

## 1. 国際共同研究 目次詳細

(所属・職名は2020年3月現在)

(注1) : 新型コロナウイルスの影響で2020年度に延期

(注2) : 新型コロナウイルスの影響で中止

\* 2020年度に延期しました課題は実施後掲載

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
小谷亜由美	名古屋大学	生命農学研究科	助教	東シベリア森林における凍土-植生-大気システムの時空間変動	1	
石川 守	北海道大学	地球環境科学研究院	准教授	地下水の動態に注目した永久凍土の変動監視	3	
加藤千尋	信州大学	理学部	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		(注1)
宮下幸長	Korea Astronomy and Space Science Institute (韓国天文研究院)	Space Science Division	Senior Researcher	ERGデータに基づくサブストーム発生に伴う内部磁気圏の変動の研究	6	
浅原良浩	名古屋大学	大学院環境学研究科	准教授	U-Pb年代測定のための新たな“若い”ジルコン標準試料の化学的均質性の評価	8	
中澤知洋	名古屋大学	KMI 情報解析研究センター/理学研究科	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	10	
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	12	
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	14	
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1	16	
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		(注1)
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	18	
土屋史紀	東北大学	大学院理学研究科	助教	北米におけるVLF電波観測と地上統合観測を用いた高エネルギー電子降り込み過程の同定	20	
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	22	
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		(注1)
中森健之	山形大学	学術研究院	准教授	銀河系内宇宙線源探査に向けたCTA望遠鏡の改良と可能性評価	24	
西澤智明	国立環境研究所	環境計測研究センター 遠隔計測研究室	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	26	
藤原 均	成蹊大学	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	28	
寺尾 徹	香川大学	教育学部	教授	多様な水文気候学的地域特性が駆動するアジアモンスーン変動に迫る国際共同研究	30	

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
坂崎貴俊	京都大学	大学院理学研究科 地球惑星科学専攻	助教	宇宙圏からのエネルギー流入に対する下層大気の大気潮汐の応答	32	
馬場賢治	酪農学園大学	酪農学研究科・農食環境学群環境共生学群	准教授	アジアダストホットスポット域からのエアロゾル輸送に関する研究		(注1)
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		(注1)
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	34	
吉川 顕正口	九州大学	理学研究院・地球惑星科学部門	准教授	Pc1地磁気脈動の全球的発生・伝播特性に関する研究	36	
平原靖大	名古屋大学	環境学研究科	准教授	ALMAアーカイブデータのリトリバル解析によるタイタン気象学の創成	37	
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	39	
成影典之	国立天文台	SOLAR-C 準備室	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	42	
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	特任研究員	オーロラパッチ内部の分極電場	44	
芳原容英	電気通信大学	大学院情報理工学研究科	教授	東南アジアにおけるELF帯電磁波観測を用いた、大規模雷の電氣的、時空間特性に関する研究	46	

東シベリア森林における凍土-植生-大気システムの時空間変動  
Spatial and temporal variability of  
permafrost - vegetation - climate system in eastern Siberia

小谷 亜由美 (名古屋大学・生命農学研究科)

【背景・目的】

地球温暖化が顕在化した現象の一つとして、永久凍土表層の融解があげられる。実際に過去30年間において、環北極域の永久凍土地域では気温上昇に伴う地温上昇と永久凍土の融解が観測されている。永久凍土表層の融解は、地表面付近の温度や水分状態の変化に伴う大気とのエネルギー収支の変化や、土壌中に蓄積された炭素（二酸化炭素・メタン）の放出を通して気候にフィードバックし、気候変動の駆動因子のひとつになっている（Lorantý et al., 2018）。活動層（暖候期に融解する地表から1-2mの層）の融解と凍結の季節サイクルは、永久凍土域における陸域生態系の成立や維持の土台となる現象である。その季節サイクルを逸脱する活動層の深化は、凍土融解の初期現象として現れるため（Shuur et al., 2008）、活動層の深度を決める要因を明らかにしておくことが重要である。

そこで本研究では、近年の降水量変動に伴う活動層内の土壌水分の増減が顕著な東シベリアの森林において、凍土-植生-大気システムの実態解明を行うことを目的とする。具体的には、活動層の深度を決める要因と森林の水・熱・物質循環への影響を明らかにするために、カラマツ林における活動層の空間・時間変動の要因を調査した。

【方法】

東シベリアの Spasskaya Pad (SP) および Elgeei (EG) の2サイト（カラマツ林）を調査対象とし、SPでは2019年5、8、9月、EGでは9月に簡易貫入試験により融解深を測定した。本共同研究期間を含む融解深と地温および地表被覆と周辺植生の写真データを整理し、ADS (Arctic Data archive System, <https://ads.nipr.ac.jp>) で公開する準備をした。両サイトの気象観測データを整備し、地温の鉛直プロファイルと微気象観測データを用いて融解深を含む活動層の凍結・融解に関するパラメータを算出し、年々変動の特徴とその要因を比較した。

【結果・考察】

2つの森林サイトに設置した50×50m区域において、EGでは貫入深の変動幅が大きく、1地点の地温プロファイルに基づく融解深が貫入深よりも過大になる傾向があった（図は省略）。そのため、区域周辺の微地形や植生の違いによる空間代表性の不確かさに留意する必要があることがわかった。

融解の季節進行を決める要因として活動層へのエネルギー供給と相変化エネルギーの影響をみるため、改 Stefanモデル (Brown et al., 2000など) の Edaphic factor (E-factor) に着目した (図1)。E-factorは地表被覆を含む土壌の熱拡散特性 (融解効率) を表し、融解期間の諸プロセスの積算効果により決まる。季節進行に伴いその値は増加し効率的に融解が進むことが示された (図1)。これは、鉛直方向に均一なモデルの土壌と異なり、融解層厚の増加に伴い表層の有機物層に対して鉱質土壌層の比率が増加し、融解層全体の熱伝導率が大きくなるためと考えられた。最大融解時には土壌水分とE-factorが概ね正相関を示したが、SPでは近年の土壌水分低下によらず融解効率が高い状態が保たれ、過剰湿潤のメモリー効果がみられた (図2)。一方、地表被覆の断熱効果をあらわすn-factorは、0℃以上と0℃以下の、それぞれの気温積算値に対する地表面温度 (本研究では5cmの地温) 積算値で求められ、値が小さいほど地表被覆の断熱効果が大きい (Klene et al., 2002など) ことを意味する。SPでは融解期間のn-factorが20年間にわたり減少傾向を示し (図3)、林床植生の成長に伴う断熱効果が顕著であった。凍結期間のn-factorは一般に積雪による断熱効果を表し、3年に限られるがEGでその傾向がみられた。一方SPでは林床植生の増加による断熱効果が加わり、冷却を抑制する傾向にあった (図4)。

本対象地域で1990年代から続く地温上昇と活動層の応答に関し、本共同研究は、2000

年代の湿潤イベントやそれに伴う植生変化 (Iijima et al., 2016, Kotani et al., 2019) が凍土融解に対し加速と抑制の両方向に働きうることを示した。この結果は、特異な気候変動への森林土壌の、局所的ではあるが一過性ではない応答を示すものである。火災や伐採などによる森林の変容 (Boike et al., 2016) と併せ、その推移を注視する必要がある。

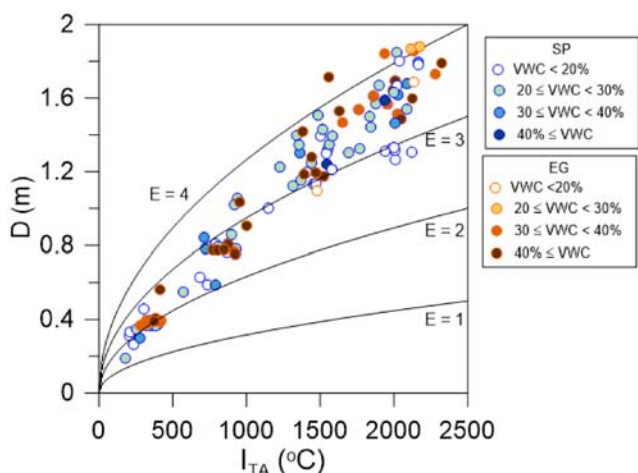


図 1: 融解深  $D$ 、融解期の積算温度  $I_{TA}$ 、体積含水率  $VWC$  (深さ 50cm までの加重平均) の関係。曲線は  $D = E \times I_{TA}^{0.5}$  ( $E$  は  $E$ -factor で、 $E = 1-4$ )。6/1, 7/1, 8/1, 9/1 および最大融解時 (9 月末) を抜粋して示す。

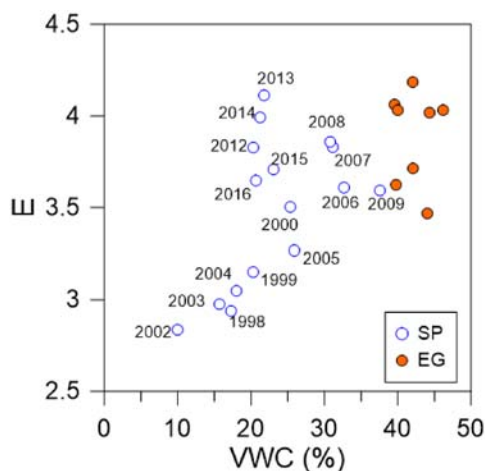


図 2: 最大融解深 (= 活動層厚) に対応する  $E$ -factor と体積含水率  $VWC$  (図 1 と同様)。

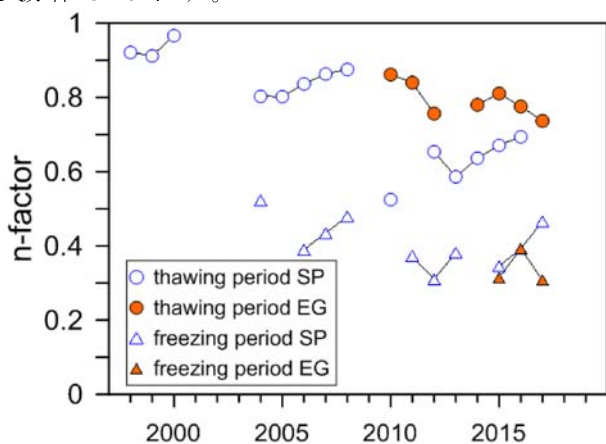


図 3: 融解および凍結期間の  $n$ -factor の年々変動。

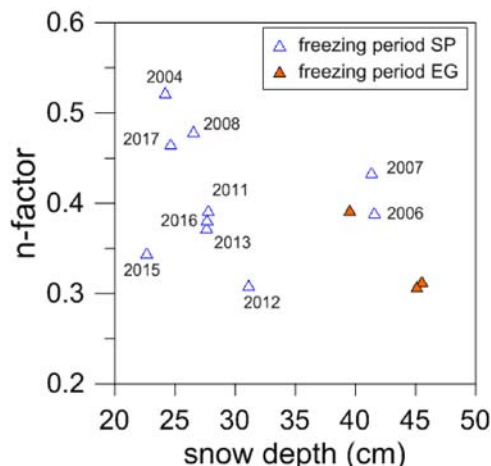


図 4: 凍結期間の  $n$ -factor と最大積雪深の関係。最大積雪深は観測サイトに最も近い気象ステーションにおける 12-3 月平均値

【引用文献】

Boike et al., 2016. *Glob. Planet. Change*, 139, 116–127. doi:10.1016/j.gloplacha.2016.01.001.  
 Brown et al., 2000. *Polar Geography*, 24, 166–258. doi:10.1080/10889370009377698.  
 Iijima et al., 2016. *Int. J. Clim.*, 36, 4265–4275. doi:10.1002/joc.4629.  
 Klene et al., 2002. *Arct. Antarct. Alpine Res.*, 33, 140–148. doi:10.1080/15230430.2001.12003416.  
 Kotani et al., 2019. *Agric. For. Met.*, 265, 295–309. doi:10.1016/j.agrformet.2018.11.025.  
 Loranty et al., 2018. *Biogeosciences*, 15, 5287–5313. doi:10.5194/bg-15-5287-2018.  
 Shuur et al., 2008. *BioScience*, 58, 701–714. doi:10.1641/B580807.

【成果発表】

Kotani, A., Ohta, T., Hiyama, T., Maximov, T.C.: Altering seasonal transition of surface energy fluxes in larch forest on permafrost: warming spring and wetting autumn. American Geophysical Union fall meeting, 2019/12/10.

地下水の動態に注目した永久凍土の変動監視  
Detecting permafrost changes focusing on ground ice

石川 守（北海道大学・地球環境科学研究所）

### 研究目的

国際永久凍土学会（International Permafrost Association: IPA）は、永久凍土融解の実態を把握すべく、グローバルな永久凍土温度観測網の拡充を進め、今日では世界各地の計約1000地点で観測が行われるようになった。申請者らは、永久凍土が不連続に分布するモンゴルにおいて、永久凍土の温度を地下10～30メートルまでモニタリングする観測網を構築してきた。観測網は連続・不連続・点在的永久凍土分布域にわたって計100地点で展開され、これにより、永久凍土の熱的安定性を統計的有意性に基づいて議論できるようになった。また衛星リモートセンシングによって、地下水に富む永久凍土表層部の熱的融解（サーモカルスト）地形の変化も明らかにされつつある（Saruulzaya et al., 2016）。

永久凍土の分布は湿潤な地盤の分布とよく対応し、そこでは森林や湧水といった重要な地域生態系サービスが成立している。今日においても遊牧が主な生業となっている同国では、言わば永久凍土が直接的に地域住民の生活を支えており、その動態を監視することが求められている。したがって永久凍土の動態を温度だけでなく地下水の様態も併せて監視していく必要性が生じた。

一方、連続永久凍土帯に位置する東シベリア・ヤクーツク近郊には凍土中の地下水起源の湧水が点在する。Hiyama et al. (2013)は湧水の水文トレーサー濃度（トリチウム濃度やCFCs濃度）を分析し、この地域の湧水が活動層内の地下水（凍土上地下水）と凍土層内の地下水（凍土内地下水）が混合し、地表に湧出したものであることを明らかにした。湧水のバルク年代はモニタリングを行った2009年～2012年の4年間で大きな変化は無く、温暖化による地下環境の激変は検出されなかった。ただし、その後の気候変動によって地表近くの永久凍土の熱・水環境が変化し、湧水のバルク年代が変化した可能性は否定できない。

不連続的永久凍土帯に位置するモンゴルでは、近年、湧水の枯渇や流出量の減少が顕在化しており、凍土の融解によって地下水に急激な変化が生じている可能性がある。そこで本国際共同研究は、永久凍土を地温だけでなく水の観点からも捉え、南限域永久凍土融解の実態把握を行い、水文トレーサーを用いた永久凍土の脆弱性について考察することを目的とする。

### 研究方法

研究対象地域は、ユーラシア永久凍土帯南限で凍土と湧水の分布が良く対応しているモンゴル・ハンガイ山脈とその周辺域である。我々が設置した地温観測網から地温データを取得し、永久凍土の安定性を評価した。また、研究対象地域に点在する湧水の現況を地域住民への聞き取りや現地踏査、衛星画像データなどから調べ、1960年代に作成された官製地図と比較し、過去数十年での湧水の劣化傾向を把握した。

また、複数の湧水から水サンプルを採取、日本に輸送し、名古屋大

学で前処理した後、International Atomic Energy Agency (2006)に基づいて(株)地球科学研究所でトリチウム濃度とCFCs (CFC-12, CFC-11, CFC-113)濃度を定量した。

