

## 1. 国際共同研究 目次詳細

(所属・職名は平成29年3月現在)

研究代表者	所属機関	所属部局	職名	研究課題名	頁
笠羽 康正	東北大学	大学院理学研究科・地球物理学専攻	教授	ハワイ展開する小口径望光赤外遠鏡群と電波望遠鏡群・軌道上望遠鏡群・惑星探査機による木星・火星・金星大気上下結合の研究	1
岩花 剛	アラスカ大学	国際北極圏研究センター	Research Assistant Professor	永久凍土を利用した古環境復元の可能性	3
浅原 良浩	名古屋大学	環境学研究科	講師	Chibanian (千葉時代)の地球磁場逆転にかかるテクタイトの精密年代測定	5
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	7
大矢 浩代	千葉大学	大学院工学研究科	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	11
宗像 一起	信州大学	理学部	教授	改良された汎世界的宇宙線観測ネットワークによる宇宙天気観測	13
纈纈 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	16
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	主幹研究員	複数衛星系・複数周波数GNSS信号に対するプラズマバブルの影響評価	18
藤本 晶子	九州大学	国際宇宙天気科学・教育センター	学術研究員	電離圏電場と地上磁場同時観測に基づくグローバルPc5波動の研究	20
小島 浩司	愛知工業大学	工学部	客員教授	宇宙線で探る太陽風擾乱の空間構造	22
土屋 史紀	東北大学	大学院理学研究科	助教	高エネルギー電子降下領域の時空間発展の実証的研究	25
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	27
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	29
吉川 顕正	九州大学	国際宇宙天気科学・教育センター	講師	赤道域地磁気変動の稠密観測に基づく太陽地球環境変動モニタリングシステムの開発	31
尾花 由紀	大阪電気通信大学	工学部基礎理工学科	講師	プラズマ圏質量密度の長期モニタリングと経度比較研究	34
寺尾 徹	香川大学	教育学部	教授	インド亜大陸北東部モンスーンの変動メカニズムの解明	36
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面爆発のメカニズム	37
平原 靖大	名古屋大学	環境学研究科	准教授	ALMAアーカイブデータによるタイタン大気の化学組成と変動要因の解明	39

研究代表者	所属機関	所属部局	職名	研究課題名	頁
Tsun-Thai Chai	Tunku Abdul Rahman University	Department of Chemical Science, Faculty of Science	Associate Professor	スズ鉱山跡地に生育する植物の環境修復能力の比較	41
高橋 透	情報・システム研究機構 国立極地研究所	研究教育系宇宙圏研究グループ	特任研究員	脈動オーロラによる中間圏ナトリウム密度減少の観測	43
八代 誠司	米国カトリック大学	物理学科	助教	噴出型フレアと非噴出型フレアの包括的な比較研究	45
坂野井 健	東北大学	大学院理学研究科	准教授	衛星搭載イメージング光学系用バッフル・ベーン的设计と開発	47
芳原 容英	電気通信大学	情報・ネットワーク工学専攻	教授	東南アジアにおけるELF帯電磁波観測を用いた、大規模雷の電氣的、時空間特性に関する研究	49

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

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

笠羽 康正、東北大学・大学院理学研究科・地球物理学専攻

## 1. 研究目的

東北大では、数十年来に渡って宮城・福島に設けた太陽・木星電波観測施設に加え、ハワイ大の協力を得て惑星光赤外観測施設をハワイ・マウイ島ハレアカラ高高度観測施設(標高約 3000m)に整備してきた。40cm 望遠鏡可視観測でイオ火山ガスからなる「イオトーラス」の構造・量・速度場観測を世界で唯一継続して行い、水星・月の Na 希薄大気も含め貴重な長期観測データを提供した。2014 年には福島県飯舘村から 60cm カセグレン反射望遠鏡を移設し、赤外線観測も可能として観測テーマを金星・火星大気も含め広げている。双方とも東北大が主要観測時間を使用でき(40cm : 100%、60cm : 85%)、惑星探査機との連携では必須の「短中長期にわたる柔軟な連携運用」が常時可能な貴重な望遠鏡である。本研究は、この望遠鏡の活用を軸に行ったもので、木星で紫外線望遠鏡衛星 Hisaki および米探査機 Juno (2016/7 に軌道投入)、火星で米探査機 MAVEN および欧探査機 ExoMars Trace Gas Orbiter (2016/ 10・12 に軌道投入)、金星で日 Akatsuki 探査機との連携観測を行った。本研究計画は惑星探査機群や惑星専用望遠鏡衛星 Hisaki を支える国際地上観測ネットワークの一翼である。米 Juno 探査機に対しては強力な国際地上観測網が組まれたが、日本の光赤外・電波地上観測は長期継続性の点でユニークな一翼を占めた。金星・火星についても同様で、またプロポーザル採択を要する大型望遠鏡群(ハワイ : IRTF 3m、アタカマ : ALMA サブミリ波干渉計、NASA/DLR 成層圏航空機望遠鏡 SOFIA など)の活用にも成功した。

## 2. 研究方法・結果

(1)木星 : 2014 年来イオトーラスの全体構造・EUV 分光情報と UV オーロラ全発光量の長期データを蓄積する Hisaki 紫外線望遠鏡衛星, 2016/7 に軌道投入され 5-6 月には太陽風モニター・磁気圏モニターとしてそれ以降は極軌道を巡る「深部・低層~超高層大気」「極上空を含む内部-中間磁気圏」の初探査を行う Juno 探査機を支える観測を実施。木星システム研究を ERG 等による地球システム研究と同時並行に比較できる重要機会を我々に提供した。イオ火山活動に起因する中性ガス大規模構造分布(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)を長期継続観測により、イオ火山活動度

とイオトーラスへの物質供給量の指標、中性ガス電離で生成される磁気圏プラズマ供給量の指標をえて、「ひさき」によるプラズマトーラス密度・温度推定および紫外線オーロラ全発光量と合わせ、磁気圏マスローディング推定量提供の基礎を形成した。また、この観測を支える熱圏-電離圏-磁気圏結合に伴う電流・ポテンシャルモデル開発も併せて進めた。木星・土星圏での重要現象「衛星内部からの水放出」の継続的観測につながる水分子イオンを捉える Visible 高分散分光器の開発・活用も開始することができた。電波観測設備では、放射線帯を観測する東北大 IPRT 30m 電波望遠鏡の長期観測結果を磁気圏・オーロラ・大気光変動と連携させつつある。また、6月・2-3月には IRTF 3m・SUBARU 8m で海外研究者と共同観測し、オーロラ・大気光・熱発光のスポットデータの取得にも成功した。

(2) 火星：火星探査機 MAVEN による紫外線リモート観測と磁場・粒子 In-situ 観測を組み合わせで超高層大気観測・大気散逸観測が本格化している。2016年度は60cm望遠鏡に冷凍機駆動による「中間赤外線レーザーheterodyne 分光器・2号機」の装着作業・試験観測を実施した。本観測装置は NASA/GSFC およびケルン大グループと共同開発し、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、液体窒素を不要とする2号機でより柔軟な遠隔運用を可能とした。これにより、2017年度から高～低高度の密度・温度・速度場データと結合させ、下層の大気擾乱（最大級は「ダストストーム」）の超高層大気変動との相関を追跡し、火星大気の大気圏～中間圏～熱圏・電離圏結合に対する示唆を得る準備となった。また既に進めてきた Mars Express および 2017 末に観測が本格化する Mars Trace Gas Orbiter の赤外線分光観測から得られる大気水平・鉛直分布データとの結合のため、サブミリ波干渉計 ALMA, 航空機搭載赤外望遠鏡 SOFIA との短期大型地上観測との連携も実施した。

(3) 金星：金星探査機 Akatsuki とともに火星同様の分光観測の準備を行うとともに、Subaru/COMICS による中間赤外線同時観測を実現させた。また 2017 年度開始予定の千葉工大カメラによる連携観測の準備を進めた。これらは地球大気光を用いた大気上下間結合研究に比するものであり、また「地球のありえた過去・ありえる未来の姿」「磁場がないため太陽活動により翻弄される姿」という視点へ資することで、本コミュニティによる地球-金星-火星の「兄弟比較惑星学」推進の礎の1つとなるものである。

(4) ハレアカラ観測施設整備：40cm/60cm 望遠鏡群の運用整備を継続実施するとともに、本経費により研究者を現地長期派遣し、ハワイ大等と建設を進める 1.8m 惑星/系外惑星望遠鏡 PLANETS 推進に現地で寄与した。後者に搭載予定の可視分光偏光観測機 DiPol2 による系外惑星試験観測も継続し、その開発に寄与した。

#### 4. 成果発表

様式 1-1 を参照されたい。

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

代表：岩花 剛、アラスカ大学・国際北極圏研究センター  
共同研究者：檜山哲哉・Ahn Jinho・A. N. Fedorov・斉藤和之

(研究目的)

近年、地球温暖化によって融解が危惧される永久凍土は、有機炭素や地下氷の巨大な貯蔵庫であり、第五次 IPCC 報告書では炭素循環における大きな不確定要素としてこの永久凍土変動を理解する重要性が強調されている。含氷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、中央ヤクーチアを中心とした最も大規模なエドマ層の分布域を対象として、地下氷およびエドマ堆積物を採取し、凍土中の有機物や水の同位体を利用した古環境復元を実施することを目的とする。

(研究方法と進捗状況)

本年度予定されていた永久凍土研究試料の採取は予定通りに完了した。2016年9月までにアラスカ北部を対象とした複数地点において、露頭やトンネルの壁面からコアラーやチェーンソーを利用したサンプリングを実施した(図1)。2016年9-10月には、東シベリア・ヤクーツク近郊における同様のサンプリングを実施した。得られた試料は、氷脈分布を記述し、一部を蒸発の影響がないように融解させて、アラスカ大学安定同位体計測施設にて抽出した水の酸素・水素安定同位体比を測定した。また、試料を凍結乾燥させ、前後の質量と体積から含氷率を求めた。永久凍土試料のガス成分は水上置換で捕集し、ガス含有量を測定するとともに、ガス組成分析を行った。アラスカの試料の一部について、ガスクロマトグラフおよび安定同位体比質量分析装置を用いて、温室効果ガスの濃度と安定同位体組成を測定した。また、ヤクーツクの試料については、現地で41のガスサンプルを抽出して輸出許可を待つ段階である。この内13サンプルについては、試料を2つ用意してモスクワ大学の共同研究者によって予備的なメタン濃度分析が実施された。

これまでに採取した試料のうち、地下氷の一部を冷凍乾燥させ、残留した固形物から有機物を採取して炭素年代測定の依頼分析を行った。H28年度中には、試料の一部について研究代表者が宇宙地球環境研究所の受け入れ研究者(檜山哲哉教授・南雅代准教授・池田晃子技術員)の協力と指導の下、氷試料中の堆積有機物、堆積物中の無機炭素、溶存無機炭素(DIC)についての前処理と二酸化炭素精製を名古屋大学年代測定部の実験設備を利用

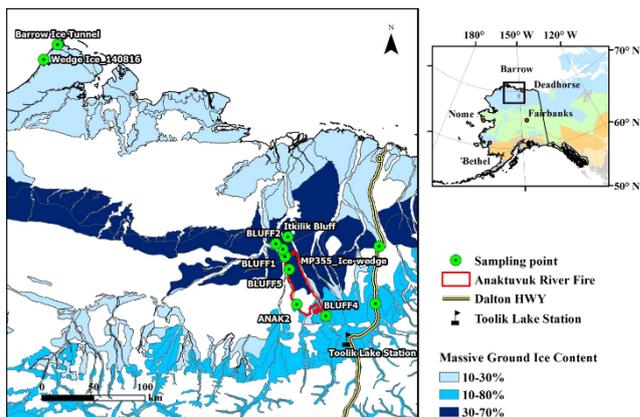


図1 地下水採取地点（緑マーカー）の位置図

中で3 - 5 %、堆積凍土中で1%程度である。一方、シベリアの13試料については、これまでの文献値と同様に、メタン濃度が1 - 16 ppmとアラスカの試料に比べて非常に低い値を採ることが分かった。

アラスカの試料については、一部依頼分析によって大まかな年代を把握した。今回対象とした永久凍土試料は、更新世中後期から完新世前期まで様々な年代を示したが、メタン濃度との明確な対応は見られなかった。しかし、メタン濃度が非常に低かった Iktilik サイトとシベリアのサンプリング地点の年代が2 - 3 万年前と考えられ、同様の気候・水文環境において類似したプロセスにより地下水中の気泡が形成された可能性がある。エドマ氷の形成は更新世の中後期あるいは完新世前期の寒冷期に集中していた。

一方、アラスカ・スワード半島の Kougarak サイトで採取した約 1.5m の永久凍土コアについて氷脈分布、含氷率、有機物含有量および水安定同位体比のプロファイルを得た。この分析からは、火災を経験したツンドラの永久凍土層が一時的に融解し、その時点まで保存されていた比較的古い地下水が、最近天水と入れ替わり、新たな永久凍土層を形成していることが示唆された。また、含氷率プロファイルや水安定同位体の分別シグナルから古水文環境の変化についての情報が永久凍土中に保持されている可能性を指摘した (Iwahana et al., 2016 : 別紙様式 0-1 参照)。こうした永久凍土から得られる過去の水文環境情報は、来年度以降実施予定の炭素年代測定結果と併せて永久凍土を用いた古環境復元の可能性についての検討に利用する。

#### (まとめ)

3 年計画の第一年目として、これまでの予備調査による試料の分析により、対象地点の古水文情報の一部が明らかにした。また、新たにアラスカ・シベリアでの試料採取に成功し、一部は地球雪氷学的・地球化学的分析および放射性炭素年代測定のための試料調整を実施中である。依頼分析による試料の年代測定の結果から、採取したエドマ氷の形成年代は、更新世中後期と完新世前期に大きく分けられることがわかった。H29 年度以降に得られる年代測定情報と古環境情報から、永久凍土を用いた古環境復元の可能性について考察する。

して実施した。来年度にかけて、引き続き試料のグラフ化を実施し、AMS 加速器によって放射性炭素同位体比を測定して年代を決定する予定である。

#### (研究結果と考察)

アラスカの地下氷から抽出した気体成分のメタン濃度は、各サイトの平均値として 50 - 14,000 ppm と大きな空間変動を示した。凍土中の気泡体積は地下水

## Chibanian (千葉時代) の地球磁場逆転にかかるテクタイトの精密年代測定 Precise dating of tektite possibly related to Chibanian magnetic reversal

研究代表者：浅原良浩、名古屋大学・環境学研究科

研究協力者：李 承求、韓国地質資源研究院

：田中 剛、名古屋大学・宇宙地球環境研

：南 雅代、名古屋大学・宇宙地球環境研

### <研究目的>

千葉県房総半島上総層群中に地磁気の逆転層が見出されている。その中の火山灰層から、約 77 万年の精細な U-Pb 放射年代が得られ、それらを含む地質時代に「千葉時代」の命名が期待されている<sup>1)</sup>。なぜこの時代に地磁気の逆転が起こったか？ 同時期には、もうひとつ地球史上の大事件が知られている。それは東南アジアからオーストラリアにかけてのテクタイトシャワーである。

テクタイトは、隕石の種類のひとつと考えられた時期もあったが、現在ではその化学組成や同位体組成から、地球の物質が何らかの衝撃で数十キロメートルの高空に打ち上げられ熔融し、再度地表に落下したものと考えられている。世界に 4ヶ所知られているテクタイトの落下地域のうち、本申請研究で扱う東南アジア、オーストラリアに跨がるものが大規模で最も若く、その熔融(落下)年代として、70~75 万年の K-Ar 年代、Ar-Ar 年代が報告されている<sup>2)</sup>。しかしながら、この年代値は、約 40 年前のやや古い測定値であり、大きな誤差を含んでいる。

落下したテクタイトの総量はジャワ島だけでも 1 億トンを下らないといわれ<sup>3)</sup>、それを打ち上げた天体落下の衝撃の巨大さが推し量られる。“地球の永久磁石は、衝撃により磁区の並びが乱れ、磁界が弱まる。” 巨大天体が地球に与えた大衝撃による地球磁場の擾乱の可能性やそのメカニズムについては、その専門の方々の研究に俟つとして、本申請研究では、地磁気の逆転時期の年代 77 万年と、これまでに得られているテクタイトの生成年代の差が事実なのか、あるいは『同時』なのか、を最新の年代測定技術により、複数のテクタイト試料についてより厳密に確認する。

### <試料と研究方法>

本研究の試料となり得るテクタイトは、フィリピン、インドネシア、ベトナム、タイ、ラオス、中国南部からオーストラリアー帯および、その周辺海域に広く見出される。最近は類似のテクタイトが北米大陸にまで分布しているとの調査結果も出されている<sup>4)</sup>。本研究では、テクタイト分布地域の中央となるベトナムおよびタイからそれぞれ 2 個のテクタイト、計 4 試料を分析対象とした。タイのテクタイトは、テクタイトの希ガスを研究された、大阪大学名誉教授の松田准一先生から頂いたもので、ベトナムのテクタイトは、地学標本を扱っているニチカ(京都)から購入したものである。



図 1：本研究で分析したテクタイト。左はベトナム産 約 80 g、右はタイ産 約 20 g。タイ産のテクタイトは、上部に凹みがある。これは、地上の礫などの上にテクタイトが未固結の状態で落下したことにより形成された雌型と考えられる。

テクタイトは、粘板岩化学組成のガラスであるが、原岩が完全に熔融しなかった融け残り岩片を含むテクタイトは、K-Ar 年代測定法ではより古い岩片の影響が残る。本研究ではそのチェックも含め、韓国地質資源研究院でテクタイトの薄片を作成し、偏光顕微鏡下で内部構造をチェックした。副屈折を示す明るい斑点が多数見られたが、これらの多くは薄片作成時に取り込まれた塵埃と思われ、テクタイトの内部に不均質は認められなかった<sup>5)</sup>。

テクタイト試料は蒸留水に浸し、超音波洗浄後に風乾し、瑪瑙乳鉢を用いて粉碎した。K-Ar 放射年代測定に用いることから、1 mm の篩、0.5 mm の篩、0.25 mm の篩を重ね、1~0.5 mm、0.5~0.25 mm、0.25 mm 以下、の 3 フラクシオンを回収した。粗い 2 つのフラクシオンは、K-Ar 年代測定に、0.25 mm 以下の細粒フラクシオンは、さらに細粉化し、化学分析に用いた。

<結果>

韓国地質資源研究院の蛍光 X 線分析装置を用いて主成分元素組成を、韓国地質資源研究院の ICP-MS (Perkin Elmer Nex ION 350X 型)および名古屋大学環境学研究科の ICP-MS (Agilent 7700x) を用いて微量元素組成を測定した。両地域のテクタイトについて得られた主要成分元素、微量成分元素の組成は相互に類似しており、東アジアのテクタイトの化学組成に極めて近い、一般的な化学組成を持つことが判明した<sup>5)</sup>。

上述のように 1.0~0.5 mm および 0.5~0.25 mm の粒度にそろえたテクタイト試料を、年代測定のためのアルゴン (Ar) の同位体分析に用いた。アルゴンの分析は、韓国極地研究所 (KOPRI) の希ガス同位体分析室 (長尾研究室) においてなされた。分析結果を年代値とともに表 1 に示す。

表 1 : テクタイトの K-Ar 年代測定の結果。

Sample (grain size)	Sample used		Pottasium error		[ <sup>36</sup> Ar] error		<sup>40</sup> Ar/ <sup>36</sup> Ar error		[ <sup>40</sup> Ar-rad] error		K-Ar age	error	Air-fraction
	mg	wt.%			10 <sup>-9</sup> cc/g				10 <sup>-9</sup> cc/g		Ma		%
Thai (1.0-0.5 mm)	367.51	2.11	0.11	0.092	0.010	814.8	129.6	47.42	0.60	<b>0.579</b>	0.073	36.6	
Thai (0.5-0.25 mm)	428.88	2.11	0.11	0.122	0.013	699.2	106.9	48.76	0.58	<b>0.595</b>	0.073	42.6	
Vietnam (1.0-0.5 mm)	458.74	1.99	0.10	0.125	0.013	1156.2	176.7	106.83	1.26	<b>1.382</b>	0.171	25.7	
Vietnam (0.5-0.25 mm)	281.25	1.99	0.10	0.142	0.016	621.9	99.1	45.80	0.61	<b>0.593</b>	0.076	47.9	

5% error is assumed for K concentrations.

