



ISSN 1349-1113
JAXA-RR-14-009

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

宇宙科学情報解析論文誌 第四号

2015年3月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

序文

宇宙科学情報解析論文誌（Journal of Space Science Informatics Japan）第四号をお送りします。

近年、宇宙科学における様々な分野において、観測装置と計算機の大型化によって、以前に比べて飛躍的に大量のデータを取得することが可能になってきています。それによって、観測から優れた科学的成果を産出するためには、大規模データをいかに効率良く解析し、必要な情報を引き出すかが重要な技術課題となりつつあります。また、デジタル技術の普及に伴い、デジタルプラネタリウムや様々なアプリケーションに代表されるように、宇宙観測データが科学研究以外の分野でも広く利用されるようになってきています。

そのような状況を鑑み、JAXA 宇宙科学研究所・学際科学研究系では、その前身である宇宙科学情報解析研究系、宇宙科学情報解析センター（PLAIN センター）の時代より、主に JAXA の科学衛星・探査機によって得られた宇宙観測データを収集し、広く国内外の研究者による利用を促進するためのサイエンスデータベースの開発・運用を行うとともに、新たなデータ解析手法の研究等を行ってきました。これからも当研究系では、宇宙科学データ（シミュレーションデータを含む）に関する新しい処理・解析・利用の手法、データベース技術やそれを応用したシステムの構築・運用技術など、宇宙科学・情報科学・情報技術に関わる成果発表および情報交換の場として「宇宙科学情報解析シンポジウム」を開催するとともに、それに関連した研究論文を集めた「宇宙科学情報解析論文誌」を発行して参ります。当論文誌が、周辺領域の研究者、技術者の間の情報交換や活発な議論につながることを期待しています。

2014年12月

JAXA 宇宙科学研究所

学際科学研究系

海老沢 研、篠原 育、高木 亮治、三浦 昭、山本 幸生

plainsympo@c-soda.isas.jaxa.jp

目 次

衛星試験・運用、信号処理

「GSTOS コマンド計画検証ソフトウェアの開発」

西村 佳代子, 松崎 恵一, 下川 有希, 谷田貝 宇, 宮野 喜和 …… 1

「Arduino 互換ミッション OBC 用のソフトウェア開発」

堀口 淳史, 橋本 論, 中澤 賢人, 久保田 晃弘 …… 15

『どこでも運用システム』の開発状況(第二報)」

永松 弘行 …… 33

データ処理

「あけぼの衛星アナログ広帯域受信器による観測データの自動較正法」

笠原 禎也, 後藤 由貴, 大池 悠太 …… 41

「スーパーコンピュータを活用した高効率な地球観測データ処理の検証」

齋藤 紀男, 齋藤 進, 藤澤 達也, 竹島 敏明, 内田友恵,
今中 誠, 山崎 朋朗 …… 51

「高速データ解析ライブラリ Sakura の開発と ALMA データ解析への応用」

中里 剛, 杉本 香菜子, 川崎 渉, 川上 申之介, 中村 光志, 小杉 城治 …… 67

アーカイブ・アプリケーション開発

「CDF data archive and integrated data analysis platform for ERG-related ground data developed by ERG Science Center (ERG-SC) 」

T. Hori, Y. Miyashita, Y. Miyoshi, K. Seki, T. Segawa, Y.-M. Tanaka,
K. Keika, M. Shoji, I. Shinohara, K. Shiokawa, Y. Otsuka, S. Abe,
A. Yoshikawa, K. Yumoto, Y. Obana, N. Nishitani, A. S. Yukimatu,
T. Nagatsuma, M. Kunitake, K. Hosokawa, Y. Ogawa, K. T. Murata,
M. Nosé, H. Kawano, and T. Sakanoi …… 75

「かぐや搭載スペクトルプロファイラデータ分析のためのウェブ地理情報システム『月光』」

林 洋平, 小川 佳子, 平田 成, 寺藺 淳也, 出村 裕英, 松永 恒雄,
山本 聡, 横田 康弘, 大竹 真紀子, 大嶽 久志 …… 91

「DARTS/AKARI 全天マップ画像検索機能の開発」

吉野 彰, 稲田 久里子, 松崎 恵一, 山内 千里 …… 105

データ解析、データサイエンス

「オーロラの出現・形状の予測に向けた全天オーロラ画像の自動分類への試み」

田中 孝宗, 田中 良昌, 佐藤 由佳, 池田 大輔 …… 127

『あかり』アーカイブデータを用いた近赤外線面輝度スペクトルの成分分離」

津村 耕司, 左近 樹, 松浦 周二, 松本 敏雄, 和田 武彦,

Pyo Jeonghyun, 田中 昌宏 …… 135

「SELENE 搭載 α 線検出器データ処理とラドン α 線強度分布マップ解像度の改善」

木下 克之, 野口 冬馬, 伊藤 真之, 高島 健, 三谷 烈史,

柏木 利介, 奥野 祥二, 西村 純 …… 151

データ可視化

「Google Earth 用ボリューム可視化ソフトウェア VDVGE の天体データへの応用」

川原 慎太郎, 杉山 徹, 荒木 文明, 高橋 桂子 …… 161

『はやぶさ』の軌跡の可視化 -タッチダウン時の位置推定 -」

三浦 昭, 山本 幸生, 吉川 真 …… 173

「SPICE を用いた視野シミュレータ FLOW の開発」

山本 幸生, 岡田 尚基, 本庄 英司, 大友 翔一 …… 185

GSTOS コマンド計画検証ソフトウェアの開発

西村佳代子*¹ 松崎恵一*³ 下川有希*² 谷田貝宇*² 宮野喜和*²

Development of GSTOS Spacecraft Operation Planning Software

Kayoko NISHIMURA*¹, Keiichi MATSUZAKI*³, Yuki SHIMOKAWA*², Hiroshi YATAGAI*², Yoshikazu MIYANO*²

Abstract

GSTOS is Generic Spacecraft Test and Operations Software, which is applied to spacecraft developed by ISAS (Institute of Space and Aeronautical Science). We have developed Command Planning and Verification Software, one of the software components of GSTOS. This software is characterized by verification part which verifies validity of operation and command plan. In order to support various spacecraft, the verification part is implemented in a modular way and users can select the modules suitable for their application. At this moment, modules for SPRINT-A have been developed and used for in-orbit operation.

Keywords: spacecraft operation planning, GSTOS, コマンド計画検証ソフトウェア

概要

GSTOS (Generic Spacecraft Test and Operations Software; 汎用衛星試験運用ソフトウェア) は, ISAS (Institute of Space and Aeronautical Science) の衛星の試験と運用に使用される汎用のソフトウェア群である. 我々は GSTOS の構成要素であるコマンド計画検証ソフトウェアを開発した. 検証を行う計画検証部とマージを行うコマンド計画作成部に大別する方針とし, そのうち, 検証部については, 衛星毎に必要な機能の取捨選択, 入替できるように, 機能・処理毎のモジュール群で構成することとした. 現時点では, 各モジュールはひさき (SPRINT-A) 衛星を対象として開発し, 実運用で使用されており, 他衛星への流用が検討されている.

1. はじめに

人工衛星 (探査機を含む; 以下衛星と略記) を用いてミッションを遂行するには, 地上から衛星にコマンドを送って制御する必要がある. 制御対象は, ミッション機器とバス機器に分類される. バス機器に対する制御には, 姿勢制御, 軌道制御, 電力制御, データ処理系制御などが含まれる. 制御方法としては, 地上から送られたコマンドを衛星側が受け取り次第実行する方法 (リアルタイムコマンド) と, 地上から時刻を指定して送られたコマンドを, 一旦衛星のメモリ上に配置して, 指定時刻になると実行する方法 (ストアードコマンド) がある. いずれの制御方法においても, 制御内容を地上で計画し衛星に送信する. これらの制御を実行することで衛星に異常等発生する可能性はないか, 正しくデータを取得できるかなど, 計画の妥当性の検証が必須である.

従来の ISAS の衛星では, 計画の妥当性を検証するツール類は, 衛星毎に固有のものとして作成されてきた. しかし, いくつかの問題点があり¹⁾, その改善のため, SIB2 (Spacecraft Information Base version 2)/GSTOS-1 プロジェクトにてコマンド計画検証ソフトウェアを整備することとした.

* 平成 26 年 12 月 19 日受付 (Received 19 December, 2014)

^{*1} 日本電気航空宇宙システム株式会社 (NEC Aerospace Systems, Ltd)

^{*3} 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 学際科学研究系
(Department of Interdisciplinary Space Science, ISAS)

^{*2} 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 科学衛星運用・データ利用センター
(Center for Scientific Satellite Operation and Data Archive, ISAS)

本論文では、コマンド計画検証ソフトウェアの開発経緯と実用例について述べる。まず2章で開発目的、3章で開発経緯について示す。以下4章で現在の使用状況について紹介し、5章にまとめる。

2. 開発目的

ISAS の衛星運用システムは、典型的に、状態を監視・制御する試験・運用系と定常運用を省力化する定常運用系から構成されている(図 1)。このうち、定常運用系は、運用計画を作成する運用計画・コマンド計画作成ツールと、状態を診断するテレメトリ診断ツールで構成されている。さらに、運用計画・コマンド計画作成ツールは、「計画検証部」と「コマンド計画作成部」で構成されている。計画検証部では、軌道予測から各地上局での可視時間帯を計算した上、どのように観測するか、そのため、どの機器をいつどのように制御するか計画を立てる。また、その計画を用いた場合の衛星や搭載機器の状態を簡易的に予測し、電力、データ容量、熱、姿勢などの制約条件と照らし合わせ、計画の妥当性を確認する。コマンド計画作成部では、妥当性が確認された計画を、衛星管制卓で使用するコマンド計画ファイルの形式に変換し、出力する。SIB2/GSTOS-1 プロジェクトにおいても、図 1 の機能構成を踏襲している。

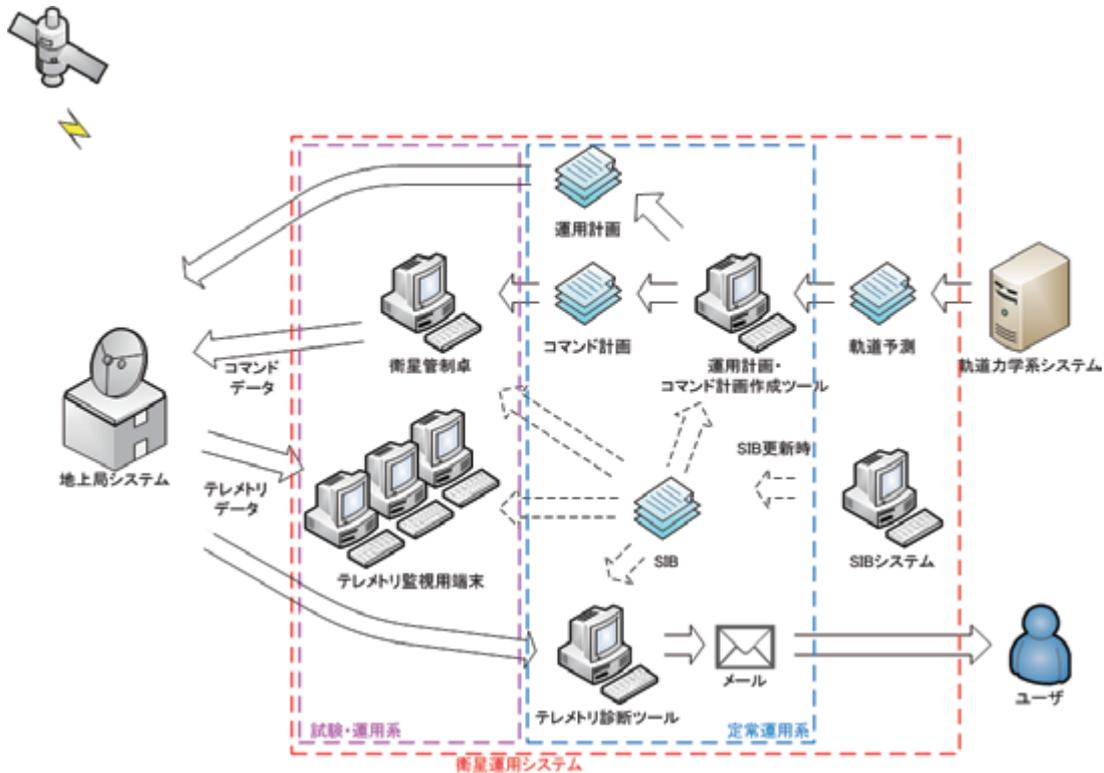


図 1 衛星運用システム

[「SIB2/GSTOS-1 における開発状況」¹⁾より引用]

従来の ISAS の衛星運用システムでは、コマンド計画作成部として ISACS-PLN(Intelligent Satellite Control Software-Planner)というツールが開発・運用され、計画検証部は、一部既存衛星からの流用があるもののそれぞれ個別のモジュール群として各衛星プロジェクトによって作成・運用されることが多かった。参考文献 1)では、従来の衛星運用システムの問題点を大きく4つ挙げている。そのうち以下の3つが、運用計画・コマンド計画作成ツールの問題点を含んでいる。

(1) 運用計画・コマンド計画作成ツールの問題点：

運用計画・コマンド計画作成ツールのうち計画検証部は、衛星の打上前後に、若手研究者が作成していた。これは、本来研究に充てるべき時間をツールの作成やメンテナンスで消費することになり、科学的な生産性を落とすと共に、ツールの検証不足による不具合発生などのリスク要因となることが多い。

- (2) 衛星プロジェクト毎の開発・運用体制の問題点：
衛星毎の新規性がほとんどない箇所でもプロジェクト毎に開発・運用し、それぞれのプロジェクトでメーカーと対応しており非効率である。また、各サブシステムがソフトウェアを含むブラックボックスの装置として整備され、ソフトウェア部分の開発規模が不明瞭となり、開発・運用のコストや品質の管理が困難となるとともに装置毎にコストが発生することとなっている。
- (3) 維持管理の問題点：
メーカーや ISAS 内の特定の個人のみが詳細な設計内容を把握しているという属人的な開発が行われてきたため維持管理に必要な設計情報が不足している。

これらの問題点を解決するため、SIB2/GSTOS-1 プロジェクトでは、対象プロジェクトを横断的な視点から分析し、全体で開発規模がミニマムになるよう留意しつつ、関係メーカーとの協力の下、ユーザ向け文書や設計文書を含んだ製品としての運用計画・コマンド計画作成ツールである「コマンド計画検証ソフトウェア」を開発した。

3. 開発経緯

3.1. SIB2/GSTOS-1 プロジェクト対象衛星への要求のヒアリング

SIB2/GSTOS-1 プロジェクトが発足当初対象とした三衛星(SPRINT-A, ASTRO-H, MMO)及び参考にあかつき(PLANET-C)衛星開発担当メーカーへヒアリングし、コマンド計画検証に必要な要件を洗い出した²⁾(表 1)。その結果、軌道、姿勢制御、通信、電力、データレコーダ(Data Recorder; DR)、ミッションの各サブシステムの項目毎にそれぞれ検証項目が存在し、衛星の搭載機器、ミッション内容、軌道に応じて、共通的な項目と衛星固有の項目があることが明らかとなった。

表 1 対象衛星への要求ヒアリング結果

要求がある項目に対して○をつけている。またその要求によって作られる関連ツールも示す。

No	要求項目		MMO	SPRINT-A	ASTRO-H	PLANET-C (参考)	関連ツール
	大項目	小項目					
1	軌道	SAAの影響	×	○	○	×	緯度、経度、高度で放射線の影響度合いを表示するツール
		可視時間番	○	○	○	○	可視時間を示すツール
2		慣性空間指向	×	○	○	○	慣性空間での指向方向を指定する。天球図等を表示するツール
		緯度経度指向	×	×	×	○	天体の表面と直下点の軌跡を表示するツール
4	姿勢制御	天体指向	×	×	×	○	天体の中心、およびそこからオフセットで姿勢を指定する。惑星や衛星のリムや影を表示するツール
		STT管理	×	○	○	○	姿勢決定に使える恒星の有無と色のチェックするツール
6		アンローディング管理	×	?	?	×	アンローディング実施を計画するツール
7		スピン軸管理	○	×	×	×	天球上にスピン軸を表示し、制約条件を示すツール
8		アンテナパターン	カージオイド 単一指向	カージオイド	カージオイド	カージオイド 単一指向	
9	通信	可視中のアンテナ切替	×	○	○	△	ルックアングル表示、地上受信レベル予測ツール
		アンテナ駆動装置	○	×	×	○	HGAポインティング管理ツール MGAジンバル角管理ツール
11		テレビットレートの変更	○	×	×	○	回線マージン解析ツール
12		バッテリー	○	○	○	○	バッテリーの充放電を管理するツール
13	電力	HCE Peak Power割当の変更	?	?	?	×	太陽角や機器モード(大電力機器)から必要なHCEピークパワーを算出するツール
		電力収支	○	○	○	○	発生電力と消費電力の収支を示すツール
15	DR	DR蓄積量	○	○	○	○	DRの蓄積量を管理するツール
16		カメラ撮像	×	○	○	○	撮像計画ツール (姿勢へのフィードバックが必要)
17	ミッション	イベント数計測	○?	×	○	×	?
18		磁場計測	○	×	×	×	?

[「汎用衛星試験運用ソフトウェアコマンド計画・発行ソフトウェア(その1)成果報告書」より引用]

3.2. これまでのコマンド計画検証プロセスの検証

当時運用中の衛星プロジェクト(あかり、ひので、すざく、あかつき)のコマンド計画検証プロセス(コマンドを計画し、検証するプロセス)及び使用されているツールについて調査した³⁾。3.1で述べた要求のヒアリングから、標準的なコマンド計画検証プロセスを図2のようにイメージ化し、これらを踏まえ運用中の衛星に対し、ヒアリングを実施した。

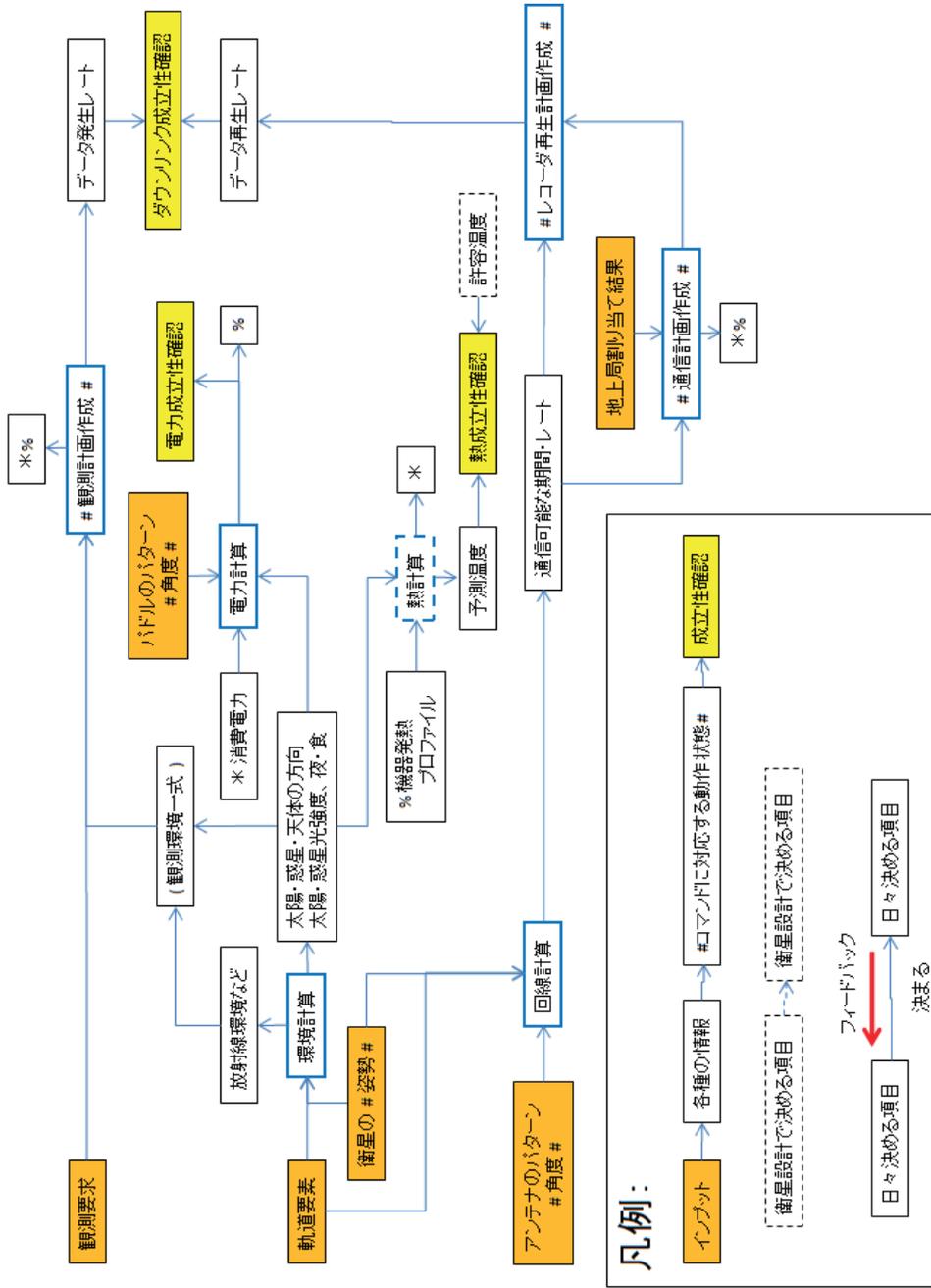


図 2 標準的なコマンド計画検証プロセスイメージ
 [「汎用衛星試験運用ソフトウェアコマンド計画・発行ソフトウェア(その2)設計検討書
 (コマンド計画検証ソフトウェア)」より引用]

ここで、ISACS-PLN を用いているあかり、ひので、すざくのうち、ひのでのコマンド計画検証プロセスを図3に示す。これらの衛星プロジェクトでは、全てを一括し検証するのではなく、要求毎に妥当性を検証し、計画が妥当でない場合は入力値を変更(必要があればさらにその前の手順に戻って入力値を変更)し検証しなおしていること、複数の要求のとりまとめ・計画のマージが行われていること、モジュールは検証項目毎に存在することが明らかとなった。また、ヒアリングの中でISACS-PLNの問題点として、コマンドの時刻決定の仕様が不明確なこと、複雑なため使用されていない機能があることが挙げられた。

他方、あかつきでは、軌道や観測計画などのインプットからコマンド計画ファイルの作成までを、計画検証部、コマンド計画作成部と分割せず、PCNAV と呼ばれる一つのツールで実現していることが分かった。そこで、PCNAV の内部構造についてヒアリングしたところ、インターフェース等は異なるものの、ISACS-PLN を用いる場合と同様のプロセスで記述できた(図4)。

凡例

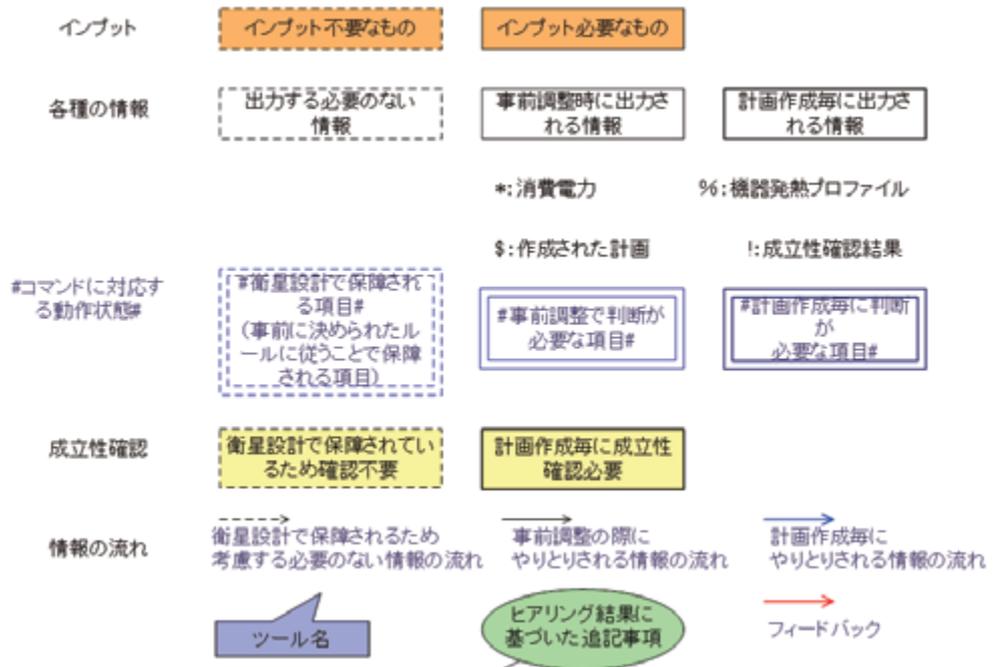


図3 ひのでのコマンド計画検証プロセス (1/2)
 [汎用衛星試験運用ソフトウェアコマンド計画・発行ソフトウェア(その2)設計検討書
 (コマンド計画検証ソフトウェア)より引用]

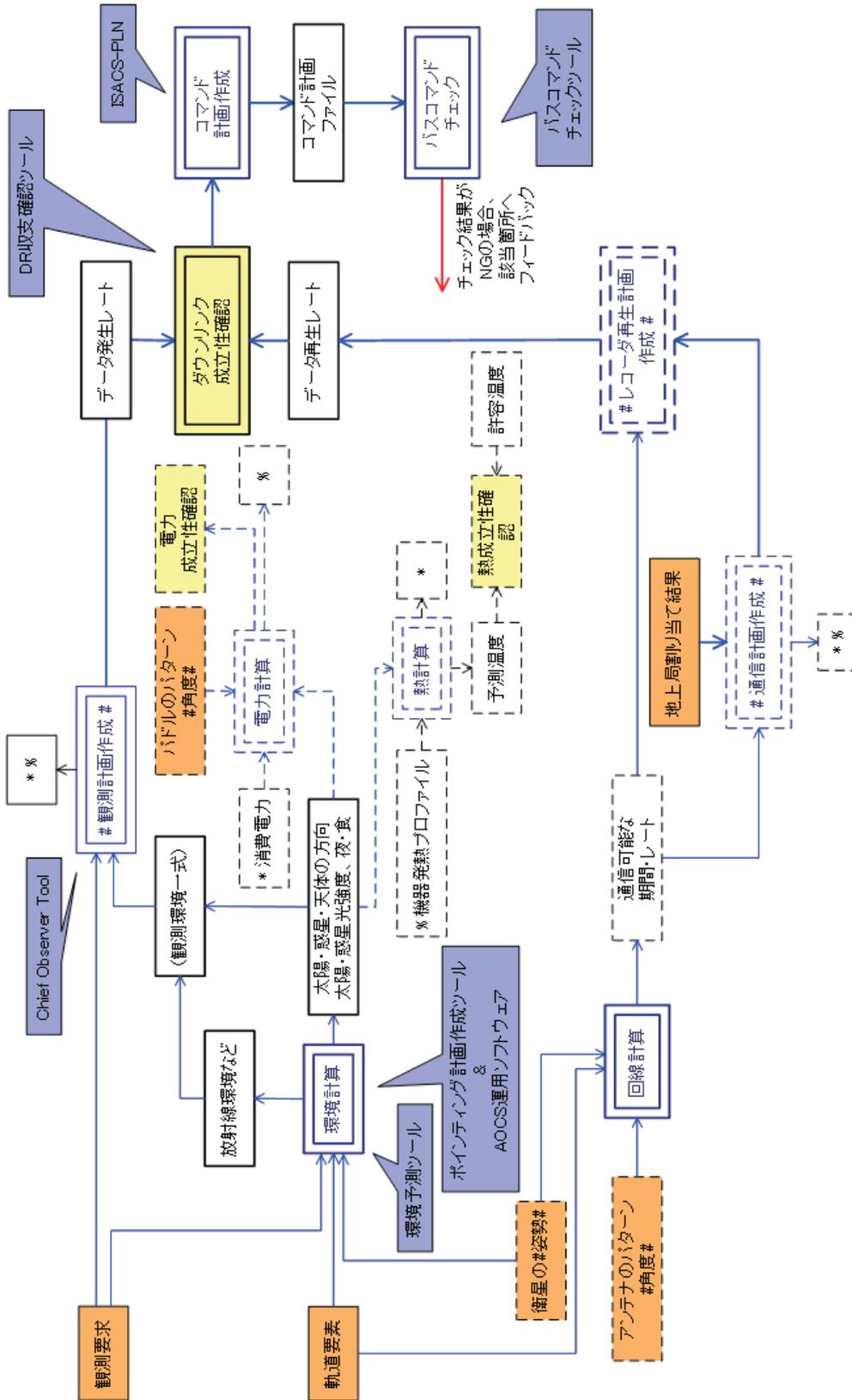


図 3 (続き) ひのでのコマンド計画検証プロセス (2/2)
 [汎用衛星試験運用ソフトウェアコマンド計画・発行ソフトウェア(その2)設計検討書
 (コマンド計画検証ソフトウェア)より引用]

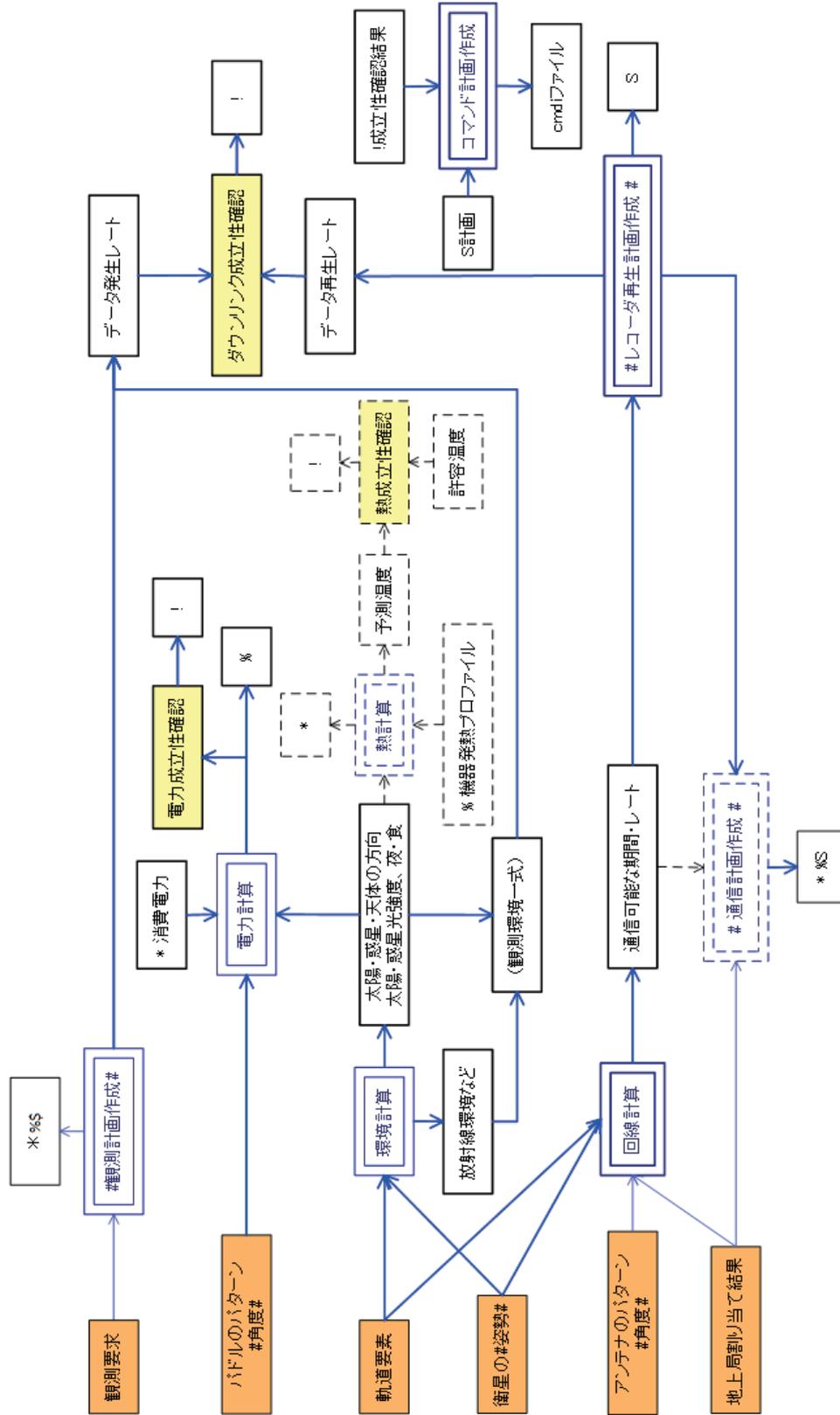


図 4 あかつきのコマンド計画検証プロセス
 [「汎用衛星試験運用ソフトウェアコマンド計画・発行ソフトウェア(その2)設計検討書
 (コマンド計画検証ソフトウェア)」より引用]

3.3. 仕様検討

前節の結果を基に、ISACS-PLN を使用しているプロジェクトで使用しているモジュールの流用や、PCNAV を流用する方式も含め、コマンド計画検証ソフトウェアの仕様を検討した。多くの ISAS の衛星では、ミッション機器の担当者やバス機器の担当者がそれぞれ独立に運用要求ファイルを作成、計画を検証し、取りまとめ役が作成された運用要求ファイルをマージし、最終的にコマンド計画ファイルを作成してきた。そのため、コマンド計画検証ソフトウェアにおいても、独立に作成された運用要求ファイルをマージする ISACS-PLN 方式を踏襲し、検証を行う計画検証部とマージを行うコマンド計画作成部に大別する方針とした。

この方針を受け、計画検証部とコマンド計画作成部のインタフェースである運用要求ファイルの仕様を検討し、その経緯について参考文献 4) にまとめた。運用要求ファイルは、イベント時刻対応表が記述されたファイルと運用要求記述言語(ORLG; Operation Request Language for GSTOS)で記述されたファイルから構成される。ここでイベント時刻対応表はイベントとその発生時刻の一覧であり、ORLG は、コマンドシーケンス、およびイベントとコマンドシーケンスの対応を記述するための、プログラミング言語 Ruby を母言語とする DSL(Domain Specific Language)である。これらを用いると、コマンド計画作成部のユーザは、ある定常的なイベント(軌道上で発生する事象や制御内容に応じた出来事)に対するコマンドシーケンス(目的に応じたコマンドを順番に並びひとまとめにしたもの)を ORLG で定義し、そのコマンドシーケンスを実行するイベントが発生する実時刻を日々の計画検証の際にイベント時刻対応表として与えることにより、何度も同じような定義文を記述する必要がなくなる。また、計画検証部では、個々のコマンドあるいはコマンドシーケンスではなく、イベントを検証の対象にできるため、衛星毎の固有性を小さくできる。

3.3.1. 計画検証部

計画検証部は機器の制御計画を立てると共にその妥当性の検証を行い、制御計画を運用要求ファイルとして出力する。計画検証部が衛星毎の搭載機器の差異や運用方針の差異などに柔軟に対応するには、すべての機能を備えた単独のソフトウェアとして構築するのではなく、機能毎にモジュールに分割し、衛星毎に必要なに応じて検証項目の取捨選択や各自が用意したモジュールに入れ替えられるようにすることがよいと判断した。ただし、MMO では既に衛星プロジェクトにより、計画検証部として独自のツールを作成していたため、スコープから除外した。

ヒアリングの結果を基に、一般的な計画検証部のもつ機能として、ミッション計画作成機能、軌道環境計算機能、姿勢成立性検証機能、電力成立性検証機能、ダウンリンク成立性検証機能、熱成立性検証機能、基本運用情報作成機能、局割当機能の 8 つの機能を定めた。これらには、汎用的に整備する部分、衛星毎に整備する部分の双方が含まれる。まず機能間のインタフェースを、次に各機能内に必要な処理を、今後の衛星でも使用できるよう意識して定めた。図 5 に、これらの機能構成のイメージを示す。なお、スコープから除外した MMO についても、ツールの内部構成が図 5 に示す関係で表されることを確認した。

開発対象の衛星のうち、SPRINT-A と ASTRO-H は近地球型の衛星であり、汎用化に取り組みやすい。しかし、検討の時点で ASTRO-H の要求の詳細が定まっていなかったことから、SIB2/GSTOS-1 プロジェクトでは、まず、SPRINT-A をターゲットに汎用的になり得るモジュールを開発することとした。その他の部分については、SPRINT-A プロジェクトにて整備することとした。図 6 に、SPRINT-A におけるコマンド計画検証ソフトウェアの機能構成を示す。これらの機能のうち、既に複数プロジェクトで同じインタフェースであった局割当機能については、既存のモジュールを流用し、微改修と文書整備にとどめることとした。それ以外の機能については、設計概念のみを流用することとして、モジュールあるいは機能の一部を担う部品を新規に開発した。以下に、各機能の処理内容を示す。

(1) ミッション計画作成機能 (機能の一部を担う部品のみ作成)

ミッション計画作成機能は、検証する対象であるミッション機器の制御に関わる要求に基づき、運用要求ファイル(ミッション計画運用要求ファイル)の作成と、データ発生量や消費電力量の時間変化の出力を行う。このうち、SIB2/GSTOS-1 プロジェクトでは、計画に基づくデータ発生量と消費電力量の時間変化プロファイルを出力する機能をもつモジュールを整備することとした。これらのモジュールは、あらかじめ、各種のイベントに対し、データ発生量または消費電力を設定ファイルに指定し、立案毎にイベントの時刻を入力し、これらの対応付けによりデータ発生量および消費電力の時間変化プロファイルを出力する。

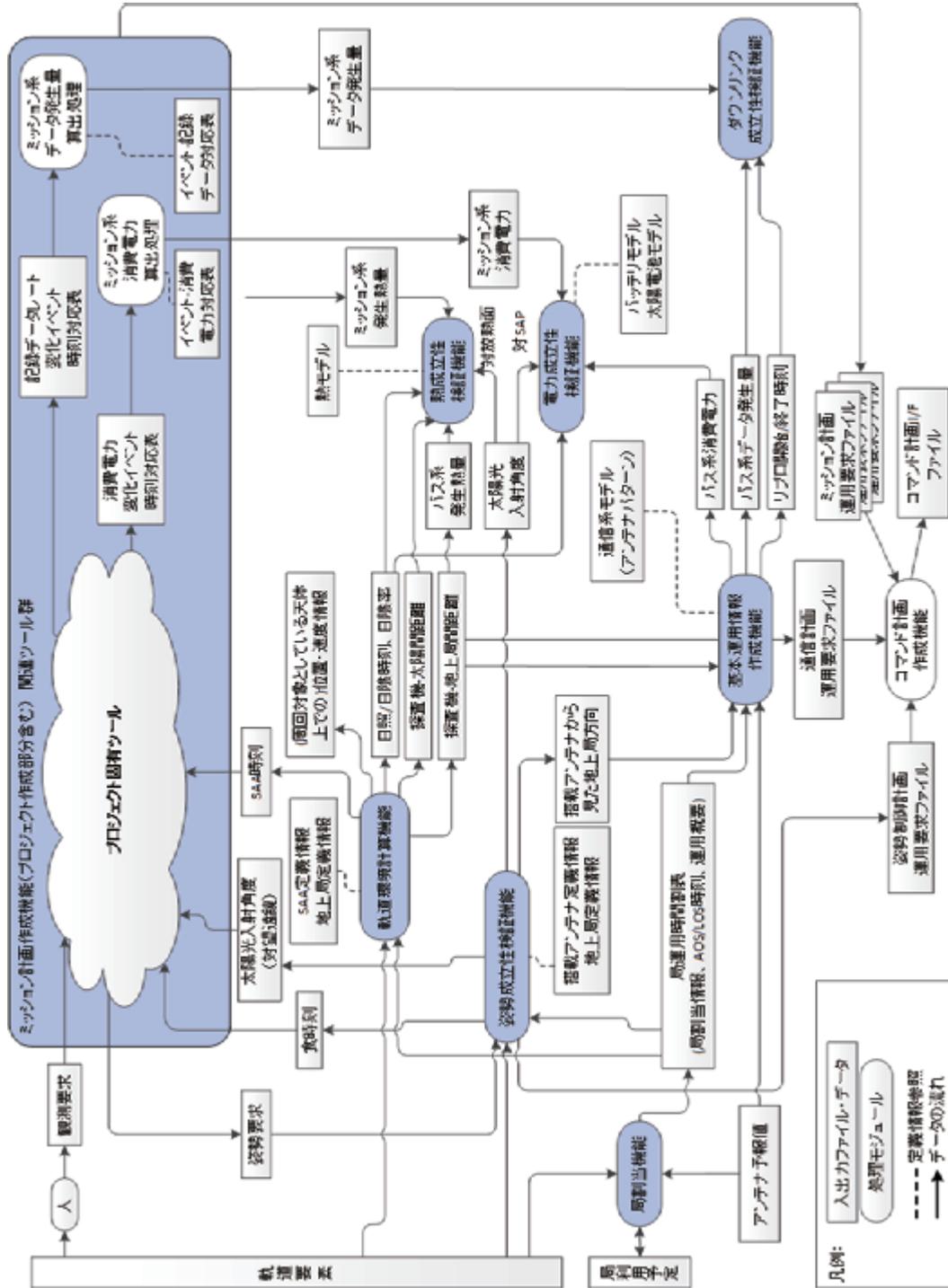


図 5 汎用的な計画検証ソフトウェア機能構成イメージ

(2)ダウンリンク成立性検証機能

ダウンリンク成立性検証機能は、DRに蓄積されたデータが全て地上で取得できることを検証する。必要に応じ衛星運用に割り当てられる地上局の時間帯(局運用時間帯)を増やす、または観測データの取得レート(DRに蓄積するデータ量)を下げるなどの調整をするためのものである。SPRINT-Aでは、DRに蓄積したデータを順次前から再生していく運用方式だったため、これに合わせ設計した。バス機器の発生データ量はほぼ一定として、ミッション機器の発生データ量はミッション計画作成機能で出力するデータ発生量の時間変化プロファイルを用いる。そして局運用でDRを再生する時間帯の情報を基に記録・再生ポイントの動きを模擬することで、衛星運用終了時の各パーティションに蓄積されているデータ量と、データの欠損が発生すると想定される期間を算出する。なお、DRに蓄積されたデータのうち取得したい範囲をアドレスで指定する運用方式の場合には本モジュールの適用外となる。

(3)軌道環境計算機能

軌道環境計算機能は、後段での検証に必要な情報として、SAA(South Atlantic Anomaly)時刻、周回対象とする天体上での位置・速度情報、日照/日陰時刻、衛星-地上局間距離、衛星-太陽間距離を計算する。SAA領域の定義については、マージン等も含めて衛星毎に変更すると考え、設定ファイルで領域を定義可能とした。

(4)電力成立性検証機能

電力成立性検証機能は、ミッション機器、バス機器の運用により消費される電力と、日照中の発生電力、充電電力が足りあうことを検証する。必要に応じ観測機器の消費電力を下げるなどの調整をするためのものである。電力量と共にDOD(Depth of Discharge; 放電深度)を計算し、DODに対してエラー、ワーニングの閾値を設定し、その値に達していないかどうか判定する。

(5)熱成立性検証機能

熱成立性検証機能は、衛星上で熱的にクリティカルなコンポーネントが許容する温度範囲に入っていることを検証する。しかし、SPRINT-Aなど近地球の衛星では、衛星設計の段階で各種の姿勢に対しシミュレーションが行われ、日々の軌道上運用では放熱面など各種の面に対する太陽光の角度のみを確認すれば良いことが多い。そこで、作成するモジュールは、各種の面に対し、太陽光入射角度をチェックするのみとした。

(6)姿勢成立性検証機能 (機能の一部を担う部品のみ作成)

姿勢成立性検証機能は、衛星の姿勢制御に関わる要求に基づき、姿勢制御の成立性を検証し、運用要求ファイルを作成する。このうち、SIB2/GSTOS-1プロジェクトでは、後段での検証に必要な情報として、食時刻、太陽光入射角度、搭載アンテナから見た地上局方向を計算するモジュールを整備するのみとした。これに必要な姿勢要求(姿勢情報)は、クォータニオンの時系列データとして記述したものを入力とすることとした。なお、ダイナミクスのシミュレーションについては、衛星固有な処理と密接に関わるが多いため、必要に応じプロジェクト側で整備することとした。

(7)基本運用情報作成機能

基本運用情報作成機能は、バス系消費電力・データ発生量の時間変化プロファイルや、衛星と地上局間の通信計画(リプロ開始・終了時刻、通信計画運用要求ファイル)を作成する。バス系消費電力はミッション系消費電力と同様の処理で計算し、バス系データ発生量は、HKのデータの発生量として一定量×時間で表すこととした。衛星と地上局間の通信計画の作成では、天頂角回避運用の場合や、アンテナの切れ込み回避運用の場合を考慮し、リンク切断時間を算出し、局運用時間帯に合わせてリプロ開始・終了時刻と搭載アンテナ側のアンテナ切り替え時刻を計算することとした。

(8)局割当機能

局割当機能は、軌道要素から衛星が各局にて運用できる範囲にある時間帯の一覧を出力する。実際には、地上局は複数の衛星がシェアしているため、それぞれの衛星の局運用時間帯は調整会議の結果決まる。局割当機能は、会議で決定された時間、及び局で運用する内容を取り込み、局運用時間帯表に出力する。この機能は、既にひのでで使用されていたモジュールを流用し、他の機能とのインタフェース方式や起動引数の指定方法があうように改修することで実現した。

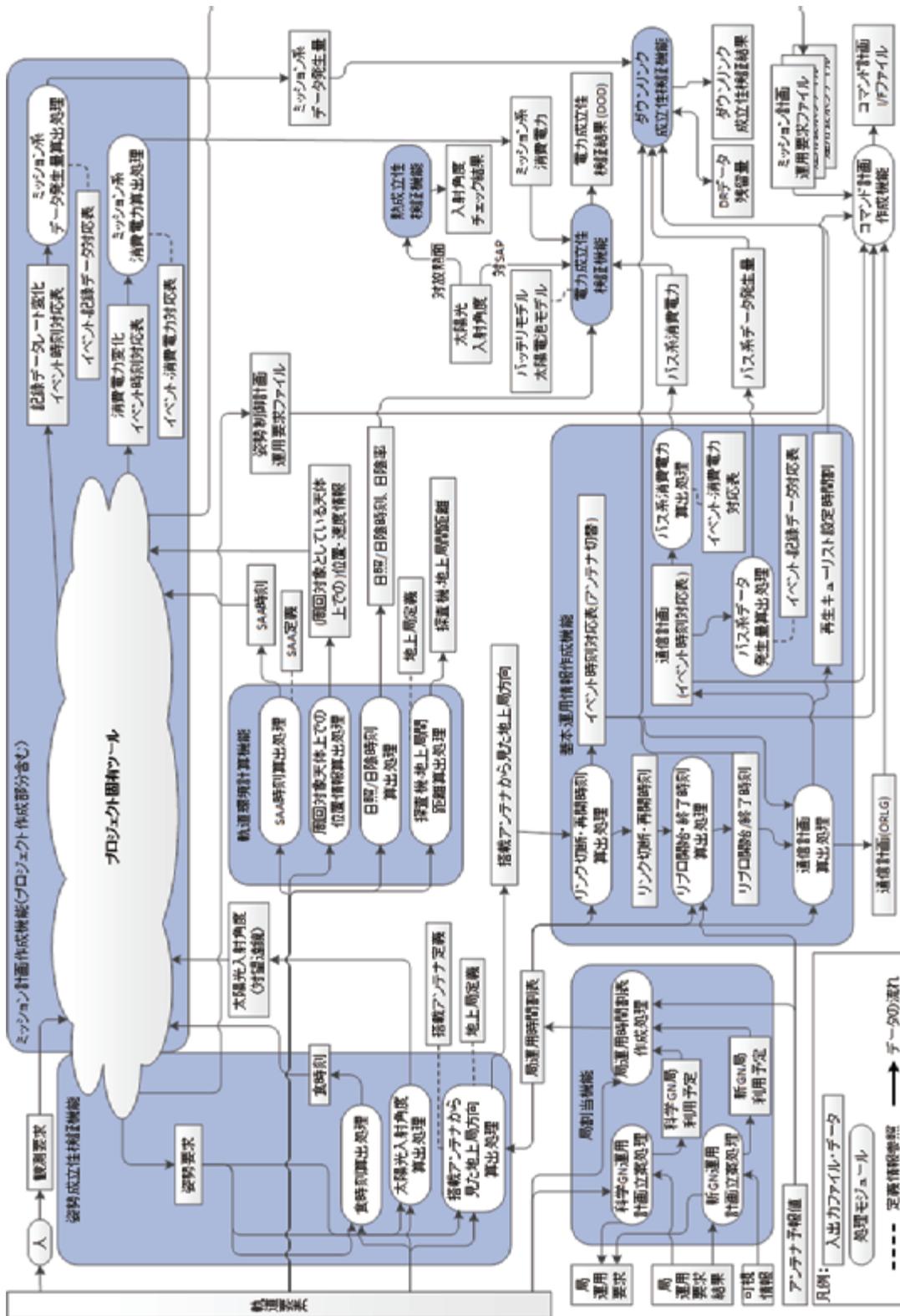


図6 SPRINT-Aに対応したコマンド計画検証ソフトウェア機能構成

3.3.2. コマンド計画作成部

コマンド計画作成部は、運用要求ファイルを複数入力し、それらをマージした結果として、コマンド計画ファイルを出力する。コマンドは、リアルタイムコマンドとして地上から発行するか、ストアードコマンドとして衛星から発行するか、振り分けを行う。マージされ、振り分けられたコマンドが衛星管制卓や衛星上のストアードコマンドのメモリの制約を満たしているか、コマンド間、コマンド・イベント間の整合性をチェックする。

ISACS-PLN の問題点の解決には根本的な見直しが必要であったため、SIB2/GSTOS-1 プロジェクトでは、新規にモジュールを開発した。限られたリソースの中で、必須で単純な機能のみを実装、特に、SIB2 と ORLG への対応と、コマンドの時刻決定の仕様の明確化を行った。

3.4. 開発

コマンド計画作成部は、汎用的な仕様を定めることができたため、計画検証部に先んじ開発した。また、計画検証部は 3.3.1 で述べた仕様を要求仕様書にまとめ、各機能への要求を満たすモジュールを開発した。機能間のインタフェースについては、要求仕様書の付録に機能間インタフェース仕様として規定文書を作成した。軌道要素、アンテナ予報値、局運用要求結果等、従来の外部システムにより規定されているインタフェースについては、既存のフォーマットを使用することとしている。なお、各機能は、関連性が高いものを同時期に開発した。

4. 現在の使用状況

コマンド計画検証ソフトウェアのモジュールの使用状況及び検討状況を表 2 に示す。主に、2013 年 9 月に打ち上げられた SPRINT-A の実運用にて使用されている。コマンド計画作成部は MMO の運用模擬試験等でも使用されている。ASTRO-H については、SPRINT-A をターゲットに開発した計画検証部のモジュールに、改修が必要かどうか検討を行う予定である。また、コマンド計画検証ソフトウェアの開発後に立ち上がった衛星プロジェクト(ERG,HAYABUSA2)へも、順次展開が進んでおり、コマンド計画作成部についてはいずれのプロジェクトも適用の予定である。ERG については、計画検証部の各モジュールについて、要求と比較し、改修が必要かどうか、どのような拡張が必要か議論されている。なお、HAYABUSA2 の計画検証部については、はやぶさのものをベースに衛星固有なツールの整備がすすめられている。

表 2 コマンド計画検証ソフトウェアのモジュールの使用・検討状況

	SPRINT-A	ASTRO-H	MMO	ERG	HAYABUSA2
計画検証部					
ミッション計画作成機能	○	△	※1	※2	衛星固有ツール
ダウンリンク成立性検証機能	-		※1	※2	
軌道環境計算機能	○		△	△	
電力成立性検証機能	-		※1	※2	
熱成立性検証機能	-		※1	※2	
姿勢成立性検証機能	○		-	△	
基本運用情報作成機能	○		○	△	
局割当機能	○		○	○	
コマンド計画作成部	○	○	○	○	○

○：使用または使用予定 △：拡張等検討中 -：未使用

※1:MMO 固有ツール使用予定

※2:GSTOS 利用または MMO 固有ツール流用のいずれか検討中

5. まとめ

SIB2/GSTOS-1 プロジェクトでは、運用計画を作成するツールとして、コマンド計画検証ソフトウ

エアを開発した。これは、今後の再利用を意識した計画検証部と、要求の記述方法を見直したコマンド計画作成部から構成される。このうち、計画検証部は、衛星毎の差が大きいこと、MMOでは既に一部ツールを作成していたことから、まずは近地球衛星を対象を絞って共通部を開発した。特に、SPRINT-A に対し全モジュールの構築を実施することで、モジュール構造にて目的を達成できることを示した。現在、モジュール単位で他衛星プロジェクトでの使用、機能拡張等を検討中である。

参考文献

- 1) 西村佳代子, 松崎恵一, 宮澤秀幸, 高木亮治, 山下美和子, 宮野喜和, 福田盛介, 馬場肇, 永松弘行, 山田隆弘: SIB2/GSTOS-1 における開発状況, 宇宙科学情報解析論文誌 第三号 (2013), <http://repository.tksc.jaxa.jp/pl/dr/AA0062302003>
- 2) 日本電気株式会社: 汎用衛星試験運用コマンド計画・発行ソフトウェアの開発(その1) (JX-PSPC-272517) 成果報告書, 2009年3月, JAXA 内文書
- 3) 日本電機株式会社: 汎用衛星試験運用コマンド計画・発行ソフトウェアの開発(その2) (JX-PSPC-285601) 設計検討書(コマンド計画検証ソフトウェア), 2010年5月, JAXA 内文書
- 4) 西村佳代子, 松崎恵一: ORLG の言語設計と課題についての検討経緯(RDA-13009), 2014年2月, JAXA 内文書

謝辞

GSTOS コマンド計画検証ソフトウェアは、日本電気株式会社、日本電気航空宇宙システム株式会社、宇宙技術開発株式会社の協力の下、ソフトウェアの開発を実施しました。各社のエンジニアをはじめ、構想の具現化に協力を頂いた方々に、感謝の意を表します。

Arduino 互換ミッション OBC 用のソフトウェア開発 ——抽象化とリプログラミング——

堀口 淳史^{*1}・橋本 論^{*2}・中澤 賢人^{*3}・久保田 晃弘^{*4}

Development of Software for the Arduino-compatible Mission OBC Abstraction and Re-programming

Junshi Horiguchi^{*1}, Ron Hashimoto^{*2}, Kent Nakazawa^{*3}, Akihiro Kubota^{*4}

ABSTRACT

This paper describes the design philosophy and implementation details of the software of “Morikawa” which is a mission OBC of 1U CubeSat Art Satellite “INVADER”.

On February 28 2014 (JST) INVADER was launched as a piggyback payload of the H-IIA launch vehicle No.23 and entered a circular non-sunsynchronous orbit at an altitude of 378 km and an inclination of 65 degrees. Morikawa is an open-source hardware Arduino compatible mission OBC. Developers can use the base software, extension libraries and the development environment that were cultivated in the Arduino community.

Morikawa's hardware modules are abstracted consistently as much as possible, hence the coders can write programs to use them very easily and freely.

In addition, a virtual machine is implemented by defining an original machine language on Morikawa using its strictly designed interface. The VM enables us to re-program Morikawa efficiently by sending only small bytecode from ground station.

Last of all, some results of missions executed by Morikawa on orbit are reported.

Keywords: Art Satellite, CubeSat, Arduino, Programming, Software, C++, Virtual Machine

概要

1U CubeSat の芸術衛星「INVADER」に搭載されたミッション OBC「Morikawa」のソフトウェアの設計思想と実装の詳細について述べる。INVADER は 2014 年 2 月 28 日に H-IIA 23 号機の相乗り衛星として、高度 378 km、傾斜角 65 度の太陽非同期軌道に投入された。Morikawa はオープンソースハードウェアの Arduino 互換であり Arduino のコミュニティで培われた基盤ソフトウェア、拡張ライブラリや開発環境をほぼそのまま利用することができる。

ハードウェアの実装をできる限り抽象化することで各種記憶素子をほぼ同一の手順で利用できるよう配慮した。さらにインターフェースを厳密に定義することで Morikawa 上に独自のマシン語を定義し、Virtual Machine (VM) を実装することが可能になった。この VM を使って少ないデータ転送量で効率的に軌道上でリプログラミングを行うことができる。最後に Morikawa を用いて宇宙空間で実行したミッションの成果について報告する。

*1 多摩美術大学 × 東京大学 ARTSAT PROJECT (Tama Art University × Tokyo University ARTSAT PROJECT)

*2 多摩美術大学 (Tama Art University)

*3 多摩美術大学 × 東京大学 ARTSAT PROJECT (Tama Art University × Tokyo University ARTSAT PROJECT)

*4 多摩美術大学 (Tama Art University)

1 はじめに

超小型衛星の打ち上げ機会の増加にあたり、大型衛星の専門家だけでなく大学の研究室やアマチュアグループによる小型衛星の開発が増えつつある。このような小型衛星の1つに約10 cm 角の1U CubeSat という衛星規格が存在する。1U CubeSat は物理的な実験機器や動作機構、推進機を搭載するには容積に制約があるが、近年の電子部品の小型化、軽量化により、センサの情報を収集したり宇宙空間でソフトウェアの動作実験を行うには十分な大きさがある。しかしながら衛星の開発を行うためには、ソフトウェアのみならず、構造設計・熱設計・放射線耐性の検討・電子部品の選定など広範囲な分野の専門知識が必要であり、これらを総合して設計開発を行う必要がある。

近年は衛星の設計をモジュール化し初期導入コストを軽減する試み⁵が行われているが、それは主に独自ハードウェア分野での取り組みである。それに対して、芸術活用を目的とした芸術衛星「INVADER」⁶では、ユーザに開かれた柔軟性のあるソフトウェアをベースとしたミッションを設定した。ソフトウェアの動作実験を主なミッションとする衛星にとっては、ハードウェアはオープンソースで多くの分野の非専門家に用いられているものが良い。そのため、ソフトウェアの動作環境としては芸術デザインの分野でも広く用いられている Arduino⁷ を選択する。さらにプラットフォームのモジュール化を行うとともにソフトウェアのライブラリ化を実施し、ミッション関連機器を再利用可能なものとした。

芸術衛星 INVADER はパワーモジュール・メインモジュール・ミッションモジュールという3つの大きなサブシステムにより構成される。パワーモジュールは衛星全ての電力管理を行っており最も権限が強く、メインモジュールは地上局との通信やミッションモジュールの起動など衛星全体のオペレーションを行う。ミッションモジュールはメインモジュールに従属する形で動作する Arduino 互換の実験用ソフトウェア実行環境である。

本論文では、芸術衛星 INVADER に搭載されている宇宙空間で動作する Arduino 互換ミッションモジュールの設計とリプログラミング可能なソフトウェアの実装方法について述べる。

2 芸術衛星のミッションモジュール

2.1 芸術衛星としての機能

芸術衛星である INVADER 衛星を設計するにあたり1U CubeSat に搭載するべき必要最低限の機能を検討す

るとともに芸術目的の利用を行うために何が必要かを検討した。情報芸術・メディアアート分野の作家や学生の意見を交えながら現実的に衛星に搭載できる機能を選定し、情報の可視化やジェネラティブアートのパラメータとして利用できるようにセンサデータを取得する機能が搭載された。

「みんなの衛星・感じる衛星・美しい衛星」というコンセプトをもとに FM パケット通信だけではなく音声信号による地上へのメッセージ送信機能も搭載された。音声信号には PWM で生成した音階を演奏する機能と音声合成チップ⁸を利用した日本語発音機能が含まれている。センサとしては、太陽電池パネルの発電電力・太陽電池パネルの温度・リチウム蓄電池の充放電電力・リチウム蓄電池の温度・各種バスシステムの電流電圧や温度・磁気・ジャイロの値を取得することができる。これらのセンサは衛星の健康状態の監視にも利用することができ衛星の少ないスペースを有効的に活用できる。さらに最大 640 * 480 ピクセルの CMOS カメラを搭載しており解像度は低いながらもカラー写真を撮影することができる。

これらの機能は過去の衛星開発でも採用されており新しいものではないが芸術活用のためのパーソナル・メディアとしての INVADER 衛星では理論ではなく実際に自分の耳で聴き、自分の手でシャッターを切り、自分の目で地球を見ようというプロセスが大切であると考え、確実に動作する機器を採用しソフトウェアの力によって可能性を広げる手法を選択した。

2.2 Arduino の採用

2.2.1 Arduino の概要

情報芸術分野においてハードウェアでは Arduino、ソフトウェアでは Processing⁹ や openFrameworks¹⁰ の利用者が増えつつある。これらは高度な技術を持った技術者だけでなく技術に興味のある子供や DIY 者などにも利用できるように設計された初めての本格的なモジュールである。これらを利用した開発はラピッドプロトotypingと呼ばれ、実現したいアイデアを少ない知識と時間で可能にする。

Arduino では回路図は公開されソフトウェアは GPLv3 や LGPL ライセンスで提供されている。openFrameworks でもソースコードは MIT ライセンスで提供されておりオープンソースなプロジェクトである。基盤部分がオープンソースであることによりこれらの環境をサポートしたサードパーティー製の製品や有志によ

⁵ ほどよし SDK や SH4-BoCCHAN-1 OBC 等

⁶ <http://artsat.jp/project/invader>

⁷ <http://arduino.cc>

⁸ 株式会社アクエストの AquesTalk pico

⁹ <http://processing.org>

¹⁰ <http://openframeworks.cc>

るライブラリも数多く存在し再利用可能なエコシステムが成立している。

これらの文化を踏まえ INVADER 衛星ではミッションモジュールを完全に独自開発するのではなく Arduino の資産を利用する。Arduino を採用することにより Arduino を利用したことのある者であれば過去に作成したプログラムをそのまま宇宙で動作させられる機会を提供することができる。

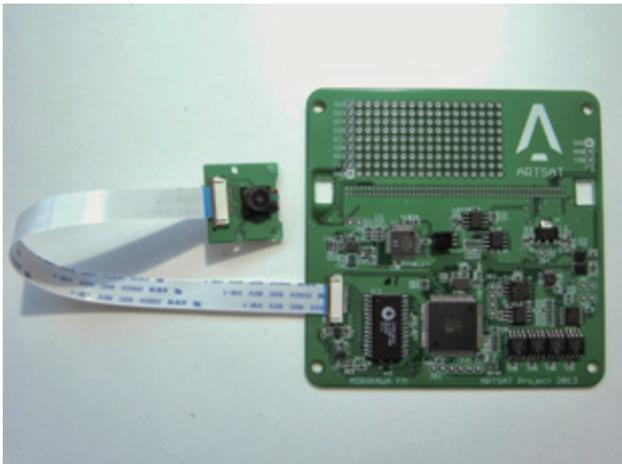


図 1 ミッションモジュール Morikawa

INVADER 衛星には【図1】に示す Arduino 互換のミッションモジュールが搭載され、これを Morikawa と呼ぶ。メイン CPU として ATMEL の ATmega 2560 を採用しており、Arduino Mega 2560¹¹ に相当し Arduino の開発環境¹²を用いて Morikawa のソフトウェアを開発することが可能である。

2.2.2 Arduino の特徴

Morikawa は Arduino 互換であるために一般的な Arduino の特徴を継承する。

以下に Arduino の標準的な特徴をまとめる。

- ・リアルタイム OS やその他のオペレーティングシステムを利用しないためにリアルタイム処理を記述することができる
- ・シングルタスクであり割り込みを利用する
- ・外部メモリを搭載せずに CPU 内部の SRAM や EEPROM を利用する
- ・Arduino Mega 2560 の 5 V 系は 16 MHz, 3.3 V 系は 8 MHz で動作する
- ・ハードウェアやソフトウェアは冗長性を持たない

2.2.3 Arduino の開発環境

Arduino のソフトウェアは Arduino IDE を用いて開発される。Arduino IDE はソースコードの記述からコンパ

イル・リンク・実行バイナリのハードウェアへの書き込みまで全ての工程を簡単に行うことができる。Arduino IDE はコンパイルとリンクに内部で avr-gcc を利用しており、avr-gcc を直接利用した Arduino ソフトウェアの開発も可能であるが、Morikawa では Arduino IDE を用いて全ての開発を行う。

Morikawa は Arduino 1.0.5 を対象として開発された。Arduino 1.0.5 は内部では次のような機能を利用している。

- ・コンパイラは avr-g++ (GCC) 4.3.2 である
- ・リンカは avr-ld (GNU Binutils) 2.19 である
- ・アーカイバは avr-ar (GNU Binutils) 2.19 である
- ・ABI は -mmcu=atmega2560 を指定する

2.3 Morikawa ハードウェアの設計

2.3.1 設計の概要

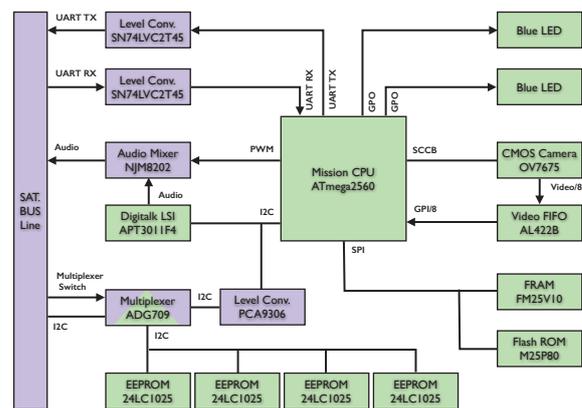


図 2 Morikawa のシステムダイアグラム

Morikawa の設計の中心は【図2】に示すようにメイン CPU である ATmega 2560 である。Morikawa は地上で単独動作する Arduino とは違い、衛星全体を管制するメインモジュールや電力システムを管理するパワーモジュールと協調して動作しなければならない。衛星の電池残量が少なくなれば計画的に強制終了される可能性もありデータの読み書きの安全性なども検討項目となる。

これらを解決するために Arduino の基盤ソフトウェア¹³に改造を加える方法が検討されたが、標準的な Arduino の開発環境を利用できなくなることや標準環境を前提に構築されたエコシステムの恩恵を受けることが難しくなる。そこでハードウェアを構成する部品は一般的に入手可能な民生品を利用し、ソフトウェアにおいても可能な限り基盤ソフトウェアには手を加えない手法が取られた。

¹¹ <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>

¹² Arduino IDE (執筆時のバージョンは 1.0.5)

¹³ <Arduino>/hardware/arduino/cores/arduino/ フォルダ以下のファイル群

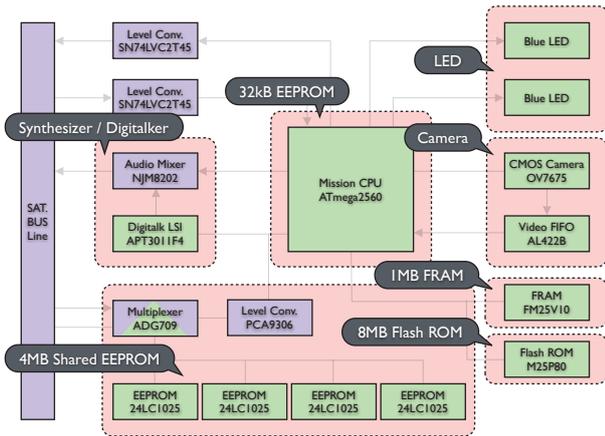


図 3 Morikawa のペリフェラル機器

メイン CPU である ATmega 2560 を中心に配置し、センサ、データ格納用メモリや音声合成 LSI などをペリフェラル機器として接続した【図3】。さらに、Morikawa は能動的にメインモジュールやパワーモジュールと連携するのではなく、メインモジュールに従属する受動的な設計とした。Morikawa もまたメインモジュールのペリフェラル機器の 1 つとなる。このような設計ではペリフェラル機器ごとにハードウェアとソフトウェアをモジュール化することが可能となり、機器の差し替えや追加を容易に行うことができ INVADER 衛星の開発だけではなく後の衛星の開発においても資産を生かすことが可能となる。

【表1】と以下に Morikawa の特徴をまとめる。

- ・ Arduino Mega 2560 にペリフェラル機器を接続したものと同等である
- ・ メインモジュールに従属し電源管理はメインモジュールが行う
- ・ 秋葉原や digikey などを通して購入できる部品で構成され MIL 規格の部品を利用しない
- ・ 標準的な Arduino の基盤ソフトウェアと開発環境を利用する

表 1 Morikawa ハードウェア

分類	詳細
CPU	ATmega 2560
電源電圧	3.3 V
動作周波数	8 MHz
部品規格	民生品
揮発性メモリ	内蔵 SRAM
不揮発性メモリ	内蔵 EEPROM, 外部 FRAM, 外部 FlashROM, 外部 EEPROM
OS	利用しない
タスク処理	シングルタスク
割り込み	利用する
開発環境	Arduino IDE 1.0.5

・ タイマー・SPI・I2C 通信などのソフトウェアは標準 Arduino 用に提供されているライブラリ¹⁴を可能な限り利用する

2.3.2 メインモジュールとの協調

Morikawa はメインモジュールに従属する設計であるがメインモジュールとの間でテレメトリデータの伝達や状態の通知といった通信を行う。Morikawa とメインモジュールの間はシリアル通信 (UART) によって接続されており、具体的には Arduino Mega 2560 の Serial1 を利用する。

標準的な Arduino のシリアル接続を扱うクラスでは開発者は割り込み処理を記述せずに受信データのポーリングを実施する。Morikawa の設計では標準的な機能を積極的に利用するためにシリアル接続に関しても受信データのポーリングを行う。

通常受信データは loop() 関数内で取得されるが、メインモジュールとの通信ではデータの取りこぼしを避ける必要があるために、loop() 関数内ではなくタイマーによる一定間隔の割り込み処理の中で確実なポーリングを行う。ポーリング用のタイマーには Arduino Mega 2560 の Timer1 を利用する。

Morikawa とメインモジュールの間では【表2】のようなコマンドが送受信される。通信の開始権限は双方が保持しており通信に関しては対等の関係性である。

表 2 シリアル通信で伝達されるコマンド

コマンド	方向	役割
c-c-m-eco	メイン→Morikawa	存在確認
r-m-c-eco	Morikawa→メイン	上記への返答
c-c-m-smm	メイン→Morikawa	テレメトリデータの伝達
c-c-m-asd	メイン→Morikawa	強制終了予告の伝達
c-m-c-nsd	Morikawa→メイン	正常終了の伝達
c-m-c-don	Morikawa→メイン	オーディオ回路の電源オン要求
r-c-m-don	メイン→Morikawa	上記への返答
c-m-c-dof	Morikawa→メイン	オーディオ回路の電源オフ要求
r-c-m-dof	メイン→Morikawa	上記への返答

2.3.3 共有メモリを利用した協調

Morikawa とメインモジュールの間でシリアル通信を介して伝達されるデータは限られた種類のデータのみである。Morikawa に搭載されたアプリケーションが生成した個別のデータは共有メモリに書き込まれメインモジュールに引き渡される。また、メインモジュールが Morikawa を起動する際に起動パラメータを伝達する目的にも利用され、共有メモリの一部が特別に割り当てられている。

共有メモリは Morikawa が起動されている間は Morikawa が読み書きの権限を保持しており、Morikawa

¹⁴ TimerOne ライブラリ <https://code.google.com/p/arduino-timerone>

とメインモジュールは排他的に共有メモリにアクセスする。

2.4 Morikawa ソフトウェアの考察

Morikawa の基盤ソフトウェアには標準 Arduino 用のソフトウェアを利用することができるが、Morikawa は 3.3 V 系で動作しており 5 V 系 Arduino Mega 2560 用の基盤ソフトウェア¹⁵をそのまま利用することはできない。そこで SparkFun Electronics¹⁶ が公開し提供している Arduino Mega Pro 2560V 3.3 V 用のハードウェア定義ファイル¹⁷を Arduino の開発環境に追加¹⁸する。

Morikawa のペリフェラル機器を操作するソフトウェアはペリフェラル機器 1 種類につき 1 つの C++ 言語クラスとして提供する。Morikawa の基本機能を操作するインターフェースとペリフェラル機器を操作するインターフェースを統合した Morikawa クラスをアプリケーションプログラミングインターフェース (API) として開発者に提供する。

Arduino のプログラミングでは setup(), loop() という 2 つの関数がとても重要な意味を持っており、Arduino の開発者は慣れ親しんだ標準的な流儀に従ってプログラミングできることを期待している。そこでユーザーインターフェースとなる Morikawa クラスも標準の流儀に従う形で定義し実装する必要がある。

さらに Morikawa はメインモジュールとテレメトリデータの受け渡しを行っているためテレメトリデータの送受信機能の実装とテレメトリデータを取得するインターフェースの提供が必要である。テレメトリデータの送受信機能の実装は Morikawa クラスを利用する開発者からは隠蔽し抽象化する。Morikawa ソフトウェアは具体的なアプリケーションの中身については実装せず、可能な限り抽象的な形でハードウェアのすべての機能を操作できるように提供し、これらをまとめて MorikawaSDK¹⁹ として提供する。

3 MorikawaSDK の実装

3.1 MorikawaSDK の概要

これまでの考察に基づき MorikawaSDK には【表3】のクラスが含まれる。TSTMorikawa クラスは最も重要なクラスであり Morikawa アプリケーションの開発では主にこのクラスを利用する。

TSTFRAM, TSTFlashROM, TSTSharedMemory, TSTLED, TSTTone, TSTDigitalalker, TSTCamera クラスはそれぞれ ATmega 2560 に接続されたペリフェラル機

表 3 MorikawaSDK に含まれるクラス

クラス名	役割	直接利用可能
TSTMorikawa	Morikawa を操作する基本クラス	はい
TSTFRAM	1M bits FRAM を読み書きするクラス	いいえ
TSTFlashROM	8M bits Flash ROM を読み書きするクラス	いいえ
TSTSharedMemory	4M bits Shared EEPROM を読み書きするクラス	いいえ
TSTLED	Morikawa 基板上の LED を操作するクラス	いいえ
TSTTone	ATmega の PWM を利用して音階を演奏するクラス	いいえ
TSTDigitalalker	AquesTalk 音声合成 LSI を操作するクラス	いいえ
TSTCamera	OV7675 CMOS カメラを操作するクラス	いいえ
TSTCriticalSection	割り込み禁止領域を管理するクラス	はい
TSTTrinity	プリミティブ変数の 3 冗長化を行うクラス	はい
TSTSCCB	SCCB プロトコル通信を行うクラス	はい

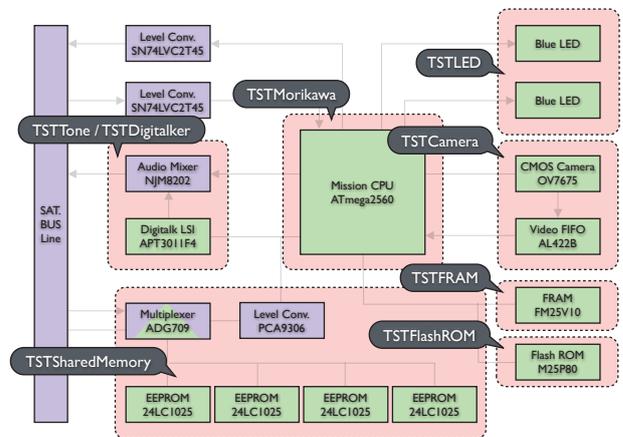


図 4 ペリフェラル機器を担当するクラス

器を表しており読み書きやその他の操作を行うための機器固有の実装を含んでいる【図4】。ペリフェラル機器のクラスは TSTMorikawa クラスを通して利用する設計でありアプリケーション開発者が直接利用することはできない。これによりハードウェアの部品が入れ替わったり実装の詳細が変更された場合でもアプリケーションレベルではソフトウェアの変更を行うことなく対応することができる。

TSTCriticalSection クラスは ATmega 2560 のハードウェア割り込みを一時的に禁止するためのクラスであり C++ 言語を用いて実装されているのでデストラクタで自動的に割り込みの状態を復元することができソフトウェアの安全性が向上する。

TSTTrinity クラスはプリミティブ変数の 3 冗長化を行うクラスであり C++ 言語のテンプレート機能を用いて実装されている。例えば int i; という整数型を

¹⁵ Arduino IDE から選択できる Arduino Mega 2560 or Mega ADK

¹⁶ <http://www.sparkfun.com>

¹⁷ <http://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Dev/Arduino/Boards/mega-pro-3.3V-v1.1.zip>

¹⁸ <User Document>/Arduino/hardware フォルダ以下に追加する

¹⁹ <http://github.com/ARTSAT/MorikawaSDK>

TSTTrinity<int> i; と変更すると 3 冗長化された変数にアクセスすることが可能となる。

TSTSCCB クラスは OV7675 と通信するための SCCB プロトコル²⁰を実装した¹⁾クラスである。

MorikawaSDK は次のような仕様にに基づき実装を行い高度に抽象化されたアプリケーションプログラミング環境を提供し、ソフトウェアが確実に安全に宇宙空間で実行されることを目指した。これらの仕様と抽象化は同時に Virtual Machine の実装を容易にすることにも寄与している。

- ・ MorikawaSDK は C++ 言語を用いて実装する
- ・ 完全なカプセル化を実施するためにクラス変数は private 変数のみとする
- ・ コンストラクタ / デストラクタ・set / get・read / write・setup / cleanup / isValid 系関数などの仕様を統一化する
- ・ 実行時エラーは可能な限り補足する
- ・ 関数が内部でエラーを発生させた場合には、呼び出し時の引数の内容を維持する
- ・ ソフトウェアフローの中で重要な判定を行う変数は 3 冗長化する
- ・ FRAM, Flash ROM, EEPROM などの各種記憶素子の読み書きインターフェースを抽象化する
- ・ メインモジュールからの強制的な終了に備えて時間のかかる処理には中断機能を実装する
- ・ エラー発生時にエラーの内容を地上に伝える手段を提供する

3.2 C++ 言語を用いた実装

MorikawaSDK は C++ 言語を用いて実装されているが、これは Arduino の基盤ソフトウェアが C++ 言語を用いて実装されていることに起因する。C, C++ 言語は実行時オーバーヘッドが少なく低性能の環境でも効率的にソフトウェアを実行することが可能²⁾である。またアセンブラよりも人間に理解しやすい記述方法なので不本意な不具合を組み込む可能性も軽減される。

C++ 言語には仮想継承、仮想関数、typeid、dynamic_cast やテンプレートなどのオブジェクト指向プログラミングのための機能が備わっているが仮想継承や仮想関数はメモリ使用量の増加と実行時オーバーヘッドの増大を生じさせる。typeid や dynamic_cast などの実行時型情報をサポートするにはコンパイラの設定を変更³⁾する必要がある。同様に例外を利用する場合にもコンパイラの設定の変更⁴⁾と ABI のリターゲットが必要になる。これらの機能は ATmega 2560 のような 8 ビットマイコンではできるだけ使用しない方が確実な動作が期待できるため MorikawaSDK では利用しない。

3.3 完全なカプセル化

アセンブラや C 言語を用いた 8 ビットマイコンのプログラミングでは変数や関数のカプセル化を実施することは稀であり、機能がオブジェクト化されず再利用性の低いソフトウェアとなる傾向がある。

Arduino 互換の環境では C++ 言語が利用できるため C++ 言語のカプセル化機能を積極的に利用する。MorikawaSDK ではメンバ変数はすべて private 変数とし大域変数は一部の関数を除いてオブジェクトファイルのスコープの範囲とする。メンバ関数についても private・protected・public の順に優先的に利用し積極的に非公開メンバ関数とする。

3.4 関数の仕様の統一化

3.4.1 コンストラクタ / デストラクタ

MorikawaSDK では例外を使用しないのでコンストラクタやデストラクタの中で発生したエラーを外部に搬出する手段が存在しない。これらの内部では状態管理用の変数の初期化などエラーを発生させない処理のみを記述する。

3.4.2 set / get 系関数

set / get 系関数は主として private なメンバ変数へのアクセスを提供する。MorikawaSDK ではペリフェラル機器の状態を操作する関数も含まれるためそのような関数ではエラーを適切に返す必要がある。

単純なアクセッサ

```
- void setXXX(typename const& param);
- typename const& getXXX(void) const;
```

エラーを返すアクセッサ

```
- TSTError setXXX(typename const& param);
- TSTError getXXX(typename* result) const;
```

3.4.3 read / write 系関数

read / write 系関数は主としてデータ格納用メモリなどの記憶素子への読み書き機能を提供する。ペリフェラル機器との通信ではエラーを発生させる可能性があるためにこれらの関数はエラーを返す必要がある。

```
- TSTError writeXXX(...);
- TSTError readXXX(...);
```

3.4.4 setup / cleanup / isValid 系関数

コンストラクタやデストラクタでは変数の初期化など単純な操作のみ可能であるためエラーを発生させる可能性のある操作は setup / cleanup 系関数で行う。

cleanup 系関数はインスタンスの解放時やアプリケーションの終了時に呼び出されるためエラーを返してもエラー状態から回復する有意義な方法が存在しない。そこで

²⁰ OmniVision Serial Camera Control Bus

cleanup 系関数は常に成功するものと仮定しエラーを返さない仕様とする。

isValid 系関数は setup / cleanup 系関数の呼び出し状態を判定するための関数であり setup 系関数の成功から cleanup 系関数の呼び出しまでのあいだ true を返し、それ以外の場合は false を返す。

- TSError setup(...);
- void cleanup(void);
- bool isValid(void) const;

3.4.5 関数のコーディング規約

MorikawaSDK では上記の特別な関数以外においても次のような規約を採用している。

- ・ 関数名の先頭は小文字で始まり 2 単語目からは先頭が大文字である (getData / getAngleX)
- ・ R.A.M. や R.O.M. などの略語はすべて大文字とし関数名の先頭には用いない (getFRAMSize)
- ・ position を pos などのように 1 単語を略さない
- ・ インスタンスに対して操作を行う関数は動詞の原型で始まる (findItem / update)
- ・ インスタンスの状態を取得する関数は is + 形容詞や動詞の三人称単数形 + 名詞の単数形とし bool 型を返す (isValid / hasUpdate)
- ・ ハードウェア割り込みから呼び出される関数は on で始まる (onReceive / onTimer)
- ・ インスタンスの内容を変更しない関数は const 関数とする
- ・ 関数の引数にプリミティブ型以外のインスタンスを渡し、関数が引数の内容を変更しない場合は const 参照渡しとする²¹
- ・ 関数が引数の内容を変更する場合はポインタ渡しとする²²
- ・ 関数がエラーを返す場合には成功失敗を表現する bool 型ではなく TSError 型を返す

3.5 実行時エラーの補足

例外を使用しないのでエラーは関数の戻り値として搬出する。errno のようなエラーを保持する大域変数は呼び出しシーケンスによって解釈が変更される可能性があるために抽象的なプログラミングには適さない。

【コード1】の例に示すようにエラーが発生した場合、続く正常なシーケンスの処理を中止しエラーを呼び出し元に返却する。エラーを回復できる可能性がある場合には回復処理を実行する。この手法を再帰的に適用する。

コード 1 再帰的なエラーの補足

```
void setup(void)
{
```

```
    if (parent_func() == TSTERROR_OK) {
        if (another_func() == TSTERROR_OK) {
            // normal task
        }
        else {
            // error recovery task
        }
    }
    else {
        // error recovery task
    }
    return;
}

TSError parent_func(void)
{
    TSError error(TSTERROR_OK);

    if ((error = child_func()) == TSTERROR_OK) {
        // normal task
    }
    else {
        // error recovery task
    }
    return error;
}

TSError child_func(void)
{
    TSError error(TSTERROR_OK);

    return error;
}
```

3.6 エラー発生時の引数の内容の保持

関数の内部でエラーが生じた場合でも、引数として渡されたインスタンスの中身は呼び出し前と同じであることが保証される。このような規約を設定することにより【コード2】に示すように同じ引数を代替関数に渡して安全に処理を続行したりエラーから容易に復帰することが可能となる。

コード 2 引数の内容の保持

```
int value = 123;

if (func(&value) == TSTERROR_OK) {
    // value will be changed successfully
}
else {
    // value = 123
}
```

3.7 ハードウェアの停止

Morikawa はシングルタスクで動作しておりオペレーティングシステムなどを利用せずメモリ保護機能も搭載していない。そのため、不正なメモリアクセスや 0 除算などを行った場合の動作は不定である。

また、Arduino 用に開発されたライブラリの実装詳細には極力関与しない設計方針であり Watch dog timer

²¹ インスタンスのコピーが行われる値渡しよりも効率的

²² 関数呼び出し時に引数に & 演算子を記述することで内容が変更されることが明示的になる

をクリアするコードを既存のライブラリ内に挿入することができないので、Morikawa では Watch dog timer を利用しない。これらの動作は Arduino の実行環境に依存しており Morikawa では明示的な設定を行っていない。

メインモジュールは Morikawa を起動すると設定された時間の後に強制的に電源を停止する。これにより Morikawa の不意な停止時にも電力の消費を抑え Morikawa を再起動することが可能となる。Morikawa の電源が切断されると CPU 内部の各種レジスタや揮発性メモリの状態は保持されず破棄される。不意な停止時にレジスタの状態を外部からコアダンプのような形式で取得することはできない。

3.8 変数の 3 冗長化

3.8.1 Morikawa における冗長化

Morikawa は導入コストの低い Arduino 互換の環境を目指しているためハードウェアの 3 冗長化を行わず、ソフトウェアでの冗長化に頼っている。宇宙空間では放射線の影響で CPU やメモリの素子が破壊されたりデータが書き変わるというシングルイベントが発生するため実行時に予期しない動作を引き起こす可能性がある。ハードウェアを 3 冗長化し実行結果を評価することによって予期しないシングルイベントの影響を回避することができるがハードウェアが複雑化する。

3.8.2 ソフトウェアの冗長化

ハードウェアを冗長化せずにソフトウェアを冗長化する場合、プログラム本体のデータと実行時メモリ内のデータ²³を冗長化する必要がある。プログラム本体のデータを冗長化して同時に実行することは ATmega 2560 では不可能であり、それは複数の ATmega 2560 を使用して実行することと同じである。プログラムメモリ内に同じプログラムを複数個複製して書き込んでおき、動作開始時に 1 つを選択して実行することは可能であるが 1 つを選択する動作を行うプログラム自身は冗長化できない。

実行時メモリの冗長化についてもコンパイラが自動的に割り当てるレジスタやスタックの内容については冗長化できないため冗長化できるのは開発者が明示的に記述できる箇所のみである。

Morikawa ではプログラムメモリの冗長化は行わず、実行時メモリ内の重要な変数のみを冗長化し少しでもシングルイベントの影響を軽減することを目指す。具体的にはメインモジュールとの通信処理を管理する変数やペリフェラル機器の状態を判定する変数などである。

3.8.3 C++ 言語を用いた冗長化クラス

MorikawaSDK では C++ 言語のテンプレート機能を利用して変数の 3 冗長化を行う。TSTTrinity クラスを利用するとプリミティブ変数を【コード3】と【コード4】

のような書き換えのみで冗長化することが可能となる。TSTTrinity クラスはポインタ変数にも適応することができる。

コード 3 冗長化されていない変数

```
int i;

i = 123;
if (i == 123) {
    // yes
}
```

コード 4 冗長化された変数

```
TSTTrinity<int> i;

i = 123;
if (i == 123) {
    // yes
}
```

TSTTrinity クラスは内部に 3 つの変数を保持し、代入・比較や演算などで常に 3 つの変数に対して演算を行う。2 つの変数が同一で 1 つの変数が異なる場合、即時に 3 つの変数が同一になるように多数決によって修復される。3 つの変数が同時に異なる場合にはランダムに 1 つが選択され 3 つの変数を一致させる。

TSTTrinity クラスの実装では 3 つの変数が配列として確保されておりコンパイラはこれらの変数をメモリ上に順番に確保するため隣り合うメモリセルにも破壊が及ぶようなシングルイベントの場合には対応できない。

3.9 記憶素子の抽象化

3.9.1 記憶素子による特性の違い

Morikawa はデータ格納用の記憶素子として不揮発性メモリである FRAM, Flash ROM, Shared EEPROM, ATmega EEPROM を内蔵している。【表4】に示すようにこれらの記憶素子はそれぞれの特性に応じた読み書きシーケンスを持っている。

例えば FRAM (FM25V10) ではページの概念がなくランダムにアドレスを指定して任意のバイトを書き換えるこ

表 4 記憶素子の特性

	FRAM	Flash ROM	Shared EEPROM	ATmega EEPROM
型番	FM25V10	M25P80	24LC1025	ATmega 2560
バイト書き込み	可能	ページ毎に 1 回	非効率だが可能	可能
バイト読み込み	可能	可能	可能	可能
ページの概念	なし	あり	あり	なし
ページ書き込み	不可	可能	可能	不可
セクタの概念	なし	あり	なし	なし
書き込み前の消去	なし	必要	なし	なし

²³ ATmega 2560 はハーバードアーキテクチャなのでプログラムメモリとワーキングメモリは分かれている

とができる⁵⁾。Flash ROM (M25P80) にはページ概念がありページ毎に 1 度だけ書き込むことができる。再度書き換えるにはセクタ単位での消去を実行してから書き込む必要がある⁶⁾。

Shared EEPROM (24LC1025) では消去せずに上書き可能であるがページ概念があり、ページ単位で書き込むと高速に書き込むことができ、同時に素子の寿命を延ばすことができる⁷⁾。ATmega EEPROM は ATmega 2560 に内蔵された EEPROM であり AVR のアセンブリ言語や C 言語からは任意のバイト数で読み書きすることができる⁸⁾。

このように記憶素子によってランダムアクセスの可否、ページ概念の有無、消去の必要性などに違いがある。

3.9.2 インターフェースの抽象化の必要性

アプリケーション開発者は記憶素子の種類を区別することなく「データを保存したい」「データを読み出したい」という目的を重視する。そこで記憶素子の種類に関わらず同じ使い方でデータの読み書きができると学習コストを軽減しソフトウェアの再利用性が向上する。

読み書きの方法を統一化することは記憶素子を抽象化していることと同等であり C++ 言語を用いたクラスの継承やテンプレートクラスとも相性が良く Virtual Machine の実装においても素子による条件分けを必要とせず効率的なマシン語の定義を可能にする。

3.9.3 抽象化されたインターフェース

そこで MorikawaSDK では【表5】の設計仕様に基づき、TSTMorikawa クラスが次のような仕様の読み書きインターフェースを提供する (XXX には FRAM, FlashROM, SharedMemory, EEPROM が該当する)。

表 5 記憶素子を抽象化した設計仕様

操作内容	設計仕様
バイト書き込み	受け付けるが書き込めないときはエラーを返す
バイト読み込み	受け付けるが読み込めないときはエラーを返す
ページ概念	ページサイズを取得できるようにする、存在しないときは 0
ページ書き込み	バイト書き込みと共通とし内部で自動判別する
セクタ概念	セクタサイズを取得できるようにする、存在しないときは 0
書き込み前の消去	内部で自動的に処理する

- unsigned long getSizeXXX(void);
解説：全体サイズを取得する関数
引数：なし
戻値：全体のサイズ、素子が存在しない場合は 0
- unsigned int getPageSizeXXX(void);
解説：ページサイズを取得する関数
引数：なし
戻値：ページのサイズ、概念が存在しない場合は 0
- unsigned long getSectorSizeXXX(void);
解説：セクタサイズを取得する関数
引数：なし
戻値：セクタのサイズ、概念が存在しない場合は 0

