

1. 国際共同研究 目次詳細

(所属・職名は2021年3月現在)

(注2) : 新型コロナウイルスの影響で中止

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
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	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	1	
中澤 知洋	名古屋大学	素粒子宇宙起源研究所	准教授	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	3	
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2	5	
中村 琢磨	オーストリア科学アカデミー	宇宙科学研究所	常勤研究員	磁気圏尾部リコネクション過程におけるジェット先端領域の安定性	7	
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	9	
宮下 幸長	Korea Astronomy and Space Science Institute	Space Science Division	Senior Researcher	ERG衛星と低高度衛星の連携による内部磁気圏におけるサブストームに伴う変動の研究	11	(注2)
野村 麗子	宇宙航空研究開発機構	国際宇宙探査センター	招聘研究員	米国観測ロケット実験LAMPに搭載の磁気インピーダンス (MI) センサの研究開発	12	
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	13	
島 伸一郎	兵庫県立大学	大学院シミュレーション学研究科	准教授	超水滴法に基づく雲と降水の精密シミュレーションに関する国際共同研究の推進	15	
野中 敏幸	東京大学	宇宙線研究所	助教	宇宙線空気シャワー観測装置の惑星間空間擾乱の観測への利用方法の研究	17	
Nishiizumi Kunihiko	University of California, Berkeley	Space Sciences Laboratory	Senior Space Fellow	隕鉄中の宇宙線生成核種 ¹⁴ Cの測定	19	
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	21	
池田 昭大	鹿児島工業高等専門学校	一般教育科	講師	シューマン共鳴多点観測による雷活動・電離圏変動の調査	23	(注2)
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	24	
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・システム設計	26	
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	助教	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	28	

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
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観測II	30	
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に迫る国際共同研究	32	
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搭載可視高速撮像装置の設計と開発	34	
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	36	(注2)
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	37	
成影 典之	自然科学研究機構 国立天文台	SOLAR-C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	39	
平原 靖大	名古屋大学	環境学研究科	准教授	ALMAアーカイブデータ解析による太陽系内天体大気の物理化学プロセスの解明	41	
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	44	
小島 浩司	愛知工業大学	工学部	客員教授	宇宙線をプローブとした太陽風とIMFの断層撮像的観測	46	
高橋 透	情報・システム研究機構 国立極地研究所	研究教育系	外来研究員	オーロラパッチ内部の分極電場	48	
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	50	
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	53	
津田 卓雄	電気通信大学	大学院情報理工学研究科	助教	トロン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	55	

(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 e
astern Siberia

中井太郎、国立臺灣大學・森林環境暨資源學系

【研究目的】

環北極陸域は気候変動により大幅な気温上昇が予測されており、20世紀後半の30年間は温暖化が顕著に進行した(Serreze et al., 2000)。またその影響が、環北極陸域の生態系や水循環過程に既に現れていることが指摘されている(e.g., Hinzman et al., 2005)。このような気候変動が将来、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。

【研究方法】

研究代表者は、熊谷朝臣氏（東京大学大学院農学生命科学研究科教授・名古屋大学宇宙地球環境研究所客員教授）とともに、動的全球植生モデルSEIB-DGVMを樹木個体ベースで蒸散および関連する生理応答特性を表現するように改良し、陸域生態系動態モデル(S-TEDy)を開発した。本研究では、S-TEDyを東シベリアのカラマツ林に適用するための改良、特に、土壌の凍結融解過程を表現する土壌物理モデルの改良を進めた。2019年度は地温分布モデルに必要な係数の特性について、実測との比較から解析した。そこで2020年度は生態水文学的に重要な凍土の融解深と土壌水分についてモデル化した。

永久凍土地域の活動層（季節融解層）は、凍土面で下方浸透を遮ることで融雪水や降水を一時的に貯留し、植物にとって貴重な水資源供給システムとなる。そのため、この地域での土壌水分を計算するためには、季節的に変化する凍土の融解深を計算する必要がある。当初は地温の鉛直分布を計算して融解深を求めることを試みたが、現実的な結果を得ることは難しいことが分かった。そのため、融解深 d は土壌の熱伝導方程式の単純化した解の一つであるStefan解を採用し、次式で与えた (e.g., Hinkel and Nicholas, 1995)。

$$d = \sqrt{\frac{2kI_{TS} \times 86400}{L_f \rho_w \theta_{wi}}}$$

この式では、地表面の正の積算温度 I_{TS} と前年秋の凍結直前の土壌水分 θ_{wi} によって融解深 d が求められる。この d が根圏深より浅い場合、土壌水分の計算において根圏より下への下方浸透と下からの毛管上昇はゼロとした。 d が根圏深より深い場合、 d を地下水面として下方浸透と毛管上昇を計算した。

【結果および考察】

実測の地温分布から推定される最大融解深は1.5m前後であることから、今回導入した土壌の融解深モデルは実測を良く表現した。また体積含水率は、春の融雪期に上昇し、その後秋に向けて減少する実際の季節変化を表現した。また、凍結土壌が下方浸透を遮る効果

を考慮することで、考慮しない場合に比べ夏の土壌水分減少が緩やかになった。

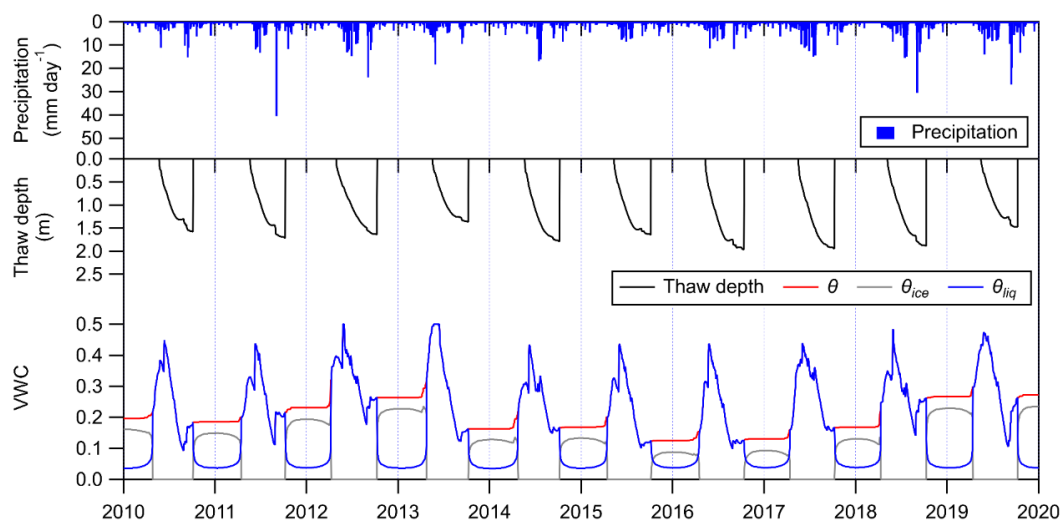


図 1 降水量（上段）、土壌の融解深（中段）および体積含水率（下段）の季節変化。体積含水率は全体の量（赤）および液体水（青）と氷（灰色）の寄与毎に示した。

このモデル計算を2100年まで実施した結果、降水量（フォーシングデータ）は将来増加傾向としたものの、温暖化によって土壌の融解深が深化し、土壌水分が減少することで、将来的に土壌が乾燥化することが示唆された。このことが森林生態系の動態にどう影響を及ぼすか、今後検討していく。

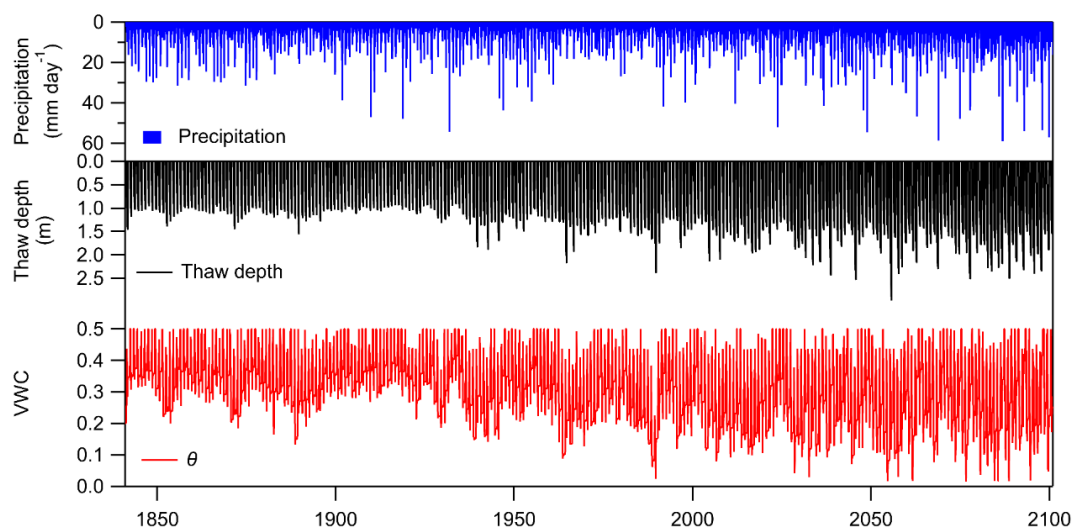


図 2 降水量（上段）、土壌の融解深（中段）および体積含水率（下段）の計算期間全体（1841年から2100年の260年間）の長期変動。

なお、モデル改良のための検証データと知見を得るために、2020年度もロシア・サハ共和国のヤクーツク近郊にあるスパスカヤパッド研究林に出張する予定であった。しかしながら、新型コロナウイルスの影響でロシア入国が不可能となり、出張を断念した。

【成果発表】 Nakai, T., Hiyama, T. Modeling of soil moisture dynamics in a larch forest in eastern Siberia. 11th Symposium on Polar Science, Online Meeting, November 16 – December 18, 2020.

(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、さらにこのガンマ線の被曝量が 1.4 μ Gy に達することを確認した[3]。

世界的な雷ガンマ線研究の進展を受けて、2020 年 11 月に打ち上げを迎えた衛星が 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雷放電ガンマ線同時観測を、世界で初めて実施する予定であった。我々はガンマ線電子線装置および可視光カメラの開発に参加しており、TARANIS の日本チームを構成している。我々の地上観測の世界最先端の知見と、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、世界的な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る。

2 : 研究結果

本年度は東京大学の大学院を優秀な成績で卒業（研究科賞を受賞）した和田博士が、TARANIS 衛星の打ち上げ後のキャリブレーションに立ち会うために 11 月からフランスに滞在していたが、大変残念なことにロケットの不具合により衛星の打ち上げは失敗してしまった。独自性の高い重要な観測能力を失ったことで、TGF/TLE と雷放電の研究は大きな損害を受けており、痛恨の事態である。

フランスではそのリベンジ衛星 TARANIS2 (仮称)の計画が急速に立ち上がり、CNES を中心に Phase-A スタディーが始まっている。打ち上げ当日にパリで準備をしていた和田博士は、日本グループの代表としてパリ大学/CNES のフィリップ・ロラン主任研究員とともに XGRE2(仮称)の検討に直ちに参画し、現在も深く関わっている。XGRE2 の装置そのものはフランスで開発するが、日本発の技術である MPPC 光センサー(浜松ホトニクス社)を用い、GSO シンチレータ(オキサイド社@山梨県)あるいは GAGG シンチレータ(古河機械金属製など)を検出器とする構想が真剣に検討されており、そのサポートを始めた。

2020 年度は 10 月 22 日から 2021 年 3 月 17 日まで、金沢市の 2 箇所で大製の大規模検出器を一部予算にとって設置し、他にも 10 個以上の小型検出器を運用した。大型検出

器では、2021年1月8日夕刻と9日の早朝に雷ガンマ線イベントの観測に成功した。鉛コリメータを用いた MeV ガンマ線の指向性観測に初めて成功し、同時に高エネルギー電子も実測できるなど、画期的なデータを得られた。現在そのデータ解析中である。

3：まとめ

和田君のフランス訪問により、TARANIS チームにおいて、日本チームの存在感をさらに示すことができ、リベンジ計画に主体的に参加する機会を得た。2020年7月には JpGU 研究会で発表を3つ、2021年3月には日本物理学会で学会発表を1つ実施している。

5：成果発表

- ・ Yuuna Tsuji, Kazuhiro Nakazawa, Shohei Hisadomi, et al. "Gamma-ray Observation of Winter Thunderclouds: Long-distance tracking of long burst with monitoring posts", JpGU-AGU2020、オンライン 2020.7.15"
- ・ 久富章平、中澤知洋、辻結菜、Alexia Fabiani 他「雷活動に由来するガンマ線の観測プロジェクト：2019年度の多地点観測の進展」、JpGU-AGU2020 オンライン 2020.7.15
- ・ 久富章平、中澤知洋、辻結菜、伊神勇作、小谷大貴 他「雷活動に由来するガンマ線の観測プロジェクト：2020年度における電子加速域の高度測定を試み」、日本物理学会、2020、オンライン、2021.3.12
- ・ Wada, Y.; Enoto, T.; Nakazawa, K.; Odaka, H.; Furuta, Y.; Tsuchiya, H., "Photonuclear Reactions in Lightning: 1. Verification and Modeling of Reaction and Propagation Processes", Journal of Geophysical Research: Atmospheres 125, 10.1029/2020JD033193, 2020.10.01
- ・ Wada, Y.; Enoto, T.; Nakazawa, K.; Odaka, H.; Furuta, Y.; Tsuchiya, H., "Photonuclear Reactions in Lightning: 2. Comparison Between Observation and Simulation Model", Journal of Geophysical Research: Atmospheres 125, 10.1029/2020JD033194, 2020.10.01
- ・ Yuasa, Takayuki; Wada, Yuuki; Enoto, Teruaki; Furuta, Yoshihiro; Tsuchiya, Harufumi; Hisadomi, Shohei; Tsuji, Yuna; et al. "Thundercloud Project: Exploring high-energy phenomena in thundercloud and lightning", Progress of Theoretical and Experimental Physics 2020, 10.1093/ptep/ptaa115, 2020.10.09

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, 06113 (2019)

(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 2

Investigation of vertical atmospheric couplings in Jupiter, Mars,
and Venus by the connection of Hawaiian small telescope
with radio / space telescopes & orbiters : 2

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

2020 年度はコロナ禍に見舞われ、本来想定した現地観測作業を行うことができず、緊急の故障対応派遣(鍵谷、2020 年末)を行えたに留まった。とはいえ、コロナ禍の前に行われた観測による成果創出、および装置変更等ができないながらの遠隔操作による観測継続を行うことはできた。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。なお、これらの活動で東北大では博士論文 1、修士論文 2、および名古屋大で修士論文 2 を得た。

(1) 観測活動：ハレアカラを中核として

木星では、Juno 探査機を支える電波-赤外-可視地上観測を実施。Subaru-8m では 2020 年 7 月末に中間赤外観測装置 COMICS の最終観測となった「木星成層圏・熱圏の変動観測」を国立天文台・三鷹から遠隔実施した。

冥王星では、stellar occultation 検出を目指す京大チーム観測を支援し、2015 年の New Horizon 観測時から外圏大気量が 7%/年程度の急激な縮小を遂げている可能性を示唆した。

金星では、下部中間圏での風速場導出を査読論文として成果公表した。火星では、2018 年

全球ダストストーム時の超高層変動を成果としてまとめ、論文投稿中である。

<論文>

Arimatsu et al. (2020). Evidence for a rapid decrease of Pluto's atmospheric pressure revealed by a stellar occultation in 2019. *Astron. Astrophys.* 638, L5.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/202037762>

Takami et al. (2020). Evaluation of a method to retrieve temperature and wind velocity profiles of the Venusian nightside mesosphere from mid-infrared CO₂ absorption line observed by heterodyne spectroscopy. *Earth Planet Space* 72:60.
<https://doi.org/10.1186/s40623-020-01188-0>

<発表>

Miyamoto+. Zonal wind acceleration in the Martian mesosphere during the global dust storm 2018 observed by IR heterodyne spectroscopy. JpGU-AGU Joint Meeting 2020. 2020/7.

<報告>

笠羽康正、巨大惑星の屋根：宇宙空間へつながる木星の大気を探る。国立天文台ニュース 2020年9月号。P.8-9. https://www.nao.ac.jp/contents/naoj-news/data/nao_news_0326.pdf

(2) ハレアカラ観測施設整備：現地訪問が大変困難な中、T40/T60 望遠鏡遠隔運用を支えるとともに、2021年度の展開を期して近赤外線 Echelle 分光器および中間赤外線レーザーヘテロダイナミック分光器の整備・開発を進めた。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、主鏡を日本に戻して東北大での各種の準備作業を進めた。2021年度には、現地の load 縮小と running cost 圧縮のため T40 の機能を T60 に集約する予定である。また、PLANETS-1.8m の主鏡研磨を経て実試験観測の実現へ進めていく。

<発表>

Hirahara+ (2020). Development of the liquid nitrogen cooled hollow core waveguide fiber for the mid-infrared region. *Proc. SPIE 11451, Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation IV.* <https://doi.org/10.1117/12.2561187>

Kagitani+ (2020). High dynamic-range observation using a 1.8-m off-axis telescope PLANETS: feasibility study and telescope design. *Proc. SPIE 11445, Ground-based and Airborne Telescopes VIII.* <https://doi.org/10.1117/12.2556458>

Nakagawa+ (2020). Broadband mid-IR fiber optics for heterodyne spectroscopy in solar system exploration missions. *Proc. SPIE 11451, Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation IV.* <https://doi.org/10.1117/12.2561939>

<発表>

Kambara+, Development of a near-infrared high-resolution Echelle spectrograph ESPRIT for planetary atmospheric observations. JpGU-AGU Joint Meeting, 2020/7.

