

2022年度 04)一般共同研究 目次詳細

56 件

*所属・職名は2023年3月現在

*Affiliation and Department displayed are current as of March 2023.

(注1): 新型コロナウイルスの影響で中止/Cancelled due to COVID-19

(注2): 中止/Cancelled

研究代表者 Principal Investigator	所属機関* Affiliation	所属部局 Department	職名* Job title	研究課題名 Project Title	頁 Page	備考 Remarks
湯口 貴史	山形大学	理学部	教授	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	82	
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る無衝突衝撃波の研究	86	
中野 佑樹	東京大学	宇宙線研究所	特任助教	Super-Kamiokandeを用いた宇宙線ミュオン強度変動の研究	88	
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	90	
岸田 拓士	ふじのくに地球環境史ミュージアム	学芸課	准教授	古代DNAによる先史時代の日本の生物多様性の解明	91	
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	92	
小島 正宜	名古屋大学		名誉教授	IPSスペクトル解析法の問題点	94	
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	96	
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精度化	97	
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1	99	

研究代表者 Principal Investigator	所属機関* Affiliation	所属部局 Department	職名* Job title	研究課題名 Project Title	頁 Page	備考 Remarks
浅村 和史	宇宙航空研究開発機構	宇宙科学研究所	准教授	「あらせ」衛星による内部磁気圏赤道域低エネルギーイオンの加熱現象とプラズマ波動の解析	103	
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	104	
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	106	
窪田 薫	海洋研究開発機構	海域地震火山部門	研究員	温暖化アナログとしての縄文海進最盛期の北海道沿岸部の水温・栄養 塩循環・海流の定量的復元	108	
後藤 直成	滋賀県立大学	環境科学部	教授	気候変動が琵琶湖における植物プランクトン群集に及ぼす影響 ～衛星リモートセンシングによるモニタリング～	110	
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	112	
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による代替フロン HCFC-142b/HFC-134aの経年変化の解析	113	
丸橋 克英	情報通信研究機構	電磁波研究所宇宙環境研究室	協力研究員	太陽風磁気ロープ構造に関わる解析手法の高度化	115	
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	117	
松田 昇也	金沢大学	理工研究域	准教授	あらせ衛星による波動・粒子観測データを用いた内部磁気圏重イオン分布に関する研究	119	
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	120	
津田 卓雄	電気通信大学	大学院情報理工学研究科	准教授	共鳴散乱ライダーシステムにおける絶対周波数基準の為の飽和分光実験	121	
Siswanto Eko	海洋研究開発機構	Earth Surface System Research Center	Researcher	赤潮モニタリングのためアルゴリズム開発	122	

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
鈴木 臣	愛知大学	地域政策学部	Professor	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	131	
横田 勝一郎	大阪大学	理学(系)	准教授	あらせ衛星搭載XEPの観測データを用いた応答特性評価	132	
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	134	
馬場 賢治	酪農学園大学	農食環境学群	准教授	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	135	
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	137	
野澤 恵	茨城大学	理学部	教授	宇宙物体突入時の直接電波観測による太陽電波バーストの解明	138	
西山 尚典	情報・システム研究機構 国立極地研究所	研究・教育系	助教	地上光学-磁気圏衛星の同時観測に基づく脈動オーロラの周期性および磁気圏プラズマの輸送-消失過程の研究	139	
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	141	
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	143	
北 和之	茨城大学	理工学研究科	教授	UAVを利用した上空でのバイオエアロゾルサンプリングと雲形成過程研究への応用	145	
河野 光彦	関西学院大学	理学部	研究員	高校生と行うビッグデータ分析による温室効果ガス排出源の探索方法の開発	148	
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	150	
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	152	

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
栗田 怜	京都大学	生存圏研究所	准教授	地上-あらせ衛星共同観測を軸とした脈動オーロラステレオ観測による降下電子エネルギーの時空間発展の推定	153	
田中 公一	広島市立大学	情報科学研究科	教授	太陽圏における銀河宇宙線伝播の研究	155	
河野 英昭	九州大学	国際宇宙天気科学・教育センター	准教授	SI時の中緯度SuperDARN ground/sea backscattersとFLRの関係	157	
中山 智喜	長崎大学	環境科学部	准教授	都市および森林におけるPM2.5中の有機成分の光学特性と化学特性のオフライン分析	159	
眞部 広紀	佐世保工業高等専門学校	一般科目	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	160	
大東 忠保	防災科学技術研究所	水・土砂防災研究部門	主幹研究員	積乱雲の発生過程解明のための大気環境場観測	162	
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	164	
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	165	
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	167	
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	168	
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	169	
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	171	
下条 圭美	自然科学研究機構 国立天文台	アルマプロジェクト	准教授	豊川太陽電波強度偏波計データベースを使った過去の大フレアにおける粒子加速の研究	173	

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
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	174	
岳藤 一宏	宇宙航空研究開発機構	臼田宇宙空間観測所	主任研究開発員	低周波VLBIによるCrabパルサーの精密なDM決定にむけて	175	
松岡 彩子	京都大学	理学研究科	教授	あらせ軌道上磁場データの評価と特性向上の検討	183	
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	184	
村木 綏	名古屋大学	宇宙地球環境研究所	名誉教授	太陽のインパルスフレアで生成された太陽宇宙線の加速機構の研究	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	190	
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	192	

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
Three-dimensional internal structures within quartz crystals and
the quantitative analysis of minor component in the quartz.

湯口貴史 山形大学 理学部
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。特に、石英は岩体内部での岩相が異なっても普遍的に産出するケースが多い。例えば、宮崎県の大崩山花崗岩体では3岩相（黒雲母花崗岩、ホルンブレンド黒雲母花崗岩、ホルンブレンド黒雲母花崗閃緑岩）に共通して石英を産出し、岩手県の遠野複合深成岩体でも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、カソードルミネッセンス（CL）に基づく成長構造の解明（例えば、[Drivenes et al., 2016](#)）や、結晶化温度の導出（例えば、[Wark and Watson, 2006](#)）などの結晶化の際の情報から、石英の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（例えば、[Yuguchi et al., 2020](#)）。

石英の微量含有元素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と山形大学間で一般共同研究として実施された。CL像は、結晶構造の乱れや結晶中の微量な含有成分に起因する（[Drivenes et al., 2016](#)）。このため、CL像の解析により、石英の結晶成長の様式を推定可能である。石英中のチタン（Ti）濃度は石英の結晶化温度に依存する。このためTi濃度をTitaniQ温度計に適用することによって、そ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その定量分析は困難である。そこで2016年度から2018年度は岩手県の遠野複合深成岩体および岐阜県の土岐花崗岩体の石英を対象とし、2019年度から2022年度の間は富山県の黒部川花崗岩体、宮崎県の大崩山花崗岩体および岩手県の久喜花崗岩体の石英に対して研究を実施した。この長期間の共同研究によって、名古屋大学・宇宙地球環境研究所（ISEE）のEPMAを用い、かつ様々な深成岩体中に産出する石英を対象とすることで、Ti濃度の高精度定量分析法を構築した。また、2020年度から2022年度はTi濃度だけでなく、アルミニウム（Al）濃度の同時定量分析を実施し、高精度で定量する分析手法を獲得した（土岐花崗岩体における成果は *Journal of Asian Earth Sciences* にて公表（[Yuguchi et al., 2020](#)）するとともに、その他の岩体における成果は日本鉱物科学会の2018年年会から2021年年会において、成果を公表）。

2021年度の共同研究において、石英の正確な結晶化温度を導出するためには、石英の真のコアを定量分析する必要性が新たな課題として認識した。これは薄片試料を対象とすることに起因する。2022年度の共同研究では、遠野複合深成岩体では薄片試料を対象とし、大崩山花崗岩体と久喜花崗岩では、石英分離・樹脂埋めを行い、マウント試料を対象とする。マウント試料に対しては、段階的な研磨を行い、それぞれの段階ごとにカソードルミネッセンス像観察を行い三次元的な内部構造を取得した。最終的に石英の中央（コア）断面で、EPMAによる局所領域でのTi濃度とAl濃度をセットで取得する。本研究は、この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結晶化プロセスの理解の高度化を目指すものである。