- bool isValidXXX(void) const;
解説：利用可能かどうかを判定する関数
引数：なし
戻値：利用可能な時は true、そうでない場合は false
- TSTError writeXXX(unsigned long address, void const* data, unsigned int size, unsigned int* result = NULL);
解説：RAM 領域上の任意のバイト列のデータを書き込む関数
引数：address 書き込みを開始する記憶素子上のアドレス
data 書き込む RAM 領域のデータへのポインタ
size 書き込むデータのサイズ
result 実際に書き込んだサイズ
戻値：バイト数が適合しない時や消去が必要な場合などにはエラー
- TSTError writeXXXPGM(unsigned long address, void const* data, unsigned int size, unsigned int* result = NULL);
解説：ROM 領域上の任意のバイト列のデータを書き込む関数
引数：address 書き込みを開始する記憶素子上のアドレス
data 書き込む ROM 領域のデータへのポインタ
size 書き込むデータのサイズ
result 実際に書き込んだサイズ
戻値：バイト数が適合しない時や消去が必要な場合などにはエラー
- TSTError readXXX(unsigned long address, void* data, unsigned int size, unsigned int* result = NULL);
解説：任意のバイト列のデータを読み込む関数
引数：address 読み込みを開始する記憶素子上のアドレス
data データを読み込む RAM 領域へのポインタ
size データを読み込む RAM 領域のサイズ
result 実際に読み込んだサイズ
戻値：バイト数が適合しない時や問題が発生した場合などにはエラー
- TSTError formatXXX(void);
解説：全体を 0xFF で初期化する関数
引数：なし
戻値：問題が発生した場合などにはエラー

これらの関数を使用した記憶素子へのデータの読み書きのサンプルコードを【コード5】と【コード6】に示す。

コード 5 FRAM への読み書き

```
// 読み書きに使うバッファ
char data[600] = "write to FRAM!";

// FRAM が利用可能かどうか判定
if (Morikawa.isValidFRAM()) {

    // FRAM の全領域を 0xFF で初期化
    Morikawa.formatFRAM();

    // FRAM の 100 バイト目から 600 バイトを書き込み
    Morikawa.writeFRAM(100, data, sizeof(data));

    // FRAM の 80 バイト目から 600 バイトを読み込み
    Morikawa.readFRAM(80, data, sizeof(data));
}
```

コード 6 Flash ROM への読み書き

```
// 読み書きに使うバッファ
char data[600] = "write to Flash ROM!";
```

```
// Flash ROM が利用可能かどうか判定
if (Morikawa.isValidFlashROM()) {

    // Flash ROM の全領域を 0xFF で初期化
    Morikawa.formatFlashROM();

    // Flash ROM の 100 バイト目から 600 バイトを書き込み
    Morikawa.writeFlashROM(100, data, sizeof(data));

    // Flash ROM の 80 バイト目から 600 バイトを読み込み
    Morikawa.readFlashROM(80, data, sizeof(data));
}
}
```

3.9.4 FRAM の実装

FRAM (FM25V10) は任意のアドレスのデータにランダムにアクセスすることができ、ページやセクタの概念が存在せずバイト単位で読み書きを行うことができる【図5】。

SPI での接続となりデータ列に先立って読み書きの開始アドレスを送信する必要がある。アドレスの送信は 1 度限りの方が効率が良いため始めにアドレスを送信し次に任意のバイト数を送受信する。

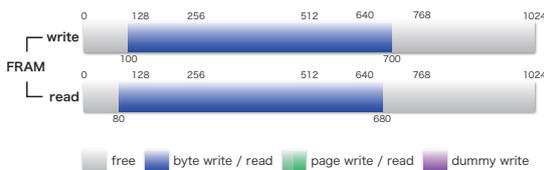


図 5 FRAM の読み書き手順

3.9.5 Flash ROM の実装

Flash ROM (M25P80) はページ毎に 1 度だけ書き込むことができ、再度書き込むにはセクタ単位での消去を必要とする。読み出しはランダムなアドレスから任意のバイト数で可能である【図6】。

SPI での接続となりデータ列に先立って読み書きの開始アドレスを送信する必要がある。

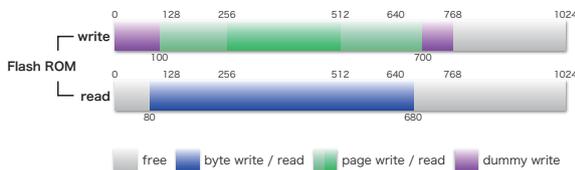


図 6 Flash ROM の読み書き手順

ページ概念が存在しページ毎に 1 度だけ書き込むことができるためデータの書き込みをページ単位で行う必要がある。任意の開始アドレスから書き込む場合には次のページ境界までと最後のページ境界から書き込みの最終アドレスまでを特別に処理し、それぞれのページで不足しているバイトを 0x00 のダミーデータで補完する。中間部分のデータについてはページ単位で書き込む。

一度書き込んだページには再度書き込むことができないため、書き込みたいバイト数に該当する連続したページ領域が消去された状態であればいけない。連続したページを確保できない場合はエラーを返すなど処理を中止する。MorikawaSDK では Flash ROM のページ毎の状態を管理するために ATmega EEPROM の一部をページマップとして利用している。ページマップはページ毎に 2 ビットを使用し 1 バイトで 4 ページを管理する。1 つ目のビットはページの正常性を表し、2 つ目のビットはページが書き込み済みかを表す。

セクタ単位での消去時に始めにセクタを 0x00 で上書きし全ビットが 0 に変更されたことを検証し、次にセクタ消去を行い全ビットが 1 に変更されたことを検証することによってセクタ内のページの正常性が検証される。検証に失敗したページは破壊されていると認識され利用できなくなる。

3.9.6 Shared EEPROM の実装

Shared EEPROM (24LC1025) にはページ毎に処理を行うことで高速に書き込むことができ同時に素子の寿命を延ばすことができる。また、ページを利用せずに任意のアドレスからバイト単位で書き込むことも可能である。読み出しはランダムなアドレスから任意のバイト数で可能である【図7】。

I2C での接続となり、バイト単位での書き込みではアドレスを送信し次に 1 バイトのデータを送信する。ページ単位での書き込みではアドレスを送信し次に 128 バイトを送信する。読み込みではアドレスを送信し任意のバイト数を受信する。



図 7 Shared EEPROM の読み書き手順

MorikawaSDK では任意のアドレスから書き込む場合、ページ境界に属さないデータはバイト単位で書き込まれる。該当するページのデータを作業用メモリに一時的に読み出し、更新するバイトを新しいデータで置き換えてページ書き込みをすると素子の寿命を延ばせるが 1 ページ分の作業用メモリが必要となる。ATmega 2560 は実行時メモリの資源が少ないために素子の寿命よりも実行時メモリの節約を優先しバイト書き込みを採用した。

3.9.7 ATmega EEPROM の実装

ATmega EEPROM は ATmega 2560 に内蔵された EEPROM であり AVR の命令セットや C 言語ライブラリ²⁴から読み書きすることができる。ATmega EEPROM

²⁴ avr/eeprom.h ファイルに含まれる関数群

ではページ概念を意識せずランダムなアドレスからバイト単位で読み書きを行うことが可能である【図8】。

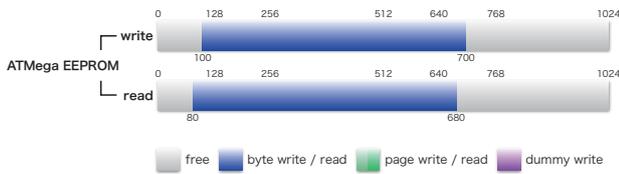


図 8 ATmega EEPROM の読み書き手順

ATmega 2560 に内蔵された EEPROM であるため読み書きにおいてエラーが発生する可能性は低く、外部に接続されたペリフェラル機器の状態の管理や実行時状態の保存などに利用することができる。

3.9.8 その他の種類のメモリ

Morikawa では全て不揮発性メモリを採用しているがアクセス速度や素子の耐久性の観点から SRAM や DRAM などの揮発性メモリを採用することも考えられる。そのような場合においても Morikawa で定義しているインターフェースを踏襲することができ FRAM での実装に近いものになると考えられる。

3.10 処理の中断

Morikawa はメインモジュールに従属して管理されているため予期しないタイミングで電源を切断される可能性がある。データ格納用のメモリにデータを書き込んでいる状態で電源を切断されると予期しない不具合を引き起こす可能性があるため、電源の切断前にメインモジュールから Morikawa に強制終了のメッセージが通知される。

MorikawaSDK は受信割り込み処理内で強制終了の通知を受信すると強制終了フラグを設定し、ペリフェラル機器への読み書きなど時間のかかる処理を行う関数は強制終了フラグが設定されているかどうかを随時確認する。強制終了フラグが設定されている場合には安全な時点で速やかに処理を終了し強制終了エラーを返却する。

3.11 地上へのエラーの伝達

実行中に発生したエラーを地上に伝達する手段が用意されていると実行時の不具合の原因特定の手助けとなる。MorikawaSDK ではすべてのエラーを関数の戻り値として返しエラーを確実に補足する記述方法を採用しており、アプリケーション開発者も返されたエラーを適切に処理することによりプログラムの内部で発生したエラーを外部に伝達することが可能である。

補足されたエラーは Shared EEPROM のデバッグ用テキストエリア²⁵に書き込むことができ、メインモジュールからデバッグ用テキストエリアを参照することが可能である。ただし Shared EEPROM の操作においてもエラー

を発生させる可能性があるため、エラーの内容をモールス信号で地上に送信する²⁶など代替手段の検討も必要である。MorikawaSDK は地上へのエラー送信の具体的な実装には関与しないのでアプリケーション開発者の設計に任されている。

4 リプログラミングの実現

4.1 軌道上でのリプログラミング

地球を周回している衛星のソフトウェアを書き換えるにはいくつかの手法があるが、Arduino 互換である Morikawa では Arduino のブートローダを利用したソフトウェアの書き換えが検討された。

この方法は標準的な Arduino と Arduino の開発環境を用いて地上でプログラムを実行する場合と同等である。予め Arduino のブートローダを書き込んだ ATmega 2560 を Morikawa に搭載しておき、地上から新しいソフトウェアを送信し、メインモジュールを介してリプログラミングを行う。標準的な Arduino のリプログラミングの手法をそのまま転用することが可能となるが衛星に送信するソフトウェアのサイズが大きくなりアマチュア無線帯の転送帯域を利用する場合には現実的ではない。

そこで INVADER 衛星では MorikawaSDK の抽象化された API の利点を生かし独自の言語を用いたスクリプティングが考えられた。MorikawaSDK では Morikawa に搭載されているすべての機能を操作できるように最小の組み合わせの API 関数が用意されている。これらの関数をどのように呼び出すかという手順のみをリプログラミングすることで、個別の機器の具体的な操作手順を再送信することなくリプログラミングと同じ効果を得ることが可能となる。

4.2 InvaderVM の概要

InvaderVM は InvaderVM マシン語を実行する Morikawa アプリケーションの 1 つである【付録A】。InvaderVM は【表6】に示す 16 個のレジスタ、128 バイトのヒープ、128 バイトのプログラムメモリを持っている。

表 6 InvaderVM のレジスタ

レジスタ名	役割
ERRN	API 関数のエラー
FUNC	呼び出す API 関数
RETV	API 関数の戻値
HCUR	ヒープの現在位置
HEAP	HCUR が指し示すヒープの内容
ARG0 - ARG4	汎用レジスタ 0 - 4

²⁵ Morikawa.setText(TEXT_DEBUG, "something");

²⁶ Morikawa.playMorse(NOTE_C6, "something");

表 7 InvaderVM のアセンブリ言語

ニーモニック	オペランド	動作
END	なし	プログラムの終端
NOP	なし	何もしない
SET	char, long	long 値を設定
SETC	char, char	char 値を設定
SETI	char, int	int 値を設定
CLR	char	0 クリア
MOV	char, char	移動コピー
XCHG	char, char	入れ替え
CALL	なし	関数呼び出し
JMP	char	ジャンプ
JMPIF	char, char	条件ジャンプ
JMPNOT	char, char	否定条件ジャンプ
INC	char	1 加算
DEC	char	1 減算
NEG	char	符号入れ替え
ADD	char, char	加算
SUB	char, char	減算
MUL	char, char	乗算
DIV	char, char, char	除算
AND	char, char	論理積
OR	char, char	論理和
XOR	char, char	排他的論理和
NOT	char	否定
SHR	char, char	右シフト
SHL	char, char	左シフト
EQ	char, char, char	合同
LT	char, char, char	より小さい (未満)
LE	char, char, char	以下
GT	char, char, char	より大きい
GE	char, char, char	以上
WAIT	char	ミリ秒停止
TXT	long, char...	文字列読み出し
EXC	long	ヒープをプログラムとして実行
COMPRESSED	なし	圧縮されたプログラム

InvaderVM マシン語は少ないプログラムデータ量で MorikawaSDK に含まれる API 関数を効率的に呼び出すことができる設計となっており、【表7】に示すように、レジスタへの代入・数値演算・数値比較・条件分岐・関数呼び出し・文字列の読み出し・ヒープの利用に対応している。

InvaderVM マシン語を生成するには InvaderVM ニーモニックを用いてプログラムを記述し、InvaderVM アセンブラ²⁷を使用してコンパイルする。

4.3 InvaderVM の実装

InvaderVM は独自のプログラムカウンタを持ち 128 バイトのプログラムメモリ内のマシン語を逐次実行する。各レジスタは 4 バイトあり 32 ビット値をそのまま格納することができる。

スタックの概念は存在せず API 関数の引数は ARG0 ~ ARG4 のレジスタを介して渡される。API 関数の TSTError 型の戻値は ERRN レジスタに格納され、API 関数の結果を表す戻値や引数は RETV レジスタに格納される。API 関数を呼び出すには FUNC レジスタに呼び出したい API 関数のインデックスを設定し CALL 命令を実行する。

128 バイトのヒープメモリは HCUR レジスタと HEAP レジスタを介してアクセスする。HCUR レジスタはヒープ上の現在位置を表し、HEAP レジスタは現在位置の内容を表す。InvaderVM はヒープ上のバイト列をマシン語として実行する機能を持っており EXC 命令を実行することで動的に生成したマシン語を実行する機能も持っている。また、MorikawaSDK の FastLZ 圧縮 / 解凍エンジン²⁸を利用して FastLZ により圧縮されたマシン語を実行することも可能である。

5 INVADER 衛星での実証と成果

5.1 MorikawaSDK を利用したアプリケーション

INVADER 衛星には MorikawaSDK を利用して実装された【表8】に示す 10 種類のアプリケーションと 5 種類のメンテナンス用ユーティリティが搭載された。

これらのアプリケーションは Shared EEPROM の起動モードを指定するパラメータ²⁹を利用して Morikawa の起動時に選択して実行される。

【コード7】と【コード8】に MorikawaSDK を利用して作成されたアプリケーションのソースコードを示す。

コード 7 HelloSpace

```
static char const hellospace_morse[] PROGMEM
    = "Hello, space!";
static char const hellospace_speak[] PROGMEM
    = "konnichi'wa uchu-";

void HelloSpace_setup(void)
{
    __debug__(Morikawa.setTextPGM(
        TEXT_Y,
        hellospace_morse
    ), 1);
    return;
}

void HelloSpace_loop(void)
{
```

²⁷ http://github.com/ARTSAT/INVADER/tree/master/ground_station/mission/software/iva

²⁸ Morikawa.freezeFastLZ() 関数と Morikawa.meltFastLZ() 関数

²⁹ Morikawa.getBootMode() 関数で取得できる

```

__debug__(Morikawa.playMorsePGM(
    NOTE_C6,
    hellospace_morse
), 101);
delay10mTimes(300);

__debug__(Morikawa.speakPhrasePGM(
    hellospace_speak
), 102);
delay10mTimes(300);
return;
}
    
```

コード 8 PlayMelody

```

static NoteParam playmelody_param;

void PlayMelody_setup(void)
{
    TSTError error;

    error = __debug__(Morikawa.getParamNote(
        &playmelody_param
    ), 1);
    if (error != TSTERROR_OK) {
        Morikawa.shutdown();
    }
    return;
}

void PlayMelody_loop(void)
{
    __debug__(Morikawa.playNote(
        reinterpret_cast<NoteSequence const*>(
            playmelody_param.data
        ),
        playmelody_param.size / sizeof(NoteSequence)
    ), 101);
    delay10mTimes(300);
    return;
}
    
```

5.2 Morikawa の稼働状況

日本時間 2014/02/28 の INVADER 衛星の打ち上げ後、2014/03/08 の運用で Morikawa が初めて起動され HelloSpace アプリケーションが実行された。その後随時動作確認を行い、搭載されているすべてのアプリケーションの起動確認を行った。

HelloSpace によるモールス符号の受信と日本語メッセージの受信、SpeechText による地上から設定したメッセージの発音、PlayMelody による地上から設定した楽譜の演奏、InvaderBot による INVADER 衛星との会話などが通常の運用である。SpeechText を利用し次のような宇宙詩の朗読実験も行った。

```

fuuuuuuuuu;mu,;poppo
tsukikibowo,o;o;ooooochi_suchi_kuchi_suchi_kuchi;
pogosama;pogosama+poppo+poggo,ochitamuuuuuu?
ku;biee?
    
```

日本時間 2014/05/23 03:34 にはミッションモジュールを使った Morikawa のタイマー起動によりヨーロッパ

表 8 アプリケーションとユーティリティ

名称	ID	内容
SelfTest	0	起動後すぐに正常終了する
HelloSpace	1	Shared EEPROM の TEXT_Y パラメータに "Hello, space!" を設定し、モールス符号で FM 送信した後「こんにちは、宇宙」を音声合成し FM 送信する
SpeechText	2	Shared EEPROM の TEXT_X パラメータに設定された内容を音声合成して FM 送信する
CodeText	3	Shared EEPROM の TEXT_X パラメータに設定された内容をモールス符号で FM 送信する
PlayMelody	4	Shared EEPROM のノートパラメータに設定された楽譜を演奏して FM 送信する
InvaderBot	5	Shared EEPROM の TEXT_Y パラメータに設定された問いかけに Space ELIZA が応答し TEXT_Y パラメータに返答を設定する
InvaderMusic	6	全センサのテレメトリデータを数式に従って変換した音階を演奏し FM 送信する
InvaderCam	7	Morikawa に搭載された CMOS カメラを使って写真を撮影し Shared EEPROM に書き込む
InvaderVM	8	Shared EEPROM の TEXT_Z パラメータに設定されたマシン語を実行する
TelemetryDump	9	全センサのテレメトリデータを順次 Shared EEPROM に書き込む
EraseSelfTestLog	128	自己診断テストログを初期化する
FormatEEPROM	129	ATmega EEPROM を 0xFF で初期化する
FormatSharedMemory	130	Shared EEPROM を 0xFF で初期化する
FormatFRAM	131	FRAM を 0xFF で初期化する
FormatFlashROM	132	Flash ROM を 0xFF で初期化する

上空での HelloSpace の実行に成功し、ヨーロッパ各地のアマチュア無線家から受信報告を得ることができた。

5.3 InvaderVM を用いたリプログラミング

InvaderVM の動作検証として「こんにちは、宇宙」を InvaderVM 上で動作させるプログラム【コード9】（【コード10】）を送信し実行することに成功した。

コード 9 InvaderVM のテストコード

```

CLR, HCUR # load string into the heap
TXT, 11, <NUM VAL=3>
SETC, FUNC, speakPhrase # initialize registers
SETC, ARG0, 11 # speakPhrase() argument
SETC, ARG1, 3 # counter
SETI, ARG2, 1000 # 1000 millisec
begin: # while (ARG1 > 0)
CLR, HCUR
CALL
WAIT, ARG2
SETC, HCUR, 9
DEC, ARG1
DEC, HEAP
JMPIF, ARG1, begin:
CLR, HCUR # end while
TXT, 18, konnichi'wa uchu-
SETC, ARG0, 18
CALL
END
    
```

コード 10 コンパイルされたマシン語

```
05 03 1f 0b 00 00 00 3c 4e 55 4d 20 56 41 4c 3d
33 3e 03 01 4a 03 05 0b 03 06 03 04 07 e8 03 05
03 08 1e 07 03 03 09 0d 06 0d 04 0a 06 f1 05 03
1f 12 00 00 00 6b 6f 6e 6e 6e 69 63 68 69 27 77
61 20 75 63 68 75 2d 03 05 12 08 00
```

また、音声合成 LSI の数値読み上げ機能を利用してテレメトリデータを声で地上に伝える InvaderVM プログラムの動作実験にも成功した。

5.4 MorikawaSDK の既知の不具合

INVADER 衛星に搭載された MorikawaSDK には Shared EEPROM 上の特定のバイト列を読み込むと無限ループに陥る不具合が発見された。不具合の原因は MorikawaSDK が採用している I2C ライブラリの利用方法であった。

このライブラリは標準 Arduino 付属の Wire ライブラリ³⁰をもとにミッションモジュールと効率的に通信できるように改変されたものであるが、0 バイトの受信を行うと無限ループに陥る欠陥がある。Wire ライブラリではこのような利用は想定されていないため unsigned 型変数により演算を行っている箇所でアンダーフローが発生し、次にバッファオーバーランを引き起こし I2C 通信を制御している重要なフラグを上書きする。

コード 11 修正前

```
// I2Cm.cpp (twi.c)
static volatile uint8_t twi_masterBufferIndex;
static volatile uint8_t twi_masterBufferLength;
```

コード 12 修正後

```
// I2Cm.cpp (twi.c)
static volatile int16_t twi_masterBufferIndex;
static volatile int16_t twi_masterBufferLength;
```

【コード11】と【コード12】に示すようにこの不具合は最新版の MorikawaSDK では修正済みであるが、INVADER 衛星では不具合を避ける対処療法により運用が行われている。

5.5 Morikawa で撮影された地球

日本時間 2014/04/08 16:28:18 に InvaderCam の動作実験が行われた。初回の起動であったため 160 * 120 サイズ RGB565 フォーマットの写真が撮影された。

始めに 60 行目を受信したところ地球らしき緑色から青色のピクセルが確認されたので引き続きデータを受信したところ地球と INVADER 衛星のアンテナが写っていることが判明した。そこでアマチュア無線家の協力を得てすべてのデータを 1 ヶ月あまりかけて受信した。

撮影された時点の INVADER 衛星の位置を【図9】に撮影された写真を【図10】に示す。

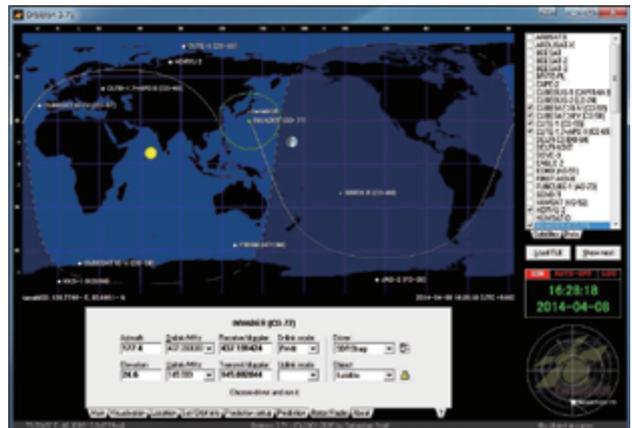
図 9 撮影時の位置⁹⁾

図 10 撮影された写真

6 謝辞

ARTSAT プロジェクトは、2014 年度多摩美術大学共同研究費「超小型芸術衛星 INVADER の打ち上げと ARTSAT プロジェクトの展開」および 2014 年度科研費基盤研究 (C)「衛星芸術用ミッションモジュールの開発と遠隔創造の実践」の支援を受けて進められた。

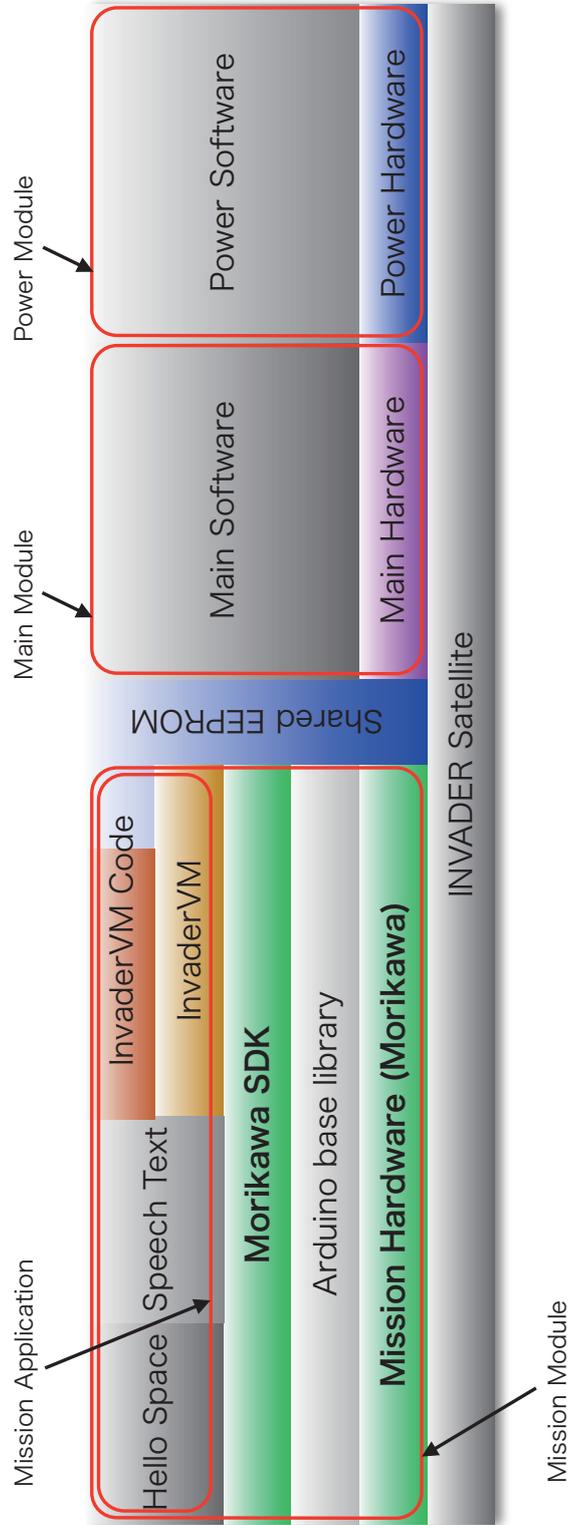
田中利樹 INVADER 開発 PM を始めとする ARTSAT プロジェクトメンバーと関係各位の尽力に厚く御礼を申し上げます。

³⁰ <Arduino>/libraries/Wire/utility/twi.c ファイル

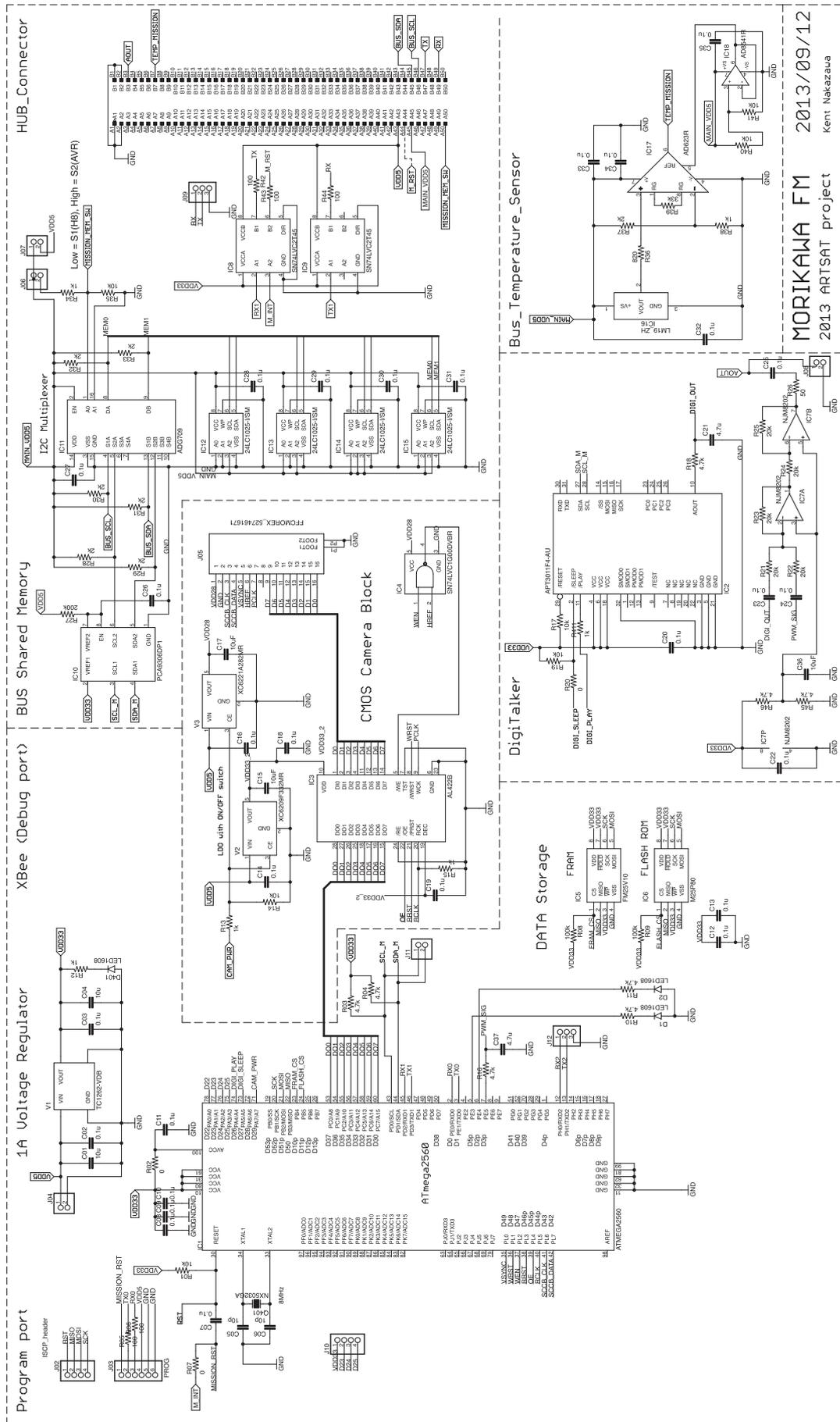
参考文献

- 1) OmniVision Technologies, Inc., OmniVision Serial Camera Control Bus (SCCB) Functional Specification, OmniVision Technologies, Inc., Document Version 2.2 (2007), pp.8-15
- 2) Bjarne Stroustrup (著) *επιστημη* (監) 岩谷宏 (訳) , C++の設計と進化, ソフトバンククリエイティブ, 2005, pp. 31-154
- 3) Richard M. Stallman and the GCC Developer Community, Using the GNU Compiler Collection, GNU Press, For gcc version 4.3.6, p. 33
- 4) Richard M. Stallman and the GCC Developer Community, Using the GNU Compiler Collection, GNU Press, For gcc version 4.3.6, p. 222
- 5) Cypress Semiconductor Corporation, FM25V10 1Mb Serial 3V F-RAM Memory, Cypress Semiconductor Corporation, 001-84499 Rev. *B (2013), pp.1-3
- 6) Micron Technology, Inc., Micron M25P80 Serial Flash Embedded Memory, Micron Technology, Inc., Rev. G (2013), pp.6-15
- 7) Microchip Technology Inc., 24AA1025/24LC1025/24FC1025, Microchip Technology Inc., Revision E (2007), pp.8-12
- 8) Atmel Corporation, ATmega640/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V [DATASHEET], Atmel Corporation, 2549Q-AVR-02/2014 (2014), pp.22-25
- 9) Sebastian Stoff, Orbitron - Satellite Tracking System, <http://www.stoff.pl> (2014)

付録 A



付録 B



MORIKAWA FM 2013/09/12
 2013 ARTSAT project
 Kent Nakazawa

「どこでも運用システム」の開発状況(第二報)

永松 弘行^{*1}

Development of Anywhere Satellite Operation System (2)

Hiroyuki Nagamatsu^{*1}

Abstract

We are in progress to develop a system for automatic operation of a satellite in order to reduce human load at satellite steady operation phase. The ground station for small satellite REIMEI is used as a test bench for verification of the proposed method. The automatic operation system is nearly completed for downlink operations of the data recorder that account for 80% of REIMEI steady operation. This approach is very effective to reduce psychological and physical load of operators. To extend or complement functions of automatic operation system, we are also in progress to develop a system for remote operation of satellite as a web-based application which is portable to various devices, for example, tablet, smart phone and personal computers. With this remote operation system, operators can monitor status of satellite and ground station anywhere. In addition, on receiving emergency call, operator can send appropriate commands or operation plans by controlling automatic operation system.

Keywords: Anywhere Operation System, Automatic Operation, Remote Operation, Web-bases Application

概要

衛星の定常運用における運用人員(オペレータ)の負担軽減を主目的とする衛星自動運用システムを開発中である。「れいめい」衛星の運用局(相模原局)を実験ケースとして試験運用を継続しており、実用化の目処は立った。また、自動運用システムを補完、あるいは拡張するための遠隔運用システムをあわせて開発中であり、「どこからでも衛星が運用・監視可能なシステム(どこでも運用システム)」の構築を目指している。携帯端末上にて試作した遠隔運用システムの汎用性向上のための改修を施し、Webアプリケーションとしての整備を進めている。本稿では、「どこでも運用システム」の開発状況を紹介する。

1. はじめに

宇宙機(衛星や探査機)を打ち上げる目的は様々だが、ミッション期間中に高品質の観測データを安定して提供し続けるための、また、宇宙機の状態を監視し、観測インフラとしての宇宙機の維持管理をするための運用システムの整備が、オペレータの確保も含めて肝心である。しかしながら、運用システムを維持するためのこれら要素は、宇宙機の開発においては後回しにされがちであり、運用システムの整備維持が不十分、オペレータの確保が不十分、運用人員の負担増、運用コストは削減傾向にある、などの問題がある。定常運用の負担軽減、効率化、コスト削減のための現実的な方策が求められると考える。運用システムを可能な限り自動化してオペレータの負荷を軽減する方法がいくつか提案され、また、実施している例、機関もある^{1), 2), 3)}。

筆者らはこれまで、特に地球周回衛星の定常運用におけるオペレータの負担軽減を主目的に、ISAS/JAXAが開発した小型科学衛星「れいめい」の地上局(相模原局)⁴⁾をテストベッドとした衛星自動運用システム⁵⁾

^{*1} 宇宙科学研究所 科学衛星運用・データ利用センター 衛星運用グループ
(Satellite Operation Group, Center for Science-satellite Operation and Data Archive, Institute of Space and Astronautical Science)

の開発を行ってきた。このシステムは衛星管制システムとは独立に整備可能なシステムで、ユーザの要求に応じて機能拡張可能なように設計されている。また、「れいめい」衛星による、観測データ/HKデータのダウンロード運用のほぼすべてを自動運用システムで行うという実績を積んでおり、自動運用システム導入の効果は大きい。さらに、緊急時対策や遠隔地からの衛星状態監視など、自動運用システムの機能を補完あるいは拡張するための遠隔運用システムを携帯端末上に試作した⁶⁾。遠隔運用システムは、1)衛星運用の操作一式(運用時間調整、運用、取得データ管理、安全管理)を、場所を選ばず実現し、2)自動運用システムと組み合わせて、「どこからでも衛星が運用・監視可能なシステム」(以下、「どこでも運用システム」と呼ぶ)を実現することで、最終的には「衛星運用における人間の負担を極力削減し、人間は人間にしかできない作業に集中できる環境を提供することで、低コストで効率的な運用を実現する環境」の整備を目指している。また、自動運用システムの開発に用いている簡易シミュレータ⁶⁾もあわせて、運用を意識した衛星開発(逆に衛星開発を意識した運用システム開発)が可能なシステムを実現することも、「どこでも運用システム」の一つの大きな目標である。

試作した遠隔運用システムは「どこでも運用システム」の実現に近づくものではあったが、端末の開発環境(具体的には iPad/Xcode)に依存するため汎用性に欠け、使い勝手もやや癖があるものであった。そこで、端末の機種依存性を極力なくす(汎用性を高める)方向でシステムの改良を行った。

本稿の構成は、以下の通りである。第2章で、「どこでも運用システム」の概要を述べる。第3章で、「どこでも運用システム」のコアシステムの一つ、遠隔運用システムの汎用性向上を目指した Web ベースのアプリケーションの開発手順について述べる。第4章で開発中のシステムに関する考察を行う。第5章で今後の課題を示し、本稿をまとめる。

2. 「どこでも運用システム」の概要

「どこでも運用システム」の概要を、図1に示す。

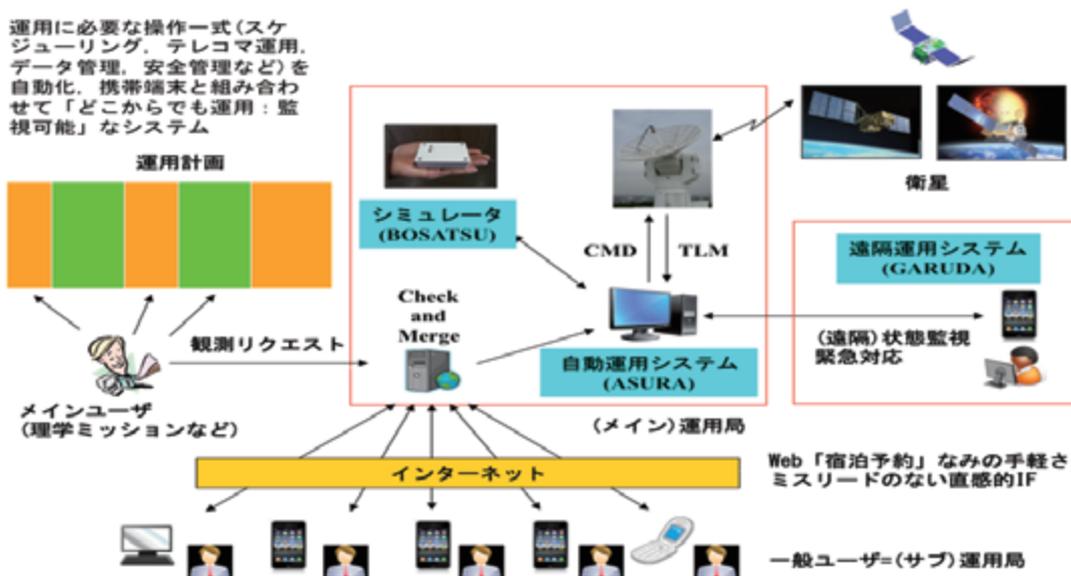


図1 「どこでも運用システム」の概要

「どこでも運用システム」は、オペレータが行うべき操作をソフトウェアにより自動化し、さらに自動化したシステムを遠隔地から Web 宿泊予約並の手軽さとわかりやすいインターフェースで衛星や地上局の監視および制御することで、運用の質を維持したまま人間の負担を軽減、人間が人間にしかできない作業に集中できるシステムの実現を目指している。これら機能の実現を目指し、「どこでも運用システム」は、以下の三つのコア・サブシステムより構成される。本論文では、2)の衛星遠隔運用システム GARUDA の汎用性向上のための改良を実施したが、本章では各サブシステムの概略を述べる。

- 1) 衛星自動運用システム ASURA (Adaptable Scheduler for Ubiquitous and Rational Application)
- 2) 衛星遠隔運用システム GARUDA (Generic Attachment for Reviewers' Utility and Data Archives)
- 3) 簡易シミュレータ BOSATSU (Basis Of Simulator Architecture for Total Satellite Utility)

衛星自動運用システム ASURA は、可視時間中のアンテナ制御やコマンド送信、衛星や地上局の状態監視などの運用シーケンス全体をオペレータの代わりに管理・統括・制御することで、(ほぼ無人の)運用システムを実現するサブシステムである⁵⁾。図2が、ASURAの典型的な動作シーケンスである。ASURAの機能確認のため、「れいめい」実機および相模原局を用いての自動運用試験を、2010年末より継続している(試験回数は2014年6月末現在、500回以上)。「れいめい」運用においては、観測データ/HKデータのダウンロード運用が定常運用の約8割を占め、このほぼすべてを自動運用システムにより実施している。

自動運用システムの導入によってオペレータの負担が軽減される。オペレータが衛星や地上局の状態を監視したり、場合によっては緊急時の対応をせざるを得なかったり(セーフホールド状態からの復帰、緊急コマンド送信、災害対策など)、というケースに自動運用システムとしてどのように対応するかを検討・実装しておく必要がある。人間が極力運用システムに(時間的にも空間的にも)拘束されないための一手段として、図3に示すサーバ・クライアントモデルに基づく衛星遠隔運用システム GARUDA を開発した。GARUDAはsshポートフォワーディングによって任意の遠隔地からASURAの監視および制御が可能であり、ASURAと連携することで「どこからでも衛星が運用・監視可能な」システムを実現している⁶⁾。

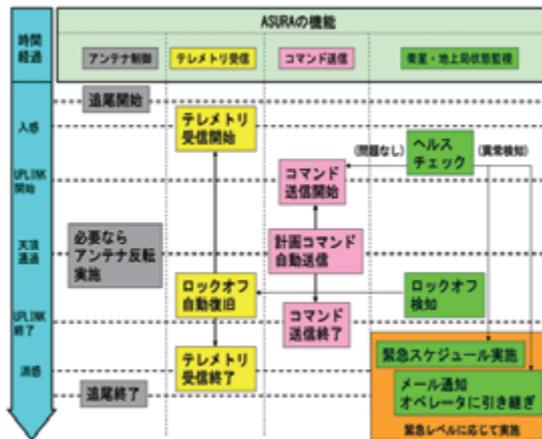


図2 ASURAによる自動運用シーケンス

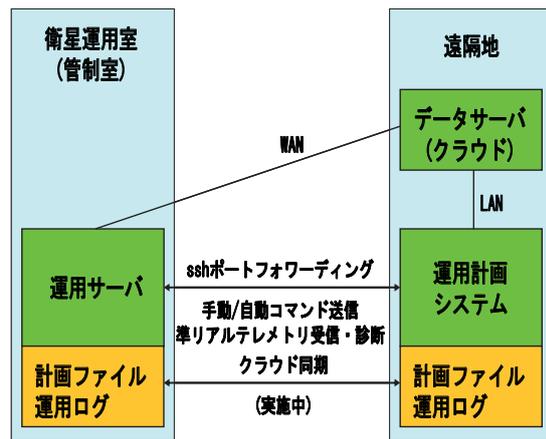


図3 GARUDAのサーバ・クライアント構造

簡易シミュレータ BOSATSU は、ASURA に組み込むアルゴリズムの検証用治具として開発した⁷⁾。当初検証に用いた相模原局・試験運用システム(「れいめい」搭載計算機のプロトモデルを利用)の出力信号は、信号の欠損がない、出力信号は一定パターンに限られるなど、試験信号として期待するものとは限らず、

例えばアンテナ受信レベルの変動に信号の欠損なく追従するためのアルゴリズム、衛星状態に問題がある場合に適切なコマンド処理を施すためのアルゴリズム、などの検証が十分とはいえないため、衛星実機および地上局の挙動に近い(擬似)信号パターンを容易に生成できるシステムとして BOSATSU を開発した⁴⁾。BOSATSU には衛星を模擬する BOSATSU-SAT と地上局を模擬する BOSATSU-GSE があり、BOSATSU を用いることで、図 4 に示すような衛星・地上局を含む閉ループ試験システムを比較的容易かつコンパクトに構築できる。ASURA は自動的に連続して複数の運用シナリオを走らせることができるため、その検証がより確実かつ容易になる。BOSATSU は、図 4 中の XML 形式で記述される衛星データベース (SATbase.xml) および地上局データベース (GSEbase.xml) を書き換えることで他衛星・地上局へ適用可能な汎用性を確保している。これらデータベースは、ASURA/GARUDA でも読み込んでそれぞれの動作を決定するものであり、3 つのサブシステムで共通的に利用する。

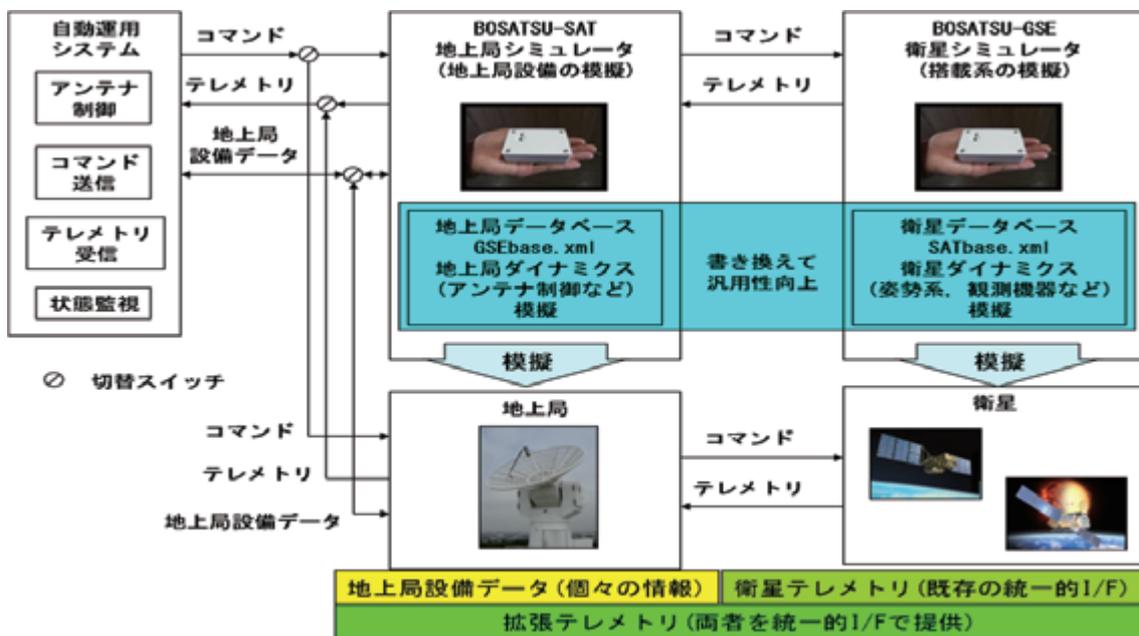


図 4 簡易衛星シミュレータ (BOSATSU) を用いた閉ループ試験システム

3. 遠隔運用システム GARUDA の汎用性向上への試み

遠隔運用システムの開発にあたり、近年急速に普及している iPad に代表されるタブレット端末やスマートフォンに着目した。これらは安価であり、場所を選ばずに(無線環境があればどこでも)情報のやりとりが可能である。必要なときに即座に取り出して使え、不要になったらしまえるなど、使い勝手がよい。開発環境もタブレット自体のシミュレータがある。煩雑になりがちな配線も大幅に削減可能で、また、消費電力も低く抑えられる。用途を絞れば、低コストで使い勝手のよいシステムが構築できる。

セキュリティ確保や通信回線(必要な帯域の確保)の問題などから、まず、衛星や地上局の状態監視を行うシステム(衛星・地上局の情報を受信するだけの受動的なシステム)を、iOS 端末 (iPad/iPhone) 専用の開発環境である Xcode を用いて開発した。iPad 版衛星状態監視システムは、「れいめい」の衛星状態監視機能の一部を実装している。「れいめい」運用システムの LAN に設置した無線アクセスポイント (Wi-Fi) 経由

で衛星・地上局の情報を取得し、有効距離は 10m 弱ではあるが、2012 年 8 月より、「れいめい」定常運用において、従来運用システムの衛星状態監視の補完システムとして利用している。

Xcode は前述の通り、iOS 端末 (iPad/iPhone) 専用の開発環境である。優れたユーザインタフェースを提供する一方、開発したアプリケーションの動作機種は iOS 端末のみとなるため、汎用性に欠ける。より一般的には、iOS 端末も含め、これ以外の例えば Android 端末や汎用 PC など、複数種類の端末で衛星運用システムを構成するのが望ましい。したがって、対応機種の拡大を考える必要がある。

「どこでも運用システム」のサブシステム ASURA/GARUDA は、第 2 章で述べたように衛星や地上局の特性を記述するデータベースを持っている。データベースには、例えば衛星バス機器や地上局設備の名称、工学値変換のための数式、監視のためのリミット値などが記述されている。このデータベースは、第 2 章で述べたように「どこでも運用システム」の各サブシステムにおいて共通の情報源として機能する。対応機種の拡大、アプリケーション開発におけるデータベースのより効率的な活用を可能とするため、データベースから衛星・地上局の状態監視ならびに制御 (コマンド送信) を行えるアプリケーションを (半) 自動生成する仕組み (スクリプト) を開発した。この仕組みを用いてアプリケーションを生成する具体的な手順は、以下の通りである。

[アプリケーションの (半) 自動生成手順]

- (1) 衛星データベースを作成する (XML 形式で記述)。
- (2) スクリプトを用いて、JavaScript/HTML のアプリケーション・コードを、自動生成する。
- (3) 生成したアプリケーションは、そのまま Safari/Firefox などの Web ブラウザ上動作する。
- (4) 表示など、ユーザの好みに応じてカスタマイズする ((1) の手順に戻る)。

この手順により生成したアプリケーションは、Web ブラウザがあれば端末や OS の種類に依存せずに利用可能であり、携帯端末 (iPad) 上に実装した試作版に比べて、より汎用性の高いものとなっている。iPad 版の特長 (場所を選ばない、省電力、省スペースなど) はそのまま、アプリケーション開発の労力が軽減される点がメリットとなる。今回開発した手順を用いると、iPad 版衛星状態監視システムと同等の機能を有する Web 版衛星状態監視システムを作成するには、[アプリケーションの (半) 自動生成手順] (1) に従って衛星データベースを作成した後は、手順 (2) に従ってスクリプトを一度起動するだけでよく、JavaScript/HTML によるアプリケーションのコーディング時間は、ほぼゼロとなる。また、従来版 (Xcode 版) は、端末の種類別に解像度やサイズに最適化した GUI を設計し直す必要があるが、改良版 (Web 版) ではその必要はない。一度コードを生成すれば、端末の種類や OS に依存せず、衛星状態監視および衛星・地上局のコマンド制御が可能となる。

Web 版衛星状態監視システムは、2013 年 10 月より、相模原局にて実運用試験 (一部項目はシミュレータを併用) を実施している。試験運用のシステム構成を図 6 に、条件を表 1 に、それぞれ示す。図 6 に示すシステムは、図 1 の赤線で囲んだ部分を模擬するものである。自動運用システム ASURA は、あらかじめ決められた運用計画 (HK モニタ運用および DR データ再生) にしたがって、オペレータに代わって運用を実施する。安全性の確保、法律の関係からオペレータは ASURA の目の前に座っているが、基本的には「運用の様子を見ているだけ」である。衛星あるいは地上局トラブルの場合は、図 2 の右下に記述した手順が起動し、オペレータに運用を引き継ぐ。衛星、地上局のステータスおよび ASURA のステータスは、有線あるいは無線

LAN(Wi-Fi)を介して GARUDA に配信され(図 5 では有線 LAN は省略), オペレータ以外の人間にもチェック可能である. 図 5 の右側に表示されているのが, Web ブラウザ Safari 上で稼働する GARUDA のスクリーンショットである.

このシステムを用いて,「れいめい」の HK モニタ運用および DR データ再生運用において, 衛星の機器ステータス(バス電圧やバッテリー温度など)や地上局の機器ステータス(パワアンプの ON/OFF 状態やアンテナの AZ/EL 角度など)が問題なく表示されることを確認した. 無線 LAN のみを用いたシステムについては, iPad 版衛星状態監視システムを用いた試験運用を実施しているが, 今回は Web 版をいくつかの端末環境に実装し, 動作に問題がないことを確認した. 具体的に動作を確認した環境は, iPad 上の Safari に加えて(Wi-Fi 接続のみ), Macintosh/Windows 上で稼働する Safari/Firefox である(Wi-Fi/有線).

Web 版衛星状態監視システムは, iPad 版と同じくコマンド送信機能を有するが, 特にセキュリティ面の制約を考慮し, 実運用においては状態監視機能の確認に止め, コマンド送信機能の確認は,「れいめい」衛星の搭載計算機を利用した試験装置(「れいめい」搭載計算機プロトタイプを用いたハードウェアシミュレータ)を対象として実施しており, 原理的に可能なことは確認済みである.

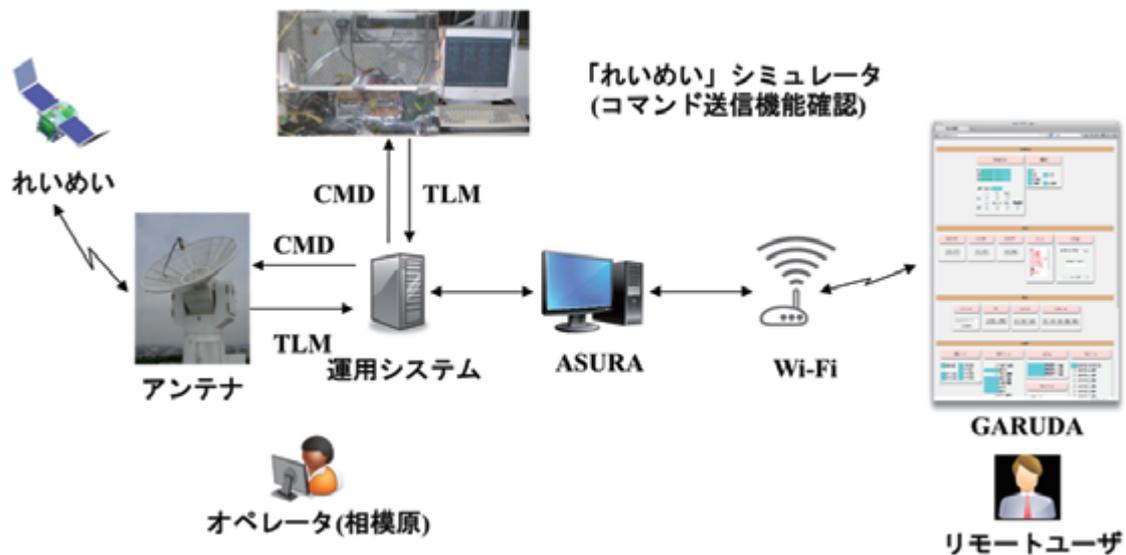


図5 相模原局における GARUDA 試験運用システムの構成

表1 相模原局における GARUDA 試験運用時の条件

項目	項目名 / 条件
アプリケーション	衛星状態監視システム
ネット接続環境	「れいめい」運用室内設置の有線 LAN および Wi-Fi ルータ GARUDA - ASURA - 運用システム - 衛星/シミュレータ
テレメトリ受信レート	8 kbps ~ 128 kbps (8/16/32/64/128 の5段階で可変)
コマンド送信レート	1 kbps (ハードウェアシミュレータを対象)

4. 考察

今回開発したアプリケーション生成手順を用いると、衛星データベース、地上局データベースから必要なアプリケーションが(半)自動生成されるため、アプリケーション開発の労力軽減、容易な維持管理、コスト削減が期待される。例えば GUI に相当する部分は、Web ブラウザの標準機能を用いる限りは開発の必要がなくなる。すなわち、GUI 部コーディングの時間はほぼゼロになる。また、コーディングがほぼ不要となるため、コードの維持管理もほぼ不要となる。開発者は衛星データベース、地上局データベースという、運用システムのより根幹的な部分の構築作業、維持管理作業に集中すればよい。これは、「どこでも運用システム」が目指す「人間は人間にしかできない作業に集中できる環境を提供する」ことに繋がる。

また、今回開発したアプリケーション生成手順を用いると、衛星・地上局の開発初期段階から試験治具として使えるアプリケーションを揃えられる。このアプリケーションを用いると、データベース中に記述される衛星・地上局のステータスを即座に確認できるし、コマンド送信も可能である。衛星の開発において、試験は重要な位置を占める。試験の際に、データ入出力のための適切な治具が準備されていることは重要であるが、地上運用設備(衛星管制システム)に近い完成度を持つ治具の整備を、搭載側の開発と平行して進めることには非常な労力を要する。しかし、開発の早期段階から運用に用いる衛星管制システムに近い完成度を持つシステムを導入できるなら、試験の労力が大幅に削減できる可能性は高い。

第1章で触れたように、運用システムの開発は、衛星の開発に比べると後回しにされがちであり、衛星の開発の目処が立ってから地上局の整備を行う場合が多いと考えられる。衛星の運用において重要な機能が衛星開発の初期段階から見やすい環境が整備できていれば、より効率的な運用システムの開発に繋がることが期待できる。本論文で提案する手法は、このことに対する一つの回答と考える。つまり、開発の早期段階から衛星と地上システムそれぞれの開発者が、実機や実設備を使うリスクを軽減しつつ、双方のイメージを把握し、同時並行的開発・開発の同時最適化に寄与することが期待できる。衛星を打ち上げる目的は様々だが、搭載系の自律機能を除けば、打ち上げ後の衛星の維持管理は地上局を介して行うしかなく、搭載系の能力を十分発揮できるか否か、無理のない運用が可能かどうか、は、地上の運用システムの完成度に大きく左右される。したがって、開発の早期段階から衛星と地上局の同時並行的な開発を行うことの重要性を、ここで改めて強調する。

また、本論文で提案する手法は、特に小規模・少人数の衛星プロジェクトにおいては、アプリケーション開発に割くリソースを抑えつつ、効率的な開発体制を整えるために威力を発揮すると考えている。

5. まとめ

時と場所を選ばず「どこからでも衛星が運用・監視可能なシステム」すなわち「どこでも運用システム」の開発状況について述べた。「どこでも運用システム」のコアとなるサブシステムの一つが、衛星自動運用システムの機能を補完あるいは拡張するための遠隔運用システムである。本論文では、「どこでも運用システム」の実現を目指すシステム開発の一環として、コアとなるサブシステムの一つ、遠隔運用システムの汎用化を提案し、システム構築の現状および実運用試験について報告した。

具体的には、「どこでも運用システム」で共通的に使われる衛星データベース、地上局データベースから遠隔運用システム上で稼働する Web ベースのアプリケーションを”直接”自動生成する手順を開発した。

また、開発した自動生成手順により生成したアプリケーションをいくつかの端末上(異なる OS/Web ブラウザ、および有線端末と無線端末)で、相模原局における「れいめい」定常運用にて動作させることで、汎用化が実現できたことを確認した。

今後も、システム機能の充実を図りつつ、「れいめい」衛星ならびに相模原局以外の衛星および地上局へと適用範囲を広げてゆきたいと考えている。相模原局自体も、引き続き自動運用・遠隔運用システムの試験環境として有効活用してゆく。また、特に大学衛星をはじめとするピギーバック衛星向けに、自動運用・遠隔運用を前提とする運用システムを、ハードウェアを含めて提供できるよう、「れいめい」に依存する要素を無くする形で構築中である。

謝辞

日頃からご指導ご鞭撻頂いております、「れいめい」開発メンバ、運用メンバの皆様、自動運用システムのソフトウェア開発でお世話になっております秋丸忠隆氏に、この場を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) J.ean-Marc Soula: “Automation of CNES Ground Station Networks”, 8th International Workshop on RCSGSO, Automation No.3, Tsukuba, Japan, 2009.
- 2) D.Chung et.al.: “Concept Design of the Generic Mission Operation System”, 8th International Workshop on RCSGSO, Automation No.12, Tsukuba, Japan, 2009.
- 3) J.Jackson et.al.: “NASA's Ground Network's Right Sizing and Transition to Outsourcing”, 8th International Workshop on RCSGSO, Outsourcing No.5, Tsukuba, Japan, 2009.
- 4) H. Saito et.al. : “An overview and initial in-orbit status of “INDEX”satellite”, 56th International Astronautical Congress, IAC-05-B5.6.B.05, Fukuoka, Japan, Oct. 2005.
- 5) H. Nagamatsu and H. Saito : “Development of Automatic Operation System-Using REIMEI Ground Station as a Test Bench”, 62nd International Astronautical Congress, IAC-11-B4.3.4, Cape Town, South Africa, Oct. 2011.
- 6) 永松 : どこでも運用システムの開発, 第 57 回宇科連, JSASS-2013-4572, 2013.
- 7) 永松 : 簡易衛星シミュレータの開発, 第 55 回宇科連, JSASS-2011-4278, 2011.

あけぼの衛星アナログ広帯域受信器による観測データの自動較正法

笠原 禎也*1, 後藤 由貴*1, 大池 悠太*1

Abstract

Akebono was launched in February, 1989 and has attained the 25 years of successful operation without major troubles. The VLF instrument onboard Akebono measures plasma waves below 20 kHz and plays an important role to study plasma physics in the Earth's magnetosphere. The VLF measures not only wave spectrum in digital format but also analogue waveform, and the analogue waveform data are transmitted via analogue telemetry. Huge amount of analogue data have been stored, but data analyses are not comprehensively performed so far because of the difficulties of their peculiar characteristics. In the present paper, we introduce current status of data analysis system developed for the VLF analogue waveform data. We also address anticipated outcomes from these huge datasets.

概要

あけぼの衛星は1989年2月に打ち上げられ、25年を超えた現在も定常運用を継続している。同衛星に搭載されたVLF波動観測装置は20kHz以下のプラズマ波動の電磁界観測を担当し、その長期観測データは磁気圏物理の解明に重要な役割を果たしている。同装置は、デジタルデータとしての波動スペクトルの計測だけでなく、アナログテレメトリによるVLF波形観測も行っているが、膨大に蓄積されたアナログ波形データは取り扱いの困難さから、これまで網羅的な解析が困難であった。しかし近年の情報処理技術の発展にともない、データのデジタル化や蓄積、観測データの自動較正が可能となり、これらの大容量データを用いて新たな知見が得られることが期待されている。本論文では、アナログ波形データの解析システムに用いられている情報処理技術の現状を報告するとともに、これまでに蓄積された大容量波動観測データの解析により期待される新しいサイエンスについて述べる。

1. はじめに

あけぼの衛星はオーロラを光らせるプラズマの加速メカニズムの解明を目的に、プラズマ加速機構に関わるプラズマ粒子や電場・磁場の精密観測をめざして、1989年2月に打ち上げられた。初期軌道条件は遠地点高度約10,000km、近地点高度約300km、軌道傾斜角約75度である。同衛星には、直流電場・磁場計測装置、プラズマ粒子計測装置、オーロラ撮像カメラのほか、プラズマ波動観測装置を搭載し、そのユニークな軌道の特性を活かして、当初の目的である極域観測のみならず、放射線帯やプラズマ圏などの中・低緯度域においても貴重なデータ取得を実現し、打ち上げから25年を経た現在も放射線モニタやプラズマ波動観測などの測器による継続観測が行われている。

プラズマ波動観測装置は、20kHz以下のELF/VLF帯の電磁界成分を計測するVLF装置と、20kHz以上の高周波帯の電磁波計測とサウンダー観測を行うPWS装置に分けられる。VLF装置のサブシステムの一つである広帯域スペクトル受信器(WBA; Wide Band Analyzer)は、14kHz以下の電界または磁界のアナログ波形データを取得し、そのデータはアナログテレメトリで地上に送られる。WBAデータは、地球磁気圏で観測される多種多様なVLF波動の詳細解析に大変有用であるが、アナログデータ特有の取り扱いの困難さゆえに、すべてのデータを網羅的に解析できないという問題があった。しかし、近年の計算機環境や情報処理技術の飛躍的進歩により、データのデジタル化や較正処理の定型化が進み、ようやくこれまで蓄積された大容量データの網羅的な解析にめどが立ちつつある。本論文では、WBAデータの解析システムの現況を紹介するとともに、データアクセス・解析環境の整備によって今後期待される科学成果について述べる。

*1 金沢大学大学院自然科学研究科 (Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University)

2. あけぼの広帯域スペクトル受信器 (WBA) によるデータ取得

2.1 VLF 観測装置

あけぼの衛星に搭載された VLF 観測器^{2,3)}のブロック図を図 1 に示す。VLF 観測器は 20kHz 以下のプラズマ波動の電磁界成分について、電界はスピン面内に伸展した片側 30m の直交ワイヤアンテナによるスピン面内の直交 2 成分、磁界は 800Hz 以上をループアンテナ、800Hz 以下をサーチコイルによって直交 3 成分の測定が可能である。VLF 観測器の受信部は 5 つのサブシステムに分かれており、本論文で紹介する WBA の他に、アンテナインピーダンス校正用の VIP (Vector Impedance Probe)、100Hz 以下の超低周波帯の観測を担当する ELF (Extra Low Frequency Range Analyzers)、波動の伝搬方向推定を目的とする PFX (Wave Normal and Poynting Flux Analyzers)、20kHz 以下の電磁界スペクトルを測定する MCA (Multi-Channel Analyzers) から構成される。

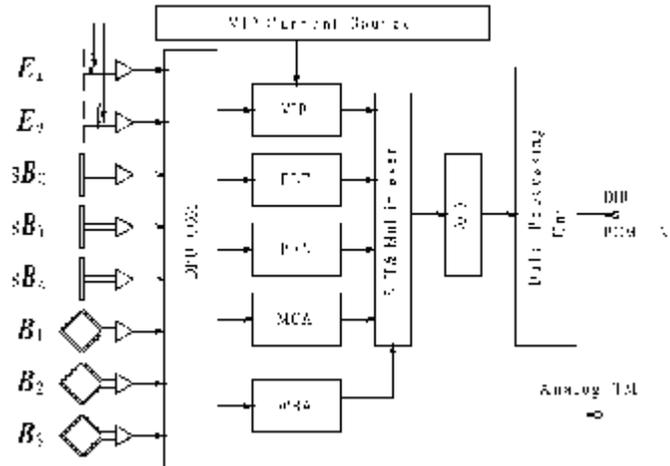


図 1 あけぼの VLF 観測装置ブロック図

WBA 以外の 4 つのサブシステムは、図 1 に示されるように機上でデジタル化され、デジタルテレメトリとして地上局に伝送される。これに対し、WBA は取得データをアナログテレメトリとして地上伝送する。そのため、上述した MCA と WBA はカバーする周波数帯域がほぼ同じにもかかわらず、データの特性や用途が大きく異なる。

すなわち、MCA が電界・磁界各 1 成分のダイナミックスペクトルを、対数的に等間隔に分割した 16 チャンネルのフィルタバンク (バンドパスフィルター) を用いて、ノミナル観測モード時は時間分解能 0.5 秒で測定するのにに対し、WBA は電界または磁界のどちらか 1 成分しか測定できない代わりに、アナログの波形データを取得するため、任意の時間・周波数分解能で解析が可能である。その反面、WBA はシステム特性上、データの校正や可視化に多数の処理過程を要するため、データ解析に大変手間がかかるという問題がある。

2.2 WBA 装置の特徴

WBA はアナログ計測器であるため、データ処理を行う際に、他のデジタル機器と異なる様々な点に留意しつつ解析を行う必要がある。以下に WBA データの特徴をまとめる。

1. 観測波形の VSB 変調

WBA は電界または磁界センサいずれか 1 成分で測定した 14kHz 以下の波形信号に対し、20kHz のサブキャリアを用いて振幅変調 (AM) の一種である VSB 変調した信号が送られてくる。元の観測データのスペクトルと、VSB 変調後のスペクトルの関係は図 2 に示すとおりである。VSB 変調は、振幅変調したスペクトルの片側の側波帯に加え、残る反対側の側波帯の一部までを含めた帯域を伝送する通信方式で、WBA では下側波帯のすべてと上側波帯の一部を地上局に伝送している。送

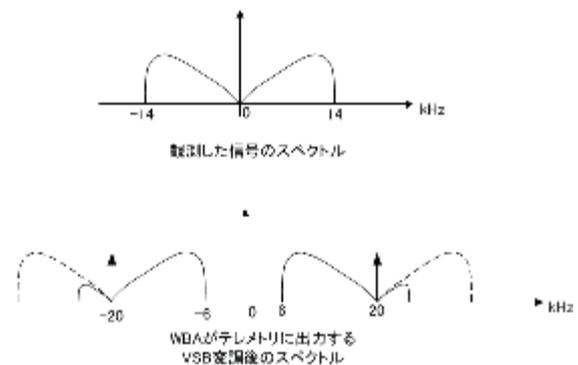


図 2 VSB 変調のイメージ図

信されたデータは VSB 変調がかかったまま地上局で記録されるため、受信信号は 20kHz を起点に周波数が上下逆転した状態で記録・蓄積される。そのため、実際に観測された波動のスペクトルを得るには、変調がかかったままの信号に FFT をかけ、20kHz 以下の周波数スペクトルを上下反転させる必要がある。一方、元の波形を復調するには、一般に VSB 変調波の復調に用いられる 20kHz のローカル信号を用いた同期検波を行う必要がある。

2. データの記録形態

WBA が生成するアナログ信号 (VSB 変調された信号) は、可聴域の周波数帯であることから、打ち上げ当初は地上局に設置した市販の DAT (Digital Audio Tape) デッキを用いて「音声信号として」磁気テープである DAT に録音後、宇宙研を介して我々の研究グループのもとに郵送されていた。DAT に記録された WBA データの数は、約 28,400 パスに上る。解析を行うには、まず、テープを 1 本ずつ DAT デッキで再生する必要があるが、市販のオーディオデッキによる音声再生のため、早送り再生などは不可能である。そのため、全データの再生には観測総時間と同じだけかかる。

3. 時刻情報のデコード

WBA データには、地上局で時刻情報としてアナログのタイムコードが付与される。具体的には、DAT に記録できる音声データがステレオに対応していることから、右チャンネルに VSB 変調がかかったままの WBA の観測信号を入力し、左チャンネルにタイムコードを入力することでステレオ音声として記録する。使用されるタイムコードは、IRIG-A, IRIG-B, NASA コードなど追跡局やデータ取得時期によって 3 種類のタイムコードが混在しており、テープを再生する際にタイムコードの種類を判別してデコードを行う必要がある。

4. WBA 観測状態との照合

WBA による実観測データは上述の通りアナログテレメトリとして送られてくるが、WBA の機器情報、いわゆる House Keeping データ (以下、HK データ) は、他の観測器と同様、デジタルテレメトリとして送られており、宇宙研の SIRIUS に登録される。WBA の HK データとしては、WBA の ON/OFF 情報のほか、使用センサの種類 (電界 or 磁界) とセンサ軸方向 (Ex, Ey など)、受信器のゲインなどがある。WBA は後に述べる WIDA というチップを用いたオートゲインコントロール (AGC) を行っており、ゲイン情報はデータ較正のために大変重要な HK データである。

2.3 取得した WBA データの記録形態

DAT に記録された音声データは、このまま磁気テープ媒体で保管すると、テープの劣化により貴重なデータが失われる恐れがあることや、どのテープ (どのパス) にどのような波動現象が記録されているかを調べるには、逐一、テープを再生しなければ確認できない。しかし、打ち上げ当初はテープを再生し、デジタル化したデータをそのまま電子ファイルとして保管するには容量が大きすぎ、デジタルデータをそのまま保管することはほとんど不可能であった。そのため、当初のデータ解析は MCA など興味ある波動データが観測された日時を選び出し、該当時刻の WBA データを再生して詳細解析を行う方法が主流であった。

しかしこの問題は、近年のパソコンや周辺機器性能の進歩に伴い、劇的に改善された。まず我々は、追跡局でデータ記録に用いていた DAT デッキを、サウンドカードを組み込んだ汎用デスクトップパソコンに置き換え、データをその場で A/D 変換して wav フォーマットの音声ファイルに変換して記録するデータ記録方式に変更した。サウンドカードで取り込んだ音声を、デジタル音声化する部分はパブリックドメインで公開されている一般的な音声記録ソフトウェアを使用している。これにより、内之浦局では 2006 年以降、スウェーデン・エスレンジ局では 2009 年以降の WBA データが、追跡局で直接デジタル化されるようになった。デジタル化されたデータは内之浦局では DVD に記録され郵送で、またエスレンジ局のデータはネットワーク経由で取得可能となった。

一方で、上記の装置にリプレースが行われる以前に DAT に録音し、当研究グループで保管していたデータは、テープ総数が 20,000 本を超えるため、DAT を 1 本ずつ DAT デッキにかけては、たとえ 24 時間休まず再生を続けても、全データのデジタル化には少なくとも 5 年超の時間を要してしまう。この問題に対し我々は、複数チャンネルの音声を独立に取り込むことが可能なオーディオインターフェースカード⁴⁾に DAT デッキの出力を並列で接続することで、DAT を再生した音声を同時に A/D 変換して wav 形式の音声ファイルを計算機に取り込むシステムを構築した。このシステムが完成したことにより、現在は学生アルバイトの形で日常的に DAT の再生を行い、wav ファイル化した波形データをハードディスクに蓄積する作業が進んでいる。現在は、使用可能な DAT デッキの台数の制約から 4 台のデッキを併用して、これまでに約 7 割弱のテープ再生が完了している。全テープの再生が完了するまでに、あと 1 年余り要する見込みである。

なお、wav 形式に変換後の音声データは、サンプリング周波数が 48kHz、1 サンプルあたり 16bit、ステレオ形式で記録される。すなわち生成されるデータ容量は、

$$16\text{bit/sample/ch} \times 48,000 \text{ sample} \times 2\text{ch} = 1,536,000\text{bps} \quad (1)$$

であり、1時間分の観測データが691.2MByteに相当する。これまでの観測データをすべてデジタル化すると、約30TByte超になると予想される。現在これらの音声データは、当研究グループが保有するRaid HDD上に、追跡局名とパス番号を付与したファイル名で蓄積され、ネットワーク上に接続された計算機から利用可能となった。しかしこれらは先に述べた通り、VSB変調されたままの波形データとタイムコードをそのまま記録しただけの形式であり、実際のデータ解析を行うには、時刻データのデコードや強度補正などの処理を行う必要がある。これらの方法について次章で詳しく述べる。

3. WBA データ較正処理

3.1 WBA ステータス参照システム

WBAには十分なダイナミックレンジ確保のために、ON/OFFが切り替わるICチップ増幅器(WIDA: Wide Dynamic Range Amplifier)が組み込まれており、受信器のゲインを自動調整する機能(オートゲインコントロール; AGC)を有する。WBAに実装されたWIDAは1個あたり15dBのゲイン^{†1}のON/OFFが切り替えでき、合計3個のWIDAにより、受信器のゲインが0dB~45dBの間で変更可能である。WIDAは0.5s毎に直前に得られたプラズマ波動の強度を参照して、最適な値に切り替えられる。2.2節で述べたように、このON/OFF情報は、WBAのアナログ波形(アナログテレメトリ)とは別に、WIDAがゲインONしている数として0~3の値としてHKデータに出力され、デジタルテレメトリで地上に伝送されている。

WBAで計測した信号の強度を求めるには、このWIDA情報が必須である。そこで我々は、デジタルテレメトリから、WBAのWIDAに関するHKデータを抜き出し、PostgreSQLを用いてデータベースを構築した。同データベースに対し、時刻情報をキーに問合せを行い、該当時刻のWIDA情報を得るアプリケーション組み込み型の関数を用意することで、WBAデータからデコードした時刻をもとに、その時刻のゲイン情報が得られるようになった。処理の概念図を図3に示す。

3.3 強度較正アルゴリズム

図3に示す処理システムを構築することにより、観測データのゲイン情報が機械的に参照できるようになった。しかし、WBAデータに記録されている時刻は、地上局で付与されたタイムコードであり、デジタルテレメトリを宇宙研のSIRIUSに登録する際に付与される時刻情報とは、衛星内部や局内遅延、さらにはテレメトリの伝送遅延など様々な要素がからんで完全には一致しない。また、HKデータの時間分解能は0.5秒であるため、これより細かい時刻精度で、実際にWIDAがゲインを切り替えた時刻を特定できない。このため、上述のWIDAステータスのデータベースを参照してWBAデータの強度補正を行っても、ゲインの切り替え部分にわずかなギャップが生じる。この問題を解決し、WIDAのゲインが切り替わってもスペクトルデータをスムーズにつなぐための強度補正アルゴリズムを考案した。以下にその詳細を示す。

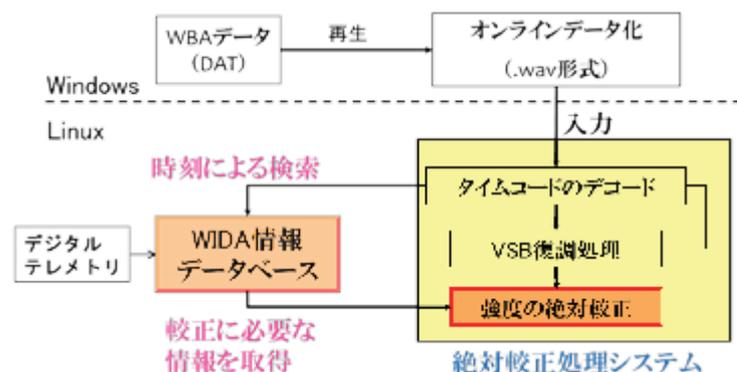


図3 WBA データ解析手順のブロック図

^{†1} WIDAの本来のゲイン設計は25dBで³⁾、PFXなど他のサブ機器は実測上もそうなっているが、WBA内蔵のWIDAだけは打ち上げ後の統計的なデータ評価により15dBが妥当とされ、較正処理では15dBを採用している。

図4は1997年6月21日にスウェーデン・エスレンジ局で取得されたWBAデータのスペクトルである。ここでは、タイムコードをデコードした後、20:16:17~20:16:27UTまでの10秒間の波形データに対してFFTを施して描画したスペクトルの例を示している。FFTは960点で行っており、時間分解能20ms、周波数分解能50Hzを実現している。この段階では、WIDA情報に基づく強度補正は行っていないことに注意いただきたい。

図では、20:16:20UT過ぎにスペクトルの強度がいったん増加し、再び20:16:24UT過ぎに元のレベルに戻る様子が見られる。これは、真ん中(20:16:17~20:16:27UT付近)の時間帯は、前後の時間帯に対して受信機のゲインが15dB高くなっており、相対的にこの時間帯のみ強度が大きく記録されていたためである。

次に、WIDA情報のデータベースに記録された時刻情報をもとに、強度補正を行った結果を図5に示す。図より、WIDAの動作数が増加した部分が補正され、全体的に等レベルのスペクトルが得られているが、矢印を施した2か所において、強度の不連続部分が見られる。これは、先に述べたように地上局においてWBAデータに付与されたタイムコードと、SIRIUSに登録されたデジタルテレメトリの時刻情報にわずかなずれが存在する(HKデータに付与された時刻情報のほうが相対的に早い)ため、左側の矢印部では誤って強度が15dB小さく補正され、逆に右側の矢印部は補正が行われずに15dB高いままのスペクトルが残ってしまったためである。

そこで、このわずかな時刻のずれを補正し、正しく強度補正を行うための自動判定アルゴリズムを、新たに導入した。以下に手順を示す。

1. WIDAの動作数が増加した時刻を中心に、前後0.5秒間(計1秒間)のデータについて、FFTを行った時間幅(20ms)単位で、100Hz~10kHzの周波数帯域における平均強度を求める。強度変化の時間分解能は20msである。
2. 時間方向に、前後2点ずつの5近傍(100ms相当)のデータを使って、平均強度データにメディアンフィルタをほどこす。
3. メディアンフィルタを通したあとの強度変化の時系列データに対し、閾値以上の強度変化が見られる時刻を、WIDAの動作数が増加した時刻と同定する。現行システムでは、閾値をWIDAのゲインである15dBの半分の7.5dBに設定して判定しており、これで良好な特性が得られている。

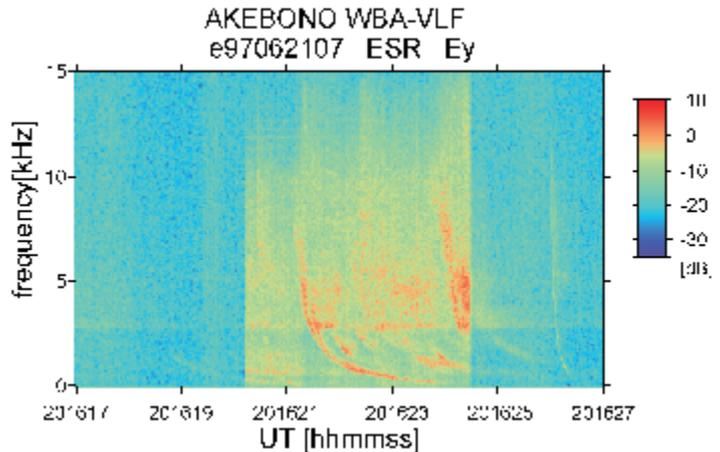


図4 強度補正前のWBAスペクトルの例

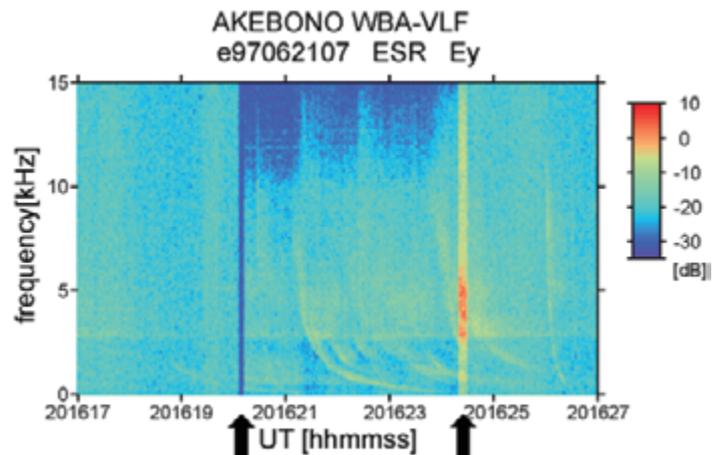


図5 WIDA動作情報に基づく強度補正後のスペクトル(時刻補正を行う前)

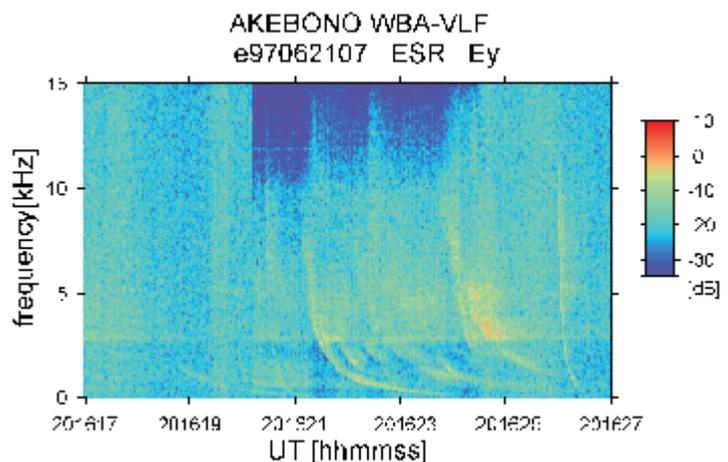


図6 時刻補正後のスペクトル

このような処理を行って、精密な WIDA 動作数の切り替わり時刻を決定し、スペクトル強度を補正した結果を図 6 に示す。図より、WIDA の動作数がいったん増加し、再び減少したいずれの時刻においても、時間方向にスペクトルがスムーズに接続されている。なお、真ん中の 20:16:17~20:16:27UT 付近の時間帯で、10kHz より高い周波数帯の強度が若干小さくなっているが、これは WBA 受信器本来の LPF の特性である。それに対し、前後の時間帯は WIDA による増幅率が小さいために、WBA からの出力信号のレベルが小さく、後段で重畳した雑音により LPF 特性が見られなくなったためと考えられる。

同アルゴリズムの適用により、WBA データを周波数領域に変換したデータについて、強度補正処理の自動化が実現し、大量に蓄積された WBA データの可視化と網羅的な周波数解析が可能となった。

4. WBA データを利用したデータ解析の今後の展望と課題

4.1 スペクトルデータを用いた雷ホイスラの解析

雷起源ホイスラは、雷放電を源として発生する VLF 帯のインパルシ的な電磁波が、電離層を突き抜けて宇宙プラズマ中を伝搬する波動現象である。あけぼの衛星では、この雷起源ホイスラが頻繁に受信されている。あけぼの衛星で WBA が受信した雷起源ホイスラの一例を図 7 に示す。

地球の磁気圏プラズマ中を伝搬する 20kHz 以下の電磁波は、プラズマの異方性の影響で、ホイスラモードと呼ばれる波として、地球の磁力線に沿うように屈折しながら伝搬し、その伝搬速度は高周波より低周波のほうが遅いという特性がある⁵⁾。その結果、観測点には高周波の波ほど先に到達し、遅れて低周波の波が到達することから、図 7 に示されるように、スペクトログラム上で「ノ」の字を左右反転させた形状となる。

ホイスラ波は伝搬時間 t が周波数 f の平方根に反比例する特性を持ち、雷起源ホイスラは、伝搬時間と周波数が次式で表せることが知られている。

$$t = \frac{D}{\sqrt{f}} \quad (2)$$

ここで変数 D は雷起源ホイスラの伝搬遅延の度合いを表すパラメータであり、「分散」と呼ばれる。雷起源ホイスラの伝搬特性から、分散 D は波源からの伝搬距離が長くなるほど大きくなる。また伝搬通路中の電子密度が大きいほど、分散 D が大きくなることも理論的によく知られている。

あけぼの衛星は軌道傾斜角 75 度で、南北半球を横切るような形で飛行するが、1 周回軌道の間に雷起源ホイスラが連続的に観測される事例が多数見られる。式(2)で示されるように、WBA で取得したスペクトルを、縦軸を周波数 f の平方根の逆数に置き換えて描画し直すと、雷起源ホイスラは直線で表され、分散 D は直線の傾きの逆数として求めることができる。

例として、1991 年 8 月 1 日に WBA で連続観測された雷起源ホイスラの分散 D の時間変化の様子を図 8 に示す。同図は衛星軌道に沿った、雷起源ホイスラの分散 D の時間変化である。また図 9 に、同時間帯におけるあけぼの衛星の軌道を、磁気子午面内に投影したグラフと、縦軸に磁気緯度、横軸に磁気ローカルタイムを取ったグラフの 2 種類で示す。この時、あけぼの衛星は北半球から南半球に向かって飛行しており、この間に雷起源ホイスラの分散 D は $50\text{s}^{1/2}$ から $20\text{s}^{1/2}$ まで徐々に減少している。すなわちこのイベントでは、あけぼの衛星は波源に近づく方向に飛行しており、南半球に波源を持つ雷起源ホイスラが衛星軌道に沿って連続観測されたことがわかる。

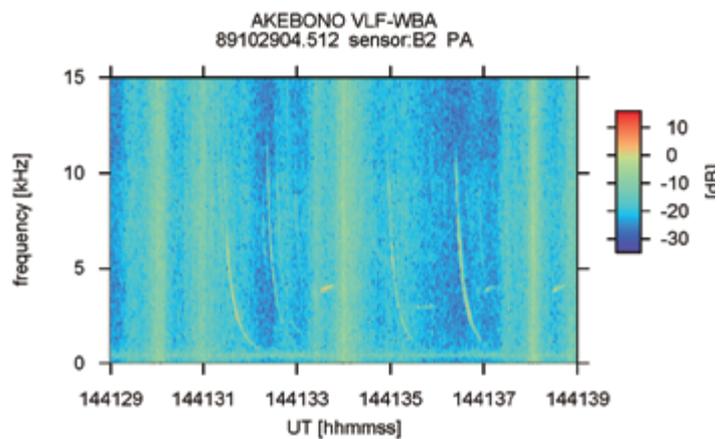


図 7 あけぼの衛星 WBA で観測された雷起源ホイスラのスペクトル

最後に、このような雷起源ホイストラの分散値解析の活用法について述べる。先に述べた通り、雷起源ホイストラの分散値 D は、伝搬通路長だけでなく伝搬通路に沿った電子密度にも依存するため、たとえ波源から観測点までの距離が同じでも、波の伝搬遅延時間は一定とは限らない。ホイストラモードの波の伝搬通路や伝搬時間は、レイトレイシング^{6,7}という方法を用いることで理論的に計算可能である。すなわち、地球磁気圏の電子密度プロファイルを変化させて、ホイストラ波のレイトレイシングを行い、衛星軌道に沿って実観測された分散値 D のトレンド合致する電子密度プロファイルが得られれば、時々刻々と変化する地球磁気圏内のグローバルな電子密度プロファイルが、1 周回軌道毎に求められることになる。

このような解析法は一般に「逆問題」と呼ばれ、我々のグループではすでに、船舶航行用ナビゲーションの目的で地上局から送信されていた VLF 帯のオメガ信号をあげぼの衛星軌道上で受信し、その伝搬特性をレイトレイシングで再現することで、磁気圏内の電子密度プロファイルを求めることに成功している⁸。オメガ信号は GPS の発展により 1997 年 9 月に停波されたため、それ以後のデータに対して同解析手法を適用することは不可能となったが、それに代わるグローバルセンシング法として、25 年超にわたる WBA による雷起源ホイストラ解析は、非常に有用と考えられる。現在、我々は雷起源ホイストラデータを用いた逆問題解法の検討を、理論⁹と実観測¹⁰の両方から進めており、近い将来、具体的なイベント解析につなげていきたいと考えている。

4.2 今後の課題

WBA アナログ波形データのデジタル化後のデータ蓄積処理が進み、同時に周波数領域での強度較正がシステムティックに行えるようになったことで、時間・周波数分解能に優れた WBA データを用いた雷起源ホイストラなどの解析とその応用にめどが立ちつつあるが、WBA データが十分利活用できるようになるには、まだ様々な課題が残されている。

まず、本論文で紹介した強度補正アルゴリズムは、FFT を施した後のスペクトルデータに対して有効であるが、波形データに対する補正法はまだ確立していない。ある特定の時間帯に特化して、ゲインが変化した時刻を FFT の結果から同定して、波形レベルで強度補正することは原理的に可能ではあるが、1 時間以上にわたって連続的に記録されている VSB 変調がかかった音声データを復調する傍らで、WIDA のゲインが切り替わった時刻を同定し、

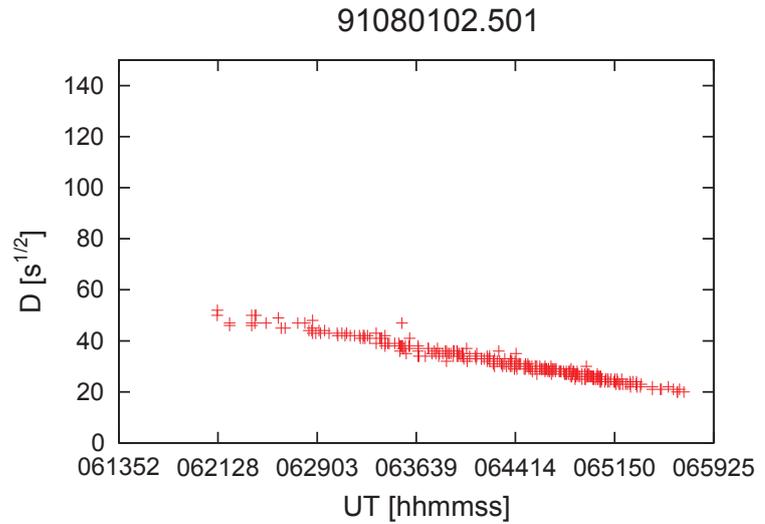


図8 1991年8月1日にWBAで観測された雷起源ホイストラの分散 D の時間変化

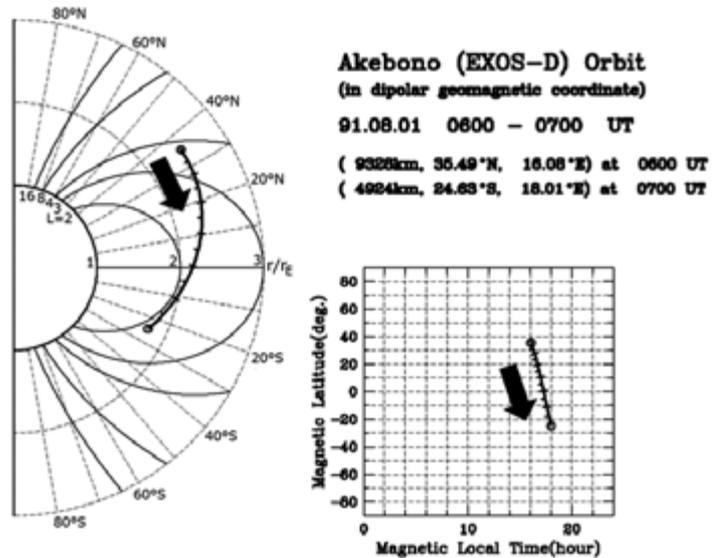


図9 1991年8月1日6:00:00~7:00:00UTのあげぼの衛星の軌道

滑らかに波形をつなぐ処理を自動的に行える信号処理システムを確立しなければ、数十 TB に及ぶ大量データをシステムティックに復調・強度補正することは不可能である。

また本論文でも述べたように、DAT は磁気テープのため、経年劣化を起こしつつあり、すでに DAT に記録されていたデータの一部が、テープの劣化により読み取り困難になっている問題がある。具体的には、左チャンネルに記録されているタイムコードが信号波形の歪みによって、デコードできない時間帯が存在する。左チャンネルが歪んでいるということは、実データそのものも歪んでいる可能性もあるが、その問題を除いても、時刻が同定できない時間帯は、時刻情報がデコードできた前後の時刻情報から何らかの方法で補完を行う必要がある。このような劣化が起きたデータの取り扱いが今後の課題である。

最後に、WBA は 14kHz 以下の周波数帯をすべて網羅した広帯域受信器であることから、狭帯域のフィルタバンクで観測した MCA などにも比べてもともとデータの S/N 比が良くない上に、アナログテレメトリによる伝送の過程でも雑音が重畳するため、ある特定の波動現象をシステムティックに抽出したり、観測データを網羅的に統計解析に用いるには事前に十分なデータクリーニングが必要である。データ総量が数十 TB におよぶ巨大データであることから、今後、より高度な情報処理技術の研究・開発が必要であろう。

5. 結論

本論文では、25 年超に及ぶ長期間観測を実現した、磁気圏観測衛星あけぼのに搭載された VLF 観測装置のサブシステムとして、14kHz 以下のアナログ波形データを観測する WBA 装置について、データ取得から強度較正に至るまでの現状報告を行った。計算機技術の進歩に伴い、これまで取り扱いが困難であったアナログデータを、ルーチン的にデジタル化し、源泉が異なる時刻情報が付与された HK データをもとに、自動的に強度補正を行うデータ処理システムの開発に取り組み、完成させることができた。

さらに衛星軌道に沿って WBA が連続的に観測した雷起源ホイスラの分散値の時間変化の情報が、地球磁気圏内のグローバルな電子密度推定に有用であることを述べた。今後、数多くの雷起源ホイスラの分散値を求めることで、ホイスラ波動の伝搬特性を明らかにするとともに、グローバルな電子密度プロファイルの推定に役立てたい。

また本論文では触れなかったが、あけぼの衛星は放射線帯を横切るユニークな軌道を取ることから、磁気嵐に関与するコーラス波動など、内部磁気圏物理の解明に重要な波動現象を多数計測している。近年、多くの磁気圏観測衛星がプラズマ波動の波形観測機能を有するが、機上でのデジタル波形の取得は、データ容量が巨大になりすべてのデータを地上伝送できないため、間欠観測とならざるを得ない現状がある。それに対し、WBA はアナログ観測器の特性を活かして、長時間の連続波形を取得・地上伝送できることから、これらの波動現象の詳細なスペクトル構造の解明に大変有用である。

アナログデータゆえの取り扱いの困難さから、これまで十分活用が進んでいなかった WBA 波形データであるが、現在の計算機技術を活かして、今後さらなる利活用が進むことを期待したい。

謝辞

あけぼの WBA データの強度補正システムの開発と改善にご協力いただいた、越山 祐一氏（現在、(株) PFU プラットフォーム開発事業部）ならびにレ タム ホアイ氏（現在、(株) アレクシード）に謝意を表します。

参考文献

- 1) H. Oya, and K. Tsuruda, Introduction to the Akebono (EXOS-D) Satellite Observations, *J. Geomagn. Geoelectr.*, 42(4), 367-370, 1990.
- 2) 山本 正幸, 木村 磐根, 長野 勇, 橋本 弘藏, 岡田 敏美, 林 幹治, 澤田 晃, 伊藤 嘉彦, 軒内 栄一, 岸 洋司, 笠原 禎也, あけぼの (EXOS-D) 搭載 VLF 装置による初期観測結果, 宇宙科学研究報告, 特集 25, 63-73, 1990.
- 3) I. Kimura, K. Hashimoto, I. Nagano, T. Okada, M. Yamamoto, T. Yoshino, H. Matsumoto, M. Ejiri, and K. Hayashi, VLF Observations by the Akebono (EXOS-D) Satellite, *J. Geomagn. Geoelectr.*, 42(4), 459-478, 1990.

