



ISSN 2433-2216(Online)  
JAXA-RR-23-007

# 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 第十三号

Journal of Space Science Informatics Japan Volume 13

2024年2月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

## 目次

1	科学人工衛星データを用いたスポーツ施設の立地と体育教育の地域間格差に関する解析 大友 翔一.....	1
2	HEALPix を用いた「かぐや」の月面標高データベースとデータ 提供システムの開発 小林 寧々, 梶浦 梨央, 中平 聡志, 山本 幸生, 内田ヘルベルト 陽仁, 海老沢 研 .....	13
3	宇宙環境計測情報提供プラットフォームの研究開発 宮川 雄大, 木本 雄吾, 上野 遥, 松本 晴久 .....	23
4	宇宙物体の軌道低下と宇宙天気現象の関係及び宇宙天気現象を考慮した軌道予測の可能性 野澤 恵, 久保庭 敦男, アルベリウス 幸子, 玉置 晋 .....	35
5	機械学習を用いた XRISM 衛星搭載極低温検出器の異常検知アルゴリズムの開発 柏崎 未有, 辻本 匡弘 .....	45
6	半球面マルチタッチパネル機能付き背面投影型デジタル地球儀の展示事例紹介と可搬化への取り組み 小山 幸伸, 吉松 陽菜 .....	57
7	Preliminary Study on Literature-Based Classification of Space Missions TSUNODA Takehiro, DEMURA Hirohide, HASHIMOTO Yasuhiro, OKUDAIRA Kyoko .....	63
8	磁気インピーダンスセンサを用いた廉価な磁力計の開発： 関東 - 東北 - 北海道への稠密磁場観測ネットワークの展開 前田 大輝, 能勢 正仁, 野村 太志, 足立 匠, 山本 優佳, 熊本 篤志, 石田 祐宣, 市原 寛, 河野 剛健, 岩永 吉広, 立松 峻一, 浅利 晴紀, 平原 秀行, 海東 恵美, 長町 信吾, 渡邊 修一, 山内 大輔 .....	71
9	位置依存型 Point-spread Function を用いた Richardson-Lucy 法の X 線衛星 Chandra 撮像画像への応用 ~ 超新星残骸カシオペア座 A の鮮明化 ~ 酒井 優輔, 山田 真也, 佐藤 寿紀, 早川 亮大, 日暮 凌太, 小湊 菜央 .....	83

# 科学人工衛星データを用いたスポーツ施設の立地と体育教育の 地域間格差に関する解析

大友 翔一<sup>\*1</sup>

## Analysis of Regional Disparities of Location of Sports Facilities and Sports Education Using Scientific Satellite Data

OTOMO Shoichi<sup>\*1</sup>

### ABSTRACT

In recent years, the application of satellites and big data on the economic field has been rapidly expanding. In particular, it has become clear that the intensity of the night lights acquired by satellites correlates with social and economic indicators such as gross domestic product, employment, population, and education in each country. Developing countries and some regions are still lagging in terms of development of reliable statistical data by region as well as many of the existing statistical data being not credible. In addition, there has been several issues raised in the past, including potential problems of macroeconomic indicators when making global comparisons of Gross Domestic Product (GDP). In contrast, night lights are used to analyze GDP and the scale of the economy, a single indicator can be used to compare economic activity across multiple countries. Therefore, those are rapidly utilized in the field of economics among the satellites data. In this paper, an analysis of the location and distribution of sports facilities, transition of the fitness industry, and the environment surrounding sports participation will be made. Specifically, swimming will be used as an example to measure effects of the environmental factors - such that location and distribution of the sports facilities significantly affect the disparity of results in competitions.

**Keywords:** Night light, Satellites data, Sports Facilities, Disparity.

### 概 要

近年、人工衛星やビッグデータの経済分野への応用が急速に拡大している。特に、人工衛星が取得した夜間光の強度が、各国の国内総生産、雇用、人口、教育などの社会・経済指標と相関関係があることが明らかになってきた。

とりわけ、途上国や一部地域においては未だに地域別各種統計データの整備が遅れており、その入手・利用は困難であることや、既存の統計資料には信憑性のないものも多い。また国内総生産である Gross Domestic Product (GDP) の国際比較等の際に、マクロ経済指標が潜在的に内包する問題などは、以前から多数の指摘があった。

こうした点に対して、GDP や経済規模の分析などに夜間光画像を用いると、単一指標で複数国家に跨る経済活動の比較が行える。そのため、人工衛星が取得するデータの中でも夜間光画像は、経済学分野における利活用が急速に進んでいる。

本論文では人工衛星の取得するデータの中でも、特に夜間光データを用いた経済分析の一つの事例を報告する。具体的には、公共の体育施設と民営の体育施設の所在地がどういった場所に多くあるのか、その場所やその場所を含む市区町村の夜間光の強さと、体育施設数の関連について報告する。また、フィットネス産業の変遷及びそれらを含むスポーツを取り巻く環境に関しても解析事例を報告する。特に、水泳を事例として、これら施設の立地や分布が夜間光輝度の高いところに偏在するなどの環境的要因が、中学生や高校生の大会などのレースにおける結果の格差をもたらしている可能性に関して言及する。

\* 2023 年 11 月 30 日受付 (Received November 30, 2023)

<sup>\*1</sup> 株式会社 GEOJACKASS, 應義塾大学大学院経済研究科・産業研究所, 静岡大学情報学部・土木情報学研究所 (GEOJACKASS, Keio Economic Observatory, Keio University Institute of Civil Engineering and Informatics, Shizuoka University)

# 1 はじめに

## 1.1 背景

情報通信技術の発達やデータ解析技術の発達により、宇宙情報科学を始めとする大容量のデータ (ビッグデータ) を扱えるようになり、データの新しい利用価値を生み出す基盤が整えられつつある。さらに近年では、二次利用の可能なルールで公開された公共データ (オープンデータ) の利用促進を目的としたさまざまな取り組みが、国を挙げて進められている。

しかし、途上国や一部地域においては未だに地域別各種統計データの整備が遅れており、その入手・利用は困難であることや、既存の統計資料には信憑性のないものも多い。また GDP の国際比較等の際に、マクロ経済指標が潜在的に内包する問題などは、以前から多数の指摘があった。

一方、近年では飛躍的な技術の進歩とともに、人工衛星の取得するデータは、大規模かつ、高頻度にデータを取得可能になった。その中でも汎用性が高いデータとして注目されているのが、夜間光 (Night Lights) のデータである。

一般的に、夜間光データを用いた放射輝度と都市化には相関関係があるとされている。大友 (2021)[20] によれば、人口が多く、商業的に発展している地域ほど放射輝度が高くなると言われている。一方で、公共性の高い下水道や医療機関、医療従事者数といったものは、夜間光とはさほど相関がないとされている。そこで本稿では、民営と公営それぞれの体育施設の立地と夜間光の関係性、及びフィットネス産業の変遷と、それらを含むスポーツを取り巻く環境格差に関する解析を行った結果を報告する。

解析の結果、スポーツ施設の立地状況は公共施設と民間施設とでは大きく異なることが確認された。

## 1.2 先行研究

人工衛星のデータの利用拡大に関してその流行の理由を、Donaldson et al.(2016)[3] は、急速な技術の進歩とともに、高解像度かつ高精細なビッグデータが取得可能になり、ペタバイト級の衛星画像が公開され、経済学を含め、工学、地理学などの関連分野で利用されるようになったことであるとしている。

特に夜間光を用いた研究を列举すると、Henderson et al.(2012)[6] は、夜間光を用いた分析を行い、アジア通貨危機前後のインドネシアにおける GDP、ルワンダ虐殺、マダガスカル鉱山の発掘など、様々な社会的・経済的なショックの前後で GDP と夜間光が連動して推移していたことを指摘した。また、同論文では、GDP の算出には、比較対象となる商品の品質や為替レートなどの様々な要素を含むことや、特に途上国における政府公表のデータの正確性に問題があり、解析結果の不確実性につながると指摘している。これらを踏まえ、一国の内部や国境をまたぐ複数の国家間の比較を行う場合に、夜間光を利用する統計的枠組みの方が、既存の指標よりも経済水準・社会活動の代理変数として不確実性を取り除ける可能性に言及している。

同様に一ノ瀬ら (2002)[18] も、場所を問わずアジア (あるいは世界) の各都市に適用可能な都市の発展段階の定量化手法の開発が必要であり、リモートセンシングから得られる情報を Geographic Information System (GIS) 上で行政界単位に集計し、既存統計資料の代替とする手法は、その代表例といえるとしている。

さらに、倉田 (2017)[21] は低所得国における夜間光と様々な社会・経済指標との関係を明らかにするため、バングラディッシュ国内の行政区レベルの分析を行った。結果、夜間光は人口、雇用、インフラなどの基礎的な社会・経済状況に加え、貧困や成人の教育水準、児童の健康状態などの人的資本に関連する指標とも有意な相関関係にあると報告している。

Li et al.(2019)[10] は、中国国内の6つの省における地域の経済指標などに基づく持続的な発展の可能性の指標 (SDIs: Sustainable Development Indicators) に関して、夜間光との関係性を確認している。また、一部地域でのデータ欠損に対して夜間光で補完可能であること及び地域的な影響による経済波及効果を吸収する形

での、単一かつ一意の指標として夜間光を用いる有用性に言及している。

Chalkias et al.(2019)[2] は、都市開発に関連する計画、政策分析、意思決定、資源利用及び保全のために、時空間的な人口動態や社会経済情報を調査することが重要であり、それらの推定に夜間光が有用であることを EU を事例に報告している。特に EU は世界有数の観光立国のため、観光業は経済資源、雇用の源泉として重要であり、これらの季節単位、年単位での変化を、連続的かつ比較的正確かつ安価に把握するために夜間光が有用であるとしている。また同論文では、夜間の衛星画像、発光量と観光活動に関する統計データに関して、線形回帰と地理的加重回帰を用いて分析し、高い相関があるとして報告している。Derek & Moncef (2018)[5] は、地理空間エネルギー分析の中でも、特に細分化された建物毎のエネルギー使用量の推計に夜間光画像を使用する手法を提唱している。

一方、スポーツ施設の分析に関しては、データ解析的なものが少ない。この点に関しては軽部 (2002)[20] は、これまでのスポーツ施設の立地分析のアプローチに関して、客観性または計量性を求めるよりも、ある事象に関する概念的整理に関心を集中させたり、研究対象施設に対して調査結果から一般化を図ったり、あるいは現実の計画に役立たせようといったことはあまり指向していないと分析している。また、従来の研究は広く有効性をもつ政策科学的・計画論的研究には結び付かず、結局、現実のスポーツ施設計画には役立っていないと指摘している。

### 1.3 本研究の意義及び新規性に関して

軽部 (2002)[20] によれば、茨城県を事例に解析を行っているが、データ解析的なアプローチのスポーツ施設分析に関する報告は少ないとしている。そこで、本研究では日本全国を調査及び解析の対象地域としていること及び、対象のスポーツ施設数も 155 箇所から、10,683 箇所と大幅に増加させた。さらに、ArcGIS[4] 及び QGIS[16] といった GIS ソフトウェアを用いることで、隣接するスポーツ施設同士の最短隣接距離の集計も、先行研究の 1km よりも細かい単位での集計が可能となった。本稿では 100m を単位として論述する。また、隣接距離以外にも夜間光データを用いることで、スポーツ施設の分布特徴に関して、特に民間のスポーツ施設は夜間光の高いところに多くあることが全国的にも明らかになった。このことに、本研究の意義及び新規性があると言える。

## 2 スポーツ産業のデータ解析

### 2.1 フィットネス産業の市場規模推移

e-Stat[19] にて公開されている特定サービス産業動態統計調査から、フィットネス産業に関するデータを参照すると、2001 年 1 月から月次ごとの会員数や売上高等が確認できる。これを描画すると下記図 1、図 2、図 3 のようになる。

調査開始の 2001 年から 2019 年のコロナ禍の影響を受けるまでの間、産業自体は成長を続け、月間の利用者数は 2001 年 1 月の約 900 万人から最大が 2019 年 7 月の 2200 万人以上に及んでいる。また、売上高は月間で約 160 億円から 280 億円以上にまで増加していた。これに伴い、従業員数も約 2 万人から最大で 4.5 万人以上に増加していることが確認できる。

このことから、フィットネス産業全体は大きく成長している過程であったと言える。

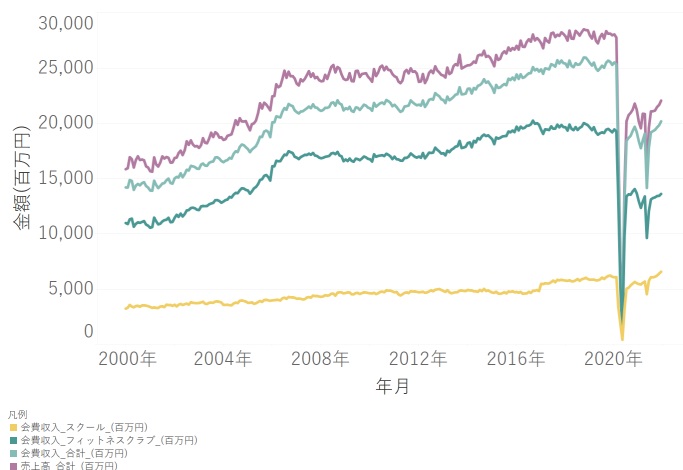


図 1 売上高・会費収入等推移

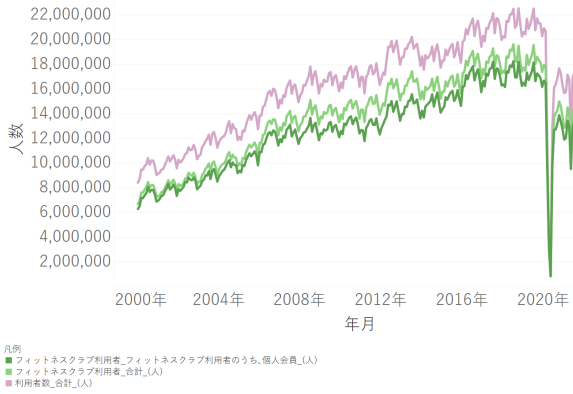


図2 利用者数・会員数等推移

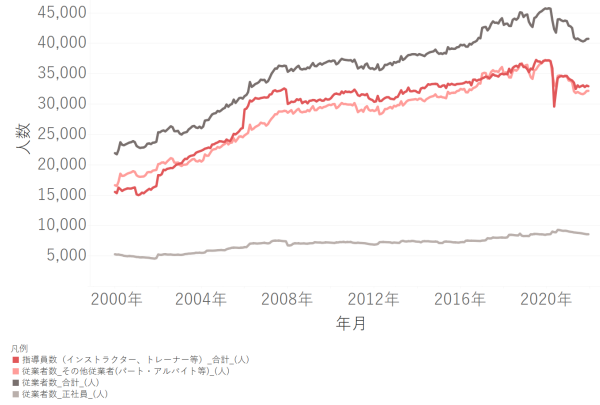


図3 従業員数等推移

## 2.2 スポーツ施設の立地場所

スポーツ施設の立地に関してスポーツの統計学 [1] 及び軽部 (2002)[20] によれば、図4 公共施設の方が各市区町村まんべんなく分布しているのに対して、民間施設では水戸市、日立市、つくば市など比較的人口の多い都市に集中して分布しているとしている。

これに倣い、本稿では2021年度の全国的な体育施設の立地に関する最短隣接距離の計算を行った。これを下記図5、図6に示す。ここから明らかなように、日本全国の体育施設でも、先行研究同様に、公共施設と比べて民間施設は最短隣接距離が短い。つまり特定の場所に密集して分布していることが分かる。

大友 (2021)[22] によれば特にサービス業や小売業などにおいては、夜間光強度の高いところに店舗が密集することが知られており、医療等の公共性の高いものは夜間光との相関は比較的低いと報告している。では体育施設は、こういったところに分布あるいは密集するのか、またそれは公共と民間でどの程度異なるのかを確認する。

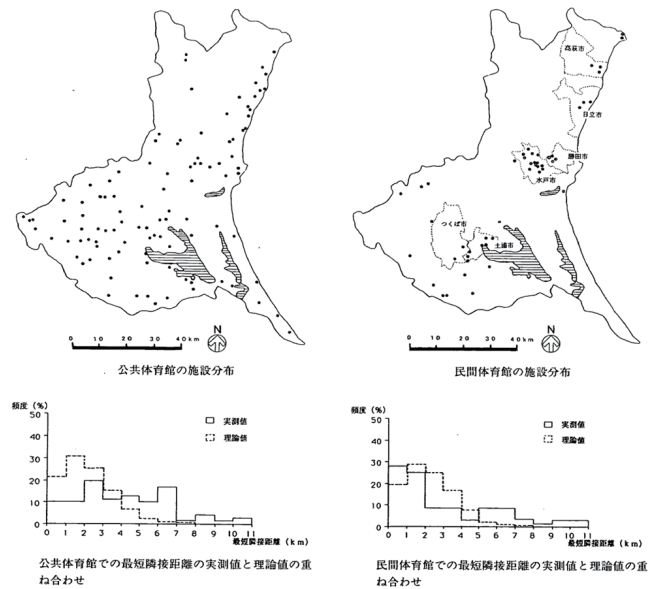


図4 スポーツ施設分布（公共・民間）\*\*1

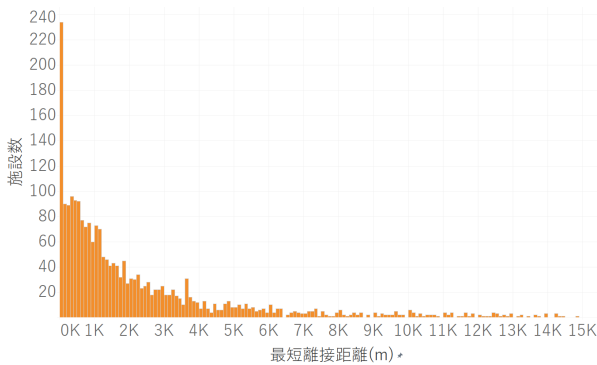


図5 公共体育施設最短隣接距離

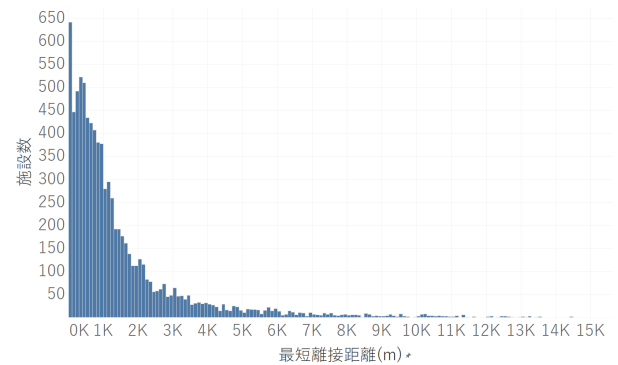


図6 民間体育施設最短隣接距離

## 2.3 使用する夜間光データ

米国空軍気象衛星である Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) が取得するデータを利用する。これはアメリカ海洋大気庁 (NOAA) が公開しており、年次毎の平均データの外、夜間光輝度調整済みのものなど複数種類ある。当該データは GeoTIFF 形式 [12] で配布されており、NOAA の公開するスペックシート [14] によれば、経度 -180 度から 180 度、緯度 -65 度から 75 度とほぼ全球を網羅しており、1 グリッドは 30 秒角とされている。ただし、一つの施設の中に陸上競技場、野球、サッカーなどの複数フィールドを併せ持つもの、水泳施設などを併設する大規模施設など、あるいは隣接する複数の異なる施設について、それぞれを夜間光から判別することはできない。



図 7 日本の夜間光強度<sup>\*\*2</sup>

## 2.4 夜間光強度に基づくスポーツ施設の分布

ここで、大友 (2021,2022)[22][23] から図 7<sup>\*\*2</sup> を参照し、日本全体の夜間光の特徴に関して簡単に述べると、いわゆる都心部は全域に於いて明るいことが分かる。都市化の進んでいない市区町村の夜間光の特徴は、単純に最小値が 0 になるわけではない。駅前などの繁華街が明るい、同一の市区町村内において最小値が 0 となる地域も多いため、結果として分散が大きくなる傾向にある。

体育施設の立地分布を調査するために NTT のインターネット版電話帳「i タウンページ」[15] を利用してデータを抽出した。次にこれら施設情報に緯度経度情報を付与するために、東京大学空間情報科学研究センターにて公開されているジオコーディングサービス[24]を使用した。

まず体育施設と水泳施設のそれぞれに関して、各市区町村内の平均夜間光強度ごとの施設数分布を確認すると図 8、図 9 となる。ここから、民間の施設は体育施設も水泳施設も、夜間光強度の高いところ、即ち商業的に発展した駅前や繁華街あるいは住宅地といった比較的明るい地域に多く密集していることが分かる。他方、公共の体育施設は夜間光強度の高いところに多く立地しているものの、民間の施設と比較すると密集の度合いが低いことが分かる。これは、公共施設の場合は、体育施設を建てること、あるいはその維持管理等の施設に関連する事業を地方に提供した結果、利用者の利便性以外のことも考慮したため、夜間光強度の高いところ以外にまんべんなく立地していると考えられる。

次に、子どもの生活と学びに関する親子調査 [25] によれば、水泳は小学生男子の習い事ランキングにおいて低学年男子、高学年男子の 1 位であった。そこでここでは、特に水泳施設にあるいは複合型施設で水泳設備を併設しているものを、体育施設同様に最短隣接距離を測定し掲載した。

結果、水泳施設は一般的な体育施設と比べてより顕著に、民間施設の方が夜間光強度の高いところに集中して立地していることが図 8、図 9 から読み取れる。この施設立地に関して地図的に確認すると図 10、図 11、図 12、図 13<sup>\*\*3</sup> となる。次章からは、水泳施設の立地が影響すると思われる、都道府県別の全国大会出場者数などを確認する。

<sup>\*\*1</sup> [1],[20] 掲載の図を筆者一部加工

<sup>\*\*2</sup> [22],[23] 一部改変して利用

<sup>\*\*3</sup> データ公開元 NOAA, [13], Data values range from 0-63

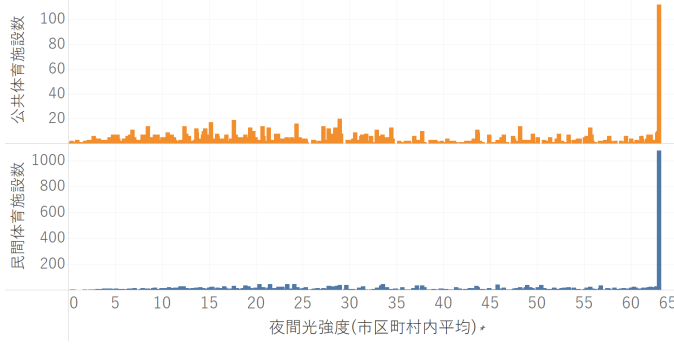


図8 体育施設の市区町村内平均夜間光強度ごとの施設数

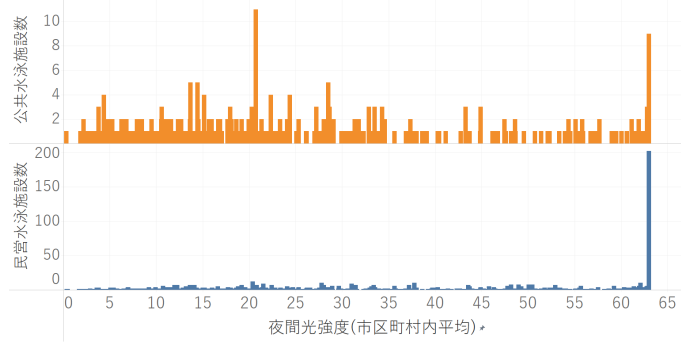


図9 水泳施設の市区町村内平均夜間光強度ごとの施設数

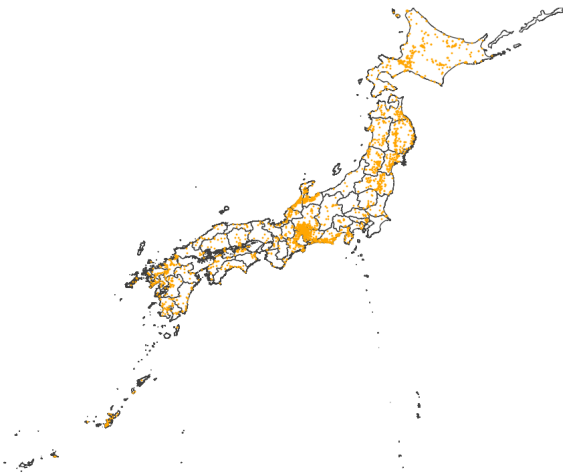


図10 国内の公共体育施設の分布



図11 国内の民間体育施設の分布

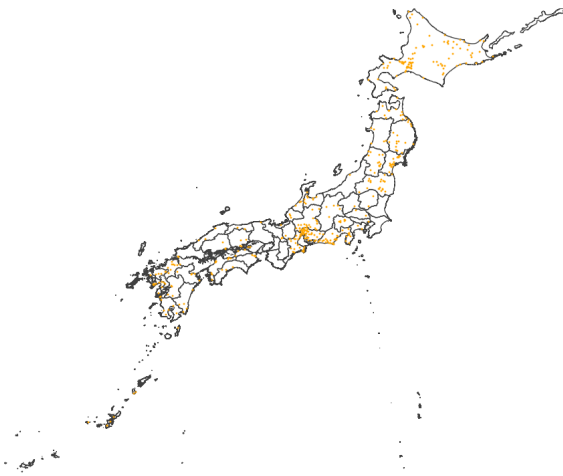


図12 国内の公共水泳施設の分布

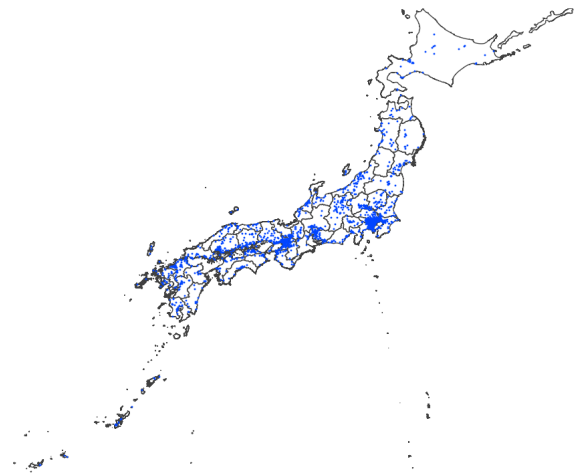


図13 国内の民間水泳施設の分布



### 3 水泳大会のデータ解析に基づく環境格差

#### 3.1 全国中学校水泳競技大会

SEIKO 社から公開されているデータ [17] をもとに、全中水泳 2021 年度の大会結果を確認すると図 14 から、都道府県別の大会出場回数が多い順に、神奈川、東京、埼玉、愛知、大阪、千葉と続く。これらはいずれも都心であり、夜間光強度が高いこと、民間の水泳施設が多く密集していることが図 7 から明らかであろう。

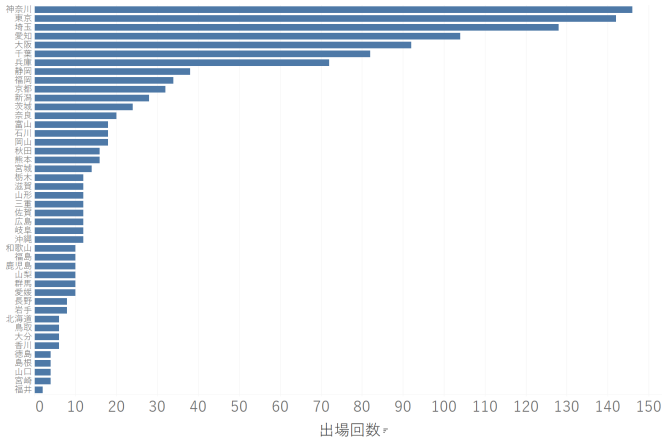


図 14 全中水泳 2021 都道府県別出場回数

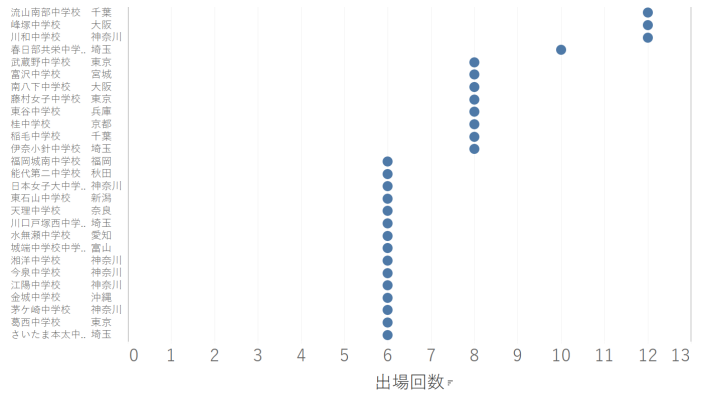


図 15 全中水泳 2021 中学校別出場回数

中学校の段階では、一般的にスポーツ推薦などは存在しないはずである。しかし、出場回数が多い中学校が存在することは図 15 から読み取れる。

また、中学生くらいまでは選手に専門種目というものは多く、優秀な選手はメドレー（クロール、ブレスト、バタフライ、バックストローク）を全て練習させるそうである。結果的に図 16 を参照すると明らかのように、一人で複数の種目に出場することが多くある。そのため図 15, 図 16 において、出場回数としている。

では、これらの学校はいわゆる強豪校なのであるか。

一部の私立中学校は、付属の高校や大学と連携を図っており、選手の育成を行うこともありえないではないであろう。しかし、公立中学校に関しても私立中学校同様の付属高校や大学と連携が図れるかは疑問符が付く。

いずれにせよ、学校自体は都心部に近いところにあるため、公立中学校に通う優秀な選手というのは、例えば民間の水泳施設で練習を行い、その施設に通う選手たちが、必然的に施設に近い学区の中学校に行く可能性を考慮することも出来るのではなかろうか。

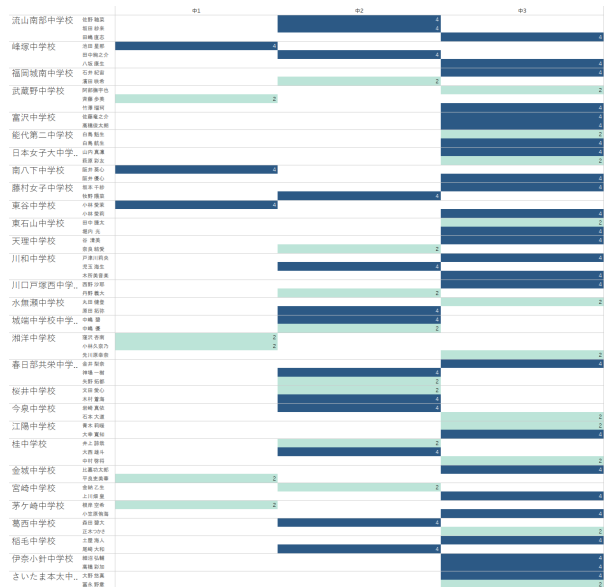


図 16 全中水泳 2021 中学校学年選手別出場回数

### 3.2 全国高校水泳選手権大会

全国高校水泳選手権大会 2021 年度の大会結果を確認すると図 17 から、都道府県別の大会出場回数が多い順に、大阪、東京、神奈川、愛知、埼玉と続く。順序は多少異なるが、全中水泳の都道府県別出場回数の上位都道府県とほぼ等しいことが分かる。

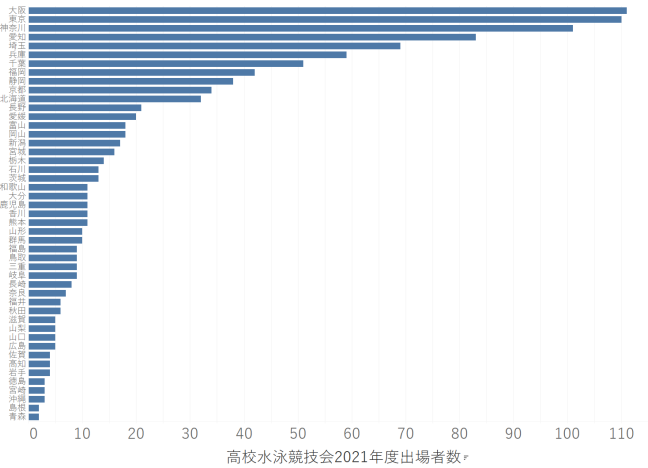


図 17 全国高校水泳選手権大会 2021 都道府県別出場回数

中学校と異なり、高校からは一般的にスポーツ推薦などがある。そのためか文部科学省学校コード [11] に従い、公立と私立を分類すると、中学校図 15 では上位 20 校 (同出場回数を含む 27 校) の内、私立は 5 校と 2 割以下である。しかし高校図 18 では、上位 20 校は全て私立となり、上位 30 校 (同出場回数を含む 34 校) の内、公立が 1 校と私立学校の割合が大きく増加してくる。

図 19 を参照すると明らかなように、一人で複数の種目に出場する場合もあるが、一つの学校からの出場者は中学校と比べて大きく増加する。これは、高校生くらいから専門種目が出来てくるためであると考えられる。

また、高校の水泳強豪校に推薦で入学するためには、中学校で好成績を残す必要がある。ここまでの分析から中学校で好成績を残すためには民間の水泳施設で練習を行っているものと考えられ、全中水泳で好成績を取るためにはそれ以前の小学校あるいはさらにそれ以前から、水泳を教育されていたと考えられる。そして、それは、いずれも民間の水泳施設であったと考えるのが妥当であろう。

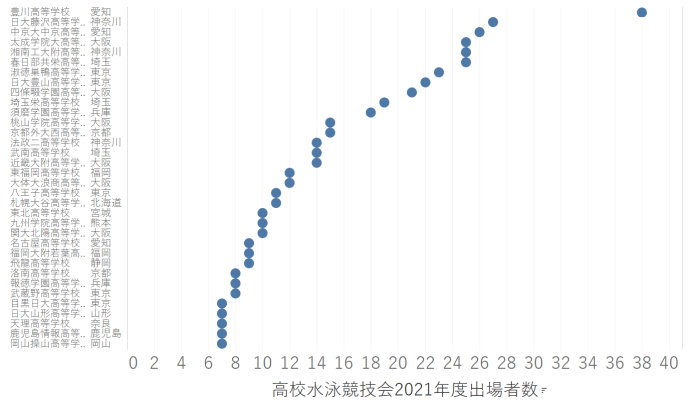


図 18 全国高校水泳選手権大会 2021 高校別出場回数

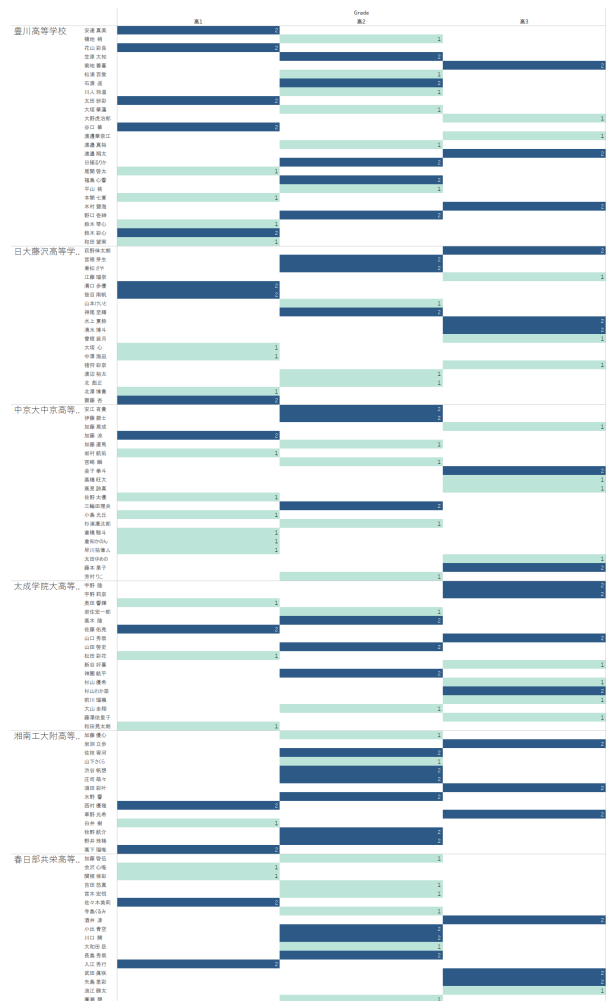


図 19 全国高校水泳選手権大会 2021 高校学年選手別出場回数

## 4 おわりに

ここまでの結果をもとにすると、先行研究で指摘されていた体育施設の立地や密集に関して、全国的にも同様に民間の体育施設は人口の多いところに密集しやすく、公共の体育施設は空間的にまんべんなくなるように配置される傾向が明らかになった。また、それは夜間光強度との結びつきが強く、駅前や繁華街、住宅地といった明るいところに、民間の体育施設が多く密集すると言える。

選手の多さに関して、[図 14](#)、[図 17](#)を参照すると、夜間光輝度の高い、明るい都道府県から大会に出場する選手が多いことが分かる。そして、そうした選手が多く出場する都道府県というのは、民間の体育施設や水泳施設が多く立地する、夜間光輝度の高く、商業的に発展した人口の多い都道府県であることが多いということである。

また、一般的な体育施設の中でも、とりわけ水泳施設においてはこの夜間光輝度の高い地域に偏在する傾向が強くなる。これは施設維持にかかるコストが関係するものと思われる。結果的に、水泳の選手を多く輩出するのは東京、神奈川、埼玉、大阪、愛知といった都心部からの出場選手が多い。

また、水泳選手としてのキャリア形成の初期段階は遅くとも中学生くらいから始まり、その段階では民間の水泳施設で練習することが多いと考えられる。そして、将来的に社会人選手あるいはプロ、オリンピック代表選手などを目指すような場合にも、中学生あるいはそれ以前に、どこに住んでいたかが影響を及ぼす可能性を棄却できないと言えるであろう。

これらを一種の環境に伴うスポーツ教育の格差ととらえることも可能であろう。環境依存度が高いスポーツとしてはスキー・スノーボード、あるいはサーフィンなどが比較的直観的である。一方で、水泳のような施設種目は地域差が出にくい種目であると想定していたが、環境依存度はかなり高いと言えることも分かった。

今後は、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）の公開する、人工衛星のデータ利用拡大のためのポータルサイト G-Portal [7] から他の人工衛星データを利用したい。例えば、水循環変動観測衛星「しずく（GCOM-W1）」[9]には、土壌水分量、降雨、降雪といったスノーリゾートに必須のデータもある。これらを利用して、スノースポーツに関する調査研究や、水泳以外のスポーツにおける地域差や施設配置計画に関する考察を行いたい。

あるいは、気候変動観測衛星として「しきさい（GCOM-C）」がある [8]。ここからは正規化植生指数、拡張植生指数といった植物の分布状況や活性度が取得できる。これらを使用して、スポーツ以外にも都市と文化資本に関連する格差に関する調査研究を行いたいと考えている。

## 参考文献

- [1] スポーツの統計学. シリーズ 社会現象の計量分析 ; 3. 朝倉書店, 東京, 2000.
- [2] CHALKIAS, C., KRIKIGIANNI, E., AND TSIAKOS, C. Estimating the relationship between touristic activities and night light emissions. *European Journal of Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1582305>. *European Journal of Remote Sensing* 52 (02 2019).
- [3] DONALDSON, D., AND STOREYGARD, A. The view from above: Applications of satellite data in economics. *Journal of Economic Perspectives* 30, 4 (November 2016), 171–98.
- [4] ESRI ジャパン. Arcgis. <https://www.esri.com/products/arcgis/>. (参照 2023 年 12 月 1 日).
- [5] FEHRER, D., AND KRARTI, M. Spatial distribution of building energy use in the united states through satellite imagery of the earth at night. *Building and Environment* 142 (2018), 252–264.
- [6] HENDERSON, J. V., STOREYGARD, A., AND WEIL, D. N. Measuring economic growth from outer space. *American Economic Review* 102, 2 (April 2012), 994–1028.
- [7] JAXA. G-portal. <https://gportal.jaxa.jp/gpr/?lang=ja>. (参照 2022 年 06 月 24 日).
- [8] JAXA. 気候変動観測衛星/gcom-c. [https://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM\\_C/index-j.html](https://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM_C/index-j.html). (参照 2022 年 06 月 24 日).
- [9] JAXA. 水循環変動観測衛星/gcom-w. [https://www.jaxa.jp/projects/sat/gcom\\_w/](https://www.jaxa.jp/projects/sat/gcom_w/). (参照 2022 年 06 月 24 日).
- [10] LI, C., LI, G., TAO, G., ZHU, Y., WU, Y., LI, X., AND LIU, J. Dmsp/ols night-time light intensity as an innovative indicator of regional sustainable development. *International Journal of Remote Sensing* 40, 4 (2019), 1594–1613.
- [11] MINISTRY OF EDUCATION, CULTURE, SPORTS, SCIENCE AND TECHNOLOGY. 文部科学省 学校コード. [https://www.mext.go.jp/b\\_menu/toukei/mext\\_01087.html](https://www.mext.go.jp/b_menu/toukei/mext_01087.html). (参照 2022 年 11 月 18 日).
- [12] NILES RITTER, MIKE RUTH, SPOT IMAGE CORP. Geotiff format specification. <http://geotiff.maptools.org/spec/geotiffhome.html>. (参照 2023 年 12 月 1 日)
- [13] NOAA. Noaa. <https://www.noaa.gov/>. (参照 2022 年 06 月 24 日).
- [14] NOAA/NGDC. Noaa/ngdc. [https://ngdc.noaa.gov/eog/gcv4\\_readme.txt](https://ngdc.noaa.gov/eog/gcv4_readme.txt). (参照 2022 年 09 月 30 日).
- [15] NTT タウンページ株式会社. i タウンページ. <https://itp.ne.jp/>. (参照 2022 年 06 月 24 日).
- [16] QGIS コミュニティー. Qgis. <https://qgis.org/ja/site/index.html>. (参照 2023 年 12 月 1 日)
- [17] セイコータイムクリエーション株式会社. 競泳リザルト速報サービス. <http://swim.seiko.co.jp/>. (参照 2022 年 06 月 19 日).
- [18] 一ノ瀬俊明, 松村寛一郎, 中谷友樹, 中野泰臣, AND ELVIDGE, C. 夜間光衛星画像データ dmsp によるアジアの地域別経済活動強度推定. *地球環境シンポジウム講演論文集* 10 (2002), 299–303.
- [19] 経済産業省サービス動態統計室. 特定サービス産業動態統計調査. <https://www.e-stat.go.jp/>. (参照 2022 年 06 月 18 日).
- [20] 軽部光男. 新しいスポーツ施設はどこに建てるのが良いのだろう. *オペレーションズ・リサーチ : 経営の科学 = Operations research as a management science research* 47, 3 (03 2002), 155–160.
- [21] 倉田正充. 低所得国における夜間光と社会・経済指標の相関関係. *上智経済論集* 62 (3 2017), 19–26.
- [22] 大友翔一. 日本における夜間光と各種統計指標との相関関係. *GIS 理論と応用* 29, 1 (6 2021), 23–28.
- [23] 大友翔一. 夜間光画像を用いた詳細な地域経済分析の可能性. *情報処理学会論文誌* 63, 3 (mar 2022), 733–741.
- [24] 東京大学空間情報科学研究センター. アドレスマッチングサービス. <https://geocode.csis.u-tokyo.ac.jp/>.

(参照 2022 年 06 月 19 日).

