

2024年度 04)一般共同研究 目次詳細

54 件

* 所属・職名は2025年3月現在
* Affiliation and Department displayed are current as of March 2025.

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
湯口 貴史	熊本大学	大学院先端科学研究部(理学系)	教授	石英の内部構造と微量含有元素が示すアダカイト質マグマの貫入・定置プロセス	98	
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	102	
岸田 拓士	日本大学	生物資源科学部	教授	古代DNAによる近代以前の日本の生物多様性の解明	103	
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	104	
徳丸 宗利	名古屋大学		名誉教授	327MHz電波望遠鏡の観測データを用いた太陽風速度予測モデルの改良	106	
赤田 尚史	弘前大学	被ばく医療総合研究所	教授	福島県浜通り地域における降水の水素酸素安定同位体比	108	
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	109	
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	宇宙線ミュオン強度と高層大気変動の相関研究	111	
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	112	
小島 正宜	名古屋大学		名誉教授	IPSスペクトル解析-異なる観測所データの比較	114	
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	116	
笠羽 康正	東北大学	理学研究科 惑星プラズマ・大気研究センター	教授	Arase衛星DC・低周波電場波動による衛星帯電・内部磁気圏の研究促進:その3	118	

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
天野孝伸	東京大学大学院	理学系研究科地球惑星科学専攻	准教授	非線形プラズマ波動に伴う粒子加熱・加速の研究	120	
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	121	
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の統計解析	123	
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メタン同位体導出手法の開発	125	
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	127	
近藤文義	海上保安大学校	基礎教育講座	准教授	外洋域における海上波しぶき光学粒子計を用いた渦相関法による海塩粒子放出量の直接評価	128	
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 ₂ 濃度の継続測定方法の開発	130	
荻谷愛彦	専修大学	文学部 環境地理学科	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	132	
馬場賢治	酪農学園大学	農食環境学群	教授	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	134	
坂下卓也	気象衛星センター	データ処理部解析課	課長	ひまわり8号/9号雲プロダクトの高度化	136	
能勢正仁	名古屋市立大学	データサイエンス学部	教授	稠密地磁気観測ネットワークによる宇宙プラズマ環境マップの作成	138	
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	140	
勝田 哲	埼玉大学	理工学研究科	准教授	X線天文衛星で探る2022年トンガ海底火山の大噴火による超高層大気密度の変動	142	
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	144	
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	145	

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
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	147	
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	148	
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 ¹⁴ C量の分布と変遷の把握	150	
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	151	
今田晋亮	東京大学	理学系研究科	教授	太陽周期活動予測に関する研究	153	
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 時の中緯度 SuperDARN ground/sea backscatters と FLR の関係	154	
山本一清	名古屋大学	大学院生命農学研究科	教授	UAV空撮画像による森林伐採後の植栽・生育状況AI診断技術の開発	156	
五味高志	名古屋大学	大学院生命農学研究科 森林水文・砂防学研究室	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	158	
渡邊堯	情報通信研究機構	ナレッジハブ	特別研究員	流星によるVLF帯電波放射の観測的研究	160	
小島浩司	中部大学	天文台	客員教授	宇宙線で探る内部太陽圏 IMF 磁場擾乱の空間構造	162	
寺本万里子	九州工業大学	大学院工学研究院 宇宙システム工学研究系	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	163	
山本常夏	甲南大学	理工学部	教授	半導体光検出器SiPMの20 GeV帯域ガンマ線観測への応用と紫外分光性能の評価	165	
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	166	
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	167	
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技術とインフラサウンド観測による火山(桜島)モニタリング技術開発	168	

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
浅井歩	京都大学	大学院理学研究科附属天文台	准教授	長時間持続ガンマ線イベント(Sustained gamma-ray emission)の太陽大気応答	170	
佐々木聡史	群馬大学 共同教育学部	理科教育講座	講師	南極における第四紀の海成化石と堆積物を用いた古環境復元	172	
久保雅仁	自然科学研究機構 国立天文台	SOLAR-Cプロジェクト	助教	「ひので」太陽極域磁場ISEEデータベースを用いた極域近傍の磁場の研究	173	
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	沖積層に含まれる碎屑物を用いた堆積年代の高精度解析	175	
松田昇也	金沢大学	理工研究域	准教授	あらせ衛星による6年間の観測で得られた低周波プラズマ波動の網羅的解析	177	
中野佑樹	富山大学 学術研究部 理学系	物理プログラム	助教	太陽模型構築と日震学理論に基づく太陽ニュートリノを用いた太陽 g-mode 振動探索	178	
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	180	
中村亨	高知大学	理工学部	教授	太陽圏における銀河宇宙線伝播の研究	182	
堤雅基	国立極地研究所	宙空圏研究グループ	教授	北極域の中層大気から熱圏大気への大気重力波エネルギー・運動量輸送の定量評価	184	
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	186	
林政彦	福岡大学	理学部	教授	無人航空機を用いた雲・エアロゾル・水蒸気の時空間分布観測	187	
松岡彩子	京都大学	理学研究科 地磁気世界資料解析センター	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	188	

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
城崎陽太	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

石英は珪長質深成岩中に普遍的に含有される鉱物である。石英の内部構造や温度条件などの結晶化の際の情報は、マグマの貫入・定置に関する情報を保存する。既存研究において石英の結晶化プロセス推定は、カソードルミネッセンス (CL) 像およびチタン (Ti) 濃度を組み合わせる方法が提案されている (例えば, [Drivenes et al., 2016](#))。CL 像は、結晶構造の乱れや結晶中の微量な含有成分 (不純物) を反映するため、結晶成長の様式と関連付けることが可能である。一方、石英中の Ti 濃度は石英の結晶化温度の推定に利用できる ([Wark and Watson, 2006](#))。しかし、石英に含有される Ti 濃度はごく微量であるため、電子プローブマイクロアナライザ (EPMA) 分析での一般的な分析条件では定量が困難であった。そこで、石英の微量含有元素 (特にチタン濃度) の定量分析に関する一連の共同研究が、2016 年度から 2023 年度の間、名古屋大学宇宙地球環境研究所「一般共同研究」として実施された。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 2023 年度の共同研究は適用する岩体を広げるとともに、石英を対象に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 (その成果は [Yuguchi et al. \(2020\)](#) として国際誌 *Journal of Asian Earth Sciences* にて公表)。特に、2022・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を行い、それぞれの段階ごとにカソードルミネッセンス像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 (その成果は [Yuguchi et al. \(2024\)](#) として国際誌 *Journal of Asian Earth Sciences* にて公表)。

これまでの共同研究で構築した分析手法を踏まえ、2024 年度はアダカイト質の化学的特徴を有するマグマの石英の結晶化プロセスの解明を図る。著者らはアダカイト質岩を産出する北上山地の遠野複合深成岩体と堺ノ神深成岩体の年代学的研究を進めている。また、九州肥後変成帯に産する白石野花崗閃緑岩もアダカイト質岩の特徴を有する。今年度の共同研究では、遠野複合深成岩および白石野花崗閃緑岩体を研究対象とし、それらの岩体に普遍的に産する石英に対してデータの拡充を図り、石英の内部構造の解析と微量含有元素の定量分析から、アダカイト質岩中の石英の結晶化プロセスの解明を実施した。

2. 試料と研究方法 (使用した共同利用装置・施設)

石英の CL 像取得は、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。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 μm 、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 1600 s) 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、 2σ 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ならびに 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。

3. 研究結果・考察

白石野花崗閃緑岩体の石英は波動消光とグラノブラスティック (Granoblastic) 組織を有する (図 1)。これらの組織は岩体に応力がかかったことによる歪によって説明されている (De Toni and Costa, 2024)。CL 像観察より、石英は粒子内で輝度の漸移的な変化を示す Gradual zoning (GZ) (図 2A)、輝度の変化がない Homogeneous pattern (HP) (図 2B) を有する。それに加え GZ や HP の分布を横断するように定方位や網目状の「CL 低輝度分布 (図 2C)」を有する。GZ および HP の CL 輝度パターンを示す領域は Ti 濃度と CL 輝度に正の相関を有するのに対して (図 3)、CL 低輝度分布領域においてはこの関係を持たない。先にも述べたように CL 像は、結晶構造の乱れや結晶中の微量な含有成分 (Ti 濃度) を反映する。このため、GZ および HP の CL パターンは Ti 濃度の含有量の大小に由来し、CL 低輝度分布は結晶構造の乱れに由来すると考えることができる。これは歪により生じる波動消光とグラノブラスティック組織が観察されることと整合する。GZ および HP の CL パターン領域から得られた石英の Ti 濃度から、Wark and Watson (2006) の TitaniQ 温度計を用いて温度を導出したところ $638 \pm 41 \sim 812 \pm 22^\circ\text{C}$ の温度条件を得た。

上記より①と②を解釈することができる：①冷却するマグマの中で、GZ および HP パターンを有する石英がマグマから約 800°C から 650°C の間の温度条件で晶出したこと。②CL 低輝度分布は岩体固結後のサブソリダス期に岩体への応力が加わることにより生じた組織であること。

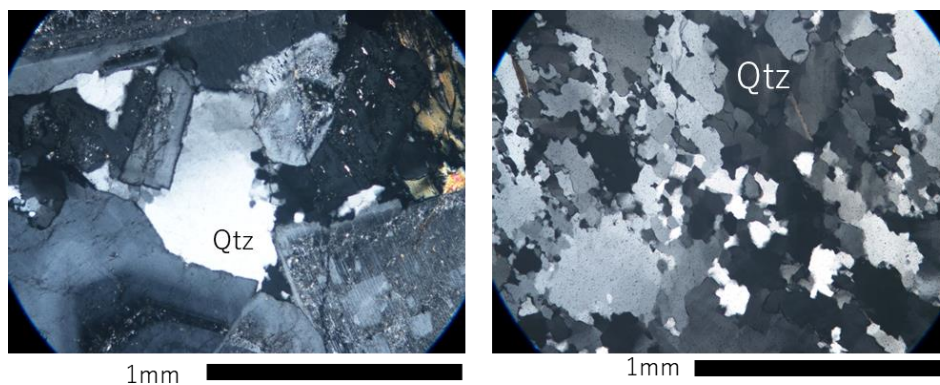


図 1 白石野花崗閃緑岩体の石英の偏光顕微鏡像
(左図：波動消光を示す石英，右図：グラノブラスティック組織を示す石英)

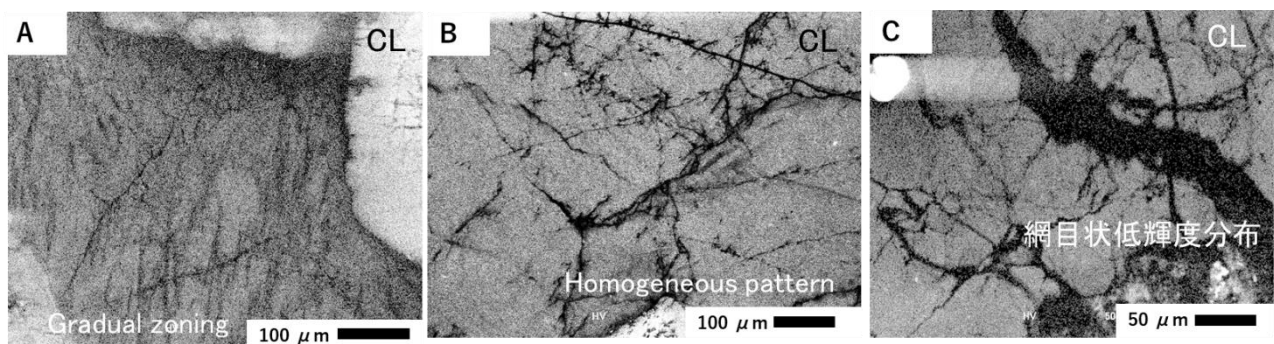


図 2 白石野花崗閃緑岩体の石英のカソードルミネッセンス像

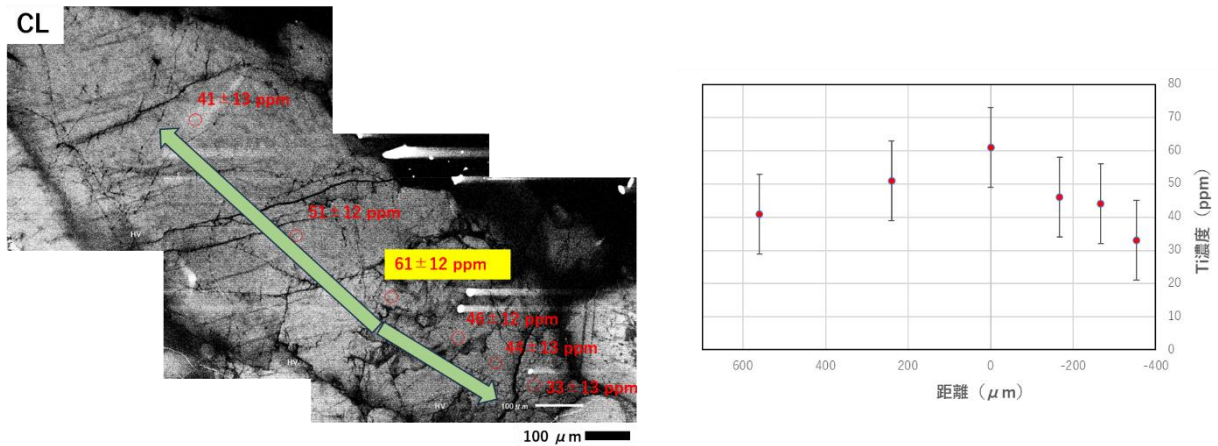


図3 白石野花崗閃緑岩体の石英のカソードルミネッセンス像と Ti 濃度のラインプロファイル

遠野複合深成岩においては、135 地点の Ti 濃度の分析を実施した。結果として、 22 ± 18 ppm から 593 ± 13 ppm の幅のデータを得た。これは Wark and Watson (2006) の TitaniQ 温度計を用いた場合、 593 ± 65 °C から 1018 ± 21 °C の温度に相当する。遠野複合深成岩において、特徴的な CL 構造を見出した。それは、輝度の変化の帯が狭い領域で繰り返し、低輝度と高輝度の帯の境界は曲線を呈する (図 4)。一見すると「しわ」のように見える組織である。今回、その領域を密な頻度での分析を実施した。

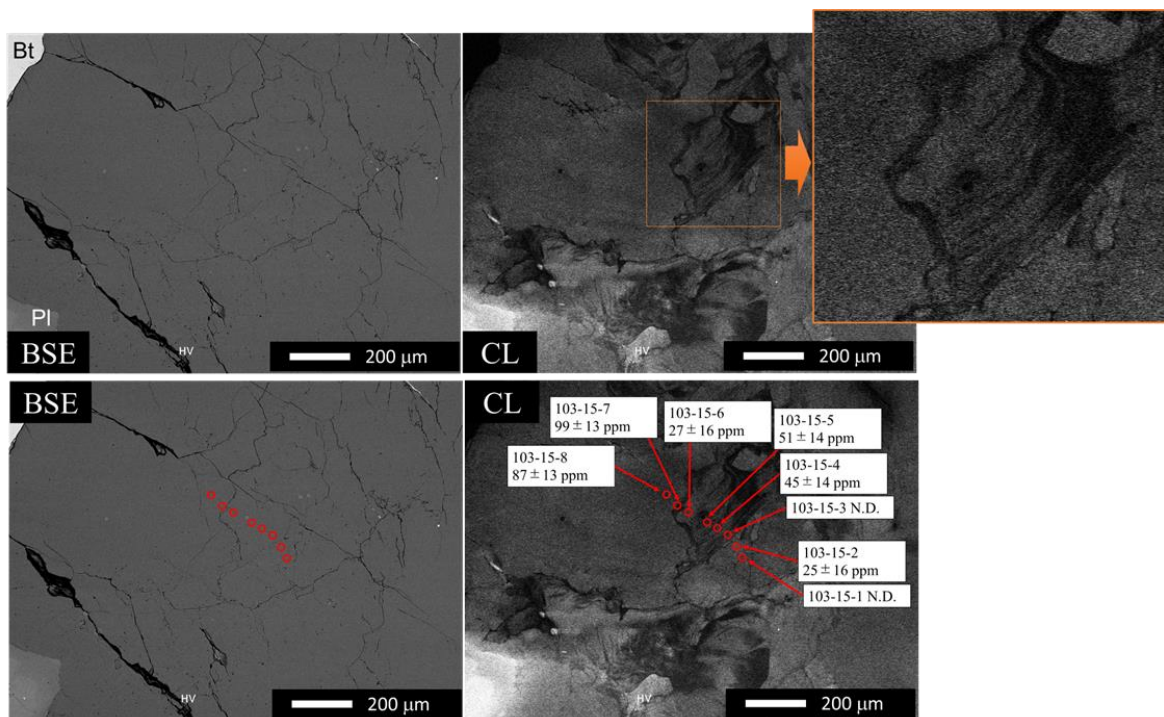


図4 遠野複合深成岩の石英に観察される高輝度と低輝度帯のしわ状構造
Ti 濃度のラインプロファイル (sample No. 103 (中心部相), grain No.15)

この構造を持つ領域 (約 $300 \mu\text{m}$) で 25 ± 16 ppm から 99 ± 13 ppm の幅の Ti 濃度の急激な変化が認められる (図 4)。この Ti 濃度の変動は CL の輝度とおおむね正の相関を示す。このような傾向は、マグマ溜り中の局所的な TiO_2 活動度や温度の偏りを示している可能性を持ち、今後も詳細な解析を実施する。

4. 引用文献

- De Toni, G.B., Costa, J.A.L., 2024. Kinematic analysis of the Caçapava do Sul Granitic Complex, southern Brazil: Ediacaran syntectonic magmatism and strain partitioning during inclined ductile extrusion along a transpressional shear zone, Dom Feliciano Belt. *Journal of South American Earth Sciences* 143, 104996.
- 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.
- 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., 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)

太陽中性子を用いた太陽高エネルギー粒子の研究
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 (>100 MeV) を検出することにより、太陽高エネルギー粒子加速機構を解明することを目的とする。これまでの太陽中性子観測から、太陽表面での高エネルギーイオン加速は、太陽表面での中性子生成時間を、加速電子が生成する電磁波と同じであると仮定すれば、高加速効率のショック加速ではなくて、統計加速であることがわかっている。中性子は電磁波と違い、質量を有するので、エネルギーによって太陽地球間の飛行時間が異なるので、エネルギーを測らないと、太陽表面での生成時間がわからない。これまでエネルギー情報が得られたイベントは1イベントだけであるので、加速機構が統計加速であることを結論づけるためには、太陽表面での中性子の生成時間を仮定しなくてよいイベントをもっと検出する必要がある。

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 (4,600m) 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観測が維持されている。観測されたデータはボリビアのサンアンドレス大学のサーバーと、メキシコ自治大学のサーバーに保存されている。これらのデータは、名古屋大学宇宙地球環境研究所の計算機サーバーにコピーされ、保存されている。本共同利用研究は、宇宙地球環境研究所の計算機を使用させていただくという意味での共同利用研究である。

メキシコの太陽中性子検出器には、SNT と呼ばれる検出器と、SciCRT (SciBar Cosmic Ray Telescope) と呼ばれる検出器がある。後者は、宇宙線ミュオン検出器としても利用される。データ収集においては、2024年度が始まった当初、SciCRT による太陽中性子観測は、データ収集装置の問題からストップしていたが、2024年秋には現地研究者の努力により、データ取得が再開された。SNT の方は問題なく運用されている。チャカルタヤの太陽中性子観測も問題なく運用されている。一方太陽活動は、2024年に極大期を迎えたと言われ、その状況は現在 (2025年3月3日) も続いている。太陽フレアの強度を軟X線フラックスで分けたときの、もっとも高い段階を X クラスと呼ぶが、Xクラスのフレアの数、第24太陽活動期の49回の2倍以上をすでに超えている。残念ながら、2024年度のデータを用いた解析では、太陽中性子イベントは検出されていない。軟X線の強度は、GOES とよばれる衛星で測定されているが、GOES のデータはリアルタイムで見ることができるので、大きな太陽フレアの発生有無については、随時チェックしている。今のところ、検出できませんでした、という報告であるが、研究自体は粛々と継続している。

論文

Monterde-Andrade, F., L. X. Gonzalez, Y. Matsubara, et al., Detection Response of the active components of SciBar Cosmic Ray Telescope at Sierra Negra, Eur. Phys. J. C. (2024) 84:981, 10.1140/epjc/s10052-024-13325-0

学会・研究会発表

神谷晏那、小井辰巳、松原豊他、乗鞍観測所における宇宙線複合観測に向けた準備研究、日本物理学会第79回年会、北海道大学、2024年9月16日

松原豊、SciCRT プロジェクトの現状、太陽地球環境と宇宙線モジュレーション (ISEE研究集会)、名古屋大学宇宙地球環境研究所、2025年2月21日

(別紙様式04-2)

古代DNAによる近代以前の日本の生物多様性の解明
Revealing genetic diversity of premodern fauna in Japan using the ancient DNA techniques

岸田拓士、日本大学生物資源科学部

現在の生物多様性の健全性を評価し、将来に向けた保全を考える上で、過去の多様性の理解は欠かせない。しかしながら、ニホンオオカミやヒグマなど陸棲メガファウナに比べて、海棲メガファウナの過去の遺伝的多様性に関する研究報告は極めて少ない。

本研究では、道東釧路に位置する二つの縄文遺跡（東釧路貝塚 [縄文早期～中期]、幣舞遺跡 [縄文晩期～続縄文]）を中心に、先史時代捕鯨の跡が残る3地域6サイトの先史時代遺跡から出土したイルカ類の骨からコラーゲンおよびDNAを抽出して、放射性炭素年代測定とミトコンドリア塩基配列解読を行った。その結果、東釧路貝塚から出土したイルカ類、特にカマイルカの遺伝構成は、同じ場所に存在するが時代の異なる幣舞遺跡出土のイルカ類とは大きく異なることが示された。また、東釧路貝塚で最も若いサンプル（およそ4000年前）と幣舞遺跡で最も古いサンプル（およそ3000年前）の間の1000年間に、当該年代を示すイルカの骨が発見されない、釧路地方における捕鯨の空白期が見つかった。この空白期のはじまりは全地球規模の寒冷化、いわゆる4200年前イベントと同期しており、当時の気候変動によって陸上だけでなく海洋環境も大きな影響を受けたことが示唆された。

本研究成果の詳細に関しては、代表者の所属部局よりプレスリリースを行った。

<https://hp.brs.nihon-u.ac.jp/~NUBScommon/release/20250124.pdf>

発表文献

Kishida T, Sawada K, Namigata S, Takabatake T, Suzuki M, Takezoe N, Yamamoto T, Nakanishi T, Kitagawa H. (2025) Hidden population turnover of small odontocetes in the northwestern North Pacific during the Holocene. *Biology Letters* 21, 20240525. (<https://doi.org/10.1098/rsbl.2024.0525>)

岸田拓士 (2024) 古代DNAで探る縄文時代の鯨類の遺伝的多様性. *In: 種生物学会 編, タイムカプセルの開き方*. 文一総合出版. pp.79-94. ISBN: 978-4-8299-6212-1.

(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、1次元3階差分および5階差分演算子を導入することにより、空間精度を6次に拡張した新たな手法を前年度した(Sekido & Umeda PIER M 2024)。これに、Sekido & Umeda (EPS 2024)のLaplacianを考慮した3階差分および5階差分演算子を導入したが、精度の改善にはあまりつながらないことを示した。また、空間4次精度のFDTD法(Sekido & Umeda EPS 2024)をプラズマ運動論コードに実装する際に生じる電荷保存則の数値誤差を除去するための検討を行った。

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。

成果発表

学会発表

関戸 晴宇, 梅田 隆行, 三好 由純, 陽的時間領域有限差分法のクーラン条件の緩和および数値誤差の低減, 日本地球惑星科学連合 2024 年大会 (JpGU2024), 2024/05/30, 幕張メッセ, ポスター.

葛 心雨, 梅田 隆行, 関戸 晴宇, 三好 由純, 有限差分時間領域法 (FDTD) シミュレーションの改良: 電流源を含む高次精度手法における数値誤差の改良, 日本地球惑星科学連合 2024 年大会 (JpGU2024), 2024/05/30, 幕張メッセ, ポスター.

尾崎 理玖, 梅田 隆行, 三好 由純, オーロラ加速領域における電気二重層の計算機シミュレーションのための高精度手法の研究, 日本地球惑星科学連合 2024 年大会 (JpGU2024), 2024/05/30, 幕張メッセ, ポスター.

梅田 隆行, 尾崎 理玖, 溝口 英一郎, A new fourth-order leap-frog integrator for relativistic equations of motion for charged particles, 日本地球惑星科学連合 2024 年大会 (JpGU2024), 2024/05/30, 幕張メッセ, ポスター.

H. Sekido, T. Umeda, Y. Miyoshi, Relaxation of the courant condition and reduction of numerical errors in the explicit finite-difference time-domain method for plasma kinetic simulations, 15th International School/Symposium for Space Simulation (ISSS-15), 2024/08/05, Garching, Poster.

T. Umeda, R. Ozaki, E. Mizoguchi, New integrator for relativistic equations of motion for charged particles, 15th International School/Symposium for Space Simulation (ISSS-15), 2024/08/06, Garching, Oral.

H. Sekido, T. Umeda, Y. Miyoshi, Relaxation of the courant condition and reduction of numerical errors in the explicit finite-difference time-domain method for plasma kinetic simulations, 21st International Congress on Plasma Physics (ICPP2024), 2024/09/10, Ghent, Oral.

T. Umeda, R. Ozaki, E. Mizoguchi, New integrator for relativistic equations of motion for charged particles, 21st International Congress on Plasma Physics (ICPP2024), 2024/09/10, Ghent, Oral.

関戸 晴宇, 梅田 隆行, 三好 由純, ラプラシアン演算子を用いた陽的時間領域有限差分法のクーラン条件の緩和および数値誤差の低減, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2024 年秋季年会, 2024/11/26, 国立極地研究所, 口頭.

葛 心雨, 梅田 隆行, 関戸 晴宇, 三好 由純, 電流源を含む高次有限時間差分領域法における数値誤差の改良, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2024 年秋季年会, 2024/11/25, 国立極地研究所, ポスター.

尾崎 理玖, 梅田 隆行, 三好 由純, オーロラ加速領域における電気二重層の計算機シミュレーションのための高精度手法の研究, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2024 年秋季年会, 2024/11/26, 国立極地研究所, 口頭.

梅田 隆行, Performance evaluation of relativistic particle integrator with conditional branching statements inside a loop for PIC simulations, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2024 年秋季年会, 2024/11/25, 国立極地研究所, ポスター.

327MHz電波望遠鏡の観測データを用いた太陽風速度予測モデルの改良
Improvement of the solar wind speed prediction model
using observations with 327-MHz radio-telescopes

徳丸宗利、名古屋大学・名誉教授

1. 研究目的

太陽から超音速で吹き出す太陽風は地球周辺の宇宙環境に大きな影響を与えるため、地球に到来する太陽風を正確に予測することが宇宙天気予報における重要課題となっている。太陽風の加速メカニズムが未だ謎であるため、太陽風の数値シミュレーションでは経験則に基づいて太陽風速度を予測するモデル（太陽風速度モデル）が用いられる。太陽風速度モデルの例として、コロナ磁場の磁力線拡大率との逆相関関係に基づくWSモデル（Wang & Sheeley, 1990, Arge et al., 2000）、コロナホール境界からの角度距離(DCHB)に対する依存性に基づくモデル(Riley et al., 2001)、両者を統合したWSAモデル(Arge et al., 2003, 2004)などがある。これらのモデルは飛翔体観測データを使って最適化されているが、その精度はあまりよくない(Riley et al., 2015)。その原因の一つとして、モデルの最適化に用いた飛翔体観測は黄道面付近で行われており、黄道面の太陽風は太陽活動サイクルを通じて低速風が支配的であるため、最適化されたモデルが低速風に偏ったものになっていることが考えられる。ISEEで実施している多地点IPS観測からは高緯度を含めた全球について太陽風速度データが得られる。本研究では、この利点を活かしてIPS観測を用いて太陽風速度モデルを最適化することで、精度良く太陽風速度を予測するモデルの開発を目指す。その結果から太陽風速度をより精度よく決定するコロナ磁場パラメータについて検討し、太陽風加速メカニズムを探る手掛かりを得る。

2. 研究方法

本研究では、ISEEのIPS観測から得られた太陽風速度データと太陽磁場データのポテンシャル磁場解析データを用いてDCHBモデルとWSモデルについて最適化を行った。解析期間はサイクル23における異なる太陽活動に対応した6つのCarrington Rotation: CR1913, CR1963, CR2005, CR2021, CR2061, CR2083とし、太陽磁場データはAir Force Data Assimilative Photospheric Flux Transport (ADAPT) Modelによって極磁場の補正が行われたものを用いた。ADAPTデータのポテンシャル磁場解析(藤木助教担当)の結果からDCHBと磁力線拡大率 f を計算し、その計算結果とIPS観測を比較することで、太陽風速度モデルを最適化するパラメータを決定した。最適化は次の3つの方法で行った。①Synoptic mapの各点(360x180)について観測とモデルの相関をとり、相関係数(PCC)が最大となるパラメータを求める、②DCHBまたは f に対する太陽風速度のプロットを作成し、その空間上でモデルと観測の偏差 χ^2 が最小となるパラメータを求める。③Synoptic mapの各点(360x180)について観測とモデルの偏差 χ^2 が最小となるパラメータを求める。これら3つの最適化法で得られたモデルについてIPS観測に対するPCCや速度差(バイアスおよびrms)を評価し、どの最適化モデルがよいかを検討した。PCCや χ^2 の計算においては、Synoptic mapの緯度効果の補正を行っている。

3. 研究結果

DCHBモデルでは極大期(CR1963)を除くすべての期間でIPS観測に対して相関係数が0.5以上の有意な相関が見られ、相関係数の平均値は0.7であった。極大期においては有意な相関が見られなかったが、その原因として極大期におけるコロナ磁場や太陽風分布が短時間で変化することが考えられる。WSモデルでも同様に極大期を除くすべての期間で相関係数は0.5以上の相関が見られたが、その値はDCHBより全体的に低く、平均値は0.6であった。この傾向は3つの最適化でほぼ同じであるが、DCHBモデルでは方法②、WSモデルでは方法③が最もIPS観測を再現できるモデルを生んだ。本研究で得られた結果は先行研究(Riley et al., 2015)と概ね一致している。ただし、最適化されたパラメータは先行研究と大きく異なっていた。この違いは全球的なデータでモデルを最適化したことによると考えられる。特に本研究で得られたDCHBモデルのパラメータ ϵ はほぼゼロであ

り、コロナホール境界が最も低速で、そこから離れるにつれて直ちに（オフセットなく）速度が増加することを示している。 $\varepsilon=0$ のとき、既存のDCHBモデルでは低速風の速度 V_{slow} よりも高い速度で下限値が制約されてしまう。この問題を避けるため、本研究ではDCHBモデルの修正版を提案した。修正DCHBモデルは ε を含み、 V_{slow} が速度の下限値を与える。本研究では方法②を使って修正版DCHBモデルをIPS観測に最適化した。最適化した修正版DCHBモデルは、既存のDCHBモデルと同程度の性能を示した。さらに本研究では、極大期を除く期間の最適化パラメータの平均値を使ってDCHBおよび修正DCHBモデルの性能を評価をした。その結果、各期間について最適化したパラメータを用いた場合に比べて遜色ない性能（PCC、速度差）が得られることがわかった。

4. まとめ

本研究では、極大期を除く期間についてIPS観測で得られた太陽風速度データを高い精度で再現できるDCHBモデルを決定した。最適化したDCHBモデルはWSモデルよりもより良い性能を示した。このことは f に比べDCHBが太陽風加速をよりよく説明するパラメータであること示している。DCHBと f の関係を調査した結果、両者には一対一の対応関係は見られなかったが（小さいDCHBに大きな f と小さな f が対応し、小さな f には小さなDCHBと大きなDCHBが対応）、我々はDCHBが f と同様に磁力線拡大率を表現するパラメータであると考えている。この点は今後の研究で明らかにしてゆきたい。また、パラメータを固定した場合でも様々な太陽活動の時期について良好な性能を発揮する太陽風速度モデルが得られたことは、宇宙天気予報への応用の観点から意義がある。

本研究で得られた成果はSolar Physics誌に投稿・出版されている（Tokumaru et al., 2024a）。また、本研究で作成したデータを用いてpseudostreamerと低速風の関係について調査する研究課題を2025年度のISEE共同研究（一般）に申請した。

5. 参考文献

- Arge, C.N., and V.J. Pizzo, Improvement in the prediction of solar wind conditions using near-real time solar magnetic field updates, *Journal of Geophysical Research*, 105, A5, 10,465-10,479, 2000.
- Arge, C.N., D. Odstrcil, V.J. Pizzo, and L.R. Mayer, Improved Method for Specifying Solar Wind Speed Near the Sun, *AIP Conf. Proc.*, 679, 190-193, 2003.
- 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.