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（JEOL IT100A+Gatan mini CL）を用い、石英中のTi・Al濃度定量には名古屋大学ISEEのEPMA（JCXA-733）を用いた。Ti・Al濃度定量の分析条件は、加速電圧15kV、照射電流60nA、ビーム径20 μ m、1回の測定時間を200s（ピーク：100s、バックグラウンド：50sずつ）とし、同一地点で8回（計1600s）カウントした値を積算することにより1点の定量値を得る。これまでの手法では、1つの分光結晶（TAP）をSiのカウントに割り当て、石英へのダメージのモニタリングを行った。しかし、[Yuguchi et al. \(2020\)](#)をはじめ、これまでの石英分析で、上記の分析条件で結晶へのダメージは確認されなかつ

た。このため、これまで Si のカウントを行っていた分光結晶 (TAP) を Al の検出に割り当て、残り 4 つの分光結晶 (PET) を Ti の検出に割り当てた。EPMA 分析後の SEM 観察にて、石英の全ての分析点でダメージが生じていないことを確認した。この手法により、Ti 濃度の検出限界は 15 ppm, Al 濃度の検出限界は 16 ppm, それぞれの分析誤差は約 10% の精度で定量値を取得できた。このような小さな誤差を伴う定量値の導出は、石英結晶の内部構造と Ti 濃度や Al 濃度の関連性の高精度な解明を可能にする。

3. 研究結果・考察

大崩山花崗岩体 (マウント試料), 久喜花崗岩体 (マウント試料), および遠野複合深成岩体 (薄片試料) で得た結果について報告する。

大崩山花崗岩体においては 26 点の Ti・Al 濃度の定量分析を行った。Al 濃度は $253 \pm 22 \sim 1421 \pm 13$ ppm の幅を持ち, Ti 濃度は $107 \pm 11 \sim 260 \pm 11$ ppm の幅を持つ。この Ti 濃度を TiO_2 の活動度を 1 として Wark and Watson (2006) の地質温度計を用いて計算を行うと結晶化温度 $761 \pm 25^\circ\text{C}$ から $877 \pm 21^\circ\text{C}$ の幅を有する。

大崩山花崗岩体において、段階的な研磨と BSE 画像・CL 画像を取得することにより、CL 画像から内部構造の空間的な分布を把握することができた。図 1 は、大崩山花崗岩体の石英 (サンプル No. 052405Q-5) のリムからコアへと至る 4 断面 (150 μm 間隔) の BSE 像と CL 像である。この CL 像から、オシラトリゾーニングの空間的な変化を見て取ることができ、結晶成長の開始地点を特定できる。また、図 2 は図 1 の石英粒子の中心断面で実施した Ti ならびに Al 濃度の分析位置とその変化を示すラインプロファイルを示した図である。この石英粒子の中央断面は CL 像においてコアからリムに向けて明暗の輝度が層状に変化するオシラトリゾーニングが観察される。ラインプロファイルより、CL 像の高輝度域で高い Ti 濃度、低輝度域で低い Ti 濃度を持ち、輝度と Ti 濃度の間には正の相関を有することを把握した。

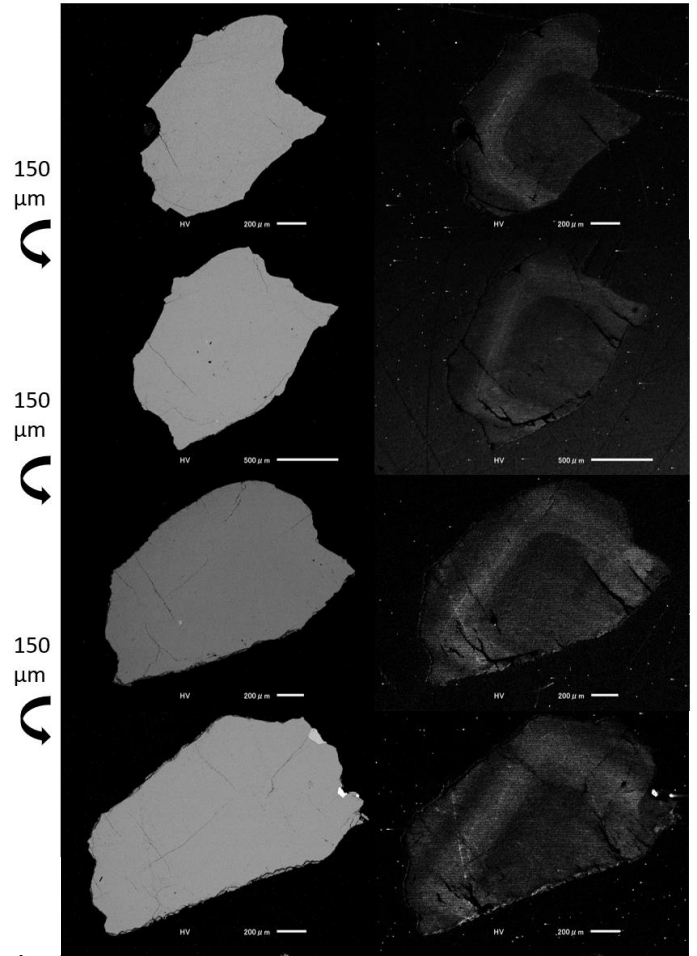


図 1 大崩山花崗岩体の石英粒子中の 4 断面における BSE 像 (左図), CL 像 (右図)

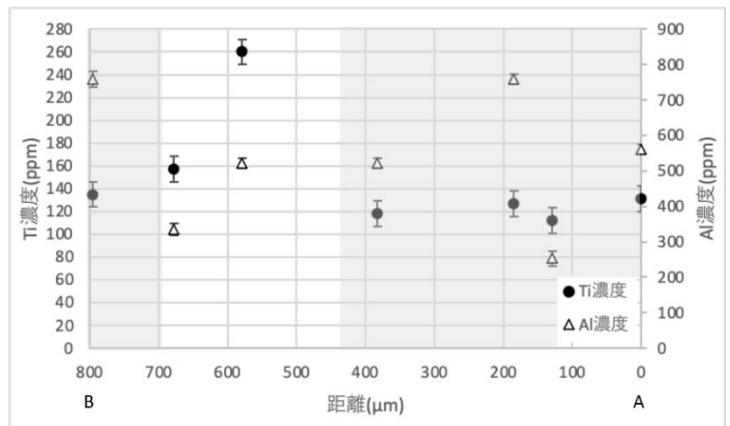
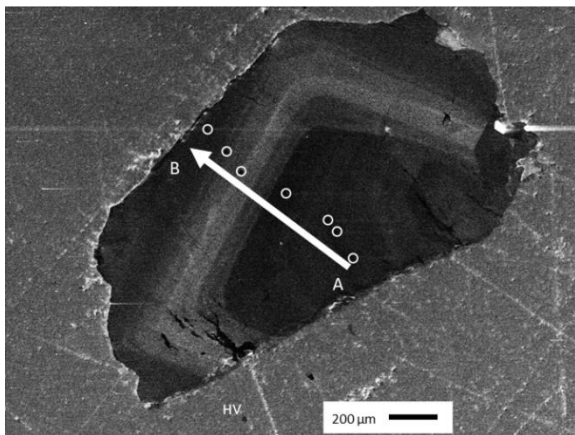


図 2 大崩山花崗岩体の石英粒子の中央断面における CL 像と微量含有元素のラインプロファイル (Ti 濃度と Al 濃度)

図2のラインプロファイルの0 μm付近が、対象とする石英粒子の真のコアと捉えることができる。実際のTi濃度は131 ± 11 ppmであり、高輝度域(450 ~ 700 μm領域)と比べて低い。このことはメルトから石英の晶出が開始する際(真のコア)に、TiO₂活動度が低く、CL画像で高輝度の580 μm付近(260 ± 11 ppm)が晶出する際にはTiO₂活動度が高くなるというメルト中の活動度の局所的な変動現象を反映すると解釈される。このことは仮に真のコアを分析しても、その際のメルト中のTiO₂活動度次第では、正しい結晶化温度を捉えられないことを示している。

久喜花崗岩体においては、36点のTi・Al濃度の定量分析を行った。Al濃度は299 ± 9 ~ 1901 ± 361 ppmの幅を持ち、Ti濃度は108 ± 11 ~ 304 ± 9 ppmの幅を持つ。このTi濃度をTiO₂の活動度を1としてWark and Watson (2006)の地質温度計を用いて計算を行うと結晶化温度757 ± 14°Cから901 ± 20°Cの幅を示す。CL輝度の変化を有する石英は最大900°Cの結晶化温度を持つことを示しており、深成岩体の石英としては比較的高温で結晶化したことを示している。図3は久喜花崗岩中の石英粒子の中央断面のTi濃度のラインプロファイルを示したものである。このラインプロファイルは、CL像の輝度とTi濃度の間には正の相関を有することを示している。

