

IUGONET 解析ソフトウェアの開発

田中 良昌^{*1}, 新堀 淳樹^{*2}, 鍵谷 将人^{*3}, 堀 智昭^{*4}, 阿部 修司^{*5}, 小山 幸伸^{*6}, 林 寛生^{*2}
吉田 大紀^{*7}, 河野 貴久^{*8}, 上野 悟^{*9}, 金田 直樹^{*9}, 米田 瑞生^{*10}, 田所 裕康^{*10}
元場 哲郎^{*1}, 三好 由純^{*4}, 関 華奈子^{*4}, 宮下 幸長^{*4}, 瀬川 朋紀^{*4}, 小川 泰信^{*1}

Development of IUGONET data analysis software

Yoshimasa TANAKA^{*1}, Atsuki SHINBORI^{*2}, Masato KAGITANI^{*3}, Tomoaki HORI^{*4}
Shuji ABE^{*5}, Yukinobu KOYAMA^{*6}, Hiroo HAYASHI^{*2}, Daiki YOSHIDA^{*7}, Takahisa KONO^{*8}
Satoru UeNo^{*9}, Naoki KANEDA^{*9}, Mizuki YONEDA^{*3}, Hiroyasu TADOKORO^{*10}
Tetsuo MOTOKA^{*1}, Yoshizumi MIYOSHI^{*4}, Kanako SEKI^{*4}, Yukinaga MIYASHITA^{*4}
Tomonori SEGAWA^{*4} and Yasunobu OGAWA^{*1}

Abstract

In this paper we report an outline of data analysis software developed by the IUGONET (Inter-university Upper atmosphere Global Observation NETwork) project. UDAS (iUgonet Data Analysis Software) is the software to visualize and analyze the upper atmospheric data distributed by five universities/institutes (Tohoku Univ., Nagoya Univ., Kyoto Univ., Kyushu Univ., and NIPR) that belong to the IUGONET project. The UDAS is a plug-in software of TDAS (THEMIS Data Analysis Software suite) that is written in IDL (Interactive Data Language) and has many useful routines to visualize and analyze time series data. In addition, the UDAS provides the GUI (Graphical User Interface) for beginners of IDL. A beta version of the UDAS was released at the IUGONET website in May, 2011. Furthermore, future perspectives of the UDAS are described.

Keyword: IUGONET project, data analysis software, upper atmosphere, THEMIS mission, IDL

概要

本論文では、大学間連携プロジェクト「超高層大気長期変動の全球地上ネットワーク観測・研究」(IUGONET)で開発された解析ソフトウェア(UDAS)の概要について報告する。UDASは、IUGONET参加機関である東北大学、名古屋大学、京都大学、九州大学および国立極地研究所の5機関が所有する超高層大気データの可視化・解析ソフトウェアである。UDASは、IDL(Interactive Data Language)で書かれたTHEMISミッションの統合データ解析ツールTDAS(THEMIS Data Analysis Software suite)のプラグインソフトであり、TDASの機能を利用することで、IUGONET所属機関が所有する種類の異なる複数の時系列データの可視化・解析を容易にする。また、初心者でも

^{*1} 国立極地研究所 (National Institute of Polar Research)

^{*2} 京大大学生存圏研究所 (Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University)

^{*3} 東北大学惑星プラズマ・大気研究センター (Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Tohoku University)

^{*4} 名古屋大学太陽地球環境研究所 (Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University)

^{*5} 九州大学宙空環境研究センター (Space Environment Research Center, Kyushu University)

^{*6} 京都大学理学研究科附属地磁気世界資料解析センター (Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism, Graduate School of Science, Kyoto University)

^{*7} 気象情報通信株式会社 (Weather Information & Communications Service LTD.)