6. 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>).
- 徳丸宗利、「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：Pseudostreamerと低速風」、ISEE研究集会「太陽圏・宇宙線関連の共同研究成果報告会」、名古屋大学・研究所共同館Ⅱ 409室（名古屋市）、2025/2/20

福島県浜通り地域における降水の水素酸素安定同位体比
Stable hydrogen and oxygen isotope composition in rain at seaside area
of Fukushima Prefecture

赤田尚史、弘前大学・被ばく医療総合研究所

福島県浜通りでは、福島第一原子力発電所の廃炉作業が進められ、2023年8月には廃炉作業に伴い発生するトリチウムを含む処理水の海洋放出が開始された。地域住民にとって、海洋放出による身近な環境への影響の有無は、関心の一つである。その地域で生活する住民にとって最も身近な環境水は河川水等の陸水であり、河川や浅層地下水から取水される水道水である。この地域における陸水の特徴を明らかにするためには、水の供給源となる降水のトリチウム濃度だけでなく水素酸素安定同位体の特徴も明らかにし、その変動傾向を把握することは重要である。これまでの研究により、福島県浪江町を流れる請戸川の集水域を対象に、水同位体の特徴を明らかにした。一方、浪江町の帰還困難区域である津島地区におけるトリチウム濃度については、既に論文として発表している (Yamada et al. 2024)。本研究では、福島県浜通り地域における降水の水素酸素安定同位体比を測定し、トリチウム濃度も加えた降水の同位体地球化学的特徴を把握する。

本研究における降水の採取地点は福島県富岡町である。富岡町は福島第一原子力発電所が立地する大熊町の南に位置し、令和6年11月1日現在、1,799世帯、2,556人が町内に居住している。降水試料は、富岡町役場敷地内にある食品検査所の裏に設置した降水採取装置 (RS-1D, Palmex, Croatia) に3Lのポリエチレンボトルを取り付けて毎月採取した。採取した試料は実験室に持ち帰り、重量を測定することで降水量を求めた。その後、pHとECを測定した後、一部の試料はシリンジフィルター (DISMIC 25C 045AS, ADVANTEC, Japan) を用いてろ過した後、宇宙地球環境研究所の設備である水同位体アナライザー (L2130-i, Picarro Inc., USA) を用いて水素酸素安定同位体比の測定を行った。残試料は蒸留した後、固体高分子膜電解濃縮装置 (Tripure XZ001, DerNora Permelec, Japan) を用いて水素の放射性同位体であるトリチウムを濃縮した後、再蒸留した。その後、試料の50mLを145mLのポリエチレンバイアル内で同量の液体シンチレーター (UltimaGold LLT, PerkinElmer, USA) と混合し、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, Japan) を用いてトリチウムの測定を行った。トリチウム濃度は採取期間の中間日に半減期補正を行った。

ここでは図に月間降水中トリチウム濃度を示す。2023年1月から2024年12月までの富岡町の降水量は1から269mmであり、2024年12月が最小であった。同期間のトリチウム濃度は検出下限値以下から0.84 Bq/Lの範囲であり、明瞭な季節変動は認められなかった。日本では、一般的に春季に高く夏季に低くなる季節変動傾向を示すことが知られている。本調査では、2023年には2月に最大値を示し、2024年は6月に最大値を示した。月間降水中トリチウム濃度は、降水を生成する水蒸気の供給源に支配される。本研究期間で少し異なる傾向を示したことから、更なる長期連続観測によりその特徴を把握する必要があるといえる。本調査を継続し水素酸素安定同位体比データと組み合わせることで、福島県浜通りの降水の水同位体の特徴を明らかにしたい。

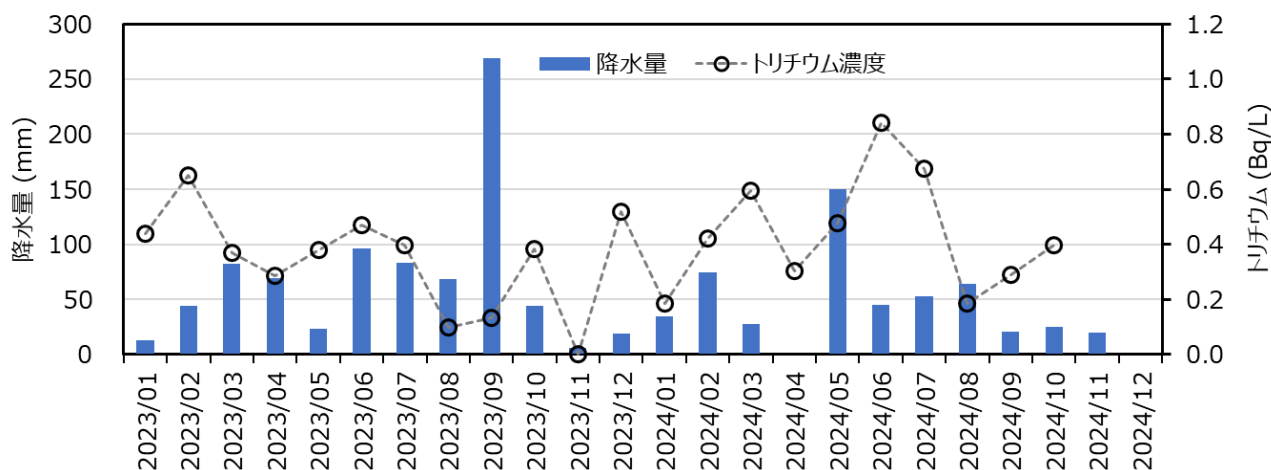


図 福島県富岡町にける月間降水中トリチウム濃度

(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usp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、その場合、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メカニズムが考えられている。しかし、どのようなプラズマ波動が実際の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を同定するためには、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。私たちは 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の分離が可能な質量分析性能を持つ超熱的イオンエネルギー質量分析器の実現を目指すこととし、観測機器開発を進めている。

私たちはこれまで、超熱的イオンエネルギー質量分析器 (TSA) を開発してきた。そして 2021 年 11 月に打ち上げられた観測ロケット SS520-3 に搭載し、成功裏に観測を行った。本研究ではこの開発をさらに進め、現在 NASA に提案中である脈動オーロラ現象の解明を目指した観測ロケット計画 LAMP-2 やワーキンググループとして活動している FACTORS 衛星計画への搭載を念頭に、 $\sim 1\text{eV/q} \sim 100\text{eV/q}$ をカバーし、円盤状の視野と視野方向変更機能 (仰角方向への変更機能)、さらに質量分析機能をもったイオン観測器を開発する。

本年度は昨年度までに行った観測器設計をさらに進め、 20eV/q 程度以下の入射イオンに対し、電極電圧制御を用いて感度を相対的に $1/10000$ 以下にできるようにした。これは FACTORS 衛星への搭載を念頭においたものである。FACTORS 衛星は近地点高度 350km 程度、遠地点高度 4000km 程度の軌道においてプラズマ直接観測を計画しているが、近地点付近では衛星速度の効果により、背景の高密度熱的プラズマが超熱的エネルギーとなって観測器に入射し得る。このため、観測器の処理能力以上に入射フラックスが大きくなることが予想され、感度低減が必要となる。一方、高エネルギー粒子を観測する場合や、低密度の高高度域では十分な感度を持たなくてはならない。このため感度変更専用の電極を配置し、印加電圧による感度変更機能を持つこととしている。図1(左) は $\sim 10\text{eV/q}$ の入射イオンに対する観測器感度を示したものである。観測器の入射口近くに設けた感度変更電極とエネルギー分析部出射部付近に設けた感度変更メッシュの 2電極を用いることにより、印加電圧制御精度を大きく高めることなく $1/10000$ 以下の相対感度変更を実現することができている。なお、質量分析については N^+ と O^+ を分離する能力を維持している (図1(右))。

また、本年度は計算機シミュレーション結果を基に、観測器試験モデルの設計を行った。図2は設計した試験モデルの形状を示している。現在このモデルの試作を行っており、部品試作後、組み上げとイオンビーム照射などによる性能確認を進める予定である。

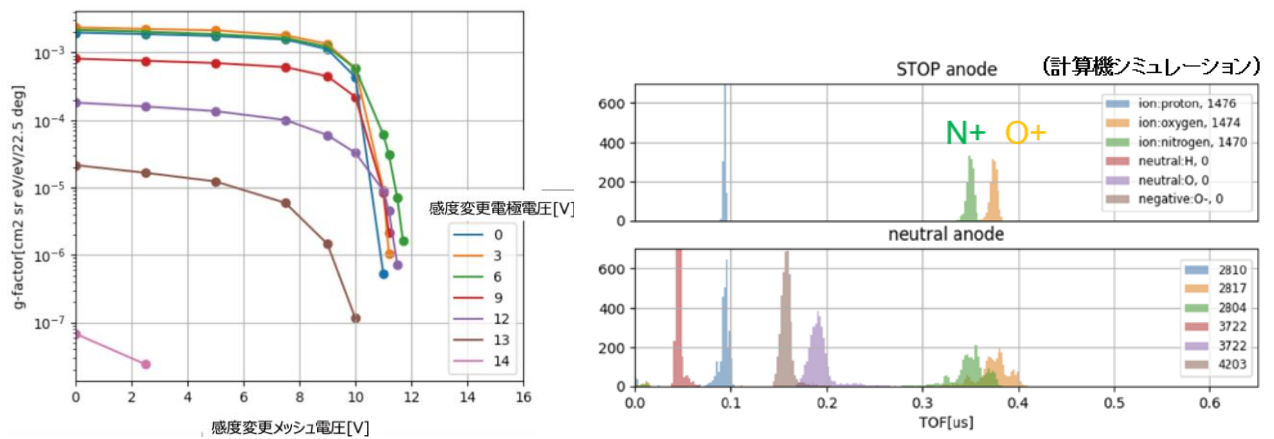


図1: 計算機シミュレーションによって求めた (左) 電極電圧制御による感度変更性能。(右) $\sim 10\text{eV}/q$ の入射イオンに対する質量分析結果。観測器内で粒子の飛行時間を計測することで、速度を分析し質量を導出するため、計測飛行時間に対するヒストグラム表示となっている。STOP アノードを用いた計測を行うとN⁺と O⁺を分離することができる。

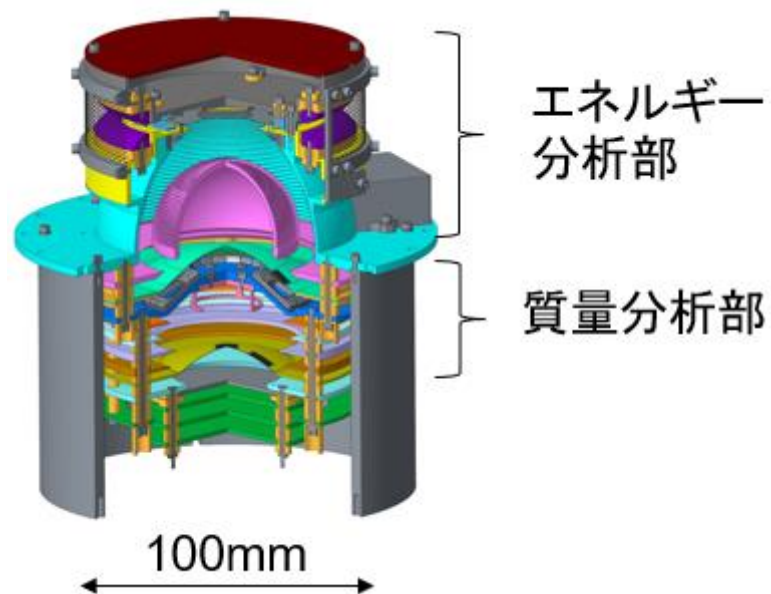


図2: 設計した観測器試験モデルの形状

宇宙線ミューオン強度と超高層大気変動の相関研究

Variability study between cosmic ray muon intensities and upper atmosphere

研究代表者: 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(中部大)、長田和男(名大環境学科)

2024 年度は第 25 太陽活動期が最盛期を迎え、太陽宇宙線加速過程に係る重要なイベントが乗鞍観測所や Bolivia の Chacaltaya 観測所で受信された。我々はそのイベント解析に集中したため、超高層大気変動の研究に割く時間がなかったことを始めにお断りしておく。代わりにどのようなイベントが日本やボリビアの高山で得られ、何が今までに分かったのかを報告する。

乗鞍観測所は、冬季観測所が閉鎖され発電機からの電力は得られないので、独自に太陽光発電によって、電力を賄い装置を動かしている。そのため冬期に観測できる機器は限定される。2023 年 7 月に乗鞍観測所に中部大学のスタッフが乗鞍観測所に出かけ、断線していた太陽光発電パネルからの結線をつなぎ直した。また長期に亘る電力の未供給状態で使えなくなっていたバッテリーを除去し、新たに 3 台新規に購入し取り換えた。これらの努力の結果、中性子モニター 12NM64 は冬季も data をとり続けた。そのため 2024 年 5 月 8 日、11 日、27 日と 10 月 24 日の巨大な太陽フレアに伴って発生した太陽中性子の信号受信に成功した。2025 年 3 月現在、詳細な解析を進めている。

2024 年 5 月 11 日のイベントは巨大な Forbush decrease の回復時に、中性子の信号が乗鞍で観測され、また少し遅れた時刻に、カナダの Calgary に設置されている中性子モニターにも信号増加が観測された。カナダ現地は 18 時なので、太陽中性子が入射しこの増加を作ったのではなく、太陽中性子崩壊陽子が崩壊して入射し陽子が作ったものであろう。これは観測史上 6 例目の太陽中性子崩壊陽子イベントといえる。

また 2024 年 5 月 27 日には、Bolivia Chacaltaya 山 (5,250m) に設置されている名大太陽中性子観測装置に 11.5σ の増加が観測された。フレアの発生時刻は 07 時 UT であり、現地時刻は朝の 4 時なので、このイベントの増加は太陽中性子が作り出したものではなく、太陽中性子崩壊陽子によるものと考え。もしそうならこれは観測史上 6 例目の太陽中性子崩壊陽子の例である。また Lagrangian point にいる SOHO 衛星の EPHIN 装置に太陽中性子崩壊陽子と電子が観測された。その時間は 07 時 UT である。太陽中性子崩壊電子の観測は観測史上 3 例目である。Chacaltaya のイベントは荷電陽子が日照側から入射し地磁気で曲げられ早朝の Chacaltaya 山に入射したことを鬼頭による軌道計算が示唆している。非常に重要なイベントである。まずは 2025 年 7 月に Geneva で開催される宇宙線会議で報告するよう現在準備中である。

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衛星の打ち上げが2024年5月に実施された。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ことを目標に、地上設置の雲レーダー等の観測を利用し、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衛星の観測データを念頭において、NICT雲レーダーCPRによる radar reflectivity およびDoppler速度を利用する。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。

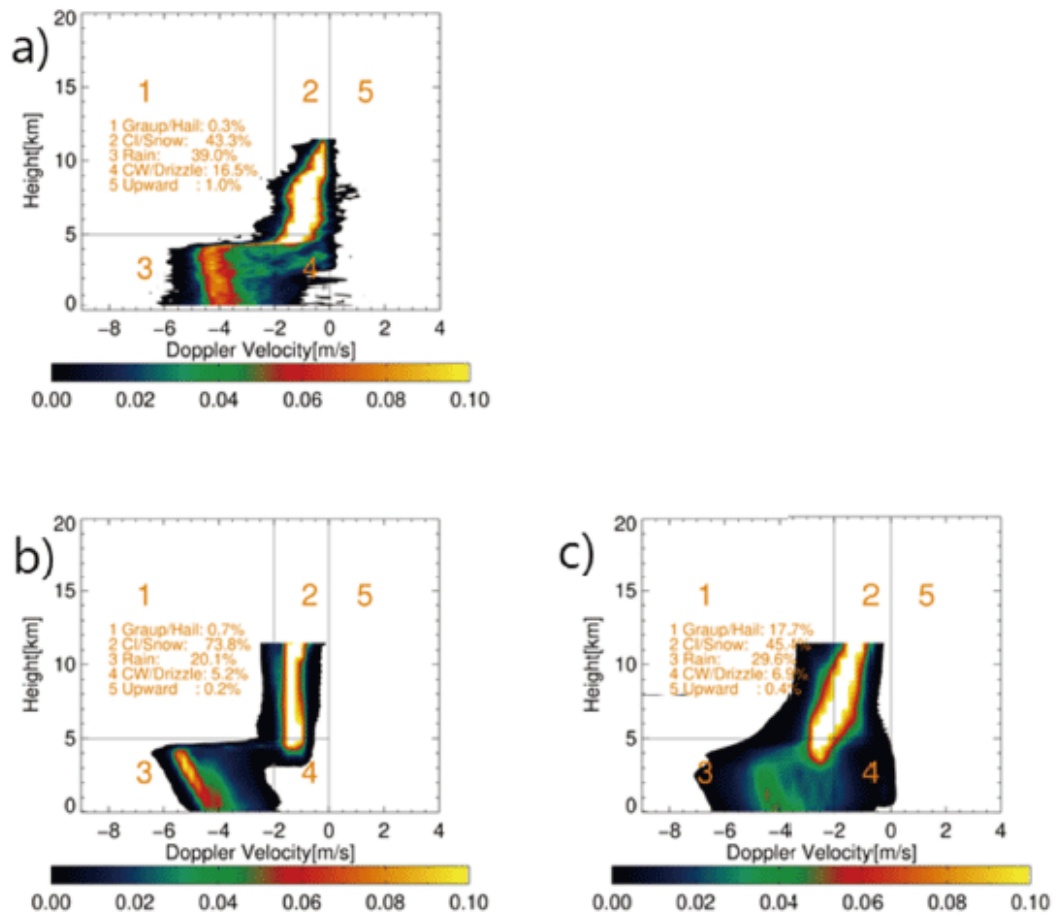
研究結果

地上に設置した雲レーダーによって得られた「ドップラー速度」データを用いて、雲と降水の粒子を詳細に分析した。ドップラー速度は粒子の速度を測定する技術であり、これにより雲の中の粒子がどのくらいの速度で動いているかを知ることができる。このデータを利用して、雲氷/雪、霰/雹、雨、雲水/霧雨に分類し、この分類方法を用いて数値モデルと比較し、モデルが実際の観測とどれだけ一致するかを評価した。

本研究では、全球非静力学モデルNICAMによる数値計算結果に「観測シミュレーター」を適用し、雲レーダーの観測に相当するデータを得た。2つの雲微物理スキームNSW6とNDW6を利用して数値シミュレーション結果を評価した。これらのスキームは、それぞれ異なる仮定に基づいて雲の微物理過程をシミュレートしている。図に示すように、ドップラー速度の各高度の頻度分布から、雲の分類を試みた。シミュレーション結果では、氷と水粒子によるドップラー速度の差が高度5km付近で明確に現れた。また、氷粒子は落下速度が速い霰と遅い雪に相当する粒子に分類できる。さらに、ドップラー速度が上向きの粒子は上昇流域に対応していると考えられる。

NSW6スキームの場合、観測に比べてドップラー速度の範囲が狭く表現されているのに対し、NDW6スキームは雪の終末速度を過大評価していることが判明した。具体的には、NDW6スキームは観測データと比較して、雪の粒子がより速く降下する傾向を示していた。この結果、実際には雪であるにもかかわらず、モデル上では霰や雹と誤認される場合があった。この問題は、特に強い対流が発生している地域で顕著である。

本研究では、EarthCARE衛星で想定されるシグナルノイズ等の条件を使用してNSW6とNDW6によるシミュレーション結果の解析を実施した。人工衛星の速度が非常に速いため、ドップラー速度にエラーが生じる可能性があるが、そのエラーが上記の方法にどの程度の誤差を与えるかについても検討した。



図：地上レーダー観測(a)と数値モデル NSW6(b)、NDW6(c)によるドップラー速度分布の比較。各図は、ドップラー速度と高度の関係を示し、水物質の分類（霰/雹、雲氷/雪、雨、雲水/霧雨、上昇気流）を色分布で表示している。地上レーダー観測と比較すると、NSW6 と NDW6 のモデルには雪や雨粒子の降下速度に違いが見られ、特に NDW6 モデルでは霰/雹の割合が過大評価されていることが確認できる。

IPS spectrum 解析の model fitting 法とData bank 法
Two IPS spectrum analysis methods: model fitting method and data bank method

小島正宜 名古屋大学

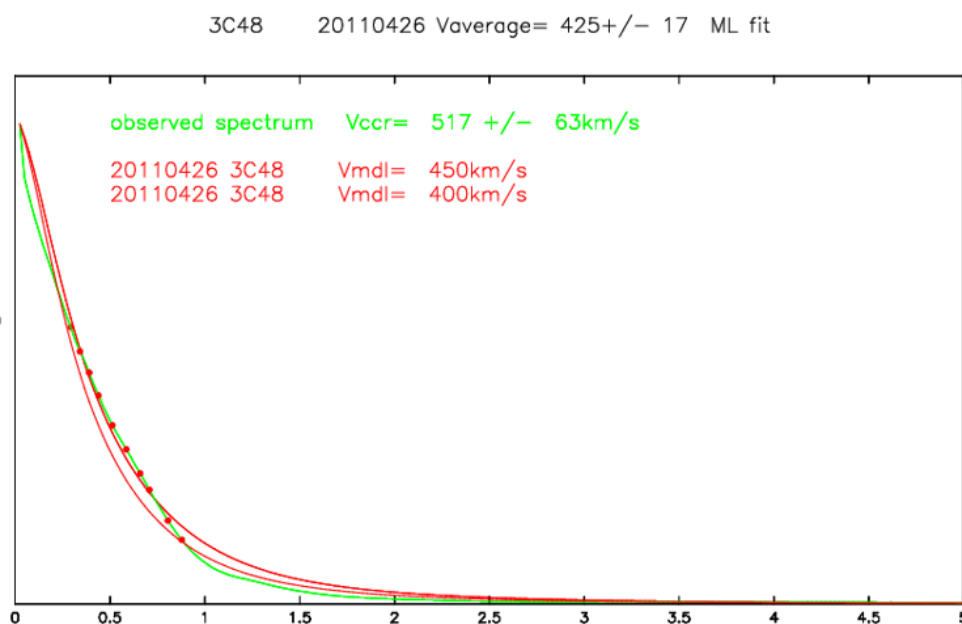
IPS観測に複数の remote antenna が利用できるときは、それらにより受信された IPS 信号の相互相関解析を行うことにより太陽風速度を求めることができる。この方法を用いれば太陽風プラズマのスペクトル形状にバイアスされない信頼度の高い速度値を得ることが出来る。しかし複数アンテナによる観測が不可能なときは単一アンテナで観測されたIPSスペクトルのみから太陽風速度を推測する必要がある。スペクトル解析では、太陽風による電波散乱モデルを作りスペクトル解析を行う。その場合モデルはpower law 型の太陽風擾乱を仮定して行う。しかし実際に観測されるスペクトルにはこのようなモデルで近似できない場合が多々ある。

ISEEにはSTE研時代からのIPS 3点観測のデータが多くある。このデータは相互相関解析により得られた速度値と各アンテナで観測されたスペクトルデータをセットとして構成されている。そこで2011年から2019年までに観測された 3C48, 3C147, 3C161, 3C273, 3C298 の5 IPS電波源の観測データから速度値とスペクトル形状をセットとするData bank を作った。

そして次に、個々の観測スペクトルをdata bank の全てのスペクトルと比較し、良い一致の見られるものを探し、そのdata bankの速度値を観測された太陽風の速度とする。許容範囲内で複数のデータから良い一致が得られるのでそれらを平均した値を求める速度値とする。

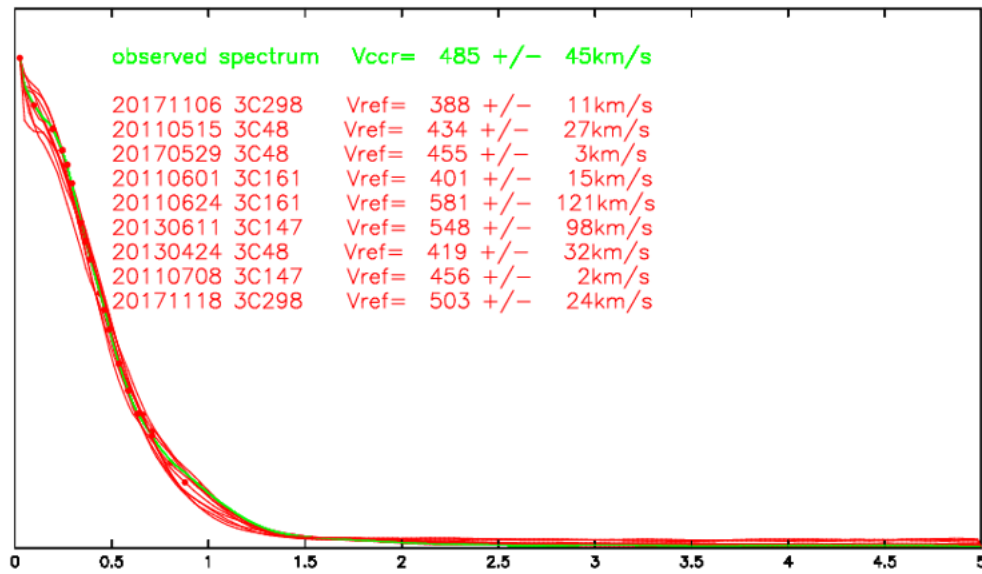
IPS スペクトルは電波源構造（大きさや異方性）の影響を受けるので電波源毎にスペクトル形状が異なる可能性がある。そこで Data bank 法の解析では先ず電波源構造の依存度を調べた。例えば3C48のIPS解析には 3C48のみからなるData bank を用い解析を行った。次に上記の5電波源のData bankを一体化したものをData bank として解析を行った。この両者の結果を比較した結果、一体化した Data bank を用いても大差ないことを確認した。

最終的にはmodel fitting 法とData bank 法の両者を用いる Hybrid 法を開発した。観測されたスペクトルをmodel で良い近似が得られる場合はmodel fitting 法による速度値を採用し、近似に難がある場合にはData bank 法をもちる。このHybrid 法の方が、model fitting 法、Data bank 法を個々に独立に用いた場合よりも良い結果が得られた。



2011年4月26日の3C48の解析。これは model fitting で上手くスペクトル形状が近似できている例。このIPSは、相関法では 517 ± 63 km/sの速度が、model fitting では 425 ± 17 km/sが得られた。

3C48 20170417 Vaverage= 457+/- 20 AI fit



2017年4月17日の3C48の解析。観測されたスペクトル（緑線）は0.1-0.2Hzの低周波域で励起があり単純なpower law モデルで近似できない。しかし data bank 中には類似のスペクトルが多々あり、図ではそれらの9例を重ね表示している。このIPSは、相関法では $485 \pm 20 \text{ km/s}$ の速度が得られており、data bank 法では 平均 $457 \pm 20 \text{ km/s}$ のスペクトルが良い一致を示している。赤字はdata bank 中の良い一致を示したデータの IPS source 名と相関法で得られた速度値である。

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 analyzer, 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、地球上層大気の大気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、地球上層大気の大気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 (Takada, ..., Yokota et al., 2021, JGR)。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】

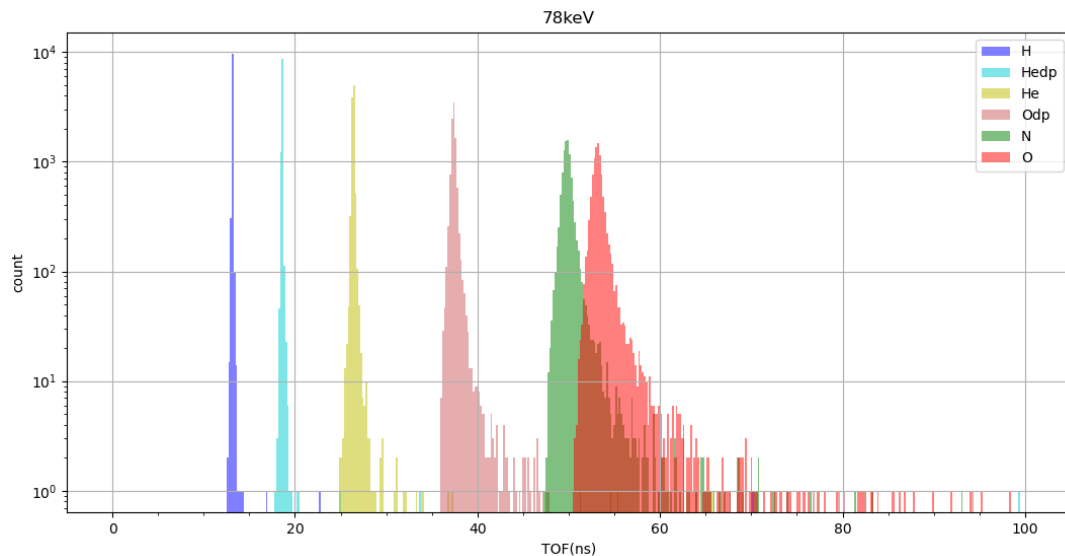


図1：78keVイオンの入射に対してMEPiで取得されるTOF分布 (SRIM計算結果)

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す

る。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 $\Delta T(K)$ が生じる。 $\Delta T(K)$ 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 ΔE に対応する分散も生じている。較正データとして既に得られている ΔE を今回はskew normal関数 $f(K)$ で近似した。

図2は磁気嵐中の2017年9月7日にMEPiで得られたTOFデータのうち、78keVに相当するエネルギーステップのみ示している。観測データ（青点）に対して色付きのヒストグラムの較正データでフィッティングを行った。 $\sum_K \Delta T(K) \cdot f(K)$ としてTOF分布に幅を与えた。またTOF計測ではCFD回路を組んで高精度に努めているが、それでも1ns程度の不定性は生じるため、その効果も追加した $\sum_K \Delta T(K) \cdot f(K) \cdot f_{1n}$ 。 $f(K)$ はエネルギー分析器の特性上、エネルギーで規格化すると同一になる。一方で f_{1n} はイオン種に依らず、あくまで1nsというスケールで分布に幅を与える。

78keVに相当するエネルギーステップでのTOF分布に対して、SRIM計算に基づいた較正データはTOF分布に対して一致を得ることができた。 N^+ と O^+ の分離も期待通り実現でき、存在比 N/O は20%程度と磁気嵐中の低下を示した。 OH^+ 左側に不一致が見られるが、TOF計測が短い時間範囲においては線形性から外れることが原因と考えられる。

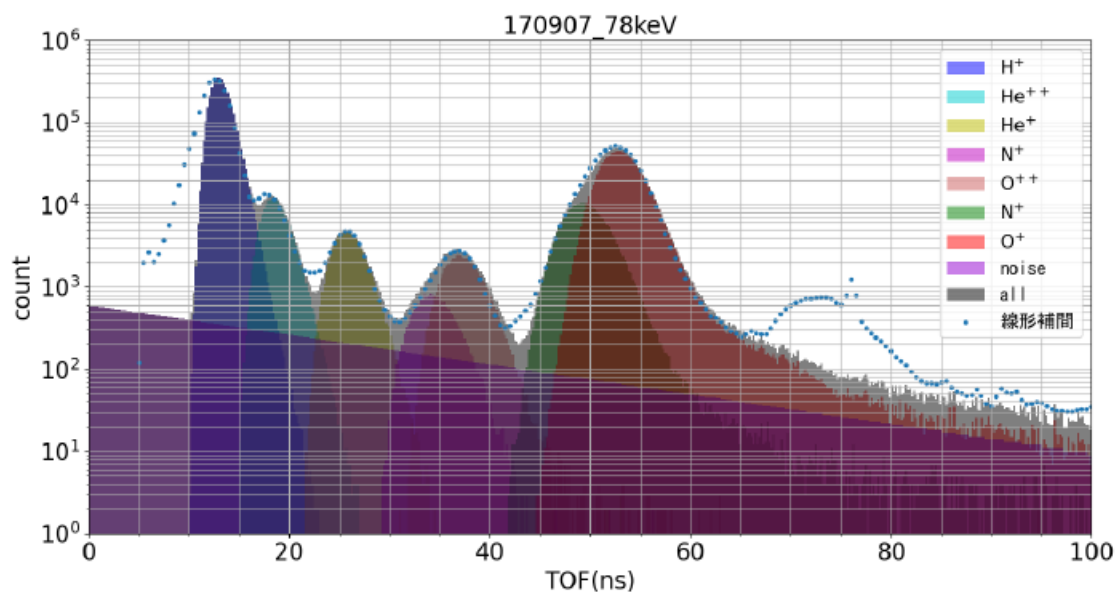


図2：2017年9月7日にMEPiで取得された78keVイオンTOF分布に対する較正データでのフィッティング

【まとめ】

本研究ではRIM計算に基づいた較正データからあらせ衛星搭載MEPiのTOFデータの評価を行い、 N/O の分離を行った。その結果、物理モデルに裏付けされた手法によって、MEPiのTOFデータから N/O 比を得ることができた。同手法にて15ステップ全てに対して同様の評価はできている。今後は一つのイベントについて時系列で N/O 分別を求めていく予定である。

Arase衛星DC電場・低周波電場波動による衛星帯電および内部磁気圏の研究促進：その3
Enhancement of the Spacecraft Charging and Inner Magnetospheric Researches by Arase DC and
low frequency E-field: #3

笠羽 康正、東北大学 惑星大気・プラズマ研究センター

1. 研究目的

本研究は、磁気圏構造変動とプラズマ輸送の情報を握るDC電場・低周波電場波動の校正で明らかになってきた衛星帯電影響の検討、およびそれらの定量評価と物理的役割の解明を促進を目的として活動した。名大ERGサイエンスセンターメンバーとの協力により、Araseを軸とする内部磁気圏研究の重要な一翼を支える。また、本申請メンバーが並行して進めるBepiColombo Mio探査機搭載のPlasma Wave Investigation (PWI) による水星電場観測準備にも重要な基盤を提供する。

このご支援により2024～2027年度の基盤B「電磁波動による初の水星磁気圏探査：その基盤構築と初動観測活動」の採択を得ており、御礼申し上げたい。次年度からはこの経費による活動へ移行する。

2. 研究方法・結果

(1) データパイプライン設定・更新および校正

サイエンスセンターのメンバーとともにLevel-2データの公開・メンテナンス作業を順調に進めた。データ校正は「センサー電気性能の反映」までとし、周辺plasma環境に依存した校正は含めない。以下のスキームは、2024年度から本格構築を開始した「BepiColombo PWIデータ方式」の原型となっている。

[PWE/EFD Wiki] <https://ergsc.isee.nagoya-u.ac.jp/mw/index.php/ErgSat/Pwe/Efd>

[観測データ] https://ergsc.isee.nagoya-u.ac.jp/data_info/erg.shtml.ja

・スピン周期データ

スピニフィット(～8sec分解能)の電場波形 (double probe, EFD E spin-fit)

スピン平均(～8sec分解能)の衛星ポテンシャル (single probe, EFD pot)

・波形データ

256Hzおよび64Hz電場波形 (double probe, E 256HzおよびE 64Hz)

8Hzポテンシャル波形 (single probe, pot 8Hz)

・電場スペクトル：1-sec分解能

(1～>200Hz, EFD spec)

・SWPIA (ソフトウェア波動-粒子相互作用解析機能) に伴う短時間バーストデータ

電場波形データ (double probe, E 512Hz)

ポテンシャル波形データ (single probe, pot 128Hz)

(2) 電場の評価

電場導出の基礎となるポテンシャル・電場波形のスピン依存変動は、衛星形状に依存する光電子放出量の変化(衛星potentialの変動)と、その放出方向が太陽方向に偏りを持つこと(衛星周辺空間のpotential変動)とが絡み合う。これらがspin時間内に変動することで起きることがわかってきたが、磁場方向等の影響も相まって単純には排除不能である。

衛星電位とスピン位相・磁場方向・プラズマ密度との関係を解析し、太陽方向に衛星から離れた光電子雲のモデル計算と比較を実施することで、スピンに伴うSine変動から外れる成分は衛星起因光電子の非等方分布および磁場方向を入れるとある程度説明が可能であることを見出した。とはいえ、電場の補正に至るにはまだ電子雲モデルのさらなる定量化を要することもみえている。

[関連成果]

中川朋子, 堀智昭, 笠羽康正, 松田昇也, 笠原禎也, 三好由純, 土屋史紀, 熊本篤志, 新堀淳樹, 松岡彩子 (2025). 人工衛星「あらせ」DC電場観測波形への光電子の影響. 東北工業大学紀要 45, 1-9