- 4) Lynx Studio Technology, Lynx AES16e, <https://www.hookup.co.jp/products/lynxstudio/aes16e.html>, (2014年6月8日参照).
- 5) D. L. Carpenter, Remote Sensing of the Magnetospheric Plasma by Means of Whistler Mode Signals, *Reviews of Geophysics*, 26(3), 535-549, 1988.
- 6) I. Kimura, Effects of Ions on Whistler-Mode Ray Tracing, *Radio Science*, 1(3), 269-283, 1966.
- 7) I. Kimura, and Y. Goto, Ray Tracing, <http://waves.is.t.kanazawa-u.ac.jp/>, (2014年6月8日参照).
- 8) I. Kimura, Y. Kasahara, and H. Oya, Determination of Global Plasmaspheric Electron Density Profile by Tomographic Approach Using Omega Signals and Ray Tracing, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 63(11), 1157-1170, 2001.
- 9) Y. Goto, Y. Kasahara, and T. Sato, Determination of Plasmaspheric Electron Density Profile by a Stochastic Approach, *Radio Science*, 38(3), 1060, doi:10.1029/2002RS002603, 2003.
- 10) I. P. A. Bayupati, Y. Kasahara, and Y. Goto, Study of Dispersion of Lightning Whistlers Observed by Akebono Satellite in the Earth's Plasmasphere, *IEICE Trans. Communications*, E95-B(11), 3472-3479, 2012.

スーパーコンピュータを活用した高効率な地球観測データ処理の検証

齋藤紀男*1, 齋藤進*1, 藤澤達也*1, 竹島敏明*1, 内田友恵*2, 今中誠*2, 山崎朋朗*2

Verification of efficient earth observation data processing which utilized the JAXA Supercomputer System

Norio Saito*1, Susumu Saitoh*1, Tatsuya Fujisawa*1, Toshiaki Takeshima*1, Tomoe Uchida*2, Makoto Imanaka*2, Tomoo Ymasaki*2

Abstract

The effect which utilizes the JAXA supercomputer system for processing of earth observation data has been studied. AMSR-E products, which are accumulated over 10 years till the present, were used for data. First, it was verified that the quality of the processing data by the supercomputer system was equivalent to the standard product offered to the users. In process of verification, the subjects depending on a compiler or a processor architecture and those depending on the mathematical model of an algorithm were found out. The possibility of the improvement towards the future was discussed about this point. Next, the processing performance was evaluated and we found that reprocessing of all the data in which about 14 months was required can be considerably shortened within 22-day duration. Therefore, it is expected that the waiting period which offers data to a user can be shortened sharply.

Keyword: Earth observation, data processing, super computer

概要

JAXA スーパーコンピュータシステムを地球観測データの処理に活用した効果を検証したので報告する。検証には約 10 年分のデータが蓄積されている AMSR-E を用いた。まず、処理データの品質について、ユーザーへ提供されている標準プロダクトと同等であることを検証し、問題ないことが確認された。検証の過程で、コンパイラやプロセッサに依存する課題、及び、アルゴリズムの数理モデルに依存する課題が発見されたので、将来へ向けた改良の可能性を考察する。次に処理性能の評価を行い、従来は約 14 か月を要していた全データの再処理を 22 日間以内の期間に短縮できることが示された。これにより、ユーザーへデータを提供する待ち期間を大幅に短縮できることが確認された。

1. はじめに

地球環境のモニタリングや防災／減災等に活用されている地球観測データであるが、衛星の増加、運用期間の長期化によりデータが年々蓄積され、その処理に要する計算機の規模も大きくなっている。また、衛星の運用停止後にもアルゴリズムの更新やパラメーターの変更に伴うデータの再処理が必要であり、その頻度も年一回、センサーによってはより高い頻度が必要とされるため、その処理を行う計算機

*1 第一衛星利用ミッション本部 (Satellite Applications Mission Directorate D)

*2 三菱スペース・ソフトウェア株式会社 (Mitsubishi Space Software Co., Ltd.)

システムの調達及び、維持管理にかかる負担は増大する一方である。今回、JAXA 全体として計算機リソースを効率的に使い、併せて、高性能計算機を活用することでユーザーへのサービス向上へ繋げる施策の一環として、JAXA スーパーコンピュータシステム（以下、JSS と略す。）を地球観測データの処理に活用することを試みた^{1),2)}。

対象として選んだ AMSR-E は、2002 年に打ち上げられた NASA の衛星 Aqua に搭載されたマイクロ波放射計である。同じく 2002 年打上げの ADEOS-II に搭載された AMSR と同系のセンサーである。公式に提供されているデータ（標準プロダクトという）としては、2003 年 6 月からレベル 1 プロダクトが、2003 年 9 月からは高次処理プロダクトが一般提供され、これ以降、約 10 年間にわたる観測データが蓄積されている。

ここでは、まず、AMSR-E の標準プロダクトと、JSS による計算結果の比較を行い、プロダクトの同一性の検証を行った。検証に用いるデータには、季節ごとに数日分のデータを選択し、年間の季節変動による影響がないか観察することとした。

次に、JSS を使うことでスループットの向上がどの程度期待できるかを見積もった。長期にわたって蓄積されているという特徴を生かし、精度よく定量的に性能向上の効果を評価するために、最大で 3 ヶ月分の AMSR-E データを JSS 上へ持ち込み、性能測定を実施した。

検証の結果、プロダクトの検証では、最終的に品質上の問題はないことが確認できたが、2 者間の数値差が完全には解消されず、その原因となるいくつかの課題が見いだされた。性能については、従来、再処理に要していた期間を大幅に短縮可能であることが明らかになった。プロダクト検証の結果は 3 章、性能検証の結果は 4 章に示す。5 章に、プロダクト検証にて見いだされた問題点に関して、将来へ向けた改良の可能性について考察を加える。

2. 背景

2.1. 地球観測データの処理と再処理の必要性

衛星による地球観測の方式は、利用の観点からは大きく二つに分けられる。一つは関心領域（area of interest）を必要なときに観測するもので、ALOS2 などがそれに当たる。このような観測データの場合、ユーザーの観測要求や注文にしたがってデータ処理を行うこととなる。一方、地球環境の継続観測などのためには、衛星が軌道上を運動している間、常に観測を行う必要がある。そのような衛星では、センサーによる観測データは取得次第、全てが処理され、それにより地球全体を覆うような全球観測が可能となっている。AMSR-E は後者のセンサーの一種で、1 日 24 時間休みなく地上の観測を行っている。

観測データはシーンと呼ばれる単位に分割されて処理され、ユーザーに提供されるプロダクトとなる。AMSR-E の場合は、衛星の半周回分のデータをシーンとし、昇交軌道と降交軌道のそれぞれでプロダクトのファイルとなっている。ただし、後述するレベル 3 プロダクトは全球のデータを 1 ファイルに収めたものである。

AMSR-E が地表を観測する様子を表す概要図と、観測データの例を、それぞれ図 1 の左図、右図に示す。図 1 左図に示すように、AMSR-E は地心方向を軸とする回転運動をしており、地表面から放射されるマイクロ波を円に沿うようにスキャンする。1 スキャンで得られるデータは約 1450km の観測幅を持ち、図 2 右図に示すように、観測される。時間経過とともに衛星が観測する領域は経度方向に移動して地表全体を観測することとなる。AMSR-E の場合は、約 3 日間で全球をカバーする。

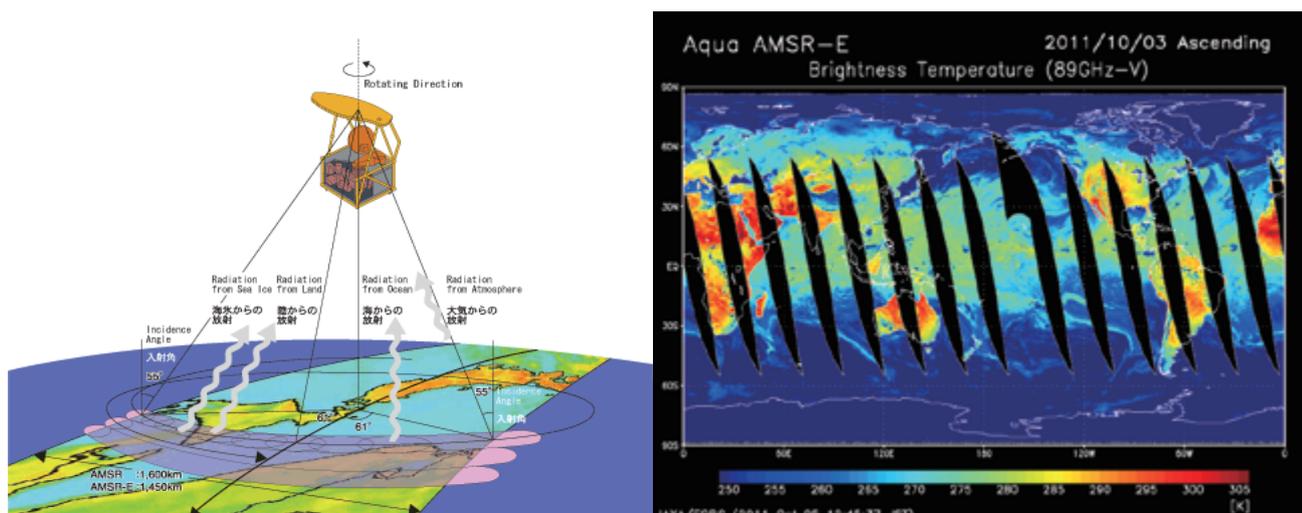


図1 AMSR-Eの地表観測の様子：左図はAMSR-Eが軌道上から地表面を観測の様子を示し、右図は実際の観測データ（輝度温度）の例を示す。ここに示す観測データの例は、2011年10月3日の昇交軌道での観測のものである。（AMSR-Eプロジェクトのホームページ³⁾より）

ユーザーに提供されるプロダクトは全ての種類が JAXA 第一衛星利用ミッション本部が開催する審査を経て、品質が確認される。計算機のリースアウトに伴う換装時には、プロダクトのデータ値が変わることがあり、その際には、品質保証の観点で検証が行われる。検証済みのデータでなければユーザーには公開されない。

観測を継続する間に、観測機器の校正係数の更新や、研究の進展によりアルゴリズムが変更されることがある。AMSR-Eのようなグローバルセンサーでは、それらの変更に伴い、蓄積された全ての観測データの再処理が必要となる。再処理は年に1回程度の頻度で実施される。ここで、処理の対象となるデータ量は観測期間が長くなるにつれて時間に比例して増大する。したがって、観測データの再処理に要する時間は、計算機の規模が変わらなければ、再処理するたびに衛星の運用期間に比例して長期化することとなる。

2.2. スーパーコンピューター活用の狙い

従来の地球観測衛星分野での計算機調達の見え方は、それぞれの衛星ごとに開発・運用のプロジェクトが組織され、プロジェクトごとに必要な規模の計算機を調達、維持、管理している。衛星は1日24時間運用しているから、併せて衛星それぞれの地上系システムも1日24時間の体制で取得した観測データの処理を行っている。このような処理を定常処理と呼んでいる。

定常処理用の計算機資源は、データ量や処理のための計算性能に関する要求により決められる。また、再処理が定常処理と計算機資源の点で競合してしまうことを避けるため、同一構成の計算機をプラス α して再処理用として調達している。このプラス α 分は規模が大きいとは限らず、AMSR-Eの再処理の実績では、約10年間の蓄積データの再処理に14か月の期間を要していた。

また、衛星が運用終了した場合、定常処理は停止することになるが、再処理は継続して行われることがある。近年では、例えばAMSR-Eの後継センサーとなるAMSR2が運用しているように、同じミッションを担いつつ性能を改良したセンサーをシリーズで運用するケースが多い。その場合、後継センサー

の運用で新たに得られた知見を過去のセンサーのデータに反映し、アルゴリズムの改良等が行われるのが普通である。したがって、この再処理を目的として、センサーの運用停止後であっても計算機資源を維持する必要がある。

このような従来の計算機の調達方式を継続した場合、次のようなコストインパクトが有る。

- ①衛星の寿命は、一般に計算機のリース期間より長く、換装の度にソフトウェアの移植、プロダクト検証のコストがかかる。
- ②再処理のために計算機保守、運用費用が継続して必要となる。
- ③再処理に要する期間が長期化し、ユーザーサービスが年々、低下する。

これらのインパクトを JSS を有効に活用することで解決、または軽減できないか検討している。すなわち、JAXA が保有する大規模計算リソースである JSS を有効利用することで、プロジェクト側が保有する計算機資源と運用体制を削減し、コスト削減と運用効率化を図ること、また、データ処理期間の短縮により、ユーザーサービスを向上させることである。

このためには、まず、品質保証の条件をクリアすることが必須である。JSS 上でデータ処理を実際に行い、プロダクトの同一性検証を行うのは、第一に、品質が妥当であることを示す必要があるからである。

次に、プロダクトの同一性に問題が無い場合、再処理期間がどれだけ短縮できると期待できるか、が重要である。従来はプロジェクト側に必要とされていた計算機資源の削減だけでなく、運用に係る人件費、光熱水費用等のコストの削減に直接つながるからである。

3. AMSR-E 処理プログラムの移植とプロダクト検証

3.1. 移植、検証の対象について

移植対象のソフトウェアは 3 種類に分類でき、それらを表 1 に示す。

表 1 移植対象のソフトウェア

分類	概要
レベル 1 処理ソフトウェア	シーン単位にまとめられた観測データであるレベル 0 データを入力としてレベル 1 プロダクトを作成する。 主に観測点の経度、緯度の計算、観測データから輝度温度の計算等を行う。また、観測点における太陽方位角の計算等を併せて実施する。
レベル 2 処理ソフトウェア	レベル 1 プロダクトを入力としてレベル 2 プロダクトを作成する。ただし、過去 3 日分のレベル 3 海面水温（日平均）と過去 6 日分のレベル 3 輝度温度（日平均）も必要である。 レベル 1 のデータから数理モデルに基づいて物理量を計算する。それらは、積算水蒸気量、積算雲水量、降水量、海上風速、海面水温、海氷密接度、土壌水分量、積雪深の 8 種類である。

レベル 3 処理ソフトウェア	レベル 1 プロダクトとレベル 2 プロダクトを入力としてレベル 3 プロダクトを作成する。 輝度温度, 各物理量の空間的, 時間的な平均を求める。 プロダクトは日平均の輝度温度, 月平均の輝度温度, 日平均の物理量 (8 種類), 月平均の物理量 (8 種類) からなる。
----------------	---

表中のレベル 1, レベル 2, 及び, レベル 3 の名称について, 以降, L1, L2, 及び, L3 と略すこととする。

移植作業は JAXA 第一衛星利用ミッション本部が主体となって, JAXA 情報・計算工学センターの協力を得て, 三菱スペース・ソフトウェアに主な移植作業を委託して実施した。移植したソフトウェアによって作成されたデータに標準プロダクトとの差異がある場合, アルゴリズム開発を総括する JAXA 地球観測研究センターの助言を受けながら調査を進めた。

移植前後のプログラミング環境の違いは移植性へ影響する重要なポイントである。JSS と現在の AMSR-E 処理の計算機環境の概略を表 2 に示す。

表 2 計算機環境の比較

区分	JSS	AMSR-E 運用環境
CPU	SPARC64 VII 32GB / ノード(CPU)	Intel Xeon-E5630 6.0GB / 2CPU
プログラム開発環境	Solaris11 富士通コンパイラ	RHEL5 for x86 GNU GCC4.1.2 20080704 (Red Hat 4.1.2-50) PGI Fortran Work-station

JSS は平成 26 年度にリプレース作業に着手しており, 表の CPU の後継機が導入される予定である⁴⁾。現行システムと後継システムの CPU は, AMSR-E 運用環境における Intel の CPU とはバイトオーダーが異なることが知られている。この違いはバイナリデータの入出力を伴うプログラムの移植性に大きく影響する。また一般に, コンパイラ, ライブラリ等の違いは計算結果の差異の原因になり, その詳細な調査結果は 3.2 節に示す。

バイトオーダーの違いによって, 一部の処理プログラムで, 処理のためのパラメーターを定義したバイナリデータを入力した後, 引き続き計算処理部分に誤りが生じた。これに対しては, 当該パラメーターファイルのコンバージョンツールを使用することで解決した。このツールは処理システムの維持管理作業の中で数年前に作成されたものであったため, 今回, 特別にツールを作成する必要はなく, かつ, 当初予期した範囲の作業であった。次に, ビッグエンディアンとリトルエンディアン間の変換を自動化しているコードと, リトルエンディアンでのみ正常動作するコードとが混在しているプログラムがあり, 対処のための調査と修正が必要となった。

一方、プロダクトが準拠する **HDF** 形式は計算機環境の差を吸収する機能を具備⁵⁾しており、そのルールに従ったファイルの入出力では、全く問題を生じなかった。**HDF** 形式は衛星リモートセンシングの分野で標準的に使われており、天文分野で普及している **FITS** 形式と同様に、異機種間のデータの互換性を保つための規格、及び、ツールからなっている。

3.2. AMSR-E プロダクトの同一性の検証

観測データの全数を調査するのは作業期間等により現実的でないため、季節毎の影響を考慮できることを条件に、一部のプロダクトを選択することとした。選択したデータの特性を表 3 に示す。

表 3 検証に用いたデータ

季節	処理期間	シーン数
冬 (1 月)	2008 年 1 月 17 日～18 日	58
春 (4 月)	2008 年 4 月 23 日～24 日	58
夏 (7 月)	2008 年 7 月 13 日～14 日	58
秋 (10 月)	2008 年 10 月 18 日～19 日	55

処理結果の比較のために、表 4 に示すように、各処理プログラムの入力データには運用環境に蓄積されたプロダクトを用い、その出力を標準プロダクトと比較した。

表 4 データ比較の方法

プロダクトの種別	処理プログラムの入力データ	比較データ
L1 プロダクト	運用システムに蓄積された L0 プロダクト	運用システムで作成された L1 プロダクトと JSS 上で作成した L1 データ
L2 プロダクト	運用システムに蓄積された L1 プロダクト	運用システムで作成された L2 プロダクトと JSS 上で作成した L2 データ
L3 プロダクト	運用システムに蓄積された L1 プロダクトと L2 プロダクト	運用システムで作成された L3 プロダクトと JSS 上で作成した L3 データ

プロダクト比較結果のサマリーを表 5 に示す。L1 プロダクトには観測点の経緯度の値が分解能 0.01 度で格納されているが、緯度については全観測点の 0.02%程度、経度については 0.2%程度の観測点において、分解能に相当する差が認められた。発生原因について調査したところ、処理プログラムで共通ライブラリとして用いている部分に原因があることを突き止めたので、次節に示す。L2 プロダクトについては 4 種の物理量に、浮動小数点数の最下位ビット (LSB) の差より大きい有意な差が認められた。これらの差の原因の調査結果は 3.2.2 節に示す。L3 プロダクトに関しては差異は無く、全観測点で完全に一致した。

表 5 プロダクト比較結果のサマリー

処理レベル	データの差異の概要
L1	観測点の経緯度に大きさ 0.01 度（データの分解能に相当）の差異が見られた。 観測点の差異により，太陽方位角等にも差異が生じた。
L2	3 種の物理量に LSB を超える差異が見られた。 ※差異のある物理量：海上風速，積算水蒸気量，積雪深
L3	差異無く，JSS と運用システム間でプロダクトは一致した。

3.2.1. L1 プロダクトの差異の原因

データ値の差異の原因となる箇所は，L1 プロダクト作成の処理フローの一部の計算にあった。

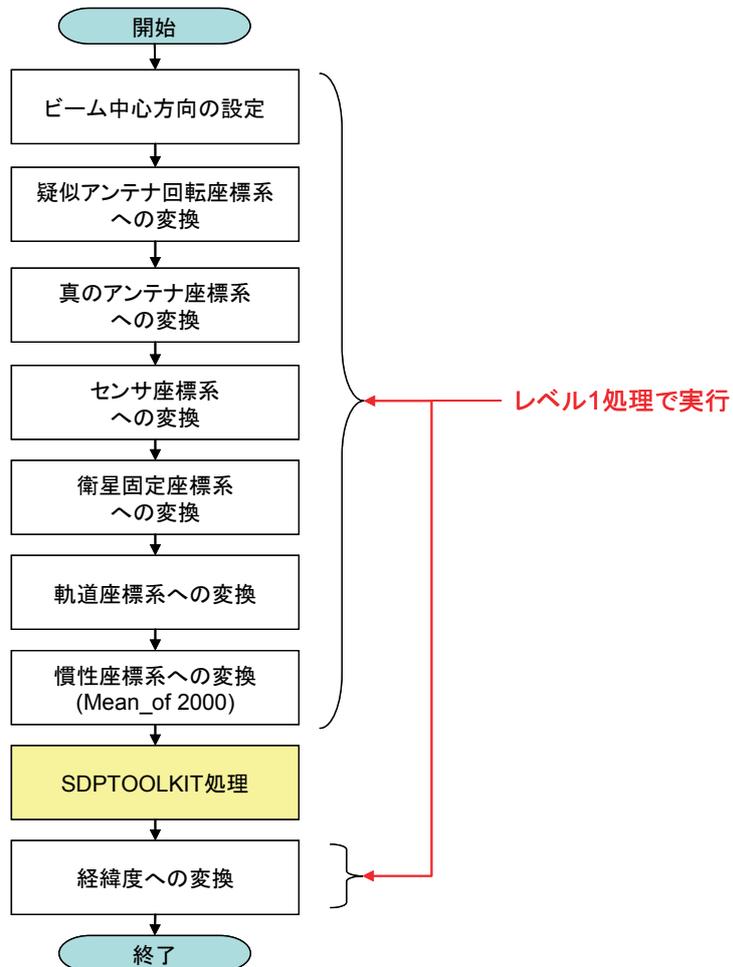


図 2 AMSR-E L1 プロダクト作成の処理フロー（参考文献 2）より引用

図 2 に示す L1 処理の一連の計算の中で，背景色付きで示す SDPTOOLKIT は NASA より提供されたライブラリである。図 2 のフローの各段階ごとの出力データを調査した結果，SDPTOOLKIT において，

数値計算の精度が倍精度浮動小数点数から単精度浮動小数点数に落ちていることが分かった。これにより、経緯度への変換時に 0.01 度の差異を生じていたものである。なお、他の計算ブロックにおいてはデータ値の差異を生じる問題は無かった。

このような問題はあったが、プロダクトとして提供される物理量に要求される精度には影響しないこと、したがって、プロダクトの品質には影響しないことが確認されている。将来的に高精度の地上分解能を有するセンサーが実用された場合、この限りではないであろう。今回発見されたデータの差の原因を参考に、ソフトウェア開発上の教訓として活かしていく必要がある。

3.2.2. L2 プロダクトの差異の原因

L2 プロダクトのうち、まず、海上風速について、データ比較の結果を図 3 に示す。これは、あるシーンについて横軸に標準プロダクトのデータ値、縦軸に JSS での出力データ値から標準プロダクトのデータ値を差し引いた値を示したものである。全観測点のうち、約 0.02% にこのような差が生じた。

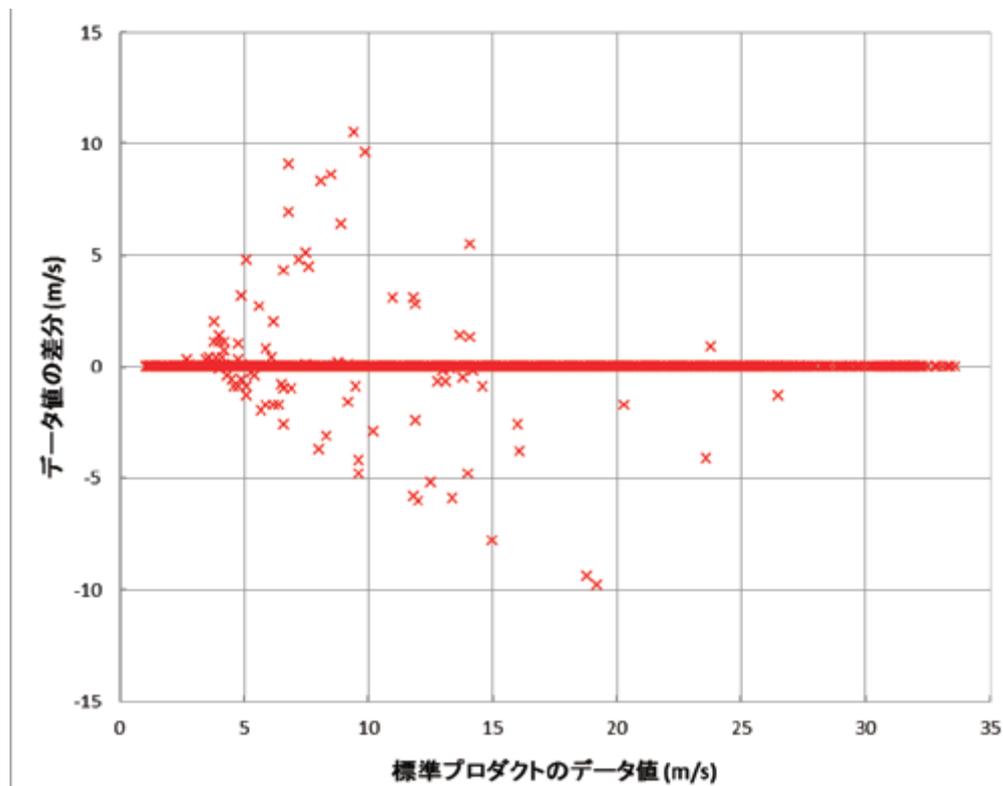


図 3 海上風速のデータ差異（参考文献 2）に基づき作成）：横軸は標準プロダクトのデータ値、縦軸は JSS での出力データ値から標準プロダクトのデータ値を差し引いた値

データの差の特徴を示すため、ある 1 スキャンについて 2 種のデータを重ね合わせたグラフを図 4 に示す。

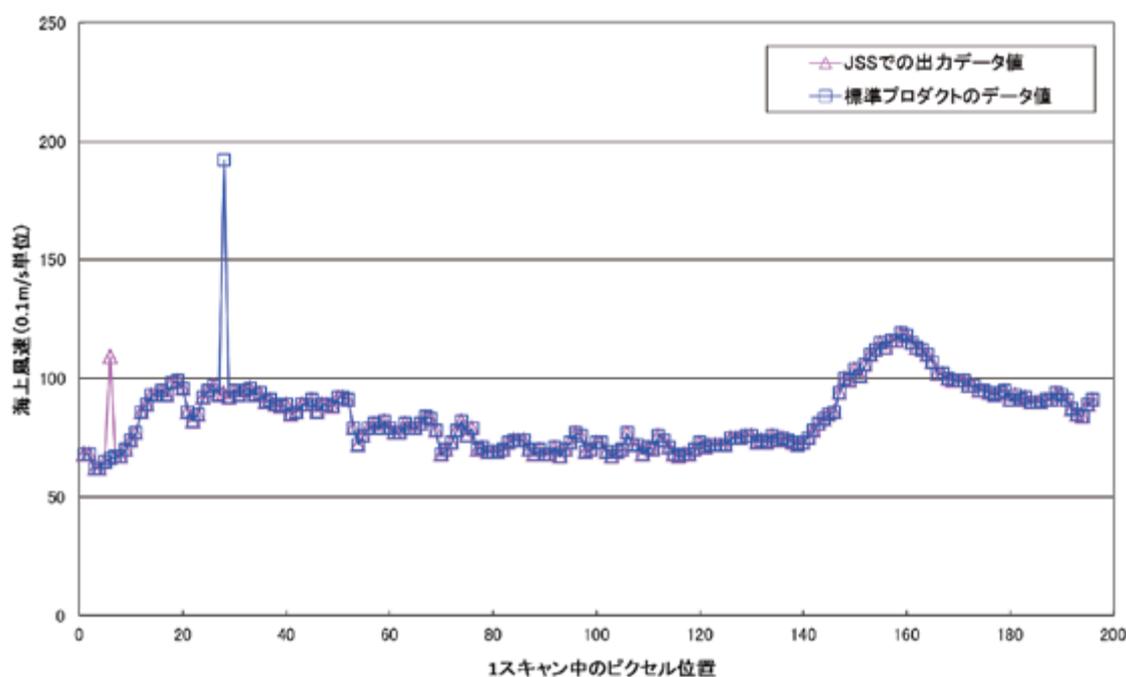


図4 海上風速のあるスキャンにおけるデータ差異（参考文献2）に基づき作成）：“△”の点はJSSでの出力データ値，“□”の点は標準プロダクトのデータ値を示す。

図4で，“△”の点はJSSでの出力データ値，“□”の点は標準プロダクトのデータ値を示す。本図から、本プロダクトにはスパイク状に誤差が大きい個所があり、加えて、もともとのプロダクトにも問題があったことが判明した。

プログラムを調査した結果、風速を算出する際に行う風向補正と呼ばれる処理において、補正值の最小値探索を行うループに問題があり、データによっては最小値の探索に失敗し、異常値が設定される場合があることが分かった。また、この最小値探索では、標準プロダクトを計算した環境とJSS上の計算との間で補正值のLSBの差が影響し、探索失敗が発生するケースが異なることとなり、そのため、図4でスパイク状の誤差が生じたピクセル位置が異なる結果となった。

次に、積算水蒸気量について、図3と同様の比較結果を図5に示す。全観測点のうち、約0.005%にこのような差が生じた。

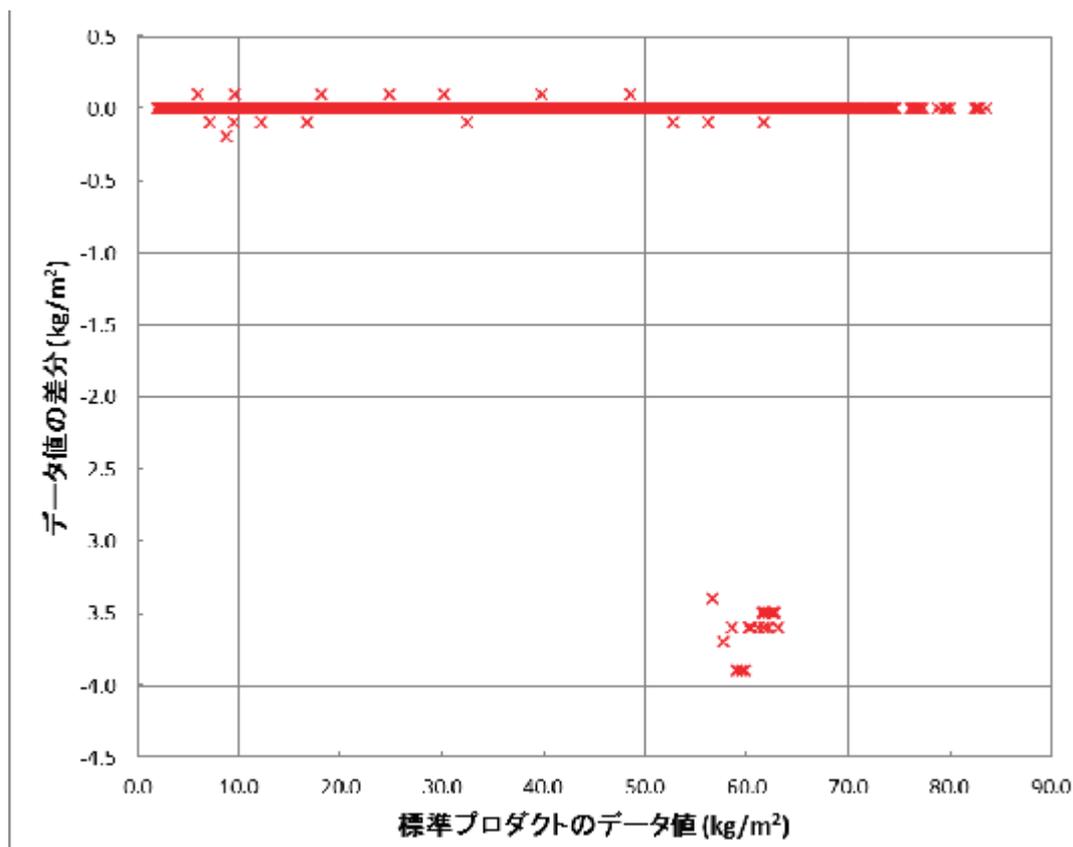


図5 積算水蒸気量の比較結果（参考文献2）に基づき作成）：横軸は標準プロダクトのデータ値，縦軸はJSSでの出力データ値から標準プロダクトのデータ値を差し引いた値

本プロダクトの処理プログラムは，雲域判別指数と呼ばれるパラメーターを計算し，その値に従って晴天，曇天，雨天の3つの数理モデルに処理を振り分ける．どのモデルを適用するかによって計算結果が異なることになる．その境界値には2進数で厳密値を持たない数値である0.2(2進数で0.00110011...)が使用されている．そのため，パラメーター値のLSBでの差によっても，異なるモデルを選択することとなり，データ値に有意な差が発生する結果となった．十進数0.2は2進数で必ず丸め誤差を持つので，どちらのモデルが選択されるかは，計算機の環境に依存する結果を生じる．

また，大気平均温度と呼ばれるパラメーターを使う計算部分も差を生じる原因となった．大気平均温度は離散値を取る配列で定義されている．そのデータを参照する際に，配列番号を決定するロジックにおいて単精度浮動小数点数による演算を行っているため，演算結果のLSBが異なると配列番号がずれてしまうようになっていた．JSS上での計算と運用システムでの計算では，このLSBに差が生じ，その結果，大気平均温度の値が不連続に飛んでしまい，データの差が生じたものである．図5のデータ値の差は，これら雲域判別指数，及び，大気平均温度による制御方式が重なって発生した．

次に，積雪深について，図6に，図5と同様にデータの比較結果を示す．全観測点のうち，約0.002%で差が生じている．また，1点のみであるが，標準プロダクトのデータ値が0である観測点で，50mmという極端に大きな数値が得られたことも特徴である．

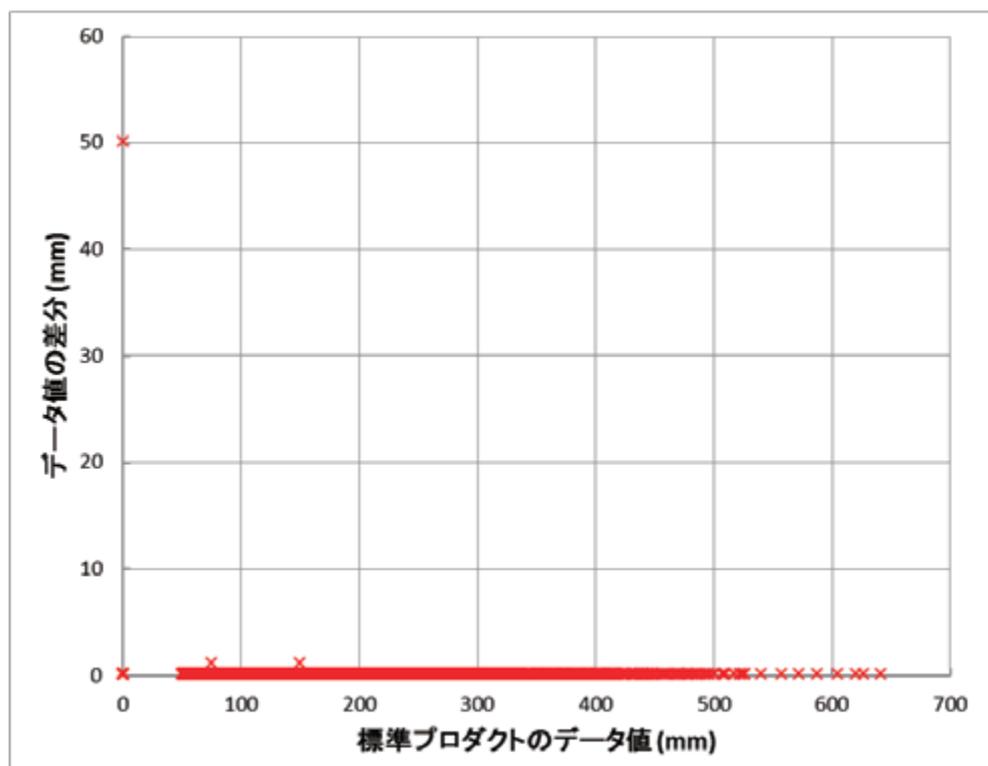


図6 積雪深の比較結果 (参考文献 2)に基づき作成) : 横軸は標準プロダクトのデータ値, 縦軸は JSS での出力データ値から標準プロダクトのデータ値を差し引いた値

積雪深の計算においても, 積算水蒸気量の計算と同様に, パラメーターの値によって 3 種類の数理モデルが設定されている. この場合も, 上記の物理量と同様, 適用するモデルを振り分けるための境界値において, 判定に用いられるパラメーター (単精度浮動小数点数) の LSB での差異によって, 適用されるモデルが異なり, その結果, データの差を生じる制御方式がとられていた. 1 点だけ生じていた極端に大きな差も同じ原因によることを確認した.

以上より, 積算水蒸気量と積雪深の計算で誤差を生じる様子は次のように要約できる.

- ①物理量の計算に複数の数理モデルが設定されている. または, 離散的な係数が用意されている.
- ②数理モデル (系数) の決定にあたって, 浮動小数点数を判定基準に用いている.
- ③浮動小数点数を判定基準とするため, その LSB が異なるだけで選択する数理モデル (系数) が異なり, したがって, 計算結果に丸め誤差を大きく超える有意な差が生じる.

浮動小数点数の下位ビットに誤差が発生するのは, 多数回の四則演算を繰り返したり, 関数を使用する際には避けられない. その誤差の発生傾向は CPU が有する演算機構の違いや, コンパイラ及びライブラリの実装に依存するものである. したがって, 数理モデル (または係数) を選択する際のパラメーター値に差が生じることは避けられない. このことから, 上記 2 種の物理量のプロダクトについては, JSS のデータと標準プロダクトで生じる差は, 合理的に説明が可能な範囲の結果であると言える.

一方、海上風速の計算で最小値探索に失敗するケースでは、探索失敗としてエラーを返すか、または、探索方法を修正するなどの対応が必要である。この点では、AMSR-Eの後継センサーであるAMSR2の処理システムでは改善されていることが確認されている。

4. 処理性能の検証

4.1. 処理プログラムの実行方式

大規模なシミュレーションとは異なり、衛星観測データの処理はシーンなどの小規模な単位で行うのが普通である。AMSR-Eにおいて、処理プログラムの実行単位は表6の通りである。

表6 処理プログラムの実行単位

処理レベル	実行単位
L1	シーン AMSR-Eにおいては、衛星の軌道半周分のデータの集まり
L2	同上
L3	日平均プロダクト：1日分の観測データ 月平均プロダクト：1月分の観測データ

シーン毎の処理は数分程度で完了するため、スパコン向けの特別なチューニングは行っていない。ただし、コンパイラによる自動最適化（スレッド並列を含む）が性能の向上に効果が有る場合は、コンパイルオプションで並列化を含む最適化を指定した。L1処理で用いられるライブラリ（SDPTOOLKIT）、及び、L3処理プログラムはコンパイラによる自動最適化を行った。

JSSで実行するジョブの単位は、3つのケースで試行した。一つは処理プログラムの実行単位、すなわち1シーンの処理を1ジョブとするものである。このほか、1日分のシーンの処理をまとめて1ジョブとするケースや1ヶ月または3ヶ月のシーンをまとめて1ジョブとするケースを設定した。これらと比較し、ジョブの実行の効率を含めて評価を行った。また、プロセス並列は適用しないので、計算ノードの1ノード当たり1シーンの処理を行う。これらの多数のジョブを連続して投入し、全ての処理が完了するまでの時間によって性能を評価した。

4.2. 性能測定の結果とスループットの向上

実行状態の例を図7に示す。図7はL1処理を1ジョブ当たり1シーンとして大量投入した際の実行状態を示す。横軸はジョブ投入開始からの経過時間（分）、縦軸は使用されている計算ノードの数を表し、“-”の点は実行中のノード数（実行状態のジョブ数），“+”の点はウェイト状態のノード数（実行待ちのジョブ数）を表す。

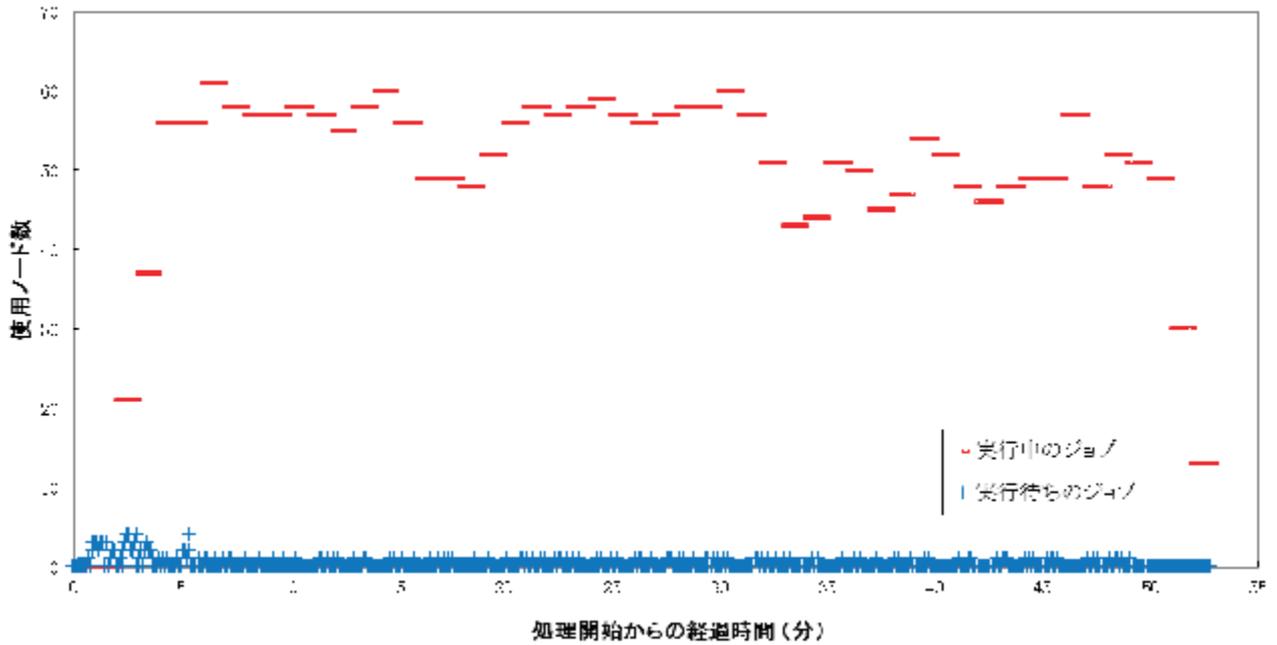


図7 L1 処理の実行状態 (参考文献 2)に基づき作成)：横軸はジョブ投入開始からの経過時間 (分)、縦軸は使用されている計算ノードの数を表し、“-”の点は実行中のノード数 (実行状態のジョブ数)、“+”の点はウェイト状態のノード数 (実行待ちのジョブ数) を表す。

ジョブの実行数は最大で 61 ノードとなったが、これは、ジョブの実行時間が短いため、実行待ちの時間が露わに影響していることを示している。すなわち、(ジョブの実行時間) / (ジョブの待ち時間) が 60 程度であることの結果である。

同時並行して実行できるジョブ数が増えれば増えるほど、全シーンの処理完了に要する時間は短縮され、スループットの向上が期待できる。今回の実験のうち、L3 プロダクトの作成処理では、1 ヶ月間のデータの処理を 100 ノードに割り当てたケースでは、全ての計算ノードを使用して実行することができた。

性能測定の結果に基づき、10 年分の全データの再処理に要する時間を見積もった。見積もりの前提とした測定結果は、表 7 に示す性能測定の方法を前提とした。これらの場合に効率よい性能が達成できたことによる。

表 7 見積りの前提とした性能測定方法

処理レベル	ジョブの単位	性能値の前提
L1	1 シーン / ジョブ	1 ヶ月の観測データを連続処理し、シーン当たりの平均を用いる。
L2	1 シーン / ジョブ	1 ヶ月の観測データを連続処理し、シーン当たりの平均を用いる。
L3 (輝度温度 / 日平均)	1 ヶ月分 / ジョブ	1 ヶ月の観測データの連続処理を複数回実行し、平均を取る。

L3 (輝度温度/月平均)	3 ヶ月分/ジョブ	3 ヶ月の観測データの連続処理を複数回実行し、その平均を用いる。
L3 (物理量/日平均)	1 ヶ月分/ジョブ	1 ヶ月の観測データの連続処理を複数回実行し、その平均を用いる。
L3 (物理量/月平均)	3 ヶ月分/ジョブ	3 ヶ月の観測データの連続処理を複数回実行し、その平均を用いる。

表 8 に 10 年分の処理時間の見積もりを示す。表には、使用ノード数の仮定、及び、その根拠を併せて示す。

表 8 10 年分の全データの再処理に要する時間

処理レベル	処理時間	使用ノード数 (仮定)	使用ノード数の根拠
レベル 1	約 4.0 日	56	実験結果の同時に使用可能なノード数の平均 (図 7 参照)
レベル 2	約 8.0 日	29	処理アルゴリズムの制約により、並列実行が可能な最大の観測期間が 1 日間に制限される。
レベル 3 輝度温度/日平均	約 9.1 日	100	システムからの割り当てを 100 ノードと仮定した。本実験の最大割当て数と等しい。
レベル 3 輝度温度/月平均	約 5 分	100	同上
レベル 3 物理量/日平均	約 16 分	100	同上
レベル 3 物理量/月平均	約 2 分	100	同上

この結果、従来、約 14 か月を要していた再処理期間を 22 日間以内に短縮できることが分かった。今後、JSS のリプレースによってシステムの基本性能が向上することから、ジョブの起動・管理に要するオーバーヘッドが短縮されること、CPU の演算能力が高まることを考慮すると、さらに処理期間が短縮されることが期待できる。JSS の次期システム構築はこの 4 月から開始しており、新しいシステムで改めて性能を検証する価値はある。

5. データ値の差異に関する考察

プロダクトの同一性検証では L1 処理ソフトウェアにおいて、JAXA 及び NASA で共有しているライブラリ内の計算で演算精度が落ちているという問題が発見された。AMSR-E の観測分解能から見るとプロダクトの品質には影響ないが、将来的に分解能が大幅に向上する場合には改善が必要となる可能性が

ある。今後の教訓とすべきであろう。

L2 プロダクトにおいては、3種の物理量（海上風速、積算水蒸気量、積雪深）に、発生頻度は小さいながら有意な差異があることが分かった。海上風速のデータに見いだされた差異は、最小値探索における考慮不足が原因である。プログラムの動作に関する十分な点検が必要であることを示している。

積算水蒸気量と積雪深に見いだされた差異は様相が異なる。ここで生じた差異は、数理モデルが3種用意されており、その選択の前提となった判定条件における境界値のわずかなずれのために、数理モデルが変動することが原因であった。一般的な数値計算誤差については、その理解が進み、精度よく計算するための方法論も多くのテキストに示されている（文献6）など。例えば、数値シミュレーションでよく行われる反復計算（いわゆるループ計算）において、ループの制御変数は原則的に整数型にすべきであり、それにより丸め誤差の影響を除くことが必要とされる⁷⁾。制御変数に実数型を用いると、丸め誤差の累積によってループ回数を誤る可能性があるためだ。これと同様の考え方が応用できる可能性が有る。すなわち、モデル選択の判定条件を整数型で行えるような改良が可能であれば、選択のぶれを抑止できる。また、別の改良の可能性としては、境界値に単精度数で使用されていたことから、倍精度などの多倍長の変数を使用することも考えられる。これらの改良はアルゴリズムの改訂やプログラム修正を要するもので、今回の検証の範囲を超えるものではあったが、今後の検討テーマとして重要であると考えられる。

この他に全く異なるアプローチとして、Intel CPU 上で動作させる時のコンパイル条件を変更する方法も有りうる。この例として、偶然ではあるが、今回のデータと同じ AMSR-E のデータを用いた実験がある⁸⁾。Intel 系の CPU では SPARC 系には無い、IEEE 規格と異なる 80 ビット長の浮動小数点ユニットを持っており、そのため、単純な二項演算でも差が発生することが多い。この実験では、数値計算に Intel CPU の SSE2 を使用することによって IEEE 規格 (IEEE754) に則った計算をさせ、これによりデータの差異が解消することを示した。また、CPU 間の計算の差異を抑止するためのオプションを準備しているコンパイラもある⁹⁾。こうした対策にはある程度の技術習熟が必要であるが、そのためのコストが検証コストを下回る限り投資効果が高いと言え、今後、検討を続けていくのが重要と考えられる。

6. まとめ

今回、衛星データの再処理のスループットの向上、及び、JAXA 全体としての計算機コストの効率化へ貢献することを目標に、AMSR-E データの処理ソフトウェアを用いて JAXA が保有するスーパーコンピュータ JSS の活用を試行した。

プロダクトの同一性検証については、L2 プロダクトの2種の物理量（積算水蒸気量、積雪深）に有意な差異が残っているが、現状では問題ないことが確認できた。アルゴリズムの制約として、浮動小数点数による演算では避けられないものであることが確認できたが、今後の改良の余地があり、さらなる検討を行いたい。

処理性能に関しては、約10年間の観測データの再処理に約14か月の期間を要していたことに対して、JSS の計算ノードを大規模に用いて、22日以内に処理が完了することが分かった。これにより、JSS を有効活用することにより、処理期間が大幅に短縮され、ユーザーサービスが向上することが実証された。

謝辞

JSS (JAXA Supercomputer System) へのプログラム移植にはシステムのサポートグループ諸氏の支援を得た。また、アルゴリズムの調査に関連して、JAXA/EORC (地球観測研究センター) 前田様の支援を得た。紙面を借り謝辞申し上げる。

参考文献

- 1)AMSR-E 処理システムソフトウェアの JAXA Supercomputer System への移植・検証 (JX-PSPC-360307) 成果報告書 (DS 5A26-91-001), 2013
- 2)改良型高性能マイクロ波放射計 (AMSR-E) 処理ソフトウェアの JAXA Supercomputer System 上での整合性検証及び性能の再確認 (JX-PSPC-381958) 成果報告書 (DS 5B52-91-001), 2014
- 3)AMSR-E プロジェクトのホームページ, http://sharaku.eorc.jaxa.jp/AMSR/index_j.html
- 4)富士通プレスリリース (2014年4月7日), <http://pr.fujitsu.com/jp/news/2014/04/7.html>, 2014
- 5)http://www.hdfgroup.org/HDF5/doc/UG/UG_frame11Datatypes.html
- 6)伊理 正夫, 藤野 和建, 数値計算の常識, 1985
- 7)牧野 淳一郎, パソコン物理実地指導, 1999
- 8)改良型高性能マイクロ波放射計 (AMSR-E) 処理ソフトウェアを用いた仮想化検証 (JX-PSPC-389694) 成果報告書 (DS 5B8A-91-001), 2014
- 9)Martyn J. Corden, David Kreitzer (Software Services Group, Intel Corporation), Consistency of Floating-Point Results using the Intel® Compiler or Why doesn't my application always give the same answer?, 2012

高速データ解析ライブラリ Sakura の開発と ALMA データ解析への応用

中里 剛^{*1}, 杉本 香菜子^{*1}, 川崎 渉^{*1}, 川上 申之介^{*1}, 中村 光志^{*1},
小杉 城治^{*1}

Development of High-Performance Data Analysis Software, Sakura, and Its Application to ALMA

Takeshi Nakazato^{*1}, Kanako Sugimoto^{*1}, Wataru Kawasaki^{*1},
Shinnosuke Kawakami^{*1}, Kohji Nakamura^{*1}, and George Kosugi^{*1}

Abstract

We have been developing a general-purpose library for scientific data analysis software, Sakura. A noticeable feature of Sakura is its modern design optimum for recent CPU capabilities such as vector operation and multi-core. Based on Sakura, we have made a prototype application to reduce single dish radio telescope data taken with Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) for evaluation. We found that Sakura-based application is able to reduce data 10 or 20 times faster than existing data analysis software for ALMA. Our result indicates that Sakura is able to improve processing speed by making maximum use of CPU capability.

Keywords: ALMA, data analysis, high performance computing

概要

Sakura ライブラリは、科学計算に必要な基本的な機能を提供することを目的として開発中の汎用ライブラリである。Sakura ライブラリの特長は、ベクトル演算とマルチスレッド化で CPU の性能を最大限活用し、これまでに無い高速な処理を目指している点である。本稿では、Sakura ライブラリ導入の効果を示すため、Sakura ライブラリを基盤として大型電波望遠鏡 ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) の単一電波望遠鏡データを解析するアプリケーションを作成し、既存の ALMA 用データ解析ソフトウェアとの性能比較を行った。その結果、Sakura ライブラリを使ったアプリケーションでは、解析処理が 10~20 倍高速化されることがわかった。この結果は、Sakura ライブラリの導入により CPU の潜在的な性能を有効に活用されてアプリケーションが高速化されることを示している。

^{*1} 国立天文台チリ観測所 (Chile Observatory, National Astronomical Observatory of Japan)

1. はじめに

ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) は日本を含む東アジアと米欧の国際協力のもと南米チリのアタカマ砂漠に建設され、科学運用が行われている大型ミリ波サブミリ波電波望遠鏡である^{*1}。ALMA では、取得されたデータはデータ解析アプリケーション CASA (Common Astronomy Software Applications)^{*2} および CASA を基盤として実装された ALMA パイプラインシステムによって処理され、処理結果が生データとともに観測者に提供される。データレートは最大 64MB/s、平均 6.4MB/s であり、1 年間にアーカイブされるデータ量は 200TB に達する¹⁾。このような大量のデータを遅滞無く処理するためには、クラスター計算機の導入等ハードウェアによる処理能力強化に加え、データ解析アプリケーション自体の高速化が必須である。

ところで、最近の CPU はクロック周波数が頭打ちになっており^{*3}、マルチコア化やベクトル演算幅の拡張等による処理性能の向上が主流になってきている。マルチコア CPU の場合、シリアルな処理を前提としたアプリケーションでは CPU 本来の性能を有効に活用することはできないため、高速な処理が鍵となるようなアプリケーションでは、設計・開発の段階から CPU の特長を意識し、複数のコアで並列に解析処理を行うマルチスレッド処理や、複数のデータを一度に演算するベクトル演算を活用した処理の高速化・効率化を図る必要がある。CASA や ALMA パイプラインシステムでは、比較的大きな処理単位のプロセス並列が実装されているが、各処理プロセスは基本的にシリアルな処理である¹⁾。ALMA のデータ解析においては、ベクトル演算や小さな処理単位でのスレッド並列処理の導入はいまだ途上にある。こうした背景から、我々はベクトル演算とマルチスレッド処理を有効活用して解析処理を高速化する汎用ライブラリの着想を得、ライブラリ名を Sakura として 2012 年からその開発に着手した。

本稿では、データ解析ライブラリ Sakura の概要とその ALMA への応用について述べる。2 章では解析処理を高速化するという観点で Sakura ライブラリの特長を概説し、3 章で Sakura ライブラリを基盤として作成したデータ解析アプリケーションを用いた Sakura ライブラリの性能評価の結果について述べる。今回作成したデータ解析アプリケーションは、CASA に比べて 10 から 20 倍の処理速度を達成した。最後に、4 章で今回の結果を踏まえた Sakura ライブラリ開発の今後の展望を述べる。

2. Sakura ライブラリ

2.1 Sakura ライブラリの概要

Sakura ライブラリは、基本的なデータ解析機能を提供することを目的として現在開発中の汎用ライブラリである。Sakura ライブラリの大きな特長は、SIMD^{*4}によるベクトル演算とマルチスレッド処理を活用した解析処理の高速化である。現状はマルチスレッドやベクトル演算による処理の高速化を検証するためのプロトタイプとして開発を進めており、高速化の実証と機能の充実を図った上で公開することを計画している。

*1 <http://almaobservatory.org>

*2 <http://casa.nrao.edu/>

*3 CPU DB: <http://cpudb.stanford.edu/>

*4 Single Instruction Multiple Data: 単一命令で複数データを処理する並列化の手法

Sakura ライブラリの開発では基本的にコンパイラの最適化機能により処理をベクトル化するが、コンパイラによるベクトル化が不十分な場合は SIMD 拡張命令の組み込み関数を用いて可能な限り処理をベクトル化する。また、Sakura ライブラリの内部ではマルチスレッド処理を行わないが、提供する機能を可能な限りスレッドセーフな実装とすることで、アプリケーションレベルでのマルチスレッド処理をサポートする。これらの工夫により、マルチコア CPU の性能を最大限に引き出すことができる。

Sakura ライブラリの概要を表 1 にまとめた。現在のところ、Sakura ライブラリは Linux のみをサポートしている。また、コンパイラは gcc および LLVM clang に対応し、ソースコードは C++11 (ISO/IEC 14882:2011) 準拠のため、gcc では 4.8.1 以降、clang では 3.3 以降が必須である（ただし clang については 3.5 でのみ動作確認済み）。他の OS、コンパイラのサポートは順次進める予定である。さらに、次節で述べるように Sakura ライブラリはアーキテクチャ毎に SIMD 命令の最適化を行っており、新しいアーキテクチャが出ればその都度対応する。Sakura ライブラリは C 言語互換のインターフェースを持ち、ヘッダファイルをインクルードしてライブラリをリンクすれば C/C++ のアプリケーションで汎用的に利用できる。また、C ライブラリと連携可能な他のプログラミング言語でも利用可能である。さらに Python インターフェースを定義することにより、Python ベースのスクリプトでも手軽に利用できるようになっている。

表 1 Sakura ライブラリの概要

開発言語	C++ (C++11 準拠)
インターフェース	C, Python
依存ライブラリ	FFTW, Eigen
OS	Linux
コンパイラ	gcc 4.8.1 以降, clang 3.5 以降 (binutils 2.22 以降)
SIMD 命令の最適化 規模 (2014/6/19 時点)	Intel SandyBridge および Haswell アーキテクチャ <ul style="list-style-type: none"> • ソースコード行数約 17000 (うちコメント行約 2000) • ライブラリサイズ 3.3MB
計算内容 (汎用)	<ul style="list-style-type: none"> • 1次元のデータ補間 • 最小 2 乗法によるフィッティング • ビット配列の演算 • しきい値に基づくデータのマスク • NaN, Inf のマスク • 1次元の畳み込み (平滑化) • 2次元の畳み込み (平滑化)
計算内容 (単一電波望遠鏡専用)	<ul style="list-style-type: none"> • データの較正処理
その他の特長	<ul style="list-style-type: none"> • スレッドセーフである • メモリ管理をアプリケーション側で指定できる

2.2 SIMD 命令の最適化

SIMD は大量のデータに同じ処理を施すときに大きな性能向上が期待できるため、画像データや音声データの処理との相性が良く、マルチメディア処理では SIMD による高速化が一般的に行われている。また科学計算の分野でも SIMD の活用が進みつつある。SIMD によるベクトル化ではアーキテクチャにより利用できる拡張命令セットが異なり、一般に新しいアーキテクチャではより効率的なベクトル演算が可能である。Sakura ライブラリでは、利用できる SIMD 拡張命令セットが実行環境によって異なることを前提に、実行環境に応じた最適化を図っている。具体的には、様々な実行環境に最適化された複数のオブジェクトコードをライブラリが保持しており、実行時に最適なコードを選択することでこれを実現している。現在の実装では、SSE^{*5} による最適化を行った場合と Intel AVX^{*6} (SandyBridge アーキテクチャ) および Intel AVX2^{*7} (Haswell アーキテクチャ) の最適化を行った場合の 3 つのオブジェクトコードがライブラリに含まれており、アプリケーション実行時に、実行環境に応じてどちらかのコードが選択される。なお、単一のソースコードに対して複数のオブジェクトコードを持つため、ソースコードの行数に対してライブラリサイズは大きくなる傾向にある (表 1)。

3. Sakura ライブラリの性能評価

3.1 性能評価の概要

Sakura ライブラリの性能評価は、Sakura ライブラリを基盤とした性能評価用データ解析アプリケーションを作成し、その性能を既存のアプリケーションと比較する、という方法で行った。比較対象のアプリケーションは CASA である。Sakura ライブラリと比較すると、CASA は 1) ベクトル化が活用されていないこと、および 2) 並列化の処理単位が大きく、スレッド並列ではなくプロセス並列であることの 2 点で大きく異なっている。性能評価では、ポジションスイッチ法²⁾により取得された単一電波望遠鏡のスペクトル観測データの標準的な解析処理を性能評価用アプリケーションで実装し、CASA を用いた同等の解析処理とスループットを比較した。解析処理の概要を表 2 に示す。

表 2 解析処理の概要

処理ステップ	処理の概要
1	天体起源の電波成分の抽出 強度スケールリング
2	NaN, Inf のマスク
3	スペクトル線成分の抽出 (連続波成分の除去)
4	スプリアス成分の除去
5	スペクトル線成分のスモーキング
6	各データの統計量計算

*5 Streaming SIMD Extensions: インテルが開発した SIMD 拡張命令セット

*6 Intel Advanced Vector eXtensions: SSE 後継の SIMD 拡張命令セット

*7 Intel AVX の機能をさらに強化した SIMD 拡張命令セット

ALMAは基本的には電波干渉計であり、その弱点を補う目的で単一電波望遠鏡が導入されている。したがってデータの解析処理は干渉計データ用と単一望遠鏡データ用との2つに大別され、干渉計データ解析の重みが多い。しかし、ここでは、1)単一望遠鏡データの解析は我々日本のグループが開発を担当しており、内容の理解も進んでいて実装が容易であること、2) CASA は野辺山 45m 電波望遠鏡や ASTE 望遠鏡といった他の単一電波望遠鏡のデータ解析もサポートしており、単一望遠鏡解析の高速化は ALMA のみならず他の望遠鏡にも恩恵があること、の 2 つの理由から単一電波望遠鏡データの解析処理をサンプルとして選んでいる。干渉計データの解析については、複素数データを扱う都合上単一望遠鏡データの解析に比べると Sakura ライブラリの組み込みはそれほど単純ではないため、干渉計データ解析への応用は今後の課題である。

性能評価用アプリケーションは、I/O をシリアルに行う I/O スレッドをひとつと、解析処理を行う複数のスレッドから構成されるマルチスレッド処理を実装している。実装の模式図を図 1 に示す。I/O スレッドは、ファイルからデータを読み込み、解析スレッドにデータを受け渡す。各解析スレッドは、I/O スレッドからデータを受け取ると定められた処理フローに従って解析を行い、処理結果を I/O スレッドに返す。最後に、処理結果を受け取った I/O スレッドが処理結果をディスクに書き込む。これら一連の処理が独立して実行され、全体としては I/O と複数のデータ処理が並列に進行する。

性能評価用のデータは、ALMA の評価活動で取得された単一電波望遠鏡のスペクトル観測データをもとにして作成した。スペクトルデータの総数は約 40000、各スペクトルデータのチャンネル数（配列サイズ）は 3840、データサイズはおよそ 1GB である。



図 1 性能評価用アプリケーションの模式図

CASA および性能評価用アプリケーションのスループットの指標として、ここでは、単位時間あたりに処理したスペクトルデータの数をを用いた。これを処理速度と呼ぶことにすると、処理速度 v はスペクトルデータ数 N と処理時間 t を用いて、(1)式で表される。

$$v [\text{sec}^{-1}] \equiv \frac{N}{t [\text{sec}]} \quad (1)$$

性能評価に用いたデータ解析サーバの性能諸元は表 3 にまとめた。なお、この測定環境では Sakura は Intel AVX に最適化されたコードを実行する。

表 3 性能評価用データ解析サーバ性能諸元

CPU	Intel® Xeon® CPU E5-1650 @ 3.20GHz 6 cores × 1 (12 Threads)
メモリ	64GB
ディスク	3TB (512GB SSD × 6, RAID0)
OS	Red Hat Enterprise Linux Workstation release 6.3 (x86_64)
コンパイラ	gcc 4.8.1

3.2 性能評価結果

(1)式で定義した処理速度の測定結果は表4のようになった。また、表4の結果を図示したものが図2である。性能評価用アプリケーションではマルチスレッド処理が可能なため、アプリケーションが利用可能な最大スレッド数を1からCPUの最大スレッド数+1にあたる13(表3)まで変えて測定を行った。また、シリアルな処理の場合についても測定を行った。一方、今回の解析処理フローではCASAは並列化されないため、CASAの測定はマルチスレッドを無効化したケースのみである。図2においては、マルチスレッドを無効化した場合とマルチスレッドだが実質1スレッドの場合をともに最大スレッド数1としてプロットした。これら2つの測定結果を比べると、マルチスレッドを無効化した場合のほうが高速であるが、これはマルチスレッドに必要な処理がオーバーヘッドとして効いてくるためである。

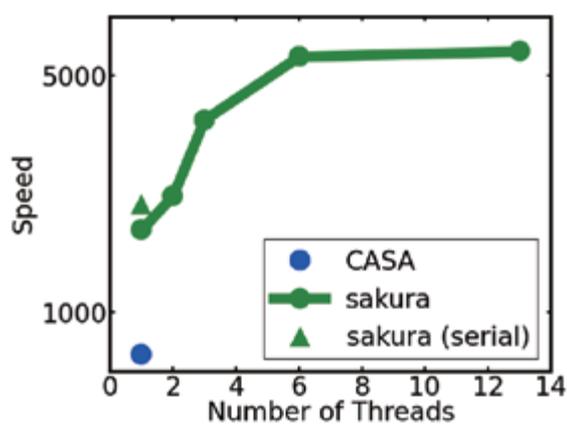


図 2 処理速度測定結果

表 4 処理速度測定結果

アプリケーション	マルチスレッド*8	処理速度 v [sec ⁻¹]	対 CASA 比率
Sakura	OFF	2826.74	9.79
	ON (1)	2395.24	8.29
	ON (2)	2970.82	10.3
	ON (3)	4258.72	14.8
	ON (6)	5326.35	18.4
	ON (13)	5415.30	18.8
CASA	OFF	288.71	1.0

*8 括弧内の数字は最大スレッド数を示す。また OFF はシリアル処理を表す。

表 4 および図 2 より、スレッド数により Sakura ベースのアプリケーションは CASA に比べておよそ 10 から 20 倍高速化されることがわかった。

3.3 考察

図 2 に示す通り、処理速度はスレッド数に比例して向上しない。これは処理が I/O ネットになっているためである。これを検証するため、アプリケーションの動作を変更し、処理開始時に一括でデータを読み込み、それらを解析スレッドで順次処理して処理完了後に処理結果をまとめてディスクに書き込むようにして I/O 処理と解析処理を分離した場合についても測定を行った。図 3 は I/O 処理の分離しない場合と分離した場合のアプリケーション実行時の CPU の使用率を比較したものである。図 3 において、CPU 稼働率が低い部分は主に I/O を行っている。I/O と処理が並列に行われる場合（上段）に比べて I/O と処理を分離した場合（下段）では CPU の稼働が遅れているが、これはデータの読み込みが完了するまで処理を待っているためである。図 3 より、I/O と解析処理を分離した場合、CPU の使用率は 1200%に近い（12 スレッド全てが使用率 100%に近い状態である）のに対し、分離しない場合の CPU 使用率は 300%から 1000%程度までの値を変動している、すなわち、実効的に利用されているスレッドの数が 3 から 10 程度であることがわかる。これは、I/O スレッドの処理が各解析スレッドの処理に追いついておらず、いくつかのスレッドが使われないまま待機していることを示している。なお、I/O と解析処理を分離すると、I/O と解析処理が並列に実行されないため、結果としてスループットが低下することには注意が必要である。

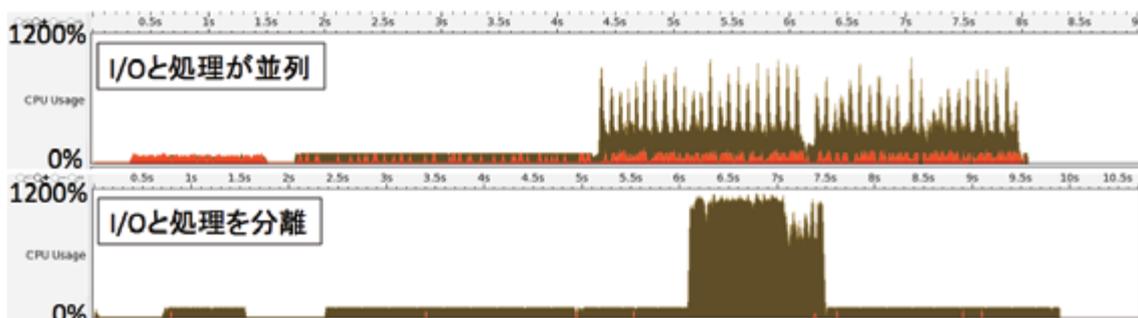


図 3 CPU 利用率の推移（最大スレッド数 13 の場合）

ところで、図 2 によれば、シリアル処理の段階でも性能評価用アプリケーションが CASA に比べて 10 倍程度高速である。これは、ベクトル化の効果^{*9}に加え、コンパイラの最適化オプションの有効活用や処理内容の効率化の他、パイプライン処理により余計なデータのコピーを低減していることによる効果もある。ここで、パイプライン処理とは、各処理ステップがデータを更新しながら次のステップへ順次データを受け渡していく方式である。一方 CASA では、ユーザーの自由度を重視して各処理ステップで一旦処理を完結させるという措置を取っており、その影響で処理ステップの開始時と終了時に必ずデータの入出力処理が必要になる。今回比較対象として作成した CASA の

^{*9} AVX ではベクトル演算幅が 256 ビットなので、単精度浮動小数点数（32 ビット）の演算ではベクトル化の効果は最大でも 8 倍である。

スクリプトでは、これによって生じるディスク I/O の影響を排除するため、入出力処理の代わりに各処理ステップの終わりにメモリ上に生成されたデータオブジェクトに結果を書込み、次の処理ステップで改めてデータオブジェクトからデータを読み出す形で疑似パイプライン処理を実装した。これによりディスク I/O の影響は排除できるが、それでもメモリ上でのデータの書込み・読み出しは発生しており、これによりおよそ 30% 程度の性能劣化が起こっている。仮にメモリ上のデータコピーをディスク I/O に置き換えた場合、性能劣化はさらに大きくなると考えられる。今後データ量が増加して I/O にかかる時間が深刻になる場合には、ある程度ユーザーの自由度を犠牲にしても効率化を優先してパイプライン処理を導入することも検討すべきであろう。

4. 結論

本稿では、我々が現在開発している汎用高速データ解析ライブラリ **Sakura** の概要と、その性能評価結果について述べた。**Sakura** ライブラリはベクトル演算 (SIMD) とマルチスレッド処理を徹底的に活用することで CPU の性能を最大限に引き出し、処理を可能な限り高速化することを目的に開発が進められている。**Sakura** は C 言語互換のインターフェースを持ち、様々なアプリケーションに組み込み可能である。また Python インターフェースも定義されていて、Python ベースのスクリプトでも利用可能である。

ここでは、**Sakura** ライブラリの性能を評価するために性能評価用アプリケーションを作成し、ALMA のデータ解析アプリケーションである CASA との性能比較を行った。その結果、**Sakura** ライブラリを用いたアプリケーションでは、CASA に比べてスループットが 10 から 20 倍に向上することがわかった。スループットはアプリケーションが利用可能な最大スレッド数が大きいほど向上する。この結果は、ベクトル演算やマルチスレッド処理を活用することにより、シリアル処理を前提としたアプリケーションが大幅に高速化されうることを示唆しており、また **Sakura** ライブラリの導入がそのような形での高速化にきわめて有効であることを示している。

今回の測定では処理が I/O ネックになっていることもわかった。すなわち、ここで用いた解析処理フローに従って解析処理を行う限り、これ以上処理を高速化してもスループットは I/O で制限されてしまうため無意味である。解析処理を高速化すればするほど処理時間全体に占める I/O の割合は増加するため、これは当然の帰結である。従って、大規模データを扱う必要があるアプリケーションでスループットを向上させるためには、処理の高速化に加えて I/O を高速化させることがきわめて重要である。

今後は **Sakura** ライブラリによる高速化の実証事例として CASA への **Sakura** ライブラリの組み込みを本格化させつつ、**Sakura** ライブラリの公開に向けて機能充実、OS やコンパイラのサポート拡充を進める。これによりデータ解析や数値シミュレーションなど、様々なアプリケーションで **Sakura** ライブラリが活用されることを目指したい。

参考文献

- 1) 小杉城治, ALMA の大規模データ処理, 宇宙科学情報解析論文誌, 第 1 号, 2012, p.77-81 URL: <http://repository.tksc.jaxa.jp/pl/dr/AA0065236010>
- 2) 中井直正, 坪井昌人, 福井康雄, シリーズ現代の天文学 16 宇宙の観測 II 電波天文学, 日本評論社, 2009, p.251-270

CDF data archive and integrated data analysis platform for ERG-related ground data developed by ERG Science Center (ERG-SC)

T. Hori^{*1}, Y. Miyashita^{*1}, Y. Miyoshi^{*1}, K. Seki^{*1}, T. Segawa^{*1}, Y.-M. Tanaka^{*2,*3}, K. Keika^{*1}, M. Shoji^{*1}, I. Shinohara^{*4}, K. Shiokawa^{*1}, Y. Otsuka^{*1}, S. Abe^{*5}, A. Yoshikawa^{*5}, K. Yumoto^{*5}, Y. Obana^{*6}, N. Nishitani^{*1}, A. S. Yukimatu^{*2,*3}, T. Nagatsuma^{*7}, M. Kunitake^{*7}, K. Hosokawa^{*8}, Y. Ogawa^{*2,*3}, K. T. Murata^{*7}, M. Nosé^{*9}, H. Kawano^{*5}, and T. Sakanoi^{*10}

Abstract

The Exploration of energization and Radiation in Geospace project Science Center (ERG-SC) has developed the science data file archive and integrated data analysis tool for the ground network observation data of the ERG project. We have organized data design consortiums to develop and elaborate the standard metadata and data variable sets for each type of the ERG-related ground data being archived as Common Data Format (CDF) files. The integrated data analysis software for the project has also been developed on the basis of the Space Physics Environment Data Analysis Software (SPEDAS) which works in concert with the CDF data file repository. The software tools, which are provided as plug-in libraries for SPEDAS, are made available to the international science community so that scientists and students are ready to proceed to integrated studies combining the ground data with other satellite and simulation data seamlessly. The integrated data analysis software can make scientific activities more productive and help the ERG project achieve the scientific goals.

Keywords: ERG project, ground network, data archive, integrated analysis software

^{*1} Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, Japan.

^{*2} National Institute of Polar Research, Japan.

^{*3} SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies), Japan.

^{*4} Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, Japan.

^{*5} International Center for Space Weather Science and Education, Kyushu University, Japan.

^{*6} Osaka Electro-Communication University, Japan.

^{*7} National Institute of Information and Communications Technology, Japan.

^{*8} University of Electro-Communications, Japan.

^{*9} Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism, Graduate School of Science, Kyoto University, Japan.

^{*10} Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Tohoku University, Japan.

1. INTRODUCTION

The Exploration of energization and Radiation in Geospace (ERG) project is a science project which seeks to explore dynamics of the Earth's inner magnetosphere with a special focus on how the radiation belt particles are generated and then lost by various interactions between particles and electromagnetic waves in the course of space storms. To pursue its scientific goals, the ERG project proceeds as collaborative efforts of three research elements: ERG satellite observation, ground-based network observation, and simulation/integrated studies. The satellite is going to provide in situ measurement of particles and electric/magnetic fields in the inner magnetosphere, while the world-wide network of ground-based observation consisting of, for example, ground magnetometers, ionospheric radars, optical instruments, and radio wave receivers, will supplement the single-point observation of the satellite with the global picture of ionospheric currents, electric field, and particle precipitations. Both observations will be compared from various aspects with numerical simulations/modeling that reveal important physical processes as well as their spatial structures. Close collaboration of these three efforts, leading to integrated studies on dynamic phenomena in geospace, is a key to comprehensive understanding of relativistic electron generation/loss resulting from cross-energy and cross-regional coupling in which different plasma populations dynamically interact with one another as well as background electric/magnetic fields. A preliminary concept study for the ERG project was reported previously ¹⁾ and a more recent, detailed review of the project was also published ²⁾.

It is essential to combine effectively the three different kinds of data for better understanding of the dynamics of the inner magnetosphere. Moreover, facilitating integrated studies combining them in the international science community is crucial to maximizing scientific output of the ERG

project. Taking into consideration this concept, the ERG Science Center (ERG-SC) has launched and started developing key elements of a science center. After the preliminary development of science center functions at Solar-Terrestrial Environment Laboratory (STEL), Nagoya University, ERG-SC has been established in 2013 as a joint research center of space science operated by the Institute of Space and Astronautical Science (ISAS), Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) and STEL.

Figure 1 gives a schematic diagram of the ERG-SC framework by which we bundles the various data and provides a useful data analysis system for the science community, and collaborates with other projects. As stated above, the ERG project data consist of ERG-satellite data, ERG-related ground data, and ERG-related simulation/modeling data. Hereinafter, the latter two data resources are referred to as ERG-ground data and ERG-simulation data, respectively. All of these project data are archived in the science data archive at ERG-SC and are made available to worldwide researchers and students for their scientific activities. Also developed and then released by ERG-SC is integrated data analysis software which provides data users with a unified way to access online, read, manipulate, and visualize various kinds of the project data seamlessly.

2. ERG-GROUND DATA

As evident from the schematic diagram in Figure 1, the science data archive and integrated data analysis tools are the core components to promote the ERG science. Since the ERG-satellite data are present only after the satellite launch in 2016 and the archive of the ERG-simulation data are still in the design phase, first we have developed the core components with the ERG-ground data. So far the ground-based observational data listed in Table 1 have been incorporated into the integrated data analysis platform.

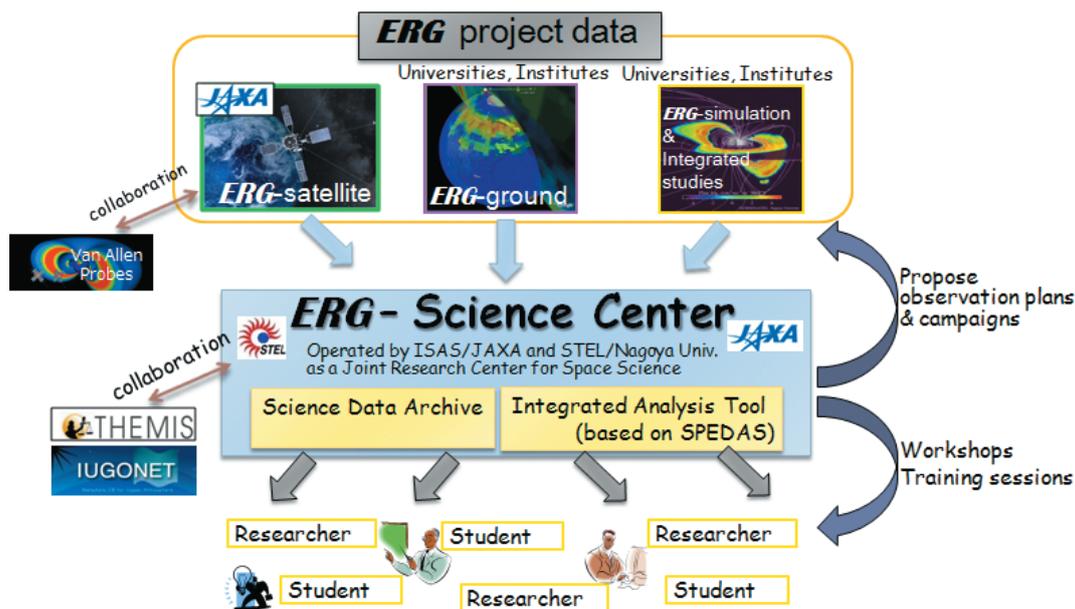


Figure 1. A schematic of ERG science center framework. All science data of the ERG project are archived by and released from ERG-SC. ERG-SC collaborates with other projects in terms of both technical development and scientific coordination. ERG-SC also promotes the science activities of the ERG project through planning of observation schedule and campaigns as well as holding scientific workshops and training sessions for the science community.

Table 1. The list of ERG-ground data archived in the CDF data repository of ERG-SC.

Data name	Observed quantity	Time resolution	Observation site	Data provider
210MM magnetometer chain data	DC geomagnetic field vector	1 sec 1 min 1 h	Japan, Russia, Indonesia, Australia, etc. 33 sites for 1 min/1 hour data, 5 sites for 1 sec data	A. Yoshikawa, Kyushu Univ.
STEL magnetometer data	DC/AC geomagnetic field vector	1 sec 1 min 1 h 64 Hz (AC)	Japan, Russia, Indonesia, Canada, New Zealand. 4 sites for 1 sec data, 6 sites for 1 min data, 5 sites for 64 Hz	K. Shiokawa, STEL, Y. Obana, OECU
MAGDAS magnetometer data	Geomagnetic field vector	1 sec	Asia, Pacific, North America, Australia, Africa, etc. 1 sec data for 16 sites	A. Yoshikawa, Kyushu Univ.
SuperDARN common time fitacf data	Ionospheric plasma convection velocity	~1 min	World-wide, mid. to high latitudes	SuperDARN PI groups*
OMTI all-sky imager data	Aurora / airglow image	~1-2 min	Japan, Canada, Russia, Indonesia, Australia, Antarctica, Hawaii, Norway (15 sites)	K. Shiokawa, STEL

*The list of SuperDARN PIs can be found at the Virginia Tech SuperDARN website at <http://vt.superdarn.org/tiki-index.php?page=Radars+Overview>.

Figures 2 to 5 provide location maps of the observation sites where the observational data listed in Table 1 have been being recorded. The left and right maps of Figure 2 show the observation

sites of 210 Magnetic Meridian (210MM) magnetometer chain data³⁾ and those of the STEL magnetometer data⁴⁾ respectively. 3-dimensional vector geomagnetic field data with 1 minute

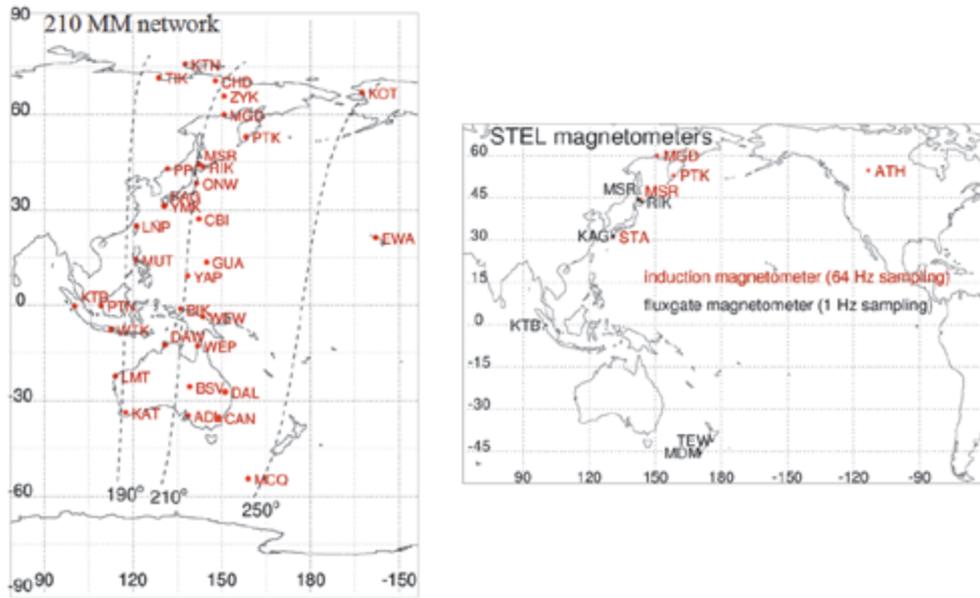


Figure 2. The location maps of magnetometer stations for (left) 210MM geomagnetic field observation and (right) STEL magnetometer observation. Both maps are drawn in the geographical coordinate. Dashed curves superposed on the 210MM map show 190, 210, and 250 geomagnetic meridians as of January 1, 2014 based on the International Geomagnetic Reference Field-11 (IGRF-11)¹⁴⁾.

resolution obtained by fluxgate magnetometers are available for all of the stations and those with 1 sec resolution are available for the selected 5 stations (CAN, KAG, KTB, MSR, and RIK) as ERG-ground data. The STEL magnetometer data are obtained by fluxgate magnetometers with 1 second resolution (in operation at black points on the map) and/or induction magnetometers with a sampling rate of 64 Hz (at red points on the map). Both fluxgate and induction magnetometer data are provided as the ERG-ground data. Detailed information on the 210MM and STEL magnetometer data can also be obtained at the websites at, <http://stdb2.stelab.nagoya-u.ac.jp/mm210/>, and <http://stdb2.stelab.nagoya-u.ac.jp/magne/>, respectively.

Figure 3 is a location map for the selected 16 magnetometer stations belonging to the MAGnetic Data Acquisition System (MAGDAS)⁵⁾. The vector geomagnetic field data with 1 second resolution from them are available as ERG-ground data for the science community. Combining data from all of the three magnetometer networks together allows for an extensive spatial coverage of geomagnetic field

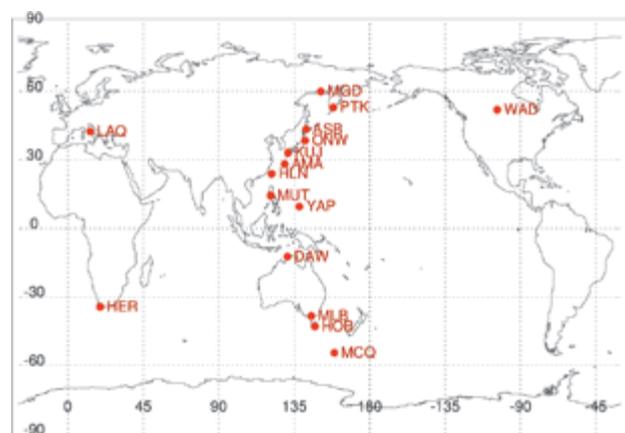


Figure 3. The location map of 16 selected MAGDAS magnetometer stations from which 1-sec data are provided for the ERG-SC CDF data file repository.

observation. These ground magnetic field data give us the crucial information on the global distribution of ionospheric currents and low-frequency plasma wave activities which reflect dynamics of the Earth's magnetosphere and ionosphere. One can obtain the comprehensive, up-to-date information on the MAGDAS project and its data from the MAGDAS website at <http://magdas.icswse.kyushu-u.ac.jp/>.

Two kinds of 2-dimensional data have joined the ERG-ground data and been made available from ERG-SC. One is all-sky airglow and aurora image data obtained by the Optical Mesosphere Thermosphere Imagers (OMTI) system ⁶⁾. The all-sky imagers have been deployed at both domestic

and overseas sites as shown in Figure 4, and been producing 2-dimensional optical image data typically with ~1-2 minute resolution. Detailed information on them, such as the observation period for each imager, can also be obtained from OMTI website at <http://stadb2.stelab.nagoya-u.ac.jp/omti/>.