^{*8} 東京大学物性研究所 (Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo)

^{*9} 京都大学理学研究科附属天文台 (Kwasan and Hida Observatories, Graduate School of Science, Kyoto University)

^{*10} 東北大学大学院理学研究科 (Graduate School of Science, Tohoku University)

利用し易いように、GUI (Graphical User Interface) も提供する。UDAS は、2011 年 5 月より IUGONET ウェブページでβバージョンがリリースされている。さらに、UDAS 開発の今後の展望について述べる。

1. はじめに

平成 21 年度から 6 カ年計画でスタートした大学間連携プロジェクト「超高層大気長期変動の全球地上ネットワーク観測・研究」(IUGONET: Inter-university Upper atmosphere Global Observation NETwork)¹⁾ は、東北大学、名古屋大学、京都大学、九州大学、国立極地研究所の 5 機関が所有する全球規模の地上観測ネットワークで取得された多種多様な超高層大気データを利用して、複数の要因が複雑に絡み合った超高層大気長期変動のメカニズムを解明することを目的としている。そのために、本プロジェクトでは、複数の機関が分散管理している多様な観測データを横断検索できるメタデータ・データベースの構築、並びに、各機関が所有する種類の異なる複数の時系列データを並べてプロットしたり相関解析できる解析ソフトウェアの開発を行っている。本論文では、後者の IUGONET 解析ソフトウェア (略称: UDAS) の概要と現状、今後の展望について述べる。

2. 開発方針

まず、IUGONET 参加機関が所有するデータを使って超高層大気長期変動メカニズムを研究するために、どういった描画、解析が必要かという議論からスタートした。その結果、解析ソフトウェアの主な仕様として、複数の時系列データを並べて表示できる機能や、ダイナミックスペクトルやケオグラム (カメラ画像のある方向の断面を時系列に並べたもの) のように横軸に時刻、縦軸に周波数や高度、緯度等をとった 2 次元カラー表示機能、太陽画像やオーロラ画像、電離層等価電流等の 2 次元画像・ベクトル表示機能、フィルターやフーリエ変換、相関解析等の機能が必要であることが明らかになった。

次に、上記の仕様を実現するために、既存の解析ソフトウェアについて調査を行なった。主なものとして、IDL (Interactive Data Language)²⁾、GDL (GNU Data Language)³⁾、MATLAB⁴⁾、Scilab⁵⁾、SciPy⁶⁾、Autoplot⁷⁾ 等を調査した。最終的に、以下の理由から IDL を選択した。(a) プロジェクト参加機関の多くで使われており、既存のソフトウェア資源を有効活用できる。(b) 国内外を問わず、太陽地球系物理学の分野に広く普及しており、開発したソフトウェアのユーザーを安定して獲得できる。また、太陽物理のための統合ソフトウェアライブラリである SolarSoft⁸⁾ や、SuperDARN (Super Dual Auroral Radar Network)^{9), 10)} レーダー用のライブラリ GO¹¹⁾、THEMIS ミッション¹²⁾ のライブラリ TDAS (THEMIS Data Analysis Software suite)¹³⁾ といった参考となるサイエンス目的の IDL ライブラリが既に存在する。(c) IDL はライセンスが高額であるが、後述するように IDL Virtual Machine¹⁴⁾ という実行ファイルを走らせることができる環境が無償で提供されている。

特に、本プロジェクトでは、THEMIS ミッションで開発された TDAS をベースにソフトウェアを開発することに決定した。TDAS を選択した理由については、TDAS の概要と共に 3 節で説明する。

3. TDAS の概要

TDAS は、THEMIS ミッションで取得された衛星観測データ、地上観測データを解析するための統合解析ツールであり UCB (University of California, Berkeley) のウェブサイト (<http://themis.ssl.berkeley.edu/software.shtml>) で公開されている。ここで、THEMIS ミッションとは、2007 年 2 月に打ち上げられた 5 機の磁気圏探査衛星と北米の約 20 ヶ所の全天カメラ、磁場観測装置を組み合わせ、オーロラが爆発的に発達する現象「サブストーム」^{15), 16)} の発生機構を解明することを目的としたミッションである。

TDAS は、各ユーザーのコンピュータに IDL がインストールされていることが前提になっている。TDAS の主な特徴として、以下が挙げられる。(1) HTTP プロトコルを使って遠隔にあるデータファイルをインターネット越しに各自のコンピュータにダウンロードする機能が備わっている。(2) ロードしたデータは、観測プロジェクトの情報やデータ使用ポリシー等のグローバル属性やデータの描画についての可視化属性と共に tplot 変数と呼ばれる構造体に格納され、描画・解析時に参照される。(3) 複数データのスタックプロットやフィルター、ウェーブレット等の時系列データの可視化・解析のためのサブルーチンが多数用意されている。(4) テキスト形式で書かれた IDL プログラムのライブラリであるため、IDL の知識があれば、ユーザーが自由に参照、改良できる。(5) GUI (Graphical User Interface) が用意されており、IDL 初心者でも比較的簡単に利用できる。