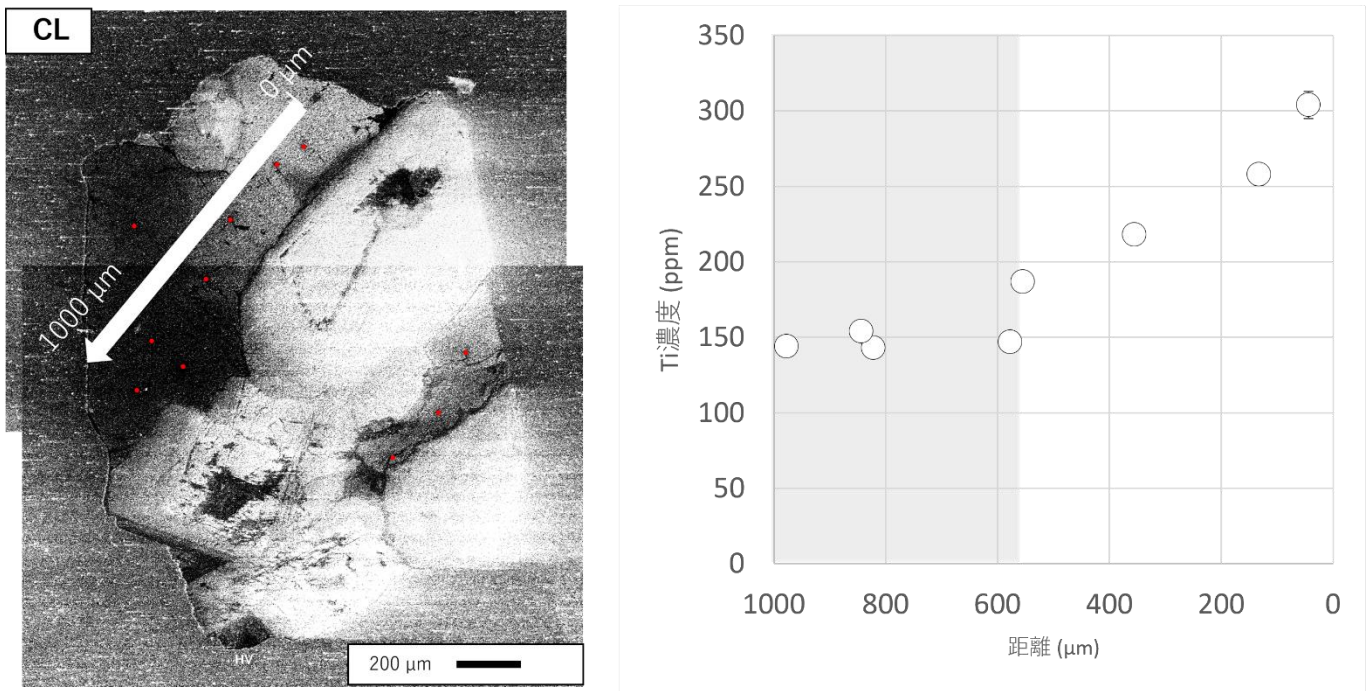


図3 久喜花崗岩体の石英粒子の中央断面におけるCL像と微量含有元素のラインプロファイル (Ti濃度)

遠野複合深成岩体においては、93点のTi・Al濃度の定量分析を行った。Al濃度は検出限界以下となり、Ti濃度は16 ± 12 ~ 708 ± 12 ppmの幅を持つ。TiO₂の活動度を1としてWark and Watson (2006)の地質温度計を用いて計算を行うと結晶化温度は561 ± 119°Cから1053 ± 21°Cの幅を持つ。また、遠野複合深成岩体においてもCL像の輝度とTi濃度の正の相関も確認されている(図4)。

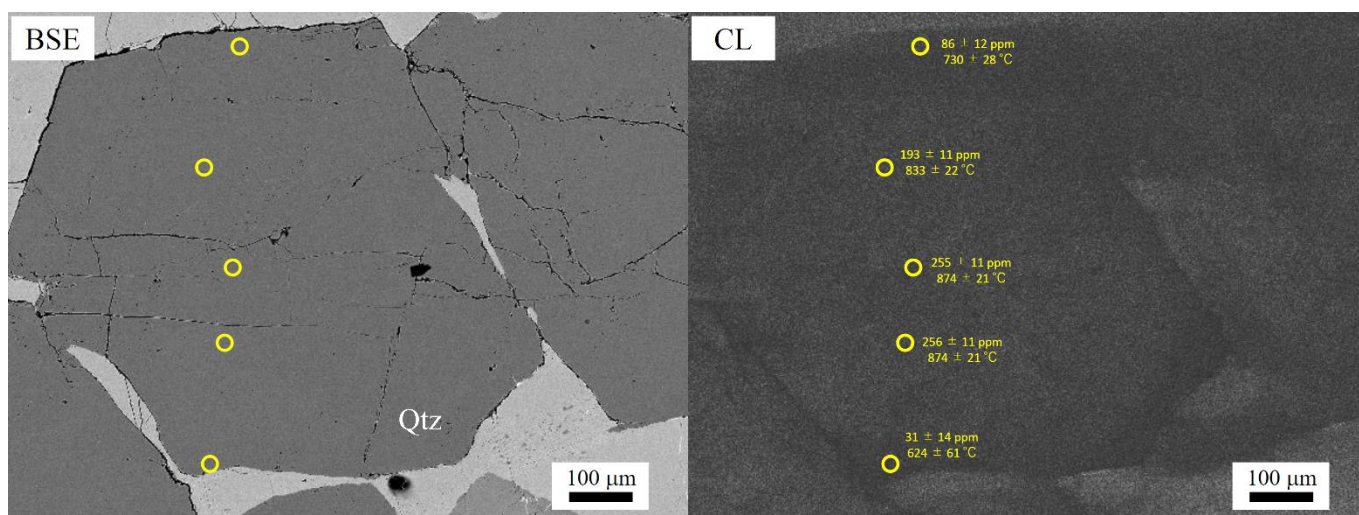


図4 遠野複合深成岩体の石英粒子のBSE像、CL像と微量含有元素のラインプロファイル (Ti濃度)

以上の点から、本共同研究において石英中の微量含有元素であるTi濃度とAl濃度を同時定量手法と石英粒子の段階的な研磨による内部構造の解明を結び付けることを可能にした。今後は、この手法をより多くの石英粒子に対して実施し、石英の結晶化プロセスや結晶化温度に関する普遍的な知見を得ることが次年度の課題となる。

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.
- 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.

(別紙様式 4-2)

高強度レーザーで生成される無衝突衝撃波の研究
Study of collisionless shocks generated by high-power lasers

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、過去9年間、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、測定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：ショット前に封入した窒素がターゲットから放出される電離光子によって磁化プラズマとなるが、プラズマ自発光計測やトムソン散乱計測の結果から、磁化された窒素プラズマ中を伝播するMSの生成に成功したと結論した。また、[1]-[3]の成果発表を行なった。さらに、2022年度は外部磁場3.9 Tを印加したショットを16回行った。外部磁場のかける方向(y方向)はターゲットから放出されるプラズマの進行方向にほぼ垂直であるが、その向きを正の向き($B_y > 0$)にしたショットを3回、負の向き($B_y < 0$)にしたものを13回行った。これらのショットの自発光イメージング計測や磁場計測の結果、 $B_y > 0$ の場合と $B_y < 0$ の場合で、結果が異なることがわかった。特に、無衝突磁化衝撃波の遷移層で生じたと考えられる磁場の波動の測定に成功し、PICシミュレーションの計算結果と比較した。また、自発光イメージング計測では、アルミプラズマと窒素プラズマの境界面の不安定性をみとめ、その起源について考察した。揺らぎがMHDスケールであることが分かったので、新たな2次元流体シミュレーションの計画を立てた。

