

01) 国際共同研究 目次詳細

所属・職名は2022年3月現在

2021年度 23件

研究代表者 Principal Investigator	所属機関 Affiliation	所属部局 Department	職名 Position	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	5	
中井 太郎	國立臺灣大學 (National Taiwan University)	森林環境暨資源學系 (School of Forestry and Resource Conservation)	助理教授 (Assistant Professor)	東シベリア・カラマツ林の生態水文学的プロセ スのモデル化	7	
Kato Chihiro	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 よる宇宙天気の観測II	9	
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	11	
門叶 冬樹	山形大学	理学部	教授	第25太陽活動期に向けた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	13	
中澤 知洋	名古屋大学	KMI	准教授	次世代雷観測衛星 TARANIS2へむけた日仏連携 と日本付近の雷からのガンマ線・電磁界地上観 測の融合研究	15	
浅村 和史	宇宙航空研究開発機 構	宇宙科学研究所	准教授	観測ロケットを用いた高エネルギー電子マイク ロバースト現象の成因の解明	17	
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	太陽活動極小期における北極冠域熱圏・電離圏 変動の研究	18	
日高 洋	名古屋大学	環境学研究科	教授	太陽系初期に分化した惑星物質の年代学的研究	21	
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	23	
土屋 史紀	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	准教授	北欧・北米における高エネルギー電子降下現象 の総合解析のための VLF/LF電波伝搬観測	25	
細川 敬祐	電気通信大学	大学院情報理工学研究 科	教授	ロケットと地上光学観測を組み合わせた脈動 オーロラの総合観測	27	
坂野井 健	東北大学	大学院理学研究科	准教授	将来小型衛星FACTORS搭載可視・紫外カメラの 設計と開発	29	

研究代表者 Principal Investigator	所属機関 Affiliation	所属部局 Department	職名 Position	研究課題名 Project Title	頁 Page	備考 Remarks
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	太陽フレアによる高エネルギープラズマの生成メカニズムの理解	31	
Terao Toru	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	33	
尾花 由紀	大阪電気通信大学	工学部基礎理工学科	准教授	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	35	
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	36	
西澤 智明	国立環境研究所	環境計測研究センター	室長	地上ライダーネットワークによる南米エアロゾル観測研究の強化	38	
津田 卓雄	電気通信大学	大学院情報理工学研究科	准教授	トロムソにおけるオーロラ・大気光の光学スペクトル観測を活用した超高層大気研究	40	
小井 辰巳	中部大学	工学部	准教授	最高精度宇宙線ミュオン望遠鏡による宇宙天気観測	42	
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	43	
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 ミッションのための搭載機器・システム検討	44	
大矢 浩代	千葉大学	大学院工学研究院	助教	Tweek空電を用いた高精度な自動下部電離圏反射高度マッピングシステムの開発	46	

(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、宮城・福島で運用する太陽・木星電波観測施設に加え、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 40cm シュミットカセグレン望遠鏡 (T40)・60cm 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・米探査機 Juno、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)で進める。また展開する装置の開発を行うとともに、ハワイ大等と惑星・系外惑星専用 1.8-m 望遠鏡 PLANETS の建設にも名大・京大の協力も得て取り組み、本コミュニティの活動エリアをより広げようとしてきた。

2. 研究方法・結果

2021 年度は、引き続きコロナ禍の元で本来想定の現地観測作業を行うことができず、故障対応も 2022 年度にずれ込んだため、ハレアカラ施設を用いた観測成果の創出、特に装置の改定・変更等を伴う観測継続は今年となった。このため、(1) 今後の本学望遠鏡を用いた他機関共同を含む将来展開、(2) ハワイ大型観測施設のリモート利用による成果創出が活動の軸となった。現地での支援を頂いたハワイ大のメンバーに対しては感謝に耐えない。

(1) 今後の本学望遠鏡を用いた他機関共同を含む将来展開

現地訪問が大変困難な中、T40 の活動縮小、T60 望遠鏡のドーム故障に対する対応を含めた遠隔運用を支えるとともに、2022 年度の展開を期して近赤外線 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、現地の気象モニター等の更新準備などを進めた。また、2022 年度に予定する T40 の活動休止検討においては、新たに浮上した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に着手した。これらは、2022 年度にハワイ大を含めた本格的な作業・議論に着手する。

また、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開始した。この作業は 2022 年度にも継続される。

<主な発表>

Kambara et al., Development of the near-infrared camera TOPICS and the Echelle spectrograph ESPRIT for planetary observations. Japan Geoscience Union Meeting 2021, online, 2021 年 6 月.

Nagata et al. Development of PLANETS telescope: An attempt to reduce polishing volume in final polishing process by using an active mirror support. Japan Geoscience Union Meeting 2021, online, 2021 年 6 月.

Kagitani et al. High dynamic range observation using a 1.8-m off-axis telescope PLANETS: feasibility study and telescope assembly. Japan Geoscience Union Meeting 2021, online, 2021 年 6 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, 宮本明歩, 山崎敦. 中空光ファイバを用いた太陽系内探査用中間赤外レーザーヘテロダイン分光器の開発. 第 150 回 地球電磁気・地球惑星圏学会 総会・講演会. online. 2021 年 11 月

坂野井健, 鍵谷将人, 中川広務, 寺田直樹, 笠羽康正, 平原靖大, 栗田光樹夫. 高コントラスト望遠鏡 PLANETS の開発状況と惑星・衛星近傍の希薄ガス発光の検出可能性. 第 150 回 地球電磁気・地球惑星圏学会 総会・講演会. online. 2021 年 11 月

<修士論文>

塚田悟輝 (東北大・理) 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

(2) ハワイ大型観測施設のリモート利用による成果創出

T60/T40 による観測成果創出は低調たらざるを得なかったが、火星では、2018 年全球ダストストーム時の超高層変動が、査読論文として公表に至っている。

また、Subaru 望遠鏡を利用した観測に絡んだ国際共同観測成果の創出が当面の活動維持方策となったが、2020 年夏に最終観測を我々が担うこととなった Subaru 中間赤外線分光撮像装置 COMICS を用いた貢献による、木星の長期大気擾乱観測 (Antunano et al. 2021) および海王星の大気温度場観測 (Roman et al. 2021) をチームとして支えた。

<論文>

Miyamoto et al. (2021). Intense zonal wind in the Martian mesosphere during the 2018 planet-encircling dust event observed by ground-based infrared heterodyne spectroscopy. Geophys. Res. Lett. 48, e2021GL092413. <https://doi.org/10.1029/2021GL092413>

<主な発表>

Antunano, A., L. N. Fletcher, G. S. Orton, H. Melin, P. T. Donnelly, M. T. Roman, J. A. Sinclair, Y. Kasaba. Cycles of variability in Jupiter's atmosphere from ground-based mid-infrared observations. Europlanet Science Congress 2021. online, 2021 年 9 月

Roman, M. T., et al. Variation in Neptune's mid-infrared emission from ground based imaging. Europlanet Science Congress 2021. online, 2021 年 9 月

(別紙様式 1 - 2)

東シベリア・カラマツ林の生態水文学的プロセスのモデル化
Modeling of ecohydrological processes in a larch forest in eastern Siberia

中井太郎、国立臺灣大學・森林環境暨資源學系

【研究目的】

気候変動が将来、永久凍土と共生的に分布する森林生態系の生長・維持にどう影響するのかを予測することが本研究の目標である。そしてこの目標達成のため、東シベリアのカラマツ林を対象とした実地調査および陸域生態系動態モデルS-TEDyの適用・改良により、凍土の物理プロセスと森林植物の生理生態的応答を解明・再現することが本研究の目的である。今年度は、凍土面の微細地形（凹凸）およびそれにとまなう局地的な土壌の過湿が東シベリアのカラマツ林の枯死に影響を及ぼす重要な因子と考えられていることに着目し、融解深の空間変動を確率密度分布で表現することを試みた。

【研究方法】

東シベリアのスパスカヤパッド研究林およびエルゲイ研究林において、それぞれ50m×50mの格子点プロットを設け、2016年から2019年までの間、融解期の初中期および融解期終わりの融解深を半定期的に測定した。ルーチン観測ではそれぞれ原則的に25点で測定した。これらのデータに加えて、より詳細な融解深の空間分布特性を理解するため、2017年6月にスパスカヤパッド研究林においてルーチン観測以外の20点で追加の測定を実施した。融解深の測定には、簡易貫入試験器を使用した。

本研究では融解深の空間変動の表現にガンマ分布を採用した。ガンマ分布は、確率密度分布を形状パラメータ k とレートパラメータ λ のみで表現でき、また確率変数の平均値（期待値）がこれらの比 k/λ で表されるという特徴がある。今回、観測で得られたデータの累積相対度数分布に対してガンマ分布の当てはまり具合を調べた。また、ノンパラメトリックブートストラップ法により、ガンマ分布の95%信頼区間を調べた。さらに、融解深の平均値から空間分布を予測する経験モデルを開発した。

【結果および考察】

合計45点のデータが得られている2017年6月のスパスカヤパッド研究林のデータを用いて、様々な確率密度分布関数の当てはまりを調べた。その結果、平均値に対し対称な分布となる正規分布に比べ、非対称な分布となるガンマ分布の適合度が高かった。なお、平均値に対して非対称性を持つ他の分布と比較し、ガンマ分布の適合度が必ずしも最高ではなかったが、比較的近い適合度であったことと、ガンマ分布の上述の特徴を考慮し、本研究ではガンマ分布を採用した。また、ブートストラップ法の結果から、実測値が95%信頼区間にほぼ収まっていることが確認された。このことは、他のルーチン観測の結果についてもいえた。

k と λ の特性を調べた結果、どちらも平均融解深 $\overline{D_T}$ に依存した。上述のガンマ分布の特徴から $k = \lambda \overline{D_T}$ と表現できるため、 λ を三段階で表現するモデルを提案した。Model 1は定数、Model 2は $\overline{D_T}$ に関する線形関数、Model 3は $\overline{D_T}$ に関する非線形関数で、それぞれ λ を表現した。スパスカヤパッド研究林では、 k と λ の変動幅がともに大きかった。Model 1を $\overline{D_T}$ が浅いときの平均 (Model 1-1) と全体の平均 (Model 1-2) に分けて検討したが、Model 1-1は融解深が深いときの分布を表現できず、Model 1-2は浅いときの分布を表現でき

なかった。融解期全体の特徴を表現するにはModel 2、Model 3が必要であった。このサイトは過去に平年以上の降水を経験しており、永久凍土面付近に氷を多く含む層が形成されたことで、季節最大融解深を抑制していることが推察された。一方エルゲイ研究林では λ の変動が小さく、Model 1でも融解深の分布を十分表現できた。これは、最低一回の融解深の空間分布情報があれば、このモデルで任意の時点の融解深の空間分布が推定可能なことを示唆する。

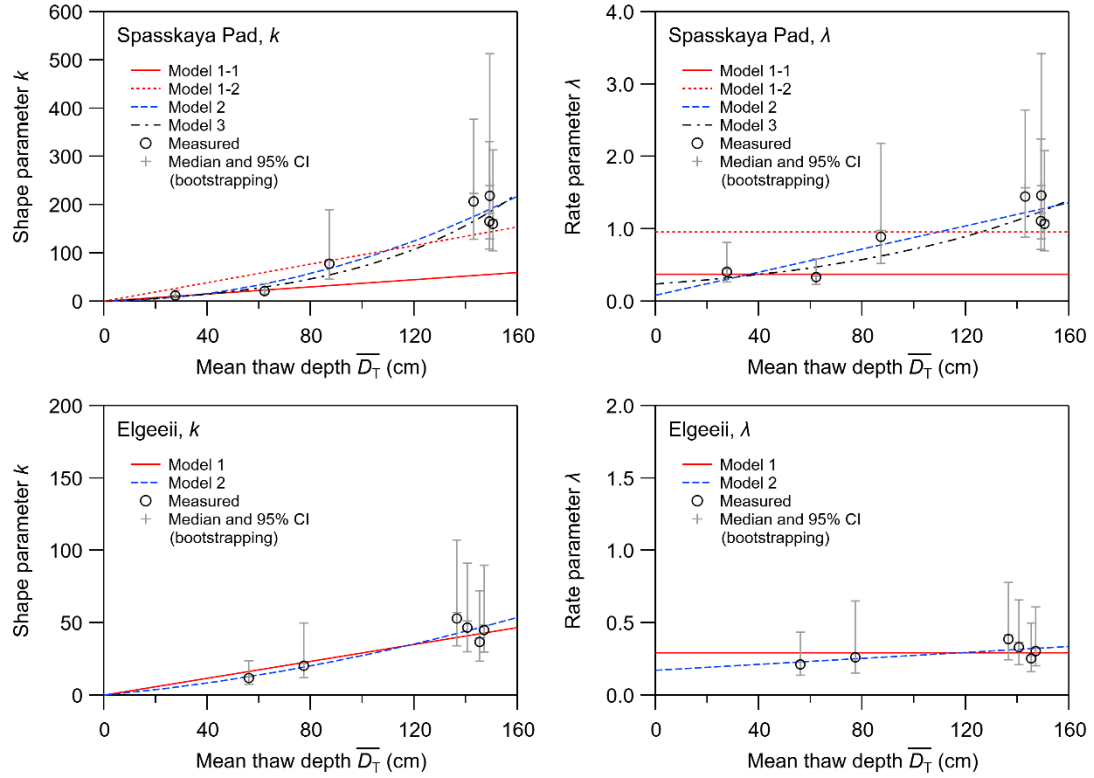


図 1 平均融解深 $\bar{D}_T$ の関数で表現したガンマ分布の形状パラメータ k とレートパラメータ λ のモデル、実測値、ブートストラップ法による中央値および 95%信頼区間。

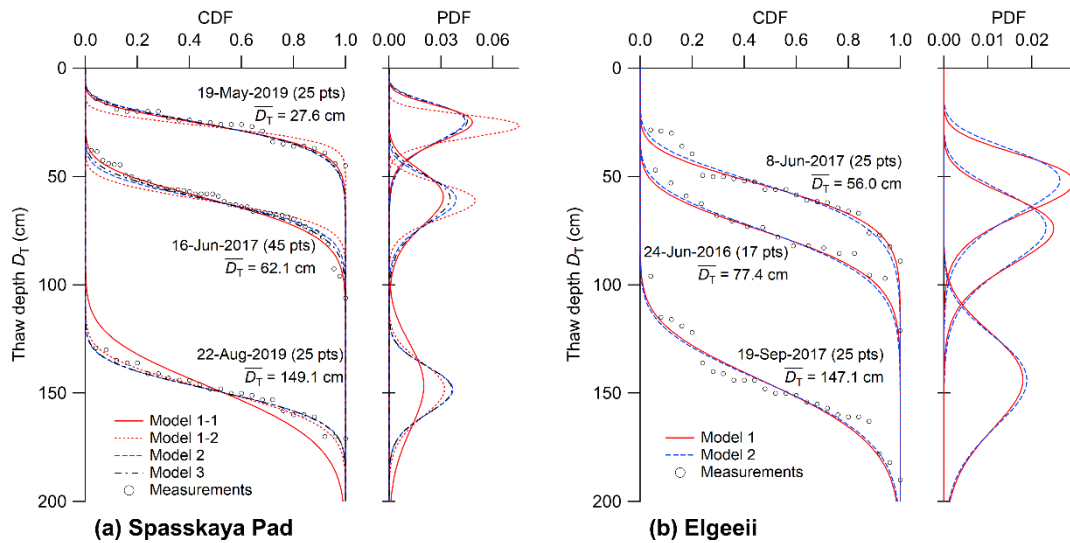


図 2 融解深の空間分布の確率密度分布モデルと実測値の例。

(別紙様式 1 - 2)