(1), (2)の特徴から, TDAS では, 日時指定 (timespan), データロード (thm_load_xxx; ここで xxx はデータ種に依存), プロット (tplot) の3つのコマンドだけで, データを描画できる. そのため, ユーザーは, データをロードするためのプログラム名さえ知っていれば, データが何処にあるのか, どんな種類のデータなのか, ファイル形式は何か, 等を意識することなく, 体裁の整ったプロットを容易に作成可能である. たとえプロットしたいデータのロードプログラムが存在しない場合でも, ユーザー側で TDAS のプログラミングの作法に従ってロードプログラムを用意することにより, TDAS を使ってデータを表示及び解析することができる. また, (3)により, 2節で述べた我々の研究に必要なとする機能の多くを利用することが可能となる. (但し, 2次元画像の描画・解析ツールは, 現時点で不十分なところがあると考えている.)

データ解析に普段 IDL 及び TDAS を使っていない研究者は, 上記データロード機能をデータ収集の目的のみに利用することもできる. TDAS にはロードした tplot 変数を ASCII ファイルに出力する機能があり, この機能を使うことで, IDL 以外のソフトウェアにデータを簡単に取り込むことができる. また, 5節で述べるように, 現在, IDL Virtual Machine 環境で動作する TDAS の開発を進めている. これが完成すれば, 高額な IDL ライセンスを必要とせずにデータ収集や ASCII ファイル出力が可能となる.

THEMIS ミッションの観測データのほとんどは, CDF (Common Data Format)¹⁷⁾ と呼ばれる自己記述型のファイル形式で保存されている. そのため, CDF ファイルを取り扱うためのライブラリが充実しており, ファイル形式を CDF ファイルに変換しておくことで最もその恩恵を受けることができる. しかし, ASCII ファイルや独自のバイナリ形式のファイルであっても, TDAS に取り込むことは容易である.

上記のような特徴から, 日本の内部磁気圏探査ミッション ERG (Energization and Radiation in Geospace)^{18), 19)} は, IUGONET プロジェクトよりも先に, TDAS を解析ツールとして正式に採用することを決定した. ERG ミッションは, 内部磁気圏探査衛星と, 地上観測ネットワーク, 理論・モデリング・総合解析を3つの軸として掲げており, IUGONET 所属機関の所有する多くの地上観測データも重要な要素であると位置づけられている. このことから, ERG ミッションと協力してソフトウェア開発ができる点, 並びに, 2014年頃の ERG 衛星打ち上げに向けて TDAS のユーザーが増えることが期待できる点も, IUGONET が TDAS を採用した理由の一つである.

以上のような経緯から, 2010年12月に開催されたアメリカ地球物理学連合2010年秋季大会 (AGU Fall Meeting 2010) において, THEMIS サイエンスサポートチーム, ERG サイエンスセンター (ERG-SC), IUGONET 開発者メンバーとの間で会合が行われ, TDAS を IUGONET プロジェクトの解析ソフトウェアとして採用することが確認され, 協力体制等が議論された.

4. UDAS の開発

3節で述べたように, IUGONET 所属機関の所有する観測データを TDAS で取り扱うためには, 各データについてのロードプログラムを作る必要がある. そこで, 開発の第一段階として, それぞれの機関が所有する代表的なデータについて, ロードプログラムを作成することにした.

TDAS では, このロードプログラムの中に, データファイルを公開しているウェブサイトの URL を書き込む必要がある. 本プロジェクトでは, メタデータについてはプロジェクト参加機関全ての統合データベースが存在するが, 実データについてはそれぞれの機関で分散管理されている. これは, 実質的にマンパワーが不足している, 各機関により既に実データデータベースがある程度整備・公開されている, データが多様多岐であり管理が困難である等が主な理由である.

