

2022年度 01)国際共同研究 目次詳細

20 件

*所属・職名は2023年3月現在

*Affiliation and Department displayed are current as of March 2023.

(注1): 新型コロナウイルスの影響で中止 / Cancelled due to COVID-19

(注2): 中止 / Cancelled

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
笠羽 康正	東北大学	大学院理学研究科 惑星プラズマ・大 気研究センター	教授	ハワイ展開する小口径光赤外望遠鏡群による木星・火星・金星大気上下結合研究および新規望遠鏡の展開: その1	1	
笠原 慧	東京大学	大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻	准教授	Comet Interceptorミッション搭載機器および地上系システム検討	4	
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	6	
津田 卓雄	電気通信大学	大学院情報理工学 研究科	准教授	静止軌道衛星ひまわりによる夜光雲の観測	8	
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	10	
横田 勝一郎	大阪大学	理学(系)	准教授	飛翔体用荷電粒子分析器の視野掃引及び高エネルギー質量分析機能の開発	12	
河村 公隆	中部大学	中部高等学術研究 所	客員教授	バイオマス燃焼生成物の大気中での光化学的変質: 組成解析と室内実験	14	
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	
西山 尚典	情報・システム研究機構 国立極地研究所	研究・教育系	助教	短波長赤外分光器・イメージャとEISCAT Svalbard radarを組み合わせた薄明時におけるオーロラの検出	18	
中澤 知洋	名古屋大学	KMI	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検討	20	

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
島田 幸治郎	琉球大学	理学部	助教	長距離輸送中における有機エアロゾルの分解および生成過程の解明	22	
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	24	
尾花 由紀	九州大学	国際宇宙惑星環境 研究センター	学術研究者	機械学習を用いた磁力線共鳴振動周波数の自動同定とプラズマ圏長期モニタリング	26	
小井 辰巳	中部大学	工学部	教授	最高精度宇宙線ミュオン望遠鏡による宇宙 天気観測	28	
野中 敏幸	東京大学	宇宙線研究所	助教	僻地へ展開可能な多方向宇宙線モニター による惑星間擾乱観測	29	
松岡 彩子	京都大学	理学研究科	教授	内部太陽圏探査のための BepiColombo 磁 場観測	31	
川原 琢也	信州大学	学術研究院工学系	准教授	北極域ナトリウムライダー中性大気温度・風 速計測の拡張観測: 中間圏界面(80- 115km)から下部熱圏領域(< 200km)へ	32	
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	34	
成影 典之	自然科学研究機 構 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 の推進	36	
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	38	

(別紙様式 1 - 2)

ハワイ展開する小口径光赤外望遠鏡群と電波望遠鏡群・軌道上望遠鏡群・惑星探査機の連携による木星・火星・金星大気上下結合の研究：

その 3

Investigation of vertical atmospheric couplings in Jupiter, Mars,
and Venus by the connection of Hawaiian small telescope
with radio / space telescopes & orbiters : 3

笠羽 康正、東北大学・大学院理学研究科・地球物理学専攻

1. 研究目的

東北大は、ハワイ大の協力を得てハワイ・マウイ島のハレアカラ高高度観測施設(標高約 3,000m)に 60cm 可視赤外カセグレン反射望遠鏡(T60)を整備してきた。この活用を軸に、木星では紫外線望遠鏡衛星 Hisaki(2023 年度で活動終了を予定)・米探査機 Juno(Galileo 衛星群のフライバイを extended missionとして実施中)、火星では米探査機 MAVEN・欧探査機 ExoMars Trace Gas Orbiter (TGO)、金星では日 Akatsuki 探査機との連携観測で、これらの対流圏～電離圏に連なる大気垂直輸送・結合の研究を力学面(時間変動・大気波動)・物質面(時間変動・各種生成/消失/輸送機構)で進めてきた。

同じくハレアカラ山頂で運用を行ってきた 40cm 可視シュミットカセグレン望遠鏡(T40)は、その機能を T60 に移しており、1-2年かけて閉所の方向である。ただし、東工大グループが「突発天体追跡観測用」へ転換を検討しており、2022 年度末現在、我々およびハワイ大との協議途上にある。

2. 研究方法・結果

引き続きコロナ禍の元で現地での観測活動は低調で、また秋～冬にかけての荒天とそれに伴う停電・通信切断によって観測運用の停止に至ったため、将来展開に要する装置開発を主に進めるとともに、共通して必要となる補償光学システムの開発着手、およびハワイ大等と共同による惑星・系外惑星専用 1.8-m 望遠鏡 PLANETS の開発を名大・京大の協力を得て取り組んできた。

このため、ハレアカラ施設を用いた観測成果の創出は海外協力研究者によるこれまでの観測蓄積によるものとなった。日本側主導の観測は持ち越しとなっており、2022 年度は電力・通信を含む現地施設の復旧・整備作業が中心となった。支援を頂いたハワイ大メンバーには感謝に耐えない。

(1) 本学望遠鏡を用いた他機関共同を含む観測・開発成果

ハレアカラ施設を用いた観測成果としては、海外協力研究者による小惑星(Belskaya et al., 2022) および高エネルギー突発天体(Kravtso et al. 2022)の偏光観測が論文文化に至った。S+発光を用いた木星・イオトラスの変動観測も引き続き進行している。

また、新たに可視補償光学装置の開発に着手し、T60 に試験装着した。これは、BepiColombo の到着が 2025 年末に迫る水星の外圏大気を 1 arcsec を切る空間分解能で変動モニター可能とすることを主たる目標とするものである。ハワイに設置した装置を遠隔操作して検証およびソフトウェア開発を進めたが、

2023 年初頭には名大のご支援も得て現地へ赴き、装置光学系の換装および水星観測に要する昼間観測能力の付与を行うことができた(吉野 et al. 2023a, 2023b)。

T40 は事実上活動を休止したが、東工大グループによる突発天体・人工デブリ観測への援用を狙う共同運用化の検討を行った。これにはハワイ大側の協力研究者の確保が必要であり、ハワイ大天文学研究所との協議を進めている。

<論文>

Belskaya I., A. V. Berdyugin, Y. Krugly, Z. Donchev, A. Sergeev, R. Gil-Hutton, S. Mykhailova, T. Bonev, V. Piirola, S. Berdyugina, M. Kagitani, T. Sakanoi (2022). Polarimetry of M-type asteroids in the context of their surface composition, *Astron. Astrophys.* 663, A146.

<https://doi.org/10.1051/0004-6361/202142784>

Kravtsov, V., A. V. Berdyugin, I. A. Kosenkov, A. Veledina, V. Piirola, Y. A. Qadir, S. V. Berdyugina, T. Sakanoi, M. Kagitani, J. Poutanen (2022), Optical polarization signatures of black hole X-ray binaries, *Mon. Not. Royal Astron. Soc.* 514, 2479-2481. <https://doi.org/10.1093/mnras/stac1470>

<主な発表>

吉野富士香、鍵谷将人、笠羽康正 (2023a). ハワイ 60 望遠鏡に搭載する補償光学装置の開発. 日本天文学会 2023 年春季年会、立教大、2023 年 3 月.

吉野富士香、鍵谷将人、笠羽康正 (2023b). ハワイ・ハレアカラ東北大 60cm 望遠鏡に搭載する補償光学装置の開発状況. 補償光学研究開発のための情報交換会、国立天文台、2023 年 3 月.

(2) 本学望遠鏡の将来展開に要する開発作業

T60 望遠鏡の復旧・維持を含めた遠隔運用を支えるとともに、2023 年度の展開を期して国内での近赤外線 Echell 分光器および中間赤外線レーザーヘテロダイン分光器の整備・開発を進めた。前者は、ようやく懸案の冷却系・電気系における根本問題に曙光がみえたところで、2023 年 2 月に北大・名寄望遠鏡に装着して近赤外カメラの試験観測に至っている(cf. 永田 et al. 2022a, 2022b)。後者では、装置の安定化・小型化に要するファイバー Optics の援用における技術的基礎が確立し、2022 年度末から具体的な装置の再構築に入っている。2023 年度早期に仙台市天文台における試験観測にこぎつける予定で進めている(cf. 塚田 et al. 2022、Nakagawa et al. 2022)。

ハワイ大等と建設を進める 1.8m 惑星/系外惑星望遠鏡 PLANETS では、名大・京大と共同しての主鏡研磨作業を 2022 年度一杯を使って進めてきた(cf. 鍵谷 et al. 2022、2023)。2023 年度にはこれを完了し、コーティングののち飯館観測所における組立・試験検証へ進む予定である。

<主な論文>

Nakagawa, H., S. Tsukada, T. Katagiri, Y. Kasaba, I. Murata, Y. Hirahara, Y. Matsuura, A. Yamazaki (2023) Mid-infrared laser heterodyne spectrometer by hollow optical fiber and its newly designed coupler. *Applied Optics* 62, A31-A36. <https://doi.org/10.1364/AO.475426>

<主な発表>

永田 和也、坂野井 健、鍵谷 将人、市川 隆、笠羽 康正、大友 綾、平原 靖大 (2022a). 近赤外撮像装置 TOPICS の検出器駆動と冷却システムの開発. Japan Geoscience Union Meeting 2022、幕張メッセ、2022 年 5 月.

鍵谷 将人、永田 和也、平原 靖大、花村 悠祐、栗田 光樹夫、坂野井 健、笠羽 康正 (2022). 1.8m 軸外し望遠鏡 PLANETS 主鏡の形状計測と研磨. Japan Geoscience Union Meeting 2022、幕張メッセ、2022 年 5 月.

塚田 悟輝、中川 広務、村田 功、平原 靖大、笠羽 康正、片桐 崇史、松浦 祐司、山崎 敦 (2022). 中空光ファイバを用いた惑星探査用中間赤外レーザーヘテロダイン分光器の開発. Japan Geoscience Union Meeting 2022、幕張メッセ、2022 年 5 月.

永田和也, 坂野井健, 鍵谷将人, 市川隆, 笠羽康正, 大友綾, 平原靖大. 近赤外撮像装置 TOPICS の検出器駆動と冷却システムの開発 (2022b). 天文学会 2022 年秋季年会、新潟大、2022 年 9 月.

鍵谷将人、高橋啓介、平原靖大、栗田光樹夫、森本悠介、花村悠祐、永田和也、坂野井健、笠羽康正 (2023). 引き摺り 3 点計測法による 1.8m 軸外し望遠鏡 PLANETS 主鏡の研磨. 日本天文学会 2023 年春季年会、立教大、2023 年 3 月.

(3) ハワイ大型観測施設のリモート利用による成果創出

Subaru 望遠鏡観測に絡んだ国際共同観測では、中間赤外線分光撮像装置 COMICS を用いた貢献による、土星の 40 年間に渡る長期大気擾乱観測の総まとめ (Blake et al. 2023) および海王星の大気温度場季節変動観測 (Roman et al. 2022) をチームとして支えた。後者は未だ周回探査がなされていない氷巨大惑星、すなわち天王星・海王星の次世代大型探査検討の基礎の 1 つとなっている (Cohen et al., 2022)。

<論文>

Blake, J. S. D., L. N. Fletcher, G. S. Orton, A. Antuñano, M. T. Roman, Y. Kasaba, T. Fujiyoshi, H. Melin, D. Bardet, J. A. Sinclair, M. Es-Sayeh (2023). Saturn' s seasonal variability from four decades of ground-based mid-infrared observations. *Icarus* 392, 15347. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2022.115347>

Cohen, I. J., C. Beddingfield, R. Chancia, G. DiBraccio, M. Hedman, S. MacKenzie, B. Mauk, K. M. Sayanagi, K. M. Soderlund, E. Turtle, C. Ahrens, C. S. Arridge, S. M. Brooks, E. Bunce, S. Charnoz, A. Coustenis, R. A. Dillman, S. Dutta, L. N. Fletcher, R. Harbison, R. Helled, R. Holme, L. Jozwiak, Y. Kasaba, P. Kollmann, S. Luszcz-Cook, K. Mandt, O. Mousis, A. Mura, G. Murakami, M. Parisi, A. Rymer, S. Stanley, K. Stephan, R. J. Vervack, Jr., M. H. Wong, P. Wurz (2022). The Case for a New Frontiers-Class Uranus Orbiter: System science at an underexplored and unique world with a mid-scale mission. *Planetary Sci. J.* 3, 58. <https://doi.org/10.3847/PSJ/ac5113>

Roman, M. T., L. N. Fletcher, G. S. Orton, T. K. Greathouse, J. I. Moses, N. Rowe-Gurney, P. G. J. Irwin, A. Antuñano, J. Sinclair, Y. Kasaba (2022). Subseasonal Variation in Neptune' s mid-infrared emission. *Planetary Sci. J.* 3, 4. <https://doi.org/10.3847/PSJ/ac5aa4>

(別紙様式 1-2)

Comet Interceptor ミッション搭載機器および地上系システム検討

Study of science payloads and ground-segment system for the Comet interceptor mission

笠原 慧、東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻

研究目的

彗星の核から放出される大気は太陽の紫外線や周辺プラズマによって部分電離され、太陽風プラズマと相互作用する。1986年の国際的なHalley彗星フライバイ探査や、ESAによる2014-2015のChuryumov-Gerasimenko彗星のランデヴー探査は、このプラズマ-大気相互作用に関する知見を提供した一方で、新たな謎を投げかけている。今後、彗星における衝撃波や接触層といったプラズマ不連続境界の生成・維持・消滅や、太陽風-彗星部分電離大気間の相互作用の理解を進めるためには、コマ活動度(=彗星大気生成率)が桁で異なるようなパラメタ空間での観測が有効である。これは、これまでの短周期彗星のような表面付近のガスが枯れた彗星ではなく、オールト雲に長く滞在した、より始原的な彗星をターゲットとすることで実現できる可能性が高い。ESAのComet Interceptorミッションでは、そのような長周期彗星(Long-Period Comet, LPC)をターゲットとしてフライバイ探査を行う。このミッションは、ESAのFast class missionの第一候補として選ばれ、システム・観測器の検討が進められている。日本による子機1台の提供が想定されており、日本でもISAS/JAXAのプロジェクトとすべく検討を進めている。国内では、WG活動を経て2020年度からISAS所内検討チームとして検討を続けている。2022年度の大きなマイルストーンはミッション定義審査、システム要求審査、システム定義審査であり、探査機システム・観測器それぞれの検討、ならびにそのIFの調整が進行中である。

研究方法

本申請では、Comet Interceptor ミッション搭載機器および地上系システム検討を実施した。内容は、

- 1) 各観測器の技術的実現性の確認(前年度からの継続)
- 2) 探査機システムのインタフェイスの議論(前年度からの継続)
- 3) 地上系システム、科学マネジメントプランに関する国内外の議論
- 4) 国内サイエンス会合
- 5) 国際Science Working Team会合

である。国内では毎週のハードウェア定例会に加え、サイエンス会合を10月に実施した。ミッションをリードする欧州側とは不定期のシステム会合の他、2度のScience Working Team会合が開催された。また、搭載機器の一つであるイオン質量分析器のプロトタイプの実験を実施した。

研究結果

上記のように高頻度・高密度の打ち合わせを重ねた結果、システム・観測器ともに検討を詳細化し、7月にミッション定義審査・システム要求審査を通過した。さらに3月にはシステム定義審査の説明会が開催され、次年度4月には本審査を受審する予定である。一方、欧州側もシステムメーカー候補2社による検討および日本側とのインタフェイス要求の調整が進められた結果、6月にプロジェクト化された。地上系システムについてもJAXAの対応部署と打ち合わせを重ね、運用に必要な設備等を識別した。国内外のサイエンス会合での議論内容は、フライバイ運用に反映される。また、観測器開発については静電分析器のテストモデル性能評価を実施し設計通りのエネルギー・角度応答を得た。

成果発表

- 船瀬龍ほか, "長周期彗星探査計画 Comet Interceptor", 第23回宇宙科学シンポジウム, 口頭発表, 相模原, 2023年1月5日.