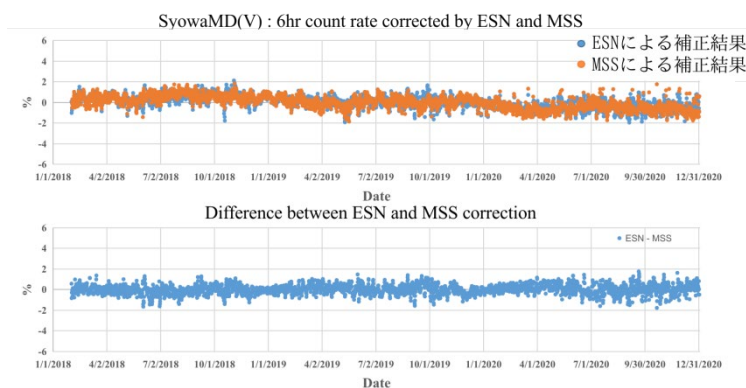
改良された汎世界的宇宙線観測ネットワークによる宇宙天気観測 II

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。

本研究の目標は, (1)メキシコのSciCRTをミュオン計として用い, GMDNが抱える観測の空白域を埋める, (2)南極昭和基地宇宙線計を用いて大気ミュオン強度に対する大気効果の実験的検証を行い, 大気効果の補正法を確立することによりGMDNによる宇宙線観測を飛躍的に改良することである。昭和基地での観測は順調に継続されており, 本年度は昭和基地宇宙線計のデータを用いて大気効果の補正に機械学習を用いることの試行を行った。また, 2021年11月には新たな宇宙天気現象が観測され, GMDNデータを用いたCMEイベント解析を開始した。未だ最終



機械学習による大気効果補正の試行

解析結果までは達していないが, 経過については下記の学会等で発表されている。

- C.Kato et al., Simultaneous observation of cosmic rays with muon detector and neutron monitor at the Syowa station in the Antarctic, JpGU, Online, 2021/5/6
- C.Kato et al., Simultaneous observation of cosmic rays with muon detector and neutron monitor at the Syowa station in the Antarctic, ICRC2021, Online, 2021/7/12-23
- S.Asano et al., Correction of the atmospheric temperature effect on cosmic ray muon count rate by machine learning, 極域シンポジウム, Online, 2021/11/15-18
- 浅野駿太他, 地表宇宙線ミュオン強度の変動に対する大気温度効果の補正, 日本物理学会第77次年次大会, オンライン, 2022/3/17
- 宗像一起他, 宇宙線計による2021年11月の宇宙天気事象の観測報告, 日本物理学会第77次年次大会, オンライン, 2022/3/17

研究組織

氏名	所属機関	職名
加藤 千尋	信州大学	教授
宗像 一起	信州大学	特任教授
浅野 駿太	信州大学	M2
門倉 昭	極地研究所	教授
片岡 龍峰	極地研究所	准教授
小財 正義	情報・システム研究機構	研究員
徳丸 宗利	名古屋大学	教授
伊藤 好孝	名古屋大学	教授
松原 豊	名古屋大学	准教授
柴田 祥一	中部大学	教授
小島 浩司	中部大学	特任教授
土屋 晴文	日本原子力研究開発機構	特別研究員
渡辺 恭子	宇宙航空研究開発機構	プロジェクト研究員
J. F. Valdes-Galicia	メキシコ自治大学	教授
P. Evenson	デラウェア大学	教授
M. L. Duldig	タスマニア大学	特任教授
A. Dal Lago	ブラジル宇宙科学研究所	研究員
M. M. Sharma	クウェート大学	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

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】

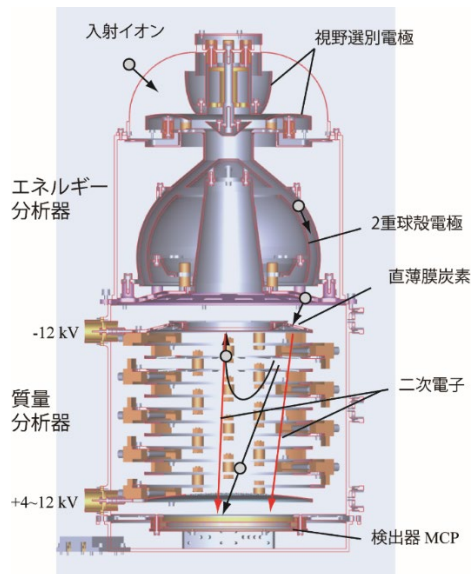
本研究の目的は、次世代型の宇宙機搭載用荷電粒子分析器のため、半球視野を確保する視野掃引及び高分解能質量分析の機能確立することである。人工衛星や観測ロケットを利用したプラズマのその場観測におけるイオン計測には、3次元の速度分布関数を取得することと共に、質量分析によってイオン種の同定を行うことも必須となっている。3次元の速度分布関数の取得には全方向に対する視野の獲得が必要であり、探査機がスピンしない場合は自力での確保が求められる。また、イオン種の情報は、プラズマのモーメント等のパラメータ算出に対して精度を向上させるだけでなくプラズマの起源を推定する上で有用性が高い。

最近の地球放射線帯観測衛星「あらせ」に搭載されたイオン分析器にも質量分析器は備わっている (Asamura et al., EPS, 2018; Yokota et al., EPS, 2017)。REIMEIや現在検討中のFACTORSのような光学系観測機器との共同観測を実施する場合は、三軸制御衛星の利

用が考えられるため、荷電粒子分析器には独力で広い視野を確保することが求められる。一般的には、2台の分析器によって半球ずつ視野を確保する例が多い。また、イオン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)、FACTORS (地球電磁気圏)、MA CO (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、イオン観測に対しては3次元の速度分布関数の取得のみならず質量分析も求められている。質量分析ではこれまでに無い $M/\Delta M > 50-100$ を目指していて、実現すれば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の取得が可能となる。周囲のイオン種の混在が無くなるため、存在比が低くこれまで観測困難であったイオン種についても検出が期待できる。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。

【研究方法】

2020年度に行った試作モデルによる性能試験の結果に基づき、2021年度はエンジニアリングモデルの設計・製作を行った (次ページ図)。



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イオンビームを用いた性能試験を行った。

【研究結果】

コロナ禍であったが2回のワクチン接種後に試験設備まで出張して性能試験を行い、設計時に数値モデルにて得た性能が実機にて得られていることを確認した。今後のフライトモデル性能試験のため試験環境や物品消耗品の準備なども行った。

【まとめ】

本研究成果を元にMSAチームはMMX計画におけるJAXA詳細設計審査会(CDR)を2022年4月に受ける予定である。その後、フライトモデルの製作に移行して性能

試験及び環境試験を実施する。

【成果発表】(学会研究会発表は全てリモート形式)

- S. Yokota et al., In situ observations of ions and magnetic field around Phobos: The Mass spectrum Analyzer (MSA) for the Martian Moons eXploration (MMX) mission, Earth Planets Space, 73:216, 2021. <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01452-x>
- Y. Saito, D. Delcourt, M. Hirahara, ..., S. Yokota, ..., C. Verdeil et al., Pre-flight Calibration and Near-Earth Commissioning Results of the Mercury Plasma Particle Experiment (MPPE) onboard MMO (Mio), Space Science Reviews, 217:70, 2021. doi.org/10.1007/s11214-021-00839-2
- S. Yokota et al., Development of an engineering model (EM) of the Mass spectrum Analyzer (MSA) for Mars Moons eXploration (MMX), 地球電磁気・地球惑星圏学会 第148回総会・講演会, 遠隔, 2021年11月2日.
- 横田勝一郎他, 火星衛星探査計画 MMX MSA エンジニアリングモデル(EM)開発状況報告, 第65回宇宙科学技術連合講演会, 遠隔, 2021年11月11日.

(別紙様式 1 - 2)

第25太陽活動期に向けた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, low latitude sites to the 25th solar cycle

門叶 冬樹、山形大学・理学部

研究目的

本研究は、太陽活動が減少期に入っている第23期および第24期の、そして第25期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を目的としている。また、Be-7はエアロゾルに付着して降下しているため、太陽活動の地球環境へ及ぼす影響について大気運動を含めて評価することが期待できる。我々は2000年から21年間、北半球中緯度(日本・山形市)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大気中宇宙線生成核種Be-7の連続観測を進めており、第25期に入る2021年までの観測結果について報告する。

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。

研究結果

1) 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2021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4月からサンプリングが再開される予定である。本連続観測は、第23期の後半から第24期太陽活動期全期間、そして第25期の始めをカバーしている。太陽黒点数は2019年が極小であり2021年は約3.2倍に増加

している。一方、Oulu の中性子強度は 2020 年がピークで 2021 年は約 1.0%減少している。それに対して Be-7 の濃度変化は、山形とバンコクはともに 2019 年がピークであり、2020 年は減少に転じ 2021 年は 2019 年に対して各々 14.7%、28.81%減少している。今後、地球規模での大気移流パターンの季節変動を調べ中緯度および低緯度で Be-7 濃度の減少との関連を解析する。太陽活動が第 25 期に入っている 2022 年の観測データは重要である。

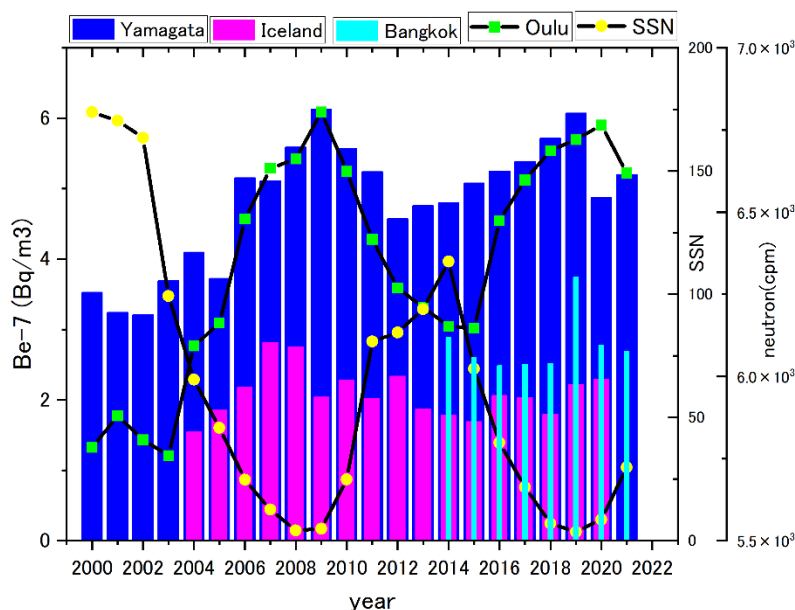


図 1. 2000 年から 2021 年までの高緯度、中緯度および低緯度の大气中 Be-7 濃度、太陽黒点数 (SSN)、oulu での地上中性子強度の年変動

[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. “Be-7 in Japan, Iceland and Thailand during solar cycle 24 descent phase”, H.Sakurai, Y. Kawamura, S. Suzuki, F.Tokanai, et al., JpGU-AGU Joint meeting 2021/6/3—6/6 eposter (PEM08-P11)
2. “Yearly variations in Be-7 concentrations in the surface air at Iceland and Japan for 17 years from 2003: Solar modulation of cosmogenic nuclide”, H.Sakurai, Y. Kawamura, F.Tokanai, et al., 12th Symposium on Polar Science online meeting OSo26 (online 2021 11/18)

(別紙様式 1 - 2)

次世代雷観測衛星 TARANIS と日本付近の雷からのガンマ線・電磁界 地上観測の融合研究

Synergy with next generation lightning observation satellite
TARANIS and on-ground lightning gamma-ray and electric-field
measurements in Japan

中澤知洋、名古屋大学、KMI/理学研究科

1：研究目的・研究方法

雷放電や雷雲そのものから、TGF やガンマ線グローと呼ばれる、30 MeV に達するガンマ線放射が観測される。我々は 2006 年から日本海岸の冬季雷雲や高山でのガンマ線地上観測を始め、雷雲ガンマ線(またはグロー)のスペクトルが制動放射であることを確立し[1]、雷放電ガンマ線(または TGF)により大気中で光核反応が起きていることを観測的に確認[2]し、さらにその被曝量が $1.4\mu\text{Gy}$ に達することを確認した[3]。

雷ガンマ線研究の進展を受けて、2020/11 に打ち上げられた衛星が TARANIS である。フランスが開発した小型衛星で、ガンマ線、高エネルギー電子、雷光、そして突発電波という多波長多粒子での同時観測を世界で初めて実施する予定で、我々もガンマ線電子線装置と可視カメラの開発に参加していた。我々の地上観測の先端の知見と、TARANIS による革新的な TGF 観測を組み合わせ、加速や放射の基礎物理を前者で、全地球的分布を後者で測定することで、大きなシナジーが期待できた。しかし残念なことにロケットの不具合で衛星の打ち上げは失敗した。直後からフランスではリベンジ衛星 TARANIS2 の計画が立ち上がり、CNES を中心に基礎開発が始まった。本計画では TARANIS2 への日本として貢献しつつ、地上観測をさらに発展させるものであった。

2：研究結果

TARANIS2 のガンマ線検出器の素材候補として国産の GSO 結晶シンチレータの利用を考え、OXIDE 社と仕様調整を進めていた。しかし、CNES 所長の交代などより、2021 年の夏にその開発予算は停止され、ゼロベースで衛星提案に応募することを勧告された。ロラン主任研究員の個人研究費などでシナジー研究は進めたが、衛星実現の目処が立たないため、本計画そのものを一旦中止することとした。

研究計画のもう一つの柱である、北陸での冬季雷の地上観測は精力的に進め、末尾にまとめた成果を得ている。2021 年度は 2021/10/25-28 に金沢で観測を開始し、2022/3/21-23 に撤収した。12/30 に強力な下向き TGF を、2/16 と 2/17 に明るいガンマ線グローの観測に成功し、過去のデータとの比較など、データ解析を始めたところである。また、別の TGF 観測衛星の実現も目指し、MeV 観測装置の開発も進めてきた。

こうした中で、中澤が共同提案者である NASA の SMEX 衛星 COSI が、2021/10/18 に Phase-A を突破し、2025 年の打ち上げが決まった。COSI は赤道軌道を回る宇宙 MeV 観

測衛星で、半導体コンプトン望遠鏡とそれを囲む結晶シンチレータのシールド、全天を観測する独立した小型シンチレータ検出器などで構成される。COSI は、同じく赤道付近を周回する AGILE 衛星などと連携することで、「TGF ガンマ線の多点同時計測」を多く実現できる可能性が高い。これが達成できれば、いまだに判明していない上向き TGF のビーム開口角や傾きの分布を知り、TGF の真の強度分布を得られることから、COSI チーム内で中澤がそのサイエンス検討を進めている。この連携については、TARANIS の他波長観測とは性質が異なるため、別途予算の申請を始めたところである。

3 : まとめ

TARANIS2 の開発は終了し、連携観測は実現できなかった。しかし、TARANIS 計画に参画し、本予算によって日本人研究者がフランスに長期滞在したことで、日本とフランス、およびデンマークなどとの連携が深まり、雷観測研究における日本のプレゼンスは大きく向上した。地上観測を中心に、和田 et al. (2021)、久富 et al (2021)などの査読論文、学会発表などの成果も着実に得ている。また COSI 衛星など、未来につながる国際連携も得ており、打ち上げ失敗を超えて、着実な成果を得たものと考えている。

5 : 成果発表

・大熊佳吾, 中澤知洋, 久富章平, 辻結菜, 他「雷活動に由来するガンマ線の観測プロジェクト : 2021 年 1 月の gamma-ray glow のコリメータスペクトルの詳細解析」、日本物理学会 2021 秋季年会 オンライン 2021/9/16