今野 翼、伊藤 穂尚。眞野 航平、あらせ衛星が観測した電場波形にツノ状ひずみが生じる条件、東北工業大学 工学部 情報通信工学科2024年度卒業研修論文、2025年3月。

[関連講演]

Nakagawa, T., T. Konno, H. Ito, K. Mano, T. Hori, Y. Kasaba, Y. Miyoshi, S. Matsuda, Y. Kasahara, I. Shinohara. Photoelectron extent estimated from spacecraft potential at electric-field waveform distortion, SGPSS 2024 Fall meeting, 2024/11

中川朋子, 今野翼, 伊藤穂尚, 眞野航平, 堀智昭, 笠羽康正, 三好由純, 松田昇也, 笠原禎也, 篠原育, 電場計測プローブと衛星本体間の光電子のやり取りによる電場観測への影響, 惑星圏シンポジウム2025, 2025/3

(3) 衛星ポテンシャルの評価

衛星電位は、光電子流出量・二次電子放出量が衛星表面材および衛星形状・姿勢に依存すること、流入電流量が周辺電子温度に影響されることなどから、その電子密度の決定精度は低い。しかし、目視決定や仮定に依存せず 1-spin (8sec 程度)の分解能で観測量を取得できるため、ある程度の信頼性+連続性を持った電子密度の指標となる。2024 年度に UHR 周波数による電子密度決定情報が大幅に改良され、また 2024 年秋まで提供期間が延びたこともあり、この評価を急速に確立する必要がある。

PWI による衛星電位計測は、ワイヤアンテナ先端のプローブ電位で、バイアス電流を供しこれを周辺プラズマ電位に近づけることで成立する。とはいえ、BepiColombo 設計を流用した Arase 衛星のワイヤアンテナは長さ 15-m と短い。プラズマポーズ外での低密度・高温域では デバイ長 $\lambda_D[m] = \left(\frac{\epsilon_0 kT}{ne^2}\right)^{1/2} \sim 7.4(T[\text{eV}]/n[1/\text{cc}])^{1/2}$ は 15-m を大きく越えることはありえる。この場合、両プローブは衛星電位の影響下となり、その電位は実プラズマ電位から外れうる。この状態は、計測電場が実際よりも小さくかつ大きなエラーを含むことを意味するので、(2)の評価に直接影響する。実際、あらせで計測されるプローブ計測による衛星電位は、低密度では他衛星よりも低電圧側にずれることがわかっており、また LEP 低エネルギーイオンのカットオフエネルギーから演繹される衛星電位より低密度域で低めにすることも示された。この評価は、BepiColombo 水星観測時の計測精度にも関わる喫緊課題である。低密度域における 10Hz 以下電磁波の E/B 比等の評価も含め、早々に補正方法に目処をつけたい。なお、このずれはデバイ長の評価を通して、電子温度の導出による熱的プラズマ分布評価につながる可能性もある。

[関連講演] Kawagata, K., Y. Kasaba, F. Tsuchiya, Y. Kazama, K. Tachi, Y. Katoh. Examination of electron density in the Earth's magnetosphere and ionosphere using the satellite potential observed by the Arase, Japan, JpGU 2024, 2024/5

(4) Arase衛星による電場計測を用いた成果創出のサポート

引き続き、プラズマ圏・磁気圏電場観測・密度評価、EMICなど低周波波動や電離圏電場対応に絡み、あらせ電場観測結果の量的基礎と信頼性評価を与えた。査読論文としては以下が出版され、また関連口頭講演を支えている。

・従来想定よりも高高度域における沿磁力線加速電場の評価 : Imajo, S., Y. Miyoshi, Y. Kazama, K. Asamura, I. Shinohara, K. Shiokawa, Y. Kasahara, Y. Kasaba, A. Matsuoka, S.-Y. Wang, S. W. Y. Tam, T.-F. Chang, B.-J. Wang, C.-W. Jun, M. Teramoto, S. Kurita, F. Tsuchiya, A. Kumamoto, K. Saito, T. Hori (2024). Precipitation of auroral electrons accelerated at very high altitudes: Impact on the ionosphere and a possible acceleration mechanism, J. Geophys. Res. Space Phys. 129, e2024JA032696. <https://doi.org/10.1029/2024JA032696>

・オーロラ電子と磁気圏密度ダクトとの関連に絡むあらせ衛星・地上同時観測 : Ito, Y., K. Hosokawa, Y. Ogawa, Y. Miyoshi, F. Tsuchiya, M. Fukizawa, Y. Kasaba, Y. Kazama, S. Oyama, K. Murase, S. Nakamura, Y. Kasahara, S. Matsuda, S. Kasahara, T. Hori, S. Yokota, K. Keika, A. Matsuoka, M. Teramoto, I. Shinohara (2024). On the factors controlling the relationship between type of pulsating aurora and energy of pulsating auroral electrons: Simultaneous observations by Arase satellite, ground-based all-sky imagers and EISCAT radar. J. Geophys. Res. Space Phys. 129, e2024JA032617. <https://doi.org/10.1029/2024JA032617>

(別紙様式04-2)

非線形プラズマ波動に伴う粒子加熱・加速の研究
Particle Heating and Acceleration Associated with Nonlinear Plasma Waves

天野孝伸、東京大学大学院・理学系研究科)

本研究では主に地球バウショック近傍または磁気シース領域で見られる高周波ホイッスラー波の励起機構やそれにとまなう電子の散乱, さらに非熱的電子の加熱に着目して研究を行っている. 2024年度は (1) MMS衛星観測を用いたバウショックにおけるホイッスラー波の統計解析, (2) 理論的な波動励起機構の検討, (3) Particle-In-Cell (PIC) シミュレーションによる波動の再現, について研究を進めた. 得られた成果はそれぞれに以下の通りである.

(1) MMS衛星で観測された91例の衝撃波イベントに対して, 衝撃波遷移層内部において観測されるホイッスラー波強度を周波数ごとに定量化し, そのパラメータ依存性を調べた. その結果, de Hoffmann-Teller系におけるAlfvenマッハ数とよい相関があることが分かった. この結果と統計的衝撃波ドリフト加速 (Stochastic Shock Drift Acceleration; SSDA) の理論を総合すると, 準垂直衝撃波において効率の良い非熱的電子加速が見られるという既存の統計解析の結果を説明することができる. この結果はPhysics of Plasmas誌から出版済みである.

(2) 衝撃波上流および下流の電子速度分布関数からVlasov-Liouvilleマッピングによって衝撃波遷移層の速度分布関数をモデル化し, この分布に対して近似的な不安定性の線形解析を行った. Oka et al. (2017) で報告されたイベントについてこの手法を適用したところ, サイクロトロン共鳴によってホイッスラー波が不安定になることが分かった. また, この解析によって予測される波動の周波数は観測と整合的であることも分かった.

(3) 地球バウショックの典型的なパラメータを用いて無衝突衝撃波の2次元のPICシミュレーションを実施した. その結果, 背景磁場に平行伝播する高周波ホイッスラー波が再現された. また同じAlfvenマッハ数であってもより背景磁場が垂直に近い場合にはベキ型に加速された電子のエネルギースペクトルが見られた. 加速された電子の起動を解析したところ, 衝撃波遷移層においてピッチ角散乱が起こっていることが確認され, これにはホイッスラー波が寄与していることが示唆される.

査読付き論文

[1] Amano, T., Masuda, M., Oka, M., Kitamura, N., Le Contel, O., & Gershman, D. J. (2024). Statistical analysis of high-frequency whistler waves at Earth's bow shock: Further support for stochastic shock drift acceleration. Physics of Plasmas, 31(4), 042903. <https://doi.org/10.1063/5.0196502>

学会発表

- [1] Wang, R., Amano, T., Linear theory of oblique whistler wave generation at collisionless shocks, 日本地球惑星科学連合2024年大会, 幕張, 2024年5月
- [2] Wang, R., Amano, T. Investigating wave generation mechanisms driven by shock-reflected electrons at quasi-perpendicular shocks, 第156回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 立川, 2024年11月
- [3] 天野孝伸, 統計的衝撃波ドリフト加速による非熱的電子の加速, 高エネルギー宇宙物理学研究会, 仙台, 2024年10月

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

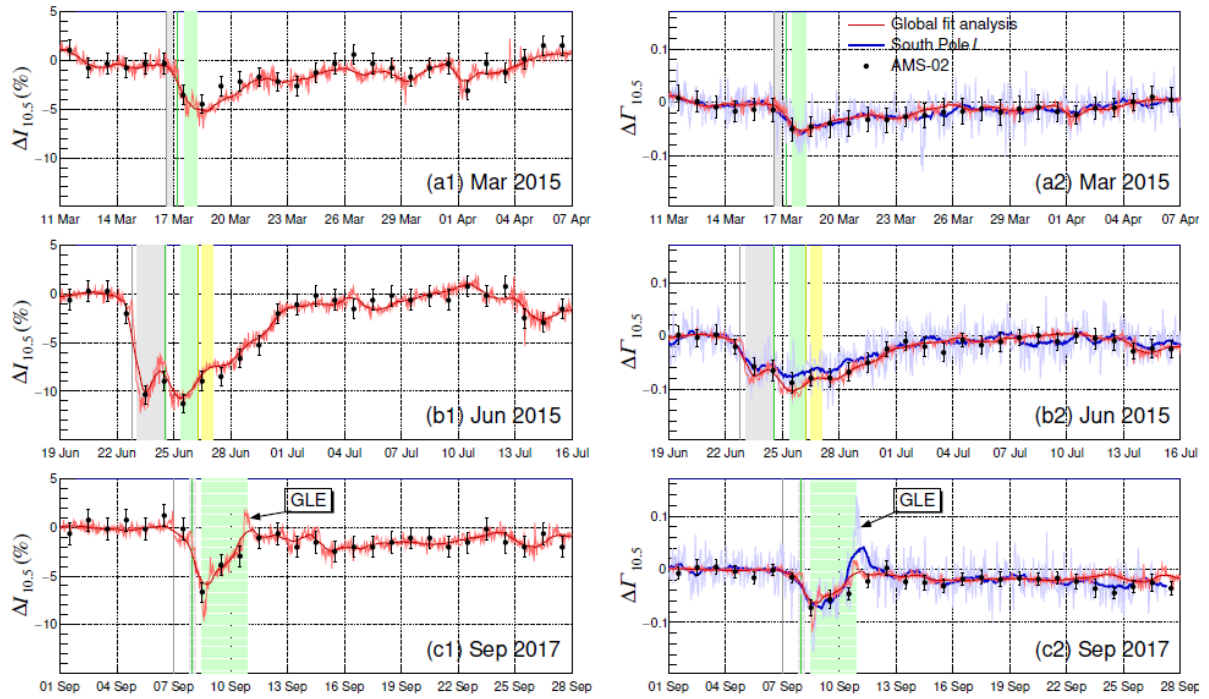
中性子計と地表ミュオン計のグローバル・ネットワークによる観測データを統合して解析し、大気圏外の宇宙空間における宇宙線強度変動とそのリジディティ依存性を導いた。

地磁気カットオフ・リジディティや標高の異なる地点に設置された中性子計は、平均リジディティが約10–35 GVの一次宇宙線を観測する。一方、地表ミュオン計は約50–100 GVの一次宇宙線を観測する。したがって、両者を統合して解析することにより宇宙線強度変動のリジディティ依存性をより広いリジディティ範囲にわたって調べることができる。

地上で観測される宇宙線強度変動は気圧変動の影響を受けるが、ミュオン計による観測データは気圧変動に加えて宇宙線計上空の気温変動の影響も被る。この気温効果の補正が困難であったため、ミュオン計による観測データは、中性子計データに比べて従来余り解析されていなかった。我々は、衛星観測による気温の鉛直分布 (GDAS) を用いた気温効果の補正法を開発し (Mendonça+, 2016)、それにより上記の統合解析が初めて可能となった。Munakata+ (2022)は、Global Fitting Analysis (GFA) と呼ばれるこの解析手法を2021年11月のForbush Decrease (FD)に適用し、Magnetic Flux Ropeの中で大振幅の2次異方性が卓越してMunakata+ (2022)いることを導くとともに、そのリジディティ依存性を明らかにした。これがGFAによる世界初の解析結果である。

本共同研究ではGFAを2012年1月と7月に観測されたFDに適用した。これらのFDは、連続して発生した太陽面爆発の影響で数週間という長期間にわたって観測された特異なイベントである。ただし、すべての太陽面爆発の兆候が地球周辺の衛星観測データ (OMNI data) に見られるわけではない。特に7月のイベントでは同期間のOMNI dataに兆候が見られないにも関わらず、宇宙線のFDだけが観測されている。このことからこのイベントは”Phantom FD”と呼ばれ、太陽面爆発で地球から離れた空間に引き起こされた擾乱に起因すると考えられていた (Thomas+, 2015)。我々はGFAによる解析結果から、”Phantom FD”では宇宙線強度変動のリジディティ・スペクトラムが大きく変動していることを明らかにし、遠方の衝撃波面と地球を繋ぐ磁力線上の磁場揺らぎが変化することによるものであることを示唆した (Munakata+, 2024)。

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がGFAで正しく導かれていることを確かめるため、AMS-02による観測データと同じリジディティでの比較を行った。その結果、FD中の強度変動の様子とそのリジディティ依存性が、ともにAMS-02による観測結果と極めて良い一致を示すことが判った。リジディティ依存性については、SOPO中性子計で観測されたLeader Fractionとも良い一致を示している (下図参照)。これらの結果は、地上観測の有効性を示す世界で初めての結果である (Mitthumsiri+, 2025, submitted to ApJL)。



Temporal variations of cosmic ray flux and spectral index (right) relative to a reference interval (first 3 days of each plot), based on two ground-based observing techniques, GFA (red) and South Pole L (blue) [hourly data: thin, light curves; 24-hour running averages: thick, dark curves] and, when available, space-based daily AMS-02 proton data (black). Each panel displays values for rigidity 10.5 GV during 27-day solar rotation periods including five FDs starting in (a) March 2015, (b) June 2015, (c) September 2017. FDs are associated with interplanetary shock arrival at Earth (vertical line) and/or passage of an ICME (shading of the same color). There is very good consistency between all measures of GCR flux and spectral variations. A GLE (solar energetic particle enhancements) in (c) September 2017 was observed by ground-based detectors but excluded from published AMS-02 data.

業績論文：

1. **K. Munakata** et al., “Global analysis of the extended cosmic-ray decreases observed with world-wide networks of neutron monitors and muon detectors; temporal variation of the rigidity spectrum and its implication”, *Astrophys. J.*, 974, 283, 2024 (October 20) (doi: 10.3847/1538-4357/ad7466).
2. Kittiya, **K. Munakata** et al., “Cosmic-Ray Flux Correlation between MCMU and JBGO Neutron Monitors”, *Astrophys. J.*, 975, 274, 2024 (November 10) (doi: 10.3847/1538-4357/ad8577).
3. M. Kozai, **K. Munakata** et al., Y “Cosmic ray north-south anisotropy: rigidity spectrum and solar cycle variations observed by ground-based muon detectors”, *Astrophys. J.*, 977, 160, 2024 (December 20) (doi: 10.3847/1538-4357/ad8577).

学会発表等：

1. **K. Munakata**, “Extended cosmic-ray decreases observed with global networks of neutron monitors and muon detectors in 2012”, COSPAR 2024 (Busan), D1.7, oral, July 20, 2024.
2. **K. Munakata** et al., “Global analysis of the cosmic-ray rigidity spectrum during extended Forbush decreases and its implication”, SGPSS 2024 (NIPR), R007-02, oral, November 25, 2024.
3. **K. Munakata** et al., “Global analysis of the cosmic-ray rigidity spectrum during extended Forbush decreases and its implication”, 15th Symposium on Polar Science (NIPR), OS09, oral, December 4, 2024.
4. **K. Munakata** et al., “Rigidity dependence of galactic cosmic ray modulation observed with the ground-based and space-borne detectors, JSPS spring (online), 19aW2-4, oral, March 19, 2025.

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】

本研究では、アラスカ・ポーカーフラッ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細構造「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目指す。

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程度と言われているが、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。

【研究方法】

本研究では、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。まず、画像データの各画素における、ある時間幅での時系列データに対して周波数分析を行い、発光輝度変動が同じ周波数成分をもつ空間領域をフリッカリングオーロラのパッチ一つとみなし、周波数と空間スケールのペアとする。この解析を、フリッカリングオーロラが観測されている時間帯の画像全体に対して適用する。空間スケールに関しては、フリッカリングオーロラを引き起こしている波動の波数と対応しているとみなして、周波数と空間スケールのペアから、分散関係を導出する。これにより、フリッカリングオーロラを引き起こしていると考えられる波動に対して成約を与える。

【研究結果と今後の方針】

フリッカリングオーロラがディスクリートオーロラ近傍に出現することから、SCMOSの視野内にディスクリートオーロラがみられる時間帯を調査し、その後、該当する時間帯にフリッカリングオーロラが観測されているかを調査した。その結果、2016年2月8日の観測において、ディスクリートオーロラが1時間程度にわたってSCMOSカメラの視野内に存在し、それに伴い、フリッカリングオーロラが長時間観測されているイベントを発見した。このイベントにおいて、ディスクリートオーロラは南北方向には狭く、東西方向にはSCMOSカメラの視野全域にわたりみられ、フリッカリングオーロラはこのディスクリートオーロラに沿って広く観測された。SCMOSカメラの視野は高度100kmにおいて200km四方であることから、このイベントにおいては、フリッカリングオーロラがディスクリートオーロラに沿って少なくとも200km程度の範囲に出現していたことになる。周波数分析の結果、2-10Hz程度の明滅周波数をもつフリッカリングオーロラがディスクリートオーロラに沿って広くみられ、低周波ほど空間スケールが大きいパッチサイズとなる傾向がみられた。ディスクリートオーロラの一部では、20Hz程度の明滅周波数をしめす部分も存在し、高周波成分は局在化している可能性を示唆している。また、オーロラアークを複数の領域に分割してその発光輝度のフーリエ変換を行い、周波数分析を行ったところ、5-10Hzの周波数で明滅するオーロラが、アークの様々な領域で同時に出現している様子が明らかになり、フリッカリングオーロラの原因となるプラズマ波動が、アークに沿って広く分布していることを示唆している。さらに、5-10Hz付近に輝度変動ピークをもつ場合に加えて、2-20Hzにわたる比較的広い周波数帯域で輝度変調を示す時間帯も確認された。これは、フリッカリングオーロラの中には、狭帯域の輝度変調を有し

ている場合と、広帯域の輝度変調を示すといった、周波数変調の複雑さを示唆する。輝度変調の周波数構造は、フリッカリングオーロラを励起させるプラズマ波動の周波数を反映していると、様々なモードが寄与していることが考えられる。

現在、2016年2月8日のイベントに加えて、sCMOSの視野内でオーロラアークが見られた複数日のデータ解析を進めている。その結果、フリッカリングオーロラが複数の日にちで観測されていることがわかってきており、統計的な解析が可能であると考えている。現状の解析から、オーロラアークの発光強度よりも、発光領域が移動して速度シアが発生するのに伴いフリッカリングオーロラが発生する傾向が見えてきている。

今後は、2016年2月8日のイベントに対してオーロラの発光高度を仮定し、パッチの大きさを定量的に導出することを目指す。パッチサイズを導出した後には、周波数の情報とあわせて分散関係を導出し、フリッカリングオーロラに寄与しているプラズマ波動のモード推定を目指す。この事例解析に加えて、他のフリッカリングオーロライベントを同定し、同様の解析を展開していく。

【成果報告】

- 栗田 怜、三好 由純、Long-lived and wide-spread flickering aurora、脈動オーロラ研究集会、名古屋大学、2025年1月23日

フーリエ変換型分光計を用いた地上分光観測によるメタン同位体導出手法の開発
Development of the retrieval of methane isotopes
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、O₃など多くの成分を解析してきたが、本研究ではメタン同位体の解析を行っている。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、‰単位の微小な絶対値を精度よく求めることは難しい。本研究でも昨年度は¹³CH₄の解析を試みたが、¹³CH₄の大気中での変動幅は1‰以下のため赤外分光では相対変動を求めるのも難しいと判断した。しかし、現在解析している¹²CH₃Dの場合は相対的な変動が%オーダーであり、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、本年度は¹²CH₃Dの解析を進めた。

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、¹²CH₃D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いる。当初は、過去の他の解析で用いられた波数領域などを参考にして解析を試行したが、いずれも吸収のピークが数%以下の吸収線しかなく、近くにある他の成分(干渉成分)の吸収線がうまくフィッティングできていないなどの影響もあって解析誤差が比較的大きく、3μm帯、8μm帯それぞれから導出した¹²CH₃Dを用いて別途解析している¹²CH₄との比からδDを求めてみると、その経年変化の傾向が異なるといった問題があった。その後、HITRANデータベースから吸収線強度のなるべく大きな吸収線を選び出し、実際のつくばでの観測スペクトルで干渉成分の影響などをチェックしながら解析波数領域の変更やフィッティングパラメータの変更などを行い、3μm帯と8μm帯での経年変化の傾向はほぼ一致するようになった。ただし、結局のところ数%以上吸収のある吸収線で解析に使えるものはなく、個々のスペクトルからの¹²CH₃Dの導出精度の向上はこれ以上は難しそうである。

導出した¹²CH₃Dと¹²CH₄それぞれの日平均値からδDを求めたものの時系列を図に示す。これを見ると近年の減少傾向が見えており、この傾向はサンプリングによる地上観測の結果と整合的である。ただし、個々のスペクトルからの¹²CH₃Dの導出精度からはこの経年変化が有意といえるかどうかは難しく、今後統計処理等を行って信頼性を調べる予定である。

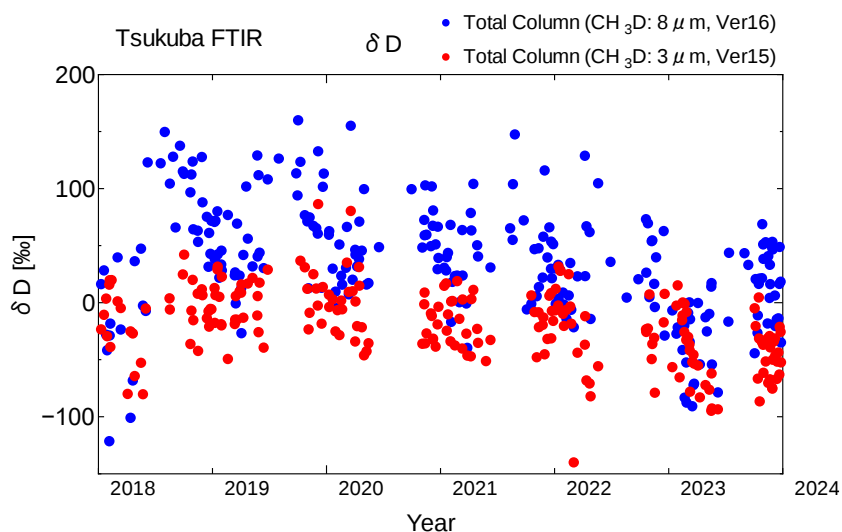


図. 3μm帯および8μm帯のCH₃Dの吸収線からそれぞれ導出したδDの経年変化

【成果発表】

村田 功、長浜 智生、森野 勇、中島 英彰、つくばFTIRで観測されたメタン同位体比の経年変化、日本地球惑星科学連合2024年大会，幕張，2024年5月．

Murata, I, T. Nagahama, I. Morino, H. Nakajima, Temporal variation of CH₃D observed with FTIR at Tsukuba, NDACC/IRWG-TCCON-COCCON Annual Meeting 2024, Boulder, U.S.A., July 8 - 12, 2024.

村田 功、長濱智生、森野 勇、中島 英彰、つくばFTIRで観測されたCH₃Dの経年変化、第7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，仙台，2024/9/10-11.

村田 功、長濱智生、森野 勇、中島英彰、つくばFTIRで観測されたCH₃Dの経年変化、第29回大気化学討論会、神戸、2024年10月9-11日．

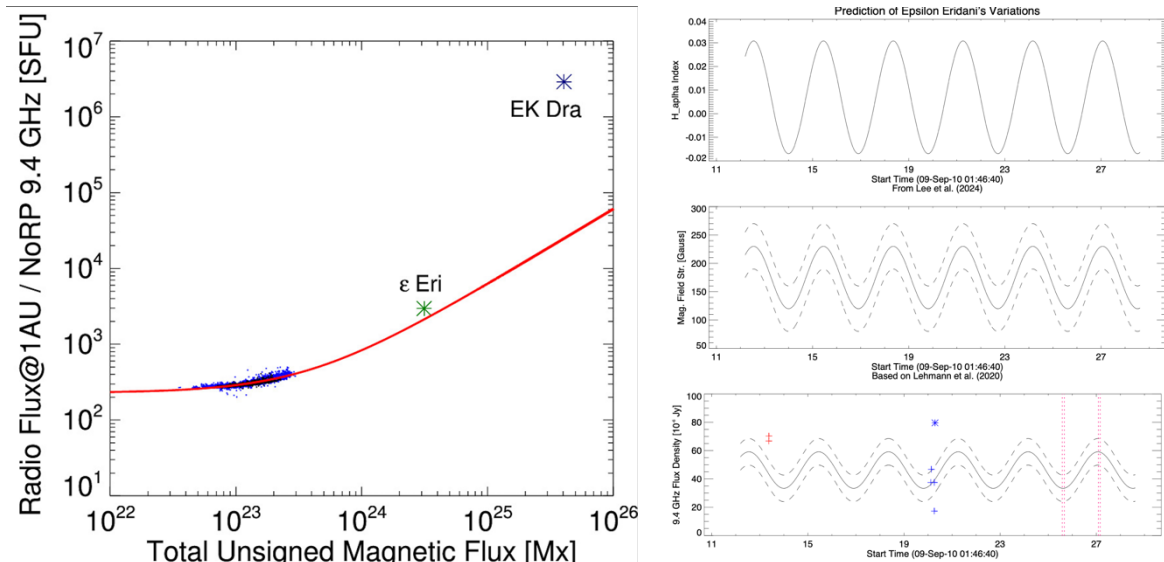
豊川・野辺山強度偏波計の観測データベースによる恒星磁気活動の研究
 Study of stellar magnetic activity based on the databases
 of Toyokawa and Nobeyama Radio Polarimeters

下条圭美、国立天文台・アルマプロジェクト

1951年に名古屋大学 豊川キャンパスで開始され、国立天文台 野辺山キャンパスで継続されている太陽マイクロ波強度・偏波観測は、2025年で74年目を迎えた。6太陽周期以上の強度・偏波データにより、太陽の長周期活動を捉え[1]、宇宙天気の状態を探る手掛かりにもなっている [2]。特に長期偏波データは唯一無二のデータである。一方JVLA・ALMAなどの大型電波干渉計により、恒星フレアで加速された非熱的電子からのマイクロ波だけでなく、静穏時の熱的プラズマからの恒星マイクロ波が検出されはじめています[3]。そのデータの解釈には、太陽マイクロ波観測で得られた知見を応用する必要があります。

本研究では、2023年に出版した、豊川・野辺山強度偏波計の長期観測データを整備・調査結果[4]を基に、長期間の太陽マイクロ波強度・偏波データと太陽全面の磁束・紫外線強度・X線強度など各種太陽指標との関係を明らかにした[5]。この関係を、マイクロ波帯での熱的放射が唯一検出・確認されている星 ϵ Eri[3]に応用したところ、図1のように太陽で明らかにした全磁束密度と電波強度の関係と同じ傾向を見ることができた。ただし、この図では星の活動周期が考慮されていないため、 $H\alpha$ 線の強度で明らかになった活動周期[6]、Zeeman broadeningで平均磁場を長期に測定したデータ[7]と我々が明らかにした全磁束密度と電波強度の関係を使って推定される電波強度と、実際のJVLAによる観測を比べた(図2)。これによれば、フレア時以外は推定が正しそうであることがわかった。さらに推定の確度を上げるため、 ϵ Eriの次の極小期・極大期をJVLAでの観測を提案し、極小期である2025年8月に観測時間を得ることに成功した[8]。

今後は、JVLAで得られたデータを基に推定精度を上げるとともに、 ϵ Eri以外の星でマイクロ波帯での熱的放射のサーベイを行い、恒星のタイプによる太陽から導き出される関係からのズレを調べ、恒星大気・磁気活動の理解に繋げていきたいと考えている。



左：図1 9.4GHzの電波強度と全磁束量の関係。青が太陽データ、赤線が太陽データからの推定。緑のアスタリスクが ϵ Eri (熱的電波放射)、青のアスタリスクがEK Dra(非熱的電波放射)

右：図2 上段 $H\alpha$ 線の強度で明らかになった活動周期、中段 Zeeman broadeningの測定と上段の活動周期から推定した平均磁場の長期変動、下段 中段のデータを基に推定した ϵ Eriの電波放射強度。+はJVLAによる観測。*はフレア時の観測。ピンクの波線は次回の極小・極大期を示す。

Reference [1] Shimojo et al. (2017) ApJ 848, 62 [2] Cliver et al. (2020) ApJ 903, 41 [3] Suresh et al. (2020) ApJ 904, 138 [4] Shimojo and Iwai (2023) GJ 10, 114 [5] Shimojo et al. (2024) ApJ 965, 170 [6] Lee et al. (2024) PASJ 76, 27 [7] Lehmann et al. (2015) A.N. 336, 25 [8] <https://library.nrao.edu/proposals/catalog/21814>

(別紙様式 4 - 2)

外洋域における海上波しぶき光学粒子計を用いた渦相関法による海塩粒子放出量の直接評価

Direct evaluation of sea salt particle flux by eddy covariance
using sea-spray spectrometer probe over the open ocean

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、これまで試験観測を行ってきた沿岸域から外洋域での実観測へと展開するため南極観測船「しらせ」に乗船、航行する船舶上において洋上大気乱流による濃度変動を10Hzの時間分解能で計測、渦相関法により海面から放出される海塩粒子の放出量を直接評価することを目的とした第66次南極地域観測航海における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を用いて観測を実施した。設置した観測システムは波しぶき計の他に、超音波風速温度計、オープンパス型CO₂/H₂Oガス分析計、船体動揺計測装置からなる（図1）。これらから大気乱流により生じる3次元風速、音仮温度、粒子数密度、CO₂とH₂O密度の変動に加えて、3次元加速度と角速度を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、第1甲板の左舷と右舷にそれぞれハンドレールを利用して設置した。波しぶき計の大気試料の吸引口として漏斗を用い、長さ18cm・内径5mmのユニ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、本体内蔵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 しらせの第1甲板船首側に設置した乱流フラックス観測システム

研究結果

図2は第66次南極地域観測のレグ1航海期間中における、波しぶき計によって計測された1~3 μm の粒径区分における粒子数密度の30分平均の観測結果を示す。12月9日の豪州フリーマントル出港後から12月28日の昭和基地着岸まで、南極観測船「しらせ」が南下するにつれて粒子数密度が減少、一方で2月9日の昭和基地離岸から2月21日のフリーマントル沖までの北上中は粒子数が増加する傾向がみられた。この南下による減少と北上による増加の傾向は、しらせが陸域から遠ざかって、徐々に清浄となっていく空気試料中の粒子数密度を計測したことによるものであると考えられる。また、昭和基地着岸から離岸までの期間は降雪による粒子数密度の増加がみられるものの、昭和基地滞在中の粒子数密度は概ね一定であった。左舷と右舷に設置した波しぶき計は3ヵ月の長期にわたって連続稼働したが、両舷での粒子数密度の計測数は絶対値と変動値ともに同様の傾向であることから、図に示す1~3 μm の粒径を含め全粒径区分において波しぶき計の計測感度は変わらなかったと考えられる。

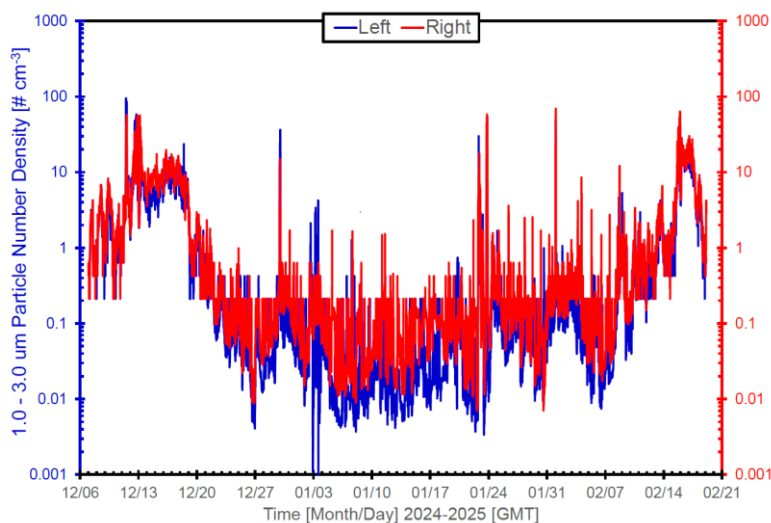


図2 左舷（青）と右舷（赤）に設置した波しぶき計による1~3 μm の粒径区分における粒子数密度の計測数の時系列変動

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、航行する船舶を利用して外洋域における海塩粒子の放出量を渦相関法により直接評価するための観測を南極観測船「しらせ」の船上で実施した。第66次南極地域観測のレグ1航海期間中は、南緯40度から60度にかけて暴風圏と呼ばれる海域を航行したが、往路と復路ともに海面から海塩粒子が生成されるような波しぶきがみられる荒天にまでは至らなかった。続くレグ2では、往路の暴風圏と、強く冷たい滑降風であるカタバティック風が吹き抜けるトッテン氷河沖において、荒天により海塩粒子が海面から生成されるような波しぶきが頻繁にみられるとの報告を受けている。レグ1では、運動量と熱の海面フラックスは渦相関法により直接評価できていることが確認しており、しらせが日本を帰国する次年度において観測データを回収した後に解析に着手し、渦相関法による海塩粒子も含めた海面フラックスの直接観測結果を報告する予定である。

成果発表

- Fumiyoshi KONDO, Toshio FUJITA, Hidenori AIKI: Direct Measurements of Sea-Spray Particle Fluxes using High Temporal Resolution Optical Particle Counter over the Coastal Ocean, Coastal Engineering Journal, Vol. 66(3), pp. 467-478, <https://doi.org/10.1080/21664250.2024.2359160>, 2024

高校生とともに行う都市大気中CO₂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 CO₂ Concentration

河野 光彦、関西学院大学・理学部

【序】

地球温暖化の主要な原因である二酸化炭素 (CO₂) の排出源を特定し、その排出量と空間的な広がり を正確に把握することは、CO₂の動態解析や高精度な気候シミュレーションを行う上で極めて重要である。しかし従来の観測手法では、コストや可搬性の問題で詳細な空間分布や時間変動を捉えることが困難であった。本研究では、これらの課題を克服するため、小型で可搬性に優れたCO₂カラム混合比観測装置を開発している。