- 村田直史ほか, "Comet Interceptorミッションにおける超小型探査機を用いた磁場観測実現に向けた検討状況", 第66回宇宙科学技術連合講演会, 口頭発表, 熊本, 2022年11月1日.
- 笠原慧ほか, "Comet Interceptor搭載 Plasma Suiteの開発準備状況", 第23回宇宙科学シンポジウム, ポスター発表, 相模原, 2023年1月5日.
- 笠原慧ほか, "The Comet Interceptor mission: JAXA's MDR/SRR completed", SGEPPS, ポスター発表, 相模原, 2022年11月5日.
- Kasahara, S. et al., "Test results of the breadboard-model ion mass spectrometer for the Comet Interceptor mission", 地球惑星科学連合2022年大会, ポスター発表, 幕張, 2022年05月23日.

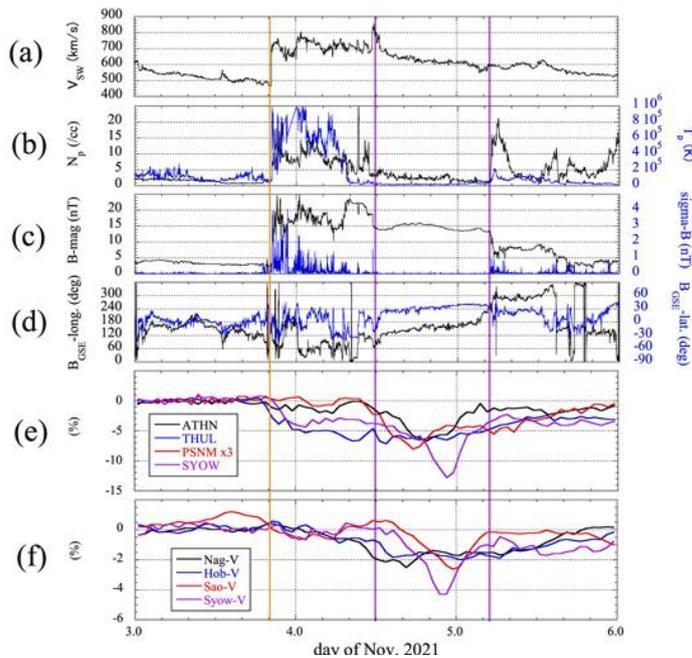
(別紙様式 1 - 2)

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

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, その中での宇宙線輸送過程を解明することを目的とする。現在太陽活動は第25サイクルに入り, 宇宙天気現象の増加が予想される。



宇宙天気現象時の太陽風パラメータと宇宙線強度変動
Munakata et al.(2022)より引用

本年度は,南極昭和基地での観測データを用いて,機械学習を使って宇宙線強度変動への大気効果補正を試行,検証するとともに,中性子計の強度変動における積雪量の影響を見積もることが出来た(Kataoka, et al.,

2022)。加えて,昭和基地を加えた

GMDN と中性子計による宇宙線観測網のデータを用いて宇宙天気現象を統合解析した結果,対象イベントでの「双方向流」と呼ばれる 2 方向からの宇宙線の流れを確認した

(Munakata et al., 2022)。今後の解析で、宇宙天気現象での宇宙線減少のメカニズムの解

明につながると期待される。これらの結果は以下で公表されている。

- K. Munakata et al., Large-amplitude Bidirectional Anisotropy of Cosmic-Ray Intensity Observed with Worldwide Networks of Ground-based Neutron Monitors and Muon Detectors in 2021 November, 2022, *ApJ*, 938, 30, DOI 10.3847/1538-4357/ac91c5
- R.Kataoka et al., Local environmental effects on cosmic ray observations at Syowa Station in the Antarctic: PARMA-based snow cover correction for neutrons and machine learning approach for neutrons and muons, 2022, *Journal of Space Weather and Space Climate*, 12, id.3711, DOI 10.1051/swsc/2022033

(別紙様式 1-2)

静止軌道衛星ひまわりによる夜光雲の観測
Noctilucent cloud observation by the geostationary orbit satellite
Himawari

津田卓雄，電気通信大学 大学院情報理工学研究科

研究目的

現代社会が抱える環境課題として全球規模で生じる地球温暖化現象の多面的な理解と様々な監視手段が求められている。夜光雲は地球温暖化現象の一端である超高層寒冷化の高精細な指標になると考えられているが、十分な活用方法が確立されていない。本研究課題では、静止軌道衛星ひまわりの全球輝度画像データから夜光雲の特性量（発生頻度、発生高度、粒径分布、etc.）を推定する手法を開発し、広域・連続・長期の夜光雲特性量の定量観測を開拓することを目指す。その際、地上ライダー観測、米国 AIM 衛星などの関連データを用いた検証を行うことで、夜光雲の特性量推定手法の妥当性を評価し、科学探究に耐え得る定量的な特性量推定を確立する。静止軌道からの夜光雲の定量観測は、従来の局所的・断続的な観測では捉えきれない全球規模の超高層寒冷化に伴う夜光雲の広域変動を連続的に捉えることが可能な新手法として、地球温暖化現象の定常監視手段の発展に貢献することが期待される。

研究進展状況

ひまわり 8 号による夜光雲観測のイメージを図 1 に示す。全球輝度画像の地球周辺部に注目することで、夜光雲をリム観測することが可能である。本研究では、ひまわり 8 号の全球輝度画像について夜光雲による散乱光の有無を判別することで夜光雲を自動検出する手法の開発を中心に研究を進めた。まず、全球画像の各ピクセル（各視線方向）について地球大気楕円体との接線を計算して地球リム観測としての位置情報を求め、各地点の輝度データの高度分布を取得した。次に、輝度データの高度分布を利用して背景光成分（背景大気によるレイリー散乱光成分を含む）を多項式近似等で再現・除去した後に、夜光雲による有意な散乱光成分を検出するアルゴリズムを構築した。自動検出結果と目視による夜光雲判定結果の比較などを通じて背景光成分再現の最適近似パラメータや散乱光成分検出時の最適閾値を調整することで夜光雲の自動検出精度の向上を目指した。最終的に、完成した手法で 2015 年 7 月から 2022 年 12 月までのひまわり 8 号の全データについて、夜光雲の自動検出を実施した。夜光雲検出結果と AIM/CIPS による夜光雲観測データの詳細な比較によって、本研究による夜光雲検出について検証を行った。その結果、両者の結果に非常に良い一致が見られることが判明し、本研究による夜光雲検出の有用性が実証された。

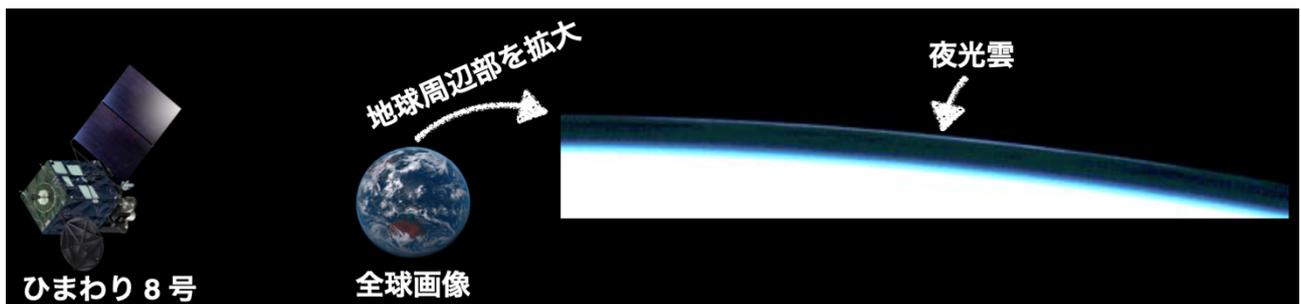


図 1. ひまわり 8 号による夜光雲観測のイメージ。

開発した夜光雲検出手法を用いて、準リアルタイムで一連のデータ処理を行い、夜光雲の検出結果をウェブサイトで即時公開するシステムを構築した。ウェブサイトでは、市民科学への寄与も意識し、夜光雲の検出結果を毎日 1 回吐く twitter bot も運用している。ウェブサイトのスクリーンショットを図 2 に示す。ウェブサイトで公開している夜光雲検出データは、国内の大学（電通大、明治大、etc.）の学生による研究や米国（NASA）やカナダ（University of New Brunswick）の研究者による研究に利用されるなど、共同研究が拡大しつつある。電通大の学生による研究では、冬半球成層圏と夏半球夜光雲の半球間結合過程について複数イベント解析が実施され、両者の対応に関する時間遅延などが明らかとなった。この成果は電通大の卒業論文としてまとめられている。明治大の学生による研究では、北半球で夜光雲が出現する南限緯度についての解析が行われ、中緯度夜光雲の特性に関する理解が深まった。この成果は SGPSS において学会発表が行われている。NASA の研究者による研究では、夜光雲の年々変動と背景の大気温度、水蒸気量の対応関係について調査が行われた。その結果、極域の夜光雲発生領域において水蒸気量が顕著に減少する様子を捉えるなどの成果が得られた。これらの成果は学術論文として投稿されている。

2022 年 12 月に、ひまわり 8 号から 9 号への切替が実施された。今後、夜光雲検出についても、ひまわり 9 号の全球輝度画像データへの対応を進めることを予定している。

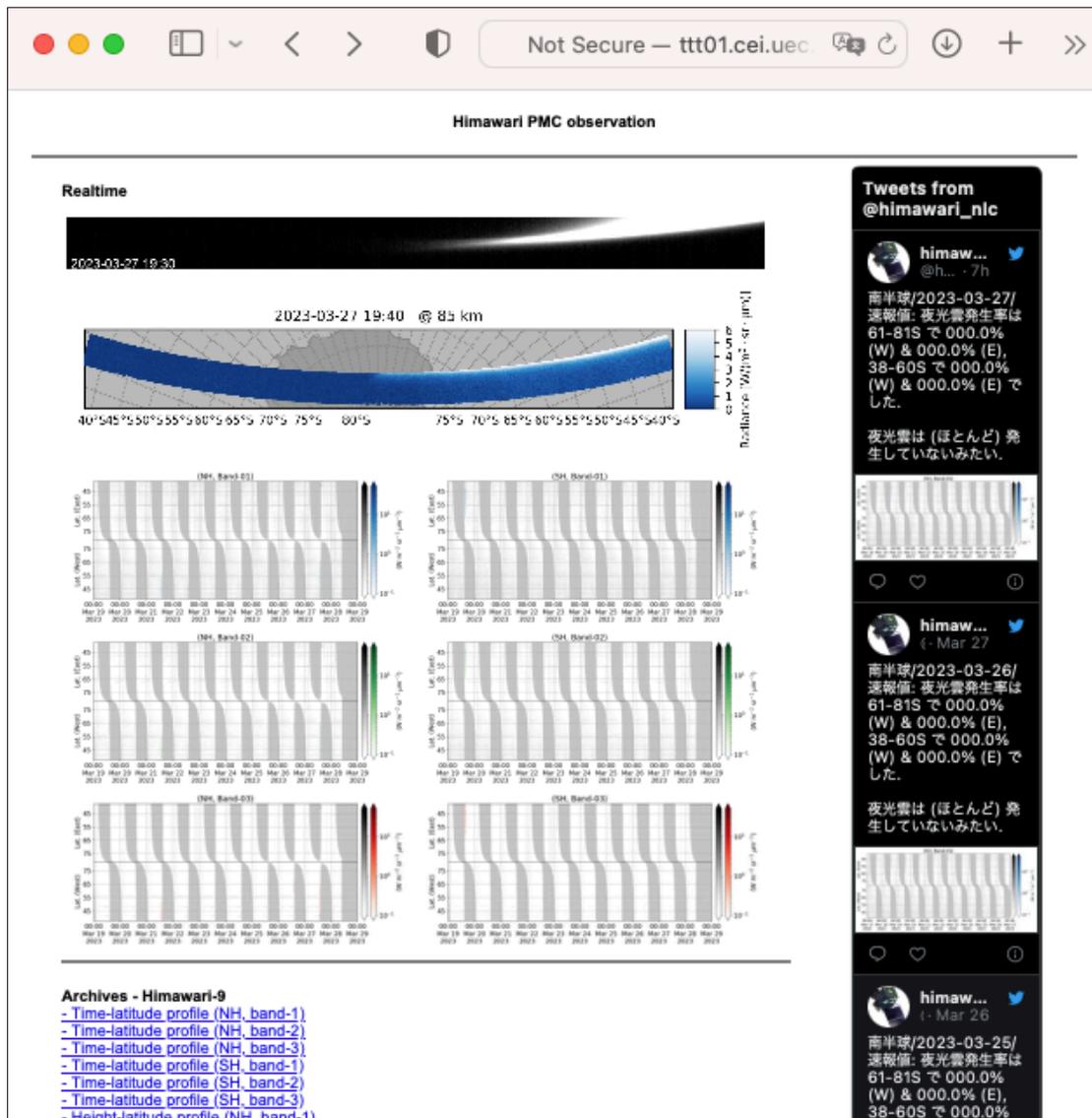


図 2. ひまわり夜光雲観測のウェブサイト。

(別紙様式 1-2)

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23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活動期の立ち上がり期にある。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23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（北緯 38.3° ）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、高緯度（アイスランド：北緯 64.47° ）、中緯度（山形市： 38.25° ）および低緯度（バンコク： 13.1° ）の大気中 Be-7 濃度、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について2000年から2022年までの年変動を示している。ただし、アイスランドサンプリングサイトが事故により休止したため2021年のアイスランドデータは得られなかった。2022年9月からサンプリングが再開された。アイスランドの2022年の値は9月から12月の平均値である。

表 1 に 3 地点の 2014 年から 2019 年までの平均 Be-7 濃度の比較を示す。中緯度の Be-7 濃度は、高緯度および低緯度の約 2 倍であり明らかな緯度依存性を示している。流跡線解析から山形に移流してくる春と秋の空気塊は高緯度極域からが卓越しており夏は中緯度の流跡線であった。また、バンコクへの流跡線は低緯度が卓越していた。アイスランドではかなり高緯度の局所的な流跡線であった。これらの Be-7 濃度の緯度に依存する季節変動は主に宇宙線強度の緯度効果と圏界面高度で説明できそうである。ちなみに高緯度、中緯度、低緯度の圏界面平均高度は各々、平均 9.5 km, 12 km, 16.5 km であった。

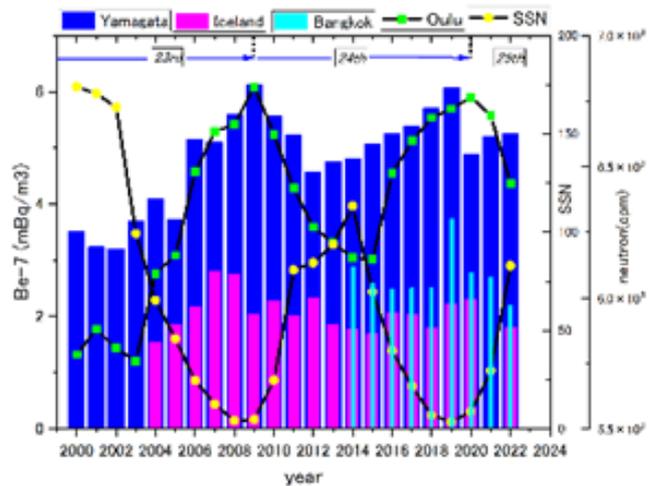


図 1. 2000 年から 2022 年までの高緯度、中緯度および低緯度の大気中 Be-7 濃度、太陽黒点数 (SSN)、oulu の中性子強度の年変動

表 2 に太陽活動第 23 期と第 24 期の下降期間における Be-7 濃度 (山形) 変動率、中性子強度 (oulu) 変動率、太陽黒点数 (ピーク値) の比較を示す。各々、第 23 期に対して第 24 期は減衰しており約 50% 程度であり宇宙線生成核種の地表濃度においても太陽活動の活動度に応答していることを示している。なお、Be-7 濃度の変動率は中性子強度の 3~4 倍であり、低エネルギー宇宙線スペクトルの閾値の違いを反映している可能性を示唆している。これらの結果との比較において第 25 期の太陽黒点数の立ち上がりからピークへ向かう 2023 年の観測データは重要である。

表 1. 2014 年から 2019 年までのアイスランド、山形、タイにおける Be-7 濃度の平均値

観測地	Be-7 濃度 (mBq/m ³)
Iceland	1.9±0.2
Yamagata	5.4±0.5
Bangkok	2.8±0.5

表 2. 太陽活動第 23 期と第 24 期の下降期間における Be-7 濃度 (山形) 変動率、中性子強度 (oulu) 変動率、太陽黒点数 (ピーク値) の比較

