

2024年度 01)国際共同研究 目次詳細

20 件

* 所属・職名は2025年3月現在
* Affiliation and Department displayed are current as of March 2025.

研究代表者 Principal Investigator	所属機関* Affiliation	所属部局* Department	職名* Job title	研究課題名 Project Title	頁 Page	備考 Remarks
横田勝一郎	大阪大学大学院	理学研究科	准教授	BepiColomboフライバイ運用を利用したイオン質量分析器のデータ評価	3	
門叶冬樹	山形大学	理学部	教授	第25太陽活動立ち上がり期における極域から低緯度までの大気中宇宙線生成核種の濃度変動の観測研究	5	
中澤知洋	名古屋大学	KMI/理学研究科	准教授	赤道周回MeVガンマ線観測衛星COSIによる雷ガンマ線観測のデザイン	7	
加藤千尋	信州大学	学術研究院・理学系	教授	改良された汎世界的宇宙線観測ネットワークによる宇宙天気観測II	9	
能勢正仁	名古屋市立大学	データサイエンス学部	教授	電離圏における電磁流体波動捕捉現象の解明: 南北両半球の広い緯度範囲における地上と人工衛星の微小磁場変動観測	10	
西山尚典	国立極地研究所	先端研究推進系	助教	短波長赤外分光器・イメージャとEISCAT Svalbard radarを組み合わせた昼側オーロラの精密計測	13	
大矢浩代	千葉大学	大学院工学研究院	助教	東南アジアにおける雷放電とグローバルサーキットとの関連性の解明	16	
島田幸治郎	琉球大学	理学部	助教	国際共同観測ネットワークによる有機エアロゾルの分解および生成過程の解明	18	
西澤智明	国立環境研究所	地球システム領域	室長	地上ライダーネットワークと衛星観測を融合した南米スモークの観測研究	20	
阿部修司	九州大学	国際宇宙惑星環境研究センター	学術研究員	インドネシア広域地磁気観測網の展開: 赤道・低緯度領域の超高層・内部電磁気学現象の解明	22	

研究代表者 Principal Investigator	所属機関* Affiliation	所属部局* Department	職名* Job title	研究課題名 Project Title	頁 Page	備考 Remarks
土屋史紀	東北大学	大学大学院理学研究科	教授	プラズマ波動による高エネルギー電子降込みと下部電離圏への影響評価の実証的研究	24	
坂野井健	東北大学	大学院理学研究科	准教授	LAMP-2ロケット搭載カメラAICの観測最適化のためのシーボトムにおける地上オーロラ観測	26	
尾花由紀	九州大学	国際宇宙惑星環境研究センター	学術研究員	ディーブラーニングによる新しい磁気圏擾乱プロセスモデルの構築	28	
細川敬祐	電気通信大学	大学院情報理工学研究科	教授	国際的短波ドップラー観測網を用いた電離圏擾乱現象の観測的研究	29	
平原靖大	名古屋大学	環境学研究科	准教授	ALMAと実験室分光による太陽系内天体大気の物理化学プロセスの解明	31	
藤原均	成蹊大学	サステナビリティ教育研究センター/理工学部	教授	シアー構造を伴う高速熱圏風の生成機構の研究	33	
平沢尚彦	国立極地研究所	先端研究推進系 気水圏	助教	自動気象観測装置(AWS)の新しいデータ品質管理とデータ公開に関するスキームの構築	37	
額縁佑衣	名古屋大学	大学院環境学研究科	准教授	Lu-Hf法を用いた三波川変成帯石英エクロジャイトの変成ピーク年代の推定	39	
寺尾徹	香川大学	教育学部	教授	多様な水文気候学的地域特性が駆動するアジアモンスーン変動の予測可能性の研究	41	
成影典之	国立天文台	太陽観測科学プロジェクト	助教	日米共同・太陽フレアX線・集光撮像分光観測ロケット実験 FOXSI-4	43	

(別紙様式01-2)

BepiColomboフライバイ運用を利用したイオン質量分析器のデータ評価
Mass spectrometry data calibration of Mercury's magnetosphere by BepiColombo flyby operations

横田 勝一郎、大阪大学大学院・理学研究科

【研究目的】

地球型惑星の中で固有の磁場を持ち磁気圏を形成するものは地球と水星だけである。水星は地球と比べて特徴が大きく異なり、その比較研究は地球型惑星の磁気圏の理解に留まらず系外惑星も含めた磁気圏一般の理解に大きく役立つことが期待される。

水星探査機BepiColomboは2025年末に水星軌道に投入され、直後に電磁場・粒子・プラズマ観測器群によって水星磁気圏観測が開始される。中でも高分解能のイオン質量分析器MSAは、質量分析によってプラズマ密度、速度、圧力を精密に見積もるだけでなく、水星起源イオンを分別し磁気圏や希薄大気（更には表層物質）の情報を獲得する。現在は水星軌道投入のため金星フライバイ運用が2回、水星フライバイ運用が6回と全て実施されており、観測も同時に行われて1回あたり1～2時間の観測データが得られている。また、2026年11月に水星軌道投入が予定されている。フライバイ運用中は観測データも取得しており、2024年度も金星や水星フライバイ中の観測データを利用して4本の誌上発表を行った。

本研究では、BepiColombo搭載MSAのフライバイ観測データを用いて、MSA質量分析機能の健全性確認と観測データの評価を第一の目的とする。観測データ及び機上ソフトウェア機能の解釈や検証のため、スペアモデルを用いた実験室での較正試験を追加で実施する。フライバイ観測は時間や視野が限られているが前例の無い高分解能のイオン質量分析であるため、並行して、十分検証した観測データを用いて水星起源イオンを同定し、水星磁気圏・希薄大気・表層の観測的研究を行う。

【研究方法】

フライバイ観測データの評価、他のイオン電子観測器との観測データの比較から、過剰反応を起こしてSHUTDOWNを発生させる感度自動制御機能や、時刻付けがMSAだけずれが生じるという、機上ソフトウェアに起因する問題が明らかとなった。ソフトウェア改修を目的として、MSAのフライトスペア（フライトモデルと同一）を用いて、JAXA相模原キャンパス(ISAS)のビーム照射試験設備にて機能試験によるソフトウェア改訂版(v4.4E4-v4.4E8)の機能性能試験を実施した。

【研究結果】

2023年度にもフランスのメンバーも参加してISASにて試験キャンペーンを行い、改訂版(v4.4E0-v4.4E4)を評価している。その結果、フライバイ観測時の問題が何れも再現することができたが、ソフトウェア改修による根幹的な解決には至らなかった。

2024年度は、前年の結果を踏まえた議論からソフトウェア改修に必要な情報を増やすため、5月下旬に追加でビーム試験を行い、モードやアジマスCHなど計測状況を増やすことで制約を追加した。これらの結果に基づき、2025年2月にドイツIDAのソフトウェア開発者が次の改修版を準備することができたため、2月頭にISAS試験環境やMSAフライトスペア及び付属治具の動作確認を実施した。2月下旬に更新版(v4.4E5-v4.4E7)によるMSAフライトスペアによるビーム照射試験を簡易的に行い、ソフトウェア改善点に

ついて評価した結果、感度制御直後に0カウントデータの混在する期間残るものの、全体として感度自動制御機能は仕様に沿った動作を示した。

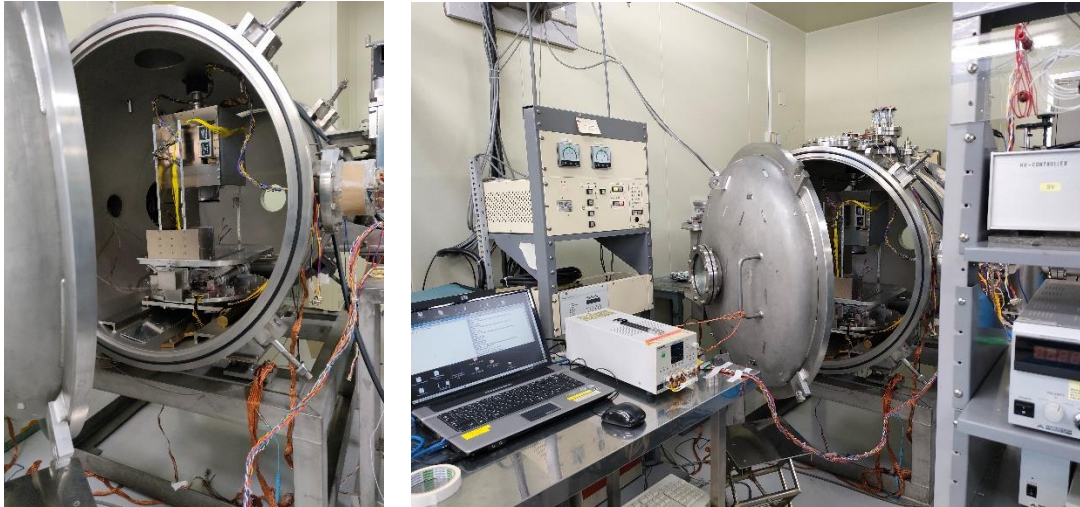


写真1：真空槽にセットしたMSAフライトスペアとデータ取得系

よって2025年3月17日から一週間フランスメンバーも参加して試験キャンペーンを行い（写真1）、ソフトウェア改訂版(v4. 4E7, 4. 4E8)によって、上述の過剰反応する感度自動制御機能から仕様通り動作する機能を確認することができた。また、時刻付けがずれる問題については、感度自動制御機能によって観測を一時停止した場合に、バッファに溜まった停止時の観測データと復旧時の観測データが混在することで説明できる挙動を示した。改訂版(v4. 4E9-v4. 4EE)を試行することで問題を解決した（図1）。

その後の議論の結果、今回の改訂版をベースに機上ソフトウェアとして探査機にアップロードする更新版を準備すると結論した。その確認作業の後に、探査機へのアップロード運用を実施する予定である。

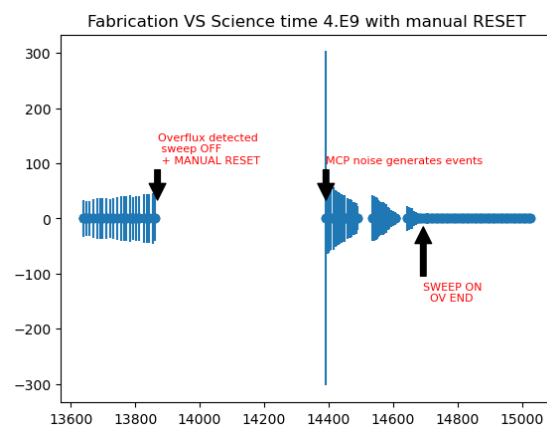


図1：機上ソフトウェアv4. 4E9時の観測時刻と処理時刻の差の収束

(別紙様式 01-2)

第25太陽活動立ち上がり期における極域から低緯度までの
大気中宇宙線生成核種の濃度変動の観測研究

Observation of cosmogenic nuclides at high, mid, and low latitude sites
during the rising in 25th solar cycle

門叶冬樹、山形大学・理学部

研究目的

本研究の目的は、太陽活動の大きな減少期である第23期から第25期までの大気中宇宙線生成核種 Be-7 を国際ネットワークにより地球規模で観測し、その11年変動と減衰から低エネルギー銀河宇宙線スペクトルと宇宙線生成核種強度との関係を明らかにすることである。本研究は、我々が2000年から25年間、北半球中緯度（山形）を中心に極域（アイスランド・フッサフェル）、低緯度（タイ・バンコク）の国際サンプリングサイトで継続的に進めている大気中宇宙線生成核種 Be-7 の連続観測をベースとする。現在、太陽は第24活動期が終わり、第25活動期のピーク期にある。太陽活動の指標である太陽黒点数は、そのピークが第21期より4期連続で減少しており、第25期は1900年付近の極小期の繰り返し（Gleissberg 周期 87 年）にあるのか、あるいは活動がさらに減衰するのかの重要な時期にあたる。本研究の25年間におよぶ長期観測は、日観測として実施され、各観測地点での捕集エアロゾルの大気季節変動の影響を評価することを可能である。第23期から第25期の太陽活動の変化に伴う22年周期変動を含めた宇宙線生成核種の変動と大気中の複雑な移流拡散の影響を見積ることは重要である。

研究方法

北半球中緯度の山形（北緯38.3°）、高緯度のアイスランド（北緯64.7°）、最高地磁気カットオフ地域であるタイ・バンコク（北緯13.7°）に各々ハイボリュームエアサンプラー（HV1000F、HV500R、吸引量500L～1000L/分）を設置してガラスろ紙に集塵している。回収したろ紙試料は、山形大学および宇宙線研究所柏地下測定設備にてガンマ線スペクトル測定分析を行い、大気中 Be-7 濃度および Pb-210 濃度の連続観測を行っている。観測データは日変動、季節変動、年変動について大気流跡線シミュレーションと比較して解析を進めている。

研究結果

高緯度、中緯度、低緯度の Be-7 濃度年変動

図1は、山形、アイスランド、タイ・バンコクにおける2014年から2024年10月までの Be-7 濃度月変動を示しており、春に高濃度で夏に低濃度の明瞭な季節変動を示している。なお平均 Be-7 濃度の緯度による違いは、圏界面高度と Be-7 生成率に依存していることが分かってきた。2021年～2022年のアイスランドデータの欠損は、サンプリングサイトの災害事故によるサンプリング休止のためである。2022年後半から

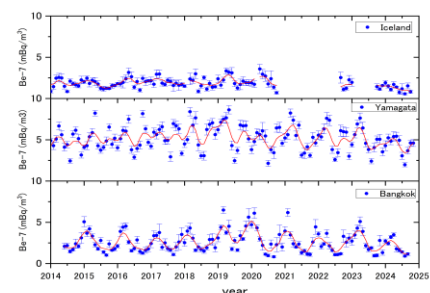


図1. 2014～2024 の Iceland, Yamagata, Bangkok の Be-7 濃度の季節変動

サンプリングが再開され 2023 年秋より継続して観測データが得られている。図 2 は、3 地点への大気移流の月毎平均流跡線を示している。山形では春に高緯度を通過してきており夏は中緯度通過しており Be-7 濃度変化に対応している。タイでは夏は赤道方向から流入している。アイスランドの流跡線は局所的である。

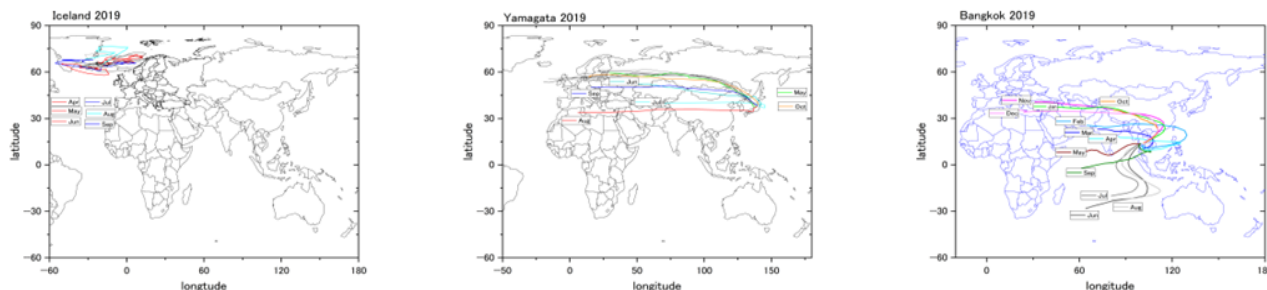


図 2. Iceland, Yamagata, Bangkok の大気流跡線の季節変動

図 3 は、2000 年～2024 年の山形、アイスランド、バンコクの Be-7 濃度の年変動および太陽黒点数 (SSN)、oulu (北緯 65.05° cut-off rigidity 0.8 GV) での地上中性子強度の年変動を示している。第 23 期ピークから第 24 期全期そして第 25 期のピーク近くまでの Be-7 濃度の太陽活動のモジュレーションが得られている。山形の Be-7 濃度の 25 期の変動率は 2024 年現在で 28%であり、アイスランド、バンコクでのその変動率は、未確定であるがそれぞれ約 43%, 44%と大きい。Be-7 の年変動は緯度特徴的であり、第 25 期太陽活動全期の観測が必要である。

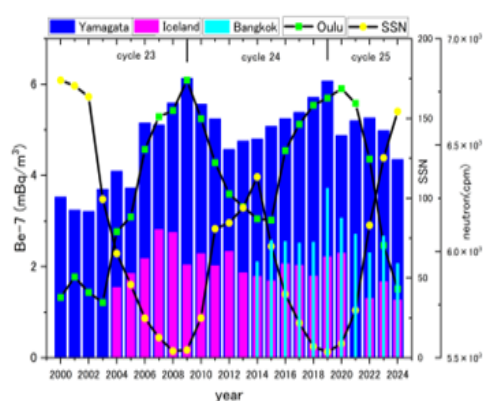


図 3. 2000～2024 の Be-7 濃度、太陽黒点数、中性子数の年変動プロフィール

[参考文献]

- 1) Solar Influences Data Analysis Center – SIDC, <http://sidc.oma.be/>
- 2) <https://cosmicrays oulu.fi/>

[成果発表]

「2000 年から 2024 年までの宇宙線生成核種 Be-7 の大気中濃度変動について」
 櫻井敬久、門叶冬樹、武山美麗、門倉昭、小財正義、B. Gunnlaugur、D. Ruffolo、W. Mitthumsiri
 ISEE「太陽圏・宇宙線関連の共同研究成果報告会」2025.2.20 (online)

赤道周回 MeV ガンマ線観測衛星 COSI による雷ガンマ線観測のデザイン

Designing TGF-detection capability on the COSI MeV observatory

(1行スペース)

中澤知洋、名古屋大学素粒子宇宙起源研究所

(2行スペース)

1：研究目的

雷ガンマ線は、地球大気内で発生する最も高エネルギーな粒子加速現象であり、加速された電子により 30 MeV に達するガンマ線が放射される。人工衛星や地上から観測できる雷放電突発ガンマ線 Terrestrial Gamma-ray Flash (以下 TGF, Fishman+ 1994)や、冬季の日本海岸の地上や高山で観測される雷雲が数分間ガンマ線を放射し続ける Gamma-Ray Glow (以下 GRG, e.g. Torii+ 2002)が知られる。これは地球上で確認されている唯一の静電場粒子加速である。しかし、加速原理が「逃走電子雪崩」(Grevitch+ 1989)という特殊なメカニズムであること以外、雷雲中での加速器の位置、サイズ、電場強度、タネ電子の起源や増幅率も不明で、定量的な理解には程遠い。

雷ガンマ線研究は始まったばかりの分野で、毎年のように新発見がある(Dwyer+ SSR 2012, Enoto+ Nature 2017, Wada+ PRG 2021 など)。宇宙からの TGF 観測では、Fermi 衛星、AGILE 衛星、ISS 搭載の ASIM が成果を上げているが、既存の数千個もの TGF データでも、ガンマ線放射のビーム開口角とその傾斜角は、基礎情報であるにもかかわらず、分かっていない。これを紐解くには、複数衛星での同時観測が欠かせない。2027 年 NASA が打ち上げ予定の MeV 宇宙観測衛星 COSI は赤道低軌道に投入されるため、赤道付近を周回する AGILE、軌道傾斜角が 21 度の Fermi との、TGF 多点同時観測のデータ数が一気に増える決定打となりうる。

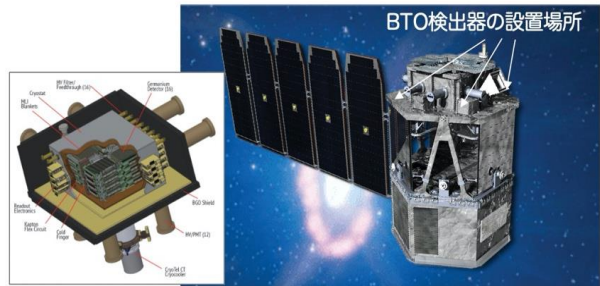


図 1. NASA の COSI-SMEX 衛星。主検出器とは独立に、Background and Transient Observer (BTO、仮称) が 4 台搭載される。