今年度は、日中のCO₂傾斜カラム平均混合比（簡単にするため以後はCO₂濃度と呼ぶことにする）について、大阪府箕面市（関西学院千里国際キャンパス：SOIS）における継続観測と、大阪国際空港（伊丹空港：ITM）周辺の4か所における3回の同様の観測を実施した。さらに南半球（豪州首都キャンベラ：ANU）における2日間の短期観測も行った。本報告では、これらの観測結果を通じて、この観測手法の有効性を検証した。さらに、航空機の影響、都市部の生活環境、地形、気象条件などがCO₂濃度の時間変動や季節変動に与える影響について考察を試みた。

【方法】

詳しい観測方法については昨年度の報告書にあるので、ここではITM周辺での観測方法について述べる。ITMの滑走路は南東から北西に伸びている。観測地点は4地点であり、滑走路の南西（SW）と北東（NE）に位置する滑走路から約1km離れた2地点、および着陸方向の滑走路端から約0.5kmの南東（SE）地点と、離陸方向の滑走路端から約0.5kmの北西（NW）地点である。

観測は、秋季（9月7,16,23,28日）、冬季（12月1,7,15,22日）、春季（3月19,20,21,22日）の各季節において1地点ずつ実施した。各日の観測は、日中の6時間以上（午前9時頃～午後4時頃）にわたってデータを取得した。また、気温・気圧などの気象データも同時に取得した。

すべての期間において、SOISでも同様の観測を継続的に行いその観測データとの比較により、ITM周辺におけるCO₂濃度の特徴を分析した。一方、ANUでの観測については、可搬性である特徴を生かして Australian National University に装置を持ち込み、Research School of Physics の建物屋上で8月6～7日（現地の冬季）に実施した。

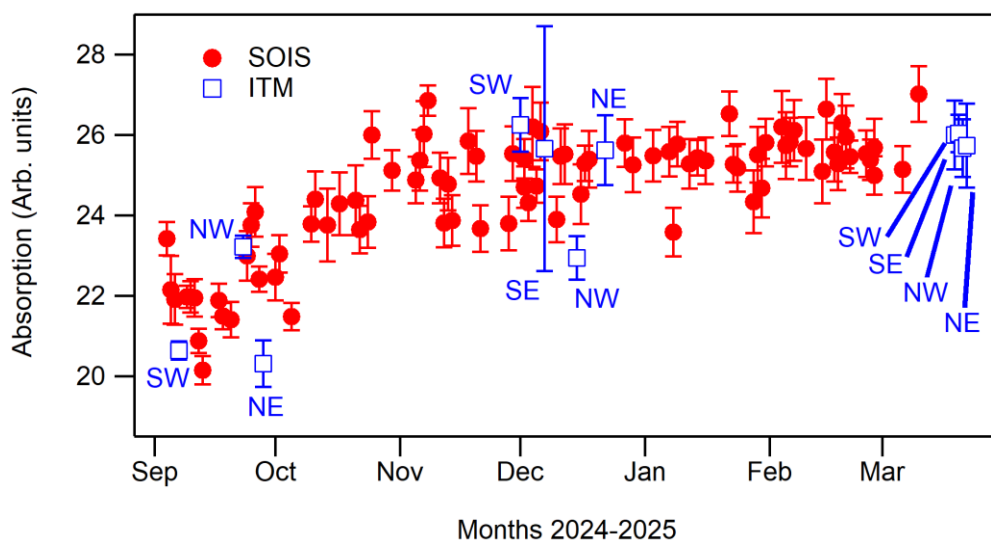


図 1 . ITM 周辺および SOIS における CO₂濃度（任意単位）

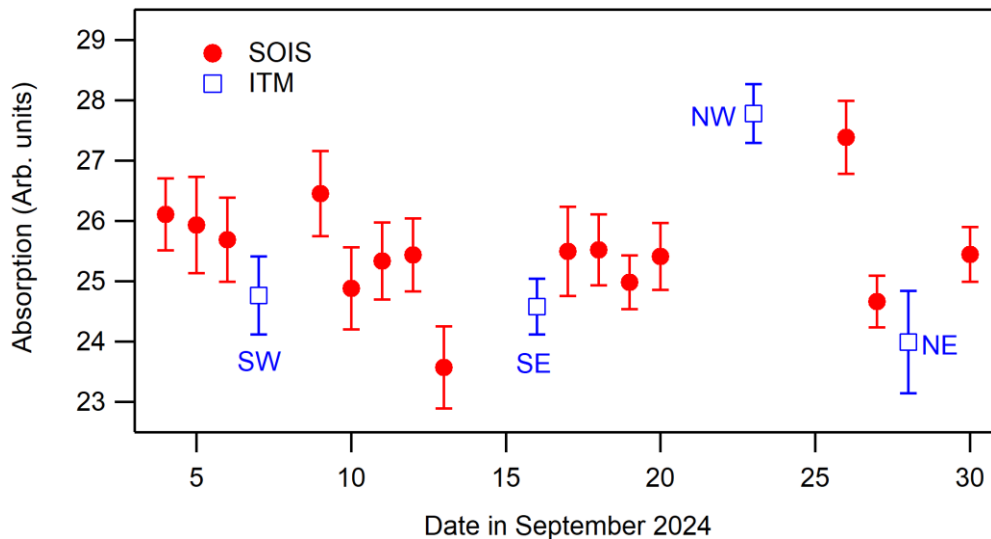


図 2 . 9 月の ITM 周辺および SOIS における CO₂ 濃度 (任意単位)

【結果】

冬季におけるANUのCO₂濃度は同時期(夏季)のSOISのそれに比べて10%程度低いことがわかった。季節の違いにより、年平均のCO₂濃度はANUのほうが明確に低くなっていると予想できる。また、相対的な計測値については問題なく分析できたことにより、この観測手法の有効性と信頼性を検証できたと結論付けられる。

ANU以外での観測データを図1に示す。太陽高度が31.0～31.5°である時の平均値を示し、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、ITM滑走路からみた観測地点の方位を表している。

図2は9月における観測データで、太陽高度が51.9～52.6°である時の平均値を示している。秋季において、SOISで観測したCO₂濃度よりもITMでの観測値のほうがNWの値を除いて低いことがわかる。その一方で、飛行機が離陸する方向はNWであり、その事実を考えると飛行機からのCO₂排出が原因でNWの値が高くなっているとも考えられる。別の見方として、飛行機からのCO₂排出とは関係なく、9月23日前後がなんらか他の原因でITMおよびSOISでともにCO₂濃度が高くなってしまっていた時期であったのかもしれない。

ところが、冬季と春季での観測では、上記の観測のような顕著な濃度の傾向はみられなかった。冬季のNWでは、むしろSOISでのCO₂濃度のほうがITMのそれより高いぐらいであったし、春季のITM周辺の観測地点によるCO₂濃度の違いもあまりみられなかった。冬季から春季にかけての観測結果は全体的にCO₂濃度が高いのは、光合成の寄与が小さくなったことによると考えられる。

【考察と展望】

ANU周辺は、湖と山など自然環境に恵まれており、工場や住宅もなくCO₂排出源が幹線道路を通る車両の排気ガスなどに限られている。さらに、植物園や森林が近くにあり日射量も多いので、冬季であっても光合成が活発であると考えられる。そのため、年平均のCO₂濃度はANUのほうが明確に低いことが推論できる。しかし、それを検証するためには、年間を通じた観測は必要になるだろう。

SOIS周辺では光合成によるCO₂吸収がもともと秋季においても少なかったことにより、その影響がほとんど出なかったのではないかと考えられる。ITM周辺はSOIS周辺に比べ比較的自然が残されている一方で、SOIS周辺は住宅開発によって比較的住宅が密集している。そのうえ、ITM周辺は平地が広いのに対して、SOIS周辺は山が接近していることも影響しているのかもしれない。ITM周辺の秋季では比較的光合成が活発であり、CO₂吸収されることによって全体のCO₂濃度が抑えられていると考えられる。それによって、飛行機からのCO₂排出が顕著に見えたのではないかと推論できる。これに対し冬季から春季にかけては、光合成によるCO₂吸収が弱まったことによる、全体的なCO₂濃度の押し上げがあったと考えられる。このことによって、飛行機からのCO₂排出が見えにくくなったと考察できる。

本研究の最終年度となる2025年度は、上記の推論を検証するための詳細な観測が必要となる。特に、1年を通じた継続観測を完了させて、光合成の活発さと航空機の影響について明確にさせる予定である。

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}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）

日本各地の大起伏山地には、地質時代・歴史時代に発生した大規模斜面崩壊（以下、崩壊）の痕跡が存在する。それらの崩壊がどのような発達過程を経てきたのか、編年を含めて、その全容は十分に解明されていない。大起伏山地における低頻度・突発的・大規模な土砂移動現象の復元は第四紀地形学・地質学のみならず、山地土砂災害の減・防災に関連して砂防学にも、また強震動や極端気象に関連して古地震学や古気候学にも資する重要な課題である。2023年度から開始した本研究の主目的は、大起伏山地における崩壊発達史の精密な復元と、それに必要な高精度年代資料の獲得である。2023年度はAD1707宝永地震に関連深いとされる安倍川源流の大谷崩（静岡県）を対象として ^{14}C 年代測定用試料の採取と年代測定を行い、この著名な大規模崩壊が通説とは異なり複数回の地形変化で生じたことや、発生年代が必ずしもAD1707に収れんしないことを示す重要な知見を得た（荻谷ほか2023）。

2024年度は大谷崩での試料探索を続ける一方、赤石山脈南半の静岡県北部～長野県南部地域の大規模崩壊地でも試料採取を行い、崩壊と誘因の関係を探ることをめざした。特に、この地域で記録の残る歴史地震（例：AD715遠江地震）や歴史豪雨との関連性について探求することとした。

本研究では、試料調整室で物理的・化学的前処理を行い、グラフィイト・ターゲットを準備した。そして加速器質量分析装置を用いて、 ^{14}C 年代測定を実施する計画とした。

(2) 研究結果・考察・まとめ

2024年3月、安倍川源流地域において、安倍川本流の河床上昇を原因として支流タチ沢に形成された堰き止め湖沼堆積物（荻谷ほか2023）の地質調査と試料採取を行った。本流の河床上昇は、大谷崩を供給源とする多量の岩屑供給に惹起されたものである。試料は露頭と簡易ボーリングコアの双方から、微細木片や葉片、樹皮など合計29点得た（写真1）。

同年11月には天竜川支流の長野県飯田市遠山川において、堰き止め湖沼堆積物の地質調査と試料採取を行った。試料は露頭から、微細木片や葉片など6点を得た（写真2）。また2025年2月には赤石山脈の東に存在する山梨県身延町の手守山地において、崩壊堆積物に含まれる木片2点を採取した。以上の試料の前処理は完了している。加速器質量分析装置が調整中であるため、年代測定は保留している。

現在のところ新規の年代値は得られていないが、昨年度までの成果もふまえると、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ことが明らかになりつつある（荻谷ほか2024）。また遠山川では、本研究に先行して成された別の研究により、AD715とは異なる2つの時期（13・14世紀）に大規模崩壊が発生したことを示唆する年代値が得られた（山田ほか2024）。今後、このことを裏付ける、もしくは新たな崩壊イベントを示す年代値が本研究によって得られる見込みが立ってきた。

(3) 引用文献

荻谷愛彦・木村恵樹・山田隆二（2023）：大谷崩（斜面崩壊）はCE1707に突発したシングル・イベントか？ 2023年度日本地理学会春季学術大会，発表要旨集，https://doi.org/10.14866/ajg.2023s.0_213
荻谷愛彦・中西利典・木村恵樹・山田隆二・木村 誇・村松 武・青島 晃・北川浩之（2024）：堰き止め湖沼堆積物の ^{14}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 誇（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

荻谷愛彦・中西利典・木村恵樹・山田隆二・木村 誇・村松 武・青島 晃・北川浩之（2024）：堰き止め湖沼堆積物の ^{14}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．



写真 1 安倍川上流タチ沢における試料採取状況



写真 2 遠山川に存在する三角州性の堰き止め湖沼堆積物

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。札幌圏の石狩平野では、冬季の季節風に伴って筋状対流雲が流入し、それらにより降雪がもたらされる。同地域においてShirooka and Uyeda(1990)は、地上観測や写真撮影から、スノーバーストによる数十分での急激な気温低下を報告した。一方、馬場ら(2016他)は、筋状対流雲付近での地上気温低下のみならず、気圧上昇を伴うことを明らかにし、一定周期のもと減衰することを示した。気圧変化による健康影響としてSato et al.(2019)などにより、内耳の不安定化が自律神経を刺激することを指摘しているが、総観規模擾乱を想定した実験である。そこで本研究では、大気による共振共鳴が内耳に影響を調査する。

【研究方法】

対象地域の札幌圏の小学校と札幌管区気象台にデータロガーを設置し、気温と気圧、湿度(一部)を5分毎に計測した。2024年度は4月上旬迄観測する予定であるため、今回の報告は昨年度の観測地点データ(図1)を用いる。また、地上データとして、札幌土木センターとAMeDASの気象データも利用した。さらに、気象庁気象レーダーと気象衛星画像も使用した。これらからスノーバーストが生じているか否かを判断した。これをもとに気象モデルのCReSSを用いてシミュレーション解析を行った。計算領域は138~142E, 42.5~46.4Nであり、624×880×66格子、およそ格子間隔500mとした。2024年2月21日12UTC(21JST)を初期値として、24時間積分を行った。概ねほぼ同時刻に日本海から筋状対流雲が繰り返し流入していることが再現されたため、この結果を基にメカニズムの理解を行う。

一方、小学校の養護教員に子供の体調に関するアンケートを依頼した。アンケートは個人情報特定されないように、頭痛やめまい、倦怠感、イライラ、鬱など、内耳が影響されたと考えられる発症者の人数を午前と午後に分けて記載する形式にした。これらの情報を基に両者の関係性について言及を行う。

【結果と考察】

40校中10校の小学校養護教員からアンケート回答を得た。データとしては疎であるが、これらから、

Ishikari

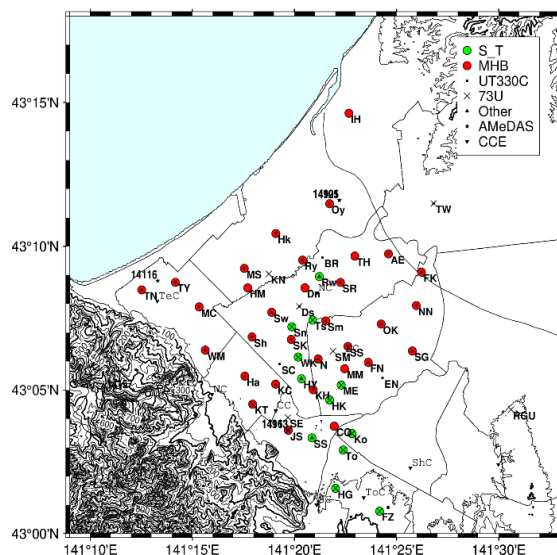


図1 2022-23年の観測網。S_TBからOtherまでは観測機器の設置箇所、AMeDASは気象庁、およびCCEは札幌市土木センターの気象観測地点を表す。

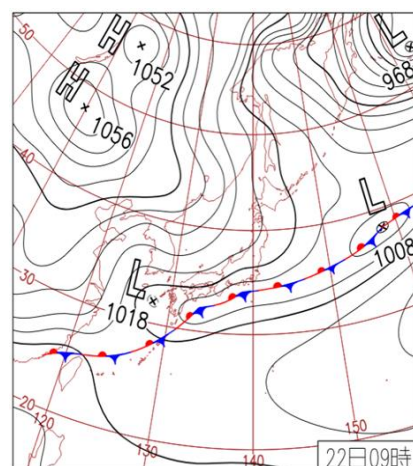


図2 2024年2月22日9時(JST)の天気図(気象庁)

比較的多くの小学校で不調者数が現れた2月22日について調査を行った。この日の北海道付近は西高東低の気圧配置のもとで等圧線が南北に密になり（図2），寒気移流が南下しやすい状況であった。同10時（JST）の気象庁気象レーダー（図3）からも石狩湾から当該地域に筋状対流雲が流入していることが分かる。ところどころに降水強度の大きい個所が散在しており，筋状対流雲が相当していることが推測できる。図4には屯田北小学校（Dn）の9時（JST）から14時の気温と気圧の時系列変化を示す。11時以降において気圧は低下傾向であり，その中で0.1～0.3hPa程度の範囲で10～20分程度の周期変化がみられる。一方，21日21時（JST）を初期値としたCReSSのシミュレーション結果をもとにした125m（z=2）での気温，気圧，風，および地上霰積算量の5分間変化量を図5に示す。空間的に気温の低下（上昇）領域と気圧の上昇（低下）領域，および，霰積算量が少しずれて存在している。地上観測を行っていない風と霰積算量を除けば，概ね観測と同様の結果が得られた。昨年までに報告したように降水物質の混合比が上層から下層へ移動し，地上付近では気温低下と気圧上昇が生じている様子が解析された。これらは，降水物質が下降する際に，周囲の熱を奪い蒸発し，周囲の気温を低下させながら地上に達し，かつ，その冷やされた空気塊が下降流となり気圧を上昇させていることが推測できる。Shirooka and Uyeda (1990)の地上で気温を降下させたスノーバースト，およびYamada et al.(2004)のRwタイプと解釈することが出来る。これが気圧変動を引き起こした一つであることが推測され，この変化により症例数が増えた可能性がある。

今後も引き続き症例データを蓄積し，これらと気象変化との関係を調査する。特に，国交省Xバンドレーダーを用いて，霰の挙動を観測し，下降流の規模と広がりについて着目したい。

【引用文献】

- ・馬場 賢治，冬季石狩平野における筋状雲性降雪が齎す地上気温と気圧の短時間変動，日本生気象学会，55(3) 39-39，2018年10月。
- ・馬場賢治，伊藤花好，上田博，2016：冬季石狩平野における筋状雲による降雪がもたらす地上気温と気圧の変化について，日本気象学会大会講演予稿集，(110)，194。
- ・Baba, K., 2018: Temporary Variation of Surface Air Temperature and Atmospheric Pressure Under Convective Clouds in Winter Monsoon, Asia Oceania Geosciences Society, 15.
- ・Sato, J., Inagaki, H., Kusui, M., Yokosuka, M., and T. Ushida, 2019: Lowering barometric pressure induces neuronal activation in the superior vestibular nucleus in mice. PloS one, 14(1), e0211297.
- ・Shirooka, R., and H. Uyeda, 1990: Morphological structure of snowburst in the winter monsoon surges. J. Meteor. Soc. Japan, 68, 677-686.
- ・Yamada, H., H. Uyeda, K. Kikuchi, M. Maki, and K. Iwanami, 2004: Dual-Doppler radar observations on factors causing differences in the structure of snow clouds during winter monsoon surges. J. Meteor. Soc. Japan, 82, 179-206.

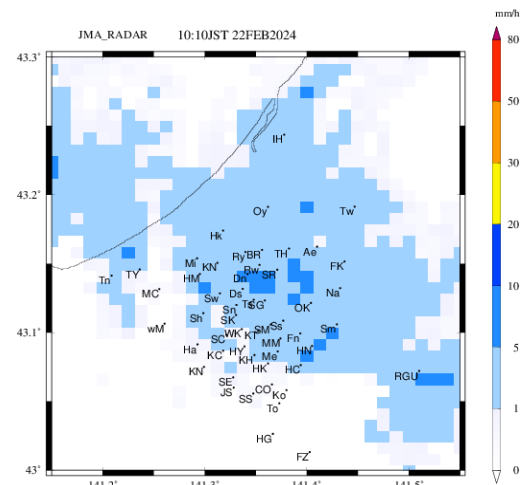


図3 2024年2月22日10時（JST）のレーダー画像。カラーは降水強度（mm/h）を表す。

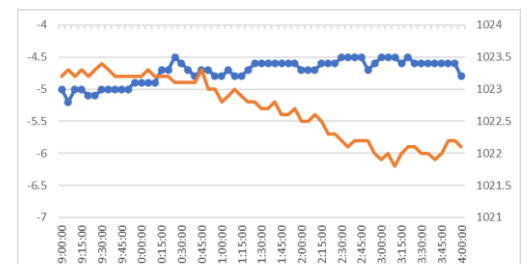


図4 2024年2月22日（JST）の屯田北小学校の気温（青：°C）と気圧（橙：hPa）の時系列。

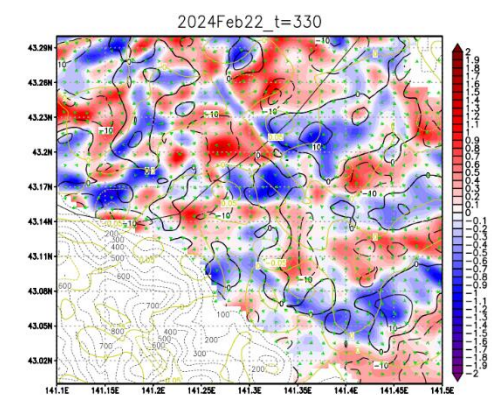


図5 2024年2月21日21時（UTC）初期値とした125mのt=330の気温（カラー），気圧（太線），風（ベクトル）および地上霰積算値（黄色）の5分間変化。

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

坂下卓也（気象衛星センターデータ処理部解析課）

気象衛星センターが運用する基本雲プロダクト（FCP）は、静止気象衛星「ひまわり」に搭載されたイメージャ（AHI）の観測値と数値予報データ等から推定した雲の有無（雲マスク）や雲物理量（雲頂高度など）を含み、高分解能雲情報や海面水温など、気象庁が作成する様々な衛星プロダクトで利用されている。しかしながら、FCP の雲マスクは、特定の雲判定テストに依拠し、また、衛星観測以外の入力データの精度に依存するといった課題がある。これらの課題に対し、雲マスクの精度やデータの独立性を高めることを目的として、機械学習を利用した、可能な限り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。

昨年度まで行った主成分分析や CLAUDIA3 (Ishida et al., 2018) から教師データを抽出して学習したモデルと FCP からそれぞれ推定された雲マスクを、Aqua/MODIS を利用した雲マスク（MYD35_L2）と比較して一致率を検証した結果では、陸上では FCP のプロダクトよりも一致率が高い一方で、海上では低いことを示した。また、機械学習のアルゴリズムを検討することで、一致率を向上できることを示した。

本年度の開発計画では、プロダクトのプロトタイプ作成まで開発を進める予定であったが、プロダクトの作成までは至らなかった。今年度の進捗を以下に示す。

本年度に行った開発は、基本雲プロダクトの雲マスクを教師ラベルとして機械学習を行うことで、基本雲プロダクトとの一致率が MYD35_L2 に比べて向上するかを評価した。ここでは、機械学習の手法として、ランダムフォレスト（RF）、ニューラルネットワーク（NN）を採用した。また 2023 年の各月 1 日、それぞれの 03、09、15、21UTC のひまわりデータの全 16 バンドを用いて学習し、判別結果は -1（晴れらしさ）から 1（曇りらしさ）の値で出力するようにモデルを作成した。

まず各学習モデルの判別結果と FCP 雲マスクの一致率の検証を行った。最も一致率の低かった 15UTC の結果においても、RF のモデルでは通年で約 90% 程度の一致率を示しており、FCP 雲マスクに近いモデルができた。また、RF の方が NN よりも高い一致率を示したものの NN においても、各時間帯で 80% 以上の一致率が得られた。

次に学習モデルの判別結果と MYD35_L2 との比較検証を行った。図 1 は各学習モデル、FCP 雲マスクと MYD35_L2 の各月の一致率を示したものである。陸上日中の結果を見てみると、6 月以外の月において、RF モデルが FCP 雲マスクよりも高い一致率を示しており、この条件においては汎化したモデルができたといえる。一方で、海上日中においては、FCP 雲マスクが各学習モデルよりも高い一致率を示した。夜間については、RF と FCP 雲マスクは同程度の一致率を示していた。

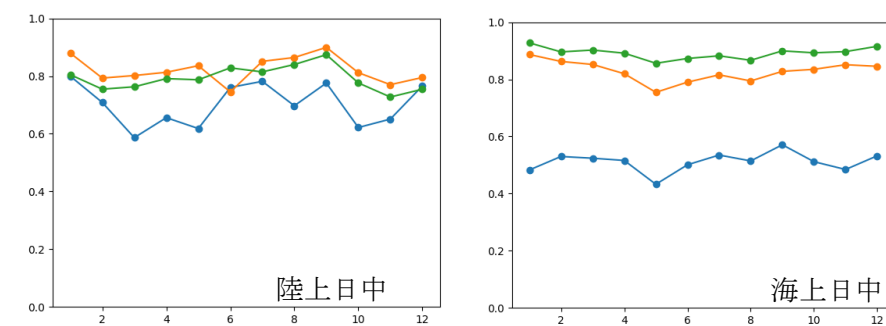


図 1. 2022 年各月における各モデルと MYD35_L2 との一致率の比較

横軸：各月、縦軸：MYD35_L2 との一致率。緑：FCP 雲マスク、橙：RF、青：NN。

上記検証では、出力値の中央である 0 を閾値にして、それ以下を晴れ、それ以上を曇りとラベル付けして MYD35_L2 のラベルとの一致率を比較していたが、その閾値を調整してラベル付けおよび一致率の計算をすることで、最適な閾値を検証した。図 2 ではその結果を示す。陸上日中（左図）では RF では閾値-0.7 から 0.3 までは FCP 雲マスクの一致率を上回っており、-0.3 で一致率の最大 82.8% であった。また、海上日中（右図）では閾値を-0.6 に設定することで、FCP 雲マスクの一致率 87.6% に対し、RF の一致率 87.3% まで近づけることができた。また、夜間についても地表面の種類ごとに同様の傾向を示した。

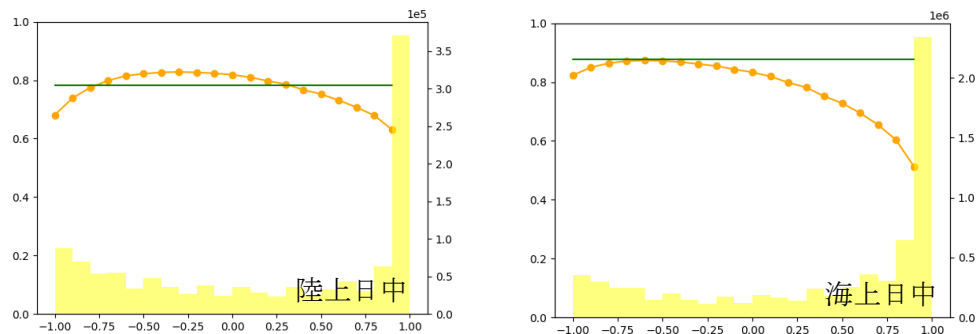


図 2. 閾値を調整した一致率の検証。横軸：調整後の閾値、縦軸左：MYD35_L2 との一致率（緑：FCP 雲マスク、橙：RF）、縦軸右：値に属するデータ数（黄ヒストグラム）。

図 3 では、2023 年 3 月 1 日 03UTC のひまわり観測領域の判別結果を示す。学習モデルの傾向としては、RF は曇りを多く、NN は晴れを多く判定する傾向にある。また、緑枠のベンガル湾海上に着目すると、赤外バンドでは晴れているように見えるが、FCP や RF では曇りと判定してしまっている一方で、NN は正しく判別できている。このように、FCP が誤判別している領域も RF は模倣してしまっている可能性があるため、今後は目視での検証も行う必要があると考えられる。

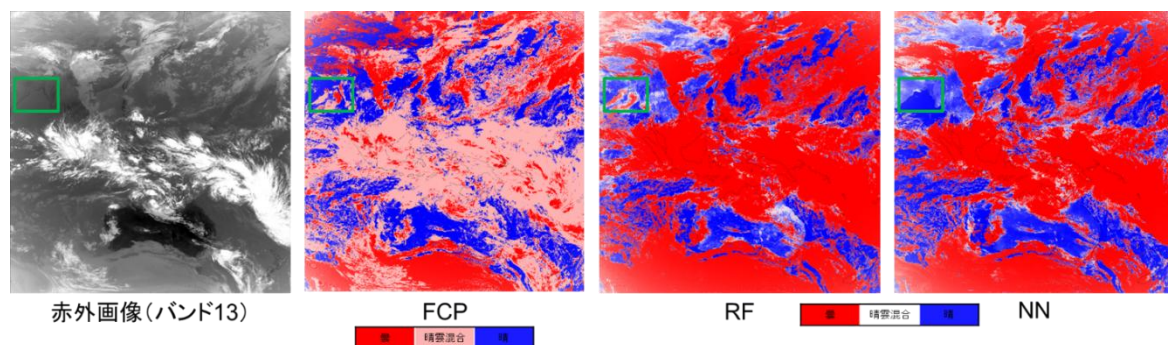


図 3. ひまわりバンド 13 (10.4 μ m) 輝度温度画像と各モデルの判別結果との比較

最後に、海上の一致率を向上させることを目的として、説明変数に海面水温を追加して学習を行った。この学習についても上述と同様に閾値調整を行い一致率の検証を行った結果、NN の一致率が上昇し、RF と同程度の一致率を示したほか、海上夜間の領域について、RF の一致率は 87.6%（閾値-0.5）と、FCP 雲マスクの一致率 87.4% を上回る結果が得られた。

今後は教師データである FCP を目視で確認し、誤判別と考えられるデータのラベルを修正して再学習することでさらなる精度向上を目指す。また NN のモデルを改良して検証することを計画している。

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

成果発表： 半田太郎、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会、名古屋大学、2025 年 3 月

稠密地磁気観測ネットワークによる宇宙プラズマ環境マップの作成
Dense geomagnetic observation network for creating space plasma environment map

能勢正仁、名古屋市立大学・データサイエンス学部

研究目的

宇宙防災上、プラズマの質量密度は特に重要な物理量である。プラズマは宇宙空間の背景媒質であり、その質量密度は宇宙で生起する現象にすべて関わってくるためである。宇宙の一点に留まってプラズマ密度を計測し続けることは不可能であるが、宇宙空間には地球の持つ磁場(地磁気)が張り出しているため、地表で地磁気を計測することでプラズマ密度の継続的な推定が可能となる。地磁気観測を多点で稠密に行えば、宇宙空間の広い範囲におけるプラズマ密度を高い空間分解能で可視化できる。この研究では、廉価な地磁気観測装置を用いて、関東から東北・北海道に亘る地域に、世界的にも類を見ない稠密地磁気観測ネットワークを構築し、そこからのリアルタイムデータを解析して、「宇宙プラズマ環境マップ」をオンラインで配信するシステムの開発に挑戦する。

研究方法

現在までに、名古屋大学宇宙地球環境研究所・国土交通省国土地理院・気象庁地磁気観測所の協力の元、図1に示したような稠密地磁気観測ネットワークを構築してきた。協力機関では、橙色で示した9か所の観測所において、フラックスゲート磁力計による地磁気の連続観測を行っている。そこで、これらの観測所の間を埋めるように、磁気インピーダンス(Magneto-impedance, MI)センサーを利用した廉価な地磁気観測装置を4台、赤色で示した観測所(苫小牧・むつ・白神・川渡)に設置した。これら合計13か所の観測ネットワークは、観測所間緯度間隔が平均して約0.8°であり、これまでに実現されたことがない稠密なものである。

各観測点において得られた地磁気1秒データを解析し、周期が数10秒から200秒程度の地磁気振動が同時観測されている事例を選び出す。こうした地磁気振動は、その観測所を通る地球の磁力線に定在波が生じたためと解釈されており、その定在波の周波数から、磁力線に沿ったプラズマ質量密度を計算できる。計算結果を元に、非常に高い空間分解能で、内部磁気圏(プラズマ圏およびプラズマ圏界面付近)におけるプラズマの質量密度の微細構造を可視化した「宇宙プラズマ環境マップ」を作成する。



図1: 現在までに構築した稠密磁場観測ネットワークの観測点分布

研究結果・考察・まとめ

図2は、2022年11月28日22:00-22:30 UTに稠密磁場観測ネットワークで観測された地磁気変動の一例である。左上から右下にかけて観測所の地磁気緯度の降順で並んでいる。ただし、むつ観測所と苫小牧観測所においては、この時にはまだ観測が始まっていなかったため、掲載していない。MIM-Piのデータ(川渡観測所、白神観測所)については、生データに対して100 mHz以下を通過させるローパスフィルタをかけ、その後1秒ごとの移動平均をとったものを用いている。鹿野山測地観測所を除く10観測所のX成分において周期約50秒のPc4地磁気脈動が観測されていることがわかる。鹿野山測地観測所のデータについては、観測所が比較的都市部に位置するため、電車等による人工ノイズが大きく、発生した波動がノイズに埋もれてしまっていると予想される。これらのデータから、地磁気脈動の周波数を同定し、モデル計算を行うことにより、地球周辺のプラズマ質量密度分布を推定した。

図3は、推定したプラズマ質量密度の緯度分布を示している。地磁気緯度が増すごとにプラズマ質量密度が減少する様子がわかる。引き続き、こうしたイベントを選び出し、特に継続して地磁気脈動が表れている例について、宇宙プラズマ環境マップを作成することを目指す予定である。