・大熊佳吾, 中澤知洋, 辻結菜, 久富章平 他「雷活動に由来するガンマ線の観測プロジェクト : 2021 年 1 月の gamma-ray glow のコリメータスペクトルの時間変動解析」、日本物理学会 2022 年会、オンライン、2022.3.1

・辻 結菜、中澤 知洋、久富 章平、他、「2020 年度雷雲ガンマ線観測における高度測定用検出器 GOOSE の展開と観測」、JPGU 2021、2021/6/6

・Wada, Y., Matsumoto, T., Enoto, T., Nakazawa, K., Yuasa, T., et al. " Catalog of gamma-ray glows during four winter seasons in Japan", Physical Review Research 3, 10.1103/PhysRevResearch.3.043117

・Hisadomi, S., Nakazawa, K., Wada, Y., Tsuji, Y., Enoto, T., Shinoda, et al. s, " Multiple Gamma-Ray Glows and a Downward TGF Observed From Nearby Thunderclouds", JGR-Atmospheres 126, 10.1029/2021JD034543

引用文献

[1] H. Tsuchiya et al. "Observation of an Energetic Radiation Burst from Mountain-Top Thunderclouds" PRL 102, 25503 (2009)

[2] T. Enoto et al. "Photonuclear reactions triggered by lightning discharge" Nature, 551, 24630 (2017)

[3] Y. Wada et al. "Downward Terrestrial Gamma-Ray Flash Observed in a Winter Thunderstorm", PRL, 123, 061113 (2019)

(別紙様式 1 - 2)

観測ロケットを用いた高エネルギー電子マイクロバースト現象の成因
の 解 明

Study of high-energy electron microburst by using a sounding
rocket and coordinated ground-based observations

浅村和史、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所

米国 NASA が主導する LAMP 観測ロケットミッションに参画した。私たちは LAMP 搭載観測機器として高エネルギー電子観測器 (HEP)、オーロラ撮像カメラ (AIC)、磁場計測器 (MIM) を開発し (図1)、単体性能確認試験を経て米国 NASA に持ち込み、各種システム試験および打ち上げ運用に参加したほか、地上支援観測網の構築と運用を行った。LAMP は2022.3.5 (アラスカ現地時間) にアラスカ・ポーカーフラットリサーチレンジ (PFR R) から打ち上げられた(図2)。打ち上げにあたっては、私たちが PFR R 北方の Venetie、Fort Yukon に展開したオーロラ光学観測カメラによって取得したオーロラ高速撮像データを参照し、ターゲットである高速変調を内包した脈動オーロラがロケット飛翔軌道直下に存在することを確認した上で打ち上げタイミングを決定した。結果的に LAMP は高速変調する脈動オーロラの発生領域を飛翔した。そして、予備的な解析ではあるが、搭載機器も電子マイクロバーストの検出及び脈動オーロラの高速撮像 (10Hz) に成功したことが分かっている。

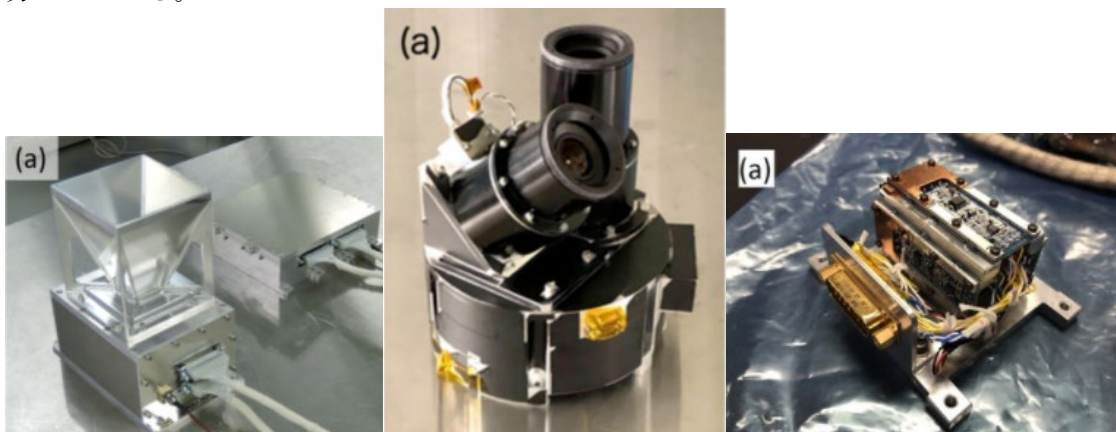


図2: 日本側が開発した LAMP 搭載観測機器 (左) 高エネルギー電子観測器 HEP (中) オーロラカメラ AIC (右) 磁場観測器 MIM。

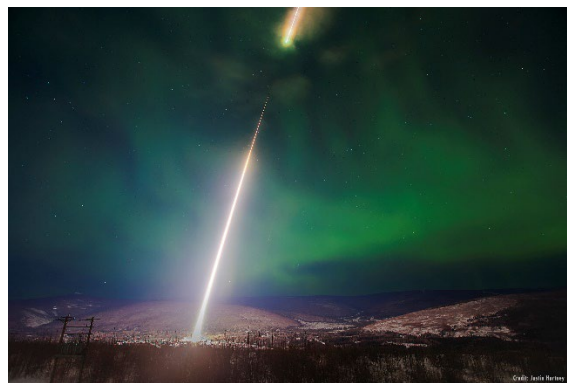


図2: LAMP 打ち上げ (2022.3.5 2:27:30 AKST) [Justin Hartney 氏提供]

太陽活動極小期における北極冠域熱圏・電離圏変動の研究

Studies of variations of the polar cap thermosphere and ionosphere during solar minimum periods

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

Chris Hall ノルウェー北極大学

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、極域熱圏・電離圏領域、特に極冠域での変動の解明に取り組んできた。例えば、極冠域での中性大気・プラズマのエネルギー源について、その大きさや空間分布を把握し極冠域でのエネルギー収支を理解することを目指してきた。Fujiwara et al. (AnGeo 2007) では、磁気圏前面の現象に起因する昼側電離圏での準周期的な加熱の大きさを推定したほか、Fujiwara et al. (EPS 2012) では(約100年ぶりに低調と言われた)太陽活動極小期(2007年-2008年)における地磁気静穏時の極冠域のイオン温度変動を示した。また、太陽活動が上昇期に向かう際の2012年3月には、CMEに伴う昼側電離圏での加熱現象をEISCATレーダーにより観測することに成功した(Fujiwara et al., AnGeo 2014)。現在、太陽活動は再び極小期から極大期へと推移しているが、2000年前後の太陽活動と比較して、低調な活動度のままとなっている。太陽活動が低調な時期の新たな電離圏データを取得して、2007年-2008年の極小期前後のデータのと比較により、太陽活動の低調期における電離圏変動を抽出できるものと期待される。特に、昼側極冠域電離圏は、観測手段が限定されることから、他の領域に比べて十分な観測が実施されていない。本研究では、緯度約75~83度の範囲の昼側電離圏をEISCATレーダーシステムによってモニターし、また、GCMシミュレーションを実施することにより、極域電場が通常よりも高緯度に分布している際の電離圏変動の特徴を調べることを目的とする。地磁気擾乱時には、加熱領域が狭い範囲に集中していることで、従来とは違った電離圏変動を捉えることが出来るものと考えている(当グループのGCMシミュレーションからも予測されている)。

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 (2021 年度 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, 2022 年 3 月に特別実験を実施する予定であったが, 依然として感染拡大の終息が見込めないことから, 現地スタッフに特別実験を委託し, 2022 年 3 月 15 日, 16 日の 7:00-11:00 UT に EISCAT 特別実験を実施した。ESR32m アンテナの故障により, ESR42m アンテナ, UHF レーダー観測のみの実施となった。15 日, 16 日ともに地磁気静穏時のデータが取得できたが, 特に 16 日データ中に局所的な変動が顕著に見られ, その原因について検討を進めている。

本研究課題に関連した主な成果発表

学会発表等

藤原 均, 野澤 悟徳, 小川 泰信, 三好 勉信, EISCAT_3D 観測から期待される極域大気上下結合の理解, 地球惑星科学関連学会連合大会 (JpGU-AGU Joint Meeting), 6 月, オンライン, 2021.

品川 裕之, 埜 千尋, 陣 英克, 三好 勉信, 藤原 均, スポラディック E 層発生予測システムの開発: 現状と今後の展望, 地球惑星科学関連学会連合大会 (JpGU-AGU Joint Meeting), 6 月, オンライン, 2021.

埜 千尋, 陣 英克, 品川 裕之, 三好 勉信, 藤原 均, Ionospheric storms in GAIA under lower atmospheric and magnetospheric inputs, 地球惑星科学関連学会連合大会 (JpGU-AGU Joint Meeting), 6 月, オンライン, 2021.

陣 英克, 三好 勉信, 埜 千尋, 品川 裕之, 藤原 均, Validation of a revised version of whole atmosphere-ionosphere coupled model GAIA, 地球惑星科学関連学会連合大会 (JpGU-AGU Joint Meeting), 6 月, オンライン, 2021.

埜 千尋 1), 陣 英克 1), 新堀 淳樹 2), 品川 裕之 1), 三好 勉信 3), 藤原 均, 観測との比較による GAIA 極域改良版の再現性評価, 第 149 回地球電磁気・地球惑星圏学会, オンライン, 11 月, 2021.

陣 英克・三好 勉信・埜 千尋・品川 裕之・藤原 均, 大気圏電離圏モデル GAIA による地磁気静穏時の平均的熱圏・電離圏変動の再現, 第 149 回地球電磁気・地球惑星圏学会, オンライン, 11 月, 2021.

品川 裕之・埜 千尋・陣 英克・三好 勉信・藤原 均, 太陽活動がスポラディック E 層に与える影響, 第 149 回地球電磁気・地球惑星圏学会, オンライン, 11 月, 2021.

(別紙様式 1-2)

太陽系初期に分化した惑星物質の年代学的研究
Chronological study of the differentiated planetary materials
in the early solar system

日高 洋、名古屋大学・環境学研究科

太陽系内惑星の初期進化過程を年代学的に研究することを目的とし、太陽系初期に分化した小惑星天体ベスタの地殻部に由来すると考えられている隕石種であるダイオジェナイトの形成年代を測定する手法の確立を行った。従来の ^{87}Rb や ^{147}Sm などの長寿命放射性核種の放射壊変系を利用した年代測定の適用が困難なダイオジェナイトに対して、半減期260万年の短寿命放射性核種 ^{60}Fe から ^{60}Ni への壊変系は、分化惑星物質中においてFe/Ni元素存在比がより高くなるために有利であると考えられる。本研究では、Fe-Ni壊変系を用いたダイオジェナイトの形成年代決定に先駆け、それに必要となるNi同位体精密測定法ならびに惑星物質からNiを効率よく化学分離する手法の確立を目指した。

Niの同位体測定は李博士の所属するKIGAMに設置の複数検出器搭載の高分解能ICP質量分析計(MC-ICPMS: Neptune Plus)を用いて行った。同装置は9つのファラデーカップ検出器を搭載し、同時に9つの同位体を検出することが可能である。このうち6つの検出器を使用して、Niの5つの安定同位体 ^{58}Ni , ^{60}Ni , ^{61}Ni , ^{62}Ni , ^{64}Ni に加え、 ^{58}Ni の質量スペクトルに干渉を与える可能性がある ^{58}Fe の存在度を知る目的で ^{57}Fe の質量領域をモニターするように設定を行った。同装置はイオン源にArプラズマを使用しているために、質量スペクトルにおいて ^{57}Fe の質量領域には $^{40}\text{Ar}^{17}\text{O}+^{40}\text{Ar}^{16}\text{OH}$ 、 ^{58}Ni においては $^{58}\text{Fe}+^{40}\text{Ar}^{18}\text{O}$ が干渉する。これらの干渉を抑制するために、イオン光学系を調整することにより質量分解能を通常仕様(M/ Δ M=700)から高分解能仕様(M/ Δ M=1100)に設定した。高分解能仕様により、例えば ^{58}Fe (原子質量単位57.933276 u)と ^{58}Ni (57.935343 u)をスペクトル上で分離することは不可能であるが、 ^{57}Fe (56.935394 u)を $^{40}\text{Ar}^{17}\text{O}$ (56.96151 u)と $^{40}\text{Ar}^{16}\text{OH}$ (56.96512 u)から分離することができ、測定試料中に不純物として ^{58}Fe が存在した場合は、常時モニターしている ^{57}Fe の存在度から ^{58}Fe を正確に補正することが可能となる。

表1にNi同位体の国際標準物質NIST SRM986による測定結果を示す。

表1 Ni 標準試料 NIST SRM986 の同位体比測定結果

	$^{60}\text{Ni}/^{58}\text{Ni}$	$^{61}\text{Ni}/^{58}\text{Ni}$	$^{62}\text{Ni}/^{58}\text{Ni}$	$^{64}\text{Ni}/^{58}\text{Ni}$
本研究				
(A) 通常分解能	0.385054 (5)	=0.016744	0.0533367 (15)	0.0136465 (14)
(B) 高分解能	0.385258 (17)	=0.016744	0.0533188 (21)	0.0135951 (20)
文献値[1]	0.385200	=0.016744	0.0533900	0.0135960

表中かっこ内の数字は繰り返し測定による標準誤差を95%信頼度で示している。測定中に生じる装置内同位体質量分別は、 $^{61}\text{Ni}/^{58}\text{Ni}=0.0167$

44を規格値としてexponential lawを用いて補正した。本研究で検討した測定法により、各Ni同位体比について0.01%以下の繰り返し誤差での測定が可能であることを確認した。

Niの化学分離に関して、一般的な無機溶媒によるイオン交換クロマトグラフィーではNiとアルカリ土類金属の分離が困難なことから、これまで、岩石試料からのNiの分離にはジメチルグリオキシム (DMG) とNiの錯形成反応が広く利用されてきた[2, 3]。しかし、この手法ではNiをDMG錯体として回収するため、DMGの分解・除去に長時間を要する問題点があった。DMGが試料中に残存すると、MC-ICP-MSによる同位体測定時に質量スペクトルに干渉を及ぼす要因になり得る。本研究では、先行研究[4]を参考に検討を重ね、以下の工程による3種のイオン交換カラムを用いた4段階の分離法を確立した。

- ① 試料を3 mLのHCl-アセトン溶液 (80%アセトン+20% 10M HCl) とし、一番目の陽イオン交換カラム (AG50W-X8, 200-400メッシュ, 2 mL) に通した後、カラムを12 mLのHCl-アセトン溶液に次いで2 mLの水で洗浄し、次いで10 mLの6M HClを流して回収する。
- ② 上記回収フラクションを蒸発乾固後、1 mLの0.9M HNO₃に再溶解し、二番目の陽イオン交換カラム (AG50W-X8, 200-400メッシュ, 1.5 mL) に通した後、15 mLの0.9M HNO₃で洗浄し、次いで5 mLの6M HClを流して回収する。
- ③ 上記回収フラクションを蒸発乾固後、5 mLの0.5M HF-1M HClに再溶解し、三番目の陰イオン交換カラム (AG1-X8, 100-200メッシュ, 2 mL) に通した後、5 mLの0.5M HF-1M HClで洗浄し、次いで5 mLの0.5M HF-1M HClを流して回収する。なお、ここで用いた陰イオン交換カラムを次の工程のために7 mLの6M HClで洗浄する。
- ④ 上記回収フラクションを蒸発乾固後、2 mLの6M HClに再溶解し、三番目の陰イオン交換カラムに通した後、5 mLの6M HClを流して回収する。

上記の工程に基づき、岩石試料から90%以上のNiが回収できることを確認した。

本研究で確立したNi同位体測定手法および効率的なNiの化学分離手法をダイオジェナイト試料に速やかに適用し、Fe-Ni年代測定法に応用させることを試みる予定である。

引用文献

- [1] Gramlich, J.W., Machlan L.A., Barners I.L., Paulsen P.J. (1989) Absolute isotopic abundance ratios and atomic weight of a reference sample of nickel. *J. Res. N.I.S.T.* 94, 347-3356.
- [2] Shimamura, T., Lugmair G.W. (1983) Ni isotopic compositions in Allende and other meteorites. *Earth Planet. Sci. Lett.* 63, 177-188.
- [3] Victor A.H. (1986) Separation of nickel from other elements by cation-exchange chromatography in dimethylglyoxime/hydrochloric acid/acetone media. *Anal. Chim. Acta* 183, 155-161.
- [4] Chernonozhkin, S.M., Goderis S., Lobo L., Claeys P., Vanhaeckle F. (2015) Development of an isolation procedure and MC-ICP-MS measurement protocol for the study of stable isotope ratio variations of nickel. *J. Anal. At. Spectrom.* 30, 1518-1530.