いずれの分析においても、<sup>36</sup>Ar から推計される大気アルゴンの含有量は少量であった。タイの 2 試料とベトナムの 0.5 mm~0.25 mm の試料の K-Ar 年代値は 60 万年で、良く一致している。しかしながら、ベトナムの 1.0~0.5 mm のより粗粒な試料は、138 万年と古い年代値を示す。これは、試料の一部分に融け残り岩片が含まれていたことによると考えられる。

<考察・まとめ>

テクタイトの衝撃形成年代を求める事を目的として、タイおよびベトナムからのテクタイト計 4 試料の化学組成と K-Ar 放射年代測定を行った。今回分析したテクタイトの 2 つの産出地域は 100 km 以上離れているにも関わらず、19 微量元素をふくむ化学組成は相互に類似していることが判った。K-Ar 放射年代は 60 万年であり、既発表値<sup>2, 4)</sup>よりやや若い年代であった。ベトナムのテクタイトの一測定は、138 万年と際立って古い年代を与えたが、これは融け残り物質が存在したことによると考えられる。得られた値が既発表値よりやや若いことから、落下年代の地域的変化の有無を探るため、オーストラリア/東南アジアのテクタイトを含めたより詳細な年代測定が望まれる。

<文献>

- 1) Suganuma, Y., Okada, M., Horie, K., Kaiden, H., Takehara, M., Senda, R., Kimura, J-I., Kawamura, K., Haneda, Y., Kazaoka, O. and Head, M.-J. (2015) Age of Matsuyama-Brunhes boundary constrained by U-Pb zircon dating of a widespread tephra. *Geology* **43**, 491-494.
- 2) O'Keefe, J.A. (1976) *Tektites and Their Origin*. Elsevier, Amsterdam, pp.254.
- 3) 松田准一 (2008) テクタイト: 松田准一・塚本尚義共編 地球化学講座 第 2 巻『宇宙・惑星化学』 第 6 章 p.190-208, 培風館 pp. 291.
- 4) Schwarz, W. H., Trieloff, M., Bollinger, K., Gantert, N., Fernandes, V. A., Meyer, H.-P., Povenmire, H., Jessberger, E. K., Gugliemino, M. and Koeberl, C. (2016) Coeval ages of Australasian, Central American and Western Canadian tektites reveal multiple impacts 790 ka ago. *Geochim. Cosmochim. Acta* **178**, 307-319.
- 5) 浅原良浩, Lee Seung-Gu, 南 雅代, Choi Jisu, 長尾敬介, 田中 剛 (2016) 松山 - ブルン地磁気逆転期とテクタイト衝撃形成期の年代比較. 名古屋大学年代測定研究 **I**, 72-77.

<2016 年度に行った成果の発表>

- 浅原良浩, Lee Seung-Gu, 南 雅代, Choi Jisu, 長尾敬介, 田中 剛 (2017) 松山 - ブルン地磁気逆転期とテクタイト衝撃形成期の年代学的比較研究. 第29回 (2016年) 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 (名古屋大学宇宙地球環境研究所, 2017年1月30~31日) 口頭発表.
- 浅原良浩, Lee Seung-Gu, 南 雅代, Choi Jisu, 長尾敬介, 田中 剛 (2016) 松山 - ブルン地磁気逆転期とテクタイト衝撃形成期の年代比較. 名古屋大学年代測定研究 **I**, 72-77.

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

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

研究代表者 藤原 均, 成蹊大学・理工学部

共同研究者

野澤悟徳	名古屋大学・宇宙地球環境研究所
三好勉信	九州大学・大学院理学研究院
小川泰信	国立極地研究所
Chris Hall	ノルウェー北極大学

### 研究目的

極域熱圏・電離圏領域、特に極冠域での熱圏・電離圏は極めて複雑に変動することが、これまでの観測から明らかとなっている(例えば, Innis and Conde, 2001; Lühr et al., 2004; Liu et al., 2005; Fujiwara et al., AnGeo 2007; Carlson et al., 2012; Fujiwara et al., EPS 2012, AnGeo 2014)。これらの研究によって提起された極冠域での熱圏・電離圏変動の研究課題の主なものは、例えば、以下のとおりである。

- 1) 下層大気、オーロラ帯において励起された大気波動・擾乱が極冠域においてどの程度の振幅を持ち、維持、又は消滅するのか? 擾乱の励起源は何か?
- 2) 高温の中性大気・プラズマを生成するための極冠域でのエネルギー源は?
- 3) 極冠域での高速中性風、プラズマ流の生成機構は?

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上記課題に取り組んできた。特に、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。例えば、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)。

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)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、ロングイヤ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、その成因を明らかにする。上記総合観測に加え、極域へのエネルギー流入と熱圏・電離圏変動との関係を GCM シミュレーションにより精査する。

## 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、ロングイヤビン)での EISCAT レーダー、及びナトリウムライダー等により電離圏、熱圏大気温度変動を観測する。これらの観測に基づき、広範な緯度領域での昼側電離圏の高速プラズマ流と加熱について定量的に理解する。また、GCM シミュレーションにより、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

昨年度に引き続き、藤原、野澤、小川がトロムソに赴き、2017年3月14日、27日に EISCAT 特別実験を実施した。当初、連続した2日間に ESR と KST の同時観測を実施する予定であったが、3月14日に ESR 送信機不具合が発生したため、この日は KST 観測のみを実施し、残る1日の実験は ESR の復旧後、3/27に実施した(観測時間はともに 7:00UT~13:00 UT)。

3月14日、観測期間中の太陽・地磁気活動度は以下の通りであった。太陽 F10.7 指数: 70, Kp 指数: 0-1。今回のデータは、太陽活動極小、地磁気静穏時のデータの例としてこれまでのデータ、GCM 計算結果とあわせて詳細な解析を実施する予定である(ロングイヤビン、トロムソともに静穏な電離圏が観測されているときの下層大気起源と思われる大気重力波のシグナルを詳細に解析する)。3/27には磁気嵐が発生し、Kp~5-6となった。地磁気擾乱時のデータは当研究グループでの観測例は2012年以来であり、局冠域とオーロラ帯での電離圏擾乱の特徴を調べる上で極めて有効と考えている。

EISCAT 観測に加えて、下層大気と熱圏・電離圏との結合過程について調べるために、トロムソにて Na 観測を実施した。また、トロムソ Na ライダーを用いた上部成層圏大気温度の導出手法の開発を進めるとともに、下部熱圏における中性大気温度とイオン温度との比較研究を実施した。

これまでに得られたデータ、及び GCM シミュレーションから、地磁気静穏時における昼側極域電離圏・熱圏変動について以下が示された。

- (1) カスプ近傍の電離圏では、地磁気活動静穏時においても高速イオン流やジュール加熱が存在する。Kp~1-2 程度のコンディションにおいても、ロングイヤビン北部では高温、高速イオン流の領域が常に現れる一方で、トロムソ上空では静穏な電離圏状態となっている。これらは、オーロラオーバルが収縮した際の昼側極域電離圏の特徴と考えられる。
- (2) 電離圏が静穏な状態のとき、ロングイヤビン近傍やトロムソ上空において、下方から伝播してきたと考えられる大気重力波のシグナルが常に得られる。

上記の性質は、地磁気静穏時の昼側極域電離圏の特徴であり、磁気圏からのエネルギー流入や下層大気からの変動の影響が常に電離圏に及んでいることを示すものである。

## 本研究課題に関連した成果発表

### 論文発表

T. Takahashi, K. Hosokawa, S. Nozawa, T. T. Tsuda, Y. Ogawa, M. Tsutsumi Y. Hiraki, H. Fujiwara, T. D. Kawahara, N. Saito, S. Wada, T. Kawabata, and C. Hall, Depletion of mesospheric sodium during extended period of pulsating aurora, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122, 1212-1220, doi:10.1002/2016JA023472, 2017.

### 学会発表等

#### 招待講演

Miyoshi, Y., H. Jin, H., H. Fujiwara, Shinagawa, Behavior of Gravity waves in the thermosphere simulated by high resolution GAIA, JpGU 2016 meeting, Makuhari Messe, Chiba, 22 May- 26 May, 2016.

Miyoshi, Y., H. Fujiwara, H. Jin, H., Shinagawa, Vertical propagation of gravity waves in the thermosphere simulated by GAIA, International Symposium on the Whole Atmosphere (ISWA), Tokyo, 14 September-16 September, 2016.

#### 一般講演

Hitoshi Fujiwara · Yasunobu Miyoshi · Hidekatsu Jin · Hiroyuki Shinagawa · Satonori Nozawa · Yasunobu Ogawa · Ryuho Kataoka · Huixin Liu, Studies of the thermosphere and ionosphere with the EISCAT radar and whole atmosphere/ionosphere model: GAIA, 地球惑星科学関連学会連合大会, 5月, 幕張, 2016.

品川 裕之 · 陣 英克 · 三好 勉信 · 藤原 均 · 横山 竜宏 · 大塚 雄一, Occurrence probability of plasma bubbles deduced from GAIA simulation data, 地球惑星科学関連学会連合大会, 5月, 幕張, 2016.

陣 英克 · 三好 勉信 · 藤原 均 · 品川 裕之 · 埜 千尋, Development of a whole atmosphere-ionosphere model GAIA for higher accuracy and its application toward data assimilation modeling, 地球惑星科学関連学会連合大会, 5月, 幕張, 2016.

野澤 悟徳 · 小川 泰信 · 津田 卓雄 · 藤原 均 · 堤 雅基 · ホール クリス · ブハート ステファン · 斎藤 徳人 · 和田 智之 · 川原 琢也 · 高橋 透 · 川端 哲也 · 日比野 辰哉 · 滝田 真太郎 · ブレッケ アスゲイル, Variations of the polar lower thermosphere and mesosphere in February 2016 using EISCAT radar, meteor radar, MF radar, and sodium LIDAR observations, 地球惑星科学関連学会連合大会, 5月, 幕張, 2016.

Hitoshi Fujiwara · Satonori Nozawa · Yasunobu Ogawa · Ryuho Kataoka · Yasunobu Miyoshi · Hidekatsu Jin · Hiroyuki Shinagawa · Huixin Liu, Ionospheric weather in the dayside polar cap region, 地球惑星科学関連学会連合大会, 5月, 幕張, 2016.

埜 千尋 · 陣 英克 · 品川 裕之 · 藤原 均 · 三好 勉信, 全球大気モデル GAIA による中低緯度熱圏・電離圏ダイナミクスの主磁場依存性, 地球惑星科学関連学会連合大会, 5月, 幕張, 2016.

陣 英克 · 三好 勉信 · 藤原 均 · 品川 裕之, Tidal variabilities and their effects on the upper atmosphere during stratospheric sudden warmings studied with a long-term whole atmosphere-ionosphere simulation, 地球惑星科学関連学会連合大会, 5月, 幕張, 2016.

藤原 均 · 三好 勉信 · 陣 英克 · 品川 裕之, 地球・惑星超高層大気微量成分のモデリング研究, H28 年度名古屋大学宇宙地球環境研究所 研究集会「STE シミュレーション研究会 -太陽地球惑星系探査とシミュレーション研究」, 8月31日~9月2日, 東北大学, 2016.

- 藤原 均・三好勉信・東尾奈々, 宇宙機・宇宙デブリ軌道予測のための宇宙環境モデリング研究, 第 60 回宇宙科学技術  
連合講演会, 9 月, 函館アリーナ, 2016.
- 藤原 均・三好 勉信・陣 英克・品川 裕之・Liu Huixin・松村 充, 中間圏・熱圏での大気微量成分のモデリング研究, 第  
140 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 9 月 19 日-23 日, 九州大学伊都キャンパス, 2016.
- 陣 英克・三好 勉信・藤原 均・品川 裕之・埜 千尋, 大気圏電離圏シミュレーションを用いた大気上下結合の解析およ  
び精度改良に向けた取り組み, 第 140 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 9 月 19 日-23 日, 九州大学伊都キャンパス,  
2016.
- 埜 千尋・陣 英克・品川 裕之・藤原 均・三好 勉信, 全球大気モデル GAIA による中低緯度熱圏・電離圏ダイナミクス  
への主磁場強度の役割, 第 140 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 9 月 19 日-23 日, 九州大学伊都キャンパス, 2016.
- 野澤 悟徳・小川 泰信・津田 卓雄・藤原 均・堤 雅基・三好 勉信・Hall Chris・Buchert Stephan C.・斎藤 徳人・和  
田 智之・川原 琢也・高橋 透・川端 哲也・Brekke Asgeir, 成層圏突然昇温にともなう北極域下部熱圏・中間圏変  
動, 第 140 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 9 月 19 日-23 日, 九州大学伊都キャンパス, 2016.
- 三好 勉信・陣 英克・藤原 均・品川 裕之, 重力波が熱圏・電離圏におよぼす影響について, 第 140 回地球電磁気・地  
球惑星圏学会, 9 月 19 日-23 日, 九州大学伊都キャンパス, 2016.
- 松村 充・塩川 和夫・品川 裕之・陣 英克・藤原 均・三好 勉信, GAIA モデルを用いた太陽フレアに対する電離圏応答  
のシミュレーション, 第 140 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 9 月 19 日-23 日, 九州大学伊都キャンパス, 2016.
- 品川 裕之・陣 英克・三好 勉信・藤原 均・横山 竜宏・大塚 雄一, GAIA の長期シミュレーションデータから推定する  
プラズマバブル発生特性, 第 140 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 9 月 19 日-23 日, 九州大学伊都キャンパス, 2016.
- 藤原 均・三好勉信・陣 英克・品川裕之・野澤悟徳・小川泰信・片岡龍峰・Huixin Liu, 地球・惑星熱圏大気の研究, 名  
古屋大学宇宙地球環境研究所 研究集会, 12 月 26 日~28 日, 立教大学, 2016.
- 藤原均・三好勉信・陣英克・品川裕之, 中間圏・下部熱圏大気微量成分の光化学モデル開発, PSTEP 研究集会「太陽地  
球圏環境予測のためのモデル研究の展望」, 1 月 26 日~27 日, 学, 名古屋大学, 2017.
- Hitoshi Fujiwara・Yasunobu Miyoshi・Hidekatsu Jin・Hiroyuki Shinagawa, Satonori Nozawa・Yasunobu Ogawa・  
Ryuhō Kataoka・Liu Huixin, Variations of the polar thermosphere and ionosphere revealed from the EISCAT  
radar observations and whole atmosphere GCM simulations, Small workshop and group discussion before  
PSTEP-2, March 21-22, Kyoto University, 2017.

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・大学院工学研究科

1. 研究目的

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

2. 観測

平成 28 年度は 3 年計画の 1 年次であり、まずは大気電場と雲との相関を調べるため、国内の大気電場と雲の同時観測を開始した。2016 年 6 月 1 日に、千葉大学西千葉キャンパス内工学系総合研究棟 2 の屋上 (海拔約 55 m) にフィールドミル (Boltek 社, EFM-100) を設置し、大気電場の定常観測を開始した (図 1)。その隣に、雲の光学観測のため全天カメラを設置した (図 2)。フィールドミルから約 76m の地点で、95GHz 雲レーダ FALCON-I が雲の反射強度やドップラー速度の定常観測を行っている (図 3)。FALCON-I は気象で通常使用される X バンドレーダ (9 GHz) より送信周波数が一桁高いため、空間分解能がよく、雲のより細かい内部構造や雨粒の高度、雲からの落下状況を詳しく知ることができる。



図 1 フィールドミルの概観



図 2 全天カメラ



図 3 FALCON-I

3. 研究結果

3-1 雲量自動検出プログラムの開発と観測結果

全天カメラにより取得される雲画像の RGB 値を解析し、雲量を自動推定するプログラムを作成した。2016 年 6-11 月のうち 6 日間の雨でなかった日の大気電場と雲量との相関を取ったところ、雲量が多いと大気電場が小さくなる傾向が確認された (図 4)。雲量が多いと雲によってシールドされ、大気電場が減少したと考えられる。また、雲量が多いとき、大気電場の分散が小さかった。

### 3-2 雷接近時の大気電場変動

2016年7月4日08:30 UTから10:30 UTに、雷雲接近による大気電場変動が確認された(図5)。この大気電場変動から、雷雲の接近・通過に伴い変化し正に増加、負に減少、正に増加の全体的変動と、急激なパルス状の変動の2パターンの変動が見られた。前者からは、通常考えられている雷雲位置と大気電場変動の関係とは異なる結果が得られた。本イベントでは、アンビルが真上に来ると下向き大気電場が増加し、降雨時に上向き大気電場が増加した。これはアンビル中の正電荷からの影響であると考えられる。後者では、大気電場がピーク値を取ったのは12点であった。これは近隣で発生した雷の影響であると考えられる。

### 3-3 降雪時の大気電場変動

2016年11月23日の降雪時に、千葉大と柿岡の両方で、似たような周期の大気電場振動が見られた(図6)。千葉大では約73分と55分、柿岡では約98分と54分の周期性がある。この原因について、今後FALCON-Iで得られたレーダ反射因子の周期解析を行い、調べる予定である。

成果発表

[1] 中森広太, 鈴木康樹, 大矢浩代, 鷹野敏明, 河村洋平, 中田裕之, フィールドミルによる大気電場および95GHz雲レーダFALCON-Iによる雲の同時観測の初期結果, 第140回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 福岡, 2016年11月21日

[2] 中森広太, 鈴木康樹, 大矢浩代, 鷹野敏明, 河村洋平, 中田裕之, 山下幸三, フィールドミルによる大気電場と全天カメラおよび95GHz雲レーダFALCON-Iによる雲の同時観測, 日本大気電気学会, 神戸, 2017年1月5日

[3] 大矢浩代, 中森広太, 鈴木康樹, 中田裕之, 鷹野敏明, 山下幸三, 大気電場と95GHz雲レーダFALCON-Iによる雲との同時観測, 地域ネットワークによる宇宙天気観測・教育活動に関する研究集会, 福岡, 2017年3月15日

[4] K. Yamashita, Y. Kubono, Y. Takahashi, J. Hamada, J. Matsumoto, Study on early detection of thunderstorm based on electromagnetic measurement in ELF-VLF band, Japan Geoscience Union 2016, Chiba (Japan), 2016年5月24日

[5] 山下幸三, 高橋幸弘, 増田拓, 岩男辰雄, 虫明一彦, ELF-VLF帯電磁界計測に基づいた雷放電観測による積乱雲早期検知の検討, 第10回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2016年9月9日

