

## 2025年度 04) 一般共同研究 目次詳細

63 件

\*所属・職名は2026年3月現在

\*Affiliation and Department displayed are current as of March 2026.

研究代表者 Principal Investigator	所属機関* Affiliation	所属部局* Department	職名* Job title	研究課題名 Project Title	頁 Page	備考 Remarks
松原 豊	中部大学	ミュオン理工学研究 センター	客員准教授	太陽中性子を用いた太陽高エネルギー粒子 加速機構の研究	107	
湯口 貴史	熊本大学	大学院先端科学研究 部(理学系)	教授	若い年代を有する花崗岩質マグマの貫入・定 置プロセス: 石英の内部構造と微量含有元素 の理解を通じたアプローチ	108	
鳥海 森	宇宙航空研究開発 機構	宇宙科学研究所	准教授	太陽黒点形成シミュレーションの新たな展開: 先進的データ解析手法の活用による太陽磁場 構造の理解	111	
徳丸 宗利	名古屋大学		名誉教授	太陽風速度をよりよく決定するコロナ磁場パラ メータの探索	112	
岸田 拓士	日本大学	生物資源科学部	教授	先史時代の気候変動と動物相の変遷との関係 性の解明	114	
坂下 卓也	気象衛星センター	データ処理部解析課	解析課長	ひまわり8号/9号雲プロダクトの高度化	115	
小島 正宜	名古屋大学		名誉教授	IPS スペクトルを用いた太陽風速度推定方法 の開発	117	
勝田 長貴	岐阜大学	教育学部	教授	湖沼堆積物の元素分析による最終氷期以降 の東モンスーン及び偏西風域の古環境復元	119	
横田 勝一郎	大阪大学大学院	理学研究科	准教授	あらせ搭載MEP-i質量分析データからの窒素 イオン抽出手法の開発	121	
梅田 隆行	北海道大学	情報基盤センター	教授	ポストエクサ時代に向けた革新的プラズマシ ミュレーション技術の開発	123	
佐藤 正樹	東京大学	大気海洋研究所	教授	衛星シミュレータを利用したglobal storm- resolving modelの比較実験	125	
能勢 正仁	名古屋市立大学	データサイエンス研究 科	教授	LAMP2科学ロケット搭載用磁気インピーダンス センサー-磁力計(MIM)の開発	127	

研究代表者 Principal Investigator	所属機関* Affiliation	所属部局* Department	職名* Job title	研究課題名 Project Title	頁 Page	備考 Remarks
浅村 和史	宇宙航空研究開発機構	宇宙科学研究所	准教授	電離圏イオン流出機構の解明を目指した超熱的イオン質量分析器の開発	128	
堤 雅基	国立極地研究所	宙空圏研究グループ	教授	北極域中間圏界面領域の風速・温度・乱流の精密観測	130	
田中 万也	国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構	原子力科学研究所先端基礎研究センター	研究主幹	層状マンガ酸化物を用いた重水素分離に向けた基礎研究	132	
村田 功	東北大学	大学院環境科学研究科	准教授	フーリエ変換型分光計を用いた地上分光観測による同位体比変動の観測	134	
中島 英彰	国立環境研究所	地球システム領域	特命研究員	フーリエ変換赤外分光器を用いた地上分光観測によるHFC-134aの解析	136	
村木 綏	名古屋大学宇宙地球環境研究所	宇宙線研究部	名誉教授	太陽活動最盛期の太陽中性子の研究	138	
河野 光彦	関西学院大学	理学部	研究員	高校生とともに行う都市大気中CO <sub>2</sub> 濃度の継続測定方法の開発	140	
渡邊 堯	情報通信研究機構	ナレッジハブ	特別研究員	ELF-MF帯電波・超低周波音波・光学の総合観測による、流星・宇宙機再突入に伴う電波放射現象の解明	142	
飯田 佑輔	新潟大学	教育研究院 自然科学系 情報電子工学系列	准教授	機械学習を用いた太陽表面輻射輸送の計算効率化手法の開発	144	
中野 佑樹	富山大学	学術研究部 理学系	助教	太陽ニュートリノを用いた太陽g-mode振動探索	145	
下条 圭美	自然科学研究機構	国立天文台 アルマプロジェクト	准教授	豊川・野辺山強度偏波計の観測データベースによる恒星磁気活動の研究	147	
小島 浩司	中部大学	天文台	フェロー	宇宙線で探る内部太陽圏IMF磁場擾乱の空間構造	148	
栗田 怜	京都大学	生存圏研究所	准教授	高感度・高速オーロラ撮像データ解析によるフリッカリングオーロラの特性的統計解析	150	
宗像 一起	信州大学	理学部	特任教授	宇宙線観測データの解析による宇宙天気研究	151	
鈴木 臣	愛知大学	地域政策学部	教授	低コスト557.7-nm大気光カメラの開発と性能評価	153	

研究代表者 Principal Investigator	所属機関* Affiliation	所属部局* Department	職名* Job title	研究課題名 Project Title	頁 Page	備考 Remarks
佐藤 興平	静岡大学	防災総合センター	客員教授	Sr・Nd同位体分析と <sup>14</sup> C年代測定から探る浅間山の山体崩壊	154	
河野 英昭	九州大学	国際宇宙惑星環境研究センター	准教授	SI が中緯度 SuperDARN sea/ground backscatters と FLRs に及ぼす影響	156	
渡邊 恭子	防衛大学校	地球海洋学科	教授	横須賀太陽電波強度偏波計で行う宇宙天気研究	158	
森澤 征一郎	沖縄工業高等専門学校	機械システム工学科	准教授	台風付近を飛行する飛行機の位置情報を用いた気象情報の抽出	160	
保田 浩志	広島大学	原爆放射線医科学研究所	教授	東南極地域における宇宙線中性子観測とその解釈	162	
松田 昇也	金沢大学	理工研究域	准教授	あらせ衛星観測に基づく電磁イオンサイクロロン波動のモデリング	163	
近藤 文義	海上保安大学校	基礎教育講座	教授	熱・気体・粒子の渦相関法による海面フラックスの高精度観測の試み	164	
宮本 祐介	福井工業大学	工学部電気電子情報工学科	教授	次世代マルチビームシステム Phased Array Feedの基礎開発	166	
筒井 壽博	弓削商船高等専門学校	電子機械工学科	嘱託教授	浮体水路の内部流れに対する風が及ぼす影響に関する調査	168	
加藤 雄人	東北大学	大学院理学研究科地球物理学専攻	教授	グローバル・素過程モデル連成計算と科学衛星観測による地球内部磁気圏での波動粒子相互作用の研究	170	
苅谷 愛彦	専修大学	文学部	教授	大起伏山地における大規模斜面崩壊の発達過程解明に向けた高精度年代測定	172	
土屋 史紀	東北大学	大学院理学研究科	教授	低周波超長基線電波干渉計観測における電離圏の影響評価	173	
奥野 充	大阪公立大学	大学院理学研究科	教授	<sup>14</sup> Cウイグルマッチング法による十和田八戸噴火の精密年代決定	175	
三澤 浩昭	東北大学	大学院理学研究科	准教授	高分解電波スペクトルと太陽大気画像解析に基づく太陽高エネルギー粒子生成起源の究明	177	
広瀬 正史	名城大学	理工学部	准教授	熱帯低気圧の中心付近における降水空間情報の評価	178	

研究代表者 Principal Investigator	所属機関* Affiliation	所属部局* Department	職名* Job title	研究課題名 Project Title	頁 Page	備考 Remarks
豊嶋 紘一	立正大学	データサイエンス学部	助教	衛星データを用いた巻雲分布特性の解明と降水への影響評価	179	
谷水 雅治	関西学院大学	生命環境学部	教授	海藻資料を用いた北海道周辺海域14C量の分布と変遷の把握	180	
天野 孝伸	東京大学	理学系研究科	教授	外部駆動系におけるプラズマ不安定性の非線形発展	181	
石川 遼太郎	自然科学研究機構 核融合科学研究所	研究部	助教	黒点半暗部における小スケールダイナミクスと構造形成	182	
野澤 恵	茨城大学	理工学研究科理学野	教授	衛星軌道データ(TLE)の解析によるCMEを含む宇宙天気現象の解明	184	
馬場 賢治	酪農学園大学	酪農学研究科/農食環境学群	教授	降水粒子判別を基にした筋状対流雲による擾乱プロセスの解明と人体への影響に関する研究	185	
眞部 広紀	佐世保工業高等専門学校	基幹教育科	准教授	UAV・UGVをプラットフォームとして活用する進入困難な環境のエアロゾル・マルチガス計測手法	187	
西川 泰弘	大阪教育大学	理数情報教育系・環境安全科学部門	特任講師	長期観測を見据えた分離機構搭載投下型観測装置(ペネトレータ)の開発	189	
西村 竜一	国立研究開発法人 情報通信研究機構	ネットワーク研究所 レジリエントICT研究センター	研究マネージャー	映像IoTとインフラサウンドによる火山活動の自律観測	191	
寺本 万里子	九州工業大学	大学院工学研究院	准教授	あらせ衛星とSuperDARNレーダーを用いた地磁気脈動の観測研究	193	
佐藤 文衛	東京科学大学	理学院	教授	視線速度法による第二の地球検出における恒星表面磁気乱対流の影響	195	
中西 利典	ふじのくに地球環境史ミュージアム	学芸課	教授	沖積層に含まれる砕屑物を用いた高精度堆積年代決定	197	
今田 晋亮	東京大学	理学系研究科	教授	磁気リコネクションにおける粒子加速現象の多様性の起源	200	
中村 正吾	名古屋大学	宇宙地球環境研究所	客員准教授	希ガスシンチレータの研究	201	
五味 高志	名古屋大学	生命農学研究科	教授	積雪が卓越している山地上流域における水貯留および流出プロセス解明: 流出観測および安定同位体比分析	203	

研究代表者 Principal Investigator	所属機関* Affiliation	所属部局* Department	職名* Job title	研究課題名 Project Title	頁 Page	備考 Remarks
赤田 尚史	弘前大学	被ばく医療総合研究所	教授	トリチウム計測のためのバックグラウンド水の評価	205	
木口 雅司	東京大学	大学院工学系研究科	上席研究員	インド亜大陸東北部におけるプレモンスーン期のシビアストーム形成機構の解明	206	
関 華奈子	東京大学	大学院理学系研究科	教授	実証的グローバルモデリングに基づく固有磁場強度と領域間結合が内部磁気圏ダイナミクスに与える影響の研究	208	
松岡 彩子	京都大学	理学研究科	教授	あらせ磁場長期データの精度評価と特性改善の検討	210	
吉村 令慧	京都大学	理学研究科	教授	桜島を対象とした地下比抵抗構造推定のための電磁場観測	211	
額 佑衣	名古屋大学	大学院環境学研究科	准教授	EPMAを用いた石英エクロジヤイトのざくろ石組成累帯構造の分析	212	

(別紙様式04-2)

太陽中性子を用いた太陽高エネルギー粒子加速機構の研究

Study on the acceleration mechanism of solar energetic particles using solar neutrons

松原豊、中部大学・ミュオン理工学研究センター

本研究は、太陽表面で加速された高エネルギーイオンと太陽大気との相互作用で生成される中性子を地上で観測することによって、太陽高エネルギー粒子の加速機構を解明しようというものである。中性子は電荷を持っていないので、惑星間磁場によって散乱されることなく到来するため、加速されたイオン（主として陽子）を観測するよりも、加速機構についての直接的な情報が得られると考えられる。宇宙地球環境研究所を中心とするグループの長年の太陽中性子観測により、太陽表面でのイオン加速は統計加速と考えてよいことがわかってきた。しかし、イオンと電子の加速時間が同じであるかどうか、という点についてははっきりとした結論が得られておらず、太陽中性子測を継続する必要がある。

現在、太陽中性子の観測は、ボリビアのチャカルタヤ山 (5,250m) とメキシコのシェラネグラ山 (4,580m) に設置された検出器によって継続されており、現地研究者によって保守されている。もともと太陽中性子観測は太陽地球環境研究所（宇宙地球環境研究所の母体研究所の一つ）によって設置された世界7か所の観測点で観測され、観測データは宇宙地球観測研究所の計算機サーバーに保存されてきた。2023年3月をもって本研究代表者が退職するにあたり、太陽中性子データを宇宙地球環境研究所のサーバーにコピーする人間がいなくなったのをきっかけに本共同利用研究は始まった。太陽中性子データを保存する計算機サーバーは、共同研究者である毛受弘彰が管理しており、2023年度と2024年度は研究代表者である松原が随時名大に訪れ観測所のデータのコピーを行った。2025年度になると、中部大のご厚意で、中部大に太陽中性子用のデータスペースが用意された。また、毛受の協力により、中部大学から宇宙地球環境研究所のサーバーにアクセスすることが可能となり、中部大学にしながら、太陽中性子観測データの宇宙地球環境研究所へのコピーと、中部大学へのコピーを同時に行うことが可能となった。

大規模な太陽フレアが発生した際には、それに伴う太陽中性子検出のための解析を行っているが、解析が追いついていない。本研究メンバーでない研究者によるデータ解析も行われている。2025年度に特筆すべきことは、太陽中性子観測では狙っていなかった、地上での荷電宇宙線増加の観測（Ground Level Enhancement, GLE）が太陽中性子検出器によって検出されたこと、また、Forbush減少とよばれる現象もまた、太陽中性子検出器で検出されたこと、である。GLEは荷電宇宙線の加速そのものを見ているため、惑星間空間磁場の影響を受けやすい。一方、太陽中性子を観測しやすい場所は、宇宙線の入りやすい極地域とは逆に高エネルギーの太陽宇宙線しか入ってこないことがわかっている。従って、メキシコやボリビアでGLEが検出されるとは全く予想していなく、新鮮な驚きがあった。Forbush減少は太陽風による惑星間磁場の変動で、銀河宇宙線の入射が減少する現象であるが、これも低いエネルギーの宇宙線によくみられる現象で、やはりメキシコやボリビアで観測されるとは予想していなかった。GLEとForbush減少は新鮮な発見であり、太陽中性子検出器で今後狙うべき、新たな対象が加わった、と言うことができる。

研究成果論文

Newton-Bosch, J., L. X. Gonzalez, Y. Matsubara, et al., Atmospheric pressure and temperature effect on solar neutron telescope at Sierra Negra, *Advances in Space Research*, 75, 6543-6552, 2025.

学会発表

乗鞍岳における宇宙線複合観測の現況と準備研究、神谷晏那、小井辰巳、松原豊他、日本物理学会第80回年次大会、広島大学、9月17日

研究会発表

太陽中性子を用いた太陽高エネルギー粒子加速機構の研究、松原豊、名古屋大学ISEE研究集会「太陽圏宇宙線関連の共同研究成果報告会」、2026年3月2日、名古屋大学宇宙地球環境研究所

若い年代を有する花崗岩質マグマの貫入・定置プロセス：  
石英の内部構造と微量含有元素の理解を通じたアプローチ

Intrusion and emplacement processes of young granitic magma:  
Internal structures and minor components within quartz in the pluton.

湯口 貴史	熊本大学大学院先端科学研究部
小北 康弘	山形大学大学院 理工学研究科
永松 万理子	熊本大学理学部理学科
加藤 丈典	名古屋大学 宇宙地球環境研究所

## 1. 研究目的

珪長質深成岩体には石英が普遍的に観察されるものの、石英の主成分元素の化学的な均質性、そして鉱物組織の多様性の乏しさから、珪長質深成岩に含まれる他の鉱物（例えば、斜長石や角閃石）と比較すると、その研究事例は少ない。しかし、石英はマグマの貫入・定置に関する情報を、カソードルミネッセンス (CL) 像に基づく内部構造や微量含有元素として保存する (Drivenes et al., 2016)。そこで、石英の内部構造と微量含有元素（特にチタン濃度）の定量分析に関する一般共同研究が、2016 年度から 2024 年度の間、名古屋大学（加藤丈典准教授）と申請者との間で実施された。

具体的には、2016 年度から 2018 年度の共同研究によって EPMA 分析に基づき石英中のチタン濃度を高精度で定量する分析手法を構築した。また、2019 年度から 2024 年度の共同研究は適用する岩体を広げるとともに、石英のチタン濃度だけでなく、アルミニウム濃度の定量分析を実施し、分析手法の高度化を図った。特に、2022 年度から 2023 年度は石英の真のコアを定量分析するため、石英粒子の段階的な研磨・観察を行い、三次元的な内部構造を取得し、結晶化温度との関連について解明した。2024 年度は北上山地の遠野複合深成岩体と九州肥後変成帯に産する白石野花崗閃緑岩を対象とし、アダカイト質岩の石英の結晶化プロセスを議論した。これらまでの共同研究を通じて、石英の内部構造と微量含有元素に関連する論文 3 報 (Yuguchi et al. 2020; 2024; 2026) が国際誌 *Journal of Asian Earth Sciences* および *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences* に公表されている。

2025 年度の共同研究はこれまでの共同研究で構築した分析手法を踏まえ、日本列島の中で比較的若い年代を有する花崗質岩（丹沢山地に位置する丹沢トータル岩体）の石英を対象とした。丹沢トータル岩体では、伊豆・小笠原弧が本州弧に衝突した後の 500 万年前から 400 万年前のマグマ活動によって形成されたことが報告されており (Tani et al., 2010)、ならびに中部地殻 (middle crust) へマグマが定置したことが報告されている (Suzuki et al., 2014)。このように、丹沢トータル岩体は、島弧が会合するフォッサマグナのような地殻変動の活発な地域でのマグマの貫入・定置、そして深成岩体の冷却を解明する上で最適な研究対象となる。特に、2025 年度は石英の結晶化温度を高精度で決定した。丹沢トータル岩体では、既報においてルチルの産出が報告される (佐藤・高木, 2010)。ルチルの産出は  $\text{TiO}_2$  活動度を 1 と決定でき、より確かな石英の結晶化温度の導出を可能とする。本研究では、石英の CL 像から得られる内部構造と微量含有元素 (Ti と Al 濃度)、そして Ti 濃度から導出される結晶化温度を解明した。これらの石英の結晶成長プロセスの理解はマグマ溜りの熱史の高精度評価に貢献するデータとなる。

## 2. 試料と研究方法（使用した共同利用装置・施設）

石英の CL 像収集は、山形大学の SEM-CL 装置 (JEOL IT100A+Gatan mini CL) を用い、石英中の Ti 濃度定量は名古屋大学 ISEE の EPMA (JCXA-733) を用いた。EPMA を用いた Ti 濃度定量の分析条件は、4 つの分光結晶 (PET) を Ti の検出に割り当て、もう 1 つの分光結晶 (TAP) を Al の検出に割り当てた。加速電圧 15 kV、照射電流 60 nA、ビーム径 20  $\mu\text{m}$ 、1 回の測定時間を 200 s (ピーク : 100 s, バックグラウンド : 50 s) とし、

同一地点で8回(計1600s)カウントした値を積算することにより1点の定量値を得る。その結果として、 $2\sigma$ の誤差が約10%の高精度な定量分析を実施した。Ti濃度とAl濃度の検出限界はそれぞれ14 ppmおよび39 ppmである。このような高精度な分析は、石英結晶の内部構造に応じたTi濃度とAl濃度の変動傾向を高精度に評価できる。また、石英へのダメージの評価は、EPMA分析終了後に偏光顕微鏡あるいはSEMにて破壊程度の評価を行った。破壊が生じた分析データに関しては、議論に採用しない。サンプルは丹沢トータル岩体を構成するトータル岩相と石英閃緑岩相からそれぞれ4試料を用いた。

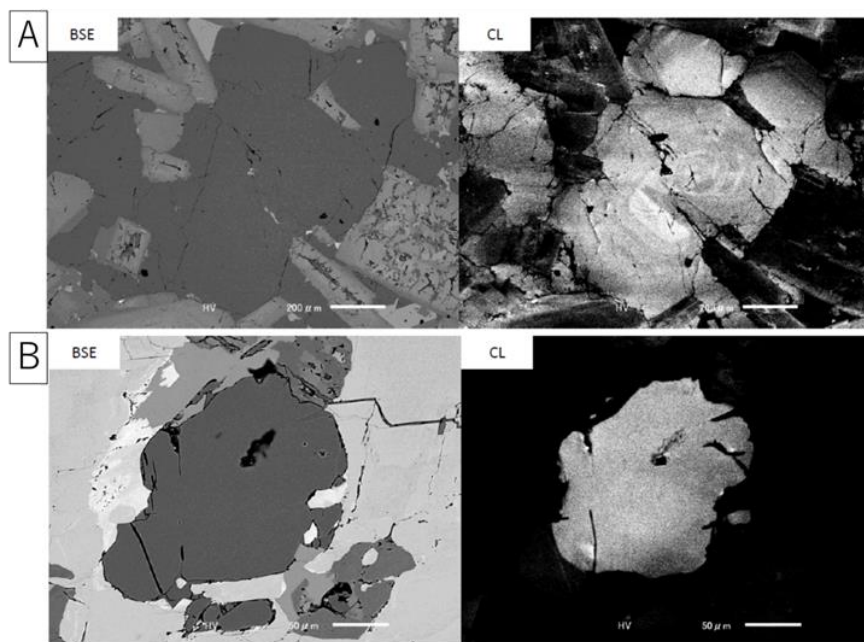


図1 丹沢トータル岩の石英のカソードルミネッセンス像

### 3. 研究結果・考察

石英の内部構造を取得するために、石英の形状(自形・半自形・他形)および他鉱物に包有される石英ごとにCL像の収集を行った。CLパターンとしては、コアからリムに向けて高輝度域と低輝度域を繰り返すオシラトリゾーニング(OZ)(図1A)、コアからリムに向けて輝度が次第に変化するグラジュアルゾーニング(GZ)(図1B)、CLパターンに変化がない均質パターンの3種類が確認された。これらの区分の中で、丹沢トータル岩においてはOZパターンを有する石英が最も優位に分布することを把握した(CL観察を行った46粒子中、36粒子)。これは石英の形状や包有関係によらず、共通の特徴であった。深成岩における石英のOZの形成はメルト(マグマ)中の元素拡散に支配される(Yuguchi et al. 2020; 2024)。OZが優位に発達することは石英の結晶成長が、元素拡散の速度が速い比較的高温で生じたことを示唆する。

丹沢トータル岩の石英に含まれる微量含有元素(TiとAl濃度)に関して定量分析を行った結果、大多数の分析点においてTiとAl濃度の両方で、検出限界以上の値を得た。また、6粒子を対象としたラインプロファイルの結果、CL像の輝度分布はTi濃度に依存しており、Ti濃度が高いほどCL輝度は高い傾向が見られた(図2)。

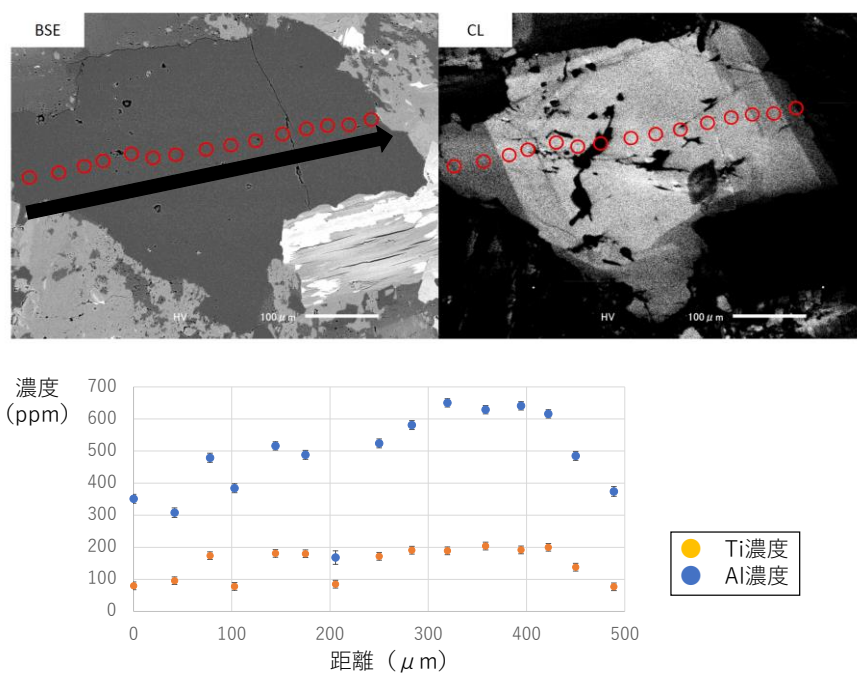


図2 丹沢トータル岩の石英中のTi・AL濃度のラインプロファイル

OZのTi・Al濃度は、GZや均質パターンのもものと比較して、その分布幅が広く、かつ高濃度を有する特徴を示す。このことは、CLパターンが結晶化温度の影響を受けて形成されていることを示唆する。図3はTi濃度とAl濃度の関係を岩相ごとに示した図である。石英閃緑岩相よりもトータル岩中の石英において両元素の濃度がともに分布領域が広く、濃度が高い傾向が見られた。得られたTi濃度は、Wark and Watson (2006)のTitaniQ温度計を用いて結晶化温度を導出した。ルチルの産出に基づき、TiO<sub>2</sub>活動度は1と仮定できる。その結果、トータル岩相の石英の結晶化温度は730 ±29 °Cから991 ±21 °Cの温度幅を有する。一方、石英閃緑岩相の石英は754 ±26 °Cから946 ±21 °Cである。最低温度に相違はないものの、最高温度に関しては、トータル岩相の石英が石英閃緑岩相のものよりも高温である。つまり、石英の結晶化開始温度はトータル岩相の石英が高いことを示唆する。このように両岩相の石英の結晶化開始温度が900 °Cを超え、ソリダスに近い温度条件まで石英が成長を続けることは、マグマが中部地殻(middle crust)へ定置し、冷却速度が緩やかであることを示唆する。

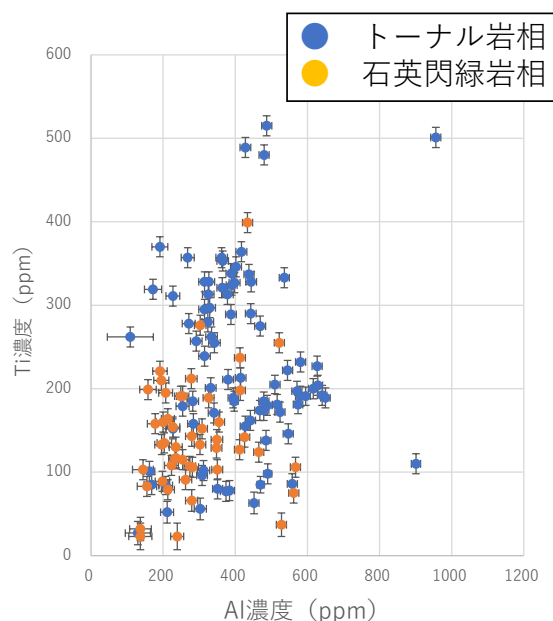


図3 丹沢トータル岩の石英中のTi濃度とAl濃度の関係

#### 4. 引用文献

- Drivenes, K., Larsen, R., Muller, A., Sorensen, B. 2016. Crystallization and uplift path of late Variscan granites evidenced by quartz chemistry and fluid inclusions: Example from the Land's End granites, SW England. *Lithos*, 252-253, 37-75.
- 佐藤隆恒, 高木秀雄, 2010. 丹沢トータル岩体における石英中のマイクロクラックから推定された古応力場の変遷と伊豆弧の衝突. *地質学雑誌*, 116, 309-320.
- Suzuki, K., Yamamoto, S., Sawaki, Y., Aoki, K., Omori, S., Kond, Y., Hirata, T., Li, Y., Takaya, Y., Fujinaga K., Kato, Y., Maruyama, S., 2014. Zircon U-Pb dating from the mafic enclaves in the Tanzawa Tonalitic Pluton, Japan: Implications for arc history and formation age of the lower-crust. *Lithos* 196-197, 301-320.
- Tani, K., Dunkley, D.J., Kimura, J., Wysoczanski, R.J., Yamada, K. and 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.
- Wark, D., Watson, E. 2006. TitaniQ: a titanium-in-quartz geothermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152, 743-754.
- Yuguchi, T., Ogita, Y., Kato, T., Yokota, R., Nishiyama, T., 2020. Crystallization processes of quartz in a granitic magma: Cathodoluminescence zonation pattern controlled by temperature and titanium diffusivity. *Journal of Asian Earth Sciences*, 192, 104289.
- Yuguchi, T., Ogita, Y., Yamazaki, H., Kato, A., Sasao, E., Kato, T., 2026. Growth processes of quartz crystals in granitic plutons, implying magma chamber processes: Case study of Kuki granite and Kurobegawa granite, Japan Arc. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 121, 250729
- Yuguchi, T., Kato, T., Ogita, Y., Watanabe, M., Yamazaki, H., Kato, A., Itoh, D., Yokoyama, T., Sakata, S., and Ohno, T., 2024. Crystallization processes of quartz in a granitic magma: Implications for the magma chamber processes of Okueyama granite, Kyushu, Japan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 265, 106091.

(別紙様式04-2)

太陽黒点形成シミュレーションの新たな展開：先進的データ解析手法の活用による太陽磁場構造の理解

New developments in sunspot formation simulations: understanding solar magnetic structures by using advanced data analysis methods

鳥海 森、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所

本研究は、太陽黒点形成過程および太陽磁場構造の理解を深めることを目的として、受入教員の名古屋大学ISEE堀田英之教授と共に、大規模輻射磁気流体シミュレーションと高度なデータ解析手法を融合させるものである。特に近年、太陽内部の熱対流と磁束管の相互作用が黒点形成や磁気ヘリシティ注入に重要な役割を果たすことが示されており (Toriumi and Hotta 2019; Toriumi, Hotta, and Kusano 2023, 2024)、こうした知見をさらに発展させるための研究基盤整備を進める計画である。

2025年度は、使用予定であった国立天文台天文シミュレーションプロジェクト (CfCA) のスーパーコンピュータが次世代版へ更新される時期に重なり、環境移行への対応作業に時間を要した。このため、当初予定していた黒点形成の大規模数値シミュレーションは実行できなかったものの、次年度以降の研究遂行に向けた重要な準備期間となった。

研究費については、今後取り扱う大容量シミュレーションデータを確実に保存・整理するためのストレージ (SSD) 購入に充てた。これにより、複数ケースのシミュレーション結果を安全に保管し、解析パイプラインと連携させるための環境が整備された。特に黒点形成シミュレーションは大規模のデータを生むため、計算結果を損失なく保持できる体制の構築は、研究の質を支える基盤として重要である。

また、2026年度からは名古屋大学ISEEの飯島陽久准教授との共同研究を新たに開始する予定である。飯島氏が開発するシミュレーションコードは、太陽表面の熱対流によるダイナミクスを高精度に扱うことができ、これを基盤として、熱対流が上空における太陽風加速やエネルギー輸送に及ぼす影響を詳細に調べる共同研究を計画している。

以上のように、2025年度は大規模な成果こそ得られなかったものの、計算環境更新への対応、ストレージ拡充、新たな共同研究体制の構築など、今後の研究を着実に前進させるための基盤整備を十分に進めることができた。ISEE「一般共同研究」に採択いただいた本年度の活動は、2026年度以降の研究成果創出に向けて確実に活かされるものであり、研究計画の長期的な発展にとって有意義な期間であったと言える。

#### 【関連する成果発表】

S. Toriumi, “Flare-productive active regions: key observational features and how numerical models explain them”, Udaipur Solar Observatory Golden Jubilee International Conference on Exploring the Sun at High-resolution: Present Perspectives & Future Horizons, インド・ウダイプル, 2026年2月13日 (招待講演)

S. Toriumi, “The current status of R2D2 flux emergence simulations and how MUSE and IRIS can constrain them”, Joint MUSE/IRIS Science Team Meeting, 米国カリフォルニア州マウンテンビュー, 2025年10月28日 (招待講演)

S. Toriumi, “Realistic flux emergence simulations from the deep convection zone using the R2D2 code”, COFFIES Virtual Workshop: Connections Between the Deep Interior and Atmosphere, オンライン, 2025年9月26日 (招待講演)

S. Toriumi, H. Hotta, K. Kusano, “Flux Emergence Simulations in a Deep Domain: How Magnetic Twist Affects Active Region Formation”, Hinode 18 - IRIS 16 Meeting, 英国ロンドン, 2025年6月23日

太陽風速度をよりよく決定するコロナ磁場パラメータの探索  
Search for a better coronal magnetic field parameter  
to determine the solar wind speed

徳丸宗利、名古屋大学・名誉教授

## 1. 研究目的

太陽風がどこでどの様に加速されるかは十分解明されていない。その太陽風加速機構の謎を解明する上で手掛かりとなるのが、コロナ磁場の大規模な特性と太陽風速度の密接な関係である。例えば、コロナ磁場の拡大率  $f$  は太陽風速度  $V$  と逆相関関係にあることが知られており (Wang&Sheeley,1990)、地球に到来する太陽風を予測する太陽風シミュレーションでは  $f$  と  $V$  を関連付けた経験的モデル (WS モデル, e.g., Arge et al., 2004) が使われている。この WS モデルは、極小期における高速風と低速風の大規模な構造は概ね説明できるが、他の期間を含めて詳細にみると太陽風速度の分布を再現できていないことがわかる (Riley et al., 2015)。特に WS モデルの再現性が悪いのが pseudostreamer (PS) 上空にある低速な太陽風である。即ち、PS では磁力線拡大率が小さいにも係わらず低速風の流源となっており、 $f$  と  $V$  の逆相関関係が成立していない。本研究では、 $f$  とは別の PS のコロナ磁場構造を特徴付けるパラメータを用い、それらと太陽風速度の関係を調査する。これにより太陽風速度をよりよく説明する新たなコロナ磁場パラメータの発見を目指す。より正確に太陽風速度を決定するコロナ磁場パラメータが見つければ、宇宙天気予報の精度改善につながる他、太陽風加速機構を解明する手がかりが得られる。

## 2. 研究方法

本研究では、PS のコロナ磁場の特徴を表すパラメータ  $S$  および開いた磁力線に対する  $f$  の最大値  $f_{max}$  に注目して、 $V$  との関係进行调查する。 $S$  は隣接する磁力線に対する光球面の足元の距離を表す指標であり、PS や Helmet Streamer (HS) では大きな値をとる。一方、 $f$  は HS では大きい、PS では小さくなる。HS、PS とともに低速風に対応しているので、パラメータ  $S$  を使えば低速風の流源をより正確に同定することが期待できる。また、 $f_{max}$  は通常 Source surface における  $f$  に一致するが、PS では Source surface よりも低高度で  $f$  が最大値  $f_{max}$  とり、上空では減少する傾向がある。磁力線の拡大が Source Surface より低い高度で生じると、濃密なプラズマ中でアルベン波の散逸が起こり低速な太陽風が生成されると考えられる。本研究は  $S$  および  $f_{max}$  を太陽磁場データのポテンシャル (PF) 磁場解析から計算し、ISEE の IPS 観測で得られた太陽風速度  $V$  と比較した。このような  $S$  や  $f_{max}$  と  $V$  を比較した研究は本研究が初めてである。太陽磁場のポテンシャル磁場解析は藤木助教が担当し、その解析結果を使った  $S$  と  $f_{max}$  の計算や、 $V$  との比較は申請者が実施した。太陽磁場データは ADAPT モデルで補正したものを利用し、 $V$  データは計算機トモグラフィ解析結果 (ISEE web-site より入手) を用いた。解析期間は 2024 年度一般共同研究 (Tokumeau et al., 2024a) で対象とした 6 つの Carrington Rotation (CR1913, 1963, 2005, 2021, 2061, 2083) である。これにより、前年度に得られたコロナホール境界からの距離 (DCHB, Riley et al., 2001) と  $V$  の相関、 $f$  と  $V$  の相関などと比較ができる。

### 3. 研究結果と今後の課題

6つのCRについてPF解析結果からSおよびfmaxを計算した。得られたSデータから平均値+3 $\sigma$ を超える領域を選び、隣接する磁力線で極性が反転している場合HS、極性が同じ場合PSとして同定した。その結果、CR2083ではPSは同定されなかった。得られたSデータをIPS観測で得られたVデータと比較したところ、同定されたHS,PSはすべて低速風に対応することがわかった。このようにPSでfが小さくなる問題は、Sデータでは解消した。しかし改善があったのは局所的であり、全体で見るとSとVの相関はfとVよりも低くなった。また、fmaxデータはPSにおいてfより大きな値をとり、PSでfが小さくなる問題がfmaxでも改善することがわかった。fmax $\neq$ fは磁力線の拡大がより低高度で起こっていることを示し、アルベン波による太陽風加速モデルとも整合する。しかし、fmax $\neq$ fとなるのはPSのみであり、HSを含め他の領域ではfmax=fであった。よって、Sデータと同様にfmax $\neq$ fとなるPS領域はSource Surfaceのごく限られた面積しかなく、全体的にみるとVデータとの相関はf-Vとほとんど変わらなかった。以上のことから、Sおよびfmaxは太陽風速度をよりよく説明するパラメータとはなり得ないと結論された。一方、Source surface上で測ったHS/PSからの角距離 (Distance from Streamer Boundary) を計算し、Vデータと比較したところ、両者に有意な相関があることが判明した。相関係数は0.69であり、fとVの相関よりも高く、前年度に解析したDCHBと同程度である。よって、DSTB (およびDCHB) が太陽風速度の分布をよりよく説明できるパラメータであると結論した。今後、飛翔体による太陽風データを使ってDSTB/DCHBとVとの関係を調査してゆきたい。

3月5-6日に名大ISEEを訪問して本研究課題の解析に使用している計算機システムの保守作業を行った。その結果、判明した課題については引き続き検討してゆくことにした。また、今後の研究の進め方について藤木助教と打ち合わせを行ったところ、GONGzと呼ばれるデータを解析すべきという指摘があった。次年度から、その解析に取りゆくんで行く予定である。配分された共同研究経費は前述の出張および消耗品の購入に使用した。

### 4. 参考文献

- Arge, C.N., J.G. Luhmann, D. Odstrcil, C.J. Schrijver, and Y. Li., Stream structure and coronal sources of the solar wind during the May 12th, 1997 CME, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 66, 1295-1309, 2004.
- Riley, P., J. A. Linker, and Z. Mikic, An empirically-driven global MHD model of the solar corona and inner heliosphere, *Journal of Geophysical Research*, 106, A8, 15,889-15,901, 2001.
- Riley, P., J.A. Linker, and C.N. Arge, On the role played by magnetic expansion factor in the prediction of solar wind speed, *Space Weather*, 13, 154-169, 2015.
- Wang, Y.-M., and N.R. Sheeley, Solar wind speed and coronal flux-tube expansion, *Astrophysical Journal*, 355, 726-732, 1990.

### 5. 成果発表

- Tokumaru, M., K. Fujiki, and H. Watanabe, Optimization of solar-wind speed models using interplanetary scintillation observations, *Solar Physics*, 299, 110, 2024a (<https://doi.org/10.1007/s11207-024-02356-1>).
- Tokumaru, M., and K. Fujiki, Coronal magnetic-field configuration associated with pseudostreamer and slow solar wind, *Solar Physics*, 299:160, 2024b (<https://doi.org/10.1007/s11207-024-02398-5>).

(別紙様式04-2)

先史時代の気候変動と動物相の変遷との関係性の解明

Climate changes and the rise and fall of megafaunas in prehistoric Japan

岸田拓士、日本大学生物資源科学部

人類活動による大きな気候変動に対峙しつつある現在、過去の地球環境変動に際して当時の動物相がどのように変化したのかを知ることは重要である。寒冷化や温暖化に伴う陸棲メガファウナの遺伝的多様性の変化に関してはシベリアなど寒冷地を中心に多くの報告がある。だが、四方を海に囲まれた日本の気候は海流など海洋環境に大きく左右されるが、そうした海洋環境変動の影響を直接受ける海棲メガファウナに関しては研究例がほとんど無い。

本年度は、北海道の道東・道南地方の縄文時代貝塚から出土したイルカやアシカを中心に、骨からDNAおよびコラーゲン抽出を行ってミトコンドリアDNA塩基配列解読と放射性炭素年代測定を行った。縄文時代間に種の遺伝構造が何度か変化しており、当時の気候変動との関連が推定された。加えて、本年度は西日本の貝塚から得られた軟骨魚類の歯からもDNAおよびコラーゲンの抽出に成功した。遺存体が残りにくい軟骨魚類に関して、代表者の知る限り2025年現時点で最古のDNA分子である。これらの結果は現在解析中・論文執筆中であり、2026年度中の論文発表を予定している。

発表文献

Noda M, Kishida T, Kitagawa H, Fukuyama I, Nishikawa K. (2025) Ancient DNA integrates fossil and modern giant salamander taxonomy. *Scientific Reports* 15, 18642.

基本雲プロダクトの高度化  
Improvement of Fundamental Cloud Products

半田太郎、佐伯悠樹、丸山拓海、坂下卓也（気象庁）

## 1. はじめに

気象衛星センターでは、静止気象衛星「ひまわり」の観測値と数値予報データから雲の有無（雲マスク）や雲頂高度、雲相といった雲に関する物理量を推定する「基本雲プロダクト」を作成している。雲マスクは最上流に位置し、下流の様々な衛星プロダクトの基礎となる重要なデータである。しかし、現行の雲マスクは特定の雲判定テストに依拠しており、数値予報など衛星観測以外の外部データの影響を受けるため、それら外部データの品質によって精度が変動するという課題がある。これらの課題に対し、当センターではデータの独立性を高めることを目的として、機械学習を利用し、ひまわり観測データのみから雲の有無を識別する手法の開発を行っている。昨年度の研究集会では、ランダムフォレスト（RF）やニューラルネットワーク（NN）を用いた学習を試行し、極軌道衛星（Aqua/MODIS）の雲マスクと比較検証を行った。その結果、NNを用いて判別結果の閾値を調整することで現行プロダクトと高い一致率を示すモデルを構築できる可能性を示した。本年度は、さらなる精度向上と空間情報の活用を目的に、画像セグメンテーションに特化したAIモデルである「U-Net」を導入した手法の開発を行った。

## 2. 手法（U-Net の導入と学習方法）

本研究で導入したU-Netは、「エンコーダ」と「デコーダ」の二部構成を持つAIモデルである。エンコーダ部で入力画像を段階的に圧縮して大域的な特徴（全体的な雲の覆いなど）を抽出し、デコーダ部で元の解像度へと段階的に復元しながらピクセル単位の分類を行う。さらに「スキップ接続」という構造により、圧縮過程で失われやすい微細な位置情報をデコーダ側へ転送・統合することで、大域的な特徴と詳細な輪郭の双方を高精度に反映させることが可能となる。学習にあたっては、ひまわり（AHI）の16バンドの観測データのみを「説明変数」とし、雲マスクを「目的変数」とした。計算コスト削減のため、フルディスク画像を256x256ピクセルの小領域（パッチ）に分割して学習を行った。

## 3. 開発概要と精度検証

本研究では、検証目的に応じて以下の2種類の雲マスクを目的変数（正解データ）とし、段階的にモデルの評価と改良を行った。①現行雲マスク：外部データに依存せず、AHI観測データのみで現行手法の判定精度をどの程度「再現」できるか検証した（実験1）。②MODIS雲マスク：国際的に広く利用されているMODISを正解とし、現行プロダクトの精度を「上回る」ことが可能か検証した（実験2）。

### 3.1 実験1：現行雲マスクによる学習

現行雲マスクを目的変数として学習し、学習に用いていない期間で検証を行った。その結果、AIモデルによる雲マスクは現行手法と視覚的に非常に近い出力を示し、晴れ曇りの一致率は0.94を記録した。しかし、現行雲マスクが元々もつ弱点（オーストラリア陸上での晴天域を曇りと判定するなど）もそのまま学習し、再現してしまう課題が確認された。（図1）

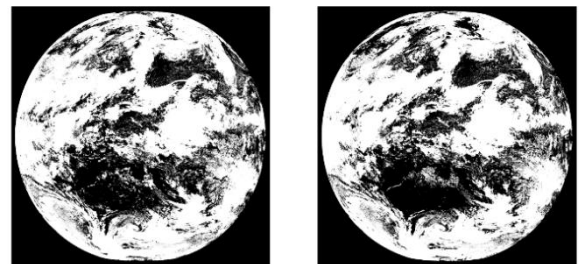


図1. 現行雲マスク（左）とAIモデルによる推定結果（右）の比較。2024年8月16日06UTC。

### 3.2 実験2：MODIS 雲マスクによる学習

次に、MODIS 雲マスクを目的変数として学習を行った。その結果、実験1の課題であったオーストラリア陸上での晴天域は正しく判別できるようになった一方で、新たに赤道付近で晴れ領域を誤判定（判定過多）してしまう課題が確認された。（図2）

### 3.3 実験3：ハイブリッド学習（ラベル修正）による改良

実験2で顕在化した課題に対し、MODISの雲マスクをベースとしつつ、現行手法が得意とする領域の「晴れ」情報を統合して正解データを再定義する「ハイブリッド学習（ラベル修正）」を適用し、学習を行った。その結果、図3に示すように実験2の赤道域の課題が解決し、かつオーストラリア陸上の課題も同時に改善された。現行手法との高い整合性（一致率0.96）を維持しつつ、特定領域における判別性能の向上が視覚的にも確認された。さらに、MODISを正解として現行雲マスクと定量的な比較を行った結果、陸上・海上、日中・夜間の全条件において、開発したU-Netモデルが現行プロダクトと同等以上の高い判別性能を示した。（図3）



図2. AIモデルと現行雲マスクの差分（左）。色は、両モデル

の一致（緑、灰）、AIモデルのみ晴れ（青）、現行のみ晴れ（赤）を示す。同時刻の赤外画像（右）。日時は図1と同様。

図3. AIモデルと現行雲マスクの差分。色、日時は図2と同様。

## 4. まとめと今後の課題

本研究により、外部データに依存せずひまわり観測データのみを入力とするAI（U-Net）ベースの雲マスク算出手法の有用性が示された。今後は、時間帯や個別の地表面状態（砂漠や雪氷域等）の違いに着目した詳細な精度検証を進めるとともに、ひまわり10号運用開始に合わせたプロダクトの仕様設計やルーチン導入の準備を進める予定である。また、本手法はひまわり10号に搭載される赤外サウンダデータ処理への応用も期待されるため、得られた知見を活用していく。

**参考文献：** Ishida, H., et al., 2018. Remote Sens. Environ. 205, 390-407.

Ackerman, S., et al., 2017. MODIS Atmosphere L2 Cloud Mask Product. NASA MODIS Adaptive Processing System, Goddard Space Flight Center, USA: [http://dx.doi.org/10.5067/MODIS/MYD35\\_L2.061](http://dx.doi.org/10.5067/MODIS/MYD35_L2.061)

**成果発表：** 半田太郎、佐伯悠樹、丸山拓海、山田裕里佳、坂下卓也「基本雲プロダクトの高度化」、GPMおよび衛星シミュレータ合同研究集会、名古屋大学、2026年3月

(別紙様式04-2)

データベース法を用いた太陽風速度推定  
**Solar Wind Speed Retrieval Using IPS Spectral and a Precomputed Velocity-Spectrum Database**

小島正宜 名古屋大学

今年度の研究過程で申請課題と異なる重要な課題を見つけたので研究内容を変更し表題のものとした。

IPS spectrum を用い太陽風速度を推測する新たな解析法を開発した。この方法は model fitting で生ずる幾つかの難点を回避することができる。またこの方法を用い 11 年間の IPS データを解析したところ従来の解析法に幾つかの問題があることも判明した。

速度解析結果に信頼度のある 3 点観測による相互相関解析による速度 ( $V_{ccr}$ ) を基準に評価を行った。その理由は、 $V_{ccr}$  はスペクトル解析に必要な様々の近似や仮定が必要ないためである

- ・ 2011 年から 2019 年の solar activity cycle 1 周期以上に渡り行われた三点同時観測のデータを解析したので低速風から高速風までの広範囲のデータでの検証が出来た。
- ・ model fitting では多くの free parameter が必要であるが、3 点観測の相互相関解析から速度を求めるには radial flow の仮定以外は free parameter は用いないので信頼度の高い評価ができる。
- ・ 2 点観測の相互相関解析しか利用出来ないときには、太陽風密度分布の空間分布を等方分布と仮定せねばならない。しかしこの方法は今回の研究により解析された速度値の信頼度が落ちることが判明した。
- ・ 三点観測の相互相関法を用いた解析では得られた速度値の信頼度も得ることができる。そこで信頼度の悪い速度値と今回開発した手法で得られた速度を比較したところ三点観測で信頼度の悪い速度値よりも今回開発したスペクトル解析法を用いる方が信頼できる速度値が得られることが分かった。
- ・ 単一アンテナでの観測しかない場合は IPS のスペクトル解析により速度を求める以外に手段がないが一般に用いられている方法は太陽風密度擾乱の空間スペクトルを power law で近似して IPS スペクトルを計算する。しかし実際観測される IPS スペクトルにはこの近似ができない事例が多々ある。開発した方法は model spectrum を用いないのでこの難点を避けることができる。

