

# 1. 国際共同研究 目次詳細

(所属・職名は平成30年3月現在)

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
笠羽康正	東北大学	大学院理学研究科・地球物理学専攻	教授	ハワイ展開する小口径望光赤外遠鏡群と電波望遠鏡群・軌道上望遠鏡群・惑星探査機による木星・火星・金星大気上下結合の研究：その2	1
宗像一起	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の観測	3
大矢浩代	千葉大学	大学院工学研究院	助教	東南アジアVLF帯電磁波ネットワーク (AVON) による下部電離圏のグローバルサーキット効果の研究	5
石川 守	北海道大学	地球環境科学研究院	准教授	南限域永久凍土の温度と地下水動態の観測	7
岩花 剛	アラスカ大学	国際北極圏研究センター	Research Associate	永久凍土を利用した古環境復元の可能性	10
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	13
浅原良浩	名古屋大学	大学院環境学研究科	准教授	イラン国内に分布するキルナ型磁鉄鉱-燐灰石 (IOA) 鉱床の年代測定と成因解析	15
瀧藤佑衣	名古屋大学	大学院環境学研究科	助教	炭質物ラマン温度計とCHIME年代測定法を組み合わせた台湾造山帯の形成史解明	17
尾花由紀	大阪電気通信大学	工学部基礎理工学科	講師	プラズマ圏質量密度の長期モニタリングと経度比較研究	19
吉川顕正	九州大学	国際宇宙天気科学・教育センター	講師	赤道域地磁気変動の稠密観測に基づく太陽地球環境変動モニタリングシステムの開発	21
門叶冬樹	山形大学	理学部	教授	第24太陽活動期における極域から低緯度までの大気中宇宙線生成核種の濃度変動の観測研究	23
藤原 均	成蹊大学	理工学部	教授	北極域総合観測と大気圏・電離圏統合モデル・シミュレーションによる極域熱圏・電離圏変動の研究	25
小島浩司	愛知工業大学	工学部	客員教授	宇宙線で探る太陽風擾乱の空間構造	28
鈴木 臣	愛知大学	地域政策学部	准教授	ヨーロッパ中緯度での地上大気光イメージング観測網の構築	30
土屋史紀	東北大学	大学院理学研究科	助教	高エネルギー電子降下領域の時空間発展の実証的研究	32
宮下幸長	Korea Astronomy and Space Science Institute	Solar and Space Weather Group	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	34
馬場賢治	酪農学園大学	酪農学研究科/農食環境学群 環境共生学類 環境気象学研究室	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	36

(所属・職名は平成30年3月現在)

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
八代誠司	米国カトリック大学	物理学科	助教	噴出型フレアと非噴出型フレアの包括的な比較研究	38
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 宙空圏研 究グループ	特任研究員	脈動オーロラが起こすナトリウム密度変動の研究：ナトリウムライダー・EISCATレーダーの高速観測	40
齋藤 享	海上・港湾・航空技 術研究所	電子航法研究所	主幹研究員	複数衛星系・複数周波数GNSS信号に対するプラズマバブルの影響評価	42
津田卓雄	電気通信大学	情報理工学研究科	助教	トロンソにおけるスペクトログラフ観測に基づく多様なオーロラの発光スペクトルに関する研究	44
川原琢也	信州大学	学術研究院工学系	准教授	ナトリウムライダーを用いた北極域中間圏・下部熱圏領域の高時間分解能温度・風速観測	46
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	雲に関わる多相微物理・化学計算の高度化にむけた国際共同研究の推進	48
寺尾 徹	香川大学	教育学部	教授	インド亜大陸北東部モンスーンの変動メカニズムの解明	50
平原靖大	名古屋大学	環境学研究科	准教授	ALMAアーカイブデータによるタイタン大気の化学組成と変動要因の解明	51
坂野井健	東北大学	大学院理学研究科	准教授	衛星搭載イメージング光学系用パッフル・ベーン的设计と開発	53
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	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	55

ハワイ展開する小口径望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

東北大では、数十年来に渡って宮城・福島に設けた太陽・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・マウイ島ハレアカラ高高度観測施設（標高約 3000m）に整備してきた。40cm 望遠鏡可視観測でイオ火山ガスからなる「イオトーラス」の構造・量・速度場観測を世界で唯一継続して行い、水星・月の Na 希薄大気も含め貴重な長期観測データを提供した。2014 年には福島県飯舘村から 60cm カセグレン反射望遠鏡を移設し、赤外線観測も可能として観測テーマを金星・火星大気も含め広げている。双方とも東北大が主要観測時間を使用でき（40cm：100%、60cm：85%）、惑星探査機との連携では必須の「短中長期にわたる柔軟な連携運用」が常時可能な貴重な望遠鏡である。本研究は、この望遠鏡の活用を軸に行ったもので、木星で紫外線望遠鏡衛星 Hisaki および米探査機 Juno（2016/7 に軌道投入）、火星で米探査機 MAVEN および欧探査機 ExoMars Trace Gas Orbiter（2016/10・12 に軌道投入）、金星で日 Akatsuki 探査機との連携観測を行った。本研究計画は惑星探査機群や惑星専用望遠鏡衛星 Hisaki を支える国際地上観測ネットワークの一翼である。米 Juno 探査機に対しては強力な国際地上観測網が組み込まれたが、日本の光赤外・電波地上観測は長期継続性の点でユニークな一翼を占めた。金星・火星についても同様で、またプロポーザル採択を要する大型望遠鏡群（ハワイ：Subaru 8m、アタカマ：ALMA サブミリ波干渉計、NASA/DLR 成層圏航空機望遠鏡 SOFIA など）の活用にも成功した。

## 2. 研究方法・結果

(1)木星：2014 年来イオトーラスの全体構造・EUV 分光情報と UV オーロラ全発光量の長期データを蓄積する Hisaki 紫外線望遠鏡衛星および 2016/7 から極軌道で「深部・低層～超高層大気」「極上空を含む内部-中間磁気圏」の初探査を行う Juno 探査機を支える観測を実施。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できる機会を提供した。イオ火山活動に起因する中性ガス大規模分布（ナトリウム D1 発光）およびイオプラズマトーラスの詳細分布（S+ 671.6/673.1nm 発光）の長期観測によって、イオ火山活動度とイオトーラスへの物質供給量、すなわち中性ガス電離で生成される磁気圏プラズマ供給量に指

標を与え、「ひさき」プラズマトーラス密度・温度推定および紫外線オーロラ全発光量と合わせ、磁気圏マスキング推定量の基礎を形成した。また、この観測を支える熱圏-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(Terada et al. 2018)。木星・土星圏での重要現象「衛星内部からの水放出」の継続的観測につながる水分子イオンを捉える Visible 高分散分光器の開発、および MEMS を用いた光マスクシステムの開発も行った。電波観測設備では、放射線帯を観測する東北大 IPRT 30m 電波望遠鏡の長期観測結果を磁気圏・オーロラ・大気光変動と連携させつつある。5月には IRTF-3m を用いた近赤外オーロラ発光、5月・3月には SUBARU 8m で大気光・熱発光を狙う中間赤外線観測のスポットデータ取得にも成功した(Watanabe et al.)。成果は論文として形成している(e.g. Fletcher et al. 2017, Kasaba et al. 2017a, Tao et al. 2018)。

(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。本観測装置は電波ヘテロダイン並の高分散分解能  $\lambda/d\lambda > 10^6$  を得るもので、2018 年度に予定する MAVEN・TGO (火星)・Akatsuki (金星) との共同観測で高層大気変動と対流圏～中間圏～熱圏・電離圏結合に対する示唆を得る予定である(Takami et al. 2018)。また、サブミリ波干渉計 ALMA, 航空機搭載赤外望遠鏡 SOFIA との短期大型地上観測との連携も実施した (Aoki et al., 2017)。金星では千葉工大ファイバーoptics 装置による金星近紫外光撮像の試験観測にも成功した。これらは地球大気光を用いた大気上下間結合研究に比するもので、「地球のありえた過去・ありえる未来の姿」「磁場がないため太陽活動により翻弄される姿」という視点へ資することで、本コミュニティによる「兄弟比較惑星学」推進の礎の1つとなる(Kasaba et al.)。本研究は、日本-ベルギー二国間研究の柱でもある(Kasaba et al. 2018)。

(4) ハレアカラ観測施設整備: 40cm/60cm 望遠鏡群の運用整備を継続実施するとともに、本経費により研究者を現地長期派遣し、ハワイ大等と建設を進める 1.8m 惑星/系外惑星望遠鏡 PLANETS 推進にも現地で寄与した(Sakanoi et al. 2017)。

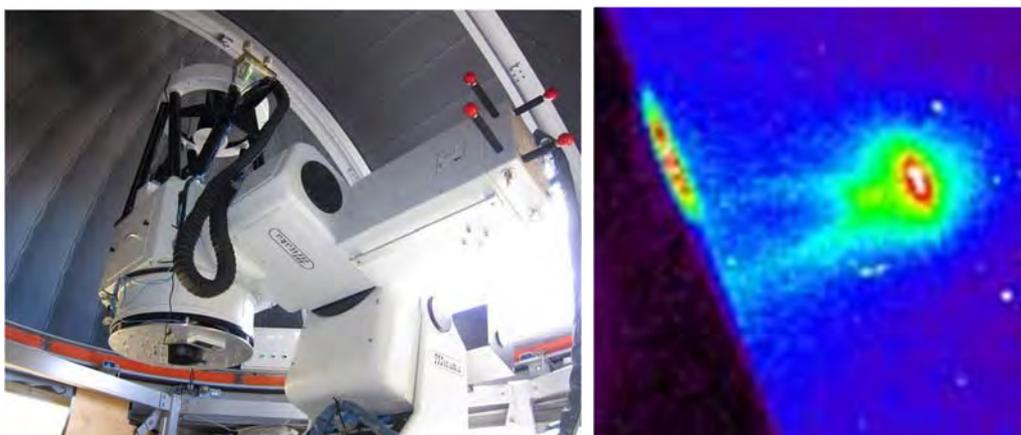


Fig. 東北大 60cm 望遠鏡 T60 (左)と木星をマスクした Io-torus 撮像 (Sakanoi et al.)

#### 4. 成果発表

様式 1-1 を参照されたい。

改良された汎世界的宇宙線観測ネットワークによる宇宙天気の観測  
Space Weather observations using  
the upgraded Global Muon Detector Network (GMDN)

宗像 一起 信州大学・理学部

本研究では2015年6月22日に観測されたCosmic Ray Burst (CRB)の解析を行った。CRBは特定の方向を観測する宇宙線計で約1%の強度増加が見られた現象である。GMDNが10分値で観測したCRBを解析した結果、この現象がIMF中の磁気中性面に伴う宇宙線異方性の卓越によるものであり、ほぼ同期間に観測された大地磁気嵐（最大Kpインデックス8+）に起因するもの（Mohanty+ PRL 2016）ではないことが判った。このことは、磁気嵐中の地球磁場モデル（Tsyganenko+ JGR 2005）を用いた宇宙線軌道計算結果からも確認されている。我々の解析によれば、大振幅異方性が約一時間にわたってその方向と振幅を大きく変化させている様子が観測されたが、この時間スケールは60 GeV宇宙線の旋回半径を太陽風が通過するのに要する時間と一致する。一方、磁気中性面に伴う磁場変動ははるかに短い時間に完了しているため、このことは、高エネルギー宇宙線異方性がIMFの変動に応答する時間スケールが、この事象では1時間程度であることを意味している。同時に、GMDNが1時間以内の「速い」変動も正確に捉える能力を備えていることが実証された。これの結果を論文にまとめ、現在Astrophysical Journalに投稿中である。

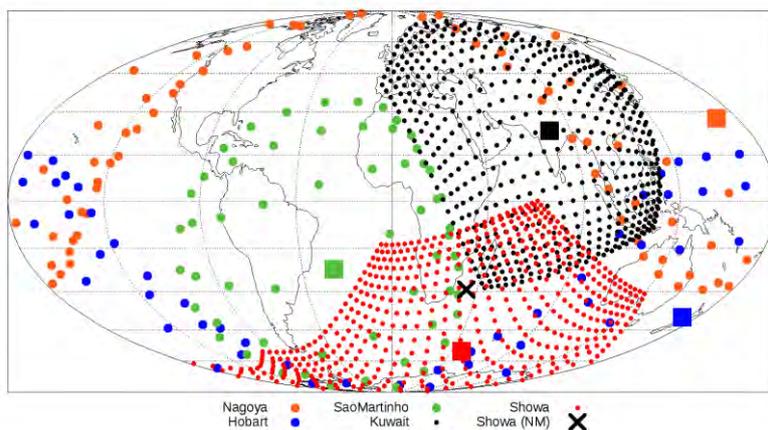
2016年3月にKuwait宇宙線計の拡張が完了し、現在はGMDNの4台の宇宙線計すべてが1分値の観測を行っている。今後はCRBに代表される「速い」変動の研究にもGMDNが威力を発揮することが期待される。



信州大学は国立極地研究所との共同研究により、2018年2月から南極昭和基地で小型ミュオン計 (2m<sup>2</sup>) と中性子モニター (NM64 with 6 BP28 tubes) による新観測を開始した (上図参照)。ミュオン計と中性子モニターは、一次宇宙線が大気中で生成する異なる二次粒子 (ミュオンと中性子) を検出するが、生成に必要な閾値エネルギーの違いにより、ミュオン計は中性子計に比べて約5倍高いエネルギーの一次宇宙線に最も高い感度を有する。一方で、二次粒子が大気中を伝播する際に起こす反応の違いにより、ミュオン計と中性子計で観測されたデータには異なる大気効果が含まれる。例えば、ミュオン計データでは、大気気圧効果が中性子計の約1/5である反面、中性子計データにはあまり見られない大気気温効果が目立つ。大気気温効果はミュオン強度に顕著な季節変動を引き起こすため、特に宇宙線密度 (強度の等方成分) の変動を解析する際には注意が必要である (Mendonça+ ApJ

2016)。南極昭和基地での両宇宙線計による同時観測は、大気効果をよりよく理解してその補正法を探る上で実験的な拠り所を与えるものである。

一方で昭和基地ミュオン計による地球磁気圏外の観測方向（*asymptotic viewing direction*）は、ブラジル宇宙線計及びクウェート宇宙線計の観測方向と一部で重なっている（下図参照）。これまで、GMDNの4つの宇宙線計のうちブラジル宇宙線計の観測方向のみが他の宇宙線計の観測方向から孤立しており、観測データを宇宙線計間で較正することの妨げとなっていた。中性子計との同時観測で気温効果が除かれた昭和基地ミュオン計のデータを用いれば、今まで困難だった較正が可能になると期待される。



東南アジア VLF 帯電磁波ネットワーク (AVON) による下部電離圏のグローバルサーキット効果の研究

Study of global circuit effects in the lower ionosphere by using AVON

大矢 浩代、千葉大学・大学院工学研究院

1. 研究目的

本研究の目的は、東南アジア VLF 帯電磁波観測ネットワーク (AVON: Asia VLF Observation Network) を中心として、新規に国内で大気電場と 95GHz FMCW 雲レーダ (FALCON)-I との同時観測を行い、名古屋大学宇宙地球環境研究所 (ISEE) が海外・国内で展開している VLF/LF 帯電磁波観測ネットワークも使用することにより、D 領域・下部 E 領域電離圏のグローバルサーキット効果を定量的に明らかにすることである。

2. 観測

平成 29 年度は 3 年計画の 2 年次であり、国内・千葉大における大気電場観測および 95 GHz FMCW 雲レーダ FALCON-I による雲の定常観測は安定的にデータ取得することができた。AVON については、タイ、インドネシアおよびベトナムにて、機器の不具合を修理あるいは機器の交換を実施し、正常に VLF/LF データ取得を開始することができた。来年度は AVON データを使用した赤道帯・低緯度における大気電場を調べる。

3. 研究結果

3-1. 降雪時における大気電場振動

2016 年 11 月 23-24 日の降雪時に、50-70 km 離れている千葉大、東京学芸大、成蹊高校 (東京都武蔵野市) および柿岡の 4 地点で、大気電場に 70-100 分のほぼフルスケールの大きい振動が見

られた (図 1)。このような離れた地点で、似たような長周期の大気電場振動が観測されたのは初めてのことである。縦軸の大気電場の値は、柿岡のみ校正値であり、その他は相対値である。図 2 に、千葉大における大気電場変動 (上)、FALCON-I による雲の反射強度 (中)、および日本無線株式会社 X バンドフェイズドアレイレーダによる雲の反射強度 (下) を示す。千葉大における大気電場振動の周期は 72.8 分であり、FALCON-I および X バンドレーダの高度 1-3 km の雲の反射強度は、約 70 分だった。

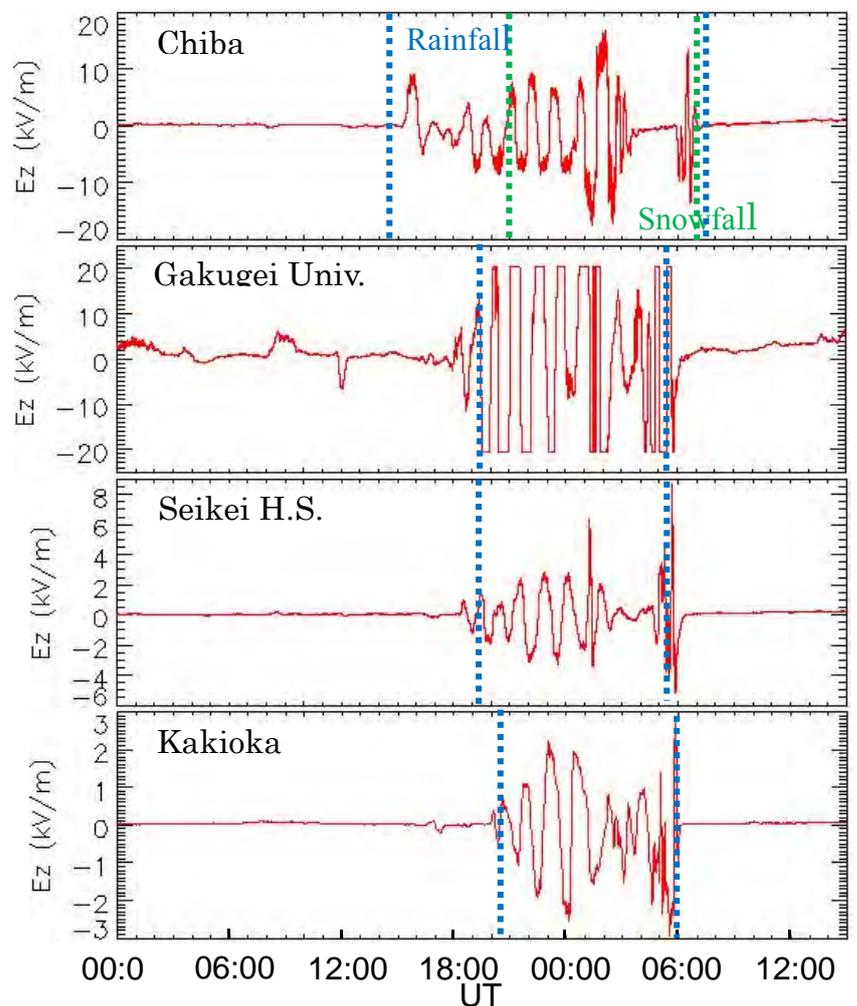


図 1 2016 年 11 月 23-24 の降雪時の、千葉大、東京学芸大学、成蹊高校および柿岡における大気電場変動。

### 3-2. 大気電場の日変化

2016年6月-2017年12月の晴天（ここでは全天カメラによる雲の光学観測で雲量が10%以下と仮定した）時388日間の夜間の統計を取ったところ、千葉大での観測で18:00UTに最大値、02:00-03:00UTに最小値をとるカーネギーカーブ(Whipple and Scrase, 1936)に似た日変化を示したことがわかった(図3)。

成果発表

- [1] 中森 広太、フィールドミルとミリ波雲レーダ FALCON-I との同時観測による大気電場と雲・気象現象との関連性に関する研究、千葉大学大学院工学研究科平成 29 年度修士論文、2018.
- [2] Nakamori, K., Y. Suzuki, H. Ohya, T. Takano, Y. Kawamura, H. Nakata, and K. Yamashita, Correlation between atmospheric electric fields and cloud cover or meteorological phenomena using a field mill and cloud observation data, European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2017, Vienna (Austria), 23-28 April, 2017.
- [3] Nakamori, K., Y. Suzuki, H. Ohya, T. Takano, Y. Kawamura, H. Nakata, and K. Yamashita, Response of atmospheric electric fields to cloud parameters using a field mill and 95 GHz cloud radar FALCON-I, JpGU-AGU 2017, Chiba (Japan), May 2017.
- [4] 中森広太、鈴木康樹、大矢浩代、鷹野敏明、河村洋平、中田裕之、山下幸三、フィールドミルによる大気電場と 95GHz 雲レーダ FALCON-I で観測された雲との比較、中間圏・熱圏・電離圏(MTD)研究集会、東京都国分寺市、2017年9月12-14日。
- [5] 中森広太、鈴木康樹、大矢浩代、鷹野敏明、河村洋平、中田裕之、山下幸三、95 GHz 雲レーダ FALCON-I で観測された雲パラメータと大気電場との比較、第 142 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会、京都府宇治市、2017年10月15-19日。
- [6] 中森広太、鈴木康樹、大矢浩代、鷹野敏明、河村洋平、中田裕之、高村民雄、山下幸三、諸富和臣、フィールドミルによる大気電場と 95 GHz 雲レーダ FALCON-I による雲・気象現象との同時観測、第 96 回日本大気電気学会研究発表会、東京都新宿区、2018年1月6-7日。

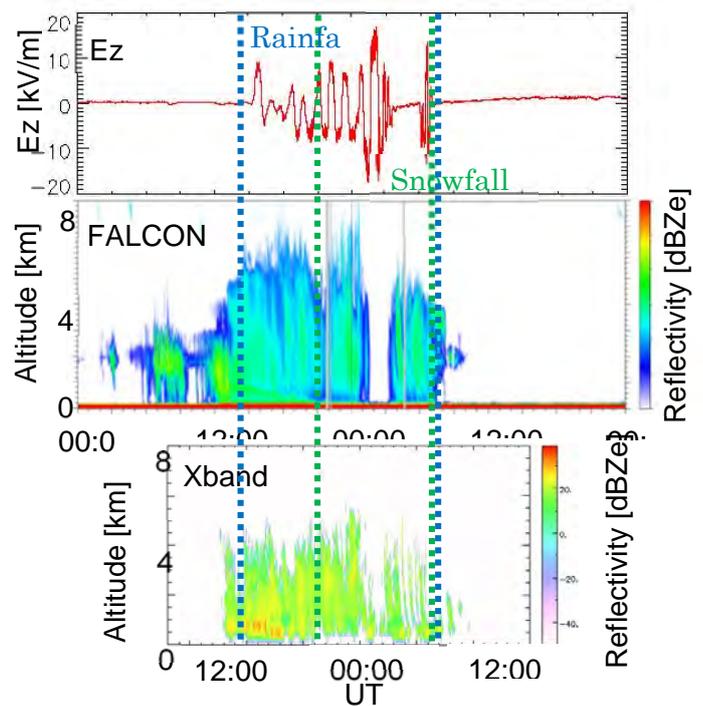


図2 2016年11月23-24日降雪時の大気電場変動(上)、FALCON-Iによる雲の反射強度(中)およびXバンドフェイズドアレイレーダによる雲の反射強度(下)。