[6] 森永 洋介, 土屋 史紀\*, 小原 隆博, 三澤 浩昭, 本間 規泰, 佐藤 光輝, 大矢 浩代, 北陸冬季雷が下部電離圏に及ぼす影響, 日本地球惑星科学連合 連合大会 2016年大会, 幕張(幕張メッセ), 2016年5月22日

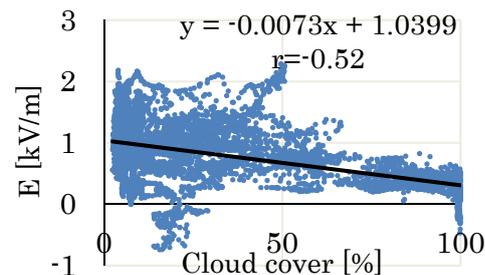


図4 大気電場と雲量との相関

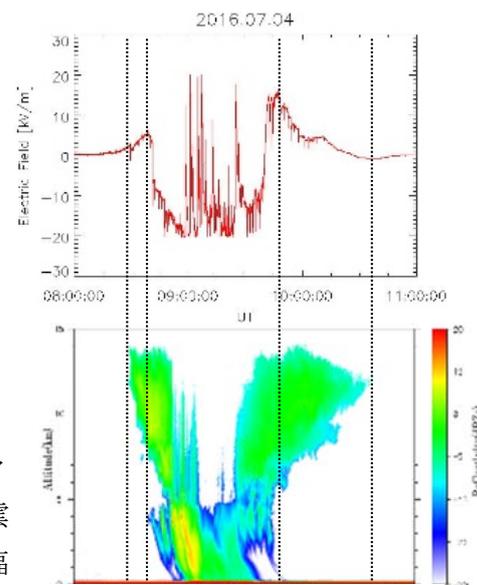


図5 雷発生時の大気電場変動(上)およびFALCON-Iによるレーダ反射因子(下)

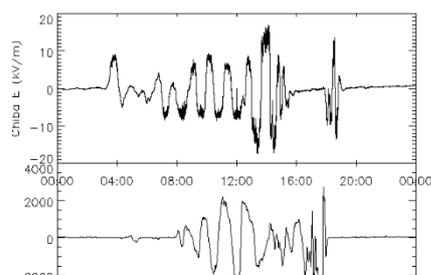


図6 降雪時の千葉大(上)および柿岡(下)の大気電場変動

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

宗像 一起 信州大学・理学部

インドの大型ミュオン計GRAPE3は、2015年6月22日の大地磁気嵐に伴って約一時間だけ宇宙線強度が増加する「Cosmic Ray burst」を観測し、その原因が地球磁場の減少によるものと報告した (Mohanty et al., Phys. Rev. Lett., 117, 2016)。これに対してGMDNによる観測結果を解析した結果、このイベントで約1%の振幅の宇宙線異方性がIMFの反転に伴って位相を大きく変えたことが明らかとなった。すなわち、この変化により異方性の方向が視野に入った宇宙線計が、約1%の強度増加を観測したことになる。これまでGMDNによる観測結果は1時間単位で議論されることがほとんどであったが、GRAPE3が報告したような短時間の変化を正しく理解するためには、少なくとも1分値の観測が必要である。2016年3月にKuwait宇宙線の検出面積が拡張されたことに伴い、GMDNの全宇宙線計で1分値の観測を開始することができた (図1. 参照)。



図1. 拡張されたKuwaitミュオン計

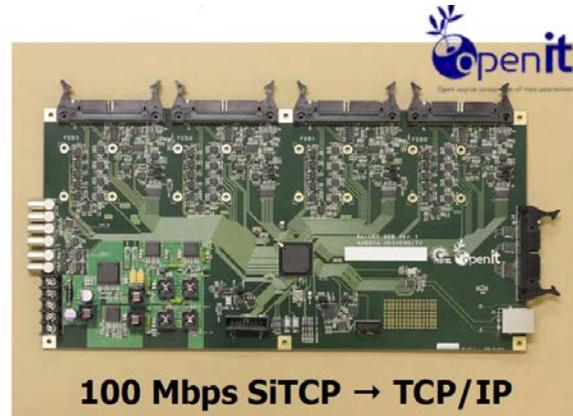


図2. SciCRT用新型データ計測基板

メキシコ・シエラネグラ山頂に設置されたSciCRT宇宙線計をミュオン計として利用するため、計数率の高いミュオンを少ない死時間で計測可能な新計測システムを開発してSciCRT宇宙線計に設置した (図2. 参照)。新システムによる連続観測を開始し、現在その稼働状況を試験中である。

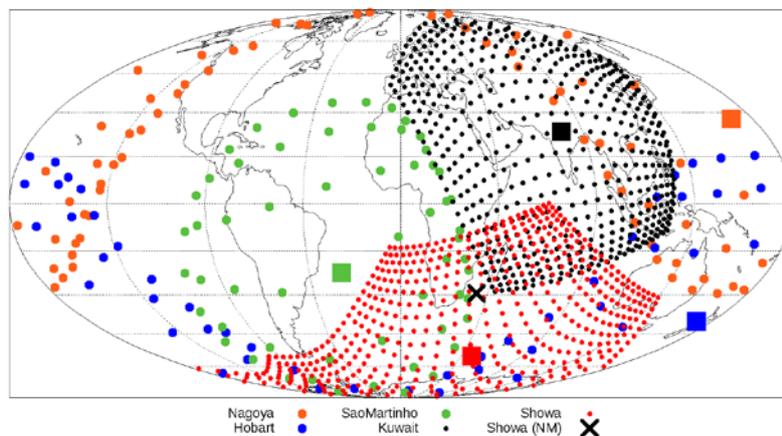


図3. 南極昭和基地宇宙線計の磁気圏外宇宙における観測方向 ●がミュオン計、×が中性子計による観測方向。●は Kuwait ミュオン計の観測方向を示す。

国立極地研究所の一般研究観測計画として、南極昭和基地での中性子モニターとミュオン計による宇宙線観測計画を開始した。昭和基地での中性子計とミュオン計による同地点・同時観測により、磁気圏外のほぼ同じ方向から入射する宇宙線量を、約5倍異なる二つのエネルギー領域で観測できる。また、同地点で観測される宇宙線は、大気中や地球磁気圏中でほぼ同じ経路を経て検出器に到達するため、大気変動や地磁気変動に対する応答の違いを正確に調べることも出来る。また、昭和基地ミュオン計による観測方向は、既存のGMDNのミュオン計によるものと良くオーバーラップしており、データの観測所間での較正も容易に行うことが出来る(図3. 参照)。

#### 論文成果リスト：

- Oriz et al., Observation of cosmic ray hadrons at the top of the Sierra Negra volcano in Mexico with the SciCRT prototype, *Advances in Space Reaserach*, 56, 201802025, 2016 (February 16).
- M. Kozai et al., Average spatial distribution of cosmic rays behind the interplanetary shock-- Global Muon Detector Network observations –, *Astrophys. J.*, 825:100 (19pp), 2016 (July 10).
- R. R. S. Mendonça et al., Temperature effect in secondary cosmic rays (muons) observed at ground: analysis of the global muon detector network data, *Astrophys. J.*, 830:88 (25pp), 2016 (October 20).

#### 国内学会発表リスト：

- 佐々井義矩ほか、SciCRTによる太陽中性子観測VI、日本物理学会第71回年次大会、東北学院大、2016年3月21日 (21pAZ-1)
- 土屋 暁ほか、SciCRTによる太陽中性子観VII、日本物理学会第71回年次大会、東北学院大、2016年3月21日 (21pAZ-2)
- 中村佳昭ほか、SciCRT検出器を用いた銀河宇宙線観測計画IX、日本物理学会第71回年次大会、東北学院大、2016年3月21日 (21pAZ-3)
- 佐々井義矩ほか、SciCRTによる太陽中性子観測VIII、日本物理学会2016年秋季大会、宮崎大、2016年9月24日 (24aSQ-3)
- 土屋 暁ほか、SciCRTによる太陽中性子観測IX、日本物理学会2016年秋季大会、宮崎大、2016年9月24日 (24aSQ-4)
- 佐々井義矩ほか、SciCRTによる太陽中性子観測X、日本物理学会第72回年次大会、大阪大、2017年3月19日 (19pK41-2-3)
- 土屋 暁ほか、SciCRTによる太陽中性子観測XI、日本物理学会第72回年次大会、大阪大、2017年3月19日 (19pK41-2-4)

#### 国際学会発表リスト：

- R. Mendosa et al., Observation of 45 years solar cycle modulation in the cosmic ray intensity observed by the Nagoya muon detector, *IAUS328, Maresias (Brazil)*, 17-21 October, 2016 (poster).
- K. Munakata et al., Cosmic ray observations at Syowa Station in Antarctica for space weather study, *The Seventh Symposium on Polar Science, Institute of Statistics and Mathematics*, 29 November, 2016.

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

纈纈佑衣 (名古屋大学大学院環境学研究科)

【研究目的】

台湾は、約6.5 Maに始まり現在も続いているユーラシアプレートとフィリピン海プレートに属する火山弧の衝突によって、3000m級の山脈が連なる衝突型造山帯が形成されている。この台湾造山帯は非常に若い変成作用を被った造山帯であり、その変成条件と年代を制約する事は、現在進行形の造山運動の発達史を理解する上で、非常に重要な地域であると言える。台湾造山帯は、西から東に向かって変成度が上昇する事が知られているが、主に付加体堆積物から構成されているため、定量的な変成温度圧力条件の解析が困難であるとされていた。加えて、急峻な地形と植生のため、緻密な試料採取に基づく岩石学的分析が進んでいない。これまでの変成岩岩石学的研究は、主に変泥質岩中に産出する塩基性-超塩基性の岩体に着目し、その中に含まれる鉱物の化学組成を基にした、熱力学的変成条件の解析が主であったが、それらの岩体は周囲の変泥質岩とは異なる変成履歴をもつTectonic Blockとして解釈されてきた。しかし、近年の研究では、変泥質岩類も高変成度の変成作用を被っている可能性が指摘されている (Keyser et al., 2016)。また、Beysac et al. (2007)は、近年開発された炭質物ラマン温度計を、炭質物を含む変泥質岩に適用し、大まかな温度構造を明らかにした。これらの先行研究によって、台湾造山帯の変成条件が次第に定量的に評価されるようになってきている。しかし、分析に用いられた試料は限られており、台湾造山帯全体の温度構造を議論するには不十分である。また、いくつかの研究において、碎屑性ジルコン年代や変成年代が報告されているが、こちらもデータが不十分であり、台湾造山帯の発達史の全容解明にはほど遠い状態である。本研究では、台湾の地質に精通しているChin-Ho Tsai准教授と協力し、炭質物ラマン温度計及びCHIME年代測定法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、主に炭質物ラマン温度計を用いた変成温度の見積り解析を行った。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 Omega XRを用いた。分析条件は、炭質物ラマン温度計について報告したAoya et al. (2010)に従い、532 nm Nd-YAGレーザーを用いて1点につき30秒の分析を行った。試料表面のレーザー照射強度は、約1mWに設定し、1試料につき30点以上を分析した。試料中に含まれる炭質物のラマン分光分析は、7月にChin-Ho Tsai准教授が来日した際に、2試料 (Garnet zone C121107, Albite zone F10803) について行った。得られたデータの解析は、榎並正樹教授と纈纈が行った。測定された炭質物ラマンスペクトルは、ピーク解析ソフトPeakFit ver.4.12 (SeaSolves Software Inc.)を用いて、G-band (~1580 cm<sup>-1</sup>), D1-band (~1350 cm<sup>-1</sup>), D2-band (~1620 cm<sup>-1</sup>), D3-band (~1520 cm<sup>-1</sup>)にピーク分離し、炭質物ラマン温度計に用いられる面積比パラメーターR2 (= [D1/(G+D1+D2)]<sub>Area</sub>)を算出した。最高到達温度は、Aoya et al. (2010)で報告されている下記の式(1)を用いて導出した。

$$T(^{\circ}\text{C}) = 221 \times R2^2 - 637.1 \times R2 + 672.3 \quad (1)$$

## 【結果と考察】

共同研究を始めるにあたって、予備分析してあった試料（YL10N01）は、測定によって見積もられた温度が396°Cから555°Cまで幅広い温度を示した。また、平均温度は466°Cであるものの、頻度分布で見ると、430°C付近と520°C付近にピークを持つバイモーダルな特徴を示した（図1）。そして、これら炭質物ラマン温度計によって得られた温度は、偏光顕微鏡下で観察される鉱物組合せと組織から予想される変成度よりも有意に高い温度条件であることが明らかとなった。一方、今年度に測定した2試料C121107とF10803は、予備分析試料と同様に、それぞれ387–617°C及び335–618°Cの幅広い温度を示したが、明瞭なバイモーダルは示さず、470°C付近にピークを示した（図1）。

本年度は予定していた院生の来日が、日程の都合上できなかったため、分析試料が2試料にとどまった。予備分析の結果も含めて3試料で議論を進める事は困難であるが、炭質物ラマン温度計の適用が進んでいる他の変成帯（例えば西南日本三波川変成帯）の結果と比較すると、見積もられる温度範囲が幅広い事が特徴的である。これは、炭質物の反応速度を考慮すると、台湾造山帯が非常に若い事に起因していると考えられる。来年度はさらに分析試料数を増やす事で、台湾造山帯全体の温度構造並びに炭質物の反応速度についても考察を進めていく予定である。

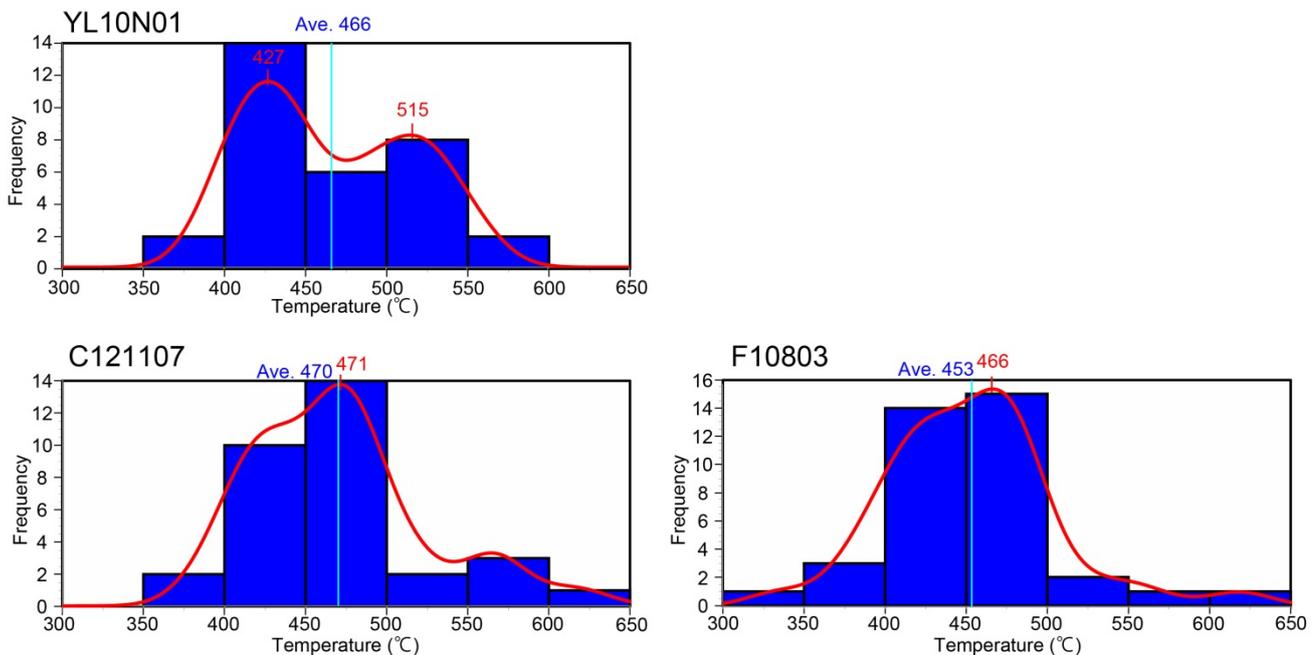


図1 炭質物ラマン温度計を用いて見積もられた温度の頻度分布

## 【引用文献】

- Aoya, M., Kouketsu, Y., Endo, S., Shimizu, H., Mizukami, T., Nakamura, D., Wallis, S., 2010. Extending the applicability of the Raman carbonaceous-material geothermometer using data from contact metamorphic rocks. *Journal of Metamorphic Geology* 28, 895–914.
- Beyssac, O., Simoes, M., Avouac, J.P., Farley, K. A., Chen, Y.G., Chan, Y.C., Goffé, B., 2007. Late Cenozoic metamorphic evolution and exhumation of Taiwan. *Tectonics* 26, TC6001, doi:10.1029/2006TC002064
- Keyser, W., Tsai, C.-H., Iizuka, Y., Oberhänsli, R., Ernst, W.G., 2016. High-pressure metamorphism in the Chinshuichi area, Yuli belt, eastern Taiwan. *Tectonophysics* 692, 191–202.

## 【成果発表】

該当なし

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を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ることにより、精度の向上と耐障害性の向上を図っている。これらの複数衛星系、複数周波数を用いる次世代の衛星航法システム(GNSS)を、MC/MF (Multi-Constellation Multi-Frequency) GNSSと呼ぶ。

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

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

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

## 方法

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

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

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

た全天大気光イメージャがあり、継続的に観測を行っている。ここでは、MC/MF GNSS受信機と全天大気光イメージャの観測を継続するとともに、プラズマバブル発生季の春分、秋分前後の1週間程度の間、シンチレーション観測が可能なMC/MF GNSS受信機を持ち込んでキャンペーン観測を行う。

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**

石垣において大気光イメージャと電離圏シンチレーション受信機を用いたプラズマバブルの同時観測を継続的に実施し、プラズマバブルとシンチレーションの空間対応に関する解析を行った。図1は、石垣において観測されたプラズマバブルの大気光画像と、同時に観測されたGNSS衛星の位置とシンチレーション強度(S4指数)の例を示したものである。シンチレーションはプラズマバブルの辺縁部分で強まる傾向が見られることがわかった。平成29年度は、プラズマバブルとシンチレーションの空間対応に関する解析を進めるとともに、衛星系、周波数による影響の違いに着目した解析を行う予定である。

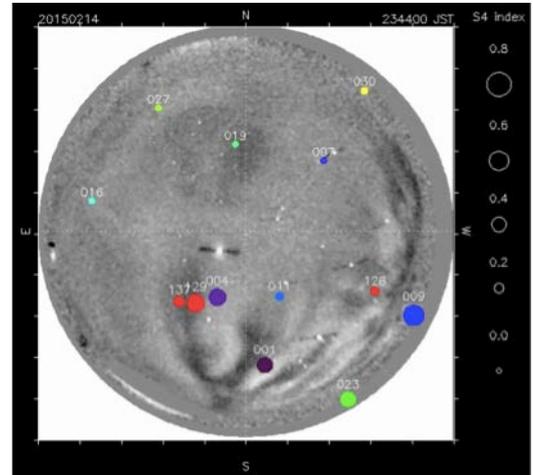


図 1.石垣において観測されたプラズマバブルの大気光画像(1 時間平均からの差分)とシンチレーションの対応。図中の○は衛星位置とシンチレーション強度(S4 指数)を示す。上下左右が北南東西に対応する。

インドネシア・コトタバンにおいては、平成29年2月にMC/MF受信機を持ち込んで試験観測を実施し、試験データを取得した(図 2)。試験観測においては弱いながらもプラズマバブル様の電離圏変動を検出した。平成29年度は、今回の試験観測の結果を元にMC/MFシンチレーション受信機によるキャンペーン観測を行うとともに、継続的なMC/MF観測のための検討を行う予定である。

**成果発表一覧**

- [1] T. Feuele, M. Stanisak, S. Saito, T. Yoshihara, GBA S Interoperability Trials and Multi-Constellation/Multi-Frequency Ground Mockup Evaluation, Proceedings of the SESAR Innovation Days (2016) EUROCONTROL. IS SN 0770-1268
- [2] Abadi Prayitno, 大塚 雄一, 塩川 和夫, Liu Huixin, 品川 裕之、Investigation of equinoctial asymmetry in the latitudinal variation of scintillation drift and neutral wind、地球電磁気・地球惑星圏学会、九州大学、2016年11月
- [3] 高見 晃平, 細川 敬祐, 斎藤 享, 小川 泰信、小型で安価な大気光イメージャを用いたプラズマバブルの観測、地球電磁気・地球惑星圏学会、九州大学、2016年11月
- [4] K. Hosokawa, K. Takami, S. Saito, and Y. Ogawa, Simultaneous observations of plasma bubbles by a low-cost imager and GNSS receivers in Ishigaki, Japan, Workshop on GNSS and SAR Technologies for Atmospheric Sensing, Kyoto University, March 2017.

