

1. 国際共同研究 目次詳細

(所属・職名は平成31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 |
|---------------------------------|---|-------------------------------|--------------------|---|-----------|
| 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 |
| Liu Huixin | 九州大学 | 理学研究院地球惑星科学部門 | 准教授 | 熱圏重力波と電離圏プラズマバブルの発生関係の検証 | 3 |
| 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遠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3 | 5 |
| 宮下幸長 | Korea Astronomy and Space Science Institute (韓国天文研究院) | 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 | 7 |
| 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 | 9 |
| 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 | 12 |
| 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 | 14 |
| 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 | 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 |
| 魚住禎司 | 九州大学 | 国際宇宙天気科学・教育センター | 特任准教授 | Pc1地磁気脈動の全球的発生・伝播特性に関する研究 | 19 |
| 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 | 21 |
| 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 | 24 |
| 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 | 26 |
| 尾花由紀 | 大阪電気通信大学 | 工学部基礎理工学科 | 准教授 | 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 | 28 |
| 中村琢磨 | オーストリア科学アカデミー | 宇宙科学研究所 | 任期付き常勤研究員 | 磁気圏尾部リコネクション過程における乱流的磁気ロープの発達過程の研究 | 30 |
| 吉川顕正 | 九州大学 | 国際宇宙天気科学・教育センター | 准教授 | 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 | 32 |
| 伊藤耕介 | 琉球大学 | 理学部 | 助教 | 太平洋における極端降水現象予測キャンペーンPRECIP2020の準備研究 | 34 |

(所属・職名は平成31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 |
|------------------------------------|---------------------|-------------------------------|----------------|---|-----------|
| 能勢正仁 | 名古屋大学 | 基盤研究部門 | 准教授 | 低緯度への誘導磁力計観測網の新規展開による高周波数電磁流体波動の研究 | 36 |
| 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 | 38 |
| 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評価に関する予察的研究 | 42 |
| 一本 潔 | 京都大学 | 大学院理学研究科附属天文台 | 教授 | 彩層微細構造のダイナミクスから探る太陽外層大気励起機構の解明 | 44 |
| 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 | 46 |
| 穂積裕太 | 電気通信大学 | 情報理工学研究科 情報・ネットワーク工学専攻 | UECポスドク研究員 | 衛星観測と地上複数点観測から明らかにする移動性電離圏擾乱の全球発生特性 | 48 |
| 野中敏幸 | 東京大学 | 宇宙線研究所 | 助教 | 宇宙線観測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 | 50 |
| 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 | 52 |
| 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 | 53 |
| 津田卓雄 | 電気通信大学 | 大学院情報理工学研究科 | 助教 | トロ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 | 55 |
| 齋藤 享 | 海上・港湾・航空技術研究所 | 電子航法研究所 | 上席研究員 | 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 | 57 |
| 高橋 透 | 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 | 59 |
| 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 | 61 |
| 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 | 63 |

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】

地球環境変動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。過去30年間に於いて環北極域の永久凍土地域では、気温上昇に伴う地温の上昇と永久凍土の融解が観測されている (Arctic Monitoring Assessment Program, 2017)。永久凍土表層の融解は、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 (Shuur et al., 2008)。したがって、活動層の深度を決める要因を明らかにしておく必要がある。

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の凍土 - 植生 - 大気システムの実態解明を行うことを目的とする。具体的課題として、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、2か所のカラマツ林を対象に、①活動層の空間変動の要因と②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サイトを調査対象とした。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、樹種構成や土壌タイプ、降水量、土壌水分量に違いがある (Kotani et al., 2014)。課題①に関して、昨年までの結果を補足するために2018年6月にEGの林内の4地点において試坑断面を作成し、地表面から10cm間隔で温度と土壌水分の鉛直プロファイルを測定して近傍での連続測定値と比較した。課題②に関しては、両サイトでの地中温度と土壌水分の連続測定値を用いることで、融解深度と温度・水分環境の季節変化とその年々変動を比較した。

【結果・考察】

①活動層の空間変動：EGで調査時 (2018年6月22-23日) の融解深度は20-40cmで、地表から5-10cmの有機物堆積層を除くと、土壌間隙率に近い土壌水分があり (体積含水率約40%)、同サイトでの連続測定からも同程度の値が得られた (図1)。図1(d)はカラマツ成木に近い地点で有機物堆積層が厚く、その下の土壌水分は他地点よりも低かった。②の定点観測では活動層内の水平方向の不均一性にも留意する必要がある。②活動層の時間変動：10-120cmの地中温度の季節変化では、暖候期 (5-9月) には両サイトの違いは小さかった一方、土壌凍結期間にはSPのほうが低温となった。SPに比べてEGでは年最高・最低温度の出現が約1か月遅かった。土壌の凍結 (融解) に伴う潜熱放出 (吸収) により冷却 (昇温) が抑制されるゼロカーテン期間は、土壌水分の多いEGでSPより長かった。さらに、積雪深がEGでSPより大きいことも、EGで冬季の温度低下を抑制した一因として考えられた。一方で暖候期には、融解深度の季節変化には両サイト間に明確な違いがみられなかった。SPでは融解前の地温は低いものの、林内への日射透過率が高く (林内日射量はEGの1.3倍) EGよりも有機物堆積層が薄いことなどから、効率よく地中の昇温が進んだと考えられる。

次に、両サイトの2010-2017年における年々変動を比較したところ、融解深度の季節進行 (特定日の融解深度) では、その年々変動の傾向は両サイトで類似していた (図

2)。たとえば2012年と2013年には、他の年に比べて夏季の融解深度が深く、各深度での融解ゼロカーテン期間が短かった。この両年は、土壌水分や6-8月気温については特異的な年ではなく、融解開始時の5月平均気温が平年よりも高いことが共通していた。両サイトともこの期間の土壌水分は比較的安定しており、気温の年々変動が影響したと考えられる。1998年からの測定値のあるSPサイトでは、1998年から現在にかけて季節融解速度が増加しているが、2005-08年に続いた活動層湿潤化の後に、表層よりも深層での加速が有意であった (Kotani et al. 2019)。これと同期間に、とくに凍結時のゼロカーテン期間が長くなり、活動層表層では湿潤化以前に戻りつつあるが、40cmより深層では湿潤化の痕跡が凍結融解過程に影響を及ぼしている。

【まとめ】

土壌水分、積雪深、林冠および林床の植生被覆の違いを反映して、カラマツ林での活動層の融解深度とその年変動において、両サイト間での相違点がみられた。とくに土壌水分はサイト間の違いをもたらす要因と考えられるが、各サイトでの年々変動への影響は2010年以降では小さかった。さらに、今回明らかになった、暖候期以外の時期に両サイトでの地中温度の違いが大きくなることは、植物活動期の開始やカラマツ落葉後の森林炭素循環に影響を及ぼすと考えられる。活動層内の地温と土壌水分の季節推移と森林蒸発散やCO₂フラックスとの関係を明らかにすることを最終年度の課題としたい。

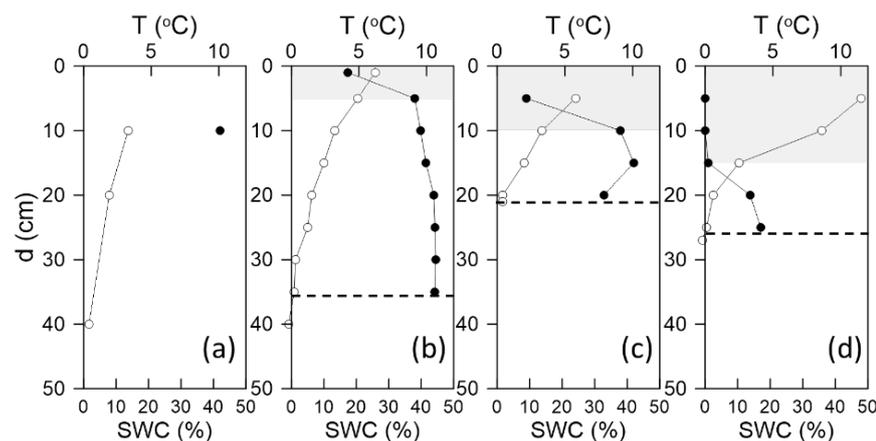


図1：SPおよびEGにおける (a)連続測定、(b,c,d)手動測定による活動層内の温度T(○)と土壌体積含水率SWC(●)の鉛直プロファイル。網掛けは有機物堆積層、破線は融解深度を示す(2018年6月22-23日EGサイト)。

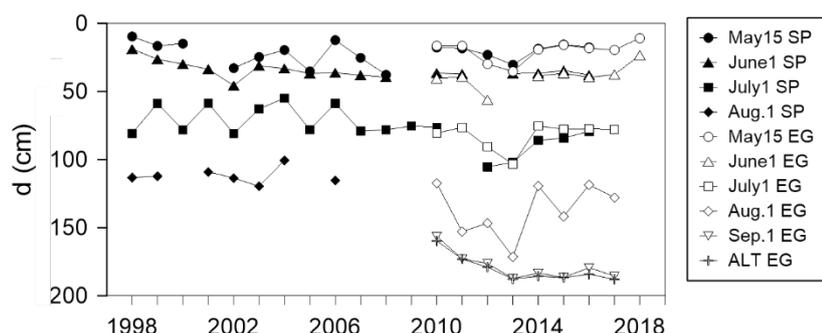


図2：SPおよびEGにおける、ある特定の日の融解深度の年々変動。SPでは2000年、2005年、および2007年以降において、8月1日に120cm(計測最深度)が融解していたため、融解深度の推定ができていない。

【引用文献】

Kotani et al., 2014. *Ecohydrol.* 7, 209-225. Kotani et al., 2019. *Agric. For. Meteorol.* 265, 295-309. Loranty et al., 2018. *Biogeosci.* 15, 5287-5313. Shuur et al., 2008. *Biosci.* 58, 701-714.

【成果発表】

A. Kotani, T. Ohta, T. Hiyama, T. Nakai, Y. Iijima, T. Maximov. Variation of seasonal thaw depth at permafrost larch forest in eastern Siberia. Japan Geoscience Union meeting, 2018 May 20-24, Makuhari.

小谷亜由美, 太田岳史, 檜山哲哉, T.C. マキシモフ. 東シベリアのカラマツ林における永久凍土の季節融解層. 水文・水資源学会研究発表会2018年9月12-14日, 津.

熱圏重力波と電離圏プラズマバブルの発生関係の検証
The role of thermosphere gravity waves in plasma bubble formation

Liu Huixin 九州大学・地球惑星科学専攻

赤道プラズマバブル(EPB)は、日没後の赤道電離圏F領域に出現するプラズマ不規則構造であり、GPSを用いた測位に不具合を起こすなど大きな影響を与える。EPBの生成メカニズムは日没後の電離圏下部に生じる Rayleigh-Taylor 不安定であると考えられているが、不安定の発生に必要なタネとなる初期擾乱が何かについては謎のままである。その理由の一つは、これまで電離圏下部の中性大気(熱圏)の直接観測は観測手法が限られるため非常に少なく、プラズマ観測から間接的に推測されたものがほとんどであったからである。

本研究は、高度約250kmを飛翔するGOCE衛星によって観測された電離圏F領域下部における大気重力波、中性大気密度と風の直接観測と、電離圏赤道プラズマバブル(EPB)の衛星・地上観測と、高精細EPBモデルを併用して、大気重力波のEPB励起源としての役割を詳細に解明することを目的とする。

今年度の研究成果として以下4つ挙げられる。① GOCE衛星観測から初めて得られて電離圏下部における重力波の全球分布と季節変動などの特徴を5月に開催された日本地球惑星科学連合と12月に開催されたアメリカ地球物理連合で発表した(Liu et al., 2018)。重力波は電離圏赤道プラズマバブルの発生頻度の高い地域ではより活発になることは明らかになった。② 高精細EPBモデルをもちいて、垂直風のプラズマバブルが発生における役割を調べた。そこで、小さいスケールの重力波はより効果的にプラズマバブルのシーズになることがわかった。これらの結果は6月に開催されたAOGS国際会議で発表し(Yokoyama et al., 2018)、現在論文にまとめ、投稿中である(Yokoyama et al., 2019)。③ 地上と衛星からの同時観測により、プラズマバブルの上方にある赤道付近のプラズマプロブを見出した。この観測は、プロブとバブルの位置関係は従来のイメージ(プロブはバブルの両端にある)と違うことにより、プラズマプロブの発生機構を調べるのに面白い事例である。詳しい分析によ

り、これらのレーアなブロブはバブル成長の intermedia フェーズにおける赤道付近で形成された可能性が高いという結論に至る (Wang et al., 2019、投稿中)。④GOCE 衛星中性大気観測と EAR レーダー電離圏不規則体観測を用いて、大気重力波のプラズマバブル発生における役割を調べた。その結果、プラズマバブルは発生した時は大気重力波の活発な時であったことがわかった。しかし、多数プラズマバブルの発生と単プラズマバブルの発生における大気重力波の活動はあまり変わらない。よって、多数と単数を決めるのは、電離圏のプラズマに要因するかもしれない(垂直ドリフトなど)。これらの成果が現在投稿中である (Abadi et al., 2019)。⑤ 2013年のメージャ成層圏突然昇温における F 層シンチレーションの変化を、COSMIC/FORMOSAT-3 衛星観測を用い調べた。その影響は経度によって大きく異なることがわかった。これらの成果が現在投稿中である (Yu et al., 2019)

Abadi, P., Y. Otsuka, K. Shiokawa, **Huixin Liu**, M. Yamamoto, K. Hozumi, T. Tsugawa, P. Supnithi, and T. Le Truong, Roles of pre-reversal enhancement and gravity wave activity on the occurrences of equatorial plasma bubbles, JGR, submitted, 2019.

Wang, Z., **Huixin Liu**, J. Shi, G. Wang, X Wang, Plasma blobs concurrently observed with bubbles in the Asian-Oceanian sector during solar maximum, JGR, under review, 2019.

Yokoyama, T., H. Jin, H. Shinagawa, **Huixin Liu**, Seeding of equatorial plasma bubbles by vertical neutral wind, JGR, submitted, 2019.

Yu, T., H. Ye, **Huixin Liu**, C. Xia, X. Zuo, X. Yan, N. Yang, Y. Sun, B. Zhao, COSMIC/FORMOSAT-3 observations of ionospheric F-layer scintillation weakening during the January 2013 major sudden stratospheric warming event, GRL, submitted, 2019.

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

笠羽 康正、東北大学・大学院理学研究科・地球物理学専攻

1. 研究目的

東北大は、数十年來に渡って宮城・福島に設けた太陽・木星電波観測施設に加え、ハワイ大の協力で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 シュミット望遠鏡(T40) 可視観測で「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 カセグレン望遠鏡(T60)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。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、火星で米探査機 MAVEN および欧探査機 ExoMars Trace Gas Orbiter（2017/4から本格観測開始）、金星で日 Akatsuki 探査機との連携観測を国際地上観測ネットワークの一翼を担って実施した。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）の活用も連動して行った。さらに、ハワイ大等とは1.8-m 惑星・系外惑星専用望遠鏡 PLANETS 計画にも取り組んでいる。

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できる機会を提供した。可視域では、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、磁気圏へのマスローディング推定量を与えた。また、IRTF-3m・Subaru-8 では近赤外オーロラ発光による熱圏構造・変動観測、中間

赤外大気光・熱発光の変動観測に成功（成果の一部は Ge et al. (2019)、Kita et al. (2018)、Watanabe et al. (2018)として出版）。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（成果の一部は Kita et al. (2019)、Tsuchiya et al. (2019)として出版）。これら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（成果の一部は Nakamura et al. (2019)として発表）。

(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 CO₂ 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、MAVEN・TGO（火星）・Akatsuki（金星）との共同観測によって、高層大気変動と対流圏-中間圏-熱圏/電離圏結合への示唆を得た。特に火星については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となる。また可視分光による火星流出大気の詳細も試みた。（成果の一部は、Kasaba et al. (2019)、Nakagawa et al. (2018)、Suzuki et al. (2018)、Takami et al. (2018)で発表）。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観測も成功した（成果の一部は Aoki et al. (2018)で出版済）。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・未来」「太陽活動による翻弄」の視点で「兄弟比較惑星学」の一部として遂行している。

(4) 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整備を継続するとともに、今後の発展を目指して Visible 高分散分光器の開発、MEMS を用いた光マスクシステムの開発、近赤外線 Echell 分光器、中間赤外線レーザーヘテロダイン分光器の開発を進めている。また、ハワイ大等と建設を進める 1.8m 惑星/系外惑星望遠鏡 PLANETS 推進を進めている（経過の一部は Sakanoi et al. (2018)で出版済、また Kagitani et al. (2018)、Sakanoi et al. (2019)で発表）。この開発は、名大・京大の赤外線天文グループを巻き込んだ幅の広いものに発展しつつある。

4. 成果発表

様式 1-1 を参照されたい。

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、Kim Hyang-Pyo (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

昨年度は、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、およびERG衛星による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解析を進めてきた。前者の解析

に必要な高時間分解能の磁場データの較正にまだ時間がかかるため、2年目の本年度は、後者の解析を進めた。

この解析では、地球から地球半径の4-5倍の距離で観測された3例について調べた。そのうち2例については南極昭和基地でオーロラ爆発を観測したが、拡大したオーロラがERG衛星に磁気的に対応する場所に到達したとき、ERG衛星の場所で磁場双極子化が始まった。磁場双極子化中に、磁場は1分程度の周期で双極子状形状と尾部状形状に交互に振動していた。磁場が双極子状になった時、Pi2周波数の波動の磁力線方向の成分は谷だった。数keVから数100 keVの高エネルギーイオン・電子フラックスは反位相で強まっていたので、磁気音波はスローモードだったことを示唆する。これらの観測は、バルーニング不安定性の特徴と一致し、サブストーム中にかなり地球に近い内部磁気圏でもバルーニング不安定性が起こり得ることを示す。さらに、Pi1周波数から電子サイクロトロン周波数の上までの広い周波数帯で電磁波や静電波が観測されたが、プラズマシートで磁場が双極子状の時に現れる傾向にあることを見出した。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。

この解析結果は、2018年5月に韓国内で開催された韓国宇宙科学会2018年春学術大会と千葉市で開催された日本地球惑星科学連合2018年大会、および2018年12月にアメリカ・ワシントンDCで開催されたアメリカ地球物理学連合秋季大会で発表した。

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。また、バルーニング不安定性との結合など、高周波波動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を進めたい。

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

石川 守（北海道大学・地球環境科学研究所）

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、永久凍土の温度の観測網をグローバルに拡充し、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・点位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）。

モンゴルでは、永久凍土の分布が湿潤な地盤の分布とよく対応し、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、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。

モンゴルに接し、連続的永久凍土帯に位置する東シベリアの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、近年の温暖化による地下環境の激変は検出されなかった。

一方、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。

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2年目）によって、以下に示す結果が得られた。

- 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、高緯度域や乾燥土壌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。これらの結果をまとめた論文が受理・掲載された(Ishikawa et al., 2018)。また、多国間協同で進められているGTN-Pの永久凍土観測の成果を取りまとめた総括的な論文が受理・掲載され(Biskaborn et al. 2019)、ここにモンゴルの長期観測結果も含まれた。
- 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。この分布図上での永久凍土外縁域では高い割合で湧水が枯渇していることが現地調査や衛星画像解析などによって示された。
- 3) 湧水を季節ごとに採水し、そのトリチウム濃度とCFCs濃度を分析した結果、トリチウム濃度とCFC-12濃度の、採水地点ごとの濃度の高低(順位)とそれらの時系列変動に、よい一致が見られた。サーモカルスト地形に存在するGalutでは、前年度の結果と同様、地下氷融解水が湧出していることがわかった。この地点のトリチウム濃度の時系列変化を見ると、時間を経るにしたがってトリチウム濃度が上昇していることから、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(Orookh)のトリチウム濃度の時系列変化を見た場合、近年の降水の寄与が減少している可能性が見出された。その傾向は、採水期間は短いものの、同じくサーモカルスト地形に存在しないTsetserlegでも同様であった。ただし、OrookhのCFC-12濃度の時系列変動に着目した場合、近年の降水の寄与が季節変化することも考えられた。すなわち、暖候期が終了する頃(10月)、暖候期に降水として地表にもたらされ、地下に浸透した水が比較的素早く湧出する可能性も見出された。

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、高緯度域や乾燥土壌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。永久凍土分布域外縁部での湧水の枯渇傾向は、

現段階では十分な数の事例を解析した結果に基づいていない。そのため次年度（最終年度）はハンガイ山脈全域の湧水動態を悉皆的に調査し、各湧水の動態と永久凍土や地形との対応を多くの事例に基づいて解析する。

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。次年度には、季節別に採水した湧水の分析を全て終了させ、トリチウム濃度とCFC-12濃度の季節変化を生じさせる原因とともに、この地域の永久凍土融解の長期変化傾向について考察し、本国際共同研究をまとめる予定である。

引用文献

- Biskaborn B K, Smith S L, Noetzli J, Matthes H, Vieira G, Streletskiy D A, Schoeneich P, Romanovsky V E, Lewkowicz A G, Abramov A, Allard M, Boike J, Cable W L, Christiansen H H, Delaloye R, Diekmann B, Drozdov D, Etzelmüller B, Grosse G, Guglielmin M, Ingeman-Nielsen T, Isaksen K, Ishikawa M, Johannsson M, Johannsson H, Joo A, Kaverin D, Kholodov A, Konstantinov P, Kröger T, Lambiel C, Lanckman J P, Luo D, Malkova G, Meiklejohn I, Moskalenko N, Oliva M, Phillips M, Ramos M, Britta K, Sergeev S D, Seybold C, Skryabin P, Vasiliev A, Wu Q, Yoshikawa K, Zheleznyak M and Lantuit H 2019 Permafrost is warming at a global scale. *Nature Communications* **10**, 264.
- 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.

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[1]。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

Modeling of Cloud Microphysics: Can we do better?