- [25] 東京大学社会科学研究所センター, AND ベネッセ教育総合研究所. 子どもの生活と学びに関する親子調査 2015-2018. <https://csrda.iss.u-tokyo.ac.jp/oyakopanel.digest.pdf>. (参照 2022 年 06 月 24 日).

# HEALPix を用いた「かぐや」の月面標高データベースと データ提供システムの開発

小林 寧々<sup>\*1,2</sup>, 梶浦 梨央<sup>\*1,3</sup>, 中平 聡志<sup>\*1</sup>, 山本 幸生<sup>\*1</sup>, 内田 ヘルベルト 陽仁<sup>\*1</sup>, 海老沢 研<sup>\*1</sup>

## Development of HEALPix-based KAGUYA's lunar digital elevation database and data provision system

KOBAYASHI Nene<sup>\*1,2</sup>, KAJIURA Rio<sup>\*1,3</sup>, NAKAHIRA Satoshi<sup>\*1</sup>, YAMAMOTO Yukio<sup>\*1</sup>,  
UCHIDA Herbert Akihito<sup>\*1</sup> and EBISAWA Ken<sup>\*1</sup>

### ABSTRACT

The lunar surface elevation data acquired by the KAGUYA satellite, which operated from 2007 to 2009, still has the world's highest spatial resolution for global lunar data. However, there is room for improvement in the accessibility of the KAGUYA data files archived at **DARTS**, since reading each file requires unique label information describing its content. In addition, each image is separated by equal latitude and longitude intervals, and represented with the same number of pixels; this causes a problem in precisely storing information into pixels at high latitudes. In this study, using the **HEALPix** method, which is widely used in astronomy, we divide the entire lunar globe into equal areas and define a hierarchical data structure consisting of multiple resolutions for different purposes. Thereby we successfully constructed a database that can be accessed quickly and efficiently according to users' needs. An example of a web application using this database is also presented.

### 概 要

2007年から2009年まで稼働していた「かぐや」衛星が取得した月面標高データは、全球データとしては現在でも世界最高の解像度を誇る。しかし、**DARTS**から公開しているデータはファイルごとにその内容を説明するラベル情報と照らし合わせて解読することが必要であり、アクセス性には改善の余地がある。また、緯度経度の値を等間隔に区切り、それを同じピクセル数の画像で表現しているため、高緯度での格納性が低いという問題がある。そこで本研究では、天文学で広く用いられている **HEALPix** という手法を用いて、全球を等面積に分割し、さらに用途に応じた複数解像度からなる階層的データ構造を定義することで、取得条件に適応して高速かつ簡便にアクセスできるデータセットを構築した。また、そのデータセットを用いた Web アプリケーションの例についても示す。

\* 2023年11月30日受付 (Received November 30, 2023)

<sup>\*1</sup> 宇宙科学研究所 (Institute of Space and Astronautical Science)

<sup>\*2</sup> 法政大学 (Hosei University)

<sup>\*3</sup> 鹿児島大学 (Kagoshima University)

## 1 背景

### 1.1 かぐやの月面標高数値モデル

月の代表的な探査データとして、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が 2007 年に打ち上げた月周回衛星かぐや (SELENE) が取得したものがあある。月の起源と進化解明のためのデータを取得することを目的とした本衛星により、高精度な月全球の標高数値モデル (Digital Elevation Model; DEM) が作成された。月の全球 DEM は、今後人類が月探査や月科学を行っていくための基本データとして重要である。

かぐやでは前方と後方の双方を同時撮像可能な地形カメラ (Terrain Camera; TC) を搭載し、ステレオ視による DEM 生成が可能であった。影の多い極周辺の領域はカメラによる DEM 生成が困難であるが、レーザー高度計の測距データが利用可能であり、特に極周回衛星の場合、極付近のデータ密度は高くなり DEM の高精度化に寄与する。

JAXA 宇宙科学研究所の科学データアーカイブ DARTS では、かぐやの地形カメラ TC とマルチバンドイメージャー MI、さらに米国の Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) に搭載されたレーザー高度計 (LOLA) のデータを使用して作成された月の全球 DEM 「SLDEM2013」 [1] を公開している。その後、米国の GRAIL 衛星により月重力場モデルの大幅な改善に伴い LOLA データも改善され、それをういた SLDEM2015 [2] が  $\pm 60$  度の低緯度から中緯度までの緯度帯のみで作成されたが、全球 DEM は公開されていない。全球 DEM としては、現在でも SLDEM2013 が世界で最も高精度である。

### 1.2 DARTS における DEM データの保管と課題

前項で説明した SLDEM2013 データは、全月球を緯度経度方向に  $1^\circ \times 1^\circ$ 、4096 pixel  $\times$  4096 pixel で区切って収録した、PDS3 (Planetary Data System ver.3) 形式のデータである。この貴重なデータの活用を促進するために、Web アプリケーション等を通して、全月球のあらゆる位置に対して、簡便かつ迅速に高度データが得られるようにすることが望ましい。しかし、それには、以下に示す二つの課題が存在する。

一つ目はデータ格納性の課題である。現在のデータ形式では月面標高データを緯度経度空間で一定間隔で分割して FITS ファイルとして格納するため、月面の場所によって一つの FITS ファイルに含まれる面積が異なる。例えば、最も面積の大きい赤道と緯度 60 度を比較すると、1 ピクセルの幅が  $1/2(\cos 60^\circ)$  に変化するので、面積は 4 倍変わることになる。ファイルごとに格納面積が異なるにも関わらず 1 つの FITS ファイルに含まれる画素数は全て 4096 pixel  $\times$  4096 pixel で統一されているため、高緯度地域では 1 ピクセルあたりの面積がさらに小さくなり、見かけ上の解像度が観測性能を大きく超えてしまう。このように場所ごとに解像度の違いがあることで、データの格納効率が低下する。

二つ目は、データの利用性の問題である。PDS 形式のデータは対象のファイルごとにその内容を記述するラベル情報を照らし合わせて解釈する必要がある。現在 DARTS で保管されている PDS3 形式のデータは緯度経度方向に  $1^\circ \times 1^\circ$  のエリアの高度情報を FITS ファイルで記録し、各 FITS ファイルが記録するエリアの情報を 1 つのラベルファイルによって説明している。そのため、例えば、ある地点周辺何 km と言った特定の月面領域データを取得したい場合、その領域をカバーする複数のファイルについて、各ファイルの境界を考慮に入れてラベルファイルを読み解く必要がある。また、一つ目の問題点で説明したように、緯度による面積の変化を解決するために、複雑な処理が必要になってしまう。

本開発ではこれら二つの課題を解決し、月面上の任意の入力位置に対して効率的なデータ取得が可能な月面標高データベースを構築する。それによって、アクセス性の高い Web アプリケーションの実現を目指す。

## 2 HEALPix を用いた月面標高データ格納方式の開発

### 2.1 HEALPix を利用することによる利点

本研究では、HEALPix (Hierarchical Equal Area isoLatitude Pixelation) と呼ばれるピクセル化アルゴリズム [3] を用いたデータ格納方式を採

用した。HEALPix は天文学において全天データを扱うために開発されたデータ形式であり、全球を等面積のタイルに分割するものである。HEALPix にはピクセル順序の方式 (ordering) として “NEST”, “RING” の二種類があり、分割数を決定するためのパラメータとして  $N_{\text{side}}$  が与えられ、 $N_{\text{side}}$  には通常 2 のべき乗数が用いられる。HEALPix を用いると全球のデータは、 $12 \times N_{\text{side}}^2$  の長さの一次元配列 (hpx) として表現でき、 $i$  番目のピクセルに格納された値は  $\text{hpx}[i]$  として参照可能である。このような性質を踏まえて、我々は HEALPix を利用した月面標高データの格納方法を開発することで以下のような利点が得られると考えた：

1. 全月球が等面積に分割されるので、標高データを緯度経度によらず全て同じ解像度で格納することができる。
2. ordering と  $N_{\text{side}}$  を決定すると、緯度経度に対するピクセル番号が HEALPix の定義から求まり、データの格納位置が決まる。
3. 更に、ordering として “NEST” を用いた時に  $N_{\text{side}}$  を  $N_{\text{side}}^a$  から  $N_{\text{side}}^b$  ( $< N_{\text{side}}^a$ ) に変換する場合を考える。これは、画像の解像度を変更することに対応する。このとき、 $N_{\text{side}}^a$  における任意のピクセル  $i_a$  は、 $N_{\text{side}}^b$  におけるピクセル

$$i_b = \text{int} \left( i_a \times \left( \frac{N_{\text{side}}^b}{N_{\text{side}}^a} \right)^2 \right)$$

の中に含まれることが、HEALPix の定義から決定される (図 1)。

4. 更に、ピクセル番号  $i_b$  に内包される  $N_{\text{side}}^a$  のピクセル番号は、 $i_b \times \left( \frac{N_{\text{side}}^a}{N_{\text{side}}^b} \right)^2$  から  $(i_b + 1) \times \left( \frac{N_{\text{side}}^a}{N_{\text{side}}^b} \right)^2 - 1$  の間で連続する。

このような HEALPix の性質を活かすことで、階層的なデータベースの構築やデータへのアクセスが容易になり、ローカルでの解析用データベースだけでなく、Web アプリケーションなど、利用者の要求に応じて即時にレスポンスが求められる用途にも HEALPix が有用となる。

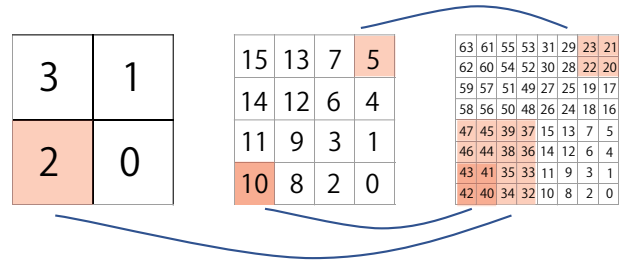


図 1 HEALPix における解像度変換の模式図 (“NEST” を用いた場合)

## 2.2 HEALPix を用いたデータ格納方式の構築

前項では、HEALPix を用いることで全月球の高度データを原理的に 1 つの配列で表現できることを示したが、全球をカバーする「かぐや」DEM データの容量は約 2 TB に及ぶ。よって、それに対応する HEALPix 配列をメモリ上、またはファイル上に格納することは現実的ではない。そのため、適切な粒度で HEALPix を分割することを検討した。ordering として以降では、前項で説明したように解像度の変換を容易に行うことが可能な “NEST” を用いる。

今回作成する HEALPix の解像度は、元データの解像度を失わないようにするため、当初  $N_{\text{side}} = 2^{18}$  を検討した。しかしこの場合、赤道付近ではオーバーサンプリングになり、補完の処理が煩雑になる。また、高度の値 (メートル) に元データと同じ 16bit 整数を用いるとデータ量が約 1.5 TB となる。これでも Web アプリケーション用データとして配置するには現時点では大きすぎるので、1 段階下げた  $N_{\text{side}} = 2^{17}$  を今回作成する最大解像度のデータと位置づけた\*\*1.  $N_{\text{side}} = 2^{17}$  を用いることで、全月球は約 2 千億個のピクセルに分割され、この場合 1 ピクセルの長辺の長さは約 13.5 m となる。

HEALPix ピクセルとファイルを分割する粒度は、実際の用途における解像度ごとの利用ケースを想定して、(1) 1 つのファイルに含まれる領域が広すぎず、(2) 必要な範囲のデータを得るために開くファイル数が多すぎない、という 2 つの要求バランスから、全月球を  $N_{\text{side}}^p = 2^{17}$  でピクセルに分割した際

\*\*1 将来的に、必要に応じて  $N_{\text{side}} = 2^{18}$  のデータベース作成も検討する。



に,  $N_{\text{side}}^{\text{F}} = 2^7$  の分割数のタイルごとに 1 ファイルを作成するように設定した. この時,  $N_{\text{side}}^{\text{F}}$  で定義された長辺は人間の目線から見た地球の水平線までの距離の約 5km よりを参考に, やや大きい約 14km とした. そうすることで, 約 20 万ファイルが作られるが, これを並列に配置するとリスト表示に時間がかかるなど, ファイルの扱いとして不便になるので,  $N_{\text{side}}^{\text{D}} = 2^3$  に相当するタイルごとにファイルを入れた (つまり 768 ディレクトリに 256 ファイルずつが格納されている).

解像度が高いデータは, 人間のスケールで月に降り立った状態の表示など, 近接して表示する際に用いられ, 解像度の低いデータは引いた画角で, より広い範囲を表示するために用いられる. そのため, 1 ファイルあたりに含めるピクセル数および, 1 ディレクトリに格納するファイル数は維持しながら, 表 1 に示すように 最も細かい解像度を  $N_{\text{side}} = 2^{17}$  とし, それ以外に,  $2^{16}, 2^{15}, 2^{14}$  の異なる解像度の階層を設定した.

$N_{\text{side}}^{\text{P}}$ (ピクセルサイズ)	$N_{\text{side}}^{\text{F}}$ (範囲)	$N_{\text{side}}^{\text{D}}$
$2^{17}$ (~14 m)	$2^7$ (~14 km)	$2^3$
$2^{16}$ (~27 m)	$2^6$ (~28 km)	$2^2$
$2^{15}$ (~54 m)	$2^5$ (~56 km)	$2^1$
$2^{14}$ (~108 m)	$2^4$ (~111 km)	$2^0$

表 1 作成した階層的なデータ構造.  $N_{\text{side}}^{\text{P}}$  は, ピクセルの分割単位 (1 ピクセルのサイズ),  $N_{\text{side}}^{\text{F}}$  はファイルのタイルの分割単位 (1 ファイルに含まれるピクセル群が覆う範囲),  $N_{\text{side}}^{\text{D}}$  はディレクトリの分割単位を表す.

### 2.3 具体的なデータ配置とデータの抽出

前項までに説明したような方針に従って, 実際のファイルとディレクトリの構造を構築した. この場合 1 つのディレクトリあたりには,

$$L = \left( \frac{N_{\text{side}}^{\text{F}}}{N_{\text{side}}^{\text{D}}} \right)^2$$

個のファイルの, ファイル番号  $i_{\text{F}}$  が,

$$i_{\text{F}} = L \times i_{\text{D}} + (0, 1, 2, \dots, L - 1)$$

の範囲のものが格納されることになる. また, 1 つのファイルあたりには

$$M = \left( \frac{N_{\text{side}}^{\text{P}}}{N_{\text{side}}^{\text{F}}} \right)^2$$

個のピクセル番号  $i_{\text{P}}$  が以下のような順序で格納されている.

$$i_{\text{P}} = M \times i_{\text{F}} + (0, 1, 2, \dots, M - 1)$$

このような規則で決定されるファイル及びディレクトリ名を,

$$\text{Dir}[i_{\text{D}}]/\text{sldemhpx-}[i_{\text{F}}].\text{fits}$$

とした. 各ファイルは, HEALPix のパラメータなどを書き込んだヘッダ情報を含む FITS 形式で作成した. 図 2 にはより具体的なファイルのツリー構造の例を示した. すべてのピクセルのピクセル番号を表すには 64 bit が必要であるが, 高度は 16bit 整数で格納されているので, 64 bit のインデックス情報を伴うことになるとデータサイズが大幅に増加してしまう. しかしすでに説明したように, ファイル名とファイル中の配列の順番から, HEALPix のピクセル番号が自明に決められるため, 作成するファイルではピクセル番号は省略し, 高度のみが書き込まれた一次元配列となっている.

$N_{\text{side}}^{\text{F}} = 2^{17}$  では 1 つの HEALPix のピクセル値は元 DEM 画像の 1 から数ピクセルの平均となるので, 元 DEM データと同じ符号付き 16 bit 整数で, ダイナミックレンジを活用するために 3 倍して格納し, 合計で約 390GB のデータとなった.  $N_{\text{side}}^{\text{F}} = 2^{16}$  以下ではより多くの元ピクセルの平均値となるため, 32 bit 浮動小数点データとして格納した ( $N_{\text{side}}^{\text{F}} = 2^{16}$  の場合約 190GB, 以降は解像度が下がる毎に 4 分の 1).

作成したデータから特定の緯度経度の値を取り出したい場合は,  $N_{\text{side}}^{\text{P}}$  を決定すると, 緯度経度に対応するピクセル番号  $i_{\text{P}}$  が HEALPix の定義から計算でき,  $i_{\text{P}}$  の格納位置は, ファイル番号  $i_{\text{F}} = \text{int}(i_{\text{P}}/M)$  の ( $i_{\text{P}}/M$ ) 番目であり, そのファイルはディレクトリ  $i_{\text{D}} = \text{int}(i_{\text{F}}/L)$  の中に存在することがわかる.

着目したエリアの画像や 3D メッシュを作成する利用ケースでは、ある領域のデータをまとめて取り出すことになる。その場合は、着目する領域に含まれるファイルを、 $N_{\text{side}}^F$  から計算し、ファイル名に対応するピクセル番号からそのエリアのタイル (ファイル) を読み出し、データの格納規則から高度データに HEALPix ピクセル番号を割り当て、その後の処理を行う。

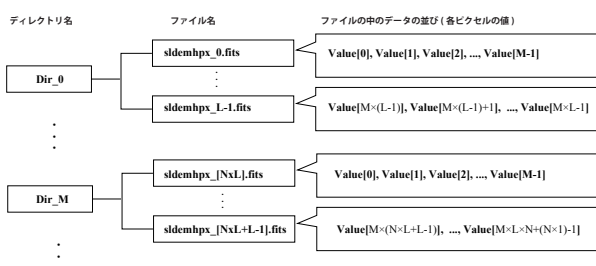


図 2 ディレクトリ構造

## 2.4 全球 DEM データの HEALPix 化変換処理の実装

DARTS から公開されている、緯度経度で分割された DEM 画像データ 64800 枚、合計約 2TB のデータセットを §2.1-2.3 で説明した HEALPix で定義されたファイルフォーマットに変換する処理を行った。変換処理の過程ではデータ量が膨大なので単純な処理では現実的な時間で終わることが難しかったが、以下のように処理することで、処理全体を半日以内で終わることができた。

### 2.4.1 1枚あたりの処理の高速化・効率化のための処理方法

まず画像 1 枚 1 枚の処理では、以下のような手順で処理を行なった。

1. 元 DEM データの画像データを 1 対 1 で HEALPix の高度データに変換した。各処理では、画像内の各ピクセルの緯度経度を HEALPix ピクセル番号に変換して、ピクセル番号をインデックスにした高度の値を取り出し、同じピクセル番号が複数存在する場合はそれらの平均を取った。
2. 最も細かい解像度に対応する  $N_{\text{side}}$  の、ピクセル

番号付きの高度データを §2.2 で説明した構造に変換した。

3. 変換後のデータを元に、解像度を 1 段階ずつ下げる処理を順次行なった。

処理の過程では、広い値域に散らばって出現するピクセル番号と対応する高度データの集計処理を行う必要がある。その高速な集計にはヒストグラムの処理が適しているがその場合、全地球のピクセル番号に近いサイズの配列をメモリ上に確保しなければならない。ただし、出現するピクセル番号の種類は、全地球のピクセル数に対して数万分の 1 程度と「疎」なので、疎行列 (sparse matrix) を用いて処理することにした。疎行列の処理には具体的には、TensorFlow[4] の疎行列パッケージの `bincount()` 関数を用いることで少ないメモリで処理を実行でき、処理全体としても簡素化および高速化が実現できた。

### 2.4.2 並列処理による高速化

1 枚あたりの処理を効率化した上でも元データの枚数が膨大なので、JAXA のスーパーコンピュータ (JSS3<sup>\*\*2</sup>; JAXA Supercomputer System generation 3) を用いた。独立な変換処理を並列で行うことで高速化した「ジョブ投入最適化ツール」を用いて 1 プロセスあたり 1CPU、同時実行上限数を約 500 プロセスに設定し、上記のようにメモリ消費量を削減した事で、1 プロセスあたりの割当メモリ量は 2 GB で問題なく処理を実施できた。

## 3 HEALPix を用いた「かぐや DEM」データベースを利用した Web アプリケーションの実装

### 3.1 Web アプリケーションとしての実装

DARTS では Web アプリケーション提供の環境としてオンプレミスからクラウドへの移行を徐々に進めており、本開発においてもクラウドサービス、具体的には Microsoft 社の Azure を利用してアプリ

<sup>\*\*2</sup> <https://www.jss.jaxa.jp>

ケーションを構築した<sup>\*\*3</sup>。本開発では、最もシンプルなアプリケーションとして、月の緯度経度と抽出するエリアを表す半径の値を入力して、画像と 3D のポリゴンメッシュデータを作成する機能だけを含めることにした。

開発した Web アプリケーション全体の構成図は図 3 に示す。フロントエンドは Node.js のフレームワークである Vue.js を用い「Azure Static Web Apps」に配置した。バックエンドは Python を使って「Azure Functions」アプリとして実装した。データベースの格納および出力の書き込み先としては、大容量のデータに向く「Azure Blob Storage」を用いた。ソースコードは GitHub に格納し CI/CD (Continuous Integration/Continuous Delivery) を用いた開発とリリースを実装している。このアプリケーション処理の流れは以下のようになっている：

1. フロントエンドに Web ブラウザーでアクセスし、着目する緯度経度と抽出領域の半径を入力し、実行ボタンを押す。
2. フロントエンドアプリが Azure Functions アプリを起動する。
3. Azure Functions アプリが、§2 で説明したファイル構造に従って Blob Storage に格納されたデータを読み取り、画像データとポリゴンメッシュデータを生成する処理を実行して、出力用 Blob Storage に結果ファイルを書き込む。
4. 書き込んだ Blob Storage のパスに対応する URL をフロントエンド経由でユーザーに返す。
5. 画像はそのままブラウザに表示され、ポリゴンメッシュデータは同時に表示される URL にアクセスすることで取得可能である。

現在の実装では、処理しきれないデータ処理要求を避けるため、利用するデータベースの解像度は要求する半径によって自動的に決定する事とし(～0.2 度で  $N_{\text{side}}=2^{17}$ )、最大半径は  $10^\circ$  (～300 km) とした。処理にかかる時間は入力に応じて変化するが、

<sup>\*\*3</sup> こちらの URL から開発版が利用可能である。  
<https://calm-bush-0abfea300.1.azurestaticapps.net/>

長くても 20 秒強から 30 秒程度で処理を終える事が確認できた。出力された画像と、レイトレーシングによって可視化したポリゴンメッシュデータの例を図 4 に示した。

### 3.2 画像データの出力について

全地球のデータを画像ファイルとして作り置きし、素早く表示するアプリはこれまでに DARTS 内でも別の実装があり、表示速度の面では本アプリより早く動作する可能性がある。しかし、全球を予め画像化し、人工的な切れ目なく表示するためには、グローバルにカラーマップを決める必要がある。いっぽう、今回開発したアプリでは着目した領域に対して適応してデータを処理しており、データの表示フレーム内の情報からローカルにコントラスト等を決める事で、細かい構造をわかりやすく可視化することが可能となっている。

### 3.3 HEALPix 点群データのメッシュ化

本研究で構築した HEALPix ベースの情報を、ゲームや 3DCG その他の用途に利用な三次元データに変換するためのアルゴリズムについて説明する。HEALPix ベースの DEM データから、任意の緯度経度に対する高度の値、更には三次元空間上の点群データを取得することは容易である。ただしこの状態の点群データだけでは面または法線を表現できず、3D データとしては不完全である。そのため、3D データとして扱いやすいポリゴンを使ったデータフォーマットでメッシュデータを作成することにした。HEALPix の定義から、図 5 の様にピクセルの並び、着目したピクセルと周辺の関係は自動的に決まっている。今回の実装ではデータに含まれる各ピクセルの境界を構成する 4 点の座標を参照し、それらのうち 3 つを結ぶ三角形を 2 つ生成した。これを繰り返すことで、HEALPix の定義に基づく並び方をした点群データをメッシュ化することができた。出力フォーマットは最も多くの 3D 関連ソフトウェアでサポートされている STL (Standard Triangle Language, Standard Tessellation Language) を採用した。例えば、月の緯度経度の座標から半径  $0.5^\circ$  以内の範囲をメッシュ化する場合、解像度  $N_{\text{side}} = 2^{17}$  の場合に

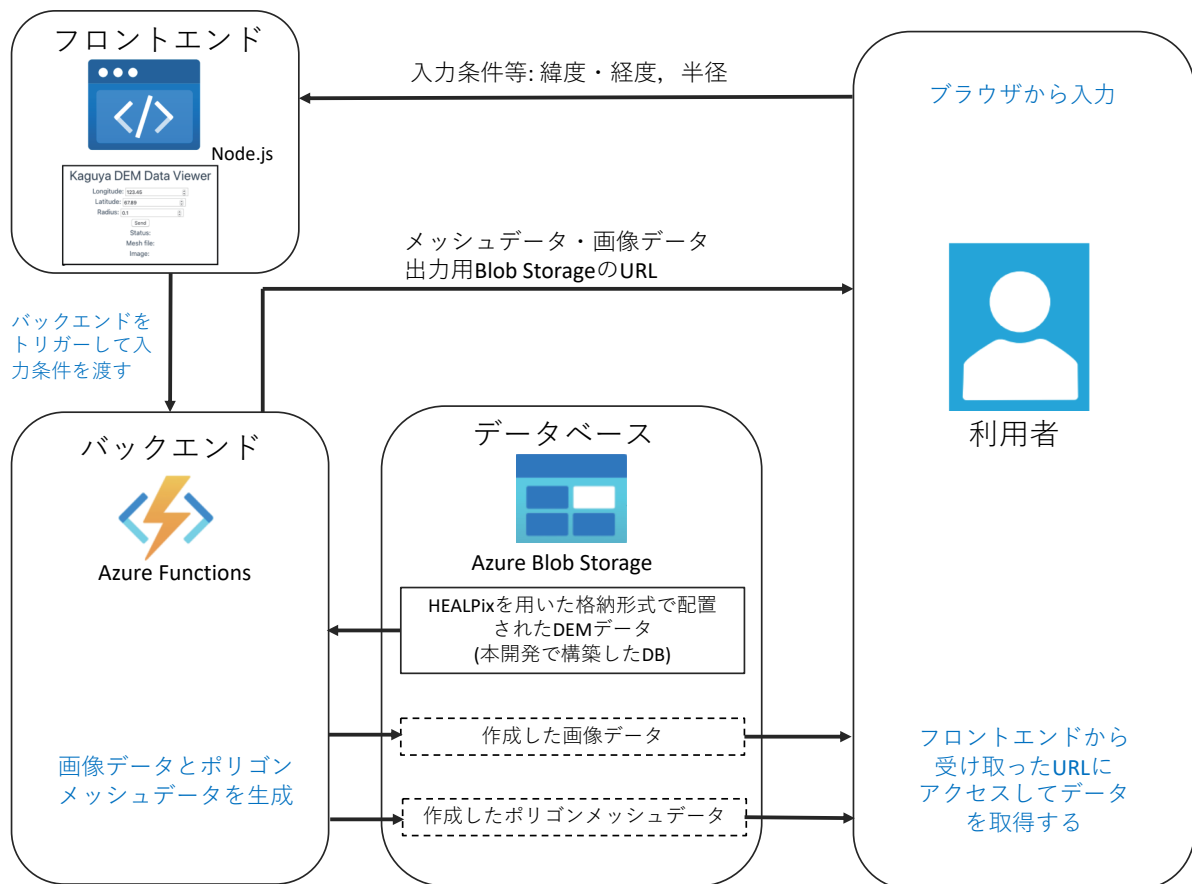


図3 Azure上に構築したWebアプリの構成

かる処理時間は、ローカル PC 環境で、10 秒程度 (データサイズは 350MB) となった。この処理時間は Web アプリでの利用でも十分に実用的な範囲だと考えられる。

#### 4 まとめと今後の展望

DARTS から公開されているかぐや DEM データ SLDEM2013 を元に、天文学でよく使われる HEALPix を用いたデータベースを作成した。また、そのデータベースを用いて、両極を含む任意の月のエリアに対する月面高度マップ画像や、3DCG 向けのポリゴンメッシュデータをリアルタイムで提供する Web アプリケーションを構築し、試験公開を開始した。

今回構築したデータの階層化を用いたデータアクセスの効率化手法と比較可能な手段としては、タイル化した画像ファイルを用いる方法が挙げられ、

HEALPixベースで実装された HiPS<sup>\*\*4</sup>等も広く使われている。今回用いた方法はそれと比較すると、データから画像を生成する処理が入る分表示の即応性は落ちるが、生成する見やすさを最適化させられる点 (§3.1)、3D メッシュを様々な解像度で作やすい (§3.2) という点でメリットがある。

現在このデータベース化の対象としているのは DEM データだけで、月面の光学的な特性を表したマップは未処理であるため、CG として利用した際の見栄えは不十分である。そのためのデータ処理は今後の課題である。また、作成したアプリケーションはデータを提供するだけの最もシンプルなものとなっている。このデータセットをフルに活かしたアプリケーションとして、全球データがシームレスに階層化されているという特徴を用いて、月面の走

<sup>\*\*4</sup> <https://aladin.cds.unistra.fr/hips/>

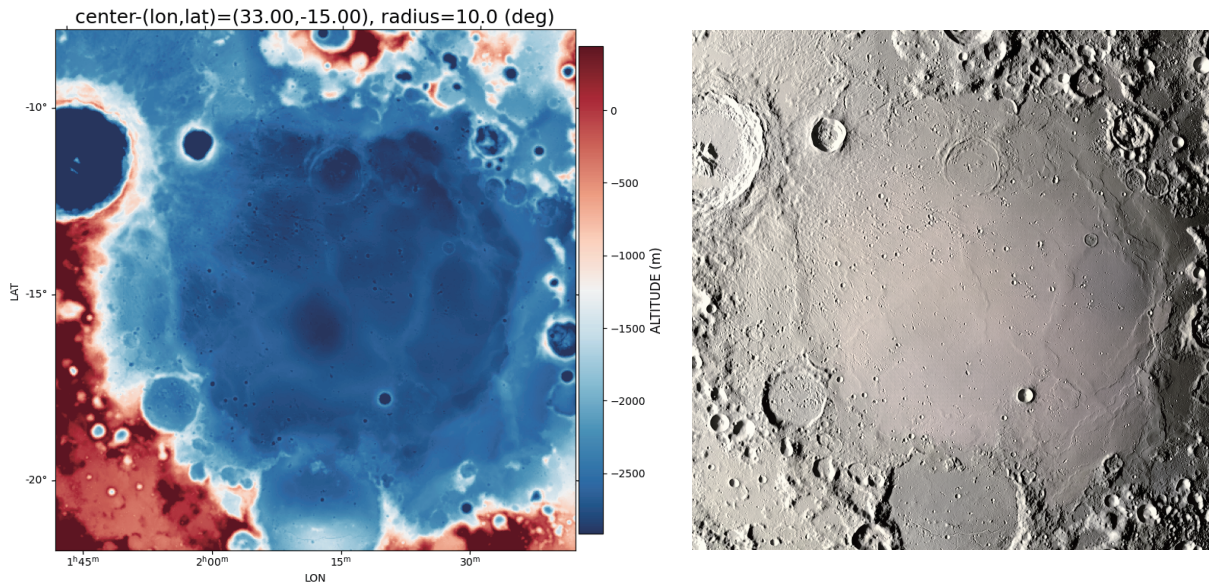


図4 月面の東経33度, 南緯15度周辺の半径約10度付近における(左)月面高度データのカラーマップ画像と(右)3Dメッシュ化したデータに平行光線を照射して得たレイトレーシング画像。

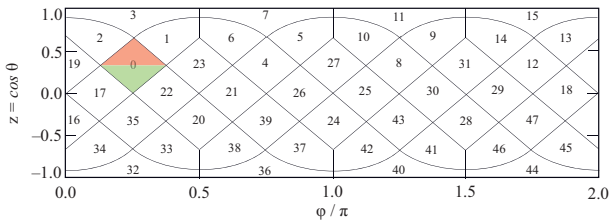


図5 HEALPix点群データをメッシュ化する際の定義. それぞれのHEALPixピクセルが三角形のポリゴンで2分割(赤, 緑)される.

行・飛行に従って動的に3Dデータを更新しながら表示するようなアプリケーションを作りたいと考えている。

## 5 謝辞

本研究では, 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所が運用する科学データアーカイブDARTSから公開されているデータを用いた。また, 宇宙航空研究開発機構スーパーコンピュータシステムJSS3を, 「JSS3を用いた科学衛星データ処理の検討」の事業名(事業コード: EU30800)で利用した。HEALPixを用いたデータ処理では, healpyライブラリ[5]を利用した。

## 参考文献

- [1] J. Haruyama, M. Ohtake, T. Matsunaga, H. Otake, Y. Ishihara, K. Masuda, Y. Yokota, and S. Yamamoto. Data Products of SELENE (Kaguya) Terrain Camera for Future Lunar Missions. In *45th Annual Lunar and Planetary Science Conference*, Lunar and Planetary Science Conference, p. 1304, March 2014.
- [2] M.K. Barker, E. Mazarico, G.A. Neumann, M.T. Zuber, J. Haruyama, and D.E. Smith. A new lunar digital elevation model from the lunar orbiter laser altimeter and selene terrain camera. *Icarus*, Vol. 273, pp. 346–355, 2016.
- [3] Krzysztof M. Gorski, Benjamin D. Wandelt, Frode K. Hansen, Eric Hivon, and Anthony J. Banday. The HEALPix Primer. *arXiv e-prints*, pp. astro-ph/9905275, May 1999.
- [4] Martín Abadi, Ashish Agarwal, Paul Barham, Eugene Brevdo, Zhifeng Chen, Craig Citro, Greg S. Corrado, Andy Davis, Jeffrey Dean, Matthieu Devin, Sanjay Ghemawat, Ian Goodfellow, Andrew Harp, Geoffrey Irving,

Michael Isard, Yangqing Jia, Rafal Jozefowicz, Lukasz Kaiser, Manjunath Kudlur, Josh Levenberg, Dandelion Mané, Rajat Monga, Sherry Moore, Derek Murray, Chris Olah, Mike Schuster, Jonathon Shlens, Benoit Steiner, Ilya Sutskever, Kunal Talwar, Paul Tucker, Vincent Vanhoucke, Vijay Vasudevan, Fernanda Viégas, Oriol Vinyals, Pete Warden, Martin Wattenberg, Martin Wicke, Yuan Yu, and Xiaoqiang Zheng. TensorFlow: Large-scale machine learning on heterogeneous systems, 2015. Software available from tensorflow.org.

- [5] Andrea Zonca, Leo Singer, Daniel Lenz, Martin Reinecke, Cyrille Rosset, Eric Hivon, and Krzysztof Gorski. healpy: equal area pixelization and spherical harmonics transforms for data on the sphere in python. *Journal of Open Source Software*, Vol. 4, No. 35, p. 1298, March 2019.

# 宇宙環境計測情報提供プラットフォームの研究開発

宮川 雄大<sup>\*1</sup>, 木本 雄吾<sup>\*2</sup>, 上野 遥<sup>\*2</sup>, 松本 晴久<sup>\*2</sup>

## Research and Development of Space Environment & Effects System

MIYAKAWA Takehiro<sup>\*1</sup>, KIMOTO Yugo<sup>\*2</sup>, UENO Haruka<sup>\*2</sup>, MATSUMOTO Haruhisa<sup>\*2</sup>

### ABSTRACT

We research and develop SEES (Space Environment & Effects Systems). SEES is the database system for providing data and model concerned with space environments, such as high energy particles, galactic cosmic rays, atomic oxygen, plasma, magnetic field, and effects from space environments, such as single event upset, degradation of solar cell, total dose, degradation of thermal control material.

In this report, we introduce the summary of our activity including asking SEES user about their opinions and their demands implemented this fiscal year. In addition, we explain about our prospects for the future.

**Keywords:** space environment, database, real-time data graph

### 概 要

我々は、宇宙環境計測情報提供プラットフォームとして宇宙環境計測情報システム(SEES: Space Environment & Effects System)の研究開発に取り組んでいる。SEESは、宇宙環境(高エネルギー粒子、銀河宇宙線、原子状酸素、プラズマ、磁場など)に関するデータとモデルを提供するデータベースであり、加えて、宇宙環境からの影響に関するデータ(シングルイベントアップセット、太陽電池セルの劣化、トータルドーズ、熱制御材の劣化など)も提供している。

本論文では、SEESの研究開発状況に関する概要、今年度を実施したSEESユーザーへの調査研究(意見・要望のヒアリング)の結果概要について述べると共に、今後の展望について説明する。

## 1 はじめに

2025年頃に太陽フレアの活動が活発になることが予想されている<sup>1)</sup>。また、極端な宇宙天気現象によるワーストシナリオとして、携帯電話システム(UHF帯)が、太陽電波バーストの影響を受け、昼間の時間帯に最大で数時間程度のサービス停止が全国の一部エリアで2週間にわたり断続的に発生する可能性があること、衛星測位システム(GPS衛星、準天頂衛星みちびき等)が、測位精度の大幅な劣化や測

\* 2023年11月30日受付 (Received November 30, 2023)

<sup>\*1</sup> 安全・信頼性推進部 (Safety and Mission Assurance Department)

<sup>\*2</sup> 研究開発部門 (Research and Development Directorate)

位の途絶が全国的に2週間にわたり断続的に発生する可能性があること等の衛星サービスに異常が発生することに加え、衛星の機能喪失への懸念が報告されている<sup>2)</sup>。太陽活動をはじめとする宇宙環境を精密に計測することは、これらの人類社会の生活への影響を正確に把握する上で重要である。

JAXA 研究開発部門では、太陽活動を起因とする衛星故障を回避することを目的に長年に渡り宇宙環境の計測及び解析を実施しており、これらの情報を、インターネットにて宇宙環境計測情報システム (SEES: Space Environment & Effects System)を公開している<sup>3)</sup>。

## 2 SEES の概要

### 2.1 SEES とは

様々な宇宙活動にて、放射線等の宇宙環境データ、宇宙環境の影響(図1参照)による部品・材料の劣化、及び誤動作データを取得し、宇宙機(衛星等)の設計及び運用に反映させることは重要である。

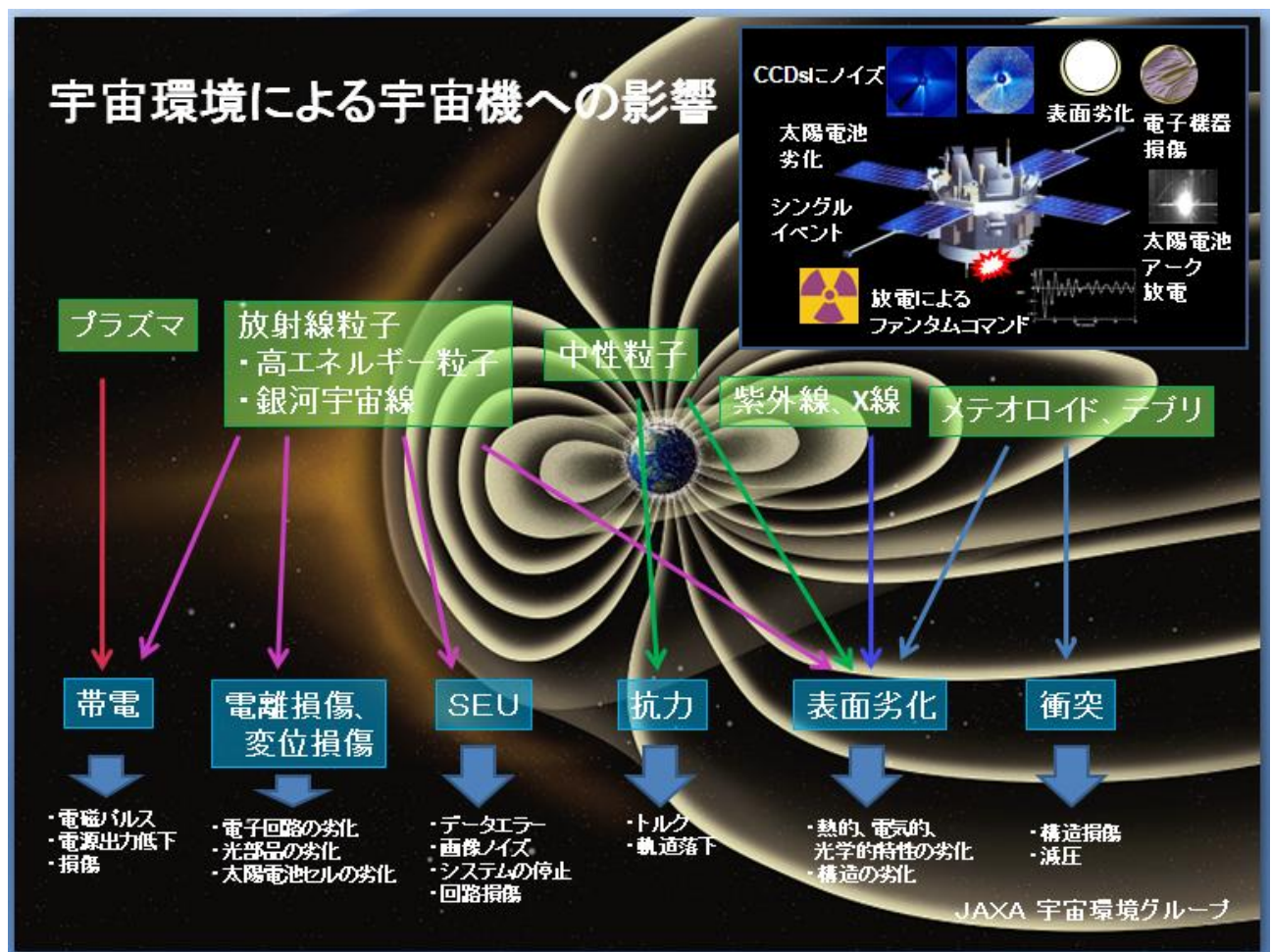


図1：宇宙環境による宇宙機への影響<sup>4)</sup>

JAXA (前身である宇宙開発事業団含む) 研究開発部門は、ETS-V(1987年打上げ) から長年に渡り様々



な宇宙機に宇宙環境計測装置を搭載してきた。特に放射線観測装置を搭載し、様々な軌道高度・期間を通じて計測を実施した。

JAXA 研究開発部門では 1994 年から SEES の研究開発を開始、そして翌 1995 年からインターネットを介し、SEES の公開を開始した。当初 SEES は当該データを利用する限られた研究者のみが使用できるツールとして整備したが、1994 年の ETS-VI 軌道投入失敗以降、宇宙環境データ（放射線、磁場）のニーズが高まった理由により、データの公開機能を有するように機能拡張をおこなった<sup>5)</sup>。計測データの一部や解析結果等の公開情報はユーザー登録なしでの利用が可能であるが、下記に説明する多くの機能を利用するためには、ユーザー登録が必要である。

SEES の機能は、①計測データ、②宇宙環境/衛星環境モデル解析ツール (SEES へ要登録)で構成され、これらのツールを SEES の HP で使用することが出来る。

JAXA 研究開発部門にて開発し、衛星へ搭載した機器を表 1 に示す。これまで 15 個の装置開発を行い、衛星搭載を実現した。放射線計測に加え、帯電電位のデータ等を取得してきた。国際宇宙ステーションの周回する低軌道 (軌道高度 約 400km)、GOSAT (高度約 667km)、Jason-2 (高度 1336km: CNES 衛星)、DRTS 等の静止軌道 (軌道高度 約 36000km)など、幅広い軌道高度に渡り宇宙環境計測を実施している。