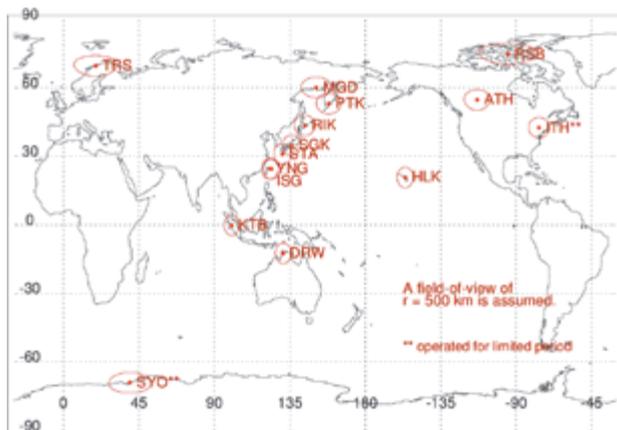


Figure 4. The location map of OMTI all-sky imagers with a rough field of view for each imager. Here the field of view is illustrated simply as a circle with a radius of 500 km whose center corresponds to each imager location. The cameras at Ithaca (ITH) and Syowa (SYO) were operated only for June 28, 2006 to April 16, 2007, and March 1, 2011 to October 1, 2011, respectively. The camera at Yonaguni (YNG) ceased to operate on May 7, 2013 and then it was moved to Ishigaki (ISG) and resumed the operation on April 22, 2014.

The other one is the ionospheric radar data obtained by the high-frequency (HF) ionospheric radars joining the Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN) ⁷⁾. Their fields of view are illustrated over the globe in Figure 5. Over 30 radars of SuperDARN are currently in operation and provide us with the fitacf data (echo power, Doppler velocity, etc. derived by fitting the raw data) obtained during the common time mode, which are available from the ERG-SC repository.

3. STANDARDIZED DATA FILE FORMAT FOR THE ERG-GROUND DATA

The primary tasks of ERG-SC include development of (1) standardized data file format and (2) program codes to import data to the processing platform of data analysis software. Each standardized data file format was developed by designing metadata elements and data variables so

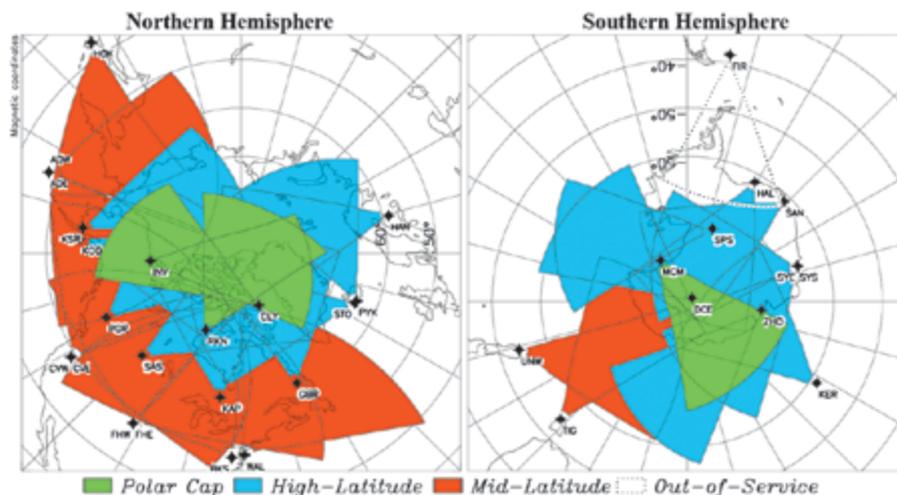


Figure 5. Fields of view scanned by the SuperDARN radars currently in operation in the (left) northern and (right) southern hemispheres. The fields of view are categorized into polar cap radars (green), high-latitude radars (light blue), and mid-latitude radars (red). This radar map is available online from the Virginia Tech SuperDARN website at <http://vt.superdarn.org/tiki-index.php?page=Radar+Overview>.

that it could be commonly used for all data of each instrument type. The present paper describes details of the resultant products in the following section.

First we describe the concept of the standardized data file formats as well as how to develop them. We started to develop the data file format by organizing a data design consortium for each instrument type of the ERG-ground data. Various topics related to the data archive were discussed in the consortiums, such as suitable metadata/data variable sets, data policy, data file format, practical issues on data processing. First the consortiums for geomagnetic data and ionospheric radar data started off and the similar consortium for all-sky image data followed later on. Those consortiums consisted of the ERG-SC members, the instrument groups represented by principal investigators (PIs), and some researchers who have extensive experience in analyzing the particular types of data. Considering the ideas and suggestions from the consortiums, the ERG-SC members took care of the actual development of the data archive and the associated program coding and data processing.

Discussions in the consortiums were primarily devoted to detailed designs of how data of the particular categories should be archived with the comprehensive but concise metadata and data variables. As a result, we adopted the Common Data Format (CDF) as the data file format (<http://cdf.gsfc.nasa.gov/>). CDF is a self-describing data format that has been released and maintained by National Aeronautical Space Administration (NASA) / Goddard Space Flight Center (GSFC) and widely been used to archive many satellite data in the solar terrestrial physics community. This file format can contain metadata and various types of data variable in a single file. Data files in CDF are endian-independent and can be read by various programming languages and commercial software on all of major operating systems because the library codes to read CDF files are made available for them by NASA/GSFC. Therefore, providing data files in

CDF allows for a ubiquitous access framework with which to analyze the data on the end-user side.

The next task was to design what metadata and data variables are needed to well accommodate the scientific data and metadata of each observation. As for the metadata, there has already existed the standard metadata list released from the CDF website, called the International Solar-Terrestrial Physics/Inter-Agency Consultative Group (ISTP/IACG) CDF guidelines, which are suitable to describe the general information on various data and observation. We adopted them as the base of metadata for our data files and further sought to supplement them with some specific information necessary for actual data analyses. Naturally these data analysis-oriented metadata are different for different types of observational data. Thus we discussed what kind of information, parameter, description would be needed for each data and summarized them as the self-sufficient set of metadata which could be commonly used for each type of data. In contrast to the metadata, the design of data variables is more or less straightforward. Basically we designed data variables for CDF files as they were stored in the original data files. In addition to data quantities readily used for research, we included some engineering data associated with the instrument operation so that data users can use them to check the validity of the observed data to some degree by themselves.

In the present paper, we show the typical set of metadata and data variables for ground magnetometer data in Tables 2a and 2b and for all-sky image data in Tables 3a and 3b, respectively. As for radar data, the metadata/data variable set for the SuperDARN data has already been provided in a separate publication⁸⁾.

Tables 2a and 2b show the metadata (also referred to as the global attributes in the CDF framework) and data variable lists, respectively, for 1-minute resolution geomagnetic field data of the 210MM magnetometer chain. The metadata set

consists of the ISTEP/IACG-standard metadata and those added by ERG-SC. The former are labeled with asterisks in Table 2a. They provide general information on the data set, such as the observation project name, brief description of the observation, instrument(s), data, and contact information of the PI. The data policy statement is stored in the “Rules_of_use” or “Text” attribute. The latter, namely, ERG-SC original metadata include more detailed information which is useful or further necessary for actual data analyses. For example, “Geographic_latitude”, “Geographic_longitude”, and “Elevation” provide the exact location of a magnetometer and data users can easily know the location in geomagnetic coordinates by referring to “Geomagnetic_latitude”, “Geomagnetic_longitude”, and “L_value”. We also added “Data_sampling_type” and “Time_calibration_method” so that users can know how the raw data were sampled and averaged and how accurate the given time labels for observed data are. “Known_problem” provides a quick summary about, for instance, unavailable time periods, data caveats, and other problems on data to be shared with users. These metadata sets have been used commonly for CDF data files of the 210MM, STEL magnetometer, and MAGDAS data.

Data variables storing the observed physical quantities obtained by the 210MM magnetometer observation are listed in Table 2b. Since the 210MM magnetometer observation produces 1 minute averaged values and 1 hour averaged values, two sets of data variables with suffixes of

“_1min” and “_1h” are prepared to accommodate both data separately. For CDF files, time labels for observation times of data are usually stored in the CDF_EPOCH format, which is an 8-byte floating point value giving the elapsed time in millisecond since OAD (January 1st, 0000, 00:00:00 UTC). In addition to the CDF_EPOCH time values, we also included those expressed as numbers of year, month, day, hour, minute, second, and millisecond as separate variables (“time_1min” and “time_1h”) so that data users can obtain the data time more straightforwardly just in case they do not have any program code to convert CDF_EPOCH values to the ordinary date and time values. As for the observed geomagnetic field, 3-dimensional field variations and their square root of sum of squares are stored in separate data variables (hdz_1min and f_1min for the 1 min data, for example). This is because some geomagnetic field observations have used separate instruments to measure the field variation and absolute intensity and thereby the square root of sum of squares of the field variation may not be necessarily equal to the observed absolute intensity. A set of separate variables can accommodate those independent observed values as they are. If only field variations are measured by a single instrument, which is the case for the 210MM, STEL magnetometer, and MAGDAS data, then their square root of sum of squares should be stored in a data variable for the absolute intensity. Thus our data variable set was designed to support both types of geomagnetic field observation data.

Table 2a. The metadata list for the 210MM geomagnetic field data designed by ERG-SC. The metadata consists of those recommended by the ISTEP/IACG CDF guidelines (labeled with asterisks “*”, see http://spdf.gsfc.nasa.gov/sp_use_of_cdf.html) and those added by ERG-SC.

List of global attributes (metadata) in 210MM 1-min data CDF file

Attribute Name	Description
Project*	Name of the project holding the ownership of data. "210 MM Magnetic Observation" is set.
Discipline*	Science discipline/subdiscipline in the ISTEP/IACG standards. "Space Physics>Magnetospheric Science" is set.

Attribute Name	Description
Source_name*	Name of the mission or investigation under which data are obtained.
Data_type*	Type of the data in CDF file. "1min>1 min Resolution" is set.
Descriptor*	Name of instrument that collects data. "210MM>210 Magnetic Meridian Ground-Based Magnetometer Network" is set.
Data_version*	Version number of data stored in CDF file.
Title*	Title for the data set. "210 MM Ground-Based Magnetometer Network 1 min Resolution Data" is set.
Text*	Description for the data set.
Generated_by*	The generating data center/group. "Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University" is set.
Generation_date*	Date on which a data file was created.
Mods*	The history of modifications made to the CDF data set.
ADID_ref*	The control authority identifier, currently being left blank.
Logical_file_id*	Name of the CDF file using the ISTP naming convention. "MM210_1MIN_(STN)_ (YYYYMMDD)_V(??)" is set. STN is 3-letter station code, YYYYMMDD is the date in the 8-digit format, and "??" corresponds to the version number of a data file.
Logical_source*	Source_name, data_type, and descriptor information, originally used by NASA/CDAWeb. "MM210_1MIN_(STN)" is set.
Logical_source_description*	The full words associated with the Logical_source.
PI_name*	Name of the principal investigator (PI) of an instrument.
PI_affiliation*	Affiliations of the PI.
Mission_group*	Data source name originally used in NASA/CDAWeb. "210MM" is set.
Instrument_type*	Type of instrument generating the data set. Following the CDAWeb naming convention, "Ground-Based Magnetometers, Riometers, Sounders" is set.
Rules_of_use*	Rules of the road on using the data is set.
Link_text*	Text describing on-line data available at PI or Co-Investigator (CoI) web sites, to be combined with the following two attributes.
Link_title*	Title of the PI or CoI website.
Http_link*	URL of the PI or CoI websites.
Time_resolution*	Typical time resolution of the data set.
Text_supplement*	Some additional descriptions on the data set, if any.
Station_name	The full spelling of station name.
Station_code	3-letter station code.
Geographic_coordinates	What kind of geographic coordinate system is used for the following latitude and longitude. Usually either of geodetic or geographic.
Geographic_latitude	Geographic or geodetic latitude of the location of station.
Geographic_longitude	Geographic or geodetic longitude of the location of station.
Elevation	Elevation of the location of station.
Geomagnetic_coordinates	What kind of geomagnetic coordinate system and what epoch and time are used for the following geomagnetic coordinate values.
Geomagnetic_latitude	Geomagnetic latitude of the location of station.
Geomagnetic_longitude	Geomagnetic longitude of the location of station.
L_value	(Dipole) L value of the location of station.
Magnetometer_type	Type of magnetometer instrument. Usually "Fluxgate" or "Induction".
Number_of_channels	Number of channels of magnetometer.
Data_coordinates	Coordinate system used for observed magnetic field vector. "other" means that an instrument-specific coordinate system is used.

Attribute Name	Description
Data_type_2	Type of observed vector values, e.g., Absolute field, Variation.
Data_resolution	Typical resolution of data values.
Data_sampling_type	What kind of time bin for averaging or sampling is used to obtain data values.
D_unit	Physical unit of the D-component of the geomagnetic field.
D_conversion_factor	Factor used to convert the unit of D-component from degree to nT.
Time_calibration_method	Time recording method for observation, e.g., "GPS".
Observation_start	The start date of instrument operation.
Observation_end	The termination date of instrument operation. This is left blank if the instrument is currently in operation.
Known_problems	Known problems regarding the data set, such as data glitches and gaps.
K9_limit	Threshold of K-index for K = 9. (for WDC data)

Table 2b. The list of data variables stored in CDF files for 210MM 1-min data.

List of data variables in 210MM 1-min data CDF file

Variable Name	Description
epoch_1min	Time labels for the observed 1-min data in the CDF_EPOCH format.
time_1min	Time labels for the observed data as an array of year, month, day, hour, minute, second, and millisecond.
hdz_1min	1-min values of 3-component vector magnetic field.
f_1min	Absolute value of 1 min magnetic field.
time_cal_1min *	Legacy variable for storing time pulses (every 1 min, 1 hour, 24 hour) from the time signal generator to check the clock inside the data logger attached to the magnetometer.
epoch_1h	Time labels for the observed 1-hour data in the CDF_EPOCH format.
time_1h	Time labels for the observed data as an array of year, month, day, hour, minute, second, and millisecond.
hdz_1h	1-hour values of 3-component vector magnetic field.
f_1h	Absolute value of 1-hour magnetic field.
time_cal_1h *	Legacy variable for storing time pulses (every 1 min, 1 hour, 24 hour) from the time signal generator to check the clock inside the data logger attached to the magnetometer.

* Meaningful values are stored only for magnetometer systems of the old type with an internal clock synchronized with the standard radio transmissions. For those with the GPS-synchronized clock which no longer register the time pulses, this data variable is padded by the fill value or simply not included in CDF data files.

Tables 3a and 3b show the metadata and data variable lists, respectively, designed for a CDF file of the OMTI all-sky image data. Here only the metadata added by ERG-SC are shown in Table 3a; those of ISTP/IACG guidelines are common to all types of data. There are several newly added metadata that do not appear in the metadata list for the geomagnetic field data files.

They include “Camera_ID”, “Filter_ID”, “Emission”, “Wavelength”, “Bandwidth”, “Exposure_time”, “Pixel_size”, and so on, which are important information specific to the optical measurement.

Data variables are more or less complicated as compared to those for the geomagnetic field data, as seen in Table 3b. Variable “image_raw” is the one holding the 2-dimensional image data. Variables

“exposure_time” and “sensitivity” have the same names as those in the metadata part. We designed the data variable list to include them also as data variables because they could vary from image to image stored in a single data file and have to be stored in data files as a time series value. We suppose that the metadata elements of the same names store their typical values that data users can quickly refer to.

So far this metadata and data variable set has been used for the OMTI all-sky image data

archived by ERG-SC. With CDF files of the same design, currently one of our collaborators, the Inter-university Upper atmosphere Global Observation NETwork (IUGONET) project ^{9),10)} is working on the archive of the all-sky image data taken in Antarctica, Iceland, and Norway ¹¹⁾ by the National Institute of Polar Research. Although these data are archived by the IUGONET project, they can be accessed by the integrated data analysis software of ERG-SC described later in Section 5.

Table 3a. The list of the metadata added by ERG-SC for CDF files of OMTI all-sky image data.

List of global attributes (metadata) in OMTI all-sky image data CDF file except those suggested by the ISTP/IACG CDF guidelines

Attribute Name	Description
Station_name	The full spelling of station name.
Station_code	3-letter station code.
Geographic_coordinates	What kind of geographic coordinate system is used for the following latitude and longitude. Usually either of geodetic or geographic.
Geographic_latitude	Geographic or geodetic latitude of the location of station.
Geographic_longitude	Geographic or geodetic longitude of the location of station.
Elevation	Elevation of the location of station.
Geomagnetic_coordinates	What kind of geomagnetic coordinate system and what epoch and time are used for the following geomagnetic coordinate values .
Geomagnetic_latitude	Geomagnetic latitude of the location of station.
Geomagnetic_longitude	Geomagnetic longitude of the location of station.
L_value	(Dipole) L value of the location of station.
Camera_ID*	ID of camera used to obtain data.
Filter_ID*	ID of filter in camera used to obtain data.
Emission*	Emission that the camera observed with the filter, such as "OI".
Wavelength*	Wavelength of emission observed by camera.
Bandwidth*	Band width around the central wavelength for the filter.
Exposure_time*	Exposure time for obtaining each image.
Cadence*	Effective time resolution with which individual images are obtained.
Pixels*	Pixel size of each image, such as "512x512 pixels".
Dynamic_range*	Dynamic range of raw count obtained by the camera device, such as "16 bit".
Typical_sensitivity*	Typical value of conversion coefficient from raw count to the physical unit, such as Rayleigh.
Unit*	Unit of raw data, such as "count".
Image_coordinates*	Coordinate system for raw image data.
Data_sampling_type	What kind of time bin for averaging or sampling is used to obtain data values.
Time_calibration_method	Time recording method for observation, e.g., "GPS".
Observation_start	The start date of instrument operation.

Attribute Name	Description
Observation_end	The termination date of instrument operation. This is left blank if the instrument is currently in operation.
Collaborator*	Institute(s) in collaboration for the observation.
Calibration_information*	Detailed information on calibration and conversion to the physical unit.
Known_problems	Known problems regarding the data set, such as data glitches and gaps.

(*) Attributes included only in all-sky image data CDF files, and not included in the geomagnetic field data CDF files.

Table 3b. The list of data variables included in CDF files of OMTI all-sky image data.

List of data variables in OMTI all-sky image data CDF file

Variable Name	Description
epoch_image	Time labels for the observed image data in the CDF_EPOCH format.
time_image	Time labels for the observed data as an array of year, month, day, hour, minute, second, and millisecond.
exposure_time	Exposure time in sec for which each pixel count is integrated.
image_raw	Raw pixel counts for each 2-dimensional image.
sensitivity	Conversion coefficients from raw count to a physical unit, such as Rayleigh.
index_column_image	Original column number for each pixel stored in image_raw.
index_row_image	Original row number for each pixel stored in image_raw.
epoch_cloud	Time labels for the cloud record in the CDF_EPOCH format.
time_cloud	Time labels for the cloud record as an array of year, month, day, hour, minute, second, and millisecond.
cloud	Sky condition data for each hour stored as the following integer. 0: clear sky with stars, 1: a few clouds and many stars, 2: many clouds and a few stars, 3: overcast or rain, 4: no observation, 5: under investigation, 9: no information.

4. CDF FILE REPOSITORY FOR ERG-GROUND DATA

In this section we briefly describe how we have been operating our data repository storing the CDF data files. ERG-SC has developed a data repository with a Linux workstation which is responsible for generating CDF data files of ERG-ground data as well as making them available via the plain HTTP access to data users. The ERG-SC CDF repository server collects the original data files from their respective data servers run by their PI groups on a regular basis. Then the data with the set of metadata are automatically converted to CDF data files and are uploaded to the web space which can be accessed at <http://ergsc.stelab.nagoya-u.ac.jp/data/>

ergsc/ground/. The CDF file conversion is executed daily or weekly, depending on how often the original data files are retrieved from their data servers. Figure 6 shows a screenshot of the web browser accessing the top directory for the ERG-ground data on the ERG-SC repository. As seen in the Figure, the top directory has three subdirectories, “camera”, “geomag”, and “radar”. CDF data files of the OMTI all-sky image data, all geomagnetic field data, and SuperDARN data are stored in the “camera”, “geomag”, and “radar” directories, respectively. Since no access restriction is applied, anybody can access all CDF files by just using web browsers or command-line tools such as the GNU Wget.

With permission from the PIs, the ERG-ground data for the entire observation periods, including



Figure 6. An overview of the top directory of the ERG-ground data repository on the ERG-SC website.

before the launch of ERG satellite, have been archived in the same way in the ERG-SC repository. This allows the data for the entire periods to benefit from the useful data analysis platform described in the following section. Further, the data files in CDF with the standardized metadata and data variable sets are all-in-one files carrying all necessary information. Once packed this way with the metadata, they are self-describing by themselves and thus suitable for the long-term archive after the primary research project for them is finished.

In near future, the simulation data generated by various numerical simulations on geospace phenomena will be published from the same website. After the launch of the ERG satellite, its level 2 science data (calibrated, converted to physical unit) and higher level data processed by ERG-SC will be posted as well. Thus this will serve as the comprehensive science data repository for the ERG project from which worldwide researchers can obtain any kind of science data related to the ERG project.

5. INTEGRATED DATA ANALYSIS TOOL

ERG-SC has been developing integrated data analysis software working with the ERG-ground data described in the previous section as well as the other ERG project data. This software has actually been released as a package of plug-in software libraries for the Space Physics Environment

Data Analysis Software (SPEDAS) written in the Interactive Data Language (IDL), a commercial software for data manipulation and visualization. SPEDAS was originally developed by the Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms (THEMIS) project¹²⁾ as their own data analysis tools called THEMIS Data Analysis Software (TDAS). Recently, they extended it to a data analysis platform for space physics community-wide use in which other scientific projects could develop program codes to read and visualize their own data with the core routines of SPEDAS and merge them to the SPEDAS source distribution. Detailed descriptions on and the source codes of SPEDAS can be obtained at the SPEDAS website at <http://spedas.org/>.

Since the SPEDAS core routines are just a set of generic application programming interfaces (APIs) to process data, we have to develop a set of program codes to load and plot each data set of the ERG-ground data by using the core routines, and further customize them to work with our own data repository described in the previous section. Thus the ERG-SC plug-in package consists of data load routines and some original visualization commands based on the SPEDAS core routines. Each data load routine was developed for each data set described in the previous section.

Once data are loaded on the SPEDAS platform, one can visualize them as a time-series plot by using the “tplot” command belonging to the SPEDAS core routines. Because SPEDAS by itself does not provide sufficient routines for visualizing 2-dimensional image-type data, we needed to develop them by ourselves. As a result, most of the ERG-SC original commands are to plot 2-dimensional image type data on a 2-dimensional canvas, which are applied for the all-sky image data and radar data belonging to the ERG-ground data. Figure 7 shows two examples of plots generated by those tools. The left panels are, from top to bottom, time series plots of STEL induction magnetometer

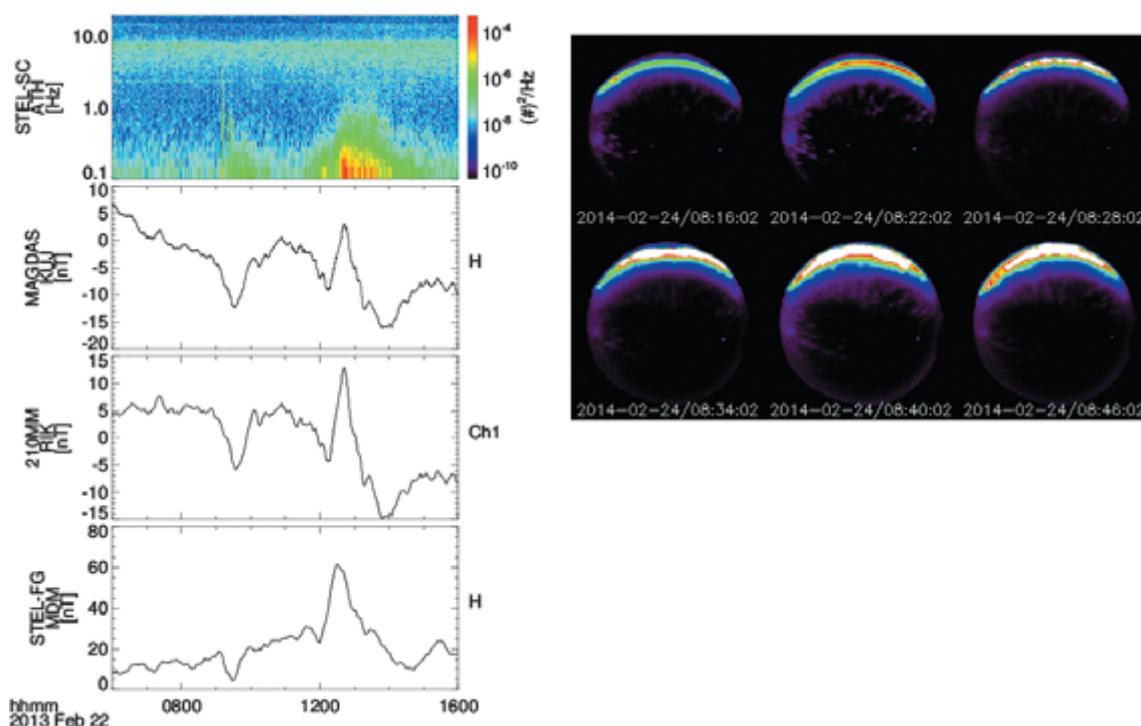


Figure 7. Plot examples for ERG-ground data generated by using the integrated data analysis tools developed by ERG-SC. The left panels are time series plots for the geomagnetic field observations, while the right panels show 2-dimensional images taken by an OMTI all-sky imager at Athabasca, Canada.

data, MAGDAS data, 210MM data, and STEL fluxgate magnetometer data. The “tplot” command of SPEDAS allows us to easily plot different types of data over the same time axis. The right panels of Figure 7 show 2-dimensional auroral images taken by an all-sky imager of OMTI at Athabasca, Canada (ATH in Figure 4), which is generated by one of the ERG-SC original commands. The other commands can superpose 2-dimensional image type data on the world map to examine their spatial coincidence with other ground data, for instance. The latest version of ERG-SC plug-in libraries can be obtained freely from the plug-in repository on the ERG-SC website at <http://ergsc.stelab.nagoya-u.ac.jp/analysis/>. They are also merged to SPEDAS basically on a yearly basis.

One of the advantages of using the SPEDAS platform is its generic interface code to load data variables and metadata from CDF files. Once one can prepare his or her own data in CDF, they can readily be read with the useful CDF libraries

implemented in SPEDAS. This is one of the most important benefits when we adopted SPEDAS as the basis of our integrated data analysis tools. Another merit is that its core routines enable us to load different types of scientific data as the common data structure called “tplot variable” and apply various data visualization/manipulation commands for them in the same manner. This means that ERG-ground data can be plotted seamlessly with many other satellite and ground observational data already supported by SPEDAS. SPEDAS-based data load routines also support a function of automatically downloading data files for a specified time interval from remote data servers via the Internet. These routines check the time stamp of data files and retrieves them only if files on the data server are newer or a user does not have them locally. The combination of the common data structure and data downloading function can commonalize programming codes for different types of data and thereby greatly reduce complexity of

coding. Actually one only has to type a series of only a few to several commands to generate each plot in Figure 7. These features benefit not only experts but also newcomers such as graduate students so that they can learn the data analysis tools rather quickly and start their own research without spending too much time in programming just to read data files and plot the data.

6. SUMMARY AND FUTURE PERSPECTIVES

To achieve the scientific goals proposed by the ERG project, ERG-SC has been developing an open data archive of the ERG-ground data in CDF as well as the integrated data analysis platform for the international science community. For the data archive, we designed a set of standard data file structures for the ERG-ground data through discussions in the data design consortiums joined by experts. The integrated data analysis tools have also been developed on the basis of SPEDAS and released for the community to promote integrate studies with the ERG-ground data and other satellite and simulation data.

We will continue to discuss scientific collaboration with other projects and to incorporate new kinds of data that can benefit the ERG science into our open CDF archive - SPEDAS data analysis scheme. Some of the databases of ground magnetometers, radars, and optical imager data developed by the IUGONET project have also been made available in the same manner with SPEDAS¹⁰⁾, contributing to the ERG-ground network. In particular, the collaboration with the Van Allen Probes mission¹³⁾ is crucial to advance our understanding of the inner magnetosphere and we need to encourage collaborative studies using ERG-ground data and Van Allen Probes data before the ERG satellite will join the inner magnetosphere observation in 2016. The integrated data analysis platform provided by ERG-SC must be of great help for them, and those efforts definitely lead to good

practice for the Japanese space physics community, making us fully prepared to welcome the ERG mission.

ACKNOWLEDGMENTS

A large number of useful comments from the ERG science working group are to be appreciated. ERG-SC is indebted to the THEMIS and IUGONET projects for their collaboration in developing the CDF data archive and integrated analysis software. This work was supported by the GEMSIS project, Solar-Terrestrial Environment Laboratory (STEL), Nagoya University, Japan, IUGONET project, MEXT, Japan, a Joint Research Center for Space Science operated by ISAS/JAXA and STEL, Nagoya University, Japan, and the NICT Science Cloud.

REFERENCES

- 1) Shiokawa, K. *et al.*, ERG – A small-satellite mission to investigate the dynamics of the inner magnetosphere, *Adv. Sp. Res.*, *38*, doi:10.1016/j.asr.2005.05.089, (2006), 1861–1869.
- 2) Miyoshi, Y. *et al.*, The Energization and Radiation in Geospace (ERG) Project, in *Dynamics of the Earth's Radiation Belts and Inner Magnetosphere*, *Geophysical Monograph Series*, *199*, edited by D. Summers, I. R. Mann, D. N. Baker and M. Shultz, doi:10.1029/2012GM001304, AGU, (2012), 103–116.
- 3) Yumoto, K. and The 210 MM magnetic observation group, The STEP 210 Magnetic Meridian Network Project, *J. Geomagn. Geoelectr.*, *48*, doi:10.5636/jgg.48.1297, (1996), 1297–1309.
- 4) Shiokawa, K. *et al.*, The STEL induction magnetometer network for observation of high-frequency geomagnetic pulsations, *Earth, Planets Sp.*, *62*, doi:10.5047/eps.2010.05.003, (2010), 517–524.
- 5) Yumoto, K. and the MAGDAS group, MAG-

- DAS project and its application for space weather, in *Solar influence on the heliosphere and Earth's environment: Recent progress and prospects*, edited by N. Gopalswamy and A. Bhattacharyya, (2006), 399.
- 6) Shiokawa, K. *et al.*, Development of Optical Mesosphere Thermosphere Imagers (OMTI), *Earth Planets Sp.*, *51*, (1999), 887–896.
 - 7) Greenwald, R. A. *et al.*, DARN/SuperDARN, *Space Sci. Rev.*, *71*, doi:10.1007/BF00751350, (1995), 761–796.
 - 8) Hori, T. *et al.*, An integrated analysis platform merging SuperDARN data within the THEMIS tool developed by ERG-Science Center (ERG-SC), *Adv. Polar Sci.*, *24*, doi:10.3724/SP.J.1085.2013.00069, (2013), 69–77.
 - 9) Hayashi, H. *et al.*, Inter-University upper Atmosphere Global Observation Network (IUGONET), *Data Sci. J.*, *12*, doi:10.2481/dsj.WDS-030, (2013), WDS179–WDS184.
 - 10) Tanaka, Y.-M. *et al.*, Analysis software for upper atmospheric data developed by the IUGONET project and its application to polar science, *Adv. Polar Sci.*, *24*, doi:10.3724/SP.J.1085.2013.00231, (2013), 231–240.
 - 11) Ogawa, Y., T. Motoba, A. Kadokura, Y. Tanaka and K. Hosokawa, Processing and visualization of large amounts of auroral data obtained with All-sky/Narrow field-of-view parallel imagers in Tromso and Longyearbyen (Japanese), *J. Sp. Sci. Info. Jpn.*, *2*, (2013), 51–61.
 - 12) Angelopoulos, V., The THEMIS Mission, *Space Sci. Rev.*, *141*, doi:10.1007/s11214-008-9336-1, (2008), 5–34.
 - 13) Stratton, J. M., R. J. Harvey and G. a. Heyler, Mission Overview for the Radiation Belt Storm Probes Mission, *Space Sci. Rev.*, *179*, doi:10.1007/s11214-012-9933-x, (2013), 29–57.
 - 14) Finlay, C. C. *et al.*, International Geomagnetic Reference Field: the eleventh generation, *Geophys. J. Int.*, *183*, doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04804.x, (2010), 1216–1230.

かぐや搭載スペクトルプロファイラデータ分析のための ウェブ地理情報システム「月光」

林 洋平 小川 佳子^{*1} 平田 成^{*1} 寺藪 淳也^{*1} 出村 裕英^{*1}
松永 恒雄^{*2} 山本聡^{*2} 横田康弘^{*2} 大竹 真紀子^{*3} 大嶽 久志^{*4}

Web GIS system "Gekko" for data analysis of Kaguya's Spectral Profiler

HAYASHI Yohei, OGAWA Yoshiko^{*1}, HIRATA Naru^{*1}, TERAZONO Junya^{*1},
DEMURA Hirohide^{*1}, MATSUNAGA Tsuneo^{*2}, YAMAMOTO Satoru^{*2},
YOKOTA Yasuhiro^{*2}, OHTAKE Makiko^{*3}, and OTAKE Hisashi^{*4}

Abstract:

We developed a web GIS system "Gekko". This paper mainly describes a web GIS system for viewing the hyper-spectral data observed by Spectral Profiler (SP) onboard Kaguya, a Japanese lunar orbiter. Gekko means moon light in Japanese. Users can browse easily the observation points of SP on the lunar image, focusing on the interesting areas. Once an observation point is selected, then the spectral data are displayed in many graphs. The users can download the plotted SP data in the graphs, too. This system was developed by Hayashi and University of Aizu team. The SP data used in the system are provided by Japan Aerospace Exploration Agency and National Institute for Environmental Studies. Gekko will be extended beyond a viewing tool and develop into a new analysis tool which contributes to the science community.

keywords: Moon, Kaguya mission, GIS, Spectral Profiler, spectral data, user interface

概要

我々は月周回衛星「かぐや」に搭載されたスペクトルプロファイラ (SP) によって観測されたハイパースペクトルバンドのスペクトルデータを閲覧するためのウェブ GIS「月光」を開発した。「月光」では SP の観測点位置を月面の画像上にプロットして表示させている。任意の観測点を選択することにより、観測点の SP スペクトルデータを様々なグラフの形式で確認することができる。グラフで使用している数値データはダウンロードすることもできる。

このシステムは、主に林および会津大学のチームが開発した。システム内で使用している SP データは、宇宙航空研究開発機構および国立環境研究所のチームによってもたらされたデータを利用している。本システムは将来的には科学コミュニティのための分析ツールとして発展させていきたい。

1. 開発の背景

月周回衛星「かぐや」によってかつてない精度で観測データがもたらされた。かぐや搭載のスペクトルプロファイラ (SP) は可視から近赤外まで (0.5~2.6 μ m) の月面からの反射光を 296 バンドで連続的にとらえる分解能を有し¹⁾²⁾、月面の全球を観測している。SP データを利用することによって、月面表層物質の情報が詳細に得られ、月の理解が飛躍的に進むと考えられる。しかしながら SP データ利用は容易ではない。

^{*1} 会津大学先端情報科学研究センター宇宙情報科学クラスター

(Aizu Research Cluster for Space Science, Research Center for Advanced Information Science and Technology, The University of Aizu)

^{*2} 国立環境研究所 (National Institute for Environmental Studies)

^{*3} 宇宙科学研究所 太陽系科学研究系 (Department of Solar System Sciences, ISAS)

^{*4} 月・惑星探査プログラムグループ (JAXA Space Exploration Center)

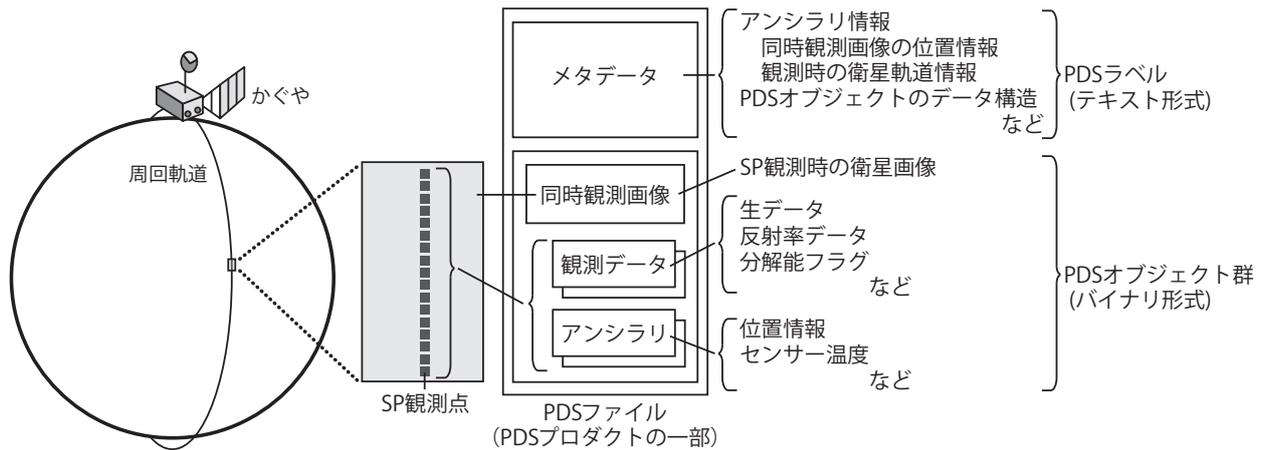


図 1 PDS ファイル (PDS プロダクトの一部) に格納された SP データおよび関連情報。

1.1 PDS プロダクト

かぐやによってもたらされた SP による観測データは惑星データシステム (PDS)³⁾ のバージョン 3 (通称 PDS3 という) に準拠している。PDS3 では観測機器ごとのデータをプロダクトと呼び、プロダクトは 1 つのファイルの場合もあれば、複数のファイルで構成されることもある。プロダクトはメタデータ部である PDS ラベルとデータ部である PDS オブジェクトから構成されている⁴⁾。PDS ラベルはオブジェクト定義言語 (ODL) と呼ばれるテキストで記述され、また PDS オブジェクトは所定のフォーマットのデータを格納することができる。本稿ではプロダクトのことを PDS プロダクト、プロダクトを構成するファイルのことを PDS ファイルと呼ぶこととする。

SP における PDS プロダクトは複数の PDS ファイルから構成される。図 1 に示したように 1 つの PDS ファイル内には、1 つの PDS ラベルと複数の PDS オブジェクトが格納されている。メタデータである PDS ラベルには、SP 観測時における同時観測画像 (衛星画像) の位置情報や観測時の衛星軌道情報といったアンシラリー情報、PDS オブジェクトのデータ構造に関する情報が含まれている。同時観測画像および SP によって観測されたデータ、関連データは、それぞれ個別の PDS オブジェクトとして格納されている。これらの観測データには、生データ、反射率データおよび分解能フラグなど、関連データには位置情報やセンサー温度などのアンシラリー情報が含まれている。

1.2 データ構造面の利用性

PDS プロダクトはデータ構造が一意に定まらないため、アプリケーションは PDS プロダクトに完全に対応することができない。PDS プロダクト中の PDS オブジェクトを部分的に抽出するプログラムは開発されている。しかしながら SP の PDS プロダクトはデータ構造が特殊であるため既存のアプリケーションでの扱いが難しい。

SP は一回の観測で衛星軌道の直下の一点 (サイズは 500m × 500m) の反射スペクトルを得る。連続した観測による測線は、極軌道をとる衛星軌道に沿う形となり、東西に隣接する軌道の測線とは離れており、面的に広がっていない。これを補うため SP データの PDS では同時観測画像が含まれている。

かぐやの SP データは、単にスペクトル情報のみ抽出することにあまり意味がない。SP データを研究で利用するためには、スペクトルのみならず、観測点と同時観測画像、その他情報を合わせながら、個々のデータの構造を保ちつつ抽出する必要がある。抽出後はさらに、SP データのスペクトルをグラフで表示させたり、同時観測画像上に SP 観測点をプロットさせる必要もある。

PDS 対応を謳っている一般的なアプリケーションは SP データには対応しておらず、データ利用には SP の PDS プロダクトのデータ構造を熟知した上でのコーディングが必要になる。

1.3 PDS ファイルの探索面における利用性

ユーザは必要な SP データを探しだすため、かなり面倒で時間のかかる状況におかれている。SP データを利用するためには、ユーザにとって関心のある領域のデータが含まれる PDS ファイルを探す必要がある。

SP における PDS プロダクトは、探査機の一周回分、またはそれをさらにいくつか分割した時系列単位で PDS ファイルとして分割されている。地理的に隣り合った周回軌道の SP データは別の PDS ファイルに格納されていることになる。このように、地理的な単位としてはまとまっていない。ある特定の地域の SP データが必要な場合、ユーザはその地域を観測した SP データを含む複数の PDS ファイルを探し出す必要がある。月に見られる直径 100km クラスのクレーターのよう広い地域の場合、対象となる PDS ファイルが数百～千程度になることもある。さらにこれらの PDS ファイルから観測条件が良くユーザが期待しているような SP データを含む PDS ファイルを探し出すことは容易ではない。

1.4 既存の取り組み

これらの要因により、データ利用者の幅は狭められている。エンドユーザーに限らず、かぐやミッション分光観測器関係者であってもデータを利用しにくい環境となっている。このような状況に対して、いくつかの先行的な取り組みが挙げられる。

寺蘭ら⁵⁾は月・惑星探査データの表示・解析を目指した「月・惑星データ協働解析システム (WISE-CAPS)」を開発した。このシステムはクライアント・サーバー型の GIS ウェブアプリケーションとして実装されている。SP データの観測点を地図上にプロットすることができ、個々の観測点のスペクトルをグラフで表示させることができる。ただしデータ閲覧に先立って、該当地域の観測点が含まれる PDS ファイルを用意し、これらの PDS ファイルを紐解いて、ウェブ経由で SP データを予め当システムへアップロードしておく必要がある。また SP データ特有のデータ構造は反映されていない。データの配信よりは、ネットワーク上での研究者間の研究促進に重点が置かれている。

三菱スペースソフトウェアは、かぐやミッションにおける SP データの PDS ファイルをプレビューするためのアプリケーション「LISM Data Viewer」⁶⁾を開発し配布している。このアプリケーションは Java で開発されており、ローカル環境で動作する。かぐやにおける SP の PDS ファイルを直接扱える。同時観測画像に SP データの観測点をプロットさせた画像を表示させることができ、SP データをグラフで表示させることができる。一方で、複数の PDS ファイルを同時に扱うことはできず、同一の画面上に複数の PDS ファイルにまたがる SP データの観測点をプロットすることはできない。また、関心領域の PDS ファイルのファイルは別途用意する必要がある。このアプリケーションはファイルのプレビューを主目的としており、この目的においては十分な機能を有している。

Hayashi Yuuki ら⁷⁾は SP データから鉱物情報を抽出し可視化するプログラムを開発している。このプログラムは IDL⁸⁾で開発されており、IDL がインストールされているローカル環境で動作する。SP データをプログラムから直接扱うことができ、同時観測画像に SP データの観測点をプロットし、スペクトル吸収帯の特徴量をマッピングすることができる。一方で LISM Data Viewer と同様、複数の PDS ファイルにまたいで同一地図上に SP データの観測点をプロットすることができず、PDS ファイルも別途用意する必要がある。このプログラムはかぐやの SP データから鉱物情報を自動抽出することを目的としている。

このようにいくつかの取り組みがあるものの、SP データの特殊性を考慮しつつ、全データを容易に利用できるようなシステムはない。

2. ウェブアプリケーション「月光」

林および会津大学のメンバーはかぐやによる SP データ閲覧に特化した月面ウェブ GIS「月光」を開発した。「月光」は、取り扱うデータが月面であり、光の情報を取り扱うことから命名した。英語名も「Gekko」と表記している。

「月光」はインターネットの環境および Firefox などのブラウザがあれば利用できるウェブアプリケーションである。利用にあたって特別なプラグインなどは必要なく、OS も選ばない。利用にあたってはユーザー登録、データ利用規約に従う必要はあるが無料で開放している。サーバは会津大学に設置しており、URL は次のとおりである。

http://fructus.u-aizu.ac.jp/gekko_info/

システムの管理・運用は会津大学先端情報科学研究センター宇宙情報科学クラスターが行っている。

2.1 システムの主な特徴

「月光」は上記に掲げた SP データへのアクセシビリティの問題を改善するために開発された。データ獲得後の SP データの解釈は個々のユーザーに委ねている。「月光」を利用するためには近赤外分光のデータを読み解く能力が求められる。それ以外はデータに興味があれば容易に利用できることを設計思想に置いている。

「月光」には主に3つの特徴がある。第一に「月光」はユーザー主体の設計思想で構築されており、直感的に使いやすい。システム利用にあたって特別なアプリケーションの操作方法を学習しなくとも使用できる。より少ない操作でユーザーが必要とする情報を閲覧できる。第二に、校正関係者からエンドユーザーまでの幅広いユーザー層に対して、どのユーザーであっても必要な情報が即座に得られる仕組みとなっている。ユーザーは SP における PDS プロダクトの複雑なデータ構造を理解していなくとも、データ構造を保ちつつ SP データおよび関連情報を閲覧できる。第三に、快適なインタラクティブ環境を実現している。システムの最適化によりすべての処理のレスポンス時間を数秒以内におさめている。そのことによってユーザーにとってレスポンス待ちによるストレスのない快適な操作を実現している。

2.2 PDS ファイルと「月光」

「月光」では、SP の PDS ファイルが持つ複雑なデータ構造を活かすようにデータを取り扱っている。「月光」の大きな特徴の一つでもある。SP の PDS ファイルが複雑な構造となっているのは、SP データだけでなく SP データを取り扱うときに必要な関連情報を 1 ファイルにまとめているためである。

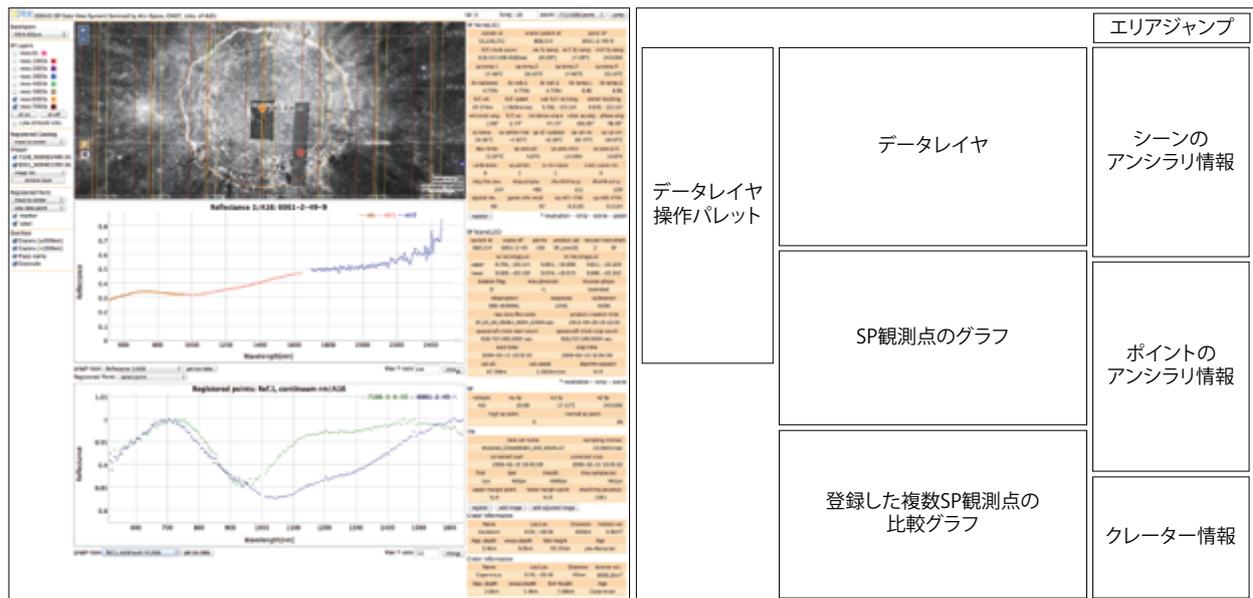


図2 「月光」のGUI(左)およびその構造(右)。

SPのPDSファイルは2種類の情報粒度のデータに分けることができ、「月光」では粒度別にデータを取り扱っている。粒度の小さい方はSPデータの観測点に関連するデータ群であり、「月光」では「ポイント」と呼んでいる。「ポイント」には、アンシラリー情報、観測地点の位置情報、SPセンサーでとらえた生データ、分解能フラグ、反射率データなどの情報がある。粒度の大きい方のデータ群は1つのPDSファイルに含まれる全「ポイント」に関連するデータであり、SPのPDSプロダクトでは「シーン」と呼んでいる。「月光」でもこれにならって「シーン」と呼んでいる。「シーン」には、1つのPDSファイルにおける全観測期間中におけるアンシラリー情報および、同時観測画像などの情報がある。

2.3 ユーザインターフェース

「月光」は図2に示すGUIを持っている。画面の構造は図2右に示したようになっており、「データレイヤ操作パレット」、「データレイヤ」、「エリアジャンプ」、「シーンのアンシラリー情報」、「ポイントのアンシラリー情報」、「クレーター情報」、「SP観測点のグラフ」、「登録した複数SP観測点の比較グラフ」のボックスによって構成されている。「月光」のすべての機能はこの8つのボックスのいずれかに集約されている。

ユーザは次に示すフローでの操作を行うことになる。

1. 特定の地域へ移動する。
2. SPデータの観測点を選ぶ。
3. 特定の観測点の情報を閲覧する。

ユーザは上記の一連の操作を無意識のうちに行うことが可能である。各ボックスはユーザをサポートするように必要に応じて現れるように実装されている。

「月光」を立ち上げた直後は「データレイヤ操作パレット」、「データレイヤ」、「エリアジャンプ」のみ表示される。ユーザは自ずと「データレイヤ」上でかぐやのマルチバンドイメージャ(MI)⁹⁾のリモートセンシング画像(低解像度モザイク画像、後述2.10参照)を閲覧するように誘い出されている。「データレイヤ」における各種レイヤの表示、非表示は「データレイヤ操作パレット」で行うことができる。「データレイヤ」上である一定の縮尺に拡大されるとSPの観測点が自動で表示される。そこで「データレイヤ」上でSPの観測点をクリックすると、状況に応じて「シーンのアンシラリー情報」、「ポイントのアンシラリー情報」、「SP観測点のグラフ」、「登録した複数SP観測点の比較グラフ」が表示される。クリックした観測点は、黄色のハイライトでマーキングされる。現在表示されている各ボックスのデータがどの地点のものなのかが一目瞭然となっている。さらにクレーター内をクリックすると、「クレーター情報」が表示される。

ユーザは関心ある場所を「データレイヤ」上で探索しながら、SPデータおよび関連情報をみることができ、それぞれのボックス内の機能は事項以降で述べる。

2.4 地理情報システム(GIS)

「月光」には地図閲覧ソフトが備えている機能を一通り備えている。「月光」はデータ利用に重点をおいており、データの編集機能は搭載していない。データの新規登録、削除および変更・修正はデータファイルを直接編集する必要がある。シ

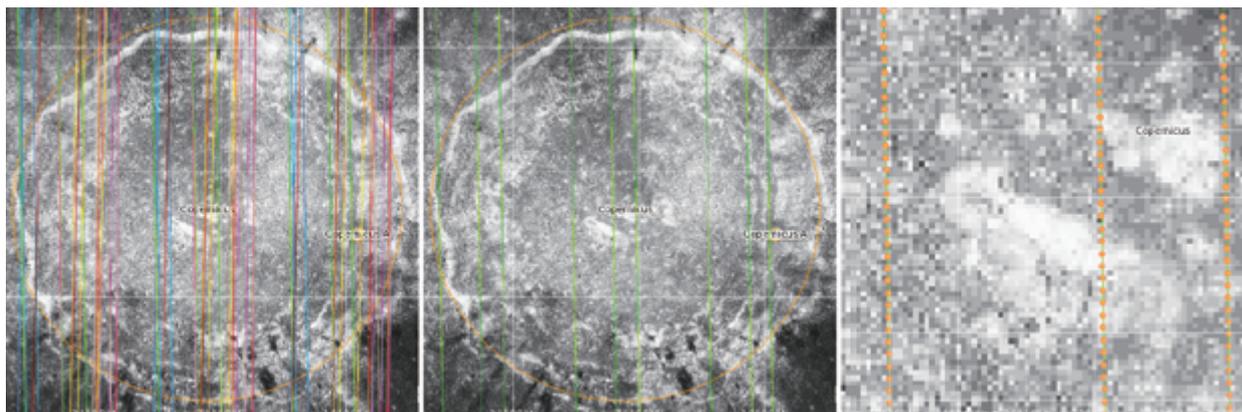


図 3 SP 観測点の記号表示. 左と中は縮尺 200 万分の 1. 右は 42 万分の 1. コペルニクスクレーター (北緯 9 度, 西経 20 度, 直径 90km)

STEM 上一般ユーザには編集を許可しておらず, そのような GUI も実装していない. 「月光」上で取り扱われるデータは全てあらかじめ登録してある.

GIS で使用している地図投影法は正距円筒図法のみである. 北極と南極の閲覧に適しているステレオ投影には対応していない. GIS 上で極付近をステレオ投影で表示させた場合, 表示させなければならない SP 観測点は正距円筒図法に比べて桁違いに多くなる. かぐや衛星は極軌道のため, 低緯度～中緯度に比べて高緯度～極域は桁違いに観測点が多いことによる. 現時点の「月光」ではステレオ投影を使用した場合, 数秒以内でのオンライン処理は困難である.

「データレイヤ」には背景画像および地名などの図形情報を表示させている. 背景画像はデフォルトの状態ではかぐや MI の VIS 0.415 μ m を表示させている. 地名はアメリカ地質調査所が作成しているデータ¹⁰⁾を使用している. クレーターに関しては地名に加え, おおよそのクレーター外縁部に沿った塗りつぶしをしていない円図形 (無数の線で構成されたポリゴン) で表示させている. クレーターのポリゴンは, Losiak ら¹¹⁾¹²⁾が作成したクレーターデータベースにおけるクレーター中心の緯度・経度と半径のデータを用いて作成した. クレーター上でクリックすると「クレーター情報」ボックスが現れ, クレーターの直径や深さ, 年代などを確認できる. これらの情報も Losiak らによるクレーターデータベースを活用している. 地名およびクレーターのポリゴンは非表示にすることができる.

縮尺の変更は「データレイヤ」左上の [+][−] ボタンを使用するかマウスのスクロールで操作できる. 表示されているエリアの変更はマウスで行うことができる. またあらかじめターゲットとする地域の位置情報が分かっているならば, 「エリアジャンプ」によって緯度・経度の入力および縮尺を選択することによって直接ジャンプすることができる.

2.5 データレイヤ上の SP 観測点

SP による観測点は全月面上に万遍なく分布し, その数は約 7,000 万点にもおよぶ. 月面全球の範囲で観測点をプロットした場合, 観測点で塗りつぶされることになる. 一方で狭域においては, 観測点は限られており, どこが観測されているのかに価値がある.

そこで「データレイヤ」上で観測点の記号表示を縮尺によって切り替えている (図 3). 観測点の記号には「シーンレベルの観測点群」と「ポイントレベルの観測点」のスタイルを用意している.

まず月面の広域を表示させているときは観測点の情報は表示されない. 縮尺が 200 万分の 1 以下になると「シーンレベルの観測点群」が線で表示される (図 3 左). 複数のシーンは連なり長い 1 本の線のようにになっている. さらに 42 万分の 1 以下になると「ポイントレベルの観測点」がオレンジの丸で表示される (図 3 右).

「シーンレベルの観測点群」には「周回軌道単位」および「シーン単位」の 2 系統の色づけがなされている. 前者の系統は周回軌道番号を 1,000 ごとに区切って色分けをして表示している. 例えば, 周回軌道が 1,000 番台は赤線, 6,000 番台は黄色といった具合である. かぐやは約 1 年半の観測期間で約 7,000 回ほど極軌道を周回している. これは SP データは周回軌道, つまり観測時期によってデータの品質や性質が異なっているためユーザが選択的にデータをみられるようにする配慮である. 後者の系統は周回軌道の色に対して同系色で濃淡をつけて表示させている. 例えば 3,000 番台の周回軌道は青色で表示しているが, シーン単位に青色と空色を交互に表示している.

また, 周回軌道 1,000 ごとに表示, 非表示を切り替えることができる (図 3 中: 図は 4,000 番台のみ表示させたところ). 低高度の「ポイントレベルの観測点」に関しては, 周回軌道番号に関係なく高度 90km 以下の観測点のみ表示する機能も設けている. 高度が低軌道だとセンサーの感度が良く分解能が高いデータが多い. これはかぐや衛星の後期運用として行われた約 4ヶ月分のデータに相当する.

2.6 アンシラリ情報

「月光」では SP データ観測時におけるアンシラリ情報を確認できる。表示されるアンシラリ情報は、PDS ファイル中に含まれるデータとなる。アンシラリ情報はシーンとポイントのそれぞれにある。前者は「データレイヤ」上で「シーンレベルの観測点群」をクリックすると「シーンのアンシラリ情報」ボックスに表示される。後者は「データレイヤ」上で「ポイントレベルの観測点」をクリックすると「ポイントのアンシラリ情報」ボックスに表示される。

「シーンのアンシラリ情報」ボックスでは同時観測画像の位置情報などのメタデータや平均移動速度や高度などがぐや衛星の状態に関する情報が示される。また、ボックス内にはクリックにて選択中の「シーンレベルの観測点群」の同時観測画像を「データレイヤ」上に表示させるためのボタンが表示される。ユーザは必要に応じてボタンを押すことによって同時観測画像を表示することができる。

「ポイントのアンシラリ情報」ボックスでは SP 観測時における分光計の温度や観測高度、太陽照射幾何条件などに関する情報が示される。SP データの校正に用いられる重要な情報となる。また、ボックス内にはデータ登録ボタンが表示される。データの登録をすることによって、複数のポイント間の参照が容易になる。

2.7 SP 観測データ

「月光」で使用している SP データの源泉は「SP Level2C (SP L2C)」という SP の PDS プロダクトである。この PDS プロダクトは、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所および国立環境研究所によって 2012 年 3 月 28 日～4 月 21 日に作成された。SPL2C は、「かぐや (SELENE) データアーカイブウェブサイト」¹³⁾ で公開される予定であり、2014 年 6 月現在準備が進められている。SPL2C のデータに関する詳細は、プロダクトフォーマット記述書より参照できる。記述書は同ウェブサイトからダウンロード可能となっている。

本システムで用いている SPL2C 由来のデータは、かぐや衛星の SP センサーがとらえた生データ、校正に必要な各種データ、反射率データがある。反射率に関するデータは、生データに対して高アルベド物質用位相角補正をおこなった反射率スペクトルおよび、低アルベド物質用位相角補正をおこなった反射率スペクトルの 2 種類ある。SP の PDS プロダクト内では前者を反射率 1、後者を反射率 2 と呼んでいる。

さらにアポロ 16 号着陸サイト校正係数¹⁴⁾による補正をおこなったデータも使用している。この係数はアポロミッションで採取したサンプルのスペクトルと同地点のかぐやミッションによるスペクトルとの差について、アポロミッション側のスペクトルにかぐやミッションのスペクトルを合わせるためバンドごとに導き出された係数である。この補正をかけたデータを用いると、かぐや以前の月探査機が得た可視～近赤外スペクトルデータと直接的に比較することができる。

2.8 グラフによる SP 観測データの表示とデータの取得

本システムでは、おおまかに分けて反射率のスペクトルに関するグラフと校正に関するデータのグラフとの 2 種類を表示できる。「データレイヤ」上で「ポイントレベルの観測点」をクリックした場合、「ポイントのアンシラリ情報」に加えて「SP 観測点のグラフ」ボックスが現れ SP データに関するグラフ (図 4～6) が表示される。

反射率のスペクトルに関するグラフは、反射率のグラフ (図 4) および、反射率に連続接線を引いて処理を行ったデータ

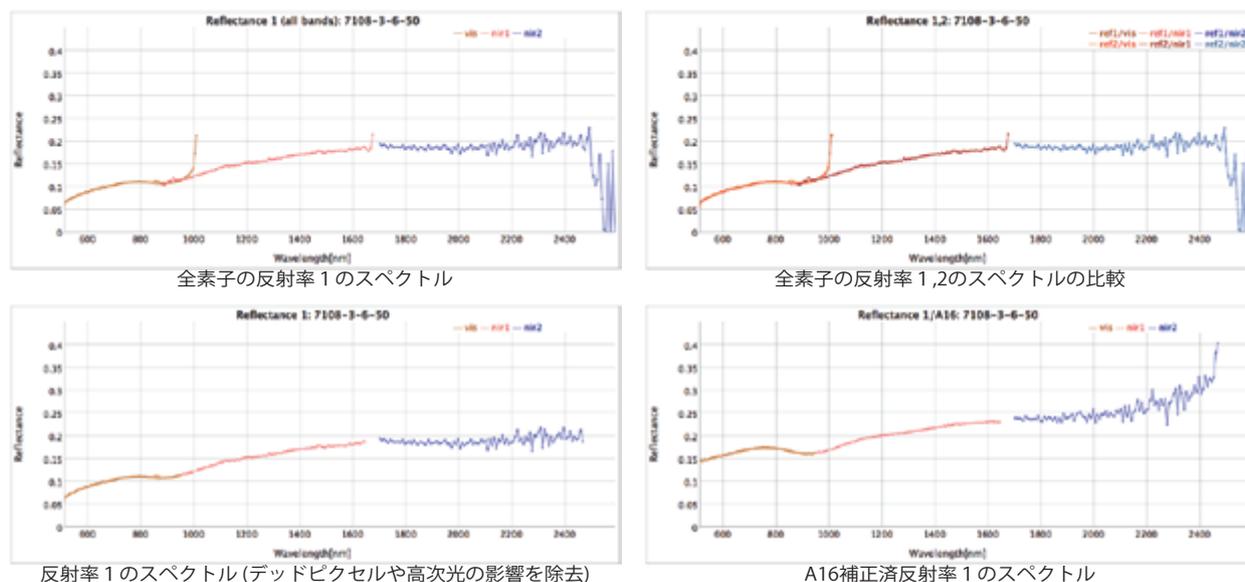


図 4 SP データに基づく反射率のグラフ。観測点はコペルニクスレータ南東部 (北緯 8.814 度, 西経 19.409 度)。

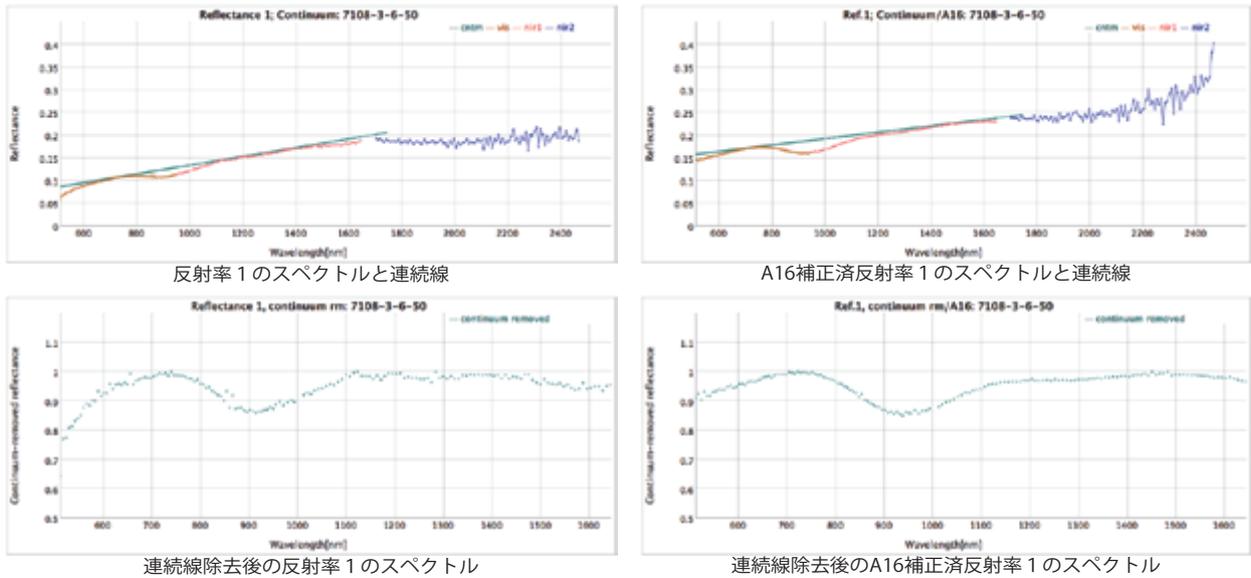


図 5 反射率に連続線を引いたグラフおよび連続線の傾きを除去したグラフ。観測点は図 4 と同地点。

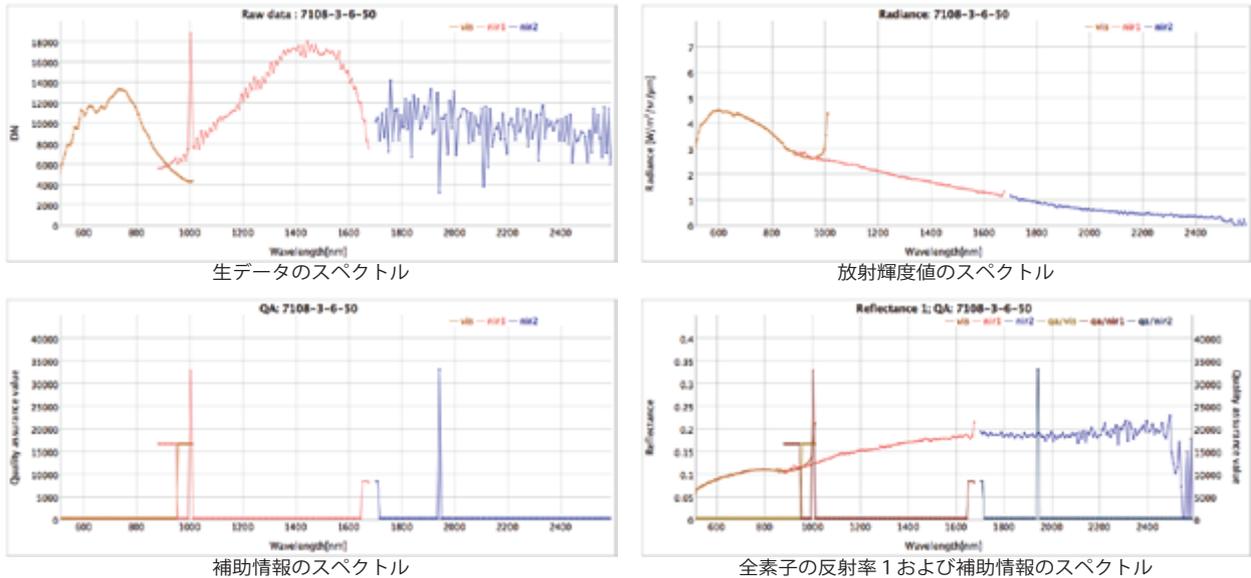


図 6 SP データの校正に必要なグラフ。観測点は図 4 と同地点。

を利用したグラフ (図 5) がある。それぞれのグラフごとに反射率 1 および反射率 2 のグラフを表示できる。さらにアポロ 16 号着陸サイト校正係数で補正したグラフも表示できる。

前者には「全素子の反射率のスペクトル」(図 4 左上) と「反射率のスペクトル」(図 4 左下) のグラフがある。「全素子の反射率のスペクトル」のグラフは、VIS (512.6~1010.7nm) , NIR1 (883.5~1676.0nm) , NIR2 (1702.1~2587.9nm) の 3 つの SP センサーの反射率の単純な重ね合わせのグラフになる。SPL2C の反射率のデータをそのまま使用している。さらに反射率 1 と反射率 2 を重ねあわせたグラフ (図 4 右上) も表示できる。反射率 1 および反射率 2 の違いを確認することができる。「反射率のスペクトル」のグラフは「全素子の反射率のスペクトル」からデッドピクセルや回折の高次光の影響を取り除いたものになる。さらにアポロ 16 号着陸サイト校正係数で補正したグラフ (図 4 右下) も用意している。エンドユーザにとって意味のあるグラフは「反射率のスペクトル」のグラフになる。

後者には「反射率のスペクトルおよび連続線」(図 5 左上) および「連続線除去後の反射率のスペクトル」(図 5 左下) のグラフがある。「反射率のスペクトルと連続線」は「反射率のスペクトル」のグラフ上に VIS および NIR1 の反射率データを用いて接線を引いたものになる。「連続線除去後の反射率のスペクトル」は「反射率のスペクトルと連続線」における接線の傾きをゼロにした VIS および NIR1 のみのグラフになる。反射率に連続線を引いてその傾きをゼロにする方法によって得られるデータは鉱物を特定する際によく用いられている。それぞれアポロ 16 号着陸サイト校正係数で補正したグラフも用意している (図 5 右上, 右下) 。

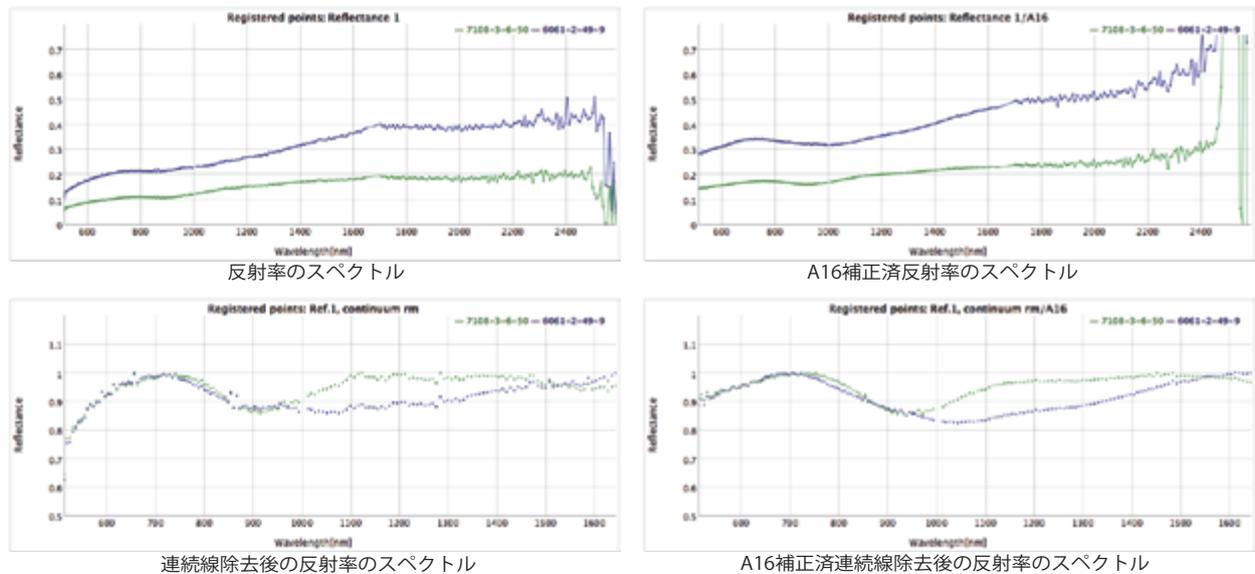


図 7 登録データの比較グラフ。全て反射率 1。グラフにおける緑線の観測点はコペルニクスレータ南東部（北緯 8.814 度，西経 19.409 度：図 4 と同地点），青線の観測点は同中央部（北緯 9.639，西経 20.117）。

校正に関するデータのグラフは、「生データのスペクトル」，「放射輝度値のスペクトル」，「補助情報のスペクトル」，「全素子の反射率および補助情報のスペクトル」の 4 つがある（図 6）。「生データのスペクトル」（図 6 左上）は校正前のセンサーがとらえたデータそのものになる。「放射輝度値のスペクトル」（図 6 右上）は輝度値，「補助情報のスペクトル」（図 6 左下）はデータの信頼性を表すグラフになる。「全素子の反射率および補助情報のスペクトル」（図 6 右下）は「全素子の反射率のスペクトル」と「補助情報のスペクトル」を重ねあわせたグラフである。「全素子の反射率のスペクトル」は反射率 1 および反射率 2 があるのでそれぞれグラフで表示できる。

さらに「ポイントのアンシラリー情報」ボックス内において，ポイントの登録をおこなった場合，「登録した複数 SP 観測点の比較グラフ」ボックスが現れ，登録データを比較できるグラフ（図 7）が表示される。表示されるグラフは登録した複数の地点を重ねあわせた「反射率のスペクトル」（図 7 左上）および「連続線除去後の反射率のスペクトル」（図 7 左下）のグラフとなる。それぞれアポロ 16 号着陸サイト校正係数で補正したグラフ（図 7 右上，右下）も用意している。

グラフの元となった数値データはその場でダウンロードすることができる。「月光」の機能にはない統計解析などの分析を行いたい場合は，数値データをダウンロードした後，解析ソフトなどを使用すれば良い。

2.9 データレイヤ上への同時観測画像表示

「月光」では必要に応じて背景画像の上に SP データ観測時の画像（同時観測画像）を表示させることができる。

同時観測画像を表示させることは 3 つの点で重要である。第一に，SP データの品質確認という点で重要である。同じ地点であっても観測時の太陽高度，向きによって照明条件は異なる。図 8 の左と中の画像は同じエリアだが，中央部分の同時

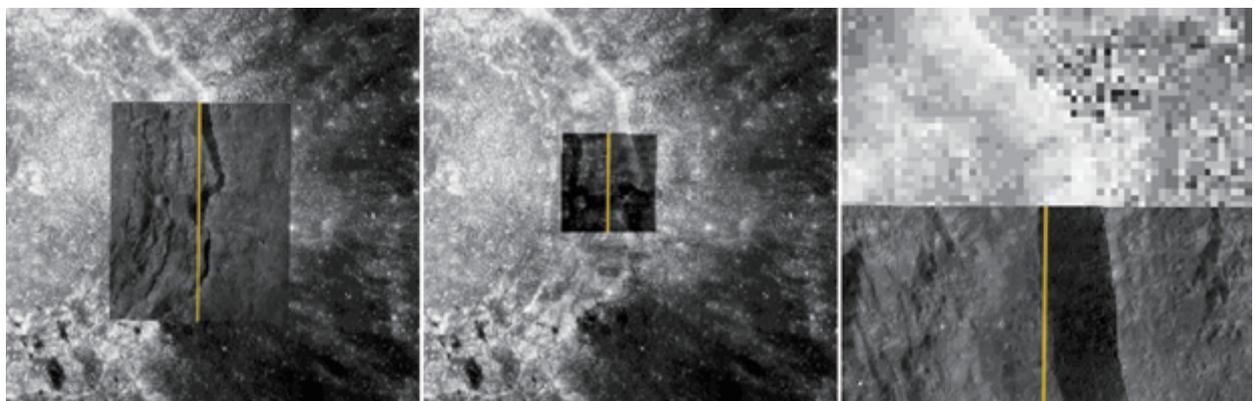


図 8 背景画像（MI VIS 0.415 μm 低解像度モザイク画像）にマッピングした同時観測画像。コペルニクスレータ（北緯 9 度，西経 20 度）の外縁。オレンジのラインはシーンレベルの観測点群（1 PDS ファイルに含まれる全 SP 観測点）を示す。

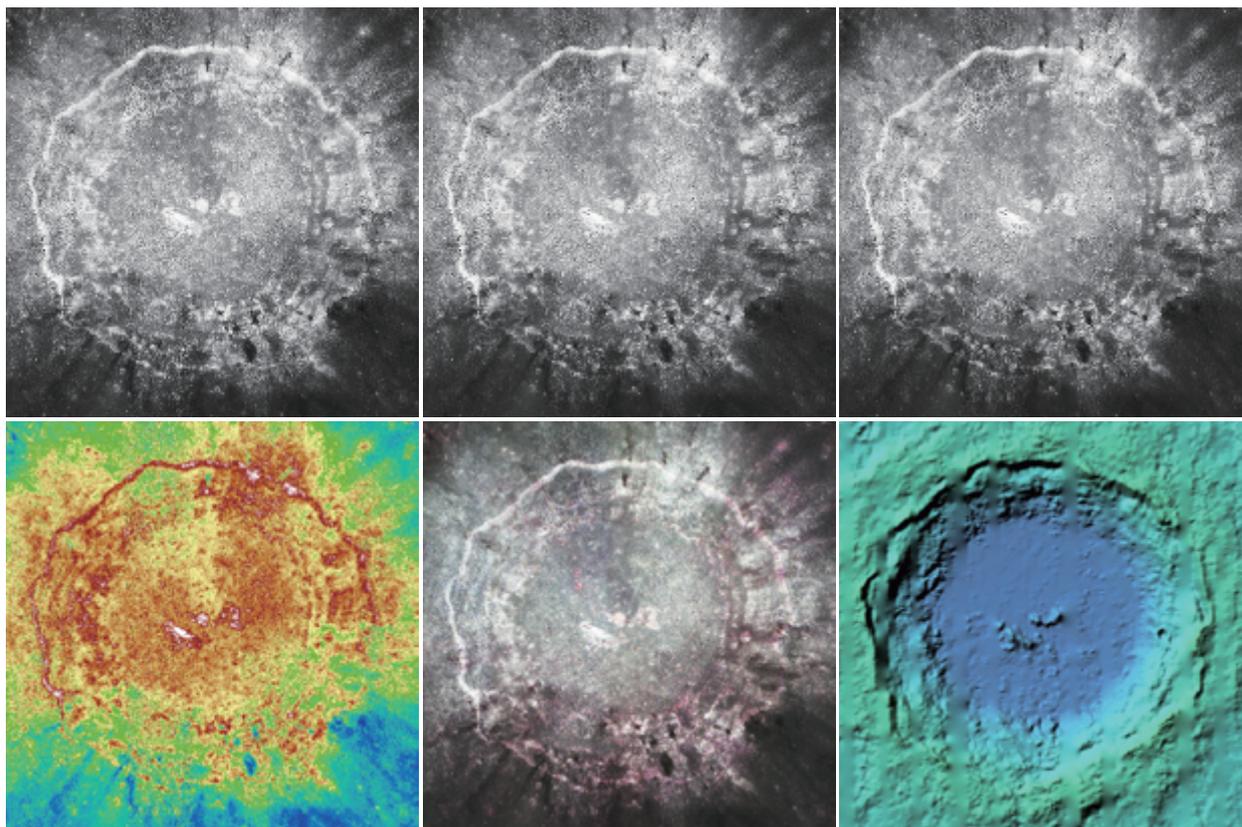


図 9 背景画像. コペルニクスクレーター (北緯 9 度, 西経 20 度) .

観測画像は観測条件が異なるので異なる画像となっている。光の向き、鏡面反射状態や明るさなどを確認することができる。第二に、位置情報の確認という点で重要である。SP の位置情報は軌道情報などから算出されている。月面は地球のように位置情報を正すためのランドスケープがないため、位置補正が難しい。かなり正確な値が求まっているが、すべての SP データの位置情報が正しいわけではない。背景画像として使用している MI モザイク画像（後述 2.10 参照）の位置情報は SP データの位置情報よりもかなり正確に求まっている。背景の MI モザイク画像と同時観測画像を照らし合わせることによって、SP データの位置情報の正確性を確認することができる。第三に、SP データが同時観測画像上どこを示しているかという点で重要である。2 番めに挙げた理由に関連するが、同時観測画像と SP データの位置情報が絶対位置として誤っていたとしても、この 2 点の相対的な位置という意味で正確である。SP データのポイントおよびその周囲の地形などの情報は背景の MI モザイク画像ではなく同時観測画像で正確に知ることができる。このような位置ずれは「月光」上でいくつか確認された。

なお「月光」で使用している同時観測画像は PDS ファイルに含まれるものに編集を加えている。元の画像はセンサーが走査した順に上から下へ作られている。観測したときの状況次第で画像は鏡像になったり上下が回転していたりする。そのため、あらかじめ「月光」へデータを搭載する段階で正しい像に変換をおこなっている。

また、「データレイヤ」にマッピングされる同時観測画像の大きさは常に一定ではない。図 8 左および中は同じ地点で同縮尺だが、それぞれの同時観測画像のサイズは同じでない。まず、同時観測画像のピクセルサイズは撮像した観測器の種類（マルチバンドイメージャあるいは地形カメラ）とその時の観測モードによって変化する。さらに撮影時の衛星の高度は一定ではないため刈幅が異なり、縮尺に対する解像度はまちまちとなっている。高い高度の同時観測画像は刈幅が広いが分解能は悪く、低い高度の同時観測画像は刈幅は狭いが分解能が良い関係となっている。ミッション後期の運用においては、衛星の高度が低く縮尺に対する解像度は高くなっている。概して、背景画像よりは同時観測画像のほうが高解像度となっている（図 8 右：図 8 左の上方を「月光」で拡大したところ）。

2.10 データレイヤの背景画像

「データレイヤ」上の背景画像は、上述のとおり SP データと不可分な関係にある。

背景画像は切り替えて表示させることができる（図 9）。現時点ではかぐやの MI センサによる「MI モザイク画像（低解像度）」、「色強調した MI モザイク画像（低解像度）」、「3 バンドの MI 合成画像」などの画像を掲載している。

MI 低解像度モザイク画像は共著者である大竹から提供された画像を利用している。この画像は大竹が MI 観測画像⁹⁾ からマージして作成しており、全球をカバーしている。画像サイズは 46,080×23,040 ピクセルであり、MI センサーの最高解像

度の 1/16 の空間解像度となっている。MI センサはマルチバンドであり、VIS 0.415 μm , 0.75 μm , 0.9 μm , 0.95 μm , 1.0 μm , NIR 1.0 μm , 1.05 μm , 1.25 μm , 1.55 μm の各バンド画像がある。9つのバンドの全球 MI モザイク画像に対して、「MI モザイク画像」(図 9 上段：左から 0.75 μm , 1.0 μm , 1.25 μm)、「色強調した MI モザイク画像」(図 9 下段左：0.75 μm) の 2 種類のタイプで表示させている。また、0.75 μm , 1.0 μm , 1.25 μm を使用した「3 バンドの MI 合成画像」(図 9 下段中) を背景画像として用意している。

かがや衛星によらない背景画像、例えば「LOLA によるカラー陰影起伏図」(図 9 下段右)なども「月光」では採用している。これは「月光」がかがやのデータ配信を目指しているわけではなく、SP データの閲覧およびそのデータの解釈を重要視しているからである。「LOLA によるカラー陰影起伏図」はアメリカ地質調査所が WMS で配信しているデータ¹⁵⁾ を利用している。

3. システム構成

「月光」は既存のオープンライセンスのアプリケーションを利用してシステムを組んでいる。既存のシステムでは足りない部分に対してプログラムにより実装を加えている。本システムはリレーショナルデータベース (RDB) とファイルシステムをデータリソースとして利用したクライアント・サーバー型のウェブアプリケーションである。GIS の機能はサーバー側は MapServer, クライアント側は OpenLayers および独自開発した Gekko Library を用いている。本システムを利用するにあたってユーザが必要とするものは、クライアントとなるコンピュータおよびウェブブラウザ、「月光」に接続するためのネットワーク環境である。

3.1 データ通信

サーバとクライアントの通信はインターネットを介しておこなう。地図データのリクエスト/レスポンスは、地図データの通信を規定したプロトコルである Web Map Service (WMS)¹⁶⁾ を用いている。

クライアントとサーバ間のおおまかなシーケンスは以下のとおりになる (図 10)。

1. ユーザは OpenLayers および Gekko Library の操作を通じて OpenLayers にデータ取得のリクエストを行う。
2. クライアント側の OpenLayers はユーザのリクエストを WMS 形式に変換し、サーバへデータのリクエストを行う。その際、座標データおよび Mapfile のパスを引き渡す。
3. サーバ側の MapServer は指定された Mapfile に定義されている条件に従いデータリソースからデータの取得を行う。
4. MapServer は取得したデータを Mapfile に定義されている形式に変換を行う。
5. MapServer は OpenLayers へリクエストに従ったデータを引き渡す。
6. OpenLayers および Gekko Library はデータの内容ごとに GUI 上にデータを表示する。

個々の詳細は事項以降で述べる。

3.2 クライアント側処理

クライアント側のフロントは OpenLayers¹⁷⁾ を用いている。OpenLayers は WMS プロトコルに対応した地図描画アプリケーションで、JavaScript でできている。ユーザの「データレイヤ」上の操作を通じて、新たにデータ取得が必要な際、WMS プロトコルを用いサーバへリクエストを行いデータを取得する。Ajax で通信をするので、画面遷移なしに地図情報の更新を行うことができる。

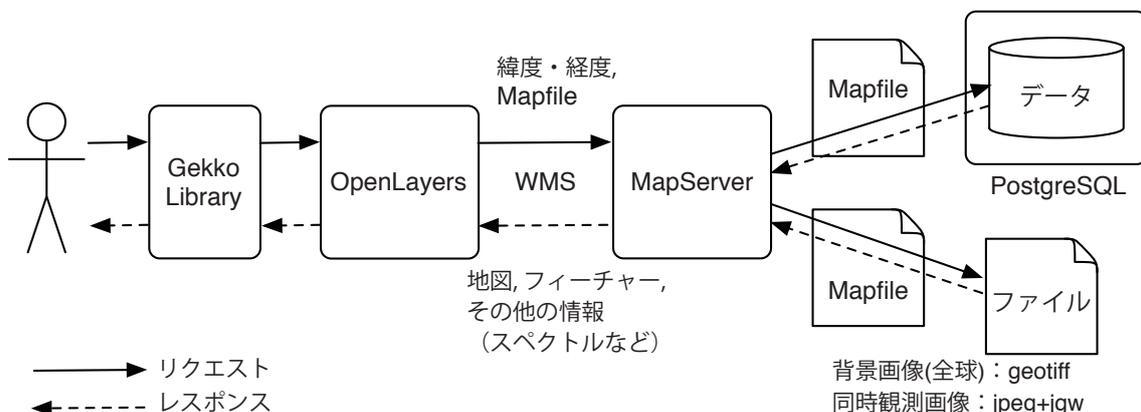


図 10 システム内のデータ通信。

ただし、OpenLayers だけだと上述の「データレイヤ」の複雑な操作や同時観測画像の表示、グラフ表示などができない。そこで、OpenLayers の機能を JavaScript で独自に拡張し、これを Gekko Library と呼ぶこととした。「データレイヤ」以外のボックスは Gekko Library を用いて処理をおこなっている。

SP データのグラフ表示は Gekko Library に加えて Dygraphs¹⁸⁾ を使用している。Dygraphs はブラウザ上でグラフを描画するための JavaScript のライブラリである。Gekko Library は OpenLayers から Dygraphs へ引き渡すためデータ変換を行っている。

3.3 サーバ側処理

サーバ側のフロントは MapServer¹⁹⁾ を用いている。MapServer は WMS プロトコルに対応した地図配信アプリケーションである。クライアントのリクエストに応じて、データリソースからデータを取り出し、測地系などの画像変換をおこないクライアントにデータを渡す処理を行っている。

データリソースへのアクセスは MapServer が仲介するプロキシ形式をとっており、クライアントが直接データリソースへアクセスすることはできない。MapServer を通じてデータリソースへアクセスする場合、Mapfile と呼ばれる定義ファイルを参照することになる。Mapfile では、データリソースの投影法、クライアントに渡す投影法、描画スタイルなどが定義されている。

クライアントは、MapServer に対して特定の Mapfile のパスおよび緯度・経度などの情報を渡すことによってトリガーを引くことになる。逆に言えば、クライアントは Mapfile に定義されていないリソースにアクセスすることはできない。Mapfile の追加、編集などは「月光」では我々管理者のみしか行うことはできなようにしている。

MapServer はユーザによる Mapfile に基づいたリクエストに対して、データリソースへアクセスを行い条件にあったデータの取得を行う。データリソースについては次項で述べる。そして MapServer は Mapfile の定義に従い、ラスターデータであれば投影変換を行い、ベクターデータであればオブジェクトの色や線幅などの描画スタイルに基づいた画像描画をおこなう。その後、クライアントへ処理されたデータを引き渡す。

3.4 データリソース

「月光」で利用するデータリソースはベクターデータとラスターデータとの2種類の形式がある。

ベクターデータは PostGIS²⁰⁾ で管理している。PostGIS は、リレーショナルデータベースである PostgreSQL に GIS の機能拡張をしたものである。PostGIS には、約 7,000 万点にも及ぶ「ポイント」の座標データ、SP データおよび関連情報、約 110 万点の「シーン」の座標データやアンシラリー情報などを格納している。

MapServer は PostGIS に緯度・経度を条件として渡し、PostGIS は該当する SP データを MapServer へ引き渡している。PostgreSQL に専用サーバ1台をあてがいが、パフォーマンス・チューニングを行うことにより、数秒以内のレスポンスを可能としている。

ラスターデータである同時観測画像や背景画像は Linux のファイルシステムで管理している。同時観測画像は jpeg フォーマットであり座標情報を持たないためそのままでは MapServer で扱うことができない。そこで緯度・経度を格納したワールドファイル（拡張子が jgw²¹⁾）を付随させている。背景画像は geotiff フォーマットであり、ファイル中には緯度・経度が含まれている。そのため MapServer で直接取り扱える。

4. 現システムの課題および今後の開発の方向性

「月光」は SP 観測データを容易に閲覧することを可能とした。「月光」によって SP データへのアクセシビリティは飛躍的に向上したと考えている。一方で、データ閲覧に関して課題も残る。

4.1 アクセシビリティに関する課題

現「月光」ではデータのスクリーニングを行っておらず、明らかに利用に適さないデータも表示される。特に高緯度～極域では照明条件が安定せず、利用可能なデータの比率が極端に少なく、選別がされていないとユーザの負担が大きい。また、前述 (2.4) のとおり「月光」ではステレオ投影の地図を導入していないため、極域のデータ閲覧に難がある。これらは今後の課題として挙げられる。

4.2 今後の開発の方向性

ところでユーザにとってデータ取得は手段であり、関心ごとには月面表層の状態を理解することにある。そこで、近い将来のうちに「直感的な知識発見」が可能なシステムへ発展させていきたい。そのために次に示す機能実装を計画している。

1. SP 分析に必要な関連データを追加する。
2. 全球域の SP データを用いた分析結果を背景画像として追加する。

3. 局所域での解析機能を実装する。

SP 分析に必要な関連データについては、例えば最新の月全球高度データなどを考えている。全球域の SP データを用いた分析結果については例えば Hayashi Yuuki ら⁷⁾による修正ガウシアンモデル²²⁾を使用した鉱物情報抽出方法を用い、鉱物マップを作成し、背景画像として搭載したいと計画している。局所域での解析機能については杉本ら²³⁾が「月光」をベースに用い、試験的に解析機能の実装を行っている。現時点においては、研究開発段階にある。これらの機能はユーザの研究活動を支援する位置づけにあり、新しい知識発見に向けた環境を提供していきたい。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 23740342 および 25287114 の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 宇宙航空研究開発機構. 月周回衛星「かぐや (SELENE)」 - 観測ミッション - TC,MI,SP. http://www.kaguya.jaxa.jp/ja/equipment/tc_j.htm (2014年5月1日アクセス) .
- 2) Matsunaga T., M. Ohtake, J. Haruyama, Y. Ogawa, R. Nakamura, Y. Yokota, T. Morota, C. Honda, M. Torii, M. Abe, T. Nimura, T. Hiroi, T. Arai, K. Saiki, H. Takeda, N. Hirata, S. Kodama, T. Sugihara, H. Demura, N. Asada, J. Terazono, and H. Otake. Discoveries on the lithology of lunar crater central peaks by selene spectral profiler. *Geophysical Research Letters*, Vol. 35, No. 23, 2008. DOI:10.1029/2008GL035868.
- 3) National Aeronautics and Space Administration. Welcome to the Planetary Data System. <https://pds.jpl.nasa.gov/> (2014年5月1日アクセス) .
- 4) 山本幸生. 日本の月惑星探査と科学データアーカイブ (第1回 PDS と日本の現状). *PLAIN News*, No. 188, 2009.
- 5) 寺菌淳也, 中村良介, 児玉信介, 山本直孝, 平田成, 小川佳子, 出村裕英. 月・惑星探査データ表示・解析システム「WISE-CAPS」. 宇宙航空研究開発機構研究開発報告, 宇宙科学情報解析論文誌, Vol. 2, pp. 89–102, 2013.
- 6) 三菱スペースソフトウェア. LISM Data Viewer (beta version). http://www.mss.co.jp/technology/LISM_Data_Viewer_Download_E.htm (2014年5月1日アクセス) .
- 7) Hayashi Yuuki, Y. Ogawa, T. Matsunaga, R. Nakamura, Y. Yokota, S. Yamamoto, T. Hiroi, M. Ohtake, Yohei Hayashi, J. Haruyama, and J. Terazono. Development of new analysis tool for the data from Spectral Profiler onboard Kaguya/SELENE based on the Modified Gaussian Model(MGM). In *Proc. of ISAS Lunar and Planet. Sympo. 46th*, 2013.
- 8) EXELIS. IDL Software - Data Visualization Software | Exelis VIS. <http://www.exelisvis.com/ProductsServices/IDL.aspx> (2014年5月1日アクセス) .
- 9) Ohtake M., T. Matsunaga, J. Haruyama, Y. Yokota, T. Morota, C. Honda, Y. Ogawa, M. Torii, H., Miyamoto, T. Arai, N. Hirata, A. Iwasaki, R. Nakamura, T. Hiroi, T. Sugihara, H. Takeda, H. Otake, C. M. Pieters, K. Saiki, K. Kitazato, M. Abe, N. Asada, H. Demura, Y. Yamaguchi, S. Sasaki, S. Kodama, J. Terazono, M. Shirao, A. Yamaji, S. Minami, H. Akiyama, and J.L. Josset. The global distribution of pure anorthosite on the moon. *Nature*, Vol. 461, No. 7261, pp. 236–240, 2009. DOI: 10.1038/nature08317.
- 10) United States Geological Survey. Target: The moon, gazetteer of planetary nomenclature. <http://planetarynames.wr.usgs.gov/Page/MOON/target> (2014年5月1日アクセス) .
- 11) Losiak A., T. Kohout, K. O'Sullivan, K. Thaisen, and S. Weider. Lunar Impact Crater Database (2011), LPI Lunar Exploration Intern Program (2009), 2009. Revised in 2011 by T. Öhman. http://www.lpi.usra.edu/lunar/surface/Lunar_Impact_Crater_Database_v24May2011.xls (2014年5月1日アクセス) .
- 12) Losiak A., D.E. Wilhelms, C.J. Byrne, K.G. Thaisen, S.Z. Weider, T. Kohout, K. O'Sullivan, and D.A. Kring. A new lunar impact crater database. In *Lunar and Planetary Science Conference*, Vol. 40, p. 1532, 2009.
- 13) 宇宙航空研究開発機構. かぐや (SELENE) データアーカイブ. <https://12db.selene.darts.isas.jaxa.jp/> (2014年5月1日アクセス) .
- 14) Yamamoto S., T. Matsunaga, Y. Ogawa, R. Nakamura, Y. Yokota, M. Ohtake, J. Haruyama, T. Morota, C. Honda, T. Hiroi, and S. Kodama. Calibration of NIR 2 of Spectral Profiler Onboard Kaguya/SELENE. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 52, pp. 6882–6897, 2014.
- 15) United States Geological Survey. Astrogeology WMS Map Layers. <http://astrowebmaps.wr.usgs.gov/webmapatlas/Layers/maps.html> (2014年5月1日アクセス) .
- 16) Open Geospatial Consortium. Web Map Service. <http://www.opengeospatial.org/standards/wms> (2014年5月1日アクセス) .
- 17) The OpenLayers Dev Team. OpenLayers: Home. <http://openlayers.org/> (2014年5月1日アクセス) .
- 18) Dygraphs developer team. dygraphs. <http://dygraphs.com/> (2014年5月1日アクセス) .