2：研究方法

COSI チームには日本グループが存在し、名古屋大学の中澤と、東大 KavliIPMU の高橋教授を中心に合計 6 名が登録されている。中澤の役割は COSI に搭載される補助検出器 Background and Transient Observer (BTO)の設計サポート、および雷ガンマ線を含んで COSI 衛星のサイエンスの最大化検討である。本研究では BTO のフライト品(FM)の開発を支援し、さらに TGF の観測機能をよくする工夫を実現する。また、地上での雷ガンマ線観測の継続活動も一部実施する。

3：研究結果と考察

FM 候補の回路図・システム設計であるアナログ基板とデジタル基板を用意し、HIMAC での C および Fe の照射試験を、それぞれ 7/18 と 11/20 に実施した。重要なことは、通常のガンマ線信号を 30 keV から 2 MeV の要求範囲でちゃんと読み出しつつ、C や Fe などの重元素宇宙線の超大信号の影響を除去し、proton と合わせてこれらの高エネルギー粒子を計数できるアナログ回路を実現することである。今回は、NaI+SiPM の検出器に 2 つの出力を用意してもらい、これを用いて通常信号と超大信号の弁別を狙った。実際には trans impedance amp (TIA)のパラメータ設定により回路応答が大きく変わり、これ

を実測することができた。HIMAC での試験は残念ながら今年度が最後となるとされる。そこで、SiPM と初段の TIA を再現した検出器のダミーシステムを構築し、LED を照射することで HIMAC 試験で得られた波形の再現を試みている。これにより、FM 回路のパラメータ調整を重粒子を照射することなく実現できる。

FM 回路の開発はこの 4-7 月で完了する予定であり、環境試験や性能試験を経て、2025 年の 9 月に COSI 衛星システム側には BTO を引き渡す予定である。並行してコマンドやテレメトリーの監視、データ処理のための地上パイプラインソフトの開発が必要である。このためにも FM システム「相当品」を、日米の双方に持つことが必要であり、その準備も進めている。

地上での雷ガンマ線観測研究については、開口角 θ を下向き TGF について知ることを目指し、チェレンコフ光を用いた独自の指向性 TGF 観測装置を別予算を用いて 2022 年から開発している。これと並行して Si pixel 検出器 Timepix3 を用いた計測も進めている。2024 年度もこの 2 種の装置を金沢に展開し、TGF の指向性観測に挑戦した。2024/11/29 と 2025/1/28 の 2 つの TGF の地上での多点観測に成功した。現在データ解析中である。また過去のデータ解析から、「上空向きのマルチパルス TGF の逆行放射（陽電子由来）を捉えた」ことを確認し論文とした。これにより「宇宙向き TGF を、地上側から同時に計測できる」ことが実証された

4：まとめ

COSI 衛星の日本チームとしての参加、特に TGF 観測のための検討は進めており、BTO 検出器の設計も固まりつつある。今後は、実際のデータ保存のための機上ソフトおよび地上ソフトの開発が重要となる。COSI を用いた上空からの衛星による多点 TGF 観測に先んじて、地上観測で TGF の多点観測に成功しているが、やはり地上での TGF は極めて光度が高く、解析は慎重を要する。今後もその解析と継続した観測を進めてゆく。

[成果発表]

・査読論文：Hannah Gulick a b, Hiroki Yoneda c d, Tadayuki Takahashi e f, Claire Chen a b, Kazuhiro Nakazawa g, Shunsaku Nagasawa b e f, Mii Ando h, Keigo Okuma h, Alyson Joens b, Samer Al Nussirat b, Yasuyuki Shimizu i, Kaito Fujisawa i, Takayoshi Kohmura j, Kouichi Hagino k, Hisashi Kitamura l, Andreas Zoglauer b, Juan Carlos Martinez Oliveros b, John A. Tomsick b, "A study of afterglow signatures in NaI and CsI scintillator modules for the background and transient observer instrument on COSI", NIM-B, Vol. 561, <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2025.165631>, 2025

・査読論文：K. Nakazawa, M. Oguchi, T. Wu, Y. Wada, K. Okuma, D. Wang, Y. Tsuji, Y. Omiya, M. Ando, T. Enoto, M. Tsurumi, J. Kataoka, T. Kanda, R. Iwashita, N. Koshikawa, T. Shinoda, G. Diniz, Y. Ikkatai, "An Upward Multi-Pulse TGF Involved With Two Thunderstorm Cells", JGR-Atmospheres, Vol 130, Issue 6, <https://doi.org/10.1029/2024JD042303>, 18 March 2025

・学会発表：田中 敦也 1、中澤 知洋 1、大熊 佳吾 1、大宮 悠希 1、安藤 美唯1、大口 真奈里1、榎戸 輝揚2、和田 有希3、一方井 祐子4、Ting Wu5、Daohong Wang5、「Si ピクセル検出器 Timepix3 を用いた電子飛跡 トラッキングによる MeV ガンマ線の 指向性計測 と冬季北陸 TGF 観測への応用」、JpGU 2024, 幕張メッセ, 2024/5/29

・国際研究会発表：中澤知洋、「Observations of X-ray and Gamma-ray Line Emissions with XRISM and COSI」KMI2025シンポジウム、名古屋大学、2025/3/7

(別紙様式01-2)

改良された汎世界的宇宙線観測ネットワークによる宇宙天気観測 II

Space Weather observations using the upgraded Global Muon Detector Network (GMDN) II

加藤 千尋, 信州大学・理学部

ミュオン計による宇宙線強度の汎世界的観測ネットワーク (GMDN: Global Muon Detector Network) を用いた宇宙天気研究を展開し, 高エネルギー銀河宇宙線の長大なリーチ (ジャイロ半径 ~ 0.05 AU, ピッチ角散乱の平均自由行程 ~ 0.1 AU) を活かして, 大規模な太陽磁場構造の変動の実態と, その中で宇宙線輸送過程を解明することを目的とする。



昭和基地ミュオン計の拡張作業

本年度は, 南極昭和基地にあるミュオン観測システムのフルスペック化を行い, 2025年2月から, これまでの1基から2基体制での観測を開始した。観測システムの更新に関しては, ブラジルの一部パーツの更新作業を開始することができた。また, 名古屋観測所機器の一部に関して, ISEE共同利用機器装置維持費をつけていただき, 更新作業を開始したところである。データ解析では, 中性子モニターとミュオン計による観測データの統合解析ならびに解析手法の改善で, 解析した宇宙天気現象 (StarLink 衛星を墜落させたことから StarLink イベントと呼ばれている) について, フラックスロープの軸推定を行い, 先行論文で延べられていた「2本のフラックスロープが時間差で地球に到達した」という説の, 少なくとも1本目について南北方向に伸びたフラックスロープが地球を通過したとする解析結果を得, ISEEの研究集会で報告された。その他の解析結果に関してもいくつかのジャーナルに投稿されている。

(別紙様式01-2)

電離圏における電磁流体波動捕捉現象の解明：

南北両半球の広い緯度範囲における地上と人工衛星の微小磁場変動観測

Understanding of magnetohydrodynamic waves trapped in the ionosphere:

Observations of small-amplitude magnetic field variations on the ground and by satellites over a broad latitudinal range in both hemispheres

能勢正仁、名古屋市立大学・データサイエンス学部

研究目的

この研究では、世界で初めて高緯度から赤道域、かつ南北両半球に誘導磁力計観測をグローバルに展開することに加え、電離圏内を飛翔し直接観測を行っているSwarm衛星との同時観測データを解析し、電磁流体波動の電離圏での捕捉現象であるPc1地磁気脈動および電離圏アルフベン波動共鳴 (Ionospheric Alfvén Resonance, IAR) について、その伝搬経路や励起メカニズムを明らかにすることを目的とする。

研究方法

名古屋大学宇宙地球環境研究所で展開している誘導磁力計ネットワークの観測所の位置(赤丸・橙丸)を図1に示してある。日本付近の経度(東経120°-140°)においては、これまで、赤丸で示したロシア(Zhigansk, Magadan, Paratunka)および日本の北海道と九州(Moshiri, Sata)の合計5か所で観測が行われてきたが、新たに日本の沖縄(Kunigami、2022年11月～)、オーストラリア(Kakadu、2023年3月～)、フィリピン(Muntinlupa、2023年6月～)において観測が開始された(図1の橙丸)。これにより、南北両半球で高緯度から赤道域までの広い緯度範囲でPc1地磁気脈動およびIARの特性を調べることができるようになった。

そこで、地上観測所のデータからPc1地磁気脈動およびIARが現れているイベントを探し出し、その中でも特にSwarm衛星が近くの経度を飛翔している時に注目し、オーロラ帯から中低緯度・赤道域にわたって、これらの現象がどのような性質を持っているのかを調べる。地上観測の結果を、Swarm衛星の磁場データと比較することで、電離圏での電磁波動伝搬や定在波動の存在を高い確度で結論付けることができる。また、SataとKakaduは地磁氣的に南北共役点近くに位置するため、これらの2か所を重点的に比較することで、伝搬特性や励起エネルギー源について新たな知見が得られると期待できる。

上記のデータ解析と並行して、インドネシアのCangar観測所(図1の緑丸)の担当者と連絡を取り、誘導磁力計を設置するための協議を行う。

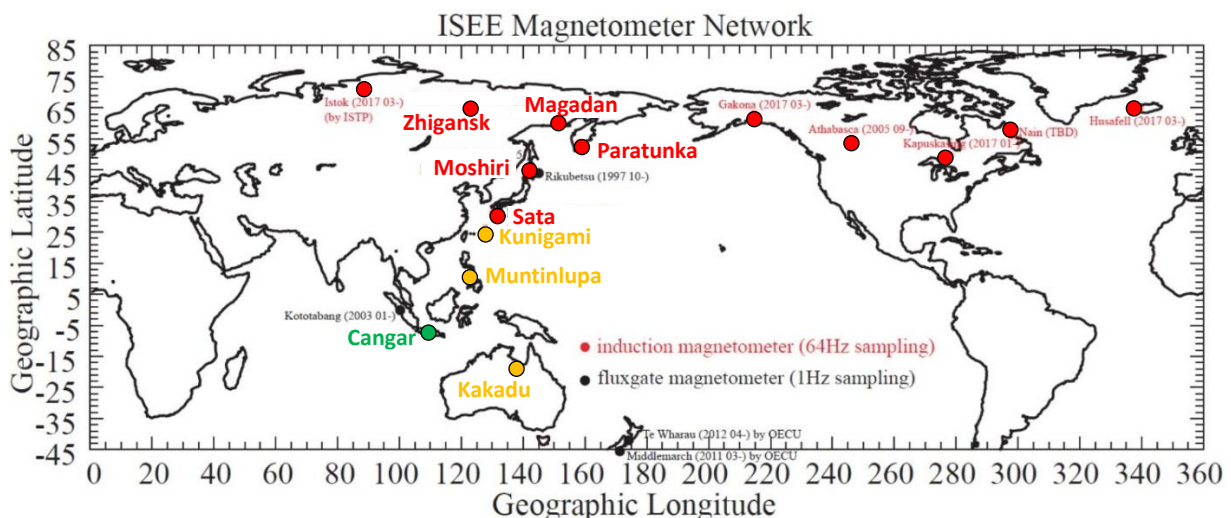


図1: 名古屋大学宇宙地球環境研究所で実施している誘導磁力計磁場観測ネットワークの観測点分布(赤丸・橙丸)と将来的に設置可能性のあるインドネシアCangar観測所の位置(緑丸)。この研究計画では、日本付近の経度(東経120°-140°)に位置する8観測所(Zhigansk, Magadan, Paratunka, Moshiri, Sata, Kunigami, Muntinlupa, Kakadu)で得られたデータを用いる。

研究結果・考察・まとめ

2023年3月23日に $\text{SYM-H}_{\min} = -170$ nTに至る比較的大きな磁気嵐が発生した。この磁気嵐の回復相後期にあたる3月25日14:10 UTごろから、ロシア(Paratunka)からオーストラリア(Kakadu)に亘る広い緯度範囲で、14:14 UTおよび14:25 UTに、Pc1地磁気脈動が発生したことが捉えられた(図2左・マゼンタ線)。この時、ほぼ同じ経度域をSwarm-B衛星が飛翔しており、14:25 UTに地上でPc1脈動の振幅が増加したのに対応して、Swarm衛星はILAT=30°あたりで、東向き成分の磁場擾乱を観測していた(図2右・白色矢印)。また、Swarm衛星が南北のILAT=44°辺りを通過した際にも東向き成分の大きな磁場擾乱が観測されていた(白色矢印)。

この観測から、Pc1脈動が磁気圏から南北の電離圏に伝搬してきている経路およびタイミングは図3のように解釈できる。

今年度は、ここに示したようにPc1脈動の解析を主に行ったが、観測を継続し、他のPc1脈動イベントやIARイベントについて解析を進める予定である。

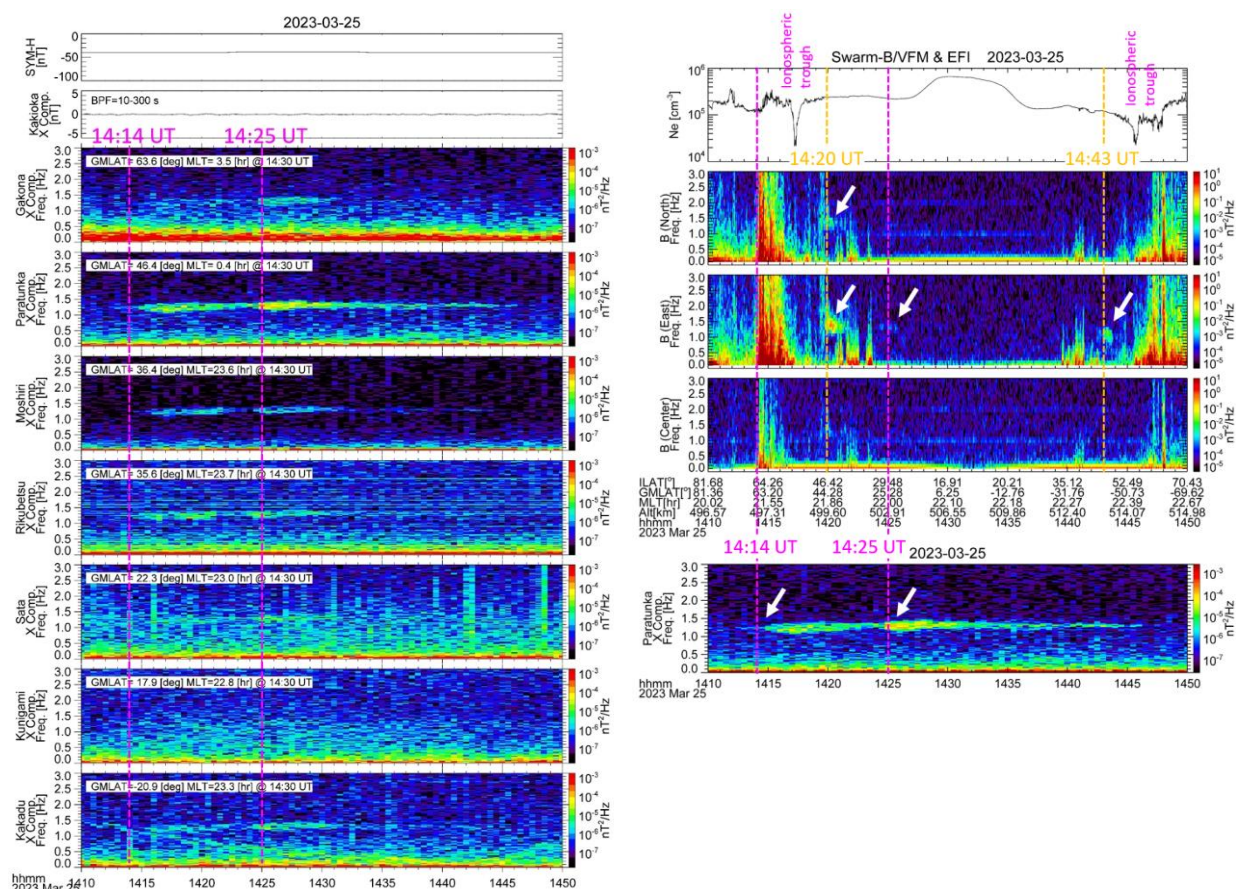


図2: (左)2023年3月25日14:10-14:50 UTにおけるSYM-H指数、柿岡における地磁気変動、カナダ・ロシア・日本・オーストラリアにおける誘導磁力計データのダイナミックパワースペクトル。14:14UTと14:25 UT(マゼンタ線)から、周波数約1.2 HzのPc1地磁気脈動が全ての観測所で観測されている。(右)同じ時間帯におけるSwarm-B衛星の電子密度、磁場のダイナミックパワースペクトル。最下部は比較のためのParatunkaの誘導磁力計データ。南北の共役位置を通過した時(14:20 UT, 14:43 UT・白色矢印)および地上でPc1地磁気脈動の振幅が増大した時(14:25 UT・白色矢印)に東向き成分の磁場擾乱が観測されている。

成果発表

- Nosé M., K. Shiokawa, Y. Otsuka, L. Wang, B. Jones, A. Lewis, M. D. Santos, P. J. Robles, and V. A. Pilipenko, Pc1 pulsations simultaneously observed at the latitudinal induction magnetometer network and by the Swarm satellite, 日本地球惑星科学連合2024年大会, 2024年5月, 千葉県・千葉市 (Poster).
- 能勢正仁, 磁気インピーダンスセンサーによる地磁気微小変動観測, 第48回日本磁気学会学術講演会, 2024年9月, 秋田県・秋田市 (Oral, Invited)

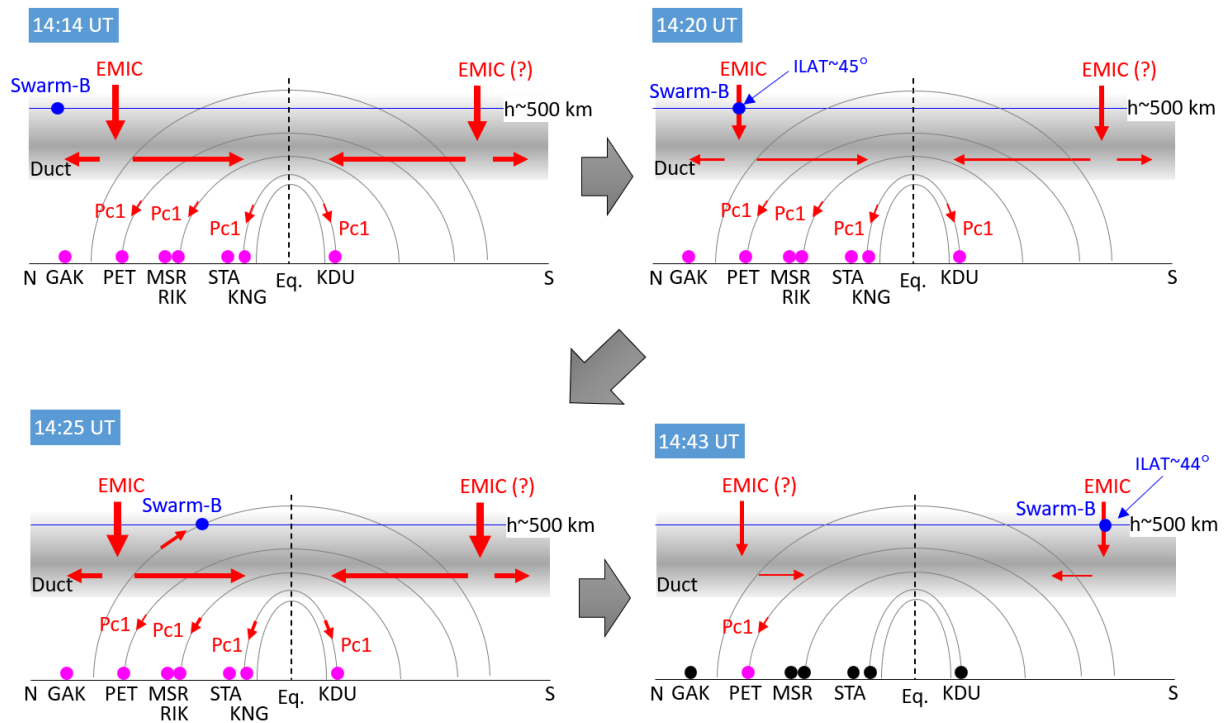


図3: 図2の観測から解釈される14:14 UT, 14:20 UT, 14:25 UT, 14:43 UTにおけるPc1地磁気脈動の伝搬経路。

短波長赤外分光器・イメージャとEISCAT Svalbard radarを組み合わせた昼側オーロラの精密計測
Precise measurements of dayside aurora using SWIR spectrograph and monochromatic imager
coordinated with EISCAT Svalbard radar