### 開発した方法

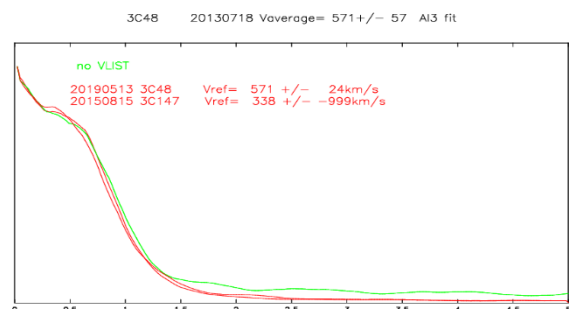
#### ① Database の作成

まず、データは 9 年間 (2011~2019 年) に収集した 5 つの天体 (3C48, 3C147, 3C161, 3C273, 3C298) で観測された IPS スペクトルと  $V_{ccr}$  をセットとするデータベースを構築した。

② このデータベースの中で観測されたスペクトル形状に最も良く一致するものを複数例探し、それらのデータベースの速度の平均を解析結果とする。

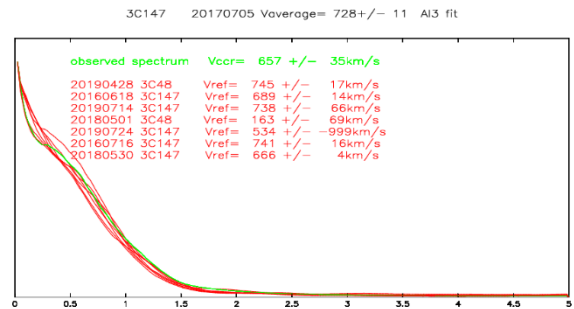
#### ③ 解析結果例

右図に緑線で示す例は simple power law model では fitting 不可能な例である。0.5 Hz 辺りに盛り上がりがある



あり simple power law のスペクトルでは fit が困難であるが、データベース中に赤線のように似た観測例が存在した。

右に示す  $V_{crr}=657 \text{ km/s}$  の高速の 3C147 の例も  $0.5 \text{ Hz}$  辺りに盛り上がりのあるスペクトルで 7 例の類似スペクトルが見つかり、 $V_{crr}=657 \text{ km/s}$  と同様に平均値は高速  $728 \text{ km/s}$  が得られた。

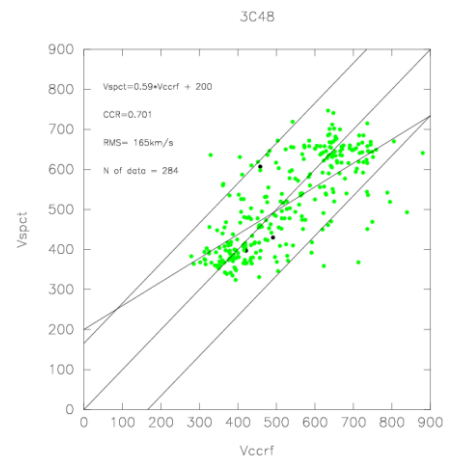


#### ④解析結果の評価

4-1 右図はデータベース法で得られた速度  $V_{spct}$  と相関法で得られた速度  $V_{crr}$  の相関図である。このような相関を model fitting 法で得られた速度についても計算し比較したのが下の表である。

	model fit 法	database 法
解析できた data 数	220	284
$V_{crr}$ と $V_{spct}$ の相関値	0.698	0.701

両解析法とも相関値は 0.7 近くで高い。しかし model fit では 64 例が model fit できなかった。



4.2 複数の電波源のデータベースをミックスしデータベースの総数を増やした方が良い。

4.3 IPS の 3 点観測が無い場合は 2 点観測の相関を用い  $V_{crr}$  を計算するが、それらを解析対象に含むか除外するかを比較したのが下の表である。

2 点観測	除外	含む
解析できた data 数	284	452
$V_{crr}$ と $V_{spct}$ の相関値	0.701	0.576

2 点観測を含めて解析できたデータ数は多いがそれらを除外した方が高い相関値が得られているので 2 点観測の解析の信頼性に懸念を抱かざるを得ない。

(別紙様式04-2)

湖沼堆積物の元素分析による最終氷期以降の東モンスーン及び偏西風域の古環境復元  
Paleoenvironmental reconstruction of East Asian monsoon and westerlies regions  
since the last glacial period by elemental analyses of lacustrine sediment cores

勝田長貴、岐阜大学・教育学部

【目的】

最終氷期から完新世に至る東アジアモンスーンの環境変動復元は、中国東北部のSihailongwan湖 (Mingram et al., 2018; Zhu et al., 2021)、Jingpo湖 (Katsuta et al., 2026)、Hulun湖 (Zhang et al., 2018)、日本海 (Minoura et al., 1997; Tada et al., 1999; Zou et al., 2012)、日本列島 (Katsuta et al., 2007; Takahara et al., 2010) などで行われてきた。その結果は、北大西洋地域で確認された千年スケールの気候変動と対比することが示された (NGRIP, 2004)。一方、日本列島の先史人類 (ホモ・サピエンス) は、約3.8万年前に大陸から渡来してきたと考えられているが、環境変化と人類活動の変化との対応関係は未だ不明な点が多い。特に、人の活動と調和的な時間分解能 (百年スケール) の陸域環境変動の最終氷期から完新世に至る日本列島の連続記録の確保は課題となっている。こうした背景のもと、志知らは、ハンドコアラーを用いた日本海沿岸陸域の泥炭層の探査を実施し、新潟県柏崎市の市野新田にて過去の5万年間の連続記録を有する泥炭層の予察的结果を得た (Shichi et al., 2024)。その予察結果によると、完新世における落葉広葉樹の拡大、ブナ属やカバノキ属の樹木の増加と海洋酸素同位体ステージ (MIS) 3に対応する寒冷化などの関係が導き出され、気候変動に対する植生応答の詳細記録の復元が可能であることが示された。そこで本研究は、堆積物に記録される過去5万年間の植生変遷と環境変動の復元とその要因の解明を目的とし、新規掘削で得た泥炭層コアの分析を進めている。

【研究方法】

堆積物試料は、2023年9月に新潟県柏崎市市野新田で採取した泥炭層堆積物である。パイロコアリング法による掘削は重複して行われ、全長約5 mのICN23A、全長約4.7 mのICN23Bの2本のコアから成る。コアピットによるICN23Aの欠損は、ICN23Bを用いて補間された。堆積物試料は1 cm間隔で分取され、花粉組成、化学組成、粒度組成、安定同位体組成の分析が進められている。このうち、全有機炭素 (TOC) と全窒素 (TN) 含有量は、有機元素分析装置 (vario MICRO CUBE、名古屋大学宇宙地球環境研究所既設) を用いて行った。TOC分析は、凍結乾燥試料をHCl処理により炭酸塩を除去して行われた。TOCの炭素同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) は、安定同位体質量分析計 (総合地球環境学研究所) を用いて測定した。木片とTOCの放射性炭素 ( $^{14}\text{C}$ ) 年代は、パレオ・ラボと名古屋大学宇宙地球環境研究所「加速器質量分析装置等利用 (共同利用)」によって測定され、 $^{14}\text{C}$ 校正年代はベイズ法に基づくBaconプログラム (Blaauw, 2011) により堆積年代推定を行った。

【研究結果】

ICN23コアの堆積物は、過去5.3万年間の記録であった (図1)。TOC、TN含有量は、MIS 3の前半に増加し、MIS3の後半~MIS2で減少傾向を示し、MIS 2~1で上昇傾向を示した。C/N比は過去5.3万年間を通じて10以上であった。

【考察】

堆積物中の C/N 比は、9%以下が植物プランクトン由来、20%以上が陸上高等植物由来であることを示す (Meyers and Teranes, 2001)。また、 $\delta^{13}\text{C}$ とC/N比の関係は、陸上高等植物は、C3植物 (-30~-25‰) とC4植物 (-15~-10‰) に区別することができる (図2)。ICN23コアの有機物は、C3植物が起源であると見なされる。これは、花粉記録の結果と

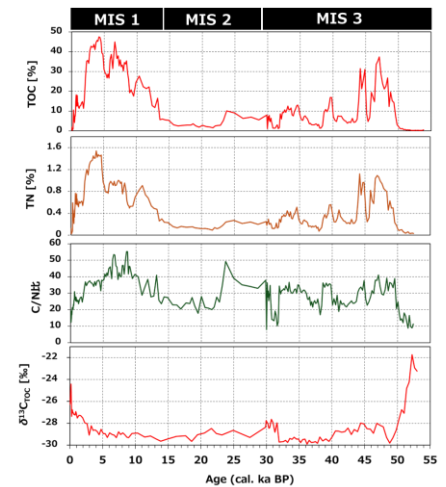


図1. 市野新田泥炭層ICN23コアの過去5.3万年間の記録。

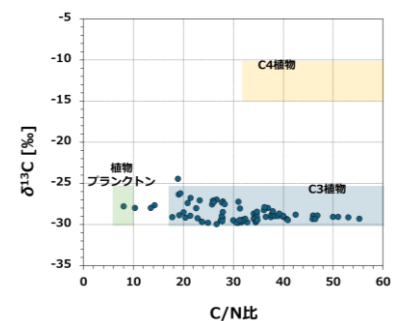


図2.  $\delta^{13}\text{C}$  と C/N 比の関係。

整合し、市野新田の植生は、最終氷期にカバノキ科の樹木やマツ科の針葉樹、完新世にブナ科やニレ科の落葉広葉樹が優勢であったと報告されている (Shichi et al., 2024)。

TOC含有量の変動は、日射量変動や大陸氷床量変動と大局的に対比することができ (Laskar et al., 2004; Lisiecki and Raymo, 2005)、市野新田周辺のC3植物を主体する生物生産量を示すものである (図3)。43~38 ka (1 ka = 1000年前) は、ダンスガード・オシュガー (DO) サイクルと対比することができ、この期間の生物生産量の増加は、DOサイクルに伴う温暖湿潤な気候に起因すると考えられる。特に、グリーンランド氷床コア $\delta^{18}\text{O}$ 値の38 ka付近に見られる顕著な増加 (DO-8) は、TOCの増加と共にブナ拡大が確認されており (Shichi et al., 2024)、新人の日本列島への拡散は温暖期の植生回復と関連付けられる。一方、24~16 kaの生物生産量の顕著な減少は最終氷期最盛期 (LGM)、8~2 kaの顕著な生物生産量の上昇は、完新世の最温暖期 (HO) にそれぞれ対応するものと考えられる。

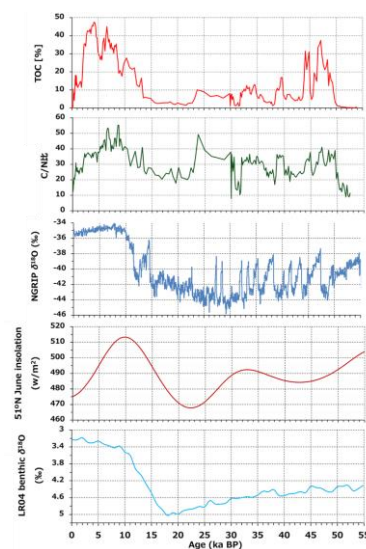


図 3. 市野新田泥炭層 ICN23 の堆積記録と地球規模の古気候変動記録の対比。

### 【まとめ】

新潟県柏崎市・市野新田のICN23コア泥炭層は、過去5.3万年の記録を有しており、TOC含有量はC3植物の生産量を反映し、その変動は北半球陸域で見られるDO-8、LGMやHOに対応する。一方、この記録は、氷床コア $\delta^{18}\text{O}$ で示される北大西洋地域の気候変動パターンと必ずしも一致するものでなかった。今後は、ICN23コアの他の成分記録と東アジアモンスーンの前古気候指標と合わせて解析し、中部日本の日本海沿岸陸域の環境変動の要因と新人の拡散への影響を評価することが課題である。

### 【引用文献】

Blaauw, M. and Christen, J. A., 2011. Bayesian Analysis 6, 457e474. Katsuta, N., et al., 2007. J. Paleolimnol. 37, 259–271. Katsuta, N. et al., 2026. Glob Planet Change, in press. Laskar, J., et al., 2005. A & A 428, 261–285. Lisiecki, L.E., Raymo, M.E., 2005. Paleoceanogr. 20, PA1003. Meyers, P. A. and Terances, J. L., 2001. Tracking Environmental Change Using Lake Sediments, pp. 240–267. Mingram, J., et al., 2018. Quat. Sci. Rev. 201, 57–76. Minoura, K., et al., 1997. Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol. 135, 41–50. NGRIP, 2004. Nature 431, 147–151. Shichi, K., et al., 2024. International Palynological Congress (IPC) XI. Prague, Czech Republic May 27-31, 2024. Takahara, H., et al., 2010. Quat. Sci. Rev. 29, 2900–2917. Zhang, S., et al., 2018. Quat. Sci. Rev. 190, 57–65. Zou, J., et al., 2012. J. Quat. Sci. 27, 891–900.

### 【成果発表】

志知幸治, 出穂雅美, 勝田長貴, 2025. シベリア-東アジアにおける現生人類拡散期の植生変遷と気候変動. 学術変革(A)統合生物考古学: 2025年度第2回研究集会, 慶応義塾大学三田キャンパス, 11月16日.

(別紙様式04-2)

あらせ搭載MEP-i質量分析データからの窒素イオン抽出手法の開発  
Development of a method for extracting nitrogen ions from ARASE/MEP-i mass spectrometry data

横田勝一郎、大阪大学・理学研究科

【研究目的】

本研究の本研究の目的は、あらせ衛星搭載の中間エネルギーイオン分析器 (Medium-Energy particle Experiments-ion mass analyzser, MEP-i) (Yokota et al., 2017, EPS)の質量分析/飛行時間 (TOF) モード観測データからN+を抽出する手法を確立し、地球上層大気の散逸ダイナミクスについて観測的研究から制約を加えることである。MEP-iの質量分解能から、TOFモード観測データではH+, He++, He+などの主要成分だけでなく、O+や分子イオンが分別できているが、N+はO+のTOF分布に取り込まれ、詳細な解析を必要とする。そこで実験室で取得した較正試験データと合わせてイオンと物質との相互作用を計算するソフトウェアStopping and Range of Ions in Matter (SRIM) を利用して、精度の高いN+とO+のTOF分布較正プロファイルを作成し、TOFモード観測データからフィッティングによるN+の分離を目指す。あらせ衛星の全期間の観測データについてN+, O+, 分子イオンを精度良く分別するスキームを構築し、地球起源の重イオン観測から地球の磁気活動前後の地球上層大気散逸を精査することを、最終的な目的とする。

O+だけの観測の場合、地球上層大気の散逸について得られる情報は散逸量の時間変化のみであった。N+や分子イオンの観測が加わると組成比の時間変化を見ることができ、これは散逸大気の起源領域 (緯度、高度) の時間変化に対応する。本研究結果から、散逸のダイナミクスについて理論モデルとの比較材料を追加することが期待できる。

【研究方法と結果】

10-180keVイオンを観測対象とする「あらせ」搭載MEPiの飛行時間 (TOF) 取得モード下での観測データに対して、較正データであるTOFプロファイルを使ったフィッティングからイオン種の検出量を評価した。MEPiにて計測する飛行時間 $T$ はイオン種の質量に対応する。一価の荷電粒子のエネルギー $K$ に対して $T = L/\sqrt{2K/m}$ と一意に決まるが、実際には入射する荷電粒子がMEPi内にある超薄膜炭素を通過する際にエネルギー・角度分散を受ける。そのためTOF分布には広がり $p(K)$ が生じる。 $p(K)$ の原因となるエネルギー・角度分散はSRIMの計算から取得することができる。加えて、MEPiは上半部のエネルギー分析器によるエネルギー分別において、エネルギー分解能 $\Delta K$ に対応する分散も生じている。較正データとして $\Delta K$ を正規分布 $f(K)$ で近似した。その結果、観測データの較正データ $P(K) = \sum_n f(K_n) \cdot p(K_n)$ を得ることができた。図1は2017年9月8日のTOFモード観測データに対する較正データによるフィッティング結果である。

またこの較正データフィッティングを利用して、2017年9月7日から8日にかけての磁気嵐時のデータを解析すると、図2のようにN+とO+を分離してN+/O+比を得ることができた。但し、フィッティングのために積分時間を10前後必要とする。磁気嵐直後の総量が多き期間は、DST指数は低いときはN+とO+は共に少なくN+/O+比は0.4程度であるが、磁気嵐が起きると両者は増大してN+/O+比は低下している。

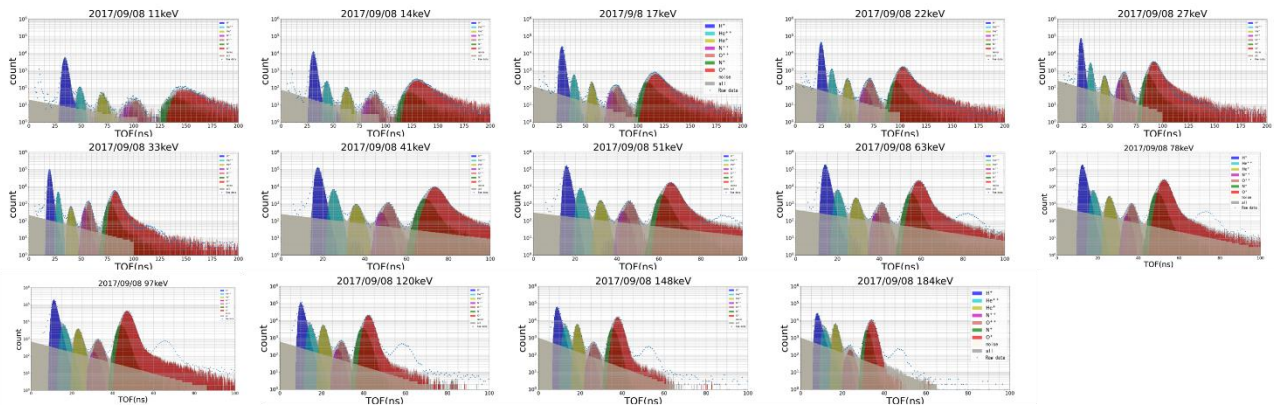


図1: TOFデータに対する各エネルギーでの各イオン種P(K)によるフィッティング

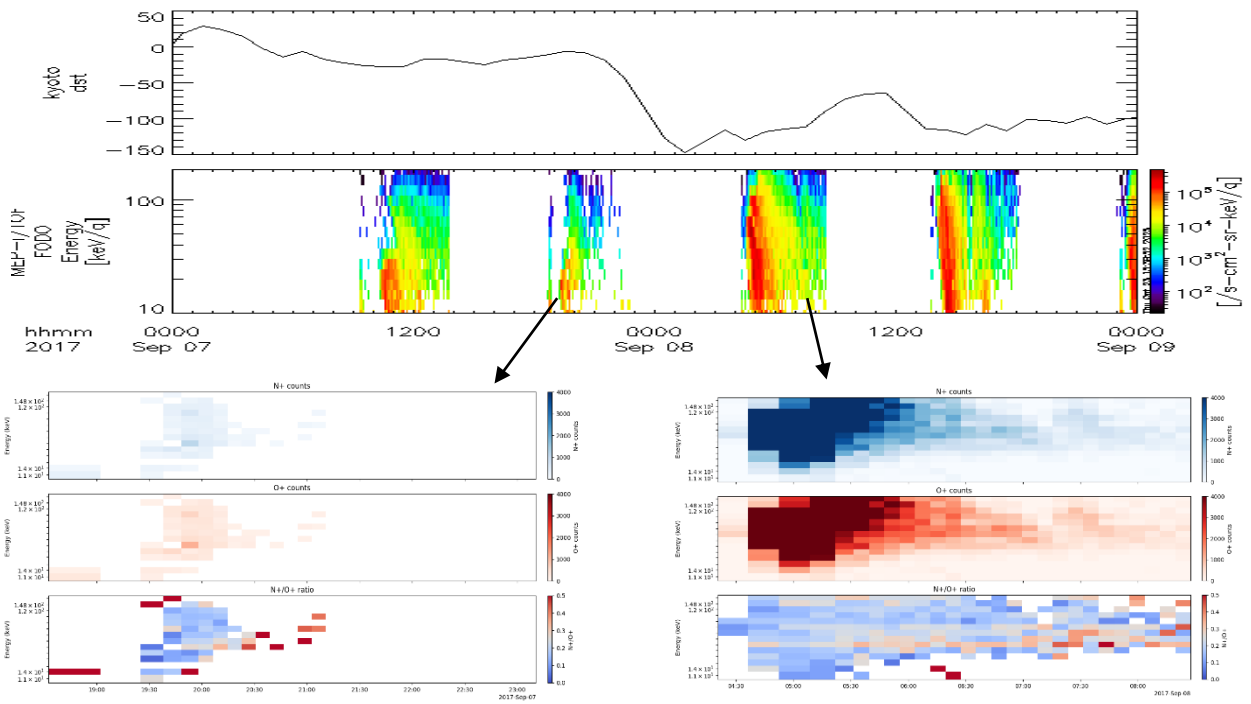


図2: TOFモード観測の2つの時間帯に対するN+(上), O+(中), N+O+(下)

(別紙様式04-2)

ポストエクサ時代に向けた革新的プラズマシミュレーション技術の開発  
Advanced numerical schemes for plasma simulations on post-Exa era

梅田隆行、北海道大学・情報基盤センター

## 研究目的

スーパーコンピュータ「富岳」は、「京」コンピュータに対して、ノードあたりの性能が約26倍、全体性能が約54倍となった。一方で、ノードあたりのメモリ容量は2倍、全体のメモリ容量は3.7倍に止まっている。この事実は、「富岳」を用いても「京」で行われていた大規模シミュレーションとほとんど変わらない計算サイズのシミュレーションしか行えないこと、またこれから5年以上(「富岳」の運用停止まで)はメモリサイズで5ペタバイト以下のシミュレーションが世界最大サイズとなることを意味している。従って、これまでの「大規模シミュレーション」からパラダイムシフトし、メモリ消費を抑えた新たな計算機シミュレーションについて考える必要がある。そこで本研究では、宇宙プラズマに関する電磁流体、電磁粒子(PIC)、電磁Vlasovおよび、これらのハイブリッドシミュレーション手法に関して、計算時間の短縮と計算精度の向上を両立させる新たな研究開発を行う。

## 研究方法

電磁界シミュレーションの標準的な数値スキームであるFDTD法について空間差分の高次精度化を行う。従来の計算機シミュレーションでは格子点数を増やすことによって空間解像度を上げていたが、空間差分の誤差を減らすことによって格子点数が少ない構造や波動でもより精度よく解けるように改良を行う。また、プラズマ粒子PICシミュレーションへ実装を目指す。

さらに、磁気流体力学方程式に圧力テンソルおよび熱輸送テンソルの時間発展式を導入した、新たな拡張電磁流体シミュレーションの手法について検討を行う。

## 研究結果

電磁界シミュレーションの標準的な数値スキームであるFDTD法について、空間精度6次のFDTD(2,6)にLaplacianを考慮した3階差分および5階差分演算子を導入することにより、新たな手法を開発している。これに、2階差分および4階差分演算子をさらに導入し、各高階差分項の係数の最適化を行っている。

空間精度4次精度のFDTD(2,4)にLaplacianを考慮した3階差分演算子を導入した手法をプラズマ運動論コードに実装する試みを行っている。電荷保存則の数値誤差を除去するための新たな手法を開発し、2次元PICシミュレーションにおいて動作検証を行った。

流速ベクトル分離法に基づいた新たな流体コードについて、特性変数と特性速度を用いた時間発展式を再導出し、その差分化についての検討を行った。風上法を用いた場合に、衝撃波管問題においてHLL近似リーマンソルバーと比べて遜色なく、数値振動の抑制が行えており、今後は高次無振動を垣見る。

## 成果発表

(学会発表)

関戸 晴宇, 梅田 隆行, 三好 由純, 高次精度陽的時間領域有限差分法の電流源における数値誤差の修正, 日本地球惑星科学連合 2025 年大会 (JpGU2025), 幕張メッセ, 2025 年 5 月 27 日

梅田 隆行, Loading of relativistic Maxwellian distribution revisited, 日本地球惑星科学連合 2025 年大会 (JpGU2025), 幕張メッセ, 2025 年 5 月 27 日

Takayuki Umeda, Eiichiro Mizoguchi, Riku Ozaki, New Integrator for Relativistic Equations of Motion for Charged Particles, URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC 2025), Sydney, August 19, 2025

Harune Sekido, Takayuki Umeda, Yoshizumi Miyoshi, Correction of Numerical Errors in the Charge Conservation Law at Current Sources in Explicit Finite-Difference Time-Domain Method with Higher-Order Accuracy, URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC 2025), Sydney, August 20, 2025

Takayuki Umeda, Eiichiro Mizoguchi, Riku Ozaki, New Integrator for Relativistic Equations of Motion for Charged Particles, 9th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP 2025), Fukuoka, September 22, 2025

Xinyu Ge, Harune Sekido, Takayuki Umeda, Yoshizumi Miyoshi, Suppressing Phase Velocity Errors in Higher-Order Finite-Difference Time-Domain Methods, 9th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP 2025), Fukuoka, September 25, 2025

Harune Sekido, Takayuki Umeda, Correction of Numerical Errors at Current Sources in Explicit Finite-Difference Time-Domain Method for Plasma Kinetic Simulations, 9th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP 2025), Fukuoka, September 25, 2025

関戸 晴宇, 梅田 隆行, 高次精度陽的時間領域有限差分法における電荷保存則についての数値誤差の抑制, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2025 年秋季年会, 神戸大学, 2025 年 11 月 25 日

葛 心雨, 梅田 隆行, 関戸 晴宇, 三好 由純, 高次精度 FDTD 法における位相速度誤差の低減, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2025 年秋季年会, 神戸大学, 2025 年 11 月 25 日

梅田 隆行, Loading of relativistic Maxwellian-type distribution revisited, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2025 年秋季年会, 神戸大学, 2025 年 11 月 27 日

(別紙様式04-2)

衛星シミュレータを利用したglobal storm-resolving modelの比較実験  
Intercomparison of global storm-resolving models using the satellite simulators

佐藤正樹、東京大学・大気海洋研究所

## 研究目的

global storm-resolving modelの出力を「観測シミュレータ」(Joint Simulator for Satellite Sensors: 東京大学・JAXA・NASAの共同開発)にかけて、GPM、EarthCARE衛星などのデータと比較することで数値モデルの精度向上を目指す。特にいまだ不確定要素の多い雲物理過程の精度向上が期待できる。

## 研究方法

EarthCARE衛星が2024年5月に打ち上げに成功し、雲・放射等の最新の観測データが利用可能になる。本課題では、GPM、EarthCARE衛星の観測データを用いて、global storm-resolving modelの結果を観測シミュレータを通して観測結果と比較し、数値モデルの改良をする。2024年8-9月に大西洋で実施された集中観測実験ORCESTRとEarthCARE衛星データを検証データとして利用し、比較実験を提唱する。特に雲物理スキームの高度化により雲解像モデルの予測精度の向上を図る。EarthCARE衛星の観測データとして、雲レーダーCPRによる radar reflectivity およびDoppler速度を利用する。また、ATLID, MSI, BBRやGPM/DPR による観測データの利用も図る。東京大学大気海洋研究所ではEarthCARE衛星による検証を念頭において、Joint Simulator for Satellite Sensorsの開発を継続しており、数値モデルの検証・改良に利用が可能である。global storm-resolving modelでは、雲降水過程について、大気中の水物質を雲水、雲氷、雨、雪、あられといったカテゴリーに分類した雲物理スキームを用いる。データ取得や取扱方法などの情報取得のための費用などが見込まれる。

## 研究結果

2024年5月に打ち上げられたEarthCARE衛星に搭載された雲プロファイリングレーダー(CPR)と、高解像度全球非静力学大気モデルNICAMを用いた比較研究を実施した。本研究は、これまで容易ではなかった雲内部の鉛直運動の評価を、衛星観測とモデルNICAMの組み合わせにより明らかにし、将来の気候予測や豪雨などの極端現象の予測精度向上に貢献するものである。

本研究の目的は、衛星観測から得られるドップラー速度データを解析し、雲中の氷粒子の落下速度および大気鉛直運動に関するメカニズムを解明することである。具体的には、スーパーコンピュータ「富岳」を用いたNICAMの870mメッシュシミュレーションから、CPRが観測するレーダ信号を模擬し、実際の観測データと相互比較を行った(図1)。その結果、中緯度低気圧に伴う前線や熱帯対流雲において、観測とモデルが示す鉛直構造には共通点と差異の双方が認められ、モデル表現および観測推定に伴う不確実性に関する知見が得られた。本研究成果は、新たな衛星観測データと高解像度モデルを組み合わせることで、雲微物理過程および鉛直運動の理解を深化させる可能性を示すものである。

これまで、全球規模で雲内部の雲粒子・降水粒子の鉛直運動を観測する手法は存在していなかった。EarthCARE衛星に搭載された雲プロファイリングレーダ(CPR)による氷・雪粒子の鉛直ドップラー速度は、粒子の終端落下速度と大気鉛直気流の双方を反映しており、雲微物理、対流、ならびに大気運動の理解に極めて重要な情報を提供するものである。従来、このような鉛直運動を全球的に制約できる観測データは得られておらず、気候モデルにおける降水量の予測や雲・放射相互作用には大きな不確実性が残されてきた。

本研究では、2024年6月に観測が開始されたCPRに着目し、取得されたドップラー速度データから氷粒子の終端落下速度と雲内部の鉛直気流を推定した。これと並行して、東京大学を中心に開発されてきた全球雲解像モデルNICAMを用い、スーパーコンピュータ「富岳」によりサブキロメートル(870 m)メッシュ解像度の数値シミュレーションを実施し、人工衛星シミュレータ Joint Simulator for Satellite Sensors(注5)によってEarthCARE類似のレーダ信号を生成した。これにより、観測とモデルの結果を定量的に比較・分析することが可能となった。

その結果、EarthCAREのドップラー雲レーダ観測とサブキロメートルスケールの高解像度大気モデルを組み合わせた初の比較解析により、雲内部の鉛直運動に関する理解を深める新たな知見を得た。

ドップラー速度は氷粒子の終端落下速度と大気鉛直速度の双方を含む量であるが、本研究で示した手法により、EarthCARE/CPRのドップラー速度から両者の成分を分離して推定できることを、NICA

Mによるシミュレーションとの比較を通じて示した。また、観測との比較により、モデルにおける雲微物理過程に起因するバイアスを評価できること、さらにモデルでは説明できない衛星特有のランダムな推定誤差の影響も識別可能であることを明らかにした。

本研究により、衛星観測と高解像度モデルが相互に補完しつつ、雲微物理および鉛直運動の理解をより包括的に深化させ得ることを示した。

本成果は、EarthCAREデータを活用した今後の雲物理研究の発展に向けた重要な基盤を提供するものである。さらに、今後進展する全球高解像度モデル間の相互比較や、気象・気候モデルにおける雲・降水過程の不確実性低減を目指す国際的取り組みにも貢献することが期待される。

本研究における分担は以下のとおりである。東京大学はNICAMの数値シミュレーションならびにEarthCAREおよびNICAMデータの解析を実施した。九州大学はEarthCAREデータ解析手法に関する技術支援を行い、JAXAはEarthCAREデータおよびその利用技術を提供した。

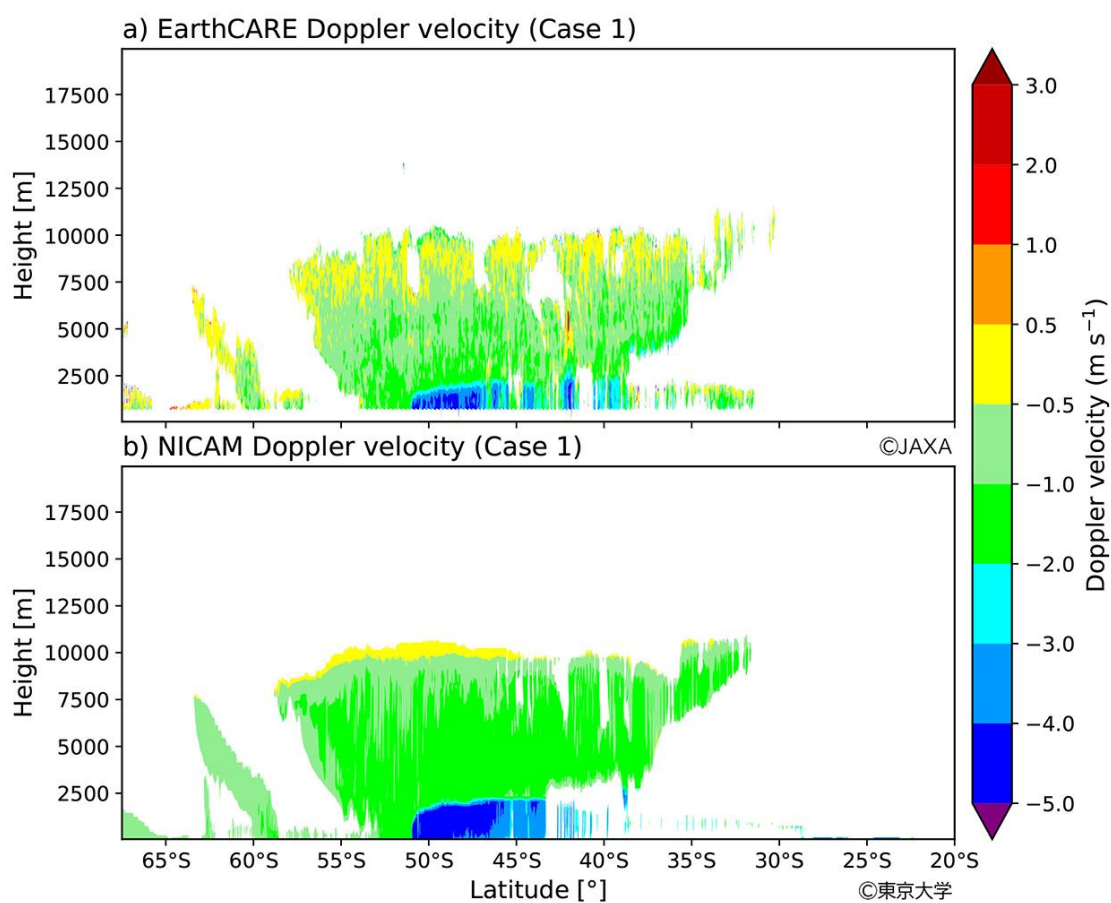


図 1 : EarthCARE (a) および NICAM (b) による中緯度低気圧に伴う寒冷前線ケースにおけるドップラー速度。ドップラー速度の単位は  $\text{m s}^{-1}$  である。

参考文献 :

Roh, W., Satoh, M., Matsugishi, S., Aoki, S., Kubota, T., Okamoto, H. (2026) Vertical Motions Inside Clouds Viewed from EarthCARE Satellite Cloud Radar Observations and Global Sub-Kilometer Scale Modeling. Sci. Rep. 16, 2622, <https://doi.org/10.1038/s41598-025-32256-8>

(別紙様式04-2)

LAMP2科学ロケット搭載用磁気インピーダンスセンサー磁力計(MIM)の開発  
Development of magneto-impedance sensor magnetometer (MIM) for LAMP2 sounding rocket

能勢正仁、名古屋市立大学・データサイエンス研究科

### 研究目的

脈動オーロラのその場観測を行うために、LAMP2(Loss Through Auroral Microburst Pulsations 2)科学ロケットの打ち上げを計画している(図1)。この研究では、LAMP2科学ロケットに、磁気インピーダンス効果と呼ばれる新しい原理を利用した磁力計(magneto-impedance sensor magnetometer, MIM)を搭載し、脈動オーロラ中の磁場変動を計測することを目的とする。変動磁場から、脈動オーロラに伴う沿磁力線電流の分布を推定することができるので、発光を引き起こす高エネルギー降り込み領域との対応を調べる。過去の研究によれば、発光中心部に上向き沿磁力線があると結論付けているものや、発光部の外縁に沿磁力線電流が集中していると結論付けているものがある。こうした結論のどれが最も蓋然性が高いかを調査する。

### 研究方法

磁気インピーダンスセンサーはすでにメーカーから購入(図2)しているが、それを組み合わせて磁力計センサーとする工程および磁力計エレキ部(AD変換やデータ処理を行う部分)とのコネクタを介しての接続、熱真空振動試験などを実施する。その後、地上で地磁気計測などを行い、磁力計としての性能を評価する。LAMP2ロケットの打ち上げ時期や場所、協力機関などはまだ確定していないが、それらが決まり次第、作製したMIMをロケットに搭載する打ち合わせや実作業を行う。

### 研究成果・考察・まとめ

2025年度は、ソリトンテクノロジー社と共同で磁力計エレキ部(MIM-E)を製作した(図3)。センサーを仮接続し、信号が問題なくA/D変換器やプログラムで処理され、200 Hzでデジタルデータが取得できることを確認した。同時に、センサーを固定する治具の作成も行った。

2026年度以降は、センサーを治具に取り付けて配線を行い、磁力計センサー部(MIM-S)の製作およびMIM-Eとの噛み合わせ試験などを実施する予定を立てている。

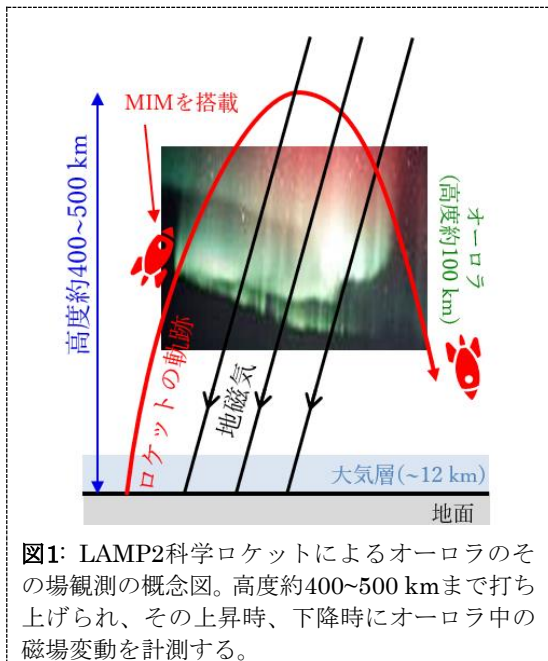


図1: LAMP2科学ロケットによるオーロラのその場観測の概念図。高度約400~500 kmまで打ち上げられ、その上昇時、下降時にオーロラ中の磁場変動を計測する。



図2: 磁気インピーダンスセンサーの外観。これで磁場の1軸を計測できるので、磁力計にするには3つを組み合わせる必要がある。

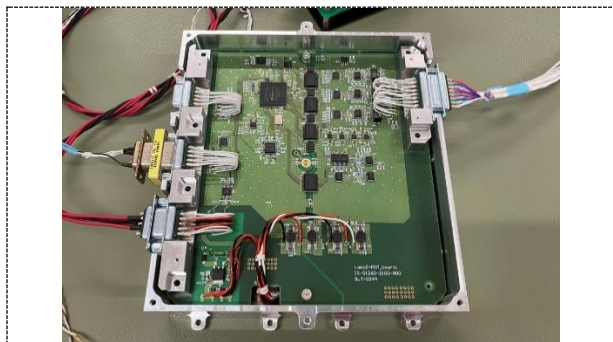


図3: 作製した磁力計エレキ部(MIM-E)の動作試験を行っているところ。

(別紙様式04-2)

電離圏イオン流出機構の解明を目指した超熱的イオン質量分析器の開発  
Development of a supra-thermal ion energy-mass spectrometer for study of ion outflow processes  
in the ionosphere

浅村和史、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所

地球の電離圏からは酸素イオンなどの重粒子が流出し、磁気圏に供給されている。これらの粒子はカサブ領域やオーロラ帯上空で磁力線垂直方向に加熱されたイオンとして観測されてきており、広帯域なプラズマ波動 (BBELF) と同時に観測されることが多い。このため、流出機構として電離圏の冷たいイオンがプラズマ波動によって加熱され、磁気ミラー力によって上昇速度を得る機構が考えられている。しかし、どのようなプラズマ波動がイオン加熱を起こしているのかは未解明のままである。イオン加熱を引き起こすプラズマ波動の同定のためには、プラズマ環境の直接観測を行い、あらせ衛星などで用いられている波動粒子相互作用解析器 (WPIA) の手法を適用することが有効と考えられる。しかし、WPIA 解析を行うためには一つ一つのイオン検出イベントに対して時刻付けを行うとともに、確実なイオン種同定が必要であり、統計的手法を用いたイオン組成比の同定では難しい。このため、電離圏における流出イオンの観測への適用は実現していない。本研究では 1~数100eV 程度までのエネルギー帯をカバーし、一つ一つの粒子検出イベントに対して代表的な流出イオンである酸素イオンと窒素イオンを分離可能な超熱的イオンエネルギー質量分析器を実現することとし、開発を進めている。

本年度は観測器質量分析部の要素技術開発を進めた。質量分析には TOF (Time-Of-Flight) 法を用いる。TOF 法は分析部内で入射粒子の飛行時間を計測して速度を導出する方法であり、別途エネルギー分析部で得られるエネルギー情報を併せて用いることで、入射粒子の質量を求めることができる。TOF 解析を行う場合、時間計測の開始 (START) タイミングと終了 (STOP) タイミングを得る必要がある。これらのタイミングを得るため、(1) 入射粒子に超薄膜カーボンを通させ、その際にたたき出される二次電子を検出器 (MCP) に導き、START 信号とする (2) 超薄膜カーボンを通した粒子をそのまま MCP で検出し、STOP 信号とする、という方法がよく用いられる。この方法を用いる場合、粒子が超薄膜カーボンを通す際に受けるエネルギーロスや角度散乱の影響を考慮する必要がある。この影響は重粒子になるほど大きくなり、あらせ衛星搭載 LEPI などの比較的シンプルな構造の TOF 分析部では、 $N^+$  と  $O^+$  をクリアに分離して計測することは簡単ではない。一方で、本観測器は地球電離圏におけるイオン加熱機構の解明のため、WPIA解析に供することを念頭に置いており、 $N^+$  と  $O^+$  を分離できる観測が求められている。

超薄膜カーボンによるエネルギーロスや角度散乱は膜厚を薄くすれば低減されると考えられるが、現在私たちが用いている超薄膜カーボンはすでに入手可能な最薄クラスのもの (公称 2.5nm) となっており、これ以上薄くすることは簡単ではない。そこで私たちは、超薄膜カーボンの代わりにグラフェン膜を用いることを考えている。グラフェン膜は単層グラフェンなども実現されており、金属メッシュなどの上に転写し、機械的に安定保持できれば超薄膜カーボンより薄い二次電子源として使用できると期待される。私たちは2層グラフェンを金属メッシュ上に転写することに成功し、試験用飛行時間分析装置に搭載して真空槽内でイオンビーム照射試験を行った。図1は2層グラフェンと超薄膜カーボン (公称厚さ 2.5nm) それぞれについて、 $H^+$ 、 $N^+$  ビームを照射し、中性粒子となって出射した粒子について飛行時間分布を計測し、得られたエネルギーロスの平均値 (左図:  $H^+$ 、右図:  $N^+$ ) を示している。また、比較のため、固体中に入射した粒子の飛程とエネルギーロスなどを計算し、軌道を追跡できる計算機シミュレーションソフトウェアである SRIM (the Stopping and Range of Ions in Matter) を用いて得た出射エネルギー分布から導出したエネルギーロスを青線で示す。グラフェンによるエネルギーロスは超薄膜カーボンに比べ 0.5倍程度に抑えられている。また、SRIM を用いた結果からは 4nm 程度の厚みのアモルファスカーボンと同等レベルのエネルギーロスであることが分かる。

次に、5keV の  $N^+$  ビームをグラフェンに入射させ、N (中性の窒素原子) となって出射したものについて飛行時間分布を計測した。なお、本観測器がターゲットとするイオンのエネルギー帯は 1~数100eV であるが、本観測器はグラフェン膜に -5kV を印加して観測することを考えており、入射粒子のグラフ

エン膜到達時のエネルギーは 5keV 以上となる。図2 に得られた N+ 入射時の飛行時間分布を示す。また、O+ の入射に対応する飛行時間分布も橙色で示すが、これは O+ ビームを照射して得たものではなく、O+ のグラフェン膜 / 超薄膜カーボンからの出射エネルギー分布が N+ と同等であると仮定し、N+ についての取得データに質量差に起因する速度差を与え、推定したものである。

上記の試験から、質量分析に用いる飛行時間分析部について、二次電子発生源にグラフェン膜を用いることで従来から用いられてきた超薄膜カーボンよりも実効膜厚を薄くでき、粒子通過時のエネルギーロスの影響を効果的に低減できることが確かめられた。この結果を受け、今後、観測器の極板設計の最適化を進めていく。

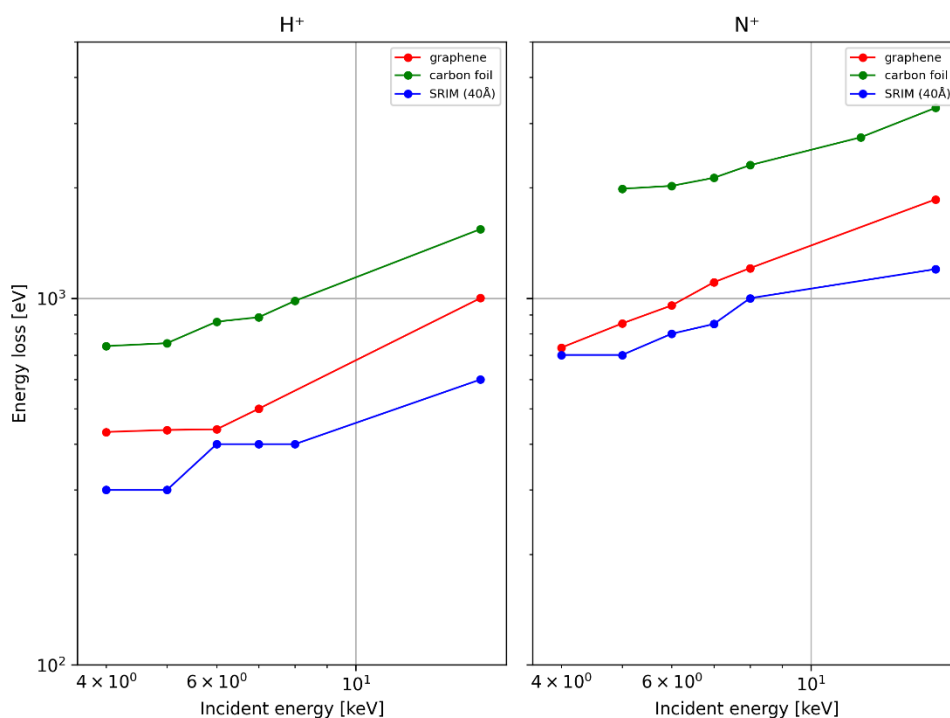


図1: グラフェン膜、超薄膜カーボンを試験用飛行時間分析器に組み付け、イオン照射によって得たエネルギーロスの平均値。左図はH+、右図はN+の結果を示す。色分けは左右で共通であり、赤線がグラフェン膜、緑線が超薄膜カーボン、青線が SRIM を用いて 4nm の膜厚のアモルファスカーボンについて導出した結果を示す。

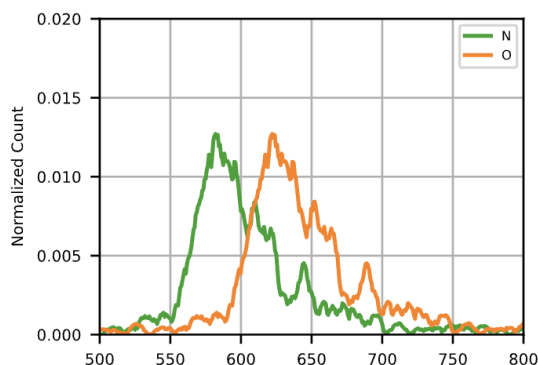


図2: (緑色) 5keV の N+ ビームをグラフェンに入射させ、N (中性の窒素原子) となって出射したものについて計測された飛行時間分布。(橙色) 出射エネルギー分布が同一と仮定し、N+ のデータに質量に起因する速度差を与えて推定した O+ の速度分布。

(別紙様式04-2)

北極域中間圏界面領域の風速・温度・乱流の精密観測  
Precise observations of wind, temperature and turbulence in the northern high  
latitude mesopause region

堤 雅基、国立極地研究所・宙空圏研究グループ

#### 研究目的

主として下層大気で励起された大気波動は、上層で散逸・乱流化してエネルギーや運動量の運び屋としての役割を担う。しかし乱流化に至る過程は時空間スケールが小さく、その観測は容易ではない。また極域の中間圏・下部熱圏域は、磁力線に沿って上から流入するエネルギーも大きく、エネルギー・運動量収支の定量評価はいまだ難しい。本研究では、北極域の中間圏から下部熱圏域の中性大気風速および温度を、これまでに例を見ない高時間・空間分解能で観測し、乱流生成領域に至る小スケールの力学現象を解析する。北欧に設置済の2つのMFレーダーを流星エコー観測に応用することで、共通視野観測の実現により、水平200km/高度75-100km程度の領域の風速の時空間発展を、水平10km/高度4km程度、時間10分程度の分解能（時空間相関手法を使うと統計的にさらなる向上が期待できる）で捉えることが可能となり、中間圏界面領域の乱流生成の現場の微細構造理解が大幅に進むと期待できる。具体的には、3次元構造可視化に加え、小スケールの時空間スペクトル分布の解析や、運動量流速解析を行う。水平構造可視化に優れた別手法である大気イメージャと比較すると、本手法は直接的に風速を測定すること、および高度方向の構造が分かることが大きな利点である。

#### 研究方法

貴研究所の野澤准教授がトロムソ（69°N, 19°E）でノルウェー北極大学と共同運用するMFレーダーに受信専用装置を新たに設け、流星エコーを利用した高分解能観測を実現する。単一のMFレーダーのみでも、時間10分・水平50km程度と、従来手法よりも飛躍的に高い時空間分解能を持つ。併せて、申請代表者がドイツLeibniz Institute of Atmospheric Physicsと協力してSaura（69°N, 16°E）MF radarでも同様の観測を行い、2つのMFレーダーの共通視野領域内ではさらに高分解能観測が実現する。得られたデータをもとに空間構造可視化を行うほか、Vierinen et al. (2019)の統計手法などを利用して、大気波動が乱流に遷移する小スケール域に至る時空間スペクトルの推定を行う。2つのレーダーによる観測が実現した際には、野澤准教授がトロムソにおいて運用するナトリウムライダー、および堤が同じくトロムソで運用するVHF流星レーダーのデータも合わせた複合観測研究を実施する。

初年度となるR7年度は、トロムソMFレーダーによる流星観測実現のための付加デジタル受信機の開発と設置を中心に研究を進めた。

#### 研究結果

本課題に先駆けて南極昭和基地のMFレーダーを使って開発した、流星エコーを利用する高時間空間分解能風速を、トロムソMFレーダーでも実現するための付加受信装置の開発を行った。堤および野澤准教授がそれぞれ代表者および分担者を務める科研費を元にして、デジタル受信機とPCを組み合わせた付加受信機を組み上げた。ノルウェー北極大のVierinen教授の協力の下、受信機をトロムソMFレーダーの既存アンテナおよび新規ループアンテナに接続し、中間圏から下部熱圏域の試験データを取得した。4チャンネルの時系列データの取得に成功し、流星エコーの確認などを行った。また本デジタル受信機の設置は、Vierinen教授が指導するノルウェー北極大の卒研究生の研究として実施した。今後、アンテナ配置の最適化を行い、4チャンネルの受信干渉計として定常的な流星風観測の実現を目指す。

上記の開発と並行し、対となるもう一つのMFレーダーであるSauraレーダー（69N, 16E）を流星風観測に応用する解析を、本レーダーを運用する Leibniz Institute of Atmospheric Physicsの研究者と協力して行った。本レーダーは、流星観測の実施に十分

な数の受信チャンネルを既に備えている。定常的に実施されている大気乱流エコーデータを元にして、良質な流星風観測が実施できることを確認し、Saura側における初期的な準備は整った。

#### まとめ

MFレーダー2台を組み合わせたネットワーク流星風速観測からは、レーダーとしては飛躍的に高い時間空間分解能（時間：数分程度、水平：5–10km程度）で空間構造を調べることができると見込まれ、大気重力波の詳細研究が期待できる。R8年度は、トロムソでの定常的な流星エコー観測を実現し、共通視野観測の開始を目指す。

#### 成果論文：

FYS-3730 - Project Paper: Rapid Prototype of a Software Defined MF Radar Receiver

Student: Lukas Jordbru

Advisors: Juha Vierinen, Masaki Tsutsumi (NIPR), Njål Gulbrandsen (TGO)

2025年度における ノルウェー北極大の卒業論文にあたる研究

#### 成果発表（学会）：

**Masaki Tsutsumi**, Toralf Renkowitz, Jorge L. Chau, Juha Vierinen, Njål Gulbrandsen, **Satonori Nozawa**, High resolution mesopause region wind observations based on common-volume MF radar meteor echo measurements in the Arctic Norway, JPGU, Makuhari, May 28, 2026.

