

2023年度 04) 一般共同研究 目次詳細

57 件

*所属・職名は2024年3月現在
*Affiliation and Department displayed are current as of March 2024.

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
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	83	
湯口貴史	熊本大学	先端科学研究部理学系	教授	石英の三次元的な内部構造と微量含有元素が示す花崗岩質マグマの貫入・定置プロセス	84	
赤田尚史	弘前大学	被ばく医療総合研究所	教授	福島県請戸川集水域における同位体地球化学的研究	88	
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の研究	89	
徳丸宗利	名古屋大学	宇宙地球環境研究所	招聘教員(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	90	
山崎了	青山学院大学	理工学部	教授	高強度レーザーで生成された無衝突衝撃波での波動励起過程の研究	92	
伴場由美	情報通信研究機構	電磁波研究所宇宙環境研究室	テニユアトラック研究員	物理モデルに基づくフレア・CME警報システムの開発	94	
小島正宜	名古屋大学		名誉教授	IPSスペクトル解析の改良	96	
村木綏	名古屋大学	宇宙地球環境研究所	名誉教授	宇宙線データによる太陽圏現象の研究	98	
笠羽康正	東北大学	大学院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2	101	

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
Siswanto Eko	海洋研究開発機構	Earth Surface System Research Center	Researcher	GCOM-C/SGLIによる赤潮検出アルゴリズム開発	103	
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	111	
深沢圭一郎	京都大学	学術情報メディア センター	准教授	連成計算フレームワークを利用したMHDシミュレーションの重合格子化の研究	113	
中西利典	ふじのくに地球 環境史ミュージアム	学芸課	准教授	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	114	
伊達謙二	気象庁気象衛星 センター	データ処理部解析 課	課長	基本雲プロダクトの高度化	116	
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CO2濃度の継続測定方法の開発	118	
渡邊恭子	防衛大学校	地球海洋学科	准教授	太陽放射スペクトルの地球圏環境への影響評価	119	
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	121	
山田広幸	琉球大学	理学部物質地球科学 科地学系	教授	台風観測ドロップゾンデデータを用いた円筒座標データセットの開発	123	
今田晋亮	東京大学	理学系研究科地球惑 星科学専攻	教授	太陽周期活動予測に関する研究	124	
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	
大矢浩代	千葉大学	大学院工学研究院	助教	VLF/LF帯電磁波を用いた太陽フレアによる下部電離圏変動の観測的研究	126	
山田和芳	早稲田大学	人間科学学術院	教授	「トトロの森」の形成・発達史解明	127	

研究代表者 Principal Investigator	所属機関* Affiliation	所属部局 Department	職名* Job title	研究課題名 Project Title	頁 Page	備考 Remarks
今山武志	岡山理科大学	フロンティア理工学 研究所	准教授	石英チタン地質温度計のヒマラヤ高温変成 岩類への適用	129	
堤雅基	情報・システム研 究機構 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	130	
中島英彰	国立環境研究所	地球環境研究セン ター	主席研究員	フーリエ変換赤外分光器を用いたCO及び HCNの観測	131	
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	133	
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	135	
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	137	
佐藤正樹	東京大学	大気海洋研究所	教授	二重偏波レーダーのデータを利用した雲解 像モデルの改良(継続)	139	
宮本祐介	福井工業大学	工学部電気電子工 学科	教授	次世代マルチビームシステム デジタル Phased Array Feedの開発	141	
加藤雄人	東北大学	大学院理学研究科	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	143	
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	145	
野澤恵	茨城大学	理工学研究科理学 野	教授	公開された衛星軌道データ(TLE)の解析に よる宇宙天気現象の解明	146	
横田勝一郎	大阪大学	理学(系)	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	147	
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	149	

研究代表者 Principal Investigator	所属機関* Affiliation	所属部局 Department	職名* Job title	研究課題名 Project Title	頁 Page	備考 Remarks
松岡彩子	京都大学	理学研究科	教授	あらせ磁場長期データの精度評価と特性改善の検討	150	
関華奈子	東京大学	大学院理学系研究科	教授	数値モデリングおよびデータ解析に基づく環電流が内部磁気圏ダイナミクスに果たす役割の研究	151	
北川淳子	福井県年縞博物館		学芸員	福井県三方五湖地域の遺跡から出土した土器付着物の年代決定	152	
天野孝伸	東京大学	理学系研究科	准教授	非線形プラズマ波動に伴う粒子加熱・加速の研究	154	
小島浩司	中部大学	天文台	客員教授	GSE座標系における宇宙線強度分布解析によるIMF磁気中性面のトランジェントな構造変動の推定	155	
土屋史紀	東北大学	大学院理学研究科 惑星プラズマ・大気研究センター	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	156	
眞部広紀	佐世保工業高等専門学校	基幹教育科	准教授	ドローンと小型センサを利用した大気微量気体とエアロゾルの3次元計測	158	
今井雅文	新居浜工業高等専門学校	電気情報工学科	講師	四国中山間地域から切り拓く広帯域低周波電波望遠鏡:木星電波観測	162	
山本一清	名古屋大学	大学院生命農学研究科	教授	空撮及び林内撮影画像解析による森林空間3次元モニタリング	164	
寺本万里子	九州工業大学	大学院工学研究院	准教授	あらせ衛星とSuperDARNレーダーを用いた地磁気脈動の観測研究	166	
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	168	
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	170	
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・水蒸気観測の高度化	172	

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
奥野 充	大阪公立大学	大学院理学研究科	教授	湿地堆積物の堆積過程の高精度復元	174	
三澤浩昭	東北大学	大学大学院理学研究科	准教授	太陽Ⅱ型電波バースト微細構造の成因の究明	178	
芳原容英	電気通信大学	大学院情報理工学研究科	教授	複合電波観測を用いたシビア現象の超高層への結合過程に関する研究	179	
村田健史	情報通信研究機構	レジリエントICT研究センター	研究統括	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	181	
鈴木臣	愛知大学	地域政策学部	教授	5方向ライダー観測による小規模大気重力波の鉛直伝搬構造	183	
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	184	
渡邊堯	情報通信研究機構	ソーシャルイノベーションユニット戦略的プログラムオフィス	招聘専門員	流星によるVLF帯電波放射の観測的研究	185	
坂野井健	東北大学	大学院理学研究科	准教授	衛星搭載イメージング・分光光学系の設計と開発	187	

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。特に、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。しかし、そもそも、日本の近代化の直接的原因となったペリー艦隊の来航目的が捕鯨船の補給基地確保にあったように、近代捕鯨の影響、ひいては近代以前の海棲メガファウナの遺伝的多様性の理解は、近代化に伴う日本の動物相の変化を理解する上で欠かすことができない。

本研究では、東京湾に位置する縄文時代後期の称名寺貝塚から出土した鯨類骨からDNAを抽出してミトコンドリアDNAの塩基配列解読を行った。DNA解析の結果、遺跡から出土した骨は4種のハクジラ類（ハンドウイルカ *Tursiops truncatus*、ミナミハンドウイルカ *T. aduncus*、カマイルカ *Lagenorhynchus obliquidens*、オキゴンドウ *Pseudorca crassidens*）に分類された。また、放射性炭素年代測定の結果、これらの骨はいずれも3500～5000年前の年代を示しており、遺跡の年代と矛盾が無いことを確認した。さらに、遺跡から出土した鯨類と遺伝的に近い個体群が現在も東京湾近辺に生息していることから、これらのハクジラ類は過去4000～5000年間にわたって母系集団の生息地がほとんど変わらなかった可能性を示唆している。また、特にミナミハンドウイルカにおいて、称名寺貝塚出土個体の遺伝的多様性は現在の東京湾近辺に生息する個体群の遺伝的多様性よりも高いことが示唆された。以上の結果を論文にまとめて発表した。

発表論文

Kishida T, Namigata S, Nakanishi T, Niiyama Y, Kitagawa H (in press) Dolphins from a prehistoric midden imply long-term philopatry of delphinids around Tokyo Bay. *Biological Journal of the Linnean Society*. <https://doi.org/10.1093/biolinnean/blad159>

石英の三次元的な内部構造と微量含有元素が示す花崗岩質マグマの貫入・定置プロセス
Intrusion and emplacement processes of granitic magma deduced from three-dimensional internal structures and minor components within quartz in the granite.

湯口貴史 熊本大学大学院先端科学研究部
加藤あすか 山形大学大学院 理工学研究科
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。このため、石英の内部構造や温度条件などの結晶化の際の情報は、花崗岩質マグマの貫入・定置に関する情報を保存する。特に、1つの珪長質の深成岩体において、その岩体内部での岩相が異なっても石英はしばしば共通して産出する。例えば、研究で対象とした岩手県の遠野複合深成岩体では3岩相（主岩相、中心部相、周辺部相）に共通して石英が観察される。このため、複数の岩相の石英から温度条件などの結晶化の際の情報を取得し、結晶化プロセスを解明することは、深成岩体全体の形成プロセスの把握へと発展可能である。

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。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](#)）。しかしながら、石英に含有される Ti 濃度はごく微量で、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る。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2022年度の間名古屋大学(加藤丈典准教授)と報告者との間で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2021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（土岐花崗岩体における成果は [Yuguchi et al. \(2020\)](#) として国際誌 *Journal of Asian Earth Sciences* にて公表）。これまでの共同研究により得た知見から、石英の正確な結晶化温度を導出するためには、石英の「真のコア」における定量分析が必要であることを見出した。また同時に、石英の産状（どのような鉱物に接するのか？包有されるのか？）の情報も重要となる。そこで2023年度は、久喜花崗岩の石英に対して、石英の三次元的な内部構造の解析と微量含有元素の定量分析から、石英の結晶化プロセスの理解の高度化を行った。一方、遠野複合深成岩体に対しては、薄片試料を用い、周辺鉱物の情報に基づき、石英の結晶化温度条件の決定の高度化を図った。これらの2つのアプローチに基づく石英の結晶化プロセスの理解は、花崗岩質マグマの貫入・定置プロセスに関する精緻な議論を可能にする。

2. 試料と研究方法（使用した共同利用装置・施設）

石英の CL 像取得は、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 ずつ）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。また、石英へのダメージの評価は、EPMA 分析終了後に 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。この手法により、Ti 濃度の検出限界は 16 ppm, Al 濃度の検出限界は 17 ppm, それぞれの分析誤差は約 10%の精度で定量値を取得することが可能となる。このような高精度な分析は、石英結晶の内部構造の Ti 濃度と Al 濃度の高精度な比較を可能にする。

3. 研究結果・考察

久喜花崗岩体においては、石英を岩石から分離し、研磨と CL 像撮影を繰り返し、複数断面の CL パターンを取得した。観察した久喜花崗岩体の石英では、顕著なオシラトリゾーニングを持たないものの、断面ごとの輝度の変化から、その成長様式を評価することができた。15 粒子の中央断面に対してチタン濃度とアルミニウム濃度の定量分析を実施した。チタン濃度のデータでは、80 点が検出限界濃度以上の値を持ち、 $31 \pm 14 \sim 224 \pm 11$ ppm の幅を持つ。図 1 は石英粒子の CL 像とチタン濃度のラインプロファイルを示す。この結果、Ti 濃度と CL 像の輝度には正の相関が見て取れる（高輝度において高 Ti 濃度を有する）。

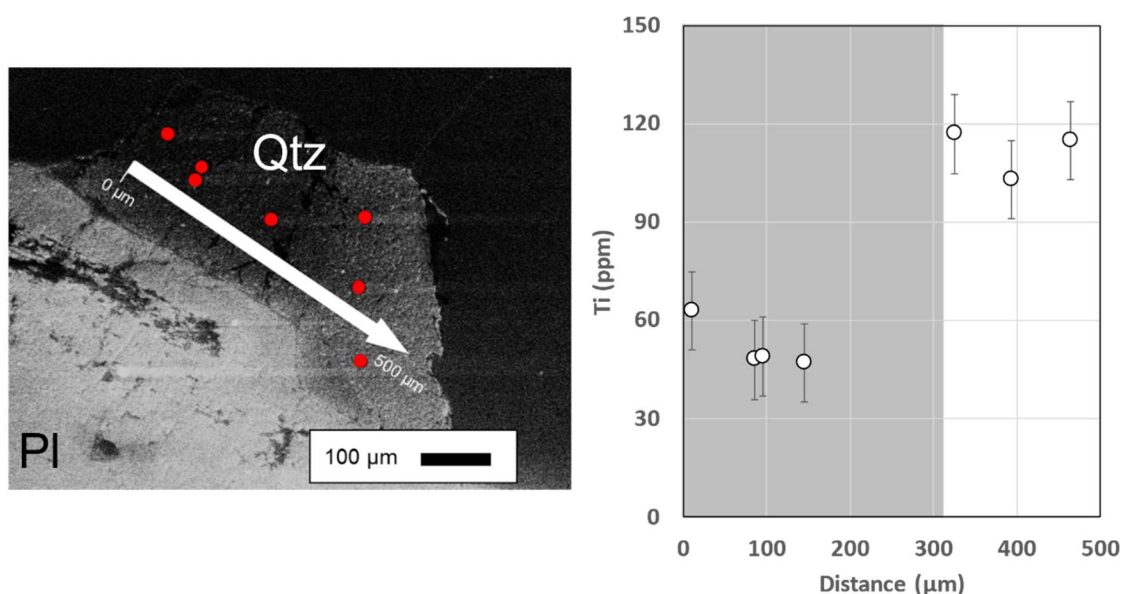


図 1 久喜花崗岩体の石英の CL 像とチタン濃度のラインプロファイル（サンプル No.4-101）

Thomas et al. (2010)の地質温度計を用いて計算を行うと 31 ± 14 ppm の値は結晶化温度 $522 \pm 28^\circ\text{C}$ となり、 224 ± 11 ppm の値は結晶化温度 $815 \pm 5^\circ\text{C}$ を示す。結晶化温度導出の際に必要な TiO_2 活動度は全岩化学組成から Rhyolite_MELTS プログラム(Gualda et al., 2015)を用いて導出した。一方、Al 濃度は大半の分析地点で検出限界濃度以下となり、12 点の分析点で検出限界濃度以上の値が得られた。その結果は $152 \pm 72 \sim 267 \pm 21$ ppm の分布を有する。検出限界を超えるデータが少なく、アルミニウム濃度と CL 像の輝度の関連性、および Ti 濃度と Al 濃度の関連性の把握は未到達な課題として残された。これを可能にするために、同一領域の Ti 濃度と Al 濃度の対となるデータの拡充が今後の課題となる。

遠野複合深成岩体においては、薄片中の石英結晶（22 粒子）に対して、122 点の Ti 濃度の定量分析を実施した。チタン濃度のデータでは、113 点が検出限界濃度以上の値を持ち、 $22 \pm 19 \sim 283 \pm 25$ ppm の幅を持つ。図 2 は遠野複合岩体の主岩相の岩石から産するジルコンを包有する石英の BSE 像と CL 像を示す。図中の石英に包有されるジルコンに対して、LA-ICP-MS による Ti 濃度の定量分析を実施した。図 2 中の石英に包有されたジルコンの Ti 濃度は 13.1 ± 0.9 ppm であり、石英粒子の Ti 濃度は 43 ± 4 ppm から 283 ± 25 ppm の幅（ $N=7$ ）を持つ。ジルコンを包有する石英の産状は、産出の順番としてジルコンの結晶化が先に生じ、その後石英の結晶化が生じたことを示す。冷却するマグマ溜り内での鉱物の晶出を考えた場合、ジルコンの結晶化温度は石英のそれと比べて低いことを示す。この晶出順・晶出温度の関係から、遠野複合岩体の石英の晶出温度の導出に最も妥当な TitaniQ 温度計を選定する。ジルコンの結晶化温度は Ferry and Watson (2007)の温度計から $815 \pm 89^\circ\text{C}$ となる（ TiO_2 活動度=0.82）。Yuguchi et al. (2020)では、石英粒子個々の結晶化温度条件を導出する

には、局所的な TiO_2 活動度の低下を加味し、粒子中の CL の最高輝度域の Ti 濃度を用いることが妥当であることを述べている。このため、 223 ± 21 ppm の Ti 濃度と TiO_2 活動度=0.82 を石英の結晶化温度の決定に用いた。また TitaniQ 温度計の検討には、Wark and Watson (2006), Thomas et al. (2010), そして Haung and Audétat (2012)の温度計を用いた。それぞれの温度計は、 884 ± 29 °C, 702 ± 61 °C, そして 899 ± 13 °C の値をもたらした。先にも述べたように、石英の結晶化温度は、ジルコンのそれよりも低くなる必要がある。このため、Thomas et al. (2010)の TitaniQ 温度計の利用が、遠野複合岩体において最も妥当な石英の結晶化温度をもたらすことを見出した。

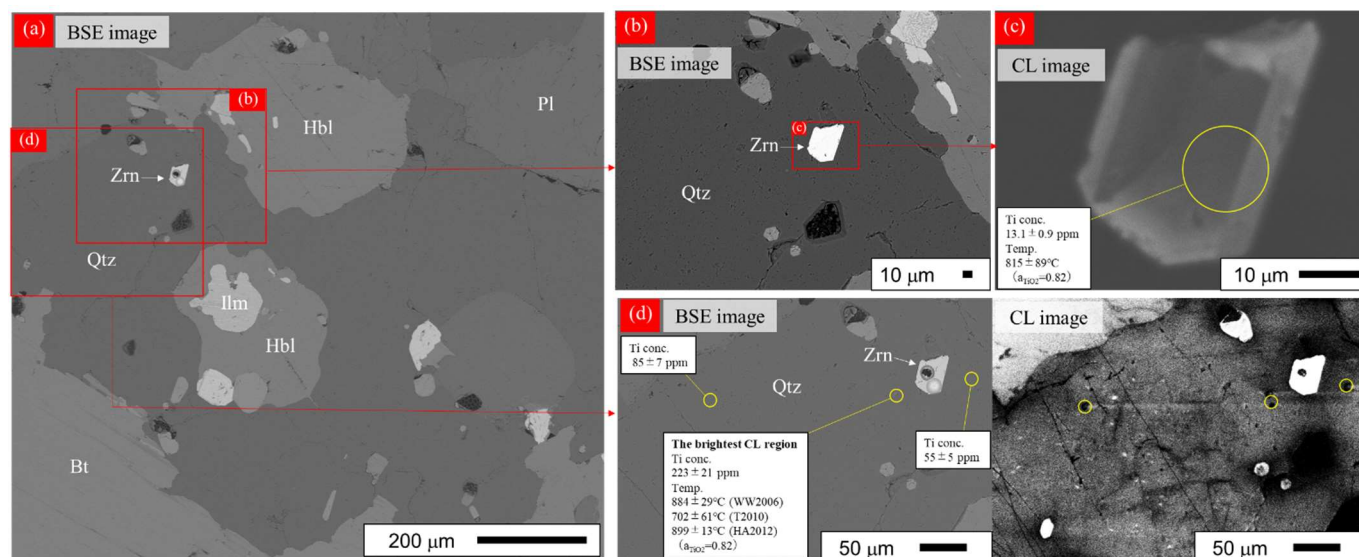


図2 遠野複合深成岩体の石英（サンプル No. 021-01）と包有されるジルコンの BSE 像、CL 像、Ti 濃度および結晶化温度

前年度までに構築した手法で、久喜花崗岩体および遠野複合深成岩体の石英において、チタン濃度データの拡充とアルミニウム濃度データの取得を行った。また、岩石試料から分離した石英を用い、結晶内の三次元的な内部構造を評価するための手法の構築を行った。加えて、薄片中の石英と石英に包有されるジルコンを用いて、石英の妥当な結晶化温度を導出するための手法を構築した。今後の課題として、異なる深成岩体における CL 像の輝度と微量含有元素との関連の解明のために、また、石英の結晶化プロセスから、マグマ溜りの冷却を評価する手法を高度化するために、データの拡充を続ける。

4. 引用文献

- Drivenes, K., Larsen, R., Muller, A., Sorensen, B. (2016) Crystallization and uplift path of late Variscan granites evidenced by quartz chemistry and fluid inclusions: Example from the Land's End granites, SW England. *Lithos*, 252-253, 37-75.
- Ferry, J.M., Watson, E.B., 2007. New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 154, 429–437.
- Gualda, G. A. R., and Ghiorso, M. S. (2015). MELTS_Excel: A Microsoft Excel-based MELTS Interface for Research and Teaching of Magma Properties and Evolution. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16, 315–324.
- Huang, R., Audétat, A., 2012. The titanium-in-quartz (TitaniQ) thermobarometer: A critical examination and re-calibration. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 84, 75–89.
- Thomas, J.B., Watson, E.B., Spear, F.S., Shemella, P.T., Nayak, S.K., and Lanzirrotti, A. 2010. TitaniQ under pressure: the effects of pressure and temperature on the solubility of Ti in quartz. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160, 743-759.
- 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.

福島県請戸川集水域における同位体地球化学的研究

Isotope Geochemistry in the Small Catchment of the Ukedo River, Fukushima Prefecture, Japan

赤田尚史、弘前大学・被ばく医療総合研究所

福島県浪江町を流れる請戸川は、流域面積428.2 km²の2級河川である。この請戸川は、福島第一原子力発電所事故により避難を余儀なくされた町民にとっても町を象徴する存在でもある。請戸川の上流は、現在でも住民が避難している帰還準備区域であり、下流域は町民が帰還している区域である。そのため、請戸川が町全体を繋いでいる状況にある。近年は、河川水中放射性セシウム濃度も低下傾向にあり、町民の請戸川への関心が高まっているものの、震災後の請戸川集水域における同位体地球化学的特徴についての報告は限られている。本研究では、請戸川の上流から下流までの定点において降水と河川水を採取するとともに、集水域にある地下水の物理観測および定期採取を実施し、水素酸素安定同位体比およびトリチウムの測定を行い、気象データも含めた集水域における同位体地球化学的特徴を明らかにすることを目的とする。

請戸川源流に近い津島地区、下流のなみえ創成小・中学校において気象観測を実施すると共に月毎の降水試料を採取した。また、請戸川の上流である津島地区と下流である幾世橋地区において河川水の採取を実施した。さらに、下流域の加倉地区の井戸を利用して水位や電気伝導度の物理計測を行うとともに、河川水試料の採取に合わせて井戸水の採取を行った。得られた試料については、pHおよび電気伝導度(EC)のち、共同利用装置である水安定同位体分析装置(L2130-i)を用いて水素酸素安定同位体比の測定を行った。更に、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, 日立)を用いて水素の放射性同位体であるトリチウムの分析を行った。トリチウムについては、低濃度であることが想定されることから、固体高分子膜電解濃縮装置(トリプュアXZ-001, デノラペルメレック)を用いて濃縮操作を行ったのちに測定を実施した。

ここでは津島地区で採取された月間降水のトリチウム濃度を示す。福島第一原子力発電所事故から約1年半経過した2012年10月から2021年12月までの月間降水中トリチウム濃度は0.10 – 0.85 Bq/Lの範囲であり、春季に高く夏季に低くなる季節変動傾向が認められた。2013年から2021年の年平均濃度は0.39 – 0.48 Bq/Lであり、日本で観測されるバックグラウンド濃度と同程度であった。津島地区は2023年より特定復興再生拠点に指定され、今後住民が帰還することが想定されている。一方、2023年8月より福島第一原子力発電所構内に保管されていた汚染水は、トリチウム以外の放射性核種を基準値以下まで取り除いたのちに、沖合1km地点に海洋放出が開始されている。今後、本研究で得られたデータを地域住民に対する放射線リスクコミュニケーション資料の一つとして活用する予定である。

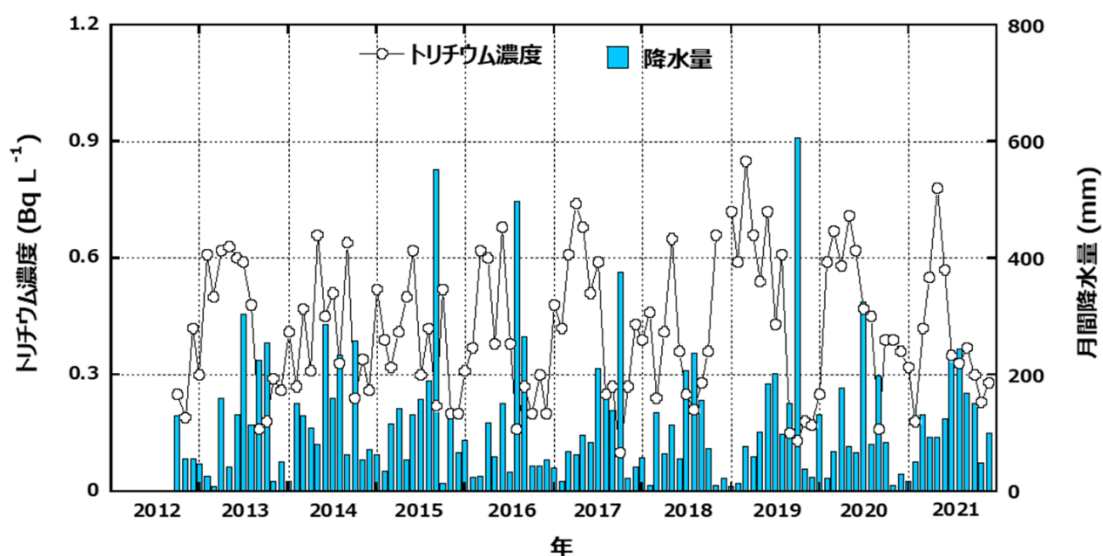


図 福島県浪江町の津島地区で採取された月間降水中トリチウム濃度と降水量の時系列変動

太陽中性子を用いた太陽高エネルギー粒子加速機構の研究
Study on the acceleration mechanism of solar energetic particles using solar neutrons

松原豊、中部大学・ミュオン理工学研究センター

研究目的

本研究は、太陽表面で起こるフレアと呼ばれる大規模なエネルギー解放現象に伴い加速される高エネルギーイオンと、太陽大気との相互作用によって生成される中性子 ($> 100 \text{ MeV}$) を赤道付近の高山で観測することにより、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している。太陽中性子が地上で検出されるのは稀で、これまでに十数イベントしか検出されていない。それでもこれまでの研究で以下の3つのことがわかっている。(1) 太陽表面での中性子の生成が電磁波と同時であると仮定すると、太陽高エネルギー粒子の加速は、統計加速とよばれる効率のよくない加速である。(2) 太陽中性子の生成時間が硬X線 ((1) の電磁波に含まれる) に比べて長いイベントが 1 イベントある。(3) 太陽フレアで中性子がもらうエネルギーは軟X線のエネルギーの 0.1 % を超えない。(2) で述べた電磁波よりも中性子の生成時間が長いイベントの場合でも、(1) の統計加速で説明できる。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の今後の焦点は、太陽表面での中性子の生成時間を電磁波と同じと仮定しなくてもよいイベントを取得して、やはり統計加速なのかどうかを確認することである。

研究方法

現在稼働中の太陽中性子検出器は、ボリビア・チャカルタヤ (5,250 m) で 30 年以上、メキシコ・シェラネグラ (4,600 m) で 20 年以上稼働している 2 観測点である。この 2 箇所にある検出器は現地研究者により保守され、データは、それぞれのサーバーに保存されている。本共同研究は、それぞれのデータを、宇宙地球環境研究所宇宙線研究部のサーバーにコピーし、太陽中性子イベントの探索を行うものである。代表者は 2023年3月まで宇宙線研究部に所属し、世界各地の太陽中性子検出器の観測データはすべて、宇宙線研究部に保存されている。また、解析のためのプログラムも整備されている。シェラネグラには別に SciCRT (SciBar Cosmic Ray Telescope) という大型の検出器もあるが、データ量が巨大で、そのコピー・解析は本共同利用ではできないので、メキシコの研究者が解析している。

2023年度の研究成果

まず、ボリビアの検出器は、2023年度、若干の欠測があるものの、ほぼ順調にデータ収集が行われている。2024年2月末までのデータは、本共同利用により、宇宙線研究部のサーバーにコピーした。また、軟X線強度で M5 以上の太陽フレアのとくに、太陽がボリビアの頭上にあった場合に太陽中性子が検出されていないかどうか探索したが、太陽中性子イベントは検出されていない。M5 というのは、GOES 衛星 (高度 35,800 km) の軟X線 (0.1 nm – 0.8 nm) 検出器で、 $5 \times 10^{-5} \text{ watts/m}^2$ を検出するレベルの太陽フレアのことである。一方、メキシコの検出器は、2023年6月に、シェラネグラ山の研究施設全体に電力を供給している変圧器が、雷のため破壊され、長い間電力供給がされない状況となった。2024年2月後半になってようやく修理された変圧器がシェラネグラに搭載される運びとなり、まもなく電量供給が再開される予定である。メキシコの太陽中性子観測装置のデータは 2023年6月4日まででストップしているが、それまでのデータについての解析は行っており、ボリビアと同じく M5 以上の太陽フレアの際に、太陽がメキシコの頭上にあった場合に、太陽中性子検出の有無を調べたが、太陽中性子イベントは検出されていない。太陽活動は 2020 年に始まり、現在極大に向け活発になっている状況である。太陽中性子検出は今後に期待したい。

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、名古屋大学宇宙地球環境研究所・招聘教員（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、太陽風を正確に予測することが宇宙天気予報において重要な課題となっている。これまでの研究から太陽風の加速は太陽コロナ磁場によって強く支配されていることがわかっているが、詳細は未だ謎である。現在、太陽コロナ磁場の特性から太陽風速度を予測するモデルとしてWSAモデル (e.g. Arge et al., 2003, 2004) が広く使われているが、この精度はあまりよくない。そこで、本研究ではISEEが実施している多地点IPS観測より求めた太陽風速度と太陽コロナ磁場のポテンシャル磁場解析結果を比較することで、精度良く太陽風速度を予測するモデルの開発を目指す。既存の太陽風速度モデルは地球近傍での飛翔体観測データ対して最適化されている。しかし飛翔体観測が行われた黄道面付近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は低速風に偏ったものになっている。IPS観測との比較では高緯度を含めた全ての領域に対して比較が可能であり、精度の改善が期待できる。

2. 研究方法

本研究ではコロナ磁場と太陽風速度の関係を説明するパラメータとしてコロナホール境界からの角距離 (DCHB) に注目して解析を行う。コロナホールは開いた磁場領域であり、ここがすべての太陽風の流源と考えられる。DCHBが小さい時には低速風、大きい時には高速風が吹き出すというモデルがRiley et al. (2001)によって提案された。一方、磁力線拡大率と太陽風速度の間に反相関があることがWang & Sheeley (1990)によって指摘され、Arge & Pizzo (2000)によってモデルが提案されている (通称、WSモデル)。Riley et al.(2015)によると、DCHBモデルはWSモデルより太陽風加速をよく説明できることが報告されており、IPS観測による最適化からはさらに精度よいモデルの開発が期待できる。本研究では、太陽磁場観測データのポテンシャル磁場解析からDC HBおよび磁力線拡大率を計算し、それを使ったDCHBおよびWSモデルの計算から得られる値とIPS観測のトモグラフィー解析から求めた太陽風速度を比較することで同モデルのパラメータの最適化を行う。また、既存のパラメータを使ってWSAモデルとIPS観測の比較も行い、WSAモデルの性能を評価する。

3. 研究結果 (途中経過)

計画の初年度にあたる2023年度では、サイクル23の異なる活動度に対応した6つのCarrington Rotationを選び、IPS観測を最もよく再現できるモデルのパラメータを決定した。WSAモデルとIPS観測の比較では、WSAモデルがDCHBモデルと同程度の精度を持っていることがわかった。さらに、これらの解析で明らかとなったDCHBモデルの問題点について同モデルの改良版について検討している。解析は主に自宅からリモートでISEEの計算機にログインして行っており、受入教員の藤木助教がADAPTデータをポテンシャル磁場モデルで解析した結果を利用している。解析の途中経過について適宜、共同研究者の藤木・渡部と議論した。2023年10月3-5日には研究打ち合わせのためISEEを訪れている。本研究で得られた成果はISEE研究集会 (2024年3月7日) で報告するとともに、論文にまとめてSolar Physics誌に投稿した。共同研究の経費は、先述したISEEへの出張に使った他、自宅での解析環境を整備するためPC周辺機器を購入した。

4. 今後の予定

2024年度では、これらの解析で得られた結果をまとめた論文をSolar Physics誌に出版する。このため2024年度の研究計画では論文校閲料とプリンターインクの費用を必要経費として計上している。また、2023年度同様にISEEに訪れて、解析結果のまとめ方や今後の共同研究の課題などについて議論する予定である。なお、共同研究者だった渡辺温は大学院進学後、別な研究課題に取り組むことになったので、次年度以降は共同研究者に含まれない。

5. 引用文献

- 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., M. Nagai, K. Fujiki, and K. Iwai, East-west asymmetry in interplanetary scintillation level variation associated with solar wind disturbances, Solar Physics, 298:127, 2023 (<https://doi.org/10.1007/s11207-023-02220-8>).
- 徳丸宗利、永井美帆、藤木謙一、岩井一正、「太陽風擾乱イベントにおいて観測される惑星間空間シンチレーション強度の東西非対称性」、第154回 SGEPPSS総会および講演会、東北大学青葉山北キャンパス（仙台市）、太陽圏セッション、R007-02、2023/9/24-27(発表日9/25)
- 徳丸宗利、「惑星間空間シンチレーション観測による太陽風速度モデルの最適化」、ISEE研究集会「太陽圏・宇宙線関連の共同研究成果報告会」、2024/3/7、名古屋大学・研究所共同館Ⅱ 409室（名古屋市）
- Tokumaru, M., K. Fujiki, and H. Watanabe, “Optimization of Solar-Wind Speed Models using Interplanetary Scintillation Observations”, Submitted to Solar Physics, 2024.

高強度レーザーで生成された無衝突衝撃波での波動励起過程の研究
Study of wave excitation mechanism in laser-produced collisionless shocks

山崎 了、青山学院大学・理工学部

研究目的：地球磁気圏や惑星間空間、さらには若い超新星残骸などに普遍的に存在する無衝突衝撃波において、プラズマ波動励起・粒子の散逸過程・非熱的成分の生成過程等の詳細は未解明である。近年、高出力レーザーによる無衝突衝撃波の生成実験（実験室宇宙物理学）が本格化し、それにより無衝突衝撃波近傍の電磁場や粒子分布関数の直接計測が可能となった。山崎を代表とするグループでは、2015年から2022年まで、大阪大学レーザー科学研究所の共同利用の実験提案を行って連続して採択され、毎年、3～4日間のマインタイムを獲得し、実験データを蓄積してきた。現在、世界的に盛んなのは、外部磁場の存在下でプラズマを生成し、磁化プラズマ中を伝播する無衝突衝撃波（MS=Magnetized shocks）を生成することである。その際、得られた実験データから本当にMSが生成されているのか明確に判断できないことが多いため、実験データの解釈はプラズマ電磁粒子(PIC)シミュレーションとの比較を通じて行われることが必須となっている。そこで、我々のグループでも、実際の実験に近いパラメータで外部磁場の強度をいろいろかえた1次元PICシミュレーションを行う。これにより、これまでの実験結果の解釈だけでなく、今後の実験に対する指針を得ることも目指す。

研究方法：我々は高効率の計算手法を取り入れた1次元の電磁粒子コードを新たに開発し、従来の計算方法とは異なって、衝撃波の発展を衝撃波静止系で追うことで長時間の計算機実験を行ってきた。本研究では、現実の電子・イオン質量比を採用し、背景磁場の強さをいろいろかえて計算を行い、得られたデータから、実験で予想されるプラズマ制動放射や電子温度・イオン温度の空間プロファイルの時間発展を計算した。さらにシミュレーション結果と実験結果を比較した。

研究結果：レーザーをアルミ(Al)ターゲットに照射した際に生じるAlプラズマの性質がよくわかっておらず、また、それによりMSの振る舞いが異なることがわかってきた。そこで、今年度はAlプラズマのイオン密度やプラズマ注入時間をいろいろ変えた計算を行い、プラズマ自発光計測の実験結果と比較した。その結果、プラズマ注入をレーザーのパルス幅程度に短くしたものよりも、連続的に注入したもののほうが実験結果に近いことがわかった。つまり、Alプラズマは十分長い時間、ある程度の運動量フラックスをもって注入され続けることを示唆する。また、トムソン散乱計測と磁場計測結果のデータ解析を行い、衝撃波遷移層で励起された波動と考えると矛盾のない結果を得ることができ、その起源について考察した。また、[1]～[8]の成果発表を行なった。

学会発表：

- [1]「磁化プラズマ中を伝播する無衝突衝撃波の生成実験の現状と今後の展望」, 山崎 了, 日本物理学会
2024年春季大会 (2024年3月18日-21日, オンライン開催)
- [2]「大型レーザー激光XII号を用いた磁化プラズマ中を伝播する無衝突衝撃波の生成実験(6): 2022年度
までの進捗状況」, 山崎 了, 田中 周太, 河村 有志郎, 正治 圭崇, 富谷 聡志他71名,
日本物理学会 第78回年次大会 (2023年9月16日-19日, 東北大学)
- [3]「大型レーザー激光XII号を用いた磁化プラズマ中を伝播する無衝突衝撃波の生成実験(7): 粒子シミュレーションを用いた2020-2022年度実験デザインの決定」, 塩田 珠里, 山崎 了, 田中 周太他13名
日本物理学会 第78回年次大会 (2023年9月16日-19日, 東北大学)
- [4]「大型レーザー激光XII号を用いた磁化プラズマ中を伝播する無衝突衝撃波の生成実験(8): パルス磁場装置開発」, 竹崎 太智, 小口 拓哉, 松山 隼, 重田 宗明, 伊藤 弘昭, 山崎 了他18名,
日本物理学会 第78回年次大会 (2023年9月16日-19日, 東北大学)
- [5]「大型レーザー激光XII号を用いた磁化プラズマ中を伝播する無衝突衝撃波の生成実験(9): 衝撃波の長時間発展と数値シミュレーションの比較」, 諫山 翔伍, 松清 修一, 森田 太智, 長野 鉄矢他30名
日本物理学会 第78回年次大会 (2023年9月16日-19日, 東北大学)
- [6]「大型レーザー激光XII号を用いた磁化プラズマ中を伝播する無衝突衝撃波の生成実験(10): 衝撃波遷移領域における不安定性の直接計測と同定」, 前之園 凱夫, 森田 太智, 松清 修一他29名,
日本物理学会 第78回年次大会 (2023年9月16日-19日, 東北大学)
- [7]「大型レーザー激光XII号を用いた磁化プラズマ中を伝播する無衝突衝撃波の生成実験(11): 磁場の向きと弧状衝撃波の形状」, 田中 周太, 田中一詳, 境 健太郎, 蔵満 康浩, 當真 賢二他43名,
日本物理学会 第78回年次大会 (2023年9月16日-19日, 東北大学)
- [8]「大型レーザーを用いた磁化プラズマ中を伝播する無衝突衝撃波の生成実験」, 山崎 了, 研究会「宇宙プラズマの活動性～天体形成から高エネルギー現象まで～」(2023年8月21日-23日, 千葉大学)

物理モデルに基づくフレア・CME警報システムの開発 Development of imminent flare/CME warning system based on physics model

国立研究開発法人 情報通信研究機構
電磁波研究所 電磁波伝搬研究センター 宇宙環境研究室
伴場 由美

1. 研究目的・方法

太陽フレアが発生すると、短波伝搬通信への影響等が懸念される。情報通信研究機構（NICT）における宇宙天気予報では、今後24時間以内に発生するフレアの最大規模（降水確率のようなイメージ）を予報しているが、例えば線状降水帯の発生予測や緊急地震速報のように、差し迫って数時間以内にフレアが発生することを警報することは実現できていない。太陽から数日かけて地球に到来するコロナ質量放出の影響とは異なり、地球からフレアを観測した時点ですでにその影響（デリンジャー現象など）は現れているため、通信障害などを回避・軽減するための対策を取る時間を確保するためには、フレア発生警報が必要である。このため本研究では、物理モデル（Ishiguro & Kusano 2017, Kusano et al. 2020）に基づく新しいフレア予測システムを開発し、フレア発生のおおむね数時間前の警報を実現することを目指す。太陽フレアの発生には、活動領域のエネルギー蓄積とトリガの2つの要因が必要であるため、本研究計画ではそれぞれを検出するスキームの開発を行う。

2. 研究成果・考察

本年度は、Kusano et al. 2020による κ スキームに基づき活動領域のエネルギー蓄積を定量的に算出するスキームの開発を行った。今年度の開発の成果は以下のとおりである。

[1] 活動領域のエネルギー蓄積を検出するスキームの基礎を構築

SDO衛星による太陽面磁場データから非線形フォースフリー磁場（NLFFF）モデリングにより活動領域のエネルギー蓄積を算出するスキームの基礎部分の構築を完了した。これにより、活動領域の中でも特に高いエネルギーが蓄積されている領域（すなわち、フレア発生の危険性が高い領域）である「フレア発生危険領域」、その中でも最も効率的にダブルアーク不安定性（Ishiguro & Kusano 2017）によりフレアを駆動できる点である「フレア予測点」、さらにフレア予測点からフレアが発生した場合の「解放可能エネルギー」の3つの情報を定量的に算出可能にした。

[2] NLFFFモデリングの高速化

上記[1]において、NLFFFモデリングはスパコンを用いても1観測データあたり2時間程度の時間を要する。一方でフレア警報システムのリアルタイム運用のためには、1観測データあたり長くとも30分以下で数値モデリングを行う必要がある。このため、低解像度化および計算ステップ数の削減によりNLFFFモデリングを高速化し、1観測データあたり10分程度で計算を完了し、かつKusano et al. 2020と同様の傾向の解析結果を得られるようにした。

[3] 「フレア発生危険領域」の可視化

活動領域中の「フレア予測点」や「解放可能エネルギー」を算出するためには計算コストの大きいNLFFFモデリングが必須であるが、「フレア発生危険領域」だけであればSDO衛星による太陽面ベクトル磁場データさえあれば算出が可能である。したがって、「フレア発生危険領域」を可視化することで、現在太陽面上に存在する活動領域の中でも大規模フレア発生の危険性が高い領域を特定することが容易になると期待できる。そこで、SDO衛星による活動領域磁場の準リアルタイムデータを定期的に取り得し、磁場データ上にフレア発生危険領域の空間分布を自動的に描画するプログラムを開発した。併せて、活動領域全体あるいはフレア発生危険領域ごとの蓄積エネルギーを定量的に算出した。これらの情報を比較しながら参照できるようwebビューワを作製し、フレア予報の参考情報として利用できるよう、NICTにおける宇宙天気予報業務を行う担当者らに提供した。

[4] フレア発生の判別可能性に関する評価

上記[1]で構築したエネルギー蓄積評価・検出スキームにより、Kusano et al. 2020で解析された活動領域（Xフレア発生あり領域9例、Xフレア発生なし領域190例）について解析を行った。これにより、① Xクラスフレアの発生の有無、② Xクラスフレア発生前におけるフレア予測点の磁気リコネクションの臨界半径の変化、について、Kusano et al. 2020の傾向を再現できることを確認した。

3. 成果発表

- [1] 伴場由美、塩田大幸、久保勇樹、草野完也、
”物理モデルに基づくフレア警報システムの開発”、
第154回 地球電磁気・地球惑星圏学会、2023年9月24日、オンライン、口頭発表
- [2] 伴場由美、塩田大幸、久保勇樹、草野完也、
”物理モデルに基づくフレア警報システムの開発：進捗状況”、
太陽研連シンポジウム、2024年2月20-22日、東京、ポスター発表
- [3] 伴場由美、塩田大幸、久保勇樹、草野完也、
”物理モデルに基づくフレア警報システムの開発：フレア発生領域の判別について”、
日本天文学会春季年会、2024年3月15日、オンライン、口頭発表
- [4] Y. Bamba, D. Shiota, Y. Kubo, and K. Kusano, “Development of a large-flare warning system based on κ -scheme: correlation between flare index and high free energy regions”, Japan Geoscience Union Meeting, May 26-31, 2024, Chiba, Japan, (採択済)