西山尚典、情報・システム研究機構 国立極地研究所・先端研究推進系 助教

【研究目的】

オーロラの光学観測は、太陽風と地球磁気圏、地球超高層大気の相互作用の理解にとって非常に重要な役割を果たしてきた。近年では、北米や北欧で地上光学観測の多点化が進み、オーロラ出現領域を「地理的には」ほぼカバーしている。しかし、空の明るい「朝-昼側」のオーロラの計測に対して未だ有効な地上から光学観測手段がないのが現状である。本研究の目的は、太陽光の比較的弱くなる短波長赤外(> 1.0 μm)においてオーロラを高分散分光観測することで、光学観測時間帯を拡張し「朝-昼側」の超高層大気へのエネルギー流入を検出し、統計的に理解する事である。スバル諸島・ロングイヤービン(78.1°N, 16.0°E)で実施中の分光器及び単色イメージャを用いた光学観測からは、薄明時/日照時のオーロラの空間範囲そして時間変動などを高分解能で捉え、EISCAT Svalbard radar (ESR)の観測を組み合わせる事で、オーロラ発光高度や降下粒子のエネルギー分布を定量的に推定する。またオーロラと同時に、①OH分子の発光スペクトルを用いた80 km高度の大気温度の導出、②高度300 km - 800 kmに分布する準定常Heの共鳴散乱発光強度の測定も行い、急激に進行する北極高緯度での気候変動の現状把握や、熱圏上部から外圏下部における熱圏・電離圏結合過程及び宇宙天気予報の予測精度向上へ貢献する。

【研究結果】

2023年2月末に発生した磁気嵐(G2)に対応した準安定Heの時間変化を発見した。2023年2月26日世界共通時19時頃に磁気嵐が発生し、そのわずか1時間以内にHe発光強度の減少が観測され、その後数日程度減少は継続した。このHeの発光強度の減少が、①OH分子(高度80 km)の発光の明るさと比べても明らかに大きく、すなわち気象条件による減光ではないということと、②2-3月の観測期間(17日間)における統計的な日変化では説明できない減少量であることが明らかになった。

一方で、Heの減少期間中に数時間程度のスケールでHeが急激な増加を示したことも明らかになっ

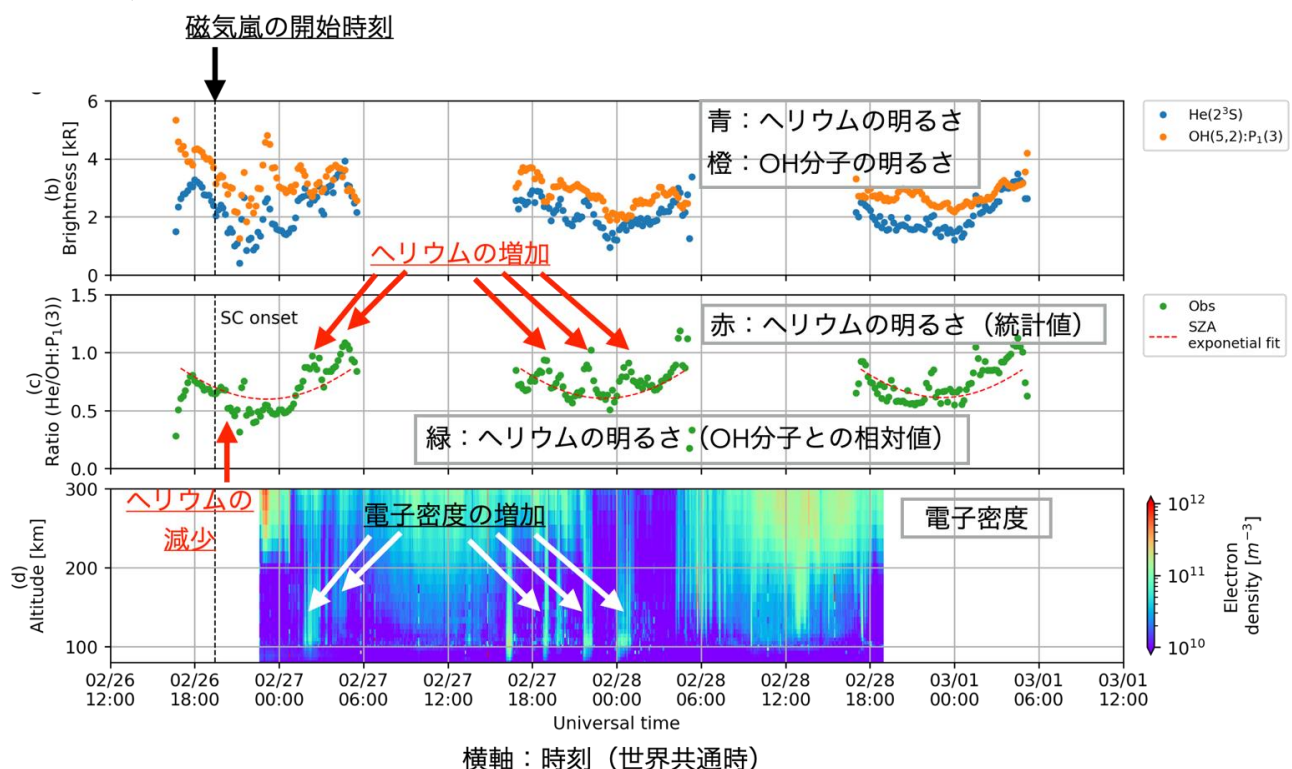


図 1 磁気嵐直後における光学観測結果(ヘリウムおよび OH 分子の発光)とレーダー観測結果(電子密度)

た。ESR による同時観測から、He の増光に対応して電子密度の増加も発生しており、降下電子によって定常状態の He が準定常状態の He へと励起させられたと考えられる。

また、2023年9月末に検出機の冷却部の故障により短波長赤外分光器の観測は停止していたが、製造メーカーによる修理及び冷却回路の更新ののち、2024年10月より観測を再開させた。2025年3月現在、順調に連続観測を継続しており、極域冬季のHe密度の極大、いわゆるHe winter bulgeの測定に成功し、太陽プロトン現象に対応したHeの突発的な増光も確認された。2025年1月の磁気嵐 (G3) では、N₂⁺オーロラに加えて、昼側及び真夜中付近でHe共鳴散乱の異常増光が確認され、地磁気擾乱時における準定常Heの生成/輸送機構の解明に向けてUniversity centre in SvalbardやSouthampton Universityと共同研究を進めている。

【考察とまとめ】

He発光強度の減少については、ESRの観測により磁気嵐の発達に伴い高度100 km - 150 kmで強い大気加熱が発生したこと、および、電離圏におけるNegative stormの発生から加熱された窒素分子が少なくとも高度300 kmまで上昇したことが明らかとなった。さらにN₂分子は高度500 km付近まで上昇し、N₂分子と準定常Heとの衝突・エネルギー交換(Penning Ionization)の結果、準定常Heが減少する反応を促進させたと考えられる。これは、下部熱圏付近で生じた大気加熱の結果、鉛直上方に輸送されたN₂が熱圏上部から外圏下部(高度300 km - 800 km)まで1時間程度という想像以上の速さで到達し、その場の大気組成に影響を与える事を示唆した結果である(Nishiyama et al., 2024, Space Weather, in revision)。

また、磁気圏からの降下電子によって準定常Heが生成される可能性を世界で初めて報告した。準定常Heの生成には光電子との衝突が最も重要と考えられてきたが、極域においては降下電子による生成も考慮すべきことが明らかになった。今後は太陽風起源のHe⁺⁺やリングカレントHe⁺といった非電離圏イオンによる電荷交換反応からの準定常Heの生成がどの程度寄与しているのか調査していくことが重要である。

【成果発表】

論文

[1] (Preprint) **Takanori Nishiyama**, Masato Kagitani, Tikemani Bag, et al. Thermospheric orthohelium, He(23S), variations associated with a moderate storm in February 2023: the NIRA S-2 observations at the Kjell Henriksen Observatory (78.1° N, 16.0° E), Svalbard. ESS Open Archive . September 27, 2024, DOI: 10.22541/essoar.172745030.03956869/v1

[2] Herlingshaw, K., Partamies, N., van Hazendonk, C. M., Syrjäsuo, M., Baddeley, L., Johnsen, M., Eriksen, N. K., McWhirter, I., Aruliah, A. L., Engebretson, M. J., Oksavik, K., Sigeres, F., Lorentzen, D. A., **Nishiyama, T.**, Cooper, M. B., Meriwether, J. W., Haaland, S., and Whiter, D. K.: Science Highlights from the Kjell Henriksen Observatory on Svalbard, Arctic Science, <http://dx.doi.org/10.1139/as-2024-0009>, 2024.

[3] Partamies, N., Dayton-Oxland, R., Herlingshaw, K., Virtanen, I., Gallardo-Lacourt, B., Syrjäsuo, M., Sigernes, F., **Nishiyama, T.**, Nishimura, T., Barthelemy, M., Aruliah, A., Whiter, D., Mielke, L., Grandin, M., Karvinen, E., Spijkers, M., and Ledvina, V.: First observations of continuum emission in dayside aurora, 2025, accepted, Annales Geophysicae.

プレスリリース

[1] 地球電磁気・地球惑星圏学会ほか、磁気嵐起源の「下から上」へ伝わった地球大気最上部の変動を発見 ～高度 500 km のヘリウムの観測、宇宙天気予報の改善や拡張に貢献～

https://www.sgepss.org/meeting/SGEPSS_FM2024_Press_Release.pdf

学会発表 (主著のみ)

[1] Nishiyama et al., Thermospheric He variations associated with two storms on February and March, 2023: the NIRAS-2 observations at Longyearbyen (78.1°N, 16.0°E), Svalbard., JpGU 2024, Chiba, Makuhari Messe, 29 May 2024

[2] Nishiyama et al., Short-wavelength infrared auroral spectroscopy and imaging observation

s at 1.1 μm in the Kjell Henriksen Observatory, Longyearbyen (78.1°N, 16.0°E), 48th Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods, Tromsø, 1 August 2024

[3] Nishiyama et al., Thermospheric orthohelium variations associated with a moderate storm on February 2023: the NIRAS-2 observations at Longyearbyen, 2024年SGEPSS秋季大会, 国立極地研究所, 2024年11月24日

[4] Upper thermospheric orthohelium, He (23S), variations associated with a moderate storm in February 2023: the NIRAS-2 observations at Longyearbyen (78.1°N, 16.0°E), Svalbard, The 15th Symposium on Polar Science, NIPR, 4 Dec. 2024

[5] Short-wavelength infrared spectroscopic and imaging observations for aeronomy from the upper mesosphere to the exosphere: He 1083-nm airglow emission observed at Longyearbyen, EISCAT研究集会, 国立極地研究所, 2025年3月28日

(別紙様式01-2)

東南アジアにおける雷放電とグローバルサーキットとの関連性の解明

Relationship between lightning discharges and global electric circuit in Southeast Asia

大矢 浩代、千葉大学・大学院工学研究院

1. 研究目的

本研究では、世界三大落雷地域の一つである東南アジアに構築しているAVON (Asia VLF observation network)に、フィールドミル(大気電場計)を新規設置し、雷放電から発生するVLF/ELF帯電磁波と大気電場とを比較することにより、雷放電がグローバル・サーキットの電源としてどの程度寄与しているのかを明らかにすることを目的とする。また気象現象等とグローバル・サーキットとの関連性についても調べる。

2. 研究結果

海底火山フンガ・トンガ＝フンガ・ハアパイは2022年1月15日に爆発的に噴火した。本研究ではラム波およびペケリス波によって引き起こされる中性大気と下部電離圏との相互作用を調査し、ペケリス波の音波共鳴により、下部電離圏変動が引き起こされていることを示した(図1)。これまでペケリス波の共鳴は観測で検出されていなかった。本研究では、下部電離圏と大気電場に焦点を当て、AVON等の複数の観測点でモニタリングを行った。図2および図3にペケリス波によって引き起こされたLF帯標準電波、地上磁場および大気電場の100~200 sの振動が観測されたことを示す。しかし、地上ではペケリス波による100~200 sの周期の気圧変動は観測されなかった。中性風のシミュレーションによって、ペケリス波が中間圏界面付近で振動していることが明らかになり、この振動が共鳴を示唆していることが分かった。したがって、大気電場の振動は、下部電離圏の共鳴がグローバル・サーキットを介して地球表面に投影された結果であると解釈される。

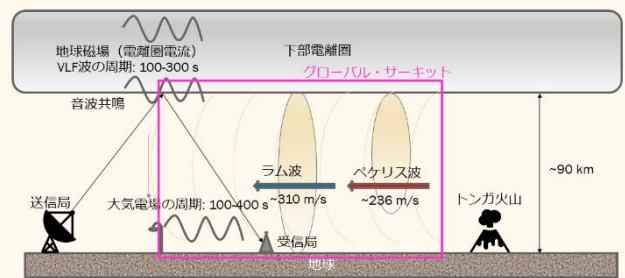


図1 トンガ噴火によって生じたペケリス波の音波共鳴により下部電離圏変動が起こる模式図。

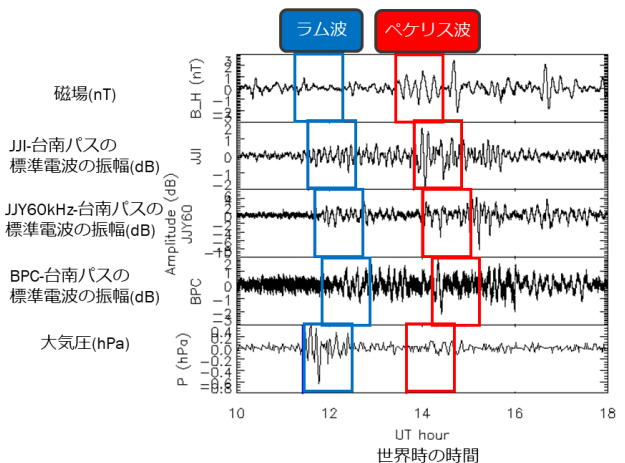


図2 トンガ噴火によるラム波(青の枠線)とペケリス波(赤の枠線)による下部電離圏変動。

成果発表

【論文】

1. Ohya, H., F. Tsuchiya, M. Nakayama, S. Maruyama, A. Kubota, Y. Takahashi, E. Sungging Mumpuni, La Ode Muhammad Musafar Kilowasid, T. Manik, D-region Ionosphere and Space Weather Phenomena: Latest Research and Impacts in AVON Project, Springer Proceedings in Physics, 153-160, 2025.
2. Furuya, R., H. Ohya, F. Tsuchiya, M.-Y. Yamamoto, H. Nakata, D-Region Ionospheric Variations Induced by a 2023 Fireball in Hokuriku, Japan, Using OCTAVE VLF/LF Transmitter Signals, Springer Proceedings in Physics, 205-212, 2025.
3. Ohya, H., F. Tsuchiya, T. Takamura, H. Shinagawa, Y. Takahashi, A. B. Chen, Lower ionospheric resonance caused by Pekeris wave induced by 2022 Tonga volcanic eruption, Scientific Reports, 14(1), 2024.
4. Iwashita, H., F. Kobayashi, K. Morotomi, S. Shimamura, A. Higuchi, H. Ohya, T. Takano, T. Takamura, POTEKA Observation/Prediction Technology on the Ground Surface, URSI Radio Science Letters, 5, 2024.
5. Enomoto, R., H. Nakata, S. Rui, K. Hattori, K. Hosokawa, H. Ohya, Analysis of Concentric Traveling Ionospheric Disturbances associated with typhoon Faxai in 2019 using HF Doppler Soundings, Journal of Atmospheric Electricity, 43, 1-7, 2024.

【口頭発表】

1. Ohya, H., D-region ionosphere and space weather phenomena: Latest research and impacts in AVON project, The 10th International Seminar on Aerospace Science and Technology (ISAST) 2024 (Bali, Indonesia), September, 2024 (Invited).
2. Ohya, H., F. Tsuchiya, D-region ionospheric variations associated with the 2024 Noto earthquake using OCTAVE LF transmitter signals, 45th Committee on Space Research (COSPAR) Scientific Assembly (Busan, South Korea), July 2024.
3. Ohya, H., F. Tsuchiya, T. Takamura, H. Shinagawa, Y. Takahashi, A. B. Chen, D-region Ionospheric Resonance Induced by Pekeris Wave associated with the 2022 Tonga Volcanic Eruption, 21st Asia Oseania Geosciences Society (AOGS) Annual Meeting (Pyeongchang, South Korea), June 2024.
4. Ohya, H., F. Tsuchiya, T. Takamura, H. Shinagawa, Y. Takahashi, A. B. Chen, Acoustic resonance in the D-region ionosphere due to Pekeris wave after the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcanic eruption using AVON VLF/LF transmitter signals, Japan Geoscience Union (JpGU) Meeting2024 (hybrid: Chiba, Japan+Online), May 2024.
5. Ohya, H., F. Tsuchiya, D-region ionospheric variations after the 2024 Noto Peninsula earthquake using OCTAVE VLF/LF transmitter signals, Japan Geoscience Union (JpGU) Meeting2024 (hybrid: Chiba, Japan+Online), May 2024.