さらに、湧水近傍の凍土の状態(地下氷の存在状態)を比抵抗二次元探査(比抵抗トモグラフィ)により現地調査した。

## 結果と考察

本国際共同研究(3年計画の3年目)によって、以下に示す結果が得られた。

- 1) モンゴル全域を対象とした永久凍土分布モデリングをオスロ大学の協力で実施した。多点地温観測結果(Ishikawa et al. 2018)を非定常熱伝導モデルCryoGrid2(Westermann et al., 2013)に適用し、森林や草地、湿地といった様々な地表面状態での土壌パラメータを求めた。ダウンスケールした再解析データ(ERA5)をモンゴル国家気象水文局の気象観測値で補正したものを入力値として全球的な永久凍土分布を出力するCryoGrid\_CCIを走らせ、1980年代からの1kmグリッドスケールでの永久凍土分布の変遷を得た。
- 2) ハンガイ地域に分布する湧水のうち約150地点についてその現況を調べたところ、南向き斜面に存在する湧水が過去数十年で顕著に衰退していることが見いだされた。今後、この結果と上記永久凍土分布図とを対比し、湧水の衰退と永久凍土の関連を調べていく。
- 3) 湧水のトリチウム濃度とCFCs濃度を分析した結果、トリチウム濃度が低い湧水ではCFC-12濃度も低く、採水地点ごとに両濃度の順位が対応し、両濃度の時系列変動も類似していた。また、サーモカルスト地形に存在する湧水ではトリチウム濃度とCFC-12濃度が両方とも低く、地下氷融解水が湧出していることが推測された。サーモカルスト近傍の湧水のトリチウム濃度には上昇傾向が見出されたため、地下氷融解水の寄与が減少し、近年の降水の寄与が増加している可能性が示唆された。一方、サーモカルスト地形に存在しない湧水のトリチウム濃度の時系列変化からは、近年の降水の寄与が小さくなっており、地下氷融解水の寄与が大きくなっている可能性が見出された。
- 4) 比抵抗二次元探査によって湧水近傍の地下氷の状態を調査した結果、サーモカルスト地形に存在する湧水近傍では地表から地下深く(約100mの深さ)にかけて、地下氷の存在量が多いことが明らかとなった。一方、サーモカルスト地形に存在しない湧水では、地表近くに地下氷は少なく、地下深くにのみ、地下氷が多量に存在していることがわかった。

## まとめ

本国際共同研究の遂行により、不連続的永久凍土帯に位置するモンゴル・ハンガイ山脈周辺域の永久凍土について、その気候変動に対する脆弱性を地温観測網と湧水観測から明らかにできた。

湿潤環境の永久凍土は気温変動への応答性が低かった一方、高緯度域や乾燥土壌中に形成された永久凍土は気温変動への応答性が高く、脆弱であることが明らかとなった。また永久凍土の分布域は従来考えられていたものよりも狭く、湖沼近辺や北向き斜面に限られることがわかった。永久凍土分布域外縁部での湧水の枯渇傾向を調べた結果、

南向き斜面に存在する湧水が過去数十年で顕著に衰退していることがわかった。

湧水のトリチウム濃度とCFC-12濃度を定量した結果、サーモカルスト地形に存在し、地下氷に富む場所で湧出する湧水の場合、地下氷融解水の寄与が大きいことがわかった。その原因として、サーモカルスト地形に存在する湧水近傍では地表から地下深くにかけて、地下氷が多量に存在するためであることが考えられた。

#### 引用文献

- Hiyama T, Asai K, Kolesnikov A B, Gagarin L A and Shepelev V V 2013 Estimation of the residence time of permafrost groundwater in the middle of the Lena River basin, eastern Siberia. *Environ. Res. Lett.*, 8, 035040, doi:10.1088/1748-9326/8/3/035040.
- International Atomic Energy Agency 2006 Use of chlorofluorocarbons in hydrology - A Guidebook. IAEA Vienna 277p.
- Ishikawa M, Jamvaljav Y, Dashtseren A, Sharkhuu N, Davaa G, Iijima Y Baatarbileg N and Yoshikawa K 2018 Thermal states, responsiveness and degradation of marginal permafrost in Mongolia. *Permafrost and Periglacial Processes* 29 271-282, doi:10.1002/ppp.1990.
- Saruulzaya A, Ishikawa M and Jambaljav Y 2016 Thermokarst lake changes in the southern fringe of Siberian permafrost region in Mongolia using Corona, Landsat, and ALOS satellite imagery from 1962 to 2007. *Advances in Remote Sensing*, 5, 215-31, doi:10.4236/ars.2016.54018.
- Westermann S., Schuler TV., Gianås K., Etzelmüller B., 2013 Transient thermal modeling of permafrost in Southern Norway, *The Cryosphere Discussions* 6(6) DOI: 10.5194/tcd-6-5345-2012

ERGデータに基づくサブストーム発生に伴う内部磁気圏の変動の研究  
Study of substorm-associated variations in the inner  
magnetosphere on the basis of ERG data

宮下幸長  
Korea Astronomy and Space Science Institute  
Space Science Division

研究体制

代表者： 宮下幸長 (KASI)

共同研究者： Lee Jaejin, Hwang Junga (KASI)  
Lee Dae-Young (Chungbuk National University)  
Kim Hyang-Pyo、三好由純  
(名古屋大学宇宙地球環境研究所)

研究目的・方法

ジオスペースでは、太陽活動の影響により、サブストームや磁気嵐などの激しい擾乱が発生する。この時、太陽風・磁気圏・電離圏の結合の下、粒子加速や各種不安定性といった宇宙で広く見られるプラズマ現象が発生し、放射線帯やリングカレントが発達する。これらの大まかな描像は確立しつつあるが、詳細な物理機構については、数多くの未解決問題が残されている。

本課題では、サブストーム・磁気嵐時における粒子加速機構（粒子注入）と放射線帯・リングカレントへの影響、および磁気圏-電離圏結合について調べ、サブストームの発生とその影響、および磁気嵐の発達の理解を発展させる。特に、サブストーム時の磁場双極子化に着目し、高エネルギー粒子の生成機構と、生成された高エネルギー粒子の特徴や輸送、その後の振る舞いについて調べる。また、磁場双極子化時に励起したPi2およびPi1脈動について調べ、磁気圏-電離圏結合の役割、およびサブストームの発生・発達について理解を深める。

ジオスペース全体の系の物理過程を理解するためには、総合的な研究が不可欠である。ここでは、**ERG**サイエンスセンターから提供された**ERG**衛星のデータ、および関連する衛星・地上観測のデータを連携させた解析を行う。**ERG**衛星のデータ解析には、**ERG**サイエンスセンターから提供された解析ソフトウェアを用いた。

研究結果・発表

本課題最終年度である本年度は、昨年度に引き続き、**ERG**衛星のデータと南極昭和基地のオーロラデータを用いた内部磁気圏におけるサブストームの磁場双極子化に伴う磁場・高エネルギー粒子・高周波波動の周期的変動に関する事例解析を進めた。**ERG**の観測により、地球から



地球半径の4-5倍の距離で発生した磁場双極子化に伴い、Pi2脈動に係るバルーニング不安定性が起こったが、磁場が双極子状になった時に高周波波動も現れる傾向を見出した。この高周波波動は、バルーニング不安定性と結合してオーロラ発光の周期的変動に影響を及ぼしているかもしれない。本年度は特に、オーロラ発展のタイミングの解析と高周波波動とバルーニング不安定性との結合についての考察を進めた。

また、韓国では、4機の編隊飛行により低高度領域を観測するSNIPE衛星の打ち上げを2021年に予定している。ERG衛星と運用期間が重なるため、両者の連携観測による研究課題について検討した。その検討結果の一部について、11月にKASIで開催されたKorea-Japan Space Weather Workshop 2019(KASI-ISEE workshop)で発表した。

さらに、本課題に関連した研究として、THEMIS衛星データを用いた疑似サブストームとサブストーム時の磁気圏尾部発展の統計解析についての論文が出版された。(Fukui, K., Y. Miyashita, S. Machida, Y. Miyoshi, A. Ieda, Y. Nishimura, and V. Angelopoulos, A statistical study of near-Earth magnetotail evolution during pseudosubstorms and substorms with THEMIS data, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 125(1), e2019JA026642, doi:10.1029/2019JA026642, 2020)

## U-Pb 年代測定のための新たな“若い”ジルコン標準試料の化学的均質性の評価 Evaluation of chemical homogeneity for young zircon grains for use as a new secondary U-Pb dating standard

代表者： 浅原良浩、名古屋大学・大学院環境学研究科  
分担者： AZIZI, HajiHossein, University of Kurdistan (Iran)  
南雅代、名古屋大学・宇宙地球環境研究所  
山本鋼志、名古屋大学・大学院環境学研究科  
REZAEI, Farzad, 名古屋大学・大学院環境学研究科

### [研究目的]

イランは、アルプス・ヒマラヤ造山帯の中に位置しており、イラン北部(カスピ海の南)のアルボルス山脈、北西部から南東部に伸びるザグロス山脈の2つの山脈(造山帯)に囲まれている。この2つのプレート収束帯における火成活動は、イラン国内に数多く分布する金属・非金属鉱床の生成と密接に関係している。ザグロス山脈東部の Urumia-Dokhtar Magmatic Arc (UDMA) 帯は新生代(65 Ma 以降)の火成活動が活発な地域であり、これらの地域には様々な鉱床が集中している(e.g. Rabiee et al., 2019; Rabiee et al., submitted)。また、従来、中生代またはそれ以前の基盤岩と考えられていたザグロス造山帯内の北部サナンダジ-シルジャン帯からは新生代の花崗岩が多数報告されており(Azizi et al., 2019; Rezaei et al., in prep.)、周辺の金鉱床との関連も指摘されている。これらの鉱床の成因解析のためには、鉱床母岩の形成時期とそのマグマ源を明らかにし、鉱床と母岩の年代的、成因的關係を知ることが不可欠である。イランの火成活動や鉱床の成因解析を進める上では、新生代の火成岩の年代測定は特に重要である。

U-Pb 年代測定では、337~1850 Ma の年代値を持つ各種ジルコン標準試料が一次標準、二次標準などに用いられているが、精度確認を行うワーキングスタンダードについてもこれらの“古い”ジルコン標準試料が使われている。数 10 Ma の“若い”年代値をもつジルコンの標準試料は GHR-1 (48.1 Ma: Eddy et al., 2019) や OD-3 (33.0 Ma: Iwano et al., 2013) など世界的にも少なく、若い U-Pb 年代値の精度確認が不十分である現状がある。名古屋大学環境学研究科の LA-ICP-MS での U-Pb 年代測定では、91500 ジルコン試料(1063 Ma)を一次標準、NIST SRM 610 ガラス標準試料を二次標準として、未知試料とともに古いジルコンの 91500 と若いジルコンの OD-3 を測定することにより、若いジルコンの分析精度の確認を行っている(高地ほか, 2015)。しかしながら、OD-3 のジルコンはサイズがやや小さく、またコンコーディア年代が得られにくいことがあること、また入手もやや困難という問題点がある。以上のような国内外の研究動向と実状を踏まえ、精度・確度の高い U-Pb 年代データを蓄積していくためには、適用範囲に合わせた“若い”ジルコン年代標準試料が望まれている。

本研究では、イランのザグロス山脈東部の UDMA 帯に分布する新生代の花崗岩体を対象とし、10~60 Ma の“若い”年代値をもつジルコン標準試料候補の探索と、その年代標準試料の適性評価を行った。本研究は、平成 30 年度 ISEE 国際共同研究「U-Pb 年代測定のための新たな“若い”ジルコン標準試料の評価に関する予察的研究」を継続的に発展させるものであり、実用化に向けた本格的な評価を行った。

### [研究方法]

本研究では、イランの UDMA 帯の新生代花崗岩の1岩体を対象として、この岩体から4試料を採取し(Azizi 担当)、それぞれの試料からジルコンを分離し、U-Pb 年代測定を行った。まず、岩石試料をジョークラッシャー、ディスクミルを用いて細砕し、篩かけをして数 100 $\mu$ m のサイズに揃えた。水簸で細粒粉末、軽鉱物を取り除き、乾燥後にネオジム磁石で磁性鉱物を取り除いた。ジヨードメタンを使った重液分離後、実体顕微鏡下でハンドピックによりジルコンを集めた。これらのジルコンの分離、その後の薄片作成は名古屋大学理学部 E 館内の実験室で行った。また、この4試料の中の1試料について追加のジルコン分離を行い、名古屋大学の全学技術センターに薄片作成を依頼した。

これらの年代測定前に、GATAN MiniCL を装備した走査型電子顕微鏡(SEM: JEOL JSM-6510LV および Hitachi S-3400N、名古屋大学環境学研究科および博物館設置)で、ジルコン結晶の後方散乱電子(BSE)像とカソードルミネセンス(CL)像を撮影し、ジルコンの構造、クラックおよび包有物の確認を行った(Azizi, Rezaei 担当)。U-Pb 年代測定は、レーザー誘導プラズマ質量分析装置(LA-ICP-MS: Agilent 7700x + ESI 社製 NWR213、環境学研究科設置)を使用した(浅原、南、山本、Rezaei 担当)。U-Pb 年代測定は高地ほか(2015)の手法に従い、レーザー径は 25  $\mu$ m に設定した。通常の火成岩のジルコン U-Pb 年代測定では、20~30 個のジルコン粒子に対し、特にリム部分の測定を集中的に行って年代値を決定するが、本研究は年代標準試料の適性評価を目的としているため、1 岩石試料あたり 30~50 個のジルコン粒子を分析し、さらに一部のジルコン粒子に対してリムとコアなど複数点を分析した。ジルコンの分離と U-Pb 年代測定は、Azizi が名古屋大学に滞在した令和元年 7 月~8 月に集中的に実施し、その後、メールで解析と議論を進めた。

また、これらの岩石試料の地球化学的特徴を把握するため、蛍光 X 線分析装置 (Rigaku ZSX Primus II、名古屋大学環境学研究科設置) による主成分元素定量分析、ICP-MS による微量元素定量分析、表面電離質量分析装置 (GVI IsoProbe-T、名古屋大学環境学研究科設置) による Sr と Nd の放射壊変起源の同位体分析も併せて実施した。

#### [結果と考察]

平成 30 年度の予察的研究では、年代標準試料の条件として、岩石については、(i) 将来にも継続的に試料を採取できる岩体であること、(ii) ジルコン結晶の含有量が高いこと、ジルコンについては、(iii) 結晶のサイズは比較的粗粒であること、(iv) インクルージョンなどの不純物が少ないこと、(v) 結晶のコアとリムで年代差がないこと、を設定し、その結果、本花崗岩試料の“若い”年代標準試料(約 20 Ma)としての適性は概ね確認できた。また、平成 30 年度に分析した 4 つの試料いずれにおいても、0.5 kg またはそれ以下の花崗岩岩片から数 100 粒のジルコンを容易に回収できており、ジルコンの含有量は高いことを確認していたが、本年度実施した追加のジルコン分離では、数 kg の岩片から約 10,000 粒のジルコンを抽出することに成功した。これらの顕微鏡観察の結果、淡黄褐色を示すジルコンが多く、100~300 μm サイズの柱状~長柱状の自形結晶のものが多く見られた。また、SEM 観察では目立ったインクルージョン(サイズ、数)は見られず、年代測定の標準試料に適している。今後の年代標準試料とするため、追加試料のジルコンについて、スライドガラス 1 枚あたり 200~700 粒のジルコンをマウントし、ジルコン標準試料の薄片を 3 枚作成した。

本研究で分析した 4 つの花崗岩試料のジルコン U-Pb 年代値はいずれも約 20 Ma であり、この 4 つの年代値は誤差の範囲で一致した。また、ジルコン結晶のコア部分とリム部分の年代値の差は全く見られなかった。最終的な年代誤差は  $\pm 0.2$  m.y. であり、年代値の均質性は高いことが確認できた。また、本花崗岩試料のジルコンの化学的均質性については、91500 ジルコン標準試料に比べて微量元素の均質性は高く、年代値の均質性を裏付ける結果が得られた。

以上のように、本研究では実用化に向けて、ジルコンの年代標準試料としての適性は確認できた。この“若い”ジルコン年代標準試料の年代値を確定させるための測定(値付け)を、他大学・他研究機関で U-Pb 年代測定を実施している複数の研究室と連携して実施する計画であったが、本年度内に完了していない。最終確認のためのジルコンの年代測定と化学分析を 2020 年春に実施した後、この UDMA 帯の新生代花崗岩の地理的、地質学的な情報、化学組成および Sr、Nd 同位体組成、および年代値の詳細について論文公表する予定である。

#### [引用文献]

- Azizi, H., Haddad, S., Stern, R.J., Asahara, Y. (2019) Age, geochemistry and emplacement of the ~40-Ma Baneh granite-appinite complex in a transpressional tectonic regime, Zagros suture zone, northwest Iran. *International Geology Review* **61**, 195-223.
- Eddy, M.P., Ibanez-Mejia, M., Burgess, S.D., Coble, M.A., Cordani, U.G., DesOrmeau, J., Gehrels, G.E., Li, X., MacLennan, S., Pecha, M., Sato, K., Shoene, B., Valencia, V.A., Vervoort, J.D., Wang, T. (2019) GHR1 zircon – A new Eocene natural reference material for microbeam U-Pb geochronology and Hf isotopic analysis of zircon. *Geostandards and Geoanalytical Research* **43**, 113-132.
- Iwano, H., Orihashi, Y., Hirata, T., Ogasawara, M., Danhara, T., Horie, K., Hasebe, N., Sueoka, S., Tamura, A., Hayasaka, Y., Katsube, A., Ito, H., Tani, K., Kimura, J., Chang, Q., Kouchi, Y., Haruta, Y., Yamamoto, K. (2013) An inter-laboratory evaluation of OD-3 zircon for use as a secondary U-Pb dating standard. *Island Arc* **22**, 382-394.
- 高地吉一, 折橋裕二, 小原北士, 藤本辰弥, 春田泰宏, 山本鋼志 (2015) 213 nm Nd: YAG レーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析計を用いたジルコンの U-Pb 年代測定: Pb/U 分別補正に NIST SRM 610 を用いるための分析条件最適化. *地球化学* **49**, 19-35.
- Rabiee, A., Rossetti, F., Tecce, F., Asahara, Y., Azizi, H., Glodny, J., Lucci, F., Nozaem, R., Opitz, J., Selby, D. (2019) Multiphase magma intrusion, ore-enhancement and hydrothermal carbonatisation in the Siah-Kamar porphyry Mo deposit, Urumieh-Dokhtar magmatic zone, NW Iran. *Ore Geology Reviews* **110**, 102930

#### [成果発表]

##### 学会発表

浅原良浩. イラン・ザンジャン州の磁鉄鉱-燐灰石鉱床の鉱石および母岩の化学組成と Sr-Nd-Fe 同位体組成. 新学術領域研究(研究領域提案型)「都市文明の本質: 古代西アジアにおける都市の発生と変容の学際研究」B01 計画研究 04 第 2 回研究会「古代西アジアをめぐる水と土と都市の相生・相克と都市鉱山の起源」, 同志社大学室町キャンパス(京都), 2019 年 8 月.