IPSスペクトル解析の改良 On IPS spectrum analysis to derive solar wind speed

小島正宜 名古屋大学

惑星間空間シンチレーション(IPS)は、1 つまたは複数の天体電波観測点を使用して太陽風速度を求めることが出来る技術である。IPSを使えば、視線方向に沿った太陽風の速度と密度の変動を推測することができる。手法には、単一時系列のスペクトルを解析する方法と、離れた複数サイトのデータの相互相関を解析する方法がある。このスペクトル解析法の開発と評価を行ってきたが一応の成果に達したので以下概要を報告する。

解析方法

厚みのある電波散乱媒質である太陽風を弱散乱の薄い散乱層の積み重ねとしてモデル太陽風を仮定してIPSをBorn散乱近似でシミュレートして解析する。

Solar wind spectrum の power law index について

太陽風密度ゆらぎのスペクトルは基本的にはKolmogorovスペクトルで近似できるが、実際のIPS観測で報告されているpower law index値は様々で先ずはこれについて考察した。その結果スペクトルのflatteningや下記のフィルター効果などを考慮してKolmogorov indexの $-11/3$ でなく、 -3 を用いることにした。

電波源視直径

電波源視直径の影響はスペクトルの高周波成分を減衰させる。実際に観測されているIPS sourceの視直径については不明なものが多く、spectral fitting解析への視直径の影響と最適視直径を考察し、 0.1 arcsecを用いることとした。

inner scale

スペクトルはcyclotron dampingによりwave energyが粒子へ移り、共鳴波長の辺りからスペクトルは崩れていきIPS観測の周波数域に影響をあたえる。 100 太陽半径以内の距離でinner scaleの太陽からの距離依存性は調べられているが速度依存性についての情報が無い。それらを考察した結果、IPSスペクトルの高周波域の減衰は、inner scale、電波源視直径、スペクトルindexの3要素を合わせ考慮すれば良いので解析ではinner scaleの影響は無視することとした。

密度擾乱度 $\delta N/N$ 距離と速度の依存性

Heliosの観測は波数 10^{-5} km^{-1} 以下でKolmogorovのpower lawを示し、擾乱の度合いは低速風が高速風を勝るが、太陽からの距離でそれは変わらない、しかし高速風は太陽から遠くなるほど擾乱度が増

える。そして $2 \times 10^{-5} \text{ km}^{-1}$ より大きな波数領域で、高速風の power level が低速風を勝る傾向にある。IPS の観測する 10^{-2} km^{-1} の波数では擾乱度の速度依存性を考察し $\delta N_e(r) \propto r^{-2} V^{-\gamma(r)}$ として $\gamma = 0.5$ を用いることとした。

Fresnel knee による速度

Fresnel knee を速度推定に用いる方法はスペクトルのモデルフィッティングをしなくてよいので簡便な方法であるので解析結果の評価を行った。しかしこの方法はデータの s/n の良否に結果が大きく左右されることが分かった。

spectrum anisotropy

スペクトル解析にて異方性は解析結果に有意な影響を与えると思われるのでそれを考察し軸比 1.7 の楕円近似が良いことを見つけた。

fitting parameter 数と速度推定の精度

スペクトル形状のフィッティングには、複数のパラメーターを用いた方が良いが、パラメーターの自由度が増えるほど速度値推定の精度は悪くなることを見つけ、速度のみを自由パラメーターとしてスペクトルフィッティングした方が Vccr に近い速度が得られることを見つけた。

IPS 時系列データの処理

スペクトルフィッティングの前処理として、時系列データ中のノイズ除去が不可欠であるがどのような除去方法が良いかを考察した。移動平均を掛けすぎると white noise レベルの推定に影響を与えるので median mean をまず使い、次に振幅分布をとり、大きなスパイクノイズを除去する方法とした。

スペクトルの評価

時系列データのノイズ除去処理を行った後、データの FFT 処理を行いスペクトルを求める。求めたスペクトルは観測状況によりモデルフィッティングに使えるような理想的な形状を必ずしも示さない。そこでフィッティングに許容できるスペクトルの評価方法を開発した。

残された課題

① 観測されたスペクトルの形状と比べ十分満足できるスペクトルがシミュレート出来たのに相関法で求めた速度と比べスペクトルフィッティングでは 100 km/s 以上低い速度値が必要な事例が幾つか見つかった。この原因と対策を調べる。

② IPS 時系列データの処理に開発した方法が豊川以外の観測点の受信信号にも適用できるかの検討。例えば豊川では都市雑音、富士観測所では電気牧柵からの放電ノイズなど。

宇宙線データによる太陽圏現象の研究

Study of Heliosphere phenomena by Cosmic ray database

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、高丸尚教(中部大)
三宅晶子 (茨城高専)

我々は 2023 年度 ISEE との共同利用研究で、名大ミュオン望遠鏡が 48 年間取得したデータ中に (125±45) 年の周期が存在することを突き止め、国際会議 ICRR2023)及び on-line journal Universe 9, 357, (2023), universe9090387 に発表した。この周期に近い先行研究を調べたところ、1984 年、GRS 衛星が取得した 300keV 以上のガンマ線 data の中にこの周期が存在するとの報告が Nature 誌に掲載されていることが判明した。また、1985 年には京大天文台の一本や黒川らが太陽の H α 線観測 data 中に、同様の長周期が存在することを Nature に報告している。この周期の存在に最初に気付いたのは NASA の Charles Wolff で、彼は太陽中心部の g-mode 振動が原因であると解釈しており、その高調波の証拠を 1983 年に ApJ 誌に発表している。しかしこの解釈は太陽振動学の研究者にまだ広く受け入れられているわけではない。一方 g-mode 振動を Kamiokande の太陽 neutrino の検出 data の中に見出そうという試みもなされている。

今回この周期が見つかったのは、長嶋、宗像らが用いた”east-west 法”による大気厚変動を起源の影響を取り除く方法を用いず、規則正しく年変動している muon data を各年毎に、サイン、コサイン関数で fitting してその年周変動を取り除き、その data に対して wavelet 解析をかけたためである。言い換えれば生 data に対してその中に含まれている主要波動(第一 harmonics) を取り除いた data を解析したため第 2、第 3 の振幅が見えてきたことになる。Wavelet 解析結果を図 1 に示す。

また同じ 48 年間の観測データを wavelet 解析したところ、数日の周期で宇宙線ミュオン強度が変動していることを見出した。特にこの変動は冬季に顕著である。宇宙線ミュオンは地球の外部から飛来する宇宙線が大気上空約 100hPa 高度で衝突し、パイオンを生成し、それが短時間で崩壊してミュオンを作る。そこで輪島上空から毎日ゾンデを上げて成層圏の状況を調べている気象庁の data を解析し、数日間の変動が、成層圏の総観変動とどう関係しているのか、2024 年度は名大の大気 group と共同研究で進める。このような解析から

太陽活動が成層圏の大気に与える長期変動の手がかりが得られるかもしれない。

今季までに分かったことを整理すると、輪島上空の 100hPa の高度が冬と夏で約 1km 程度変動するということ（図 2）。夏は大気が膨張して入射宇宙線が 1 回目の核衝突をする高度が約 1km 上昇するということである。衝突点が上空に移動すると、衝突によって作られた pion が崩壊してできる muon の走行距離が増加するので、muon の崩壊する確率が増大する。従って夏 muon の counting rate が下がることにつながっている。一方 wavelet 解析をしてみると、輪島のゾンデ data に対しては図 3 のように冬季に 5 日程度の周期性が存在する。一方名古屋 muon data に対しても、図 4 に示したように、同じような周期性が見られる。これが北極振動に由来するか否か、2024 年度共同研究課題である。

次に今年度の研究として、我々はメキシコ、ボリビアの高山に太陽中性子望遠鏡(Solar Neutron Telescope)を設置してきたが、その中に太陽中性子が崩壊して作り出した陽子 (Solar Neutron Decay Protons) の信号を見出した。これは 2004 年 11 月 7 日にメキシコの Sierra Negra 山(4,600m)に設置されていた SNT で検出された。この内容は MDPI([Universe 2024,10,16](#)) 誌にて発表した。またこの信号は同時に Finland の Oulu に設置されている中性子モニターにも検出された。これは Oulu が北極圏に近く、低エネルギーの SNDP が地球の磁場ではねられず地上まで到達したからである。同じようなイベントがもう一例見つかった。1990 年 5 月 24 日のイベントは太陽中性子が作り出した GLE event として有名であるが、その 4 日前に同じようなイベントが見つかった。このイベントに対して詳細な解析を 2024 年度の共同研究にて進めたい。

図 1. 名古屋 muon data 1970.10-2018.12 Wavelet analysis

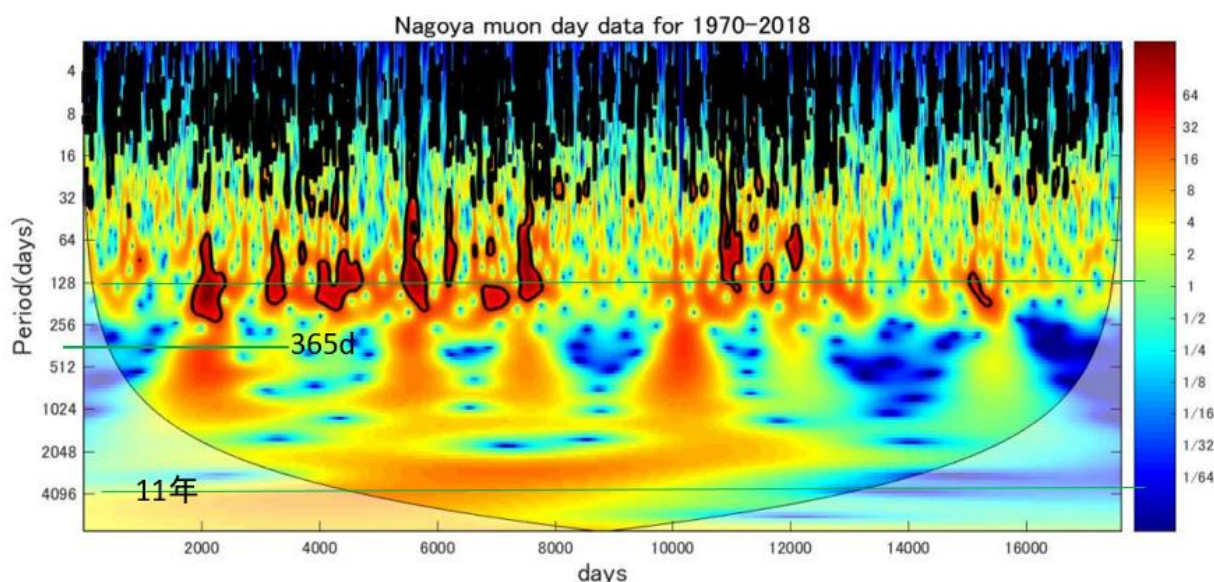


図 2. 輪島上空 100hPa 地点の日変動 (2016.1 – 2019.6)

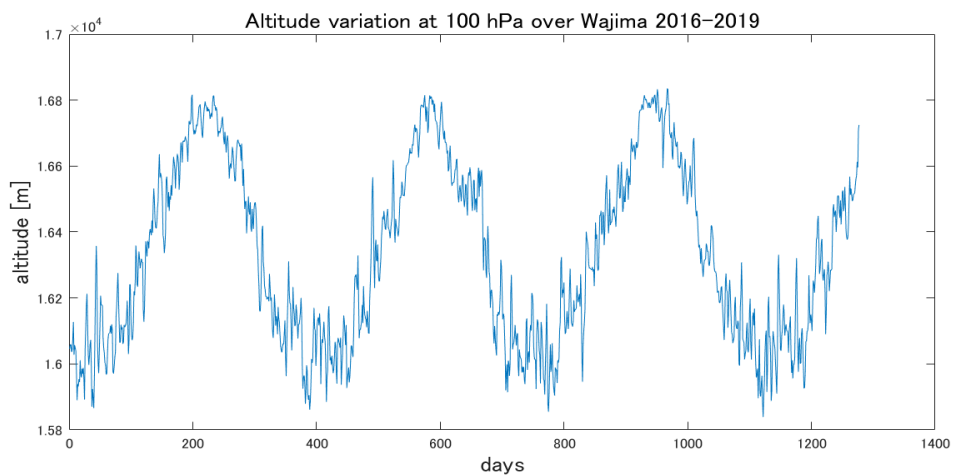


図 3. ゾンデデータに対する wavelet 解析結果(2016.1 -2019.6)

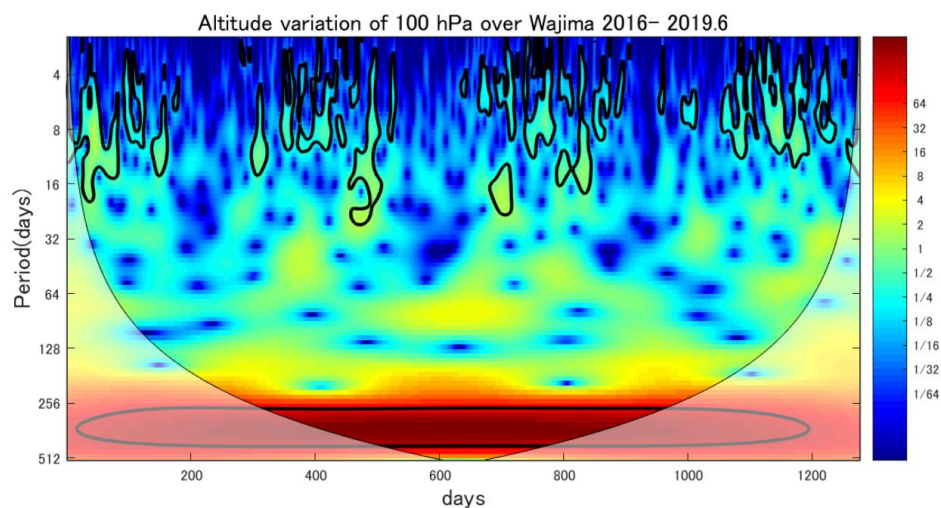
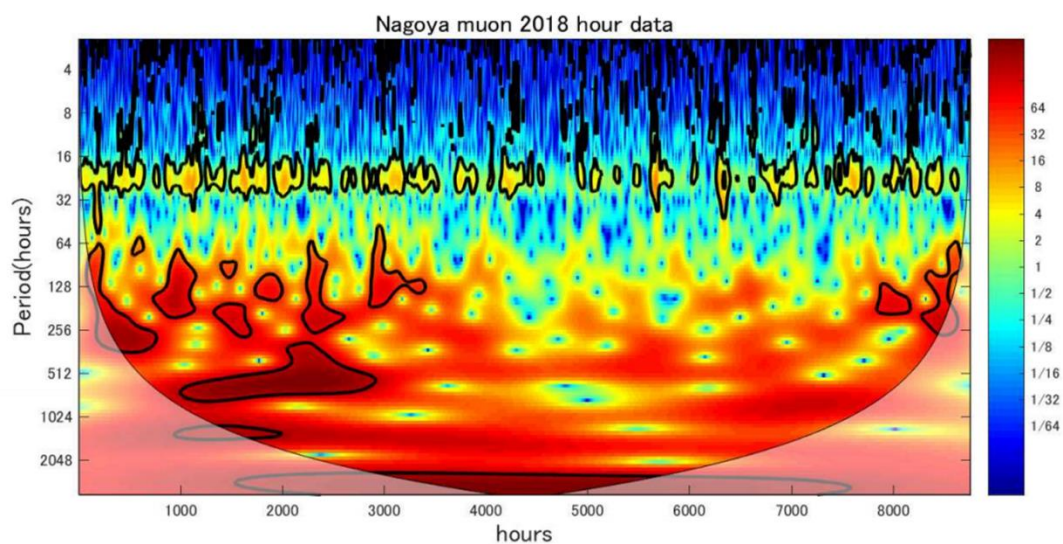


図 4. ミューオンデータに対する周期性 (2018 年度のみ)
(注意, both axes are presented by hours, not by day)



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2
Enhancement of the Spacecraft Charging and Inner Magnetospheric Researches by Arase DC and
low frequency E-field: #2

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

Arase衛星搭載電場・プラズマ波動計測器PWEは、地球内部磁気圏のプラズマ波動-粒子相互作用を的確に検出し、磁気圏内のグローバルなエネルギー収支・交換・伝搬を定量評価する手段を提供してきた。本申請は、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。

本研究は名大ERGサイエンスセンターメンバーとの協力によるもので、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。

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

サイエンスセンタのメンバーとともに以下のLevel-2データの公開・メンテナンス作業を順調に進めた。適用するデータ校正は「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想定する「BepiColombo PWIデータ方式」の原型としても想定するものである。

[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

- スピンフィット(〜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分布を入れるとある程度説明が可能であることを見出した。今後はこの電子雲モデルのさらなる定量化を行い、実際の電場データ補正に適用することを目指したい。

Combination of +Q, -q and d produce various waveforms

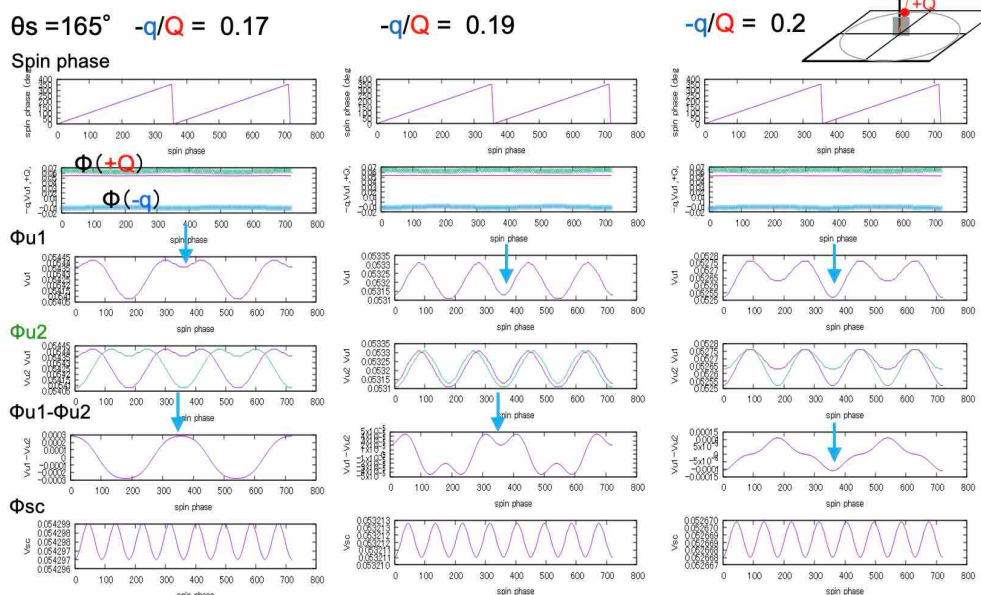


図. The distorted electric waveform model with photoelectron cloud in the sunward of spacecraft (Nakagawa+, Modeling Electric Potential Produced by Photoelectrons and Spacecraft charging: A case of the Arase satellite, URSI GA 2023, Sapporo, 2023年8月)

(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料に依存すること、衛星形状・姿勢にも依存すること、周辺電子温度にも影響されることなどから、その密度決定精度は低い。しかし、目視決定や仮定に依存せず、容易に 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データを導出することが潜在的に可能である。UHR 周波数による電子密度決定情報が存在する 2017 年 4 月～2022 年 4 月で UHR 周波数-衛星電位との相関解析を行い、その軌道依存性・経年変化の評価を行いつつある。Geotail・Cluster 事例で見られる「電子密度 $\propto \exp(\text{衛星電位})$ 」関係から外れる原因を、LEPe・LEPi のデータ等も参照して探る予定である。

衛星電位計測の基準点は、ワイヤアンテナ先端のプロープ電位である。プロープにはバイアス電流を供給し、流出光電子量と流入周辺電子量のアンバランスを補正して周辺プラズマ電位に近づけている(差: $< 0.1\text{--}0.2\text{ V}$)。低密度域でみられる衛星電位のゆらぎはプロープ電位の安定度に起因する可能性もあるが、この場合、衛星電位精度は直接 Arase の電場計測精度につながる問題となる。

また、衛星ポテンシャルの検討を通して、衛星周囲の電子と温度を導出することで、プラズマ圏の熱的プラズマ分布の情報を導出できる可能性が示された。

(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、ISEEメンバーを始めとした以下の論文成果創出に代表されるプラズマ圏・磁気圏電場観測、EMICなどの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。引き続き、Araseの成果創出を支えていく。査読論文としては、2023年度は以下が出版された。

・Pi2 パルセーション (7~25 mHz)に伴うサブストームオーロラにおける Arase ($L \sim 5$) での電場・磁場と Poynting flux と荷電粒子フラックスの準周期変動: Chen, L., et al. (2023). Correspondence of Pi2 pulsations, aurora luminosity, and plasma flux fluctuation near a substorm brightening aurora: Arase observations. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 128, e2023JA031648. <https://doi.org/10.1029/2023JA031648>

・長寿命を持つプラズマ圏ヒスについて: Wu G. et al.(2024), Long lifetime hiss rays in the disturbed plasmasphere, *Geophys. Res. Lett.*, 51, <https://doi.org/10.1029/2023GL107825>

GCOM-C/SGLI による赤潮検出アルゴリズム開発 Development of red tide algorithm based on GCOM-C/SGLI

エコ シスワント、国立研究開発法人海洋研究開発機構
地球表層システム研究センター

1. Introduction and Objectives

Currently, about 40% (60%) of Asia's population lives within 100 km (400 km) of the coast. The concentration of human settlements in the coastal zone is caused by the economic benefits that can be gained from coastal industries/activities such as mariculture, tourism, and recreation. However, population density and economic growth in the coastal zone increase the pressures on the coastal ecosystems. Some environmental pressures are the increasing rate of organic and inorganic material loads that lead to red tide, an unusual phytoplankton bloom of a dominant species (Anderson, 1994). Red tides cause ecosystem/biodiversity destructions, fish mortality, livelihood/economic losses, and adverse societal impacts (severe illness and fatalities to humans). Red tide, due to dead phytoplankton cells, frequently ends up with coastal water hypoxia.

Red tide are also associated with climate changes, as climate changes modify precipitation, upwelling, and atmospheric deposition patterns that introduce a large number of nutrients into marine environments. Many Asian coastal waters undergo long-term and periodic nutrient enrichments, and hence they are suffering from red tide as these coastal waters are surrounded by densely populated countries and vulnerable to climate changes owing to their location which are between the Pacific Ocean and the Indian Ocean.

Jakarta Bay, Manila Bay, the upper Gulf of Thailand, Sepangan Bay, and Malacca Strait are among the coastal waters or embayments in the Southeast Asian waters that frequently suffer from red tide and hypoxic/anoxic waters. Dinoflagellates (*Alexandrium*, *sp.*, *Gymnodinium* *sp.*, *Noctiluca* *sp.*, *Peridinium* *sp.*, etc.) are the main phytoplankton group causing red tide in the Southeast Asian waters (e.g., Yñiguez, et al., 2021; Luang-on et al., 2023). Among the Japanese coastal waters, the Ariake Sea and Tokyo Bay are the waters frequently affected by red tides. Recently in October 2021, a devastating red tide also occurred in the waters southeast of Hokkaido caused by dinoflagellate *Karenia selliformis* (Kuroda et al., 2022).

Rapid coastal water monitoring of red tide is thus required. However, in situ monitoring is expensive and impossible for long-term observation with a high spatiotemporal scale. Such a large-scale and rapid observation can only be carried out by satellite remote sensing. To fully exploit remote sensing technology establishing satellite-derived red tide algorithms is a prerequisite. In this report, case studies on red tide detection algorithm developments for the upper Gulf of Thailand (uGoT) and for the waters off southeast Hokkaido will be described.

3. Methodology

For the waters off southeast Hokkaido, we used the SGLI Level-2 dataset of the normalized water-leaving radiance (NWLR, $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$) and chlorophyll-a concentration (chl-*a*, mg m^{-3}) at a spatial resolution of 250 m which were obtained from the JAXA Satellite Monitoring for Environmental Studies website (JASMES, <https://www.eorc.jaxa.jp/JASMES/>). We divided the NWLR by the top-of-atmosphere solar irradiance (F_0 , $\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$) for each SGLI wavelength (λ) adopted for the GCOM-C mission (https://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM_C/data/prelaunch/index.html) to convert into remote sensing reflectance (R_{rs} , sr^{-1}).

The criteria for selecting the 3×3 pixel areas representative of optically different types of water were based mainly on SGLI red-green-blue (RGB) composites, SGLI high-chl-*a* pixels, and previous studies. This study used *K. selliformis* density maps generated by Kuroda et al. (2022) and selected

locations characterized by high cell densities of *K. selliformis* and high SGLI-retrieved chl-*a* as pixels where there were *K. selliformis* blooms. The method to classify clear- and turbid-non bloom waters followed Siswanto et al. (2023). Figure 1 shows the locations where the SGLI-derived R_{rs} for different water types were collected.

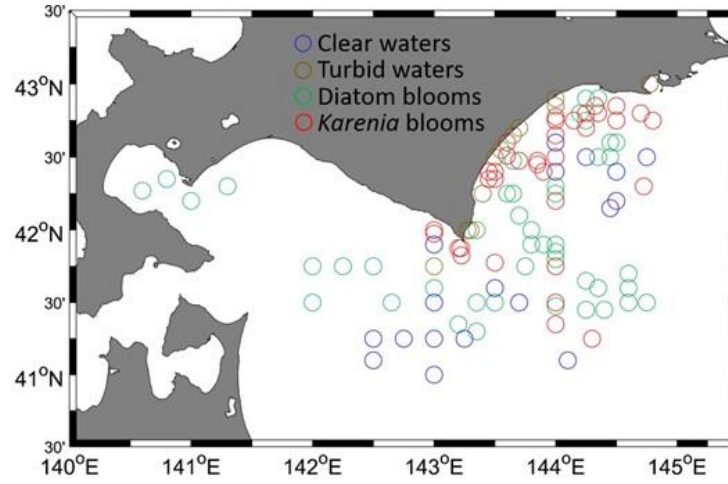


Figure 1. Locations from which remote sensing reflectance data were collected. The locations that were indicated as diatom blooms, *K. selliformis* blooms, clear waters, and turbid waters are indicated by green, red, blue, and brown circles, respectively.

We investigated whether optical properties can be used to separate diatom bloom from *K. selliformis* bloom. We used R_{rs} to calculate total absorption coefficient (a) using the quasi-analytical algorithm (QAA) of Lee et al. (2002). The QAA version 5 which uses a green band ($\lambda = 565$ nm) as the reference instead of a red band ($\lambda = 670$ nm) was used. We made this choice because most $R_{rs}(670)$ values during both diatom and *K. selliformis* blooms were below 0.0015 sr^{-1} (Lee et al., 2009).

The same method was applied to derive R_{rs} in the uGoT except that the SGLI data were acquired from the Global Portal System website (<https://gportal.jaxa.jp/gpr/>) and were corrected employing the *in situ* R_{rs} data collected within the period from 2018 to 2023. A local chl-*a* algorithm was also developed to derive chl-*a* in the uGoT more accurately. The method applied here followed MODIS-based red tide detection proposed by Luang-on et al. (2023) except it used SGLI bands.

2. Results and Discussion

2.1. Red tide off southeast Hokkaido

The spectral shapes of R_{rs} obtained from clear waters exhibited peaks at wavelengths shorter than 565 nm (Figure 2a), exclusive $\lambda = 380$ nm and 412 nm because we found that $R_{rs}(380)$ and $R_{rs}(412)$ were unexpectedly high during *K. selliformis* blooms, which might be inaccurate (e.g., Ishizaka et al., 2022; Murakami et al., 2022). The R_{rs} from turbid waters, diatom blooms, and *K. selliformis* blooms exhibited peaks at 565 nm (Figure 2b–d).

To distinguish turbid waters from phytoplankton-dominated waters, following Siswanto et al.'s (2013) approach, we plot R_{rs} slope between 443 nm and 565 nm ($R_{rs_slope}(443_565)$) against chl-*a* (Figure 3a). The variation of $R_{rs_slope}(443_565)$ was uncorrelated with chl-*a* in turbid waters but strongly correlated ($r = 0.869$, $p < 0.0001$) with chl-*a* in the waters spanning from clear to phytoplankton bloom waters (Figure 3a). We therefore defined an approximate threshold expressed by the equation 1 (gray line in Figure 3a): $R_{rs_slope}(443_565) = 9 \times 10^{-6} + 7 \times 10^{-6} \times \ln(\text{chl-}a)$, to differentiate turbid waters from waters associated with blooms of diatoms and *K. selliformis*.

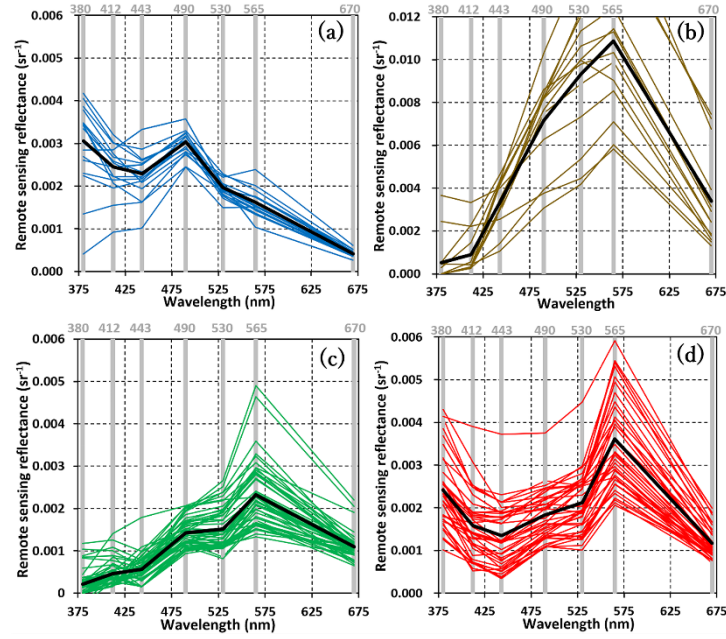


Figure 2. The average remote sensing reflectance (R_{RS}) calculated from 3×3 pixel areas at the locations shown in Figure 1. The R_{RS} values for clear waters, turbid waters, diatom blooms, and *K. selliformis* blooms are shown in (a), (b), (c), and (d), respectively.

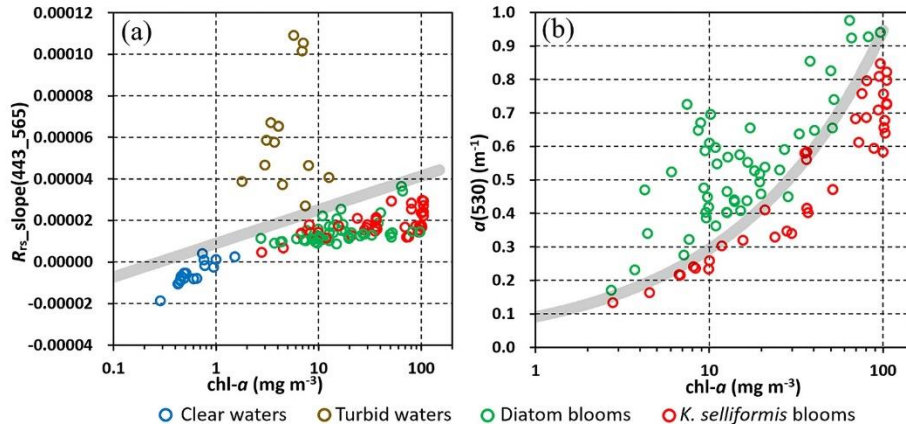


Figure 3. (a) Scatter plots of the relationship between the remote sensing reflectance (R_{RS}) slope between the 443 nm and 565 nm bands ($R_{RS_slope}(443_565)$) and the concentration of chlorophyll-a ($chl-a$). Turbid waters, clear waters, diatom bloom waters, and *K. selliformis* bloom waters are represented by brown, blue, green, and red circles, respectively. The grey regression line (equation 1: $R_{RS_slope}(443_565) = 9 \times 10^{-6} + 7 \times 10^{-6} \times \ln(chl-a)$) serves as the boundary separating the turbid water class from the other water classes. (b) Scatter plot showing the relationship between the total absorption at 530 nm ($a(530)$) and $chl-a$. Data points during diatom blooms and *K. selliformis* blooms are depicted by green and red circles, respectively. The grey line is a regression line (equation 2: $a(530) = 0.0852 \times chl-a^{0.5146}$) that distinguishes diatom blooms from *K. selliformis* blooms.

The primary challenge is to discriminate between blooms of diatoms and *K. selliformis*. Applying QAA v5, we computed $a(\lambda)$ for most SGLI wavelengths (443 nm, 490 nm, 530 nm, 565 nm, and 670 nm) and investigated whether these values could be used to differentiate blooms of diatoms and *K. selliformis* by relating them to $chl-a$. Generally, within the same range of $chl-a$, $a(\lambda)$ tended to be higher during diatom blooms than *K. selliformis* blooms (not shown). However, $a(530)$ (Figure 3b) provided better separation between blooms of diatoms and *K. selliformis* than other wavelengths. Thus, we used the natural logarithmic regression line, as expressed by equation 2 (gray line in Figure 3b): $a(530) = 0.0852 \times chl-a^{0.5146}$, to distinguish between blooms of diatoms and *K. selliformis*, i.e., if $a(530)$ was more (less) than the value predicted by equation 2, the bloom was attributed to diatoms (*K. selliformis*).

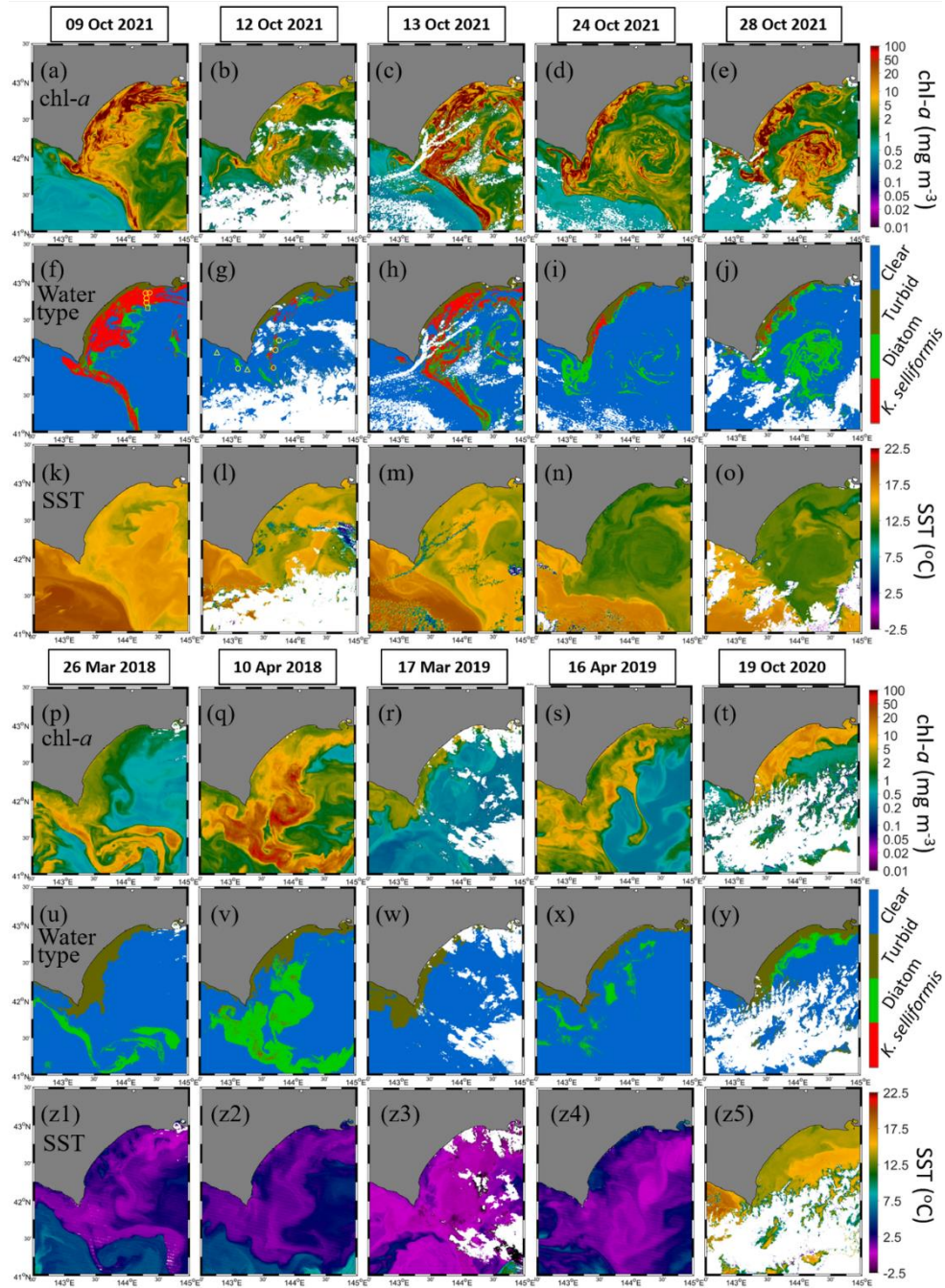


Figure 4. Maps showing the distribution of SGLI chl-*a* (a–e) and the corresponding water types (f–j) classified using the method employed in this study during the 2021 red tide event. Maps that show SGLI-retrieved SSTs (k–o) during the 2021 red tide are also mentioned. Maps (p–t), (u–y), and (z1–z5) depict the same information as (a–e), (f–j), and (k–o), respectively, but for the non-red-tide spring and fall seasons. In panels (f) and (g), open circles, squares, and triangles represent 92%, 40%, and 5% contributions of *K. selliformis* to the phytoplankton community, respectively (Yamaguchi et al., 2022).

We used the following procedures to discriminate blooms of *K. selliformis* from other types of water: 1) excluding λ of 380 nm and 412 nm, a peak of the R_{rs} spectral shape at a wavelength shorter than 565 nm implies clear water; 2) an $R_{rs_slope}(443_565)$ above the borderline defined by equation 1 implies turbid waters; 3) a value of $a(530)$ above the borderline defined by equation 2 implies a diatom bloom; and 4) otherwise, there is a bloom of *K. selliformis*. The borderline defined by equation 2 also effectively separates blooms of diatoms and *K. selliformis*, even at chl-*a* less than 10 mg m⁻³ (Figure 3b), but we consider this distinction less important because red tides are typically accompanied by chl-*a* higher than 10 mg m⁻³ (e.g., Yunus et al., 2015; Kuroda et al., 2022; Luang-on

et al., 2023). We therefore added the fourth criterion of $\text{chl-}a > 10 \text{ mg m}^{-3}$ to identify waters with blooms of diatoms or *K. selliformis* before separating them into different types of blooms.

Figure 4 shows maps of the SGLI standard product of $\text{chl-}a$ (a–e, p–t) and water types (f–j, u–y) classified using the procedures described above. During the mature phase of *K. selliformis* blooms, areas with $\text{chl-}a > 10 \text{ mg m}^{-3}$ (a–c) were predominantly classified as *K. selliformis* blooms (f–h). Our methodology also classified the seasonal spring and fall phytoplankton blooms, indicated by high $\text{chl-}a$ (Figure 4p–t), as typical diatom blooms (Figure 4u–y).

During the mature *K. selliformis* blooms, limited spatial areas were also classified as diatom blooms. This classification of diatom blooms is reasonable because in-situ observations have also detected diatom blooms alongside larger blooms caused by *K. selliformis* (Kuroda et al., 2022; Yamaguchi et al., 2022). Examination of Figure 2c and 2d reveals that the most distinctive feature in the spectral shape of R_{rs} that differentiates blooms of diatoms and *K. selliformis* is the slope of R_{rs} between 380 nm and 412 nm ($R_{rs_slope}(380_412)$). However, it should be noted that R_{rs} retrievals in the UV-blue band may be less precise than retrievals in the green bands (e.g., Ishizaka et al., 2022; Murakami et al., 2022). We therefore do not currently recommend using apparent optical properties between 380 nm and 412 nm to discriminate between blooms of diatoms and *K. selliformis*.

During the later stages of *K. selliformis* blooms on 24 and 28 October 2021, we detected *K. selliformis* blooms in high- $\text{chl-}a$ areas primarily in coastal waters (Figure 4d–e, i–j). High- $\text{chl-}a$ areas associated with diatom blooms were apparent in offshore regions, especially south of 42.5°N and east of 143.75°E . Although there are no available in-situ data or previously published studies supporting these diatom blooms, their occurrence can be expected based on the cooling of sea surface temperature (SST) (Figure 4n–o). A decrease of SST indicates an upwelling of subsurface nutrients that generally stimulate the growth of diatoms more than dinoflagellates (e.g., Malviya et al., 2016; Lampe et al., 2021). In contrast, Yamaguchi et al. (2022) have suggested that relatively high SSTs (Figure 4k–m), stratified water columns, and low nutrient concentrations favour the occurrence of *K. selliformis* blooms.

2.2. Red tide in the uGoT

The uGoT red tide has a greater diversity of species than off the coast of Hokkaido. It is often caused by green *Noctiluca scintillans*, cyanobacteria, and mixed-species blooms, in addition to dinoflagellates and diatoms. A localized algal bloom classification method has been developed for MODIS based on *in situ* hyperspectral R_{rs} measured during the algal blooms in the uGoT before applying to the satellite data (Luang-on et al., 2023). This algorithm works well with MODIS data to identify the red tides and discriminate green *Noctiluca* blooms from the other red tides. It is because each red tide contains unique algal pigments, and these differences in pigments affect their ability to absorb light at different wavelengths, especially in the blue, green, and red regions (Clementson and Wojtasiewicz., 2019). This allowed us to make a modification of the MODIS method for red tide detection using SGLI data.

For SGLI, we modified the regional classification algorithm by utilizing the same *in situ* hyperspectral R_{rs} dataset (Figure 5a). Nevertheless, the SGLI wavelengths at 490, 531, and 670 nm normalized by 565 nm were considered due to their potential to separate between algal-bloom and non-bloom waters (Figure 5b–c). The normalized R_{rs} at 490 nm (i.e., R_{rs490}/R_{rs565}) covaries with $\text{chl-}a$ concentrations in the uGoT discriminated relatively high $\text{chl-}a$ waters ($\geq 1,500 \text{ mg m}^{-3}$) of super green *Noctiluca* blooms from other algal blooms in lower $\text{chl-}a$ levels ($\geq 10 \text{ mg m}^{-3}$) and non-bloom in coastal ($\geq 1 \text{ mg m}^{-3}$) and oceanic ($< 1 \text{ mg m}^{-3}$) waters. The normalized R_{rs} at 531 nm and 670 nm (i.e., R_{rs531}/R_{rs565} and R_{rs670}/R_{rs565}) then were used to classify algal-bloom waters in the medium-to-high $\text{chl-}a$ levels of green *Noctiluca* of 50% to 80% dominant waters, other dinoflagellates, diatoms, cyanobacteria, and mixed species.