学会発表：

- [1] 「**激光XII号による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，光・量子ビーム科学合同シンポジウム(OPTO2022) (2022年6月28日-29日，関西光科学研究所)
- [2] 「**磁化プラズマ衝撃波の長時間発展の大型レーザー実験**」，東 力也，松清 修一，諫山 翔伍，山崎 了，森田 太智，竹崎 太智他11名，第152回地球電磁気・地球惑星圏学会 総会・講演会 (2022年11月4日-7日，相模原市産業会館) 特別セッション「SGEPSS・天文学会・物理学会合同セッション：室内実験・惑星・天体プラズマの普遍性と多様性」
- [3] 「**磁化プラズマ中を伝播する無衝突衝撃波の生成実験：現状報告**」，山崎 了，高エネルギー宇宙物理学研究会2022 (2022年11月8日-10日，広島大学)

(別紙様式 4-2)

Super-Kamiokandeを用いた宇宙線ミュオン強度変動の研究
Study of time variation of cosmic-ray intensity using Super-Kamiokande

中野 佑樹 (東京大学宇宙線研究所)

[研究の背景と目的]

本研究では、スーパーカミオカンデで観測される宇宙線ミュオンの電荷比と偏極を測定する研究を推進する。具体的な手順は以下になる。

(ア) 電荷比:

宇宙線ミュオンの内、スーパーカミオカンデ内部で止まったミュオンから放出される電子をタグすることで、ミュオンの時定数を測定する。この時、一部の負ミュオンは原子核に吸収されるため、時定数が見かけ上小さくなる。従って、測定された時定数と真空中のミュオンの時定数との比較を行うことで、負ミュオンの割合を算出し、電荷比を求めることができる。電荷比はエネルギー依存性が確認されており、スーパーカミオカンデの場合、地表で1.2 TeV程度の宇宙線ミュオンが到来するため、約1.3-1.4程度の電荷比が期待されている。

(イ) 偏極:

荷電パイオンの崩壊を由来とする宇宙線ミュオンは、2体崩壊であるため、ほぼ完全に偏極している。従って、宇宙線ミュオンは進行方向と平行なスピンをもつことが期待される。宇宙線ミュオンの到来方向と、崩壊電子の放出方向の間の角度を算出することで、宇宙線ミュオンの偏極を測定する。

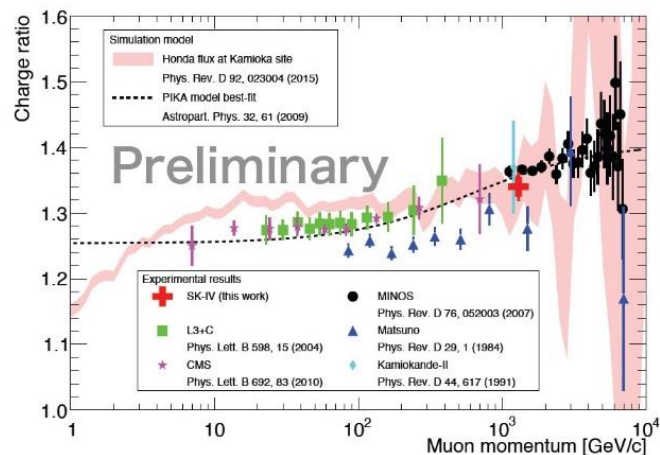
(ウ) パイオン/ケイオンの割合:

地下素粒子検出器まで飛来できる宇宙線ミュオンは大気中での原子核反応を起源とする。この時、ミュオンの大部分は荷電パイオンを起源とするが、一部は荷電ケイオンを起源とする。荷電ケイオンはパイオンに比べて時定数が短いため、大気中の他の原子核と衝突をする前に崩壊する。従って、エネルギーを失いにくく、高いエネルギーを持つミュオンが生成される。大気中の密度が低くなる時期(夏)は、ケイオンの衝突割合が減少するため、相対的にエネルギーの高いミュオンが多く生成される。そのため、地下素粒子実験にまで到達できるミュオンの数が増加することが期待される。以上の理由により、宇宙線ミュオンの年次変化を追うことで、宇宙線ミュオンの起源としてどの程度パイオン(ケイオン)が含まれているかを研究する。

[研究の進展と成果]

(ア) 電荷比に関して

本年度は、ミュオンから放出される崩壊電子の観測データを解析し、Decay time分布とEnergy分布の2つを組み合わせることにより、電荷比を測定する手法を開発した。Super-Kamiokande-IVの2971日分の観測データとMC simulationを比較することにより、宇宙線ミュオンの電荷比を決定し、 1.34 ± 0.02 (stat.+syst. preliminary) という結果を得た。これは宇宙線ミュオンに関連するsimulation(本来は大気ニュートリノ用のsimulation)の予想と、見積もった誤差の範囲で矛盾しない結果となった。



(イ) 宇宙線ミュオン偏極測定

(ア)と同様に、正負の電荷で物理が異なるため、電荷に対応する2つのsimulationを開発した。正ミュオンは自由な崩壊として考えられるが、一方で負ミュオンは原子核に捕獲されるため、自身の偏極を失う場合があり、その際に崩壊電子の放出方向に影響があることが分かった。MC simulationにこれらの効果を含め、一般的な自由な崩壊とはわずかに異なる方向分布を導入した。次に、完全偏極(正の偏極、負の偏極)を仮定したMC simulationを作成し、このsimulationの組み合わせによって、任意の偏極の場合の方向分布を作成する手法を開発した。現在、系統誤差の評価を進めており、ICRC2023にて研究成果を公表する予定である。

(ウ) パイオンとケイオンの割合に関する研究

本年度は、まず気象庁によるラジオゾンデ測定「JRA-55：気象庁 55年長期再解析」で公開されている大気高層の温度、圧力の情報を1996年から2022年まで取得した。この期間は、Super-Kamiokande実験が観測運転を継続している時期と対応する。次に、このJRA-55の情報から大気のeffective temperatureを算出した。Effective temperatureとは、宇宙線ミュオンの発生する領域(密度の大きい領域)での温度で、宇宙線ミュオンの発生しやすい(密度の高い、1次宇宙線の多い)領域でweightが大きくなるように算出する1つの数値である。この結果、岐阜県飛騨市近郊でのEffective temperatureは220 Kであり、その季節的な変動は±1%程度であることが分かった。

次に、Super-Kamiokande実験で観測されている宇宙線ミュオンの観測データの物理解析を実施した。宇宙線ミュオンは典型的に1秒に2回程度の頻度で観測されている。1996年4月から2022年6月までの観測データから、宇宙線ミュオン事象を選択し、その観測頻度の時間変化を定量的に評価した。次に、その観測頻度とEffective temperatureの相関を評価した。これらの物理解析により、宇宙線ミュオンの k/π ratioを算出できることが分かった。現在、系統誤差の評価を実施しており、経過は順調である。最終的な研究成果は ICRC 2023にて公表を予定している。

[研究成果]

Y. Nakano et al., 「Measurements of the charge ratio of cosmic-ray muons with the Super-Kamiokande detector」 Unraveling the history of the universe and matter evolution with underground physics 東京理科大学 2023年6月13日-15日 (国際会議、ポスター発表)

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。

請戸川源流に近い南津島地区、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南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を用いて濃縮操作を行ったのちに測定を実施した。

図に南津島地区の請戸川 (2021年4月~2022年5月)、幾世橋地区の請戸川 (2021年10月~2022年5月) および加倉地区における井戸水 (2021年10月~2022年5月) の水素・酸素安定同位体比の関係を示す。南津島地区の水素同位体比は-59.20~-58.09 ‰の範囲で平均 (±S.D.) -58.53±0.59 ‰、酸素同位体比は-9.12~-9.20 ‰の範囲で平均 (±S.D.) -9.15±0.05 ‰であった。幾世橋地区の水素同位体比は-52.49~-54.24 ‰の範囲で平均 (±S.D.) -52.67±0.90 ‰、酸素同位体比は-8.29~-8.55 ‰の範囲で平均 (±S.D.) -8.32±0.13 ‰であった。一方、加倉地区井戸水の水素同位体比は-46.92~-48.33 ‰の範囲で平均 (±S.D.) -46.94±0.86 ‰、酸素同位体比は-7.23~-7.38 ‰の範囲で平均 (±S.D.) -7.26±0.07 ‰であった。水素酸素同位体比は上流側である南津島が最も軽く、下流に向かうにつれて重くなる傾向にあった。これは、水が流れる過程において軽い水蒸発に寄り失われたことを示すものである。一方、南津島と幾世橋の中間に位置する加倉の井戸水の水素同位体比は最も重い結果となった。本研究では、津島地区および幾世橋地区において月間降水を採取し、その水素・酸素安定同位体比の測定も行っている。今後、降水と河川水および井戸水の安定同位体比を比較することで、その特徴を明らかにする予定である。