Solar cycle	山形 Be-7	Oulu neutron	SSN (peak)
23rd	31.8%	8.2%	173.9
24th	14.4%	4.7%	113.3
24th/23rd	0.45	0.57	0.65

[参考文献]

- 1) Solar Influences Data Analysis Center - SIDC, <http://sidc.oma.be/>
- 2) <http://neutronm.bartol.udel.edu/>

[研究発表]

- 1) “宇宙線生成核種 Be-7 の地表レベルでの大気中濃度の季節変動について”、櫻井敬久、川村容明、門叶冬樹 他、第 59 アイソトープ・放射線研究発表会 (online 2022/7/7)

(別紙様式 01-2)

飛翔体用荷電粒子分析器の視野掃引及び高エネルギー質量分析機能の開発
Development of functions of field-of-view scanning and high-resolution mass spectrometry for spaceborne instruments

横田勝一郎、大阪大学大学院・理学研究科

【研究目的】

本研究の目的は、次世代型の宇宙機搭載用荷電粒子分析器のため、半球視野を確保する視野掃引及び高分解能質量分析の機能を確認することである。人工衛星や観測ロケットを利用したプラズマのその場観測におけるイオン計測には、3次元の速度分布関数を取得することと共に、質量分析によってイオン種の同定を行うことも必須となっている。3次元の速度分布関数の取得には全方向に対する視野の獲得が必要であり、光学機器搭載のスピン運動を行わない探査機の場合は自力での確保が求められる。また質量分析器では、観測成果を挙げる度に更なる質量分解能の向上が求められている。「あらせ」の観測においても、アルファ粒子など軽量のイオン種の変動を見る場合において主成分であるプロトンの混入を無視できない状況である。また窒素イオンや分子イオンなど、存在比の低い重イオンへの関心も磁気圏観測の進展と共に高まってきている。

本研究で技術確立を目指す二つの機能は、今後の地球磁気圏観測衛星のみならず、他の惑星や衛星及び惑星間空間での観測において必須となる機能と見込んでいる。現時点で計画・検討されている宇宙機搭載の粒子分析器による観測計画では、MMX(火星衛星)、Comet Interceptor(彗星)、MACO(火星)といずれも光学機器との共同観測を基本線とするため、三軸制御衛星の利用が大前提となっている。また、質量分析ではこれまでに無い $M/\Delta M > 50-100$ も求められ、太陽風及び地球磁気圏起源のイオン種のほとんどを完全に分別し、イオン種毎に精度の高い速度分布関数を取得することを目指している。酸素や窒素など比較的軽量のイオン種であれば同位体比計測も可能となるため、超高層大気物理の研究において地球化学的な考察が得られることも期待できる。

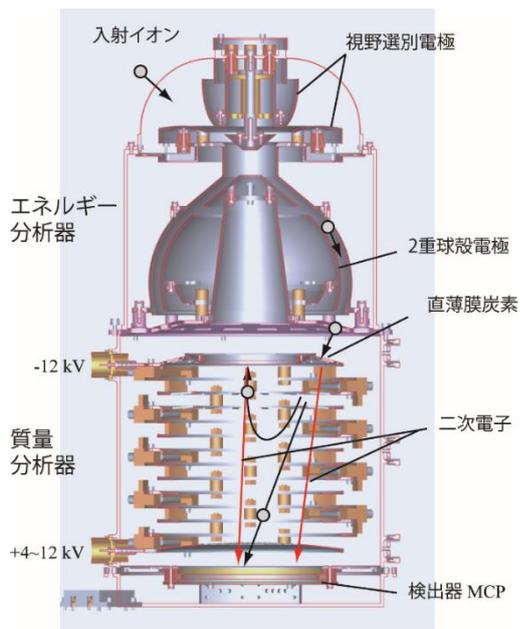


写真 1: MSA イオン分析器 FM のエネルギー分析器 (左) と質量分析器 (右) の較正試験。

図 1: MSA イオン分析器 センサ部の断面

【研究方法】

2021年度に行った火星衛星探査機MMX用イオン分析器エンジニアリングモデル開発の結果に基づき、2022年度はフライトモデルの開発を行った。イオン分析器（図1）の上半部のエネルギー分析器と、下半部の質量分析器に分けて真空槽に接地し、イオンビームを用いた較正試験を行った（写真1,2）。信号読み出しや高圧電源などは実験室設備のものを使用した。

【研究結果】

検出器での全周360度をカバーする16CHにて、エネルギー分析器の応答（図2）と、質量分析器の応答（図3）を取得した。図2では16通りの視野選別電極への電圧印加の結果を重ねている。図3では2通りの質量分析器への電圧印加の結果を上下パネルに分けている。イオン光学系として設計通りの性能であることを確認し、較正データを全て準備することができた。

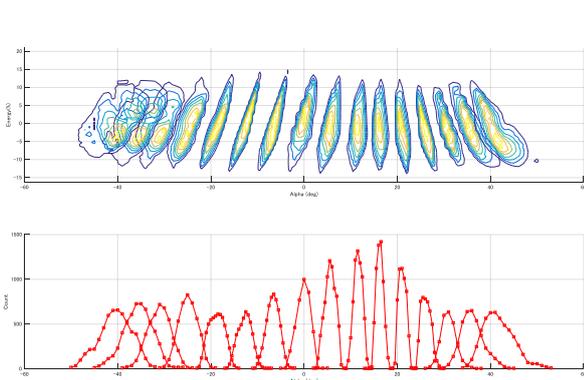


図2: 較正試験で得たエネルギー角度応答。

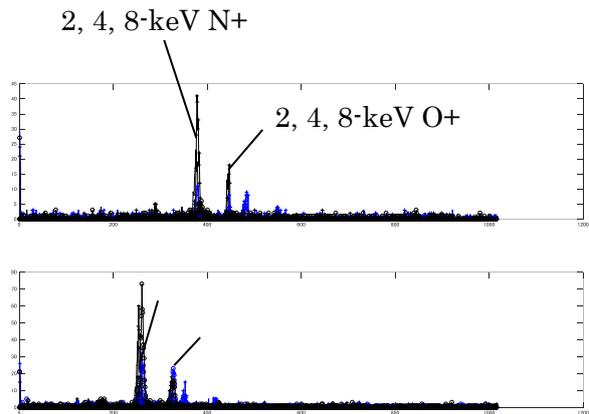


図4: 較正試験で得た質量/飛行時間プロファイル。

【まとめ】

主に2021年度のエンジニアリングモデルの開発成果によってMMX計画におけるJAXA詳細設計審査会(CDR)を2022年に通過し、その後フライトモデル開発を実施した。イオン光学系の較正試験は無事に完了したため、今後は環境試験及び総合機能試験を実施し、その後探査機システムへと合流する。MMX探査機は2024年に打ち上げられ、2025年後半から火星周回軌道への投入及び科学観測開始が予定されている。まずは較正データの整備を機上ソフトウェアの整備を行い、直近の探査機システム総合試験に向けた準備に取り組む予定である。

【成果発表】

- ・ 横田, 他7名, 宇宙プラズマ観測用質量分析装置の開発: 太陽系探査への展開, 地球電磁気・地球惑星圏学会 総会・講演会, 2022年11月, 産業会館(相模原). (招待講演)

(別紙様式 1-2)

バイオマス燃焼生成物の大気中での光化学的変質
：組成解析と室内実験

Atmospheric fate of biomass burning products:
Field observation and laboratory experiment

河村公隆、中部大学・中部高等学術研究所

【目的】

バイオマス燃焼 (BB) に由来する煙霧は、呼吸器疾患など健康被害に止まらず、微粒子(エアロゾル)の吸湿特性を増大させ雲形成・気候変動に大きな影響を及ぼすことが知られている。研究代表者らは東アジアの大気中にBBのトレーサーであるレボグルコサン(セルロースの燃焼で生成する脱水糖)を高濃度で検出するとともに、西部北太平洋・父島でのエアロゾルの長期観測を通してBBの影響がこの10年間で増加傾向にあることを報告した。また、代表者らはシュウ酸等のカルボン酸が有機微粒子の主成分であること、森林火災や野焼きの近傍ではそれらが高濃度で存在することを発見し、BBおよびBB生成物の光化学反応がシュウ酸等の重要な発生源であると提案した。本研究の目的は、ドイツ対流圏科学研究所(TROPOS)にて巨大反応チャンバーを用いた煙霧の変質実験を行い、BBからの低分子カルボン酸の一次および二次生成の仮説を検証することである。そのために、反応チャンバーから得られたエアロゾル試料を分析し、低分子ジカルボン酸・脱水糖などを測定した。また、東アジア・欧州で採取した大気エアロゾル中にバイオマス燃焼生成物を測定し、BBの大気質への影響を評価することを研究目的にしている。

【方法】

ガスクロマトグラフ(GC)・質量分析計(GC/MS)に用いることによって、バイオマス燃焼性生物であるレボグルコサンなどセルロースの燃焼で生成する脱水糖をトリメチルシリル(TMS)誘導体として測定した。また、FID検出器付きGCを用いることによって、低分子モノカルボン酸(C1-C10)および低分子ジカルボン酸(C2-C10)を、それぞれ、パラブロモフィナシルエステル、ジブチルエステルに誘導体化したのち測定した。また、植生起源のイソプレン・ α -ピネンの酸化生成物をTMS誘導体としてGC/MSにて測定した。更に、炭素計を用いて有機炭素・黒色炭素を、イオンクロマトグラフを用いて主要イオンを、安定同位体比質量分析計を用いて安定炭素・窒素同位体比を測定した。

【結果】

ドイツ・ライプツィヒTROPOS研究所で採取したエアロゾル試料(Melplitz station and village)について低分子ジカルボン酸および関連有機物をGCにて分析した。全てのエアロゾル試料でシュウ酸(C2)が主成分であり、コハク酸(C4)、マロン酸(C3)がそれに続く分子組成を示すことがわかった。この分子分布の特徴は、これまで東アジアで報告されている分布によく類似していることが判明した。ドイツ側(German Lab)はイオンクロマトグラフィー・質量分析計を用いてバイオマス燃焼のトレーサーを既に測定しているが、中部大学(KK Lab)ではGC/MS法によってこれらを測定している。そのインターキャリブレーションを行ったところ、2つの測定法で極めて良い一致を確認することができた(図1参照)。また、図2にバイオマス燃焼性生物のトレーサーであるレボグルコサン、ガラクトサン、マンノサンの測定結果の一部を示す。また、TROPOSのチャンバーを用いたバイオマス燃焼生成物の試料の分析を終了して現在データを取りまとめ中である。ジカルボン酸・ケト酸・ジカルボニルやBBトレーサーの解析を行い、近日中に論文として投稿予定である。

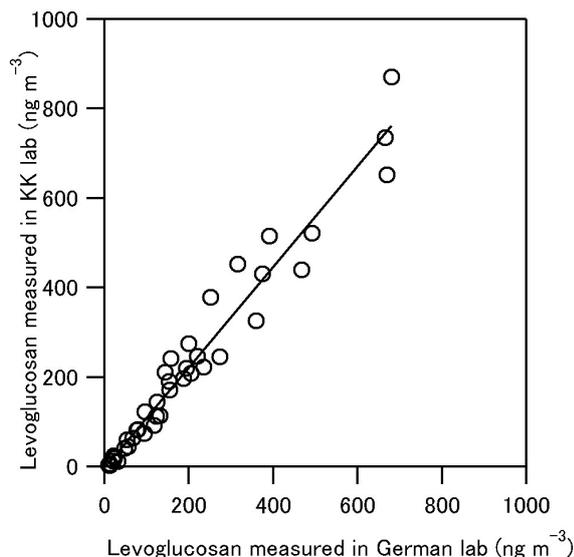


図1. 同一試料を用いたドイツ(German lab)と中部大(KK lab)におけるレボグルコサン測定結果の比較

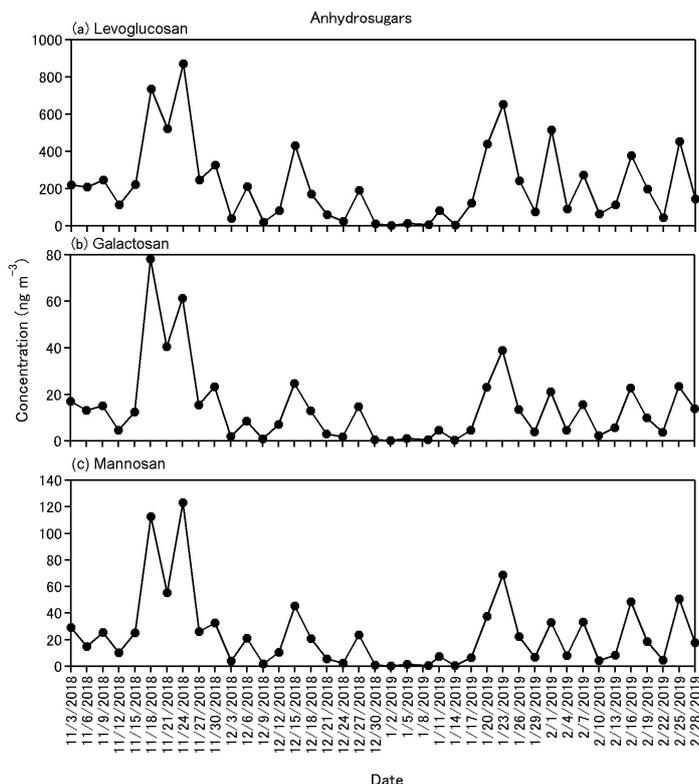


図2. ドイツ(Melplitz)におけるレボグルコサン等の濃度変動

【考察とまとめ】

本研究を通してバイオマス燃焼のよって低分子ジカルボン酸が生成することがわかった。しかし、実際の大气エアロゾル中ではしばしばマロン酸がコハク酸よりも高い濃度をしめし、大气中での光化学的変質の重要性が明らかとなった。また、バイオマス燃焼の煙の成分がチャンバーの中で変化することが認められた。今後は、国際共同研究で得られた貴重なデータを解析し、論文として国際誌に掲載するために鋭意努力する予定である。また、本研究では、薪ストーブの煙突の中で起こるガス・粒子の分配についてもデータを解析した。その結果、カリウムが煙突中で選択的に除かれ煤として沈着することが分かった。この結果は、地域においてレボグルコサン・カリウム比が大きく変動する理由として薪ストーブの寄与が大きいことを示唆しておりこれまでのデータを整理する意味で重要な知見である。そのデータを公表したところ、関連の研究者から大きな反響があった。

論文発表

- Kawamura K., Geochemical studies of low molecular weight organic acids in the atmosphere: sources, formation pathways, and gas/particle partitioning, *Proc. Jpn. Acad. Ser. B* 99, 1-28, 2023. doi: 10.2183/pjab.99.001, Published on 10 January, 2023.
- Kawamura K., B. Kunwar, D. K. Deshmukh, P. Vodička and Md. M. Haque, Deposition of Potassium on Chimney Wall from Wood Stove Smoke: Implication for the Influence of Domestic Biomass Burning on Atmospheric Aerosols. *Atmosphere* 2023, 14, 484. <https://doi.org/10.3390/atmos14030484>, Published: 28 February 2023.
- Kunwar B., K. Torii, S. G. Aggarwal, A. Takami and K. Kawamura, Comparisons of GC-Measured Carboxylic Acids and AMS m/z 44 Signals: Contributions of Organic Acids to m/z 44 Signals in Remote Aerosols from Okinawa Island, *Appl. Sci.* 2022, 12, 8017. doi.org/10.3390/app12168017
- Haque Md. M., S. K. Verma, D. K. Deshmukh, B. Kunwar, and K. Kawamura, Seasonal characteristics of biogenic secondary organic aerosol tracers in a deciduous broadleaf forest in northern Japan, *Chemosphere* 311 (2023) 136785, available online 15 October, 2022.