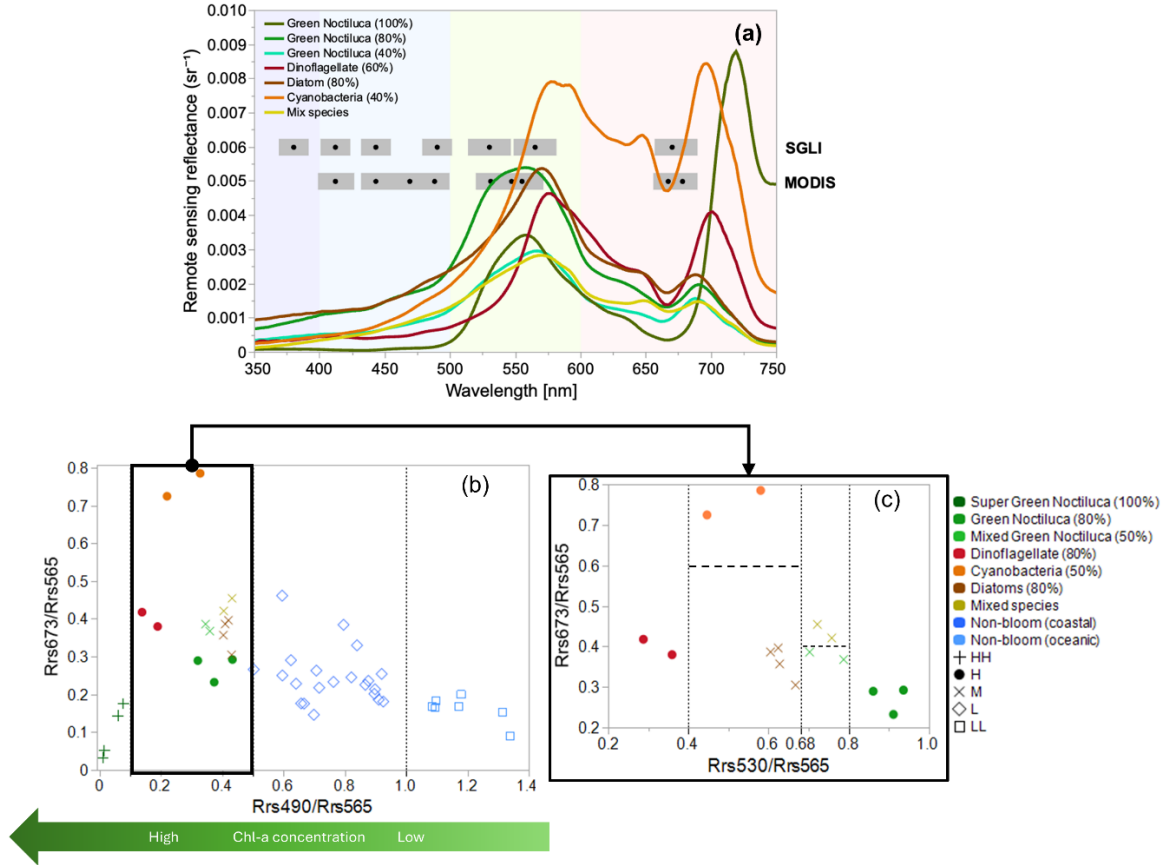


Figure 5. Modified local algorithm for classifying algal blooms by GCOM-C/SGLI data, based on the *in situ* hyperspectral Rrs dataset (a) from Luang-on et al. (2023). Cluster analysis was performed on *in situ* Rrs490/Rrs565 and Rrs673/Rrs565 (b) and Rrs530/Rrs565 and Rrs673/Rrs565 (c). Rrs673 is denoted as Rrs670 in SGLI data.

Before applying the modified local algal-bloom algorithm to SGLI data, we verified the accuracy of SGLI Rrs using the matches-up between SGLI and *in situ* data (Figure 6). However, discrepancies exist between SGLI and *in situ* data (Feng et al. 2023; Ishizaka et al. 2022; Matsuoka et al. 2022), and our results support these findings. To enhance the SGLI accuracy, we used reduced major axis (RMA) regression fitting between *in situ* and SGLI data for each Rrs and Rrs ratios. As a result, the ratios of Rrs443/Rrs565 , Rrs530/Rrs565 , and Rrs673/Rrs565 exhibited a substantially high coefficient of determination ($R^2 > 0.9$) and can be considered reliable for utilization with the local empirical algorithm to detect the red tides.

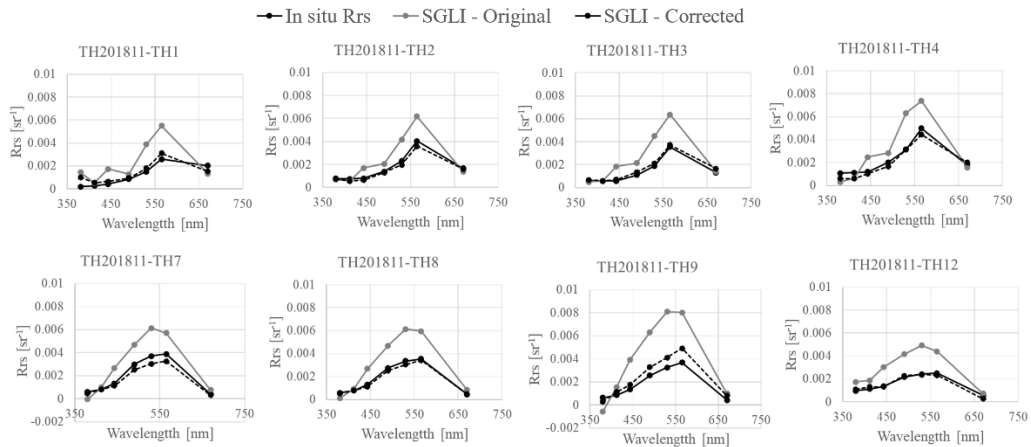


Figure 6. Comparisons of matched-up Rrs spectra for ± 24 h between *in situ* (black lines) and 3-by-3-pixel-averaged SGLI data before (grey lines) and after (dotted black lines) correction at wavelengths 380, 412, 443, 490, 530, 565, and 673 nm.

The enhanced SGLI Rrs ratios of Rrs490/Rrs565, Rrs531/Rrs565, and Rrs670/Rrs565 were then used with the modified local algal-bloom algorithm to investigate the red tides on daily SGLI images (Figure 7). To validate the algorithm performance on the SGLI data, we compared the SGLI images with red tide reports from the Department of Marine and Coastal Resources in Thailand. On cloudless days, SGLI algal bloom images revealed red tide areas in high chl-a over than 10 mg m⁻³ corresponding to red tide reports of green *Noctiluca*, diatoms, and the dinoflagellate *Karenia* sp. (Figure 7a-c) demonstrating the performance of SGLI in red tide detection.

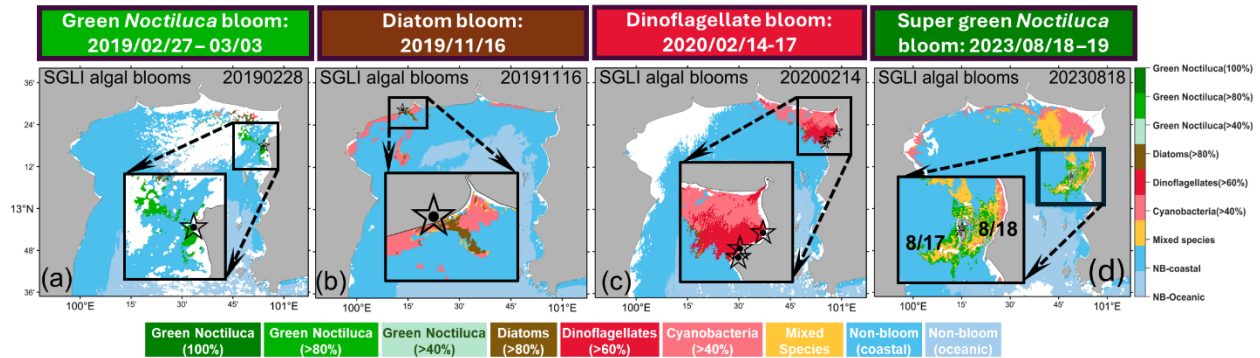


Figure 7. Comparison of SGLI red tide detection and occurrences of red tides caused by green *Noctiluca scintillans* (a), diatoms (b), and other dinoflagellates (c) reported by the Department of Marine and Coastal Resources, Thailand, as well as super green *Noctiluca* blooms reported with massive fish mortality by local people (d). Stars mark locations where red tides have been reported.

On 18 August 2023, the SGLI failed to detect the presence of super green *Noctiluca* (Figure 4d). An atmospheric correction warning was issued due to the presence of moderate glint, negative normalized water-leaving radiance in one or more bands, and gamma out-of-bounds on the day. Toratani et al. (2021) estimate SGLI atmospheric correction in the visible bands using satellite-observed aerosol reflectance in the near-infrared bands. We expected that the specific atmospheric conditions and the highly reflectivity of the sea surface during the super green *Noctiluca* blooms (Luang-on et al. 2023) would lead to a significant rise in near-infrared reflectance and a noticeable change in the visible spectrum of the SGLI. Regrettably, the available data were inadequate to validate this hypothesis due to limited chances to observe the red tide and the obstruction caused by cloud cover on SGLI data. Additional data and future red tide incidents could potentially enhance our red tide algorithm.

3. Summary

For the waters off southeast Hokkaido, we proposed a method that uses an optical model, quasi-analytical algorithm (QAA), and GCOM-C/SGLI data to detect *K. selliformis* blooms. We relied on R_{rs} spectral shape to differentiate phytoplankton bloom waters and non-bloom waters. It revealed that, at the same chl-*a*, $a(530)$ values were typically lower during *K. selliformis* blooms than during diatom blooms. The $a(530)$ could thus serve as an optical property for distinguishing *K. selliformis* blooms from diatom blooms. However, continuous verification and validation will be necessary to identify the optimal borderline or threshold used for detecting *K. selliformis* blooms in the future.

For the uGoT, a local algal bloom classification algorithm, previously developed for MODIS data, was proposed to discriminate green *Noctiluca* blooms from other red tides. This local algorithm for GCOM-C/SGLI was developed utilizing the same *in situ* hyperspectral Rrs dataset and applied into enhanced SGLI Rrs ratios of Rrs490/Rrs565, Rrs531/Rrs565, and Rrs670/Rrs565. The GCOM-C/SGLI successfully detected red tides of green *Noctiluca* blooms, diatoms, and dinoflagellates, but not super green blooms under specific atmospheric conditions. Our algorithms can be improved with the availability of additional *in situ* data and red tide incidents in the future.

References

Anderson, D.M.. 1994. "Red tide". Scientific American 271(2): 62–68. <http://www.jstor.org/stable/24942803>.

- Clementson L. A., Wojtasiewicz B. (2019). Dataset on the absorption characteristics of extracted phytoplankton pigments. Data Brief 24, 103875. doi: 10.1016/j.dib.2019.103875
- Feng, C., Y. Zhu, A. Shen, C. Li, Q. Song, B. Tao, and J. Zeng. 2023. "Assessment of GCOM-C Satellite Imagery in Bloom Detection: A Case Study in the East China Sea." *Remote Sensing* 15 (3): 691. doi: 10.3390/rs15030691.
- Ishizaka, J., M. Yang, N. Fujii, T. Katano, M. Hori, T. Mine, K. Saitoh, and H. Murakami. 2022. "Use of AERONET-OC for Validation of SGLI/GCOM-C Products in Ariake Sea, Japan." *Journal of Oceanography* 78: 291–309. doi:10.1007/s10872-022-00642-9.
- Kuroda, H., T. Azumaya, T. Setou, and N. Hasegawa. 2021. "Unprecedented Outbreak of Harmful Algae in Pacific Coastal Waters off Southeast Hokkaido, Japan, during Late Summer 2021 after Record-Breaking Marine Heatwaves." *Journal of Marine Science and Engineering* 9: 1335. doi:10.3390/jmse9121335.
- Kuroda, H., Y. Taniuchi, T. Watanabe, T. Azuyama, and N. Hasegawa. 2022. "Distribution of Harmful Algae (*Karenia* spp.) in October 2021 Off Southeast Hokkaido, Japan." *Frontiers in Marine Science* 9: 841364. doi:10.3389/fmars.2022.841364.
- Lampe, R. H., G. Hernandez, Y. Y. Lin, and A. Marchetti. 2021. "Representative Diatom and Coccolithophore Species Exhibit Divergent Responses Throughout Simulated Upwelling Cycles." *mSystems* 6: e00188–21. doi:10.1128/mSystems.00188-21.
- Lee, Z. P., K. L. Carder, and R. A. Arnone. 2002. "Deriving Inherent Optical Properties from Water Color: A Multiband Quasi-Analytical Algorithm for Optically Deep Waters." *Applied Optics* 41: 5755–5772. doi:10.1364/AO.41.005755.
- Lee, Z. P., B. Lubac, J. Werdell, and R. Arnone. 2009. "An Update of the Quasi-Analytical Algorithm (QAA_v5)." *IOCCG software report* (2009). (https://www.ioccg.org/groups/Software_OCA/QAA_v5.pdf).
- Luang-on, J., J. Ishizaka, A. Buranapratheprat, J. Phaksopa, J. I. Goes, E. R. Mau're, E. Siswanto, Y. Zhu, Q. Xu, P. Nakornsantiphap, H. Kobayashi, and S. Matsumura. 2023. "MODIS-Derived Green *Noctiluca* Blooms in the Upper Gulf of Thailand: Algorithm Development and Seasonal Variation Mapping." *Frontiers in Marine Science* 10: 10.1031901. doi:10.3389/fmars.2023.1031901.
- Malviya, S., E. Scalco, S. Audic, F. Vincent, A. Veluchamy, J. Poulain, P. Wincker, D. Ludicone, C. de Vargas, L. Bittner, A. Zingone, and C. Bowler. 2016. "Insights into Global Diatom Distribution and Diversity in the World's Ocean." *PNAS* 113(11): E1516–E1525. doi:10.1073/pnas.1509523113.
- Matsuoka, A., J. W. Campbell, S. B. Hooker, F. Steinmetz, K. Ogata, T. Hirata, H. Higa et al. 2022. "Performance of JAXA's SGLI Standard Ocean Color Products for Oceanic to Coastal Waters: Chlorophyll A Concentration and Light Absorption Coefficients of Colored Dissolved Organic Matter." *Journal of Oceanography* 78 (4): 187–208. doi: 10.1007/s10872-021-00617-2.
- Murakami, H., D. Antoine, V. Vellucci, and R. Frouin. 2022. "System Vicarious Calibration of GCOM-C/SGLI Visible and Near-Infrared Channels." *Journal of Oceanography* 78: 245–261. doi:10.1007/s10872-022-00632-x.
- Siswanto, E., J. Ishizaka, S. C. Tripathy, and K. Miyamura. 2013. "Detection of Harmful Algal Blooms of *Karenia mikimotoi* Using MODIS Measurements: A Case Study of Seto-Inland Sea, Japan." *Remote Sensing of Environment* 129: 185–196. doi:10.1016/j.rse.2012.11.003.
- Toratani, M., K. Ogata, and H. Fukushima. 2021. "SGLI Algorithm Theoretical Basis Document: Atmospheric Correction Algorithm For Ocean Color - Version 3." https://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM_C/data/ATBD/ver3/V3ATBD_O2AB_NWLR_toratani.pdf.
- Yamaguchi, A., Y. Hamao, K. Matsuno, and T. Iida. 2022. "Horizontal Distribution of Harmful Red-Tide *Karenia selliformis* and Phytoplankton Community along the Pacific Coast of Hokkaido in Autumn 2021." *Bulletin of the Japanese Society of Fisheries Oceanography* 86(2): 41–49. doi:10.34423/jsfo.86.2_41.
- Yñiguez, A.T., P.T. Lim, C.P. Leaw, S.J. Jipaning, M. Iwataki, G. Benico, and R.V. Azanza. "Over 30 years of HABs in the Philippines and Malaysia: What have we learned?" *Harmful Algae* 102: 101776. doi:10.1016/j.hal.2020.101776.
- Yunus, A. P., J. Dou, and N. Sravanthi. 2015. "Remote Sensing of Chlorophyll-a as A Measure of Red Tide in Tokyo Bay Using Hotspot Analysis." *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 2: 11–25. doi:10.1016/j.rsase.2015.09.002.

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】

明野ミュオン観測では3基のミュオン観測装置のうち1基が継続的に観測可能であり、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継続中である。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いる。

インドとの共同研究では、2020年3月にインド側の研究者2名（S. K. Gupta氏、P. K. Mohanty氏）を招聘し明野観測所で研究ミーティングを行ったが、新型コロナが急激に蔓延し、オンラインでの交流以外できなくなった。比例計数管型ミュオン観測装置の拡張（検出面積を2倍の1,120 m²にする）や実験装置の保守も滞ることになったが、コロナも収まってきた2023年3月にインドからGupta氏等2名を招き、中部大学にて研究ミーティングを行った。

本年度2024年2月の中部大学での研究ミーティングには夏の名古屋大学での宇宙線国際会議（ICRC2023Nagoya）での来日から月日がそれほど経っていないこともありインドからの出席は割愛したが、2月のこの研究ミーティングの後、大嶋氏が1週間インドに滞在し、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市立大学名誉教授の林嘉夫氏の長期インド滞在が予定されているなど活発に交流ができるようになっていく。

【研究成果】

本研究に関する成果として、Physical Review D に1篇の論文が受理され、名古屋大学で開催された宇宙線国際会議（ICRC2023）で3件の発表を行い、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. "Dependence of the parallel mean free path of high-energy galactic cosmic rays in the heliosphere on their rigidity, and solar activity as measured by the GRAPES-3 experiment", H. Kojima, T. Koi, A. Oshima, S. Shibata et. al., Physical Review D 109, 063011 (2024)

宇宙線国際会議での発表は Conference Proceedings として以下の論文になっている。

【宇宙線国際会議2023名古屋（ICRC2023Nagoya）発表リスト】

1. "The Akeno Muon Observation: A Joint Research for Near Earth Space by Japan-India Collaboration", A. Oshima et. al., Proceedings of Science PoS(ICRC2023)1313
2. "Solar wind velocity dependence of the flow of galactic cosmic rays perpendicular to the ecliptic plane on the polarity of the interplanetary magnetic field", H. Kojima et. al., Proceedings of Science PoS(ICRC2023)1339
3. "Dependence of solar diurnal variation on solar wind speed", T. Koi et. al., Proceedings of Science PoS(ICRC2023)1340

【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(31)」、小島浩司他、日本物理学会78回年次大会、東北大学、2023.9.16
2. 「地上ミュオン観測における気圧変動の効果2」、小河蒼太、大嶋晃敏他、日本物理学会78回年次大会、東北大学、2023.9.16
3. 「GRAPES-3実験における大型NaI検出器の導入について(7)」、青石知樹、…、田中公一他、日本物理学会2024年春季大会、オンライン開催、2024.3.18
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(32)」、小島浩司他、日本物理学会2024年春季大会、オンライン開催、2024.3.19
5. 「地上ミュオン観測のための地球磁気圏における宇宙線の軌道計算」、鬼頭浩志、小島浩司他、日本物理学会2024年春季大会、オンライン開催、2024.3.19

連成計算フレームワークを利用したMHDシミュレーションの重合格子化の研究
Development of Nested Grid for MHD Simulation with Cross-Reference Simulation Framework

深沢圭一郎、京都大学・学術情報メディアセンター

太陽地球惑星系は様々な領域や非線形物理過程が競合した複合システムであり、また、巨大な領域の中で様々なスケールの現象は起きている。この様なシステム全体を計算機シミュレーションで扱うことは、計算量の多さから未だに不可能であり、現在は各領域や扱いたい現象に特化した計算機シミュレーションが行われ、それぞれがその物理を理解するために大きな役割を果たしている。一方で、近年計算機システムの演算性能が飛躍的に向上してきており、これまでに不可能だった複数の領域や現象のスケールを結合するシミュレーションも可能となってきた。しかしながら、他人の開発したシミュレーションコードを理解することが難しく、簡単に様々なコードを結合させて連成計算をさせることは技術的に困難であった。このような問題に対し、我々は結合するコードの理解を最小限にとどめて結合を可能とする連成計算フレームワークCoToCoAを開発している。本研究ではこの連成計算フレームワークCoToCoAを応用した時空間スケールの異なるMHDシミュレーション同士の結合、つまり重合格子化を目指している。

重合格子は単純に時空間スケールが異なる格子を結合させるシミュレーションも可能だが、MHDとHall-MHDを結合するなど結合相手が異なるシミュレーションモデルであっても取り扱いが簡単である。一方で結合に際し、元々のシミュレーションコードに大規模な変更を加える必要があるなど、技術的な負担が大きい。CoToCoAを利用することで、元のコードにほとんど改変を加えずに簡単に重合格子結合が可能となる枠組みを開発できれば、太陽地球惑星系科学の様々なシミュレーションに適用が可能である。さらに、その結果、独立した領域や現象を解くだけでは分からなかった物理の理解が進むことが期待される。また、CoToCoAはシミュレーションコードの結合専用ではなく、データに何らかの処理を行うコードであれば、結合でき、シミュレーションと可視化や、観測データ取得と機械学習などにも適用できるため、CoToCoAの活用事例拡大も目指す。

本研究では、申請者のMHDシミュレーションコードに対しCoToCoAを利用し、重合格子化することを目指している。シミュレーション対象としては、木星磁気圏とし、全体をシミュレーションするグローバル領域と木星周辺を細かな時空間スケールでシミュレーションするローカル領域を結合することで重合格子化とする。CoToCoAには、複数のシミュレーションコードを簡単に結合するために準備された関数が多数ある。しかし、CoToCoAの当初の開発思考が、太陽-太陽風-磁気圏のような一方通行の結合であり、重合格子などで必要な相互作用を対象としていない。CoToCoAのVersion2において、相互作用機能が一部実装されたが、これだけでは重合格子化は簡単にはできないため、相互参照が可能なバッファ機能を2022年度に開発をした。

本年度では、このバッファ機能を拡張し、重合格子実現に必要なタイムステップや格子間隔の違いを上手く処理する機能の開発を進めたが、バッファ機能にバグがあり、その解決に時間を要した。そのため、修正版のバッファ機能の実装テストと評価までが進捗となった。評価によりバッファの正常な動作、性能は確認出来ており、今後の利用に問題は無い。

・学会発表

深沢圭一郎、全システムが稼働した京都大学新スーパーコンピュータシステムの性能評価、「太陽地球圏環境予測のためのモデル研究の展望」「STEシミュレーション研究会：計算科学とデータ科学の融合に向けて」 合同研究集会、兵庫、2023年12月19-22日

三宅洋平、砂田洋平、田中唯逸、深沢圭一郎、南里豪志、加藤雄人、コード間結合フレームワークに基づく宇宙環境変動-衛星帯電現象連成解析プラットフォームの開発、地球電磁気・地球惑星圏学会 第154回総会及び講演会、宮城、2023年9月24日-27日

沖積層に含まれる碎屑物を用いた堆積年代の高精度解析

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

中西利典、ふじのくに地球環境史ミュージアム・学芸課

研究目的

プレート収束～衝突帯の島弧である我が国の沿岸低地には、沖積層と呼ばれる最終氷期最盛期以降に形成された河川成および海成堆積物が分布している。沖積層が比較的厚く分布する大規模河川の河口周辺には、人口が集中する京浜や阪神などの大都市圏が構築されている。そのため、それらの地下構造や形成履歴を調査することは、過去の海水準変動や地殻変動等の解明に資するだけでなく、地震や津波、火山噴火等による自然災害の防災・減災対策を実施する上でも重要である。こうした研究を遂行する際に、沖積層に含まれる植物片や貝化石を用いて放射性炭素 (^{14}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 (Nakanishi et al., 2023abc ; 中西ほか, 2023) 。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

仙台平野と阿蘇カルデラで掘削された沖積層ボーリングコアから保存状態の良い植物片を合計25試料を分取・選定した。それらを測定限界を評価するための阿蘇4火砕流の埋もれ木と共に、ふじのくに地球環境史ミュージアムにおいて1規定の塩酸と水酸化ナトリウムを用いて化学前処理を実施して二次的な汚染を除去した。それらを酸化銅と共に名古屋大学宇宙地球環境研究所 (ISEE) の実験室で石英管に封緘・燃焼させて、発生した CO_2 を液体窒素とエタノールの冷却トラップで分離して、水素還元法でグラファイト精製を実施した。それらをISEEの加速器質量分析装置で ^{14}C 年代値を測定した。

研究結果

仙台平野の氾濫原で採取されたボーリングコア試料からは合計6試料の年代測定を実施して、 $82\pm 49\sim 2071\pm 52\text{BP}$ の年代値を得た。一方、阿蘇カルデラのカルデラ湖～河川堆積物からは19試料の植物片を選定・洗浄したが、微量なものが多くて正確な年代値が期待できるのは12試料程度になる見込みである。

考察

仙台平野の氾濫原で得られた試料から計算される再堆積を示した試料の含有率は4/6個 (67%) であり、その期間は54～1894年程度であった。一方、阿蘇カルデラのコア試料から採取した植物片の年代値が届いたら、上記のように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。

まとめ

今年度は上質なボーリングコア試料を採取するための研究助成が採択されなかったため、仙台平野と阿蘇カルデラで予察的な検討を実施した。仙台平野では氾濫原堆積物に含まれる植物片の再堆積について検討した。一方、阿蘇カルデラではカルデラ形成以後の湖成堆積物から河川成堆積物に含まれる植物片の再堆積について検討中である。

引用文献

Nakanishi T., Niwa Y., Hong W. Radiocarbon age offsets of plant and shell in the Holocene sediments from the Sanriku coast, Northeast Japan. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, **538**, p.95-102, 2023a, doi: 10.1016/j.nimb.2023.02.032

Nakanishi T., Nanayama F., Kondo Y., Yamada K., Sakai K., Yamaguchi T., Shigeno K., Katsuki K., Oda H., Furukawa R., Hong W. Radiocarbon ages and tsunami deposits in laminated mud layers from the Lake Harutori, Pacific coast of Hokkaido, Northeast Japan. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, **538**, p.173-178, 2023b, doi: 10.1016/j.nimb.2023.02.015

成果発表

中西利典・瀬戸浩二・香月興太・入月俊明・齋藤文紀・ホン ワン, 放射性炭素年代測定による斐伊川河口の完新統の堆積速度と海洋リザーバー効果. 日本第四紀学会, P-05, 早稲田大学所沢キャンパス, 2023年

Nakanishi T., Ishiyama T., Sung K.S., Hong W. Accumulation rate in the Holocene sediments across an onshore subduction thrust, northeastern Nankai Trough. The 9th East Asia Accelerator Mass Spectrometry Symposium (EA-AMS 9), P29, Seoul, 2023c

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

伊達謙二、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作成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雲の有無（雲マスク）や雲物理量（雲頂高度など）を推定し、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、雲マスクの精度を向上させるため、Ishida et al.（2018）の CLAUDIA3 と呼ばれるサポートベクタマシン（SVM）を利用した雲マスク手法を FCP に導入するための開発を行っている。

昨年度に実施した Aqua/MODIS の雲マスク（MYD35_L2）を利用した検証は、陸上では CLAUDIA3 の方が現行 FCP より MYD35_L2 との一致率が高い一方で、海上では低いことを示した。そこで、今年度は海上の雲マスクの精度向上を目指し、夜間の海上のデータを対象に、主成分分析を用いて、地表面の状態ごとのグループ分け（地表面グループ）や教師データを選定する手法を検討した。

今年度はまず地表面グループの見直しを行った。地表面グループは「晴れであれば観測できる地表面の状態」を指し、陸上は植生、砂漠、雪氷域など、放射特性の異なる地表面ごとに分類している。一方、海上は海氷の有無と緯度帯という大まかな指標により分類しているため、地表面グループの細分化により海上の雲マスクの精度向上が図れないか検討した。

図 1 は、AHI の赤外バンド 10 種の輝度温度とバンド間の輝度温度差分を用い、主成分分析と k-means 法により緯度帯ごとに MYD35_L2 で晴れのデータをクラスタ分けした結果を示す。冬半球の高緯度域では、海面と海氷の放射特性の差異により有意な二つのクラスタに分離できた。また、他の緯度帯はデータが第一主成分の平均値付近で二分され、有意なクラスタに分離できなかった。したがって、各緯度帯の海面、冬半球の海氷域という現行のグループ分けが海上では妥当であると考えられる。

冬半球の高緯度を除き地表面の状態は「海面」のみであるため、晴れ（海面）と曇りを主成分分析で分離する方法を考えた。赤外バンド 10 種類の輝度温度と各バンド間の輝度温度差分から成る主成分空間における晴れ（海面）と曇りデータの分布を調査した結果、どの緯度帯も、第一主成分で晴れ/曇りが

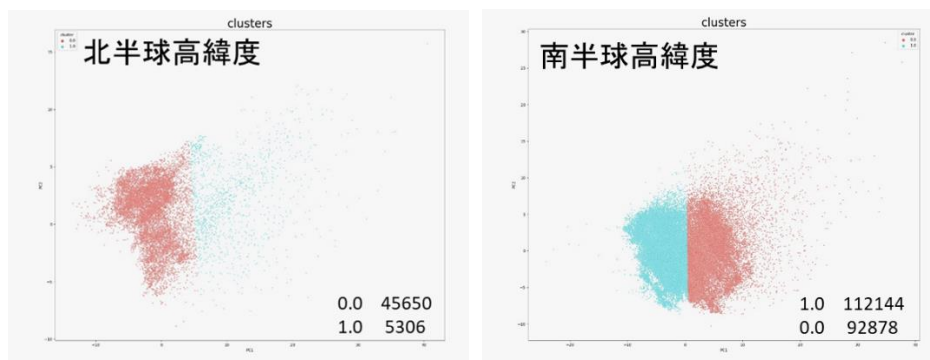


図 1. 晴れた海上の AHI のデータを用いたクラスタリングの結果（2022 年 12 月 1 日から 2022 年 12 月 15 日）。

横軸：第一主成分、縦軸：第二主成分。左：北半球高緯度、右：南半球高緯度

おおむね分離できることが分かった（図 2）。そこで、第一主成分を基に晴れの教師データの候補を抽出した後、明らかに曇りと判断できるデータを除外し、晴れの教師データを作成した。曇りの教師データは、前述の手法で晴れと判断されなかったデータから抽出した。作成された教師データの教師ラベルと MYD35_L2 との一致率は 88.7%であった。

MYD35_L2 を基準とした現行 FCP、SVM およびニューラルネットワーク（NN）による雲マスクの精度（一致率）は、それぞれ 88.7%（現行 FCP）、86.2%（SVM）、90.3%（NN）であり、NN が最も高かった。また、晴天の空振り率（誤って晴れに分類する割合）は NN が最も低く（25.9%）、NN の導入を検討すべきことを示す。図 3 は

2023 年 2 月 1 日におけるオーストラリア大陸の南東海上の雲判別結果を示す。現行 FCP は衛星画像から推定される範囲より広く曇りと分類した一方で、SVM や NN は晴れ域を適切に分類した。一方、北半球低緯度域の太平洋海上の低い雲が点在すると考えられる領域では、SVM や NN はほぼすべての領域が曇りと分類された（図略）。このような領域の誤分類の調査をする必要がある。

今後は主成分で晴れ候補データを抽出する際の最適な閾値を検討するとともに、NN のパラメータを調整し、更なる精度の向上に取り組む。また、実際の利用に向けたプロトタイプの実行も行う予定である。

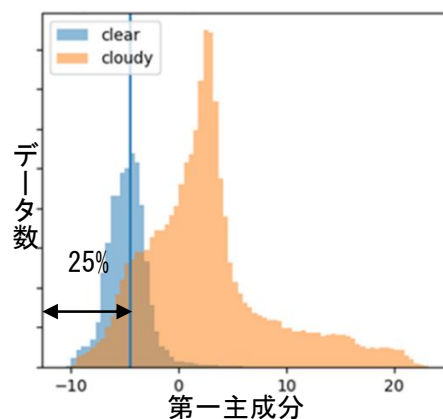


図 2. 南半球中緯度における第一主成分の分布
（2022 年 12 月 1 日から 2022 年 12 月 15 日）
青：MYD35_L2 で晴れ、橙色：MYD35_L2 で曇り

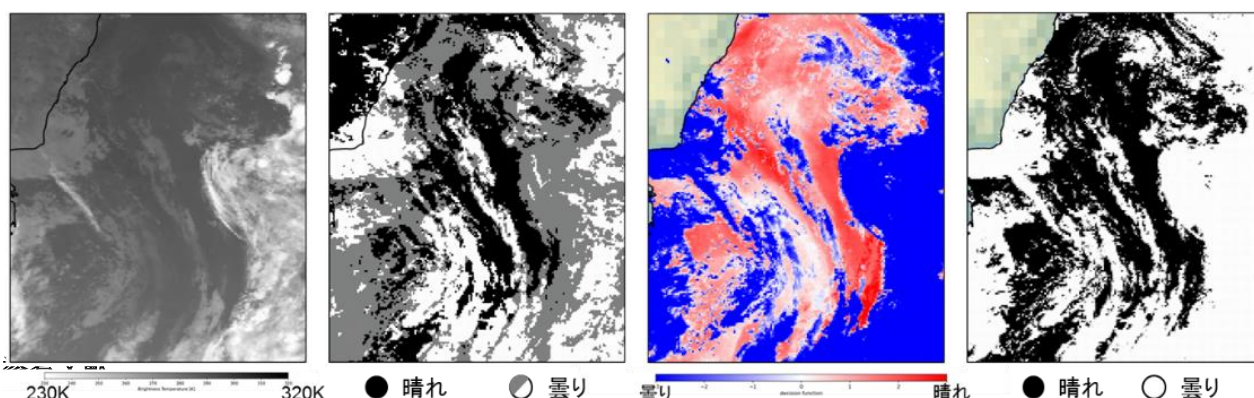


図 3. 2023 年 2 月 1 日 23:50JST におけるオーストラリア大陸南東海上領域の比較。左から 10.4 μm 輝度温度、現行 FCP、SVM 学習による分類（決定関数）、NN 学習による分類。

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、佐伯悠樹、山田裕里佳、伊達謙二「ひまわり 8/9 号の基本雲プロダクトの高精度化」、GPM および衛星シミュレータ合同研究会、名古屋大学、2024 年 3 月

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

大規模なCO₂排出実態が予想される都市域において、発生源の発生・拡散・消滅の動態解析は未だ完全な解明に至っていない。解明のために必要なCO₂の発生源の正確な位置情報と排出量を特定するには、その濃度を継続的にモニタリングが不可欠である。本研究の目的は、CO₂カラム混合比の2次元分布を継続してモニタリングする手法を開発し、都市域でのCO₂排出量を詳細に把握し時間変動の特徴を捉えることである。

昨年度、小型可搬式CO₂カラム計測装置の試作に成功し、関西学院千里国際キャンパスにおいて、試験観測を行った。この装置はOCO-2などの温室効果ガス観測衛星に搭載されている観測機と同じ原理を採用して開発した。太陽を光源とした赤外線スペクトルを観測することで、大気CO₂の光吸収からそのカラム平均濃度を分析する。今年度は、この装置の改良とえられたスペクトルの分析を試みた。

小型エタロン分光器を用いて波長 1350-1650 nm の赤外領域を観測できるが、特に 1600 nm 付近のCO₂の吸収バンドを観測する。高性能光センサーによる太陽の自動追尾によって常に同じ向きで太陽光を光ファイバーに導く。光フィルターと光ファイバーを通った赤外線は分光器に導入され、観測されたスペクトルデータは1秒ごとに小型PCで収集される。この小型PCはWi-Fiを用いてリモートコントロールされている。

開発した小型可搬式CO₂カラム計測装置によって観測された典型的な赤外スペクトルを図1に示す。観測日は2023年6月13日で観測場所は大阪府箕面市の関西学院千里国際キャンパスである。波長1580 nm 付近に大気CO₂の強い赤外吸収バンドが現れているのがわかる。この日の観測は、時刻11:30~14:30にかけて時間間隔 1s で行なわれた。波長 1470 nm 付近には水蒸気の吸収バンドも観測することができるので、CO₂ と H₂O の同時観測も可能であることがわかる。

観測された CO₂赤外吸収バンドの形状を解析し、CO₂濃度の高度分布からCO₂カラム混合比を導き出すプログラムを開発中である。また、観測は昨年6月から現在まで毎月行われており、上記データの季節変動を捉えることができるだろうと期待している。今後は、この装置をさらに改良のうえ多数作成し平面展開してゆく計画である。

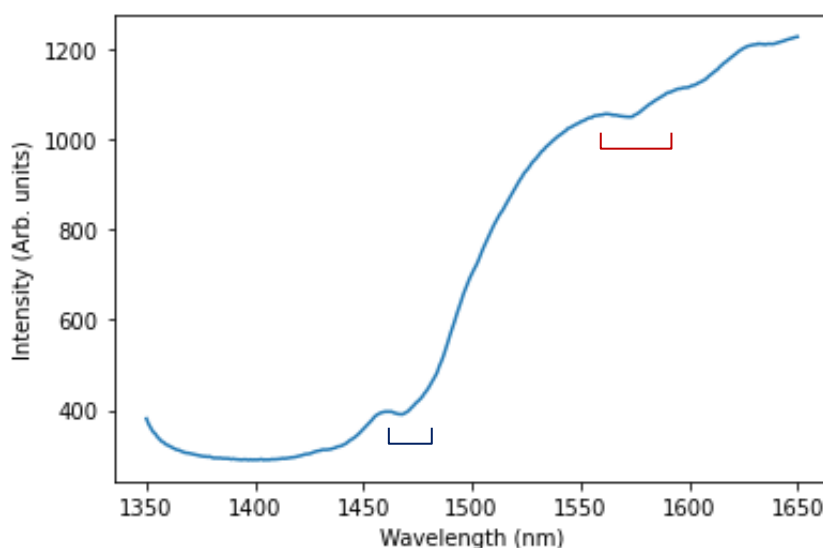


図1. 観測された太陽赤外線スペクトル
1580nm 付近に CO₂ 吸収帯が確認できる

太陽放射スペクトルの地球圏環境への影響評価
Impact of solar irradiance spectra on the terrestrial environment

渡邊恭子、防衛大学校・地球海洋学科

太陽からのX線や極紫外線（EUV）放射は太陽地球圏環境に大きな影響をもたらしていることが知られており、これらの放射が太陽フレア現象などによって急激に変化すると、デリンジャー現象（通信障害）などの宇宙天気現象が発生することが知られている。これらの地球圏環境変動への太陽放射の影響を正しく見積もるためには、太陽放射スペクトルの観測値が定常的に必要である。しかし、X線もEUV放射も地上までは届かないため、観測データは衛星が観測を行っていた期間に限られている。このため、地球圏環境への太陽放射の影響を見積もる時には、地上観測できる F10.7 という波長 10.7 cm（周波数 2.8 GHz）のマイクロ波観測が用いられてきた。F10.7 は太陽コロナからの熱制動放射と黒点磁場の磁気共鳴放射が元となっている放射で、太陽活動度を示す相対黒点数と良い相関があることが知られている。これより、F10.7 は太陽活動度を示す良い指標とされてきたが、近年の衛星によるX線やEUV放射の詳細な観測により、F10.7 は実際に地球圏環境に影響している太陽放射（EUV放射スペクトル）とは正確には一致していないことが分かってきた。

一方、地上観測されている電波放射からEUV放射を人工ニューラルネットワーク（Artificial Neural Network; ANN）を用いて再現する研究が近年行われている（Zhang & Paxton, 2018）。この先行研究では1つのEUV波長バンド（26-34 nm）がANNを用いて再現されたが、地球電離圏へのEUV放射の影響は波長により異なるため、EUV放射スペクトルの再現が求められている。

そこで本研究では、太陽活動周期変動におけるEUV放射スペクトルの変動を複数周波数の電波放射からANNを用いて再現する研究と、太陽フレア時における同様の研究を行うことで、野辺山強度偏波計（NoRP）のデータを用いて紫外線放射スペクトルを推測するアルゴリズムの構築を目指した。本研究では、名古屋大学宇宙地球環境研究所の「ひのでサイエンスセンター@名古屋」と「CIDASシステム」を使用した。また、データ解析の進め方やその解釈などについて議論を行うために、名大ISEEへ数回訪問した。

まず、太陽放射の活動周期変動について NoRP の4つの周波数（1, 2, 3.75 9.4 GHz）のマイクロ波観測データと衛星による太陽EUV放射観測データの比較を行った。太陽EUV放射観測データは、スペクトル分解能の良いTIMED/SEEの衛星観測データを用いた。これらのマイクロ波と紫外線放射スペクトルを比較した結果、低周波数（1, 2 GHz）の方が紫外線放射との相関が良いことが分かった。また、ANNを用いてEUV放射スペクトルを再現し、実測値と比較したところ、ほとんどのEUV放射波長で電波とEUV放射の観測値の相関係数を上回った。複数周波数の電波放射とANNを用いることにより、太陽からのEUV放射スペクトルをよりよく再現することができた。また、EUV放射スペクトルの再現に寄与したマイクロ波周波数を調べたところ、EUV放射の再現には1, 2 GHzが主に寄与していたことがわかった。

次に、太陽フレア時の放射について NoRP の6つの周波数（1, 2, 3.75 9.4, 17, 35 GHz）のマイクロ波観測データと衛星による太陽EUV放射観測データの比較を行った。太陽フレア時において、マイクロ波とEUV放射は時間変動が異なるため、本解析においては太陽フレア開始時間から終了時間の間の放射を積分した値を用いた。太陽EUV放射観測データは、スペクトル分解能と時間分解能の良いSDO/EVEの衛星観測データを用いた。これらのマイクロ波と紫外線放射スペクトルを比較した結果、高周波数（17, 35 GHz）の方が紫外線放射との相関が良いことが分かった。また、ANNを用いてEUV放射スペクトルを再現し、実測値と比較したところ、30 nmより短い波長においてのほとんどのEUV放射波長で電波とEUV放射の観測値の相関係数を上回った。複数周波数の電波放射とANNを用いることにより、太陽からのEUV放射スペクトルをよりよく再現することができた。

本研究より、太陽活動周期変動および太陽フレア時におけるEUV放射スペクトルを、ANNを用いることで精度良く再現することができるアルゴリズムの構築ができた。今後、フレア放射EUVスペクトルの時間変動についても再現できるようになれば、地球電離圏への影響も高い時間分解能で予測できるため、本研究の結果をよりよく宇宙天気予報に活用できると考えられる。