本課題に先立つISEE共同利用課題の活動を通じて獲得し、本課題に深く関連して実施中の科研費：  
基盤研究(B)（一般）、流星エコーを利用した新規手法による極域中間圏界面領域の風速・温度・乱流の精密観測、**堤雅基**（代表）、**野澤悟徳**他3名（共同研究者）、2024-2026年度

層状マンガン酸化物を用いた重水素分離に向けた基礎研究  
Separation of deuterium using layered Mn oxide

田中万也  
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構  
原子力科学研究所先端基礎研究センター

【研究背景及び目的】

マンガン酸化物には様々な多形が存在し、その中の一つに層状マンガン酸化物 ( $\delta$ 型) がある。層状マンガン酸化物は、 $\text{Mn(IV)O}_6$ 八面体シートの積層構造からなり、シート内の $\text{Mn(IV)}$ 欠損または $\text{Mn(IV)} \rightarrow \text{Mn(III)}$ 置換により永久負電荷が生まれる。こうした永久負電荷を補償する形で層間に陽イオンが取り込まれている。また、層間には陽イオンの他に水分子も取り込まれており、加熱により層間から水分子が脱離することがこれまでの研究が明らかとなっている(Yoshisako et al., 2025)。この際に、水の蒸発と同様に軽い同位体からなる水分子が選択的に脱離していくことが予想される。研究代表者は、こうした水分子の脱離における分別挙動を利用することにより、重水素分離が出来るのではないかと考えた。本研究では、層状マンガン酸化物からの水分子脱離における同位体分別効果の有無及びその程度を定量化することを目的とした。

【研究方法】

層状マンガン酸化物はVillalobos et al. (2003)の方法に従って研究代表者が予め所属機関にて合成し、ISEEに持ち込んだ。本研究では、ISEE内にある真空ライン及び共同利用機器である安定同位体分析装置 (Picarro L2130-i) を用いて実験を行った。まず、1) マンガン酸化物を真空ラインに封入し加熱処理を行い、放出される水を回収した。その後、2) 回収した水の水素同位体比(D/H)をPicarro L2130-iを用いて測定した。1) においては、加熱温度の条件及び封入するマンガン酸化物の量の最適化を行い、D/H分析に十分な水量の回収が可能な条件を検討した。また、真空ラインで回収した水をPicarroにどのように導入するかを検討した。2) においては、分析時のメモリー効果をどう取り除くか等分析条件を検討した。

【結果及び考察】

マンガン酸化物試料の加熱温度を100℃、200℃、400℃に設定し、それぞれの設定温度で30分以上保温した状態で放出される水を回収した。当初、試料の加熱はマントルヒーターを用いて行ったが温度制御が安定しなかった。そこで、マントルヒーターに石英ウールを敷き詰め、さらに温度制御コントローラーを設置した(図1)。その結果、試料を±10℃程度で安定して加熱できることが確認できた。

次に、マンガン酸化物試料量の最適化を行った。まず、1gの試料量で実験を開始したが、水の回収量が不十分であったことから、2g、5gと試料量を増やした。その結果、D/H分析に十分な量の水試料を回収するためには、5gの試料を用いるのが適当であることが分かった。ただし、合成したマンガン酸化物が非常に微細なため試料量が増えると粒子間にトラップされている



図1. マントルヒーターによる試料加熱の様子。  
(左) 石英ウール・温度制御コントローラーなし。  
(右) 石英ウール・温度制御コントローラーあり。

空気量も増えるため、それが水回収の妨害となることも分かった。そのため、試料を真空ラインに封入し加熱を開始する前に、十分な真空引きを実施し粒子間にトラップされている空気を出るだけ除去する必要がある。Picarro L2130-iによるD/H分析では装置の特性上メモリー効果が残しやすいため、繰り返し測定の必要がある。5gのマンガン酸化物加熱から回収した水試料量はこうした繰り返し測定に十分な量であり、測定結果に問題がないことを確認した。

以上より、計画している一連の実験が実施可能であるおおよその見通しが得られた。これまでの実験結果から推察されることとして、100℃の加熱においてマンガン酸化物表面の吸着水が脱離していると考えられる。一方、200℃以上では層間の水が脱離していると考えられる。今後の予定としては、一旦100℃で加熱して表面吸着水を除去した後、100℃間隔で400℃まで段階的に加熱し、100–200℃、200–300℃、300–400℃の温度領域で層間から脱離する水を回収する。それぞれの温度領域で回収した水試料の同位体分析を行い、D/Hにどの程度の差（同位体分別）があるのかを確認する。さらに、50℃間隔での加熱においても実験可能であるか検討する予定である。

#### 【引用文献】

- Villalobos, M., Toner, B., Bargar, J. and Sposito, G. (2003) Characterization of the manganese oxide produced by *Pseudomonas putida* strain MnB1. *Geochim. Cosmochim. Acta* 67, 2649–2662. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(03\)00217-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(03)00217-5).
- Yoshisako, H., Okamoto, N. L., Tanaka, K. and Ichitsubo, T. (2025) Surface Water Adsorption on Layered Manganese Dioxide Nanosheets: A New Concept for High-Performance Heat Storage. *Comm. Chemistry* 8, 169.

フーリエ変換型分光計を用いた地上分光観測による同位体比変動の観測  
 Temporal variations of isotope ratios observed with Fourier transform spectrometer

村田 功 東北大学大学院環境科学研究科

東北大学と国立環境研究所では、つくばでの Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC) 観測規約に基づくFTIR観測を1998年から行っている。これまでにHCl、O<sub>3</sub>など多くの成分を解析してきたが、本研究では同位体の変動を調べることにした。同位体比は発生源や化学反応によって変化するため、大気中の同位体比を測定することでこれらの情報が得られる。ただし、一般的には同位体比を求めるには高精度な観測が必要である。赤外分光では絶対量の少ない同位体でも吸収強度の強い吸収線を用いれば解析は可能であるが、吸収線の強度などに数%程度の不確実性があることが多く、‰単位の微少な絶対値を精度よく求めることは難しい。しかし、<sup>12</sup>CH<sub>3</sub>Dのように主成分である<sup>12</sup>CH<sub>4</sub>に対する相対的な変動が%オーダーと大きい場合は、吸収線強度の不確実性は相対変動には影響しないため、解析誤差を%程度に抑えられれば相対的な変動から発生源等に関する議論は可能ではないかと考え、昨年度までの共同研究課題で<sup>12</sup>CH<sub>3</sub>Dの解析手法の確立を行った。今年度からの課題では、この手法を用いて実際にメタンの水素同位体比(δD)の経年変化を調べることにした。

赤外スペクトルの解析には、NDACC/InfraRed Working Group (IRWG) で共通して用いられている、ロジャーズ法を用いたスペクトルフィッティングプログラムSFIT4 (v1.0.21) を使用している。メタンは3μm帯および8μm帯に多くの吸収線を持つため、<sup>12</sup>CH<sub>3</sub>Dの解析では3μm帯、8μm帯それぞれで複数の吸収線を同時に解いてみたが、いずれも吸収のピークが数%以下の吸収線しかなく、昨年までの課題では複数の吸収線を組み合わせることで3μm帯と8μm帯での解析結果が整合的となった。

今年度は、前課題の結果を受け、まずは解析手法の改善を試みた。相対的に吸収線強度が強くてS/Nのよい3μm帯で改めて使えそうな吸収線を全て使って解析を行い、使用する吸収線の選択やパラメータの最適化をやり直して、最終的に3μm帯の7つの波数領域(吸収線の数は8つ)を同時に解くことで少しではあるが解析精度が向上した。

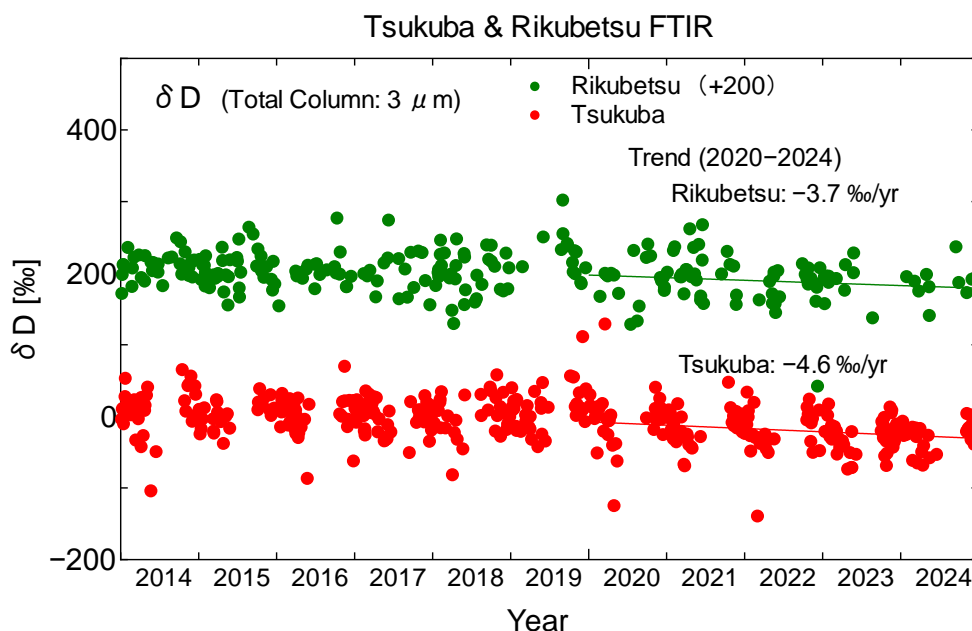


図. 3μm帯の<sup>12</sup>C H<sub>3</sub>Dおよび<sup>12</sup>CH<sub>4</sub>の吸収線から導出した陸別とつくばのδDの経年変化

そこで、この解析パラメータを用いて、つくばと陸別のこれまでの観測スペクトルから<sup>12</sup>CH<sub>3</sub>Dの解析を行い、別途解析している<sup>12</sup>CH<sub>4</sub>との比からδDを求めた。図にそのうちの2014-2024年の結果を示す。見やすいように陸別の結果は200‰上方にシフトさせているが、いずれの結果にも2020年以降に減少傾向が見られた。直線でフィッティングしてみると、陸別で-3.7‰/yr、つくばで-4.6‰/yrと比較的近い結果となった。この減少傾向はサンプリングによる地上観測の結果にも見られているが、値としては一桁

小さい10年で数%程度である。我々の観測で見ているのは地上付近の値ではなく高度方向に積分したカラム量である。メタンの場合、Clとの化学反応係数が $^{12}\text{CH}_4$ は $^{12}\text{CH}_3\text{D}$ の1.5倍程度速く、フロン規制の効果で成層圏塩素量が減少傾向にあることを考慮して簡単な見積を行うと、カラムでは-1.5%/yr程度の $\delta\text{D}$ の減少はあってもおかしくないことがわかった。ただ、それでも-4%/yr程度の値は少し大きすぎる。次年度は引き続きこのあたりの解析を進めたい。

#### 【成果発表】

- 村田 功、長濱智生、森野 勇、中島英彰、つくばFTIRで観測されたメタンの水素同位体比の減少傾向、日本地球惑星科学連合2025年大会、幕張、2025年5月。
- I. Murata, T. Nagahama, I. Morino, H. Nakajima, Some progresses in the retrieval of  $\text{CH}_3\text{D}$ , NDACC/IRWG-TCCON-COCCON Annual Meeting 2025, Nainital, India, June 16-20, 2025.
- I. Murata, T. Nagahama, I. Morino, H. Nakajima, Decrease of the hydrogen isotope ratio of methane observed with FTIR at Tsukuba, AOGS2025, Singapore, July 28 – Aug. 1, 2025.
- 村田 功、長濱智生、森野 勇、中島 英彰、FTIR観測による $\text{CH}_3\text{D}$ 導出精度の向上、第8回地上赤外分光観測による大気組成変動検出に関する研究集会、東京、2025/9/3-4.
- 村田 功、長濱智生、森野 勇、中島英彰、地上FTIR観測によるメタン水素同位体比の導出精度の向上、第30回大気化学討論会、柏、2025年10月8-10日。

(別紙様式04-2)

フーリエ変換赤外分光器を用いた地上分光観測によるHFC-134aの解析  
Analysis of HFC-134a using ground-based infrared spectra taken with Fourier-transform infrared spectrometers

中島英彰、国立環境研究所・地球システム領域

<研究目的>

フーリエ変換赤外分光器 (FTIR) を用いて、太陽光を光源に赤外分光観測を行うと、上空の様々な大気微量成分の鉛直カラム量や高度分布を導出することが可能となる。名古屋大学宇宙地球環境研究所では、1995年より北海道・陸別町においてFTIRを用いた大気微量成分の観測を行ってきており、長年の観測スペクトルの蓄積がされている。国立環境研究所と東北大学でも、1998年よりつくばにおいて同様の観測を行ってきており、ともに20年以上にわたる長期観測データがある。本研究では、つくばで観測された分光スペクトルを用い、SFIT4と呼ばれる解析プログラムを用いて、日本上空のHFC-134aのカラム全量及び高度分布を導出し、その変動の様子を調べ、AGAGE等の地上観測結果やACE-FTSなどの衛星観測結果と比較することを目的とした。

<研究手法>

今回の解析では、FTIRコミュニティーにより継続的に共同で開発されている共通の解析ツールであるSFIT4 Ver. 1.0.18を利用した。HFC-134aの解析にはMCTディテクターの観測領域である1104-1106  $\text{cm}^{-1}$ と、1182-1187  $\text{cm}^{-1}$ の2つのMicro-Window (MW) 領域をfitting領域として利用した。HFC-134aの吸収線には、G. C. Toonによる疑似吸収線データを利用した。その他の干渉気体のラインパラメータには、HI TRAN 2000とATM 2000によるline parameterを利用した。HFC-134aの初期プロファイルとしては、ACE-FTS衛星によるL2 v4.0の2018年の高度分布 (Harrison et al., 2021) を利用した。つくばのIFS-125HR FTIRによるMCT領域での観測がある2014年から最近の2023年までのデータの解析を行った。その他の解析パラメータを、表1にまとめた。

<結果と考察>

SFIT4によるHFC-134a吸収線のフィッティングの結果、一部に未知の吸収物質による残差が見受けられたが、MW-1, MW-2ともに全般的に残差 $\sim 0.5\%$ 以内でうまくフィッティング出来た。解析では、OEM (最適推定法) と、Tikhonov規則化法という2つの解法を試みた。つくばにおけるFTIR観測スペクトルは、観測パラメータ設定の関係で、2014年～2017年のMCTチャンネルの観測データは、それ以降の観測データと比べてSNRが悪いという特徴がある。2017年以前の期間に関しては、OEMの方がTikhonov法よりも安定して解を得ることが出来た。図1に、OEM解析で得られたHFC-134aの気柱全量日平均値の経年変化を示す。さらに、空気中の水蒸気成分を除き、その日の気圧を考慮してHFC-134aの乾燥空気混合比 ( $X_{\text{HFC-134a}}$ ) の値を求めた。その値の年増加率の値を、他の衛星観測やモデルによる増加率と比較した結果を図2に示す。つくばのFTIRによる値は、TOMCAT-CTMや、ACE-FTSによる値に比べて、特にTikhonov解法による値が若干大きめの値となったが、その増加率の値は他の観測やモデルによる値と良く一致した。つくばのFTIRの絶対値が他の値と比べて大きな理由としては、アジア特に中国における最近のHFC-134aの放出量の増加を反映している可能性があると考えている。

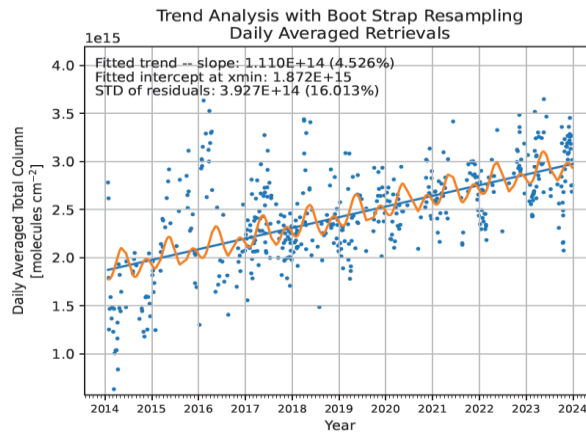


図1 SFIT4による日平均HFC-134aの解析結果

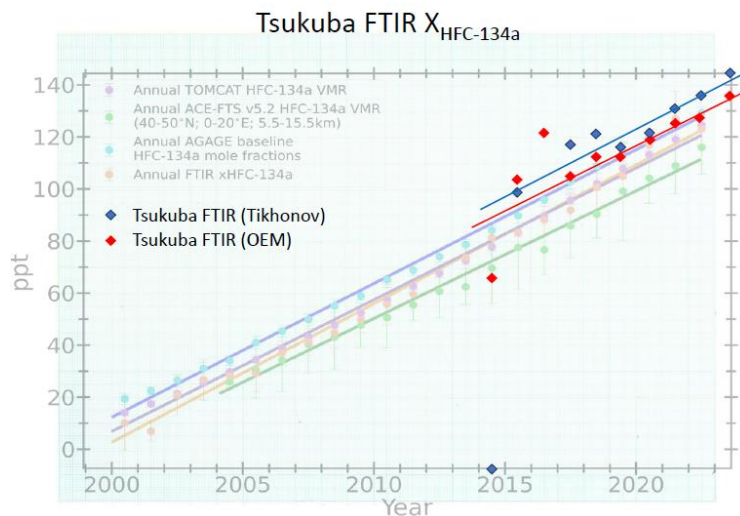


図2 FTIRによるHFC-134aの増加トレンドと、他の観測やモデルによるトレンドとの比較

< 成果発表 >

- Nakajima, H., I. Murata, I. Morino, and G. C. Toon, “First retrieval of HFC-125 by ground-based FTIR in Tsukuba, Japan”, NDACC 35-years Symposium, Virginia Beach, VA, U.S.A., November 27, 2025.
- 中島英彰、村田 功、森野 勇、G. C. Toon, 「つくばのFTIRによる世界発となるHFC-125の解析」、大気化学会 2025年大会、柏（千葉）、2025年10月9日
- Nakajima, H., I. Murata, I. Morino, and G. C. Toon, “The first retrieval of HFC-125 by ground-based FTIR in Tsukuba, Japan”, NDACC-IRWG-TCCON-COCCON Annual Meeting 2025, Nainital, India, June 18, 2025.

# 太陽活動最盛期の太陽中性子の研究

## Study of Solar Neutrons during the solar maximum

代表者： 村木 綏 (名古屋大学名誉教授)

共同研究者： 柴田祥一、大嶋晃敏、小井辰己、松原 豊 (中部大学)

**研究目的：** 第 25 太陽活動は現在最大に達している。それに伴い X-class の太陽フレアが頻発している。このような巨大な太陽フレアには、宇宙活動に影響を与える高エネルギー粒子(放射線)( $>10\text{GeV}$  以上)が伴っていることは良く知られている。しかしどのような過程で、陽子やイオンが高エネルギーまで加速されるのか、理学的課題(起源問題)になるとよくわかっていない。gradual flare では統計加速により粒子が加速される説が有力であるが Impulsive flare での粒子加速は大きな謎である。そこでこの課題の解明のために、我々は乗鞍やチャカルタヤ山で太陽中性子を受信し、そのデータを SDO や FERMI-GRB monitor 等の data と比較して加速過程を解明する課題に挑戦している。

**具体的方法：** 乗鞍岳における高エネルギー太陽粒子の検出のため、乗鞍岳の① 面積  $1\text{m}^2$  厚さ  $50\text{cm}$  の Plastic scintillator 装置と② 中性子モニター(12NM64)を用いる。太陽表面で加速されたイオンは、太陽表面大気と衝突して中性子を発生させる。中性子は電荷を有していないので太陽圏磁場に影響を受けず地球に向かって直進する。(しかし崩壊とエネルギーにより飛来時間が異なるという問題は残存する。) しかしシンチレータ測定器では  $40\text{MeV}$  以上のエネルギーを有した反応を検出できるので、飛来時間の問題はある程度制限可能で、太陽表面での中性子発生時刻を同定できる。この方法に関して我々 group は観測実績がある。乗鞍観測所には冬季の電源問題があるが、それは太陽光発電で賄っている。2024 年度は中部大学が新たにバッテリーを 3 台充足したことにより、①と②の測定器は通年に連続観測ができた。そのため 2024 年 5 月のフレアに伴う太陽中性子を 3 例検出できた。これらの成果をまとめて第 39 回宇宙線国際会議(至 Geneva)で発表した。

### 得られた成果：

① 2025 年 7 月に Geneva で 7 月 15 日~7 月 24 日に宇宙線国際会議が開催されたので、そのための論文作成に力を入れた。発表した論文は

- Oshima, Koi, Kito, Tabata, Kamiya, Shibata, Kojima, Matubara, Yamazaki(中部大)と Muraki, Masuda, and Tajima(名大)が著者で、タイトルは Solar Neutron Events recorded by Mt. Norikura Observatory during 2024 である。PoS (ICRC2025) 1351 より download が可能である。もう一つの論文は
- Observation of Solar Neutron Decay Protons by the International Solar Neutron Network (SONTEL) が表題で、著者は、Muraki, Buetikofer, Chilingalian, Flueckiger, Karapetyan, Kito, Masuda, Matsubara, Miranda, Ortiz, Oshima, Sako, Shibata and

Subieta で、日本—スイス—アルメニア—メキシコ—ボリビアの国際太陽中性子観測ネットワークを駆使して解析されたイベントである。こちらの方の内容は *Proceeding of Science; PoS(ICRC2025)1339* より download 可能である。

- ② 国際会議が終了後、次に解析を進めたのは 2024 年度に Bolivia の Chacaltaya 山(5,250m) に設置されている名古屋大学の太陽中性子観測装置で、巨大フレアの際に得られた信号の増加について解析を進めた。Chacaltaya 観測所は大気圧が約半分なので、太陽中性子が大気中を伝播する際の減衰が他地点と比べて少なく、太陽中性子の良好な受信が期待される。Chacaltaya 上空に南中する時刻の前後 2 時間内に  $X > 1$  以上の太陽フレアが発生した事例について高エネルギー中性子信号の有無を調べた。その結果 4 例とも  $3.5 \sim 5\sigma$  level の統計精度での信号の増加を検出した。そこで SOHO 衛星に搭載されている太陽表面の紫外線画像を詳細に調べた。またこのとき、Fermi 衛星に搭載されている GRB 測定器の data を参考にした。GRB 測定器は NaI と BGO から構成されており、100keV~300keV の soft ガンマ線の data がイオンの高エネルギーへの加速過程と強い相関があると考えられる。ソフトガンマ線が急激に増加する時刻に 数分以内にイオンが 10GeV 以上に加速されたと考えて良いことが分かった。この結果は 3 月 2 日の共同利用の成果発表会で報告するとともに日本物理学会で 3 月 24 日発表する。
- ③ 補足として、3 月 2 日の共同利用発表会で渡辺恭子氏より質問のあった、衛星 data の解析を進めた。Lagrangian point にいる SOHO 衛星には EPHIN 装置が搭載されている。最近その data が公開された。その結果 2024.5.14 event と SNDP が受信された 2024.5.27 event には、太陽中性子崩壊電子が観測されている。5 月 27 日 event は E89 という east limb で発生したので、荷電粒子は飛来せず、中性粒子のみが Armenia, SOHO 衛星で、NMDB が Chacaltaya で受信された。一方 5 月 12 日、9 月 14 日、10 月 9 日 event はそれより数日前の flare に伴う大量の荷電粒子の流れに太陽中性子崩壊電子や陽子の信号は遮蔽され、有意な信号が受信ができなかったことが分かった。なお太陽中性子崩壊電子は小井により発表され event である。(Nuovo Cimento **21C** (1998) 485-502).

まとめ： これらの事実を総合的に判断すると、impulsive solar flare では、Litvinenko や Somov らが提唱するように、反平行磁場が衝突し磁場の組み換えが発生する地点で  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  によって発生する電場  $\mathbf{E}$  によってイオンが数分以内に加速されるという仮説で説明可能である。ただその磁場の組み換え地点は 10,000km 以上に及び、長い電場が形成されている必要がある。この長さによってイオンの加速限界が決められると考えられる。

## 高校生とともに行う都市大気中CO<sub>2</sub>濃度の継続測定方法の開発

Development of a Method Performed with High School Students to Measure Changes in the Urban CO<sub>2</sub> Concentration

河野 光彦、関西学院大学・理学部

### 【研究目的】

気候変動の主要原因とされる大気中におけるCO<sub>2</sub>について、その動態予測は喫緊の課題であるが依然として不確実性が残されている。特に、大規模な排出源となり得る都市圏において、地上付近のみならず上空を含む鉛直方向の大気観測データは決定的に不足している。効果的な排出管理策や高精度な気候シミュレーションの構築には、地表から大気上端までの平均的な濃度を示すCO<sub>2</sub>気柱平均体積混合比(XCO<sub>2</sub>)の日変化や季節変動を捉えた詳細な地上観測データの蓄積が不可欠である。

こうした背景から本研究グループでは、高い機動性を有する小型可搬式観測装置を開発し用いることで、従来設置が困難であった地点での機動的なXCO<sub>2</sub>観測を可能とした。これまでの3年で関西学院千里国際キャンパス(SOIS:大阪府箕面市)と大阪国際空港(ITM:伊丹市)周辺4地点およびオーストラリア国立大学(ANU:キャンベラ)においてXCO<sub>2</sub>観測を実施できるところまで到達した。本報告では、上記の地点における観測結果について報告する。本研究が、可搬式装置を用いた広域的な大気観測ネットワークの構築、および都市部における温室効果ガス動態の理解に寄与することを期待する。

### 【研究方法】

本研究では、太陽直達光の近赤外スペクトルから大気成分による光吸収量を算出する、地上設置型分光観測装置を用いた。得られたXCO<sub>2</sub>任意単位のデータは今後、国立環境研究所の標準データに基づき校正を行う予定である。XCO<sub>2</sub>の計測は1.0秒間隔で実施し、並行して非分散型赤外線吸収法(NDIR)を用いた地表CO<sub>2</sub>濃度(MCH-383)、および気象要素(気温・気圧・湿度:MHB-382)を60秒間隔で記録した。開発した装置は総重量が約10kgと軽量であり、国内外への可搬性に優れている。

観測地点の詳細は以下の通りである。

(1) SOIS: ITMの北東に約8kmに位置する定点観測地。2024年9月より平日の日中(9:00-16:00)に継続観測を実施した。なお、2026年1月より恒温装置(20°C設定)を導入し、熱的要因による測定精度の向上を図っている。

(2) ITM周辺: 滑走路(南東-北西方向)周辺の4地点。滑走路端から約0.5km南東(SE)と北西(NW)、滑走路側方に約1kmの南西(SW)と北東(NE)にて実施。2024年3月より各季節(3, 6, 9, 12月)の週末に1か所につき6時間以上の連続測定を計16回以上行った。

(3) ANU: 南半球の比較地点として、2025年8月5日~8日の5日間、現地冬季の集中観測を実施した。

### 【研究結果と考察】

2025年夏にあたる6月2日~7月15日に観測されたXCO<sub>2</sub>の日毎データを図1に示す。太陽高度76~77°時の平均値を示し、エラーバーは変動している値の標準偏差を表す。白抜き青四角(□)がITM周辺の観測データで、赤丸(●)がSOISのそれとなっている。白抜き四角に添えられているSW, SE, NW, NEは、観測地点を表している。XCO<sub>2</sub>観測値はSOISよりもNW以外でのITMのほうが低い。同様の傾向は2024年9月に観測したときにも得られていた。NWでXCO<sub>2</sub>が約3%程度高くなっているのは、離陸方向がNWであることから飛行機からのCO<sub>2</sub>排出が原因だと考えられる。

ANUで観測した結果を述べる。観測期間の2025年8月5~8日は南半球で冬季にあたるが、XCO<sub>2</sub>が高

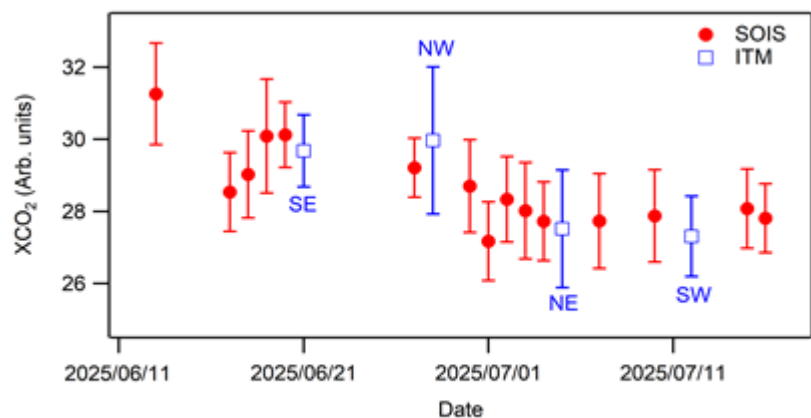


図 1. ITM 周辺および SOIS における XCO<sub>2</sub> (任意単位)

いレベルにあり、それはSOISの冬季の水準と同等であることがわかった。ITMとSOISにおける2024年9月～2026年3月の期間での観測結果では、XCO<sub>2</sub>は7月から9月の夏季が低い水準にあり、12月から4月の冬季が高い水準であった。

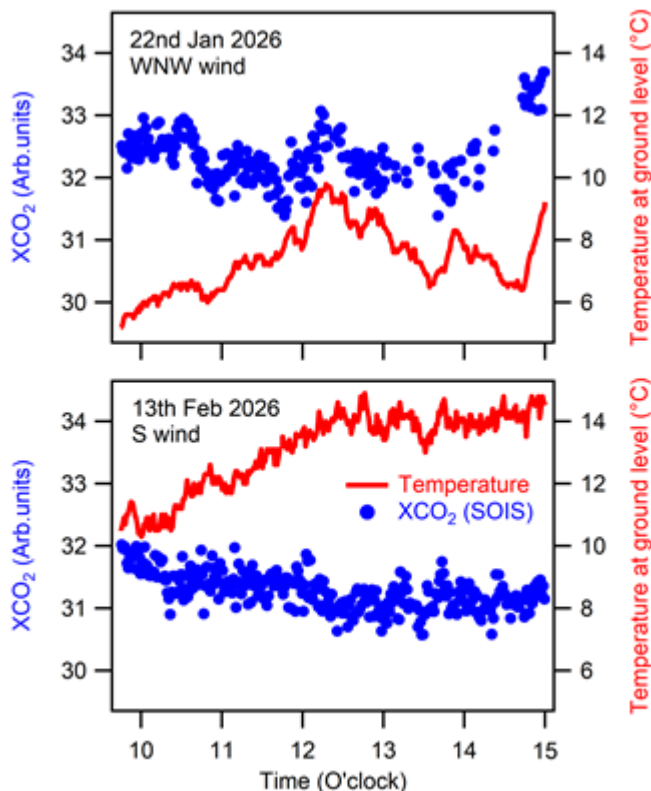


図 2. SOIS の冬季での XCO<sub>2</sub> 時間変化 (任意単位)

2026年1月22日と2月13日にSOISで観測されたXCO<sub>2</sub>の日中の時間変化(●)を気温変化(—)とともに図2に示す。上は1月22日で気温が比較的低く、気象庁データ(豊中)によると風向は西北西であった。下は2月13日で気温が比較的高く風向は南であったときのデータである。XCO<sub>2</sub>は1月22日では午後から増加しているのに対して、2月13日では午後も減少と続けている。原因としては、気温または風向が影響していると考えられる。気温(低温)による同様の傾向はANUでの観測データにおいても確認されており、XCO<sub>2</sub>の時間変化が局所的な気象条件、特に気温変動に依存している可能性がある。また高温による同様の傾向も、SOISでの観測で一部確認されている。しかしながら、データの信頼性に関して留意する必要がある。2026年1月以前のデータについては、装置自体の温度特性が測定値に混入している懸念があり、それ以降のデータと比較して信頼性が限定的である。現時点では、恒温条件下での高精度な観測はSOIS冬季データに限られており、装置の熱的安定性が確保された状態での再現性の確認が喫緊の課題である。今後は、全季節を通じて同様の条件下での観測を継続し、環境要因とXCO<sub>2</sub>真値の相関

をより精緻に評価する計画である。

一方、例外もある。1月18日のSOISでの観測データでは、気温が比較的温か(15°C以上)であるにもかかわらずXCO<sub>2</sub>は午後から増加していた。この日の風は東向きであった。このことより、気温よりも風向のほうが強い影響を及ぼしていると考えられる。SOISでは緑地のある南からの風が午後のXCO<sub>2</sub>減少の原因になっている可能性がある。

2025年12月にITM周辺で観測されたXCO<sub>2</sub>の日中の時間変化では、気温の違いに関わらずNWとSEではXCO<sub>2</sub>時間変化が類似の特徴を示しており、ともに北西の風であったことが原因であった可能性を示している。東風が吹いていたSWでは午後XCO<sub>2</sub>が減少し続けている。離陸方向に当たる北西であることから、北西からの風が飛行機から排出されたCO<sub>2</sub>を運んできてくるのかもしれない。一方、東からの風は排出されたCO<sub>2</sub>含まない空気と置換されていた可能性がある。2025年6～7月のITM観測では明確な北西からの風はなく、9月27日のITM-NE観測では北北西の風はあったものの離陸方向からは少しずれていたためか、午後の明らかなXCO<sub>2</sub>増加はなかった。

#### 【まとめ】

本研究では、独自に開発した小型可搬式観測装置を用い、SOIS、ITM周辺、および比較地点としてのANUにおいて、日中のXCO<sub>2</sub>観測を実施した。得られた主な知見は以下の通りである。

**空港周辺における局所的変動：**夏季の観測結果から、航空機の離陸方向に位置する観測地点(NW)において、XCO<sub>2</sub>が他地点と比較して約3%高値を示すことが明らかとなった。また、冬季の時系列解析では、午後に見られるXCO<sub>2</sub>上昇が、離陸エリアからの風系による輸送に起因する可能性が高いことが示唆された。

**季節変動の特性：**2024年9月から2026年3月にわたる長期観測の結果、ITMおよびSOISの両地点において、7月から9月に極小値、12月から4月に極大値を示す明瞭な季節サイクルを確認した。この変動パターンは、植物の光合成や暖房需要等の季節変化を反映した知見とも整合している。

#### 【成果発表】

河野光彦ほか,"大阪国際空港周辺のCO<sub>2</sub>カラム混合比計測",JpGU,2025年5月26日

河野光彦ほか,"キャンベラの冬季昼間で観測されたCO<sub>2</sub>気柱平均混合比の変化",JpSAC,2025年10月9日

(別紙様式04-2)

ELF-MF帯電波・超低周波音波・光学の総合観測による、流星・宇宙機再突入に伴う電波放射現象の解明

Study of ELF-MF radio waves generated by reentering spacecraft and meteors basing on radio, infrasound, and optical observations

渡邊 堯、情報通信研究所、ナレッジハブ

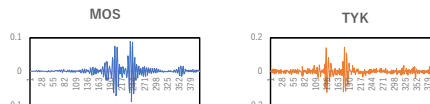
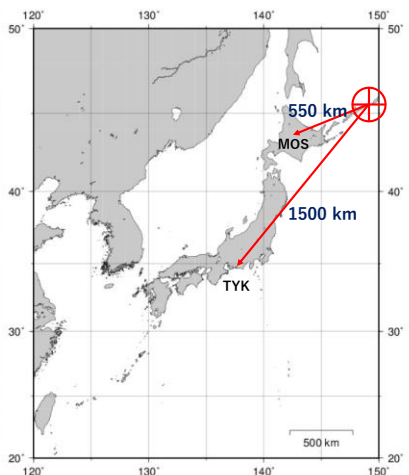
流星（火球）の発生や、宇宙機の地球大気圏再突入の発生時において、光学、電波（ELF-MF）、インフラサウンドの多点観測を可能とするシステムを整備し、これらの「秒速 10・90 km で電離層下部の高層大気圏内を飛行する物体の周辺で発生する、低周波電波放射現象」の観測と、電波発生過程の解明を行う。このような現象の存在は、前回の共同研究による観測によって、継続時間の長い宇宙機再突入の場合はほぼ確認出来たと思われるが、空電との区別が難しく、確実な検出例が少ない流星（火球）に伴う低周波電波放射については、観測態勢の整備と観測精度の向上を図り、電波発生機構の議論等に耐え得る、信頼性が保証され観測データの蓄積を目指す。当該年度に得られた研究成果（抜粋）を以下に示す。

(1) 2023年9月24日に、北米のネヴァダ・ユタ地域で実施された、OSIRIS-Rexのサンプルリターン・カプセル(SRC)の再突入の時間帯に、ネヴァダ州ユーリカ地区南部(緯度:+37.42度、経度:-115.94度)で実施した、VLF電波の方向探知(DF)観測によると、再突入によって発生したと思われる、近距離発生電波シグナルの方位角の時間変化は、秒速 11.5 km/secの一定速度で、再突入の出発点(サンフランシスコ)と終着点(ユタ州)を結ぶ線上を移動すると仮定した、簡易再突入モデルによる方位角の予想時間変化と、良い対応を示すことは、これまでの研究で確認されている。その一方、この再突入においては、NASAによる実時間軌道のレーダー観測などが十分に行われなかったため、現時点に至るまで、実軌道の詳細は公開されていない。そこでインフラサウンド観測におけるデータの解析では、いわゆる nominal 軌道が多く使用されている(Silver et al., 46th Annual AAS Guidance, Navigation and Control (GN&C) Conference, Breckenridge, Colorado, 2025)。しかし今回の方探観測では、電波の入射の象限(NE側を第1象限とする)は、電波シグナルの各成分(Hx, Hy, Ez)の組み合わせによって一意的に定まるため、各象限の境界をSRCが通過する通過のタイミングは、再突入軌道モデルに対して、ある程度の観測的制約を与えることが出来る。そこでネヴァダ州ユーリカ地域の6ヶ所のインフラサウンド観測点について、上記のSilver et al. (2025)に、観測点の真上をSRCが通過した予想時刻や高度等の記載があったため、それをもとに再現した nominal モデルによる方位角の時間変化は、方探観測による方位角の時間変化と比べて、約8秒間に及ぶ時間軸の「進み」が見られた。このモデルが正しいとすると、各観測点におけるインフラサウンド到来時刻と、SRCと観測点とが最短距離となる予想時刻との差から算出した、SRC・観測点間における平均音速が、通常の解析で使用されている約 305 m/sec よりも高速の、320 m/secに近い速度となる。一方上記の時間軸のシフトを修正した場合は、約 300 m/sec となる。このような時間軸の不一致が発生した原因の一つとして、軌道予測で使われている再突入開始(ED)の位置が不確定なため、再突入モデルによって差があることが考えられる。いずれにしても、宇宙機再突入時に発生するVLF電波放射の方探観測は、今回のような実軌道の測定手段が失われた場合に備えた観測手段として、将来的に活用出来る可能性が示唆される。

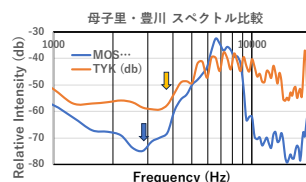
(2) 火球等の流星のVLF観測については、雷起源の空電との区別について問題が指摘されているが、

2024年12月5日に北海道東方で発生した、満月に近い明るさを持つ大火球については、名古屋大学宇宙地球研究所・母子里観測所と豊川市内の2地点からの方探観測に成功し、2点交差法によって南千島の択捉島付近で火球が発生した事が分かった（下図）。この測定結果は、北海道各地で撮影された火球のビデオ画像によって確認されている。この観測結果は、流星におけるVLF電波の放射の存在に関わる論争に、決着を付ける意味で重要と思われる。以上の観測結果は、2025年秋の日本天文学会年会、2026年3月2日に開催されたURSI-JRSM2026で発表を行った。今後多点方探観測の態勢を整備し、観測例を増やす方向で観測活動を継続する。

### 2024年12月5日01時09分に、南千島地域で出現した大火球



母子里 (MOS)、豊川 (TYK) で観測されたVLF電波波形



1. 電波源から約550 kmの母子里では、5 kHz以下の低周波領域への「伸び」が見られるが、遠距離（1500 km）の豊川では、顕著な強度低下と、より高周波部での減衰が見られる。
2. 観測されたVLF電波が、豊川の北側遠距離から伝播して来たことを示す。これは**方探観測の妥当性の傍証**となる。

(別紙様式04-2)

機械学習を用いた太陽表面輻射輸送の計算効率化手法の開発  
Development of an efficient method for solar surface radiative transfer using machine learning

飯田佑輔、新潟大学・教育研究院 自然科学系 情報電子工学系列

本共同研究では、輻射輸送シミュレーションの機械/深層学習を用いた効率化を目的とした研究を実施した。太陽表面の粒状斑や黒点などの物理過程を調査する上で、輻射輸送シミュレーションは不可欠な技術であるが、その非局所的な性質から計算負荷が大きいことが問題となっている。特に計算精度を向上するために、光線を多数本解く場合は、シミュレーションに反復が必要となり、計算負荷が非常に大きくなり、高解像度・長時間のシミュレーションの障壁となっている。

そこで、本研究では光線を24本解いた輻射輸送シミュレーションの結果を教師データとして、光線を2本のみ解いたデータをアップグレードするニューラルネットワークを構築した。機械学習の手法に習熟している新潟大学のグループとシミュレーションを得意とする名古屋大学のグループの連携が機能している研究提案と言える。

本研究ではいくつかのニューラルネットワークの構造を検討ののち、畳み込みを用いた手法(CNN: Convolutional Neural Network)を用いた手法を採用した。ニューラルネットワークそのものの妥当性検証を実施したのち、それを名古屋大学で開発している輻射磁気流体シミュレーションコードR2D2に実装して、シミュレーションにおける妥当性も検証した。その結果、異なる輻射輸送シミュレーションコードが示すばらつき程度の中には、ニューラルネットワークの誤差を抑えることに成功した。本研究の取り組みは、富岳NEXTなどGPUが基本となる次世代スーパーコンピュータにおいてさらに効果を発揮できるであろう。

(別紙様式04-2)

和文課題名 太陽ニュートリノを用いた太陽g-mode振動探索  
英文課題名 Search for solar g-mode oscillations by using solar neutrinos

中野 佑樹、富山大学 学術研究部 理学系

#### [研究の背景]

太陽はもっともよく調べられた恒星であるが、内部の密度構造、元素組成構造には不定性が残っている。太陽自身の重力に由来する太陽g-mode振動は、太陽内部構造を解明する1つの決め手である。しかし、太陽表面における振幅が極めて小さいため、光学的な探索では発見に至っていない。

#### [研究の目的]

本研究では、太陽ニュートリノを用いて太陽g-mode振動探索が可能か検討した。特に、いくつかの太陽模型構築と、星震学の手法を利用して、太陽ニュートリノの生成量が太陽g-mode振動によってどの程度変化するかを解析した。この解析により、ニュートリノ振動の周期と振幅を見積もり、ニュートリノ検出器での探索可能性を明らかにする。