Farzad Rezaei, Yoshihiro Asahara, Koshi Yamamoto, Hossein Azizi. Geochemical and isotopic constraints on origin of the Cenozoic granitoid bodies in the Zagros orogen, NW Iran. 2019 年度質量分析学会同位体比部会, 北海道登別市, 2019 年 11 月.

## 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 $1.4\mu\text{Gy}$ 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、本年6月にフランスが打ち上げる小型衛星がTARANISである。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。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。このために、地上観測を維持しつつ、TARANISのガンマ線検出器のキャリブレーションや初期運用に参画する。

### 2：研究結果

本年度は東京大学の大学院生和田君が、TARANIS衛星のキャリブレーションの打ち合わせをフランスで行い、こちらの最新の研究成果を発表してきた。また、国内でも北大の佐藤講師、中澤、和田の3名でTARANISを用いた、日本主導の研究の方針を相談した。これを受けて、5月に幕張で予定されていたJpGU2020に、TARANISガンマ線チームを代表した講演(中澤 et al.)を予定している(7月にネットワーク開催される予定)。並行して地上観測の維持、管理を進め、2019年度の観測とその基礎実験を進めた。

### 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示すことができた。また国内コミュニティーへの情報発信も進めている。2020年6月の打ち上げはコロナ騒ぎで若干遅れる可能性があるが、衛星は完成しており、あとは打ち上げを待つばかりである。2020年度中に打ち上げ、TGFデータの取得を開始する予定である。

### 5：成果発表

・2019/9/26 「第二回 MeV ガンマ線天文学研究会(9/26-27)」@東大：「Taranis 衛星による MeV 帯域の地球ガンマ線フラッシュ観測」和田 有希 (東京大学)

- 2019/12/26 高宇連タウンミーティング ~2030 年代を見据えた将来計画検討~@東工大 (田町) : 「2030 年代の sub-MeV/MeV 観測へ向けて」 中澤知洋 (名古屋大学)
- Wada, Y. et al. (incl. Nakazawa, K.) "Simultaneous detection of gamma-ray glow and downward terrestrial gamma-ray flash", AGU, Fall Meeting at San Francisco CA, 12 Dec. 2019

#### 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)

# 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

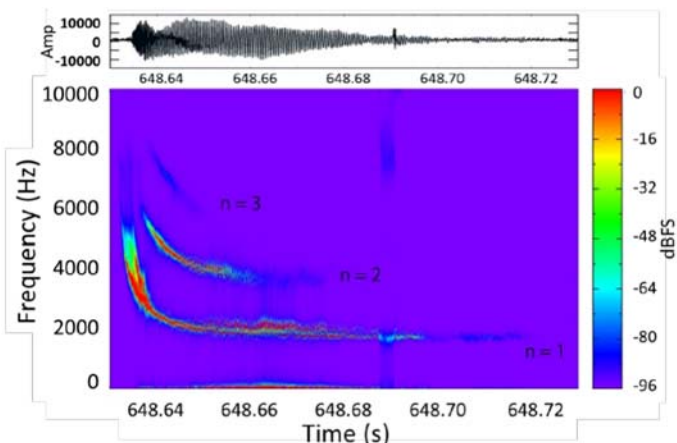
## 1. 研究目的

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  $\text{cm}^{-3}$ ) 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、

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)



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、2019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]。

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

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、 $f_c$ 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

人工tweekにより、従来の方法と提案方法とを比較した。図2に、 $d = 6000$  kmと仮定したtweekの推定結果を示す。提案方法において、 $d$ の誤差率は $f_c$ の誤差率変化と関連しており、全体的に低く抑えられている。図3に、 $d = 2000-10000$  km、 $f_c = 1600$  Hzとした場合の推定結果を示す。提案手法において、 $f_c$ および $d$ の誤差率は $d$ が小さいほど減少し、特に6000 km以下で改善している。 $d$ が小さいほど誤差が大きいため判別しやすく、推定誤差が小さくなると考えられる。

成果発表

[1] Hiroyo Ohya, Kodai Yamanobe, Kazuo Shiokawa, Yoshizumi Miyoshi, Fuminori Tsuchiya, Kozo Yamashita, Yukihiro Takahashi, Solar flare effects of the D-region ionosphere using daytime tweek atmospherics, URSI-JRSM2019, Chofu (Japan), 6 September, 2019.

[2] Kanno, M., H. Ohya, K. Shiokawa, H. Nakata, and T. Takano, A method for locating lightning discharges using tweek atmospherics, Japan Geoscience Union Meeting (JpGU) 2019, Chiba, 28 May, 2019.

[3] Kanno, M., H. Ohya, K. Shiokawa, H. Nakata, and T. Takano, Development of estimation method for propagation distance of tweek atmospherics, Workshop on radio science and wave measurement technology in space plasma, Kanazawa (Japan), 20 November, 2019.

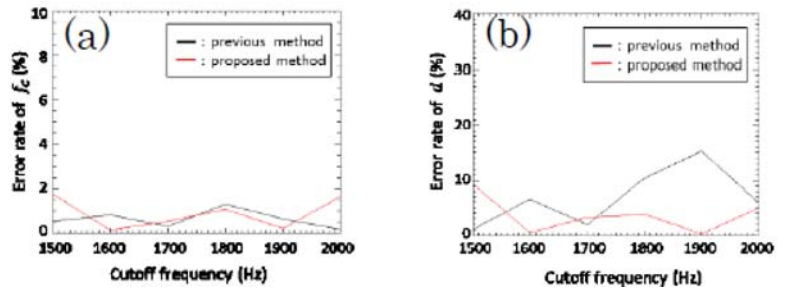


図2  $d = 6000$  km,  $f_c = 1500-2000$  Hz の場合における(a)  $f_c$ の誤差率および(b)  $d$ の誤差率

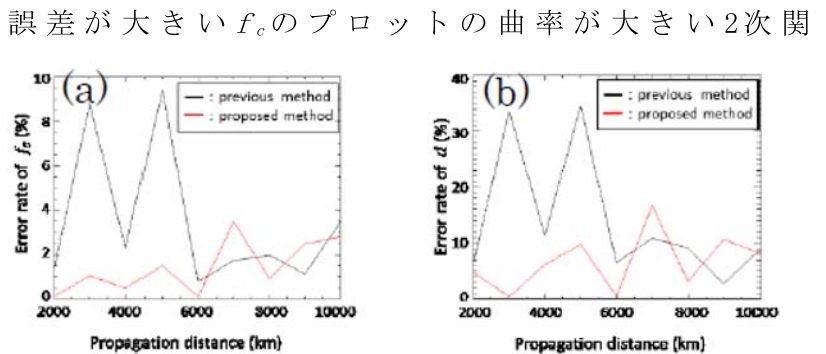


図2  $d = 2000-10000$  km,  $f_c = 1600$  Hz の場合における(a)  $f_c$ の誤差率および(b)  $d$ の誤差率

## 粒子シミュレーションを用いた磁気リコネクションジェット先端領域の乱流化過程の研究

### Study on the stability of the reconnection jet fronts by particle simulations

中村 琢磨、オーストリア科学アカデミー・宇宙科学研究所

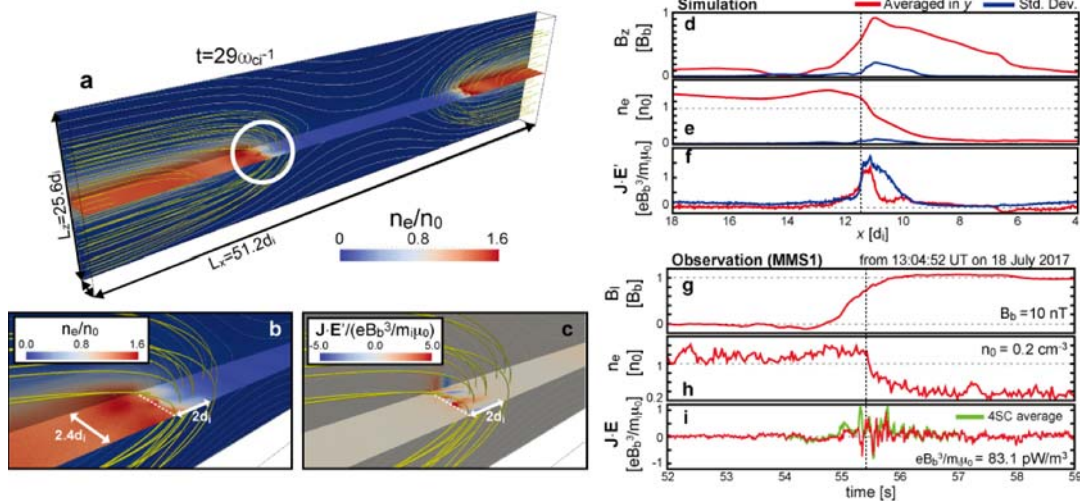
本プロジェクトでは、磁気リコネクション過程において2次的に発生する乱流現象及びそれに伴うエネルギー変換過程の解明を目的とし、数値シミュレーション、線形解析及び人工衛星によるその場観測を用いた研究を行った。磁気リコネクションは、磁気シアのあるプラズマ境界をまたいで磁力線が繋ぎ変わることで、境界層（電流層）に蓄積された磁気エネルギーを爆発的にプラズマの運動また熱エネルギーに変換するプラズマ物理において最重要なエネルギー変換過程の1つであり、太陽系から銀河ジェットまで様々な領域で起こる爆発的なプラズマ現象において中心的な役割を果たすと考えられている。例えば、地球磁気圏においては、磁気リコネクションが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、近年のコンピュータ資源またシミュレーション技術の発展により、MHDスケールに発展する磁気リコネクション過程を粒子法等を用いた運動論的シミュレーションで再現する事が可能になり、これにより、磁力線の繋ぎ変わりが起こる磁気拡散領域において運動論的スケールの物理がエネルギー変換において大きな役割を果たす事が示された[参考文献1]。さらに課題代表者らの大規模3次元完全粒子シミュレーションにより、3次元性を考慮すると、磁気拡散領域だけでなく、拡散領域の外側のリコネクションジェット先端領域で3次元的に成長するLower-hybrid drift instability(LHDI)が、さらなるエネルギー変換を起こす可能性が示された[参考文献2]。

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FX100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行った3次元完全粒子シミュレーションとNASAの国際磁気圏観測衛星ミッションMMSによる電子スケールのその場観測データ、及び、課題副代表者が主導し開発した運動論的線形解析ツール[参考文献3]を組み合わせる事で、ジェット先端領域で起こるLHDI乱流を系統的に調べた[成果発表1,2]。具体的には、まず、シミュレーション結果と地球磁気圏尾部領域で2017年7月18日にDipolarization Frontと呼ばれるジェット先端領域を観測したMMS観測イベントを比較し(図1)、ジェット先端領域におけるLHDI乱流が磁気拡散領域に匹敵する強度のエネルギー変換を起こしている事、また、シミュレーションに見られるLHDI乱流が実際に磁気圏尾部で起こっている可能性を示した。さらに、シミュレーションでは再現できない現実的なパラメータの範囲で線形解析を行う事で(図2)、シミュレーションで見られるようなLHDI乱流が、磁気圏尾部で観測されたイベントだけでなく、地球磁気圏尾部から太陽フレアを含む幅広いパラメータ範囲で発生する可能性を示した。この事は、ジェット先端領域における強いエネルギー変換が、宇宙プラズマにおける幅広い領域で磁気リコネクションの発達と共に発生している可能性を示唆しており、地球磁気圏に限らず様々な領域への応用が期待できる。また本結果は、太陽フレアからオーロラサブストームまで太陽-地球系のエネルギー輸送において中心的な役割を



果たす磁気リコネクション過程を定量的理解するにあたりジェット先端領域を考慮することの重要性を示しており、より正確な宇宙天気研究への応用も期待できる。本結果は、課題代表者が第一著者となり、本課題構成メンバー三者を共著者としてPhysical Review Lettersに出版された[成果発表1]。

図1：(a-c)磁気リコネクション過程の3次元完全粒子シミュレーション結果。リコネクシ



ンジェット先端領域に、LHDIの成長とそれに伴う強いエネルギー変換 ( $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}$ ) が見られる。(d-i)ジェット先端領域のシミュレーション結果の擬似観測と2017年7月18日のMMS衛星の観測結果の比較。繋ぎ変わった磁場が集まり密度変化の大きい先端領域においてシミュレーションで見られるのと同程度のエネルギー変換が観測においても見られる。

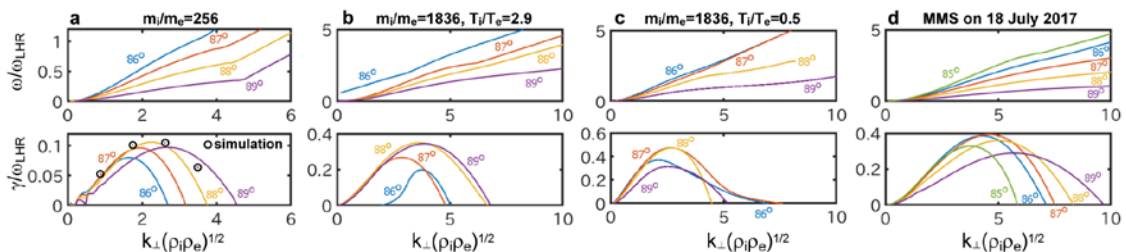


図2：シミュレーション及びMMS観測から得られたパラメータ、またその他の現実的パラメータを運動論的線形解析ツール[参考文献3]に入力した結果。MMS観測イベントを含む幅広いパラメータ範囲でLHDIが発生する事が確かめられた。

参考文献：

- [1] T.K.M. Nakamura et al., Measurement of the magnetic reconnection rate in the Earth's magnetotail, JGR, 123, 9150, 2018
- [2] T.K.M. Nakamura, T. Umeda et al., 3-D development of front region of plasma jets generated by magnetic reconnection, GRL, 43, 8356, 2016
- [3] T. Umeda & T.K.M. Nakamura, Electromagnetic linear dispersion relation for plasma with a drift across magnetic field revisited, POP, 25,102109, 2018

【成果発表】

- [1] (投稿論文) 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
- [2] (学会発表) T.K.M. Nakamura, T. Umeda, R. Nakamura, H. S. Fu, & M. Oka, Study on the stability of the reconnection jet fronts, *the EGU General Assembly 2019*, Vienna, Apr. 2019

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 1

Investigation of vertical atmospheric couplings in Jupiter, Mars,  
and Venus by the connection of Hawaiian small telescope  
with radio / space telescopes & orbiters : 1

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惑星光赤外観測施設をハワイ・マウイ島のハレアカラ高高度観測施設（標高約 3000m）に整備してきた。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) は東北大が主要時間を使用でき (T40 : 100%、T60 : 85%)、惑星探査機連携に必須の「柔軟な連携運用」が常時可能な世界的にも貴重な望遠鏡である。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、これらに対して展開する装置の開発・現地試験を行うとともに、ハワイ大等と惑星・系外惑星専用新望遠鏡建設計画にも取り組み、本コミュニティの活動エリアをより広げる活動を行っている。

## 2. 研究方法・結果

(1)木星：「イオトーラスの全体構造・EUV 分光情報」- 「UV オーロラ全発光量」結合の長期データを蓄積する Hisaki 紫外線望遠鏡衛星、および極軌道で「深部・低層-超高層大気」- 「極上空を含む内部-中間磁気圏」結合の長期データを蓄積する Juno 探査機を支える電波-赤外-可視地上観測を実施し、木星システム研究を Arase 等による地球システム研究と並行比較する機会を提供した。Subaru-8m では中間赤外大気光・熱発光の変動観測に成功している。電波域では東北大 IPRT 30m 電波望遠鏡による放射線帯長期観測結果を Hisaki 望遠鏡などによる磁気圏変動情報と連携させ、磁気圏-電離圏間の電場結合に関する研究を実施した。これらを支える熱圏-電離圏-磁気圏結合の電流・ポテンシャルモデル開発も進めた。

<論文>

Kita et al., Short-term variation in the dawn-dusk asymmetry of the Jovian radiation belt obtained from GMRT and Hisaki EXCEED observations, *ApJ Lett.*, 872:L24 (2019), doi:10.3847/2041-8213/ab0427.