(別紙様式 1 - 2)

磁気圏尾部リコネクション過程におけるジェット先端領域の安定性

Study on the stability of the reconnection jet fronts in the Earth's magnetotail

中村 琢磨、オーストリア科学アカデミー・宇宙科学研究所

本課題は、磁気リコネクション過程において2次的に発生する乱流現象及びそれに伴うエネルギー変換過程の解明を目的としている。磁気リコネクションは、磁気シアのあるプラズマ境界をまたいで磁力線が繋ぎ変わることで、電流層に蓄積された磁気エネルギーを爆発的にプラズマの運動また熱エネルギーに変換するプラズマ物理において最も重要なエネルギー変換過程の1つであり、太陽系から銀河ジェットまで様々な領域で起こる爆発的なプラズマ現象において中心的な役割を果たすと考えられている。例えば、地球磁気圏においては、磁気リコネクションが磁気圏夜側に伸びる尾部電流層に蓄積された磁気エネルギーを解放する事で、オーロラサブストームに代表される大規模な磁気圏擾乱が駆動されると考えられており、本過程におけるエネルギー変換過程を定量的に理解する事が、磁気圏物理を理解する上での最重要課題の1つとなっている。また、太陽物理においては、磁気リコネクションが太陽表面で起こるフレア爆発を駆動していると考えられている。このように、本過程におけるエネルギー変換過程の理解は、地球磁気圏また太陽物理など各単体領域の理解を超えて太陽-地球系を包括的に捉えた宇宙天気という視点からも重要である。磁気圏や太陽表面で起こる磁気リコネクションは、電磁流体(MHD)スケールに発展する大規模な現象であるが、課題代表者らの昨年度までの粒子スケール物理を考慮した関連研究により、地球磁気圏や太陽表面を含む幅広いパラメータ範囲で、磁気拡散領域と呼ばれる磁気リコネクション過程の磁力線の繋ぎ代わりが起こる中心領域に加えて、拡散領域の外側のリコネクションジェット先端領域で粒子スケールの波長を持つLower-hybrid drift instability(LHDI)が普遍的に成長することが示された[参考文献1]。さらに、課題代表者がこれまでに行った3次元完全粒子シミュレーションにより、このLHDIによって起こりうるエネルギー輸送の強度が拡散領域で予測される強度と同等レベルであることが示された。

このような背景の下、本プロジェクトでは本年度、課題代表者が名古屋大学情報基盤センターの運用するスーパーコンピュータFX1000を名古屋大学HPC計算科学連携研究プロジェクトの計算時間を使用して、これまで行っていなかったガイド磁場(リコネクション面に垂直成分の磁場)を考慮した粒子シミュレーションを新たに行い、これまで行った計算結果と合わせてエネルギー輸送のガイド磁場依存性を調べ、その結果を磁気圏においてMM S衛星を用いて既に観測されているジェット先端領域の粒子データと比較し、さらに幅広いパラメータ下で発生するLHDIの線形解析と合わせることで、太陽表面にも応用できるジェット先端領域のエネルギー輸送過程を定量的に理解する計画であった。しかし、これまでの計算結果のデータ保存に申請した計算時間を消費した関係で新たな計算が実行できなかったこと、また新型コロナウイルスの影響で、名古屋大学を共同研究者らと訪れ観測結果との比較また太陽物理への応用等の研究・議論を効率的に進めることができなかった為、計画していた研究計画を完遂させるに至らなかった。

その代替として本年度は、共同研究者らとオンラインで会議し、改めて今後の方向性を議論した。具体的には、現在、ジェット先端領域を含め太陽表面で起こる磁気リコネクション領域をより高精度に観測する次世代観測衛星PhoENiX計画が本課題の共同研究者である岡博士を中心に進められており、本課題代表者も昨年度より本計画にScience Advisoryとして関わっている他、本課題副代表梅田博士の所属する名古屋大学宇宙地球環境研究所では太陽表面物理の研究が積極的に進められているという点を考慮し、課題代表者が行ってきた粒子シミュレーションデータの解析を太陽観測に応用できる形でアウトプットさせ

ていくこと、また、MHDシミュレーションが主流の太陽表面のシミュレーション研究において、本課題で行っているようなローカルな粒子シミュレーションを連携させる定量的なアプローチを取ることの有用性やその具体的な方法など、本課題の太陽表面物理への応用について詳細な議論を行った。その後、新たに、これまで行った計算の粒子データの解析を進めている（図1）。また本年度は、国際会議（いずれもオンライン）にて本課題に関連する2つの招待講演を行った（成果発表1,2）。

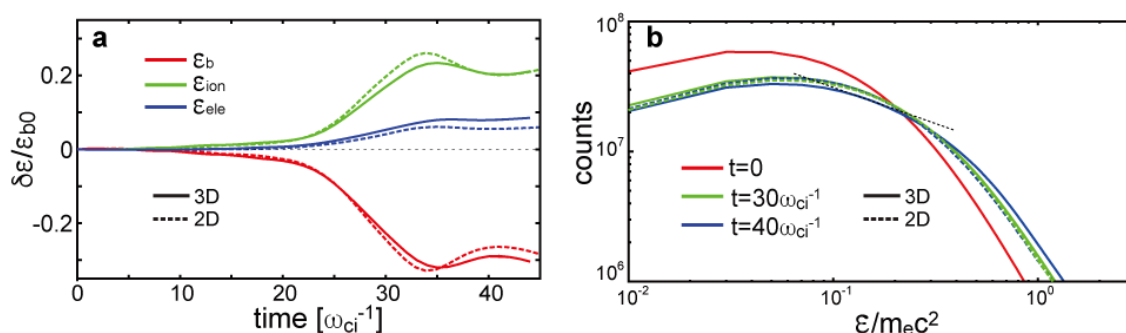


図1 : Nakamura et al. [2019] (参考文献1) で行った粒子シミュレーションの粒子データ解析結果。シミュレーション領域内の(a)磁場、電子粒子、イオン電子の全エネルギーの時間変化、及び、(b) 電子のエネルギースペクトルの時間発展。磁気リコネクションの成長と共に、磁場のエネルギーが解放され、電子とイオンの運動エネルギーに変換される。3次元計算の場合にのみ、ジェット先端領域におけるLHDIの成長と共に電子が負荷的に加熱される。この付加的な加熱は比熱的電子の生成を伴う。

参考文献：

- [1] [T.K.M. Nakamura](#), [T. Umeda](#), R. Nakamura, H. S. Fu, & [M. Oka](#), Disturbance of the Front Region of Magnetic Reconnection Outflow Jets due to the Lower-Hybrid Drift Instability, *Physical Review Letters*, 123, 235101, 2019

【成果発表】

- [1] (学会発表) [T.K.M. Nakamura](#), [T. Umeda](#), R. Nakamura, H. S. Fu, & [M. Oka](#), Disturbance of the Front Region of Magnetic Reconnection Outflow Jets due to the Lower-Hybrid Drift Instability, *the EGU General Assembly 2020*, online, May. 2020 (highlight)
- [2] (学会発表) [T.K.M. Nakamura](#), [T. Umeda](#), R. Nakamura, H. S. Fu, & [M. Oka](#), Disturbance of the Front Region of Magnetic Reconnection Outflow Jets due to the Lower-Hybrid Drift Instability, *4th Asia Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP)*, October 2020 (invited)

(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・環境計測研究センター

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ミー散乱ライダーの改良を行う。現在運用されているライダーは単波長 (532nm) の後方散乱信号を測定する仕様となっている。ここに偏光測定機能を追加する。この改良によって、バイオマス燃焼スモークや大気汚染性の球形エアロゾルと鉱物ダストなどの非球形エアロゾルに分けて測定し、ラパスにおけるエアロゾル特性を研究する。昨年度は本改良を取り入れたライダー装置全体に対する最適設計案を策定した。そこで今年度は、物品の調達および改良したライダーによる連続定常観測を行う。また、観測データの蓄積と共にデータ解析を行い、エアロゾル種の識別や光学特性の抽出とそれらの統計解析によりエアロゾルの変動の把握を進める。

3 研究結果

【ラパスライダーの改良】

昨年度策定した設計案に基づき、大気エアロゾルによる後方散乱光の水平・垂直成分を分離測定するための偏光測定モジュールを作成した (図 1)。本モジュールの試験計測を環境研にて行い、正常に稼働することを確認した。ラパスにて本モジュールをライダーへ組込み、定常観測を開始する予定だったが、コロナ禍による渡航規制のため断念した。来年度での実施を予定している。

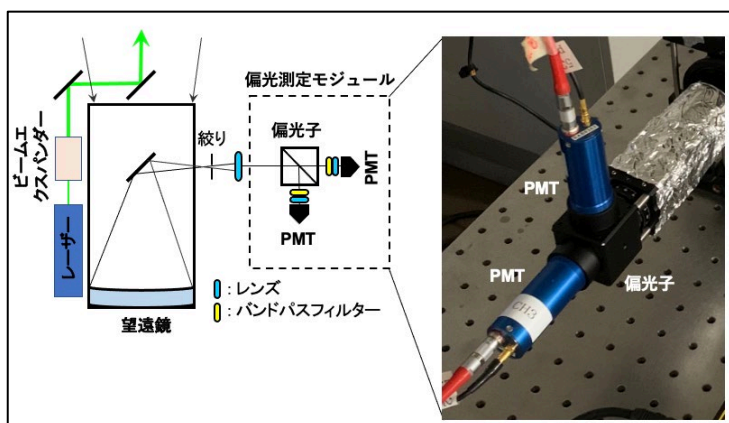


図1 策定したライダーシステム（左）と偏光測定モジュール（右）

【SAVER-Netライダーデータを用いたエアロゾル解析】

昨年度改訂した解析システムを用いて全9地点のSAVER-Netライダーデータの再処理を行った。高濃度エアロゾルイベントの集積を様々な地域と時期に対して行い、エアロゾル種毎の光学特性や動態の特徴化を進めた。その結果の一例として、アルゼンチンの内陸に位置するコルドバ観測サイトデータを用いた解析結果を図2に示す。コルドバのライダーは偏光測定機能を有し、そのデータを用いることで球形エアロゾル（スモーク、大気汚染粒子等）と非球形エアロゾル（鉱物ダスト）の時間・高度分布を得ることができる。高濃度イベントは風向に対して相関が見られ、後方流跡線解析や衛星データとの対応から、球形粒子はパラグアイの森林火災起源のスモーク粒子、非球形粒子はモンテ砂漠（アンデス山脈近傍）起源の鉱物ダストと考えられる。

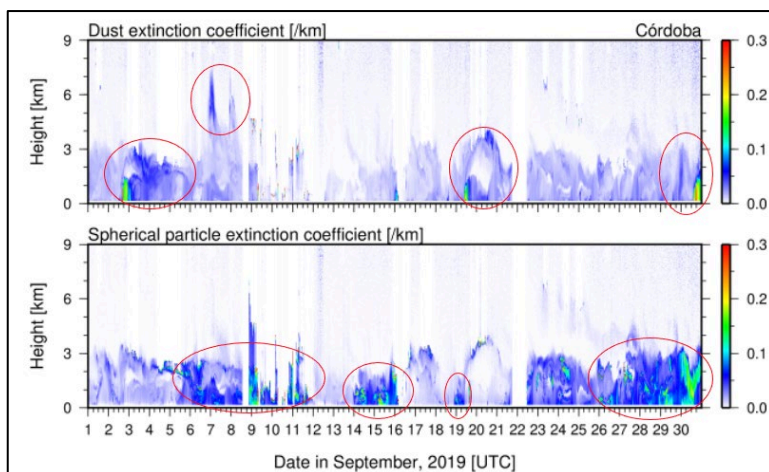


図2 コルドバ観測サイトのライダーデータから推定された非球形粒子（上）と球形粒子（下）の波長532nmでの消散係数。高濃度エアロゾルイベントが赤線で囲まれている。

4 成果発表

神慶孝, 西澤智明, 清水厚, 杉本伸夫, 水野亮, S. Papandrea, SAVER-Net ライダーで観測されたアルゼンチン北部におけるダストおよびスモークの解析, 第38回レーザーセンシングシンポジウム, オンライン, 2020年9月.

西澤智明, 岡本創, 鈴木健太郎, 石井昌憲, 神慶孝, 衛星搭載ライダー・雲レーダーによる雲・エアロゾル・対流の全球観測計画, 第38回レーザーセンシングシンポジウム, オンライン, 2020年9月

Eduardo Landulfo, Boris Barja, Marcos Andrade 他37名, 2020, Lidar observations in South America. Part II-Troposphere, IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen, 95451.

(別紙様式 1 - 2)

ERG衛星と低高度衛星の連携による内部磁気圏における
サブストームに伴う変動の研究

Study of substorm-associated disturbances
in the inner magnetosphere in collaboration
of ERG and low-altitude satellites

宮下幸長、韓国天文研究院・宇宙科学本部

本年度は、コロナ禍のため研究を実施できなかった。

(別紙様式 1 - 2)

米国観測ロケット実験LAMPに搭載の磁気インピーダンス(MI)センサの研究開発

Development of the magnetic impedance (MI) sensor
on the sounding rocket experiment LAMP

野村麗子, 宇宙航空研究開発機構・国際宇宙探査センター

1. 研究目的

名古屋大学宇宙地球環境研究所の能勢准教授が、地球地磁気観測への適用を進めているMIセンサは、極めて軽量小型で、省電力であることが大きな特徴である。そのため、重量やリソースへの制限が厳しい飛翔体に搭載して観測が実現すると、例えば地球地磁気をグローバルに同時多点観測するような、超多点観測への可能性が広がる。本研究では、これまで飛翔体に搭載実績のないMIセンサを観測ロケットに搭載し、宇宙空間での技術実証を行うとともに、地磁気の観測からロケットの姿勢を推定する。また脈動オーロラ現象に伴う磁場変動を観測し、その成因と電離圏への影響を明らかにすることを目指す。

2. 研究方法

観測ロケット実験LAMPでは、他機器としてフラックスゲート磁力計も搭載されるため、実験によって取得された地磁気観測データを比較する。これにより、MIセンサの飛翔体における有用性を確認し、将来の超小型衛星などの搭載に向けた技術的知見を得る。2020年冬季に打ち上げ予定であった観測ロケットLAMPは、COVID-19の流行により2021年に延期されたため、本年度は2つの準備①Raspberry Piを用いたデジタル処理部の製作と②熱真空試験を実施した。

3. 研究結果・報告

① Raspberry Piを用いたデジタル処理；MIセンサから出力されたアナログ値をAD変換した後、デジタル処理を行う仕組みをRaspberry Piで実現する。基本的なプログラムは出来上がり、ノイズの原因となる異常値を取得した場合に、磁場データ算出時には除外できる仕組みにプログラムを改良済である。異常値の出現については、プログラム処理の高速化により頻度を減少させられることが分かったので、引き続き、プログラムの最適化を行う。

② 熱真空試験；宇宙科学研究所にて、熱真空試験を実施した。Raspberry PiのCPUの放熱をするヒートパイプも含め、正常に動作していることがわかった。

(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 (AFigure 1VON: 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。

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、東南アジアでの VLF 波観測継続に加えて、2020 年度は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ペクトル上に、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]。

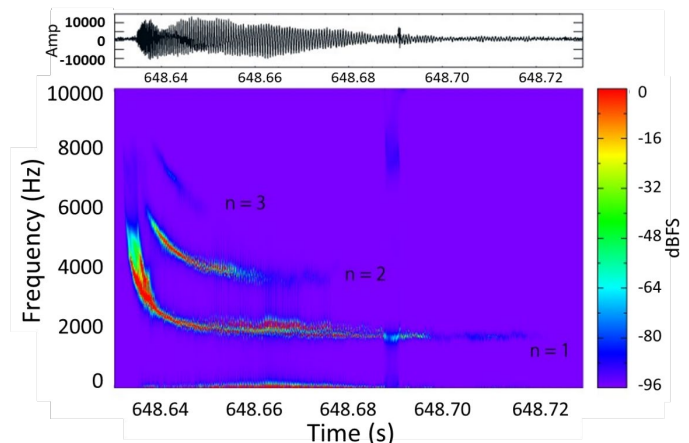


図 1 1980 年 12 月 5 日 23:50:48.63 LT に鹿児島で観測された tweek 空電の波形 (上) とダイナミックスペクトル (下)

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

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、

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

とし、 f 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 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2020/08/11 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。

成果発表

[1] Kanno, M., H. Ohya, K. Shiokawa, H. Nakata, and T. Takano, An improved procedure for estimation of propagation distance of tweek atmospherics, JpGU-AGU Joint Meeting2020, Virtual Meeting, 12-16 July, 2020.