(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(80-115km)から下部熱圏領域(<200km)へ

Widening the sodium wind/temperature lidar observation

range from 80-115 km up to 200km

川原琢也、信州大学・工学部

□ 研究目的

本研究は、ノルウェーEISCAT レーダートロムソ観測所に設置し観測を継続しているナトリウム(Na)ライダーの観測高度領域を熱圏(200 km)まで拡大し、これまで観測の空白領域だった高度領域(115-200 km)にて、大気温度と風速の定常観測を行うことを最終目標とする。その課題として背景光を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。

□ 概要

現在ノルウェーのトロムソで稼働している Na ライダーで、密度が Na 原子層ピーク高度(90 km)の1/1000 以下である熱圏領域 (高度 120 km 以上) の Na 原子を観測するためには、夜間観測の弱い背景光でさえもノイズとなる。この背景光を除去するために、透過帯域が約 2 pm (市販品の帯域の約 100 分の 1) を実現するファラデーフィルタと、それを組み込む受信系の開発を進めている。

□ 研究経過・手法

[Na セル開発] ファラデーフィルタは、加熱した Na セルを強磁場中に配置し、589 nm 偏光面の Faraday 回転を利用した超狭帯域フィルタである。Na セルの開発が技術課題となっている。今年度は、昨年度実施したアルミニウムボディとサファイア窓の接合実験を発展させ、サファイアボディとサファイア窓でのセル製作を東北大学と共同で進めている。サファイアは高温 Na に対して極めて安定な材質で、サファイアセルの製作が Na セル開発のゴールとなる。今年度のセル製作は、材質の入手に時間がかかり、接合面と窓の高精度研磨まで行った状態である。図 1 には防塵容器に収められたサファイアセルボディの写真を示す。2022 年 4 月には真空中で窓の接合を行い、真空漏れチェックを経て Na を封入する手法に発展させる。



図 1 Na セルに用いる端面が高精度研磨されサファイアボディ。

[受信系開発] 受信系の開発は名古屋大学で行っている。光学シミュレーションに基づき、実験で検証しながら開発を進めている。図 2 はライダー受信系で光ファイバー連結系を構成する場合の実験の様子となる。レーザー光を光源に、直径 1.5mm (有効径 0.99mm) の光ファイバーに対して入射角度

を変化させ、最大透過率と透過率の均一性を調べた。図3に結果を示す。光ファイバーの屈曲による透過光の変化も含めて詳細に検証している。透過率はレーザ光の入射角度により異なるが、光学シミュレーションに基づいた適切なレンズ系の選択により、最大透過率 95%が得られた。一方、入射角度が大きくなると光ファイバー内で均一の透過率とはなっていないことも画像データから確認でき、ライダー観測に用いた場合の観測データへの影響など今後さらに検証が必要となる。

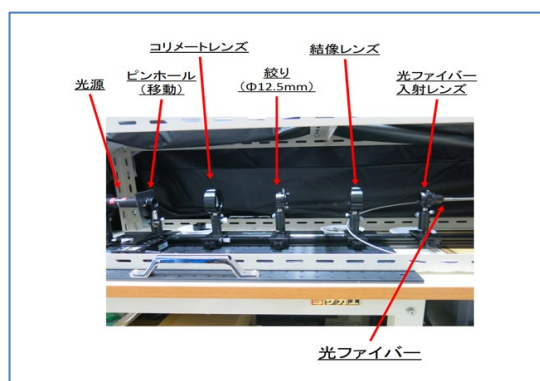


図2 光学レール上に並べた光ファイバー実験用のレンズ類

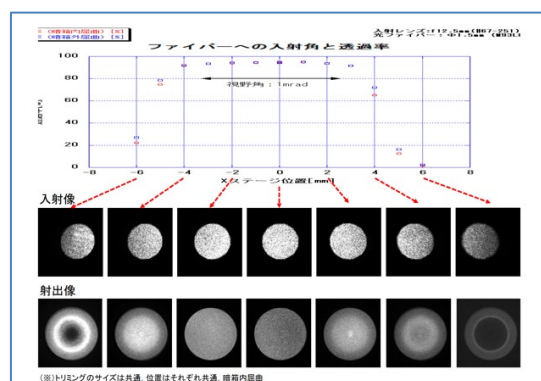


図3 光ファイバーの透過率と、透過光の均一性計測実験。グラフの横軸は光ファイバーへの入射角に相当。

□ まとめ

Na ライダー用狭帯域フィルタであるファラデーフィルタと、それを組み込む受信系の開発を進めてきた。Na セル開発に関して大きなトラブルはないが、進捗は遅い。一方、受信系製作に関しては順調に評価をしながら開発が進んでいる。次年度はサファイア製 Na セルを製作し、透過率計測の実験を行なっていく。背景光除去フィルタは昼間観測にも応用でき、ライダー年間観測により Polar Mesosphere Summer Echo (PMSE)等の解明につなげていく。

北欧・北米における高エネルギー電子降下現象の総合解析のための
VLF/LF電波伝搬観測
Observation of Energetic electron precipitation with VLF/LF
radio propagation in northern subauroral region

土屋史紀 東北大学・大学院理学研究科

100keV 以上のエネルギーを持つ高エネルギー電子が磁気圏から大気へ降下することによる下部電離圏の電離現象を観測する方法として、VLF/LF 電波伝搬観測がある。地上の固定点で、時間スケールの短い高エネルギー電子降下現象を常時モニタできる利点があり、他のオーロラ観測・電磁波観測・レーダ観測を組み合わせることによって、高エネルギー電子の降下原因とその結果もたらされる中層・高層大気への影響を観測的に調べる事が可能となる。本研究では、当初はフィンランド北部の Kevo への新設を予定していたが、COVID-19 の影響のため 2021 年度の新設は断念し、既設の受信点（ノルウェー・アラスカ・カナダ 2 カ所・ロシア）での観測データを使った北欧・北米のサブオーロラ帯における高エネルギー電子の降下現象の実証的研究を進めた。

1. 高エネルギー電子散乱に關与する電磁イオンサイクロトロン(EMIC)波動の統計的性質

EMIC 波動はサイクロトロン共鳴により相対論的電子のピッチ角散乱を起こすことが可能であるが、EMIC 波動が相対論的電子を散乱しやすい状況を統計的に調べた研究は少ない。2016 年 11 月 1 日から 2018 年 10 月 31 日の 2 年間に、地上の誘導磁力計により得られた EMIC 波動と VLF/LF 電波観測により得られた相対論的電子降下の統計解析を行った結果を図 1 に示す。EMIC 波動の発生頻度は、朝側で高くなる一方で、電子降下を伴う EMIC 波動は夕方側に局在している。それぞれの EMIC 波動の発生時間を磁気嵐の主相、回復相、静穏期で分類すると、電子降下を伴う EMIC は主相時に発生しやすいことが分かる。観測地点に近くを通過したあらせ衛星や RBSP によるプラズマ密度計測の結果から、EMIC 波

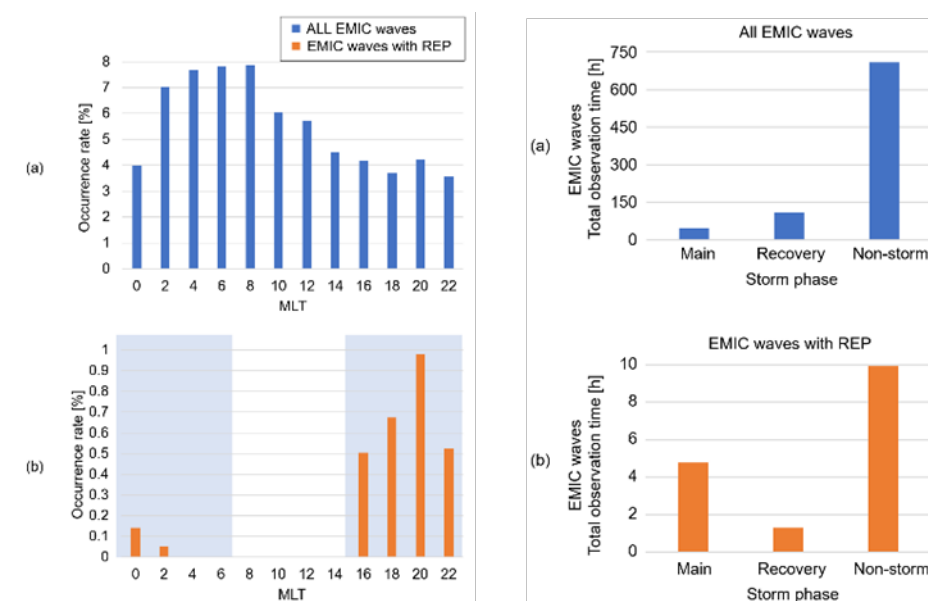


図 1: EMIC 波動発生頻度の MLT 依存性(左)と磁気嵐(右)依存性。(上)すべての EMIC 波動、(下)電子降下と伴う EMIC 波動。

動のほとんどがプラズマ圏内で発生していることも確認された。磁気嵐主相中のサブストームの発生によってリングカレントと高密度プラズマの重複領域が生じ、この領域で発生する EMIC 波動が、相対論的電子の散乱を引き起こしやすいことを示している。これらの EMIC 波動の統計的な特徴は、EMIC 波動が磁気嵐主相時の放射線帯外帯の消失の一因になり得ることを示唆する。

2. ホイッスラモードコーラス波動による高エネルギー電子降下の統計解析

ホイッスラモードコーラス波動は幅広いエネルギー範囲で高エネルギー電子と共鳴し、ピッチ角散乱を引き起こす波動である。大気への降込み電子の特徴が理論的研究により詳しく調べられた(Miyoshi et al. 2020)。この特徴の一部は低高度衛星と高速オーロラカメラによる観測で実証された(Kawamura et al. 2021)。VLF/LF 帯標準電波観測では、電子降下の MLT 分布や磁気嵐依存性についての統計的な特徴を調査した。図 2 に 2016 年 10 月から 2017 年 12 月の 15 か月間に観測された電子降下の統計分布を示す。この解析では、パルセーティングオーロラの典型的周期(4-20s)を VLF/LF 電波観測より抽出し、これをコーラス波に伴う電子降下現象とみなした。図 2 より、4-20s の時間スケールの変動を持つ降下電子現象は、朝側の MLT に偏った発生分布を示しており、この降下電子の原因がコーラス波であることが裏付けられる。磁気嵐依存性に着目すると、磁気嵐中は発生頻度が 10-20%に増大し、特に回復相の初期に発生頻度が高くなる傾向がある。EMIC 波動による高エネルギー電子降下の統計解析結果と比較すると、EMIC 波動とコーラス波に伴う高エネルギー電子降下の MLT 分布はそれぞれ夕方側、朝側に偏っており、これは電子のピッチ角散乱に寄与しているプラズマ波動の分布の違いを反映している。磁気嵐との対応に着目すると、EMIC 波動に伴う電子降下が磁気嵐主相に集中するのに対し、コーラス波に伴う電子降下は主に回復相に発生頻度が高く、サブオーロラ帯では磁気嵐の段階によって高エネルギー電子の降下の発生に寄与するプラズマ波動が異なると考えられる。

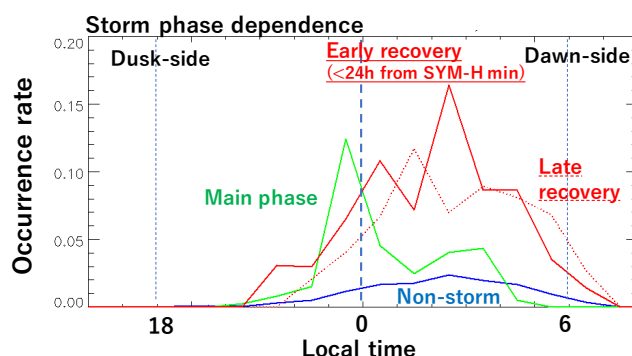


図 2: 4-20s の時間スケールの変動を持つ電子降下現象の MLT 及び磁気嵐依存性。

3. 電波伝搬の数値計算モデルを用いた VLF/LF 帯標準電波観測の定量評価

VLF/LF 帯標準電波観測から得られる観測量(受信信号の振幅・位相変動量)は下部電離圏での物理量(電離領域の空間スケール、電離量、電離の深さ)を反映している。観測量から物理量を推定するには、電磁波の伝搬を数値計算する必要がある。電気通信大学・芳原研究室に共同研究に参加していただき、FDTD法を用いた電波伝搬計算を実施した。Hirai et al. 2018 で報告された EMIC 波動に伴う電子降下現象を解析対象とし、プロトンオーロラの発光領域を用いて電離領域の空間スケールを制約することにより、電離量と電離の深さを評価した(野本他 2021)。その結果、VLF/LF 帯電波の強い振幅減少(~10dB)を説明するには、高度 60km 付近の高度で強い電離が生じている必要性が導かれた。これは EMIC 波動が相対論的電子を散乱する理論予測をサポートする結果である。

(別紙様式 1-2)

ロケットと地上光学観測を組み合わせた脈動オーロラの総合観測

Integrated observations of pulsating aurora with sounding rocket and ground-based optics

細川敬祐（電気通信大学大学院情報理工学研究科）

地球の超高層大気には、「脈動オーロラ」と呼ばれる数秒から数十秒で輝度が明滅するオーロラが出現する。このオーロラは、オーロラ爆発（オーロラサブストーム）の回復相に長時間、かつ継続的に出現することが知られており、極域超高層大気現象の中でも普遍的なもののひとつである。脈動オーロラは、磁気圏電子が準周期的に大気に降下することによって生じると考えられているが、近年の研究によって、脈動オーロラに伴って放射線帯起源と考えられる高いエネルギーを持つ電子が同時に降下している可能性が指摘されている。しかし、低高度衛星もしくは観測ロケットによる電子のその場計測による確認は未だになされていない。本研究は、アラスカにおいて米国の研究グループとの共同で実施される観測ロケット実験（NASA LAMP ロケット実験）の際に、地上で高速撮像カメラ、および降下電子エネルギーを推定するための多波長カメラによる光学観測を実施することで、脈動オーロラ発生時の高エネルギー電子の同時降下を実証することを目的とする。観測ロケットには、日本側から高エネルギー電子計測器、光学カメラ、磁力計の 3 つの機器が提供され、光学観測に見られる脈動オーロラと数 100 keV 以上の高エネルギー電子の時間変動の間の対応を明らかにすることが期待される。本申請によって、日米国際共同の枠組みで実施されるロケット実験の地上サポート観測を充実させることができれば、ロケットと地上観測を組み合わせた脈動オーロラの総合観測の機会を得ることができる。