Sinclair et al. A brightening of Jupiter's auroral 7.8-micron CH<sub>4</sub> emission during a solar-wind compression. *Nature Astronomy*, 3, 607-613, (2019)  
doi:10.1038/s41550-019-0743-x. など

<発表>

Kambara et al., Magnetospheres of Outer Planets Conf. 2019, Sendai. 2019年6月.

<学位>

中村勇貴, 木星電離圏電気伝導度に対する流星起源イオンの影響, 修士論文, 東北大学.  
2020年3月.

(2) 火星・金星: 60cm 望遠鏡に「中間赤外線レーザーheterodyne 分光器」の装着作業・試験観測を実施し、火星・金星のCO<sub>2</sub>高層大気発光データの取得に成功した。火星については11年ぶりの全球ダストストーム時の超高層を知る世界唯一の希少なデータである。金星についても超高層～中層大気の風速を捉え、あかつき等との共同を試みている。

<論文>

Takami et al., Evaluation of the retrieval method for the temperature and wind velocity profiles of Venusian nightside mesosphere from mid-infrared CO<sub>2</sub> absorption line observed by heterodyne spectroscopy, submitted to EPS

<発表>

Nakagawa et al., Space Science Symposium, ISAS/JAXA. 2020年1月.

Miyamoto et al., AGU 2019 fall meeting. San Francisco, 2019年12月. など

(3) ハレアカラ観測施設整備: T40/T60 望遠鏡遠隔運用を支えその現地整備を継続するとともに、今後の発展を目指して、特に近赤外線 Echell 分光器のハワイ展開、および中間赤外線レーザーヘテロダイン分光器の冷凍機運用化・ファイバーオプティクス化に向けた開発およびハワイ現地試験を進めた。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 推進を進め、主鏡を日本に戻して「京大せいめい望遠鏡」と同様に LogistLab 社で研磨作業をすべく、2019年度末にかけて東北大工場での各種の準備作業を進めている。また、冥王星上空大気の恒星掩蔽観測など、多様な観測活用のサポートも行った。

<発表>

Kagitani et al., Planetary Science Symposium 2020, Sendai, 2020年2月.

Kasaba et al., Planetary Science Symposium 2020, Sendai, 2020年2月.

Sakanoi et al., Planetary Science Symposium 2020, Sendai, 2020年2月.

Suzuki et al. Planetary Science Symposium 2020, Sendai, 2020年2月. など

<学位>

鈴木 駿久, 太陽系天体希薄大気の高コントラスト観測: 検出可能性の検討と PLANETS 望遠鏡の実現に向けた主鏡支持機構の開発. 修士論文, 東北大学. 2020年3月.

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

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GMD N,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。

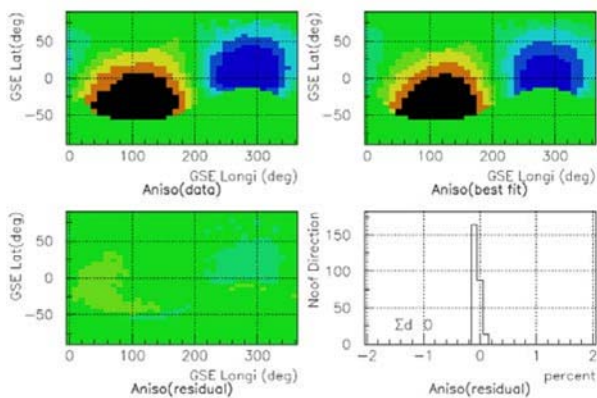


図 1 1次の異方性が存在するときの擬似データ (左上) とその再構成 (右上)、残差分布 (下段) [5]

図1に示すのは一次の宇宙線異方性を仮定した赤道付近の多方向ミュオン計での擬似データを強度分布の球面調和関数での展開結果と残差分布である。残差分布は概ね0.2%程度である[5]。全球を覆うように多地点のデータを統合することにより、Loss Cone構造を持つ前兆現象[4]などの微細な構造を伴う惑星間擾乱についてはこの程度まで検出可能になると考えられる。先行研究[5]で行ったGRAPES-3単眼の観測での実データでは24時間の積算を必要となり、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った。ネットワーク観測においてはリアルタイムに異方性の評価が出来るようになる。

そこで、本研究は、米国ユタ州の高地に約700平方キロの面積に展開されている空気シャワー観測装置である2層式シンチレーション粒子検出器507基を総面積1500m<sup>2</sup>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GRAPES-3と同程度の統計精度の観測点を確保事ができる。これにより、先述したフレアによる惑星間衝撃波に先立って観測される前兆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%以下までリアルタイムで検出可能にする。また大局的な宇宙線の流れを基に擾乱の内側にある低密度領域の接近もより高い統計精度のデータで評価することが出来るようになる[7]。本研究では、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確認することを目的としている。

## 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、世界の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 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。
- ② 装置が展開されている領域での気象条件の把握。
- ③ TA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

(検出器更新) 本年度4月～11月にかけて昨年度にあらたに増設した250台(合計750 m<sup>2</sup>)に対して宇宙線強度モニターのデータ取得が可能になるように調整し、連続観測を開始した。これにより研究申請時の1500m<sup>2</sup>の総面積から2250m<sup>2</sup>の観測面積となり、 $3 \times 10^7$  count/min の統計量で二次宇宙線強度を測定する装置となった。

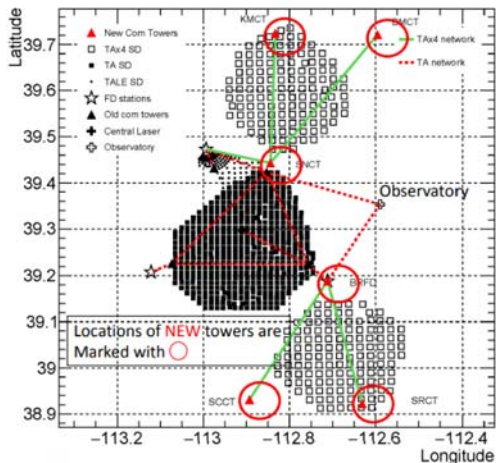


図 2 新たにモニター可能にした検出器の配置(南北 100km)と気圧計データ取得場所

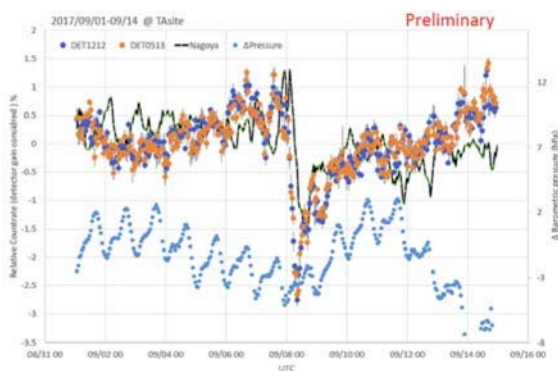


図 3 気圧効果に加えて気温由来の検出器の効果をも10分毎の校正データから補正

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の提供が可能になると期待される。

## 成果発表

36th International Cosmic Ray Conference 2019 Madison, WI, U.S.A.  
 Proceedings of 36<sup>th</sup> ICRC [PoS\(ICRC2019\)372](#)

## 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] K. Kuwabara et al. Geophysical Research Letters, V 31, Issue 19, 2004

(気象観測) 前年度購入し、既存の気象計(WX T530)と比較測定を済ませた複合環境データ記録装置(TR-73U ONDOTORI T&D製)をTCP/IPプロトコルでデータ取得を制御できるようにハードとソフトを開発し、サイト内の長距離無線ネットワークのポートに配置した。現在3台の気圧測定装置が中央の507台の検出器の領域に設置され、データを取得している。また、2020年2月に今年度追加の4台の購入をし、南北の拡張領域に増設したネットワークポートに全てに配置する準備を完了した。

(データ解析) 去年度報告した名古屋大学のミュオン計の強度変動との比較をさらに進め、気温由来の検出器の応答を補正し、TAサイト内の2つの検出器名古屋大学のミュオン望遠鏡のデータの比較を行ったところForbush Decreaseをよく再現することがわかった。過去12年分の全検出器のデータに対してこの補正係数を10分毎に求めデータベース化を進めた。

## 期待される成果:

研究方法の①②が概ね完了した。データ解析を定期的に行うようにソフトウェアを作成すれば、世界最大の多方向ミュオン望遠鏡GRAPES-3実験と反対の方向を観測する北半球で可動する約2250m<sup>2</sup>の宇宙線強度変動の観測装置となる。

今後この測定データから地磁気圏の外での宇宙線強度の推定を行うのシミュレーションを通して、既存の銀河宇宙線強度変動を測定

北米における VLF 電波観測と地上統合観測を用いた  
高エネルギー電子降り込み過程の同定  
Energetic electron precipitation observed with  
multi-groundbased instrument in North America

土屋史紀、平井あすか、小原隆博(東北大学・理)

塩川和夫、三好由純(名古屋大学・ISEE)

大矢浩代、宮下拓也(千葉大学・工)

Martin Connors(アサバスカ大学)、David Milling(アルバータ大学)

放射線帯の構造・変動は、高エネルギー電子の加速・輸送・消失過程のバランスで決まる。消失過程の理解は、放射線帯の形成過程を解明する上での重要な研究テーマである。高エネルギー電子の大気へ降下損失は、消失過程のうち重要な寄与をもつ物理過程の一つと考えられている。近年の研究から、磁気圏赤道面で励起されるプラズマ波動、特にホイッスラモードコーラス波と電磁イオンサイクロトロン(EMIC)波動が高エネルギー電子をピッチ角散乱することにより、大気への消失を駆動することが分かってきたが、それぞれの波動による電子降下過程の発動条件と寄与を明らかにするには、複数観測データの総合解析による詳細な事例研究と、統計解析が必要である。

本研究は、放射線帯から大気への高エネルギー電子降下現象の同定に低周波(VLF/LF 帯)人工電波の伝搬を用いる。下部電離圏と地上間を導波管伝搬する低周波電波受信信号の擾乱から、高エネルギー電子による下部熱圏・中間圏での電離現象を検出する。低周波電波伝搬観測と他の地上観測との比較解析から、以下の成果が得られた。

(1) ULF 地磁気脈動に同期した高エネルギー電子降下現象の同定

カナダ・アサバスカでの低周波電波観測から、2011年1月から2019年5月までの1939日の期間中に ULF 地磁気脈動に変調された電子降下現象を11例同定した。このうち、2017年6月4日5時 UT のサブストーム時の現象を詳細に解析した結果、ULF 変調の原因は、ホイッスラモードコーラス波によるピッチ角散乱が有力であるとの結論が得られた(Miyashita et al. 2020)。

(2) EMIC 波動による高エネルギー電子降下の統計解析

アサバスカでの誘導磁場観測から、2016年11月から2018年12月の約2年間に999例の EMIC 波動現象を同定した。アサバスカにおける低周波電波観測から、EMIC 波動現象と同時に検出された電子降下現象を23例同定した。これらは主に磁気嵐主相中のサブストームに伴って出現し、発生領域が夕方側～真夜中領域に集中することが明らかとなった。磁気嵐中のサブストームに伴う夕方側へのリングカレントイオンの注入が、EMIC 波動の励起と高エネルギー電子降下の発生に寄与していることを示している。

上述の成果に加え、低周波電波伝搬観測と既存の地上観測拠点との親和性を高め、総合解析が可能な現象事例を多数得るため、カナダ・ピナワに受信点を新設した。ピナワで北米東海岸の送信局電波(NAA, 24.0kHz)を受信することにより、PWING で構築された地上観測拠点の一つであるカップスケーシングでの地上観測データとの詳細な比較が可能となる。今後、ピナワでの低周波電波観測で同定された電子降下現象と、カップスケーシングのオーロラ、VLF・ULF 帯磁場観測との詳細な比較解析に取り組む。

#### 学会発表

- Hirai, A., F. Tsuchiya, T. Obara, Y. Kasaba, Y. Katoh, H. Misawa, K. Shiokawa, Y. Miyoshi, S. Kurita, M. Connors, Statistical study of EMIC wave-related electron precipitation at subauroral latitude, AGU 2019 Fall Meeting, San Francisco, U.S., 10 Dec. 2019
- Hirai, A., F. Tsuchiya, T. Obara, Y. Kasaba, Y. Katoh, H. Misawa, K. Shiokawa, Y. Miyoshi, S. Kurita, M. Connors, Spatial and temporal characteristics of EMIC wave-driven energetic electron precipitation from ground-based observations, International Symposium PSTEP-4, 28 Jan. 2020
- Miyashita, T., H. Ohya, F. Tsuchiya, H. Nakata, T. Takano, K. Shiokawa, Y. Miyoshi, N. Nishitani, M. Connors, S. G. Shepherd, ULF Modulation of Energetic Electron Precipitations Observed by VLF/LF Standard Radio Waves, URSI-JRSM 2019, 5 Sep. 2019. (学生発表賞受賞)

#### 論文(査読あり)

- 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, in press

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2019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。

【研究方法】

2019年度は、本課題の3年次計画の1年目である。2019年度は、共同研究者と会合を重ねて科学課題の検討と観測装置仕様を検討する。また、可視検出器の具体的な検討とメーカー選定を進める。

これまでの検討から、FACTORS可視撮像装置には、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が求められている。本年度はこれを達成する装置設計を進め、特にCCDもしくはCMOS検出器の評価を行うことで、技術成立性の向上を図る。この検討については坂野井が統括し、オーロラについて平原、三好、Frey、大気光観測については、津田、Schneiderが担当する。本年度は、検出器の候補となっている国内メーカーと海外メーカーのいずれかからCCDもしくはCMOSの試験用パッケージを購入し、電気試験や放射線試験を行うことで性能評価を行う。特に、FACTORS衛星は遠地点高度が3000km程度になる予定であり、放射線帯の中に長時間滞在するため検出器の耐放射線性が問題となる。科学用CMOSは低ノイズ特性をもつが、耐放射線性については実績や性能に不明点が多い。従って、本研究では、使用予定のCCDもしくはCMOSと同等の試験パッケージ(ISAS戦略的開発研究費で購入予定)を用いて、電気試験ならびに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(坂野井・山崎)。放射線のトータルドーズについては、モデルをもちいて見積もった値を採用する。

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検討する。この対物レンズ系は、上記の検出器と組み合わせ、科学観測要求を満たすために必要な性能(口径とF値)を満たすものとする。

加えて、装置開発検討のために、米国衛星搭載光学機器に実績をもつUCバークレー校Harald Frey博士ならびにコロラド大学Nick Schneider博士を訪問して研究打ち合わせを実施し、最新の知見と情報収集を測る。

【研究結果】

2019年度の検討により、国内と海外のメーカーそれぞれと会合を複数回開催し、宇宙使用可能なCCDまたはCMOSの具体的な型番や宇宙実績に基づく性能の定量的な評価をすすめる、精度の高い議論を行うことが出来た。これにより、FACTORSの理学目的であるオーロラ微細構造観測のための可視撮像検出器を調達する見通しは立ちつつある。一方、2019年度に予定されていたCCD/CMOS試験パッケージの調達が、ISAS戦略的開発研究費の充足率不足から達成できなかったため、計画していた電気試験や放射線試験を実施することができなかった。ISAS戦略的開発研究費は2020年度にも獲得を目指しており、採択されれば2020年度以降に検出器試験パッケージを用いた試験を実施する。



また、可視対物レンズ系については、共同研究者との検討の結果、れいめい衛星搭載カメラと同等の性能であれば観測成立することが確認された。

加えて、2019年12月に坂野井・三好がUCバークレー校を訪問し、Harald Frey博士とChris Chaston博士とFACTORS搭載の可視カメラ・紫外カメラの理学ならびに技術課題の検討を実施した。この後、坂野井はコロラド大学Nick Schneider博士を訪問し、FACTORS搭載カメラの技術検討を行った。これらの海外渡航費は本研究経費を用いる予定であったが、別経費により支弁することができたため、本研究経費は用いなかった。本研究経費により、カメラ光学系の基礎的な実験と解析を可能とするためにCMOSカメラや変位センサ、バンドパスフィルター、電源アダプター、ポータブルHDDを購入して実験環境を整備した。

### 【まとめ】

本年度研究により、国内と国外のメーカーそれぞれについて宇宙仕様CCDならびにCMOSの技術検討と定量的な性能の情報を得ることができた。一方で、別経費を予定していた検出器の試験パッケージの購入ができなかったため、電気試験と放射線試験は翌年度以降に実施することとなった。また、対物レンズの検討をすすめた。さらに、UCバークレー校Harald Frey博士ならびにコロラド大学Nick Schneider博士と理学課題ならびに技術検討を進め、今後の開発に必要な最新情報を得ることが出来た。

### 【成果発表】

- ・ 査読付き論文（1件）

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, Diffuse and Pulsating Aurora, Space Sci. Rev., vol 216, 4, <https://doi.org/10.1007/s11214-019-0629-3>.