超水滴法を使うことにより、数値拡散や計算コストと言ったビン法の直面する数値的問題が解決あるいは低減され、詳細な雲微物理素過程の直接計算が可能となる。超水滴法の持つこれらの利点と将来展望について詳しく論じる論文を米国気象学会誌に投稿し受理された[4]。

Particle-based Cloud Modeling (粒子ベース雲モデリング) に関する国際研究ネットワークの立ち上げ

超水滴法に代表される粒子法を使った雲モデルに対する関心の高まりを受け、国際研究ネットワーク(<http://particle-based-cloud-modelling.network>)を立ち上げた。現在10ヶ国から計20の研究グループが参加している。これによりグループ間の密な連携と情報共有が促進され、粒子ベース雲モデルの開発と応用研究が加速すると期待できる。今後活動

資金の獲得も進めていく。

超水滴法の氷相過程への拡張

氷粒子の形態変化を陽に予報できる精緻な数理モデルに対して超水滴法を適用し、混相雲の中で氷晶が生成・成長し霰・雹・雪片を形成していく様をより忠実に表現することのできる数値モデルを構築した。

孤立した積乱雲の数値実験を通して性能検証を行ったところ、氷粒子の大きさと質量の関係が経験則と概ね整合しているなど、良好な結果が得られた。現在モデルの詳細と性能検証の結果を報告する論文の執筆を進めている。

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評価

GrabowskiとAbadeは、超水滴法の理論的枠組みを使うことで、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[2]。孤立積雲の3次元計算を通してその性能検証を行う共同研究を進めた。

大気粒子の帯電が雲に及ぼす影響の評価

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 (Electro coalescence) を評価する共同研究を推進した。まずは、昨年度に開発した帯電した雲粒同士の衝突併合確率のモデルをより高精度なものに改良した。現実の大気条件を使ったいくつかのケーススタディを通して、Electro coalescenceの影響を評価する実験を現在進めている。

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更に拡大し、雲モデルの開発も進展している。

5. 引用文献

- [1] Shima, S., et al., Q. J. R. Meteorol. Soc. 135, pp.1307-1320 (2009).
- [2] Grabowski, W.W. and G.C. Abade, J. Atmos. Sci., 74, 1485–1493 (2017).

6. 成果発表

査読論文

- [3] Kajino, M., et al., 2019: NHM-Chem, the Japan Meteorological Agency's regional meteorology. J. Meteor. Soc. Japan, 97, <https://doi.org/10.2151/jmsj.2019-020>.
- [4] Grabowski, W.W., H. Morrison, S. Shima, G.C. Abade, P. Dziekan, and H. Pawlowska, 0: Modeling of cloud microphysics: Can we do better?. Bull. Amer. Meteor. Soc., 0, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0005.1>.
- [5] Sato, Y., Shima, S., & Tomita, H. (2018). Numerical convergence of shallow convection cloud field simulations: Comparison between double-moment Eulerian and particle-based Lagrangian microphysics coupled to the same dynamical core. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 10, 1495–1512. <https://doi.org/10.1029/2018MS001285>

国際発表: 11 件, 日本語発表: 5 件, 国際研究会の主催: 1 件

改良された汎世界的宇宙線観測ネットワークによる宇宙天気観測II

Space Weather observations using the upgraded Global Muon Detector Network (GMDN) II

加藤 千尋, 信州大学・理学部

宇宙線強度の汎世界的観測ネットワーク(GMDN: Global Muon Detector Network)を用いた宇宙天気研究を展開し、高エネルギー銀河宇宙線の長大なリーチ(ジャイロ半径~0.05 AU, ピッチ角散乱の平均自由行程~0.1 AU)を活かして、大規模な太陽磁場構造の変動の実態と、その中での宇宙線輸送過程を解明することを目的とする。現在太陽活動は第24-25サイクルの極小期を迎え、銀河宇宙線強度は1960年以降最高の強度を記録しようとしている。このような時期は、ドリフト効果など太陽圏全般に亘る大規模な宇宙線輸送過程を研究する絶好の機会である。

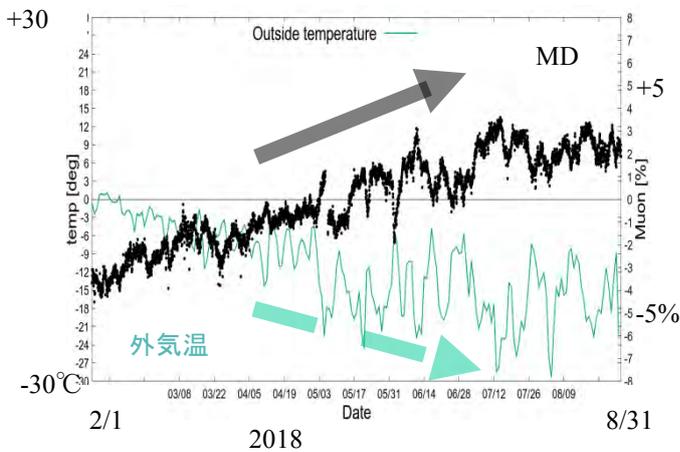


図1 観測されたミュオンの負気温効果

本研究の目標は、(1)メキシコのSciCRTをミュオン計として用い、GMDNが抱える観測の空白域を埋める、(2)南極昭和基地宇宙線計を用いて大気ミュオン強度に対する大気効果の実験的検証を行い、大気効果の補正法を確立することによりGMDNによる宇宙線観測を飛躍的に改良することである。本年度は(2)の昭和基地宇宙線計のデータについて、質的検証を行うと共に、大気効果や宇宙天気現象の観測有無を調べた。図1は昭和基地ミュオン計(MD)によって観測されたミュオンの負気温効果である。同時観測を行っている中性子計データと共に解析し気温効果に関する理解を深めることに繋がるものと期待している。図2は観測された宇宙天気現象の例である。GMDNや他の観測データを用いて解析することでその

構造等を明らかにしたい。これらの結果については、以下の研究集会において発表されている。

- JpGU 2018.5 “南極昭和基地での宇宙線観測による宇宙天気研究”
- JPS 2018.9 “南極昭和基地に新たに設置した宇宙線観測装置を用いた初期解析”
- SGEPS 2018.11 “南極昭和基地での宇宙線観測による宇宙天気研究”
- ISEE シンポジウム太陽圏物理学の最新動向 2019.2 “Space Weather observations using newly installed CR detectors at Syowa Station in the Antarctic”
- JPS 2019.3 “南極昭和基地での宇宙線観測による宇宙天気研究III”

本年度の研究活動の結果、観測データは期待通りの精度を持っており、大気効果及び太陽活動静穏期における宇宙天気現象を観測していることが確認できた。観測は継続しているのでイベントの観測例が増えることを期待している。これらデータの解析によって、宇宙線による宇宙天気研究を飛躍的に発展させるという目的に近づくことができるものと考えている。

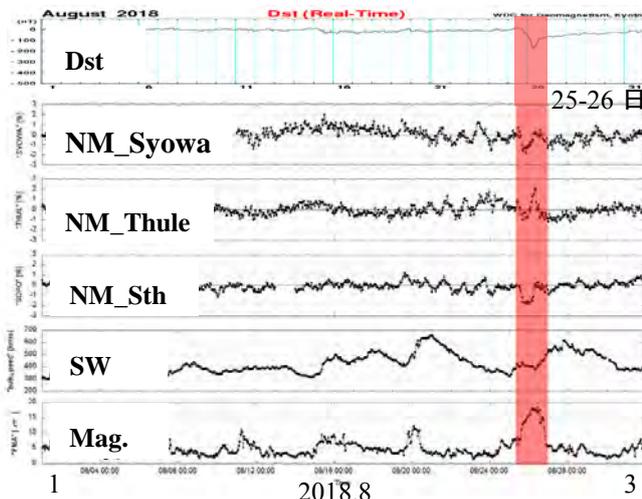


図2 宇宙天気現象の観測例。

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、有機炭素や地下水の巨大な貯蔵庫であり、最新の 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、地下水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した。ここでは、この古環境復元に年代軸を与えるための放射性炭素年代 (^{14}C) 測定について、試料中の様々な有機炭素を利用した比較実験について報告する。

研究方法

本報告で対象とする試料は、ロシア・サハ共和国ヤクーツク市から約 150km 東 ($61^{\circ} 58'N$, $132^{\circ} 36'E$) の Churapcha および、約 90km 北東 ($62^{\circ} 33'N$, $130^{\circ} 57'E$) の Syrdakh で 2017 年 9 月に採取した永久凍土堆積土および地下水である。ここで地下水はアイスウェッジ (ice wedge) の成長によってできたと仮定し、以降 IW とする。いずれのサイトにおいても、IW は地表層から約 2m 深から下に分布しており、活動層は約 2m であると推定される。 ^{14}C 年代測定の対象とした有機物は、露頭から採取可能な深度 2–3m の層から採取した。IW が分布する堆積層の土層 (約 2.8m 深) からは、大型の植物遺体を採取し、洗浄したものを堆積土層の年代測定対象試料とした。一方、それぞれの露頭からブロック状および円柱状の IW 試料を採取した。IW の年代決定のためには、試料に含まれる様々なタイプの炭素 (気泡中 CO_2 ・Particulate Organic Carbon (POC)・Dissolved Organic Carbon (DOC)・Dissolved Inorganic Carbon (DIC)) を年代測定の対象とした。対象地域の 2m 以深に存在する地下水中には大きな植物遺体は見つからずレスなどの鉱物土粒子が主な混合物であり、他の地域で IW の年代測定に用いられる植物遺体による年代測定 (Meyer et al., 2010 など) が難しい。IW 試料は表面をナイフで削った後、凍結したまま真空パックした。この試料を真空デシケータ内で融解させ、気泡中の CO_2 を回収して、AMS 測定試料の一つとした。融解後の液体試料は、 $0.7\mu\text{m}$ の石英フィルターを通して分別された固形分を POC とした。残った液体試料を使い、凍結乾燥させた残りから DOC を取り出した。DIC 試料作成には、別途用意した IW 試料を、 CO_2 を除去したデシケータ内で融解させた後、丸底フラスコ内に移し、塩化ストロンチウムを加えて炭酸ストロンチウムとして 3–4 日間沈殿させた。フラスコ内を真空に引き、沈殿した炭酸ストロンチウムにリン酸を加えて発生させた CO_2 を DIC 年代測定対象とした。

研究結果と考察

堆積土層中の植物遺体の ^{14}C 年代は 22–24 kBP の範囲であり、ほぼ同時代の堆積層であると考えられる。一方、IW 中の各種炭素の年代は、10–40 kBP と大きなばらつきを示した。IW 中炭素試料の中で、POC 年代が最も古かった (27–40 kBP)。周囲に年代の古い有機炭素が保存されやすい永久凍土帯では再堆積による年代誤差が大きい (Mackay, 1990 など) ため、POC は正確な IW 形成年代を示さない (Lachniet et al., 2012) と考えられる。DOC 年代は、測定対象とする粒径によって 9–25 kBP と大きく変動した。巨大な IW が比較的温暖な完新世に形成されたとは考え難く、また、対象がアイスウェッジと仮定すると、周囲の土層 (植物遺体年代 22–24 kBP) の堆積時期よりも IW 形成年代は若いはずである。したがって、DOC 年代の変動は現段階では説明がつかない。一方、DIC 年代は、Sydakh で 13 kBP、Churapcha で 14–18 kBP と場所による違いがあるものの、他の炭素試料年代に比べると年代幅が狭く、アイスウェッジが形成したと考えられる更新世後期の年代を示している。また、気泡中 CO_2 も DIC 年代と同様の結果を示した。

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 DOC あるいは CO_2 やメタンを測定対象とすることを推奨している。一方、本研究からは、IW 形成年代の推定には DOC や気泡中気体だけでなく、DIC 年代も含めた比較を行い、他の地質学的・古環境学的情報と併せて総合的に考察する必要があることがわかった。特に、大きな植物遺体が得られにくい地下氷の形成年代の推定において、放射性炭素年代測定の対象として DIC を利用することが有効であることが示された。

参考文献

- Lachniet, M., Lawson, D., & Sloat, A. (2012). Revised ^{14}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
- Mackay, J. R. (1990). Some observations on the growth and deformation of epigenetic, syngenetic and anti-syngenetic ice wedges, *Permafrost and Periglacial Processes*, 1(1), 15–29, doi: 10.1002/ppp.3430010104.
- Meyer, H., et al. (2010). Lateglacial and Holocene isotopic and environmental history of northern coastal Alaska - Results from a buried ice-wedge system at Barrow, *Quaternary Science Reviews*, 29(27–28), 3720–3735, doi: 10.1016/j.quascirev.2010.08.005.

成果発表

- 佐藤里名・南 雅代・岩花 剛・檜山哲哉, 地下氷の高精度 ^{14}C 年代決定手法の確立, 2018 年度名古屋大学宇宙地球環境研究所年代測定研究シンポジウム, 名古屋, 2019 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(Arc-Continental collision)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世界でも珍しいテクトニクスセッティングに位置している (Ota & Kaneko 2010)。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、現在進行形中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。台湾東部に分布するYuli帯は、台湾造山帯の中で最も変成度の高い領域であるが、その急峻な地形と植生によって詳細な変成履歴は未だに不明な点が多い。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(Beyssac et al., 2002; Aoya et al. 2010)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】本年度はプロジェクト3年目に当たり、これまで炭質物ラマン温度計を用いて分析した泥質変成岩試料の変成温度見積もりデータを精査し、特徴的な温度分布を示す試料に着目してYuli帯の変成履歴に関する議論を行った。また、年代測定を行うため、砂質変成岩からジルコン分離を試みた。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。今年度が最終年度であるため、これまでの分析によって得られた成果を総括して論文にするため、Tsai教授とメールでの綿密な議論を行うとともに、3月に瀨瀨が台湾に赴いて議論を行った。

【研究結果】これまでに得られたデータのうち、変成温度分布が非常に幅広い範囲を示す特徴的な3つの試料(図1)に着目して、その意義と解釈に関する論文を公表した(成果発表1)。論文では、幅広い温度を示す理由として、(1) 碎屑性石墨の混在、(2) 短い変成反応時間における反応速度の異なる石墨の混在について議論した(図2)。得られた温度分布ヒストグラムを見ると、1試料(YL10N01)は2つのピークを示したため、(1) 碎屑性石墨の混在の可能性が高いと結論付けた。一方で、2試料(F10803, C121107)は連続的な1つのピークを示したため、(2) 反応速度の異なる石墨の混在の可能性が高いとした。(2)の仮説が正しい場合は、Yuli帯の変成温度継続時間は100万年よりも短い可能性が示唆された。この継続時間は一般的な広域変成帯と比較すると優位に短く、Yuli帯の変成履歴を議論する上で重要なデータとなる可能性が高い。一方で、変成年代を制約するためにジルコン分離を試みたが、自身はジルコン分離の経験が無く上手くできなかったため、専門の機関(蒜山地質年代学研究所)に依頼した。しかし、専門の機関でもジルコンは分離されなかった。ジルコン分離のために用いた試料は有白色な砂質変成岩であるため、ジルコンを含んでいる可能性が高いと考えていたが、今回の結果から、Yuli帯の砂質変成岩にはジルコンがほとんど含まれていない、という興味深い結果が得られた。この結果は、Yuli帯の物質循環や沈み込み時の化学的環境やを考慮する上で重要な基礎データとなりうる。

【考察・まとめ】Yuli帯は世界的に見て非常に若く、地震活動や地殻変動を議論する上で重要な地質帯である。炭質物ラマン温度計によって得られた変成温度は他の広域変成帯と比較するとバラつきが大きく、その理由として碎屑性石墨の混入と短い変成反応時間が挙げられる。従来、石墨の結晶化度は不可逆であり炭質物ラマン温度計は最高変成温度を反映する、とされていたが、ヒストグラムの分布を考慮すると、後背地の情報や反応時間に関する議論が可能であることを示した。本研究の結果は、Yuli帯の変成履歴の理解に大いに貢献するとともに、炭質物ラマン温度計のデータ解釈においても大きな発展となる成果である。

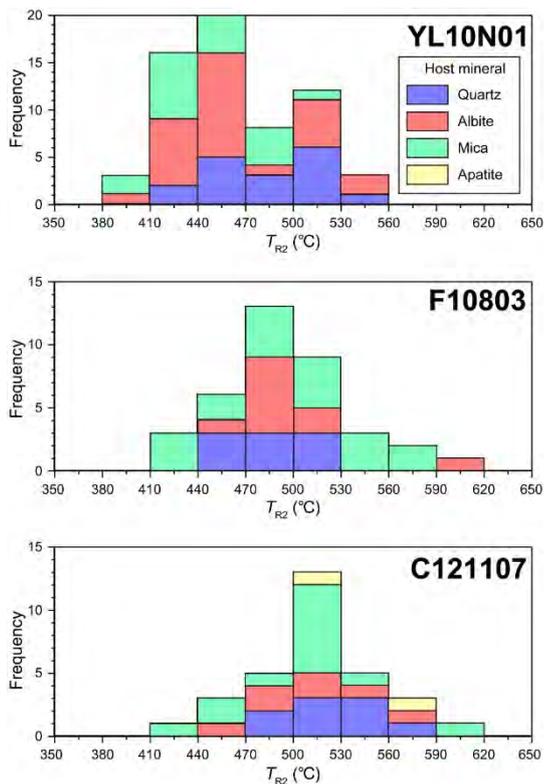


図 1. Yuli 帯の変成温度ヒストグラム

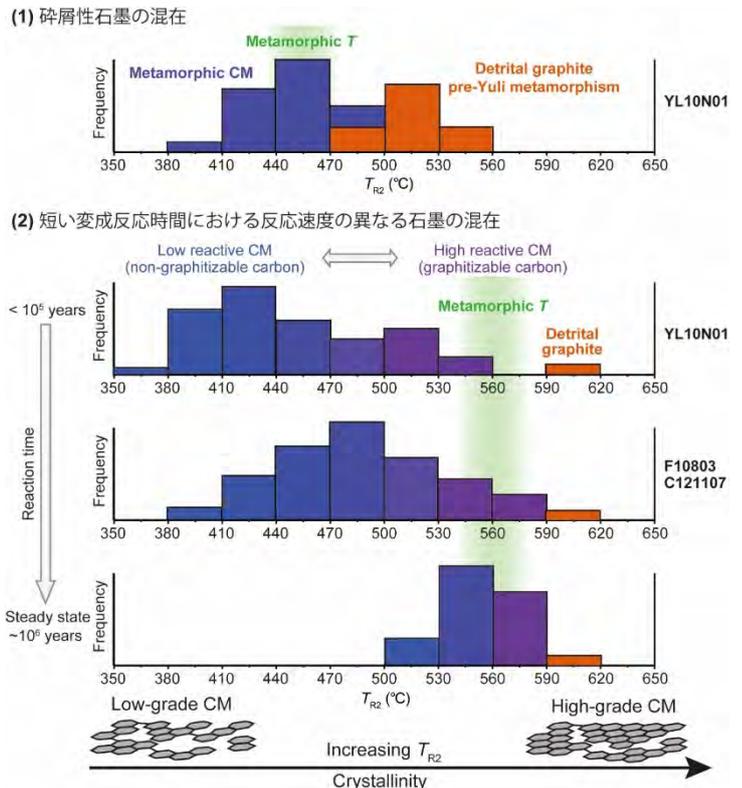


図 2. 幅広い変成温度を示す 2 つのアイデア

【引用文献】

- Aoya, M., Kouketsu, Y., Endo, S., Shimizu, H., Mizukami, T., Nakamura, D., and Wallis, S. (2010) Extending the applicability of the Raman carbonaceous-material geothermometer using data from contact metamorphic rocks: *Journal of Metamorphic Geology*, v. 28, p. 895–914, doi: 10.1111/j.1525-1314.2010.00896.x.
- Beysac, O., Goffe, B., Chopin, C., and Rouzaud, J.N. (2002) Raman spectra of carbonaceous material in metasediments; a new geothermometer: *Journal of Metamorphic Geology*, v. 20, no. 9, p. 858–871.
- Ota, T., and Kaneko, Y. (2010) Blueschists, eclogites, and subduction zone tectonics: Insights from a review of Late Miocene blueschists and eclogites, and related young high-pressure metamorphic rocks: *Gondwana Research*, v. 18, no. 1, p. 167–188, doi: 10.1016/j.gr.2010.02.013.