(別紙様式 1-2)

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

本課題では、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 ; 台湾、タイ、インドネシア、フィリピン、ベトナム)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。VLF/ELF帯電磁波からは、その低い減衰率(1-3 dB/1000 km)により広範囲 (~数千km) の雷の発生時刻、発生位置 (緯度、経度)、ピーク電流、極性、および電荷モーメントを推定でき、フィールドミルの観測から、半径 ~ 40 kmの雷による大気電場変動を捉えることができる。本課題では、東南アジアにネットワークを構築することにより、雷放電のグローバルサーキットへの影響を定量的に明らかにする。

2. 研究方法

本課題では、雷の位置 (緯度・経度)、ピーク電流、極性、および電荷モーメントを推定し、大気電場変動との関連性を明確にすることで、東南アジアの雷放電とグローバルサーキットとの関連性について明らかにする。雷放電推定結果と大気電場との比較については、雷発生時刻により、雷電波データと大気電場変動との対応関係を調べ、パラメータごとにその変動量や周期等を求める。

3. 研究結果および考察

2022年度に、科研費でフィールドミルを1台購入し、東南アジアに新規設置を予定していたが、千葉大で観測していた既存のフィールドミルの信号ケーブルが破損してしまい、新規購入したフィールドミルのケーブルに交換した。そのため、東南アジアへの設置はできなかった。2023年度はケーブルを新規購入し、ポンティアナ (インドネシア) への設置を予定している。

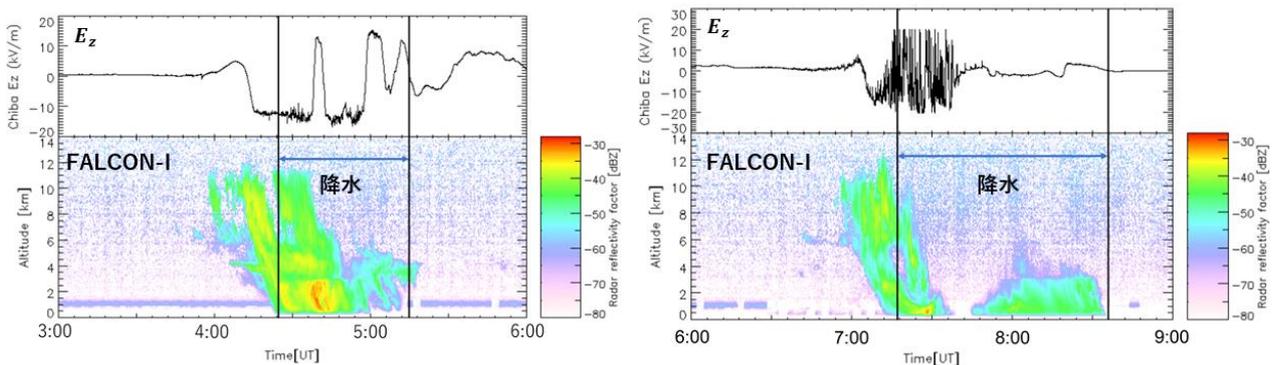


図 1 2022年6月3日 (左) 03:00-06:00 UT および (右) 06:00-09:00 UT の雷雨時に、千葉大で観測された (上) 大気電場および (下) FALCON-I で観測されたレーダ反射強度。

2022年6月3日03:00-09:00 UT の雷雨時に、千葉大で観測された大気電場変動と、本研究グループが開発した95GHz雲レーダFALCON(FMCW Radar for Cloud Observations)-Iのレーダ反射強

度との比較を図1に示す。両方の時間帯ともに雷は発生していたが、06:00-09:00 UT のほうが雷の発生数は多かった。大気電場は正が下向き（下部電離圏から地表への向き）、負が上向きを示す。FFT等により変動の周期を調べたところ、03:00-06:00 UT では、630 s 以上の大気電場の変化が雷雲の動きと関係しており、06:00-09:00 UT では数 s から 100 s の雷による変動が見られた。

大気電場の変動量と落雷の距離との間に弱い相関がみられた（図2）。これより、フィールドミルで測定された大気電場は、近い雷の影響を大きく受けることが考えられる。

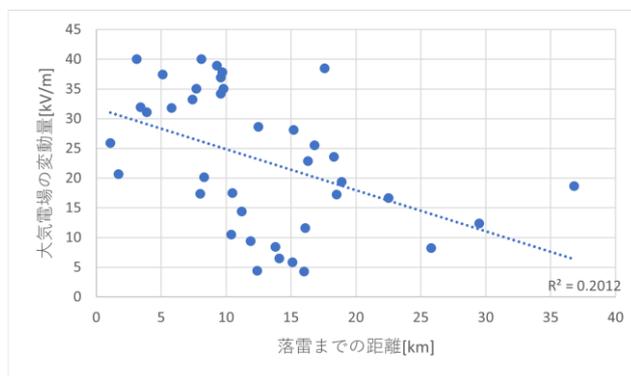


図 2 大気電場の変動量 vs 雷からフィールドミルまでの距離

4. まとめ

2022年度は東南アジアでの大気電場観測ができず、国内での観測・解析を行い、雲レーダFALCON-Iとの比較を行った。その結果、雷雲の動きによる緩やかな大気電場変動、雷による速い大気電場変動、および雷までの距離と大気電場変動量との相関について明らかにした。2023年度はインドネシアにフィールドミルを設置し、雷および気象衛星の雲データとの比較を行う予定である。

成果発表

- [1] Nozaki, Y., H. Ohya, F. Tsuchiya, K. Nozaki, H. Nakata, and K. Shiokawa, Local Time and Seasonal Variations in the D-Region Ionosphere: Does It Reflect Sudden Stratospheric Warming Effects?, URSI Radio Science Letters, 4, DOI: 10.46620/22-0045, 2022.
- [2] Nakayama, M., H. Ohya, F. Tsuchiya, K. Nozaki, K. Shiokawa, and H. Nakata, Horizontal Inhomogeneity of the D-region Ionosphere During a X-class Solar Flare by OCTAVE VLF Observations, URSI Radio Science Letters, 4, 2022 (accepted).
- [3] Ohya, H., F. Tsuchiya, J. Chum, T. Omori, and K. Shiokawa, Variations in atmospheric electric field and VLF/LF transmitter signals associated with Tonga volcanic eruption of 15 January, 2022, JpGU2022, Chiba, Japan, 24 May, 2022 (Invited).
- [4] Nozaki, Y., H. Ohya, F. Tsuchiya, H. Nakata, and K. Shiokawa, Diurnal and seasonal variations in the D-region ionosphere using LF transmitter signals, JpGU2022, Chiba Japan, 1 June, 2022.
- [5] Nakayama, M., H. Ohya, F. Tsuchiya, K. Shiokawa, Large solar flare effects on the D-region ionosphere using VLF/LF transmitter signals, JpGU2022, Chiba, Japan, 1 June, 2022.
- [6] Ohya, H., F. Tsuchiya, J. Chum, T. Omori, and K. Shiokawa, Response of Atmospheric Electric Field and VLF/LF Transmitter Signals to Tonga Volcanic Eruption of 15 January, 2022, A OGS2022, Online, 1 August, 2022.
- [7] Ohya, H., Variability and Role of the D-region Ionosphere Based on VLF/LF Wave Observations, URSI-JRSM2022, Chuo University, Tokyo, Japan, 1 September, 2022 (Invited).
- [8] Ohya, H., F. Tsuchiya, M. Kamogawa, T. Suzuki, J. Chum, and T. Takamura, Variations in the D-region ionosphere associated with Tonga volcanic eruptions of 15 July 2022 using VLF/LF transmitter signals, VERSIM2022, Online, 8 November, 2022.

(別紙様式 1-2)

短波長赤外分光器・イメージャとEISCAT Svalbard radarを組み合わせた
薄明時におけるオーロラの検出

Aurora identification in twilight condition by 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する事である。スバルバル諸島・ロングイヤビエン (78.1° N, 16.0° E) で実施予定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観測するOH分子の発光スペクトルから80km高度の大気温度の導出も行い、急激に進行する北極高緯度での気候変動への現状把握や本質的理解、電離圏への影響、そして将来予測精度向上へ貢献する。

【観測実施状況】

2022年11月に短波長赤外(1.1-1.3 μm)に感度を持つ高分散分光器を、ロングイヤビエンのThe Kjell Henriksen Observatory (KHO)の光学ドームへの設置を完了した。また、分光観測の補完のため波長1.1 μm における単色イメージャも分光器と同じドームに設置・観測を開始している。設置終了後から、2023年3月末現在で大きなデータ欠測なく運用しており、分光器は2023年5月初頭、イメージャは2023年4月初頭まで観測継続予定である。また、2023年1月22日および23日にはESR特別実験を実施し、光学機器との同時観測を行った。分光器は観測波長と波長分解能の異なる4つのモード(表1に示す)を有しており、3つのモードにおいてオーロラ発光を合計10例程度観測することに成功している。

表1 分光器における4つの観測モードと観測対象と観測実績

Mode	Target: Aurora and Airglow	
Mode-1: Aurora fine	Success: $\text{N}_2^+(0,0)$	Success: OH (5,2), He
Mode-2: Aurora wide 1	Not yet: $\text{N}_2\ 1\text{P}(0,0)$, $\text{N}_2^+(0,0)$	Success: OH (4,1), (5,2), (6,3), He
Mode-3: Aurora wide 2	Success: $\text{N}_2^+(0,0)$, $\text{N}_2\ 1\text{P}(0,1)$	Success: OH (5,2), (6,3), (7,4), He
Mode-4: OH	Success: $\text{N}_2\ 1\text{P}(0,1)$, OI-	Success: OH (7,4), (8,5), $\text{O}_2\ \text{IR}$

【結果・考察】

2023年1月21日オーロラ:

分光器の高分散モード(表1のMode-1)による $\text{N}_2^+(0,0)$ バンドの観測例について示す(図1)。18:45UT前後にオーロラの活動度が上昇し、分光器では時間分解能30秒で非常に強い $\text{N}_2^+(0,0)$ バンドのオーロラ発光が観測された。発光強度は最大で40kRを超えており、イメージャで撮像されたバンド状のオーロラ発光の時間発展や絶対強度と整合的である。短波長赤外オーロラにおける分光及び単色イメージングの同時観測例は今まで無く、現在初期結果として論文執筆中である。また、オーロラ発光スペクトル中に N_2^+ 分子イオンの回転運動に起因する微細構造が見えており、今後 N_2^+ 分子イオンの回転温度の導出に取り組む予定である。

2022年11月24日大気光:

分光器の低分散での大気光観測モード(表1のMode-4)による観測例について示す(図2)。この観測モードでは、OH大気光の(7,4)及び(8,5)バンドに加えて、 O_2 のIRバンド(1.27 μm)の観測が可能であり、OH大気光はこの分光器で観測できる中で最も明るいバンドのため、OH回転温度を最も精度良く導出できる。図2の例では、1晩平均温度の推定における観測誤差は、OH(7,4)で16.5K程度、OH(8,5)で2.0K

程度であった。OH(8, 5)バンドについては、10分の時間分解能で5K程度の誤差で温度導出が可能である。

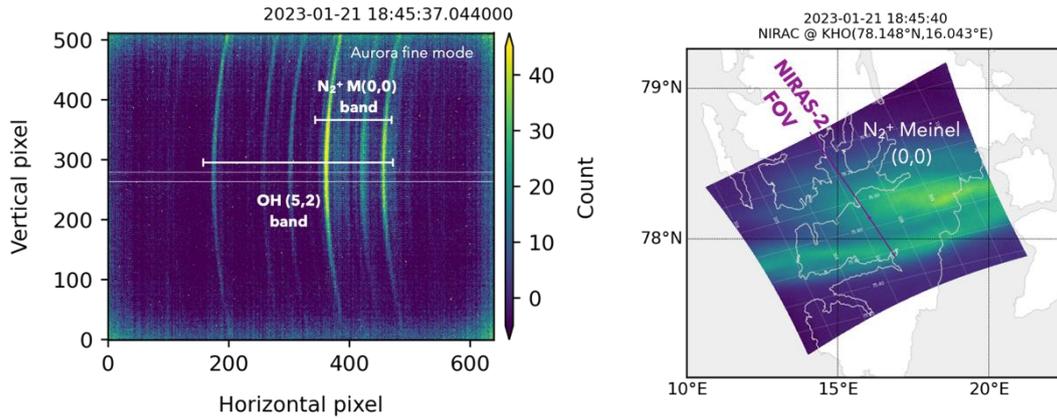


図1(左)分光器におけるオーロラ観測データ(右)イメージャーで撮像されたバンド状オーロラ

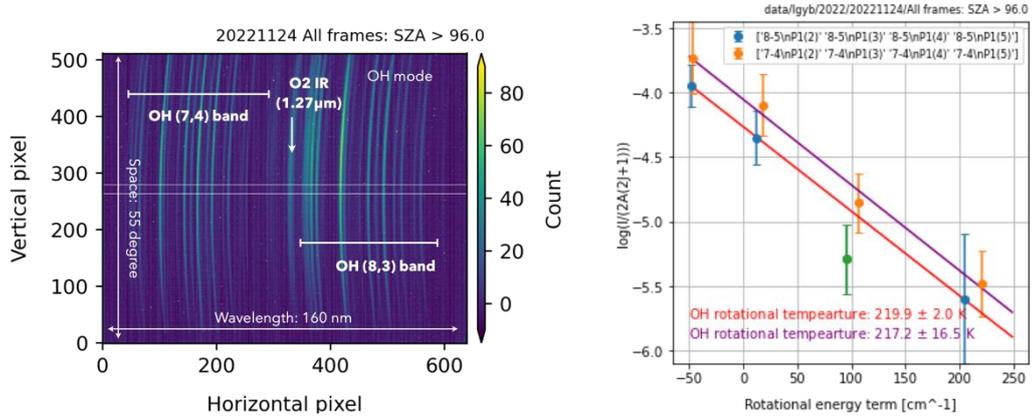


図2(左)分光器における1晩平均の大気光観測データ(右)回転温度導出のための Boltzmann

【まとめ】

2022年11月に分光器及びイメージャーをロングイアビンに設置し、概ね順調に運用を続けている。これまでに、分光器の異なるモードにおいて夜間オーロラ(N_2^+ 分子イオンや N_2 分子, O原子)を30秒の時間分解能で取得できている。大気光については、 $1.3\mu\text{m}$ 付近のOH(8, 5)バンドを中心に運用しており、10分時間分解能で5K程度の誤差で中間圏温度を導出可能である。イメージャーは $1.1\mu\text{m}$ のオーロラ発光に加えて、発光強度の弱いOH大気光の変動も撮像可能である。今後はESR同時観測イベントに着目し、分光器のデータにおける薄明時の背景光の除去手法を確立させ、薄明時/日照時のオーロラ検出に取り組む。

【成果発表】

- [1] Nishiyama et al., Spectroscopic and imaging observations of short-wavelength infrared (1.1-1.2 μm) aurora and airglow at Longyearbyen (78.2° N, 16.0° E) coordinated with EISCAT Svalbard radar, JpGU Meeting 2022, Hybrid, May 25, 2022
- [2] Nishiyama et al., A new spectroscopic and imaging observations of short-wavelength infrared (1.1-1.3 μm) aurora and airglow at Longyearbyen (78.2° N, 16.0° E) coordinated with EISCAT Svalbard radar: Ionospheric-atmospheric coupling in polar region, COSPAR 2022, Hybrid, 16-24 July, 2022
- [3] Nishiyama et al., A new spectroscopic and imaging observation of SWIR aurora and airglow (1.1-1.3 μm) at Longyearbyen with EISCAT Svalbard radar, SGEPSS秋学会, 相模原, 2022年11月4日
- [4] Nishiyama et al., A plan of new spectroscopic and imaging observation of short-wavelength infrared aurora and airglow (1.05-1.35 μm) at Longyearbyen (78.1° N, 16.0° E) coordinated with EISCAT Svalbard radar, The 13rd Symposium on Polar Science, Online, Nov. 15-18, 2022
- [5] Nishiyama et al., A new spectroscopic and imaging observation of short-wavelength infrared aurora and airglow (1.00-1.35 μm) at Longyearbyen (78.1° N, 16.0° E) coordinated with EISCAT Svalbard radar, ISAR-7, Hybrid, Mar. 6, 2023

(別紙様式 1-2)

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検討
Concept study and verification of TGF science using COSI MeV observatory