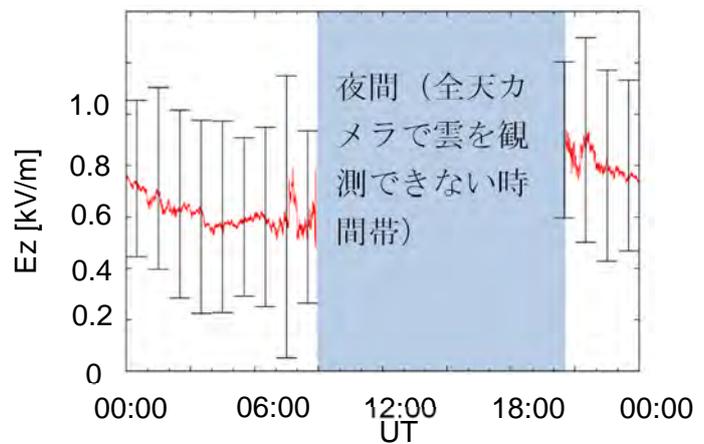


図3 2016年6月-2017年12月フェアウェザー時の、千葉大における大気電場の日変化。

南限域永久凍土の温度と地下水動態の観測  
Monitoring ground temperature and ice of southern boundary  
of Eurasian permafrost

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・点状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地理学的に評価した。また、研究対象地域に点在する複数の湧水を採取した。採取した湧水はモンゴルから輸送し、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。

## 結果と考察

本国際共同研究(3年計画の1年目)によって、以下に示す3つの結果が得られた。

1) 地温観測網のデータから年平均地温、活動層厚、年周期性地温振幅深度といった永久凍土の安定性を示す指標を算出し、気候変動に対する永久凍土の応答性を評価した。ここで、安定性は気温変動に対する地温の応答性とした。河川氾濫原や湖沼周辺といった湿潤環境では永久凍土は潜熱効果のため気温変動に対する応答性が低かった。また地温が全層にわたって融点に近い場合も、同様の効果で応答性が低かった。一方、高緯度域や乾燥土壤中に形成された永久凍土は、地温の年振幅が気温のそれに近く、高い気温応答性を示した。

2) 多地点で観測された浅層地温と地表面形状(斜面・凹地度)、植生、標高といった地理情報との相関関係を解析し、永久凍土の分布を高分解能で示した。永久凍土の分布域は従来考えられていたものより狭く、湖沼近辺や北向き斜面に限られることが示された。

3) 湧水のトリチウム濃度とCFCs濃度を分析した結果、ハンガイ山脈の北麓と南麓に点在するサーモカルスト(ChuluutとGaloot)で得られた湧水のトリチウム濃度とCFCs濃度は非常に低く、ほぼ地下水起源の湧水であることがわかった。一方、顕著なサーモカルストに付随しない湧水のトリチウム濃度とCFCs濃度は比較的高く、近年の降水により涵養された比較的若い湧水であることがわかった。ただし、ハンガイ山脈の南部に位置するBayanbulag村の唯一の水源地である湧水年代は比較的古く、地下水の融解水が混合している可能性が示唆された。東シベリアの湧水を調べたHiyama et al.(2013)の研究と比較すると、モンゴル・ハンガイ山脈周辺域の湧水年代はバラエティーに富み、年代の古い地下水が湧出しているものもあることから、地球温暖化の影響を受けやすい地域であることがわかった。

## まとめ

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した。その結果、湿潤環境では永久凍土は気温変動への応答性が低かった一方、高緯度域や乾燥土壤中に形成された永久凍土は気温変動への応答性が高いことがわかった。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。そして湧水年代からは、東シベリアに比べてバラエティーに富み、サーモカルストのような地下水に富む場所で湧出する湧水には地下水が融解した水が混入していることがわかった。今後は、湧水を少なくとも季節別に採水し、その季節変化を調べる必要がある。

## 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.
- 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.

永久凍土を利用した古環境復元の可能性  
Potentialities of Permafrost usage for paleo-environmental  
reconstruction

研究代表者：岩花 剛・アラスカ大学・国際北極圏研究センター

(研究目的)

近年、地球温暖化によって融解が危惧される永久凍土は、有機炭素や地下氷の巨大な貯蔵庫であり、第五次 IPCC 報告書では炭素循環における大きな不確定要素としてこの永久凍土変動を理解する重要性が強調されている。含水率および有機炭素含有率が高く、氷期から現在に続くまで消長の度合いが激しい永久凍土はエドマ層と呼ばれ、北東シベリアやアラスカの陸域に広く分布する。現在でも、気候変動による最も激しい永久凍土変化が観測されている地域である。しかし、これらの地域では氷河・氷床コアによる情報が得られないため、更新世から完新世前期の古環境復元が遅れている。

本研究では、これまでに永久凍土の古環境復元が進んでいない、東シベリアの中央ヤクーチアを中心とした最も大規模なエドマ層の分布域を対象として、地下氷およびエドマ堆積物を採取し、凍土中の有機物や水の同位体を利用した古環境復元を実施することを目的とする。

(研究方法と進捗状況)

研究期間 2 年目の本年度は、ロシア・サハ共和国北東部の Zyryanka 周辺での永久凍土試料の採取を予定通り 2017 年 7 月に実施した。Zyryanka 周辺では、7 地点のエドマ層のアイスウェッジ断面から試料を採取し、ヤクーツク永久凍土研究所の地下実験室に保管した後、2018 年 3 月に試料の予備処理を行った。Zyryanka 試料は、H30 年度に CT スキャンによる内部構造データの取得後に年代測定と地球化学的分析を行う予定である。

一方、アラスカ・ノーススロープにおいても追加の試料採取を行った。これらの試料の一部について、宇宙地球環境研究所の受け入れ研究者（檜山哲哉教授・南雅代准教授・池田晃子技術員）の協力と指導の下、氷試料の放射性炭素年代測定のため、堆積有機物についての前処

理と二酸化炭素精製を年代測定研究部の実験設備を利用して研究代表者が実施した。H30年度に引き続き試料のグラフアイト化を実施し、AMS加速器によって放射性炭素濃度を測定して年代を決定する予定である。

H28年度に前処理した放射性炭素年代測定試料（主にロシア・中央ヤクーチアで採取したもの）は、2018年3月に測定が完了した。試料採取場所は、レナ川右岸、ヤクーツク市から約150km西（61°58'N, 132°36'E）のChurapchaおよび、約90km北東（62°33'N, 130°57'E）のSyrdakhである。

#### （研究結果と考察）

本報告では、ロシア・中央ヤクーチアで採取した地下氷の年代測定について考察する。ChurapchaおよびSyrdakhにおける永久凍土の露頭からアイスウェッジ（IW）と考えられる地下氷の試料を採取した。IWが貫入する凍結堆積層中に見られた植物片、IW中の土壌有機物（SOC）および溶存無機炭素（DIC）に対して放射性炭素年代測定を実施した結果を表1に示す。IWが貫入する堆積土層の年代は両サイトともに22,344–24,484 year BPの範囲であり、ほぼ同時代の堆積層であると考えられる。IW中のSOC年代は、27,103–35,015 year BP、DIC年代は、12,801–17,735 year BPであった。これらの年代を2地点で比べると、Churapchaの年代の方が数千年程度古い値を含むが、Churapcha露頭ではIWの成長方向に沿ってほぼ全体に亘って採取できた一方、Syrdakhでは露頭面積が限られており、IWの一部を測定している可能性を考えると年代測定結果から両IWがほぼ同時期に発達したと仮定して考察を進める。

SOC年代幅が約8千年である一方DIC年代幅が約5千年であり、SOC年代とDIC年代の絶対値は1万年から2万年の差異が見られた。DIC年代は、試料処理時に年代の古い無機炭素が影響すると考えられたが、SOC年代よりもかなり若い年代値を示した。IW形成年代の決定には、IW中の植物片を用いるのが最も正確と考えられるが、更新世後期のIWの場合、分解の進んでいない有機物の混入はほとんどなく、レスなどの鉱物土粒子が主な混合物である。Lachniet et al. (2012)は、アラスカ・フェアバンクスの更新世後期のIWの年代について、SOCの値が実際の形成年代よりも1万年以上古く測定されると結論しているが、本測定でも同様にSOC年代には周辺の古い年代を持つ有機炭素の再堆積による誤差が顕著に出たと考えられる。Lachniet et al.

(2012)は、IWの形成年代を最も正確に反映すると考えられるIW中の溶存有機炭素(DOC)あるいは二酸化炭素やメタンを測定対象とすることを推奨している。これらのIW中のDOCや温室効果ガスを用いた年代測定は来年度の課題である。DICによる年代決定の試みは、初めて実施されたものであるが、今後、上記のDOCの年代などと比較し、測定値の意味を考察する予定である。

表 1

ロシア・中央ヤクーチアの永久凍土試料の放射性炭素年代測定結果

Site ID	Sample ID	Location	C type	<sup>14</sup> C 測定値		$\delta^{13}\text{C}$	備考
				year B.P.	‰		
Syrdakh	瑞C		DIC	21,120	±110	-32.3	NaOH添加
	中央A		DIC	18,540	±90	-33.6	NaOH添加
	#3	Lower right	DIC	12,801	±59	-9.4	
	#8	Middle right	DIC	12,954	±47	-12.0	
	#3	Lower right	SOC	27,103	±93	-23.9	
	#8	Middle right	SOC	29,861	±129	-25.6	
	Syrdakh-1	280-290cm	Plant	22,344	±67	-26.1	
	Syrdakh-2	280-290cm	Plant	22,669	±70	-26.6	
	Syrdakh-3	280-290cm	Plant	23,063	±62	-28.9	
Churapcha	Churapcha-1	280cm	Plant	24,484	±75	-22.4	
	C-09-4	4.0m_68-97cm	DIC	15,841	±52	-11.1	
	C-32	1.0m-V1.5m	DIC	17,735	±57	-12.0	
	C-33	4.0m-V1.5m	DIC	14,387	±41	-12.1	
	C-34	7.0m-V1.5m	DIC	15,761	±44	-11.8	
	C-09-4	4.0m_68-97cm	SOC	27,387	±96	-25.5	
	C-32	1.0m-V1.5m	SOC	33,687	±164	-22.9	
	C-33	4.0m-V1.5m	SOC	35,015	±168	-23.7	
C-34	7.0m-V1.5m	SOC	27,389	±127	-25.3		

(参考文献)

Lachniet, M., Lawson, D., & Sloat, A. (2012). Revised <sup>14</sup>C dating of ice wedge growth in interior Alaska (USA) to MIS 2 reveals cold paleoclimate and carbon recycling in ancient permafrost terrain. *Quaternary Research*, 78(2), 217-225. doi:10.1016/j.yqres.2012.05.007

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）

【目的】

永久凍土の表層の融解は、地表面付近の熱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の放出を通して気候変動にフィードバックすることで注目される。一方で、凍土地域の生態系の成立、維持に凍土が果たす役割は大きく、生態系の水・エネルギー・物質循環は凍土表層の融解・凍結過程に強く依存する。

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変動が著しく、森林の水・エネルギー・物質循環への影響があらわれている東シベリアの森林 (Iijima et al., 2010; Ohta et al., 2014) を対象として、凍土季節融解層の時空間変動と森林の水・エネルギー・物質循環との関係を解明することを目的とする。この水・エネルギー・物質循環は大気と地中の熱や水分状態の形成に影響をおよぼすことから、東シベリアにおける凍土-植生-大気間の相互作用の解明は急務である。本研究の具体的課題として、①融解層深度と植生・土壌など、地表面環境との関係と②融解層深度の時間変化の要因を調査する。本年度は①を中心に実施した。

【方法】

2017年9月に東シベリアの Spasskaya Pad (SP) および Elgeei (EG) で凍土融解層の調査を実施した。両調査地はいずれもカラマツを中心にカンバやヤナギから構成される森林であるが、樹種構成比や土壌タイプ、降水量、土壌水分量に違いがある。各調査地の50×50mのグリッド測定(10-15m間隔で25点)と約1kmのトランセクト測定(50m間隔で18-24点)として、簡易貫入試験機(TW-035、坂田電機)を用いて凍土層上端深度(貫入抵抗 $N_c \geq 50$ に達した深度)を測定し融解深とした。同測定点で地温、林床被覆、開空度を記録した。他経費で実施した夏季や前年までの調査結果と合わせて、2015-2017年6-7月および9月における融解深の時空間変動を整理した。各グリッド内で連続測定されている地温の鉛直プロファイルを用いて同時期の融解深を推定した(現時点ではEGのみ推定を行い、SPでは複数の鉛直プロファイルが得られその扱いを検討中である)。

【結果・考察】

グリッド測定の貫入試験による融解深と地温プロファイルに基づく推定値の違いは秋季の方が大きく、最大の場合でも測定値の分布幅と同程度であった。トランセクト測定では植生や地形の変化のあるSPにおいて、融解深の変動幅がEGよりも大きかった。全体としては、融解深の平均値は2調査地の差異は小さかったが、変動幅および季節による違いがみられた(図1)。地温プロファイルによる融解深の推定では、融解時の潜熱吸収によるゼロカーテン現象により、ゼロ℃線として一意に決定する不確実性が残り(de Pabro et al., 2014など)、引き続き次年度の課題とする。

夏季融解中の活動層では、融解深が大きいほど $N_c$ 値が小さく土壌が湿潤であることが示唆され、EGにおいても土壌水分が融解速度に影響を及ぼすこと(Iijima et al., 2010)を裏付けた。EGにおける土壌水分と $N_c$ 値との関係については、次年度の現地調査にて確認する。秋季には $N_c$ 値との関係は不明瞭となるが、融解深は林冠閉鎖度率とは正相関(融解深が深いところにカラマツ成木が多いことを反映)、林床・植生指標とは負相関(林床植生および有機層の断熱効果を示唆)がみられたが(図2)、先行研究(Fisher et al., 2016など)に比べると不明瞭であった。地表面の断熱効果については、疎林やツンドラを中心とした先行研究に比べて複雑な空間構造を持つ本調査地の森林では、多数の要素が影響すると考えられる。単相関ではなく複数要素との関係解析を引き続き次年度の課題とする。

【まとめ】

森林群落スケールの凍土季節融解層の融解深は、均一とみなせる50m以下の空間スケールでは夏季の活動層では湿潤土壌ほど融解深が深く、秋季の融解深（最大融解深＝活動層深とみなす）は樹木分布や林床植生との関係がみいだされた。50m以上のスケールでは樹種構成や立地が変化に対応して空間変動幅はより大きくなった。

【引用文献】

de Pabro et al., 2014: Thermal characteristics of the active layer at the Limnopolar Lake CALM-S site on Byers Peninsula, Antarctica. *Solid Earth* **5**, 721–739.  
 Fisher et al., 2016: The influence of vegetation and soil characteristics on active-layer thickness of permafrost soils in boreal forest. *Global Change Biology* **22**, 3127–3140.  
 Iijima et al., 2010: Abrupt increase in soil temperature following increased precipitation in a permafrost region, central Lena river basin, Russia. *Permafrost and Periglacial Processes* **21**, 30–41.  
 Ohta et al., 2014: Effects of waterlogging on water and carbon dioxide fluxes and environmental variables in a Siberian larch forest, 1998–2011. *Agricultural and Forest Meteorology* **188**, 64–75.

【成果発表】

Kotani A, Nakatsubo M, Ohta T, Hiyama T, Iijima Y, Maximov TC. Active-layer thickness at permafrost. Fifth International Symposium on Arctic Research. Tokyo. 15–18 Jan. 2018.

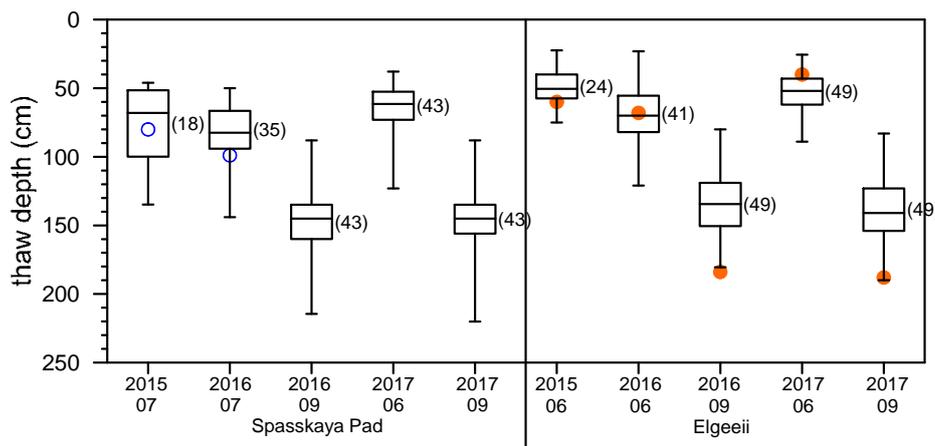


図1 簡易貫入試験による融解深。全測定値を箱ひげ図で中間値、第1・第3四分位、最大・最小値を示す。○は地温測定による推定値、()は測定点数を示す。

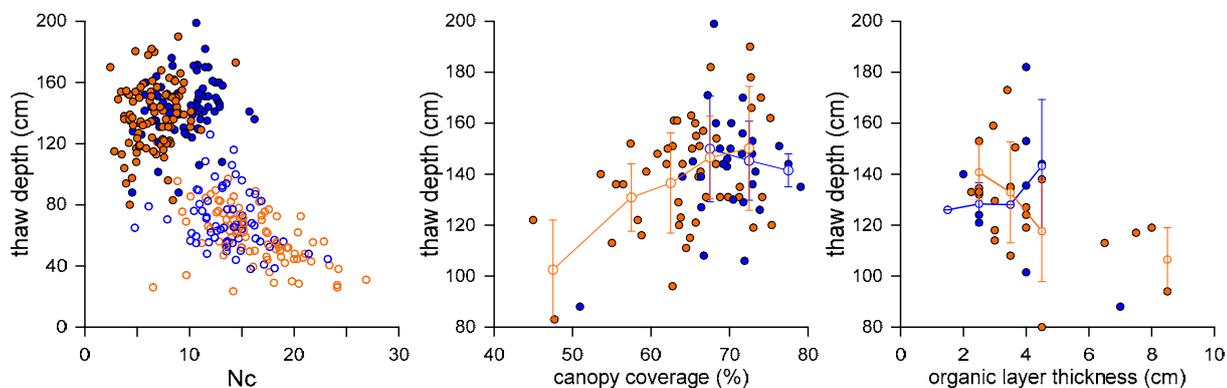


図2 融解深と貫入抵抗（左図：全測定点）、林冠閉鎖度（中図：2017年9月）、有機層厚（右図：2016年9月）との関係。青色でSP、オレンジ色でEG、左図では○6-7月と●9月を示す。中・右図では調査地ごとの区間平均値と標準偏差を示す。

## イラン国内に分布するキルナ型磁鉄鉱-燐灰石 (IOA) 鉱床の年代測定と成因解析 Geochronology and genesis of Kiruna-type iron oxide-apatite (IOA) deposits in Iran

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  
眞野航大、名古屋大学・大学院環境学研究科

### [研究目的]

鉄鉱床の1つである磁鉄鉱-リン灰石(iron oxide apatite, IOA) 鉱床は、マグマ活動に関連して生成したものと考えられており、鉄だけでなく、レアアース(希土類元素: REE)資源としても期待されている。特にリン灰石は REE を高濃度に濃集する鉱物であり、その形成過程の解明は重要である。IOA 鉱床の一種であるキルナ型鉱床は、マグマの分化作用で形成されたと長年考えられてきたが、磁鉄鉱の酸素同位体比や流体包有物の均質化温度から、マグマ源に加え熱水作用の寄与もあるとの指摘もあり、依然として議論は続いている(e.g., Knipping et al., 2015; Nabatian et al., 2013)。これらの鉱床の成因解析のためには、鉱石と母岩の年代的、成因的關係を知ることが不可欠である。

本研究の研究対象は、イラン北西部のザンジャン(Zanjan)地域のキルナ型 IOA 鉱床である。ザンジャン地域は、アルプス造山帯アルボルス山脈にあり、始新世の火成活動が活発な地域である。本研究では、鉱石と鉱床母岩に対し、放射壊変系のストロンチウム(Sr)、ネオジウム(Nd)同位体、鉄(Fe)の安定同位体、微量元素存在度、REE 存在度パターンを用いて、キルナ型鉱床の起源を探った。

### [研究方法]

ザンジャン地域での IOA 鉱床の現地調査と鉱石・鉱床母岩の試料採取については、科研費(基盤研究(A)海外学術)が採択されたため、当初計画のとおり、本研究の日本側メンバー2名(浅原、眞野)とイラン側メンバー1名(Azizi)とともに平成29年6月上旬に実施した。この現地調査は、当初計画のメンバーに加え、さらに1名のイラン側の研究者(Dr. Ali Akbar Baharifar, Payame Noor University)の支援を得て行った。この鉱床は後期始新世~前期漸新世(約40 Ma)の安山岩質の火成岩などを母岩としている(Nabatian et al., 2013)。現地調査では、先行研究(Azizi et al., 2009)で報告されているように数多くの断層が確認され、その周囲に塊状の鉱体を伴っていることが観察された。このザンジャンの IOA 鉱床およびその周辺地域から、鉱石とともに母岩試料の採取を行った。

分析試料は、塊状の磁鉄鉱と自形の燐灰石からなる鉱石および鉱床母岩である。鉱石試料は顕微鏡下で磁鉄鉱と燐灰石に分けたのち、酢酸、硝酸および塩酸を用いて段階的に(二次的な)方解石、燐灰石、磁鉄鉱の各成分を溶出した。一部の鉱石試料については、マイクロドリルで燐灰石部分と磁鉄鉱部分をそれぞれ採取し、酸溶出を行った。母岩試料については、粉末化の後にフッ化水素酸分解を行った。その後、鉱石、母岩試料ともに、陽イオン交換カラムと陰イオン交換カラムにより Sr, Nd, Fe を単離した。鉱石および鉱床母岩の試料の化学前処理は、浅原、南らが管理運営する試料前処理用クリーンルーム実験室(名古屋大学環境総合館内)で行った。