コロナ禍の影響により、2020 年 12 月に予定されていたロケット実験が 2022 年 2-3 月に延期された。昨年度から継続している本研究費によって、現地でカメラデータを保管するためのハードディスクや、追加で設置する予定の小型カメラ、レンズ等を購入し、地上サポート観測をより充実したものにするという方策を取った。本年度は、ロケット実験実施に向けて、EMCCD カメラ、sCMOS カメラによるそれぞれ 100 Hz、80 Hz の時間分解能での全天オーロラ観測システムの製作およびアラスカへの輸出を行った。システムの製作に際しては、細川、大山、小川、三好がこれまでに北欧 4 箇所、北米 2 箇所で行ってきた高速撮像プロジェクトで用いているシステムをプロトタイプとした。上述のように、本国際共同研究の予算を用いて、小型のハードディスクを購入し、ロケットの打ち上げウィンドウ期間中の EMCCD、sCMOS カメラのデータを保管するような設定を行った。また、これらの高速撮像システムに加えて、降下電子のエネルギーを推定するために、2 つの波長（427.8 nm、844.6 nm）を同時に撮像できるオーロラ観測システム 2 式を、ZWO 社の小型カメラ

を用いて開発した。この 2 波長カメラについては、三好、細川、坂野井を中心として準備を行い、PC によるカメラの制御、フィルターを装着するための治具の製作を完了し、ロケット実験期間中の観測を実現した。これらのカメラ群は、ロケット飛翔域直下における観測を行うためにアラスカ北部の Venetie, Fort Yukon に設置され、ロケット打ち上げウインドウ中の観測が行われた。これらの光学観測機器からのデータを用いて、リアルタイムで脈動オーロラの発生状況を可視化できるようなシステムを構築し、このシステムは、ロケットの打ち上げタイミングの判断に用いられた。特に、1 分毎のケオグラムを自動作成し、インターネットを介してロケットの打ち上げ場所である Poker Flat へ転送するシステムを実装し、脈動オーロラの主脈動に内包されている 3 Hz の変調（内部変調）を確認したうえで、2022 年 3 月 5 日 11:27 UT にロケットの打ち上げを行うことに成功した。

ロケット実験のサポートと並行して、実験の科学課題に関連した研究をいくつか実施している。ロケット衛星のメインターゲットであるマイクロバーストと脈動オーロラが、コーラスによる電子の散乱によって統一的に理解することができることを低高度衛星による観測によって示した (Kawamura et al., 2021)。さらに、北欧における非干渉散乱レーダーのデータを用いて、オメガバンドタイプの脈動オーロラが発生しているときに、準相対論的電子の降下が起こっていることを示し、数値シミュレーションと組み合わせることによって、電子降下が中間圏のオゾン破壊を起こす可能性があることを示した (Miyoshi et al., 2021)。これは、ロケット実験のベースとなる理学的知見であり、実験の実施前に成果として公表できたことには大きな意義があると考えられる。また、北欧におけるリオメータの観測と EMCCD カメラによる観測を用いて、脈動オーロラ発生時の降下電子エネルギーの特性を明らかにした (Miyamoto et al., 2021)。

関連する論文:

1. Miyamoto, T., S. Oyama, T. Raita, K. Hosokawa, Y. Miyoshi, Y. Ogawa, and S. Kurita,, Variations in cosmic noise absorption in association with equatorward development of the pulsating auroral patch: A case study to estimate the energy spectra of auroral precipitating electrons, *Journal of Geophysical Research*, 126, doi:10.1029/2021JA029309, 2021
2. Miyoshi, Y., K. Hosokawa, S. Kurita, et al., Penetration of MeV electrons into the mesosphere accompanying pulsating aurorae, *Scientific Reports*, 11, 13724, doi:10.1038/s41598-021-92611-3, 2021
3. Ozaki, M., T. Inoue, Y. Tanaka, S. Yagitani, Y. Kasahara, K. Shiokawa, K., Y. Miyoshi, K. Imamura, K. Hosokawa, S. Oyama, R. Kataoka, Y. Ebihara, Y. Ogawa, and A. Kadokura, Spatial evolution of wave-particle interaction region deduced from flash-type auroras and chorus-ray tracing, *Journal of Geophysical Research*, 126, doi:10.1029/2021JA029254, 2021
4. Kawamura, M., T. Sakanoi, M. Fukizawa, Y. Miyoshi, K. Hosokawa, F. Tsuchiya, et al., Simultaneous pulsating aurora and microburst observations with ground-based fast auroral imagers and CubeSat FIREBIRD-II, *Geophys. Res. Lett.*, 48, e2021GL094494, 2021

(別紙様式 1 - 2)

将来小型衛星FACTORS搭載可視・紫外カメラの設計と開発
Design and development of a fast visible camera and far-ultraviolet camera for the future small-satellite FACTORS

坂野井健, 東北大学・理学研究科

【研究背景と目的】

FACTORS は、我が国の次世代電磁圏・熱圏コミュニティ衛星として検討が進められている極域周回編隊衛星計画であり、JAXA 宇宙科学研究所において 2019 年度ワーキンググループ(WG)として採択され、活動を継続している。今後、科学課題と観測装置について具体的検討を進める必要がある。その搭載装置候補にオーロラ・大気光を紫外と可視の 2 つの波長域でイメージングする装置がある。紫外撮像装置について、欧米では Polar, IMAGE, Freja 衛星等の実績があるが、日本ではあけぼの衛星以降ない。最近の CCD や CMOS 検出器技術ならびに光学系の著しく高精度化かつ進歩しており、我が国の今後の衛星からの地球・惑星大気観測のために最新技術を導入した衛星搭載撮像装置の開発が必須である。また、宇宙からの可視撮像装置においても地上観測と同様に 10Hz の高速サンプリング、1km の高空間分解能をもつ高速性能が要求されている。FACTORS は高度約 3000km の放射線帯内で観測を行う計画であり、放射線耐性をもつ高速撮像可能な宇宙用 2 次元可視検出器の検討が必須である。

研究代表者は、2018-2020 年度に ISEE 一般共同経費により FACTORS 紫外線撮像装置の国内検討を行った。本国際共同研究は、FACTORS に搭載される可視と紫外の 2 つのカメラの検討と基礎開発を進めることを目的とする。特に、紫外撮像・分光器に多くの実績を持つ海外研究者と国際共同研究のもと情報交換しつつ開発を進める。これを通じて、可視カメラと紫外カメラの宇宙搭載可能性に見通しをたて、今後のミッション提案に貢献する。

【研究方法】

本研究は、(以下敬称略) 三好由純、平原聖文、大山伸一郎(名大 ISEE)、山崎敦、浅村和史、(ISAS/JAXA)、Harald Frey (UB バークレー校)、Nick Schneider (コロラド大)、津田卓雄(電通大)が研究分担者である。2021 年度は、本課題の 3 年次計画の 3 年目である。

本年度は、科学要求の達成に必要な可視カメラの仕様要求をまとめ、これを実現可能な装置設計を行う。これまでの検討から、可視カメラについては高度 3000km から 400x400km(視野約 8x8 度)、空間分解能約 1x1km、フレームレート 10Hz で 1-100kR のオーロラを撮像することを科学要求としている。2021 年度は、可視カメラの使用を具体的に検討し、対物レンズの概念設計を行うことで、装置の成立性に目処を立てる。

一方、当初紫外カメラは可視カメラより数倍広視野で低い時間分解能で撮像することを検討していたが、2020 年度の検討から日照中で観測ができる紫外カメラについて微細構造撮像を最優先とし、可視カメラに近い空間分解能とフレームレートを達成する方針とした。紫外カメラの開発については、本研究と密接に連携する ISEE 一般共同研究「衛星搭載イメージング・分光光学系の設計と開発」の報告書にまとめて記載した。

【研究結果】

本年度の検討により、可視カメラに必要なレンズの仕様は以下の通りとなった。

- (1) レンズの焦点距離は 150 mm ~ 200 mm の範囲とすること。
- (2) レンズの合成 F 値は 1.5 以下であること。
- (3) レンズ焦点面における入射光のスポット系は、検出器の縦横寸法に合致する直径 30mm 以内の像面領域に渡り $60 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$ または $\phi 60 \mu\text{m}$ 以内に 80%以上のエネルギーが収まること。
- (4) レンズへ入射する光の波長 $670 \pm 20\text{nm}$ において (1) - (3) の仕様を満たすこと。
- (5) レンズの硝子材料の質量が 2kg 以下であること。

このレンズ設計解の 2 例を図 1 に示す。図 1 左は F 値 1.0 と非常に明るいレンズであるが、質量が 11kg、直径 200mm、長さ 300mm であり、大型であるため適合しない。一方、図 1 右は焦点距離 170mm、F 値 1.5 で、質量 2kg、直径 113mm、長さ 215mm で要求仕様を満たす。この図 1 右のレンズでも 1kR オーロラに対して 10Hz 撮像で S/N は 500 を超える感度見積もりであり、科学目的を達成する。また、このレンズ系は 3 面非球面であり、球面レンズで校正されていたれいめい衛星 MAC と比較して軽量化させることに成功している。この収差解析とスポットダイアグラムから、630-690nm の波長範囲で良好な収差と結像特性をもち、検出器の 1 ピクセルサイズよりも小さく良好な集光特性であり、十分な空間分解能を有する。

【まとめ】

本年度の可視カメラの対物レンズ設計により、少なくとも要求をみたす解があることが分かった。加えて、重量や寸法の精度を具体化でき、システムへのリソース要求の精度も向上させることができた。今後この設計に基づき、対物レンズの試作品を製作し、CCD の EM 品もしくは市販品と組み合わせて、光学試験などの開発に必要な実験を計画する準備が整った。

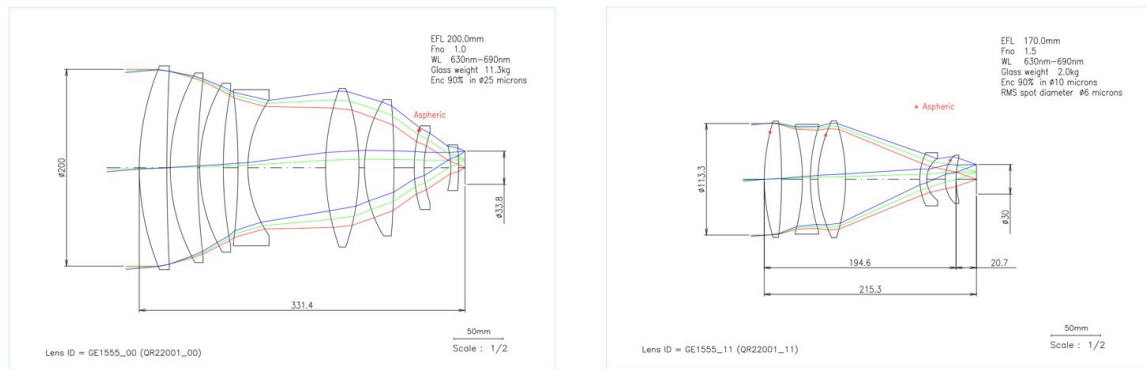


図1：可視カメラレンズの2通りの設計結果。（左）焦点距離200mm、F値1.0の例。
（右）焦点距離170mm、F値1.5の例。

【 成果発表 】

< 著書 >

Auroral Physics (Space Sciences Series of ISSI, 78), Ed. by D. J. Knudsen, J. E. Borovsky, T. Karlsson, R. Kataoka, N. Partamies, T. Sakanoi co-authored one chapter, ISBN 9402421211, ISBN-13 978-9402421217, August 27, 2021.

< 査読論文 >

Fukizawa, M., T. Sakanoi, Y. Miyoshi, Y. Kazama, Y. Katoh, Y. Kasahara, S. Matsuda, A. Kumamoto, F. Tsuchiya, A. Matsuoka, S. Kurita, S. Nakamura, M. Shoji, M. Teramoto, S. Imajo, I. Shinohara, S.-Y. Wang, S. W.-Y. Tam, T.-F. Chang, B.-J. Wang, C.-W. Jun, Statistical Study of Approaching Strong Diffusion of Low-Energy Electrons by Chorus and ECH Waves Based on In Situ Observations, J. Geophys. Space Res. Space Phys., 127, 3, 2022. <https://doi.org/10.1029/2022JA030269>

Fukizawa, M., T. Sakanoi, Y. Ogawa, T. T. Tsuda, K. Hosokawa, Statistical Study of Electron Density Enhancements in the Ionospheric F Region Associated With Pulsating Auroras, J. Geophys. Space Res. Space Phys., 126, 12, 2021. <https://doi.org/10.1029/2021JA029601>

Kawamura, M., T. Sakanoi, M. Fukizawa, Y. Miyoshi, K. Hosokawa, F. Tsuchiya, Y. Katoh, Y. Ogawa, K. Asamura, S. Saito, H. Spence, A. Johnson, S.-I. Oyama, U. Brändström, Simultaneous Pulsating Aurora and Microburst Observations With Ground-Based Fast Auroral Imagers and CubeSat FIREBIRD-II, 48, 18, 2021. <https://doi.org/10.1029/2021GL094494>

Namekawa, T. Mitani, K. Asamura, Y. Miyoshi, K. Hosokawa, Y. Ogawa, S. Saito, T. Hori, S. Sugo, O. Kawashima, S. Kasahara, R. Nomura, N. Yagi, M. Fukizawa, T. Sakanoi, Y. Saito, A. Matsuoka, I. Shinohara, Y. Fedorenko, A. Nikitenko, C. Koehler, Rocket Observation of Sub-Relativistic Electrons in the Quiet Dayside Auroral Ionosphere, J. Geophys. Space Res. Space Phys., 126, 7, 2021. <https://doi.org/10.1029/2020JA028633>

Sugo, S., O. Kawashima, S. Kasahara, K. Asamura, R. Nomura, Y. Miyoshi, Y. Ogawa, K. Hosokawa, T. Mitani, T. Namekawa, T. Sakanoi, M. Fukizawa, N. Yagi, Y. Fedorenko, A. Nikitenko, S. Yokota, K. Keika, T. Hori, C. Koehler Energy-Resolved Detection of Precipitating Electrons of 30-100 keV by a Sounding Rocket Associated With Dayside Chorus Waves, J. Geophys. Space Res. Space Phys., 126, 3, 2021. <https://doi.org/10.1029/2020JA028477>

Kataoka, R., C. C. Chaston, K. A. Knudsen, K. A. Lynch, R. L. Lysak, R. Rankin, K. Murase, T. Sakanoi, J. Semeter, T.-H. Watanabe, D. Whiter, Small-Scale Dynamic Aurora. Space Sci Rev 217, 17 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11214-021-00796-w>

< 国際学会（計3件）、国内学会・シンポジウム（計5件）、ここでは国際学会のみ記載 >

Sakanoi, T., M. Fukizawa, M. Hirahara, Y. Miyoshi, K. Asamura, Y. Saito, H. Kojima, N. Kitamura, T. Nishiyama, K. Murase, M. Kawamura, K. Sakaguchi, M. Ishii, H. U. Frey, N. Schneider, Future formation-flight satellite mission FACTORS: Development of far-ultra-violet imagers and simulation of Alfvén wave observations, JpGU Meeting 2021, Online meeting, 30 May-26 June 2021.

Hirahara, M. Yamauchi, Y. Saito, H. Kojima, K. Asamura, T. Sakanoi, Y. Miyoshi, and N. Kitamura, and An international multi-point space exploration mission for integrated observations in the space-Earth coupling system, JpGU Meeting 2021, 30 May-26 June 2021.

Sakanoi, T., M. Hirahara, K. Asamura, M. Fukizawa, A. Yamazaki, Y. Miyoshi, K. Sakaguchi, Y. Saito, H. Kojima, N. Kitamura, M. Ishii, T. Nishiyama, H. U. Frey, N. Schneider, Development of Far-ultra-violet Imager for a Future Formation-flight Satellite Mission ‘FACTORS’, AOGS 2021 annual meeting, on-line meeting, Aug. 1-6, 2021.