表 1 搭載装置の名称及び搭載衛星<sup>3)</sup>

名称	略語	搭載衛星
メモリ誤作動モニタ	SUM <sup>※1</sup>	ETS-V, ETS-VI, ADEOS, ADEOS-II, MDS-1, ETS-VII, SEDA-AP
放射線吸収線量モニタ	DOM/SDOM <sup>※2</sup>	ETS-V, ETS-VI, ADEOS-II, DRTS, MDS-1, SEDA-AP
重イオン観測装置	HIT <sup>※3</sup>	ETS-VI, ADEOS, ALOS, MDS-1, GOSAT, SEDA-AP
帯電電位モニタ	POM <sup>※4</sup>	ETS-V, ETS-VI, ADEOS, ETS-VII, SEDA-AP
積算吸収線量計	DOS <sup>※5</sup>	ADEOS, ADEOS-II, MDS-1, ETS-VII
軽粒子観測装置	LPT <sup>※6</sup>	ALOS, GOSAT, Jason-2, QZS, Jason-3
磁力計	MAM <sup>※7</sup>	ETS-VI, MDS-1, ETS-VII, QZS
汚染/熱制御材劣化モニタ	COM <sup>※8</sup>	ETS-V, ETS-VI, ADEOS
中性子モニタ	NEM <sup>※9</sup>	Suttle, SEDA-AP
原子状酸素モニタ	AOM <sup>※10</sup>	ETS-VII, SEDA-AP
集積回路モニタ	ICM <sup>※11</sup>	ETS-V, ETS-VI
太陽電池セルモニタ	SCM <sup>※12</sup>	ETS-V, ETS-VI
プラズマモニタ	PLAM <sup>※13</sup>	SEDA-AP
帯電放電モニタ	DIM <sup>※14</sup>	ETS-V
高エネルギー粒子モニタ	HPM <sup>※15</sup>	ADEOS

※1 SUM: Single event Upset Monitor / RSM: RAM Soft-error Monitor … (メモリ誤動作モニタ) 宇宙機の設計に役立てるため、シングルイベントによる半導体メモリやマイクロプロセッサの誤動作を計測する。陽子及び重イオンによる 2 つのシングルイベント現象 (シングルイベントアップセット、シングルイベントラッチアップ) の発生頻度を計測する。

※2 DOM: DOse Monitor / SDOM: Standard DOse Monitor (放射線吸収線量モニタ) … 放射線強度の空間分布を示す。加えて、その時間変動が太陽活動によってどの様に变化するかデータの蓄積によって捉え、宇宙機の受ける全照射量予測の精度を上げることで衛星の信頼性設計に寄与する。電子、陽子、重イオン等の強度計測にシリコン半導体検出器を用いる。SDOM の場合は、シリコン半導体検出器とシンチレーションを用いる。

※3 HIT: Heavy Ion Telescope (重イオン観測装置) … 半導体素子のシングルイベント現象に対し、大きな影響を与える重イオンを計測する。シリコン半導体検出器を用いて高エネルギー重イオン(He より重い元素で、その粒子が持っているエネルギーが核子あたり数10MeV から数100MeV 程度のもの)の種類、エネルギー、核質量、強度、方向分布を計測する。

※4 POM: POtential Monitor (帯電電位モニタ) … 代表的な衛星材料と、軌道上でのプラズマとの相互作用に起因した帯電電位を計測することにより、軌道上での帯電放電現象を確認し、宇宙機の帯電放電防止策を検討するために計測する。衛星表面材の帯電電位の計測及びリーク電流の計測を行う。

※5 DOS: DOSimeter (積算吸収線量計) … 広範囲に渡るエネルギー分布と成分を持つ宇宙放射線からの長時間の電離損傷による影響をトータルドーズとして捉え、宇宙機の搭載面における宇宙放射線の時間変動、太陽活動の強度変化によりどの様に变化するのか測定する。ADEOS-II 以降においては、シールド厚の異なる衛星内部の多点計測によりトータルドーズモデル (dose-depth カーブ) を作成する為のデータとする。RADFET(トータルドーズ効果の感度を増した p-ch MOSFET 素子)を用いて放射線による電気特性 (ゲートソース間電圧) の変化から放射線吸収線量を計測する。

※6 LPT: Light Particle Telescope (軽粒子観測装置) … 高感度かつ高分解能で高エネルギー軽粒子の粒子組成及びエネルギースペクトルを観測する。3~8 枚の半導体検出器 (SSD) を持ち、高感度かつ高分解能で高エネルギー軽粒子 (電子、陽子、ヘリウム) の粒子組成及びエネルギースペクトルを観測する。また、3 種の計測データ形式を有することにより、検出器の性能 (エネルギー分解能、時間分解能、テレメータ量等) についてその特徴を生かした観測が可能である。

※7 MAM: MAgnetoMeter (磁力計) … 磁場の3成分を計測することにより、太陽活動に伴う磁気擾乱と地球磁場の関係を明らかにする。特に、荷電粒子の磁場による衛星での環境を明らかにする。フラックスゲート型磁力計により軌道上の磁場強度 (3成分) を測定する。

※8 COM: COntamination Monitor / TDM: Thermal control material Degradation Monitor (汚染モニタ/熱制御材劣化モニタ) … 宇宙機の開発に反映するため、宇宙機の熱制御材が、宇宙機から出る汚染等の影響により劣化する様子を計測する。熱制御材の宇宙空間における太陽光吸収率 ( $\alpha$ ) 及び赤外放射率 ( $\epsilon$ ) の経年変化を熱制御材の温度変化を計測することにより求める。

※9 NEM: NEutron Monitor (中性子モニタ) … 中性子は荷電を持たないため人体の奥深くまで到達し、軌道上で宇宙飛行士が受ける中性子被曝による影響は、宇宙放射線全体の20%にもなると言われている。そこで、有人飛行(国際宇宙ステーション計画など)のための基礎データとして中性子のデータを取得する。陽子等の混在場から中性子のエネルギースペクトルを計測する。

※10 AOM: Atomic Oxygen Monitor (原子状酸素モニタ) … 低軌道にて熱制御材の劣化に対して大きな影響を与える原子状酸素密度を計測する。エネルギーアナライザ方式を採用した質量分析装置を用いる。

※11 ICM: Integrated Circuit Monitor (集積回路モニタ) … 宇宙放射線等による集積回路の電気特性の経年変化 (トータルドーズ変化) を計測する。集積回路の電気特性を計測する。

※12 SCM: Solar Cell Monitor (太陽電池セルモニタ) … 宇宙機の開発に反映するため、太陽電池セルの耐宇宙環境特性評価を行う。負荷抵抗の切り替えにより各種太陽電池セルの V-I 特性の計測を行い、太陽電池セルの劣化特性を取得する。

※13 PLAM: PLAsma Monitor (プラズマモニタ) … 宇宙機周辺のプラズマ環境は、表面に帯電を生じさせアーク放電によるシステム/機器の誤動作の原因となることがあるため、宇宙環境の基礎データとして計測する。宇宙機周辺のプラズマ密度及び電子温度、宇宙機のフローティング電位を計測する。

※14 DIM: DIsgnare Monitor (帯電放電モニタ) … 軌道上での放電環境を調べるため計測する。宇宙機の帯電放電の頻度を、ワイヤアンテナによる EIM 受信方式により測定する。

※15 HPM: High energy Particle Monitor (高エネルギー粒子モニタ) … 高エネルギー陽子(シングルイベントの発生原因)の強度を測定する。シリコン半導体検出器を用いて、陽子の強度を計測する。

## 2.2 計測データ

SEES で公開しているデータは①リアルタイムグラフ、②計測データの2種類がある。このうち、リアルタイムデータは現在、GOSAT、QZSS、Jason-3 の情報を公開している。縦軸に Differential Flux[ $\text{cm}^2/\text{sr}/\text{sec}/\text{MeV}$ ]、横軸に UT(時間)を表すデータに加え、ある期間における世界地図上での Electron(0.91~1.06 MeV)の Differential Flux[ $\text{LOG}_{10}/\text{electron}/\text{cm}^2/\text{sr}/\text{sec}/\text{MeV}$ ]、ある期間における世界地図上での Proton(1.00~1.20 MeV)の Differential Flux[ $\text{LOG}_{10}/\text{electron}/\text{cm}^2/\text{sr}/\text{sec}/\text{MeV}$ ]を公開している。また、運用終了した衛星へ搭載/取得したデータについてもグラフを公開している。

宇宙環境/衛星環境モデル解析ツール(SEES へ要登録)は、AP8・AE8 (放射線)、MSIS-86 (中性大気)など NASA 等が無償提供されている複数のモデルを、軌道高度等の条件を入力すれば直ぐに計算できる便利なツールである。

## 3 SEES ユーザーへのアンケート調査

宇宙基本計画工程表<sup>9)</sup>にて、民間企業の参入促進が求められている中、SEES は、科学研究に留まらず、軌道上実績のない(又は少ない)新規参入企業等が必要とする情報源となる可能性を秘めていると考える。新規参入企業は、耐放射線設計や宇宙放射線影響が及ぼす衛星運用に関するノウハウが十分に蓄積されておらず、宇宙放射線に関するリスクの認知が不足している可能性がある。そこで耐放射線設計や実宇宙環境のデータベースである SEES を活用することで、それら不足部分を補うことが可能である。更に、宇宙基本計画工程表には、総務省等の施策のキーワードとして「宇宙天気」に関する課題が挙げられており、関係機関との連携や情報共有が望まれる。2項で述べた通り、宇宙環境と衛星設計・運用に関して多くの情報を有する SEES 資産の有効活用を行う必要がある。科学研究での利用促進に加え、太陽活動がもたらすリスクを抱える産業界等との連携強化が一層必要である。宇宙天気サービスの高度化や新事業の創出も検討されている<sup>9)</sup>。これらを取りまく背景をベースに SEES ユーザーのニーズを改めて直接調査する機運が生じてきた。1995年に SEES を公開して以降、SEES の登録ユーザーに対するアンケート調査が十分に行われておらず、ユーザーの声を聴き、その潜在ニーズを汲み取る仕組みが十分でなかった背景もあった。

そこで本調査研究において、SEES へユーザー登録をしている方々を対象に、今後の SEES の機能改善に向けてどのような意見や要望を有しているか明らかにするため、アンケート調査を実施した。本項では、ユーザーが特定されないよう配慮する形でおこなったアンケート調査結果の概要を述べる。

### 【調査対象】

SEES ユーザー登録利用者：77名 (内 大学、研究機関等：34名、企業関係者等：36名、JAXA 関係者：7名)

## 【調査方法】

期間：2022年9月9日～2022年10月14日

方法：Microsoft Forms のアンケートフォームへの入力

## 【回答状況】

回答数：16件（内 大学、研究機関等5名、企業関係者等6名、JAXA関係者5名）

回答率：20.8%

今回のアンケートで回答を得た16件のユーザー所属の割合を図2に示す。

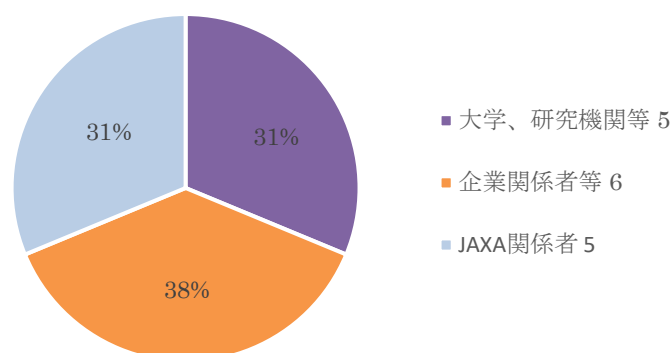


図2：ユーザーの所属の割合

使用している機能について、「①計測データ」（以降、データ）と「②宇宙環境/衛星環境モデル解析ツール」（以降、モデル）の使用割合を図3、使用されているデータの内訳を図4、使用しているモデルの内訳を図5に示す。図3よりデータの利用割合が4割程度を占めていること、図4よりデータ利用の大半が宇宙放射線の計測データの準リアルタイムグラフであることが分かった。このうち、図3に関し、モデルを使用する13ユーザーの内訳は、「大学、研究機関等」が3、「企業関係者等」が6、「JAXA関係者」が4であった。また、データを利用する8ユーザーの内訳は、「大学、研究機関等」が3、「企業関係者等」が3、「JAXA関係者」が2であった。このことから、モデルを使用するユーザーの半数は「企業関係者等」であることが読み取れる。図4に関し、準リアルタイムグラフを使用する8ユーザーの内訳は「大学、研究機関等」が3、「企業関係者等」が3、「JAXA関係者」が2であった。また、衛星デジタルデータを使用する1ユーザーは「大学、研究機関等」であり、衛星デジタルデータ利用ユーザーは、準リアルタイムグラフについても利用している。

図5からモデルの利用は、放射線帯粒子モデルと銀河宇宙線モデルの利用する割合が高いことが分かった。このうち、放射線帯粒子モデルを利用する11ユーザーの内訳は、「大学、研究機関

等」が3、「企業関係者等」が5、「JAXA 関係者」が3であった。また、銀河宇宙線モデルを利用する8ユーザーの内訳は、「大学、研究機関等」が2、「企業関係者等」が5、「JAXA 関係者」が1であった。図3からモデルを使用するユーザーの半数は「企業関係者等」であることを説明していたところ、これらの利用者が放射線帯粒子モデルや銀河宇宙線モデルを利用していることがわかる。

なお、放射線帯粒子モデルでは、高度の変化に対する放射線帯粒子(陽子、電子)のフラックスを計算することが出来る。また、銀河宇宙線モデルエネルギーの変化に対する衛星内部(遮蔽厚を入力)の銀河宇宙線のフラックス、遮蔽厚の変化に対する銀河宇宙線のフラックスを計算することが出来る。

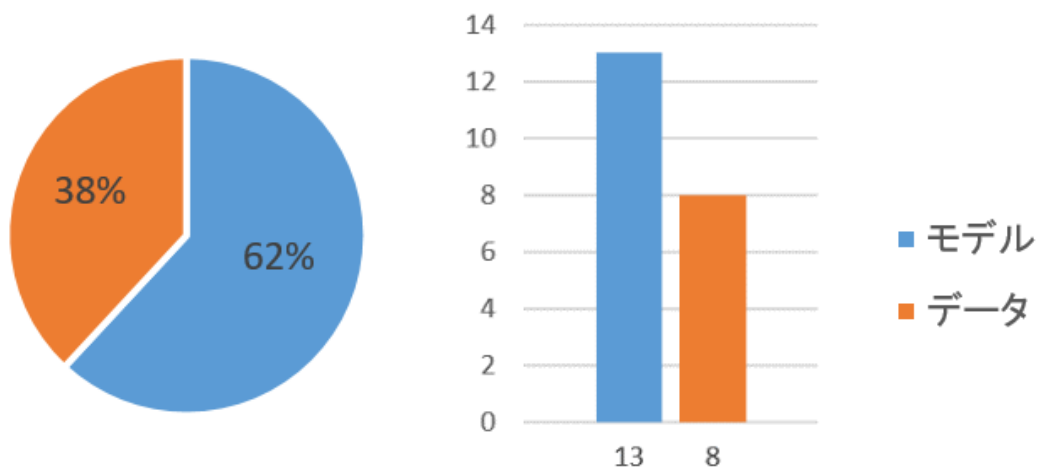


図3: モデルとデータの使用割合

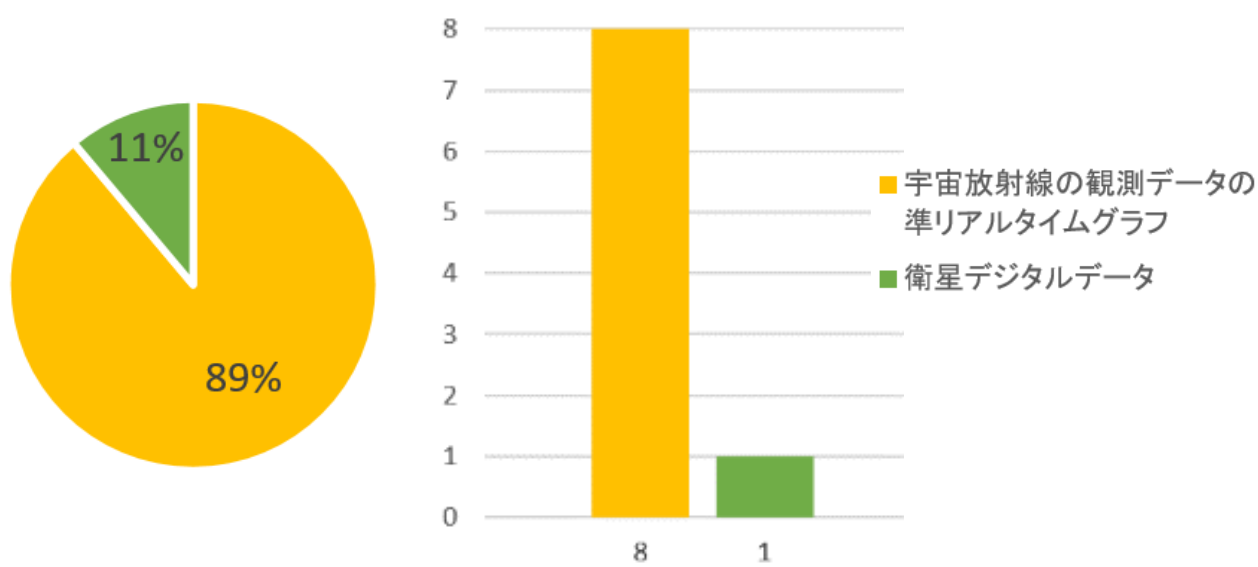


図4: SEESにて使用しているデータの内訳

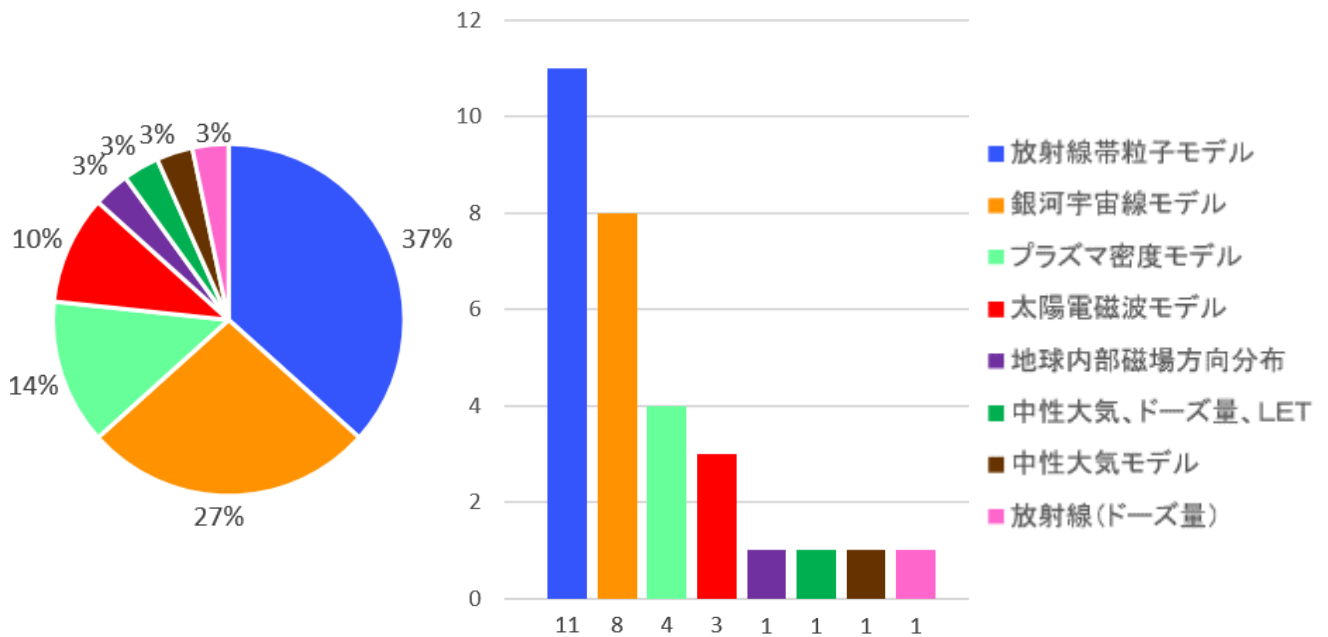


図 5 : SEES にて使用しているモデルの内訳

また、使用率の高い機能のうち、宇宙放射線の計測データの準リアルタイムグラフの例を図 6 及び図 7 に示す。

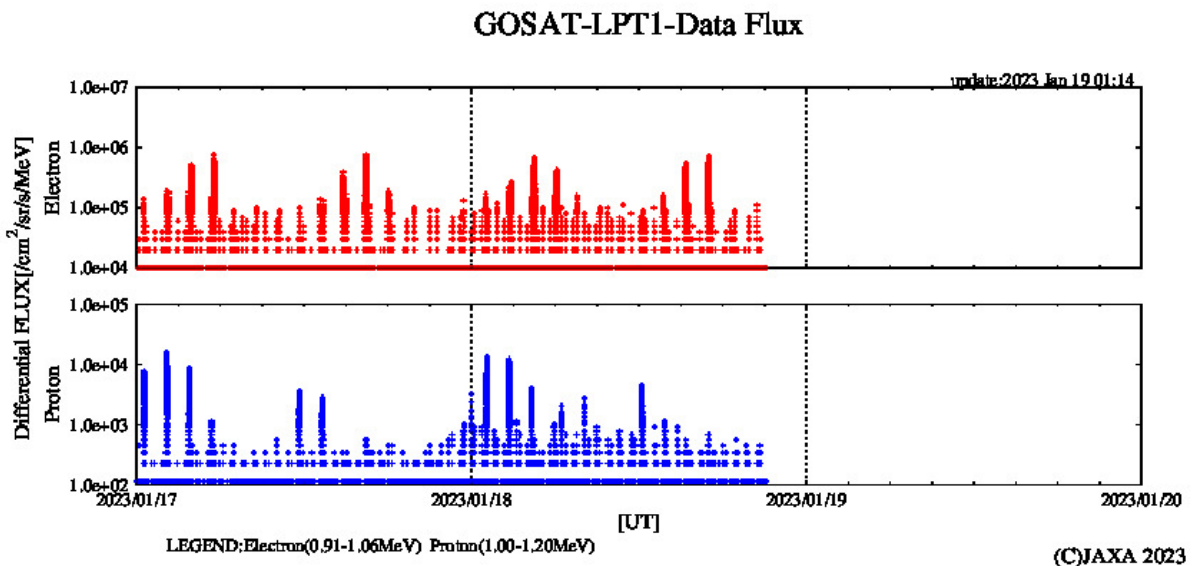


図 6 : 低軌道衛星(GOSAT)における宇宙放射線の計測データの準リアルタイムグラフ (単位面積あたりの電子 (上、赤) および陽子 (下、青) の強度の時刻変化を表したもの)

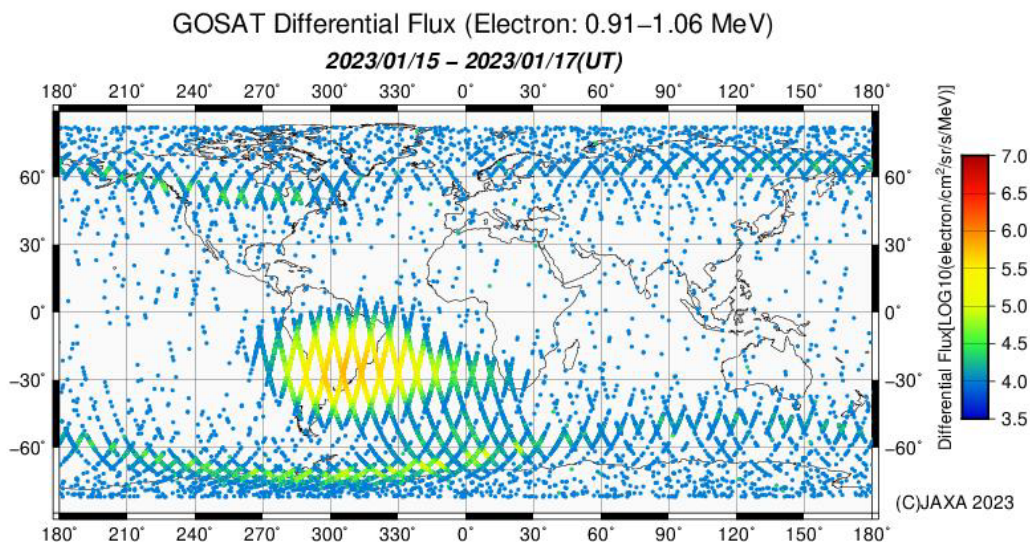


図 7：低軌道衛星(GOSAT)の軌道高度における電子の分布

(GOSAT の軌道における単位面積あたりの電子の強度の時刻変化を表したもの。) 南アメリカ付近で電子の Flux の値が高いのは南大西洋異常地域(SAA)による影響<sup>7,8)</sup>である。また、南極近くや北緯の高い地域で Flux の値が高い(放射線の捕捉されている領域が三日月型に分布している)理由は、外帯電子の Horn 領域、即ち、地球磁場の関係上、極のところで磁場に捕捉されているため Flux の値が高くなる。

また、ユーザーが何のために SEES を利用しているのか以下に概要を提示する。主に、衛星設計、大型太陽フレア発生時の過去データの参照、大学での教育等で活用されていることが分かる。

- (1) 衛星システム設計、衛星搭載機器設計に利用(例: 原子状酸素密度の評価含む宇宙環境算出に利用)
- (2) 大型太陽フレア発生時、SEES の情報を参照
- (3) 大学機関での研究・教育(例: 上記(1)の衛星システム設計での利用を含む)

アンケート調査時点で、SEES を使用していない理由を図 8 に示す。

このうち、「その他」を選択した方の内容については、「今後、適宜利用を考えている」、「要望した機能(表 2 に記載)を追加して欲しい」であった。

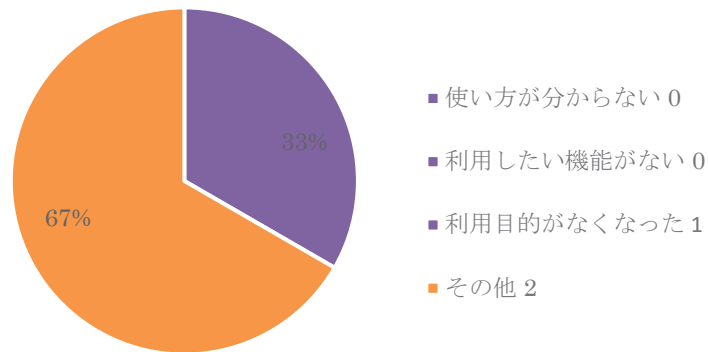


図 8 : SEES を使用していない理由

SEES で使用している機能に対する満足度を図 9 に示す。「非常に満足している」と「かなり満足している」を回答したユーザーから約 7 割が満足していることが分かった。一方、約 3 割は改善を要望していることが分かった。

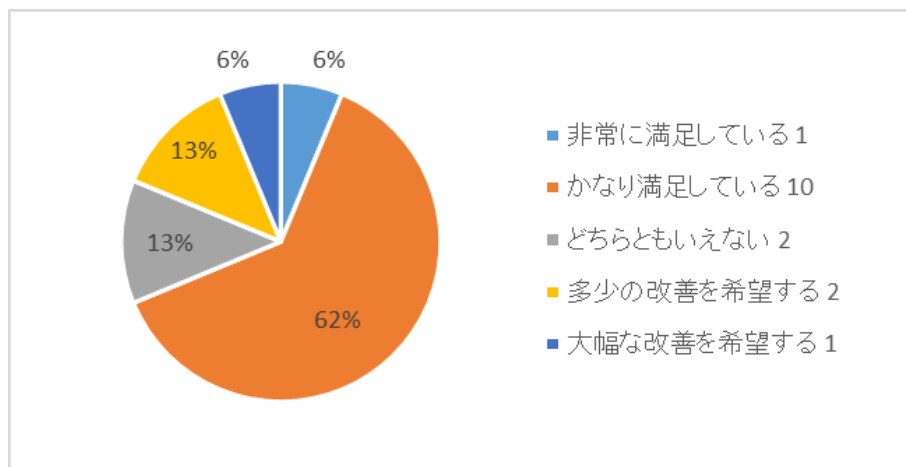


図 9 : SEES で使用している機能に対する満足度

アンケート結果を分析する限り、SEES の利用目的・内容は、宇宙環境での科学研究に加え、宇宙環境の解析や材料の放射線耐性評価といった実務的なものである。使われている機能としては、上述のとおり、計測データとモデルがあり、計測データでは宇宙放射線の計測データの準リアルタイムグラフ、モデルとしては放射線帯粒子モデルと銀河宇宙線モデルがそれぞれ主に使用されていた。

また、SEES の機能付加に関する要望に対し、必要性・緊急性等の観点から優先順位付けを実施した(表 2)。



表2 SEES の機能付加に関する要望内容と対策案

No.	SEES の機能付加に関する要望内容と対策
1	2025年頃の太陽フレア活発化に伴う要望：放射線密度が一定値を超える予測の際のアラートなど(衛星運用への活用のため)。⇒ 【対応策】2021年度迄はSEESにて機能があった。多数の衛星故障の回避に貢献するため、復活させる方向で検討する。
2	2025年頃の太陽フレア活発化に伴う要望：過去の太陽フレア時の軌道上データの把握(1989年, 2000年, 2003年など)⇒【対応策】静止軌道で太陽フレアのデータを取得しており、DRTSが2002年打上げのため2003年のデータは存在するため、特記して示すことは可能。
3	モデルの説明、パラメータの意味などの解説を充実化。(SEESはどう使えるのか) ⇒ 【対応策】モデルの説明、パラメータの意味等の解説を充実化させるための検討を行いたい。

このうち、表2のNo.1については、衛星運用警報メールシステムとして、大規模な太陽フレアや磁気嵐発生時に過酷な宇宙環境現象に曝されている地球周回衛星の運用不具合発生を回避するため、静止軌道上を周回する衛星で観測されるX線や高エネルギー電子等のデータをリアルタイムで受信し、異常時に衛星運用警報メールを発することで衛星運用者に注意を喚起する機能を有していた<sup>9,10)</sup>が、現状では本機能を有していない。今後、改めて当該機能を有する方向で検討する。なお、SEESでは、衛星搭載宇宙環境計測装置で自動検知し、計算機による自動(判断、予測)発信の衛星運用警報発令システムを構築し、実行できる。そのため、SEESの計算機では、アラートを出すためのアラート発令基準をユーザーが、磁気嵐やX線強度等を対象に数段階に分けて設定することが出来、自動的に発出される仕組みに出来るのが特徴である。

現状でSEESを利用するユーザーが77であること、アンケートでの回答数の状況を踏まえ、大学機関や新規参入企業を含む企業関係者等の研究開発利用を促進するためには、これらの課題解決に向けた取り組みが求められると考える。

#### 4 まとめ及び今後の展望

- (1) 宇宙基本計画工程表にて、民間企業の参入促進が求められている中、研究プロダクトである宇宙環境計測情報システム(SEES)の準リアルタイムグラフや放射線帯粒子モデルや銀河宇宙線モデル等の宇宙環境モデルは、科学研究での利用に加え、軌道上実績のない(又は少ない)新規参入企業等が必要とする情報源となる可能性を秘めている。
- (2) SEESを対象に、使用している機能、満足度、追加を要望する機能を把握するため、アンケートを実施した。本調査研究にて、SEESの満足度(約7割が満足)の把握・活用事例を明確化できたことに加え、研究プロダクトの質の向上に向けて改良すべきポイント(機能付加の要望)を明確化出来た。
- (3) 本調査研究成果を活かすため、2023年度に、3項の表2「SEESの機能付加に関する要望内容と対策」にて示した3つの改善点を軸に改善点を検討することにより、SEES利用者に対して最適な宇宙環境情報の提供が可能なプラットフォームの構築を目指す。

### 参考文献

- 1) <https://www.nasa.gov/press-release/solar-cycle-25-is-here-nasa-noaa-scientists-explain-what-that-means>
- 2) 宇宙天気予報の高度化の在り方に関する検討会 報告書、総務省、2022年6月21日、  
[https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000821116.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000821116.pdf)
- 3) [https://sees.tksc.jaxa.jp/fw/dfw/SEES/Japanese/Top/top\\_j.shtml](https://sees.tksc.jaxa.jp/fw/dfw/SEES/Japanese/Top/top_j.shtml)
- 4) [https://sees.tksc.jaxa.jp/fw/dfw/SEES/Japanese/WhatsSEES/whats\\_sees\\_j.shtml](https://sees.tksc.jaxa.jp/fw/dfw/SEES/Japanese/WhatsSEES/whats_sees_j.shtml)
- 5) 上野賢一郎、宇宙環境計測情報システム (SEES)、平成15年度宇宙科学情報解析センターシンポジウム、p.27-37、2004
- 6) 宇宙基本計画工程表(令和4年度改訂)、宇宙開発戦略本部決定、令和4年12月23日
- 7) D.N.Baker, P.J.Ericson, J.F.Fennell, J.C.Foster, A.N.Jaynes, P.T.Verronen, Space Weather Effects in the Earth's Radiation Belts, Space Sci Rev (2018)214:17, DOI 10.1007/s11214-017-0452-7
- 8) 宇宙環境標準、JERG-2-141、宇宙航空研究開発機構、平成22年3月2日、  
[https://sma.jaxa.jp/TechDoc/Docs/JAXA-JERG-2-141\\_N1.pdf](https://sma.jaxa.jp/TechDoc/Docs/JAXA-JERG-2-141_N1.pdf)
- 9) 中山正史、松本晴久、古賀清一、五家建夫、宇宙天気予報を使った衛星運用警報システムの構築－宇宙環境計測情報システム－、電気情報通信学会 信学技報、SANE2007-50、vol.107、p.49-51、2007
- 10) 藤田友貴奈、小川敏春、岩倉隆裕、小泉勉、越石英樹、松本晴久、宇宙環境計測データの提供環境の整備、第58回宇宙科学技術連合講演会講演集、JSASS-2014-4028、2014

# 宇宙物体の軌道低下と宇宙天気現象の関係及び 宇宙天気現象を考慮した軌道予測の可能性

野澤 恵<sup>\*1</sup>, 久保庭 敦男<sup>\*2</sup>, アルベリウス 幸子<sup>\*3</sup>, 玉置 晋<sup>\*4</sup>

## The Relationship between Satellite Orbit and Space Weather Phenomenon, and and the Possibility of Orbit Prediction considering Space Weather

NOZAWA Satoshi<sup>\*1</sup>, KUBONIWA Atsuo<sup>\*2</sup>, ARVELIUS Sachiko<sup>\*3</sup>, TAMAOKI Susumu<sup>\*4</sup>

### ABSTRACT

The TLE(Two Line Element) is used to analyze the relationship between the altitude decreasing rate of orbit of a space object and the solar radio wave F10.7 over a period of about 50 years, and we found a very high correlation between them. The correlation can be approximated by a power distribution ( $y = b \cdot x^a$ ) or an exponential distribution ( $y = b \cdot \exp(ax)$ ). Using this approximation, we estimated the rate of altitude descent, compared it with the actual altitude change, and confirmed that the two altitude decreasing rates of orbit show similar trends. We observed the space object and compared the predicted trajectory with the actual trajectory. The possibility of orbit prediction considering space weather phenomena was discussed through statistical analysis.

**Keywords:** solar flare, space weather, SGP4, satellite, orbit, TLE

### 概要

TLE を用いて宇宙物体の約 50 年に渡る軌道高度の低下率と太陽電波強度 F10.7 の関係を解析し、非常に高い相関となった。その相関はべき乗分布( $y = b \cdot x^a$ )または指数分布( $y = b \cdot \exp(ax)$ )で近似することができた。この近似式を用いて高度の低下率の推測を行ない、実際の高度変化と比較し、二つの高度の低下率が似た傾向を示すことを確認した。実際に宇宙物体を観測し、予測した軌道と比較を行なった。そして統計的に解析することで宇宙天気現象を考慮した軌道予測の可能性について議論を行なった。

### 1. はじめに

地球を周回する人工衛星などの宇宙物体は地球・月・太陽の重力だけでなく、太陽光による放射圧などを受け、絶えず衛星軌道は変化している。超高層大気は太陽紫外線や磁気圏のオーロラ粒子などの影響を受け、大気温度や密度が変化することは知られている(King-Hele 1959, Wertz 2011)。特に高度 1000km 以下の低軌道では、希薄な地球大気にも関わらず大気抵抗が働き、宇宙物体の軌道高度は低下を続ける。太陽フレアやそれに伴う太陽紫外線強度の増大などの太陽活動現象や、地球磁気活動は宇宙天気現象と呼ばれる。2022 年 2 月に、多数のスターリンク衛星が地球磁気圏の小規模な磁気嵐により大気圏に落下し消失した(Kataoka et.al.2022)。これは宇宙天気の研究者に大きな驚きを与え、たとえ小規模な宇宙天気現象であっても、宇宙物体の軌道に与える影響を無視することができないことがわかった。

<sup>\*</sup> 2023 年 11 月 30 日受付 (Received November 30, 2023)

<sup>\*1</sup> 茨城大学理工学研究科理学野 (College of Science, Ibaraki University)

<sup>\*2</sup> アマチュア天文家 (Amateur Astronomer)

<sup>\*3</sup> ABLab(Aerospace Business Laboratory)

<sup>\*4</sup> ABLab/ 茨城大学理工学研究科博士後期課程在籍

(Aerospace Business Laboratory/Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University)

宇宙物体の軌道については JAXA の衛星では独自に軌道計算を行い軌道予測しているが、大学発の超小型衛星などでは、アメリカ合衆国宇宙軍(USSF)の提供する TLE(Two Line Element)を使用している。また運用停止となった人工衛星やスペースデブリなども、TLE を用いた軌道計算により、衝突などの回避が行なわれている。

TLE は Brouwer(1959)をもとに、SGP4(Simplified General Perturbations Satellite Orbit Model 4, Hoots and Roehrich(1980))の軌道計算用アルゴリズムを用いて、宇宙物体の軌道要素として提供されている。現在は Space-Track.org や、そのミラーサイトである CelesTrack など入手可能である。低軌道では誤差 1 km を内包し、また衛星など比較的大型の飛翔体は更新頻度が高く、毎日更新される場合が多い。宇宙物体として地上から観測できる 10cm 以上の物体について 5 万個強が TLE として、現在登録されている。

野澤ら(2021)では、太陽活動の指標である相対黒点数と宇宙物体の軌道低下の相関を示した。ここでは太陽活動極小期に比べ、太陽活動極大期では最大 10 倍となる一日に 30 m 程度の軌道低下があることがわかった。そして、軌道予測と実測の差から超高層の大気抵抗となる密度の変動を推定できることを示唆した。太陽活動以外に地球磁気圏の磁気嵐も加えた研究として、玉置ら(2022)は宇宙物体の高度低下の観点で地球低軌道物体の特徴について議論し、定性的に 4 層構造に超高層大気を分類することを提案した。

本研究は TLE を用いて宇宙物体の軌道低下と宇宙天気現象の関係を解析し、特定の宇宙物体の軌道低下率を推定した。そして予測した軌道と観測データとの比較を行い、宇宙天気現象を考慮した軌道予測の可能性について言及する。

## 2. 使用するデータと解析方法

TLE には軌道要素の 6 つの量が含まれている。本研究は野澤ら(2021)の解析方法と同様に元期、平均運動を用いた。今回使用する宇宙物体は離心率が 0 に近く、軌道を真円と仮定し軌道半径(地心距離)を求め、高度を求める。ただしこの高度は、理解しやすいように軌道半径から地球の平均半径を差し引いたもので、平均海面からの標高の意味ではない。これは解析において最低 30 日以上期間で考えるため、平均化及び簡略化したモデルを用いたためである。

またデータ取得は <https://www.space-track.org/> にアカウントを作成し、python の spacetrack, tletool ライブラリを用い、python から直接 TLE をダウンロードし解析を行った。加えて天体の位置計算や SGP4 を用いた軌道計算に skyfield ライブラリを用いた。この skyfield ライブラリ(<https://rhodesmill.org/skyfield/>)は、天体暦や星座線(星座を構成する星と星を結ぶ線)、ヒッパルコスカタログ(ヒッパルコス衛星のデータから作られた星図)の使用も可能で、宇宙物体の衛星軌道を SGP4 予測ライブラリで計算し、地図や天球に表示が可能である。

太陽活動の指標として、野澤ら(2021)では太陽相対黒点数を用いたが、本研究では太陽から定常的に放射されている波長 10.7cm(周波数 2.8GHz)の電波の強度(単位は Solar Flux Unit (SFU) =  $10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ 、以下 F10.7 とする)を用いる。これは太陽相対黒点数と強い相関があり(Chen et al. 2011)、太陽活動の極大期では 200 程度、極小期では 70 程度と、黒点数と異なり 0 にならない。また、地球高層大気の加熱の原因と考えられる太陽紫外線強度とも強い相関がある。そして 60 年以上に渡り、観測され続けてデータが OMNI2 で公開(<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>)されているため、今回の解析に使用した。

### 3. 結果その 1: 宇宙物体の軌道低下と太陽活動の関係

今回使用する宇宙物体は OPS 8180 (STP RADSAT) (TLE カタログ番号 6217、COSPAR:1972-076B、以下「宇宙物体 6217」とする)である。これは、質量が 208kg のアメリカ軍の衛星で、1972 年 10 月 2 日に打ち上げられた。当初は軌道傾斜角 98.4 度、遠地点高度 761 km、近地点高度 736 km の離心率 0.0015 であったが、現在の軌道傾斜角 98.546 度、離心率も 0.001 以下となっている。そのため軌道を簡単のため真円とした。

図 1 は、宇宙物体 6217 の 1974 年頭から 2021 年末までの円軌道と仮定した軌道高度を示したものである。エラー値が入っているが、解析では省いている。図 2 は太陽活動の指標である F10.7 を示す。太陽活動に応じて、軌道低下が大きくなるのが確認できる。ただし、2010 年からの軌道高度は顕著な低下になっていない。これは 2010 年からの太陽活動が穏やかなためと推測される。