Sr 同位体比の測定は、名古屋大学環境学研究科内の表面電離磁場型質量分析計(TIMs: VG Sector 54-30)で、Nd 同位体比の測定は TIMs (GVI IsoProbe-T)で行った。Fe 同位体比の測定は、総合地球環境研究所(京都)および韓国地質資源研究院(KIGAM)の多重検出器付き磁場型 ICP 質量分析装置(MC-ICP-MS: Thermo Neptune plus)で実施した。Rb, Sr, REE を含む微量元素の定量分析は、環境学研究科内の誘導プラズマ質量分析装置(ICP-MS: Agilent 7700x)で、母岩試料の主成分元素の定量分析は蛍光 X 線分析装置(XRF: Rigaku ZSX Primus II)で行った。これらの同位体分析および定量分析は、共同研究者の Azizi が来日した平成29年7月~9月に集中的に実施し、その後データ解析を進めた。

### [結果と考察]

磁鉄鉱、燐灰石の REE 濃度はともに高く( $\Sigma$  REEs = 570~5900 ppm)、特に燐灰石は磁鉄鉱よりも約10倍高かった。磁鉄鉱・燐灰石ともに REE 存在度パターンが負の Eu 異常を示すが、その Eu 異常の程度は磁鉄鉱、燐灰石間に差はなく、ほぼ同一の起源物質から形成されたことが示唆される。一方、母岩試料は、弱い負~弱い正の Eu 異常を示した。鉱石が母岩より有意に大きな負の Eu 異常を持つこと、還元的環境下での長石類による  $\text{Eu}^{2+}$  の取り込みを考慮すると、磁鉄鉱・燐灰石は鉱床母岩のマグマの結晶分化過程後期に形成したと考えられる。

磁鉄鉱の Fe 同位体組成( $\delta^{56}\text{Fe}$ )は高温環境下(615~700°C)で形成された磁鉄鉱の  $\delta^{56}\text{Fe}$  値の範囲(+0.08~+0.86‰, Bilenker et al., 2016)に一致しており、ザンジャン地域の磁鉄鉱は高温環境下で形成されたことを示

唆している。また、磁鉄鉱、燐灰石の  $\epsilon_{Nd}$  値(+1.5~+2.6)は鉄床母岩の Zaker 石英モンズナイトの値(+1.8~+2.7)と調和的であり、磁鉄鉱・燐灰石がマグマ的な起源を持つことを示唆している。また、磁鉄鉱、燐灰石の Sr 同位体比 ( $^{87}Sr/^{86}Sr$ )はそれぞれ 0.7052~0.7058、0.7049 であり、Nd 同位体と同様にマグマ的な値を示した。特に燐灰石の Sr 同位体比は Zaker 石英モンズナイトの値(0.7046~0.7050)と一致することから、これらの Sr の起源は同一であると考えられる。これに対し、磁鉄鉱の値が燐灰石、Zaker 石英モンズナイトの値よりもやや高いことは、それらとは異なる起源を持つ、もしくは同じ起源を持つが熱水の影響を受けその値が高くなったことが考えられる。

以上の結果から、ザンジャン地域のキルナ型鉄床の形成過程は次のように考えられる。まず、マグマの結晶分化作用により長石類に Eu が分配され、その Eu に乏しいマグマから、母岩の Zaker 石英モンズナイトと同じ Sr 同位体比を持つ燐灰石が形成される。その後、マグマは安山岩質の周辺母岩を溶かし込み、燐灰石よりも少し高い Sr 同位体比を持つ磁鉄鉱を形成する。断層により規制された塊状の鉄体が現地調査で観察されたこと、Fe 同位体組成が高温環境下での磁鉄鉱の形成を示唆していること、などを考慮すると、マグマから直接生じるマグマ熱水が鉄化作用を引き起こしたことが考えられる。つまり本研究の結果は、ザンジャン州に産するキルナ型鉄床の成因がマグマ熱水で形成された、熱水性鉄床であることを支持している。

#### [引用文献]

- Azizi, H., Mehrabi, B. and Akbarpour, A. (2009) Genesis of tertiary magnetite–apatite deposits, southeast of Zanjan, Iran. *Resource Geology* **59**, 330-341.
- Bilenker, L.D., Simon, A.C., Reich, M., Lundstrom, C.C., Gajos, N., Bindeman, I., Barra, F. and Munizaga, R. (2016) Fe–O stable isotope pairs elucidate a high-temperature origin of Chilean iron oxide-apatite deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **177**, 94-104.
- Knipping, J.L., Bilenker, L.D., Simon, A.C., Reich, M., Barra, F., Deditius, A.P., Lundstrom, C., Bindeman, I. and Munizaga, R. (2015) Giant Kiruna-type deposits form by efficient flotation of magmatic magnetite suspensions. *Geology* **43**, 591- 594.
- Nabatian, G. and Ghaderi, M. (2013) Oxygen isotope and fluid inclusion study of the Sorkhe-Dizaj iron oxide-apatite deposit, NW Iran. *International Geology Review* **55**, 397-410.

#### [成果発表]

##### 論文

- Azizi, H., Haddad, S., Stern, R.J., Asahara, Y. 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*, DOI:10.1080/00206814.2017.1422394 (in press)

##### 学会発表

- 眞野航大, 浅原良浩, 壺井基裕, Hossein Azizi. Sr 同位体および REE パターンを用いたキルナ型鉄床の成因の考察. 2017 年度資源地質学会年会講演会, 東京大学本郷キャンパス(東京都), 2017 年 6 月.
- 眞野航大, 浅原良浩, 壺井基裕, Hossein Azizi, 申基澈. イラン・ザンジャン州のキルナ型鉄床の岩石学的、地球化学的特徴. 2017 年度日本地球化学会第 64 回年会, 東京工業大学(東京都), 2017 年 9 月.
- 眞野航大, 浅原良浩, 壺井基裕, Hossein Azizi, 申基澈. 北西イラン・ザンジャン地域のキルナ型鉄床の Sr-Nd-Fe 同位体分析. 第 7 回同位体環境学シンポジウム, 総合地球環境学研究所(京都市), 2017 年 12 月.
- 眞野航大, 浅原良浩, 壺井基裕, Hossein Azizi, 申基澈, Seung-Gu Lee. キルナ型鉄床の成因に関する Sr-Nd-Fe 同位体組成からの制約. 第 30 回宇宙地球環境研究所年代測定研究シンポジウム, 名古屋大学研究所共同館 II(名古屋市), 2018 年 2 月.

炭質物ラマン温度計とCHIME年代測定法を組み合わせた台湾造山帯の形成史解明  
Elucidation of formative history of Taiwan mountain belt combining  
Raman carbonaceous material geothermometer and CHIME chronology

瀨瀨佑衣（名古屋大学・大学院環境学研究科）

【研究目的】

台湾は、約6.5 Maに始まり現在も続いているユーラシアプレートとフィリピン海プレートに属する火山弧の衝突によって、3000m級の山脈が連なる衝突型造山帯が形成されている。この台湾造山帯は非常に若い変成作用を被った造山帯であり、その変成条件と年代を制約する事は、現在進行形の造山運動の発達史を理解する上で、非常に重要な地域であると言える。台湾造山帯は、西から東に向かって変成度が上昇する事が知られているが、主に付加体堆積物から構成されているため、定量的な変成温度圧力条件の解析が困難である。加えて、急峻な地形と植生のため、緻密な試料採取に基づく岩石学的分析が進んでいない。これまで、東部のYuli帯において、塩基性～超塩基性岩体における鉱物の化学組成を基にした熱力学的変成条件の解析によって、それらの岩体は周囲の大部分を占める変泥質岩とは異なる高変成度を経験したTectonic Blockとして解釈されてきた。しかし、近年の研究では、Yuli帯の変泥質岩類も高変成度の変成作用を被っている可能性が指摘されており（Keyser et al., 2016）、台湾造山帯の発達史を大幅に見直す必要があると考えられている。本研究では、台湾の地質に精通している国立東華大学のChin-Ho Tsai准教授と協力し、炭質物ラマン温度計と年代測定を用いた試料の分析を通じて、台湾造山帯の地質構造、及び変成履歴を明らかにすることを目的とする。

【研究方法】

本年度は、Tsai准教授の指導学生であるChih-Ying Yehさんを招聘し、台湾東部Yuli帯Juisui地域で採取された15試料の変泥質岩について炭質物ラマン温度計を用いた変成温度の見積り解析を行った（図1）。採取された試料は薄片にし、試料中に含まれる炭質物のラマン分光分析を行った。分析に用いたラマン分光装置は、名古屋大学大学院環境学研究科 地質・地球生物学講座に設置されているThermo Scientific社製のNicolet Almega XRを用いた。分析条件及び温度見積り方は、炭質物ラマン温度計について報告したAoya et al. (2010)に従った。

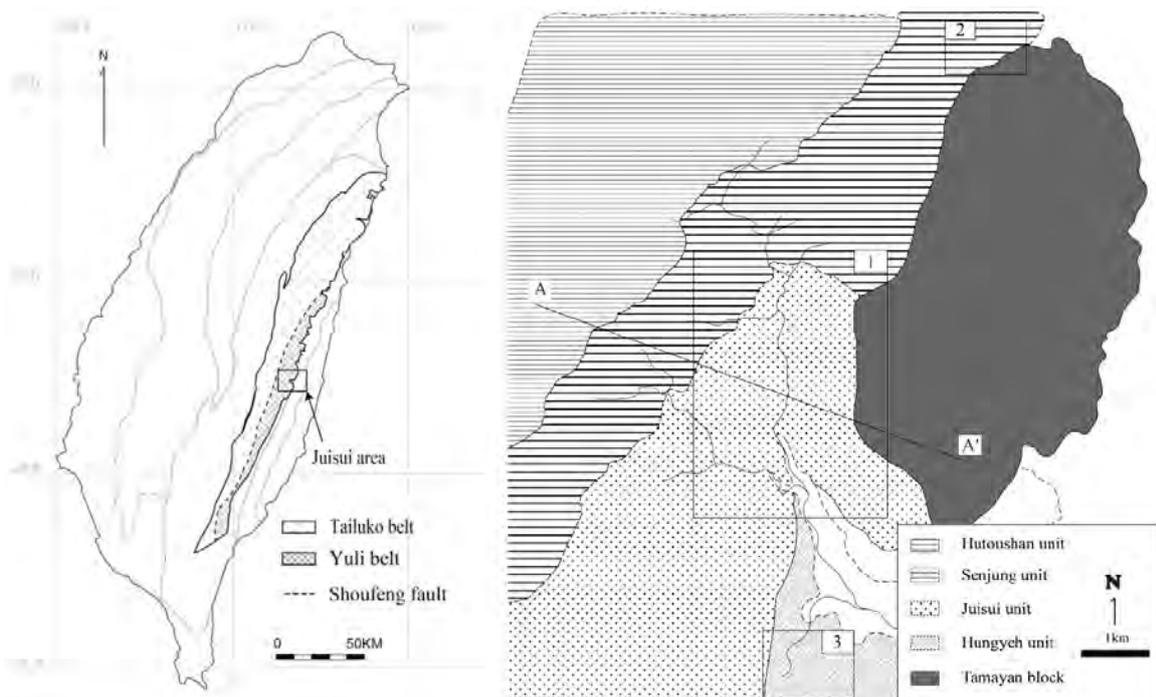


図1 台湾東部Yuli帯の分布とJuisui地域のユニット区分図

## 【研究結果】

試料は構造的上位のSenjung unitから1試料、中位のJuisui unitから11試料、下位のHungyeh Unitから3試料を分析した。構造的上位のSenjung unitと下位のHungyeh unitは同程度の見積もり温度を示し、平均値は380–400 °C程度であった。また、最低値と最高値の差は最大でも70°C程度で、試料内での大きなばらつきは見られなかった。一方、構造的中位のJuisui unitは最高値と最低値の差が100°C以上あり、ヒストグラムで見るとバイモーダルなばらつきを示すものが多数確認された。得られた温度は他の2つのユニットよりも高温を示し、最大で600°C以上を示す試料もあった。

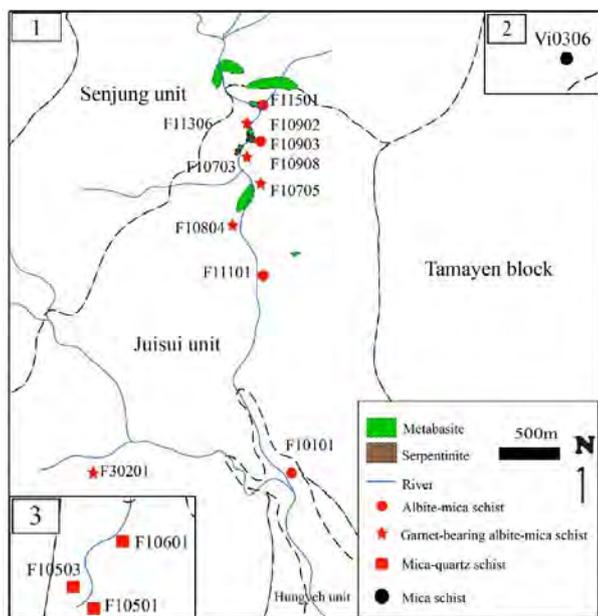


図2 試料採取地点

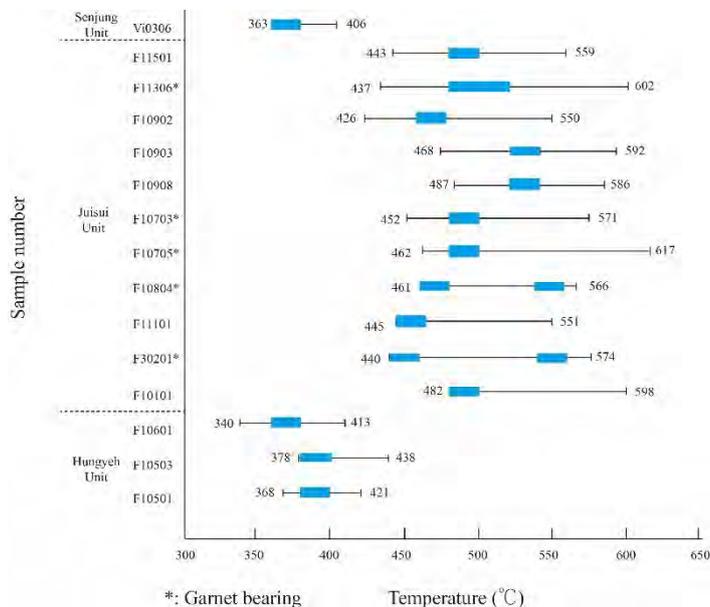


図3 見積もり温度の箱ひげグラフ

## 【考察】

Senjung unitとHungyeh unitで得られた見積もり温度は380°Cから400°C程度であり、試料内のばらつきは小さいことから、この温度がピーク温度であると解釈できる。一方、Juisui unitで得られた見積もり温度はばらつきが非常に大きく、単に平均値をとるだけでは地質学的に意味のある数字とは言えない。このJuisui unitの近くには、高変成度を経験したTectonic blockと解釈されているTamayen blockが接しており、Juisui unitが全体的に周りのunitよりも高温を示すことから、Juisui unitも高変成度を経験した可能性が示唆される。一方、見積もり温度値のばらつきが大きい原因については、碎屑性炭質物の混入が考えられるが、この仮説を検証するため、次年度に予定しているジルコンの年代測定結果と組み合わせてさらなる考察を進めていく予定である。

## 【引用文献】

- Aoya, M., Kouketsu, Y., Endo, S., Shimizu, H., Mizukami, T., Nakamura, D., Wallis, S., 2010. Extending the applicability of the Raman carbonaceous-material geothermometer using data from contact metamorphic rocks. *Journal of Metamorphic Geology* 28, 895–914.
- Keyser, W., Tsai, C.-H., Iizuka, Y., Oberhänsli, R., Ernst, W.G., 2016. High-pressure metamorphism in the Chinshuichi area, Yuli belt, eastern Taiwan. *Tectonophysics* 692, 191–202.

## 【成果発表】

該当なし

プラズマ圏質量密度の長期モニタリングと経度比較研究  
Long-term monitoring and study of meridional structure of  
plasma mass density in the plasmasphere

尾花由紀・大阪電気通信大学・工学部基礎理工学科

## 研究概要

ULF帯の地磁気脈動には、磁力線共鳴振動の性質を持つものがあり、この共鳴振動数を観測することで、磁気圏内のプラズマ質量密度を推定することができる。本研究では、これから迎える太陽極小期に向けてプラズマ質量密度の長期モニタリングを行うことを目的に、ニュージーランドで地磁気多点観測を行った。また、ニュージーランド、ヨーロッパ、アメリカ経度帯の地磁気観測データを解析して磁気嵐中のプラズマ圏密度変化を調査し、Ionosphere Plasmasphere Electrodynamics (IPE) Modelの計算結果と比較した。

## 研究方法

申請者は2010年度より名古屋大学太陽地球環境研究所「地上ネットワーク観測大型共同研究」等の助成を受け、ニュージーランドにMiddlemarch (MDM, 45.6°S, 170.1°E, L=2.78), Te Wharau (TEW, 41.2°S, 175.8°E, L=2.19)の地磁気観測点を構築してきた。この地域には、MDM, TEWのほかにINTERMAGNET観測点であるEyrewell (EYR, 43.4°S, 172.4°E, L=2.47)がある。この3点のデータを解析し、磁力線共鳴周波数を検出、波動方程式を解くことで、この経度帯のL=2.3-2.6の赤道面プラズマ質量密度を推定することができる。

2017年度はIPE modelの磁気圏側の観測結果との比較研究として、2013年3月及び2015年3月に発生した2つのSt. Patrick's Day磁気嵐イベント、および2017年9月の磁気嵐イベントについてプラズマ圏の変動を調査した。解析にはニュージーランドの地磁気データのほか、北米、ヨーロッパの地磁気データ、あけぼの衛星PWS観測データ、Van Allen Probes衛星のEMFISIS観測データ、HOPE観測データ、ARASE衛星PWE-HFAデータ、MGFデータ等を合わせて解析し、プラズマ圏プラズマの各イオン種が磁気嵐各相で再配置されていく様子を調査した。

## 研究結果とまとめ

2013年3月及び2015年3月に発生した2つのSt. Patrick's Day磁気嵐イベントでは、プラズマ圏のerosion, plume構造の形成が確認され、さらにplumeが昼側磁気圏界面へと輸送される様子も観測から確認された。一方、IPEモデルの計算結果では、plumeとそれに対応するTongue of ionizationが再現された。またこれらの構造形成に関する磁気圏・電離圏結合過程は対流電場によるExB driftによる輸送が主であることが確認された。

次のステップとして、最近注目が集まる2017年9月の磁気嵐イベントを解析した。観測結果としては、主にARASE衛星のPWE-HFAデータによ

って、昼側磁気圏で深部(L<1.6)までのerosionが観測された。またplume構造も確認された。これに対しIPEモデルの計算結果では、Weimer potential modelを導入して計算したところ、Cross Polar Cap Potentialは最大で350kVという大きな値を示したにもかかわらず、上記の深いerosionは再現できなかった。Weimer potential modelでは電場の分布が高緯度に限られるため、低緯度への電場侵入を人為的に作って再計算すると、夜側磁気圏ではL $\sim$ 1.6付近までのerosionが再現されたが昼側ではこのようなerosionを起こせなかった。今後、過遮蔽電場、SAPS等の影響を組み込んで研究を進める予定である。

## 成果発表

### 原著論文

1. Mark A. Clilverd, Craig J. Rodger, James B. Brundell, Michael Dalzell, Ian Martin, Daniel H. Mac Manus, Neil R. Thomson, Tanja Petersen, Yuki Obana, 'Long-Lasting Geomagnetically Induced Currents and Harmonic Distortion observed in New Zealand during the 7-8 September 2017 Disturbed Period', submitted for Space Weather (under review).

### 学会発表

1. Yuki Obana, Naomi Maruyama, Masahito Nosé, Ayako Matsuoka, Mariko Teramoto, Reiko Nomura, Akiko Fujimoto, Yoshimasa Tanaka, Manabu Shinohara, Yoshizumi Miyoshi, Iku Shinohara, 'Study of plasmaspheric refilling using data from the ERG-MFG, the VAPs-EMFISIS, the ground-based magnetometers and the IPE model (Oral)', 第142回地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会, 2017年10月15日～10月19日, 京都大学宇治キャンパス, 京都.

2. Naomi Maruyama, George H Millward, Robert Oehmke, Cecelia DeLuca, Raffaele Montuoro, Tzu-Wei Fang, Timothy J Fuller-Rowell, Mariangel Fedrizzi, Joseph A Schoonover, Rashid A Akmaev, Houjun Wang, Zhuxiao Li, Valery Yudin, Weiyu Yang, Mark Iredell, Samuel Trahan, Anthea J Coster, Yuki Obana, Michael Denton, Michael G Henderson, Jacques Middlecoff, Mark Goveatt, Rodney A Viereck, Philip G Richards and Adam Kubaryk, 'Evaluating the Impact of Whole Atmosphere Coupling on Storm Time Response in the Ionosphere and Plasmasphere (Oral)', American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, 11-15 Dec, 2017, New Orleans, USA.

3. Yuki Obana, Naomi Maruyama, Nosé Masahito, Ayako Matsuoka, Mariko Teramoto, Reiko Nomura, Akiko Fujimoto, Yoshimasa Tanaka, Manabu Shinohara, Yoshiya Kasahara, Shoya Matsuda, Atsushi Kumamoto, Fuminori Tsuchiya, Miyoshi Yoshizumi and Iku Shinohara, 'The Study of the plasmaspheric refilling using the data from the ERG, the VAPs, the ground-based magnetometers and the IPE model (Oral)', American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, 11-15 Dec, 2017, New Orleans, USA.

