

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

小川 泰信^{*1}, 野澤 悟徳^{*2}, Ingemar Häggström^{*3}, 大山 伸一郎^{*2}, 元場 哲郎^{*1}, 津田 卓雄^{*2}
齋藤 昭則^{*4}, 宮下 幸長^{*2}, 田中 良昌^{*1}, 堀 智昭^{*2}, 上野 玄太^{*5}, 宮岡 宏^{*1}, 藤井 良一^{*2}

Large-scale data processing and visualization of the European incoherent scatter (EISCAT) radar system

Y. Ogawa^{*1}, S. Nozawa^{*2}, I. Häggström^{*3}, S. Oyama^{*2}, T. Motoba^{*1}, T. Tsuda^{*2}
A. Saito^{*4}, Y. Miyashita^{*2}, Y. Tanaka^{*1}, T. Hori^{*2}, G. Ueno^{*5}, H. Miyaoka^{*1} and R. Fujii^{*2}

Abstract

We have developed European incoherent scatter (EISCAT) database which contains ionospheric parameters (electron density, electron and ion temperatures, and ion velocity) measured with EISCAT radars located in northern Scandinavia and Svalbard. The EISCAT database provides valuable information for studies on upper atmospheric physics in the polar region. In addition, combinations of the EISCAT database and other in-situ and ground-based databases are essential to understand dynamics of the interaction between polar mesosphere, thermosphere, ionosphere, and magnetosphere. In this paper, we explain the current status of data analysis and visualization of the EISCAT database, and discuss their application to a next generation imaging radar project named EISCAT_3D.

Keywords: Polar ionosphere, Incoherent scatter, Radar, EISCAT, Dagik, IUGONET

概 要

欧州5ヶ国及び中国との国際共同で現在進めている欧州非干渉散乱 (EISCAT) プロジェクトでは、スカンジナビア半島北部及びスバルバル諸島に設置された複数の EISCAT レーダーによって得られたデータを処理及び整備することを通じて、多岐にわたる超高層大気観測・研究を実施してきている。これまでに作成してきた EISCAT データベースは、電子密度や温度などの基本的な物理量を極域電離圏の広い高度範囲及び30年間の長期間に渡り導出及び提供しており、単独でも極域超高層大気物理の研究を推進するために貴重である。それに加え、EISCAT レーダー観測とは相補的な役割を担う、他の飛翔体及び地上観測データや数値シミュレーションとの比較及び融合研究を実施することにより、この EISCAT データベースの価値がさらに高まると考えている。そのため最近では、(1) 各種飛翔体・地上観測との同時観測データの検索及び時系列プロットの同時表示の手法開発や、(2) 観測日時や観測モードなどのメタデータの整備、(3) データの3次元可視化、等にも重点をおいてデータベース化を進めている。今後、次世代フェーズドアレイレーダーシステムである EISCAT_3D 計画の実現時には、この EISCAT データベースの作成や整備、公開を通して得られた、大規模データ処理や3次元可視化の技術や経験が応用されることが期待される。

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

^{*2} 名古屋大学太陽地球環境研究所 (Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, Japan)

^{*3} EISCAT 本部 (EISCAT Headquarters, Sweden)

^{*4} 京都大学理学研究科 (Graduate school of science, Kyoto University, Japan)

^{*5} 統計数理研究所 (Institute of Statistical Mathematics, Japan)

1. はじめに

本論文は欧州非干渉散乱 (European Incoherent Scatter, 以下 EISCAT) レーダーシステムによって得られた過去 30 年間に渡る大規模データの処理方法と、そのデータの可視化方法の現状についてまとめたものである。日本は 1996 年に国立極地研究所を代表機関として EISCAT 協会に加盟後、名古屋大学太陽地球環境研究所や国立極地研究所が中心となり、EISCAT レーダーによって得られたデータの収集や整備を進めてきている。この EISCAT データの総容量は約 20 TBytes に及ぶため、効率の良いデータ処理とその処理後の物理量データの効果的な可視化が求められている。さらに、多点フェーズドアレイアンテナ観測の実現を目指している EISCAT_3D 計画では、数 100 km に及ぶ極域超高層大気の 3 次元データを取得できることから、その大容量データ解析と立体視による可視化も今後求められる。本論文では、この EISCAT_3D 計画の実現時も見越した、大規模データ処理や可視化方法の現状、主にウェブを介したデータベースの利用方法を紹介する。