- ・ 国際学会（FACTORSの発表2件、関連オーロラ研究発表4件）

Sakanoui, T., M. Hirahara, K. Asamura, Y. Miyoshi, T.-H. Watanabe, T. Nishiyama, S.-I. Oyama, Y. Saito, K. Hosokawa, M. Yamauchi, H. Kojima, N. Kitamura, Y. Ogawa, A. Matsuoka, Design of Visible and Ultraviolet Imagers for FACTORS - A Future Satellite Mission for Understanding the Coupling and Transportation Processes in the Upper Atmosphere, AOGS 16th Annual Meeting, Suntec convention center, Singapore, 28 Jul -2 Aug, 2019.

Sakanoui, T., M. Hirahara, T. Tsuda, K. Asamura, Y. Miyoshi, T.-H. Watanabe, T. Nishiyama, S.-I. Oyama, T. Saito, K. Hosokawa, H. Kojima, N. Kitamura, Y. Ogawa, M. Yamauchi, A. Matsuoka, N. Yagi, M. Fukizawa, G. Ishizawa, Visible and ultraviolet imagers for auroral and airglow observations by FACTORS - a future satellite mission for understanding the coupling and transportation processes in the upper atmosphere, JpGU 2019, Makuhari Messe, Chiba, 26-30 May 2019.

- ・ 国内学会・シンポジウム（FACTORSの発表4件：うち3件を以下に列挙、関連オーロラ研究発表6件）

平原 聖文, 齋藤 義文, 小嶋 浩嗣, 浅村 和史, 三好 由純, 北村 成寿, 坂野井 健, 宇宙地球結合系探査計画「FACTORS」FACTORS衛星によるオーロラおよび宇宙から地球へのエネルギー流入過程の観測計画検討, 第20回宇宙科学シンポジウム, 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, 相模原, Jan. 8-9, 2020.

三好 由純, 浅村 和史, 坂野井 健, 平原 聖文, 渡邊 智彦, 西山 尚典, 海老原 祐輔, 細川 敬佑, 小川 奏信, 塩川 和夫, 八木 直志, 吹澤 瑞貴, Park InChun, FACTORS-領域間結合研究チーム, FACTORS計画におけるイオン加速, 関連計測機器の検討状況, 第20回宇宙科学シンポジウム, 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, 相模原, Jan. 8-9, 2020.

坂野井 健, 八木 直志, 平原 聖文, 浅村 和史, 三好 由純, 大山 伸一郎, 津田 卓雄, 齋藤 義文, 細川 敬祐, 渡邊 智彦, 山内 正敏, Park InChun, 小嶋 浩嗣, 北村 成寿, 松岡 彩子, FACTORS搭載可視・紫外カメラならびにオーロラロケットLAMP可視カメラによる微細・広域オーロラダイナミクス, 第146回 SGEPS 総会および講演会, 熊本市国際交流会館, 熊本, Oct. 23-27, 2019.

銀河系内宇宙線源探査に向けたCTA望遠鏡の改良と可能性評価  
Evaluation of the potential of improved CTA telescopes for Galactic cosmic-ray origin researches

中森健之、山形大学・理学部

### 研究目的

地球に到来する宇宙線は10の20乗 eVにも到達する極めて幅広いエネルギー帯域に渡り、べき乗則のスペクトルを持つ。スペクトルの折れ曲がりがある  $10^{15.5}$  eV (knee 領域) まで宇宙線を加速している天体 (PeVatron) は銀河系内に存在すると考えられ、超高エネルギーガンマ線の観測を通じて加速源の探査が行われている。例えば若い超新星残骸 RX J1713.7-3946 や銀河中心は、硬い TeV ガンマ線スペクトルを持つことが知られる銀河系内天体であり、PeV 宇宙線の供給源として有力である。しかしながら現行の観測装置では感度が十分でなく、knee 宇宙線加速の確定的な証拠となる 300 TeV 付近のガンマ線スペクトルは、従来の観測装置で測定の前例がない。

Cherenkov Telescope Array (CTA) は国際協力で開発と建設が進められている、次世代の超高エネルギーガンマ線天文台である。大・中・小口径の大気チェレンコフ望遠鏡群を数十台規模で設置することで、観測できるエネルギー帯域と感度を飛躍的に向上する。CTA の高感度観測が実現すれば、未知の宇宙線加速天体が発見されるだけでなく、上記に挙げた天体のイメージやスペクトルをより精密に測定することが期待される。PeVatron の探索と加速機構、そして伝搬の様子を明らかにするためには、100 TeV 領域のガンマ線スペクトル精度を向上させるだけでなく、スペクトルの空間構造も重要である。このエネルギー帯域は、バックグラウンドとなる宇宙線陽子や電子の混入率が非常に低いいため、感度は観測時間に比例する。つまり CTA の高感度観測を、より長時間行うことが必要となる。

大気チェレンコフ望遠鏡は通常、月光下では観測を行わない。ガンマ線が地球大気で生成する空気シャワーからの微弱なチェレンコフ光に対して S/N 比が低下することと、焦点面検出器の光電子増倍管が損傷することが主たる理由である。しかしながら、およそ 5 TeV 以上のガンマ線はハードウェア閾値を上げることで問題なく検出できると見積もられており、PeVatron 観測は原理的に可能である。また、焦点面検出器を半導体光センサで構成すれば月光下で使用しても長期安定動作することが知られている。本研究は光子統計を効率的に稼ぐために、CTA 天文台が使われない月齢期間を PeVatron の観測時間として利用する道を開拓する。

### 研究方法

ctools という多目的ガンマ線観測シミュレータを用いて、超新星残骸 RX J1713.7-3946 の CTA による観測を模擬したイベントデータを生成した。観測天体に関するパラメータを初めとするセットアップの詳細は我々の先行研究 (Acero et al., 2017) に準じる。現在までに H. E. S.

S. 望遠鏡で観測されているガンマ線放射の主成分は電子起源であると仮定し、PeV宇宙線起源のガンマ線放射が10%程度混在しているモデルを設定した。電子・陽子成分のカットオフエネルギーはそれぞれ15・300 TeVとした。シミュレーションを行うには装置応答関数（IRF）が必要となる。CTA内部でのみ提供されていた、月光下を想定して夜光量を30倍に設定された試作IRFを用いた。小口径望遠鏡群のみを使用した観測が想定されたIRFである。200時間の観測シミュレーションを行い、特に100 TeV付近のガンマ線スペクトル決定精度の評価を行った。

## 結果

RX J1713.7-3946を月光下の200時間の観測で得られる、2-150 TeVのガンマ線イメージを図1に示す。長時間の観測によって、高エネルギー帯域でも放射形状を議論できる十分な統計量が得られることが分かった。また最尤法によるスペクトル解析の結果、隠れた陽子成分を52-100 TeVで $7\sigma$ を超える有意度で検出できた。長時間観測の期待通り、先行研究での月明りのない50時間観測よりも精度が向上することが分かった。

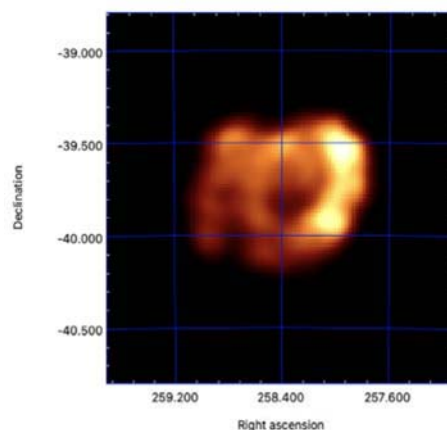


図1 CTA 小口径望遠鏡だけを用いて月光下で200時間観測したRX J1713.7-3946のイメージ。2-150 TeVのガンマ線イベントを使用。

一方で、本研究で使用したIRFには改善すべき3つの点が明らかとなった。1つ目IRFは200 TeVまでしかカバーしておらず、真に評価を行いたい領域である300 TeVまで検証できてない。

2つ目は、月光下のIRFは試作段階で解析の最適化が不十分であり、宇宙線バックグラウンドを更に除去して感度が向上する可能性があることである。さらに3つ目として、月光下の小口径望遠鏡による観測データと、月のない夜のフルレイによる観測データをマージした解析ができる体制が整備できていない。そのためソフトウェアの理由により、CTAの広帯域観測性能を引き出せていない。

本研究経費による出張で、フランスCPPMのCostantini氏と意見交換を行った。IRFの生成には膨大な量の宇宙線モンテカルロシミュレーションが必要で、個人レベルで生成することは現実的ではない。シミュレーションチーム、IRF作成チーム、ctools開発チームと問題点を共有する必要があるという結論を得た。

# 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。初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、必要な物品を調達する。次年度以降は、ライダーを改良し連続定常観測を行う。観測データの蓄積と共にデータ解析を進め、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を把握する。また、ラパスでの観測強化に加え、新規のライダー観測サイトとなる候補地の検討も行う。

## 3 研究結果

ラパスに設置されたライダーの改良に向け、現地視察しシステム設計を行った（図1）。改良コストを抑えるためにレーザー送信部は既存のままとし、受信部のみを改造することとした（右図点線部）。レーザーは直線偏光しており、大気エアロゾルによる後方散乱光の水平・垂直成分をキューブ型偏光子によって分離し、各々の光強度を2つの光電子増倍管（PMT）によって計測する。背景光による擾乱を抑え日中での信号ノイズ比の向上を図ると共にPMTの保護のために、バンドパスフィルターを各検出器の前に配置する。上記の偏光子、バン

ドパスフィルター、そしてPMTを一体型モジュールにすることで、偏光測定の実安定化とシステムの小型化を図ることとした。研究予算の減額から物品調達に次年度とし、今年度は現地視察とシステム設計を行うと共に、考案したシステムにおいて必要となる物品の選定までを実施した。また現行のライダーシステムの検討から、本システムでは532nmと共に1064nmでの2波長同時レーザー送信が可能であり、比較的簡便な改造によって2波長でのミー散乱ライダー計測が実現できることが判明した。よって、エアロゾル計測情報の拡張として将来的な実施が期待される（但し、送受信部の光学部品の変更や1064nm用の検出器が必要など、比較的高額な改造費が必要となる）。

また、新規ライダー観測サイトの候補地選定を見据え、上記した改良前および改良後のライダーのデータ解析システムの構築を進めると共に、既存のSAVER-Netライダーデータ用の解析システムの見直しを進めた。ライダーデータのノイズ算出や校正定数推定のスキームを見直しと共に自動化処理の高速化も検討した。

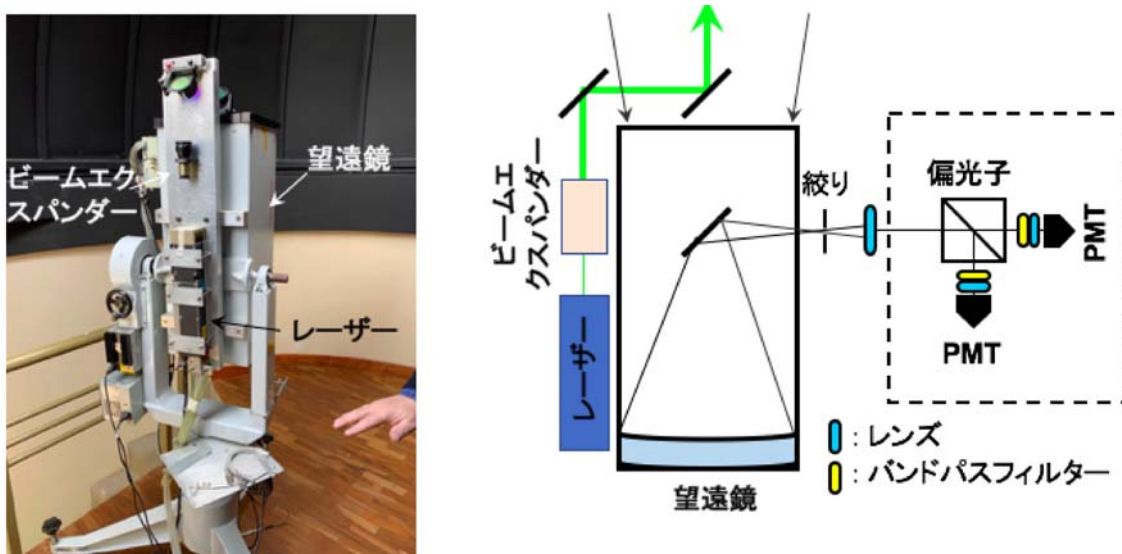


図1 ボリビア国ラパスに設置されている波長532nmのミー散乱ライダーシステム（左図）と改良システム（波長532nmの偏光ミー散乱ライダー）の構成（右図）

#### 4 成果発表

西澤智明、神慶孝、清水厚、杉本伸夫、高機能ライダーを用いたエアロゾルの5次元分布観測、地球環境、24(1),43-52, 2019. (査読有)

T. Nishizawa, A. Higurashi, R. Kudo, H. Okamoto, K. Sato, E. Oikawa, and M. Fujikawa, “Algorithms to retrieve optical and microphysical properties of aerosol, cloud, and precipitation from ATLID, MSI, and CPR measurements”, The 8<sup>th</sup> International EarthCARE science workshop, Fukuoka, November 2019.

神慶孝、西澤智明、2020, “大気エアロゾル・雲計測ライダー”, レーザー学会学術講演会第40回年次大会、仙台、2020年1月.