中澤知洋、名古屋大学素粒子宇宙起源研究所

1 : 研究目的

1990年代になって、雷活動から 30 MeV に達するガンマ線が放射されることが広く知られるようになった。人工衛星で発見された、雷放電と同期する突発ガンマ線 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、雷雲そのもの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)などで、雷雲中の静電場により電子がなだれ増幅しながら約 30 MeV まで加速される現象である。自然界に存在する唯一の静電場加速器として極めて重要であるにもかかわらず、加速原理が「逃走電子雪崩」(Grevitch+ 1989)という特殊な電場加速であることが分かっているのみで、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、高エネルギー物理学および大気電気物理学として重要かつ研究が始まったばかりの分野で、毎年のように観測的な発見が相次いでいる(Dwyer+ SSR 2012, Enoto+ Nature 2017, Wada+ PRL 2019, Wada+ PRG 2021 など)。最新の TGF 発生の理論モデルでは発生点における被曝量は 1 Sv に達するとされ、その実態の解明が重要となってきている (e.g. Melody et al, JGR 2021)。

日本海岸の冬季雷は雷ガンマ線の地上観測に最適で、我々は 2006 年から地上ガンマ線観測を続け世界の先端に立っている (Wada+ PRL 2019, Enoto+ Nature 2017, Wada+ PRD 2020, Hisadomi, Nakazawa+ JGR-A 2021 (一部、本予算で実施した研究成果))。宇宙からの TGF 観測では、Fermi 衛星、AGILE 衛星に加え、最近では ISS 搭載の ASIM 検出器が可視光とガンマ線の同時観測で成果を上げている。しかし既存の数千個もの TGF のデータをもってしても明らかに

できていないのが、TGF のガンマ線放射のビーム開口角 θ である。観測されるガンマ線強度が θ の-2乗でスケールすること、また θ は加速の物理そのものにも直接影響するため、観測的に決定することが重要である。2027 年 NASA が打ち上げ予定の MeV 宇宙観測衛星 COSI-SMEX 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 度と小さな Fermi との、TGF 多点同時観測の実現性が一気に高まり、ビーム開口角 θ を観測する決定打となりうる。

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 5 名が登録されている。このなかで、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。本研究計画は、BTO 開発支援を主とし、地上での雷ガンマ線観測の継続活動も一部実施する。



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。

3：研究結果と考察

軌道上で重粒子宇宙線に晒された時に、シンチレータからは時定数の長い発光(アフターグロー)が出るが、時定数が ms 程度と長い場合には、TGF や short GRB の一部との区別も容易ではなく、実際に使用する予定のシンチレータとプリアンプでこれを実測することは重要である。2022年6月17-18日に量子科学技術研究開発機構(旧放医研)にて、BTO 試作機に高エネルギー炭素とヘリウムを当て、フライト品の候補検出器とプリアンプ回路の応答を確認した。この結果、CsI(Tl)では要求を達成できず、NaI(Tl)が必要なことを確認した。また我々は、COSI サイエンス検討の議論を進めており、TGF 観測の可能性最大化のために必要な観測性能要求の抽出を進めてきた。COSI のメイン検出器 (Ge 半導体コンプトン望遠鏡) と BTO でも観測を検討を進めている。

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た指向性観測に挑戦している。中性子施設で得られる即発ガンマ線を用いて性能検証をした上で、2022年度の冬季から観測を開始しており、現在データ解析中である。

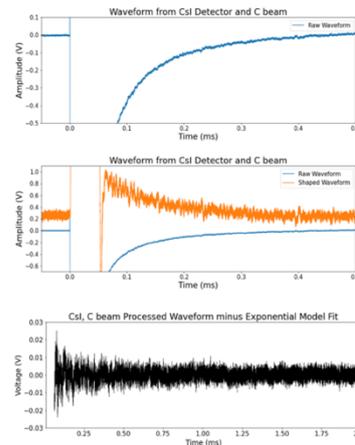
4：まとめ

COSI 衛星の日本チームとしての参加、特に TGF 観測の視点でのサイエンス検討と要求仕様策定は予定通り進んでいる。BTO 検出器の設計指針も得られ、2023年度は衛星搭載回路設計を用いた試験を予定している。呼応する下向き TGF の地上観測でも指向性観測に挑戦し、最初の観測を始めている。

[成果発表]

- Gulick, Hannah et al. "The Background and Transient Observer: A Gamma-ray Detector System for Time-Domain Astrophysics", American Astronomical Society Meeting #241, id. 120.08., the Seattle Convention Center, 8-12 January 2023
- Tomsick, John et al. "The Compton Spectrometer and Imager", American Astronomical Society Meeting #241, id. 146.06., the Seattle Convention Center, 8-12 January 2022
- 大熊佳吾 et al. "雷活動に由来するガンマ線の観測プロジェクト：コリメータ検出器で観測された3つの Gamma-ray Glow の比較", 日本物理学会 2022 年秋季年会 岡山理科大学, 2022/09/08
- 大熊佳吾 et al. "2020 年度冬季および 2021 年度冬季に 高度測定用検出器 GOOSE で得られた 2 つの雷ガンマ線グローの解析", 日本地球惑星科学連合 2022 大会、幕張/オンライン、2022/06/02
- K. Nakazawa, "X-ray to MeV astrophysics with XRISM, COSI and beyond", The 5th KMI International Symposium (KMI2023), February 21, 2023, Nagoya University

Cイオンを用いたCsIからの信号の例



Cイオンを用いたNaIからの信号の例

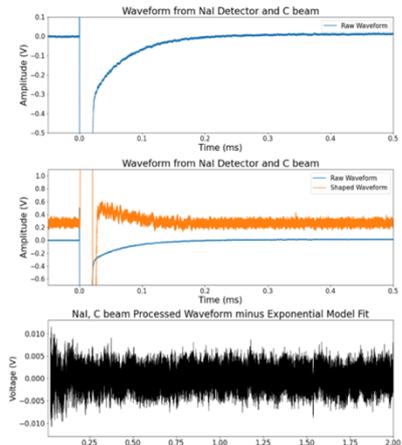


図1: HIMAC における C イオン照射時に、CsI および NaI からの信号出力と、そこにみられる afterglow 成分。

(別紙様式 1-2)

長距離輸送中におけ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 during long range transportation

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】

1) 試料採取

2022年と1月の冬季と4月の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)とTouji 島(中国)で2週間に1日1回のサンプリングを行う予定だった。しかし、冬季の沖縄は新型コロナの感染拡大に伴って、CHAAMS の使用ができなくなったため、サンプリングはできなかった。その代わりに、長崎大学屋上でサンプリングを行った。春季は新型コロナの感染者が減少したため CHAAMS の使用が可能となり、中国、長崎と沖縄でサンプリングを行った。3地点での大気観測終了後は、沖縄のみ4月から6月まで週に1回のサンプリングを行った。2023年は1月と3月に2週間に1日1回のサンプリングを中国、長崎と沖縄の3地点で行った。

1) SOA の分析手法の改良

2-1) 大気試料を Chen et al. (2016)の方法を用いてカラムにより有機成分を4分画し抽出した(疎水性有機物、水溶性有機物、酸性性フミン様物質、中性フミン様物質)。今回の報告では沖縄で4月から6月まで週に1回のサンプリングした試料を用いて分画を行った。分画された各々の有機物の主要な官能基をFT-IR によって解析した。

【結果と考察】

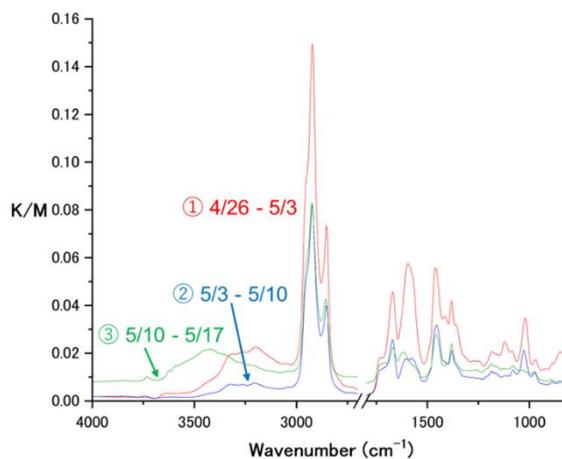
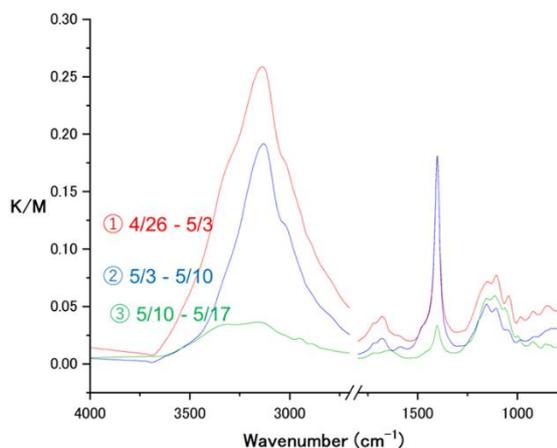
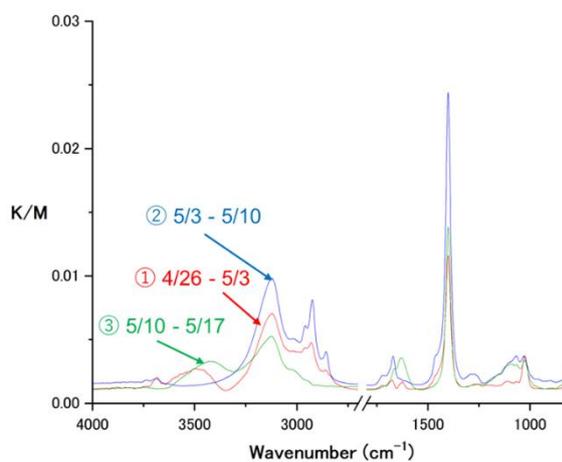
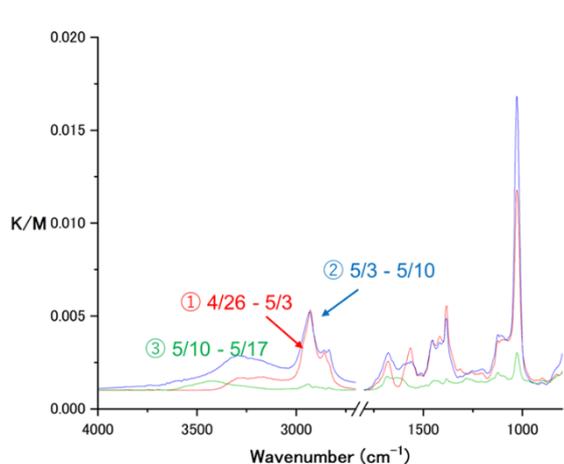
図1に中性フミン様物質、酸性フミン様物質、水溶性有機物、疎水性有機物のFT-IRのスペクトルを示した。中性フミン様物質の 1027 cm^{-1} に見られたピークはアルコールのO-H伸縮振動によるものであった。他の分画した試料のスペクトルからは見られなかったことから、このピークは中性フミン様物質に特徴的なものであると考えられる。また、 $1600\text{ cm}^{-1}\sim 1700\text{ cm}^{-1}$ 付近にはC=Oによる吸収も見られた。 2857 cm^{-1} のピークは $-\text{CH}_2$ のC-H伸縮振動によるもの、 2931 cm^{-1} のピークは $-\text{CH}_3$ のC-H伸縮振動によるものであった。 $1000\text{ cm}^{-1}\sim 1400\text{ cm}^{-1}$ 付近にはC-Oの伸縮振動による吸収が見られ、 1027 cm^{-1} のアルコールのような明確なピークは見られないが、エステル、エーテル、カルボン酸などのC-Oを持つ構造による吸収である可能性が考えられる。

酸性フミン様物質のスペクトルでは、 $1000\text{ cm}^{-1}\sim 1200\text{ cm}^{-1}$ 付近にC-Oによる吸収、 $1600\text{ cm}^{-1}\sim 1700\text{ cm}^{-1}$

¹付近に C=O による吸収が見られた。2854 cm⁻¹ のピークは -CH₂ の C-H 伸縮振動によるもの、2923 cm⁻¹ のピークは -CH₃ の C-H 伸縮振動によるものであった。特に 1402 cm⁻¹ のピークはかなり強いピークが出ているにも関わらず、先行研究、その他の参考資料からも官能基の特定はできなかった。1400 cm⁻¹ 付近には C-O 伸縮振動、O-H 変角振動などが吸収を持つことが知られている。

水溶性有機物のスペクトルでは 1000 cm⁻¹~1200 cm⁻¹ 付近に C-O による吸収、1600 cm⁻¹~1700 cm⁻¹ 付近に C=O による吸収が見られた。このスペクトルでは 3000 cm⁻¹~3400 cm⁻¹ 付近に水の O-H による吸収が大きく見られたことが特徴的であった。また、酸性フミン様物質と同様に 1402 cm⁻¹ に強いピークが見られたが、官能基の同定には至らなかった。

疎水性有機物のスペクトルでは、1000 cm⁻¹~1200 cm⁻¹ 付近に C-O による吸収、1600 cm⁻¹~1700 cm⁻¹ 付近に C=O による吸収が見られた。1380 cm⁻¹ のピークは -CH₃ の対称変角振動、1460 cm⁻¹ のピークは -CH₃, -CH₂ の C-H 変角振動、2854 cm⁻¹ のピークは -CH₂ の C-H 伸縮振動、2923 cm⁻¹ のピークは -CH₃ の C-H 伸縮振動によるものであると考えられる。他のスペクトルに比べ、より多くの C-H による吸収が見られたことから、豊富な炭化水素基を含んでいる可能性が考えられる。



シアーク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

研究代表者 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。本研究では、特に、シアーク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。

2023 年中に EISCAT_3D レーダーの稼働が実現の見込みとなっている。EISCAT_3D は、従来の 10 倍以上の性能を有し、電子密度、イオン温度、イオン速度、電場、電流の観測精度は飛躍的に向上する(世界で初めて電離圏物理量を、秒オーダーの時間分解能、10 km の空間分解能で立体的に導出できる)。また、数値モデルの改良も随時進められており、両者の融合により、電場増大に伴う局所的な電離圏・熱圏変動の新たな描像が得られるものと考えている。

研究方法(計画) (使用した共同研究利用装置・施設等を含む)

*EISCAT 観測 他

ロングイアビン、トロムソでのレーダー同時観測を実施する(国立極地研究所 EISCAT 特別実験に申請)。午前～昼側での電離圏変動に着目し、07:00-13:00 UT における観測を実施する。これにより、極冠域からオーロラ帯に至る広範な領域での電離圏変動のいくつかを観測的に理解する。これまでの当グループの EISCAT 特別実験データとの比較のため、1～3 月での観測が好ましく、研究代表者、共同研究者の学務等を考慮し、2～3 月に特別実験を実施する。また、共同研究者グループは、ESR, KST サイトにて光学観測を実施していることから、本実験ではこれらとの同時期の観測を行う。

*GCM シミュレーション

観測結果を踏まえ、様々なエネルギー流入に対する熱圏応答のシミュレーションを実施し、昼側極冠域近傍での高速熱圏風や伝搬性擾乱の励起・伝搬等の熱圏変動について調べる。熱圏大気微量成分モデルにより、極域への粒子降下に起因する大気微量成分の生成量を計算する。また、GCM による計算から熱圏大気変動を推定する。主に、藤原、三好が GCM シミュレーションを実施し、結果を吟味する。

研究結果

*これまでの EISCAT レーダー観測データの解析、および過去の観測との比較

地磁気静穏時の特徴として、北向きの ESR 観測(32m アンテナ観測)ではイオン速度変動や急激なイオン温度変動が見られ、その他ではほぼ静穏な電離圏が観測される。ESR 沿磁力線方向や、地磁気擾乱時のトロムソ上空では高エネルギー粒子の降込みも観測された例があった。これらの結果について、これまでの観測結果の整理と、GCM シミュレーションの準備を行った。

*GCM シミュレーション

地磁気静穏時・擾乱時の極域加熱を再現するためのエネルギー流入のモデル化について検討を行った。主に極域電場と、降下粒子の影響を既存の GCM へ組み込むことが必要であり、米国を中心とした最新の研究成果等を調査した。

EISCAT レーダー特別実験

コロナ禍の終息を期待して、藤原、野澤がトロムソに赴き、2023年3月に特別実験を実施する予定であったが、依然としてコロナ禍の影響のため学務等の調整が困難となり、レーダーサイトの EISCAT スタッフに依頼し、2023年3月27日の8:00-14:00 UT に EISCAT 特別実験を実施した。ESR 32m アンテナの不調により、ESR 42m アンテナ、トロムソ UHF レーダー観測のみの実施となった。本観測期間、地磁気活動は静穏であったことから、これまでに取得した静穏時データとの比較研究を進めたいと考えている。

本研究課題に関連した主な成果発表 (学会発表等)

藤原 均・三好 勉信・片岡 龍峰, Thermospheric mass density variations at altitudes between 150-250 km, 地球惑星科学関連学会連合大会 (JpGU-AGU Joint Meeting), 5月, 幕張/オンライン, 2022.