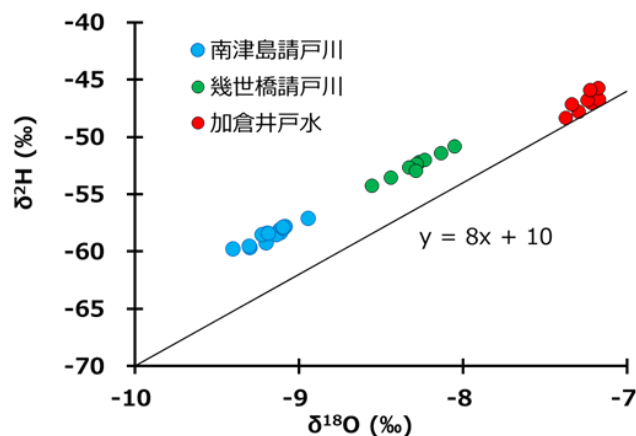


図 河川水および井戸水の水素・酸素安定同位体比の特徴

(別紙様式04-2)

古代DNAによる先史時代の日本の生物多様性の解明
Genetic diversity of animals in pre-historic Japan based on the ancient DNA

岸田拓士、ふじのくに地球環境史ミュージアム

東京湾周辺は、世界最古の先史時代捕鯨サイトの一つであり、遅くとも縄文時代早期から海棲哺乳類の捕獲が行われていた。特に、神奈川県横浜市金沢区に位置する称名寺貝塚には、縄文時代中期から晩期にかけての大規模な先史時代捕鯨の痕が残されている。本研究では、ふじのくに地球環境史ミュージアムに構築した古代DNA専用クリーンルーム(図1)において称名寺貝塚から出土した鯨類の歯や骨からDNAおよびコラーゲンを抽出した。コラーゲンに含まれる炭素原子の放射性同位体比を名古屋大学宇宙地球環境研究所の加速器質量分析計で測定した結果、分析試料の年代はいずれも5000~3000年前のものであることが解明された。この年代は、称名寺貝塚の年代と一致する。



図 1. ふじのくに地球環境史ミュージアムに構築した古代 DNA 専用クリーンルームで DNA 抽出作業を行う代表者

DNAを抽出してミトコンドリアD-loop領域を解読することで、出土した鯨類の種を判別し、現在の個体群との比較を行った。カマイルカのDNAが最も多く解読され、次いでミナミハンドウイルカとハンドウイルカのDNAが得られた。いずれの種も、現在も東京湾周辺に生息する個体群が持つハプロタイプと同じハプロタイプが得られており、加えて現在では東京湾周辺では見つからないハプロタイプも得られた。これらの結果は、当時の東京湾の鯨類の遺伝的多様性は現在のそれよりも高かったこと、そしてこれら小型鯨類の母系集団は過去数千年間に渡って生息地が固定されていることを示唆している。

得られた結果は、現在論文にまとめて執筆中である。

(別紙様式 4-2)

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)

Improvement of cloud-resolving model by using data of polarimetric radar (1行スペース)

佐藤正樹・東京大学大気海洋研究所

(2行スペース)

研究方法

これまで気象予測に利用されていない二重偏波ドップラー気象レーダーの偏波情報等の観測データを用いて、雲解像モデルの結果を観測シミュレータを通して観測結果と比較し、雲解像モデルの改良をする。特に雲物理スキームの高度化により雲解像モデルの予測精度の向上を図る。

雲解像モデルでは、雲降水過程について、大気中の水物質を雲水、氷、雨、雪、あられといったカテゴリーに分類した雲物理スキームを用いる。二重偏波ドップラー気象レーダーの観測データに、降水粒子の種類が判別できる観測シミュレータを適用し、雲物理スキームの検証・改良を行う。二重偏波ドップラー気象レーダー以外にも東京大学大気海洋研究所での雲粒及び雨滴の観測データも解析する。

研究結果

昨年度より関東圏の二重偏波ドップラー気象レーダーと東京大学大気海洋研究所において開発している全球非静力学モデル NICAM のシングルモーメント雲微物理スキーム(NSW6:Tomita 2008; Roh and Satoh 2014)、気象庁開発の局地モデル asuca のシングルモーメント微物理スキーム(MSM2003; Ikuta et al. 2021)のそれぞれについて比較を行っている。2020年4月18日を対象とした比較の結果は Satoh et al. 2022 として本年度出版された。このような二重偏波レーダーとの比較検討の結果、NSW6 の結果については、融解層より上で、強い反射強度を十分に表現できない傾向があることが分かっている。NSW6 では霰の粒形分布の表現に用いる切片パラメータが大きく、小さな霰しか表現できないことが原因と考えられる。切片パラメータの改良のみでは、反射強度の再現性の向上が見られなかったため、新たに霰として、霰よりも大きく、終端速度が速い粒子を導入したスキーム(NSW7)開発シミュレーションを行った。

ストレージ格子を用い関東域を対象にした局地シミュレーションを2021年3月13日の事例に対して行った。図1に成田空港レーダーとシミュレーションの反射強度のCFADの比較を示す。NSW6 では高度3kmよりも上で40dBZを超える反射強度が出現せず、階段状になっている。一方でNSW7 では40dBZを超える反射強度も表現できるようになっている。また、NSW7の方がNSW6に比べ強い降水強度を表現し、レーダー雨量から求めた観測結果に近づいた。

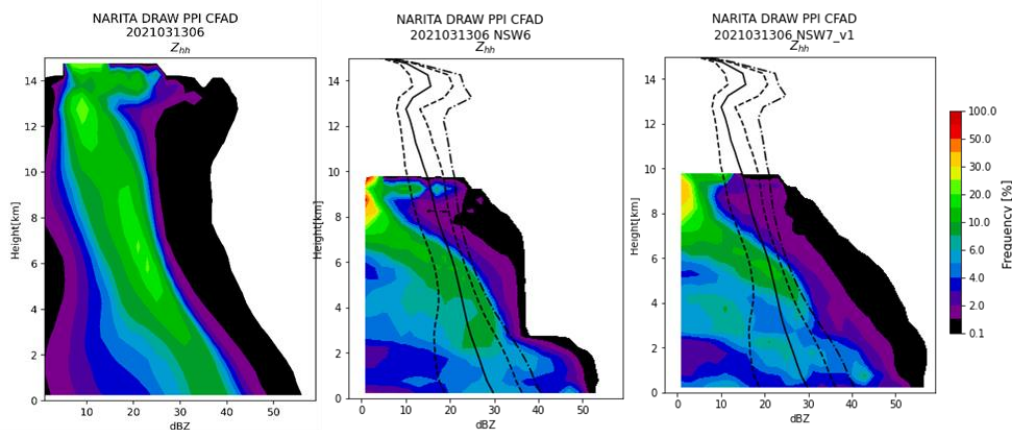


図 1 レーダー反射強度の CFAD。左から成田レーダー、NSW6、NSW7。シミュレーションは 10km まで計算。シミュレーションの破線は成田レーダーの 25,75 パーセンタイル値、実線は 50 パーセンタイル値、一点鎖線は 90 パーセンタイル値を示す。

開発した NSW7 を用いて、全球通年シミュレーションも行った。図 2 に全球シミュレーションで得られた雹の頻度分布を示す。全球シミュレーションは水平格子間隔 14km と荒い解像度でシミュレーションを行ったものの、衛星観測で推定された雹の分布に近い分布が得られた。