【成果発表】

学術論文 (査読あり)

1. Yui Kouketsu, Chin-Ho Tsai, Masaki Enami (2019) Discovery of unusual metamorphic temperatures in the Yuli belt, eastern Taiwan: new interpretation of data by Raman carbonaceous material geothermometry: *Geology*, in press

学会発表

2. Yui Kouketsu, Chih-Ying Yeh, Chin-Ho Tsai, Masaki Enami, Wide variety of crystallinity of carbonaceous materials in metasedimentary schists in the Yuli belt, eastern Taiwan, JpGU2018, SMP34-01 (口頭), 千葉県幕張, 2018年5月20日
3. Chih-Ying Yeh, Chin-Ho Tsai, Yui Kouketsu, Masaki Enami, Chiao Liu, A new discovery on spatial variation in metamorphic conditions of metasediments across the Yuli belt, eastern Taiwan: RSCM constraints and tectonic implications, JpGU2018, SMP34-P06 (ポスター), 千葉県幕張, 2018年5月20日

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

魚住 禎司、九州大学 国際宇宙天気科学・教育センター

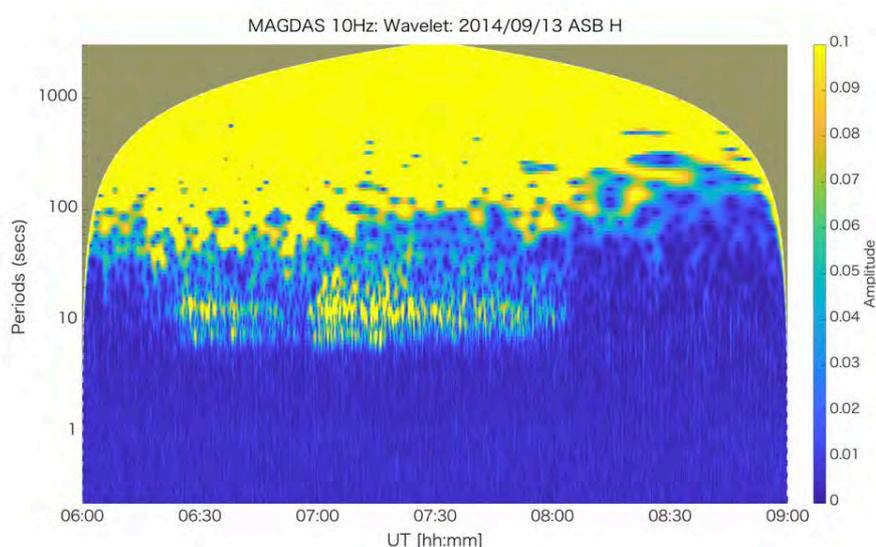
研究目的

EMIC (電磁イオンサイクロトロン) 波動は磁気圏プラズマの高エネルギー化をもたらす波動現象として注目度が高く、宇宙の安全・安心な利用という観点からもその包括的な理解が求められている。2016年12月に打ち上げられた我が国の内部磁気圏探査衛星「あらせ」も EMIC 波動がもたらす波動粒子相互作用の解明が大きな目標となっている。人工衛星による「その場観測」は高精度なデータを取得できる一方、現在どれくらいの規模で EMIC 波動が励起され、どのような分布をしているのかを把握することは困難である。本研究では、九州大学国際宇宙天気科学・教育センター(ICSWSE)が運用する世界最大の地磁気リアルタイム観測ネットワーク (MAGDAS) 観測点に設置されたフラックスゲート型磁力計によって 10Hz サンプリングでデータを取得し、EMIC 波動と密接な関わりを持つ Pc 1-2 帯の地磁気脈動の全球的発生特性とその発生・伝播機構を解明することを目指す。

研究結果

本年度は、過去に MAGDAS 観測点で試験観測されてきた 10Hz サンプリングデータを取りまとめてデータベースを構築し、そのデータの中から典型的な現象例を探し出して初期解析を行なった。下図は北海道の芦別観測点で2014年9月13日に観測されたデータを用いて作図した wavelet スペクトル図である。周期約10秒を挟んで短周期側と長周期側に two-band 構造を持つ Pc 2 脈動が発生していたことが確認できる。この Pc 2 イベントは、日本のみならず、ロシア、台湾、ベトナム、フィリピン、マレーシア、ハワイ、オーストラリア、ブラジル、インドなど、中緯度から磁気赤道域にかけて南北両半球で昼側、夜側同時に発生していた。このイベント例に類似した two-band 構造を持つ高エネルギー重イオンによる EMIC 波動が内部磁気圏で観測されている [Yu et al., 2018 JGR]。この報告例から、本グローバル Pc 2 イベントは内部磁気圏における高エネルギー重イオンによる波動粒子相互作用現象と密接な関係がある可能性が高く、今後の詳細解析によってその発生・伝播機構を明らかにしてゆく必要がある。

本グローバル Pc 2 の two-band 構造は北海道の芦別では顕著であったが、九州の久住観測所では長周期側の脈動の強度は弱く、ほぼ single-band 構造であった。一方でフィリピンのムンテルパ観測所では two-band 構造が見られるなど、世界各地の観測点ごとに band 構造に差が見られた。原因はまだ明らかになっていないが、電離層経由で波動が伝播しているとした場合、地域ごとの電離層の状況の違いによって各 band の波動の伝播に差が生じている可能性がある。この意味からも、九州大学 ICSWSE およびロシア側研究機関が共同所有するイオノゾンデによる電離層観測ともさらに協調して今後研究を進めてゆく必要がある。



図：北海道の MAGDAS 芦別観測点（磁気緯度 36.4° 、 $L=1.54$ ）で 2014 年 9 月 13 日に観測されたフラックスゲート磁力計による 10Hz サンプリングデータから求めた wavelet スペクトル図。Pc 2 イベントが発生した時、芦別観測点は 16~17 LT に位置していた。

成果発表

・論文リスト

- Fujimoto, A., A Yoshikawa, A Ikeda, Global response of Magnetic field and Ionosonde observations to intense solar flares on 6 and 10 September 2017, E3S Web of Conferences 62, 01007, 2018
- Ikeda, A., T Uozumi, A Yoshikawa, A Fujimoto, S Abe, Schumann resonance parameters at Kuju station during solar flares, E3S Web of Conferences 62, 01012, 2018.

・口頭発表

- Uozumi, T. and A. Yoshikawa, A future plan of collaborative study between ICSWSE and IKFIA using MAGDAS 10Hz data, Seminar on the collaborative study between ICSWSE and IKFIA, Yakutsk, Russia, 13 September 2018
- Fujimoto, A., A. Yoshikawa, and A. Ikeda, Global response of Magnetic field and Ionosonde observations to intense solar flares on 6 and 10 September 2017, presented at IX International Conference «Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors», in Paratunka (RUSSIA), 2018 (Oral (Invited Paper), English)
- Fujimoto, A., A. Ikeda, and A. Yoshikawa, FM-CW radar project: goals and a new installation in Peru, presented at JpGU meeting 2018 in Makuhari (JAPAN), 2018 (Oral, English)
- 吉川他、Pi 1-2, Pc 1-2 に関する ERG-MAGDAS 連携観測の報告、名古屋、平成 31 年 3 月 5 日
- 吉川他、磁気圏電離圏結合の観測的研究進展、電磁圏物理学シンポジウム、福岡、平成 31 年 3 月 13 日

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

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、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)。さらに、GCM シミュレーションにおいても、下層大気変動を起源とする電離圏変動に関して、とくに大気重力波、潮汐波の影響について調べている(Miyoshi et al., JASTP 2017; Shinagawa et al., JGR 2017; Tao et al., JGR 2017)。

これまでの研究の経緯を踏まえ、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(地磁気擾乱時・静穏時の両方におけるエネルギー流入)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、ロングイアビンとトロムソ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、その普遍的な特徴や成因を明らかにする。

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、数値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

2018年3月20-21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

前年度(2017年度)に観測された EISCAT データの解析を実施した。2017年度は、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, $K_p=0\sim 2$ 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。3月20日には, 観測時間帯において惑星間空間磁場 B_z 成分はほぼ南向きであったが, 21日にはほぼ北向きのまま維持されていた。両日共に, ESR32m アンテナデータ(緯度80度付近)において, 高速イオン流や, その準周期的な変動(10~20分周期), 大きなシア(イオン運動の向きの反転)が見られた。また, イオン速度の増大に伴ってイオン温度の上昇も見られた。最も急激な変動では, 10分程度の間約1000 Kの変動が見られた。21日の高速イオン流・温度上昇が見られた時間帯(09:10 付近)で, ロングイアビン北側に局所的な高速イオン流が存在したことが SuperDARN 観測からも確かめられている(この時の SuperDARN 観測では, ポーラーキャップポテンシャル差は29 kVであった)。

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, また, 小川がロングイアビンに赴き, 2019年3月18日, 19日の7:00-13:00 UTにEISCAT 特別実験を実施した。太陽F10.7 インデックスは70であり, 太陽紫外線放射の弱い期間の観測となった。また, 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。これまでのEISCAT レーダー観測で見られた地磁気静穏時の特徴と同じく, 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た。

本研究課題に関連した主な成果発表

論文発表

Yasunobu Miyoshi, Hidekatsu Jin, Hitoshi Fujiwara, and Hiroyuki Shinagawa (2018), Numerical study of traveling ionospheric disturbances generated by an upward propagating gravity wave, *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1002/2017JA025110.

Shigeru Fujita, Yuka Murata, Ikuko Fujii, Yasunobu Miyoshi, Hiroyuki Shinagawa, Hidekatsu Jin, Hitoshi Fujiwara (2018), Evaluation of the Sq Magnetic Field Variation Calculated by GAIA, *Space Weather*, <https://doi.org/10.1002/2017SW001745>.

学会発表等

藤原 均, 野澤 悟徳, 小川 泰信, 三好 勉信, 品川 裕之, 陣 英克, 片岡 龍峰, Liu Huixin, Variations of the polar ionosphere, thermosphere, and mesosphere caused by energy inputs from the magnetosphere, 地球惑星科学関連学会連合大会 (JpGU-AGU Joint Meeting), 5月, 幕張, 2018.

野澤 悟徳, 川原 琢也, 津田 卓雄, 藤原 均, 斎藤 徳人, 和田 智之, 小川 泰信, 高橋 透, 三好 勉信, Hall Chris, Brekke Asgeir, Spatial temperature gradients in the polar upper mesosphere and lower thermosphere above Tromsø, 地球惑星科学関連学会連合大会 (JpGU-AGU Joint Meeting), 5月, 幕張, 2018.

埜 千尋, 陣 英克, 品川 裕之, 藤原 均, 三好 勉信, 松村 充, GAIA の極域電場・粒子降込の改良と2017年9月イベントへの適用, 地球惑星科学関連学会連合大会 (JpGU-AGU Joint Meeting), 5月, 幕張, 2018.

松村 充, 塩川 和夫, 大塚 雄一, 品川 裕之, 陣 英克, 三好 勉信, 藤原 均, 埜 千尋, 津川 卓也, 新堀 淳樹, 渡邊 恭子, 西本 将平, 今田 晋亮, 川手 朋子, 李 京宣, GAIA simulations of the ionospheric response to successive X-class solar flares on September 6, 2017, 地球惑星科学関連学会連合大会 (JpGU-AGU Joint Meeting), 5月, 幕張, 2018.

Satoru Nozawa · Yasunobu Ogawa · Hitoshi Fujiwara · Takuo Tsuda · Takuya Kawahara · Norihito Saito · Satoshi Wada · Tetsuya Kawabata · Toru Takahashi · Masaki Tsutsumi · Chris Hall · Asgeir Brekke, Horizontal temperature gradients in the polar MLT region above Tromsø using sodium LIDAR data, 第144回地球電磁気・地球惑星圏学会, 名古屋大学, 11月, 2018.

三好勉信・陣英克・藤原均・品川裕之, 下層大気起源の熱圏重力波により引き起こされた大規模伝播性電離圏擾乱, 第144回地球電磁気・地球惑星圏学会, 名古屋大学, 11月, 2018.

Hitoshi Fujiwara・Satoru Nozawa・Yasunobu Ogawa・Yasunobu Miyoshi・Hidekatsu Jin・Hiroyuki Shinagawa・Chihiro Tao・Ryuho Kataoka・Huixin Liu, Ionospheric heating in the dayside polar region during solar minimum and geomagnetically quiet equinox periods, 第144回地球電磁気・地球惑星圏学会, 名古屋大学, 11月, 2018.

松村充・塩川和夫・大塚雄一・品川裕之・陣英克・三好勉信・藤原均・埜千尋・新堀淳樹・津川卓也, 巨大太陽フレア時の電離圏全電子数変動に対する中性大気組成の影響についてのGAIAシミュレーション. 第144回地球電磁気・地球惑星圏学会, 名古屋大学, 11月, 2018.

陣英克・三好勉信・埜千尋・品川裕之・藤原均・松村充, 大気圏-電離圏結合モデルGAIAの高精度化と検証, 第144回地球電磁気・地球惑星圏学会, 名古屋大学, 11月, 2018.

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

本課題の研究目的は、東南アジアVLF帯電磁波観測ネットワーク (AVON: Asia VLF Observation Network)を中心として、新規に国内で大気電場と95GHz FMCW方式雲レーダ (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)が国内外で展開している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. 研究方法

下部電離圏のグローバルサーキット効果の定量的理解を実現するために、フィールドミルによる大気電場と95 GHz FMCW方式雲レーダ (FALCON-I)による雲および雨の国内同時観測、およびAVONデータ解析を実施する。

3. 研究結果および考察

図1は、2016年7月4日08:30-10:30 UTの雷発生時の千葉大学西千葉キャンパス内 (35.63°N, 140.10°E)で同時観測した(上)大気電場および(下)FALCON-Iによるレーダ反射強度を示す。大気電場は下向きが正、上向きが負であり、建物屋上での相対値である。大気電場は雷雲通過に伴う緩やかな変動および08:50-09:30 UTに見られる雷によるパルス状の速い変動を示している。レーダ反射強度は、高度5 km以下の降雨および高度4-14 kmに雷雲を捉えている。09:00-09:30 UTの高度5 km以上は、地上の降雨強度が強すぎたため、雷雲からのエコーが見えなかった。08:30-08:40 UTに、大気電場は増加しており、従来この増加は雷雲がフィールドミルに接近しているとき、雷雲上層の正電荷により発生し、ちょうど雷雲が大気電場計の頭上に来たとき、雲底の負電荷により大気電場が負に転じるという説明がなされてきた。しかしながら、図1では、大気電場が増加しているとき、すでに高度8-14 kmに雷雲からの反射強度が見られ、つまり雷雲がフィールドミルの頭上にある。したがって、この雷雲上部はアンビルと呼ばれる雲頂が平らになって発達した積乱雲が形成されており、アンビル内の正電荷による大気電場増加であると思われる。また図1の矢印は、雲粒の上向きのみ Doppler速度を表している。矢印以外のエコー部分は全て下向きの Doppler速度を持つ。降雨開始時は雷雲アンビルの上部 (高度10-14 km)に上昇流があり、徐々に雷雲の下部 (~高度7 km)に上昇流が存在してい

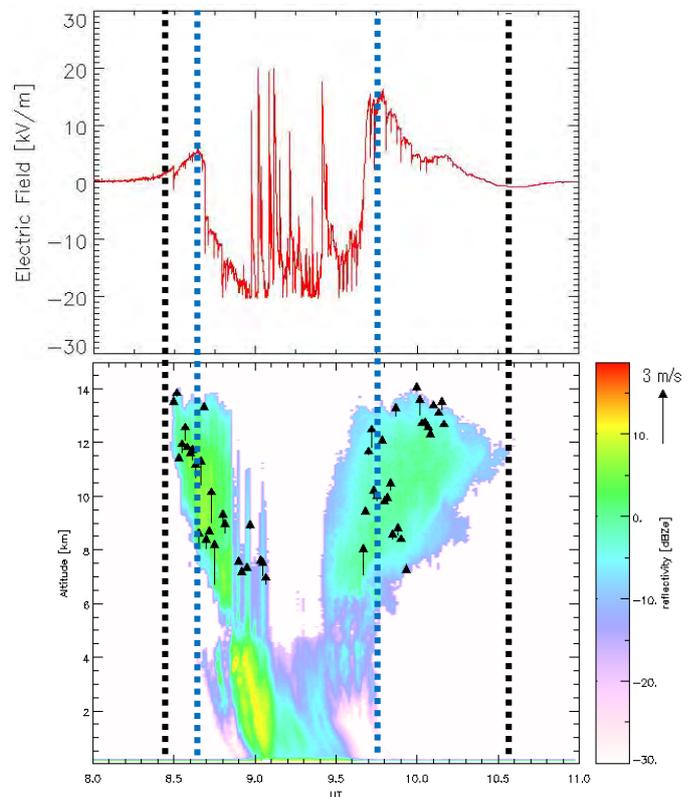


図1 2016年7月4日08:30-10:30 UTの雷発生時の(上)大気電場および(下)FALCON-Iによるレーダ反射強度。図中の黒および青の点線はそれぞれ降雨時刻と雷発生時刻を示す。矢印は雲粒の上向きのみ Doppler速度を示す。

た。また降雨時間の後半は雷雲全体に上昇流が見られるが、その後（10:00 UT頃）、雷雲上部（高度12-14 km）のみに上昇流があり、最後は上昇流が消えていた。

図2は、図1の大気電場変動を拡大したもので、矢印は雷による大気電場変動を示す。

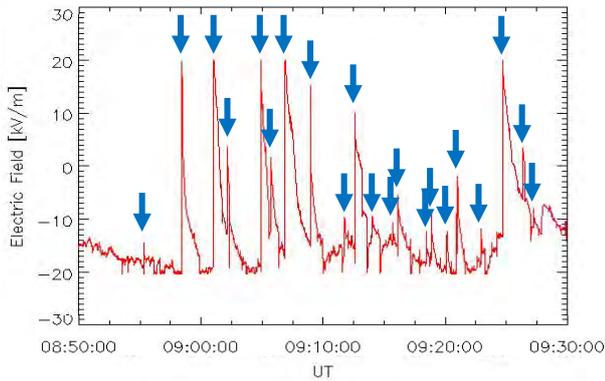


図3 2016年7月4日08:50-09:30 UTに千葉大で観測された雷による大気電場変動。

図3は、株式会社フランクリン・ジャパンが運用するJLDNで推定された、2016年7月4日08:50-09:30 UTの期間の雷発生位置を示す。赤丸は、図2の大気電場変動と同時刻に発生した雷の位置を示す。この期間に、JLDNでは2332個の雷を捉えており、そのうちの21個（0.9%）について大気電場が反応した。この21個の雷のフィールドミルからの距離は21.4-34.2 kmであり、全て下向きの雷であり、ピーク電流は10-83 kAだった。図4に、雷のピーク電流（負が下向き）と大気電場変動の継続時間との相関を示す。相関係数は-0.47であり、また大気電場変動の開始から最大までは全て1 s以下であることから、雷のピーク電流が大きいほど大気電場変動の回復時間が長いことが分かった。この雷発生位置付近を伝搬するLF帯標準電波データ（AVON）は欠測であり、また名大ISEE母子里・鹿児島観測所のVLFデータ中、昼間のtweek空電がなかったため、このイベント時の下部電離圏の推定が困難だった。

成果発表

- [1] (Invited) **Ohya, H.**, K. Nakamori, Y. Suzuki, M. Kamogawa, T. Suzuki, **T. Takano**, T. Takamura, K. Morotomi, **K. Yamashita**, and H. Nakata, Effects of cloud, lightning activities and snowfall on atmospheric electric field using 95-GHz cloud radar FALCON-I, JpGU2018, Chiba, 20 May, 2018.
- [2] **Ohya, H.**, K. Nakamori, M. Kamogawa, T. Suzuki, **T. Takano**, K. Morotomi, H. Nakata, and **K. Shiokawa**, Oscillations of atmospheric electric field during snowfall in the Kanto region, Japan, using a field mill and 95-GHz cloud radar FALCON-I, SGEPPS 2018 Fall Meeting, Nagoya, 25 November, 2018.

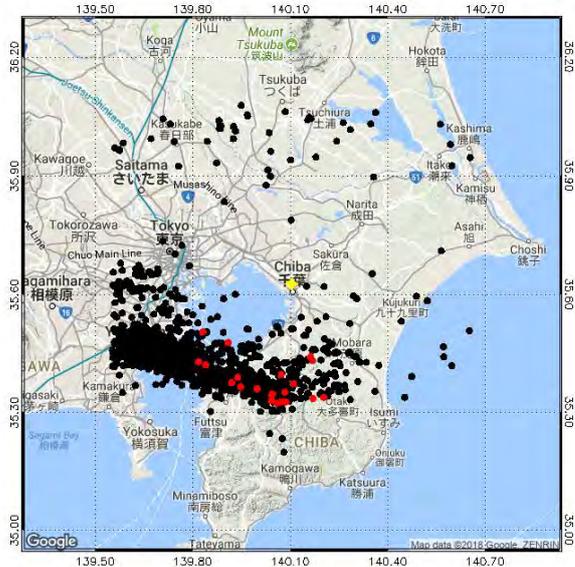


図2 JLDN（株式会社フランクリン・ジャパン）で推定された2016年7月4日08:50-09:30 UTの期間の雷の発生位置。赤丸は図2の大気電場変動と同時刻に発生した雷の位置を示す。黄色の丸は、大気電場計の位置を示す。

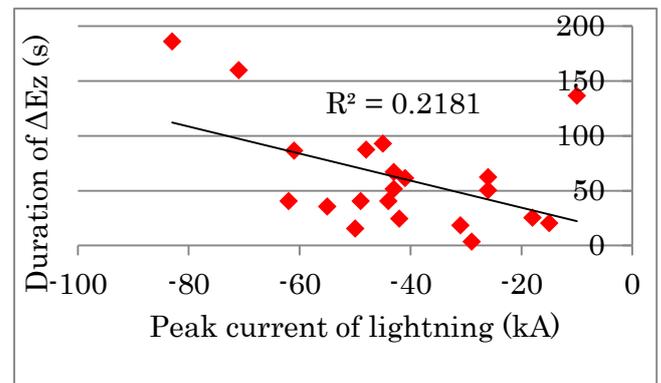


図4 雷のピーク電流（マイナスが下向き）と大気電場変動の継続時間との相関。

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, 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、二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、大気中の成層圏及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・拡散など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 ^{14}C や ^{10}Be など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 ^7Be の詳細な観測は、三つの要因相互の変動関係を明らかにする上で重要であり、且つ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大事である。

本研究は、第23期における観測の蓄積に基づき、極めて特徴的な第24期太陽活動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 ^7Be の長期観測結果及び低緯度（タイ、バンコク）で得られた2018年までの観測結果について報告する。

研究方法

北半球中緯度の山形（北緯 38.3° ）、高緯度のアイスランド（北緯 64.7° ）、最高地磁気カットオフ地域であるタイに各々ハイボリュームエアサンプラー（HV1000F, HV500R, 吸引量 $500\sim 1000\text{L}/\text{min}$ ）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、山形大学及び宇宙線研究所柏地下測定設備においてガンマ線測定分析を行い、大気中 ^7Be 濃度及び ^{210}Pb 濃度の連続観測を行っている。

研究結果

高緯度、中緯度、低緯度の ^7Be 濃度年変動

図1は、高緯度（アイスランド）、中緯度（山形）及び低緯度（バンコク）の大気中 ^7Be 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2018年10月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期太陽活動期をカバーしており、太陽磁場の極性反転（ $q_A > 0$ から $q_A < 0$ ）と（ $q_A < 0$ から $q_A > 0$ ）の時期を含んでいる。第23期（2000～2009年）における中緯度の平均 ^7Be 濃度に比べ第24期（2012～2018年）における平均 ^7Be 濃度は16.7%増加している。これに対応する太陽黒点数の減少率は17.3%である。二つの太陽活動期の ^7Be 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期の太陽活動の変動を表していることが分かる。また、この期間のOuluの中性子モニターデータの増加率は2.5%程度であり、大気中での ^7Be の生成は、低エネルギーの

宇宙線強度変動を示していると考えられる。しかし、高緯度のアイスランドの ^7Be 濃度は、23 期と 24 期の平均が減少しており、アイスランド特有の気象効果の影響を考える必要がある。

一方、バンコクの ^7Be 濃度は、2014 年から 2017 年まで下降していたが、2018 年は増加に転じている。バンコクのガラス捕集試料では地中から大気中に拡散している ^{222}Rn の娘核種である大気中の ^{210}Pb 濃度も ^7Be と同時に測定を行っている。図 2 に示す ^7Be 濃度及び ^{210}Pb 濃度の各年平均の変化では、 ^{210}Pb 濃度も 2017 年に対して増加しており気象効果の可能性が高い。図 3 にバンコクのろ紙試料に捕集されたエアロゾルの preliminary な元素分析結果を示す。blank ろ紙との比較から炭素、硫黄、鉄の元素が含まれていることが分かった。