[2] Yamanobe, K., H. Ohya, H. Nakata, K. Shiokawa, K. Yamashita, and Y. Takahashi, Solar flare effects of the D-region ionosphere using daytime tweek atmospherics and VLF/LF standard radio waves, JpGU-AGU2020, Virtual meeting, 12-16 July, 2020.

[3] 菅野 将史、大矢 浩代、塩川 和夫、中田 裕之、トウィーク空電の水平伝搬距離推定方法に関する検討、中間圏・熱圏・電離圏(MTI)研究集会、Zoomミーティング、2020年9月28-30日。

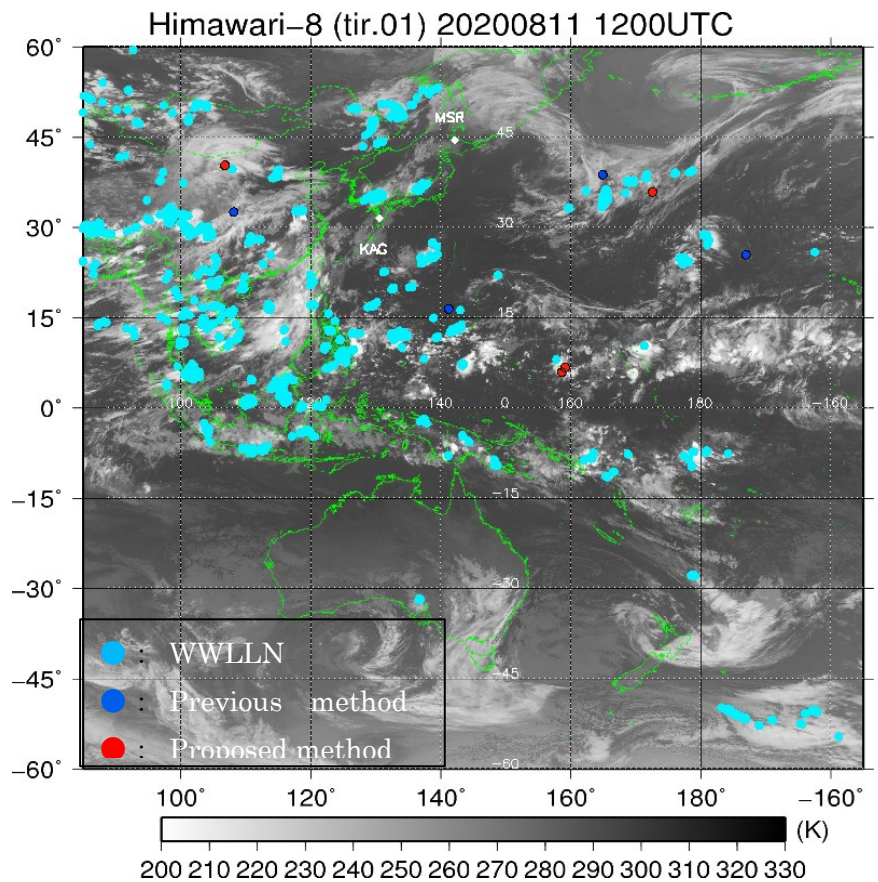


図2 2020年8月11日12:00 UTのひまわり8号による雲画像、WWLLNデータと、tweekによる雷推定位置の比較

(別紙様式 1 - 2)

超水滴法に基づく雲と降水の精密シミュレーションに関する国際共同
研究の推進

Advancing international collaboration on highly accurate simulation of
clouds and precipitation using the super-droplet method

島伸一郎、兵庫県立大学・情報科学研究科(課題実施時はシミュレーシ
ョン学 研究科)

1. 研究目的

地球の気候システムにおいて雲は極めて重要な役割を果たしており、それ自体が降水を引き起こすだけでなく、水蒸気などの微量物質を鉛直輸送するほか、放射を介して地球のエネルギー収支に大きな影響を与える。近年は数値シミュレーションにより、集中豪雨や台風、前線の活動といった気象現象の予測、および地球温暖化などの気候変動の予測が行われている。しかしながら、雲のふるまいを正確にシミュレーションすることはいまだに難しく、気象・気候予測に大きな不確実性をもたらしている。

このような背景の下、島(代表)は「超水滴法」(Super-Droplet Method, 略してSDM)と名付けた全く新しい雲微物理モデルの開発を独自に行った[1]。従来の手法と違い、個々の粒子のふるまいを記述する粒子運動論的モデルを、スパコン上で高速に並列計算することが可能である。これにより、雲の発生から成長と降水そして消滅までを雲微物理素過程の基本方程式に基づき精密にシミュレーションする道が拓けた。

近年、超水滴法を初めとする粒子ベース雲微物理モデルに対する気象分野の研究者の期待が急速に高まっている。本課題の大局的目的は、超水滴法を初めとする粒子ベース雲モデルに関する国際共同研究の推進とネットワーク拡大により、超水滴法の普及と研究開発を世界的に主導することである。

2. 研究方法

国際共同研究推進の一環として以下の課題に取り組んだ。

第10回 International Cloud Modeling Workshop (ICMW)に向けて、孤立雄大積雲を対象としたモデル間比較プロジェクト(以下、雄大積雲MIP)を推進した。このMIPでは、超水滴法を初めとする粒子法と従来的な手法であるビン法の詳細な比較に焦点が当てられている。島(代表)はGrabowski博士(NCAR)と共にそのとりまとめを任されている。

平行して、現在進行中の氷相・大気電気・層積雲・雲乱流などに関する国際共同研究をさらに前進させるとともに、新しい共同研究の立ち上げや国際共同研究ネットワークの拡大も図った。

3. 研究結果、考察

第10回ICMWは当初2020年夏に開催が予定されていたが、新型コロナウイルス

イルスの世界的感染拡大を受け、一年間開催が延期されることになった。そこで島(代表)は別途研究会を2020年11月に開催し、雄大積雲MIPの途中経過を参加グループ間で共有する場を設けた[2]。今回示された結果はモデル間で概ね一致していたものの、雲粒粒径分布の幅の広がりなどに関する系統的な差も確認された。この差違は、ビンモデルと粒子ベースモデルの数値解法としての特徴の違いに起因するものであると考えられる。第10回ICMWに向けて、より詳しい解析と、降水特性や計算コストの比較を進めていく予定である。

また、超水滴法を氷相過程に拡張した[3]。氷粒子を伴う雲は世界中いたるところで形成され、集中豪雨・台風のふるまいを理解する上でも重要である。我々は、超水滴法を使うことにより、混相雲の中で氷晶が生成・成長し霰(あられ)・雹(ひょう)・雪片を形成していく様をより忠実に表現した、氷粒子の形状を陽に計算する粒子ベース雲モデルを世界で初めて構築した。当該論文はEGU highlight articleの1つに選ばれており、分野に大きなインパクトを与えた。

観測・実験・理論との連携の在り方も含めた雲モデルの将来展望について考察する論文を出版した[4]。

EGU2020にて“Lagrangian cloud microphysics: progress and prospects”というセッションを企画運営した。

Lu教授(NUIST)の博士学生であるChongzhi Yin氏を兵庫県立大学の研究生として受け入れ、Xue博士(NCAR)とともに、霧雨を伴う海洋層積雲に関する国際共同研究を推進した。現在論文の投稿準備を進めている。

Zhou教授(ECNU)と、帯電した雲粒の衝突併合を通じた雨粒の形成速度の変化 (Electrocoalescence) を評価する研究を推進した。こちらも現在論文投稿を準備中である。また、共同研究の更なる推進のため、2021年度中にZhou教授の博士学生を研究生として受け入れる準備を進めている。

4. まとめ

以上の通り、コロナ禍の制約はあったものの、超水滴法を軸とする国際共同研究を推進し、ネットワークを拡大することができた。引き続き様々なグループとの国際交流を進め、本研究分野の発展を牽引していきたい。

5. 引用文献

- [1] S. Shima, et al., Q. J. R. Meteorol. Soc. 135, pp.1307-1320 (2009).
- [2] Pre-ICMW mini-workshop: Cumulus congestus case, 17 (UTC) Nov 2020.
https://s-shima-lab.sakura.ne.jp/events/pre-icmw_mini-ws
- [3] Shima, S., et al., Geosci. Model Dev., 13, 4107–4157 (2020).
- [4] Morrison, H., et al., J. Adv. Model. Earth Syst., 12, e2019MS001689 (2020).

6. 成果発表

査読論文 2件, 学会発表 8件, その他 3件。詳細は別添の報告書様式1-1を参照のこと。

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、長期にわたって安定して稼動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。

単眼の観測では、Loss Cone型の前兆現象[4]などの微細な構造を伴う惑星間擾乱の検出には、24時間のデータの積算から全経度方向の強度分布を推定する必要がある[5]。このため、変動の激しい複数の惑星間擾乱が地球を通過している最中には異方性の定量的な検出に困難がある。本研究は、米国ユタ州の高地に約700平方キロの範囲に展開されている Telescope Array空気シャワー観測装置(TA)を総面積1500m²のミュオン計として運用する事を目的とした。これによりGRAPES-3の観測視野のちょうど反対側に高い統計精度の観測点を確保するのが狙いである。これにより、先述した異方性の検出限界を先行研究[5,6]での限界であった0.5%より小さく、かつ振幅の変動をよりリアルタイムで検出可能にすることを目指している。

2018年から2020年度までの研究計画で、空気シャワー観測装置の宇宙線強度モニター装置としての測定の信頼度を確かめ、これらのネットワーク観測に有用なデータを得る方法を探索した。

研究方法

前述した本研究の目的にあるように、空気シャワー観測装置のモニターデータを転用し、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には以下の1)～3)の作業が必要になる。

- ①装置が展開されている領域での気象条件の把握。
- ②観測装置で記録する粒子カウントレートへの気圧・気温の影響の推定。
- ③TA実験観測装置で推定した一次宇宙線強度の変動を、各地の様々な観測装置との比較を行う。これによりデータの信頼度を確かめる。

研究結果

A: 各種の気象学的な効果について調査を行った。

検出器が測定した粒子のエネルギー損失量の分布を用いる事で、検出器の計数閾値の変動とは独立な、2次宇宙線量の変動を見積る事ができる。エネルギー損失量は、空気シャワー実験において到来粒子数を推定するために較正データとして取得されている量である。

A-1: μ 粒子が生成される高層大気の変動による計数変化について、先行研究の[7]で行われた方法で米国ユタ州での影響を実データと高層大気データを用いて調査した。

A-2: 米国ユタ州での12年の観測期間の内、1月あたりでの気圧変動が最大の期間を用いて、大気圧の変化による2次粒子の計数変動について調査した。結果を右表にまとめる。

大気パラメータ[7]	補正係数
H100hPa	$-3.992 \pm 0.01\% / km$
Tmw	$-0.186 \pm 0.005\% / K$
Tgrd	$-0.076 \pm 0.002\% / K$
T16.5km	$+0.142 \pm 0.001\% / K$
気圧効果	$-0.282 \pm 0.03\% / hPa$

B: 測定器での計数に寄与する銀河宇宙線の剛度分布の推定を行った。

TA地表検出器の応答シミュレーションと、空気シャワー観測で標準的に用いられている、大気と宇宙線原子核の衝突によるカスケードを追跡するモンテカルロシミュレーションコードを用い推定した(図 2)。また、計数に寄与する一次宇宙線を25地球半径までBack tracingし、感度分布の推定を行った。これによりミュオン望遠鏡としての強度変動とその異方性に対する応答関数を取得した(図 1 図 2)。

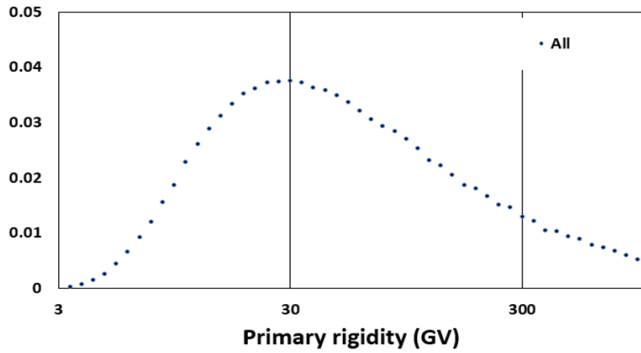


図 1 計数に寄与する1次宇宙線の剛度分布

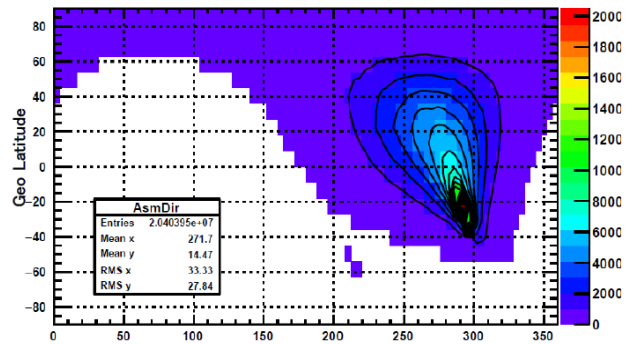


図 2 計数に寄与する一次宇宙線の磁気圏外での到来方向分布

C: これらの補正を適応し、惑星間擾乱イベントの他観測との再比較を行った(図 3)。

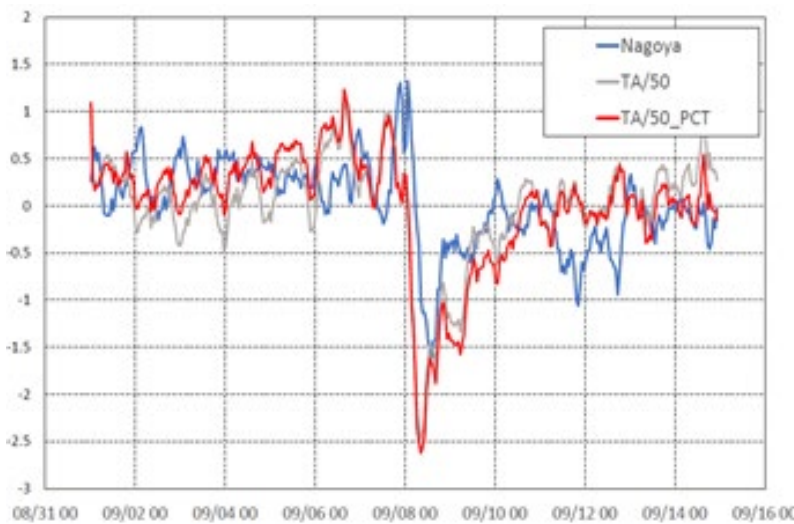


図 1 名古屋大学ミュオン望遠鏡と TA 地表検出器の比較。
赤: 気圧・高層大気補正 灰色: 気圧補正

昨年度まで得られていた、Forbush Decrease の事象例において、高層大気の影響の補正の有無の影響を示した。

名古屋の鉛直方向とTAの比較ではFD開始前の09/02-09/06日の気温の影響、09/14日付近の気温の影響が顕著であった。補正により、大きい所では0.3-4%程度、補正されている。

この補正では表の T_{mw} に相当する、高度毎の大気密度で重み付けした有効温度を使用した。

期待される成果:

既存の銀河宇宙線強度変動を測定する装置群を補完するデータ点として、惑星間空間の擾乱を理解するために有用なデータ

になると期待される。

本研究でおこなったエネルギー損失分布による気象学的効果の補正方法は、各地に存在する他の空気シャワー地表検出器でも同様に適応することが可能である。

成果発表(2020年度)

日本物理学会「TA地表検出器による銀河宇宙線宇宙線強度変動の観測」オンライン開催 20/09/14-17

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 the 29th ICRC Vol.1 359-362 2005
 [7] R. R. S Mendonca et al. Astrophysical Journal 830:88 (25pp) 2016

(別紙様式 1 - 2)

隕鉄中の宇宙線生成核種¹⁴Cの測定
Measurements of Cosmic-Ray-Produced ¹⁴C in Iron Meteorites

西泉邦彦, Space Sciences Laboratory, University of California, Berkeley

研究目的

隕石中の宇宙線生成核種(¹⁰Be、¹⁴C、²⁶Al、³⁶Cl など)から、隕石が宇宙空間で宇宙線にさらされていた時間(宇宙線照射年代)や地上に落下してから経過した年代(落下年代)、母天体からの放出条件、宇宙空間でのサイズや軌道といった多くの知見を得ることができる。特に、¹⁴C は、比較的半減期が短いこともあり、他の核種ではカバーできない 4 万年よりも若い落下年代を得るための強力なツールである。隕石の¹⁴C分析は、1962年に最初の報告がされたものの(Goel and Kohman, 1962; Suess and Wänke, 1962)、その次は、1978年の南極隕石の¹⁴C落下年代の報告である(Fireman, 1978)。1980年代に入って加速器質量分析計(AMS)が開発され、測定に必要な試料量が飛躍的に減少したことで、隕石の¹⁴C測定が本格的に行われるようになった。しかし、そのほとんどは石質隕石が対象であり(e.g., Jull, 2006)、高周波加熱炉で試料を助燃剤とともに燃焼させる方法が用いられてきた。この炭素成分の抽出方法は、隕鉄には適用が難しく、現在までに数例しかない。さらに、試料を助燃剤とともに燃焼させてしまうと、¹⁰Beなど他の核種の分析ができないため、同一試料片からの宇宙線生成核種マルチ分析は困難であった。そこで本研究では、燃焼法以外の処理手法として、隕鉄を酸溶解させて発生したCO₂を捕集する酸抽出法による隕鉄中の¹⁴Cの分析法の確立を目的とした。