2. EISCAT レーダーシステムについて

EISCAT 科学協会は、非干渉散乱レーダーを用いたヨーロッパにおける宇宙科学の研究や教育を推進するため、レーダーの建設と維持・運用を主目的として、欧州 6 ヶ国 (独、仏、英、ノルウェー、スウェーデン、フィンランド) が共同出資し、1975 年に設立された。この EISCAT 科学協会設立の背景として、(1) 高緯度域の大気圏・電離圏・磁気圏に関する研究は、基礎科学として有意義であること、(2) これらの研究にとって北欧諸国が地理的に非常に重要な位置にあり、且つ研究に必要な観測所を既に有していること、(3) 大規模施設の建設、維持・運用には国際協力が重要であること、が挙げられる¹⁾。

この EISCAT 科学協会を設立後、スカンジナビア半島北部のトロムソ (ノルウェー)、キルナ (スウェーデン)、ソダンキラ (フィンランド) に KST UHF レーダーシステムを建設し、世界で唯一の 3 局方式による電離圏観測を 1981 年より開始した。それ以降、システムのアップグレードを含む観測技術の向上を経ながら、30 年間に渡る長期間の極域超高層大気データを継続して取得している。また、UHF レーダーシステムを補う形で、電離圏内の電子密度が低い領域 (D 層や上部電離圏) を測定可能なトロムソ VHF レーダーを建設し、1988 年より観測を開始した。

その後 1990 年代前半には、スバル諸島ロングイアビンに非干渉散乱レーダーを設置し、カスプ領域や極冠域を観測する計画が、EISCAT 科学協会と日本により同時期に立案され、共同で EISCAT スバル諸島レーダー (ESR) を建設することとなった。まず EISCAT 科学協会が分担する ESR 第 1 アンテナ (口径 32m の可動式アンテナ) を 1993-1996 年に建築し、1996 年より観測を開始した。1996 年には日本が EISCAT 協会へ加盟し、その後、日本の担当する ESR 第 2 アンテナ (口径 42m の沿磁力線固定式アンテナ) が 1999 年に完成した。これらの両アンテナを用いたカスプ領域 / 極冠域観測が現在も継続して行われている。これらすべてを含めた EISCAT レーダーシステムの位置や写真を図 1 に示す (より詳しい地理情報については、<http://www.eiscat.se/about/coordinates> に掲載されている)。

2007 年に EISCAT 科学協会の協定を更新した際には、EISCAT 協会加盟国が、独、英、ノルウェー、スウェーデン、フィンランド、日本 (代表機関は国立極地研究所と名古屋大学太陽地球環境研究所)、中国の 7 ヶ国に変わり、フランスやロシア、ウクライナなどの国々は、レーダー観測時間を購入する形で EISCAT レーダーシステムを利用するようになった。

さらに、EISCAT 科学協会では、スカンジナビア半島北部に最先端のフェーズドアレイ式アンテナを設置する EISCAT_3D 計画²⁾を現在推進している。この EISCAT_3D 計画は、2008 年 12 月に欧州研究インフラ戦略フォーラム (ESFRI) のロードマップに採択されており、世界で初めての多点イメージングレーダーによる超高層大気の 3 次元観測の実現を目指して、EISCAT_3D Design Study (2005 年 5 月より 4 年間) や EISCAT_3D Preparatory Phase (2010 年 10 月より 4 年間) が進められている。