第 24 期の太陽 11 年活動は、間もなく極小になると考えられる。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。

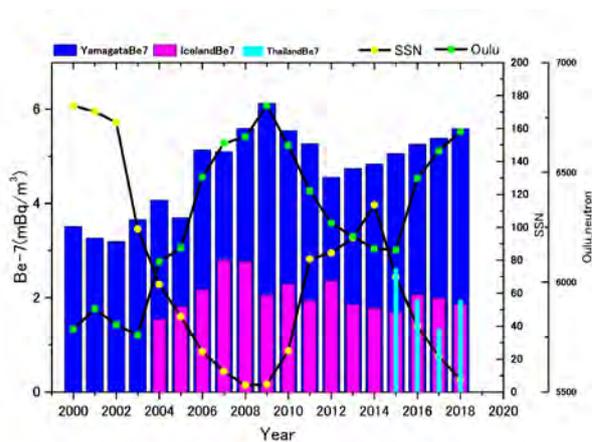


図 1. 山形、アイスランド及びバンコクでの ^7Be 濃度の年変動

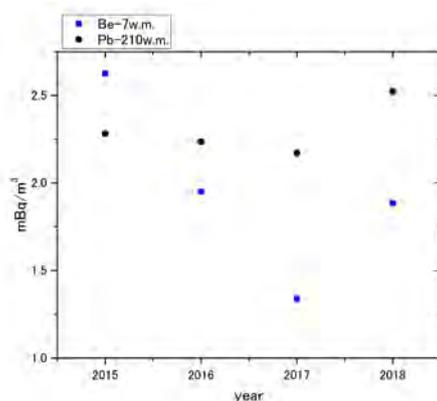


図 2. バンコクでの ^7Be , ^{210}Pb 濃度の年変動

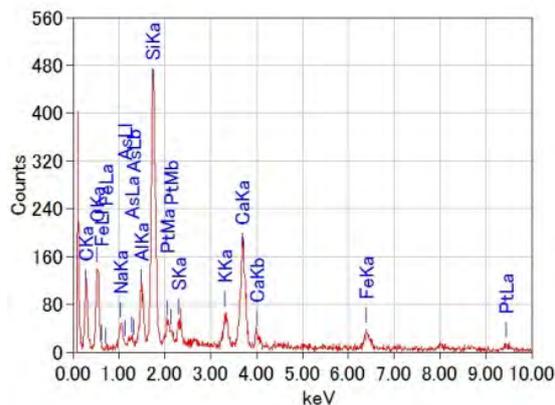


図 3. バンコクで捕集されたエアロゾルの元素分析結果

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、ニュージーランドで2011年以降に取得した約8年分の地磁気データを解析し、ニュージーランド経度帯の $L=2.6$ におけるプラズマ質量密度を調査した。その結果12月の密度が6月の密度よりも高くなる傾向がみられた。またその季節変動振幅は太陽活動度が高いほど大きくなる傾向がみられた。

ニュージーランド経度帯は我々の観測が始まるまで高時間分解能の地磁気観測は行われておらず、プラズマ質量密度の長期観測も本研究が世界初である。

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。

本研究ではこのデータにBerube et al., (2003)の自動検出アルゴリズムを適用して磁力線共鳴振動周波数を抽出し、2011-2018年のプラズマ質量密度を算出した。2017年のプラズマ質量密度をAWDANet-PLASMON観測網のDunedin観測点で得られたWhistler波周波数分散から算出した電子密度と比較したところ、よい一致が見られた。さらにSaturated plasmasphereの季節変動を調べるために、Kpインデックスの過去4日間の最大値が4以下のデータのみを選び、質量密度をプロットしたところ、12月の密度が6月の密度に比べ高い傾向がみられた。またその季節変動振幅は太陽活動度が高いほど大きくなる傾向がみられた(図)。

北米経度帯の過去の研究(Park et al., 1978; Menk et al., 2012)では電子密度、ヘリウム密度、質量密度いずれも6月の密度が12月の密度よりも高くなる傾向が報告されており、プラズマ圏の密度経験モデルを作成する際、データ点の経度帯の偏りには注意が必要であることが明らかになった。

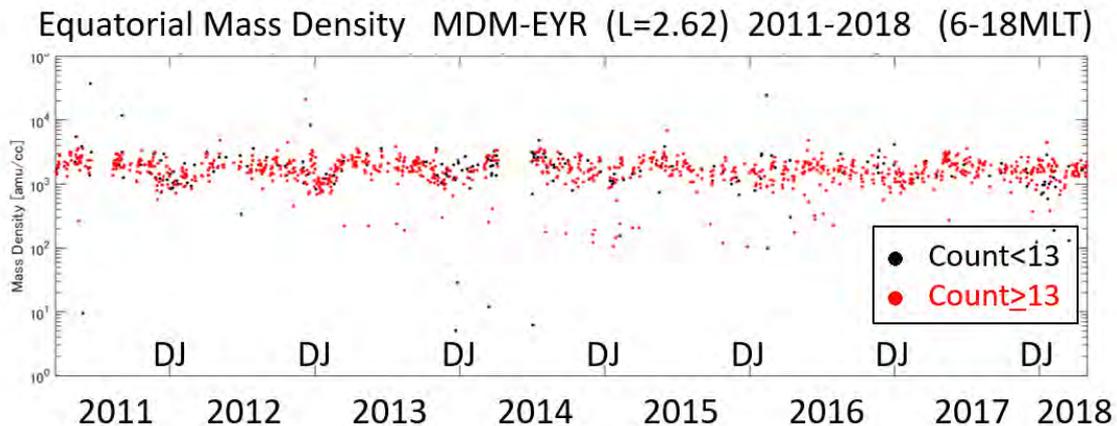


図 2011-2018年の静穏日におけるプラズマ質量密度

成果発表（上記研究のほか、ニュージーランド地磁気データが利用された研究成果も掲載する）

原著論文

1. Clilverd, Mark A., Craig J. Rodger, James B. Brundell, Michael Dalzell, Ian Martin, Daniel H. Mac Manus, Neil R. Thomson, Tanja Petersen, and Yuki Obana (2018). 'Long-lasting geomagnetically induced currents and dharmonic distortion observed in New Zealand during the 7-8 September 2017 disturbed period', Space Weather, 16. <https://doi.org/10.1029/2018SW001822>.

研究集会・学会発表

1. 尾花由紀, ニュージーランド経度帯におけるプラズマ圏の長期観測結果について, 2019年3月12日, 電磁圏物理学シンポジウム, 九州大学西新プラザ, 福岡.
2. Kenji Mitani 他, 'Statistical Study of Selective Transport of Energetic Oxygen Ions During Magnetic Storms Observed by Van Allen Probes in 2013-2017', American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, 10-14 Dec, 2018, Washington D. C., USA.
3. Mark A. Clilverd 他, 'Local time variations in mid-latitude magnetic field perturbations and geomagnetically induced currents during the 07-08 September 2017 geomagnetic storm', The 15th European Space Weather Week (ESWW), November 5 - 9, 2018, Leuven, Belgium.
4. Craig J. Rodger 他, 'Geomagnetically Induced Currents and Harmonic Distortion: Observations from New Zealand', The 15th European Space Weather Week (ESWW), November 5 - 9, 2018, Leuven, Belgium.
5. Tim Divett 他, 'Validating modelled transformer-level GIC flow in New Zealand's South Island with extensive observations', The 15th European Space Weather Week (ESWW), November 5 - 9, 2018, Leuven, Belgium.
6. Kenji Mitani 他, 'Statistical Study of Selective Transport of Energetic Oxygen Ions During Magnetic Storms Observed by Van Allen Probes in 2013-2017', 第144回地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会, 2018年11月23日～11月27日, 名古屋大学東山キャンパス, 名古屋.

磁気圏尾部リコネクション過程に置ける乱流的磁気ロープの発達過程
の研究

Study on turbulent development of small-scale magnetic flux ropes
in the magnetotail reconnection

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、主に地球磁気圏尾部領域における磁気リコネクション過程において2次的に生成される乱流現象の解明を目的とし、数値シミュレーション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跨いで磁力線が繋ぎ変わる事で境界に蓄積された磁気エネルギーを爆発的に解放する宇宙プラズマにおいて最も重要なエネルギー変換過程の1つである。特に、地球磁気圏においては尾部電流層に蓄積された磁気エネルギーが解放される事で、オーロラサブストームに代表される大規模磁気圏擾乱が駆動されると考えられており、磁気リコネクション過程を理解する事は磁気圏物理及び宇宙天気研究において最重要課題の1つである。近年、課題代表者らの研究を含む大規模3次元完全粒子シミュレーションを用いた研究によって、磁気リコネクションの発達に伴い3次的にリコネクション層が乱流化する事が示されている。この3次的な乱流現象には主に、ガイド磁場（リコネクション面に垂直な磁場成分）とリコネクション磁場成分との間で起こる2次的テアリング不安定に起因した磁気ロープ形成によるものと、リコネクション層内で2次的に発達するプラズマ波動及び不安定によるものに分類されるが、本研究ではまず前者に注目し、今まで注目されていなかった弱ガイド磁場下における2次的磁気ロープ形成過程を調べた。

具体的には、2015年に打ち上げられた現在世界最大の磁気圏観測ミッションであるMagnetospheric Multiscale(MMS)ミッションによって2017年7月11日に観測された弱ガイド磁場イベントについて、3次元粒子シミュレーション（下記成果[1]）と観測研究（下記成果[2]）の両面から検証した。まずシミュレーション研究では、観測から得られた背景磁場及びプラズマ密度・温度を初期パラメータとして2次元及び3次元粒子シミュレーションを行った。その結果、まず磁力線の繋ぎ変わる磁気拡散領域の構造は2次元及び3次元計算で大きな差がなく2次的である事が確かめられた。この点は、磁気拡散領域をMMS衛星が通過した際に得られたデータと2次元計算結果を用いた疑似観測結果がよく一致していることから確認された。次に、3次元計算特有の結果として、拡散領域の外側ではリコネクション層の淵領域及びリコネクションジェット先端領域に沿って発達する3次的な波動現象が見られた。しかし、本シミュレーション結果から、2次的に発達する磁気ロープの形成は確認できなかった。

次に、このMMSによる2017年7月11日のイベントでは、MMS衛星が拡散領域を通過した後磁気ロープの発生が確かめられている。本研究では、本申請の共同研究者であるTeh博士が主導し、このイベントで観測された磁気ロープについての詳細な観測研究を行った。具体的には、観測された磁気ロープ及び背景磁場の傾きから、観測された磁気ロープが2次的テアリング不安定によって形成された事を突き止めた（下記図1）。この事は、上記の2次的な磁気ロープの形成過程が弱ガイド磁場下でも発生する事を示している。磁気ロープの形成が確かめられなかったシミュレーション結果との差については、拡散領域観測期間に注目した観測データを元にしたシミュレーション研究[1]及び磁気ロープ観測期間に注目したTeh博士の研究[2]では推測したガイド磁場の値が異なっている事が原因である可能性がある。具体的には、拡散領域に注目した場合はガイド磁場が数倍小さく見積もられている。この事は、背景ガイド磁場の強度がイベントを通して時間変化している事を示唆しているが、今後、ガイド磁場の強度を変化させたシミュレーションを新たに行い、改めて観測研究

との比較する事が期待される。

本研究ではさらに、2次的に発達するプラズマ波動・不安定による乱流現象にも注目し、上記のシミュレーション研究にも見られたリコネクションジェット先端領域に発生するプラズマ不安定についての研究も進めた。過去の研究からジェット先端領域では、強い密度勾配層が形成され、それに起因したlower-hybrid drift instability(LHDI)と呼ばれるプラズマ不安定が成長する事が示唆されている。本研究ではまず、共同研究者である梅田博士が主導し、LHDIの成長を理論的に予想する運動論的線形解析ツールの開発に成功した[3]。本ツールでは、磁場と垂直方向にドリフトするプラズマについて完全運動論的な線形分散関係を求める。次に、本ツールを、課題代表者が主導する名古屋大学HPC計算科学連携研究プロジェクトにて本年度に行った3次元完全粒子シミュレーション結果に応用し、ジェット先端領域で発生するLHDIの成長率及び波長が線形解析結果とよく一致する事を確かめた(下記図2)。さらに、これらの結果を元に、現実的な磁気圏尾部のパラメータ下で線形解析を行い、ジェット先端領域のLHDI乱流が磁気圏尾部領域では頻繁に起こり得る事を示した。現在本結果を国際雑誌に投稿するために準備中である。

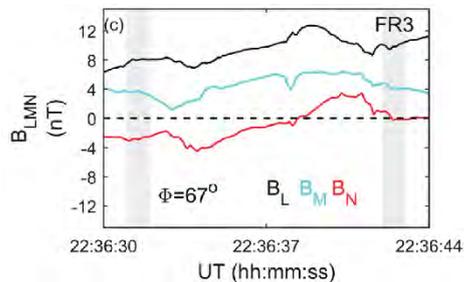


図1：2017年7月11日22:36UT付近のMMS観測結果。1つの磁気ロープ通過時の磁場3成分を示す。磁気ロープ前後(影部分)の背景データから見積もられる2次的テアリング不安定の成長角度と磁気ロープの角度の一致が確認された[2]。

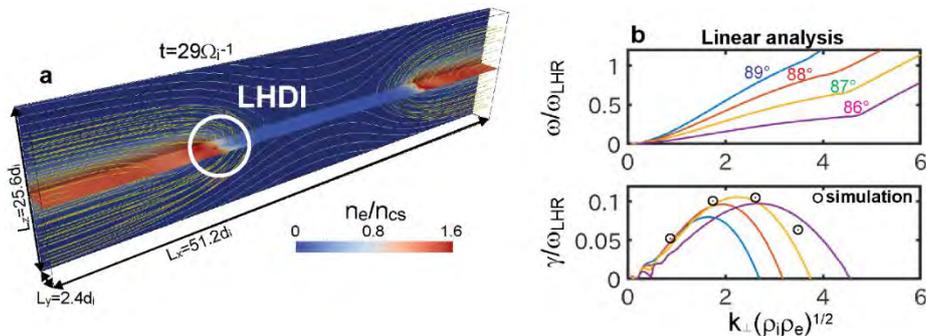


図2：(a)3次元完全粒子シミュレーション結果。リコネクションジェット先端領域にLHDIの成長が見られる。(b)シミュレーションから得られたパラメータを運動論的線形解析ツール[3]に入力した結果。得られたLHDIの成長率とシミュレーション結果から得られた成長率が一致する事が確認された。

【成果発表】 (投稿論文)

- [1] Nakamura, T. K. M., Genestreti, K. J., Liu, Y.-H., Nakamura, R., Teh, W.-L., Hasegawa, H., et al., (2018), Measurement of the magnetic reconnection rate in the Earth's magnetotail. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 123, 9150–9168.
- [2] Teh, W.-L., Nakamura, T.K.M., Nakamura, R., & Umeda, T (2018), Oblique ion-scale magnetotail flux ropes generated by secondary tearing modes. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 123, 8122–8130.
- [3] Umeda, T. & Nakamura, T. K. M. (2018), Electromagnetic linear dispersion relation for plasma with a drift across magnetic field revisited, Physics of Plasmas, 25, 102109

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 densed 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、更なる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することを目的とした研究を3カ年計画で遂行する。

初年度である今年度は、マレーシア域のペナンに新規磁場観測点を設置し、東南アジア赤道稠密観測網を強化するとともに、30年度の共同研究予算を用いてペルー、地球物理学研究所のワンカイヨ観測所にFM-CWレーダーを設置・運用を開始することにより研究の基盤となる観測体制を整えた。これらの観測データを用いて、昼間側で生じる赤道ジェット電流(EEJ)とプラズマバブルの発生頻度の相関性が東南アジア域、南米域で大きく異なることを見いだすなどの初期結果を得ている(Akimoto et al., 2018)。31年度以降は上記に掲げたインデックスの作成、データベースの強化を促進するとともに、学術的成果を積み上げていく予定である。

2018年度 査読付き学術論文リスト

1. [M Abbas, ZZ Abidin, MH Jusoh, OS Bolaji, A Yoshikawa, Features of horizontal magnetic field intensity over northern island of Malaysia, Indian Journal of Physics, 1-112019.](#)
2. [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](#)

3. R Shi, B Ni, D Summers, H Liu, A Yoshikawa, B Zhang, Generation of electron acoustic waves in the topside ionosphere from coupling with kinetic Alfvén waves: a new electron energization mechanism, *Geophysical Research Letters* 45 (11), 5299-5304, doi: 10.1029/2018GL077898
4. Ohtani, S., Motoba, T., Gjerloev, J. W., Ruohoniemi, J. M., Donovan, E. F., & Yoshikawa, A (2018). Longitudinal development of poleward boundary intensifications (PBIs) of auroral emission. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123. <https://doi.org/10.1029/2017JA024375>
5. 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>
6. EM Takla, A Khashaba, MA Zaher, A Yoshikawa, T Uozumi (2018), Anomalous ultra low frequency signals possibly linked with seismic activities in Sumatra, Indonesia, *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics* doi: 10.1016/j.nrjag.2018.04.004
7. NSA Hamid, VA Wen, NIM Rosli, A Yoshikawa, Changes in Ionospheric Currents System at Southeast Asia Region during Geomagnetic Storm in Solar's Minimum Phase *SAINS MALAYSIANA* 47 (8), 1923-1929, 2018
8. R Umar, SF Natasha, SSN Aminah, KN Juhari, MH Jusoh, NSA Hamid, MH Hashim, ZM Radzi, AN Ishak, SN Hazmin, WZAW Mokhtar, MKA Kamarudin, H Juahir, A Yoshikawa (2018), Magnetic Data Acquisition System (MAGDAS) Malaysia: installation and preliminary data analysis at ESERI, UNISZA, *Indian Journal of Physics*, 1-12, <https://doi.org/10.1007/s12648-018-1318-x>
9. Takahashi, N., Seki, K., Teramoto, M., Fok, M.-C., Zheng, Y., Matsuoka, A., Nana Higashio, Kazuo Shiokawa, Dmitry Baishev, Akimasa Yoshikawa, Tsutomu Nagatsuma (2018). Global distribution of ULF waves during magnetic storms: Comparison of Arase, ground observations, and BATSRUS + CRCM simulation. *Geophysical Research Letters*, 45, 9390–9397. <https://doi.org/10.1029/2018GL078857>
10. NMN Annadurai, NSA Hamid, Y Yamazaki, A Yoshikawa. Investigation of Unusual Solar Flare Effect on the Global Ionospheric Current System, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, <https://doi.org/10.1029/2018JA025601>
11. A Fujimoto, A Yoshikawa, A Ikeda (2018), Global response of Magnetic field and Ionosonde observations to intense solar flares on 6 and 10 September 2017 - E3S Web of Conferences, 2018
12. A Ikeda, T Uozumi, A Yoshikawa, A Fujimoto, S Abe (2018), Schumann resonance parameters at Kujū station during solar flares- E3S Web of Conferences, 2018
13. M Nakahara, A Yoshikawa, T Uozumi, A Fujimoto, Electromagnetic induction responses to geomagnetic disturbances at low-and-mid-latitudes, *Journal of Physics: Conference Series* 1152 (1), 0120352019.
14. T Akiyama, A Yoshikawa, A Fujimoto, T Uozumi, Relationship between plasma bubble and ionospheric current, equatorial electrojet, and equatorial counter electrojet, *Journal of Physics: Conference Series* 1152 (1), 0120222019.
15. ZIA Latiff, MH Jusoh, FAM Kasran, SAE Ab Rahim, M Onn, A Zainuddin, and A. Yoshikawa, The first solar-powered Magdas-9 installation and possible geomagnetically induced currents study at Johor, Malaysia, *Journal of Physics: Conference Series* 1152 (1), 0120302019.
16. SN Ibrahim, MH Jusoh, AA Sulaiman, A Yoshikawa, ZM Radzi, Characteristic of the Disturbed Days Ionospheric Current System in the 180-Degree Magnetic Meridian, *Journal of Physics: Conference Series* 1152 (1), 0120292019.
17. NM Anuar, FAM Kasran, M Abbas, MH Jusoh, SAE Ab Rahim, N Abdul Hadi, A Yoshikawa, Z Mohd Radzi, Assessment of the Geomagnetically Induced Current (GIC) at Low Latitude Region based on MAGDAS Data, *Journal of Physics: Conference Series* 1152 (1), 0120282019.
18. N.N. Anuar, FAM Kasran, ZIA Latif, SAE Ab Rahim, A Manut, MH Jusoh, N. A. Hadi, A. Yoshikawa, Estimation of Time Derivative of Horizontal Geomagnetic Component for GIC Assessment in Malaysia during Quiet Period, 2018 IEEE 8th International Conference on System Engineering and Technology (ICSET), 118-122, 2018.
19. NMN Annadurai, NSA Hamid, A Yoshikawa, Observation of Ionospheric Current during Strong Solar Flare Using Ground Based Magnetometer, *SAINS MALAYSIANA* 47 (3), 595-601
20. 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>.
21. 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>.
22. 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

太平洋における極端降水現象予測キャンペーンPRECIP2020の準備研究
Preliminary research for Prediction of Rainfall Extremes
Campaign in the Pacific (PRECIP2020)

伊藤耕介、琉球大学・理学部

東アジア地域においては、梅雨前線や台風に伴う大雨のみならず、急激に発達する積乱雲によって都市部に集中豪雨をもたらす現象も多発する。このような東アジア域における降水現象の共通理解を目指すとともに、研究者間の連携を図るために、「第13回メソスケール降水システムと顕著気象に関する国際会議 (Conference on Mesoscale Convective Systems and High-Impact Weather in East Asia: ICMCS-XIII)」を2019年3月6日から8日までの3日間にわたって、沖縄県立博物館・美術館において開催した。その翌日(3月9日)には、2020年梅雨期から夏期にかけて台湾と沖縄周辺で地上観測と航空機観測により降水システムや台風の構造を明らかにする共同観測「2020年国際共同観測実験(PRECIP2020 / TAHOPE / T-PARCI)に関する計画会合 (The Planning Meeting for the International Joint Field Experiment in 2020 (PRECIP2020 / TAHOPE / T-PARCI)」を琉球大学において開催した。そして、2020年の集中観測において米国のSEA-POLレーダ、名古屋大学のX帯偏波レーダ、Ka帯偏波レーダを設置する与那国島を米国、台湾、日本の研究者8名で視察した。本報告では名古屋大学宇宙地球環境研究所国際共同研究に関連して実施したこれら一連の活動について報告する。