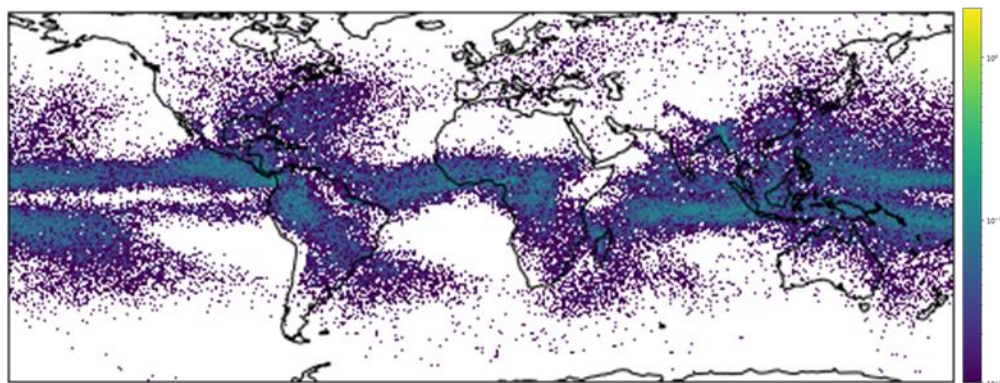


図 2 6 時間間隔出力の 1 年間のシミュレーションデータから計算した鉛直カラム内で雹が 10^{-6}kg/kg を超える頻度の水平図。

また、asuca においても MSM2003 をベースに雹のカテゴリを加えたスキームを開発した。MSM2003 では雹の切片パラメータが小さく、雹が支配的な領域での反射強度が過大になる傾向があるため、雹の切片パラメータを大きくしたうえで雹を導入した。関東域での観測との比較では、過大な反射強度が改善される傾向が見られた。

出版論文

Satoh, M., Matsugishi, S., Roh, W. *et al.* Evaluation of cloud and precipitation processes in regional and global models with ULTIMATE (ULTRa-sItE for Measuring Atmosphere of Tokyo metropolitan Environment): a case study using the dual-polarization Doppler weather radars. *Prog Earth Planet Sci* **9**, 51 (2022). <https://doi.org/10.1186/s40645-022-00511-5>

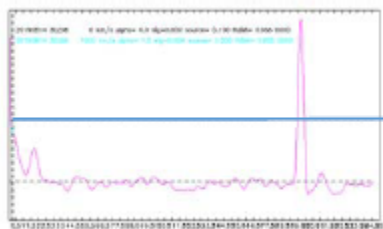
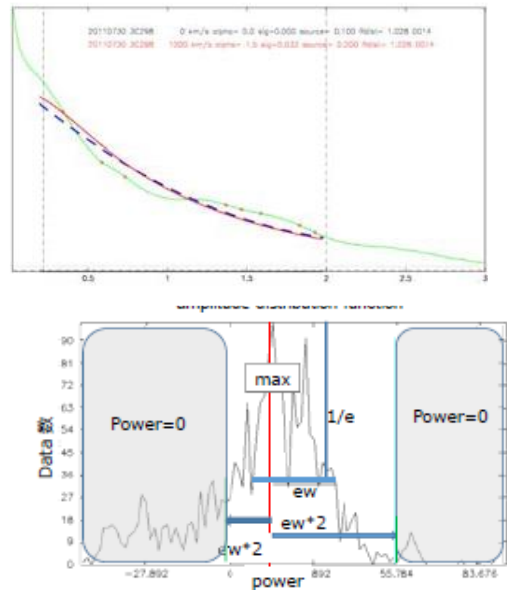
IPSスペクトル解析法の問題点
How to improve IPS spectral fitting analysis

小島正宜 名古屋大学

IPS信号のスペクトル解析により求めた速度 V_{spct} を相関法から得られた速度 V_{ccr} と比較し解析法の評価と改善を行ってきた。特にスペクトル解析を単純な最小自乗法(LSQ法)で行った時、s/n の良いデータであるのに LSQ法による評価がうまくできない事例が多く見つかったのでそれらの解決法を考察した。

最初に元データに含まれるノイズを除去する。ノイズにはパルス性のもの、周期の長い大振幅のものなど性格が異なるものがあるので、それぞれに適した除去方法が必要である。パルス性のノイズはmedian meanで処理できるが、左図のようにwhite noise levelが下がり過ぎ、高速風でmodel fitされる危険性があることが分かった。そこでmedian meanの代わりに振幅強度分布(左下図)を解析し大振幅データを除去する方法を考えた。除去されたデータポイントが全データの10%以上あるときは解析を行わない。

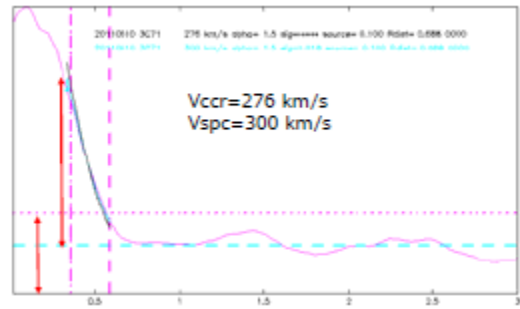
このようにして前処理されたデータをフーリエ変換しスペクトルを求める。IPS成分は2Hz以下に主に存在するが、高域に下図のようなパルス状のノイズが現れることがある。これを除去しておかないとwhite noiseが上がる。スペクトルでこのようなノイズの除去にはmedian meanが有効である。



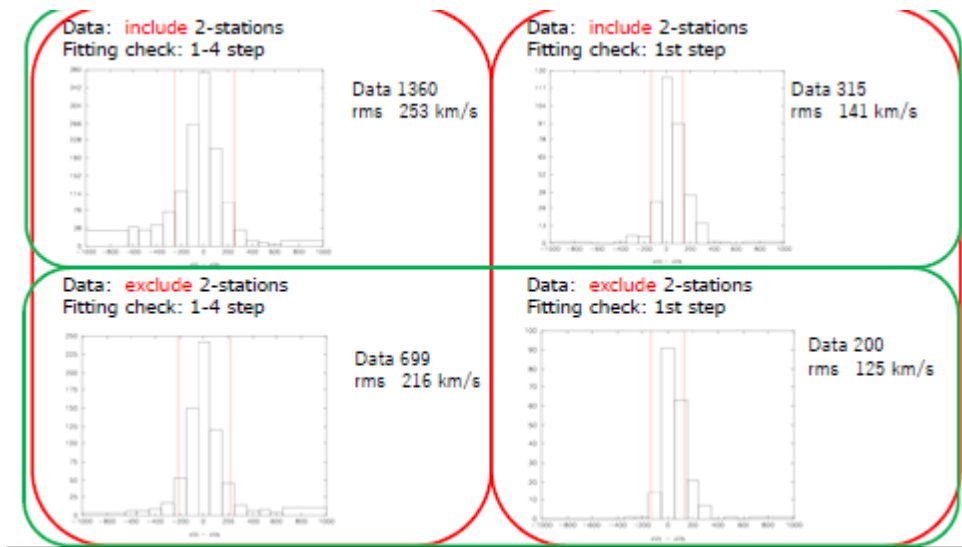
最後にこのようにして得られたスペクトル個々の形状の良否判定を以下の5段階で行う。

- 第1 check: 観測で得られたスペクトル P_{obs} とモデル P_{mdl} の各周波数点に於ける差は規定値以下か。既定値以上の周波数点に bad フラグをつけ、それが3点以上有る時は以下の判定を行い、3点以下の時は良しとする。
- 第2 check: 第1 check で bad となった周波数点でのスペクトル勾配は急か。勾配が規定値以上急な時は bad フラグを消す。bad フラグが3点以上残った時は以下の判定を行い、3点以下の時は良しとする。
- 第3 check: スペクトルがフラットとなりスペクトル強度が小さい周波数帯は s/n が悪いので判定から除外する。
- 第4 check: 観測スペクトルが大きく湾曲するところはスペクトルが white noise レベルへとマージしていくところであって、モデルスペクトルにはこの動きは考慮されていないのでスペクトルの勾配小さい領域での bad フラグは外す。
- 第5 check: このようにして残った bad flag のついた周波数点の分布が連続しているか離散的かを見て最終良否判定を行う。

次に Pobs と Pmdl の上記のような比較判定を行う周波数帯域をどうするかが課題である。周波数帯域の低周波側は 0.35Hz とする。これはそれより低い周波数帯域はアンテナビームパターン、受信機の利得変動、電離層の影響、フレネルフィルター効果、等々の影響を受けやすいからである。次に上限周波数は IPS スペクトルが white noise+3*rms レベルに落ちる所の周波数とするが、s/n の悪い場合は上限周波数は下限周波数に近づき spectral fitting に利用する帯域幅が狭くなり fitting の信頼性が問題となる。かといって広い帯域幅とすると解析できるデータ数が減ってしまう。適切な帯域幅の設定が課題である。



VCCR と Vspct を比べたとき、3点観測による VCCR は Vspct とよい一致が見られる(下図の下段緑枠)が、2点観測からの VCCR は差が大きい傾向にある(下図の上段緑枠)。2点観測による VCCR の信頼性について今後要検討である。