成 果 発 表

1. 前田護, "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", 防衛大学校理工学研究科 修士論文, 2024 年 3 月
2. Mamoru Maeda, Kyoko Watanabe, Shohei Nishimoto, Shinnosuke Kitajima, Masumi Shimojo, Kosuke Namekata, Satoshi Masuda, "Prediction of solar cycle variation in solar EUV spectra using multi-frequency radio fluxes", JpGU Meeting 2023, Makuhari Messe, Chiba, Japan, 2023 May 26
3. Kyoko Watanabe, Mamoru Maeda, Masumi Shimojo, Kosuke Namekata, Satoshi Masuda, "Relationships Between Microwave and EUV Spectra in Solar Flare and Their Estimation by Machine Learning", AOGS2023 20th Annual Meeting, Singapore, 2023 Aug 3
4. 前田護, 渡邊恭子, 西本将平, 北島慎之典, 下条圭美, 行方宏介, 増田智, "機械学習を用いた太陽フレア時の太陽EUV放射スペクトル予測", 第154回SGEPSS総会および講演会, 東北大学青葉山北キャンパス, 2023年9月24日
5. 渡邊恭子, 北島慎之典, 大窪遼介, Harra Louise, Büchel Valeria, 今田晋亮, 原弘久, 清水敏文, 三好由純, 西谷望, 堀智昭, 家田章正, 陣英克, 埜千尋, "SOLAR-C/SoSpIM が観測する太陽放射の地球上層大気への影響", 第154回SGEPSS総会および講演会, 東北大学青葉山北キャンパス, 2023年9月24日
6. 大窪遼介, 渡邊恭子, 北島慎之典, "太陽フレア時における $\text{Ly } \alpha$ と $\text{Ly } \beta$ 放射の関係", 第154回SGEPSS総会および講演会, 東北大学青葉山北キャンパス, 2023年9月26日
7. Kyoko Watanabe, Shinnosuke Kitajima, Ryosuke Okubo, Louise Harra, Valeria Büchel, Shinsuke Imada, Hirohisa Hara, Toshifumi Shimizu, Yoshizumi Miyoshi, Nozomu Nishitani, Tomoaki Hori, Akimasa Ieda, Hidekatsu Jin, Chihiro Tao, "Effects of solar radiation on the Earth's upper atmosphere", Hinode-16/IRIS-13, Toki Messe, Niigata, Japan, 2023 Sep 25-28
8. Kyoko Watanabe, Louise Harra, Valeria Büchel, Silvio Koller, Leandro Meier, Daniel Pfiffner, Krzysztof Barczynski, Nils Janitzek, Samuel Gissot, Marie Dominique, Dana Talpeanu, David Berghmans, Toshifumi Shimizu, Hirohisa Hara, Shinsuke Imada, Säm Krucker, "SoSpIM overview", Hinode-16/IRIS-13, Toki Messe, Niigata, Japan, 2023 Sep 29
9. 渡邊恭子, "GHz帯太陽強度モニター観測の現状と将来", 太陽研究者連絡会2023年度将来計画シンポジウムー太陽スペース観測シンポジウムー「SOLAR-C時代に向けた太陽地上観測の現状と将来」, JAXA宇宙科学研究所相模原キャンパス, 2023年11月20日
10. Kyoko Watanabe, Mamoru Maeda, Masumi Shimojo, Kosuke Namekata, Satoshi Masuda, "Relationship between multi-frequency microwave and EUV spectra in solar cycles and solar flares and their prediction by machine learning", 2023 AGU fall meeting, San Francisco, USA, 2023 Dec 11
11. 前田護, 渡邊恭子, 西本将平, 北島慎之典, 下条圭美, 行方宏介, 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", 2023年度太陽研連シンポジウム, 国立天文台三鷹キャンパス, 2024年2月21日
12. 大窪遼介, 渡邊恭子, 北島慎之典, "太陽活動周期変動と太陽フレア時における $\text{Ly } \alpha$ と $\text{Ly } \beta$ 放射の特徴と地球電離圏への影響", 2023年度太陽研連シンポジウム, 国立天文台三鷹キャンパス, 2024年2月20-22日
13. Kyoko Watanabe, Louise Harra, Valeria Büchel, Silvio Koller, Leandro Meier, Daniel Pfiffner, Krzysztof Barczynski, Nils Janitzek, Samuel Gissot, Marie Dominique, Dana Talpeanu, David Berghmans, Toshifumi Shimizu, Hirohisa Hara, Shinsuke Imada, Säm Krucker, "Observation and Science with SoSpIM", SOLAR-C Science meeting, ISEE Nagoya Univ., Nagoya, Japan, 2024 Mar 5
14. 前田護, 渡邊恭子, 西本将平, 北島慎之典, 下条圭美, 行方宏介, 増田智, "機械学習を用いた太陽電波放射からのEUV放射スペクトルの予測II", 日本天文学会2024年春季年会, 東京大学(オンライン), 2024年3月15日
15. 大窪遼介, 渡邊恭子, 北島慎之典, "太陽活動周期変動と太陽フレア時におけるライマン線放射について", 日本天文学会2024年春季年会, 東京大学(オンライン), 2024年3月15日

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

1. 研究目的

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おり、それらの研究で得られた結果の信頼性をするうえで、用いたモデルの正確さが定期的に検証されていることが望ましい。一方、影響評価上重要な極域における広範囲の宇宙線線量率分布については、現地での詳細な実測を行うことの困難さなどから、モデルの精度を常時十分に検証できているとはいえない。そこで、本研究では、極域における宇宙中性子強度を、独自に設計した可搬型の中性子計測システムを用いて広い範囲で測定し、当該システムの有効性を確認すると共に、得られた実測結果とモデルによる計算結果の比較を行った。

2. 研究方法

南極大陸における宇宙線中性子の測定には、申請代表者（保田）らが航空機や山頂での宇宙線測定に整備した、拡張エネルギー範囲中性子モニタ（WENDI-II）と独自に開発した小型データロガー（NM-10）で構成されるポータブルな中性子モニタリングシステムを採用した。共同研究者（栗田）は、第60次南極観測（2018年11月-2019年3月）において、このシステムにより南極の東南部の広い高度範囲（30m～3762m）において中性子計測を行った。そして、栗田らが取得した実測結果と、保田らがモンテカルロシミュレーションに基づく解析モデル（PARMA）を用いて計算した結果を比較し、モデルの精度検証に採用した中性子モニタリングシステムの有効性について論じた。

3. 研究結果および考察

実測で得られた大気圧と中性子強度（線量率）の間には明瞭な関係が見られ、大気厚みが増えればそれに応じて中性子強度が低下する現象が再現性よく観測できた。移動したルートに沿って約2ヶ月にわたり実測された中性子強度とモデル（PARMA）による予測値とを比較したところ、往路・復路ともに広い範囲で両者には良い一致が観られ、この結果から、本研究で採用した携帯型中性子計測システムは、気温の低い極域や高山のような場所においても、モデルの検証に有効に使用できると考えられた¹⁾。

一方、中性子強度の高い／大気圧の低い場所では、往路と復路（測定時期が異なる同じ地点）で多少の不一致（～10%）が観察された。測定を実施した期間（2018年12月下旬から2019年1月）には大きな宇宙気象現象は報告されておらず、これまでの実測やモデル計算で得られた知見から、宇宙線中性子のエネルギー分布の形状は大気の厚みに依存しないことが分かっているため、雲や降雪などの有無が宇宙線中性子のエネルギー分布に影響した可能性は低い。例として、今回の実測で長時間の測定を行った3地点について、PARAにより計算した宇宙線中性子のエネルギー分布を図1に示す。

これらの知見から、実測とモデル計算の結果に観られた不一致は、主にモデル側の要因（気圧を除く大気パラメータの誤差、太陽風の銀河宇宙線強度への影響、実測地点での地磁気レベルの変動等）によるものと考えられる。今後は、トリチウム濃度を含めた実測・予測データの総合的解析を進めつつ、極域での宇宙線線量率の推定値に潜在する誤差の定量化とその低減に取り組む。

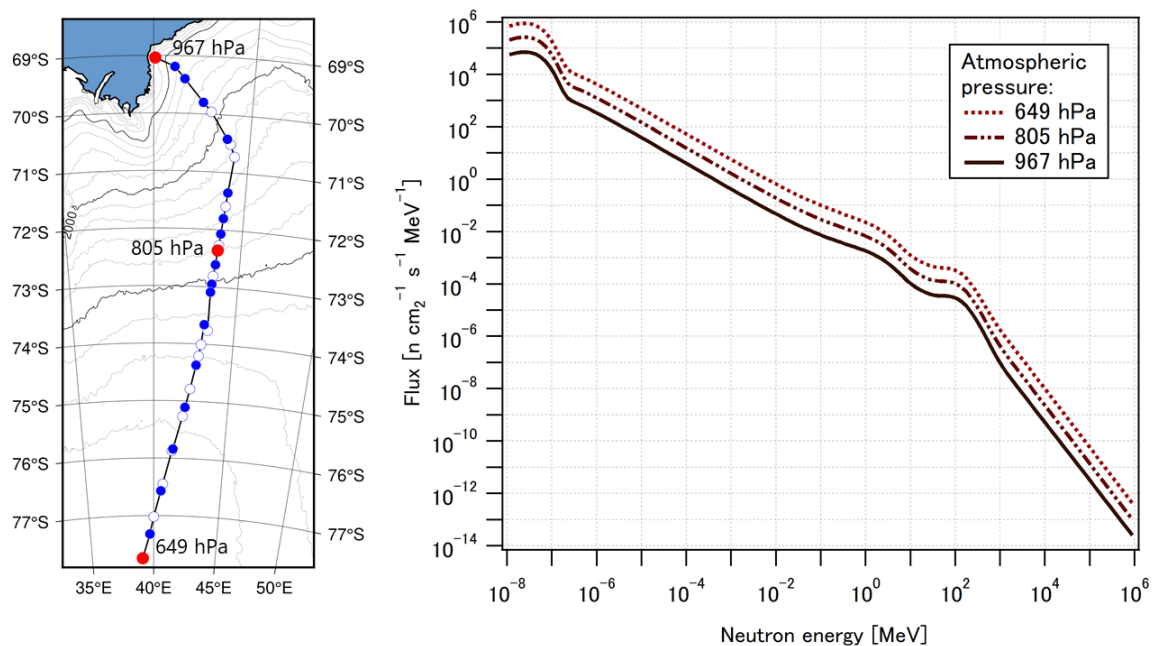


図1. 南極大陸において2018年11月から2019年1月までに携帯型中性子モニター（WENDI-II）を用いて宇宙線中性子の測定を行った地点（左）と、比較的長い期間観測を行った3地点（左図の赤色の場所）について、大気圏内における宇宙線線量率を計算するモデルPARMA²⁾を使用して計算した中性子のエネルギースペクトル（右）。

引用文献

- 1) Yasuda, H., Kurita, N. and Yajima, K. Verification of Estimated cosmic neutron intensities using a portable neutron monitoring system in Antarctica. Appl. Sci. 13, 3297, 2023.
- 2) Sato, T., Yasuda, H.; Niita, K.; Endo, A.; Sihver, L. Development of PARMA: PHITS-based Analytical Radiation Model in the Atmosphere. Radiat. Res. 170, 244-259, 2008.

(別紙様式04-2)

台風観測ドロップゾンデデータを用いた円筒座標データセットの開発
Development of a cylindrical coordinate dataset using typhoon reconnaissance dropsonde data

山田広幸、琉球大学・理学部

研究目的

台風航空機観測プロジェクトT-PARCIでは、これまで4つの非常に強いまたは猛烈な勢力の台風(Lan, Trami, Mindulle, Nanmadol)について、台風の中心を通過する飛行を実施し、ドロップゾンデを台風の中心から外側までの範囲で投下して、力学的、熱力学的なデータを取得することに成功している。このデータを用いて、台風の回転中心を原点とする円筒座標(距離、方位角、高度)のデータセットを作成し、公開することを目的とする。円筒座標は台風の力学的、熱力学的構造を調査するうえで使われており、このデータセットの提供により解析作業を容易にすることができるので、台風研究の発展と、航空機利用研究での利用拡大が期待される。特に、数値モデルや客観解析データなどで、台風の中心位置が実際からずれている場合にも、台風の回転中心に対する相対位置でデータを同化できるので、台風構造の再現性を改善すると期待される。

研究方法

データセットの品質を左右するのは、台風中心位置の精度の良い定義方法である。本研究では、気象庁や米軍合同台風警戒センターが提供するベストトラックの位置情報に加え、衛星画像を用いて中心位置を同定する複数の客観手法を検討する。目の形状が同心円に近い場合、Yamada et al. (2021)で行った方法を用いることができるが、形状が複雑になる場合は、北海道大学で開発が進み Tsukada and Horinouchi (2023)として報告されている手法を取り入れることも検討する。また、位置同定の不確定性による動径風・接線風の誤差情報もデータセットに含める計画である。

研究結果

3年計画の1年目である2022年度は、Yamada et al. (2021)にて実績のある方法で中心位置の同定を行い、2021年第台風16号(Mindulle)についてデータセットを作成した。その結果、位置の同定は概ね問題ないことを確認し、解析に使用して成果を発表した。これをもとに本年度は全ての観測事例についてデータセットの作成を行った。ただし、GPS信号の受信強度によって高度の精度が非常に悪くなる問題が無視できないことがあるので、気圧を用いて高度を補正する方法を検討し、データセットの再作成を行った。

引用文献

Tsukada, T., and T. Horinouchi, 2023: Strong Relationship between Eye Radius and Radius of Maximum Wind of Tropical Cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, 151, 569-588, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-22-0106.1>.
Yamada, H., K. Ito, K. Tsuboki, T. Shinoda, T. Ohigashi, M. Yamaguchi, T. Nakazawa, N. Naga-hama, and K. Shimizu, 2021: The double warm-core structure of Typhoon Lan (2017) as observed through the first Japanese eyewall-penetrating aircraft reconnaissance. *J. Meteor. Soc. Japan*, 99, 1297-1327. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jmsj/99/5/99_2021-063/_article

成果発表 (一部のみ)

Yamada H., K. Ito, S. Hirano, and K. Tsuboki, Relationship Between the Warm Core and Typhoon Intensity Based on in Situ Measurements, International Conference on Mesoscale Convective Systems, Colorado State University, United States, 23 May 2023.

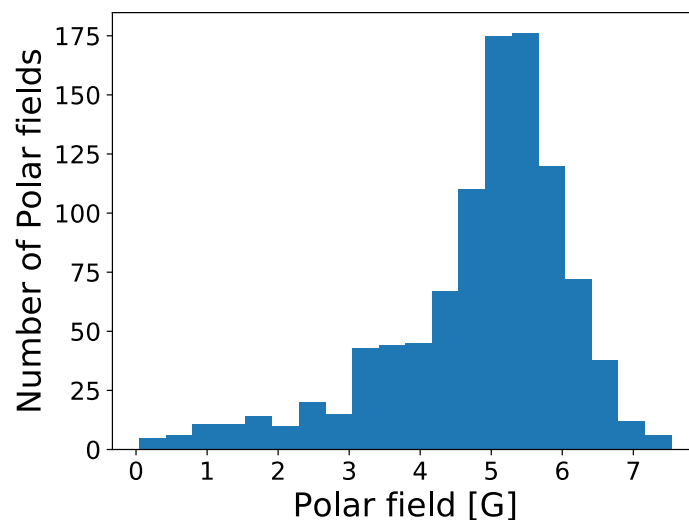
太陽周期活動予測に関する研究
Study on solar cycle prediction

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、また宇宙天気観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。

本研究は、グランドミニмумが生じる確率が磁場と速度場の非線形相互作用を加える事で説明できること、グランドミニмумに突入した際にWaldmeier効果が弱まる事でグランドミニмумを継続しうる事を示した。



1000 太陽サイクル分数値実験を行った際の極小機局磁場のヒストグラムグランドミニмум(極磁場 2.4G 以下)の確率は(63/1000)。Waldmeier 効果は極磁場 2.4G 以上のサイクル（グランドミニмумでないサイクル）時のみ有効。磁場の強さによって子午面循環流が遅くなる効果を含む。

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 NDACC(Network for the Detection of Atmospheric Composition Change)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。同位体比は一般的にパーミル(‰)オーダーの微少な値のため高精度な観測が必要であるが、相対的な変動はパーセントオーダーのものもあるため、赤外分光観測からでも相対変動は捉えられるのではないかと考え、この研究を始めた。

昨年度は比較的強い吸収線のある¹³CH₄の解析から始め、¹²CH₄との比から比較的サンプリングの結果に近い $\delta^{13}\text{C}$ を導出することは出来たが、 $\delta^{13}\text{C}$ は相対的な変動が1‰前後と非常に小さく赤外分光観測の精度ではこの相対変化を議論するのは難しいことがわかった。一方、 δD については経年変化や地域差が10‰以上あるため、現在はCH₃Dについて解析パラメータの検討を行っている。ただ、CH₃Dの吸収線の強度は¹²CH₄や¹³CH₄の吸収線より一桁以上弱いものしかなく、その分S/Nが悪くなるので分光観測的には不利である。また、メタンの分光パラメータにはまだ精度のよくないものも多いようで、HITRANやATMOSといったデータベースを使っても、複数の吸収線を同時に含む波数領域を解析するところどこかにうまくフィッティング出来ない吸収線がある、といった状況で、これは分光パラメータの精度改善を待つしかない。現状ではまだ最適な解析パラメータのセッティングは得られていないが、図に3 μm 帯と8 μm 帯のそれぞれで複数の波数領域を使って解析した結果から出した δD のこの10年間の経年変化を示す。青で示した8 μm 帯の結果は2018年6月以前は観測パラメータを入射光量を抑えるセッティングにしていた関係でばらつきが大きいが、2018年以降の部分で比べても3 μm 帯の結果は減少傾向なのに対し8 μm 帯の結果では増加傾向であり、季節変化の様子も異なるなど、二つの結果が一致していない。吸収線パラメータの精度を考えると絶対値が一致しないことはあり得るのだが、相対変動は一致すべきであるので、やはりまだ解析パラメータのセッティングに問題があると考えられる。今後もパラメータの検討を進める予定である。

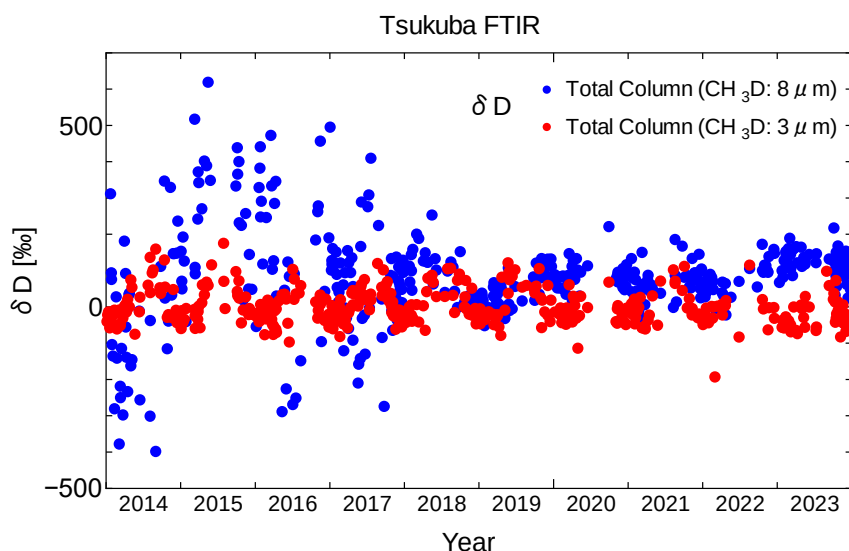


図. 3 μm 帯および8 μm 帯のCH₃Dの吸収線からそれぞれ導出した δD の経年変化

【成果発表】

I. Murata, T. Nagahama, H. Nakajima, I. Morino, Retrieval of methane isotopes at 3 and 8 micron regions from the spectra observed at Tsukuba, Japan, NDACC-IRWG/TCCON/COCCON Annual Meeting 2023, Spa, Belgium, June 12 - 16, 2023.

VLF/LF帯電磁波を用いた太陽フレアによる下部電離圏変動の観測的研究

Observations of variations in the lower ionosphere due to solar flares using VLF/LF electro magnetic waves

大矢 浩代、千葉大学・大学院工学研究院

1. 研究目的

本研究では、名古屋大学宇宙地球環境研究所の鹿児島観測所で受信されたVLF/LF帯の標準電波を解析することで、太陽フレアが下部電離圏に与える影響を定量的に明らかにすることを目指している。また、複数の伝搬経路を用いることで、太陽フレアによる下部電離圏の変動の水平分布を捉えることができる。本研究では、ISEEのVLF/LFデータを活用し、太陽フレアが下部電離圏に及ぼす影響を定量的に評価する。

2. 研究方法

本研究では、VLF/LF帯標準電波の振幅・位相データからウェーブホップ法を用いて反射高度変動を推定し、太陽フレアのクラスと下部電離圏変動との関連性を明確にすることで、太陽フレアによる変動の水平分布について明らかにする。

3. 結果

本研究では、2014年から2022年までに発生した4つのXクラス太陽フレア発生時の下部電離圏変動と反射高度の水平分布を調査した。電離圏の反射高度変動 (Δh) と太陽天頂角 (χ) の相関を調べたところ、X4.9クラスとX2.7クラスの太陽フレアでは正の相関が見られ、一方、X2.25クラスとX2.2クラスの太陽フレアでは負の相関がみられた。正の相関の場合、背景の電子密度が低いため、太陽フレアに対する応答が大きくなる可能性がある。一方、負の相関の場合、X線フラックス入射量による電離の変化が関連していると考えられる。さらに、電子密度増加率の最大値 ($\Delta N_{\max}$) とVLF/LF波の伝搬方位角 (ϕ) の相関を調査したところ、すべての太陽フレア発生時に、 $\Delta N_{\max}$ と $|\phi|$ の間に負の相関が見られた。この結果から、南北伝搬では $\Delta N_{\max}$ が低く推定される可能性が示唆される。また、東西方向の伝搬における電離圏反射係数 (R) を計算した結果、西→東伝搬の方が東→西伝搬よりも R が大きい傾向が見られた(図1)。したがって、VLF/LF波の到来方位による減衰差を考慮し、太陽フレア時の下部電離圏変動量を推定する必要があることが示唆された。

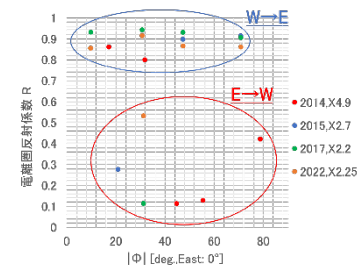


図1 電離圏反射係数 R の方位角依存性

成果発表

論文

[1] Masaharu Nakayama, Hiroyo Ohya, Fuminori Tsuchiya, Kenro Nozaki, Kazuo Shiokawa, Hiroyuki Nakata, Horizontal Inhomogeneity in the D-Region Ionosphere During an X-Class Solar Flare Determined by OCTAVE VLF Observations, URSI Radio Science Letters, 4, DOI:10.46620/22-0050, 2022.

口頭発表

[1] Masaharu Nakayama, Hiroyo Ohya, Fuminori Tsuchiya, Kenro Nozaki, Kazuo Shiokawa, and Hiroyuki Nakata, Horizontal inhomogeneity in the D-region ionosphere due to X-class solar flares by OCTAVE VLF/LF observations, Japan Geoscience Union (JpGU) Meeting2023, Chiba, 21-26 May, 2023.

[2] Masaharu Nakayama, Hiroyo Ohya, Fuminori Tsuchiya, Kenro Nozaki, Kazuo Shiokawa, and Hiroyuki Nakata, Horizontal Inhomogeneity in the D-region Ionosphere During a X-class Solar Flare Using OCTAVE VLF/LF Observations, XXXVth International Union of Radio Science (URSI) General Assembly and Scientific Symposium (GASS) 2023, G02-2, SPC, Sapporo, 22-26 August, 2023.

[3] 中山雅晴、大矢浩代、土屋史紀、野崎憲朗、塩川和夫、中田裕之、Horizontal inhomogeneity of the D-region ionosphere detected by OCTAVE VLF/LF observations network during X-class solar flares, 地球電磁気・地球惑星圏学会2023年秋季年会, R005-26, 宮城県仙台市, 2023年9月24-27日.

「トトロの森」の形成・発達史解明
Geographical study on the formation and development history
of the urban forest "Totoro's Forest"

山田和芳、早稲田大学・人間科学学術院

1. はじめに

関東山地から孤立した丘陵である狭山丘陵は、東京都と埼玉県にまたがる総面積3500 haの都市近郊の豊かな自然が残存する場所である。丘陵の中央部は多摩湖や狭山湖とよばれるダム湖が存在している。周囲は開析が進んだ谷が発達しており、谷頭部において湧水湿地が形成されていることが特徴である。1988年に公開されたアニメーション映画「となりのトトロ」のモデルとなったのが狭山丘陵北麓である。映画「となりのトトロ」では豊かな自然が描かれており、なかでもトトロが棲むコナラの大木が印象的で、狭山丘陵は大部分がコナラを中心とした雑木林で形成されている。映画公開以降、狭山丘陵は「トトロの森」としてコナラ二次林の保全運動が行われてきた(奥田、1997)。

これまで狭山丘陵の谷津湿地の形成や「トトロの森」に関する植生変遷におけるの先行研究はなく、同丘陵において里山景観がいつからどのように形成されたかは不明である。そこで、今回は狭山丘陵北麓に位置する三ヶ島湿地にて、湿地堆積物を採取して、その堆積物試料の放射性炭素年代測定とともに、CNS元素分析や花粉分析を通じて、湿地の形成時期や「トトロの森」と称される二次林の植生発達史を明らかにすることを目的とした。

なお、本研究は岡山理科大学理学部基礎理学科水野末衣加氏、および早稲田大学人間科学部人間環境科学科常峰拓真氏の2023年度卒業論文としてそれぞれまとめることができた。また、共同研究者である岡山理科大学の藤木利之准教授、ふじのくに地球環境史ミュージアムの中西利典准教授、名古屋大学宇宙地球環境研究所の北川浩之教授とともにおこなった共同研究である。

2. 方法

2022年12月に三ヶ島湿地の上流から下流にかけての4地点においてロシア式サンプラーを用いて基盤まで達する泥炭質堆積物の採取を行った(図1)。採取した堆積物は層相観察を行ったのち、年代測定用、CNS元素分析、花粉分析用にそれぞれ分割した。年代測定用試料は、良好な植物片が残っていた21試料について、酸-アルカリ-酸処理をおこなった上で、名古屋大学宇宙地球環境研究所所有の加速器質量分析計を用いて放射性炭素(^{14}C)年代測定を実施した。実際に年代測定した試料は10試料である。求めた ^{14}C 年代値は、Int Cal20のデータセット(Reimer et al., 2020)を用いて暦年較正をおこなった。暦年較正は、Calib8.2プログラム(Stuiver and Reimer, 1993)を用いて 2σ (95.4%)信頼度区間で表し、その中央値を年代値(西暦)として採用した。

CNS元素分析用試料は、凍結乾燥させたのちメノウ乳鉢にて粉末化させた。この乾燥粉末試料10mgを用いて、全層準について全炭素(TC)、全窒素(TN)含有率の測定及びC/N比を算出した。

花粉分析用試料は、水酸化カリウム処理、塩化亜鉛比重文分離処理、アセトリシス処理をおこない花粉化石のみを抽出した試料をスライドガラスに封入して、顕微鏡下において木本花粉が200個以上かつ、木本花粉、草本花粉の合計が500個以上になるように測定して、その出現率を求めた。

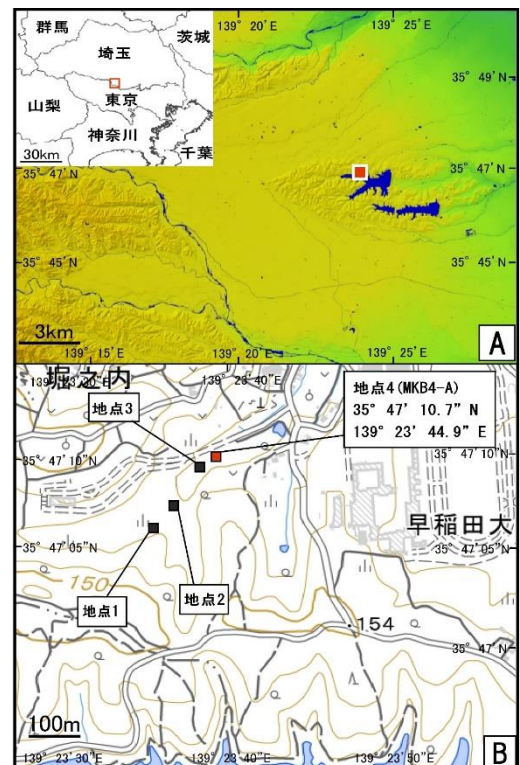


図1 三ヶ島湿地での調査地点地図

3. 結果・考察

(1) ^{14}C 年代測定による堆積年代の推定

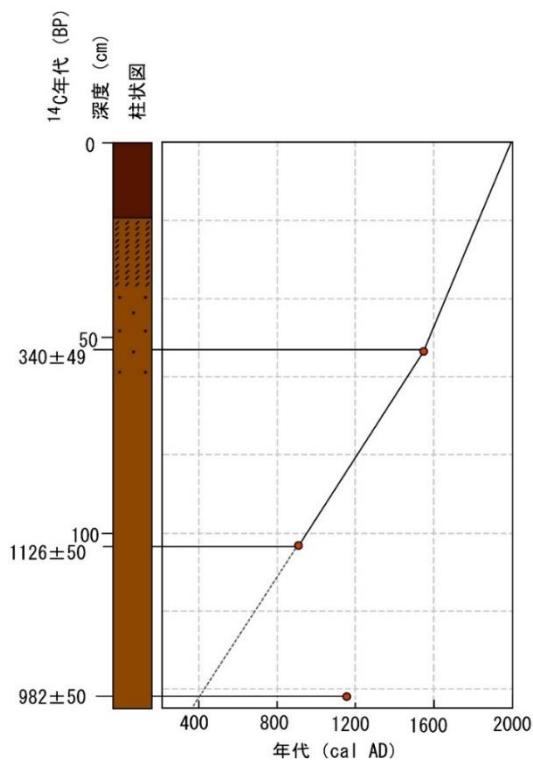


図2 MKB4 コアの深度-年代関係図

表1 MKB4 コアの ^{14}C 年代測定結果

深度 (cm)	^{14}C 年代 (BP)	較正暦年代 (cal AD) 2 σ での確立 (%)	較正暦年代中央値 (cal AD)
50 - 55	340 $\pm$ 49	1456 - 1644 (100.0)	1555
105 - 110	1126 $\pm$ 50	774 - 790 (5.4) 802 - 811 (1.3) 819 - 996 (89.6) 1002 - 1020 (3.8)	921
140 - 145	982 $\pm$ 50	980 - 982 (0.2) 990 - 1179 (98.7) 1191 - 1203 (1.2)	1086

採取した4本のコアは層序対比が可能であり、最下流に位置するMKB4コアが最も堆積年代を遡っていることが推定された。同コアの ^{14}C 年代測定による堆積年代値は深度140～145 cmで982 $\pm$ 50 BP (較正中央値:1086 cal AD)、深度105～110 cmで1126 $\pm$ 50 BP (921 cal AD)、深度50～55 cmで340 $\pm$ 49 BP (1555 cal AD)であった(図2、表1)。堆積速度は0.79～1.12 mm/yrであった。深度140～145 cmの年代値は試料採取時に上層から混入した植物根試料を測定した可能性があるため除外した。以上の年代測定結果から、三ヶ島湿地は約1,700年前には形成しており、現在まで湿地環境が維持されていることが示された。

(2) CNS分析・花粉分析による古環境の推定

CNS分析および花粉分析(図3)の結果から以下の3点について明らかにすることができた。

- ・ 三ヶ島湿地は約1,700年前に形成した。また、現在まで湿地環境が維持されていた。
- ・ 約500 cal ADよりコナラを主体とするコナラ二次林「トトロの森」が成立したと考えられた。また、約850 cal AD頃から湿地を人為的に調整することで稲作をはじめたことが示唆された。
- ・ 約1800 cal ADよりコナラ二次林、アカマツ二次林の管理の放棄が始まり、照葉樹林へ森林が回復したとともに、湿地周辺ではスギの植林が開始された。

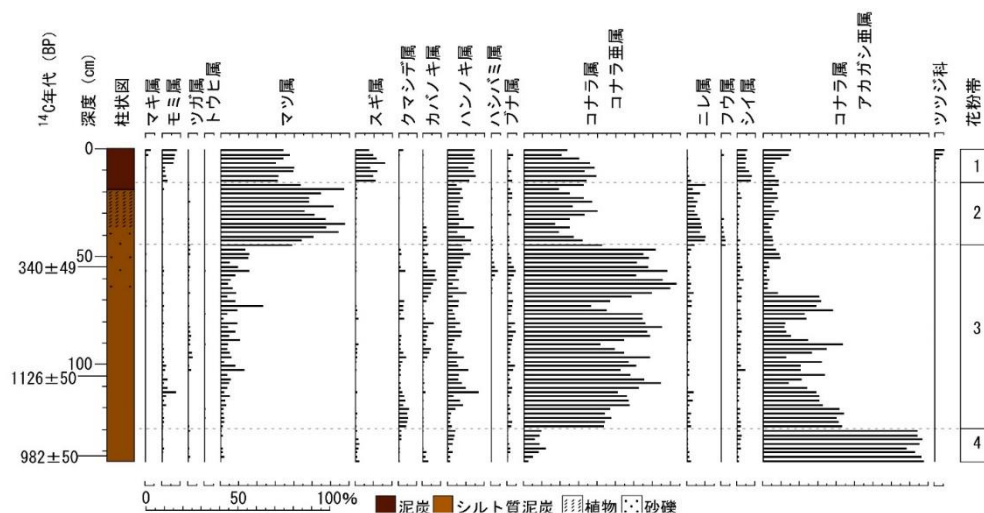


図3 MKB4 コアの花粉分析による木本花粉変遷図

引用文献

奥田重俊 (1997) 狭山丘陵の植生 (1), 奥田重俊編著, 日本野生植物館, 226-229, 小学館。

Reimer, P.J. *et al.* (2020) The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0-55 cal kBP). *Radiocarbon*, 62, 725-757.

Stuiver, M., and Reimer, P.J. (1993) Extended ^{14}C Data Base and Revised CALIB 3.0 ^{14}C Age Calibration Program. *Radiocarbon*, 35, 215-230.

(別紙様式 4-2)

石英チタン地質温度計のヒマラヤ高温変成岩類への適用(継続課題)
Application of Ti-in-quartz geothermometer to high-temperature metamorphic rocks in the Himalaya

今山武志、岡山理科大学フロンティア理工学研究所・准教授

【研究目的】

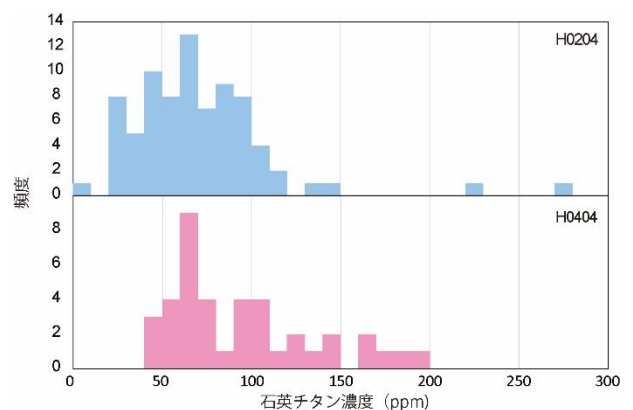
石英中のチタン量は温度依存性が強く、変成岩・火成岩類の地質温度計に利用されてきた(Wark & Watson, 2006)が、高温変成岩の石英は複数ステージで成長する場合があります、組織やステージごとに区分して詳細に検討した研究例は限られている。また、石英のカソードルミネッセンス(CL)の発光強度は、チタン量と正の相関を示す場合が多い(Muller et al., 2003)ものの、結晶中に内在する構造欠陥にも強く依存する。これらの複数回成長や構造欠陥は、メルトの生成中あるいは冷却中に関連する可能性があるが、その具体的なメカニズムは不明である。申請者は、詳細な組織観察と合わせて石英のチタン量を測定する。また、CL発光強度とチタン量を比較するとともに、CLスペクトル解析により石英の結晶化学的性質を理解する。本研究により、ミグマタイト中の石英が結晶化した変成温度を読み取り、黒雲母のチタン温度計による変成温度と比較することにより、各組織における石英がどのようなステージで結晶化したのかを理解する。また、石英の結晶化学的性質を明らかにすることによって、ヒマラヤ造山帯の地殻溶融過程の解明に貢献する。

【研究方法】

研究試料は、ヒマラヤ造山帯における極東ネパールの部分溶融で生成した優白質岩を用いて、昨年度の同地域の高温変成岩(溶け残り岩)についての結果と比較した。具体的には、1) ヒマラヤ優白質岩の薄片観察を行ない、石英の詳細な組織を記載する。2) 石英のCL像を確認して、発光強度によりそのスペクトルを得る。3) 石英の組織ごとにチタン量を測定し、結晶化温度を推定する。4) 黒雲母のチタン温度計により変成温度を推定して、石英の結晶化温度と比較する。

【研究結果・考察】

2023年12月に名古屋大学宇宙地球環境研究所で優白質岩中(試料H0204, H0404)の石英のチタン量を測定した。その結果、1) 石英のCL発光は中心部ではほぼ一定で、石英粒間でわずかに暗くなる、2) 石英のチタン濃度は約50-70 ppmでピークを示し(図)、高温変成岩中の石英のチタン濃度(約140-200 ppm)に比較すると顕著に低いことがわかった。このことは、優白質岩の石英はマグマが冷却する際に成長しており、高温変成岩中の顕著なCL累帯構造を示す昇温期からピーク変成時に成長した石英とは区別される。本研究により、部分溶融を被ったミグマタイトには、溶け残り岩と優白質岩において複数のステージ(昇温期、ピーク変成時、冷却時)で石英が結晶化することが示され、CLを用いた組織観察や石英中のチタン濃度はその指標になることが示された。今後は、黒雲母の結晶温度と比較することにより、黒雲母脱水溶融反応におけるチタン成分の挙動が明らかになることが期待される。



【引用文献】

Muller et al., 2003.Eur. J. Mineral, 15, 747-763.

Wark & Watson, 2006.CMP, 152, 743-754.

(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が北極域Tromsøにおいて運用するナトリウムライダー観測データを使って大気重力波のエネルギーおよび運動量輸送の統計解析を行い、極域熱圏域に注入されるこれらの諸量を高度域80-105kmにおいて定量的に評価する。併せて、流星エコーのレーダー観測データに、新開発解析手法(Tsutsumi, 2023; 堤他, 2023)を施して得られた高空間・時間分解能データを元にした相補的な重力波解析も行う。

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。ナトリウムライダーは狭い空間領域を高い分解能で観測する能力を持ち、2分値の温度観測データを元にしたスペクトル解析から、短周期重力波が良好に観測されていることを確認できた。一方、レーダーの流星エコーを利用した従来の観測手法は分解能においてライダーに遠く及ばない。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(Tsutsumi, 2023)は飛躍的に高い分解能を持ち、北欧域のMFレーダー(1つはライダーの設置されているTromsø、もう1つは100kmほど西に位置するSaura)にも応用できれば、ライダーデータと併用することで昼夜を問わず高品位な重力波解析が可能となる。そのため、まずは受信干渉計設備の整ったSauraレーダーに流星観測手法を応用し、短周期重力波解析に耐える風速観測が可能であることを確認した(堤他, 2023)。続いて、この結果を元に、Tromsøレーダーの受信干渉計整備計画を検討した。それらをまとめたライダー・レーダーによる大気重力波観測研究計画を、科研費基盤B(代表: 堤、分担者: 野澤他)として申請し、2024年度から3年間の計画で採択された。

まとめ

100 km前後からそれ以上の高度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り、ISEEがTromsøで運用する光学・電波観測装置を中心とした装置群による実現方法を検討した。その検討結果を元とした申請が2024年度から科研費基盤Bとして採択された。北欧のMFレーダー2台を組み合わせたネットワーク風速観測からは、レーダーとしては飛躍的に高くライダーとも比肩しうる時間空間分解能(時間: 数分程度、水平: 5-10km程度)が期待される。ライダー観測との直接比較も含む高品質重力波解析が期待される。

成果発表

High time and spatial resolution meteor wind observations using an MF radar at Syowa station (69S, 39E), Antarctic, Masaki Tsutsumi, URSI GASS 2023 2023年8月23日

中波レーダーを使った流星エコー観測に基づく高分解能風速観測, Masaki Tsutsumi, Toralf Renkwitz Jorge, L. Chau, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2023年秋季年会 2023年9月24日

フーリエ変換赤外分光器を用いたCO及びHCNの観測
Observation of CO and HCN with Fourier-transform Infrared Spectrometer

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、北海道・陸別及び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CO及びHCN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る。また、COとHCNの相関解析、火災データ、粒跡線解析を用い、つくば上空のCOの発生源及び発生地域の推定を行う。

＜研究手法＞

2010年4月－2019年5月の期間について、つくばのFTIR観測スペクトルによるCOおよびHCNの高度分布の導出を行った。観測スペクトルの解析にはロジャーズの最適推定法を基に開発されたインバージョン解析プログラムSFIT4を使用した。また同期間について、CO、HCN高度分布の相関解析、火災データ、粒跡線解析を用いて、つくば上空のCOの発生源および発生地域の推定を行った。発生地域の推定には人工衛星Terra/Aqua搭載のMODISセンサによる火災データと、環境研METEXによる後方粒跡線解析の結果を使用した。

＜結果と考察＞

リトリーバルで得られたCOの高度分布について、高度0-5km、5-18kmの二層に分解し、同じ日時・高度に対応するHCNとの相関解析を行った。解析の結果、春季のCOとHCNのパーシャルカラムにおいて、高度5-18kmにおけるそれぞれの値の間に、有意な相関関係が確認された。また高度0-5kmにおいては有意な相関関係が認められなかった。相関解析から得られたCO/HCN比から、高度5-18km春季について、大気中のCOパーシャルカラムにおけるバイオマス燃焼起源COの存在量の割合を求めた。高度5-18kmの3-5月において、バイオマス燃焼起源のCOの割合は平均で70%程度であると推測できた。この値は、つくば上空の大気に牧草や残渣の燃焼によるCOが含まれている場合、過剰に見積もられている可能性がある。火災データと後方粒跡線解析の複合解析の結果、有意な相関関係が見られた春季の高度5-18kmにおいて、中国北東部、ユーラシア大陸の緯度50-60°N帯の地域の林野火災を起源とするCOである可能性が示された

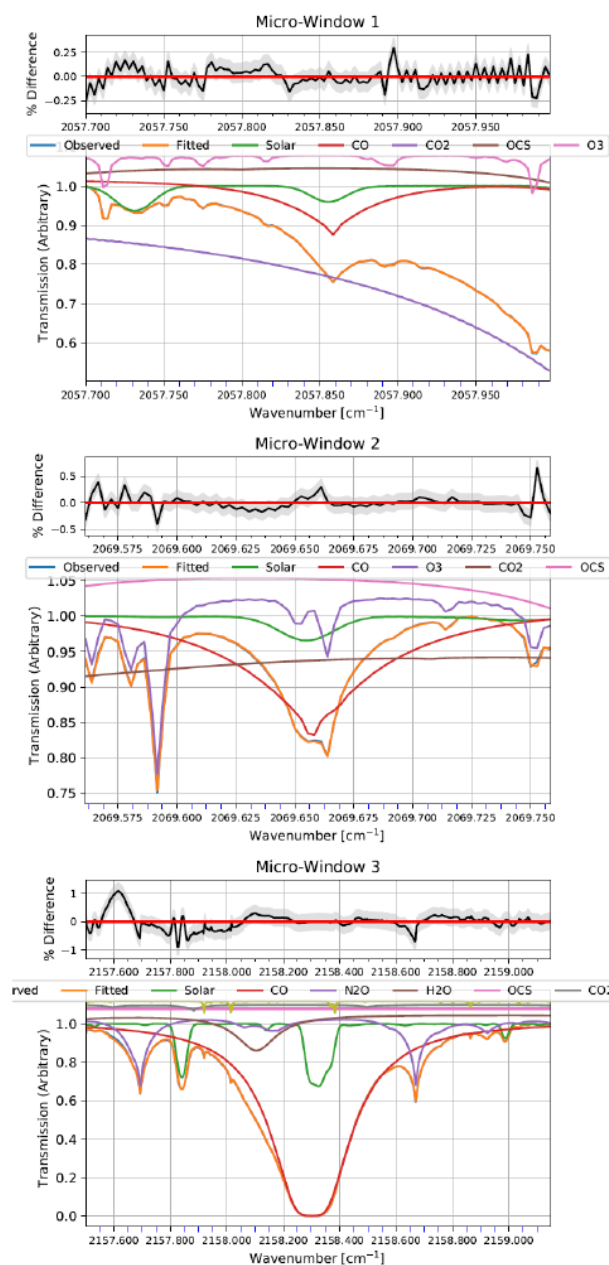


図1. SFIT4によるCOのフィッティング結果

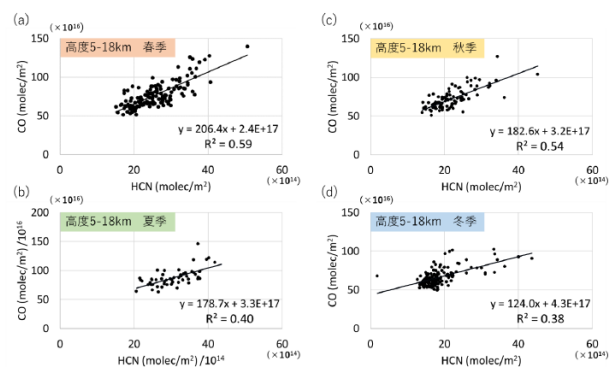


図2. 高度5-18kmの季節別CO-HCNパーシャルコラレーション

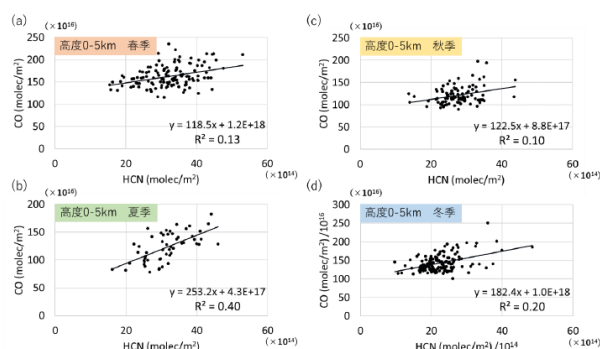
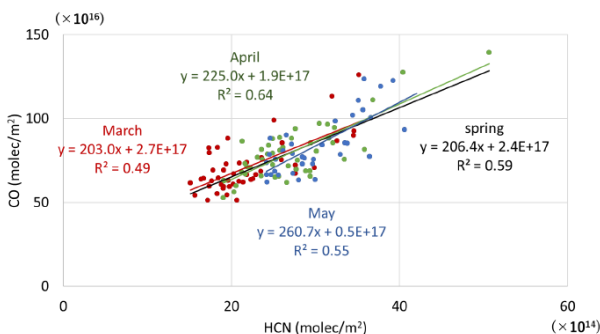


図3. 高度0-5kmの季節別CO-HCNパーシャルコラレーション



高度5-18kmにおける3-5月のCO, HCN相関

＜成果発表＞

- ・**中島英彰**、小川美宇、北 和之、M. C. Pitts、「CALIPSO観測データに基づく2011年と2020年の北極上空PSC出現状況の違いとオゾン破壊の関係」、日本地球惑星科学連合 2023年大会、幕張メッセ（千葉）＆オンライン、2023年5月22日
- ・**Nakajima, H.**, “The history of previous NDACC-IRWG-TCCON meetings”, NDACC-IRWG-TCCON-COCCON Annual Meeting 2023, Spa, Belgium, June 14, 2023.
- ・**中島英彰**、「WMO/UNEP 2022 O3 Assessment Report の概要について」、オゾン研究連絡会・日本気象学会（仙台）、2023年10月23日
- ・**中島英彰**、村田 功、森野 勇、G. C. Toon、「つくばの FTIR による HFC-134a の観測」、第28回大気化学討論会（長崎）、2023年11月21日
- ・**Nakajima, H.**, M. Ogawa, K. Kita, and M. C. Pitts, “Relationship between appearance of polar stratospheric clouds and ozone destruction over Northern polar region in 2011 and 2020 based on CALIPSO observations”, AGU 2023 Fall Meeting, San Francisco, U.S.A., December 12, 2023.