ICMCSは、East Asia Weather Research Association (東アジア天気研究会)が主体となって韓国・台湾・日本・中国・米国の持ち回りで2000年から継続して1~2年毎に開催されており、今回で13回目となっている。今回のICMCS-XIIIでは、琉球大学と名古屋大学が主担当となり、会場の予約、参加・要旨投稿・参加費の支払いのためのウェブサイト開設、会議のプログラム作成、実際の会議運営などを行った。会議には上記の5か国のほか香港と英国も含めて7か国(地域)から159名の参加があり、3日間で163件の口頭とポスターによる講演が行われた。

3月9日の「2020年国際共同観測実験(PRECIP2020 / TAHOPE / T-PARCI)に関する計画会合」には米国・台湾・香港・日本から32名(米国9名、台湾10名、香港1名、日本からは6機関で12名)の参加があった。米国からは、1月の政府閉鎖により遅れていたPRECIP2020への予算申請が採択された旨の連絡があり、これを受けて、台湾における地上観測体制、日本では与那国島に観測機器を集中させて強化観測を行うこと、航空機観測の体制などが議論された。また、強化観測期間中には、毎日、時間を決めてブリーフィングを行って観測対象や体制を確認すべきであるとの議論がなされた。さらに、数値モデルを用いた予報実験についても議論がなされた。

翌3月10日には、米国のコロラド州立大学Michael Bell准教授とKristen Rasmussen助教、NCARのWen-Chau Lee博士、イリノイ州立大学のDeanna Hince助教、国立台湾大学のMing-Jen Yang教授、琉球大学の

山田広幸准教授、名古屋大学の坪木和久教授と篠田太郎准教授で与那国島のレーダ観測地点の視察を行った。レーダ設置想定地点の地盤、電源の有無、台湾側の視界の広さ（レーダ観測における障害物）などを確認するとともに、島内での宿泊施設や食事の環境、想定される生活費などの観測の基盤となる状況についての調査を行った。これらの調査結果に基づいて、レーダの移設の日程や電源確保についての予算案作成、観測期間中のレーダ運用方法、観測期間中の人員配置（与那国島の食生活を鑑みて、ベジタリアンの方が観測に参加することが困難である旨の助言を行った）などについて、関係者間での検討を行っていく予定である。

名古屋大学からは、本国際共同研究、共同利用・共同研究の研究集会（航空機利用委員会）、地球気候系の診断に関わるバーチャルラボラトリの形成などの研究経費を利用させていただき、合計で12名分の旅費・滞在費などの支給を行った。本国際共同研究ではペンシルベニア州立大学のAnthony Didlake Jr.博士（助教）の旅費・滞在費を支給した。



写真 （上）ICMCS-XIIIの集合写真。（左下）2020年国際共同観測実験(PRECIP2020 / TAHOPE / T-PARCII)に関する計画会合の様子。Michael Bell准教授による観測計画の説明が行われている。（右下）与那国島空港に到着した関係者。左からWen-Chau Lee博士、Deanna Hence助教、Ming-Jen Yang教授、Kristen Rasmussen助教、Michael Bell准教授。

低緯度への誘導磁力計観測網の新規展開による高周波数電磁流体波動の研究

Study of high-frequency MHD waves by developing an induction magnetometer network toward low latitude

能勢正仁、名古屋大学・宇宙地球環境研究所

【学術的背景】

(A) Pc1地磁気脈動

地磁気が周期0.2-5秒で正弦波的に変動する現象は「Pc1地磁気脈動」または「EMIC(Electromagnetic ion cyclotron)波動」と呼ばれている。低緯度におけるPc1地磁気脈動については、先駆的な研究がKawamura et al. [1981]によってなされた。それによると、低緯度Pc1脈動の発生頻度は、真夜中から明け方にかけてピークを示し、高緯度Pc1脈動や磁気圏中のPc1脈動(EMIC波動)の発生頻度とは全く異なっている。そのため、低緯度Pc1脈動に関しては、「プラズマ圏とリングカレントの相互作用により夜側で励起されたEMIC波動が、磁力線に沿って電離層に入射後、電離層F層ダクトを通過して低緯度へ伝搬し、Pc1脈動として観測される」というシナリオが提案された。しかし、それ以降、低緯度Pc1脈動の研究は、Webster and Fraser [1985], Bortnik et al. [2008], Nomura et al. [2011]による報告が存在する程度で、あまり活発には行われてこなかった。上記のシナリオは観測データに基づいた更なる検証が求められている。

(B) 電離層アルフベン共鳴現象

電離層アルフベン共鳴現象(Ionospheric Alfvén Resonance, IAR)は、磁場変動のダイナミックスpektrum上で、1Hzから数Hzに亘って複数の周波数バンド(高調波)構造を持つ現象として観測される。1980年代後半以降、フィンランドやロシア、北海道などの高緯度・中緯度で観測の報告が行われてきた。しかしながら、これまでに低緯度においては、ギリシャ(地磁気緯度33°)での観測報告があるのみである[Bösiinger et al., 2002, 2004]。一方で、低緯度では観測されなかったという主張[Hayakawa, 2004]もあり、低緯度・赤道域におけるIARに関する知見は未だ限定的である。

【目的】

誘導磁力計観測の空白領域となっていた低緯度で、緯度方向のネットワーク観測を世界で初めて展開・構築する。異なる緯度の誘導磁力計のデータを同時に解析し、Pc1地磁気脈動やIARの発生分布がどの程度まで低緯度方向に広がっているかを明らかにする。

【研究の経緯】

2017年末に沖縄県国頭村にて誘導磁力計を設置したが、給電が安定せず定常的なデータ取得を開始できなかった。2018年初夏には落雷により、データロガーがダメージを受け、観測が停止してしまっている。観測装置はドイツ製のため、日本の代理店を通して修理などを依頼するのに時間が掛かり、今年度内に観測を再開することができな

った。

図1は、データロガーが故障する前に取得された2018年2月22日の沖縄県国頭村におけるデータである。シューマン共鳴が基本振動から3-4次高調波まで観測されている。また、14:00-18:00 UTには、東西(By)成分に5 Hz以下のIARが現れている。データロガーの修理が終わり次第、再度現地を訪問して観測を再開し、図1のようなイベントを選び出して解析することで、研究目的を達成するつもりである。

【誘導磁力計観測網の構築計画】

沖縄県国頭村を起点として、台湾・フィリピン・インドネシア・オーストラリアの各国に誘導磁力計を設置し、緯度方向に広がる観測網の構築を計画している。既に以下のような現地協力者と話し合いを進めており、すべての協力者から快諾を得ている。

台湾・・・国立東華大学のWen-Yen Chang教授。

フィリピン・・・アテネオ・デ・マニラ大学のQuirino Sugon Jr. 博士。

インドネシア・・・気象気候地球物理庁のJaya Murjaya博士。

オーストラリア・・・オーストラリア地球科学研究所のTristan Kemp博士。

今年度に配分いただいた研究費からは、将来的に現地観測所で用いるための耐電トランスを購入した。

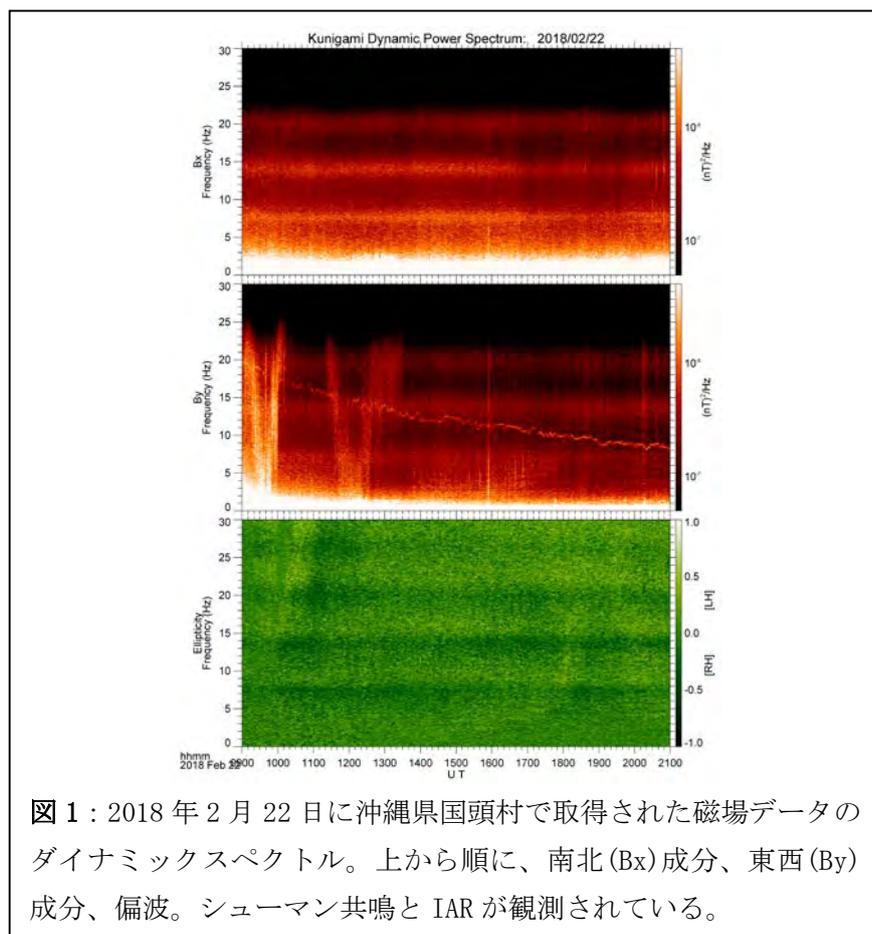


図1：2018年2月22日に沖縄県国頭村で取得された磁場データのダイナミックスペクトル。上から順に、南北(Bx)成分、東西(By)成分、偏波。シューマン共鳴とIARが観測されている。

宇宙線をプローブとした太陽風と IMF の断層撮像的観測

Tomographic observation of solar wind and IMF using cosmic ray as a probe.

小島浩司・愛知工業大学・工学部・土木工学科

研究目的

本研究では、日印共同研究として南インド・タミルナド州ウーティーに設置されている、GRAPES-3 の空気シャワー観測装置と大型宇宙線望遠鏡を用いて、広いエネルギー帯域で、多方向観測を行う。これにより、内部太陽圏の宇宙線密度分布の空間的構造とエネルギー依存性を明らかにし、太陽周辺および内部太陽圏における IMF プラズマ分布の断層的撮像（トモグラフィ）を行うことが、本研究の目的である。また、同様の手法を、名古屋大学宇宙地球環境研究所の 36 平方メートルのミュオン望遠鏡と、メキシコ・シェラネグラ山の宇宙線望遠鏡で得られるミュオンデータにも適用し、全地球規模の観測にする予定である。さらに、GRAPES-3 だけの観測では、統計的に 1 ローテーション（27 日）単位の断層撮像が限界であるが、現在南米ボリビアで建設計画が進められている ALPACA 実験に参加することで、1 日単位での断層撮像も可能となる。

太陽による宇宙線の遮蔽効果は、当然、宇宙線のエネルギーに依存することが予測されてきた。2001 年、藤本らはホバート、坂下、松代の地下ミュオン観測装置の観測データを用い、宇宙線真正恒星時異方性 (Tail In) の大きさが、太陽と地球と Tail In の位置関係 (地球の太陽に対して Tail 側と Tail の反対側の位置関係) によって大きく異なることを利用して、太陽による宇宙線の遮蔽効果 (宇宙線で透視した見かけの太陽の大きさ) と宇宙線のエネルギーの関係を見出した。その結果は、それぞれの観測における宇宙線のメディアンエネルギーと遮蔽効果が逆比例の関係であった (Proceedings of ICRC 2001: 3927)。この解析結果は、各観測の観測期間や観測時期が異なるため平均的描像といえるが、異なるメディアンエネルギーの宇宙線による、疑似的な断層撮像解析とも見なせる。

一方で、太陽周辺のプラズマの状態を直接観測する手段として IPS 観測が広く知られている。IPS で観測できるプラズマの状態は、プラズマの密度分布の変動が中心であり、磁場の変動には感度がない。それに対して、宇宙線観測では太陽の宇宙線の遮蔽効果の利用により、IMF 磁場の大きさやゆらぎを直接観測できることに特徴がある。したがって、太陽による宇宙線強度変動のモジュレーションや遮蔽効果の観測は、IPS の観測と相補的な関係にあり (IPS はプラズマの密度変動・揺らぎの移動に感度があり: 宇宙線は磁場変動・揺らぎに感度がある)、太陽周辺から内部太陽圏にいたる IMF プラズマの状態を実験的に確認できる観測手段である。このような、太陽による宇宙線強度のモジュレーションや遮蔽効果をより短期間 (究極的には 1 時間毎) で解析できるようになれば、宇宙天気予報に大きく資することができる。

研究方法

本研究では、多方向ミュオン望遠鏡による、大気ミュオンの観測に加え、宇宙線空気シャワーの精密な入射方向強度の観測を行う。ミュオン望遠鏡の観測が一次宇宙線の強度変動のモジュレーションを利用した間接的な IMF 変化のモニタリングであるのに対して、空気シャワー観測では遮蔽効果の利用により直接的モニ

ターが可能である。

本研究での利用可能な装置はインド・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。また太陽遮蔽効果の解析には GRAPS-3 空気シャワー観測装置が利用可能である。これらの観測装置に加えて，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 100 倍以上のエネルギー領域において解析が可能となる。観測で得られた宇宙線強度変動と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，それらを関連付けているパラメータを推定する。さらに，多方向ミュオン望遠鏡及び空気シャワー観測装置で得られる二次元宇宙線強度分布と，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事ができる。

本研究では，多方向ミュオン望遠鏡による，大気ミュオンの観測に加え，宇宙線空気シャワーの精密な入射方向強度の観測を行う。ミュオン望遠鏡の観測が一次宇宙線の強度変動のモジュレーションを利用した間接的な IMF 変化のモニタリングであるのに対して，空気シャワー観測では遮蔽効果の利用により直接的モニターが可能である。

本研究で利用可能な装置は，インド・ウーティの GRAPES-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。また太陽遮蔽効果の解析には GRAPES-3 空気シャワー観測装置が利用可能である。これらの観測装置に加えて，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 100 倍以上のエネルギー領域において解析が可能となる。観測で得られた宇宙線強度変動と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，それらを関連付けているパラメータを推定する。さらに，多方向ミュオン望遠鏡及び空気シャワー観測装置で得られる二次元宇宙線強度分布と，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ことができる。

GRAPES-3 研究活動報告

2018 年 8 月中旬から 9 月上旬に本研究代表者である愛知工業大学の小島と大阪市立大学の川上がインドに渡航した。またこれとは別に中部大学の大嶋が 8 月上旬から 8 月末日までインドに渡航した。その際に，インド・タタ基礎研究所において，インド側共同研究者と将来の GRAPES-3 のミュオン望遠鏡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行った。またその折，我々 GRAPES-3 グループが公表した，2015 年 6 月 22 日に観測された Cosmic Ray Burst (CRB) の解析結果の論文 (Mohanty et al. PRL 2016) に対する世界の様々なグループからの数々の批判 (APJ 2018 862 (2) :170 他数報) について議論した。主な批判の内容は GRAPES-3 多方向ミュオン望遠鏡の性能や論文の内容評価を錯誤したと考えられる表現であった。それらの批判に対して，2018 年 4 月に公表した反論論文 (Mohanty et al. PRD 2018) に加え，改めて先の CRB に他の事例も加えて，我々の主張の正当性を訴える論文作成の準備を開始した。

宇宙線強度変動と太陽風速度変動の関連性(太陽風効果)について、過去5年間で公表した論文の集大成として、地球から1天文単位以内の領域における、70 GV程度の宇宙線のプロパゲーションを特徴付ける平均自由行程について実験的決定値を計算した結果をまとめ、論文として公表した(Kojima et al. PRD 2018).

また GRAPES-3 のミュオン望遠鏡の高分角度解能かつ高統計精度の能力を存分に発揮した研究として、雷雲の接近に伴うミュオン強度の急激な変動とその異方性について詳細な解析を進めており、2014年12月に観測された雷雲について評価したところ、13億ボルトに達する電位が存在することが明らかになった。この電位の大きさは、これまでに記録された中で最大の値である。結果は、2019年3月に論文(Hariharan et al. PRL2019)として公表した。なお、GRAPES-3では年間約40~50例の雷雲事象を観測しており、今後、他の事例についても解析をおこなっていく予定である。ミュオンを用いて雷雲を観測した事実は、宇宙線観測が気象現象の観測にも応用できるという重要な意味を持っている。

GRAPES-3の維持管理および拡張に関する活動

2017年度に引き続き、2018年7月から2018年9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・ウーティに滞在し、ミュオン検出器建設作業の指導をおこなった。これにより、比例計数管の製作もほぼ完了し、比例計数管の積み上げも5層を残すのみとなっている。同時期に広島市立大学の田中もインド・ウーティに滞在し、新ミュオン検出器建設に立ち会った。本来、2018年8月には拡張作業が完了する予定であったが、雨期やインド側の予算執行の遅延のため2019年3月現在まだ完了していない(2019年2月予算執行許可がおりたのでまもなく完成する見込み)。

研究成果報告

2018年度本研究に関連する研究成果として以下のように報告する(上記の研究活動報告と一部重複する内容を含む)。2015年6月21日：太陽黒点領域 NOAA 2371 で大規模な CME 発生した。それに伴って生じた6月22日の Cosmic Ray Burst(CRB)観測に関して査読論文(PRL 117, 171101)を2016年に公表した。

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及び学術論文として公表された。それらの批判に反論すべく GRAPES-3 のミュオン望遠鏡の高分解能かつ高統計精度な特性を利用した、より詳細な解析をおこなった。その結果、天空の東西110度の観測視野(FOV)を10度刻みに分割して求めた方位において、通常の太陽時日変化の位相がずれているのに対して GRB の位相がほとんどずれていない事を示して先の GRB についての査読論文の結果の妥当性を主張する論文を2018年4月に公表した(PRD.97.082001)。この様に天空を10度刻みに分解する高分解能かつ高統計精度な GRAPES-3 のような観測は従来多く見られる正方形のシンチレーターを上下間隔1~2mに積み上げた2層構造タイプのミュオン望遠鏡(入射分解能数十度程度)では観測が非常に困難である。

この優れた方位決定精度を最大限発揮したのが雷雲に伴うミュオンの異常変動について、2011年から2014年の期間の184の雷雨についての観測データ収集及び解析である。その中の2014年12月に観測した雷雲中において電位が13億ボルトに達していて、これまで記録された中で最大の値であると推定した(従来記録された値は~1億ボルト)。この結果を2019年3月に論文(PRL. 122. 105101)として公表した。なお、この論文について、学術誌 nature のリサーチハイライト等およそ100のメディアでも公開されている。

地球近傍における70GV程度の剛度の宇宙線のプロパゲーションの平均自由行程については過去5年間にわたり公表した論文の集大成として推定された平均自由行程が~1天文単位程度あることしめし、2018年7月に論文(PRD. 98. 022004)として公表した。

【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(21)」
小島浩司、柴田祥一、大嶋晃敏他、日本物理学会 2018 年秋季大会、14aS37-2
2. 「GRAPES-3 実験における新ミュオン検出器の建設の現状について」
大嶋晃敏他、日本物理学会 2018 年秋季大会、14aS37-9
3. 「GRAPES-3 実験における大型 NaI 検出器の導入について」
田中公一他、日本物理学会 2018 年秋季大会、14aS37-10
4. 「Study of the impact of geomagnetic storms on the Earth's magnetic field by the GRAPES-3 experiment」
Sunil K.Gupta (Tata Institute of Fundamental Research) ISEE International symposium(2019)
5. 「内部太陽圏における銀河宇宙線強度と太陽風速度の関係」
小島浩司、柴田祥一、大嶋晃敏他、平成 30 年度 ISEE シンポジウム(日本語セッション)
6. 「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(22)」
小島浩司、柴田祥一、大嶋晃敏他、日本物理学会 第 74 回年次大会 (2019)、14aK407-5
7. 「GRAPES-3 空気シャワーアレイ拡張の現状について」
大嶋晃敏他、第 74 回年次大会 (2019)、16pK106-7
8. 「GRAPES-3 実験における大型 NaI 検出器の導入について(2)」
田中公一他、第 74 回年次大会 (2019)、16pK106-8

【投稿論文】

1. 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 97, 082001 (April 2018)
2. H. Kojima,S.K. Gupta, A. Oshima, S. Shibata, M. Tokumaru et al., " Measurement of the radial diffusion coefficient of galactic cosmic rays near the Earth by the GRAPES-3 experiment PHYSICAL REVIEW D 98, 022004 (July 2018)
3. B. Hariharan, S. K. Gupta, H. Kojima, A. Oshima, S. Shibata, S. Kawakami, Y. Muraki et al.," Measurement of the Electrical Properties of a Thundercloud Through Muon Imaging by the GRAPES-3 Experiment Physical Review Letters **122**, 105101(March 2019)

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

Preliminary research on evaluation of 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、北部のアルボルス山脈、北西部から南東部のザグロス山脈の2つの山脈(造山帯)に囲まれている。こ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・非金属鉱床の生成の重要な要因である。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。平成29年度 ISEE 国際共同研究「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」では、アルボルスからザグロスに広がる Astar-Baneh 構造帯の金属鉱床の母岩などに含まれるジルコン($ZrSiO_4$)を用いて、ウラン(U)-鉛(Pb)年代測定を実施した。Astar-Baneh 構造帯の鉱床母岩からは30~25 MaのU-Pb年代(e.g. Rabiee et al., submitted)が得られ、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、40 Maの第三紀花崗岩が確認された(Azizi et al., 2019)。このように、イランの火成活動や鉱床の成因解析を進める上で、新生代(65 Ma以降)の年代測定の重要性が格段に増している。世界的にも、U-Pb年代の測定対象は、先カンブリア代や中生代の古い岩石にとどまらず、新第三紀~第四紀にまで広がりつつある(e.g. Cocherie et al., 2009; Tani et al., 2010)。