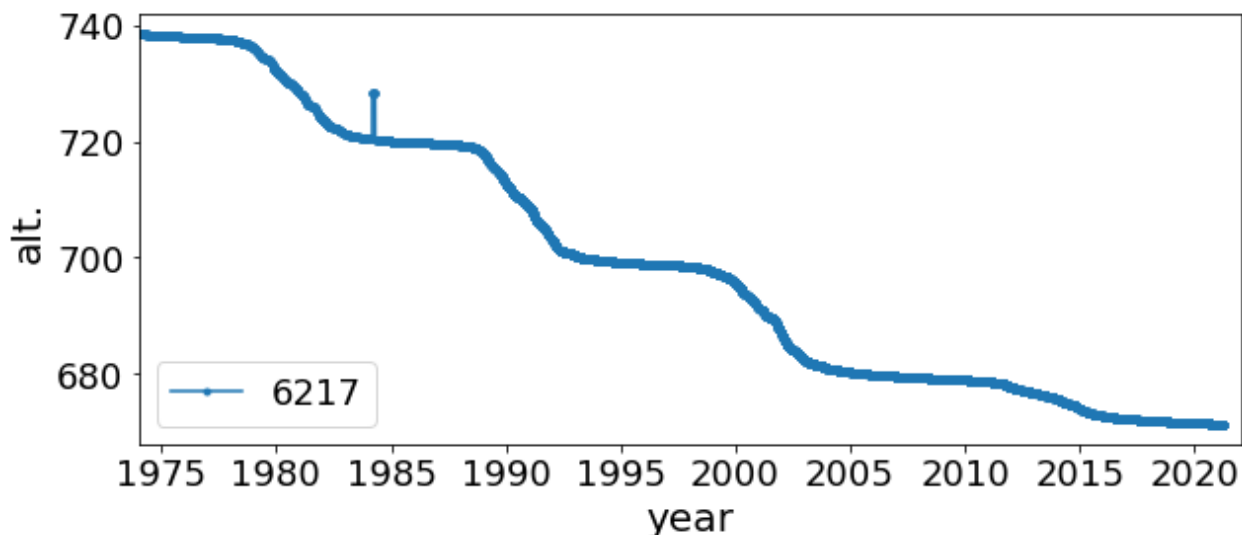


図 1 OPS 8180 (STP RADSAT)の高度(km)の時間変化図。TLE データから求めた高度を点で示した。

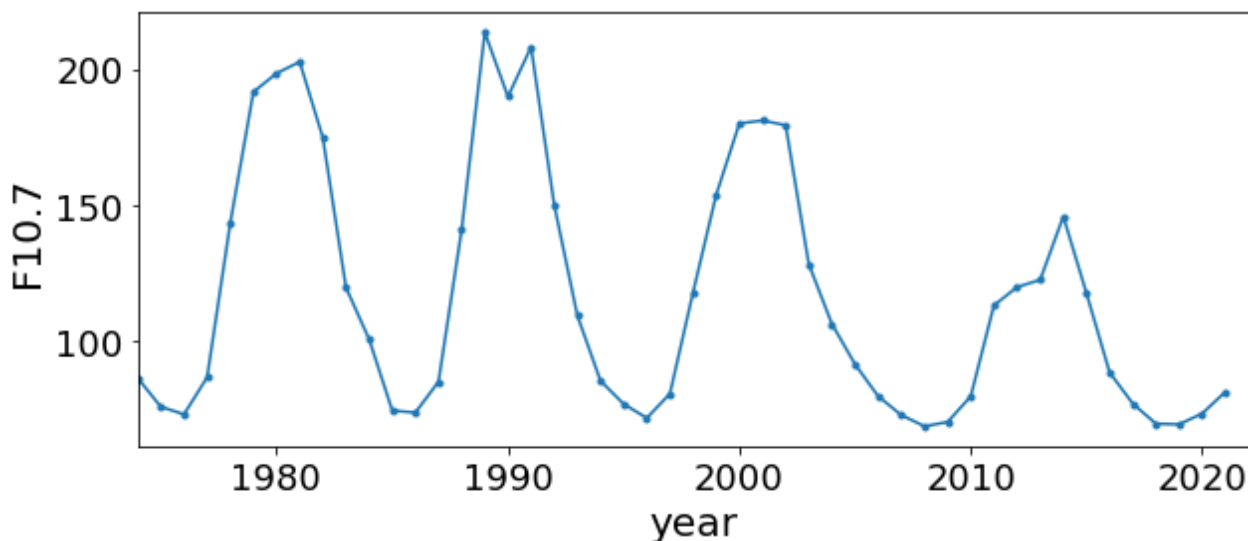


図 2 太陽電波強度 F10.7(単位は sfu(solar flux unit, 1 sfu =  $10^4$  Jy) の年平均の時間変化図。点はその年の平均値を示す。

野澤ら(2021)では衛星軌道高度から求めたある期間の平均の軌道高度の低下率(m/day、値自体は負のため相関係数は負となる)と相対黒点数との相関を報告した。本研究では、それぞれ同じ期間の30,60,120,180,360日間の高度の低下率とF10.7の相関を求めた。図3,4では360日間と30日間(太陽自転は27日程度)の相関を示す。30日間では値が散らばるが、360日間では相関が高く、ある関係式に沿っているように見える。そこで、図3はF10.7と軌道低下率の相関を両対数とした図で、相関係数は-0.95である、直線はべき乗分布( $y = b \cdot x^a$ )で、係数  $a = 3.1$ ,  $b = 9.2 \cdot 10^{-7}$ 、 $y = 9.2 \cdot 10^{-7} \cdot [F10.7] \cdot x^{3.1}$  の線が示してある。ここで[F10.7]は、その期間の平均のF10.7の値を示す。図4は高度の低下率だけを片対数にした相関図で、相関係数は-0.95、直線は指数分布( $y = b \cdot \exp(ax)$ )を示す。 $a = -0.025$ ,  $b = -0.098$  で  $y = -0.098 \cdot \exp(0.025 \cdot [F10.7])$  となる。

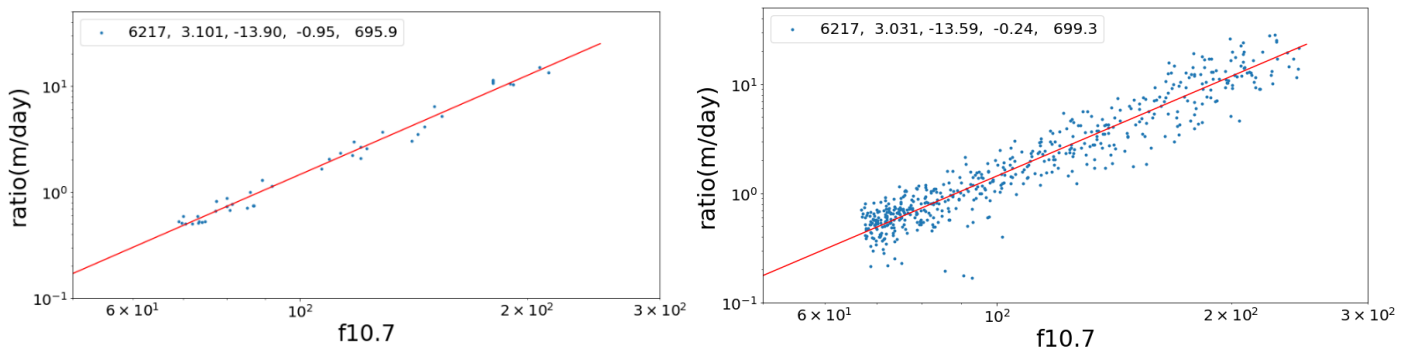


図3 F10.7と高度低下率の両対数を取った分布図。左が期間360日で平均したもの、右が30日で平均したもの。赤線はべき乗分布線である。

図の左上の数字は順にTLEカタログ番号、係数a,b、相関係数と軌道高度(km)である。

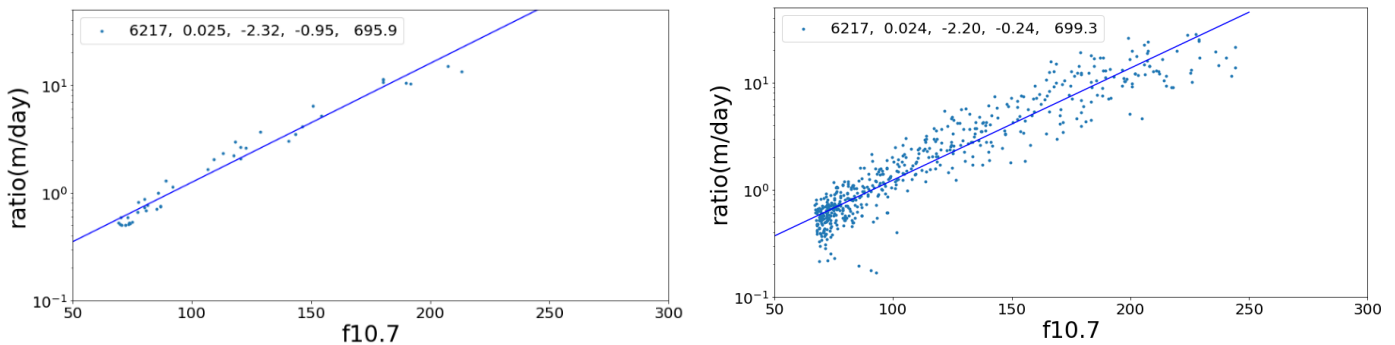


図4 F10.7と高度低下率の片対数を取った分布図。左が期間360日で平均したもの、右が30日で平均したもの。赤線は指数分布線である。

図の左上の数字は順にTLEカタログ番号、係数a,b、相関係数と軌道高度(km)である。

これらの関係式はF10.7の観測値を得たときの、高度の低下率を経験的に示すもので、例えば、F10.7がそれぞれ100, 200の場合は、1m/day, 10m/dayの低下率となる。これは、ある時間のF10.7の値が観測から提供されると、高度の低下率が計算されることを意味し、宇宙天気現象の影響による軌道の簡易的な予測、すなわち宇宙天気予報の一つと考えることもできる。

そこで、実際に過去の 6127 の高度の低下率の推測を行ない、実際の高度変化に対応しているかを検証する。そこで太陽活動が非常に激しかった 2000 年 7 月 14 日(天文観測衛星あすかが姿勢を乱したとき)の前後の三ヶ月間の軌道高度を図 5 の左に示した。右は 2008 年 9 月 1 日は太陽活動非常に低く、無黒点状態が長く続いた期間に含まれ、宇宙物体 6217 の軌道高度をそれぞれ示した。

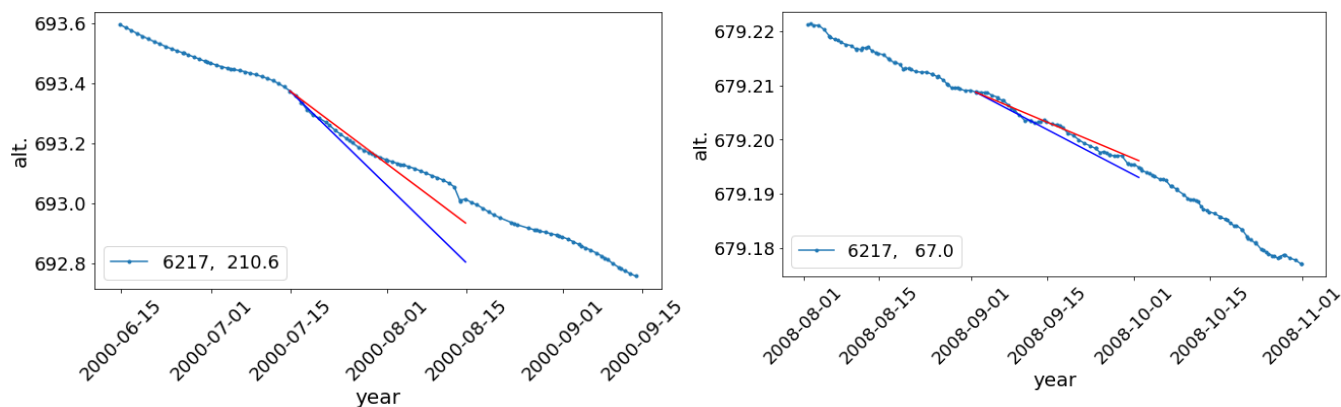


図 5 6217 の高度の時間変化図。左が太陽活動極大期である 2000 年 7 月 14 日を含む三ヶ月間、右が極小期である 2008 年 9 月 1 日を含む三ヶ月間である。赤と青の直線はべき乗分布と指数分布の関係式から予測された高度の低下率を示す。図の左下の数字は TLE カタログ番号とその日の F10.7 の観測値である。

縦軸のスケールは左右と異なり、左では三ヶ月程度で 0.8km 程度低下するが、右では 0.04km の低下である。また左図では約 15 日間で低下率の傾向が変わる。これは太陽自転が 27 日程度のため、活動領域が地球で観測し始めてから、15 日程度で半周し、地球から見えない裏側に移動するためと考えられる。

赤と青の直線はべき乗分布と指数分布の関係式から予測された高度の低下率である。左図では 7 月 14 日の F10.7 が 210.6 を使った予測の傾きは両者とも似た傾向を示すが、指数関数からの予測がより低下が激しく、最初の数日の傾きと一致している。右図は F10.7 も最低値に近い 67.0 となったときのもので、両者とも同じ傾きを示すが、やはり指数関数からの予測の方が、観測値に近くなっている。

#### 4. 結果その 2:宇宙物体の予測した軌道と観測データとの比較

アマチュア天文家の観測例として、国際宇宙ステーション(ISS)が太陽面や月面を通過するときに撮影を行ない公開され、その鮮明な ISS の姿に息を飲むことがある。最近では地上から天球を見上げたときに、どんな衛星が通過しているかを可視化するスマホのアプリもあり、この延長で ISS が太陽や月、他の惑星と同方向に位置するときに、撮影に適した時刻や場所を知らせる機能を有するものがある。公開された宇宙物体と天体が写った画像を見ると、予測された軌道とは一致しないことが多く、角度にして 0.1 度程度離れることは良くある。また予測通りに太陽の真ん中を通過する場所で撮影したが、通常よりは離れたところである太陽の周辺を通過したケースもあった。その時期の太陽活動は比較的高かったため、大気加熱による大気抵抗が大きくなり、通常以上にずれた軌道となったと解釈できるが、憶測でしかない。そこで宇宙天気現象が軌道に与える影響を定量的に扱うために、精密な観測を行なった。

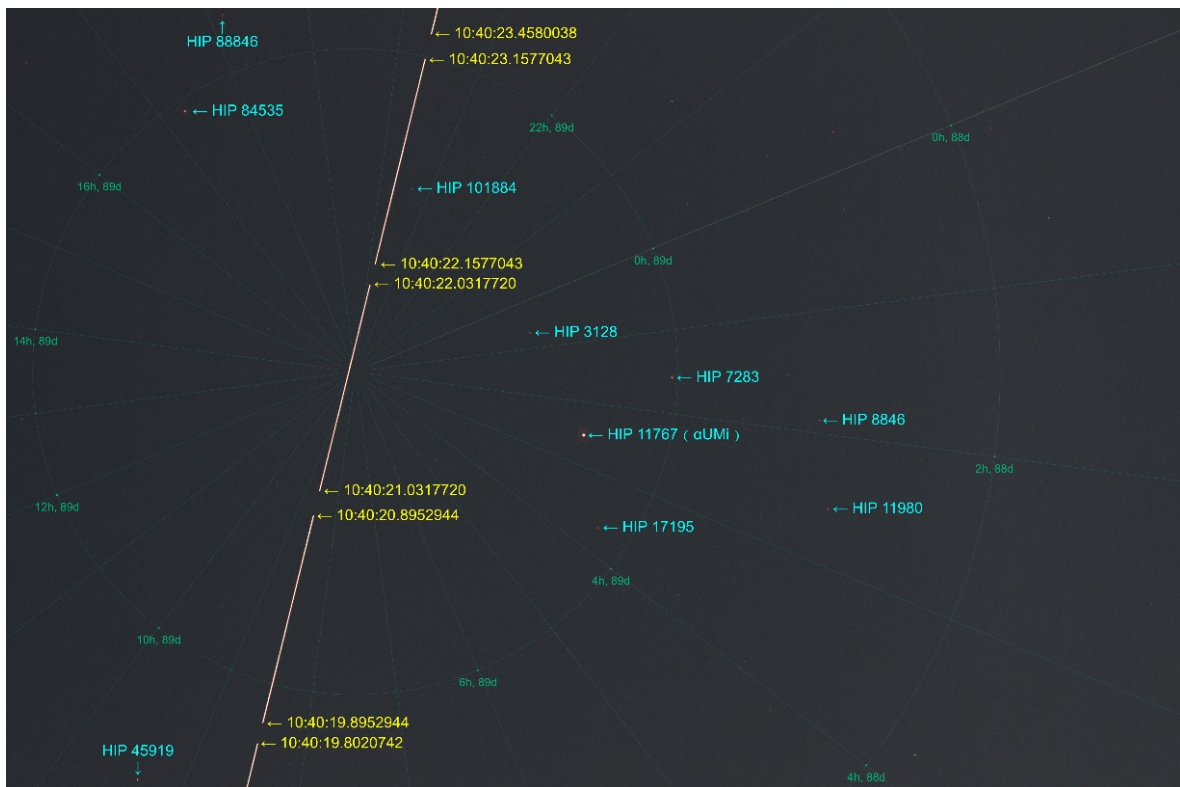


図 6 2023 年 6 月 20 日 19:40:22 JST に天の北極と北極星の間を通過する中国の宇宙ステーション(CSS)の観測画像。赤い破線は間欠の撮影された CSS の軌跡で、黄色の数字は UTC の時刻である。小青字は赤経赤緯、大青字はヒッパルコス星図カタログの天体で HIP と数字で示した。αUMi は北極星である。

そこで中国の宇宙ステーション(CSS、TLE カタログ番号 48274)を日本時間の 2023 年 6 月 20 日 19:40:20 ごろに観測した画像が図 6 である。天の北極と北極星の間を通過すると予測された CSS が見事に撮影されている。この画像は複数の画像を重ね合わせたもので、PC に同期した時刻が記録されているため、軌道時刻の同定が可能である。ただし時間精度としては、1/100 秒程度である。この画像には通過の日本時間の時刻が追記され、加えて北極星(HIP 11787(αUMI))などヒッパルコスカタログ番号)など、天体も記入されている。ただし観測機器などの由来の画像の歪みなどは排除していない。



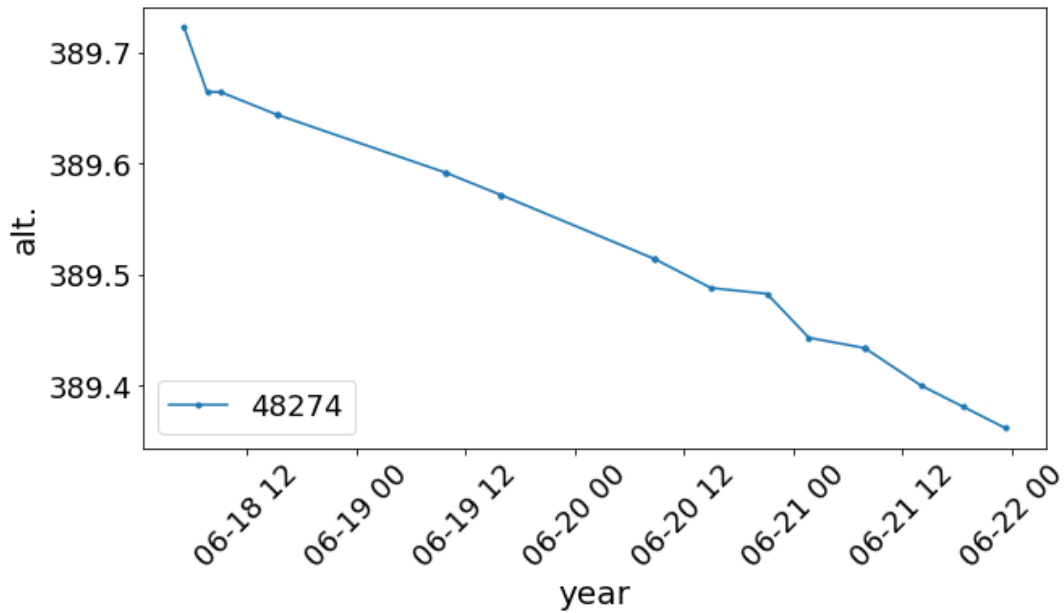


図 7 CSS(TLE カタログ番号 48274)の高度(km)の時間変化図

図 7 では CSS は離心率は 0.001 程度のため円軌道と仮定し、2023 年 6 月 18 日から 22 日までの軌道高度を示す。この期間は太陽面に 10 個以上の活動領域が存在し、中規模程度の M クラス太陽フレアが複数回発生しており、6 月 20 日の 16:42 には X1.1 の大規模フレアが発生した。画像撮影時はこの太陽フレア前 10:40UT であるため、軌道高度は通常の低下率である。撮影後の高度は上下をしており、太陽フレアの影響と予想される。

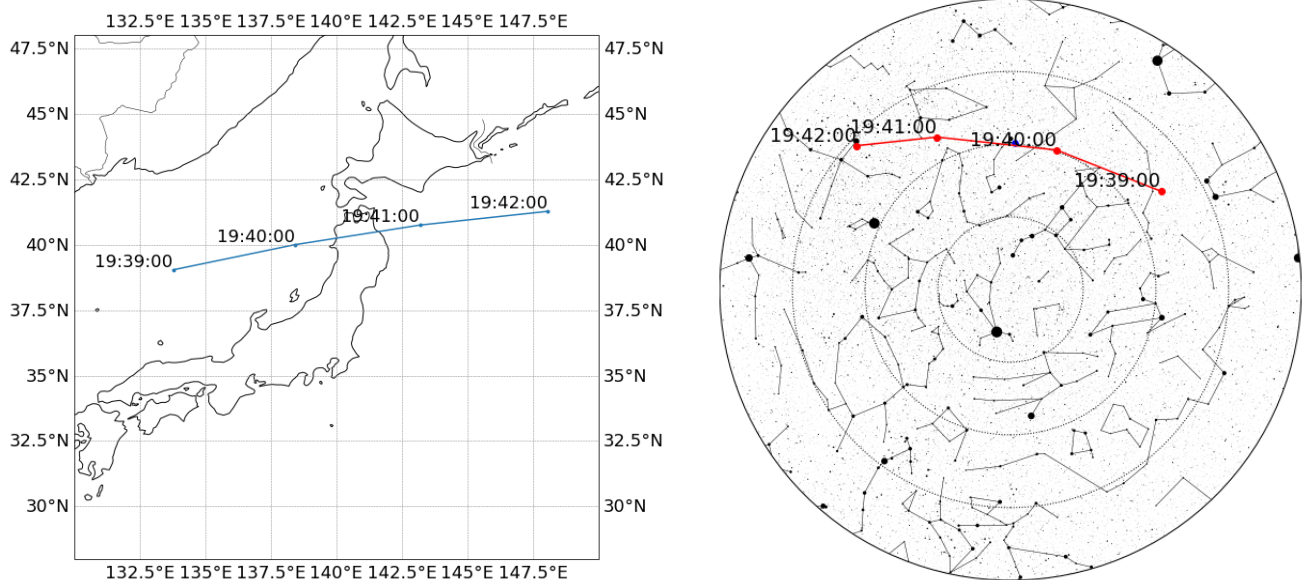


図 8 2023 年 6 月 20 日 19:40:20 JST 前後を通過する CSS の軌道を世界地図と天球に重ねたもの。左図の青線が軌跡で、青点と JST 時刻を表記した。右図も同様に天球に軌跡と時刻を表記した。

図 8 には python と skyfield ライブラリを用いて、軌道予測を行なったものを示す。Skyfield ライブラリには SGP4 が組み込まれており、それを使ったデモプログラムが公開され ISS 等の宇宙物体の軌道予測が頻繁に行なわれている。図 8 の左図では日本の東北地域を西から東に通過する軌道を確認できる。

図 8 の右は地上から見上げた天球図で、西から東に 5 分程度で天球を通過し、日本時間 19:40 すぎに北極星近傍を通る軌道となった。この予測した軌道は、別の宇宙物体の通過を予測するサイトなどと比較し、一致することを確認した。

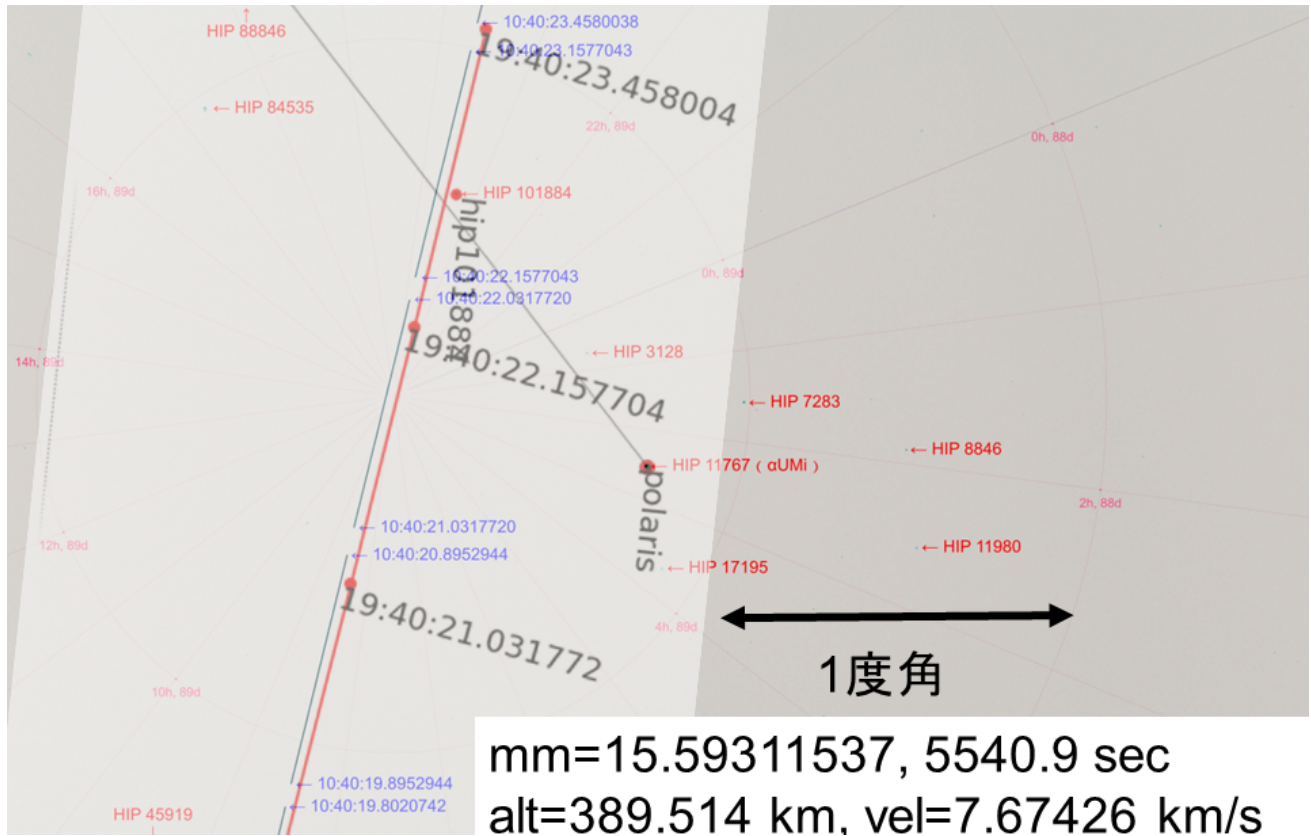


図 9 CSS の観測画像に色反転を施し、衛星予測ライブラリを用いて予測軌道(赤線)を重ねたもの。数字などは図 6 の表記に準ずる。赤線上の赤点の数字が予測された JST 時刻である。北極星( $\alpha$  UMi)を位置同定に使い、小熊座の星座線と北極星(polaris)を重ねた。また 1 度角の長さを矢印で示した。右下には予測軌道における周回率(mm、単位は周回/日)の値、一周期の時間、高度(alt)、周回速度(vel)を記した。

図 9 では、図 8 の右を拡大し、衛星軌道の予測の線を観測画像に重ねたものである。観測の軌道と予測の線は、横方向のずれが発生しているが、そのずれは 1 度角はよりずっと小さい。また通過時刻の日本時間で 19:40:23.348004 では一致するが、それ以外では観測値と予測が異なっている。この観測と予測の時刻差は SGP4 の内包する 1km 誤差程度であり、運用上は問題ないと考えられる。

## 5. まとめと議論

宇宙物体 6217 の約 50 年に渡る軌道高度の低下率と太陽電波強度 F10.7 との 360 日間平均の相関は  $-0.95$  と非常に高い結果を得た。また、図 3, 4 ではべき乗分布( $y = b \cdot x^a$ )または指数分布( $y = b \cdot \exp(ax)$ )で近似することができた。ただし、どちらが一致しているかの判別の読み取りは難しい。物理的な意味では、べき乗則は地震の大きさと発生頻度の関係で知られており、太陽フレアの発生頻度とエネルギーも同じくべき乗則である。太陽電波強度 F10.7 の発生頻度と高度の低下率の大きさと発生頻度が一致するのは不思議ではない。

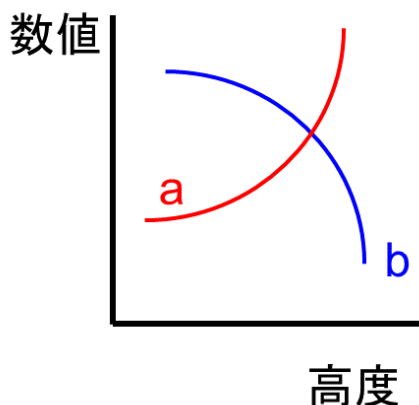


図 10 高度と係数の関係例

指数分布( $y = b \cdot \exp(ax)$ )の場合は、太陽電波強度 F10.7 と強い相関のある太陽紫外線による大気加熱が働くと考えると、高度の低下率は大気密度及び大気抵抗に比例すると考えられ、このための物理的な説明が必要である。また今回の一例だけで判断するのは難しいため、各高度毎に統計的に調べる必要がある。

この高度毎に調べることにより、べき乗分布( $y = b \cdot x^a$ )または指数分布( $y = b \cdot \exp(ax)$ )の係数  $a, b$  の高度による関係式の例(図 10)が見い出せれば、特定の宇宙物体だけでなく、適切に係数  $a, b$  をスケーリングすることで、異なる高度でも軌道低下率を近似的に予測できる可能性がある(秋山ら 2017)。これは宇宙天気現象の予報と一つとなる可能性がある。

宇宙物体 48274 である中国の宇宙ステーションを観測し、軌道予測と SGP4 の誤差程度で時刻の一致をみた。このときは太陽フレアの前で急激な大気抵抗の増大がないため、予測と大幅にずれなかったが、アマチュア天文家の公開している画像では、太陽活動の増大のため通常の軌道のずれより大きなものがあった。将来的に SGP4 に宇宙天気現象の効果を取り入れた新しいモデルの構築が望まれる。ただし、宇宙物体の軌道変化には、重力異常など地球重力場の影響、地球が真円でない効果、衛星からの熱放射などがあり、大気抵抗の影響を定量的に議論するには統計的な解析が必要である。

以上本研究では例が少なく、統計的な解析は不十分すぎるため、一般化にはより多くの宇宙物体を対象に統計的な解析が必要である。特に後者の観測は全天サーベイ観測を行なう光学望遠鏡の画像解析や、人工衛星追尾に特化した小型望遠鏡装置の開発が考えられる。また観測の解析のフィードバックを衛星予測にどのように反映する方法の構築も必要である。

## 謝 辞

本研究は JSPS 科研費 23K02807 及び、名古屋大学宇宙地球環境研究所の共同研究の助成を受けたものである。また茨城大学研究推進経費の研究拠点の支援を受けたものである。図 6 の観測画像は共同著者の久保庭敦男氏の撮影となります。最後に阿部旬也氏、井上卓悠氏の協力により完成しました。ここに深く感謝します。

## 参考文献

秋山恭平, 中村信一, 大気抵抗加速度のスケーリング則を用いた低軌道物体の軌道誤差共分散の適正化手法に関する検討, 第 61 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2K07, JSASS-2017-4450, 2017

Brouwer, D., Solution of the problem of artificial satellite theory without drag, The Astronomical Journal, 64, 378, 1959

Chen, Y., Liu, L., and Wan, W., Does the F10.7 index correctly describe solar EUV flux during the deep solar minimum of 2007–2009? J. Geophys. Res., 116, A04304, 2011

Kataoka, R., Shiota, D., Fujiwara, H., Jin, H., Tao, C., Shinagawa, H., Miyoshi, Y., Unexpected space weather causing the reentry of 38 Starlink satellites in February 2022, J. Space Weather Space Clim., 12, 41, 2022

玉置晋, アルヴェリウス幸子, 野澤恵, 宇宙天気と地球低軌道の 4 層構造, 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: 第 12 号, 51-61, 2023

野澤恵, 玉置晋, 井上卓悠. 1989 年 3 月の宇宙天気現象と人工衛星の軌道低下の関係, 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: 第 11 号, 45-55. 2023

Hoots, F. R. and Roehrich, R. L. Spacetrack Report No. 3: Models for propagation of NORAD element sets. , Aerospace Defense Center, Peterson Air Force Base (1980).

Wertz, James R., Atmospheric Drag and Satellite Decay, Sec. 9.4.4 in Space Mission Engineering: The New SMAD, ed. by J. Wertz, D. Everett, and J. Puschell, Hawthorne, CA: Microcosm Press, 2011.

# 機械学習を用いたXRISM衛星搭載極低温検出器の異常検知アルゴリズムの開発

柏崎 未有<sup>\*1</sup>, 辻本 匡弘<sup>\*2</sup>

## Development of the machine learning-based anomaly detection algorithms for the low-temperature detector onboard the XRISM satellite

KASHIWAZAKI Miu<sup>\*1</sup>, TSUJIMOTO Masahiro<sup>\*2</sup>

### ABSTRACT

Early detection of anomalies in spacecraft telemetry data is important for ensuring the safe operation of the spacecraft. The XRISM satellite, launched on September 6, 2023 (UTC), utilizes the Automatic Telemetry Monitor Software (ATMOS) for this purpose. However, ATMOS serves as a general system primarily designed for analyzing time-series telemetry data. Consequently, each mission necessitates dedicated complementary systems. In this article, we present the results of an anomaly detection algorithm applied to the Resolve instrument onboard XRISM. Our methodology entails a machine-learning approach utilizing actual data collected during ground testing. We assess the efficacy of this approach in detecting anomalies in the detector noise spectra and the cold-stage temperature data.

**Keywords:** XRISM, *Resolve*, anomaly detection, machine learning.

### 概要

安全な衛星運用を実現するため、衛星テレメトリデータの異常を早期に検知することは極めて重要である。2023年9月7日（日本時間）に打ち上げられたXRISM衛星では、異常検知システムATMOS (Automatic Telemetry Monitor Software) が使用されている。しかしATMOSはテレメトリ時系列データの閾値判定を主とした汎用システムであり、データの特性に即した異常検知にはミッションごとの異常検知システムが相補的に必要である。本研究では、XRISM衛星に搭載されたミッション機器*Resolve*のデータに対する異常検知アルゴリズムの開発を行った。地上試験データを用いて機械学習的な手法を用い、*Resolve*装置のテレメトリデータに現れる二種の異常-検出器ノイズスペクトルに含まれる異常と、検出器の温度データに含まれる異常-の検知アルゴリズムの開発を通して、同手法の有用性を検証した。

### 1. はじめに

2016年に打ち上げられたX線天文衛星ASTRO-H<sup>[14]</sup>は、衛星姿勢制御系に起因する事故により、打ち上げから約1ヶ月で運用を停止した<sup>[8]</sup>。そのため、その後継機として開発されたXRISM衛星<sup>[15]</sup>では、異常検知システムの整備が特に重要と認識されている。

現在、プロジェクトで採用されている汎用システム

ATMOS (Automatic Telemetry Monitor Software) は、衛星テレメトリデータ（もしくはその演算）の時系列データを閾値判定するものである。即時性が高い反面、複雑な判定には向いていない。相補的なシステム、すなわち即時性が低いものの複雑な判定が可能なシステムが必要である。特に運用上重要なものは、閾値判定では分からない(i)データのパターンに基づいた異常、(ii)データを一次処理しなければ発見できない異常の検知

\* 2023年11月30日受付 (Received November 30, 2023)

<sup>\*1</sup> 東京大学大学院理学系研究科 (Graduate School of Science, The University of Tokyo)

<sup>\*2</sup> 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 (Japan Aerospace Exploration Agency, Institute of Space and Astronautical Science)

である。これらの異常を検知するアルゴリズムを開発するにあたり、今回は機械学習を利用することにした。

機械学習的手法が衛星テレメトリデータの異常検知に有効であることは、いくつかの先行研究により示されている。まず Inui et al. (2009)<sup>[2]</sup>では、人工衛星の電力サブシステムで発生した異常事例について、いくつかの次元削減アルゴリズムおよび k-means クラスタリングアルゴリズムを用いて異常検知を行い、それぞれの手法の有効性を示した。また Kawahara et al. (2008)<sup>[9]</sup>では、宇宙機の姿勢変更マヌーバを模擬したデータにおける異常検知問題に対し、時系列データにおける異常発生時刻を、機械学習を利用した変化時刻検知の汎用的なアルゴリズムを部分空間法を用い検証し、手法の有効性を示した。しかし、機械学習においては汎用的な手法は存在しないので、それぞれの装置のドメイン知識を活用しながらそれに特化した異常検知アルゴリズムを開発する必要がある。

XRISM 衛星に搭載される *Resolve* 装置<sup>[16]</sup> は、X 線マイクロカロリメータ検出器を擁した X 線分光器である。6×6 ビ° クセルからなる X 線検出器の熱浴を極低温(約 50mK)に保持し、1つずつの X 線光子入射に伴う温度上昇の時系列データを軌道上で処理してエネルギーを決定する。そのデータの特質として、(1) 時間スケールや温度データの幅広いダイナミックレンジ、(2) 周波数やエネルギー空間で表現される検出器ノイズデータ、などがある。これらの特質を踏まえた、同装置に特化した異常検知が必要である<sup>[18]</sup>。

そのため、最初のステップとして、今回、2019年から2022年にかけて行われた *Resolve* 装置の地上試験のデータを活用し、異常検知アルゴリズムを開発と検証を行った。この結果を参考にして、従来のしきい値判定に対する優劣の比較や、実際の運用に組み込む異常検知システムの要求分析と設計などを行うが、それは本稿の範囲外である。

極低温検出器を要する *Resolve* 装置に特に有用な、二

つの異常を検知する異常検知アルゴリズムの開発を行った。一つ目は、検出器のノイズスペクトルに含まれる異常である。周波数空間で表現された検出器ノイズスペクトルデータにおいて、特定の周波数帯域で現れ分光性能を劣化させる既知のノイズ源が存在する<sup>[4,5,17]</sup>。そのようなノイズが出現する時間帯を検知し、その時間帯を観測時間から除去して、観測性能の品質を保証する必要がある。二つ目は、検出器の温度データに含まれる異常である。50 mK の温度ステージは、断熱消磁冷凍機 (ADR; adiabatic demagnetization refrigerator<sup>[7]</sup>) により温度制御されている。温度安定性が検出器のゲイン安定性、すなわち分光性能に直結するので、安定度を損なう事象を検知する必要がある。ここで、ADR は約2日に一度1時間ほどの再磁化をしながら使用する。リサイクルの際は、50 mK の制御が特定のパターンをたどって外れる。これは正常な運用なので、異常とみなさない工夫が必要である。

本稿の構成は以下の通りである。まず、§2で、本研究で用いた異常検知アルゴリズムを概観する。次に、§3で、実データに適用させた結果を述べ、§4で結論を述べる。

## 2. 異常検知アルゴリズム

異常検知アルゴリズムは、外れ値検知と変化点検知に大別される<sup>[10]</sup>。外れ値検知とは、正常なデータが従う確率分布から大きく外れたデータ点を検知することである。変化点検知とは、連続する時系列データが異常な変化をする時刻を検知することである。今回は、検出器ノイズスペクトルに含まれる異常には外れ値検知を、温度データに含まれる異常には変化点検知を用いた。以下、本稿で用いた異常検知アルゴリズムを概説する。詳細は参考文献<sup>[12,3]</sup>を参照されたい。

## 2.1. 外れ値検知

外れ値検出のアルゴリズムには、教師ありや半教師あり学習が利用される。教師あり学習とは、正常・異常のラベルがついた教師データからラベル付けのルールを学習し、未知のデータが異常であるかを推測する機械学習の手法の一種である<sup>[1]</sup>。一方、半教師あり学習では、正常データセットのみを機械学習の手法で学習し、学習した正常データのルールから外れたデータを異常と推測する。異常検知では、学習データとして正常データが圧倒的多数になったり、異常パターンが多様になったりするため、半教師あり学習が望ましいが、異常を明示的に学習させないので、判定精度は落ちる。以下、教師データを  $\mathbf{Y}_{\text{train}} = \{\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_{N_{\text{train}}}\}$ 、テストデータを  $\mathbf{Z}_{\text{test}} = \{\mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2, \dots, \mathbf{z}_{N_{\text{test}}}\}$  とする。

### 2.1.1. Stochastic Gradient Descent Classifier

Stochastic Gradient Descent (SGD) classifier は、確率的勾配降下法をもちいて、教師データの二つのカテゴリを類別する実数関数を求める教師あり学習の一種である<sup>[12]</sup>。ここで類別する実数関数とは、入力データ  $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  に対し

$$f(\mathbf{x}) = \omega_1 x_1 + \omega_2 x_2 + \dots + \omega_n x_n + \mathbf{b} \quad (1)$$

と表され、 $f(\mathbf{x})$  の符号によって正常と異常が分類される。

この関数のパラメータを定めるため、教師データ  $\mathbf{Y}_{\text{train}}$  に対し、以下の式が最小となるパラメータを探索する。

$$E(\boldsymbol{\omega}, \mathbf{b}) = \frac{1}{N_{\text{train}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{train}}} L(\mathbf{y}_i, f(\mathbf{y}_i)) + \alpha R(\boldsymbol{\omega}) \quad (2)$$

ここで、 $\boldsymbol{\omega} = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{N_{\text{train}}}\}$  である。L は教師データに対する損失項であり、教師データに対し分類を間違えるとスコアが増えていく。R( $\boldsymbol{\omega}$ ) は正則項であり、式が複雑になるほど値が増えることで、教師データに対する過学習を抑制する。

SGD Classifier は、式 (2) を最小とするパラメータ探索のため、確率的勾配降下法を用いる。確率的勾配降下法では、まず初期パラメータ  $\theta$  においての実数関数の勾配を求める。そして勾配の符号方向に、以下の式のように次の点を取りパラメータを更新する。

$$\theta := \theta - \zeta \frac{df(\theta)}{d\theta} \quad (3)$$

$\zeta$  は一定値である。これをランダムに取り出したサンプルに対して繰り返し、勾配が 0 になるパラメータを、最適なパラメータとする。

SGD Classifier を用いる際、scikit-learn ライブラリ<sup>[21,22]</sup> を用いた。scikit-learn における、SGD Classifier の主要なパラメータ<sup>1</sup> は、表 1 のとおりである。

実際のモデルの検討では、初めに線形モデルを試し、分けるデータが線形モデルで分類できるかを検証した。そして、うまくいかなかった場合は非線形モデルを試す方針を立てた。そこで一般的に使われる線形モデルの一つであり、多データでも対応できる SGD Classifier を検討した。

Table 1: SGD Classifier の主要なパラメータ

パラメータ	内容
penalty	正規化の種類
loss	損失関数の種類
alpha	正規化の強さ

### 2.1.2. クラスタリングを用いた再構成誤差法

クラスタリングを用いた再構成誤差法は、半教師学習を用いた異常検知アルゴリズムの一種である。このアルゴリズムでは、正常なデータには一つ以上の特定の形やパターンがあると仮定する。そして、正常データはパターンごとに、データ空間でいくつかのクラスター(群)を形成すると期待される。どの正常なクラスターに

<sup>1</sup>[https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.linear\\_model.SGDClassifier](https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.linear_model.SGDClassifier).