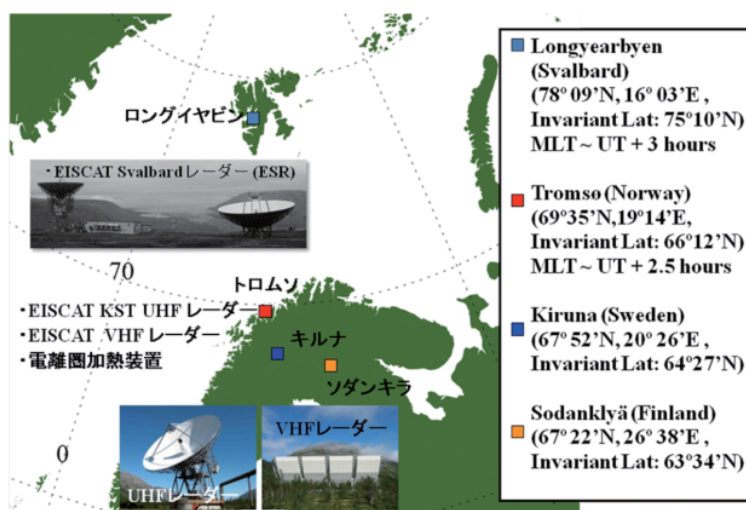


図 1 EISCAT レーダーシステムの設置場所の概要

3. EISCAT レーダーデータについて

EISCAT レーダーを含む非干渉散乱レーダーでは、(1) ピーク出力が 1 MW 以上のパルス状の電波 (VHF/UHF 帯)、(2) 開口面積が 800 m² 以上の大口径アンテナ、(3) 超高感度のレーザモジュール、を合わせ用いることにより、高度約 70-1600 km に存在する電離圏電子からの微弱なエコーに含まれるプラズマ密度や温度などの情報を取得している。

EISCAT レーダーシステムでは、特に 2000 年以降 Alternating Code³⁾ と呼ばれるコード化されたパルスを主に用いることにより、高いレーダー効率及び高レンジ分解能を有した超高層大気観測を行っている (その観測の概要については、<http://www.eiscat.se/groups/Documentation/BasicInfo/about/specifications> 及び <http://www.eiscat.se/about/experiments2/experiments> を参照)。レーダー受信波 (数 kHz の周波数帯に位置するイオン音波ラインの受信波) を直ちにデコードし、得られた自己相関関数 (ACF) を 0.5-5 km のレンジ分解能で 4-10 秒間積分してから、Matlab フォーマットの 1 ファイルとしてディスクに保存している。各レーダーサイト (ロングイアビン、トロムソ、キルナ、ソダンキラ) のワークステーション内に蓄えられた ACF データは、インターネットを介して EISCAT 本部 (スウェーデン・キルナ) に数日以内に転送され、EISCAT 本部 (及び EISCAT キルナサイト) に設置された約 100 TBytes (注: 2011 年 3 月の時点の容量) の RAID システム内に全データが蓄えられる。日本の EISCAT 関連の共同利用・共同研究拠点である国立極地研究所と名古屋大学太陽地球環境研究所では、インターネットを介した EISCAT 本部からの ACF データのダウンロードや、レーダーサイト現地にてポータブルハードディスクや DAT テープを用いて ACF データをコピーすることにより、EISCAT データの収集と国内における整備を継続的に行っている。

EISCAT では、全レーダー合わせて年間 3000-4000 時間の観測を通常実施している。その観測時間は、EISCAT 共通実験 (CP) と各 EISCAT 加盟国の特別実験 (SP) に、ほぼ等分される。CP は EISCAT 加盟国共通の観測であり、主に長期データベース作成用に用いられる。一方 SP では各加盟国の研究者による独自の観測が行われ、実験代表者が実験実施後 1 年間のデータ利用優先権を有する。1 年間未満の SP データの利用については、各国の EISCAT データ代表者を通して調整を行う。日本の SP 割り当て時間は年間約 200 時間であり、毎年公募による全国共同利用を行っている。この SP 観測時間を有効活用して、多岐に渡る超高層大気観測・研究を 1996 年以降実施してきている。

この EISCAT レーダーシステムで得られた年毎の ACF データ容量の変化を図 2 に示す。1995 年頃までは高度分解能が荒い ACF データを取得していたため、データ容量が年間約 10-20 GBytes であったのに対し、ESR が稼働し始めた 1996 年以降には 200 GBytes 程度まで増えている。さらに、1999-2001 年に実施された KST レーダーシステムの更新を終えた 2001 年からは年間 1 TBytes を超え、その後 2007 年 3 月 -2008 年 2 月の国際極年 (IPY) に ESR 連続観測を実施した頃から、年間 2 TBytes を超えるようになった。また、同時期から、より高周波数帯 (数 MHz) のプラズマラインデータも継続的に取得するようになった。なお、図 2 のグラフには、国立極地研究所に保管する主要な ACF データのみを計上しており、2010 年の他国の SP データ容量を除いている。2010 年に実施されたすべての SP データを含めると、計約 3 TBytes に達する見込みである。このように、ACF データ容量は観測技術の向上もあって、年々増加の一途を辿っている。また、1981 年から 2010 年までの ACF データすべてを合計すると、約 20 TBytes になる。