# 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)。

現在、太陽活動は再び極小期へと推移していることから、新たな極小期のデータを取得して2007年-2008年の極小期データとの比較により、太陽活動極小期に特徴的な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 (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(2019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予定し、現地観測には、申請者(藤原)、共同研究者(野澤・小川)が赴く。観測期間の太陽風、磁場データ等により極域へのエネルギー流入について理解する(観測結果の解析等は、藤原、野澤、小川、Hallが実施)。

#### \*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

### 2019年3月18-19日の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。一方、地磁気擾乱時にはトロムソ上空で激しい電離圏変動が現れ、また、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、まとめの作業を行っている。

### 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。また、大気圏・電離圏統合モデル(GAIA)に関して、極域での物理過程の高精度化を試みたほか、長期計算のための各種試験をおこなった。

### EISCATレーダー特別実験

昨年度に引き続き、藤原、野澤がトロムソに赴き、2020年3月17日、18日の7:00-13:00 UTにEISCAT特別実験を実施する予定であったが、世界的な新型コロナウイルスの感染拡大により、上記期間での特別実験は取りやめることとなった。観測開始が可能となった場合、2020年度前半にEISCAT現地スタッフに依頼して本計画での特別実験を実施したいと考えている。

## 本研究課題に関連した主な成果発表

### 学会発表等

三好勉信・藤原均, 中間圏界面におけるNO<sub>x</sub>・HO<sub>x</sub>光化学過程の全大気大循環モデルへの導入, 地球惑星科学関連学会連合大会 (JpGU-AGU Joint Meeting), 5月, 幕張, 2019.

陣 英克・三好 勉信・埜 千尋・品川 裕之・藤原 均, Climatological features of the upper atmosphere reproduced by a revised version of a whole atmosphere-ionosphere coupled model GAIA, 地球惑星科学関連学会連合大会 (JpGU-AGU Joint Meeting), 5月, 幕張, 2019.

藤原 均・三好 勉信・歌島 昌由・Liu Huixin, Investigation of the thermospheric mass density variations below 200 km, 地球惑星科学関連学会連合大会 (JpGU-AGU Joint Meeting), 5月, 幕張, 2019.

品川 裕之・陣 英克・三好 勉信・藤原 均・横山 竜宏・大塚 雄一, GAIAを用いた赤道プラズマバブルの発生・成長を支配するパラメータの解析, 地球惑星科学関連学会連合大会 (JpGU-AGU Joint Meeting), 5月, 幕張, 2019.

野澤 悟徳・津田 卓雄・斎藤 徳人・高橋 透・川原 琢也・小川 泰信・藤原 均・和田 智之・小川 洋平・Hall Chris・Brekke Asgeir, Statistical study of Sporadic Sodium Layer (SSL) observed at Tromso, 地球惑星科学関連学会連合大会 (JpGU-AGU Joint Meeting), 5月, 幕張, 2019.

品川 裕之・陣 英克・埜 千尋・三好 勉信・藤原 均, リアルタイムGAIAを用いたスポラディックE層発生予測, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 10月, 熊本, 2019.

藤原 均・野澤 悟徳・小川 泰信・三好 勉信・陣 英克・品川 裕之・埜 千尋, Characteristics of the ionospheric variations in the dayside polar region, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 10月, 熊本, 2019.

埜 千尋・陣 英克・品川 裕之・三好 勉信・藤原 均, 長期計算に向けたGAIA極域入力の改良, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 10月, 熊本, 2019.

陣 英克・三好 勉信・埜 千尋・品川 裕之・藤原 均, 大気圏-電離圏結合モデルGAIA新バージョンの開発と性能評価, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 10月, 熊本, 2019.

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

本申請は、WCRPの枠組みの元、次期RHP(Post MAHASRIプロジェクト)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、多様な水文気候学的地域特性の解明とモンスーン変動メカニズムに関する成果を出すことを主要な目的としている。

そして特に、インド亜大陸北部、ネパールのヒマラヤ南縁域における活動の進展を重点的に推進している。北極・南極に次ぐ第3の極とも称せられるチベット高原と、陸上最多雨地域のある南アジアのインドモンスーン域とに挟まれた、夏季アジアモンスーンの最も緯度の高い顕著な加熱域であるチベット高原南縁域の重要性は高い。2018-19年の活動により、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) を立ち上げるとともに、インド亜大陸北部を中心にした地域における極端シビアストームの早期警戒システムの構築を目指したモデリングに焦点を当てた研究プロジェクトESSDMS (Extreme Severe Storm and Disaster Mitigation Strategy) が開始されている。

これらの到達点に立ち、今年度は3年計画の2年目として以下の2点を目的として推進することとした。

- ①時期RHPの具体化を図り、国際的なプレゼンスを高めること。
- ②インド・ネパール・バングラデシュを含むヒマラヤ山岳南縁域の具体的な観測体制(AMY-II South Asia)の構築と、高分解能数値モデル計算結果の検証に関する共同研究の実施

【研究方法】

2019年度はそれぞれの目的を果たすため、以下の研究計画に沿って実施した。

①Post MAHASRIプロジェクトの具体化。特に、正式なプロジェクト名称の確定とキックオフ行事の実施。GEWEXでの10月にメルボルンで予定されているGHPパネルミーティングに代表を送り、次期RHPとしてプロジェクトを正式に確認されるように働きかける。特にサイエンスプランの立案を進めること。

②南アジアでの上記プロジェクトの具体化と、極端ストームの予測をテーマにした高分解能数値モデル計算結果の検証のため、ネパール・インド・バングラデシュの研究者のもとを訪問し、共同研究を展開すること。

【研究結果】

次期RHPの正式名称を決定し、Asian Precipitation Experiment (AsiaPEX) を立ち上げた。AsiaPEXは、GEWEXのProspective RHPとして承認された。サイエンスプランもGHP Panelに対して提出し、評価に付されている。AsiaPEXは、アジアモンスーン域の多様な水文気候学的特性を持つ諸地域の研究に支えられて、各地域での観測的研究を基盤に、大気水文モデリング、リモートセンシングの発展を検証するなかで、多様な水文気候学的地域特性がアジアモンスーンの多重スケール変動を駆動するメカニズムを、陸上の降水過程のS2S(Subseasonal to Seasonal)予測に焦点を当てて



解明することを目指している。ウェブページも発足し、2019年8月にはキックオフカンファレンスを北海道大学で開催した(Fig. 1)。名古屋大学でのワークショップに基づいて、レビューペーパーを出版する準備も進めている。

南アジア域のプロジェクトも進んだ。南アジアの降水を対象とした諸研究のうち、Fujinami et al. (2020)は、総観規模擾乱の特徴を解析し、Huda et al. (2019)は、バングラデシュにおける急速な開発による人為的な影響が著しい新しいタイプの洪水に関する社会学的・理工学的研究成果をまとめて発表した。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ESS DMS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の展開を検討した。



Fig. 1: AsiaPEX Kick-off Conference.

#### 【考察・まとめ】

AsiaPEXのサイエンスプランの具体化が進んでおり、これをいっそう充実させることにより、AsiaPEXをGHPのフルRHPに昇格させることが残された課題である。また、2019年度を通じて南アジアの気候学研究が大きくAsiaPEXへ合流しつつある。特に東アジアから南アジアにかけての諸研究の協調によるアジア水文気候学研究的効果的推進が2020年度にかけて展望される。

#### 【引用文献】

Fujinami, H., H. Hirata, M. Kato and K. Tsuboki, 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.

Huda, N., T. Terao, S. Murayama and Y. Suenaga, 2019: Detection of water logging floods in Bengal Mega-Delta from peoples's perception underpinned by hydrometeorological dataset. *Journal of Recent Advances in Marine Science and Technology*, 13, 60-79.

#### 【成果発表】

Terao, T., 2019: Objectives and Overarching Key Questions of AsiaPEX. AsiaPEX Kick-off Conference, Sapporo, 28 Aug. 2019.

宇宙圏からのエネルギー流入に対する下層大気の大気潮汐の応答  
Response of atmospheric tides near the surface to energy inputs from the outer space

坂崎貴俊、京都大学・大学院理学研究科

【研究目的】

昨今の研究により、我々の生活に影響を及ぼす地球大気の変動には、対流圏のみならず成層圏・中間圏といった中・上層大気の変動の影響が色濃く現れることが明らかになってきた。一方上層大気は宇宙圏からのインプットの影響を大きく受ける。そこで本研究では大気的基本的な周期変動である地上の大気潮汐（熱潮汐）変動が、宇宙圏からの外部強制力（特に、太陽短波放射の短周期変動）に対して、中層大気を介してどのように応答するのかを明らかにすることを目的とする。

【研究手法】

最新の気象再解析データであるERA-5の地上気圧データ(Hersbach et al., 2019)を用いた[解析期間: 1979-2016, 時間分解能: 1時間]。時空間フーリエ解析により、地上大気潮汐のうち最も卓越する半日周期太陽同期成分(Semidiurnal migrating tide; 以下、S2潮汐と呼ぶ)の日別値を計算した。

太陽活動の指標として、SOLAIS HEPPAの太陽放射強制力データ、うちSolar Spectral Irradiance (SSI)の日別値を用いた(Matthes et al., 2017)。なおS2潮汐は主として太陽光の紫外線によるオゾン層加熱によって励起されることから(e.g., Sakazaki and Hamilton, 2017)、SSIを紫外領域(200-400  $\mu\text{m}$ )で積分したものを太陽放射強制力の指標として用いる(以下、SSI-indexと呼ぶ)。

SSI-indexに対してスペクトル解析を行ったところ、太陽の自転に伴う27日周期の変動が最も卓越していた。そこで本研究ではこの変動に焦点を絞り、SSI-indexの27日周期変動(バンドパスフィルターで抽出)が極大・極小値を取る日を基準日として、S2潮汐振幅のラグコンジット解析を行った。

【結果と議論】

図1はラグコンジット解析の結果を示す。S2潮汐は、1Pa(平均振幅に比して1%)程度の振幅でSSI-indexの変動と同期した変動を示すことが新たに分かった。ただしその周期はおよそ13日程度と、インデックスの周期のおよそ半分である。また、S2振幅はSSI-indexの極大・極小からいずれも6-7日程度遅れて極大を取る。これらの結果は、S2潮汐はSSI-indexの27日周期変動に応答した変動を示すものの、応答の大きさはSSI-indexがニュートラルな時に極大を取ることを示唆している。S2の多くはオゾン層で励起されることが知られるが、SSIが極大を取るときに必ずしもS2を励起しやすい加熱構造になっていないと考えられる。

### 【今後の課題と展望】

まずはこれらの結果の堅牢さを確かめるために、他の現場観測データ・気候モデルを用いた解析結果との比較を行うことが必須である。現場観測データとしては、ジャカルタの高精度地上気圧データの結果との比較を進めている（K. Hamilton氏との共同研究）。また、気候モデルについては、本研究でも使用したSSIを外部強制として用いた地球システムモデル実験(CMIP6)の結果解析に着手している（気象研究所との共同研究）。結果の堅牢さを確かめたのち、オゾン層加熱分布の解析等を行うことでそのメカニズムについても明らかにしていきたい。

また成層圏オゾンは、高エネルギー粒子の振込み等の要因でも変動することが知られており、今後はこれらが大気の短周期変動に与える影響についても調査を行いたい。

### 【参考文献】

- ・ Hershbach, H. et al., Global reanalysis: goodbye ERA-Interim, hello ERA-5. *ECMWF Newsletter* **159**, 17-24, 2019.
- ・ Matthes, K., et al., Solar forcing for CMIP6 (v3.2). *Geosci. Model Dev.*, 10, 2247-2302, 2017
- ・ Sakazaki, T., and K. Hamilton, Physical Processes Controlling the Tide in the Tropical Lower Atmosphere Investigated Using a Comprehensive Numerical Model. *J. Atmos. Sci.*, 74(8), 2467 – 2487, 2017.

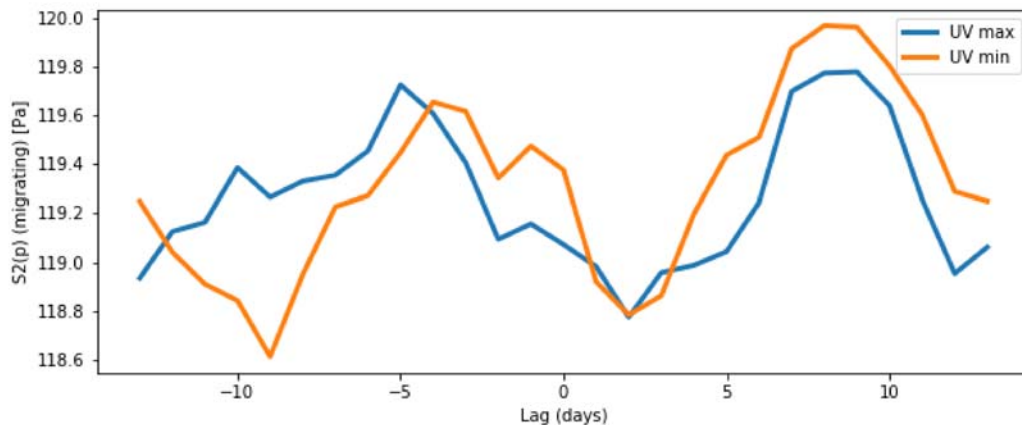


図 1 : SSI-indexの27日周期成分が（青線）最大、（橙線）最小となる日を基準日としたS2潮汐（地上気圧）の振幅（単位：Pa）のラグコンポジット解析（1979-2016年のERA5大気再解析データを使用）。

## 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20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2019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 $38.3^\circ$ ）、高緯度のアイスランド（北緯 $64.7^\circ$ ）、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 $64.47^\circ$ ）、中緯度（山形市:  $38.25^\circ$ ）および低緯度（バンコク:  $13.1^\circ$ ）の大気中Be-7濃度、太陽黒点数（SSN）、oulu（北緯 $65.05^\circ$  cut-off rigidity 0.8 GV）での地上中性子強度について2000年から2019年までの年変動を示している。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。2017年から2019年の3年間のBe-7の平均濃度は、アイスランド、山形、バンコクにおいて各々 $2.0 \text{ mBq/m}^3$ 、 $5.7 \text{ mBq/m}^3$ 、 $1.7 \text{ mBq/m}^3$ であった。高緯度と低緯度の濃度は中緯度の濃度の約30%~35%であった。また、2019年の太陽黒点数は2018年に比べて約51%減少しており中性子強度は約1.3%の増加であった。これに対してアイスランド、山形、バン

コクの Be-7 濃度は、各々約 25%、5%、44%の増加であった。中性子強度の増加度との比較からもアイスランド、バンコクの増加度は、直接的な宇宙線強度の太陽変調と考えることはできない。地球規模の大気移流の変化等と比較する必要がある、第 25 期を迎える 2020 年の観測データが重要となる。

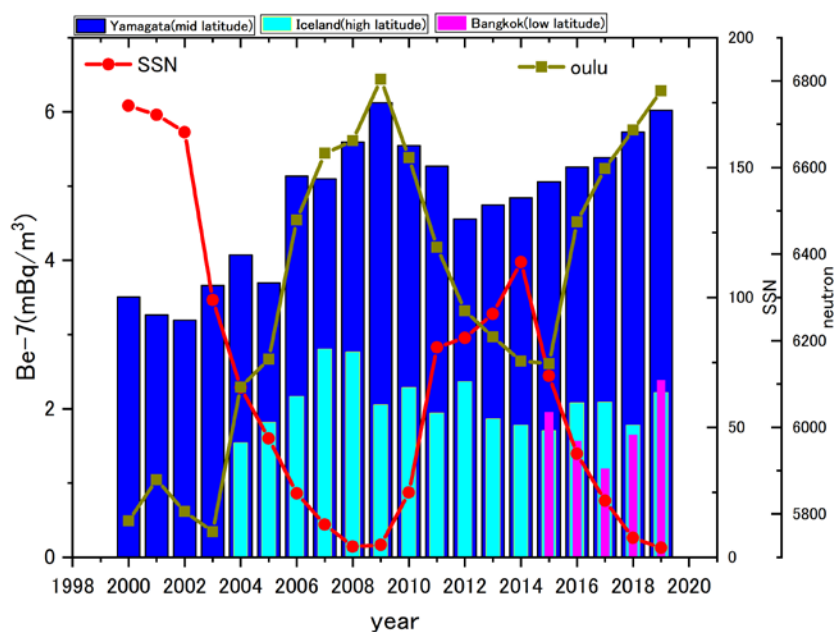


図 1. 2000 年から 2019 年までの高緯度、中緯度および低緯度の大気中 Be-7 濃度、太陽黒点数 (SSN)、oulu での地上中性子強度の年変動

[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) “Yearly variations in Be-7 concentrations in surface air at Iceland and Japan for 15 years from 2003: Solar modulation of cosmogenic nuclide”  
H. Sakurai, Y. Kawamura, F.Tokanai, et al., 第 10 回極域科学シンポジウム 2019/12/04
- 2) “Prolonged production of 14C during the ~660 BCE solar proton event from Japanese tree rings”  
H. Sakurai, F.Tokanai, et al., Scientific Reports (2020) 10:660