も属さないデータは、異常なデータとみなす。

再構成誤差法では、以下のような手順により異常検知を行う<sup>[2]</sup>。まず正常な教師データ  $Y_{\text{train}}$  を  $k$  個のクラスタにクラスタリングする。このときそれぞれのクラスタ中心を  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k$  とする。任意のテストデータ  $z_i \in Z_{\text{test}}$  について、一番近いクラスタ中心が  $\mu_j$  であるとき、 $z_i$  に対する再構成ベクトル  $\hat{z}_i$  を

$$\hat{z}_i = \mu_j \quad (4)$$

とする。このとき元のベクトルと再構成ベクトルとの差として定義する再構成誤差  $E_{\text{clustering}}$  は

$$E_{\text{clustering}} = \|\hat{z}_i - z_i\|^2 \quad (5)$$

と表される。異常なデータは再構成誤差が大きくなり、これが閾値  $s$  よりも大きいとき異常とみなす。すなわち、

$$E_{\text{clustering}} > s \quad (6)$$

となるとき、テストデータ  $z_i$  を異常と判定する。

## 2.2. 変化点検知

### 2.2.1. ChangeFinder

変化点検知アルゴリズムの一種として ChangeFinder が知られている。時刻  $t$  以前の時系列データを SDAR (sequentially discounting auto regressive) モデルにあてはめ、時刻  $t$  の観測値が実際に観測される確率を算出し、スコアリングすることで変化点検知を行う<sup>[3]</sup>。

ここで SDAR モデルとは、自己回帰モデル (AR; auto regressive モデル) という時系列モデルのパラメータ推定の計算量を軽減した時系列モデルである。AR モデルでパラメータを推定するには、変化点検知アルゴリズムでは AR モデルの係数を時間ごとに変化するモデルを仮定するので、推定の計算量は多くなる。そこで SDAR アルゴリズムでは、現在の値と過去に求めたパラメータのみを用いて推定し、計算量を軽減している。

AR モデルは定常な時系列データのみに対応するのに対し、SDAR モデルは非定常なモデルにも対応できるよう推定値に対して忘却パラメータ  $r$  を設定できる。これを用いると、共分散行列  $\Sigma$  の最尤推定量を更新する際、

$$\hat{\Sigma} := (1 - r)\hat{\Sigma} + r(\mathbf{y}_t - \hat{\mathbf{y}}_t)(\mathbf{y}_t - \hat{\mathbf{y}}_t)^T \quad (7)$$

として更新し、 $r$  が 0 に近づくほど、定常な時系列モデルとなる。そして更新した共分散行列をもとに、他のパラメータも定める。

次にアルゴリズムを説明する。まず時刻  $t$  までの時系列データ  $Y_{1:t-1} = \{\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_{t-1}\}$  に対し、SDAR モデルを構築する。この時構築された SDAR モデルから得られる確率密度関数を  $p(\mathbf{y}_t | Y_{1:t-1})$  とする。この確率密度関数に対し、時刻  $t$  のデータ  $\mathbf{y}_t$  における変化点スコア  $\text{score}_y(\mathbf{y}_t)$  を

$$\text{score}_y(\mathbf{y}_t) = -\log p(\mathbf{y}_t | Y_{1:t-1}) \quad (8)$$

とする。次にウィンドウ幅  $l$  を定め、 $z_t$  を

$$z_t = \frac{1}{l} \sum_{i=t-l+1}^t \text{score}_y(\mathbf{y}_i) \quad (9)$$

のように求める。 $\text{score}_y(\mathbf{y}_i)$  で変化点を検知すると、その変化点はその後の検知に与える影響が大きくなってしまふ。そこで  $\text{score}_y(\mathbf{y}_i)$  の移動平均系列  $Z_{1:t} = \{z_1, \dots, z_t\}$  を計算し、再度その SDAR モデルを考え変化点検知を行うことにする。よって、この操作で得られる確率密度関数  $q(z_t | Z_{1:t-1})$  を用いて、時刻  $t$  における変化点スコア  $\text{score}_z(t)$  を

$$\text{score}_z(t) = -\log q(z_t | Z_{1:t-1}) \quad (10)$$

と計算する。最後に時刻  $t$  における変化点スコアに対し、閾値  $s$  を設定し、

$$\text{score}_z(t) > s \quad (11)$$

となる時刻  $t$  を、変化点として検出する。

微分値に閾値を設定することで変化時刻を検出する



といった方法は、温度変化量の大きさに score が依存してしまうという問題がある。一方、ChangeFinder の score は温度の変化量の大きさの影響を強く受けないため、温度変化点検知に有力である。

### 3. 異常検知アルゴリズムの開発

#### 3.1. 検出器ノイズスペクトルの異常検知

##### 3.1.1. 現象の背景

Resolve 装置で X 線を検出する際、約 500 Hz 以下のノイズが X 線イベントのエネルギー分解能に影響する。その影響は、周波数が低いほど大きい。この周波数帯域にパワーを持つノイズ源を監視し、その異常を検知する必要がある。地上試験を通していくつかのノイズ源が特定されたが、ここでは検出器外部からの電磁・微小擾乱干渉に起因する以下の 2 つのノイズ（それぞれ MTQ ノイズ、beat ノイズと呼ぶ）を対象とする。

(1) 磁気トルカ (MTQ; magnetic torquer) による電磁干渉ノイズ。MTQ は XRISM 衛星に搭載される姿勢制御系のサブシステムの一つである。MTQ はコイルに電流をかけて地球磁場と作用させることで、XRISM 衛星に蓄積された角運動量を散逸する。この時、127 Hz のパルス幅変調で磁場強度を調節するので、127 Hz とその高調波でのピークがノイズスペクトルに生じる (Fig. 1)。また、検出器アレイを構成する 36 個のピクセルのうち、0, 9, 18, 27 番ピクセルにより強い線ノイズが立つことが知られている。これらのピクセルからのアナログ信号線がバンドルの端にあることから、外的影響を受けやすいためと考えられている [4]。

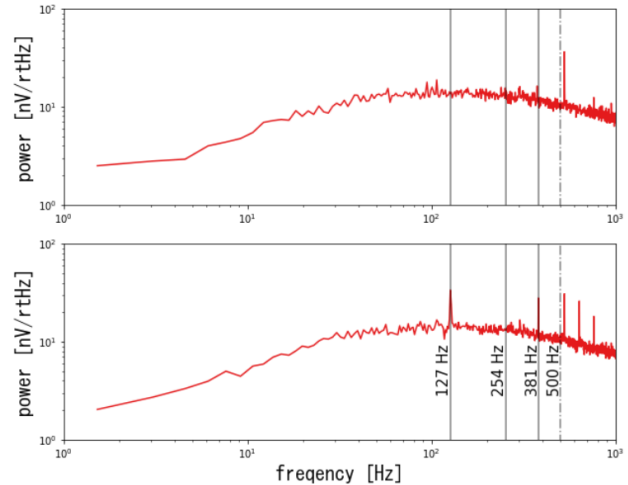


Fig. 1: 2022/06/09 に取得した MTQ ノイズなし (上)、2022/06/09 に取得した MTQ ノイズあり (下) の 8k noise spec の一例

(2) 機械式冷凍機による微小擾乱干渉ノイズ。Resolve 装置には検出器を冷却するため、複数の冷凍機が搭載されている。そのうちの 2 種類が、Stirling 冷凍機 (4 台) と Joule-Thomson 冷凍機 (1 台) という機械式冷凍機である [19,20]。Stirling 冷凍機の駆動周波数は  $f_1 = 14.77 - 15.16$  Hz, Joule-Thomson 冷凍機は  $f_2 = 51.27 - 53.35$  Hz の間で調整できる設計になっている。ある  $f_1, f_2$  を選択した時、二つの波の重ね合わせにより、

$$\begin{aligned} & \cos(2\pi n f_1 t) + \cos(2\pi m f_2 t) \\ &= 2 \cos\left(2\pi \frac{n f_1 - m f_2}{2} t\right) \cos\left(2\pi \frac{n f_1 + m f_2}{2} t\right) \end{aligned} \quad (12)$$

という波が生じる。すなわち、時空間において、振幅が周波数  $\left|\frac{n f_1 - m f_2}{2}\right|$  で変動する波 (うなり) が生じる。通常、フーリエ空間ではこのうなり周波数は現れない (単に  $n f_1$  と  $m f_2$  に分解されるだけである) が、振幅に対して非線形応答があると、うなり周波数  $\left|\frac{n f_1 - m f_2}{2}\right|$  にもパワーが分配される。実際、Resolve 装置では、 $(n, m) = (24, 7), (15, 4)$  のときの beat ノイズが実際に観測されている (Fig. 2) [5]。この時、うなりの周波数が  $f_1$  や  $f_2$  よりも低周波数帯域にくるので、特に重要である。

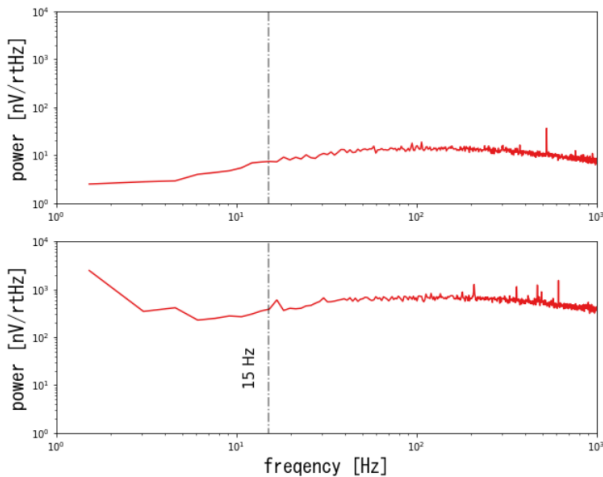


Fig. 2: 2022/06/09 に取得した Beat ノイズが発生していない時刻の 8k noise spec の一例 (上)、2019/12/11 に取得した Beat ノイズが発生している時刻の 8k noise spec の一例 (下)

### 3.1.2. 開発項目

Resolve 装置の運用では、1日に1回程度で、ノイズスペクトル (8k noise spec) が全ピクセルに対して取得される。これらから、上述の2つのノイズが発生しているかを検知するアルゴリズムを開発する。

異常検知に際し重要となる指標として、実際に異常であったもののうちどれだけ異常と予測できたかの割合を示す「真陽性率」、実際は正常であったのに異常と予測された「偽陽性率」がある<sup>[13]</sup>。今回は、検討したモデルで真陽性率の目標値を0.9と設定し、これを超える検知を行うことができるのか、そして真陽性率0.9を超える検知を行う場合、偽陽性率はどの程度の値になるかを検討した。

学習データとして、Resolve 装置の地上実験で、2021/05/06 から 2022/06/17 までの期間 (衛星初期電気試験) で得られたデータを用いた。8k noise spec 一つのサンプルは、36ピクセル×4096周波数ビン (1.5 Hz から 6.25 kHz まで 1.5 Hz の周波数分解能) のデータである。

### 3.1.3. 異常検知

**MTQ ノイズ** このノイズが強く現れる周波数を含む 10–400 Hz の帯域を、線ノイズが強くあらわれる4つのピクセルのみに対して、学習及びテストをする。このノイズは、すべてのピクセルに同時に出現するので、ピクセルを絞ってもノイズ発生時間帯を特定するには問題ない。

8k noise spec のデータとして、MTQ が確実に駆動している時刻の 82 サンプル、それ以外の時刻の 11597 サンプルを用意した。ここからランダム抽出によりテストデータを構成した。テストデータは、MTQ ノイズが立っていないデータ 115 サンプル、MTQ を駆動時に 127 Hz とその倍波でピークが立っている 25 サンプルからなる。それ以外のサンプルは、教師データとパラメータ推定用データとした。これらのデータでは、MTQ を駆動している時間帯は既知なので、その時に取得された 8k noise spec を異常、それ以外で取得されたものを正常とラベル付けをした。ただし、試験中に MTQ を駆動した時間が少なく、異常データのサンプル数が少なかったため、モデルの最適パラメータ探索の精度や学習精度が低下した。ゆえに今回は、SMOTE (Synthetic Minority Oversampling Technique)<sup>[6]</sup> をもちいて異常サンプルを増やし、正常サンプル数と均一な数にした。これにより、MTQ ノイズサンプルは正常サンプルの同数のサンプル数に増やした。ただし、SMOTE 等を用いたオーバーサンプリングを行うことで、元データの相関を損なう可能性や、過学習を引き起こす可能性が考えられることには、注意が必要である。

過学習の影響を減らすため、グリッドサーチを用いて、パラメータチューニングを行った。それぞれのデータを標準化させたのち、SGD Classifier のパラメータを決めるため、パラメータ検証用データに対し、グリッドサーチを行った。その結果、SGD Classifier のパラメータのうち、penalty は L1、alpha を  $1 \times 10^{-7}$ 、loss を squared\_hinge とした。

以上のように構築したアルゴリズムに、検証用データを適用した。異常データ 25 サンプルと正常データ 115 サンプルを用いてテストした結果を混合行列として表 2 に示す。真陽性率は 1.0、偽陽性率は 0.04 となり、0.9 以上の真陽性率での検知が可能であることが示された。加えて、偽陽性率も十分に小さく、高い確度で異常を検知できることが示された。

Table 2: SGD Classifier での MTQ ノイズ検知の混合行列

		判断された結果	
		異常	正常
実際の結果	異常	25	0
	正常	5	110

**Beat ノイズ** 今回は、対象ノイズが強く現れる 15 Hz 以下を学習・テストする周波数帯とした。Beat ノイズは多種のパターンを持つ。そこで再構成誤差法<sup>[2]</sup>を利用することにした。この手法は、半教師あり学習を用いた異常検知アルゴリズムの一つであり、beat ノイズのように表現の種類が多様な異常サンプルも判別しやすいと期待される。再構成誤差法には、次元削除もしくはクラスタリングを用いたアルゴリズムがある。複雑な教師データの場合、後者のほうが精度が良い結果が得られることが先行研究<sup>[2]</sup>より明らかになっているので、今回はクラスタリングを用いた再構成誤差法を用いた。クラスタリングのアルゴリズムとしては k-means を用いる。

今回用いる 8k noise spec の全サンプルは、beat ノイズが発生している時刻の 1356 サンプル、それ以外の時刻の 11593 サンプルである。ここからランダム抽出でテストデータを構成した。テストデータは、beat ノイズが発生している 116 サンプル、発生していないサンプル 678 サンプルである。残りを、教師データとパラメータ（クラスタ数）推定用データとした。これらのデータでは、beat ノイズが発生している時間帯は既知なので、その時に取得された 8k noise spec を異常、それ以外で取得されたものを正常とラベル付けした。

まず教師用データに対して標準化をした。そして、そ

の標準化をクラスタ数探索用、テスト用に対して用い、標準化を行った。その後、クラスタ数推定用データに対しクラスタリングを行い、エルボー法によって最適なクラスタ数を探索した。その結果、クラスタ数を 2 に設定して 2 値分類を行った。

結果、AUC (area under curve) 値は 0.92 となった。ここで AUC 値は ROC (receiver operating characteristic) 曲線の下部の面積であり、1 に近いほど誤判定が少なく検出率が高い良い検出器であることを示す指標である。再構成誤差に対する閾値を真陽性率が 0.9 となる点として定めるとき、偽陽性率 0.35 となった。これは改善すべき課題である。

## 3.2. 温度データの異常検知

### 3.2.1. 現象の説明

Resolve 装置の検出器が搭載された極低温ステージの温度制御をする ADR<sup>[7]</sup> が正常な作動をすることは、Resolve 装置の高エネルギー分解能保持に必要不可欠である。ADR はエントロピー一定で消磁をすることで温度が下がる断熱消磁を利用しており、ある程度消磁が続くと、冷却を継続するため再磁化をする必要がある。この再磁化を ADR recycle という。ADR recycle が行われるときは、検出器ステージの温度が Fig. 3 のようなパターンで変化することが観測されている。

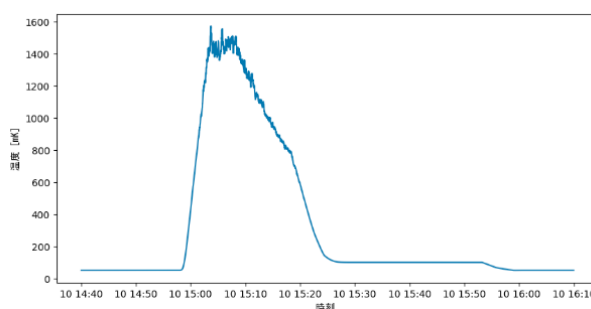


Fig. 3: ADR recycle 中の検出器ステージの温度変化の一例

Resolve 装置の検出器ステージの温度は、いくつかの時刻で温度変化していることが観測され、中には ADR

recycle での温度変化パターン以外の異常パターンでの温度変化が見られた<sup>[1]</sup> また ADR recycle 自体も、磁化電流を流す超伝導線がクエンチするなどして異常が発生する可能性がある。

### 3.2.2. 開発項目

Resolve 装置の検出器ステージの温度が正常な ADR recycle 以外のパターンでの温度変化をする時刻もしくは、ADR recycle が失敗した時刻を検知する。このとき必要となるのが、以下のようなアルゴリズムである。

- (1) 検出器ステージの温度が時間変化をした時刻を検知する検出器
- (2) (1) で検知した時刻以降の温度変化が異常であるかを検知する分類器

今回は、そのうち (1) の検出器ステージが温度変化をした時刻を検知する検出器の作成のみの開発を行った。

### 3.2.3. 開発と性能

**用いたデータセット** 今回用いたデータセットは、Resolve 装置の地上実験（2022/1/24 から 2022/06/17 までの期間）で得られた HK データのうち、検出器ステージの 50 mK モニター用温度データを用いた。

与えられた時系列データは、1 s ごとにサンプルされた連続データであるが、欠損値も散見された。欠損区間は、null 扱いとした。全サンプル数は 12446251 s 分である。変化点検知の際に用いるパラメータの調整は難しいため、すべての区間を変化点検知の対象とすると、検知精度が低下する。そこで変化点検知にかける前に、検知したい区間をある程度特定し、変化点の検出の精度を向上させる必要があった。そこで、以下の手順を踏み、変化点検知を行う区間を絞った。

- (1) 12446251 秒間の時系列温度データを  $1800 \text{ s} \times 6914$  に区切り、これを一区間とした。ADR recycle にかかる時間が約 60–90 分であることを鑑みた。
- (2) 一区間の温度データのうち、温度が 52 mK 以上となる時刻が一つでもある区間を抽出した。温度計グリッチなどによる影響を除くためである。
- (3) (2) で抽出した区間のうち、ADR recycle 中であることを示す 500 mK 以上となる区間を除いた。
- (4) (3) で抽出した区間の前後の区間をつなげた 7200 s を新たな区間とした。この区間に対して、k-means を用いてクラスタリングを行い、2 クラスに分類した。そのうちの欠損値が含まれるデータが分類されるクラス内のデータを除いた。

データを排除するために実行した。Step 2 と Step 3 では想定される対象外のデータを取り除いたが、Step 4 では二値分類を行うことで、50 mK に保たれているデータ内での異常な温度変化や、ADR Recycle による変化以外のものを検出することを目的とした。Step 4 の結果、欠損値が含まれるデータが含まれるクラスと、50 mK に保たれているデータに分類された。したがって、欠損値を含むクラスタのデータは対象外とし、除外した。

**ChangeFinder を用いた検出器ステージの温度変化点検知** § 3.2.3 で分割した区間の温度データに対し、ローパスフィルタをかけてから ChangeFinder アルゴリズムを適用した。

変化点検知の際、微分値に対して閾値を設定し変化点を検知する方法が主流だが、この方法では閾値以下の変化点を検知できないことに加え、変化点以降の変化の傾きが大きい時刻に高く微分値が出力される。それに対し ChangeFinder では、変化点のみを高く出力されるので、今回のような変化開始時刻の検知に適している。

次にローパスフィルタを用いた理由として、一部 ADR recycle が生じる前後で温度の微小な変化が多く、ADR recycle 開始時の変化が的確に検知されなかった。ゆえに変化点検知を正確に行うため、カットオフ周波数を 0.05 Hz としてローパスフィルタをかけた。加えて欠損値の温度データの前後 10 s の変化点スコアに 0 をかけ、補間したデータに対し変化点検知を行わないようにした。カットオフ周波数は、いくつかのデータを用いて最適値を決めた。ADR リサイクル以外の変化点、特に変化温度が 10 mK 程度の異常な温度変化を検出できることを重視した。

ChangeFinder のパラメータ (§ 2.2.1) は、 $r$  を 0.05、SDAR モデルのオーダーを 1、 $L$  を 1.5 とし、変化点検知を行った。Fig. 4 が ADR リサイクル時の算出された変化点スコア、Fig. 5 が温度揺らぎ時の算出された変化点スコアである。算出された変化点スコアに対し、スコアが 20 以上になる時刻を検出した結果、143 区間で変化点が 660 個検出された。しかしこの時、Fig. 5 のような温度揺らぎのところで、変化点検知が過剰に反応してしまった。この条件では、単なる温度の揺らぎまで変化点として検出されている。そのため一段階目で検知した変化点が、ADR による温度変化や異常な温度変化であるか、単なる温度揺らぎであるかを区別するため、二段階の変化点検知を実行した。

まず ADR や異常な温度変化は、一定の状態から急激に温度が変わるものである。対照的に、温度揺らぎは連続的に発生する。このため、一段階で検出された変化のタイムスタンプが本当に ADR や異常な温度変化であるのかを確かめるため、二段階目では、検知した時刻に対し前 1000s、後ろ 100s を取り、合計 1100s の区間で再度変化点検知を行った。この時は ChangeFinder のパラメータを、 $r$  を 0.01、 $L$  を 7.5 とした。これにより温度揺らぎでの部分は定常性を持つので、検知点スコアが Fig. 4 のように相対的に小さくなる傾向が見れた。つまり、最初の段階で取り出した区間が適切でなく、変化点と判断する範囲がごくわずかな時間内に制限されてしまい、定常状態を正しく把握できず、温度揺らぎに誤検出が発生していたものが、二段階目の処理によっ

てしまい、定常状態を正しく把握できず、温度揺らぎに誤検出が発生していたものが、二段階目の処理によって正確に判定できるようになった。これにより閾値を 50 に設定することで、温度揺らぎによる変化点検知の数が削減でき、見た目で判断したものを抽出できる結果になった。

この時得られた変化点時刻は 289 点となった。検知した点を確認すると、全体の約 1/4 は ADR recycle による温度変化時刻や異常な温度変化時刻であり、本来目的とした時刻を検知していた。しかし一方で、残りは温度揺らぎやグリッチによる変化点等本来検知する必要のない温度変化時刻を検知していた。これらを取り除くためには、さらにヒューリスティックな手法を重ねる必要があり、ChangeFinder のみによる温度変化検知では、今回目的とする変化時刻検知は難しいと判断された。

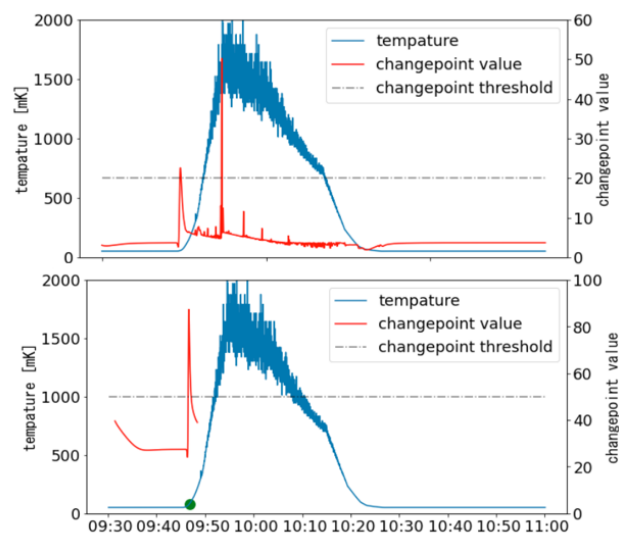


Fig. 4: 2022/1/29 での ADR Recycle 時の温度変化における、一段階目の変化点スコア (上) と二段階目の変化点スコア (下)。下図の緑の点が、二段階目で変化点検知をしている時刻である。

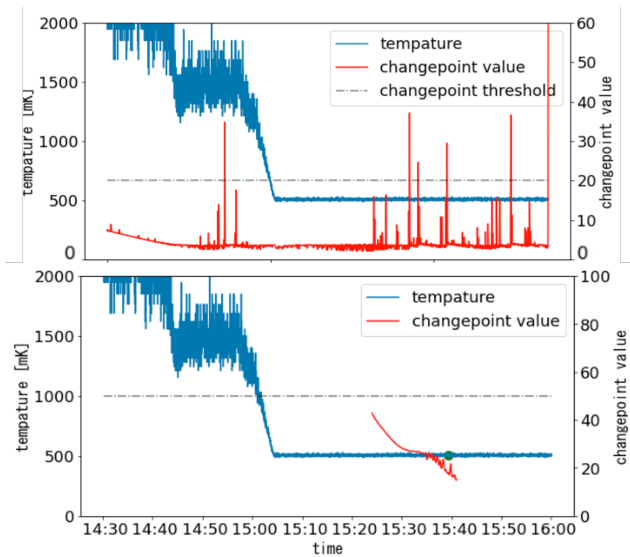


Fig. 5: 2022/2/5 での温度揺らぎ時の温度変化における、一段階目の変化点スコア（上）と二段階目の変化点スコア（下）。下図の緑の点が、二段階目に変化点検知をしている時刻である。

#### 4. 結果・考察

本稿では、XRISM 衛星に搭載されたミッション機器 *Resolve* のデータに対する異常検知アルゴリズムの開発について紹介した。地上試験データを用いて機械学習的な手法を用い、*Resolve* 装置のテレメトリデータに現れる二種の異常—検出器ノイズスペクトルに含まれる異常と、検出器の温度データに含まれる異常—を対象とした。

まず異常ノイズスペクトル検知について、今回は MTQ ノイズと beat ノイズという既知の異常を検出対象とした。MTQ ノイズに関しては、教師あり学習にもとづき SGD Classifier を用いて検出を行った結果、真陽性率 1.0、偽陽性率 0.04 での検出ができた。Beat ノイズに対しては、半教師あり学習にもとづき、クラスタリングを用いた再構成誤差法を用いて検出を行った結果、真陽性率 0.9、偽陽性率 0.37 での検出ができることが示された。MTQ ノイズに関しては、機械学習で一般的に用いられるモデルを使用した場合の結果であるが、実用化を十分目指せるレベルの結果であることが示された。Beat ノイズに関しては、適切な閾値を設定す

ることで、十分な真陽性率での検知ができることが示されたが、同時に偽陽性率が高くなり、誤検知が多くなることが分かった。ゆえに、先行研究<sup>[2]</sup>で検討された VQPCA のような、通常用いられるモデルよりも複雑なモデルを用いた再構成誤差法を検討し、偽陽性率を低下させることが必要と考えられる。

次に異常温度変化時刻検知について。検出器面の温度データを約 5ヶ月分処理し、289 点の温度変化を検知した。このときの検知した変化点には、正常な ADR recycle による温度変化とそれ以外の温度変化が混在していた。全体のうち 1/4 は ADR recycle による温度変化や異常な変化時刻（検出対象とするもの）であった。しかし残りは、温度揺らぎやグリッチによる温度変化であった。更に、アルゴリズムとして、ChangeFinder のパラメータを手動で調節する、適切なローパスフィルタを施すパラメータの異なる処理を 2 段階でかけるなど、ヒューリスティックに最適値を見つけていく過程が必要であった。異常ノイズスペクトルの検出で用いた古典的な機械学習手法とは異なり、異常温度変化時刻検知では時系列解析手法を用いたが、これを実用化するためには、ChangeFinder 以外の、別の変化点検知アルゴリズムも検討する必要があると考えられる。

#### 謝 辞

立教大学 山田真也氏、宇宙科学研究所 金丸善朗氏、匿名査読者に原稿へのコメントを頂いた。本研究を進めるうえでお世話になった、宇宙科学研究所 海老沢研教授、横浜国立大学 中村正吾准教授、及び XRISM *Resolve* チームメンバーの皆様に謝意を表す。

#### References

- [1] 塚本 邦尊, 山田 典一, 大澤 文孝, 中山 浩太郎, 松尾 豊. 東京大学のデータサイエンティスト育成講座: Python で手を動かして学ぶデータ分析. マイナビ出版. 2019. p198
- [2] 乾 稔, 矢入 健久, 河原吉伸, 町田和雄. 次元削減の再構成誤差を用いた異常検知手法の比較, JSAI, Vol.JSAI2009, 2009. pp. 1B12 - p. 1B12

- [3] 島田 直希. 時系列解析: 自己回帰型モデル・状態空間モデル・異常検知, Timeseriesanalysis. 共立出版. 2019. p. 155- p. 157
- [4] KURIHARA Miki, TSUJIMOTO Masahiro, ECKART Megan, et.al. Ground test results of the electromagnetic interference in the x-ray microcalorimeter onboard XRISM. In Space Telescopes and Instrumentation 2022: Ultraviolet to Gamma Ray, SPIE, Vol. 12181, 2022, pp. 1445–1458.
- [5] IMAMURA Ryuta, TSUJIMOTO Masahiro, AWAKI Hisamitsu, et. al., In X-Ray, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy X, SPIE, Vol. 12191, 2022, pp. 763–770.
- [6] CHAWLA V.Nitesh, BOWYER W. Kevin, HALL O. Lawrence, PHILIP W. Kegelmeyer SMOTE: Synthetic minority oversampling technique. n Journal of Artificial Intelligence Research. Vol. 16, 2002, pp. 321–357.
- [7] SHIRRON J. Peter, KIMBALL O. Mark, JAMES L. Bryan, et.al., Space Telescopes and Instrumentation 2016: Ultraviolet to Gamma Ray, SPIE, Vol. 9905, 2016, p. 99053O.
- [8] 宇宙開発利用部会 X 線天文衛星「ひとみ」の異常事象に関する小委員会, X 線天文衛星 ASTRO-H 「ひとみ」異常事象調査報告書, 国立研究開発法人 宇宙航空開発研究機構, 2016, p. 22 - p. 49
- [9] KAWAHARA Yoshinobu et al. Change-Point Detection Algorithms based on Subspace Methods. Transactions of the Japanese Society for Artificial Intelligence. Vol.23 . p. 76 - p. 85
- [10] 井手 剛, 杉山 将, 異常検知と変化検知 = Anomaly detection and change detection, 講談社, 2015, p. 3
- [11] HASEBE Takashi, IMAMURA Ryuta, TSUJIMOTO Masahiro , et.al., Ground test results of the micro-vibration interference for the x-ray microcalorimeter onboard XRISM. spie. Vol. 1218. 2022. p. 1527 - p. 1539
- [12] BOISBERRANGER du J r mie, BOSSCHE Van den Joris, et.al., scikit-learn. 2007. <https://scikit-learn.org/stable/index.html> 2023.4.17 参照
- [13] 日本統計学会. 統計学実践ワークブック. 学術図書出版社. 2020. p. 210
- [14] TAKAHASHI Tadayuki, KOKUBUN Motohide , MITSUDA Kazuhisa, et. al. The ASTRO-H (hitomi) x-ray astronomy satellite. SPIE. Vol. 9905. 2016. p. 99050U
- [15] TASHIRO Makoto, MAEJIMA Hironori, TODA Kenichi, et al. Status of x-ray imaging and spectroscopy mission XRISM. SPIE. Vol 11444. 2020. p. 176
- [16] ISHISAKI Yoshitaka, KELLEY Richard L., AWAKI Hisamitsu et.al., Status of resolve instrument onboard x-ray imaging and spectroscopy mission XRISM. SPIE. Vol 12181. 2022-9. p. 12181
- [17] HASEBE Takashi ,IMAMURA Ryuta , TSUJIMOTO Masahiro et.al, Ground test results of the micro vibration interference for the x-ray microcalorimeter onboard XRISM. SPIE. Vol.12181. 2022-8 p. 1527 - p. 1539
- [18] TSUJIMOTO Masahiro. Development of the data monitor system of the Resolve instrument onboard the XRISM satellite. JSIJ. Vol.12. 2023-2. p.1 - p. 6
- [19] ISHISAKI Yoshitaka ,KELLEY Richard L.,AWAKI Hisamitsu et.al., Status of resolve instrument onboard x-ray imaging and spectroscopy mission XRISM. SPIE, Vol 12181. 2022-9. p. 409 - p. 430
- [20] KANAO Ken'ichi , YOSHIDA Seiji, MIYAOKA Mikio et.al, Cryogen free cooling of ASTRO-H SXS helium dewar from 300 K to 4 K. Cryogenics. Vol. 88. 2017-12. p. 143 - p. 146
- [21] FABIAN Pedregosa. GAEL Varoquaux et.al. Scikit-learn: Machine Learning in Python. Journal of Machine Learning Research. Vol.12 2011. p.2825 - p. 2830
- [22] LARS Buitinck, GILLES Louppe, MATHIEU Blondel et.al., API design for machine learning software: experiences from the scikit-learn project. arXiv preprint arXiv:1309.0238 2013 p. 108 - p. 122

# 半球面マルチタッチパネル機能付き背面投影型デジタル地球儀 の展示事例紹介と可搬化への取り組み

小山 幸伸<sup>\*1</sup>, 吉松 陽菜<sup>\*1</sup>

## Exhibition case study of the rear projection digital globe with hemispherical multi-touch panel function and portability efforts

KOYAMA Yukinobu<sup>\*1</sup>, YOSHIMATSU Hina<sup>\*1</sup>

### ABSTRACT

We previously reported that we had developed a hemispherical multi-touch panel function for the rear-projection digital globe at low cost using an infrared method. We concluded that it is necessary to accumulate examples of implementation in outreach sites and to receive feedback from them. Due to COVID-19, which has spread since 2019, opportunities for face-to-face outreach have drastically decreased. Even in the case of face-to-face outreach, it has difficult to exhibit multi-touch panel functions to avoid virus infection through contact. However, based on the accumulated feedback from exhibition cases, we have developed a portable rear-projection digital globe with multi-touch panel function, a content forwarding controller, and a large trackball.

**Keywords:** Hemispherical multi-touch pane, Exhibition, Portable digital globe

### 概 要

著者らは、背面投影型デジタル地球儀のための半球面マルチタッチパネル機能を赤外線方式で安価に開発した旨を過去に報告した。そして、アウトリーチ現場への導入事例の積み重ねと、それらから得られるフィードバックが必要であると結論した。2019年から蔓延した新型コロナウイルス感染症によって、対面でのアウトリーチの機会が激減した。そして対面によるアウトリーチの場合であっても、接触によるウイルス感染を避けるため、マルチタッチパネル機能の展示が困難であった。しかしながら、展示事例を積み重ね、得られたフィードバックを元に、可搬型マルチタッチパネル機能付き背面投影型デジタル地球儀、コンテンツ順送りコントローラー、大型トラックボールを開発した。

<sup>\*</sup> 2023年11月30日受付 (Received November 30, 2023)

<sup>\*1</sup> 近畿大学工業高等専門学校 総合システム工学科 (Department of Comprehensive Engineering, KINDAI University Technical College)



## 1. 背景および目的

市民が地球環境を身近に感じるための道具のひとつとして、デジタル地球儀が挙げられる。数あるデジタル地球儀の中でも、小中学校においても低予算で導入可能なデジタル地球儀として Dagik Earth<sup>1)</sup>が挙げられる。これを操作するためのコントローラーとして、マウスや家庭用ゲーム機のコントローラーなどの様々なコントローラーがこれまで試行されてきたが、半球面を触って直感的に操作できるコントローラーはなかった。この状況を踏まえて著者らのグループは、図 1 に示した背面投影型デジタル地球儀のための半球面マルチタッチパネルを、安価な赤外線方式で開発したことを報告した<sup>2)</sup>。この報告では、半球面マルチタッチパネル機能付きデジタル地球儀のアウトリーチ現場における展示事例を積み重ね、それらからフィードバックを得ることが必要である、と結んだ。これを踏まえた本論文では、半球面マルチタッチパネル機能付きデジタル地球儀のアウトリーチの事例を積み重ね、様々な意見を収集してフィードバックをかけることを目的とする。



図 1 タッチ操作中の背面投影型デジタル地球儀

## 2. タッチパネルの仕組みと原理

図 2 のとおり、アクリル半球の断面に赤外線を入射する。入射した赤外線はスネルの法則に従って、全反射しながら反対側の端に到達する。指が触れた箇所は全反射が崩れ、赤外線カメラに検出される。赤外線カメラの映像は図 3 の Community Core Vision (CCV) に入力され、座標と移動ベクトルが求められる。この座標と移動ベクトルは、TUIO ライブラリを用いたアプリケーションによって、マウス操作に紐づけられ、地球儀の回転操作となる<sup>2)</sup>。

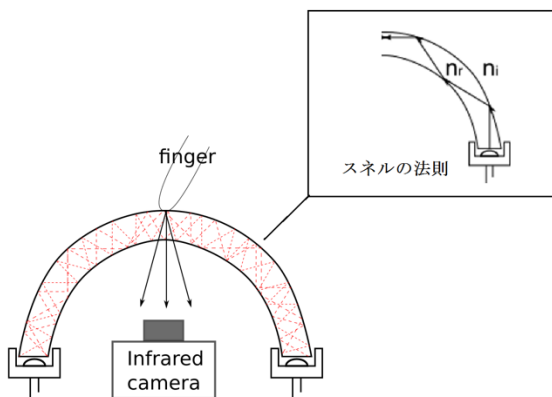


図 2 赤外線方式のタッチパネルの原理

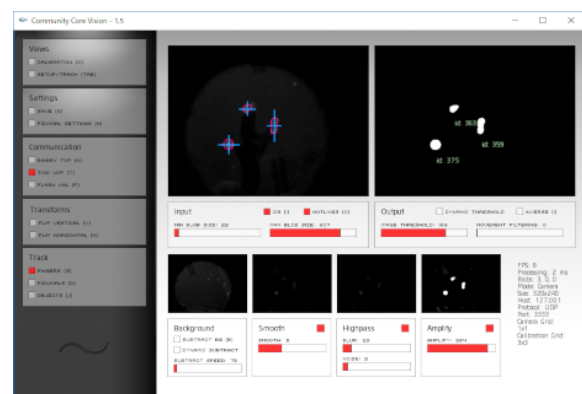


図 3 CCV によるマルチタッチ検出

### 3. 展示事例

#### 3.1. いけだエコミュージアムにおける事例

図 4 に示したように、大阪府池田市のいけだエコミュージアムにおいて、半球マルチタッチパネル機能付き背面投影型デジタル地球儀の展示が 2020 年 8 月から開始された。著者らのグループが開発したハードウェアに Dagik Earth プロジェクトが公開しているコンテンツを表示し、いけだエコスタッフが運用している。筐体の一部分はアルミの L アンクルにてリベット止めしたものの、その多くは 1x4 の SPF 材をコーススレッド止めして製作した。可搬性を考慮し、スナップ錠にて筐体の上下部が分離できるようになっている。展示開始時はコロナ禍の最中であったため、新型コロナウイルスに対して有効とされる界面活性剤を含んだ住宅・家具用洗剤とともに設置した。係員が常駐している環境であるため、都度タッチパネル表面の拭き取り対応が可能であった。



図 4 いけだエコミュージアムにおける展示

#### 3.2. 近畿大学工業高等専門学校図書館における事例

著者らが所属する近畿大学工業高等専門学校の図書館において、2021 年 6 月 29 日から 8 月 2 日にかけて、“図書館企画展示 電気電子コース・小山研とコラボ！「地球科学」”と題し、地球物理に関する図書、ポスター、さらには背面投影型デジタル地球儀を用いた図書館企画展示を図 5 のとおり開催した。新型コロナウイルスの蔓延のために、たびたび対面授業から遠隔授業に切り替わる様な状況であったため、タッチパネル機能の展示は断念した。時間の経過とともにコンテンツが切り替わり、地球を自転させることで地球を見せたものの一切の操作ができないため、我々のグループが開発しているユーザインタフェースに関する有益なフィードバックは得られなかった。



図 5 近大高専図書館における企画展示

#### 3.3. Maker Faire Kyoto における事例

2020 年 5 月 2 日から 3 日にデジタル地球儀を出展予定<sup>3)</sup>であったが、新型コロナウイルス感染症の蔓延のために Maker Faire Kyoto 2020 は中止となった。翌年の Maker Faire Kyoto 2021 はオンラインイベントであったので出展を見合わせた。さらには出展者募集の段階で新型コロナウイルス感染症の状況が落ち着いていなかった Maker Faire Kyoto 2022 は開催されなかった。そして 2023 年 4 月 29 日から 30 日に渡って開催された Maker Faire Kyoto 2023 に、著者らはデジタル地球儀を出展し、来場者からフィードバックを得

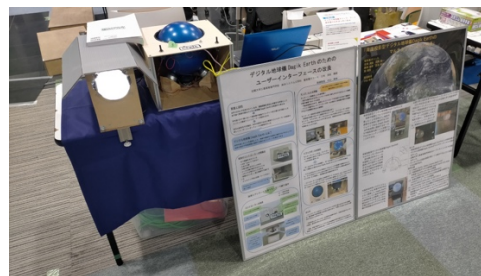


図 6 Maker Faire Kyoto 2023 におけるデジタル地球儀の展示。左の白く光っている半球がデジタル地球儀の半球スクリーンである。

た. 会場のけいはんなオープンイノベーションセンターにおいては, キャスターのついた台車等を用いた運搬が不可であったため, 図 5 の 400 φ の半球の背面投影型デジタル地球儀の運搬が困難であり, 図 6 に示した小さな 100 φ の半球の可搬型デジタル地球儀を急遽開発して展示することとなった. この詳細については, 4 節にて説明する.

### 3.4. 2023 年度第 1 回近大高専オープンキャンパスにおける事例

著者らが所属する近畿大学工業高等専門学校において, 2023 年 8 月 4 日から 5 日にかけて開催された 2023 年第 1 回近大高専オープンキャンパスにおいて, デジタル地球儀を出展した. 図 6 の Maker Faire Kyoto 2023 と同様の展示である. 2023 年 5 月 8 日に新型コロナウイルス感染症の感染症法上の取り扱いが 5 類感染症へ変更された以降ではじめての展示であり, 来場者数の制限, マスクの着用, アルコール消毒などの制約がない状態で展示を行い, 多くの来場者に利用して頂いた.

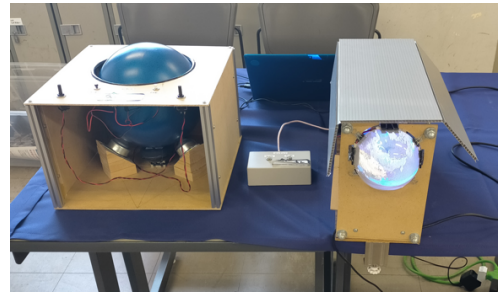


図 7 2023 年度第 1 回近大高専オープンキャンパスにおけるデジタル地球儀の展示

## 4. 可搬型半球面マルチタッチパネル機能付き背面投影型デジタル地球儀

3.3 節のとおり, 図 5 に示した 400 φ の半球スクリーンを持つ大きな半球面マルチタッチパネル機能付き背面投影型デジタル地球儀は搬入困難であった. これを踏まえて, 可搬性を向上させるべく, 半球面マルチタッチパネル機能付き背面投影型デジタル地球儀の小型化を試みた. 図 8 は 100 φ の半球の可搬型マルチタッチパネル機能付き背面投影型デジタル地球儀である. なお撮影のため, 側面を取り払っている. プロジェクターは, 231x61x173mm, 0.14kg, 50W, 5V3A, DLP 方式, 854x480pixel, 16:9 が表示可能で最大 100lm の HP 社の MP100 を使用した. ビジネスプロジェクタの多くが 3,000lm 程度であるのに対して, 100lm は決して明るくない. しかしながら, デジタル地球儀の筐体を小型化したため, 簡易的な日除け暗幕を設置することが容易になり, 明るくない光源を補うことが可能である.