## 赤道域地磁気変動の稠密観測に基づく太陽地球環境変動モニタリングシステムの開発

### Development of Solar-terrestrial monitoring system based on the dense EEJ observation

吉川 顕正、九州大学・国際宇宙天気科学・教育センター

磁気赤道領域は太陽風-磁気圏-電離圏-大気圏結合系の終着点であり、主磁場が電離層と完全に平行となる幾何学的構造に起因する電気電導度の局所的増加のため、宇宙天気変動の様々な様相が赤道ジェット電流(以下、EEJ)の異常増幅・減衰成分として観測される特異な領域として知られている。しかしながらこうした、EEJ変動を確率、或いは定量的に捉え、太陽地球環境変動監視に役立てようとする試みはこれまで殆ど行われていなかった。

本研究では、EEJ変動から太陽地球環境変動の特性を定量的に捉える事を目的として、(1) EEJの全球変動、及び緯度方向の稠密構造変動を捉える為の全球磁気赤道観測網の構築、(2) EEJの総電流量、緯度方向微細構造、擾乱時強度、振幅の経度依存性等の基本特性を定量化する新型 EE-INDEXの開発、(3) EE-indexの短期・長期変動成分の詳細解析による、「PC指数では捉えきれない磁気圏最深部まで侵入してくる太陽風擾乱」、「IMF反転に伴う極冠電位の急変と低緯度地域の磁場の増減」、「放射線帯電子フラックス変動の要因である太陽風構造特性を推定するプロキシとしての活用評価」、「磁気嵐に起因するプラズマバブルトリガーパターン」、「電離圏ダイナミクスに寄与する短期大気圏擾乱の発現特性」、「EEJと結合した太陽活動ならびに大気圏運動の長周期変動特性」等を定量化・可視化する太陽地球環境インデックスの開発、(4)赤道データ統合環境の構築により、(1)で取得されたデータを準リアルタイム公開し、(2),(3)にあげた本研究を促進する環境を整え、更にそれらの成果を既存の分野横断的大型データベースに統合化する為の調査研究を実施している。

今年度は、南米ペルー域の稠密観測網及びそのリファレンスデータを与えるオーストラリアの地磁気観測点を整備するとともに、ペルーのワンカイヨにFM-CWレーダーを設置、テスト稼働までこぎつけ、EEJの動態を精査するための環境を整えた。構築された南米域の観測網データから、磁気嵐の初層、主相、回復層におけるEEJのLT分布及び緯度方向の2次元構造の可視化に成功した。特に主相、回復層における特異性は著しく、EEJは磁気赤道に於いて午前中、午後にダブルピークを有するLT分布を示すとともに、経度方向には、磁気赤道に向けて最も振幅が小さくなるすり鉢構造を持つ事が初期結果として得られた。この結果は現在検証中である。また、プラズマバブルの抑制要因と何らかの関係があると思われるCEJについて調査したところ、CEJの要因が月潮汐と関連している場合はプラズマバブルの発生頻度を抑え込むが、その要因がSporadic E層の出現であれば、プラズマバブルの発生について影響がないことを明らかにした。

## 論文リスト

1. Yoshikawa A., and R. Fujii (2018), Earth's Ionosphere: Theory and Phenomenology of Cowling Channels, in *Electric Currents in Geospace and Beyond* (eds A. Keiling, O. Marghitu, and M. Wheatland), John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, N.J., doi: 10.1002/9781119324522.ch25
2. Seki, K., Miyoshi, Y., Ebihara, Y., Katoh Y., Amano T., Saito S., Shoji M., Nakamizo A., Keika K., Hori T., Nakano S., Watanabe S., Kamiya K., Takahashi N., Omura Y., Nose ., Mei-Ching Fok., Tanaka T., Ieda A., and Yoshikawa A., (2018), *Earth Planets Space* (2018) 70: 17. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0785-9>
3. ZZ Abidin, MH Jusoh, M Abbas, A Yoshikawa (2018), Application of solar quiet (Sq) current in determining mantle conductivity-depth structure in Malaysia, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.01.019> in press.
4. ZZ Abidin, MH Jusoh, M Abbas, OS Bolaji., and A. Yoshikawa (2018), Features of the inter-hemispheric field-aligned current system over Malaysia ionosphere, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.01.012>,
5. Kasran F.A.M., Jusoh M.H., Yoshikawa A., Radzi Z.M., MAGDAS/CPMN Group (2018), The Time Derivative of the Horizontal Geomagnetic Field for the Low Latitude MAGDAS Langkawi Station for the Estimation of Geomagnetically Induced Current. In: Suparta W., Abdullah M., Ismail M. (eds) *Space Science and Communication for Sustainability*. Springer, Singapore, [https://doi.org/10.1007/978-981-10-6574-3\\_6](https://doi.org/10.1007/978-981-10-6574-3_6)
6. Yagova, N.V., Heilig, B., Pilipenko, V.A, Yoshikawa A., Nosikova N.S., Yumoto K., and Reda J. (2017), *Earth Planets Space* 69: 61, <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0647-x>
7. Imajo, S., A. Yoshikawa, T. Uozumi, S. Ohtani, A. Nakamizo, and P. J. Chi (2017), Application of a global magnetospheric-ionospheric current model for dayside and terminator Pi2 pulsations, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 122, 8589–8603, doi:10.1002/2017JA024246.
8. S.A. Bello, M. Abdullah, N.S.A. Hamid, A. Yoshikawa, A.O. Olawepo (2017), Variations of B0 and B1 with the solar quiet Sq-current system and comparison with IRI-2012 model at Ilorin, *Advances in Space Research*, Volume 60, Issue 2, 2017, Pages 307-316, ISSN 0273-1177, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.02.003>.
9. R. A. Marshall, A Kelly, T Van Der Walt, A Honecker, C Ong, D Mikkelsen, A Spierings, G Ivanovich, A Yoshikawa (2017), "Modeling geomagnetic induced currents in Australian power networks," in *Space Weather*, vol. 15, no. 7, pp. 895-916, July 2017. doi: 10.1002/2017SW001613
10. D. Baishev, S. Samsonov, A. Moiseev, R. Boroev, A. Stepanov, V.K. Vladi, A. Korsakov, A. Toropov, A. Yoshikawa, K. Yumoto (2017), Monitoring and investigating space weather effects with meridional chain of instruments in Yakutia: a brief overview, *Solnechno-Zemnaya Fizika*, 3, (2), 27-35.
11. A Moiseev, D Baishev, V Mishin, T Uozumi, A Yoshikawa, A Du (2017), Features of formation of small-scale wave disturbances during a sudden magnetospheric compression, *Solnechno-Zemnaya Fizika* 3 (2), 36-44
12. W N I Ismail , N S A Hamid, M Abdullah, A Yoshikawa and T Uozumi (2017), Longitudinal Variation of EEJ Current during Different Phases of Solar Cycle, *J. Phys.: Conf. Ser.* 852 012019
13. N S A Hamid, H Liu T Uozumi<sup>3</sup>, A Yoshikawa and N M N Annadurai (2017) Peak time of equatorial electrojet from different longitude sectors during fall solar minimum , *J. Phys.: Conf. Ser.* **852** 012015
14. Hui, D., D. Chakrabarty, R. Sekar, G. D. Reeves, A. Yoshikawa, and K. Shiokawa (2017), Contribution of storm time substorms to the prompt electric field disturbances in the equatorial ionosphere, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 122, 5568–5578, doi:10.1002/2016JA023754.
15. SA Bello, M Abdullah, NSA Hamid, A Yoshikawa, AO Olawepo, Variations of B0 and B1 with the (solar quiet Sq-current system and comparison with IRI-2012 model at Ilorin, *Advances in Space Research*, 2017, accepted
16. Wang, G. Q., M. Volwerk, T. L. Zhang, D. Schmid, and A. Yoshikawa (2017), High-latitude Pi2 pulsations associated with kink-like neutral sheet oscillations, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 122, 2889–2899, doi:10.1002/2016JA023370.
17. Nurul Shazana Abdul Hamid, Wan Nur Izzaty Ismail and Akimasa Yoshikawa, Latitudinal Variation of Ionospheric Currents in Southeast Asian Sector, *Advanced Science Letters* 23(3):1444-1447 · February 2017, DOI: 10.1166/asl.2017.8358.
18. Nurul Shazana Abdul Hamid, Wan Nur Izzaty Ismail and Akimasa Yoshikawa , Longitudinal Profile of the Equatorial Electrojet Current and Its Dependence on Solar Activity, *Advanced Science Letters* 23(2):1357–1360 · February 2017, DOI: 10.1166/asl.2017.8372.
19. MO XiaoHua, ZHANG, DongHe, Larisa GONCHARENKO, ZHANG ShunRong, HAO YongQiang, XIAO Zuo, PE JiaZheng, Akimasa YOSHIKAWA, and CHAU HaDuyen, Meridional movement of northern and southern equatorial ionization anomaly crests in the East-Asian sector during 2002–2003 SSW, *Science China Earth Science* · February 2017, DOI: 10.1007/s11430-016-0096-y
20. Yi Zhang, Z. Zeng, L. Yao, Y. Yokota, Y. Kawazoe, and A. Yoshikawa (2017), Skin Effect of Rotating Magnetic Fields in Liquid Bridge, *Journal of Magnetism* 22(2):333-343, DOI10.4283/JMAG.2017.22.2.333.

## 第24太陽活動期における極域から低緯度までの大気中宇宙線生成核種の濃度変動の観測研究

### Observation of cosmogenic nuclides at high, mid, and low latitude sites during the 24th solar cycle

門叶冬樹、山形大学・理学部

#### 研究目的

宇宙線が地球大気と衝突して大気中に生成する宇宙線生成核種は、2つの重要な役割を担っている。1) 宇宙線生成核種は、生成の閾値が約10 MeVであるため低エネルギーの宇宙線に対するレスポンスを持っており、中性子モニターよりも低エネルギーの太陽モジュレーションを調べることができる。2) 宇宙線生成核種は、大気中の成層圏および対流圏で生成されエアロゾルに付着し、あるいは気体となり地表に降下するため、大気の流れ・拡散等の運動をモニターでき地球大気への太陽活動の影響を調べることができる。長い半減期のC-14やBe-10等の宇宙線生成核種は、過去の宇宙線強度変動、太陽活動、そして地球環境変動の探索に重要なツールである。一方、宇宙線、太陽活動、そして地球環境についてのデータが整っている現代において、短い半減期53日をもつ宇宙線生成核種Be-7の詳細な観測は、3つの要因それぞれの変動関係を明らかにする上で重要である。さらに過去の太陽フレア等の探索を精密化するためのフィードバックともなり重要である。

本研究は、第23太陽活動期における観測の蓄積に基づき、極めて特徴的な第24太陽活動期の停滞期から上昇期、そして下降期の宇宙線生成核種の大気中濃度変動を地球規模により連続観測するものである。これにより太陽活動の地球環境へおよ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大きな意義がある。中緯度（山形）と高緯度（アイスランド）での宇宙線生成核種Be-7の長期観測結果および低緯度（タイ、バンコク）で得られた2017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バンコク（北緯13.4°）に各々ハイボリウムエアサンプラー（HV1000F、HV500R、吸引量500～1000 L/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

図1は、高緯度（アイスランド）、中緯度（山形）および低緯度（バンコク）の大気中Be-7濃度、太陽黒点数（SSN）、Thule（北緯76.5°cut-off rigidity 0 GV）での地上中性子強度の2000年から2017年10月までの年変動を示している。本継続観測は、第23太陽活動期の後半から第24太陽活動期をカバーしている。第24太陽活動期のピーク付近（2012～2014）の黒点数は第23太陽活動期（2000～2002）に比べて43%減少

しているのに対して山形のBe-7濃度は同時期において42%の増加を示した。二つの太陽活動周期のBe-7濃度の変動は、太陽黒点数の変動と逆相関で良い一致を示しており大気中宇宙線生成核種の地表濃度は異なる太陽活動周期の変動を表していることが分かる。

また、第23期から第24太陽活動期の周期長を12年とすると高緯度のアイスランドの第24太陽活動下降期（2016～2017）のBe-7濃度は、第23期（2004～2005）に対して23%増加を示しており、アイスランドにおいても異なる太陽活動期の太陽活動の変動を表していると考えられる。

一方、バンコクのBe-7濃度は、2014年から下降しており山形およびアイスランドと異なった年変動を示している。バンコクのガラスろ紙試料では地中から大気中に拡散しているRn-222の娘核種である大気中のPb-210濃度もBe-7濃度と同時に測定を行っている。図2は、バンコクにおけるBe-7濃度、Pb-210濃度、降雨量、およびPb-210濃度で正規化したBe-7濃度の各年平均の変化を各々示している。2017年のBe-7濃度およびPb-210濃度は2015年に対して各々11.2%、22.4%の減少を示しているが降雨量は61.5%の増加を示した。降雨がwash-outのようにエアロゾルを除去し、バンコクの地表Be-7濃度およびPb-210濃度に影響を与えていることは確かである。しかし、Be-7とPb-210では影響度が異なっておりエアロゾルの粒径や高度分布と雨の成長高度が関係していると考えられる。2017年のBe-7/Pb-210の濃度比は、2015年に対して7.6%増加しており中緯度（山形）の3年間での増加9.3%に近い値を示している。

第24太陽活動期の11年周期は、ここ数年以内で極小になるとと思われる。北半球3地点での継続観測は、これまでの観測データと比較して大気中宇宙線生成核種の地球規模での太陽活動への応答の詳細を調べるために極めて重要となる。

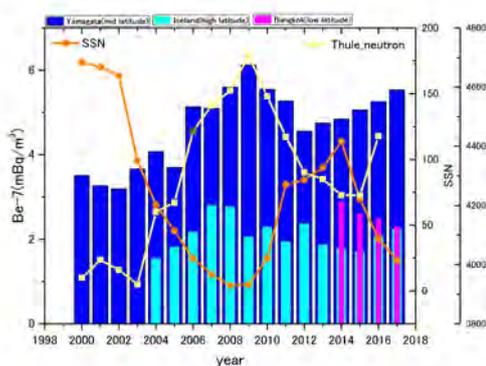


図1 山形、アイスランドおよびバンコクでのBe-7濃度の年変動

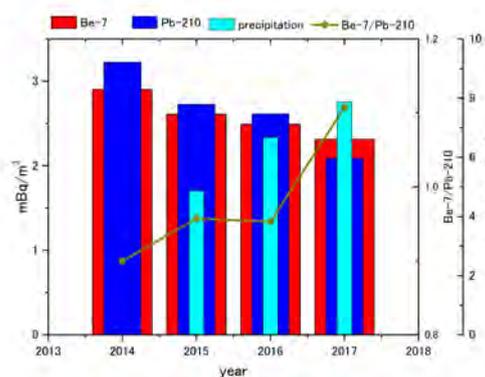


図2 バンコクでのBe-7濃度、Pb-210濃度、降雨量およびBe-7/Pb-210の年変動

# 北極域総合観測と大気圏・電離圏統合モデル・シミュレーションによる極域熱圏・電離圏変動の研究

## Studies of variations of the polar thermosphere and ionosphere with multi-instrument observations and GCM simulations

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)。下層大気起源の熱圏変動に関しては、ナトリウム (Na) ライダー観測を中心に大気潮汐や大気重力波散逸に起因すると考えられる Na 密度変動、温度変動の観測に成功している(Nozawa et al., JGR 2014; Takahashi et al., AnGeo 2014, 2015; JGR 2017)。

これまでの研究経緯を踏まえ、様々なタイプの極冠域へのエネルギー・運動量流入の形態や大気上下結合過程を観測的に理解する (EISCAT レーダーを中心とした北極での総合観測: EISCAT レーダーに加えて、Na ライダーや MF レーダー観測などを実施し、太陽風、地磁気等のオープンなデータを活用する)。また、ロングイアビン (北緯 78.2 度, 東経 16.0 度) とトロムソ (北緯 69.6 度, 東経 19.2 度) での電離圏変動は地磁気静穏時・擾乱時ともに大きく異なることがこれまでの観測から明らかになっているが、その成因を明らかにする。上記総合観測に加え、極域へのエネルギー流入と熱圏・電離圏変動との関係を GCM シミュレーションにより精査する。

本研究課題における GCM シミュレーションは、名古屋大学宇宙地球環境研究所が中心となって進めている PSTEP プロジェクトと密接に関連し、太陽活動が地球大気の組成変動やエネルギー収支に及ぼす影響を定量的に評価することを目指している。本申請代表者は、PSTEP プロジェクトの科研費(課題名: 中間圏・下部熱圏 H<sub>2</sub>O・HO<sub>x</sub> 光化学モデルの開発研究)に採択されており、科研費研究課題と ISEE 共同研究課題とが連携することにより、さらに広範囲なテーマについて国際共同研究を展開しようという試みでもある。

本研究課題はまた、VarSITI プログラムにおける「太陽活動が超高層・中層・下層大気に与える影響の解明」、ISWI と密接な関係を有する。すなわち、本研究課題では、現在特異な状況にある太陽活動と超高層大気変動との関係を精査し、太陽-地球システムに内在するエネルギー結合過程に関する物理機構の解明を目指すものである。

## 研究方法 (使用した共同研究利用装置・施設等を含む)

2つのサイト(トロムソ, ロングイアビン)での EISCAT レーダー, 及び Na ライダー等により電離圏, 熱圏大気温度変動を観測する。これらの観測に基づき, 広範な緯度領域での昼側電離圏の高速プラズマ流と加熱について定量的に理解する。また, GCM シミュレーション等により, 電離圏変動に伴う熱圏変動のメカニズムについて理解する。

## 研究結果

### 2017年3月27日の EISCAT レーダー観測データの解析

2017年3月27日には磁気嵐が発生し,  $K_p \sim 5-6$  となった。地磁気擾乱時のデータは当研究グループでの観測例は2012年以來であり, 極冠域とオーロラ帯での電離圏擾乱の特徴を調べる上で極めて有効と考えている。特に昼側電離圏への高エネルギー粒子の降り込みを示す電子密度増大が高度 70 km においても見られていたことは特筆すべき結果である。当研究グループで開発を進めている数値モデル(降下粒子による種々の化学過程モデル)計算によれば, 数 100 keV から 1 MeV 程度のエネルギーを持った粒子の降り込みがあったと考えられる。

### 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, 2018年3月20日, 21日の7:00-13:00 UTに EISCAT 特別実験を実施した。太陽活動は極小期へ入っており, 日々の F10.7 インデックスは2月20日から70前後でほぼ一定となっていた。観測日の地磁気活動は,  $K_p=1\sim 2$  であり, 地磁気静穏時であった。3方向にビームを固定して ESR(32m: 仰角 30度方向, 42m: 沿磁力線方向), EISCAT UHF レーダー(仰角 30度方向)の同時観測を実施した。特に21日の観測時間帯においては, 太陽風磁場  $B_z$  成分がほぼ北向きのまま維持されており, 通常とは異なった極域へのエネルギー流入が生じていたと考えられる。緯度 80度付近において, イオンドリフト速度の周期的な変動(10~20分周期)や, 大きなシア(イオン運動の向きの反転)が見られた。

### Na ライダー観測

EISCAT レーダー観測に加えて, 下層大気と熱圏・電離圏との結合過程について調べるために, トロムソにて Na ライダー観測を実施した。これまで取得された Na ライダー観測データを用いて, 高度 80-110 km における鉛直風の振る舞いを調べた。12時間以上データが取得されている80晩のデータを解析し, 16晩について顕著な鉛直風を検出した。オーロラ活動の影響, 大気波動の影響等を踏まえ, 現在の生成過程の解明を進めている。

## 本研究課題に関連した主な成果発表

### 論文発表

- Takahashi, T., K. Hosokawa, S. Nozawa, T. T. Tsuda, Y. Hiraki, J. Sakai, Y. Ogawa, M. Tsutsumi, H. Fujiwara, T. D. Kawahara, N. Saito, S. Wada, T. Kawabata, and C. Hall (2017), Depletion of mesospheric sodium during extended period of pulsating aurora, *J. Geophys. Res.*, 122, doi: 10.1002/2016JA023472.
- Tao, C., H. Jin, H. Shinagawa, H. Fujiwara, Y. Miyoshi, Effect of intrinsic magnetic field decrease on the low- to middle-latitude upper atmosphere dynamics simulated by GAIA (2017), *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1002/2017JA024278.
- Miyoshi, Y., D. Pancheva, P. Mukhtarov, H. Jin, H. Fujiwara and H. Shinagawa (2017), Excitation mechanism of non-migrating tides, *J. Atmos. Terr-Sol. Phys.*, 156, 24-36, doi: 0.1016/j.jastp.2017.02.012.

### 学会発表等

- 野澤 悟徳・小川 泰信・藤原 均・川原 琢也・津田 卓雄・斎藤 徳人・和田 智之・高橋 透・堤 雅基・川端 哲也・Hall Chris・Brekke Asgeir, Vertical motion of the neutral atmosphere above Tromsø, 地球惑星科学関連学会連合大会 (JpGU-AGU Joint Meeting), 5月, 幕張, 2017.
- 小川 洋平・野澤 悟徳・津田 卓雄・川原 琢也・小川 泰信・藤原 均・斎藤 徳人・和田 智之・高橋 透・堤 雅

- 基・川端 哲也・Hall Chris・Brekke Asgeir, トロムソナトリウムライダーを用いた北極域 SSL の統計解析, 地球惑星科学関連学会連合大会 (JpGU-AGU Joint Meeting), 5 月, 幕張, 2017.
- 藤原 均・野澤 悟徳・小川 泰信・片岡 龍峰・三好 勉信・陣 英克・品川 裕之, Magnetosphere-ionosphere-thermosphere-middle atmosphere coupling in the polar region, 地球惑星科学関連学会連合大会 (JpGU-AGU Joint Meeting), 5 月, 幕張, 2017.
- 埜 千尋・陣 英克・品川 裕之・三好 勉信・藤原 均・松村 充, GAIA の極域電場モデル改良, 地球惑星科学関連学会連合大会 (JpGU-AGU Joint Meeting), 5 月, 幕張, 2017.
- Satonori Nozawa, Takuo Tsuda, Yasunobu Ogawa, Hitoshi Fujiwara, Takuya Kawahara, Norihito Saito, Satoshi Wada, Toru Takahashi, Masaki Tsutsumi, Tetsuya Kawabata, Chris Hall, and Asgeir Brekke, Vertical motion of the neutral atmosphere in the polar MLT region, EISCAT international symposium 2017, May 26-30, Tokyo, 2017.
- Hitoshi Fujiwara, Satonori Nozawa, Yasunobu Ogawa, Yasunobu Miyoshi, Hidekatsu Jin, Hiroyuki Shingawa, Ryuho Kataoka, and Huixin Liu, Studies of disturbances in the polar ionosphere and thermosphere with the EISCAT radar system and whole atmosphere GCM, EISCAT international symposium 2017, May 26-30, Tokyo, 2017.

# 宇宙線で探る太陽風擾乱の空間構造

Probing the structure of the solar wind disturbance by galactic cosmic rays.