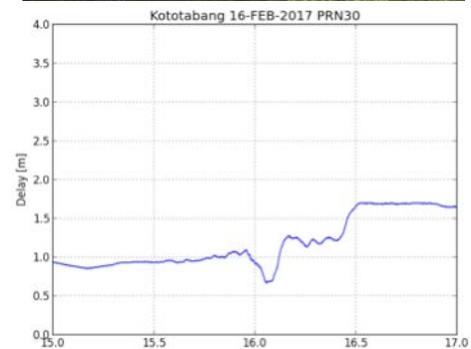
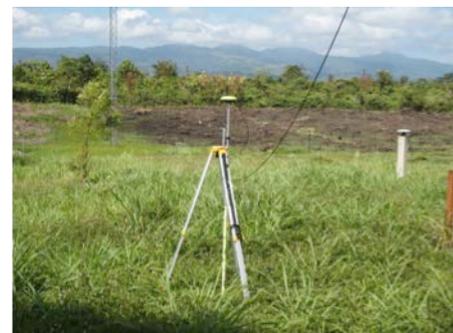


図 2.インドネシア・コトタバンにおける試験観測(上)及び検出した電離圏遅延量(全電子数)変動(下)。

## 電離圏電場と地上磁場同時観測に基づくグローバルPc5波動の研究

Study of global Pc 5 waves based on ionospheric radars and magnetometers

藤本 晶子、九州大学・国際宇宙天気科学教育センター

### 【研究目的】

太陽エネルギーの帰着点と言える赤道域において最も優勢な磁場変動は、昼側の磁場変動に現れる「赤道ジェット電流 (EEJ) [Chapman, 1951]」であるが、EEJには様々な地磁気擾乱が重畳し、その基本変動を変調させている。その1つに、赤道域で観測される2分～10分の準周期的地磁気脈動 (Pc5) がある。1990年代以降、高緯度Pc5と同期する赤道域Pc5はグローバル波動として報告され [Pathan et al., 1999; Motoba et al., 2002, 2003]、その発生機構は、極域電場の赤道域への伝播 [Motoba et al., 2002] (以降、「電場侵入モード」) が提唱されている。一方、磁気圏内Pc5波動の電場・磁場変動が直接電離圏、地上の電場・磁場変動として現れる「磁気圧縮モード」も発生機構の候補 [Ziesolleck and Chamalaun, 1993] に挙げられ、発生機構の確固たる合意は得られていない。赤道域という特異な領域において、Pc5のモードを特定する事は、赤道Pc5の発生特性、励起・伝播機構を解明でき、さらには電磁エネルギーの極域から赤道域までの伝搬の理解につながる。以上より、「電場侵入モード」、「磁気圧縮モード」を観測値から適切に抽出することが直接的な解決策であるが、地上磁場のみでは磁気圏・電離圏に起源をもつ様々な変動要因が重畳するために、上記2モードの特定は困難である。そこで、電離圏の情報を直接得られるレーダーを用いて、電離圏電場と地上磁場の位相差からモードの分離・特定を行うという着想を得た。特に、極域電場侵入によるグローバルPc5を実証するために、伝播過程の緯度方向に関しては極域、低緯度、赤道域電離圏での同時電磁場観測を行い、経度方向伝播については昼一夜の同時電磁場観測を実施することが有用である。

本研究では、九州大学国際宇宙天気科学・教育センターが運用するFM-CWレーダーの日本経度ラインを基準とし、ペルーの新規設置を含めた昼夜同時電離圏電場観測と地上磁場観測の統合解析に基づき、Pc5波動の「電場侵入モード」と「磁気圧縮モード」を切り分け、赤道Pc5の発生特性、励起・伝播機構を明らかにする。

### 【研究方法・結果】

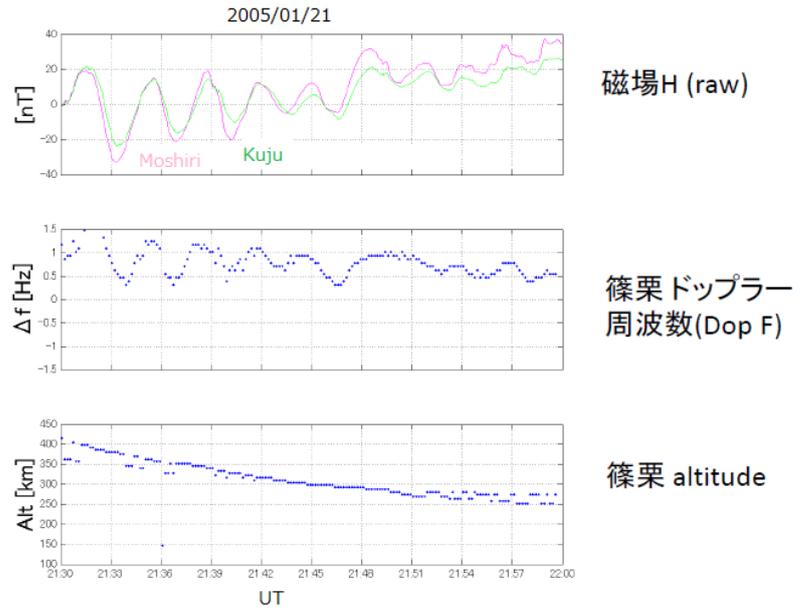
#### 研究 1 : ペルー新規FM-CWレーダー拠点構築

電離圏電場観測の昼 - 夜同時観測において2つの地方時での観測電場の位相差関係から、Pc5波動モード特定ができる。この昼 - 夜電場同時観測を実現するために、既設FM-CWレーダー拠点 (ロシア、日本、フィリピン) がある日本経度ラインの反対半球に位置するペルーに新規FM-CWレーダーの設置を計画した。

本年度のレーダー設置に向けて準備していたが、設置直前にペルー協力研究機関IGP側の設置受入条件が変更されたことに伴い、FM-CWレーダー設置を本年度中に実施することが困難になった。そのため、現地にて設置場所の相談・視察ならびに早期設置に向けた研究打合せを実施した。電波環境や施設設備などを直接確認するとともに、2017年9月にFM-CWレーダーを設置することで合意を得た。

#### 研究 2 : 既存FM-CWレーダー観測点の保守整備とオペレーション最適化

国内観測点(福岡市篠栗)のFM-CWレーダーの保守整備ならびに、アーカイブデータ整理を行った。電離圏電場観測における観測パラメータの最適化(研究1)とデータ解析(研究3)に関連して、データベース化されていない未処理データの整備ならびに事例解析を実施した。右図は、低緯度において、周期3分程度のPc5波動の地磁気変動と同期して、FM-CWレーダーによる電離圏電場観測においても同周期の変動をとらえている例である。地上磁場と電離圏電場観測で同時観測されるPc5波動検出するため、右図に示すQL図をアーカイブデータに対して作成した。



[周期3分程度の地磁気変動に同期する、FM-CWレーダーで観測されたドップラー周波数変動]

【考察・まとめ】

本年度は、予定していたペルー国内でのFM-CWレーダー設置を実施できなかったが、2017年9月に設置する方向で現地協力機関と調整することができた。既存のFM-CWレーダー観測点に関しては、保守整備するとともに蓄積しているデータの詳細な解析に向けてデータベースを整備することで、統計解析に向けた準備段階を完了させた。次年度以降、ペルーでのFM-CWレーダーの構築を完了するとともに、観測データの事例・統計解析を実施するとともに、研究成果を学会等にて発表する予定である。

【成果発表】

なし

# 宇宙線で探る太陽風擾乱の空間構造

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

小島浩司・愛知工業大学・工学部・土木工学科

## 研究目的

太陽表面の大規模な爆発現象によって、太陽フレアやコロナ質量放出（CME）等の現象が起きる。その中でも CME の内部には激しい磁気擾乱を伴う磁気雲があると考えられる。このような磁気雲が惑星間空間を伝播する過程で、周辺の惑星間空間磁場（IMF）に影響をおよぼし、太陽圏に侵入した銀河宇宙線に異方性を生ずると考えられる。銀河宇宙線の異方性を連続的に観測することで、太陽風のプラズマ磁気雲の空間的構造と IMF に関連する諸現象の理解につながり、また宇宙天気にも寄与することになると考えられる。

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

## 研究方法

本研究では、多方向ミュオン望遠鏡を用いて、大気ミュオンを計測し、間接的に一次宇宙線の強度変動を観測する。各望遠鏡はそれぞれインド・Ooty の 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。これらの望遠鏡に加えて、南北両極域を含む全世界に展開されている中性子検出器のデータを統合的に解析することで、従来の約 10 倍以上の検出面積に相当する望遠鏡としての観測が可能となる。観測で得られた宇宙線強度変動と衛星による惑星間空間プラズマの物理量（太陽風速度等）の変動を比較して、それらに関連付けているパラメータを推定する。さらに、多方向ミュオン望遠鏡で得られる二次元宇宙線強度分布と、IPS データから得られる太陽風の空間的構造とを比較解析することにより、宇宙線の異方性と太陽風の空間構造との関連を明らかにして、磁気雲の 3 次元構造や磁気中性面（カレントシート）の形状の解明を目指す。

## GRAPES-3 研究活動報告

タタ基礎研究所の S.K. Gupta と P.K Mohanty 氏が、2016 年 10 月に名古屋大学宇宙地球環境研究所及び中部大学に来訪するために来日した。中部大学にて GRAPES-3 日本メンバーとミュオン観測データの解析について議論をおこなった。2017 年 3 月 5 日～3 月 15 日に大阪市立大学の川上と中部大学の柴田がインドに渡航した（愛知工業大学の小島も同行予定であったが、急性肝不全による緊急入院のため断念した）、その際に、タタ基礎研究所において、GRAPES-3 インドメンバーと将来の Ooty における GRAPES-3 のミュオン測定装置の拡張とミュオン観測の精度向上の可能性について意見交換をおこなった。2016 年度中に小島・大嶋の 2 名が数回名古屋大学・徳丸研を訪問し、CME に関する研究を行う上での意見を求め、IPS データと宇宙線データとを関連させた解析の可能性について議論した。今後、上記の議論をふまえ、IPS 研究者の支援のもとに

宇宙線密度の空間分布と CME の空間的ひろがりの関連性についての解析をおこなう予定である。なお、本研究予算でデータ解析用・資料製作装置拡張のためのパーツとデータ保管用の HDD を購入した。

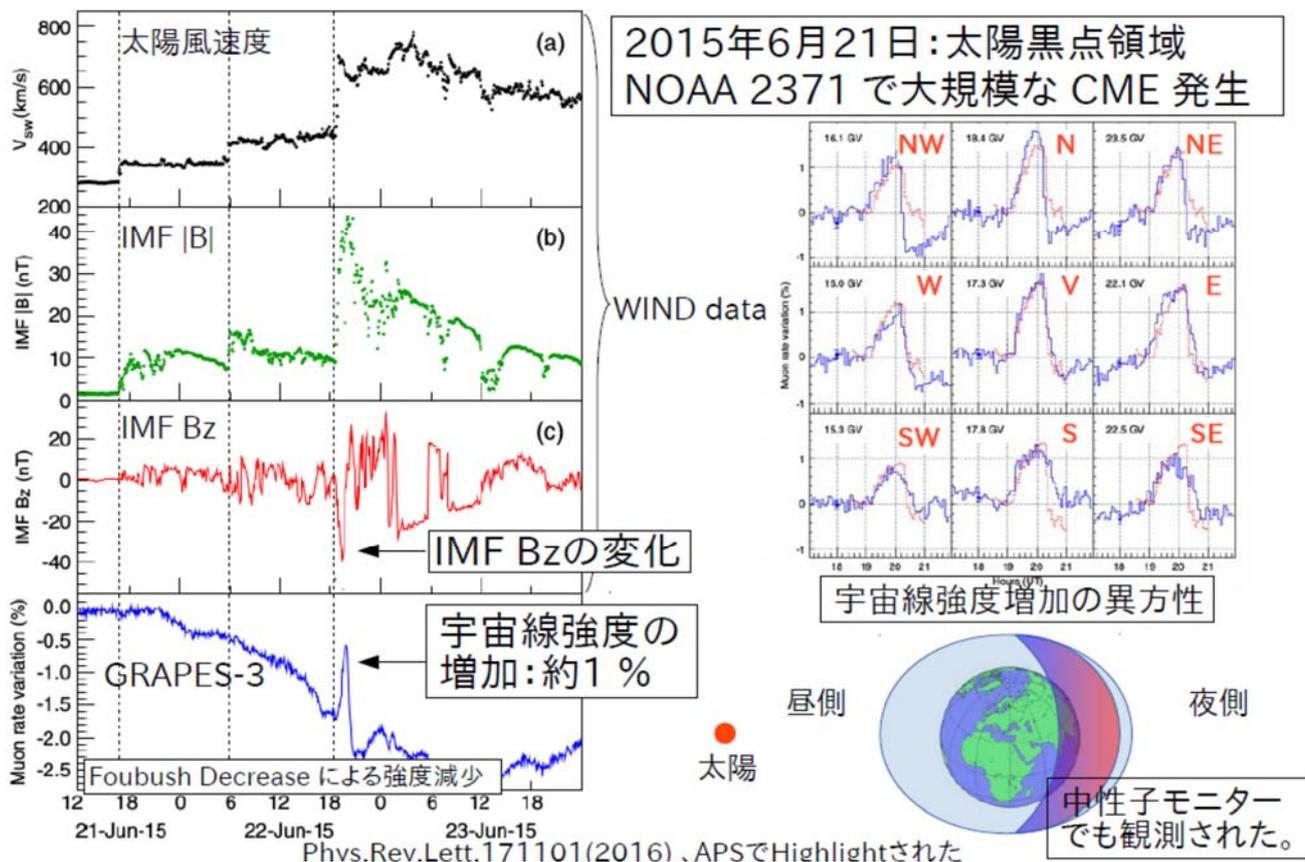
### GRAPES-3 の維持管理および拡張に関する活動

2015 年度に引き続き、2016 年 10 月まで、大阪市立大学を定年退職した林嘉夫がタタ基礎研究所の客員スタッフとしてインド Ooty に長期滞在し、ミュオン検出器建設作業の指導をおこなった。2017 年 3 月現在で約 2200 本の比例計数管が完成しており、計画本数 3700 本にむけ、100 本/月のペースで製作している。

### 研究成果

本研究に関連する研究成果として、2015 年 6 月 21 日：太陽黒点領域 NOAA 2371 で大規模な CME 発生し、それに伴って生じた宇宙線フォルブッシュディクリーズ中の宇宙線強度の異常増加の観測に関して査読論文が出版された。その結果を以下に示す。

## 2015年6月イベント



### 【日本物理学会・その他学会発表】

1. 小島浩司、柴田祥一、大嶋晃敏他、「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(18)」、物理学会（2016年秋季大会）、宮崎大学木花キャンパス、2016年9月24日
2. Akitoshi Oshima et al, 「Current status of the expansion for the GRAPES-3 project」,平成 28 年度 ISEE 研究集会—太陽圏シンポジウム、名古屋大学 宇宙地球環境研究所（研究所共同館 I）、平成 29 年 3 月 1 日
3. 小島浩司、柴田祥一、大嶋晃敏他、「GRAPES-3 実験拡張計画の進捗報告」、日本物理学会第 72 回年次大会、大阪大学豊中キャンパス、2017年3月17日

【投稿論文】

1. P.K. Mohanty, S.K. Gupta, A. Oshima, S. Shibata, H. Kojima et al., "Transient Weakening of Earth's Magnetic Shield Probed by a Cosmic Ray Burst", PHYSICAL REVIEW LETTERS, PRL 117, 171101 (2016), 21 OCTOBER 2016
2. P.K. Mohanty, S.K. Gupta, A. Oshima, S. Shibata, H. Kojima et al., "Fast fourier transform to measure pressure coefficient of muons in the GRAPES-3 experiment", Astroparticle Physics, Vol.79, 2330(2016), published

## 高エネルギー電子降下領域の時空間発展の実証的研究

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

土屋史紀 東北大学・大学院理学研究科

放射線帯からの電子の損失過程、並びに、高エネルギー粒子が超高層大気に及ぼす影響を明らかにするために、大気圏に高エネルギー電子が降下した現場を観測する必要がある。また、高エネルギー電子の降下を引き起こす主要因はプラズマ波動による電子のピッチ角散乱であり、電子の降下現象の観測は、プラズマ波動観測との比較を行う上でも重要である。本研究では、VLF/LF帯の標準電波観測によって高エネルギー電子(>100keV)の降下現象を検出し、磁気嵐・サブストーム時の電子降下現象の時空間発展を観測的に明らかにするとともに、プラズマ波動観測との比較手段を提供する。

本研究では、2016年10月にアラスカ(ポーカーフラット実験場)に設置されているLF帯電波受信装置(2014年10月設置)のメンテナンスとアップデートを行い、ノルウェー・ニーオルセン、カナダ・アサバスカ、北海道・陸別を含めたネットワーク観測体制を整えた。このネットワーク観測は「あらせ衛星」プロジェクトの地上観測ネットワークと位置付けられており、今後あらせ衛星との共同観測を推進する。VLF/LF帯の標準電波観測はPWINGで設置を行っている地上観測装置の一つともなっており、今後、観測の空白域となっているロシア(ジガンスク)への設置も計画している。2016年12月には、名古屋大学宇宙地球環境研究所の鹿児島観測所に、他の観測点と同様の広帯域LF帯受信装置(10kHz-100kHz)を新規設置し、鹿児島観測所で長年運用されてきたJJY40KHzの標準電波観測の継続が可能となった(図1)。



図1：鹿児島観測所に設置されたLF帯標準電波観測装置(2016/12/17-19設置)