#### [本研究の成果]

先行研究として、*Astrophys. Lett.* 792, L35 (2014)では、太陽g-mode振動と同じ周期で、17%程度の振幅を持って太陽ニュートリノフラックスが増減することを指摘していた。本研究では、最近の太陽模型に対して、先行研究と同等の物理解析の実施を試みた。しかし、球対称性の取り扱いの違いにより、我々のグループの理論計算では、太陽g-mode振動によって引き起こされる太陽ニュートリノの変動が非常に小さいことが分かった。この結果から、現在稼働中の太陽ニュートリノ観測実験の観測頻度の範疇では、太陽g-mode振動の証拠を見つけることが困難であることを指摘した。

一方で、新しい取り組みとして、2次の振動の効果を取り入れた項の計算も実施した。もし仮に太陽活動(11年周期)に伴って、太陽内部の対流領域の構造に変化が見られた場合、多数の太陽g-mode振動の効果の総和を考慮すれば、太陽ニュートリノフラックスの全体的な増減の可能性を指摘した。このような我々の理論計算を、過去の太陽ニュートリノ観測結果に適応することで、太陽内部に存在する太陽g-mode振動の総数に制限を課すことができた。図1(次ページ)に本研究で得られた成果を示す。太陽g-mode振動の振幅に相当するパラメータ  $A_{nl}$  の値を変化させたときに、太陽内部に存在できる太陽g-mode振動の数を初めて棄却した。特に、Super-Kamiokande検出器の ${}^8\text{B}$ 太陽ニュートリノの観測結果から、最も強い制限を得ており、 $A_{nl} = 10^{-5}$ の時に、その上限値を  $N_{\text{g-mode}}^{\text{SK}} < 7.8 \times 10^8$  個と定めることができた。今回の解析は、太陽内部に存在する太陽g-mode振動の個数に関して、世界で初めての実験的な制限となった。

以上の2026年度に得られた成果は論文としてまとめており、2026年4月に学術雑誌に投稿される予定である。

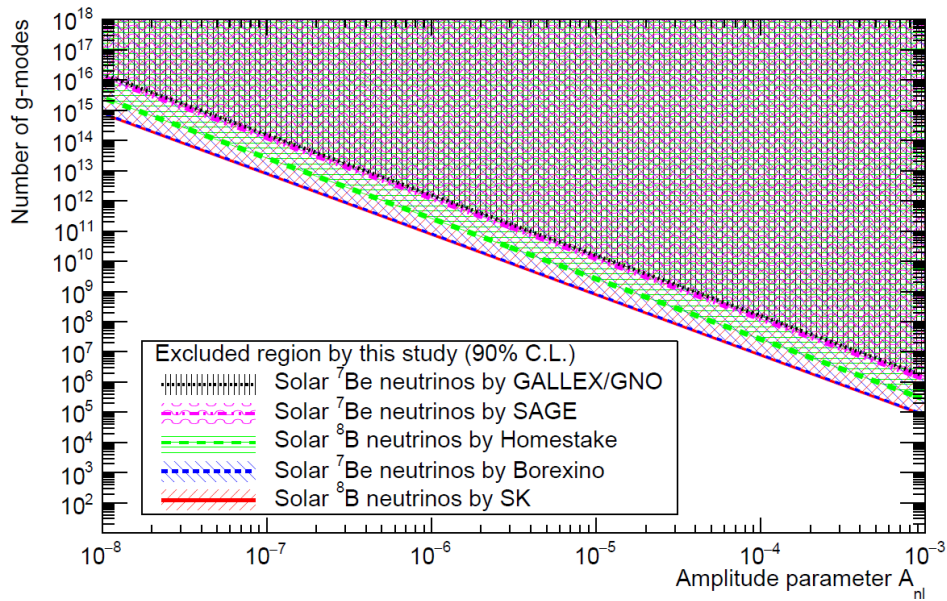


図 1: 太陽内部に存在する太陽 g-mode 振動の数に関する制限。横軸は太陽 g-mode 振動の振幅に相当するパラメータ、縦軸は太陽内部に存在する g-mode 振動の数。色のついた領域が棄却された領域に相当する。

成果発表

- (1) 中野 佑樹, 八田 良樹, 國友 正信, 伊藤 博士, 須釜 祥, 「太陽ニュートリノを用いた太陽g-mode 振動探索の検討」, 第52回 北陸信越地区 素粒子論グループ研究会 (新潟大学), 2025年7月26日-27日 (ポスター発表)
- (2) Yoshiki Hatta, Masanobu Kunitomo, Yuuki Nakano, Sho Sugama, Hiroshi Ito, 「Solar neutrino flux fluctuations caused by gravity modes」, Interdisciplinary Physics of the Sun (ドイツ バートホンフネ), 2025年6月29-7月4日 (口頭発表)
- (3) 須釜 祥, 八田 良樹, 國友 正信, 中野 佑樹, 伊藤 博士, 「太陽g-mode振動による太陽ニュートリノ振動への影響」, 日本物理学会 第80回年次大会 (広島大学), 2025年9月16日-19日 (口頭発表)
- (4) Yuuki Nakano, 「Solar neutrino oscillation results and future prospect」, II EU Workshop on Water Cherenkov Experiments for Precision Physics (ポーランド クラフク), 2025年9月17日-19日 (招待講演, 口頭発表)
- (5) 中野 佑樹, 八田 良樹, 須釜 祥, 國友 正信, 伊藤 博士, 「太陽内部を伝搬する太陽g-mode振動への実験的な制限」, 第11回「極低放射能技術」研究会 (神戸大学), 2026年3月6日-7日 (ポスター発表)
- (6) 中野 佑樹, 八田 良樹, 須釜 祥, 國友 正信, 伊藤 博士, 「太陽ニュートリノを用いた太陽g-mode 振動探索の検討(3)」, 日本物理学会 2026年春季大会 (online), 2026年3月23日-26日 (口頭発表)

(別紙様式04-2)

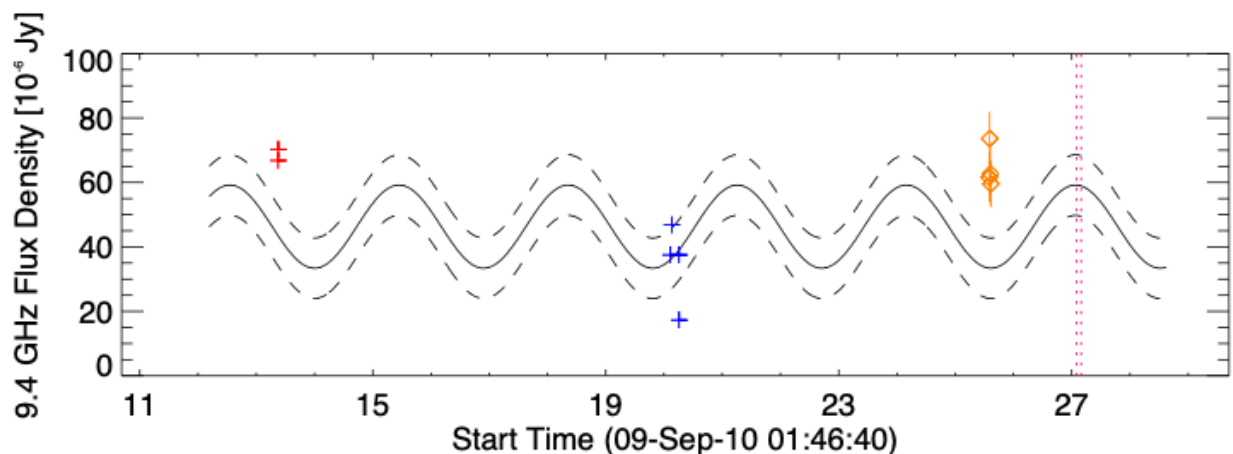
豊川・野辺山強度偏波計の観測データベースによる恒星磁気活動の研究  
Study of stellar magnetic activity based on the databases  
of Toyokawa and Nobeyama Radio Polarimeters

下条圭美、自然科学研究機構・国立天文台 アルマプロジェクト

名古屋大学空電研究所から国立天文台野辺山に移管され観測され続けている、70年以上にわたる太陽マイクロ波モニター観測データと太陽磁場観測データを組み合わせにより、太陽における熱放射マイクロ波フラックス密度と総磁束量の関係を示した(Shimojo et al. 2024)。このマイクロ波フラックス密度と総磁束量の関係と、岡山188cm鏡のH $\alpha$ 長期モニターデータ(Lee et al. 2024)による活動周期予測、および複数の可視光吸収線プロファイルによる長期磁場測定(Lehmann et al. 2015)を使って、太陽型星である  $\epsilon$  Eridani星 (K2V型星: 以降 $\epsilon$ Eriと呼称) の熱放射マイクロ波フラックス密度を2012年から17年間推定(下図参照)した。その結果、2025年8月に $\epsilon$ Eriの極小期を迎える可能性が示され、この推定を基にJVLAによる $\epsilon$ Eri観測を提案し観測時間を得た。観測提案では、全球を観測する必要があるため、 $\epsilon$ Eriの自転周期である12日間を目安に3日毎の観測を4回提案し、また予想されるX-Band帯(8-12GHz)での電波フラックス密度 $20 \mu$  Jyを精度良く観測するため、1回の観測あたりの観測時間を約1時間とした。

実際のJVLA観測は2025年8月2, 5, 9, 12日の同じ時間帯(12~15UT)に行われ、提案では3日であった観測インターバルは観測提案の優先度や気象条件等の問題で厳格には守られなかったが、ほぼ希望する条件での観測することに成功した。ただし、観測が行われた時間帯の $\epsilon$ Eriのエレベーション角がJVLAサイトでの静止衛星軌道のエレベーション角とほぼ同じになってしまった。X-Bandは、衛星からのダウンリンクの周波数であり、静止衛星からの非常に強力なRFIをJVLAが受信することになってしまった。RFIの周波数範囲は今回の観測周波数範囲の一部ではあったため、注意深いデータ選択によりRFIを避けることはできたが、感度を上げるために積分できる周波数幅が想定の $1/3 \sim 1/2$ 程度になってしまった。このため観測提案での要求感度は $4 \mu$  Jyであったが、実際の観測データの感度は $5 \sim 7 \mu$  Jy程度に悪化するというアクシデントに見舞われた。

感度は悪化したが、 $\epsilon$ Eriからの電波フラックス密度が予想以上に高かった( $\sim 60 \mu$  Jy)ため、星からの電波放射を検出することには成功した。ただしこの値は、提案時の予想から3倍以上も高く、過去の観測から考えると極大期に近い電波フラックス密度である。現在、これまでの観測や予測に使ったデータの再検討を行なっている。



図： $\epsilon$ EriからのX-Bandフラックス密度。2012年からの熱放射マイクロ波フラックス密度の予想(実線・破線)と、過去(赤・青+)と今回(オレンジ色の◇)の観測値。ピンクの点線は次回の極大期の予想を示している。

(別紙様式04-2)

宇宙線で探る内部太陽圏IMF磁場擾乱の空間構造

Exploring the spatial structure of inner heliosphere IMF magnetic field disturbances using cosmic rays

小島 浩司、中部大学・天文台

### 研究目的

我々は2018年度まで、名古屋大学太陽地球環境研究所の「地上ネットワーク観測大型共同研究」において、「日印両国に設置した超大型ミュオン望遠鏡(GRAPES-3ミュオン望遠鏡)による宇宙線強度の空間変動と惑星間空間におけるCMEの素過程の研究」という課題で助成を受け、平常時の宇宙線強度と太陽風速の関連性についての研究を継続してきました。これまでの解析により、宇宙線強度と太陽風速が負の相関関係にあることを示し、その結果として地球近傍の惑星間空間における約70GVの宇宙線の平均自由行程が約1auほどであり、太陽活動にともない変動することを明らかにした[“Phys. Rev. D 98, 022004 (2018),” Phys. Rev. D 109, 063011 (2024)]。2024年から2025年にかけて太陽活動は最盛期を迎えX線強度Xクラスの大規模フレアも多発している。また、フレアに伴うフォルツプシュディクリーズ(FD)と呼ばれる宇宙線強度の急激な変動も多く見られた。このFDの時系列変動をGRAPES-3ミュオン望遠鏡の特長である空間方向の高分解能及び時間的高統計精度な機能を利用して、空間的に等方的な変動と異方性を持つ変動を分離した精密な解析により、FDが起きている空間のIMFの構造との関係性を明らかにする。

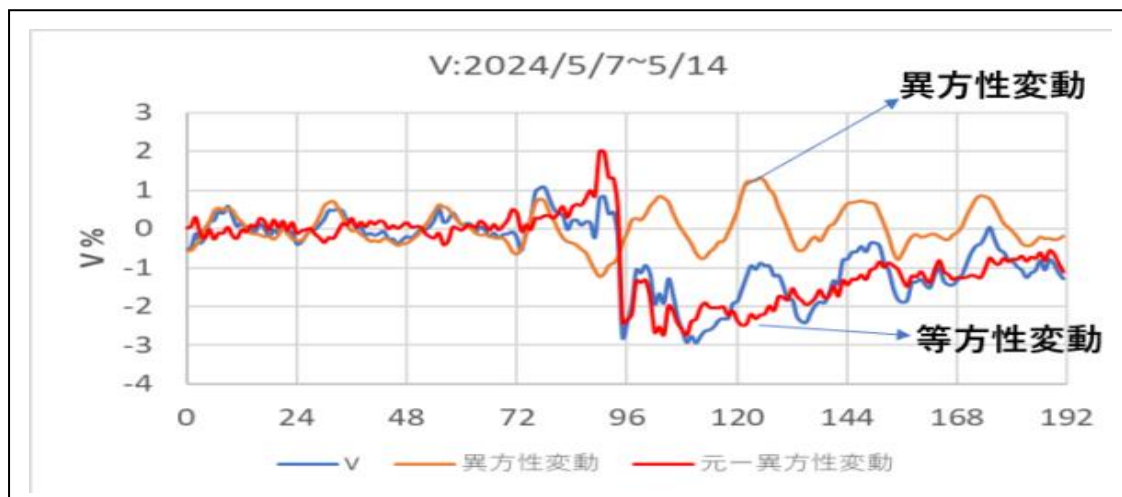
### 結果

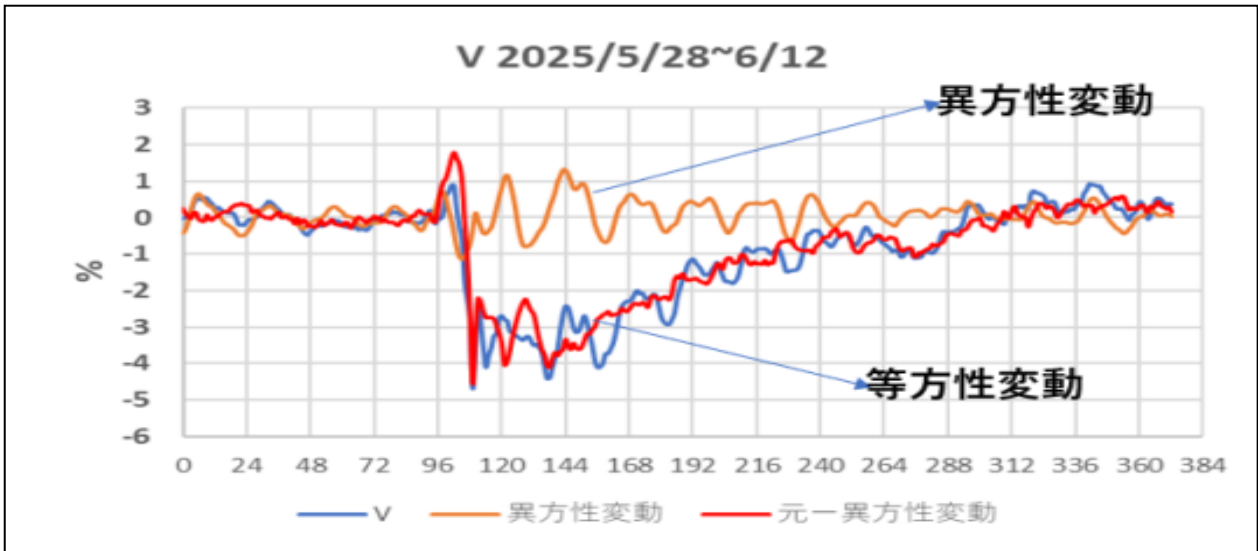
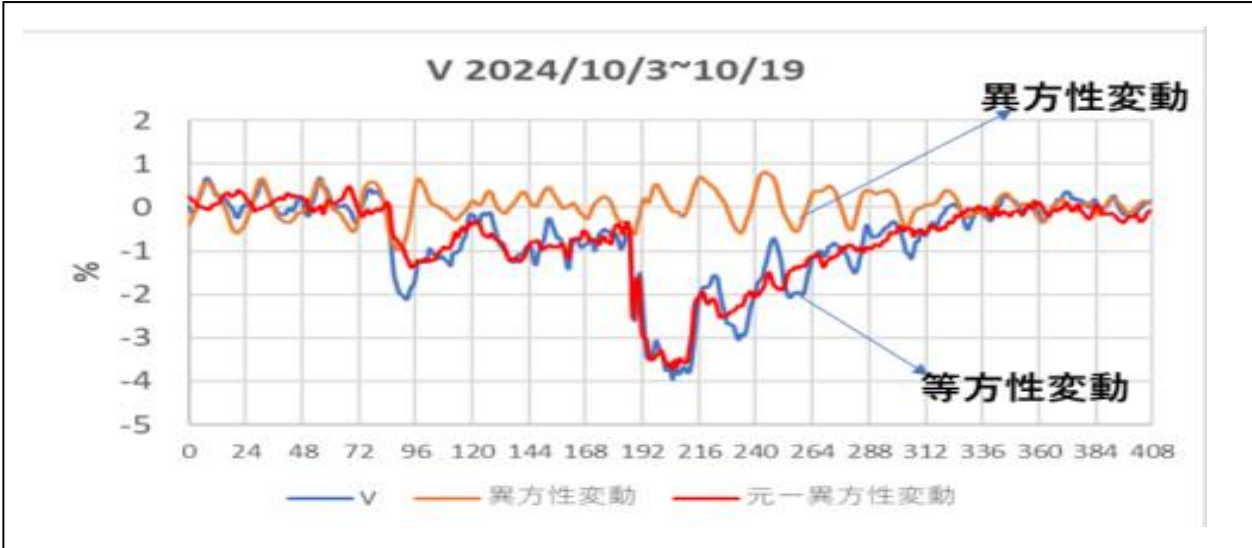
2024年5月から2025年11月にかけて起きた大規模な3つのFDの宇宙線の強度変動の解析を行った。これらの変動には従来から知られている典型的な形のFDによる宇宙線強度変動にその他の変動が重なった時系列変動となっている。この時系列強度変動には全方向同時の等方性の変動と空間的に特定の方向に異方性を持つ変動が混在している状況が示唆される。そこで我々は宇宙線の異方性解析によく用いられる「E(東)-W(西)メソッドを利用して等方性成分と異方性成分の分離する事が出来た。しかしこの結果について異方性成分のと等方性成分がIMFの構造とどのように関連しているかについては明確に明らかにできなかった。ゆえに、今後解決すべき課題とした。

### まとめ

今後は、等方性成分と異方性成分のそれぞれの振幅を定量的に明らかにすると共にそれらの量とサテライトによるIMF測定との間の具体的に関連付ける必要がある。

以下にGRAPES-3ミュオン望遠鏡による等方性成分と異方性成分を分けた図を示す。





(別紙様式04-2)

高感度・高速オーロラ撮像データ解析によるフリッカリングオーロラの特性の統計解析  
Statistical investigation of properties of flickering aurora observed by the high-sensitivity and high-temporal resolution auroral camera

栗田 怜、京都大学生存圏研究所

【研究目的と手法】

本研究では、アラスカ・ポーカークラフトに設置されている、高感度かつ高速でオーロラを撮像可能なSCMOSカメラによって長期間取得されたデータを用いて、ディスクリートオーロラ中に見られる微小構造「フリッカリングオーロラ」の特性を統計的に明らかにすることを旨とする。

フリッカリングオーロラは、ディスクリートオーロラ中においてパッチ状の構造が数Hz程度で明滅を繰り返す現象である。パッチの空間スケールは、発光高度で1-10 km程度であり、1 km以下の大きさの構造も報告されている。典型的な明滅の周波数は5-15 Hz程度とされているが、20 Hz以上の高速輝度変調を示す事例も報告されている。これまでにおいて、フリッカリングオーロラの観測事例は非常に限られており、その統計的な様相、例えば、時空間発展の様子は明らかになっていない。

フリッカリングオーロラは、オーロラ電子加速領域近傍で励起された数-数十Hz帯の低周波のプラズマ波動の電界成分が、降下電子のエネルギーに時間的・空間的に変調を与えることにより発生していると考えられている。フリッカリングオーロラの時空間発展は、このプラズマ波動の周波数と波長を反映していると考えられており、時空間発展を明らかにすることにより、フリッカリングオーロラの励起メカニズムに制約を与えることができる。そこで、名古屋大学ISEEのグループにより長期間運用されているSCMOSカメラのデータからフリッカリングオーロラの撮像に成功した事例を抽出し、その時空間発展の様子を画像データの解析から明らかにする。明滅周波数や空間構造のサイズがプラズマ波動の周波数と波長に対応するという仮定のもと、フリッカリングオーロラを生成するプラズマ波動に対し、観測結果から制約を与える。

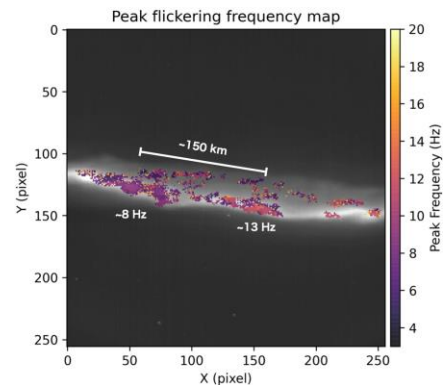


図 1. SCMOS カメラで観測されたクラスター化したフリッカリングオーロラの実例。周波数の異なるパッチのグループが 100km 程度の構造をもっている [Nanjo et al., under review]

【研究成果】

2026年度は、これまで開発してきたフリッカリングオーロラの周波数解析手法の改善と、パッチの空間スケール推定手法を新規に開発し、ディスクリートオーロラ中に見られるフリッカリングオーロラの時空間発展を長時間にわたって追跡できるアルゴリズムを開発した。このアルゴリズムを用いて、2017年3月6日に観測されたフリッカリングオーロライベント時において、ディスクリートアークに沿って、周波数やパッチサイズの異なるフリッカリングオーロラが、別々の領域にクラスターとなって同時に存在していることを定量的に示すことに成功した。各々のクラスターのサイズは、高度110kmで概ね100km程度であり、そのクラスターは約10秒程度で周波数が変化したり、消滅するという特徴が見られ、フリッカリングオーロラ発光を担うプラズマ波動 (EMIC波動、分散性Alfven波) の出現と消滅・空間的広がりを示していると考えられる。また、イベントごとに見ると、周波数とパッチの構造には分散性が見られ、波動の特性を反映していると考えられる。この成果はNanjo et al.として、Annales Geophysicaeに投稿済みである。

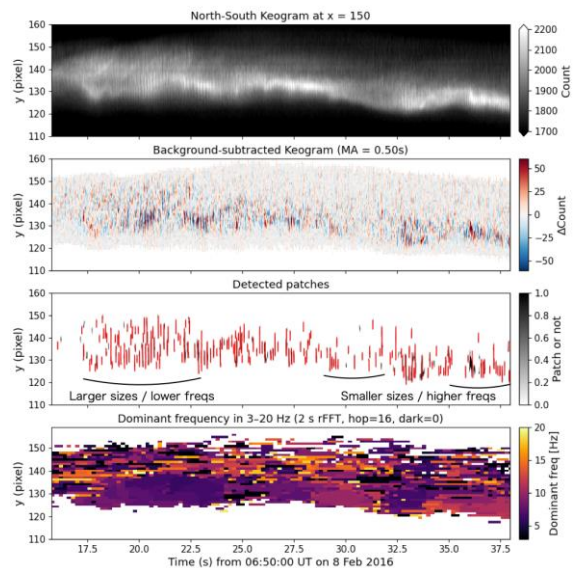


図 1. SCMOS カメラで観測されたフリッカリングオーロラの周波数とパッチサイズの自動抽出結果。大きなパッチは低い周波数をもつ傾向がイベントごとには見られる一方、全体としては明瞭な分散関係がみられないことがわかっている [Nanjo et al., Under review]。

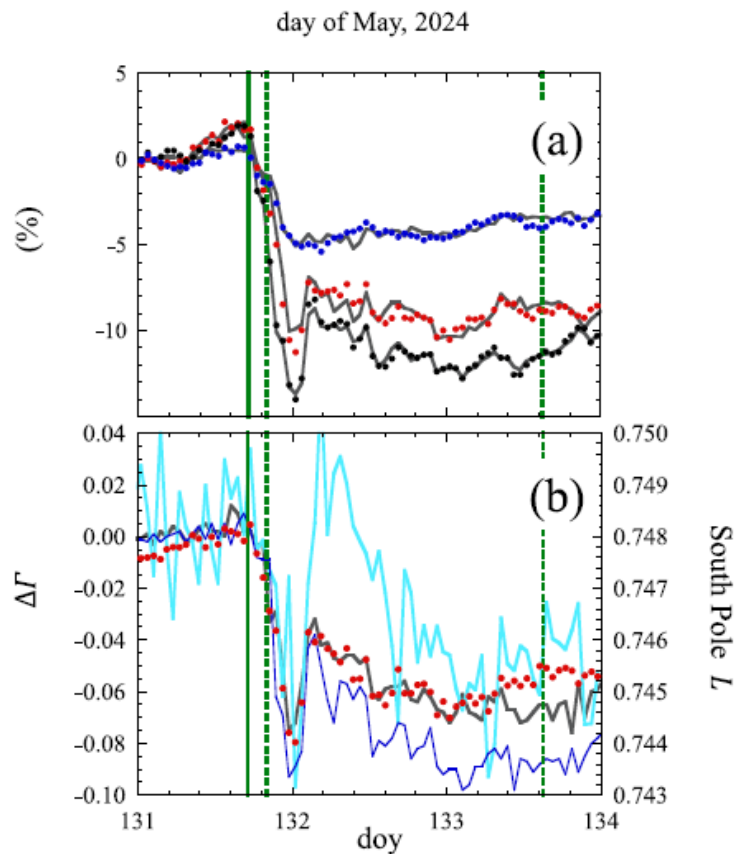
宇宙線観測データの解析による宇宙天気研究

Space weather study with cosmic ray data analyses

宗像一起 信州大学・理学部

我々は、中性子計と地表ミュオン計のグローバル・ネットワークによる観測データを統合して解析し、大気圏外の宇宙空間における宇宙線強度変動とそのリジディティ依存性を導く手法 (Global Fitting Analysis: GFA) を開発した。この手法は、フォーブッシュ減少のリジディティ依存性 (べき乗関数  $P^{-\Gamma}$ ) を仮定した場合のべき指数  $\Gamma$  の変化  $\Delta\Gamma$  をイベント毎に毎時与えるが、リアルタイムで解析することが困難だという短所を備えている。

この問題を克服するため、2018年に開始した南極昭和基地での中性子計 (NM) とミュオン計 (MD) による同時観測を利用することを試みた。ミュオン計は中性子計に比べて約5倍高いリジディティの宇宙線に感度を有するので、両者の計数率の比 ( $F_n$ ) の変化からべき指数の変動をリアルタイムでモニターすることが可能である。



上の図は2024年5月11-12日に観測されたフォーブッシュ減少の観測結果で、上のパネルが昭和NM（赤点）、昭和MD（青点）、South Pole NM（黒点）で観測された強度変動と、GFAによる各強度変動の再現値（灰色線）を示す。GFAが観測値を良く再現していることが判る。下のパネルは、昭和NMの計数率が昭和NMと昭和MDの計数率の和に占める割合（ $F_n$ ：赤点）とGFAによる $\Gamma$ の変化分（ $\Delta\Gamma$ ：灰色線）を示したもので、 $F_n$ が $\Delta\Gamma$ の良いモニターであることが判る。 $F_n$ は観測された計数の単純な比であるので、リアルタイムで導くことが出来る。

青線はSouth Poleでの $\Delta\Gamma$ をGFAで計算した結果であるが、これらの $\Delta\Gamma$ （赤点、灰色線、青線）には5月11日に増加する傾向が見られる。これはこの日に観測されたGLE 74によるもので、ソフトなスペクトラムのGLEの寄与により $\Gamma$ が増加していることを表している。一方、空色線はSouth Pole NMで測定されているLeader Fraction ( $L$ )で、GLEによる増加がより大きく捉えられている。大気中の高エネルギー中性子（Follower）はNMの鉛中で連鎖的に複数の中性子を生成し、一方低エネルギー中性子は平均的に一つの中性子イベント（Leader）として計測される。したがってLeaderの計数が全計数（Leader+Follower）に占める割合（Leader Fraction）の変化も、 $\Delta\Gamma$ の指標となる。GLEの寄与により $L$ が $F_n$ より大きく変動するのは、 $L$ で計測される宇宙線のレジディエーターが $F_n$ に比べて低いことで、GLEに伴う $\Delta\Gamma$ の観測には $L$ の測定が有利であることが判る。こうした観点から、我々は昭和NMでも $L$ の測定を開始する計画である。

業績論文：

- ・ K. Poopakun, W. Nuntiyakul, C. Kato, K. Munakata, M. Kozai, Y. Hayashi et al., "Solar and interplanetary determinants of long-term solar modulation of cosmic ray intensity for median rigidities of 11 to 107 GV", *Astrophys. J.*, 991:127, 2025 (October 1) (doi: 10.3847/1538-4357/adfdd3).
- ・ Yuki Hayashi, Kazuoki Munakata, Masayoshi Kozai, Ryuho Kataoka et al., "Real-time monitoring of the rigidity spectrum of large Forbush decreases in May and October 2024 with the paired neutron monitor and muon detector at the Antarctic Syowa Station", *Earth Planets and Space*, 2026 (March 3) (doi:10.1186/s40623-026-02386-y).

学会発表：

- ・ Y. Hayashi, R. Kataoka, C. Kato, K. Munakata et al., "New observation with a full-scale muon detector at Syowa Station, the Antarctic", *JpGU 2025 (PEM10-P23)*, 幕張, 5月27日
- ・ Y. Hayashi, R. Kataoka, C. Kato, K. Iwai, K. Munakata et al., "Top 57 Major Forbush Decrease Events Observed by the Nagoya Muon Detector (1976-2024)", *JpGU 2025 (PEM10-11)*, 幕張, 5月27日
- ・ 林 優希, 宗像一起, 加藤千尋, 片岡龍峰ほか, "Real time monitoring of the rigidity spectrum of Forbush decreases using neutron monitor and muon detector at Syowa Station", *SGEPSS 2025*, 神戸, 11月24日
- ・ Y. Hayashi, C. Kato, R. Kataoka, M. Kozai, A. Kadokura, K. Munakata et al., "Report on the updated cosmic ray observation at Syowa Station in 2025 and a real-time monitoring of cosmic ray rigidity spectrum using paired neutron monitor and muon detector", *NIPR sympo. 2025*, 立川, 12月4日
- ・ K. Munakata, Y. Hayashi, C. Kato, R. Kataoka et al., "Global Fitting Analysis of Forbush decreases", *NIPR sympo. 2025*, 立川, 12月4日

(別紙様式04-2)

## 低コスト557.7-nm大気光カメラの開発と性能評価

### Development and Performance Evaluation of a Low-Cost 557.7-nm Airglow Camera

鈴木臣, 愛知大学・地域政策学部

本研究では、低廉なWATECカメラを用いた557.7 nm大気光観測システムの開発を行い、中間圏下部(約95 km)における小スケール・短周期の大気重力波構造の取得を目的とした。既存のOH大気光観測と組み合わせることで、異なる発光高度の情報を統合し、中間圏界面領域における風速推定の高度化を目指すとともに、従来高額装置に依存していた観測の低コスト化を図ることを狙いとしている。

本年度は主として観測システムの設計・構築および基礎的検証を実施した。光学系については、従来のOH大気光観測システムを基盤としつつ、中心波長560 nm帯域の干渉フィルタを導入することで、557.7 nm輝線に感度を持つ構成とした。また、将来的な多波長観測を見据え、OH大気光およびNa大気光に対応する光学フィルタを整備し、観測の拡張性を確保した。これらのフィルタ整備に研究経費を充当し、観測基盤の強化を行った。

データ取得系については、複数の方式を比較検討した結果、長時間観測における安定性および既存システムとの整合性を重視し、ビデオエンコーダを用いた従来方式を採用した。本方式はこれまでのOH大気光観測において長期間の連続運用実績を有しており、観測システム全体の信頼性確保の観点から有効である。本研究ではこの安定した取得系を前提としつつ、取得後データに対する画像合成処理(フレーム積算)の適用や処理条件の最適化を進め、低輝度な557.7 nm大気光への対応可能性を検討した。さらに、カメラ、光学系、データ取得・保存系を含むシステム統合試験を実施し、一連の観測フローの動作確認を行うとともに、ノイズ特性やゲイン設定が画像品質に与える影響について基礎的な評価を行った。

以上の結果、557.7 nm大気光観測に対応した低コストカメラシステムの基本構成を確立し、観測に向けた準備を大きく前進させた。特に、既存の観測システムの信頼性を維持したまま新たな波長帯への適用を可能とした点、および低輝度信号に対する画像処理手法の検討を進めた点は重要な成果である。また、多波長観測を前提とした設計とすることで、OHおよびNa大気光との統合観測により高度分解能の高い風速推定へ発展可能な基盤を整備した。これらは、低コスト観測によって中間圏の時空間変動を高密度に把握するための重要なステップと位置付けられる。

一方で、本年度は主としてシステム構築および基礎評価に重点を置いたため、本格的な大気光観測および定量的な性能評価には至っていない。今後は光害の少ない観測地点において試験観測を実施し、信号対雑音比や波動構造の検出性能を評価するとともに、既存の大気光観測装置(OMTI等)との比較観測により本システムの妥当性を検証する予定である。さらに、画像処理手法の高度化と多波長同時観測の実現により、中間圏界面領域の風速推定精度の向上を目指す。

以上より、本研究は低廉な観測装置による暗い大気光観測の実現に向けた技術的基盤を確立し、中間圏観測の低コスト化と高頻度化に貢献するものである。今後の観測データの蓄積により、大気の上層結合過程の理解や宇宙天気・気候モデルの高度化への寄与が期待される。

成果発表:

S. Suzuki, and K. Shiokawa, Measuring Mesospheric Winds Using Airglow Imaging of Atmospheric Gravity Waves, AGU 2025 Fall Meeting, New Orleans, 2025.12.17.

S. Suzuki, and K. Shiokawa, M. K. Ejiri, T. Nakamura, and M. Tsutsumi, Measuring Mesospheric Winds Using Airglow Imaging of Atmospheric Gravity Waves, SGPSS 2025 Fall Meeting, 神戸, 2025.11.25.

**Sr・Nd同位体分析と<sup>14</sup>C年代測定から探る浅間山の山体崩壊**  
**Volcanic collapse of Mt. Asama probed by Sr and Nd isotope analysis**  
**and <sup>14</sup>C dating**

佐藤興平；所属機関・部局： 静岡大学防災総合センター

### 1) 研究目的

浅間火山は群馬・長野両県の県境に位置し、若く活動的な火山として常時監視の対象となっている。噴火活動の開始時期は約10万年前と推定され、現在の山体の西側に安山岩質の成層火山が存在した。黒斑火山と呼ばれるこの初期火山体は約2.7万年前に大崩壊し、跡地に残る馬蹄形カルデラ（黒斑山）の中に成長したのが現在の浅間山である。黒斑山の崩壊物は山体周辺を埋め尽くしただけでなく、群馬県側では吾妻川の谷に沿って流下し、現在の前橋・高崎地域に厚く堆積して前橋台地を形成した。長野県側では軽井沢～佐久平地域を平坦地に変えた後、更に千曲川の谷に沿って流下し、少なくとも上田まで達したとみられる。堆積物の東西分布は100kmに及ぶ。

山体崩壊が起こった約2.7万年前には、最終氷期の寒冷な気候が広がっていたが、岩宿遺跡の発見で知られるように（約3～2.5万年前）、既に旧石器時代の人々が住んでいた。当時と比べて人口が激増している現在の日本列島に同様な山体崩壊が起これば、その被害は想像を絶する規模になろう。火山体の崩壊は、確かにそう頻繁に起こる現象ではない。しかし、世界的に知られた火山体崩壊の事例としての磐梯山の1888年と米国ワシントン州St. Helens火山の1980年の間隔が100年に満たないことに注意したい。火山帯の崩壊は、環太平洋域で100年に一度くらいの頻度で発生するとみることできる。環太平洋の地震・火山地帯に位置する日本列島に生きる我々は、日常生活の視野に映る山々の美観とともにそのリスクも配慮する必要があるだろう。もちろん、火山体のリスク評価は容易ではない。おそらく山体ごとに個性があり、過去の活動を記録した地質情報と現在という時間断面での活動状況の観測データを組み合わせた地道な知見の集積が不可欠なのだと思う。

### 2) 研究方法

以下の3点を主要な検討課題とした。(1) 山体崩壊堆積物に含まれる安山岩塊の<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr比から、岩塊の起源が浅間火山であることは、我々のこれまでの研究で判明していた。さらに、Sr同位体比の微妙な変化から、崩壊のプロセスについて何らかの手掛かりが得られる可能性が考えられたため、崩壊跡の黒斑山から試料を採取して岩塊との詳細な対比を試みる。(2) 火山体の熱水変質は、岩石強度の脆弱化のため山体崩壊のトリガーとなり得るが、これまで浅間山の詳しい調査はなされていない。黒斑山の変質帯である「シロズレ」を調査し、その岩石・鉱物を記載して崩壊の手掛かりを探る。(3) 浅間山から前橋・高崎まで山体崩壊物の80kmを超える長い流走距離を可能にしたメカニズムが解明されていない。浅間北麓に存在した湖が関与した可能性を探るため、湖成層の調査を行い、山体崩壊の約2.7万年前に湖水が存在したかどうかを確認する。

### 3) 研究結果：

上記の(1)については、試料採取と顕微鏡観察は終了したが、同位体比の測定は未完である。(2)については、「シロゾレ」試料の顕微鏡観察やXRDによる解析で、この変質帯が酸性熱水により黒斑火山の山体が交代されてできた明礬石鉱床と言えるほど高品位の地質体であることが初めて判明した。(3)については、湖成層とそれを不整合に覆う火砕流堆積物に含まれる木片の<sup>14</sup>C年代から、火砕流が流下した約1.7万年前には湖水が消滅していたことが判明した。しかし、湖成層から発見できた木片はいずれも<sup>14</sup>C年代の測定限界を超えて古く、山体崩壊時の約2.7万年前に湖水が存在していたかどうかは未解明であり、別の年代測定法を採用する必要がある。

### 4) まとめと今後の課題

今期の成果が(2)に限定されたのは、ひとえに代表者の責任である。来期を期したい。火山体の内部を把握するのは容易ではないが、日本と同様に山体崩壊に起因する災害が危惧される米国西部のカスケード火山帯では、地球物理探査の手法で火山体内部を評価する試みが始まっている。削剝で古い火山の内部に露出した変質帯の解析も重要な考察要素となろう。

SI 時の中緯度 SuperDARN ground/sea backscatters と FLR の関係  
SI-time ground/sea-backscatters of mid-latitude-SuperDARNs and their relation with  
FLR

研究代表者：河野英昭、九州大学・国際宇宙惑星環境研究センター  
研究所担当教員・共同研究者：西谷 望、名古屋大学・宇宙地球環境研究所  
共同研究者：堀 智昭、名古屋大学・宇宙地球環境研究所  
行松 彰、国立極地研究所・共同研究推進系  
田中良昌、情報・システム研究機構・データ  
サイエンス共同利用基盤施設

### 【研究目的】

SI (Sudden Impulse) は地上磁場強度の急増現象であり、太陽風動圧の急増がその原因であると考えられている。SIは圧縮性波動fast mode wavesとして磁気圏内を伝わる。それが近地球磁気圏の磁場・プラズマを(座標原点=地球として)動経方向に振動(poloidal-mode oscillation)させうる事、そしてそれが磁力線固有振動(Alfven modeでの振動)と共鳴(Field Line Resonance, **FLR**)しうる事が報告されている [e.g., Southwood and Kivelson, 1990]。しかしFLRにおいてこれまで主に注目されていた磁力線固有振動はtoroidal mode (東西方向の振動)であった。地上磁場ではこの成分が頻繁に観測されるためである。

一方高緯度SuperDARN radars (以下 **SD** と記す) においては、その受信信号から得られる電離圏プラズマのLOS (視線方向速度)のうち ground/sea backscattered signals (以下 **GSBS** と記す)のLOS中に 長期間(4-5時間)継続する単一周期の波動が頻繁に観測されている [e.g., Ponomarenko et al., 2005]。GSBSのLOSは電離層の鉛直運動によってしか時間変化しないので、磁気圏の動経方向のglobalな振動が上記波動の成因と考えられる。また、上記のGSBS長時間振動期間中にFLRが観測された例も報告されており [e.g., Ponomarenko et al., 2005]、それにより生じる磁力線固有振動は poloidal mode (動経方向の振動)とされている。上記論文の中のeventsでは SI との関連は見られなかった。

一方、中緯度(高緯度より磁力線が鉛直方向から傾いている。また沿磁力線プラズマ質量総和がより大きい為固有振動しにくい)の GSBS も同じ特徴を示すか否かはまだ調査されていない。そこで、地上中低緯度を通る近地球磁気圏の“重い”磁力線を振動させる為の駆動源として最も強力な SI の発生期間においてそれを調査し、またFLRが観測された場合について その固有振動周波数から近地球磁気圏プラズマ密度を推定するのが本研究の主目的である。

### 【研究方法】

出来るだけ多くのeventsを集めるために、SuperDARN Hokkaido East and West radars(中緯度に位置)を中心とするが それ以外の多くのSDのデータも見る。まずSIの事例を集め、それらについて GSBS-LOS 中に波動が見られているか調べ、見られている場合は更にFLR現象が見られているか調べ、見られている場合はその固有振動周波数から近地球磁気圏内プラズマ密度を推定する。そしてその値を太陽風動圧値、太陽風速度・密度、磁気圏活動度指標、等と比較する。

### 【研究結果】

この研究は本報告書の対象年度 (2025 年度) より前に、名古屋大学・宇宙地球環境研究所・修士課程(2019年度修了)・飯田剛平氏 (指導教員：西谷准教授) が発見した SI イベント 1 例の解析から開始した。このイベントは Hankasalmi, Finland (以下 HAN と記す) の SD でも Pykkvibaer, Iceland (以下 PYK と記す) の SD でも観測されており、特に HAN Beam#1 において明瞭だった。すなわち、~14hr UT 以降 GSBS が定常的に観測されていたのだが、その観測緯度範囲内において、~15:10UT 開始の SI とほぼ同時に LOSV の強い波動現象が開始し ~30 分継続した。その LOSV の振幅と位相は FLR に典型的にみられる緯度依存性を持っていたので、この波動現象は FLR により生じたと考えられる。ただ、LOSV の最大値が 100m/s を超えていたため、

GSBS 領域内ではあるが ionospheric backscattered signals が混在していたと考えるに至った。そうすると本研究の研究目的からはやや外れる事になるが、興味深い現象であるので解析を続ける事にし、この event の HAN と PYK の他の beams の解析に進んだ。しかし、データ量が大変多く、当時は目視でイベント同定していた為、解析の進行が遅かった。

本研究では多数の SI events について大量の SD のデータの解析を行う事を目指しているが、目視同定では時間がかかりすぎて目標達成が難しい事が確実であった。そこで、FLR を自動同定する方法の開発に着手した。そして、2020 年度前半までに、FLR events を SD LOSV データ中から自動同定する functions/procedures 一式は既に出来ていた。しかしそれらの functions/procedures は、4 つのコンピュータ言語で作った(過去の自作プログラムの活用)ものが混在しており、実行手順に沿って別言語プログラム間でデータをやり取りするのは手動で行っていた。これでは完全な自動化には至っておらず、大量のデータの解析は難しい。

そこで、完全自動化の為、2020年度後半から上記functions/proceduresを全てIDL言語で書きかえて統合する作業を開始した。しかし、技術的問題が多数発生し、また、書き換えるだけでなくアルゴリズムの改良の余地がある部分(下記)も発見し、2024年度末にもこの作業は継続中だった。

それと並行して、2021 年度には HAN の全ての beams 中の FLR events を既存の codes で自動同定し、その結果、目視では同定できなかった events も複数同定され、その中には ionospheric backscattered events も sea-backscattered events も含まれていた。そして、同定された全ての FLR events について対応する磁気圏プラズマ密度を推定したところ、電離層反射点は近くても ionospheric backscattered events と sea-backscattered events とで密度が大きく異なる傾向があった。この原因として、1 分値で 30 分間のデータを解析した為データ数は 30 で FFT 結果の周波数間隔が 0.56mHz と大きくなっている事が影響しているのではないかと考え、2022 年度には周波数分解能を上げるため zero-padding を行った (60 分間のゼロデータをイベントデータの後に加えて FFT を行った)。その結果周波数分解能が 3 倍となった FFT'ed data を用いて FLR 周波数同定と密度推定を行った結果、ionospheric backscattered events と sea-backscattered events での密度はより近い値となった。

2022 年度の時点では、2023 年度には zero-padding より高度な Lomb-Scargle 法により周波数分解能を上げる方法も検討したいと考えていた。そして、2023 年度にその検討を行った結果、Lomb-Scargle 法は時刻が等間隔でないデータの解析も可能な方法だが、宙空圏の観測データの大半は時刻等間隔でありその解析に Lomb-Scargle 法ほどの高性能は無くても良いと考え得る事、また Lomb-Scargle 法で振幅と位相の 2 つを計算する open-source の IDL procedure は見つけられず、アルゴリズム(特に位相を求める部分)が複雑なため自作するには時間がかかりそうな事、が判った。そこで、時刻等間隔のデータについて同じ目的を達成することができ、また自作がより簡単と予想できる他の方法を探し、Discrete-time Fourier transform (DTFT) [e.g., Oppenheim et. al] という方法を知った。そこで、その IDL procedure の作成とテストを行い、予想と異なりプログラミング上の技術的問題が生じ時間を要してしまったが、2024 年度中に実用可能なレベルのものにした。また、並行して、上記の、複数の言語で作られた functions/procedures を全て IDL 言語で書きかえて統合する作業も継続した。しかし、河野(研究代表者)の事故・体調不良の為、進行が遅れた。それでも統合プログラムは現在約 8 割作成し終えている。今後出来る限り急いで完成させ、SD データの大量解析に進む計画である。

#### 【引用文献】

- Ponomarenko, Menk, Waters, and Sciffer, Ann. Geophys., p1271, 2005.
- Southwood and Kivelson, JGR, p2301, 1990.
- Oppenheim, Schaffer, and Buck, Discrete-time signal processing (2nd ed.), 1999.