## Pc1 地磁気脈動の全球的発生・伝播特性に関する研究

Study on generation and propagation mechanism of global Pc 1 pulsation

吉川 顕正、九州大学・理学研究院

ダイナミックに変動する太陽地球環境を反映して、磁気圏・電離圏結合システムでは、様々な周期帯の地磁気脈動現象が観測される。地磁気脈動の内、周期0.1~5秒程度で振動するPc1脈動は、内部磁気圏での高エネルギー粒子生成の担い手であるEMIC(イオンサイクロトロン共鳴電磁波)とともに発生し、磁力線をつうじて電離圏へと伝達することが知られている。本研究の目的は、地上で観測されるPc 1地磁気脈動のグローバルな発生・伝播特性を解明する国際共同研究を推進し、内部磁気圏におけるEMIC発生状況と、高エネルギー粒子生成過程のリアルタイムモニタリングへと繋がる予測研究を進展させる事にある。

従来こうした、Pc 1 地磁気脈動の特性を調べる研究は誘導磁力計による観測データを用いて進められてきた。誘導磁力計では多点で観測される波形の直接比較が難しかったが、本研究では通常よりも高時間分解(10Hz)性能を持つMAGDS9型フラックスゲート磁力計の観測データを解析に用いることによって、波形・振幅の直接比較、位相差、伝播特性、より正確な偏波特性など、これまでとは異なる観測量で全球領域の Pc 1 の発生・伝播特性を調査することができることが期待される。

解析の結果、高緯度 Pc1は主に朝側から夕方側に多く観測され、中低緯度 Pc1は主に真夜中側をピークに観測されることが確認された。一方、高緯度 Pc1は顕著な季節変化は見られず、中低緯度 Pc1は10-3月に多く見られることが確認された。これは従来誘導磁力計での観測データから得られた特性とほぼ一致している。更に我々は変動周期が5-10秒であるPc2脈動が、強い磁気嵐中に全球的に励起されていることを確認した。このPc2脈動ダブルバンド構造を持つなどの特徴を持ち、衛星との同時観測により、O+の高エネルギー化に伴うEMIC波動として内部磁気圏で励起されていることが示唆された。また、グローバルに観測されるPc2帯脈動は6LTと11-15LTの主に昼間側に多く見られ、3-7月に多く分布するといった地方時分布と季節依存性を確認した。この結果は、Pc1-2脈動では同じ発生・伝播メカニズムをもつという従来の考えを大きく修正するものであった。

今後の課題として、このような Pc1-Pc2 脈動に関する偏波特性解析を進め、グローバルな発生特性の精密な様相を明らかにするとともに、FM-CW データやイオノゾンのデータとの比較による電離層構造変化との関連性、PWING による高緯度地域での Pc1 発生特性、ERG 衛星による宙空環境での EMIC 発生特性の同時解析等、包括的なアプローチによる内部磁気圏—高緯度—中低緯度—磁気赤道領域結合過程解明の研究アプローチについても議論する予定である。

ALMAアーカイブデータのリトリバル解析によるタイタン気象学の創成  
 A frontier study for Titan meteorology by retrieval analysis of  
 ALMA archive data

平原 靖大 名古屋大学・環境学研究科

In this study, we found the effects of volcanism to generate the Io's atmosphere. Io's atmosphere is thin (several nbar) and is dominated by SO<sub>2</sub> (~90%)<sup>[1]</sup>. Oxygen and sulfur atoms in the upper atmosphere are escaped and ionized, and then generate Io plasma torus around Io's orbit<sup>[2]</sup>. Io's volcanism can be classified in two types. One is effusive eruption. Lava directly flows out of a volcano and onto the ground. The other is explosive eruption. Gases in the magma under volcanoes suddenly froth, and are ejected SO<sub>2</sub>-rich gas through the volcanic vent (called plume)<sup>[3]</sup>. In powerful volcanoes such as Loki and Pele, lava eruptions sometimes accompany with plume. Which type of eruptions emit gasses enough to change the profile of Io's atmosphere and Io plasma torus is still unknown.

We demonstrated the spatial and velocity distribution of SO<sub>2</sub> emissions by analyzing ALMA archive data on 20 March 2018. As shown in Figure 1, we found presumed volcanically active areas in the east side and northern high latitude region (Volcano 1) and in the west side near the equator (Volcano 2). In Region 1, high and low velocity components are clearly identified in the velocity distribution before ingress (Figure 2). The Doppler shift of the high velocity component relative to the low velocity is ~0.6 km/s. The result suggests the significant volcanic plume generated atmospheric dynamics and supply SO<sub>2</sub> gases to the upper atmosphere. In Volcano 2, we could not detect the high velocity

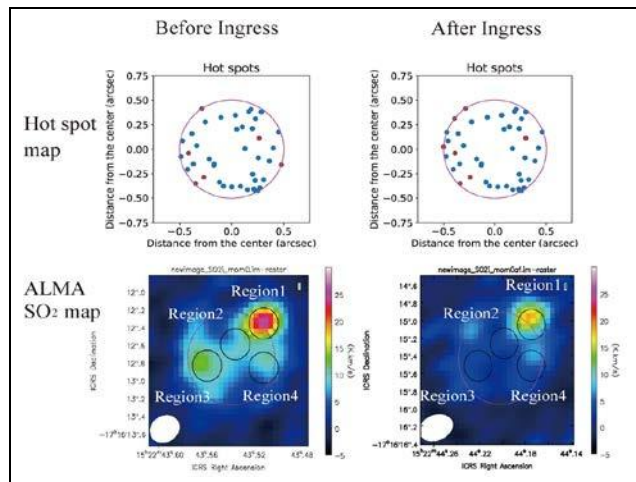


Figure 1: *upper*: Distribution of hot spots on Io's disk in the same periods. Longitude and latitude of hot spots are referred from Cantrall et al. (2018).

*lower*: Integrated intensity maps of SO<sub>2</sub> 346.652 GHz (19(1,19)-18(0,18)) and SO 346.528 GHz (9(8)-8(7)) emissions before and after Ingress. Unit is K·km/s. Red circles show Io's disk and white ovals show the beam size.

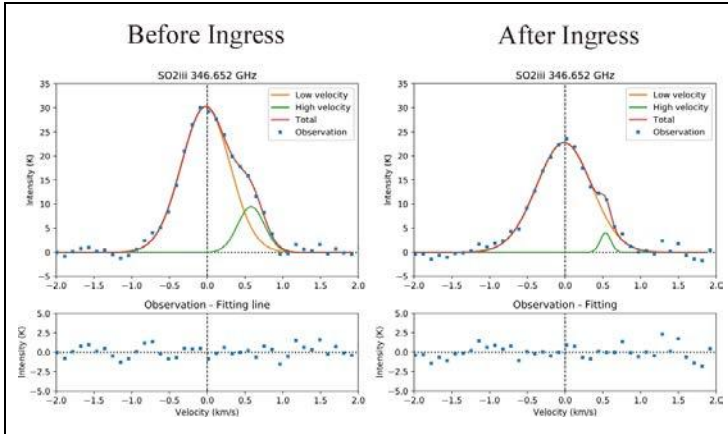
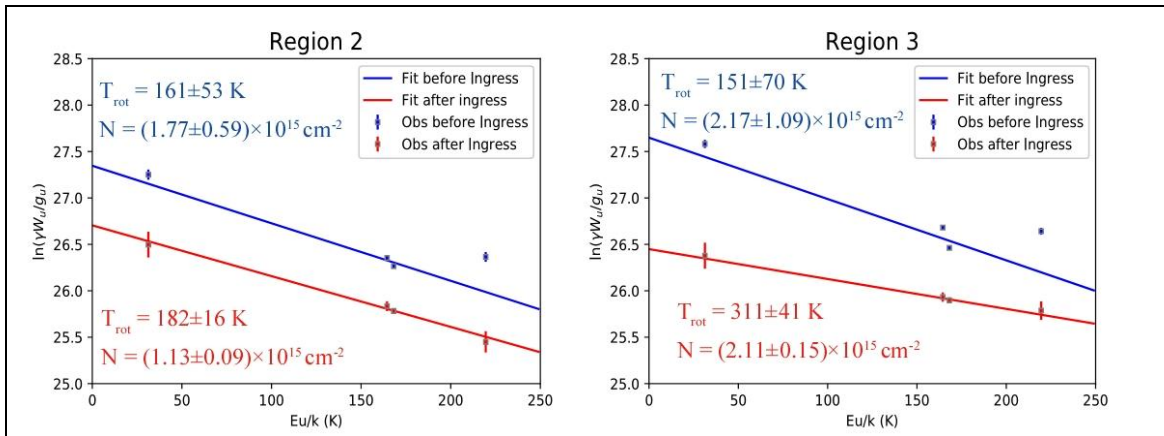


Figure 2. Spectra of SO<sub>2</sub> 346.652 GHz for Region 1 shown in the Figure 1, before and after ingress. Solid lines show composite fitting line of Gaussian function (red line), low (orange) and high velocity components (green). The lower plots show residuals for the fit.

component of SO<sub>2</sub> gas. However, the rotational temperature of SO<sub>2</sub> is 311±41 K after the ingress, much higher than temperature of sublimation atmosphere (~100-200 K). It might reflect the temperature of low velocity gases which are emitted from volcanoes or/and heated by a hot lava lake in Volcano 2 (Figure 3).

We also observed the enhancement of Io plasma torus on the dusk side by Hisaki ultraviolet satellite with EXCEED<sup>[4]</sup> in the same

period of the ALMA observation. This result suggests the direct volcanic input of SO<sub>2</sub> gases may trigger the enhancement of Io plasma torus. We detected gases that may be emitted by effusive and explosive eruptions from ALMA archive data simultaneously.



Population diagrams of Io's SO<sub>2</sub> atmosphere in four regions before (blue) after ingress (red). The values in the top or bottom are estimated rotational temperature and column density. Definitions of x and y axis are shown in the text. Square marks with error bars show the observation results and solid lines show linear fitting of the observation.

References: [1] Moullet et al. A&A 482(1) 279-292 (2008), [2] Schneider and Bagenal, "Io's neutral clouds, plasma torus, and magnetospheric interaction", In R. M. C. Lopes, & J. R. Spencer (Eds.), Io after Galileo, A new view of Jupiter's volcanic moon (pp. 265–286). Springer, [3] Jessup et al. Icarus 169(1) 197-215 (2004), [4] Koga et al. Icarus 299 300-307(2018)



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。図1に、脈動オーロラの ON と OFF の発光スペクトルを示す。両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が確認できる。図2に、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) を示す. 630.0 nm 付近に OI630.0 nm による輝線状の発光は確認できない. 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が確認できる. 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. 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, in prep.) の執筆に着手している.

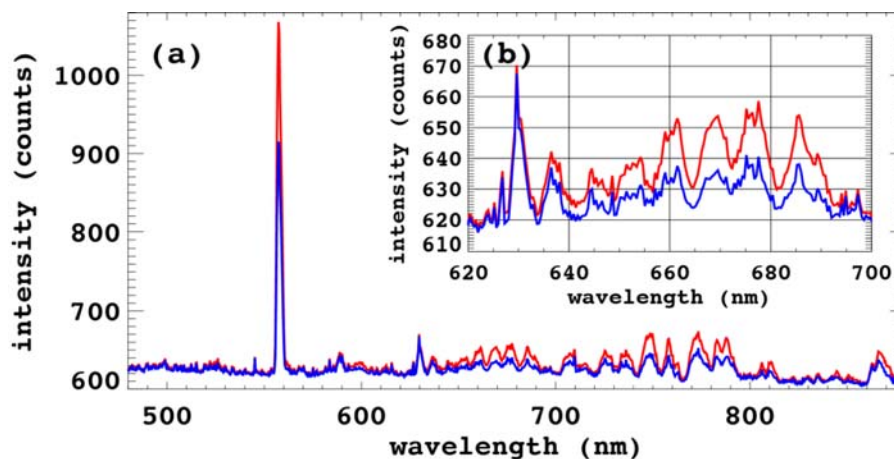


図1. 脈動オーロラの ON (赤) と OFF (青) の発光スペクトル (Tsuda et al., JGR, in prep.).

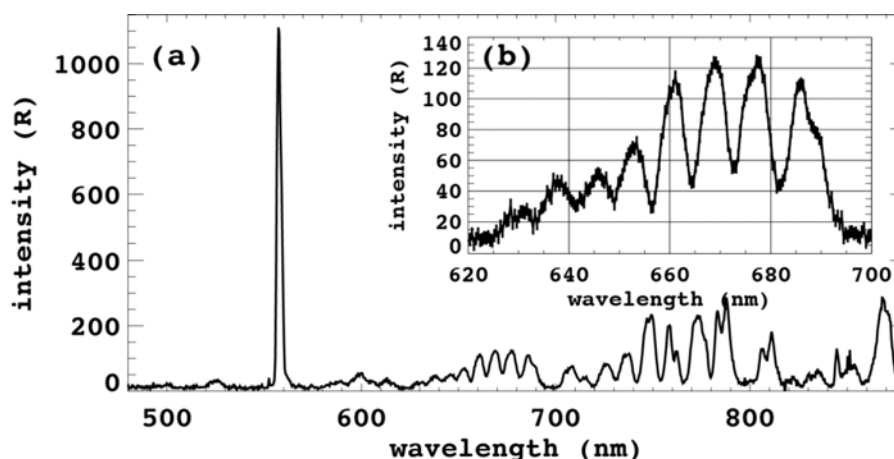


図2. 脈動オーロラの明滅スペクトル (ON と OFF の差分スペクトル) (Tsuda et al., JGR, in prep.).

## 研究発表

- (1) C. Li, T. T. Tsuda, K. Hosokawa, S. Nozawa, T. Kawabata, A. Mizuno, S. Oyama, and J. Kurihara, An event analysis on pulsating aurora observed by an optical spectrograph at Tromsø, Norway,

- ISAR-6, Tokyo, March 2020. (oral)
- (2) T. T. Tsuda, C. Li, K. Hosokawa, S. Nozawa, T. Kawabata, A. Mizuno, S. Oyama, and J. Kurihara, A pulsating aurora event observed by an optical spectrograph at Tromsø, Norway, AGU Fall Meeting 2019, San Francisco, USA, December 2019. (poster)
  - (3) C. Li, T. T. Tsuda, K. Hosokawa, S. Nozawa, T. Kawabata, A. Mizuno, S. Oyama, and J. Kurihara, Spectra of pulsating aurora emissions observed by an optical spectrograph at Tromsø, Norway, The Tenth Symposium on Polar Science, Tokyo, December 2019. (poster)
  - (4) 李成宇, 津田卓雄, 細川敬祐, 野澤悟徳, 川端哲也, 水野亮, 大山伸一郎, 栗原純一, ノルウェーのトロムソで観測された脈動オーロラ発光の波長特性, 地球電磁気・地球惑星圏学会第146回講演会, 熊本, 2019年10月. (ポスター)

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

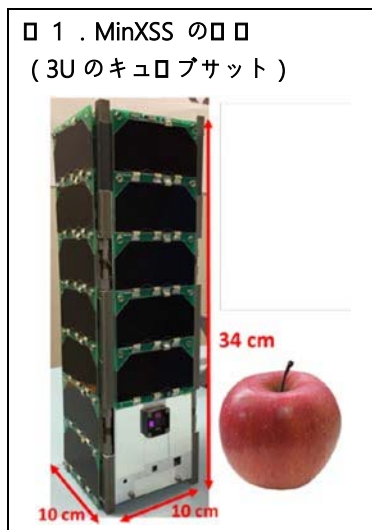
成影 典之、国立天文台・SOLAR-Cプロジェクト

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/pics/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、今回の申請はその1年目である。

2019年度（計画1年目）は、米国のキューブサット計画 MinXSS（<http://lasp.colorado.edu/home/minxss/>；図1）で取得した太陽・軟X線スペクトルデータの解析手法の習得を目的とし研究を行った。我々は、FOXSIで取得したX線集光撮像分光観測データを持っているが、観測時間が約5分に限られる観測ロケット実験では太陽フレアを観測することは困難である。実際、FOXSIではフレアの観測は行えていない。一方で、MinXSS-1は、2016年5月～2017年5月の約1年間にわたって観測を行っており、太陽フレアも数多く観測している。ただし、MinXSSは空間分解能を持っておらず、太陽全面からの軟X線を時間・エネルギー分解して観測している。この様に、「空間分解能は持っていないが、長時間の観測が行えるMinXSS」と「空間・時間・エネルギーの3つの分解能を同時に実現しているが、観測時間が約5分間に限られたFOXSI」は相補的な関係にある。