三好 勉信・陣 英克・品川 裕之・埜 千尋・藤原 均, 大気圏-電離圏結合モデルによる大気上下結合研究, 地球惑星科学関連学会連合大会 (JpGU-AGU Joint Meeting), 5月, 幕張/オンライン, 2022.

品川 裕之・三好 勉信・埜 千尋・陣 英克・藤原 均, イオノゾンデ観測で得られる foEs データを用いた GAIA の改良, 地球惑星科学関連学会連合大会 (JpGU-AGU Joint Meeting), 5月, 幕張/オンライン, 2022.

陣 英克・埜 千尋・三好 勉信・品川 裕之・藤原 均, Data assimilation of GAIA model using TEC and satellite ionospheric observations, 地球惑星科学関連学会連合大会 (JpGU-AGU Joint Meeting), 5月, 幕張/オンライン, 2022.

藤原 均・野澤 悟徳・小川 泰信・三好 勉信, Changes in the polar cap thermosphere/ionosphere during geomagnetically quiet periods, 地球惑星科学関連学会連合大会 (JpGU-AGU Joint Meeting), 5月, 幕張/オンライン, 2022.

小川 泰信・宮岡 宏・野澤 悟徳・橋本 大志・大山 伸一郎・西村 耕司・津田 卓雄・藤原 均・堤 雅基・田中 良昌・西山 尚典・中村 卓司・藤井 良一, Japan's Activities for the EISCAT_3D Project. 地球惑星科学関連学会連合大会 (JpGU-AGU Joint Meeting), 5月, 幕張/オンライン, 2022.

品川 裕之・埜 千尋・陣 英克・三好 勉信・藤原 均, リアルタイム GAIA を用いたプラズマバブル発生予測システムの開発, 第150回地球電磁気・地球惑星圏学会, 相模原, 2022年11月.

(別紙様式 1-2)

機械学習を用いた磁力線共鳴振動周波数の自動同定と
プラズマ圏長期モニタリング

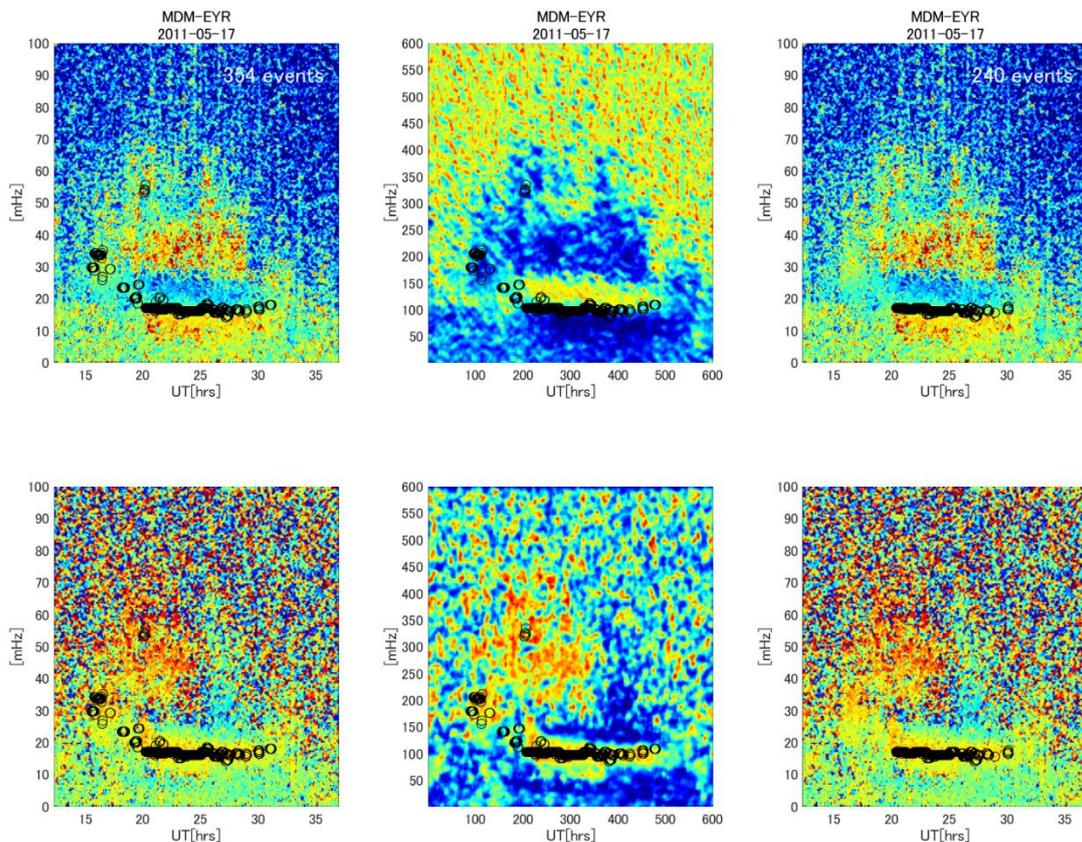
Long-term monitoring of the plasmasphere and automated detection of the FLR frequency using machine learning

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、我々が2011年からニュージーランドに展開している地磁気観測網で得られた約10年分の地磁気データを機械学習によって解析し、磁力線共鳴振動周波数の自動検出手法を確立することを目的とした。

2021年度までに、Middlemarch観測点とEyrewell観測点で得られた地磁気データを、ニューラルネットワークを用いて解析し、磁力線共鳴振動に特徴的な位相差・振幅比の構造が検出できるか否かの判定を行う分類モデルを構築した。2022年度は、この分類モデルを、既存の磁力線共鳴振動周波数検出アルゴリズム(Berube et al., 2003)と組み合わせて使用することで、磁力線共鳴振動を高精度に検出する手法を開発した。

図1 - 4は、2011年5月17日12時から翌18日12時までの間にニュージーランドの地磁気観測点Middlemarch (MDM)とEyrewell (EYR)で観測された地磁気データをBerubeのアルゴリズムで解析し、検出された磁力線共鳴振動周波数を黒丸でプロットしたものである。それぞれMDM-EYRパワー比(図1)、MDM-EYR位相差(図2)、パワー比の画像に対するニューラルネットワークモデルのClass Activation M



apping (CAM) (図3)、位相差の画像に対するCAM (図4)に重ね合わせてプロットしている。

5月17日20時から翌18日6時頃にかけて、17mHz付近に磁力線共鳴振動が表れており、Berubeのアルゴリズムもその時刻・周波数に多数のイベントを正しく検出している。一方で、5月17日15-20時頃にかけて20-55mHzに多数の「誤検出」イベントがある。この誤検出イベントを取り除くことが磁力線共鳴振動自動検出モデルの構築を行う上で最重要な課題となっている。CAMの特徴を解析したところ、磁力線共鳴振動が正しく検出されている時刻において、パワー比のCAMが磁力線共鳴振動の低周波数側で極小、高周波数側で極大を取り、また位相差のCAMは磁力線共鳴振動周波数付近で極大をとることが明らかになった。よってこの特徴を持たないイベントを誤検出とみなして取り除くこととした。その結果を示したのが図5, 6である。それぞれパワー比、位相差に重ね合わせてプロットしている。イベント数が354から240に減り、誤検出がすべて取り除かれていることがわかる。

これらの成果は以下の学会・論文誌等で発表された。

【論文等】

- [1] 才田 聡子, 尾花 由紀 (2019), 'データサイエンス教育の題材としてのオープンデータ可視化ツールの開発', 情報教育シンポジウム論文集, 2019, 17-23 (2019-08-10).
- [2] 尾花由紀, 才田聡子 (2019), '地磁気データのリアルタイム送受信システムの開発 Development of a Real-Time Data Transmission System for Geomagnetic Data', 大阪電気通信大学研究論集 (自然科学編) 第54号.
- [3] Obana, Y., Miyashita, Y., Maruyama, N., Shinbori, A., Nosé, M., Shoji, M., A. Kumamoto, F. Tsuchiya, S. Matsuda, A. Matsuoka, Y. Kasahara, Y. Miyoshi, I. Shinohara, W. S. Kurth, C. W. Smith and R. J. MacDowall (2021). Field-aligned electron density distribution of the inner magnetosphere inferred from coordinated observations of Arase and Van Allen Probes. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126, e2020JA029073. <https://doi.org/10.1029/2020JA029073>

【学会発表等】

- [1] Saita, Satoko, Akiko Fujimoto, Yuki Obana, 'Identification of Field Line Resonances using Machine Learning Algorithms', The 12th Symposium on Polar Science, 15 - 18 November 2021, Online.
- [2] 尾花 由紀, 才田 聡子, 藤本 晶子, 機械学習を用いた磁力線共鳴振動周波数の自動同定とプラズマ圏長期モニタリング, 2021年度ISEE共同利用・共同研究 コミュニティ・ミーティング, 2021年8月5日, Online.
- [3] Akiko Fujimoto, Yuki Obana, Satoko Saita, 'Seasonal Variation in Plasmaspheric Mass Density in the New Zealand Meridian', American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, 9-13 Dec, 2019 (15 Dec Poster), San Francisco, USA.
- [4] Saita, Satoko, Akiko Fujimoto, Yuki Obana, 'Performance of Rule-based and Machine Learning Algorithms for Field-line Resonances Identification', 03 Aug 2022, Asia Oceania Geosciences Society 19th Annual Meeting, Oral, Online.
- [5] Satoko Saita, Yuki Obana and Akiko Fujimoto, 'ニュージーランド地磁気観測データへの機械学習アルゴリズム適用による地磁気脈動活動の判別精度向上について (Verification of Machine Learning Techniques for Identification of Field Line Resonances)', ISEE Workshop in FY 2022 「ジオスペースの低エネルギープラズマ研究会集 (Workshop on Low Energy Plasma in the Geospace)」 22 Sep 2022, Nagoya.

(別紙様式 1-2)

最高精度宇宙線ミュオン望遠鏡による宇宙天気観測
Space Weather observation by the highest accuracy cosmic-ray muon telescope

小井 辰巳、中部大学・工学部

【研究目的】

惑星間空間磁場における磁気旋回半径が0.1~1AU程度という銀河宇宙線を利用した宇宙天気研究の進展が目的である。

【研究方法】

日印共同宇宙線実験GRAPES-3のミュオン望遠鏡は、大面積による高精度、広視野でありながら、他の宇宙線地上観測装置に比べて圧倒的な高方向分解能を持っている。このGRAPES-3のミュオン望遠鏡の22年間、2太陽周期に亘る観測結果を解析することによって、静穏時の銀河宇宙線の太陽圏内での伝播にかかわる基礎的な物理量を導くとともに、その変動を調べることによって、宇宙天気に関わる地球近傍での突発的な現象についても、惑星間空間磁場や太陽風プラズマの速度などといった他の測定量との関係性を探る。またGRAPES-3のミュオン望遠鏡と同様の方向分解能をもつ装置を日本国内に建設することによって、地球近傍における宇宙天気の突発的な現象の多点同時観測を目指している。

【研究結果】

GRAPES-3のミュオン望遠鏡の高方向分解能は、宇宙線の地球磁場との相互作用と相成って、異なる剛度、すなわち、エネルギーの銀河宇宙線の測定を行っていることに通じる。インドから、Gupta氏とBalakrishnan氏を招聘し、GRAPES-3のミュオン望遠鏡の22年間2太陽周期に亘る長期間のデータを、太陽電波強度に基づいて、太陽活動度別に分類して、それぞれにおける、太陽宇宙線強度変動と、太陽風速度の関係について研究を行った。この結果については、現在、論文としてまとめているところである。また、地球近傍における宇宙天気の突発的な現象についてGRAPES-3のミュオン望遠鏡と同時観測を目指して東京大学宇宙線研究所明野観測所で運用している装置について、その気圧データ欠落を補完する方法に関しての報告を行った。

【成果発表】

1. 「GRAPES-3空気シャワー観測の全体報告」、大嶋晃敏、小島浩司、野中敏幸、田中公一他、2022年9月、日本物理学会2022年秋季大会、6aA124-1
2. 「GRAPES-3実験における大型NaI検出器の導入について(6)」、田中公一、小島浩司、大嶋晃敏、野中敏幸他、2022年9月、日本物理学会2022年秋季大会、6aA124-2
3. 「大面積高精度muon望遠鏡による方位別宇宙線強度変動の研究(29)」、小島浩司、大嶋晃敏、野中敏幸、田中公一他、2022年9月、日本物理学会2022年秋季大会、8pA125-9
4. 「GRAPES-3 Muon Telescopesによる宇宙線強度変動の観測(7)(多点同時観測に向けて)」、野中敏幸、大嶋晃敏、小島浩司、田中公一他、2022年9月、日本物理学会2022年秋季大会、8pA125-10
5. 「大面積高精度muon望遠鏡による方位別宇宙線強度変動の研究(30)」、小島浩司、大嶋晃敏、野中敏幸、田中公一他、2023年3月、日本物理学会2023年春季大会、23pW2-3
6. 「地上ミュオン観測における気圧変動の効果」、小河蒼太、大嶋晃敏、小島浩司、野中敏幸、田中公一他、2023年3月、日本物理学会2023年春季大会、23pW2-4

僻地へ展開可能な多方向宇宙線モニターによる惑星間擾乱観測
Observation of Interplanetary Disturbances with a Multi-
directional Cosmic Ray Monitor Deployable to Remote Areas
研究代表者 野中敏幸、所属：東京大学・宇宙線研究所

研究背景・目的

地上の宇宙線観測装置を用いた、低エネルギーの銀河宇宙線の強度変動と異方性の観測を通して太陽活動による惑星間空間の状態の変化を観測する手法が存在する。[1,2,3,4] 現在、展開されているミュオン計は、信州大学グループによる GMDN、インドタミルナド州に設置されている GRAPES-3 ミュオン望遠鏡[5]、長期にわたって安定して稼働している名古屋大学ミュオン望遠鏡が主な装置として存在する。

私たちは米国ユタ州の高地に約 700 平方キロの面積に展開された 1 台 3 平米の 2 層式シンチレーション粒子検出器 508 台を 1.2km 間隔で設置し平均稼働率 95%を維持しながら 2008 年から 13 年間運用している。本研究の目的はこれまでの $1500m^2$ の検出器での時系列での強度変動の測定を継続しつつ、現存する地上での宇宙線ネットワーク観測網の過疎地である北米大陸に、方向分解能を加えた装置を安価に Off-Grid で安定稼働させる方法を確立する事である。

研究方法

前述した本研究の目的にあるように、Off-Grid に装置を設置し、既存の宇宙線モニター装置と同等なデータが得られた場合のデータを想定する事、検出器を構成するものに必要な部分を試作するなどを進めている、

研究結果

本年度、事前に予想された通り、秋ごろまで COVID-19 の影響により実験環境にはさまざまな制限が多い状態が続いた。このため 国内で可能な作業に着目して作業を進める事を計画した。

1. 山梨県北杜市明野町にある東京大学宇宙線研究所 明野観測所にて Telescope Array 実験と同様のデータ取得システムを（無線データ収集 Host + ネットワーク）を構築した。作業が間に合わず、肝心の 比例係数菅の安定した制作手順を試してみる事は出来ていない。
2. 既存の装置（方向分解能が無い）についてのデータ解析を進めた。
複数台のミュオン計が稼働している際に、不具合による検出器の変動を考慮し利用できる検出器を選別（そしてなるべく台数を最大化）する処理を制作。ユタ州での観測実験のデータにそれを適応し、昨年度宇宙線国際会議で報告した高層大気に対する応答[6] を加味し 結果として 400 台余りの検出器を用いた観測データとして 宇宙線の強度変動を抽出した。同経度にある、南半球の Auger 実験の計数データと比較可能なデータを得られることが分かった。
この結果は 2022 年 9 月に日本物理学会の秋季大会で報告した。