小島浩司・愛知工業大学・工学部・土木工学科

## 研究目的

太陽表面の大規模な爆発現象によって、太陽フレアやコロナ質量放出 (CME) 等の現象が起き、惑星間空間に放出された CME はその前面に磁気衝撃波を形成しつつ惑星間空間を伝搬していく。CME はその内部に激しい磁気擾乱を伴う磁気雲があると考えられる。また、太陽風には太陽コロナの磁場構造に応じて太陽風速度が激しく変化する領域が存在する。この領域は太陽の自転とともに回転するので共回転相互作用領域 (CIR: corotating interaction region) と呼ばれている。この激しい速度変化は惑星間空間内に複雑な磁気構造を生じさせ、激しい速度変化により形成された磁気衝撃波とともに磁気擾乱を伴う CIR 磁気雲を形成する。このような磁気雲が惑星間空間を伝播する過程で、周辺の惑星間空間磁場 (IMF) に影響をおよぼし、太陽圏に侵入した銀河宇宙線に異方性を生ずると考えられる。銀河宇宙線の異方性を連続的に観測することで、太陽風のプラズマ磁気雲の空間的構造と IMF に関連する諸現象の理解につながり、また宇宙天気にも寄与することになると考えられる。

宇宙線強度の空間変動を「異方性」として観測することによって、直接的に惑星間空間の磁場構造を探ることができる。本研究では、方向決定性能を有する多方向ミュオン望遠鏡と世界各地に設置されている宇宙線中性子検出器を用いて、地球近傍の IMF 磁場構造に感度のある比較的エネルギーの低い宇宙線を観測する。今後、さらに進んだ研究として、人工衛星による観測データと惑星間空間シンチレーション (IPS) のデータを組み合わせた解析を今後行っていきたい。

## 研究方法

本研究では、多方向ミュオン望遠鏡を用いて、大気ミュオンを計測し、間接的に一次宇宙線の強度変動を観測する。各望遠鏡はそれぞれインド・Ooty の GRAPS-3 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。これらの望遠鏡に加えて、南北両極域を含む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 10 倍以上の検出面積に相当する望遠鏡としての観測が可能となる。観測で得られた宇宙線強度変動と衛星による惑星間空間プラズマの物理量 (太陽風速度等) の変動を比較して、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で得られる二次元宇宙線強度分布と、IPS データ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て、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

2017 年 3 月 6 日～3 月 20 日に本研究代表者愛知工業大学小島とともに大阪市立大学の川上と中部大学の柴田がインドに渡航した、その際に、タタ基礎研究所において、GRAPES-3 インドメンバーと将来の Ooty における GRAPES-3 のミュオン測定装置の拡張とミュオン観測のための光検出素子の半導体化の可能性につ

いて意見交換をおこなった。2017年度中に小島・大嶋・柴田の3名が数回名古屋大学・徳丸研を訪問し、太陽圏内の銀河宇宙線の伝搬過程とCMEに関する研究を行う上での意見を求め、IPSデータと宇宙線データとを関連させた解析の可能性について議論した。今後、上記の議論をふまえ、IPS研究者の支援のもとに宇宙線密度の空間分布とCMEの空間的ひろがりの関連性についての解析を計画している。

### GRAPES-3の維持管理および拡張に関する活動

2016年度に引き続き、2017年7月から2018年3月まで、大阪市立大学の林嘉夫がタタ基礎研究所の客員スタッフとしてインドOotyに長期滞在し、ミュオン検出器建設作業の指導をおこなった。2018年3月現在で約3700本の比例計数管がほぼ完成しており、2018年8月には拡張されたミュオンステーションが稼働する予定である。また2018年3月3日から3月13日まで中部大学の嶋がOotyに滞在して各ステーションの仕上げ作業と比例計数管の特性検査を行った。

### 研究成果

本研究に関連する研究成果として、2015年6月21日:太陽黒点領域NOAA 2371で大規模なCME発生し、それに伴って生じた宇宙線フォルブッシュディクリーズ中の宇宙線強度の異常増加の観測に関して査読論文が2016年に出版された。しかしその結果に対して世界の様々グループからの批判があり、その批判が国際会議等の場で公表されたのでそれらの批判に反論して先の査読論文の結果の妥当性を主張する論文を投稿してアクセプトされた。また"GRAPES-3実験によって測定された、ミュオン強度の大気温度依存性に関して解析を行い、論文としてパブリッシュした。

#### 【日本物理学会・その他学会発表】

1. 「大面積高精度 muon 望遠鏡による方位別宇宙線強度変動の研究(19)」  
小島浩司、柴田祥一、大嶋晃敏他、日本物理学会 2017年秋季大会、14aU31-4
2. 「GRAPES-3 ミュオン検出器の拡張と新型検出器の計画について」  
大嶋晃敏、柴田祥一、小島浩司他、日本物理学会 第73回年次大会(2018)、22aK308-11
3. 「大面積高精度 muon 望遠鏡による方位別宇宙線強度変動の研究(20)」  
小島浩司、柴田祥一、大嶋晃敏他、日本物理学会 第73回年次大会(2018)、22pK308-5
4. 「銀河宇宙線の異方性と太陽風速度」小島浩司他、平成29年度ISEE研究集会－太陽圏宇宙線シンポジウム
5. 「GRAPES-3 ミュオン検出器拡張の進捗報告」大嶋晃敏他、平成29年度ISEE研究集会－太陽圏宇宙線シンポジウム

#### 【投稿論文】

1. K.P Arunbabu, S.K. Gupta, A. Oshima, S. Shibata, H. Kojima et al, "Dependence of the muon intensity on the atmospheric temperature measured by the GRAPES-3 experiment", et al "Astroparticle Physics, Vol.94, p.22-28(2017)
2. P.K. Mohanty, S.K. Gupta, A. Oshima, S. Shibata, H. Kojima et al., "Was the cosmic ray burst detected by the GRAPES-3 muon telescope on 22 June 2015 caused by a transient weakening of the geomagnetic field or by an interplanetary anisotropy?" Physical Review D, 27 March 2018, accepted,

## ヨーロッパ中緯度での地上大気光イメージング観測網の構築

### Development of an airglow imaging network in Europe

鈴木臣 愛知大学・地域政策学部

下層大気の大気擾乱で発生する大気重力波は、運動量を保存しながら上方へと伝搬し、超高層大気の下端である中間圏・下部熱圏 (MLT: 80~120 km) で崩れていく。この時、運動量を解放し MLT 大気を加熱・加速させることで地球規模の大気大循環の形成に貢献する。また一部の波動は、より高高度領域 (熱圏・電離圏) へ侵入し、様々なプラズマ擾乱の種になっていると考えられる。MLT における大気重力波は、大気の上下層の力学的なつながりを議論する上で重要な意味を持つ。本研究では、これまで観測空白領域であった北欧における大気波動の統計的描像を得るとともに、極域気象起源の大気波動が中・低緯度に伝搬する際の経度方向の広がりを解明することを目的として、高感度かつ低廉な大気光カメラシステムを開発し、ドイツ北部において高密度・広域大気光観測ネットワークを展開する。

2017年度は、昨年度にドイツ IAP 研究所 Juliusruh 観測サイト (54.6°N, 13.4°E) に設置したシステムと同様の観測システムを、ドイツ Kühlungsborn の IAP 研究所 (54.1°N, 11.8°E) に設置した (図1左)。これらのシステムは、中間圏界面付近 (高度 85 km) に発光層を持つ近赤外のOH 大気光 (波長 700~900 nm) と電離圏F層下部 (250 km) の酸素原子大気光 (630 nm) の2チャンネルのビデオ信号を同時に観測し、愛知大学のサーバに jpeg 画像 (4秒露光, 10秒ごと) として転送される。



図1: (左) Kühlungsborn に設置した2チャンネルカメラとコントロール系の写真。(右) Juliusruh のカメラと観測コントロール系の写真。

特に 2017 年度に自動観測プログラムの刷新により、より効率良くデータを転送することが可能になった。これまでは、観測時間を 18:00~06:00LT で固定しており (ビデオエンコーダの設定)、日の入り前や日の出後、満月期間といった背景光が強く大気光を撮像することができない時間のデータも、一旦すべてサーバに転送していた。現地のネットワーク負担の軽減と日本において解析する時間のデータを抜き出す手間、ストレージの節約のため、自動観測プログラムの内部で、月のない夜間のみデータを取得する仕様に変更した。

開発した観測プログラムは、今後の大気光観測のさらなる多地点化において、データ転送および解析の効率化の面で大きく貢献する。

また、Juliusruh 観測サイトの観測コントロール PC のため画像データの転送がおこなわれていなかったため、PC の交換作業およびシステムのメンテナンスをおこなった（図 1 右）。これら 2 点のステレオ観測により、波動構造の経度方向の広がり（およそ 600 km）とともに大気光発光層を算出することができる。現地 Kühlungsborn ではライダー観測も実施されており、大気重力波の振る舞いと超高層大気への作用をより総合的に議論する。

成果発表：

1. 鈴木臣，超高層大気イメージング観測の超多地点展開，九州大学情報基盤研究開発センターシンポジウム「HPCとIoT -観測・計測系IoTとHPCをつなぐ-」，福岡市（九州大学伊都キャンパス），2017年8月25日。
2. 鈴木臣，小型カメラによる大気光イメージング観測ネットワークの構築，気象学会2017秋季大会，札幌市（北海道大学），2017年10月31日。
3. 鈴木臣，OH大気光イメージングによる大気重力波観測，国立極地研究所集会「低廉光学機器による超高層大気ネットワーク計測に関する研究集会」，立川市（国立極地研究所），2018年2月23日。
4. 塩川和夫，鈴木臣，夜間大気光のふしぎ，幻冬舎，2018年3月20日。

## 高エネルギー電子降下領域の時空間発展の実証的研究

Observation of time and spatial evolutions of high-energy electron precipitation

土屋史紀・東北大学・大学院理学研究科

放射線帯からの高エネルギー電子の損失過程の一つとして、プラズマ波動による電子のピッチ角散乱による大気への降下が考えられている。本研究では、VLF/LF帯の標準電波観測によって高エネルギー電子(>100keV)の大気への降下現象を検出し、磁気嵐・サブストーム時の電子降下現象の時空間発展を観測的に明らかにするとともに、プラズマ波動観測との比較手段を提供する。また、高エネルギー粒子が超高層大気に及ぼす影響を明らかにする観点からも、大気圏に高エネルギー電子が降下した現場を観測できる本研究は有用である。VLF/LF帯の標準電波は世界各国で運用されており、地上と下部電離圏の間を反射し長距離伝搬する。この電波の受信信号の強度・位相の観測から、伝搬の伝搬経路上の熱圏下部・中間圏で発生した電離現象を捉えることができる。放射線帯からの高エネルギー電子の降下の他、落雷により発生する電磁パルスや太陽フレアによる電離現象を捉えることが可能で、現在、国内外9カ所で観測を実施している(ニーオルスン(ノルウェー)、ポーカーフラット(米国)、アサバスカ(カナダ)、ジガンスク(ロシア)、台南、ポンティアナ(インドネシア)、サラブリ(タイ)、名大・陸別観測所、名大・鹿児島観測所)。

2017年は8月にニーオルスンにて受信機の更新作業、12月に鹿児島にてアンテナ故障の復旧作業を実施し、各観測局で自動連続観測が実施されている。2017年3月からはあらせ衛星との同時観測キャンペーンが実施され、キャンペーン期間を中心にコーラスや電磁イオンサイクロトロン(EMIC)波に伴う高エネルギー電子降下現象の同定・解析を実施した。主な研究成果は以下の通りである。

- ・ パルセイティングオーロラ(PsA)に伴う高エネルギー電子降込みの同定  
2017年3月27日の磁気嵐中に発生したサブストーム回復相でPsAの出現時間帯に高エネルギー電子の降下現象がアサバスカ上空付近で観測された。PsAの明滅周期に同期して高エネルギー電子の降り込みが起こっていることが初めて観測的に示された(図1)。  
(研究成果：(1),(4))
- ・ EMIC(Pc1)、プロトンオーロラの発生と同期した高エネルギー電子降込み  
2017年3月22日・27日の磁気嵐中に発生したサブストーム時に、Pc1の発生と同期した高エネルギー電子の降下現象がアサバスカ上空で観測された。27日のサブストームでは、Pc1の発生と同期してアサバスカ上空では孤立プロトンオーロラ(IPA)が発生しており、高エネルギー電子の降り込みが検出されたのは、NLKから送信された24.8kHz標準電波の伝搬経路上にIPAが出現してしていた時間帯のみであった。このことから、EMICによる高エネルギー電子のピッチ角散乱が高エネルギー電子の降り込みを引き起こしたと判断できる。高エネルギー電子の降り込みには、Pc1のパール構造に同期した1分程度の時間変動現象も初めて検出された。(研究成果：(1),(2),(3))
- ・ Pc5に同期した高エネルギー電子降込み  
2017年9月7-8日の磁気嵐中のサブストームに伴い、高エネルギー電子の降下現象が検出された。Wavelet解析の結果、標準電波の振幅・位相変動の両方に約10分周期の変動が含まれており、降下電子フラックスがPc5で変調を受けていることが分かった(研究成果：(1),(5),(6))

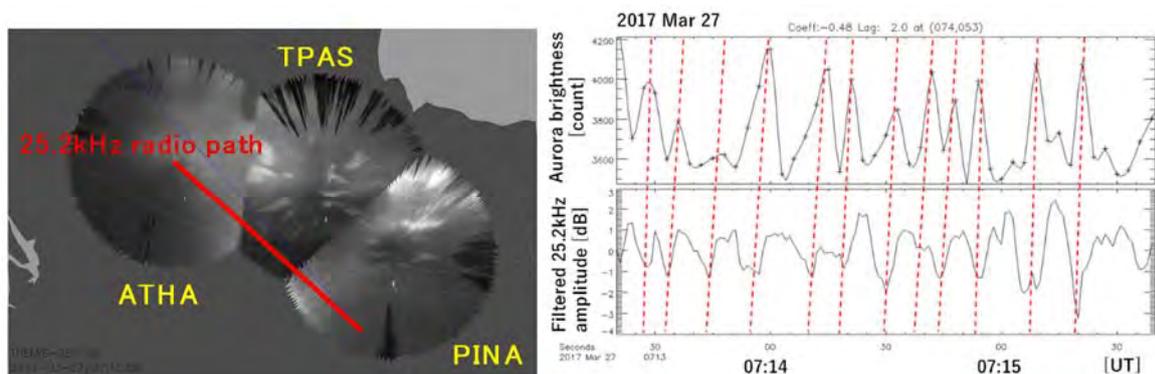


図 1 : (左)高エネルギー電子降下を検出する標準電波の伝搬経路とオーロラを観測する全天カメラ (THEMIS GBO)との位置関係。(右) TPAS の全天カメラ視野内の標準電波の伝搬経路の中心に近いピクセルでのオーロラ発光強度変化(上)と 25.2kHz の標準電波受信強度の変動との対応。

#### 成果発表

- (1) Tsuchiya, F., T. Obara, A. Hirai, H. Misawa, K. Shiokawa, Y. Miyoshi, M. Connors, Y. Ogawa, T. Sakanoi, and D. Hampton, Energetic electron precipitations at auroral and sub-auroral latitudes associated with substorm-induced injection, EMIC wave, and ULF pulsation, IAPSO-IAMAS-IAGA2017, Cape Town, 2017-08-27
- (2) Hirai, A., F. Tsuchiya, T. Obara, H. Misawa, K. Shiokawa, Y. Miyoshi, EMIC waves-driven radiation belt electron precipitation into the atmosphere with ground-based observations in the subauroral region, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Makuhari, 2017-05-20
- (3) 平井あすか, 土屋史紀, 小原隆博, 三澤浩昭, 坂野井健, 塩川和夫, 三好由純, Connors Martin, Hampton Donald, Energetic electron precipitation associated with Pc1/EMIC waves: Six-month LF-wave observations over North America, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 142 回総会・講演会, 宇治, 2017-10-15
- (4) 土屋史紀, 小原隆博, 平井あすか, 三澤浩昭, 塩川和夫, 三好由純, 小川泰信, 大矢浩代, Connors Martin, 坂野井健, Hampton Donald, Energetic electron precipitations observed by VLF/LF subionospheric propagation: ARASE and ground-based observation campaign, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 142 回総会・講演会, 宇治, 2017-10-15
- (5) Ohya, H. and F. Tsuchiya, Observations of energetic electron precipitation into the atmosphere using LF/VLF standard radio waves, The 359th Symposium for Sustainable Humanosphere "International Workshop on radio science and radio application technology", Kanazawa, 2017-10-30
- (6) 宮下拓也, LF/VLF 帯標準電波を用いた磁気嵐中の高エネルギー降下電子の観測, H 2 9 年度千葉大学工学部電気電子工学科卒業論文

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  
Solar and Space Weather Group

研究体制

代表者： 宮下幸長 (KASI)

共同研究者： Lee Jaejin (KASI)  
Hwang Junga (KASI)  
Lee Dae-Young (Chungbuk National University)  
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

1年目である本年度は、具体的に以下の2つの解析を実施し、成果発表を行った。ただし、本年度の段階では、ERG衛星のデータの較正があまり進んでなかったため、定性的な初期結果である。今後、較正済みの

高時間分解能のデータを用いてより定量的な解析を進める予定である。

#### (1) ERG衛星とSwarm衛星の連携観測によるサブストームの磁場双極子化に伴う低周波波動の解析

ERG衛星と低高度衛星であるSwarm衛星が同一かすぐ近くの磁力線にあり、ERG衛星がサブストームの磁場双極子化を観測した事例について、両衛星によるPi2やPi1脈動の比較を行った。ERG衛星の位置では、磁場双極子化の直前か開始時にPi2脈動が始まり、磁場双極子化中にPi2脈動は強まり、Pi1脈動も励起した。これらの脈動は、磁気音波よりもアルフベン波の成分が強かった。一方、Swarm衛星ではPi1脈動が観測され、ERG衛星と同様に磁気音波よりもアルフベン波の成分が強かった。Pi2脈動については、時間変動と空間変動の両方が混ざるため、注意が必要である。

これらの初期結果について、2017年9月に韓国チェジュ島で開催されたThe 3rd COSPAR Symposium "Small Satellites for Space Research"、および11月に名古屋大学宇宙地球環境研究所で開催されたKorea-Japan Space Weather Workshop 2017で発表した。

今後、ERG衛星の高時間分解能の磁場・電場データを用いてポインティングフラックスを解析し、エネルギーの観点から磁気圏-電離圏結合について考察したい。

#### (2) 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増大に関する解析

ERG衛星のデータを用いて、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増大について事例解析を行った。磁場双極子化中に、磁場は1~2分周期で振動していたが、磁場が強まった時、数10 keVから数100 keVの高エネルギーイオンと電子の両方が強まっていた。同時に、広帯域の電磁波と電子サイクロトロン周波数の下から上にかけての周波数帯の静電波が見られた。この静電波は、プラズマシートの中心付近で見られたが、そこから離れると弱いか見られなかった。

この解析結果は、2018年5月に韓国内で開催される韓国宇宙科学会2018年春学術大会、および千葉市で開催される日本地球惑星科学連合2018年大会で発表する予定である。

今後は、さらにERG衛星による粒子降り込みやポインティングフラックス等について解析し、地上オーロラ観測データとの比較も行いたい。これらの結果を基に、粒子・波動の周期的増大の磁場双極子化やサブストームの発達における役割について考察したい。

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  
Research on aerosol transportation from Asian dust hotspot region

馬場賢治 酪農学園大学・農食環境学群環境共生学類

## 1. 研究の目的

バイオエアロゾルを観測する試みによる報告は幾つか存在しているが、ウィルスなどの生物起源物質の保存を考慮した大気場の過程や状況についての論文はほとんどない。そこで、アジアダストに付着したウィルスなどの生物起源物質が大気場輸送中に保存される環境場について、つまり、アジアダストが凝結核となり、雲水、氷晶、雪などに変遷する雲物理過程を気象モデルやリモートセンシングデータから明らかにし、時空間的な拡散の変遷や多寡を理解すること、併せて、アジアダストイベント毎の経路と症状発祥地との関連も含めて評価を行い、それらを基にして、新たに現地での観測を行いながら解釈を行うことを目的として研究を進めている。バイオエアロゾルのメタゲノム解析から、アジアダスト発生地と飛来地において同定されたことから、客観性を持たせるためには更なる観測が必要である。また、生物由来物質が集積しやすい場所での飛散過程も調査する必要がある。また、輸送過程の理解も進んでいるが、現状モデルでは限界があるため、ダスト粒子を考慮した領域気象モデルを利用する必要がある。これら新たな問題・課題定義から、以下の項目を本研究の目的として行う。

### A) アジアダスト発生の理解

- ・地形・植生・水文学的に考慮したアジアダスト発生地 of 把握
- ・現地での簡易風洞実験を用いた砂塵飛散の比較

### B) アジアダスト輸送・多寡の理解

- ・ダストを考慮した気象モデルによる輸送・多寡の検証
- ・人工衛星ひまわり・CALIPSOなどを用いたアジアダストの変遷

### C) トレーサーとしての理解

- ・現地と日本での同時観測によるバイオエアロゾル・無機物質の同定
- ・飛散地域の粒子に付着した化学的・生物学的特徴の理解

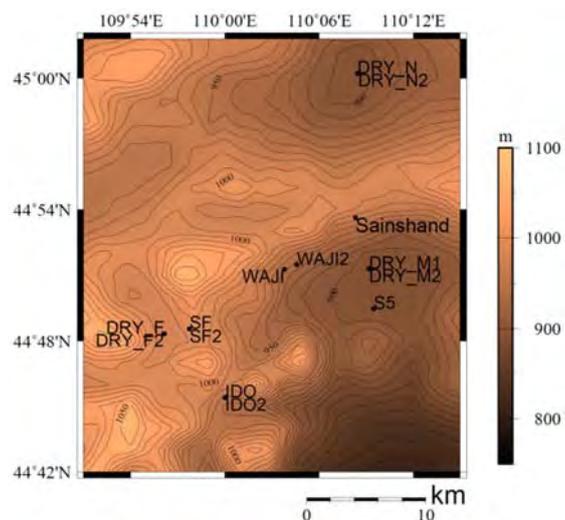


図 1 対象地域

初年度は、上記のうち A と C を中心に行った。

## 2. 研究方法

過去のリモートセンシングデータから、滞水が確認され、且つ、アジアダスト発生源であるポイントの位置情報を抽出し、現地において目視でドライレイクやワジの位置を特定した (図 1)。観測地点では、送風機とチャンバー、およびテントを設置し (写真 1)、簡易的な風洞実験を行った。送風機の回転数を徐々に段階的に増加させ、風を地表面に当て、巻き上がった特定の大きさの粒子数をテント内で計測した。尚、回転数と風速の関係は表 1 に示す。また、粒径は、0.3, 0.5, 3, および  $5\mu\text{m}$  を光学式パーティクルカウンター (KANO

MA X社製 Model13886) を用いて計測した。

### 3. 結果と考察

各観測地点で計測した飛散実験の結果を図3に示す。風速を段階的に強くしていくと、3および5 μmの飛散粒子量は増加する傾向がみられる。9.0m/s相当になると、飛散量は急激に増加している。しかしながら、場所により大きな差異がみられ、地域依存性が大きいことが確認された。ワジでは土壌水分量が小さい傾向にあり、とくにWAJI2地点では飛散量が多かった。一方、ドライレイクでは、土壌水分量が多めではあるが、飛散量は多めであった。単純に土壌水分量と飛散量の多寡に関係性は見られなかった。