同様の理由により, 本プロジェクトでは, 実データのファイル形式の統一は行わない. THEMIS ミッションでは, データファイルは基本的に CDF 形式で統一されており, ファイルの中に観測プロジェクトや PI (Principal Investigator) の情報, データ使用ポリシーといったグローバル属性や描画のための可視化属性が含まれているため, tplot 変数へのロードがシンプルに記述できる. 一方, CDF ファイル以外のものについては, TDAS に実装されている cdf2tplot (CDF ファイルを読み込んでデータを tplot 変数に格納する便利なサブルーチン) 等が使えず, ASCII や独自バイナリファイルからデータを読み, 且つ, グローバル属性や可視化属性を tplot 変数へ格納するためのプログラムを独自に書く必要がある.

これらのロードプログラムは, ERG ミッションのサイエンス部門である ERG サイエンスセンター (ERG-SC) とメーリングリストやテレビ会議等で情報交換しながら共同で開発されている. 図1に, これまでに作成したいくつかのロードプログラムを使って TDAS で描画した例を示す. 図1に示されるように, IUGONET 所属機関の持つ種類の異なる複数の時系列データを, 並べて表示することが可能である.

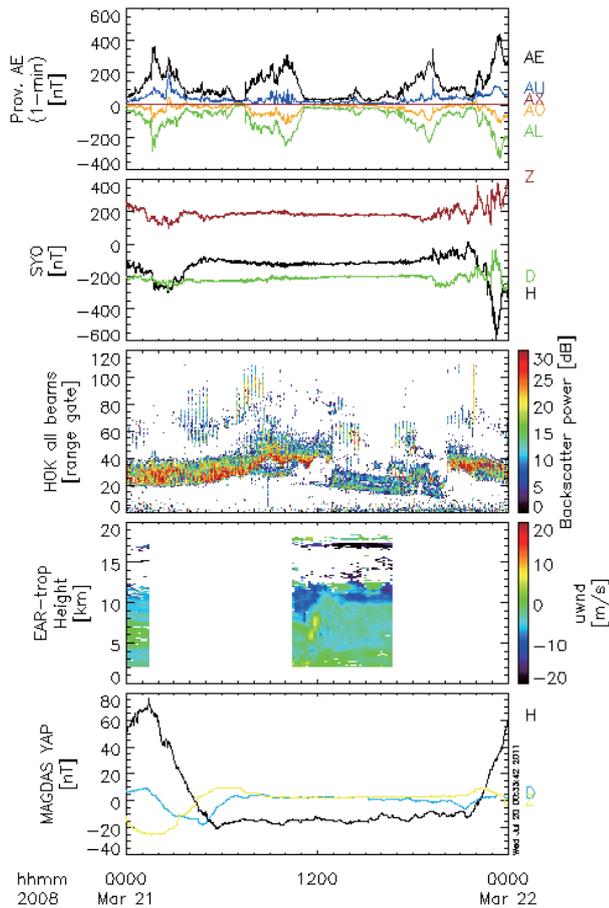


図1 UDASのロードプログラムを使って作成したスタックプロット。上から、2008年3月21日の京大地磁気世界資料解析センター（以下、京大WDC）のAE指数²⁰⁾、極地研の昭和基地地磁気データ、名大のSuperDARN北海道レーダーデータ、京大生存圏研究所の赤道大気レーダーデータ、九大のMAGDAS^{21), 22), 23)}のYAP観測点の地磁気データ。

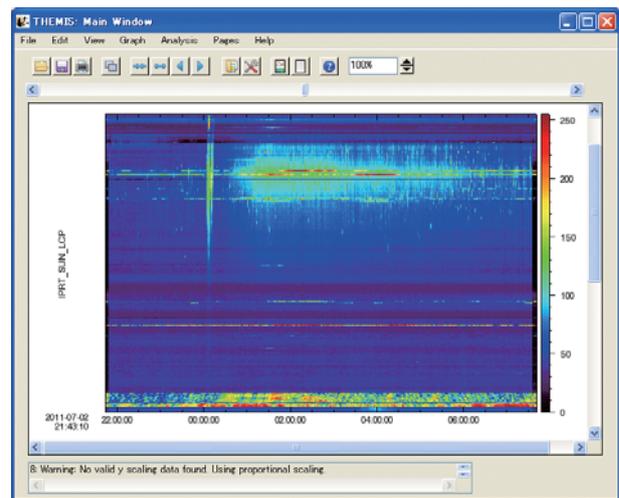
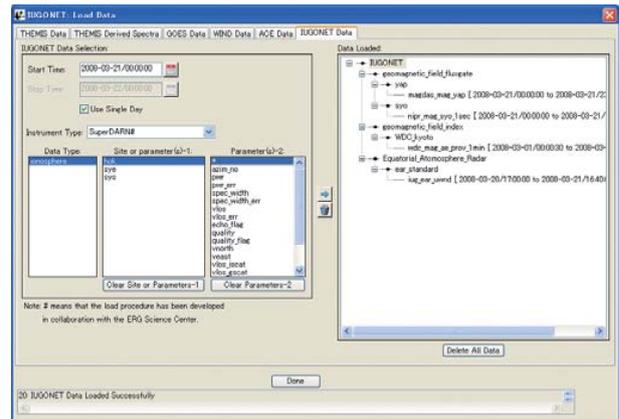