- 19) University of Minnesota. Welcome to MapServer: open source web mapping. <http://mapserver.org/> (2014年5月1日アクセス) .
- 20) PostGIS Project Steering Committee, PSC. PostGIS — Spatial and Geographic Objects for PostgreSQL. <http://postgis.net/> (2014年5月1日アクセス) .
- 21) Environmental Systems Research Institute, Inc. 17489 - What is the format of the world file used for georeferencing images? <http://support.esri.com/en/knowledgebase/techarticles/detail/17489> (2014年5月1日アクセス) .
- 22) Jessica M. Sunshine, Carle M. Pieters, and Stephen F. Pratt. Deconvolution of mineral absorption bands: An improved approach. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)*, Vol. 95, No. B5, pp. 6955–6966, 1990.
- 23) 杉本紘平, 林洋平, 小川佳子, 平田成, 寺菌淳也, 出村裕英, 松永恒雄, 山本聡, 横田康弘, 大竹真紀子, 大嶽久志. かぐやスペクトルプロファイルデータを動的に解析するためのウェブアプリケーション開発. 2014年日本地球惑星科学連合大会, 5月.

DARTS/AKARI 全天マップ画像検索機能の開発

吉野彰^{*1}, 稲田久里子^{*1}, 松崎恵一^{*1}, 山内千里^{*2}

Development of Search Function for All-Sky Map Image Data on DARTS/AKARI

Akira Yoshino^{*1}, Kuriko Inada^{*1}, Keiichi Matsuzaki^{*1}, Chisato Yamauchi^{*2}

Abstract

DARTS (<http://darts.jaxa.jp/>) is a scientific data archive system which provides data of scientific satellites launched by JAXA, and is developed and maintained by Center for Science-satellite Operation and Data Archive (C-SODA) in ISAS/JAXA. We have developed a web interface with search function to provide 2 dimensional image data (all-sky map) obtained from all sky survey observation of infrared astronomy satellite “AKARI”.

The all-sky map is composed of many image files which are arranged like as tiles to cover whole celestial sphere and each image occupies a region about several square degrees. This search function is intended to return all image files in the region designated by a user, if they are overlapped with the region. To realize such a search, we adopt a method that each image is divided into a large number of small rectangular areas and then the center of each area is represented by an orthogonal coordinate system to register in the database. This method has the advantages that other external libraries to divide the celestial area such as HEALPix are not needed, and that both celestial poles is not treated as a singular point, and that high-speed search for arbitrary coordinate system can be obtained. To reduce the costs of development and maintenance, we apply the mechanism of AKARI catalogue search to this search function using PHP and PostgreSQL.

Keywords: Archive, Image, Infrared Astronomy, AKARI, DARTS

概要

DARTS (<http://darts.jaxa.jp/>) は、JAXA の様々な科学衛星のデータを研究用に公開するデータアーカイブシステムであり、宇宙科学研究所科学衛星運用・データ利用センター (C-SODA) が

^{*1} 宇宙科学研究所 (ISAS) 科学衛星運用・データ利用センター (C-SODA)

^{*1} みさと天文台, 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 宇宙科学研究所 (ISAS)

^{*1} Japan Aerospace Exploration Agency(JAXA) Institute of Space and Astronautical Science(ISAS) Center for Science-satellite Operation and Data Archive(C-SODA)

^{*1} Misato Observatory, Japan Aerospace Exploration Agency(JAXA) Institute of Space and Astronautical Science(ISAS)

運用している。我々は、赤外線天文衛星「あかり」の全天サーベイ観測によって得られた2次元画像（全天マップ）を公開するための検索機能付きウェブインターフェースを開発している。

全天マップは、多数の画像ファイルがタイル状に並んで全天球面をカバーするように構成されており、それぞれの画像は数度平方程度の天域を占めている。本検索機能において、ユーザーに指定された領域を一部でも含む画像ファイルは全て検索結果として返されるものとする。そのような検索を実現するため、各画像内を多数の小さな矩形領域に分割して各領域の中心点を直交座標系で表し、その座標値をデータベースに登録するという方法が採用される。この方法は、HEALPixのような外部の天球分割ライブラリが不要で、天の両極が特異点にならず、かつ任意の座標系を用いた高速検索が可能という利点を持つ。開発と維持管理のコストを低減させるため、我々はあかりカタログ検索の仕組みを本検索機能に応用し、またPHPとPostgreSQLを用いることによって本機能を実装する。

1. はじめに

科学衛星運用・データ利用センター (C-SODA: Center for Science-satellite Operation and Data Archive) (<http://c-soda.isas.jaxa.jp/>) は、日本の科学衛星の運用から観測データの保存と公開までを業務とする、宇宙航空研究開発機構 (JAXA: Japan Aerospace Exploration Agency)/宇宙科学研究所 (ISAS: Institute of Space and Astronautical Science) に属する一組織である。DARTS (Data ARchives and Transmission System) (<http://darts.jaxa.jp/>) は、そのC-SODAによって開発・運用されている、観測データを保存しインターネットを通じて公開するデータアーカイブシステムである。

赤外線天文衛星「あかり」は、“ASTRO-F”とも呼ばれ、ISAS/JAXAの“ASTRO-Fプロジェクトチーム”によって開発から観測運用まで行われた日本の科学衛星である (Murakami 2007)。「あかり」には遠赤外線観測装置 FIS (Far-Infrared Surveyor) (Kawada et al. 2007) と近・中間赤外線観測装置 IRC (InfraRed Camera) (Onaka et al. 2007) が搭載され、全天サーベイ観測を行った。

“あかり全天サーベイマップ画像データ (AKARI All-Sky Survey Map Image Data)” は、その「あかり」の全天サーベイ観測で得たスキャンデータに様々な画像処理を施して得られた赤外線全天イメージである (Ishihara et al. 2009, Doi et al. 2009)。本論文では以後それを総称として単に“全天マップ”と呼ぶ。全天マップは後述のように多数のファイルで構成されており、そのうちの1つまたは複数のファイルのことを、以後マップ画像と呼ぶ。また、FISによる観測データを処理して作られた全天マップはFIS全天マップと呼び、IRCによるそれはIRC全天マップと呼ぶことにする。図1はそのIRC全天マップのうち $9\mu\text{m}$ についての全体図を表す。

我々は、あかりプロジェクトチームからその全天マップを引き取り、DARTS上で検索機能付きで公開することを予定している。この機能を“AKARI-DAS (AKARI all-sky survey map image Data Archive Server)”と呼ぶことにする。これは、先に公開された“あかり全天点源天体カタログ Ver.1” (<http://www.ir.isas.jaxa.jp/AKARI/Observation/PSC/Public/>) 用の検索機能“AKARI-CAS (AKARI Catalog Archive Server)” (Yamauchi et al. 2011) と対になる名称である。

カタログ検索CASと画像データ検索DASの命名は、可視光全天サーベイSDSS (Sloan Digital Sky Survey) のデータリリース7のアーカイブ (<http://www.sdss.org/dr7/>) (Abazajian et al. 2009) を参考にしている。SDSSのCASでは膨大な観測データが細かく分類されてデータベース

のテーブルに収録されている。そのテーブル、ビュー（1つまたは複数のテーブルを用いて、いくつかのカラムを抜き出して作成される、二次的なテーブル）、そして内部計算用の関数の定義は外部に公開されており、ユーザーはそれらを組み合わせてSQL文を作成し入力することで、検索条件を自由に与えて検索結果を得ることができる。これは、データベース内部で計算を完結させることができ、Web ページ側ではその計算結果を表示するだけにすることで高速検索（処理時間の短縮）が可能になり、かつどのような計算によって検索結果が得られたかが明確になる、優れた方法である。我々はそのSDSSのCASの基本概念を踏襲してAKARI-CASを開発した。AKARI-CASのユーザー I/F（インターフェース）を図2に示す。

我々はAKARI-DASを開発するに当たり、検索範囲に一部でも含まれるマップ画像をすべて返す検索の仕組みと、ユーザーが簡単に操作できる検索 I/F を、AKARI-CAS の資産を生かして低開発コストで実現させ、かつ今後長期間に渡って維持させることを目標に設定した。本論文はそれらの目標に関わる課題とその解決法を提示することを目的とする。

本論文は以下の章で構成される。次の第2章では全天マップの概要を述べる。第3章ではユーザー I/F に対する要求とその解決法を検討する。第4章では開発と維持管理のコストに対する要求とその解決法を検討する。第5章では内部処理に対する要求とその解決法を検討する。第6章では今後の開発予定を述べる。第7章では本開発のまとめを述べる。

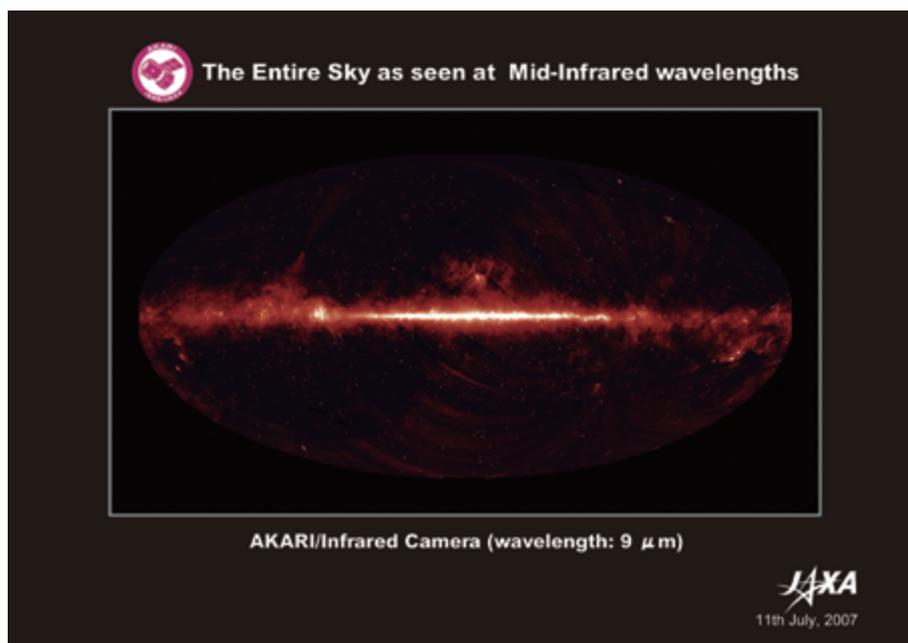


図 1: IRC 9 μ m 全天マップ (<http://www.ir.isas.jaxa.jp/AKARI/Outreach/results/>)。これは広報用に作成された画像であり、本論文の対象とする FITS 形式のファイルではない。

2. 全天マップの概要

全天サーベイの観測生データはあかり衛星の軌道によって帯状にスキャンされた撮像データである。同じ天域は複数回数スキャンされている。それらを重ね合わせ、様々な処理により検出器ノイ

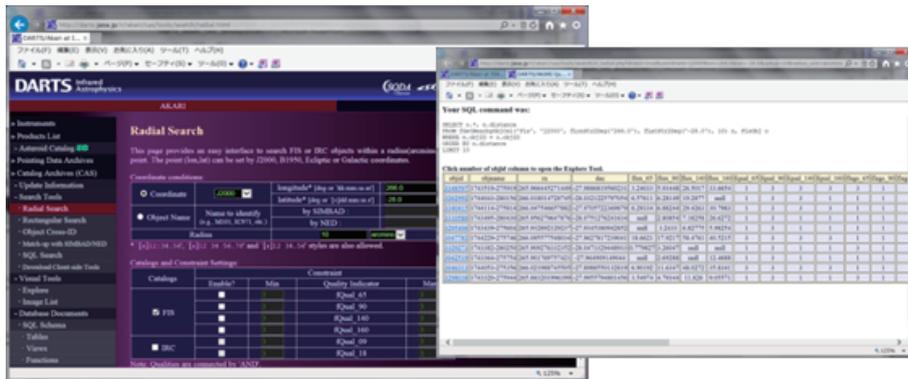


図 2: AKARI-CAS の Web I/F (<http://darts.jaxa.jp/ir/akari/cas.html>)。左側が検索条件入力ページ (5 種類あるうちのの一つ), 右側が検索結果表示ページである。

ズや観測天体以外からのシグナルが出来る限り取り除かれ, 全天を多数の正方形領域で分割するように再編された高次処理済みの画像データが, 本論文で扱われる全天マップである。マップ画像のフォーマットは天文学分野で一般的に用いられる FITS 形式 (Wells, Greisen and Harten 1981) である。

本論文執筆時点ではまだ全天マップは外部に公開されていない。FIS 全天マップと IRC 全天マップは, それぞれ 2014 年度末と 2015 年度末までに処理と検証を終えて外部へ公開される予定である。IRC については S9W, L18W の 2 バンド, FIS については N60, WIDE-S, WIDE-L, N160 の 4 バンドの各々に対しマップが作られている。

本論文で扱われる全天マップは, ASTRO-F プロジェクトチーム (当時) が 2012 年 12 月にチーム内向けに限定公開した FIS 全天マップ (計 4 バンド) である。

分割された各画像は 288[pixel]×288[pixel] で 1.2[deg]×1.2[deg] をカバーし, 約 40000 枚という多数のファイルが 1.0[deg] 間隔でタイル状に並んで全天をカバーしている。天球面上で隣接する画像同士には黄道座標系の東西南北それぞれに 0.1[deg] ずつ重なりがある。各画像の天球上の位置は 2000 年分点の黄道座標系で示されている。

また, 全天マップ本体 (intensity map) の他に, 処理の途中で生成される 3 種類の画像データも, 品質評価用に公開され, あかりプロジェクトチーム作成のリリースノート (Doi et al. in preparation) によってそれぞれ以下のように定義されている。

- ・ intensity map ; sky-brightness image [MJy sr^{-1}].
- ・ sigma map ; standard deviation of the image data at each position.
- ・ Nscan map ; spatial scan numbers [times].
- ・ Nsamp map ; detector signal sample numbers at each position, weighted by Gaussian PSF.

上記のファイルは現在 DARTS の磁気ディスクの非公開領域に保管されており, チーム内公開版は今後も外部には公開されない。

外部公開版の全天マップについては, 今後まず DARTS の磁気ディスクの非公開領域に一時保管されたのち, 決められた外部公開日に, 外部から読み取り可能な領域へディレクトリごと移動されることで, それらのダウンロードが可能になる予定である。

3. ユーザー I/F に対する要求分析と解決法の検討

最も単純なユーザー I/F は、それらのファイルの入ったディレクトリにアクセスでき、ファイルのダウンロードが可能であるような静的 Web ページ (HTML ファイル) である。またそのディレクトリの上に、全天マップの説明書 (リリースノート; PDF ファイル) と、各ファイル名と対応する中心位置 (赤道座標) を一覧にしたリスト (テキストファイル) を置き、それらもダウンロード可とする。それにより、非常に長期 (数十年以上) に渡って最低限必要な情報が保存され、かつファイル名や中心位置による簡単な検索も文字列一致によって可能である。DARTS は Web を通じて長期的に科学データを配布する、主に研究用のデータアーカイブと位置づけられているため、そのような静的ページとリリースノートとファイルリストも、ユーザーに提供することを予定している。

一方、ユーザーが Web ブラウザで複数の条件で対象を絞り込んで、該当するファイルだけダウンロードできる仕組み (検索 I/F) があれば、ユーザーは選別の手間を短縮できて便利であり、サーバにとってもダウンロードにかかる負荷が軽くて済む。そのようなサービスが出来る限り維持されることで、研究の基礎資料として全天マップの長期に渡る利用を促進し、多くの研究成果を生み出すことにもなると期待される。

ユーザーが Web ページで何か検索条件を入力すると該当する検索結果が出力されるという I/F は、各マップ画像に対応する ID (識別番号) の中から、ある条件に該当する ID だけを抜き出すという仕組みで実現できる。この章では、そのユーザー I/F に対する要求を分析し、その実装法を検討し、設計を行う。またそれに基づいて試作されたものの仕様を述べる。

3.1. 想定ユーザーと基本設計

我々は、Web と赤外線天文学についての一定の知識を持つ研究者を主要ユーザーに設定し、そのようなユーザー向けに最適化したシンプルなデザインで実装することとする。ここで、純粋に研究目的で利用するユーザーからは、ビジュアル的に凝ったユーザー I/F は必ずしも必要とされず、それよりもシンプルで実用的なもの、すなわち入力項目が少なく、出力結果も一目で分かり、短時間でファイルを取得できることが優先されると考えられる。

天文学研究用の検索 I/F では、Web ページ上で天球面上の位置や範囲などの検索条件を入力すると、検索結果が画面に表示され、目的の画像をダウンロードできるというフローが広く採用されている。我々は AKARI-DAS の基本設計についてもそのフローを採用する。それにより、AKARI-DAS のフローは図 3 のようになる。ユーザーは「検索条件入力ページ」で必要な値を手入力し、GET メソッドで「検索結果出力ページ」にその入力値が送信され、検索結果が表示されたら、ユーザーはその中から必要なファイルをダウンロードする。

3.2. 検索条件と出力形式の指定方法の設計

想定ユーザーにとって理解しやすく、少ない操作で、過不足のない検索条件を与えられることが要求される。

検索条件を入力するページにおいて、ユーザーに最低限入力してもらわなければならない検索条件は天球面上の位置である。その位置は座標または天体名によって特定されることができる。想定ユーザーは、座標の知識を持ち、またその天体名は別途資料 (天体カタログ) を参照することで得られることを知っているものとする。従って、位置を特定するために、座標値か天体名を入力するような入力欄

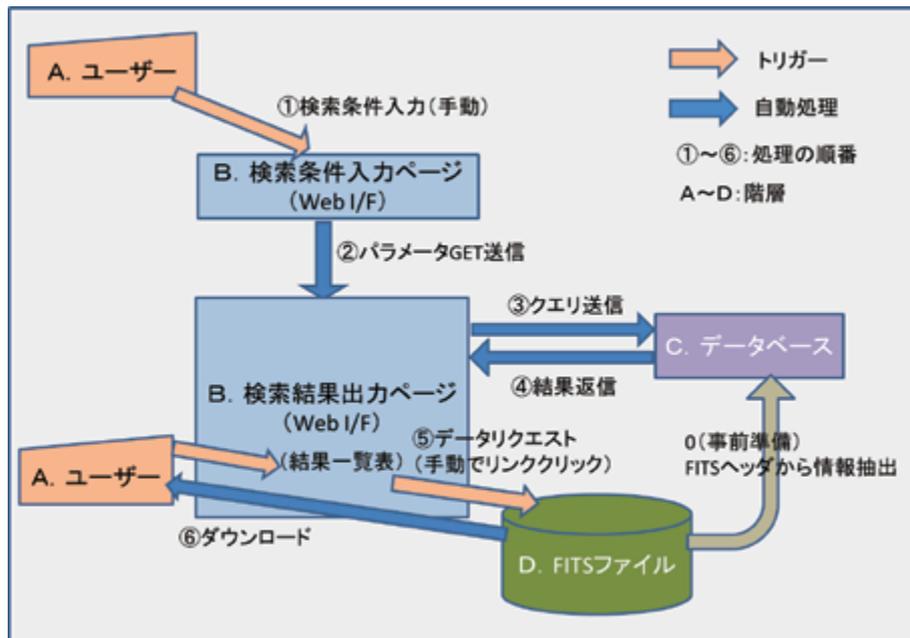


図 3: 処理の流れの概略図.

が必要である。そして天体名そのものは位置情報を持っていないため、天体名が入力されたときはそれに対応する座標値が参照されるような内部の仕組みが必要である。

また天文学で用いられる座標系は複数存在し、一般的に赤道座標系、黄道座標系、銀河座標系のうちのどれかで表される。大部分の天体カタログでは赤道座標系が用いられるが、ある種の天体や研究分野では黄道座標系か銀河座標系も用いられる。現在では 2000 年分点の座標値が広く使われているが、古いカタログには 1950 年分点の値が載っているため、赤道座標系については両方使えるほうが便利である。従って、上記の 4 種類 (赤道座標系 2000 年分点, 赤道座標系 1950 年分点, 黄道座標系 2000 年分点, 銀河座標系 2000 年分点) のどれを用いても検索ができることが要求される。

また検索範囲 (天球面上のある領域) の指定方法については、ユーザーにとって入力項目が少なくて済み、検索結果が分かりやすいものであるように、単純な形状を採用するほうが良い。一般に、点源か点源に近い領域を表すには、その点源を中心とする一定の半径を持った円形が良い。また広く拡散した天体を含む領域を表すには、その拡散範囲を指定しやすいように図 4 のようにある球面座標系の四隅の点で張られる矩形が良い。従って検索範囲の形状として、円形と矩形の 2 つがあれば必要十分であると考えた。円形検索の時は、円の中心の座標値または天体名と、円の半径の値を入力することで検索範囲が決まる。矩形検索の時は、対角の 2 つの隅の座標値を入力することで検索範囲が決まる。

ユーザーは通常、検索結果を Web ブラウザで表示し、その画面でファイルをダウンロードすると想定される。そのための出力形式 (フォーマット) は HTML である。検索結果のリスト自体を保存するために、カンマ区切りのテキスト形式 (CSV) での結果出力が可能であると便利である。また VO (Virtual Observatory) との連携利用を試みるためには VO Table 形式で結果が出力されていると応用範囲が広がり便利である。そこで、ユーザーが HTML, CSV, VO Table の 3 通りの中から出力形式を選択できるようにする。

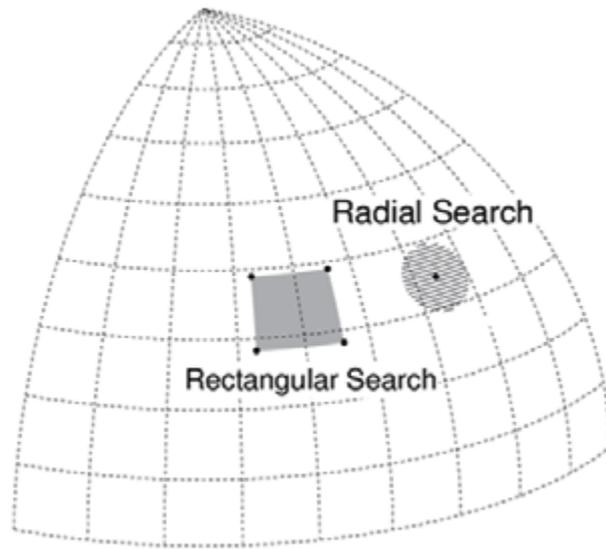


図 4: 天球面（の一部）と円検索（Radial Search）と矩形検索（Rectangular Search）それぞれの範囲。

3.3. 検索結果表示とファイル取得方法の設計

検索結果を表示するページにおいて、まずユーザーから最低限求められる情報は、条件に該当するマップ画像の一覧と、そのファイルをダウンロードできる仕組み（例えばファイルの URL へのリンク）である。その最低限の機能を備えた上で、そのファイルの閲覧からダウンロードまでの効率を向上させることが要求される。

FITS 形式のマップ画像を閲覧するには専用のソフトウェアが必要であるため、ユーザーがそのマップにどのようなものが写っているか確認するには、ダウンロードして自分のパソコンでそのファイルを開かなければならない。そのような手間を省けるように、ダウンロードの前におおまかにその画像を確認できると便利である。具体的には、各マップ画像に対応する早見画像（PNG 形式）をあらかじめ用意し、Web ブラウザの別画面で表示できるようにする。

また、少ない操作で一度に多数のファイルを取得できれば便利である。具体的には、結果一覧に表示された全てのマップ画像、またはその中からユーザーが自身の判断で選んだ複数のマップ画像を、一括でダウンロードできるようにする。

3.4. 実装されたユーザー I/F の仕様

上記の設計によって実装されたユーザー I/F の試作版の仕様を述べる。

3.4.1. 検索条件入力ページ

このページでは、ユーザーが以下のような検索条件を入力し、また出力形式を選択する。その後「SEARCH」ボタンを押すと次の検索結果出力ページへそれらの情報が送信され、結果が出力される。「RESET」ボタンを押すと与えられた条件が消去され、初期状態に戻る。図 5 は Web ブラウ

ザ上で表示されたこのページの試作版である。入力すべき項目はその種別により点線の枠で囲まれている。また値を入力する項目には入れるべき値の単位と範囲が示されており、入力ミスによるエラーを減らしている。

- 検索対象の選択

IRC の 2 バンド、FIS の 4 バンドの中から検索の対象とするものを、ユーザーがチェックボックスにより選択する。初期状態では全てにチェックが入っていて検索対象になっている。

- 検索エリアの選択

選択ボタンにより、1. 「Radial Search by Object (天体名と円の半径の指定による円検索)」か、2. 「Radial Search by Coordinate (中心座標と円の半径の指定による円検索)」か、3. 「Rectangular Search (矩形の両端の座標指定による矩形検索)」の 3 つの検索方法から 1 つを選択できるようにする。初期状態では 1. 「Radial Search by Object」が選択されている。

以下で座標系の選択が必要な場合、選択肢 (プルダウンメニュー) により、ユーザーは 4 種類の座標系 (赤道座標系 2000 年分点, 赤道座標系 1950 年分点, 黄道座標系 2000 年分点, 銀河座標系 2000 年分点) の中からどれか 1 つを選択する。初期状態では赤道座標系 2000 年分点を選択されている。

1. 「天体名と半径の指定による円検索」

ユーザーは、天体名と、円の半径の値を、それぞれ入力欄に入力する。その天体に対応する赤道座標値 (2000 年分点) が円の中心となる。天体名からその赤道座標への変換は、外部サーバのネームリゾルバ (天体名検索エンジン) を利用することで得られる。そのようなネームリゾルバとして、SIMBAD (<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>) と NED (<http://ned.ipac.caltech.edu/>) がある。選択ボタンにより、SIMBAD か NED のどちらかを選択できる。また、半径の単位は度 (degree) である。初期状態では天体名に “M42”, ネームリゾルバに “SIMBAD”, 半径に “1” が入っている。

2. 「座標系選択と中心座標と半径の指定による円検索」

ユーザーは選択肢から座標系を選び、その座標系での中心座標の値 (経度, 緯度) と、円の半径の値を、それぞれ入力欄に入力する。初期状態では座標値は入っていないが、半径に “1” (degree) が入っている。

3. 「座標系選択と矩形の両端の座標指定による矩形検索」

ユーザーは選択肢から座標系を選び、その座標系による矩形の座標値 (経度, 緯度) を入力する。実際には、四隅のうち対角の 2 か所の位置が与えられれば矩形を張ることができるので、入力すべき座標値は経度の最小値と最大値、そして緯度の最小値と最大値の合計 4 つである。初期状態では値は入っていない。

- 検索結果出力形式の選択

選択ボタンにより、検索結果出力形式として、HTML, CSV, VO Table の 3 通りの中から 1 つを選択する。それらのうち HTML 出力が選択される場合が最も多いと思われるので、レスポンスの悪化を防ぐために、HTML 選択時の最大出力数は、FIS と IRC それぞれに対し 1000 に設定してある。初期状態ではフォーマットが HTML に、また出力上限数が 100 に選択されている。出力上限数は 10, 50, 100, 500, 1000 から選択可能である。フォーマットに CSV または VO Table が選択された場合には出力数の上限はない。

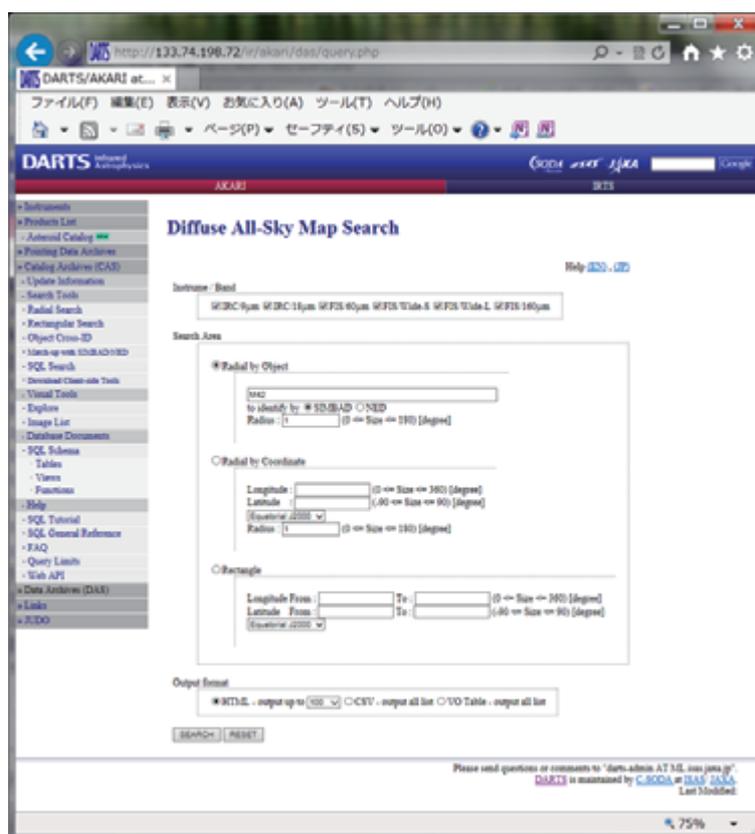


図 5: 検索条件入力ページ (試作版)。

3.4.2. 検索結果出力ページ

このページでは、検索条件に該当するマップ画像の一覧が表示される。また、ユーザーは、その一覧の中から取得したいファイルを選択しダウンロードできる。図 6 は Web ブラウザ上で表示されたこのページの試作版である。フォーマットに CSV または VO Table が選択された場合には該当するマップ画像とその参照座標の一覧のみが出力される。

- 入力された検索条件の再表示

ユーザーが入力した値や選択肢が、検索条件入力ページに戻らなくても確認できるようにするために、ここで再び表示される。また、選択されたネームリゾルバによる、天体名から赤道座標系 2000 年分点の座標値への変換結果が表示される。

- ヒットした件数とそのうちの表示件数

DISPLAY : 32 / HITS : 32 というように、表示件数/検索条件に合致した件数が表示される。

- ダウンロード対象の選択

第 2 章で述べたように、全天マップには天体の表面輝度を表すマップ画像本体 (intensity map) の他に、3 種類の品質評価ファイル (sigma map, Nscan map, Nsamp map) がある。選択ボタン

により、それら品質評価ファイルもダウンロードするかどうかをユーザーが選択できる。初期状態では品質評価ファイルは選択されていない (intensity map のみダウンロード対象とする)。

さらに、「WGET SCRIPT」ボタンを押すことによって、選択された種別の、(チェックボックスによって) 選択されたマップ画像に対し、wget コマンドを用いて一括ダウンロードするためのスクリプトが生成され、ユーザーがそのスクリプトをダウンロードできる。

- 該当するマップ画像一覧表

指定された座標系で、そのマップ画像の参照点 (ほぼ画像中心) の経度と緯度それぞれの昇順で、該当するマップ画像の一覧が表示される。また、円検索の場合は、「DISTANCE」カラムで、検索中心からそのマップ画像の参照点までの距離が角度 (degree) で表示される。ユーザーはその一覧表で、「SELECT」のチェックボックスにチェックを入れるか外すことで、上記の一括ダウンロードの対象とするかどうかの選択ができる。初期状態では全てのファイルにチェックが入っている。また、全チェックボックスに一括でチェックを入れるか外すこともできる。ユーザーは Web ブラウザ上でこれらの操作を何度でもやり直すことができる。

- 早見画像と FITS ファイルへのリンク

一覧表の中で、各マップ画像について、FITS 形式のファイルへのリンク (DL ; ダウンロード) と、PNG 形式の早見画像 (QL ; Quick Look) へのリンクが生成される。早見画像は、各 FITS ファイルから画像変換によって事前に作成され保存されているものである。“QL” をクリックすると、Web ブラウザの別ウィンドウにその早見画像が表示され、ユーザーはそれに対応する FITS ファイルをダウンロードするかどうかの参考にすることができる。“DL” をクリックすると、FITS ファイルがユーザーのパソコンへダウンロードされる。

これらの工夫によって、ユーザーが少ない操作で必要なファイルだけを選んで取得できるようにした。

4. 開発と維持管理のコストに対する要求と解決法の検討

この章では、開発と維持管理のコストに対する要求を分析し、その解決法を検討する。またその結果選択されたソフトウェアを述べる。

4.1. 要求分析

本システムの開発にかかるコストは低いほうが良い。また DARTS に組み込まれるために、本システムの完成後は長期的に低コストで安定運用可能なことが要求される。そこで、ある仕組みを実装するために複数の方法がある場合は、より単純で明解な方法を選ぶこととする。

4.2. コーディングの基本方針

一般にソフトウェアではバグや基盤ソフトのバージョンアップに伴う不具合がしばしば発生する。もし開発の基幹部分を外注したりブラックボックス部分が多いと、そのような不具合が発生した際

Used search conditions

Instrum: Broad
 IRC Nam, IRC 11am, FIS WideM, FIS Wide-S, FIS Wide-L, FIS 200um

Search Area
 Object: M42 => Coordinate: (003.8221, -01.3611) [Equatorial J2000] identified by centroid
 Radius: 1 [deg]

Output list up to: 100

IRC
 DISPLAY: 0 / HITS: 0

FIS
 DISPLAY: 32 / HITS: 32

Download [Map Files Query Files] => [GO] [Script]

Checked All "SELECT" ON OFF

No.	SELECT	QI	DL	FITS_NAME	BAND	RAC (quatorial J2000)	DEC (quatorial J2000)	DISTANCE (deg.)
1	<input type="checkbox"/>	QI	DL	IR01.55_b-20.00_ac1_idag_N340_fitsimage.fits	N340	82.154543	-4.780542	86.323022
2	<input type="checkbox"/>	QI	DL	IR01.73_b-20.00_ac1_idag_N340_fitsimage.fits	N340	82.732237	-5.780504	67.712173
3	<input type="checkbox"/>	QI	DL	IR01.98_b-20.00_ac1_idag_N340_fitsimage.fits	N340	83.004680	-6.754883	94.923746
4	<input type="checkbox"/>	QI	DL	IR03.48_b-24.00_ac1_idag_N340_fitsimage.fits	N340	83.104483	-4.721560	43.823480
5	<input type="checkbox"/>	QI	DL	IR03.89_b-20.00_ac1_idag_N340_fitsimage.fits	N340	83.796840	-5.724198	19.797212
6	<input type="checkbox"/>	QI	DL	IR03.14_b-20.00_ac1_idag_N340_fitsimage.fits	N340	84.020217	-6.703027	79.598576
7	<input type="checkbox"/>	QI	DL	IR03.82_b-20.00_ac1_idag_N340_fitsimage.fits	N340	84.128705	-4.678007	19.484429
8	<input type="checkbox"/>	QI	DL	IR04.04_b-20.00_ac1_idag_N340_fitsimage.fits	N340	84.760705	-5.669432	18.481802
9	<input type="checkbox"/>	QI	DL	IR01.23_b-20.00_ac1_idag_N300_fitsimage.fits	N300	82.154543	-4.780542	86.323022
10	<input type="checkbox"/>	QI	DL	IR01.73_b-20.00_ac1_idag_N300_fitsimage.fits	N300	82.732237	-5.780504	67.712173
11	<input type="checkbox"/>	QI	DL	IR01.98_b-20.00_ac1_idag_N300_fitsimage.fits	N300	83.004680	-6.754883	94.923746

図 6: 検索結果出力ページ (試作版). 注意: デバッグ中のため, この図に見える「DISTANCE」の値は正しくない.

に, 多大な別コストをかけて修復するか, そのコストをかけられず運用停止のやむなきに至るであろうことが予想される. そこで, 低コストでの長期運用の要求に応えるため, 設計書からコーディングまで一貫して内製開発とし, ソースコードに必要十分なコメントを挿入することで, 可読性を高くする. すなわち開発者本人以外の人でもそのソースの理解を容易にすることで解決を図る.

しかし一方で, 全てのソースコードを内製とするのは開発コストが高くなる. そこで, 天文学研究用に実績があり, 安定動作することが確認されていれば, 既存の内部または外部のツールを利用することで開発コストを下げることにする. 例えば 3.4.1 章で述べられたように, 我々はネームリゾルブ機能については外部サーバの SIMBAD と NED を利用する. これらは長年の実績を持つ信頼できるサーバである. どちらも, その URL をユーザー I/F (Web ページ) のソースに組み込み, ユーザーに入力された天体名をその URL の中に代入すれば座標値を得られるため, 実装が簡単である.

AKARI-DAS の基本システムは DB 層と Web 層に大別される (図 3 参照). カタログ検索 AKARI-CAS では FITS ファイルへのアクセスとダウンロードはないが, それ以外は AKARI-DAS と共通である. 従って, 以下に述べるように, その DB 層の基本構成と Web 層の主要ロジックをあかりカタログ検索機能 AKARI-CAS を見本にしてコーディングすることができる. 完成後は, カタログ検索とマップ画像検索の両者を同様に管理できるため, 結果的にあかりデータアーカイブ全体の維持コストも下げることができる.

4.3. ソフトウェアの選択

- データベース (DB) ソフトウェアの選択

AKARI-CAS では DB ソフトウェアとして PostgreSQL (フリーソフトウェア) が採用された. PostgreSQL は他の DB ソフトウェアに比べて対応している数学関数の種類が多く, それらを組み

合わせて開発者が（DB 内計算用の）内部組み込み関数（ストアド関数；stored function）を作成しやすい利点がある。そこで、AKARI-DAS の DB にも、AKARI-CAS と同様に PostgreSQL を採用する。AKARI-CAS の DB には単位変換や座標変換、また角距離計算を行うためのストアド関数が豊富に用意されており、それらは AKARI-DAS に流用可能である。そして、後述する直交座標値 (X, Y, Z) の算出と、それによる検索の SQL 文についても、AKARI-CAS で使われているものの多くが流用可能である。

- Web ページ動作環境の選択

Web ページの動的な部分はサーバが動かすものとし、クライアント側の環境にできる限り依存させないものとする。すでに述べたように、検索条件入力ページに入力された検索条件のそれぞれの値は、GET メソッドにて検索結果ページへ送信され、それらの値が SQL 文に代入され、DB 接続と検索結果表示が実行される（図 3）。この方法はいわゆる HTML の「枯れた技術」で、今後も長期に渡り安定動作することが期待できる。ソフトウェアを呼び出し実行する部分は、AKARI-CAS と同様に PHP（フリーソフトウェア）を採用することにする。PHP はコンパイル不要で動作し、C 言語に近い書式で記述でき、可読性の高さに定評のある優れたスクリプト言語である。また PHP には PostgreSQL に接続するためのモジュールが標準で備わっている。我々はそれを用いることで、比較的単純なコーディングで検索 I/F を構築可能である。

これらの検討により、我々は表 1 の通りのソフトウェアを選択した。AKARI-DAS の動的部分は、DARTS のサーバ（OS：Linux x86 64bit）上でこれらだけを用いて構築できた。また、現在の主要なパソコンの OS と Web ブラウザのいずれに対しても問題なく動作し、要求を満たすことができた。今後これらのソフトウェアがバージョンアップされると、AKARI-DAS の動作に不具合が発生するリスクは存在する。しかしこれらのソフトウェアは現在非常に広く使われているため、同様の事例に対する修復方法の情報の入手は容易であり、かつ内製コードのため内部にて柔軟に修復が可能であると考えられる。

表 1: 使用ソフトウェア一覧

ソフトウェア名	バージョン	内容・用途
PHP	5.3	動作用スクリプト言語
PostgreSQL	8.4	データベース
Apache	2.2	Web サーバ

5. 内部処理に対する要求と解決法の検討

この章では、内部処理に対する要求を分析し、その解決法を検討する。またその結果採用される方法の詳細を述べる。

5.1. 要求分析

一般に、赤外線で観測される天体は比較的低温の恒星、惑星、ガス、ダストなどである。そのガスやダストは定まった形状を持たず、複数のマップ画像にまたがるように広く拡散していることも

ある。従って、そのような広がった天体を領域内に包含するマップ画像群を、取りこぼさずに取得することが、天文学研究にとって重要であると推測される。図7は一部天域のマップ画像と検索円を模式的に表したものである。もし検索範囲に全部収まるマップ画像だけを検索結果として返すとすると、広く拡散した天体の辺縁部が写っているマップ画像が振るい落とされてしまう恐れがある。またそのような仕様では、図7のような場合には該当なしになってしまう。

そこで、あるマップ画像の領域が検索範囲に一部でも重なっていればそのマップ画像は検索結果として返されることが要求される。すなわち、図7のような場合、検索円とそれぞれ一部が重なる4枚 (ID=2, 3, 5, 6) のマップ画像を返すような検索を実現する。このように広めにする検索結果から、ユーザーが自身の判断で画像を取捨選択するようにすれば、天文学研究上の要求を満たすには十分であると我々は考えた。以下に、そのような検索を実現するために必要な内部処理 (事前準備を含む) について検討する。

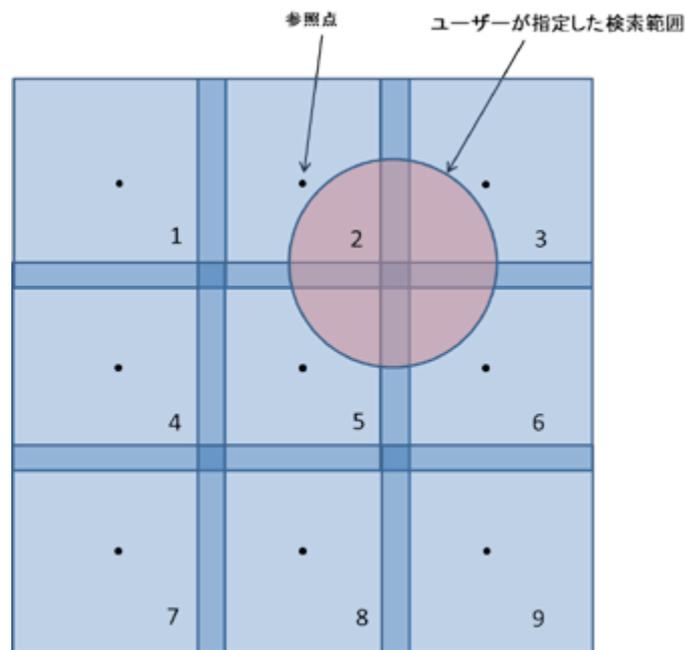


図7: 全天マップの一部と検索円の模式図. 青で示された、タイル状に並ぶ小さな正方形のそれぞれが1つのマップ画像を表し、黒い点は各マップ画像の参照点 (ここでは画像の中心とする) を表し、紫で示された円が検索範囲の円である。各マップには黄道座標系の東西南北方向それぞれに0.1度ずつ重なりがあり、その部分は濃い青で示されている。図中の番号 (1 から 9) は画像 ID とする。

5.2. 位置情報の取得

一般に、FITS ファイルのヘッダには、天球上のどこを撮像したものであるかが分かるように、以下の位置情報 (WCS: World Coordinates System) が書き込まれている。1. 座標系の名前 (例えば赤道座標系)。2. 元期 (例えば 2000.0 年分点)。3. 参照点と呼ばれるある 1 点の、画像上の座標 (ピクセル座標 (Xp, Yp))。4. その参照点の天球上の座標 (例えば赤道座標系であれば (赤

経, 赤緯)). 5. 天球面をその画像 (2次元平面) に投影する方法 (例えば画像中心を接点とするタンジェント投影).

参照点のピクセル座標と天球座標はそれぞれ (CRPIX1, CRPIX2), (CRVAL1, CRVAL2) という記号 (FITS キーワード) の値としてヘッダに入っている. 参照点は一般的にその画像の中心付近か原点である. そこで, 各マップ画像のヘッダから, そのファイルを示す ID とその参照点の座標値を読み出すことが, 画像検索を実現するための第一歩となる.

しかし 1 画像の位置情報が 1 点のみである場合, 画像の一部が検索条件の範囲内に重なっていたとしても, 当該画像の参照点が範囲外にあるために検索にかからないことがある (図 7 参照). そのため, 1 画像につき 1 点の位置情報を紐付けておくだけでは要求を満たすことはできない. そこで, 1 画像内を何らかの方法で細分化して多数の位置情報を得ておくことで, できる限り検索にかかる (検索範囲と画像の位置情報が重なる) ように改善することを考える.

具体的には, 天球側を分割するか画像側を分割するかのどちらかの方法が考えられる. 以下にそれぞれのメリットとデメリットを検討する.

5.2.1. 天球分割法

全天を一定の形状を持つ部分面に細かく分割し, 各部分面に何らかの方式で ID を振る. 分割の細かさを決めれば, 各部分面の中心点に対応する天球上の座標が決まる. 従って, それら部分面領域が, ある画像が張る天球面上の領域と重なるかどうか分かる. このようにして, 天球座標と天球の部分面中心点 ID と画像 ID の三者を対応させ, 検索することができる. これは天球分割法と呼ばれ, 1 画像の内部が多登録されることで, 1 画像 1 点登録に比べれば精度の良い検索が可能になる.

部分面の形状と ID の付け方には様々なやり方が考えられるが, 図 8 のような分割法による画像検索を実現する, HEALPix というソフトウェアが NASA から公開されている (<http://healpix.jpl.nasa.gov/>) (Górski et al. 2005). HEALPix はすでに多くの天文データアーカイブで導入実績があり, 無料で利用できる点が開発コストに対するメリットとなる.

ただし, HEALPix の API 仕様はたびたび変更されている (本論文執筆現在でバージョン 3.11). また現在の HEALPix は “Software for pixelization, hierarchical indexation, synthesis, analysis, and visualization of data on the sphere.” と記述されているように, 天球面上のデータに対し様々な解析や描画が行える複雑で多機能なソフトウェアへと発展している. しかし本システムの開発にはそのような多機能は必要なく, 導入後の維持管理に対しては複雑さはデメリットになる. もちろん, HEALPix の基本アルゴリズムは複雑ではないのでシステム全体の単純化のために自分で実装することもできるが, 天球上の緯度による場合分け演算が必要であり, 後述する格子点法のような単純明快さはない.

5.2.2. 格子点法

図 9 のように, 各マップ画像の内部を, X, Y 方向に沿って等面積の部分面に細かく分割し, 各部分面の中心点に何らかの方式で ID を振る. その中心点をここでは (格子状に並ぶので) 格子点と呼ぶ. 分割の細かさを決めれば, 画像内での各格子点の位置が決まり, 従って各格子点に対応する天球上の座標が決まる. このようにして, 格子点 ID とその座標値と元画像 ID の三者を対応させ, 検索することができる. この方法を格子点法と呼ぶことにする. 天球分割法と同様, 1 画像の内部が多登録されることで, 1 画像 1 点登録に比べれば精度の良い検索が可能になる.

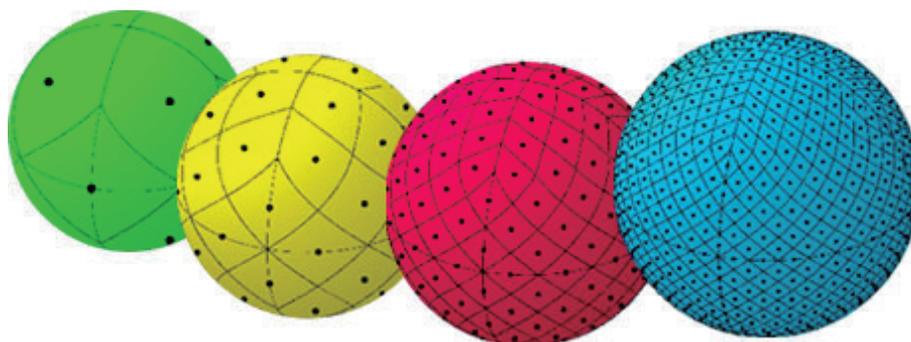


図 8: HEALPix による天球分割の模式図 (<http://healpix.jpl.nasa.gov/>)。右に行くほど細かく分割している。

格子点法の画像検索を実現するソフトウェアは特に公開されていない。従って格子点法を採用する場合、ソフトウェアのコーディングから始めなければならないのが開発コストに対するデメリットとなる。

しかし、マップ画像の FITS ヘッダの WCS を読み込んで、格子点の座標値を求めるのは、既存の FITS エディタソフト（例えば CFITSIO (<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/fitsio/fitsio.html>) (Pence 1999) や SFITSIO (<http://www.ir.isas.jaxa.jp/~cyamauch/sli/index.ni.html>)) を用いて簡単にできる。特に SFITSIO では、日本語のマニュアルがあり、 X, Y 方向それぞれの分割数を入力することで FITS 画像を分割できるサンプルコードが用意されているため、それを用いることで格子点法のソフトウェアの開発コストを低く抑えることができる。

また、あらかじめ格子点 ID とその座標値と元画像 ID を並べた一覧表を作成しておけば、その一覧表は言わば全天に一定間隔で天体が並んでいるような点源天体カタログと同じである。従って、既存のカタログ検索 AKARI-CAS の仕組みをそのまま流用して画像検索を実現できる。これは AKARI-CAS の資源を持つ我々にとって大きなメリットである。また、格子点 ID を元画像 ID に紐付けして与えるようにすれば、HEALPix の非常に抽象的な ID に比べて具体的に分かりやすく、その作成や今後の管理が容易である。

5.2.3. 仕様検討

ここでは性能として、誤差（精度）と処理速度について比較する。

まず誤差について検討する。天球分割法と格子点法の違いは、根本的には天球面側を分割するか、それとも画像側を分割するかというだけである。いずれにしても面を点、すなわち離散的な位置情報で代用している。そして 1 画像内部の多くの点の位置情報を登録することで位置情報の隙間を小さくし、検索範囲と一部でも重なっている画像であればできる限り検索にかかるようにしようという発想は同じである。当然、天球分割法か格子点法のどちらを用いても、分割が細かいほど誤差は小さくなる。誤差の最大値は、それら各部分面の中心点の間の距離となる。どちらの方法でも、何らかの手段で範囲を追加して、検索の際にその中心点間距離をカバーすれば検索の取りこぼしを防ぐことはできる。ここではこの追加範囲をマージンと呼ぶ。ただし中心点間距離は方向によって異なるため、そのマージンがその中心点間距離よりも長いと余分な画像も検索にかかることになる一方、短いと取得したい画像に範囲が届かない。すなわち円や矩形のような単純な形状の範囲で誤

差をゼロにすることは原理的にできず、どちらの方法でも、マージンをどのように与えても、その中心点間距離に比べて精度が大きく改善するわけではない。

本開発では 5.1 章の要求に従い、取りこぼしを防ぐことを優先する。我々は後述するように格子点法を採用し、検討の結果必要十分な精度として 10 分角（約 0.17 度）間隔、すなわち 1 度平方当たり 36 個の格子点を登録することとする。そして図 9 のように残った隙間の最大幅（格子点の対角距離の半分；約 0.12 度）だけマージンを広げる内部処理を追加することで取りこぼしを防ぐ。

天球上の角度で表された隣接格子点間隔は、実際には平面への投影法や歪曲により、厳密には一つの画像の内部でも場所によってわずかに異なるが、簡単化のため、そのマージンを隣接するそれぞれの格子点間に対して決めず、定数値（最大値）に設定する。従って、もしそのマージン値よりも小さな距離に隣接マップ画像の格子点が存在すれば、その隣接画像にわずかに届かないような検索範囲がユーザーによって指定された場合、マージンのためにその隣接画像も検索にかかることになる。もっとも、実際には第 2 章で述べたように、本検索の対象の FIS 全天マップについて言えば、あるマップ画像はその東西南北に隣接するマップ画像とそれぞれ 0.1 度ずつ重なりを持っている。従って上記の検索条件の場合に、その隣接画像も検索にかかるのは検索結果として正しく、これ以上の精度は必要ない。このような仕様で実装されていることはユーザー向けのヘルプページに明記したうえで、その隣接画像の検索結果への混入を許容することとする。

次に処理速度について検討する。天球分割法か格子点法のどちらでも、分割を細かくすればするほどデータ数が増大し、検索速度は遅くなる。HEALPix のような外部ソフトウェアを使う場合は、DB へ問い合わせる前に、そのソフトウェアで、ある範囲に含まれる天球座標から対応する部分面 ID を割り出すという準備計算（オーバーヘッド）が必要になる。一方、格子点法の場合、格子点座標の一覧表がテーブルに登録され、インデックスが作成されていれば、準備計算なしですぐに SQL ステートメントで検索が可能である。従って、原理的には、双方の手法においてインデックス検索が同じ速度であるという条件下においては、HEALPix を用いるよりも準備計算のオーバーヘッドがない分高速である。1 平方度当たり 36 点で分割すると、全天 4 万平方度に対し必要な格子点は 144 万点であり、マップ画像同士に重なりがあるため実際には約 150 万点を DB のテーブルに登録することになる。現在の環境において、DB はこの程度のレコード数に対しては非常に高速である（5.5 章参照）。ただし実際の処理速度は、サーバやクライアントやネットの環境に大きく依存するため、外部ソフトウェアによる天球分割法と内製の格子点法のどちらでも実用上問題ない。

以上の検討で、天球分割法と格子点法のどちらでも性能（パフォーマンス）としての目立った優劣は特に存在しないことが分かった。従って本開発では長期的な維持管理に要するコストで判断し、格子点法を採用することとした。

5.3. 直交座標系の使用

取りこぼしのない検索を実現するうえでもう一つ問題となるのは、赤道座標のような天球座標（極座標）系における北極・南極の存在である。北極・南極は、経度の値が存在しない特異点である。また、極域をまたぐような範囲（言わば緯度 90 度（または -90 度）を超える向こう側まで含む範囲）を検索結果で返したい場合、やや複雑な場合分けと SQL 文の工夫をしなければならない。このように、極域のデータを検索の対象とするためには何らかの特別な対応が必要となる。

その解決のため、我々はその格子点を表す座標として、天球座標（例えば赤道座標系）に加えて、直交座標系 (X, Y, Z) を与えることにする。ここで直交座標 (X, Y, Z) とは、天球の半径を 1 とし、天球の中心からある天球上の位置を指す単位ベクトルの 3 成分のことである。赤道座標 (RA, DEC) [degree] から (X, Y, Z) への変換式は以下の通りである。

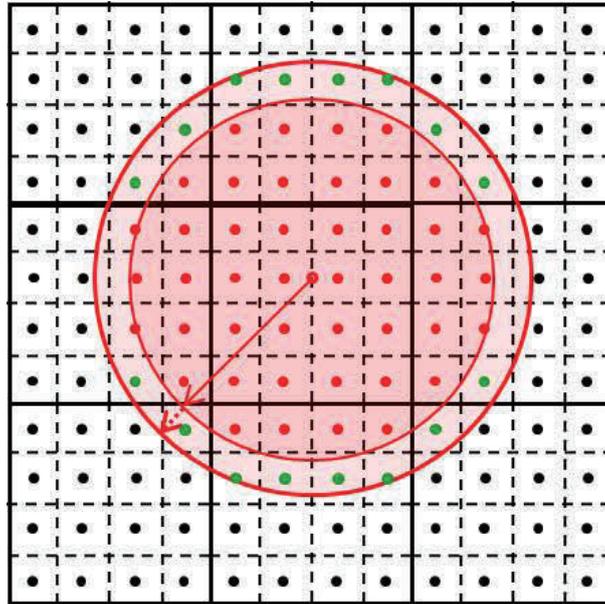


図 9: 格子点検索法の模式図. 単純化のため, 1枚のマップ画像が4×4分割され, 9枚のマップ画像が隙間なく並んでいると仮定した模式図である. ある検索中心と半径が与えられた時に張られる検索円が濃いピンクで, その円に追加されるマージンが薄いピンクで表される. そのマージンにより検索範囲に含まれるようになった格子点が緑色で表されている. 与えられた検索円と一部でも重なる画像(この図では9枚全て)は, それらに付随する格子点のいずれかがその拡張された検索円内部に含まれるため, 検索にかかることになる.

$$X = \cos(DEC) \sin(RA)$$

$$Y = \cos(DEC) \cos(RA)$$

$$Z = \sin(DEC)$$

この定義を用いて, 各格子点の (X, Y, Z) を事前に算出し, DB に登録しておく. 直交座標系では, 天球上の位置は, それぞれが -1 から 1 までの無次元量である (X, Y, Z) で表すことができ, 従って天球上のどの位置でも, 天の両極でも, 区別なく検索の対象となる. また直交座標系で表されていれば, 極座標系での経度 360 度以下から経度 0 度以上までをまたぐ範囲に対しても, 360 度を足したり引いたりというような内部処理が不要であるというメリットもある.

このようにして, 画像 ID に紐付けされた格子点 ID を, 直交座標系で表されたその位置に関連付けて DB に登録すれば, HEALPix の複雑なアルゴリズムによって抽象的な部分面中心点 ID と天球座標と画像 ID を関連付ける方法に比べると, はるかに単純で, 簡単に検算でき, ID 同士の関係も直感的に理解できる. そのため内部処理がブラックボックス化しないで済む.

この方法による DB のテーブルは, ある格子点に対し, 「格子点 ID, 画像 ID, 赤道座標系 2000 年分点 (RA, DEC) , 赤道座標系 1950 年分点 (RA, DEC) , 黄道座標系 2000 年分点 (LON, LAT) , 銀河座標系 2000 年分点 (l, b) , 直交座標系 (X, Y, Z) , ピクセル座標 (Xp, Yp) , マージン値」を登録したものとなる.

これらのうち赤道座標系 2000 年分点, 赤道座標系 1950 年分点, 黄道座標系 2000 年分点, 銀河座標系 2000 年分点の値は, WCSTools (<http://tdc-www.harvard.edu/wcstools/>) (Mink 1999) を用いることによって, FITS ヘッダから得られた座標系の値から事前に計算して求めておく. そ

れらに直交座標系を加えた5種類の座標系を、上記のように全て事前登録しておくことで、検索のたびに座標変換の計算をする必要がなく、ユーザーがストレスを感じないくらいに処理時間の短い検索が可能である。

また、DB内部では直交座標系(X, Y, Z)を用いて検索しているが、あくまで内部の計算にのみ使われ、ユーザーI/Fに直交座標系が露わになることはない。それにより、ユーザーは馴染みのある4種類の座標系(赤道座標系2000年分点、赤道座標系1950年分点、黄道座標系2000年分点、銀河座標系2000年分点)を使って容易に検索することができる。

我々は、以上の検討の結果、「直交座標系で表された格子点法」を用いることで、取りこぼしのない検索の要求に対し解決を図ると同時に、開発コストの低減も可能にした。

5.4. 矩形検索の実現方法

矩形検索の時は、(ユーザー指定の座標系の)経度、緯度それぞれの最小値と最大値がユーザーに指定される。それら経度、緯度それぞれの値の範囲に含まれる格子点IDを返すことによって、矩形検索は簡単に実現できる。なお、マップ画像の取りこぼしを防ぐために、矩形検索の際にもマージンが検索範囲に追加されている。また、指定された経度、緯度の値から、天球の反対側を回る矩形を張ることもできるが、本システムでは常に小さいほうの矩形を範囲として用いることとする。

5.5. 円検索の実現方法

円検索の時は、円の中心座標と半径 R (天球上の角度)がユーザーに指定される。その円の内部に含まれる格子点を選び出す単純な方法は、円の中心点から全ての格子点までの角距離 θ をそれぞれ計算し、その角距離が半径 R よりも小さいような格子点を選び出すというものになる。しかし、全天で約150万点の格子点全てに対し角距離計算をするのは大変処理時間がかかる。そこで、直交座標系で格子点を表しているメリットを生かし、以下のように検索を2段階に分けることで高速化を図る。これはAKARI-CASですでに実績があり(Yamauchi et al. 2011)、本開発でも採用するものである。

- ・1段階目：天球面上の検索円の中心と半径 R (内部処理でマージンが追加される)を用いて、図10のような1辺 $2R$ の立方体を張り、その立方体に含まれる格子点を切り取る。つまり、 X, Y, Z それぞれの最小値(検索円の中心 $-R$)から最大値(検索円の中心 $+R$)までの間に入る格子点を選び出す。これで大部分の格子点は候補から外される。

- ・2段階目：続いて、その選び出された各格子点と円の中心との角距離 θ を余弦定理によって求める。求められた θ のうち $\theta \leq R$ を満たす格子点のIDを返す。これにより円の外に残っている不要な格子点が除外される。その計算はDBに登録されたストアド関数によって行われる。

この方法を用いることにより高速の円検索が実現できる。本開発で用いられたDBサーバ環境(CPU:2.2GHz 8コア、メモリ:32GB)で、この方法によって約150万点の格子点に対し半径1度の円検索を実行するのに要する時間は、約0.1秒である。これは一般的にユーザーにとってほとんどストレスを感じない、非常に速い速度であると考えられる。なお、矩形検索実行時の所要時間は一般にさらに短い。ただしこの数値はコマンドラインでDBに問い合わせから結果が返るまでの時間であり、Web I/Fを通じての検索条件入力値や検索結果出力値の受け渡しや、ユーザーのマシンのWebブラウザ上でそれらを表示するための時間は別途かかる。

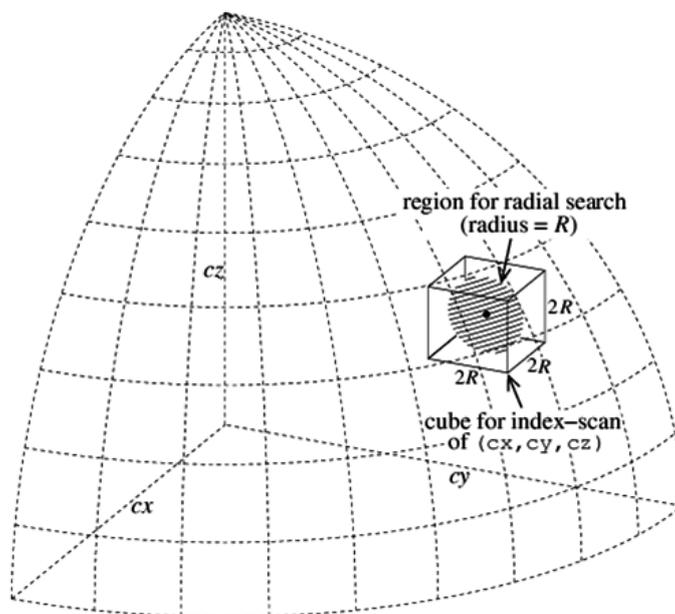


図 10: 円検索時の 2 段階検索の様式図. この図では直交座標系 (X, Y, Z) が (cx, cy, cz) と表記されている.

6. 今後の開発予定

本開発により, 全天マップ検索システムの試作版が完成した. 今後, 外部への公開に向けて, 以下の開発を予定している.

6.1. 公開版全天マップ用への改装

本論文で紹介した AKARI-DAS は, 非公開版 FIS 全天マップを用いて作られた試作版であり, 外部には公開されていない. 公開版の FIS と IRC それぞれの全天マップの中身は, 本論文の第 2 章に述べられたものから変更されることが予告されている. ただし, 検索機能の開発をする上で, FIS と IRC の違い, また FIS の公開版と非公開版の違いは, 各ファイルがカバーする天球上の面積が異なるだけであり, DB 登録の手続きや検索の実装方法は変わらない. すなわち, 本論文で述べる要求分析とその解決法は, 複数の FITS 形式のファイルで全天をカバーするようなマップ画像群を対象とする検索であれば一般的に有効であると考えられる.

6.2. AKARI-CAS から AKARI-DAS へのリンク作成

上述の通り, AKARI-DAS は天球上の位置を基準にマップ画像を検索するシステムである. しかし研究目的によっては, 位置ではなく, 天体の光度やスペクトル型や形態などの基準による検索が可能であると便利である. 例えば, あかり点源天体カタログや, NGC (New General Catalog) のような外部カタログから, ある明るさ以上の天体を選び出し, それらが写っている (と思われる) マップ画像を全天から拾い出すというような検索である.

そこで、そのような複雑な条件の検索は AKARI-CAS で対応させ、その検索結果から AKARI-DAS へ飛ぶ（リンク）ことで、該当のマップ画像を配布することができる。具体的には、AKARI-CAS の検索結果一覧から該当天体の各 ID にリンクを設け、そのリンクからその天体の位置情報が AKARI-DAS の検索結果表示ページに送信されれば、そのような検索が可能になる。その処理を多数の天体に対して一括で行う方法については現在検討中である。

6.3. AKARI-CAS/Explore ページ（カラー早見画像表示機能）の開発

図 11 のように、AKARI-CAS の機能の一部として、Explore ページというビジュアルツールが既に存在する。そのページでは、可視光から赤外光までの様々な全天サーベイのカラー早見画像が外部サーバから取得され、並べて表示されるようになっている。しかし現時点では未完成で、あかりの全天マップはこのページに表示されていない。それが外部公開された後には、このページにその早見画像も表示されるようにする。

そのために我々が現在検討している処理は、ある天体の中心座標とある範囲が与えられると、全天マップの複数の FITS ファイルを合成して、その中心と範囲による新たな 1 つの FITS ファイルが作成され、さらに複数バンドのそれらが合成されて疑似カラーの JPEG 形式の早見画像が作成される、というものである。その早見画像の埋め込みにより Explore ページにその縮小画像を表示できる。また中間で生成される新たな FITS ファイルもダウンロード可能とする。本論文執筆時点で、我々はそのような内部処理と Explore ページの開発に着手しており、試作版が出来つつある。

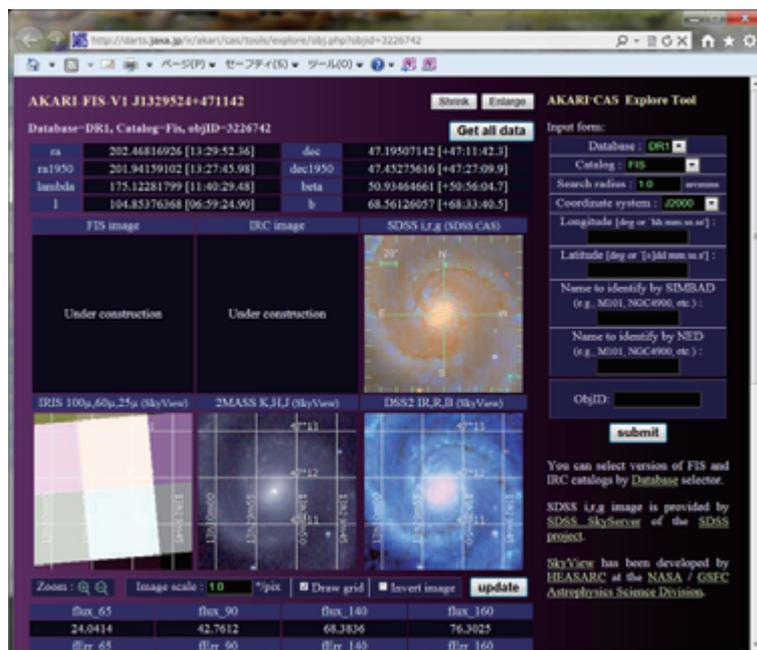


図 11: AKARI-CAS/Explore ページ (<http://darts.jaxa.jp/ir/akari/cas/tools/explore/obj.php>)。現状ではまだあかり全天マップ（上段の右と中にそれぞれ FIS, IRC の全天マップが入る予定）が表示されていない。

7. まとめ

本論文では、あかり全天マップ用の検索機能を開発するにあたり、仕様への要求、課題、解決法、そして非公開版データ用の試作版を提示した。まず、想定ユーザーを天文学研究者とすることによる要求と、コスト面の要求を検討し、解決法を探った。シンプルさを優先した検索 I/F によって、ユーザーが少ない操作で効率良く目的のマップ画像を取得することを可能にした。その検索の事前準備として、各マップ画像の内部を 10 分角間隔で分割し、それらの中心点（格子点）の座標値を 5 種類（赤道座標系（2000 年分点）、赤道座標系（1950 年分点）、黄道座標系、銀河座標系、直交座標系）全てデータベースに登録した。また格子点の間隔による取りこぼしを防ぐためにわずかに検索範囲を広げる内部処理を与えた。その結果、極域データを含め取りこぼしのない検索を高速で実行することが可能になった。そして我々は、これらの開発を、既存の AKARI-CAS の仕組みを流用することで低コストで進めることができた。本機能は PHP と PostgreSQL の組み合わせを基本とする最小限のソフトウェアによって実装することができた。またその可読性の高いソースコードによって、今後出来る限り長期間低コストで本機能を維持できるようにした。これらの解決法により、我々は要求を満たすものを構築することができた。今後、外部公開用に作り直すと共に、AKARI-CAS と連携しての高機能検索やビジュアル化処理を開発する予定である。それらの機能は、あかり全天マップが長期に渡り利用され、多くの研究成果を生み出すことに貢献するであろう。

参考文献

- Abazajian, K. N., et al. 2009, *ApJS*, 182, 543
- Doi, Y., et al. 2009, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 418, 387
- Doi, Y., et al., in preparation.
- Górski, K. M., et al. 2005, *ApJ*, 622, 759
- Ishihara, D., et al. 2009, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 418, 9
- Kawada, M. et al. 2007, *PASJ* 59, 389
- Mink, D. J. 1999, *ADASS VIII, A.S.P. Conference Series*, 172, 498
- Murakami, H., et al. 2007, *PASJ*, 59, 369
- Onaka, T., et al. 2007, *PASJ*, 59, 401
- Pence, W. 1999, *ADASS VIII, A.S.P. Conference Series*, 172, 487
- Wells, D. C., Greisen, E. W., and Harten, R. H., 1981, *AAS*, 44, 363
- Yamauchi, C., et al. 2011, *PASP*, 123, 852

オーロラの出現・形状の予測に向けた 全天オーロラ画像の自動分類への試み

田中 孝宗^{*1}, 田中 良昌^{*2}, 佐藤 由佳^{*2}, 池田 大輔^{*1}

Toward Automatic Classification of Auroral All-Sky Images to Forecast Auroral Behaviors

Takanori TANAKA^{*1}, Yoshimasa TANAKA^{*2}, Yuka SATO^{*2}, Daisuke IKEDA^{*1}

Abstract

Aurora, which is attractive for many people, is an astronomical phenomenon related to many fields, such as interplanetary space, magnetosphere and ionosphere, and thus it is difficult to predict behaviors or shapes of aurora. The big goal of this research is to forecast them using observed data in different formats from different fields. To do that, we need training data which shows when and what types of aurora have appeared. In this paper, we evaluate three popular methods of automatic classification of images to classify auroral all-sky images. We found that two methods based on the local feature and the color histogram, both of which are expected to classify auroral all-sky images in detail, fail to capture characteristics of aurora in the preliminary experiment, while we obtained 92.3% of the classification accuracy based on auroral area, which can only classify whether an image contains aurora or not.

Keywords :Aurora, e-Science, Image classification, オーロラ, データ科学, 画像分類

概要

オーロラは多くの人を魅了する自然現象だが、惑星間空間、磁気圏、電離圏などの多くの領域にまたがる現象であり、その物理モデルは完全には構築されていない。そこで、我々は観測分野を横断し、関連するデータを組み合わせながらデータ指向型科学の手法を用いて、オーロラの出現や形状等の予測を行うための研究を進めている。このような予測を実現するためには、いつ、どのようなオーロラが発生したのかという正解データを準備し、これを訓練データとして用いる必要がある。そこで本論文では、将来の機械学習によるオーロラ画像自動判定において良質な訓練データを得る準備として、国立極地研究所が公開している全天オーロラ画像に対して、オーロラの有無や、規模、雲の有無によって自動的に分類する画像処理の手法を適用し評価を行う。形状特徴による分類が可能になる局所特徴量を用いた手法と色のヒストグラムを用いた手法は、予備実験の段階で必要な精度がでないことが分かった。一方、HSV カラーモデルの閾値を満たす画素数でオーロラの有無を分類した場合、正答率が92.3%であり良好な結果を得た。

1 はじめに

オーロラは、その美しさにより多くの人々を魅了すると同時に、現代の我々の生活に関わりの強い天体現象である。例えば、大規模なオーロラが発生した場合には、人工衛星に障害が発生するなど、我々の生活にも

^{*1} 九州大学システム情報科学府 / 研究院 (Graduate School and Faculty of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University)

^{*2} 国立極地研究所宙空圏グループ (Space and Upper Atmospheric Science Group, National Institute of Polar Research)

影響がある [8]. しかし、自然現象は一般に非定常な振る舞いを見せるため、その物理モデル化は難しく、正確な予測は極めて難しいとされており [7], オーロラの出現予測に向けた様々な研究 [3] が行われてきたが、完全に解明されていない事柄も多く、詳細な出現地域の予測や、オーロラサブストームの開始時刻の予測には至っていない。

従来、科学を支えてきたのは理論 (モデル)、実験、シミュレーションであったが、近年のセンシング技術の発達やネットワークの充実等に支えられ、データ指向型科学 (Data-intensive Science) が科学を支える第 4 の柱として注目を集めている [1, 4, 9]. データ指向型科学の大きな特徴の一つとして、精緻なモデルを構築せずに、既存のデータを大量に用いて未知のデータを説明しようとする点にある。例えば、コンピュータ将棋の分野では、保木邦仁氏の作成した Bonanza[16] 以降、大量の棋譜データをもとに評価関数のパラメータを自動的に学習することで、トッププロにも迫る強さを獲得している。従来のコンピュータ将棋アルゴリズムが、プログラマが構築する将棋モデルの精緻さに依存していたことと対照的に、保木氏は駒の動きを知っている程度であった。他にも、画像認識や音声認識等のパターン認識、画像検索等のマルチメディアを対象とした情報検索、化合物の活性予測分野にも適用され、従来の精度を大きく改善している [17, 18].

本研究でも、データ指向型科学の立場から、物理モデルを極力仮定せずに、観測データから未知のデータの分類を目指す。しかし、オーロラは、発生機構が惑星間空間、磁気圏、電離圏などの多くの領域にまたがる天体現象であるため、様々な関連するデータが存在する (図 1 参照)。例えば、太陽面画像等の画像データや、太陽風パラメータや地磁気等の時系列データなどが存在する。さらに、例えば画像データなどのデータ量は膨大で、全天カメラの画像データの場合、そのサイズは 10 年間で 1.3 テラバイトに達する。先述の通り、デー

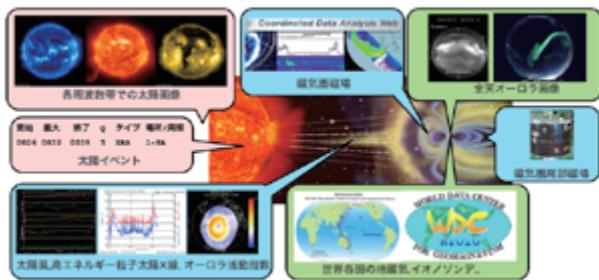


図 1: オーロラに関連するデータの例

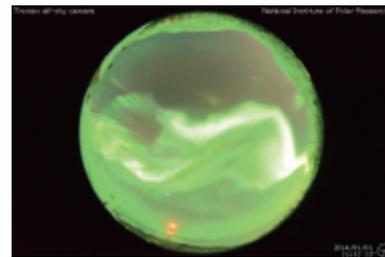


図 2: 全天オーロラ画像

タ指向型科学的手法において最も重視すべき点は、大量のデータを用意する事である。特に、いつ、どのような規模のオーロラが発生したかという情報を他の観測データと紐づけて、訓練データとして用意する必要がある。しかし、現在そのようなデータは存在していないため、オーロラの全天観測画像をオーロラの有無、規模、雲の有無によって分類する必要がある。

そのために、本稿では一般的な画像処理技術をオーロラ画像の分類に適用し、その精度を評価する。評価のために、ノルウェー・トロンソにおいて国立極地研究所によって撮影されたオーロラの画像 (図 2 参照) を用いる。これらの画像は国立極地研究所のホームページ [13] 上で公開されている。この画像は、トロンソの観測所内の地上に設置したカメラに魚眼レンズを装着する事によって、一枚の画像で全を撮影しており、今回の目的に好適である。本研究では、この画像データに対して、局所特徴量を用いたベクトルの類似度による分類と色のヒストグラムを用いた手法、及び、HSV カラーモデルの閾値を満たす画素数によるオーロラの面積抽出の手法を適用し、それぞれの結果を評価する。これらの手法は、順番に、形状や色などの画像特徴をより細く分類できる手法で、局所特徴量を用いた手法は画像検索に用いられる。ヒストグラムは色の分布に、オーロラの面積抽出はオーロラに対応する色のピクセル数にのみ着目している。

本稿では、全天オーロラ画像をオーロラの有無・規模・雲の有無によって分類する手法の結果と考察について第 2 節で述べ、今後の展望について第 3 節で述べる。

2 全天オーロラ画像の画像分類

本節では、ヒストグラム類似度と局所特徴量を用いて全天オーロラ画像を、巨大なオーロラが出現している画像、薄いオーロラが出現している画像、雲がオーロラを遮っている画像、悪天候でオーロラが確認できない画像/オーロラが確認できない画像の4つのカテゴリに分類することで、訓練データの生成に利用できない画像データを取り除き、オーロラが巨大になった時間のデータを収集することを目標とする。また、オーロラの面積を計算することによって全天オーロラ画像を「オーロラ有」と「オーロラ無」の二種類に分類する手法と専門家による評価結果について述べる。

2.1 ヒストグラムを利用したカテゴリ分類

撮影された全天オーロラ画像には、オーロラがはっきりと写っている画像や、薄いオーロラが出現している画像、オーロラが写っていない画像、悪天候によりオーロラが確認できない画像などが混在している。図3は、オーロラがはっきりと写っている画像と薄いオーロラが出現している画像の例である。そして、図4の右のグラフは、画素の持つ青、緑、赤の輝度値(0-255)を横軸に、出現数を縦軸とした輝度値ヒストグラムであり、異なっている両画像間のヒストグラムに差が生じている事がわかる。本節では輝度値ヒストグラムを利用して、オーロラの規模、雲の有無によるオーロラ有画像のカテゴリ分類を行う。以後、全天オーロラ画像をカテゴリへ分類するための指標となる画像を分類基準画像、分類する対象となる画像を未分類画像と呼ぶ。本手法ではオーロラの規模、雲の有無による4つの分類基準画像を各6例ずつ用意し、未分類画像を4

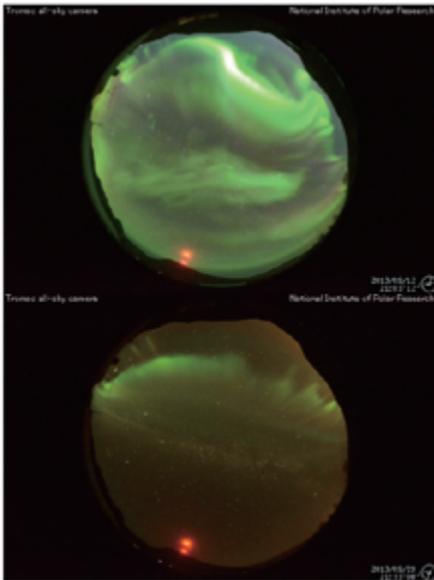


図 3: オーロラの規模の異なり

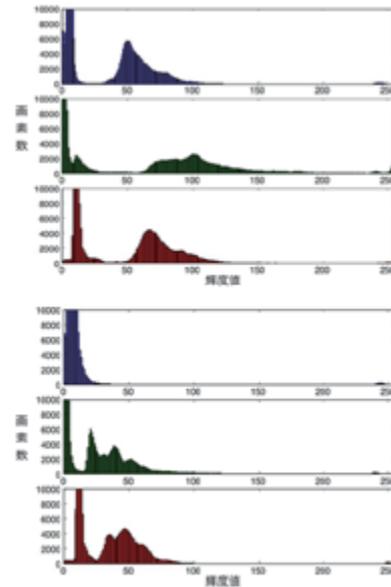


図 4: 出現規模によるヒストグラムの異なり

つのカテゴリ(図5)へ分類する。図5は、分類する4つのカテゴリ、[第1行]: 巨大なオーロラが出現している画像、[第2行]: 薄いオーロラが出現している画像、[第3行]: 雲がオーロラを遮っている画像、[第4行]: オーロラが確認できない画像の分類基準画像となっている。未分類画像のヒストグラムを算出し、分類基準画像のヒストグラムとの類似度を0Γ1範囲の数値で算出する。その後、最も類似度の高い分類基準画像が所属するカテゴリへ未分類画像を分類するプログラムを作成した。類似度の算出にはOpenCVに実装されて

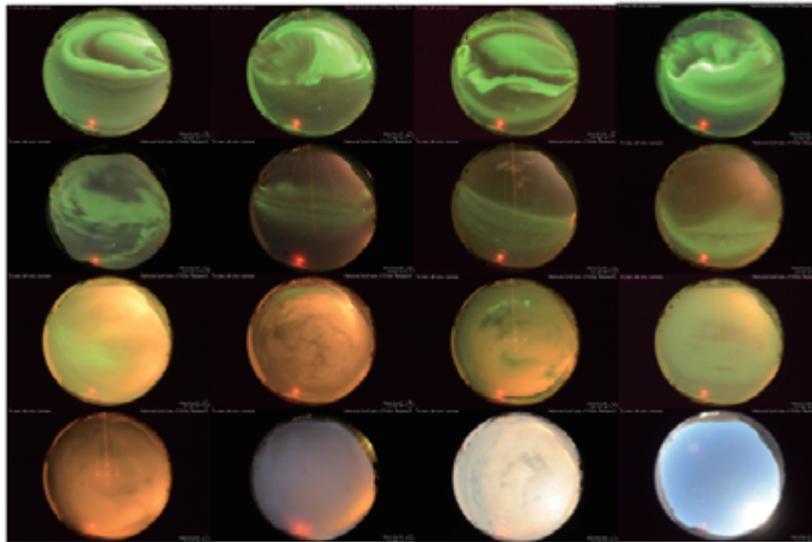


図 5: 分類する 4 つのカテゴリとその基準画像 :

[第 1 行]: 巨大なオーロラが出現している画像, [第 2 行]: 薄いオーロラが出現している画像,
[第 3 行]: 雲がオーロラを遮っている画像, [第 4 行]: オーロラが確認できない画像

いるヒストグラム相関を利用して、ランダムに選択した画像 392 枚の分類を行った。図 5 の分類基準画像に類似していると判断された、上位 5 枚の画像を図 6 に示す。

分類結果を目視で確認したところ、どのカテゴリにも雲がオーロラを遮っている画像が上位に位置する結果となった。これは、雲の持つ輝度値が高いため、画像全体の輝度値が高くなり、オーロラの出現している画像のヒストグラムに類似するためであると考えられる。分類基準画像を増加させた場合でも同様の結果が得られたため、本研究で実施したヒストグラム類似度による分類では、オーロラ全天観測画像の分類は困難であることがわかった。

2.2 局所特徴量を用いた画像分類

より詳細な画像分類を実現する為に、局所特徴量を利用した画像分類を行う。この手法は現在一般画像認識分野で広く用いられており、近年はこの手法による高精度な画像検索のシステムも登場している。本節ではオーロラの出現している画像、オーロラの出現していない画像のそれぞれから特徴点を抽出し、抽出された特徴点を利用した画像分類を目標とする。

代表的な特徴点抽出手法として、SIFT(Scale Invariant Feature Transform)[11] と SURF(Speeded Up Robust Features)[10] がある。SIFT は SURF と比較して特徴点の抽出時の計算量は増加するが、画像の明暗の変化、微小な形状変化に対して頑健な手法であるため、SIFT を採用した。全天オーロラ画像から抽出した特徴点の位置を図 7 に丸で示す。抽出の結果を見ると、画像上部のオーロラの周囲は特徴点として抽出されているが、画面中央の薄いオーロラについては特徴点として抽出されず、電灯などの人工物や山が特徴点として抽出される結果となった。オーロラは緩やかな濃度勾配を持つため、特徴のある点ではないと判定され、局所特徴量を用いた画像分類に利用できないことがわかった。そのため、今後は緩やかな濃度勾配をもつ対象についても特徴点を抽出できるような手法を検討する必要がある。

2.3 オーロラの面積を利用した画像分類

本節では、画像に写るオーロラの面積を算出することで全天オーロラ画像中のオーロラの有無を判定する(図 8 参照)。本手法では、目視でオーロラが確認できる画像を「オーロラ有り画像」、目視ではオーロラが確

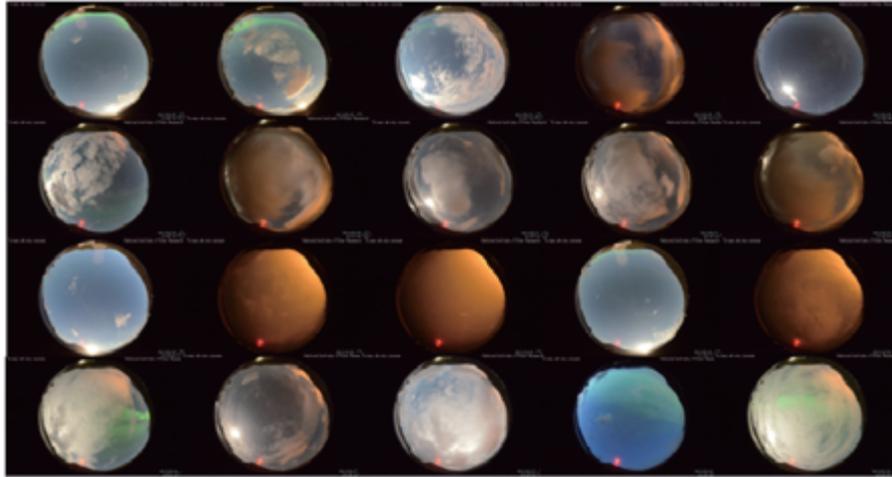


図 6: ヒストグラム類似度による分類結果 :
 [第 1 行]:巨大なオーロラが出現している画像, [第 2 行]:薄いオーロラが出現している画像,
 [第 3 行]:雲がオーロラを遮っている画像, [第 4 行]:オーロラが確認できない画像

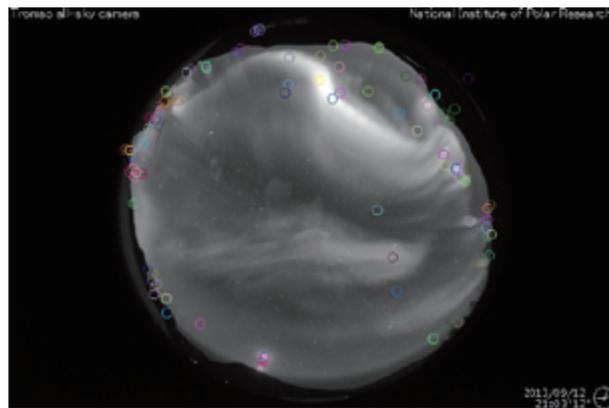


図 7: SIFT による全天オーロラ画像からの特徴点抽出結果

認できない画像を「オーロラ無画像」として、算出された面積をもとに全天オーロラ画像を二種類に分類する事を目標とする。目視で確認できるオーロラは、鮮やかな緑色を伴って出現するため、画像中のオーロラ

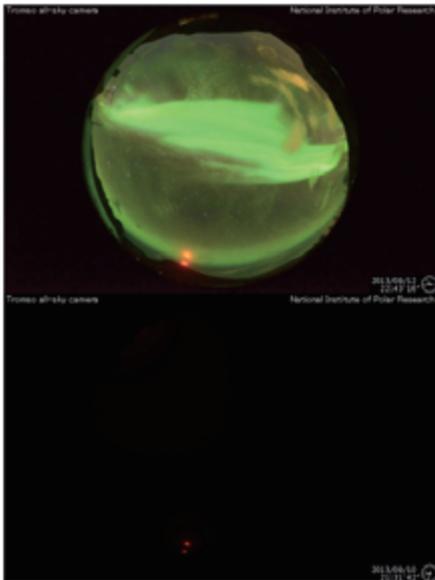


図 8: オーロラ有画像 (上) とオーロラ無画像 (下) の例

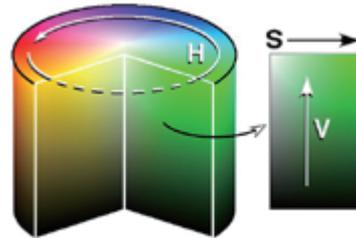


図 9: HSV カラーモデルの視覚的イメージ

の面積を算出する前にオーロラの持つ緑色の範囲を定義した。加法混色である RGB カラーモデルでは緑色の定義が困難であるため、HSV カラーモデル [19](図 9) を利用した。HSV カラーモデルは、色相を表す H 、彩度を表す S 、輝度を表す V の値を定める事で色を定義し、RGB カラーモデルよりも直感的に色を定義する事が出来る。オーロラ的面積を算出するために、オーロラの H 、 S 、 V の値の範囲を画像処理ソフトウェアによって調査した。全天オーロラ画像について、 H 、 S 、 V の全ての値が定めた範囲内である画素をカウントし、カウントされた画素の数をオーロラ的面積とする。面積 [pixel] が閾値を超えた場合にオーロラが出現しているものと判定する。 $H = 60 \sim 180$ 、 $S = 25 \sim 97$ 、 $V = 20 \sim 90$ として 2.1 節で利用した画像 392 枚について、オーロラの出現判別を行った。面積が 100[pixel] を超えた場合、オーロラが出現しているものとし、専門家による目視にて評価を行った。出現判別の結果を表 1 に示す。判別結果を見ると、オーロラ的面積による画像分類は単純なアルゴリズムながら、良い結果が得られた。しかし、空が明るく薄いオーロラが出ている全天オーロラ画像や、やや赤みがあったオーロラはオーロラが出現していないと判断されてしまった。

表 1: 識別結果

	正答率	誤識別率
オーロラ有	94.3%	4.7%
オーロラ無	91%	9%

本節では、全天オーロラ画像に写るオーロラ的面積を算出した。このオーロラ的面積の変化をグラフ化したものを図 10 に示す。図 10 は、2014/01/01 00:00-23:59 に撮影された、全天オーロラ画像に写るオーロラ的面積を時系列グラフにしたものであり、縦軸がオーロラ的面積 [pixel]、横軸は 00:00 からの経過時間 (秒) を表している。このグラフから 21:30 に急激にオーロラ的面積が変化している事がわかった。この時間の前後の全天オーロラ画像を確認したところ、巨大なオーロラが短時間で出現していた事から、オーロラ的面積の時系列データからオーロラサブストームの開始時刻を発見できる可能性を発見した。今後はこのデータを

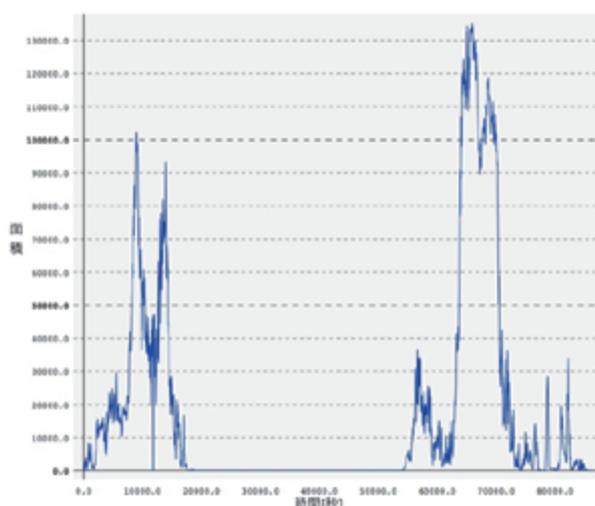


図 10: オーロラ面積の時系列グラフ：100px を超えた場合にオーロラが出現していると判定した。

利用してオーロラサブストームの開始時刻を収集し、オーロラサブストーム開始前の地磁気、太陽風等の時系列データなどを入力、オーロラの面積を出力として学習させる事で、オーロラサブストームの発生時刻の予測に向けた研究を進める。

3 まとめと今後の課題

形状特徴による分類が可能になる局所特徴量を用いた手法と色のヒストグラムを用いた手法は、予備実験の段階で必要な精度がでないことが分かった。オーロラの有無に関しては、実装したプログラムによって全天オーロラ画像から判断することが可能となり、平均正答率が 92.3% という良好な結果が得られた。ただし、薄いオーロラや雲による影響までは分類することができなかった。今後は撮影時の太陽の高さや雲量を考慮し、暗い緑や、明るい緑に分けて H , S , V のパラメータを変化させ、面積の計算を行うことでより細かい画像分類を実現し、10 年間の全天オーロラ画像の分類を行うことが課題である。

この手法を利用することによって、専門家が研究に利用する画像データ収集の際の負担を軽減し、物理学におけるモデル構築等の支援も可能になると考えられる。今後は、オーロラの有無の精度向上に加えて、オーロラの種類、オーロラの出現予測に向けたアプローチを行う予定である。

謝辞

本研究に際して、画像データを提供して頂いた国立極地研究所の宮岡宏准教授、共同研究者の小川泰信准教授にこの場を借りて深謝いたします。

本研究は JSPS 科研費 25540039 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 村田健史, “科学研究用クラウドシステム (NICT サイエンスクラウド) の提案”, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告書 宇宙科学情報解析論文誌 第 3 号, pp. 39 – 56, (2014).
- [2] 小川泰信, 門倉昭, 元場哲郎, 田中良昌, 細川敬祐, “トロムソ/ロングイアビンにおけるオーロラ観測用並列イメージャーの大量データ処理と可視化”, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告書 宇宙科学情報解析論文誌 第 2 号, pp. 51 – 61, (2013).