一方、数10 Maの若い年代値をもつジルコンの標準試料は世界的にも少なく、若いU-Pb年代値の精度確認が不十分である現状がある。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。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(33 Ma; Iwano et al., 2013)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の小さいものやクラックがある粒子も多く、古いジルコンに比べてコンコーディア年代が得られにくいことがある。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、イランのザグロス造山帯内の北部サナンダジ-シルジャン帯に分布する第三紀の花崗岩体を対象とし、10~60 Ma程度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評価を行った。

[研究方法]

本研究では、イランの北部サナンダジ-シルジャン帯の第三紀花崗岩の1岩体を対象として、この岩体から5試料(1試料については平成29年度に予備分析を実施済み)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 μ 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。ジョ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、その後の薄片の作成は名古屋大学理学部E館内の実験室で行った。名古屋大学環境学研究科設置のGATAN MiniCLを装備した走査型電子顕微鏡(SEM: JEOL JSM-6510LV)で、ジルコン結晶の後方散乱電子(BSE)像とカソードルミネッセンス(CL)像を撮影し、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、環境学研究科設置の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)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)の手法に従った。火成岩のジルコンU-Pb年代測定では、通常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の分析を行った。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ていた平成30年4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。

[結果と考察]

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 20Ma であり、平成 29 年度の予備分析の年代値とも一致したことから、この岩体全体でジルコン年代の不均質性はないと考えられる。

本研究では、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、本花崗岩試料の年代標準試料としての適性の確認を行った。具体的には、Azizi が現地調査でその岩体の大きさと試料採取可能な露頭の位置を確認しており、継続的に試料を採取できる見込みである。また、今回分析した5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。ジルコンのサイズは 100~200 μm が多く、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、LA-ICP-MS 分析に適している。ジルコン結晶のコアとリムの年代値は一致しており、いずれのジルコン粒子にも年代値の差は全く見られない。

今回分析した花崗岩 5 試料のうち 2 つの岩石試料のジルコンではコンコーディア年代がほぼ 100%得られたが、残りの 3 試料では 90%程度であり、コンコーディア年代が得られにくいジルコンを含む試料があることが問題点として残っている。この原因を突き止め、ジルコン年代標準試料の信頼性を確立すること、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も連携し、この若いジルコン年代標準試料の年代値を確定させること、が“若い”ジルコン標準試料の実用化に向けた今後の課題である。

以上のように、ジルコン標準試料候補を絞り込み、その“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。このイランの北部サナンダジ-シルジャン帯の第三紀花崗岩の地理的、地質学的な詳細および年代値の詳細については今後論文で公表する。

[引用文献]

- Azizi, H., Haddad, S., Stern, R.J., Asahara, Y. (2019) Age, geochemistry and emplacement of the ~40-Ma Baneh granite-appinitic complex in a transpressional tectonic regime, Zagros suture zone, northwest Iran. *International Geology Review* **61**, 195-223.
- Cocherie, A., Fanning, C.M., Jezequel, P., Robert, M. (2009) LA-MC-ICPMS and SHRIMP U-Pb dating of complex zircons from Quaternary tephros from the French Massif Central: Magma residence time and geochemical implications. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **73**, 1095-1108.
- 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.
- Tani, K., Dunkley, D.J., Kimura, J.I., Wysoczanski, R.J., Yamada, K., Tatsumi, Y. (2010) Syncollisional rapid granitic magma formation in an arc-arc collision zone: Evidence from the Tanzawa plutonic complex, Japan. *Geology* **38**, 215-218.

[成果発表]

学会発表

- 浅原良浩, 眞野航大, 壺井基裕, アジジ ホセイン, 申基澈, 李承求. Sr-Nd-Fe isotopic constraints on the origin of Kiruna-type deposit in Zanjan, NW Iran. 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 幕張メッセ(千葉県), 2018 年 5 月.
- Rezaei, F., Azizi, H., Asahara, Y., Yamamoto, K. Geochemical and Sr-Nd isotopic constraints on origin of the Marivan granitoid body, northwest Iran. 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 幕張メッセ(千葉県), 2018 年 5 月.
- 眞野航大, 浅原良浩, 壺井基裕, アジジ ホセイン, 申基澈, 李承求. 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. 日本地球化学会年会, 琉球大学(沖縄県), 2018 年 9 月.
- Rezaei, F., Azizi, H., Asahara, Y., Yamamoto, K. Geochemical constraints of the Eocene granitoid in the northern Sanandaj-Sijan Zone, Zagros Orogen, NW Iran. 日本地球化学会年会, 琉球大学(沖縄県), 2018 年 9 月.
- Rezaei, F., Azizi, H., Asahara, Y., Yamamoto, K. Zircon U-Pb dating and geochemical study on Cenozoic granitoids in the northern Sanandaj-Sijan Zone, Zagros Orogen, NW Iran. 第 31 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), 2019 年 2 月.

彩層微細構造のダイナミクスから探る太陽外層大気励起機構の解明
Observation of fine scale dynamics in chromosphere
to explore the activation of the outer solar atmosphere

一本潔、京都大学・理学研究科附属天文台

太陽の彩層はスピキュールやモットルと呼ばれる小さなスケール（幅～200km）のジェットや筋構造からできており、それらはプラズマの流れや振動を伴い絶えず動的に変化している。こうした彩層のダイナミクスを介して、彩層はもとより上空の遷移層やコロナへエネルギーが受け渡されていると考えられることから、彩層微細構造にみられる運動場を把握することは、太陽紫外線放射やコロナ加熱ひいては太陽風の生成メカニズムの理解にとって重要である。本研究は、中国雲南天文台フーシャン湖太陽観測所が有する世界最高レベルの解像度を誇る口径1m真空太陽望遠鏡（NVST, Liu et al., 2014, RAS）と、京都大学が開発した高速彩層速度場撮像装置を組み合わせることにより、0.15秒角（約100km）という高い空間分解能で彩層微細構造の速度場とその時間発展を追跡することで、磁束管内を伝播する波動や衝撃波、小規模磁気リコネクションに伴う流れを捉え、エネルギー輸送過程の理解に繋げることを目的とした。

観測は2018年5月26日～6月8日に京都大学から大学院生を含む数名がフーシャン湖太陽観測所に滞在し、雲南天文台のXu博士らの協力の下でおこなった。京都大学が持ち込んだチューナブルフィルター（UTF32, Hagino et al 2014, SPIE, 9151）と高速カメラを、NVSTの焦点面観測テーブルに設置し、0.05"/pixの空間サンプリングで水素H α 線おける撮像観測をおこなった。本研究の大きな特徴は、2台のカメラを使ってH α \pm 0.5Åの画像を完全同時に取得することにより、シーイングの影響を大きく低減した視線方向速度場マップを取得する点にある。このようにして短時間に取得された多数の画像ペアをさらに画像処理することにより、望遠鏡の回折限界で決まる空間分解能の速度場マップを得ることが可能となる。図1はこのようにして得られた磁気浮上領域の様子である。H α 中心の画像（左）では磁気浮上に伴う、向きの揃ったループが複数並んで見え、視線速度場マップ（右）では、上昇するループに沿ってガスが両足に流れ落ちている様子が見える。図2はリムの上には存在する静穏型プロミネンスである。ここでも速度場マップ（右）にはプロミネンス内部に複雑で小さなスケールのガスの流れが存在していることがよくわかる。生憎今回の観測期間はフーシャン湖の天候条件に恵まれず、長時間安定した大気の下でデータを得ることが出来なかったが、短時間とはいえ磁気浮上領域やプロミネンスの極めて高い解像度の速度構造を捉えることに成功したことで、彩層微細構造のダイナミクスを詳らかにする本手法の有効性が示されたといえる。

本研究の手法を含めた今回の観測結果は短い論文に執筆中である。

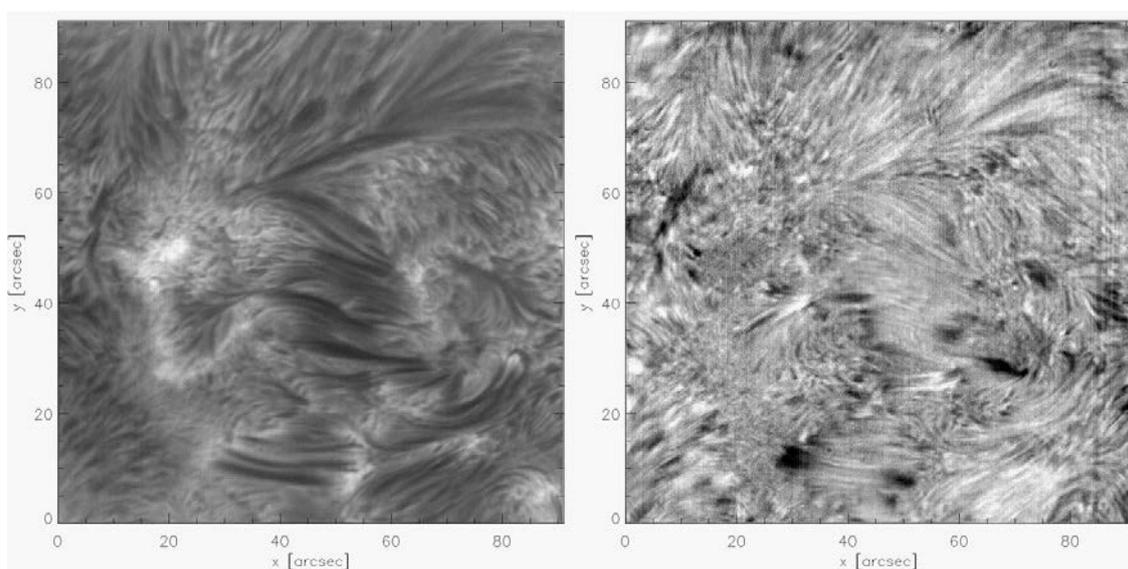


図 1. 2018 年 5 月 31 日の浮上磁場領域。H α 中心画像 (左) と H α $\pm 0.5\text{\AA}$ の差分画像 (右)。差分画像は白が上昇、黒が下降流をあらわす。

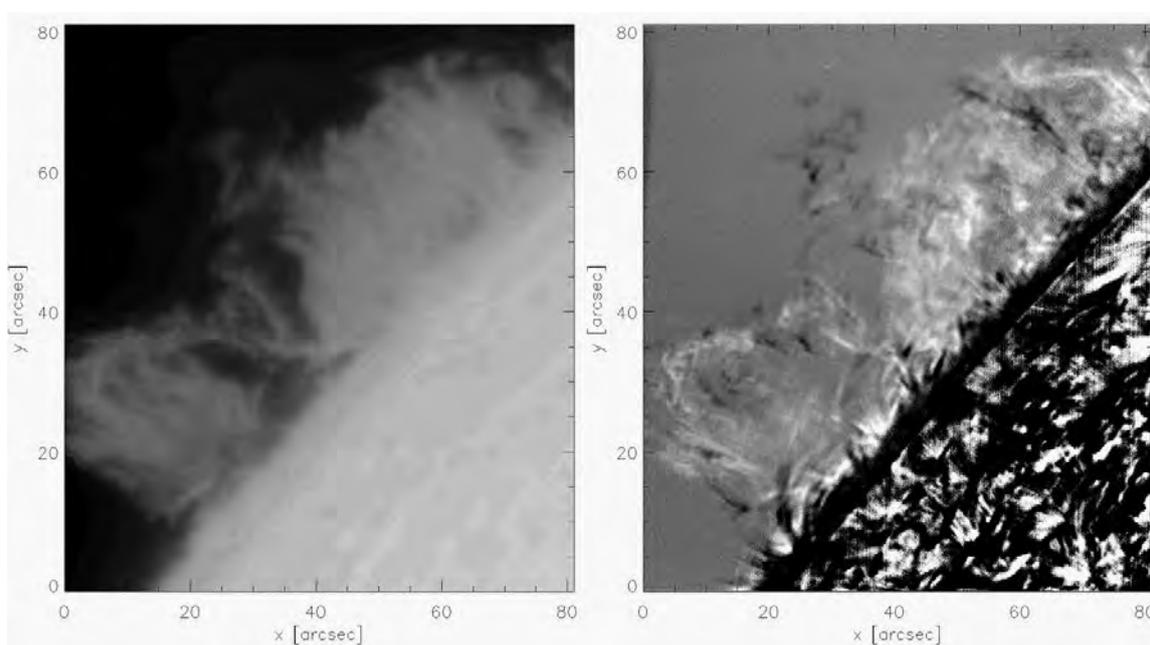


図 2. 2018 年 5 月 31 日の浮上磁場領域。H α 中心画像 (左) と H α $\pm 0.5\text{\AA}$ の差分画像 (右)。差分画像は白が地球から遠ざかる方向、黒が近づく方向をあらわす。

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。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一部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。本研究では、アジアダスト発地域のうち、流水により集積したことが考えられるドライレイクやワジにおいて、簡易風洞実験による砂塵飛散実験の比較やその粒子に付着した化学的・生物学的な理解を昨年引き続き行った。

2. 研究方法

過去のリモートセンシングデータ (MODIS) 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 (KANOMAX社製 Model3886) を用いて計測した。

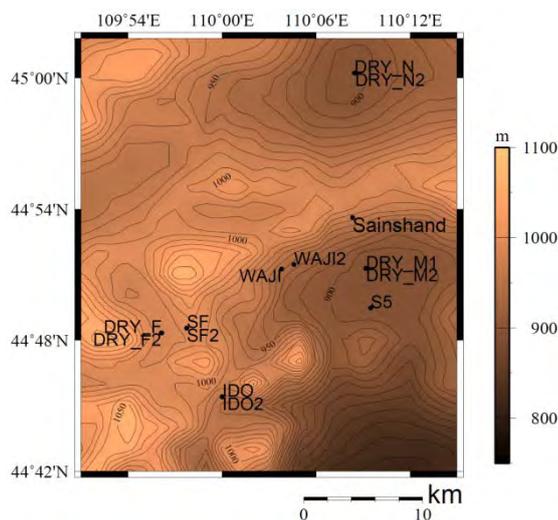


図 1 対象地域



写真 1 飛散実験風景

3. 結果と考察

サインシャンド北部の Dry_N についての結果を示す (図 2)。2017 年の観測では、1600 回転 (地上 1 cm で 7.7m/s 相当) を境界に粒径 3 および $5\mu\text{m}$ のダストは急増していた。一方、2018 年については、増加はみられるが 2017 年の半分程度であった。10 cm 土壌水分量は 2018 年の方が 1% ほど少なかった。過去 2 年間の降水量変遷を図 3 に示す。2017 年の秋季以降は降水量が少なめに推移しているため、滞水が生じることなく、常

に風により飛散しやすかった場が形成されていた可能性がある。引き続き、裏付けを明確にする調査が必要である。また、同地域のサンプル粒子から生物由来物質の確認がなされたが、詳細は調査中である。さらに、同地域でのダストの起こり易さをモデルで検証する目的で、ドローンにカメラと赤外線計測器を取り付け、空間的な分布を観測した(図4)。現在、データを整理している段階であるが、地表面の温度分布や起伏、粗度長などから、ダストデビルの発生について領域気象モデルを用いてシミュレーション解析する予定である。

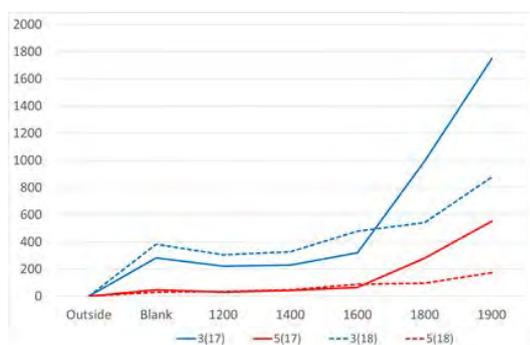


図2 Dry_N 地点の回転数(風速)と粒子数の関係

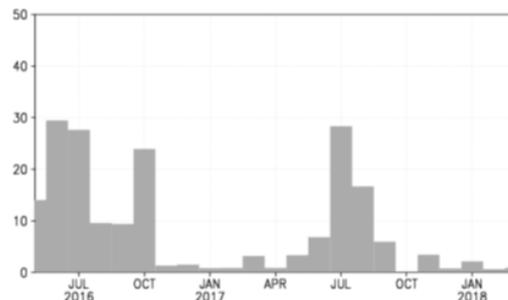


図3 Sainshand 付近の月別降水量
GPCC (Global Precipitation
Climatology Centre)

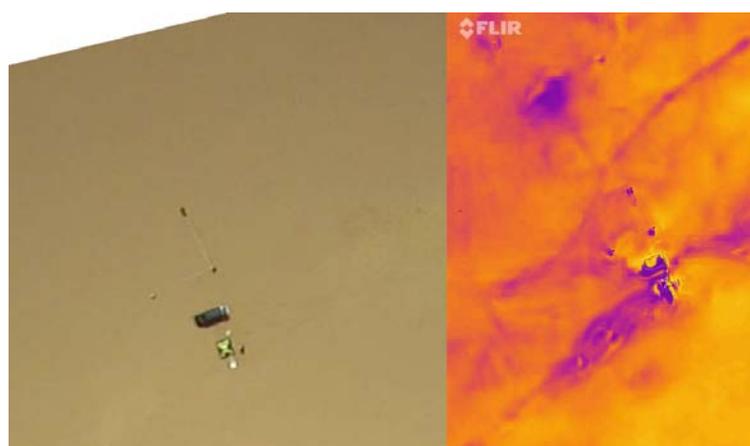


図4 ドローンによる可視画像(左)と赤外線画像(右)

4. 成果発表

Buho HOSHINO, Yuki SOFUE, Yuta DEMURA, Tsendendamba PUREVSUREN, Morine KURIBAYASHI, Kenji BABA, Enkhtuvshin ZOLJARGAL, Katsuro HAGIWARA, Jun NODA, Keiichi KAWANO, Olaf KARTHAUS, Kenji KAI, Detection of dry lake beds formation and estimate of environmental regime shift in semi-arid region, 沙漠研究, 28(5) 109-113, 2018年

馬場賢治, 松本珠季, 星野佯方, モンゴルゴビ砂漠ドライレイク・ワジにおける飛散実験解析, 第6回大気エアロゾルシンポジウム, 北海道大学, 2018年11月9日(2018年度ISEE研究集会経費利用)

衛星観測と地上複数点観測から明らかにする移動性電離圏擾乱の全球発生特性

Study on global characteristic of MSTID with space-borne imaging and ground-based observation network

穂積 裕太、電気通信大学、情報理工学研究科

■ 学術的背景

移動性中規模電離圏擾乱(MSTID)は、日本を含む中緯度域では、もっとも振幅の大きい電離圏擾乱のひとつである。このような電離圏擾乱は電波の伝搬に屈折、遅延、干渉を引き起こし、GPS測位、衛星通信、航空航法システム、電波通信など、電波を用いたシステムに影響を及ぼすため、現象の正確な理解が求められている。これまで、地上からのレーダー観測、大気光イメージング観測や、GPS受信機網による電離圏全電子数(TEC)観測などでMSTIDの特性が調べられてきた。しかしながら、日本上空の観測ネットワークだけではMSTIDの広域構造を捉えられないこと、観測が疎である海上などでは観測が困難であることなどから、MSTIDの広域構造、全球発生特性は未だ不明な点が多い。

■ 目的

高度400kmを飛行する国際宇宙ステーションから大気光を撮像観測する超高層大気観測ミッション(ISS-IMAPミッション)が2012年から2015年に行われた。ISS-IMAPの観測機器、可視近赤外撮像装置(VISI)は電離圏の酸素大気光(630 nm)を撮像観測している。VISIは天底方向に視野を持つため、MSTIDの電離圏擾乱を中低緯度全域において同様の条件観測できる。本研究ではVISIのデータと日本、台湾上空の大気光イメージング観測、GPS-TEC観測を組み合わせ、MSTIDの広域構造、全球発生特性を明らかにすることを最終的な目的としている。これまで研究でMSTIDの典型的振幅はVISIの感度と比較しそれほど大きくないためVISI観測データ中にMSTIDイベントを見つけることは簡単ではないことが分かっていた。そこで今年度はVISI観測データからMSTID変動を効果的に抽出する手法を開発することを目標とした。

■ 研究手法

MSTIDは北半球では通常、北西から南東方向の波面を持つという性質(南半球では南西から北東方向)を持つ。この性質を活用し、IMAP/VISIで得られた大気光2次元画像をそれらの方向に沿って平均をとり、微弱なMSTIDによる変動を効果的に抽出するデータ解析手法を開発した。この解析手法を前後視野で得られたデータに適用し両者を比較することで、MSTIDの構造に対して視線方向の異なる前後視野の見え方の違いの評価を行った。また、開発したデータ解析手法を特定の期間のデータに適用しMSTIDの同定を行った。

■ 研究の結果と考察

・ 前後視野の差異の評価

解析の結果を図1に示す。図から分かるように、前後視野を比較した場合、後視野で見られるMSTIDの振幅は前視野で見られるものより小さい。これは、MSTIDの3次元構造に対する視線方向が前後で異なるため、VISIの前視野視野、後視野の感度が異なるため、と2つの原因があるのではないかと考えられる。また、前後視野間でMSTIDの変動の位相がずれている例も見られる。これは前後視野間での感度の差では説明できず、MSTIDの3次元構造に起因するものと考えられる。MSTID3次元構造の効果を正確に見積もるためにモデルに検証が必要である。今年度は電離圏モデル解析の経験が豊富な台湾・成功大学・Chen助教と打ち合わせの機会を持ち、今後、モデルを用いたMSTID3次元構造の前後視野への見え方評価を行っていく方法を確認した。また、前後視野のMSTID振幅の違いの原因の切り分けのため、感度校正の必要性も改めて認識された。これまでVISIでは地上実験データに基づく感度校正が行われているが、実軌道データと地上イメージャー取得データの比較に基づく感度校正を今後行いたい。これにより時間経過に伴う機器の感度変化を含むより高精度な校正ができる。

・ イベントの同定

2014年5月から2014年7月の観測データに対して上記解析手法を適用し、1次元プロットを目視で確認した結果、50を超えるMSTIDイベントの同定できた。十分な数のMSTIDがIMAP/VISIにより観測できていることが確認できたため、今後統計解析を進めることができると判断した。客観性の高い統計解析を進めるために、目視に頼らない定量的なMSTIDイベントの判断基準を今後開発していくことが必要である。

■ まとめ

MSTIDを波面方向にVISI大気光輝度の平均をとる手法を開発した結果、多数のMSTIDイベントの同定に成功した。また、前後視野によりMSTIDの見え方の違いに顕著な違いが確認された。今後はより高精度な感度校正を行った上で、モデルにより検証を行いながら、前後視野のMSTIDの見え方の違いにおけるMSTIDの3次元構造効果の評価を行いたい。また、客観性の高いMSTIDイベント同定手法を開発し統計解析を進めたい。

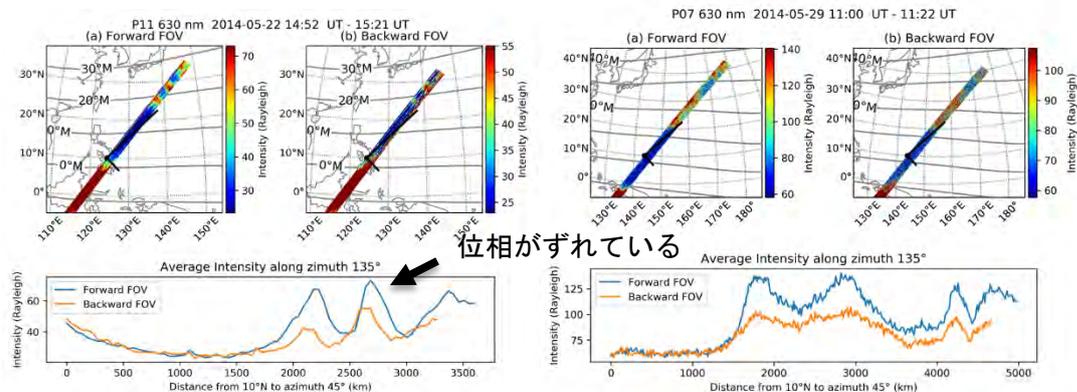


図1：VISI 観測データ中に見られるMSTIDイベントの例

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
 Use of detectors of air shower experiment for observation of interplanetary environment.