酸溶解法を用いて隕鉄中の¹⁴Cを分析する方法を確立するとともに、¹⁴C分析に値する研究対象を模索するにあたり、宇宙空間で十分な宇宙線照射を受けた履歴がある隕石を探す試みも行った。宇宙線照射期間の長い隕石では、宇宙線照射で誘発される中性子捕獲反応によって変動するSm, Gd, Erなどの元素の同位体組成を測定するのが有効である(Hidaka et al., 1995)。元素の同位体組成を高精度に測定するには、その対象となる元素を化学的に単離する必要があるが、Sm, Gd, Erなどが属する一連の希土類元素(REE)は物理化学的性質が類似しており、一般には化学分離が困難である。これまで、REEの化学分離についてはいくつかの手法が考案されているが、いずれもREEの全ての元素についての相互分離はなされておらず、その手法も複雑である。本研究においては、使用する隕石試料は絶対量が限られていること、隕石試料中のREEは微量であること、を踏まえ、微量のREEを個々に化学分離する手法の開発に着手した。

研究方法

① 隕鉄中の¹⁴Cの分析法の開発

隕鉄中のFeと宇宙線との相互作用で生成した¹⁴Cを酸と反応させて¹⁴CO₂化させ、同時に、既知量の炭素キャリア(¹⁴C-freeの炭酸塩)を反応させることにより、発生した¹²CO₂との比をAMSで測定して、隕鉄の¹⁴Cを測定する方法を検討した。キャリア物質と隕鉄を同時に酸溶解させる手法は、¹⁰Beなど¹⁴C以外の宇宙線生成核種の前処理に一般的に用いられている(e.g., Nishiizumi et al., 1989)。この手法と、密閉容器中に発生したCO₂を真空ラインで捕集する水試料の溶存無機炭素(DIC)の前処理手法(Takahashi et al., submitted to Radiocarbon)の2つの手法を融合し(図1)、標準鉄(日本鉄鋼標準物質)と炭酸カルシウム(産業技術総合研究所の標準岩石JLs-1)を用いて、CO₂抽出実験を行なった。また、図1の右に示す反

反応容器(リアクター+ジョイント)は、口が狭くて隕鉄や標準鉄試料が入りにくいいため、口を広げ、容器内を真空にした後、試料と酸を反応させ、発生したCO₂を真空ラインで捕集するのに適した容器を開発した(図2)。反応容器(リアクター+ジョイント)の製作には、本研究経費を使用した。

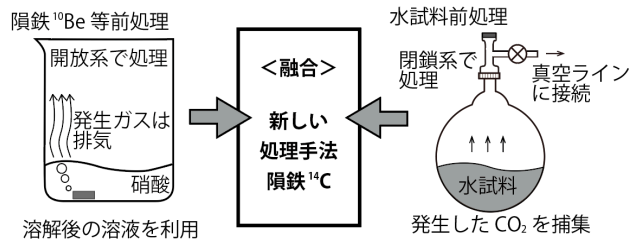


図1 隕鉄からの炭素抽出法の検討

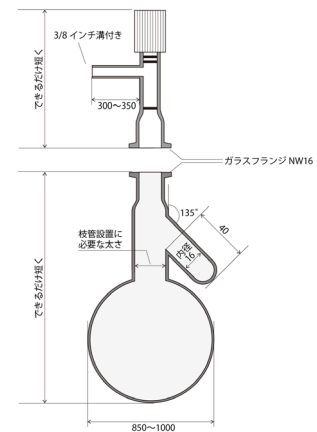


図2 新しく開発した反応容器

② REEを個々に化学分離する手法の開発

REEの化学分離に特化したイオン交換樹脂であるLNレジン(米アイクローム社製)をガラスカラムに充填したクロマトグラフィー法を用い、塩酸と硝酸を溶離液としてREEの相互分離を試みた。カラムからの溶離液を連続的に回収後、溶離液中の元素成分についてICP-MSを用いて定量分析することにより分離プロファイルを得た。なお、化学分離に要した酸試薬およびICP質量分析測定に要したArガスは本研究経費から支出した。

結果

① 隕鉄中の¹⁴Cの分析法の開発

標準鉄+キャリアの酸溶解実験から、CO₂抽出、¹⁴C測定が問題なく実施できることを確認した。一方、¹⁴C分析については、今後、分析数を増やし、再現性とブランクの検証を行っていく必要があることが明らかになった。

② REEを個々に化学分離する手法の開発

溶離液として塩酸を用い、その濃度を0.15 M~6.0 Mの範囲で9段階に分けて用いることにより、容易に希土類元素の相互分離が可能となった(Mizutani et al., 2020)。本手法を岩石試料等に応用させ、Sm, Gd, Er等の同位体測定が可能であることを確認した(Hidaka et al., 2020; Mizutani et al., 2020)。本手法の隕石試料への適用が十分に期待できる。

成果発表

- H. Hidaka, Y. Mizutani and S. Yoneda, "Estimation of thermal and epithermal neutron fluences at the lunar surface from isotopic compositions of rare earth elements". *Astrophys. J.*, 904, 183 (7pp), 2020.
- Y. Mizutani, H. Hidaka, S. Yoneda, "Chemical separation and determination of the isotopic compositions of Dy, Er and Yb in geochemical materials by TIMS". *Geochem. J.*, 54, 381-391, 2020.
- H.A. Takahashi, M. Minami, H. Handa and R. Sato, "A simple CO₂ extraction method for radiocarbon analyses of dissolved inorganic carbon in water samples without a carrier gas". submitted to *Radiocarbon*
- H. Hidaka, K. Nishiizumi, M. Caffee and S. Yoneda, "Determination of neutron energy spectra for lunar meteorites studied from REE isotopic compositions". *Goldschmidt 2020*, virtual on line, 21-26 June 2020.

(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2020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2020年までの年変動を示している。ただし、2020年のBe-7濃度は、山形(10月まで)、アイスランド(9月まで)、タイ(7月まで)であり現在その後のデータは測定解析中である。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をカバーしている。太陽黒点数の変化などから2020年は第25期太陽活動期に入ったと思われる。2018年から2020年の約3年間の

Be-7 の濃度変化は、アイスランドが増加、山形とバンコクは 2019 年まで増加し 2020 年は減少している。2020 年の Be-7 濃度は、2019 年に対してアイスランドでは 3.6%の増加、山形では 21.9%の減少、バンコクでは 13.7%の減少である。それに対して Oulu の中性子強度は 0.7%の増加を示している。2020 年は中緯度および低緯度で Be-7 濃度が減少に転じているようであるが季節変動を解析して地球規模の大気移流パターンとの関連を調べる必要がある。太陽活動が第 25 期に入っている 2021 年の観測データは重要である。

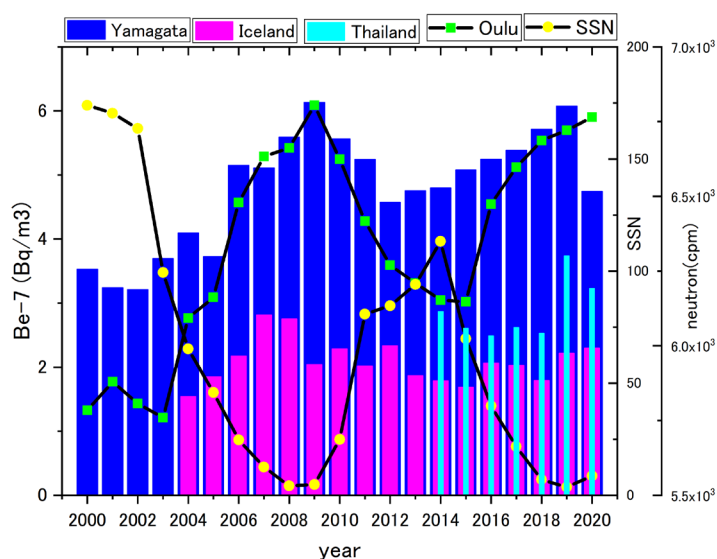


図 1. 2000 年から 2020 年までの高緯度、中緯度および低緯度の大气中 Be-7 濃度、太陽黒点数 (SSN)、oulu での地上中性子強度の年変動

[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. “¹⁴C during the ~660 BCE solar proton event from Japanese tree rings”, H. Sakurai, F. Tokanai, et al., JpGU-AGU Joint meeting 2020 (online) invited iposter C003088 (2020 7/12-16)
2. “Yearly variations in Be-7 concentrations in the surface air at Iceland and Japan for 16years from 2003: Solar modulation of cosmogenic nuclide”, H. Sakurai, Y. Kawamura, F. Tokanai, et al., 11th Symposium on Polar Science online meeting OSp2 poster (2020 11/16-12/18)

(別紙様式 1 - 2)

シューマン共鳴多点観測による雷活動・電離圏変動の調査
Investigation of Solar and lightning activity by multipoint
observation of Schumann resonance

池田 昭大、鹿児島工業高等専門学校・一般教育科

新型コロナウイルス感染症拡大により、本研究計画における海外観測器設置作業等が困難な状況であったため、研究計画を中止した。

(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 (JAXA)

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、数 keV から数十 keV のエネルギーを持つ電子が、宇宙空間から間欠的に降り込んでくることによって発生するが、コーラスと呼ばれるプラズマ波動がこれらの keV 帯電子の降下を引き起こし、脈動周期を決定していると考えられている。我々はこれまでの理論的な検討によって、コーラス波は数 MeV に達する高いエネルギーを持った放射線帯の電子とも共鳴することができ、結果として脈動オーロラの原因となる電子だけでなく、相対論的電子も同時に大気へ降下させている可能性を指摘してきた (Miyoshi et al., 2020)。本研究は、この仮説を実証するために、米国の大学、NASA と連携して、アラスカにおいて国際共同観測ロケット実験 (LAMP ミッション) を行うことを企図したものである。我々は LAMP 搭載用の高エネルギー電子観測器、オーロラカメラ、磁力計、および地上観測機器を開発してきており、観測ロケットによる高エネルギー電子の直接計測を軸に、地上機器や数値実験と連携することによって、脈動オーロラと放射線帯電子消失過程の関連性、相対論的電子の大気へのインパクト (オゾン破壊等) の理解につなげる。

しかし、コロナウイルスの影響により、本年度の LAMP 観測ロケットの打ち上げは 2021 年度冬季に延期となり、それに伴って NASA Wallops Flight Facility における機器噛み合わせ試験も延期となった。本予算は機器噛み合わせ試験に参加するための旅費に使用する予定であったが、試験の延期を受け、地上観測用の高速オーロラカメラの制御システム構築に使用することとした。このオーロラカメラはロケット飛翔後のデータ解析に供するだけでなく、ロケットの打ち上げタイミングを決定するためにも用いる重要な機材である。このため、リアルタイムでデータを可視化し、電子マイクロバースト現象と関連すると考えている脈動オーロラの主脈動中に見られる高速変調の有無を即座に判断できるようなシステムの構築を目指している。

一方、我々は 2019 年 1 月 13 日にノルウェー・アンドーヤから打ち上げられた NASA の観測ロケットミッション RockSat-XN に参画し、高エネルギー電子観測器、中間エネルギー帯電子観測器、オーロラカメラ、磁力計を搭載した。RockSat-XN においても電子マイクロバースト現象の観測を狙っており、全機器とも正常動作したが、残念ながら打ち上げ期間中に打ち上げ条件に恵まれず、電子マイクロバーストを捉えることはできなかった。しかし、磁気圏内のコーラス波動によるピッチ角散乱が原因と考えられる 30-100keV 帯の電子降り込みを検出することができ、論文に纏めた [Sugo et al., 2021] ほか、相対論的電子の降り込みについても観測に成功し、1 篇が査読中となっている。

関連する論文:

1. Miyoshi, Y., Saito, S., Kurita, S., Asamura, K., Hosokawa, K., Sakanoi, T., et al. (2020). Relativistic electron microbursts as high-energy tail of pulsating aurora electrons. *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL090360. <https://doi.org/10.1029/2020GL090360>

2. Sugo, S., Kawashima, O., Kasahara, S., Asamura, K., Nomura, R., Miyoshi, Y., Ogawa, Y., Hosokawa, K., Mitani, T., Namekawa, T., Sakanoi, T., Fukizawa, M., Yagi, N., Fedorenko, Y., Nikitenko, A., Yokota, S., Keika, K., Hori, T. and Koehler, C. (2021). Energy-resolved detection of precipitating electrons of 30–100 keV by a sounding rocket associated with dayside chorus waves. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126, e2020JA028477. <https://doi.org/10.1029/2020JA028477>

(別紙様式 1 - 2)

Comet Interceptor ミッションのための搭載機器・システム設計
Study of payloads and spacecraft system for the 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、現在もオールト雲に存在し、今後突発的に地球近傍に飛来する始原的な彗星(Dynamically new comet, DNC)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、初期システム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。

研究方法

本申請では、Comet Interceptorミッションの初期検討の打合せを実施した。内容は、以下のとおりである。

- 1) 3機での同時フライバイであること踏まえた、観測項目とスペックの絞り込み
- 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イスの議論

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および不定期のサイエンス会合を実施した。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状況を詳細化し、9月にISASのワーキンググループから所内検討チームに移行し、3月には理学委員会の科学評価を受審・完了した。また、観測器開発についてもオプティクスなど主要部分の設計が決まり、現在は製作・試験の準備を進めることができた。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、9月には観測器のpreliminary requirements review, 3月にはシステムのpreliminary requirements reviewが、それぞれオンスケジュールで実施されている。後者には、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

- 笠原慧, 松岡彩子, 村田直史, 天野孝伸, 桂華邦裕, 大平豊, 吉岡和夫, "彗星探査計画 Comet Interceptor におけるプラズマ観測", ISEE研究集会, 口頭発表, virtual, 2021年3月16日.
- 笠原慧, 吉岡和夫, 坂谷尚哉, 亀田真吾, 松岡彩子, 村田直史, 船瀬龍, 中島晋太郎, 尾崎直哉, 宇佐美尚人, 河北秀世, 新中善晴, 杉田精司, "Comet Interceptor ミッション: WGからISAS所内検討チームに移行", 惑星圏科学会, ポスター発表, virtual, 2020年11月13日.
- Kasahara, S., T. Amano, K. Keika, K. Yoshioka, Y. Ohira, A. Matsuoka, and N. Murata, "Plasma themes of the Comet Interceptor mission", SGEPPS, 口頭発表, virtual, 2020年11月1日.

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、オーロラ観測、自然電磁波観測、レーダー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ことができる。2020 年度は、既設の受信点（ノルウェー・アラスカ・カナダ 2 カ所・ロシア）の観測データを用いたサブオーロラ帯の高エネルギー電子降下現象の解析や、ホイッスラーコーラス波動に伴い生じる高エネルギー電子降下現象の数値計算研究(Miyoshi et al. 2020)を進めた。統計解析からは、コーラス波動や EMIC 波動による高エネルギー電子降下がそれぞれ磁気圏の朝側及び夕方側で出現し、特に磁気嵐の主相から回復相の前半に高い発生頻度を示すことが明らかとなった。また、substorm 時に Pi2 地磁気脈動に同期した高エネルギー電子降下現象が見つかった。地上の VLF 観測点でコーラス波動が観測されたことから、ホイッスラーモード波による高エネルギー電子の散乱が原因と考えられる(Miyashita et al. 2020)。2020 年度に VLF/LF 帯電波受信機を Kevo(フィンランド北部)へ新設することを予定していたが、コロナ禍による海外出張制限のため、受信機の準備と設置交渉・打ち合わせを行った。2021 年度以降に海外出張が可能となり次第、設置を行い、EISCAT レーダー観測や北欧で行われているミリ波、オーロラ、および磁場観測との比較研究を実施する。

研究成果

論文(査読付き)

- Miyoshi, Y., S. Saito, S. Kurita, K. Asamura, K. Hosokawa, T. Sakanoi, T. Mitani, Y. Ogawa, S. Oyama, F. Tsuchiya, S. L. Jones, A. N. Jaynes, J. B. Blake (2020), Relativistic Electron Microbursts as High - Energy Tail of Pulsating Aurora Electrons, *Geophysical Research Letters*, 47(21)
- Miyashita, T., H. Ohya, F. Tsuchiya, A. Hirai, M. Ozaki, K. Shiokawa, Y. Miyoshi, N. Nishitani, M. Teramoto, M. Connors, S. G. Shepherd, Y. Kasahara, A. Kumamoto, M. Shoji, I. Shinohara, H. Nakata, T. Takano (2020), ULF Modulation of Energetic Electron Precipitations Observed by VLF/LF Radio Propagation, *Radio Science Bulletin*, Vol. 2020, No. 372