観測網の整備・運用と並行して、サブオーロラ帯での電子の降り込み現象の解析を実施している。これまでのニーオルセン、アサバスカ、アラスカでの観測から、(1)サブストームのインジェクションに伴う高エネルギー降下、(2)ULF (Pc5)に変調を受けた高エネルギー降下現象が検出されているが、アサバスカで観測された LF 帯標準電波の位相変動を誘導磁力計(名大 ISEE)の観測データと比較した結果、EMIC との対応が非常によい高エネルギー電子の降り込み現象を検出した。図 2 にアサバスカより低緯度の標準電波局(60kHz、送信局:米国 WWVB) から送信された電波の受信信号の位相変動と誘導磁力計データの比較を示す。UT7:00-9:20に見られる位相の上昇が高エネルギー電子の降り込みによるものと考えている。位相変化の時間より EMIC の出現期間が長いのは、位相変動が標準電波の伝搬経路上で生じた電子降下現象のみを表しているのに対し、EMIC は伝搬特性を持ち、標準電波の伝搬経路から離れた場所の現象も観測されているためと考えられる。EMIC と電子降下領域の位置関係をより詳細に把握するため、今後、EMIC の偏波解析やプロトンオーロラ観測との比較を実施する。このイベントは、EMIC が発生しやすいと考えられている夕方側ではなく、真夜中付近の LT で発生している。今後、統計解析を通して現象の出現の特徴を詳細に調査していく予定である。

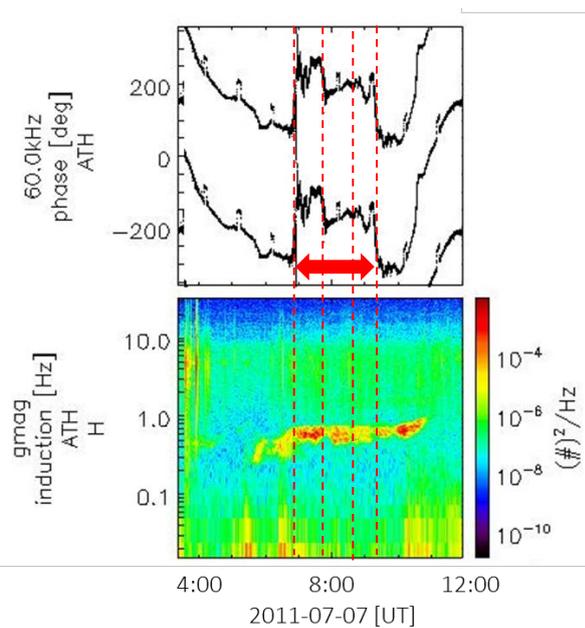


図 2 : アサバスカで観測された標準電波の移動変化(上図・赤矢印)と EMIC(下図)。UT7:00-9:20に見られる位相の上昇が高エネルギー電子の降り込みによるものと考えており、位相変化量と EMIC の強度変化との間には良い対応関係が見られる(赤破線)。UT4 時からの位相の減少と UT10 時以降の上昇は日没、日照による下部電離圏の電離度変化を反映したものである。

## 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、大気中の成層圏および対流圏で生成され、エアロゾルに付着するか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。特に長い半減期を持つC-14やBe-10などの宇宙線生成核種は、過去の宇宙線強度変動や太陽活動、そして地球環境変動の探索に重要なツールである。一方、宇宙線、太陽活動、そして地球環境についてのデータが整っている現代において、短い半減期53日をもつ宇宙線生成核種Be-7の詳細な観測は、3つの要因相互の変動関係を密化するためにフィードバックできる貴重なデータを提供する。本研究は、第23期太陽活動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。ここでは中緯度(山形)と高緯度(アイスランド)でのBe-7の長期観測結果および低緯度(タイ、バンコク)で得られた2016年までの観測結果について報告する。

### 研究方法

北半球中緯度の山形(北緯38.3°)、高緯度のアイスランド(北緯64.7°)、最高地磁気カットオフ地域であるタイに各々ハイボリュームエアサンプラー(HV1000F、HV500R、吸引量500L~1000L/分)を設置してガラスろ紙に集塵した。回収したろ紙試料は、山形大学および宇宙線研究所柏地下測定設備にてガンマ線測定分析を行い、大気中Be-7濃度およびPb-210濃度の連続観測を行った。

### 研究結果

#### 1) 中緯度と高緯度のBe-7濃度年変動

図1は、中緯度(山形)および高緯度(アイスランド)の大気中Be-7濃度、太陽黒点数(SSN)、Thule(北緯76.5° cut-off rigidity 0 GV)での地上中性子強度の2000年から2016年までの年変動を示している。第24期の太陽黒点数は、上昇期の2009年~2011年の3年間で16倍の増加であり、下降期の2014年~2016年の3年間で65%の減少である。これに対して山形のBe-7濃度は、15%の減少と8.6%の増加である。Be-7濃度の太陽活動期の開始期の急激な黒点数変化

への反応は、直線的ではないが太陽モジュレーションを表わしている。しかし、Thule の中性子強度は、2009 年から 2015 年まで下降し 10% の減少であり、2016 年に増加している。山形 Be-7 濃度は 2013 年から増加に転じており、中性子強度より 3 年早い。

アイスランドの Be-7 濃度は、2008 年から 2015 年まで下降しており 38% の減少であり、中性子強度の 4 倍近い変動である。これらの観測結果は、高緯度への低エネルギー銀河宇宙線および太陽宇宙線の入り込みを反映していると考えられ、第 24 期の 11 年変動についての観測が重要となる。

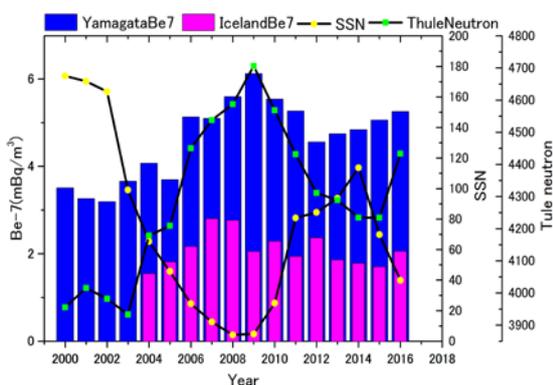


図 1 山形、アイスランドでの Be-7 濃度の年変動

## 2) 低緯度地域タイ・バンコクにおける Be-7 濃度変動

図 2 にタイ・バンコクにおける 2014 年から 3 年間の Be-7 と Pb-210 の日濃度変動を示す。12 月から 5 月にかけて Be-7 濃度が高い季節変動が明瞭であり、地表起源の Pb-210 は同様な季節変動であるが、Be-7 より 1 か月程度位相が早い。バンコクにおける Be-7 濃度の季節変動と地球規模での大気移流の関係を調べるために HYSPLIT 流跡線解析を行った。図 3 は、バンコクに流入する各月の流跡線を示している。流跡線は、10 月から 2 月の大陸経路、3 月から 5 月の太平洋経路、そして 5 月から 9 月のインド洋経路の 3 つのパターンに分類できる。大陸経路と太平洋経路は Be-7 濃度が高い季節にインド洋経路は Be-7 濃度が低い季節に対応していると考えられるが、各経路での生成量との関係を調べる必要がある。

## 3) 金峰年輪試料の C14 測定

キャリントンフレアー (1859) 時の年輪を春材・夏材に分けて測定を行った。春材と夏材で C14 濃度に違いがあった。

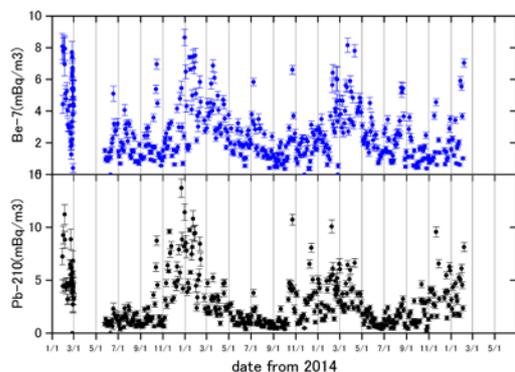


図 2 3 年間のタイ・バンコクでの Be-7, Pb-210 濃度の日変動

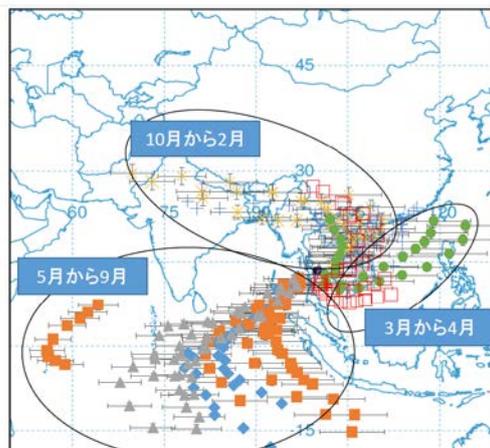


図 3 バンコクに流入する各月の流跡線

## ヨーロッパ中緯度での地上大気光イメージング観測網の構築 Development of an airglow imaging network in Europe

鈴木臣 愛知大学・地域政策学部

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

2016年度は、前年度の観測システムに改良を加え、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た。2機のカメラにそれぞれの大気光波長を通す光学フィルタを取り付け、ビデオエンコーダ (2チャンネル入力) で観測を制御する。露光時間 4 秒のビデオ信号は 10 秒毎に 1 枚の画像として自動で保存される。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)。このシステムでは観測画像は1晩で約 5,800枚 (計 600 MB) となるが、順リアルタイムにデータを公開するため、クラウドサービスを利用した逐次的なデータ転送環境を構築した。非力なマシンでもデータ転送が安定しておこなえ、将来はより簡易なシステム (例えばデータストレージ・データ転送にPCではなく携帯電話を用いたよりシンプルでインフラが整っていない場所にも設置可能なシステム) への展開も可能である。また、2波長の大気光画像をサーバに転送し、観測画像データをウェブ上に自動でアップロードする環境を整備した (ただし、観測画像データの公開環境は簡易版であるため、次年度によりリアルタイム性を重視するとともに、過去のアーカイブにも容易にアクセスで



図1: (上) Juliusruh 観測所建物の屋上に設置した2波長大気光カメラと (下) 観測コントロール系の写真。

きる仕組みに改良する予定)。さらに、開発した観測機を屋外で運用するためのハウジングも制作もおこなった。

愛知大学構内での数晩のテスト観測を実施した後、2017年3月22日に、ドイツ IAP 研究所に出張し、同観測所の研究者とともに Juliusruh 観測サイト (54.6°N, 13.4°E) に製作した大気光カメラを設置した(図1)。これにより、2015年度に設置したドイツ Kühlungsborn の IAP 研究所 (54.1°N, 11.8°E) の大気光カメラと視野がオーバーラップした観測がおこなえ、大気光の発光層高度の推定も可能となる。観測される波動の高度を見積もることができることは、同地点で運用されているレーダーやライダーとの同時観測を実施する上で非常に重要となる。ただし、Kühlungsborn のカメラは OH 大気光のみを観測しているため、次年度は 630 nm 大気光観測用カメラを追加し、さらに両サイトのカメラと観測視野がかぶるような位置に 3 基目の 2 波長大気光観測システムを設置して、広範囲の同時イメージング観測を実施する予定である。

成果発表：

1. 鈴木臣, 中間圏重力波観測用低廉大気光カメラの性能評価 3 : 画像処理, 日本地球惑星科学連合2016年大会, 幕張, 2016年5月24日.
2. Suzuki, S., K. Shiokawa, Performance Evaluation of Low-Cost Airglow Camera for Mesospheric Gravity Wave Measurements, American Geophysical Union 2016 Fall meeting, San Francisco, 2016年12月14日.

## 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、更にそれらの成果を既存の分野横断的大型データベースに統合化する為の調査研究を実施する。

今年度は、本経費を用いて、マレーシア域トレガンヌ、及びジョホールバルの2観測点を設置し、東南アジア域における観測網の稠密化を行った。EE-index変動を時間帯ごとに区切って積分することによってその時間に流れるEEJの総量を求め、プラズマバブルとの関係性についての調査を行った。その結果、日没付近(17:00~19:00LT)を積分したものでは、積分値が大きいほどプラズマバブルが発生しやすく値が負になると発生しにくいことがわかり、Uemoto et al., (2010)と同様な結果が得られた。プラズマバブルが発生するときにはPREが発達しやすいためEUELの値が大きくなりやすく、積分値が負になるときはCEJが発生していることが考えられる。その結果F層下部高度が上

昇しにくく、PRE も発達しづらくなるため、プラズマバブルも発生しにくくなると考えられる。

また、日中(07:00~17:00LT、09:00~15:00LT)を積分したものに関しては、積分値が大きいほどプラズマバブルが発生しやすいことがわかり、Uemoto et al., (2010)とは異なる結果が得られた。先行研究では EEJ の大きさを磁気赤道でエンハンスする部分のみで定義しており、Sq 成分は取り除いた上でプラズマバブルとの関係を調べていた。しかし、本研究では EE-index を用いており、EEJ の大きさは Sq 成分も考慮した上で算出されている。このため、EEJ を用いてプラズマバブルの予測を予測するには Sq 成分も含めて考える必要がある可能性がある、などの初期結果を得た。

#### 論文成果リスト

1. SA Bello, M Abdullah, NSA Hamid, A Yoshikawa, AO Olawepo, Variations of B0 and B1 with the solar quiet Sq-current system and comparison with IRI-2012 model at Ilorin, *Advances in Space Research*, 2017, accepted
2. GQ Wang, M Volwerk, TL Zhang, D Schmid, A Yoshikawa, High - latitude Pi2 pulsations associated with kink - like neutral sheet oscillations, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, accepted
3. Rabiou, A. B., Folarin, O. O., Uozumi, T. and Yoshikawa, A. (2016) Simultaneity and Asymmetry in the Occurrence of Counterequatorial Electrojet along African Longitudes, in *Ionospheric Space Weather: Longitude and Hemispheric Dependences and Lower Atmosphere Forcing* (eds T. Fuller-Rowell, E. Yizengaw, P. H. Doherty and S. Basu), John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. doi: 10.1002/9781118929216.ch2
4. Ohtani, S., and A. Yoshikawa (2016), The initiation of the poleward boundary intensification of auroral emission by fast polar cap flows: A new interpretation based on ionospheric polarization, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, doi:10.1002/2016JA023143. (Selected as Editor's Highlight)
5. Takahashi, K., M. D. Hartinger, D. M. Malaspina, C. W. Smith, K. Koga, H. J. Singer, D. Fröhaufl, D. G. Baishev, A. V. Moiseev, and A. Yoshikawa (2016), Propagation of ULF waves from the upstream region to the midnight sector of the inner magnetosphere, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, 8428-8447, doi:10.1002/2016JA022958.
6. Imajo S., A. Yoshikawa, T. Uozumi; S. Ohtani, A. N. Sodnomsambuu Demberel, B. M. Shevtsov (2016), Solar terminator effects on middle-to-low latitude Pi2 pulsations, *Earth, Planets and Space*, 68 (1), 13768 (1), 137.
7. Uozumi, T., A. Yoshikawa, S. Ohtani, S. Imajo, D. G. Baishev, A. V. Moiseev, and K. Yumoto, (2016), Initial deflection of middle-latitude Pi2 pulsations in the premidnight sector: Remote detection of oscillatory upward field-aligned current at substorm onset, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, doi:10.1002/2015JA021698.
8. Nishimura N., T. Kikuchi; Y. Ebihara, A. Yoshikawa, S. Imajo; W. Li, H. Utada, Evolution of the current system during solar wind pressure pulses based on aurora and magnetometer observations, *Earth, Planets and Space*, 68 (1), 144, (2016).
9. Bisoi, OS. K., D. Chakrabarty, P. Janardhan, R. G. Rastogi, A. Yoshikawa, K. Fujiki, M. Tokumaru, and Y. Yan (2016), The prolonged southward IMF-Bz event of 27-4 May 1998: Solar, interplanetary causes and geomagnetic consequences, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, 3882-3904, doi:10.1002/2015JA022185.
10. Bolaji, O. S., E. O. Oyeyemi, O. P. Owolabi, Y. Yamazaki, A. B. Rabiou, D. Okoh, A. Fujimoto, C. Amory-Mazaudier, G. K. Seemala, A. Yoshikawa, and O. K. Onanuga, Solar Quiet Current Response in the African Sector Due to a 2009 Sudden Stratospheric Warming Event, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 2016 August 6, doi:10.1002/2016ja022857.

11. Tsuda, T., M. Yamamoto, H. Hashiguchi, K. Shiokawa, Y. Ogawa, S. Nozawa, H. Miyaoka, and A. Yoshikawa, A proposal on the study of solar-terrestrial coupling processes with atmospheric radars and ground-based observation network, *Radio Sci.*, 51, doi: 10.1002/2016RS006035, 2016."
12. Fujimoto, A., T. Uozumi, S. Abe, H. Matsushita, S. Imajo, J. K. Ishitsuka, and A. Yoshikawa, Long-term EEJ Variations by Using the Improved EE-index, *Sun and Geosphere*, Vol. 11, Issue 1, 2016
13. Moiseev, A.V., D. G. Baishev, V. A. Mullayarov, S. N. Samsonov, T. Uozumi, A. Yoshikawa, K. Koga, and H. Matsumoto (2016), The Development of Compression Long-Period Pulsations on the Recovery Phase of the Magnetic Storm on May 23, 2007, *Cosmic Research*, 2016, Vol. 54, No. 1, pp. 31-39.