(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

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できる (Wark & Watson, 2006)。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)。一方、高温変成岩の石英は複数ステージで成長する場合などがある。さらに、石英のCL発光強度は、チタン量だけでなく、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、詳細な組織観察や相平衡計算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。さらに、石英に含まれる流体包有物などから、変成流体の特徴や結晶時の変成圧力を知る。本研究により、高温変成岩中の石英が結晶化した変成温度や圧力を読み取り、相平衡計算による変成温度—圧力条件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ことである。

【研究方法】

研究試料は、ヒマラヤ造山帯における高温変成岩類を対象にした。研究代表者 (今山) は、ヒマラヤ地域の変成温度—圧力条件を詳しく推定しており (Imayama et al., 2010, 2012, 2019)、地殻溶融に関連した試料を用いた。今年度は、1) ヒマラヤ変成岩類の薄片観察を行ない、変成岩中の共存鉱物を検討し、石英の詳細な組織を記載した。2) 岡山理科大学の走査型電子顕微鏡を用いて、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た。3) 名古屋大学宇宙地球環境研究所の電子プローブアナライザーを用いて、石英の組織ごとにチタン量を測定し、結晶化した変成温度を推定した。

【研究結果と考察】

研究試料は、ザクロ石、堇青石、黒雲母、カリ長石、石英、斜長石から主に構成され、黒雲母の脱水溶融反応を被っている (Imayama et al., 2019)。石英は、基質部に含まれる他、ザクロ石の包有物として多数観察される。石英のCL像により、基質部の一部の石英には累帯構造が見られ、コアからリムへかけてCLの発光強度が強くなる。石英のCLスペクトル解析を実施した結果、CLの発光強度はチタン発光に由来するスペクトルが観察された。石英のチタン量を測定した結果、1) 石英のCL発光強度とチタン濃度は相関がある、2) 基質部の石英チタン濃度はコアからリムへ上昇しており (図1)、石英のCL累帯構造は温度上昇中の昇温変成作用を記録する、3) 黒雲母の隣接する石英で高チタン濃度が検出され、黒雲母の脱水溶融反応に伴って、黒雲母がチタンを放出した可能性があることがわかった。今後は、さらにヒマラヤ変成岩類の石英のチタン濃度測定を推進して、相平衡計算を並行して実施して、石英の結晶化や地殻溶融過程を明らかにしていく予定である。

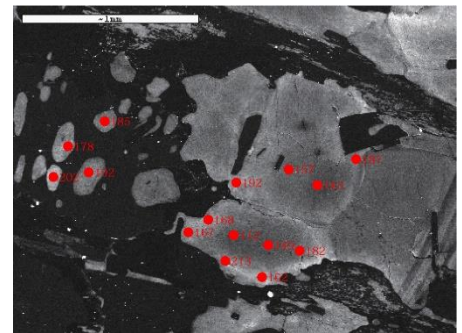


図1 石英CL画像とチタン濃度 (ppm)

【引用文献】

- Imayama et al., 2010. JMG, 28, 527-549.
Imayama et al., 2012. Lithos, 134-135, 1-22.
Imayama et al., 2019. GSL Sp. Pub., 481, 143-173.
Muller et al., 2003. Eur. J. Mineral, 15, 747-763.
Wark & Watson, 2006. CMP, 152, 743-754.

基本雲プロダクトの高精度化
Improvement of Cloud Products

伊達謙二、気象衛星センター、データ処理部解析課

要旨

気象衛星センターでは、基本雲プロダクト (FCP) と呼ばれる衛星プロダクトを運用している。FCP は、静止気象衛星「ひまわり」の観測値と数値予報データから雲の有無 (雲マスク) や雲頂高度、雲相といった雲に関する物理量を推定するプロダクトであり、高分解能雲情報や晴天放射場、海面水温など、気象庁で運用している様々な衛星プロダクトで利用されている。

FCP の雲マスクには、その推定結果が特定の雲判定テストに支配されることや、その精度が数値予報など衛星観測以外のデータの精度に依存するといった課題がある。例えば、冬季の強い寒気移流による急激な海面の冷却は、雲マスクで利用する海面水温の解析値に即座に反映されないため、そのような状況下の晴れた海面を雲と推定しやすいことが知られている。そのため気象衛星センターでは、これらの課題に対応し雲マスクの精度を向上させるため、Ishida et al. (2018) の CLAUDIA と呼ばれるサポートベクタマシン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なっている。CLAUDIA を導入することで、ひまわりの観測値のみから雲の有無を推定することが可能となり、衛星観測データとしての独立性を高め、精度の安定した雲マスクが提供可能になると期待されている。

今年度は開発の初期段階として、まず衛星センターで運用している日本域の CLAUDIA の算出領域をひまわりの観測領域全域に拡張し、雲の検出精度を①2019年5月の事例を用いて既存のFCPと比較し、その精度を検証した。精度の検証には Ackerman et al. (2017) の Aqua/MODIS を利用した雲マスク (MYD35_L2) を真値と仮定し (表1)、CLAUDIA、FCP の雲マスクの一致率をそれぞれ MYD35_L2 比較した (図1)。次にその結果を踏まえ、教師データにおける晴・雲のデータ数における不均衡を解消し、FCP が苦手としている雪氷の晴データ数を増やし、また判別に用いる特徴量の見直しを行い (表2)、②2022年12月の事例を用いて既存のFCPと比較した (図2、図3)。

		MYD35_L2	
		晴れ	曇り
CLAUDIA / FCP	晴れ	N_{clear}	N_{under}
	曇り	N_{over}	N_{cloudy}

スコアの計算方法:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{全天適中率} = (N_{clear} + N_{cloudy}) / (N_{clear} + N_{under} + N_{over} + N_{cloudy}) \\ \text{晴れの空振り率} = N_{under} / (N_{clear} + N_{under}) \\ \text{曇りの空振り率} = N_{over} / (N_{over} + N_{cloudy}) \end{array} \right.$$

表1 比較に用いたスコアの計算方法

	陸上・日中	陸上・夜間	海上・日中	海上・夜間	
ND(R0.64μm, R1.6μm)	●	-	●	-	NDWI (正規化水指標)
R0.64μm or R0.86μm	●	-	●	-	反射率: 陸上ではR0.64、海上ではR0.86
ND(R1.6μm, R2.3μm)	●	-	●	-	雪氷の識別
ND(R0.86μm, R0.64μm)	●	-	●	-	NDVI (正規化植生指標)
D(T10.4μm, T6.9μm)	●	●	●	●	高層雲検出
D(T13.3μm, T10.4μm)	●	●	●	●	CO2差分
D(T10.4μm, T12.4μm)	●	●	●	●	赤外差分
D(T10.4μm, T8.6μm)	①	①	●	①	高層雲検出
D(T10.4μm, T3.9μm)	●	●	●	●	赤外差分2
ND(R0.86μm, R1.6μm)	●	-	-	-	砂漠域検出
ND(R1.6μm, R0.51μm)	●	-	-	-	NDSI (正規化積雪指標)
D(T10.4μm, T11.2μm)	①	①	●	①	窓領域差分
D(T6.9μm, T6.2μm)	②	②	-	②	相関の少ないバンド間差分を追加
D(T10.4μm, T9.6μm)	②	②	-	②	相関の少ないバンド間差分を追加

表2 判別に用いた特徴量

①は2019年5月の事例、②は2022年12月の事例のみで用いた特徴量で、●はいずれの事例でも用いた特徴量である。表中のTは輝度温度、Rは反射率を示しており、NDは規格化差分、Dは差分を表す。

$$\begin{array}{ll} \text{ND} \cdots \text{規格化差分} & \text{ND}(a, b) = (a - b) / (a + b) \\ \text{D} \cdots \text{差分} & \text{D}(a, b) = a - b \end{array}$$