#### 【成果発表】

- Hideaki Kawano, Akira Sessai Yukimatu, Nozomu Nishitani, Yoshimasa Tanaka, Satoko Saita, Tomoaki Hori, Improving the resolution of the FLR frequency in SuperDARN VLOS to improve the magnetospheric density estimation, Japan Geoscience Union], 幕張メッセ国際会議場 (千葉市), 2025.05.25-05.30

横須賀太陽電波強度偏波計で行う宇宙天気研究  
Yokosuka Radio Polarimeter (YoRP) and its application to space weather research

渡邊恭子、防衛大学校・地球海洋学科

地球圏環境に影響を与えている主な太陽放射はX線や極紫外線（EUV）であるが、これらの放射は地上までは届かず、観測データも衛星観測に限られている。一方、マイクロ波放射は地上観測でき、またマイクロ波放射と太陽EUV放射は相関が良いことが知られている。そのため、これまではEUV放射の代替として、地上観測しているF10.7（周波数：2.8 GHz）というマイクロ波観測を用いて、擬似的なEUV放射スペクトルを適用する手法が用いられてきた。しかし実際は、F10.7とEUVの放射起源は場所もメカニズムも異なっているため、このような単一周波数のマイクロ波のみで全波長のEUV放射スペクトルを正確に導出できるかどうかは定かではない。

そこで我々は、防衛大学校内に2-10 GHzの太陽電波スペクトルを観測することができる横須賀太陽電波強度偏波計（YoRP）を2023年度に建設し、宇宙天気研究に活用するための太陽マイクロ波放射の取得を2024年10月中旬より始めた。野辺山太陽電波強度偏波計（NoRP）のYoRPで同時に観測している周波数（2, 3.75, 9.4 GHz）を用いて、YoRPの観測データの較正方法を確立し、1年以上にわたる観測データを用いて、YoRP観測データと黒点・EUV放射との関係を調べた。

SDO/HMIで観測された総磁場フラックス（視線方向磁場を全積分したもの）と各周波数のYoRPマイクロ波フラックスとの相関を調べた結果を図1に示す。図1より、総磁場フラックスとの相関が良いマイクロ波周波数は4.3 GHzあたりであることが分かった。この結果は、太陽黒点からのマイクロ波放射のピークが4.3 GHzあたりであることを示している。

また、TIMED/SEEで観測されたEUV放射スペクトルとYoRPマイクロ波スペクトルとの相関も調べた（図2）。これより、EUV放射との相関が良いマイクロ波放射周波数は、前述の結果と同様に4 GHzあたりであることがわかる。また、短波長のEUV放射と低周波のマイクロ波との相関の方が、長波長のEUV放射と高周波のマイクロ波との相関よりも良い傾向が見られた。

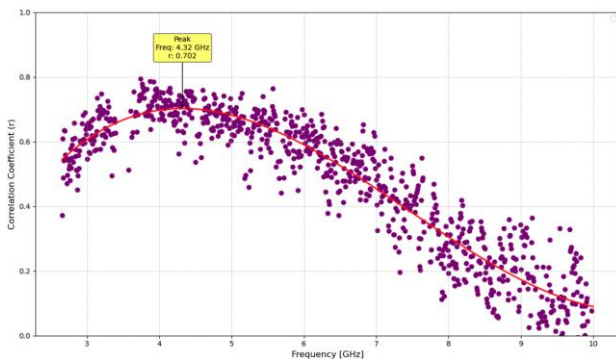


図1：各周波数の YoRP 電波フラックスと SDO/HMI 総磁場フラックスの相関

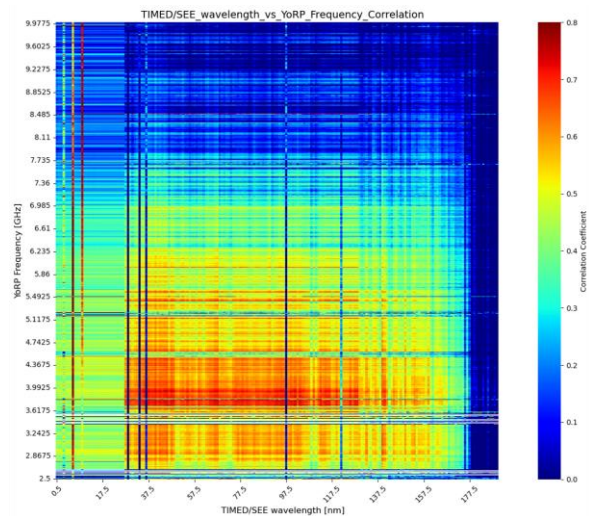


図2：YoRP マイクロ波スペクトルと TIMED/SEE の EUV スペクトルの相関

2026年2月より、YoRPにおいて常時観測をはじめ、約7秒毎にマイクロ波スペクトルを記録できるようになった。この時間分解能の向上により、太陽フレアなどの短時間に起こる現象を記録することができるようになる。今後は、この高時間分解能のデータを用いて、フレア放射スペクトルの詳細な分析なども行ってゆく。

#### 成果発表

1. 渡邊恭子, 城河内涼佳, 安居賢生, 北島慎之典, 大窪遼介, 下条圭美, 岩井一正, 増田智, "横須賀太陽電波強度偏波計による太陽マイクロ波スペクトル観測", JpGU Meeting 2025, 幕張メッセ, 2025年5月26日
2. Kyoko Watanabe, Shinnosuke Kitajima, Ryosuke Okubo, Masumi Shimojo, Kazumasa Iwai, Satoshi Masuda, "Calibration of the Yokosuka Radio Polarimeter with the Nobeyama Radio Polarimeters and Observations of Solar Microwave Spectra", AOGS2025 22nd Annual Meeting, Singapore, 2025 July 29
3. 渡邊恭子, 城河内涼佳, 安居賢生, 野原岳志, 辻将仁, 北島慎之典, 大窪遼介, 北山攻学, 下条圭美, 岩井一正, 増田智, "横須賀太陽電波強度偏波計の較正と太陽マイクロ波スペクトルの観測", 日本天文学会 2025年秋季年会, 海峡メッセ下関, 2025年9月10日
4. Kogaku Kitayama, Kyoko Watanabe, Shinnosuke Kitajima, Ryosuke Okubo, Ryoka Shirogauchi, Kensho Yasui, Takeshi Nobara, Masahito Tsuji, Kazumasa Iwai, Satoshi Masuda, Masumi Shimojo, "Solar microwave spectral observations using the Yokosuka Radio Polarimeter : Initial Findings for the Successor to the Nobeyama Radio Polarimeters", 第158回 SGEPPSS 総会および講演会, 神戸大学, 2025年11月24日
5. Kyoko Watanabe, Shinnosuke Kitajima, Ryosuke Okubo, Kogaku Kitayama, Masumi Shimojo, Kazumasa Iwai, Satoshi Masuda, "Solar Microwave Spectra Observations with the Yokosuka Radio Polarimeter (YoRP)", AGU25, New Orleans, USA, 2025 December 19
6. 北山攻学, 渡邊恭子, 北島慎之典, 大窪遼介, 岩井一正, 増田智, 下条圭美, "横須賀太陽電波強度偏波計による太陽マイクロ波スペクトル定常自動観測", 2025年度太陽研連シンポジウム, 京都大学, 2026年2月17-19日

(別紙様式04-2)

台風付近を飛行する飛行機の位置情報を用いた気象情報の抽出  
Extraction of weather information using the location data of airplanes flying near typhoons  
(1行スペース)

森澤 征一郎, 沖縄工業高等専門学校・機械システム工学科  
(2行スペース)

### 1. 研究目的

沖縄県は東西に約1,000km, 南北に約400kmに及ぶ広大な海域に多くの島々が点在し, 他県と比べて台風の接近回数が多い. そのため, 悪天候によって公共交通機関の欠便や遅延などが生じ, 県内の交通手段に大きな影響を与える. 特に, 台風接近による暴風域や時化によって船舶の運航は制限され, 離島への物資や人の輸送手段は飛行機のみとなる. 一方, 台風付近において多くの飛行機が運航されており, 例えば伊藤ら[1]によると台風中心から100km以内においても1万便以上の飛行機が観測されている. しかし, 飛行機によって計測された温度や風などはエアラインの所有データであり, データ公開はされていない.

このような背景のもと, 我々の研究グループでは台風の進路や強度の予測に貢献するため, 飛行機の位置情報から乱気流の発生状況など局地的な気象情報の取得を目指している. 本研究では, 広く一般的な方にも利用可能な情報源である位置情報のADS-Bを用いて台風付近を飛行する飛行機の位置情報を渦消散率(EDR)という形で気象情報に変換し, 那覇空港を離陸後に各方面へ飛行している機体への影響を調査したので報告する.

### 2. 研究方法

飛行機の位置情報には, 国土交通省が提供するCARATS Open Data[2]を用いる. 本データは, 航空管制用レーダーから獲得したデータである. 対象範囲は日本が管轄する福岡飛行情報区(FIR)全域であり, 本データは時刻, 仮想便名, 飛行機の位置(緯度, 経度, 高度), 型式の順に約10秒間隔の時系列データが保存されている. なお, 調査対象の型式はBoeing737-400に絞る. 理由は台風が発生した2016年とそうでない2015年当時において県外便と県内間の離島便の両方が存在するのは型式に限られたためである. また, 航空機の位置情報から気象情報の抽出方法としては, Kopecらによって提案された論文[3]を参考に台風付近を飛行している飛行機のデータに適用した.

### 3. 研究結果・考察

図1に2016年9月17日でのBoeing737-400が那覇空港から離陸した際の航空路およびその際の台風の位置を示す. その結果, 図1で示すように那覇空港から離陸した飛行機の航路図では大きく分けて6つの系統があり, ①東京方面行き, ②大阪方面行き, ③福岡方面行き, ④韓国方面行き, ⑤県内離島方面行き, ⑥台湾方面である. なお, ④および⑥に関しては福岡FIR全域から外れているため, データが途中で存在しない. ②および⑥に関するEDR算出は行っていない.

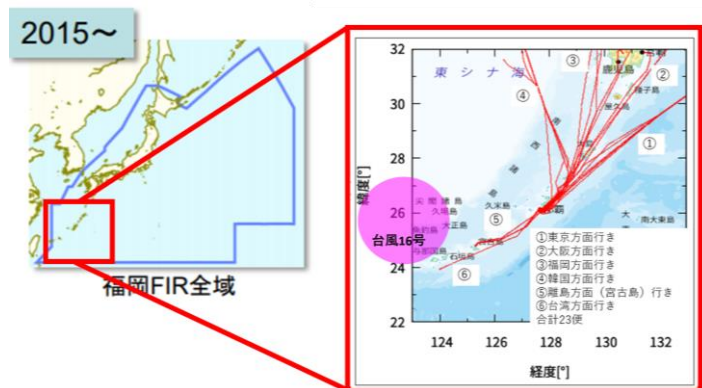


図1 那覇空港から離陸した Boeing737-400 の航空路例

次に、図 2 に④および⑥を除いた那覇空港から各空港に着陸するまでの高度、および EDR の変化を示す。図 2 より、台風から離れた東京方面および大阪方面では、離陸初期段階において EDR の値が小さい。一方で、台風から近い福岡方面および宮古島方面では、離陸初期段階において EDR の値が大きい。このことから、離陸時において、東シナ海側の台風の使い経路に対する強い風環境が抽出することができた。また、その他の飛行フェーズとしては巡航時では変化がなく、着陸時では離陸時の傾向と逆転している。これらについては現在、調査中である。

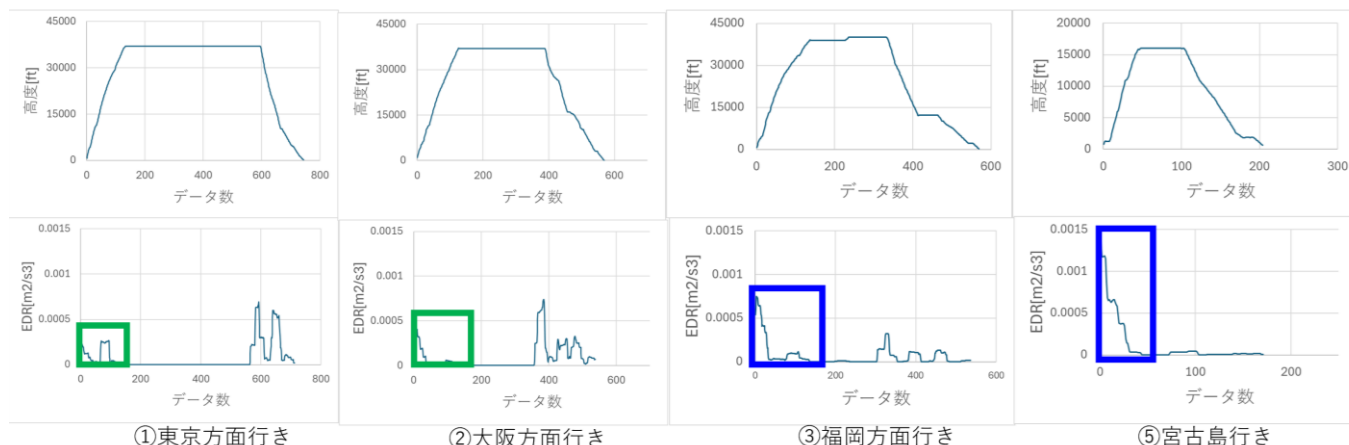


図 2 那覇空港を離陸する機体の高度と EDR

#### 4. まとめと今後に向けて

本研究では、台風付近を飛行する飛行機の位置情報から EDR を抽出し、那覇空港から離陸し、その他の地域へ飛行する際の影響を調査した。その結果、離陸時において、東シナ海側の経路に対する強い風環境が抽出することができた。なお、本研究で抽出した結果は離陸による飛行機の加速と機体の揺れによる EDR の分離ができていない。今後は、これらの影響の除去を試みる。

#### 5. 引用文献

- [1] K. Ito and R. Yamamoto, “Thermodynamic and kinetic structure of tropical cyclones in the western North Pacific based on ACARAS/AMDAR,” *Frontier in Earth Science*, Vol. 10, 2022, <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1058262>
- [2] 国土交通省, 航空交通, CATATS Open Data, [https://www.mlit.go.jp/koku/koku\\_tk13\\_000015.html](https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk13_000015.html)
- [3] J. M. Kopec, et. al. “Retrieving atmospheric turbulence information from regular commercial aircraft using Mode-S and ADS-B”, *Atmospheric Measurement Techniques*, Vol. 9, pp. 2253–2265, 2016.

#### 6. 研究成果

##### 1) 成果論文リスト

なし

##### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

森澤征一郎, 菊地亮太, 高橋暢, ”飛行機の航跡データを用いた沖縄周辺における台風下における気象情報の抽出に向けた事前検討と環境構築,” 日本地球惑星科学連合 2025 年大会(JpGU2025), 幕張, ACG54-P02, 2025 年 5 月 25-30 日

##### 3) その他の成果リスト (著者、特許等)

なし

東南極地域における宇宙線中性子観測とその解釈  
Analysis of cosmogenic neutron doses measured over the east Antarctica

保田浩志 広島大学・原爆放射線医科学研究所  
栗田直幸 名古屋大学・宇宙地球環境研究所

大気中の宇宙線強度を推定するための数学モデルは、宇宙線生成核種の生成速度の予測、大気組成と気候の変化の予測、航空機乗務員の宇宙線被ばくの評価、精密電子機器への影響評価等に関する多くの研究分野で用いられている。申請代表者（保田）は、全球規模で宇宙線被ばく線量を予測できるモンテカルロシミュレーションに基づく解析モデル（PARMA）を開発している。宇宙線被ばく線量に尤も寄与する高エネルギー粒子は中性子線であるため、モデルの性能評価には中性子線量計測データを利用するのが一般的である。

一方、宇宙線強度が最も高くなる極域では実測データがほとんどなく、モデル結果の信頼性については不明なままである。そこで、本研究では、共同研究者（栗田）が南極域で観測した結果と数値モデル結果を比較し、現在のモデルの性能を評価した。具体的には、栗田が第60次南極地域観測隊(JARE60)に参加して実施した、昭和基地近傍の南極沿岸域(S16)から内陸のドームふじ基地(DF)に至るルート上で中性子線計測とモデルの相互比較を実施した。その結果、PARMAは観測結果を適切に再現できていることが確認された(Yasuda et al., 2023)。

加えて、栗田は、ドームふじ基地に向かうルート上で積雪試料採取も行い、そして、帰国後に宇宙線生成核種であるトリチウム分析を行い、中性子線計測結果と同様に、沿岸域から内陸域にむかってトリチウム濃度が高くなるという地理的特徴を明らかにした。この計測結果に基づき、今年度は、モデルの精度評価と改良に取り組んだ。申請代表者が宇宙線被ばく線量の計算に利用してきたPARMAをトリチウム生成量の予測に活用することを狙いとして、Poluianov et al. (2020)で報告されたモデル結果(大気中トリチウム生成量データ)を利用してモデルと観測値の比較を行った。大気中のトリチウム濃度は生成量と除去量(降水量)のバランスで決まり、生成量の時間変化は相対的に小さいことから、除去量の増減がトリチウム濃度変化に大きく影響する。そこで、除去量の増減を気塊の滞留時間の関数と仮定し、滞留時間ごとにトリチウム分布を計算し、観測値と比較を行った。その結果、南極地域では、氷床の堆積により内陸に向かって地表面気圧が減少することを反映したトリチウム濃度分布を示した。また、沿岸域から氷床斜面域では、南極周辺大気中のトリチウム濃度付近に分布していたが、頂上部付近ではその濃度が急激に高くなることが分かった。これは、トリチウムの除去過程が弱まり、トリチウムの滞留時間が長くなっていることを示唆している。現在のPoluianov et al. (2020)のモデルやPARMAでもトリチウム生成量のある程度予測できるものの、本研究で得られた観測データは、大気中トリチウムの濃度は生成量よりも除去過程に大きく依存していることを示しており、これをより精密に予測するためには、既存のモデルの精緻化よりも南極水循環の正確な把握が重要といえる。

さらに、今年度の関連する取組みとして、南極での中性子観測データで精度を検証したPARMAモデルを用いて、2014～2020年度に航空機を利用した日本人旅客の宇宙線被ばく線量を計算し解析した(Yasuda et al., 2025)。得られた主な知見として、典型的な巡航高度である37,000フィートでは、国際線の乗客一人当たりの平均年間実効線量(APCD)は約 $60 \mu\text{Sv}/\text{年}$ と推定された一方、国内線の乗客一人当たりの平均APCDは、対象期間において約 $2 \mu\text{Sv}/\text{年}$ であった。これらの結果は、パンデミック期間中、日本の旅行先分布に大きな変化がなかったことを示している。対照的に、日本人人口での平均APCDは、旅行者数の減少に対応して、パンデミック前期間(2014～2019年)の約 $10 \mu\text{Sv}/\text{年}$ から2020年には $2 \mu\text{Sv}/\text{年}$ へと大幅に減少した(Yasuda et al., 2025)。

引用文献

- Poluianov, S.V. et al. *J. Geophys. Res. Atmos.* 125, e2020JD033147 (2020).  
Yasuda, H. et al. *Appl. Sci.* 13(5), 3297 (2023).  
Yasuda, H. et al. *Front. Public Health* 13, 1554332 (2025).

(別紙様式04-2)

あらせ衛星観測に基づく電磁イオンサイクロトロン波動のモデリング  
Modeling on Electromagnetic Ion Cyclotron Waves Observed by Arase

松田昇也 金沢大学理工研究域

内部磁気圏で0.1 Hz～数十 Hzの周波数帯域に観測される電磁イオンサイクロトロン波動は、放射線帯電子消失をはじめとする内部磁気圏ダイナミクスの一端を担うだけでなく、重イオンを含むマルチコンポーネントプラズマの組成診断にも活用できる重要な自然現象である。あらせ衛星は2016年の打ち上げから約9年間に渡り、内部磁気圏の電磁イオンサイクロトロン波動を観測し続けている。本研究では、あらせ衛星に搭載したプラズマ波動・電場観測器(PWE)と磁場観測器(MGF)のデータを網羅的に使用し、内部磁気圏で観測される電磁イオンサイクロトロン波動の特性解析を通じた現象のモデリングを行うことを目指している。

2か年計画の1年次にあたる本年度は、あらせ衛星に搭載された磁場観測器(MGF)による2017年5月から2025年7月までの波形データを使用し、観測データに含まれるノイズの除去方法を検討しつつ、目視に依らずに電磁イオンサイクロトロン波動の出現頻度および平均振幅を求める方法を実装した。図は得られた結果の抜粋であり、14～20時頃の磁気地方時かつ磁気赤道域において、電磁イオンサイクロトロン波動の観測頻度が高いことが分かる。これは、Matsuda et al. 2018 (GRL)などで示された目視によるイベント収集と統計解析の結果ともおおむね一致する。一方で、右図ではあらせ衛星の遠地点付近において、磁気緯度に依らず観測頻度が高い様子が示されているが、ここには電磁イオンサイクロトロン波動以外のプラズマ波動現象や、観測機器由来の雑音が含まれていることが分かっており、次年度の共同研究において、これらを適切に取り除くための工夫をしたうえで、分布の再解析が必要である。

次に、Matsuda et al. 2021 (GRL)で示された電磁イオンサイクロトロン波動のダクト伝搬の物理的妥当性を検証するため、プラズマ波の伝搬通路を理論的に計算するレイトレーシングを用いた多点同時観測イベントの再現および伝搬特性解析を行った。電磁イオンサイクロトロン波動の伝搬特性は、伝搬通路上のイオン組成やプラズマ密度構造に強く依存するため、プラズマ中の複数種のイオンの影響を考慮した伝搬通路計算を行い、さらに伝搬途上でのモード変換を模擬した計算アルゴリズムを新たに実装することで、電磁イオンサイクロトロン波動の伝搬特性を定量的に解析可能とした。さらに、ダクト伝搬の特性を解析するため、磁力線に沿ったプラズマ密度の粗密構造をプラズマ密度プロファイルに導入した。本年度開発したレイトレーシングプログラムを用いて、次年度は電磁イオンサイクロトロン波動がダクトに沿って長距離伝搬するメカニズムの検証を行う。

本共同研究では、2028年に科学観測を開始予定の超小型衛星「IMPACT」における、電磁イオンサイクロトロン波動の観測戦略についても検討を行っており、次年度も衛星開発と並行して科学観測戦略の検討を行っていく。

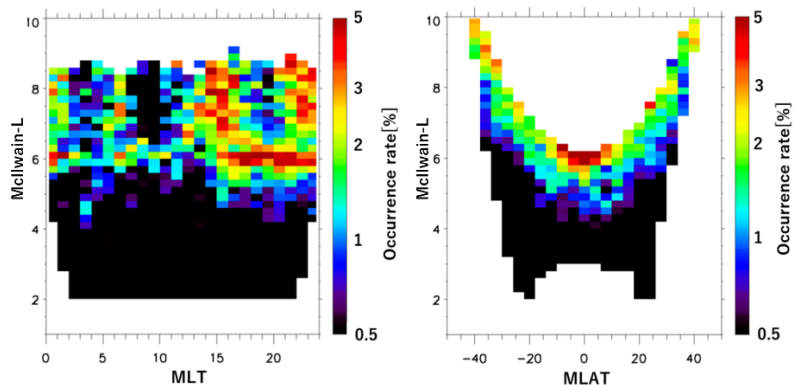


図 電磁イオンサイクロトロン波動の出現頻度分布  
(観測機器由来の雑音の影響が含まれていることに注意を要する)

(別紙様式 4 - 2)

熱・気体・粒子の渦相関法による海面フラックスの高精度観測の試み

## High precision observations of sea surface fluxes for heats, gases, and particles by eddy covariance technique

近藤文義 海上保安大学校・基礎教育講座

### はじめに

海塩粒子は海面から大気中へ放出され浮遊し、放射や雲物理、物質循環など様々な分野において重要な物質である。しかしながら、海塩粒子の海面からの生成率を現場で直接測定された例はあまりなく、その見積りには未だオーダーレベルのばらつきがある。さらに除去過程も複雑であるために、大気中の濃度を精度よく推定することも出来ていない現状がある。

所内担当教員の相木教授は、台風のような強風・高波発生時におけるエアロゾルの粒径分布と、それらと海面波砕や白波との関係を計測できるような海上波しぶき光学粒子計（波しぶき計）を試作して、海洋観測塔や湾内に係留したブイに試作機を設置し、海上でエアロゾルの濃度変動の実観測試験を行ってきた。その結果、台風通過に伴う海塩粒子の劇的な増加を観測することに成功している。

本申請では、海面近傍の大気中に浮遊する粒子の動態が大気と海洋間の熱と気体の交換過程をどのように変化させようのかといった問いに取り組むため、海面から放出される海塩粒子と共に、特に計測が困難とされる気体成分である二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）を対象とした海面フラックスの渦相関法による高精度測定法を確立することを目的とし、波崎海洋観測施設の観測栈橋を利用した試験観測結果を報告する。

### 研究方法

本研究では、貴所の共同利用機器である波しぶき計の他に、オープンパス型（OP）とエンクローズドパス型（EP）のCO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>Oガス分析計、超音波風速温度計を観測栈橋に設置した（図1）。これらから大気乱流によって生じる3次元の風速、音仮温度、粒子数密度、CO<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>Oの密度（OP）と混合比（EP）の変動成分を10Hzの時間分解能で計測した。粒子数密度は0.3、0.5、0.8、1.0、3.0、5.0、10、15μm以上の8粒径別で毎時55～35分の40分間、他は常時連続計測した。また観測システムは2セット、北側と南側（EPは無し）のハンドレールを利用してそれぞれ設置した。波しぶき計の大気試料の吸引口として漏斗を用い、長さ8cm・内径5mmの導電性チューブを波しぶき計本体上部から折れ曲がらないように波しぶき計の試料取込口まで伸ばし、本体内部のポンプにより大気試料を吸引した。吸引量は2.83L/minである。



図1 波崎海洋観測施設の観測栈橋に設置した乱流フラックス観測システム

## 研究結果

図2は、OPとEPによるCO<sub>2</sub>混合比の10Hz計測値を1分平均した時系列変動を示す。EPは絶対値と変動値ともに1日を通じてほぼ一定であるのに対して、OPは絶対値が減少するにつれ変動値は増大する様子がみられる。OPは大気乱流によるCO<sub>2</sub>変動値を直接計測することができる利点がある一方、計測部で赤外線透過する光学窓が海塩粒子などで汚染されることにより、みかけのCO<sub>2</sub>変動が計測され渦相関法によるCO<sub>2</sub>の海面フラックスの評価誤差が生じる原因となる。観測期間中に光学窓は降雨により何度か自然に清掃され、OPの絶対値はEPと同じ水準まで回復することもあったが、変動値は必ずしも戻らなかった。

一方でEPは計測部までブローにより大気試料を分析部まで吸引する途中に焼結フィルターで試料中に含まれる光学窓の汚染源となる海塩粒子などを除去するため、長期にわたり安定的にCO<sub>2</sub>変動を計測することのできる利点がある。しかし大気試料の吸引過程でCO<sub>2</sub>変動が減衰する欠点もあり、CO<sub>2</sub>フラックスが小さな海面では変動減衰の影響はフラックスの過小評価として本質的な問題となる可能性がある。能城らは海面と同じくCO<sub>2</sub>フラックスが小さい雪氷面において、変動減衰によるフラックスの過小評価を5%以下と報告している。本観測結果ではまだ十分に精査されていないものの、FFTによる周波数解析からはNoshiroらと同じ周波数帯で変動減衰による影響がみられるため、フラックスの過小評価はほぼ同程度と考えられる。

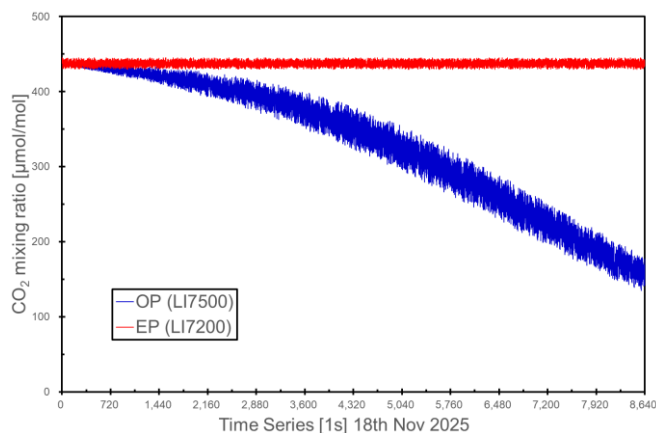


図2 OP（青）とEP（赤）によるCO<sub>2</sub>混合比の10Hz計測値の1分平均の時系列変動

## まとめ

本研究は、宇宙地球環境研究所の共同利用機器「海上波しぶき光学粒子計」を利用し、海面近傍の大気中に浮遊する粒子の動態が大気と海洋間の熱と気体の交換過程をどのように変化させるのかといった問いに取り組むため、今年度はエンクロードドパス型ガス分析計を導入して正確なCO<sub>2</sub>フラックスを評価するための試験観測を実施した。EPによる変動減衰によるフラックスの過小評価をバンドパス法で補正することを今後検討する。EPはOPの光学窓汚染と同じく、みかけのCO<sub>2</sub>変動を引き起こす原因となるH<sub>2</sub>Oとの相互干渉や空気密度変動の補正を要しない計測法も導入できる利点もあるため、高精度なCO<sub>2</sub>の海面フラックスを評価するに適していると考えられる。

## 成果発表

Makoto KOIKE, Yoshimi KAWAI, Kouji ADACHI, Hidenori AIKI, Yugo KANAYA, Hideaki KAWAI, Kazuyuki KITA, Fumiyoshi KONDO, Tsuyoshi KOSHIRO, Hitoshi MATSUI, Takuma MIYAKAWA, Ayumu MIYAMOTO, Takafumi MIYASAKA, Yuzo MIYAZAKI, Michihiro MOCHIDA, Tatsuhiro MORI, Nobuhiro MOTTEKI, Toshiyuki MURAYAMA, Hisashi NAKAMURA, Sho OHATA, Eitarou OKA, Satoru OKAJIMA, Yutaka TOBO, Shion SEKIZAWA, Atsushi YOSHIDA: Integrated Aircraft and Research Vessel Observational Studies of Aerosols and Clouds in Summer over the Western North Pacific, Progress in Earth and Planetary Science, Vol. 12(50), <https://doi.org/10.1186/s40645-025-00719-1>, 2025

(別紙様式04-2)

次世代マルチビームシステム Phased Array Feedの基礎開発  
Development of the next generation multi-beam system Phased Array Feed

宮本祐介 福井工業大学・工学部 電気電子情報工学科

【研究目的】

星形成の母体である分子雲の形成過程はいまだ十分には解明されていない。近年、分子雲形成の鍵となる低密度分子雲が銀河系内に広く分布している可能性が指摘されており、その全体像を把握する広域観測手法の確立が重要となっている。本研究では、Phased Array Feed (PAF) を福井工業大学10 mパラボラアンテナに搭載し、従来よりも大幅に効率的な広域サーベイ観測を実現することを最終目標とする。PAFは、一次焦点前面に配置した複数素子の信号を電気的に合成することで複数ビームを柔軟に形成できるため、従来型マルチビーム受信機に比べて拡張性・自由度が高い。一方で、安定したビーム形成、較正、機械系・受信系との統合など解決すべき技術課題も多い。令和7年度はその基礎開発として、10 mアンテナおよび2.4 mアンテナの整備、受信系の性能確認、PAF素子となるダイポールアンテナの試作と評価を進め、今後のプロトタイプPAF開発と実機搭載に向けた技術基盤の構築を目的とした。

【研究方法（使用した共同利用装置・施設等を含む）】

本研究は、前年度までに進めてきたPhased Arrayシステムの基礎技術研究と、福井工業大学10 mアンテナへのPAF搭載に向けた試作・検討を発展させるものである。PAFの実用化には、素子アンテナ単体の設計に加えて、ビーム形成、ビーム制御、較正、さらに搭載先アンテナの駆動系・受信系との整合を含めたシステム全体としての成立性の検証が不可欠である。このため本共同研究では、共同研究者が有するPhased Arrayおよびビーム形成・較正に関する知見と、福井工業大学側で進めている10 mアンテナおよび2.4 mアンテナの整備・受信系評価・PAF素子開発を結びつけ、要素技術から実機展開までを見据えた基礎開発を進めた。令和7年度は、主として福井工業大学あわら宇宙センターの10 mパラボラアンテナおよび2.4 mパラボラアンテナを用い、以下の4項目を実施した。

(1) 10 mアンテナ駆動部の整備

PAF搭載先である10 mアンテナについて、将来的な追尾観測およびPAF評価実験の実施に必要な基盤整備として、既存のACモーターからDCモーターおよび新たな駆動機構への変更を見据えた整備を進めた。あわせて、モーター交換に伴う配線整備、端子系の見直し、ならびに角度検出機構の設置方法の検討を行った。これは、将来PAFを実機搭載した際に必要となる安定した指向制御・ビーム評価の前提条件を整えるためのものである。

(2) 10 mアンテナ受信システムの性能評価

10 mアンテナに搭載されている受信システムについて、今後のPAF接続試験および性能評価に向けた基礎情報を得るため、受信系の構成確認と基本的な性能評価を行った。これにより、既存受信系の活用可能性を整理するとともに、今後PAFを接続した際に必要となる改修点や評価項目を明確化した。

(3) 2.4 mアンテナシステムの整備

PAF開発のテストベッドとして導入した2.4 mアンテナについて、新規サーボアクチュエーターの仕様検討と発注、新駆動系に対応する制御システムの検討を行った。また、受信系の接続確認とIF系の性能評価を実施し、組立後の性能試験に向けた準備を進めた。

(4) PAF用ダイポールアレイ素子の作成および性能評価

PAFを構成するダイポール素子アンテナの試作を進め、素子単体の基本性能確認を行った。さらに、アレイ化を見据えて、素子配置、相互結合、給電方式、支持構造等を検討し、今後のビーム形成実験に必要な設計条件を整理した。

## 【研究結果】

### (1) 10 mアンテナ駆動部整備

10 mアンテナについて、DCモーターおよび新たな駆動機構を前提とした整備を進め、既存機構との接続方法、配線ルート、端子処理、保守性を考慮した実装方針を具体化した(図 1)。加えて、将来的な指向制御に必要な角度検出機構について、設置位置や機械的干渉の有無、配線処理方法を含めた検討を進めた。これにより、PAF搭載後の追尾観測に必要なアンテナ基盤整備の方向性が明確になった。



図 1 : 10m アンテナ駆動部の整備

### (2) 10 mアンテナ受信システムの性能評価

10mアンテナの既設受信系について、各構成要素の接続状態と信号伝送系の確認を行い、PAF接続試験を見据えた受信システムの現状把握を行った(図 2)。特に、既設システムのRF/IF系が今後の実験にどのように活用可能かを整理できたことは、PAF評価系の設計に有用であった。



図 2 : 10m アンテナ鏡面でのシステム性能評価の様子

### (3) 2.4 mアンテナ整備

2.4 mアンテナについては、新規サーボアクチュエーターの導入に向けた検討と発注を行い、新しい駆動系に整合する制御方式の検討を進めた。また、受信系の確認およびIF系の性能評価を実施し、組立後に速やかに受信試験へ移行できる見通しを得た。R7年度中の実機観測には至らなかったものの、来年度の組立・性能評価に必要な準備を概ね整えることができた。

### (4) ダイポールアレイ素子の作製・評価

PAF用ダイポール素子について、試作と基本性能評価を実施した(図 3)。素子単体の特性把握に加え、アレイ構成時に重要となる素子間隔、支持構造、給電系の課題を整理した。これにより、今後実施するアレイ全体の性能評価およびビーム形成試験に向けた基礎データが得られた。

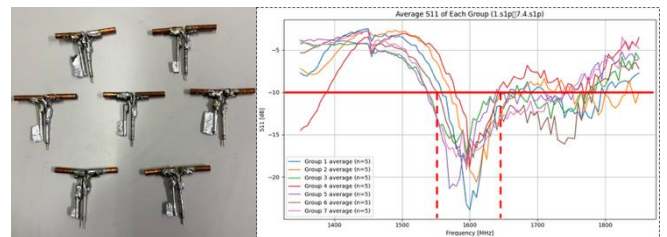


図 3 : 作製したダイポールアレイ素子とその性能

## 【考察】

R7年度は、主にPAF実装に必要な機械系・制御系・受信系・素子系の基盤整備を実施した。10 mアンテナについては、PAFを搭載して運用するためには受信機開発だけでなく、安定した指向制御と保守性の高い駆動系が不可欠であり、今回のDCモーター化および角度検出機構の検討はその前提条件を整える重要な進展と位置付けられる。

また、2.4 mアンテナについては、PAF開発のテストベッドとして活用するための準備が進み、来年度中の組立・性能評価に向けた見通しが得られた。これは、いきなり10 mアンテナで本格的なPAF試験を行うのではなく、より小型の系で段階的に評価手法を確立するうえで有効である。

さらに、ダイポール素子の作成と評価により、今後のアレイ化およびビーム形成実験に必要な設計上の留意点が明確になった。今後は、2.4 mアンテナの組立・性能評価、ダイポールアレイ全体の性能評価、デジタルビーム形成および校正手法の検証へと進めることで、10 mアンテナへのPAF搭載に向けた基礎技術を具体化できると考えられる。

## 【まとめ】

本年度は、次世代マルチビームシステムPAFの基礎開発に向けて、10 mアンテナの駆動部整備と受信系評価、2.4 mアンテナの整備、ならびにPAF用ダイポール素子の試作と評価を実施した。これにより、PAF実装に必要な装置基盤の整備が進み、来年度に予定している2.4 mアンテナの組立・性能評価およびダイポールアレイの評価試験へつながる技術的見通しを得た。今後は、段階的な性能実証を通じて、10 mアンテナへのPAF搭載と広域サーベイ観測の実現を目指す。

(別紙様式04-2)

浮体水路の内部流れに対する風が及ぼす影響に関する調査  
Investigation of the influence induced by wind on the internal flow of a floating channel

筒井壽博、弓削商船高等専門学校・電子機械工学科

【1. 背景と目的】

潮流エネルギー回生機構は従来プロペラ型×全没水式での研究が先行しているが、翼面へのフジツボなどの付着による性能の経年劣化等が懸案となっている。一方、本研究対象である浮体水路を用いた表層潮流エネルギー回生機構については波浪の影響を忌避し本格的な検討がすすんでいない。表層潮流エネルギー回生機構は小規模かつ分散的な施設の構築に有利であるが、波浪によっては防波堤の内側などに装置を回航する必要も考えられる。

その頻度が多ければ実質的なエネルギー回生性能を喪失するので、運転可能な波浪程度の推定と波浪に対しより堅牢な浮体形状、水車型式、搭載手法などについての設計要件を得ることが急がれる。

これらの知見は所内担当教員の相木教授が推進している「大気と海洋の波動エネルギー循環のシームレス解析による熱帯・中緯度相互作用の解明」の後継課題として社会と科学が連携した新しい研究コミュニティの形成に寄与するものと思われる。本研究では具体的な技術として社会実装の可能性を検討し得る波浪の影響を予知予測する手法の構築と模型実験による本回生機構の改良研究を並行して行う。

【2. 研究方法】

佐々木らの方法(2002年)を参考にして、浮体水路に設置した開放型下掛け水車の年間稼働時間を潮流速度のみにより推算する場合に対し、波浪の影響を加味した場合どの程度短くなるのかを評価し得る手法を構築する。一方、利活用の範囲を拡げるため本回生機構をより低流速から稼働できる水中帆を艤装する手法を回流水槽における模型実験にて並行してすすめる。

【3. 研究成果とまとめ】

波浪の評価方法については2026年5月からの実海域にて波浪の測定が実施できるよう測定用模型ヴィ(君塚、2025年)および実験支援艇の準備(図1)をすすめた。

また、回生機構についてはその通過流速が増速する浮水路形状(水車後流の水路を拡幅する手法、長井、筒井ら)見出していたが、本年度は更に水車入口側の水路床を深くし、流れ方向に階段状に水深が浅くなる形状とすることによっても水車軸出力が増大する(長井、筒井ら)ことを確認した。

また、この手法の応用として浮体水路入口側に湧昇流を誘導する膜構造(水中帆)を設け、それにより水車上流水位が大幅に上昇すること(森、長井ら)を確認した。

予備実験段階ではあるが、この水中帆による水車上流側の水位上昇の効果と浮体水路の拡幅による水車後流の水位低下の効果との相乗効果を図2に示す。今回は準備した計測システムの限度を超えたため水車軸出力の最大出力は確認できていないが、大幅な出力向上が伺えた。

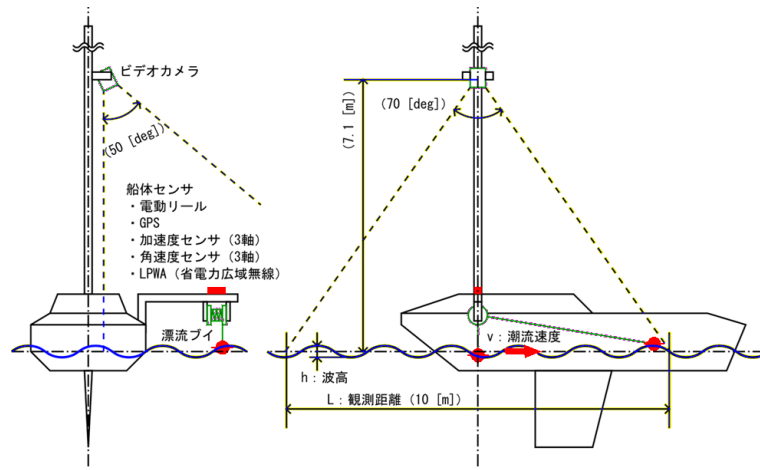
この後、模型実験の追試と設置予定海域の波浪の測定を並行してすすめる予定である。

引用文献

- ・佐々木、須田、港湾工事用波浪予測法の開発と工事の安全管理、日本沿岸域学会論文集, 14 ,pp. 155-166(2002年3月)
- ・君塚, <https://www.metro-cit.ac.jp/contents/000012631.pdf>, 海洋・波浪モデル, 研究・技術・教育シリーズ集, 東京都立産業技術高専(2026年3月確認)
- ・長井、筒井ら, 表層潮流エネルギー回生機構における浮体水路幅変化による下掛け水車の増速効果, ターボ機械, 52(6) 35-46(2024年6月)

成果発表

- ・長井、筒井ら, 深さ方向に変化する浮体水路による下掛け水車への出力向上効果, 海洋エネルギー研究所報告「OPEC」, 29 29-32(2025年2月)
- ・森、長井ら, 竹材カスケード利用のための下掛け水車式表層潮流エネルギー回生機構用浮体水路への湧昇流誘導構造の艤装, ターボ機械協会 第93回松江講演会(2025年12月)

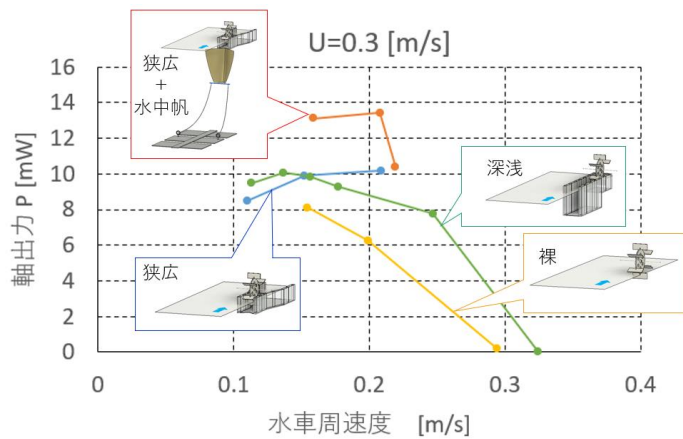


(a) 模型ブイによる波浪観測

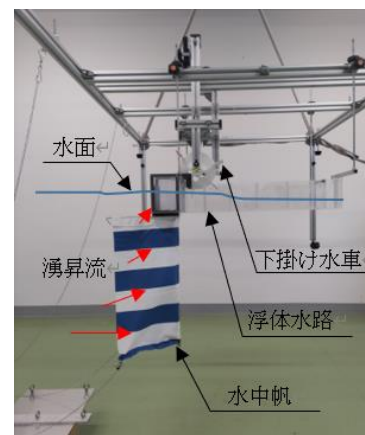


(b) 実験支援艇の準備状況

図1 波浪観測の準備



(a) 水中帆の効果



(b) 「狭水路+水中帆」概観

図2 湧昇流を誘導する水中帆の効果

(別紙様式04-2)

グローバル・素過程モデル連成計算と科学衛星観測による地球内部磁気圏での  
波動粒子相互作用の研究

Study of wave-particle interactions in the inner magnetosphere by  
Global-PIC cross-reference simulations and satellite observation

加藤 雄人，東北大学 大学院理学研究科

### ・研究目的

宇宙天気現象時の地球内部磁気圏では多様なプラズマ波動・粒子相互作用が生じる。中でも、内部磁気圏の広い領域で発生するホイッスラーモード・コーラス放射は、相対論的高エネルギー電子の生成・消失過程において重要な役割を担うとされている。近年の理論・シミュレーション研究により、コーラス放射との波動粒子相互作用における非線形効果の重要性が指摘されている。内部磁気圏のどの領域で、どのようなタイミングでコーラス放射が生じるかを明らかにするためには、高エネルギー電子の磁気圏内での輸送を扱うグローバルモデルが有用なツールとなるが、波動粒子相互作用で本質的に重要となる非線形効果をどのように取り入れるかが課題として残されている。本研究課題では、これまでの共同研究により確立したグローバル・素過程連成計算手法を用いたシミュレーションと、あらせ衛星をはじめとする科学衛星による直接観測結果から、内部磁気圏でのコーラス放射の発生領域とその時間・空間変化を明らかにすることを目的とする。

### ・研究方法

内部磁気圏赤道領域におけるkeV帯の電子のダイナミクスを解くグローバルモデルと、PIC法を用いて波動粒子相互作用を解き進める素過程シミュレーションとの連成計算を実施する。具体的な連成計算としては、素過程シミュレーションの結果に基づいて得られた非線形相互作用の閾値計算モジュールをグローバルモデルに組み込む方法（連成計算1）と、素過程シミュレーションの初期条件にグローバルモデルの結果を用いる方法（連成計算2）とを検討する。さらに、モデルの計算結果を衛星観測結果と比較することにより、本手法の有効性を検証する。本課題で提案する手法により、内部磁気圏においてコーラス放射の励起過程ならびに相対論的電子加速の生じる領域の時間・空間発展を定量的に議論することが可能となる。

### ・研究結果

2025年度における研究課題の成果は以下の通りである。

連成計算1について、2017年3月に発生した磁気嵐を対象に実施したグローバルモデルによる計算結果の解析を進めた。グローバルモデルの計算結果に示される高エネルギー電子の速度分布関数を用いた連成計算2により、コーラス放射が発生する条件のサーベイ計算を実施した。特に背景磁場強度の空間勾配の変化がコーラス放射発生条件に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、同イベント時のあらせ衛星による観測結果に基づいた素過程計算を実施している。また、あらせ衛星ならびにCluster衛星による観測結果を解析して、ホイッスラーモード波動の強度がULF波動と同期して変動するイベントを複数同定し、ULF波動に起因する全磁場強度の変動がホイッスラーモード波動の伝搬過程にULF波動がもたらす影響を考察した。空間2次元のレイトレース計算の結果との比較に基づいて、同定されたイベントではULF波動がダクト構造を形成している可能性が高いことを示した。以上の成果を国内外の学

会・研究会で報告した他，学術誌に発表した。本申請に関連する科研費・基盤B課題（代表：三好，分担：加藤他）が2023年度より開始し，あらせ衛星とモデル計算結果との詳細比較を進めた。

(別紙様式04-2)

大起伏山地における大規模斜面崩壊の発達過程解明に向けた高精度年代測定  
High precision  $^{14}\text{C}$  dating for reconstructing large-scale rockslides in high relief mountains

研究代表者 荻谷愛彦 専修大学・文学部

(1) 研究目的・研究方法 (使用した共同利用装置・施設等を含む)

日本の大起伏山地には、地質時代・歴史時代に発生した大規模斜面崩壊 (以下、崩壊) の痕跡が広く残されている。しかし、個々の崩壊がどのような発達過程を経て現在に至ったのか、数値年代を含めた全体像は十分に解明されていない。大起伏山地における低頻度・大規模な土砂移動現象の復元は、第四紀地形学・地質学にとどまらず、山地土砂災害の減災・防災に関わる砂防学、強震動や極端気象との関連を扱う古地震学・古気候学にも資する重要な課題である。

2023年度に開始した本研究の目的は、崩壊発達史を精密に復元するとともに、その基盤となる高精度年代資料を得ることである。2023~2024年度は、1707年宝永地震との関連が指摘されてきた赤石山脈・大谷崩 (静岡県) を主対象として、崩壊堆積物および堰止めに伴う湖沼堆積物に挟在する微小有機物 (植物片等) を試料に、加速器質量分析装置を用いた放射性炭素 ( $^{14}\text{C}$ ) 年代測定による検討を進めた。その結果、大谷崩の発生は通説のように1707年に収れんせず、100年以上の時間幅をもつ地形変化の結果として理解すべきことを示す重要な知見を得た (荻谷ほか 2024)。2025年度は赤石山脈南半の静岡県北部~長野県南部に分布する崩壊地でも試料採取を行い、崩壊と誘因の関係を検討する計画とした。とくに、歴史地震 (例: 715年遠江地震、1586年天正地震) や歴史豪雨との関係解明を目標とした。

(2) 研究結果・考察・まとめ

2024年度に赤石山脈とその周辺山域 (赤石山脈南半の静岡県北部~長野県南部) で採取した年代測定試料 (山田ほか 2024) は、2025年度前半に前処理を完了した。しかし、2025年度は加速器質量分析装置が調整中であったため、年代測定は2026年3月時点で保留となっている。

一方、次段階となる新規試料採取の準備を進めた。2025年度は新規科研費を充当し、静岡県安倍川上流部における崩壊性堰止め湖沼堆積物を対象にボーリング掘削を計画立案し、掘削適地選定のため電気探査を先行実施した。現在解析中で、その結果にもとづき近日中に掘削に着手する予定である。現時点では、現河床下数十mの複数層準に植物片を含む細粒層が伏在する可能性が高いと見込まれる。掘削後は回収コアから試料を分別し、装置復旧後、速やかに年代測定へ移行できるよう計画を整備している。さらに比較研究として、八ヶ岳の堰止め湖沼堆積物 (既存ボーリング) から試料採取を行い、今後の測定に供する予定である。この堆積物の形成には、南海トラフ・駿河トラフで発生したと推定される887年仁和地震の関与が指摘されている。なお、以上の計画に関連し、2026年度名古屋大学宇宙地球環境研究所「一般共同研究」および「加速器質量分析装置等利用 (共同利用)」に応募中である。

現時点で新規年代値は得られていないが、前年度までの成果から、大谷崩の初期発生は14~15世紀に遡り、16世紀までに複数回の突発的土砂流出があった可能性が高まりつつある。また長野県南部の遠山川流域では、715年とは異なる2時期 (13~14世紀) に崩壊が発生したことを示唆する年代値が得られている。今後、ボーリング試料の年代測定を含む追加データの取得により、これらの解釈を裏付ける、あるいは新たな崩壊イベントを示す編年情報が得られることを期待する。

(3) 引用文献

荻谷愛彦・中西利典・木村恵樹・山田隆二・木村 諤・村松 武・青島 晃・北川浩之 (2024) : 堰止め湖沼堆積物の $^{14}\text{C}$ 年代から探る大谷崩の発達過程. 日本第四紀学会2024年研究大会発表要旨集.  
山田隆二・村松 武・寺岡義治・荻谷愛彦・木村 諤 (2024) : 遠山川上流・矢筈山くずれによって形成された堰止湖の痕跡. 日本地すべり学会 2024年度研究大会要旨集.