#### 国内学会・国際学会・招待講演リスト

1. Yoshikawa A., Magnetosphere-Ionosphere Coupling, The SCOSTEP/ISWI International School on Space Science, November 7-17, 2016, Sangli, Maharashtra, India (Invited lecture)
2. 吉川顕正、磁気圏電離圏結合、平成28年度「磁気圏・電離圏シンポジウム」、電離圏・磁気圏探査衛星検討リサーチグループ第1回会合、10/14-15, 2016, 宇宙科学研究所, 神奈川県相模原市、招待講演
3. 吉川顕正、磁気圏電離圏結合ダイナミクスの無撞着な記述：境界条件を超えて、「磁気圏複合系研究会・プラズマシート極域電離圏投影問題研究会」、9/20-21, 2016, 国立極地研究所、東京都立川市、招待講演
4. 吉川顕正、Alfven 波による一般化された 3 次元磁気圏電離圏結合、名大 ISEE/極地研/NICT/京大 RISH 共同主催「中間圏・熱圏・電離圏 (MTI) 研究集会」/(第 321 回生存圏シンポジウム), 8/29-31, 2016, 情報通信研究機構, 東京都小金井市、招待講演
5. Yoshikawa A., (B, V) Paradigm of Magnetosphere-Ionosphere Coupling, URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC 2016), Seoul, Korea, August 24, 2016, (Invited)
6. Yoshikawa A., Magnetosphere-Ionosphere coupling by shear Alfven wave, Impact of Space Weather on Earth COSPAR Capacity Building Workshop August 15 - 26, 2016, Paratunka, Kamchatka, Russia, (invited lecture)

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

## 研究目的

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

## 研究方法

申請者は2010年度より名古屋大学太陽地球環境研究所「地上ネットワーク観測大型共同研究」等の助成を受け、ニュージーランドにMiddlemarch (MDM, 45.6°S, 170.1°E, L=2.78), Te Wharau (TEW, 41.2°S, 175.8°E, L=2.19)の地磁気観測点を構築してきた。TEWは2016年度開始当時観測を停止していたので、本研究で現地での改修・再設置作業を行った。

ニュージーランドの地磁気観測点は、申請者が整備した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。この手法を用いて2013年3月及び2015年3月に発生した2つのSt. Patrick's Day磁気嵐イベントについてプラズマ圏の変動を調査した。解析にはニュージーランドの地磁気データのほか、北米、ヨーロッパの地磁気データ、あけぼの衛星PWS観測データ、Van Allen Probes衛星のEMFISIS観測データ、HOPE観測データ等を合わせて解析し、プラズマ圏プラズマの各イオン種が磁気嵐各相で再配置されていく様子を調査した。またその結果をIPE Modelの計算結果と比較した。

## 研究結果とまとめ

解析の結果、2つのSt. Patrick's Day磁気嵐イベント中のプラズマ圏には、それぞれ特徴的な経度方向の不均一構造があることがわかった。2013年のイベントではニュージーランドとUKの経度帯でプラズマ圏のerosionがみられたが、アメリカ経度帯ではerosionがみられなかった。2015年のイベントではUKとアメリカ経度帯でプラズマ圏のerosionがみられたが、ニュージーランド経度帯ではerosionがみられなかった。

た。太陽風から推定した磁気圏対流電場の時間変動を調べると、ニュージーランド経度帯は対流が発達した時間帯にその影響を受けやすい夜側にあり、erosionが起きないことは考え難い。

そこでerosionの発生と同時に $O^+$ など重イオンが増加したために質量密度が減少しなかったのではないかと考えた。実際、IPEモデルに光電子や環電流による加熱を追加すると、プラズマ圏の $O^+$ が増加し、観測結果を説明できるように思われた。しかしながらあけぼの衛星PWS観測データで見るかぎりニュージーランド経度帯の電子密度は減少しておらず、観測結果を重イオンの増加で説明することは難しいかもしれない。この点については3月に行われたプラズマ圏研究集会でいくつかの指摘を受けており、今後引き続き調査を行う。

## 成果発表

1. N. Maruyama, P.G. Richards, M. Denton, M. G. Henderson, Y. Obana, J. Raeder, M. R. Hairston, M. Fedrizzi, T. J. Fuller-Rowell, T.-W. Fang, M. Codrescu, 'Investigation of the distribution of cold plasmas across geospace during storms using the IPE model (Poster)', American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, 12-16 Dec, 2016, San Francisco, USA.
2. Y. Obana, N. Maruyama, 'Measurement and Modeling of the Plasmasphere during the St. Patrick's Day 2013 and 2015 Storms', 第140回地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会, 2016年11月19日～11月23日, 九州大学伊都キャンパスキャンパス, 福岡.
3. 尾花由紀, 中田真由美, 寺内和也, 'ニュージーランド経度における内部磁気圏プラズマ質量密度の季節変動について (Seasonal variation in equatorial plasma mass density in the New Zealand meridian) (Oral)', 日本地球惑星科学連合2016年大会, 22-26 May 2016, 幕張, 千葉.
4. 尾花由紀, 丸山奈緒美, 熊本篤志, 'プラズマ圏のerosionとrefillingにおける局所構造について', 名古屋大学宇宙地球環境研究所研究集会「プラズマ圏の観測とモデリング」, 2017年3月6日-7日, 大阪電気通信大学駅前キャンパス, 大阪.
5. 丸山奈緒美, 尾花由紀, P. Richards, M. Fedrizzi, T. Fuller-Rowell, A. Coster, M. Denton, M. Henderson, M. Hairston, J. Raeder, 'Plasmasphere Modeling: from the Aspect of Ionosphere-Plasmasphere Coupling', 名古屋大学宇宙地球環境研究所研究集会「プラズマ圏の観測とモデリング」, 2017年3月6日-7日, 大阪電気通信大学駅前キャンパス, 大阪.
6. 丸山奈緒美, 尾花由紀, 'Measurement and Modeling of the Plasmasphere during the St. Patrick's Day 2013 and 2015 Storms', Mini GEM workshop, San Francisco, USA, 11 Dec 2016.

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

寺尾 徹、香川大学・教育学部

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

申請者らのグループはバングラデシュ気象局、インド・アッサム州ガウハチ大学、インド・メガラヤ州North-Eastern Hill Universityの研究者らと共同でバングラデシュに20地点、インド・アッサム州及びメガラヤ州に20地点の転倒ます雨量計を2004年より設置し観測を行ってきた。Terao et al. (2017)は、2004-2013年におけるこれらの雨量計とTRMM 2A25 V7データセットでPRレーダーが上空を通過するタイミングのデータを比較した。その結果、メガラヤ高原の南斜面から山麓地域にわたってTRMMデータによる降水量に大きな過小評価がみられることがわかった。この地域はプレモンスーン季(3-5月)にも多量の降水量が観測されるが、プレモンスーン季の過小評価はモンスーン季に比べて大きくなかった。一方バングラデシュ平野部及びインド・アッサム州のブラマプトラ盆地内の雨量計観測点では過小評価は大きくなかった。

2017年2月21-22日に本研究費を使用して招聘したバングラデシュの研究者2名を含め、バングラデシュ7名(内2名は北大学生)、インド・アッサム州1名、ネパール1名の研究者が参加して名古屋大学で研究集会”International workshop for climate variability and related studies over North East Indian subcontinent”を実施した。インド北東部地域のモンスーンについて研究する現地研究者はまだ非常に少なく、今回の集会によって日本人研究者と現地研究者だけでなく近隣の国の研究者同士が情報交換する良い機会となった。例えば、モンスーン季におけるインド北東部地域とインド主要部の降水変動の逆相関関係については、ネパール気象局はこの関係について把握していることがわかり、バングラデシュ気象局の研究者からも原因に関して質問が出され、情報交換を行うことができた。

#### 参考文献

Terao, T., Murata, F., Kiguchi, M., Fukushima, A., Tanoue, M., Ahmed, S., Choudhury, S. A., Syimelieh, H. J., Cajee, L., Bhagabati, A., Bhattacharya, P., Dutta, S., Mahanta, R., Hayashi, T., "Direct validation of TRMM 2A25 near surface rain over the northeastern Indian subcontinent using a tipping bucket rain gauge network", *SOLA*, submitted.

彩層微細構造のダイナミクスから探る太陽面爆発のメカニズム  
Observation of fine scale dynamics of solar chromosphere to  
explore the solar eruption

一本 潔、京都大学・理学研究科附属天文台

【研究目的】

太陽フレアは大量の高エネルギー粒子を生成するとともに紫外線・X線を急激に増光させ、また、ダークフィラメント（プロミネンス）の噴出はコロナ質量放出（CME）を伴い、いずれも太陽圏環境に急激な変動をもたらす。これら太陽の爆発現象は、太陽面下の対流運動によって励起され、コロナに蓄積された磁気エネルギーが突如解放されて、プラズマの運動エネルギーや熱エネルギーに変換される過程として理解されているが、その発生機構と予測は太陽物理学及び宇宙地球環境予測において未解決な重要課題である。これら大規模な爆発現象は、より小規模な要素的エネルギー解放過程の連鎖、集合によって生じていると考えられ、それは彩層の微細構造のダイナミクスとして観測される。すなわち、フレア時には彩層で多数の輝点（フレアカーネル）が次々と光りだし、プラズマの局所的な激しい運動が励起され、また、ダークフィラメントの不安定化においてもその構造はダイナミックに運動する多数の微細な筋構造の集合体として観測される。そして、大規模な不安定化を誘発するトリガーが彩層における局所的な磁気リコネクションであるとする、それも彩層プラズマの小さなスケールの運動の変化として見いだされることが期待される。すなわち、彩層の微細スケールのプラズマ運動を把握することは、フレアやフィラメント放出のメカニズムを理解し、発生を予測する上で重要なヒントを与えるものと考えられる。

さらに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上空のコロナへエネルギーが伝達されていることは疑いようもないため、彩層の微細ダイナミクスの成因を理解することは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も本質的に重要であろう。

本研究では雲南天文台フーシャン湖観測所が有する世界最高レベルの解像度を誇る太陽望遠鏡と、京都大学が近年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、彩層の速度場構造をかつてない高い分解能、すなわち、0.15秒角（約100km）の空間分解能と2秒程度の時間分解能で観測する。第1の目的は、フレアまたはダークフィラメント噴出における微細な彩層構造の速度場を空間分解して捉え、不安定化のメカニズムを理解することである。また、フレアオンセット時の個々のフレアカーネルにおける彩層プラズマの動的応答を詳細に捉え、彩層へのエネルギー注入過程、およびその要因である高エネルギー粒子の形成、伝播過程に迫ることも重要な目標である。一方、スピキュールなど普遍的に存在する彩層微細構造のプラズマ運動を捉え、それらの形成機構およびコロナへのエネルギー伝達過程の一端を理解することを第2の目的とする。特に個々のスピキュールを分解してその3次元的な速度構造を捉えることにより、それが彩層の磁束管内を上に向かって伝播する衝撃波によって形成されるのか、ジェットの軸周りの回転運動を伴う捻れアルフベン波によって形成されるのか、という現在対立するスピキュールの成因モデルを識別することができると考えている。

なお、本研究の研究課題は、VarSITIで推進される4つのプロジェクトのうち、MiniMax 24/ISEST (International Study of Earth-affecting Solar Transients) と密接に関連し

た研究テーマでもある。

#### 【研究方法】

本研究では京都大学が近年開発した高速彩層速度場撮像装置を雲南天文台撫仙湖太陽観測所が有する口径1 mの真空太陽望遠鏡に設置することで、彩層の速度場構造をかつてない解像度で観測する。高速彩層速度場撮像装置は、液晶遅延素子により約0.1秒の応答時間で透過波長を制御できる狭帯域フィルターを要とし、これに2つの高速カメラを組み合わせることで代表的な彩層ラインであるH $\alpha$ 線(6563Å)の $\pm$ 0.5Åの波長における画像を同時に取得することを可能とするものである。 $\pm$ 0.5Åの画像の差分をとることによりH $\alpha$ 線の波長シフト(プラズマの視線方向速度)を求めることができるが、両画像を完全に同時に取得することで地球の大気揺らぎ(シーイング)による波長シフトの計測誤差を大幅に低減し、2次元的な速度場情報を従来に無い精度と時間分解能で取得することができる。一方撫仙湖太陽観測所はシーイング条件の良いこともあり、口径1 mの望遠鏡による理論的分解能(H $\alpha$ 線で太陽面上約100km)を達成できる機会も多々ある。

本研究課題では、上野、木村、大辻、萩野の4名が狭帯域フィルターを持参して計11日間フーシャン湖太陽観測所に滞在し、雲南天文台のLiu Zhong、Xiaoli Yan 博士らと協力して観測を行なった。

#### 【観測結果】

今回の滞在期間中は、残念ながら概してあまり良い天候には恵まれず、また、フレアやフィラメント噴出現象には遭遇できなかったが、初めてセットアップした観測システムを予定どおり機能させることができ、以下に示す有益なデータが取得できた。

2016-12-14(水)曇時々晴:

- ・ディスクセンター付近のスピキュール(モットル) (但し観測継続時間は約3分間のみ)

2016-12-17(土)晴時々曇:

- ・ディスクセンター付近のダークフィラメント
- ・北西リム上の活動的なプロミネンス

2016-12-19(月)晴時々曇:

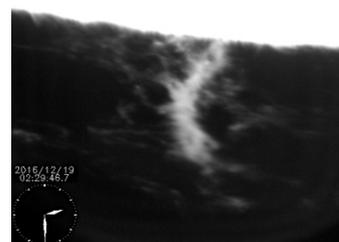
- ・東リム上の活動的なプロミネンス (右図)

2016-12-21(水)晴後曇:

- ・新しい活動領域(S05E15, AR番号無し)の浮上磁束管やコンパクトな発光現象

2016-12-23(金)曇時々晴:

- ・ディスクセンター付近のダークフィラメント



なお、今回の観測では、後に画像回復処理に掛けられるよう、ある時刻において、1秒間に100画像を取得してあり、これを数秒ごとに繰り返した。

#### 【まとめ】

現在、得られたデータに対し、シーイングによる影響を低減するための画像回復処理(スペックルマスキング)を行っており、今後、観測されたターゲットごとに分類して日本と中国の参加研究者が分担し、「研究目的」で述べた事象に着目しながら解析を行い、成果としてまとめる。

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

平原 靖大 名古屋大学・環境学研究所

## 【研究目的】

本研究の目的は、これまでにない高感度・高空間分解能を誇るアタカマミ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。

タイタンの表面での大気圧は地球の約1.5倍、気温は90K~94Kであり、その殆どが $N_2$ (~98%)と $CH_4$ (~2%)で構成され、残りを多種多様な有機分子が占めている。これらの有機分子は大気上層で宇宙線や紫外線による解離と再結合反応によって生成し下層に輸送されていると考えられている。タイタンは地軸が $26.7^\circ$ 傾いていることから公転周期約30年の季節変動が存在し、季節ごとに大気の移動や温度の変化を生じる。

## 【研究方法】

本研究では、タイタンの視直径(~1")とほぼ同等の空間分解能を有するALMAを用いた、過去の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の多数のスペクトルデータセットを詳細に解析し、化学的に不安定な炭素鎖分子 $HC_3N$ (シアノアセチレン)の純回転スペクトル計18種の強度の空間分布と、輻射輸送モデル計算に基づいた高度1000kmまでの鉛直分布、および1年間での時間変動を導出した。

## 【研究結果】

2012年前後に取得されたALMA観測データの解析の結果、タイタンの北極のみに極端に偏在している時期が存在することが確認された(例: 図1)。また、タイタン大気中の温度、密度、および $HC_3N$ の濃度の高度分布をパラメータとした放射伝達計算を行った(図2)。様々な鉛直分布モデルを参考に最尤解を探索した結果、過去に提示されたCordiner et al.(2014)<sup>[1]</sup>やMarten et al. (2002)<sup>[2]</sup>による $HC_3N$ の鉛直分布や、Nakamoto et al.(2016)<sup>[3]</sup>により導出された安定有機分子 $CH_3CN$ (メチルシアニド)の鉛直分布とは異なり、高度70km付近の比較的low高度から $HC_3N$ が非常に豊富に存在しており、高度450km付近(成層圏)で存在度が極大値を示すことが明らかになった。

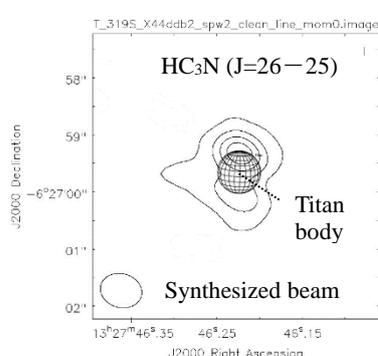


図1 タイタン大気における $HC_3N$   $J=26-25$  の輝線強度分布

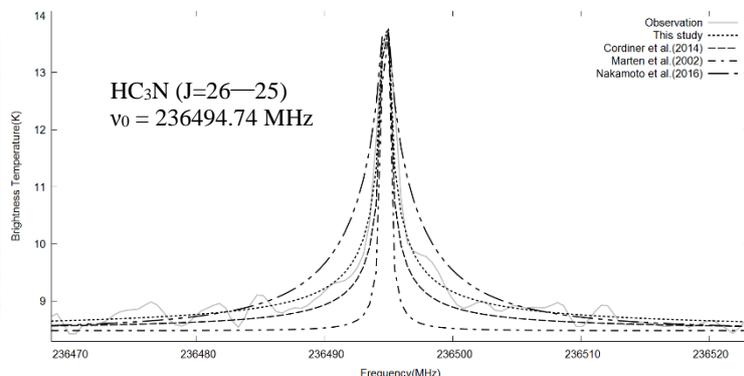


図2 タイタン大気における $HC_3N$   $J=26-25$  のスペクトルと輻射輸送計算結果の比較

### 【考察】

タイタンでは春分点と秋分点を境とする季節変動により、夏側の極から冬側の極への大気循環(pole to pole circulation)が起こる。タイタンでのHC<sub>3</sub>Nの分布が北極と南極に偏在し赤道で少ないことは、その影響によるものと考えられる。一方、本研究での輻射輸送計算により、HC<sub>3</sub>Nは大気上層での大気循環の影響や宇宙線・紫外線の影響を受けにくい大気下層に多く存在することが明らかになった。探査機カッシーニの観測によると、C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> (アセチレン)も両極の下層に偏在していることが報告されている(Vinatier et al. 2015<sup>[4]</sup>)。大気上層から下層へのHC<sub>3</sub>Nの鉛直方向の大気循環輸送以外に、下記の中性ラジカル反応：



によるHC<sub>3</sub>Nの生成が相当の寄与をしていると考えられる。

### 【今後】

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。次年度においてはこれらの開発要素にも取り組み、米欧やアジアの研究グループと協力しつつ、2013年以降のタイタンに対するALMAアーカイブデータの解析を進める。

### 【引用文献】

- [1] Cordiner, M. A., Nixon, C. A., Teanby, N.A, et al. 2014, *Astrophysical Journal Letters*, 795, L30
- [2] Marten, A., Hidayat, T., Biraud, Y., & Moreno, R. 2002, *Icarus*, 158, 532.
- [3] Nakamoto, S. 名古屋大学環境学研究科 2015 年度修士論文
- [4] Vinatier, S., Bézard, B., Nixon, C. A., et al. 2010, *Icarus*, 205, 559

### 【成果論文リスト】

- [1] Iino, T., Ohyama, H., Hirahara, Y., Tsukagoshi, T. & Takahashi, T. ASTE Observation of Jupiter's Stratospheric Carbon Monosulfide (J=7-6) in 19 Years After the Cometary Impact, *The Astronomical Journal*, 152(6), pp. 179-183, 2016
- [2] Iino, T., Yamada, T. & Tanaka Y. Development of the Terahertz Numerical Radiative Transfer Calculation Code for the New ALMA Continuum Observation of Neptune: An Application of New HITRAN CIA Catalog, *Journal of Remote Sensing Society of Japan (In revision)*

### 【学会発表リスト】

- [1] 仲本悟、平原靖大、飯野孝浩、中山勇麻、ALMAアーカイブデータ解析によるTitan大気中のCH<sub>3</sub>CNの鉛直分布、JpGU Meeting, 千葉, 2016/5/22
- [2] 飯野孝浩、平原靖大他、アルマ干渉計を用いた海王星成層圏HCN(J=4-3)観測、JpGU Meeting, 千葉, 2016/5/22
- [3] 飯野孝浩、ALMAとの連携による、ガス惑星大気の高空間分解能・低分散中間赤外分光観測、地上赤外線観測による太陽系内天体の観測戦略ワークショップ、三鷹、2016/9/8
- [3] Iino, T., Nakamoto, S., Tsukagoshi, T., Tanaka, K., Tanaka, Y., Hirahara, Y. ALMA Observation of Neptune's Spatially-resolved Stratospheric HCN ( J = 4-3), AAS-DPS meeting #48 Pasadena, 2016/10/16-21
- [4] 平原靖大、GIGMICSの開発と惑星大気科学への応用、第16回CPS月惑星探査研究会、神戸大学、2016/10/11
- [5] 水野亮、ミリ波・サブミリ波による惑星大気観測、地球型惑星圏環境に関する研究集会、立教大学、2016/12/27

スズ鉱山跡地に生育する植物の環境修復能力の比較  
Comparative evaluation of phytoremediation potential of plants growing in ex-tin mining lands.