図2 (上) TDASのGUIのデータロードウィンドウにIUGONET Dataタブを組み込んだ例。(下) TDASのGUIでプロットした東北大の飯館電波望遠鏡観測によるVHF～UHF帯太陽電波データ。

また、我々は、TDASに既存のGUIでIUGONETデータがロードできるようにTDASのプログラムを変更・追加した。図2に、作成したGUIのサンプル画像を示す。ここで、GUIのデータロードウィンドウにIUGONET Dataタブが追加されていることに注意してほしい（上図）。この改良にはTDASのGUIプログラムを一部書き換える必要があるが、後に述べるようにTDASオリジナルのプログラムを上書きする訳ではない。

開発したプログラムは、2011年5月より、UDAS (iUgonet Data Analysis Software) β バージョンとしてウェブページで公開されている。図3にUDASダウンロードページを、表1に9月1日時点において公開されているUDASバージョン1.00.b3のロードプログラムの一覧を示す。UDASは、TDASのプラグインソフトであり、TDASがインストールされたコンピュータにダウンロードし、IDLパスを設定することで、UDASのライブラリが使えるようになる。バージョン番号の1.00はTDASバージョン6.00用のプラグインであることを、b3はリビジョン番号を表している。UDASパッケージの中には、GUIについてのプログラムの一部がTDASと同じ名前前で置いてあり、TDASよりもUDASを先に読むようにIDLのパスを設定することで、GUIにおけるIUGONETデータロード機能を実現している。

UDASでロードできるデータについての様々な情報は、2011年4月に β バージョンの公開を開始したIUGONETメタデータ・データベース (<http://search.iugonet.org/iugonet/>)^{24), 25)}で収集できる。ユーザーは、このメタデータ・データベースでキーワード検索や時刻検索、緯度経度検索を行うことによって、解析したいデータの詳細な解説や使用ポリシー、観測点・観測装置の情報、観測プロジェクトや実データ・データベースのURL、コンタクトパーソンの連絡先といった有用な情報を取得できる。UDASから直接メタデータ・データベースにアクセスする方法についても、現在検討中であり、5節でその一例を紹介する。



図3 UDASのダウンロードページ.

URL: <http://www.iugonet.org/software/install.html>

表1 UDAS v1.00.b3に含まれているロードプログラム.

(*)印は, ERG 関連データのロードプログラム (erg_load_xxx) のエイリアス.

観測データ	プログラム名
飯館電波望遠鏡データ	iug_load_iprt
境界層レーダーデータ	iug_load_blr_rish_txt
Lバンド下部対流圏レーダーデータ	iug_load_ltr_rish_txt
赤道大気レーダーデータ	iug_load_ear
MUレーダーデータ	iug_load_mu
流星レーダーデータ	iug_load_meteor_rish
MFレーダーデータ	iug_load_mf_rish
SuperDARNレーダーデータ (*)	iug_load_sdfit
EISCATレーダーデータ	iug_load_eiscat
地磁気指数, WDC地磁気データ	iug_load_gmag_wdc
昭和基地, アイスランド地磁気データ (*)	iug_load_gmag_nipr
210°地磁気観測網1分値データ (*)	iug_load_gmag_mm210
MAGDAS地磁気観測網データ	iug_load_gmag_serc

ここで, 本プロジェクトと先に述べた ERG ミッションの解析ソフトウェア開発方針の違いを述べておく. まず, ERG ミッションでは, IUGONETと異なり, ERG ミッションに関連する衛星・地上観測データの統合データベースを構築する. また, ERG ミッションでは, THEMIS ミッションと同様に, 全てのデータファイルを CDF 形式に変換する.