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】

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Shiroyoka 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(図1)、気温と気圧、湿度(一部)を5分毎に計測した。2023年度は4月上旬迄観測する予定であるので、今回の報告は昨年度のデータを用いる。また、地上データとして、札幌土木センターとA MeDASの気象データも利用した。また、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確認する。さらに、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。2020年2月19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】

コロナ禍ということもあり、小学校の養護教員からアンケート回答は少なかった。その中で、比較的多くの小学校で不調者数が現れた2月20日について調査を行った。この日は西高東低の気圧配置で北海道付近は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り、日本海側を中心に筋状の対流雲が繰り返し流入していた。図3は2月20日15時(JST)気象レーダーエコーを示しており、筋状雲と解釈できる帯状レーダーエコーが観測できる。この時間の地上気温(カラー)と地上気

Ishikari

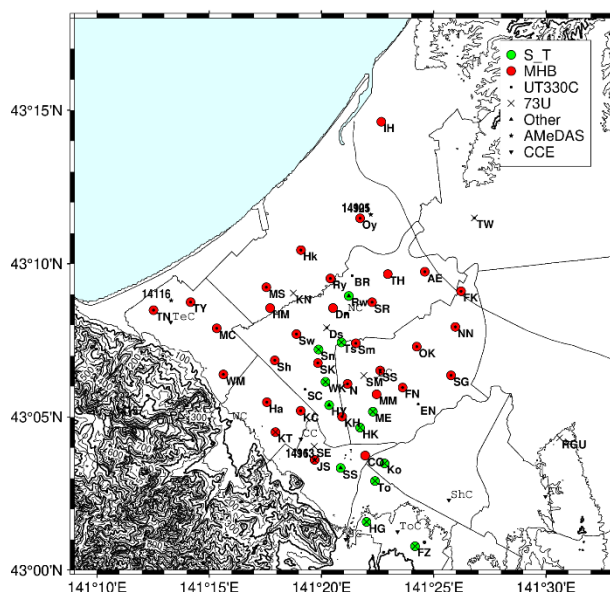


図1 2022-23年の観測網。MHBからOtherまでは観測機器の設置箇所、AMeDASは気象庁、およびCCEは札幌市土木センターの気象観測地点を表す。

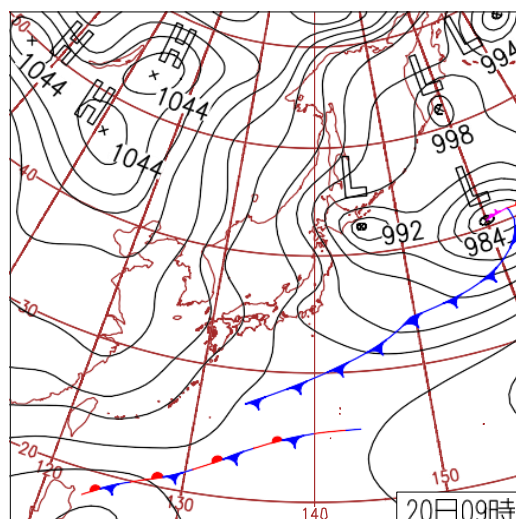


図2 2023年2月20日9時(JST)の天気図(気象庁)

庄(実線)の10分間の変化を図4に示す. 図3のTN地点から南東のKC付近まで筋状の対流雲があり, この前面(東側)で気温の負領域が拡がり, 同時に気圧の正領域が分布している(図4). この筋状対流雲が東進すると, 気温と気圧の変化領域も移動し, やがて衰退していく様子が見られた. CReSSによるシミュレーション解析からは, 帯状のセルが確認され, 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あ. Shirooka and Uyeda(1990)の地上で気温を降下させたスノーバーストと矛盾が無く, Yamada et al.(2004)のRwタイプと解釈することが出来る.

この日の観測点において, 10分間差分値が 2σ 以上の変動(気温 -0.5°C , 気圧 0.5hPa)を超えた事例は, 延べ36件あった(冬季全体で約400件). これらの過程で気圧変動が狭い範囲で生じていることから, 体調を崩す生徒が増えた可能性がある. 今後, 研究協力者の医師らと関連性について協議する予定である.

【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, 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 2016年9月.

・馬場賢治, 野田真由, 上田博, 北海道における2007/08~2017/18の冬季落雷の傾向, 日本気象学会大会講演予稿集, (114) 290, 2018年10月.

・Baba, K., Temporary Variation of Surface Air Temperature and Atmospheric Pressure Under Convective Clouds in Winter Monsoon, Asia Oceania Geosciences Society, 15, 2018年6月.

・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.

【成果発表】

馬場賢治, 三樹圭亮, 上田博, 気象モデルを用いた冬季石狩平野における筋状対流雲によるスノーバーストの再現実験, 日本気象学会大会講演予稿集 (124) 2023年10月25日

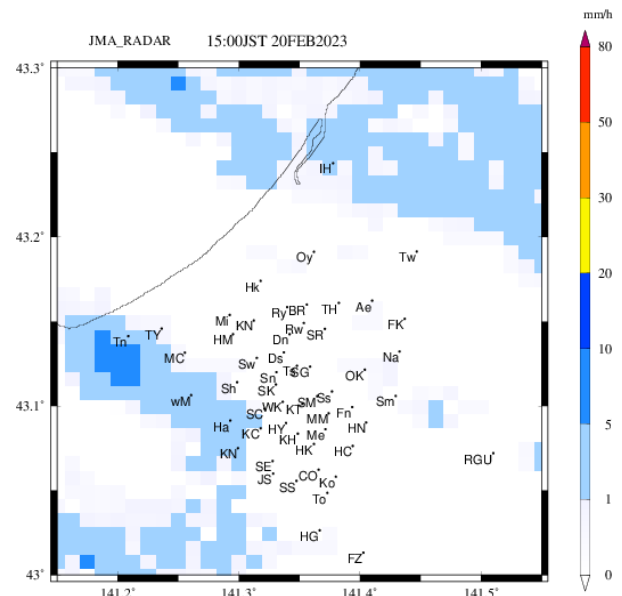


図3 2023年2月20日15JSTのレーダー画像. カラーは降水強度(mm/h)を表す.
230220 15:00(10min)

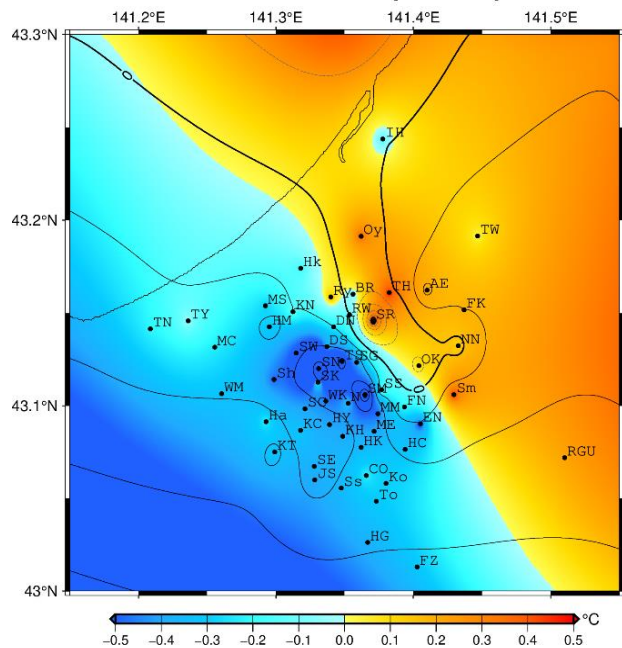


図4 2023年2月20日15時(JST)における気温(°C)と気圧(hPa)の10分間変動

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以上の高速輝度変動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。今後は、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】

- 森井雄大，三好由純，栗田怜，細川敬祐，大山伸一郎，小川泰信、光学2波長観測によるオメガバンドオーロラの降下電子エネルギー特性の推定、地球電磁気・地球惑星圏学会，2023年9月
- Y. Morii, Y. Miyoshi, S. Kurita, R. Nakamura, K. Hosokawa, S. Oyama, Y. Ogawa, S. Imajo, S. Saito, K. Asamura, Two-wavelength optical measurements on the omega band aurora, AGU Fall Meeting 2023, 2023年12月

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

地球上層大気・磁気圏に存在するプラズマは、数 eV 以下から数 MeV 以上の広いエネルギー範囲にわたって存在している。この中で、数 eV 程度以下のイオンは、地球から 20Re (Re: 地球半径) 程度離れた領域で観測されるなど、地球電離圏外にも広く分布することが分かっている。また、磁気圏では、極域電離圏起源と考えられる重イオン (N^+ 、 O^+ 、分子イオンなど) が観測される。電離圏におけるイオンの典型的エネルギーは 0.1eV 程度であり、磁気圏へと流出するためには何らかの加速・加熱が必要である。しかし、諸説あるものの、イオン流出機構の解明には未だ至っていない。この加速・加熱過程の解明には 1eV 程度以下から 100eV 程度にわたるイオンの直接観測が望まれる。ところが、数 eV 程度以下のイオンをエネルギー・質量・到来方向弁別を行って観測することは簡単ではないため、観測例は限定的にしか存在しない。また、数 eV 程度以下のイオンを観測する場合、衛星速度の影響が無視できない。一方でプラズマ粒子の計測においては全ピッチ角をカバーした観測が重要となる。衛星速度方向と磁場方向の関係は軌道運動に伴って変化するため、効率の良い観測を行うためには観測器側に視野方向を変更でき、さらにはイオン種弁別を行う機能が必要となる。

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。

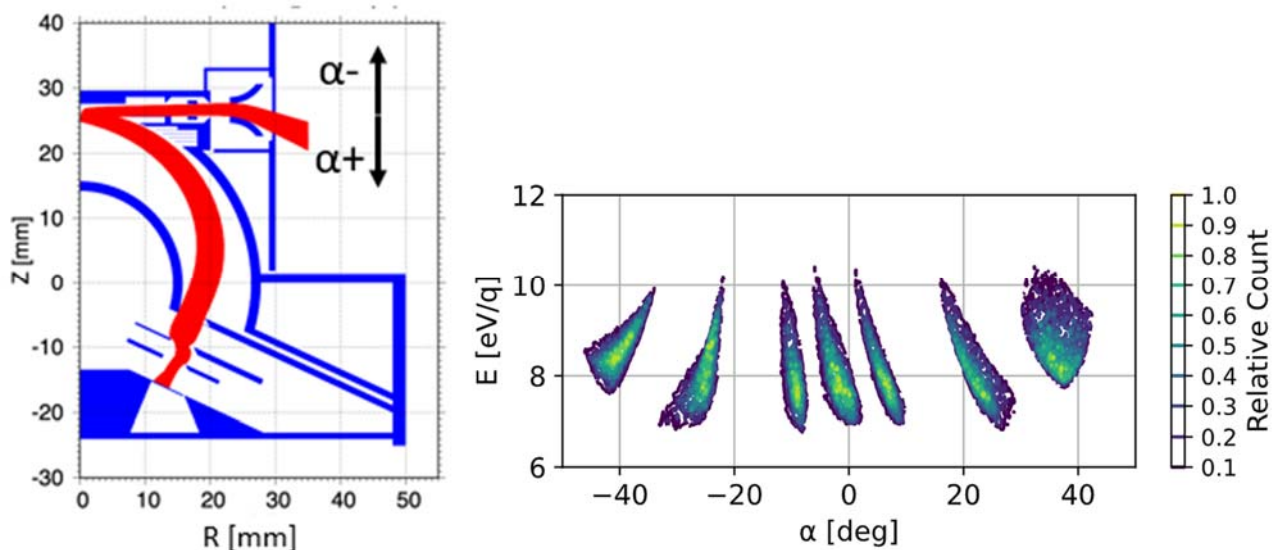


図1: (左) 設計した計測器エネルギー分析部の断面図。機器は Z 軸 ($R=0$) 周りに対称な形状となっている。赤はイオンの軌道例を示している。(右) 計算機シミュレーションによって得たエネルギー分析部のイオン入射パラメータ (入射時のエネルギーおよび仰角) に対する応答。視野方向変更電極について、異なる電圧設定での計算結果を重ねてプロットしている。仰角 (α) について、 -40 度から $+40$ 度の範囲で制御できていることが分かる。

本年度は計算機シミュレーションを用いて観測器形状の設計を行った。本観測器は全ピッチ角を同時にカバーできるようにするため、エネルギー分析部にトップハット型の静電分析器を採用する。通常のトップハット型分析器は円盤状の視野を持っており、全ピッチ角をカバーする場合には磁場方向が視野内に含まれている必要がある。一方、数eV程度以下の低エネルギーイオンを計測する場合には衛星速度方向もカバーすることが望まれる。このため、観測器の入射口部に電極を配置し、印加電圧を変更することによって到来方向を変更する機構を新たに設けることとした。図1(左) は設計した観測器の断面図、図1(右) は計算機シミュレーションによって得たイオンの入射パラメータ（入射時のエネルギーおよび仰角）に対するエネルギー分析部の応答を示している。粒子の入射仰角（ α ）について、-40度から+40度の範囲をカバーした上で 10度程度の角度分解能を実現できていることが分かる。

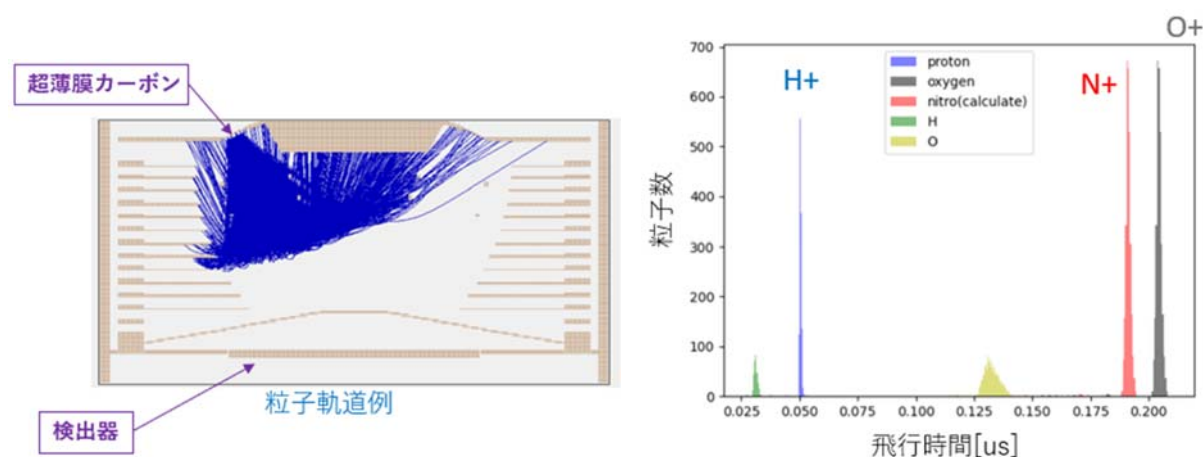


図2: (左) 飛行時間分析部（質量分析部）の断面図。青色は長白各カーボンから出射したイオンの軌道例を示す。(右) 計算機シミュレーションによって得た飛行時間分布例。N+ と O+ がクリアに分離できている。

エネルギー分析部を出射した粒子は質量分析部に導入する。質量分析部には LEF (Linear Electric Field) 型飛行時間分析法を用いることとした。飛行時間分析法は分析器内で粒子の飛行時間を計測する手法の一つである。また、LEF 法は距離に比例して電界強度が強まるポテンシャル構造を用いることにより、入射粒子のエネルギーや入射角のばらつきが飛行時間に与える影響を抑制することができる手法である。図2(左) は設計した質量分析部の断面形状である。LEF 法を用いることにより、 $M/\Delta M \sim 20$ 程度の高い質量分解能を実現することができた (図2(右))。

今後、センサー設計の最適化、観測器試験モデルの設計・試作を行い、イオンビーム照射試験などでセンサー性能の確認などを進めていく。

成果発表

- 寺澤他, Development of suprathermal ion energy-mass spectrometer for observations in the polar ionosphere, SGEPS 2023年秋季年会, R006-P11, 仙台, 2023年9月23-27日
- 寺澤他, 電離圏起源低エネルギーイオンの観測を目指したイオンエネルギー質量分析器の開発, 低エネルギープラズマ研究集会, 福岡, 2024年2月5日
- 寺澤他, 電離圏起源低エネルギーイオンの観測を目指したイオンエネルギー質量分析器の開発, あらせサイエンス会議, 金沢, 2024年3月13-15日

二重偏波レーダーのデータを利用した雲解像モデルの改良
Improvement of cloud-resolving model by using data of polarimetric radar

佐藤正樹、東京大学・大気海洋研究所

研究目的

雲解像モデルの精度向上、特にいまだ不確定要素の多い雲物理過程の精度向上を目指す。

研究方法

雲解像モデルの出力を「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、二重偏波レーダーのデータと比較する。東大に設置したディストロメータによる雨滴粒径分布の観測結果との比較も行う。

研究結果

低気圧の影響で東日本から東北にかけて降水があった2021年12月8日を例に、雲解像のモデルNICAMのシミュレーション結果、それを用いて観測シミュレータで計算した二重偏波レーダーのシミュレーション結果を解析した。

図1はNICAMのシミュレーション結果を用いて観測シミュレータで計算した二重偏波レーダーのレーダー反射因子を、柏の二重偏波レーダーの観測値と比較したものである。ディストロメータが設置されている東大柏キャンパスの地点での比較である。概ね似た時間変化を示しているが、シミュレーション結果の方が少し大きい値をとっている。また図2にこの両者の反射因子差から導出した雨滴のmedian volume diameter D_0 を比較したもの示す。ディストロメータで直接観測した D_0 も合わせて示す。ディストロメータで直接観測した D_0 と柏の二重偏波レーダーで観測された反射因子差から導出した D_0 はよく一致している。NICAMのシミュレーション結果から導出した D_0 も多少の時間差があるものの概ね近い値になっている。但しNICAMのシミュレーション結果から導出した D_0 の方が大きい。このことは図3の相関図からもよくわかる。NICAMのシミュレーション結果の雨水量は観測値とよく合っているものの、雨滴数密度は観測値と比較すると一桁程小さいことから、雨滴の直径が観測より大きくなっていることがわかる(図4)。そのため降水強度およびレーダー反射因子が過大評価されたものと思われる。NICAMで設定されている雨滴の平衡半径の値の検討が必要と思われる。

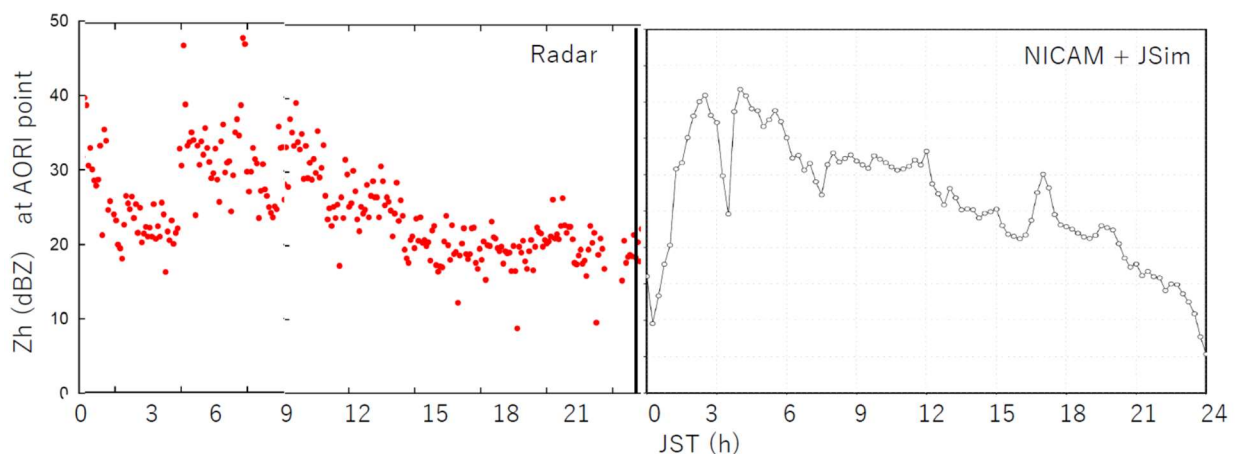


図1 2021年12月8日東大地点のレーダー反射因子の時間変化。左図はレーダーの観測値。右図はNICAMのシミュレーション結果から導出したもの。

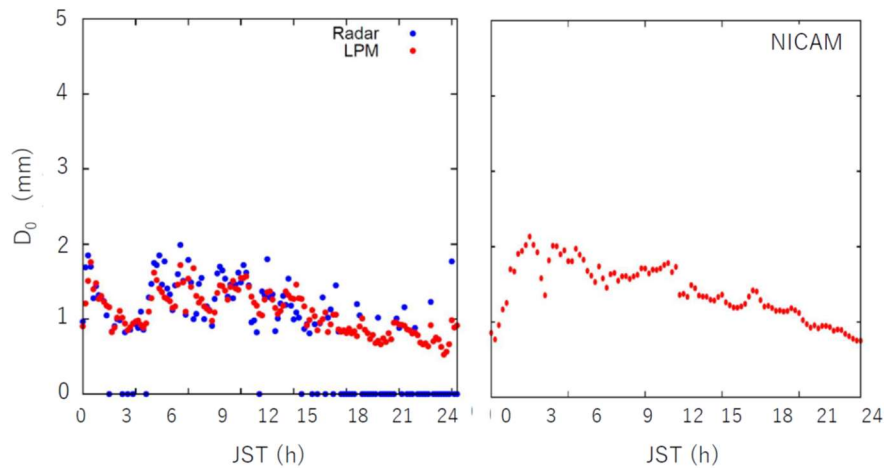


図2 2021年12月8日東大地点の雨滴のmedian volume diameter。左図はレーダーの観測値から導出したもの（青）とディストロメータで観測されたもの（赤）。右図はNICAMのシミュレーション結果から導出したもの。

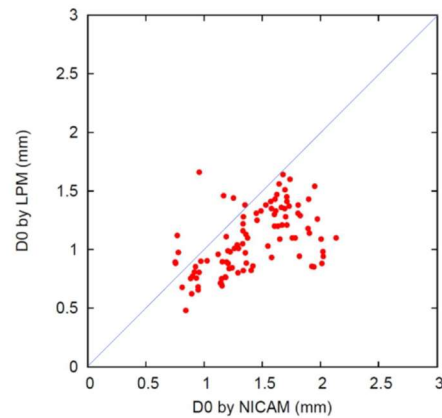


図3 2021年12月8日東大地点の雨滴のmedian volume diameter の相関図。ディストロメータで観測されたもの（縦軸）とNICAMで導出したもの（横軸）。

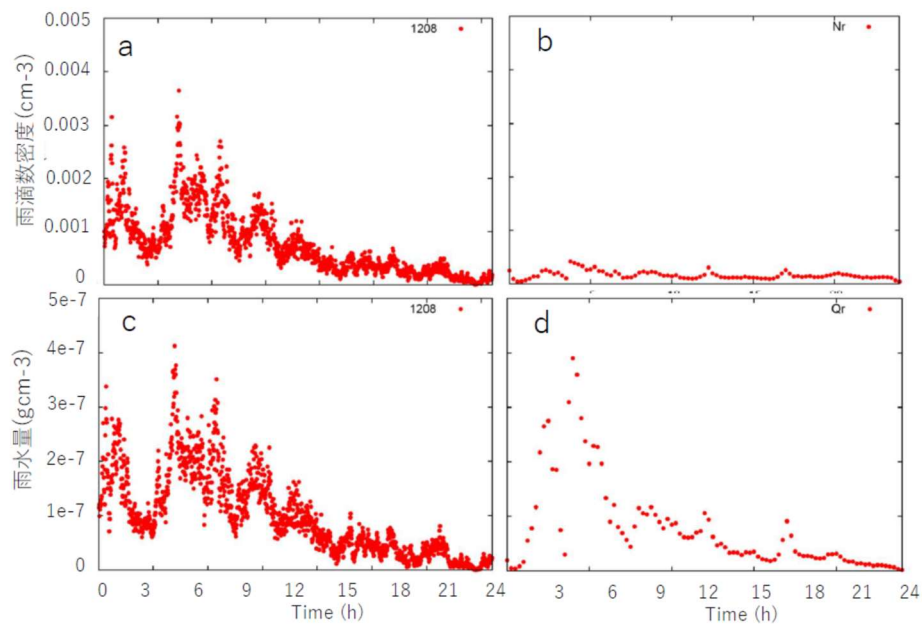


図4 2021年12月8日東大地点の雨滴数密度（aとb）と雨水量（cとd）の時間変化。ディストロメータで観測されたもの（aとc）とNICAMで導出したもの（bとd）。

次世代マルチビームシステム デジタルPhased Array Feedの開発
Development of Digital Phased Array Feed as the Next-Generation Multi-Beam System

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

天の川銀河全域に広く分布するとされる低密度分子ガスは宇宙における物質循環、特に星の母体である分子ガスが原子ガスからどのように形成されるかを解明する鍵である。本研究の最終目標は次世代マルチビームシステム Phased Array Feed (PAF) を福井工業大学10mパラボラアンテナに搭載することで従来の2桁以上広域な天の川銀河掃天観測を行い、低密度分子ガスの全容を明らかにすることである。本課題ではPAFを天文観測に展開するための基礎開発、特にデジタルPhased Arrayシステムの基礎研究および福井工大10mアンテナに搭載するPAF試作機の開発検討を進める。

研究方法 (使用した共同利用装置・施設等を含む)

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350MHzとし、16台の長さ約50 cmのダイポールアンテナを素子アンテナとする。東西方向に半波長(およそ50 cm)間隔で8台のダイポールアレイを並べ、さらに同じ配列で南北方向に50 cm離して並べる2次元アレイを構築することで東西方向に約14度の角度分解能の合成ビームを形成する。8×2素子アレイのうち南北に並ぶ2素子の出力をアナログ信号のまま結合し、これをADCに入力する。8つのデジタル出力を合成器に導き、受入教員が開発した制御プログラムで各出力の位相を調整することで合成ビームの方向を制御する。

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10 mアンテナは現在駆動系が故障しており、その改修を進めている。PAF開発を遅滞なく進めるため、PAF開発のテストベッドとして小型アンテナシステムの導入を検討する。基礎開発ではPAFを搭載するフロントエンド部の頻繁な調整が必要となるため、直接手が届き、試験・評価を気軽に行うことができる人の大きさ(2 m)程度のアンテナが適している。小型アンテナを導入し、システムの整備および、この光学系を用いたPAFシミュレーションおよび開発試験を実施する。

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16台(2台×8)のダイポールを用いたPhased Array測定実験を実施した(図 1)。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、感度不足のため未検出であった。次に、南北方向の2つのダイポールの出力をアナログで結合後、デジタル変換した。東西方向の計8つのデジタル出力を合成器に入力し、各出力の位相を調整することで合成ビームの方向を天頂から水平方向に±15度刻み(EL=90°, ±75°, ±60°, ±45°, ±30°(東方向が+))でビームを傾け、得られるパワースペクトルを確認した。300MHz帯ではどのELでも強い無線周波数干渉(RFI)がみられるが、ELを低くしていくにつれRFIが強くなり、さらにEL=30°に比べEL=-30°でRFIが強くなることが確認された。これは、測定地の東側に住宅地、西側には名古屋駅含む繁華街が広がっていることから、人口密度の高い名古屋駅方面からより強い人工電波が出ていると解釈できる。この結果から、定性的ではあるがPhased Arrayの合成ビームを計算通りに変化させることができたと考えられる。

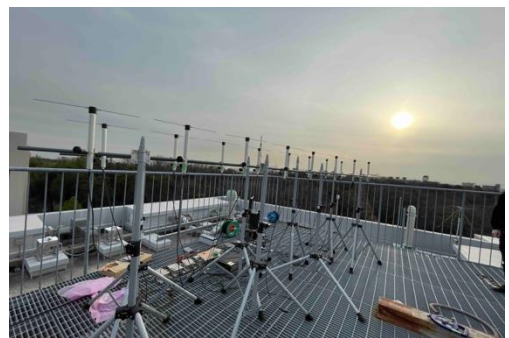


図 1: Phased Array 試験測定の様子

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開発のテストベッドとして、2.4mアンテナシステムを情報通信研究機構より譲り受ける手続きを

進めた(図 2)。2.4m は副鏡に搭載するPAF フロントエンド部の調整が容易であり、PAF 開発の迅速化が見込める。2.4mアンテナの移設が令和6年3月末となったことに加え、AZモーターでの不具合が報告され現在メーカーによる原因調査中であるため、システムの整備までは至っていないが、2.4m図面を入手し、プロトタイプPAFとして搭載するダイポールアレイの検討を始めた。先行研究(Nagel 2006)を参考に、プロトタイプアレイとして7つのダイポール素子アンテナを採用する。ダイポールアンテナは銅張積層板のグランドプレートから1/4波長の高さを持つ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) とする方針である。今後これをベースにシミュレーション評価を実施し、最終調整をしたのち作製に取り掛かる。

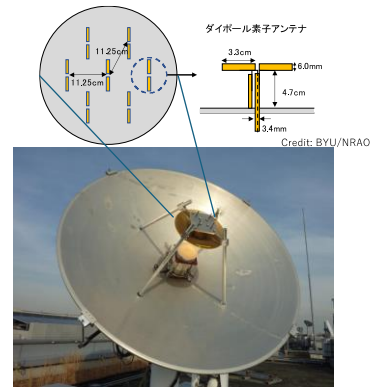


図 2: 2.4m アンテナ

考察

デジタルPhased Arrayシステムの測定実験から、合成ビームのELを低くしていくにつれRFIが強くなり、さらにEL=30°(東側)に比べEL=-30°で(西側)でRFIがより強くなることを確認した。測定地の東側に住宅地、西側には名古屋駅含む繁華街が広がっていることから、人口密度の高い名古屋駅方面からより強い人工電波が出ていると解釈でき、Phased Array合成ビームの方向の制御に成功したと考えられる。ただし、RFIは様々な場所から出ており、現時点では定性的な議論に留まっている。そのため、今後太陽を用いた連続波観測を行い、太陽の有無による(ベースラインの)出力変化を確認する必要がある。ただし、現状システムノイズが高く、太陽を検出できないため、ダイポールアンテナ直後にLNAを搭載するなどシステムの高感度化が必要である。

PAF試作機の開発検討においては、2.4mアンテナのシステム整備と並行し、7素子ダイポールアレイによるPAFシミュレーションの実施およびシミュレーション結果に基づいた7素子ダイポールアレイを作成する。作成後、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

16台(8×2)の2次元ダイポールアレイを用いた合成ビームの制御試験を行った。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、合成ビームのELを低くしていくにつれRFIの電波強度が強くなり、さらに方向によっても周囲環境と矛盾しない強度変化を示したことから、Phased Arrayのビーム制御に成功したと考えられる。また、PAF開発迅速化のため小型2.4mアンテナの整備を進めた。今後、2.4mアンテナシステムの整備と7素子プロトタイプ PAFの開発・評価試験を進める予定である。

引用文献

Nagel, J., R., 2006, A Prototype Platform for Array Feed Development, (Thesis of Brigham Young University)

成果発表

宮本 祐介, 「福井工業大学宇宙観測研究室の立ち上げ状況とVLBIコミュニティへの期待」 VLBI懇談会シンポジウム招待講演, 2024年12月15日

(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

2023年度における研究課題の成果は以下の通りである。

連成計算1について、2017年3月に発生した磁気嵐を対象に実施したグローバルモデルによる計算結果の解析を進めた。グローバルモデルの計算結果に示される高エネルギー電子の速度分布関数を用いた連成計算2により、コーラス放射が発生する条件のサーベイ計算を実施した。さらに、コーラス放射発生条件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keV帯高エネルギー粒子計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keV電子フラックスおよび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について、ULF波動に起因するホイッスラーモード波動の発生条件の変動に加えて、ホイッスラーモードの伝搬過程にULF波動がもたらす影響を考察することにより説明できることを明らかにし

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。2024年度は引き続きコーラス放射発生条件に関するサーベイ計算と、衛星観測結果を初期条件として行った連成計算 2 の結果から、宇宙天気現象時の内部磁気圏における非線形波動粒子相互作用の発生領域とその時間・空間発展を明らかにすることを計画している。

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）

赤石山脈のような大起伏山地には、地質時代・歴史時代に発生した大規模斜面崩壊（以下、崩壊）の痕跡が各地に存在する。それらの崩壊がどのような発達の過程を経てきたか、編年を含めて、その全容は全国的に十分解明されていない。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。

本研究の主たる目的は、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 宝永地震が主因だったと広く信じられている赤石山脈・安倍川源流の大谷崩を対象として、その通説の妥当性を検証した。そのために、この崩壊で形成された支流性堰き止め湖沼堆積物中の微小植物片を年代測定に供試した。

本研究では、試料調整室で物理的・化学的前処理を行い、グラフアイト・ターゲットを準備した。そして加速器質量分析計を用いて、 ^{14}C 年代測定を実施した。

(2) 研究結果・考察・まとめ

赤石山脈南部を南北に縦貫する安倍川の源流地域において、安倍川本流の河床上昇を原因として支流（ヨモギ沢、タチ沢、コンヤ沢）に形成された堰き止め湖沼堆積物（荻谷ほか 2023 など）の地質調査を行った。各支流の堰き止め湖沼堆積物に含まれる微細な木片や植物片を採取し、それらを試料として合計 20 点の AMS ^{14}C 年代値を得た。

年代値は支流ごとに一定の範囲に集中し、なおかつ支流ごとに範囲がずれることが判明した。安倍川本流の河床上昇は大谷崩（巨大斜面崩壊地）を供給源とする過剰な土砂供給が主因であり、崩壊の発生時期は西暦 1707 年・宝永地震時と広く考えられてきた（建設省静岡河川工事事務所 1988 など）。しかし今回の測定で最古の年代範囲を示したコンヤ沢の場合、校正暦年の確率分布は AD1300~1450 に集まる。この結果は、支流を堰き止めるような本流の顕著な河床上昇、すなわち大谷崩からの過剰な土砂供給は従来の推定より 250~400 年古い時代にすでに始まっていたことを示唆する。日本有数の大規模斜面崩壊地である大谷崩の初生時期に関して、年代学的・層序学的観点での再検討が必要なことが明らかとなった。

(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
建設省静岡河川工事事務所（1988）「安倍川砂防史」

(4) 成果発表

発表準備中

公開された衛星軌道データ (TLE) の解析による宇宙天気現象の解明
Study of Space Weather Phenomena by TLE analysis

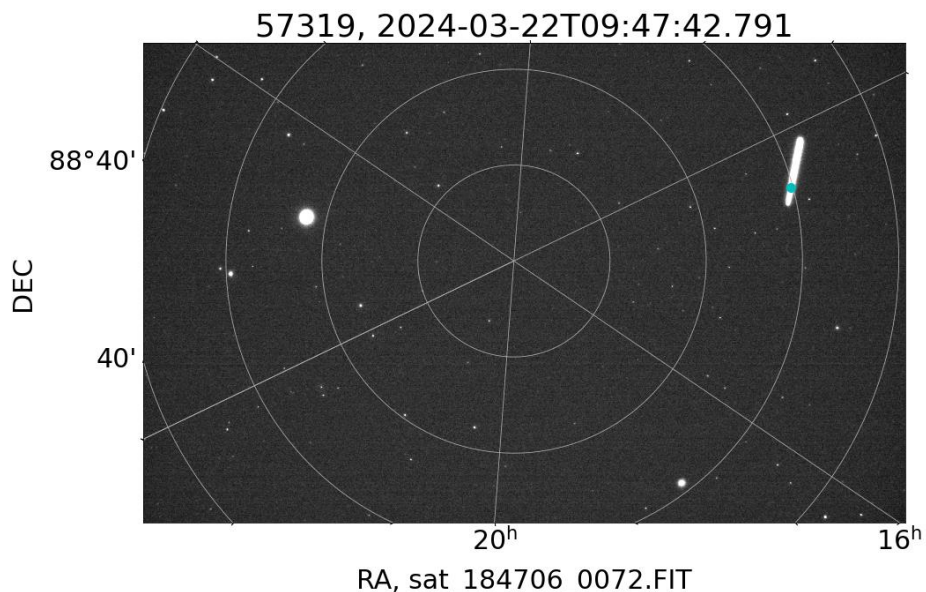
野澤恵、茨城大学、理工学研究科理学野

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。2022 年 2 月に、多数のスターリンク衛星が地球磁気圏の小規模な磁気嵐により大気圏に落下し消失した。宇宙物体の軌道については JAXA の衛星では独自に軌道計算を行い軌道予測しているが、大学発の超小型衛星などでは、アメリカ合衆国宇宙軍(USSF)の提供する TLE(Two Line Element)を使用している。また運用停止となった人工衛星やスペースデブリなども、TLE を用いた軌道計算により、衝突などの回避が行なわれている。

そこで TLE を用いて宇宙物体の約 50 年に渡る軌道高度率と太陽電波 F10.7 の関係を解析し、非常に高い相関となった。この相関からの関係式は F10.7 の観測値を得たときの、高度降下率を経験的に示すもので、ある時間の F10.7 の値が観測から提供されると、高度降下率が計算されることを意味し、宇宙天気現象の影響による軌道の簡易的な予測、すなわち宇宙天気予報の一つと考えることもできる。

そこである宇宙物体を観測し、軌道予測と sgp4 の誤差程度で時刻の一致をみた。このときは太陽フレアの前で急激な大気抵抗の増大がないため、予測と大幅にずれなかったが、アマチュア天文家の公開している画像では、太陽活動の増大のため通常の軌道のずれより大きなものがあつた。そこで思考実験として、公開されている TLE のパラメータを操作して軌道予測を行うことを試みた。これは sgp4 に宇宙天気現象の効果を取り入れることで、これも宇宙天気の予報の一つとしての軌道予測に繋がる試みであり、TLE の最後の平均運動だけ値を変化させ sgp4 で予測軌道を生成する方法である。ただし注意すべき点は、TLE は実際の観測結果から軌道 6 要素と、高度の一次変化率、二次変化率を B*(ビースター、抗力係数)とい

うパラメータにより
リセットで推定しているため、軌道要素だけを変化させたとしても軌道予測の精度を上げるわけではない。将来的に sgp4 に宇宙天気現象の効果を取り入れた新しいモデルの構築が望まれる。



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

O⁺だけの観測の場合、地球上層大気の散逸について得られる情報は散逸量の時間変化のみであった。N⁺や分子イオンの観測が加わると組成比の時間変化を見ることができ、これは散逸大気の起源領域 (緯度、高度) の時間変化に対応する (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】

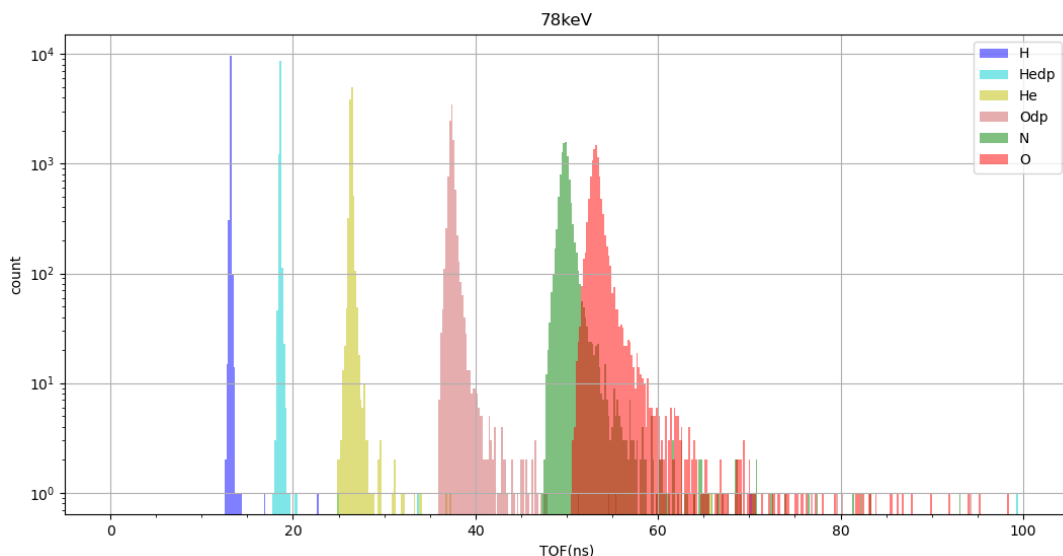


図1：78keVイオンの入射に対してMEPiで取得されるTOF分布 (SRIM計算結果)