(4) 成果発表

山田隆二・荻谷愛彦・長谷川怜思 (2025) 八ヶ岳大月川岩層なだれ堆積物から出土した材化石年代の再検討. 2025年度公益社団法人日本地すべり学会第64回研究発表会.  
荻谷愛彦 (2026) : 日本アルプスの第四紀地形学・地質学—課題と展望. 日本第四紀学会学会賞・学術賞受賞記念講演会、オンライン.

(別紙様式04-2)

低周波超長基線電波干渉計観測における電離圏の影響評価  
Evaluation of ionospheric effects on Low-Frequency VLBI Observations

土屋史紀 東北大学・大学院理学研究科

高い集光力をもつ大型電波干渉計 Square Kilometre Array (SKA) の建設が開始され、2020 年代後半より SKA と他の電波望遠鏡との間での超長基線電波干渉計(VLBI)観測を通して、天文学、惑星科学分野での研究に大きな進展が見込まれる。地球の電離圏を電波が通過する際に受ける群遅延は周波数の二乗に反比例するため、低周波の VLBI 観測では、電離圏での遅延効果の評価・補正が必須となる。本研究は、低周波(300MHz 帯)での VLBI 観測における電離層の効果の定量的評価及びその補正方法の確立を目的として実施された。

2024 年度の共同研究によって、名古屋大学・豊川分室の IPS 太陽風観測システム (図 1(c)) と東北大学の飯舘惑星電波望遠鏡 (IPRT) (図 1(a)) 間で VLBI 観測を行い、有意な相関信号を得ることに成功していた。2025 年度は、これらに東北大学蔵王観測所に設置されている 27 素子 2x4 スタック八木アンテナ (図 1(b)) を加えた 3 局の電波望遠鏡の間で VLBI 実験を行い、局間の遅延時間変動の導出手法を確立した。図 1 に 3 局の電波望遠鏡の写真と位置を示す。図 2 に 2025 年 5 月 2 日に実施した VLBI 観測の結果を示す。観測対象は VLBI 観測に適したコンパクトな電波源 3C147 を用いた。図 2 は上から飯舘-蔵王間、蔵王-豊川間、飯舘-豊川間の相関処理結果を示し、左側に群遅延から求められた位相差、右側に相関係数の振幅を示す。約 3 分間の観測時間内にゆっくりとした位相差の時間変動が検出された。

本研究を通して、300MHz 帯において定常的に VLBI 観測を実施できる体制を構築することができた。この成果は、2025 年 6 月にフランス・マルセイユで開催された Planetary, solar and heliospheric Radio Emissions (PRE) X で発表され、査読つきプロシーディングに投稿された (Kita et al. 2026, 査読中)。今後の課題は、遅延時間差から電離圏での群遅延成分を抽出し、GNSS-TEC のデータとの比較することによって、電離圏での遅延量を定量的に評価することと、観測視野内の複数の電波源に対して相関処理を行い、電波源ごとに遅延量を導出することによって電離層での遅延補正 (in-beam) を行うノウハウを確立することである。

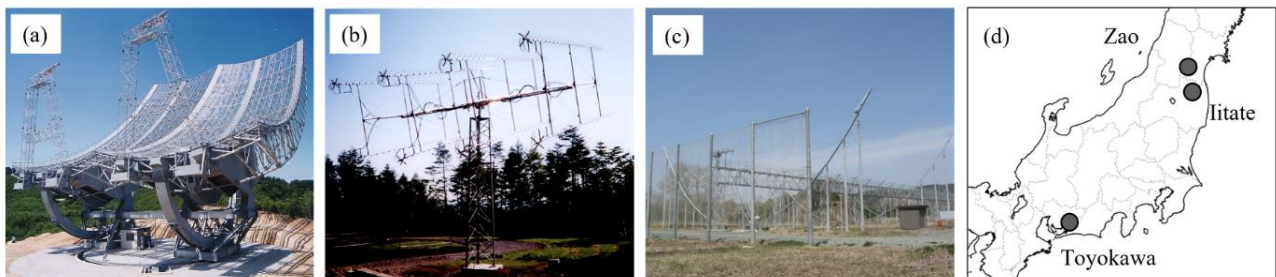


図 1 : 3 局の電波望遠鏡の写真(a-c)と位置(d) (Kita et al. 2026)。

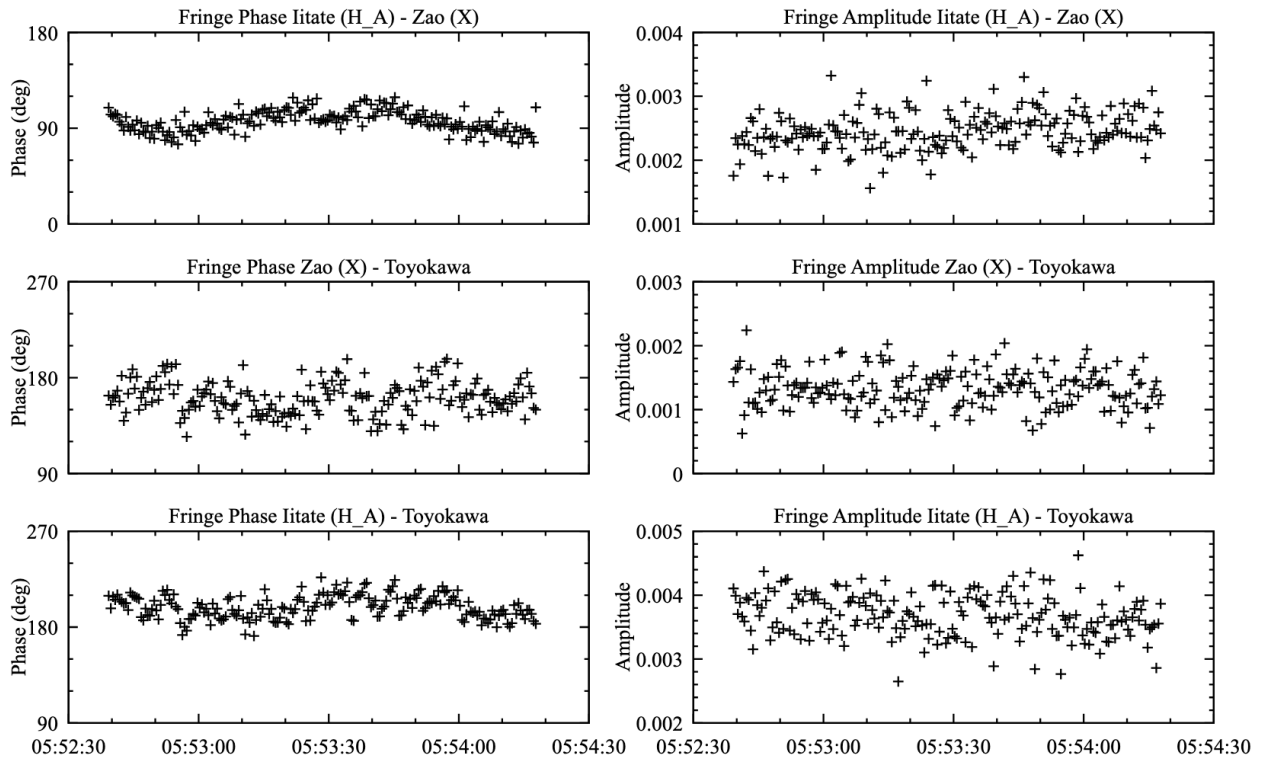


図 2 : 2025 年 5 月 2 日に実施した電波源 3C147 の VLBI 観測の結果。上から飯舘-蔵王間、蔵王-豊川間、飯舘-豊川間の相関処理結果を示す。左側に群遅延から求められた位相差、右側に相関係数の振幅である (Kita et al. 2026)。

<sup>14</sup>Cウイグルマッピング法による十和田八戸噴火の精密年代決定  
Precise dating of the Towada-Hachinohe eruption using <sup>14</sup>C wiggle matching method

奥野 充、大阪公立大学・大学院理学研究科

【研究目的】 放射性炭素 (<sup>14</sup>C) 年代測定法は、炭素の放射性同位体である<sup>14</sup>Cを含んだ試料の年代を決定する測定法である。得られた<sup>14</sup>C年代は、暦年較正曲線を用いた暦年較正によって暦年代に変換される。北半球の陸産試料の暦年較正にはIntCalが用いられ、最新のIntCal20 (Reimer *et al.*, 2020) は、約5,000 cal BPまで較正可能である。樹木年輪は、IntCalを構成するデータの中で最も信頼性が高いデータだが、約13,910 cal BPまでしか遡れず、欧米産データが中心で日本産データは過去3000年に限定される。近年、半球内における大気<sup>14</sup>C濃度の不均一性(地域効果)が指摘されている中で、日本産樹木年輪データの採用によって紀元前後における較正曲線の形状が見直され、より正確な暦年較正が可能となった。ただし、IntCal20では過去3000年より古い年代域において、日本産試料の暦年代推定について十分な検証が行われていない。十和田八戸 (To-H) テフラは、日本の広域テフラのひとつであり(町田・新井, 2003)、グリーンランド氷床コアの火山ガラスNEEM1502.60 m (22粒)との対比により、 $15.7 \pm 0.2$  ka b2k ( $2\sigma$ ) 年代が報告されている (Bourne *et al.*, 2016)。van der Plicht *et al.* (2012) は、To-Hの埋没樹幹試料から34点の<sup>14</sup>C年代を報告し、IntCal20から大きく乖離した箇所を示した。坂田 (2024) も同様の乖離箇所の一部られたを示した(図1)。本研究では、十和田八戸噴火の年代を精密決定するため13,910 cal BPを遡る日本産樹木年輪データを確保することを目的とした。

【研究方法】 To-Hに埋没した樹幹試料を採取し、福島大学において木口面を年輪が明瞭に見えるように研磨した後、年輪幅と酸素同位体比の測定を行い(林ほか, 2025)、クロスデーティングによって試料間の時間軸上の位置関係を明らかにした。その後、セルロース抽出を行い、<sup>14</sup>C年代の大きな変動が見られた年代域を狙って<sup>14</sup>C年代測定を行った。セルロース抽出とAMS年代測定は、パレオ・ラボによる10点と、名古屋大学でセルロース抽出、韓国のKIGAMでAMS年代測定した11点の計21点の<sup>14</sup>C年代が得られた。この年代域の詳細な変動パターンを検討するため、van der Plicht *et al.* (2012)、坂田 (2024) が報告した<sup>14</sup>C年代と比較した。

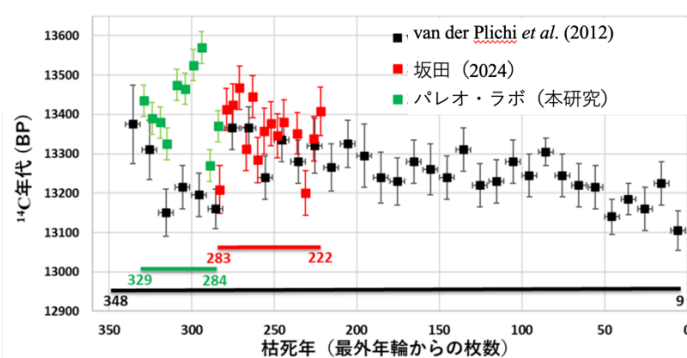


図1 To-Hの埋没樹幹年輪の<sup>14</sup>C年代プロット(その1)。黒色：van der Plicht *et al.* (2012)、赤色：坂田 (2024)、緑色：パレオ・ラボ測定。

【研究結果と考察】 本研究で得られた計21点の<sup>14</sup>C年代をvan der Plicht *et al.* (2012) や坂田 (2024) が報告した<sup>14</sup>C年代と比較すると、<sup>14</sup>C年代の大きな変動が見られる年代域(枯死年から280~330年前)では類似した変動が見られるが、最も顕著な年代域では約300年古い年代を示した(図2)。これらのデータは、IntCalでは平滑化処理によって明瞭に表現できていない<sup>14</sup>C年代の変動を捉えていると考えられ、今後の暦年較正曲線IntCalの詳細化に貢献する可能性がある。ただし、較正曲線の誤差幅を増加させる可能性があるため、統計処理方法の検討、さらなるデータ点数の拡充が求められる。

【謝辞】 林は、株式会社パレオ・ラボ「若手研究員を支援する研究助成(第20期)」を受け、試料採取を実施し、10点の<sup>14</sup>C年代も測定していただいた。この成果を利用して大阪公立大学大学院理学研究科に修士論文を提出した。記して謝意を表す。

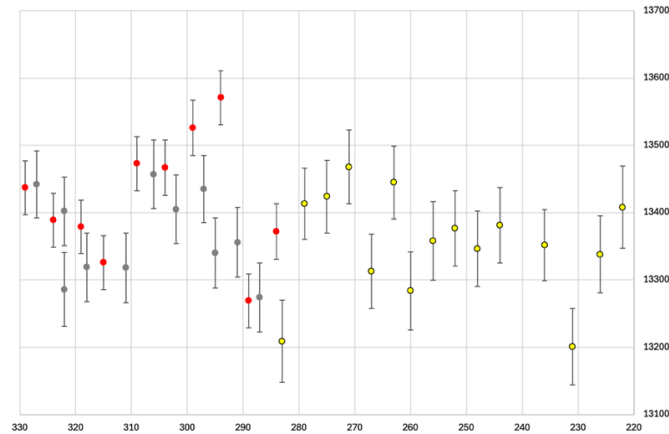


図2 To-Hの埋没樹幹年輪の<sup>14</sup>C年代プロット(その2)。縦軸(<sup>14</sup>C年代:BP)、横軸(外側からの年輪枚数)。黄色:KIGAM測定(坂田、2024)、赤色:パレオ・ラボ測定、灰色:名古屋大セルローズ抽出・KIGAM測定。

【引用文献】

Bourne, A. J., Abbott, P. M., Albert, P. G., Cook, E., Pearce, N. J. G., Ponomareva, V., Svensson, A. and Davies, S. M. (2016) Underestimated risks of recurrent long-range ash dispersal from northern Pacific Arc volcanoes. *Sci. Rep.*, **6**, 29837.

林 優樹・木村勝彦・南 雅代・ホン ワン・奥野 充 (2025) 十和田八戸テフラの埋没樹幹の年輪計測. 名古屋大学年代測定研究, **9**, 51-57.

町田 洋・新井房夫 (2003) 新編火山灰アトラスー日本列島とその周辺ー. 東京大学出版会, 336p.

Reimer, P.J., Austin, W.E.N., Bard, E., Bayliss, A., Blackwell, P.G., Bronk Ramsey, C., Butzin, M., Cheng, H., Edwards, R.L., Friedrich, M., Grootes, P.M., Guilderson, T.P., Hajdas, I., Heaton, T.J., Hogg, A., Hughen, K.A., Kromer, B., Manning, S.W., Muscheler, R., Palmer, J.G., Pearson, C., van der Plicht, J., Reimer, R.W., Richards, D.A., Scott, E.M., Southon, J.R., Turney, C.S.M., Wacker, L., Adolphi, F., Büntgen, U., Capano, M., Fahrni, S.M., Fogtmann-Schulz, A., Friedrich, R., Köhler, P., Kudsk, S., Miyake, F., Olsen, J., Reinig, F., Sakamoto, M., Sookdeo, A., Talamo, S. (2020) The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0-55 cal kBP). *Radiocarbon*, **62**, 725-757.

坂田皓亮 (2024) 十和田八戸火砕流堆積物中の樹木年輪を用いた年代学的研究: 暦年較正データの精度向上に向けて. 福岡大学大学院理学研究科修士論文(手記).

van der Plicht, J., Imamura, M., Sakamoto, M. (2012) Dating of Late Pleistocene tree-ring series from Japan. *Radiocarbon*, **54**, 625-633.

【成果発表】

林 優樹・木村勝彦・南 雅代・ホン ワン・奥野 充 (2025) 十和田八戸テフラの埋没樹幹の年輪計測. 名古屋大学年代測定研究, **9**, 51-57.

林 優樹・奥野 充・木村勝彦、十和田八戸テフラの埋没樹幹年輪の酸素同位体比測定. 国際火山噴火史情報研究集会 2025-1, 大阪公立大学、2025/7/29.

林 優樹・木村勝彦・南 雅代・三宅美沙・ホン ワン・奥野 充、十和田八戸テフラの埋没樹木年輪の放射性炭素年代測定: 日本産試料の暦年較正. 国際火山噴火史情報研究集会 2025-2, 福岡大学、2026/2/15.

林 優樹・木村勝彦・南 雅代・三宅美沙・ホン ワン・門叶冬樹・奥野 充、十和田八戸テフラの埋没樹木年輪の放射性炭素年代測定. 第26回AMSシンポジウム, 名古屋大学、2026/3/26.

(別紙様式 04-2)

## 高分解電波スペクトルと太陽大気画像解析に基づく太陽高エネルギー粒子生成起源の究明

Investigations on origin of solar energetic particle (SEP) phenomena  
based on the analyses of high-resolution radio spectra and coronal images

代表者: 三澤浩昭(東北大学大学院理学研究科)

### 1. 研究目的

フレアやコロナ質量放出(CME)の発露に伴い多様な太陽電波が出現する。この中で特にCME発生時に頻出する負の緩やかな周波数ドリフトを示すⅡ型と呼ばれる現象がある。Ⅱ型電波出現は太陽高エネルギー粒子(SEP)現象出現と関係があることが知られているが、両者の具体的関係は不明である。申請者らは数100MHz帯電波の観測から、Ⅱ型電波には急激な周波数ドリフトを示す微細構造が存在することを明らかにし、顕著な粒子加速の存在可能性を示してきたが、この現象がSEP発生に何処で如何に関わっているかは未解明である。本研究は、電波の高分解スペクトルと太陽大気画像の解析に基づき、①微細構造を示す電波の発生高度～粒子加速域高度の推定、②大気構造変動導出による粒子加速域の同定から、SEP生成起源の究明を行うことを目的としている。また、SEP出現と高相関を示す低周波電波を捉え得る新装置開発と観測も目標とする。

### 2. 研究内容・進行状況

3年計画の2年目となる本年度は、電波現象解析面では東北大学のメートル波帯太陽電波分光装置(IPRT/AMATERAS)で観測された高時間・高周波数分解スペクトルデータを用いて、Ⅱ型電波スペクトル微細構造と微細構造が含まれる大規模構造各々の周波数ドリフト率に着目した解析を行い、CMEのどの部分が微細構造の生成域たるか絞り込みを行った。太陽サイクル24の期間に得られたⅡ型電波出現現象の解析から、微細構造を含む現象の生成域として、CMEの(衝撃波)側面域とする可能性が示されたが、これは近年の電波干渉計によるⅡ型電波源探査結果(ex. Zucca+, A&A, 2018)とも合致している。また、副査として研究指導に関わった東北大学の修士学生による、Ⅱ型電波のスペクトル解析と、太陽大気画像解析(SDO/AIA EUV image, HAO/K-coronagraph & SOHO/LASCO C2 coronagraph image)およびPFSS(Potential-Field Source-Surface)磁場モデル等を併用した対照解析研究から、Ⅱ型電波出現現象の生成域としてCMEの(衝撃波)側面域とする可能性が示された(修士学位論文として纏められた)。これらは何れもイベント解析の結果であるが、ともにⅡ型電波の生成域がCME(衝撃波)の前面域ではなく側面域であることを示唆している点で興味深い結果である(学術誌投稿準備中)。現在、今太陽サイクル25に出現したⅡ型電波出現現象も含めて、この生成域の一般性とSEPとの関係の精査を進めている。尚、今太陽サイクルでは、2020年冬のその開始以降、東北大学のメートル波帯太陽電波望遠鏡の不具合により、観測実施率は6割程度に留まるが、それでも2026年3月末まで30例以上のⅡ型電波出現現象を確認し、その中にはフレア・CME発生域と地球とがwell-connectしたSEP現象も複数例含まれており、特にSEP現象に対応したⅡ型電波出現現象の精査を優先的に進めている。

一方、電波観測面では、SEP現象との関連性が高いとされる低周波帯(数10～数100MHz)の高分解電波計測を可能にするための2つの受信系開発を継続進行させている。1つは現行のメートル波帯太陽電波分光装置の計測周波数帯域を2倍(150～500MHz→100～700MHz)、計測周波数帯域平均の感度を2.5倍以上に更新するアンテナ素子と分光系であり、設計と電波暗室での特性計測等がほぼ終了し、実機製作を検討・実施中である。もう一つは、より周波数の低い20～100MHzのアレイ・アンテナ系で、年度当初計画よりやや遅れているが、今春に2素子アレイを立上予定である。両系実現により20～700MHz帯の太陽電波の高精細観測(電波生成域として大凡1.04～3太陽半径相当)が可能になるが、共に2026年度内の完成を目指している。

### 3. 報告済成果等

- ①三澤他, 太陽研連シンポジウム, 京都大学, 2026年2月16-18日
- ②三澤他, 日本天文学会2026年春季年会, 京都産業大学, 2026年3月4-7日

## 熱帯低気圧の中心付近における降水空間情報の評価

Evaluation of spatial information on precipitation near the center of tropical cyclones

広瀬正史, 名城大学・理工学部

長期に及ぶ衛星降水観測は熱帯低気圧に伴う降水の構造や変動に関する均質な情報をもたらすことが期待される。一方、マイクロ波放射計による低周波の輝度温度観測はフットプリントが大きく、また衛星搭載降水レーダも分解能や地表面クラッターの干渉の問題があり、熱帯低気圧中心部における急変する低高度の降水空間情報の把握は精査を要する課題である。本研究では、蓄積された衛星搭載降水レーダ情報の統計の整合性や特有の構造を分析し、熱帯低気圧に伴う降水空間情報の気候学的な特徴と推定誤差・観測限界について理解を深める。

研究期間全体を通して、熱帯降雨観測衛星搭載降水レーダ (TRMM PR) と全球降水観測計画主衛星搭載二周波降水レーダ (GPM DPR) による熱帯低気圧中心付近の降水空間情報を吟味する。また、GSMaP等のマイクロ波放射計情報を用いた同様の解析や衛星シミュレータの利用により、熱帯低気圧に伴う降水の時空間情報の進展や留意点を調査する。熱帯低気圧に伴う降水の総雨量への寄与や条件別の平均パターンなどに関する以前の調査から、2つのセンサーの観測・推定方法の違いに起因する差が確認されており、データの統合方法についても検討を重ねる。今年度は、地表面クラッター干渉および感度に関する推定誤差の低減、熱帯低気圧に伴う降水のマッチアップデータの刷新、熱帯低気圧に伴う降水事例の可視化 (Tropical Cyclone 3D mapの開発) に関する取り組みを実施した。

降水情報の問題については、低高度降水鉛直分布、浅い降水の欠損、弱い降水の欠損に着目し、各影響を補正することで不整合の低減を試みた。その結果、衛星搭載降水レーダが観測しづらい降水の影響が36度より低緯度側で現在の推定値の約1割、高緯度側 (36~66度) で約4割程度に及ぶことやセンサー・軌道の変更によって変化することを確かめた。詳細はJMSJに投稿している論文にまとめている。熱帯低気圧については、後述するウェブサイトで各事例の低高度降水鉛直分布の補正効果を確認できる機能を追加した。

熱帯低気圧に伴う降水のマッチアップデータは位置情報や最大風速等の情報を加えて新たに作成した。今年度は2014~2024年にGPM DPR KuPRが北西太平洋で観測した熱帯低気圧の全事例を対象とした解析を行った。JTWCのベストトラック情報をもとに1時間ごとの熱帯低気圧中心位置情報を作成し、中心から1度以内に観測が行われた事例について0.05度格子の降水格子情報 (高度0~22 km, 176層) を整備した。これらの各高度の画像は、公開中の衛星搭載降水レーダによる降水気候値に関するウェブサイト (<http://www.rain-clim.com>) に追加したTropical Cyclone 3D mapに掲載した。本サイトでは、図1のように熱帯低気圧に伴う降水の空間的な情報を様々な切り口から確認できる。次年度はTRMM PRのマッチアップ事例も追加し、上述の誤差特性を含め、コンジット解析やセンサー間の比較を実施する予定である。

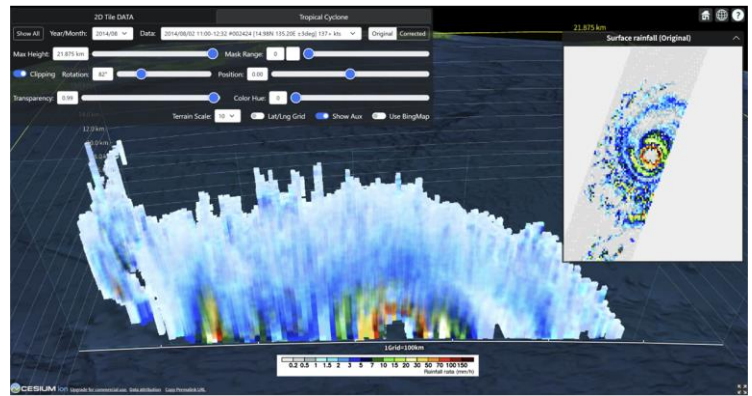


図1 Tropical Cyclone 3D map の例

## 成果発表

Shimizu, R., S. Shige, T. Iguchi, and M. Hirose, 2026: "Narrowing the blind zone of the GPM Dual-frequency Precipitation Radar to improve shallow precipitation detection over oceans", *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 104, 6, <https://doi.org/10.1007/s44394-025-00008-x> (2026-1)

Hirose, M., S. Shige, T. Kubota, S. Seto, V. Mantas, H. Fujinami, F. A. Furuzawa, H. Minda, and H. Masunaga, "Filling observational gaps in spaceborne precipitation radars", *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-8272812/v1>, in review.

衛星データを用いた巻雲分布特性の解明と降水への影響評価

Analysis of the characteristics of cirrus cloud distribution and evaluation of their effect on precipitation using satellite data

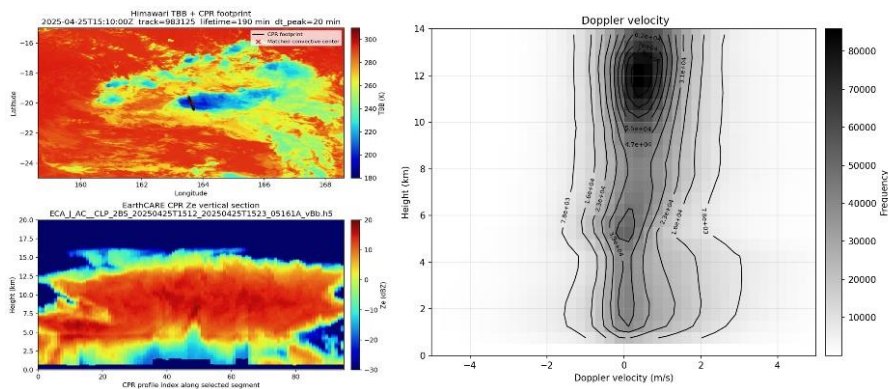
豊嶋紘一、立正大学・データサイエンス学部

1. 研究目的

本研究は、衛星観測データを用いて対流雲の発達過程とその鉛直構造を統一的に捉え、巻雲の生成・分布特性および降水過程への影響の評価を目的とする。静止衛星ひまわり9号による高時間分解能観測と、EarthCARE衛星に搭載されたミリ波ドップラーレーダーによる鉛直構造観測を組み合わせ、対流雲のライフサイクルと雲内部の上昇・下降運動の関係を定量的に解析する。巻雲は対流活動に伴い対流圏界面付近で形成される氷晶雲で、その分布は対流雲の発達過程と密接に関連している。本研究では、巻雲の直接的な解析に先立ち、その基盤となる対流雲の時間発展を明らかにする。対流雲の寿命、発達段階、およびそれに対応する鉛直構造の統計的特徴を整理する。EarthCAREが提供するドップラーレーダー観測を活用し、対流雲の発達段階ごとに上昇・下降場と雲構造の対応関係を解析する。

2. 研究方法と結果

本研究では、ひまわり9号およびEarthCARE衛星の観測データを用いて、対流雲の抽出・追跡と鉛直構造の対応付けを行った。解析には2025年1月から2025年6月までの期間のデータを使用した。ひまわりデータは、千葉大学CEReS提供のグリッド化データ (10.4  $\mu$ m帯の赤外輝度温度) を使い、EarthCAREデータはJAXAが提供するEarthCARE Level2プロダクト (AC\_CLP vBb) を用いた。対流雲の抽出には、赤外輝度温度  $T_b \leq 235$  K の領域を雲ドメインとして、 $T_b \leq 220$  K の画素を含む領域を積乱雲のドメインとして定義し各時刻において抽出し重心および最小輝度温度点を算出、時系列データに対してIDを付与することでライフタイムを定義した。CPR (Cloud Profiling Radar) の観測データから雲レーダー反射因子 (Ze) およびドップラー速度を用いて対流雲の代表点とCPRフットプリントとの距離に基づいて一定距離以内の観測を対応付けることで、対流雲のライフサイクルと鉛直構造を関連付けた。



左：図1 ひまわりの赤外輝度温度分布にEarthCARE衛星のCPRフットプリントを重ねて表示したマッチアップ事例。赤色の印は対流雲の代表点 (最小輝度温度点) を示し、黒線および白点はCPRの観測軌道およびフットプリントを示す。下段には対応するCPRのZeの鉛直断面を示し、対流雲の水平構造と鉛直構造の対応関係を確認できる。

右：図2 検出した全サンプル対流雲とマッチアップしたEarthCARE CPRのドップラー速度のCFADを示す。対流圏上部 (約10-13 km付近) において正のドップラー速度 (上昇流) に対応するピークが見られ、対流雲の発達過程に伴う鉛直運動の特徴が確認できる。

(別紙様式04-2)

海藻資料を用いた北海道周辺海域<sup>14</sup>C量の分布と変遷の把握

Spatial and temporal variation of seawater <sup>14</sup>C around Hokkaido area reconstructed from seaweed samples

谷水雅治、関西学院大学・生命環境学部

【はじめに】

放射性炭素(<sup>14</sup>C)は、自然界では大気上層での宇宙線起源の中性子と大気中の<sup>14</sup>Nと核反応することで生成し、CO<sub>2</sub>として地球表層の炭素循環に組み込まれる。<sup>14</sup>Cは年代測定に利用されており、半減期が海洋循環と比較して十分に大きいことや海洋への供給源が表層からの流入のみであることから海洋循環の理解にも利用されている。一方で、1950~1960年代にかけて、主に太平洋の中心で行われた大気核実験によって人為起源的な<sup>14</sup>Cが大量に対流圏に放出され、大気-海洋間のガス交換によって海洋に取り込まれたことで<sup>14</sup>Cは海洋の表層循環における重要なトレーサーの一つとなっている。大気核実験以降の<sup>14</sup>C濃度 (<sup>14</sup>C/<sup>12</sup>C比) 変動の分析には炭酸塩骨格を持ち、長寿命であるサンゴが主に用いられているが、サンゴは低緯度地域にのみ生息しているため高緯度地域での<sup>14</sup>C量の時間変動の研究例は少ない。対して、海藻であるコンブは短寿命であるが高緯度地域に生息し、生育時期の海洋の<sup>14</sup>C濃度を記録していることが期待できる。本研究では、コンブ標本資料中の<sup>14</sup>C濃度を測定することで海藻中の<sup>14</sup>Cが海洋循環のトレーサーとして利用できるかを検討した。また、時系列変化を調査することで道東地域の<sup>14</sup>C濃度変動の復元を試みた。

【試料と分析法】

本研究では、北海道の根室半島から襟裳岬までの道東地域を調査地域とした。日本列島の太平洋側の海域では、北東から寒流である親潮が南下、南西からは暖流である黒潮や津軽海流が北上しており、道東地域は年間を通して主に親潮の影響を大きく受けている。コンブ標本資料には、北海道大学総合博物館所蔵の1948年から1997年にかけて道東で採取されたものを使用した。塩酸で表面を洗浄後、酸化銅と共に石英管に封じて燃焼することでガス化し、CO<sub>2</sub>に精製してグラフアイト化後にタンデム加速器質量分析計(名古屋大学)を用いて<sup>14</sup>C濃度を測定した。

【結果と考察】

測定結果は、1960年頃から徐々に<sup>14</sup>C濃度が上昇し始めて1973年に最大値に達し、その後は減少傾向を示した。この傾向は、黒潮系に属する海域でのサンゴを用いた先行研究<sup>1)</sup>と同様であったため、コンブは海洋表層循環のトレーサーとして利用できると考えられる。また、道東地域での<sup>14</sup>C濃度の最大値は、黒潮系に属する海域よりも低く、最大値到達後の減少速度も速かった。これは、<sup>14</sup>C濃度の少ない古い海水を含む親潮の影響を受けているためだと考えられる。

【引用文献】

1) Kubota et al., 2018, J. Geophys. Res. Oceans, 123, 2867-2881.

【成果発表】

石橋歩果・福山寛伍・南雅代・伊藤茜・阿部剛史・谷水雅治、コンブ標本資料を用いた道東地域の<sup>14</sup>C濃度変動の復元、2026年度日本地球化学会年会

外部駆動系におけるプラズマ不安定性の非線形発展  
Nonlinear evolution of plasma instability in an externally driven system

天野孝伸 東京大学・大学院理学系研究科

宇宙空間プラズマでエネルギー・運動量輸送に本質的な役割を果たすプラズマ波動の励起源の一つとして、温度異方性などの速度分布関数の特徴的な構造によって駆動される運動論的プラズマ不安定性が考えられている。通常は様な平衡状態からの不安定性の線形・非線形発展が議論され、これによって基本的な理解が得られている。一方で、実際に観測される波動は、必ずしもこのような古典的なアプローチで全てが理解されるわけではない。特に波動のコヒーレンスや、自発的、または外因的な波動の強度変化などは、一様・閉鎖系での数値シミュレーションでは再現が難しいことが知られている。本研究では外部駆動されるプラズマ不安定性についての議論・考察を進めている。今年度に行った研究は以下の通りである。

(1) 2次元Particle-In-Cell (PIC) シミュレーションコードを用いて、地球バウショック相当のパラメータ範囲での数値シミュレーションを実施した。この結果、衝撃波遷移層ではコヒーレントなホイッスラー波が再現された。波動は磁力線垂直方向には波長と同程度のサイズを持つ波束として励起され、詳細解析の結果、周波数は電子サイクロトロン周波数の数10%程度で、磁力線にほぼ平行伝播することが分かった。これらの特徴は人工衛星で観測される波動の特徴と非常に良く一致する。励起源としては電子温度異方性が考えられるが、個々の波束は多くの場合一方（平行もしくは反平行）伝播でよく記述される。これは平行・反平行に対称な波動励起を预言する単純な温度異方性とは不整合である。衝撃波遷移層では静電ポテンシャルの効果によってビーム状の分布が形成されることが知られており、これが非対称性を生む要因になっている可能性がある。今後はこの点についてより詳細な解析を進める予定である。

(2) 理論的には、衝撃波近傍のように非マクスウェル分布を持つ複雑な速度分布関数のもとの線形安定性解析が重要である。本研究では、衝撃波遷移層の速度分布関数をLiouvilleマッピングでモデル化し、さらにKennel and Wong (1967)の半解析的方法を用いた線形安定性解析を実施し、ホイッスラー波の励起可能性についての理論解析を行った。その結果、de Hoffmann-Teller系でのマッハ数が高い衝撃波では衝撃波で反射された電子が異常サイクロトロン共鳴によって斜め伝播のホイッスラー波を励起することが分かった (Wang and Amano, in press)。この理論と観測および数値シミュレーションで見られる波動との関連については今後の研究でより詳細に調べる必要がある。

(3) また、より理想化した外部駆動系の数値シミュレーションモデルとして系に境界から定常的にエネルギー（粒子および磁場）を注入するモデルの境界条件を実装し、そのテストを行った。これまでにこのモデルで、数10イオンサイクロトロン周期にわたる長時間の計算でも安定して計算が実行できること、長時間発展の結果として電子起源のホイッスラー波やイオン起源のミラー不安定性の構造が形成すること、などが分かった。今後はこのモデルを用いてより詳細に外部駆動系のプラズマ不安定性の性質を調べる予定である。

査読付き論文

[1] Wang, R., Amano, T., Generation of Whistler Waves by Reflected Electrons and Their Self-Confinement at Quasi-Perpendicular Shocks, *Physics of Plasmas*, in press.

学会発表

- [1] Amano, T., Kitamura, N., Generation of coherent quasi-parallel whistler waves at Earth's bow shock, 第158回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 神戸大学, 2025年11月  
[2] Wang, R., Amano, T., Electron Confinement and Associated Acceleration at Quasi-Perpendicular Shocks, 第158回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 神戸大学, 2025年11月

(別紙様式04-2)

黒点半暗部における小スケールダイナミクスと構造形成  
Fine-scale dynamics and structure formation in sunspot penumbrae

石川遼太郎、自然科学研究機構核融合科学研究所・研究部

【研究目的】

黒点は太陽表面において最も強い磁場を有する構造であり、強磁場中でのプラズマ物理を理解する上で重要な対象である。このような活動領域では空間的に小さな構造や乱流現象を理解することが肝要であると考えられている。本研究では特に(A)太陽フレアを駆動する物理機構と(B)黒点半暗部の構造形成過程について着目した。光球や彩層で形成される線スペクトルを高い空間分解能で偏光分光観測することで、小スケールの磁場構造やその時間変化を捉え、これらの物理過程において小スケールのダイナミクスが果たす役割を明らかにすることを目的とした。

【研究方法】

国際気球観測実験SUNRISE-3搭載の近赤外偏光分光観測装置(SCIP)と米国超大型太陽望遠鏡DKISTを用いて黒点の観測を行った。SUNRISE-3は2024年7月に観測に成功し、本年度はデータの較正と解析を行った。SCIPは太陽光球で形成されるFe I 846.8 nm, 841.4 nm, 841.5 nm線や光球上層で形成されるK I 770 nm線、彩層で形成されるCa II 846.8 nm, 854.2 nm線などを偏光分光観測した。SUNRISE-3は2024年7月13日に発生したM5クラスのフレアについて、発生前の1時間前からの連続観測に成功した。DKISTについては2025年9月に黒点半暗部の偏光分光観測を行い、米国側でデータ較正が行われた。

【研究結果・考察】

SUNRISE-3及びDKISTの両方について、想定よりも較正に時間を要した。特にDKISTのデータ較正は2026年3月下旬に終了しデータが配布されたため、本年度はDKISTのデータ解析を行うことができなかった。SUNRISE-3/SCIPでは太陽仰角変動に伴う温度変化などの影響が発覚し、やはり較正に時間を要したものの、本年度中に科学解析を開始できる程度まで較正が進んだ。図1はSCIPで観測したフレアの例である。この観測ではフレア発生前後における磁気中性線近傍の磁場構造の観測に成功した。視野は限られているものの、EUV域で顕著な増光が開始する場所で、複雑な偏光スペクトルが中性の鉄のスペクトル線で観測された。この複雑な円偏光プロファイルは正負両極が混在した大気構造で説明できることが分かった。一方、上層で形成されるK I線やCa II線は単極磁場で説明可能なプロファイルであるため、両極が隣接した構造は光球底部に局在していると考えられる。周囲の大規模な磁場構造を合わせて考えることで、bald patch構造がここに存在しフレアの発生に繋がった可能性が示唆された。黒点半暗部についても、図2のようにSUNRISE-3/SCIPで高空間分解能の観測に成功している。また高時間分解能の観測も実施しており、大小さまざまな時空間スケールの現象を解析可能なデータセットを取得している。光球および彩層で形成されるスペクトル線の同時観測により、磁場の3次元構造の推定が可能である。

【まとめと今後】

今年度は時間を要したものの較正に目処をつけることができた。SUNRISE-3/SCIPでは光球及び彩層で形成されるスペクトル線で偏光信号を確認できており、今後より詳細なデータ解析を進めていく。特に彩層の磁場構造を推定するためには、彩層で形成されるCa II 849.8 nm線や854.2 nm線の偏光スペクトルを定量的に解析する必要がある。非局所熱力学平衡まで考慮した輻射輸送計算を用いて、黒点半暗部やフレア前後の複雑な偏光スペクトルから磁場の推定を行う予定である。また、黒点半暗部の構造形成については、DKISTのデータ解析に加えR2D2コードを用いた数値計算との比較を進めることで、本質的に重要な構造や物理過程を同定していく。

【学会発表】

- R.T. Ishikawa et al., "SUNRISE III observations in coordinate with Hinode and IRIS", Hinode18/IRIS16 science meeting, London, June 2025 (招待講演)
- 石川遼太郎他, 『SUNRISE-3/SCIPで観測した磁気中性線上の偏光分光プロファイルとフレア活動』, 太陽研連シンポジウム, 京都大学, 2026年2月17日

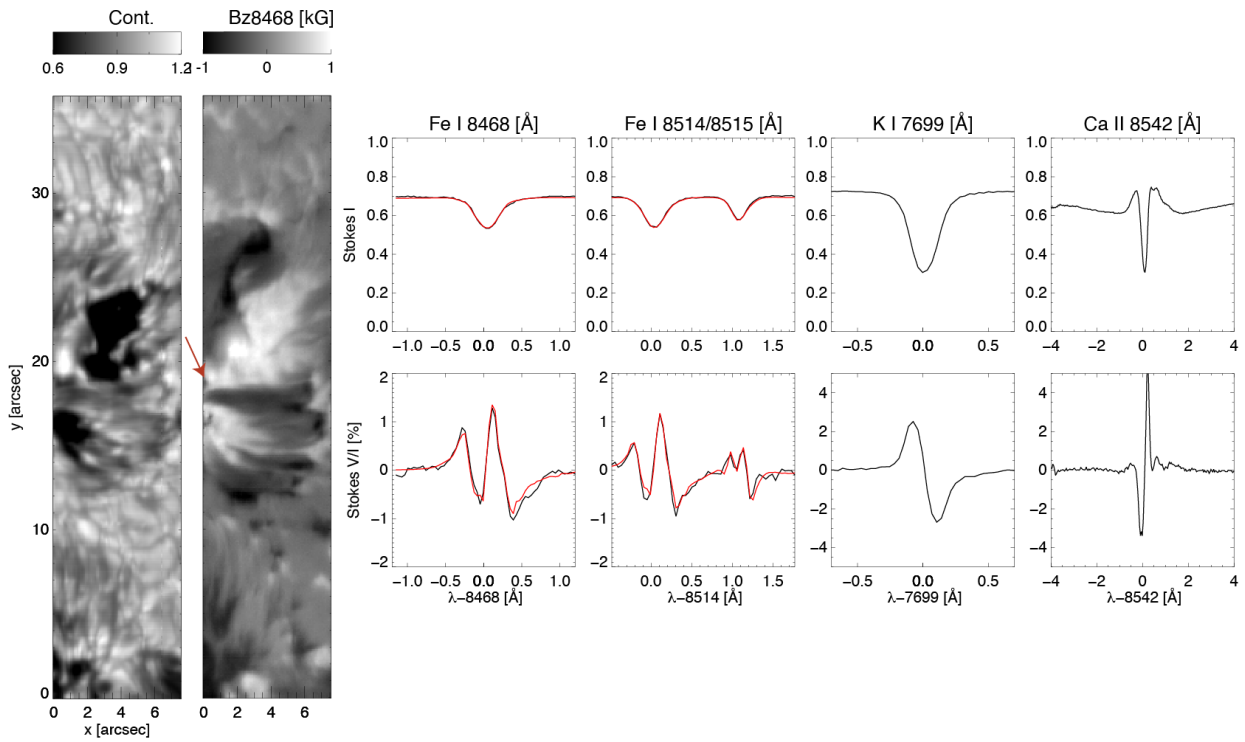


図 1 SUNRISE-3/SCIP で観測したフレア発生領域の連続光輝度分布と光球磁場分布を左パネルに示す。矢印で示した磁気中性線における偏光分光スペクトルを右パネルで示す。黒線が観測されたプロファイルで、赤線は輻射輸送計算によるフィッティング結果。このフィッティングでは正負両極の磁場を含む大気が推定された。

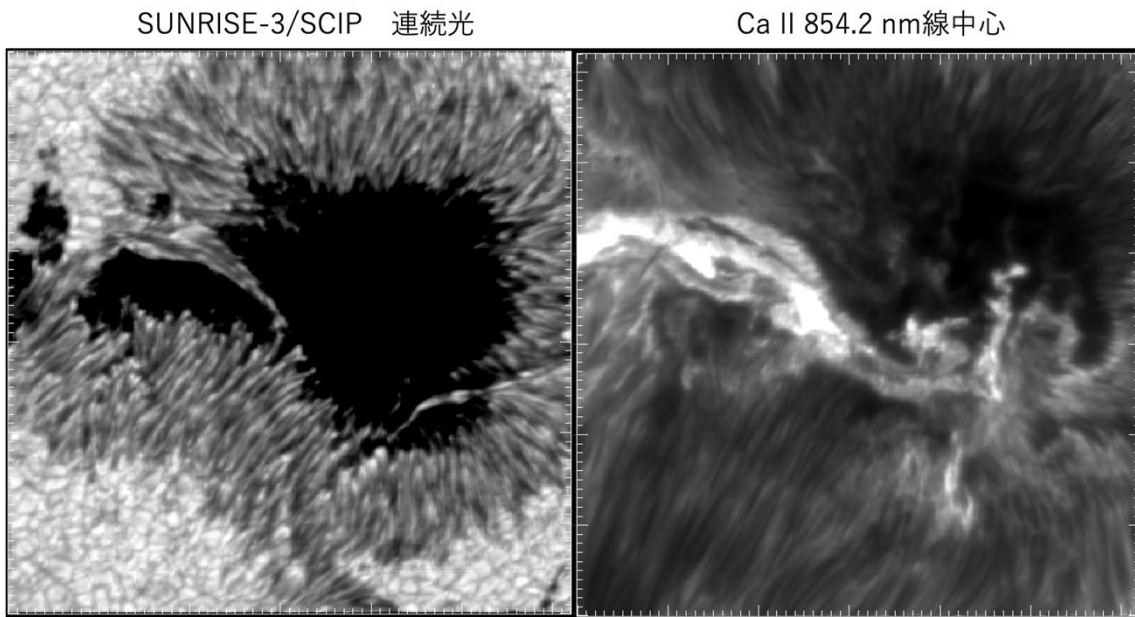
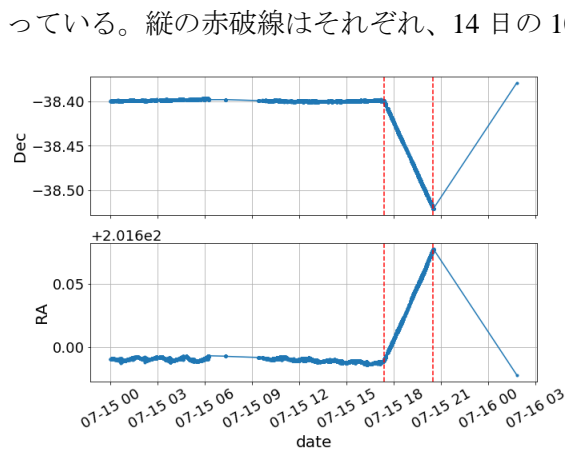
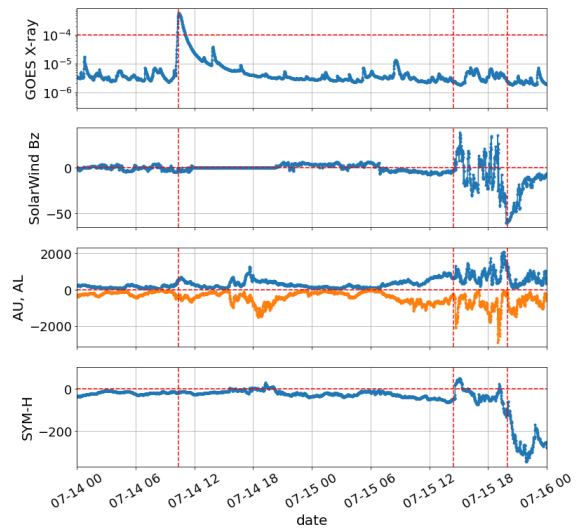


図 2 SUNRISE-3/SCIP で観測された黒点の例。左図は連続光輝度分布、右図は Ca II 854.2 nm 線中心輝度の分布を示す。半暗部の筋模様が両者で確認できる。

衛星軌道データ(TLE)の解析による太陽紫外線を含む宇宙天気現象の解明  
Study of Solar EUV radiation and Space Weather Phenomena by TLE analysis

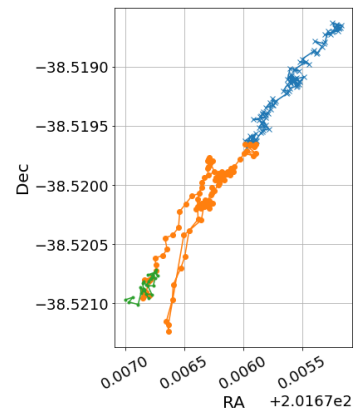
野澤恵、茨城大学、理工学研究科理学野

地球を周回する人工衛星などの宇宙物体は地球・月・太陽の重力だけでなく、太陽光による放射圧などを受け、絶えず衛星軌道は変化している。超高層大気は太陽紫外線や磁気圏のオーロラ粒子の影響を受け、加熱を受け、大気温度や密度が変化することは知られている。特に X 線天文衛星「あすか」が有名な事例として挙げられる。2000 年 7 月 14 日の大規模な太陽フレアにより、翌日に地球では大磁気嵐が発生した。これにより「あすか」衛星は姿勢の保持を喪失し、制御不能となった。そこで、「あすか」衛星の観測データの中に記録された姿勢データの解析を行った。右図は 2000 年 7 月 14 日から 16 日までの宇宙天気現象の観測量を示す。一番上は太陽活動を示す GOES-10 号の X 線(0.1 - 0.8nm)放射(単位は  $W/m^2$ )で、07/14 10:24 に X5.7 を観測した。二番目は太陽風の北向きの磁場(単位は nT)を示す。07/15 14:40 ごろに地球磁気圏に到達した。同日 20 時ごろに -60nT となった。三番目、四番目は地磁気活動である AU, AL(オレンジ色)と SYM-H で、単位は nT である。各マークが記録点である。太陽風が磁気圏に到達してから擾乱が大きくなっている。縦の赤破線はそれぞれ、14 日の 10:24、15 日の 14:30 と 20:00 の時刻を示す。左図は 2000 年



7 月 15 日 00:00 から「あすか」衛星が残した最後の姿勢角の記録である。上が Dec(赤緯)、下が RA(赤経)で、単位は度角であり、各マークが記録点を示す。同日 17:20 ごろから、姿勢がドリフトし始めるのを確認でき、20:30:39 に記録が途絶える。最後の一点は 7 月 16 日 01:48:08 で、これ以降の記録は見いだすことができなかった。縦の赤破線はそれぞれ、15 日の 17:20 と 20:30 の時刻を示す。右図は 20:30

前の拡大図で、7 月 15 日の 20:27:01 から 20:28:33 までを青、それから 20:30:09 までをオレンジ、それから 20:30:39 までを緑とし、姿勢角の変位を示す。各マークが記録点である。7 月 14 日以前は衛星制御の変動は非常に小さく、このようなドリフトは見られない。この姿勢制御の解析は宇宙天気現象の影響の評価は重要である。その後の天文赤外線観測衛星「あかり」では観測データに姿勢データが記録され、運用中である X 線天文観測「XRISM」では GPS から詳細な軌道データが公開されている。これらの姿勢記録の解析と宇宙天気現象との比較が重要となり、次年度以降に行なう予定である。



稠密観測に基づく冬季石狩平野の筋状対流雲下の大気場変動の把握とその人体への影響についての研究

Research on understanding atmospheric field fluctuations under convective snow clouds and their effects on human health based on dense observations of the Ishikari Plain in winter.