その他に、この ACF データの元となる時系列 (IQ) イオンラインデータのアーカイブを 2010 年より EISCAT 本部で開始している。この IQ データの容量は年間 20-30 TBytes であり、1 秒間に 200 万個 (2 MHz) のサンプルを取得している。この IQ データのファイル形式は ACF データと同じく Matlab フォーマットであり、そのファイル内には時刻やサイト名なども含むパラメータブロックも割り当てられている。データ容量の関係から、トロムソ VHF レーダーと ESR による一部の観測モードに対してのみ IQ データの取得を現在は行っており、複数のアンテナを組み合わせた干渉法解析やイオン音波擾乱の高時間分解能観測⁴⁾、ラグプロファイル逆問題解析⁵⁾、流星エコーなどを除去した物理

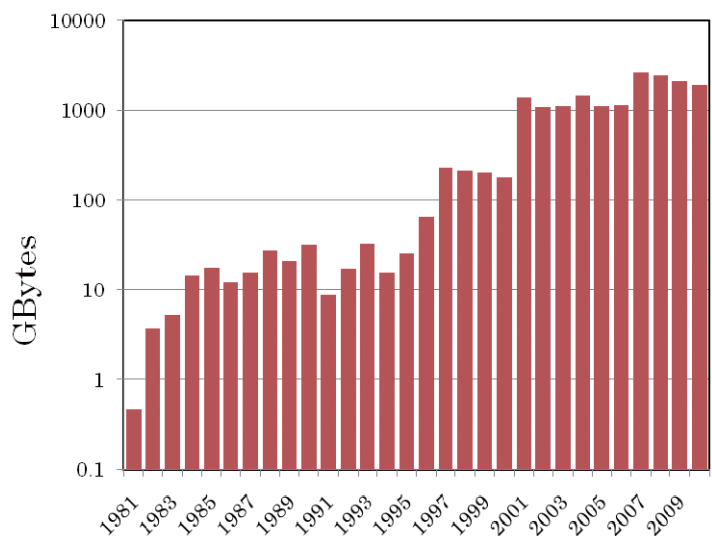


図 2 1981-2010 年の EISCAT レーダーシステムで得られた ACF データ容量の年変化 (注: 縦軸は対数表示)

量導出手法の開発などに応用されつつある。

4. EISCAT データからプラズマ物理量を導出する方法について

EISCAT レーダーシステムにより得られたイオンラインの ACF データからプラズマ物理量を導出するには、GUIDAP (Grand Unified Incoherent Scatter Design and Analysis Package)⁶⁾ と名付けられた数値データ解析用ソフトウェアが通常用いられる。GUIDAP は非干渉散乱レーダーデータ解析用に設計され、不確定性関数 (Ambiguity Function) を用いた計算と統計的逆問題理論に基づく数値解析手法である。GUIDAP は Matlab 上で動作し、ACF データと同じく Matlab フォーマットのファイルを作成し、得られたプラズマ物理量の情報をその中に保存する。また、最新の EISCAT レーダー観測に基づく GUIDAP のアップデートが EISCAT 本部にて継続的に行われている。この GUIDAP を用いた非干渉散乱スペクトルフィッティングにより得られる物理量は、高度約 70-1600 km における電子密度、電子及びイオン温度、イオン速度である。また、イオン-中性粒子衝突周波数やイオン組成については経験モデルを基にした値を通常利用しているが、条件によってはフィッティングによる直接導出も可能である。さらに、スペクトルフィッティングで得られた各種物理量と磁場モデル (IGRF) や中性大気モデル (MSIS) を組み合わせることにより、電離圏電場や電気伝導度、中性風速度、降下粒子エネルギー分布等の 2 次物理量を推定することが可能である。これらの物理量は極域超高層大気研究において特に重要であり、これらの EISCAT データを用いた定量的な解析研究がこれまでに数多くなされている。時間分解能に関して、通常は ACF を 1-5 分間程度積分することにより、精度の高い物理量データが GUIDAP を用いて得られる。但し、より高い時間分解能が求められる研究対象 (オーロラ微細構造の研究等) の場合、積分時間が 0.4-1 秒程度の受信パワー情報のみを用いて電子密度分布を推定する方法が用いられることもある。