- [3] Sakaguchi, K., Miyoshi, Y., Saito, S., Nagatsuma, T., Seki, K., Murata, K. and T. “Relativistic electron flux forecast at geostationary orbit using Kalman filter based on multivariate autoregressive model”, Space Weather Volume 11, Issue 2, pp 79 – 89, February, (2013).
- [4] ビクター・マイヤー＝ションベルガー, ケネス・クキエ, “ビッグデータの正体”, 講談社, (2013).
- [5] F. Sigernes, M. Dyrland, P. Brekke, “Two methods to forecast auroral displays”, Space Weather Space Clim vol.1, (2011).
- [6] 岩崎雅二郎, “近似 k 最近傍グラフによる距離空間の近傍検索”, 情報処理論文学会誌 Vol. 3, pp. 91 - 110, (2010).
- [7] Tokunaga, T., Ikeda, D., Nakamura, K., Higuchi, T., Yoshikawa, A., Uozumi, T., Fujimoto, A., Morioka, A. and Yumoto, K. “Detecting Precursory Events in Time Series Data by Extension of Singular Spectrum Transformation”, Proceedings of the 10th WSEAS International Conference on Applied Computer Science, pp.366 – 374, (2010).
- [8] 篠原学, “宇宙天気”, 誠文堂新光社, (2009).
- [9] Tony Hey, Stewart Tansley, and Kristin Tolle, “The Fourth Paradigm: Data-Intensive Scientific Discovery”, Microsoft Research, (2009).
- [10] Herbert Bay, Tinne Tuytelaars, Luc Van Gool, “SURF: Speeded Up Robust Features”, Lecture Notes in Computer Science Volume 3951, pp.404–417 (2006).
- [11] David G. Lowe, “Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints”, International journal of computer vision ,60 (2), pp. 91– 110 (2004).
- [12] H. Gleisner, “Response of the auroral electrojets to the solar wind modeled with neural networks”, Journal of Geophysical Research: Space Physics . Vol.102(A7), pp. 14269 – 14278, (1997).
- [13] 国立極地研究所 “<http://polaris.nipr.ac.jp/acauration/aurora/Tromso/>”
- [14] NASA SWPC ACE “http://www.swpc.noaa.gov/ace/ace_rtsw_data.html”
- [15] Alaska University Aurora Forecast “<http://www.gi.alaska.edu/AuroraForecast>”
- [16] Bonanza-The Computer Shogi Program “http://www.geocities.jp/bonanza_shogi/”
- [17] Merck Molecular Activity Challenge “<https://www.kaggle.com/c/MerckActivity>”
- [18] Large Scale Visual Recognition Challenge 2012
“<http://www.image-net.org/challenges/LSVRC/2012/>”
- [19] 画像出典: “<http://ja.wikipedia.org/wiki/HSV>”

「あかり」アーカイブデータを用いた近赤外線面輝度スペクトルの成分分離

津村 耕司^{*1} 左近 樹^{*2} 松浦 周二^{*3} 松本 敏雄^{*4} ^{*3} 和田 武彦 ^{*3}
Pyo Jeonghyun^{*5} 田中 昌宏^{*6}

Component Separation of the Near-Infrared Diffuse Spectrum from the AKARI Archive Data

Kohji TSUMURA^{*1}, Itsuki SAKON^{*2}, Shuji MATSUURA^{*3}, Toshio MATSUMOTO^{*4,*3},
Takehiko WADA^{*3}, Jeonghyun PYO^{*5}, and Masahiro TANAKA^{*6}

E-mail: tsumura@astr.tohoku.ac.jp

概要

赤外線天文衛星「あかり」に搭載された近・中間赤外線カメラ InfraRed Camera (IRC) の分光データを用いて、波長範囲 1.8-5.3 μm ($\lambda/\Delta\lambda \sim 20$) における面輝度分光カタログを作成し公開した。赤外線面輝度の分光カタログは過去にほとんど例がなく、この規模の面輝度分光カタログは世界初である。このカタログは「あかり」のコールドミッション (液体ヘリウム枯渇前) 中に撮られた地球光コンタミを含まない全 278 点の面輝度スペクトルデータを含み、データ点は黄道座標・銀河座標によらず全天に広く分布している。面輝度に影響を及ぼす恐れのある点源 (K バンドで 19 等以下) は全て除外しているため、銀河系内の星の寄与は無視できる。また、本カタログを用いて赤外線面輝度を、黄道光 (ZL), 銀河系内拡散光 (DGL), 銀河系外背景光 (EBL) の 3 成分に分離する事に成功し、さらに各成分ごとの解析から新たな知見が得られた。本論文では、「あかり」による赤外線面輝度分光解析に特化したデータ解析手法と、赤外線面輝度の成分分離の手法について述べる。

Abstract

We constructed a spectral catalog of diffuse radiation of the sky obtained by the InfraRed Camera (IRC) onboard AKARI. There is no precedent for spectral catalogs of the infrared diffuse radiation, thus this is the first infrared spectral catalog of the diffuse radiation in the world. This catalog contains the 278 low-resolution ($\lambda/\Delta\lambda \sim 20$) near-infrared (1.8-5.3 μm) spectra of diffuse sky covering a wide range of galactic and ecliptic latitudes before the exhaustion of liquid-helium. Advanced reduction methods specialized for the slit spectroscopy of diffuse sky spectra have been developed for constructing the spectral catalog. Point sources brighter than m_K (Vega)=19 were detected on the slit and masked for deriving the diffuse spectrum, and the brightness due to unresolved Galactic stars under this detection limit is negligible. Using this

^{*1} 東北大学 学際科学フロンティア研究所 (Frontier Research Institute for Interdisciplinary Science, Tohoku University)

^{*2} 東京大学 大学院理学系研究科 (Graduate School of Science, The University of Tokyo)

^{*3} 宇宙科学研究所 宇宙物理学研究系 (Department of Space Astronomy and Astrophysics, Institute of Space and Astronautical Science)

^{*4} 台湾中央院 天文及天文物理研究所 (Institute of Astronomy and Astrophysics, Academia Sinica)

^{*5} 韓国天文宇宙科学研究院 (Korea Astronomy and Space Science Institute)

^{*6} 筑波大学 計算科学研究センター (Center for Computational Sciences, University of Tsukuba)

catalog, the diffuse radiation was successfully separated into three components of the zodiacal light (ZL), the diffuse Galactic light (DGL), and the extragalactic background light (EBL). In this paper, the specialized reduction methods for AKARI infrared diffuse radiation, and the method of component separation of the near-infrared diffuse spectrum are described.

Key words: AKARI, Diffuse Galactic Light, Extragalactic Background Light, Infrared Astronomy, Spectral Catalog, Zodiacal Light

1. はじめに

「夜空はなぜ明るくないのか？」という問いは、オルバースのパラドックスとして有名である。この問いに対する回答は、宇宙は時間的・空間的に有限であるという現在の宇宙の理解の下に説明される。しかしそれでも尚、夜空は完全に暗い訳ではなく、淡く光っている。そのような宇宙からの面輝度として最も有名なものは、ビッグバン宇宙論の証拠ともなった宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background, CMB) であるが、マイクロ波以外の波長帯でも宇宙は淡く光っている。近赤外線での空の明るさを観測した場合、その中には主に以下の3成分が含まれている。

- 黄道光 (Zodiacal Light, ZL) : 太陽系内のダスト (惑星間塵) による太陽光の散乱光 (波長 $<3.5 \mu\text{m}$) および惑星間塵からの熱放射 (波長 $>3.5 \mu\text{m}$)
- 銀河系内拡散光 (Diffuse Galactic Light, DGL) : 銀河系内のダストによる星間輻射の散乱光 (波長 $<2 \mu\text{m}$) および放射 (波長 $>2 \mu\text{m}$)
- 銀河系外背景光 (Extragalactic Background Light, EBL) : 太陽系内および銀河系内の既知の成分を観測値から差し引いても尚残る銀河系外成分の面輝度

これらの成分の観測値に占める割合は、観測された天域にもよるが、おおよそ ZL:DGL:EBL=7:1.5:1.5 程度であり、銀河面付近を除いて黄道光が観測値の大半を占める。黄道光強度は主に黄緯に依存、銀河光強度は主に銀緯に依存、背景光強度は全天ではほぼ一様に分布するという空間構造の違いを利用して、これらを観測値から成分分離する事を通して、近くの宇宙 (黄道光=太陽系) から遠くの宇宙 (背景光=銀河系外) までを、同一の観測データセットから研究する事が可能である。

近赤外線での面輝度観測は、黄道光のさらに10倍程明るい大気光の存在のため地上からの観測は非常に困難であり、大気圏外からの観測が必要である。そこで本論文では、赤外線天文衛星「あかり」(ASTRO-F)¹⁾ に搭載された近・中間赤外線カメラ (InfraRed Camera, IRC)²⁾ による赤外線面輝度分光観測について述べる。観測された赤外線面輝度を空間分布およびスペクトル構造の違いを用いて成分分離する為には、広い領域を多数観測する必要があるが、特定の領域を狙って観測する必要は無い。すなわち、別目的の科学観測データであっても、その観測が低分散分光で行われたのなら、そのデータ中に面輝度分光データも含まれているので、「あかり」のアーカイブデータの中から条件を満たすデータを選び出してまとめてデータ解析を進めることで、各データを取得した時にそれぞれ想定されていた科学目的とは異なる科学成果を引き出す事に成功した。また、この解析によって作成された広い天域にわたる面輝度分光をカタログ化し、一般公開した^a。赤外線面輝度分光には大気圏外からの観測が必須な事もあり、この規模の赤外線面輝度スペクトルカタログは世界初である。尚、本論文のより詳しい内容、特に得られた科学成果の詳細については先に出版された論文^{3, 4, 5)} も参照してもらう事とし、本論文では「あかり」アーカイブデータに特化したデータ解析により、面輝度スペクトルを成分分離する手法に焦点を絞って述べる。

^a http://www.ir.isas.jaxa.jp/AKARI/Archive/Catalogues/IRC_diffuse_spec/

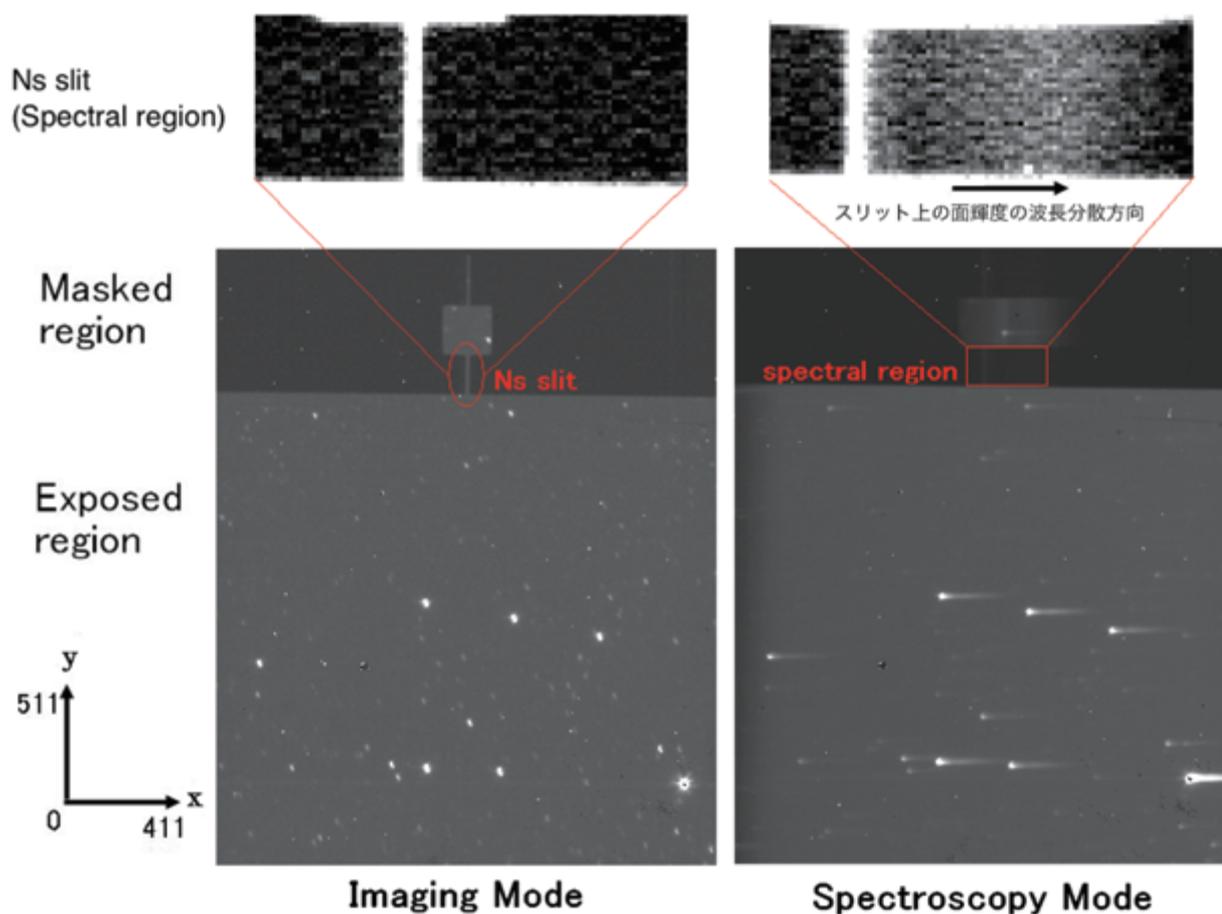


図 1: 「あかり」IRC の NIR チャンネルにおける撮像モード (左) および低分散分光モード (右) の画像の例. 分光モードでは多天体同時分光 (スリットレス分光) に加え, 画像上部に用意されたスリットを用いた拡散光の分光も可能であり, 本研究は Ns スリットでの拡散光分光データを用いた. 図の上部に Ns スリット部およびスペクトル領域の拡大図も載せた (シグナルが見やすいようにコントラストは調整してある).

2. データ処理

2.1 データセット

「あかり」は有効口径 68.5 cm の主鏡をもち, 2006 年 2 月に打ち上げられ 2011 年 11 月に運用を終了した. その内, 最初の 550 日間は液体ヘリウムにより極低温 (6 K) まで冷却されており⁶⁾, 最高性能の観測を実施した. IRC は「あかり」に搭載された近・中間赤外線観測装置であり, 撮像及び分光機能を有する. 図 1 に IRC による撮像および低分散分光画像を示す.

IRC のうち最短波長のチャンネル (NIR チャンネル) は波長 1.8-5.3 μm を 512 \times 412 ピクセルの InSb 検出器でカバーしている. IRC 内部のフィルターホイールに設置されたプリズムを挿入する事で, 撮像を低分散 ($\lambda/\Delta\lambda \sim 20$) 分光 (NP モード) に切り替える事が可能である⁷⁾. 点源の分光の場合は, 画像下部にて複数の天体をスリットレス分光, もしくは画像上部の小窓部分にターゲット天体を挿入しての分光, というのが普通である. 一方, 拡散光分光用のスリットも用意されており, 本研究では 5 秒角幅 \times 0.8 分角長 (2.8 \times 27.2 ピクセル)

の N_s スリットの部分のデータを用いた。N_s スリットを通過した光は低分散モードでは検出器上で横方向に 65 ピクセルにわたり分散される (図 1 において左側が短波長)。この 65×27 ピクセルの領域をスペクトル領域とよぶ。

「あかり」の観測データのほとんどは AKARI Catalogue Archive Server (CAS)⁸⁾ にて公開されている。本研究では、最初に以下の条件により解析に用いるデータを抽出した。

- NIR チャンネルの低分散分光データ
- 液体ヘリウム枯渇前に観測した、地球光コンタミ^{b 9)} が無いデータ (2006 年 9 月から 2007 年 5 月の期間)

この条件の下、349 点のデータが抽出された。このうち、視野内の明るい点源からの迷光等で汚染されている等、科学データ解析に適さないデータを除外し、最終的に 278 点のデータを科学解析に用いる事とした。最終的に残ったデータ点の天球上の分布を示したのが図 2 である。完全にはランダムではないものの、黄道座標・銀河座標によらず広くデータ点が分布している事が分かる。

2.2 暗電流の差し引き

赤外線面輝度観測における、NASA の赤外線天文衛星 Spitzer¹¹⁾ に対する「あかり」の優位点は、コールドシャッターの存在である。面輝度の絶対値を導出する為には、観測値の零点を決めるために暗電流の差し引きが必須であり、その為にコールドシャッターを閉じての暗電流値測定が必要であるが、Spitzer はコールドシャッターが使えない¹²⁾ ため、面輝度の絶対値測定ができない。一方で「あかり」は上空でコールドシャッターを閉じての暗電流測定を毎観測ごとに行っただけではなく、検出器内の暗領域 (図 1) にて天文観測中も暗電流を常にモニターしている。暗領域とは IRC 検出器面上のマスクされた領域のことで、天文観測中においてもコールドシャッターが閉じている時と等しく暗電流を取得できる。これらのデータを用いて、新たな暗電流推定方法を開発¹³⁾ し、本研究に適用した。

ブラジル上空には南大西洋異常帯 (South Atlantic Anomaly, SAA) と呼ばれる放射線が非常に強くなる領域が存在する事が知られている。「あかり」がこの SAA を通過すると、放射線ヒット率の増加に伴い、暗電流が増加する。従来の暗電流推定法では、100 枚のダークフレームを足し合わせたスーパーダークフレームを事前に用意しておき、それを SAA 通過に伴う暗電流増加に応じた係数をかけて差し引いていたが、それでは検出器内の非一様な暗電流の増加に対応できておらず、不十分であった。

そこで、「あかり」IRC の NIR チャンネルにおける、液体ヘリウム枯渇前にコールドシャッターを閉じて得られた全プレダークフレーム^c (約 4500 枚) を解析した。この約 4500 枚のダークフレームを用いて、暗領域内での暗電流の平均値 (C) と各ピクセル (i, j) の暗電流値 (D_{ij}) の関係を全ピクセルに対して調べた所、両者に強い相関があることを発見した (図 3)。

$$D_{ij} = A_{ij} \cdot C + B_{ij} \quad (1)$$

この相関を用いれば、暗領域内での暗電流の平均値から、全てのピクセルの暗電流値を推定できる。そして、暗領域内での暗電流は、コールドシャッターを閉じたダークフレームのみでなく、天文観測中でも常にモニターしている為、あらゆる天文データに対して、この相関関係から、コールドシャッターを閉じた場合に相当するダークフレームを推定する事ができる。しかもこの新手法による暗電流の推定には、約 4500 枚という大量の

^b 北半球の夏において、地球光が「あかり」のバッフルに散乱されて光路中に迷光として入ってしまう季節がある。

^c リセットアノマリーの影響を避ける為、各観測前後に取得されたダークフレームの内、観測前に取得されたダークフレーム (プレダークフレーム) のみを本解析で用いた。

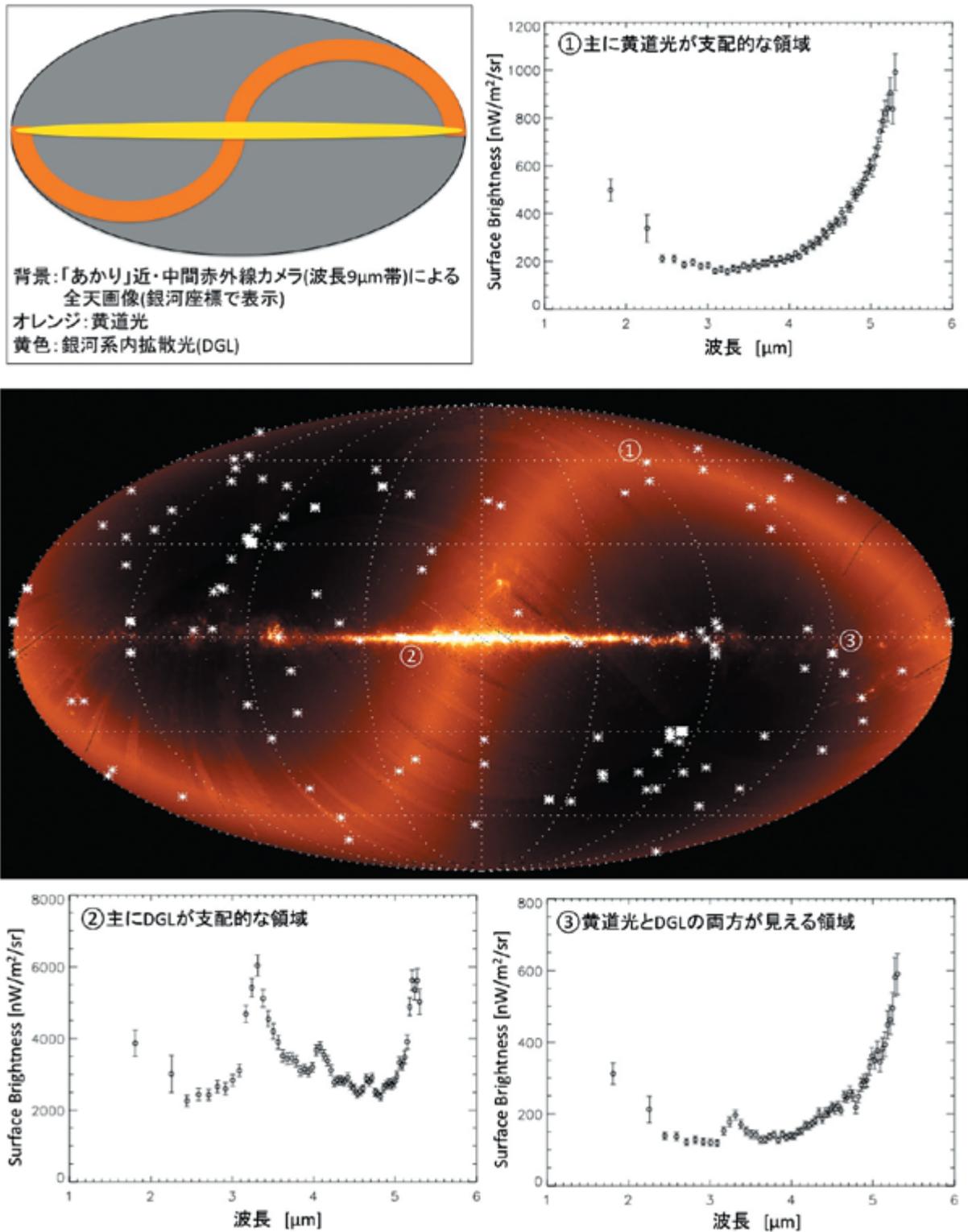


図 2: (中央) 「あかり」全天画像¹⁰⁾(波長 9 μm 帯)^d 上に、今回の解析に用いた 278 カ所の観測地点を示す。全天画像は、観測したままの空の明るさを反映している。図の中央に左右に広がるのが銀河面(天の川)で、それに対して大きくカーブして見える光の帯が黄道光である。(右上、左下、右下) 数字で示した地点の「あかり」近赤外線スペクトル。場所により、黄道光が主成分となっている領域、DGL が主成分となっている領域、両者の成分が見えている領域がある。

^d 「あかり」波長 9 μm 帯全天画像は、名古屋大学が中心となって作成を進めており、2016 年春までに公開の予定である。今回使用したのは、黄道光を含むデータ処理の中間過程の画像である。

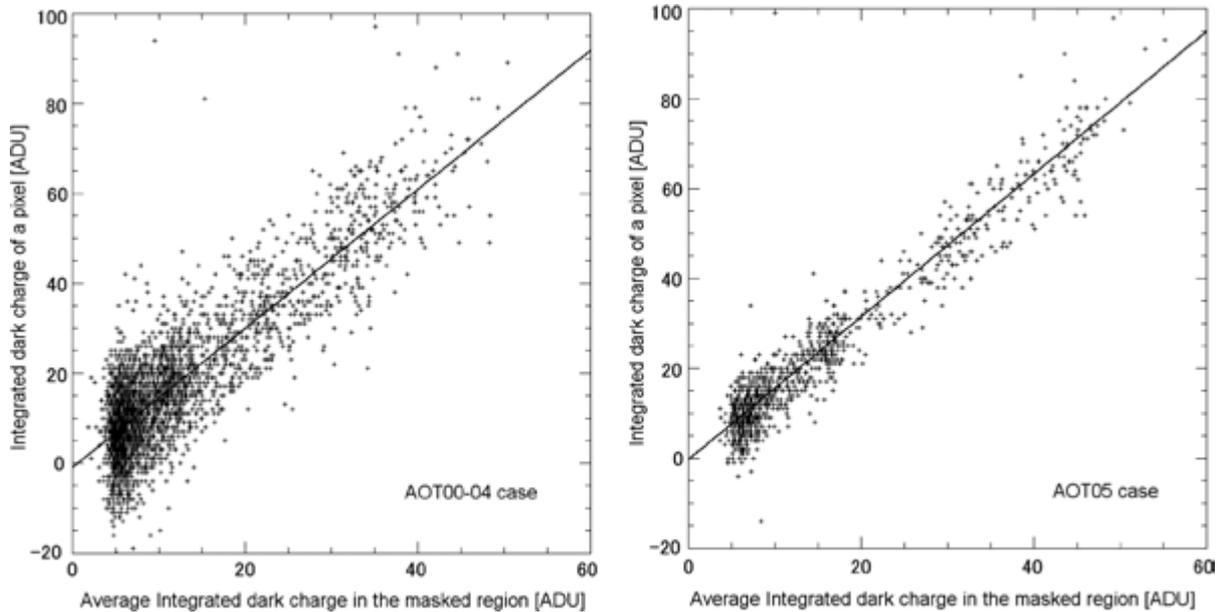


図 3: コールドシャッターを閉じて取得したダークフレーム 4500 枚における, 暗領域内の暗電流の平均値と, あるピクセル $(i,j)=(301,200)$ における暗電流値の相関の例¹³⁾. この相関の傾きが A_{ij} , y 切片が B_{ij} となる. 左右の図は異なる観測モード (Astronomical Observation Template, AOT²⁾) の結果を示している.

ダークフレームを用いていることから, この手法による暗電流差し引きの不定性は 1 ADU 程度 (IRC の N2 バンドで $3 \text{ nWm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 相当) で, 従来の手法と比べ 5 倍以上良い¹³⁾.

この手法の肝は, 焦点面上に暗領域を用意した事で, 暗電流を常にモニターできる設計となっていた点である. この手法は焦点面上に暗領域さえあれば, 天文衛星に限らず, SAA を通過する軌道の地球観測衛星等にも応用可能である.

2.3 点源のマスク

データによってはスリット上に点源が存在する場合があるが, 本研究では面輝度スペクトルに興味がある為, このような点源はマスクする. 「あかり」のデータセットには, 観測モード (Astronomical Observation Template, AOT²⁾) によって複数のスペクトル画像が格納されているが, 衛星の姿勢安定性の問題から, スリット上の点源の位置もこれらの画像間で微妙に異なる (図 4). そこで, 各画像上で点源の位置を検出しマスクした. 点源検出は最も高い S/N で点源検出できる波長 $2 \mu\text{m}$ 付近で行い, ベガ等級で $m_K = 19$ までの点源を検出し, その点源を全波長に対してマスクした (図 4). これより暗い銀河系内の星からの面輝度に対する寄与は TRILEGAL モデル¹⁴⁾ によって評価し, 無視できる事を確認した. また, これより暗い銀河からの面輝度に対する寄与は, ディープサーベイ¹⁵⁾ の結果から K バンドで $<4 \text{ nWm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ と推定される.

また, 星マスクと同時にホットピクセルもマスクした. まず, 最もシグナルが強い波長 $2 \mu\text{m}$ 付近のシグナルより 1.5 倍以上大きな値を持つピクセルを, 明らかなホットピクセルとしてマスクする. その後, 各波長ごとに対応するピクセルを 3σ クリッピングの後に平均した. この操作により, 弱いホットピクセルも取り除いた上で, スペクトル画像から 1 次元のスペクトルを導出した.

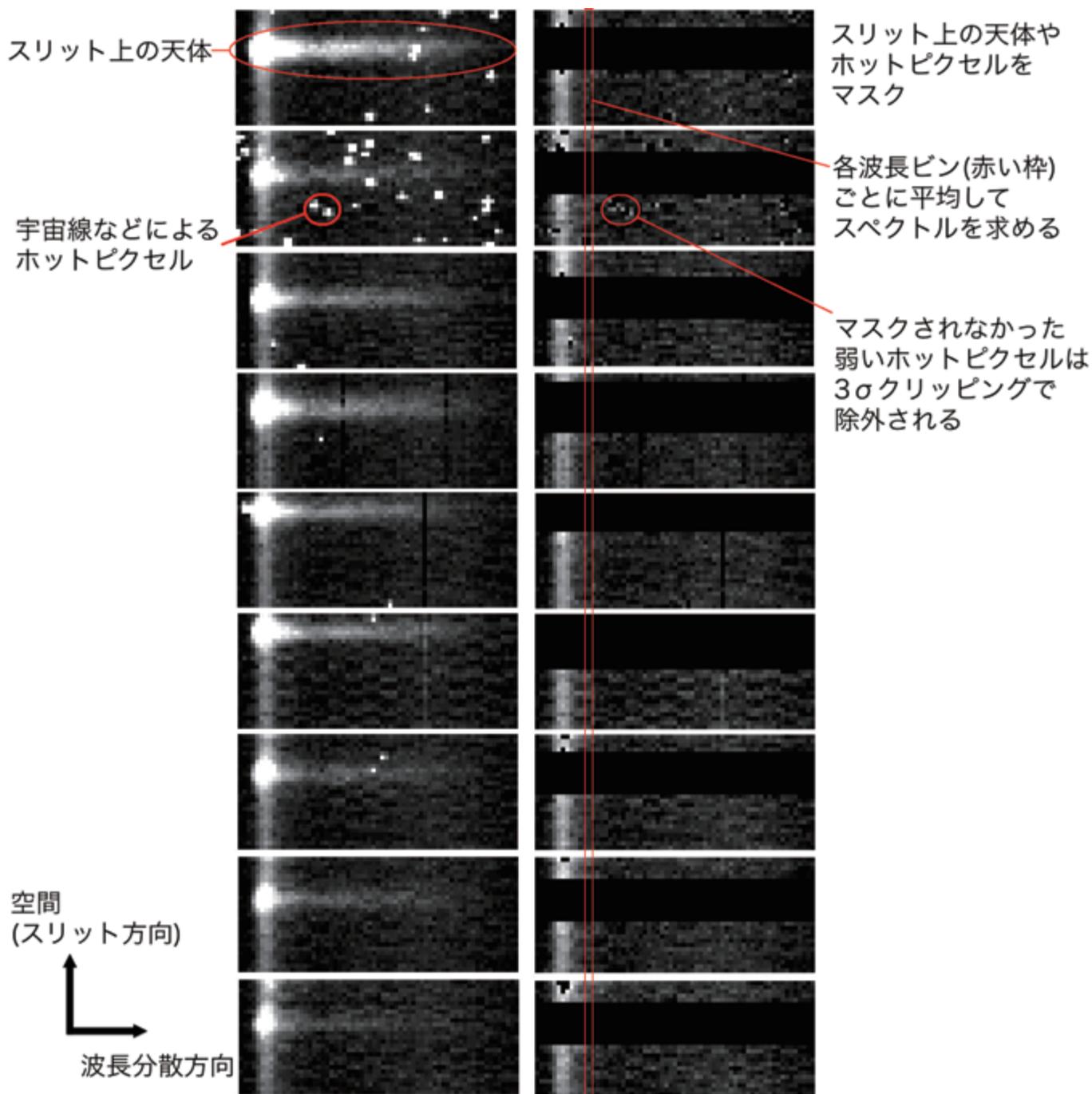


図 4: スペクトル領域におけるマスクングの例. これらの図は同一天域を連続してデータ取得したときの例であり、点源の位置がわずかにずれているのは衛星の姿勢安定性によるものである。左図の各生画像に存在する点源が、右図ではホットピクセルと共にマスクされている。この後、各波長ビンごとにピクセルを 3σ クリッピングの後に平均を求め、1次元スペクトルを得た。

2.4 フラックスキャリブレーション

この段階で得られた1次元スペクトルは、検出器の出力単位であるADUで出力されている。これをスペクトルが既知の標準天体と比較する事で、物理的な単位に焼き直す必要がある。本研究では標準天体として、KF09T1というK0III型星($m_H = 8.11$ mag)を用いた。この天体のスペクトルは3%の精度で与えられており、Spitzer/IRACの標準光源としても利用されている天体である¹⁶⁾。

フラックスキャリブレーションの精度を決めているのは標準天体の位置決定精度である。標準天体は撮像領域でのスリットレス分光によりスペクトルデータが得られているが、その位置をサブピクセル精度で決める事は不可能であり、その位置不定性起因の波長不定性が最終的なフラックスキャリブレーション精度を決める要因となり、特にその不定性はプリズムによる分散が小さい(1ピクセルあたりの $\Delta\lambda$ が大きい)最短波長(<2 μm)で顕著である。そこで、標準天体の位置決定精度を ± 0.5 ピクセルとして、それに起因するエラーをキャリブレーションエラーに加えた。さらに、最短波長では分散が小さいため星のエネルギーが密集しシグナルが強い為、PSFの裾野の影響も大きい。そこで、撮像における最短波長フィルターであるN2フィルター(波長2.4 μm 帯)での撮像データにおけるPSFを、分光データの最短波長に適応する解析手法を採用した。これらの処理を経た最終的なフラックスキャリブレーションによる系統誤差を図5に示す。

2.5 過去のデータとの比較

以上の処理を全データに対して適応し、各天域における面輝度スペクトルを導出し、カタログ化した。これらのカタログ化されたスペクトルの妥当性を確認する為、以下の2種類の独立した観測データと比較した。

最初は、日本初の宇宙赤外線望遠鏡 Infrared Telescope in Space (IRTS)¹⁷⁾による波長1.4-4.0 μm での面輝度分光データ¹⁸⁾との比較である。「あかり」とIRTSでほぼ同じ天域で面輝度分光観測を行ったデータが数点存在する。そこで、波長2.2 μm における黄道光の季節変化を後述の黄道光モデル¹⁹⁾で計算して補正した後と比較し、互いに誤差の範囲でスペクトルが一致している事を確認した(図6)。

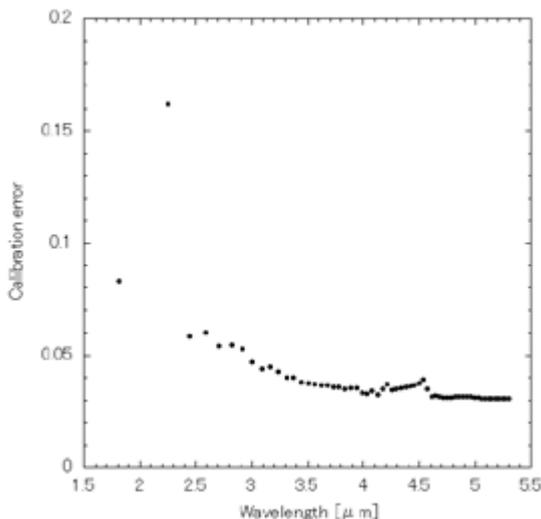


図5: フラックスキャリブレーションの最終的な系統誤差³⁾。波長2 μm 付近では波長分散が粗くなるため、位置決め誤差による波長決定誤差が、フラックス誤差に混入している。

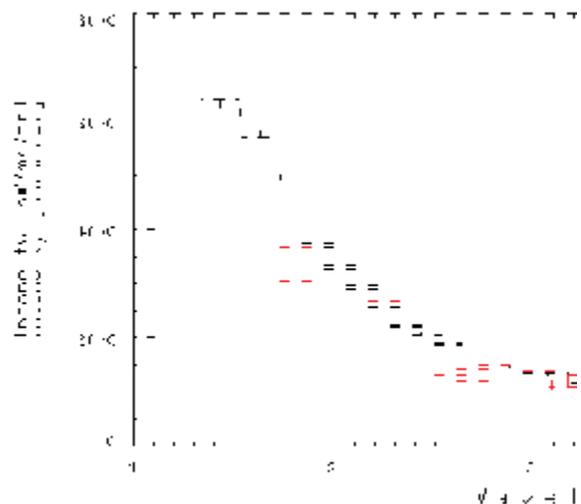


図6: 「あかり」(赤)とIRTS(黒)の面輝度スペクトルの比較の例³⁾。黄道座標で $(\lambda, \beta) = (130^\circ, 20^\circ)$ の天域を、1995年4月にIRTSが観測したデータ¹⁸⁾と、2006年12月に「あかり」が観測したデータを、黄道光の季節変化の補正をした後に比較している。

もう一つは、北黄極領域で同時期に同じ IRC で観測された撮像データ¹⁷⁾ との比較である。この撮像データは、N2 フィルター (波長 2.4 μm 帯), N3 フィルター (波長 3.2 μm 帯), N4 フィルター (波長 4.1 μm 帯) に限られるが、深い撮像観測のため前景のより暗い点源まで取り除いた上で面輝度を導出できている。この結果とも互いに誤差の範囲で輝度が一致している事を確認した。

3. 赤外線面輝度スペクトルの成分分離

3.1 黄道光 (ZL)

作成された面輝度スペクトルは、以下の 3 成分が含まれている。

$$SKY_i(\lambda) = ZL_i(\lambda) + DGL_i(\lambda) + EBL_i(\lambda) \quad (2)$$

ここで i は、作成した 278 点の面輝度スペクトルを区別するデータ番号である。まずは主成分である黄道光について解析し、黄道光を成分分離する手法を確立した³⁾。この解析においては、事前に後述の手法で DGL の差し引きをした上で解析を進めた。波長 3.3 μm の多環芳香族炭化水素 (Polycyclic Aromatic Hydrocarbon, PAH) バンドは高銀緯・低黄緯の領域では検出されなかった為、黄道光スペクトル内に PAH バンドは無いといえる。

黄道光は季節および場所によって輝度に変化する。最初に季節変化を探る為に、北黄極領域を異なる季節で観測した面輝度スペクトルデータを比較した (図 7)。この図から、黄道光のスペクトルは、同じ天域での季節変化においては、スペクトルの形状は変化せず、全体的な輝度だけが変化する事が分かる。一方で、黄道面 (黄道光が最大) と北黄極領域 (黄道光が最小) での面輝度スペクトルデータを比較したのが図 8 である。図 8 (右) を見ると、両者のスペクトルの比は波長 3.5 μm を境に段差になっており、その両側では平坦となっている事が見て取れる。これは、黄道光の散乱光成分 (波長 < 3.5 μm) と熱放射成分 (波長 > 3.5 μm) それぞれのスペクトルの形状は場所によって変化しないが、天域によって両者の比は変化していると理解できる。従って、黄道光のスペクトルを成分分離する場合は、この 2 成分に分けて考える必要がある。

黄道光のスペクトル形状のみを抽出する為、まずは黄道面と北黄極領域の差分スペクトルを求めた。これにより両者に共通する背景放射のスペクトルはキャンセルされる。その差分スペクトルを、散乱光成分 (5800 K) と熱放射成分 (300 K) に分離した (図 9)。これらを黄道光のテンプレートスペクトルとして利用する。黄道光の輝度は、NASA の背景放射観測衛星 Cosmic Background Explorer (COBE) に搭載された Diffuse Infrared Background Experiment (DIRBE) の観測に基づく黄道光モデル¹⁹⁾ の値に準拠した。この DIRBE 黄道光モデルは、任意の日時と座標を入力すると、波長 1.25 μm から波長 240 μm までの 10 バンドの黄道光の値が出力される。手元の面輝度スペクトルカタログの全データに対しこの DIRBE 黄道光モデルの値を計算し、波長 2.2 μm のモデル値に対して散乱光成分を、波長 4.9 μm のモデル値に対して熱放射成分を以下の式で合わせる事で、各データに対する黄道光スペクトルを導出した。

$$ZL_i(\lambda) = ZL_i^{\text{scat}}(\lambda) + ZL_i^{\text{thermal}}(\lambda) \quad (3)$$

$$ZL_i^{\text{scat}}(\lambda) = \text{DIRBE}_i^{2.2\mu\text{m}} \cdot ZL_{\text{temp}}^{\text{scat}}(\lambda) \quad (4)$$

$$ZL_i^{\text{thermal}}(\lambda) = [\text{DIRBE}_i^{4.9\mu\text{m}} - ZL_i^{\text{scat}}(4.9\mu\text{m})] \cdot ZL_{\text{temp}}^{\text{thermal}}(\lambda) \quad (5)$$

得られた黄道光スペクトルの波長 3.5 μm での値は、波長 3.5 μm でのモデル値とよく一致している事も確認した。図 10 は、この手法によって得られた黄道光スペクトルを、過去に大気圏外から得られた黄道光スペクトル 18, 21, 22, 23, 24) と比較したもので、本手法による黄道光スペクトルは過去の観測結果とよく一致している事が確認された。これにより、DIRBE 黄道光モデル¹⁹⁾ を援用する事で、任意の時刻・天域において波長 1.8-5.3 μm での黄道光スペクトルを求められるようになった。

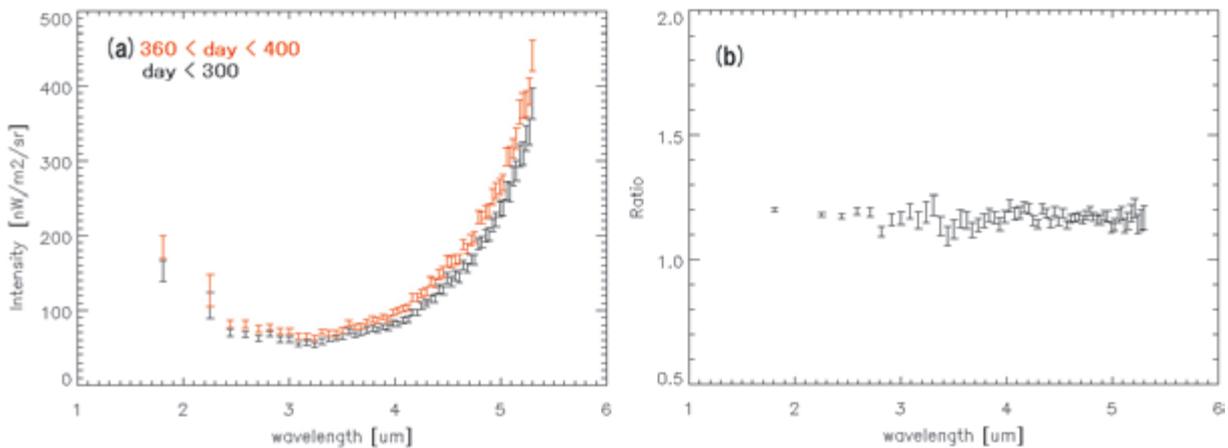


図 7: 北黄極領域での面輝度スペクトル (黄道光が支配的) の季節変化³⁾. (左) 2006 年 1 月 1 日から起算した場合の, 250-300 日目 (黒) と 360-400 日目 (赤) の面輝度スペクトル平均値の比較. エラーバーは統計誤差と系統誤差の両者を含んでいる. (右) 2つのスペクトルの比. 波長依存せず全体的に輝度が変化している事が分かる. キャリブレーション起因の系統誤差はキャンセルされる為, エラーバーは統計誤差のみ含んでいる.

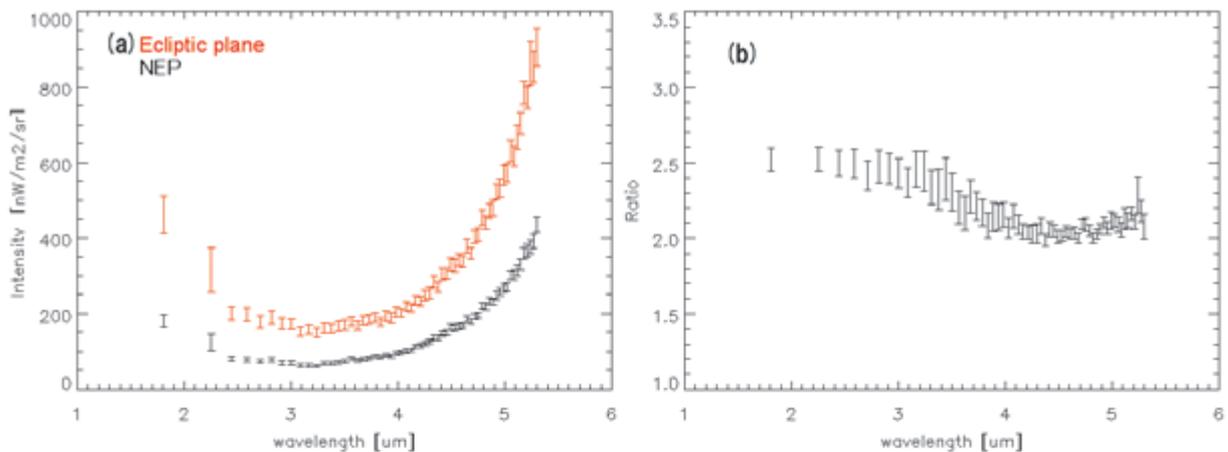


図 8: 面輝度スペクトル (黄道光が支配的) の黄緯依存性³⁾. (左) 黄道面 (赤) と北黄極領域 (黒) の面輝度スペクトルの比較. (右) 2つのスペクトルの比. 散乱光成分と熱放射成分の境界である波長 3.5 μm 付近に明らかな段差が見える. エラーバーについては図 7 と同様.

3.2 銀河系内拡散光 (DGL)

DGL と星間ダストからの熱放射との相関関係を用いて, 一般の星間空間における DGL の成分分離に世界で初めて成功した⁴⁾. まず, DGL が最大となる波長 3.3 μm 帯 PAH バンドの輝度 ($E_{3.3}$) を抽出し, 銀河系内の星間ダストからの波長 100 μm 帯での熱放射 (SFD マップ)²⁵⁾ および中性水素の柱密度²⁶⁾ との相関を調べた (図 11). この結果から, DGL は中性水素の柱密度よりも波長 100 μm 帯での熱放射との方が相関が強く, 波長 100 μm 帯での熱放射が極めて強い銀河面を除いて, 良い線形相関がある事が確認された. 波長 100 μm 帯での熱放射が中性水素の柱密度よりも相関が良い理由は, 中性水素のデータの方が空間分解能が悪い為である.

次に, この DGL と波長 100 μm 帯での熱放射 ($\lambda I_i^{100\mu\text{m}}$) との良い線形相関関係を用いて, DGL のスペクトルを抽出した. 3.1 節で求めた黄道光を差し引くと, 空間相関するのは DGL だけとなる為, 以下のように書ける.

$$SKY_i(\lambda) - ZL_i(\lambda) = a(\lambda) \cdot \lambda I_i^{100\mu\text{m}} + EBL_i(\lambda) \quad (6)$$

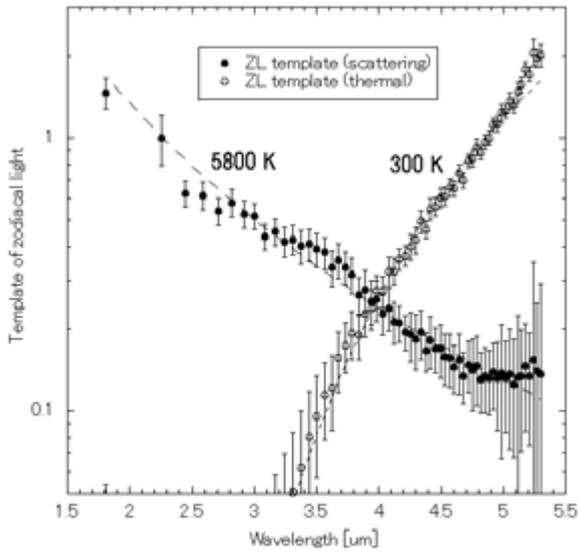


図 9: 黄道光の散乱光成分 (5800 K) と熱放射成分 (300 K) のテンプレートスペクトル³⁾. 波長 2.2 μm および 4.9 μm で規格化してある.

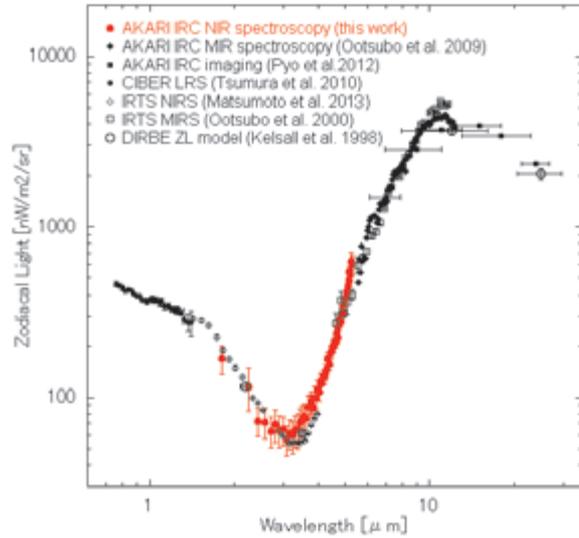


図 10: 高銀緯・高黄緯領域での、今までに大気圏外から取得された黄道光スペクトル³⁾. 全てのデータは DIRBE 黄道光モデル¹⁹⁾ に対して合わせている.

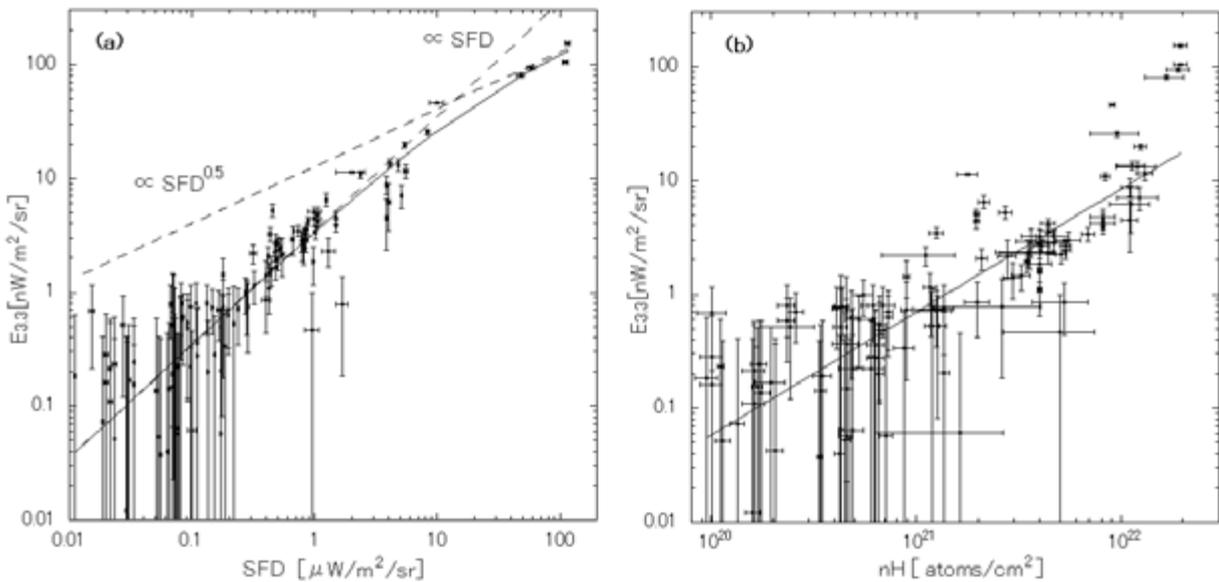


図 11: 面輝度スペクトル内の波長 3.3 μm 帯 PAH バンドの輝度 ($E_{3.3}$) と、星間ダストからの波長 100 μm 帯での熱放射 (左) および中性水素の柱密度 (右) との相関⁴⁾. 銀河面付近の高密度領域を除き、良い線形相関が見られる.

そこで、DGL と波長 $100 \mu\text{m}$ 帯での熱放射との線形相関を用いるため、 $\lambda I_{100\mu\text{m}} < 3 \mu\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ (銀緯で $|b| > 5^\circ$ に相当) のみのデータを用いて、各波長ごとにその相関を調べた。図 12 がその相関を示しており、各波長での傾き $a(\lambda)$ が、主に $5^\circ < |b| < 15^\circ$ での DGL のスペクトル形状となる。この相関解析による DGL 抽出の誤差は、波長 $< 3.8 \mu\text{m}$ で 5%、波長 $3.8 \mu\text{m}$ から $4.2 \mu\text{m}$ で 15%、波長 $> 4.2 \mu\text{m}$ で 20% であった。この DGL スペクトル形状 $a(\lambda)$ が天域によらず一定と仮定する事で、DGL のスペクトルは以下のように書ける。

$$DGL_i = a(\lambda) \cdot \lambda I_i^{100\mu\text{m}} \quad (7)$$

これにより、波長 $100 \mu\text{m}$ 帯での星間ダストからの放射マップ²⁵⁾を援用する事で、任意の天域において波長 $1.8\text{--}5.3 \mu\text{m}$ での DGL スペクトルを求められるようになった。得られた DGL スペクトルを図 13 に示す。本研究により得られた DGL スペクトルは、過去の DGL スペクトルの推定値^{27, 28)}より低い値になっているが、以下の理由により本研究の DGL 推定の方が正しい。過去の推定は波長 $100 \mu\text{m}$ 帯での熱放射よりも相関が悪い中性水素の柱密度を用いており、しかも数点の高密度領域 ($\text{HI} \sim 2 \times 10^{22} \text{ atoms/cm}^2$) に依存している。しかし、図 11 (右) から明らかなように、中性水素の高密度領域 ($\text{HI} > 10^{22} \text{ atoms/cm}^2$) においては系統的に DGL との相関からずれており、これが原因で過去の推定では DGL を大きく見積もっていた。

尚、実際の解析においては、3.1 節での黄道光の成分分離と本節での DGL の成分分離を反復し、両者の収束解を求めている。

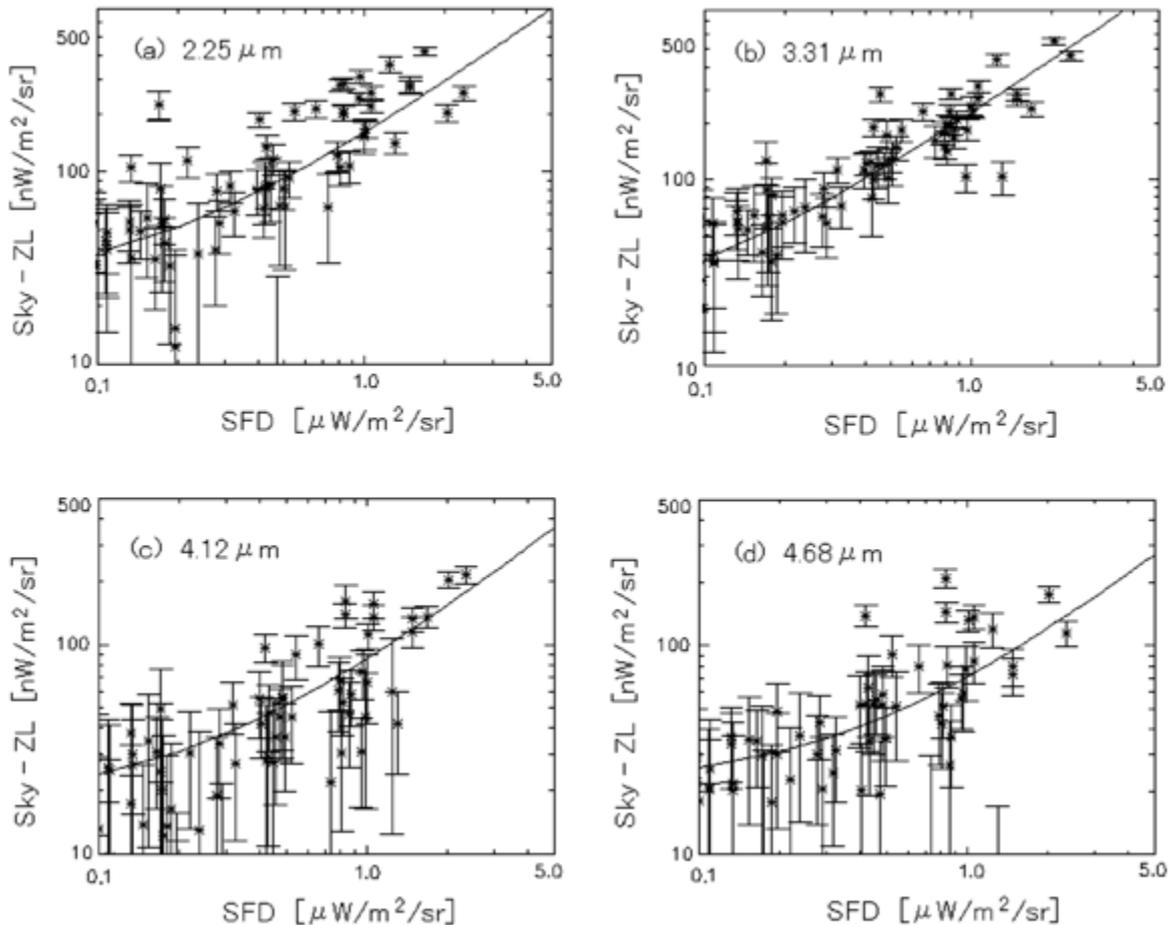


図 12: いくつかの波長における、 $SKY_i(\lambda) - ZL_i(\lambda)$ と波長 $100 \mu\text{m}$ での熱放射 ($\lambda I^{100\mu\text{m}}$) との相関。

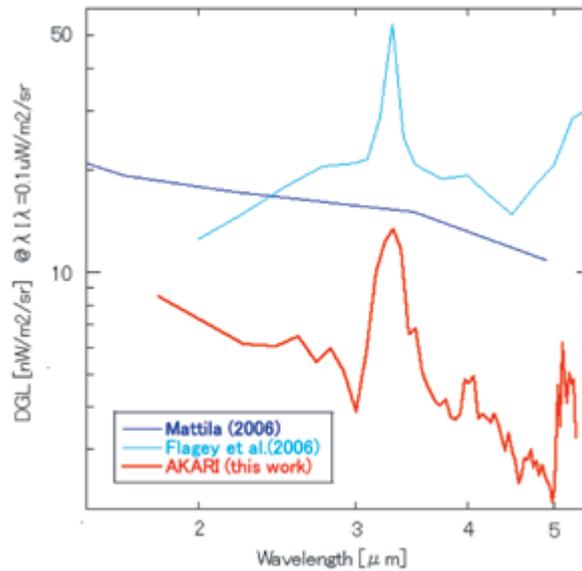


図 13: $\lambda I^{100\mu m} = 0.1 \mu W m^{-2} sr^{-1}$ ($HI = 5 \times 10^{20}$ atoms/cm² に相当) でスケーリングした DGL のスペクトル⁴⁾.

3.3 銀河系外背景光 (EBL)

前節までで成分分離された前景光 (ZL および DGL) を差し引く事で、一様な EBL を抽出した⁵⁾。下記のように、各波長ごとに 3.2 節で求めた DGL の観測値を差し引き、これと 3.1 節で求めた黄道光との相関を取った。

$$SKY_i(\lambda) - DGL_i(\lambda) = C(\lambda) \cdot ZL_i(\lambda) + EBL(\lambda) \quad (8)$$

この相関関係を示したのが図 14 である。この図において、傾き $C(\lambda)$ が黄道光の補正項でほぼ 1 の値を取り (誤差約 5%), y 切片がここで求めたい背景放射 $EBL(\lambda)$ を表している。誤差としては、黄道光や DGL の推定に伴う不定性と、キャリブレーションに起因する不定性とが支配的である。これらを考慮した最終的な EBL の決定精度は、波長にもよるが約 30% 程度である。

図 15 に、この手法で求められた EBL のスペクトルを、過去に求められた EBL^{18, 29, 30, 31)} および既知の銀河の積算値^{15, 32, 33, 34, 35)} とともに示す。波長 $< 4 \mu m$ では有意な EBL を検出できており、過去の観測同様、既知の銀河の積算値からの超過も確認された。得られた EBL は黄道座標・銀河座標ともに依存しておらず、空間的に一様だということも確認した。ただし注意しなければならない点として、本研究を含む過去の EBL の測定はほぼ全て、最大の前景光である黄道光の輝度はモデルに依存しているという点である。もし DIRBE 黄道光モデル¹⁹⁾ では表現されていないような黄道光の一様成分が存在した場合、そのような成分は本手法では一様な EBL に含まれてしまっているという点に注意が必要である。

このように観測的に EBL を求める事は、点源として検出できない遠方もしくは暗い天体からの寄与が宇宙進化にどのような影響を与えたかを探る上で重要である。特に本研究で検出された EBL 超過を説明する為には、初期宇宙での大規模な初代星形成^{36, 37, 38, 39, 40, 41)} や、銀河周囲に広がった intrahalo light による寄与⁴²⁾ など未知の光源を考える必要がある、それらの宇宙進化に与える影響を定量的に見積もる為にも、本研究により EBL のスペクトルを観測的に決めた事には大きな意義がある。

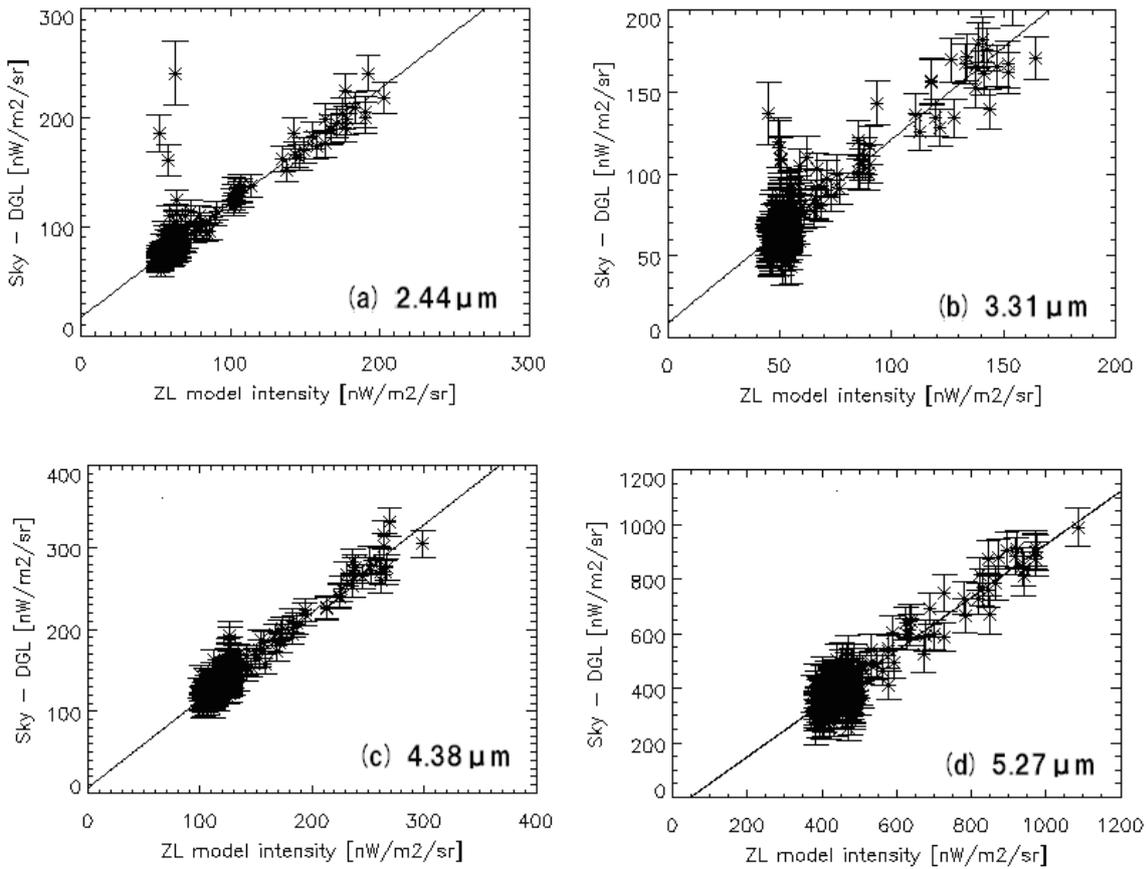


図 14: いくつかの波長における, $SKY_i(\lambda) - DGL_i(\lambda)$ と黄道光 ($ZL_i(\lambda)$) との相関⁵⁾. y 切片が一樣な背景放射 $EBL(\lambda)$ を表している.

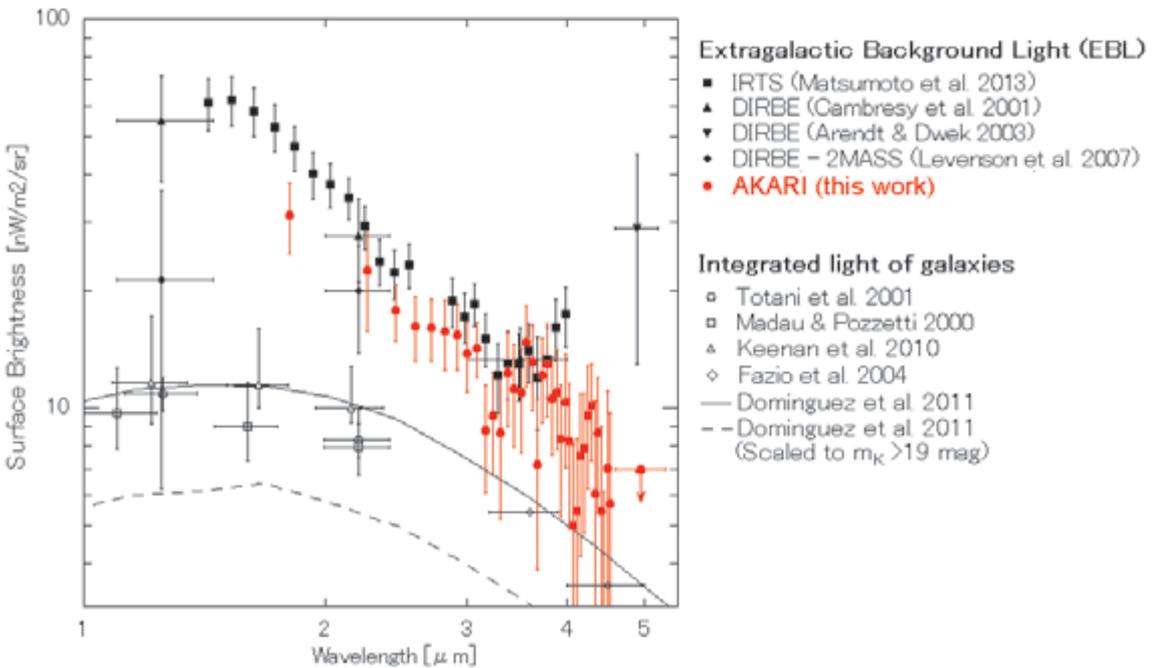


図 15: EBL および銀河の積算のスペクトル⁵⁾. 赤のデータ点が本研究で求められた EBL のスペクトル, 黒のデータ点が過去の IRTS および DIRBE による EBL で, 白抜きデータ点が既知の銀河の積算値を示している. 本研究により求めた EBL が, K バンドで 19 等より暗い銀河の積算値 (点線) から超過している事が確認できる.

4. まとめ

赤外線天文衛星「あかり」搭載の近・中間赤外線カメラ InfraRed Camera(IRC) によるアーカイブデータを用いて、波長 1.8-5.3 μm での面輝度スペクトルカタログを作成し公開した。このデータを用いて、任意の時刻・天域における黄道光および DGL のスペクトルを求める手法を開発した。この手法により、観測された空のスペクトルから前景の黄道光および DGL を成分分離する事に成功し、一様な EBL スペクトルを導出する事ができた。

謝辞

本研究は赤外線天文衛星「あかり」による観測データを用いた成果である。「あかり」は、宇宙航空研究開発機構 (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA) が欧州宇宙機関 (European Space Agency, ESA) との協力の下に実現させたプロジェクトである。本研究の実現にあたり、「あかり」IRC チームの皆様からの協力を頂いた。また、白井文彦氏 (東京大学) および山村一誠氏 (ISAS/JAXA) にはデータ公開についてお世話になった。これらの皆様にお礼を申し上げます。本研究は文部科学省および日本学術振興会の科学研究費補助金 (21111004, 24111717, 26800112) の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) Murakami, M., et al. 2007, PASJ, 59, S369
- 2) Onaka, T., et al. 2007, PASJ, 59, S401
- 3) Tsumura, K., Matsumoto, T., Matsuura, S., Pyo, J., Sakon, I., & Wada, T. 2013, PASJ, 65, 119
- 4) Tsumura, K., Matsumoto, T., Matsuura, S., Sakon, I., Tanaka, M., & Wada, T. 2013, PASJ, 65, 120
- 5) Tsumura, K., Matsumoto, T., Matsuura, S., Sakon, I., & Wada, T. 2013, PASJ, 65, 121
- 6) Nakagawa, T., et al. 2007, PASJ, 59, S377
- 7) Ohyama, Y., et al. 2007, PASJ, 59, S411
- 8) Yamauchi, C., et al. 2011, PASP, 123, 852
- 9) Pyo, J., et al. 2010, A&A, 523, A53
- 10) 石原他, 2012, 宇宙科学情報解析論文誌, 2, 39
- 11) Werner, M. W., et al. 2004, ApJS, 154, 1
- 12) Fazio, G. G., et al. 2004a, ApJS, 154, 10
- 13) Tsumura, K. & Wada, T. 2011, PASJ, 63, 755

- 14) Girardi, L., Groenewegen, M. A. T., Hatziminaoglou, E., & da Costa, L. 2005, *A&A*, 436, 895
- 15) Keenen, R. C., Barger, A. J., Cowie, L. L., & Wang, W. -H. 2010, *ApJ*, 723, 40
- 16) Reach, W. T., et al. 2005, *PASP*, 117, 978
- 17) Murakami, M., et al. 1996, *PASJ*, 48, L41
- 18) Matsumoto T., et al. 2005, *ApJ*, 626, 31
- 19) Kelsall, J. L, et al. 1998, *ApJ*, 508, 44
- 20) Matsumoto, T., et al. 2011, *ApJ*, 742, 124
- 21) Ootsubo, T., et al. 2009, in *ASP Conf. Ser.*, 418, *AKARI, a Light to Illuminate the Misty Universe*, ed. T. Onaka, G. J. White, T. Nakagawa, & I. Yamamura (San Francisco, CA: ASP), 395
- 22) Pyo, J., Matsumoto, T., Jeong, W. S., & Matsuura, S., 2012, *ApJ*, 760, 102
- 23) Tsumura, K., et al. 2010, *ApJ*, 719, 394
- 24) Ootsubo, T., et al. 2000, *Adv. Space Res.*, 25, 2163
- 25) Schlegel, D. J., Finkbeiner, D. P., & Davis, M. 1998, *ApJ*, 500, 525
- 26) Kalberla, P. M. W., et al. 2005, *A&A*, 440, 775
- 27) Mattila, K. 2006, *MNRAS*, 372, 1253
- 28) Flagey, N., et al. 2006, *A&A*, 453, 969
- 29) Cambresy, L., Reach, W. T., Beichman, C. A., & Jarrett, T. H. 2001 *ApJ*, 555, 563
- 30) Arendt, R. G. & Dwek, E. 2003, *ApJ*, 585, 305
- 31) Levenson, L. R., & Wright, E. L. 2007, *ApJ*, 666, 34
- 32) Totani, T., Yoshii, Y., Iwamuro, F., Maihara, T., & Motohara, K. 2001, *ApJ*, 550, L137
- 33) Madau, P., & Pozzetti, L. 2000, *MNRAS*, 312, L9
- 34) Fazio, G. G., et al. 2004b, *ApJS*, 154, 39
- 35) Domínguez, A., et al. 2011, *MNRAS*, 410, 2556
- 36) Santos, M. R., Bromm, V., & Kamionkowski, M. 2002, *MNRAS*, 336, 1082
- 37) Salvaterra, R. & Ferrara, A. 2003, *MNRAS*, 339, 973
- 38) Cooray, A., & Yoshida, M. 2004, *MNRAS*, 351, L71
- 39) Dwek, E., Arendt, R. G. & Krennrich, F. 2005, *ApJ*, 635, 784
- 40) Madau, A., & Silk, J. 2005, *MNRAS*, 359, L37
- 41) Fernandez, E. R., & Komatsu, E. 2006, *ApJ*, 646, 703
- 42) Cooray, A., et al. 2012, *Nature*, 490, 514

SELENE 搭載 α 線検出器データ処理と ラドン α 線強度分布マップ解像度の改善

木下克之^{*1}, 野口冬馬^{*1}, 伊藤真之^{*1}, 高島 健^{*2}, 三谷烈史^{*2},
柏木利介^{*3}, 奥野祥二^{*3}, 西村 純^{*2}

Data Processing of the Alpha-Ray Detector onboard SELENE and Improvement of the Resolution of Radon α -Particle Intensity Map

Katsuyuki KINOSHITA^{*1}, Toma NOGUCHI^{*1}, Masayuki ITOH^{*1}, Takeshi TAKASHIMA^{*2},
Takefumi MITANI^{*2}, Toshisuke KASHIWAGI^{*3}, Shoji OKUNO^{*3}, Jun NISHIMURA^{*2}

Abstract

Alpha-ray detector (ARD) onboard SELENE was designed for detecting α -particles emitted by ^{222}Rn emanated on the lunar surface and its descendent nuclear species ^{210}Po . Distribution and variation of radon gas measured by the α -particle signal is expected to provide information on the subsurface uranium distribution, crustal structures including faults, and behavior of the thin atmosphere of the moon. In this paper, we describe the flow of ARD data processing and a method to derive the α -particle intensity distribution utilizing the angular response of the detector which is applied to the radon α -particle observations for the first time. The method improves the resolution of the α -particle intensity map and enables detailed comparison with the geographical features of the lunar surface.

Keywords: Moon, Radon α -particle, Data processing, SELENE

概要

月周回探査衛星 SELENE に搭載された α 線検出器 (ARD : Alpha-Ray Detector) は月面から放出される ^{222}Rn およびその崩壊過程で生じる ^{210}Po から放射される α 線を観測し, 月表層下のウラニウムの分布および断層などの地殻構造, 月の希薄大気の動態等に関する情報を得ることを目的とする. 本論文では, ARD のデータ処理の流れと, 角度応答関数を考慮した月面の α 線強度分布の導出方法について紹介する. この方法は月ラドン α 線観測データの解析では始めて用いられるもので, α 線強度分布マップの解像度を向上し, 月地形等の詳細な比較を可能とする.

^{*1} 神戸大学大学院 人間発達環境学研究所 (Graduate School of Human Development and Environment, Kobe University)

^{*2} 宇宙科学研究所 太陽系科学研究系 (Department of Solar System Sciences, Institute of Space and Astronautical Science (ISAS))

^{*3} 神奈川大学工学部 (Department of Engineering, Kanagawa University)

1 はじめに

月周回探査衛星 SELENE (SELEnological and ENgineering Explorer) は 2007 年 9 月に JAXA により打ち上げられ、2009 年 6 月にミッションを終えた。SELENE には 14 種類の科学観測機器とハイビジョンカメラが搭載された^{1), 2)}。本論文では、粒子線検出器サブシステムに位置づけられる α 線検出器 ARD (Alpha-Ray Detector) のデータ処理の流れと、角度応答関数を考慮した月面の α 線強度分布の導出方法について紹介する。現在、種々の観測機器のデータは JAXA の SELENE データアーカイブ³⁾を通じて公開されている。ARD データも公開に向けた準備を進めている。

2 月のラドン α 線と SELENE/ARD の概要

2.1 月ラドン α 線観測

月面から放出されたラドンの α 線検出の可能性は、1966 年に Kraner 他により初めて指摘された⁴⁾。 ^{222}Rn は ^{238}U 崩壊系列に含まれるため、その崩壊によって放出される α 線はウラニウム分布の指標となる。 ^{222}Rn は半減期 3.8 日で崩壊し、5.490 MeV の α 線を放出する。 ^{222}Rn は α 崩壊後、何段階かの壊変を経て ^{210}Po へと至る。 ^{222}Rn から ^{210}Po へと至る時間スケールは、中間核種である ^{210}Pb の半減期 22.3 年によって支配される。 ^{210}Po は半減期 138 日で 5.305 MeV の α 線を放出する。すなわち ^{222}Rn α 線の検出は観測前 1 週間程度のラドンガスの放出、 ^{210}Po α 線の検出は過去数十年程度のガス放出の累積を反映する。月面の ^{222}Rn および ^{210}Po α 線を観測することで、月面から月面下のウラニウム分布、月面*⁴のガス放出箇所と関連する断層等の地殻構造、月希薄大気の動態等に関する情報が得られると期待される。

月面付近のラドン α 線は、Kraner らの提案から数年後に Apollo 計画において初めて検出された。1971 年に打ち上げられた Apollo 15 号、1972 年に打ち上げられた Apollo 16 号に α 線検出器 (APS: Alpha-Particle Spectrometer) が搭載され、その観測により、アリストアルコス・クレーター (Crater Aristarchus) や、月の海の周縁部でラドン α 線強度の増加が報告されている^{5), 6), 7), 8)}。ただし、検出された α 線強度は月面で地球表面と同程度のラドン放出があると仮定して計算した Kraner 他の予測の 1/500 程度であった。Apollo は月の赤道付近を周回する軌道を取っていたため観測は比較的低緯度領域に限られ、また観測期間も 10 日程度に留まった。その後、1998 年に打ち上げられた月探査衛星 Lunar Prospector にも APS が搭載され、再びラドン α 線観測が行なわれた。Lunar Prospector は極軌道を周回し 230 日程度にわたって月全球の観測を行なった^{9), 10)}。しかし、検出器サイズや宇宙線および太陽粒子によって制限されるデータの統計精度の限界から、 α 線強度分布マップの解像度は、月の赤道付近の緯度・経度で 10 度 (実距離で 300 km) 程度に留まり、月面の地形的特徴などの詳細な比較は難しかった。

*4 ラドンの速度と月の重力係数から、放出されたラドンガスは数 km 程度のスケールハイトで月にトラップされていると考えられる。

2.2 SELENE/ARD

SELENE の ARD は Apollo および Lunar Prospector に継ぐ月面ラドン α 線観測システムである¹⁾。ARD は検出器有効面積が Apollo および Lunar Prospector の α 線検出器と比較して一桁以上大きく、観測の統計精度の向上が可能となる。また重ね合わせた検出器との反同時計数により、宇宙線によるバックグラウンドを大幅に減らし、観測精度を大きく向上することを計画した。

ARD は面積 $2.6 \times 2.6 \text{ cm}^2$ 、厚さ $100 \mu\text{m}$ の Si 半導体素子 48 個で構成され、検出器有効面積は 326 cm^2 である。4 素子を 1 ユニットとし、4 ユニットの信号が一括して処理される設計で、これをチャンネルと呼ぶ (図 1)。検出器の各素子にはコリメータが設置されており、視野角は約 45 度 (FWHM) 平方、SELENE の月面高度 100km に対して月面視野で約 150 km 平方に設定されている。



図 1 ARD 外観。Si 半導体素子 46 個で構成されており、全体で 326 cm^2 の有効面積を持つ。2×8 個の素子をユニット (チャンネル) として、出力信号はチャンネルごとにまとめて処理される (写真上側よりチャンネル 1, 2, 3)。

ARD 検出器前面には可視光を遮蔽するために、電子ビーム蒸着により Au/Ni が厚さ約 2500 \AA で付されている。また、検出器裏面には高エネルギー宇宙線バックグラウンドを除去するための反同時計数用検出器 (厚さ $450 \mu\text{m}$ の Si 半導体) が付置されている。さらに、これらの検出器とは別に、主として検出器-信号処理系の温度変化に伴うエネルギーゲインの変動などの較正を目的として、同等の検出器にエネルギー較正用の ^{241}Am 線源を付した Radiation Monitor (以下 RM と略記する) と呼ばれるユニットがシステム内に設置されている。

SELENE は高度 100 km の極軌道 (軌道傾斜角 90 度) をとり、周期約 2 時間で月を周回した。衛星は ARD が設置された面が常時月中心方向を指向するように姿勢制御されており、ARD は衛星直下の月面領域を南北方向に走査する形で観測する。月の自転に伴って軌道は月面に対して西方向に移動するため、約半月で全球の観測が可能となる。

SELENE の月周回軌道投入後、取得されたデータから、ARD には下記のような問題が生じていることが明らかになった。

- (1) 反同時計数機能の不具合
- (2) 検出器への光漏れ
- (3) 異なるチャンネル間の信号の干渉

これらの詳細については軌道上の機器較正とあわせて別途報告を予定しているが、ここではデータ処理と α 線強度分布の導出に関係する点について簡単に述べる。反同時計数機能の不具合が生じていることから、データ処理・解析にあたっては、反同時計数処理を行っていないデータを用い、4節に述べる方法でバックグラウンドを推定して α 線シグナルを評価した。光漏れとチャンネル間の干渉については、それらの現象が生じて α 線シグナルの評価に影響を与えうる時間帯を除去する形で処理した。

3 ARD のデータ処理

本節では、ARD のデータ処理の流れについて述べる。図2にその概要を示した。

ARD テレメトリーデータは1秒単位のフレームとしてまとめられており、フレーム内には、衛星時刻、当該フレームに対応する時間に検出されたARD のイベント情報、およびRM のイベント情報が含まれる。このうち、ARD のイベント情報は、イベント検出時の3チャンネルごとの、出力パルスハイトおよび反同時計数フラッグの情報から成る。また、RM のイベント情報は出力パルスハイトから成る。ARD データ処理の第一段階としては、初期処理が施されたテレメトリーデータから、ARD のイベントリストを格納したイベントファイルとRM のイベントリストを格納したイベントファイルを生成する。このイベントファイルでは、イベントごとに、1秒を単位として時刻情報が付加されている。イベントファイルには、CERN (欧州加速器研究機構) で開発され、粒子物理学および高エネルギー宇宙物理学の衛星観測などの分野で広く利用されているデータ解析フレームワーク ROOT のファイル形式を用いた。

次に、ARD イベントファイルに対して、衛星軌道情報を参照して、イベントごとに検出時の視野中心の座標 (衛星直下の経度、緯度) を付加する。その際、NAIF (The Navigation and Ancillary Information Facility) による SPICE ツールを利用している。

較正用線源 ^{241}Am の α 線による信号出力を含むRM のデータは、ARD のエネルギーゲインの変動に対する補正に利用する。ARD のエネルギーゲイン G_{ARD} は主としてARD を含む粒子線検出器の信号処理回路 GPE の温度 T_{GPE} と相関している。ただし、両者の関係には観測時期による変化が見られることから、GPE の温度変動に応じて観測をいくつかの期間に分割し、それらの時期ごとに T_{GPE} と G_{ARD} の関数関係 $G_{ARD}(T_{GPE})$ を決定した。これを用いてARD イベントファイルのイベントごとのパルスハイト値をエネルギー値に換算し、その情報をイベントファイルに追記する。エネルギーゲインの温度依存性とその補正に関する詳細は、別途ARD の軌道上の性能と較正に関する論文で報告する。なお、ARD 検出器およびGPE の温度などのデータはSELENE 衛星の House Keeping データに含まれており、ARD の解析に必要な House Keeping 情報のみを抽出したファイルを別に作成している。

次に、上記のイベントファイルを用いて、光漏れなどが生じ解析に適さない時間帯を同定し、それらを除外することにより、最終的に科学解析に供するイベントファイルを生成する。

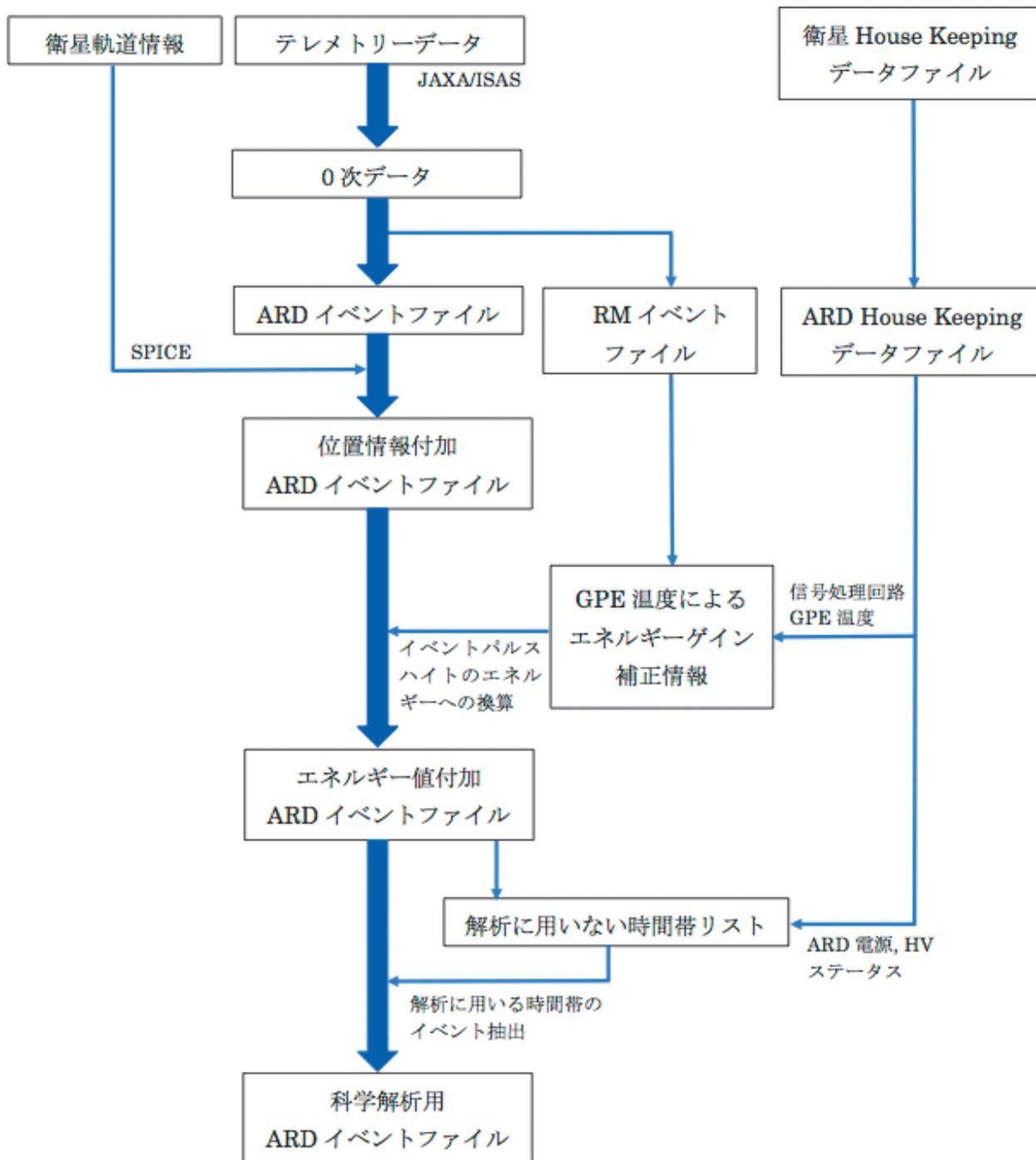


図 2 ARD のデータ処理の流れ (詳細は本文を参照).