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。TOFはイオン種の質量に対応する。単一エネルギー K の入射イオンの飛行時間は $T = L/\sqrt{2K/m}$ と一

定になるが、実際はMEPi内にある超薄膜炭素を通過するためにエネルギー・角度分散を受ける。そのため結果としてTOF分布には広がり $\Delta T(K)$ が生じる。この $\Delta T(K)$ はSRIMを用いた計算によって取得できる。

図2は磁気嵐中の2017年9月17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のものである。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。MEPiでのエネルギー分析は半値幅で10%未満の幅があり、その応答は正規分布 f で近似できるため、 $\sum_k \Delta T(K) \cdot f(K)$ 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じ大きさになる。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特にTOF分布の左側への広がり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。 O^{++} や H^+ 左側に不一致が見られるが、超薄膜炭素通過後に負イオンとなったものの影響が考えられる。

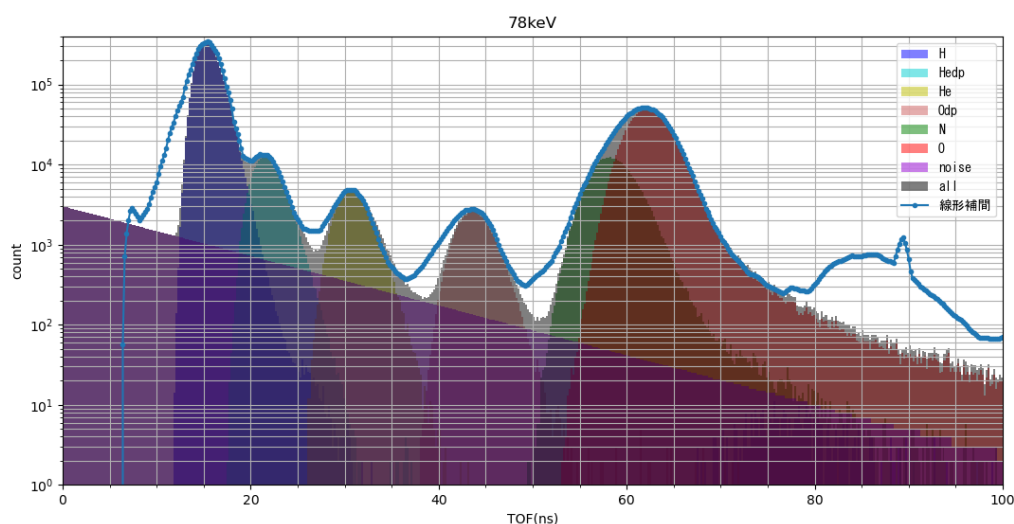


図2：78keVイオンの入射に対してMEPiで取得されるTOF分布（SRIM計算結果）

【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。今回は一つのエネルギーステップのみの評価であるが、同手法にて15ステップ全てに対して評価を行う予定である。

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年の打ち上げ以降約6年間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6年間の観測データを網羅的に解析し、磁気赤道域～中緯度域に渡る低周波波動の空間分布とプラズマ波動の特徴解析を行った。

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抽出し、周期的な振幅変調の有無で分類した。図1および図3は、周期的な振幅変調が見られるRising tone磁気音波の観測頻度分布であり、図2および図4は周期的な振幅変調が見られないStructureless磁気音波の観測頻度分布である。これらの解析結果から、Rising tone磁気音波は主に $L>4$ の領域に限って観測され、一方でStructureless磁気音波は $L<4$ でも観測されることが分かった。次に、現象が観測されたときのプラズマポーズ位置をHFA(High Frequency Analyzer)によるUHR周波数の計測結果から求め、プラズマポーズからの距離で現象进行分类したところ、Rising tone磁気音波の観測頻度はプラズマポーズの内外で有意に変化する傾向が見られた。この結果は、Rising tone磁気音波が周期的な振幅変調を伴ったままプラズマ圏内に伝搬できないことを示唆する。レイトレーシングを用いた研究では、通常磁力線に対してほぼ垂直に伝搬する磁気音波が、プラズマポーズ近傍では伝搬角を大きく変えることが報告されている。今後は個々の観測例について、伝搬方向解析やレイトレーシングによる調査を進め、2種類の磁気音波の伝搬メカニズムの違いを議論する。

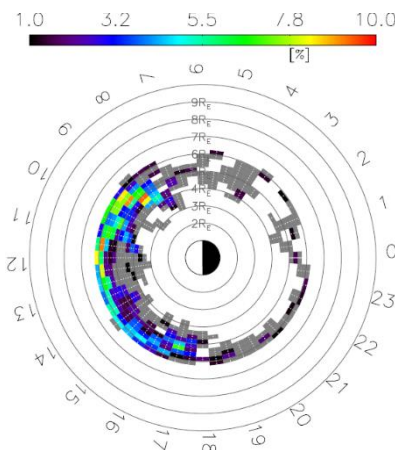


図1 Rising tone磁気音波の観測頻度分布

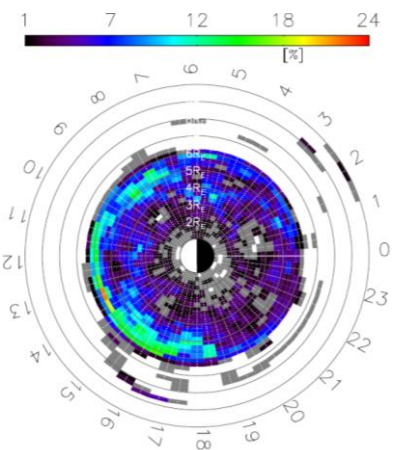


図2 Structureless磁気音波の観測頻度分布

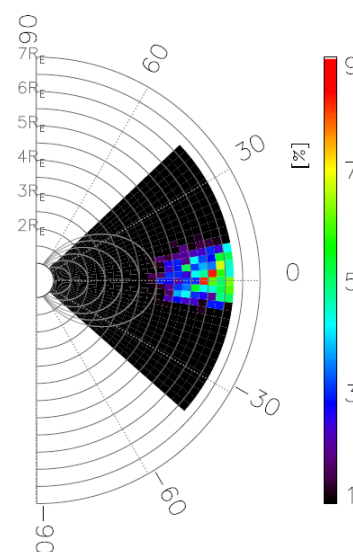


図3 Rising tone磁気音波の観測頻度分布 (磁気子午面)

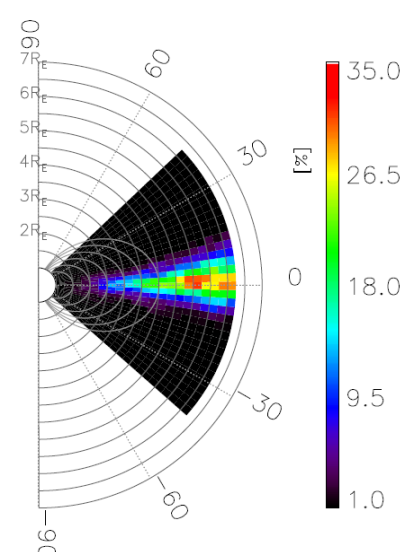


図4 Structureless磁気音波の観測頻度分布 (磁気子午面)

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

【研究背景・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。あらせ衛星の磁場データはJAXA宇宙科学研究所のデータサーバ及び処理専用マシンで処理、評価、校正されている。軌道上のあらせ衛星の磁場データを評価してアライメントやオフセット、時刻補正係数等、校正に必要なパラメータを導出している。校正したデータは、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プロジェクトチーム内外の研究者に提供され、多くのサイエンス成果があがっている。従来の衛星観測による結論を超える成果を出していくためには、観測した磁場データの精度向上が重要である。あらせ衛星で得た磁場データを高精度で校正するには、地上校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。

2017年3月の定常観測開始以降約7年間磁場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。軌道上データの高精度の評価と校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っている。あらせプロジェクトが目指してきた、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。太陽活動の極大期を迎えていることから、今後は異なる太陽活動フェーズ間の比較も可能となり、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。長期間のデータを継続的に評価することにより、経年変化を含んだ校正パラメータを導出する作業が可能となる。校正パラメータは機器の素材の物性や部品の経年変化によって変化していくが、打ち上げ前の地上における試験の範疇を超えるために、その要因を特定したり今後の変化を予想したりすることは容易ではない。本研究では校正パラメータの長期変化を調査し、その要因を類推して今後あらせ衛星が取得する磁場データや、将来の長期ミッション（遠い天体の探査等）への影響を探ることを目的としている。

【研究方法】

衛星が軌道上で長期放射線環境にあり、また高温と低温を繰り返すと、センサの機械的変形や回路の素子の特性変化が起きる可能性がある。これらの機会的変形や特性変化は磁場データのオフセットやアライメントの変化として影響に現れる。軌道上のあらせ衛星磁場データのオフセットやアライメントの誤差は、科学成果に直結し、慎重に評価、校正を行う必要がある。オフセットは軌道上の衛星のスピント、スピン軸方向の磁場が微小になったタイミイングのデータを利用することによって校正パラメータを求めている。アライメントは、地上校正試験における軸間角度の情報と、軌道上の衛星のスピンを利用して校正パラメータを求めている。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必要がある。磁場計測機器PIである研究代表者が、あらせサイエンスセンターメンバー、磁場データを主に用い内部磁気圏の研究を行う研究者と協同して検討を行った。進捗状況は、ローカルなオンライン打ち合わせやあらせサイエンス会議で共有した。

研究経費は、出張等の外出中であってもデータ評価のためにデータサーバと通信を行うポータブルWi-Fiや、データ評価作業の際に用いるPCの操作に必要なドッキングステーション、変換アダプタ等の購入に使用した。

【研究結果・考察】

2023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。今後引き続き評価とより良い校正方法の検討に尽力する。

(別紙様式 4-2)

数値モデリングおよびデータ解析に基づく環電流が内部磁気圏ダイナミクスに果たす役割の研究
Study of role of the ring current in the inner magnetospheric dynamics based on numerical modeling and data analysis

関 華奈子、東京大学・大学院理学系研究科

研究計画の概要：

ジオスペース最大規模の変動現象である宇宙嵐(geomagnetic storm)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、磁気圏全域にダイナミックな変動が引き起こされる。環電流が内部磁気圏ダイナミクスに果たす役割は、磁気圏の形状そのものを変化させるだけでなく、磁気嵐時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、環電流によるULF励起機構等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。世界的なジオスペース環境変動の理解を目指した動きの中で、データ解析・モデリング・シミュレーションの観点からは、観測と数値モデリングとの連携が重要となってきた。

宇宙嵐時のジオスペースのダイナミックな変動機構を理解するために、本研究では、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) [Amano et al., 2011]を改良して用いる。この環電流モデルの特徴は、ULF波動を含む電磁場の変動と環電流イオンのダイナミクスを同時に物理方程式に基づき記述可能にした点である。本研究では、このモデルを基軸として、環電流によって引き起こされる磁場変形やPc5帯のULF波動の励起が放射線帯粒子加速に果たす役割を明らかにすることを目的としている。また、蓄積されつつある、あらせ衛星の観測データを用いて、環電流によるPc5波動の励起機構や励起条件、および、電離圏からの環電流へのプラズマ供給機構などを明らかにすることを目指している。

2023年度の主な成果：

本研究計画では、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GEMSIS-RC(環電流)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。今年度は、昨年度開発した磁気圏電離圏結合モデル(GEMSIS-RC & POT)とプラズマ圏低温プラズマモジュールを用いた研究を推進し、内部で駆動されるfundamental Pc4-5波動が、地球起源低エネルギーイオンプラズマのつくる急激な密度勾配にともなって、プラズマ圏流出プリュームおよびプラズマポーズ近傍の2箇所で局所的に励起されることを明らかにした。また、これらのPc4-5 ULF波動は、イオン位相空間密度の速度空間での正の勾配によるドリフト共鳴によって発生することが示された。

2つ目の課題は、電離圏から内部磁気圏へのイオン供給機構に関する、あらせ衛星と地上レーダー観測に基づいた研究である。今年度は、昨年度から行っている1996年から2015年にかけてのEISCATの長期観測データの統計解析結果の考察をさらに深め、低高度(≤ 350 km)のイオン上昇流は主に磁気嵐中の夜側と朝側に発生することが示された。また、この低高度イオン上昇流を引き起こすメカニズムは主に2つあり、そのうち摩擦加熱は、CME駆動磁気嵐時と北緯 75° 朝側以外でCIR磁気嵐時のイオン上昇流に寄与するのに対し、電子降り込みは主に朝側と夜側でのCIR磁気嵐中、および北緯 66° の夜側でのCME磁気嵐中のイオン上昇流に寄与していることが明らかとなった。

福井県三方五湖地域の遺跡から出土した土器付着物の年代決定
Determining the ages of deposits on pottery unearthed from archaeological sites
in Five Lakes of Mikata area, Japan

福井県年縞博物館 北川淳子・若狭三方縄文博物館 小島秀彰・名古屋大学 北川浩之

研究目的

本研究は、福井県三方五湖周辺の縄文時代遺跡の年代を放射性炭素年代測定で比定し、同一地域内の堆積物の環境復元の結果と年代対比を可能にするものである。近年、放射性炭素年代の較正曲線が精緻化し、高精度な年代に基づいた環境復元が可能となってきた。三方五湖地域では水月湖の年縞堆積物を中心に環境復元の研究が進んでいる。しかし、未だに多くの遺跡では型式学と層位学により年代が比定され、堆積物で明らかになった環境変化と遺跡から明らかにされた人々の活動状況の対比が十分に行われていない。三方五湖周辺の鳥浜貝塚においては、縄文時代草創期・早期から前期にかけての年代測定は多数実施されてきたが、その後の拠点遺跡となるユリ遺跡や北寺遺跡は、土器編年により時代が比定され、年代学的な曖昧さがのこされている。土器編年の手法を用いることで精度よく相対年代を知ることができるが、その年代は地域による違いがある可能性がある。三方五湖周辺での土器型式の年代を比定しておくことは、遺跡を中心とした環境への働きかけの時間軸を知ることにもつながる。そのためにも、多数の遺物の出土する鳥浜貝塚後の拠点遺跡の土器の年代を比定し、遺跡での活動時期を推定する。

材料と方法

三方五湖周辺の鳥浜貝塚以降の重要な縄文時代の拠点遺跡である北寺遺跡とユリ遺跡から出土し、若狭三方縄文博物館収蔵庫の保管資料を使用した。土器型式で縄文時代中期から晩期までと時期不明の縄文土器片を20点と弥生時代の土器片1点を選択した。その内、9点については土器の内面と外面から別々に年代測定試料を採取した。

試料は名古屋大学宇宙地球環境研究所において、土器片全体を蒸留水にひたして超音波洗浄をし、表面に二次的に付着した汚染物を除去した。その後、1N塩酸、約2.5%水酸化ナトリウム溶液、1N塩酸の順に化学的に洗浄(AAA処理)を行い、二次的に混入した可能性のある汚染物を除去した。その後、蒸留水で十分洗浄、乾燥した後、名古屋大学宇宙地球環境研究所の加速器分析装置で¹⁴C年代測定を行った。得られた放射性炭素年代測定の結果は、OxCal4.4 (Bronk Ramsey, 2009) を利用し、IntCal20 (Reimer et al., 2020) で暦年代に較正した。

結果

¹⁴C年代測定結果は表1に示す。

縄文土器の放射性炭素年代は約6000年前から約3000年前の結果が得られた。土器の内面から採取した試料の年代のほうが古く出る傾向が認められるが、例外的に外面のほうが年代の古い土器試料(CY R07)や、有意年代の違いがない土器試料(CKT13, CKT18)もあった。

考 察

当該地域は海に近く、海産物を煮炊きに利用していた可能性が考えられ、海洋リザーバー効果(Yoneda et al. 2001)によって内面が古く出ると予期をしていたが、必ずしもそうでなかった。土器試料の年代や土器も内・外の違いを評価するためには、同じ層準から出土した種子などの遺物も併せて推定していく必要があると考えられる。

遺跡での活動時期であるが、両遺跡とも、縄文時代前期の終わり、約5800年前ごろ、鳥浜貝塚が土砂災害で利用されなくなった頃から利用されている可能性が高い。縄文時代中期の土器はほぼ中期相当の年代が得られたが、後期の土器では、中期相当の年代が得られたものが複数みられた。若狭地方の土器の年代については、さらに精査が必要である。

引用文献

- Bronk Ramsey, C. (2009). Bayesian analysis of radiocarbon dates. *Radiocarbon*, 51(1), 337–360.
Reimer PJ, Bard E, Bayliss A, Beck JW, Blackwell PG, Bronk Ramsey C, Buck CE, Cheng H, Edwards RL, Friedrich M, Grootes PM, Guilderson TP, Haflidason H, Hajdas I, Hatté C, Heaton TJ, Hoffmann DL, Hogg AG, Hughen

KA, Kaiser KF, Kromer B, Manning SW, Niu M, Reimer RW, Richards DA, Scott EM, Southon JR, Staff RA, Turney CSM, van der Plicht J (2013) IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50,000 years cal BP. Radiocarbon 55 (4), 1869-1887.

Yoneda, M., Hirota, M., Uchida, M., Uzawa, K., Tanaka, A, Shibata, Y., Morita, M. (2001) Marine radiocarbon reservoir effect in the western north Pacific observed in archaeological fauna. Radiocarbon 43 (2A),465-471.

表 1 福井県若狭町北寺遺跡とユリ遺跡出土土器の放射性炭素年代測定結果

土器 試料	土器の 内外別	遺跡	土器型式	測定結果 ¹⁴ C BP	較正年代 cal BP	測定番号 NUTA2-
CYR16	外	ユリ	縄文中期前葉	4747±53	5576-5510 (79.1%), 5485-5479 (16.3%)	31061/31062
CYR16	内	ユリ	縄文中期前葉	5039±91	5986-5976 (0.7%), 5938-5595 (94.7%)	31083
CYR20	内	ユリ	縄文中期前葉	4939±67	5896-5804 (13.8%), 5798-5781(1.2%), 5770-5582 (79.8%), 5502-5492 (0.7%)	31094
CYR09	外	ユリ	縄文中期後葉	4344±67	5280-5169 (8.9%), 5136-5103 (2.0%), 5072-4823 (84.0%), 4747-4734 (0.6%)	31075
CYR07	外	ユリ	縄文後期初頭	4079±48	4816-4753 (16.5%), 4717-4666 (9.2%), 4657-4425 (69.8%)	31063/31064
CYR07	内	ユリ	縄文後期初頭	3979±47	4574-4292 (94.9%), 4267-4259 (0.5%)	31084/31085
CYR02	内	ユリ	縄文後期前葉	4313±66	5269-5188 (3.5%), 5124-5112 (0.4%), 5055-4800 (84.4%), 4760-4696 (5.4%), 4677-4647 (1.7%)	31093
CYR01	外	ユリ	縄文後期末葉	3460±79	3958-3954 (0.2%), 3921-3549 (91.7%), 3541- 3492 (3.5%)	31057
CYR29	外	ユリ	弥生中期	1897±70	1993-1695 (91.5%), 1665-1695 (3.9%)	31073
CYR32	外	ユリ	縄文晩期	2911±65	3324-3311 (0.3%), 3236-2868 (95.2%)	31059
CYR32	内	ユリ	縄文晩期	3522±103	4091-3559 (94.5%), 3521-3511 (0.7%), 3504-3496 (0.3%)	31081
CYR08	外	ユリ	不明(縄文)	3774±69	4405-4367 (3.7%), 4360-3976 (91.2%), 3942-3935 (0.5%)	31058
CYR08	内	ユリ	不明(縄文)	3847±66	4424-4083 (94.1%), 4033-4008 (1.4%)	31080
CYR15	外	ユリ	不明(縄文)	3957±76	4790-4765 (1.2%), 4620-4153 (94.2%)	31060
CYR15	内	ユリ	不明(縄文)	4195±70	4865-4526 (95.4%)	31082
CKT10	内	北寺	縄文中期前葉	5194±68	6185-6140 (7.5%), 6123-5860 (77.4%), 5828-5753 (10.6%)	31079
CKT05	外	北寺	縄文中期末葉	4094±68	4825-4426 (95.4%)	31068
CKT05	内	北寺	縄文中期末葉	4469±68	5309-4956 (87.6%), 4940-4879 (7.9%)	31090
CKT13	外	北寺	縄文中期末葉	4373±77	5286-5161 (17.7%), 5143-4834 (77.8%)	31069
CKT13	内	北寺	縄文中期末葉	4393±67	5284-5163 (19.5%), 5141-5097 (5.6%), 5090-4846 (70.3%)	31091
CKT27	外	北寺	縄文中期末葉	3580±87	4148-4117 (1.8%), 4099-3682 (91.5%), 3671- 3640 (2.2%)	31070
CKT03	外	北寺	縄文中期	4206±69	4871-4466 (95.4%)	31072
CKT23	内	北寺	縄文後期初頭	4205±47	4855-4612 (92.3%), 4604-4581 (3.2%)	31095/31096
CKT18	外	北寺	縄文後期前葉	3885±70	519-4475 (4.3%), 4448-4144 (88.2%), 4126-4094 (2.9%)	31067
CKT18	内	北寺	縄文後期前葉	3885±68	4517-4479 (3.8%), 4446-4146 (89.2%), 4123-4096 (2.5%)	31087
CKT28	内	北寺	縄文後期中葉	3835±95	4519-4472 (2.9%), 4449-3976 (92.3%), 3941-3936 (0.2%)	31086
CKT24	外	北寺	縄文後期中葉	3590±86	4150-4112 (2.5%), 4102-3686 (91.6%), 3666-3643 (1.4%)	31071
CKT24	内	北寺	縄文後期中葉	3745±66	4352-4331 (1.3%), 4298-3901 (94.2%)	31092
CKT14	外	北寺	縄文後期中葉	3690±66	4235-4198 (3.9%), 4185-3844 (91.6%)	31074
CKT21	外	北寺	縄文後期中葉	3650±72	4228-4204 (1.3%), 4158-3824 (90.9%), 3795-3768 (1.8%), 3750-3727 (1.3%)	31078

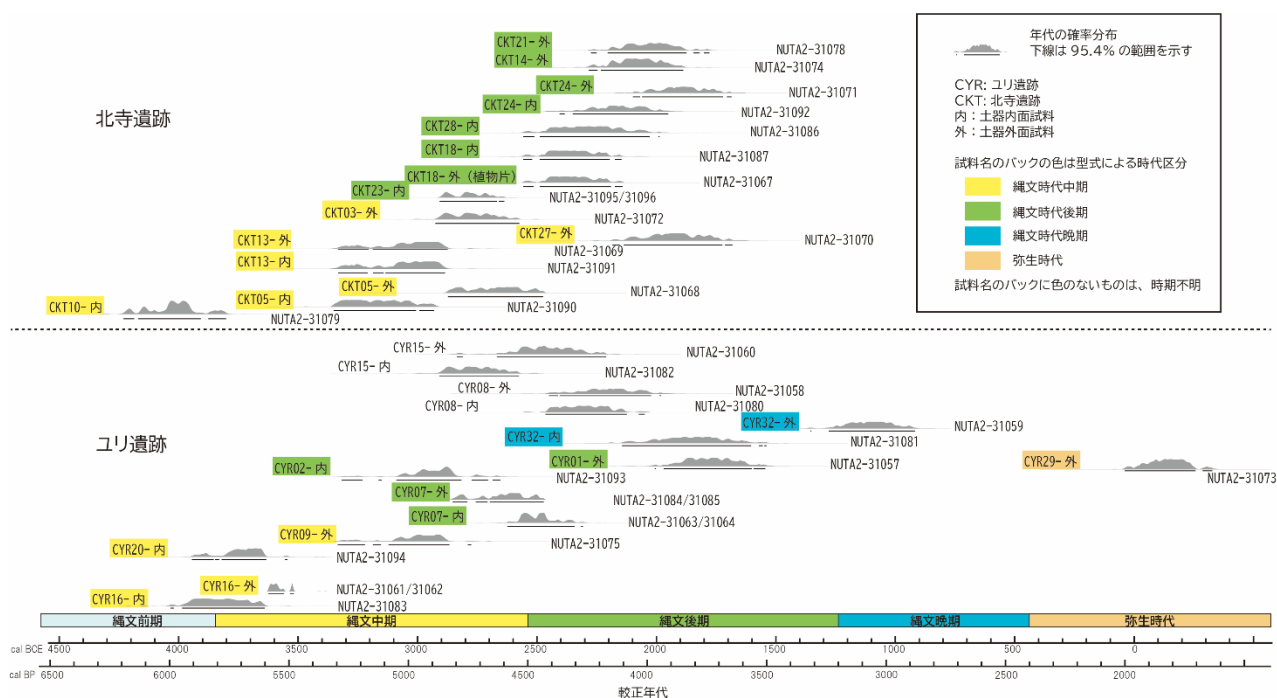


図 1 福井県若狭町北寺遺跡とユリ遺跡出土土器の放射性炭素年代測定結果

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、東京大学理学系研究科

本研究では、MMS衛星のデータ解析を通じて、衝撃波近傍における高周波ホイッスラー波動の統計的性質を調べた。その結果、衝撃波遷移層におけるホイッスラー波動の強度は、Alfvenマッハ数の増加とともに増大する傾向が見られた。特に、de Hoffmann-Teller系における Alfvenマッハ数との相関が顕著であった。このことは、衝撃波における波動の励起が、衝撃波の強さや伝播速度に大きく依存していることを示唆している。

また、本研究では、確率的衝撃波ドリフト加速 (SSDA) 理論との比較を行った。その結果、de Hoffmann-Teller系での Alfvenマッハ数が30-60を超えると、ホイッスラー波動の強度がSSDAによる電子加速に必要な閾値を上回ることが明らかになった。この結果は、地球のバウショックにおける高エネルギー電子のスペクトル指数に関する先行研究の結果とよく一致しており、SSDAが電子加速の主要なメカニズムであることを支持するものである。

さらに、本研究ではホイッスラー波動の励起機構についても議論を行った。その結果、高ベータのプラズマ環境がホイッスラー波の励起に適している可能性が示唆された。これは、銀河団衝撃波や太陽フレアの終端衝撃波といった天体物理学的環境における電子加速を考える上で重要な示唆を与えるものである。高ベータプラズマ中では、温度異方性に起因する自由エネルギーが大きくなるため、ホイッスラー波の励起が起りやすくなると考えられる。ただし、この点についてはさらなる理論的・観測的な研究が必要である。

以上の成果から、SSDAは地球のバウショックにおける電子加速の主要なメカニズムであり、高マッハ数の天体衝撃波における電子の注入過程としても重要な役割を果たしていると考えられる。ただし、SSDAの開始には高周波ホイッスラー波動が重要であるが、より高エネルギーの電子の散乱・加速には低周波の揺動が必要となる。また、熱的なエネルギー以下の電子の加熱には静電的な波動が支配的である可能性がある。したがって、衝撃波における電子加速の包括的な理解のためには、静電的・電磁的な波動の両方について、幅広い周波数帯での活動を調べる必要がある不可欠である。

今後は、本研究で得られた知見を基に、磁気圏内の様々な領域で見られる波動現象との比較検討を進めていく予定である。特に、磁気シースや磁気圏界面における波動の励起・伝播過程や、それに伴う粒子の散乱・加熱・加速過程について、詳細な解析を行いたい。また、本研究の成果は、数値シミュレーションによる理論モデルの構築にも活用していく予定である。シミュレーションでは、衝撃波や磁気シースのような非一様な環境における波動の励起・伝播過程を再現し、観測との比較を通じてモデルの検証を行う。これらの研究を通じて、非線形プラズマ波動に伴う粒子加熱・加速の物理機構の理解を深めていきたい。

査読付き論文

- [1] Lindberg, M., Vaivads, A., Amano, T., Raptis, S., & Joshi, S. (2024). Electron Acceleration at Earth's Bow Shock Due to Stochastic Shock Drift Acceleration. *Geophys. Res. Lett.*, 51(5), e2023GL106612. <https://doi.org/10.1029/2023GL106612>

国際会議

- [2] Amano, T. et al., Mach number dependence on the shock dynamics and non-thermal electron acceleration efficiency, 65th Annual Meeting of the APS-DPP, Denver, USA, Nov. 2023
- [3] Amano, T. et al., Statistical Analysis of Whistler Wave Intensity at Earth's Bow Shock, AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, Dec. 2023

(別紙様式04-2)

GSE座標系における宇宙線強度分布解析によるIMF磁気中性面のトラン
ジェントな構造変動の推定

Estimating transient structural fluctuations of the IMF
magnetic Neutral Sheet by cosmic ray intensity distribution analysis in the GSE
coordinate system

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、[Phys. Rev. D 98, 022004 (2018)] で公表してきました。また、この解析の過程で、IMFセクターの極性が変化する境界付近で太陽風速が減少することが明らかになり、これを学会講演等で公表してきました。この事実は、宇宙線強度と太陽風速の関係をより広い視点で解析すると、IMF極性を分ける磁気中性面（ニュートラルシート）の空間構造を観測的に示すことが可能であることを示唆している。

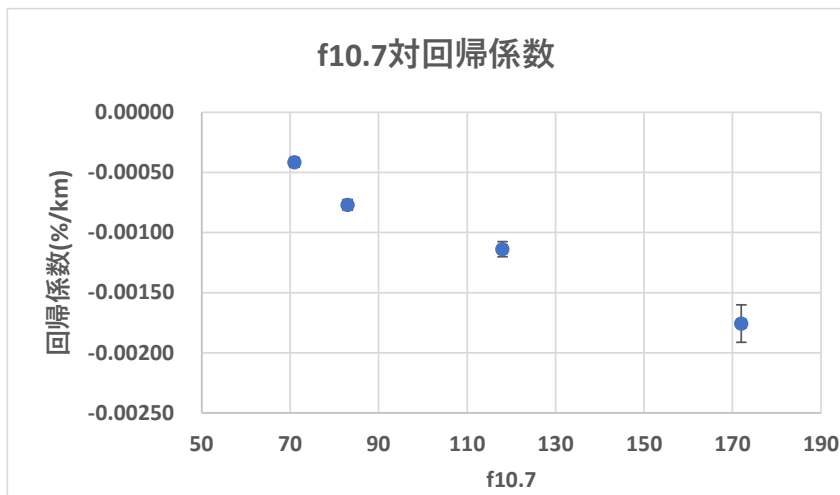
結果

IMF磁気中性面は、太陽面におけるHCS（カレントシート）が太陽風によって惑星間空間に引き出されることで形成されていると考えられます。このため、IMF磁気中性面の波状構造は、HCSの太陽面上での傾き角（チルトアングル）によって明確になると考えられます。この傾き角は太陽活動に関連した変化を示しています。そこで、宇宙線強度と太陽風速の負の相関関係について、太陽活動をf10.7の値により4つの期間に分けて負相関とf10.7の関連度を調査し、[PHYSICAL REVIEW D 109, 063011 (2024)] で論文として公表した。

まとめ

今後は、負相関関係とHCSの傾き角との関連付けを試みると同時に、今後より高エネルギーの宇宙線観測による宇宙線を太陽が遮蔽する太陽の影等の結果と比較してIMF磁気中性面の空間的形狀を明らかにしたい。

以下に、4期間に分けたf10.7対太陽風速・宇宙線強度回帰係数のグラフを示します。



(別紙様式04-2)

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

土屋史紀、東北大学・大学院理学研究科

低周波(300MHz帯)での超長基線電波干渉計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研究目的とする。大口径の大型電波干渉計Square Kilometre Array (SKA) の建設が開始され、2020年代後半より低周波数帯の電波観測を通じた天文学、惑星科学研究の大きな進展が国際的に見込まれる。本研究では、SKAと日本国内を含む他局との低周波超長基線干渉計(VLBI)観測を通して、系外惑星系の恒星、惑星の検出を視野に入れた研究開発を進める上で課題となる地球電離圏での群遅延の定量評価と補正方法の開発を行う。

名古屋大学の多地点IPS太陽風観測システムと東北大学の飯舘惑星電波望遠鏡(IPRT)の間でVLBI実験を実施するために、2023年度は、名古屋大学の多地点IPS太陽風観測システムの豊川局にIPRTと同スペックのVLBI受信機の設置を2024/1/10-11に実施した。図1に設置した受信システムの写真を図1に、受信信号のスペクトルを図2に示す。受信帯域内にRFIはなく、受信状態が良好であることを確認した

観測は、設置したPCを東北大からリモート制御することにより実施するが、PCと豊川局のルータ間の通信に不具合がある。2024年度にこの問題を解消した上でIPRTとのVLBI実験を行い、相関フリンジの取得を目指す。観測対象はIPS観測で使用されているコンパクトな電波源0531+194を想定している。2つの電波望遠鏡で観測された信号の相関フリンジから電離圏由来の時間遅延を測定し、GNSS-TECのデータを活用して検証する予定である。



図1:設置したVLBI用ベースバンド受信機(左上赤枠)とPC(右側赤枠)

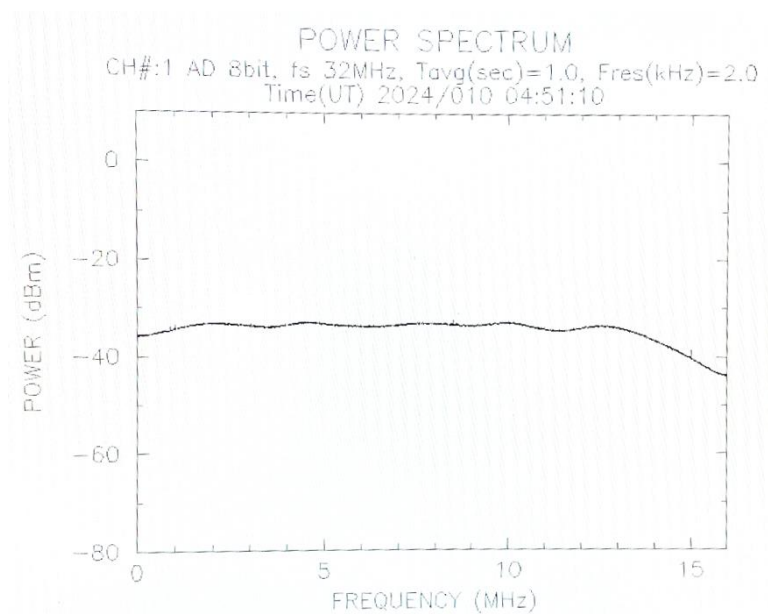


図2: 受信信号のスペクトル

成果発表

- Kita, H., , H. Misawa, F. Tsuchiya, T. Kondo, K. Takefuji, Low-frequency VLBI observation with Iitate and Zao observatory, URSI GASS 2023, Sapporo, 2023/8/21
- 北元, 三澤浩昭, 土屋史紀, 近藤哲朗, 岳藤一宏, 飯舘・蔵王観測所を用いた低周波VLBI実験, 惑星圏研究会2024, 仙台, 2024/2/20
- 北元, 三澤浩昭, 土屋史紀, 近藤哲朗, 岳藤一宏, 飯舘・蔵王観測所を用いた低周波VLBI実験, 地球電磁気・地球惑星圏学会2023年秋季年会, 2023/9/25
- 岳藤一宏, 日本における低周波VLBIの進捗について, 2023年度 VLBI懇談会シンポジウム, 新潟, 2023/12/15
- 岳藤一宏, 徳丸宗利, 三澤浩昭, 土屋史紀, 北元, 日本国内における327MHz 帯VLBI について, 日本天文学会2023年秋季年会, 名古屋, 2023/9/20
- 土屋史紀, 三澤浩昭, 北元, 安田陸人, 桑山陽次, 木村智樹, 藤井友香, 小林秀行, GMRTによる連星矮星2MJ0746+20観測計画, 2023年度 VLBI懇談会シンポジウム, 新潟, 2023/12/15
- 小林秀行, P-band VLBIの提案, 2023年度 VLBI懇談会シンポジウム, 新潟, 2023/12/15
- 桑山陽次, 三澤浩昭, 土屋史紀, 北元, 氏原秀樹, メートル波太陽・惑星電波観測用広帯域フィードシステムの開発, 2023年度 VLBI懇談会シンポジウム, 新潟, 2023/12/15
- 桑山陽次, 三澤浩昭, 土屋史紀, 北元, 氏原秀樹, 太陽・惑星電波観測用広帯域フィードシステムの開発, 惑星圏研究会2024, 仙台, 2024/2/20
- 桑山陽次, 三澤浩昭, 土屋史紀, 北元, 氏原秀樹, メートル波太陽・惑星電波観測用広帯域フィードシステムの開発, 日本天文学会2023年秋季年会, 名古屋, 2023/9/20
- 桑山陽次, 三澤浩昭, 土屋史紀, 北元, 氏原秀樹, メートル波太陽・惑星電波観測用広帯域フィードシステムの開発-II, 日本天文学会2024年春季年会, 駒場 (オンライン), 2024/3/15
- 三澤浩昭, 土屋史紀, 熊本篤志, 北元 小林秀行, 寺澤敏夫, 岳藤一宏, 木坂将大, 低周波数電波観測による太陽～恒星・惑星科学, 日本天文学会2023年秋季年会, 名古屋, 2023/9/20
- 三澤浩昭, 土屋史紀, 北元, 桑山陽次, 小林秀行, 低周波(系外)惑星電波観測に向けた準備状況, 惑星圏研究会2024, 仙台, 2024/2/20

(別紙様式04-2)

ドローンと小型センサを利用した 大気微量気体とエアロゾルの3次元計測

Three Dimensional Measurements of Atmospheric Trace Gas and Aerosol
using UAV and Compact Sensors

眞部 広紀、佐世保工業高等専門学校・基幹教育科

【本研究の目的と方法】前年度に続き、ドローン（図1左上、共同利用装置）による写真測量、小型低重量 PM_{2.5} 測定装置の性能検証を行った。さらに、IR カメラを搭載したドローンによる近赤外線撮影を行った。

【1：ドローンによる地形計測実験】

本研究では、複数機ドローンによる空中 PM_{2.5} 観測の基盤データとして、地形効果の詳細な観測・検証を目指す。第一段階として、自律飛行中に一定の対地高度をドローンに維持させるため、当該地形の3次元標高データを取得する。2019年では山口県「秋吉台」の南側エリアでドローン写真測量実験を行い、3次元モデルを作成したが、2023年度は「秋吉台」の北側エリアでドローン写真測量を行った（図1）。「秋吉台」の山焼きから1か月後（地表面が草木によって覆われていない時期）で撮影を行った。



図1. 「秋吉台」北部のドローン写真測量

上左：使用ドローン、 上右：北側エリア撮影のための東 HP 下：北側エリア撮影のための北 HP

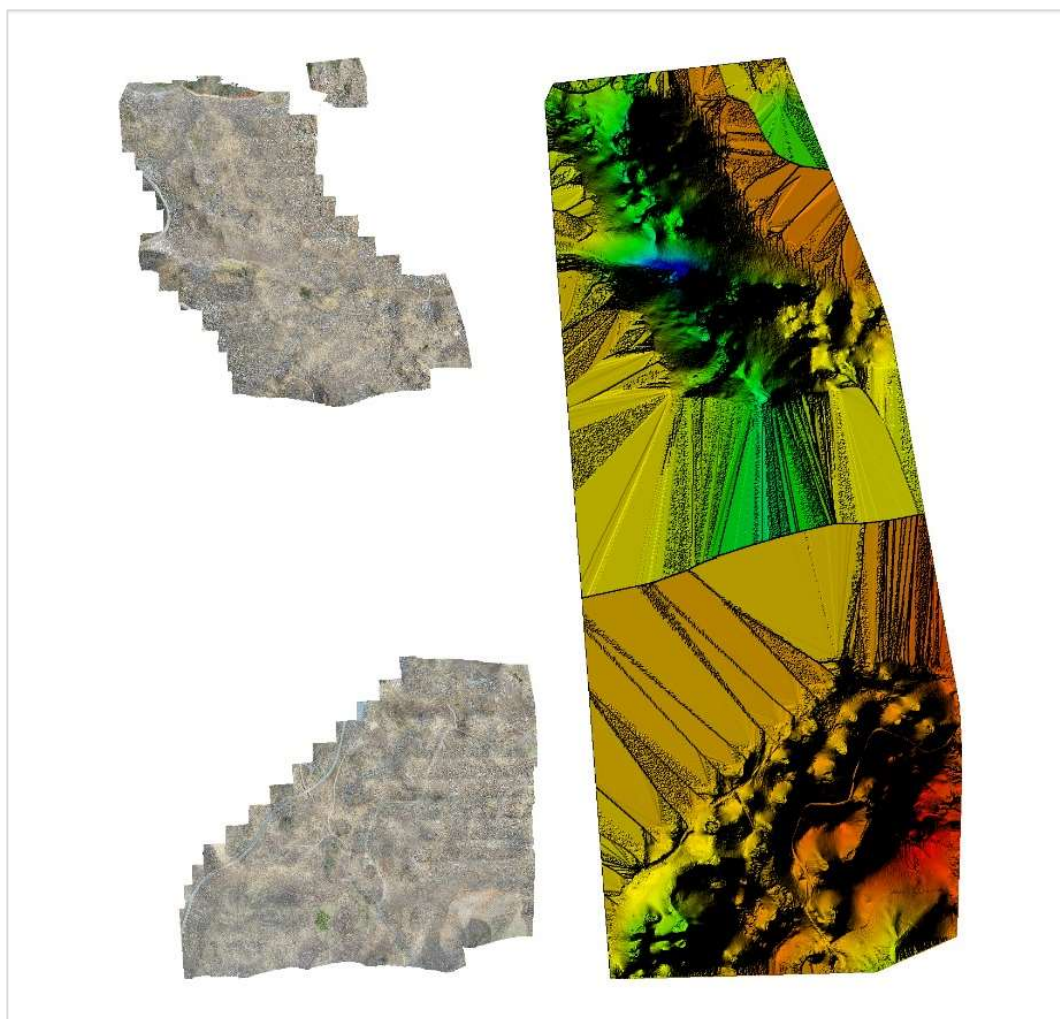


図 2. 「秋吉台」北部の3次元モデル（左側：スクリーンショット、右側：標高段彩表示）

【2：PM_{2.5}観測実験】ドローン搭載型測定システムの筐体はペットボトルを使用していたが、2023年度はセンサを露出させた状態（籠の中に回路を置く）で使用した。