今後は、水溜などの存在のタイミングや量、流入物質の量、ダスト粒子の存在量の多寡、土壌形成物質、地形など周辺地域の特徴など、多角的な調査を行うことが必要である。次年度以降は、可能な限り調査項目を増やし、差異について言及したいと考える。また、生物学的特徴も併せて議論する。

表1 送風機の回転数と風速の関係

回転数	風速(地上 1 cm)	風速(地上 5 cm)
1200	4.5±1.0m/s	4.8±0.6m/s
1400	6.1±1.2m/s	7.5±1.0m/s
1600	7.7±1.3m/s	8.9±1.0m/s
1800	9.0±1.6m/s	9.5±1.2m/s
1900	11.0±1.6m/s	14.0±2.2m/s



写真 1 飛散実験風景

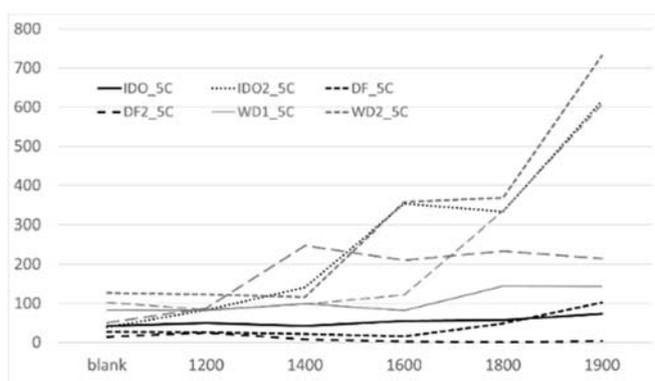


図2 5 μmの飛散量と回転数(横軸)の関係。

成果報告：

馬場ほか、モンゴルゴビ砂漠 Sainshand 付近のバイオエアロゾル集積地における飛散実験について、日本気象学会秋季大会、北海道大学、2017年10月31日

噴出型フレアと非噴出型フレアの包括的な比較研究  
A comprehensive comparison of eruptive and confined flares

八代誠司、米国カトリック大学・物理学科

【研究目的】

太陽フレアとコロナ質量放出 (Coronal Mass Ejection; CME) は磁気リコネクションで発生する一連のエネルギー解放現象の異なる側面と理解されている。しかし全てのフレアに必ずCMEが存在するのではなく、最大級であるXクラスフレアでも約10%はCMEを伴わない。したがって太陽フレアはCMEの有無により、噴出型(eruptive)と非噴出型(confined) に分類できる。高エネルギープロトン現象や磁気嵐などの主要な宇宙天気現象を引き起こす直接の原因がCMEであることから、フレア発生時のCME付随条件を解明することやCMEの有無によるフレアの特徴を明らかにすることは宇宙天気研究にとって非常に重要である。フレアとCMEの関係について統計的に比較することで両者の関係を明らかにするとともに、宇宙天気予報の精度向上へ貢献を目的とする。

【研究方法】

研究の基盤となる噴出型・非噴出型フレアリストの作成・更新を行った。前年度までに解析が終了した2014例のM・Xクラスフレアに加えて、1996年から2017年に発生した2110例のC3-C9クラスフレアについて、SOHO衛星やSTEREO衛星を用いてCMEの有無を調べた。合計4124例のうち、1164例のフレアは確実にCMEを伴い、2272例にはCMEが確実に無いことを確認した。残りの688例のフレアは、太陽表面の噴出現象が曖昧などの理由でCMEの有無を決定できなかった。この噴出型・非噴出型フレアリストを用いて様々な解析を行った。

【研究成果】

噴出型・非噴出型フレアリストのうち、野辺山電波ヘリオグラフで観測されたフレアについて詳しく調べた。今回弱いフレア (C3-C9クラス) まで範囲を拡張したことで、全イベント数は倍以上になった。より弱いフレア研究対象になったことで、電波強度が強くなるとともにフレアにCMEが付随する割合が増加することがより明確になった (図1)。

2017年9月は太陽活動減衰期であったが、非常に活発な活動領域12673が出現し、4例のXクラスフレア、27例のMクラスフレアを引き起こした。それぞれのフレアについてCMEの有無を調査し、そのうち8例が噴出型であることを確認した (図2)。CME有無の判断が出来なかった3例を除くとフレアのCME付随率は29%であった。活動領域12673はその活

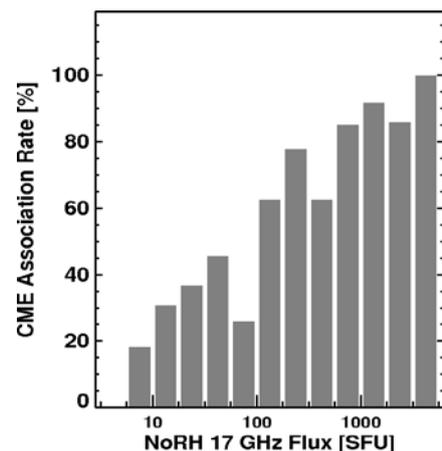


図1 電波強度と CME 付随率。

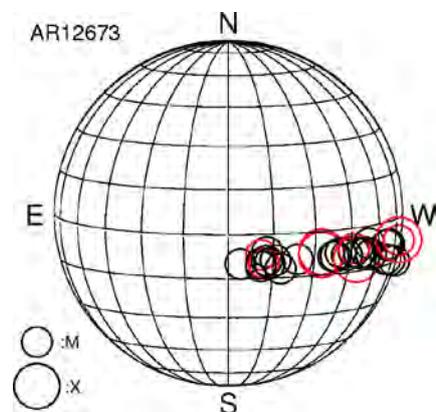


図2 活動領域 12673 で発生した噴出型フレア (赤丸) と非噴出型フレア (黒丸) の発生場所。円の大きさがフレアの大きさに対応する。

動度の高さが注目されたが、CME付随率は平均的であった。この解析は速報的に行い、解析結果は太陽コミュニティ内で共有された。

CME付随率の太陽活動に対する変化を前年度に続き調べた。フレア強度による違いを調べるために、Higher-C (C4.7-C9.9), Lower-M (M1.0-M2.1), Middle-M (M2.2-M4.6), Higher-M (M4.7-M9.9) と X の5クラスに分類し、その年間の発生数を図3aに示す。表示を合わせるために、Higher-C, Lower-Mクラスの発生数は半分にして表示してある。太陽周期変化との比較のために、太陽黒点数を灰色の影で表示する。黒点数の増減とフレアの増減が一致していることがよくわかる。

CMEの有無がはっきりと確認できなかったイベントは誤差として扱い、噴出型フレアの年間発生数を図3bに示す。そして噴出型フレア数を全フレア数で割ることで、CME付随率を求め、図3cに示す。フレア強度が強くなるにつれて（水色から赤になるにつれて）CME付随率は30%から90%へと上昇する。これは以前より知られている結果ではあるが（たとえば Yashiro et al., ApJ, 650, L143, 2016）、今回Cクラスまで解析範囲を拡張したこともあり全イベント数は3倍以上になっており、より強固な結果を得ることが出来ている。

第24活動周期のCME付随率は減少傾向にあることを前年度に報告したが、Higher-Cクラスでも同様の結果となることを確認した（図3c）。2017年にフレア数、CME数、CME付随率の上昇が見られるのは、前述の活動領域12673が出現した為である。この活動領域が2017年のCME付随率をほぼ決定しており注意が必要である。

本件の成果で4124例の噴出型・非噴出型フレアリストを作成した。作成された噴出型・非噴出型フレアリストは ICCON ウェブサイト(<https://hinode.isee.nagoya-u.ac.jp/ICCON/>)にて公開している。多くの研究者が使用し、様々な共同研究へを発展している。

**【成果発表】**

Yashiro, S., et al., SCOSTEP 14th Quadrennial Solar-Terrestrial Physics Symposium, Toronto, Canada, 9 – 13 Jul 2018

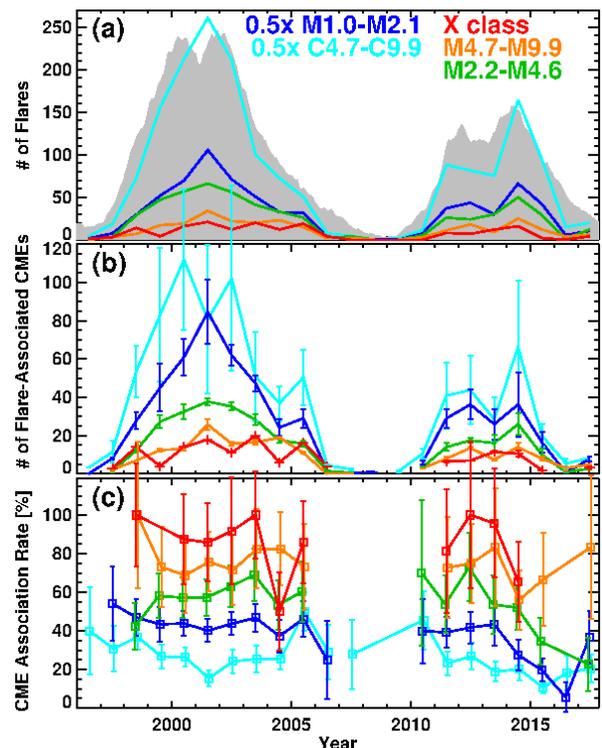


図3 太陽フレアの年間発生数(a), CMEが付随するフレアの年間発生数(b), およびCME付随率(c)の年変化。

脈動オーロラが起こすナトリウム密度変動の研究:  
ナトリウムライダー・EISCAT レーダーの高速観測  
Pulsating aurora-induced Na density depletion:  
high-speed Na lidar and EISCAT radar observation

高橋透 国立極地研究所・研究教育系 特任研究員

### 研究目的

Takahashi et al. (2017)では、トロムソナトリウムライダー (Naライダー) によるNa密度の5秒値とEISCATレーダーの電子密度の1分値を比較することで、電荷交換反応(分子イオンとNa原子) を評価した。彼らの研究は移流の効果を完全には取り除けていないことと、限られた時間帯のみに対して行ったイベント解析であるために、統計的描像は明らかにできていないことの二つの点において、未だ発展の余地を残す。そこで、本研究では、2016年度から行ってきた、トロムソNaライダーの高速観測化により実現した、サブミリ秒でのNa密度観測とEISCATレーダーの高速観測を組み合わせた同時観測により、できる限り移流の効果を排除した解析を行う。本研究では、数秒から数十秒の周期で明滅する脈動オーロラの明滅の1つ1つに対して、電子密度増大とNa密度変動の関連性をトロムソNaライダーとEISCATレーダーの高速観測により評価することで、オーロラに伴うNa密度減少の統計的描像を明らかにすることを目的とする。

### 研究方法

本研究では、EISCATレーダー、トロムソNaライダー、流星レーダーの同時観測キャンペーンをノルウェー・トロムソ(北緯69.6度、東経19.2度)で行なった。キャンペーン観測は00 UTから04 UTに行った。EISCATレーダーは小川泰信准教授と申請者がEISCATレーダーの運用を担当し、申請者と野澤悟徳准教授がNaライダーの運用と解析を担当した。また、水平の移流の効果を見積もる流星レーダーの運用、データの提供はChris Hall教授、堤雅基准教授が担当した。Naライダーでは5方向観測を行い、Na密度導出の時間分解能は0.5秒であった。

### 研究結果、考察、まとめ

2018年2月18日00-04 UT, 19日00-04UT, 20日00-04 UTにVHFレーダー鉛直向き、パルスコード” manda” で特別実験を行なった。この期間、ほぼ全ての時間で天候は晴れ、共回転相互作用領域の到来に伴って地磁気活動は活発であった。

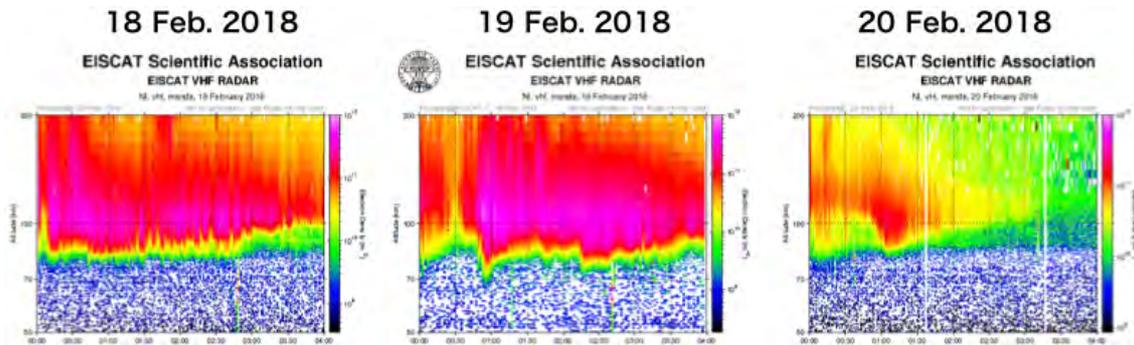


図1. EISCAT VHFレーダーで観測された電子密度。

図1にEISCAT VHFレーダーで観測された電子密度を示す。3期間すべてでオーロラによる高度100 km以下での電離があった。また、高度70 km付近でも電離が見られるなど高エネルギー電子が降り込んだ時間帯も確認できた。

脈動オーロラが出現した2018年2月18日01:10-01:20 UTでNa密度データと電子密度データの比較を行った。Na密度は0.5秒値、電子密度は5秒値で図2に示した。電子密度には、約 $5.0 \times 10^{10} \text{ m}^{-3}$ を背景密度として、 $1.5 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ をピークに持つ周期的な電離が見られる。一方、Na密度はおよそ $3 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ から $6 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ で変動しており、時間変動量が電子密度変動に対して大きく周期的変動は見られない。よって、今後はEMCCDカメラデータから脈動周期を抜き出し、適切な時間、高度積分をNa密度データに対して行うことで、測定誤差（ばらつき）を抑えたデータを作成し、電子密度から抽出した脈動成分との比較検証を行う。これらの解析により、脈動周期に同期した電荷交換反応によるNa密度減少プロセスを明らかにする。

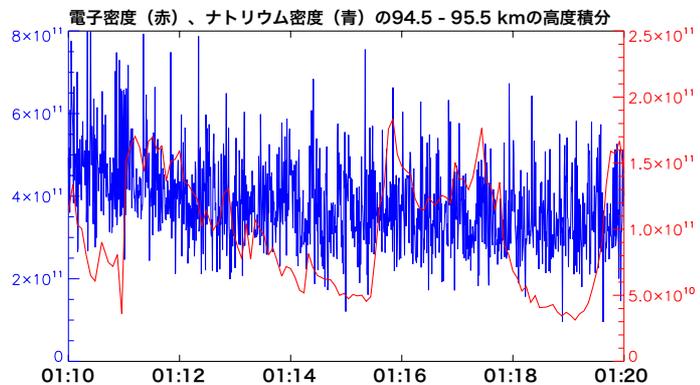


図2. Na密度と電子密度の比較。

#### 参考文献

Takahashi T., K. Hosokawa, S. Nozawa, T. T. Tsuda, Y. Ogawa, M. Tsutsumi Y. Hiraki, H. Fujiwara, T. D. Kawahara, N. Saito, S. Wada, T. Kawabata, and C. Hall, Depletion of mesospheric sodium during extended period of pulsating aurora, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122, doi:10.1002/2016JA023472, 2017.

# 複数衛星系・複数周波数GNSS信号に対するプラズマバブルの影響評価 Study of impacts of plasma bubbles on multi-constellation multi-frequency GNSS signals

齋藤 享、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

## 研究背景・目的

衛星測位は社会基盤として重要性を増しており、精密測量、航空航法、時刻同期など様々な社会システムが衛星測位を基盤として成り立っている。衛星測位への依存度が増すに従い、衛星測位の耐障害性の向上の必要性が高まっている。

衛星測位においては、これまでに主に使われてきた米国のGPSに加え、複数の衛星系（欧州Galileo、ロシアGLONASS、中国Beidou、日本QZSS）の信号を組み合わせて用い、さらに複数の周波数(L1: 1.57542GHz, L2: 1.22760GHz, L5: 1.17645GHz)の信号を組み合わせて用いることにより、精度の向上と耐障害性の向上を図っている。これらの複数衛星系、複数周波数を用いる次世代の衛星航法システム(GNSS)を、MC/MF (Multi-Constellation Multi-Frequency) GNSSと呼ぶ。

MC/MF GNSSにおいては、複数周波数の組み合わせにより電離圏による伝搬遅延を相殺することができると考えられているが、電離圏が激しく変動する場合はシンチレーションなどにより信号精度が劣化する場合においては複数周波数に依存することは反対にリスクの増大を招く恐れがある。

MC/MF GNSSは、送信信号強度、変調方式、周波数などが衛星系ごとに必ずしも同一ではなく、信号の特性がそれぞれ異なることが知られている。電離圏の伝搬遅延は周波数によって異なり、強度シンチレーションの大きさも周波数ごとにFresnel回折の原因となる電離圏不規則構造の空間スケールの違いから周波数によって異なることが予想されている。さらに、変調形式の違いによっても電離圏擾乱時の信号追尾精度の違いから受信信号品質に違いが出ることも予想されている。しかしながら、MC/MF GNSS信号はごく新しく送信が始まったものであり、衛星系、周波数の違いによる信号ごとの電離圏擾乱の影響の詳細な影響評価はあまり進んでいないのが現状である。

本研究では、電離圏擾乱としてプラズマバブルを対象とし、MC/MF GNSS受信機によって信号品質を衛星系、周波数ごとに評価するとともに、プラズマバブルの発生、発達、伝搬を含む時空間変動と信号品質、測位精度の関係を評価することを目的とする。さらに、データの蓄積の後、プラズマバブルの形状とMC/MF GNSS信号が受ける影響の関係を示すモデルの構築を目指す。

## 方法

本研究では、平成28年度から3年計画で、MC/MF GNSS受信機によるGNSS信号の観測と大気光全天イメージャによるプラズマバブルの2次元観測を行う。MC/MF GNSS受信機により、GNSS信号の品質(コード擬似距離精度、位相擬似距離精度、信号強度、シンチレーション指数)を測定し、同時に同じ場所から大気光全天イメージャによるプラズマバブルの2次元観測を行い、GNSS信号の品質とプラズマバブルの空間構造との関係を詳細に測定する。また、影響の衛星系による違い、周波数による違いを詳細に調べる。これにより、プラズマバブルにおいてGNSSにとって警戒すべき場所が同定されるとともに、その衛星系による違い、周波数による違いを知ることができる。

本研究では、MC/MF GNSS受信機と大気光全天イメージャの組み合わせを、沖縄県石垣市(北緯24.3°、東経124.2°磁気緯度19.7°)、インドネシア・コトタバン(南緯0.2°、東経100.3°、磁気緯度-9.2°)に設置する。これにより、MC/MF GNSS信号への電離圏擾乱の影響の赤道異常帯と受信点の相対位置による違いを検証するとともに、天候に左右される全天イメージャとMC/MF GNSS受信機の同時観測機会を増やす。

沖縄県石垣市においては、電子航法研究所が5ヶ所に2014年からシンチレーション観測が可能なMC/MF GNSS受信機を設置し観測を行っている。また、電子航法研究所と名古屋大学及び電気通信大学が協力して大気光全天イメージャ観測を2014年から行っている。インドネシア・コトタバンにおいては、インドネシア航空宇宙庁が設置したMC/MF GNSS受信機(シンチレーション観測には非対応)と、名古屋大学が2002年に設置した

全天気光イメージャがあり、継続的に観測を行っている。インドネシア・コタババンには、MC/MF GNSS シンチレーション受信機を設置し、継続観測を開始する。

得られたデータは、コード擬似距離精度、位相擬似距離精度、信号強度、シンチレーション指数を指標に、衛星系、周波数ごとに信号品質を評価するとともに、品質と、衛星とプラズマバブルの相対位置との関係と比較する。これらを長期的に行い、プラズマバブルの時空間変動とMC/MF GNSS信号が受ける影響の関係を示すモデルの構築を目指す。

### 結果・考察・まとめ

石垣市の観測データから得られる電離圏全電子数の空間変動の解析の取りまとめを行うとともに、電離圏シンチレーションが衛星航法に与える影響として、地上型衛星航法補強装置(Ground-Based Augmentation System: GBAS)に備えられ、GNSS観測データを様々な形で処理しGNSS補強情報の信頼性を担保するためのインテグリティモニタが受ける影響について評価を行った。2014年8～9月のうちシンチレーションが発生した13日間のデータを用い、電離圏に関連するインテグリティモニタとしてサイクルスリップ、Code-Carrier Divergence (CCD)モニタ、電離圏勾配モニタについて、それぞれの異常検出の指標となる検定統計量について、強度シンチレーション指数(S4)との関係について解析を行った。その結果、これら3つのインテグリティモニタの検定統計量はシンチレーション強度の増大に伴い増大し、シンチレーションの発生に伴ってGBASにおける衛星排除率が增大することがわかった(図1)。モデル化されたシンチレーションに伴う衛星排除率は、磁気低緯度地域において電離圏擾乱の影響をより正しく取り入れたGBASの性能評価を可能とするものである。

MC/MF GNSSシンチレーション受信機を用いた観測については引き続き継続したが、太陽活動の低下に伴い、プラズマバブルの発生頻度は大きく低下し、シンチレーションの発生頻度も大きく低下した。このため、より低緯度での観測を継続して行うため、MC/MF GNSSシンチレーション受信機のうち1台をインドネシア・コタババンに移設することとした。移設は2018年3月に行い、既存の2周波GNSSアンテナを撤去し、3周波(L1, L2, L5)対応アンテナを新設し、これにMC/MF GNSSシンチレーション受信機を接続し、2018年3月17日から連続観測を開始した(図2)。

2018年度は引き続きシンチレーションがGBASインテグリティモニタに与える影響を評価するとともに、その知見を次世代のMC/MF GBASの概念設計に取り入れていく。また、インドネシア・コタババンの観測を継続して行い、MC/MF GNSSシンチレーションデータの収集を行うとともに、プラズマバブルの時空間変動とMC/MF GNSS信号が受ける影響の関係を解析を進めていく予定である。



図 1. S4 指数とサイクルスリップ発生率



図 2. インドネシア・コタババンに設置した 3 周波 GNSS アンテナ(左)と受信システム(右)。

### 成果発表一覧

S. Saito et al., GPS Solutions, "Ionospheric delay gradient model for GBAS in the Asia-Pacific region", 21, 1937-1947, 2017, DOI 10.1007/s10291-017-0662-1.

S. Saito and T. Yoshihara, Evaluation of extreme ionospheric total electron content gradient associated with plasma bubbles for GNSS Ground-Based Augmentation System, Radio Sci., 52, 951-962, 2017, doi:10.1002/2017RS006291.