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

【研究目的】

冬季札幌圏においては、日本海から季節風に伴って筋状対流雲が流入し易く、降雪がもたらされ、時折大雪となる。Shirooka and Uyeda(1990)はこの地域における観測網を展開し、地上観測や写真撮影からスノーバーストによる短時間での気温低下を報告した。馬場ら(2016)は稠密な地上観測から、筋状対流雲付近の気温低下と気圧上昇を捉え、周期的な変化で減衰することを示した。このスノーバーストを引き起こす霰に注目して、Xバンドレーダと降水粒子判別(Kouketsu et al. 2015)から解析を行った。

【研究方法】

2023年12月22日に西高東低(図1)の気圧配置の下、石狩湾から石狩平野に筋状降雪雲が流れ込んでいた。今回は、0800~0900JSTにこの付近で生じた降雪雲を対象事例とした(図2)石狩平野に流入する筋状降雪雲をXバンドレーダにより3次元的に捉え、特に走向の極大域(図3)を基にして断面図を作成した。また、同バンドの二重偏波レーダから得られる各種パラメータ値が降水粒子の種類に依存していることを利用し、卓越した降水粒子を推定する方法(Kouketsu et al. 2015)を本解析では用いた。

【結果と考察】

筋状降雪雲の断面図(図4)からMagono et al.(1966)同様に海岸付近で反射強度の大きい特徴がみられた。一方、内陸約35kmに最大30dBZを超える反射強度が示された。高度1km以上で示度が増していることから、この領

降雪雲によって内陸部平野上の極大域が形成したと考えられる。降水、内陸部の極大域において0025UTCまで(not shown)はDry Snow (DS)だが、0030UTC(not shown)にDry Graupel (DG)分布が急拡大し、支配的となった。この変化の過程を検討するために $\rho_{hv}$ 分布に着目

(not shown)の内陸25~30km付近の高度1kmより低層において値が0.9以上の大きな $\rho_{hv}$ 分布は、0030UTC(not shown)では内陸25~38km付近にまで拡大し、粒子判別結果のDG分布と対応していることから、DG分布拡大の主な要因は一樣な粒子の降雪によって $\rho_{hv}$ が増大したことでありと考えられる。これは、Kouketsu et al. (2015)で用いられているメンバーシップ関数では、DGは $\rho_{hv}$ の下限が0.98に対し、Dry Snow(DS)は0.98未満と相対的に小さい値をとっていることと整合的である。 $\rho_{hv}$ は散乱体積内に存在する粒子の一樣度によって値が一の形状の粒子が分布していることを表す。降雪粒子の形状を示す中、内陸25~35km付近において-0.2~0dBを示しており、やや存在を示唆していた。反射強度が最大でも30dBZ程度と海岸付近と比べ、岩見沢付近で発生したDG分布は海岸付近で発生した霰粒子、すなわち、六角錘形~球形の霰粒子の集中的な降雪が発生したと推察される。

図3 図3の鉛直断面図(x地点) . 0は海岸線.

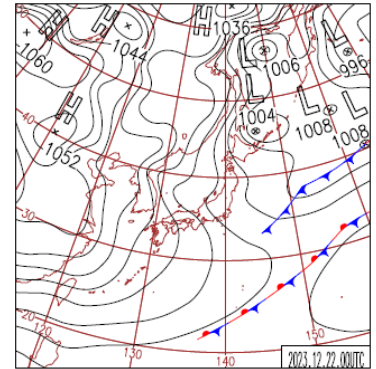


図1 2023年12月22日 09JSTの地上天気図(JMA)

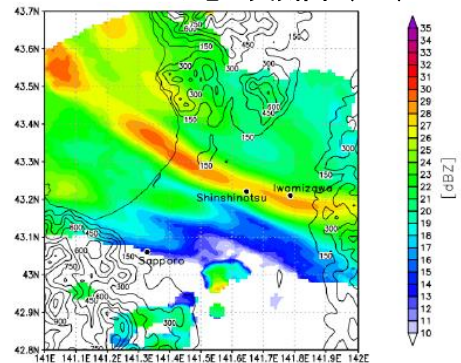


図2 Xバンドレーダによる2023年12月22日0800~0900JSTの平均反射強度分布

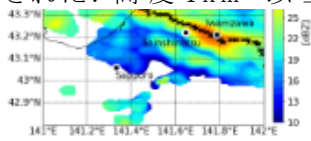


図3 2023年12月22日 0855JSTのXバンドレーダ反射強度

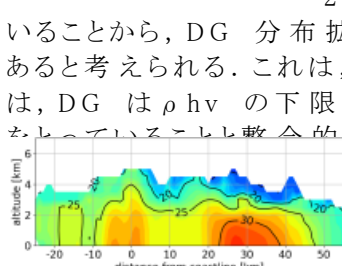


図3 図3の鉛直断面図(x地点) . 0は海岸線.

#### 引用文献

Kouketsu, T., H. Uyeda, T. Ohigashi, M. Oue, H. Takeuchi, T. Shinoda, K. Tsuboki, M. Kubo and K. Muramoto, 2015: A hydrometeor classification method for X-band polarimetric radar: Construction and validation focusing on solid hydrometeors under moist environments. J. Atmos. Oceanic Technol., 32, 2052-2074.

Magono, c., K. Kikuchi, T. Kimura, S. Tazawa and T. Kasai, 1966: A Study on the Snowfall in the Winter Monsoon Season in Hokkaido with Special Reference to Low Land Snowfall (Investigation of Snow Crystal VI). Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University, Series7, Geophysics, 2, 287-308.

Shirooka, R. and H. Uyeda, 1990: Morphological Structure of Snowburst in the Winter Monsoon Surges. J. Meteor. Soc. Japan, 68, 677-686.

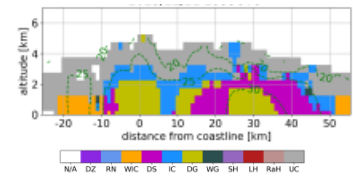


図4 図4の降水粒子判別結果

#### 成果発表

気象モデルCReSSを用いた地上の短周期大気変動を引き起こすスノーバーストの解析, 馬場賢治, 日本生気象学会誌 62(2) 39-39 2025年11月9日 冬季筋状雲下における大気場シミュレーション解析, 馬場賢治, 2024年度(令和6年度)名古屋大学HPC計算科学連携研究プロジェクト成果報告会 2025年7月30日

Xバンド二重偏波レーダーを用いた石狩平野内陸部における降雪雲再発達過程の解析, 三樹圭亮, 清水慎吾, 上田博, 馬場賢治, 令和7年度 日本気象学会北海道支部第1回発表会 2025年7月24日 Xバンド二重偏波レーダーを用いた冬季石狩平野内陸部における霰粒子形成過程の解析 ~2023年12月22日における筋状の降雪雲事例について~, 三樹圭亮, 清水慎吾, 上田博, 馬場賢治, 日本地球惑星科学連合2025年大会 2025年5月26日

(別紙様式04-2)

## UAV・UGVをプラットフォームとして利活用する進入困難な環境のエアロゾル・マルチガス計測手法 Aerosol and Multi-gas Measurement Methods for Inaccessible Environments Utilizing UAV/ UGV as Sensing Platforms

眞部広紀、佐世保工業高等専門学校・基幹教育科

### 【研究目的】

人間が進入困難な環境、とくに有毒ガス成分が含まれるかもしれない未知の閉鎖空間環境においては、代理作業ロボット (Agent robot) による計測探査手法が有効である<sup>[1]</sup>。本研究の目的は、

- ① コンパクトで軽量のエアロゾル・マルチガス計測装置の開発と作製
- ② センシングプラットフォームとしてのUAV, UGVの開発と作製
- ③ ①の計測装置を②のロボットに搭載して、閉鎖空間環境の実証実験

に設定している。

### 【研究方法】

名古屋大学宇宙地球環境研究所の研究メンバーが①「エアロゾル・マルチガス計測装置の開発と作製」を担当し、佐世保工業高等専門学校等の研究メンバーが②「ロボットの開発と作製」、③「①計測装置を②ロボットに搭載し、閉鎖空間環境におけるロボット移動探査実証実験の実施」を担当した。

### 【結果と考察】

- ① : 計測装置の部品調達は、次年度の一般共同研究課題『移動ロボット群に搭載する大気計測装置の開発』で完遂することに計画を変更した。
- ② : 昨年度 (2024年度) エアロゾル計測装置を②のUAVに懸吊する方式であったが、UAVについては今年度以降もこの方式を採用する<sup>1)</sup>。②の閉鎖空間探査実験用UGVは今年度 (2025年度) 内にプロトタイプモデルを開発・作製することができた<sup>2)</sup>。
- ③ : ②のプロトタイプモデルUGVを使用して、鹿児島県曾於市「溝ノ口洞穴」(図1)、山口県美祢市秋吉台「無名穴」(図2)、静岡県伊東市「穴の原溶岩洞穴」(図3)においてロボット移動探査実験を行った。

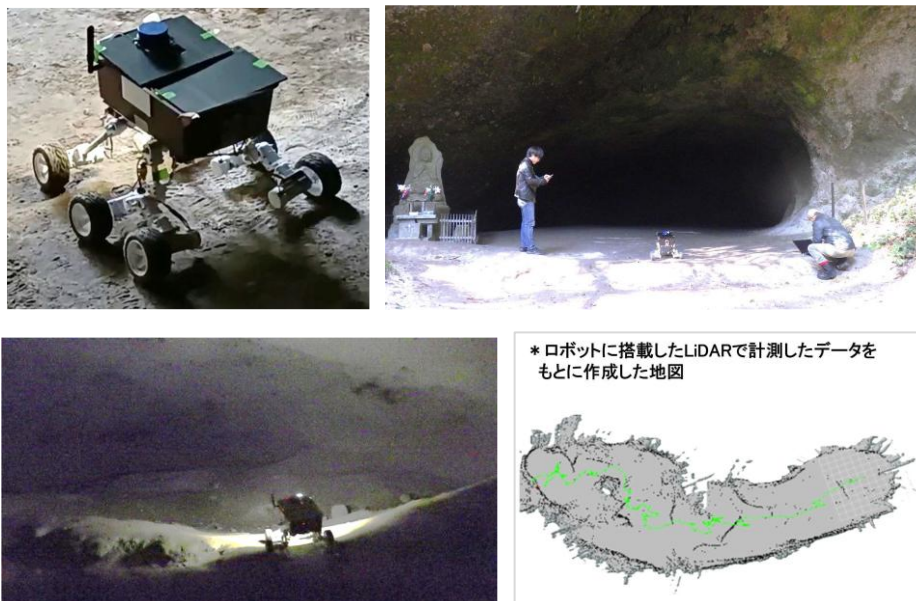


図1. 「溝ノ口洞穴」実験 (2DLiDAR 計測による 2D マップ)



図 2. 「無名穴」実験（中右、右：UGV カメラによる縦穴底の画像）



図 3. 「穴の原溶岩洞穴」実験（中右、右：UGV の懸垂下降）

#### 【まとめと展開】

閉鎖空間環境におけるロボット移動探査実験について、プロトタイプUGVを使用した予備実験に成功した。次年度（2026年度）は、マルチガスセンサ計測装置を搭載してロボット移動計測実験を行うことを目標とする。

#### 【引用文献】

1) 眞部広紀，春山純一，岡本渉

**UAV に懸吊するエアロゾル測定システムと地磁気分布測定手法の検討**

佐世保工業高等専門学校研究報告，巻 62，p. 28-30，発行年 2026-01-31

2) 眞部広紀，堀井樹，ヴァルデスラジャン，春山純一，岡本渉，根本雅人，久間英樹

**秋吉台「無名穴」における懸吊式ロボットKUMA-2の垂直降下登昇実験**

佐世保工業高等専門学校研究報告，巻 62，p. 10-15，発行年 2026-01-31

#### 【成果発表】

[1] 上寺哲也，眞部広紀，堀江潔，

**堀井樹旧呉鎮守府防空指揮所調査ロボットの開発と安全調査**

旧軍港四市 鎮守府日本遺産シンポジウム in 呉，2025年12月7日

(別紙様式04-2)

長期観測を見据えた分離機構搭載投下型観測装置（ペネトレータ）の開発  
Development of a Penetrator with Separation Mechanism for Long-term Observation

西川泰弘、大阪教育大学・理数情報教育系 環境安全科学部門

## 1. 研究目的

本研究では、地球極域や惑星表面などアクセスが困難な環境での観測機器の設置を可能とする投下貫入型観測装置（ペネトレータ）の通信安定性の確保を目的とした開発を行う。ペネトレータは鉛筆型の筒状構造の内部に観測機器を搭載し、上空から投下して地面に設置（貫入）させることで観測点を展開する装置である。この方式は、人が立ち入ることが困難な地域においても安全かつ低コストで観測機器を展開できる利点を持ち、極域観測や惑星探査において有効な観測手法として期待されている。

現在、ペネトレータは、JAXAが推進している火星小型着陸探査計画 **Front-Loading** の STEP1 段階の観測機器として採用される予定であり、2022～2025年には南極において実証試験が行われ、白瀬氷河に3機のペネトレータが投下された。しかし、投下された3機のうち1機は投下直後に通信が途絶し、もう1機も数日後に通信が途絶した。通信を維持できたのは11ヶ月間通信を続けた1機のみであった。この原因として、ペネトレータが氷河に貫入した際に機体全体が氷中に埋没する過貫入が生じ、通信アンテナが地表面に露出しなかったことが考えられている。

この通信不安定を解決するため、本研究ではペネトレータが地面に貫入する際に通信機を搭載したテール部分（通信部）が本体と分離し、通信機器を地表面に残すことで通信安定性を確保する分離機構を備えたペネトレータの開発と性能試験を行う。

## 2. 開発

分離機構には、テール部（通信部）と観測部の接続部分にボルト/バネ/ケーブルからなる構造を採用した（図1）。ペネトレータの貫入時には大きな衝撃加速度が発生するため、この衝撃を利用して接続ボルトを破断させ、テール部分を本体から分離する仕組みとした。具体的には、接続ボルトの本数および直径を調整することで破断強度を制御し、さらに圧縮したバネを接続部に組み込むことで、ボルト破断後にテール部分が地表面側へ押し出されるよう設計した。また、通信部と観測部を電氣的・機械的にケーブルと連結させることによって、通信部のロストを防いでいる。

この構造により、本体は地面内部に貫入して観測装置として機能しつつ、通信機器を搭載したテール部分は地表面に残ることで通信を維持することが可能となる。

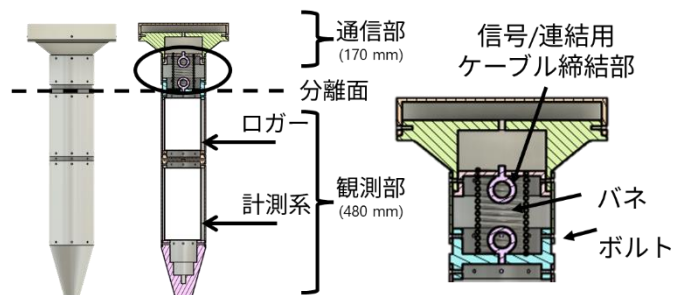


図1：分離機構搭載型ペネトレータ

## 3. 性能試験

本研究では、様々な地盤条件において安定して分離機構が作動するかを検証するため、異なる地面条件で投下実験を実施した。実験は以下の3地点で行った。

高知工科大学グラウンド（硬い地面）  
高知県仁淀川河口（柔らかい砂地）  
新潟県奥只見（積雪環境）

投下には6枚羽ドローンを用い、高度150 mからペネトレータを自由落下させた。この場合、地表面への貫入速度は約50 m/sとなり、地面状態に応じて150～1200 G程度の衝撃加速度が発生した。これらの条件のもとで、貫入状態および分離機構の作動状況进行评估した。

#### 4. 成果

投下実験の結果、ペネトレータは地面の硬い高知工科大学グラウンド、地面の柔らかい仁淀川の河口でそれぞれ半貫入、全貫入し、どちらの実験でもテール部分の分離に成功し、テール部の露出再現性が確認できた(図2)。特に新潟県奥只見の雪面で行われた投下試験では衝撃加速度が小さいにも関わらず分離に成功し、通信部が地表面付近に露出することを確認した。これら3地点の実験結果によってボルト/バネ/ケーブルを用いた分離機構の性能と通信部残置の有効性が明らかになった。

しかしながら、分離機能の実装によりテール部の通信アンテナ面が地中側に向く可能性も示された。通信安定性と分離機能の検証については、今後の設計改良の課題として整理した。

また、長期観測に向けた太陽光発電システムの搭載についての検討を行ったが、本年度の試作機への実装には至らず、今後の設計改良の課題として整理した。

本研究で開発した分離機構を備えたペネトレータは、極域の氷河観測や火山地域など人が立ち入ることが困難な環境での観測装置として利用できる可能性がある。また、本技術は将来の月・火星などの惑星表面探査における観測ネットワーク構築にも応用可能であり、地球科学および惑星科学の双方に貢献する観測技術として発展することが期待される。



図2：投下実験後の分離の様子

実験場所を変えることで半貫入、全貫入、過貫入それぞれの場合で分離機構の作動を確認した。

映像IoTとインフラサウンドによる火山活動の自律観測  
Autonomous observation of volcanic activities using visual IoT and infrasound

西村竜一、国立研究開発法人情報通信研究機構・レジリエントICT研究センター

### 1. 研究目的

情報通信研究機構レジリエントICT研究センターでは、これまでに映像IoTおよびインフラサウンド観測に基づく自然環境計測技術の開発を進めてきた。本共同研究課題では、名古屋大学宇宙地球環境研究所（ISEE）の鹿児島観測所にカメラおよびインフラサウンドセンサーを設置し、映像と音波（インフラサウンド）による火山活動の遠隔自動監視技術の実現可能性について調査する。

### 2. 研究内容

桜島は、現在、爆発的噴火の頻度が国内で最も高い火山であるとともに、地震計や空振計などのデータに基づいて発表される気象庁による噴火発生情報も利用可能である。そこで、名古屋大学宇宙地球環境研究所の鹿児島観測所にPTZカメラおよびインフラサウンド観測装置を設置し、

- 1) ここで観測されたデータと気象庁の発表情報とを比較することで、火山活動観測におけるそれぞれのセンサが有利・不利になる条件を明らかにするためのデータ取得を継続するとともに、
- 2) 電源やネットワーク資源が乏しい環境で持続的な監視を可能とするための効率的な映像・インフラサウンドデータの取得・解析・伝送方式を検討し、
- 3) さらに、取得データをAI解析することで自律的に火山活動の状況を判断する技術を開発する。

鹿児島観測所は、安定した電源およびネットワーク環境を有しており、他の火山観測地点で発生するデータ欠損も少なく、連続的なデータ取得を2022年度から継続している。加えて、観測装置の設置場所に定期的に人が出入りしていることから、ローカルな記録媒体を用いた高画質映像データの長期間記録とその回収も可能であり、AI解析に必要となるデータ収集を効率的に行うことができる施設である。

### 3. 研究結果

本年度は、上記の研究内容で記した3項目のうち、特に3)の自律的に火山活動の状況を判断する技術の開発に取り組んだ。夜間や曇天などカメラ映像による火山活動監視が困難な状況において、インフラサウンドによるモニタリングは有効な手段のひとつとなる。爆発的噴火時には、その活動に起因するインフラサウンドが観測されるため、自律的に噴火の発生を検知できる。しかし、インフラサウンド観測においては、風による雑音を観測精度を低下させる。そこで、オートエンコーダー（AE）を用いることで、検出精度の低下を抑える手法を検討した。

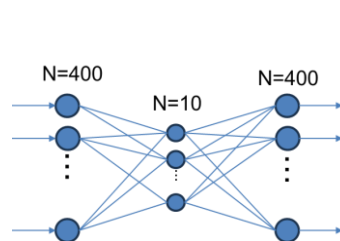


図1：使用したAEのモデル

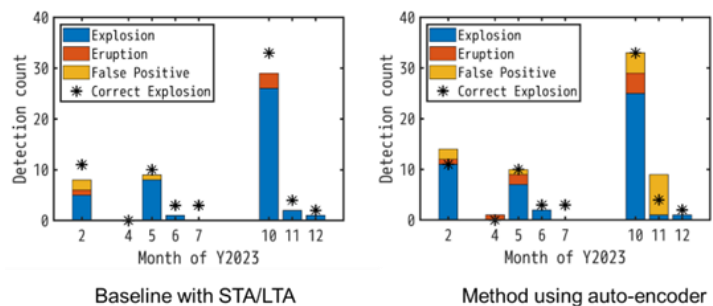


図2：爆発的噴火の自動検出結果（左：従来手法）

図1のような多層モデルにおいて入力と出力が同じ信号になるように、噴火がない時の観測信号を学習データとしてモデル学習を行った。このモデルに対して噴火した際のインフラサウンドを含む信号を入力すると、学習されていない信号のため入力信号と出力信号との差が大きくなり、それを手がかりとして火山噴火を自律検出することができる。気象庁による噴火発表を正解とした時の今回の手法と従来手法との比較結果を図2に示す。AEを用いた手法では、振幅の大きなインフラサウンドが必ずしも発生しない（爆発的ではない）噴火に対しても検出例が増えていることが見て取れる。一方で、誤検出の割合が増えることも確認された。本検討結果については、下記研究成果の[1]において外部発表を行った。

#### 4. 研究成果

[1] R. Nishimura and Y. Suzuki, "Detection of volcanic eruptions using auto-encoder of infrasound," Joint Meeting of ASA and ASJ, Hilton Hawaiian Village Waikiki Beach Resort Honolulu, Hawaii, 1-5 Dec. 2025.

あらせ衛星と SuperDARN レーダーを用いた地磁気脈動の観測研究  
Analysis of Ultra Low Frequency waves using the Arase satellite and SuperDARN data

寺本万里子、九州工業大学工学研究院

【研究目的】

地磁気に観測される地磁気脈動と呼ばれる低周波波動は、放射線帯電子の加速や高周波波動の励起に関する重要な現象である。本研究では、あらせ衛星と中緯度 SuperDARN レーダーの観測を組み合わせることで、地磁気脈動のモードを決定し、その空間構造と励起機構を明らかにすることを目的とする。

【研究方法】

昨年度に引き続き、2022 年度に実施された SuperDARN と Arase の磁力線共役キャンペーン観測において、夕方側で観測された約 2.3 mHz の地磁気脈動イベントの詳細解析を行った。本イベントでは、Arase の磁力線フットプリントが北米上空に位置していたため、北米の地上磁場ネットワーク、SuperDARN 観測網、TEC データと、Arase 衛星による電場・磁場観測を組み合わせた統合解析を実施した。

SuperDARN の二次元観測から波の伝搬方向および波数の同定を行い、地上磁場データから緯度方向の位相・振幅変化に基づき磁力線共鳴の同定を行った。さらに、Arase の電場・磁場データを用いて Poynting flux を算出し、波動のエネルギー伝搬特性を評価した。加えて、同時刻に磁気圏境界付近に位置していた THEMIS 衛星のデータも解析し、上流擾乱の有無を検討した。なお、本研究は共同研究として実施し、申請者は主に衛星データ解析を担当した。

【研究結果と考察】

SuperDARN 観測から、本地磁気脈動は地磁気緯度 62–72 度、経度 280–340 度の広範囲にわたり観測され、反太陽方向の東向き伝搬特性を持つことが明らかとなった。また、波数解析により波数  $m \sim 12$  の比較的小さな構造であることが示された。地上磁場および SuperDARN の観測から、地磁気緯度約 68 度付近で位相および振幅の変化が見られ、磁力線共鳴の存在が確認された。

Arase 衛星では、電場・磁場のトロイダル成分において地上と同周期の波動が卓越しており、スペクトル解析から電場と磁場の位相差は約 45 度 (2 mHz 付近) であることが示された。この結果は、本波動が定在波と進行波が混在した性質を持つことを示唆する。さらに、電子密度観測からイオン密度を仮定して共鳴周波数を評価した結果、電離圏電気伝導度の非対称性に起因する quarter wave モードを支持する結果が得られた。

加えて、THEMIS 衛星は磁気圏境界付近に位置しており、同時刻にプラズマ速度および磁場に準周期的振動が観測された。これらの特徴は Kelvin–Helmholtz 不安定性 (KHI) による境界擾乱と整合的である。

以上の結果から、本研究では KHI により励起された quarter wave モードの地磁気脈動を、地上観測と衛星観測の統合解析により初めて明確に捉えた。これらの成果は論文として取りまとめ、国際誌へ投稿済みである。

【成果発表】

[1] Y.Obana, N.Nishitani, K.Hosokawa, T.Hori, M.Teramoto, A.Shinbori, A.S.Yukimatu, C.L.Waters, M.D.Sciffer, R.L.Lysak, P.V.Ponomarenko, G.Hussey, Y.Miyoshi, A.Matsuoka, A.Kumamoto, F.Tsuchiya, S.Matsuda, Y.Kasahara, I.Shinohara, "Quarter-Wave Resonances: Coordinated Observations by SuperDARN, Magnetometers, and Arase", 地球電磁気・地球惑星圏学会 2025 年秋季年会、神戸、2025 年 11 月 23-27 日

(別紙様式04-2)

視線速度法による第二の地球検出における恒星表面磁気乱対流の影響

Effects of Stellar Surface Magnetic Turbulence Convection on Second-Earth Detection by Radial-Velocity Method

佐藤文衛、東京科学大学・理学院

【研究目的】惑星の周回によって引き起こされる主星の運動を恒星スペクトル吸収線の波長変化としてとらえる観測手法（ドップラー効果を利用した視線速度法）は、太陽近隣の恒星系の地球型惑星「第二の地球」を発見する最有力の手段である。しかし、地球型惑星による主星の視線速度変動はわずか10cm/s程度であるのに対し、恒星表面の磁気乱対流による恒星自身の視線速度変動は1m/s以上と一桁程度大きく、これを如何に惑星による変動と分離するかが第二の地球検出の大きな課題となっている。そこで本研究では、様々なタイプの恒星における表面磁気乱対流を3次元磁気流体計算によってシミュレートし、これがもたらす恒星の視線速度変動の特徴を調査する。そして、この変動の影響を低減し、惑星による視線速度変動を抽出するためのスペクトル吸収線解析の手法を研究する。さらに、同手法を実際の観測データに適用することで、第二の地球を検出するための方法論を構築する。

【研究方法】まず、第二の地球探索の対象となるFGK型主系列星を想定した3次元磁気乱対流シミュレーションを行う。さらに、輻射輸送計算によってこのような動的な大気のもとでの恒星スペクトルを再現する。これにより、表面磁気乱対流が恒星スペクトル線の形状および視線速度に及ぼす影響を調べ、これを低減する観測・解析手法を研究する。これと並行して、国立天文台ハワイ観測所岡山分室に設置されている188cm望遠鏡と高分散分光器HIDES-Fを用いて複数の明るいFGK型主系列星の時系列スペクトルデータを取得する。上記手法を実際の観測データに適用することによって、手法の妥当性・有効性を調べる。

【研究結果・考察】2025年度は、188cm望遠鏡による系外惑星探索の観測ターゲットとして想定されている、こいぬ座 $\alpha$ 星 ( $\alpha$  Cmi) とふたご座 $\beta$ 星 ( $\beta$  Gem) について、恒星進化計算コードMESAによる内部構造の計算と、恒星大気の3次元表面磁気乱対流シミュレーションの準備計算を実施した。両星とも未経験の計算パラメータ範囲であったが、既存のコード (R2D2) で計算できることを確認した (図1)。しかし、計算領域が小さく解像度が低いため妥当な計算にはなっていないと考えられ、 $\alpha$  CmiはMESAで想定している光度を熱対流で運んでいるものの、 $\beta$  Gemは75%ほどの光度しか運べていない結果になっている。今後、妥当な計算領域や解像度などを試行錯誤で見出していく必要がある。また、 $\beta$  Gemは半径が大きく重力が弱いいため圧力スケール長が長く、非常に大きな熱対流セルを持っていることが分かった。模擬観測スペクトルを計算するときは幾何学的な効果が効いてくる可能性があり、注意が必要である。

観測面では、188cm望遠鏡と高分散分光器HIDES-Fを用いて波長分解能30万の超高波長分解能スペクトルを取得することができるようになった (図2)。このデータや他望遠鏡のデータなどを用いて吸収線輪郭形状変化の解析手法の検討を進めたが、恒星自身の変動以上に分光器の不安定性に起因する変動が大きいことが分かったので、今後はこの分光器に起因する影響の評価と低減を進めていく。

【まとめと今後】視線速度法による「第二の地球」検出を念頭に置いて、恒星表面磁気乱対流が引き起こす恒星自身の見かけの視線速度変動と惑星による視線速度変動とを区別するための方法について研究を進めた。2025年度は、188cm望遠鏡の観測ターゲットとして想定されている二星について、恒星進化計算コードMESAによる内部構造の計算と、恒星大気の3次元表面磁気乱対流シミュレーションの準備計算を実施し、既存のコード (R2D2) で計算できることを確認した。また、188cm望遠鏡と高分散分光器HIDES-Fを用いて波長分解能30万の超高波長分解能スペクトルを取得することができるようになった。今後は、シミュレーションについては妥当な解像度と計算領域を決定した上で本計算を行う。さらに、輻射輸送計算によってこのような動的な大気のもとでの恒星スペクトルを再現し、表面磁気乱対流がスペクトル線の形状および視線速度に及ぼす影響を調べ、これを低減する観測・解析手法を引き続き検討する。これと並行して、188cm望遠鏡を用いて天体の時系列スペクトルデータを取得し、上記手法の妥当性・有効性を調べる。

# $\alpha$ CMi

MESAの設定:

Mass:  $1.51M_{\odot}$ , Age:  $2.133 \times 10^9$  yr

$\rightarrow \log L/L_{\odot} = 1.581, T_{\text{eff}} = 6453\text{K}$

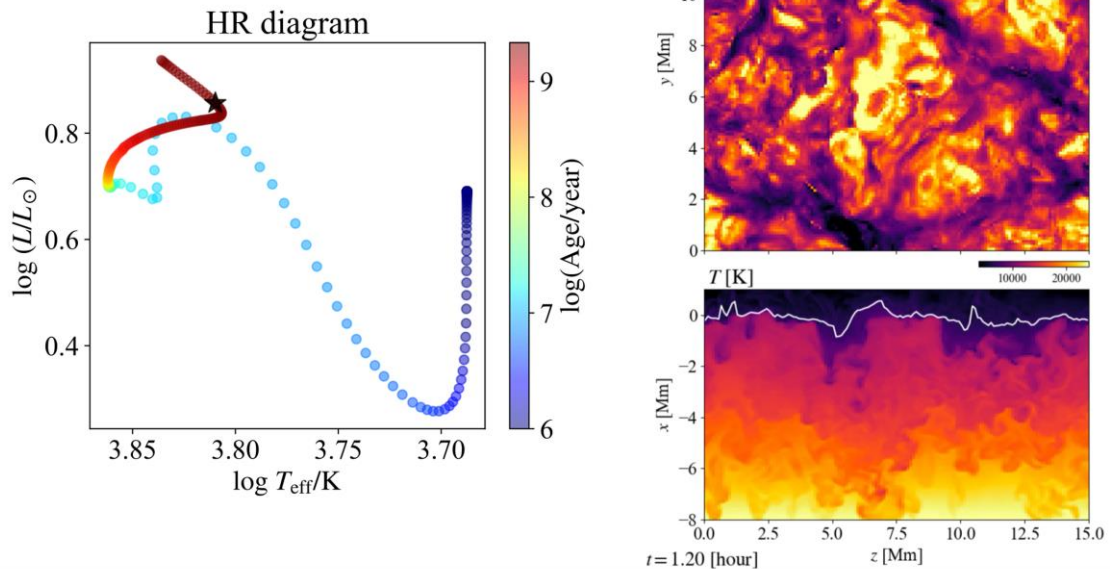


図1: こいぬ座 $\alpha$ 星に対する恒星進化計算コードMESAによる内部構造の計算(左図)と、恒星大気の3次元表面磁気乱対流シミュレーション(R2D2)の準備計算の結果(右)

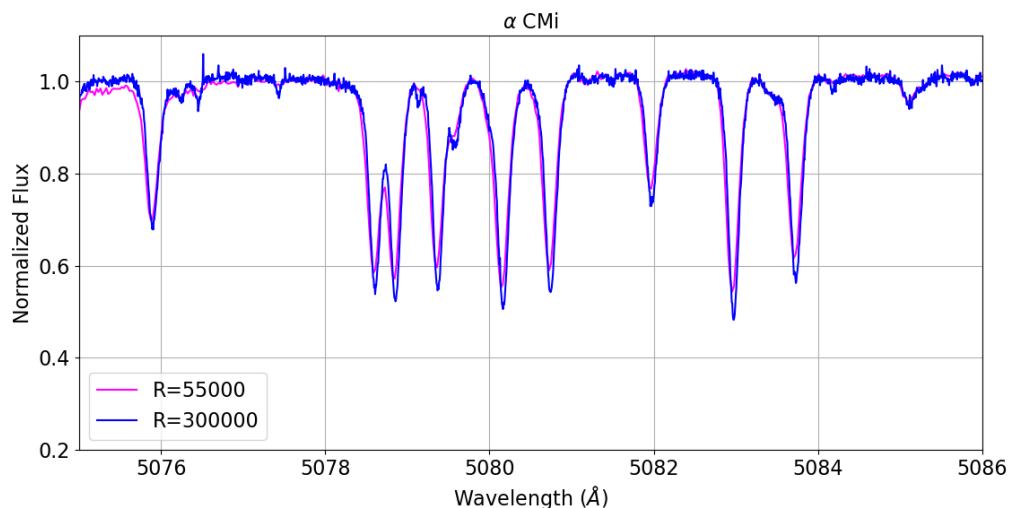


図2: 188cm望遠鏡高分散分光器HIDES-Fの波長分解能30万モードで取得した、こいぬ座 $\alpha$ 星のスペクトル(青線)。波長分解能55000で取得したスペクトル(ピンク)に比べてより吸収線を細かく分解できていることが分かる。

(別紙様式04-2)

### 沖積層に含まれる碎屑物を用いた堆積年代の高精度解析

High resolution analysis of the depositional ages from coastal sediments after the Last Glacial Maximum

中西利典、ふじのくに地球環境史ミュージアム・学芸課

#### 研究目的

プレート収束～衝突帯の島弧である我が国の沿岸低地には、「沖積層」と呼ばれる最終氷期最盛期以降に形成された河川成および海成堆積物が分布している。沖積層が比較的厚く分布する大規模河川の河口周辺には、人口が集中する京浜や阪神などの大都市圏が構築されている。そのため、それらの地下構造や形成履歴を調査することは、過去の海水準変動や地殻変動等の解明に資するだけでなく、地震や津波、火山噴火等による自然災害の防災・減災対策を実施する上でも重要である。こうした研究を遂行する際に、沖積層に含まれる植物片や貝化石を用いて放射性炭素 ( $^{14}\text{C}$ ) 年代測定をおこない堆積年代が推定されてきた。ただし、植物片や貝化石の年代を同等に使うためには、海洋リザーバー効果の定量が必要となる。本研究では堆積学的な観点から、堆積年代の推定で不確定要素となる古い試料の混入(再堆積)やアナジャコなどによる掘り込み(生物擾乱)を明確にした上で、海洋リザーバー効果等を定量的に評価することを目的とする。

#### 研究方法(使用した共同利用装置・施設等を含む)

ふじのくに地球環境史ミュージアムにおいて、堆積年代の高精度解析に適したボーリングコア試料を選定して、超音波洗浄機と篩を用いて植物片や貝化石等を抽出する。植物片は酸-アルカリ-酸処理、貝化石は薄い酸で不純物を除いた後で、再堆積の影響が少ないと考えられる植物片3mg程度と貝10mg程度を選定して分取する。それらの試料を名古屋大学宇宙地球環境研究所(ISEE)の高真空のガラスラインで封入した後で、二酸化炭素を発生させて水素還元法でグラフアイトを精製する。これらを同様な方法で調整したNIST Ox IIやIAEA C-7などの標準試料とブランク試料と個別にカソードに詰めて、同施設の加速器質量分析装置(AMS)を用いて $^{14}\text{C}$ 年代測定を実施する。上記の方法で、阿蘇カルデラで掘削されたボーリングコア(MTI)から保存状態の良い植物片を合計19試料分取・選定して、ISEEのAMSで $^{14}\text{C}$ 年代測定を依頼した。微量な試料が多かったので、正確な年代値が期待できるのは12試料程度の見込みであり、必要に応じて追加の年代測定を実施する予定である。

## 研究結果

阿蘇カルデラで掘削されたMTIコア試料の年代測定結果が届いたら、再堆積を示す試料の含有率とその期間を検討する予定である。それらの結果をカルデラ形成以後の湖成堆積物から河川成堆積物へと移り変わる古環境変化に関する微化石群集組成やCNS分析結果などと合わせて総合的に検討して、国際学会で発表した後でSCI誌に公表したいと考えている。一方、本研究課題に関連する隠岐島後および出雲平野、濃尾平野、仙台平野、奈良盆地の成果が学術誌（福本ほか，2025；Dianto et al., 2025；Nakanishi et al., 2025；Maruyama et al., 2025；Miura et al., 2025；川嶋ほか，2025）に公表され，駿河湾および山陰地方の成果をRadiocarbon国際学会と日本AMSシンポジウムで発表した（Nakanishi et al., 2025；中西ほか，2026）。

## 引用文献

福本 侑・香月 興太・中西 利典・北川 浩之・汪 良奇. 隠岐諸島島後，女池における過去約千年間の水環境変化. LAGUNA, 32, p.37-49, 2025年4月, [https://doi.org/10.60290/laguna.32.0\\_37](https://doi.org/10.60290/laguna.32.0_37)

Aan Dianto, Kota Katsuki, Tetsuya Sakai, Koji Seto, Toshimichi Nakanishi, Toko Tanaka, Iori Miura, Akira Hayashida, Toshiaki Irizuki, Yoshikazu Sampei, Akira Tsujimoto, Masami Watanabe, Takuto Ando, Yasuhide Nakamura, Yoshiki Saito. Holocene coastal evolution and paleogeography of the Izumo Plain and Lake Shinji, Western Japan: incised-valley fills in a wave-dominated estuary environment. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 670, 112941, July, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2025.112941>

Toshimichi Nakanishi, Kazuaki Hori, Rei Nakashima, Wan Hong. New constraints on the marine reservoir effect in Holocene around Kuroshio current from multiproxy sediment core analysis. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 36, 27. July 2025, <https://doi.org/10.1007/s44195-025-00111-y>

Manata Maruyama, Kazuaki Hori, Toru Tamura, Yuji Ishii, Koji Seike, Toshimichi Nakanishi, Wan Hong. Beach ridge formation and Holocene relative sea-level changes in the southern Sendai coastal plain, northern Japan. *Geomorphology*, 488, 109957, November 2025. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2025.109957>

Iori Miura, Kota Katsuki, Toshimichi Nakanishi, Koji Seto, Yoshiki Saito. Holocene salinity changes of the Lake Shinji, western Japan, with sea-level fluctuation and delta plain development based on siliceous microfossil analysis. *Quaternary International*, 749, 109994, October 2025. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2025.109994>

川嶋 涉造・木村 治夫・谷口 薫・中西 利典・堤 浩之. 超多重スタック地中レーダ探査と群列ボーリング解析に基づく奈良盆地東縁断層帯・帯解断層の極浅部地下構造. *活断層研究*, 63, 2025年10月

## 成果発表

Toshimichi Nakanishi, Akihisa Kitamura, Tatsuya Ishiyama, Kazuaki Hori, Nobuhisa Matta, Kazuyoshi Yamada, Hiroyuki Kitagawa, Wan Hong, Radiocarbon marine reservoir effects around the Suruga Bay, P

acific coast of central Japan. The 25th Radiocarbon Conference, A01-9, Krakow, Poland, 30 June 2025

中西 利典・瀬戸 浩二・香月 興太・入月 俊明・齋藤 文紀・ホン ワン, 簸川平野と東郷池における放射性炭素年代測定による完新世堆積物の編年. 第26回AMSシンポジウム, P-06, 名古屋大学理学部南館坂田・平田ホール, 2026年3月26-27日

(別紙様式04-2)

磁気リコネクションにおける粒子加速現象の多様性の起源

Origin of diversity in particle acceleration phenomena in magnetic reconnection

今田晋亮、東京大学・理学系研究科

太陽大気・地球磁気圏をはじめとして、様々な宇宙・実験室プラズマ環境を観測する事が可能になり、いたるところで突発的なエネルギー解放現象である高速磁気リコネクションが起こっている事が明らかになった。これらの研究により、この10年の間、磁気リコネクションの高速化に関する理解が飛躍的に進んだ。一方で、磁気リコネクションに伴う粒子加速に関して多くの研究が行われているものの未だ理解が進んでいない。特に、磁気リコネクションに伴い非熱的な高エネルギー粒子が多く生成される場合とほとんど生成されない場合があり、この違いが何によるものなのかはほとんど理解されていない。宇宙空間の、いつどこでどのくらいの高エネルギー粒子が生成されるかを理解する事は、理学的な意義だけでなく、工学的にも意義がある科学課題である。そこで、本研究計画では磁気リコネクションに伴う粒子加速がどのような条件で起こるのかに焦点を当て『磁気リコネクションにおける粒子加速現象の多様性の起源』の解明を目的とする。多様性の主な起源は磁気リコネクション速度（リコネクションレート）の違いによるものと仮説を立て、以下の三つの方向から検証・考察する。1) 太陽コロナ・地球磁気圏尾部において、磁気リコネクション速度と粒子加速の関係を観測的に明らかにする。2) Hall MHD数値実験により大規模構造の中でどのようにして粒子加速を伴うような速い磁気リコネクションが起こるのか明らかにする。3) 太陽コロナ・地球磁気圏尾部以外のプラズマ環境を用いて、磁気リコネクション速度以外の多様性の起源を考察する。本研究は2028年度に打ち上げ予定のSOLAR-Cが解明する科学課題を粒子加速と結びつけて発展させるものであり、将来計画にも貢献するものである。本研究では、『磁気リコネクションにおける粒子加速現象の多様性の起源』の解明を目的とする。多様性の起源は磁気リコネクション速度（リコネクションレート）の違いによるものと仮説を立て、以下の三つの計画から検証・考察する。計画1) 磁気リコネクションにおける粒子加速現象の多様性の起源の観測的理解、計画2) 粒子加速が起こる高速磁気リコネクションの理論的理解、計画3) 比較プラズマ物理学。

本年度は、観測とマルチスケール (MHD-PIC) シミュレーションを組み合わせ、太陽フレアにおける磁気リコネクションの支配機構を明らかにした。EUV観測からはプラズモイド不安定性を示唆する構造が確認された一方、現実的質量比を用いたPIC計算では二次プラズモイドは抑制され、リコネクションレートの増強にも寄与しないことが示された。さらに、Hall支配領域を拡張しても大域的レートは変化せず、ミクロ構造が直接マクロなエネルギー解放を決めないことが判明した。加えて、運動論効果が存在してもMHDスケールではPetschek型に類似した遅い衝撃波構造が形成されることを示した。これらの結果から、太陽フレアの高速リコネクションは単一機構ではなく、運動論とMHDのマルチスケール結合によって制御されることを明らかにした。

参考文献

Akutagawa et al. 2025, Can plasmoid-mediated reconnection occur in collisionless systems?, Physics of Plasmas, Volume 32, Issue 8, id.082103.