図 3. 携行型 PM_{2.5} 観測装置

【3：ドローン IR カメラ撮影】通常の光学カメラ画像と近赤外線カメラ画像を同時撮影できる機種のドローンを使用した（図 4。）



図 4. IR カメラ搭載ドローン（Robotix Japan 社製）

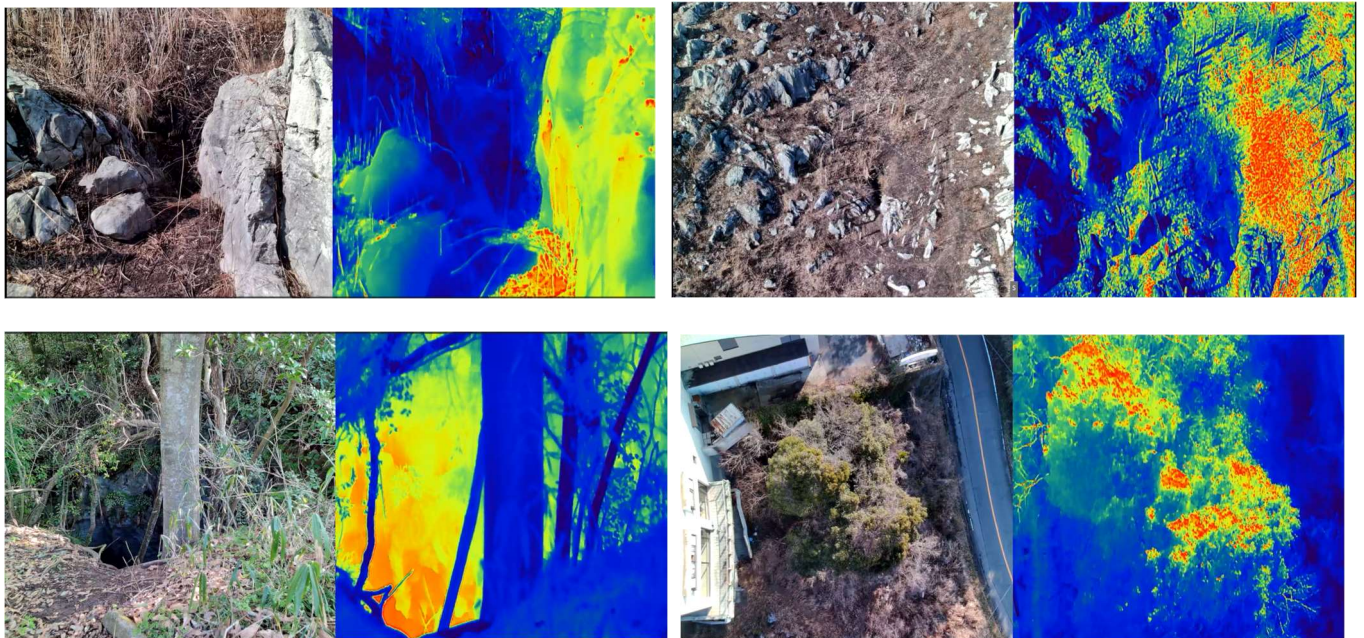


図 5. 可視光（通常のカメラ）撮影画像と近赤外線（IR カメラ）撮影画像

上：秋吉台「恵藤穴」 上左（手持ちカメラ撮影）、上右（ドローン搭載カメラ撮影）
下：秋吉台「無名穴」 上左（手持ちカメラ撮影）、上右（ドローン搭載カメラ撮影）

【まとめと課題】

- [1 の実験]撮影に使用した小型ドローンの性能限界と法規による制約（目視操縦範囲に限定）により、予定した北エリア全域を撮影・測量することができなかった。
→今後、共同研究により目視外飛行可能なドローンの開発を行い、北エリア全域の測量を行う。
- [2 の実験]回路の不具合により精度を上げたときの観測は出来なかった。
- [3 の実験]ドローン搭載 IR カメラの撮影が有効な調査手法であることが確認できた。
→今後、共同研究によりマルチスペクトルカメラ搭載ドローンを開発して、マルチガスのイメージ観測を行う。[2 の実験]の装置は比較対象用として使用する。

【参考文献（URL）】

- 1) 眞部広紀, 岡本渉, 久間英樹, 堀井樹, 堀江潔
火星の縦孔への UAV 接近飛行を模擬する UZUME 実験サイトの検討,
佐世保工業高等専門学校研究報告第 60 号 pp52-59 (2024 年 01 月)
- 2) 眞部広紀, 堀井樹, 兵藤悠二, 岡本渉, 松広航, NuNuWin, 根本雅樹, 春山純一
UZUME 実験サイト群における溶岩洞窟,
佐世保工業高等専門学校研究報告第 60 号 pp60-70 (2024 年 01 月)
- 3) 眞部広紀, 堀井樹, 岡本渉, 松広航, NuNuWin, 根本雅樹, 春山純一
UZUME 実験サイト群から構成された縦孔-地下空洞の多段階模擬計測探査プログラム,
佐世保工業高等専門学校研究報告第 60 号 pp71-77 (2024 年 01 月)
- 4) 眞部広紀, 堀井樹, 岡本渉, 松広航, NuNuWin, 根本雅樹, 春山純一
富士宮の溶岩洞窟「万野風穴」における UZUME 計測探査の模擬実験,
佐世保工業高等専門学校研究報告第 60 号 pp78-82 (2024 年 01 月)

(別紙様式04-2)

四国中山間地域から切り拓く広帯域低周波電波望遠鏡:木星電波観測
Wideband low-frequency radio telescope in Shikoku: Jupiter radio observations

今井雅文、新居浜工業高等専門学校・電気情報工学科

1. 研究目的

木星からのデカメートル波帯における自然電波放射である木星電波は、6億km離れた地球でも受信されるほど強力で、その放射機構の解明は惑星磁気圏で発生するエネルギーの物理過程の核心を理解する上で極めて重要な情報である。木星電波は米国・LWAやヨーロッパ・LOFARのような広帯域低周波電波望遠鏡でプロポーザル形式での観測が行われている。一方、日本のようなアジア地域には狭帯域低周波電波望遠鏡でしか木星電波観測は行われず、広帯域低周波電波望遠鏡は存在していない。本研究では、四国中山間地域に新たな広帯域低周波電波望遠鏡を立ち上げ、地上多地点での電波干渉計を用いて、木星電波のビーム幅を測定し、これらの新たな情報をもとに木星電波放射機構解明に取り組む。また、2021年11月にJAXAのイプシロンロケット5号機で打ち上げられ、現在地球を周回している国立高専初の木星電波観測技術実証衛星KOSEN-1(2Uキューブサット)との連携観測も試みる。令和5年度は広帯域低周波電波望遠鏡の電波環境と設置を行った。

2. 研究方法

図1のような四国中山間地域である高知県吾川郡仁淀川町に新たな広帯域低周波電波望遠鏡を設置するため、電波受信領域の可視化を行った。具体的には、KOSEN-1衛星の430MHzのCW電波を用いて、全天球マップを作成する⁽¹⁾。また、令和3年度から蝶ネクタイ型アンテナ3台を設置しているが、令和5年度は8台まで拡張して電波干渉計を建設する。



図1 高知県吾川郡仁淀川町に設置する観測サイト

3. 研究結果と考察

KOSEN-1衛星から常に430MHz帯のCW電波が送信されており、2022年12月から2023年8月まで観測サイトに設置したQFHアンテナで受信した結果を図2に示す。上下が北南、右左が東西に対応している。また、紫色の領域が電波を受信した時のKOSEN-1衛星の位置であり、オレンジ色の点はCW電波を受信できた時のKOSEN-1衛星の位置をそれぞれ示している。図2より、観測サイトは西側に電波的に開けた観測を行うことができることがわかった。また、図3のように地元の協力者の全面協力のもと、蝶ネクタイ型アンテナ8台の設置やケーブルの配線は完了している。

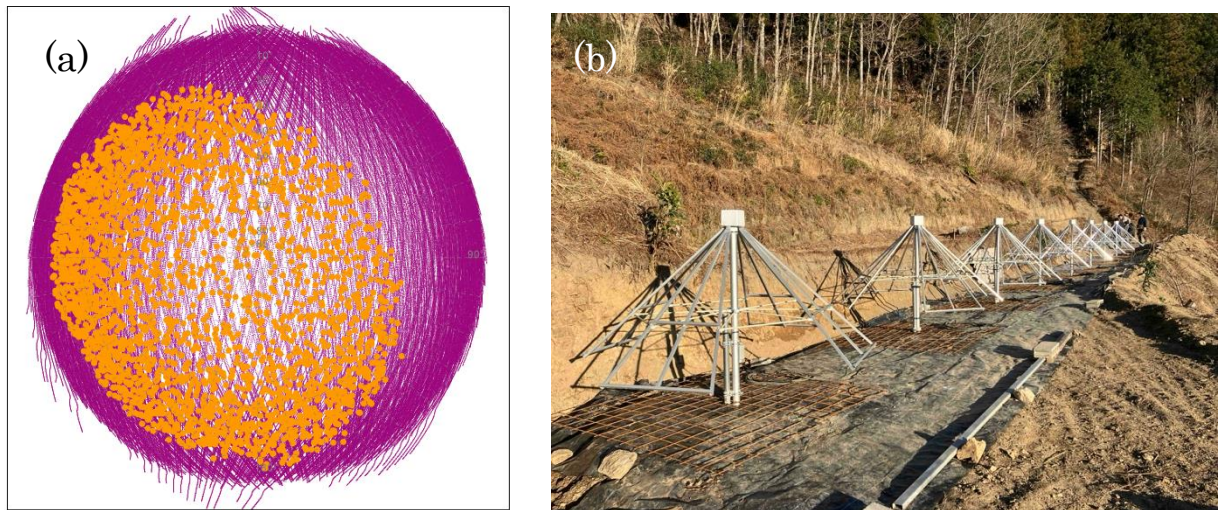


図2 (a) 高知県吾川郡仁淀川町から見た430MHz帯の全天球マップと (b) 蝶ネクタイ型アンテナ8台を設置した様子

4. まとめ

本研究では、KOSEN-1衛星の430MHz帯CW波を受信することで、全方向の電波環境マップも作成し、観測可能が西側に開けていることを特定することができた。また、米国・LWAで使用されている蝶ネクタイ型アンテナを四国中山間地域に設置し、新たな広帯域低周波電波望遠鏡を立ち上げた。蝶ネクタイ型アンテナ1台では広帯域周波数(5-90MHz)の範囲で銀河背景雑音から5-14dBの感度があり、偏波成分も分離可能である。令和5年度は8台の蝶ネクタイ型アンテナを設置することができた。また、名古屋大学で開発された汎用フェーズドアレイ装置を用いて、木星電波を含む自然電波の観測を予定していたが、研究開発に時間が要したため、今年度の実施は難しくなった。その代わりに、現在、8チャンネルの電波合成器を2台用いてアナログビームを生成して、低周波電波干渉計の初期観測を開始している。

引用文献

- (1) Imai, M., K. Imai, N. Hirakoso, M. Nishio, T. Takada, K. Kitamura, J. Nakaya, Y. Murakami, M. Tokumitsu, K. Fukai, and KOSEN-1 team (2023), One-Year Operation of Technology Demonstration CubeSat KOSEN-1 (Oral), Join Symposium: 34th ISTS & 12th NSAT, Kurume, Japan, June 3-9.

成果発表
なし

空撮及び林内撮影画像解析による森林空間3次元モニタリング

3-D monitoring of forest space by aerial photography and analysis of images taken in the forest

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

近年、UAV（無人航空機、通称ドローン）とSfM（Structure from Motion：複数枚の画像から対象の3次元形状を復元する技術）を併用した測量技術（以下UAV-SfM測量とする）を利用した森林計測技術の開発が進められてきた。しかし、森林を構成する樹木は、人工林においてさえ幹が完全な鉛直方向に成立しているとは限らず、根元位置と上空から視認できる梢端位置が一致しない場合も多い。そのため、森林内と上空からの3次元計測データの連結を考えた場合、両者を少なくとも個体レベルで結合する技術が不可欠である。以上のことから、本研究では個体レベルでの空撮及び林内計測データの連結技術について検討を行った。

研究方法

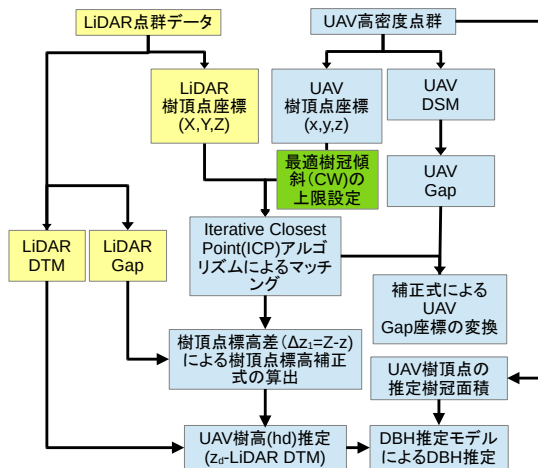


図1. 開発した UAV 樹頂点補正手法

三重県内の6地区に設置したプロットを対象とした。プロットを含む森林において2019年度～2023年度にかけてUAV（Marvic2 Pro、DJI社製）により得られた空撮画像を用いた。空撮画像から、SfMソフトウェアMetashape Professional ver. 1.8（Agisoft社製）により、空撮範囲内の3次元点群を生成し、点群解析システムにより3次元点群から樹頂点（梢端位置）を抽出した。次に、同地域の航空レーザ測量成果を利用し、新たに開発した樹頂点位置補正手法（図1）によりUAV点群から抽出した樹頂点の位置補正を行い、現地調査結果との比較を行った。なお、3次元点群の生成においては、各撮影時の画像からSfM処理により点群を生成する方法（従来法）に加え、近年複数時期の空撮画像をまとめてアラインメントを行い相対位置統合を行うco-alignment手法（CA手法）とCA手法により立木検出率(%)及び樹高・DBHの平均誤差(ME)・RMSEに差が生じるかについて検討を行った。

結果

表1に示したように、立木検出率(%)の分散及び樹高の各項目については、CA処理の有無で有意な差が認められたが($p < 0.05$)、DBHに関しては何れの項目も有意な差は認められなかった($p > 0.05$)。DBHはDBH推定式による推定値であるため、推定式自体の誤差も含まれるが、樹高については高密度点群から算出された計測値であるため、CA処理は一定の有効性を持つものと考えられた。

表1. 従来法（CA処理無）とCA処理による立木検出率(%)及び樹高・DBHのME・RMSEの比較結果

CA処理	立木検出率(%)		樹高(m)				DBH(cm)				N
			ME		RMSE		ME		RMSE		
	平均	分散	平均	分散	平均	分散	平均	分散	平均	分散	
無	96.68099	28.26211	0.49830	1.18285	1.29536	0.60515	1.17263	6.17712	4.60932	2.39839	733
有	96.89942	23.55427	0.34461	1.01175	1.21669	0.46559	1.33078	5.82049	4.54477	2.40590	733
P値	n.s.	p < 0.05	p < 0.05	p < 0.05	p < 0.01	p < 0.01	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	

成果発表（学会発表）

山本一清. 2023. GIS、リモセン技術と森林計画学の振り返りと今後の方向性 森林GISフォーラム30

周年記念大会 静岡県男女共同参画センター「あざれあ」 2023/10/10

大槻峻介・山本一清. 2024. 植栽地時系列比較のためのUAV 空撮画像の相対的位置統合 第135回日本森林学会大会 東京農業大学 2024/3/8

成果発表（論文：査読有）

大槻峻介, 山本一清. 2024. 深層学習を用いたUAV空撮画像からの植栽木自動確認手法の開発—撮影時期ごとの検出精度の検討—. 日本森林学会誌106(2). 印刷中

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

寺本万里子、九州工業大学・工学研究院

【研究目的】

地磁気に観測される地磁気脈動と呼ばれる低周波波動は、放射線帯電子の加速や高周波波動の励起に関わる現象であることが知られている。地磁気脈動の空間構造を理解することは、放射線帯電子の加速領域、高周波波動の励起領域などの理解につながることから、重要な研究課題であると言える。地磁気脈動の研究においては、人工衛星によって観測された電場・磁場データを用い、地磁気脈動のモード決定するという方法がある。しかし、衛星観測は一点観測であることから衛星観測のみを用いて、地磁気脈動の空間構造を特定することは難しい。一方、SuperDARNレーダーは電離圏で引き起こされた地磁気脈動を、二次元的に捉えることができるという利点があるため、地磁気脈動の空間構造を理解する上で重要な観測であると言える。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】

今年度は2022年9月から12月にかけて実施したあらせ-SuperDARNのキャンペーン観測期間を中心にあらせのデータ解析を実施した。あらせ衛星およびSuperDARNの観測データは名古屋大学宇宙地球環境研究所統合データサイエンスセンターが提供しているCDFファイルを用い、解析にはサイエンスセンターが提供しているツールを用いた。また解析は研究協力者と分担して行い、研究代表者は主に衛星のデータの解析を担当した。

【研究結果】

北米SuperDARNが夕方側に位置しているときに、電離圏エコーに見られるRange-Timeダイアグラム(RTダイアグラム)に特徴的な縞模様が見られるイベントについて解析を行った。SuperDARNのRTダイアグラムに縞模様は、地磁気脈動によって作られる電離圏の電場の変化を反映していることが知られている[e.g., Ponomarenko et al., 2003]。Footprintが北米SuperDARNに位置するあらせ衛星の電場・磁場観測から、内部磁気圏にはtransverseな地磁気脈動が発生していることがわかった。またあらせ衛星のfootprintに位置する地上磁場の特定の緯度の地磁気ステーションでは、あらせ衛星で観測された地磁気脈動が観測されていた。あらせ衛星および、地上で観測された地磁気脈動は高い相関を示していた。SuperDARNの解析によって、この地磁気脈動は東向きに伝播していること、この地磁気脈動の経度方向の波数は10程度と小さいことがわかった。

【考察】

小さな波数を持つ地磁気脈動は、主に磁気圏外に駆動源があり、太陽風の動圧変化[Eriksson et al., 2006]や高速太陽風により引き起こされるケルビンヘルムホルツ不安定性[Rae et al., 2005]などが候補として挙げられる。あらせ衛星に近い経度に位置し太陽風にいるMMS衛星の観測を確認したところ、イベント時に太陽風動圧の変化が観測されていた。よって今回観測した地磁気脈動は太陽風動圧の変化によって引き起こされる可能性がある。

【今後の展望】

今回の研究で示したように、SuperDARNは電離圏の広範囲をカバーしており、地磁気脈動の伝播方向や波数などの波動の性質を特定する上で大変有効である。あらせ-SuperDARNの共役観測は2023年も実施している。2023年は2022年に比べ地磁気活動度がより高く、今回研究した地磁気脈動とは異なる性質を持つ地磁気脈動を観測している可能性がある。今回の解析を踏まえ、さらに別の地磁気イベントを解析する予定である。

【参考文献】

Ponomarenko, P. V., Menk, F. W., and Waters, C. L., (2003) Visualization of ULF waves in

SuperDARN data, *Geophys. Res. Lett.*, 30,
Rae, I. J., Donovan, E. F., Mann, I. R., Fenrich F. R., Watt C. E. J., Milling D. K., et
al. (2005) Evaluation and Characteristics of Global Pc5 ULF Waves during a High Solar Wind
Speed Interval, *J. Geophys Res.*, 110.
Eriksson, P. T. I., Blomberg, L. G., Shaefer, S., and Glassmeier, K. -H., (2006) On the
excitation of ULF waves by solar wind pressure enhancements, *Ann. Geophys.*, 24., 3161-3172.

(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准教授らは、これまで台風のような強風・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、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し、渦相関法によって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て実施した南極観測船「しらせ」の第64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甲板の中央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26cm・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甲板中央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64次南極地域観測の航海期間中における、大気乱流によって生じる気温、水蒸気とCO₂の密度、1~3 μm の粒径区分における粒子数密度の変動の観測例を示す。気温変動は最大0.6°C程度の振幅、水蒸気密度は最大0.5g/m³程度の振幅で気温変動と正の相関がみられた。CO₂密度は最大0.02mmol/m³程度の振幅で気温や水蒸気密度とは負の相関がみられた。これらから顕熱と潜熱は海面から大気へ放出、CO₂は大気から海面へ吸収されていることが分かる。また粒子数変動は最大60個程度の振幅、気温や水蒸気密度とは正の相関がみられ、粒子が海面から大気へ放出されている様子が観測された。粒子数濃度の絶対値と変動ともに沿岸域における観測値よりも小さいが、他の物理量と相似変動がみられた。また海塩粒子が卓越した沿岸域同様に1~3 μm の粒径区分の乱流変動がみられ、本観測においても放出された海塩粒子を捉えているものと思われる。

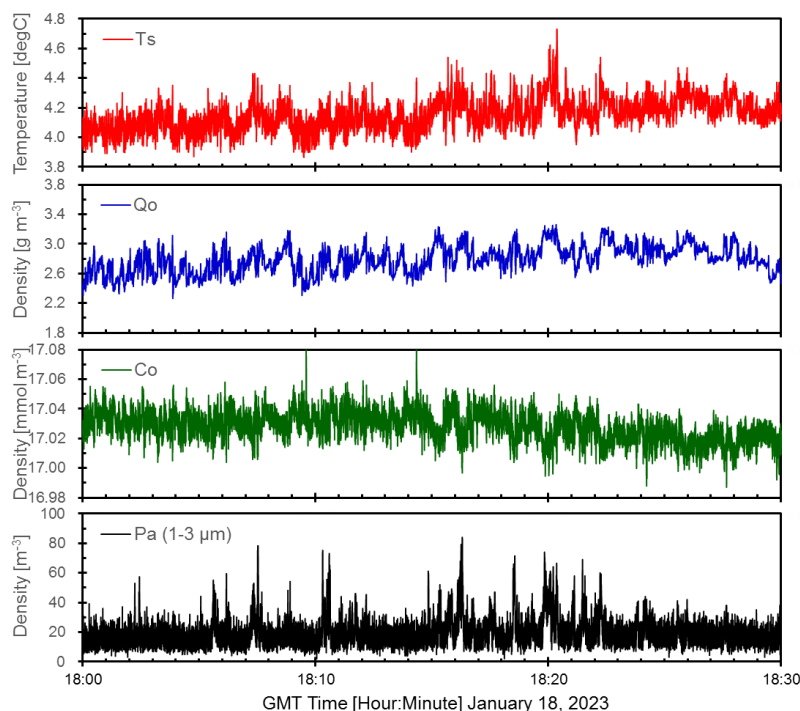


図2 大気乱流による気温 (Ts) ・水蒸気 (Qo) とCO₂ (Co) の密度
・1~3 μm の粒径区分における粒子数密度 (Pa) の乱流変動の観測例

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た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実施した。航行する船舶上での観測では、これまでにオープンパス型CO₂/H₂Oガス分析計で計測されるCO₂とH₂O密度の計測値が船舶動揺の影響を受けることで、算出されるフラックス値に誤差を生じさせることが分かっているが、波しぶき計による粒子数密度の計測値は生の乱流変動値からみられていないことも確認できた。また研究代表者は来年度の第64次南極地域観測に夏隊員としてしらせに乗船し観測を実施する予定である。

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, 2024 (revised)
- 相木秀則, 近藤文義, 民田晴也: 産業用ミリ波レーダーと光学式粒径別計数装置を用いた海面砕波観測システムの開発, Japan Geoscience Union Meeting 2023, MIS12-P05, 幕張 (オンライン), 2023年 5月

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、国立極地研究所・共同研究推進系
才田聡子、北九州工業高等専門学校・生産デザイン工学科

【研究目的】

SI (Sudden Impulse) は太陽風動圧の急増現象で、地上では磁場強度の急増として観測される。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VLOS (視線方向速度)のうち ground/sea backscattered signals (以下 **GSBS** と記す)のVLOS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VLOS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-VLOS 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 VLOS の強い波動現象が開始し ~30 分継続した。その VLOS 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、VLOS 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、データ量が大量で、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 VLOS 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である。

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 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おり、2022 年度報告書にもそのように記した。そして、今年度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 Lomb-Scargle 法はオーバースペックである事、また Lomb-Scargle 法で振幅と位相の 2 つを計算する IDL procedure は存在せず、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のには時間がかかりそうな事、が判った。そこで、他の方法を探し、Discrete-time Fourier transform という方法を知った。そこで、その IDL でのプログラミングを行い、テストしたところ、興味深い結果が得られたが、プログラム中の bug が残っている可能性も発見され、現在それを調査中である。

【引用文献】

Ponomarenko, Menk, Waters, and Sciffer, Ann. Geophys., p1271, 2005.
Southwood and Kivelson, JGR, p2301, 1990.

【成果発表】

Hideaki Kawano, Akira Sessai Yukimatu, Nozomu Nishitani, Yoshimasa Tanaka, Satoko Saita, Tomoaki Hori, Improving the resolution of the FLR frequency in SuperDARN VLOS to improve the magnetospheric density estimation, Japan Geoscience Union Meeting 2023, online 参加, 2023.05.21-05.26
Hideaki Kawano, Akira Sessai Yukimatu, Nozomu Nishitani, Yoshimasa Tanaka, Satoko Saita, Tomoaki Hori, Methods to increase the precision of the frequency of FLR in SuperDARN VLOS and the magnetospheric density, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第 154 回 総会・講演会, 仙台, 2023.09.23-09.27
Hideaki Kawano, Akira Sessai Yukimatu, Nozomu Nishitani, Yoshimasa Tanaka, Satoko Saita, Tomoaki Hori, Magnetospheric-density estimation from SuperDARN VLOS data to identify magnetospheric regions, by using FLR events in ionospheric or ground/sea backscatters, The 14th Symposium on Polar Science, 立川, 2023.11.14-17

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。

2. 方法

福岡都市部における凝結核（超微粒子）の動態を明らかにするため、2023年6月29日～11月15日まで福岡大学18号館における連続観測、および、11月3日に福岡市生の松原において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120mまでの鉛直分布観測を行った。また、久住高原において野焼きが行われた2024年3月3, 9, 10日に、久住グライダー滑空場（大分県竹田市白丹）にて、超微粒子粒径分布計測装置（SMPS）を小型ロガロ翼無人航空機（カイトプレーン）および、中型マルチコプタ（ツバサフロンティア製）に搭載し、実証観測を行った。

3. 観測結果と考察

1) 福岡における凝結核数濃度時空間変動

Figure 1に、生の松原で観測された11月3日9～16時、140mまでの凝結核の時空間変動を示す。10時20分の観測において高度60～130mに高濃度層が見られた。過去の福岡大学、生の松原、田村花立公園のような都市辺縁部における観測においても、午前中に高度60mを境に、高濃度層が、下層や上層に見られることがあった。福岡は市内に空港があるため、建築物等の高度制限があり、繁華街である博多地区、天神地区の大部分は、60m以上の高さの建物を建てることできない。このような建築物は都市キャノピーを形成し、混合層の発達途中には、都市キャノピー内外での汚染物質濃度に違いが生じる。こうして、高度60mを境界とした構造が移流流出すると風下に都市キャノピーの構造を反映した層行動が形成され、高度約60mを航海とする層構造が形成されるものと推測された。

11月3日は11時半に濃度上昇、午後に15時くらいにかけて急に濃度が低下した。新粒子の付加による濃度上昇、凝集による濃度減少の可能性を検討したが、いずれも想定される時間スケールが現象の時間スケールより短いため、汚染物質を高濃度で含む気塊の水平移流によって起きた現象と考えられた。

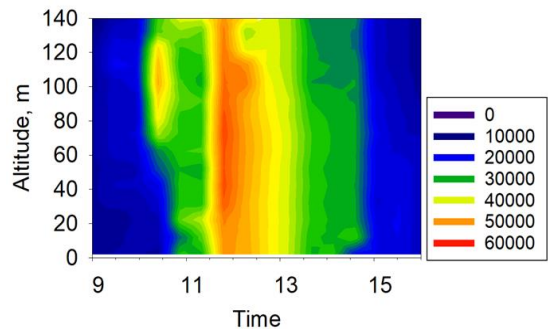


Fig.1 博多湾沿岸の生の松原における 2023年 11 月 3 日 9～16 時の高度 0～140m の超微小粒子数濃度(個/cc) (小型 UAV による観測)

2) 久住高原における野焼き時の超微小粒子観測

久住高原では、例年3月の第1, 2日曜日に広域の野焼きが行われる。野焼きの際に発生するエアロゾルの組成や粒径分布、その空間分布を観測し、バイオマス燃焼による大気環境への影響について検討することを予定している。Fig.2に野焼きの際には、0.01～0.1 μ mの超微小粒子が大量に発生するため、この粒径領域の粒径分布を観測するため、カイトプレーン及びマルチコプタにSMPS（走査型移動度粒径スペクトルメータ）を搭載し、試験観測を行った。また、福岡で実施した凝結核計数装置搭載マルチコプタによる観測も行った。

2024年は主には3月3, 10日に野焼きがおこなわれ、3, 9, 10日に観測を行った。地上連続観測結果をFig. 2に示す。3/3の10時前の高濃度

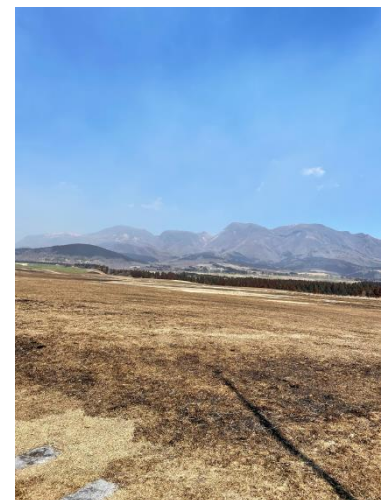


Fig.2 野焼きによる煙で霞む久住山系(グライダー滑空場より、3月10日12時に撮影)

は、草刈り機などのコンタミネーションである。3/3の14時の変動の激しい高濃度減少が、近傍の野焼きに伴うものである。3/9の午前、3/10の午後の高濃度はやや遠方の野焼きに伴う濃度上昇と考えられる。3日や10日の朝の濃度からバックグランド状態では1000~2000個/cc程度と考えられる。近傍の野焼き時の濃度は200,000個/cc程度まで上昇する。

小型マルチコプタによる観測は間欠的に行われ、近傍と遠方の野焼きの影響の違いが、時空間変動の大きさの違い良しとすることができた。また、近傍の野焼きの影響は、対地高度80m程度までであった。対流混合層の発達に伴って上空へ輸送されるものと考えられる。

カイトプレーンによる観測は、カイトプレーンのトラブル等により実施できなかった。株式会社ツバサフロンティア製マルチコプタに重量約4kgのPAMS (KANOMAX社製) を搭載し、高度140mで3分間のホバリング飛行を行い、粒径分布を取得した。解析は、これからである。

4. まとめ

- 1) 福岡都市辺縁部の粒径10nm以上の凝結核数濃度の鉛直分布には、福岡中心部の都市キャノピーの構造を反映した、海拔高度約60mを境界とする層構造が形成されることがあった。また、昼前後の凝結核高濃度ピークを形成する午前の濃度上昇、午後の濃度低下は、移流により形成されると推測された。
- 2) 久住グライダー滑空場で凝結核数濃度の鉛直分布の観測及び粒径分布の試験観測を行った。バックグランド状態で数千個/cc、野焼きの影響を受けた気塊では10万個/cc近い高濃度が観測された。
- 3) マルチコプタによる4kg規模のペイロードによる観測は可能であるが、フライト時間が10分程度と身近痛め、オペレーションの工夫などが必要になると考えられた。

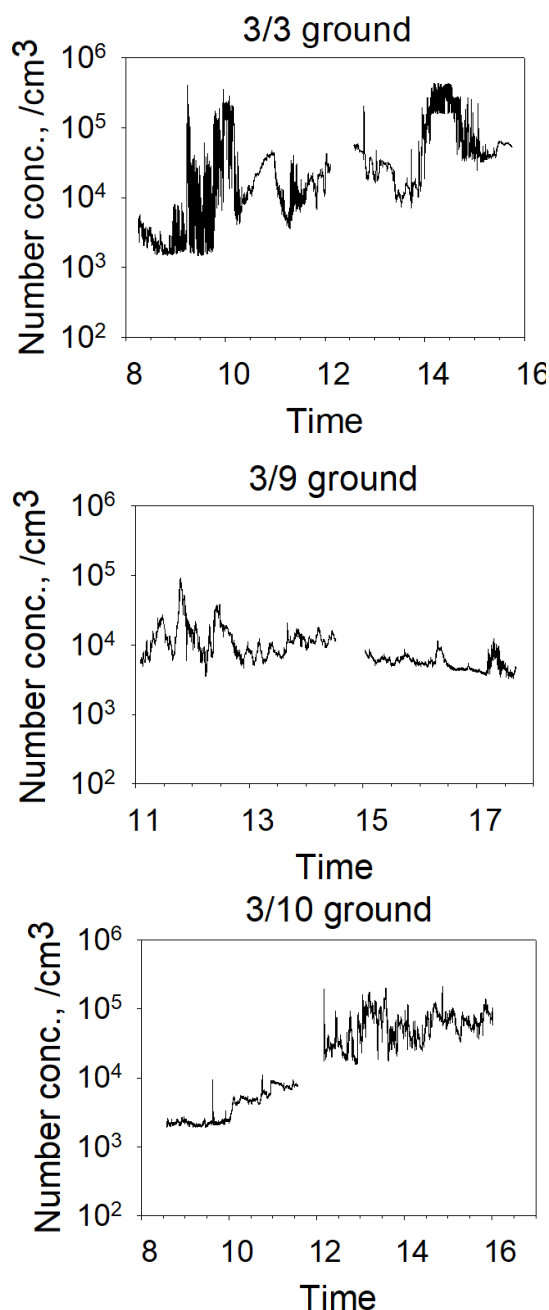


Fig.3 野焼き実施日の久住グライダー滑空場における凝結核数濃度の時間変化

湿地堆積物の堆積過程の高精度復元
Accurate reconstruction of deposition process of wetland sediments

奥野 充、大阪公立大学・大学院理学研究科

【研究目的】

湿原堆積物は、花粉化石の保存が良好であるために、コア試料を用いた花粉分析による古植生研究がこれまで盛んに研究されてきた。古植生研究では、湿原のなかでも連続的に堆積しており、できるだけ長期間の植生変遷が復元されることが期待できる地点（湿原中央部）においてコア試料が採取される。湿原内におけるコア試料を採取地点が、これまでの論文に記載されていないことも多かった。そのため、湿原は単なる「点」として捉えられ、湿原堆積物の空間分布（空間的堆積・層序）については考慮されていなかったと考えられる。

代表者らも、これまで花粉分析やテフラの精密年代決定を目的として、佐賀県の檜原湿原（奥野ほか，2011; Fujiki *et al.*, 2013），山口県の宇生賀盆地（大下ほか，2023），京都府の八丁平湿原（西川ほか，2023）でコア試料を採取して研究してきた。これらの湿原の形成には、火山噴火や地すべりによる堰き止めなどの自然要因、ため池を造成するための堤体の構築などの人為要因があり、これらの要因によって地下水位が上昇することで、湿原となる範囲が拡大したことが想定される。すなわち、湿原の拡大に関与したイベントの年代を推定するには、これまであまり顧みられることがなかった湿原縁辺部におけるコア試料の採取が重要になってくる。本研究では、様々な要因で拡大したと考えられる上記の湿原に、福井県勝山市の池ヶ原湿原（高原，2018）と静岡県蛇石大池湿原（叶内，2012）も加えて、それぞれで複数地点からコア試料を採取した（奥野ほか，2024）。このことによって、湿原環境をよりダイナミックに復元して、その形成・拡大に関わるイベント年代を精密推定することを試みる。

【研究方法】

上記した5つの湿原や盆地（Fig. 1A）においてピートサンプラーならびにルートオーガー（共に Royal Eijkelpkamp 社製）によるコア試料を採取し、コア試料の層相観察およびデジタル写真とエックス線撮影（イメージテック株式会社製，X 線検査装置 ITX-S40T），初磁化率（Bartington 社製，磁化率計 MS2）や含泥率、堆積物密度などの試料分析を行った。火山ガラスの主成分化学組成分析（エネルギー分散型 X 線マイクロアナライザー JEOL 社製，JSM-7001F と Oxford 社製，X-Max Aztec）を行った。植物片の加速器質量分析（AMS）法による ^{14}C 年代測定を行い、 ^{14}C 年代-暦年代データセット IntCal20（Reimer *et al.*, 2020）とコンピュータープログラム Calib8.2（Stuiver *et al.*, 2021）を用いて ^{14}C 年代を暦年較正した。

【研究結果と考察】

脊振山地に位置する檜原湿原では、今回4地点でコア試料を採取した（Fig. 1B）。植物質に富むシルト層に複数の砂層が挟まっており、これまでのコア試料の層序（奥野ほか，2011; Fujiki *et al.*, 2013）と調和的である。東側の地点3では、シルト層が比較的薄く、ため池を整備するために堤体が構築された影響により江戸時代に湿原域が拡大された可能性がある。この湿原は、ため池とそのための堤体の整備に密接に関連するので、それらをさらに検討したい。

阿武火山群の宇生賀盆地は、南側の権現山（約 0.31 Ma）、北側の高牟礼山（約 0.18 Ma）、東側の西台・

東台 (約 0.04 Ma), 鍋山スコリア丘・堀越溶岩 (-0.08 Ma) に取り囲まれている (角縁ほか, 2000). コア試料の花粉分析 (畑中・三好, 1980) や埋没林 (Hakozaki *et al.*, 2012) の研究などがある. 完新世の広域テフラである鬼界アカホヤ (K-Ah) テフラが, 大下ほか (2023) により泥炭層から検出された. この泥炭層の分布は, 宇生賀盆地の埋積過程と密接に関わると考えられるため, この研究では分布範囲を追跡するため 13 地点でコア試料を採取した (Fig. 1C).

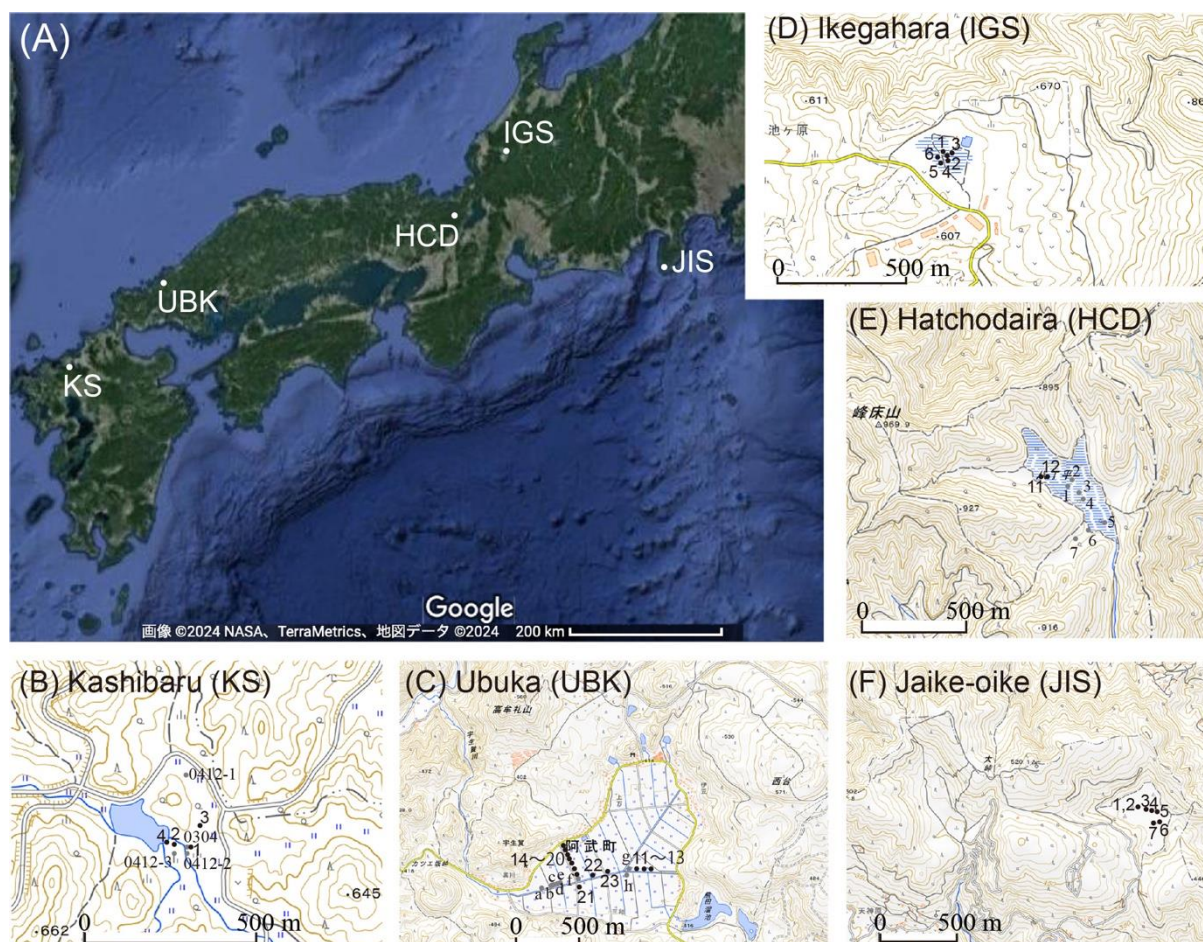


Fig. 1 Index maps of study sites. (A) Location map of the five study sites in Central-Western Japan. Google satellite images were used as the base map. (B) Sampling sites in Kashibaru Wetland (KS), northern Kyushu on the GSI map. The numbers 1 to 4 are the locations where core samples were collected in this study, and “0304”³⁾ and “0412”⁴⁾ indicate the sampling locations in previous studies. (C) Sampling sites in Ubuka Basin (UBK) within Abu monogenetic volcanic group on western tip of Honshu Island on the GSI map. The numbers 11 to 23 are the locations where core samples were collected in this study, and “a” to “f” indicate the sampling locations in previous study⁵⁾. (D) Sampling sites in Ikegahara Wetland (IGS) in Katsuyama City, Fukui Prefecture, Hokuriku Region on the GSI map. The numbers 1 to 6 are the locations where core samples were collected in this study. (E) Sampling sites in Hatchodaira Wetland (HCD) in Kitayama, Kyoto City on the GSI map. The numbers 1 to 7 indicate the locations where core samples were collected in previous study, and in this study core samples were collected at three locations: locations 11 and 12, as well as location 5. (F) Sampling sites in Jaishi-oike Wetland (JIS) at the southern tip of the Izu Peninsula on the GSI map. The numbers 1 to 7 are the locations where core samples were collected in this study.

福井県勝山市の池ヶ原湿原では、6 地点でコア試料を採取した (Fig. 1D). コア試料は暗褐色の植物質シルト～泥炭層を主体とし、灰白色シルト～砂層を挟む。この層は過去の洪水を記録している可能性がある。地点 1 では既報告 (高原, 2018) の始良 Tn (AT) テフラの純層を確認したが、その他のテフラは今のところ検出できていない。

京都北山の八丁平では、AT, K-Ah, 鬱陵隠岐 (U-Oki) の火山ガラスなどが検出され、その多くが再堆積であると考えられている (高原・竹岡, 1986). 西川ほか (2023) でも約 7300 cal BP より下位の層準から AT に由来する火山ガラスを検出したが、この他のテフラは検出できなかった。再堆積テフラは、地震による液状化によって吹き上がった可能性があり、その分布を追跡するため、地点 5 に加えて地点 11 と 12 の計 3 地点でコア試料を採取した (Fig. 1E).

伊豆半島南端の蛇石大池湿原では、叶内 (2012) が、34°42'38"N (日本測地系)、標高 385 m の地点からコア試料 (Jai91-1～3) を採取し、そのうち、最大深度 6.3 m の Jai91-3 で AT, K-Ah, Kg (カワゴ平) の各テフラを報告している。今回の調査では、7 地点でコア試料を採取した (Fig. 1F). 泥炭層中にテフラ層が検出され、そのうち径 2 mm 程度の軽石粒は Kg に対比されることが考えられる。

【まとめ】

本研究では、5 ヶ所の湿地および盆地において複数地点からコア試料を採取した。基本的に完新世の堆積物は有機 (植物) 質で氷期に入ると乏しくなることから、概ね気候変動を反映していると考えられる。しかし、厳密には層相の変化と同時間面は斜交することが多く、層相による対比は適当ではないと考えられる。

テフラは時間指標層として極めて強力なツールであり、¹⁴C 年代値との組み合わせで、精密な対比を確立する必要がある。さらなる分析を進めて、湿原堆積物の時空分布から湿原の形成史 (拡大縮小) を精緻なものにしていきたい。

【引用文献】

- Fujiki, T. *et al.* (2013) Radiocarbon chronology and pollen analysis of core KS0412-3 from Kashibaru Marsh in northern Kyushu, southwest Japan. *Radiocarbon*, **55**, 1693–1701.
- 角縁 進・永尾隆志・長尾敬介 (2000) 阿武単成火山群のK-Ar年代とマグマ活動史. 岩石鉱物科学, **29**, 191–198.
- 叶内敦子 (2012) 伊豆半島南部, 蛇石大池湿原堆積物の花粉分析. 駿台史学, No. 125, 119–130.
- Hakozaki, M. *et al.* (2012) Tree-ring study of a lake Holocene forest buried in the Ubuka basin, Southwestern Japan. *IAWA Journal*, **33**, 287–299.
- 畑中健一・三好教夫 (1980) 宇生賀盆地 (山口県) における最終氷期最盛期以降の植生変遷. 日本生態学会誌, **30**, 239–244.
- 西川 空・奥野 充・大下愛央・藤木利之・中西利典・林田 明・鳥井真之・洪 完 (2023) 京都北山, 八丁平湿原から採取したコア試料の層序と年代. 名古屋大学年代測定研究, **7**, 36–42.
- 奥野 充・森 勇一・藤木利之・杉山真二・此松昌彦・上田恭子・長岡信治・中村俊夫・鮎沢 潤 (2011) 中世の人間活動と土砂災害: 北部九州・檜原湿原のボーリングコア分析. 中條利一郎・酒井英男・石田 肇 編「考古学を科学する」, 臨川書店, 79–98.