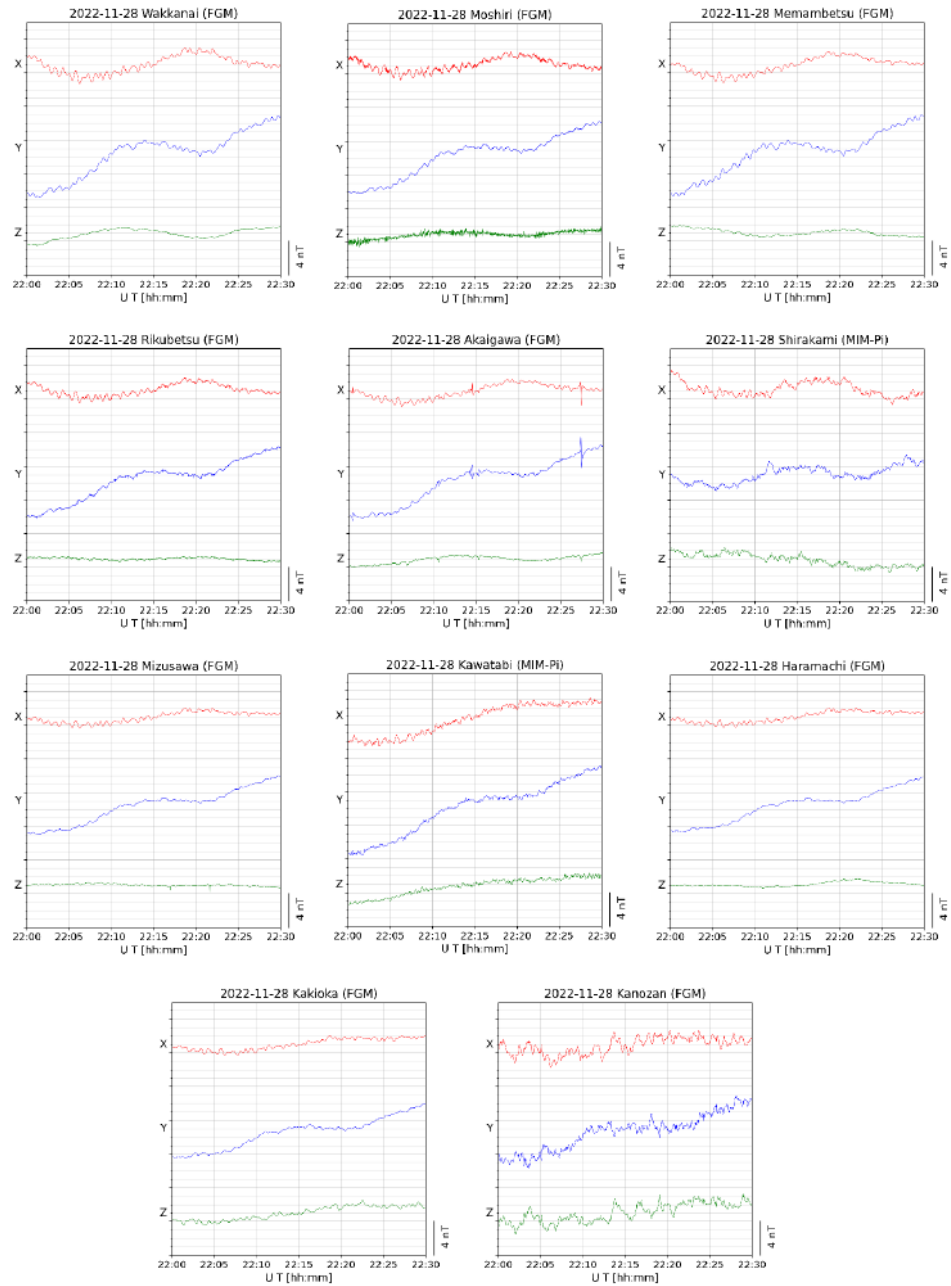


図2: 稠密磁場観測ネットワークによる観測例。2022年11月28日22:00-22:30 UTの30分間に、鹿野山測地観測所以外のすべての観測所で同様の地磁気脈動が観測されている。

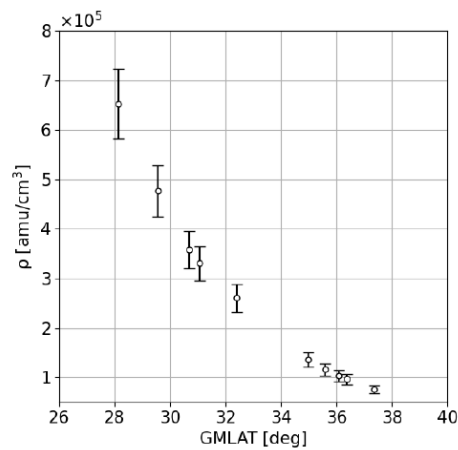


図3: 図2に示した地磁気脈動の周期から推定したプラズマ質量密度の緯度分布。

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 cm^{-1} と、1182-1187 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、HITRAN 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。また図2に、FTIR解析による年増加率と、他の観測やモデルによる増加率との比較を示す。FTIRによる増加率（OEM: $+5.3\%/y$, Tikhonov: $+5.9\%/y$ ）は、TOMCAT CTMや、ACE-FTSによる増加率に比べて若干大きめの値となった。これは、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。

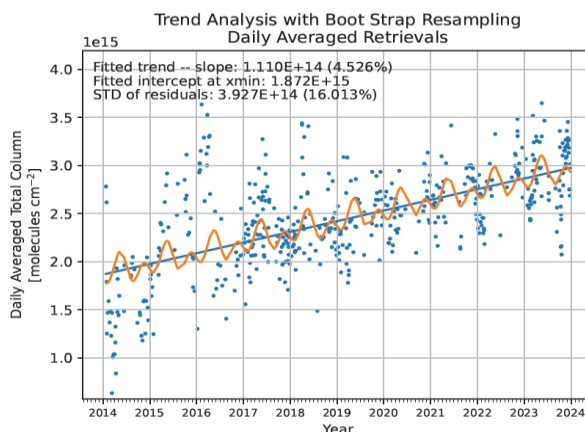


図1 SFIT4による日平均HFC-134aの解析結果

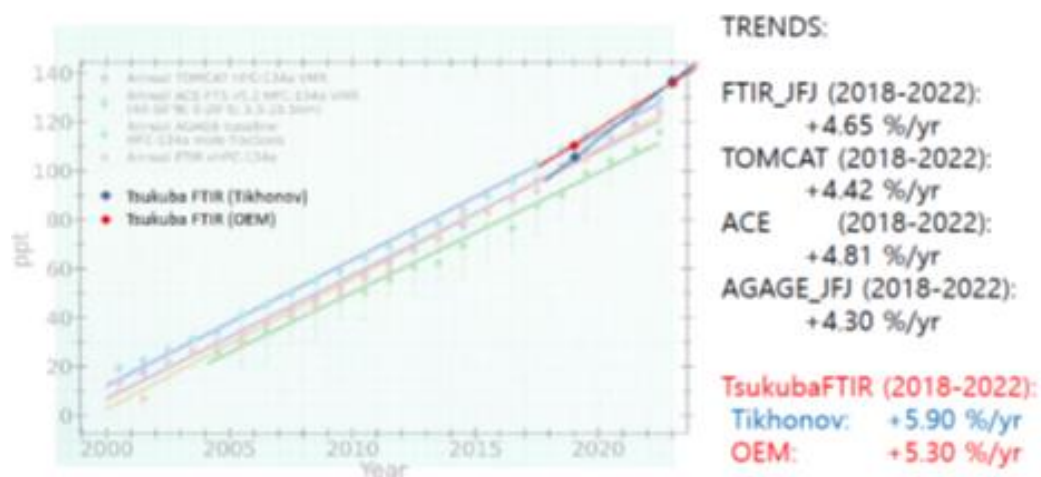


図2 FTIRによるHFC-134aのトレンドと、他の観測やモデルによるトレンドとの比較

<成果発表>

- ・中島英彰、村田 功、森野 勇、G. C. Toon、「つくばの地上設置FTIRによるHFC-134aの観測と解析」、日本地球惑星科学連合 2024年大会、幕張メッセ（千葉）&オンライン、2024年5月27日
- ・Nakajima, H., I. Murata, I. Morino, and G. C. Toon, “Observation of HFC-134a at Tsukuba, Japan”, N DACC-IRWG-TCCON-COCCON Annual Meeting 2024, Boulder, U.S.A., July 11, 2024.
- ・中島英彰、村田 功、森野 勇、G. C. Toon、「つくばのFTIRによるHFC-134aのトレンド解析」、第29回大気化学討論会（神戸）、2024年10月9日。

X線天文衛星で探る 2022 年トンガ海底火山の大噴火による超高層大気密度の変動

X-ray study of the upper atmospheric density disturbance caused by
the explosive eruption of the 2022 Tonga's volcano

勝田哲、埼玉大学・理工学研究科

2022年1月15日にトンガで海底火山の大噴火が発生した。この大噴火が上空100~200 kmの超高層大気にどのような影響を与えたのか、X線天文衛星を用いて調査した。高度100 km付近は中間圏から熱圏下部に位置し、太陽活動や大気波動など、上下からの影響を受けて変動すると考えられている。しかしこの高度の大気観測(特に中性大気の密度計測)は難しく、観測研究が非常に乏しい。近年、我々はX線天文衛星による大気えんぺいを通じたリモートセンシングにより、この領域の密度を測定する新手法を開拓してきた(参考文献1, 2)。本課題では、この手法を用いて大噴火が与えた超高層大気への影響を調査した。

トンガ海底火山の噴火時には、米中のX線天文衛星Insight-HXMT, NuSTARがそれぞれCassiopeia A, Cen X-3という明るいX線天体を観測していた。噴火の数時間後には、これらの天体が火山上空で大気掩蔽現象を起こした。このうち、Cen X-3は天体自身のX線強度変動が激しく観測結果の解釈が難しかったため、本研究では、Insight-HXMTによるCassiopeia Aの観測データ解析に注力した。

Insight-HXMTは、噴火3.4時間後、5時間後、5.1時間後、6.6時間後、8.2時間後、9.8時間後に、それぞれ火山から~500 km、~2000 km、~2500 km、~4000 km、~6500 km、~9000 km離れた地点で大気えんぺいを捉えていた。この位置を図1(上)に示す。我々は各えんぺいを解析し、高度90~150 kmにおける中性大気密度を計測し、これを、GAIAおよびNRLMSIS2.0による大気密度のシミュレーションの結果と比較した。観測とシミュレーションの密度比を図1(下)に示す。この図から、噴火の直後、火山から1000 km以内の範囲において、観測した大気密度はシミュレーション予想に対して0.1~0.5程度と著しく減少していること、一方で噴火後5時間以降たった遠方地点では、比較的緩やかな密度減衰を示すことが判明した。さらに、測定した密度分布は波打った構造を持ち、その波長は、鉛直方向に20 kmないし水平方向に1000 km程度であった。これは噴火に伴うラム波や大気重力波による擾乱の可能性がある。本研究成果は、論文発表(参考文献3)するとともに、日本惑星科学連合の年会JpGU2024および名古屋大学で開催した「第1回アルベドの融合科学ワークショップ」にて口頭発表を行った。

[参考文献]

1. Katsuda, S., Fujiwara, H., Ishisaki, Y., Maeda, Y., Mori, K., Motizuki, Y., et al. (2021). "New measurement of the vertical atmospheric density profile from occultations of the Crab Nebula with X ray astronomy satellites Suzaku and Hitomi", Journal of Geophysical Research, 126(4), e28886. <https://doi.org/10.1029/2020JA028886>
2. Katsuda, S., Enoto, T., Lommen, A. N., Mori, K., Motizuki, Y., Nakajima, M., et al. (2023). "Long-term density trend in the mesosphere and lower thermosphere from occultations of the Crab Nebula with X-ray astronomy satellites", Journal of Geophysical Research, 128(2), e2022JA030797. <https://doi.org/10.1029/2022JA030797>
3. Katsuda, S., Shinagawa, H., Fujiwara, H., Jin, H., Miyoshi, Y., Miyoshi, Y., et al. (2024). "X-raying neutral density disturbances in the mesosphere and lower thermosphere induced by the 2022 Hunga-Tonga volcano eru

ption-explosion.” Geophysical Research Letters, 51, e2024GL112025. <https://doi.org/10.1029/2024GL112025>

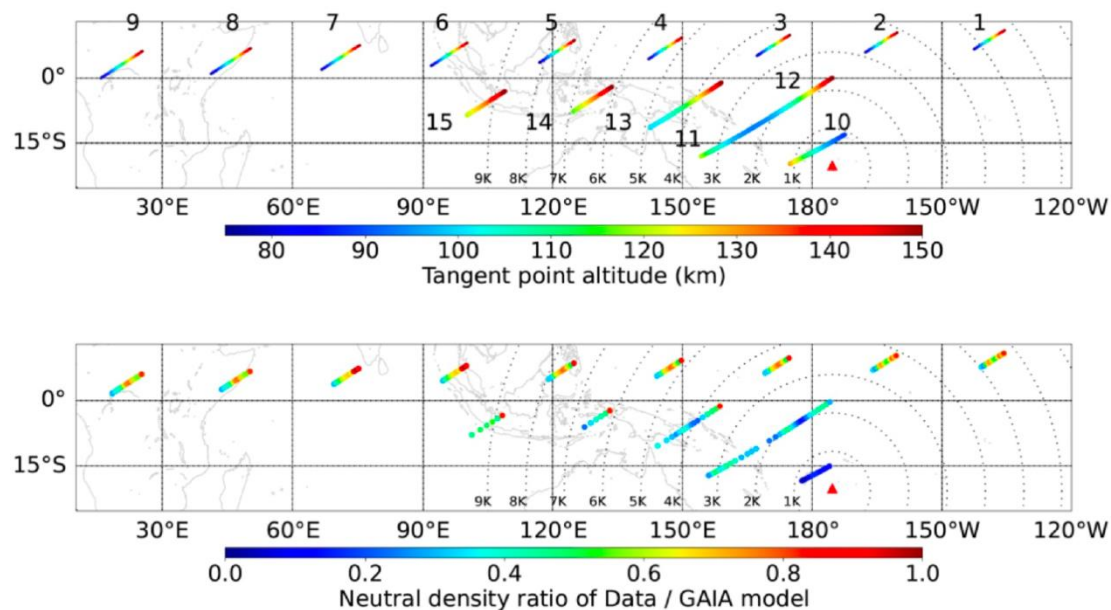


図 1 (上): トンガの噴火前後(2022 年 1 月 14 日、15 日)、Insight-HXMT による Cassiopeia A 観測時の大気えんぺいの場所。接線高度(衛星の視線が地表に最も近く場所の高度)をカラーで示す。トンガ火山を赤の三角で示す。図 1(下): 上図のえんぺいで計測した大気密度。噴火の影響を考慮しない GAIA モデルによる予想値との密度比をカラーで示す。

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。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する。

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。そこで、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）に至るルート上での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）。

また栗田は、中性子線計測に加えて、ドームふじ基地に向かうルート上で積雪試料採取も行っている。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。そこで、今年度の一般共同研究では、この計測結果を使ったモデル評価に取り組んだ。

本研究で利用するPARMAは、宇宙線の入射に伴う高エネルギー粒子群（空気シャワー）による放射線量を予想するモデルであり、現段階ではトリチウム生成量を直接予測することはできない。そこで今年度は、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）のバランスで決まる。また、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。ここでは、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。比較結果を図1に示す。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ため、気圧に対するトリチウム濃度分布を示している。また、積雪採取は往路（S16⇒DF）と復路（DF⇒DF）で実施したため、それぞれ別の色で区別している。南極周辺域の大気中トリチウムの生成量を黒線で示し、灰色線は南極大陸上での滞留時間の違いを表す。図をみると、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るが、頂上部付近ではその濃度が急激に高くなっている。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している。Poluianov et al.(2020)のモデルやPARMAはトリチウム生成量を予測するが、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、その予測ではモデルの性能よりも南極水循環の正確な把握が重要といえる。

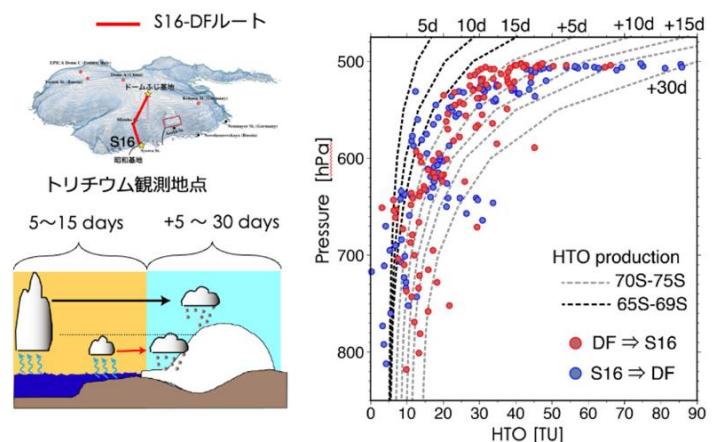


図1. 南極大陸におけるトリチウム観測地点（左上）、トリチウムモデル計算概念図（左下）、そして南極大陸におけるトリチウム観測データとPoluianovら(2020)のモデルにより計算した推定値の比較（右）。

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).

(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

加藤 雄人、東北大学 大学院理学研究科

・研究目的

地球磁気圏・放射線帯外帯における相対論的電子の加速機構において、赤道領域を起源とするホイッスラーモード・コーラス放射が重要な役割を担うとされる。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いては、コヒーレントな波動による捕捉を基本とする非線形相互作用の重要性が指摘されている。放射線帯電子の生成過程を理解する上で、内部磁気圏のどの領域で、どのようなタイミングで電子加速過程が生じるかを定量的に明らかにすることは重要である。そのためには、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、コーラス放射との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。本研究課題は、コーラス励起過程を再現する素過程シミュレーションとグローバルモデルとの連成計算手法を確立し応用して、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

2024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、前年度に引き続き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た。素過程計算結果に基づいたコーラス放射の発生条件に関する考察から、あらせ衛星による観測結果が説明できることを示した。また、あらせ衛星による観測結果に見出された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て、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比較することで、

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。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が進められた。

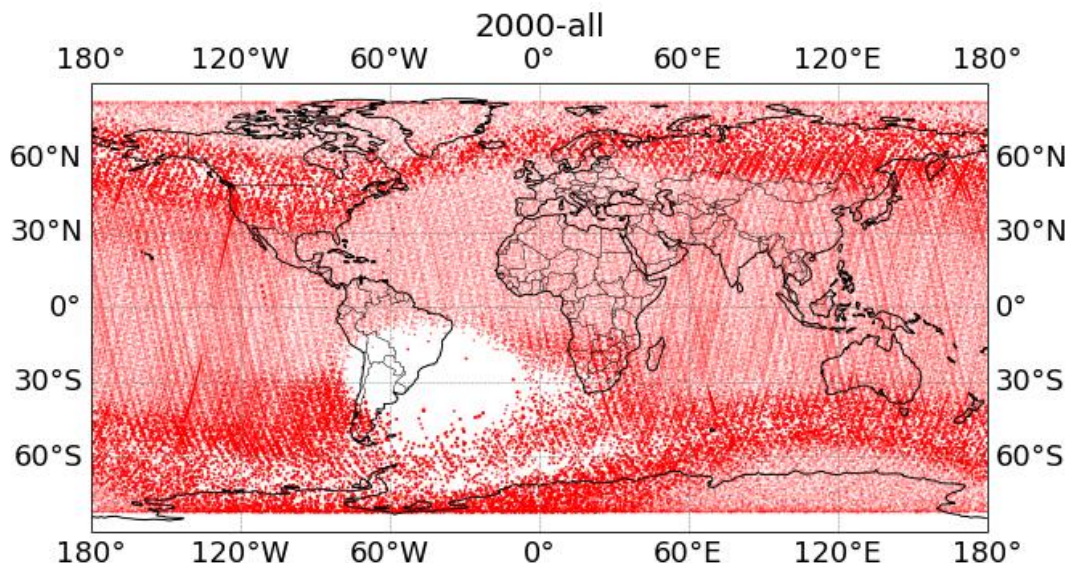
共同研究により開発された連成計算手法を、あらせ衛星を始めとする衛星観測結果との比較・考察に活用することにより、放射線帯領域での電子加速過程ならびに波動励起過程における非線形効果の定量的な究明が可能となる。本申請は3年計画の3年次にあたるが、2025年度の一般共同研究課題として新規申請を行っており、引き続き宇宙天気現象時の内部磁気圏におけるコーラス放射発生条件に関する探究と非線形波動粒子相互作用の発生領域の時間・空間発展を明らかにすることを計画している。

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
Study of CME 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。特に高度 1000km 以下の低軌道では、希薄な地球大気にも関わらず大気抵抗が働き、宇宙物体は落下を続ける。太陽紫外線を始めとする太陽活動現象や、地球磁気活動が地球環境に与える影響は宇宙天気現象と呼ばれる。現在まで、宇宙物体と宇宙天気現象の関係性について、軌道降下の解析を行なってきた。

今回は特に高エネルギー粒子の影響について注目した。エネルギー帯を決め、粒子の振込を計測する装置を組み込んだ衛星観測は実用化されているが、ここでは太陽撮像観測を行なう衛星に着目し、撮像するセンサーに高エネルギー粒子が降り込み、白い点(ブライトポイント)として画像に記録される現象を利用する。通常はエラーと考えこの白い点を排除するのだが、逆に宇宙天気現象に繋るものと考え、簡易検出器として利用するものである。過去に太陽フレアが発生したときに「ひので」衛星で観測された白い点がフレア強度との相関を行ない、ある程度の相関が確認できた。今回は TRACE 衛星



(1998/04/02-2010/06/21)を用いた。全観測期間の極端紫外線 171Å の画像に写る白い点を数えた。

図は 2000 年の結果である。点が検出された衛星の場所で、点の大きさがその画像の検出数を示す。南米や南大西洋で点が無いのは SAA(南大西洋異常帯)で高エネルギー粒子が顕著に降り込む領域なため TRACE 衛星は観測を停止するためである。しかし、その周辺では数多くの粒子が検出され、SAA が広がっていることを示唆している。また極域に帯状が確認できる。SAA もこの帯も地球磁場に高速された高エネルギー粒子の放射線帯である。またその外側にも帯が確認できるが、これはオーロラ帯の影響と考えることができる。全期間の解析結果では、太陽極小期に高エネルギー粒子の降り込みが多くなっていることが確認できた。この太陽活動との逆の相関の定量的な解析をすることで、宇宙天気現象の長期的な影響も明かにできると考えている。

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 Multibeam 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未解明であり、その解明には広域に分布する低密度分子雲の特性を把握することが不可欠である。近年の研究により、大量の低密度分子雲が銀河系に広く存在する可能性が指摘されており、本研究では銀河系全体の低密度分子雲の分布と量を解明することを目的とする。そのために、福井工業大学の10mパラボラアンテナに搭載する次世代マルチビームシステムPhased Array Feed (PAF) の基礎開発を進める。PAF はパラボラアンテナの一次焦点前面に並べた素子アンテナの信号位相を電氣的に制御してビームを形成し、異なる指向方向のビームを容易に同時形成できるため、複数の固定フィードを並べた従来型のマルチビームシステムのような空間的制約を受けることなく柔軟な拡張が可能である。一方で、天文観測への応用には合成ビームの安定化や較正手法の確立といった課題が残されている。本研究では、PAF を搭載する10mアンテナの整備および10mアンテナ光学系を用いたPAFシミュレーションの実施、その結果に基づいたダイポールアレイを作成し、PAFの基礎技術である合成ビームの形成およびその制御等について知見を得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）】

本研究では、デジタルPhased Arrayシステムの基礎技術研究と福井工業大学10mアンテナに搭載するPAF試作機の開発検討を並行して実施する。

1. デジタルPhased Arrayシステムの基礎技術研究

Phased Arrayで形成される合成ビームの評価試験を行う。観測中心周波数は327 MHzとし、16台の長さ約50 cmの半波長ダイポールアンテナを素子アンテナとしたアンテナアレイによる太陽観測を実施する。測定系としては、半波長(およそ50 cm)間隔で16台のダイポールアンテナを東西方向に並べ、また地面には金属反射板を敷き、30 cmの高さにアンテナを設置する。これにより、東西方向に約6度の角度分解能の合成ビームが形成される。合成器で結合した16素子の信号を、低雑音・高利得増幅器(LNA)、バンドパスフィルター(BPF)を介し、スペクトラムアナライザ(SA)に導く。太陽の南中時の出力変動と前後1時間前に測定したノイズレベルとの比較から、アンテナおよびアナログ受信系の性能を評価する。

2. 福井工大10mアンテナに搭載するPAF試作機の開発検討

PAF搭載予定の福井工大10m アンテナは現在電気系・駆動系が故障しており、その改修を進めている。電気系については、システム図面を基にメガテスターを用いた測定により不具合箇所を特定する。また駆動系は、これまで使用されてきたACモーターからDCモーターへの変更可能性について検討する。これら改修作業と並行し、10m アンテナに搭載するダイポールアンテナおよびアレイのシミュレーションを実施する。これらをもとに試作機の作成・性能評価を実施する。

【研究結果】

1. デジタルPhased Arrayシステムの基礎技術研究

名古屋大学 宇宙地球環境研究所共同館 I の屋上にて東西方向に並列した16台のダイポールを用いたPhased Array測定実験を実施した(エラー! ブックマークが自己参照を行っています。)。まず、全16アレイをアナログ信号のまま結合し、南中時の太陽検出を試みたが、無線周波数干渉が非常に強く、結合器直下のLNAが飽和してしまった。そのため、多少システム雑音を悪化させてしまうものの、LNAの前に低損失BPFを挿入するこ

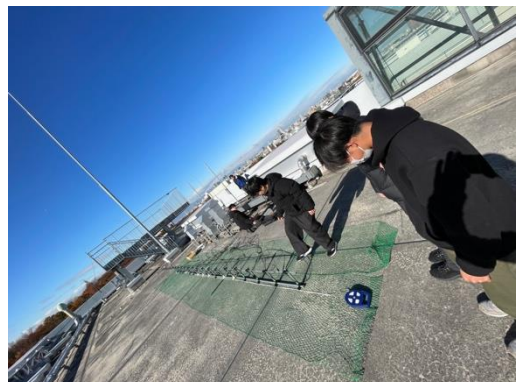


図 1 : Phased Array 試験測定の様子

とで飽和問題を解決した。また、今回のシステムは太陽がビーム内に入ること期待される増加量は1dBであるため、安定なノイズレベル測定が重要であるものの、測定当初、不安定であった。これは測定者自身や屋上に設置されている金属収納箱等の干渉によることが大きいと結論付けられたため、場所を宇宙地球環境研究所共同館 I 前駐車場に移して実施した。しかしながら屋上と比べ低地では無線干渉の影響が大きくなり、太陽の明確な検出は困難であった。一方で、予備のダイポールアンテナと信号発信機を繋ぎ、送信アンテナとすることで、ダイポールアレイの近傍でのビームパターンを測定した。

2. 福井工大10mアンテナに搭載するPAF試作機の開発検討

10m アンテナの電気系調査を実施し、アンテナ主鏡裏にあるハブ内の端子ボックスの水没が漏電の主因であることがほぼ特定でき、主要箇所の防水対策処理を行った。駆動系については現在使用されていない中古DCモーター設置のためのアダプタの作成および取り付け、また対応するモーターコントローラーが情報通信研究機構で使用されているためその接続試験を実施し、問題なく動作することを確認した。また、プロトタイプPAFとして搭

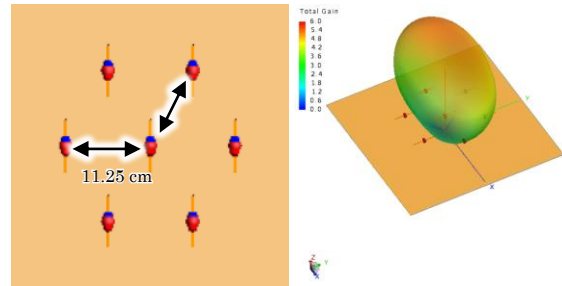


図 2：7 素子ダイポールアンテナの合成ビームシミュレーション

載するダイポールアレイについての検討を進めた。ダイポールアレイは先行研究(Nage1 2006)を参考に、7つのダイポール素子アンテナを採用し、銅張積層板のグランドプレートから1/4波長の高さを保持するバランフィードタイプとし、またアレイ配置は入射電界を十分サンプリングし、相互結合も低減できる間隔(0.6λ)を確保した。当初、既製のダイポールアンテナを用いてアレイを構築予定であったが、本共同研究予算を超過したため、セミリジッドケーブル等を調達し、これらを加工・組み合わせることで自作アンテナの作成を進めている。今後は、これらの性能評価を実施予定である。

【考察】

Phased Arrayシステムの測定実験から、300GHz帯は無線周波数干渉が非常に強いいため、LNA前段にBPFを挿入する必要があることがわかった。しかしながら、初段での損失はシステム雑音の悪化に直結する。今回太陽を用いた連続波観測を用いたアナログ受信系の性能評価を目指したが、明確な検出はできなかった。今後、アレイを増やすことでアンテナゲインを稼ぐことに加え、初段に組み込むBPFの低損失化、またLNAの低雑音化により、システムの高感度化を図ることで天体を用いたシステム評価の実現を目指す。PAFの開発検討においては、10mアンテナのシステム整備と並行し、ダイポールアンテナのシミュレーションおよびダイポール試作機の作成を進めている。また、7素子ダイポールアレイによるPAFシミュレーションを実施した。ダイポールアンテナ作製後、性能評価およびデジタルPhased Arrayシステムで形成されるビーム特性の測定・評価が必要である。安定したビームパターンの制御および較正手法の開発・実証試験について受入教員の協力を仰ぎ検討する。

【まとめ】

東西方向に並列した16台ダイポールアレイを用いたアナログ受信系の性能試験を行った。測定周波数帯(350MHz)ではRFIが強く、またシステム感度に制限があったものの、ダイポールアンテナと信号発生器を用いた測定により、合成ビームの感度応答を確認した。精密な測定は未実施であるが、感度応答自体は期待通りの反応であった。また、PAF開発のため、10mアンテナの整備を進めている。今後、10mアンテナ搭載に向けたシステムの整備と7素子プロトタイプ PAFの開発・評価試験を実施し、実用化に向けた技術の確立を目指す。

(別紙様式04-2)

海藻資料を用いた北海道周辺海域 ^{14}C 量の分布と変遷の把握

Spatial and temporal variation of seawater ^{14}C around Hokkaido area reconstructed from seaweed samples
(1行スペース)

谷水雅治、関西学院大学・生命環境学部

(2行スペース)

【はじめに】

海水中の元素濃度の計測は環境評価のために重要であるが、海水採水時の濃度のみの把握となる。近年、生物濃縮を用いたバイオモニタリング手法による水環境の汚染評価が注目されている。生物濃縮とは、生物の組織に汚染物質が蓄積して、環境中の濃度よりも高くなることであり、バイオモニタリング手法ではこの生物濃縮を利用し、生物中の元素濃度を測定することによって間接的に海水中の元素濃度を把握することができる。バイオモニタリングに用いられる生物は生物指標と呼ばれ、近年、生物指標として海藻を用いる研究が盛んにおこなわれている。生物濃縮には、主に食物を取り込むことに基づくプロセスと大気や水から直接取り込むプロセスが含まれ、海藻は後者のプロセスによって海水中から直接栄養や水分を吸収する。このため、海藻中の元素濃度は生育環境をそのまま反映していると考えられる。1950年代から1960年代にかけての大気核実験により、人為的な ^{14}C が大量に生成され、環境中に拡散した。サンゴ骨格は季節によって形成する密度が異なるため年輪模様が観察でき、これを利用した大気核実験以降の ^{14}C の時間変動の研究が日本でも進められている(三ツロ, 2004)。1960年代前半には大気中の ^{14}C 濃度は大気核実験前の1.7~2倍になったが、その後、 ^{14}C 濃度は指数関数的に減少し、2000年には実験前の1.1倍ほどとなった。しかし、サンゴは熱帯~亜熱帯の浅瀬にしか生息していないため、本研究では褐藻類の一種であるコンブを用いて ^{14}C 量の時系列変化を評価した。

【試料と分析法】

試料には、博物館が所蔵する北海道道東産コンブの標本資料3試料を利用した。希塩酸で洗浄後の試料約10 mgを石英管内で完全燃焼させ、ガラスラインにより CO_2 を精製した後、還元してグラファイトとして、名古屋大学のタンデントロン加速器質量分析計(AMS: General Ionex)に導入し、 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比を測定した。

【結果と考察】

道東産コンブの ^{14}C 量は、大気核実験が盛んであった1955年よりも1966年の試料で高く、対して1994年では減少した。ピーク時期が大気核実験時期より遅れているのは、大気と海洋表層が平衡に近づくまでに時間がかかるためであり、その後の減少は深層水などの ^{14}C 量の少ない海水との混合や放射壊変の結果であると考えられる。この傾向は先行研究と同様であるため、コンブは海水の ^{14}C 量の情報を保存しており、海洋トレーサーとして利用できる可能性が示唆された。

【引用文献】

三ツロ丈裕, 2004, サンゴ骨格年輪の ^{14}C 分析による海洋環境研究, 地球化学, 38, 287-301

(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 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 1,000 km、南北に約 400 km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航空機のみとなる。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 100 km 以内においても 1 万便以上の飛行機が観測されている。一方、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、一般にデータ提供はなされていない。

このような背景のもと、私たちのグループでは、台風の進路や強度の予測に貢献するため航空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を取得し研究を行うことを目指している。本研究では、この前段階として必要な飛行機の位置情報を抽出し、航跡データに変換することで台風が沖縄県に接近した年とそうでない年の那覇空港に離発着する飛行機の進路を比較する。そして、台風の有無で航跡データにどのような違いが生じた調査したので報告する。

2. 研究方法

航空機の航跡データには、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であり、本データは時刻、仮想便名、航空機の位置（緯度、経度、高度）、型式の順に約 10 秒間隔の時系列データが記録され、それらの 1 日のデータが 0 時から 12 時、12 時から 18 時、18 時から 24 時の 3 分割で保存されている。なお、この調査対象の型式は Boeing737-400 に絞る。理由は 2015 年、2016 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 Boeing737-400 に限られたためである。

一方、気象データには、気象庁の数値予報 GPV データに含まれる Lsurf[3]を用いる。Lsurf には地上から高度 10 m での気圧、風速値、気温、相対湿度、時間降水量、雲量、日射量などの物理量が約 4.2km(緯度)、約 7 km(経度)間隔で格子状に格納されている。検討した日は、2016 年 9 月 17 日とした。この日を選択した理由は、台風の最低中心気圧が 930 hPa の最小値を示したことにある。さらに、図 1 で示すように 2016 年 9 月に発生した台風 16 号[3] が、進行方向の右側より沖縄県に接近し、その影響もより大きいためである。一方で、同日で台風が発生していない年の 2015 年のデータを利用する。

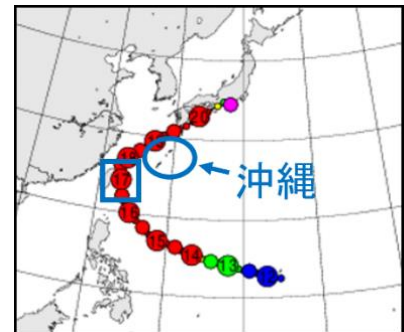
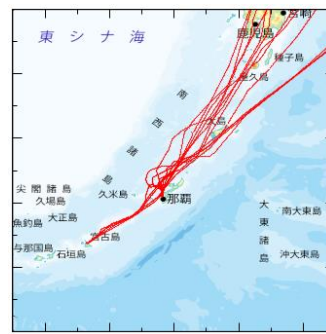


図 1 台風 16 号の進路[3]

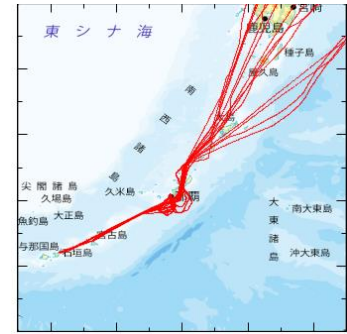
3. 研究結果・考察

飛行機の位置情報を抽出した航跡データを図 2 に示す。図 2 より台風の発生した 2016 年には石垣島に着陸する航跡データが存在しない。この原因は台風の影響で欠便になったと考えられる。加えて、台