その他に、プラズマラインの非干渉散乱スペクトルデータを用いてプラズマ周波数 (ω_{pe}) を求めることにより、

$$n_e = \frac{m_e \epsilon_0 \omega_{pe}^2}{e^2} \quad (1)$$

の関係から電子密度を正確に推定できる。ここで n_e は電子密度、 e は電子の電荷、 m_e は電子の質量、 ϵ_0 は真空の誘電率である。イオンライン観測では電子密度の絶対値を正確に推定することが困難であるため、このプラズマラインやイオノゾンデデータを用いて補正される。ここ数年の観測技術の革新により、EISCAT レーダーでは約 5-10 km の分解能でプラズマラインの高度分布を観測可能になりつつある。そのため電子密度の絶対値の推定以外にも、プラズマラインを用いた様々な応用が期待されている⁷⁾。関連して、ノイズ成分が多く含まれるプラズマライン観測データからプラズマラインの位置を正しく検出するために、カルマンフィルター等の統計的・数理的な手法を駆使した導出方法を現在開発中である。

EISCAT レーダーシステムによって得られた 30 年間に渡るデータでは、様々な観測モード (アンテナのスキャンパターン) や送受信パルススキームが用いられているため、統一したプラズマ物理量データベースを作成するにはかなりのデータ処理時間と手間を要する。そこで最近の GUIDAP では並列計算が可能である点を生かし、複数のワークステーションを用いて複数 (数 10 個) のデータ処理プロセスを並列で同時に行っている。このようなデータ処理を継続して行うことにより、これまでに 1, 2, 5 分積分値のプラズマ物理量データベースを作成・整備してきている。そのデータ容量は合計すると約 4 TBytes になる。これらのデータをアスキー形式に変換した数値ファイルと、観測結果のサマリープロットを、ウェブページ (<http://polaris.nipr.ac.jp/~eiscat/eiscatdata/> 及び <http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/~eiscat/data/EISCAT.html>) 内に順次公開している。また、この 30 年間に渡る大容量データベースを系統的 / 統一的に扱うための解析プログラムを、Matlab の Parallel Computing Toolbox と GPU による汎目的計算 (GPGPU) を組み合わせて現在開発している状況である。

5. EISCAT データの可視化及び公開内容について

EISCAT レーダーシステムで得られたプラズマ物理量データを、より把握 / 利用しやすくするためのソフトウェア開発及びデータベース作成を実施してきている。この EISCAT データベースは、電子密度や温度などの基本的な物理量を極域電離圏の広い高度範囲で導出及び提供しており、単独でも極域超高層大気物理の研究を推進するために重要である。さらに、EISCAT レーダー観測とは相補的な役割を担う、人工衛星やロケット、他の地上観測データとの比較及び融合研究を実施することにより、この EISCAT データベースの価値がより高くなると考えられる。そのため最近では、(1) 各種飛翔体・地上観測との同時観測データの検索及び時系列プロットの同時表示の手法開発や、(2) 観測日時や観測モードなどのメタデータの整備、(3) データの 3 次元可視化、等にも重点をおいてデータベース化を進めている。これまでに作成・公開してきた

代表的なウェブページ/データベースの内、ここでは3つの内容を紹介する。1つ目は Conjunction Event Finder (CEF) の EISCAT 版ウェブページ、2つ目は Dagik 用 kmz データベース、3つ目は IUGONET Data Analysis Software (UDAS) 上で EISCAT データを扱うことが可能な共通データフォーマット (CDF) データベースである。

1つ目の CEF⁸⁾ は、人工衛星及び地上観測機器によって得られた観測データのクイックルックを容易に表示するウェブ用ツールである。主に宇宙科学研究所にて開発され、同研究所の Data Archives and Transmission System (DARTS) 内に公開している。特定の日時を指定することにより、様々な観測データのクイックルックのリンク先一覧が利用できるため、地上-衛星同時観測イベントの検索に威力を発揮する。