- 奥野 充・大下愛央・西川 空・黒木 瞭・藤木利之・中西利典・林田 明・鳥井真之・洪 完 (2024) 湿原堆積物の空間分布から推定される湿原形成イベント. 令和5年度自然災害研究協議会西部地区部会会報・論文集, No. 48, 29-32.
- 大下愛央・奥野 充・西川 空・藤木利之・中西利典・林田 明・鳥井真之・洪 完 (2023) 阿武単成火山群, 宇生賀盆地から採取したコア試料の層序と年代. 名古屋大学年代測定研究, 7, 43-49.
- Reimer, P. *et al.* (2020) The IntCal20 northern hemisphere radiocarbon age calibration curve (0-55 cal kBP). *Radiocarbon*, 62, 725-757.
- Stuiver, M. *et al.* (2021) CALIB 8.2 [WWW program] at <http://calib.org>.
- 高原 光 (2018) 解き明かされる池ヶ原湿原周辺の植生の移り変わり (特集: 池ヶ原湿原の自然再生). ナチュラリスト, 29 (1), 3-4.
- 高原 光・竹岡政治 (1986) 京都市八丁平湿原周辺における最終氷期最盛期以降の植生変遷. 日本生態学会誌, 46, 339-347.

【成果発表】

- 奥野 充, 高精度古環境復元に対する放射性炭素年代測定の役割. (招待講演) 日本地球惑星科学連合2023年大会, ハイブリッド開催 (千葉), 2023/5.
- 西川 空, 奥野 充, 大下愛央, 藤木利之, 林田 明, 中西利典, 鳥井真之, 洪 完, 京都北山, 八丁平湿原における完新世の堆積環境史. 日本地球惑星科学連合2023年大会, ハイブリッド開催 (千葉), 2023/5.
- 大下愛央, 奥野 充, 西川 空, 藤木利之, 林田 明, 中西利典, 鳥井真之, 洪 完, 阿武単成火山群, 宇生賀盆地の埋積過程. 日本地球惑星科学連合2023年大会, ハイブリッド開催 (千葉), 2023/5.
- Oshita M., Nishikawa K., Maximo R.P.R., Lim R.B., Gemal M.T.Q., Cochon J.E.A., Marco A.Q., Norcio A.P.D., Vergara C.J.G., Hayashida A., Nakanishi T., Katsuki K., Seto K., Fujiki T., Tomiyasu T., Murao S., and Yamada K., and Okuno M., Analysis of core samples from Balungbong maar in the San Pablo volcanic group, Luzon Island, Philippines. 第33回社会地質学シンポジウム, ハイブリッド開催 (東京), 2023/11.
- Nishikawa K., Oshita M., Maximo R.P.R., Lim R.B., Gemal M.T.Q., Cochon J.E.A., Marco A.Q., Norcio A.P.D., Vergara C.J.G., Hayashida A., Nakanishi T., Katsuki K., Seto K., Fujiki T., Tomiyasu T., Murao S., and Yamada K., and Okuno M., Analysis of core samples from Paitan Lake in the Amorong volcanic group, Luzon Island, Philippines. 第33回社会地質学シンポジウム, ハイブリッド開催 (東京), 2023/11.
- 黒木 瞭, 奥野 充, 藤木利之, 中西利典, 林田 明, 佐賀県唐津市, 檜原湿原の形成史. 国際火山噴火史情報研究集会 2023-2, ハイブリッド開催 (福岡), 2024/2.
- 西川 空, 黒木 瞭, 奥野 充, 藤木利之, 中西利典, 林田 明, 福井県勝山市, 池ヶ原湿原の堆積環境変化の復元. 国際火山噴火史情報研究集会 2023-2, ハイブリッド開催 (福岡), 2024/2.
- 大下愛央, 黒木 瞭, 奥野 充, 藤木利之, 中西利典, 林田 明, 伊豆半島南部, 蛇石大池湿原の形成史の高精度復元. 国際火山噴火史情報研究集会 2023-2, ハイブリッド開催 (福岡), 2024/2.
- 奥野 充, 大下愛央, 西川 空, 黒木 瞭, 藤木利之, 中西利典, 林田 明, 鳥井真之, 洪 完, 湿原堆積物の空間分布から推定される湿原形成イベント. 令和5年度自然災害研究協議会西部地区部会研究発表会 (福岡), 2024/3.

太陽Ⅱ型電波バースト微細構造の成因の究明

Investigations on origin of the fine structures forming solar type II bursts

代表者: 三澤浩昭(東北大学大学院理学研究科)

1. 研究目的

太陽嵐(～フレア/コロナ質量放出(CME))の発露に伴い、kHz～GHz 帯に多様な電波バーストが出現する。この中で数 100MHz 帯で数分にわたって出現し、緩やかな負の周波数ドリフトを示すⅡ型バーストがある。Ⅱ型バーストに対する申請者らによる数 100MHz 帯での高時間・周波数分解のスペクトル観測から、ほぼ全てのバーストは継続時間が約 100msec 程の微細構造から形成されており、微細構造は大きな周波数ドリフト率を示すこと、また、ドリフト率には無視出来ない”揺らぎ”が含まれることが明らかになっている。この周波数ドリフト率の解析から、微細構造の起源について、解釈①: 一般的なコロナ密度より数倍濃密なプラズマ中を光速に漸近する速度を持つ電子が移動して放射、解釈②: 一般的なコロナ密度中を光速の 3～4 割の速度を持つ電子が移動して放射、の 2 つの可能性が考案されているが、その観測的査定が課題となっている。本研究は、太陽コロナ域についての光学・電波観測に基づき、微細構造で構成されるⅡ型バーストの生成域を同定し、その生成過程の究明を行うことを目的とする。

2. 研究内容・進行状況

太陽電波については東北大の高時間・高周波数分解能(10msec, 61kHz)の 150～500MHz 帯スペクトル観測装置 AMATERAS の電波データ、生成域探査については科学衛星による EUV イメージデータを用いて、Ⅱ型バースト出現のタイミングに対応する太陽コロナ変動様相を精査する計画を持ち、研究を進めてきた(メートル波帯の電波は太陽から概ね 1.5 太陽半径以内で生成される)。発生域について、Ⅱ型バースト生成に関わる粒子加速域としてコロナ磁場ループ(CME 等)のフロントやフランク域が候補と目されるが、本年度は電波干渉計データも併用した電波生成域～粒子加速域の場所と変動に着目し、Ⅱ型バーストの微細構造の成因を考察した。

これまで AMATERAS で 2010～2022 年に取得した 30 余例のⅡ型電波バーストのうち、本年度は特に、SDO の EUV イメージデータ、電波干渉計 MWA(豪)が取得した電波イメージデータが揃っている 2014 年 9 月 28 日 02:45UT 頃に出現した微細構造を持つⅡ型バーストを対象とした解析を行った。このⅡ型バーストは M5.1 のフレアに伴って出現し、明確な CME の出現が認められない現象であったが、幸運にも MWA による電波源探索が行われていた(Bhunja+, A&A, 2023)。この探索結果も併用すると、その電波源はループトップ域付近にあること、piston-driven 型衝撃波起因である可能性が示唆された(この現象の場合、電波源に明確なプラズマ密度増加域を伴わないことから、微細構造の起源については1で記した②の可能性がある)。一方、微細構造に含まれる周波数ドリフトの”揺らぎ”については、その特性解析時間が微細構造個々の継続時間に対応する程短時間ではないものの、電波源変動解析からは電波発生後の”プラズマ散乱”による見掛けの現象である可能性も示唆されている。今回の研究で適用した電波源変動探索データは、微細構造が判然としていたバーストの出現時刻・周波数とは完全には一致していないこともあり(電波源変動探索データが AMATERAS の観測周波数外であったため)、“揺らぎ”が”プラズマ散乱”に依るのか、発生源固有の高エネルギー粒子運動に依るのかは断定は出来ない。このため、微細構造成因の完全な理解は今後の課題となるが、申請者らは 2025 年完成予定で AMATERAS の観測周波数拡大のための機器開発も並行して進めており、近未来に電波源イメージングとの共同計測の機会を拡大し、更なる課題究明を行ってゆく予定である。尚、本研究成果は 2024 年 5 月開催の JpGU2024 でも報告予定である。

3. 報告済成果等

①三澤他, 太陽研連シンポジウム, 国立天文台, 2024 年 2 月; ②三澤, 太陽圏宇宙線プラズマ合同研究シンポジウム, 名古屋大学, 2024 年 3 月

複合電波観測を用いたシビア現象の超高層への結合過程に関する研究
Effect of severe meteorological phenomena to upper
atmosphere and ionosphere

芳原容英、電気通信大学・大学院情報理工学研究科

1. 研究目的：

近年、世界的にシビア現象による深刻な被害が多発している。多くのシビア現象は、雷嵐を伴っているが、雷嵐を構成する大気圏中の雷雲や雷活動の気象学的、電気的特性を含めた高高度への影響等を包括的に捉えた研究は極めて少ない。そこで本研究では、日本国内および、周辺領域で観測されるシビア現象の発生から衰退に至る期間に渡り、電磁気的手法による大気圏の雷嵐と電離層の同時観測から気象擾乱の電離圏への結合過程を調査する。2023年度は、過年度から実施している台風に関連した大気-電離圏結合過程に関する研究をさらに推進する。具体的には、2019年に発生した台風15号についてVLF/LF帯送信電波受信ネットワークのうちMSR(母子里)-NPMとYMG(山口)-NPMパスで観測された下部電離圏観測データから大気波動(AGW)による下部電離層の擾乱の可能性を調査する。そして、電離層擾乱をFDTDによる数値計算でモデル化し、電離層擾乱の高さ変動とAGWの伝搬速度を導出する。

2. 研究方法：

2019年の台風15号における電離層擾乱を観測するために、VLF/LF帯送信電波受信ネットワークにより観測された受信電界振幅変動を用いる。また、台風やフレネルゾーン周辺の雷活動を観測するために、アースネットワークストータル雷観測ネットワーク(ENTLN)の雷標定データを使用する。このネットワークから、雲雷(IC)および対地雷(CG)の位置、時間、放電極性、ピーク電流が得られる。台風の活動は、気象衛星ひまわり(MT-SAT8)による輝度温度データを用いる。観測波長は可視、近赤外、赤外であり、時間分解能は10分である。台風に伴う雷活動は、台風中心付近とVLF経路周辺の2つの領域に分類した。AGWsの同定と伝播速度は、VLF信号の時間変動、および隣接する2つの経路間の時間差からそれぞれ導出される。また、観測データとFDTDにより生成された電離層擾乱モデルを併用することで、AGWsにより擾乱された電離層高度の時間変化を導出する。

3. 研究結果：

図1は、台風15号発生時のMSR-NPMパスとYMG-NPMパスにおける輝度温度と雷活動、およびVLF信号変動との相関を示している。2019年9月4日、台風15号の中心付近で雷活動が活発となり、温度が急激に上昇した。これは台風が成熟期に入った時期に対応する。この期間、両パスともVLF信号が大きく低下した。次に観測されたVLF信号の変動を電離層の数値計算モデルと比較する。2次元FDTD法を用いて、観測されたVLF信号強度と数値計算による信号強度の変動に対応する電離層擾乱の高さを計算する。

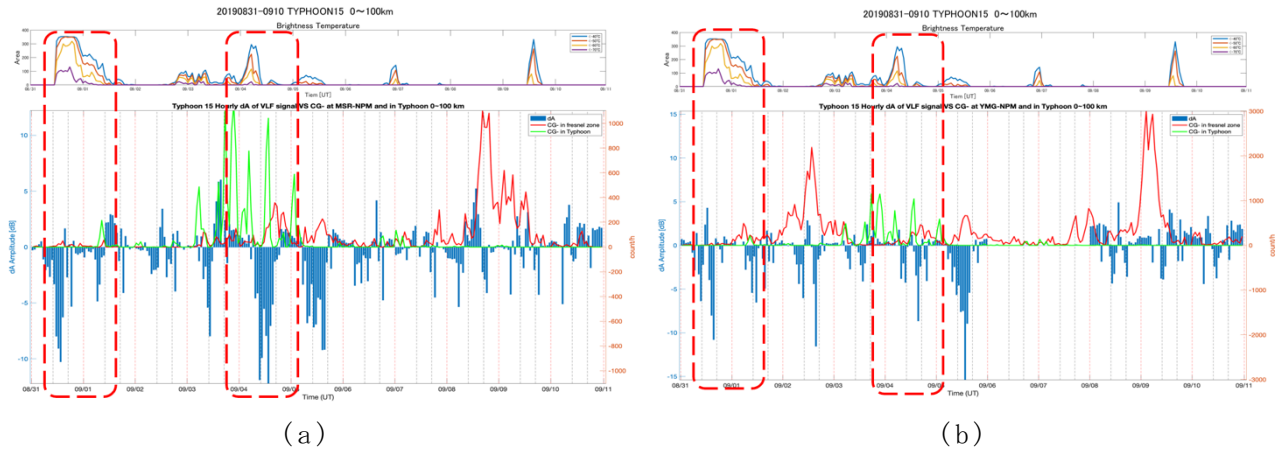


図1： 台風15号に伴うVLF電波受信電界振幅の変動dA(青)と輝度温度（上段）、雷活動（赤；VLFパス周辺、緑：台風中心周辺）(a)はMSR-NPM、(b)はYMG-NPM。

図2に9月4日の台風による下部電離層擾乱時の電離層の高さの時間変化を30分の時間分解能で導出した結果を示す。図2よりYMG-NPMの10:45-12:45UTの電離層高度変化とMSR-NPMの13:15-15:15UTの電離層高度変化の時間変動パターンは類似しており、両者の時間差は2.5時間程度である。今回の解析可能時間は、日の出による電離層高度の背景変化周辺時間を除くとかなり短いものの、同定された高度の時間変動は台風中心からYMG-NPMとMSR-NPMの2つのパスに台風から発生したAGWの位相遅れとして観測されたと考えられる。つまり、台風から発生したAGWsはまずYMG-NPMパスに到達後、MSR-NPMパスへと伝播していることを示唆している。また、雷活動は大局的には電離層の高度変化へそれほど影響が見られない。さらに、MSR-NPMパスとYMG-NPMパスの距離は848kmであり、両者の時間遅れは2.5時間であることから、AGWの位相速度は94.2 m/sと導出された。

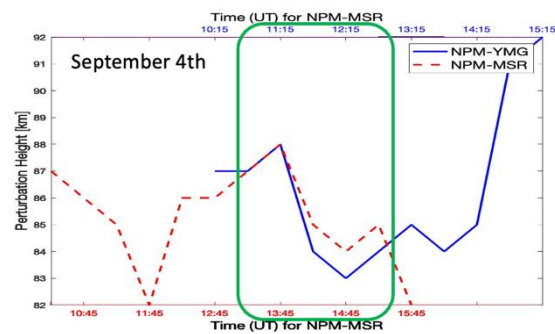


図2. 台風15号（09/04）のMSR-NPMとYMG-NPMパスの下部電離層高度の時間変化の比較（2.5時間の遅れを反映している）

成果発表：

[1] A. D. Setiawan, S. Hirai, H. Kikuchi, and Y. Hobara, "Modeling Atmosphere-Ionosphere Coupling on Gravity Waves during 2019 Typhoon 15 and 19 using FDTD Method," 2023 XXXVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GAS S), Sapporo, Japan, 2023.

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

村田健史、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[1]。本共同研究では、名古屋大学宇宙地球環境研究所（ISEE）の鹿児島観測所に両センサーを設置し、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。

本研究では、映像IoTによる噴火活動確認およびインフラサウンドセンシングによる火口位置特定技術を組み合わせることで桜島の噴火活動を総合的にモニタリングすることを目指す。このような取り組みはこれまでなかったため、2023年度は気象庁のデータと比較し、本手法の有効性の検証を行う。具体的には、気象庁が公開する桜島噴火情報（日時、現象、有色噴煙、白色噴煙、流向、火口、噴煙量）と両センサーのデータを比較し、どのような規模・タイプの噴火活動において映像・音波のそれぞれでどのような信号が取得されるのかを検証する。



図1 鹿児島観測所設置システム外観

2. 研究方法（使用した共同利用装置・施設等を含む）

映像IoTによる噴火活動確認およびインフラサウンドセンシングによる火口位置特定技術を組み合わせることで桜島の噴火活動を総合的にモニタリングすることを目指す。名古屋大学ISEE鹿児島観測所（垂水）に図1の映像IoTおよびインフラサウンドセンサーシステムを設置し、24時間の定常観測を実施した。気象庁が公開する桜島噴火情報と両センサーのデータを比較し、どのような規模・タイプの噴火活動において映像・音波のそれぞれでどのような信号が取得されるのかを検証した。2023年度は、新たに姶良市にカメラを追加設置することで、風向きに依らない画像取得を可能にした。また、インフラサウンドでの検出性能を高めるため、新しい構成によるインフラサウンド観測装置のファームウェア開発を実施した。

3. 研究結果

図2は現在運用中の映像IoT桜島モニタリングシステムでのエッジとサーバでの画像処理結果である。リアルタイムに噴火を検出し、平時はサンプリング伝送する映像を、活動時には連続伝送する仕組みの実現のためのアルゴリズムの開発・検証を行なった。図3は新たに姶良市の公園に設置したカメラ画像である。南北2台のモニタリングにより、桜島噴煙のより詳細な情報を得られる環境を構築した。

新しいインフラサウンド観測装置は、噴火に伴い生成されるインフラサウンドが比較的高い周波数であることに着目したもので、従来のMEMS気圧センサーだけを用いるのではなく、可聴域に近



図2 エッジ・サーバ検出結果（映像 IoT）



図3 始良市設置カメラ画像（映像 IoT）

い周波数の信号を高SN比で取得できる小型超低周波マイクロホンを併用したものである。これにより、現在よりも低自己雑音での観測が可能となり、噴火イベントの検出精度の向上が期待される。2023年度は研究室環境での動作試験までを完了した。

4. 考察とまとめ

2023年度の成果をもとに、インフラサウンド観測については鹿児島観測所を含め実フィールドでの実地試験を実施する予定である。また、インフラサウンドと映像 IoT の統合処理による検出精度の向上に向けた検討も実施予定である。

5. 引用文献

[1] 村田健史, “レジリエント自然環境計測技術～ 目と耳と手で見る・視る・診る自然環境 ～,” 電波技術協会報 FORN 2022年9月号, no. 348, pp. 14-17, 2022.

6. 成果発表（当該年度に行った口頭発表を含む）

[1] 菊田和孝, 村田健史, 長妻努, 西村太志, “映像IoT技術による桜島モニタリング技術開発,” 日本火山学会2023年度秋季大会

5方向ライダーを用いた小規模重力波伝搬の3次元解析
3-D analysis of the small-scale gravity waves observed by the Tromsø 5-direction lidar

鈴木臣, 愛知大学・地域政策学部

名古屋大学宇宙地球環境研究所が Tromsø (69.6°N, 19.2°E) において運用している Naライダーは、オーロラ活動に伴う超高層大気の大気温度変化の空間構造や極域の超高層大気波動観測に用いられている。観測は冬季に限られるものの、数時間から十数時間の周期を持つ大気波動を検出しており、超高層大気波動の伝播に伴う温度変動を高い精度で観測することに成功している (Nozawa et al., 2014, JGR)。さらに同ライダーは2012年から、天頂を含む5方向ビームでの観測を実施して、より狭い空間構造の変動を捉えることができるようになった。本研究ではナトリウム層の共鳴散乱 (80–110km) に加えて Rayleigh 散乱 (30–50km) を用いることで、高度方向 (高度: 20–110km, 底面: 58×58km の四角錐の領域) に拡張することで、小規模重力波の3次元伝搬構造を明らかにする。大気重力波は中間圏・下部熱圏 (MLT: 80–120km) で砕波して運んできた運動量を解放することで局所的あるいは全球的な温度場・風系場の形成に貢献している。特に、小スケール・短周期の大気重力波は、より多くの運動量を輸送すると指摘されており (Fritts and Vincent, 1987, JAS; Nastrom and Fritts, 1992, JAS), 超高層大気への力学的インパクトも大きいと考えられるが、観測研究が限られているのが現状である。超高層大気の小スケール大気重力波の観測研究では主に大気光イメージング観測が使われているが、本研究では、大気光では観測することができない波動の伝播にともなう温度、風速変動を捉えることができるため、超高層大気への影響をより定量的に評価することが可能となる。

本年度はライダーと同じく Tromsø に設置されている大気光カメラ (OMTIs) で観測される小スケール大気重力波が5方向ライダーで観測されるかを確認した。2018年1月18日の晩にOMTIs では水平波長 30.9 km, 水平位相速度 57.9 m s⁻¹, 周期 8.9 min で北東方向 (北から東向き 40.7°) に伝搬する重力波構造を得た。これは典型的な小スケール大気重力波のパラメータである。ライダー温度のロムスカーグル解析から同時時間帯の5方向すべてで同様の周期をもつ波動が検出された。さらに、ライダーの鉛直方向のビームから直接観測されたこの周期の鉛直風変動は、OMTIs で得られた波動の水平パラメータを用いて大気重力波の分散関係式から計算される鉛直風変動と同程度であった (図1)。鉛直風変動の時間変化はわずかに位相のずれも見られたが、本研究結果からは、5方向ライダーにおいても大気光イメージングでしばしば観測される小スケール大気重力波を観測できることが明らかとなった。ライダー観測で直接得られる運動量フラックスの大きさも 0.57 m² s⁻² であり、これまでの大気光観測とモデルから算出される典型的な大きさであった。このこともライダーによる小スケール大気重力波観測の有用性を支持する。

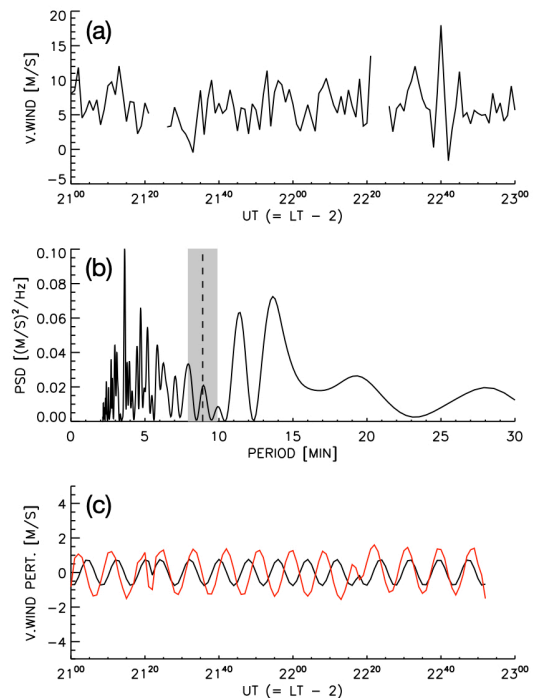


図1: (a) ライダーで観測された鉛直風. (b) 鉛直風のスペクトル密度. (c) 黒はライダー観測による鉛直風変動, 赤は大気光観測から得られた波動の水平パラメータから算出した鉛直風変動を表す.

成果発表:

- S. Suzuki et al., Observational evaluation of temperature/wind perturbations associated with small-scale AGWs: Horizontal propagation, JpGU Meeting 2023, Chiba, 2023.05.26.
- S. Suzuki, Airglow imaging observation of small-scale gravity waves in the upper atmosphere, IAP seminar, Kühlungsborn, Germany, 2024.03.21.

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

信州大学宇宙線グループは、南極昭和基地を含む世界5か所に設置された地表多方向ミュオン計による汎世界的観測ネットワーク (Global Muon Detector Network: GMDN) による宇宙線観測を推進してきた。GMDNは合計69方向から地球に入射する宇宙線の強度を同時に観測する能力を有し、その観測データの解析により、約60GVの銀河宇宙線強度の等方成分 (宇宙線密度) と非等方性分 (異方性) を分離してそれぞれ時間の関数として導くことが出来る。宇宙線異方性は、地球周辺の宇宙線密度の空間分布 (宇宙線密度勾配) を反映するため、その観測から宇宙線の空間分布を決定する大規模磁場構造を導くことが出来る。GMDNを用いた従来の研究から、様々な宇宙天気事象にともなう磁場構造が明らかにされてきた。

一方で、既存の中性子モニターによる世界的観測ネットワークは、約10GVの銀河宇宙線強度の同時観測を行っている。本研究では、中性子モニター・ネットワークとGMDNによる観測データを併せて解析することにより、宇宙線密度と異方性のリジディティ・スペクトラムも時間の関数として導くことを試みた。その際、環境の異なる多地点で観測されたデータに含まれる「local effect」のため、導かれる宇宙空間での異方性が地球の自転周期で変動してしまうことが判った。我々は、この問題を解決する手法を開発し、大振幅の異方性が約1週間にわたって観測された2012年の1月と7月の宇宙天気事象を解析した。具体的には、べき型のスペクトラムを仮定しそのべき指数の時間変動を導いた。その結果、宇宙線密度と異方性のべき指数がダイナミックに変動する様子を世界で初めて明らかにした。今後、他のいくつかの宇宙天気事象も解析し、結果を論文として公表する予定である。

流星によるVLF帯電波放射の観測的研究
Observation of Meteoric VLF Radio Emission
(1行スペース)

研究代表者：渡邊 堯、情報通信研究機構
(2行スペース)

本研究は特に明るい流星（火球）に伴う VLF 電波の検出を主たる目的としているが、宇宙機の地球大気圏再突入についても、観測範囲を拡大している。特に 2023 年度では、2023 年 9 月 24 日(UT) に小惑星探査機 OSIRIS-Rex のサンプルリターン・カプセル（以下カプセルと略称）の再突入が、米国ネヴァダ・ユタ両州にかけて実施された事を受けて、現地での VLF 電波観測を実施した。2020 年にオーストラリア南部で実施した、「はやぶさ 2」カプセル再突入 V L F 観測においては、観測条件の制約によりループアンテナ 1 基のみによる波形データのみの取得であったため、カプセル起源の電波放射の確認においては、波形やスペクトルの特性の相違によって、雷空電との区別を行ったが（文献 1）、今回は東西南北方向に設置したクロス・ループアンテナに加えて、垂直ロッドアンテナによる観測を実施した。観測場所は再突入時に発生するアブレーションが最大レベルに達する位置の直下に近い、ネヴァダ州ユーリカ地区において実施された。この地点ではカプセルがほぼ天頂を通過する見込みであったため、ループアンテナによる東西方向の方位測定に加えて、地平線からの高度に関する方向探知（方探）解析を可能とした。観測データの記録は、VLF 電波の Hx（南北）、Hy（東西）、Ez（垂直）各方向の電磁成分に加えて、GPS 信号より生成した秒・分信号を、4 チャンネル TASCAM DR70R により、96000 サンプル/秒にて記録した。また環境音声、FM 放送電波、中波帯電波雑音の記録も並行して実施した。

観測は現地時間で 2023 年 9 月 26 日午前 7 時 40－50 分にかけて実施された。現地における天候は、断雲も認められない快晴であり、局地的な雷活動は発生していないことが推測された。また、このような時間帯においては、大陸とその周辺における雷雲活動は、五大湖地域東岸、フロリダ半島周辺、カリブ海地域にのみ限定されており、特に観測点より約 2000km 東方に位置する、五大湖地域からの空電が優勢であり、西方から伝播してくる空電は、この時間帯における強い減衰のためもあって、受信頻度が低かった。このことは、遠距離からの雷空電と、近距離発生であるカプセル起源の VLF 電波放射とを区別する上で、重要な情報となる。また、主要な遠距離空電源が、いくつかの方角に偏在していることにより、方探解析の信頼性のチェックを行う事が可能となる。

解析はカプセルの最大加熱予想発生時刻(14:42:50 UTC)を中心とした火球フェイズが最大限に発生したと思われる時間帯について、通常の高周波空電とは異なる波形とスペクトルを示す波形を探し出すことから始められた。その結果、特にアブレーションが最高度に発達していたと思われる時間帯に於いて、やぶさ 2 の SRC 再突入時に検出されたような非パルス状信号が、断続的に受信されていることが分かった。カプセル減速率が最大となる時間帯の直前に観測された、かなり強いノイズの波形とスペクトルを、夫々図 1、図 2 に示す。スペクトルの 4-6 kHz 帯に見られる強度の上昇は、減衰の大きい長距離伝播では見られない現象であり、このノイズが近距離発生であることが、強く示唆される。このような信号について、直線偏波を仮定したゴニオメータ方式の方位測定と、垂直アンテナの指向性を利用した高度角の推定を行った。観測は 100 Hz－96 kHz の広帯域で行われたため、各方向の周波数成分間の位相差が 20 度以内となる周波数領域のみを使用した解析とした。観測時間帯における、顕著な雷運活動地域（主に五大湖西岸とメキシコ湾領域）の方位との比較から、方位の測定精度は 10 度程度と見込

まれるが、高度角については、特に高度角が大きい場合、20 度程度の不確定さが見込まれる。この解析によって得られた上記の非パルス性信号の方位・高度角は、誤差の範囲内で、SRC の減速や高度変化が顕著ではない火球フェイズにおいて、第 2 示すように、SRC の推定位置と良い一致を示している。現時点では実測定によるカプセルの軌道の情報は公開されていないが、予想誤差の範囲内で、上記の観測結果はカプセル再突入における VLF 電波放射の存在を示していると思われる。VLF 電波放射の発生は、高速で移動するカプセル周辺領域や航跡のプラズマ内で形成される、電荷分離に起因する放電によることが推測される。

出版論文

Watanabe, T., M. Kobayashi, Y. Katoh, K. Shiokawa, H. Ohya, K. Suzuki, S. Tanaka, Y. Ishihara, T. Yamada, and M. Yoshikawa, WGN, the Journal of the IMO 51:3, 2023.

口頭発表

名古屋大学宇宙地球環境研究所研究集会・現象報告会（2024 年 2 月 6 日）

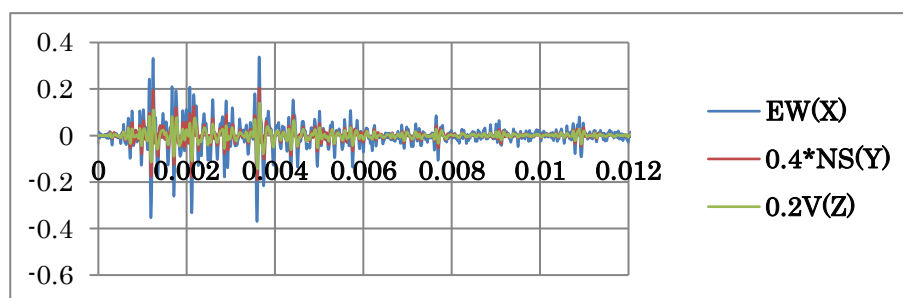


図 1 : 2023 年 9 月 24 日 14:42:59.347 (UTC)に観測された、近距離継続性ノイズの各方向における波形（較正後）

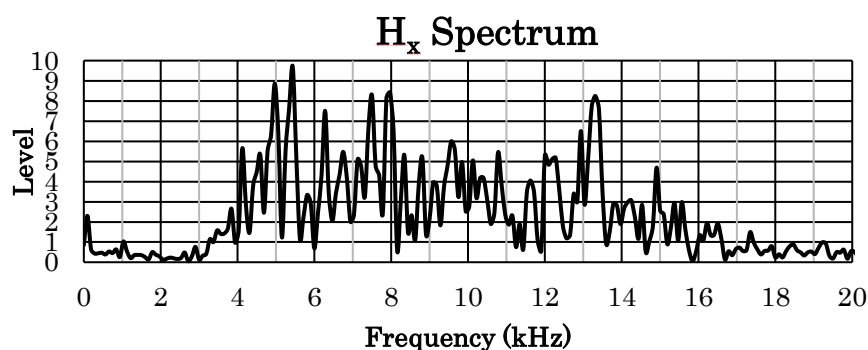


図 2 : 図 1 に示した波形のスペクトル (H_x)。

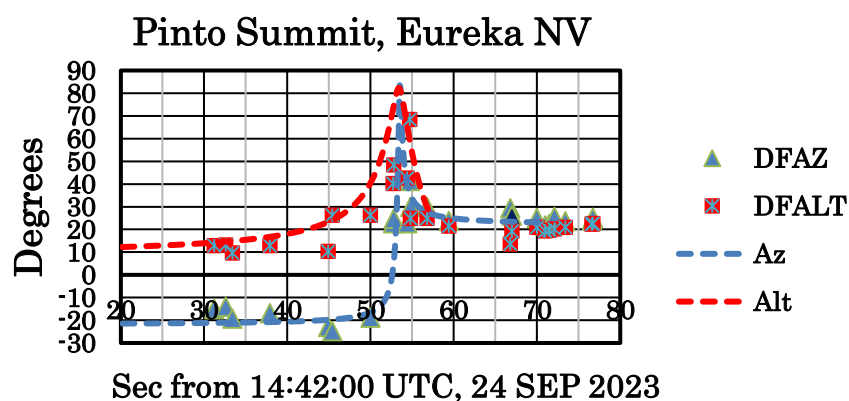


図 3 : VLF 電波源の方位角 (DFaz、東西線を基準、北側が正)、高度角 (DFALT、地平線を基準、北側が正)。点線は予想方位角 (Az)、予想高度角 (Alt)。時刻は再突入の予想開始時刻 2023 年 9 月 24 日 14:42:00 (UTC)からの経過時間 (秒)。

衛星搭載イメージング・分光光学系の設計と開発
Design and development of visible and ultra-violet imaging spectrograph

坂野井 健、東北大学・理学研究科

【研究目的と意義】

現在、磁気圏・電離圏・熱圏コミュニティでは、将来観測のためのISAS/JAXA小型衛星計画FACTORSの検討が行われている。これは極域を複数の衛星が編隊飛行で周回する計画であり、オーロラカメラが搭載される予定である。特に、微細オーロラの高速変動とそれを引き起こす現象の解明に取り組む。一方、NICTを中心に静止軌道衛星に紫外イメージャーを搭載して電離圏擾乱を監視する検討を進めている。今後の研究のためには、最新技術と知見に基づく衛星用の紫外カメラと可視高感度カメラの技術向上が不可欠である。本研究は、これらの将来衛星に搭載し、オーロラ・大気光の微弱発光を観測可能なイメージングカメラの基礎開発を行うことを目的とする。

FACTORS衛星によるオーロラ観測には、数千kmの高度から、れいめい衛星以上の時間・空間分解能を達成することが求められており、約一桁高い感度(受光フォトン数とノイズの比)が必要である。現在、可視カメラは日陰時のみに530x530km程度(高度約4000km、視野約8x8度)を空間分解能約1x1kmで詳細観測を行う計画である。紫外カメラは、当初の広視野カメラ設計を見直し、比較的狭い視野を高速・高空間分解する性能要求をすることとなった。昨年度まで紫外カメラの光学設計と浜ホト製・CCDセンサ試験パッケージ、紫外カメラ筐体真空チャンバと紫外用レンズ光学系を調達した。これらを用いた実験、すなわち紫外センサの電気試験、紫外分光感度試験を行う。今後、紫外・可視ともにカメラ試験器を用いて動作試験および感度試験等の検討と性能検証を行う必要がある。ならびに可視センサ試験品をもちいた動作試験を行う必要がある。これらの課題に対して、本研究経費用いて分担者との間で装置仕様と科学意義の検討と情報共有をはかり、プロジェクト成立性に見通しを立てる。また、開発実験は外部資金を活用して行う。

【研究方法】

本研究は、ISAS/JAXAが主導する小型衛星FACTORSと、NICTが主導する静止衛星に可視・紫外カメラの基礎検討を国内共同研究者と推進する。具体的に本研究経費は、(以下敬称略)三好由純、平原聖文、大山伸一郎(名大ISEE)、浅村和史、山崎敦(ISAS/JAXA)、津田卓雄(電通大)が研究分担者であり、当年度は3年計画の3年次である。2020年度までに、FACTORS衛星計画に関連してISEE国際共同研究経費(一般:2018~2020、ならびに国際:2019-2021)を活用して、オーロラ微細構造の科学課題の検討、オーロラの粒子画像同時観測に最適な軌道検討、紫外用広角対物ミラー光学系の設計、大気光観測に基づく中性大気-電離圏結合解明の戦略について議論と開発が進められた。また、ISEE国際共同利用経費と外部経費(ISAS戦略開発経費、NICT-東北大マッチングファンド)を用いて紫外用CCDセンサと真空チャンバ筐体ならびに紫外屈折レンズ光学系を開発した。このように、研究目標に対し、複数の外部経費とISEE共同研究経費を適切に組み合わせて用いながら実現を図る。具体的に、本研究経費は名古屋大学の分担者と実験に必要な治具や材料調達に用いる。

【研究結果】

2023年度は、前年度に発生した紫外カメラ用CCD(浜松ホトニクス製)のソケット嵌合問題を解決し、紫外カメラ用の真空チャンバに高さ調整用の治具を製作して設置した(図1)。また、基盤とカメラヘッドの真空-大気間の電気信号ケーブルを自作した。さらに、これまで製作していた真空紫外用のCaF₂レンズをチャンバに取り付け、紫外カメラの試験器を完成させた(図2)。これを用いて電気試験を行った結果、入射光(可視光)に対する正常なカウント値上昇が確認できた。一方、ISASの紫外分光器試験については、共同研究者と検討の結果、この光源の強度は微弱であり、目的とする遠紫外光のカウント値上昇の評価が困難であると判断された。このため、まずこの紫外カメラ試験器に重水素ランプ光を直接照射させ、遠紫外光に対するCCD検出器の応答を調べることとした。この試験は2024年度に予定されている。

また、可視カメラについては、耐放射線性CMOS検出器の宇宙実証のあるベルギー・カエレストテ製sCMOS(2048x2048)ならびに読み出し・制御エレクトロニクスを別経費にて購入し、これにレンズマウントを取り付けて撮像可能とした(図2)。これを用いて、シングル撮像、連続撮像の機能を試験した結果、ノイズの低い均質かつシャープな画質と、100frame/sでも十分に連続撮像ができることを確認することができた。これにより、感度試験、放射線試験などのより定量的な試験を行う準備を整えることが出来た。

【今後の方針】

2024年度以降に、極地研積分球をもちいた感度試験、および放射線性試験を予定している。これらは外部経費用いて行われる計画である。



図1. (左) 紫外カメラチャンバ蓋部にとりつけられた遠紫外用 CaF₂ レンズ。角度調整機構をつけてある。(中) 紫外チャンバ内に取り付けられた CCD 固定治具と CCD 検出器、(右) 紫外カメラチャンバ組み上げ作業中の状況。手前にあるのが民生品カメラヘッドで、これにケーブル・コネクタを嵌合させることで正常動作を確認した。

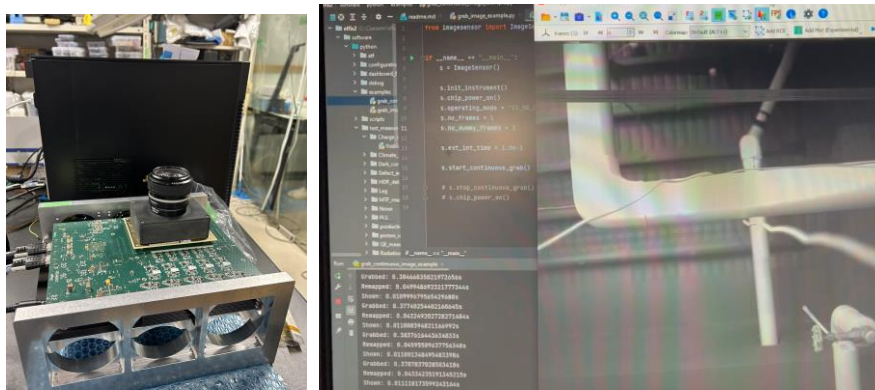


図2. (左) カエレステ社製 sCMOS および制御基盤に取り付けられたカメラレンズ。ニコン F マウントに加え、SM1, SM2 マウント取り付け可能とした。(右) カメラ撮像画像例(天井の配管を撮したもの)。Python により、様々な露出、ビニング、元などを調整しながら撮像可能とする環境を構築した。

【 成果発表 】

<査読論文 (合計6件、以下抜粋)>

- Oyama, S., K. Hosokawa, H. Vanham?ki, A. Aikio, T. Sakanoi, L. Cai, I. I. Virtanen, K. Shiokawa, N. Nishitani, A. Shinbori, Y. Ogawa (2023), IMF Dependence of Midnight Bifurcation in the Thermospheric Wind at an Auroral Latitude Based on Nine Winter Measurements in Tromsø, Norway, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 50, 14, doi: <https://doi.org/10.1029/2023gl104334>.
- Oyama, S., A. Aikio, T. Sakanoi, K. Hosokawa, H. Vanham?ki, L. Cai, I. Virtanen, M. Pedersen, K. Shiokawa, A. Shinbori, N. Nishitani, Y. Ogawa (2023), Geomagnetic activity dependence and dawn-dusk asymmetry of thermospheric winds from 9-year measurements with a Fabry?Perot interferometer in Tromsø, Norway, *Earth, Planets Space*, Vol. 75, 70, doi: <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01829-0>.
- Namekawa, T., T. Mitani, K. Asamura, Y. Mioshi, K. Hosokawa, M. R. Lessard, C. Moser, A. J. Halford, T. Sakanoi, M. Kawamura, M. Nose, R. Nomura, M. Teramoto, M. Shumko, K. A. Lynch, A. N. Jaynes, M. G. McHarg (2023), Simultaneous Precipitation of Sub-Relativistic Electron Microburst and Pulsating Aurora Electrons, *Geophys. Res. Lett.*, April 23, 2023, <https://doi.org/10.22541/essoar.168167378.83120518/v1>.

<国際学会 (合計8件、以下抜粋)>

- Sakanoi, T., K. Asamura, Y. Miyoshi, K. Hosokawa, A. Halford, M. Lessard, Small-scale pulsating auroral distribution obtained with the auroral camera on the LAMP rocket, *JpGU Meeting 2023, Hybrid (Makuhari Messe - online)*, Chiba, Japan, 21-26 May 2023.
- Miyoshi, Y., K. Asamura, K. Hosokawa, T. Mitani, T. Namekawa, S. Saito, T. Sakanoi, M. Nose, K. Takahashi, Y. Obayashi, M. Lessard, A. Halford, M. Shumko, N. Paschalidis, M. McHarg, A. Jaynes, D. Hampton, V. Ledvina, K. Lynch, H. Kim, Relativistic electron microburst is a high-energy tail of pulsating aurora electrons: LAMP sounding rocket experiment and computer simulation, *JpGU Meeting 2023, Hybrid (Makuhari Messe - online)*, Chiba, Japan, 21-26 May 2023.

<国内学会/シンポジウム等>

- MCPを含む高感度紫外2次元検出器を応用：惑星観測用装置開発の東北大学の取り組み - FACTORS衛星搭載遠紫外カメラ開発を中心に -, 坂野井健、鍵谷将人、中川広務, マイクロチャンネルプレートの高感度化とその応用分野についての研究会, 東北大学, 仙台, March 28-29, 2024.