研究代表者 野中敏幸、所属:東京大学・宇宙線研究所

研究目的

地上の宇宙線観測装置を用いた、低エネルギーの銀河宇宙線の強度変動と異方性の観測を通して太陽活動による惑星間空間の状態の変化を観測する手法が存在する。[1, 2] 現在、展開されているミュオン計は、信州大学グループによるGMDN、インドタミルナド州に設置されているGRAPES-3ミュオン望遠鏡、長期にわたって安定して稼動している名古屋大学ミュオン望遠鏡が主な装置として存在する。全球的に観測することが衛星観測を補完する上で重要であるという観点から、観測点を地球上により多く確保し、相互に比較できる事が求められている。

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として用いられている 2層式シンチレーション粒子検出器507基を総面積1500㎡のミュオン計として運用する事を目的としている。本研究で用いる検出器には粒子の到来方向の識別能力は無いが、既存の観測ネットワークと共同で惑星間空間をモニターする利点は大きい。本研究によって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、これらの測定に参加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等の気象条件の影響の推定。
- ② 装置が展開されている領域の中での気象条件の差異の把握。
- 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

本年度5月～6月にかけてTAサイト内の中央に設置してある気象計(WXT530)と低消費電力で気圧測定が可能な複合環境データ記録装置(TR-73U ONDOTORI T&D製)の同時測定を行い、気圧計としての動作と、相対変動の設置環境毎の違いを評価した。TR-73Uの記録する気圧の絶対値は-0.6hPa程度の較正が必要であるが、記録される変動は気象計の記録と0.1hPa以内で一致する(表1, 図1)

表1: 気象計(WXT530)と複合データ記録装置の比較

| 測定器型番 | 測定器名 | 基準計との差(hPa) | |
|--------|---------|-------------|--------|
| WXT530 | WS (基準) | - | - |
| | EM_CL | -0.579 | ±0.095 |
| TR_73U | EM_LR | -0.583 | ±0.096 |
| | EM_SK | -0.506 | ±0.099 |
| | EM_BR | -0.258 | ±0.096 |

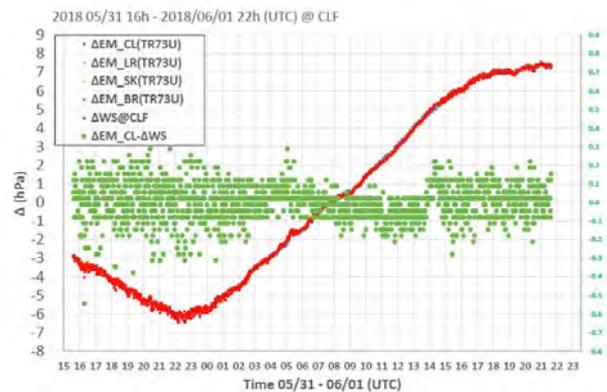


図1: 5つの記録装置の記録した気圧の相対変動。(0.1hPa以内で重なって表示されている。)

この結果を確認した後、TR-73U の連続運用のために本年度ソーラーパネルとバッテリーによる電源、5V電源で動作するデータ送受信のための小型コンピュータなどの資材を購入した。(これにより来年度②の目的を達成する。)

次にデータ解析として、2017年02月11日～02月12日にかけて急激な気圧の上昇を示した際のデータを用いて暫定的な気圧係数を求めた(-0.24%/hPa 図)。通常のミュオン計での気圧効果係数は-0.12%/hPa 程度の影響であり大きく異なる。予備的に標高の異なる2検出器の地点で気圧の同時測定を行い、10分間の係数率の比較を行ったところ6.7hPaの気圧差に対して計数率の比は $1.64 \pm 0.1\%$ (stat)の差であった。求めた気圧計数からの予測(1.61%)と誤差の範囲で一致する。TA実験で用いている薄型のシンチレーション検出器の場合は検出器に吸収層を持たないため、電磁成分の気圧効果の寄与が影響していると理解している。

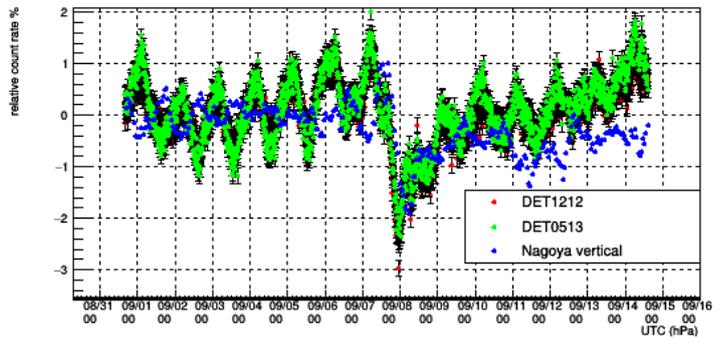
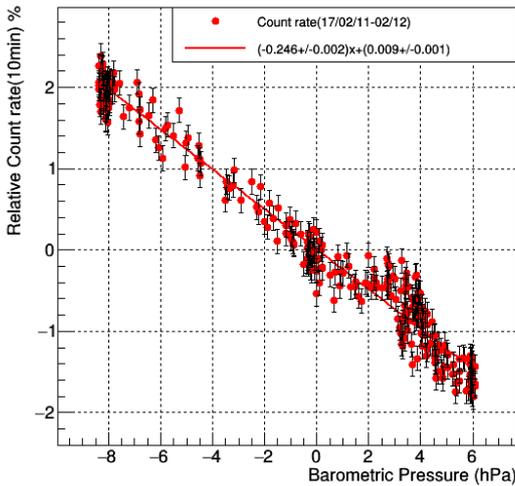


図 2: 気圧変動によるカウントレートの相対変動

図 3: TA 実験検出器と名古屋大学ミュオン計の比較

また得られた気圧係数を用いて、複数の測定装置との比較を行った(図3)。TAサイト内の2つの検出器(DET1212, DET0513)と名古屋大学のミュオン望遠鏡のデータをみるとともに09/07日に発生したForbush decreaseを観測している。データから気温による効果を考慮することでさらに意味のある比較を行う事が可能である。

期待される成果:

以上の活動から2018年度の研究ではデータへの気圧効果を把握するための方法に目処をつけることができた。また測定された気圧変動を元に地表検出器データの気圧効果係数を求めそれを適応することで少数台のデータではあるが他の測定点との比較を行うことができた。2019年度は気圧計の多地点への設置作業と、気温効果を考慮したデータ解析手法を確立する必要がある。これらを行うことによって、既存の銀河宇宙線強度変動を測定する装置群を補完するデータ点として、惑星間空間の擾乱を理解するために有用なデータを提供するものとなると期待される。

成果発表

日本物理学会 2018年 秋季大会 09/14 14pS37 TA実験315: TA実験 全体報告

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)

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 ± 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、高時間分解能の観測装置が必要となる。トロムソにある 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 200Hz（5 ミリ秒間隔）で観測している。一方、トロムソのナトリウム温度/風速ライダーは、ナトリウム層（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、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必ずしも十分とはいえず、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である。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。

研究結果

現有の音響光学素子（AO）2 台に加え、高速波長切り替えのための光学シャッターとして 2 台の AO を本予算により導入し、現有の機械式シャッターを置き換えた新しい光学レイアウトにおけるシステムの検証を行ってきた。計 4 台の AO に対しそれぞれ on/off のトリガー制御を与えることで 3 周波数の切替ができる。AO の反応速度はトリガー信号入力から約 20 ナノ秒で、パルスレーザ射出（1 ミリ秒間隔）における高速周波数切り替えを十分に可能にする。また、射出レーザの高速周波数切り替えに対応する受信カウンタを FPGA で設計・シミュレーションし、1 ミリ秒間隔で周波数が切り替わる場合のデータ取得手法、保存、データ転送などの検討を行った。高速観測に関する今後の課題を明らかにすることができた。

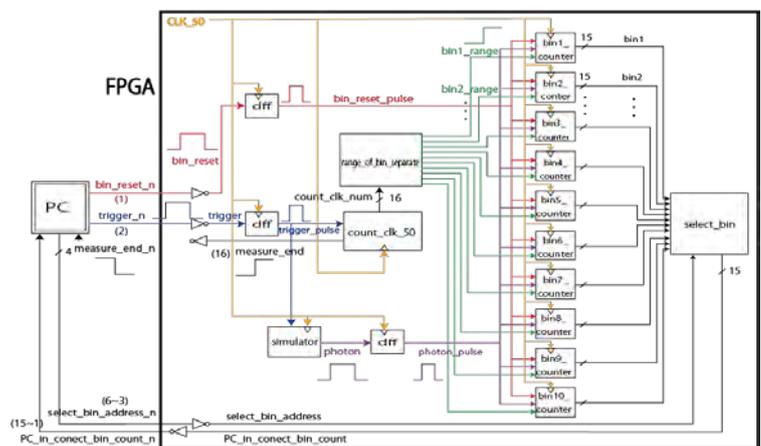


図 1 (上) FPGA を用いたカウンタの構成図
(下) カウンタシミュレーションのテスト画面

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ものである。

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) を同時に観測するシステムを開発し 2 チャンネル入力のネットワーク・ビデオエンコーダで観測を制御するシステムを構築した (図1)。複数枚の大気光画像を重ね合わせて、その時間差分をとることで、安価なカメラで大気中の波動構造を得ることができる (平成28年度名古屋大学宇宙地球環境研究所一般共同研究)。このシステムでは順リアルタイムにデータ公開を目指し、逐次的なデータ転送環境を構築した。

最終年度である2018年度は、これまでに設置した Kühlungsborn の IAP 研究所 (54.1°N, 11.8°E) および Juliusruh 観測サイト (54.6°N, 13.4°E) の大気光カメラのメンテナンスと観測データの総括をおこなった。

Kühlungsborn においては、コントロール PC の不具合にて 2018年度半ばから観測がストップしていた。また、観測データを日本のサーバへアッ



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。

プロードする際にクラウドサービス (Dropbox) を利用していたが、一部データについてはうまく同期できずストレージの容量が小さいローカルの PC にデータが蓄積して観測データが失われる事態となった。そのため、コントロール PC のリプレイスとともに、データ転送環境の更新をおこなった。具体的には、これまで観測時間を固定 (20:00-29:00LT) していたが太陽と月が地平線より十分に低い時間のみを判断しデータとして残すことでデータ転送を効率化し、複数のストレージに保存することで冗長性を確保し観測データが損失する可能性をできるかぎり小さくした。また毎晩の観測終了後には関係者宛にログとサンプル画像を電子メールにて送信する仕組みを構築した (図2)。これにより、装置や観測の不具合に素早く対応できるようになった、本研究で開発したこれらの環境は、今後の大気光観測システムとして標準化していく。

From: sslab_obs@gmail.com
Subject: AIC obs report [2019-03-26 @KBR]
Date: 26 March 2019 14:10
To: sslab_obs@gmail.com

```
[2019-03-25 15:50:01] check schedule...
today's schedule: 20190325,185000,20190325,232000
[2019-03-25 18:40:00] remove old data and wait
[2019-03-25 18:49:00] remove old data and wait again
[2019-03-25 18:49:00] image storing process is open in 1-min
[2019-03-26 05:10:22] observation is just closed
[2019-03-26 05:10:27] all processes complete!!!
please find the latest image of camera ID 01.
in the directory(ies) 2019/20190325/ # of files: C01 (3240), other(s) (3240)
```



図2: 観測ログのサンプル (2019年3月25日)。

本研究で開発したこれらの環境は、今後の大気光観測システムとして標準化していく。

3基目の2波長大気光観測システムの設置によるさらなる広範囲の同時イメージング観測を実施する予定であったが、候補地選定の遅延と上記システムメンテナンスのため実現することができなかった。しかしながら、本研究で得られた2地点観測データにおいても北極での広域イメージング観測という当初の目的は達成できている。数晩において大気重力波構造が得られており、ライダーとの同時観測も実現している。今後は本研究による大気光観測で得られた波動構造と、ライダー・レーダー観測による温度・風速変動の関係から大気重力波が超高層大気に及ぼす影響を定量的に評価するとともに経度方向への広がりを議論していく。さらに、共同で観測を進めてきた IAP において今後も観測体制を維持していく合意が得られたため、さらなる共同観測体制の構築とデータの蓄積が期待される。

成果発表：

1. 鈴木臣, 超高層大気の縞模様で見る地球と宇宙のつながり, 平成30年度第1回「高高度発光現象の同時観測」に関する研究会, 東京, 2018年5月19日.
2. S. Suzuki, T. Nakamura, M. K. Ejiri, K. Tsuno, T. Nishiyama, A. Mizuno, and J. Salvador, Airglow Imaging of Mesospheric Gravity waves Using Near-Infrared Camera, 日本地球惑星科学連合2018年大会, 幕張, 2018年5月22日.
3. S. Suzuki, J. Park, Y. Otsuka, K. Shiokawa, H. Liu, and H. Lüehr, Neutral and plasma density perturbations in the top-/bottom-side ionosphere associated with MSTIDs, 地球電磁気・地球惑星圏学会秋学会, 名古屋, 2018年11月25日.

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 大学院情報理工学研究科

研究目的

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

昨年度に引続いて、自動運転によるスペクトログラフの連続連続観測をノルウェー、トロムソで実施した。取得データを用いて複数トピックに関するデータ解析を並行的に進めている。また、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公開している。

干渉フィルター（半値幅 数 nm）を用いた酸素原子発光線 777.4 nm の分光観測における窒素分子発光バンド 1 PG の混入問題に関して、スペクトログラフ観測データに基づいた評価を行った。定量的な評価より、窒素分子発光バンド 1 PG の混入の影響は無視できるものではないことが判明した。従って、干渉フィルターによる分光観測で酸素原子発光線 777.4 nm を観測しようとする際には、窒素分子発光バンド 1 PG の影響を評価することが必須であると考えられる。以上に関して学術論文 (Oyama et al., EPS, 2018) として発表した。

脈動オーロラ明滅時の発光スペクトル変化に着目し、明滅に寄与している原子・分子の波長や降下電子のエネルギーに関する情報を抽出する取組みを進めている。現在は、脈動オーロライベントの選定と複数イベントの解析を並行的に進めている。

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デ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、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。以上に関して学術論文 (Tsuda et al., EPS, 2018) として発表した。

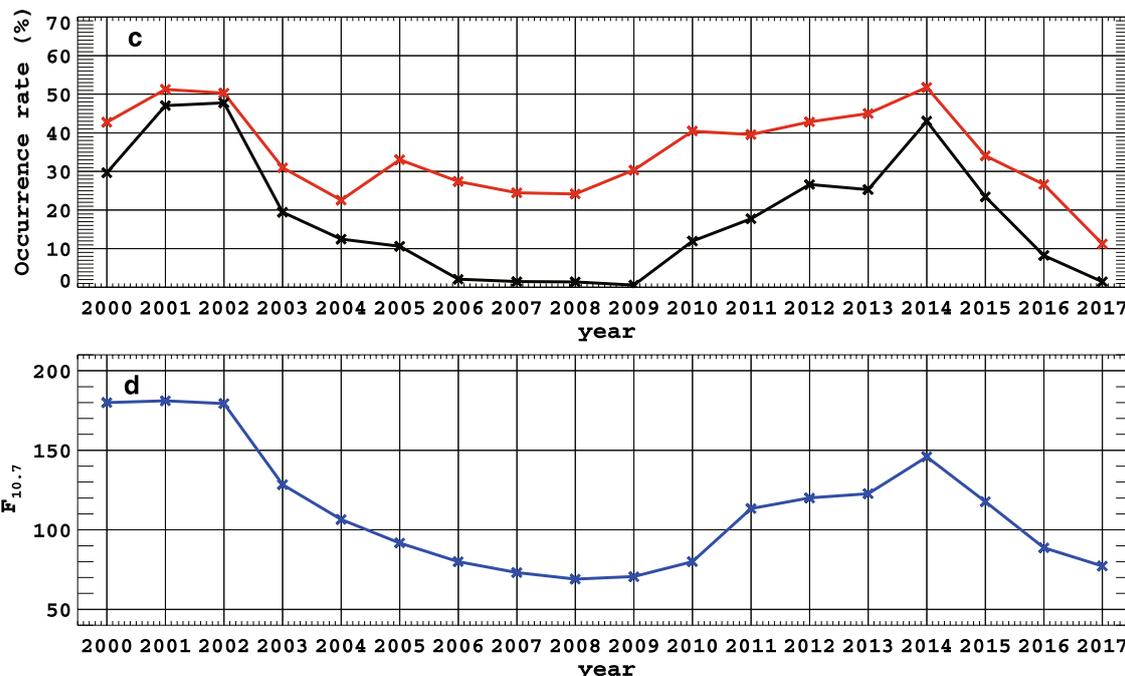


図. 人工オーロラ実験 (赤: 送信周波数 2.8 MHz, 黒: 送信周波数 4.0 MHz) の観測可能性と太陽活動度の関係 (Tsuda et al., EPS, 2018)

学術論文 (査読付)

- (1) M. K. Ejiri, T. Nakamura, T. T. Tsuda, T. Nishiyama, M. Abo, T. Takahashi, K. Tsuno, T. D. Kawahara, T. Ogawa, and S. Wada, Vertical fine structure and time evolution of plasma irregularities in the Es layer observed by a high-resolution Ca⁺ lidar, *Earth Planets Space*, 71, 3, doi:10.1186/s40623-019-0984-z, 2019.
- (2) S. Nozawa, T. Kawabata, K. Hosokawa, Y. Ogawa, T. T. Tsuda, A. Mizuno, R. Fujii, and C. M. Hall, A new five-wavelength photometer operated in Tromsø (69.6°N, 19.2°E), *Earth Planets Space*, 70, 193, doi:10.1186/s40623-018-0962-x, 2018.
- (3) T. T. Tsuda, Y. Hozumi, K. Kawaura, K. Hosokawa, H. Suzuki, and T. Nakamura, Initial report on polar mesospheric cloud observations by Himawari-8, *Atmos. Meas. Tech.*, 11, 6163-6168, doi:10.5194/amt-11-6163-2018, 2018.
- (4) S. Oyama, T. T. Tsuda, K. Hosokawa, Y. Ogawa, Y. Miyoshi, S. Kurita, A. E. Kero, R. Fujii, Y. Tanaka, A. Mizuno, T. Kawabata, B. Gustavsson, and T. Leyser, Auroral molecular-emission effects on the atomic oxygen line at 777.4 nm, *Earth Planets Space*, 70, 166, doi:10.1186/s40623-018-0936-z, 2018.
- (5) T. T. Tsuda, M. T. Rietveld, M. J. Kosch, S. Oyama, Y. Ogawa, K. Hosokawa, S. Nozawa, T. Kawabata, and A. Mizuno, Survey of conditions for artificial aurora experiments by the second electron gyro-harmonic at EISCAT Tromsø using dynasonde data, *Earth Planets Space*, 70, 94, doi:10.1186/s40623-018-0864-y, 2018.