本研究（1年目）では、MinXSS 計画を実施している米国コロラド大学ボルダー校・LASP (<http://lasp.colorado.edu/home/>) と Southwest Research Institute (<https://www.boulder.swri.edu/>) を訪問し、MinXSSのコアメンバーである Dr. Amir Caspi の指導のもと、MinXSS データの解析手法を取得した。この訪問には成影、川手（研究員）、長澤（大学院生・修士1年）の3名が参加した。帰国後は定例の解析検討会を開催し（2019年度中に合計8回開催）、長澤が中心となってMinXSSのデータ解析を進めてきた。本研究は長澤の修士論文のテーマの一つにもなり、日本天文学会2020年春季年会で発表を行った（長澤ら；<http://www.asj.or.jp/nenkai/archive/2020a/pdf/M39a.pdf>）。以下に、本研究の成果の一部を示す。

MinXSSのデータには、生データ(Level 0 data)と較正済データ(Level 1 data)が存在するが、MinXSSのデータを深く理解するために、Dr. Caspiの指導のもと、Level 0 data から Level 1 data を作るという基礎中の基礎から解析手法をマスターした。これらのノウハウはMinXSSのデータ解析マニュアルとしてまとめた（現在も、更新中）。また、MinXSSが観測したフレアのデータベースも作成した。

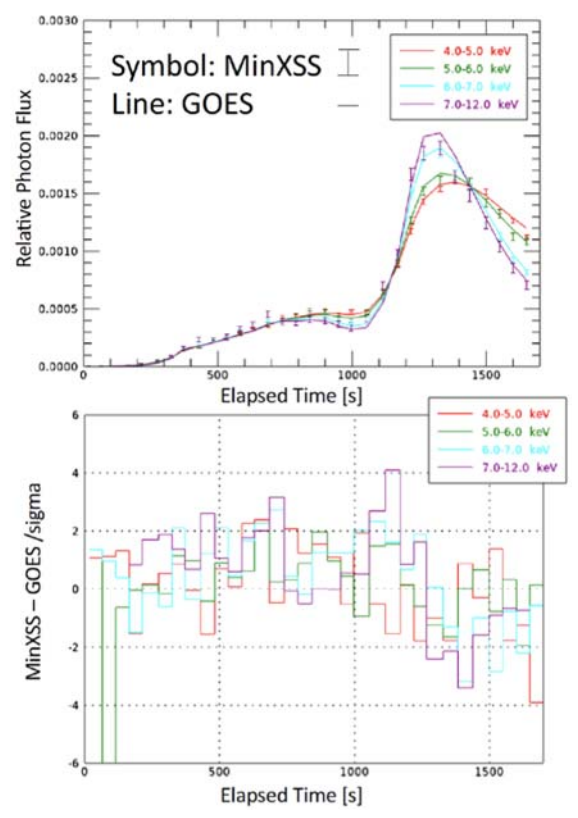
その後、1つのMクラスフレア（中規模のフレア）に注目し、GOES衛星のデータも用いた解析を開始した。図2は、「MinXSSが観測したX線スペクトル」と「GOESから求めた単温度を仮定した場合の熱放射スペクトル」のエネルギー帯域毎のライトカーブの比較である。MinXSS（X線スペクトル）の時間変化は、低エネルギー側（ $\leq 7$  keV）ではGOESから求めた単温度熱放射とほぼ一致したが、高エネルギー側（ $\geq 7$  keV）ではフレアのピーク付近でGOESとのズレが大きく（MinXSSの方が早くフラックスが上昇）、単温度熱放射では説明できないことが分かった。このことは、7～12 keVに非熱的な成分が存在する可能性を示唆している。今後、RHESSI衛星（硬X線観測衛星）のデータも使い、非熱的成分の存在を詳しく調査する予定である。

今回の結果は、軟X線帯域のスペクトルが持つ情報の重要性を示すものであり、FOXSI や MinXSS によって太陽X線観測が新しいステージに入ったことを意味する。そして、PhoENiX 衛星計画で実現を目指す「太陽フレアに対するX線帯域の集光撮像分光観測」の科学的価値の一端を証明した。

なお、MinXSSのデータは、高エネルギーX線天文学の研究者らからも注目されており（長澤も高エネルギーX線天文学の研究室に所属）、本研究は、学際的研究として発展し始めている。

図2. MクラスフレアのX線エネルギー帯域毎のライトカーブ

○ ○ ○ : MinXSS と GOES から求めたライトカーブ  
 ○ ○ ○ : MinXSS と GOES の差



以上

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

高橋 透  
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

■研究目的・研究方法

東西に伸びたアーク状の領域が電離され発光するアーク状オーロラとは異なり、パッチ状オーロラ、またはオーロラパッチは、数100 km程度の局所的な領域が電離され発光している。オーロラパッチ内部は、オーロラ降下粒子によって中性大気が電離されることで、外部より電気伝導度が高い。オーロラパッチ内部では強い電流と、外部の弱い電流との一様性を保つために、分極電場が生成されていると考えられている。Hosokawa et al. (2010)では、このメカニズムを検証したが、生成されると見積もられた分極電場と、観測される分極電場の強度が一致しないことを報告している。申請者が新たに欧州非干渉散乱 (EISCAT) レーダーとKilpisjärvi Atmospheric Imaging Receiver Array(KAIRA)レーダーの同時観測データを用いた研究を行ったところ、元来の水平方向のみの2次元的な電流系ではなく、沿磁力線電流も含めた3次元的に発達する電離圏の電流系を考慮しなければならないことを示した。よって、本研究では、EISCATレーダーとKAIRAレーダーを用いて観測された電場とオーロラパッチ内部の電子密度勾配から見積もられた沿磁力線電流の強度を比較することで、オーロラによる分極電場の生成メカニズムを理解することを目的とする。さらに、ロングイヤビンで行われるロケット実験と全天カメラのデータを用いた観測によって、分極電場が電離圏擾乱の成長に与える影響を明らかにする。また、同時にナトリウムライダーを用いた中性大気の温度観測によって、分極電場が引き起こす大気加熱量についても検証を行うことで、プラズマ大気と中性大気のエネルギー的結合過程の調査も行う。

■研究結果・考察・まとめ

分極電場の生成メカニズムに関する研究は3カ年の研究機関の内、1年目に遂行しており、既にその結果を論文としてまとめ、2019年4月に受理・出版された。2020年度は分極電場の生成メカニズムを明らかにした上で、ロケット観測によって得られたデータに基づいて分極電場が電離圏擾乱の生成に及ぼす影響について集中して調査した。

2019年4月から過去に打ち上げられたVISION-2, TRICE-2, CAPER-2ロケットのデータの解析から着手した。これらのロケットの内、VISION-2ロケット (2018年12月に打ち上げ) は打ち上げ後、ロケットはカस्पオーロラの上空を飛行し、そのフットプリントで630.0 nmと557.7 nmの発光が激しく変動した。ロケットに搭載された電子密度、電場の観測装置でも、オーロラの発光変動とほぼ同時に大きな変動が観測された。VISION-2で観測された電子密度と電場成分から電離圏擾乱の成分を抽出し、オーロラの発光強度の時間変化とを比較した。その結果、630.0 nmの発光強度の増加と10 mスケールの電離圏擾乱の強度の増加に比例関係が見られることが分かった。これは、630.0 nmの発光層が位置するF領域を電離するオーロラ降下粒子が10 mスケールの電離圏擾乱の生成に重要な役割を果たしていたことを示唆する。これまでオーロラ降下粒子による電離は主に1 kmスケール以上の大きいスケールの電離圏擾乱を生成することが示されてきたが(Kelley et al., 1982)、この観測で、より小スケールの電離圏擾乱も生成される可能性が示された。

また、557.7 nmの発光強度が4.5 kRを越えると電離圏擾乱は減衰することが分かった。これは557.7 nmの発光高度領域である約150 km付近の電気伝導度が、強いオーロラ発光と同時に高められ、E領域とF領域間で沿磁力線方向に荷電粒子が動きやすくなり、F領域の分極電場を弱めたためと考えられる。電離圏擾乱が減衰するメカニズムを観測した例は少なく、現在、この結果を論文としてまとめ、投稿する予定である。

上記の解析研究に加えて、ロケット観測キャンペーンに参加するために2019年11月24日から12月9日の日程でノルウェー領スピッツベルゲン島ロングイヤビンに渡航した。この期間中、研究代表者はEISCATスバルバルレーダーを合計約40時間運用し、ロケット打ち上げの判断基準となる電離圏パラメータのリアルタイムの提供を行った。期間中、ICI-5, CHI, C-REX-2ロケットが打ち上げられる予定で、研究代表者の滞在中にはICI-5ロケットが11月25日にニューオールスンから打ち上げられた。このデータに関しては現在解析中である。

さらに、オーロラパッチ内部に生成された分極電場が一因と考えられる流星レーダーで観測された拡散係数の異常増大に関して、トロムソ大学のJuha Vierinen氏とLeibniz Institute of Atmospheric Physics (IAP)のJorge Chau氏と議論を行った。この議論から地磁気擾乱時と地磁気静穏時における拡散係数の異常増大の発生確率を導き出し、地磁気地方時の夕方と朝方にオーロラオーバルのエッジ付近でその発生確率が高いことが分かった。特に朝方にはオーロラパッチが出現することが多く、オーロラパッチ内部の分極電場が拡散係数の異常増大の生成原因であることを強く示唆する結果を得た。この研究に関しては現在論文を執筆中である。

東南アジアにおけるELF帯電磁波観測を用いた、大規模雷の電氣的、  
時空間特性に関する研究

Spatio-temporal characteristics and electrical properties of  
intensive lightning over Southeast Asia using ELF  
observations

芳原容英，電気通信大学・Ⅱ類（融合系）電子情報学プログラム

【研究目的】

落雷からの電磁放射のうちELF帯放射は、その波長の巨大さゆえ、大地と電離層の間の3次元的な球殻状コンデンサー中の電磁波動の伝搬となる。また、VLF/LF帯観測から導出される落雷ピーク電流とは独立した、落雷電荷モーメントの遠隔導出が可能である。本研究では、マレーシア国内の共同研究者とともに、マレー半島に新規ELF観測点を構築することにより、既存の国内に設置したISEE観測所敷地内の観測点と合わせて、東南アジア域におけるELF帯観測ネットワークを構築する。この新規ELF観測ネットワークと申請者グループの展開する既存の落雷標定ネットワーク観測から落雷電荷モーメントやピーク電流等の詳細な時空間分布を導出し、その季節変化や背後にある気象特性を調査することで、大きな電荷モーメントを有する落雷発生機構の解明や、中間圏発光現象発生領域の調査を行う。特に、マレーシア国内での詳細な落雷電荷量の空間分布を導出し、雷災害ハザードマップを作成することで、同国において近年大きな問題となっている、大電荷量を伴う落雷の電力設備等への雷災害の軽減に貢献する。さらに低緯度域での、雷嵐に伴う大気波動や、電磁界による大気と上層プラズマとの結合過程について、上記落雷電荷モーメント、VLFエネルギー時空間分布とVLF帯送信電波受信による電離層擾乱観測や、レーダー、光学観測との併用により調査する。

【研究方法】

本研究代表者が日本国内に展開中のELF帯電磁場観測（周波数帯 1 Hz ~ 1 kHz）からの知見を最大限利用のうえ、マレー半島において設置候補地を複数選定し、4観測候補地にて電磁環境調査を実施した結果、最も電磁環境の良好な地点に観測設備の本設置を実施した。具体的には、2018年3月1日～3月7日にかけて、UMP(マレーシア大学パハン校)キャンパス内の再生エネルギー関連施設敷地内に磁界センサーを埋設し、ELF帯水平磁場2成分の連続波形観測を無事開始した。

【研究結果と考察】

以下に、マレー半島でのELF帯磁場観測による初期データ解析結果を紹介する。本報告書では2019年3月31日におけるELF帯電磁場観測事例を紹介する。図1は、3月31日11時43分22秒(UT)に、クアラルンプール上空で発生した落雷から生じたELF帯磁場パルスを示している。

(a)

(b)

time [UT]

図1：UMPにて観測された、ELF帯水平磁場の時間波形。それぞれ、  
(a)南北成分、(b)東西成分を示す。縦線（赤）は落雷発生時刻を示す。



(a)

(b)

図2：図1のイベントのホドグラム(a)および、(a)を用いた方向探索結果

図1の時間波形のうち時間軸中心付近にある雷放電を源とするパルス対して、ホドグラムを作成し、方向探索を行った結果を、雷標定データと比較したところ、到来方位及び発生時間との対応からクアラルンプール上空で発生した落雷によるものと同定された。この落雷は負極性で、ピーク電流値は19 kA程度と小さいが、ELF帯パルス振幅と落雷地点までの距離から計算された落雷電荷モーメント $Q_{ds}$ は560 Ckmにも及ぶ大電荷量雷であることが判明した。中和された電荷の高さを10 kmとすると、50 Cの電荷量に対応する。



図3：11:30, 11:40, 11:50分から10分間落雷地点の空間分布例。Xの大きさと色はそれぞれ $Q_{ds}$ の大きさと落雷極性（赤：正極性、青：負極性）を示す。

図3より、活発な雷活動がクアラルンプール、スマトラ等北部、カンボジア南部、及びカリマンタン島に確認できる。多くの落雷は負極性であり、一般的な夏季雷の様相を示している。特に、クアラルンプールとスマトラ島付近において $Q_{ds}$ が600 Ckmを超える大規模落雷が多数確認でき、クアラルンプールでは正極性雷の発生数も他領域と比較して多いことが分かる。

#### 【まとめと今後の展開】

今回の研究成果から、雷加活動が常時極めて活発な東南アジアにおいて、高感度のELF帯磁場観測により、広いダイナミックレンジを有する $Q_{ds}$ の導出に初めて成功した。今後、解析期間を全ての観測期間に延長することで統計解析を実施し、 $Q_{ds}$ 、 $I_p$ 等に注目した落雷空間分布の季節、年変化を導出する。また、得られた空間分布から雷災害ハザードマップを作成することで、東南アジア域において近年大きな問題となっている、大電荷量を伴う落雷の電力設備等への雷災害の軽減に貢献する。さらに、今回の報告までに成果が報告できなかった、雷嵐に伴う大気波動や、電磁界による大気と上層プラズマとの結合過程についての調査を引き続き鋭意進めていく予定である。

#### 【研究成果発表】

1. Y. Hobara, R. Kitamura, T. Narita, D. Ohta and T. Tsuya, Lightning Charge Estimation over Eastern Part of Japan by ELF and LLS Observations, 2019 UR SI AP-Rasc, New Delhi, India, 10th March 2019

2. R. Kitamura, Y. Hobara, M. Sato, Y. Takahashi, T. Adachi, T. Ushio and M. Suzuki, Global distributions of Lightning Electrical Energy Estimated by Optical Observations from International Space Station, 2019 URSI AP-Rasc, New Delhi, India, 10th March 2019
3. Y. Hobara, Lightning applications to severe weather and power grid systems, National Conference on Severe Weather (NCSW-2019), Kolkata University, Kolkata, India, 19th March 2019
4. Y. Hobara, Lightning Charge Moment Changes Deduced from Highly Sensitive ELF Magnetic Field Observations in Southeast Asia, EMC Sapporo & APEMC2019, Sapporo, Japan, 5th June 2019
5. Y. Hobara, ELF transient observations to mitigate damage to power grid systems, 4th International Symposium on Lightning Research (ISLR2019), Selangor, Malaysia, 28th August 2019
6. Y. Hobara, Lightning Applications to Natural Hazard Mitigation, 2019 URSI-Japan Radio Science Meeting, Tokyo, Japan, 5th September 2019

【謝辞】

今度の国際共同研究プロジェクトのおかげで、期間中には国内観測点の整備、マレーシアをベースとする高感度ELF観測を開始することができた。塩川教授をはじめとするISEEメンバー、マレーシアの共同研究者の方々、およびISEE陸別観測点の関係者の皆さまにこの場を借りて厚くお礼申し上げますとともに、今後も引き続き、当該研究を鋭意進め、成果を発表していく予定である。