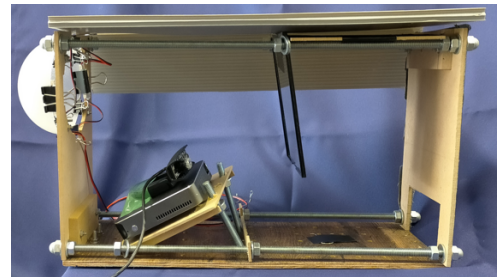


図 8 可搬型背面投影型マルチタッチパネル機能付きデジタル地球儀

赤外線方式のマルチタッチパネル機能<sup>2)</sup>は, 1. タッチしていない状態を赤外線カメラで撮影し, 2. その際に写っている赤外線の背景場をソフトウェアによって差し引き, 3. タッチ時の赤外線の差分を検出しマウス操作に紐づける. このため, タッチによる筐体のずれ, さらにはダブルクリップを介して筐体に固定されているアクリル半球のずれが累積すると, 再び赤外線の背景場を差し引く必要がある. 時々刻々と変化する赤外線の背景場を動的に差し引くようソフトウェア設定しているものの, 筐体やアクリル半球が大きく動いた際には調整は必要である. そしてこの問題は, 大きな筐体よりも小さな筐体の方が顕著になる. そこで, サンワサプライ製の TAP-F37CLAMP デスククランプをデジタル地球儀の筐体にねじ止めし, そのクランプによって机を挟んで固定する仕様とした.

これによって、マルチタッチパネル機能の調整頻度を下げることはできたものの、メンテナンスフリーの運用は未だ実現できていない。

以前は OptoSupply 社の 3φ の赤外線 LED の OSI5LA3131A を赤外線方式のタッチパネルの光源として使用していたが<sup>2)</sup>、デジタル地球儀の筐体の小型化に伴い、光源の小型化が必要となった。そこで、赤外線のピーク波長が 940nm、半値角 120°、順方向電流 100mA の際の放射強度が 20mW/Sr である OptoSupply 社の 3.5×2.8×1.9mm の表面実装型赤外線 LED の OSI5LAS1C1A<sup>4)</sup>を用いて、図 9 の表面実装赤外線モジュール

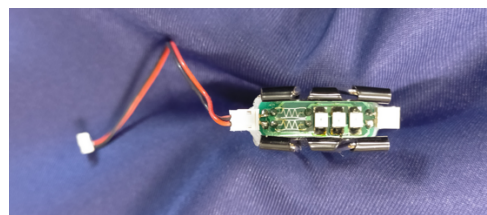


図 9 表面実装赤外線 LED モジュール

を作成した。赤外線 LED の集積度を高めて光を強くしたことによって、タッチ検出は容易になった。

## 5. コンテンツ順送りコントローラーの開発

PC のキーボードやマウスを用いてデジタル地球儀を操作することは可能である。しかしながら、不特定多数の利用者を対象とする展示利用の場合は、制約なしのこれらの操作は問題であることが、展示事例を通じて分かった。そこでデジタル地球儀用外部コントローラーとして、図 10 のコンテンツ順送りコントローラーを開発した。タカチ電機工業の SW-120S 汎用型プラスチックケースに、5.8φ のマル信無線電機の MS-313-7 モーメンタリープッシュスイッチを取り付け、さらにはヒューマン・インタフェース・デバイス (HID: Human Interface Device) 機能を有する Arduino Pro Micro マイコンボードを組み込んだ。このコンテンツ順送りコントローラーは、福島市立ふくしま支援学校および釧路市こども遊学館に利用されている。



図 10 コンテンツ順送りコントローラー

このコントローラーは、PC 上のブラウザの複数タブに、Web 版の Dagik Earth の複数コンテンツがあらかじめ用意されていることを前提とする。マイクロコントローラーに書き込まれたプログラムが「すすむ」ボタン入力を検出した際に、USB 接続された PC に Ctrl+Tab キーが入力されたという信号を送信する。そして PC 上のブラウザでは、次のタブに設定されたコンテンツに切り替わる仕組みである。同様にして、「もどる」ボタンが押された場合は、Ctrl+Shift+Tab キーが入力されたという信号を PC に送信し、PC 上のブラウザでは、前のタブに設定されたコンテンツに切り替わる。

## 6. 大型トラックボールの開発

上述のとおり、赤外線方式のマルチタッチパネルは未だメンテナンスフリーではなく、時折、人による調整を必要とする。これによって利用者を待たせないようにするために、補助的なユーザインタフェースを用意して併用する必要があると判断した。そこで地球を直感的に回している感覚を損なわないユーザインタフェースとして、図 11 の大型トラックボールを開発した。200φ の縁なしアクリル半球を二つ接合し、市販の安価な光学式マウスをひっくり返すことにより、トラックボールの回転を検出した。これに加え

て、前述のコンテンツ順送りコントローラーも組み込んだ。オープンキャンパス等の展示イベントで何回か使用しているが、いずれも安定して動作した。

## 7. まとめ

本論文では、半球面マルチタッチパネル機能付き背面投影型デジタル地球儀の展示事例について報告した。コロナ禍のために対面でのアウトリーチの機会が激減し、また接触によるウイルス感染が懸念されてマルチタッチパネル機能の展示が困難であった。しかしながら、得られたフィードバックを元に、可搬型半球面マルチタッチパネル機能付き背面型デジタル地球儀、コンテンツ順送りコントローラー、さらには大型トラックボールを開発した。2023年5月8日に新型コロナウイルス感染症の感染症法上の取り扱いが5類感染症へ変更されたため、再び開発および展示によるフィードバックを加速し、タッチパネル機能がメンテナンスフリーで運用できるようになることを目指す。

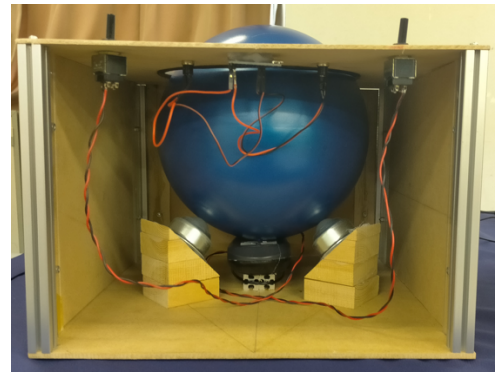


図 11 大型トラックボール

## 謝 辞

Maker Faire Kyoto 2023 において、デジタル地球儀の展示、説明、操作感のヒアリングをおこなってくれた、近畿大学工業高等専門学校の富永拓杜氏、飛鳥博希氏、有本和真氏、および山下順正氏に著者一同は感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 齊藤 昭則, 津川 卓也, 市川 浩樹, 島田 卓也, 多様な環境においてデジタル立体地球儀を実現するためのダジック・アースの開発, 宇宙科学情報解析論文誌, 第 6 号, 2017, doi:10.20637/JAXA-RR-16-007/0012.
- 2) 小山 幸伸, 廣田 尚樹, 増田 花乃, Pipatpol TANAVONGCHINDA, 佐藤 弘, 背面投影型デジタル地球儀 Dagik Earth のための半球面マルチタッチパネルの開発, 宇宙科学情報解析論文誌, 第 8 号, 2018, doi:10.20637/JAXA-RR-18-008/0003.
- 3) Maker Faire Kyoto 2020 出展者情報(近大高専こやま研), <https://makezine.jp/event/makers-mfk2020/m0006/>, 参照日: 2023 年 11 月 1 日.
- 4) Infrared SMD LED OSI5LAS1C1A, <https://akizukidenshi.com/download/ds/optosupply/OSI5LAS1C1A.pdf>, 参照日: 2023 年 8 月 4 日.

# Preliminary Study on Literature-Based Classification of Space Missions

TSUNODA Takehiro<sup>\*1</sup>, DEMURA Hirohide<sup>\*1</sup>, HASHIMOTO Yasuhiro<sup>\*1</sup>, OKUDAIRA Kyoko<sup>\*1</sup>

## ABSTRACT

This research explores methods to enhance the long-term value of space missions and projects, particularly beyond their operational phases. Grounded in a review of existing literature, the study introduces a novel approach to the missions by analyzing their publication histories, with a specific emphasis on the temporal pattern of publications. This vectorization process is designed to quantify the influence and progression of space missions over time. While the current research focuses on this temporal aspect, future work aims to incorporate a graph-based citation network structure. This more complex model will examine the detailed interconnections among publications through their citation links, potentially revealing deeper insights into the development and impact of space missions. The present study, therefore, serves as a preliminary exploration, setting the stage for further advanced analyses that will investigate the complex network of citations to understand the broader impact and evolution of space missions.

**Keywords:** Space Missions, Data Science, Project Management, Digital Object Identifier

## 1. Introduction

The advancement of large-scale space development projects, such as NASA's Apollo Program [1], underscores the critical need for effective project management. Recognized frameworks like the Project Management Body of Knowledge (PMBOK) [2] have been developed to guide project initiation, management, and completion. This research extends these discussions by focusing on strategies for enhancing the long-term value of space projects, even after their operational phases have ended.

To measure a project's value, we propose a “ripple effect” metric, measured by both the number and interconnectedness of academic papers generated from the inception of a project to the present. This study represents a preliminary step for future work, which aims to identify and recommend [3,4,5] untapped areas in space missions by clustering missions using a graph-

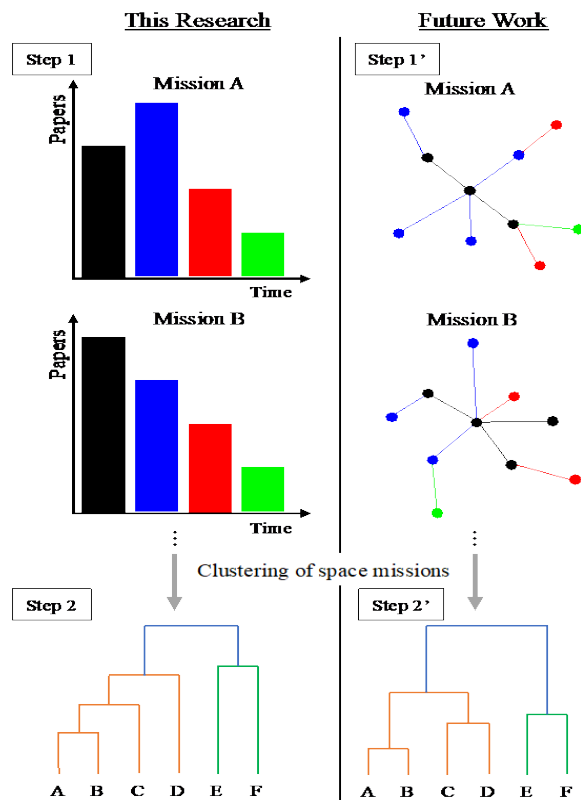


Fig. 1. Clustering analysis of space missions

<sup>\*</sup> 2023 年 11 月 30 日 受付 (Received November 30, 2023)

<sup>\*1</sup> 会津大学 (The University of Aizu)

based citation network structure.

Figure 1 delineates the progression from the current study (on the left) to the anticipated future work (on the right), illustrating our methodological evolution in classifying space missions to pinpoint unexplored opportunities within the field. The present research lays the groundwork by clustering missions based on the temporal sequence of their scholarly output. The initial step, Step 1, presents a bar graph for each mission, where the bars' height represents the quantity of published papers over time, segmented into phases from the mission's start to the current period, each distinguished by a unique color—black, blue, red, and green—indicating distinct operational phases. The subsequent step, Step 2, involves hierarchical clustering to identify groups of similar missions based on their publication patterns. Future work intends to augment this approach by analyzing space missions through the lens of their citation networks. This expanded analysis will visualize the connections between publications, denoted by color-coded periods akin to the first graph, Step 1'. This addition will allow for the incorporation of citation counts and nuanced paper characteristics into the clustering process, thereby offering a more detailed comparison between different missions' influences.

This research has two primary goals: First, to define a characterization vector for space missions based on existing literature; and second, to classify space missions for future identification.

Table 1. Mission names and associated research fields

Mission Name	Field in Space Science
Akari <sup>[9]</sup>	Infrared astronomy
Akatsuki <sup>[10]</sup>	Planetary atmosphere
HALCA <sup>[11]</sup>	Radio wave astronomy
Hayabusa <sup>[12]</sup>	Primitive asteroid sample return
Hiten <sup>[13]</sup>	Orbit engineering
Kaguya <sup>[14]</sup>	Lunar science, interplanetary science
Sakigake / Suisei <sup>[15]</sup>	Cometary science, interplanetary science
Suzaku <sup>[16]</sup>	X-ray astronomy
Tanpopo <sup>[17]</sup>	Astrobiology
Yohkoh <sup>[18]</sup>	Solar science

## 2. Method

### 2.1. Data Source

This study focuses on selected space missions listed in Table 1, chosen for their representative roles in Japanese space science. These missions span a range of research fields, including infrared astronomy, planetary atmosphere, radio wave astronomy, primitive asteroid sample return, orbit engineering, lunar science and interplanetary science, cometary science and interplanetary science, X-ray astronomy, astrobiology, and solar science.

We have compiled a literature dataset presented in Table 2, sourced from the Astrophysics Data System (ADS) <sup>[6]</sup>, IEEE Xplore® <sup>[7]</sup>, and ScienceDirect® <sup>[8]</sup>. Papers were extracted from these databases by including mission names in the title or the abstract. This selection method indirectly considers the citation counts of initial

Table 2. Space Mission Dataset

DOI	Title	Year	Journal Name	Field
10.1016/j.icarus.2022.115370	Sample studies and SELENE (Kaguya) ...	2023	<i>Icarus</i>	S
10.1109/JDT.2010.2052452	Conversion Method From Moving Pictures ...	2010	<i>Journal of Display Technology</i>	E
10.1038/nature08317	The global distribution of pure anorthosite ...	2009	<i>Nature</i>	H

result papers, thus facilitating the identification of papers related to space missions. The dataset comprises five key attributes: DOI and Title are used for identifying individual papers; Publication Year measures the timing of each publication; and Journal Name and Journal Field are employed for classifying the papers; The Journal Field is categorized into two primary fields and one cross-field based on Journal Name. Two primary fields are ‘Engineering,’ which predominantly publishes papers related to engineering, and ‘Scientific,’ which focuses on papers from various scientific disciplines. However, this classification encounters difficulty when categorizing journals that publish papers in both engineering and scientific fields, such as ‘Nature’ and ‘Science.’ To address this issue, we introduce the ‘High Impact Factor’ class, as these journals typically exhibit higher impact factors compared to other journals. These categories are combined with Journal Names to address the issue of sparse data distribution.

## 2.2. Visualizing Space Mission Features

This research categorizes each mission into distinct phases. Phase 0 extends from the start of the mission to the satellite launch. Phase 1 spans from the satellite launch to the timing of initial reports plus an additional two years. Phase 2 starts from this point and lasts for the same duration as Phase 1. Subsequent phases are defined in the same manner.

These phases, along with three categories—*High Impact Factor*, *Engineering*, and *Scientific*—are visualized in bar plots, as exemplified by the HALCA mission shown in Fig. 2. The horizontal axis represents the summation of all phases as well as individual phases. The vertical axis displays the ratio of papers published in all phases and the percentage of the total number of papers in each phase. Dotted lines indicate the end of operations, while solid lines represent the current time. Bars are colored green, red, and blue to indicate *High*

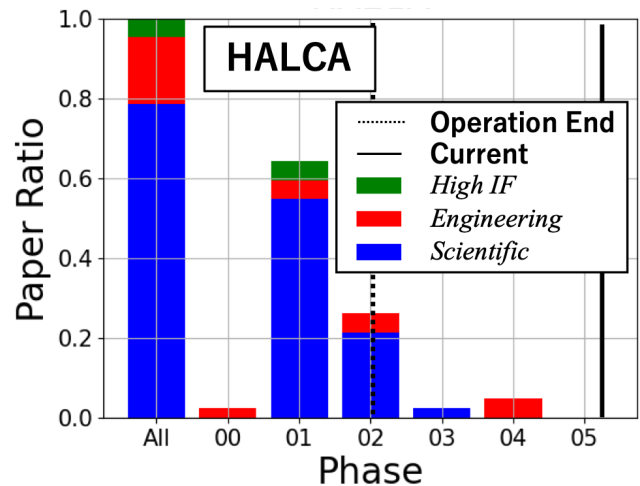


Fig. 2. Visualization of HALCA

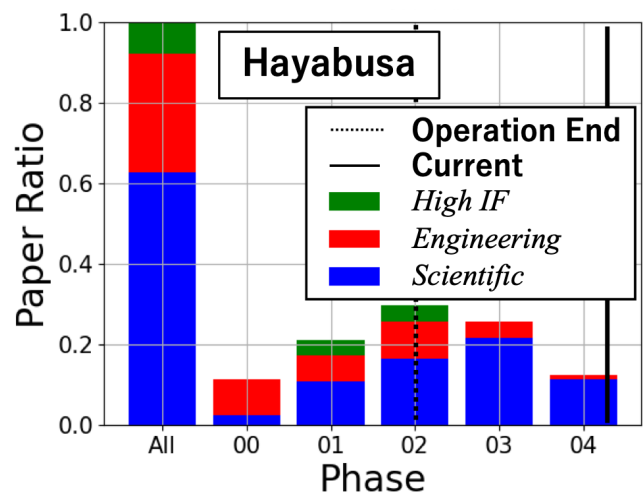


Fig. 3. Visualization of Hayabusa

*Impact Factor*, *Engineering*, and *Scientific* categories, respectively.

## 2.3. Definition of Space Mission Vector

In this section, we introduce a methodology to represent space missions as vectors based on their scholarly output, which serves as an initial phase towards adopting a graph-based citation network for more complex clustering analyses in the future.

Our method categorizes space missions based on the timing of their research outputs. The first category includes missions that have the bulk of their publications between the launch (Phase 0) and up to Phase 2, indicative of early output. The second category consists of missions that continue to generate significant



Table 3. Space Mission Vector

Mission Name	$n \geq 2$	$\sum_{i=0}^{l-2} P(2+i) \geq 0.5$	$\sum_{i=0}^1 P(l-i) \geq 0.1$	All_H	All_E	All_S	...	P03_H	P03_E	P03_S
Akari	1	1	1	0.0742	0.00606	0.92	...	0.0106	0.00152	0.185
Akatsuki	1	1	1	0.161	0.119	0.72	...	0.0424	0.0593	0.195
HALCA	0	0	0	0.167	0.0476	0.786	...	0	0	0.0238
Hayabusa	1	1	1	0.296	0.0788	0.626	...	0.0394	0	0.217
Hiten	1	1	1	0.625	0	0.375	...	0.0312	0	0.0625
Kaguya	0	1	1	0.248	0.0254	0.727	...	0.0212	0.00212	0.127
Sakigake/ Suisei	0	1	0	0.0769	0.135	0.788	...	0	0	0.0192
Suzaku	1	1	1	0.0336	0.00468	0.962	...	0.00781	0.000781	0.23
Tanpopo	0	0	1	0.217	0	0.783	...	0	0	0
Yohkoh	1	1	0	0.0249	0.00277	0.972	...	0.00461	0	0.291

research outputs well into Phase 3 and beyond, suggesting a late surge in scholarly interest. For our analysis, we consider the 'active lifetime' of a mission to typically conclude around Phase 2, the point by which primary objectives are often achieved, while also acknowledging that publications can continue to accrue long after.

The 'space mission vector' contains 18 elements that quantitatively capture various aspects of a mission's publication record. The initial three elements assess the temporal distribution of publications, represented as binary (0 or 1) values based on observed patterns:

- **Full bloom** ( $n \geq 2$ ): This indicates whether the mission's peak publishing activity occurs no earlier than phase 2. It is set to 1 if the peak is in phase 2 or beyond.
- **Long bloom** ( $\sum_{i=0}^{l-2} P(2+i) \geq 0.5$ ): This checks whether over half of the mission's publications are released from phase 2 onwards. A 1 is assigned if this criterion is met.
- **Late bloom** ( $\sum_{i=0}^1 P(l-i) \geq 0.1$ ): This determines if the final phases account for more than 10% of the total publications. A 1 is assigned for a significant late-stage output.

Here, ' $n$ ' denotes the phase with the highest publication count (peak phase), ' $l$ ' the latest phase, and ' $P(i)$ ' the number of publications in phase ' $i$ '.

The remaining 15 elements of the vector provide a phase-by-phase ratio of publication types, capturing the impact and focus of the research output across High Impact Factor, Engineering, and Scientific categories:

- **All\_H / All\_E / All\_S**: These elements reflect the overall ratio of High Impact Factor, Engineering, and Scientific publications across all phases.
- **P00\_H / P00\_E / P00\_S to P03\_H / P03\_E / P03\_S**: Each set of these elements corresponds to the ratios within specific phases, from the launch (phase 0) up to phase 3.

This detailed vectorization allows for the comparison and assessment of missions with varied durations and research outputs, such as Sakigake/Suisei's extensive 14-phase timeline versus Tanpopo's shorter 2-phase lifecycle.

### 3. Results

#### 3.1. Identification of Space Mission Types

This study identifies two primary types of space missions based on the distribution of academic papers

published at different phases of the mission lifecycle. These are:

**Short-Run Type (SR):** Missions like HALCA show a high paper output ratio during Phase 0 and Phase 1 (see Fig. 2).

**Long-Run Type (LR):** Missions like Hayabusa exhibit a high paper output ratio from Phase 2 onward (see Fig. 3).

### 3.2. Hierarchical Clustering Results

Figures 4 and 5 display the outcomes of a hierarchical clustering analysis. We applied the Ward method and Euclidean distance metrics to analyze space mission vectors, which encompassed data on the bar graph's shape and publication ratios for each phase. The clustering analysis successfully separates LR missions from SR missions at a distance of 1.7.

## 4. Discussion

This study discovered two types of space missions: SR and LR types. These categories are based on the timing of academic publications related to the missions. SR missions are those that generate most of their papers before the initial report is published, while LR missions do so afterward.

We use these classifications to categorize missions into three distinct patterns: Full Bloom, Long Bloom, and Late Bloom, as shown in Table 3's initial three elements. A mission with more zeros in its vector indicates an SR tendency, while more ones suggest an LR tendency. The subsequent 15 elements depict the ratio of papers published during all phases, along with a percentage breakdown from Phase 0 to Phase 3.

Figure 4 and 5 indicate future work focused on identifying and recommending untapped areas within the realm of space missions. For example, in Figure 4, Akari, Suzaku, and Yohkoh are classified as LR type

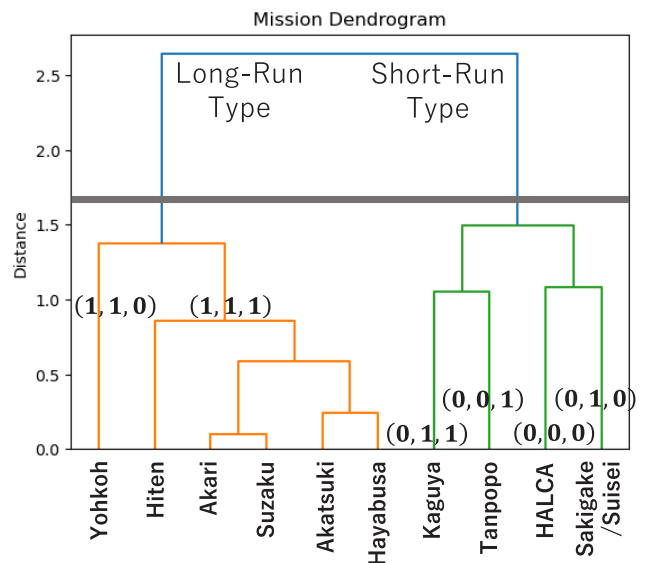


Fig. 4. Hierarchical Clustering of Space Mission Vector with a distance of 1.7. However, within each cluster, both Akari and Suzaku have a cluster distance of 0.2, indicating their higher similarity compared to Yohkoh within the same cluster. This research introduces a method of target comparison through hierarchical clustering. In our future work, we will define graph-based citation network structures and employ hierarchical clustering to achieve more detailed mission classification.

## 5. Conclusion

In conclusion, this study has successfully met its two primary objectives. First, based on existing literature, we have defined a characterization vector for space missions. This vector serves as a multidimensional representation that encapsulates the diverse impacts of various missions, offering valuable insights into their strengths and weaknesses.

Second, we have applied this characterization vector to classify space missions. Our classification framework employs Short and Long-Run categories to account for the timing and volume of academic publications generated by these missions. This has revealed the process of evaluating space missions through vectorization. It has also enabled us to lay the

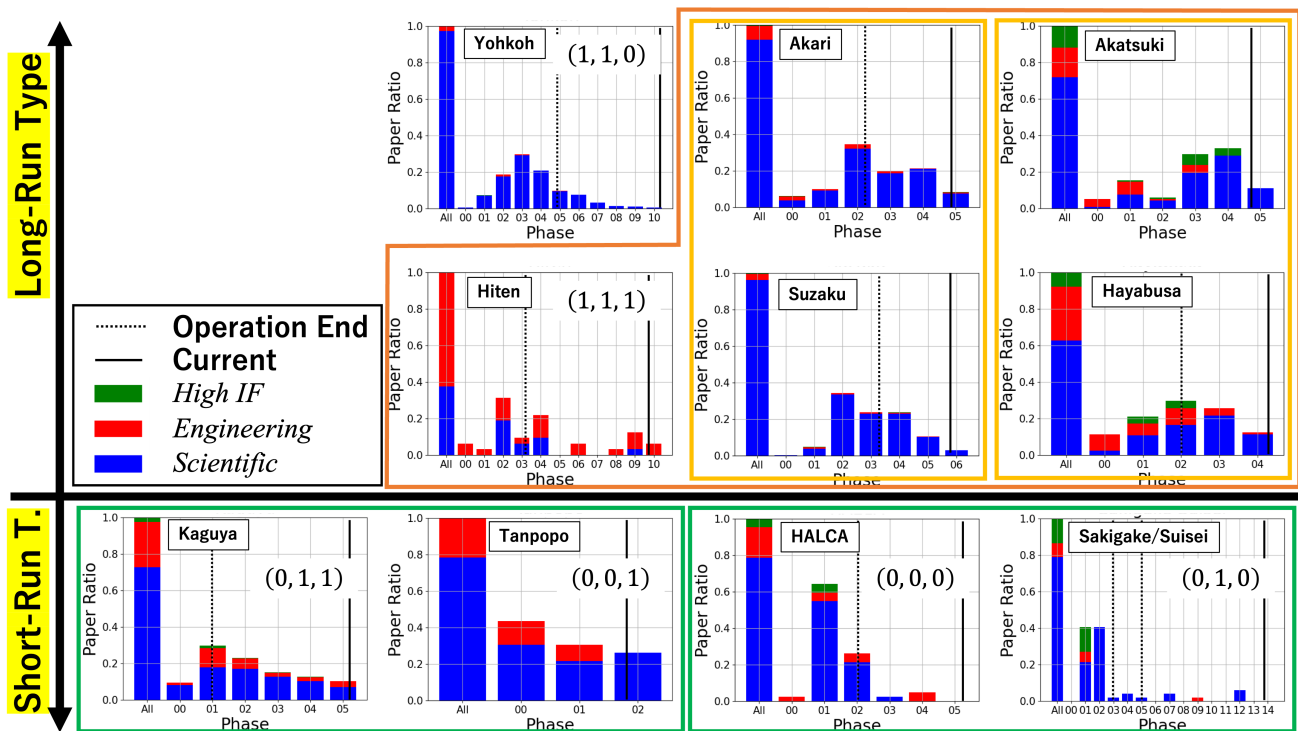


Fig. 5. Result of hierarchical clustering

foundation for evaluating space missions using citation network structures in future research.

This study represents a step toward understanding how to measure and enhance the long-term value of space missions. It also provides a foundation for developing recommendation systems that have the potential to inform decision-making in space research and development.

However, it's worth noting that this research has some limitations, including the need for a more extensive dataset for validation and the challenges associated with categorizing highly interdisciplinary or evolving missions.

Future research will build on the insights gained in this study by integrating a graph-based clustering approach to analyze citation networks, aiming to uncover patterns and insights within space mission literature. Advanced machine learning techniques will play a pivotal role in the classification and analysis of missions, taking into account a multitude of variables such as budgetary allocations, technical complexities,

and broader societal impacts. This multi-faceted approach is expected to yield a robust framework for assessing and understanding the full spectrum of influences on development of space missions.

## ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank Prof. Hirata, N., Prof. Honda, C., and Prof. Ohtake, M. for their fruitful discussions. All contributions were made in affiliation with The University of Aizu.

## REFERENCES

- [1] “Apollo”, [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/apollo/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/apollo/index.html) (Feb. 17th, 2023 retrieved)
- [2] PMBOK 7th edition (2021)
- [3] D. Jannach, *et al.*, “Recommender Systems: An Introduction” Cambridge University Press (2010)
- [4] Deepak K. Agarwal and Bee-Chung Chen, “Statistical Methods for Recommender Systems” Cambridge University Press (2016)
- [5] M. Schrage, “RECOMMENDATION ENGINES” The MIT Press, (2020)

- [6] “astrophysics data system”, <https://ui.adsabs.harvard.edu/> (Feb. 17th, 2023 retrieved)
- [7] “IEEE Xplore®”, <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp> (Feb. 17th, 2023 retrieved)
- [8] “ScienceDirect®”, <http://www.sciencedirect.com/> (Feb. 17th, 2023 retrieved)
- [9] D. Ishihara, *et al.*, “AKARI Infrared Imaging of Reflection Nebulae IC4954 and IC4955” Publications of the Astronomical Society of Japan, vol. 59, issue sp2 (2007), pp. S443-S454, doi: 10.1093/pasj/59.sp2.S443
- [10] M. Nakamura, *et al.*, “Overview of Venus orbiter, Akatsuki” Earth, Planets and Space, vol. 63 (2011), pp. 443-457, doi: 10.5047/eps.2011.02.009
- [11] H. Hirabayashi, *et al.*, “Overview and Initial Results of the Very Long Baseline Interferometry Space Observatory Programme” Science, vol. 281, issue 5384 (1998), pp. 1825-1829, doi: 10.1126/science.281.5384.1825
- [12] A. Fujiwara, *et al.*, “The Rubble-Pile Asteroid Itokawa as Observed by Hayabusa” Science, vol. 312, issue 5778 (2006), pp. 1330-1334, doi: 10.1126/science.1125841
- [13] K. Uesugi, *et al.*, “Japanese first double lunar swingby mission “Hiten”” Institute of Space and Astronautical Science, vol. 25, issue 7 (1991), pp. 347-355, doi: 10.1016/0094-5765(91)90014-V
- [14] J. Haruyama, *et al.*, “Lack of Exposed Ice Inside Lunar South Pole Shackleton Crater” Science, vol. 322, issue 5903 (2008), pp. 938-939, doi: 10.1126/science.1164020
- [15] K. Hirao and T. Itoh, “Project overview and highlights of Suisei and Sakigake” Advances in Space Research, vol. 5, issue 12 (1985), pp. 55-64, doi: 10.1016/0273-1177(85)90067-5
- [16] K. Mitsuda, *et al.*, “The X-Ray Observatory Suzaku” Publications of the Astronomical Society of Japan, vol. 59, issue sp1 (2007), pp. S1-S7, doi: 10.1093/pasj/59.sp1.S1
- [17] A. Yamagishi, *et al.*, “Environmental Data and Survival Data of *Deinococcus aetherius* from the Exposure Facility of the Japan Experimental Module of the International Space Station Obtained by the Tanpopo Mission” Astrobiology, vol. 18, issue 11 (2018), pp. 1369-1374, doi: 10.1089/ast.2017.1751
- [18] Y. Ogawara *et al.*, “The Status of YOHKOH in Orbit: an Introduction to the Initial Scientific Results” Publications of the Astronomical Society of Japan, vol. 44, no. 5 (1992), pp. L41-L44

## 磁気インピーダンスセンサを用いた廉価な磁力計の開発: 関東-東北-北海道への稠密磁場観測ネットワークの展開

前田 大輝<sup>\*1</sup>, 能勢 正仁<sup>\*1,2</sup>, 野村 太志<sup>\*1</sup>, 足立 匠<sup>\*1</sup>, 山本 優佳<sup>\*1</sup>, 熊本 篤志<sup>\*3</sup>,  
石田 祐宣<sup>\*4</sup>, 市原 寛<sup>\*5</sup>, 河野 剛健<sup>\*6</sup>, 岩永 吉広<sup>\*6</sup>, 立松 峻一<sup>\*6</sup>, 浅利 晴紀<sup>\*7</sup>,  
平原 秀行<sup>\*7</sup>, 海東 恵美<sup>\*7</sup>, 長町 信吾<sup>\*7</sup>, 渡邊 修一<sup>\*8</sup>, 山内 大輔<sup>\*1</sup>

### Development of low-cost magnetometer using magneto-impedance sensors: Deployment of dense observation network to Kanto-Tohoku-Hokkaido regions

MAEDA Taiki<sup>\*1</sup>, NOSE Masahito<sup>\*1,2</sup>, NOMURA Hiroshi<sup>\*1</sup>, ADACHI Takumi<sup>\*1</sup>, YAMAMOTO Yuka<sup>\*1</sup>,  
KUMAMOTO Atsushi<sup>\*3</sup>, ISHIDA Sachinobu<sup>\*4</sup>, ICHIHARA Hiroshi<sup>\*5</sup>, KAWANO Takeshi<sup>\*6</sup>,  
IWANAGA Yoshihiro<sup>\*6</sup>, TATEMATSU Shunichi<sup>\*6</sup>, ASARI Seiki<sup>\*7</sup>, HIRAHARA Hideyuki<sup>\*7</sup>,  
KAITO Megumi<sup>\*7</sup>, NAGAMACHI Shingo<sup>\*7</sup>, WATANABE Shuichi<sup>\*8</sup>, YAMAUCHI Daisuke<sup>\*1</sup>

#### ABSTRACT

In the field of Earth-space science, fluxgate magnetometers have been used to observe variations of the Earth's magnetic field. Fluxgate magnetometers generally cost several million yen or more, making it difficult to deploy an observation network that consists of many observation sites with a limited research budget. On the other hand, magneto-impedance (MI) sensors were invented at Nagoya University in 1993 [Mohri, 1994; Panina and Mohri, 1994]. Nosé et al. [2022] improved MI sensors for scientific applications and showed that they can be used for geomagnetic field measurements. In this study, we developed an inexpensive 3-axis magnetometer (Magneto-Impedance Magnetometer using Raspberry Pi, MIM-Pi) with a price of approximately 1/5 to 1/10 of fluxgate magnetometers, using MI sensors and a one-board PC (Raspberry Pi), and tried to construct a dense observation network in Kanto-Tohoku-Hokkaido regions.

**Keywords:** Magneto-impedance sensor, Low-cost magnetometer, Dense observation network, Geomagnetic pulsation

\* 2023 年 11 月 30 日受付 (Received November 30, 2023)

<sup>\*1</sup> 名古屋大学 宇宙地球環境研究所 (Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University)

<sup>\*2</sup> 名古屋市立大学 データサイエンス学部 (School of Data Science, Nagoya City University)

<sup>\*3</sup> 東北大学大学院 理学研究科 (Graduate School of Science, Tohoku University)

<sup>\*4</sup> 弘前大学大学院 理工学研究科 (Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University)

<sup>\*5</sup> 名古屋大学大学院 環境学研究科 附属地震火山研究センター  
(Earthquake and Volcano Research Center, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

<sup>\*6</sup> 愛知製鋼株式会社 (Aichi Steel Corporation)

<sup>\*7</sup> 気象庁 柿岡地磁気観測所 (Kakioka Magnetic Observatory, Japan Meteorological Agency)

<sup>\*8</sup> 日本海洋科学振興財団むつ海洋研究所 (Mutsu Marine Laboratory, Japan Marine Science Foundation)

## 概 要

宇宙地球科学分野では、地球磁場の微小な変動を観測するためにフラックスゲート磁力計(Fluxgate Magnetometer, FGM)と呼ばれる磁力計が用いられてきた。一般的に FGM は数百万円以上で販売されており、高価であるため、限られた研究費で多くの観測点からなるネットワーク観測を展開するのは難しい。一方、磁気インピーダンス(Magneto-impedance, MI)センサは 1993 年に名古屋大学で発見された磁気インピーダンス効果を利用した磁気センサである[Mohri, 1994; Panina and Mohri, 1994]。Nosé et al. [2022] では、科学利用を目的に MI センサを改良し、自然磁場計測に転用できることが示された。本研究では、MI センサとワンボード PC(Raspberry Pi)を用いて、FGM の 5 分の 1 から 10 分の 1 程度の廉価な 3 軸磁力計(Magneto-Impedance Magnetometer using Raspberry Pi, MIM-Pi)を開発し、稠密な磁場観測ネットワークの構築を試みた。

### 1. はじめに

MI センサは磁気インピーダンス効果を利用したセンサである。Mohri [1994]と Panina and Mohri [1994] は、アモルファスワイヤのインピーダンスが外部磁場の大きさに敏感に反応することを発見した。この時のインピーダンス $Z$ は以下の式によって表される[Mohri et al., 2015]。

$$Z = \frac{ka}{2} R_{DC} \cdot \frac{J_0(ka)}{J_1(ka)}$$

$$k = \frac{1+j}{\delta}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu(H_{ext})}}$$

ただし、 $R_{DC}$ ,  $a$ ,  $\rho$ はそれぞれワイヤの DC 抵抗、半径、抵抗率である。また、 $\delta$ は表皮深さ、 $\omega$ は印加電流の角周波数、 $\mu$ は外部磁場 $H_{ext}$ に依存する周方向の最大微分透磁率であり、 $J_0$ と $J_1$ は第一種の Bessel 関数、 $j$ は虚数単位である。電流の周波数が十分に高い場合、表皮効果が現れ、電流はアモルファスワイヤの表面付近を流れる。その際、 $\delta \ll a$ であるなら、インピーダンス $Z$ は以下の式で表される。

$$Z = \frac{a}{2\sqrt{2\rho}} R_{DC} (1+j) \sqrt{\omega\mu(H_{ext})}$$

この式からわかるように、 $Z$ の変化を検知することで、外部磁場の強さを確認することができる。実際の MI センサにおいては、アモルファスワイヤにピックアップコイルを巻き、パルス電流を流した際に生じる誘起電圧を検知することで外部磁場の向きと大きさを検出するように作られている。

MI センサはスマートフォンの電子コンパスや食品工場における金属などの異物検知、投げたボールの回転速度の計測、車の自動運転など一般社会において広く活用されている。Nosé et al. [2022]は一般利用されている MI センサに着目し、愛知製鋼株式会社との共同で MI センサを科学利用できるように改良した。また、野村 [2021]では、MI センサを用いた廉価な磁力計のプロトタイプを作成し、多数のテスト計測を行った。この研究では、このプロトタイプをさらに実地展開するために改良することを目標とし、稠密磁場観測ネットワークの構築を開始した。

## 2. 開発機器

Magneto-Impedance Magnetometer using Raspberry Pi (MIM-Pi)はMI センサを3つ用いており、以下のブロック図に示すような構成である。3軸分のMI センサと温度センサをまとめてセンサ部、電圧変換用の回路基板とADコンバータ、Raspberry Piをまとめて制御部とする。センサ部と制御部は100 mのケーブルで接続している。MI センサは、 $\pm 80000$  nTの範囲の磁力を $\pm 15$  Vの電圧に変換して出力する。一方で、今回用いたADコンバータは0-5 Vの電圧を入力に受け付け、デジタルデータに変換する。そのため、 $\pm 15$  Vから0-5 Vに電圧変換(降圧)する回路が必要になる。また、センサを駆動するための電圧は $\pm 15$  Vであるため、外部電源に接続したACアダプターが出力する9 V電圧を変換(昇圧)する回路が必要になる。この電圧変換回路が図1中の基板に実装されている。図2はその回路図である。レギュレータは、温度センサおよび減衰器の電源入力に必要な5 Vを9 V電源から安定して供給するために用いた。Raspberry PiはADコンバータによりデジタル変換されたデータを読み込み、その都度タイムスタンプと共にファイルに書き込んでいる。サンプリングレートは約33 Hzであり、データ解析時には1秒ごとに移動平均をとることで、ノイズの低減を図った。

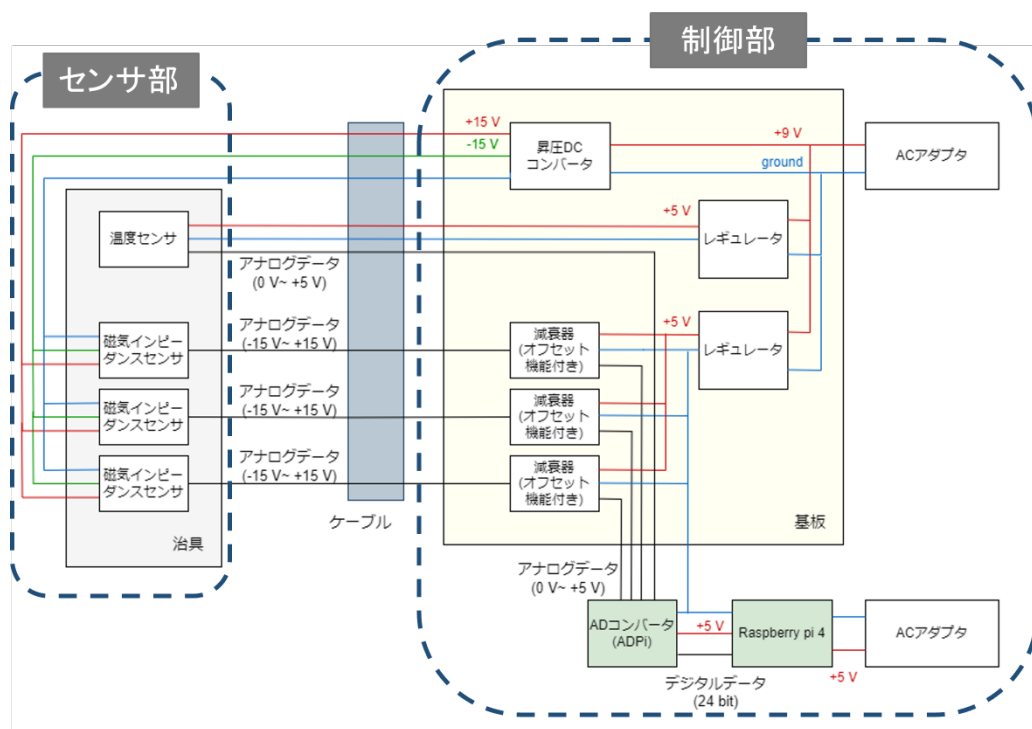


図1 MIM-Piのブロック図

図3はMIM-Pi センサ部および制御部の外観と内部の写真である。センサ部は、3つのセンサがそれぞれ90度をなすように治具に取り付けられており、防水かつ低重心の筐体に治具ごと入っている。筐体の下部はアルミ製、上部はポリ塩化ビニル製であり、非磁性である。ねじなども真鍮製を採用しており、非磁性を保證している。制御部はアルミケースの中に電圧変換回路やレギュレータが搭載された基板、Raspberry Pi等を固定し、USB, LAN, HDMIなど必要なインターフェイスをケース表面に備えている。

MIM-Piは約38万円で作成可能であり、これはフラックスゲート磁力計(Fluxgate Magnetometer, FGM)の5分の1から10分の1程度の価格である。MIM-Piは低コストであるため、多数の観測装置による磁場観測ネットワークの構築が容易になる。