この CEF の公開に合わせ、EISCAT レーダー観測と相補的な役割を担う各種飛翔体・地上観測との同時観測データの検索、及びデータの相互利用に重点をおいた EISCAT レーダーシステム用ウェブページ (<http://polaris.nipr.ac.jp/~eiscat/eiscat.cgi>) を開発し、宇宙科学研究所の DARTS 内の CEF (<http://darts.isas.jaxa.jp/stp/cef/cef.cgi>) との双方向のやり取りを可能にした (図3参照)。また、DARTS 内に整理・公開された人工衛星データの各種クイックルックに合わせ、2

時間及び1日単位の EISCAT データサマリープロットを作成し、EISCAT 版 CEF ウェブページ内に整備・公開することにより、関連する人工衛星データの結果との比較を容易に行うことができるようになった。これらの複数データに含まれる情報を (ウェブを介して) 容易に結ぶことができる本ツールにより、太陽風から磁気圏、電離圏、熱圏、中間圏までの幅広い領域間を定量的に繋ぐ新たな研究を促進することが期待される。

特に、EISCAT 科学協会では2000年7月及び8月に打ち上げられた Cluster 衛星^{9) 10)} との共同観測に力を入れてきたため、CEF の検索機能を利用した EISCAT-Cluster 衛星の同時観測データを用いた研究が期待される。磁気圏を飛翔する Cluster 衛星の磁力線フットプリントが北欧上空を通過する場合には、複数の EISCAT レーダーを組み合わせた電離圏観測を全 EISCAT 加盟国による SP として数多く実施してきている。その他には、高度 650 km 付近を飛翔し、オーロラの微細構造を観測するれいめい衛星¹¹⁾ と EISCAT との同時観測も、日本やノルウェー、スウェーデンによる SP として、2005 年 11 月以降に精力的に行ってきている。

2つ目に挙げた Dagik (<http://dagik.org/>) は、京都大学理学研究科で開発された地球科学データのデータ見本集 (データ・ショーケース) であり、Google Earth や Dagik Earth 上に地球科学データを3次元的に表示可能なツールである。この Dagik で EISCAT データを表示するために、kmz 形式のデータベースを作成・整備し、ウェブページ (<http://polaris.nipr.ac.jp/~eiscat/eiscatdata/>) 上に公開している。EISCAT レーダーシステムでは、様々なアンテナのスキャンパターンが存在し、さらに複数のレーダーが同時あるいは独立で稼働する。そのため、Dagik による3次元可視化は EISCAT レーダー観測の状況を理解・把握する上で貴重である (図4参照)。また、アウトリーチに関して例えば、サブストーム¹²⁾ 発生時などに、この kmz 形式の3次元可視化用データを Google Earth 上で利用することにより、宇宙天気やオーロラに興味/関心を持つ一般の人々も、極域超高層大気のダイナミックな変動の様子を体感することができる。

さらに、2章の最後に触れた EISCAT_3D 計画では、数 100 km の範囲に及ぶ極域超高層大気の3次元プラズマ物理量データを取得できることから、データの3次元可視化も今後求められる。Dagik はそのような EISCAT_3D データの可視化にも役立つことが十分に期待される。