3. インド GRAPES-3 実験での多方向計の応答関数のシミュレーションと同等なもの
の再制作を進めている。

期待される成果：

僻地で運用可能な方向弁別機能を持つ宇宙線計によって、方向毎の情報を持つ観測点
が北米に確保する事ができる。これにより、全球的に展開された観測網による事象の再
構成での異方性振幅の評価精度が向上すると期待される。
これによりこれまでの観測にかかる閾値に満たなかった振幅の前兆現象、その他の減少
を GRAPES-3、GMDN 検出器 などの検出器によってとらえる事が可能になると期待される。

成果発表(2022年度)

学会報告

日本物理学会 2022年秋季大会 6pA124-8 TA実験392：TA地表検出器による銀河宇宙線強度変
動の観測(2)

参考文献:

- [1] K. Munakata et al. Butsuri-Tansa Vol.65 No. 3 (2012) pp. 173-179
- [2] Kozai et al. Earth, Planets and Space 66:151 (2014)
- [3] K. Munakata, J. Geophys. Res., 105(A12), 27457- 27468
- [4] K. Nagashima and K.Fujimoto et al.,Planet space sci (1992) 40 1109
- [5] T. Nonaka PhD thesis Osaka City University (2005)
- [6] T.Nonaka et al. Proceedings of 37th international cosmic ray conference, Po
S(ICRC2021)1255

(別紙様式 1-2)

内部太陽圏探査のための BepiColombo 磁場観測
Study of inner heliosphere by BepiColombo magnetic field experiment

松岡彩子、京都大学・理学研究科

【研究背景・目的】

日欧共同の水星探査ミッションである BepiColombo は 2018年10月に打ち上げられた。2025年12月の水星到着までの約7年間、日本で JAXA 宇宙科学研究所によって開発・製造された「みお」および ESA が担当した Mercury Planetary Orbiter (MPO)、推進モジュール(MTM)がスタックした状態で惑星間空間を巡行する。これまで1回の地球フライバイ、2回の金星フライバイ、1回の水星フライバイを行い、最接近時刻を中心として観測データを取得している。2022年には、6月に2回目の水星フライバイが予定されている。

2つの探査機のそれぞれに2式ずつ磁場観測器が搭載され、惑星間空間の磁場の観測を行っている。MPO に搭載された磁力計のブームは伸展されているが、「みお」の磁力計マストは水星周回軌道投入まで収納された状態である。このため特に「みお」搭載の磁場観測器は探査機が出すノイズの影響を受けやすく、フライバイ時の惑星周辺磁場や惑星間空間磁場を精密に測定する万全の状況とは言えない。更に、スタック状態であることが要因となり MPO に搭載された磁力計のデータについてもノイズの分離など慎重な評価が必要となっている。現在 BepiColombo の磁場チームでは、計4式の磁場観測器のデータを組み合わせることにより探査機が出すノイズを適切に評価し、惑星周辺や太陽風を研究する目的を満足する精度を持つデータを出すことが出来るという認識を持っている。困難な条件にあるデータの較正、ノイズ除去を行い、惑星周辺の磁場構造に関する研究を推進する。

【研究方法と結果】

本研究では、(1) BepiColombo 「みお」磁場データ処理・解析と、水星周回軌道投入後のデータをコミュニティで使用されるようにデータベース化するための準備作業 (2) 「みお」および MPO 惑星フライバイ時の磁場データによる、惑星周辺の磁場構造の研究の推進 を行った。

(1) は、「みお」搭載磁場観測器の2式のセンサの位置の違いによる探査機磁場ノイズの影響の違い、MPO 搭載磁場観測器のセンサ位置における探査機磁場ノイズの影響を評価することによって、自然界の磁場と人工的なノイズを分離する手法を開発した。また、水星周回軌道投入後に速やかにデータを BepiColombo および関連する研究者コミュニティに提供するために、「みお」磁場観測器のテレメトリデータを処理して較正するパイプラインの準備作業を行った。ノイズ分離の手法の開発とパイプライン準備作業は、代表者(松岡)と David Fischer 博士が行っている。Werner Magnes 博士は磁場観測器ハードウェアの観点からのデータ評価、Daniel Heyner 博士は MPO による磁場観測器データの解析を担当した。

(1) で開発した手法により、2021年10月および 2022年6月の水星フライバイ時のデータからノイズを除去し、磁場観測チームで共有するとともに、同時のプラズマ観測データの解析を行う研究者に提供した。これにより、水星フライバイ時の水星近傍・周辺におけるプラズマ・電磁環境の理解を進めることが出来た。

新型コロナウイルスの影響は徐々に軽減されてきたものの、2022年度も依然として海外への出張が困難な状況にあった。研究費は、オンラインで会議を行うための機材購入に使用し、海外の共同研究者と密に議論をしながら作業を進める環境を整備した。11月には神戸大学で対面で BepiColombo サイエンスチーム会合が開催され、ヨーロッパメンバーが来日して参加し、久しぶりに対面で打合せすることが出来た。また、東北大学で開催された惑星圏シンポジウム 2023 に参加し、「みお」の磁場データ解析について打合せをしたほか、水星を含めた惑星探査の将来計画に関する議論に参加した。

【考察とまとめ】

水星フライバイの貴重な機会のデータからノイズを除去し、科学研究への使用が可能な質を持つデータを生成できたことは大きな成果であった。この成果をさらに発展させ、今後のフライバイ観測においても、海外メンバーと協力して有益なデータの取得と解析を推進する。

(別紙様式 1-2)

北極域ナトリウムライダー中性大気温度・風速計測の拡張観測：
中間圏界面(80-115 km)から下部熱圏領域(<200 km)へ
Widening the sodium wind/temperature lidar observation
range from 80-115 km up to 200 km

川原琢也、信州大学・工学部

□ 研究目的

ノルウェートロムソ観測所のナトリウム(Na)ライダーは、2010年10月から2019年12月まで下部熱圏・上部中間圏(80-115 km)のNa層の観測を行ってきた。本研究では、通常のNa層より高高度200 kmまで広がる低密度のNa原子を観測対象とし、従来のNa層(80-115 km)を含めて、観測領域を高高度200 kmまで拡張することを最終目標とする。低密度(数十個/cm³)のNa原子からの微弱な散乱光を観測するためには、夜間の微弱な背景光さえも除去する超狭帯域光学フィルタ(ファラデーフィルタ)の開発を進めるのが本課題の目的である。

□ 研究手法

ファラデーフィルタ実現の課題は、透過帯域が約2 pm(市販品のフィルタ帯域は~1 nm)の超狭帯域の透過特性を計測するための計測システムの構築と、計測したフィルタ透過特性の安定性評価を行うこと、である。本研究ではプロトタイプファラデーフィルタ(中心磁場245 mT、ガラス製Naセル)を用いて、理化学研究所に構築した589 nmレーザ光源で透過率計測を行い、フィルタ透過特性計測と計測システムの検証を行った。

□ 計測システム

構築した計測システムの構成は、波長スキャン可能な589 nmレーザ光源と、Naライダー観測で用いている絶対波長モニターのためのDoppler Free飽和分光システムである(Fig.1(a))。レーザ光源は、近赤外波長の2種の分布帰還型(distributed feedback:DFB)レーザを混合して和周波発生(589 nm光源(出力数μW))を用いた。DFBレーザは、従来レーザ光源と比べて、波長選択性や安定性の観点で利点があるが、和周波発生で得られる出力が低いことが難点である。以上の研究は、ISEE2022年度一般共同研究「共鳴散乱ライダーシステムにおける絶対周波数基準の為の飽和分光実験」(代表者津田卓雄)と連携している。

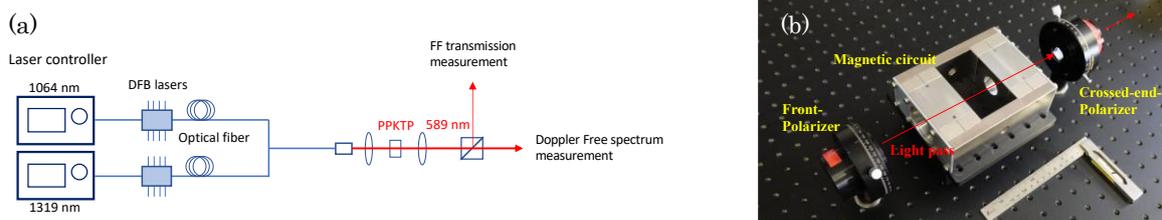


Fig.1 (a) 1064 nmと1319 nmのDFBレーザを用いた和周波技術による589 nmレーザ発生システム。光を分岐して、飽和分光法による絶対波長計測とファラデーフィルタ透過率計測を行う。(b) プロトタイプファラデーフィルタ。

ファラデーフィルタの構成は、直交する偏光プリズムの間に強磁場回路を設置し、そこにガラス製Naセルを配置し加熱温度制御を行う。589 nm光源の波長スキャンは、ファンクションジェネレータを用いて1064nmレーザコントローラへ三角波の電圧印加で外部制御を行い、波長スキャン範囲(三角波電圧の最大値と最小値で決まる範囲)を30Hzで正負方向にリニアに連続スキャンを行う。光ディテクタにはメタルパッケージPMTを用い、電圧印加に同期してフィルタの透過光強度の計測を行う。PMTで計測される光強度は、三角波と同期をとってデジタルオシロスコープに表示され、解析用にデータ保存可能である。あらかじめ計測しておいた最大透過光強度を用いて透過率に変換し透過率プロファイルを得る。尚、本

システムの波長分解能（約0.03 pm）ではDoppler Free飽和分光で得られる絶対波長スペクトルの超微細構造（約0.001 pm）は十分に得られないが、絶対波長校正に必要なスペクトルを得るには問題ない。

□ 結果

Fig.2(a)には Na セルの温度を変化させて計測した透過率測定の結果を示す。横軸は波長校正されていないデータナンバーで示し、縦軸は相対強度を示す。温度を変化させると蒸気状態の Na セル内の原子密度が変わる。透過特性はセル温度により非常にダイナミックに形状を変える。一方、セル温度が 0.1°C の精度で一定値に制御されていても、ガラス材質と高温における Na 蒸気の化学反応性が影響し透過特性に大きく変化が生じる。このため、新たなセルの開発に関して本研究課題で報告をしてきた。Fig.2(b) は縦軸を透過率、横軸が Na D_{2a} ピーク波長(589.1583nm)を中心とした相対周波数で表した図を示す(赤のプロット)。以下に考察する。

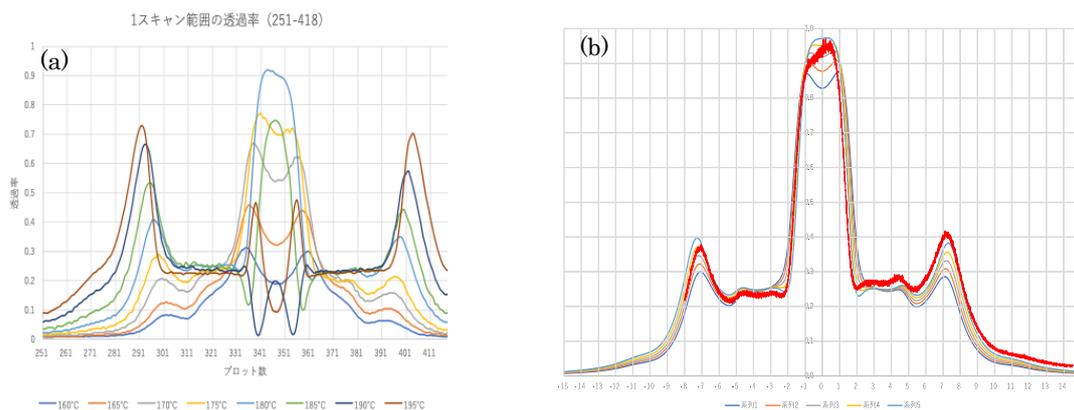


Fig.2 (a) セル温度160°Cから195°Cまで5°Cずつ変化させて計測した透過光強度。(b) セル温度180°Cで計測された透過率に、シミュレーションの透過率を重ねた。シミュレーションで設定した温度は172°Cから176°Cまで1°C間隔。

□ 考察

Fig.2(b)の透過率と理論シミュレーションとの比較から考察を行う。比較の結果をまとめる。

- (1) Doppler Free スペクトルから決定した周波数目盛で実験結果をプロットすると、透過率形状の中心軸がグラフの $\nu = 0$ GHz の軸に合わない。
- (2) 理論では $\nu = \pm 7$ GHz 付近の小ピークは $\nu = 0$ GHz 軸に対して対象の位置となるので、実験結果の小ピークの間周波数を $\nu = 0$ GHz に合わせると、形状の透過率ピークが $\nu = 0$ GHz 軸からずれる。
- (3) 実験結果の透過率形状に関して、周波数の負の側は理論よりも低めに、周波数正の側は理論よりも高めとなっており、周波数ごとの透過率補正がうまくいっていない。
- (4) 実験結果の中心透過率ピークが、欠ける。また、欠け方に対称性がない。

レーザの周波数スキャンに関しては、外部からの制御に対してレーザ結晶の温度変化がリアルタイムで追従しない問題がわかっている。透過率補正に関してはレーザ強度の周波数依存性があることがわかっており、これらの課題を慎重に解決していく必要がある。

□ まとめ

本研究では、ファラデーフィルタの透過率計測を行い、理論シミュレーションと比較することで計測結果の評価をしつつ計測システムの課題の考察を行なった。トロムソにある589 nm光源に加え、国内で超狭帯域フィルタの透過率評価システムが稼働したことは大きな成果である。課題は残されているが、順次克服しつつ開発を進めていく。

(別紙様式 1-2)

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

木星衛星イオは、太陽系内で最も活発な火山活動を有し、 SO_2 を主成分とする希薄な大気 ($\sim 10^{-3}$ Pa– 10^{-4} Pa) と表面 (~ 120 K– 80 K) の広域に SO_2 の霜が存在する。イオ表面における SO_2 霜の分光学的性質や熱特性などを明らかにするために、イオ表面環境の模擬分光実験がこれまでに数例行われてきた。しかしながら、微粒子の形成と霜の成長メカニズムの詳細については不明なままである。そこで、本研究では SO_2

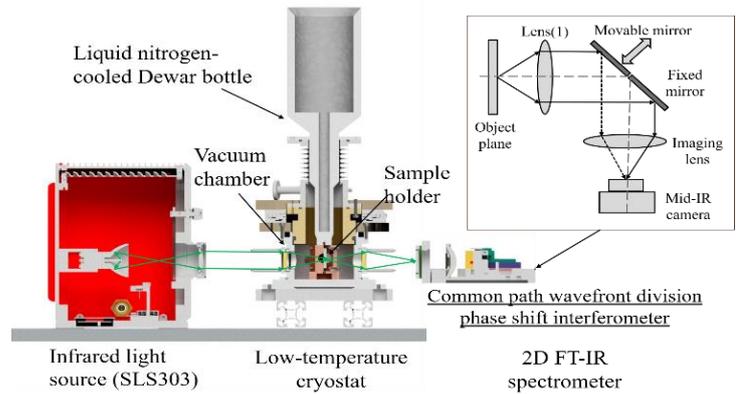


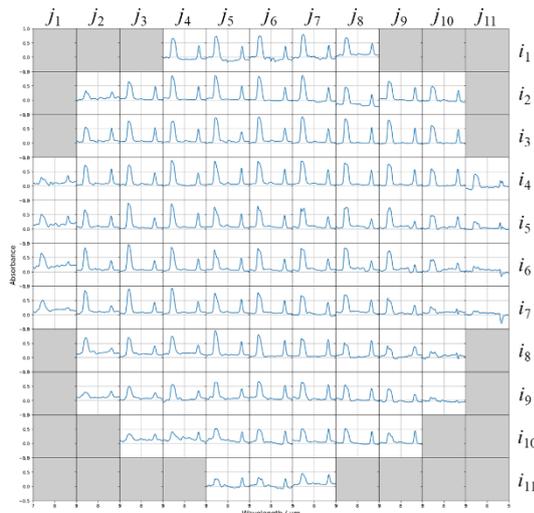
図1. 開発した低温固体 in-situ 赤外分光イメージング測定装置

霜の微細構造や成長・変質過程の解明を目的とし、図1に示す液体窒素冷却クライオスタット実験装置を開発し、准共通光路波面分割型位相シフト干渉法(1)による新しい2D FT-IR イメージング分光器を用いて、イオ表面環境を模擬した SO_2 霜の中間赤外線スペクトルを *in-situ* 測定した。 SO_2 霜の堆積に先立って真空冷却試験を実施したところ、固体試料を堆積させる赤外透過性 ZnSe 板付きサンプルホルダーを最低 81 K まで冷却でき、さらに真空チャンバー内の圧力を 6.3×10^{-4} Pa まで減圧できたことで、イオ表面環境を模擬することが可能となった。このクライオスタットを用い、真空冷却下で SO_2 霜の堆積およびその透過吸収イメージングスペクトルの測定を行った(図2)。 SO_2 霜を 94 K から 210 K まで昇温する過程で、 SO_2 分子の ν_3 region ($\sim 7.4 \mu\text{m}$) のバンドがブロード化し、最終的に昇華してガスの P および R 枝と思われる二重線構造へ変化した。また、同時に先行研究(2)で見られた ν_1 region ($\sim 8.7 \mu\text{m}$) のバンドの吸光度の減少もみられた。さらに、透過吸収イメージングスペクトル ((i_{1-11}, j_{1-11})) のグリッドの違いによって昇華特性が異なる可能性が考えられた。