S. Saito et al., "Preliminary results of impacts of ionospheric scintillations on GAST-D ground integrity monitors", ION International Technical Meeting 2018, Reston, USA, January, 2018.

## トロムソにおけるスペクトログラフ観測に基づく多様なオーロラの発光スペクトルに関する研究

Study on a variety of auroral emission spectrum based on spectrograph observations in Tromsø

津田卓雄, 電気通信大学・情報理工学研究科

### 背景と目的

オーロラの形態によってオーロラ電子のエネルギー分布も異なるため、オーロラ発光スペクトルにも多様性が存在するはずである。しかし、過去の研究では、オーロラの形態に紐付ける形で発光スペクトルを計測している例が少ない。また、HF帯の電波を電離圏に送信して、人工的に電離圏の電子を高エネルギー化（加熱）し、その電子（加熱電子）によって励起された大気が発光する現象を人工オーロラと呼ぶが、人工オーロラの発光スペクトルに関する十分な情報が得られていない。

本研究では、ノルウェーのトロムソにおいて、電通大で開発したスペクトログラフによるオーロラ観測、人工オーロラ観測を実施し、多様なオーロラや人工オーロラの発光スペクトルを明らかにすることを目的としている。

### 研究進展状況

オーロラ・人工オーロラ観測を実施する為、スペクトログラフの整備、調整を国内で進めた。その後、観測場所のトロムソへの設置を行い、現在は冬季連続観測を実施中である。また、共同研究を更に活性化する為の取組みとして、スペクトログラフの観測データは、電通大のウェブページを通じて準リアルタイムで公開している。

脈動オーロラ明滅時の発光スペクトル変化に着目し、脈動オーロライベントの選定と複数イベントの解析を進めている。初期的な取組みとして、酸素原子・窒素分子等の発光輝線・発光バンドの明滅時の発光強度変化に注目することで、明滅に寄与している降下電子のエネルギーに関する情報を抽出する手法を開発中である。

並行して、人工オーロラ実験の計画立案の為の予備調査を実施した。約18年間（2000-2017年）のトロムソ観測所におけるダイナゾンの観測データを解析し、トロムソ観測所での人工オーロラ実験に適した時期の選定を試みた。その結果、太陽活動極大期が人工オーロラ実験に最適であること、太陽活動極小期には実験成功の可能性が極めて低いことなどを見出した。この結果と近年の低調な太陽活動度を考慮し、今年度の人工オーロラ実験は見送ることにした。数年後の太陽活動極大期を待って、人工オーロラ実験を再度企画する方向で検討を進めることを予定している。

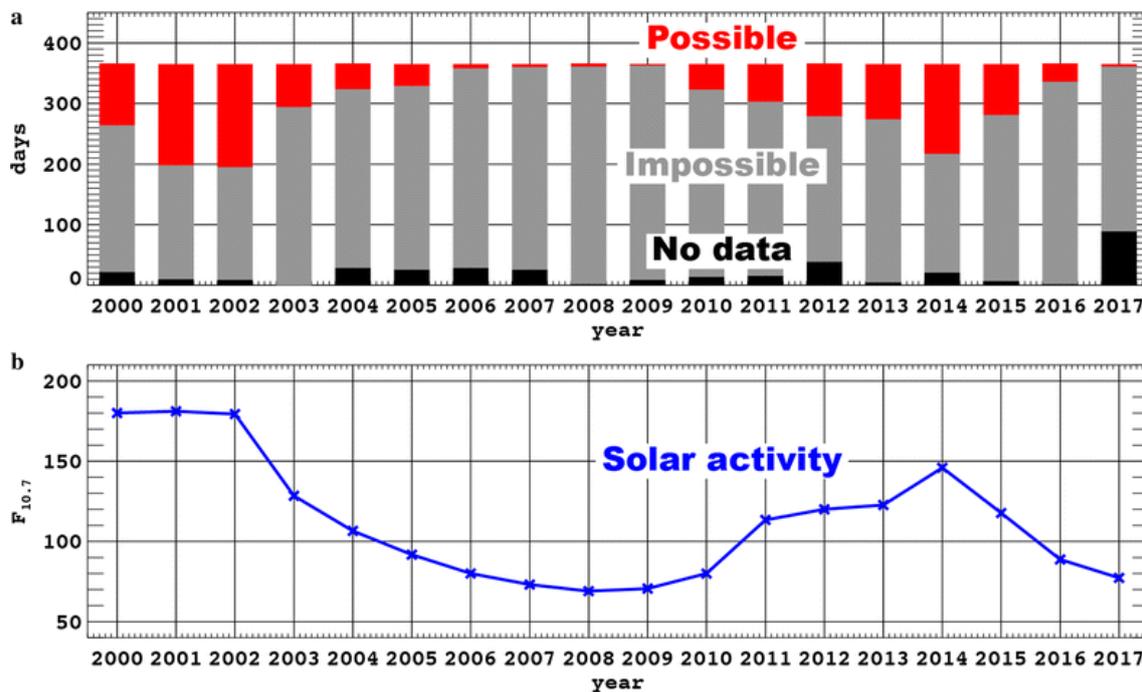


図. 人工オーロラ実験の観測可能性と太陽活動度の関係 (Tsuda et al., EPS, 2018)

#### 学術論文 (査読付)

- (1) T. T. Tsuda, M. T. Rietveld, M. J. Kosch, S. Oyama, K. Hosokawa, S. Nozawa, T. Kawabata, A. Mizuno, and Y. Ogawa, Survey of conditions for artificial aurora experiments at EISCAT Tromsø using dynasonde data, *Earth Planets Space*, 70, 40, doi:10.1186/s40623-018-0805-9, 2018.
- (2) S. Oyama, K. Kubota, T. Morinaga, T. T. Tsuda, J. Kurihara, M. F. Larsen, M. Yamamoto, and L. Cai, Simultaneous FPI and TMA measurements of the lower-thermospheric wind in the vicinity of the poleward-expanding aurora after substorm onset, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 122, 10,864-10,875, doi:10.1002/2017JA024613, 2017.
- (3) M. Kogure, T. Nakamura, M. K. Ejiri, T. Nishiyama, Y. Tomikawa, M. Tsutsumi, H. Suzuki, T. T. Tsuda, T. D. Kawahara, and M. Abo, Rayleigh/Raman lidar observations of gravity wave activity from 15 to 70 km altitude over Syowa (69°S, 40°E), the Antarctic, *J. Geophys. Res. Atmospheres*, 122, 7869-7880, doi:10.1002/2016JD026360, 2017.
- (4) T. T. Tsuda, T. Nakamura, M. K. Ejiri, T. Nishiyama, K. Hosokawa, T. Takahashi, J. Gumbel, and J. Hedin, Statistical investigation of Na layer response to geomagnetic activity using resonance scattering measurements by Odin/OSIRIS, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 5943-5950, doi:10.1002/2017GL072801, 2017.
- (5) T. D. Kawahara, S. Nozawa, N. Saito, T. Kawabata, T. T. Tsuda, and S. Wada, Sodium temperature/wind lidar based on laser-diode-pumped Nd:YAG lasers deployed at Tromsø, Norway (69.6°N, 19.2°E), *Opt. Express*, 25, A491-A501, doi:10.1364/OE.25.00A491, 2017.

#### 招待講演

- (1) 津田卓雄, 斎藤徳人, 野澤悟徳, 川原琢也, 川端哲也, 高橋透, C. M. Hall, 和田智之, 中村卓司, 江尻省, 西山尚典, 阿保真, 津野克彦, J. Gumbel, J. Hedin, 光リモートセンシングによる超高層大気の研究, レーザー学会 学術講演会 第38回年次大会, 京都, 2018年1月.
- (2) T. T. Tsuda, T. Takahashi, S. Nozawa, T. D. Kawahara, T. Kawabata, N. Saito, S. Wada, C. M. Hall, Y. Ogawa, K. Hosokawa, T. Nakamura, M. K. Ejiri, T. Nishiyama, M. Abo, K. Tsuno, J. Gumbel, and J. Hedin, Energetic particle impact on the Na layer, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Chiba, May 2017.

## ナトリウムライダーを用いた北極域中間圏・下部熱圏領域の 高時間分解能温度・風速観測

High resolution observations of neutral temperature and wind in the polar MLT region  
using a sodium LIDAR

川原琢也、信州大学・学術研究院工学系

### 研究目的

極域下部熱圏・中間圏領域では、風速は下層大気から大気波動の影響を受けて  $\pm 100$  m/s の範囲で大きく変動する。一方でオーロラ電子が降下しているとき、この領域の変動の時間スケールは数秒（あるいはそれ以下）と極めて短く、オーロラ現象に伴う大気変動の解明には、高時間分解能の観測装置が必要となる。

トロムソ（北緯 69.6 度、東経 19.2 度）にて運用されている EISCAT レーダーでは、電子密度変動を 1 秒程度の時間分解能でとらえることができる。2017 年 1 月にトロムソに導入した 5 波長フォトメーターは、現在オーロラ発光変動を 400Hz で観測している。一方、トロムソで観測を続けるナトリウム(Na)温度/風速ライダーは、Na 層（高度 80-110 km）での中性大気温度・風速計測が可能な強力な観測装置であるが、Na 密度のピーク高度領域における時間・高度分解能は、これまで 3 分・500m となっていた。これはオーロラ変動のタイムスケールから考えると十分とはいえず、より高時間分解能で計測できるライダーにシステムの改良が必要とされていた。

本研究ではレーザ周波数制御部分を新システムに改良し、全システムを最適化して 10 秒以下で大気温度導出を実現し、オーロラ現象にともなう大気温度・風速変動を観測により明らかにすることを目的とする。

### 研究方法と研究結果

トロムソ Na ライダーで現有の AO システムを用いて高速切り替えの観測実験を行なった。これまでは 5 秒間のデータ積分（5 秒毎にデータを取り込む）で 1 分毎に波長を切り替えるモードであった。2017 年 12 月 12 日から高時間分解能観測の検討・テスト、およびレーザ調整により、2 秒積分で 20 秒毎の波長切り替えモードの運用を行った。これにより、1 分間(3 周波数データ)で中性大気温度・風速・ナトリウム原子密度の導出を行った。図 1 は 2018 年 1 月 22 日の南方向ビーム(Az=180°, El=60°)における時間分解能 1 分・高度分解能 2 km のデータを示す。上段から、受信強度(2 秒値)、Na 密度（1 分値）、視線方向速度（1 分値）、大気温度（1 分値）である。風速と大気温度変動から、大気波動による影響が見てとれる。また、受信強度および Na 密度から、21UT 付近に、Sporadic Sodium Layer (SSL)が見える。この高密度領域付近では、大気温度が短時間で変動していることがわかる。この SSL の解明にも、高時間分解能が必須であり、今年度実現して、1 分値によりデータ導出は、今後解明に大きく貢献すると考えられる。本申請は 3 年計画であり、来年度以降、平成 29 年度経費にて購入した AO 素子を用いた、AO 光学シャッターによる高速波長切り替えの実現に向けて、研究を進めていく。

### 学術論文（査読付）

- (1) T. D. Kawahara, S. Nozawa, N. Saito, T. Kawabata, T. T. Tsuda, and S. Wada, Sodium temperature/wind lidar based on laser-diode-pumped Nd:YAG lasers deployed at Tromsø, Norway (69.6°N, 19.2°E), Opt. Express, 25, A491-A501, doi:10.1364/OE.25.00A491, 2017.

### 招待講演

- (1) 野澤悟徳、EISCAT レーダー及びナトリウムライダー観測による極域上部中間圏・下部熱圏変動の研究、田中館賞受賞記念講演、第 142 回地球電磁気・地球惑星圏学会総会・講演会、2017.10.18、京都大学（招

待講演)

- (2) T. D. Kawahara, S. Nozawa, N. Saito, T. Kawabata, T. T. Tsuda, and S. Wada, Sodium temperature/wind lidar based on laser-diode-pumped Nd:YAG lasers deployed at Tromsø, Norway (69.6°N, 19.2°E), Opt. Express, 25, A491-A501, doi:10.1364/OE.25.00A491, 2017. (査読有)
- (3) T. D. Kawahara, Introduction to Na lidar observations: basics for beginners, China-Japan sodium lidar meeting, HeFei (China), Sep 2017. (招待講演)
- (4) S. Nozawa, T. D. Kawahara, T. T. Tsuda, Y. Ogawa, T. Takahashi, N. Saito, S. Wada, H. Fujiwara, M. Tsutsumi, C. Hall, T. Kawabata, Y. Ogawa, and A. Brekke, Sodium LIDAR observations of polar mesosphere and lower thermosphere, Laser Solution for Space and the Earth, OPTICS and PHOTONICS International Congress 2017, Kanagawa, April 2017. (招待講演)

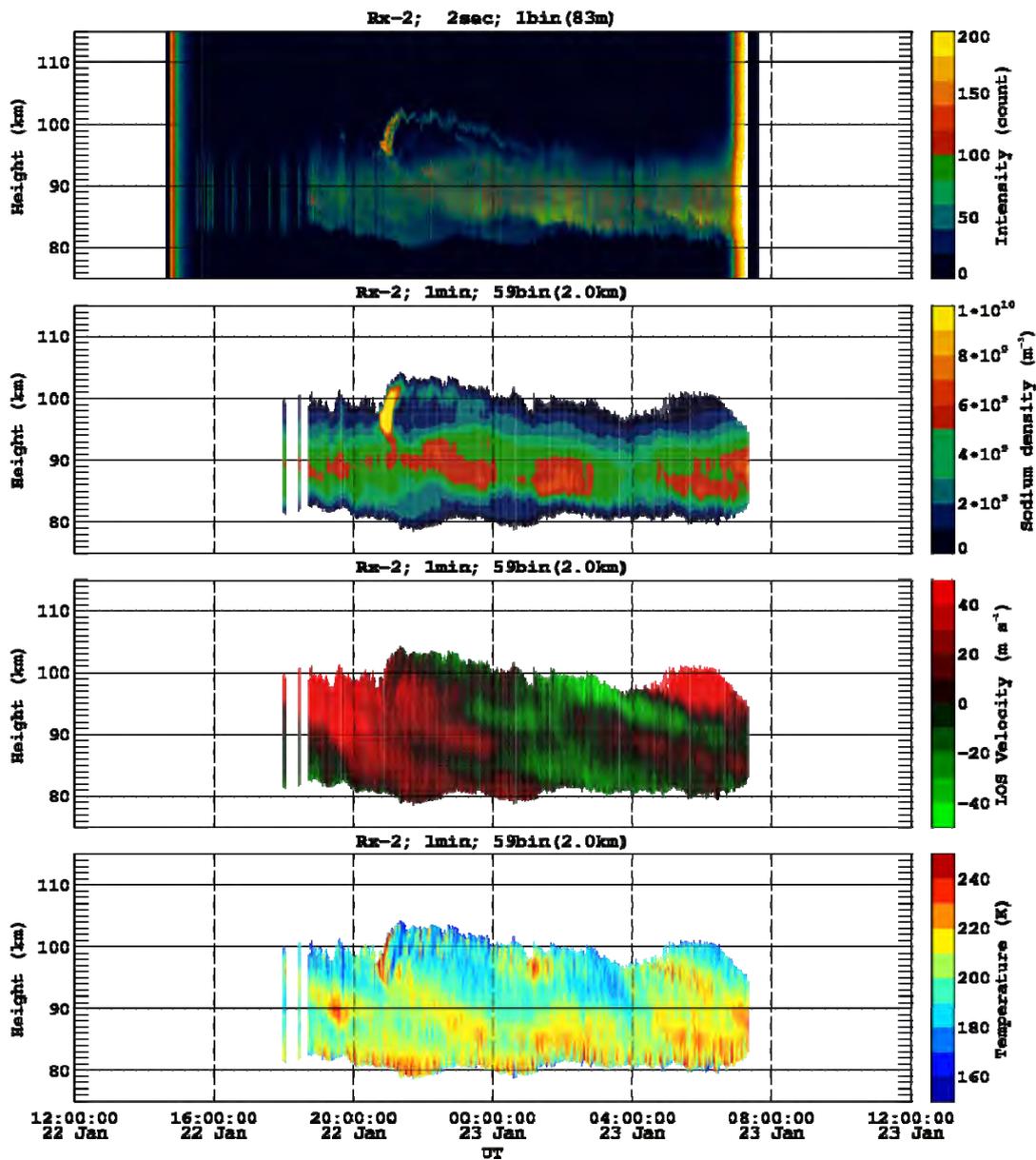


図1. 2018年1月22日の南方向ビームにおける中性大気温度・風速・ナトリウム原子密度。1波長20秒ずつの観測で計1分間(3周波数データ)で導出。時間分解能1分、高度分解能2km。

雲に関わる多相微物理・化学計算の高度化にむけた国際共同研究の推進

Advancing international collaboration to sophisticate cloud related multiphase microphysics and chemistry simulation

島 伸一郎，兵庫県立大学・大学院シミュレーション学研究所

## 1. 研究目的

大気中には多様な化学組成のエアロゾル粒子が多数漂っている。雲はこのエアロゾル粒子が核となって作られる。エアロゾル粒子の一部は降水とともに大気中から除去されるが，その他大部分の雲粒は蒸発して再びエアロゾル粒子となる。この様に，雲とエアロゾルはお互いに密接に影響を及ぼし合っている。この雲とエアロゾルの相互作用を定量的に評価することは依然として難しく，このことが気象予報・気候変動予測に大きな不確実性をもたらしている。

本研究の目的は、雲とエアロゾルの相互作用を定量的に評価できる数値モデルを世界で初めて実現することである。

## 2. 研究方法

島(代表)は「超水滴法」(Super-Droplet Method, SDM)と名付けた全く新しい雲微物理モデルを独自に開発した(Shima et al. 2009)。超水滴法はエアロゾル粒子・雲粒・降水粒子の運動と状態変化を，確率的な粒子法を使って統一的に計算する数値計算手法である。従来の手法と違い，時間発展を原理的な物理法則に基づいて精密かつ高速に計算することができる。観測との比較を通し超水滴法の有効性は実証されており，既に実用段階に至っている。しかし，現行の超水滴モデルは液相の雲微物理過程に特化している。

そこで，国際共同研究の推進と拡大を通して，超水滴モデルを，帯電過程や，氷相過程，詳細な大気エアロゾル・化学過程も扱えるように拡張し，原理的法則にもとづいてエアロゾル・雲・降水粒子の運動と状態変化を統一的かつ正確に計算できるようにする。

## 3. 研究結果、考察

### 超水滴法の氷相過程への拡張

島(代表)はここ数年かけて，氷を伴う混相雲を扱えるように超水滴法の拡張を進めてきた。氷相過程に関しては，そもそも雲微物理素過程の気象学的理解が甚だ不十分であり，このことが開発に際し大きな困難を生んでいた。しかし，2017年に様々な機会を利用してGrabowski博士(NCAR, USA), Pawlowska研究室のメンバー(Warsaw University, Poland), Stratman博士のチームメンバー(TROPOS, Germany)と議論し得られた知見を積み重ねた結果，最先端の気象学的知見を組み込んだ混相雲用の超水滴型雲解像モデルの初版をついに12月に完成させることができた。簡易な性能検証を行った上で，速やかにモデルの設計詳細を解説する論文を公表する予定である。

## 超水滴法の拡張による過飽和度に関するSGS乱流ゆらぎモデルの構築

Grabowski博士とAbade助教(Warsaw University, Poland)は、数値計算の際に水蒸気の過飽和度が計算格子内のSGS乱流により揺らぐことを表現する新しい手法を考案した(Grabowski and Abade 2017). 手法の肝となるのは、過飽和度の時間発展を各超水滴の属性として表現した点であるが、これは超水滴法の理論的枠組みを使うことで初めて実現できた画期的な成果である.

## TwomeyのCCN活性化モデルの導入による超水滴法の高速化

Grabowski博士, Ziekan研究員(Warsaw University, Poland), Pawlowska教授は、従来型の超水滴法にTwomeyのCCN活性化モデルを導入し、雲の存在する所にだけ超水滴を配置する計算手法を考案した (Grabowski, Ziekan, and Pawlowska 2018). これにより、厳しい計算時間の制約がある数値天気予報においても超水滴法が活用できる可能性が見えてきた.

## 大気粒子の帯電が雲に及ぼす影響の評価

2017年の12月にZhou教授(East China Normal University, China)の研究員が島研究室に一ヶ月間滞在し、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. まずは、雲粒の帯電過程のモデルと、Zhou教授らの考案した帯電した雲粒同士の衝突併合確率のモデルを、CReSS-SDMに実装した. その上で、理想化された晴天積雲に対して感度実験を行い、帯電により雨粒の形成が大きく抑制されるという予備的結果を得ることができた.

## 4. まとめ

以上の通り、超水滴法を軸とする国際共同研究ネットワークが広がってきており、雲モデルの開発も進展している.

## 5. 引用文献

Shima, S., K. Kusano, A. Kawano, T. Sugiyama, and S. Kawahara, Q. J. R. Meteorol. Soc. 135, pp.1307-1320 (2009).

Grabowski, W.W. and G.C. Abade, J. Atmos. Sci., 74, 1485–1493 (2017).

Grabowski, W.W., Dziekan, P., and Pawlowska, H., Geosci. Model Dev., 11, 103-120, (2018).

## 6. 成果発表

### 査読論文

[1] “A grid refinement study of trade wind cumuli simulated by a Lagrangian cloud microphysical model: the super-droplet method”, Sato, Y., Shima, S.-i. and Tomita, H. (2017), Atmos. Sci. Lett., 18: 359–365. doi:10.1002/asl.764.

[2] “On the CCN (de)activation nonlinearities”, Arabas, S. and Shima, S.-I., Nonlin. Processes Geophys., 24, 535-542, 2017.