Tsun-Thai Chai  
Tunku Abdul Rahman University, Department of Chemical Science

### Study purpose

Ex-tin mining lands are common in Peninsular Malaysia, particularly in the states of Selangor and Perak, owing to the history of Malaysia being the world's premier tin producer in the past decades (Yap, 2007). Ex-mining lands are commonly contaminated by heavy metals. Phytoremediation is an inexpensive pollutant-removing strategy using plants. Wild plants in ex-mining sites are promising candidates as phytoremediators. However, physiological properties and biochemical mechanisms of the heavy metal tolerance of such phytoremediators are not fully understood. In this study, we characterised the phytoremediation potential of *Waltheria indica*, a common wild plant in numerous ex-tin mining sites in Perak. Specific objectives of the study were:

1. To determine heavy metal contents in shoot and root samples of *W. indica* and in soil samples
2. To predict phytoremediation capacity of the plant based on translocation and bioconcentration factors
3. To study physiological and biochemical parameters of *W. indica* in the five locations with different levels of soil heavy metal contents

### Materials & Methods

Plant materials were collected from five study sites during 27-30 September 2016. The sites were located within 11 km from the city centre of Kampar, Perak, Malaysia. GPS coordinates of the five sites are: Site 1 (4°20'23.5"N101°08'08.5"E), Site 2 (4°21'52.7"N101°05'36.5"E), Site 3 (4°17'20.7"N101°08'02.9"E), Site 4 (4°15'04.0"N101°11'35.8"E) and Site 5 (4°20'12.2"N101°08'55.4"E). For heavy metal analysis, soil, shoot and root samples were dry-ashed and analysed by using inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS). The ability of the plant to accumulate heavy metals was estimated by using bioconcentration factor (BCF, ratio of metal concentration in plant roots to soil) and translocation factor (TF, ratio of metal concentration in plant shoots to roots), as described in Yoon et al. (2006). Gas exchange parameters were measured using a portable photosynthesis system (LCpro-SD). Chlorophyll contents were measured according to Barnes et al. (1992). Peroxidase activities were measured according to Maehly and Chance (1954). Catalase activity and lipid peroxidation assays were performed as in Dhindsa et al. (1981).

### Results

BCF for various metal elements varied with plant locations (Table 1). BCF for the tested metals at all sites, except As (Site 3), Pb (Site 5) and U (Sites 4 and 5), showed values of more than 1. *W. indica* growing at Site 2 had the highest capacity to accumulate Mn in root tissues (BCF= 412.80), followed by Sr (BCF= 271.27).

**Table 1: Phytoremediation capacity of the model plant species based on bioconcentration factor (BCF) of 10 selected heavy metals. Data are mean ± standard errors (n=3).**

Site	Li	Mn	Co	Ni	Ga	As	Sr	Cd	Pb	U
1	42.73±3.65	102.55±17.69	30.27±11.32	33.29± 7.17	215.88±159.28	7.52± 2.99	190.14±19.53	84.36±10.24	7.88± 6.74	7.46± 3.97
2	66.25±1.22	412.80±106.10	23.09± 1.79	54.43±13.92	21.75± 7.84	31.74±8.68	271.27±25.57	60.70± 6.68	23.35± 8.65	5.15± 1.60
3	4.55± 0.14	4.42± 0.51	2.13± 0.27	13.82± 0.94	10.95± 1.48	0.55± 0.09	39.23± 3.05	138.16±3.62	6.29± 0.54	9.64± 1.46
4	10.59±0.90	6.93± 0.46	1.16± 0.17	8.14± 1.12	2.55± 0.16	1.24± 0.31	7.69± 0.37	129.21±30.67	5.11± 1.38	0.53± 0.09
5	2.12± 0.23	5.28± 2.30	4.18± 0.20	29.32± 6.07	2.63± 0.57	1.36± 0.09	36.64± 5.25	54.58± 18.38	0.84±0.10	0.28± 0.07

TF values ranged between 0 and 6 (Table 2). Overall, 54% of TF values were less than 1. For Site 3, TF for all metals, except for Uranium, exceeded 1. *W. indica* from Site 5 was the most efficient in accumulating Cd in its shoots (TF= 5.05). *W. indica* from Site 3 which exhibited good translocation capacity for Mn (TF= 4.18) and Li (TF= 4.09).

**Table 2: Phytoremediation capacity of the model plant species based on translocation factor (TF) of 10 selected heavy metals. Data are mean ± standard errors (n=3).**

Site	Li	Mn	Co	Ni	Ga	As	Sr	Cd	Pb	U
1	1.48 ± 0.39	1.61 ± 0.07	0.56 ± 0.01	1.92 ± 0.01	0.80 ± 0.003	0.52 ± 0.03	0.93 ± 0.04	0.69 ± 0.07	0.17 ± 0.01	0.08 ± 0.02
2	0.78 ± 0.10	1.71 ± 0.06	0.85 ± 0.04	1.47 ± 0.04	0.65 ± 0.01	0.77 ± 0.05	0.96 ± 0.03	0.46 ± 0.03	0.22 ± 0.02	0.32 ± 0.03
3	4.09 ± 0.01	4.18 ± 0.83	2.08 ± 0.12	2.17 ± 0.07	1.74 ± 0.09	3.90 ± 0.41	1.43 ± 0.25	2.48 ± 0.20	1.09 ± 0.15	0.72 ± 0.14
4	0.43 ± 0.06	1.62 ± 0.15	0.64 ± 0.01	1.42 ± 0.05	0.92 ± 0.05	0.45 ± 0.01	1.45 ± 0.02	0.95 ± 0.09	0.49 ± 0.07	0.31 ± 0.03
5	0.89 ± 0.06	3.75 ± 0.22	0.58 ± 0.04	0.37 ± 0.05	2.19 ± 0.42	1.60 ± 0.005	1.21 ± 0.01	5.05 ± 0.31	1.17 ± 0.25	0.44 ± 0.08

Volumetric water content of the soils was very low because of sandy soil. The soil was dry especially in Sites 2 and 3. Maximum photosynthetic rate at light saturation was high in Site 1, but low in Site 2 and 3. Among the physiological

parameters investigated, there were no significant differences among the specific leaf area in samples collected from all five sites (Table 3). Total chlorophyll contents in Sites 2 and 4 were both higher compared with Sites 1, 3 and 5. No differences were found for the ratios of chlorophyll a: chlorophyll b across the five sites.

**Table 3: Soil moisture content, photosynthetic rates, specific leaf area and chlorophyll contents. Data are mean  $\pm$  standard errors (n>5).**

Site	Volumetric Water Content of the soil (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	Maximum Photosynthetic Rate ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	Specific Leaf Area (cm <sup>2</sup> /g DW)	Total chlorophyll content (mg/g FW)	Ratio of chl a: chl b
1	0.063 $\pm$ 0.033 <sup>a</sup>	21.0 $\pm$ 2.6 <sup>a</sup>	126.25 $\pm$ 2.27 <sup>a</sup>	1.15 $\pm$ 0.13 <sup>a</sup>	5.56 $\pm$ 0.50 <sup>a</sup>
2	0.044 $\pm$ 0.022 <sup>ab</sup>	12.1 $\pm$ 6.4 <sup>b</sup>	94.14 $\pm$ 6.97 <sup>a</sup>	2.31 $\pm$ 0.35 <sup>b</sup>	5.48 $\pm$ 0.55 <sup>a</sup>
3	0.024 $\pm$ 0.015 <sup>b</sup>	11.1 $\pm$ 7.3 <sup>b</sup>	122.13 $\pm$ 16.89 <sup>a</sup>	1.16 $\pm$ 0.16 <sup>a</sup>	5.05 $\pm$ 0.39 <sup>a</sup>
4	0.077 $\pm$ 0.037 <sup>a</sup>	16.7 $\pm$ 2.5 <sup>ab</sup>	117.17 $\pm$ 4.05 <sup>a</sup>	2.00 $\pm$ 0.13 <sup>b</sup>	6.46 $\pm$ 0.36 <sup>a</sup>
5	0.060 $\pm$ 0.028 <sup>a</sup>	16.6 $\pm$ 6.3 <sup>ab</sup>	119.45 $\pm$ 9.17 <sup>a</sup>	1.40 $\pm$ 0.13 <sup>a</sup>	6.37 $\pm$ 0.58 <sup>a</sup>

Different superscript letters in the same column denote values with statistically significant differences (P < 0.05) according to the Fisher's LSD test.

There were no significant differences among the catalase activities in leaf samples collected from Sites 1, 3, 4, and 5 (Table 4). For Site 2, catalase activity in leaf samples was at least 5.5-fold lower than that of other sites. Peroxidase activity varied broadly across the five sites. Peroxidase activity of samples from Site 2 was the lowest among all sites, although not significantly different from that in Sites 4 and 5. Peroxidase activity of samples from Site 3 was the highest among all sites. The lowest levels of lipid peroxidation were detected in samples from Sites 1 and 2, whereas the highest level in Site 5.

**Table 4: Catalase and peroxidase activities and level of lipid peroxidation (calculated as TBARS content) in leaf samples. Data are mean  $\pm$  standard errors (n=3).**

Site	Catalase specific activity ( $\mu\text{mol H}_2\text{O}_2$ decomposed / min / mg protein)	Peroxidase specific activity (nmol tetraguaiacol produced / min / mg protein)	Thiobarbituric acid-reactive substances (nmol TBARS/g FW)
1	55.55 $\pm$ 11.07 <sup>a</sup>	92.24 $\pm$ 36.17 <sup>a,c</sup>	59.93 $\pm$ 12.43 <sup>a</sup>
2	8.91 $\pm$ 3.52 <sup>b</sup>	10.35 $\pm$ 1.75 <sup>b</sup>	64.95 $\pm$ 13.06 <sup>a</sup>
3	49.66 $\pm$ 7.27 <sup>a</sup>	130.14 $\pm$ 28.49 <sup>a</sup>	112.35 $\pm$ 13.76 <sup>b</sup>
4	65.52 $\pm$ 5.55 <sup>a</sup>	27.51 $\pm$ 2.09 <sup>b,c</sup>	128.56 $\pm$ 2.42 <sup>b</sup>
5	71.46 $\pm$ 17.02 <sup>a</sup>	43.20 $\pm$ 8.63 <sup>b,c</sup>	179.40 $\pm$ 9.76 <sup>c</sup>

Different superscript letters in the same column denote values with statistically significant differences (P < 0.05) according to the Fisher's LSD test.

## Discussions

*W. indica* growing in different ex-tin mining sites showed different phytoremediation capacities for various metal elements. Overall, BCF data indicate that the species of *W. indica* is suitable for phytoextraction. Phytoextraction is a plant-based approach for the removal of contaminants from soils and concentrates them into harvestable tissues. BCF data also indicate that *W. indica* is suitable for remediation of Mn and Sr-contaminated soils. Most metals were highly accumulated in *W. indica* roots and remained there, while some metals were further translocated to the shoots. The immobilisation of contaminants through absorption by roots is known as phytostabilisation. TF data indicates that *W. indica* at Site 3 was more efficient in translocating heavy metals compared with the same species in other sites. This correlated with the highest peroxidase activity in Site 3, suggesting that this enzyme may have protective value in the plant tolerance against potential heavy metal stress. However, the overall low TF values for Site 1 in comparison to Site 5 do not correlate with peroxidase activities in the two sites. Thus, peroxidase activity does not appear to be a reliable indicator of the plant's ability to phytoremediate metal-contaminated soils. Similarly, catalase activity and lipid peroxidation levels did not correlate with phytoremediation capacity of the plants in the five sites.

## Conclusion

*W. indica* is potentially useful for the phytoextraction and phytostabilisation of heavy metal-contaminated soils. Physiological and biochemical parameters investigated did not correlate with phytoremediation potential of the species in the five ex-tin mining sites. Thus these parameters are not good predictors of phytoremediation potential. A more comprehensive characterisation of the physiological and biochemical characteristics may be more useful in future.

## References

- Barnes, J.D., Balaguer, L., Manrique, E., Elvira, S., & Davison, A.W. (1992) A reappraisal of the use of DMSO for the extraction and determination of chlorophylls a and b in lichens and higher plants. *Environmental and Experimental Botany*, 32: 85-100
- Dhindsa, R.S., Plumb-Dhindsa, P., & Thorpe, T.A. (1981) Leaf senescence: Correlated with increased levels of membrane permeability and lipid peroxidation, and decreased levels of superoxide dismutase and catalase. *Journal of Experimental Botany*, 32: 93-101
- Maehly, A.C. & Chance, B. (1954) The assay of catalases and peroxidases. *Methods of Biochemical Analysis*, 1: 357-424
- Yap, K.M. (2007) Tin mining in Malaysia: Is there any revival?. *Jurutera*, 12-18
- Yoon, J., Cao, X., Zhou, Q., & Ma, L. Q. (2006). Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. *Science of the Total Environment*, 368(2), 456-464

脈動オーロラによる中間圏ナトリウム密度減少の観測  
Observation of mesospheric sodium density depletion  
due to pulsating aurora

高橋透、国立極地研究所・研究教育系宙空圏研究グループ

太陽風のエネルギーは、オーロラ電子の降下やオーロラ電流系の強化などの形で極域の地球大気に注入される。太陽風エネルギーの入力に対する地球大気の物理的・化学的応答の把握は、太陽から地球大気へ供給されるエネルギーの散逸を理解する上で欠かすことができない。これまでの研究では、ディスクリートオーロラ内部の温度上昇や、オーロラアーク近傍における中性風速の急峻な変動が報告されてきた(Kurihara et al., 2006; Kosch et al., 2010)。これらの現象は、主として、オーロラ電流によるジュール加熱や、磁気圏電場の印加に伴うイオンドラッグなどの物理的プロセスによって駆動されていると考えられているが、それらの物理過程のみでは、現象のすべてを説明できないことが分かっている。これは、中性大気の応答に対する化学的応答の貢献を定量的に評価せず、その寄与が未解明な点に本質的に起因する。

## 研究目的

中間圏のナトリウム密度は、大気波動やその散逸により生成される乱流によって常に変動を受けている。これらの寄与と区別するためには、地球大気へのエネルギー入力が準周期的に行われる事例について、数秒スケールの高速観測により化学的応答の時間特性を調べていくことが望ましい。本研究でターゲットとする脈動オーロラは、磁気圏での波動粒子相互作用によって電子が数秒から数十秒の周期で電離圏に降下することで、準周期的な明滅を示す現象である。脈動オーロラを作り出す電子のエネルギーは高く(最高 200 keV, Miyoshi et al., 2015)、100 km 以下の高度を効率的に電離する。本研究では、数十秒周期で明滅する脈動オーロラに対する中間圏大気の化学的応答、特に応答が内包する早い時間変動を、光、電波、レーザーによるリモートセンシングと理論的考察を組み合わせ、定量的に解明することを目的とする。

## 研究方法

本研究はノルウェー・トロムソの EISCAT トロムソ観測所において、EISCAT レーダー、ナトリウムライダー、流星レーダー、全天カメラのキャンペーン観測を実施した。トロムソ UHF レーダーを用いて、電離圏 E 領域の電子密度の導出を行なった。これらの観測には脈動オーロラの数秒の周期の明滅に伴った電子密度、Na 密度の変動を捉える為に、1 秒以下の時間分解能での観測を実施した。ナトリウムライダーは現行の 5 秒分解能からサブミリ (0.2 秒) 秒での観測が可能になるように観測ソフトウェアの開発を行い、ナトリウムライダーの観測系に組み込んだ。

## 研究結果

2016年10月28日から2016年11月7日までと、2017年1月24日から2017年2月6日までの2回、合計25日間にわたってノルウェー・トロムソ観測所に滞在し、EISCATレーダー、ナトリウムライダーの観測に従事した。これらの期間内にEISCATレーダーを25時間運用した。天候不良やナトリウムライダーのレーザー送信系の不調により、長時間の同時観測を成立させるには至らなかったが、2017年2月1日、2日の晩の合計6時間において、ナトリウムライダーとの同時観測が成立した。この同時観測データに関して現在、解析を行っている。

同時に、高速観測用のナトリウムライダーの観測ソフトウェアの開発を行った。このソフトウェアを用いて、2017年2月前半には最速0.2秒分解能でのNa密度の導出を行うことに成功した。中性大気温度と同時に導出されたNa密度の時間分解能としては、世界最速であり今後の解析によって、数秒のスケールでオーロラによって変動する中性大気が内包する化学反応過程のより詳細なメカニズムに関する新たな知見が得られることが期待できる。

## まとめ

本研究では、ナトリウムライダーとEISCATレーダーを使って1秒以下の分解能でNa密度、電子温度を導出し、脈動オーロラに伴うNaの化学的応答を理解することを目的として研究を遂行した。今年度EISCAT観測所には24日間滞在し、EISCATレーダーを25時間運用した。天候不良や観測機器の不調等があったものの、2晩合計9時間において、EISCATレーダーとナトリウムライダーの同時観測が成立した。この同時観測ではナトリウムライダーは1秒時間分解能でNa密度を導出することができる観測モードであった。

また、ナトリウムライダーの高速観測化も行った。現段階では0.2秒分解能での観測に成功しており、今後脈動オーロラに追従するNa密度変動の研究をより詳細に行うことを可能にしている。本結果は、データ解析を行い、来年度のEISCAT国際シンポジウム等の学会、研究集会で報告し、議論を深め、投稿論文としてまとめる予定である。

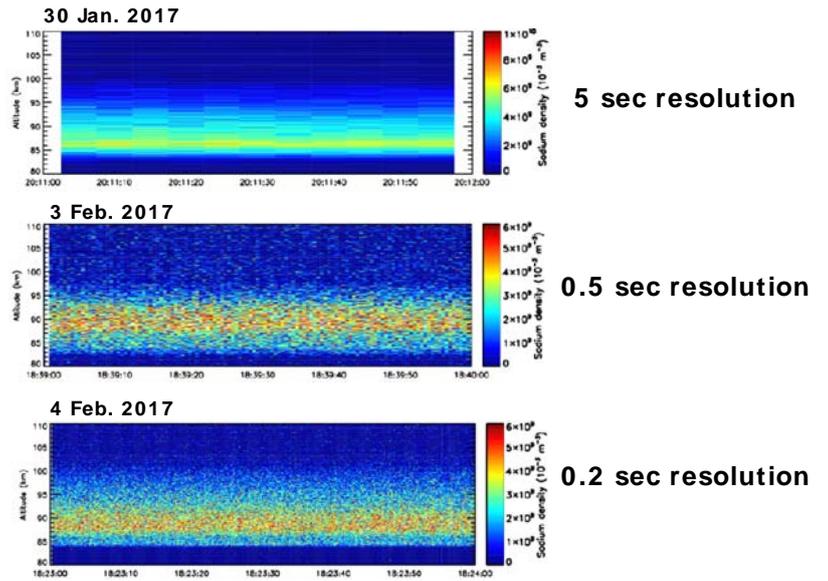


図1. ナトリウムライダーで観測されたNa密度。上段がこれまでの時間分解能でのNa密度、中段、下段が本研究で開発した観測ソフトによって実現した高速観測によって得られたNa密度(0.5、0.2秒分解能)。

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

八代誠司、米カトリック大学・物理学科

【研究目的】

太陽フレアはコロナ質量放出(Coronal Mass Ejection; CME)を伴う噴出型(eruptive)と、伴わない非噴出型(confined)の2種類に分類できる。太陽フレアとCMEは磁気リコネクションで発生する一連のエネルギー解放現象の異なる側面と理解されているが全てのフレアに必ずCMEが存在するのではなく、最大級であるXクラスフレアでも約10%はCMEを伴わない。そして高エネルギープロトン現象や磁気嵐などの主要な宇宙天気現象を引き起こす直接の原因がCMEであることから、フレア発生時のCME付随条件を解明することやCMEの有無によるフレアの特徴を明らかにすることは宇宙天気研究にとって非常に重要である。フレアとCMEの関係について統計的に比較することで両者の関係を明らかにするとともに、宇宙天気予報の精度向上へ貢献する。