学会発表等

- Ohya, H., T. Miyashita, K. Tanaka, F. Tsuchiya, M. Ozaki, Y. Miyoshi, K. Shiokawa, N. Nishitani, T. Hori, M. Connors, S. G. Shepher, Energetic electron precipitations showing ULF modulation of VLF-LF transmitter signals, 3rd ISEE symposium PWING-ERG conference and school on the inner magnetosphere, 2021 年 3 月, 名古屋大学(online)
- Tsuchiya, F., A. Hirai, T. Obara, H. Misawa, S. Kurita, Y. Miyoshi, K. Shiokawa, M. Connors, M. Ozaki, Y. Kasahara, A. Kumamoto, Y. Kasaba, A. Matsuoka, M. Shoji, I. Shinohara, Energetic electron precipitations associated with pulsating aurora: statistical analysis of low altitude satellite and VLF subionospheric propagation, 3rd ISEE symposium PWING-ERG conference and school on the inner magnetosphere, 2021 年 3 月, 名古屋大学(online)
- Ohya, H., T. Miyashita, F. Tsuchiya, M. Ozaki, K. Shiokawa, Y. Miyoshi, N. Nishitani, T. Hori, M. Teramoto, M. Connors, S. G. Shepherd, ULF Modulation of Energetic Electron Precipitations Observed by VLF-LF Transmitter

- Signals, AGU fall meeting 2020, 2020 年 12 月
- Tsuchiya, F., A.Hirai, T.Obara, H.Misawa, S.Kurita, Y.Miyoshi, K.Shiokawa, M.Connors, M.Ozaki, Y.Kasahara, A.Kumamoto, Y.Kasaba, A.Matsuoka, M.Shoji, I.Shinohara, Relativistic electron precipitation associated with pulsating aurora observed by VLF radio propagation: A case study, The 9th VERSIM workshop, 2020 年 11 月, 京都大学(online)
- Hirai, A., F.Tsuchiya, T.Obara, Y.Kasaba, Y.Katoh, H.Misawa, K.Shiokawa, Y.Miyoshi, S.Kurita, Martin Connors, Statistical Study of EMIC Wave-Related Electron Precipitation: Ground-Based Magnetometer and Subionospheric VLF-LF Radio Measurements, The 9th VERSIM workshop, 2020 年 11 月, 京都大学(online)
- Miyoshi, Y., K. Hosokawa, S. Saito, S. Kurita, S.-I. Oyama, Y. Ogawa, A. Kero, E. Turunen, S. Kasahara, S. Yokota, T. Hori, K. Keika, T. Mitani, T. Takashima, N. Higashio, I. Shinohara, Y. Kasahara, S. Matsuda, A. Kumamoto, F. Tsuchiya, A. Matsuoka, Wide energy electron precipitations by chorus waves: Arase-EISCAT coordinated observations, The 9th VERSIM workshop, 2020 年 11 月, 京都大学(online)
- Ohya, H., T. Miyashita, F. Tsuchiya, M. Ozaki, Y. Miyoshi, K. Shiokawa, N. Nishitani, M. Connors, S. G. Shepherd, Energetic Electron Precipitations Showing ULF Modulation of VLF-LF Standard Radio Waves, The 9th VERSIM workshop, 2020 年 11 月, 京都大学(online)
- 土屋史紀, 平井あすか, 小原隆博, 三澤浩昭, 三好由純, 塩川和夫, 大矢浩代, Connors Martin, 笠原禎也, 熊本篤志, 小路真史, 篠原育, Energetic electron precipitation associated with pulsating aurora: Statistical analysis, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 148 回総会・講演会 2020 年 11 月
- 大矢浩代, 宮下拓也, 土屋史紀, 尾崎光紀, 塩川和夫, 三好由純, 西谷望, 堀智昭, 寺本万里子, Connors Martin, Shepherd Simon G, ULF modulation of energetic electron precipitations observed by using VLF-LF transmitter signals, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 148 回総会・講演会 2020 年 11 月
- 大矢浩代, 宮下拓也, 土屋史紀, 尾崎光紀, 塩川和夫, 三好由純, 西谷望, 堀智昭, 寺本万里子, Martin Connors, Simon G. Shepherd, VLF-LF 帯標準電波を用いた高エネルギー降下電子の ULF 変調, 第 13 回 ERG サイエンス会議 - 2020 年度内部磁気圏研究集会 2020 年 9 月
- Tsuchiya, F., A. Hirai, Y. Miyoshi, K. Shiokawa, H. Ohya, M. Ozaki, Y. Kasahara, A. Kumamoto, M. Connors, T. Obara, H. Misawa, I. Shinohara, Energetic electron precipitation associated with pulsating aurora: Statistical analysis of sub-ionospheric VLF radio propagation, 第 13 回 ERG サイエンス会議 - 2020 年度内部磁気圏研究集会 2020 年 9 月
- Ohya, H., M. Takuya, F. Tsuchiya, A. Hirai, M. Ozaki, K. Shiokawa, Y. Miyoshi, N. Nishitani, T. Hori, M. Teramoto, M. Connors, S. G. Shepherd, Y. Kasahara, A. Kumamoto, M. Shoji, I. Shinohara, H. Nakata, T. Takano, Pi2 ULF modulation of energetic electron precipitations observed by using VLF-LF transmitter signals, JPGU-AGU Joint meeting 2020 2020 年 7 月
- Hirai, A., F. Tsuchiya, T. Obara, Y. Kasaba, Y. Katoh, H. Misawa, K. Shiokawa, Y. Miyoshi, S. Kurita, C.-W. Jun, M. Connor, Statistical study of EMIC waves and energetic electron precipitation: ground-based magnetometer and subionospheric VLF-LF radio measurements at subauroral latitude, JPGU-AGU Joint meeting 2020 2020 年 7 月

(別紙様式 1 - 2)

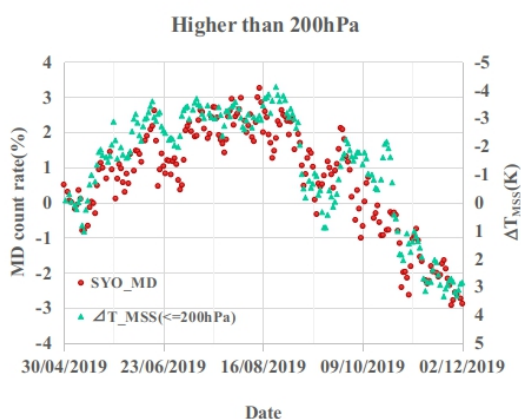
改良された汎世界的宇宙線観測ネットワークによる宇宙天気観測 II

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24-25サイクルの極小期を迎え, 銀河宇宙線強度は1960年以降最高の強度を記録しようとしている。このような時期は, ドリフト効果など太陽圏全般に亘る大規模な宇宙線輸送過程を研究する絶好の機会である。

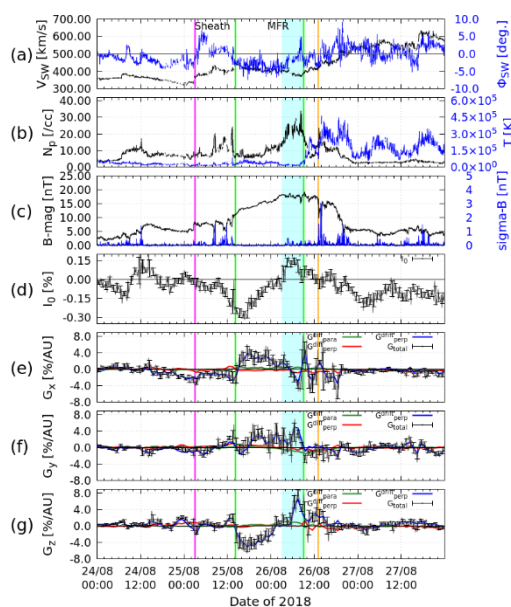


本研究の目標は, (1)メキシコのSciCRTをミュオン計として用い, GMDNが抱える観測の空白域を埋める, (2)南極昭和基地宇宙線計を用いて大気ミュオン強度に対する大気効果の実験的検証を行い, 大気効果の補正法を確立することによりGM

DNによる宇宙線観測を飛躍的に改良する, ことである。本年度は(2)の昭和基地宇宙線計のデータを用いて大気効果の検証を始めると共に, GMDNを用いて観測された太陽活動の極小期におけるCMEイベント解析を継続した。その結果, 極域で観測される成

層圏突然昇温においても宇宙線ミュオン計の計数が変動することが確認された(左上図)。イベント解析についてはGMDN+昭和基地MD,及び中性子計ネットワークによる観測データを用いて宇宙線異方性解析をおこないこの特異なCMEの構造を解析し, フラックスロープにおいて断熱加速が起きており, その結果宇宙線密度(I_0)が増加している可能性を指摘した(右図青い影の部分, I_0 はグラフ(d))。これらの結果については, 以下において発表されている。

- JpGU-AGU Joint Meeting 2020 “Cosmic Ray Intensity Increase Associated with Slow Coronal Mass Ejection”
- 日本物理学会2020年秋季大会“2018年



8月のCMEイベントの解析3”

- NMDB@Home: Virtual symposium on cosmic ray studies with neutron detectors “A Particular ICME Event in August 2018 Observed with the Ground Based Muon Detectors and Neutron Monitors”
- NMDB@Home: Virtual symposium on cosmic ray studies with neutron detectors “A New Cosmic Ray Observation at Syowa Station in the Antarctic”
- Space Weather(2021), accepted “A Peculiar ICME Event in August 2018 Observed with the Global Muon Detector Network”
- Journal of Space Weather and Space Climate(2021), accepted “New cosmic ray observations at Syowa Station in the Antarctic for space weather study”

(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に迫る国際共同研究
A international research initiative for the Asian monsoon
variability driven by diverse regional
hydroclimatological characteristics

寺尾 徹、香川大学・教育学部

【本申請の目的】

アジアモンスーンは、ユーラシア大陸とチベット高原、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、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。本申請は、WCRPの枠組みのもと、Future Earthとの協力関係の構築も目指すGEWEXの次期RHPの初動期における計画策定および観測と研究を効果的に推進し、研究成果を出すことを主要な目的として課題を推進してきた。中でも特に、チベット高原の強い影響下にある南アジアの研究者との交流の発展に重点を置いてきた。

2019年度には、次期RHPとしてAsian Precipitation Experiment (AsiaPEX) を立ち上げた。2019年8月にはキックオフカンファレンスを北海道大学で開催し、GEWEXのProspective RHPとして承認された。AsiaPEXはサイエンスプランをGHP Panelに提出し、評価に付されている。AsiaPEXは、TRMM-PRを用いた0.01度解像度の平均降水分布の推定(Hirose and Okada 2018)、メソ対流系の生成へ地表面温度非均一性のインパクト検出(Teramura et al. 2019)、シベリア中央部の熱波に対するユーラシア大陸の積雪分布インパクトの解析(Sato and Nakamura 2019)等の成果をあげてきた。

また、2019年度までに、南アジアの降水を対象とした諸研究が進んでいる。ヒマラヤ南縁域における降水メカニズムの新しい研究プロジェクトHiPRECS (Himalaya Precipitation Study) が立ち上げられ、Fujinami et al. (2020)は、総観規模擾乱の特徴を解析した。ヒマラヤ域をターゲットにしたCORDEXの高解像度ダウンスケーリングプロジェクトの立ち上げへの協力を行うとともに、インド北部の豪雨早期警戒プロジェクトESSDMSの豪雨予測モデルに関する第2回ワークショップを2020年2月27-29日にラジャスタン中央大学にて開催した。更に引き続いてAsiaPEX / South Asiaワークショップを開催(3月1-2日)し、南アジアにおけるAsiaPEXの展開を検討してきた。2020年度はこれら2019年度までの達成をふまえた研究推進を目指した。

【研究方法】

2020年度は以下の研究計画を策定して臨んだ。

① GEWEXのもとRHPの一つとしてのAsiaPEXのプレゼンスを強化するため、パリで11月に予定されているGHPパネルミーティングに参加するとともに、AsiaPEXの中心メンバーで執筆を進めているレビューペーパーの出版を進める。

② HiPRECSやESSDMSの研究活動の協力関係を深めるため、AsiaPEXの南アジア地域主体(AsiaPEX/South Asia)を立ち上げる。

③ ヒマラヤ南縁域の降水メカニズムや、インド亜大陸北部の豪雨の予測に関する具体的な研究成果を出版する。そのためにAOGS2020のAsiaPEXセッションなどの機会を活用する。

④ AMY-II IOPの研究計画を検討するワークショップを開催し、HiPRECSとESSDMSの中心メンバーらと南アジアにおけるAMY-II IOPにおける観測計画を具体化する。

⑤ CORDEXのヒマラヤ周辺域の高解像度ダウンスケーリングプロジェクトの出力の活用を促進するとともに、その検討のため香格里拉で8月に予定されているワークショップに貢献する。

【研究結果】

しかし、計画していた活動は、軒並み新型コロナウイルス感染症の影響を強く受け

た。CORDEXのダウンスケーリングワークショップ、AOGS2020はいずれも中止となった。

そこで、以下の活動に絞って実施して、研究交流を維持強化した。

① AsiaPEXレビューペーパー及びサイエンスプランの完成を支援すること。サイエンスプランのGHPパネルにおけるレビューは、新型コロナウイルスの影響を受けて遅れていたが、2020年11月のGHPパネルミーティング（遠隔開催）での討議を受けて再開されている。AsiaPEXレビューペーパーは、出版へ向けて進行している。本研究はこれら重要文書の英文校正の支援を行った。これまでのAsiaPEXの取り組みの押出しの取り組みも行われた(松本ら 2020; Terao et al. 2020)。

② 研究交流機会をつくること。2021年8月1-6日のAOGS2021(遠隔開催)にセッションを立ち上げた。また、2021年5月の日本気象学会春季大会に専門分科会を。同じく9月の水文・水資源学会に、プロポーズドセッションを立ち上げて開催を予定している。

③ 新たに立ち上げた南アジアの研究交流主体を活性化すること。メーリングリストの構築を行い、2021年8月に予定されているAsiaPEX関連セッションに、多くの関連する研究発表を得ることができた。

一方で、AsiaPEXの重要な研究成果も引き続きあげられてきている。GPM/DPRを用いた全球の降水粒径気候値分布(Yamaji et al. 2020)や、フィリピンの冬季モンスーンの豪雨メカニズムにかかわる総観規模擾乱の解析(Olaguera et al. 2020)、地球温暖化に対するアジアの循環場と降水の変動特性の解析(Takahashi et al. 2020)などである。

【考察・まとめ】

アジアモンスーンに関する研究活動を引き続き活性化しつつ、2021年度中のAsiaPEXサイエンスプランと、レビューペーパーの出版に向けて、計画されている諸研究交流機会を活用することが求められている。

【引用文献】

Fujinami, H. et al. (2019): Mesoscale precipitation systems and their role in the rapid development of a monsoon depression over the Bay of Bengal. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 146, 267-283, doi: 10.1002/qj.3672.

Hirose, M. and K. Okada (2018): A 0.01 degree resolving TRMM PR precipitation climatology. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 57, 1645-1661.

Sato, T. and T. Nakamura (2019): Intensification of hot Eurasian summers by climate change and land-atmosphere interactions. *Scientific Reports*, 9:20866, doi:10.1038/s41598-019-47291-5.

Teramura, H. et al. (2019): Observed evidence of enhanced probability of mesoscale convective system initiations due to land surface heterogeneity in semiarid East Asia. *SOLA*, 15, 143-148, doi:10.2051/sola.2019-026.

Takahashi, H. G. et al. (2020): Response of the Asian Summer Monsoon Precipitation to Global Warming in a High-Resolution Global Nonhydrostatic Model. *J. Climate*, doi: 10.1175/JCLI-D-19-0824.1.

Olaguera, L. M. et al. (2020): Non-tropical cyclone related winter heavy rainfall events over the Philippines: climatology and mechanisms. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*. doi: 10.1007/s13143-019-00165-2.

Yamaji, M. et al. (2020): 4-year climatology of global drop size distribution and its seasonal variability observed by spaceborne Dual-frequency Precipitation Radar. *J. Meteor. Soc. Japan*, 98, 755-773. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2020-038>.

【成果発表】

Terao, T. et al. (2020): The Asian Precipitation Experiment (AsiaPEX) Kick off Conference, Sapporo, Japan, 28-30 August 2019. *GEWEX Quarterly*, 30(3), 5-7.

松本 淳ら (2020): 第8回GEWEX国際会議報告. *天気*, 67(9), 531-540.