(別紙様式 1 - 2)

太陽フレアによる高エネルギープラズマの生成メカニズムの理解
Understanding of generation mechanism of high energy plasmas
by solar flares

成影 典之、国立天文台・太陽観測科学プロジェクト

太陽は高エネルギープラズマで満たされており、「プラズマの加熱」、「磁気リコネクションによるエネルギー解放」、「粒子の加速」など、プラズマ現象の宝庫である。これらのプラズマ素過程は、宇宙空間の至る場所で起きており、それぞれの環境(太陽、地球磁気圏、マグネターなど)でプラズマの状態に差異はあるが、物理過程には共通点が多数あり、宇宙プラズマ物理における重要研究課題である。

そこで我々は、太陽の持つ「身近な天然のプラズマ実験室」、「他の天体の指標となる天体」、「地球環境へ影響を与える天体」という特色を活かし、太陽を観測することで「基礎科学研究(加熱、加速の理解)」、「分野間連携研究(他天体との比較)」、「応用研究(地球への影響)」という3つの課題に取り組んでいる。具体的には、太陽コロナを満たす高エネルギープラズマの振る舞いを詳細に調査し、その物理の理解を深化させることを目指している。その手段として用いるのが「太陽X線帯域の集光撮像分光観測」という新しい観測手法である。この観測では、太陽コロナ中のプラズマから放たれるX線光子を1個1個精密に計測し、その位置・時間・エネルギー情報を同時に取得する。我々はこれまでに、この観測手法の基礎技術を確立し、世界初の観測を実施した(日米共同観測ロケット実験FOXSI; <https://hinode.nao.ac.jp/news/topics/foxsi-3/>; <https://hinode.nao.ac.jp/news/topics/foxsi-3-data-release-jp-20190115/index.html>)。そして現在、この観測手法を用いた太陽常時観測(PhoENiX 衛星計画; <https://phoenix-project.science/>)を計画している。

一方で、このような新しい種類の観測データから科学成果を生み出すための準備も並行して進めておく必要がある。そこで我々は、本ISEE国際共同研究において、既存の太陽X線分光データを用いてその準備を行う。本計画は、3年を計画しており、今回(2021年度)はその3年目である。

3年目にあたる今回は、下記の3つを実施した。

- ① 米国のキューブサット計画 MinXSSのデータを用いた科学成果の創出
- ② 2018年に打ち上げた日米共同観測ロケット実験FOXSI-3のデータ解析準備
- ③ 2024年打ち上げ予定の観測ロケット実験FOXSI-4に向けた準備

以下に、その概要を成果とともに報告する。

【① 米国のキューブサット計画 MinXSSのデータを用いた科学成果の創出】

米国のキューブサット計画 MinXSS (<http://lasp.colorado.edu/home/minxss/>)は、2016年5月～2017年5月の約1年間にわたって太陽全面からの軟X線を時間・エネルギー分解して観測を行っており、太陽フレアを多数観測した。我々は本計画の1年目(2019年度)に本予算を用いて渡米し、このデータの解析手法をマスターした。2年目(2020年度)には、成影、川手の指導のもと、長澤(大学院生、東京大学カブリIPMU 高橋研究室)が中心となり、MinXSSが観測した最大のフレア(2016年7月23日に発生したMクラスフレア)を対象としたX線スペクトル解析を行った。

太陽フレアに伴うX線の放射には、主に加速された電子からの非熱的放射と、加熱された高温プラズマからの熱的放射が存在する。これまで衛星を用いたX線観測によってフレアに伴う加熱・冷却や粒子加速過程の理解が進みつつある一方で、軟X線帯域のスペクトル情報

が不足しているために熱的放射成分を定量的に評価するにあたって不定性が大きいことが問題となっている。そこで我々は、MinXSSによる軟X線分光観測データ、及びRHESSI衛星の硬X線撮像分光観測データを組み合わせ、X線天文学で用いられるXSPECによるスペクトル解析を行った。その結果、最短10秒の分解能で温度・エミッションメジャーの時間発展が得られ、~3 MKの低温、~15 MKの高温、~30 MKの超高温、と最大3つの熱放射成分が存在することが分かった。さらにGOES衛星、野辺山太陽強度偏波計によるフラックス情報、SDO/AIA、RHESSI、SOHO/LASCOによる空間情報を加えることによって、各温度成分の放射に関連する構造を推定した。この結果は、長澤の修士論文のテーマの一つとしてまとまった。なお、長澤の修士論文「光子計測型 X 線検出器を用いた 太陽フレアの高分解能観測による 磁気エネルギー解放過程」は、東京大学大学院理学系研究科奨励賞に選ばれた。そして、3年目の今回、その結果を国際ワークショップで発表するとともに、論文にまとめ *The Astrophysical Journal* に投稿中である。レフリーからは好意的なコメントが届いており、近々の受理が期待できる。

【② 2018年に打ち上げた日米共同観測ロケット実験FOXSI-3のデータ解析準備】

データ解析の過程で、観測装置（CMOS検出器）の機器校正が不十分であることが判明し、分子科学研究所の放射光施設UVSORを6週間用いて再評価を実施した。今回の再評価のために新しい測定システム（ミラーを使った反射型の減光システム）を開発したが、これが期待通りに動作し、優れた校正用データが取得できた（評価の概要は、UVSORのActivity Reportに投稿済）。これにより観測装置の校正がほぼ完了し、本格的な科学データ解析に取り組み始めている。

【③ 2024年打ち上げ予定の観測ロケット実験FOXSI-4に向けた準備】

FOXSI-4（FOXSIの4度目の飛翔計画）は、太陽フレアにおける「エネルギー解放量と解放場所の調査」「超高温成分の生成過程の調査」「フレア後期の粒子加速現象の探索」を科学目標とした日米共同の観測ロケット実験である。用いる観測手法は、過去3度の飛翔と同様、ミラーと高速度カメラの組み合わせによるX線集光撮像分光であるが、太陽フレア観測に向け、各コンポーネントにアップデートを施す。FOXSI-4計画の実施は、下記のような多角的意義を持つ。(1) 磁気再結合が引き起こす太陽フレアのX線集光撮像分光観測（世界初）を実現し、それによって可能となる精密プラズマ診断により高エネルギー現象の物理の理解に挑むこと。(2) 観測時間が5分程度に限られる観測ロケットでは困難であった太陽フレア（発生の予測が困難な観測対象）の観測に挑むものであり、観測ロケット実験の可能性を広げる挑戦的な試みであること。(3) FOXSIの発展版として日本が中心となり検討を進めているPhoENIX衛星計画にとっては、科学的・技術的実証の絶好の機会であること。

本計画は、2019年にNASAに対し提案書を提出、2020年に最高評価（Excellentの評価）で採択されており、打ち上げは2024年を予定している。そして本年度（2021年9月）、日本側の計画参加のために予算申請していたJAXA宇宙科学研究所の小規模計画に満額査定で採択された。また、FOXSI-4を研究課題として本年度応募した科研費・基盤研究(A)（2022～2024年度）にも採択された。これにより計画実施に必要な予算の目処を得た。FOXSI-4は日米共同の計画であり、各種検討会合（サイエンス検討会合、装置開発検討会合、マネージメント会合など）を定期的に行っている。FOXSI-4に関する研究・開発成果は、SPIE、日本天文学会、宇宙科学シンポジウム、観測ロケットシンポジウムなどで発表を行った。

以上のように、太陽フレアによる高エネルギープラズマの生成メカニズムの理解を目指した本研究は、当初想定していた既存の太陽X線分光データを用いた科学成果の創出だけに留まらず（上記①と②）、太陽フレアに対する世界初の太陽X線撮像分光観測の実現（FOXSI-4、上記③）に挑めるまでに大きく進展した。

2021年度もコロナ禍の影響を受け、当初予定していた渡米しての共同研究は行えなかったが、本国際共同研究経費のおかげで、リモート会議のための環境維持や、放射光施設UVSORでの機器校正が実施でき、上記のような成果を挙げる事ができた。

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】

アジアモンスーンは、ユーラシア大陸、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。アジアモンスーンの恩恵を受け、アジア域には数十億の人口に上る人々が暮らしている。アジア域の持続可能な社会の形成のため、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。

本研究は、太陽地球系結合過程としてのアジアモンスーンの特異性である緯度の高い大気加熱の影響の解明、インド亜大陸北東部の降水過程のマルチスケール解明、国際共同研究プラットフォームの発展、の3点を重点的課題として研究を進めてきた。特にインド亜大陸北東部の降水と気候変動メカニズムを研究しているグループSOHMONと、WCRPの枠組みのもと、GEWEXの次期RHPのとしてプロジェクトを推進してきたAsian Precipitation Experiment (AsiaPEX)のプロジェクトを通じた国際共同研究の発展に重点を置いている。

【研究方法】

バングラデシュの降水過程とかかわる地表面の水分布の解析、高湿潤静的エネルギー大気の蓄積に着目する新しいアジアモンスーンの診断手法の研究を重点的に実施した。

TRMM-PRの検証に焦点を当てた。TRMM-PRには、年降水量の世界記録を持つインドメガラヤ山脈南斜面付近を中心に顕著なモンスーン期の過小評価が確認されており(Terao et al. 2017)、現地に雨滴粒度計を複数導入し、降水過程に踏み込んだ検討を進めている。Murata et al. (2020) は初期的な観測結果を活用し、小さい粒径の雨滴が過小評価に係っている可能性を指摘した。

現地研究者との共同研究を発展させる条件を広げるための国際学会におけるセッションの開催と、レビューペーパーの作成に重点を置いて研究を進めた。

【研究結果】

下層の高湿潤静的エネルギー大気質量と、上層の高乾燥静的エネルギー大気質量を比較する新しい手法を開発し、これをもとにアジアモンスーンオンセットにおけるベンガル湾からベンガル平野にかけての降水過程の役割や、盛夏期におけるチベット高原の役割に関するデータ解析を行い、成果を国際学会で発表した(Terao 2021/AOGS)。ヒマラヤ南斜面の気象観測プロジェクトに基づき降水日変化メカニズムを解析し、成果を発表した(Fujinami et al. 2021)また、バングラデシュ西部の地表面の水面分布に2002年ころを境にした急速な変化がみられ

ることを確認し、エビ養殖による人為的な効果が支配的である可能性を指摘した(Huda et al. 2021)。

現地カウンターパートとの協力のもと更にデータを集め、谷間と尾根筋の比較や入射角によるちがいを評価することにより、過小評価メカニズムの解明を進めており、査読中である。

Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) の2021年の年次大会に AsiaPEX プロジェクトとしてのセッションを開催し、28件の研究発表を集めて、Top Convener Award を受けた。2019年度ISEE国際ワークショップでの支援を受けた研究グループで引き続きAsiaPEXのレビューペーパーの作成を進め、気象学のTop Journalの一つに投稿し、査読中である。

【まとめ】

感染症により国際共同研究上厳しい状況が続いているが、諸課題に関する国際共同研究を進めるとともに、いくつかの国際共同研究論文を出版、準備する一方、研究交流を活発にするためのセッション開催とレビューペーパー作成を推進している。次年度に向けて更なる成果が期待できる。

【引用文献】

Fujinami, et al. 2021: Twice-daily monsoon precipitation maxima in the Himalayas driven by land surface effects, JGR-Atmospheres, 126, doi:10.1029/2020JD034255.

Huda, N., et al. 2021: Time-Series Remote Sensing Study to Detect Surface Water Seasonality and Local Water Management at Upper Reaches of Southwestern Bengal Delta from 1972 to 2020. Sustainability, 13, doi:10.3390/su13179798.

Murata, F. et al., 2020: Characteristics of orographic rain drop-size distribution at Cherrapunji, Northeast India. Atmosphere, 11, <https://doi.org/10.3390/ATMOS11080777>.

Terao, T. et al., 2017: Direct validation of TRMM/PR near surface rain over the Northeastern Indian subcontinent using a tipping bucket raingauge network. SOLA, 13, 157-162, <https://doi.org/10.2151/sola.2017-029>.

【成果発表】

Terao, T., S. Kanae, J. Matsumoto, 2021: The Focus of the AsiaPEX Science Plan and Implementation of Asian Monsoon Year-II. Asia-Oceania Geosciences Society, virtual, 6 Aug.

Terao, T., 2021: Impact of the Tibetan Plateau on the Atmospheric Heating Process over the Asian Monsoon Region. Asia-Oceania Geosciences Society, virtual, 4 Aug.

(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 大阪電気通信大学・工学部基礎理工学科

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ている。またその結果を用いて、ニュージーランド経度帯の内部磁気圏におけるプラズマ質量密度の高精度な長期モニタリングを行うものである。解析結果は、Ionosphere-Plasmasphere Electrodynamics (IPE) モデルを使った数値計算結果と比較し、日照の偏り、磁気圏電場の変動、電離圏加熱など、プラズマ圏プラズマの供給・損失に寄与する諸過程の効果を評価する計画である。

研究3年目(2020年度はコロナ禍の影響により研究を休止したため実質的には2年目)にあたる2021年度は、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。

モデルはFully Convolutional Network (FCN)、Long Short Term Memory Fully Convolutional Network (LSTM-FCN)、Residual Network (ResNet) の三種類のニューラルネットワークを試し、それぞれの成績を比較した。またモデルに入力するデータは、前処理手法を、前処理を行わず地磁気の生データを入力するものと、高速フーリエ変換(FFT)を行い地磁気のパワースペクトルを入力するものと、FFTを行い2つの観測点間の位相差を入力するものと、様々に変えて判定成績を比較した。

モデルと前処理手法の組み合わせで判定精度が最も高かったのは、ResNetに地磁気のパワースペクトルを入力したものを入力した組み合わせであった。この組み合わせでは、学習に使ったデータの範囲では85-87 %程度の正答率で分類できた。

さらに、この分類モデルをClass Activation Mapping (CAM) で判断根拠を可視化したところ、パワースペクトルの中でも、実際に磁力線共鳴が生じている時間帯の、共鳴周波数に近い周波数帯に重点的に着目していることが分かった。よって今後、CAMに着目することで、磁力線共鳴振動周波数そのものを判定するモデルの構築に道筋がつけられるものと期待される。

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を得られるようにするために以下の 1.検出器試作 2.データ取得手法の確立 3.データ解析の作業が必要となる。

本年度はデータ解析と平行して、検出器本体とデータ取得回路の検討を行った。

研究結果

本年度、米国ユタ州への渡航と複数人数による実験作業が COVID-19 の影響により困難であった。このため検出器試作を十分に進める事は出来なかった。

比例計数管の制作および、既存の測定回路を用いた試験測定のための可能な準備を明野観測所にて進めた。実際の制作は次年度以降となるので安定した制作手順を試してみる事は出来なかった。プリアンプ ディスクリミネーター・記録回路については過去に行った設計を元に、試作準備のための回路基板の制作を進めている。

データ解析では、これまでのユタ州での観測実験のデータの高層大気に対する応答を加味して再構成した宇宙線強度変動を宇宙線国際会議で報告した[6]。また雷雲下で変動する 2 次宇宙線についてこれまでの観測にない密度で 2 次元的にその影響をとらえた結果を報告した[7]。

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(2021年度)

学会報告

第37回宇宙線国際会議「Study on the cosmic ray intensity variation using scintillation counters for air shower observation」Online開催 12-23 July 2021

T.Nonaka et al, "Study on the cosmic ray intensity variation using scintillation counters for air shower observation" , Proceedings of 37th international cosmic ray conference , PoS(ICRC2021)1255

第37回宇宙線国際会議「Observation of Variations in Cosmic Ray Shower Rates During Thunderstorms and Implications for Large-Scale Electric Field Changes」

R.Abbasi et al, "Observation of Variations in Cosmic Ray Shower Rates During Thunderstorms and Implications for Large-Scale Electric Field Changes", PoS(ICRC2021)297

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, PoS(ICRC2021)1255
- [7] R.Abbasi et al. Proceedings of 37th international cosmic ray conference,PoS(ICRC2021)297