【研究方法】

研究の基盤となる噴出型・非噴出型フレアリストを作成した。1996年-2015年発生したすべてのMクラス、Xクラスフレアについて、SOHO衛星やSTEREO衛星を用いてCMEの有無を調べた。フレアとCMEの紐付けは発生タイミングを合わせるだけでは不十分で、フィラメント噴出やDimmingなどの太陽表面に現れるCMEに付随する現象を確認する必要がある。SDO衛星、STEREO衛星、「ひので」衛星で取得されるEUV像やX線像だけでなく地上観測されるH $\alpha$ 線像を用いて噴出現象を調べた。コロナグラフ観測がある2014例のフレアについて丁寧に調べ、869例のフレアは確実にCMEを伴い、860例にはCMEが確実に無いことを確認した。残りの285例のフレアは、太陽表面の噴出現象が曖昧などの理由でCMEの有無を決定できなかった。

【研究成果】

噴出型・非噴出型フレアリストのうち、野辺山電波ヘリオグラフで観測されたフレアについて調べ、電波強度が強くなるとともにフレアにCMEが付随する割合が増加することを発見した。成果はSolar Physics with Radio Observations, Nagoya, Sept. 9-10, 2016にて発表した。作成されたフレアリストをICCONウェブサイト(<https://hinode.isee.nagoya-u.ac.jp/ICCON/>)にて公開した。

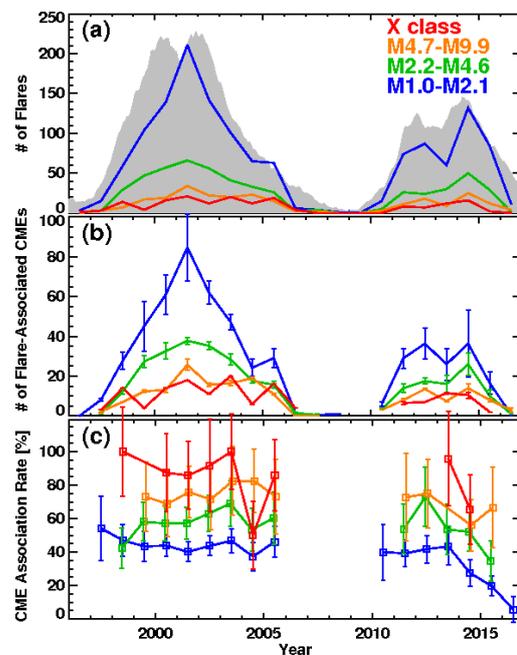


図1 太陽フレアの年間発生数(a), CMEが付随するフレアの年間発生数(b), およびCME付随率(c)の年変化。

次にフレアのCME付随割合が太陽活動に対して変化するか否かを調べた。フレア強度による違いを調べるために、Lower-M(M1.0-M2.1), Middle-M(M2.2-M4.6), Higher-M(M4.7-M9.9) と X の4クラスに分類し、その年間の発生数を図1a に示す。太陽周期変化との比較のために、太陽黒点数を灰色の影で表示してある。2000年ごろの左の山が第23太陽活動周期、右の山が第24太陽活動周期である。次にCMEが付随したフレアの年間の発生数を図1b に示す。ここで、CMEの有無がはっきりと確認できなかったイベントは誤差として扱い、その半数がCME有りとして仮定した。そして、CMEが付随するフレア数を全フレア数で割ることで、CME付随率を求めた(図1c)。フレア強度が強くなるにつれて(青から赤になるにつれて) CME付随率は40%から90%へと上昇することがわかる。太陽活動周期23から24の前半までは、各フレアレベルではほぼ同じ値で推移していたが、2014年から急激に減少したことを発見した。第24 太陽周期は北半球が2012年に、南半球は2014年に活動のピークがあった。黒点数、フレア数は2014年の方が多かったが、CME数は2012年の方が多かった。

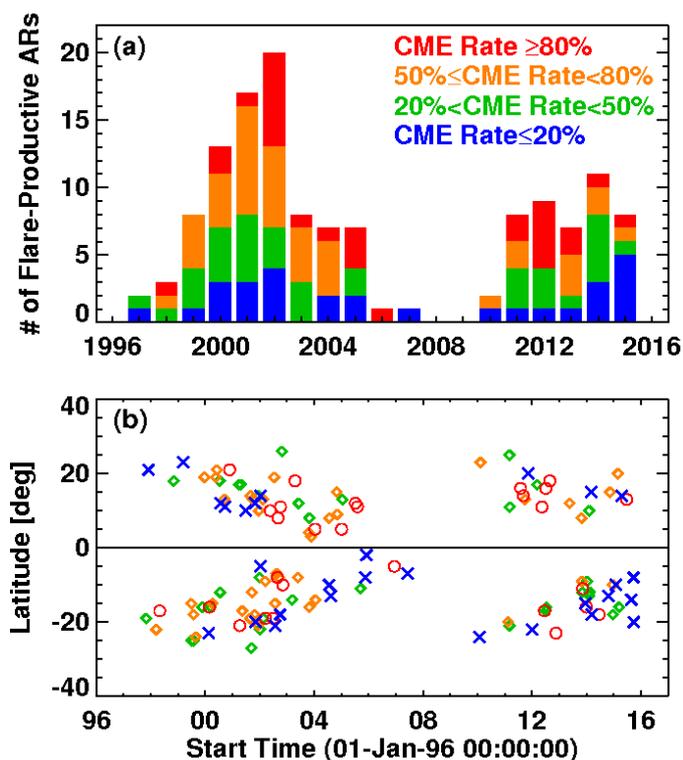


図2 CME付随率でわけたフレアプロダクティブな活動領域の数(a)と緯度(b)の太陽周期変化。

なぜCME付随率が減少したのかを調査した。少なくとも5個以上のM,Xフレアが発生したフレアプロダクティブな活動領域を選び出し、活動領域ごとにフレアのCME付随率を求めた。図2a にフレアプロダクティブな活動領域の数の年変化を示す。CME付随率で色分けしてある。第24太陽周期の南半球に出現した活動領域の約半数が、フレア活動は高くてもCMEを発生しない CME-Poorな活動領域であったことを発見した(図2b)。CME-Poor活動領域としてNOAA AR 12192が有名であるが、似たような活動領域が第24太陽周期の南半球に多数出現したことを発見した。

【成果発表】

Yashiro, S., Gopalswamy, N., Akiyama, S., Makela, P. and Masuda, S., CME association rate of solar flares in cycles 23 and 24, AGU Fall Meeting, San Francisco, December 2016  
 Yashiro, S., Gopalswamy, N., Akiyama, S., Makela, P. and Masuda, S., CMEs in solar cycle 24 and their space weather consequence, The 2nd PSTEP International Symposium, Kyoto, March 2017

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

坂野井健、東北大学・大学院理学研究科

< 研究目的 >

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

< 研究方法 >

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

以上の課題について、平成28年度は広視野紫外撮像を可能とする光学系検討と、海外で紫外オーロラ・大気光撮像の実績のある2グループを訪問し最新の情報収集を行う。地球紫外オーロラ・大気光の撮像に関して、米国カリフォルニア大バークレー校のHarald Frey氏はIMAGE衛星やICON衛星の紫外撮像を担当している実績があり、またれいめい衛星データ解析でも協力関係がある。また、火星オーロラについては、米国コロラド大・大気宇宙物理研究所（LASP）Nick Schneider氏はMAVEN探査機紫外分光器IUVSを担当した実績があり、火星CO<sub>2</sub>+紫外オーロラで成果を挙げており、MAVENの最新成果と装置設計両面から共同研究は不可欠である。

< 研究結果とまとめ >

平成28年度は、まず紫外オーロラ観測装置の検討を進めた。この結果、観測対象は酸素原子（OI）135.6nmまたは窒素分子LBHが適当と判断された。また、光学系は分光器と単色イメージャーのそれぞれ長所短所を比較し、本計画では小型軽量となる単色イメージャーのほうが適当であると判断された。また、ジオコロナ（Ly-alpha 121nm）を除去のためにBaF<sub>2</sub>やCaF<sub>2</sub>フィルターを用いる案が検討された。また、紫外光学系については、狭視野光学系と広視野光学系の2通りがいずれもアプラナートによる反射系で設計された。狭視野光学系は3枚鏡系で、視野 $2 \times 2^\circ$ 、Fno=6.0、焦点距離f=380mm、広視野光学系は7枚鏡系で視野 $40 \times 48^\circ$ 、Fno=2.4、焦点距離f=5.28mmで、いずれも検出器前面で十分に収差の小さな像がえられることを解析により確認した。

また、コロラド大LASPならびにカリフォルニア大バークレー校SSLには、3月14-19日にかけて連続して訪問した。コロラド大LASPではNick Schneider准教授、Sonal Jain研究員らと、最新のMAVENの火星紫外オーロラや大気光観測成果や、我々の火星オービターからの紫外撮像観測計画について情報交換がなされた。カリフォルニア大バークレー校SSLでは、Harad Frey研究員ならびにChris Chaston研究員と、欧米のオ

オーロラ・磁気圏観測衛星の最近の動向や我々の地球オーロラ・大気光観測計画について情報交換がなされた。とくに、オーロラ紫外撮像ならびに可視撮像いずれも検出器に放射線被曝をさけるためにCMOSがよいことが示唆された。また、ミラーの反射率は0.9を越えるものが入手可能であり、今年度設計した7枚反射系でも十分実現可能であると判断された。

#### < 成果発表 >

- ・ 査読付き論文
- 1 Sakanoi, T., M. Kagitani, H. Nakagawa, T. Obara, Y. Kasaba, S. Okano, J. R. Kuhn, S. V. Berdyugina, I. F. Scholl and M. Yoneda (2017), Optical and IR observations of planetary and exoplanetary atmospheres, SPIE Newsroom, DOI: 10.1117/2.1201612.006817.
- 2 Nakagawa, H., S. Aoki, H. Sagawa, Y. Kasaba, I. Murata, G. Sonnabend, M. Sornig, S. Okano, J. Kuhn, J. M. Ritter, M. Kagitani, T. Sakanoi, M. Taguchi, K. Takami(2016), IR heterodyne spectrometer MILAHI for continuous monitoring observatory of Martian and Venusian atmospheres at Mt. Haleakal, Hawaii, Planet. Space Sci., DOI information: 10.1016/j.pss.2016.04.002.
- 3 Nishiyama, T., Miyoshi, Y., Katoh, Y., Sakanoi, T., Kataoka, R., Okano, S. (2016), Substructures with luminosity modulation and horizontal oscillation in pulsating patch: Principal component analysis application to pulsating aurora, J. Geophys. Res. A121 (3), pp. 2360-2373, DOI: 10.1002/2015JA022288.
- ・ 国際学会発表
- 1 Iwata, T., T. Sakanoi, H. Nakagawa, J-P. Bibring, V. Hamm, C. Pilorget, T. Nakamura, S. Aoki, S. Crites (ISAS/JAXA), and Y. Kasaba, Near-Infrared Hyperspectral Imager NIRS4/Macromega on MMX, Intern. Session of Symposium on Planetary Science 2017, Tohoku Univ., Sendai, Feb. 20-22, 2017.
- 2 Sakanoi, T., et al., Near-field imaging and SNR estimation, MMX mission remote sensing science meeting, Tohoku Univ., Sendai, 28-29 Nov., 2016. Sakanoi, T., T. Iwata, T. Nakamura, T. Kasaba, M. Taguchi, H. Nakagawa, M. Kagitani, A. Yamazaki, S. Aoki, T. M. Sato, Development of Near- and Mid-Infrared Imaging Spectrometers for the Martian Moon's Sample Return Project and Future Planetary Missions, 13th Annual Meeting AOGS, Beijing, 31 Jul to 5 Aug, 2016.
- 3 Sakanoi, T., T. Iwata, T. Nakamura, Y. Kasaba, M. Taguchi, H. Nakagawa, M. Kagitani, A. Yamazaki, S. Aoki, T. M. Sato, Development of near- and mid-infrared imaging spectrometers for the Martian moon's sample return mission and next generation space projects, Intern. session of JPGU 2016, Makuhari Messe, May 22-26, 2016.
- ・ 国内学会等
- 1 坂野井健他, 夜側オーロラ領域のサイエンス, 平成28年度磁気圏・電離圏シンポジウム, 宇宙科学研究所, 10月14-15日, 2016.
- 2 坂野井健, 他, MMX搭載検討のAOTF素子を用いた近赤外ハイパースペクトルイメージャー, 第16回CPS月惑星探査研究会「太陽系探査を目指した, 観測装置に関するワークショップ」, 10月11-12日, 2016.
- 3 平原 聖文, 齋藤 義文, 大山 伸一郎, 浅村 和史, 横田 勝一郎, 坂野井 健, 小嶋 浩嗣, 宇宙地球結合系探査に向けた編隊飛行衛星計画とプラズマ・中性粒子分析器開発, 及び開発環境整備, 日本地球惑星科学連合2016年大会, 幕張, May 22-26, 2016.

東南アジアにおけるELF帯電磁波観測を用いた、大規模雷の電氣的、  
時空間特性に関する研究  
Spatio-temporal characteristics and electrical properties of  
intensive lightning over Southeast Asia using ELF  
observations

芳原容英，電気通信大学・Ⅱ類（融合系）電子情報学プログラム

【研究目的】

落雷からの電磁放射のうちELF帯放射は、その波長の巨大さゆえ、大地と電離層の間の3次元的な球殻状コンデンサー中の電磁波動の伝搬となる。また、VLF/LF帯観測から導出される落雷ピーク電流とは独立した、落雷電荷モーメントの遠隔導出が可能である。本研究では、マレーシア国内の共同研究者とともに、マレー半島に新規ELF観測点を構築することにより、既存の国内に設置したISEE観測所敷地内の観測点と合わせて、東南アジア域におけるELF帯観測ネットワークを構築する。この新規ELF観測ネットワークと申請者のホスト観測点の1つであるWWLLN等の既存の落雷標定ネットワーク観測から雷落雷電荷モーメントやVLFエネルギーの詳細な時空間分布を導出し、その季節変化や背後にある気象特性を調査し、大きな電荷モーメントを有する落雷発生機構の解明や、中間圏発光現象発生領域の調査を行う。また低緯度域での、雷嵐に伴う大気波動や、電磁界による大気と上層プラズマとの結合過程について、上記落雷電荷モーメント、VLFエネルギー時空間分布とVLF帯送信電波受信による電離層擾乱観測や、レーダー、光学観測との併用により調査する。さらに、マレーシア国内での詳細な落雷電荷量の空間分布を導出し、雷災害ハザードマップを作成することで、同国において近年大きな問題となっている、大電荷量を伴う落雷の電力設備等への雷災害の軽減に貢献する。

【研究方法】

1. マレー半島でのELF帯磁場観測システムの展開に向けた電磁環境調査とテスト観測

本研究代表者が日本国内に展開中のELF帯電磁場観測（周波数帯 1 Hz ~ 1 kHz）からの知見を最大限利用のうえ、マレー半島において設置候補地を複数選定し、電磁環境調査およびテスト観測を実施する。なお、観測点の選定、設置および、観測データの転送と蓄積は、マレーシアの国際共同研究パートナーとの協働にて実施する。

2. 国内ELF観測点の整備

ISEE北海道母子里観測所敷地内で実施させていただいているELF観測に関して、ISEE北海道陸別観測所への移設にむけ、電磁環境調査調査と、機材の設置を実施する。

【研究結果と考察】

1. マレー半島におけるELF帯電磁環境調査とELF磁場波形テスト観測

マレー半島でのELF帯観測点候補として以下の2地点を候補地として選定し、現地にて電磁環境調査及びテスト観測を実施した。

(a) UPM（プトラジャヤ大学キャンパス内）

H28年8月29日～9月4日にかけて、クアラルンプール近郊の都市であるプトラジャヤ

ヤにあるプトラジャヤ大学において、Prof. Gomesの協力のもと、雷観測施設敷地内にELF観測装置(磁場センサー含む)を展開し、数日間にわたる連続観測を実施した。その結果、50 Hz以上の周波数において多くの時間的に変動する電磁干渉が見られた。そこでデジタルフィルタ処理により、50 Hz以下の周波数成分を抽出したところ、落雷に伴うELFトランジェント波形が受信できることが分かった。

#### (b) UTM (マレーシア工科大学) ジョホールバルキャンパス

H29年3月19日～3月23日にかけて、マレーシア南端のジョホールバルにあるマレーシア工科大学のProf. Abdul-Malekを訪問し、キャンパス内の丘にある観測所にてELF観測装置、磁場センサーを展開し、数日間にわたる連続観測を実施した。その結果、電力線放射及び高調波による電磁干渉が強いものの、これらの放射周波数が安定しているため、デジタルフィルタで除去したところ、インダクションコイルセンサーのアップercutオフ周波数である1 kHzまで、落雷に伴うELFトランジェント波形が多数受信できることが確認された。

## 2. 国内ELF観測点の整備

H28年8月25日～27日にかけて、ISEE北海道陸別観測点の森の中にELF磁場観測システムの仮設置(コイルは地上)および連続テスト観測を開始した。ELFトランジェントの観測結果が良好であったので、同年10月26日～28日にて本設置を実施し無事終了した。現在、データの取得中であり、上記のマレーシアの観測結果との照合を実施予定である。

### 【まとめと今後の展開】

3年計画の初年度であるH28年度には、研究方法に記述されたように、マレーシア国内2地点において落雷に伴うELF帯電磁放射の連続観測のための電磁環境調査およびテスト観測を実施した。その結果、UTM(マレーシア工科大学)ジョホールバルキャンパスおよび、UPM(プトラジャヤ大学キャンパス内)の両地点において落雷に伴うELF帯トランジェントの受信が確認された。なお、受信環境はUTMの方が卓越しており、周波数1 kHzまでの広帯域で観測が可能であるが、UPMにおいては、電磁干渉のため40 Hz以下の周波数での観測のみが可能であることが確認された。今後の展開として、まずテスト観測中に受信されたトランジェントの落雷源の位置同定および電荷モーメントの導出が喫緊の課題である。これには日本の観測点のデータも用いる。また、今回のマレーシアの観測候補2点のうち電磁環境のより良好なUTMを第一候補として、現在現地の共同研究者から提案されている北部および東部の別の候補地も検討した上で、最終決定し、連続観測を開始する。

北海道ISEE母子里観測所敷地内にて実施中の、ELF帯トランジェント電磁場観測設備の移設に向け、ISEE陸別観測所にてELF周波数帯における電磁環境調査、数か月にわたるテスト観測を経て、新たにELF帯磁場観測設備の本設置を実施し、無事連続観測を開始することができた。

### 【研究成果発表】

Y. Hobara, J. Yamashita, T. Narita, H. Mitsuzuka, "Electrical properties of lightning over northern part of Japan by using ELF and LLP observations", European Geosciences Union General Assembly 2016 Vienna, Austria, 17-22 April, 2016.

Y. Hobara, "A study on global temperature and thunderstorm activity by using the data of Schumann resonance observed in Japan", The Atmospheric Global Electric Circuit (GEC), Mitzpe Ramon, Israel, 5-10 February 2017.

### 【謝辞】

今回の国際共同研究プロジェクトのおかげで、国内観測点の移設及び、マレーシアにおける新たな観測点の設置にむけ大きな前進がみられました。ISEEおよびマレーシアの共同研究者の方々、ISEE陸別観測点の関係者の皆さまにこの場を借りて厚くお礼申し上げます。