(別紙様式 1 - 2)

将来小型衛星FACTORS搭載可視高速撮像装置の設計と開発

Design and development of a fast visible imager for the future small-satellite FACTORS

坂野井健、東北大学・大学院理学研究科

【研究目的】

現在、我が国の次世代電磁圏・熱圏コミュニティ衛星として小型衛星FACTORSの検討が進められている。FACTOS計画は、JAXA宇宙科学研究所で2018年度ワーキンググループ(WG)として採択されており、理学課題と観測装置について具体的な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つの波長域で撮像する装置がある。オーロラ・大気光の紫外発光を捉える衛星搭載撮像装置は、欧米ではPolar、IMAGE、Freja、ICON衛星等の実績があるが、日本ではあけぼの衛星以降なく、最新技術に基づく衛星搭載紫外撮像装置の開発が我が国の今後の研究発展に必要である。一方で、衛星からの可視オーロラ観測は、れいめい衛星で高速8Hz撮像が行われたが、視野が狭い(70km x 70km)問題があった。加えて、FACTORSは高度3000kmの放射線帯内で観測を行うため、耐放射線耐性かつ高速撮像性能を有する宇宙用2次元検出器の検討が急務である。本研究は、FACTORSに搭載される可視オーロラ撮像装置の開発に重点を置く。特に、可視オーロラ微細構造の高速撮像を可能とすると可視2次元検出器の検討と開発を行うことを目的とする。本研究では、可視2次元検出器の具体的な検討に加えて、電気試験や放射線試験を行うことで宇宙搭載可能かどうかに見通しをたてる。なお、本申請は、名古屋大学ISEEが推進する「宇宙太陽地球システムの包括的研究による地球環境と宇宙利用の課題解決のための国際共同研究拠点の構築」(基盤事業)に関わる。なお、2020年度は、本課題の3年次計画の2年目である。

【研究方法】

本研究においては、小型衛星搭載可視・紫外撮像装置の検討に関するミーティングを研究分担者と行い、研究目的のブラッシュアップ、観測要求の整理、装置仕様等の検討を重ねてきた。2019年度は、科学課題の具体的な検討と観測装置仕様との整合性を検討した。これにより、可視撮像装置に求められるオーロラ撮像性能が、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、感度範囲1-100kRであることが明確に定められた(以下科学要求と称する)。また、これまで複数のメーカーの宇宙使用可能なCCDまたはCMOSの検討から、検出器の性能が明らかになってきた。2020年度は、これまでの検討を踏まえて、CCDもしくはCMOS検出器の試験用パッケージを他経費も合わせて購入し、実験を行うための準備を進める。検出器試験用パッケージの選定においては、宇宙搭載の実績の有無や、衛星メーカーとの電気インターフェースなどの開発成立性を含めて検討する。また、この検出器試験用パッケージ用いた試験の準備(東北大に加え、JAXA/ISAS設備利用の交渉も含む)を進める。特に、FACTORS衛星は遠地点高度が3000-4000km程度になる計画であり、放射線帯の中に長時間滞在するため、耐放射線性が問題となる。本研究で購入した検出器試験用パッケージを用いて、放医研もしくは同等の試験設備にて放射線試験を実施する。また、可視撮像装置用の屈折レンズを用いた対物光学系を設計する。これは、本研究では、上記の検出器と組み合わせて科学要求を満たすために必要な性能(口径とF値)を満たすものとなる。この設計と試験において衛星搭載可視・紫外光学装置開発に実績のある海外研究者(Frey氏、Schneider氏)と連携する。本研究は、2019年度から3年間計画のISEE一般共同研究「衛星搭載イメージング可視・紫外撮像光学系の設計と開発」を相補しつつ、海外研究者の参加に基づく共同研究である。

【研究結果】

本年度は可視カメラと紫外カメラ用のそれぞれの検出器について、国内メーカーのCCDと海外メーカーのCMOSともに検討を重ねた。この結果、CCDとCMOSいずれもカメラ搭載可能性があることが分かった。しかしながら、CCDについては国内メーカーの製品が感度が高く、かつ調達性も良好であるものの宇宙実績がないこと、CMOSについては海外メーカー検出器は宇宙実績がありノイズも低い、メーカーの開発スケジュールと我々のスケジュールが一致しないと検出器が提供できないなど、それぞれ一長一短であることが分かった。また、国内衛星メーカーと検討を行い、可視・紫外カメラの電気系、光学系いずれについても設計・製作可能であることが分かった。

この検討後、本年度は可視と紫外いずれにも使用できる可能性がある国内メーカーの試験用検出器パッケージ（検出器と読み出し・駆動エレキおよびPCソフトウェアのセット）を購入した。これに外部経費を加え、カメラ筐体、試験用光学レンズ、レンズ視野回転ステージを製作した。本年度COVID-19のために出張が制限されたため、開発や実験に遅れが生じたが、本年度の開発により検出器電気試験、光学試験、分光感度特性試験などの環境に加え、耐放射線試験を行う準備を整えることができた。来年度東北大やJAXA/ISASにおいて、電気試験と光学試験を計画している。

また、検討の結果可視カメラの科学要求を持たすためには、れいめい衛星搭載カメラよりも数倍明るい対物レンズと低ノイズの検出器が必要であることが分かった。現状れいめい衛星で実績のある対物レンズを改良することで製作可能と見込まれているが、この光学系詳細設計と重量・サイズの見積もりは来年度以降の課題である。

【成果発表（坂野井に下線）】

<査読付き論文>

1. Kataoka, R., C. Chaston, D. Knudsen, K. A. Lynch, R. L. Lysak, Y. Song, R. Rankin, K. Murase, T. Sakanoi, J. Semeter, T. H. Watanabe, D. Whiter (2021), Small-Scale Dynamic Aurora, *Space Sci. Rev.*, vol. 217, 1, 17, <https://doi.org/10.1007/s11214-021-00796-w>.
2. Fukizawa, M., T. Sakanoi, Y. Miyoshi, Y. Kazama, Y. Katoh, Y. Kasahara, S. Matsuda, A. Matsuoka, S. Kurita, M. Shoji, M. Teramoto, S. Imajo, I. Sinohara, S. Y. Wang, S. W. Y. Tam, T. F. Chang, B. J. Wang, C. W. Jun (2020), Pitch-Angle Scattering of Inner Magnetospheric Electrons Caused by ECH Waves Obtained With the Arase Satellite, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 47, 21, e2020GL089926, <https://doi.org/10.1029/2020GL089926>.
3. Miyoshi, Y., S. Saito, S. Kurita, K. Asamura, K. Hosokawa, T. Sakanoi, T. Mitani, Y. Ogawa, S. Oyama, F. Tsuchiya, S. L. Jones, A. N. Jaynes, J. B. Blake (2020), Relativistic Electron Microbursts as High-Energy Tail of Pulsating Aurora Electrons, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 47, 21, e2020GL090360, <https://doi.org/10.1029/2020GL090360>.
4. Nishimura, Y., M. R. Lessard, Y. Katoh, Y. Miyoshi, E. Grono, N. Partamies, N. Sivasdas, K. Hosokawa, M. Fukizawa, M. Samara, R. G. Michell, R. Kataoka, T. Sakanoi, D. K. Whiter, S.-I. Oyama, Y. Ogawa, S. Kurita (2020), Diffuse and Pulsating Aurora, *Space Sci. Rev.*, vol 216, 4, <https://doi.org/10.1007/s11214-019-0629-3>.

<学会発表>

1. M. 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, 日本地球惑星科学連合2020年大会, ポスター発表, May 24-29, 2020.
2. T. Sakanoi, M. Hirahara, Y. Miyoshi, K. Asamura, K. Hosokawa, Y. Saito, H. Kojima, N. Kitamura, M. Fukizawa, S.-I. Oyama, T. Tsuda, A. Saito, H. Frey, and N. Schneider, Auroral imaging at visible and far-ultra-violet wavelengths for the future polar orbiting satellite mission FACTORS, 日本地球惑星科学連合2020年大会, ポスター発表, May 24-29, 2020.
3. 平原 聖文、齋藤 義文、小嶋 浩嗣、浅村 和史、山内 正敏、坂野井 健、三好 由純、北村 成寿、杉本 理英、宇宙地球結合系探査「FACTORS」計画の現状：編隊飛行衛星群と軌道擾乱・制御、第21回宇宙科学シンポジウム、ポスター発表, Jan. 6-7, 2021.
4. 三好 由純、北村 成寿、平原 聖文、浅村 和史、坂野井 健、西山 尚典、小嶋 浩嗣、FACTORSオーロラ観測チーム、大気加熱・流出検討チーム、FACTORS計画における科学検討の現状報告、第21回宇宙科学シンポジウム、ポスター発表, Jan. 6-7, 2021.
5. 浅村 和史、小嶋 浩嗣、坂野井 健、FACTORS 計画検討チーム、FACTORS計画における観測機器開発の現状報告、第21回宇宙科学シンポジウム、ポスター発表, Jan. 6-7, 2021.

(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 detec
tion 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

コロナ禍のため研究を実施できなかった。

(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2021年冬季に延期された。当初は、本国際共同研究の予算を用いて、現地への地上観測機器の輸送や運用を担当するメンバーの旅費を支弁する予定であったが、この予算を用い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。2020年度は、2021年冬季の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、より可搬性が高く、ロバストなシステムを構築することを目指している。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ている。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(670 nm, 844.6

nm) を同時に撮像できるオーロラ観測システムを、ZWO 社の小型カメラを用いて開発している (本国際共同研究の予算を用いて購入) 。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製作を行っており、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、などについて 2021 年秋までにシステムを完成させる目処が立ちつつある。これらの光学観測機器は、ロケットの打ち上げタイミングの判断にも用いられるため、リアルタイムでデータを可視化できるようなシステムを実装する必要がある。特に、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) を確認できることがロケットの打ち上げ条件に含まれていることから、内部変調の有無を現場で判断できるような quick look (QL) システムの構築を行うことが今後の課題である。

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。北欧およびアラスカにおける EMCCD カメラを用いたオーロラの高速度撮像とあらせ衛星による磁気圏コーラス波動の観測を組み合わせることで、数秒から数十秒の周期をもつ主脈動だけでなく、その中に内包される秒以下の明滅 (内部変調) についても、コーラスの微細な時間変化によって形成されていることを実証的に確かめた (Hosokawa et al., 2020) 。また、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、数値シミュレーションによって明らかにしている (Miyoshi et al., 2020) 。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。さらに、Hosokawa et al. (2020) で取り扱った事例について詳細な解析を行い、脈動オーロラの発光強度の時間変化が単純な ON/OFF だけでなく、OFF のときにディフューズオーロラの背景輝度レベルよりも低くなる傾向を見いだし、あらせ衛星のデータを用いてその原因を考察した論文も出版している (Hosokawa et al., 2021) 。

関連する論文:

1. Hosokawa, K., Miyoshi, Y., Ozaki, M. et al. Multiple time-scale beats in aurora: precise orchestration via magnetospheric chorus waves. *Sci Rep* 10, 3380 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59642-8>
2. Miyoshi, Y., Saito, S., Kurita, S., Asamura, K., Hosokawa, K., Sakanoi, T., et al. (2020). Relativistic electron microbursts as high-energy tail of pulsating aurora electrons. *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL090360. <https://doi.org/10.1029/2020GL090360>
3. Hosokawa, K., Miyoshi, Y., Oyama, S.-I., Ogawa, Y., Kurita, S., Kasahara, Y., et al. (2021). Over-darkening of pulsating aurora. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126, e2020JA028838. <https://doi.org/10.1029/2020JA028838>
4. Sugo, S., Kawashima, O., Kasahara, S., Asamura, K., Nomura, R., Miyoshi, Y., Ogawa, Y., Hosokawa, K., Mitani, T., Namekawa, T., Sakanoi, T., Fukizawa, M., Yagi, N., Fedorenko, Y., Nikitenko, A., Yokota, S., Keika, K., Hori, T. and Koehler, C. (2021). Energy-resolved detection of precipitating electrons of 30–100 keV by a sounding rocket associated with dayside chorus waves. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126, e2020JA028477. <https://doi.org/10.1029/2020JA028477>

(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(2020年度)はその2年目である。

2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のデータ解析の準備
- 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年目の今回は、成影、川手の指導のもと、長澤(大学院生・修士2年、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、主に加速電子の制動放射による非熱的放射と、加熱された高温プラズマによる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、日本天文学会2020年秋季年会と2021年春季年会で発表するとともに、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。

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

FOXSI-3のデータ解析に向けて、観測装置の機器校正とデータ解析用のツールの整備を実施した。これらの作業は米国 FOXSI チームと定期的な打合わせのもと実施し、機器校正の成果の一部は、Buitrago-Casas et al. (2020)として論文にまとまった。現在、機器校正はほぼ完了し、観測データの解析を開始している。2021年度（本計画の最終年である3年目）には、科学成果を論文として出版できると考えている。

【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。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)で採択された。打ち上げは、2024年を予定している。この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。

FOXSI-4の採択を受け、2020年11月にはミッションのキックオフ会合を開催し、本格的な活動が開始した。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についての研究成果については、日本天文学会2021年春季年会で2件の口頭発表を行った。

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ている。太陽フレアを観測するFOXSI-4の実施においては、ISEEが進められている太陽フレア発生予測研究(Kusano et al. 2020 など)の協力を仰ぎたいと考えている。

最後に、2020年度は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、本国際共同研究の経費のおかげで、リモートでの打ち合わせ環境を整えることができ、成果を挙げる事が出来た。ありがとうございました。

以上

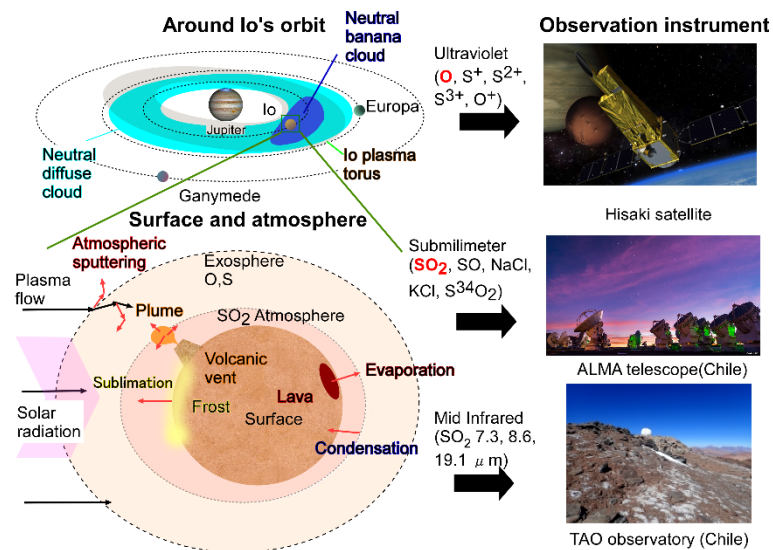
ALMAアーカイブデータ解析による太陽系内天体大気の
物理化学プロセスの解明
ALMA Archive Data Analysis for the Chemical Physics in
Atmospheres of Solar Objects

平原 靖大 名古屋大学・環境学研究所

【研究目的】 イオ大気の生成・散逸の物理化学プロセスの解明

SO₂を主成分としたイオの希薄な大気((1-10)×10⁻⁹ bar)は、高温火口から直接噴出と、表面に堆積した SO₂の霜が太陽光の加熱による昇華によって生成する。SO₂は電子衝突や太陽光によって O, S 原子に解離し、イオ重力圏から脱出し、最終的に磁気圏でイオン化する。このトーラスイオンはイオや他の衛星の地表や大気と衝突し、化学反応を起こす。従って、イオの地表や大気、イオ軌道周辺の原子・イオンを多波長で観測することは、イオ大気の生成・散逸過程、衛星の表層環境や火山活動、及び木星磁気圏への物質供給への理解につながる(図 1)。また、火山活動が活発という点でイオと地球は共通しており、金星や火星でも活火山の存在が議論されている。これらの天体大気の電波観測は比較惑星学的観点において重要である。

図 1: イオの大気の供給と散逸過程、および、イオを起源とする固体および気体化学種の観測手法



【研究方法】 本研究では、イオ大気の ALMA アーカイブ観測データの詳細な解析を行い、木星の陰にイオが入る前と後の SO₂ 大気の空間分布や速度分布を明らかにした

[成果論文 1: R. Koga, T. Suzuki, F. Tsuchiya, T. Sakanoi, and Y. Hirahara, ApJL (2021)].

SO₂ の spectral map(図 2 左)からイオの北半球高緯度の西側のリム(Region 1)と赤道周辺の東側(Region 3)で発光強度が大きいことがわかった。Region 1 と Region 3 では異なる火山ガスの噴火形態を見ることができた。イオが陰に入る直前の Region 1 のスペクトル形状は、Main component と Red-shifted component の二つのガウス関数の重ね合わせで説明できた(図 2 中央)。それらの成分の速度差は~0.6 km/s で、プルームによって放出されて

いるガス速度の視線方向成分と地表付近からの昇華成分との差を反映していると解釈できる。

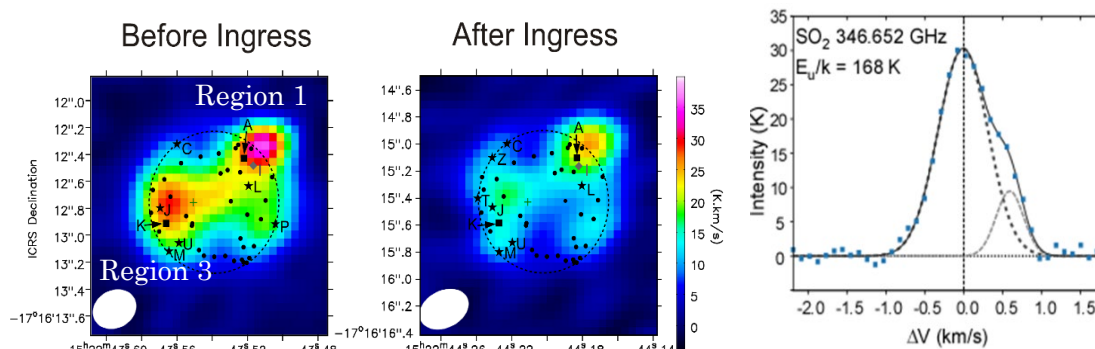
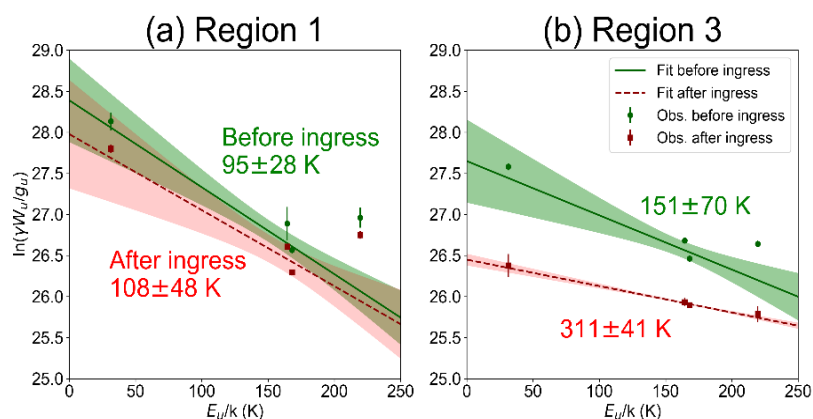


図 2 (左) Integrated intensity maps for the SO₂ 346.652 GHz (19_{1,19}-18_{0,18}) line before and after Ingress. Dashed circles show Io's disk and white ovals show the beam size. Distribution of hot spots listed by Cantrall et al (2018) [2] is overlapped. (右) Spectral lineshapes for the SO₂ lines in Region 1 before ingress. Solid lines show the fitted lines to the composite Gaussian function. Dashed lines show the main and redshifted spectral components.