IUGONETでも, 一部の観測装置 (フラックスゲート磁力計の一部, ELF/VLF 帯自然電波受信装置, リオメータ, イメージングリオメータ²⁶⁾, SuperDARNレーダー, EISCAT (European Incoherent SCATter)レーダー²⁷⁾, イメージャ等)のデータの CDF 化が進められており, これらのデータの CDF 化は部分的に ERG-SC の協力により行われている. さらに, ERG ミッションで開発されたロードプログラムは, 関係者にテスト公開された後, TDAS に統合され UCB ウェブページから公開される. 既に, TDAS バージョン 6.00 には, ERG-SC が中心となって開発した 210°地磁気観測網^{28), 29)} 1分値データと昭和基地・アイスランド地磁気データのロードプログラムが含まれている.

5. 今後の展望

本節では、UDAS の今後の計画として、(i) IDL Virtual Machine (以下、IDL-VM) 環境で走る実行ファイルの開発、(ii) メタデータ・データベースとの連携、(iii) 2次元画像データのロード、描画プログラムの開発、の3つについて紹介する。

(i) について、TDAS は IUGONET プロジェクトの解析ソフトウェアとして有用であるが、TDAS を使う一つの問題点として、IDL ライセンスが高額であることが挙げられる。そこで、我々は、IDL-VM 環境で動作する TDAS の開発を進めている。IDL-VM とは ITT-VIS により無償提供される IDL の実行環境であり、IDL ライセンスがある状況でコンパイルした実行ファイルを、この環境でライセンス無しで走らせることができる。これまでに、IDL の標準ライブラリと TDAS ライブラリを全てコンパイルする方法で TDAS の GUI の実行ファイルを作成した。その結果、TDAS v6.00 の GUI は、一部の THEMIS 衛星データのロードに不具合が見られる以外は、ほぼ全ての機能が IDL-VM 環境で動作することを確認した。今後、THEMIS サイエンスサポートチームと協力してバグを修正し、UDAS を含めて 2011 年度中に実行ファイルを公開することを目指す。

(ii) のメタデータ・データベースとの連携として、解析ソフトからメタデータ・データベースにアクセスして、データファイルの所在情報を動的に取得することを検討している。前述のように、TDAS では、個々のデータのロードプログラムの中でデータの URL が静的に与えられる。しかし、この方法は、データの所在が変わる度にロードプログラムを修正しなければならない、効率的な方法とは言えない。そこで、以下のような手順でデータの URL を取得することを検討している。1. 解析ソフト (IDL) から SRW (Search/Retrieval Web Service)³⁰⁾ あるいは SRU (Search/Retrieval via URL)³¹⁾ プロトコルを用いて IUGONET メタデータ・データベースに対して目的のデータを検索するためのクエリーを送信する。2. 検索結果を XML 形式のファイルで受信する。3. IDL の XML パーサを使って URL を抽出する。既に、我々は、IDL からメタデータ・データベースへアクセスし、取得したメタデータを加工できることを確認している。

このような UDAS とメタデータ・データベースとの連携は、UDAS のメンテナンスの負担軽減という点からも極めて有効である。上記のようにロードプログラムに必要な情報をメタデータ・データベースから動的に取得することで、メンテナンス作業はメタデータの更新のみに抑えられ、UDAS のプログラム変更の手間を最小限にすることができる。また、様々なデータのロードプログラムをある程度統一した形式で記述することができるというメリットもある。