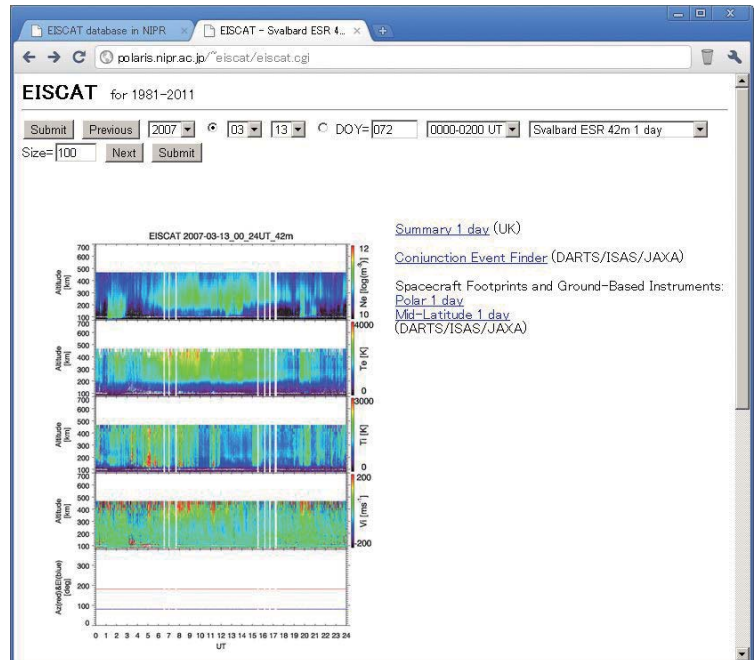


図3 Conjunction Event Finder (CEF) の EISCAT 版ウェブページ

3つ目に挙げた UDAS¹³⁾ は、大学間連携プロジェクト (IUGONET, <http://www.iugonet.org/>) で開発が進められている、超高層大気の地上観測データを表示・解析するためのソフトウェアであり、IDL 上で動作する。この UDAS を THEMIS Data Analysis Software suite (TDAS) に組み込むことで、THEMIS 等の衛星データを含む多様な地上・衛星観測データにオンラインでアクセスし、時系列データの並列表示が可能になる。この UDAS/ TDAS 上でデータを扱うためのフォーマットとして共通データフォーマット (CDF) が使われているため、EISCAT データについても CDF フォーマットのデータベースの作成・整備を経て、ウェブページ (<http://polaris.nipr.ac.jp/~eiscat/eiscatdata/>) 上での公開を 2011 年 5 月に開始した。さらに、この IUGONET プロジェクトの一環として、EISCAT レーダーシステムの観測日時や観測モードなどのメタデータの整備を進めている段階である。

この UDAS を用いることで、EISCAT で得られるプラズマ物理量を高度幅や時間幅などを自由に選択して表示することが可能となるため、様々な研究者によるデータ検索・表示とその後の研究成果の発表資料の作成にも利用されることが期待される。具体的には、極域の超高層大気物理を研究している研究者や、さらに、下層大気から磁気圏までの上下間結合やグローバルな大気/プラズマ環境に関する研究を実施（もしくは実施を計画）している研究者により、EISCAT データベースに含まれるプラズマ物理量データを利用した、極域超高層大気の長期的及び短期的変動とその原因、他の領域との相互作用の理解に関する研究が行われることが期待される。

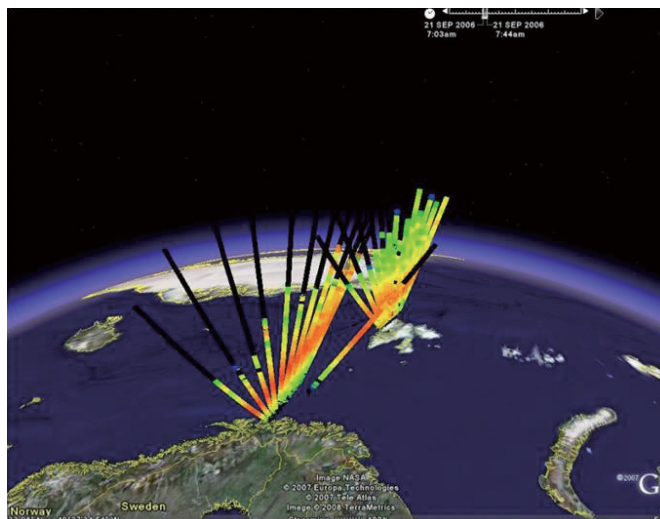


図4 Dagik 用 EISCAT 電子密度データ (kmz 形式) を Google Earth 上で用いた表示例

6. まとめ

スカンジナビア半島北部及びスバルバルに、現在 6 基の非干渉散乱レーダーアンテナを展開中の EISCAT レーダーシステムによって得られた、高度 70-1600 km の超高層大気領域における 30 年間のプラズマ物理量データについて、そのデータ処理方法とデータ可視化や利用の現状を本論文で紹介した。我々は 1996 年に日本が EISCAT 科学協会に加盟後、15 年に亘り EISCAT データベースの作成や整備、ウェブページ上での公開を進めてきた。その EISCAT データベースや新規特別観測によって得られたデータを用いて、多岐にわたる超高層大気観測・研究が実施されてきている。最近では、(1) 各種飛翔体・地上観測との同時観測データの検索及び時系列プロットの同時表示の手法開発や、(2) 観測日時や観測モードなどのメタデータの整備、(3) データの 3 次元可視化、等にも重点をおいてデータベース化を進めている。この EISCAT データベースは、超高層大気のシミュレーション研究に必要な基本物理量を様々な時間スケールで与えると共に、グローバルスケールの電離圏モデルを構築するためにも必要不可欠であると考えられる。今後、次世代フェーズドアレイレーダーシステムである EISCAT_3D 計画の実現時には、このデータベース作成時の大規模データ処理や 3 次元可視化の技術や経験が、EISCAT_3D を用いたサイエンスに生かされることが期待される。