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る用い、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る用いにより、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・コトタバンには及びタイ・バンコクにはMC/MF GNSSシンチレーション受信機が2018年3月に設置され、継続観測を行っている。

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、2015年2~3月のうちシンチレーションが発生した30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、及びDual-Solution Ionosphere Gradient Monitoring Algorithm (DSIGMA)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4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増大することがわかった。モデル化されたシンチレーションに伴う衛星排除率は、現在国際民間航空機関(ICAO)の作業部会において、低緯度におけるGBASの性能向上のための基準策定に活用されている。

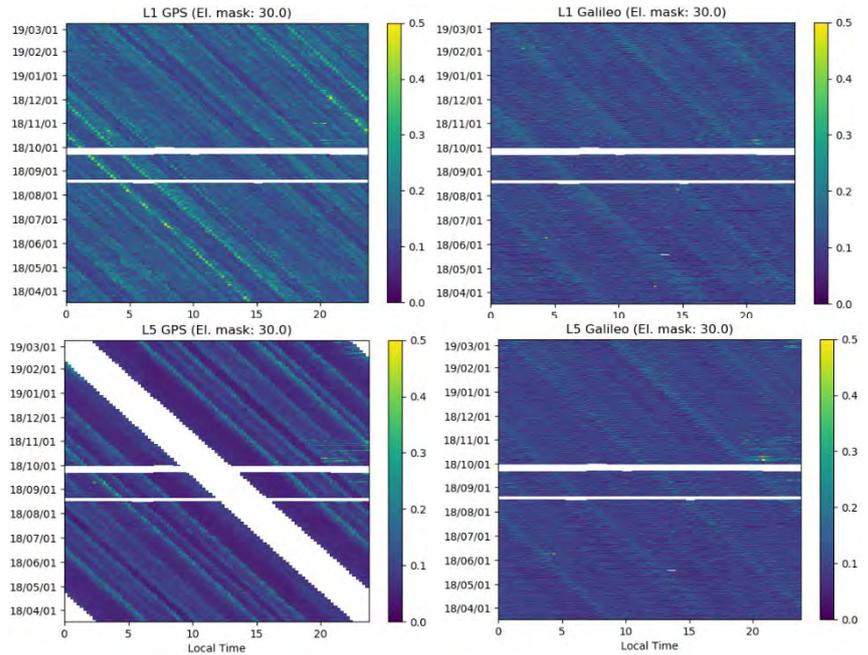


図 1. 2018 年 3 月～2019 年 3 月の、GPS、Galileo の L1 及び L5 帯のシンチレーション指数(S4)。2018 年 10 月の 22～23LT、2019 年 2 月の 23～24LT 付近にシンチレーション指数の増大が見られる。なお GPS では L5 信号を送信する衛星が少ないため、L5 信号が受信されない時間帯が発生している。

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、2018年3月から2019年3月までにインドネシア・コトタバンにおいて観測されたデータを解析し、衛星系、信号ごとのシンチレーション発生特性を解析した(図1)。太陽活動が低い時期ではあるが、2018年10月、2019年2月にシンチレーションの発生が確認できた。2018年10月については赤道大気レーダーによる同時観測があり、赤道大気レーダーにおいてもプラズマバブルの発生が確認された。信号特性としては、L1に比べL5信号は雑音レベルが低く、弱いシンチレーションの検出に適していること、GPS L5とGalileo E5aの比較においてはGalileo E5aの方が雑音レベルが低いことがわかった。

今後、さらに観測を継続し、コード擬似距離精度、位相擬似距離精度など、信号品質の評価を行うとともに、衛星とプラズマバブルの相対位置との関係の解析を行っていく予定である。

成果発表一覧

Budtho, J., Supnithi, P., and Saito, S. (2018). Analysis of quiet time vertical ionospheric delay gradients around Suvarnabhumi airport, Thailand. *Radio Science*, 53. doi:10.1029/2018RS006606.

Bumrungrkit, A., Supnithi, P., & Saito, S. (2018). Statistical analysis of separation distance between equatorial plasma bubbles near Suvarnabhumi International Airport, Thailand. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123, doi:10.1029/2018JA025612.

Saito, S., and Yoshihara, T., Impact assessment of ionospheric scintillation associated with plasma bubbles on GAST-D ground integrity monitors, ION GNSS+ 2018, Miami, 26 March 2018.

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

高橋透、国立極地研究所、研究教育系

学術的背景

近年、オーロラパッチ内部に分極電場が生成されていることが示された(Hosokawa et al., 2008)。この電離圏起源の電場は、磁気圏由来の電場とは異なる形で、ジュール加熱やイオンドラッグに寄与することや、電場が磁力線に沿って磁気圏に伝搬することで、グローバルな磁気圏の対流に影響を与えられ考えられる。従って、オーロラパッチ内部の分極電場の生成メカニズムを理解することは磁気圏-電離圏-熱圏結合を理解する上で重要である。

研究目的

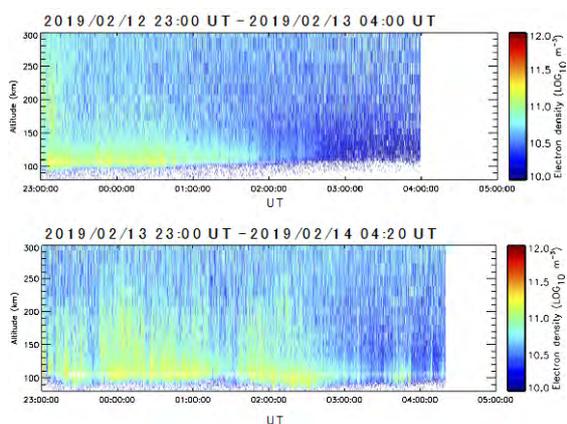
東西に伸びたアーク状の領域が電離され発光するアーク状オーロラとは異なり、オーロラパッチは、数 100 km 程度の局所的な領域が電離され発光している。特に、オーロラパッチ内部で高度 110 km 以下を電離するような高エネルギー粒子降下による電離が起こると、ホール伝導度がペダーソン伝導度に比べて急激に増大する。オーロラパッチ内部では強い電流と、外部の弱い電流との一様性を保つために、分極電場が生成されていると考られている。Hosokawa et al. (2010)では、このメカニズムを検証したが、生成されると見積もられた分極電場と、観測される分極電場の強度が一致しないことを報告している。これは、3次元的に発達する電離圏の電流系を、水平の 2次元の電流のみと仮定し、分極電場の大きさを見積もっていたことに起因すると考えられる。よって、本研究では、EISCAT レーダーと KAIRA レーダーの同時観測を行う。この観測を基に、3次元的な電離圏電流系を考慮することで見積もられた分極電場と、観測された分極電場とを比較することで、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した。また、同一磁力線に伝搬する分極電場を F 領域で観測することで、分極電場の高高度への伝搬過程を理解することや、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を理解することを目的として研究を行なった。

研究結果とまとめ

申請者はまず、2015年11月に実施された EISCAT レーダーと KAIRA レーダーの同時観測データの解析を行なった。この結果、これまで提唱されてきたようにホール伝導度の増大によって対流電場と同程度の強度を持つ分極電場がオーロラパッチ内部で生成されていることがわかった。また、分極電場は少なくとも高度約 100 km で生成され 200 km まで伝搬していることを明らかにした。同時に、5~10 uA/m²の沿磁力線電流 (FAC) がオーロ

ラパッチの東西エッジに繋がっており、分極電場の強度を弱める働きをしていたことを示した。この結果を2018年5月に幕張で開催されたJpGUと2018年12月にワシントン D. C.で開催されたAGUで発表した。この研究は科学論文としてまとめ、2018年11月にJournal of Geophysical Researchに投稿し、2019年3月に受理されている。

さらに、FACのより定量的な値を人工衛星のデータと比較するためにはオーロラパッチのエッジでの電子密度勾配を詳しく推定する必要があることが分かった。そこで申請者は2019年2月にEISCAT トロムソ観測所に渡航し、EISCAT UHF レーダーを用いてオーロラパッチ内部をスキャンする観測を2晩にわたって実施した。この観測ではナトリウムライダーによる中性大気・温度観測も同時に行っている。2晩の内、1晩(2月14日)でほぼ東向きに伝搬するオーロラパッチを観測することができた。観測結果を解析し、結果を報告するためにPCを購入し、現在解析と考察を行なっている。結果は、適宜学会や研究集会で報告を行い科学論文としてまとめる予定である。



2019年2月に実施したEISCAT UHF レーダーを用いた特別実験によって観測された電子密度。

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

An international research initiative for the Asian monsoon variability
driven by diversified regional hydroclimatological characteristics

寺尾 徹、香川大学教育学部

研究目的

アジアモンスーンは、太陽地球系結合過程として、地球の交点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は、アジアモンスーンの変動メカニズムを解明することは急務となっている。

アジアモンスーン研究は、継続的にWCRPの枠組みのもと、GEWEX Hydroclimatology Panel (GHP) のRegional Hydroclimate Projects (RHP) の一つとして、1996-2006年のGEWEX Asian Monsoon Experiment (GAME)プロジェクト、2006-2016年の Monsoon Asian Hydro-Atmosphere Scientific Research and Prediction Initiative (MAHASRI)プロジェクトとして展開されてきた。これらのプロジェクトのもと、アジア諸国との研究協力は大きく広がり、熱帯から高緯度域に至る多様な地表面のアジアモンスーン循環に対する役割の明確化などの成果をもたらした。これらの達成の上に立って、現在、Post MAHASRIプロジェクト準備会（世話人：鼎信次郎・寺尾徹）のもと、次期RHPの計画策定が進められている。

MAHASRIプロジェクトを通じて、南アジアの研究者との協力関係が大きく発展した。一方のチベット高原側でも、最近重要な条件の発展があった。中国の研究機関が中心となって水文気候学的研究を展開しているThird Pole Environment (TPE) プロジェクトがGHPの枠組みのもとで検討されている。

本申請（3年計画）は、WCRPの枠組みの元、次期RHP(Post MAHASRIプロジェクト)の計画策定および初動期における国際研究協力体制の構築のための研究者の派遣、および招聘を主要な目的としている。これらの取り組みの中で多くの内外の研究者との共同研究を推進している。

研究結果

本申請は、3年計画の1年目であり、その他の関連する研究プロジェクト（科学研究費補助金、民間の研究助成等との共同研究経費等）と連携して研究を推進してきた。

5月に行われたThe 8th GEWEX Science Conference（2018年5月6-11日@カナダ・Canmore）に3名の研究者を派遣し、次期RHPに向けた検討状況を発表して国際的な所研究者との交流を行い、次期RHPへの多くのsuggestionを得た。

Post MAHASRIプロジェクトのサイエンスプランを練り上げるため、ドラフティング作業会合を、10月6日（香川大学）と、11月12日（首都大学東京）で行い、中心となるコアチームの研究者を中心に全体に共通する5つのQuestionを定式化した。

10月下旬にChileのSantiagoで行われたGHP Panel Meetingでは、Post MAHASRIプロジェクトの構想を作業会合の内容をもとに参加者に説明し、基本的に内容について合意が得られ、Prospect RHPの一つとして認知されるに至った。プロジェクトのウェブページも作成し、基本的な情報を掲載している。2019年8月には札幌でPost MAHASRIプロジェクトのキックオフカンファレンスを開催することを決め、発表している。

プロジェクトの内容を多くの海外の研究者と協議した。これらの研究者には、中国のTPEプロジェクトのAilikun博士や、インド気象局元長官のA. Tyagi教授、ラジャスタン中央大学のS. Das教授、ノースイースタンヒル大学のH. J. Syiemlieh教授、インド工科大学ガウハチ校のS. Dutta教授、ネパールのM. Shrestha博士、バングラデシュのA. T. M. S. Hossain教授らが含まれている。

これらの活動に基づき、南アジア、東南アジアの広い領域にわたるアジアモンスーン

ン降水の特徴の研究も進んだ。バングラデシュの降水同位体の多重スケールでの変動を観測に基づき明らかにするとともに、モデルを用いて降水の元となる水蒸気の起源を推測した研究 (Tanoue et al. 2018)、インド各地の降水パターンの季節変化や年々変動と周辺の循環場との関係を明らかにした研究 (Fukushima et al. 2019)、フィリピンの雨季に見られる1990年代の急激な気候シフトを指摘し、その原因について論じた研究 (Olaguera et al. 2019)、ベトナムの気候変動にともなう2046-65年に超える降水パターン変動のバイアス補正に関する研究 (Trinh-Tuan et al. 2019)、タイの1カ月スケールのダム流入予測に関する研究 (Amnatsan et al. 2018)などである。

その他の外部資金で観測やデータ取得を推進する経費の獲得を目指した。

なお、2019年2月には東京大学で、Indo-Japan Joint Workshop, Socioeconomic / Hydroclimatological Perspectives of Future Asian Monsoonを開催し、Post MAHASRIの周縁の人文社会科学系研究者との共同研究の基盤となる協力関係を強化した。

まとめ

Post MAHASRIプロジェクトが、GEWEXの枠組みの元のProspect RHPとして認められたことで、1年目の目標はほぼ達成された。サイエンスプランのドラフティングも進んでおり、6つのアプローチと全体に共通する5つのQuestionの定式化が行われ、GHPパネルミーティングでも肯定的に受け止められた。多くの内外の研究者とのPost MAHASRIプロジェクトの協議が進んだ。

次年度には、キックオフカンファレンスの開催、サイエンスプランの策定と、プロジェクトのフルRHPへの発展をめざす。

参考文献

- Tanoue, M., K. Ichiyanagi, K. Yoshimura, M. Kiguchi, T. Terao and T. Hayashi, 2018: Seasonal variation in isotopic composition and the origin of precipitation over Bangladesh, *Progress in Earth and Planetary Science*, 5:77.
- Fukushima, A., Kanamori, H. and Matsumoto, J. 2019: Regionality of long-term trends and interannual variation of seasonal precipitation over India. *Progress in Earth and Planetary Science* 6: 20.
- Olaguera, L.M., Matsumoto, J. Kubota, H., Inoue, T., Cayanan, E.O. and Hilario, F.D. 2018: Abrupt climate shift in the mature rainy season of the Philippines in the mid-1990s. *Atmosphere* 9: 350.
- Trinh-Tuan L., Matsumoto J., Tangang F.T., Juneng L., Cruz F., Narisma G., Santisirisomboon J., Phan-Van T., Gunawan D., Aldrian E. and Ngo-Duc, T. 2019. Application of quantile mapping bias correction for mid-future precipitation projections over Vietnam. *SOLA* 15: 1-6.
- Amnatsan, S.; Yoshikawa, S.; Kanae, S. 2018: Improved Forecasting of Extreme Monthly Reservoir Inflow Using an Analogue-Based Forecasting Method: A Case Study of the Sirikit Dam in Thailand. *Water*, 10, 1614.

成果発表

- Terao, T., S. Kanae, J. Matsumoto, Towards establishment of the science plan of the post-MAHASRI RHP. GEWEX Conference, Canmore, Canada, 9, May 2018.
- Terao, T., S. Kanae, J. Matsumoto, Towards the establishment of the post-MAHASRI science plan. JpGU2018, Makuhari, Chiba, 20, May 2018.
- Terao, T, S. Kanae, J. Matsumoto, Upcoming Asian monsoon hydroclimatological research framework under GEWEX, EMS Annual Meeting, Budapest, Hungary, 4, Sep. 2018.
- Terao, T., Potential RHP Post-MAHASRI. GHP Panel Meeting, Santiago, Chile, Oct. 2018.
- Terao, T. et al., A focus of post MAHASRI GEWEX hydroclimatological project: Climate Projection and Subseasonal to Seasonal Prediction of Extreme Severe Storms. International Workshop on Extreme Severe Storms and Disaster Mitigation Strategies, Central Univ. of Rajasthan, India, 24 Dec. 2019.

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・環境学研究所

【研究目的】

本研究の目的は、これまでにない高感度・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、そしてその時間変動を明らかにすることにある。ALMA干渉計では年ごとに望遠鏡素子数や基線長が増え、空間分解能や感度が持続的に向上している。タイタンの場合、観測生データの蓄積量は年間あたり7TByte程度で、今後の推移を考慮するとデータストレージの確保と計算機環境の構築、およびデータ処理のパイプライン化・バッチ化の導入が必要になる。

【研究方法】

本研究では、ALMA共同利用観測アーカイブデータのうち、校正天体として取得されたタイタンおよびイオの多数のスペクトルデータセットの自動解析を行うためのソフトウェアの製作を行った。それは、(1) ALMAデータを処理・解析するためのパッケージCASAの一連の内部処理タスクを、対話モードでなく自動実行するためのpythonスクリプト、(2) CASAタスクのうち、最も長時間の演算処理を必要とするcleanの自動化のための、人工知能の自動画像認識によるマスクパターン製作、(3)スペクトルデータのリトリバル解析パッケージARTS(The Atmospheric Radiative Transfer Simulator)の改良に分けられる。

【研究結果】

研究方法(1),(2)は、産業総合研究所人工知能研究センターのAAIC(AIST Artificial Intelligence Cloud)を利用し、主に名大キャンパス内からのリモート接続下でのAAICへのバッチジョブの投入の実装を目指して諸々の検討と実装を行った。結果を下図1に示す。

自動解析は、まずALMAアーカイブデータセットの自動ダウンロードから始まり、以後、pythonスクリプトによって、listobsを実行し、観測情報を取得し、その内容を基に次のcleanタスクのパラメータを取得し、AIによってマスクを作成しつつ、天体暦(JPL Horizons)を別途取得し、次のドップラー補正タスクcvel,fixplanetsに用いる。最も重要で演算時間を消費するclean処理は、これらのデータを用いて自動的に行い、最終データを得る。

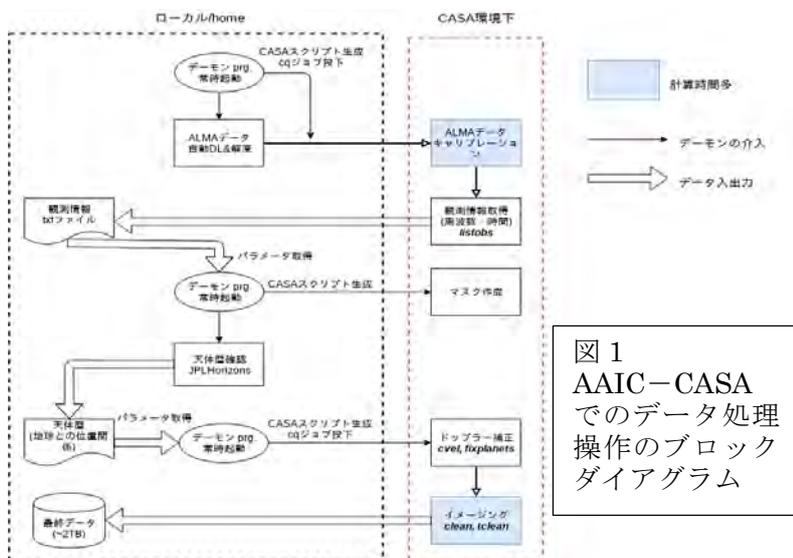


図1
AAIC-CASA
でのデータ処理
操作のブロック
ダイアグラム

この自動処理は、AAICのLinux OSのデーモンプロセスとして行い、個々のCASAタスク

のパラメーターを適宜変更させ、そのCASAスクリプトが書かれたpythonスクリプトを自動的に生成し、自動的にキューに投下することで行う。

研究方法(3)では本来、地球大気のスpekトルのシミュレーション用に開発されたARTSのC++ソースコードの修正に従事した。タイタンやイオの低い大気温度条件(<60K)では計算が破綻する。その原因が分子の分配関数の計算アルゴリズムにあることを見出し、原理式に基づいて修正を行うように修正した。シミュレーション結果を下図2に示す。これにより、様々な大気微量分子のspekトルの計算やリトリーバル解析が可能になった。

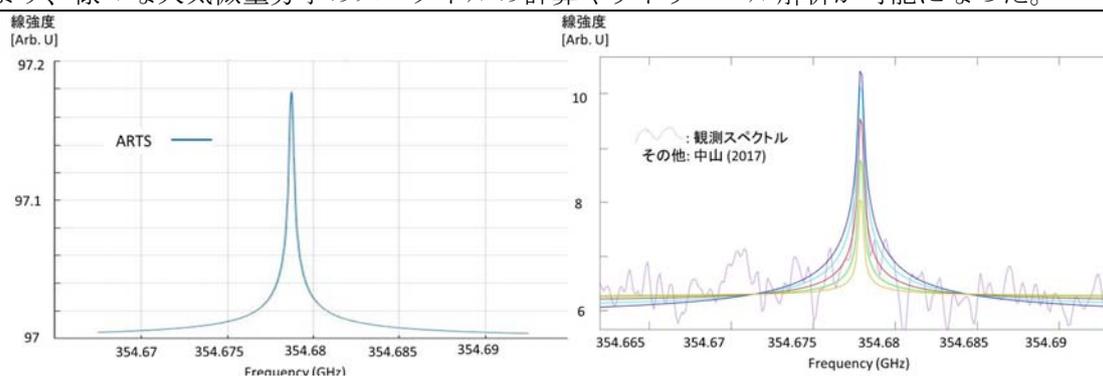


図2 タイタン大気中のHC₃N (J=39-38)spekトル 左:プログラムの改良後のARTSシミュレーション計算結果、右:ALMA観測データの解析結果

【成果論文リスト】

- [1] Kosuke Takami, Hiromu Nakagawa, Takashi Katagiri, Oleg Benderov, Yasuhiro Hirahara, Yasumasa Kasaba, Alexander V. Rodin, Isao Murata, Shin Tamura, "Evaluation and optimization of optical hollow fiber and rectangular hollow waveguide coupler as applications of future mid-infrared heterodyne spectrometer", SPIE Proceedings, Ground-based and Airborne Telescopes VII 10700, 2018
- [2] Sakanoi, T., J. R. Kuhn, S. V. Berdyugina, M. Emilio, M. Kagitani, Y. Hirahara, H. Nakagawa, Y. Kasaba, T. Obara, S. Okano, I. Scholl, A. Berdyugin V. Piroola, "Development of PLANETS telescope and visible-infrared spectrometer for monitoring of planetary and exoplanetary atmospheres", SPIE Proceedings, Ground-based and Airborne Telescopes VII 10700, 2018

【学会発表リスト】

- [1] 鈴木達也、平原靖大、古賀亮一、坂野井健、菅原徹也、"ALMAアーカイブデータ解析によるイオ大気中の火山起源分子の空間分布", 地球電磁気・地球惑星圏学会、2018/11/25
- [2] 伊藤良太、平原靖大、青木祥平、中川広務、笠羽康正、"中間赤外線観測装置のための冷却中空ファイバーガイドの開発", ALMA Workshop for solar system planetary observations, 地球電磁気・地球惑星圏学会、2018/11/27
- [3] 鈴木達也、平原靖大、古賀亮一、坂野井健、他、"ALMAアーカイブデータを用いたイオ大気における火山起源分子の空間分布", ALMA太陽系ワークショップ、国立天文台、2018/12/28
- [4] 古賀亮一、坂野井健、鈴木達也、平原靖大、他、"ひさきとALMAの観測によるイオ大気生成・散逸過程の研究", ALMA太陽系ワークショップ、国立天文台、2018/12/28
- [5] 坂野井健、鍵谷将人、平原靖大、栗田光樹夫、他、"1.8m非軸望遠鏡「PLANETS」計画の現況と今後の展望", 第8回 可視赤外線観測装置技術ワークショップ、国立天文台、2019/2/26