Akutagawa et al. 2025, Influence of kinetic effects in large-scale magnetic reconnection with multi-hierarchy simulation code KAMMUY, Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 78, Issue 1, pp. 82-96,

希ガスシンチレータの研究  
A study on rare gas scintillators

中村正吾、名古屋大学・宇宙地球環境研究所

① 研究目的

宇宙暗黒物質探索で検出器の主要部に用いられている希ガスシンチレータについて、その基礎特性に関する研究を推進する。特に、当研究所の宇宙線研究グループ（CR研）が推進するXENONnT実験や将来計画のXLZD計画などの検出器に用いられている液体キセノンシンチレータについて、その知見をさらに深める。本研究によって、希ガスシンチレータを用いた検出器の性能を飛躍的に向上させ、今後の暗黒物質探索計画を推進する。

② 研究方法

研究代表者は2024年度まで横浜国立大学に所属し、希ガスシンチレータの研究に特化した実験装置を開発して、特に分光測光系の改良を重ねてきた。本研究では同実験装置を当研究所の宇宙線研究グループ（CR研）に移設し、引き続き、希ガスシンチレータの研究を進める。

実験装置の構成は、主に、キセノンガスを $-110^{\circ}\text{C}$ に冷却して液体キセノン生成するガス系、低温液体を安定して保持するの真空断熱系、そして微弱なシンチレーション光を取り出し測光する光学系の3つの要素からなる。この系で、真空断熱系内から放射線を液体キセノンに入射して発光させる。

この実験装置の最大の特徴は、測光部に2系統の超高感度な冷却CCDと高い波長分解能を有する分光器の組み合わせを用い、VUV領域からNIR領域までの広い波長域で超高感度な光検出が出来ることで、液体キセノンについて、既知のVUV発光に加えて微弱なNIR発光も測定することが可能である。

③ 今年度の成果

研究に用いる実験装置は、複数の要素に適切に解体されて、今年度初めまでに当研究所に運搬された。その後、7月から研究代表者が東海国立大学機構の招聘教員となって、本学の環境共用館5階の実験室において実験装置の再構築を進めた。

再構築は光学系から取り組んだが、研究代表者の体調の関係で酷暑の時期と各種の検査の時期を避けて作業を行なった。また、再構築を機に、従来の構成で冗長となっていた部分を除くなど、架台の最適化も行なった。

結果として、光学系ラを除いて概ね試験が構築も途中まで行な。現在までの実験装置示す。写真の中で左上中央の黒い機器がVis中央右の青い機器がVUVある。分光器は、測定柔軟に入れ替えて用いる。冷却CCDは写真には外してある。



④ 今後の予定

次年度に具体的な測定計画を決定し，それに合わせて実験装置の再構築を進め，実際の測定に移行する。

⑤ その他

本研究のきっかけとなった研究代表者の VUV光を利用した過去の研究について，依頼を受けて関連する研究会で口頭発表を行なった。

- ・中村正吾，“1980年頃から約20年間の固体飛跡検出器を用いた磁気モノポール・超重粒子探索の記憶から”，第1回TAICO研究会（名古屋大学宇宙地球環境研究所，Dec. 2025）

(別紙様式04-2)

積雪が卓越している山地上流域における水貯留および流出プロセス解明：  
流出観測および安定同位体比分析

Water storage and runoff processes in a mountainous headwater catchment dominated by snow cover:  
Runoff observations and stable isotope analysis)

五味高志、名古屋大学・生命農学研究科

## 1. 研究目的

我が国の国土の約3分の2を占める森林は、降水を土壌や基盤岩へと浸透させ、時間遅れを伴って河川へ流出させる「水源涵養機能」を有し、洪水軽減や地域生態系の維持において不可欠な役割を担っている。近年、気象変動の影響を緩和するシステムとして、森林流域の貯留機能を正確に評価することの重要性が再認識されている。なかでも、積雪が卓越する山地上流域においては、降雪が積雪として地表面に長期間貯留され、融雪によって時間遅れを伴いながら地下水涵養や基底流維持に多大な寄与をもたらすという特有のプロセスが存在する。しかし、山地源流域における降雨・融雪一流出プロセスは、地形や地質、基盤岩の構造に起因して空間的に著しく不均一であり、単一の小流域モデルを単純にスケールアップして広域へ適用することには限界がある (Asano et al., 2009)。流出経路や地下水寄与の空間的ばらつきを克服し、集水メカニズムの解明には、多地点での連続的な流量観測に加えて、水の起源や滞留時間を制約可能なマルチトレーサ (水温、溶存イオン、安定同位体比など) を統合したアプローチが必要不可欠である。本研究では、積雪が卓越する堆積岩山地源流域を対象に、連続的な水文・気象観測と高密度な多地点多時期の流量・水質調査を実施する。マルチトレーサを包括的に活用することで流出特性の時空間的不均一性を詳細に把握し、積雪・融雪プロセスを包含した流域内の水貯留機構および深部地下水流出経路のメカニズムを総合的に解明することを目的とする。

## 2. 研究方法

対象流域は、岐阜県郡上市の亀尾島川流域に位置する内ヶ谷山林内のC流域 (100 ha、標高770~1100 m、平均傾斜37.1°) である。当地域はジュラ紀中期の塊状砂岩および砂岩泥岩互層を基盤とし、年平均降水量3167 mmのうち約18%が降雪によってもたらされる豪雪地帯である。観測体制として、スケールの異なる本川D地点 (697.8 ha) および左岸支流PF地点 (10.2 ha) において水位計を設置し、連続的な流量観測と気象観測を実施した。また、降雪・融雪過程を定量化するため、融雪ライシメータを用いた地表到達水量の観測および小型温度ロガーを用いた積雪深観測を行った。さらに、空間的な流出特性を把握するため、無積雪期の2023年および2024年に計10回、流域内の149か所の小流域 (林道と溪流の交点など) を対象に、表流水の有無、流量、水温、電気伝導度 (EC) を計測した。採水サンプルの水質分析では、イオンクロマトグラフィー法で主要イオン ( $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$  など) を、ICP発光分析法で $\text{SiO}_2$ 濃度を定量し、キャビティリングダウン分光法 (CRDS) により水の安定同位体比 ( $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$ ) を分析した。加えて、蒸発散量を考慮した (Inokoshi et al., 2023) 動的貯留量評価手法 (Kirchner 2009の改良) を用いて、日単位の流量データから流域の最大貯留量の推定を行った。

## 3. 研究結果

**降雪・融雪プロセスと流域貯留機能：**融雪ライシメータの観測結果から、降雨と融雪が同時に発生するrain-on-snowイベント時 (例：2024年3月29日) には、地表到達水量が最大221 mm/dayに達することが確認された。しかし、同期間の河川流出量 (PF地点：43 mm/day) との比較から、地表到達水量の約47%はただちに流出せず、表層土壌や基盤岩へ浸透・貯留されたことが明らかとなり、積雪が時間遅延型の強力な水供給・貯留機構として機能していることが実証された。蒸発散量を考慮した解析でも、当流域の最大貯留量は342 mmに達し、他地域の山地流域と比較しても極めて高い貯留能力を持つことが判明した。

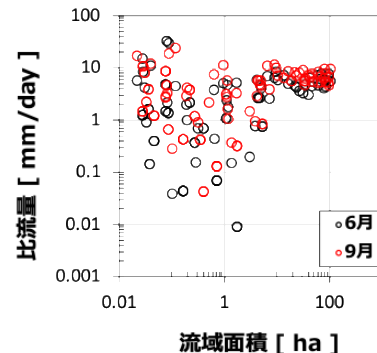


図-1 6月と9月の流域面積と比流量の関係

**流量および水質・水温の空間的不均一性：** 多地点調査の結果、比流量には最大5オーダーに及ぶ空間差が存在した（図-1）。特に流域面積1ha未満の小流域では3オーダー以上の比流量のばらつきが生じたが、面積が10 haを超えると比流量は高い水準で安定する傾向が確認された。水質分析においても、 $\text{Ca}^{2+}$ や $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SiO}_2$ など岩盤風化に由来する成分は、10 ha以上の流域で比較的高濃度で安定していたのに対し、10 ha未満の小流域では低濃度から高濃度まで広く分布していた。水温についても同様に、夏季において10 ha以上の大流域や右岸側の流路では10~15℃と低く安定していたが、小流域では気温の影響を直接受けやすく20℃を超える地点も点在した。

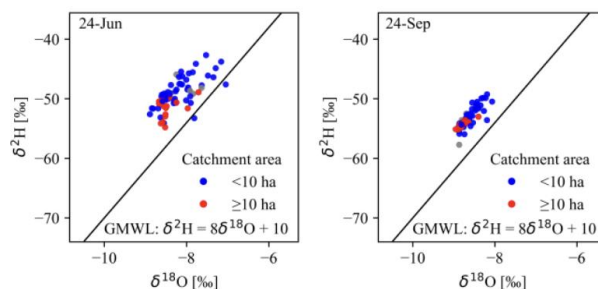


図-2 2024年6月と2024年9月の $\delta$ ダイアグラム

**安定同位体比の時空間変動：** 水の安定同位体比の範囲は、乾燥した時期（2024年6月）の方が湿潤な時期（9月）よりもばらつきが大きかった（図-2）。降水の同位体比が季節ごとに大きく変動するのに対し、流出水（特に大流域からの流出水や岩盤地下水）の同位体比の振れ幅は極めて小さく、基盤岩内部で古い水が長期にわたり滞留し、十分に混合されていることが示された。

#### 4. 考察

流域面積10 ha未満の小流域において比流量や水質成分が大きくばらつく現象は、浅層土壌水、斜面表層流、深部への浸透水など、局地的な流出経路の違いが顕著に反映されているためであると考えられる。一方で、10 ha以上の流域で比流量が高く安定し、水温が低く保たれ、風化由来のイオン濃度が収束する傾向は、上流の小流域で深部へと浸透した降雨や融雪水が、長大な斜面の基盤岩内部を移動・混合され、下流側の大流域において「岩盤地下水」として湧出している「地下水の流域間移動」の存在を強く示唆している。本研究における貯留量解析と他流域との比較を通じて、当流域の流量変化の安定性（貯留感度の低さ）は、深い風化岩盤層の発達と明確な負の相関があることが示された。すなわち、降雪による大規模な水入力が、厚く透水性の高い堆積岩の風化帯へ浸透することで大規模な地下水タンクが形成され、これが基底流を長期間にわたり安定的に維持する主要因となっている。これらの結果は、森林流域の水源涵養機能を評価する際、土層のみを貯留層とみなす従来の単純なモデル（小流域の大流域へのスケールアップ）では不十分であり、土層・岩盤層間の鉛直浸透や深部地下水流動を明示的に組み込んだ統合的な評価モデルの構築が不可欠であることを示している。

#### 5. まとめ

本研究により、積雪が卓越する堆積岩山地源流域において、水文プロセスにはスケールに依存した強い空間的不均一性と、基盤岩内部での複雑な水貯留・混合メカニズムが存在することが証明された。マルチトレーサを用いた多地点観測から、小流域で深部へと浸透した水が、長大な斜面の基盤岩内部を移動・混合され、下流域において岩盤地下水として湧出するという「地下水の流域間移動」のプロセスが実証された。加えて、積雪・融雪プロセスの定量評価により、積雪が単なる一時的な地表貯留ではなく、融雪期にかけての「時間遅延型の強力な水供給・貯留機構」として機能している学術的知見が得られた。特に、降雨と融雪が同時に発生するrain-on-snowイベント時には地表への水供給が非線形に増幅される一方、地表到達水量の約半分（約47%）はただちに流出することなく流域内に残留することが判明した。この水入力が、厚く透水性の高い風化岩盤層へと浸透・貯留されることで巨大な地下水タンクを形成し、長期間にわたる基底流の安定的な維持に多大な寄与をもたらしていることが明らかとなった。

#### 引用文献

- Asano, Y., et al. (2009). Spatial patterns of stream solute concentrations in a steep mountainous catchment with a homogeneous landscape. *Water Resources Research*, 45(10). <https://doi.org/10.1029/2008WR007466>
- Inokoshi, S., et al. (2023). A watershed-scale evapotranspiration model considering forest type, stand parameters, and climate factors. *Forest Ecology and Management*, 547, 121387.
- Kirchner, J. W. (2009). Catchments as simple dynamical systems: Catchment characterization, rainfall-runoff modeling, and doing hydrology backward. *Water Resources Research*, 45(2).

(別紙様式04-2)

トリチウム計測のためのバックグラウンド水の評価  
Evaluation of tritium-free background water for tritium measurement

赤田尚史、弘前大学・被ばく医療総合研究所

環境水に含まれるトリチウムは、その水の供給源や挙動を明らかにするための有用なトレーサーとして用いられてきた。特に、雪氷試料やアイスコアにおけるトリチウム濃度は、その堆積環境や年代を決定するための重要なツールとして利用されてきた。このトリチウムを高精度で計測する際、試料水と同様に処理したトリチウムを含まない水（バックグラウンド水：BG水）を同時に測定する必要があるが、各研究機関においてその水の入手先は異なる。また、実際のトリチウム濃度がどれくらい低いのかは明らかにされていない。本研究では、いくつかの深部地下水（温泉水）に加え、市販のミネラルウォーターの分析を進め、極低濃度で存在するトリチウムを簡易に高精度で計測するための基盤を構築することに貢献することを目的とする。

深部地下水（温泉水）試料として、これまでにBG水として実績のある茨城県高萩市の温泉水、佐賀県佐賀市の温泉水ではなく、青森県おいらせ町の温泉水も対象とした。青森県おいらせ町の温泉水について、登記情報を表1に示す。掘削震度は約1,140mと深く、源泉温度は約40℃、ナトリウム-塩化物鉱泉に分類されていることから、古い海水が地温で温められたものと考えられ、バックグラウンド水である可能性が高い。源泉より採取した試料水は、 $\text{Na}_2\text{O}_2$ を数ミリグラム加えて2回蒸留することで不純物を除去した。蒸留済試料の1500 mLを改良した固体高分子膜電解濃縮装置を用いてトリチウムの濃縮を行った。装置の概略を図1に示す。一方、市販のミネラルウォーターとしては、鹿児島県で採取されているものを用いた。この水は、火山灰シラス台地に降った降水が地下に浸透した深層地下水である。ミネラルウォーター1Lを蒸留した後、その800mLを電解濃縮した。初期水量1500mLから約52mLまで電解濃縮した際の濃縮倍率はおおよそ15倍、800mLから52mLまでの濃縮倍率はおおよそ8.3倍であった。濃縮した試料水は再度蒸留し、蒸留済試料水50mLと同量の液体シンチレータ（UltimaGold LLT, Revvity）を145mLのポリエチレンバイアル（内側はテフロンコーティング）内で十分に混合した。その後、冷暗所で5日程度静置した後、低バックグラウンド液体シンチレーション計数装置（LSC-LB5, Aloka）を用いて1000分測定を行った。トリチウム濃度は、試料の採取日およびミネラルウォーターの採水日まで減衰補正を行った。

表1 青森県おいらせ町で採取した温泉水の概要

登記情報
掘削深度：約 1140 m
孔明開始深度：約 950 m
孔明終了深度：約 1113 m
源泉温度：約 40.1 °C
揚湯方式：動力揚湯（水中ポンプ）
揚湯量：約 451 L/min
温泉成分の公式区分
泉質（温泉法上）：
ナトリウム-塩化物泉（低張性・弱アルカリ性・塩泉）

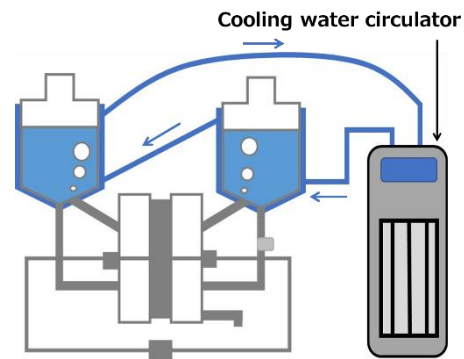


図1 改良した固体高分子膜電解濃縮装置の概要

青森県おいらせ町のトリチウム濃度を測定した結果（n=3）、トリチウムは検出下限値以下であり、バックグラウンド水として利用可能であることが示唆された。濃縮倍率と検出下限値より、その濃度は0.01 Bq/L以下であると見積もられた。一方、市販のミネラルウォーターについても測定した結果（n=3）、トリチウムを検出することはできず、その濃度は0.04 Bq/L以下であると見積もられた。両者とも、バックグラウンド水として利用できることを確認することができた。天然の温泉水に比べて入手が比較的容易な市販のミネラルウォーターがバックグラウンド水として利用できるのであれば、その価値は大きい。今後、市販のミネラルウォーターについても1500mLから濃縮し、極低濃度領域での濃度を評価することを計画している。

インド亜大陸東北部におけるプレモンスーン期のシビアストーム形成機構の解明  
Study on the severe storm formation during the pre-monsoon period  
in the Northeast of the Indian Subcontinent.

木口 雅司、東京大学大学院工学系研究科

1. 研究目的

インド亜大陸東北部では、近年プレモンスーン期のシビアストームが社会に与えるインパクトに注目が集まっており、豪雨や竜巻と、それに伴う洪水や土砂災害が、昨今顕在化している。これまでプレモンスーン期の降水現象における総観気象場 (Murata *et al.*, 2011) やシビアストームの発生環境場 (例えば、Mahanta and Yamane, 2020) に関する研究がされてきたが、その形成機構については特に鉛直方向のデータの不足によってなされていない。そこで本研究は、当該地域におけるプレモンスーン期のシビアストームの形成機構を明らかにし、気候変動による影響を推計する。

2. 研究方法

高解像度時空間スケールの降雨データを我々の研究グループは運用しており、これまでの再解析データを主にした解析に新たな高解像分解能の降水現象を追加することで、さらに形成機構の高解像度化を図る。インドシナ半島のプレモンスーン期のメソ擾乱は中緯度の偏西風の蛇行が影響を与えていることが示されており (Kiguchi and Matsumoto, 2005; Kiguchi *et al.*, 2016)、インド亜大陸東北部におけるプレモンスーン期のメソ擾乱もその可能性が高い。そのため、さらに上流(つまり西方)となるネパールなどヒマラヤ山脈南縁における科学的知見も重要となる可能性が高いとみており、ヒマラヤ山脈南縁における降水現象の研究を推進している藤波氏(受入責任教員)との共同研究を実施することで、その知見の提供が期待される。

3年計画の1年次として、(1) 現在実施している国際共同研究を通じて、国際誌に掲載されていないようなインド国内での研究や利用可能なデータセットを整理し、(2) プレモンスーン期の降水量が多かった2017年と2020年を対象に擾乱発生の環境場を解析しつつ、(3) 気候変動の影響評価をするための過去のプレモンスーン期のシビアストームの長期間のデータ収集を行う。

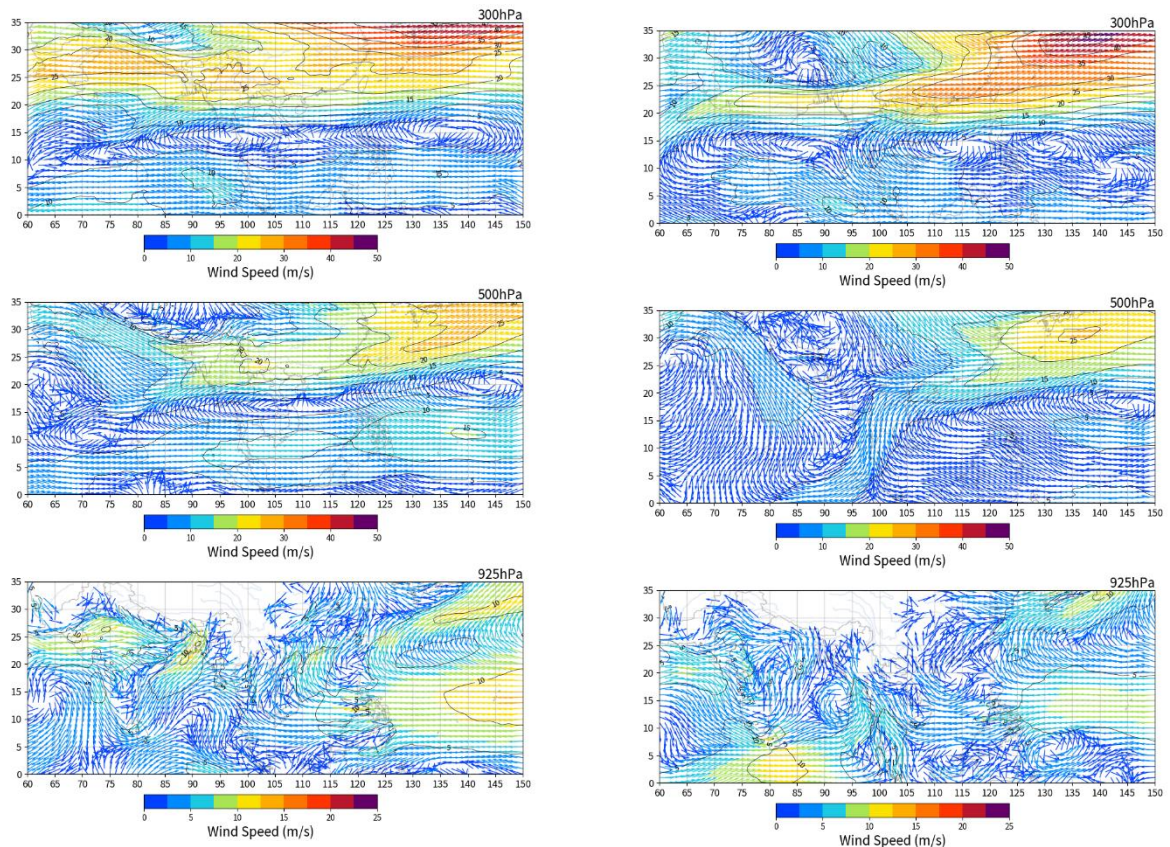
3. 研究結果

インド国内における気象データのうち、Webを通じて公開している、レーダーを含むものを、リスト化し、取得可能かどうかも含め整理した。また、我々の研究グループが2006年より実施している高時間分解能なバングラデシュ、インド・メガラヤ州及びアッサム州の観測網のデータ整備を行った (<https://www.sohmon.net/>)。世界有数の多雨地域であるインドとバングラデシュの国境に位置するメガラヤ高地とその周辺地域に展開された観測網は、Murata *et al.* (2024)によるTRMM PR(熱帯降雨観測衛星搭載の降雨レーダー)の雨量気候分布との検証結果から、その特性はすでに評価されているものである。

当初予定していた2017年、2020年における解析は、データが早期に揃わなかったため、2007年のプレモンスーン期に顕著な擾乱活動が報告されているため、解析年を2007年に変更した。ERA5の再解析データと高解像度降水量データを用いて、対流が活発だった、4月21~25日(P23(第23半旬))と5月6~10日(P26)と、対流が不活発だった5月1~5日(P25)を抜粋して、図示する。対流が活発な時期は、対流圏下層にベンガル湾から湿った大気が流入し、対流圏上層では、対流活発期には南風成分が卓越しトラフの前面にバングラデシュが位置していることが示唆された。一方、対流不活発期には上層で北西風が卓越し、下層では南風が弱まる。これは、上層のトラフが西から東へ通過していることを示しており、中緯度偏西風帯の影響を強く受けていることが分かった。この結果、潜在(対流)不安定が強化されている。このことは、既存文献の統計的解析と一致する。以上の結果から、対流圏上層のトラフの接近によってトラフ前面での上昇流の強化と対流圏下層での南西風の強化によって、擾乱が発達したと考えられる。

4. まとめ

インド国内でWeb公開されている気象・レーダーデータを調査し、取得可否を含めて整理した。また、メガラヤ州・アッサム州およびバングラデシュに展開された高時間分解能観測網データの整備を行った。2007年プレモンスーン期を対象にERA5再解析データと高解像度降水量データを解析した結果、対流活発期には下層でベンガル湾からの湿潤気流流入と上層トラフ前面での南風強化が認められ、これらが対流活動および擾乱発達を促進することが示された。



図：上段から、300hPa、500hPa、925hPa面の風向・風速。(左) 2007年4月21～25日、(右) 2007年5月1～5日。

#### 引用文献

- 1) Murata, F.; Terao, T.; Kiguchi, M.; Fukushima, A.; Takahashi, K.; Hayashi, T.; Habib, A.; Bhuiyan, S. H.; Choudhury, S. A. Daytime thermodynamic and airflow structures over Northeast Bangladesh during the pre-monsoon season: A case study on 25 April 2010. *J. Meteorol. Soc. Japan.* **89A**, 167-179, 2011. DOI:10.2151/jmsj.2011-A11
- 2) Mahanta, R.; Yamane, Y. Climatology of local severe convective storms in Assam, India. *Int. J. Climatol.* **40**, 957-978, 2020. DOI:10.1002/joc.6250
- 3) Kiguchi, M.; Matsumoto, J. The rainfall phenomena during the pre-monsoon period over the Indochina Peninsula in the GAME-IOP year, 1998. *J. Meteorol. Soc. Japan.* **83**, 89-106, 2005. DOI:10.2151/jmsj.83.89
- 4) Kiguchi, M.; Matsumoto, J.; Kanae, S.; Oki, T. Pre-monsoon rain and its relationship with monsoon onset over the Indochina Peninsula. *Front. Earth Sci.* **4**:42, 2016. DOI:10.3389/feart.2016.00042
- 5) Murata F.; Terao, T.; Yamane, Y.; Fukushima, A.; Kiguchi, M.; Tanoue, M.; Kamimera, H.; Syiemlieh, H. J.; Cajee, L.; Ahmed, S.; Choudhury, S. A.; Bhattacharya, P.; Bhagabati, A. K.; Dutta, S.; Hayashi, T. Validation of spaceborne precipitation radar data by rain gauges and disdrometers over the complex topography of the northeastern Indian subcontinent. *J. Meteorol. Soc. Japan.* **102(2)**, 309-329, 2024. DOI:10.2151/jmsj.2024-014

#### 成果発表

- 1) Hayashi, T.; Terao, T.; Murata, F.; Kiguchi, M.; Yamane, Y.; Fukushima, A.; Tanoue, M.; Kamimera, H. History of Meteorological Disasters in the Northeastern Indian Subcontinent. AAEH2025. Kagawa Univ., Takamatsu, Kagawa, Japan, September 26 - October 2, 2025.
- 2) Kiguchi, M. Environmental Conditions for Pre-Monsoon Precipitation Disturbances, International Workshop on Extreme Events in a Changing Climate. Cotton University, Guwahati, Assam, India, February 14-15, 2026.

## 実証的グローバルモデリングに基づく

## 固有磁場強度と領域間結合が内部磁気圏ダイナミクスに与える影響の研究

Effects of the intrinsic magnetic field and regional couplings on the inner magnetospheric dynamic based on combination of global numerical modeling with observations

関 華奈子、東京大学・大学院理学系研究科

## 研究計画の概要：

地球磁気圏における最大規模の変動現象である磁気嵐時には、環電流が発達し、静穏時には双極子磁場がしっかりしてあまり変動のない内部磁気圏に至るまでダイナミックな変動が引き起こされる。磁気嵐時の環電流の発達、磁気圏の磁場構造を変化させるだけでなく、Pc5 波動などに代表される ULF 波動を励起することで、放射線帯電子の変動にも寄与すると考えられているが、電離圏と磁気圏の間の領域間結合の影響や ULF 波動の空間分布の支配要因には不明な点も多く、定量的な理解を得るには至っていない。また、この数百年にわたり地球の固有磁場が現象傾向にあるが、固有磁場強度が弱まった際に磁気嵐の発達がどのように変化するかについてもよくわかっていない。本研究の目的は、独自のドリフト運動論近似に基づく 5 次元内部磁気圏グローバルモデルと観測との比較に基づき、現在の地球磁気圏における磁気嵐時の内部磁気圏ダイナミクスに電離圏-磁気圏結合が果たす役割を明らかにすることにある。さらに現在の地球磁気圏で実証的に検証されたモデルを、固有磁場が弱い場合に適用し、固有磁場強度が磁気嵐の発達に与える影響も調べられると考えている。

本研究で用いる内部磁気圏モデルは、現在の地球における静止軌道よりも内側の内部磁気圏におけるイオン分布関数と電磁場の時間発展を自己無撞着に説くドリフト運動論近似のグローバルシミュレーションをコアモジュールとし、内側境界では電離圏の電場ポテンシャルソルバーと結合するとともに背景低温プラズマの運動を同時に解くモデルとなっている。イオン分布関数は 5 次元位相空間で解くことになるため、空間解像度を上げると必要となる計算リソースが大きく増える。境界条件については、プラズマシート側の外部境界条件については、グローバル MHD シミュレーション結果からプラズマシートのパラメータを抽出して用いた。

また、シミュレーション設定としては、現在の地球 (Case 1)、弱い固有磁場 (現在の地球の 2/3) で固有磁場の変化に対応して電離圏電気伝導度を高くした惑星 (Case 2)、弱い固有磁場だが電離圏電気伝導度を Case 1 と同じにした惑星 (Case 3) の数値実験を行った。各 Case の設定とグローバル MHD シミュレーション結果から抽出した外部境界条件 (温度・密度・圧力) と極冠電位差は Table 1 の通りである。

Table 1. シミュレーションの設定

	Dipole magnetic moment [ $10^{22}$ Am <sup>2</sup> ]	Ionospheric conductivities	Simulation box $L$ value [ $R_E$ ]	Plasma sheet temperature [keV]	Plasma sheet density [ $/cc$ ]	Plasma sheet pressure [nPa]	Cross polar cap potential [kV]
Case 1	7.76	Standard	3.6–7.6	8.4	1.3	1.7	75
Case 2	5.17	$\Sigma_P \propto M^{-1}$ $\Sigma_H \propto M^{-4/3}$	3.1–6.6	8.8	1.4	2.0	57
Case 3	5.17	Standard	3.1–6.6	7.7	1.5	1.9	72

2025年度の主な成果：

各 Case に対して Dessler-Parker-Sckopke (DPS) 関係式から SYM-H 指数を計算し、リングカレントの発達の規模を比較した (Figure 1)。その結果、系全体を積分した総エネルギーは Case1 > Case3 > Case2 の順で大きくなった。リングカレントの総エネルギーは概ね対流電場の大きさと夜側外部境界での圧力の積によって決定されていると考えるとこの結果は理解できる。一方で、地表で見られる磁気嵐の規模の指標である SYM-H 指数の最終状態での値は Case3 < Case1 < Case2 の順で小さくなった。SYM-H の減少率 (磁気嵐の発達速度) は、磁気嵐主相の開始当初は Case1 に比べて磁場の弱い Case2, 3 が大きい。主相後半では Case2 よりも Case1 が大きくなった。Case2, 3 で Case1 よりも早く SYM-H 指数が減少した理由として、弱い双極子磁場では、磁場強度に対して地球中心からの距離が近くなるため、ドリフトによるリングカレントの方位角方向への発達が早くなることが考えられる。

こうした SYM-H 指数の大きさの違いは、対流電場の大きさと固有磁場強度の関係に依存していると考えられる。DPS 関係式によれば、SYM-H 指数はリングカレントの総エネルギーを双極子磁場のエネルギーで規格化して求められる。Case2 では Case1 より電離圏伝導度が強く、クロスポーラーキャップポテンシャルが小さくなることで、リングカレントの総エネルギーも小さくなっている。

また、同じモデルを用いた先行研究 (Yamakawa et al. (2023)) による報告と同様の、リングカレント粒子の波動粒子相互作用による ULF 波動の励起を各 Case で確認した。詳細な解析の結果、固有磁場が弱い Case2, 3 では Case 1 と同じドリフト周波数を持つ低エネルギーイオンとのドリフト共鳴によって ULF 波動がより地球に近い小さな L で駆動される。また、この ULF は同は各 Case で同様の MLT で現れるが、固有磁場が弱い場合には、磁気嵐開始後のより早い時刻に現れることなどが明らかになった。これらの結果は、大学院生を主著者とした投稿論文として準備中である。また、本研究に関連して、共同研究者の長田氏が日本地球惑星科学連合 2025 年大会学生優秀発表賞を受賞している。

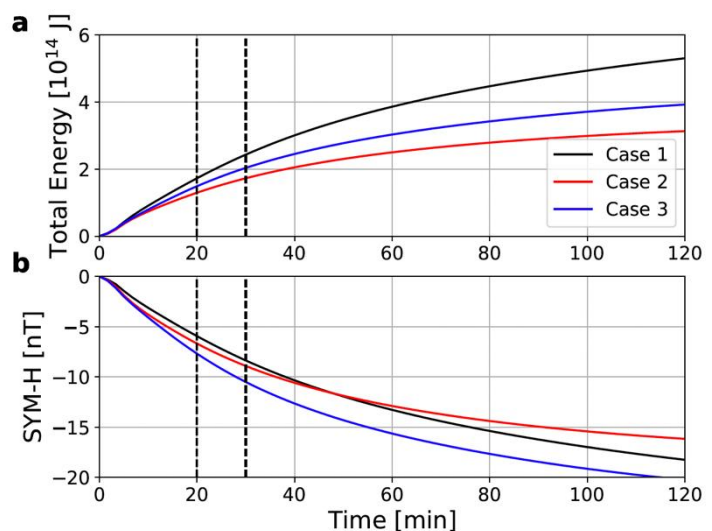


Figure 1. 各 Case について算出した(a)総エネルギーと(b) SYM-H 指数の時間変化

(別紙様式04-2)

あらせ磁場長期データの精度評価と特性改善の検討  
Evaluation and improvement of long-term magnetic field data of Arase

松岡彩子、京都大学・理学研究科

【研究目的】

あらせ衛星は地球放射線帯における相対論的電子の消長など、ジオスペースで起こる様々なプラズマ現象の解明を目指して2016年12月に打ち上げられた。2017年3月の定常観測開始以降約9年間データの取得をほぼ連続的に継続し、貴重なデータベースが構築されつつある。あらせが打ちあがった当初は太陽活動が静穏であったが、現在極大期を迎えており、2024年には大きな磁気嵐現象が複数回起きている。様々な太陽活動間における現象の比較による研究がますます盛んに行われるものと期待される。現象の太陽活動への依存性を正確に把握するためには、精度の良い長期データの蓄積が必要であり、観測した磁場データの精度向上およびその維持が重要である。

あらせで得た磁場データを高精度で較正するためには、地上較正試験の結果だけでなく、軌道上のデータの評価が必要である。長期間のデータを継続的に評価することにより、経年変化を含んだ較正パラメータを導出する作業が可能となる。軌道上データの高精度の評価と較正を行うことにより、ロスコーンに降り込むプラズマ粒子の観測、電流の方向や量の同定、EMIC波動やULF波動の強度、それらの伝搬方向の特定などのサイエンス課題で精密な解析が可能となる。較正したデータは、名古屋大学宇宙地球環境研究所あらせサイエンスセンターのデータサーバによってあらせチーム内外の研究者に提供され、多くのサイエンス成果をうみだしている。磁場データの高精度較正は、今後も、あらせが目指してきた、放射線帯や内部磁気圏の研究の発展へに貢献することが大いに期待される。

【研究方法】

軌道上のあらせ衛星の磁場データの較正方法の検討や、経年変化の評価を行い、絶対的な精度、磁場分解能、時間分解能、クオリティフラグによるデータ品質分別などにより、データ特性を向上する。

データの評価は、あらせ衛星の特性、磁場観測器の性能や、内部磁気圏で観測される磁場データの特徴について高度な知見を持つ専門家によって行われることが望まれる。磁場計測機器PIである研究代表者が、衛星によって観測された磁場データの評価に豊富な経験を持ち、かつ、内部磁気圏の磁場が関連した現象に造詣の深い研究者と協同する。それぞれの専門を生かす役割分担を行い、結果を元に議論する機会を定期的に持つことにより研究を進める。データ較正やデータベース作成に関する打合せを名古屋大学で対面にて行う。

【研究結果】

2025年度には、良質のデータを迅速にプロジェクトチームや一般の研究者に提供するためのパイプライン整備について、定期的にオンラインの打ち合わせを行った。また、名古屋大学宇宙地球環境研究所あらせサイエンスセンターの方々と協力してデータ欠損期間の洗い出しを行い、ユーザーに周知する方法(Wiki ページへの掲載)について検討と議論を行った。更に、2026年3月5日～6日のあらせサイエンス会議には、研究組織の大部分のメンバが対面で参加し、磁場データを用いた研究に関する議論を行った。

【考察とまとめ】

太陽活動度が活発であり、昨今大きな磁気あらしがたびたび起こっている。あらせ搭載の磁場観測器は正常に稼働しほぼ連続的にデータを取得している。このデータをなるべく早急に、使用する上で重要な情報(欠損期間など)と共にあらせチーム内外の研究者に提供することの重要性は高い。今後引き続き名古屋大学宇宙地球環境研究所あらせサイエンスセンターの方々と協力して、磁場データの評価とより良い較正方法の検討に尽力し、科学成果の創出に貢献することを目指していく。

(別紙様式04-2)

桜島を対象とした地下比抵抗構造推定のための電磁場観測  
Electromagnetic Field Measurement for Subsurface Resistivity Structure  
around Sakurajima Volcano

吉村令慧、京都大学防災研究所

桜島火山の活動評価のために必要となる地下構造の理解のために、桜島島内および周辺において電磁場観測 (MT観測) を実施し、地下20km程度までを目標に広域比抵抗構造を推定する。本課題においては、名古屋大学宇宙地球環境研究所鹿児島観測所上の原台地観測点敷地内において、2025年12月21日に広帯域電磁場観測装置を設置し、2026年1月17日まで電場2成分、磁場3成分の測定を行った。

上の原台地観測点周辺には農地が広がり、周辺農道を高頻度に自動車等が通過するため、昼間には磁場へのノイズ混入が認められた。一方で、MT観測において信号源となる自然電磁場変動は、太陽活動極大期にあたったため、探査にとって著しく良好な信号を捉えることができた。

時系列解析では、夜間のデータを切り出し、BIRRPプログラム (Chave and Thomson, 2003, 2004) を用いたリモートリファレンス処理 (Gamble *et al.*, 1979) を施した。推定されたMT応答 (見かけ比抵抗および位相の非対角成分)、ならびに地磁気変換関数 (実部) を図に示す。電場ノイズに起因すると思われる推定精度の低い帯域が限定的に認められるが、全体として非常に良質な応答を得ることができた。推定されたMT応答について、回転不変量の一つである **determinant average impedance** (たとえば、Simpson and Bahr, 2005) から求められる見かけ比抵抗および位相に対して OCCAM コード (Constable *et al.*, 1987) を用いた一次元逆解析を行ったところ、この地点下には数100m深に帯水層を示すと思われる低比抵抗層が、その下部には基盤を示すと思われる高比抵抗層を挟み、数km深から低比抵抗となる三層の大局構造が推定された。

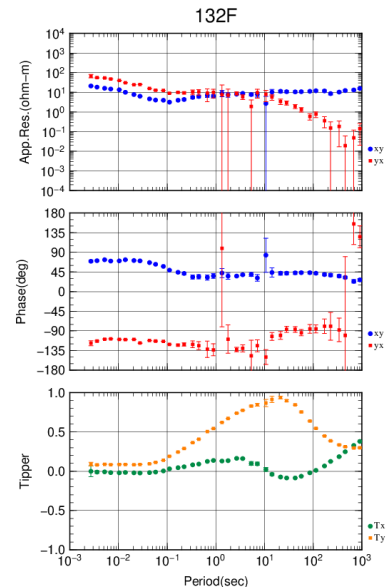
本課題により得られた1地点でのMT応答は、この他に2024,2025年度に実施した69地点のデータと統合し、桜島火山およびその周辺の地下三次元構造解析に活用し、Dewi *et al.* (2026) にて、その予察の結果を発表した。

引用文献 :

- Chave, A.D. and Thomson, D.J. (2003): A bounded influence regression estimator based on the statistics of the hat matrix, *Journal of Royal Statistical Society, Series C (Applied Statistics)*, Vol. 52, pp. 307-322.  
Chave, A.D. and Thomson, D.J. (2004): Bounded influence estimation of magnetotelluric response functions, *Geophysical Journal International*, Vol. 157, pp. 988-1006.  
Gamble, T.D., Goubau, W.M. and Clarke, J. (1979): Magnetotellurics with a remote magnetic reference, *Geophysics*, Vol. 44, pp. 53-68.  
Simpson, F. and Bahr, K. (2005): *Practical Magnetotellurics*, Cambridge University Press, 254pp.

成果発表 :

- Dewi *et al.* (2026): Preliminary Report on Broadband Magnetotelluric Survey on Sakurajima Island, 京都大学防災研究所共同研究一般研究集会「東北地方太平洋沖地震から15年～電磁気学研究的進歩と現状、今後の課題」, 福島県郡山市, 2026年3月18日.



図：上の原台地観測点で得られた MT 応答。上から見かけ比抵抗、位相、地磁気変換関数。

(別紙様式04-2)

EPMAを用いた石英エクロジヤイトのざくろ石組成累帯構造の分析  
Analysis of compositional zoning of garnet grains in quartz eclogite  
using EPMA

瀬戸佑衣、萩野峻右 (名古屋大学大学院環境学研究科)  
加藤丈典 (名古屋大学宇宙地球環境研究所)

【研究目的】

四国中央部三波川変成帯において最も深部まで沈み込んだとされている石英エクロジヤイトには、粗粒なざくろ石が多数含まれている(Miyamoto et al., 2007)。ざくろ石は変成作用によって成長する鉱物であり、組成累帯構造や包有物は変成岩形成時の情報を保持していると考えられている。本分析で使用したサンプルのザクロ石には、炭酸塩鉱物であるドロマイトが確認され、CO<sub>2</sub>存在下での変成作用を受けたことが示唆された。熱力学計算をベースとしたシュードセクション解析では、ざくろ石の組成累帯構造が形成されたときの変成条件を推定できるが、三波川帯の石英エクロジヤイトに含まれるざくろ石の組成にはバリエーションがあることが知られており(Enami et al., 2019)、全岩化学組成と鉱物組成などは同じサンプルで比較する必要がある。本研究では、ざくろ石の組成累帯構造の定量データをISEE年代測定研究部に設置されている電子プローブマイクロアナライザー(EPMA)を用いて取得し、ざくろ石成長時の変成条件の解明を行う事を目的とした。

【研究方法】

鉱物組成の定量分析は、名古屋大学宇宙地球環境研究所(ISEE)に設置されているEPMA(JCXA-733, JEOL)を用いて実施した。測定条件は、加速電圧15 kV、ビーム電流12 nAとした。測定元素は、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、MnO、FeO、CaO、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>Oを対象とした。測定は、バックグラウンド20秒、測定時間20秒×2回を行った。ザクロ石8粒子に対して、それぞれ中心から外側にかけて直線状に点分析を行った。

【研究結果】

分析結果は表1のようになった。得られたざくろ石組成を解析した結果、粒径が大きいざくろ石では明瞭な累帯構造が確認され、中心部であるGrIではCaが外側に向かって減少し、Mgは増加する組成を示した一方、縁部であるGrIIではCaが増加しMgが減少する傾向が見られた(図1)。これに対し、粒径が小さいザクロ石では、中心部でCaが少なくMgが多い組成を示し、外側に向かってCaがわずかに増加し、Mgが減少した。

表1 分析したざくろ石8粒子の代表的な分析値 (wt.%)

Sample	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	FeO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Total
Site 1	38.28	21.13	0.06	0.54	8.06	0.61	25.68	6.62	0.04	0.03	101.05
Site 2	39.58	21.88	0.06	0.71	10.34	0.69	21.71	5.73	0.04	N.D.	100.73
Site 3	38.98	21.36	N.D.	N.D.	10.27	N.D.	24.14	5.14	0.07	N.D.	99.97
Site 4	38.99	21.43	0.03	N.D.	9.70	0.48	23.37	6.57	0.06	N.D.	100.64
Site 5	39.94	21.84	0.04	N.D.	9.70	0.35	24.11	5.71	0.07	N.D.	101.77
Site 6	39.09	21.8	0.04	N.D.	8.40	0.54	24.16	7.12	0.05	0.02	101.22
Site 7	39.56	21.7	0.05	N.D.	8.91	N.D.	21.79	8.64	0.06	N.D.	100.70
Site 8	39.76	21.69	0.05	N.D.	9.53	1.59	21.67	6.47	0.03	N.D.	100.78

### 【考察・まとめ】

Miyamoto et al. (2007)及び、Enami et al. (2019)で報告されているざくろ石の化学組成累帯構造と本研究で得られたデータを比較した結果、類似したパターンが確認されず、本試料において特徴的な組成である可能性が示された。このサンプルは、ドロマイト包有物を含んでおり、CO<sub>2</sub>分圧が高い条件下でざくろ石が成長した可能性が示唆される。今後、得られたざくろ石の化学組成と本試料の全岩化学組成データを組み合わせることによって、ざくろ石が成長した圧力(P)-温度(T)-二酸化炭素分圧(XCO<sub>2</sub>)を解析し、ざくろ石が成長した変成条件を制約する予定である。

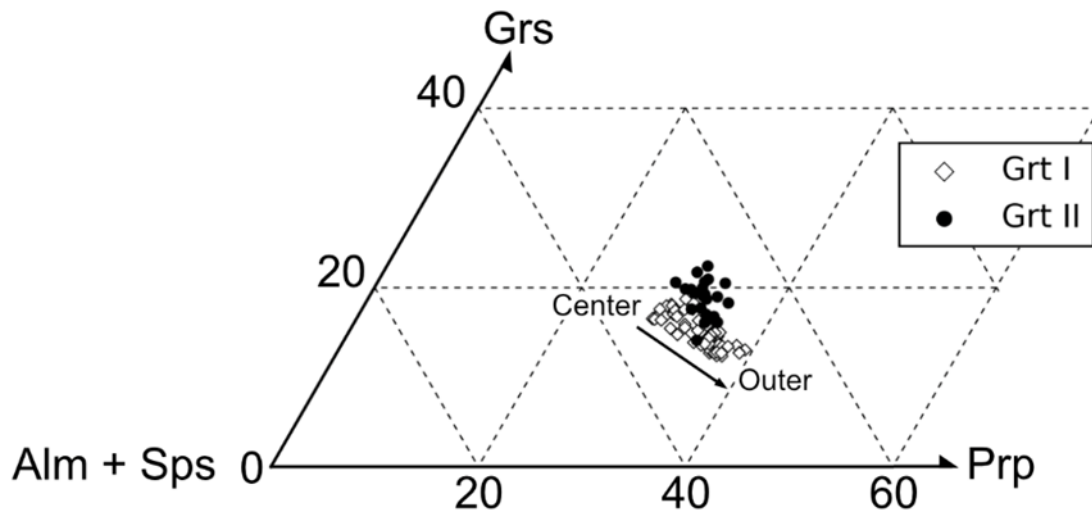


図1 本研究において分析したざくろ石化学組成の端成分三角ダイアグラム

Alm: almandine, Sps: spessartine, Prp: pyrope, Grs: grossular

### 【引用文献】

- Enami, Masaki, Jun-Ichi Kimura, Motohiro Tsuboi, Yui Kouketsu, Takayoshi Nagaya, and Shuaimin Huang. "Coexisting Different Types of Zoned Garnet in Kyanite-Quartz Eclogites from the Sanbagawa Metamorphic Belt: Evidence of Deformation-induced Lithological Mixing during Prograde Metamorphism." *Island Arc* 28, no. 1 (2019): e12274.
- Miyamoto, Atsushi, Masaki Enami, Motohiro Tsuboi, and Kazumi Yokoyama. "Peak Conditions of Kyanite-Bearing Quartz Eclogites in the Sanbagawa Metamorphic Belt, Central Shikoku, Japan." *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences* 102, no. 6 (2007): 352–67.

### 【成果発表】

- 荻野峻右、瀨瀬佑衣、加藤丈典、四国中央部三波川帯石英エクロジャイトのザクろ石の組成累帯構造を用いた変成履歴の推定、変成岩などシンポジウム（口頭）、千葉大学、2026年3月18日