風が接近した場合、那覇空港に着陸する進路は北側の進路を取っているのに対して、台風が存在しない場合は逆の進路を取っている。特に、台風の発生した際の航跡データは南西諸島にある大島から沖縄本島付近の上空でばらついている。これは、那覇空港の南側から着陸していたものが、台風が存在によって飛行機の進路が乱されたためと考えられる。



(a) 台風が接近した年



(b) 台風が発生していない年

図 2 航跡データの抽出結果

4. まとめと今後に向けて

本研究で用いた航跡データによって台風の有無による飛行機の位置情報が確認できた。しかし、議論するなかで CARTAT Open Data から気象情報を抽出するにはサンプリング時間間隔が大きいことがわかった。今後は ADS-B 信号を直接受信できる環境を構築し、信号を共有するサービス(Filghtrader24)と連携させることで、広範囲かつサンプリング時間間隔が短い飛行機の位置情報を得ることで、より精緻な航跡データの分析を進める。

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
- [3] デジタル台風 - 最新の台風情報と過去 40 年間画像データベース, 台風 16 号, 2016 年. <https://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/summary/wnp/s/201616.html.ja>

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 暢宏, “航空運航データを用いた離発着解析と気象情報抽出,” 航空機観測研究集会, オンライン, 2024 年 12 月 20 日

3) その他の成果リスト (著者、特許等)

なし

太陽周期活動予測に関する研究
Study on solar cycle prediction

今田晋亮、東京大学・理学系研究科

太陽活動は通常、黒点数に顕著に現れているように 11 年周期で盛衰を繰り返しているが、数百年のスケールで、黒点数が極端に少ない、すなわち極度に太陽活動が低下した時期（グランドミニмум）が存在することが知られている。このような太陽活動の低下が 17 世紀のヨーロッパの寒冷化のように過去に地球に小氷期などの気候変動をもたらした可能性も示唆されており、グランドミニмумがどのようにして生じるのかを理解することは、ダイナモの物理そのものの理解を深める上でも、また宇宙天気の見点からも重要である。

太陽活動は前サイクルの極磁場と強い相関があり、極磁場は観測から出現した黒点が移流や拡散により輸送されることで変動すると考えられている。出現する黒点は太陽内部のダイナモによって生成されるが、出現黒点には、数、緯度、面積、距離、傾斜角等のパラメータがあり、これらのパラメータには統計的な不定性があるため、黒点数が同程度のサイクルであっても極磁場変動の振る舞いが著しく異なることがある。本研究では、出現した黒点から極磁場を計算する表面磁束輸送モデル(SFT モデル)を用いて極磁場の変動を確率的に予測することで、グランドミニмумすなわち極端に低調な極磁場が黒点の統計的不定性のみによって発生しうるのか、またグランドミニмумを引き起こす物理や黒点の性質を明らかにすることを目的として研究をおこなった。従来の観測から理解されている黒点パラメータの不定性のみを考慮して、数値実験を1000太陽周期分行ったところ、グランドミニмум程度の極度に太陽活動が低下した時期はほとんど生じず、観測で議論されている確率ではグランドミニмумにはならないことがわかった。続いて、黒点パラメータの不定性に加えて、サイクルの活動度によって黒点数のピークの時間が異なるというWaldmeier効果の有無、および磁場からのフィードバックにより子午面環流速度が変化する非線形効果を考慮した結果、グランドミニмумが引き起こされる確率は観測と同程度となる結果を得た。

本研究では、太陽全球磁束輸送モデルを用いて、1000サイクル（1万年分）の全球磁場のアンサンブル計算を2次元で行った。この計算により、極端に低調な太陽活動時の全球磁場から極端に活発な太陽活動時までの様々な太陽活動における大局的な磁場を得る事ができた。この磁場をもとに、電磁流体シミュレーションを行うことで、フレアの非線形発展を計算し太陽フレア・CMEがどの規模まで発展しうるかを見積もる。この計算により、太陽活動が低調な場合、大局的な磁場による閉じ込め効果があまり働かず、結果として巨大フレアが起これやすい状況になっているかどうか理論的に明らかにする。本年度はこのMHD計算を行う準備を行なった。その結果は、鈴木他の講演で報告した。

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 (2023 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、2023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進展させた。

【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, Tomoaki Hori, Estimation of the FLR frequency and the magnetospheric density from the SuperDARN VLOS data using the Discrete-Time FT, Japan Geoscience Union Meeting 2024, 幕張メッセ国際会議場 (千葉市), 2024.05.26-05.31

UAV空撮画像による森林伐採後の植栽・生育状況AI診断技術の開発

Development of AI diagnosis technique for planting and growth conditions after deforestation using UAV images

山本一清、名古屋大学・大学院生命農学研究科・教授

研究目的

日本の森林の約4割を占める人工林の多くが、現在成熟期を迎えている。また、花粉症等への対策等もあいまって、国内時人工林の整備等が進められている。しかし、これらの森林整備事業などの補助事業では、行政による竣工検査に多大な労力と時間を要することとなる。そのため、UAV空撮画像による検査も認められているが、現状では目視判読による検査が主体となっている。そこで、UAV空撮画像による検査の自動化及び定期的な状況把握が可能となれば、UAV画像検査が進み、植栽検査における行政コスト・所有者の申請コストの削減が可能となり、その効果は大きいものと考えられる。そこで、本研究ではUAV空撮画像からの間伐を自動抽出するアプローチについて検討した。

研究方法

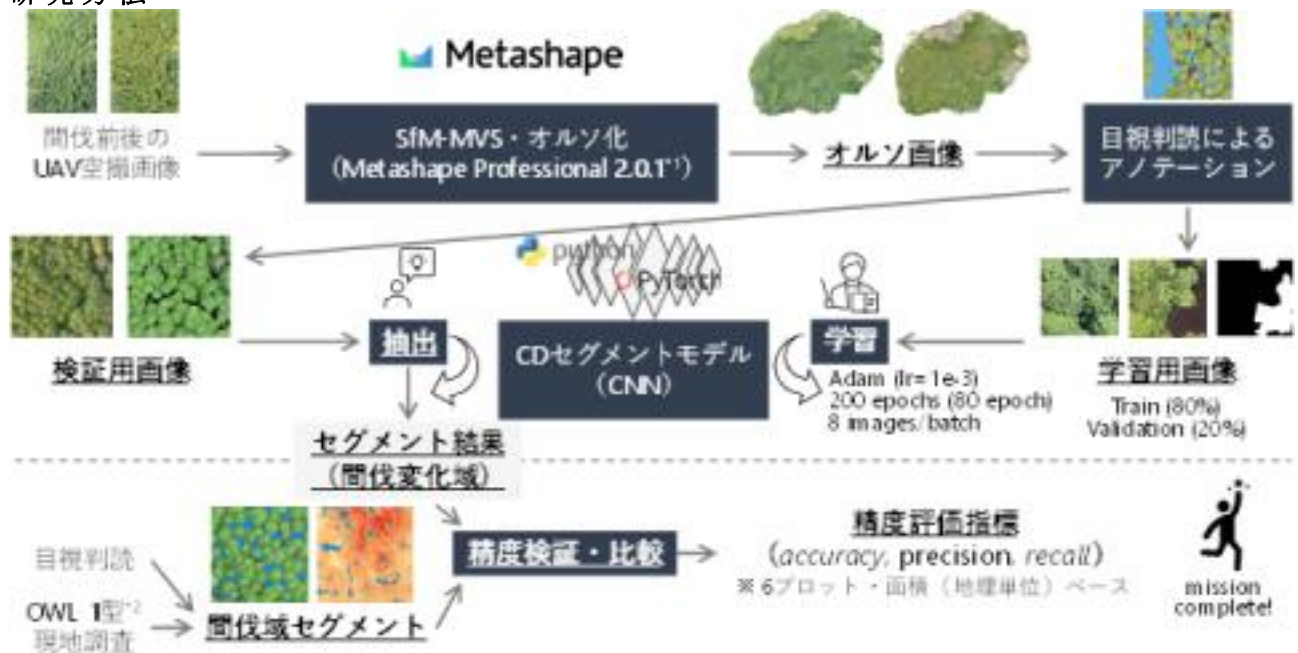


図1. 本研究のアプローチ概要

表1. 試験地の概要

Field	Pref. & City	Lat, Lon	UAV	Flight Altitude [m]	Area Size [ha]	Acquired Date		
						Before	After	
Train Data (4Fields 7Areas)								
南	三重県熊野市	33.9063N, 136.0666E	Mavic2Pro (DJI)	145	7.9	2019/10/4	2020/1/24	
三多気-1	三重県津市	34.5236N, 136.2260E	Mavic2Pro (DJI)	140	20.6	2020/8/5	2021/4/12	
三多気-2			Mavic2Pro (DJI)	95	23.9	2020/8/5	2021/4/12	
島谷-1	三重県大台町	34.3103N, 136.3004E	Mavic2Pro (DJI)	120	8.9	2022/3/28	2022/10/6	
島谷-2			Mavic2Pro (DJI)	140	8.5	2021/2/19	2021/4/9	
島谷-3			Mavic2Pro (DJI)	50	11.2	2020/12/17	2021/4/9	
横谷	三重県大台町	34.3589N, 136.3084E	Mavic2Pro (DJI)	120	7.1	2019/10/9	2020/3/17	
Test Data (1Field 1Area)								
稲武	愛知県豊田市	35.2049N, 137.5723E	Evo2Pro (Autel Robotics) Phantom4RTK (DJI)	130 100 (対地高)	8.6 (共有部)	2021/4/1	2024/9/2	

本研究では、間伐の自動抽出という課題に対して、以下の方針のもと

- 単木単位の把握は不可能なので、間伐領域の抽出（セグメント）をメインタスクにする
- DEMや形状特徴は安定しないので、オルソ画像を活用する

表 1 に示した試験地を対象に、間伐抽出手法として図 1 に示したアプローチを検討した。

結果及び考察

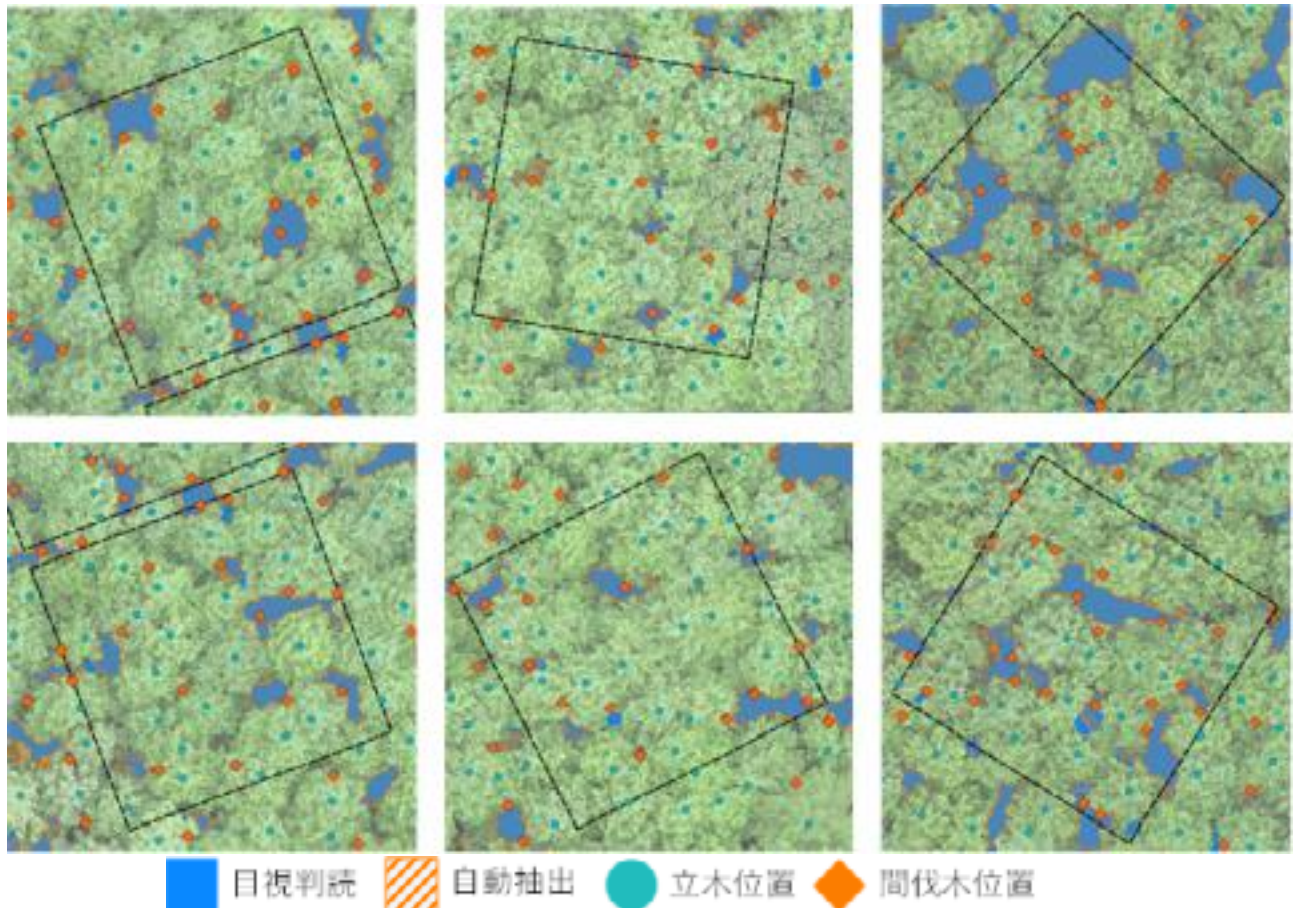


図 2．検証画像に対する間伐域の抽出結果（精度評価）

本研究で提案したアプローチにおいては、図 2 に示したとおり間伐を個体レベルの変化ではなく、間伐領域の変化抽出として捉えるという新たな方法で、その精度についてはaccuracy : 98.58%、recall : 86.17%、precision : 95.25%という高い検出精度が得られた。このように、UAV空撮画像を用いた間伐領域の抽出は目視判読と同等の水準で自動化可能であることが示唆された。

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

Evaluating Water Storage and Runoff Processes in Snow-Dominated Mountain Headwaters:
Runoff Observations and Stable Isotope Ratio Analysis

五味高志、名古屋大学・生命農学研究科

1.はじめに

山地流域へ浸透した雨水は、土壌や岩盤のさまざまな流出経路を経て、その一部は流出するとともに、岩盤や土壌への貯留、さらには深部浸透をもたらす。土壌や岩盤への水の貯留は、崩壊や土石流の発生にも関連している。既往研究からでは森林源流域の水流出量は地質や地形などにより、隣接流域でも流出量が異なり不均質であることが報告されている。たとえば、Asano and Uchida (2012)では多地点における水質調査から流出に影響を与える土壌や岩盤層が表面地形や滞留時間と関連があることを示した。Egusa et al.(2013)では多複数地点による水質調査から複数の地質が存在する流域においても、その流域の代表的な流域面積である (Representative Elementary Area: REA) が存在することを示した。一方で、流出量は時間的にも変動することが示されており、それらは地質や地形条件により異なる。たとえば、地頭菌ら (2004) は地質調査と水文観測から100mm程度の降雨に対する直接流出率は6%未満であり、逓減の減衰が小さいことを示してしめている。Katsuyama et al. (2008)は花崗岩流域と堆積岩流域のハイドログラフの比較から、堆積岩流域における逓減は大きく、貯留量が小さいことを示した。これらの点から空間的にも多様な地形や地質において、降雨量の季節変化等により流量が時間的にどのように変化することが検討が重要であることが示されている。そこで本研究では、①流量やECなどの簡易多地点調査から流出特性を把握し、②安定同位体比分析とシリカなどの水質分析から山体での滞留や流出過程を評価し、③山地上流域での水流出プロセスの時空間的変動を考察することを目的とした。

2.研究方法

調査は岐阜県郡上市の木曽川水系長川支流亀尾島川上流内ヶ谷流域内に位置する山地上流域 (C流域: 面積100 ha) を対象とした (図-1)。流域の地質は中生代堆積岩による砂岩泥岩互層であり、流域の層向傾斜は一様であり西に約75°傾斜している。C流域内に位置する源流域の抽出には航空機LiDARの1mDEMを用いた。その中から調査流域141地点 (面積0.02~100ha、高低差25~330m) を選定した。現地踏査において流路の存在、流水の有無、湧水点を確認し、緯度・経度を記録した。流水が有る場合は流量、電気伝導度 (EC)、水温を計測し、50~100mlの水サンプルを採取した (図-1)。

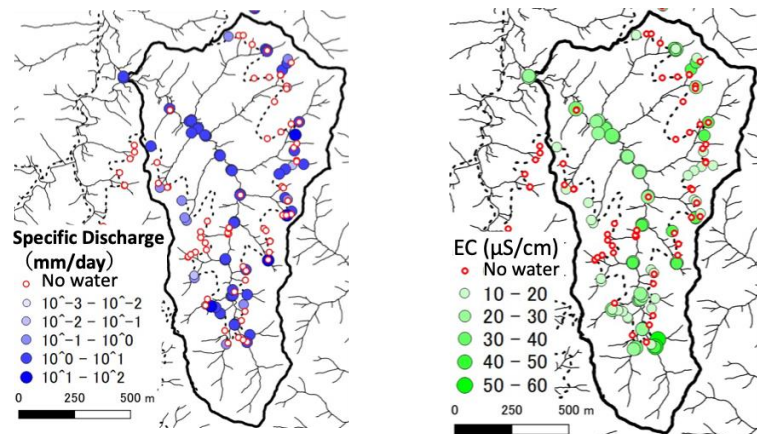


図-1 調査流域の比流量とECの分布

安定同位体比 ($\delta^2\text{H}$ および $\delta^{18}\text{O}$) は、名古屋大学宇宙地球環境研究所に設置のPicarro L2130-i 同位体分析装置を用いて測定した。分析対象は渓流水、降水、浅層土壌水 (深さ5cmおよび30cm) である。シリカ (SiO_2) 濃度は、モリブデン黄法により定量され、試料中の SiO_2 がモリブデン酸と反応して生成する黄色錯体の吸光度を測定することで濃度を算出した。シリカの分析は、株式会社地球科学研究所の協力により実施した。

3. 結果と考察

堆積岩地域における源流域141地点を対象に、基底流の流出特性を多地点かつ時系列で評価し、その空間的変動を明らかにした。比流量には0.01mm/日から10mm/日の4オーダーの違いがあり、電気伝導度 (EC) には10~50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の違いが見られた。小規模流域 (<10ha) では、透水性の高い岩盤 (例: 風化した砂岩) では、降水が深層まで浸透することで流量・ECともに低下し、逆に低透水性岩盤 (例: 未風化の泥岩) では、地下水が基岩沿いに流下・滞留することで流量 (1~10 mm/day) やEC (40~50 $\mu\text{S}/\text{cm}$)

が高くなる傾向が示された。大規模流域(>10ha)では、透水性の異なる層が交互に存在し、水が低透水層に沿って集約されることで、安定した流量と高いECの流出が確認された(図-2)。

さらに、2024年6月に採取された水試料の安定同位体比($\delta^2\text{H}$ および $\delta^{18}\text{O}$)分析では、ECが高い地点では、冬季降水に近い同位体比($\delta^2\text{H}=-10$ 、 $\delta^{18}\text{O}=-60$)を示しており、これらの地点では冬季に浸透した水が基岩内に貯留され、遅延して流出している可能性があることが示唆された(図-3)。一方、ECが低い地点では、夏季降水に近い同位体比($\delta^2\text{H}=-4$ 、 $\delta^{18}\text{O}=-28$)が見られ、表層近くの浅層水の影響が強いと考えられる。

加えて、シリカ(SiO_2)濃度の分析では、ECが高く同位体比が冬季降水に近い地点でシリカ濃度も高く(10~15mg/L)、これらの地点では風化度の低い基岩との接触が長く、ミネラルの溶出が進んでいることが推測された。このように、安定同位体比およびシリカ濃度の情報は、流出水の起源や滞留時間、通水経路の深さに関する有力な指標となった。

本研究により、堆積岩地域における基底流の流出特性が、地質構造や風化の程度によって大きく左右されることが明らかとなった。具体的には、風化泥岩や未風化基岩の存在が流路の深さや滞留時間に影響し、それが比流量や電気伝導度(EC)に反映された。高ECの流域では、基岩に沿った長期的な遅延流が流出に寄与しており、同位体比の低さからも冬季降水の貯留水が関与している可能性が示唆された。一方で、透水性の高い岩盤では水が深層に浸透して流出量が少なく、ECも低かった。さらに、大規模流域では異なる透水性を持つ地層を経て水が集約され、安定した高ECの基底流が生じと考えられた。また、流域東側では流域西側と比較して比流量が高くECが低くなる傾向が見られ、異なった点は、亀裂や走向傾斜などの岩盤構造が影響していると考えられた。砂岩泥岩互層からなる堆積岩流域においては、層理面や節理面に沿った水の移動が確認されている(Inaoka et al. 2020)。走向傾斜は同様であっても、堆積岩の層構造の傾斜方位および層に形成される亀裂の有無により、水の移動方向は異なる可能性がある。今後、流域の土壌の湿潤度の違いと流出の違いについてより詳細に検討する必要もある。山地上流域での水流出プロセスの時空間変動を把握し、その要因として、降水による流域の湿潤状態の変化や、走向傾斜などの岩盤構造などを検討する必要もある。

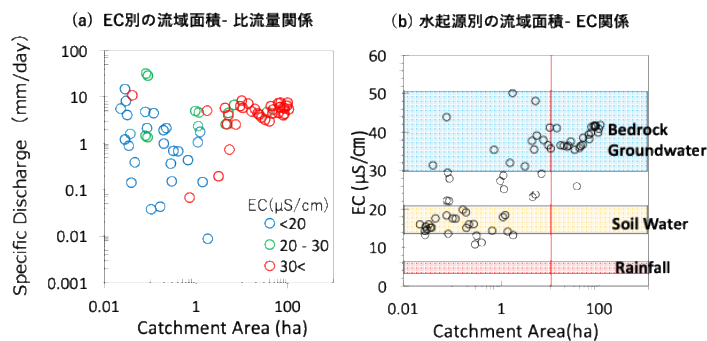


図-2 (a) EC 別の流域面積と比流量関係、(b) 水起源別の流域面積と EC の関係

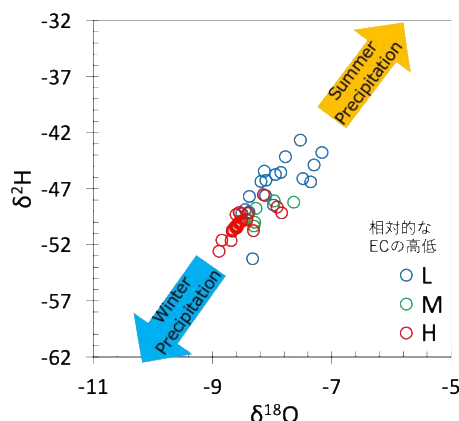


図-3 サンプル地点の EC の違いと安定同位体比分析結果

引用文献

- Asano & Uchida, (2012) Flow path depth is the main controller of mean base flow transit times in a mountainous catchment. *Water Resources Research* 48(3): 3512.
- Egusa et al., (2013) Relationship between catchment scale and the spatial variability of stream discharge and chemistry in a catchment with multiple geologies. *Hydrological Research Letters* 7(2): 12-17.
- Inaoka et al., (2020) Effects of geological structures on rainfall-runoff responses in headwater catchments in a sedimentary rock mountain. *Hydrological Processes* 34(26): 5567-5579.
- 地頭蘭ら, (2004) 鹿児島県出水市針原川流域の水文地形的特性と深層崩壊. 砂防学会誌 56(5): 15-26.
- Katsuyama et al., (2008) Comparison of rainfall-runoff characteristics in forested catchments underlain by granitic and sedimentary rock with various forest age. *Hydrological Research Letters* 2: 14-17.

流星による VLF 帯電波放射の観測的研究

Observation of Meteoric VLF Radio Emission

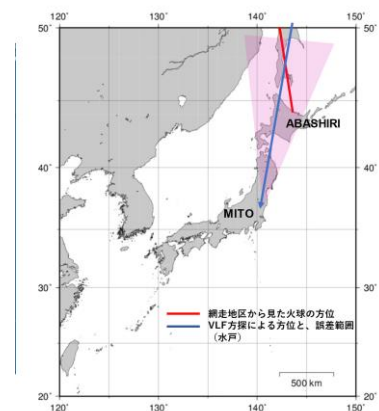
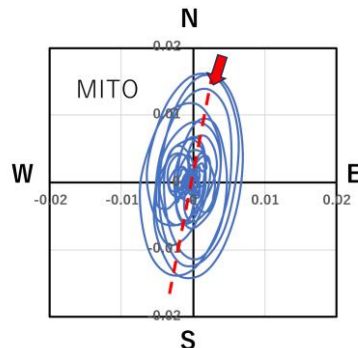
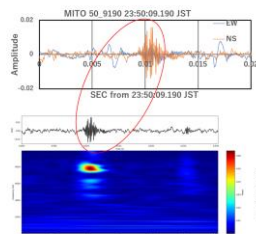
渡邊 堯（情報通信研究機構）、大矢浩代（千葉大）、塩川和夫（名古屋大）、小林美樹（NMS）、加藤泰男（名古屋大）、鈴木和博（NMS）

この研究は、地球上層大気圏に突入する流星や宇宙機の周辺で発生することが示唆されている、VLF 領域における電波放射の存在の確認を、主な目的としている。流星については、1981年8月におけるペルセウス流星群に属する火球（特に明るい流星）について、初めてVLF電波放射の存在を示唆する観測結果が得られているが、引き続き各国で行われている同様の観測においては、雷起源の空電との判別が明確で無く、この種の電波放射の存在については、未だに意見が分かれている状態にある。宇宙機再突入については、2020年の「はやぶさ2」再突入において、電波放射の存在を示す観測結果が得られ、特に2023年のOSIRIS-REXについては、方向探知（方探）解析によって、VLF電波放射の存在がほぼ確認されたと言える（詳細な解析は継続中）。電波放射の発生は、波形やスペクトル等の特性により、地球超高層大気圏を秒速数十kmで運動する物体の周辺に形成される、高温のプラズマ領域における放電現象が、主要な電波発生源であることが推測される。以上の研究成果を踏まえ、VLF電波放射と流星関連現象との関連を推定する上で、有効性が確認された方探観測技術を、本年度に発生した流星群や宇宙機再突入イベントに適用することにより、以下のような結果が得られた。

(1) 2024年8月12日23時50分09秒に発生した流星に伴うVLF電波の方探観測

この流星は、ペルセウス流星群の活動極大期に、北海道や北日本で見られた低緯度オーロラをバックにして発生した明るい流星（0等級）として、注目を集めた（左図、網走市能取湖で撮影。提供：陸別銀河の森天文台・津田浩之氏）。この時、母子里観測所におけるVLF電波データは、観測装置の不具合のため欠測であったため、水戸市近郊で得られたVLF観測データの方探解析を行った（NS/EWループ+垂直アンテナを使用）。この流星の発生時刻に検出された、連続性VLFノイズの波形と動スペクトルを下図aに示す。この波形の方探解析（リサーチ表示）の結果を下図bに示す。垂直アンテナによる入射電波の極性測定の結果、このシグナルは水戸から見て、ほぼ真北の方向から来ていることが分かった。この結果は、上記の流星写真による流星の発生方位と、誤差の範囲内で良い一致が見られ、流星はサハリン南部で発生したことが分かる（下図c）。当該方向には雷雲活動も見られず、流星出現時刻との対応も良いため、流星起源のVLF電波放射が観測されたものと思われる。

水戸 (36.43N, 40.36E)



(a) : 2024年8月12日23時50分09.1秒(JST)、水戸市近郊で観測された連続性VLFノイズの波形、下：上記波形の動スペクトル(Wavelet解析)

(b) VLF電波のNS/EW各成分のリサーチ表示による方探解析。電波の入射方向は垂直アンテナ出力により決定。

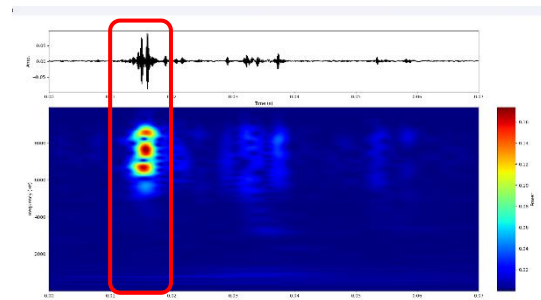
(c) VLF帯電波の方位(青線)と誤差範囲(ピンク)、能取湖(網走)より撮影された写真(上掲)による流星発生方位(赤線)。

(2) 2024 年 12 月 5 日 01 時 09 分に北海道東方で発生した大火球に伴う VLF 電波放射の方探観測

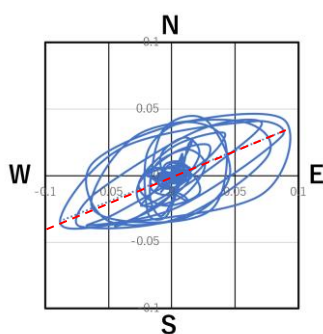
母子里観測所における VLF 電波観測データの方探解析の試行として、表記のイベントの解析を行った。この火球は満月クラスの明るさを持ち、オホーツク海沿岸地域から道南地域にかけて広く観測されたが、ライブカメラの映像が多く、方位測定は映り込んだ地物によって行った。紋別市で撮影されたライブカメラ映像を下図 a に示す。この大火球発生の時間帯について、母子里観測所で得られた VLF 電波観測データを調べたところ、12 月 5 日 01 時 9 分 42.15 秒 (JST) に、下図 b にある波形と動スペクトルに見られるような、前述のケースと同様の、継続性を持ったノイズが発生していることが分かった。そこで下図 c にあるように、NS/EW 成分のリサーチ解析を行ったところ、このシグナルは母子里観測所における東西線から、東北東 (+21 度) もしくは西南西 (-21 度) の方向から来ていることが示された。母子里では垂直アンテナによる観測が行われていないため、入射方向の判別は出来ないが、西南西の方向には雷雲活動が殆ど見られないことと、火球発生時刻との整合性の観点から、この VLF シグナルが大火球の発生に起因することが、強く示唆される。そこで紋別と士幌の 2 ヶ所のライブカメラによる映像から推定した方位と、母子里における VLF 方探観測による方位を比較すると、下図 d にあるように、この大火球は南千島地域で発生したことが分かる。



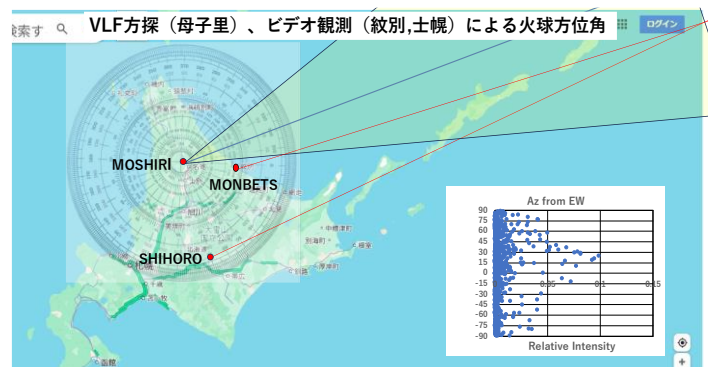
(a) 2024 年 12 月 5 日 01 時 09 分 (JST) 頃、紋別市において撮影された大火球。カメラ視野は東向き。



(b) 大火球発生時に母子里観測所で観測された VLF 電波シグナルの波形と動スペクトル。



(c) NS/EW 成分のリサーチ表示による方探解析。



(d) 紋別、士幌の2地点におけるビデオ映像から求めた火球の方位 (赤線) と、母子里から見た VLF 電波シグナルの入射方向と誤差範囲。

(3) まとめ

本年度に観測された2件の明るい流星について、VLF放射の存在が、方探解析によってほぼ確認されたと解される。日本周辺で発生した2件の大型宇宙機再突入については、VLF電波放射の存在が認められたため、現在解析が進行中である。今後は更に方探観測の信頼性向上のため、複数観測点での方探観測により、電波放射の「位置」の確定を目指す。また、楕円偏波の特性を示すケースが多く、直線偏波近似による解析の場合は誤差が大きいため (入射高度角がゼロでは無いことによる)、波動解析による精度の向上を図りたい。

(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であることを明らかにした[Phys. Rev. D 98, 022004 (2018)]。2024年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て、フレアに伴うフォルツブシュディクリーズ(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た精密な解析により、FDの原因と思われるIMFの空間構造との関係性を明らかにする。

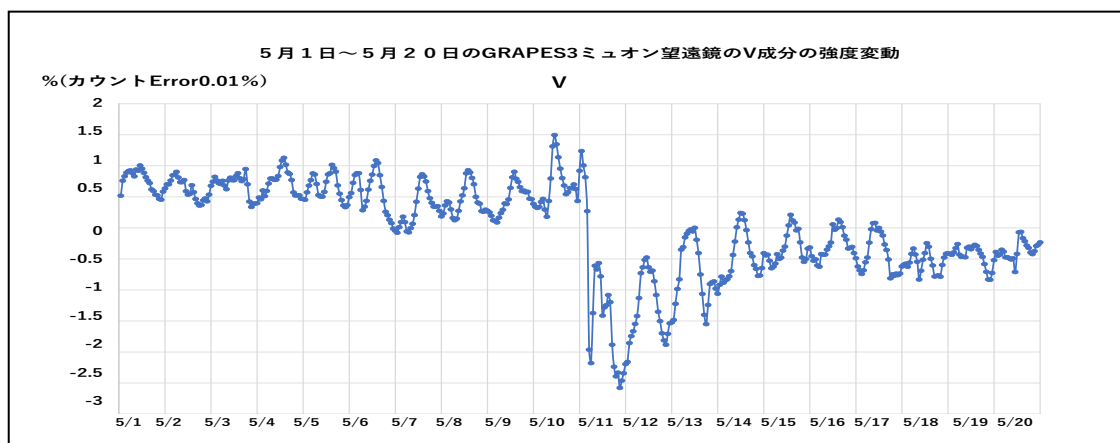
結果

2024年5月8日から15日にかけて太陽面で大規模フレアが連続して発生した。この期間中の宇宙線の強度変動で典型的な形のFDによる宇宙線強度変動が5月10日から14日かけて見られた。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抽出においてその振幅の大きさの見積の精度が十分とは言えない。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5月1日から20日までのGRAPES-3ミュオン望遠鏡の垂直方向(V)成分の強度変動を示す



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】

地磁気で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わる現象であることが知られている。本研究では、あらせ衛星の観測と中緯度 SuperDARN レーダーの観測を組み合わせることにより、地磁気脈動のモードを決定しその空間構造を明らかにする。