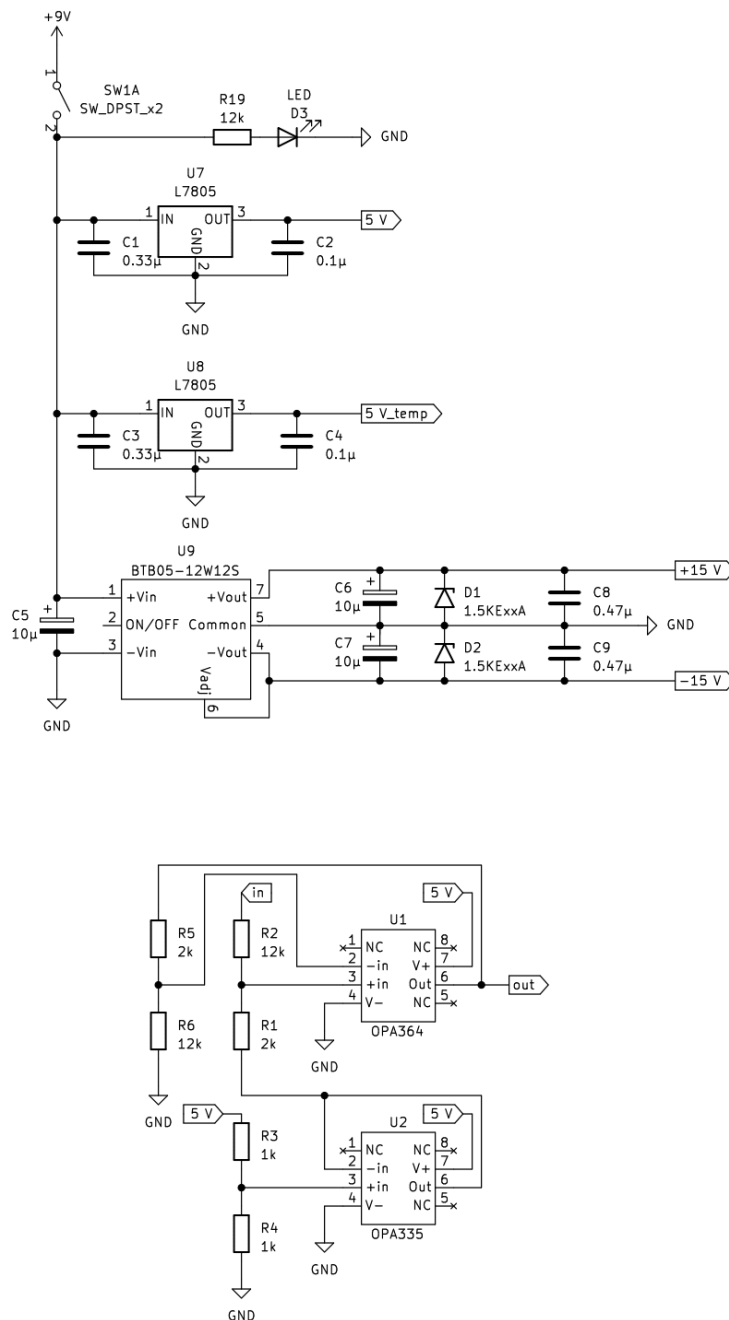


図2 MIM-Pi 基板部の回路図。上が昇圧回路、下が降圧回路である。実際の回路では、降圧回路を3つ実装している。





図 3 MIM-Pi の写真。(左)センサ部、(右)制御部。

### 3. 観測

#### 3.1. テスト観測

##### 3.1.1. 稲武でのテスト観測

MIM-Pi が自然微小磁場を観測可能であることを確かめるため、愛知県豊田市に位置する稲武観測所(地磁気緯度  $26.8^\circ$  , 地磁気経度  $-152.5^\circ$ )にてテスト観測を行った。稲武観測所は名古屋大学・地震火山研究センターが管理している施設であり、山の側面から掘削されたトンネル内で、水晶管伸縮計を用いて地殻変動の連続観測が行われている。トンネル入り口前に道路が通っているが、車の通りはそれほど多くはなく、山の中であるため人通りも少ない。また、電車の路線から 30 km 以上離れているため、人工ノイズの影響を受けにくい観測点である。ここでは 2019 年 1 月から Bartington 社製の FGM Mag-03 による連続観測が行われており、本研究では 2021 年 11 月 19 日から 2022 年 1 月 14 日までの約 2 カ月にわたり 2 台の MIM-Pi と 1 台の FGM との並行観測を実施した。

図 4 は 2021 年 12 月 17 日の 1 日プロットである。左から順に MIM-Pi No. 1, MIM-Pi No. 2, FGM の観測結果を示している。また、上段から地磁気 X(北向き)成分, Y(東向き)成分, Z(鉛直下向き)成分が表示されている。どの観測機器にも、地磁気の日変化である Solar quiet (Sq)変動が良く見て取れる。また、15:00 UT 前後に現れている数十分程度の周期的な変動も MIM-Pi と FGM の両方で確認できる。このことから、MIM-Pi は FGM と同様に自然微小磁場変動を観測できているといえる。

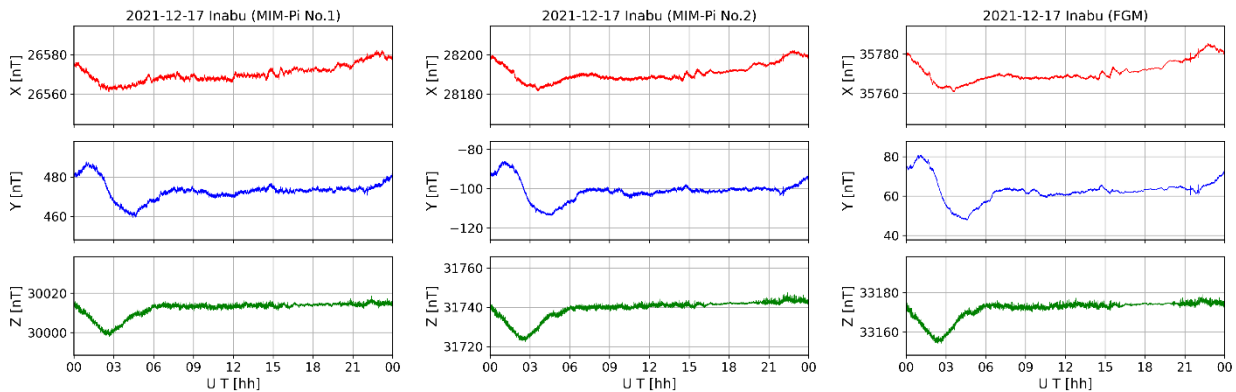


図 4 稲武観測所における観測例。2021 年 12 月 17 日の 1 日プロット。左から MIM-Pi No. 1, MIM-Pi No. 2, FGM。すべての観測機器で同様の日変動および 15 UT 頃の周期的な変動が観測されている。

### 3.1.2. 柿岡でのテスト観測

稲武観測所において MIM-Pi によって比較的良好的な地磁気データが得られることがわかったため、続いて茨城県石岡市に位置する柿岡地磁気観測所(地磁気緯度 28.00°, 地磁気経度 209.80°)にてテスト観測を行った。柿岡地磁気観測所は気象庁に属する施設であり、人工ノイズの影響が限りなく抑えられた環境で FGM により地磁気観測が行われている。そこで、こうした理想的な環境下での MIM-Pi と FGM の比較、および MIM-Pi が安定して長期観測を継続できるかの確認を目的としてテスト観測を実施した。観測期間は 2022 年 1 月 28 日から 2022 年 10 月 18 日まで約 9 カ月間である。MIM-Pi No. 1 は、実際の観測ネットワーク構築へ向けて、実地展開の準備を行っていたため、柿岡でのテスト観測には MIM-Pi No. 2 のみを用いた。

図 5 に 2022 年 2 月 3 日の 1 日プロットを示す。左が MIM-Pi で、右が FGM により取得されたデータのプロットである。MIM-Pi の観測結果には、00:00–09:00 UT にかけて、数時間の時間スケールを持つ上昇トレンドが Z 成分に見られる。それに加え、同時帯における FGM の X 成分には明らかな下降トレンドが見られるが、MIM-Pi の X 成分にはそのような下降トレンドは見られない。これは MIM-Pi を屋外の小屋内に設置したことにより、センサ周辺の温度変化が影響を及ぼしたためであると考えられる。それ以降の時間帯では、地磁気の激しい変動が MIM-Pi と FGM の両方で同じように観測できていることがわかる。

図 6 に 2022 年 2 月 19 日 13:00–14:00 UT における 1 時間プロットを示す。プロットのフォーマットは図 5 と同様である。このプロットを見ると、観測機器のノイズレベルの違いにより MIM-Pi のプロット線が太くなっているが、両方に共通して X 成分の 13:00–13:40 UT に地磁気の変動が見られる。これは地磁気脈動と呼ばれる変動であり、その周波数から Pc4 脈動に分類される。稠密磁場観測ネットワークによる観測対象の一つがこの地磁気脈動であり、柿岡地磁気観測所において MIM-Pi が FGM と同様に脈動を観測できたことは MIM-Pi が観測ネットワークの構築に利用可能であることを意味する。

柿岡地磁気観測所での長期観測において、停電がないにもかかわらず、観測が中断してしまう事例が何回も見られた。原因は明らかにはなっていないが、データ収録プログラムが何らかの理由で異常停止したためと思われる。そこで、この対処策として、データ収録プログラムのプロセスが動いているかどうかを確認し、その結果に応じてデータ取得を再開させるスクリプトを作成した。このスクリプトを定期的に自動実行させ、継続観測ができることを確認した。

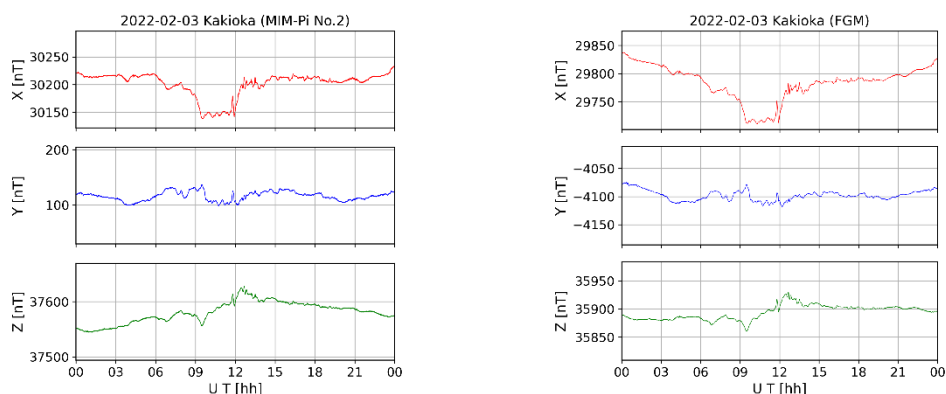


図 5 柿岡地磁気観測所における観測例。2022年2月3日の1日プロット。左から MIM-Pi No. 2, FGM。地磁気が荒れている様子が確認できる。

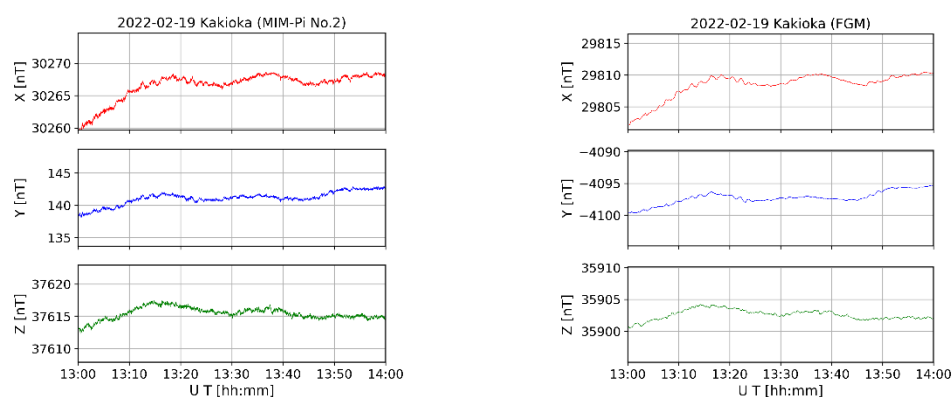


図 6 柿岡地磁気観測所における観測例。2022年2月19日 13:00–14:00 UT の1時間プロット。フォーマットは図5と同様。両方の観測機器で同様の地磁気脈動が観測されている。

### 3.2. 稠密磁場観測ネットワークの構築

前節で説明した稲武、柿岡におけるテスト観測の結果を元に、実際に日本の東北地方へ MIM-Pi を設置することにした。図7は現在構築中の稠密磁場観測ネットワークである。気象庁、国土地理院、名古屋大学がすでに FGM を設置している観測点(黄色)に加え、MIM-Pi を宮城県川渡、青森県白神、青森県むつ(赤色)に設置し、合計で 12 観測所から構成される。表1は各観測所の位置を示している。川渡は 2022年9月、白神は 2022年11月、むつは 2023年6月から定常観測を開始した。既設の FGM だけでは、赤井川–水沢間に大きな観測空白域があったため、その間を埋めるように新たに MIM-Pi を 2 台設置している。また、水沢–原町間も地磁気緯度で約  $1.5^\circ$  の間隔があったため、MIM-Pi で緯度間隔を狭めることにした。これにより、緯度間隔約 10 度内に 12 個の観測所が展開されているため、平均で観測所同士の間隔は 1 度以下となる。現在世界で展開されている緯度方向に並んだ磁場観測ネットワークでもこれほど稠密なものはない。

図 8 に上記の稠密磁場観測ネットワークで観測された地磁気変動の一例を示す。左上から右下にかけて観測所の地磁気緯度の降順で並んでいる。ただし、むつ観測所においては、図 8 に示した期間には観測が始まっていないため、掲載していない。また、白神のデータは温度変化による上昇トレンドが大きかったため、2022 年 11 月中の地磁気データと温度データから MIM-Pi の温度依存性を求め、その結果(X 成分:31.98 nT/°C, Y 成分:22.07 nT/°C, Z 成分:26.95 nT/°C)を用いて温度補正を行っている。これらのプロットから、22:00–22:30 UT で鹿野山観測所を除く 10 観測所の X 成分において振幅約 0.5 nT、周期約 50 秒の Pc4 地磁気脈動が観測されていることがわかる。鹿野山のデータについては、観測所が比較的都市部に位置するため、電車等による人工ノイズが大きく、発生した波動がノイズに埋もれてしまっていると予想される。これらのデータから、地磁気脈動の周波数を同定し、モデル計算を行うことにより、地球周辺のプラズマ質量密度の分布を調査することを計画している。

表 1 各観測所の位置

観測所		コード	地理緯度 [°]	地理経度 [°]	地磁気緯度 [°]	地磁気経度 [°]	L-shell
稚内	Wakkanai	WAK	45.40	141.75	37.36	210.06	1.583
母子里	Moshiri	MSR	44.37	142.27	36.38	210.66	1.543
女満別	Memambetsu	MMB	43.91	144.19	36.09	212.43	1.531
陸別	Rikubetsu	RIK	43.46	143.77	35.60	212.43	1.513
赤井川	Akaigawa	AKA	43.07	140.81	34.97	209.55	1.489
むつ	Mutsu	MTS	41.45	141.12	33.39	210.04	1.434
白神	Shirakami	SRM	40.52	140.22	32.39	209.34	1.402
水沢	Mizusawa	MIZ	39.11	141.20	31.07	210.4	1.363
川渡	Kawatabi	KWT	38.75	140.76	30.68	210.05	1.352
原町	Haramachi	HAR	37.62	140.95	29.57	210.35	1.322
柿岡	Kakioka	KAK	36.23	140.19	28.13	209.82	1.286
鹿野山	Kanozan	KNZ	35.26	139.96	27.15	209.72	1.263



図 7 現在構築中の稠密磁場観測ネットワークの観測点分布

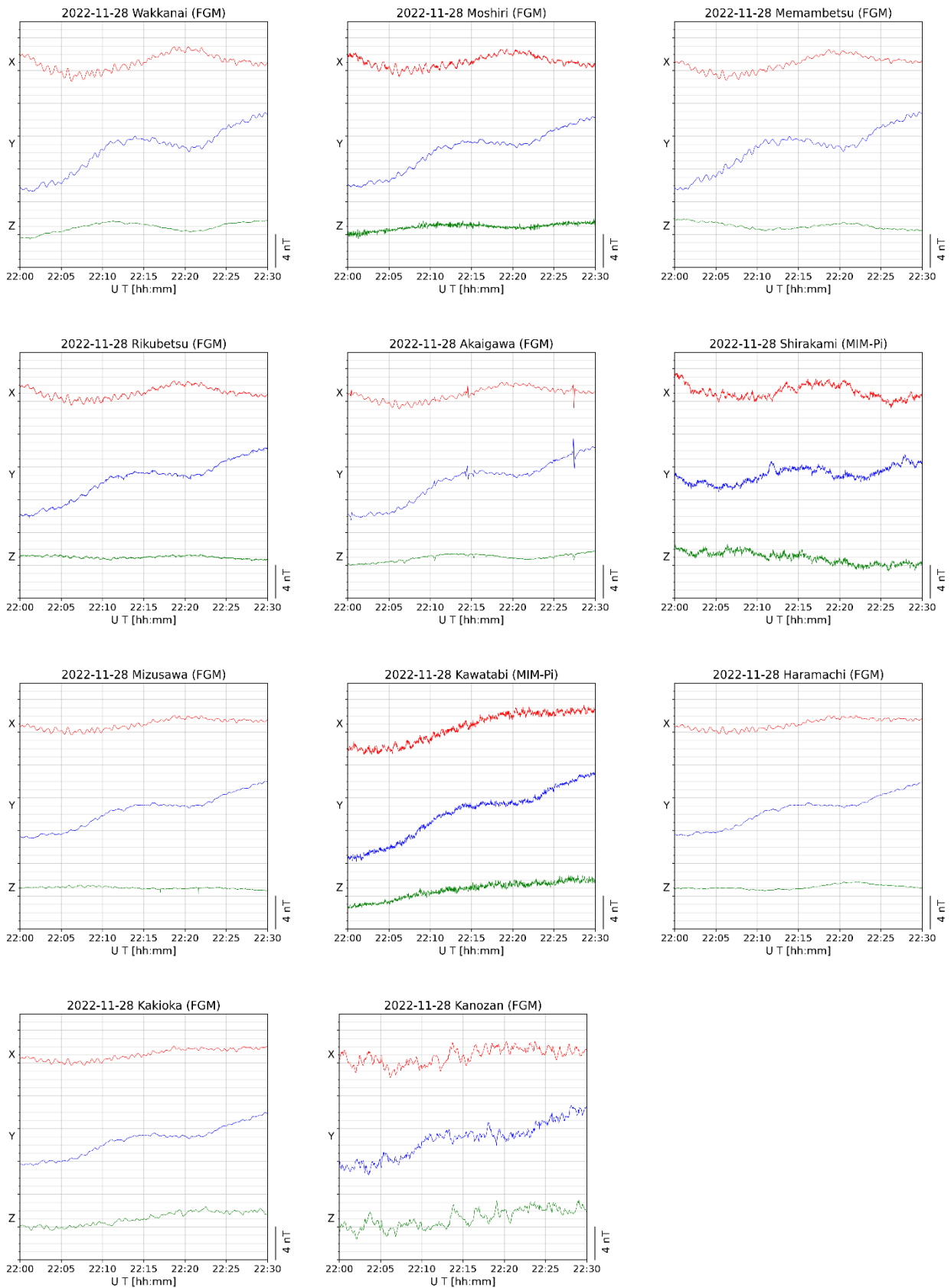


図 8 観測ネットワークによる観測例。2022年11月28日22:00–22:30 UTの30分間のプロット。鹿野山観測所以外のすべての観測所で同様の地磁気脈動が観測されている。

### 3.3. 過去の地磁気脈動観測に基づく MIM-Pi の観測性能評価

これまでに低緯度における Pc3-4 地磁気脈動の観測報告がなされてきた。Sutcliffe et al. [2011]は、地磁気緯度 $-32^{\circ}$ ~ $-34^{\circ}$ に位置する Hermanus および Sutherland において、振幅が約 1 nT で周波数が 50 mHz の磁力線共鳴現象が観測されたことを報告している。Villant and Tiberi [2016]は、地磁気緯度  $36.3^{\circ}$  に位置する L'Aquila のデータを統計的に調べ、磁力線共鳴の周波数は 55-60 mHz であることを報告している。Ziesolleck et al. [1993]は、オーストラリア西岸のネットワーク観測から、地磁気緯度 $-42^{\circ}$ の Newcastle あたりで磁力線共鳴が起こっている例を解析している。その振幅は約 0.5 nT、周波数は約 30 mHz である。Yagova et al. [2017]は、地磁気緯度が約 $-33^{\circ}$ の Learmonth で、振幅が約 0.5 nT で周波数が 25 mHz 程度の脈動が観測された例を示している。

以上のことから、今回構築した稠密磁場観測ネットワークの緯度領域では、振幅が 0.5 nT 以上で周波数が 60 mHz より低い(周期が 17 秒より長い)脈動が発生すると想定される。Nosé et al. [2022]によれば、科学解析用途で改良した MI センサは、 $10^4$  Hz から 0.5 Hz の間の広い周波数範囲で FGM と同じようなパワースペクトルを持つ観測結果が得られている。(ただし、一部の例では、30 mHz から 0.5 Hz のパワーが FGM より高い場合もある。) また、0.5 nT 程度の振幅の地磁気脈動について、FGM と同じような波形を観測できていることも示されている。したがって、関東-東北-北海道地域で発生する地磁気脈動のほとんどを図 8 で示したように MIM-Pi でも十分に検出できると考えている。

## 4. まとめ

本研究では、低価格で購入できる MI センサと Raspberry Pi を用いることで、FGM の 5 分の 1 から 10 分の 1 程度の価格で製作可能な磁力計 MIM-Pi を開発した。そして、稲武観測所および柿岡地磁気観測所でのテスト観測を通じて MIM-Pi がフィールドワークに利用可能であることを確認した。この結果を元に、実際に稠密磁場観測ネットワーク構築のため MIM-Pi の設置を開始した。現状では東北地方の 3 か所(川渡、白神、むつ)に設置が完了しており、今後は北海道の苫小牧をはじめ、MIM-Pi を設置する観測所の数を増やしていく計画である。また、稠密磁場観測ネットワークで得られたデータを解析することで、宇宙現象の調査も進めていく予定である。

## 謝 辞

稚内、赤井川、水沢、原町、鹿野山のデータは国土地理院より提供いただきました。

名古屋大学 宇宙地球環境研究所 栗田直幸准教授には白神観測所とむつ観測所に関して、情報を提供いただきました。

この研究は、日本学術振興会科学研究費 21H01147, 17K18804, 16H06286, 21H04518, 22H00116, JPJSCCB20210003 の助成、および伊藤科学振興会と山田科学振興財団からの研究助成を受けたものです。

## 参考文献

- Mohri, K. (1994). Application of amorphous magnetic wires to computer peripherals. *Materials Science and Engineering*, A185(1994), 141–146. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(94\)90937-7](https://doi.org/10.1016/0921-5093(94)90937-7)
- Mohri, K., Uchiyama, T., Panina, L. V., Yamamoto, M., & Bushida, K. (2015). Recent advances of amorphous wire CMOS IC Magneto-Impedance sensors: Innovative high-performance micromagnetic sensor chip. *Journal of Sensors*, 2015, 718069. <https://doi.org/10.1155/2015/718069>
- 野村太志, 磁気インピーダンスセンサを用いた低コスト地磁気観測システムの開発と多点観測への応用, 名古屋大学工学部, 修士論文, 2021
- Nosé, M., Kawano, T., & Aoyama, H. (2022). Application of magneto-impedance (MI) sensor to geomagnetic field measurements. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127, e2022JA030809. <https://doi.org/10.1029/2022JA030809>
- Panina, L. V., & Mohri, K. (1994). Magneto-impedance effect in amorphous wires. *Applied Physics Letters*, 65(9), 1189–1191. <https://doi.org/10.1063/1.112104>
- Sutcliffe, P. R., Ndiitwani, D. C., Lühr, H., Heilig, B. (2011). Studies of geomagnetic pulsations using magnetometer data from the CHAMP low-Earth-orbit satellite and ground-based stations: A review. *Data Science Journal*, 10. <https://doi.org/10.2481/dsj.IAGA-03>
- Villante, U., and P. Tiberi (2016), Occurrence and characteristics of nighttime ULF waves at low latitude: The results of a comprehensive analysis, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121, 4300–4315. <https://doi.org/10.1002/2015JA022137>
- Yagova, N. V., Heilig, B., Pilipenko, V. A., Yoshikawa, A., Nosikova, N. S., Yumoto, K. and Reda, J. (2017). Nighttime Pc3 pulsations: MM100 and MAGDAS observations. *Earth Planets Space*, 69:61. <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0647-x>
- Ziesolleck, C. W. S., Fraser, B. J., Menk, F. W., and McNabb, P. W. (1993). Spatial characteristics of low-latitude Pc3–4 geomagnetic pulsations. *Journal of Geophysical Research* 98(A1), 197–207., <https://doi.org/10.1029/92JA01433>



# 位置依存型 Point-spread Function を用いた Richardson-Lucy 法の X 線衛星 Chandra 撮像画像への応用 ~超新星残骸カシオペア座 A の鮮明化~

酒井 優輔<sup>\*1</sup>, 山田 真也<sup>\*1</sup>, 佐藤 寿紀<sup>\*2,1</sup>, 早川 亮大<sup>\*3,1</sup>, 日暮 凌太<sup>\*1</sup>, 小湊 菜央<sup>\*1</sup>

## Richardson-Lucy Deconvolution with a Position-Dependent Point-spread Function of Chandra X-ray Satellite Imaging: Enhancement of Sharpness in the Cassiopeia A Supernova Remnant

SAKAI Yusuke<sup>\*1</sup>, YAMADA Shinya<sup>\*1</sup>, SATO Toshiki<sup>\*2,1</sup>, HAYAKAWA Ryota<sup>\*3,1</sup>, HIGURASHI Ryota<sup>\*1</sup>,  
KOMINATO Nao<sup>\*1</sup>

### ABSTRACT

Artificial satellite-based telescopes face several challenges during space observations, often resulting in the acquisition of limited information. It is imperative to maximize the use of available data and develop methods to obtain more accurate results. In X-ray telescope observations, images are degraded due to telescope aberrations, resulting in image spreading. This spreading is quantified by the point spread function (PSF). When studying the spatial distribution of celestial objects, correcting for the influence of the PSF is critical to determining the true distribution. In astronomy, Richardson-Lucy (RL) deconvolution [1, 2] is widely used for this purpose. Previous studies in X-ray astronomy using this method [e.g., 10, 11, 12] often use a single-shaped PSF for the observed images, limiting the correction to local regions where the PSF is assumed to be uniform.

However, when the region of interest extends over a large area where PSF variation cannot be neglected, a position-dependent RL method [e.g., 4, 18, 3] becomes necessary, using the PSF at each position. In this study, we have developed a program that applies the position-dependent RL method [3] to the entire field of view in the Chandra X-ray satellite observations. We have successfully processed and clarified images covering the entire region of the supernova remnant Cassiopeia A. This method has the potential to deepen our understanding of the universe through image enhancement in the field of space observations.

**Keywords:** Astronomy data analysis, Astronomy image processing, High angular resolution, X-ray astronomy

---

\* 2023 年 11 月 30 日受付 (Received November 30, 2023)

<sup>\*1</sup> 立教大学理学部物理学科 (Department of Physics, Rikkyo University)

<sup>\*2</sup> 明治大学理工学部物理学科 (Department of Physics, School of Science and Technology, Meiji University)

<sup>\*3</sup> 量子場計測システム国際拠点、高エネルギー加速器研究機構

(International Center for Quantum-field Measurement Systems for Studies of the Universe and Particles (QUP), KEK)

## 概要

人工衛星上の望遠鏡による宇宙観測は様々な制約下で行われるため、観測で得られる情報はしばしば限定的である。そのような情報を最大限に活用し、より確かな情報を得るための手法の開発が重要である。X線望遠鏡を用いた観測では、望遠鏡の収差により像が広がって撮像されるため観測画像は劣化する。この像の広がり方は、点源拡散関数 (Point-spread Function; PSF) によって表現される。天体の空間的な分布が研究対象である場合、PSF の影響を正確に補正して真の分布を求める必要があり、その方法として天文学では Richardson-Lucy deconvolution 法 (RL 法) [1, 2] がよく使われる。その際、観測画像に対し単一形状の PSF を用いることが多く、この手法を用いた X 線天文分野での先行研究[e.g., 10, 11, 12]では、PSF が一様であると近似できる局所領域のみに RL 法を用いている。研究対象の領域が PSF の変化が無視できないような広範囲に及ぶ場合、各位置の PSF を用いた位置依存型 RL 法[e.g., 4, 18, 3]が必要となる。そこで、本研究では X 線衛星 Chandra の観測画像の視野全体に対して位置依存型 RL 法[3]を適用するプログラムを実装し、実際に超新星残骸カシオペア座 A の全領域の画像を処理し鮮明化することに成功した。本手法は、宇宙観測分野において画像の鮮明化を通じて宇宙の理解を深化させられる可能性を秘めている。

### 1. はじめに

宇宙環境における天体観測には、観測装置やその運用においてさまざまな制約があり、多くの場合取得情報に制限がかかる。X線天体観測では、X線望遠鏡の光学系の収差のため、光軸から離れるほど軸外での集光性能が低下し像が広がって撮像される。この特性は点源拡散関数 (Point-spread Function; PSF) により評価される。PSF の影響を正確に補正し観測対象天体の真の空間的な分布を推定するために、イメージデコンボリューション法が用いられる。

イメージデコンボリューション法は、古典的な方法から最近の機械学習を用いた手法まで幅広く研究されており、PSF が既知か否かに基づいて大別される。宇宙観測では、推定される画像に信頼性が求められるため、機械学習による手法を直接適用することが難しい場面が多く、古典的なアプローチが一般的に用いられる。X線衛星 Chandra の場合、地上と衛星軌道上で行われた豊富なキャリブレーションでモデル化された高精度な PSF が提供されているため、PSF を用いた古典的な Richardson-Lucy deconvolution 法 (RL 法) [1, 2] がよく使われる。RL 法は既知の PSF と観測画像から、ベイズ推定を反復的に用いることにより真の鮮明な画像を推定する手法である。その後もさまざまな派生手法[e.g., 6, 7, 8, 9]が開発されており、現在でも X 線観測の分野で使われている[e.g., 10, 11, 12]。

RL 法を用いた先行研究では、観測画像に対し単一形状の PSF を用いる場合が多く、Chandra 衛星の画像解析[e.g., 11, 12]でも PSF が同一と見做せる局所領域でのみ RL 法を利用するに留まっていた。Chandra 衛星視野の全領域にわたる画像解析においては、PSF の位置依存性が無視できないため、場所毎の PSF の違いを適切に考慮した位置依存型 RL 法[e.g., 4, 18, 3]が必要となる。位置依存型 RL 法を用いた先行研究としては、宇宙のガンマ線観測[4]やデジタルカメラのモーショントラッキング画像の復元[18]などがある。ガンマ線の先行研究[4]では、一つ一つの光子の位置とエネルギーに対して PSF を用意する必要があるため、Chandra 衛星のような光子数の大きい観測では計算コストの面で適用が難しい。一方、デジタル画像[18]の先行研究では、ガウスノイズを想定して実装しているため、Chandra 衛星画像の光子統計とは性質が異

なる。このように、観測機器等に合わせた手法の実装が必要となる。本研究では、観測画像視野全体で精度を損なわず現実的な計算コストで実行するため、PSF のサンプリング間隔を大きくし、そのサンプリングの境界に適切な処理を施した位置依存型 RL 法[3]を実装した。そして、その実証として超新星残骸カシオペア座 A の観測画像全体に本手法を適用し、その鮮明化に成功した。

本論文の構成は次のとおりである。2 章でイメージデコンボリューションの概観を説明し、3 章では RL 法の手法とその特徴について詳しく解説する。そして、4 章では位置依存型 RL 法について紹介する。最後の 5 章では、Chandra 衛星による超新星残骸カシオペア座 A の観測画像全体への適用結果や、高速化に向けた PSF の取り扱い方法について紹介する。本論文内で使われた位置依存型 RL 法の実装コードは、doi:10.5281/zenodo.8020557 で公開されている。

## 2. イメージデコンボリューションの概観

### 2.1. ブレとは

ブレ (ブラー、ぼけ) とは、観測機器の光学系などによって対象が不鮮明に見える現象である。このブレ画像を数学的に記述する際には、点源が撮影時にどのように広がって観測されるかを表した PSF が使われる。PSF と観測画像との関係を図 1 に示す。

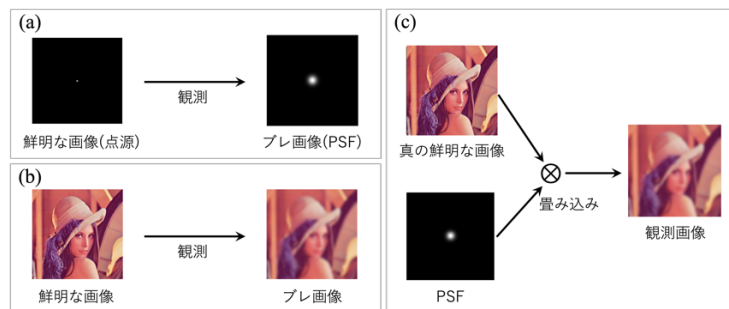


図 1. PSF と観測の関係。(a) : 点源を観測した場合の概念図、(b) : 鮮明な画像を観測した場合の概念図、(c) : 観測を畳み込みで表した概念図。

図 1(a)は点源を観測したブレ画像、すなわち PSF を示す。図 1(b)は現実の鮮明な画像を観測した場合におけるブレ画像を表している。図 1(b)の元画像の各ピクセルは、図 1(a)の点源と同様に PSF で拡散され、それらが重なり合っってブレ画像として観測される。図 1(b)は、図 1(c)のように畳み込み演算 (⊗) を用いて表現できる。

### 2.2. ブレの数式表現

以降、数式は簡単のため 1 次元で考える。ブレは畳み込み演算を用いて

$$H(x) = (W \otimes P)(x) = \int W(\xi)P(x|\xi)d\xi = \int W(\xi)p(x - \xi)d\xi \quad (1)$$

と表せる。ここで、 $W(\xi)$ は元の鮮明な真の画像の $\xi$ 番目のピクセル値を表し、 $H(x)$ は観測画像の $x$ 番目のピクセル値である。 $P(x|\xi)$ は、真の画像 $W$ の $\xi$ 番目の値が、観測画像 $H$ の $x$ 番目で観測される確率を表す。PSF が一様である場合、 $P(x|\xi)$ は形状関数 $p(x)$ を平行移動させた関数 $p(x - \xi)$ で表現することができる。

式(1)は理想的な場合を示しており、一般的には観測時の様々なノイズ $N$ が加わり、

$$H(x) = (W \otimes P)(x) + N(x) \quad (2)$$

となる。

### 2.3. イメージデコンボリューションの種類

イメージデコンボリューションとは、ブレの原因となる PSF などを使用して真の画像を推定する手法である。ここでは、デコンボリューションの古典的な方法と機械学習を用いた手法の概要について説明する。

#### 2.3.1. 古典的手法

PSF が既知または未知の場合は、それぞれ Non-Blind deconvolution、Blind deconvolution と呼ばれる。図 2 は、左から順に観測、Non-Blind deconvolution、Blind deconvolution の概念図を示したものである。古典的手法では、観測に適切なモデルを仮定し、逆畳み込み演算 ( $\otimes^*$ ) を用いて真の画像を推定する。本論文で取り上げる RL 法は、Non-Blind deconvolution に属する。

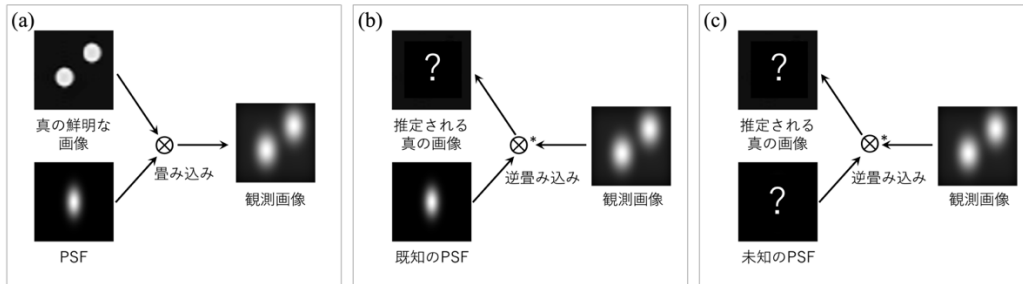


図 2. イメージデコンボリューションの種類。(a): 観測の概念図、(b): Non-blind deconvolution の概念図、(c): Blind deconvolution の概念図。

#### 2.3.2. 機械学習手法

機械学習を活用したイメージデコンボリューション手法も広く研究されており、文献[5]にまとめられている。これらの手法は、ブレ画像と鮮明な画像のペアを大量に使用して教師あり学習を行うことが一般的であり、学習データの収集や推定画像の信頼性の評価が難しいという課題がある。特に X 線観測の場合、光学系や様々な観測上の制約により、鮮明な画像の取得が困難であり、推定される画像の信頼性に対する懸念があり、そのため機械学習の直接の利用は難しい場合が多い。

## 3. Richardson-Lucy deconvolution の概観

この章では、RL 法の導出方法および代表的な派生手法を紹介する。ここで紹介する派生手法などは、観測条件に合わせて 4 章の位置依存型 RL 法と組み合わせることも可能である。

### 3.1. 観測とベイズの定理の関係

真の画像 $W$ を求めるためには、観測画像 $H$ の $x$ で検出されたイベントが、真の画像 $W$ の画素 $\xi$ からの放射

である確率 $Q(\xi|x)$ を求める必要がある。この $Q(\xi|x)$ はベイズの定理を用いて、

$$Q(\xi|x) = \frac{W(\xi)P(x|\xi)}{\int W(\xi)P(x|\xi)d\xi} \quad (3)$$

と表すことができる。畳み込みと逆畳み込みの関係は

$$\begin{cases} H(x) = \int W(\xi)P(x|\xi)d\xi \\ W(\xi) = \int H(x)Q(\xi|x)dx \end{cases} \quad (4)$$

で与えられる。逆畳み込みの関係は自明ではないため、式を追って確認する。式(4)の $Q$ に式(3)を代入すると、

$$\begin{aligned} \int H(x)Q(\xi|x)dx &= \int H(x) \frac{W(\xi)P(x|\xi)}{\int W(\xi)P(x|\xi)d\xi} dx \\ &= \int H(x) \frac{W(\xi)P(x|\xi)}{H(x)} dx \\ &= \int W(\xi)P(x|\xi)dx \\ &= W(\xi) \int P(x|\xi)dx \\ &= W(\xi) \end{aligned} \quad (5)$$

となる。したがって、逆畳み込みの関係式は成り立つ。

### 3.2. ベイズ推定と RL 法の関係

ベイズ推定は、初期の事前分布（推定する真の画像の初期値）を設定し、観測（真の画像と PSF の畳み込み）による事後分布（更新された真の画像）をベイズの定理に基づいて推定する手法である。RL 法では、この事後分布を次の事前分布として使用し、複数の反復により真の画像を推定する。ここでは、ベ

イズ推定と RL 法の関係について式を追って説明する。

真の画像は本来知り得ないため、適当な主観的な事前分布  $W_r$  をベイズの定理の式(3)に代入すると  $Q_r$  は、

$$Q_r(\xi|x) = \frac{W_r(\xi)P(x|\xi)}{\int W_r(\xi)P(x|\xi)d\xi} \quad (6)$$

と表される。式(6)を式(4)の逆畳み込みの式に代入すると、事後分布  $W_{r+1}$  は、

$$\begin{aligned} W_{r+1}(\xi) &= \int H(x)Q_r(\xi|x)dx \\ &= \int H(x) \frac{W_r(\xi)P(x|\xi)}{\int W_r(\xi)P(x|\xi)d\xi} dx \\ &= W_r(\xi) \int H(x) \frac{P(x|\xi)}{\int W_r(\xi)P(x|\xi)d\xi} dx \end{aligned} \quad (7)$$

となる。式(7)の初期値を  $r = 0$  として設定すると、

$$W_{r+1}(\xi) = W_r(\xi) \int \frac{H(x)}{\int W_r(\xi)P(x|\xi)d\xi} P(x|\xi)dx \quad r = 0, 1, 2, \dots \quad (8)$$

となる。式(8)は RL 法の式であり、畳み込み演算子  $\otimes$  を用いて、

$$W_{r+1}(\xi) = W_r(\xi) \left( \frac{H}{W_r \otimes P} \otimes P^* \right) (\xi) \quad r = 0, 1, 2, \dots \quad (9)$$

と表すこともできる。ここで、 $P^*$  は  $P$  の転置行列したものに相当する。 $P(x|\xi) = p(x - \xi)$  がかつ 2 次元画像の場合、 $P^*$  は PSF の中心に対して点対称移動したものに对应する。

### 3.3. RL 法の性質

ここでは、RL 法の性質について式を追って確認する。

#### 3.3.1. RL 法の真の画像の非負性

RL 法の式(8)から、観測画像と真の画像の初期値が非負の場合、推定される真の画像も必ず非負となる性質がある。

#### 3.3.2. RL 法の積分値の保存性

RL 法は、真の画像と観測画像の積分値が保存する性質がある。この特徴について導出する。式(8)の両辺を積分すると、

$$\begin{aligned} \int W_{r+1}(\xi)d\xi &= \int \left( W_r(\xi) \int \frac{H(x)}{\int W_r(\xi)P(x|\xi)d\xi} P(x|\xi)dx \right) d\xi \\ &= \int \frac{H(x)}{\int W_r(\xi)P(x|\xi)d\xi} \left( \int W_r(\xi)P(x|\xi)d\xi \right) dx \\ &= \int H(x)dx \end{aligned} \quad (10)$$

となる。したがって、推定される真の画像  $W_{r+1}$  と観測画像  $H$  の積分値は等しい。式(10)は  $W_r$  の積分値に依らないため、数値計算において真の画像の初期値を観測画像の積分値に合わせる必要がないことを示している。

### 3.3.3. RL 法の PSF の規格化性

RL 法には、PSF の項が分母分子で打ち消し合うため、PSF の積分値が規格化される性質がある。この特徴について式を用いて確認する。 $\lambda(> 0)$ 倍した PSF を  $P_\lambda = \lambda P$  とし、式(8)に代入してその積分値を求めると

$$\begin{aligned} \int W_{r+1}(\xi) d\xi &= \int \left( W_r(\xi) \int \frac{H(x)}{\int W_r(\xi) P_\lambda(x|\xi) d\xi} P_\lambda(x|\xi) dx \right) d\xi \\ &= \int \frac{H(x)}{\int W_r(\xi) P_\lambda(x|\xi) d\xi} \left( \int W_r(\xi) P_\lambda(x|\xi) d\xi \right) dx \\ &= \int \frac{H(x)}{\int W_r(\xi) \lambda P(x|\xi) d\xi} \left( \int W_r(\xi) \lambda P(x|\xi) d\xi \right) dx \\ &= \int H(x) dx \end{aligned} \quad (11)$$

となる。実際、PSF は有限の領域に対してシミュレーションされるとき、厳密にはその積分値は 1 以下となる場合が多いが、RL 法では PSF の積分値が 1 に規格化される。

### 3.3.4. RL 法の真の画像の収束条件

RL 法の収束条件について説明する。式(8)の分母は観測の計算を意味するため、反復回数  $r$  の真の画像から得られた擬似的な観測画像  $H_r(x) := \int W_r(\xi) P(x|\xi) d\xi$  を導入する。 $H/H_r \sim 1$  を式(8)に代入すると、

$$\begin{aligned} W_{r+1}(\xi) &= W_r(\xi) \int \frac{H(x)}{H_r(x)} P(x|\xi) dx \\ &\sim W_r(\xi) \int P(x|\xi) dx \\ &\sim W_r(\xi) \end{aligned} \quad (12)$$