4 検出器角度応答を反映した α 線強度分布の導出

Apollo および Lunar Prospector の過去の観測・データ解析においては、 α 線がイベント検出時の観測視野中心で発生したものと近似し、これを月面上に設定したピクセルで集積する形で α 線強度分布が報告されている。ピクセルサイズは、赤道付近において、Apollo の場合で経度 20 度×緯度 10 度 (実距離で約 600 km

×300 km), Lunar Prospector の場合で経度 10 度×緯度 15 度 (実距離で約 300 km×450 km) となっている。この方法では、得られる強度分布図の解像度が、角度応答によって決まる検出器本来の位置分解能より低くなるほか、月面上に設定したピクセルのサイズ程度以下の広がりをもった α 線発生源が、複数のピクセルにわたって観測される場合、その有意性が実際より低く表示・評価される可能性がある。これに対して、検出器の角度応答の情報を利用する次に示す方法で、検出器本来の解像度を持つ強度分布図を作成することができる。このような方法は X 線天文学などの分野では既に用いられているが、月面ラドン α 線観測データへの適用はこれまでなされていなかった。

ARD では、測定対象である α 線の飛程に対してコリメータおよび検出器の厚さは十分に厚いので、検出器の α 線に対する角度応答は、コリメータおよび検出器入射窓の幾何学的形状で決まる。以下に述べる解析手続きにおいては、コリメータおよび検出器の幾何学的形状から計算した角度応答関数を用いている。コリメータの高さは 30mm, 内壁は一辺 31mm の正方形で、検出器の α 線入射窓はそれと中心を共有する一辺 26mm の正方形である。 α 線入射窓がコリメータ内壁より 2.5mm 内側に位置することにより、視野中心部での角度応答関数の角度依存性が滑らかになっている。

(1) 角度応答を考慮した有効カウント数の算出

ARD の α 線検出イベントに対して、その α 線の月面上の発生位置 (x, y) の確率密度分布 $f(x, y)$ が、検出器の角度応答関数に基づいて与えられる (図 3)。ここで x, y はそれぞれ、ARD の月面上の視野中心に対する経度、緯度方向の相対座標とする。月面上に検出器の視野より十分小さいピクセル (i, j) を設定し、ピクセル中心の月面位置座標を (X_i, Y_j) とする。 α 線シグナルが期待されるエネルギー範囲の全イベントに対してこの確率密度分布を加算し、ピクセルあたりの有効カウント数 $C_{eff}(i, j)$ を算出する。

$$C_{eff}(i, j) = \sum_{n=1}^N f(X_i - X(n), Y_j - Y(n)) \Delta S_{i, j}$$

ここで、 $(X(n), Y(n))$ は、 n 番目のイベント検出時の検出器視野中心の月面位置座標、 $\Delta S_{i, j}$ は月面上のピクセル (i, j) の面積を表す。

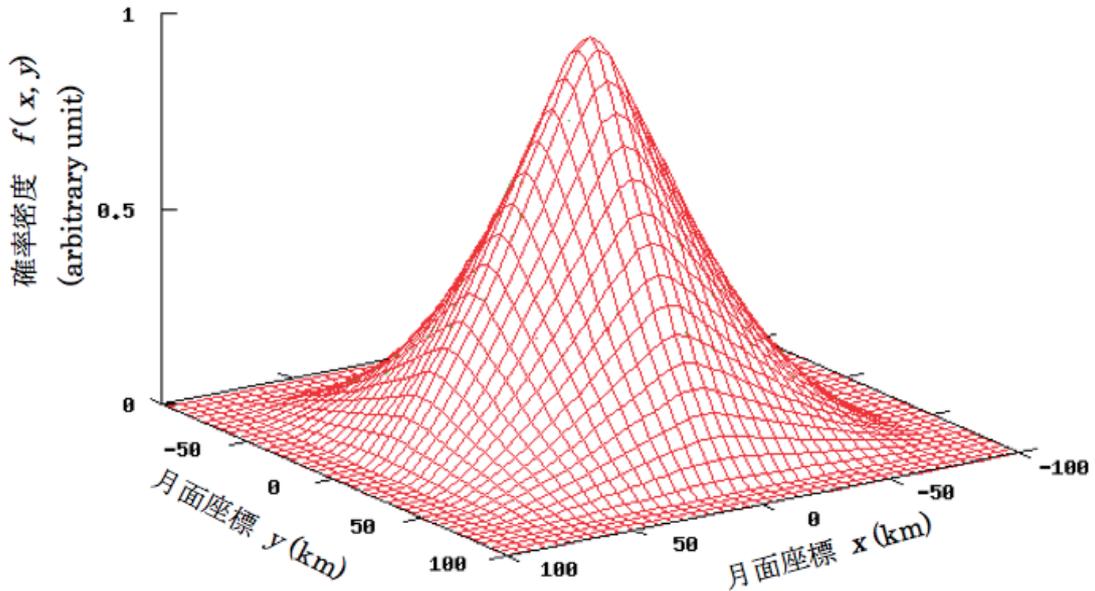


図3 ARDに α 線が検出された場合の、月面上視野内の α 線発生位置の確率密度分布 $f(x, y)$ 。ここでの月面座標は、観測視野中心（衛星直下）を座標の原点とし、緯線、経線方向をそれぞれ x 軸、 y 軸とした。

(2) 角度応答を考慮した有効観測時間の補正

月面上に設定したピクセルごとに、その地点がARD視野に含まれている時間に角度応答関数の値を乗じた有効観測時間を算出する。

$$T(i, j) = \sum_{k=1}^K f(X_i - X(t_k), Y_j - Y(t_k)) \Delta t$$

ここで、 Δt は観測時間積算のための時間単位（1秒）、 t_k は各時間単位の時刻とする。

ピクセルごとに(1)で求めた有効カウント数を有効観測時間で割り、各ピクセルの有効計数率 $CR_{eff}(i, j)$ を算出する。

$$CR_{eff}(i, j) = \frac{C_{eff}(i, j)}{T(i, j)}$$

(3) バックグラウンドの評価と差し引き

バックグラウンドの計数率を推定して、有効計数率から差し引くことで、月面上の α 線強度分布を推定することができる。バックグラウンドの推定値は、ARD検出器のエネルギー分解能を考慮して、 α 線シグナルが期待される領域を除いたエネルギー範囲を用いてバックグラウンドのスペクトルをモデルフィットし、得られたモデルから着目する α 線エネルギーバンドにおけるバックグラウンド計数率を算出する。バックグラウンドの評価・差し引きを含む具体的な解析方法の詳細は、別途科学解析に関する論文で報告する。

図4に、上記の方法による月全球の ^{210}Po α 線強度分布図の作成過程を示した。

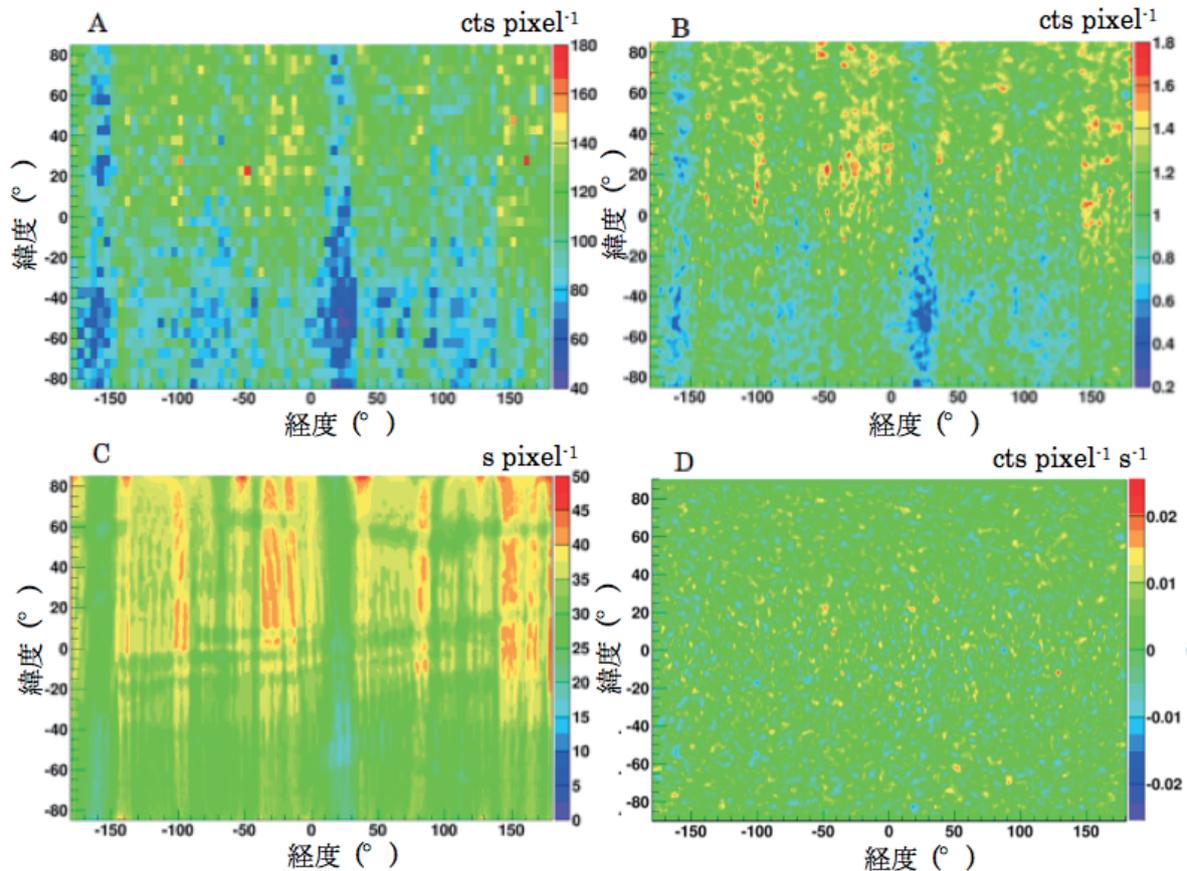


図4 検出器角度応答を反映した月全球の ^{210}Po α 線強度分布導出過程. 2008年1月から6月の有効観測データから抽出した, ^{210}Po α 線エネルギーバンド(5.2-5.4 MeV)のチャンネル1(108 cm²)で観測したイベントに基づく. A: 月面に検出器視野と同程度のピクセル(5度平方)を設定し, α 線が検出時の視野中心で発生したと近似して集積したカウント数(counts pixel⁻¹). B: 各イベントに対して, 検出器角度応答に基づいて月面視野内の α 線発生位置の確率密度分布を算出し, 月面に視野の1/10程度のピクセル(0.5度平方)を設定して集積した有効カウント数(counts pixel⁻¹)分布. C: Bのピクセルに対する, 角度応答を考慮した有効観測時間(s pixel⁻¹)分布. D: B, Cから算出した各ピクセルの有効計数率からバックグラウンドを差し引いた α 線強度(counts s⁻¹pixel⁻¹)分布(バックグラウンドの評価方法については本文参照).

科学解析にあたっては, 上記の方法で導出した全球の α 線有効計数率分布に対してスライディング・ウィンドウのアルゴリズムを適用し, 一定の有意水準を超える α 線シグナルが見られる箇所を同定し, 科学的検討を行なうという手続きをとる(詳細は別途科学解析論文に報告する). 図5に, 例として雨の海東端付近(西経10° - 東経10°, 北緯15° - 35°)の領域について, Apollo, Lunar Prospectorの解析と同様の方法で作成された ^{210}Po α 線強度分布図(A)と, 上に述べた方法で検出器の角度応答を反映して作成した強度分布図(B)を比較のために示した. いずれも, 上述の方法で観測時間分布に関する補正とバックグラウンドの評価・差し引きを行なっている. 検出器の角度応答を考慮しない従来の解析方法では, 月面における空間分解能は α 線検出イベント集積のピクセルサイズによって決まるが, 仮にピクセルサイズを検出器視野の大き

さ程度とした場合、150km 程度となる (図 5-A)。これに対して、角度応答を反映した場合、月面上の空間分解能は約 80km となる (図 5-B)。角度応答を反映した有効計数率分布に対するスライディング・ウィンドウによるサーチでは、図 5-B に見られる 2 つの顕著なピークが 3σ 程度の有意性で検出された。北側の東西に伸びるピークについては、図 5-A ではシグナルが複数のピクセルに分割されているために有意性が低い印象を与える。図 5-C には、同領域の可視光画像に角度応答を反映した α 線強度分布を重ね合わせて示した。科学的な議論は別論文に譲るが、 α 線強度分布図の解像度の向上により、月地形との詳細な比較が可能となっていることがわかる。月面において ^{222}Rn が熱速度で放出され、その後、弾道運動と月面での反射を繰り返しながら、 α 崩壊に至るまで拡散すると仮定すると、 ^{222}Rn および ^{210}Po の月面での広がり数百 km 程度と見積もられるが、Apollo 15 の観測結果は、その広がりがこの予想より小さく、150km 程度以下であることを示唆している。実際、SELENE/ARD の観測と角度応答を考慮した解析から、これを裏付ける結果が得られた。

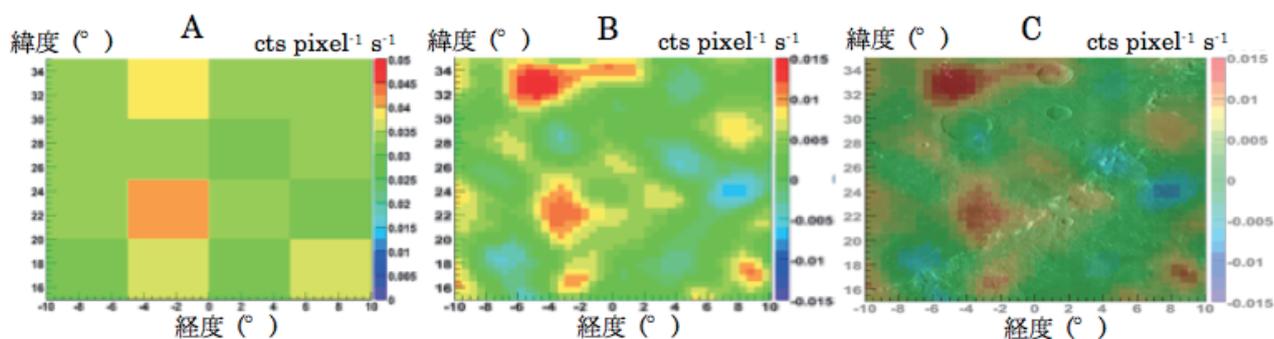


図 5 雨の海東端領域 (西経 10° - 東経 10° , 北緯 15° - 35°) の ^{210}Po α 線強度分布図の比較. A : 月面に視野と同程度のピクセルを設定し、 α 線が検出時の視野中心で発生したと近似する従来の方法で作成した強度分布図 (ピクセルサイズは 5 度平方). バックグラウンドは、本文中に示した方法で評価し、差し引いた. B : 検出器角度応答を反映した強度分布図 (ピクセルサイズは 0.5 度平方). C : B の強度分布と可視光画像を重ねた図.

5 まとめ

SELENE に搭載された搭載 α 線検出器 ARD は、Apollo および Lunar Prospector による過去のラドン α 線検出器を一桁以上回る大面積等の特徴を活かし、 α 線をプローブとして月の表層から表層下のウランウムの分布、ガス放出箇所、断層・亀裂等の地殻構造などに関する情報を提供する。ARD には、月周回軌道投入後、光漏れ等いくつかの問題が生じていることが明らかになったが、適切なデータ選択等により、これらの影響を除いて科学解析を行なう手続きが確立した。本論文では、これを含む ARD のデータ処理の流れと、角度応答関数を考慮した月面の α 線強度分布の導出方法について紹介した。角度応答関数を考慮した月面の α 線強度分布の導出は、月のラドン α 線観測データの解析には初めて適用される方法で、Apollo および Lunar Prospector による過去の観測・解析と比較して、詳細な地形とラドン α 線強度分布との比較が可能となった。ARD の観測データは、2014 年度中を目処として、SELENE データアーカイブを通じた公開に向けた準備を

進めている。

謝辞

衛星の開発、運用を行なわれた SELENE プロジェクトの各位と、本論文の著者以外の ARD チームメンバーに心からの謝意を表す。

参考文献

- 1) M. Kato, S. Sasaki, K. Tanaka, Y. Iijima, Y. Takizawa, The Japanese lunar mission SELENE: Science goals and present status, *Advances in Space Research*, 42, 2008, pp.294-300
- 2) M. Kato, S. Sasaki, Y. Takizawa, The Kaguya Mission Overview, *Space Sci Rev*, 154, 2010, pp.3-19
- 3) <http://l2db.selene.darts.isas.jaxa.jp/index.html.ja>
- 4) H. W. Kraner, G. L. Schroeder, G. Davidson, et al., Radioactivity of the Lunar Surface, *Science*, Vol. 152, No. 3726, 1966, pp.1235-1236
- 5) P. Gorenstein, P. Bjorkholm, Alpha-Particle Spectrometer Experiment, Apollo 15 Preliminary Science Report, 1972, pp.18-1-18-7
- 6) P. Gorenstein, P. Bjorkholm, Detection of Radon Emanation from the Crater Aristarchus by the Apollo 15 Alpha Particle Spectrometer, *Science*, Vol. 179, No. 4075, 1973, pp.792-794
- 7) P. Bjorkholm, L. Golub, P. Gorenstein, Detection of a Nonuniform Distribution of Polonium-210 on the Moon with the Apollo 16 Alpha Particle Spectrometer, *Science*, Vol. 180, No. 4089, 1973, pp.957-959
- 8) P. Gorenstein, L. Golub, P. Bjorkholm, Detection of Radon Emission at the Edges of Lunar Maria with the Apollo Alpha-Particle Spectrometer, *Science*, Vol. 183, No. 4123, 1974, pp.411-413
- 9) W. Feldman, K. Ahola, B. Barraclough, et al., Gamma-Ray, Neutron, and Alpha-Particle Spectrometers for the lunar Prospector mission, *JGR*, Vol. 109, 2004, E07S06
- 10) S. Lawson, W. Feldman, D. Lawrence, et al., Recent outgassing from the lunar surface : The Lunar Prospector Alpha Particle Spectrometer, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 110, 2005, E09009
- 11) J. Nishimura, T. Kashiwagi, T. Takashima, et al., Radon alpha-ray detector onboard lunar mission SELENE, *Advanced in Space Research*, Vol. 37, 2006, pp.34-37

Google Earth 用ボリューム可視化ソフトウェア VDVGE の天体データへの応用

川原慎太郎*¹, 杉山徹*¹, 荒木文明*¹, 高橋桂子*¹

VDVGE: Volume Visualization Software for Google Earth - Application to Astronomical Data -

Shintaro KAWAHARA*¹, Tooru SUGIYAMA*¹, Fumiaki ARAKI*¹ and Keiko Takahashi*¹

Abstract

In this paper, we introduce a volume visualization software tool for Google Earth developed in the EXTRAWING project. This tool, called VDVGE, visualizes a three-dimensional scalar field dataset obtained by a computer simulation or an observation and generates a content dataset in KML format with COLLADA modeling data for our volume-rendering-like representation on Google Earth. This representation method is applicable not only on the Earth but also on the moon, Mars and other astronomical objects. As an example of the application, we introduce how to visualize an observational data on the moon.

Keywords: visualization, google earth, volume visualization, application software, graphical user interface

概要

情報発信プロジェクト EXTRAWING において開発した、Google Earth 用ボリューム可視化ソフトウェア VDVGE を紹介する。VDVGE は、シミュレーションや観測により得られた三次元スカラー場データを可視化し、Google Earth 上でのボリューム表現を含むコンテンツとして KML および COLLADA で出力する。この表現法は地球上のデータだけでなく、Google Earth で表示可能な月や火星、その他の天体のデータの可視化にも適用可能である。天体関連データへの適用例として、VDVGE による月観測データの可視化方法を紹介する。

1. はじめに

近年、アウトリーチ活動などによる研究成果の公開・社会還元がより強く求められるようになった。現在我々はこれに対する取り組みの一つとして、地球環境流体シミュレーションや観測により得られた 3 次元データをバーチャル地球儀ソフトウェア Google Earth ¹⁾の技術を用いて情報発信するためのプロジェクト「EXTRAWING (EXploring and TRAvelling the World INside Geoscientific data)」を推進している ²⁾。EXTRAWING では、可視化手法、情報の公開方法、ソフトウェア開発など、本プロジェクトに関する研究開発を横断的に実施しており、2010 年 12 月には情報発信用 Web アプリケーション ³⁾を公開した (図 1)。これは、サイト来訪者自身の自由な視点による現象の観察や理解を促すものであり、新しい情報発信の形を示すものとなった。

*¹ 海洋研究開発機構
(Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)



図1 EXTRAWING Web アプリケーションのブラウザでの表示。

Web アプリケーションでは EXTRAWING における可視化手法の一つである Google Earth 上でのボリューム表現を適用したコンテンツが公開されている。しかしながら、この時点でのコンテンツ制作は非対話型のコンテンツ作成プログラムによるトライ&エラーの手法によるものであり、今後のコンテンツ制作にも膨大な時間を要することが容易に予想できた。そこで、Web アプリケーションの開発と並行してコンテンツ制作用 GUI ソフトウェアの開発に着手し、2012年12月には Google Earth 用ボリューム可視化ソフトウェア VDVGE (Volume Data Visualizer for Google Earth)としてインターネット上での公開を開始するとともに、プロジェクトで得られた成果の普及にも努めている。

本稿では、2章にて EXTRAWING における可視化手法を紹介するとともに、3章にて同手法を実装したソフトウェアである VDVGE の概要について述べる。続く4章では、Google Earth を用いた可視化の天体データへの応用として、「かぐや」による月磁場環境観測データを、VDVGE を用いて可視化した事例を紹介する。

2. 可視化手法

2.1 Google Earth で読み込み可能なデータ形式

Google Earth 上での可視化について述べる前に、Google Earth が読み込み可能なデータ形式について説明する。Google Earth が読み込み可能なデータ形式の内、可視化表現のための3-Dオブジェクト表示に使用することができるデータ形式は、KML (Keyhole Markup Language)⁴⁾および COLLADA (COLLABorative Design Activity)⁵⁾の二つである。両者は表現可能なオブジェクトが異なるだけでなく、オブジェクトを表現するための座標系も異なる。

KML は三次元地理空間情報の表示を管理するための XML ベースのマークアップ言語であり、点、線および面の表現に用いられる。KML における座標系は極座標系であり、点、面および線を構成する頂点座標は緯度、経度、高度[m]での指定となる。線または面を構成する各頂点間は直線で結ばれるため、頂点間距離が離れている場合には線や面が地中や海中に埋没することに注意する必要がある。また、面に対して色情報を付与することができるが、面内部を単色で塗り潰すだけのものであり、面を構成する各頂点に対して異なる色情報を付与することによるグラデーション効果を得ることはできない。例外として、地面オーバーレイと呼ばれる機能を用いる場合には、指定した緯度経度範囲の同一海拔高度を示す曲面（または地表面および海表面）が自動的に生成され、これに対してテクスチャ画像を貼付することができる。特に地面オーバーレイ機能は自然科学データの可視化によく用いられており、海表面温度分布や降水量分布など、二次元的な情報

の表現に利用されている⁶⁾。

COLLADA は、異なる 3-D CG ソフトウェア間でのデータ交換のために共通化されたファイルフォーマットである。KML と同じく XML ベースのマークアップ言語であるが、KML では表現が困難な、複雑な構造を持つポリゴンモデルの表現に用いられる。COLLADA の座標系は直交座標系であるため、極座標系のデータを COLLADA で表現する場合には、Google Earth の測地系が WGS84 (World Geodetic System 1984) であることを考慮した座標変換が必要となる。Google Earth 上での可視化における利用例としては、等値面などの表現に用いられる⁷⁾。

Google Earth 上での可視化を行うにあたっては、両者の特性を理解し、それぞれのデータ形式に適した形での表現や、用途に合わせた使い分けをする必要がある。

2.2 Google Earth 上でのポリリューム表現

EXTRAWING にて開発した可視化手法の一つが、Google Earth 上でのポリリューム表現である。これは、テクスチャベースポリリュームレンダリング⁸⁾の手法を応用したものであり、不透明度を有する断面画像を貼付したポリゴン面群を積層表示することにより、Google Earth 上でのポリリューム表現を実現した。

本手法の模式図を図 2 および図 3 に示す。本手法では、入力データに基づき (1) 緯度経度断面 (図 2(a))、(2) 経度高度断面 (図 2(b))、(3) 緯度高度断面 (図 2(c))、の三種類の断面画像群を作成する。これらに対応するポリゴン面群を Google Earth 上に作成し、図 2 で示した断面画像を貼付する (図 3)。

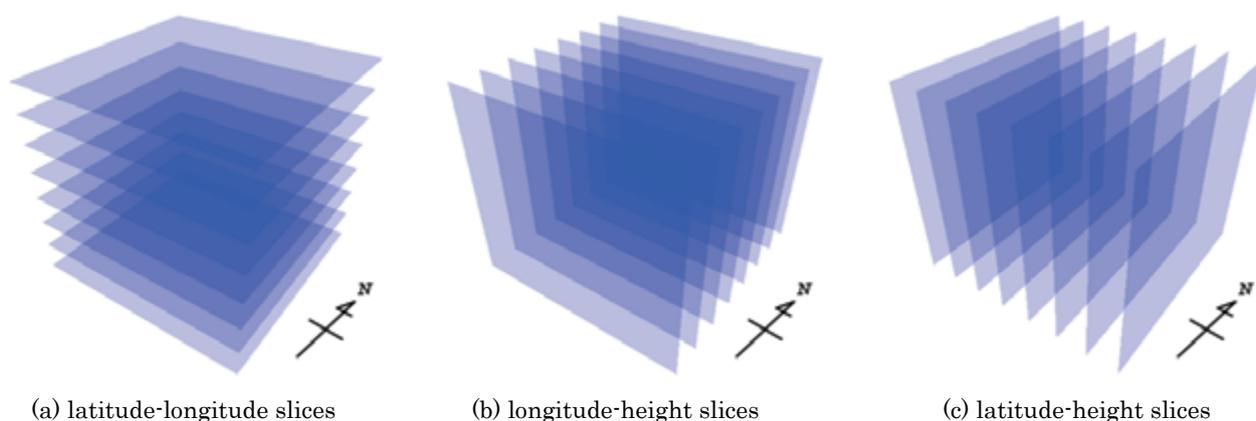


図 2. ポリリューム表現を実現するための断面群の構成。

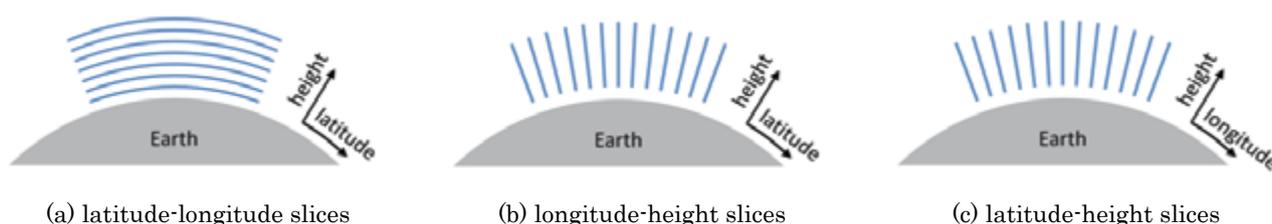


図 3. 図 2 の断面群を貼付するためのポリゴン面群の構成。

まず、(1)の緯度経度断面については KML の地面オーバーレイ機能を用いた表現を行う。入力データから作成した断面画像を対応する海拔高度に地面オーバーレイとして貼付し、それらを積層表示する。前節で述べた通り、地面オーバーレイ機能では指定した緯度経度範囲の同一海拔高度を示す曲面が自動的に生成されるため、曲面を構成するための頂点座標

および法線ベクトルや、曲面上に断面画像を貼付するためのテクスチャ座標の計算は不要である。

次に、(2)の緯度高度断面および(3)の経度高度断面については、KMLではなく COLLADA を用いた表現を行う。KML は、緯度高度断面および経度高度断面に相当するポリゴン面を作成することはできるが、これに対してテクスチャ画像を貼付することができない。そこで、COLLADA を用いて緯度高度断面および経度高度断面に相当するポリゴン面を作成し、これに対応する断面画像を貼付する。COLLADA の座標系は直交座標系であるため、画像を貼付するポリゴン面を構成する頂点座標については極座標系から直交座標系へと座標変換したものをを用いる。入力データの緯度経度範囲が広範囲である場合には、地球表面に沿って湾曲するアーチ状のポリゴン面として表現する。

(1)~(3)の全てにおいて、断面画像の保存はピクセル毎に異なる不透明度の設定が可能な PNG 形式にて行う。これらを Google Earth 上で積層表示することにより、ボリューム表現が得られる。Google Earth での表示時には、視点位置に応じて適切な（各層間の隙間が目立ちにくい）もののみが表示されるようユーザ自身に切り替えさせる。

3. VDVGE

前章にて紹介した可視化手法をソフトウェアレベルで実装したものが VDVGE である。VDVGE では、入力された三次元スカラー場データを、Google Earth での表示に適した形で可視化・出力する。VDVGE への入力となる三次元スカラー場データとしては、地球科学関連のデータ用可視化ソフトウェア GrADS (Grid Analysis and Display System)⁹⁾ で用いられているデータ形式を採用した。GrADS 用データは、Data Descriptor File と呼ばれるテキストファイルと、データ本体であるバイナリファイルの二つから構成される。Data Descriptor File には、バイナリファイルのファイル名、各軸（緯度、経度、高度）方向の格子数および座標情報、時刻に関する情報、バイナリファイルに含まれる物理量の説明等が記述されている。GrADS へのバイナリファイルの読み込みは、この Data Descriptor File を介して行われる。Data Descriptor File 内で指定できるバイナリファイルのデータ形式としては、書式なし FORTRAN（単精度実数）、GRIB、NetCDF、HDF-SDS があるが、VDVGE では書式なし FORTRAN のみに対応している。書式なし FORTRAN バイナリデータには、緯度、経度、高度を軸とする三次元直交格子データが格納されている。格子点上のデータは単精度実数での記録となるため、一時刻あたりのデータサイズは（緯度方向の格子数）×（経度方向の格子数）×（高度方向の格子数）×4（バイト長）となる。時系列データである場合、総データサイズは（一時刻あたりのデータサイズ）×（タイムステップ数）となる。

基本的には、GrADS 用に作成した上記データセットを VDVGE でそのまま使用することができるが、一部制限がある。VDVGE では同時に複数の物理量を可視化対象とすることはできないため、Data Descriptor File およびバイナリファイルに複数の物理量が含まれている場合には、それらを物理量毎のデータセットになるよう事前に変換しておく必要がある。

図 4 に VDVGE の実行中の画面を示す。これは、大気大循環モデル AFES (AGCM for the Earth Simulator)¹⁰⁾により出力された日本周辺の大気中の雲水量分布を、緯度経度断面の積層表示によるボリューム表現により可視化したものである。以下、本章内の図では同一のデータを可視化対象として使用している。図 4 右側の操作パネルにて可視化パラメータの設定を行い、同図左側のプレビューウィンドウ上ではそれに基づいた可視化結果が即時表示される。全ての可視化パラメータの設定は、スライダー、チェックボックス、テキストボックスなど、操作パネル上の GUI パーツにより行う。また、プレビューウィンドウでは、クロスプラットフォームのグラフィックス API である OpenGL を用いた可視化結果の描画が行われる。

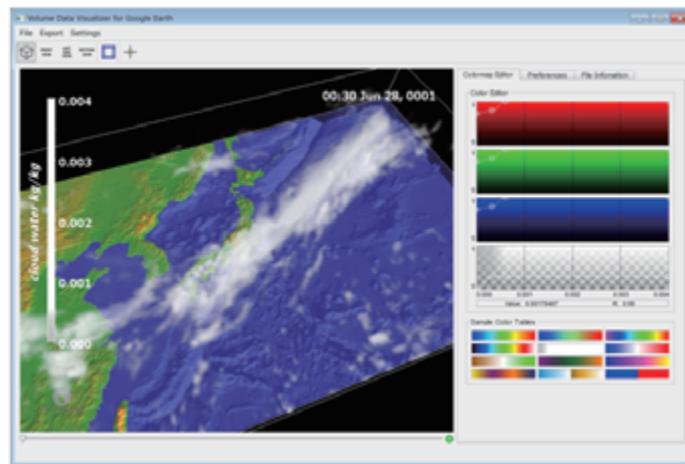


図 4. VDVGE の動作画面。

ボリューム表現に用いる断面画像群の作成には、OpenGL の 3D テクスチャ機能を用いる。VDVGE に入力されたデータはグラフィックスハードウェアの 3D テクスチャ用メモリ上にロードされ、ボリューム表現を行う際の断面画像データの作成に用いられる。VDVGE を実行するハードウェアのグラフィックス性能に依存する問題ではあるが、3D テクスチャで扱うことができるデータサイズには上限がある。このため、入力データサイズがそれを超える場合は 3D テクスチャメモリ内に収まるよう可視化用データとしてプログラム内部でリサイズを行う。3D テクスチャメモリ内でのデータは、ユーザが設定した下限値および上限値の範囲内で 256 階調のインデックスデータとして保持され、カラーマップエディタで設定したインデックスカラーに基づいて断面画像が生成される。VDVGE での色の指定は RGBA にて行う。カラーマップエディタでは RGBA の各要素について、コントロールポイントを使った設定を行う。各コントロールポイントは、マウス操作による移動、追加および削除が可能である。コントロールポイント間の接続は Ferguson 曲線または直線のどちらかを選択することができる。また、予め設定されたカラーマップを適用することで、可視化のための作業を効率的に行うことができる。Google Earth 用コンテンツファイル出力時にも同様の方法にて断面画像の生成を行うが、3D テクスチャメモリではなく本体メモリを用いた処理となるため、出力される PNG 画像はプレビューウィンドウ上の表示よりも高解像度なものとなる。図 4 における表示結果を Google Earth 用コンテンツファイルとして出力し、Google Earth で表示した結果を図 5 に示す。プレビューウィンドウ上の可視化結果が Google Earth 上でもよく再現されていることがわかる。

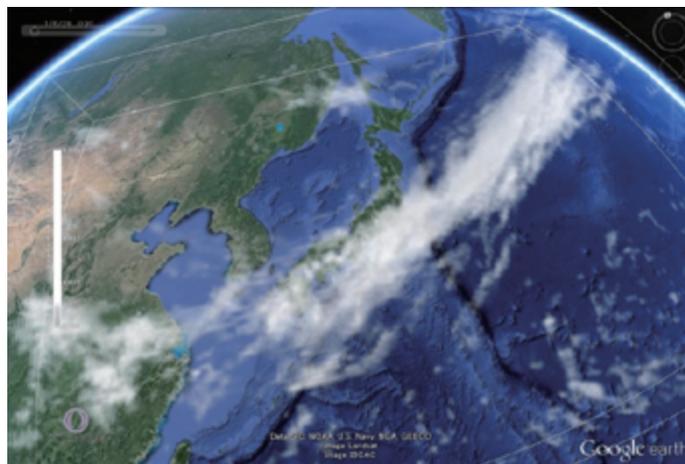


図 5. 出力したコンテンツファイルの Google Earth 上での表示。

ボリューム表現の他の可視化機能として、カラースライスと等値線を表示することができる。カラースライス表示機能では、ボリューム表現と同様、3D テクスチャから作成した断面画像を表示する。緯度、経度、高度の各軸に直交するカラースライスを、軸上の任意の位置に配置できる他、貼付する断面画像に対するアルファチャンネルの適用の可否や、カラースライス全体の不透明度の設定を行うことができる。出力される Google Earth 用データは、ボリューム表現と同じく緯度経度断面を KML、緯度高度断面および経度高度断面を COLLADA にて記述する。カラースライス機能の適用例を図 6 に示す。

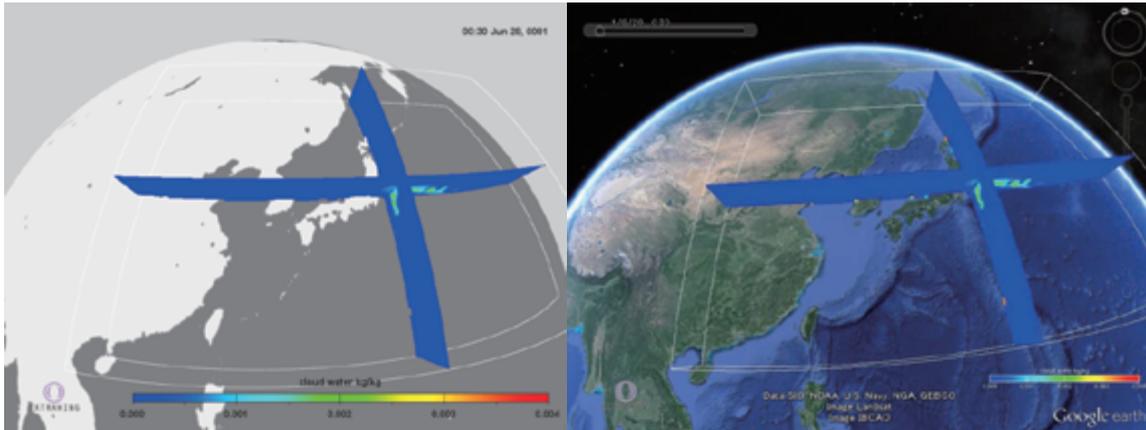


図 6. カラースライス表示. 左が VDVGE 上での表示, 右が Google Earth 上での表示.

等値線表示機能では等値線生成時の精度を重視し、3D テクスチャメモリ内の正規化されたデータではなく、元データから緯度、経度、高度の各軸に直交する断面データを作成する。この断面データに基づき、操作パネル上で設定したデータ範囲（下限値および上限値の範囲）内で等値線を描画する。出力される Google Earth 用データは線分のみの表現となるため、各軸用共に KML にて記述する。等値線機能の適用例を図 7 に示す。

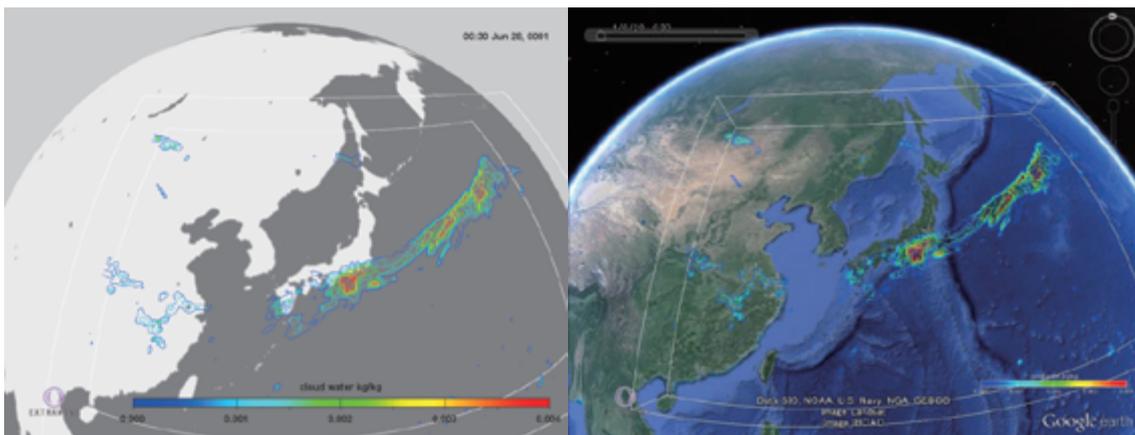


図 7. 等値線表示. 左が VDVGE 上での表示, 右が Google Earth 上での表示.

VDVGE は時系列データの読み込みについても対応している。出力する Google Earth 用ファイルにも時刻情報が含まれるため、プレビューウィンドウ上での可視化結果のアニメーション表示だけでなく、Google Earth 上でのアニメーション表示にも対応している。入力した時系列データの一部の時間帯のみを可視化対象としたい場合は、操作パネル上から開始時刻および終了時刻を指定することにより、指定した時刻範囲のみのプレビューや Google Earth 用ファイルの出力が可能

である。

プレビューウィンドウ上の表示を静止画や動画で保存することも可能である。静止画保存機能では、現在表示されている描画結果の保存の他、時系列データを連番画像として保存することができる。本機能において、各画像は PNG 形式で指定したディレクトリに保存される。フリーソフトウェアである FFMPEG¹¹⁾を利用した動画保存機能では、時系列データを Windows Media Video 形式の動画ファイルとして保存することができる。本機能を利用する場合、FFMPEG を別途インストールする必要がある。

このようにして作成した画像やコンテンツファイルを外部に向けて公開する際、データの帰属をわかりやすい形で明記することは研究のアクティビティを示す上でも重要である。VDVGE では、任意の PNG 画像をプレビューウィンドウでの表示および出力した Google Earth 用ファイル中に埋め込むことができる。図 5~7 の各図において、画像左下に EXTRAWING ロゴの表示が確認できる。

本ソフトウェアの開発には、C++用 GUI ツールキットである Qt¹²⁾を用いている。Qt はクロスプラットフォームのユーザインタフェースフレームワークであり、共通のソースコードから異なるプラットフォーム用の実行バイナリを作成できる。現在までに、主要なデスクトップ用 OS (Windows, Mac OS X, Linux) での動作を確認しており、幅広いユーザー層での利用が期待できる。

4. 天体データの可視化への応用

4.1 「かぐや」観測データの可視化

Google Earth を使った可視化の天体データへの応用として、月周回衛星「かぐや」搭載磁力計 LMAG による月磁場環境観測データを、VDVGE を用いて可視化する方法について述べる。月磁場環境観測データについては、「かぐやデータアーカイブ」¹³⁾より取得した、衛星高度 100km における磁気異常グリッドデータ (LMAG / Higher Level / Magnetic anomaly grid data, ファイル名: MA_GD_002.dat) を使用した。取得したデータは緯度、経度方向ともに 1 度間隔のグリッドデータとしてテキストファイルに記録されている。テキストファイル中の各行は、緯度および経度の他、磁気異常値および関連データを示す合計 9 つのパラメータから構成される。取得したデータのままで VDVGE に入力することができないため、元データの各行から緯度、経度および地磁気全磁力 (Total Intensity [F]) のみを抽出し、地磁気全磁力の二次元直交格子バイナリデータを作成した。バイナリデータのファイルサイズは 360 (経度方向) × 179 (緯度方向) × 1 (高度 100km の一層データ) × 4 (データ長, 単精度実数) = 255,760 バイトであった。このデータを VDVGE で読み込むために作成した Data Descriptor File を図 8 に示す。Data Descriptor File には時刻情報の記述が必要であるが、対象が統計データであるため、便宜的にデータベースへの情報登録日時を記述した。

```
DSET ^MA_GD_002.grd
TITLE SELENE Data
UNDEF -9.99E+33
XDEF 360 LINEAR -179.5 1.0
YDEF 179 LINEAR -89.0 1.0
ZDEF 1 LEVELS 100.0
TDEF 1 LINEAR 07:57Z27MAY2010 1hr
VARS 1
z 1 0 Magnetic Field [nT]
ENDVARS
```

図 8. 「かぐや」データの読み込みのために作成した Data Descriptor File の内容。各行にはファイル名、各軸方向の格子数、物理量の説明などが記述されている。

作成したファイルを入力とし、有効データ範囲を 0.0~2.0 [nT]として可視化した場合の、VDVGE 上でのプレビュー表示を図 9 に示す。VDVGE の最大の特徴は、三次元データを入力とした場合のボリューム表現であるが、今回入力に使用した月磁場強度データは高度 100km 一層のみの二次元データである。そこで、不透明度を調整したカラースライスによる表現とし、Google Earth 用ファイルを出力した。

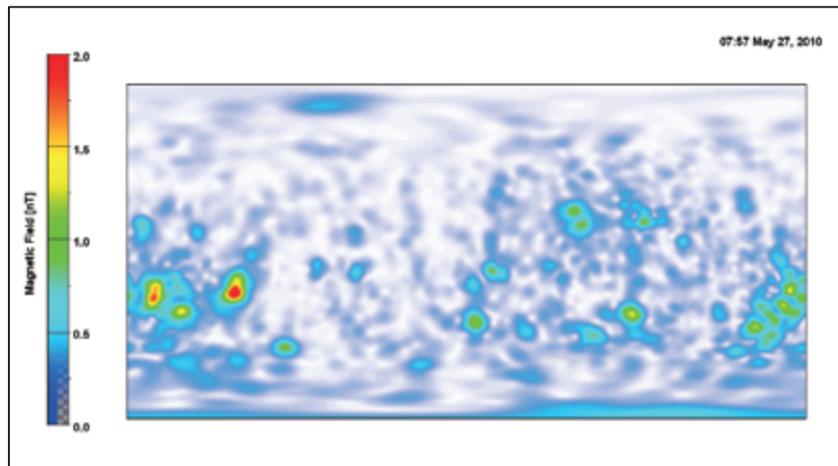


図 9. 入力した月磁場強度データの VDVGE 上での表示。

出力したファイルを Google Earth でそのまま読み込んだ場合、月磁場強度のカラースライス画像は地球に対して重ね合わせ表示される。そこで、Google Earth の機能を使って地球表示モードから月表示モードに切り替える。月表示モードへの切り替えは、Google Earth の表示モード変更ボタンにより行うことができる。また、KML ファイル中に表示モードを直接記述することで、月表示モードで Google Earth を実行することも可能である。現在のバージョンの VDVGE には、Google Earth の表示モードを制御する機能は無いため、出力された KML ファイルに対して月表示モードを選択するための記述をテキストエディタにより直接追記する。VDVGE で出力された KML ファイル (doc.kml) に対し、月表示モードでの読み込みとなるよう追記したものを図 10 に示す。太字かつ斜体で示された「`hint="target=moon"`」の部分が追記箇所である。本稿にて対象としているのは月観測データであるが、同じく Google Earth で表示可能な火星に関するデータが対象である場合、該当箇所を「`hint="target=mars"`」とすればよい。Google Earth 上での表示結果を図 11 に示す。

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<kml
  xmlns="http://earth.google.com/kml/2.2" hint="target=moon"
  xmlns:gx="http://www.google.com/kml/ext/2.2"
  xmlns:kml="http://www.opengis.net/kml/2.2"
  xmlns:atom="http://www.w3.org/2005/Atom">
  <Document>
    <name>Magnetic Field [nT]</name>

    -- (以下省略) --
```

図 10. 月表示モードでの表示となるよう、VDVGE で出力した KML ファイル (doc.kml) に追記したもの。太字かつ斜体の部分が追記した箇所である。

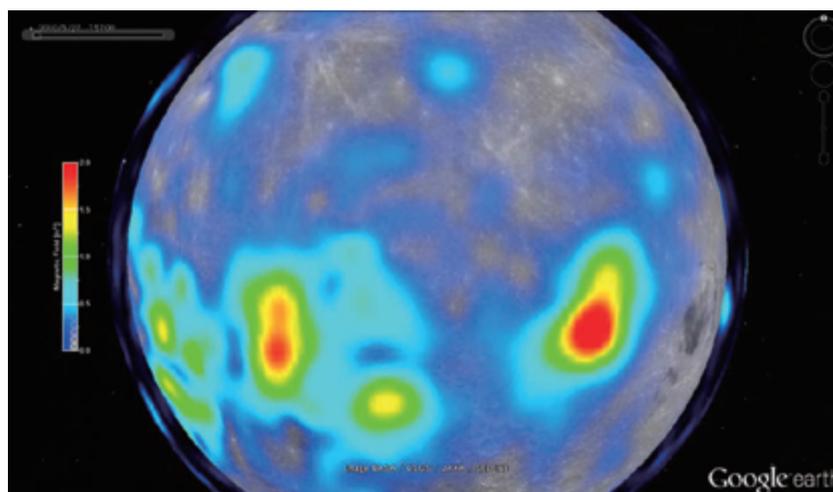


図 11. Google Earth 上での月磁場強度の表示.

4.2 さまざまな天体の表現

Google Earth で表現可能な天体は地球，月，火星の三つであるが，KML の地面オーバーレイ機能を用いて地球全体を覆い隠すように天体テクスチャ画像を貼付することにより，その他の天体を簡易的に表現することも可能である．図 12 に天体テクスチャ画像貼付用 KML ファイルの例を，図 13 に Google Earth での表示例を示す．

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<kml xmlns="http://earth.google.com/kml/2.2">
<Document>
  <name>Mercury</name>
  <GroundOverlay>
    <Icon>
      <href>planet_textures/mercury.jpg</href>
    </Icon>
    <LatLonBox>
      <west>-180.0</west>
      <east>180.0</east>
      <south>-90.0</south>
      <north>90.0</north>
    </LatLonBox>
    <altitudeMode>clampToGround</altitudeMode>
  </GroundOverlay>
</Document>
</kml>
```

図 12. 天体テクスチャ貼付用 KML ファイルの例.

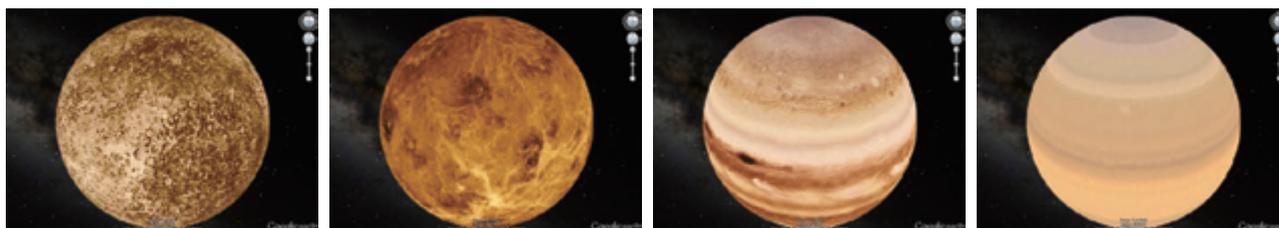


図 13 Google Earth への天体テクスチャの貼付例. 左から水星，金星，木星，土星. 天体テクスチャ画像については，JHT's Planetary Pixel Emporium¹⁴⁾から取得したものを使用した.

本例では地面オーバーレイの標高モードとして“clampToGround”を指定しているため、テクスチャ画像は Google Earth における地球の地表面および海表面に沿って貼付される。図 13 のように遠景である場合には描画結果に対する地形の影響は無視できるが、視点位置を地上に近づけた場合にはそれらによる凹凸が明らかとなるため、地形の影響が出ないような海拔高度を指定する等の工夫が必要となる。

5. まとめ

VDVGE を用いることにより、ボリューム表現を含む Google Earth 用コンテンツファイルを誰でも簡単に作成することができるようになった。当初、地球環境流体シミュレーションにより得られたデータを対象として開発を開始したソフトウェアではあったが、本稿にて紹介したように地球のみならず他の天体データの可視化にも適用することができる。VDVGE はマルチプラットフォームのソフトウェアであり、Windows, Mac OS X, Linux で動作する。また、本ソフトウェアのソースコードはインターネット上にて公開されており¹⁵⁾、誰でも自由に利用することができる。VDVGE を単なる可視化ソフトウェアとして利用するだけに留まらず、アウトリーチ活動や教育等、研究成果の発信に広く活用されることを期待したい。

参考文献

- 1) Google Earth (<http://earth.google.com>)
- 2) 荒木文明, 杉村剛, 馬場雄也, 川原慎太郎, 高橋桂子: "EXTRAWING: Google Earth API を利用した地球・環境流体シミュレーション結果の Web 展示手法", 可視化情報, Vol.30, Suppl./No.2 (2010) pp.333-334.
- 3) EXTRAWING (<http://www.jamstec.go.jp/ceist/extrawing>)
- 4) KML (<http://www.opengeospatial.org/standards/kml>)
- 5) COLLADA (<http://www.khronos.org/collada>)
- 6) Ballagh, L. M., B. H. Raup, R. E. Duerr, S. J. S. Khalsa, C. Helm, D. Fowler, and A. Gupte, "Representing scientific data sets in KML: Methods and challenges", Computers & Geosciences, Vol.37, Issue1, (2010), pp.57-64.
- 7) Reena R. Patel, Robert M. Wallace: "3D Visualization of Wind Field and Pressures near Hurricane Eye using Google Earth", IEEE VisWeek 2011, 23-28 October, 2011, Providence, Rhode Island, USA.
- 8) Timothy J. Cullip and Ulrich Neumann: "Accelerating Volume Reconstruction with 3D Texture Hardware", Tech. Rep. TR93-027, University of North Carolina, Chapel Hill, NC (1993)
- 9) Doty, B. and J.L. Kinter III: "The Grid Analysis and Display System (GrADS): A practical tool for earth science visualization", 8th International Conference on Interactive Information and Procession Systems, Atlanta, Georgia, 5-10 January (1992)
- 10) W. Ohfuchi, H. Nakamura, M. K. Yoshioka, T. Enomoto, K. Takaya, X. Peng, S. Yamane, T. Nishimura, Y. Kurihara and K. Ninomiya: "10-km mesh meso-scale resolving simulations of the global atmosphere on the Earth Simulator: Preliminary outcomes of AFES (AGCM for the Earth Simulator)", Journal of Earth Simulator, Vol.1, (2004), pp.8-34.
- 11) FFMPEG (<http://www.ffmpeg.org>)
- 12) Qt (<http://qt-project.org>)
- 13) SELENE Data Archive (<http://l2db.selene.darts.isas.jaxa.jp/index.html.en>)

- 14) JHT's Planetary Pixel Emporium (<http://planetpixemporium.com>)
- 15) VDVGE (<http://www.jamstec.go.jp/ceist/avcrg/vdvge.ja.html>)

「はやぶさ」の軌跡の可視化

- タッチダウン時の位置推定 -

三浦 昭*¹, 山本 幸生*¹, 吉川 真*²

Visualization of Trajectories of 'HAYABUSA'

- Positioning of 'HAYABUSA' during Touchdown Phase -

Akira MIURA*¹, Yukio YAMAMOTO*¹, Makoto YOSHIKAWA*¹

Abstract

In this paper, we propose methods to estimate positions of 'HAYABUSA' during the period of the first touchdown on Itokawa in order to visualize the trajectories of 'HAYABUSA'. In this period, there are no reliable ephemeris data of 'HAYABUSA'. We used a variety of telemetry data and a shape model of Itokawa to estimate the trajectories. The period is divided into several sub-periods according to the availability of the data. In each sub-period, we propose suitable methods to estimate the positions. The methods are based on the policy that the trajectory should be smooth and continuous in each sub-period.

概要

本稿では、「はやぶさ」が小惑星イトカワへタッチダウンする様子を可視化するにあたっての、「はやぶさ」の位置推定手法を示した。この期間は、信頼のおける位置データが残されておらず、本稿では、「はやぶさ」の軌道情報や各種テレメトリデータを、イトカワ形状モデルと組み合わせることによって軌道推定を行った。一部のデータは利用可能な期間が限られているため、利用可能なデータの種別に応じた期間分けをした上で、各期間の推定手法を示す。本稿では、期間毎に、可視化に必要な一筋のなめらかな軌道を計算することに主眼を置いている。

1. はじめに

本稿では、「はやぶさ」が小惑星イトカワへタッチダウンする様子を可視化するために、その基本データとなる、「はやぶさ」の位置を推定する手法について述べる。

筆者らは従来から「はやぶさ」の軌跡の可視化を行って来た。小惑星イトカワ近傍での「はやぶさ」の位置は公開データから知ることができ、その一部については、各種観測機器のデータを用いて補正された、精度の高い位置情報として利用可能となっている。その一方で、小惑星イトカワへのタッチダウンの過程については、正確な位置データが残っておらず、他の手段で推測するしか

無い状況にある。

これまでに行われた位置推定^[1]によって、「はやぶさ」はイトカワへの降下途中、極方向に向きを変えたことが知られている。しかしながら、その推定に用いられた形状モデルは筆者らが採用したモデルとは異なるものである。推定された「はやぶさ」の位置もイトカワ上の緯度経度にマッピングされた2次元情報であり、筆者らが目的としている3次元の可視化には適さない。また学術研究の常として、位置推定としては誤差範囲を含めた結果が掲載されている。

筆者らが求める位置情報は、可視化のために使用するものであり、各時点の位置情報は一意に定まっており、かつ滑らかに繋がっている必要がある。また従来から可視化に用いている形状モデルとの整合が取れた位置情報が望まれる。そのため、現存する各種テレメトリデータ等を用いて、タッチダウン時における「はやぶさ」の3次元位置情報を再現することとした。

本稿ではまず、利用可能なデータや推定対象期間等を

*¹ 宇宙科学研究所 学際科学研究系
(Department of Interdisciplinary Space Science, Institute of Space and Astronautical Science)

*² 宇宙科学研究所 宇宙機応用工学研究系
(Department of Spacecraft Engineering)

含めた、位置推定の概要について述べる。続いて、期間毎の推定手法と推定結果について述べる。最後に今後の課題について述べる。

2. 位置推定の概要

本稿において可視化の対象とする期間は、「はやぶさ」がイトカワに最初にタッチダウンを試みた 2005 年 11 月 19 日 20:30 [UTC] 頃から 21:30 [UTC] 頃迄とする。以後、時刻は UTC で表記するものとする。

「はやぶさ」のイトカワへのタッチダウンを可視化するにあたっては、描画するフレーム毎の「はやぶさ」の位置を推定する必要がある。このためには、位置推定に利用可能なデータの種別と、それらが利用可能な期間を分別し、それぞれの期間毎に必要な手順を整理する必要がある。以下に、その概要を示す。

2.1. 位置推定に使用するデータ

本稿で位置推定に使用するデータやパラメータ類を記す。公開された位置・姿勢データ等は、NAIF (Navigation and Ancillary Information Facility, NASA)²が提供する SPICE カーネルの中から選択する。

2.1.1. 利用可能な期間が限られるデータ

これらのデータは、それぞれに取得時期が異なっており、「はやぶさ」の位置推定等に利用できる期間には相違がある。「はやぶさ」が最初にイトカワへのタッチダウンを試みた時期 (2005 年 11 月 19 日 20 時台 [UTC]) に利用できるデータの期間を表 1 に示す。

(a) 「はやぶさ」の位置・姿勢

SPICE カーネルから、「はやぶさ」の位置データは hayabusa_itokawarendezvous_v01.bsp を用い、姿勢データは hayabusa_itokawarendezvous_v02n.bc を用いる。

(b) ONC-W1 (画像データ)

「はやぶさ」搭載のカメラの内、広角光学航法カメラ 1 (Optical Navigation Camera-Wide; ONC-W1) は「はやぶさ」の底面 (-Z 方向) に取り付けられており、タッチダウンの手前までイトカワを撮像していた。以後、ここで得られる画像データを ONC-W1 画像と記す。

(c) ONC-W1 (ターゲットマーカの方位データ)

「はやぶさ」がイトカワにタッチダウンする際には、ONC-W1 はターゲットマーカの方位を計算するために用いられた。以後、ここで得られるデータを ONC-W1 (方位) データと記す。

(d) LRF-S1 (測距データ)

「はやぶさ」とイトカワとの距離を記録したデータとして、LRF-S1 というレーザ測距計のデータがある。LRF-S1 は「はやぶさ」の-Z 方向に対して 30 度の傾きをもって 4 方向でイトカワとの距離を測定しており、「はやぶさ」に対するイトカワ表面のおおまかな形状を推測可能である。

(e) RCS (噴射時間データ)

「はやぶさ」に搭載されたスラスタ (Reaction Control System; RCS) については、その噴射時間の累積値が記録されている。

表 1 各データの利用可能期間

「はやぶさ」位置	20:33 頃迄、ONC-W1 画像での補正があれば利用可能
「はやぶさ」姿勢	22:11 頃迄
ONC-W1 画像	20:33 頃迄
ONC-W1 (方位)	20:34 頃から 20:43 頃迄
LRF-S1	20:34 頃から 22:14 頃迄
RCS	20:34 頃から 20:43 頃迄は 16 秒間隔。その他は 128 秒間隔

2.1.2. 利用期間の制約が無いデータ等

本稿で可視化の対象とする時期において、利用可能期間の制約が無いデータ等は、以下の通りである。

(a) イトカワの形状データ

イトカワの形状データとして、Gaskell 形状モデル³より、3,145,728 面モデル (itokawa_f3145728.tri) を使用する。そのため、本稿におけるイトカワの座標系は、Gaskell 形状モデルにおける座標系を使用する。

(b) イトカワの位置・姿勢

イトカワの位置データは SPICE カーネルから itokawa_1989_2010.bsp を使用する。イトカワの自転に関するパラメータは、itokawa_gaskell_n3.tpc を使用して Gaskell 形状モデルとの整合がとれた姿勢を計算する。

(c) イトカワの密度

イトカワの密度は、 1.9 ± 0.13 [g/cm³]^[2]もしくは 1.95 ± 0.14 [g/cm³]^[3]等と見積もられている。

(d) 太陽の輻射圧

太陽の輻射圧は、 -1.261×10^{-7} [m/s²]^[1]と見積もられている。ただし本稿で取り扱う「はやぶさ」の速

² <http://naif.jpl.nasa.gov/naif/>

³ http://darts.jaxa.jp/planet/project/hayabusa/shape_ja.pl

度は 0.1 [m/s] のオーダーであるため、太陽の輻射圧は位置推定に本質的な影響を与えるものではないと考えられる。

- (e) AMICA もしくは ONC-T
用途によって呼称が変わるが、「はやぶさ」に搭載されていた望遠光学航法カメラ (Asteroid Multi-band Imaging CAmera もしくは Optical Navigation Camera-Tele) の画像が公開されている。ここで得られる画像データを AMICA 画像と記す。位置推定に係る時期に撮影された、利用可能なデータは無いが、イトカワの詳細な形状を照合するために、他の時期に撮影された画像を利用する。

2.2. 位置推定の区分と推定方法

表 1 の制約及び「はやぶさ」の挙動に基づいて、「はやぶさ」の位置推定に係る期間等を以下のように区分し、次節以降に各々の推定方法を記す。

- (a) ONC-W1 画像データが利用可能な期間
この期間は 20:33 頃迄が該当し、これを第 1 期間とする。第 1 期間においては、SPICE カーネルの「はやぶさ」位置データを ONC-W1 画像データを用いて補正することにより、「はやぶさ」の位置推定を行う。
また第 1 期間終末における「はやぶさ」の推定位置と ONC-W1 画像上のターゲットマーカの輝点、イトカワ形状モデルから、イトカワ上のターゲットマーカの位置を推定する。
- (b) ONC-W1 (方位) データが利用可能な期間
この期間は 20:34 頃から 20:43 頃迄が該当し、これを第 2 期間とする。第 2 期間においては、ONC-W1 (方位) データとターゲットマーカの推定位置、LRF-S1 データ、イトカワ形状モデルから、「はやぶさ」の位置を推定する。
これと共に、RCS データから推測される各時刻の「はやぶさ」の位置を計算し、ONC-W1 (方位) データを用いた推定方法の妥当性を検証する。
- (c) 1 回目のタッチダウン迄
この期間は 20:43 頃から 21:09 頃迄が該当し、これを第 3 期間とする。第 3 期間においては、LRF-S1 データ、イトカワの形状モデル及び密度データ等を用いて「はやぶさ」の位置を推定する。
- (d) 1 回目のタッチダウン
この期間は 21:09 頃から 21:12 頃迄が該当し、これを第 4 期間とする。第 4 期間は、小さな 2 回のパウンドで構成されると推測されるが、その位置を精度よく推定するに足るだけのデータが無いため、第 3

期間の終末の位置・速度や LRF-S1 データの近似等から「はやぶさ」の位置を仮定する。

- (e) 2 回目のタッチダウン迄
この期間は 21:12 頃から 21:30 頃迄が該当し、これを第 5 期間とする。第 5 期間においては、第 3 期間と同様の手法により、「はやぶさ」の位置を推定し、その推定位置と、AMICA 画像から確認できるイトカワの地形との整合性を検証する。
- (f) 2 回目のタッチダウン以後
この期間は 21:30 頃以降が該当し、これを第 6 期間とする。第 6 期間においては、位置変化を推定するに足るだけのデータが無いため、2 回目のタッチダウン位置を着地点と仮定した場合の「はやぶさ」とイトカワの地形との整合性等について検証するにとどめる。

3. 「はやぶさ」の位置推定 1

本節では、第 1 期間における「はやぶさ」の位置推定について記す。

3.1. ONC-W1 画像の歪み推定

3.1.1. 歪み推定の必要性

本稿で可視化の対象としている時期において、SPICE カーネルから得られる「はやぶさ」の位置データは、無視できない誤差を含んでいる。この時期の「はやぶさ」の位置を推定するためには、何らかの手段で SPICE カーネルの位置データを補正する必要がある。本稿では、この補正に ONC-W1 画像データを用いる。

しかしながら「M-V-5/MUSES-C 飛翔実験計画書 (衛星編)」^[4] (以下、計画書と記す) によると、ONC-W1 の歪みは 10% となっており、その歪みを考慮して位置補正する必要がある。

3.1.2. 推定すべき歪み等

歪み推定にあたって考慮すべきパラメータは以下の通りである。ここでイトカワの姿勢 (自転に係るパラメータ) と「はやぶさ」の姿勢は既知とする。

「はやぶさ」の位置の他に、未知のパラメータとして、ONC-W1 の「はやぶさ」に対するアラインメントや ONC-W1 の光学的な歪みが挙げられる。以後は、これらをまとめて歪み等と記す。

本稿ではこれらの歪み等を、ImageMagick という画像処理用ソフトウェアを用いて推定する。

(a) 樽型歪み

樽型歪みについては、歪みの中心点を原点として、以下の式で各画素の原点からの距離を推定する。

$$R_{src} = r(Br^2 + Cr + D) \quad \text{式 1}$$

ここで、 r は変換後の画素の原点からの距離、 R_{src} は歪みの無い画像における当該画素の原点からの距離を表す。いずれの距離も、画像の幅もしくは高さの半値を1とした時の相対値で表す。

ONC-W1の画素数は、幅・高さ共に同一値であるので、以下、幅・高さ共に w [pixels]と記す。また樽型歪みの原点は、 (X, Y) [pixels]の位置に置く。

以上の変数を用いて、ImageMagickの引数は「-distort Barrel $A B C D X Y$ 」となる。

(b) あおり

撮像素子の傾きを推定する。補正するピクセル数を p 、幅・高さから p を差し引いた値を q として、ImageMagickの引数は「-distort Perspective $0,0,p,p p,q,0,w,w,0,q,p,q,q,w,w$ 」となる。

(c) アラインメント

ONC-W1の取り付け角度を推定する。この値は微小であるため、画像の平行移動で代用する。

3.1.3. 歪み等の推定手順

可視化手順は、「『はやぶさ』の小惑星イトカワ探査軌道・姿勢の可視化」⁵⁾における「ONC-Wを用いた位置補正」に準じる。

まずONC-W1の実画像から、イトカワが適当な大きさに映っており、かつ「はやぶさ」の影がイトカワ上に視認できる画像を数枚選ぶ。本稿においては次の時刻の画像を選択した。これらの画像は、ONC-W1の歪み等の推定に用いる。また推定結果として同時に得られる、各時刻における「はやぶさ」の位置情報を、係る時刻範囲の「はやぶさ」の位置補正にも用いる。

表 2 推定に用いる ONC-W1 画像の時刻情報

2005/11/19 19:04:37
 2005/11/19 19:15:16
 2005/11/19 19:43:01
 2005/11/19 19:58:01
 2005/11/19 20:31:16
 2005/11/19 20:32:55
 2005/11/19 20:33:13

画像は複数の解像度のものがあるが、照合作業を簡易にするために、縦 1024 [pixels]・横 1024 [pixels]に統一する。

続いて以下の手順を繰り返すことで、「はやぶさ」の位置とONC-W1の歪み等の推定を同時に行う。1時点の画像のみでは推定が困難であるため、複数時点の画像で同様の推定を繰り返し、全画像において妥当と思われるパラメータを推定する。

(a) 各時刻において、「はやぶさ」の推定位置に基づい

て、歪み等の無い模擬画像 (CG) を合成する。この基本手順は文献 [5]に同じである。ONC-W1の公称の視野角は60度であるが、10%の誤差を見込んで、歪み等の無い模擬画像の視野角は66度とし、画像サイズは縦横共に1152 [pixels]とする。

(b) この画像に対して、推定される歪み等をImageMagickで付加した後、中央の縦横1024 [pixels]を実画像と照合する。

(c) 照合の結果として両者の主要な特徴の位置が一致するよう、「はやぶさ」の推定位置及び、歪み等の推定パラメータを修正する。

イトカワの形状モデルは、起伏が目立たない場所は比較的良くイトカワの形状を再現していると考えられるが、起伏の多い場所は、必ずしもイトカワの形状を忠実に再現しているとは限らない。例えば、イトカワ表面の岩石等は、形状モデルでは比較的なだらかな突起として表現されている。突起の裾野は広がっており、元の岩石の形状は維持されていない。複数の岩石が散在する領域は、形状モデルでは、それらの岩石が連なった丘陵のように表現されている。そのため、マッチングの対象は、画面上で1~数ピクセルで視認されるような、比較的小さな岩石等や、なだらかな輪郭線等が中心となる。

なお現状ではマッチングは手作業となっている。マッチングの自動化は今後の課題である。

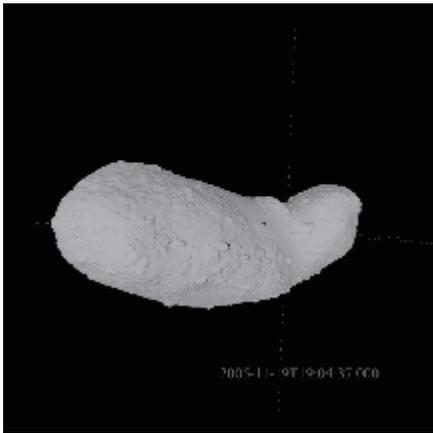
3.1.4. 推定結果

以上の繰り返しにより得られた各パラメータの推定値を表3に記す。これらの値は、画像を照合する上で妥当と思われる値を示したものである。互いに類似の効果をもたらすようなパラメータもあり、現実のONC-W1がこのようなパラメータで定義される歪みを有していたことを示すものではない。

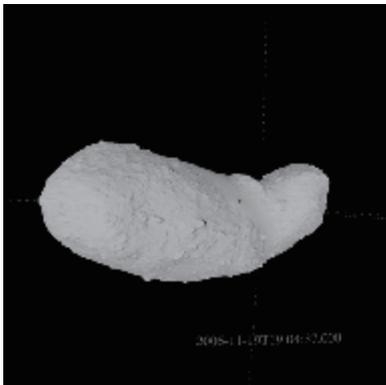
表 3 歪み等のパラメータ推定値

パラメータ	推定値	備考
A	0	
B	0.028	
C	0.067	
D	1.01	
X	576	
Y	616	
あおり	8	単位は[pixels]
平行移動 (横)	0	
平行移動 (縦)	-2	

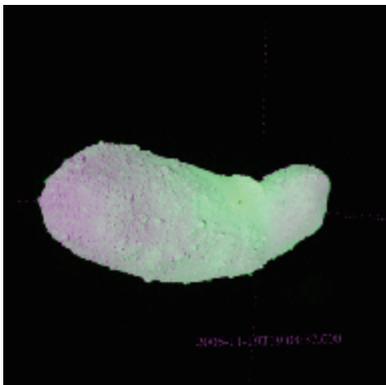
これらのパラメータに基づいて歪み等を与えた模擬画像と実画像の照合結果例を図1に示す。輪郭や主要な特徴は、ほぼ一致している。



(図 1a 歪みの無い模擬画像)



(図 1b 歪みを与えた模擬画像)



(図 1c 歪みを与えた画像 (紫) と実画像 (緑) の比較)

**図 1 ONC-W1 の歪み推定例
(2005/11/19 19:04:37[UTC])**

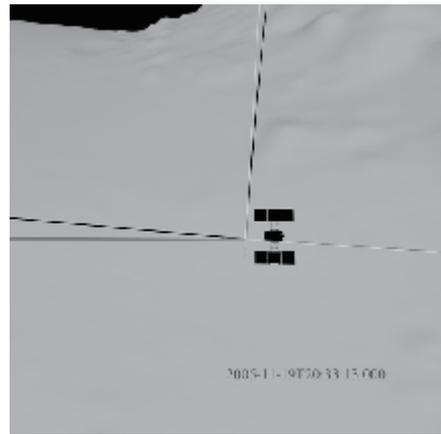
3.2. ターゲットマーカの位置推定

ONC-W1 (方位) データを利用するためには、予めイトカワにおけるターゲットマーカの位置を推定する必要がある。ONC-W1 画像の中から、ターゲットマーカが映っている画像を抽出し、その画像と、同時刻の ONC-W1 画像を模擬した CG 画像を照合することにより、イトカワ上のターゲットマーカの位置を推定することができる。

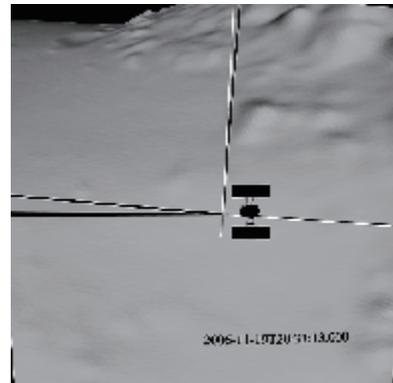
本稿において位置推定に用いた画像は、2005/11/19 20:33:13 の画像である。

ターゲットマーカの位置はイトカワ表面上にあると仮定し、歪み等を付加した模擬画像上に描かれたターゲットマーカが実画像のターゲットマーカと一致する場所を求める。具体的には以下の手順を繰り返すことで、ターゲットマーカの座標値を得る。

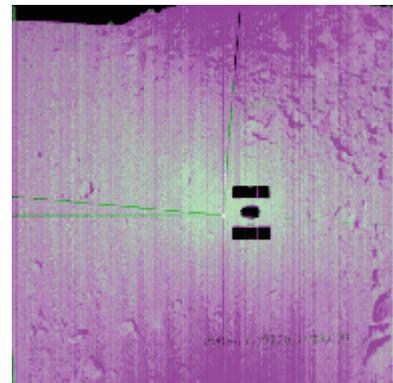
- (a) イトカワ形状モデルに、推定位置に基づいて、ターゲットマーカのオブジェクトを追加する。
- (b) 描画された模擬画像に歪み等を付加する。
- (c) 実画像と比較し、条件に合致するように、ターゲットマーカの座標値を修正する。



(図 2a 歪みの無い模擬画像)



(図 2b 歪みを与えた模擬画像 (高コントラスト))



(図 2d 模擬画像 (紫) と実画像 (緑) の比較)

**図 2 ターゲットマーカの位置推定
(2005/11/19 20:33:13[UTC])**

図 2 にターゲットマーカの推定に用いた照合画像と推定位置を示す。図中の交差する線は、その線の交点がターゲットマーカの推定位置であることを表している。図 2d の中央の白丸は、実画像におけるターゲットマーカの位置を表している。なお、この時点の模擬画像、実画像共にコントラストが低くなっているため、印刷用にコントラストを調整した。

3.3. 「はやぶさ」の位置推定

ONC-W1 画像の歪み推定時に得られた「はやぶさ」の推定位置に基づいて、この期間の軌道を補正した結果を図 3 に示す。画像データによる照合を行わなかった時刻の位置補正量は、照合を行った時刻の位置補正量から線形補間で求めた。図中の赤色が、SPICE カーネルから得られた「はやぶさ」の軌道、水色が位置補正後の軌道を表している。中央付近の赤丸は、ターゲットマーカの推定位置を表している。

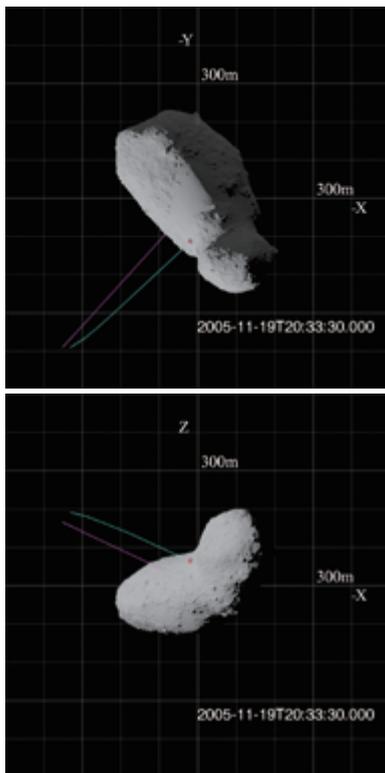


図 3 「はやぶさ」の位置データ補正結果
赤色: 補正前の軌道, 水色: 補正後の軌道

4. 「はやぶさ」の位置推定 2

本節では、第 2 期間 (20:34 頃から 20:43 頃迄) における「はやぶさ」の位置推定について記す。

4.1. ONC-W1(方位)データと LRF データを併用した位置推定

ターゲットマーカの座標値が求まったことにより、

ONC-W1 (方位) データが得られている期間においては、「はやぶさ」のターゲットマーカに対する相対方位を求めることが可能となる。方位データが取得できなかった時刻については、本稿では前後直近の取得データから線形補間で値を求めた。図 4 に補間後の ONC-W1 (方位) データを示す。

しかしながら、ここで求まるのは方位のみであり、「はやぶさ」とイトカワの距離は別の手段により求める必要がある。

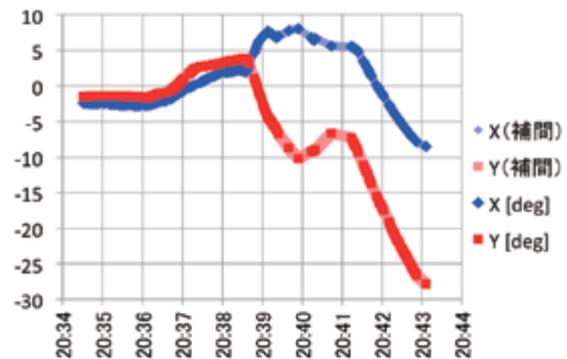


図 4 ONC-W1 (方位) データ (データ補間済)

本稿では距離情報を得る手段として LRF-S1 の測距データを用いる。LRF-S1 を構成する 4 つの LRF は「はやぶさ」の-Z 方向に対して、それぞれ 30 度の角度をもって 4 方向を測距するように取り付けられている。本稿では、これら 4 つの LRF を LRF1 (+Y 側), LRF2 (-X 側), LRF3 (-Y 側), LRF4 (+X 側) と番号付ける。各 LRF の測距データを図 5 に示す。

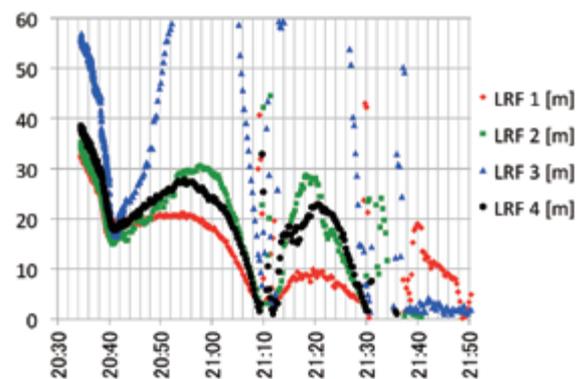


図 5 LRF-S1 の測距データ

これらの LRF データと ONC-W1 (方位) データ、ターゲットマーカの座標値及びイトカワの形状モデルを用いて、20:34 頃から 20:43 頃迄の、「はやぶさ」のイトカワに対する相対位置を求めることが可能となる。以下に手順を記す。

(a) ONC-W1 (方位) データと「はやぶさ」の姿勢デー

タの組み合わせにより、ONC-W1 とターゲットマーカーを結ぶ直線が定義される。

- (b) この直線上において、LRF1 から LRF4 の測距データで求まるイトカワの仮想表面上の点（以下、測距位置と記す）4 点とイトカワ形状モデルの表面とが合致する箇所を求める。具体的には、LRF1 から LRF4 の各方向の測距位置 4 点からイトカワ表面までの距離の自乗和が最も小さくなる位置を、「はやぶさ」の推定位置とする。

4.2. RCS データを用いた位置推定

4.1 で示した手法の妥当性を確認するために、本節では RCS (Reaction Control Subsystem; RCS) の推力を積算して「はやぶさ」の軌道を推定することを試みる。この手法は加速度を 2 回積分するため、誤差要因が大きく、そのまま位置推定に用いることは困難であるが、傾向を把握するために用いることは可能であると考えられる。そこで「はやぶさ」の加速度を、RCS に起因する加速度と、イトカワの重力に起因する加速度の和で表し、各時刻の位置を計算する。

「はやぶさ」には RCS として 12 の化学エンジンが搭載されており、それぞれについて、16 秒もしくは 128 秒の単位時間毎に噴射時間[秒]の積算値が記録されている。積算値の差分をとると、各単位時間あたりの噴射時間が求められる。このようにして求めた 20:34 頃から 20:43 頃迄の噴射時間を、図 6 に示す。図 6 を含めた以後の RCS に係る図においては、12 のスラスタを判別するため、縦軸を 1 刻みでずらしている。

RCS の推力は約 20N であるが、「M-V-5/はやぶさ 飛翔実験報告書 (衛星編)」^[6] (以下、報告書と記す) によると実運用での推力は、その数割減であった。個々の時刻において具体的な比率を求めることは困難であり、ここでは一律に計画書の値の 7 割の推力で計算することとする。また、第 2 期間においては 16 秒毎に噴射時間の積算が記録されており、その中のどのタイミングで噴射したかは不明である。したがって、16 秒の間は、平均して同じ頻度で噴射していたと仮定する。

「はやぶさ」・イトカワ間の引力を計算するにあたって、イトカワの質量分布は、質点の集合で表す。具体的には、Gaskell 形状モデルの座標上で、X, Y, Z 方向に各々 5 [m] 間隔の格子点を取り、形状内の各格子点に初期値としての質量 237,500 [kg] ($1.9 \text{ [g/cm}^3\text{]} \times 500\text{[cm]} \times 500\text{[cm]} \times 500\text{[cm]}$) を与える。また本稿においてはイトカワの密度分布は均一であると仮定して引力に基づく加速度を計算する。

なお RCS データのみでは、「はやぶさ」の位置・速度の初期値を知ることはできないため、本節では 4.1 で求めた 20:34 付近の位置・速度を基に、全体的な傾向が一

致するように初期値を微調整する

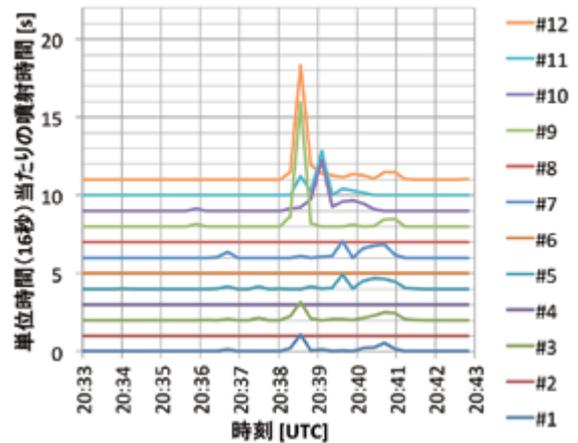


図 6 RCS の噴射時間 (20:34 頃から 20:43 頃迄)

4.3. 位置推定結果

両手法を用いた位置推定結果と速度推定結果を図 7、図 8 に示す。これらの図の各軸は、図を直感的に把握するために、20:34:34 時点における「はやぶさ」座標系の各軸方向とした。概ね Z 軸方向がイトカワからの「高さ」、X, Y 軸方向が、「横」方向の位置変化を表す。各々、「X (RCS)」, 「Y (RCS)」, 「Z (RCS)」が RCS データを用いた位置推定結果, 「X (ONC)」, 「Y (ONC)」, 「Z (ONC)」が ONC-W1 (方位) データを用いた位置推定結果を表している。

両者は位置推定としては概ね矛盾しない傾向となっている。以後の「はやぶさ」の位置推定においては、時間に伴う誤差蓄積の無い、ONCW1 (方位) データと LRF データを併用した位置推定を採用する。

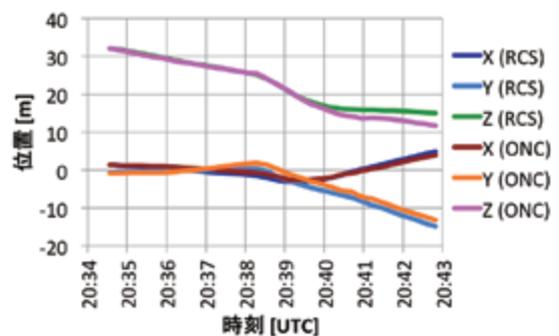
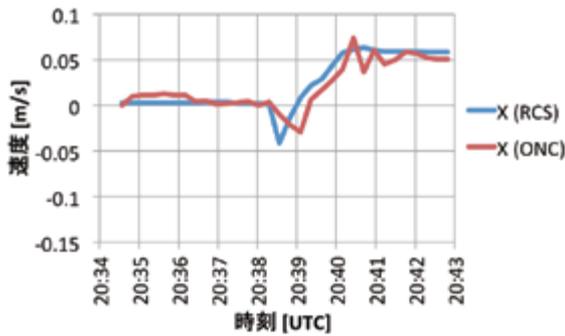
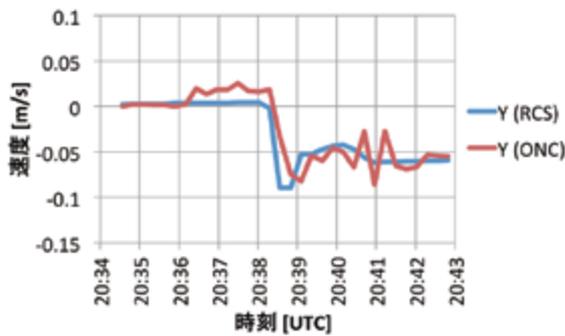


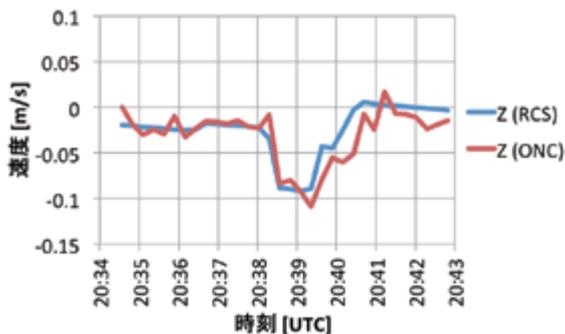
図 7 RCS データを併用した位置推定



(図 8a 速度推定: X 軸)



(図 8b 速度推定: Y 軸)



(図 8c 速度推定: Z 軸)

図 8 RCS データを併用した速度推定

5. 「はやぶさ」の位置推定 3

本節では、第 3 期間 (20:43 から 21:09 頃迄) の位置推定について記す。

5.1. 軌道計算に用いるデータ

20:30 頃から 22:10 頃までの噴射時間の推移を図 9 に示す。これによると、20:43 から 21:09 頃までの間は噴射が殆ど無く、この期間の軌道は自由落下に近い。そこで第 3 期間は、第 2 期間の終末時点の位置を始点として「はやぶさ」に何らかの初期速度を与え、「はやぶさ」が最初にタッチダウンを迎える時点 (21:09) までの軌道を計算する。

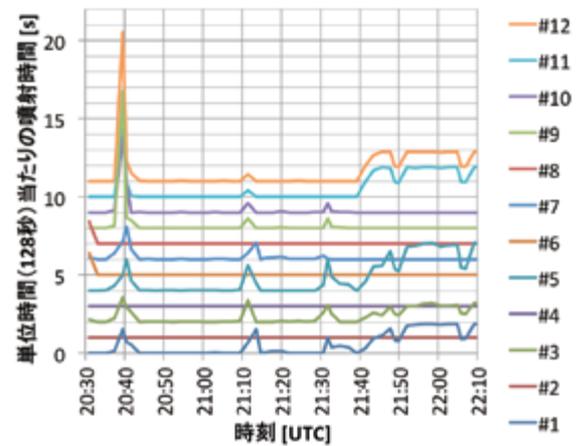


図 9 RCS 噴射時間 (20:30 頃から 22:10 頃迄)

「はやぶさ」の軌道計算に用いるデータは、以下の通りである。実質上は、RCS の噴射と太陽光の輻射圧の影響は微小であると考えられ、イトカワの質量分布による影響が支配的である。

(a) イトカワの質量分布

4.2 で定義した質量分布を基準とする。

(b) RCS データ

4.2 と同様の手法で RCS の噴射時間を「はやぶさ」の加速度に換算する。

(c) 太陽光の輻射圧

太陽光の輻射圧を -1.261×10^{-7} [m/s²] として加速度に加味する。

5.2. 軌道計算の手順

第 2 期間の終末時点 (20:43) で計算された「はやぶさ」の速度を基準速度として、その周囲で適宜初期速度を変更しながら最適な軌道を計算する。基準速度に対する初期速度の探索範囲は、x, y, z の各軸について ± 0.03 [m/s] とする。軌道推定の手順を以下に示す。探索の刻み幅や倍率は、試行錯誤に基づいたものであり、理論的な裏付けによるものではない。

- 各軸について探索範囲の 1/6 刻みで計算される初期速度に対して 5.1 に挙げた加速度成分を積算し、各時刻における「はやぶさ」の位置・速度を求める。
- 求めた各時刻の位置から LRF データによって定まるイトカワの仮想表面の位置 (最大 4 点) を計算する。
- 各時点における仮想表面の位置とイトカワ形状モデルにおけるイトカワ表面との距離の誤差を測距誤差として通算し、RMS 値を求める。ここで 20:52 迄は、LRF の一部が岩や凹凸の多い地域を測距する時期であり誤差が大きくなる懸念がある。本稿では誤差の通算は 20:53 から 21:09 の区間で計算する。

また明らかに測距に失敗していると考えられる LRF データも誤差の計算対象外とする。

- (d) 当該探索範囲において、誤差の通算が最も小さくなる初期速度を次の基準速度とする。探索範囲を 1/2 乃至 1/8 倍して上記手順を繰り返す。

この手順を繰り返すことで、誤差が最小となる初期速度を推定することができる。

イトカワの質量は初期値の 0.9 倍から 1.2 倍の範囲で、0.005 刻みで変更しながら上記推定を繰り返す。

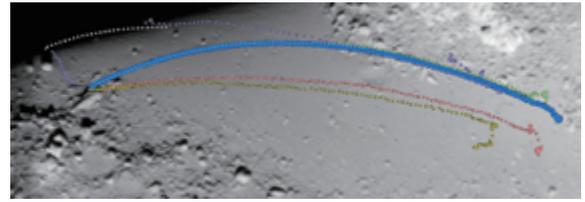
なお LRF データの中には、暗時（レーザ光がターゲットを外している時）を示すものが見受けられる。このようなデータは上記推定では考慮されない。この問題によるエラーを回避するために、計算結果を可視化して目視確認する。すなわち推定された軌道において、暗時にも関わらず LRF の測距位置が「はやぶさ」の近傍であることが明らかであると判断されるような、矛盾した内容が含まれるものは、推定結果として採用しない。