【研究方法】

昨年度に引き続き、2022 年度に実施した SuperDARN と Arase の磁力線共役キャンペーン観測期間に夕方側で観測された 2.3mHz の周波数をもつ地磁気脈動について、イベント解析を行った。このイベントは Arase が位置する磁力線の footprint が北米大陸上空にあるため、北米の地磁気ネットワーク、SuperDARN 観測網、TEC、による地上観測データと、Arase 衛星の電場・磁場の観測データを組み合わせた解析が可能となった。また、地磁気静穏期に発生している。SuperDARN の 2 次元の観測によって地磁気脈動の伝搬方向の同定と波数の同定を行った。また、地磁気観測における地磁気脈動の位相と振幅の緯度変化から磁力線共鳴の同定を行った。さらに、Arase 衛星の電場磁場観測から地磁気脈動の Poynting Flux を計算し、地磁気脈動の特性について調べた。上記の解析は、共同研究として行っており、申請者は主に衛星データの解析を担当した。

【研究結果と考察】

北米 SuperDARN の観測によって、地磁気脈動は地磁気緯度 62 度から 72 度・経度 280 から 340 度の広範囲で観測され、反太陽方向の東向き伝搬の特性を持つことが明らかになった。また、この ULF 波の経度方向の波数を SuperDARN の観測を用いて推定したところ 12 と小さいことがわかった。SuperDARN と地上磁場両者の観測から、地磁気緯度 68 度付近で地磁気脈動の位相と振幅が変化することもわかった。一方 Arase 衛星では、電場・磁場の toroidal 成分に地上で観測された地磁気脈動と同周期の波動が卓越している。スペクトル解析によって電場・磁場の位相差を計算したところ 2mHz において 45 度であった。この電場と磁場の位相差から、この地磁気脈動が定在波と進行波が混在した波動であることと解釈される。また Arase の電子密度の観測に基づいてイオン密度を仮定し、地磁気脈動の共鳴周波数を導出したところ、周波数は南北半球の電離圏の電気伝導度の違いによって起きる quarter wave を支持する結果となった。以上の解析から、本研究は、quarter wave mode によって引き起こされた地磁気脈動を地上と衛星観測で初めて捉えたことを示している。

【今後の展望】

本研究で得られた成果は、現在、国際誌への投稿に向けて準備を進めている。今回は 2022 年の静穏時に発生した地磁気脈動を解析したが、2023 年にも同様のキャンペーン観測を実施しており、この期間には磁気嵐を含む擾乱時のデータも含まれている。今後は、静穏時と擾乱時のイベントを比較し、地磁気脈動の経度方向の波長構造や伝搬方向の違いなどの特徴を詳しく調べる。

【成果発表】

- [1] N. Nishitani, K. Hosokawa, T. Hori, M. Teramoto, P. V. Ponomarenko, A. Shinbori, Y. Obana, A. S. Yukimatu, Y. Miyoshi, I. Shinohara, “Preliminary report of special time measurements in support of Arase conjunctions in Fall 2022”, SuperDARN Workshop 2023, May 30, 2023, University of KwaZulu-Natal, and SANSA, South Africa
- [2] 西谷 望, 細川 敬祐, 堀 智昭, 寺本 万里子, Ponomarenko Pavlo, 新堀 淳樹, 尾花 由紀, 行松 彰, 三好 由純, 松岡 彩子, 熊本 篤志, 土屋 史紀, 松田 昇也, 笠原 禎也, 中村 紗都子, 篠原育 “2022 年秋の SuperDARN とあらせ衛星共役 観測によって捉えられたイモムシ型 ULF 波動について”、SGEPSS Fall Meeting 2023、2023 年 9 月、仙台、日本
- [3] 新堀 淳樹、細川 敬祐、堀 智昭、寺本 万里子、Pavlo Ponomarenko、尾花 由紀、西谷 望、行松 彰、大塚 雄一、西岡 未知、Perwitasari Septi、熊本 篤志、土屋 史紀、松田 昇也、笠原 禎也、松岡 彩子、三好 由純、篠原 育、“超低周波波動によって駆動される高緯度電離圏振動：SuperDARN レーダーと GNSS-TEC 法を用いた同時観測結果”、JpGU 2024、2024 年 5 月、幕張
- [4] Atsuki Shinbori, Keisuke Hosokawa, Tomoaki Hori, Mariko Teramoto, Pavlo V. Ponomarenko, Yuki Obana, Nozomu Nishitani, Akira Sessai Yukimatu, uichi Otsuka, Michi Nishioka, Septi Perwitasari, Atsushi Kumamoto, Fuminori Tsuchiya, Shoya Matsuda, Yoshiya Kasahara, Ayako Matsuoka, Yoshizumi Miyoshi, Iku Shinohara “Periodic oscillations of the high-latitude ionosphere driven by ultralow frequency waves: simultaneous measurements using SuperDARN radars and GNSS-TEC technique”, SuperDARN Workshop 2024, May 23, 2024, NSSC/CAS

半導体光検出器SiPMの20 GeV帯域ガンマ線観測への応用と紫外分光性能の評価
Application of silicon photomultipliers for 20 GeV gamma-ray observations and evaluation of
their UV sensitivity

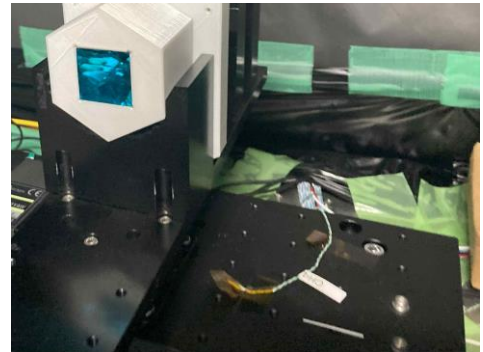
山本常夏、甲南大学・理工学部

【作成要領】

本計画により20 GeV帯域ガンマ線観測で使うSiPM検出器の開発を行っている。この検出器は将来、ガンマ線観測計画CTAの大口径望遠鏡に搭載することを考えている。

CTA計画は口径4~23 m の複数の種類の望遠鏡を合計約100台建設し宇宙で起こっている高エネルギー現象を高精度で測定する国際共同研究である。特に大口径望遠鏡は口径23mの主鏡と1885本の光電子増倍管からなるカメラを搭載している。20 GeV以上のエネルギーのガンマ線が大気中で生成した空気シャワーから発せられる大気チェレンコフ光を高効率で集光し観測している。この大口径望遠鏡のカメラに搭載されている光電子増倍管を半導体検出器SiPMに置き換えることを検討している。それにより、画素数を4倍にして空間分解能を上げることと、光検出効率を上げることにより、観測精度が高くなることが期待される。一方SiPMは光電子増倍管に比べ赤外線への感度が高い。チェレンコフ光は紫外線領域で強く、赤外線に感度があると夜光などのノイズが増え観測精度の低下が懸念される。それに加え、SiPM自体が赤外線を発光する。光子電子をアバランシュにより増幅させたときに赤外線が発生し、それが光電面に届くことが確認されている。赤外線を吸収し紫外線を透過させるようなフィルターは作れず、赤外線は反射させるか透過させるしかない。このため光電面に赤外線フィルターを置くとSiPM内部で発生した赤外線が戻され周辺の画素に入射することによりクロストークが生じる。そこでSiPMに赤外線の反射率を下げた集光器を取り付けることを検討している。

こういったガンマ線観測用の焦点面検出器を開発するには、検出器の感度を入射光の波長と入射角の関数で計れる装置が必要になる。本計画では、遠隔から自動制御できる



開発中の SiPM を使った検出器。赤外線を除去する集光器を取り付けている。



キセノンランプと分光器を組み合わせた光源。遠隔操作により自動測定ができるようになっている。

分光装置を搭載したキャリブレーションシステムの開発を行っている。右図に開発中のSiPM検出器を示す。SiPMに赤外線の反射率を下げた鏡で作った集光器を取り付けている。この検出器を治具に取り付け暗室の中のキャリブレーション装置に装着している。これまではLEDやPhotodiodeなどを使い測定をしていた。この方法だと測定できる波長が限られるうえに、波長を変えるごとに検出器にかけている電圧を下げ、手で光源を取り換える必要があった。それをコンピュータにより遠隔操作しながら自動測定ができるように改良している。まず光源はHAMAMATSU Photonics社製E7536を使ったキセノンランプを使い、それをSIMADZU社製 SPG-120UVという分光器に通して190~700 nmの波長領域で分光し、検出器に照射するようにした。左図に開発した光源を示す。この分光器導出により波長と入射角を同時に遠隔制御することできるようになり、検出器の検出性能を効率よく測定できるようになった。2025年4月に光学系の制作が完了する予定で、本格的な測定ができるようになるはずである。

今後この装置によりSiPMを使った光検出器の感度を測定し、最適化を行っていく予定である。

(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電波バーストが出現する。この中で 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型と呼ばれる電波バーストがある。Ⅱ型バーストの出現は太陽高エネルギー粒子(SEP)現象の出現と関係があることが知られているが、両者の具体的な関係は不明である。申請者らは数 100MHz 帯電波の観測から、Ⅱ型バーストには大きな周波数ドリフト率を持つ微細構造が含まれてい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 にどのように関わっているかは未解明の課題である。本研究は、広帯域Ⅱ型バーストの高分解スペクトルと太陽大気画像の解析に基づき、①電波微細構造導出による電波発生高度～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する。

2. 研究内容・進行状況

3 年計画の初年となる本年度は、電波観測・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・高周波数分解偏波スペクトルデータを用いて、太陽サイクル 24 に出現したⅡ型バースト 13 イベントの出現特性の解析を進めた。全イベントで微細構造を示すことは既に確認済みであったが、本解析により新たに、イベント毎に微細構造を示す時間帯と示さない時間帯が混在している場合があること、その混在度合いは各イベントで様々であることを見出した。13 イベントのうち 1 例は、豪州のアレイアンテナ(MWA)での電波源探索も同時に行われており、このⅡ型バーストは磁気ループのトップ付近で発生し、プラズマの複雑な動きを伴う現象であったことが報告されている(Bhunia+, 2023)。このプラズマ変動の検出は、スペクトル微細構造と粒子加速との関連性を誘起させる結果として興味深い。著者らは、プラズマの動きは電波散乱による見掛けの現象と述べている。電波散乱では、散乱の有無で偏波特性に差異が生じることが想定される(ex. Ledenev+, 2002)。そこで IPRT/AMATERAS の偏波スペクトルデータを用いて、このⅡ型バーストの偏波解析を行った結果、微細構造と非微細構造で偏波に有意な差異はないことを見出した。このことは微細構造の有無は電波出現後の散乱による見掛けの現象ではない可能性を示しており、Ⅱ型バースト生成に寄与する粒子加速の特徴を示す結果として重要である(学術誌投稿準備中)。本結果に基づき、微細構造の有無は電波生成域固有の特徴として、現在は今太陽サイクルに出現したⅡ型バーストのデータも加えて粒子加速域の特徴の精査を進めている。また、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)の高分解電波スペクトル計測を可能にするため、アレイ型アンテナと高時間分解能偏波分光受信系の開発も新たに進めている。本開発計画では 2025 年度内に 2 素子アンテナでの観測開始を目指しており、立ち上げ後は、IPRT/AMATERAS との組み合わせで 20～500MHz 帯の太陽電波の高精細観測(電波生成域として大凡 1.05～3 太陽半径相当)が可能になる見込みである。

一方、太陽大気撮像データとⅡ型バーストデータの照合解析については、撮像間隔が短く、電波データとの比較・照合を行う面でメリットのある、SDO 衛星(NASA)の EUV 撮像装置 AIA の連続撮像データを用いて、上述した 13 のⅡ型バーストイベントから照合解析対象に適した時間帯を抽出し、微細スペクトル構造から想起されるプラズマ様相変動の関係の精査を進めている。

3. 報告済成果等

①三澤他, 日本地球惑星科学連合 2024 年大会, 幕張メッセ, 2024 年 5 月、②三澤他, 太陽研連シンポジウム, 宇宙科学研究所, 2025 年 2 月

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

本研究は、低周波(300MHz 帯)での超長基線電波干渉計(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、名古屋大学の多地点 IPS 太陽風観測システムの豊川局と東北大学の飯舘観測所及び蔵王観測所に設置されている電波望遠鏡の間で VLBI 実験を実施する。大口径の大型電波干渉計 Square Kilometre Array (SKA) の建設が開始され、2020 年代後半より SKA と他の電波望遠鏡間の VLBI 観測を通じた天文学、惑星科学研究の大きな進展が見込まれる。一方、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、電離圏の遅延効果の評価・補正がより重要となる。電波が地球電離圏を通過する時に受ける群遅延や電離圏の空間非一様によって生じる屈折の効果は電波源を 2 つの電波望遠鏡で観測して受信波形の相関処理を行うことにより、電波の到達遅延時間として検出される。電波源の位置を精密に決定するためには電離圏で生じる遅延時間の評価が必須となり、本研究では 300MHz での遅延時間の定量評価と補正方法の確立を目標とする。

本研究は 2023 年度に開始し、1 年目は VLBI 観測に必要なデータ収録システムを豊川局に設置した。その後、データ収録システムを構成しているサンプラ（日本通信機 VSSP32）や PC に不具合がでたため、2 年目の本年度はサンプラや PC の交換などを実施し、2025/2/6 に 3 つの電波源(0019-00、0056-00、および 3C144)の観測を、3/25 に 1 つの電波源(1938-15)の観測を名古屋大学豊川局と東北大学飯舘観測所で実施した。2/6 の観測では相関処理の結果有意なフリンジの検出ができなかったが、観測設定を改めた結果 3/25 の観測結果から有意な相関結果を得ることに成功した（図 1）。今後は、このような観測を積み重ねて電離層の遅延量変動の成分を取り出すとともに、名古屋大学富士局と木曽局、東北大学蔵王観測所との VLBI 観測の実施体制を整備し、電離層の遅延量の補正方法の確立を進める。

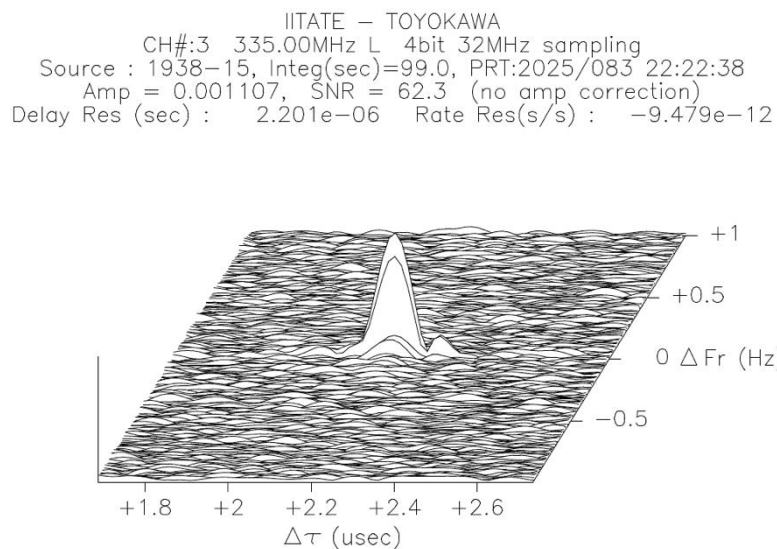


図 1 : 2025/3/25 に名古屋大学豊川局と東北大学飯舘観測所で実施した 325MHz における電波源 1938-15 の相関処理結果。横軸が遅延時間 $\Delta\tau$ 、縦軸が遅延時間変化率 ΔFr 、高さ軸が相関関数を示す。

(別紙様式04-2)

映像IoT技術とインフラサウンド観測による火山（桜島）モニタリング技術開発
Monitoring of a volcano (Sakura-jima) via visual IoT technology and infrasound observation

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、映像IoT技術開発およびインフラサウンドセンサー開発を進めてきた。本共同研究課題では、長期間に及ぶ常時データ取得、モニタリング性能評価、システム改良のサイクルにより、これらの技術を火山モニタリングに用いる際の問題点の抽出とその解決のための技術開発を行う。これにより、遠隔地点からの実用的な火山モニタリングの実現可能性について研究する。

2. 研究内容

名古屋大学宇宙地球環境研究所（ISEE）の鹿児島観測所に火山監視カメラおよびインフラサウンド観測装置を設置し、映像と音波（インフラサウンド）による桜島モニタリング実験を行う。取得データは、名古屋大学統合データサイエンスセンター計算機システムのネットワークを経由し、情報通信研究機構のデータサーバーへ転送される。

- ① 鹿児島観測所はネットワーク的に安定してデータ送付が可能なことから、これまではクラウド上のサーバーで実行できる映像解析の技術開発を進めてきた。しかし、画角的に望ましい火山監視カメラの設置場所がデータ通信的にも都合が良い場所とは限らない。そこで、通信環境が厳しいケースを想定し、必要なデータ送信量を削減することを目的に、噴火（噴煙）監視のための映像解析をエッジとクラウドの両方で連携して実施する手法について2023年度に検討を開始した。本年度は、エッジでの噴煙検出手法を発展させ、さらに定量的な削減効果の評価を実施した。
- ② 火山噴火の際に発生する比較的高い周波数のインフラサウンドを高S/Nで観測すべく、鹿児島観測所で常時観測を継続しているインフラサウンド観測装置を、従来の静電容量型MEMS気圧センサー単体を用いたものから、MEMS気圧センサーと小型超低周波音マイクロホンの両方を併用し2023年度に開発したファームウェアを搭載した新しい複合型の観測装置に交換し、常時観測を継続した。また、取得したデータを基に、火山噴火の自動検出手法に係る検討を開始した。

3. 研究結果

上述の研究内容の各項目に対し、それぞれ下記の研究成果を得た。

- ① 2023年度にエッジ・クラウド連携として、クラウドではOptical Flowによる隣接フレーム間の物体の動きを追跡した手法で噴煙を検出し、エッジではフレーム間差分による軽量の計算により噴煙を検出する手法を提案した。エッジにおける単純なフレーム間差分による画像では、噴煙以外の雲や映像中に映り込む車を誤検出する可能性がある（図1左）。そこで、その悪影響を低減するためのマスキングの適用を新たに考案した。エッジにおいて噴火（噴煙）の発生の可能性のあるフレームをスクリーニングし、対象となるフレームのみをクラウドのサーバーへ送信して検出することで、全映像データをクラウドへ送付して検出する場合と比較して、データの送信量を90%以上削減できることが確認された。
- ② 複合型の新しいインフラサウンド観測装置（図2左）によるインフラサウンド観測波形（図2右）は、ノイズフロアが 0.1 Pa に満たない程度の低自己雑音を実現していることが確認された。図中観測波形に3回現れる大きな振幅の信号は、気象庁が発表する桜島の爆発的噴火の時刻に対応しており、従来よりも高いS/Nで噴火由来のインフラサウンドが観測できている。さらに、振幅が数 Pa レベルの信号も複数回見られており、これらは必ずしも噴火由来というわけではなく、近くの道路を通

過する車の風圧など、別起源の可能性も考えられる。しかし、複合型観測装置の観測性能の高さは示唆しており、適切な設置場所で運用することで火山活動の観測に役立てられる可能性がある。

4. 成果発表

[1] 菊田和孝、村田健史、西村太志、“映像IoT技術と画像解析による桜島モニタリング”、日本火山学会2024年度秋季大会、2024年10月



エッジでのフレーム間差分による検出

（単純なフレーム間差分では上図のように雲が誤検出されるため、明度に基づきマスキングすることで検出対象領域を制限する。）

クラウドでの Optical Flow による検出

図 1：エッジとクラウドでの連携映像解析による噴火（噴煙）検出

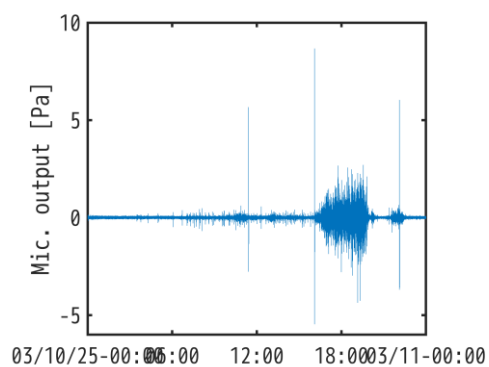


図 2：複合型観測装置による火山噴火のインフラサウンド観測例

(別紙様式04-2)

長時間持続ガンマ線イベント (Sustained gamma-ray emission) の太陽大気 応答

Chromospheric/Coronal Response to Sustained Gamma-Ray Emission (SGRE)

浅井 歩、京都大学・大学院理学研究科附属天文台

【研究目的】

Fermi衛星搭載のLarge Area Telescope (LAT) などにより、大規模なフレア/CMEイベントに付随して、しばしば長時間持続ガンマ線放射 (Sustained Gamma-Ray Event; SGRE) が検出されることが知られている (Ajello et al. 2021)。100MeV以上もの高エネルギー帯ガンマ線放射が、フレアのインパルス相をはるか越え数時間続いて検出されることもある。SGREをもたらす300MeV以上の陽子の起源については議論があるが、フレアでの磁気リコネクション領域とコロナ質量放出 (CME) 前面の衝撃波面の両方が加速の場所として示唆されている。SGREの放射は、このような加速された高エネルギー陽子が太陽大気 (彩層・光球) に突入することによって考えられているが、その際に太陽大気 (コロナ・彩層・光球) がどのように応答するか (例えば増光を伴うのかなど) は全く分かっていない。特に、インパルス相よりも十分に後の太陽大気応答であるため、これまでそもそも興味の対象となることが少なかった。そこで本研究では、SGREに対する太陽大気の応答を、太陽コロナ・彩層・光球などの観測データを用いて、特にインパルス相以降の時間帯での様子を調査することとした。

【研究方法】

Fermi/LATにより、2011年から2022年の間に40件程度のSGREイベントが報告され、そのイベントリストが整備されている。これらのイベントについて、SDO衛星AIAによる極端紫外線撮像データや京都大学飛騨天文台SMART望遠鏡などによる彩層データ、国立天文台野辺山電波ヘリオグラフによるマイクロ波データを用いて、コロナ・遷移層・彩層など太陽大気の応答、特に増光などがないかを調べる。SGREは、フレアループやリボンではなく、フレアを生じた活動領域の端の付近から放射されている可能性や、時間によって放射位置が移動することも報告されている (Ajello et al. 2021) ことから、フレア後の長時間にわたってフレア領域および周辺領域を広く調査する。本研究は、申請者およびISEE受け入れ教員が参加した国際ワークショップ「Origin of High-Energy Protons Responsible for Late-Phase Pion-Decay Gamma-Ray Continuum from the Sun2」(2023年10月に名古屋大学ISEEで開催) での議論に着想を得てさらに発展させたものである。

【研究結果・考察】

2024年度には、重点イベントとして、2012年3月7日のX5.4フレアをピックアップし、集中的に太陽大気について調査を行った。野辺山電波ヘリオグラフによるマイクロ波データや、飛騨天文台SMART望遠鏡によるH α 線画像ではSGREに伴う目立った増光などは活動領域周辺では確認できなかった。今後より調査範囲を広げてみる必要がある。一方で、AIAによる極端紫外線画像では、フレア直後に生じた短時間コロナホール (CMEに伴って発生したと考えられる) が消失する様子がとらえられた。これらとSGREとの関係について、より詳細な解析が必要である。

【まとめ】

本研究では、2012年3月7日に発生したX5.4フレア/CMEイベントに付随して、発生した長時間持続ガンマ線放射SGREについて、その太陽大気（コロナ・遷移層・彩層）の応答を調査した。マイクロ波やH α 線では目立った増光などは検出されなかったが、極端紫外線画像での短時間コロナホール形成消失過程と関連する可能性が見いだされた。SGREはこれまでに興味を引いてこなかった現象を調査する新規性の高いものであり、太陽大気の応答が発見された場合・されなかった場合のいずれも、SGRE生成メカニズム、ひいては太陽地球間での粒子加速機構に大きなインパクトを与えると期待され、今後も継続課題として推進を希望する。

- 1) https://cdaw.gsfc.nasa.gov/meetings/2023_SGRE/sgre_eventlist.html
- 2) <https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/SGRE2023/>

(別紙様式04-2)

南極における第四紀の海成化石と堆積物を用いた古環境復元
Quaternary paleoenvironment reconstruction using marine fossils and sediments
in the Antarctic region.

佐々木聡史、群馬大学・共同教育学部 理科教育講座

【研究目的】

本研究の目的は、東南極沿岸域の堆積物中に含まれる貝形虫や有孔虫などの石灰質微化石を用いた放射性炭素年代測定 (^{14}C) を行い、高精度な年代モデルを構築し、古環境や相対的な海水準の変化を復元することで、南極氷床の融解の時系列変化を明らかにすることである。

【研究内容・計画】

本研究は、宗谷海岸地域における海浜堆積物や湖沼堆積物に含まれている貝形虫や有孔虫などの石灰質微化石を対象にAMS法による放射性炭素年代測定を行い、より高精度の年代推定を行う。分析試料は、ふるい分けられた粗粒堆積物から石灰質微化石を約5 mg抽出する為、多くの時間が必要である。そのため、複数回に分けてISEEに訪れ、分析を行う。

【研究結果】

名古屋大学ISSE年代測定研究部において放射性炭素を測定の試料作から分析までを行った。各層準から貝形虫化石とゴカイ化石を抽出し、合計4試料の年代測定試料を作成したが、まだ測定はできていない。

【成果発表】

該当なし

「ひので」太陽極域磁場ISEEデータベースを用いた極域近傍の磁場の研究

Study of vector magnetic fields close to the solar poles using the Hinode database at ISEE

久保雅仁、自然科学研究機構国立天文台・SOLAR-Cプロジェクト

【作成要領】

1. 研究目的

太陽極域磁場の精密な測定は、太陽活動の11年周期変動を理解する上で不可欠であり、太陽風の発生源を特定する上で重要な境界条件を提供する。本研究の目的は、太陽極域の中でも緯度75度以上の極点近傍の磁場の振る舞い・特徴を理解することである。太陽極域磁場に関連する重要な課題として、極域の光球磁場から外挿した惑星間空間の磁束量と比べて、地球近傍で観測される磁束量が3-4倍大きいというオープンフラックス問題がある。太陽極小期の極点付近はほぼ単極の磁場で占められ、オープンフラックスになっていると考えられており、その磁束量の見積もりに直結する。極点付近の磁場の平均強度や傾きといった特徴を精度よく理解することは、オープンフラックス問題の原因が太陽極域磁場の測定にあるかを切り分けることにつながる。また、極点近傍の磁場の長期変動を詳細に調べることで、極点付近の子午面還流の振る舞いやそれに伴う磁束輸送を理解する手掛かりにもなる。極点近傍の磁場情報を得られるのは、シーイングの影響を受けずに高解像度・高精度のベクトル磁場観測が可能な「ひので」衛星のデータのみである。ただし、「ひので」データでも極点付近の磁場を精度よく導出するのは挑戦的な課題である。

2. 研究結果

本研究では、2017年から2021年にかけて「ひので」衛星で行われた太陽極域パノラママップキャンペーン (HOP206) で得られた名古屋大学宇宙地球環境研究所で公開中のデータベース (doi: 10.34515/DATA.HSC-00001) を使用して (図1)、超高緯度域における磁束の減少の原因を調べた。過去の研究 (Petrie 2017, Yang et al. 2024) で太陽の75度以上の高緯度では磁束が減少することが指摘されていたが、本研究で75度以上の高緯度における減少傾向は緯度の関数ではなく、heliocentric angleの関数であることを示した (図2)。つまり、太陽リム付近の磁束が過小評価されていることを意味する。リム付近で太陽面に対する磁場の傾き角のばらつきが大きくなり、マイナーな極性の磁場が増えることで極域の正味の平均磁束が小さくなっている。磁場の傾き角のばらつきが大きくなる要因として、リム付近でS/N比が低いためではないかと考えたが、空間的なピクセルビニングによってS/N比を向上させても極域磁束の過小評価は解決されなかった。極域の強い磁場に対してはS/N比を向上させることで、極性の偏りが大きくなったが、極域の平均磁束は主に弱い磁場によって決定されることが原因と考えられる (図3)。一方で、極域の磁束の過小評価が改善したと仮定しても、緯度70度以上の極域全体の平均磁束は測定値に対して約1.2倍にしかならず、オープンフラックス問題解決には不十分であることも分かった (成果発表I, IV, V)。

3. 成果発表

- I. 藤森愛梨沙、「ひので」衛星観測を用いた太陽極域磁場の導出方法に関する研究」、東京大学大学院理学系研究科天文学専攻修士論文、2025年
- II. M. Kubo, D. Shiota, Y. Katsukawa, M. Shimojo, D. Orozco Suarez, N. Nitta, M. DeRosa, R. Centeno, H. Iijima, T. Matsumoto, S. Masuda, "Comparison of polar magnetic fields derived from MILOS and MERLIN inversions with Hinode/SOT-SP data", Solar Physics, 2025, submitted.
- III. D. Shiota, M. Kubo, Y. Katsukawa, M. Shimojo, A. Iijima, T. Matsumoto, S. Masuda, "Hinode observation of long-term variation of magnetic fields in the Sun's polar regions during Cycle 24-25", Hinode-17/IRIS-15/SPHERE meeting, Montana State University, July 23-27, 2024
- IV. 藤森愛梨沙、勝川行雄、久保雅仁、「太陽極域におけるリム付近での平均磁束密度の過小評価について」、日本天文学会2025秋季年会、関西学院大学、2024年9月11-23日
- V. 藤森愛梨沙、勝川行雄、久保雅仁、「「ひので」衛星観測を用いた太陽極域磁場の導出方法に関する研究」、太陽研究者連絡会シンポジウム 2024、JAXA/ISAS、2025年2月17-19日

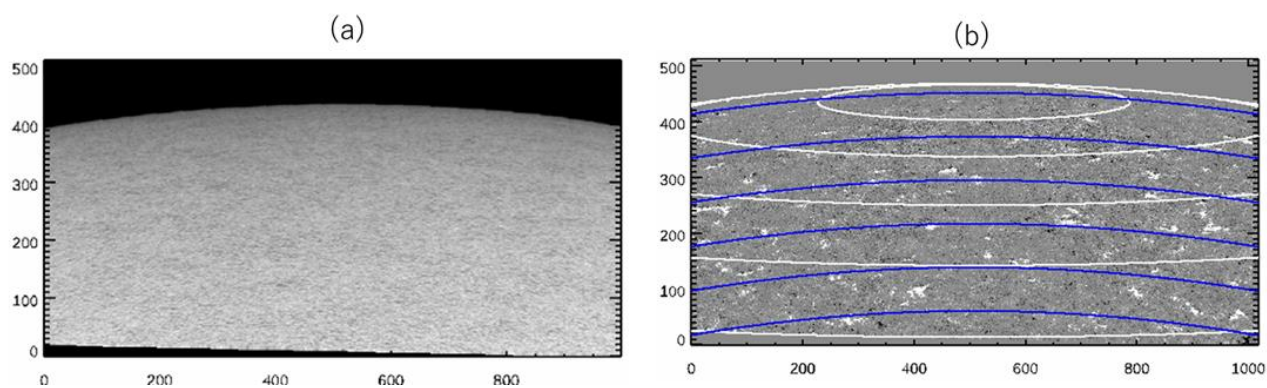


図1. 「ひので」衛星で2021年9月22日に取得した北極域の連続光強度マップ(a)と磁束密度のマップ(b)。白線は緯度、青線は太陽面中心からの距離のコントラストを示す。緯度は65度から5度刻み、距離は825秒角から25秒角刻み。成果発表Iから抜粋。

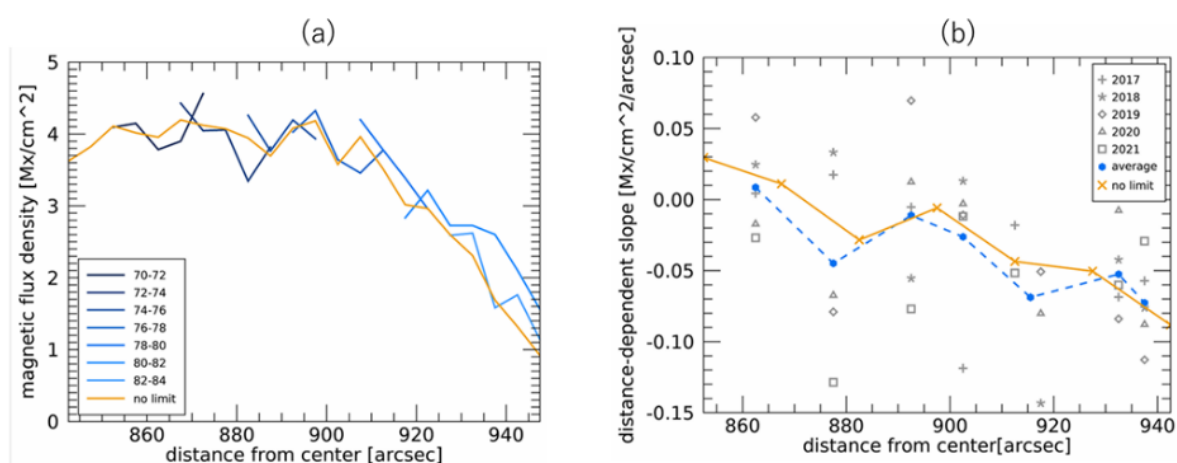


図2. (a) 平均磁束のhelio-centric angle依存性 (オレンジ線)。青線は緯度を固定した場合の各緯度でのhelio-centric angle依存性を示す。(b) (a)図のオレンジ線及び青線の傾き。成果発表Iから抜粋。

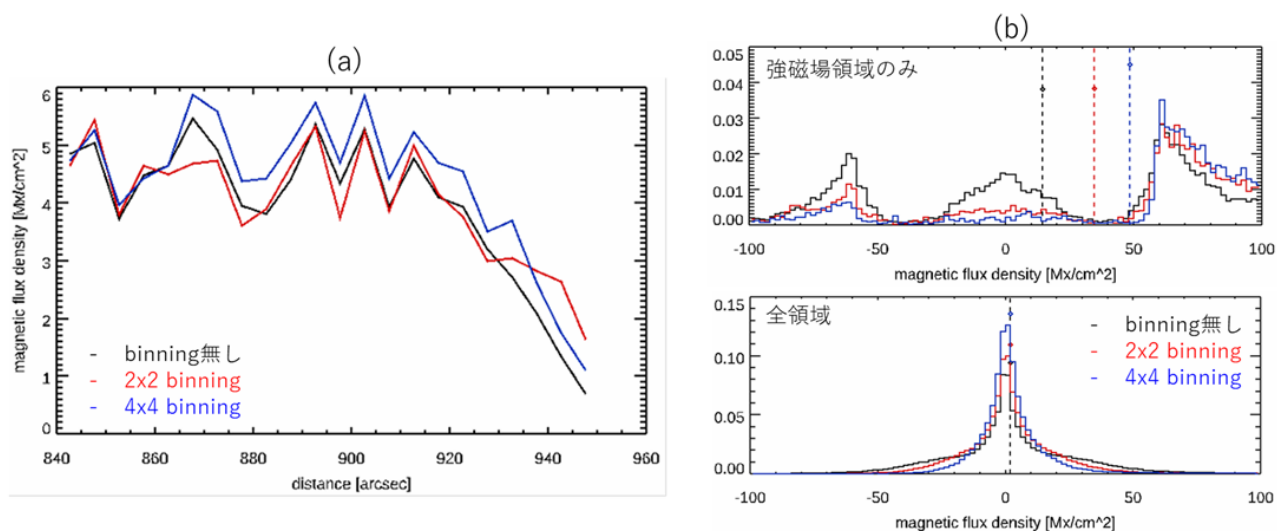


図3. (a) 異なる空間binningにおける平均磁束のhelio-centric angle依存性。黒線がbinning無し、赤線が2x2 binning、青線が4x4 binningの場合。(b) 太陽面中心からの距離が840秒角～940秒角の領域の磁束密度のヒストグラム。線の色の意味は(a)と同じ。上図は磁場が強い領域のみで、下図は磁場の強弱に関わらず全ピクセルを使った場合。縦点線は分布の重心を表す。成果発表Iから抜粋。