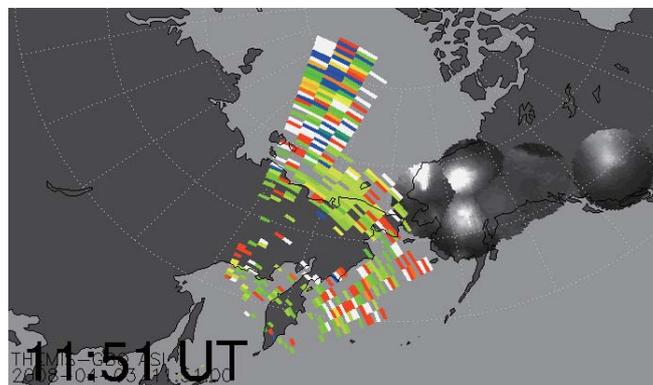


図4 SuperDARN 北海道レーダーデータと THEMIS 地上観測点で得られた全天カメラ画像を地図上に重ね描きした例。

(iii) について、IUGONET 参加機関の中には、太陽画像やオーロラ画像、レーダーデータ、イメージングリオメータデータ等、2次元データが複数存在し、これらを TDAS でロード、描画する要求がある。しかし、IUGONET の2次元データのロードプログラムは、現時点で SuperDARN レーダーを除いて UDAS に含まれていない。一方、同じ地理座標上にオーロラ画像や SuperDARN レーダーデータ、イメージングリオメータデータ、地磁気から推定される電離層等価電流系、衛星のフットプリント等を重ね描きすることは、超高層物理学、特に、磁気圏電離圏物理学の分野でしばしば求められる機能である。

図4は、UDAS v1.00.b3 に含まれている SuperDARN レーダーのプロットルーチンを使って、SuperDARN 北海道レーダーのデータと THEMIS 地上観測点の全天カメラ画像を重ねて描画した例である。今後、IUGONET 所属機関が所有する複数の2次元データを同様の方法でプロットするためには、プロットルーチンの開発は元より、2次元データを地理座標上へマッピングするための情報の整備、公開も必須である。

6. まとめ

大学間連携プロジェクト「超高層大気長期変動の全球地上ネットワーク観測・研究」(IUGONET)では、参加機関の地上観測データを可視化・解析するソフトウェア UDAS を開発している。UDAS は、THEMIS ミッションのデータ解析ツール TDAS のプラグインソフトであり、太陽地球系物理学分野で普及している IDL の言語で書かれている。既に、IUGONET 参加機関の代表的なデータのロードプログラムを集めたパッケージをβバージョンとして IUGONET ウェブページより公開している。今後、IDL-VM 環境で動作する TDAS 及び UDAS 実行ファイルの公開、メタデータ・データベースとの連携、2次元データ表示ツールの開発を行っていく予定である。

謝辞

大学間連携プロジェクト「超高層大気長期変動の全球地上ネットワーク観測・研究」は、文部科学省特別教育研究経費(研究推進)[平成21年度]および特別経費(プロジェクト分)[平成22年度から]の交付を受けて、平成21年度より6ヶ年計画で実施している事業である。TDASの使用にあたり、ご協力いただいたTHEMISサイエンスサポートチームに感謝する。また、UDASで扱っているSuperDARNレーダーデータの一部は情報通信研究機構により提供されている。IUGONETプロジェクトで使用される観測データのデータベース構築に携わった全ての方々に感謝する。特に、国立極地研究所宙空圏研究グループのデータ整備に尽力下さった余川真純氏、京都大学生存圏研究所のデータ整備に尽力下さった橋口典子氏に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) IUGONET - 超高層大気長期変動の全球地上ネットワーク観測・研究
<http://www.iugonet.org/>
- 2) IDL (Interactive Data Language)
<http://www.ittvis.com/language/en-US/ProductsServices/IDL.aspx>
- 3) GDL (GNU Data Language)
<http://gnudatalanguage.sourceforge.net/>
- 4) MATLAB
<http://www.mathworks.co.jp/>
- 5) Scilab
<http://www.scilab.org/>
- 6) SciPy
<http://www.scipy.org/>
- 7) Autoplot
<http://autoplot.org/>
- 8) SolarSoft
<http://sohowww.nascom.nasa.gov/solarsoft/>
- 9) SuperDARN(Super Dual Auroral Radar Network)
<http://superdarn.jhuapl.edu/>
- 10) Greenwald, R. A., K. B. Baker, R. A. Hutchins, and C. Hanuise, An HF phased-array radar for studying small-scale structure in the high-latitude ionosphere, *Radio Sci.*, Vol.20, No.1 (1985), pp.63-79.
- 11) GO
<http://www.ion.le.ac.uk/cutlass/idl/go.html>
- 12) Angelopoulos, V., The THEMIS mission, *Space Sci. Rev.*, Vol.141 (2008), pp.5-34, doi:10.1007/s11214-008-9336-1.
- 13) TDAS (THEMIS Data Analysis Software suite)
<http://themis.ssl.berkeley.edu/software.shtm>
- 14) IDL Virtual Machine
<http://www.ittvis.com/language/en-US/ProductsServices/IDL/IDLModules.aspx>