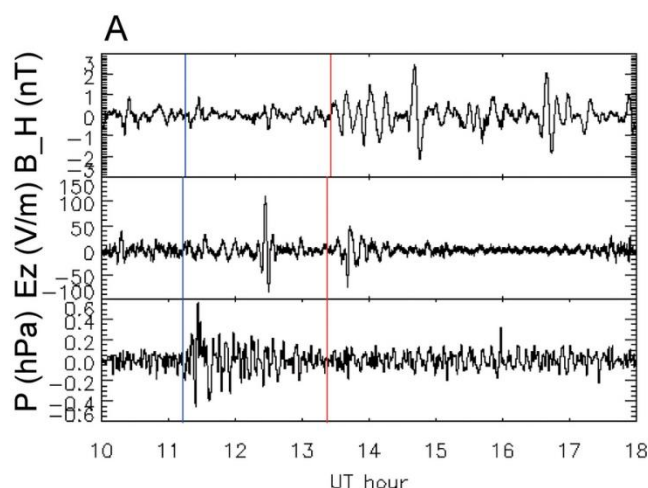


図 1 上からトンガ噴火時の地上磁場、大気電場、気圧。

国際共同観測ネットワークによる有機エアロゾルの分解および生成過程の解明
Elucidation of the degradation and formation process of organic aerosols

島田幸治郎、琉球大学・理学部

【研究目的】

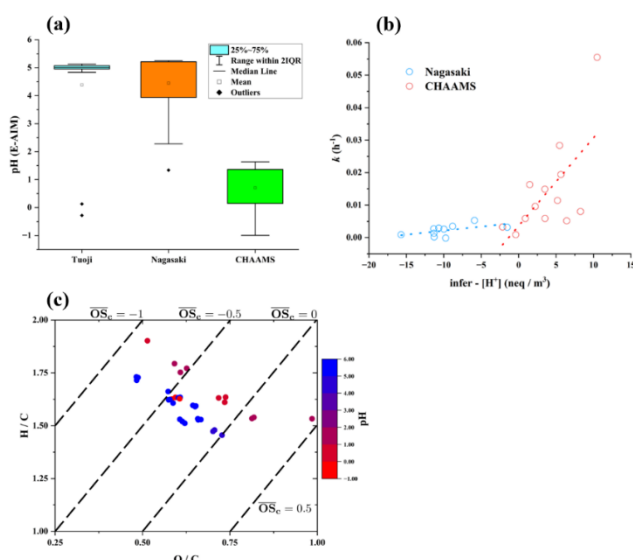
長距離輸送される二次有機生成エアロゾル(SOA:Secondary organic aerosol)の組成は、室内実験の結果から大きく2つの議論にわかれている。1 つは、SOA はオリゴマーやフミン様物質のような比較的分子量の大きい難分解性の有機物が主要成分であり、長距離輸送中に生成される。もう一つは、SOA であるオリゴマーやフミン様物質は長距離輸送される間にオゾンによる酸化や光化学酸化反応によって分解が促進され低分子化し、さらに分解副産物も生成するというものである。上記2つの議論について実態を解明するため本研究では、これまで申請者が構築してきた東アジアの国際共同観測ネットワークを活用し、長距離輸送中の SOA がどのようなタイムスケールで生成や分解を起こすのかを解明する。

【研究方法】

2022年、2023年の冬季と春季に辺戸岬に位置する国立環境研究所 辺戸岬 大気・エアロゾル観測ステーション(CHAAMS)(日本)、Touji 島(中国)、長崎大学(日本)で1日1回のサンプリングを行った(Table 1)。長距離輸送される同一気塊中の SOA を捕集するために、Shimada et al. (2020)を参考にして気塊の輸送経路である中国 Touji 島、長崎と沖縄辺戸岬で同時に、2022 年～2023 年の春季と冬季に大気観測(合計 128 試料)を行った。TOC 計で全水溶性有機成分(WSOC)を分析した。全有機物(OC)と元素上炭素(EC)を OC/EC 計で分析し、全疎水性有機成分(WIOC)は OC と WSOC の差分により算出した。どの試料が同一気塊の SOA を捕集したか調べるために化学的変質を起こさない元素状炭素(EC)、衛星と3次元大気化学モデルを組み合わせた解析手法を用いて同定した。特に、その同定した試料の水溶性で低分子有機物である高極性水溶性有機物(HP-WSOC)と高分子有機物であるフミン様物質(HULIS)に Zhou et al. (2022)の方法で2分画に抽出し、エアロゾル質量分析計で定量した。フィルターのイオン成分分析は、イオンクロマトグラフ(ICS-1600, Thermo Fisher Scientific)を用い、得られた各サンプルのイオン濃度を熱力学平衡モデルである E-AIM (Extended AIM Aerosol Thermodynamics Model)、ISORROPIA IIに入力し、エアロゾルの pH を算出した。

【結果と考察】

長距離輸送における H_2SO_4 の生成に伴う酸性度変化と高分子有機物であるフミン様物質(HULIS)の酸化度($\overline{\text{OS}}_c$)との関係を図1に示す。全イオン濃度に占める割合が最も高かったカチオンは、3地点すべてにおいて NH_4^+ であった。一方、アニオンは Touji 島で NO_3^- が 27.7%と最も高く、長崎、CHAAMS ではそれぞれ SO_4^{2-} が 30.9%、45.6%と最も高くなり、pH は図1(a)に示すように、長距離輸送にかけて大きく低下した。これは、図1(b)で示したように、酸性度の増加に伴い SO_2 の H_2SO_4 への酸化速度が上昇したためであった。また、図1(c)より、同程度の $\overline{\text{OS}}_c$ 値をもつ粒子では、酸性度が高いほど O/C が高くなる傾向が見られたことから、実大気中においても酸性条件下



における SOA の官能基化、高分子化の進行が示唆された。

【引用文献】

1. Shimada, K.; Nohchi, M.; Yang, X.; Sugiyama, T.; Miura, K.; Takami, A.; Sato, K.; Chen, X.; Kato, S.; Kajii, Y.; Meng, F.; Hatakeyama, S. Degradation of PAHs during long-range transport based on simultaneous measurements at Tuoji Island, China, and at Fukue Island and Cape Hedo, Japan. *Environmental Pollution*, 2020, 260, 113906.
2. Zhou, R.; Chen, Q.; Chen, J.; Ren, L.; Deng, Y.; Vodička, P.; Deshmukh, D. K.; Kawamura, K.; Fu, P.; Mochida, M. Distinctive Sources Govern Organic Aerosol Fractions with Different Degrees of Oxygenation in the Urban Atmosphere. *Environ. Sci. Technol.* 2021, 55 (8), 4494–4503.

【成果発表】

1. 北條就三, 吉野暢晃, 石川栄作, 持田陸宏, 周瑞辰, 孫錢哲, 魏辰然, 板橋秀一, 高見明憲, 清水厚, 佐藤圭, 中山智喜, 山口真弘, 佐藤啓市, 畠山史郎, **島田幸治郎**, (2024) 中国Tuoji 島から沖縄辺戸岬に長距離輸送される有機エアロゾルの化学的変質の解析, 第65回大気環境学会年会, 口頭発表(慶應義塾大学) (9月).
2. HOJO Shuzo, KOMUTA Nikita, YOSHINO Nobuaki, ISHIKAWA Eisaku, MOCHIDA Michihiro, WEI Chenran, SUN Qianzhe, WEI Chenran, YANG Xiaoyang, TAKAMI Akinori, SATO Kei, SHIMIZU Atsushi, ITAHASHI Syuichi, HATAKEYAMA Shiro, NAKAYAMA Tomoki, YAMAGUCHI Masahiro, and **SHIMADA Kojiro** (2024) Analysis of chemical properties of organic aerosols during long-range transport from Tuoji island, China to Okinawa, Japan. International Symposium on plant phenology and climate feedbacks mediated by BVOCs (PCF2024), Poster presentation (Nagaragawa Convention Center) (October).
3. 小牟田ニキータ, 北條就三, Xiaoyang Yang, 高見昭憲, 佐藤圭, 清水厚, 中山智喜, 山口真弘, Xuan Chen, Fan Meng, 畠山史郎, **島田幸治郎** (2024) 長距離輸送される同一気塊中のエアロゾル酸性度変化の解析. 第65回大気環境学会年会, 口頭発表(慶應義塾大学) (9月).
4. KOMUTA Nikita, HOJO Shuzo, OHO Genki, YOSHINO Nobuaki, MOCHIDA Michihiro, WEI Chenran, SUN Qianzhe, ITAHASHI Syuichi, SHIMIZU Atsushi, SATO Kei, NAKAYAMA Tomoki, YAMAGUCHI Masahiro, SATO Keiichi, HATAKEYAMA Siro, and **SHIMADA Kojiro** (2024) Evaluation of aerosol acidity changes during long range transport based on simultaneous measurements at Tuoji Island, China, Nagasaki University and Cape Hedo, Japan. International Symposium on plant phenology and climate feedbacks mediated by BVOCs (PCF2024), Poster presentation (Nagaragawa Convention Center) (October).
5. 小牟田ニキータ, 北條就三, Xiaoyang Yang, 高見昭憲, 佐藤圭, 清水厚, 板橋秀一, Xuan Chen, Fan Meng, 畠山史郎, 持田陸宏, 周瑞辰, 孫錢哲, 魏辰然, 中山智喜, 山口真弘, **島田幸治郎**, (2024) 中国Tuoji島から沖縄辺戸岬に長距離輸送される エアロゾル酸性度変化の評価. 気象学会2024年度秋季大会, ポスター発表(つくば国際会議場) (11月).
6. **SHIMADA Kojiro**, YOSHINO Nobuaki, ISHIKAWA Eisaku, MOCHIDA Michihiro, WEI Chenran, SUN Qianzhe, TAKAMI Akinori, SHIMIZU Atsushi, SATO Kei, NAKAYAMA Tomoaki, YAMAGUCHI Masahiro, SATO Keiichi, HATAKEYAMA Siro, ITAHASHI Syuichi (2024) Analysis of chemical transformation of organic aerosols transported over long distances from Tuoji Island, China to Cape Hedo, Okinawa. JpGU-AGU Joint Meeting 2026, Oral presentation (Makuhari Messe, Japan) (May)

地上ライダーネットワークと衛星観測を融合した南米スモークの観測研究
Observational study of the South American smoke by integrating ground-based lidar network
and satellite observation

西澤智明、国立環境研究所・地球システム領域

1 研究目的

本研究では、地球気候や地域環境に影響を及ぼす南米スモーク（主にアマゾンスモーク）の動態および微物理・光学特性の実態把握と新たな知見の創出を目的とした観測研究を行う。アマゾンスモークは、アマゾン熱帯雨林から風下となる南方への長距離輸送がこれまでの観測研究からしばしば報告されている。SAVER-Netプロジェクト等で構築・発展された地上ライダーネットワークは、風下国となるアルゼンチン、チリ、ボリビアに展開されており、本課題に適した観測地点構成となっている。これを最大限活用し、アマゾンスモークの物理特性の高度分布の把握を行う。ライダーネットワークによるスモークの多地点・高度分布計測と共に、スモークの発生域や水平輸送を掌握するために、静止衛星GOES/AHIや極軌道衛星Aqua/MODIS等の衛星観測を併用して用いる。特にGOES衛星は北南米大陸を常時監視していることから、本研究において有用な衛星観測データとなる。また、スモークの移流経路の詳細把握のために、流跡線解析や数値モデルによるシミュレーション解析も用いる。これらを複合的に用い、南米スモークの物理特性と共にその時間経過や経路環境に沿った特性の変質（エイジング効果）についても明らかにする。また、本課題で実施する地上ライダーネットワーク観測やそれを用いたエアロゾル研究は、南米エアロゾル研究の基盤の底上げに資する国際的な共同研究基盤としての意義もある。本課題を通じて、南米の他の観測コミュニティ（地上ライダーネットワークLALINET (Latin America Lidar Network)など）との連携の強化も推進する。

2 研究方法

先行研究において構築された地上ライダーネットワークを用いてスモークを含むエアロゾルの常時観測を実施する。予想されるアマゾン熱帯雨林からのスモークの移流経路上の観測サイト（ラパス、トゥクマン、コルドバ、ブエノスアイレス）については、重要地点として常時観測体制を強化する。衛星観測として、静止衛星GOESおよび極軌道衛星Aquaの光学センサーからのエアロゾルプロダクトおよび森林火災データを取得し、スモークの発生域や水平動態を検知する。また、地上ライダーデータと衛星観測データの複合解析により、エアロゾルの光吸収性に感度のある消散・後方散乱係数比（ライダー比）や粒径に感度のあるオングストローム係数といった物理量の抽出を試み、スモークのキャラクター化と共に、そのエイジング効果を掴む。ライダーによる高度分布観測から移流経路について水平方向だけではなく高度方向についても言及できる。流跡線解析や数値モデルによるシミュレーション解析を併用し、3次元的な移流経路の同定を行い、エイジング効果の評価を行う。また、発生したスモークの移流経路上に他の地上観測データ（例えば、AERONETなど）がある場合は、それらも利用する。

3 研究結果

ライダー観測

南米スモークの移流経路上の重要観測サイトとなるラパス（ボリビア）でのライダー観測を昨年度再開し、今年度は継続的に観測を実施することができた。トゥクマン（アルゼンチン）では、レーザーの故障や観測環境の整備のため観測停止を余儀なくされていたが、国立環境研究所で開発した可搬型小型ライダーの搬入を今年度果たし、2024年8月から昼夜連続観測を実施中である。図1にトゥ

クマンにおける2024年8月18日のライダー観測例（波長532nmの後方散乱信号の時間一高度断面図）を示す。高度2km以下において信号強度が高いことからエアロゾルが分布していることがわかる。また、エアロゾル分布の時間変化から混合層の発達の様子を捉えている。

南米スモークの下流側に位置するコルドバおよびブエノスアイレスでのライダー観測は継続中である。コルドバについては、SATREPS課題で導入した高スペクトル分解ライダー（HSRL）がアクティブであることを確認した。スモーク等のイベント中にHSRL観測が実施できるように現地オペレーターに技術指導を行った。

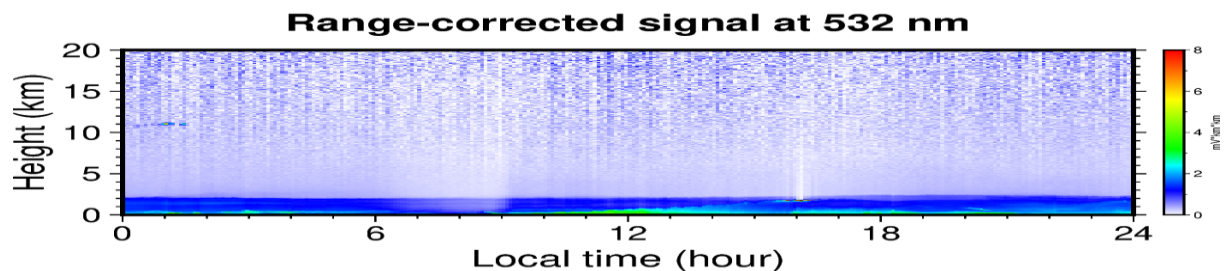


図1 トクマンにおける2024年8月18日のライダー観測例

エアロゾル採取計測と化学組成分析

観測地点について南米共同研究者と協議を行い、観測環境や計測設備の優れたコルドバにてエアロゾル採取計測を実施することにした。試料採取に使用するハイボリュームサンプラーや器具類の搬送準備は完了したものの、これらの機器のアルゼンチンへの輸送の手配に関する業者への打診において時間を要しており、今年度中の搬送完了には至らなかった。搬送手続きは可能となり次第進める予定であり、次年度早々の搬送を目指している。

衛星データを用いたスモークイベントの抽出と解析

南北米大陸を網羅する静止気象衛星GOESなどの衛星データの収集・解析およびスモークイベントの抽出を進めている。本研究期間だけではなく、2020年まで遡りその動態の把握を行っている。図2にGOES衛星から推定されたエアロゾル光学的厚さが示されおり、ライダーの地上ネットワーク観測によってスモークの大規模流を捉えられることが示されている（左図）。一方で、その流れを捉えられないケースもある（右図）。衛星観測や他の地上観測データ（AERONET等）も複合的に利用しスモークの性状・動態解析を進めていく。

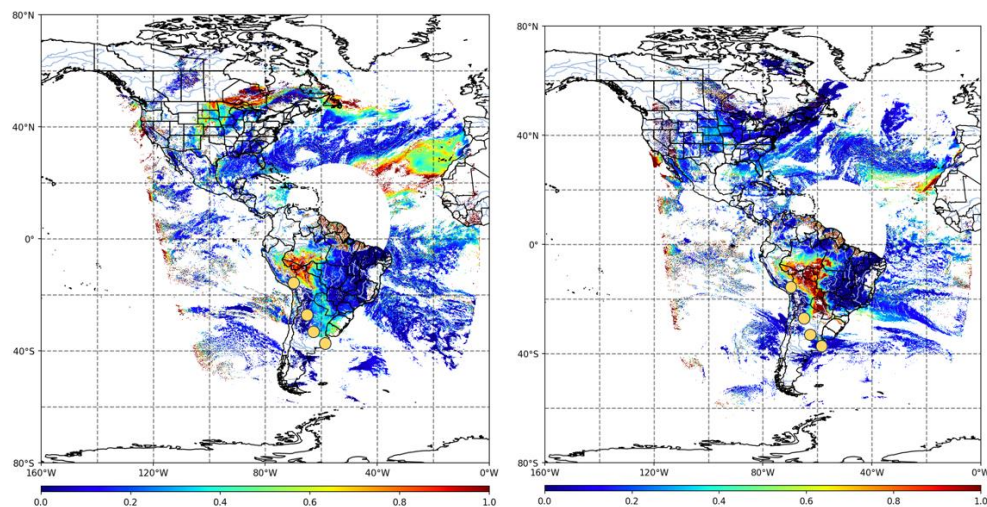


図2 GOES衛星から推定されたエアロゾル光学的厚さ（550nm）

左図）2021年8月18日 右図）2020年9月5日。図中の黄点はライダー観測地点

(別紙様式01-2)

インドネシア広域地磁気観測網の展開：赤道・低緯度領域の超高層・内部電磁気学現象の解明
Investigation of Upper Atmospheric/Internal Electromagnetic Phenomena in Equatorial/Low Latitude by the Indonesian Geomagnetic Observation Network

阿部修司、九州大学・国際宇宙惑星環境研究センター

本共同研究の科学的な目標は、インドネシアのMAGDAS地磁気観測網を経度領域に拡張し、赤道領域の宇宙天気の現象の時空間発展を詳細に調査してその物理メカニズムを解明すること、また、内部電磁気学の観点から、より広域な領域を密度濃くカバーすることで観測精度の向上を促し、局地的な内部電磁気的現象の早期検知をおこなうことである。本目標を達成するため、昨年度、ブラウイジャヤ大学の協力の下、インドネシア・東ジャワ州のチャンガル観測点（CNG）へ3成分フラックスゲート磁力計の設置をおこなった。本磁力計は2024年11月以降に不具合が発生したため、2025年3月にチャンガル観測点へ赴き、メンテナンスを行った[1]。メンテナンス後は、順調に稼働を続けている。あわせて、名古屋市立大学の能勢教授が進めている同観測点へのインダクション磁力計の設置補助をおこなった。また、これらの作業に先立ち、2024年10月にMaryanto教授が九州大学国際宇宙惑星環境研究センターを訪れ、設置作業に関する事前調整、機器メンテナンス・学術交流に関する覚書についての打ち合わせをおこなった[2]。



図1：2024年10月、九州大学国際宇宙惑星環境研究センターでの共同研究打ち合わせ（左）、2025年3月、インドネシアチャンガル観測点の作業メンバー（右）

設置された磁力計を用いた分野横断研究の先駆けとして、九州大学で開催されたThe 10th International Exchange and Innovation Conference on Engineering & Sciences (IEICES 2024) Conferenceにて、共同研究者のMaryanto教授が発表及びプロシーディング論文の出版をおこなった[3][4]。本研究は、インドネシアのチャンガル地域における持続可能な開発を達成するために、地質学的・環境学的研究を実施するとともに、異なる物理学的アプローチの研究を加えることで、当該地域における地熱資源の可能性と、休火山の噴火による脅威を探るものである。論文の中では、MAGDASデータを解析することで、磁場の変動に基づくチャンガル地域の地熱および火山システムの地下の変化に関する情報を得られることが言及されている。

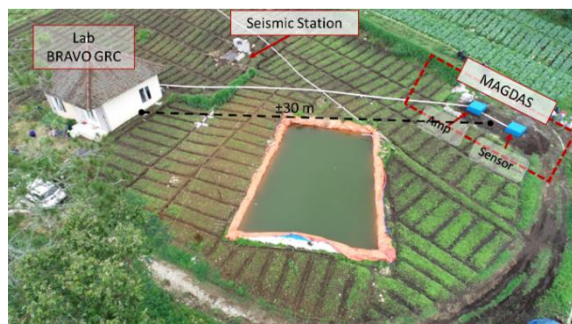


図2：地震計とフラックスゲート磁力計の同時観測（Maryanto et al, 2024）

さらに、2024年12月にブラウイジャヤ大学とオンラインのハイブリッド形式で「i-MAGDAS partnership forum - Workshop on International MAGDAS Series 1」と銘打ったワークショップを開催した[5]。本ワークショップには、先に挙げた能勢教授の他、共同研究者のGirgis博士とTakla博士に加え、マレーシアのMAGDASトレングヌ観測点の責任者であるUmar博士が登壇した。日本・エジプト・マレーシア・インドネシアの研究者によるハンズオンセッションとインタラクティブなディスカッションを通し、超高層大気物理学や内部電磁気学に関する知識を参加者に提供する国際コラボレーションを実施した。