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}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 OxII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}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}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釧路市春採湖および丹那盆地、小浜低地、紀伊半島ゆかし潟の成果が学術誌(酒井ほか, 2024; 木村ほか, 2024; 堀ほか, 2024; Fujiki et al., 2025)に公表され、富士川扇状地および斐伊川河口の成果をRadiocarbon国際学会で発表した(Nakanishi et al., 2024a,b)。

引用文献

Toshiyuki Fujiki, Toshimichi Nakanishi, Kazuyoshi Yamada, Kaoru Tabata, Haruhiro Ikeda, Pollen analysis of sediment core from Yukashigata Lagoon, western Japan: revealing human induced paleovegetation changes during the past 1500 years. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 36, 4. 2025, <https://doi.org/10.1007/s44195-025-00088-8>

堀 和明・岡田篤正・中西利典・洪 完・中島 礼．小浜低地の地下地質．季刊地理学，**76**(4)，181-189，2024年

木村治夫・堤 浩之・稲荷絢音・谷口 薫・中西利典．地中レーダ探査からみた丹那断層田代地点の極浅部左横ずれ構造．*第四紀研究*，63(2)，p.65-75，2024年，doi: 10.4116/jaqua.62.220756

酒井恵祐・中西利典・七山 太・藤木利之・大串健一．北海道東部春採湖の花粉分析による過去9,500年前から3,200年前にかけての古植生変遷．*LAGUNA*，31，p.1-13，2024年

成果発表

Toshimichi Nakanishi, Tatsuya Ishiyama, Ki-suck Sung, Wan Hong, Holocene sediments reveal accumulation rates across an onshore subduction thrust in northeastern Nankai Trough. The 4th International Radiocarbon in the Environment Conference, Lecce, 2024a

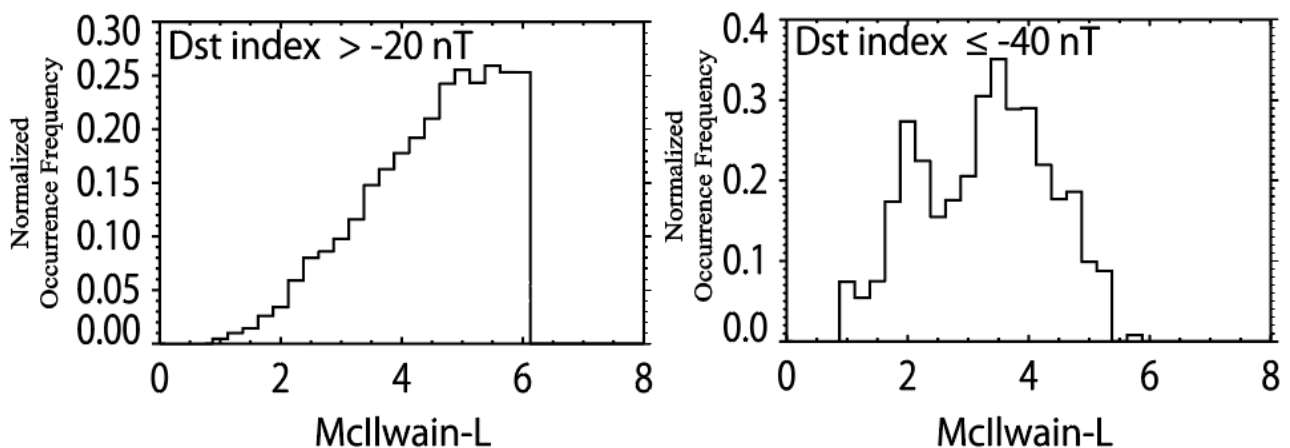
Toshimichi Nakanishi, Koji Seto, Kota Katsuki, Toshiaki Irizuki, Yoshiki Saito, Wan Hong, Holocene sediments reveal accumulation rates across an onshore subduction thrust in northeastern Nankai Trough. The 4th International Radiocarbon in the Environment Conference, Lecce, 2024b

あらせ衛星による6年間の観測で得られた低周波プラズマ波動の網羅的解析
Comprehensive study on the low frequency plasma waves using Arase data

松田昇也 金沢大学理工研究域

地球内部磁気圏で観測されるプラズマ波動のうち、磁気音波は数十～数百Hz以下の比較的低周波数帯で観測される現象である。近年の研究によって、磁気音波が内部磁気圏のプラズマを加熱させることで電磁イオンサイクロトロン波を間接的に励起させるなど、内部磁気圏の波動粒子相互作用を紐解くうえで重要な存在であることが認識されつつある。あらせ衛星は2016年の打ち上げ以降、長期に渡って低周波プラズマ波動を連続観測している。特に内部磁気圏の低～中緯度帯における連続観測データは世界的に見ても貴重であり、磁気音波をはじめとする低周波波動の3次元的分布を解明するために有用なデータセットであると言える。本研究では、あらせ衛星の観測データを網羅的に解析し、2年計画の1年目では磁気赤道域～中緯度域に渡る磁気音波の空間分布を明らかにした。2年目にあたる今年度は、磁気音波の特徴的な周波数上昇パターンに着目して現象を分類したうえで、領域毎の観測頻度分布が地磁気活動度に対してどのように依存するかを主に調査した。

あらせ衛星に搭載されたプラズマ波動・電場計測器のEFD (Electric Field Detector) によって2017年3月から6年間に観測された磁気音波を、周期的な振幅変調を有する「Rising tone磁気音波」と、変調を有さない「Structureless磁気音波」に分類した。このうちStructureless磁気音波に着目し、観測された時間帯のDst指数で地磁気静穏時 (Dst指数 >-20 nT) と地磁気擾乱時 (Dst指数 <-40 nT) に分類したうえで、観測位置 (McIlwain-L) 毎の観測頻度分布を調査した (下図)。図から、地磁気静穏時にはStructureless磁気音波の発生頻度が高L値側ほど高く、地磁気擾乱時には観測頻度のピークが低L側に移動する傾向がみられた。この結果は、Structureless磁気音波の励起領域が地磁気擾乱度に応じて変化することを示唆していると考えられる。磁気音波はプロトンリング分布によって励起すると考えられており、地磁気擾乱時にはプラズマシートからのイオンの流入が活発化することで、プロトンリング分布がより内側のL値に広がることが示されている。今後はStructureless磁気音波の発生頻度分布とプロトンリング分布との位置関係を定量的に評価するとともに、Rising tone磁気音波の地磁気活動度依存性を明らかにしていく。



図：Structureless 磁気音波の L 値分布 (左：地磁気静穏時，右：地磁気擾乱時)

太陽模型構築と日震学理論に基づく太陽ニュートリノを用いた太陽g-mode振動探索
Search for solar g-mode oscillation using solar neutrinos
based on solar model construction and helioseismic theory

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)が17%程度の振幅を持って太陽ニュートリノが増減することが指摘されていた。本家級では、最近の太陽模型に対して、先行研究と同等の物理解析を実施した。図1に、本研究の解析で得られた太陽g-mode振動によって引き起こされる⁸B太陽ニュートリノフラックスの変動予想を示す。太陽⁸Bニュートリノ場合、1.5時間の周期に対してフラックスは最大で1.8%程度変動することがわかった。これは、先行研究に比べて1/10程度の結果であった。また、先行研究から発展して、他の太陽ニュートリノの場合も、変動の大きさを網羅的に評価した。

また、2次の振動の項の計算も実施し、将来のニュートリノ検出器を用いた場合に、太陽g-mode振動の実験的な探索が可能かに関して議論を継続している。2025年度に論文を投稿予定である。

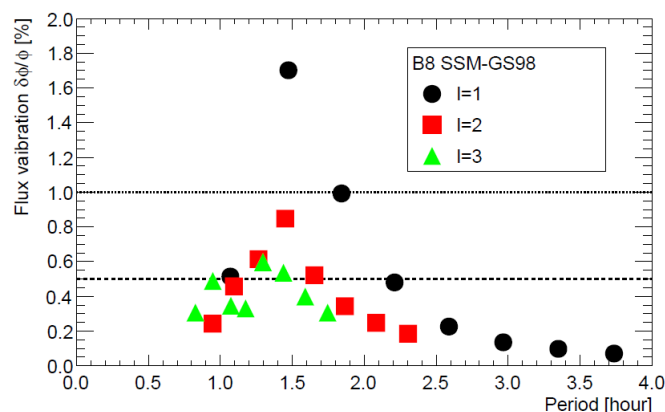


図 1: 太陽 g-mode 振動によって期待される太陽 ⁸B ニュートリノの周期的な変動

[研究成果]

- (1) 中野 佑樹, 國友 正信, 八田 良樹, 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」 日本物理学会、北海道大学、2024年9月16日
- (2) 中野 佑樹, 八田 良樹, 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」 日本物理学会北陸支部大会、金沢大学、2024年11月30日
- (3) 八田 良樹, 國友 正信, 中野 佑樹, 伊藤 博士、「線形断熱振動理論に基づく、重力波モードにより生じる太陽ニュートリノフラックス変化の予測」 日本天文学会、水戸、2025年3月20日
- (4) 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(2)」 日本物理学会、オンライン開催、2025年3月21日

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放射の代替スペクトルとして、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することは難しい。そこで我々はこれまでに、野辺山太陽電波強度偏波計（NoRP）の多周波マイクロ波データを用いて太陽EUV放射スペクトルを機械学習の手法を用いて推測する研究を行ってきた。その結果、太陽の平穏時（フレアが発生していない時）には1-2 GHz程度の低周波数のマイクロ波が、太陽フレア時には10 GHz以上などの高周波数のマイクロ波がEUV放射スペクトルの再現に寄与していることがわかってきた。

上記の研究で用いたNoRPでは7周波数のみを観測しているため、NoRPで観測していない周波数とEUV放射スペクトルとの関係はNoRPの観測データだけでは分らない。そこで申請者は、自身の所属する防衛大学校内に2-10 GHzの太陽電波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年度に建設した。本研究では、YoRPの観測データを宇宙天気研究に活用するための事前検証研究を行っている。特に2-10 GHzのマイクロ波データとEUV放射スペクトルとの関係を明らかにすることで、いろいろな宇宙天気現象の予測に有用なマイクロ波周波数を同定することができれば、YoRPの観測データを宇宙天気予報へ活用することができると期待できる。

本研究の1年目である2024年度においては、まずNoRP観測データとEUV放射スペクトルの関係を詳細に調べた。EUV放射スペクトルの観測データは、本研究を実行するために必要な波長分解能があるThermosphere・Ionosphere・Mesosphere・Energetics and Dynamics (TIMED)/Solar Extreme ultraviolet Experiment (SEE)（太陽活動周期変動）とSolar Dynamics Observatory (SDO)/EUV Variability Experiment (EVE)（フレア時）のデータを用いた。その結果、マイクロ波放射とEUV放射の関係は、主にそれぞれの放射の起源に寄っていた。特にEUV放射の中でも彩層からの放射ラインは、コロナ放射が主な起源であるマイクロ波との相関があまり良くなかった。この点については、いろいろな周波数のマイクロ波や他の彩層起源の放射を用いて補正できるか、今後検討してゆく必要がある。しかし、ほとんどのコロナ起源のEUV放射はどの周波数のマイクロ波放射とも相関が良かった。今後は、今回調べたNoRPのマイクロ波放射とEUV放射の関係が、YoRPの観測データ、特にNoRPが観測していない周波数においても同様に成り立っているかについて確認してゆく。

また、NoRPの観測データによるYoRPの観測データの較正も進めた。まず、NoRPとYoRPで同時に観測を行っている2, 3.75, 9.4 GHzの3周波数について、NoRPの太陽フラックスとYoRPの観測データからチョッパー・ホイール法を用いて導出した太陽の輝度温度をそれぞれ比較した。その結果、高い周波数になるにつれてYoRPデータのばらつきが大きくなるものの、3周波数についてNoRPフラックスとYoRP輝度温度との比例係数を求めることができた。NoRPが観測していない周波数についても内挿することでこの比例係数を求め、YoRPの観測スペクトルの導出を行った。これにより、来年度の比較研究に用いるためのYoRPの観測スペクトルの導出を行うことができた。しかし、このYoRP観測スペクトルには大きなばらつきが見られた。これには温度の測定などが影響していることが考えられるため、今後はばらつきの起源とその補正方法についても考察してゆく。

成 果 発 表

1. Kyoko Watanabe, Masumi Shimojo, Kazumasa Iwai, "A New Solar Radio Polarimeter in Yokosuka - Yokosuka Radio Polarimeter (YoRP)", JpGU Meeting 2024, Makuhari Messe, Chiba, Japan, 2024 May 30
2. Kyoko Watanabe, Seiji Yashiro, Satoshi Masuda, "Solar Flare Impulsivity and Its Relationship with White-light Flares and with CMEs", AOGS2024 21st Annual Meeting, Singapore, 2024 Jun 24
3. Kyoko Watanabe, Masumi Shimojo, Kazumasa Iwai, Nariaki V. Nitta, "Introduction of Yokosuka Radio Polarimeter (YoRP) and Its Observation", AOGS2024 21st Annual Meeting, Singapore, 2024 Jun 26
4. 渡邊恭子, 前田護, 下条圭美, 行方行介, 増田智, "機械学習を用いた多周波太陽電波放射からの EUV放射スペクトルの予測とその宇宙天気予報への活用", ISEE研究会「情報科学技術との融合による太陽圏物理学の新展開」, 名古屋大学 宇宙地球環境研究所, 2024年9月10日
5. 渡邊恭子, "太陽フレア放射とその電離圏・熱圏への影響", 令和6年度「中間圏・熱圏・電離圏 (MTI) 研究集会」, 九州工業大学 戸畑キャンパス, 2024年9月18日
6. Kyoko Watanabe, Satoshi Masuda, "Characteristics of white-light flares and their relationship to space weather", Joint Symposium of Space Climate 9 Symposium and ISEE Symposium, Nagoya University, Nagoya, Japan, 2024 Oct 3
7. Kyoko Watanabe, Masumi Shimojo, Kazumasa Iwai, "Introduction of New Solar Radio Polarimeter in Japan; Yokosuka Radio Polarimeter (YoRP)", Joint Symposium of Space Climate 9 Symposium and ISEE Symposium, Nagoya University, Nagoya, Japan, 2024 Oct 3-4
8. 渡邊恭子, 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観測", 第156回SGEPSS総会および講演会, 国立極地研究所, 2024年11月25日
9. Kyoko Watanabe, Masumi Shimojo, Kazumasa Iwai, Satoshi Masuda, "Solar Microwave Observations with New Solar Radio Polarimeter in Japan", 2024 AGU fall meeting, Washington D.C., USA, 2024 Dec 13
10. 渡邊恭子, 城河内涼佳, 安居賢生, 下条圭美, 岩井一正, 増田智, "横須賀太陽電波強度偏波計 (Yokosuka Radio Polarimeter; YoRP) による太陽マイクロ波スペクトル観測", 2024年度太陽研連シンポジウム, 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, 2025年2月17-19日
11. Kyoko Watanabe, Ryoka Shirogauchi, Kensho Yasui, Masumi Shimojo, Kazumasa Iwai, Satoshi Masuda, "Observations of solar microwave spectra by the Yokosuka Radio Polarimeter (YoRP)", 第8回 ISEEシンポジウム "Frontier of Space-Earth Environmental Research as Predictive Science" (予測の科学としての宇宙地球環境研究のフロンティア), Nagoya University, Nagoya, Japan, 2025 Mar 5-7

太陽圏における銀河宇宙線伝播の研究
Study on Galactic Cosmic Ray Propagation in the Heliosphere

中村亨、高知大学・理工学部

【研究目的】

本研究はインドに設置された日印共同実験GRAPES-3の大面积比例計数管型ミュオン観測装置（面積560 m²）と日本の東山、および明野観測所のミュオン望遠鏡を用いて、太陽地球間距離程度の磁気旋回半径（0.3～1 AU）をもつ銀河宇宙線をプローブとして惑星間空間の電磁場環境の観測を行い、宇宙線強度変動と太陽活動との関係、および宇宙線異方性と惑星間磁場（IMF）の構造との関係について調べることを目的とする。さらに、これにより惑星間磁場中における宇宙線の加速・伝搬機構の理解を深めることも目指す。

【研究方法】

地球上で観測される宇宙線の強度はほぼ等方的である。しかし比較的エネルギーの低い銀河宇宙線は、内部太陽圏において太陽活動の影響を受け、惑星間磁場（IMF）との相互作用などにより複雑な流れを形成している。これは地球上で宇宙線の異方性として観測される。こうした宇宙線の流れは、惑星間磁場中における宇宙線の加速・伝搬現象を反映しているので、地球上に展開される多数の宇宙線観測装置から得られるデータに対して異方性やモジュレーション解析を施すことによって、宇宙線の加速・伝搬機構の理解を深めることができる。我々が用いるミュオン望遠鏡は、およそ数十GV程度のrigidityの宇宙線を観測することができる。これは約0.4 AUの旋回半径に相当する空間領域を観測することになり、IMFの構造の観測にもつながる。

本研究では、GRAPES-3実験（インド）、本研究所（東山）、および東京大学宇宙線研究所明野観測所の各ミュオン望遠鏡を用いて、銀河宇宙線の連続観測を実施する。GRAPES-3と明野観測所のミュオン望遠鏡は、ともに4層の比例計数管の方向を交互に90度ずらして配置したホドスコープ型の望遠鏡であり、我々のグループにより運用されている。インドと日本では経度で約60度の差異があり、この差異と地球の自転を利用した連続観測により、広範囲の同時観測が実現できる。

【研究活動報告】

今年度も昨年と同様に、明野ミュオン観測において3基の内1基を使い継続的に観測しており、共同研究者である中部大学の大嶋晃敏氏が時々明野観測所に行き保守を行っている。残り2基も同様にデータが取得できるよう整備作業を続けている。また東京大学宇宙線研究所乗鞍観測所で中性子モニターを稼働することを目指し、共同研究者である中部大学の小井辰巳氏を中心に太陽電池システムのテストを行っている。無人になる冬季でも安定して稼働できる電力を賄うため、バッテリーの状態をモニターし続けており、データが蓄積されている。降雪により発電できなくなる機関があり、対処法を考慮中である。

インドとの共同研究では、大嶋氏が2月の研究ミーティングの後10日間ほどインドに滞在し、2025年宇宙線国際会議に向けての議論を行っている。

また拡張した比例計数管型ミュオン観測装置の立ち上げ等に関し、共同研究者である大阪公立大学名誉教授の林嘉夫氏の長期インド滞在（ビザ等の関係で遅れており、来年度になる予定）など活発に交流ができるようになっている。

本年度は太陽活動が極大期に近づいており、本州でオーロラが見られるなどの現象が続いたが、

GRAPES-3の大規模ミューオン観測装置でも5月に大きなフォーブッシュ減少が見られた。それらを到来方向別（剛度別）に解析し、予備的な結果を求めた。

【研究成果】

本研究に関する成果として、Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physicsに1篇の論文と、秋季、春季での日本物理学会で計5件の発表を行った。

【成果論文リスト】

1. "Observation of thunderstorm-induced muon events in GRAPES-3 experiment", et. al., P.K. Nayak, M. Chakraborty, S.R. Dugad, S.K. Gupta, B. Hariharan et. al., Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics 258 (2024) 106231

【日本物理学会発表リスト】

1. 「大面積高精度muon望遠鏡による方位別宇宙線強度変動の研究(33)(太陽フレアによる惑星間空間における宇宙線強度空間分布の急激な変化)」、小島浩司他、日本物理学会79回年次大会、北海道大学（札幌キャンパス）、2024.9.16
2. 「太陽活動下における宇宙線の軌道計算」、鬼頭浩志他、日本物理学会79回年次大会、北海道大学（札幌キャンパス）、2024.9.16
3. 「GRAPES-3空気シャワー実験の全体報告2024」、大嶋晃敏他、日本物理学会第79回年次大会、北海道大学（札幌キャンパス）、2024.9.18
4. 「大面積高精度muon望遠鏡による方位別宇宙線強度変動の研究(34)(フォルブッシュディクリーズ振幅の剛度別スペクトル)」、小島浩司他、日本物理学会2025年春季大会、オンライン、2025.3.19
5. 「太陽活動下における宇宙線の軌道計算Ⅱ」、鬼頭浩志他、日本物理学会2025年春季大会、オンライン、2025.3.19

(別紙様式04-2)

北極域の中層大気から熱圏大気への大気重力波エネルギー・運動量輸送の定量評価
Quantitative evaluation of energy and momentum flux transportation of atmospheric
gravity waves from middle atmosphere to thermosphere in the Arctic

堤 雅基、国立極地研究所・宙空圏研究グループ

研究目的

性格を異にする中層大気と熱圏大気の境界に位置する下部熱圏領域において、特に運動量輸送の担い手として背景風速場に大きな影響を与える大気重力波の振る舞いを定量的に探る。MSTレーダーによる中間圏域観測法は最有力手法であるが、90km程度より上部では信頼に足る観測例は稀である。さらに極域の下部熱圏域は、オーロラなどに代表される高エネルギー粒子による上からのエネルギー輸送も重要となる領域である。本研究では、光学(ナトリウムライダー)および電波観測(流星エコー観測)を元にした解析手法開発を行い、これまで解析困難であった北極域下部熱圏域の大気重力波の、特に運動量輸送量について解析を試みる。

研究方法

ISEEとノルウェーUiTが北極域Altaにおいて運用する流星レーダー、および極地研がTromsøにおいて運用する流星レーダーを用いて、大気重力波および大気乱流の解析を行った。併せて、MFレーダーで受信される流星エコーを利用した新開発解析手法[Tsutsumi et al., 2024など]を、ISEEとUiTがTromsøにおいて運用するMFレーダーにも適用する検討を行った。

研究結果

中間圏・下部熱圏域の大気大循環維持に重要な役割を果たす大気重力波の解析のためには、観測精度および分解能の高い観測が必要となる。対象とする高度域の観測には、従来からVHF帯の流星レーダーが広く使用されている。しかし、スケールの小さな大気重力波観測のために十分な時間高度分解能を有していたとは言い難い。そのため、本年度は、2つのアプローチ方法により、レーダーによる大気重力波研究をこれまで以上に推進するための取り組みを行った。

1つには、VHF帯流星レーダーを複数組み合わせたネットワーク観測により、1台のみの運用よりも飛躍的に分解能を高める手法である。ドイツおよびノルウェーの研究者らと共同で研究を進め、運動量流束などの推定を試みて、国際学会で発表した[Conte et al., 2024]。

もう1つは、研究代表者が南極において開発したMFレーダーによる流星エコー観測手法の、北極域MFレーダーへの応用である。VHF帯に比べて流星エコーが100倍以上に長寿命化することを利用したもので、VHF帯流星レーダーに比べて飛躍的に高い分解能を持つ。本手法を北欧域の2台のMFレーダー(1つはISEEの運用するTromsø、もう1つは100kmほど西に位置し独IAPが運用するSaura)にも応用することで分解能をさらに高め、大気光イメージングにも迫るような高分解能を有する大気重力波観測研究がレーダーで可能となりうる。本ISEE共同研究をベースとしたこのアイディアに基づく研究計画が、科研費基盤B(代表:堤、分担者:野澤他)として本年度から採択された。国際学会などで検討内容を報告すると共に[Tsutsumi et al., 2024]、Tromsø MFレーダーで流星観測が容易となるような外付け受信システムの開発を行った。

まとめ

高度100 km前後からそれ以上の領域における大気重力波の解析、とりわけ運動量流速の推定はほぼ前例がないほど困難である。ISEEが北極域TromsøとAltaで運用する観測装置に、極地研および独IAPが運用する各種レーダーを組み合わせた観測研究と開発を行った。本課題は本年度が最終年度となるが、来年度からは本課題を発展させた課題として実施予定である。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。

成果論文

Dissipation Rates of Mesospheric Stratified Turbulence From Multistatic Meteor - Ra

dar Observations, J. Vierinen, F. L. Poble, J. L. Chau, V. Avsarkisov, H. L. Pécseli, **M. Tsutsumi**, **S. Nozawa**, M. G. Johnsen, R. Latteck, N. Gulbrandsen, Geophysical Research Letters, <https://doi.org/10.1029/2023GL105751>, 2024.

Gravity waves generated by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcanic eruption and their global propagation in the mesosphere/lower thermosphere observed by meteor radars and modeled with the High-Altitude general Mechanistic Circulation Model, Gunter Stober 他、全32名. 堤、野澤はそれぞれ、23および25番目

成果発表 (学会)

High resolution wind observations based on advanced MF radar meteor echo measurements, **Masaki Tsutsumi**, Toralf Renkowitz, Jorge Chau, Juha Vierinen, MST16/iMST3, Rostock, Sep. 2024.

Almost one decade observing the MLT over Europe using multi-static specular meteor radars, Federico Conte, Jorge Chau, Ralph Latteck, Christoph Jacobi, **Masaki Tsutsumi**, Njål Gulbrandsen, MST16/iMST3, Rostock, Sep. 2024.

High resolution wind observations based on network MF radar meteor echo measurements, **Masaki Tsutsumi**, Toralf Renkowitz, Jorge L. Chau, Juha Vierinen, SGEPS, Tachikawa, Nov. 2024.

High resolution mesopause region wind observations based on common-volume MF radar meteor echo measurements in the Arctic Norway, **Masaki Tsutsumi**, Toralf Renkowitz, Jorge L. Chau, Juha Vierinen, Njål Gulbrandsen, **Satonori Nozawa**, JPGU, Makuhari, May 2025 (予定).

本課題活動を通じて獲得した科研費

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

(別紙様式04-2)

和文課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は、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。具体的には 2 つの課題に焦点をしばって研究を進めている。1 つめの課題は、上述のグローバル内部磁気圏モデルを用いて、宇宙嵐時に環電流によって励起される ULF 波動の励起機構や、励起条件、モード等を明らかにすることである。この課題は、内部磁気圏での粒子と電磁場を自己無撞着に記述可能な GEMSIS-RC モデルの特徴を活かしたもので、電磁場を経験モデルや平衡モデルで仮定する従来の環電流モデルでは記述しない現象であり、世界的にみても独自性を持った取り組みである。特に電離圏-磁気圏結合を含めた場合と含めない場合の比較を行い、結果を観測と比較することで、ULF 波動の空間分布に領域間結合が果たす役割を調べるとともに、モデルの現象記述能力を高める計画である。2 つ目の課題は、現象記述能力を高めたモデルを応用して、固有磁場強度が現在よりも弱い場合の内部磁気圏ダイナミクスを明らかにすることである。外部境界条件としては、グローバル MHD シミュレーション結果を用いるとともに、電離圏の電気伝導度や沿磁力線電流を変化させた計算を行い、固有磁場強度が磁気嵐の発達に与える影響を系統的に調べる計画である。

2024年度の主な成果：

本研究では、これまで私たちが開発してきた、内部磁気圏における電磁場と粒子の変動を自己無撞着に解くことが可能な環電流モデル(GEMSIS-RC)と全球で電場ポテンシャルを説くポテンシャルソルバー(GEMSIS-POT)を結合させプラズマ圏モジュールを加えた新しいグローバル内部磁気圏モデル[Yamakawa et al., JGR, 2023]を用い、境界条件設定などにあらせ衛星等の衛星観測や地上観測データを用いるとともに、結果を衛星観測と比較することにより、実証的に研究を進めている。計画初年度の 2024 年度には、課題 1 については磁気嵐のイベント研究を行い、あらせ衛星が観測した ULF 波動の一部再現に成功し、投稿論文としてまとめて投稿した。2 については、MHD 計算結果をインプットとして固有磁場を現在の 2/3 にした場合のシミュレーションを行い初期結果を得た。またこれらの初期結果について、SGEPSS 秋学会や AGU fall meeting などで成果発表を行った。現在、結果を学生が主著者の投稿論文としてまとめようとしているところである。

無人航空機を用いた雲・エアロゾル・水蒸気の時空間分布観測

Observation of cloud/ aerosol/ water distributions using Unmanned Aerial Vehicles

林政彦 (福岡大学・理学部)

1. 目的

カイトプレーン、マルチコプタを用いてエアロゾル、凝結核、気象要素等の観測を行い、リモート地域、都市部などにおける雲、エアロゾル動態と変動課程を明らかにする。カイトプレーンについては安定した自動制御システムの構築を行い、実観測運用を目指す。マルチコプタについては、久住、福岡平野などにおける観測を行い、超微小粒子の動態とその機構を明らかにする。

2. 観測と結果

1)福岡都市部から陸風により流出する人為起源超微小粒子

2024年11月4日に博多湾と外湾の境界に位置する志賀島（沿岸から約7km）と福岡大学間の車載観測、志賀島で7:00～13:00まで、地上及び凝結核計数装置搭載マルチコプタ（DJI社製Inspire 2）による、高度140mまでの超微小粒子鉛直分布観測を行った。

未明からの陸風下の志賀島に7:00頃に高さ140mの接地超微小粒子高濃度層が到達した。その後、陸風下の60～100mの接地汚染層と前日の残余弱汚染層の2層構造が、西風によって海洋の清浄大気に置き換わる11:00頃まで維持されていた（図1）。

2)野焼き近傍の燃焼プルーム中のエアロゾル、CO/CO₂観測

久住高原において野焼きが行われた2025年3月9日に、久住グライダー滑空場（大分県竹田市白丹、標高810m）にて、凝結核計数装置、CO/CO₂モニタ（総ペイロード4.5kg）を搭載した中型マルチコプタで、9:00～16:00に、対地高度150mまで上昇速度0.5m/secの鉛直分布観測を30～40分ごとに実施した。1フライトの所要時間は、7～10分で滑空場周辺の野焼きが行われた13:00～15:00の間のフライトを中心として、野焼きプルーム中の高度10mの厚さの層別のエアロゾルの採取にも成功した（図2）。サンプルの分析は、福岡大学のSEM/EDXによって行う。

3)カイトプレーンへのPixhawk搭載と大気中水銀観測

2024年の試験フライトを踏まえ、インジェクション式エンジンの制御を含め、より平易で機動的にカイトプレーンのオペレーションを行えるように、自動制御装置をポピュラーなPixhawkに変更し、調整試験フライトを行った。

Pixhawk搭載カイトプレーンを用いて、久住高原の2025年3月9日の野焼き時の国立水俣病総合研究センターによる大気中水銀のサンプリング観測に協力を行った。観測は、エンジン停止が一度起こることがあったが、全体としては、順調に観測を行い、対地高度100m程度の水銀サンプリングに成功した（図3）。本観測により、カイトプレーンとマルチコプタの同時オペレーションが可能であることも示された。

今後は、長崎県福江島での越境大陸汚染気塊中の新粒子生成機構解明のための観測等にも用いることを検討している。

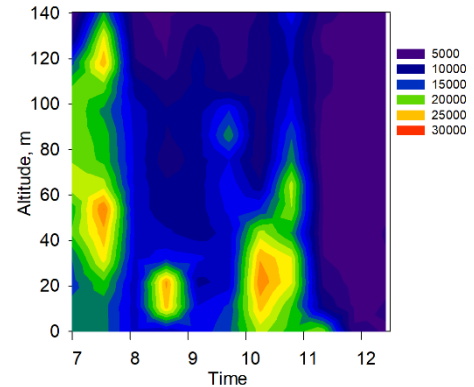


図1 2024年11月4日の志賀島上空の超微小粒子数濃度（個/cm³）の高度時間断面

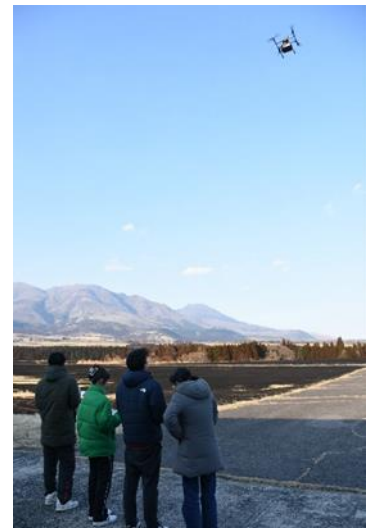


図2 2025年3月9日野焼きで霞む久住連山を背景にした超微小粒子のマルチコプタ観測



図3 Pixhawkを搭載し大気中水銀観測を実施したカイトプレーン（右）と超微小粒子観測を実施したマルチコプタ（左）
2025年3月9日16時半。久住連山が野焼きのエアロゾルにより霞んでいる。

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8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。現在太陽活動が増大するフェーズにあり、異なる太陽活動間の比較も可能となり、今後は蓄積された長期データを使った研究に重点が移行していくものと期待される。従来の衛星観測による結論を超える成果を得るためには、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詳細な観測、電流の方向や量の同定、EMIC波動、ULF波動などのサイエンス課題で詳細な議論が可能となる。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。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の貢献が期待される。

【研究方法】

軌道上のあらせ磁場データの較正方法の妥当性の検討、経年変化の評価を行い、磁場分解能、時間分解能、周波数特性、クオリティフラグによるデータ品質分別などの、データ特性の向上をはかる。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、内部磁気圏の磁場変動現象に造詣の深い研究者と協同して行う。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意見交換は主にオンラインで行うが、年に1度程度の頻度で対面にて議論するための旅費が必要となる。また、小型のデータ保存媒体を用いデータの保管や交換を行う。

【研究結果】

2024年度には、あらせ衛星磁場データのオフセットやアライメントの経年変化の評価を行い、大きな変化が起きていないことを確認した。また、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。更に、2025年3月10日～12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】

太陽活動度が上昇し放射線環境の厳しさが増している昨今も、磁場観測器ははじめあらせ搭載の観測機器が正常に稼働しており、活発な放射線帯を直接観測する好機を迎えている。今後引き続き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には高い価値がある。