一方、土星最大の衛星タイタンの高密度($\sim 1.5\text{atm}$)で冷たい(~ 90 K)大気では、衛星探査機の観測によってエチレン(C_2H_4)等の炭化水素のヘイズの存在が確認されている。本研究では、タイタン大気中での C_2H_4 凝華過程に伴うスペクトル変化と結晶構造との関係を理解するために、赤外分光測定(波長: $7 < \lambda < 12 \mu\text{m}$)により C_2H_4 の低温固体形成の模擬実験を行った。その結果、中間赤外線($\lambda \sim 10.5 \mu\text{m}$)に現れる C_2H_4 分子の面外変角振動(ν_7)に起因する、温度 83 K の各種固体のスペクトルイメージング測定(直径 $3.5\text{mm}\phi$ 、空間分解能 $\sim 0.3\text{mm}\square$)に成功した(図3)。各測定点で得られた C_2H_4 のスペクトルは、高さ、中心波長、半値全幅をパラメーターとする 2 成分ローレンツ関数により精度よくフィッティングできた。スペクトル形状の詳細な解析により、先行研究(3)で示されたような非晶質、準安定晶、結晶形に分類可能であることがわかった。

上記の凝華過程に伴うスペクトル形状と結晶構造の詳細な関係を理解する上では、 SO_2 の ν_3 変角振動($\lambda \sim 19 \mu\text{m}$)や、 C_2H_4 の ν_{10} 振動($\lambda \sim 6 \mu\text{m}$)、 ν_{12} 振動($\lambda \sim 12 \mu\text{m}$)のイメージング測定の実現が重要である。

(a) SO₂ ガス噴出 1 分後, 94 K



(b) SO₂ ガス噴出 95 分後, 210 K



図 2 真空チャンバー内に SO₂ ガスをパルス噴出してからの透過吸収イメージングスペクトルの経時変化。1 グリッドは 360×360 μm の範囲を平均化して表示している。灰色でマスクされているグリッドは、その中心がサンプルホルダー中心の直径 3 mm の貫通穴の円周よりも外側にあるエリアである。

そこで本研究では、測定可能波長帯： $4 < \lambda < 20 \mu\text{m}$ を実現するために、以下の改良による新たな位相シフト干渉分光計の設計と製作を行った(図 4)：(a)多重スリットへの結像用 Ge フォーカスレンズと位相シフター導光用 Ge リコリメートレンズ及び撮像検出器用 Ge リフォーカスレンズを 90°軸外し放物面鏡に変更、(b)位相シフト干渉用ピエゾアクチュエータを真空対応品に変更、(c) $\lambda > 13 \mu\text{m}$ の大気中の水蒸気や CO₂ 分子の吸収の影響の排除のための真空筐体の採用、など。そして、分光光学系の製作が完了し、可視 He-Ne レーザー光源と開口直径 1 μm のピンホールを用いた、光学系の精密調整に成功した。

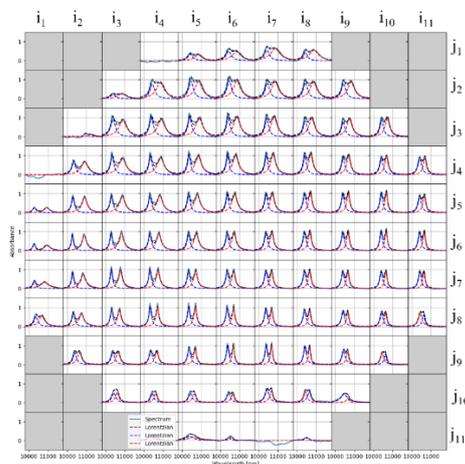


図 3. 低温 C₂H₄ 固体の透過吸収イメージングスペクトル
(視野:~3.5 mmφ; 点線:フィッティング結果)

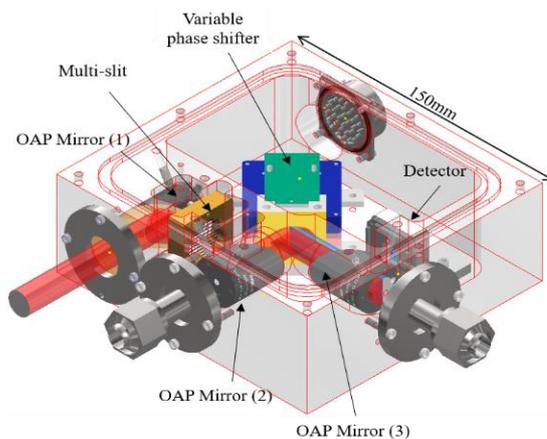


図 4. 真空対応広帯域 2D FT-IR の構成
(サイズ:160×150×55mm)

参考文献

- (1) Qi et al. (2015). Applied Optics, 54(20), 6254. doi:10.1364/ao.54.006254
- (2) Slobodkin et al. (1981). JQSRT, 26, 33-38, doi:10.1016/0022-4073(81)90018-2
- (3) Hudson et al. (2014). Icarus, 243, 148-157. doi:10.1016/j.icarus.2014.09.001

(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、2024年春に、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を行うことで、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

直近に打ち上げたFOXSI-3のデータ解析を進めるためには、軟X線の観測に用いたCMOS検出器の機器較正(検出器のX線に対する応答関数の作成)が不可欠である。我々は応答関数のモデル化に取り組んだが、検出器の応答が複雑で、データ解析に必要な精度を得ることに難航していた。そこで本研究の予算を活用し、分子科学研究所の放射光施設UVSORにおいて検出器の応答を実測することとした。具体的には、単色のX線を20eV刻みで検出器に照射し、検出器が出力する信号のパターンを測定した。これにより、データ解析に十分な精度で機器較正を完了することができた。この較正手法と較正結果については、現在、論文にまとめているが、これによりFOXSI-3のデータ解析の準備が整った。その後、データ解析に向けた研究会を開催するなど(ISEEの研究集会の補助も得て開催; <https://xray-sun.jp/meeting-20230323>)、科学成果創出に向けた活動が加速している。また、今回確立した検出器の構成方法は、FOXSI-4の検出器の較正にも活用できる。

一方、粒子の運動も取り込んだ新しい数値計算モデルの構築については、太陽フレア(磁気再結合)時のプラズマ環境をMHDで計算し、そこにテスト粒子を導入することで粒子の運動を調査する取り組みを行っている。この研究は、本研究メンバーのサポートと指導のもと、大学院生(修士1年生)の研究課題として推進している。初期結果については、シンポジウムでポスター発表を行った。

このように、2022年度(計画1年目)の目標は達成できたと考えている。

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

学会発表を23件行った。内訳は、口頭発表が12件、ポスター発表が11件である。そして大学院生による発表が17件、学部学生による発表が3件である。

以上

(別紙様式 1-2)

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

【研究目的】

本研究の目的は、アジアモンスーン変動の多重スケールの予測可能性の解明を目指す観測・解析・モデリング連携研究を進めるとともに、世界気候研究計画 (WCRP) の枠組みのもと推進されているアジア水文気候学研究プロジェクトAsian Precipitation Experiment (AsiaPEX)の重要な一翼を担うことで、それを国際共同研究として発展させることである。なかでも特に南アジアの研究者との共同のいっそうの発展に焦点を当てた。

アジアモンスーンは、太陽地球系結合過程として、地球の公転軸に対する自転軸の傾きと、ユーラシア大陸とインド洋・太平洋の大規模な海陸分布がもたらす大規模大気循環系である。このアジアモンスーンの恩恵を受け、アジアには、多様な文化的背景を持った数十億の人口に上る人々が暮らしている。地球温暖化や太陽活動の変動に伴う気候変動のアジアモンスーンへのインパクトは大きなものとなることが予想され、アジア域の持続可能な社会の形成のために、アジアモンスーンの変動メカニズムの解明が急務である。

アジアモンスーン研究は、WCRPの枠組みのもと、GEWEX Hydroclimatology Panel (GHP) のRegional Hydroclimate Projects (RHP) の一つとして、1996-2006年のGEWEX Asian Monsoon Experiment (GAME) プロジェクト、2006-2016年の Monsoon Asian Hydro-Atmosphere Scientific Research and Prediction Initiative (MAHASRI) プロジェクトとして継続的に展開されてきた。これらの達成の上に立って、本国際共同研究課題の研究グループを中心に次期RHPの計画策定が進められてきた。2019年度にAsian Precipitation Experiment (AsiaPEX) が立ち上げられ、GEWEXのProspective RHPとして承認された。AsiaPEXは、アジアモンスーン域の多様な水文気候学的地域特性がアジアモンスーンの多重スケール変動を駆動するメカニズムを解明することを目指している。ウェブページも発足し、2019年8月にはキックオフカンファレンスを札幌で開催した。共同研究プロジェクトAsiaPEXの研究プランを検討するとともに、南アジアにおけるアジアモンスーン変動の多重スケールの予測可能性の解明を目指す観測・解析・モデリング連携研究を進めてきた。

【研究方法】

2022年度は特に、以下の方法を重視して国際共同研究を推進してきた。

- ①当該地域の既存の観測網の維持管理と発展および新たな研究プロジェクトの立案。
- ②ベンガル湾からヒマラヤ南縁域にかけての地域を一体としてとらえた循環場の季節内変動と日変化の解析とモデリング研究。
- ③AsiaPEXのレビューペーパーの出版となどの共同研究成果の発信。

【研究結果】

上記の3つの分野に即して研究結果をまとめる。

①観測網維持構築と新しいプロジェクトの立案

ここ2-3年の間、新型コロナウイルス禍のもとで観測網の維持には困難が続いた。HiPRECS, SOHMONともにインストールした観測機器の維持管理が難しい状況があった。しかし、2022年度にはこの点に次第に変化がみられ、南アジアの国々への渡航が可能となる条件が広がった。HiPRECS, SOHMONともに観測網の再建と観測データ取得が少しずつ進んだ。研究代表者の寺尾は8-9月にバングラデシュ・インド・ネパールの各国の多くの研究者と直接の会合を果たし、9月3日にはカトマンズから、共同研究者のSomeshwar Das博士やAjit Tyagi博士の協力のもと、SAMA (South Asian Meteorological Association) のウェビナーを開催し、これら各国から多くの研究者の参加を得た招待講演を行った。8月と2-3月にはバングラデシュで、バングラデシュ北東部の氾濫湖に対する気候変動影響を解明するプロジェクトに関する連携を大きく広げた。更に、2月のバングラデシュ、3月のインド訪問では、2024年プレモンスーン～モンスーン期にかけての下層大気の変動をとらえるSOHMONによる観測プロジェクトの実装のための折衝を成功裏に行うとともに、インドアッサム州のCotton Universityで、観測プロジェクトにかかわ

るワークショップを開催し、20名を超える研究者の参加を得た。

②ベンガル湾からヒマラヤ南縁域にかけての解析とモデリング

HiPRECSの観測成果を活かした2021年度までの研究により、ヒマラヤ南縁域における降水の日変化の特徴が明らかとなってきた。また、かねてよりベンガル湾からベンガル平野、ヒマラヤ南縁域に至る領域のマルチスケールでの降水特性の研究が進められてきた(Terao et al. 2006; Fujinami et al. 2017)。これらの成果を基盤に、Fujinami et al. (2022)は、ERA5を用いた解析により、ベンガル湾西岸に沿った領域の下層大気における日変化する湿潤な強い気流が存在することを示唆した。更にHirata et al. (2023)は、ヒマラヤ南縁域における降水には、総観規模の低気圧システムや、日変化する大気下層からの熱フラックスなどの多重スケールの現象が複合的に関係していることを明らかにした。

③AsiaPEXレビューペーパーの出版と研究成果の発信

AsiaPEXの国際科学推進グループ (International Science Steering Group) は2019年9月、名古屋大学ISEE国際ワークショップの支援を受けてAsiaPEXの科学的方向性を定めるワークショップを名古屋にて開催した。その議論を基盤にAsiaPEXとして米国気象学会のBulletin of American Meteorological Society (BAMS) にレビューペーパーを掲載する取り組みを進め、2020年にレビューペーパー企画が提案されてアクセプトされた。2022年12月、レビューペーパーはアクセプトされ、出版に至った (Terao et al. 2023)。このレビューペーパーはAsiaPEXの歴史的背景や基本的戦略、6つのアプローチ、アプローチごとの現状と課題を明らかにするとともに、2020年代後半の観測モデリングイニシアチブとして、Asian Monsoon Year-II (AMY-II) に向けた基本的な戦略とスケジュールを提起した。

【考察とまとめ】

本共同研究を通じてAsiaPEXの基盤が強まるとともに、南アジアにおけるアジアモンスーン変動の多重スケールの予測可能性の解明を目指す観測・解析・モデリング連携研究のための観測体制の再構築が進むとともに、現象の解明も進んだ。新たな研究プロジェクトの萌芽もいくつも見えてきている。更に、2023年度以降の方向性もより明確になった。名古屋大学ISEE国際ワークショップの支援の成果としてのレビューペーパーも出版に至った。特に、このレビューペーパーによってアジアの水文気候システムの特徴の科学的解明のための国際共同観測モデリングイニシアチブの提起に至ったことは、国際共同研究の推進に大きく資するものである。

【引用文献】

- Fujinami, H., T. Sato, H. Kanamori, and M. Kato (2022): Nocturnal southerly moist surge parallel to the coastline over the western Bay of Bengal. *Geophysical Research Letters*, 49, e2022GL100174. <https://doi.org/10.1029/2022GL100174>
- Fujinami, H., T. Sato, H. Kanamori, and F. Murata (2017): Contrasting features of monsoon precipitation around the Meghalaya Plateau under westerly and easterly regimes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122, 9591-9610. <https://doi.org/10.1002/2016JD026116>
- Hirata, H., H. Fujinami, H. Kanamori, Y. Sato, M. Kato, R. B. Kayastha, M. L. Shrestha, and K. Fujita (2023): Multiscale Processes Leading to Heavy Precipitation in the Eastern Nepal Himalayas. *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 24, 641-658. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-22-0080.1>
- Terao, T., S. Kanae, H. Fujinami, S. Das, A. P. Dimri, S. Dutta, K. Fujita, A. Fukushima, K.-J. Ha, M. Hirose, J. Hong, H. Kamimura, R. B. Kayastha, M. Kiguchi, K. Kikuchi, H. M. Kim, A. Kitoh, H. Kubota, W.-Q. Ma, Y.-M. Ma, M. Mujumdar, M. I. Nodzu, T. Sato, Z. Su, S. Sugimoto, H. G. Takahashi, Y. Takaya, S. Wang, K. Yang, S. Yokoi, P. van Oevelen, and J. Matsumoto (2023): AsiaPEX: Challenges and Prospects in Asian Precipitation Research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, in press. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0220.1>
- Terao, T., M. N. Islam, T. Hayashi, and T. Oka (2006): Nocturnal jet and its effects on early morning rainfall peak over northeastern Bangladesh during the summer monsoon season. *Geophysical Research Letters*, 33, L18806. <https://doi.org/10.1029/2006gl026156>

【成果発表】

Terao, T., S. Kanae, and J. Matsumoto, AsiaPEX from the perspective of South Asia. *South Asian Meteorological Association*, Tribhuvan University/On-line, 3 Sep 2022.