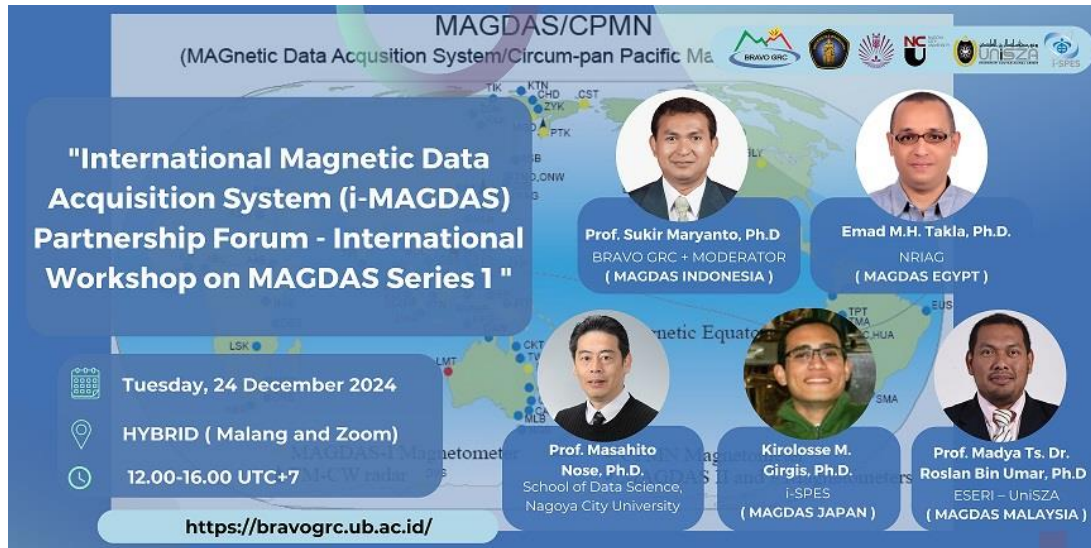


図3：MAGDAS国際ワークショップの案内

以上のように、設置されたMAGDAS磁力計を起点として、複数の機器を用いた観測網の拡充、分野横断的研究の促進、国際ワークショップの開催などが行われた。これらの成果は、本共同研究が目標とする赤道・低緯度領域の超高層・内部電磁気学現象の解明に向けた研究基盤が確かに構築されたことを示しており、これからも数多くの研究・教育成果が導出されることが期待される。

参考文献：

- [1] Installation of Induction Magnetometer Instruments in BRAVO GRC Field Lab at ATP Cangar (<https://bravogrc.ub.ac.id/installation-of-induction-magnetometer-instruments-in-bravo-grc-field-lab-at-atp-cangar/>)
- [2] Development of Research Facilities at Cangar Laboratory (<https://bravogrc.ub.ac.id/development-of-research-facilities-at-cangar-laboratory-collaboration-with-nagoya-city-university/>)
- [3] 10th International Exchange and Innovation Conference on Engineering & Sciences (IEICES) 2024 (http://www.tj.kyushu-u.ac.jp/en/igses/ieices/common_pdf/Conference%20Program%202024.pdf)
- [4] Maryanto et al., Multi-method Geophysical Observations in Governing Sustainable Development of a Volcano-Hosted Geothermal Area in Cangar, Indonesia, Proceedings of International Exchange and Innovation Conference on Engineering & Sciences (IEICES) 10:1205-1211, DOI:10.5109/7323410
- [5] i-MAGDAS partnership forum – Workshop on International MAGDAS Series 1 (<https://bravogrc.ub.ac.id/i-magdas-partnership-forum-workshop-on-international-magdas-series-1/>)

高エネルギー電子が磁気圏から大気へ降下する現象は、放射線帯外帯の損失過程として働くとともに、地球大気の中間圏・下部熱圏の電離源としても重要である。中間圏・下部熱圏では、電離に伴う化学反応によって窒素酸化物や水素酸化物が生成され、これらの触媒反応によりオゾン減少が生じるとされている。これらの一連の現象を観測により実証していくことが課題となっている。本研究は、高エネルギー電子の降込みによる下部電離圏の電離からその中間圏への影響について、観測的な実証を得ることを目的として実施された。以下に、2024 年度の活動と成果を報告する。

高エネルギー電子降下の観測は、北米、北欧、日本国内に展開した VLF 帯標準電波の電波伝搬ネットワークにより実施している。ネットワークの維持のためアラスカ・ポーカーフラットリサーチレンジおよび北海道・陸別観測所においてモノポールアンテナの交換とケーブルの保守を実施した。このネットワークを用いた研究成果として、サブストームに伴って出現する IPDP タイプの EMIC 波に注目し、サブオーロラ帯での IPDP とこれに伴う高エネルギー電子降下の出現特性についての統計解析結果が JGR Space physics 誌に受理された(Hirai et al. 2025)。

高エネルギー粒子の大気への降下によって、中間圏のオゾン濃度が減少することが予想されている。高エネルギー粒子の降込みによる中間圏のオゾン濃度の減少を調べるため、名古屋大学 ISEE が南極・昭和基地で実施しているミリ波分光放射計観測のデータの解析を 2022 年 7 月から 2023 年 3 月、2024 年 5 月の観測に対して実施した。解析対象は 249.8 GHz 帯と 250.0 GHz 帯の O₃ スペクトルで、オゾンの濃度の高度分布を推定するリトリバル手法を用いて中間圏高度のオゾン濃度の変動を導出した。2024 年 5 月に発生した巨大磁気嵐時には、5 月 10 日から 20 日にかけて 10MeV 以上の太陽プロトンフラックスの増大が発生し、夜間の中間圏 O₃ カラム量に、夕方から朝方にかけて単調減少の変動傾向が確認された。この傾向は特に 5 月 10 日から 11 日に顕著であった。昭和基地のリオメーターでは、5 月 10 日 LT 20:10 に高エネルギー粒子の強い降込みがあり、LT 21:40 頃まで弱い降込みが確認されたことから、5 月 10 日から 11 日に昭和基地上空に高エネルギー粒子降込が発生し、それに起因して中間圏 O₃ カラム量の減少が引き起こされたと考えられる。5 月 10 日から 11 日は昭和基地が曇天であったため、磁気共役点付近に近いノルウェー・トルムソ上空における rTEC ケオグラムデータを用いてオーロラオーバルの位置の移動を調査した。昭和基地で中間圏 O₃ 量減少が観測された 5 月 10 日 LT 19:30 から LT 22:30 の時間帯は、昭和基地はオーロラオーバルの高緯度側（極冠域）に位置していたと考えられることから、中間圏 O₃ 量減少は高エネルギー電子ではなく、太陽プロトンによって起こされたと結論した。この観測結果は、地上のミリ波分光放射計で中間圏オゾン濃度の減少を捉えた初めての報告となる。

成果発表

<論文>

Hirai, A., Tsuchiya, F., Obara, T., Miyoshi, Y., Katoh, Y., Kasaba, Y., et al. (2025). Properties of EMIC waves and EMIC wave-driven electron precipitation in subauroral latitudes observed at Athabasca, Canada. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 130, e2024JA033357. <https://doi.org/10.1029/2024JA033357>

<学会等発表>

Hikaru Suzuki, et al., Variations in the ozone concentration in the mesosphere observed at Syowa station associated with energetic particles precipitation, 日本地球惑星科学連合 2024 年大会, 2024 年 5 月 26 日, 幕張メッセ

鈴木 ひかる他、高エネルギー粒子降下による南極昭和基地上空での中間圏オゾン濃度変動、第 29 回大気化学討論会、2024 年 10 月 9 日～11 日、神戸大学

水野 亮 他、昭和基地のミリ波多周波超伝導分光計による一酸化窒素(NO)時間変動観測と高エネルギー粒子降り込みの影響、第 29 回大気化学討論会、2024 年 10 月 9 日～11 日、神戸大学

Hikaru Suzuki, et al., Variations in the ozone concentration in the mesosphere observed at Syowa station associated with energetic particles precipitation, The 15th Symposium on Polar Science, 2024 年 12 月 3 日～12 月 5 日、国立極地研究所

鈴木 ひかる他、高エネルギー粒子降下による南極昭和基地上空での中間圏オゾン濃度変動、第 22 回 ERG サイエンス会議、2025 年 3 月 11 日、名古屋大学

(別紙様式01-2)

LAMP-2 ロケット搭載カメラ AIC の観測最適化のための
シーボトムにおける地上オーロラ観測
Ground-based auroral observation at Skibton for the optimization of auroral camera AIC
onboard the --2 rocket

坂野井 健、東北大学・理学研究科

【 研究目的と意義 】

日米共同観測ロケット「LAMP-2」は、NASA に申請中のロケット実験であり、脈動オーロラに伴って発生する数 keV から数百 keV ～数 MeV にわたる高エネルギー電子降下 (Energetic Particle Precipitation; EPP) とその中層大気へ及ぼす影響、ならびに脈動オーロラに伴い加熱された朝方側電離圏から磁気圏へのイオン流出過程を調べる計画である。この解明のために、その場観測と地上 3D レーダーの共同観測が重要な課題となっている。LAMP-2 ロケットでは、2 台のカメラ (AIC1, AIC2) が搭載され、研究代表者は搭載カメラの責任者であり、現在この設計と観測計画を進めている。本研究は、搭載カメラと同じフィルタ・CMOS カメラで構成されるオーロラカメラをシーボトムに設置し、脈動オーロラに対して実測されるカウントとノイズを評価する。これにより、搭載カメラの 2 波長を決定し、ターゲットに最適化した時間・空間分解能などの観測計画を確立させることを目的とする。

【 研究成果 】

2024 年度は、2 台の LAMP-2 ロケット搭載カメラ試験品 AIC1-EM および AIC2-EM (検出器: ZWO 社 ASI-432MM、波長: 670nm, 845nm) ならびに全天カメラ (検出器: ZWO 社 ASI-483MMpro、魚眼レンズ: Fujinon FE185C086HA-1, f=2.7mm F/1.8、波長: 845nm) と狭角カメラ (検出器: ZWO-ASI294MMpro、レンズ: Space 43F2409M-MP C, f=24mm F/0.8, FOV=28x28deg、波長: 650nm より長波長) の合計 4 台を開発した。この開発を年度前半に行い、7 月 12-13 日に名大 ISEE にて全系電気試験を行い、正常動作確認を行った後に、Skibton 観測所に輸送した。

Skibton 観測所への設置作業は研究メンバーの名大・大山伸一郎氏が行った。この設置状況を図 1 に示す。9 月時には、狭角カメラの立ち上げ以外の 3 台のカメラについては設置が完了し、その 3 台について 10 月以降に連続自動運用を開始した。その後の運用状況としては、しばしばカメラの動作不良やストレージ (NAS) の不具合等のマイナーな問題により、短期的な観測欠損が生じたものの、日本からリモートアクセスすることで問題解決し、復旧させることができた。



図 1. Skibton 観測所 (左) への 4 台のカメラ設置状況 (中) および運用システム (右)。

取得されるカメラのデータ量は膨大なため、インターネット回線ですべて転送することはできないが、磁気活動度が高かった期間の一部データについてリモートで回収し、データ解析を行った。この結果は、2024 年 11 月の SGEPS で成果報告された。

2024 年 10 月 7 日の観測例を図 2 に示す。この例も含め、複数のオーロラの発光例に対して、本研究で設置されたカメラにより画像取得が確認された。しかしながら、LAMP-2 ロケットカメラのうち AIC2-EM(845nm)についてはカウント値が低いことが分かった。このため、別な観測波長の候補として N2+428nm の観測検討を行うこととなった。

2025 年 2 月に研究代表者の坂野井健が本経費により Skibton 観測所を訪問し、それまでに観測されたデータの回収および AIC2-EM のフィルターを 845nm から 428nm へ変更した。また、9 月に観測立ち上げができていなかった狭角カメラの運用を開始した。

【今後の課題】

2025 年は、前年度に観測されたデータの解析をすすめるとともに、冬期には同システムの観測を再開し、一定の観測データを取得した後に機器回収を行う予定である。

【 成果発表 】

＜ 査読論文（合計7件、以下抜粋） ＞

Hosokawa, K., Y. Miyoshi, M. Mcharg, V. Ledvina, D. Hampton, M. Lessard, M. Shumko, K. Asamura, T. Sakanoi, T. Mitani, T. Namekawa, M. Nose, Y. Ogawa, A. Jaynes, A. Halford (2024), Variation of the Altitude of Auroral Emission During a Substorm Cycle: Stereoscopic Optical Observations During the LAMP Rocket Experiment, J. Geophys. Res.-Space Phys, Vol. 129, 11, doi: 10.1029/2024JA033036.

Hirahara, M. Y. Ebihara, N. Kitamura, T. Sakanoi, K. Asamura, T. Takada, H. Saito (2024), Reimei Satellite Observations of Alfvénic Interaction Modulating Inverted-V Electrons and Filamentary Auroral Forms at the Poleward Edge of a Discrete Arc, J. Geophys. Res.-Space Phys., Vol. 129, 10, doi: 10.1029/2024JA032650.

Oyama, S., H. Vanhamaki L. Cai A. Shinbori K. Hosokawa T. Sakanoi K. Shiokawa A. Aikio I. I. Virtanen Y. Ogawa Y. Miyoshi S. Kurita N. Nishitani (2024), Thermospheric Wind Response to March 2023 Storm: Largest Wind Ever Observed With a Fabry-Perot Interferometer in Tromsø, Norway Since 2009, Space Weather, vol. 22, 3, DOI: 10.1029/2023SW003728.

Sakanoi, T., M. Emilioac, S. D. dos Santos, S. V. Berdyugina, Ryan Swindle, M. Kagitani, M. Kurita, K. Takahashi, Y. Hirahara, J. R. Kuhn, K. Lewis (2024), High-contrast imaging and spectroscopy by a low-scattering off-axis telescope PLANETS; current status of the development and future plan, SPIE proceedings, ADVANCES IN OPTICAL AND MECHANICAL TECHNOLOGIES FOR TELESCOPES AND INSTRUMENTATION VI, Vol. 13100, doi: 10.1117/12.3019510.

＜ 学会発表 ＞

・本研究に関する国際学会：8件（うち坂野井筆頭が3件）、国内学会6件（うち坂野井筆頭が4件）

＜ 著書 ＞

坂野井健, オーロラ研究者が歩んだ道：南極から木星まで, 特集「太陽活動極大期のオーロラの魅力に迫る」, 極地～南極と北極の総合誌～, 第120号, 2025年3月（印刷中）.

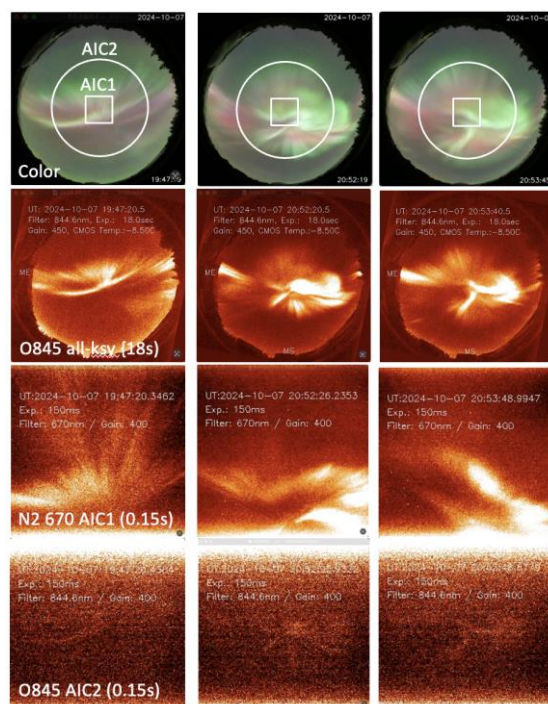


図 2. 2024 年 10 月 7 日の Skibton 観測所におけるオーロラ観測例。上から、カラーカメラ (Kiruna/IRF 南條氏提供)、全天 845nm カメラ、LAMP2 カメラ (670nm と 845nm)。

ディープラーニングによる新しい磁気圏擾乱プロセスモデルの構築

Construction of a new model of magnetospheric disturbance process by deep learning

尾花由紀・九州大学・国際宇宙惑星環境研究センター

本研究は、ディープラーニングを太陽地球系科学分野に導入することで、多種・大量の観測データに潜む本質的な物理過程を抽出する枠組みを構築することを最終目的とする。特にプラズマ波動スペクトルの自動解析と、磁気圏擾乱を引き起こす未知の太陽風パターンの探索について重点的に取り組むために、以下の2つの短期的（2023年－2025年度）研究課題を設定している。

■課題1 ■ 地磁気データを用いた磁力線共鳴振動現象の自動検出手法の確立

■課題2 ■ 低エネルギープラズマの極端枯渇をもたらす太陽風の未知のパターンの探査

2024年度は、課題1、2について、以下の研究を行った。

課題1に対する取り組み

まず、ニュージーランドに設置された3地点（MDM, EYR, TEW）における1秒サンプリング地磁気データを用い、中緯度における磁力線共鳴（FLR）現象の検出に適した教師データを整備した。これに基づき、畳み込みニューラルネットワーク（CNN）、特にResNet18をベースとした転移学習モデルを構築し、FLRが明瞭に観測されるか否かの二値分類モデルを開発した。

開発したモデルでは、入力として地磁気データから作成された振幅比法および位相差法に基づくダイナミックスペクトル画像を使用し、FLRの有無を分類する。学習には2012-2022年の10年間に取得された4987枚のスペクトル画像を用い、F1-score 0.88、正解率（Accuracy）0.84を達成した。また、Grad-CAM（Gradient-weighted Class Activation Mapping）による可視化技術を併用することで、モデルがFLRのどの特徴に着目して判別しているかを明示し、解釈性の高いモデル設計に成功した。

さらに、FLRが検出された場合にその共鳴周波数を自動で抽出する手法として、Grad-Cam マスクの適用による注目領域の抽出、モルフォロジー変換、時間軸方向の移動平均処理、画素値の差分抽出によるエッジ検出を組み合わせたFLR抽出モデルも構築し、一定の性能を確認できた。しかしながら、磁力線共鳴の有無の判定、共鳴周波数の抽出、いずれも過学習の典型的な兆候が表れるなど改善の余地が残されており、2025年度は改善と論文執筆を重点的に行う予定である。

課題2に対する取り組み

地磁気擾乱インデックス(Dst, Kp, AE)との関係解析を実施した。LppとEyの相関を磁気地方時（MLT）別に調査した結果、22-2 MLT（深夜～早朝）領域で最も高い相関が確認された。また、最適なEyの平均化時間にはMLT依存性が見られ、夜側（22-6 MLT）では約45時間と極めて長い平均化時間が必要だったのに対し、昼側（6-14 MLT）では約10時間と近似的短い平均化時間のEyが高い相関を示した。このことは、対流によるプラズマ圏の収縮が夜側から開始されることを考えると奇妙な結果であり、今後、一般的理解との整合性や物理的背景について、詳細な検討が必要である。

国際的短波ドップラー観測網を用いた電離圏擾乱現象の観測的研究

Observational studies of ionospheric disturbances
using international network of HF Doppler sounding systems

細川敬祐 電気通信大学 大学院情報理工学研究科

1. 研究目的

電離圏の乱れは、電離圏の内部で不安定性などによって生成されるものに加え、1) 上方からグローバルに伝達される太陽活動起源の電磁エネルギー、2) 下層大気起源の波動が下方から輸送するエネルギーの入力によって発生する。これらの 2 つの起源の異なる電離圏擾乱を理解するには、その変動要因を切り分けたうえで、電離圏の応答過程を調べる必要がある。しかし、局地的な観測では、観測領域が限られるためにこの切り分けを行うことができず、電離圏擾乱の理解に制限をかけてきた。申請者らは、このボトルネックを国際協力によって解消することを目指し、「チェコ科学アカデミー大気物理研究所」と「電気通信大学を中心とする日本のグループ」がそれぞれ行ってきた短波ドップラー(HFD)法による電離圏観測を相互補完的に融合することでグローバルなネットワーク観測を実現する。特に、日本国内に展開されている HFD 観測網と、チェコのグループが欧州、南米、アフリカに展開している HFD 観測を組み合わせ、これまでにない広い経度帯での同時観測を実現する。さらに、日本で行っている HFD 観測に周波数変調 (FM-CW) 機能を持たせることによって、電波の伝搬距離を導出し、電波の反射高度を観測することにも取り組む。

2. 研究方法

東京都調布市の電気通信大学調布キャンパスにおいて、5.006, 8.006 MHz の 2 周波の短波帯電波の送信局を運用し、国内 10 地点におけるネットワーク観測を継続した。各観測点では、調布から送信している 2 つの周波数だけでなく、千葉県の上野毛、北海道の根室からそれぞれ送信されている 6.055, 3.925 MHz のラジオ日経の電波も受信しており、合計 4 周波数における HFD 観測を行うことができていた。ただし、藤沢観測点、杉戸観測点の 2 局では、GPS 基準信号発生器に問題があるために周波数にオフセットが見られており、2025 年度には、これらの観測点で稼働しているソフトウェア受信機を置き換える予定である。