(別紙様式 1-2)

地上ライダーネットワークによる南米エアロゾル観測研究の強化
Improvement of aerosol observation study in South America by
ground-based lidar networks

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、先行研究 (SAVER-Netプロジェクト/JST-JICA) でアルゼンチン・チリに構築した地上観測網を発展させることによって、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拠点を構築することを目的とする。アルゼンチン・チリにボリビアを加え、エアロゾル観測を強化することで、南米中・南部における黒色炭素エアロゾルの特性や動態についての新たな科学的知見の創出を狙う。観測基盤の強化として、ライダーに偏光測定機能を付加する。この付加により、黒色炭素エアロゾルの検知能力を向上させると共に、ボリビアにおける都市大気汚染に関するエアロゾル研究への応用も目指す。ボリビアは、アマゾンからのバイオマス燃焼スモークの大規模移流が懸念されると共に、アルゼンチン等の南米南部地域へと輸送される際の窓口ともなる。そこで、ボリビアでのエアロゾル観測の強化と共に新規観測サイトの開拓により、黒色炭素エアロゾルの南米南部地域における空間分布の解明に資する。数値モデルによる南米南部地域での黒色炭素エアロゾルの飛来再現・予測精度の向上を念頭に、最適な観測地点を検討し効果的かつ効率的な地上観測網の構築・発展を目指す。

2 研究方法・計画

本研究では、ボリビア国におけるエアロゾル観測強化のため、首都ラパスに設置されている波長532nmでのミー散乱ライダーの改良を行う。このライダーに偏光測定機能を追加することで、球形エアロゾル (バイオマス燃焼スモーク等) と非球形エアロゾル (鉱物ダスト等) を分けて抽出する。観測データを蓄積し、エアロゾル種毎の高度分布を抽出し、その変動を把握する。この観測強化に加え、新規のライダー観測サイトとなる候補地を検討する。アマゾンから輸送されるバイオマス燃焼スモークの南部南米地域への飛来の再現・予測に有用な情報が得られることをサイト選考の条件とする。候補地選定の客観性を高めるため、ライダーデータに加えて、エアロゾル輸送モデルの結果も加味し検討する。関係者と観測環境等についても検討する。

3 研究結果

【新規観測サイトの検討】SAVER-Netライダーデータの解析結果と流跡線解析や数値モデルによる輸送経路解析も加味し、新規観測サイトの候補として、ボリビア東部の都市サンタクルス (17.64S, 63.14W) を選定した。サンタクルスはアマゾンスモークの南部南米地域への流入の上流に位置する。中流・下流域に多く存在する既存のSAVER-Netライダーサイトと合わせることで、モデル同化による南米スモーク再現・予測の高度化が期待できる。本共同研究に参画しているボリビアの共同研究者とも協議し、サンタクルスでの観測の実現性は高いと結

論づけられた。実現へ向けた協議を今後重ねていく。

【ラパスライダーの改良と観測】策定した設計案に基づき、偏光測定モジュールの試作及び試験観測を昨年度行った。今年度は装置故障の抑制とSN向上を企図し、試作機の遮光性を高める改良を施し、最終版を作成した（図1）。COVID-19による渡航規制は今年度も解除されなかったため、現地訪問を断念し、本モジュールを現地へ送付することとした。残念ながら今年度中の取り付け・観測開始には至らなかったが、本モジュールを用いた観測を次年度に実施する予定である。



図1 改良した偏光測定モジュール

【SAVER-Net等ライダーを用いたエアロゾル解析と応用】COVID-19以前のデータの解析は実施しデータセット化した（前年度成果）。一方COVID-19以降は、厳しい国内移動規制によりライダーの保守が行えず、2019年末以降は観測停止が余儀なくされた（結果として、観測データの蓄積や解析を行うことはできなかった）。そこで、COVID-19収束後のSAVER-Netライダーとラパスライダーの利用を見据え、以下2つの応用研究を行った。

（1）モデル同化研究の推進を念頭に、モデル同化用の測定パラメタおよびそのフォワードモデルの検討、およびデータ同化用の入力（観測）データセットの構築を既存のSAVER-Netデータを用いて行った。

（2）国際的な地球衛星観測ミッションへの貢献を見据え、ライダーデータを用いた地上検証を行った（図2）。ここでは、欧州宇宙機関

（ESA）で現在運用中のADM-Aeolus衛星搭載の風・エアロゾル計測ライダー（ALADIN）と国立環境研究所・九州大学で共同運用されているラマンライダー（九州大学応用力学研究所に設置）を用いた。2019年11月から2020年5月までの約半年間のデータに対して、衛星・地上でマッチアップしたデータはわずか9プロファイル（晴天かつ水平80km圏内）であった。有意な

地上検証を行うためには、昼夜連続観測をベースとしたデータの蓄積が肝要となる。ALADINと同型の雲・エアロゾル計測ライダーATLIDが2023年度に日欧共同地球観測衛星ミッションEarthCAREで打ち上げられる。COVID-19収束後は、ここで構築した地上検証プログラム群を転用することで、SAVER-Net等ライダーを用いた南米でのALADIN, ATLIDの地上検証を実施できる。

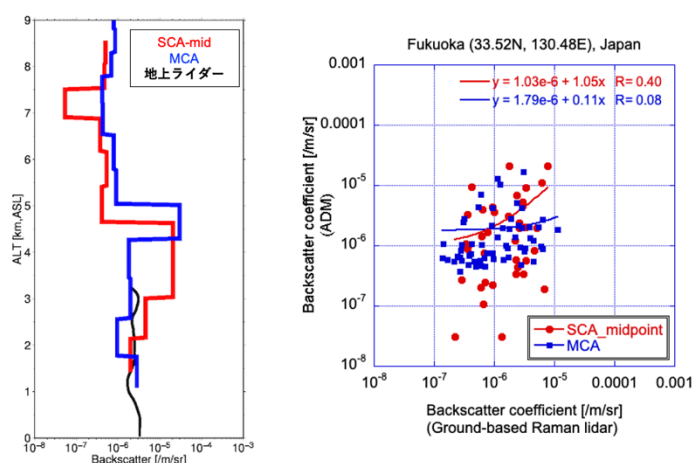


図2 測定された後方散乱係数を用いたADM-Aeolus衛星搭載ライダーの地上検証
左図) 2019年4月3日の0912UTCにおける高度分布 右図) マッチアップデータの散布図
ADM-Aeolusミッションで公開されているstandard correct algorithmを用いたプロダクト
(SCA-midpoint)とMie correct algorithmを用いたプロダクト(MCA)が用いられた

(別紙様式 1 - 2)

トロムソにおけるオーロラ・大気光の光学スペクトル観測を活用した 超高層大気研究

Research on upper atmosphere utilizing optical spectral
observations of aurora and airglow at Tromsø

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

近年の地上光学観測は、全天イメージング観測 (OMTI, etc.) に代表されるように水平 2 次元イメージングが盛んで、最近の高時間分解イメージングや高空間分解イメージングから従来の光学観測では捉えきれなかったようなダイナミックに変動するオーロラや大気乱流・音波領域の大気光変動の様子が捉えられるようになってきている。その一方で、オーロラや大気光の光学スペクトル観測は、イメージング観測と比べると精力的な観測が不足している状況にあると思われる。

本研究グループは、電通大が開発したスペクトログラフと名古屋大が開発した多波長フォトメータを用いてノルウェーのトロムソでオーロラ・大気光の分光観測を実施し、近年の研究進展を踏まえた分光観測による超高層大気研究を進めている。

研究進展状況

(1) Na 大気光スペクトルの解析

Na 夜間大気光の発光メカニズムは、チャップマンメカニズム (Chapman, 1939) として知られている化学反応プロセスで長年説明されてきた。チャップマンメカニズムによると、Na D_1 線 (589.756 nm), Na D_2 線 (589.158 nm) の発光強度比は、理論的に一定値 ($D_2/D_1 = 2$) となることが期待されるが、近年の観測においては、 D_2/D_1 発光強度比が、一定値とはならず、変動することが報告されており、この変動要因の解釈を行う為に、チャップマンメカニズムの修正が提案されている (Slanger et al., 2005; Plane et al., 2007; Harrell et al., 2010; Plane et al., 2012)。

本研究では、Na D_2/D_1 発光強度比の試験的な観測を目的として、ノルウェー、トロムソ (69.6°N, 19.2°E) で設置・運用している電通大スペクトログラフの回折格子を従来の 4 倍の高分解能の回折格子に交換することで波長分解能を 4 倍 (~ 0.4 nm 分解能 $\rightarrow \sim 0.1$ nm 分解能) にし、Na D_1 線 (589.756 nm) と Na D_2 線 (589.158 nm) を分離した分光観測を試みた。この試験観測は、2017-2018 年の冬季に実施しており、今年度は、取得したデータの解析を中心に研究を進めた。

取得した Na 夜間大気光のスペクトルデータにおいて、Na D_1 線、Na D_2 線のダブルピーク形状を確認、この形状に合わせて、背景光成分を設定・除去し、その後、ダブルガウシアンでフィッティングを行い、Na D_1 線と Na D_2 線の各々の発光強度を求め、両者の比を計算した (図 1 参照)。その結果、本試験観測においても D_2/D_1 発光強度比が、必ずしも $D_2/D_1 = 2$ とはならず、時間的に変動する様子を捉えることに成功した。本結果は先行研究で報告されている D_2/D_1 発光強度比の変動と整合的であり、チャップマンメカニズムの修正を支持する結果であると考えられる。

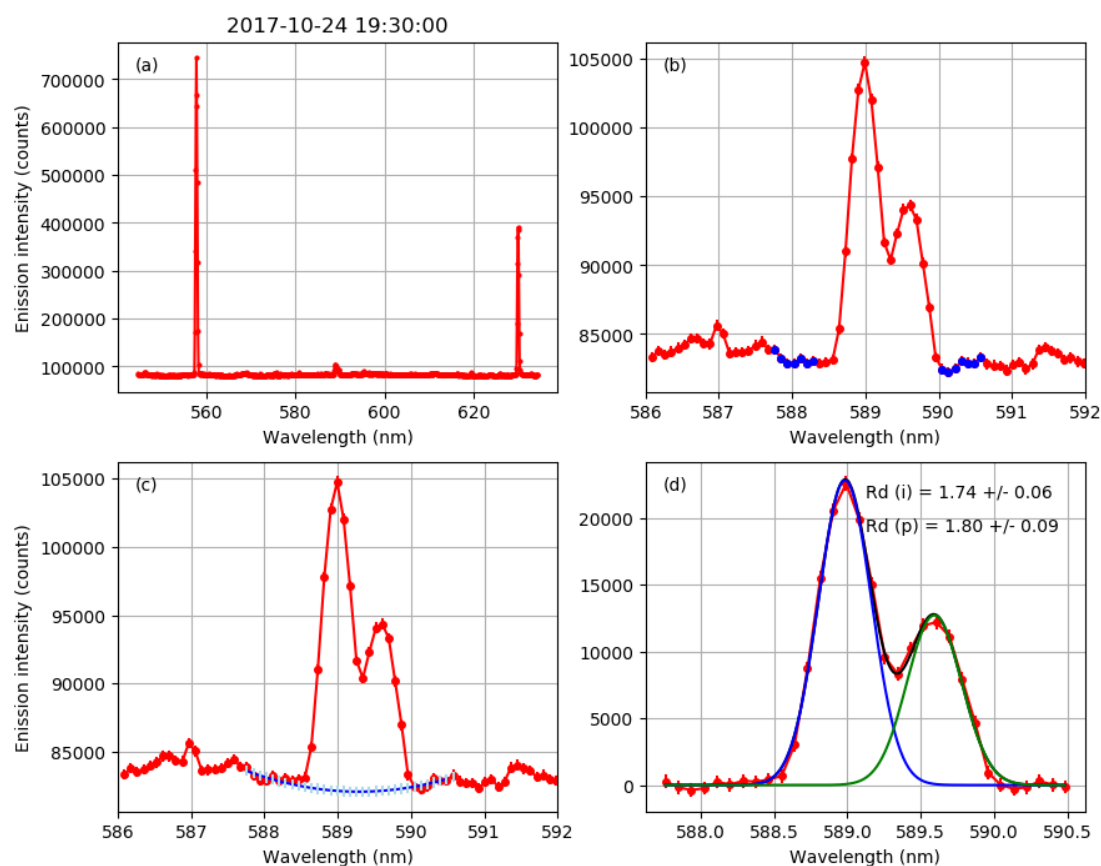


図 1. トロムソの電通大スペクトログラフによる Na 夜間大気光の観測例 (2017 年 10 月 24 日 19:00-20:00 UT). (a) 波長範囲 540-640 nm の観測スペクトル (赤). (b) 波長範囲 586-592 nm (Na D 線付近) の観測スペクトル (赤) と背景光レベルの推定に用いたデータ点 (青). (c) 波長範囲 586-592 nm の観測スペクトル (赤) と設定した背景光レベル (青). (d) 波長範囲 586-592 nm の背景光レベルを除去した観測スペクトル (赤) とダブルガウシアンフィッティングデータ (緑: Na D₁ 線, 青: Na D₂ 線, 黒: 緑と青の和).

(2) 紫外オーロラスペクトルを用いた熱圏温度推定手法の検討

先行研究において、紫外域の N₂ オーロラの高分解スペクトル情報を用いて熱圏温度を推定する手法があるが、高分解スペクトル計測の為に大型・高価な観測装置を必要とする。本研究では、小型・安価な装置による低分解スペクトル計測で熱圏温度の推定を可能とする為に、理論計算と試験観測による分光スペクトルデータの解析を組合せ、観測波長や温度推定手法について詳細検討を進め、その結果、N₂ の 2 つのバンドの強度比から熱圏温度を推定する手法を考案した。今後、考案手法を実現する為の実機の開発を行う予定である。

研究発表

T. T. Tsuda, K. Hosokawa, S. Nozawa, T. Kawabata, A. Mizuno, S.-i. Oyama, J. Kurihara, and K. Nielsen, Aurora and airglow observations by an optical spectrograph at Tromsø, Norway, JpGU Meeting 2021, online, June 2021. (poster)

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 highest accuracy cosmic-ray muon telescope

小井辰巳、中部大学・工学部

宇宙天気研究の分野は、高度に電子化・ネットワーク化が進んだ人類社会においてその重要性が増している。本年2月には、SpaceXが打ち上げたスターリンク衛星40器が太陽風の影響で失われるなど、改めて宇宙天気研究を深化させる必要性が浮き彫りとなった。我々は、インド・ウーティで行われている、GRAPES-3宇宙線観測実験の宇宙線到来方向を決定できるホドスコープ型のミュオン観測装置を使って、太陽活動などに伴う宇宙線変動を観測し宇宙天気研究に役だてようとしている。地上における宇宙線観測は、中性子モニターや宇宙線空気シャワーの観測によっても行われているが、中性子モニターはせいぜい数十GeVという、エネルギーの低い宇宙線を観測し、また検出器として宇宙線の到来方向を決定することができない。これに対して、空気シャワー観測は、1TeVを超える高いエネルギーの宇宙線を到来方向とともに観測できる。しかし高いエネルギーの宇宙線の到来頻度は低いので、宇宙天気で問題となる、比較的時間の短い変動を捉えるのにはむかない。これに対して、GRAPES-3のミュオン検出器は、宇宙線の到来方向をしることができ、数十GeVからの宇宙線を観測できるので、宇宙天気に関連する比較的短期間の変動を観測するのに適している。我々の観測装置は、ホドスコープ型の宇宙線ミュオン観測装置として、最高精度の方向分解能と最大の検出面積を持っている。

我々がこの検出器で見ている宇宙線は、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であり、これを利用した宇宙天気研究の進展を目標に、基礎研究としてGRAPES-3の広視野かつ高方向分解能を生かした過去の2太陽周期分の観測データに対する解析を宇宙天気研究の視点を含めて解析を行なった。