国際発表: 8 件, 日本語発表: 9 件, 国際研究会の主催: 1 件

インド亜大陸北東部モンスーンの変動メカニズムの解明  
Understanding of mechanism of summer monsoon over northeast India  
n subcontinent

寺尾 徹、香川大学・教育学部

インド北東部地域は、インドの主要部とは降水変動が異なり、むしろ逆相関であることが古くから知られている。卓越する季節内変動周期も異なっており、インドの多くの地域で40-50日周期が卓越するのに対し、インド北東部地域は10-20日周期が卓越する。対象地域はインドで最も雨の多い地域であり、メガラヤ高原やヒマラヤ山脈の南斜面における地形性降水が顕著である。その雨は河川を流れてバンングラデシュの洪水をコントロールする主因となる。本研究は、このような独自の特徴をもつインド北東部地域のモンスーン変動メカニズムを解明し、降水変動の予測可能性を議論することを目的とする。地形性降水がインド北東部モンスーン降水量の大きな割合を占めるので、具体的な調査対象として、地形とモンスーンの相互作用による降水メカニズムの理解に焦点を当てる。

申請者らのグループはバンングラデシュ気象局、インド・アッサム州ガウハチ大学、インド・メガラヤ州North-Eastern Hill Universityの研究者らと共同でバンングラデシュに20地点、インド・アッサム州及びメガラヤ州に20地点の転倒ます雨量計を2004年より設置し現地では入手が難しい時間分解能の高い降水量データを蓄積している。これらのデータはメガラヤ高原の南面で特に特徴的な夜間に活発化する降水活動(e.g. Fujinami et al. 2017)など熱帯で卓越する降水の日変化のメカニズム解明において有用である。またバンングラデシュ気象局やインド気象局の協力を得て長期間の気象観測データを収集してきた(e.g. Endo et al. 2015)。複雑地形となる当該地域におけるTRMM/PR地表雨量の過小評価の検出も行った(e.g. Terao et al. 2017)。今年度はこれまで紙媒体で保存されていた旧英領インドであった現バンングラデシュ域の19世紀後半から20世紀前半までの降水量データのデジタル化を行った。これに加えてモンスーン季の前の3-5月に頻発するシビアストームについての新聞記事等の文献調査によるストーム発生件数の長期変化の調査や、アッサム地方において有名な茶園で独自に観測される気象データの入手を実施中である。

さらに、乾季と雨季で大きく陸面状態が変化する本研究地域は大気陸面相互作用が大気に大きな役割を果たしている可能性がある。今年度はこの研究の促進のために、本研究を用いて、本研究地域を対象としてこの分野の研究を実施した領域気候モデリングの研究者(Sugimoto et al. 2017)を本研究地域に派遣した。さらに、申請者は本研究地域だけでなくアジアモンスーン域における気象水文研究をリードする枠組みとなってきたMAHASRIプロジェクトの次期代表として2017年10月に行われたTPE-GHP/GEWEX Joint Workshopに参加し、1月及び3月の国内集会を通じて次のプロジェクトの計画の立案中である。

#### 参考文献

- Fujinami, H. et al. 2017: *J. Geophys. Res.* doi:10.1002/2016.JD026116  
Endo, N. et al. 2015: *SOLA*, 11, 113-117.  
Sugimoto, S. and Takahashi, 2017: *J. Climate*, 30, 921-938.  
Terao, T. et al. 2017: *SOLA*, 13, 157-162.

# ALMAアーカイブデータによるタイタン大気の化学組成と変動要因の解明 On the origin of the variation of Titan's atmospheric composition by ALMA archive data analysis

平原 靖大 名古屋大学・環境学研究所

## 【研究目的】

本研究の目的は、高感度・高空間分解能を誇るアタカマリ波サブミリ波干渉計ALMA(Atacama Large Millimeter/ submillimeter Array)を用いたサブミリ波帯波長域(84~950 GHz)における高分解能分光観測により、土星最大の衛星であるタイタンをはじめとするガス天体大気の組成やダイナミクス、温度分布、そしてその時間(季節)変動を明らかにすることにある。タイタンはALMAにおける強度較正天体として頻繁に観測され、アーカイブデータとして蓄積されていて、それらを逐次解析することで太陽系の惑星や衛星の大気の化学組成と時空間変動がモニター可能である<sup>[1]</sup> (昨年度ISEE国際共同研究の成果)。

ALMA干渉計観測データは合成開口パターンの影響を受けており、CLEANとよばれる deconvolution演算<sup>[2]</sup>が必須である。このCLEANがデータ解析において最も時間・計算コストのかかる部分で、従来の方法でタイタンのアーカイブデータをすべて解析するとその解析時間は1年あたり1万時間を超える。したがってCLEANを自動化・高速化する方法の開発は今後のALMAデータ利用に有意義である。CLEANでは観測結果の電波強度の強い場所・有意な場所にmaskをかける必要がある。maskの作成において、PSFの影響によるノイズと天体自身の構造を区別する基準はなく、解析者の主観による影響が排除しきれない。

## 【研究方法】

そこで本年度の国際共同研究では、申請者の研究室で過去に蓄積した土星の衛星タイタンのALMAアーカイブデータとその解析結果を教師データとする深層学習によって上記の課題を解決する自動解析手法を開発した。一般に、深層学習を用いることで、AI(人工知能)は教師データの中から一定の客観的基準を抽出することが可能である。本研究ではCLEAN処理の自動化・高速化のため、画像変換モデル Pix2Pix<sup>[3]</sup>を使用し、dirty image(CLEAN処理前画像)からのmask自動作成手法を開発した。そして、AIを標準的なALMA解析ツールCASAと結合し、自動解析プログラムのコーディングを行った。深層学習においては、産総研・人工知能研究センターのAAIC (AIST Artificial Intelligence Cloud)を用いた。

## 【研究結果のまとめと今後】

図1に、本研究において開発した自動解析プログラムのフローチャートを示す。教師データ数764に対してdiscriminatorの層の数などのハイパーパラメーター探索をすることで、正解となるmaskのピクセル数が平均33.5[pixels]に対して7.6[pixels]の誤差で再現するモデルが得られた<sup>[4]</sup>。図2に、深層学習により自動生成されたmaskパターンの例を示す。

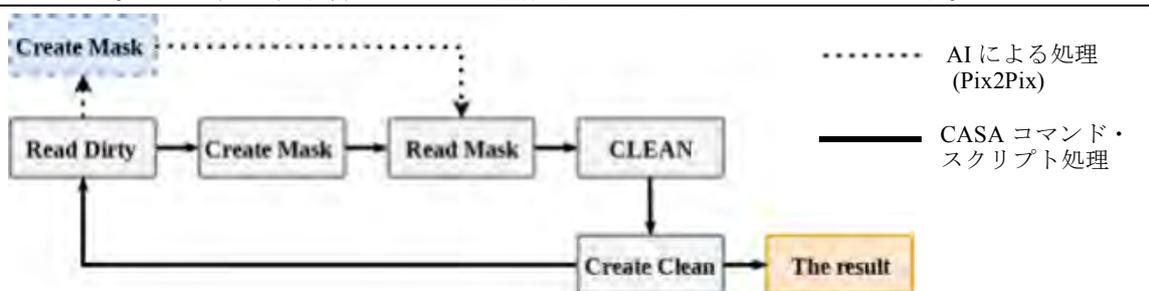


図1: AI-CASA自動解析プログラムでのデータリダクション処理のフローチャート

今後、更に多くのアーカイブデータ解析をすす  
め、教師データの逐次追加することにより、U-N  
etなど、高精度であるがより多くの教師データ数  
を必要とする深層学習モデルを用い、多くの惑  
星・衛星観測データの解析に適用可能な自動解析  
ソフトの開発を進める。2年間の本ISEE国際共同  
研究によって、パリ天文台の惑星観測グループと  
の緊密な連携研究体制を構築することができた。  
今後、この連携体制をさらに強化し、国際共同電  
波観測施設ALMAのみならず、建設が開始したハ  
ワイ・マウイ島ハレアカラ山頂の口径1.8m望遠鏡  
PLANETSを用いた系内・系外惑星大気分子の赤  
外線高分解能分光観測の新展開に繋げる。

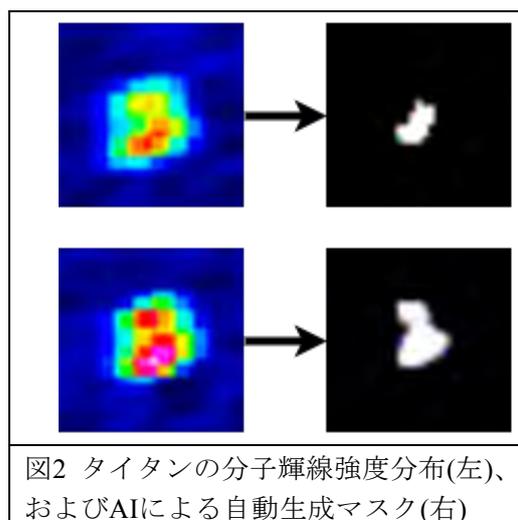


図2 タイタンの分子輝線強度分布(左)、  
およびAIによる自動生成マスク(右)

#### 【引用文献】

- [1] 中山勇麻、名古屋大学理学部地球惑星科学教室 卒業論文、2016
- [2] B. G. Clark, "An efficient implementation of the algorithm 'CLEAN'", *Astronomy and Astrophysics*, 89(3), 377, 1980
- [3] Isola et al. (2017). "Image-to-Image Translation with Conditional Adversarial Networks". *Computer Vision and Pattern Recognition*, <https://arxiv.org/abs/1611.07004>, 2017
- [4] 鈴木達也、名古屋大学理学部地球惑星科学教室 卒業論文、2017

#### 【成果論文リスト】

- [1] T. Iino and T. Yamada, "Spatially Resolved Sub-millimeter Continuum Imaging of Neptune with ALMA", *Astronomical Journal* 155(2), DOI:10.3847/1538-3881/aaa420, 2018
- [2] T. Iino, H. Namiki, T. Yamada, "A feasibility study of exhaustive analysis of ALMA calibration data for the creation of big-data driven solar system astronomy", *Journal of Space Science Informatics Japan: Vol. 7*, 19-32 2018
- [3] T. Iino, T. Yamada and Y. Tanaka, "A simulation study on terahertz continuum-wave observations of Neptune's atmosphere focusing on future ALMA observation", accepted to the *Journal of Remote Sensing Society of Japan*

#### 【学会発表リスト】

- [1] 高見 康介、中川 広務、佐川 英夫、Krause Pia、青木 翔平、笠羽 康正、村田 功、平原靖大、Oleg Benderov、片桐崇史、"金星中間圏の風速・温度観測に向けた中間赤外ファイバーヘテロダイン分光器の開発"、地球電磁気・地球惑星圏学会、京都大学宇治キャンパス、2017/10/19
- [2] T. Suzuki, Y. Hirahara, T. Kohyama, and R. Nakamura, "Automation of CLEAN task with deep learning", ALMA Workshop for solar system planetary observations, 国立天文台三鷹キャンパス、2017/3/7
- [3] R. Moreno, "Planetary atmosphere observations with ALMA", ALMA Workshop for solar system planetary observations, 国立天文台三鷹キャンパス、2017/3/7
- [4] T. Iino, "ASTE and ALMA observations of outer planets", ALMA Workshop for solar system planetary observations, 国立天文台三鷹キャンパス、2017/3/7

衛星搭載イメージング光学系用バッフル・ベーン的设计と開発  
Design and development of baffle and vane for a space-borne  
imaging optical system

坂野井健、東北大学・大学院理学研究科

< 研究目的 >

現在、電磁圏・熱圏コミュニティでは、将来小型衛星の観測検討が行われている。その搭載装置候補の一つにオーロラ・大気光撮像装置がある。将来衛星では、高高度観測を計画しており、日照条件下でオーロラ・大気光撮像を可能とする迷光対策や、広視野紫外撮像光学系の開発が必要不可欠である。本研究は、将来小型衛星による地球や火星における中～高高度からの観測により、可視オーロラ詳細観測と紫外広域観測を達成するため要求される技術検討を行う。

< 研究方法 >

地球オーロラを高高度から観測する場合には、迷光源としては衛星から望む惑星日照面（三日月型）と太陽直達光がある。ここでは、衛星高度は、地球オーロラ観測の場合3000km、火星オーロラ観測の場合は10000kmとし、光学系全角視野は8度～15度の範囲と仮定する。地球オーロラ観測時では600nm付近の太陽直達光は60TR/nm、地球日照面は460MR/nmと見積もられる。2nm程度のバンドパス干渉フィルターを用いた場合、これらは地球オーロラに比べてそれぞれ $10^{10}$ 倍、 $10^5$ 倍明るい。同様に、火星オーロラ観測時では300nm付近の太陽直達光が5TR/nm、火星日照面の明るさが22MR/nmと見積もられる。4nmのバンドパス干渉フィルターを用いた場合、これらは、火星オーロラに比べてそれぞれ $10^{11}$ 倍、 $10^6$ 倍明るい。この強烈な光源の迷光を低減させるためには、ベーンやバッフルによる遮光光学系が必要である。また、紫外（130-160nm付近）では相対的に太陽光が弱くなるため、オーロラ観測に有利なため、過去の高高度オーロラ観測では紫外撮像系が採用されている。

以上の課題について、平成28年度は広視野紫外撮像を可能とする光学系検討と、海外で紫外オーロラ・大気光撮像の実績のある米国カリフォルニア大バークレー校（UCB）と米国コロラド大・大気宇宙物理研究所（LASP）を訪問した。UCBではIMAGE衛星やICON衛星などで地球オーロラ・大気光紫外観測器開発実績のあるHarald Frey氏と、LASPではMAVENで火星オーロラ・大気光紫外観測実績のあるNick Schneider氏と打ち合わせを行った。平成29年度では、前年度課題となっていた紫外用2次元検出器と耐放射線性可視2次元検出器の選定、遮光光学系の検討ならびにスウェーデンとの共同研究の推進、ならびに科学課題（オーロラ加速機構ならびに熱圏ダイナミクス）と観測装置の整合性の検討を行った。

< 研究結果とまとめ >

平成28年度はまず科学目的を達成するための観測条件が検討され、紫外は視野40x40度、可視は視野7.5x7.5度のとき、範囲と空間分解能いずれも要求をみたすことが明らかになった（図1）。次に、紫外オー

ロー観測対象を検討し、N2 LBH(140-160nm)または酸素原子(OI) 135.6nmが適当と判断された。この波長で前述の広視野を達成するための反射光学系の設計を行い、アプラナート7枚反射系で明るく(Fno=2.4)十分に小さな収差像を得られる解を見いだした(図2)。

平成29年度は、遮光光学系についてISAS/JAXA山崎敦氏や東北大中川広務氏らと協力し、SEMI衛星遮蔽光学系[Jackson et al., Solar Phys, 225, 177, 2005]を参考にしつつ検討を行った。この結果、可視イメージャーでは日陰時のみ観測を実施することとした。平成30年3月にはスウェーデン・キルナでの研究会(SRS)に参加し、将来衛星計画FACTORSについて発表するとともに、IRF山内正敏氏、Tima Sergienko氏、Urban Braentstoem氏らと衛星搭載紫外・可視イメージャーについて検討を行った。ここではオーロラ観測の科学意義や観測波長の詳細検討に加えて、スウェーデンが今後の将来衛星計画に機器開発協力・提供や小型衛星提案など多面的な共同体制が議論され、今後とも連絡を密に取り合うことが合意された。観測波長については、可視はオーロラ物理解明の点でN2 1PG(650nm-)またはN2 1NG(391nm or 428nm)が適切で、加えてもし多波長にする場合には熱圏酸素密度観測でN2 VK(290-340nm)が候補となった。一方、紫外ではN2 LBH(140-160nm)とOI(135.6nm)の比から熱圏ダイナミクスが観測できることが議論された。宇宙用2次元検出器について、紫外用にCCDとMCPの両面で検討を行った。また、可視用に宇宙用EMCCDと耐放射線性CMOSの両面で具体的に検討を進めた。

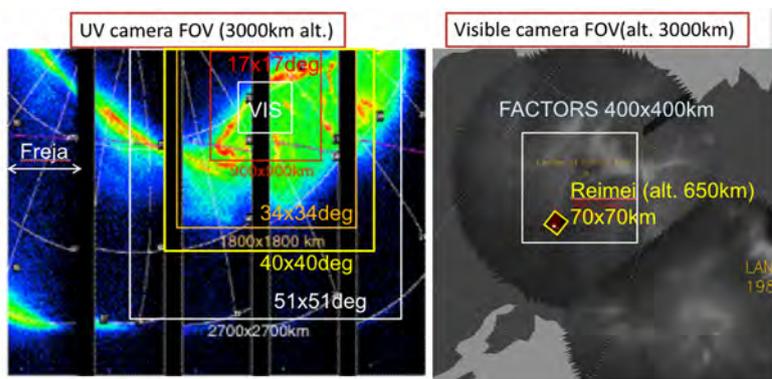


図1. 紫外イメージャー(左)並び可視イメージャー(右)の視野検討。可視では7.5x7.5度の視野で高度3000kmから見たときの範囲400x400kmを描いている。

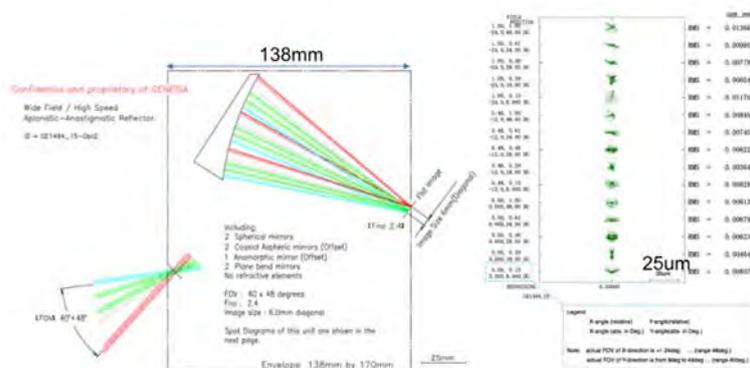


図2. 紫外イメージャーの光学設計例(左)と検出器面のスポット図。特許関連用、左図では7枚鏡のうち結像ミラーのみ描いている。

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のホスト観測点の1つであるWWLLN等の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VLFエネルギー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。また低緯度域での、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。さらに、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。

【研究方法】

1. マレー半島でのELF帯磁場観測への電磁環境調査、テスト観測及び本設置

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、H28年度に引き続き新たな2観測候補地において電磁環境調査およびテスト観測を実施する。その後、H28年度から合わせた4観測候補地から最も電磁環境の良好な地点に観測設備の本設置を実施する。なお、観測点の選定、設置および、観測データの転送と蓄積は、マレーシアの国際共同研究パートナーとの協働により実施する。

2. 国内ELF観測点におけるデータ取得とシステム整備

ISEE北海道陸別観測所に設置されたELF帯磁場観測点において、H29年度夏に近雷により故障した磁場センサーの交換作業を実施し、連続観測を再開する。

【研究結果と考察】

1. マレー半島でのELF帯磁場観測への電磁環境調査、テスト観測及び本設置

H28年度においてテスト観測を実施した2地点はいずれも、落雷に伴うELFトランジェント波形は受信可能ではあるものの、電磁干渉がかなり強い。そこでUPMゴメス教授と協議をして、より電磁干渉の少ないと考えられるマレー半島南東部および北部でのELF帯観測点候補として以下の2地点を紹介いただいた。そこで、これら2地点にて電磁環境調査及びテスト観測を実施した。

(a) UMP（マレーシア大学パハン校） - 電磁環境調査及び、テスト観測

H29年7月17日～7月18日にかけて、マレー半島南東部沿岸に位置するマレーシア大学パハン校ペカンキャンパスにおいて、Wan Ibrahim先生、Fkee先生の協力のもと、再

生エネルギー施設敷地内に、ELF観測装置(磁場センサー含む)を展開し、一昼夜にわたる連続波形観測を実施した。その結果、水平磁界周波数スペクトルから50 Hzとその高調波を含む電磁干渉は極めて小さく、その時間変動もまた小さいことが判明した。デジタルフィルタ処理による、50 Hz及びその高調波の周波数成分を除去したところ、落雷に伴うELFトランジェント波形が明確に受信できることが分かった。

#### (b) UniMAP (マレーシア大学プルリス校) – 電磁環境調査及び、テスト観測

H29年7月19日～7月22日にかけて、マレーシア北部のタイとの国境に近いプルリスにあるマレーシア大学プルリス校キャンパス内のモスクの横の敷地内において、Nizam先生らの協力のもと磁場センサーを展開し、数日間にわたる連続観測を実施した。その結果、電力線放射及び高調波による電磁干渉はスペクトルが広く比較的強いことと、100 Hz以下において広帯域の電磁干渉が間欠的に見られることがわかった。デジタルフィルタで除去したところ、落雷に伴うと考えられるELFトランジェント波形が受信できることが確認されたが、上記UMPに比べ波形に頂上されたノイズ成分は大きいことが判明した。

上記のテスト観測結果を踏まえて、H30年3月1日～3月7日にかけて、UMP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帯水平磁場二成分の連続波形観測を開始した。磁場センサーは、施設の建物から80 m程度離れたところに設置され、建物内にはデータ収録システム、UPSおよびルーターが設置された。その結果、前回訪問時のテスト観測と同様に、良好な波形を得ることができた。今後、マレーシアを中心とする東南アジア域の大電荷量落雷の調査を実施していく予定である。なお、本設置は、プトラジャヤ大学ゴメス教授、パハン大学のスタッフ(Nizam博士、Wang講師)、現地の工事会社(ケーブル埋設)とともに実施した。また、建物内からのデータ転送およびデータロガーのコントロールのための、日本からのネット接続も無事確立された。

## 2. 国内ELF観測点の整備

H29年10月18日～21日にかけて、ISEE北海道陸別観測点の森の中に設置してあるELF磁場観測システムの磁界センサー(東西成分)の交換を実施し、無事終了した。これは、H29年7月上旬に、同東西成分の波形に異常があることが判明したことによる。その後ロガーと信号ケーブルの結線を入れ替えたりした結果、センサー自体の故障であることがほぼ確定されたため、センサーの交換を実施した。現在、データの質は良好であり、波形の連続取得中である。今後、上記のマレーシアの観測結果との照合を実施予定である。

### 【まとめと今後の展開】

3年計画の2年目であるH29年度には、H28年度のマレーシア国内2観測候補地に加え、さらに2地点において落雷に伴うELF帯電磁放射の連続観測のための電磁環境調査およびテスト観測を実施した。その結果、マレーシア大学パハン校ペカンキャンパスにおけるテスト観測結果が最も良好であることが判明したため、同校に観測設備の本設置を実施した。今後、WWLLN等の落雷標定ネットワーク観測による雷標定データから、マレーシアで観測されたELFトランジェント波形との比較により雷を同定し、E雷落雷電荷モーメントやVLFエネルギーの空間分布を導出する。北海道ISEE陸別観測所にて実施中のELF観測システムの故障対応を行い、無事観測が再開された。

### 【研究成果発表】

Y. Hobara, J. Yamashita, R. Murai, T. Narita and H. Mitsuzuka, Spatial distributions of lightning electrical properties over Eastern part of Japan by ELF and LLP observations, URSI 2017 GASS, Montreal, Canada, 2017

村井峻、芳原容英ほか、風力発電施設への着雷事例を用いたELF帯電磁波観測により遠隔推定された落雷電荷モーメントおよび落雷電荷量推定精度の検証、電気学会平成29年度電力・エネルギー部門大会、東京、2017。

### 【謝辞】

今回の国際共同研究プロジェクトのおかげで、国内観測点の整備、マレーシアにおける新たな観測点の設置を行うことができました。ISEEおよびマレーシアの共同研究者の方々、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。