となる。したがって、 $H/H_r \sim 1$  のとき、 $W_{r+1} \sim W_r$  となり、RL 法は収束する。

### 3.3.5. PSF が点源の場合の真の画像の収束性

PSF が全ての場所で点源、つまりブレの全くない画像の場合の真の画像の収束性について説明する。このとき、PSF はディラックのデルタ関数  $\delta$  を用いて表現でき、式(8)の  $r = 0$  に代入すると

$$\begin{aligned} W_1(\xi) &= W_0(\xi) \int \frac{H(x)}{\int W_0(\xi) P(x|\xi) d\xi} P(x|\xi) dx \\ &= W_0(\xi) \int \frac{H(x)}{\int W_0(\xi) \delta(x - \xi) d\xi} \delta(x - \xi) dx \\ &= W_0(\xi) \int \frac{H(x)}{W_0(x)} \delta(x - \xi) dx \\ &= W_0(\xi) \frac{H(\xi)}{W_0(\xi)} \\ &= H(\xi) \end{aligned} \quad (13)$$

となる。したがって、1 反復で真の画像は観測画像と同一のものとなる。このように、RL 法では PSF が点源の場合も正しく計算できる。

3.3.6. RL 法の定性的な更新の定性的イメージ

RL 法における反復処理による更新のイメージを説明する。式(12)で導入した $W_r$ から得られる擬似的な観測画像 $H_r$ を用いると RL 法の式(8)は、

$$W_{r+1}(\xi) = W_r(\xi) \int \frac{H(x)}{H_r(x)} P(x|\xi) dx \quad r = 0, 1, 2, \dots \tag{14}$$

となる。ここで、式(14)では真の画像を推定する際に、 $H/H_r$ の項により観測画像同士を比較し、 $H_r$ が $H$ に近づくとき、推定された $W_r$ が本来知り得ない真の画像に近づくことが期待される。ただし、観測画像同士の比較には PSF の不定性が含まれるため、PSF の重みを掛けたものが $W_{r+1}$ として更新される。図 3 はその更新の概念図を示しており、本質を損なわずに図示を容易にするため、 $H/H_r$ ではなく $H - H_r$ を用いる。

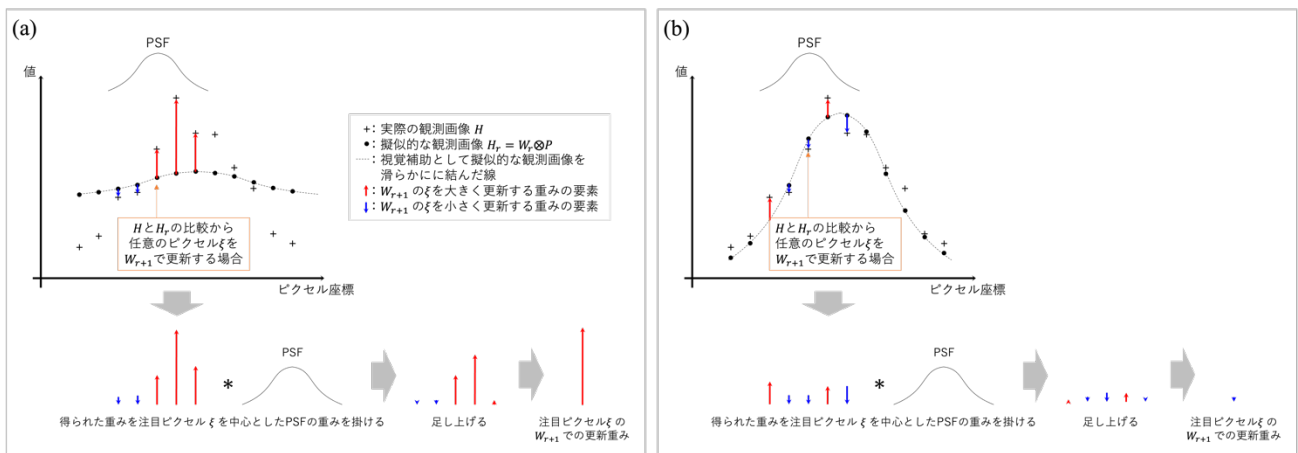


図 3. RL 法の真の画像の更新のイメージ図。(a) : 反復初期。(b) : 反復が進んだ後。

図 3(a)は反復初期の状態を示しており、 $H - H_r$ が非常に大きくなり、したがって仮定した $W_r$ が大きく異なることを意味する。 $W_{r+1}$ の重みは、その値に対し PSF の重みが合わさって決まる。そして、反復が進むと図 3(b)の状態になり、ノイズ等が正負にできるが打ち消し合うため $H - H_r$ はゼロに近づき、軽微な違いが $W_{r+1}$ で更新される。このように、RL 法は反復を通じて観測画像と真の画像の比較を行い、徐々に真の画像に収束するプロセスとして理解できる。

3.3.7. RL 法の真の画像の初期値依存性

RL 法は PSF よりも高周波な構造を推定することが、更新の適切な重みを得られないため困難である。そのため、一般的には真の画像の初期値 $W_0$ には観測画像や全ての画素に同じ値を入れた画像を用いることが多い。

実際に真の画像の初期値における違いをシミュレーションにより比較した結果が図 4 である。図 4(a)は、点源を真の画像として使用し、PSF の畳み込みことにより観測画像をシミュレーションしたものである。図 4(b)は、その PSF を用いて真の画像の異なる初期値 $W_0$ に対して RL 法で推定した結果である。図 4 上段の高周波の初期値では初期値に強く影響を受け、適切な更新重みが得られていないことがわかる。この結果から、真の画像の初期値は慎重に選ぶ必要があり、高周波の初期値は RL 法の収束に悪影響を与える可能性があることが確認できる。



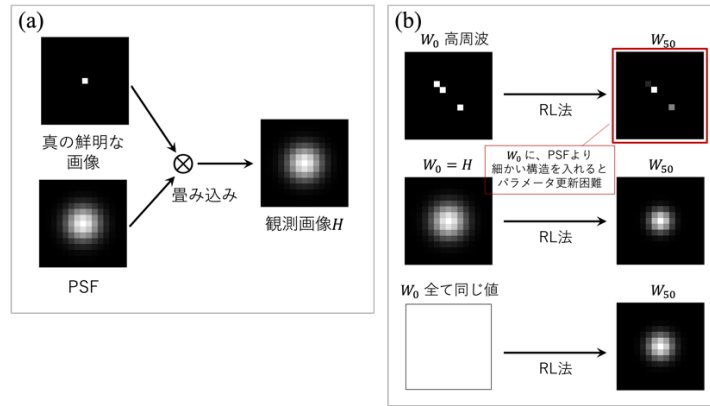


図 4. 真の画像の初期値による推定画像の違い。(a) : 真の鮮明な画像を PSF で畳み込み作成した観測画像。(b) : (a)の観測画像と PSF を用いて、真の画像の初期値 $W_0$ を変えた際の RL 法の結果を並べたも。上から順に高周波画像、観測画像と全く同じ画像、全て同じ値を入れた画像。

### 3.4. 最尤法と RL 法の関係

RL 法はポアソン分布を尤度関数とした最尤法から求められる。この関係について式を追って説明する。

#### 3.4.1. 最尤法

最尤法とは、データの分布やモデルの仮定に基づいて、データを最もよく説明するパラメータを推定する方法である。RL 法においては、観測画像 $H$ を最もよく説明する真の画像 $W$ を求めることに対応する。真の画像 $W$ と観測画像 $H$ の各画素の $n$ 個のピクセル値をそれぞれ $W = (W(1), W(2), \dots, W(n))$ ,  $H = (H(1), H(2), \dots, H(n))$ と表すと尤度関数 $L$ は、

$$L(W|H) = \prod_{x=1}^n P(H(x)|W) \quad (15)$$

となる。最尤推定量 $\hat{W}$ を求めると、

$$\begin{aligned} \hat{W} &= \arg \max_W L(W|H) \\ &= \arg \max_W \prod_{x=1}^n P(H(x)|W) \\ &= \arg \min_W - \ln \prod_{x=1}^n P(H(x)|W) \\ &= \arg \min_W - \sum_{x=1}^n \ln P(H(x)|W) \\ &= \arg \min_W - \int \ln P(H(x)|W) dx \end{aligned} \quad (16)$$

となる。ここで、式(16)の積分記号は、以降の数式を簡略化させるために用いた。最尤法は、この最尤推定量 $\hat{W}$ を求めることに対応する。

#### 3.4.2. 尤度関数がポアソン分布の場合

光子統計に関する画像の尤度関数はポアソン分布に従い、この場合の尤度関数は

$$L(W|H) = \prod_{x=1}^n P(H(x)|W) = \prod_{x=1}^n \frac{(W \otimes P)(x)^{H(x)} e^{-(W \otimes P)(x)}}{H(x)!} \quad (17)$$

と表される。式(17)を式(16)に代入すると最尤推定量 $\hat{W}$ は、

$$\begin{aligned}
\hat{W} &= \arg \min_W - \int \ln P(H(x)|W) dx \\
&= \arg \min_W \int -\ln \frac{(W \otimes P)(x)^{H(x)} e^{-(W \otimes P)(x)}}{H(x)!} dx \\
&= \arg \min_W \int ((W \otimes P)(x) - H(x) \ln(W \otimes P)(x) + \ln H(x)!) dx \\
&= \arg \min_W \int ((W \otimes P)(x) - H(x) \ln(W \otimes P)(x)) dx \tag{18}
\end{aligned}$$

となる。ポアソン分布の性質より、式(18)の $n$ 個の $W$ 関数は凹関数であるので、最尤推定量は全てのパラメータにおける偏微分がゼロのときとなる。数値最適化手法の一つである EM アルゴリズム[16]を用いると RL 法の更新式が導出できる[17]。

### 3.5. RL 法の派生手法

RL 法にはさまざまな派生手法があり、ここでは代表的な手法について紹介する。

#### 3.5.1. 尤度関数がガウス分布の RL 法

RL 法は、尤度関数にガウス分布を使用した場合にも適用できる。ここでは、ガウスノイズの場合の RL 法[15]について説明する。ガウスノイズの場合の尤度関数は

$$L(W|H) = \prod_{x=1}^n P(H(x)|W) = \prod_{x=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(H(x) - (W \otimes P)(x))^2}{2\sigma^2}\right) \tag{19}$$

と表される。ここで、 $\sigma^2$ は分散である。式(19)を式(16)に代入すると最尤推定量 $\hat{W}$ は、

$$\begin{aligned}
\hat{W} &= \arg \min_W - \int \ln P(H(x)|W) dx \\
&= \arg \min_W \int -\ln \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(H(x) - (W \otimes P)(x))^2}{2\sigma^2}\right) dx \\
&= \arg \min_W \int -\ln \exp\left(-\frac{(H(x) - (W \otimes P)(x))^2}{2\sigma^2}\right) dx \\
&= \arg \min_W \int (H(x) - (W \otimes P)(x))^2 dx \tag{20}
\end{aligned}$$

となる。式(20)は $W$ に関して凹関数である。EM アルゴリズムを用いると、更新式

$$W_{r+1}(k) = W_r(k) + \lambda(H - W_r \otimes P) \otimes P^*(k) \tag{21}$$

が導かれる。文献[15]によると、 $\lambda$ は反復の途中で可変的に変化させて使うことができる。

#### 3.5.2. 和形式の表現

RL 法は更新重みの項を積で表す式(9)のほか、本質的には和で重みを表現することもできる。和形式での RL 法[6]は、その更新の重みを $\lambda$ として

$$W_{r+1}(\xi) = W_r(\xi) - \lambda \left(1 - \left(\frac{H}{W_r \otimes P} \otimes P^*\right)(\xi)\right) \quad r = 0, 1, 2, \dots \tag{22}$$

と表される。式(22)は、RL 法の特徴の一つである真の画像の非負性および積分値の保存性については破綻するが、反復毎の更新の重みを任意に調整できるという利点がある。

### 3.5.3. 正則化を用いた表現

RL 法はノイズに対して過度に収束しやすい性質や、画像の境界やエッジ領域でリングアーチファクトが発生しやすい課題がある。その影響を抑えるためのさまざまな派生手法がある。ここでは、Tikhonov-Miller, Total Variation, Bilateral Filter を正則化として用いた方法について説明する。ここで、ポアソンノイズのもとでの対数尤度関数を

$$J(W) = \int ((W \otimes P)(x) - H(x) \ln(W \otimes P)(x)) dx \quad (23)$$

とにおいて、以降の正則化の数式で使用する。

#### 3.5.3.1. Tikhonov-Miller の正則化手法

文献[6]で提案された Tikhonov-Miller の正則化を用いた RL 法の最尤推定量  $\widehat{W}_{TM}$  は式(23)を用いて

$$\widehat{W}_{TM} = \arg \min_W \left( J(W) + \lambda_{TM} \int |\nabla W(x)|^2 dx \right) \quad (24)$$

と表され、これを解くと

$$W_{r+1}(\xi) = \frac{W_r(\xi)}{1 + 2\lambda_{TM}\Delta W_r(\xi)} \left( \frac{H}{W_r \otimes P} \otimes P^* \right)(\xi) \quad r = 0, 1, 2, \dots \quad (25)$$

となる。ここで、 $\Delta$ はラプラシアン作用素、 $\lambda_{TM}$ は重みパラメータである。文献[6]では $\lambda_{TM} \sim 10^{-4}$ が使われている。この手法は、ポアソンノイズの過剰な増幅を抑える効果が確認されているが、同時に画像中のエッジも平滑化されるという問題が報告されている[6]。

#### 3.5.3.2. Total Variation の正則化手法

文献[7]で提案された Total Variation の正則化を用いた RL 法の最尤推定量  $\widehat{W}_{TV}$  は

$$\widehat{W}_{TV} = \arg \min_W \left( J(W) + \lambda_{TV} \int |\nabla W(x)| dx \right) \quad (26)$$

と表され、これを解くと

$$W_{r+1}(\xi) = \frac{W_r(\xi)}{1 - \lambda_{TV} \operatorname{div} \left( \frac{\nabla W_r(\xi)}{|\nabla W_r(\xi)|} \right)} \left( \frac{H}{W_r \otimes P} \otimes P^* \right)(\xi) \quad r = 0, 1, 2, \dots \quad (27)$$

となる。ここで、 $\nabla W_r(\xi)$ は $W_r(\xi)$ の勾配、 $\operatorname{div}(\cdot)$ は発散を表す。文献[7]では $\lambda_{TV} \sim 0.002$ が使われている。この方法は、ポアソンノイズの過剰な増幅を抑える効果があり、前述の Tikhonov-Miller の方法と比べ画像中のエッジも保持されることが確認されている[7]。

#### 3.5.3.3. Bilateral Filter の正則化手法

文献[8]で提案された Bilateral Filter の正則化マップを  $F_{BFW_r}$  として

$$F_{BFW_r} = \iint \exp\left(-\frac{|x-\xi|^2}{2\sigma_s}\right) \left(1 - \exp\left(-\frac{|W_r(x) - W_r(\xi)|^2}{2\sigma_r}\right)\right) d\xi dx \quad (28)$$

とおく。ここで、式(28)の最初の指数関数の項は場所における重みを表し、2つ目は $W$ の値による重みを表している。文献[8]によると、 $\sigma_s$ は使用する PSF の半径を $R$ とした場合、 $\sigma_s = (R/3)^2$ とし、 $\sigma_r$ は $W$ の最大値 (max) と最小値 (min) を用いて、 $\sigma_r = 0.01(\max(W_r) - \min(W_r))^2$ としている。この正則化を用いた最尤推定量  $\widehat{W}_{BF}$  は、

$$\widehat{W}_{BF} = \arg \min_W \left( J(W) + \lambda_{BF} F_{BFW_r} \right) \quad (29)$$

と表され、これを解くと

$$W_{r+1}(\xi) = \frac{W_r(\xi)}{1 + \lambda_{BF} \nabla F_{BF, W_r}(\xi)} \left( \frac{H}{W_r \otimes P} \otimes P^* \right) (\xi) \quad r = 0, 1, 2, \dots \quad (30)$$

となる。文献[8]では、 $\lambda_{BF} \sim 0.05$ が使われている。この手法により、リングングアーチファクトの抑制の効果が確認されている[8]。

#### 3.5.4. Blind RL 法

RL 法は通常既知の PSF を使用するが、PSF を未知の Blind deconvolution にも適用できる。この方法は、文献[9]で提案され Blind RL 法と呼ばれる。この手法は、真の画像と PSF は数学的に入れ替え可能であることを利用し、真の画像と PSF を交互に反復的に推定する。数式では

$$\begin{aligned} P_{r+1}(\xi) &= P_r(\xi) \left( \frac{H}{W_r \otimes P_r} \otimes W_r^* \right) (\xi) \\ W_{r+1}(\xi) &= W_r(\xi) \left( \frac{H}{W_r \otimes P_{r+1}} \otimes P_{r+1}^* \right) (\xi) \quad r = 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (31)$$

と表される。数値計算において式(31)の $P$ は、現実的に考えられる PSF のスケールに合わせた適切な計算範囲を指定することや、PSF の形状の制限を与えることで推定精度の向上が期待できる。

## 4. 提案手法

ここでは、5章で用いる PSF の位置依存性を考慮した RL 法について説明する。RL 法は、観測画像に対し単一の PSF を用いて計算されることが多い。しかし、場所毎で PSF が異なる場合にも利用できる。実際、式(8)では、 $P(x|\xi)$ において場所 $\xi$ ごとに異なる PSF を使うことが考慮されており、それを明示的に示すために $P_\xi(x)$ を導入する。ここで、 $P_\xi(x)$ は、場所 $\xi$ で得られる PSF に基づいて $P(x|\xi)$ を計算する関数である。このようにして位置依存型 RL 法[3]は、

$$W_{r+1}(\xi) = W_r(\xi) \int \frac{H(x)}{\int W_r(\xi) P_\xi(x) d\xi} P_\xi(x) dx \quad r = 0, 1, 2, \dots \quad (32)$$

と表される。この式(32)により、各場所で別々の PSF で計算される。ただし、数値計算において、計算コストの制約から、PSF をピクセル単位で用意することが難しい場合もあるため、本研究では一定区間毎に PSF をサンプリングし、その区間毎に PSF を切り替えて使用する。なお、式(32)は、問題に応じて3章で紹介した任意の尤度関数や正則化手法を組み合わせることも可能である。実際に文献[3]では Chandra の観測データに適用する際に、ポアソンノイズの過剰な増幅を防ぐために、Total Variation 正則化を組み込んだ手法が提案されている。

## 5. Chandra 衛星で観測した超新星残骸カシオペア座 A への適用

### 5.1. 使用したデータ

本研究では、Chandra 衛星の観測データを使用した。それらのデータを表 1 に示す。データ解析には、Chandra 衛星の標準データ処理パッケージである Chandra Interactive Analysis of Observations (CIAO[13]) を使用した。表 1 の観測データに対し、level 1 のイベントファイルから CIAO の”chandra\_repro”を用いて前処理を行った。各観測は、光軸とロール角が揃っていないため、CIAO の”merge\_obs”により 1 つの観測画像に結合して、解析に使用した。

表 1. 本研究で利用した Chandra 衛星の超新星残骸カシオペア座 A の観測データ

Obs. ID	Obs. Start yyyy mmm dd	Exp. Time (ks)	Detector	R.A. (deg)	Decl. (deg)	Roll (deg)
4636	2004 Apr 20	143.48	ACIS-S	350.9129	58.8412	49.7698
4637	2004 Apr 22	163.50	ACIS-S	350.9131	58.8414	49.7665
4639	2004 Apr 25	79.05	ACIS-S	350.9132	58.8415	49.7666
5319	2004 Apr 18	42.25	ACIS-S	350.9127	58.8411	49.7698

## 5.2. PSF の作成方法

PSF を Model of AXAF Response to X-rays (MARX[14])を用いてモデリングした。その際、CIAO の”simulate\_psf”を使用した。本研究では 0.5-7.0 keV のエネルギー帯域の観測データを用いたが、単一のエネルギー 2.3 keV で PSF を作成した。表 1 に示された 4 つの観測データは、光軸の位置が一致しているため、PSF はその代表として Obs. ID=4636 で計算されたものを使用した。図 5 はカシオペア座 A の観測画像を背景として、 $35 \times 35$  ピクセル間隔毎に作成した PSF を重ねて表示したものである。図 5 から、Chandra 衛星の PSF は光軸から離れるほど広がり、画像の鮮明度は低下することが分かる。また、PSF の形状が光軸周りの方位角によっても変化することが確認できる。左側に拡大して図示した 2 個所の PSF から、角度分解能が桁で変化することもわかる。

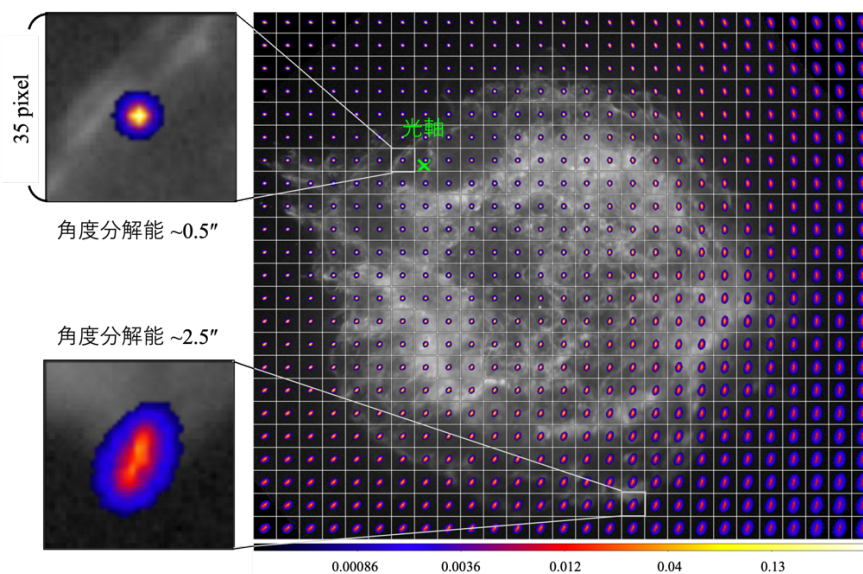


図 5. 背景のカシオペア座 A (Obs. ID=4636) の観測画像とその場所に対応した PSF。カラーバーは PSF の確率、クロスは光軸、PSF のサンプリング間隔は  $35 \times 35$  ピクセル。

## 5.3. 位置依存型 RL 法の結果

図 6(a)は表 1 の観測画像であり、図 6(b)は位置依存型 RL 法の反復計算を 200 回行って得られた結果である。5.2 節で説明した  $35 \times 35$  ピクセル間隔で作成した PSF を使い、領域毎に PSF を切り替えながら計算した。この手法を適用する前後の結果を比較するために、図 6 の四角枠で示した領域の拡大図を図 6 (a-1, -2, -3)および(b-1, -2, -3)に示した。観測画像全域にわたって鮮明になっていることが定性的に確認できる。

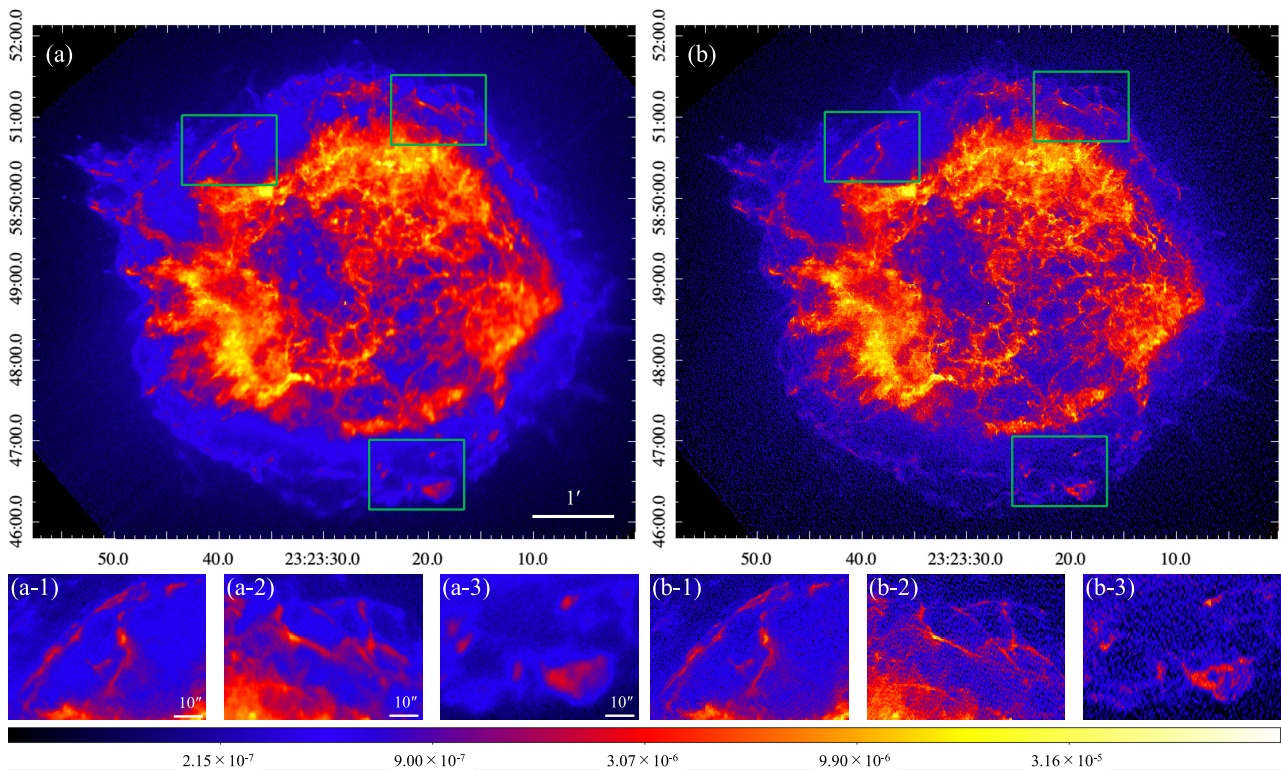


図 6. 観測画像と位置依存型 RL 法で得られた画像の比較。(a) : Chandra 衛星によるカシオペア座 A の 0.5-7.0 keV の X 線画像。(a-1, -2, -3) : (a)の四角枠で示した領域の拡大図。(b) : 位置依存型 RL 法で得られた画像、(b-1, -2, -3) : (b)の四角枠で示した領域の拡大図。下方のカラーバーは画像中の色と Flux ( $\text{photons cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )の対応関係を表す。

#### 5.4. 位置依存型 RL 法の PSF のサンプリング間隔による違い

図 6 では PSF のサンプリング間隔を 35×35 ピクセルとしたが、ここでは異なるサンプリング間隔を持つ場合の位置依存型 RL 法の結果を比較する。

図 7 は、観測画像全体に対して位置依存型 RL 法を適用して得られた画像から、4つの領域を拡大表示したものである。上から順に北東領域 (on-axis)、南東領域 (光軸からの距離 : 約 150 秒角)、南西領域 (光軸からの距離 : 約 250 秒角)、北西領域 (光軸からの距離 : 約 150 秒角) である。また左から順に PSF のサンプリング間隔を  $n=5, 15, 25, 35, 45, 55$  ピクセルとした場合を示す。ここで PSF が切り替わる境界を画像周縁の目盛りで示した。図 7 の北東領域および南西領域の結果ではサンプリングによる違いがほとんど見られないが、南東領域の  $n=45$  ピクセル以降の結果では、PSF の境界で画像の横方向に人工的な線 (アーチファクト) が顕著に見られる。同様に、北西領域の  $n=45$  ピクセル以降でも、境界部で画像の縦方向にアーチファクトが確認できる。

これらの PSF の境界のアーチファクトの原因として、サンプリング間隔の増加に伴い隣接する PSF が境界で急激に変化することが挙げられる。Chandra 衛星の PSF は、主に光軸からの離角と光軸周りの方位角の 2 つのパラメータに依存して形状が決まる。光軸からの離角は主に PSF 中心付近での分布を変化させるが、方位角は主に PSF 周辺部での形状の変化に寄与する。中心付近の確率密度は周辺部に比べ大きいので、PSF の変化が顕著に現れるのは光軸からの離角方向の PSF の境界であり、アーチファクトが発生しやすいと考えられる。

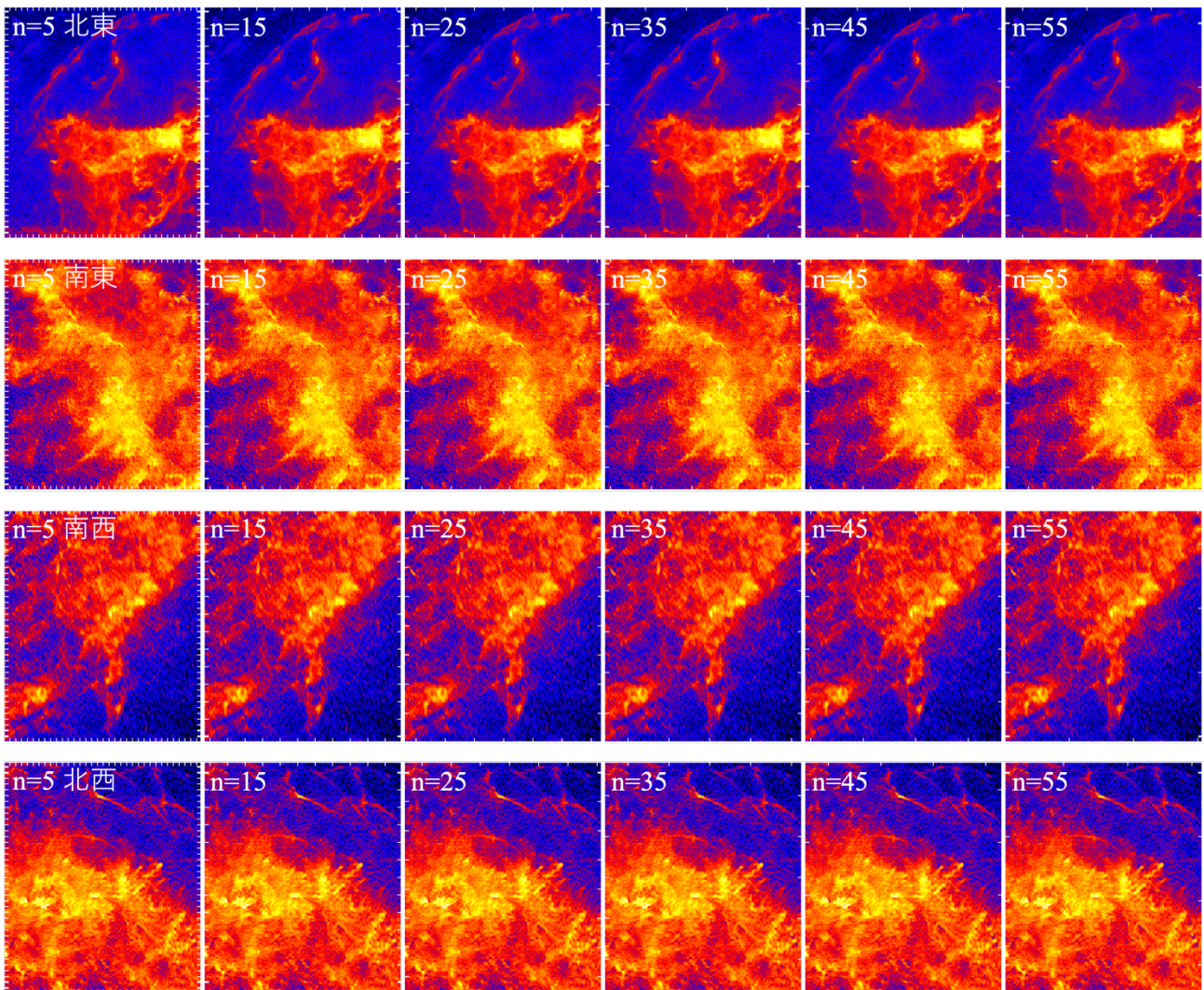


図 7. PSF のサンプリング間隔の違いによる位置依存型 RL 法反復回数 200 回の結果。上から順に領域と光軸との距離の関係は、北東 (on-axis)、南東 (off-axis 150 秒角)、南西 (off-axis 250 秒角)、北西 (off-axis 150 秒角) 領域である。n は PSF のサンプリング間隔の一辺であり、画像周縁の目盛りは PSF の切り替え部を表す。

#### 5.4.1. PSF の境界部のアーチファクトの抑制

PSF の境界部におけるアーチファクトを抑制する方法として、サンプリング間隔を細かくして境界部での変化を軽減させる方法が挙げられるが、一方で計算コストは増加する。逆にサンプリング間隔を粗くすると PSF の精度は低下する。ここでは、PSF の境界部におけるアーチファクトの抑制方法として、境界部の PSF を周辺の PSF を用いて補完する方法を提案する。このアプローチにより、PSF の変化の急激な境界部において、PSF の変化が緩やかになりアーチファクトを軽減させる効果が期待できる。

図 8 は、PSF の境界部における補完に使用される PSF の重みを示している。本研究では補完方法として、平均化とランダム化の 2 つの方法を用いる。平均化による補完では、図 8 に示された PSF の重みに従って、複数の PSF を合成して使用する。一方、ランダム化による補完では、PSF の境界で一意的に切り替えるのではなく、境界部近くの各反復回でランダムに選択された 1 つの PSF を使用する。

図 9 は、南東領域においてこの補完方法を使用した位置依存型 RL 法の結果を示している。図 9(a)は、

補完を行わずに  $n=5$  のサンプリング間隔で 200 回の反復を行った結果で、アーチファクトがほとんど見られないことから、この結果をリファレンス画像として評価する。一般的には、 $n=1$  をリファレンスとするのが理想だが、計算コストの制約から  $n=5$  を用いた。図 9(b, c, d)は、それぞれ補完を行わない場合、平均化補完、ランダム化補完を使用して位置依存型 RL 法を実行した結果を示している。図 9(\*-1)は、これらの結果とリファレンス画像 (図 9(a)) との絶対値の差分画像である。補完を行った場合、境界部での差分が  $n=5$  の結果に近づいており、アーチファクトが軽減されていることが確認できる。図 9(-2)では、差分画像 (図 9(-1)) をリファレンス画像 (図 9(a)) で割った変化率を示している。明るい領域において、補完を行った場合、境界部での変化率は 1%程度となり、補完なしの場合に比べて改善されている。南東領域の明るい領域では統計誤差が 3%程度であるため、補完によって統計誤差の範囲内で  $n=5$  と近い結果が得られたことがわかる。

A:1	A:1	A:2/3, B:1/3	A:1/3, B:2/3	B:1	B:1
A:1	A:1	A:2/3, B:1/3	A:1/3, B:2/3	B:1	B:1
A:2/3, C:1/3	A:2/3, C:1/3	A:4/9, B:2/9, C:2/9, D:1/9	A:2/9, B:4/9, C:1/9, D:2/9	B:2/3, D:1/3	B:2/3, D:1/3
A:1/3, C:2/3	A:1/3, C:2/3	A:2/9, B:1/9, C:4/9, D:2/9	A:1/9, B:2/9, C:2/9, D:4/9	B:1/3, D:2/3	B:1/3, D:2/3
C:1	C:1	C:2/3, D:1/3	C:1/3, D:2/3	D:1	D:1
C:1	C:1	C:2/3, D:1/3	C:1/3, D:2/3	D:1	D:1

図 8. 境界部近傍における PSF の平均化とランダム化の重み。黒太線は PSF の切り替え領域、薄線はピクセルを表す。A, B, C, D はそれぞれの場所における PSF を示し、境界線では 1/3, 2/3 の重みが、4 つのコーナーの境界では 1/9, 2/9, 4/9 の重みが適用される。



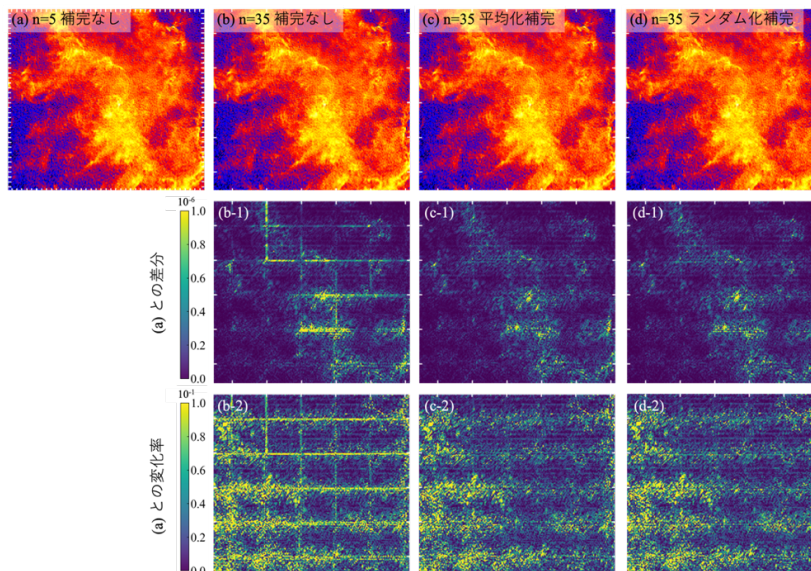


図 9. 南東領域における境界の PSF の補完の有無による比較。PSF のサンプリングピクセル間隔を  $n$  で示す。PSF の境界部を画像周縁の目盛りで示す。(a) :  $n=5$  の場合、境界の PSF の補完を行わずに位置依存型 RL 法を適用し、リファレンス画像として使用。(b) :  $n=35$  の場合、境界の PSF の補完を行わずに位置依存型 RL 法を適用。(c, d) : (b) と同じ PSF 間隔で、境界部の PSF を図 8 の重みに従ってそれぞれ平均化、ランダム化して位置依存型 RL 法を適用。(b-1, c-1, d-1) : (b, c, d) と (a) の差分の絶対値。(b-2, c-2, d-2) : (b-1, c-1, d-1) を (a) で割った差分の変化率。

### 5.4.2. 補完によるアーチファクトの抑制効果の定量評価

図 9 の結果を定量的に評価するために、平均絶対誤差、平均二乗誤差、平均変化率の評価指標を使用する。これらの評価指標の結果を表 2 に示す。表 2 からわかるように、いずれの評価指標においても、補完を行った場合（平均化補完およびランダム化補完）が補完を行わない場合（補完なし）に比べて改善されている。この結果から、PSF の境界部のアーチファクトを抑制するために、簡単な補完方法が効果的であることが示唆される。

表 2. 図 9 の南東領域における PSF の図 9(a) をリファレンス画像とし、図 9(b, c, d) の各誤差指標での結果。

	補完なし	平均化補完	ランダム化補完
平均絶対誤差 ( $10^{-7}$ flux)	1.42	1.16	1.18
平均二乗誤差 ( $10^{-14}$ flux <sup>2</sup> )	6.33	3.70	3.95
平均変化率 (%)	3.80	3.22	3.27

## 6. まとめ

本研究は、画像デコンボリューション法の一つである RL 法を、X 線衛星 Chandra の観測画像全体での適用のために、PSF の位置依存性を適切に考慮して実装した。この手法を Chandra 衛星の超新星残骸カシオペア座 A に適用し、観測画像全体で鮮明化できることを確認した。さらに、位置依存型 RL 法は計算コストが課題となるが、PSF のサンプリング間隔を調整し、境界部を適切に補完する方法を提案した。この方法により、計算速度を向上させつつも、推定精度を保つことができることを確認した。この研究成果は、Chandra 衛星以外の他の人工衛星においても応用可能であり、光学系に合わせて補完方法を最適化することで、現実的な計算コストでの実用化が期待される。宇宙開発および宇宙観測に携わる人で RL 法に興味を持った人の一助となれば幸いである。

## 謝 辞

本研究は、日本学術振興会（JSPS）科学研究費 挑戦的研究(開拓)JP20K20527「精密 X 線分光偏光観測に向けた極低温コンプトンカメラの開発（研究代表者：山田真也）」、基盤研究(B)JP22H01272「X 線連星 SS433 ジェットによる電波星雲 W50 の形成とガンマ線放射生成機構の解明（研究分担者：山田真也）」基盤研究(B)JP20H01941「輻射磁気流体計算に基づく活動銀河中心核状態遷移過程の解明（研究分担者：山田真也）」による助成を受けて行われた。

## 参考文献

- [1] Richardson, W. H., Bayesian-based iterative method of image restoration, *JoSA*, 62.1, 1972, 55.
- [2] Lucy, L. B., An iterative technique for the rectification of observed distributions, *AJ*, 79, 1974, 745.
- [3] Sakai Y., et al., Richardson–Lucy Deconvolution with a Spatially Variant Point-spread Function of Chandra: Supernova Remnant Cassiopeia A as an Example, *ApJ*, 951, 2023, 59.
- [4] Tajima, H., et al., Studies of EGRET sources with a novel image restoration technique, *AIP Conf. Proc.*, 921, 2007, 187.
- [5] Zhang, K., et al., Deep image deblurring: A survey, *International Journal of Computer Vision*, 130, 2022, 2103
- [6] Dey, N., et al., 3D microscopy deconvolution using Richardson-Lucy algorithm with total variation regularization, *INRIA*, 2004, 1.
- [7] Dey, N., et al., Richardson–Lucy algorithm with total variation regularization for 3D confocal microscope deconvolution, *Microsc. Res. and Tech.*, 69, 2006, 260.
- [8] Yuan, L., et al., Progressive inter-scale and intra-scale non-blind image deconvolution, *ACM Trans. Graph.*, 27, 2008, 1.
- [9] Fish, D. A., et al., Blind deconvolution by means of the Richardson–Lucy algorithm, *JOSA A*, 12.1, 1995, 58.
- [10] Grefenstette, B. W., et al., Locating the most energetic electrons in Cassiopeia A, *ApJ*, 802, 2015, 15.
- [11] Thimmappa, R., et al., Chandra imaging of the western hotspot in the radio galaxy Pictor A: image deconvolution and variability analysis, *ApJ*, 903, 2020, 109.
- [12] Sobolenko, M., et al., NGC 6240 supermassive black hole binary dynamical evolution based on Chandra data, *MNRAS*, 517.2, 2022, 1791.
- [13] Fruscione, A., et al., CIAO: Chandra's data analysis system, *Proc. SPIE*, 6270, 2006, 586.
- [14] Davis, J. E., et al., Raytracing with MARX: X-ray observatory design, calibration, and support, *Proc. SPIE*, 8443, 2012, 375.
- [15] Daube-Witherspoon, M. E., & Muehllehner, G., n iterative image space reconstruction algorithm suitable for volume ECT, *IEEE transactions on medical imaging*, 5.2, 1986, 61.
- [16] Dempster, A. P., Laird, N. M., & Rubin, D. B., Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm, *Journal of the royal statistical society: series B (methodological)* 39.1, 1977, 1.
- [17] Shepp, L. A., & Vardi, Y., Maximum likelihood reconstruction for emission tomography. *IEEE transactions on medical imaging*, 1.2, 1982, 113.
- [18] Tai, Y. W., Tan, P., & Brown, M. S, Richardson-lucy deblurring for scenes under a projective motion path. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 33.8, 2010, 1603.

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-23-007

JAXA Research and Development Report

宇宙科学情報解析論文誌 第十三号

Journal of Space Science Informatics Japan Volume 13

---

発行 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1

URL: <https://www.jaxa.jp/>

発行日 2024年2月27日

電子出版制作 松枝印刷株式会社

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。

Unauthorized copying, replication and storage digital media of the contents of this publication, text and images are strictly prohibited. All Rights Reserved.

---