謝辞

本論文で述べられている EISCAT データベースは、平成 22 年度科学研究費補助金（研究成果公開促進費（データベース）、課題番号：228039、データベース名称：欧州非干渉散乱 (EISCAT) データベース）を用いて整備や公開がなされており、その作業に関わったすべての方々に感謝する。特に、EISCAT データ整備に尽力を費やして下さった杉田郁美氏と、TDAS 上で利用可能な EISCAT データ表示プログラム作成作業にご協力頂いた高田拓博士に感謝の意を表する。また、EISCAT データの利用に当たり、施設の運用及びデータ提供をしている EISCAT 所長及びスタッフに感謝する。EISCAT は日本（国立極地研究所及び名古屋大学太陽地球環境研究所）及び中国、ノルウェー、スウェーデン、フィンランド、イギリス、ドイツ、フランス（2006 年末まで）の研究機関によって運営されている国際科学協会である。

参考文献

- 1) 佐藤夏雄, 日本が EISCAT 科学協会に加盟, *極地研ニュース*, 1996 (ISSN1347-6483)
- 2) Wannberg, G., EISCAT-3D: The Third Generation European Incoherent Scatter Radar System, *Proceedings of Radio Science and Communications & Mathematical Modelling of Wave Phenomena* (Eds. Sven Nordebo and Boerje Nilsson), RVK08/MMWP08, ISSN 1650-2647, 140-144, 2008.
- 3) Häggström, I., H. Opgenoorth, P. J. S. Williams, G. O. L. Jones and K. Schlegel, Application of alternating codes for EISCAT observations during the ERRRIS campaign for E-region plasma irregularities, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 52, 431-438, 1990.
- 4) Grydeland, T., E. Blixt, U. Løvhaug, T. Hagfors, C. La Hoz, and T. Trondsen, Interferometric radar observations of filamented structures due to plasma instabilities and their relation to dynamic auroral rays, *Ann. Geophys.*, 22, 1115-1132, 2004.
- 5) Virtanen, I. I., M. S. Lehtinen, T. Nygrén, M. Orispää, and J. Vierinen, Lag profile inversion method for EISCAT data analysis, *Ann. Geophys.*, 26, 571-581, 2008.
- 6) Lehtinen, M. S. and A. Huuskonen, General incoherent scatter analysis and GUIDAP, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 58, 435-452, 1996.
- 7) Djuth, F. T., M. P. Sulzer, and J. H. Elder, Application of the coded long-pulse technique to plasma line studies of the ionosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 21(24), 2725-2728, 1994.
- 8) Miyashita, Y., I. Shinohara, M. Fujimoto, H. Hasegawa, K. Hosokawa, T. Takada, and T. Hori, A powerful tool for browsing quick-look data in solar-terrestrial physics: "Conjunction Event Finder", *Earth Planets Space*, 63, pp. e1-e4, 2011.
- 9) Escoubet, C. P., R. Schmidt, and M. L. Goldstein, Cluster -Science and mission overview, *Space Sci. Rev.*, 79, 11-32, doi:10.1023/A:1004923124586, 1997.
- 10) Escoubet, C. P., M. Fehringer, and M. Goldstein, The Cluster mission, *Ann. Geophys.*, 19, 1197-1200, 2001.
- 11) Saito, H. et al., INDEX: Piggy-back satellite for aurora observation and technology demonstration, *Acta Astronaut.*, 48, 723-735, doi:10.1016/S0094-5765(01)00079-0, 2001.
- 12) Akasofu S-I., The development of the auroral substorm. *Planet. Space Sci.*, 12:273-82, 1964.
- 13) 田中良昌他, IUGONET 解析ソフトウェアの開発, 宇宙科学情報解析論文誌, 第 1 号, 91-98, 2012.