通常の HFD 観測に加える形で、2024 年 3 月から、周波数変調した信号を送信することによる電波の伝搬距離の計測を開始した。調布から通常の連続波 (CW 波) に重畳する形で周波数変調をかけた連続波 (FM-CW 波) の送信を行い、千葉において FM-CW 波の受信を行った。受信点で観測された周波数から電波の伝搬遅延を求め、電波の反射高度を導出することが可能になっている。この FM-CW 機能を付与した HFD 観測システムについては、日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2024 年大会、および地球電磁気・地球惑星圏学会において合計 3 件の発表を行い、現在、観測システムの概要をまとめた論文を準備中である。

備しているところである。

HFD 観測のデータベースを構築するために、本共同研究の予算を用いてハードディスクを購入し、50 TB の容量を持つストレージを導入した。これにより、冗長性を持った状態でデータベースを構築することができている。本観測によって得られたデータやプロットは全て HFD Project のウェブページ (<http://gwave.cei.uec.ac.jp/~hosokawa/public/~hfd>) において公開されている。また、ウェブページからダウンロードすることができるバイナリ形式の生データ (.bin 形式)、および、ドップラースペクトルから抽出された受信電界強度およびドップラーシフトの時系列データ (.hf2 形式) を読みこんでプロットすることができる python script を公開することによって、関連研究者にデータを活用してもらええる仕組みを導入している。

プロジェクトの推進のために、定例オンライン打ち合わせを月に 1 回のペースで実施し、国内の HFD 観測機器の運用に関する情報共有を行うだけでなく、得られたデータの解析結果や論文執筆状況などの共有・議論を行ってきた。また、海外共同研究者の Chum が 2024 年 5 月に開催された JpGU に参加した際に、対面での打ち合わせを行い、本共同研究の進捗について共有する機会を持った。その打ち合わせにおいては、チェコと日本のグループの共同で申請を行ってきた科研費二国間共同研究の申請書の内容について議論を行うだけでなく、2024 年 5 月に発生した大規模な磁気嵐の際にチェコと日本において得られたデータについての吟味を行い、今後のデータ解析の方針を相談することができた。

3. 研究成果

太陽活動起源の電離圏変動に関しては、2023-2024 年に発生した中規模、大規模の 5 つの磁気嵐事例 (2023 年 3 月 23-24 日, 2023 年 4 月 23-24 日, 2024 年 5 月 10-12 日, 2024 年 10 月 10-11 日, 2025 年 1 月 1-2 日) について、HFD, イオノゾンデ, GNSS-TEC を組み合わせた解析を進めている。直接的に中緯度に侵入する電場に伴う電離圏の上下動と、大規模伝搬性電離圏擾乱 (LSTID) に伴う波動的変動を切り分けながら、海外共同研究者 Chum からチェコのグループによる HFD 観測データの提供を受けてグローバルな変動の解析を行っているところである。

下層大気起源の変動に関しては、台風に伴う電離圏変動について、HFD を用いて高精度で解析した結果を論文として発表した (Enomoto et al., 2024)。この研究に関しては、GNSS-TEC を組み合わせた研究に発展させており、2025 年度はその成果を論文として公表することを予定している。さらに、2024 年 1 月に発生した能登地震に伴って観測された電離圏変動についても、HFD と GNSS-TEC を組み合わせた解析を進めており、2024 年の JpGU で発表を行った。さらに、浅間山の噴火に伴って発生した電離圏変動を HFD と GPS-TEC のデータを用いて解析し、その成果を EPS 誌に投稿している (Nakata et al., in revision)。

HFD に FM-CW 機能を付与して観測高度を同定する取組については、2024 年夏季の夜間に得られたデータの解析を集中的に進め、スボラディック E に伴って、ドップラー周波数の遷移、および電波の伝搬距離に特徴的な変動が現れることを示した。特に、スボラディック E の水平移動に伴って、HFD データに準周期的な構造が見られることを FM-CW 観測によって実証し、HFD 観測によってスボラディック E の微細構造の可視化が可能であることを示した。

ALMAと実験室分光による太陽系内天体大気の物理化学プロセスの解明
 Elucidation of physical and chemical processes in atmospheres of solar system bodies by ALMA
 and laboratory spectroscopy

平原 靖大 名古屋大学・環境学研究科

(1) 冥王星・トリトン環境を模擬した低温 N_2O 固体の変性と中間赤外線分光イメージング測定

一酸化二窒素(N_2O)は、生命前駆体アミノ酸を生成する際の重要物質であり、その低温固体は N_2O 分子の大きな分極のため、強い静電

相互作用による分子結晶となる。

N_2O は太陽系外縁天体の冥王星や海王星衛星トリトン大気中では太陽紫外線の照射により N_2 と O_2 を出発物質として生成しうる。探査機 Voyager 2 や New Horizons が各天体で氷火山噴火の観測から、38 (表面) -120 K (高度百数十 km)での N_2O の昇華・凝縮循環の成立が示唆されている。観測、実験、理論にまたがる先行研究から、これらの低温天体

での微粒子の成長と変成、及び UV による N_2O 氷の光解離過程により、赤外線領域に現れる N_2O 氷の振動スペクトルは複雑な応答を示すことが予想される。

本研究では、これらの N_2O 氷の化学進化過程の解明を目的とし、図 1 に示す装置を用いて低温微粒子の *in-situ* 中間赤外スペクトル測定を行った。上記(1)と同様に、パルスノズルを用いて N_2O ガスを噴出させ、 N_2O 氷を ZnSe 基板に堆積させた。分光撮像の結果、波長 $7.75\text{ }\mu\text{m}$ (N_2O 分子の ν_1 振動モード付近) に強い吸収バンド、及び $8.60\text{ }\mu\text{m}$ (N_2O $2\nu_2$) と $7.27\text{ }\mu\text{m}$ (N_2O ν_1+92 (torsion):David A. Dows 1957) に弱い吸収バンドがそれぞれ観測された (図 2 (a))。続いて、光解離反応を再現するため、 D_2 lamp を用いて 8.5 時間の紫外線照射 ($190-340\text{ nm}$) を行った。その結果、 N_2O 凝結試料中心部で、照射開始から 2 時間で N_2O の全ての振動モードの吸収強度が減少した (図 2 (b))。照射した紫外線の波長が N_2O 分子の N-O 結合の解離極限波長 (741.5 nm)より短いため、凝縮相中の分子が解離し、O 原子が生成したと考えられる。また、 N_2O 凝結試料外縁部で N_2O_3 (ν_3)もしくは NO_2 に相当する波長 $7.66\text{ }\mu\text{m}$ に新たな吸収ピークを確認し (図 2 (c))、 N_2O 氷の光解離過程は堆積厚みや結晶構造に依存すると考えられる。これらの多数の振動スペクトル線の吸光度の時間変化をもとに、窒素酸化物を含む 17 化学種に対する化学反応ネットワーク計算を行い、 ν_1 振動モードのピーク吸光度の減少レートをもとに反応速度定数を見積もったところ、解離定数: $3.6 \times 10^{-4}/\text{s}$ 》生成定数: $4.3 \times 10^{-23}/\text{s}$ となり、今回の実験においては光解離反応が支配的であったと考えられる。以上の実験と解析結果を、学術誌 Earth, Planets and Space に投稿した。

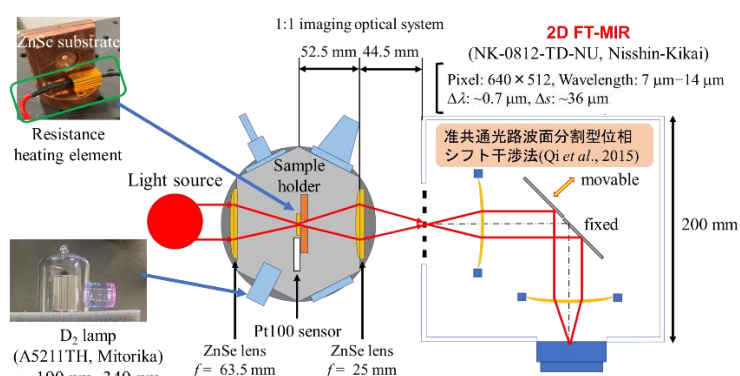


図 1. 開発した低温固体 *in-situ* 赤外分光イメージング測定装置。本年度において、低温固体微粒子のアニーリング用加熱機構と、紫外線光源をサンプルステージ近傍に配置し、実験を行った。

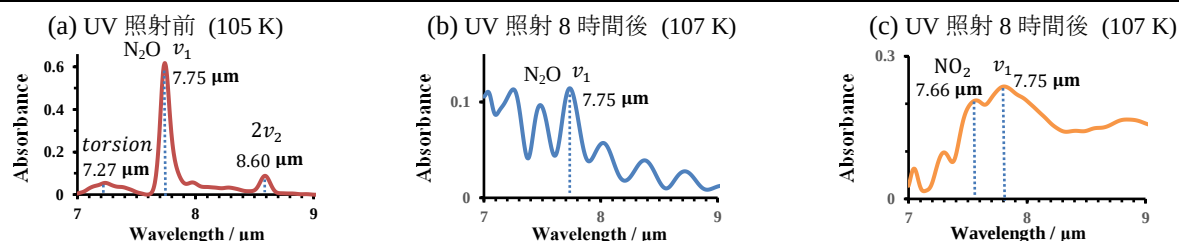


図 2: N_2O 氷の UV 照射前後の中間赤外スペクトル (a), (b): ZnSe 基板中心付近、(c): 外縁部

(2) 新型広帯域 2D FT-IR の開発

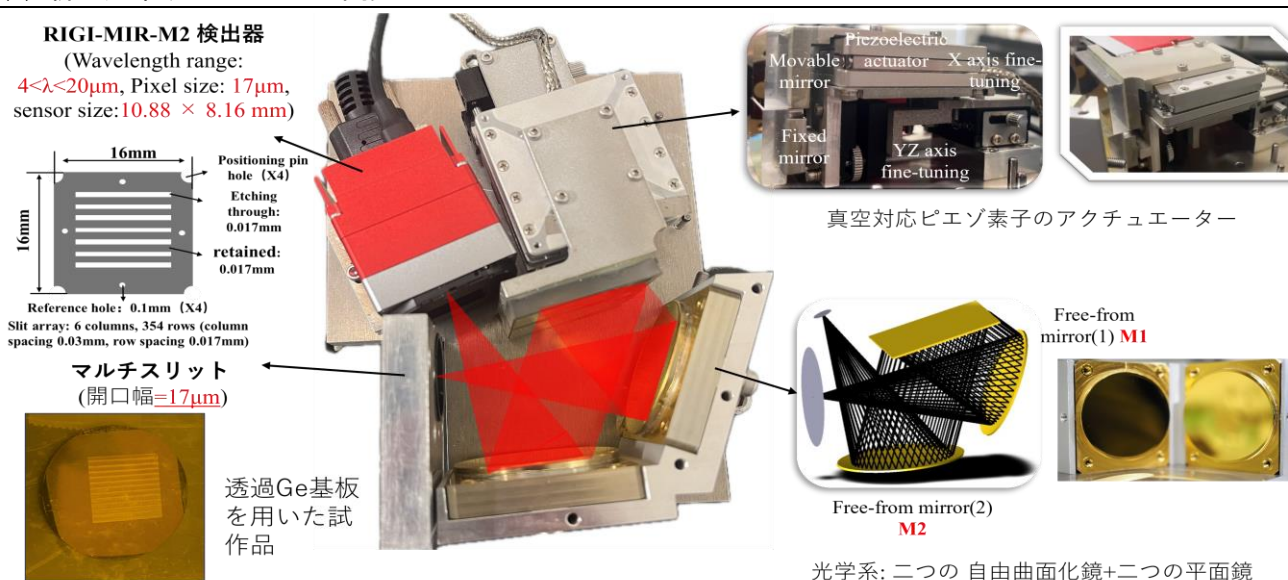


図 3：製作が完了した広帯域赤外線イメージング分光器本体 サイズ：122 x 155 mm

自由曲面鏡(M1, M2, 形状精度 $<1\mu\text{m}$) + 平面鏡（上部可動、下部固定）による純反射光学系

先に述べた低温固体微粒子の赤外スペクトルイメージング測定には、市販品の准共通光路波面分割型位相シフト干渉法に基づく広帯域赤外線分光器を用いてきた。このイメージング分光法では、対物面からの赤外光はまず結像面に置かれた一次元マルチスリットに結像し、それを透過した赤外光は再び平行光とし、 piezo actuator で駆動される可変位相シフター ($\pm 1\text{ mm}$) で反射されたのち、広帯域赤外線カメラに結像される。一次元多重スリットは、対物面において隣接する 2 つの輝点からの光の、アレイ検出器上での破壊的干渉の抑止のため、そのピクセルサイズと同一の開口幅 ($17\mu\text{m}$) とする必要がある。本年度において、このマルチスリットを Ge 基板上に蒸着した金のフォトリソグラフィによって製作した。また、広帯域な赤外線領域での結像の実現のために、2 つの自由曲面鏡 ($\sim 40\text{ mm}\phi$) を用いた 3 反射光学系(M1, M2, FM1)の設計を行い、超精密金属加工法による特注製作を行った。それらの開発と中間赤外線量子カスケードレーザーを用いた精密な光学微調整を行った結果、これまでに前例のない、反射光学系のみによって構成された広帯域赤外線イメージング分光器(測定可能波長帯 $4 < \lambda < 20\mu\text{m}$, 波長分解能 $R_{14\mu\text{m}} = \lambda/\Delta\lambda \sim 100$, 入射視野角 $\sim 1.3^\circ$, 空間分解能 $34\mu\text{m} \div 2 \times \text{pixel size}$)の開発が完了した (Biao Zhao(趙彪) et al. Proc. SPIE, doi:10.1117/12.3019640)。

このイメージング分光器は、前頁(1)に示した低温固体窒素酸化物およびその紫外線解離生成物(イオンラジカルおよび会合体) の多様な振動スペクトルの測定に適用可能なほか、小型・軽量・耐振動特性を活かした次世代の小型衛星搭載観測装置への展開が可能である。

シアー構造を伴う高速熱圏風の生成機構の研究 Generation mechanisms of high speed thermospheric winds and strong shears

藤原 均、成蹊大学・サステナビリティ教育研究センター/理工学部

共同研究者

野澤 悟徳(名古屋大学・宇宙地球環境研究所), 三好 勉信(九州大学・大学院理学研究院), 小川 泰信(国立極地研究所), Johnsen Magnar Gullikstad (ノルウェー北極大学), 堤 雅基 (国立極地研究所)

研究の目的

本研究グループでは、EISCAT レーダー・各種光学観測と GCM シミュレーションに基づく研究により、極域電離圏・熱圏領域、特に極冠域での中性大気・プラズマの時空間変動や、それらを引き起こすエネルギー源について理解することを目指してきた。申請者らのこれまでの EISCAT レーダー観測によれば、極冠域にて高速熱圏風の駆動源と考えられる超高速プラズマ流(>1000 m/s)がしばしば観測されている(例えば、2018 年 3 月 20 日の ESR 観測)。本研究では、特に、シアー構造を伴う高速熱圏風の生成機構と、その駆動源と考えられる超高速プラズマ流、局所的な電離圏・熱圏加熱を観測とモデリング・シミュレーションの双方から理解することを目的とする。

EISCAT レーダーシステムによる昼側極域電離圏観測

1. 2024年度観測

2024年度EISCAT特別実験(EISCAT-SP)に採択された昼側電離圏観測を、2025年3月21日にEISCAT VHF、UHFレーダーを用いて実施した(08:00-12:00 UT)。ESRによる観測を現地スタッフに依頼予定であったが、同システムが稼働不能となり、EISCAT UHF、VHFレーダーによる観測に変更した。これまでや今後の観測データとの比較を可能とするため、北向きに仰角 30° での観測を行った。空間的な電離圏変動の違いを見るため、VHF、UHFレーダーの方位角をそれぞれ 0° 、 345° とした。本観測では、太陽活動極大期(F10.7=195)、地磁気活動はほぼ静穏時($K_p=2+$)のデータを取得することができた。これまでに、同様の昼側電離圏観測データとしてF10.7の大きさが70~160程度の地磁気静穏時のデータが取得できており、今回、更にF10.7の大きなコンディションでの電離圏変動のデータが付け加わった。観測時間帯の中で、 $> 500\text{m/s}$ のイオン流が何度か観測され、それに伴うイオン温度の上昇が見られた。VHF、UHFレーダー観測結果を比較すると、概ね同様の変動(日変化+イオン流増大に伴う変動)が見られたが、例えば、高度400kmにおけるイオン温度では、変動の振幅に顕著な違いが見られた。

2. これまでの観測例1(地磁気静穏時でイオン加熱の無い場合)

2018年3月20日のEISCAT-SP観測では、F10.7=69, $K_p=0$ 、2023年3月27日のEISCAT-SP観測では、F10.7=158, $K_p=0$ での観測データが取得された。両者ともに極めて地磁気活動度の静穏な時間帯での観測であり、太陽活動の影響が支配的な状況での電離圏と考えることが出来る。これら2つの観測では、ESR 42mアンテナによる観測データが取得されており、両データ、及び経験モデルとの比

較が可能である。

図 1 に、2023年3月27日のEISCAT-SP観測 (ESR42mアンテナ観測) から導出されたイオン、電子温度の平均値と経験モデルIRI-2016における値を示す。

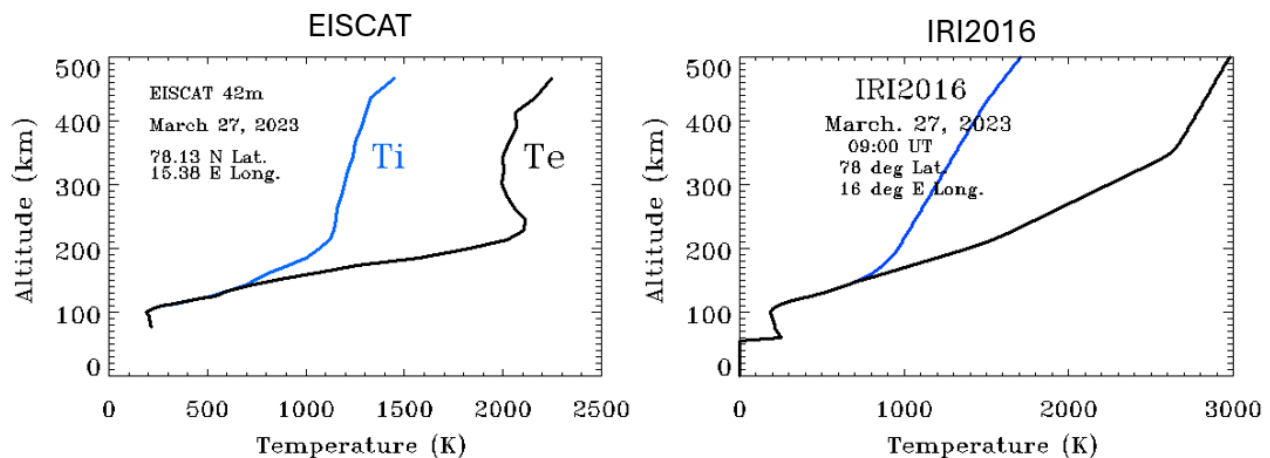


図 1. 2023年3月27日のEISCAT-SP観測 (ESR 42mアンテナ観測, 08:00–12:00 UT) から導出されたイオン、電子温度の平均プロファイル、及び経験モデルIRI2016から得られたイオン、電子温度プロファイル。

EISCAT観測とIRIでは、プロファイルの傾向は一致しているものの、詳細な形や、特に高高度での値に大きな食い違いが見られる。一方、電子密度に関しては概ね一致している (図 2 参照)。

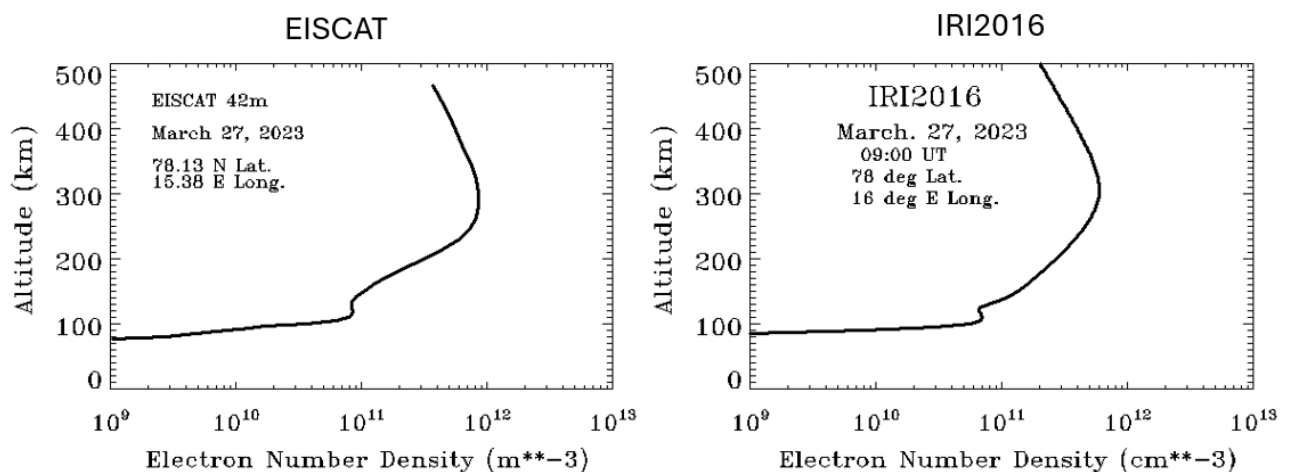


図 2. 図 1 と同様。ただし、ここでは電子密度プロファイルを示す。

プラズマや中性大気温度の計測は限られた手段でしか実施できないことから、上記の結果は、高緯度域では特に温度観測データが十分には蓄積されておらず、実際の温度が経験モデルに反映されていないことを示している。電子密度に関しては、温度に比べデータ量が豊富であり、また数値モデルによる再現性も高いことにより、上記のような一致が見られたものと考えられる。

2018年観測と2023年観測では、極めて地磁気静穏時であったことから、200kmより下方のイオン温度(Ti)は、中性温度に近いものと思われる。以下に両者の値の比較例を示す(表 1)。

表 1. 2018年EISCAT-SP観測と2023年EISCAT-SP観測(ともにESR42mアンテナ観測)における高度150 km付近、200km付近でのイオン温度の平均値.