以上の手順の結果、イトカワの質量が初期値の 1.04 倍の時に誤差が最も小さくなる初期速度を得ることができた。「はやぶさ」の軌道は、この初期速度に基づいて計算する。

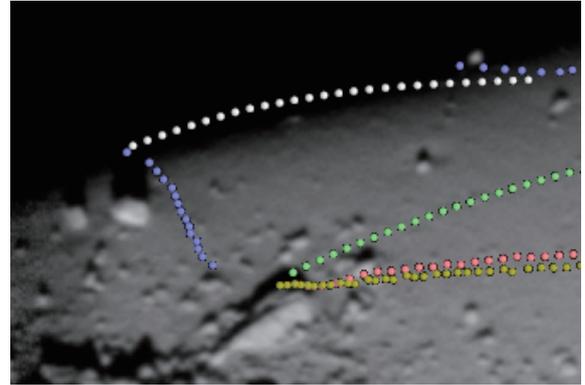
本節の手法による計算結果に基づいた、各 LRF のイトカワ座標系における測距位置（全体、拡大）を図 10 に示す。背景の画像は、同一視点から同一方向にイトカワを見た AMICA 画像である。図中の水色は「はやぶさ」の軌道を表している。赤丸、緑丸、紫丸、黄丸は、それぞれ LRF1 から LRF4 が測距した結果に基づくイトカワ表面の位置を表している。白丸は暗時のデータであるが、図中では仮に 60 [m] 程度の距離でプロットしている。

図 10b の拡大図で特徴的なのは、LRF4（黄）がタッチダウン寸前に地形の盛り上がり記録していることである。また LRF3（紫）も緩やかな地形の変化を記録している。これらの特徴とタッチダウン地点の関係を確認するため、タッチダウン寸前（21:05 から 21:09）のみの誤差が最小となる軌道も求めた。結果を図 11 に示す。図 10b との相違は僅かであり、また他にこのような地形の候補となる地域も見受けられないため、この計算結果を以て、第 3 期間迄の軌道と見なすこととする。

細かな地形については、なお考慮の余地があるが、これを検証するためには、実画像と形状モデルとの整合性をさらに詳細に検討する必要がある、今後の課題となっている。



(図 10a 全体)



(図 10b ダッチダウン付近の拡大)

図 10 第 3 期間迄の軌道計算

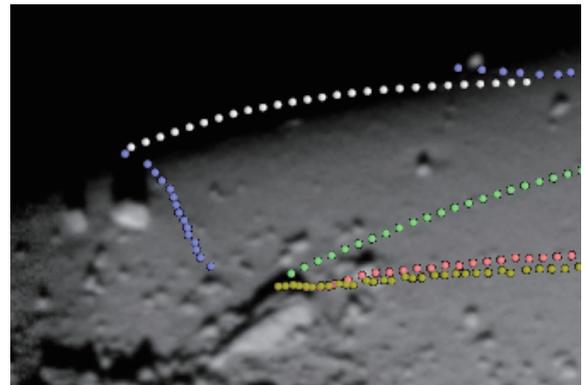


図 11 ダッチダウン付近の LRF 値を用いた推定結果

6. 「はやぶさ」の位置推定 4

本節では、第 4 期間（21:09 頃から 21:12 頃迄）の位置推定について記す。

この期間は最初のタッチダウンがあったと考えられる期間であるが、LRF データの乱れが大きく、また期間も短いため、5 節と同様の手法で位置推定するのは困難である。この期間の「はやぶさ」の軌道は、主観的解釈も入るが、第 3 期間の終末時点の速度を概ね維持しつつ LRF データに見られるような小規模のバウンドがあったと仮定する。

LRF データの中で、測距エラーと思われるデータを排除した結果を図 12 に示す。小バウンド前後の測距ができて LRF2、LRF4 については、データ間を 2 次曲線で補間した値を併せて記す。この LRF データを用いて、イトカワとの高さを推定し、横方向の位置変化は、

第 3 期間の終末と同様であったと仮定して「はやぶさ」の位置を計算する。

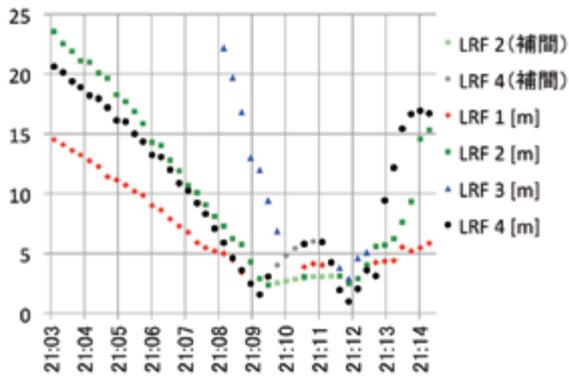


図 12 LRF データの選別・補間

7. 「はやぶさ」の位置推定 5

本節では、第 5 期間（21:12 頃から 21:30 頃迄）の位置推定について記す。

7.1. 計算に基づく推定

この期間は、第 4 期間の終末の「はやぶさ」の位置付近を起点として、次のタッチダウンを迎える 21:30 迄について、5 節と同様の手順で位置推定を行う。ただし測距誤差の通算は、当該期間全体を通して行うものとする。

数 m 程度の範囲で起点をずらしながら次のタッチダウン位置を推定した結果を図 13 に示す。図中、左下の水色の領域が、推定されたタッチダウン位置の分布する領域である。ここで起点が特定できれば第 4 期間の位置推定の精度を上げる事も可能であるが、現時点では、特別可能性の高い起点・タッチダウン位置の組み合わせを特定するには至っていない。

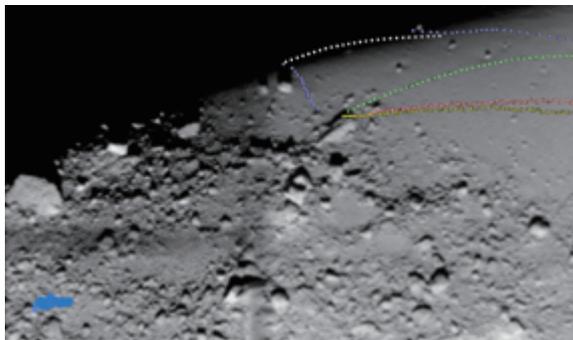


図 13 第 5 期間末の推定位置

7.2. 目視による位置確認

第 3 期間において「はやぶさ」は、イトカワの表面が比較的滑らかな領域を通過していたのに対して、第 5 期間においては、凹凸の多い領域を通過している。このよ

うな領域では 3.1.3 でも述べたように、形状モデルと実際のイトカワの地形が必ずしも一致しない。そのため、この期間においては、LRF データと形状モデルを用いた計算で大まかな軌道推定は可能であるが、細かい起伏の照合は困難である。

AMICA 画像の中には、第 5 期間に「はやぶさ」が通過した領域を比較的鮮明に写した画像が何枚か存在する。それらの画像と計算結果とを重ね合わせて、目視による位置確認を行う。図 14 は、LRF の測距位置と AMICA 画像上の起伏とが比較的良く一致した例である。大まかなイトカワ上の構造と LRF の測距位置とは一致しているように見えるが、なお細かな不一致が残っており、これがノイズに起因するものか本来の位置を外した結果なのかの判別は困難である。また、良く一致する軌道を見いだしたとしても、他に該当する軌道が無いことを解明する必要がある。

とは言え、LRF の値と AMICA 画像を信用するという前提に立つならば、イトカワの地形と LRF の測距位置が矛盾無く一致する場所が存在すると考えられる。今後は形状モデルを用いた位置推定の精度を上げつつ、イトカワの地形と合致する軌道を求めることが課題となる。

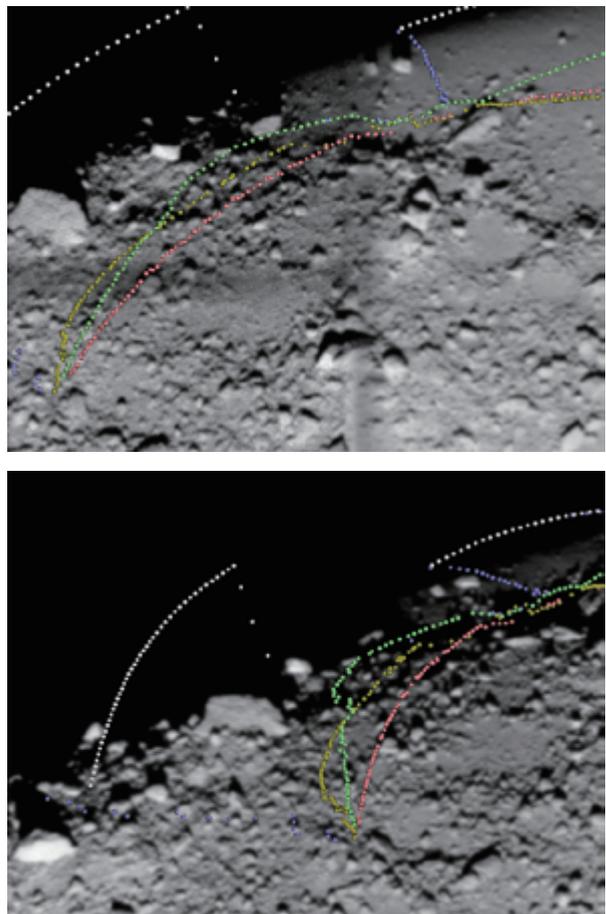


図 14 目視による位置推定 (LRF 測距位置)

8. 位置推定結果

第2期間から第5期間までの位置推定結果を図15に示す。第6期間における「はやぶさ」のイトカワに対する姿勢も、目視においては明確な矛盾は見いだせなかった。

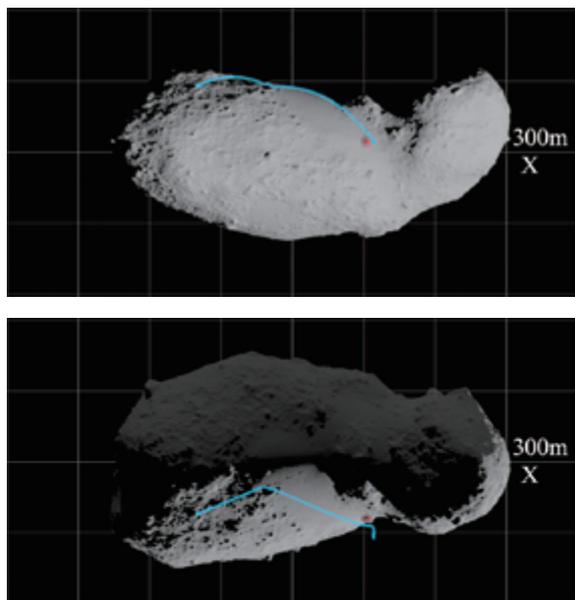


図15 第2期間から第5期間までの位置推定結果

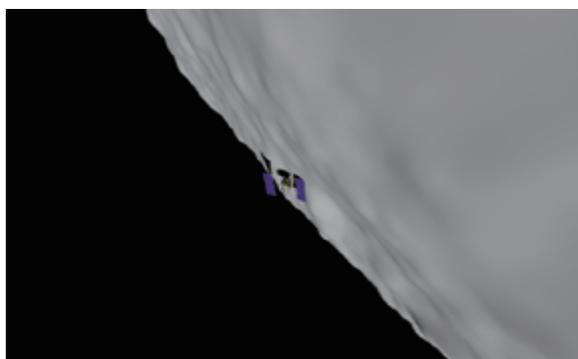


図16 第6期間における「はやぶさ」のイトカワに対する姿勢

9. まとめ

「はやぶさ」がイトカワにタッチダウンする時期における位置推定手法について述べた。本稿においては、「はやぶさ」がタッチダウンする際の軌道を映像化するために、なめらかな連続的軌道を得ることを主眼に置いて、繰り返し計算を用いる位置推定手法について述べた。

今後の課題は、下記の通りである。

本稿の手法で得られた軌道は極値に陥っている可能性もあり、軌道が大局的に見て適切であるかどうかについては、LRFデータと「はやぶさ」、イトカワの関係等を

イトカワ全域で調査し、妥当性を検証する必要がある。また、今回用いた姿勢データは、SPICEカーネルから得られたものであるが、他の姿勢に関連するデータ等と照合し、特に第6期間における「はやぶさ」の位置・姿勢の妥当性について、数値計算により検証する必要がある。

他方で局所的な位置推定精度を向上させるためには、形状モデルのみならず、AMICA等の画像とLRFデータの照合を行う等の改善点が挙げられる。

謝辞

「はやぶさ」の可視化にあたり、ONC-W1画像データをご提供頂きました宇宙航空研究開発機構の尾川順子氏、テレメトリデータをご提供頂きました同機構大槻真嗣氏および、位置推定に係るデータをご提供頂きましたドイツ航空宇宙センターの相田彩夏氏に感謝致します。また本稿の執筆にあたり、貴重な助言を頂きました「はやぶさ」関係各位に感謝致します。

参考文献

- [1] J. Kawaguchi, S. Aida, H. Morita, “Hayabusa, Detailed Guidance and Navigation Operations during Descents and Touchdowns,” *AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit*, 2006.
- [2] A. Fujiwara, J. Kawaguchi, et al., “The Rubble-Pile Asteroid Itokawa as Observed by Hayabusa,” *Science*, 第312巻, 第5778, pp. 1330-1334, 2006.
- [3] S. Abe, T. Mukai, et al., “Mass and Local Topography Measurements of Itokawa by Hayabusa,” *Science*, 第312巻, 第5778, pp. 1344-1347, 2006.
- [4] M-V-5/MUSES-C 飛翔実験計画書(衛星編), 宇宙科学研究所, 2003.
- [5] 三浦昭, 山本幸生, 吉川真, “「はやぶさ」の小惑星イトカワ探査軌道・姿勢の可視化,” *宇宙科学情報解析論文誌*, 第3, pp. 7-15, 3 2014.
- [6] M-V-5/はやぶさ 飛翔実験報告書(衛星編), 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部, 2005.
- [7] S. Aida, Y. Shibasaki, K. Shirakawa, H. Morita, J. Kawaguchi, “Trajectories and Attitudes of an Asteroid Sample Return Spacecraft “HAYABUSA” during Touchdowns on ITOKAWA,” *Proceedings of 16th Workshop on JAXA Astrodynamics and Flight Mechanics*, 2007.

SPICE を用いた視野シミュレータ FLOW の開発

山本 幸生^{*1} 岡田 尚基^{*1} 本庄 英司^{*2} 大友 翔一^{*3}

Development of SPICE-based Field Of View Visualizer: FLOW

Yukio Yamamoto^{*1}, Naoki Okada^{*1}, Eiji Honjoh^{*2}, and Shoichi Otomo^{*3}

Abstract

The function to simulate an instrument's field of view has been widely used in past missions, and will be used in future missions. We develop an FOV simulator, FLOW, based on SPICE Toolkit for versatile application. The FLOW is composed of two console programs: one is a simulation engine, and the other is an image generator. The simulation engine outputs an XML file which includes a simulated result. The image generator reads the XML output, and generates an image in FITS/PNG/JPEG formats. In this report, we describe the software requirement based on use-case of the FOV simulation, and FLOW's functions to draw. In addition, introduce a web-based FLOW application using FLOW.

Key Words: SPICE, Field Of View, FOV, Visualization

概要

惑星探査機に搭載された観測機器の視野をシミュレートすることは、これまで多くの観測機器が行ってきたことであり、また将来的にも利用されつづける機能の1つである。私たちは、SPICE Toolkit を利用した、汎用的な視野画像シミュレータ FLOW を開発した。FLOW は2つのコンソールプログラムから構成され、一つはシミュレーション・エンジンであり、もう一つは画像生成プログラムである。シミュレーション・エンジンは、シミュレーション結果を含んだ XML ファイルを出力する。画像生成プログラムは、その XML を読み込み、FITS/PNG/JPEG フォーマットで画像を生成する。本報告では、ユースケースに基づいた要求項目を列挙し、FLOW の持つ描画機能について説明する。また FLOW を用いたウェブブラウザベースのソフトウェアについても紹介する。

1 はじめに

惑星探査において、観測機器の視野をシミュレートするツールの需要は多い。多くの惑星探査機にはカメラが搭載されており、実際に撮像した画像とシミュレートした画像を比較すれば、位置や姿勢、カメラの歪みの検証を行うことが可能である。

またシミュレーションでは、実際には起こりえない条件を設定することができる。例えば惑星の夜側を撮像した場合、実際の画像では真っ暗な画像が得られることもある。このような場合に、シミュレーションでは影の効果をなくし、撮像領域を明確にすることもできる。他にも、実際には撮像していない時間帯を模擬したり、予測軌道や姿勢を与えることにより、将来取得されるであろう画像を事前に作成することもできる。

目的に応じて表面に貼り付けるテクスチャ画像を変えることで、通常的地表面の代わりに経緯度線や白地図を用いたり、空間分解能の低い機器がどの領域を撮像しているのかを示したりすることもできる。

^{*1} 宇宙科学研究所 学際科学研究系
(Department of Interdisciplinary Space Science, Institute of Space and Astronautical Science)

^{*2} 株式会社アストローツ (AstroArts Inc.)

^{*3} 慶應義塾大学 (Keio University)

上記のような視野を模擬したシミュレーションは、これまで幾度となく行われてきたはずである。それにも関わらず、汎用的なツールとしては開発されてこなかった。本開発では、多くの観測機器に対して、最小限の設定を行うことで、汎用的に利用可能な視野シミュレータを開発することを目的とする。

汎用的な視野シミュレータの開発において、どこまで再現性を高める必要があるのかは検討が必要である。繊細なシミュレーションを行おうとした場合には時間がかかり、また適用すべきシミュレーションモデルの検討も必要となってくる。そこで本開発では、主なユーザとして惑星探査機に搭載する視野角を持つ機器の開発者を想定し、探査機運用や地上データ処理で利用可能なツールの開発を行う。

2 SPICE

観測機器の視野に含まれる映像をシミュレートしようと考えた場合、ある時刻に対して、探査機の位置、姿勢、観測機器の視野を考えて計算を行う。この計算を行う上で最大の関門は、必要な情報をどのように取得すればよいか、という点である。特に汎用的なツールとして開発する場合、これらの情報が画一的なフォーマットとして用意されていなければ、ツール側で多様なフォーマットに対応しなければならない。

幸いにして、惑星探査においては SPICE という汎用的なツールがある [16]。SPICE は、NASA のジェット推進研究所 (Jet Propulsion Laboratory; JPL) によって開発され、探査機の時刻、軌道、姿勢や、観測機器の視野角などの補助情報をアーカイブするために、SPICE カーネルと呼ばれる画一的なフォーマットを規定している。またそれら进行操作するためのライブラリ (SPICE Toolkit) の提供を行っており、ライブラリを通して SPICE カーネルを参照し、それをを用いた計算を行うことができる。例えば、ある時刻における探査機の姿勢や視野角の情報を得たいと考えた場合、SPICE カーネルと簡単なプログラムを用意すれば良い。必要な SPICE カーネルの多くは、SPICE のウェブサイトからダウンロードすることができる。

日本の惑星探査においても、姿勢や軌道などの情報は SPICE カーネルとして提供している。SPICE は今後の惑星探査で標準的に利用されると考えられるため、視野を計算するのに必要な SPICE カーネルが揃っている探査機においては、本シミュレータで可視化できることを目標とする。

3 シミュレータ概要

3.1 背景

本シミュレータは、視野を可視化するためのソフトウェアとして、2009 年から開発が始まり、当時は mpsim という JAXA 内のプロジェクトで使用するためのツールであった。翌年 2010 年の開発により、現最新版とほぼ同等の機能を備えたツールへと進化した。2012 年 12 月に、FieLd Of View Visulaizer から FLOW と名付け、ソフトウェアの他に、コンパイル環境や使用方法を詳細に記したウェブサイトを整備した上で一般公開を行った。FLOW のソースコードはインターネットからダウンロードすることができる [10]。

3.2 構成

FLOW は、シミュレーション・エンジン (flow_se) とイメージ・ジェネレータ (flow_ig) の 2 つのコンソールプログラムから構成される (図 1)。

flow_se では、設定ファイルである config file に書かれた条件を読み込み、探査機に搭載された機器の視野内に写る天体の座標を計算し、天体の位置情報をシーンファイルとして出力する。シーンファイルはそれ単体で描画に必要な情報を全て有しており、flow_ig 以外のアプリケーションからも利用可能なよう、汎用性の高い XML フォーマットを採用している。またシミュレーション結果に対して意図的にデータを挿入したい場合には、シーンファイルを編集することで、レンダリング結果に反映することができる。

flow_ig では、シーンファイルを入力とし、レンダリングを行い画像を出力する。このとき「恒星のスペクトル型によるカラー描画」「惑星・衛星のテクスチャマッピング」「形状モデルの描画」「観測機器の視野形状によるマスク」処理を行っている。

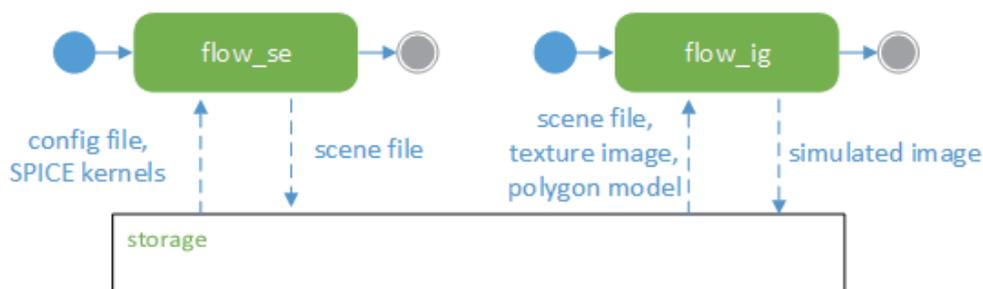


図1 視野シミュレータ FLOW の処理フロー。シミュレーション・エンジン flow_se が config file および SPICE kernel を読み込み scene file を作成する。イメージ・ジェネレータ flow_ig は作成された scene file と惑星等に貼り付ける texture 画像, polygon モデルを読み込んでシミュレーション画像を作成する。

FLOW の利用者が用意すべきファイルは、flow_se の入力となる config file と、計算に必要な SPICE カーネル群、描画に必要なテクスチャ画像、小惑星等の形状モデルである。

4 要求仕様

本ソフトウェアの開発を行う際の要求仕様を表1にまとめた。以下に各要求仕様について記述する。

4.1 マルチプラットフォーム対応

要求仕様の中で、特に優先度を高く設定したのは、マルチプラットフォーム対応である。SPICE Toolkit が正式に対応しているプラットフォーム上で動作することを目標としている。より多くのプラットフォーム上で動作させるために、特殊な環境が不要なコマンドラインベースの「コンソール・プログラム」を採用した。

現段階では POSIX[9] に準拠したアーキテクチャに対応している(表2)。POSIX 環境ではないアーキテクチャについては、未サポートとしている。また未サポートではないが、環境そのものが準備できなかったため、動作検証を行っていないアーキテクチャについては未検証とした。

4.2 設定ファイル

ユーザがシミュレーションを行う場合、全ての条件は設定ファイルである config file で行う。図2に実際の config file の例を示す。本 config file には、

- SPICE カーネルのファイルパス
- 星描画時のマグニチュード上限
- SPICE の計算条件 (時刻, 観測機器, 光路差の処理方法)
- テクスチャ情報
- 描画オブジェクト
- 画像のサイズ

が含まれている。

表1 要求仕様

No.	分類	要求詳細	理由
1	マルチプラットフォーム対応	SPICE Toolkit が動作するアーキテクチャで動作すること.	SPICE Toolkit は Mac, Linux, Windows(cygwin), Solaris, およびそれら環境の各種 32bit/64bit 環境で動作するため, 同環境で動作することが望ましい [18].
		コンソールプログラムとして動作すること.	X-Window や OpenGL などがインストールされていなくとも, シミュレートした画像を生成できるようにする.
2	描画情報の入出力	Lua 形式による設定ファイルを入力とすること.	複雑な設定をコマンドラインではなく設定ファイルから読み込むことで, 再現性を高めるようにする.
		XML 形式による描画情報を出力すること.	シミュレートした結果は, 各種情報をテキストファイルとして出力し, ユーザが確認できるようにする.
		天体情報を出力すること.	視野内に含まれる天体情報を出力する. また画像上での位置も含める. 例えば恒星の場合, Hipparcos カタログ [20] が存在し, その中には恒星までの距離やスペクトルなどが含まれている.
3	描画コンテンツ	ユーザが予め用意したテクスチャを, 対象天体の表面に貼付けられること.	月面などは詳細なテクスチャ画像により, 描画領域が正しいかどうか確認することができる. 部分的に高解像度のテクスチャを持つ場合, それにも対応する.
		リングを持つ天体を描画できること.	木星や土星を描画する際に, リングをテクスチャとして用意することで, リングのある惑星を描画する.
		恒星は, 色・明るさを考慮して描画すること.	SPICE カーネルには, Hipparcos カタログも含まれ, その中には色情報も含まれており, それを参照する.
		部分的なテクスチャを描画できること.	惑星全球のベースマップとは別に, 部分的に高解像度テクスチャが存在する場合, それを描画できること.
		形状モデルを表示できること.	小惑星など形状モデルが存在する場合, それを表示する. フォーマットは STL[23], SPICE DSK[17] に対応する.
		多角形・四角形・円・楕円の視野形状に対応すること.	例えば Venus Express の VMC は八角形の視野角を持ち, 視野領域以外をマスクする機能が必要である.
		プッシュ・ブルーム方式の撮像に対応すること.	視野定義が 4096x1 のようなラインセンサとなるため, そのまま描画すると細長い画像ができてしまう. そのため探査機の動きに合わせた画像を作る必要がある.
4	描画オプション	陰影の有無を制御できること.	例えば夜側を撮像した場合に, 影の効果を無視して描画を行う.
		ワイヤフレームによる描画をサポートすること.	本オプションを選択することで, テクスチャの代わりにワイヤフレームで描画を行う.
5	画像出力	シミュレートした画像は FITS, JPEG, PNG で出力できること.	FITS は惑星探査でも良く使われる形式の 1 つであるため, FITS 形式を出力として含める.
		FITS 形式の場合, WCS ヘッダを含めること.	WCS ヘッダに対応することで, ds9 等の FITS ビューワで確認した際に, 観測領域の赤経赤緯が表示される.
		FITS 形式の場合, カラー出力に対応すること.	ds9 で読み込むことができるカラーフォーマット FITS RGB [24] をサポートすることにより, カラーテクスチャを取り扱うことができる.

config file のフォーマットは, Lua[22] を用いたスクリプト形式を採用している. Lua はスクリプト言語であるが, FLOW のように C 言語で記述されたプログラムから呼び出すことが可能で, Lua スクリプト内で定義した定数は C 言語から参照することができる. また Lua は連想配列に相当するテーブル型を利用することができ, テーブル自身を入れ子構造とすることができる. config file 内では, SPICE カーネルのパス設定や, 描画天体に関連したファイルのパスを設定するために, Lua のテーブルを利用している.

```

-----
--! @file color rosetta.lua
--! @brief FLOW configuration example (ROSETTA 3rd Earth flyby)
--! @copyright Copyright 2010-2012 Japan Aerospace Exploration Agency
--
-- ROSETTA 3rd Earth flyby
--
-- Overview
--
-- This example creates a ROSETTA WAC simulation observed
-- at 2009-11-13T14:23:00. Refer to 'Rosetta Earth swingby successful' to
-- compare.
--
-- Reference
-- Rosetta Earth swingby successful
-- http://www.planetary.org/blog/article/00002212/
-----

-- Kernel directories
generic_kernel_dir = "kernels/generic_kernels/"
rosetta_kernel_dir = "kernels/ROSETTA/kernels/"

-- SPICE kernels
spice_kernels = {
  generic_kernel_dir .. "lsk/naif0010.tls",
  generic_kernel_dir .. "pck/pck00010.tpc",
  generic_kernel_dir .. "spk/planets/de421.bsp",
  rosetta_kernel_dir .. "fk/ROS_V18.TF",
  rosetta_kernel_dir .. "scl/ROS_110405_STEP.TSC",
  rosetta_kernel_dir .. "ik/ROS_OSIRIS_V11.TI",
  rosetta_kernel_dir .. "spk/ORGR_00096.BSP",
  rosetta_kernel_dir .. "ck/ATPR_P091108000000_00086.BC",
}

-- star data
star_kernel = generic_kernel_dir .. "stars/hipparcos.bdb"
star_magnitude_limit = 4.0

-- view settings.
title = "Sample view from ROSETTA"
time = "2009-11-13T14:23:00"
basis_object = "ROSETTA"
basis_instrument_id = -226112 -- WAC
aberration_correction = "LT+S"

-- object texture and model
texture_file_dir = "texture/"
object_table = {
  [{"PLANET.EARTH"}] = {
    {
      type = "texture-body",
      file = texture_file_dir .. "earth.jpg",
    },
  },
}

-- output objects
output_objects = {
  "SUN",
  "PLANETS",
  "STARS",
}

image_width = 1024
image_height = 1024

```

図2 config file の例。Lua スクリプト形式となっている。

表 2 FLOW のアーキテクチャ対応状況. FLOW は POSIX に対応している OS をサポート. 環境が用意できず検証していない OS は未検証と表記.

Architecture	SPICE Toolkit	FLOW	備考
Mac/Intel, OSX, Apple C, 32bit/64bit	○	○	未検証
Mac/PowerPC, OSX, Apple C, 32bit	○	△	
PC, CYGWIN, gCC, 32bit	○	○	
PC, Linux, gCC, 32bit/64bit	○	○	未サポート
PC, Windows, Microsoft Visual C, 32bit/64bit	○	×	
Sun/Intel, Solaris, Sun C, 32bit/64bit	○	○	
Sun/SPARC, Solaris, Sun C, 32bit/64bit	○	△	未検証

4.3 シーンファイル

シミュレーション画像に恒星などの天体が含まれていた場合、その画像から含まれる天体の名称を判別するのは困難である。そこでシミュレーション過程で得られた描画対象の天体に対して、天体名称や色などの天体情報や、その天体が画像上のどの位置に表示されているのかを示す必要がある。

そこで FLOW では、これらの天体情報を、入力に用いた撮像条件と共に、シーンファイル内に含めて出力する。図 3 はシーンファイルの実サンプルであり、各々のタグの意味を表 3 に示す。シーンファイルには、カテゴリとして描画条件、観測条件、天体情報の 3 つの内容が含まれている。描画条件は、入力となる config

表 3 シーンファイルに含まれる情報. 描画条件および観測条件は 1 シーンファイルに 1 つ存在する. 天体は描画する対象の個数に応じて含まれる.

カテゴリ	タグ	出力項目
描画条件	title	タイトル (FITS を指定した場合にヘッダに追記される)
	image_size	画像サイズ
	sky_color	宇宙空間となる背景色
観測条件	location	観測点位置 (x,y,z)
	boresight	観測機器座標系における視線方向ベクトル (x,y,z)
	bounds	観測機器座標系における視野境界ベクトル (x,y,z) × 個数 (四角形の場合 4 つ)
	fov	視野角 (degrees)
	pos_angle	画面中心から画面上端中央までの角度 (degrees)
	angle_res	画面中心から画面上端中央までのピクセル解像度 (degrees/pixel)
	shape	視野形状 (四角形, 多角形, 円, 楕円)
	center	視野中心の赤経・赤緯
天体情報	type	天体種別 (太陽系天体, 恒星)
	name	名称
	magnitude	明るさ (強度)
	distance	距離
	radius	半径 (天体が点でなく大きさを持つ場合)
	rotation	回転行列 (天体が点でなく大きさを持つ場合)
	spectral	スペクトル (天体が恒星の場合)
	texture	テクスチャ情報 (天体のテクスチャが存在する場合)
	model	ポリゴンモデル情報 (天体のポリゴンモデルが存在する場合)
	image_pos	天体の画像上での位置 (ピクセルの座標)

file に書かれた情報をそのまま出力する。観測条件は、主に SPICE カーネルから読み込んだ情報を出力する。天体情報は、視野角内に含まれる天体の情報を計算し、それら計算値と SPICE カーネルに含まれる天体情報の値を出力する。天体が複数ある場合、シーンファイルには天体情報が複数含まれている。

4.4 描画コンテンツ

4.4.1 テクスチャ画像の張り付け

FLOW は、描画対象となる惑星・衛星が、点ではなく大きさを持つ場合には、ユーザが予め用意したテクスチャ画像を貼付けられる機能を持つ。この機能により、実際の観測とシミュレーションとの比較を容易にすることができる。例えば白地図や経緯度線のみ含まれるテクスチャ画像を用意することで、観測領域の明確化が可能となる。

図 4 は、2007 年 11 月 13 日 19 時 30 分 00 秒 (UTC) に撮像した Rosetta OSIRIS WAC のシミュレーション例である。実際には夜間にあたるため、陰影効果の除去を行い、地表面のテクスチャの明確化を行っている。

用意すべきテクスチャ画像は、縦横比 1:2 かつサイズが 2 のベキ乗となっている必要がある。また左端が経度 0 度、右端が経度 360 度、上端が緯度 90 度、下端が緯度-90 度の画像を用意する (図 4 左下参考)。

画像の解像度は任意であるが、描画領域に比べて用意した画像の解像度が低いと、ズームアップした場合に十分な解像度が得られない。このような場合、全球に渡って高解像度のデータを用意するのは難しく、また用意できたとしても、ファイルそのものが巨大になりソフトウェアの動作に支障を来す恐れがある。

これを解決するために、FLOW は、部分的に高解像度を持つテクスチャが用意された場合に、その部分のみ高解像度に表示することができる。図 5 は、SELENE HDTV WIDE カメラによる 2007 年 11 月 7 日 05 時 56 分 00 秒 (UTC) の撮像をシミュレートしたものである。ベースマップとなる Clementine の画像の上に、SELENE LALT で作成した高度データ (カラー) を経度 170-190 度、緯度 70-90 度の部分のみ重ね合わせている。重ね合わせの効果を分かり易くするために、陰影の効果は除去している。FLOW はさらに、部分的なテクスチャを準備する方法として、Web Map Service (WMS)[26] もサポートし、画像のファイルパスの代わりに、WMS の URL とレイヤータイトルを使用することで、部分的な画像を直接描画することができる。図 6 は、部分テクスチャ画像として WMS を設定するための、config file の一部である。テクスチャ定義を並列に記述することにより、先に記述した内容は、後ろに記述されたテクスチャ定義によって上書きされる。テクスチャが部分的な領域の場合には、部分的に上書きされる。

4.4.2 リングを持つ天体の描画

FLOW は、木星や土星などのリングを持つ惑星を描画する機能を備えている。図 7 は Cassini ISS NAC で 2004 年 3 月 27 日 13 時 10 分 00 秒 (UTC) に撮像した土星の、実画像とシミュレーションの比較である。

リングの表示には、土星のテクスチャ画像の他に、リング用のテクスチャ画像を用意している (図 8)。リングのテクスチャ画像には透明色を利用するため、PNG フォーマットで用意する必要がある。

config file では、texture-body に加えて texture-ring の設定を追加する (図 9)。使用するリングのテクスチャ画像が、木星の半径の何倍に相当するかを rate として与えなければならない。図 9 の例では、木星の外環のリングが、木星半径の 2.31 倍となる画像を用いている。

土星の夜側の陰影の様子から、土星のシミュレーションはうまく機能していることが分かるが、FLOW ではレイトレーシングのように光の道筋を正確にトレースしていないため、シミュレーションの画像 (図 7 右) において、リングの上に土星の影が落ちていないことが分かる。

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<svdoc>
  <head>
    <title>Sample view from ROSETTA</title>
  </head>
  <frame>
    <view>
      <date>2009-11-13T14:23:00.000</date>
      <location>
        <x>-138408685.101606</x>
        <y>-85904.111791</y>
        <z>52053691.578269</z>
      </location>
      <boresight>
        <x>0.000000</x>
        <y>0.000000</y>
        <z>140.000000</z>
      </boresight>
      <bounds>
        <point>
          <x>14.554687</x>
          <y>14.554687</y>
          <z>138.478598</z>
        </point>
        <point>
          <x>-14.554687</x>
          <y>14.554687</y>
          <z>138.478598</z>
        </point>
        <point>
          <x>-14.554687</x>
          <y>-14.554687</y>
          <z>138.478598</z>
        </point>
        <point>
          <x>14.554687</x>
          <y>-14.554687</y>
          <z>138.478598</z>
        </point>
      </bounds>
      <fov>16.909067</fov>
      <pos_angle>327.509055</pos_angle>
      <angle_res>1.171875e-02</angle_res>
      <shape>RECTANGLE</shape>
      <center>
        <ra>352.706650</ra>
        <dec>-24.638810</dec>
      </center>
      <image_size>
        <width>1024</width>
        <height>1024</height>
      </image_size>
      <sky_color>
        <red>0.000000</red>
        <green>0.000000</green>
        <blue>0.000000</blue>
        <alpha>1.000000</alpha>
      </sky_color>
      <object type="solar" id="PLANET.EARTH">
        <name>EARTH</name>
        <position>
          <x>-1828.232707</x>
          <y>-355.078269</y>
          <z>235646.330177</z>
        </position>
        <magnitude>-17.00</magnitude>
        <distance>235653.609641</distance>
        <texture component="body">
          <src type="file">texture/grid.png</src>
        </texture>
        <image_pos>
          <x>474</x>
          <y>534</y>
        </image_pos>
        <radius>
          <x>6378.1366</x>
          <y>6378.1366</y>
          <z>6356.7519</z>
        </radius>
        <rotation>
          <A3>0.8171123481, -0.3059782862, -0.4885741490</A3>
          <A3>-0.5693960767, -0.2959306158, -0.7669505711</A3>
          </A3>
          <A3>0.0900861726, 0.9048769856, -0.4160313960</A3>
          </A3>
        </rotation>
      </object>
      <object type="star" id="STAR.HIPPARCOS.114341">
        <name>114341</name>
        <position>
          <x>0.641700</x>
          <y>-0.096234</y>
          <z>0.994485</z>
        </position>
        <magnitude>3.60</magnitude>
        <distance>2.204055e+15</distance>
        <image_pos>
          <x>716</x>
          <y>40</y>
        </image_pos>
        <spectral>K1</spectral>
        <color>255,160,160</color>
      </object>
      <object type="star" id="STAR.HIPPARCOS.115438">
        <name>115438</name>
        <position>
          <x>-0.015239</x>
          <y>-0.083835</y>
          <z>0.996363</z>
        </position>
        <magnitude>3.96</magnitude>
        <distance>1.535163e+15</distance>
        <image_pos>
          <x>437</x>
          <y>102</y>
        </image_pos>
        <spectral>K0</spectral>
        <color>255,160,160</color>
      </object>
    </view>
  </frame>
</svdoc>

```

図3 シーンファイルの例。シーンファイルはXML形式で出力される。この例では、シミュレーションの結果として、視野角内に含まれる3つの天体情報が出力されている(着色部)。

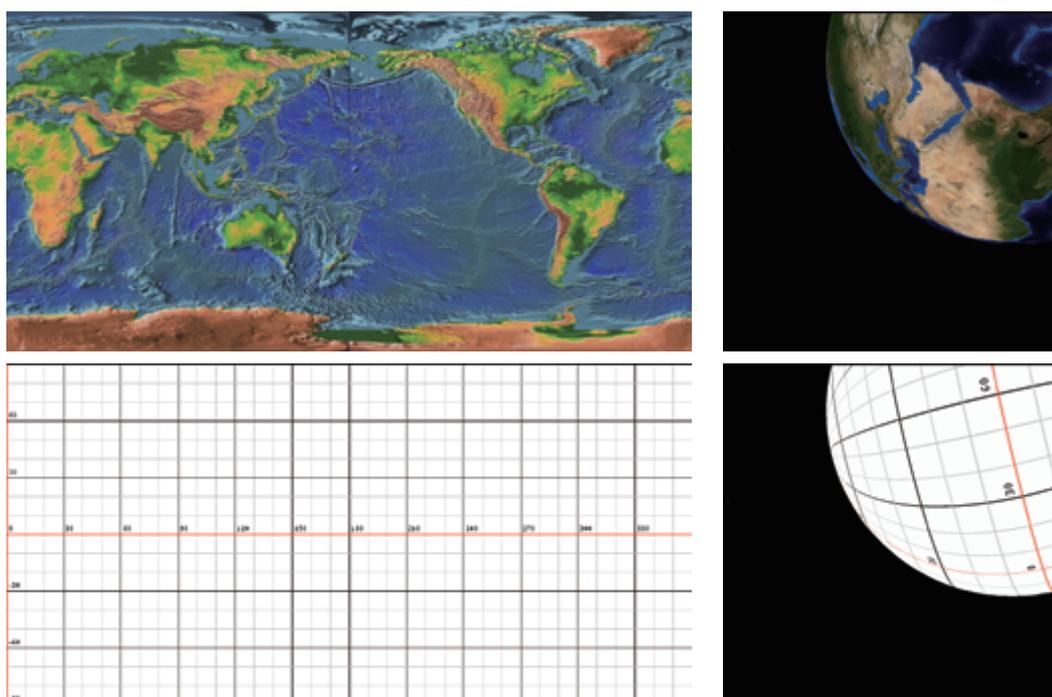


図4 テクスチャ表示例. シミュレーション対象の機器として Rosetta OSIRIS WAC を選択. 地球の地形テクスチャ (上段) と経緯度線グリッドテクスチャ (下段) を用いた. 双方とも左側は使用したテクスチャ画像, 右側はシミュレート結果である.

4.4.3 形状モデルの描画

視野のシミュレートを行う際, 単なる球面にテクスチャを張るだけでなく, 予め用意された形状モデルを描画する機能が必要である. 小惑星探査機はやぶさには, AMICA と呼ばれるカメラが搭載され, 小惑星 25143 Itokawa の観測を行った. これをシミュレートしたのが図 10 である. 形状モデルは小惑星 Itokawa の Gaskell 形状モデル [12] を用いた.

形状データの座標系は, +X 方向が子午線方向, +Z 方向が北極とし, +Y 方向は +X と +Z から右手系となるように決定する. 形状データの中で用いる数値 (距離) の単位は km である. 形状モデルと SPICE の座標系 (FRAME) とのマッピングは, flow_se の設定ファイルである config file で行う.

FLOW では, 形状モデルに対してテクスチャを張る機能を有しておらず, 単色の物体として, config file 内に形状モデルの色を RGB で設定する項目を含んでいる. 例えば小惑星 Itokawa のシミュレーションを行う場合には, (Red,Green,Blue)=(204,204,204) という値を config file に設定している.

4.4.4 視野形状対応 (多角形・四角形・円・楕円)

SPICE Toolkit では, “POLYGON”, “RECTANGLE”, “CIRCLE”, “ELLIPSE” の 4 つの視野形状に対応している. FLOW も同様に, これら 4 つの視野角を取り扱うことができる. FLOW における視野形状の処理は, 最初に視野全体を含む長方形を計算し, 次に視野以外の部分をマスクする方法で実現している.

図 12 は, Venus Express に搭載されたカメラ VMC による実画像とシミュレーション画像の比較である. 対象として 2014 年 01 月 07 日 01 時 04 分 59 秒 (UTC) に撮像された画像を用いた. VMC の視野は八角形の形状をしており, 多角形形状である視野がマスクされていることが分かる. そのままシミュレーションを行うと, マスク部分が黒のために, 視野の境界が明確とならない場合がある. そこで config file 上でバックグラ

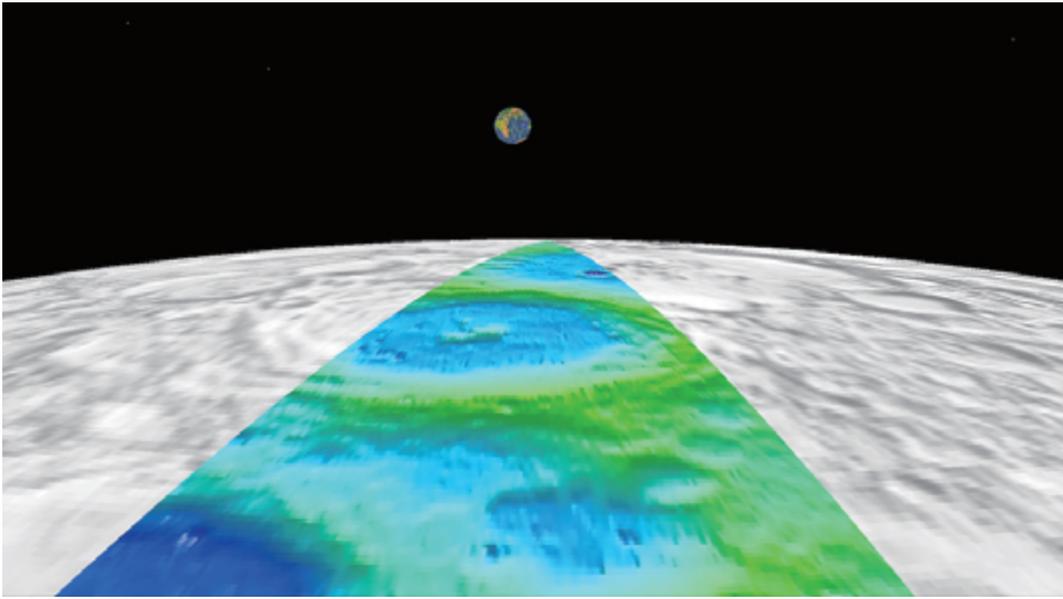


図5 FLOWの部分テクスチャ機能例。2007年11月07日05:56:00(UTC)のSELENE HDTV WIDEカメラ撮像をシミュレート。Clementineの全球テクスチャにSELENEレーザー高度計(LALT)によるテクスチャの重ね合わせている。重ね合わせの効果が分かりやすいよう、陰影の効果は除去している。

```
[ "SATELLITE.MOON" ] = {
  {
    type = "texture-body",
    file = texture_file_dir .. "moon.png",
  },
  {
    type = "texture-body",
    wms_url = "http://onmoon.jpl.nasa.gov/wms.cgi",
    wms_title = "LRO Colorized and Shaded Elevation, second version",
    region = "170.0,70.0,190.0,90.0",
    resolution = 50
  },
},
```

図6 部分テクスチャ画像による上書きを行う config file 例。ここでは WMS サーバを使用して、部分テクスチャ画像をプログラム実行時に読み込んでいる。

ウンド色 (sky.color) として深い青色を指定してシミュレーションを行っている。

4.4.5 プッシュ・ブルーム対応

周回衛星などに搭載されるカメラには、衛星の移動方向と垂直に設置した1次元センサーによってスキャンしていくことで2次元画像を作る「プッシュ・ブルーム方式」と呼ばれるカメラがある(図13)。SPICEの視野定義としては横4096ピクセル、縦1ピクセルといった定義がなされる。これをそのまま描画すると、横に長い画像が作成され、意図したシミュレーション画像が得られない。そこで本ソフトウェアでは観測時刻の代わりに、観測開始・終了時刻と時間刻み幅が与えられた場合には、プッシュ・ブルーム方式として動作する機能を追加している(図14)。

FLOWは3軸固定の周回衛星がラインセンサを使用した際のシミュレーションに対応しているが、1軸スピナーの衛星がスキャンして作成する画像については、今のところ対応していない。

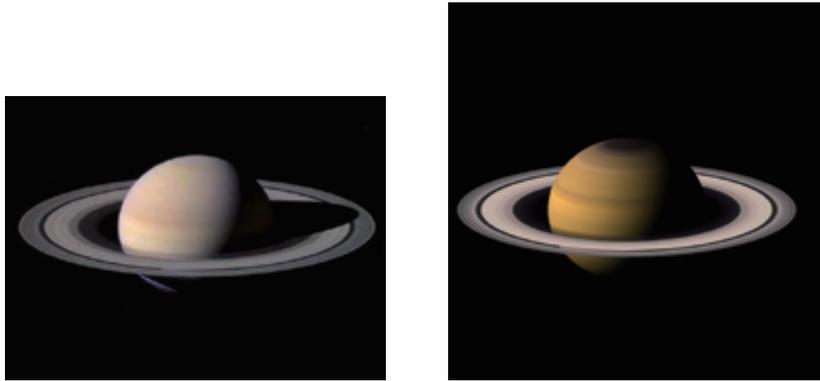


図7 土星リングの表示例. 2004年03月27日13:10:00(UTC)のCassini ISS NACを対象としてシミュレート. 実際の観測画像(左)とFLOWによるシミュレーション画像(右).

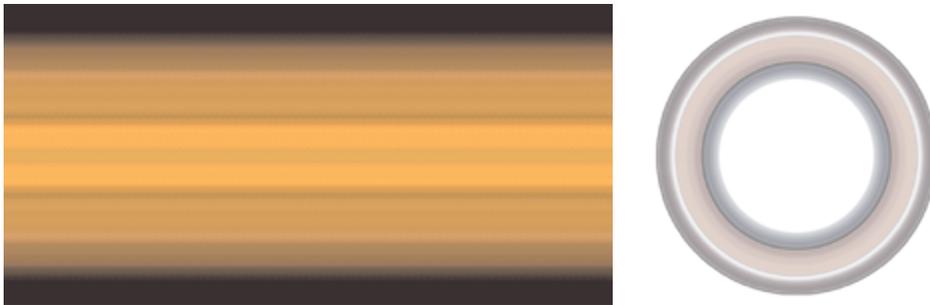


図8 土星表示に使用するテクスチャ画像. 土星表面のテクスチャ画像(左)とリングのテクスチャ画像(右). リング用のテクスチャ画像はPNGフォーマットによる透明部分を含んでいる.

```
object_table = {
  ["PLANET.SATURN"] = {
    {
      type = "texture-body",
      file = texture_file_dir .. "saturn.png",
    },
    {
      type = "texture-ring",
      file = texture_file_dir .. "saturn_ring.png",
      radius = "2.31",
    },
  },
},
}
```

図9 土星の環を表示するためのconfig file内の設定例. texture-bodyに加えて, texture-ringの設定を追加する.

4.5 描画オプション

描画オプションとは, 実際の描画を担うflow.igに対するオプションである. シミュレーション条件や描画コンテンツとは独立に用意された機能であり, どのシミュレーションにおいても描画時に指定することができる.

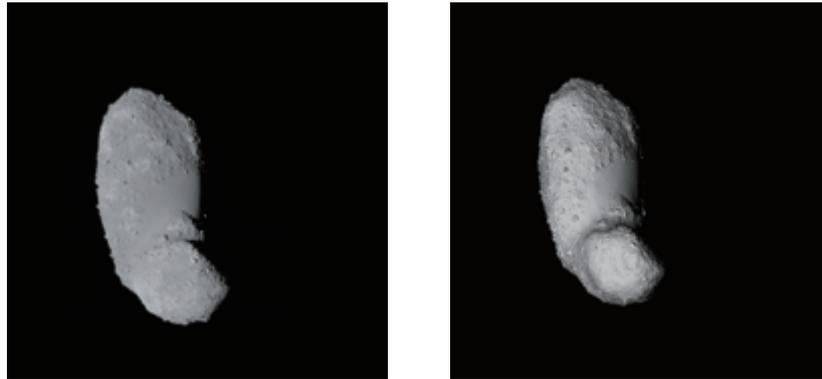


図 10 形状モデルシミュレーション例. 2005 年 10 月 16 日 13:30:13(UTC) に取得した Hayabusa AMICA による実際の観測画像 ST_2465140661_v(左) と FLOW によるシミュレーション画像(右). 形状モデルの色は, config file 内で灰色に設定している.

```
object_table = {
  ["ITOKAWA"] = {
    {type = "model",
     file = model_file_dir .. "itokawa_f0049152.stl",
     scale = 1.0,
     color = "204,204,204",
     format = "STL"}
  }
}
```

図 11 ポリゴンモデルを表示するための config file 設定例.

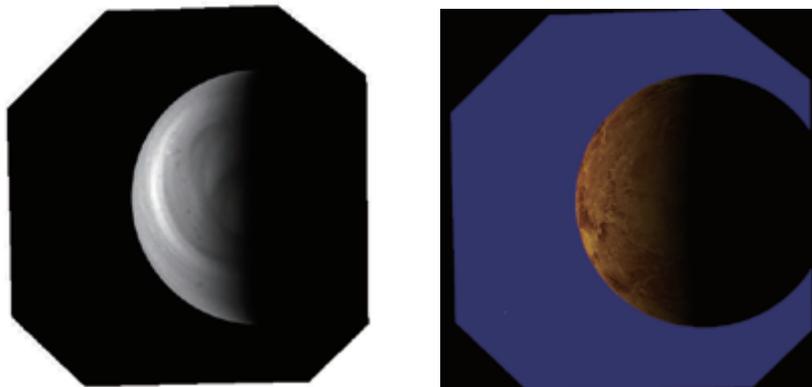


図 12 多角形視野のシミュレーション例. Venus Express UV が 2014 年 01 月 07 日 01:04:59(UTC) に行った金星観測をシミュレートした. 左は実際の観測画像, 右は本ソフトウェアによるシミュレーション画像. 多角形の視野が分かりやすいよう, sky_color オプションで背景に深い青色を用いている.

4.5.1 陰影効果の除去

図 15 は, 陰影の効果除去した例である. 通常のシミュレーション時には, 陰影の効果によって月面が半分だけ見えている. 陰影の効果除去すると, 月面が全面見えるようになる.

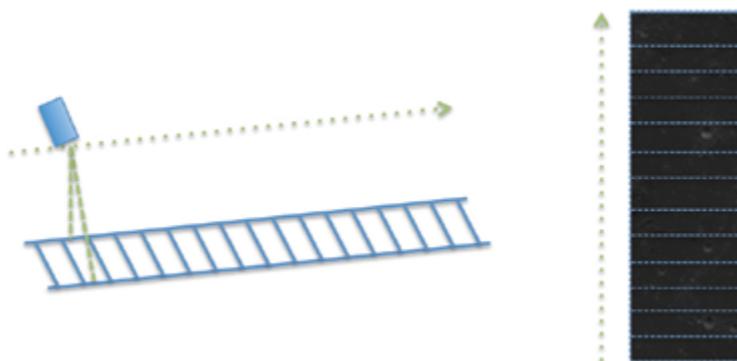


図13 プッシュ・ブroom方式による撮像. 2008年05月20日21:26:00から10秒間, SELENE TCの撮像をシミュレート. ラインセンサを衛星の移動方向と垂直に置くことで, 二次元イメージを作成することができる.

```
time_start = "2008-05-20T21:26:00"
time_end   = "2008-05-20T21:26:10"
time_step  = 0.0075
```

図14 プッシュ・ブroom方式で描画するための config file 設定例.



図15 陰影効果を無視したシミュレーション例. 2007年11月14日06:36:00(UTC)に実施したRosetta OSIRIS NACによる地球スイングバイ後の月観測を模擬している. 陰影あり(左)と陰影なし(右)をそれぞれシミュレートしている.

4.5.2 ワイヤーフレーム

ワイヤーフレームは, 対象となる天体にテクスチャを張らずに, それらをワイヤーで接続した描画を行う. 図16は, ワイヤーフレームの効果を表した例である. SELENE HDTVの望遠カメラ(TELE)が, 2008年04月05日21時44分26秒(UTC)に月面から見た地球の夜明けをシミュレートしたものである. 図16左は通常のシミュレーションに陰影の効果を除いたものである. 図16右は, ワイヤーフレームオプションをつけ, かつ陰影の効果を除いたものである. 月面および地球がワイヤーフレームとなっていることが分かる.

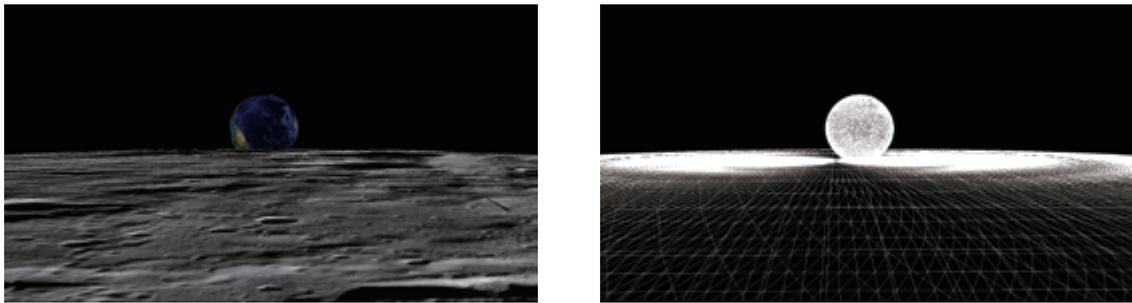


図 16 ワイヤーフレームシミュレーションの例. 2008 年 04 月 05 日 21:44:26(UTC) を使用. SELENE HDTV のシミュレーション (左) とワイヤーフレームシミュレーション (右). 双方とも陰影の効果は除いている.

4.6 画像の出力形式

画像を出力する上で、一般的な画像形式に対応することは、様々なシステムに組み込む上で重要な点である。FLOW では、一般的なフォーマットとして JPEG および PNG による出力をサポートしている。

一方で、天文分野で標準として使用され、近年では惑星探査においてもしばしば利用される FITS フォーマットもサポートしている。FITS による出力では、ファイル自身のヘッダ部に World Coordinate System (WCS)[14] 固有のキーワードを含んでいる。そのため ds9 [25] 等の WCS に対応した FITS ビューワで出力された画像を開いた場合に、赤経・赤緯が表示される (図 17)。

5 ソフトウェアの実装

5.1 恒星の表現

恒星の表現は、AstroArts 社 [1] で開発したステラナビゲータに由来した、視覚・体験に基づいた表現を行っている。恒星のサイズや明度は、明るさに応じて、8 段階に変化させている (図 18)。またスペクトル型に対応して色表現を変えている (図 19, 表 4)。スペクトル型の情報は、SPICE カーネルの恒星データベース (例えば Hipparcos カタログ) の情報を参照する。

表 4 恒星のスペクトル型と RGB 対応

恒星のスペクトル型	(Red,Green,Blue)
O	(128,128,255)
B	(160,160,255)
A	(192,192,255)
F	(224,224,255)
G	(255,192,192)
K	(255,160,160)
M	(255,128,128)

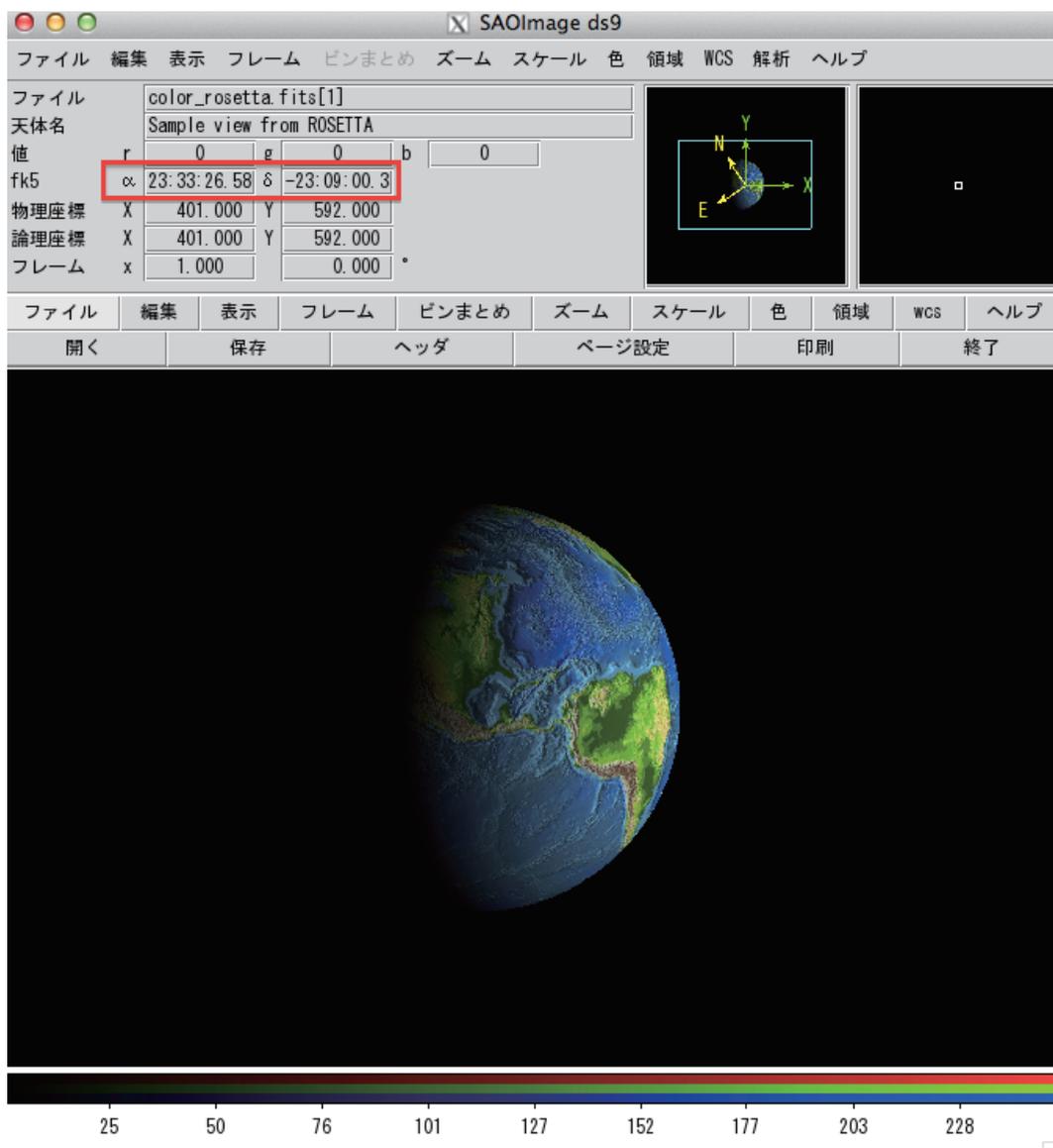


図 17 ds9 による出力結果の表示. シミュレーションには Roseta OSIRIS WAC が 2009 年 11 月 13 日 14:23:00(UTC) に撮像した地球スイングバイ時の時間を選択した. FITS RGB/FITS cube によるカラー対応と, WCS ヘッダによる赤経・赤緯の表示に対応している (赤枠部分).

5.2 独自の描画エンジン

より多くのプラットフォームで動作させるために, FLOW は, それ単体で動作する独自の描画エンジンを搭載している. 一つは 2D グラフィックエンジン (2D-canvas) であり, もう一つは 3D グラフィックエンジン (Tiny 3D Graphic Engine; 3D-tge) である.

2D-canvas は, オンメモリで動作する低レベルルーチンであり, FITS/JPEG/PNG の入出力となる Image I/O と接続する (図 20 左). ピクセルのカラー指定, カラーブレンド, canvas 同士の掛け合わせに対応している.

3D-tge は, ステラナビゲータ用に 2000 年に開発された技術を土台としている. 三角形ポリゴンの描画機能を有し, 陰影処理, 深度バッファ, アルファブレンド機能に対応している. 3D-tge の描画は, 2D-canvas を



図 18 恒星の明るさに応じたサイズ・明度の変化. 恒星の明るさは 8 段階で表現を行い, 左端が Magnitude 7.5~6.5 に対応し, 右に行くに連れ Magnitude が 1.0 下がる. 右端は Magnitude 0.5 未満に対応する.



図 19 スペクトル型による色表現の変化. 左から恒星のスペクトル型 O, B, A, F, G, K, M に対応する.

バックエンドとして利用する (図 20 右).

ハードウェアレンダリングを必要としないため, OpenGL 不要, X-Window System 不要, GPU 非依存であり, 移植性の高いソフトウェアを実現している. また高速化要求のために OpenGL に移行しやすいよう, 3D-tge の関数名の命名規約は OpenGL と似た関数名を採用している. 例えば OpenGL で RGBa カラー形式で色を指定する場合に用いる関数 `glColor4f()` は, 3D-tge では `tgeColor4f()` に対応している.

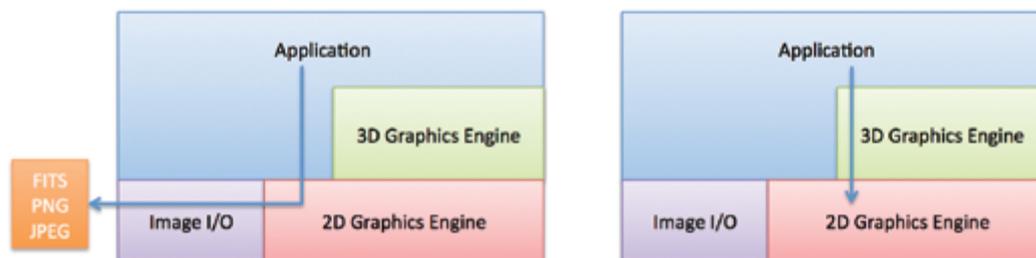


図 20 搭載グラフィックス・エンジンの構造. 2D グラフィックスは FITS/PNG/JPEG の Image I/O と接続する (左). 3D グラフィックスは 2D グラフィックスをバックエンドとして使用 (右).

5.3 形状モデルの読み込み

形状モデルのフォーマットは, 一般的なフォーマットである STL(STereoLithography) フォーマットと, SPICE Toolkit のアルファ版で提供している SPICE DSK Type 2 に対応している.

STL フォーマットの構文解析については, ステートマシンコンパイラ Ragel[28] を利用して C 言語のソースコードを出力し, これを組み込んでいる.

SPICE DSK Type 2 は C 言語による API が提供されているため, これを用いて形状データを読み出している. NAIF による SPICE DSK Type 2 の開発状況は現在 α 版であるが, 小惑星 25143 Itokawa, 小惑星 2867 Stein, 小惑星 4 Vesta, 火星の衛星 Phobos が公開されており, FLOW ではこれらを表示することができる (図 21).

5.4 依存ライブラリとライセンス

本ソフトウェアは, SPICE 同様, 一般に広く利用してもらうことを前提に開発を行い, 修正 BSD ライセンス [19] で公開している. また本ソフトウェアを利用したいユーザが, その使用に対して制約がないよう,

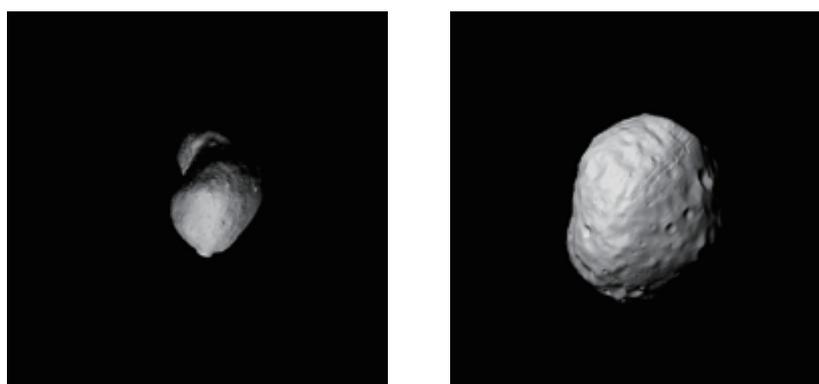


図 21 形状モデルの読み込み。左は STL フォーマットによる小惑星 25143 Itokawa(撮像時刻 2005 年 10 月 10 日 07:35:40 UTC)。右は SPICE DSK Type 2 フォーマットによる火星の衛星 Phobos(撮像時刻 2006 年 01 月 20 日 23:07:49 UTC)。

ソースコード公開の義務のある GPL[5] や LGPL[6] を避けている。また商用でも利用可能なように、Public domain, 修正 BSD ライセンス, MIT ライセンスを主体としたソフトウェア構成としている (表 5)。

しかしながら、実際に本ツールの派生ソフトウェア等を開発したいと考えた場合には、次の 2 つの点について注意が必要である。一つは libxml2 がリンク可能な iconv2 のライセンス、もう一つは libgcc に含まれる libregex である。これら 2 つのソフトウェアは共に LGPL を採用しているため、本ツールの派生ソフトウェアを開発しソースコードを非公開のまま再配布したいと考える場合には、libxml2 から iconv2 を除き、かつ libregex を libgcc の一部として利用するなど工夫が必要である。

表 5 依存ライブラリのライセンス

ライセンス	依存ライブラリ	備考
MIT	libxml2, Lua, libcurl	libxml2 は標準で iconv2 をリンク
Original	SPICE Toolkit, cfitsio, libpng, jpeglib	
LGPL	iconv2, libregex	派生ソフトウェア配布時に注意が必要

5.5 パッケージング

SPICE Toolkit では、複数のプラットフォームで動作するように、プラットフォームごとにソースコードを分けている。FLOW では、libxml2 や libpng など、複数の既存ライブラリに依存しているため、ソースコード配布時に頻繁に利用されている Autoconf[3] および Automake[4] を使用して各種プラットフォームに対応している。これによりソースコードを修正することなく、マルチプラットフォームでコンパイルを実現できる設計としている。また複数のプラットフォームでのコンパイル例を実例として示すことにより、コンパイルで迷う手間を低減している。

6 一般ユーザ向けのインターフェイス

6.1 一般ユーザ対応

本シミュレータは、利用者として SPICE の習得度についてある程度のレベルを求めている。少なくとも視野角を計算するために必要な SPICE カーネル群の準備や、対象とする観測機器に割り当てられている NAIF

ID についての知識が必要である。実際にこれが可能なのは、観測機器チームであったり、過去に惑星探査に携わり SPICE を利用した経験があるユーザである。本セクションでは、SPICE の修得を隠蔽し、一般向けのユーザのために開発したインターフェイスについて記述する。

6.2 開発コンセプトと開発要件

一般ユーザが利用する場合、観測機器の選択と時刻があれば、シミュレーションに必要な情報は十分である。また描画時のオプションとして、陰影の有無、テクスチャの選択ができれば、FLOW が持つ機能を損なうことなく、ユーザが求める描画に対応することができる。しかし一般ユーザの中には、実際にどのような時刻を入れて良いのか分からない場合があるため、これをサポートする仕組みも必要である。加えて、恒星や惑星が画像に含まれていた場合に、どの天体であるのかを識別する必要がある。これらを実現するために、以下の要求を開発要件とした。

1. ユーザが時刻を入力し、送信ボタンを押した場合に、シミュレートした画像を表示すること
2. 観測機器が複数存在する場合、観測機器を選択できること
3. 画像の表示オプションとして、陰影あり・なし、ワイヤーフレームによる表示、高解像度テクスチャの表示を選択できること
4. ユーザの入力をサポートするために、具体的な例をマウスで選択した場合に、時刻の入力・観測機器の選択をサポートすること
5. 画像の描画に時間がかかる場合、待ち状態であることを分かるような表示を行うこと
6. 画像に表示された天体が分かるよう、天体の情報と画像上の位置を表示すること
7. 画像の現在位置を知るために、マウスオーバー時にカーソルポジションを表示すること

6.3 ウェブブラウザベース・アプリケーション

より多くのユーザに対応するために、一般ユーザ向けのインターフェイスとして、ウェブブラウザベースのアプリケーションを選択した (図 22)。これを FLOW on the web と名付けインターネット上で公開している [11]。デスクトップユーザだけでなく、モバイル等でアクセスするユーザにも対応している。

入力項目は時刻のみ、描画オプションとして、陰影の有無、ワイヤーフレームの選択が行えるようになっている。また高画質のテクスチャやポリゴンモデルが存在する場合には、それらも選択可能としている。

時刻の入力は、ISO 8601 に準拠した YYYY-MM-DDThh:mm:ss という形式を取っている。エディットボックスには、薄くフォーマットが表示される工夫を行っている。また、日付と時刻の間に、アルファベットの T を入れることを一般のユーザが気づかない可能性も考慮し、Date Examples を掲載し、参考となる入力時刻を同形式で表示している。また Date Examples は、クリックすると、JavaScript により時刻と観測機器が自動的に設定されるようになっている。Date Examples の例をクリックし、Draw ボタンを押すだけで画像が描画される。

Date Examples は、各々が Reference に示す参考画像と対応しており、FLOW によるシミュレーションが正常に動作しているかどうかを確認できる時間帯を選んで例示している。実際のシミュレーション結果は右に表示し、画像の上には時間と描画オプションを表示している。画像の下には、視野内に含まれる天体情報を表形式で掲載している。

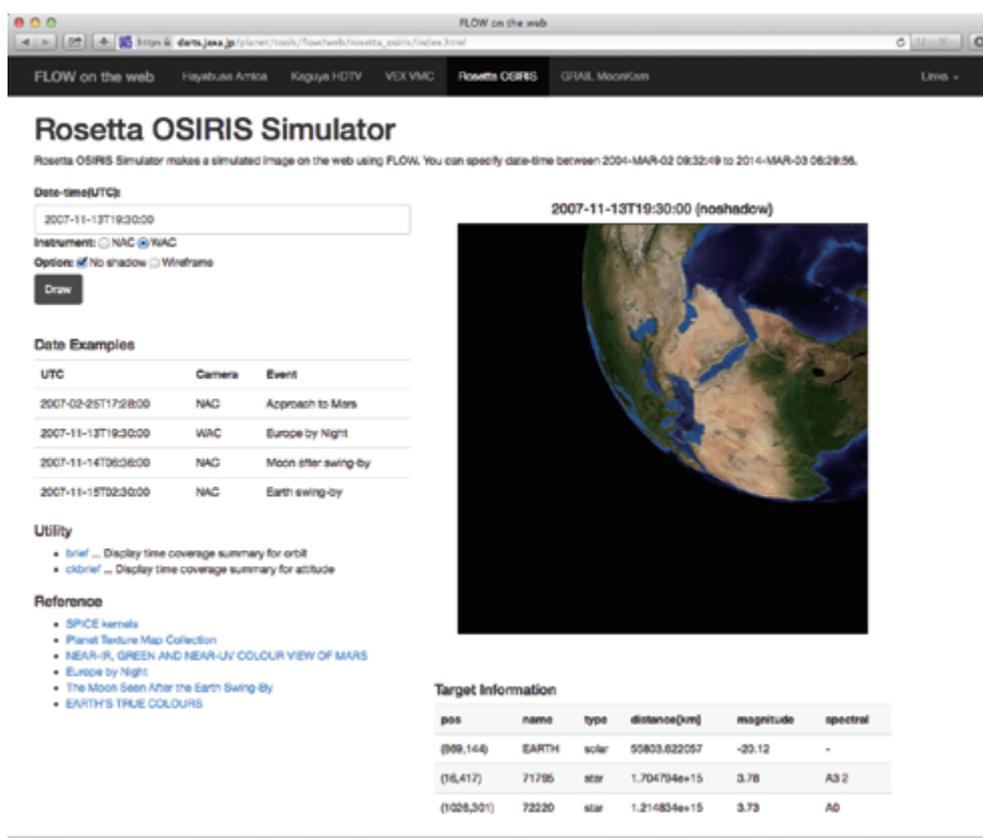


図 22 FLOW on the web のウェブサイト。

6.4 技術的な仕組み

図 23 は、FLOW on the web を模式的に描いた図である。最初にブラウザが HTML ファイルをダウンロードすることから始まる。この HTML ファイルには、JavaScript が含まれており、また関連する JavaScript 群も一緒にウェブサイトからダウンロードする。

ユーザが時刻を入力した後、Draw ボタンを押すと、サーバ上で json.php が実行される。json.php は、主に次の 3 つの処理を行う。

1. テンプレートを読み込み、描画オプションに応じた config file を作成
2. 作成した config file を元に、コンソールプログラム (flow_se と flow_ig) を実行
3. 実行が終了した際に、シーンファイル、画像の URL を JSON 形式 [2] で返却

FLOW のコンソールプログラムが画像を作成するまでに時間がかかるため、AJAX による非同期処理を行っている。非同期処理では、JSON 形式のデータがダウンロードされるまで待ち状態 (アニメーション gif の表示) を続け、データがダウンロードされた後、そこに含まれる URL にアクセスして描画を行う。

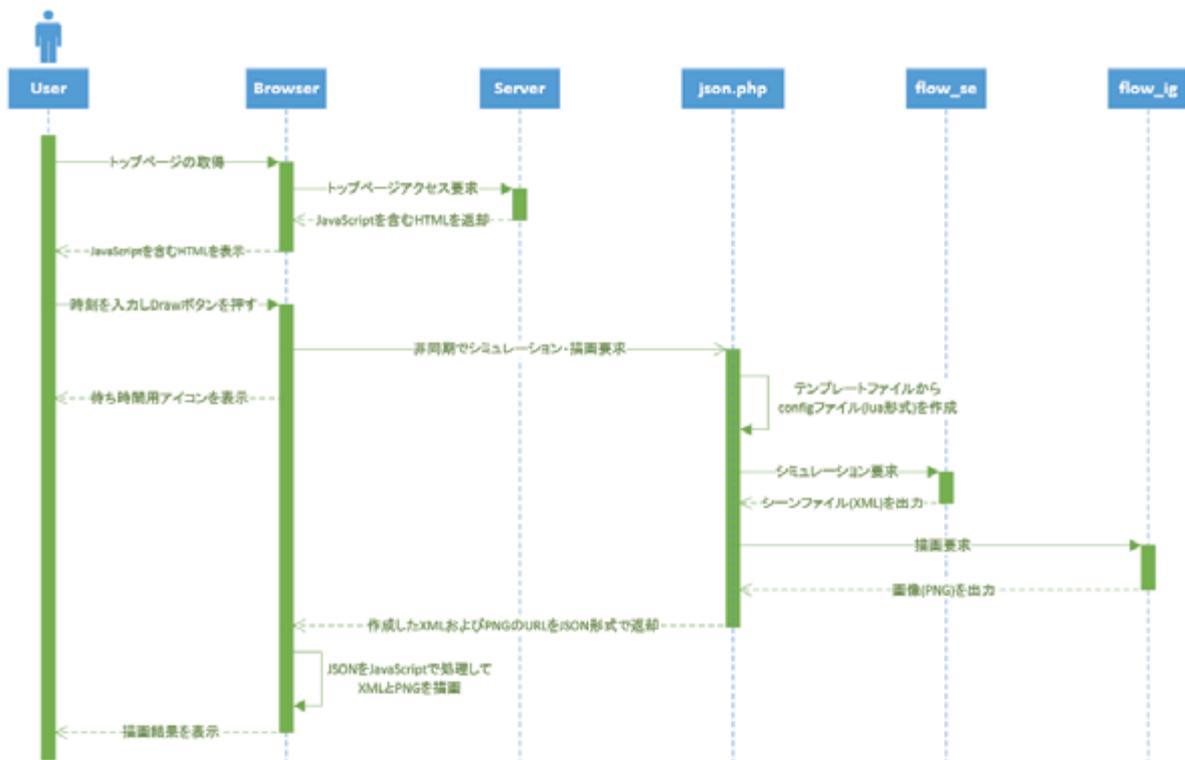


図 23 FLOW on the web の仕組み. コンソールプログラムの FLOW を PHP プログラムから実行する. AJAX により, 描画が終わるまで非同期で待ち, 描画終了と共に JSON が応答として返される. その後 JavaScript でシーンファイルと画像をダウンロードする.

7 発展の方向性

本ソフトウェアの開発は, より汎用的な手法で探査機運用や科学データのパイプライン処理の高次データ作成に利用可能なツールとすることを目的としている. しかし惑星探査において視野角を持つ機器のシミュレーションに対する要求は様々であり, 目的によっては本ソフトウェアでは達成できない項目もある. 本ソフトウェアはオープンソースのソフトウェアであり, ライセンスも修正 BSD ライセンスによって公開しているため, 必要に応じて利用者が改良することが可能である. ここでは本ソフトウェアでは現時点で実現できないシミュレーションについて言及し, 発展の方向性について記述する.

7.1 レンダリング手法

描画の過程において, レイトレーシングを実施していないため, ある物体が別物体に対して光や影の効果を再現することができない. 例えば土星などのリングを持つ惑星がリングに落とす影を再現することはできず(図 7), 同様に地球照のような地球の照り返しをシミュレーションすることはできない. また探査機自身によって作られる影はシミュレーションされない. 図 24 は, 2005 年 11 月 19 日(UTC)に撮像されたはやぶさ搭載の広角カメラ ONC-W1 による実際の撮像と, 三浦らによって POV-Ray[27] を使って可視化された画像[13], さらに FLOW によるシミュレーションの比較である. 公開されている SPICE カーネルには ONC-W1 の視野情報を含んでいないため, 簡易的に AMICA の視野角を 5.7 度から 60 度に変更してシミュレーション

を実施している。これらを比較すると、FLOW のシミュレーションでは探査機の影が実現されていないことが分かる。レイトレーシングによる描画機能の実装は、影が描画に強く影響を及ぼす場合に必要な機能であるが、シミュレーションに必要な時間が増大し、時間制約の限られた探査機運用や地上データ処理に組み込むには不向きであると言える。そのため現段階においてはレイトレーシングによるレンダリングは実装のスコープから外している。

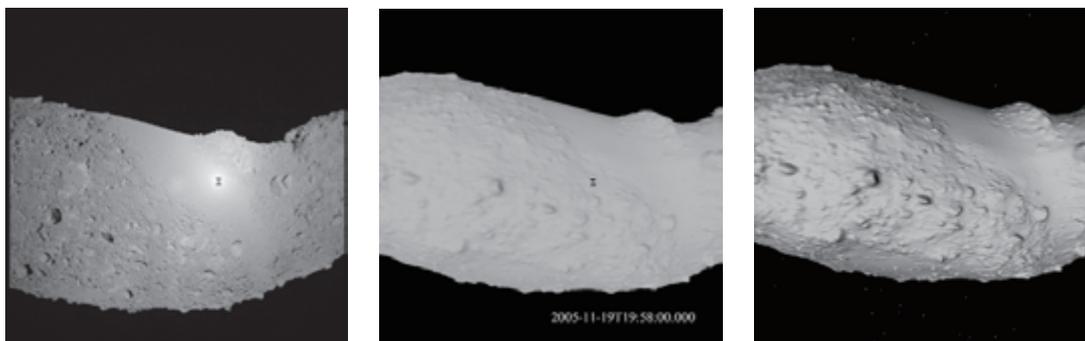


図 24 Itokawa 上に落ちるはやぶさの影。左は実画像，中は三浦らの POV-Ray によるシミュレーション，右は FLOW によるシミュレーション。FLOW によるシミュレーションでは、はやぶさの影は実現できていない。

さらに本ソフトウェアでは反射モデルとして Lambert 反射を用いている。もしそれ以外の反射モデル (例えば Hapke モデル [7] や Phong モデル [21]) を用いたい場合には、3D-tge の反射率計算を改良しなければならない。しかしながら、本ソフトウェアの主目的である探査機運用および地上データ処理の観点から、これらの反射モデルを適用することは現時点で考えていない。

7.2 3次元形状モデルの表現

本ソフトウェアは、小惑星などの3次元形状モデルを描画することができるが、STL と SPICE DSK type 2 のみをサポートしていることから分かる通り、形状モデルの各面に対して色を表現することはできない。現在の FLOW におけるポリゴンは単色であり、設定ファイルに記述する方式を採用している。

NASA は 3D モデルをインターネットで公開しており、ここでは Apollo Lunar Module などダウンロードすることができる [15]。これらのデータは .3ds という色も含めた 3 次元形状を表現可能なフォーマットで公開されている。これらのモデルを扱えるようになることは、月面着陸のシミュレーションや分離機構のある探査機では必要になる可能性がある。

またテクスチャを切り替えられる機能はユーザの理解を助けるために重要な機能であり、形状が球体である月・惑星の表示についてはテクスチャを自由に選択できるようになっている。一方で形状モデルに関してはこの機能を有していない。平田らのチームは、小惑星 Itokawa 上に、単色ではないテクスチャを貼付けるソフトウェアを開発している [8]。将来的にはこの技術や色を含めた形状を表現できるフォーマットを参考に、ポリゴン上へのテクスチャ画像の張り付けを改良することも可能である。

7.3 探査機に関連した改善点

本ソフトウェアは、3軸安定の探査機を考慮して作られている。開発の初期には探査機が動くことにより画像が作られるプッシュ・ブルーム方式には対応していなかった。しかしながらプッシュ・ブルーム方式は周回衛星では比較的良く利用される方式であり、実際に SELENE の地形カメラがそれを意識した SPICE カーネルを作成していたため、機能として追加を行った。同様の理由で、将来的には 1 軸スピナー衛星のスキャン画

像への対応も必要となる可能性がある。

また惑星探査の運用で利用するという目的においては、仮想的な補助線を用いて理解を助けることも考えられる。例えばはやぶさ2の対象天体である小惑星1999JU3は、その形状が球形に近く、シミュレーション結果だけではその方向が分かりにくい。このような場合には、自転軸や赤道、あるいは小惑星固定座標系のXYZ軸が表示される機能が必要となる。その他にも、観測領域に星が写り込んでいる場合は、補助線として星座線を描画することも良いであろう。シーンファイルなしで、直感的にユーザに観測領域を伝えることが可能となる。

8 おわりに

本論文では、SPICEを利用した汎用的な視野可視化のソフトウェアFLOWについて、実際のシミュレーション結果と併せて、機能と実装の詳細について紹介した。

探査機運用および地上データ処理を目的としたソフトウェアとして、様々なプラットフォームで動作させることを念頭に開発を行い、その結果プラットフォームの多様化した運用室の端末にも組み込むことが可能なソフトウェアとなった。さらに地上データ処理で作られるダミーデータとして、過去のミッションデータの流用ではなく、予想軌道や予測姿勢などを考慮したより精度の高いダミーデータの作成を実現できるようになった。

またSPICEがサポートする視野角の形状(多角形, 円, 楕円)を実現でき、さらに探査機が動くことによって画像を作りあげるプッシュブルーム方式にも対応した。今後行われる多くの探査機, 多くの観測機器で利用されることが期待できるソフトウェアとなった。

加えてSPICEを使いこなす専門家だけでなく、FLOWをバックエンドのエンジンとして利用した一般ユーザー向けのウェブサイトの開発も行い、FLOWと連携したアプリケーションの可能性も示した。

一方で、現時点でFLOWでは実現できないシミュレーションについても論じ、将来の改良の方向性を示した。しかしながら、多様化する要求に対して全ての機能を実現することは困難であり、その代わりにソフトウェア自身をオープンソースで公開し、幅広く利用可能な修正BSDライセンスを採用した。この意味は、より多様化した要求を実現するために、要求を持つユーザ自身が本ソフトウェアを成長させてくれることを望んだものである。

参考文献

- [1] ASTROARTS INC. AstroArts - アストローツ. <http://www.astroarts.com/index-j.html>. (参照 2014 年 12 月 1 日).
- [2] BRAY, T. The JavaScript Object Notation (JSON) Data Interchange Format. RFC 7159, RFC Editor, March 2014.
- [3] GNU PROJECT. Autoconf - gnu project - free software foundation (fsf). <http://www.gnu.org/software/autoconf/>. (参照 2014 年 12 月 1 日).
- [4] GNU PROJECT. Automake - gnu project - free software foundation (fsf). <http://www.gnu.org/software/automake/>. (参照 2014 年 12 月 1 日).
- [5] GNU PROJECT. Gnu general public license, version 3. <http://www.gnu.org/licenses/gpl.html>, June 2007. (参照 2014 年 12 月 1 日).
- [6] GNU PROJECT. Gnu lesser general public license, version 3. <http://www.gnu.org/licenses/lgpl.html>, June 2007. (参照 2014 年 12 月 1 日).
- [7] HAPKE, B. W. A theoretical photometric function for the lunar surface. *J. Geophys. Res.*68 (Aug. 1963), 4571–4586.
- [8] HIRATA, N., KAWAMAE, W., TUAN, A., D., KITAZATO, K., DEMURA, H., AND ASADA, N. ポリゴン形状モデルを基盤とした不規則形状小天体観測データ検索・解析システム. 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-11-007 1 (Mar. 2012), 133–139.
- [9] IEEE STANDARDS ASSOCIATION. IEEE SA - POSIX - Austin Joint Working Group. <http://standards.ieee.org/develop/wg/POSIX.html>. (参照 2014 年 12 月 1 日).
- [10] JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY. Field Of View Visualizer. <http://darts.jaxa.jp/planet/tools/flow/>. (参照 2014 年 12 月 1 日).
- [11] JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY. FLOW on the Web. <http://darts.jaxa.jp/planet/tools/flow/web/>. (参照 2014 年 12 月 1 日).
- [12] JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY. Hayabusa Project Science Data Archive. https://darts.jaxa.jp/planet/project/hayabusa/shape_ja.pl. (参照 2014 年 12 月 1 日).
- [13] MIURA, A., YAMAMOTO, Y., AND YOSHIKAWA, M. 「はやぶさ」の小惑星イトカワ探査軌道・姿勢の可視化. 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-13-010 3 (Mar. 2014), 7–15.
- [14] NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. Fits world coordinate system (wcs). http://fits.gsfc.nasa.gov/fits_wcs.html. (参照 2014 年 12 月 1 日).
- [15] NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. Home — 3d resources (beta). <http://nasa3d.arc.nasa.gov>. (参照 2014 年 12 月 1 日).
- [16] NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. SPICE. <http://naif.jpl.nasa.gov/>. (参照 2014 年 12 月 1 日).
- [17] NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. SPICE DSK. http://naif.jpl.nasa.gov/pub/naif/toolkit_docs/Tutorials/pdf/individual_docs/45_shape_model_preview.pdf. (参照 2014 年 12 月 1 日).
- [18] NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. Toolkits for C. http://naif.jpl.nasa.gov/naif/toolkit_C.html. (参照 2014 年 12 月 1 日).
- [19] OPEN SOURCE INITIATIVE. The bsd 3-clause license — open source initiative. <http://opensource.org/licenses/BSD-3-Clause>. (参照 2014 年 12 月 1 日).

- [20] PERRYMAN, M. A. C., LINDEGREN, L., KOVALEVSKY, J., HOEG, E., BASTIAN, U., BERNACCA, P. L., CRÉZÉ, M., DONATI, F., GRENON, M., GREWING, M., VAN LEEUWEN, F., VAN DER MAREL, H., MIGNARD, F., MURRAY, C. A., LE POOLE, R. S., SCHRIJVER, H., TURON, C., ARENOU, F., FROESCHLÉ, M., AND PETERSEN, C. S. The HIPPARCOS Catalogue. *A&A* 323 (July 1997), L49–L52.
- [21] PHONG, B.-T. Illumination for Computer Generated Pictures. *Communications of the ACM* 18, 6 (1975), 311–317.
- [22] PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO DE JANEIRO. The Programming Language Lua. <http://www.lua.org/>. (参照 2014 年 12 月 1 日).
- [23] ROCK, S. J., AND WOZNY, M. J. A flexible file format for solid freeform fabrication. In *Proceedings Solid Freeform Fabrication Symposium* (1991), pp. 1–12.
- [24] SMITHSONIAN ASTROPHYSICAL OBSERVATORY. FITS RGB. <http://zeus.asu.cas.cz/extra/ds9/file.html>. (参照 2014 年 12 月 1 日).
- [25] SMITHSONIAN ASTROPHYSICAL OBSERVATORY. Saoimage ds9. <http://ds9.si.edu/site/Home.html>. (参照 2014 年 12 月 1 日).
- [26] THE OPEN GEOSPATIAL CONSORTIUM (OGC). Web Map Service — OGC. <http://www.opengeospatial.org/standards/wms>. (参照 2014 年 12 月 1 日).
- [27] THE POV-TEAM. POV-Ray - The Persistence of Vision Raytracer. <http://www.povray.org/>. (参照 2014 年 12 月 1 日).
- [28] THURSTON, A. D. Parsing computer languages with an automaton compiled from a single regular expression. In *CIAA 2006: Proceedings of the 11th International Conference on Implementation and Application of Automata* (2006), O. H. Ibarra and H.-C. Yen, Eds., vol. 4094 of *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, pp. 285–286.