- 15) Akasofu, S.-I., The development of the auroral substorm, *Planet. Space Sci.*, Vol.12 (1964), pp.273-282.
- 16) Elphinstone, R. D., J. S. Murphree, and L. L. Cogger, What is a global auroral substorm?, *Rev. of Geophys.*, Vol.34 (1996), pp.169-232.
- 17) CDF (Common Data Format)
<http://cdf.gsfc.nasa.gov/>
- 18) ERG (Energization and Radiation in Geospace)
http://gemsissc.stelab.nagoya-u.ac.jp/erg_ja
- 19) Miyoshi, Y., K. Seki, K. Shiokawa, T. Ono, Y. Kasaba, A. Kumamoto, M. Hirahara, T. Takashima, K. Asamura, A. Matsuoka, T. Nagatsuma, and ERG working group, Geospace Exploration Mission: ERG project, *Transactions of the Japan society for aeronautical and space sciences, aerospace technology Japan*, Vol. 8, ists27, (2010) Tm_1-Tm_6.
- 20) AE(Aurora Electrojet) 指数 <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aedir/index-j.html>
- 21) MAGDAS
<http://magdas.serc.kyushu-u.ac.jp/>
- 22) Yumoto, K. and the MAGDAS Group, MAGDAS project and its application for space weather, *Solar Influence on the Heliosphere and Earth's Environment: Recent Progress and Prospects*, Edited by N. Gopalswamy and A. Bhattacharyya (2006), pp.309-405, ISBN-81-87099-40-2.
- 23) Yumoto K. and the MAGDAS Group, Space weather activities at SERC for IHY: MAGDAS, *Bull. Astr. Soc. India*, Vol.35 (2007), pp.511-522.
- 24) 小山幸伸, 河野貴久, 堀智昭, 阿部修司, 吉田大紀, 林寛生, 田中良昌, 新堀淳樹, 上野悟, 金田直樹, 米田瑞生, 元場哲郎, 鍵谷将人, 田所裕康, 超高層物理学分野の為のメタデータ・データベースの開発, *宇宙科学情報解析論文誌*, 第1号, 99-104, 2012.
- 25) 堀智昭, 鍵谷将人, 田中良昌, 林寛生, 上野悟, 吉田大紀, 阿部修司, 小山幸伸, 河野貴久, 金田直樹, 新堀敦樹, 田所裕康, 米田瑞生, IUGONET 共通メタデータフォーマットの策定とメタデータ登録管理システムの開発, *宇宙科学情報解析論文誌*, 第1号, 105-111, 2012.
- 26) Detrick, D. L. and Rosenberg, T. J.: A phased-array radiowave imager for studies of cosmic noise absorption, *Radio Sci.*, Vol.25, No.4 (1990), pp.325-338.
- 27) 小川泰信, 野澤悟徳, Ingemar Häggström, 大山伸一郎, 元場哲郎, 津田卓雄, 齋藤昭則, 宮下幸長, 田中良昌, 堀智昭, 上野玄太, 宮岡宏, 藤井良一, 欧州非干渉散乱 (EISCAT) レーダーの大規模データ処理と可視化, *宇宙科学情報解析論文誌*, 第1号, 83-89, 2012.
- 28) 210 度地磁気観測網
<http://stdb2.stelab.nagoya-u.ac.jp/mm210/>
- 29) Yumoto, K. and the 210MM Magnetic Observation Group, The STEP 210 magnetic meridian network project, *J. Geomag. Geoelectr.*, Vol.48 (1996), pp.1297-1310.
- 30) SRW (Search/Retrieval Web Service)
<http://srw.cheshire3.org/>
- 31) SRU (Search/Retrieval via URL)
<http://www.loc.gov/standards/sru/>