	2018 (F10.7=69)	2023 (F10.7=158)
Ti at 212, 213 km	808 K	1118 K
Ti at 149, 152 km	642 K	751 K

3. これまでの観測例 2 (地磁気静穏時でイオン加熱のある場合)

2018年3月20日のEISCAT-SP実験では、ESR42mアンテナ観測に加え、ESR32mアンテナを用いて、北向き(仰角 30°)観測を行い、地理緯度およそ 83° のF領域観測を実施した。ESR32mアンテナ観測データでは、42mアンテナ観測データとは異なり、高速イオン流が観測されている。図4にイオン温度、イオン流の観測結果を示す。

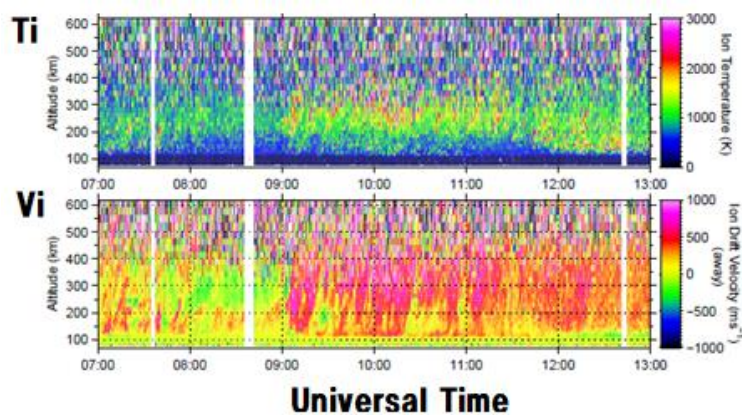


図 4. 2018年3月20日EISCAT-SP (ESR32mアンテナ観測, 北向き仰角 30° にておよそ地理緯度 83° を観測)による、イオン温度、イオンドリフト速度観測結果。

図5にESR観測時間帯における、SuperDARNによるポーラーキャップポテンシャル、イオン流観測を示す(<https://superdarn.ca/convection-maps>)。

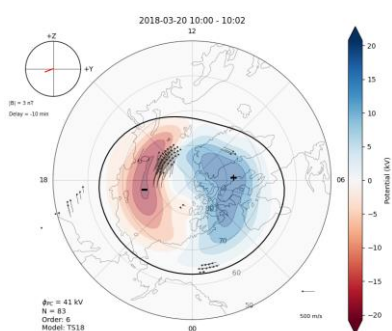


図5. SuperDARN観測による2018年3月20日 10:00-10:02UTにおけるポーラーキャップポテンシャル、イオン流観測結果。



図6. 図5から想定される高速イオン流とESRとの位置関係。

ESR42mアンテナ(ESRサイトの沿磁力線方向を観測)では高速イオン流は観測されず、ESR32mアンテナ(ESRサイトの北方を観測)では高速イオン流が観測されたことから、図5のSuperDARN観測から図6のような高速イオン流を観測していたと考えられる。高速イオン流が観測された際、高度200km付近で、ESR42mアンテナ観測と比べ、例えば10:15UT付近では500~1000Kの温度上昇が見られた。

今後の課題

現在まで、地磁気静穏時の電離圏のリファレンスデータとなりうるデータが、F10.7=69~195の太陽活動度において蓄積されてきた。データ間の比較、及び経験モデルとの比較により電離圏の基本状態の理解や、モデルの再現性について議論が可能となり、今後、詳細な比較を行っていく必要がある。

EISCAT観測により、高速イオン流、及びそれに伴うイオン温度上昇がいくつかのケースにおいて観測された。高速イオン流に伴う加熱により、電離圏の基本状態から500~1000Kまでイオン温度が上昇する際の時間スケールや、加熱の割合等について詳細なデータ解析を実施する予定である。

本研究課題に関連した主な成果発表

学 術 論 文

Tikemani Bag, Ryuho Kataoka, Y Ogawa, Hitoshi Fujiwara, Zheng Li, Vir Singh, V. Sivakumar, S. Sridharan, P. Pirnaris, S. Tourgaidis (2024), Thermospheric Nitric Oxide Energy Budget During Extreme Geomagnetic Storms: A Comparative Study, Front. Astron. Space Sci., 15 May 2024, Sec. Space Physics Volume 11 - 2024 | <https://doi.org/10.3389/fspas.2024.1273079>.

学 会 発 表

Hitoshi Fujiwara, Satonori Nozawa, and Yasunobu Ogawa, Basic structures of the polar ionosphere at higher latitude than the auroral zone during periods of the solar minimum and maximum, 地球惑星科学関連学会連合大会, 5月, 幕張/オンライン, 2024.

陣 英克・安藤 慧・埜 千尋・三好 勉信・品川 裕之・藤原 均, 大気圏・電離圏モデル GAIA を用いた電離圏データ同化の構築, 地球惑星科学関連学会連合大会, 5月, 幕張/オンライン, 2024.

小泉 海・中川 広務・寺田 直樹・藤原 均・津田 卓雄・田中 今日子・木村 勇気・笠羽 康正・青木 翔平・Ann Carine Vandaele・Ian Thomas・Bojan Ristic・Frank Daerden・Zachary Flimon・Yannick Willame・Jonathon P Mason⁸・Manish Patel・Giuliano Liuzzi・Giancarlo Bellucci・Jose Juan Lopez-Moreno, TGO 搭載分光器 NOMAD を用いた火星中間圏水氷雲における核生成機構の研究, 地球惑星科学関連学会連合大会, 5月, 幕張/オンライン, 2024.

埜 千尋・陣 英克・新堀 淳樹・品川 裕之・三好 勉信・藤原 均, GAIA 極域変動版を用いた中規模磁気嵐イベント時の電子密度分布の特徴, 地球惑星科学関連学会連合大会, 5月, 幕張/オンライン, 2024.

藤原均・野澤悟徳・小川泰信, EISCAT レーダーで観測された地磁気静穏時の昼側極域電離圏変動の特徴について, 第156回地球電磁気・地球惑星圏学会, 11月, 立川, 2024.

藤原 均, 昼側極冠域・オーロラ帯電離圏変動の研究, EISCAT 研究集会, 立川/オンライン, 2024年3月28日.

(別紙様式01-2)

自動気象観測装置（AWS）の新しいデータ品質管理とデータ公開に関するスキームの構築

Establishment of a scheme for data quality control and data release for Automatic Weather Station (AWS)

平沢尚彦、国立極地研究所・先端研究推進系・気水圏

【研究目的】

地球温暖化の増幅によって南極氷床の質量が減少し海水準を上昇させることが懸念されている。最新の知見では、西南極の温暖化及び氷床質量の減少と東南極の温暖化の停滞と氷床質量の増加が認識されている。しかし、この知見の形成に際して現地の観測データは極めて少ない。最近、世界気象機関(WMO)は、極域の気象の把握の重要性を認識し、南極域では南半球極域観測年 (Year of Polar Prediction in the Southern Hemisphere: YOPP-SH) が実施された。日本はゾンデ観測の強化と氷床上の自動気象観測装置 (AWS) のデータの即時配信を実施した。広大な南極氷床上の観測データを充実させ、国際的に共有することは、地球の日々の天気予報や気候変動のモニタ、或いは気候モデルの検証にとって今後必要である。南極内陸域の気象の通年観測にとって AWS 観測の充実が最も現実的、有力な方法である。

本研究は、これまで南極域の AWS 観測をリードしてきたウィスコンシン大学との協力関係をより深め、観測方法の改良とデータ品質管理方法の改良を共同で行うことを目的とする。ウィスコンシン大学が構築する AWS (ウィスコンシン大 AWS) については、より高精度の日本仕様の測器への置き換え及び電源設備を供給する。極地研究所が構築する AWS (極地研 AWS) については、ウィスコンシン大学が持つデータ品質管理技術の適用し、日本独自のアルゴリズムを開発し共有する。ここで達成された成果は、南極の広域に設置されている他の AWS への適用が可能であり、また、過去のデータの補正も可能であることから、南極の気候変動の新たな知見を得る可能性がある。

【研究方法】

1. ウィスコンシン大 AWS 更新: みずほ基地の AWS の更新の準備として、耐低温バッテリーの調達、温湿度計への強制通風機能付加を行い、昭和基地に輸送した。2025 年 11 月以降の設置を目指す。
2. データ品質管理: ウィスコンシン大学で運用されている品質管理の自動化、及び極地研 AWS の品質管理方法の開発に取り組んだ (温湿度、積雪深、風向風速)。気温の月平均データの公開を実施した。
3. 過去データの品質改善: ウィスコンシン大及び極地研の過去の AWS の気温データについて、Kurita et al. (2024)が提案した方法によりデータの均質化を行い、月平均データを作成した (出版 2)。
4. 成果発表: 出版 2 件、投稿 1 件があった。日本気象学会、日本雪氷学会、JpGU、極域科学シンポジウム (極地研)、JAXA-EORA3 シンポジウム (東京)、南極気象気候 WS (オハイオ州立大学)、SCAR OSC (チリ) 等において発表した。

【研究結果・考察】

過去に共有した AWS データを使った国際共同研究の論文が出版された (論文 1)。気温の品質管理を過去に遡って実施したことによって、東南極氷床上の長期の気温変動のメカニズムの解析が可能となり、インド洋の大気循環パターンとリンクしたシステムを提案し、国際ジャーナルに投稿した (口頭発表 5, 出版 3)。積雪深計の観測値から堆積イベント及び地吹雪の再配分イベントを抽出するアルゴリズムを開発し、氷床表面の堆積に関する新しいデータセットを構築する見込みとなった (口頭発表 1)。このア

ルゴリズムはウィスコンシン大学 AWS にも適用可能である。積雪深計の暖候期のデータは気温の日周期変化に同期したドリフトがあること、それが計測精度と同等の大きさであることが分かった。この特性はこれまでに引き上げられておらず、原因は特定されていない。最も起こり得る原因を仮定してその補正に取り組んだ（口頭発表 4）。補正が成功すれば観測精度は数倍向上する見込みである。そのために国内の実験観測を含めて今後の調査が必要である。風向風速計の低温や霜付着に起因する動作不良をデータから判断することについて検討を進めた（口頭発表 2）。

【まとめ】

ウィスコンシン大学の AWS の設置について、日本南極地域観測隊の内陸観測のスケジュールに組み込んでおり、2025 年 11 月に出発する第 67 次隊での設置が計画されている。また、ウィスコンシン大学の AWS について、日本との共同観測地域以外においても強制通風機能付きの温湿度計に置き換える構想が持たれるようになった。今後、データの品質管理や高次データの構築についても日本側のアイデアを活用する。

【文献リスト】

引用文献

1. Kurita, N., et al. (including Hirasawa, N., Lazzara, M. A.) (2024). Near-Surface Air Temperature Records over the Past 30 Years in the Interior of Dronning Maud Land, East Antarctica. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 41(2), 179–188. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-23-0092.1>（査読有）

成果：出版

1. Bromwich, D. H., et al. (including Hirasawa, N., Lazzara, M. A.) (2024). Winter Targeted Observing Periods during the Year of Polar Prediction in the Southern Hemisphere (YOPP-SH). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 105, E1662–E1684, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-22-0249.1>（査読有）
2. Kurita, N. (2025). JARE-AWS dataset: Bias-corrected surface air temperature data (1993–2022). National Institute of Polar Research. <https://doi.org/10.17592/002.2025010413>
3. (投稿中) Kurita, N., et al. (including Hirasawa, N., Lazzara, M. A.) (2025). Anthropogenic summer warming in the East Antarctic interior.

成果：口頭発表

1. Hirasawa, N., et al. (including Nakazawa, F., Kurita N.) (2024): Introduction of Antarctic meteorology and climate data - Meteorology, Glaciology and Satellite -, The 15th Symposium on Polar Science, NIPR, Tokyo, December 3, 2024.
2. Sugiura, K. and N. Hirasawa (2024): Trend analysis of blowing snow occurrence in Antarctica using the ICESat-2 dataset from November 2018 to October 2023, The 15th Symposium on Polar Science, NIPR, Tokyo, December 4, 2024.
3. Nakazawa, F., N. Hirasawa, et al. (2024): Automated snow depth measurements at multiple points along the Antarctic inland route and its device development, The 15th Symposium on Polar Science, NIPR, Tokyo, December 4, 2024.
4. 齋藤圭祐, 平沢尚彦, 他 (2024): 南極AWSに搭載した超音波積雪深計データの補正方法の検討ー特に暖候期の日変化に着目してー, 日本雪氷学会2024年度秋季大会, 長岡, 2024年9月16-19日.
5. Kurita, N. et al. (including Hirasawa, N., Lazzara, M. A.) (2024): Warming in the interior of East Antarctica driven by the Mascarene high variability, 19th Workshop on Antarctic Meteorology and Climate (WAMC), Byrd Polar and Climate Research Center, The Ohio State University, Columbus, OH, USA, June 10-13, 2024.

(以下略)

(別紙様式01-2)

Lu-Hf法を用いた三波川変成帯石英エクロジャイトの変成ピーク年代の推定
Estimation of the metamorphic peak age of quartz eclogite
in the Sanbagawa metamorphic belt using Lu-Hf method

額部佑衣、名古屋大学・大学院環境学研究科

Naomi Tucker, The University of Western Australia

加藤丈典、名古屋大学・宇宙地球環境研究所

【はじめに】

三波川変成帯は関東から九州にかけて帯状に分布する低温高压型の変成帯であり、世界中で最もよく研究されている沈み込み型変成帯の一つである(e.g. Banno & Sakai, 1989; Enami et al., 1994). その中でも最も深部まで沈み込んだと考えられている石英エクロジャイトが四国別子地域に産出しており、年代や温度圧力推定などがされてきた(Okamoto et al., 2004; Miyamoto et al., 2008; Enami et al., 2019). 年代についてはジルコンのU-Pb年代から約120 Maという値が報告されており、このデータを元にして三波川変成作用のピーク年代であると解釈されてきたが(Aoki et al., 2014), 近年の研究では三波川変成帯の多くの岩石のピーク変成作用時の年代は約90 Maという年代値が報告されており(Wallis et al., 2009; Knittel et al., 2024), 三波川変成帯のピーク変成年代についての議論が巻き起こっている. 三波川変成帯の年代を議論する上で鍵となる石英エクロジャイトには、累進変成作用時に成長した粗粒なざくろ石が多数含まれているため、この鉱物が成長した年代をLu-Hf年代法を用いて測定することで、三波川帯の変成履歴を明らかにできると考えられる.

【手法】

本研究では、四国別子地域の東赤石山の峰である権現越付近に露出する石英エクロジャイトを採取し、薄片を作成してLu-Hf年代測定を行った. 分析は共同研究者であるTucker博士が所属する西オーストラリア大学で実施した. 分析にはLaser-Ablation Split-Stream (LASS) Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS)を用い、分析手順はKylander-Clark et al. (2013)に従った.

【結果】

今年度は予察的に1つの薄片中に含まれるざくろ石1粒子に対してコアからリムを横断する24点の分析を行い図1のような結果を得た. アイソクロンから得られた年代値は 131 ± 191 Maとなった. 誤差が大きい理由は、ざくろ石中に含まれるLuやHfの濃度が低い可能性が考えられる.