また、LTE 状態の仮定のもとで、Region 3 の大気回転励起温度を計 4 本の SO₂ の遷移 ($E_u/k = 31, 164, 168, 220$ K) の積分強度から Population diagram [文献 1] を用いて評価した (図 3)。Region 1 では、木星蝕前と中の観測点に対するフィッティングの精度は悪く、 $E_u/k = 220$ K の点に熱的に非平衡である成分が見られた。この原因は磁気圏のイオンが外気圏に衝突することによる上層大気加熱が関係していると考えられる。Region 3 では木星蝕前は 151 ± 70 K に対し、木星蝕中は 311 ± 41 K に上昇することが分かった。また、木星蝕中はすべての遷移の積分強度がフィッティングの信頼区間の範囲に収まった。このことからイオンが木星蝕中、昇華大気が凝結により消失し、溶岩起源ガスのみが残されたと考えられる。

図 3. Population diagrams of Io's atmospheric SO₂ for Region 1 and 3 before and after ingress. The 1- σ confidence intervals of observed values are shown in filled areas.



【今後】

これまでの ALMA のイオ大気観測は木星側の面の観測がメインである。しかし木星側より反木星側の方が、観測された火山プルームは多く、フロストが降り積もっている表面の割合も大きい[2]。また、HST 観測によると、反木星側の面の方が木星側より SO₂ 大気による Ly- α の吸収が大きいことがわかっている[3]。火山噴火が大気に与える影響をより詳細に理解するため、木星側より多くのガスの存在が期待できる反木星側の面をイオ視直径を上回る分解能で電波観測することが必要である。

【引用文献】

- [1] N.A, Goldsmith, P. F., & Langer, W. D., “Population diagram analysis of molecular line emission”, *ApJ*, 517, 209-225 (1999).
- [2] Feaga, L. M., McGrath, M., & Feldman, P. D., “Io’s dayside SO₂ atmosphere”, *Icarus*, 201, 570-584 (2009).
- [3] Cantrall, C., de Kleer, K., & de Pater, I., et al., “Variability and geologic associations of volcanic activity in 2001–2016”, *Icarus*, 312, 267–294 (2018).

【関連成果論文】

- [1] R. Koga, T. Suzuki, F. Tsuchiya, T. Sakanoi, and Y. Hirahara, "ALMA Observation of SO₂ Gas Originating from Io's Volcanic Plume and Lava Areas", *ApJL*, 907(1), L6-14, DOI:10.3847/2041-8213/abd39f

【関連学会発表】

- [1] 古賀 亮一、木星衛星イオの火山噴火による大気と散逸ガスの変動、衛星系研究会、一関高専（オンライン開催）招待講演、2021/3/1
- [2] 古賀亮一、土屋史紀、鈴木達也、平原靖大、H.T.Smith、木村智樹、村上 豪、吉川一朗、吉岡和夫、山崎 敦、鍵谷 将人、坂野井 健、”木星衛星からの大気・内部物質散逸”、第22回惑星圏研究会、東北大学(オンライン開催)、2021/2/19
- [3] 古賀亮一、平原靖大、鈴木達也、土屋史紀、坂野井健、"ALMA で検出された木星衛星イオの二酸化硫黄噴火ガス"、2020年秋季日本天文学会、弘前大学(オンライン開催)、2020/9/8
- [4] 古賀 亮一、平原 靖大、鈴木 達也、土屋 史紀、鍵谷 将人、坂野井 健、木村 智樹、吉川 一朗、吉岡 和夫、村上 豪、山崎 敦、"ひさき衛星とALMAで観測されたイオの火山活動と大気・イオプラズマトーラスの関係"、JpGU-AGU Joint Meeting 2020, 幕張メッセ（オンライン開催）、2020/7/12
- [5] 平原靖大、” スペースからの中間赤外線高分散分光による宇宙化学”、G-REXサイエンス検討会、招待講演、早稲田大学(リモート開催)、2021/3/24-25

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】

本研究は、高質量分解能を有した次世代型の宇宙機搭載用イオンエネルギー質量分析器の機能を確認することである。人工衛星及び観測ロケットを利用したプラズマその場観測では、3次元速度分布関数の取得と共に質量分析によるイオン種の同定もイオン計測には必須となっている。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となる。

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である。現時点で計画及び検討されている宇宙機搭載の粒子計測器による観測計画では、MMX(火星衛星)、Comet Interceptor(彗星)、FACTORS(地球電離圏)、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。またいずれの観測計画でも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なくなるため、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も得られることも期待出来る。

【研究方法】

前年度までに数値モデルを用いたイオン質量分析器イオン光学系の設計を完了し、製作し試作モデルを真空槽内に設置してイオンビームを照射する性能試験を行った。本年度は試作モデルの結果を反映させてMMX計画用イオンエネルギー質量分析器(MSA)のエンジニアリングモデルの設計を行った。

【研究結果】

コロナ禍により、移動を伴う他機関実験室での作業は制約を受けたが、設計作業はコンピュータ上でほぼ完結するため滞りなく予定を消化した。数値計算によって要求性能を満たすイオン光学系を決定し、振動衝撃への耐性や組み上げ作業を考慮した構造を備えたCADモデルを作成した(図1)。また、今後の性能試験のため試験環境や物品消耗品の準備などを行った。

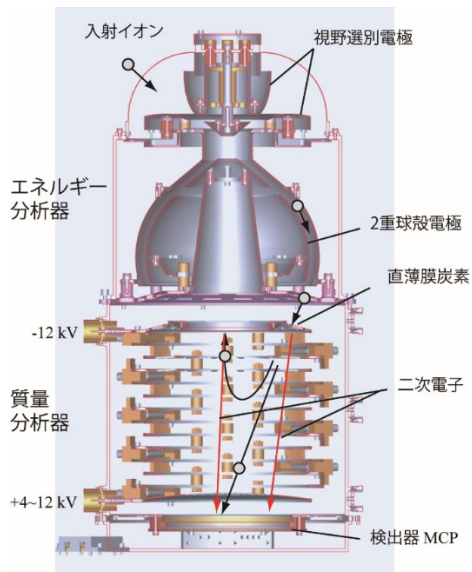


図1：イオン分析器 CAD モデル断面図

【まとめ】

本研究成果を元にMSAチームはMMX計画におけるJAXA基本設計審査会(PDR)を受け、2020年10月にエンジニアリングモデル開発について了承を得た。現在は設計結果に基づきエンジニアリングモデルを製造中である。2021年度はエンジニアリングモデルの性能試験及び環境試験を実施し、設計結果と比べて検証作業を行う。エンジニアリング試験結果をまとめてフライトモデル設計を行い、詳細設計審査会(CDR)への準備作業へと向かう予定である。

【成果発表】(学会研究会発表は全てリモート形式)

- 横田勝一郎他, lobal emissions of carbon ions from the total lunar surface, 日本地球惑星科学連合 2020 年大会, 2020 年 7 月 13 日
- 横田勝一郎他, 火星衛星探査計画 MMX MSA 開発状況報告, 第 64 回宇宙科学技術連合講演会, 2020 年 10 月 29 日.
- 出口雅樹, 横田勝一郎他, MMX 搭載用イオンエネルギー質量分析器の性能評価, 日本惑星科学会 2020 年 秋季講演会, 2020 年 11 月 12 日.
- 横田勝一郎他, In situ observations of ions and magnetic field around Phobos: Mass Spectrum Analyzer (MSA) for Mars Moons eXploration (MMX), 地球電磁気・地球惑星圏学会 第 147 回総会・講演会, 2020 年 11 月 2 日.
- S. Yokota, Lunar pickup ions, Mini-moon seminar, Taiwan Space Union, 2020年12月7日.
- 横田勝一郎他, 地球型惑星衛星に起きている物質の供給と放出, Symposium on Planetary Sciences 2021, 2021年2月19日(招待講演)
- S. Yokota et al., In situ observations of ions and magnetic field around Phobos: Mass Spectrum Analyzer (MSA) for Mars Moons eXploration (MMX), 4th MMX Science working Team Meeting, 2021年2月24日.
- 横田勝一郎他, 火星衛星フォボス周辺での将来イオン磁場観測: MMX探査機搭載MSAの開発, ISEE研究集会「宇宙地球結合系における物理機構・素過程に関する統合的研究形態・体系の構築・推進」, 2021年3月18日.
- S. Yokota et al., Global emissions of indigenous carbon ions from the Moon, *Science Advances*, 6, eaba1050, 2020.

(別紙様式 1 - 2)

宇宙線をプローブとした太陽風と IMF の断層撮像的観測 Tomographic observation of solar wind and IMF using cosmic ray as a probe

小島 浩司、中部大学・天文台

研究目的

本研究では、日印共同研究 GRAPES-3 (南インド・タミルナド州 Ooty) の空気シャワー観測装置と大型宇宙線望遠鏡を用いて、広いエネルギー帯域で、宇宙線の多方向同時観測を行う。これにより、内部太陽圏の宇宙線密度分布の空間的構造とエネルギー依存性を明らかにし、太陽周辺領域および内部太陽圏における IMF プラズマの断層的撮像 (トモグラフィ) を行うことが、本研究の目的である。また、同様の手法を、名古屋大学宇宙地球環境研究所 (ISEE) の 36 平方メートルのミュオン望遠鏡と、メキシコ・シエラネグラ山の宇宙線望遠鏡にも適用し、世界規模の観測を目指す。さらに、現在南米ボリビアで建設計画が進められている ALPACA 実験に参加することで、1 日単位での断層撮像も可能となる。

研究方法

本研究では、多方向ミュオン望遠鏡を用いた大気ミュオン観測と、宇宙線空気シャワー観測で得られたデータを用いる。ミュオン望遠鏡では、一次宇宙線の強度変動のモジュレーションを利用し、空気シャワー観測では、太陽の宇宙線遮蔽効果の利用を IMF のモニタリングを行なう。

本研究で用いる観測装置は、GRAPES-3 の多方向ミュオン望遠鏡、本研究所・東山キャンパス内の多方向宇宙線ミュオン望遠鏡、および東京大学宇宙線研究所・明野観測所の多方向ミュオン望遠鏡である。また太陽遮蔽効果の解析には、GRAPES-3 空気シャワー観測装置を利用する。これらの観測装置に加えて、全世界に展開されている中性子検出器のデータを統合的に解析することで、従来の約 100 倍以上のエネルギー領域において解析が可能となる。観測で得られた宇宙線強度変動と宇宙探査機による IMF プラズマの物理量を比較して、それらに関連付けているパラメータを推定する。さらに、多方向ミュオン望遠鏡及び空気シャワー観測装置で得られる二次元宇宙線強度分布と、惑星間シンチレーション (IPS) 観測から得られる太陽風の空間的構造とを比較解析することにより、宇宙線の異方性と太陽風の空間構造との関連を明らかにし、磁気雲の 3 次元構造や磁気中性面 (カレントシート) の形状の解明を目指す。

GRAPES-3 研究活動報告

2019 年度の終盤では、新型コロナウイルスの世界的流行により、予定していた 3 月中のインド渡航が取りやめになった。これにより、2019 年度の研究予算の未執行分は次年度に

繰り越された。

2020年度においても、依然として新型コロナウイルスの流行が治まらなかったため、ほぼ全ての研究活動が計画通りに進めることができなかった。本研究における主要協力機関であるインド・タタ基礎研究所においても状況は日本国以上に悪く、今現在においても外国人の入国が認められていない。さらにインド国内においても、永らく全土におよぶ都市封鎖が長期に亘ったこと、とくに GRAPES-3 のある Ooty への侵入が著しく制限されていたため、インド側共同研究者も観測施設に行くことが困難な状況が続いた。そのため、我々が進めているミュオン検出器の建設作業も滞っている。そのような中、本研究においても、予算計画を見直すことになり、専ら次に挙げる事項に関連した物品購入を2019年度の繰り越し部分も含め執行することにした。①観測データの長期保管の手法、②新ミュオン検出器の回路部品、③比例計数管製作用物品、④データ解析環境の整備。これらの項目について、高圧・低圧電源、記録メディア、PCモニター、蝋付け用品、電子部品を購入した。

一方で、オンラインによる研究打合せは随時行なわれており、解析に関するミーティングは週に1回程度で行なわれている。日本国内においても、GRAPES-3 共同研究者による不定期の会議が行なわれている。

(別紙様式 1 - 2)

オーロラパッチ内部の分極電場
Polarization Electric field inside auroral patch

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所
電子航法研究所
高橋透

研究目的

近年、オスロ大学が実施したロケット実験データから申請者らは、170 km以下(F領域下部およびE領域)の電気伝導度がオーロラによって増大させられると、250 km付近(F領域)で生成された電離圏擾乱が弱められることを明らかにした(投稿済)。この結果は、E領域の伝導度が増大することでF領域とE領域を結ぶ沿磁力線電流が生成され、F領域の分極電場を弱めたため電離圏擾乱も同時に弱められたと考えられる。従って、E領域の電気伝導度の増大は、電離圏擾乱を弱める働きをするということが考えられる。

これまで本研究課題で遂行した研究は事例解析であり、より普遍的な電離圏擾乱の描像を明らかにするためには統計解析を行う必要がある。E領域の電気伝導度を増大させるオーロラ降下粒子による電離は全天カメラによる557.7 nmの発光強度から推定が可能である。また、E領域において高度方向に薄く電子密度(伝導度)の高い領域であるスポラディックE(Es)層が発生することがある。Es層はスポラディックナトリウム層(SSL)との発生が良好な特徴を利用し、ナトリウムライダーによるNa密度観測からEs層の出現と内部の電気伝導度の推定をする。また、イオノゾンデも電離圏電子密度の推定やEs層の検出に用いる。これらのE領域の電気伝導度の増大と、電離圏擾乱を観測するGPSシンチレーション観測とを合わせ用いることにより、E領域での電気伝導度の増大によって電離圏擾乱が弱められるか否かを統計的に明らかにすることを目的とする。

研究方法

2018~2019年度に実施した事例解析結果が普遍的な電離圏の描像であるかを統計研究によって調査する。そのために、ノルウェー・トロムソ及びスキボトム、スピッツベルゲン島ニーオールスンにおいてGPSシンチレーション観測とオーロラ発光強度、およびEs層の同時観測を実施する。

研究結果

当初は研究方法に記述の通り、観測所または研究機関に出張し、現地観測及び議論を行う予定であったが、新型コロナウイルスの感染拡大によって移動が大きく制限を受けた。そのため、研究目的を部分的

に変更し、これまで実施された4回のロケット実験データを用いて、オーロラの発光強度と電離圏擾乱の生成・成長の研究を実施した。

2018年12月7日にVISIONS-2:35039、2018年12月8日にTRICE-2:52003及び52004、2019年1月9日にCAPER-2が打ち上げられた。これら4発のロケットにはMulti-Needle Langmuir Probe (m-NLP)が搭載され電子密度を高速(6250-10000 Hz)で観測しており、10 mから1000 mのスケールの電子密度の変動を観測することができる。

ロケットで観測された電子密度変動(イレギュラリティ)と全天カメラで観測されたオーロラ発光強度との比較を図1に示す。図(a), (b), (c)から、557.7 nmの発光強度とイレギュラリティとに顕著な相関は見られなかった。その一方で、図(d), (e), (f)から、35029, 52004, CAPER-2で観測されたイレギュラリティと630.0 nmのオーロラの発光強度には相関が見られ、発光強度の増大に伴って、イレギュラリティの振幅も増大した。