宇宙線の太陽時異方性をGRAPES-3の方向分解能を活かして、初めて2次元マップで描いた研究は、宇宙線国際会議の太陽圏領域でのホットトピックとして選出された。その他に、ミュオン観測装置のデータ取得回路の更新により、いままでよりも多くの情報が採取できるようになるとともに、詳細な解析のための気圧補正の高度化が試みられている。

21年度は、Covid19の対策のため残念ながらインドへ行くこともインドから研究者をよぶことも出来なかったが、リモート会議等で共同研究を進めている。また配分金は、インドでの観測設備やデータ保存装置の増強のために使わせて頂きました。

2021年度の成果報告（宇宙線国際会議）

High-resolution two-dimensional map of the solar time anisotropy obtained by the GRAPES-3 large-area muon telescope, H. Kojima et al., ICRC2021

An Advanced Triggerless Data Acquisition System for the GRAPES-3 Muon Detector, A.Jain et al., ICRC2021

Measurement of large angle muon flux in GRAPES-3 experiment using triggerless DAQ system, B.Hariharan et al., ICRC2021

Zenith angle dependence of pressure effect in GRAPES-3 muon telescope, M. Zuberi et al., ICRC2021

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

【研究目的】

太陽の近傍領域は、太陽風の加速機構など、太陽と惑星圏の相互作用を理解する上で基本的な課題を解き明かすために探査すべき重要な領域である。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、2025年12月の水星到着までの約7年間、惑星間空間を巡行する。「みお」および Mercury Planetary Orbiter (MPO) 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。この機会に、太陽風の一般的な性質や太陽からの質量放出現象、衝撃波等が太陽からの距離に伴いどのように発展するかを調べることが出来る。また、惑星（金星、水星）フライバイの機会には、内部太陽圏と惑星との相互作用を研究するデータの取得が可能である。

【研究方法】

惑星間空間巡航中は、「みお」とMPOはスタックされ推進モジュールに搭載された状態である。更に、「みお」の磁力計マストは水星周回軌道投入まで収納されている。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、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。ノイズの評価と除去には更に検討が必要であることから、今年度は MPO の磁場データを用い、データの補正が進んでいる金星フライバイの期間について解析し、太陽風と金星との相互作用を考察した。尚、本研究は、京都大学理学部地球惑星電磁気学講座の4年生の課題研究（卒業研究）として行った。

【研究結果】

2020年10月15日に、BepiColombo は昼側から金星に近づき、フライバイした後、長時間（約9時間）金星の尾部中を金星からの距離が遠ざかる方向に飛翔した。この間の MPO の磁場データを用い、金星から太陽方向の磁場成分 B_x がゼロクロスするタイミングの前後のデータに Minimum Variance Analysis (MVA) を施し、尾部 Current Sheet の法線方向を求めた。

BepiColombo は約 9 時間をかけ、8~45 Rv の距離の金星夜側尾部を観測した。大きな固有磁場を持つ地球と異なり、Current sheet の法線方向は 0 から 180度のあらゆる方向を向いたが、距離約 10Rv 程度で区切った範囲の中では、法線方向はある角度範囲に限定されていた。また、 B_x がゼロクロスする連続するイベントについて法線ベクトルの方向の変化を調べることで、Current sheet の構造が往復運動をしているのか、面が波打っているのかの判別を試みたが、明確な傾向は見られなかった。

【考察】

単一のフライバイデータでは、Current sheet の法線方向の変化が時間変化によるものか、空間変化によるものかを判別することは出来ない。更に、STEREO や SOHO の観測により、このフライバイの期間にコロナ質量放出 (CME) が金星に到達していたことが示唆されている(1)。金星の尾部の構造はダイナミックな変化をしていた可能性がある。しかし、本解析の結果は、10Rv 程度の空間スケール、あるいは2時間程度の時間スケールで Current sheet の構造が安定していたことを示していた。 B_x のゼロクロスが連続して起こることが、構造の動きによるものか、波打ちによるものかが明確にならなかったことについては、先行研究の地球の場合(2)と比べ、金星の Current sheet の構造が複雑であり、同じ手法では同定できない可能性がある。

【まとめ】

BepiColombo の観測は、Pioneer Venus や Venus Express 等の金星に近い軌道を周回していた探査機では観測しえなかった結果をもたらした。一方で、仕方がないことではあるが、探査機による磁場ノイズが大きく、プラズマ観測器や波動観測器の取得するデータ利用にも制約が大きく、詳細な解析を行うことの限界があった。

【引用文献】

- (1) Volwerk, M., et al. (2021). Ann. Geophys. 39(5): 811-831.
- (2) Rong, Z. J., et al. (2021). JGR: Space Physics 126(2): e2020JA028200.

【成果発表】

京都大学理学部地球惑星電磁気学講座の4年生が、卒業課題研究の発表を行った。

(別紙様式 1 - 2)

Comet Interceptor ミッションのための搭載機器・システム検討

Study of payloads and spacecraft system for ESA's 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紫外線・太陽風電子によって部分電離され、太陽風と相互作用する。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彗星の周回探査は、このプラズマ-大気相互作用に関する知見を提供したが、その一方で、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、初期検討を進めている。2020年度後半には、ISAS所内検討チームの設立が認められ、2021年度の終わりまでに科学審査、プリプロ候補移行審査、MDR, SRR, SDRなど複数の大きなマイルストーンが設定されている。

研究方法

本申請では、Comet Interceptorミッションの観測器と探査機システムの検討を実施した。

内容は、

- 1) 各観測器の開発状況を踏まえた、理学観測と成果創出までの道筋の詳細化
- 2) 上記の技術的実現性の確認
- 3) 探査機システムのインタフェースの議論

である。打ち合わせは、COVID-19の状況に鑑みて全てオンラインで実施した。国内では毎週のハードウェア定例会を実施した。ミッションをリードする欧州側とは隔週のハードウェア定例会、不定期のシステム会合、1-2か月毎のサイエンス勉強会を実施した。また、搭載機器の一つであるイオン質量分析器の開発のため、実験設備を整備した。

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・観測器ともに着実に検討を詳細化し，メーカ検討も経てコスト上限を確定し，2022年度初頭にmission definition reviewおよびsystem requirements reviewを受審できる見込みを得た．また，観測器開発については質量分析器のテストモデル性能評価を実施し設計通りの質量分解能を確認できた他，静電分析器の設計も確定した．欧州側も，システムメーカ候補2社による検討が進められており，preliminary design reviewを経て2022年6月にプロジェクト化する見込みである．この際，日本側とのインタフェース情報が必要であり，本研究で進めた検討結果が反映されている．

成果発表

- 船瀬龍ほか，”Comet Interceptorミッションの検討状況”，第22回宇宙科学シンポジウム，ポスター発表，virtual，2022年1月6日．
- 村田直史，松岡彩子，横田勝一郎，笠原慧，”宇宙科学ミッションに適用可能な小型高精度新方式磁力計 ～MMX及びComet Interceptor搭載に向けた開発状況～”，第22回宇宙科学シンポジウム，ポスター発表，virtual，2022年1月6日．
- 笠原慧，河北秀世，新中善晴，吉岡和夫，坂谷尚哉，亀田真吾，松岡彩子，村田直史，原田裕己，船瀬龍，中島晋太郎，尾崎直哉，宇佐美尚人，Comet Interceptor science team，”Comet Interceptorの科学目的とミッション要求”，惑星圏科学会，ポスター発表，virtual，2021年9月16日．
- Kasahara, S., S. Yokota, K. Asamura, Y. Saito, M. Hirahara, A. Matsuoka, N. Murata, T. Amano, K. Keika, Y. Ohira, and K. Yoshioka, "Challenges for ion measurements in a comet mission", 地球惑星科学連合2021年大会, ポスター発表, Virtual, 2021年06月04日．

(別紙様式 1 - 2)

Tweek空電を用いた高精度な自動下部電離圏反射高度マッピングシステムの開発
Development of automatically accurate estimation system for reflection
height in the lower ionosphere using tweek atmospherics

大矢 浩代、千葉大学・大学院工学研究院

1. 研究目的

本課題の研究目的は、東南アジア VLF 帯電磁波観測ネットワーク AVON (Asia VLF Observation Network)および名古屋大学宇宙地球環境研究所 (ISEE)が国内外で展開している VLF/LF 帯電磁波観測ネットワークデータを使用することにより、tweek 空電のソースである雷放電の発生位置を高精度に自動推定し、下部電離圏反射高度をマッピングするシステムを開発することである。Tweek 空電とは、雷放電から発生し、地球-電離圏導波管内を長距離伝搬する VLF/ELF 帯電磁波である。地上 whistler 空電と同じ周波数帯域 (1.5-10.0 kHz)であるが、tweek の継続時間は 5-100 ms と非常に短い (図 1)。VLF/ELF 波の地球-電離圏導波管内の夜間の減衰率は 1-3 dB/1000 km と小さいため、日本で夜間に観測された tweek の伝搬距離は 1000-10000 km と長い。従来、tweek は昼間は太陽からの極端紫外線や X 線による強い電離により吸収されてしまい観測できないと考えられてきたが、本研究代表者は tweek が昼間でも観測され、反射係数の厳密式を解くことにより、昼間の tweek の減衰率はこれまで考えられていた値 (100 dB/1000 km) より小さく (20 dB/1000 km)、昼間でも伝搬可能であることを示した [Ohya et al., JGR, 2015]。Tweek は D 領域・下部 E 領域のある一定の電子密度面 (数十個 cm^{-3}) で反射される。したがって、tweek 反射高度の変動は D 領域・下部 E 領域の電子密度変動に対応しており、また ISEE 母子里・鹿児島観測所での tweek 受信率は夜間で数十~100 個/分であり、また海上の様々な伝搬パスが予想されることから昼夜の下部電離圏モニタリングとして有用である。

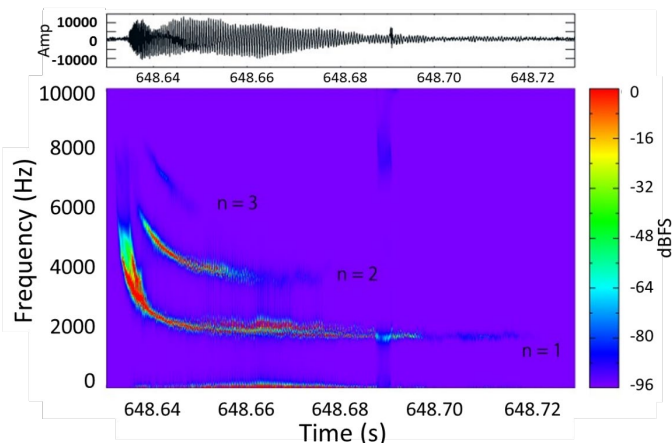


図 1 1980 年 12 月 5 日 23:50:48.63 LT に鹿児島で観測された tweek 空電の波形 (上) とダイナミックスペクトル (下)

2. 研究方法 (使用した共同利用装置・施設等を含む)

本研究課題で、tweek 反射高度の自動マッピングシステムを実現するために、2021年度も引き続き伝搬距離推定精度の改善を行った。使用した共同利用装置は、ISEE 附属母子里観測所および鹿児島観測所の ELF/VLF 帯電磁波観測ネットワークシステムである。2019年6月に鹿児島観測所、2020年3月に母子里観測所における VLF 観測システムが改良され、tweek の観測時間が1時間中4分から59分へと長くなり、サンプリング周波数が 20 kHz から 40 kHz となった。これにより D 領域電離圏のモニタリングが、より高時間分解能で長時間行うことができるようになった。

これまでTweekの水平伝搬距離および反射高度は、最大エントロピー法により描いたダイナミックスpekトル上に、球面地球―電離圏導波管モデルでの周波数分散性の式(1)を最小二乗法によってフィッティングし推定していた[Ohya et al., EPS, 2003]。

$$f(t) = \frac{(t_g + t)f_c}{\left(1 - \frac{c}{2af_c}\right) \sqrt{(t_g + t)^2 - \left(\frac{d}{c}\right)^2}} \quad (1)$$

ここで、 t_g は伝搬時間、 f_c は一次モードのカットオフ周波数、 d は水平伝搬距離、 c は光速および a は地球半径である。

本研究では、以下の推定方法を提案し、検証を行った。式(1)を変形し、

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} = \frac{c}{d}t + \frac{c}{d}t_g \quad (2)$$

とし、 f_c を 1500-2400 Hz の範囲で 100 Hz ステップで変えながら、式(2)を計算する。その計算結果を2次関数でフィッティングし、2次項の係数を求める。2次項の係数が最小のとき、 f_c が推定値となり、式(2)は線形となる。最小二乗法による直線の傾きから d を推定する。

3. 研究結果および考察

疑似tweek空電によるシミュレーション推定精度の評価では、水平伝搬距離の誤差は新規手法で8.2 %、従来手法では15.3 %となった。更に2020年08月11日 12:00 UT に観測された4 個のtweek 空電に対する新規手法による推定位置は、ひまわり8 号による雲の位置およびWWLLNの雷の位置とよく一致し、新規手法の有効性が示された(図2)。母子里、鹿児島に加え、さらに1点以上の観測データを用いれば、雷の位置をさらに高精度で推定でき、tweek反射高度のマップが作成できると思われる。

成果発表

EPS誌へ論文投稿を準備中。

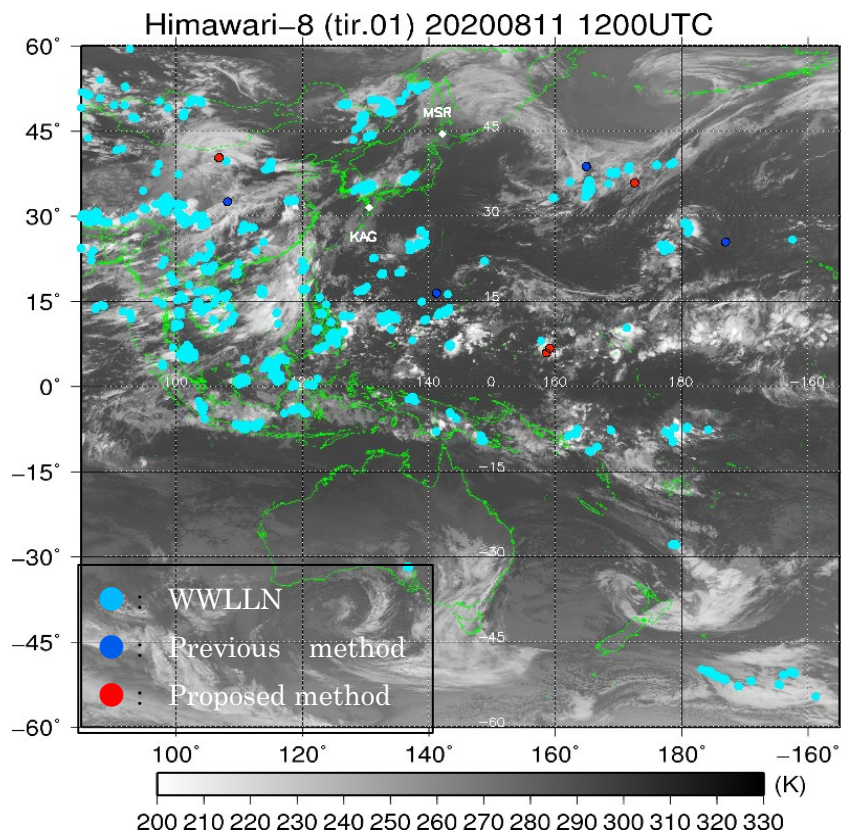


図2 2020年8月11日12:00 UT のひまわり8号による雲画像、WWLLNデータと、tweekによる雷推定位置の比較