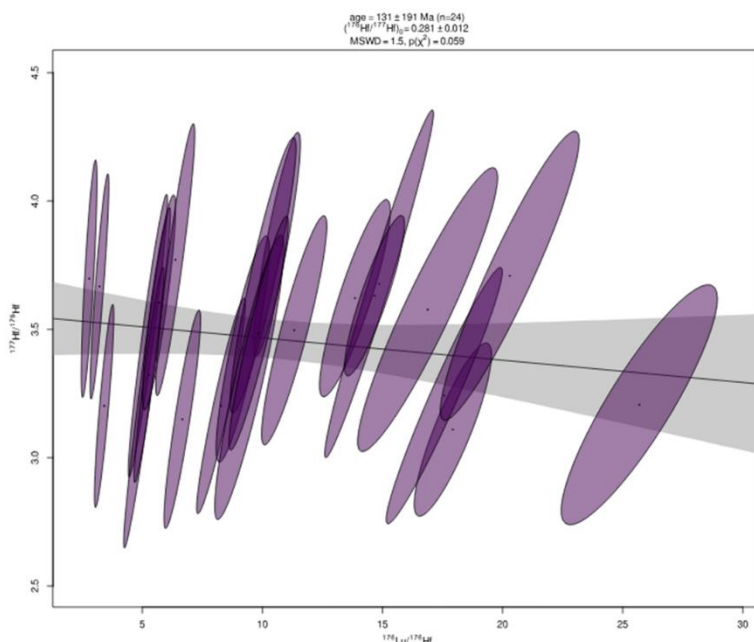


図1 四国別子地域石英エクロジャイトのLu-Hf年代測定結果

【議論】

現在得られている年代値は誤差が大きいため精度の高いデータとは言えないが、平均値である131 Maは先行研究で得られているジルコンのU-Pb年代と同様に古い値を示した。この値が正しい場合、石英エクロジヤイト中に含まれるざくろ石は白亜紀前期の早い段階で沈み込み帯の深部において成長したと解釈される。石英エクロジヤイトが産する東赤石山には、大陸地殻深部の斑レイ岩起源である東五良津岩体と海洋地殻の玄武岩起源である西五良津岩体が産する。それぞれの岩体では、東五良津岩体に隣接する石灰岩起源の変成岩中に含まれるチタン石のU-Pb年代が約200 Ma (Yoshida et al., 2021)、西五良津岩体のエクロジヤイトに含まれるざくろ石のLu-Hf年代が116 Ma (Endo et al., 2009) という古い年代値が報告されている。Endo et al. (2009)では、116 Maという値は、イザナギプレートの沈み込み開始年代であると解釈しているが、それよりも古い131 Maという値は、イザナギプレートがより古い年代から沈み込みを開始していた可能性を示唆している。

しかし、今回の測定結果は誤差が大きいため、今後分析点を増やして誤差を小さくして年代値を慎重に議論する必要がある。また、Endo et al. (2009)では、ざくろ石のコア部分にLuが濃集していることを報告しており、石英エクロジヤイト中に含まれるざくろ石も同様にLuの濃度が場所によって不均質である可能性が高い。今後は、LuやHfの濃度マッピングを行った上で適切な分析場所や分析時間を決めることで、精度の高い年代データが得られる事が期待される。

引用文献

- Banno, S., & Sakai, C. (1989). Geology and metamorphic evolution of the Sanbagawa metamorphic belt, Japan. *Geological Society, London, Special Publications*, 43(1), 519–532.
- Enami, M., Kimura, J. I., Tsuboi, M., Kouketsu, Y., Nagaya, T., & Huang, S. (2019). Coexisting different types of zoned garnet in kyanite-quartz eclogites from the Sanbagawa metamorphic belt: Evidence of deformation-induced lithological mixing during prograde metamorphism. *Island Arc*, 28(1).
- Enami, M., Wallis, S. R., & Banno, Y. (1994). Paragenesis of sodic pyroxene-bearing quartz schists: implications for the P-Thistory of the Sanbagawa belt. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 116, 182–198.
- Endo, S., Wallis, S., Hirata, T., Anczkiewicz, R., Platt, J., Thirlwall, M., & Asahara, Y. (2009). Age and early metamorphic history of the Sanbagawa belt: Lu-Hf and P-T constraints from the Western Iratsu eclogite. *Journal of Metamorphic Geology*, 27(5), 371–384.
- Knittel, U., Tokiwa, T., Tsutsumi, Y., Endo, S., & Wallis, S. R. (2024). Geochronology of the Sanbagawa Belt: Younger and Faster than Before. *Elements*, 20(2), 89–95.
- Kylander-Clark, A. R. C., Hacker, B. R., & Cottle, J. M. (2013). Laser-ablation split-stream ICP petrochronology. *Chemical Geology*, 345, 99–112.
- Miyamoto, A., Enami, M., Tsuboi, M., & Yokoyama, K. (2008). Peak conditions of kyanite-bearing quartz eclogites in the Sanbagawa metamorphic belt, central Shikoku, Japan. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 102(6), 352–367.
- Okamoto, K., Shinjoe, H., Katayama, I., Terada, K., Sano, Y., & Johnson, S. (2004). SHRIMP U-Pb zircon dating of quartz-bearing eclogite from the Sanbagawa Belt, south-west Japan: Implications for metamorphic evolution of subducted protolith. *Terra Nova*, 16(2), 81–89.
- Wallis, S. R., Anczkiewicz, R., Endo, S., Aoya, M., Platt, J. P., Thirlwall, M., & Hirata, T. (2009). Plate movements, ductile deformation and geochronology of the Sanbagawa belt, SW Japan: Tectonic significance of 89–88 Ma Lu-Hf eclogite ages. *Journal of Metamorphic Geology*, 27(2), 93–105.
- Yoshida, K., Niki, S., Sawada, H., Oyanagi, R., Hirata, T., Asakura, K., & Hirajima, T. (2021). Discovery of the Early Jurassic high-temperature pre-Sanbagawa metamorphism recorded in titanite. *Lithos*, 398–399, 106349.

多様な水文気候学的地域特性が駆動するアジアモンスーン変動の予測可能性の研究
Study on predictability of the Asian monsoon variability
driven by diverse regional hydroclimatological characteristics

寺尾 徹、香川大学・教育学部

1. 研究目的

本研究は、アジアの水文気候学研究プロジェクトであるAsiaPEX (Terao et al. 2023)の戦略的観点に立脚して、アジア各地域の研究コミュニティと連携し、複雑な大気陸面海洋相互作用と結びついたアジアモンスーンのプロセスの多様性の理解を推進することを通じて、多様な特性を持つ諸地域における観測プラットフォームの構築に資することを目的としている。現時点で存在するデータと観測機器を用いて、それぞれの地域でカギとなるプロセスを仮説的に見いだして解析し、その仮説的プロセスの重要性や妥当性、観測的課題を明らかにする研究が重要となる。特に2024年度は、南アジア・東アジア・東南アジアのAsiaPEXの主要な研究者と連携し、先導的検討を行った。

2. 研究方法

2024年度は、南アジア・東アジア・東南アジアからAsiaPEXの主要な研究者を日本に招いて研究集会を開催した。GEWEX OSC (Open Science Conference, 2024年7月, 札幌)の機会に開催することにより、多くのAsiaPEX参加の研究者との議論が可能となった。研究集会における、南アジア・東アジア・東南アジアに各一つ以上の典型的な観測プラットフォームを構築することを展望した議論を進めるとともに、その立案に必要な背景となる基礎研究を展開した。東アジア・東南アジアでもそれぞれの観測プラットフォームに基づき、2024年の研究集会等で研究課題を明確化しつつ、基礎研究を論文成果、更に統合連携観測計画に発展させる研究を進めた。

3. 研究結果

GEWEX/OSC (Open Science Conference, 2024年7月, 札幌)の機会に研究集会を開催することにより、多くのAsiaPEX参加の研究者との議論を行った。研究集会では、南アジア・東アジア・東南アジアに各一つ以上の典型的な観測プラットフォームを構築することを展望し、その立案に必要な基礎研究を開始した。東南アジア・北東アジア諸国を主な対象として”Workshop on AsiaPEX activities over SE & NE Asia”を開催した。このワークショップにはタイ・ベトナム・フィリピン・モンゴル等の国々から参加があり、降水の推定に関する課題や、気候変動ダウンスケーリング、国連のファンドを用いた洪水の農業被害に関するプロジェクトの展開、CORDEX等modelのキャリブレーションの推進の期待、レーダー・nowcasting・季節予報等の気象予報の改善に関する取組等について交流があった。南アジアからは30人を超える研究者の参加を得て”Workshop on modeling severe local storms over NE Indian subcontinent”を開催し、観測とモデリングの統合を目指す研究デザインについて議論した。われわれのグループによるGEWEX/OSCのセッション”Observational and modeling initiatives for the Asian monsoon field campaign (AsiaPEX and AMY-II)”には、東アジアからも新たな参加があった。例えば韓国国立気象研究所からの研究発表は、アジアモンスーン降水変動に関して西部北太平洋の亜熱帯高気圧の動向に関する観測と予報の不確実性に大きな問題があり、観測を含む共同研究の発展を呼びかける研究発表であった。これは新しい共同研究の発展のきっかけとなった。

こうした研究交流を推進する傍ら、アジア水文気候学の基礎研究を推進した。南アジアでは、インド亜大陸北東部の雷予測とそのモデルによる再現性の検証(Mondal et al. 2024)、人工衛星による降水推定のディスドロメーターによる検証(Murata et al. 2024)、ヒマラヤ山脈南斜面の豪雨に関するモデル研究(Fujinami et al. 2025)などの基礎研究を推進。東アジアでは、日本の雪に対する気候変動の影響の解析(Tamura et al. 2024)、東南アジアでも、フィリピンに影響を与えた2021年の台風(Rai)の特性の研究(Petila et al. 2024)、東南アジアの秋季の降水に対するENSOのテレコネクションの解析(Nguyen-Le et al. 2024)などが実施された。観測プロジェクトも進められ、インド亜大陸北東部の観測プラットフォームでは、観測機器・データを動員して大気下層の高湿潤静的エネルギー大気の生成プロセスを解析するための高層気象強化観測が展開された。ヒマラヤ山脈南斜面の観測プラットフォームでは、降水日変化プロセスの精緻化と周辺の総観場との関連性の解析やモデリングの研究がすすめられた。これらの基礎研究を背景に、AsiaPEXサイエンスプランをアップデートするとともに、6つのサイエンス

パネルメンバーへの研究者の組織化が開始されている。

4. 考察とまとめ

これらの基礎研究の到達点から、本研究の今後の発展方向の一つとして、東南アジアにおける多様な大気陸面海洋相互作用に焦点を当てることが重要であることが示された。これは第1に、東南アジアは、複雑な地形と海陸分布のもと、地域ごとにまた季節ごとに異なるモンスーンの様相を持つ興味深い地域であること。特に、台風や季節変化する風系、ENSOなどのシステムがマルチスケール構造をもって相互に関係し、東アジア・南アジア・西部北太平洋をつなぐ複雑性を持つ地域であり、この地域の気候水文学的なシステムの変動メカニズムの解明の重要性が高いこと。第2に、東南アジアには日本の強い影響力の下で発展してきた比較的小さいけれども高いポテンシャルを持ち始めている研究コミュニティが集まっており、日本側との国際共同研究の推進による研究の一層の推進が求められる地域であることが、GEWEX/OSCの過程でも明確になったこと。が理由である。とりわけ、南西モンスーンの影響を受けるタイ、冬季の北東モンスーンの影響も含むベトナム、夏季と冬季で大きく異なる降水分布を示し海洋に囲まれたフィリピンの東南アジア諸国における降水過程に大気陸面海洋相互作用が与える影響の重要度が高い。

- Fujinami, H., Sugimoto, S., Ueno, K. (2025). Dynamics of rainstorms over southern Himalayan slopes and foothills and their simulation by numerical models. In: Das, S., Tao, WK. (eds) Severe Storms. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-7075-5_13
- Mondal U., Panda S.K., Terao T., Kumar M. and Sharma D. (2024): Evaluating the performance and detection efficiency of Weather Research Forecasting model with lightning parameterization schemes for identifying lightning hotspots over Northeast region in India. *Clim. Dyn.*, 62, 10381-10404. [10.1007/s00382-024-07457-y](https://doi.org/10.1007/s00382-024-07457-y)
- Murata F., Terao T., Yamane Y., Fukushima A., Kiguchi M., Tanoue M., Kamimura H., Syiemlieh H.J., Cajee L., Ahmed S., Choudhury S.A., Bhattacharya P., Bhagabati A.K., Dutta S. and Hayashi T. (2024): Validation of spaceborne precipitation radar data by rain gauges and disdrometers over the complex topography of the Northeastern Indian subcontinent. *J. Meteor. Soc. Japan*, 102, 309-329. [10.2151/jmsj.2024-014](https://doi.org/10.2151/jmsj.2024-014)
- Nguyen-Le, D., Ngo-Duc, T. and Matsumoto, J. (2024): The teleconnection of the two types of ENSO and Indian Ocean Dipole on Southeast Asian autumn rainfall anomalies. *Clim. Dyn.*, 62, 5283-5305 <https://doi.org/10.1007/s00382-024-07163-9>
- Petilla, C. E. R., Olaguera, L. M. P., Gruz, F. A. T., Villarin, J. R. T., Fudeyasu, H., Yoshida, R. and Matsumoto, J. (2025). The unique features of Typhoon Rai (2021): an observational study. *Natural Hazards* <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07138-x>
- Tamura, K. and T. Sato, 2024: Evaluating how historical climate change affected a heavy snowfall event in northern Japan in mid-December 2021 using two pseudo global warming methods. *J. Geophys. Res. -Atmos.*, 124, e2024JD041553, DOI:10.1029/2024JD041553.
- Terao, T. S. Kanae, H., Fujinami, S., Das, K-J. Ha, M. Kiguchi, T. Sato, J. Matsumoto et al. (2023): AsiaPEX: Challenges and Prospects in Asian Precipitation Research. *BAMS*, 104, E884-E908.

(別紙様式01-2)

日米共同・太陽フレアX線・集光撮像分光観測ロケット実験 FOXSI-4
Promotion of the U.S.-Japan Joint Sounding Rocket Experiment FOXSI-4 for Solar Flare X-ray
Focusing Imaging Spectroscopic Observation

成影 典之、国立天文台・太陽観測科学プロジェクト

研究目的

本研究では、米国NASAの観測ロケットを用いて**世界初となる太陽フレアに対するX線集光撮像分光観測（観測ロケット実験 FOXSI-4）**を実施し、磁気再結合が引き起こす磁気エネルギーの解放とそれによって生じるエネルギー変換機構の追究に必要な観測技術および研究手法の実証と、研究基盤の構築を行う。具体的な目的は下記になる。

- 【1】 世界初となる太陽フレアのX線集光撮像分光観測を成功させる。
- 【2-1】 観測から、太陽フレア領域全体の温度構造を精確に評価する。
- 【2-2】 観測から、太陽フレア領域全体にわたって加速された電子(非熱的成分)を探索する。
- 【2-3】 観測から、太陽フレアで解放されたエネルギーや加速された電子の伝搬を追跡する。
- 【2-4】 観測と数値計算の両輪で、太陽フレアにおけるエネルギー解放・変換過程を精査する。
- 【3】 取得した観測データや解析用ソフトを公開し、この新しい観測手法を普及させる。

FOXSIで実施するX線集光撮像分光観測とは、X線帯域において「空間・時間・エネルギーに対する3つの分解能」と「高いダイナミックレンジ(明るい場所も暗い場所も同時に観測できる能力)」という4つの観測能力を同時に達成することができる観測手法で、太陽高エネルギープラズマ(熱的成分と非熱的成分の両方)に関する情報を、これまでにはない質と量でもたらししてくれる。なお、既存の太陽X線観測においてこれら4つの能力を同時に達成するものはなく、我々の国際連携グループが世界に先駆けてこの観測を実現し、世界第一級の科学成果を出してきた。FOXSI-4では、いよいよ太陽フレアの観測に挑む。

研究方法

本研究では、FOXSI-4で取得する観測データから科学成果を創出するための準備に主眼を置く。本計画は3年計画で、下記のように進めていく。

【2022年度(計画1年目)】 過去のFOXSIで得られたデータの解析、および、粒子の運動も取り込んだ新しい数値計算モデルの構築を推進する。

【2023年度(計画2年目)】 2024年春に予定されているFOXSI-4の実施に向けた打ち合わせ(観測プラン、フレア予測、装置開発、試験手順、スケジュールなどに関する議論)を実施する。

【2024年度(計画3年目)】 2024年春に打ち上げるFOXSI-4で得られた太陽フレア観測データの解析を実施し、初期成果の創出を行う。

研究結果

世界標準時 2024年4月17日22時13分、日米共同の観測ロケット実験 FOXSI-4 は打ち上げられ、世界初の太陽フレアX線集光撮像分光観測に成功した(図1)。打ち上げは、米国アラスカ州の Poker Flat Research Range にて、観測ロケット実験によるフレア観測という NASA でも初の試みとして実施した。

観測ロケットによる観測時間は弾道飛行中の約5分間に限られることと、太陽フレアの発生を分単位で予測することは現状不可能であるため、決まった時刻に打ち上げるという従来の打ち上げ方法では太陽フレアを観測することはできない。そこで今回は、ロケットを打ち上げ可能状態で待機させ、米国の気象衛星GOESが計測している太陽X線フラックスをリアルタイムに近い形でモニタし、太陽フレアの発生を検知後、直ちに打ち上げるという手法を取った。一方、観測成果を高めるために、できるだけ規模の大きなフレアを観測するという要求と、複数の活動領域がある場合、どの領域でフレアが起きるかを事前に予測しておくという要求があった。前者は、大きなフレアほどエネルギーの解放や粒子の加速が長く継続し、それらを観測できる可能性が増えるためである。後者は、打ち上げ後、フレアの発生場所を探すことなく直ちにフレアの観測を開始するためである。そこで、打ち上げオペレーションに対する日本からの貢献として、草野教授(名古屋大学・宇宙地球環境研究所)が開発し、伴場博士(情報通信研究機構)が宇宙天気予報への実用化を進めているκスキームを FOXSI-4 の打ち上げに活用し、フレ

ア規模とフレア発生場所の事前予測を行った。これらの入念な準備の上に行われた打ち上げによって、FOXSI-4 は、観測ロケットによる世界初の太陽フレア観測を成功させた。観測したフレアの規模はMクラスフレア（ピーク時は、M1.6）で、発生場所も含め、事前予測と合致していた。これにより、観測開始とともにフレアが観測でき、フレアのピークは過ぎていたものの、Mクラスレベルのフラックスを保っている期間から観測を開始することができた（図2）。

ここから観測したデータを紹介する。FOXSI-4 は、太陽フレア領域を約4.5分間（図3）、活動領域を約1分間観測した。日本から提供した6台のカメラ（軟X線用CMOSカメラ2台と硬X線用CdTeカメラ4台）は全て正常に動作し、軟X線帯域（10keV程度まで）で1千万個以上の、硬X線帯域（10keV程度以上）で2万个以上のX線光子を計測した。

FOXSI が取得したデータの特徴は、これらの光子を自由に配分してプラズマ診断が行えることである。例えば、あるエネルギーのX線の空間分布を調べることで、X線スペクトルの時間変化を追うこと、領域ごとのX線スペクトルを精査すること、などができる。軟X線帯域では、1千万度以上の超高温プラズマが生成する鉄の輝線なども検出されており（図4）、これまでの太陽観測では行えなかった超高温プラズマの精密診断を可能とした。

観測時間中には、フレアだけでなく、マイクロフレアが発生する様子やプラズモイドの噴出も捉えており、下記のようなサイエンスが期待できる。

- ✓ フレア領域における非熱的成分の調査
- ✓ マイクロフレアにおける熱的・非熱的成分の時間変化の追跡（エネルギー解放の開始時点から追跡可能）
- ✓ フレアループ、プラズマ噴出領域周辺、非フレア活動領域などのプラズマ加熱の調査
- ✓ 恒星フレアとの比較

現在、取得したデータの較正、観測装置の較正、解析ソフトウェアの整備、データ公開の準備などを日米協力のもと進めている。このように2024年度は、先に述べた FOXSI-4 の目的の【1】を達成、それに続く【2】【3】のための準備を進め、観測データの分析（初期成果）までを終えており、2024年度（計画3年目）の計画を予定通り遂行した。

なお、FOXSI計画に関連する研究と開発は、本研究メンバーとメンバーが指導する学生らによって推進されており、若手育成にも大きく役立っている。

成果発表

2024年度は、本研究に関して、博士論文1篇と収録6篇を発表した。

学会発表は、25件行った。内訳は、口頭発表が18件（うち招待講演3件）、ポスター発表が7件で、国際発表が9件ある。そして大学院生による発表が10件、学部学生による発表が2件である。

2024年6月に横浜で開催された国際光工学会（SPIE）主催のシンポジウム SPIE ASTRO 2024 では、大学院生2名が SPIE ASTRO 2024 Paper Prizes を受賞した。



図1. FOXSI-4 の打ち上げの様子（左の飛行軌跡）。FOXSI-4 打ち上げの1分後に Hi-C FLAREも打ち上げられた（右）。

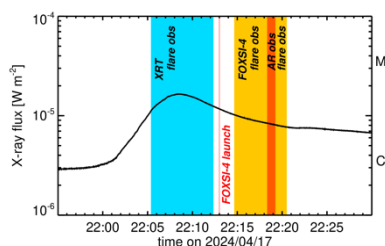


図2. GOES衛星によるX線フラックスの時間系列データ。FOXSI-4 の観測時間帯はオレンジ（フレア領域）と赤（活動領域）の帯で示している。フレアのピーク（M1.6）を7分ほど過ぎての観測開始となったが、Mクラスレベルを保っている期間から観測を開始した。

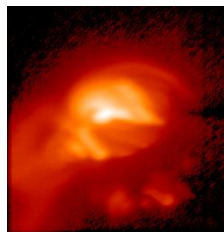


図3. FOXSI-4 搭載の軟X線装置で観測した太陽フレア像。

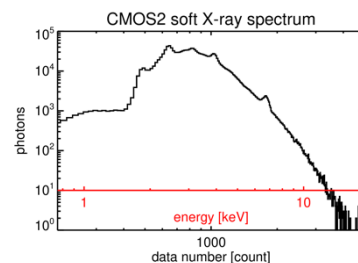


図4. FOXSI-4 搭載の軟X線装置で取得した軟X線帯域のスペクトル。連続光成分に加え、1千万度以上のプラズマが生み出す輝線成分も検出されている。