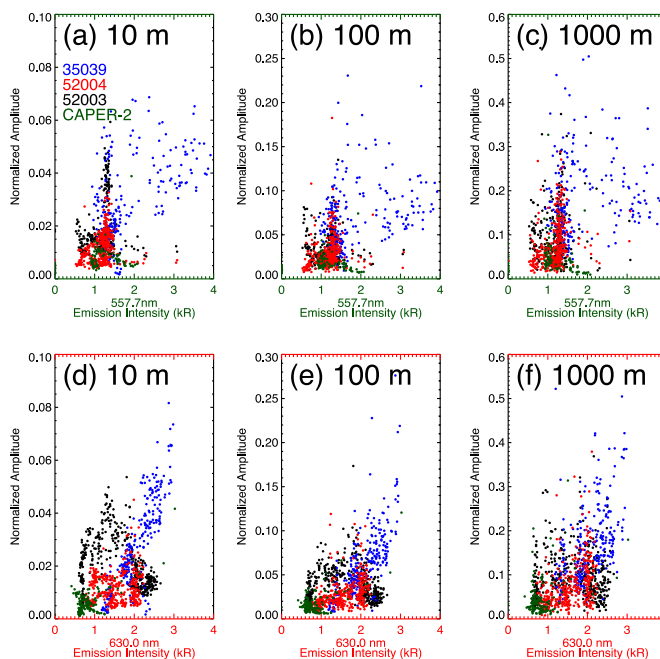


図1. オーロラ発光強度と10, 100, 1000 mスケールのイレギュラリティとの比較。557.7 nmとの比較を(a), (b), (c)に、630.0 nmとの比較を(d), (e), (f)に示す。

考察とまとめ

本研究では630.0 nmの発光強度とイレギュラリティとの関係に着目した。52003で観測されたイレ

ギュラリティは他のロケットで観測されたものとは異なる描像であった。全天カメラの画像データから、ロケットがカस्पオーロラに侵入した時刻を見ると、52003はカस्पオーロラが拡大した直後にカस्पオーロラ内部に侵入しており、イレギュラリティの振幅の増大はカस्पオーロラのエッジ付近で見られた。その他のロケットのケースでは、カस्पオーロラが拡大し、その形状を保った状態の時にその内部にロケットが侵入しており、カस्पオーロラの中心部でイレギュラリティの増大していた。また、52004は52003の2分後にカस्पオーロラに侵入している。ことから、イレギュラリティを作り出す主なメカニズムは2分以内のタイムスケールで変化し、カस्पオーロラが拡大した直後はそのエッジ付近で密度勾配が急峻になったことに起因したメカニズム(密度勾配不安定など)によって主に生成され、その後はカस्पオーロラの中心部でオーロラの構造化した降り込みによって生成されている可能性が考えられる。

これらの研究は論文として近日中に投稿する予定である。

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・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)。

太陽活動は、2019 年 12 月より Cycle25 がはじまった。2020 年以降、徐々に活発な太陽活動に移行するものと思われるが、Cycle25 も Cycle24 同様に低調な太陽活動であるとの予測もあり(<https://www.swpc.noaa.gov/news/solar-cycle-25-forecast-update>)、レーダー観測データ等を用いることにより、幾つかの Cycle における静穏な極域電離圏の比較が可能になるものと考えられる。本研究では、極域(特にカस्प近傍での昼側極冠域)の電離圏・熱圏データを取得して、2007 年-2008 年の極小期データ等との比較を実施する(昼側極冠域電離圏・熱圏は、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。したがって、本研究のようなデータの蓄積が重要と考えている)。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(局所的に)分布している際の電離圏変動(特に静穏時)の特徴を調べることを目的とする。

研究方法（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（2020 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

高エネルギー粒子の流入による電離、大気加熱、大気組成変動を調べるための数値コードを開発してきた。数値コードの動作確認や GCM への組み込みを行っている。本年度は、コロナ禍の影響により研究活動が制限され、数値シミュレーションの準備・検討といった作業が中心となった。

EISCAT レーダー特別実験

昨年度中止となった特別実験を実施するため、藤原、野澤がトロムソに赴き、2021年3月に特別実験を実施予定であったが、新型コロナウイルスの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、2021年3月11日、25日の7:00-13:00 UT に EISCAT 特別実験を実施した(3/11 と 3/12 の連続日程での実施予定であったが、ESR サイトでの機器トラブルのため 3/12 は中止とし、3/25 の実施となった)。

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, 野澤 悟徳, 小川 泰信, 陣 英克, 埜 千尋, 品川 裕之, Space weather modelling of the dayside polar ionosphere and thermosphere, 地球惑星科学関連学会連合大会 (JpGU-AGU Joint Meeting), 7月, オンライン, 2020.

埜 千尋, 陣 英克, 品川 裕之, 三好 勉信, 藤原 均, Neutral and ion dynamics seen in GAIA with variable high-latitude input, 地球惑星科学関連学会連合大会 (JpGU-AGU Joint Meeting), 7月, オンライン, 2020.

野澤 悟徳, 津田 卓雄, 斎藤 徳人, 川原 琢也, 和田 智之, 小川 泰信, 藤原 均, 高橋 透, 川端 哲也, ホール クリス, ブレッケ アスゲイル, Statistical study of Sporadic Sodium Layers (SSLs) above Tromso (2), 地球惑星科学関連学会連合大会 (JpGU-AGU Joint Meeting), 7月, オンライン, 2020.

陣 英克, 三好 勉信, 埜 千尋, 品川 裕之, 藤原 均, 太陽放射スペクトルの変動による熱圏・電離圏の応答, 第148回地球電磁気・地球惑星圏学会, オンライン, 11月, 2020.

Satonori Nozawa, Takuo Tsuda, Norihito Saito, Takuya Kawahara, Satoshi Wada, Yasunobu Ogawa, Hitoshi Fujiwara, Toru Takahashi, Tetsuya Kawabata, Chris Hall, Asgeir Brekke, Statistical study of Sporadic Sodium Layers (SSLs) above Tromsoe (3), 第148回地球電磁気・地球惑星圏学会, オンライン, 11月, 2020.

川原 琢也, 野澤 悟徳, 津田 卓雄, 斎藤 徳人, 川端 哲也, 和田 智之, 藤原 均, 三好 勉信, 北極域ナトリウムライダーによる中性大気温度・風速観測: 下部熱圏 (80km-200km)と年間観測への拡張, 第148回地球電磁気・地球惑星圏学会, オンライン, 11月, 2020.

Chihiro Tao, Michi Nishioka, Susumu Saito, Daikou Shiota, Kyoko Watanabe, Hidekatsu Jin, Hiroyuki Shinagawa, Naoto Nishizuka, Takuya Tsugawa, Yasunobu Miyoshi, Hitoshi Fujiwara, Mamoru Ishii, Statistical analysis of short-wave fadeout for extreme event estimation, 第148回地球電磁気・地球惑星圏学会, オンライン, 11月, 2020.

Yasunobu Ogawa, Satonori Nozawa, Yoshimasa Tanaka, Taishi Hashimoto, Shin-ichiro Oyama, Takuo Tsuda, Hitoshi Fujiwara, Koji Nishimura, Hiroshi Miyaoka, Takuji Nakamura, Ryoichi Fujii, Ingemar Haggstrom, Craig Heinselman, Current EISCAT and next EISCAT_3D database, 第148回地球電磁気・地球惑星圏学会, オンライン, 11月, 2020.

藤原均, 超高層大気科学の研究課題とレーダー観測・数値シミュレーション, 2020年度EISCAT研究集会, オンライン, 3月25日, 2021.

(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 80-115km 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。この技術はそのままライダー昼間観測に応用でき、ライダーの夏季観測・24 時間連続観測へと発展可能である。その課題として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 ライダーでは、冬季夜間の観測で背景光を除去するために市販のバンドパスフィルタ (幅約 1nm@589nm) を使用している。一方、熱圏領域 (高度 120 km 以上) の Na 原子密度は、密度が Na 原子層ピーク高度(90 km)の 1/1000 以下で、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) (図 1) を実現する超狭帯域光学フィルタの開発を開始した。Na ライダーでの温度・風速計測手法では、レーザ波長におけるフィルタ透過率の安定性が極めて重要となる。その核となるのが Na セルであり、従来品の問題点の根本的な解決のためにライダー観測用に独自開発を開始した。本年度はその Na セルの試作を行った。

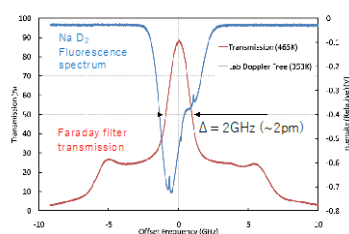


図 1 Faraday filter 透過率 (半値幅~2pm, 赤線) と Na セルからの共鳴散乱光 (青線)。

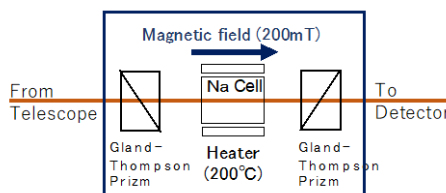


図 2 Faraday filter の構成。強磁場中に加熱した Na セルを配置。

□ 研究経過・手法

ファラデーフィルタは図2のように構成され、中心に配置するNaセルは透明の光学窓と、内部が真空で固体Na原子が封じてある小型(直径25mm, 長さ25mm程度)の容器である。新型Naセルはファラデーフィルタ専用の仕様として特殊な技術を用いて開発するセルで、市販品(ガラス製、加工容易、Na原子と化学反応する)とは材質も製作過程も全く異なる。(1) 高温のNa原子と化学反応をしない材質選定、(2) かつ可視光を透過する窓材質選定、(3) 真空中で異種材料の接合をする技術、が開発のキーとなる。試作品の製作は、東北大学と共同で進めてきた。

今年度は、アルミニウム円筒ボディ(内壁は酸化アルミニウム=サファイアコーティング)と、サファイア円盤窓で、接合実験を兼ねてサンプルを試作した。セルは加熱状態(200°C)で使用するので、製作時の室温からの熱応力による破壊がおきないかなど、実験的に確認をする。本予算は、主に高精度研磨を必要としたサファイア窓の購入に用いた。

□ 結果

図3にセルの試作品の写真を示す。現状ではNa原子をセル内に封じる手法は確立していないため、内部が真空のまま窓の接合を行った。接合方法は、半導体ウエハの接合に用いる常温接合で、これをセル形状に適応するのは今回が初めてである。真空封止ができることは、すでに実証済みの技術である。東北大学でサンプル(現時点で1つ)を製作し、同時に接合状態の検証も行った。部分的に接合状態が悪い箇所はあるが、全周にわたって接合はされており、真空封止はできていると判断できる。



図3 試作したNaセル。ボディがアルミニウムで窓がサファイア。

□ まとめ

Naライダー用の狭帯域背景光除去フィルタとして、ファラデーフィルタの開発を開始した。特殊仕様のNaセルを試作し、ボディと窓の接合状態の確認を行い、セル製作手法の確認ができたと判断できる。次年度はNa原子の封止方法を検討しつつセルを製作し、透過率計測の実験を行っていく。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。

(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、最近の高時間分解能イメージングや高空間分解能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ような状況にある。

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

脈動オーロラ (数秒~数十秒で明滅するオーロラ) の明滅時に、発光時定数 110 sec の酸素原子輝線発光 630.0 nm (OI630.0) が明滅しているというイメージング観測の報告例 [e.g., Liang et al., JGR, 2016] があるが、波長分解能が数 nm 程度の干渉フィルターを用いた単色分光イメージングでは、630.0 nm 近辺の窒素分子バンド発光 (N_2 1PG) の混入の可能性を評価できていない。

本研究では、スペクトログラフによる観測データを用いて脈動オーロラの明滅 (ON と OFF) に伴う発光スペクトル変化に着目し、明滅に寄与している原子・分子の波長情報を調査した。脈動オーロラの ON と OFF の両方の発光スペクトルにおいて 630.0 nm 付近に OI630.0 による輝線状の発光を確認したが、脈動オーロラの明滅スペクトル (ON と OFF の差分スペクトル) では、630.0 nm 付近に OI630.0 による輝線状の発光は確認できなかった。代わりに、 N_2 1PG の 632.3 nm (10,7) バンド発光が 630.0 nm 付近まで広がっている様子を確認した。同様の調査を複数の脈動オーロライベントについて行なったところ、いずれのイベントでも同様の結果が得られた (図1参照)。このように、脈動オーロラの 630.0 nm 付近の明滅に関して、OI630.0 ではなく N_2 1PG バンド発光が明滅の主成分を担っていることが判明した。以上に関して学術論文 (Tsuda et al., JGR, 2020.) として発表した。

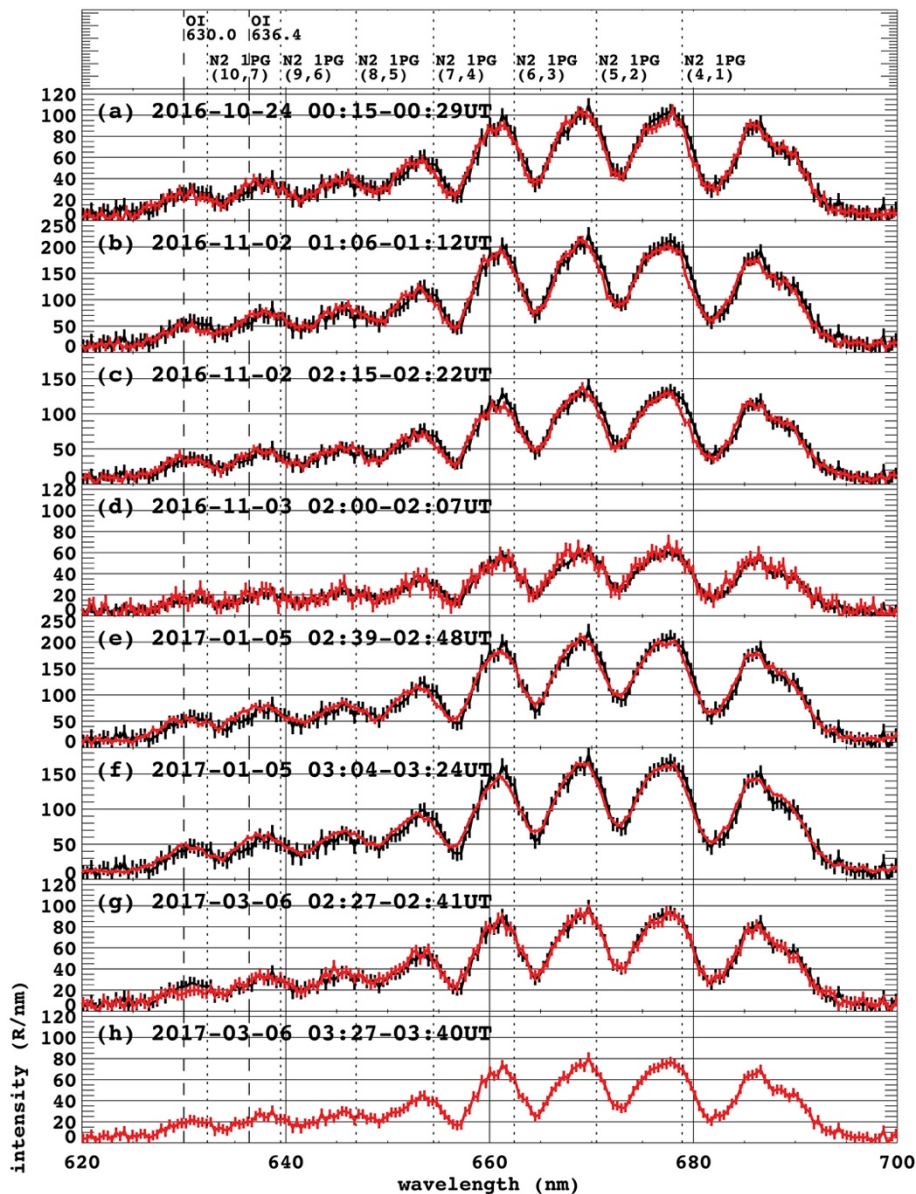


図1. 脈動オーロラの明滅スペクトル (Tsuda et al., JGR, 2020).

研究発表

- (1) T. T. Tsuda, C. Li, S. Hamada, K. Hosokawa, S.-i. Oyama, S. Nozawa, T. Kawabata, A. Mizuno, J. Kurihara, T. Nishiyama, and M. J. Kosch, OI 630.0 nm and N2 1PG emissions in pulsating aurora events observed by an optical spectrograph at Tromsø, Norway, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 125, e2020JA028250, doi:10.1029/2020JA028250, 2020.
- (2) T. T. Tsuda, C. Li, S. Hamada, K. Hosokawa, S.-i. Oyama, S. Nozawa, T. Kawabata, A. Mizuno, J. Kurihara, T. Nishiyama, and M. J. Kosch, OI 630.0 nm and N2 1PG emissions in pulsating aurora events detected by an optical spectrograph at Tromsø, Norway, *The 11th Symposium on Polar Science*, online, December 2020. (poster)
- (3) T. T. Tsuda, C. Li, K. Hosokawa, S. Nozawa, T. Kawabata, A. Mizuno, S.-i. Oyama, and J. Kurihara, A pulsating aurora event observed by an optical spectrograph at Tromsø, Norway, *JpGU-AGU Joint Meeting 2020*, online, July 2020. (poster).