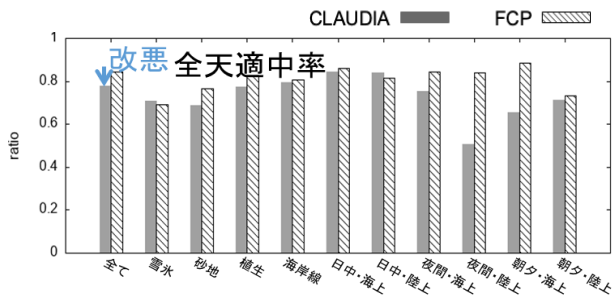


図1 ①2019年5月のCLAUDIA3及び現行雲マスクの全天的中率（地表面状態、時間帯別）

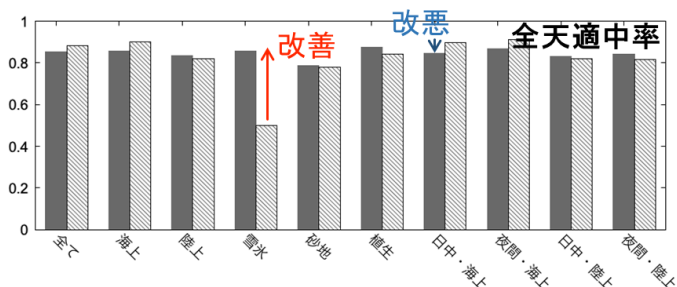


図2 ②2022年12月のCLAUDIA3及び現行雲マスクの全天的中率（地表面状態、時間帯別）

比較結果を図1, 図2に示す。①の事例ではMYD35_L2とCLAUDIAとの一致率は8割程度であり、FCP（9割）よりやや低く、日中・陸上以外では判別精度は改悪していた。これは本判別で用いた学習設定が、日本域の日射量プロダクトのために調整されたものであることに起因すると考えられる。②の事例では夜間における判別精度が改善し、日中・夜間とも陸上では現行の精度を上回っており、特に雪氷では大幅な改善が見られた。海上では①の事例に比べると判別精度が改善しているが、現行の判別精度は下回っており、全体の判別精度でも下回っている。

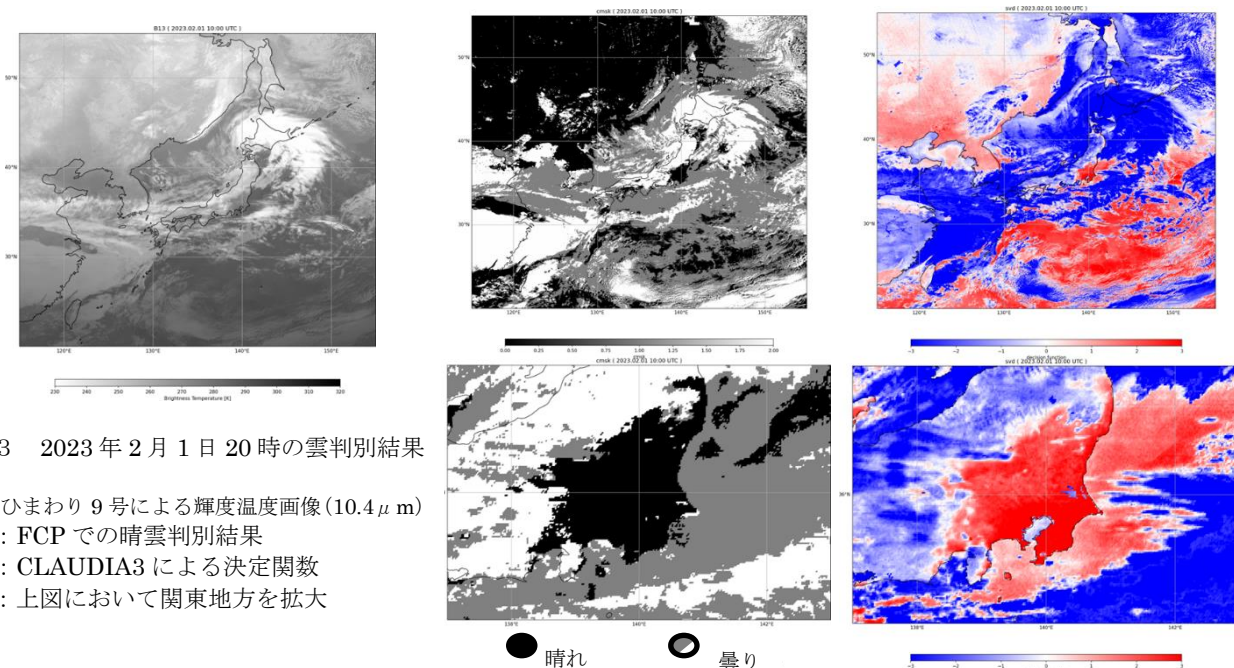


図3 2023年2月1日20時の雲判別結果

左: ひまわり9号による輝度温度画像(10.4 μm)
 中: FCPでの晴雲判別結果
 右: CLAUDIA3による決定関数
 下: 上図において関東地方を拡大

図3に2023年2月1日における雲判別結果を示す。関東沖において、FCPでは曇りと判別しているが、輝度温度からは晴れているように判断でき、CLAUDIA3による判別でも晴れと判定されている。一方で日本海北部の大陸沿岸では輝度温度で晴れ、FCPでも晴れと判別している領域でCLAUDIAでは晴れと判別できていない。海上で精度が低下している領域が見られることは図2の結果と整合する。

教師データや特徴量の選定を工夫することで、CLAUDIA3による雲判別精度が向上することが確認できた。今後も現行の判別精度を上回るよう、更なる精度向上に取り組んでいく。

参考文献

Ishida, H., et al., 2018. Remote Sens. Environ. 205, 390-407.
 Ackerman, S., et al., 2017. MODIS Atmosphere L2 Cloud Mask Product. NASA MODIS Adaptive Processing System, Goddard Space Flight Center, USA: http://dx.doi.org/10.5067/MODIS/MYD35_L2.061

成果発表

佐伯悠樹、山田裕里佳、半田太郎、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、2023年3月

(別紙様式 4-2)

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1

Enhancement of the Spacecraft Charging and Inner Magnetospheric Researches by Arase DC and low frequency E-field: #1

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いる。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・低周波電場波動について、その校正によって明らかになってきた衛星帯電の影響の研究検討、およびそれらの励起・伝搬過程の定量評価と物理的役割の解明を促進する。

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

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。

- ・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**)
- ・1-sec 分解能の電場スペクトル (1～>200Hz, **EFD spec**)
- ・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**)

また、SWPIA(ソフトウェア波動-粒子相互作用解析機能)に伴って取得される短時間のバーストデータについても、Level-2 データの公開に至った。

- ・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**)

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。データおよびその解説は、以下で公開されている。

- ・ERG Science Center 観測データ https://ergsc.isee.nagoya-u.ac.jp/data_info/erg.shtml.ja
- ・ERG Science Center PWE/EFD Wiki <https://ergsc.isee.nagoya-u.ac.jp/mw/index.php/ErgSat/Pwe/Efd>

これらのスキームは、構築途上にある BepiColombo PWI データ方式の原型としても想定している。

(2) 電場およびポテンシャルの評価

電場導出の基礎となるポテンシャル・電場波形のspin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）とが絡み合う複雑なもので、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。これらは、磁場方向等の影響も相まって、単純には排除不能である。成果の一部を以下へまとめるとともに、引き続き調査を進めつつある。

・電場 vector に対する衛星帯電の影響評価状況についての総括報告を行った。(中川朋子、笠羽康正、中村紗都子、堀智昭、三好由純、松田昇也、笠原禎也、北原理弘、土屋史紀、熊本篤志、松岡彩子。 あらせ PWE/EFD 電場データ: 電場 vector に対する衛星帯電の影響評価状況。 第 17 回 ERG サイエンス会議、東京大駒場、2022 年 9 月)

・衛星電位と spin 位相・磁場方向・プラズマ密度との関係を解析し、光電子・衛星帯電による電荷のモデル計算と比較を実施。電場に影響を与える probe 毎のばらつきは、衛星起因光電子の非等方分布が問題を生んでいるとみられる。(中川朋子、堀智昭、中村紗都子、笠羽康正、小路真史、三好由純、北原理弘、松田昇也、笠原禎也、篠原育。 衛星帯電と光電子からの電場計測への干渉。 第 152 回地球電磁気・地球惑星圏学会、相模原、2022 年 11 月)

・観測電場のあるべき方向からのずれは、プラズマ密度が薄い場所で卓越する。640cm⁻³ 以上では方向ずれが8割で <10° だが、80 cm⁻³ 以下では4割が > 50° のずれとなる。(中川朋子、三好由純、笠羽康正、笠原禎也、土屋史紀、熊本篤志、北原理弘、中村紗都子、松岡彩子、人工衛星「あらせ」により観測された電場方向のずれの特性、東北工業大学紀要 理工学編・人文社会科学編, 43, pp.1-7, 2023 年)

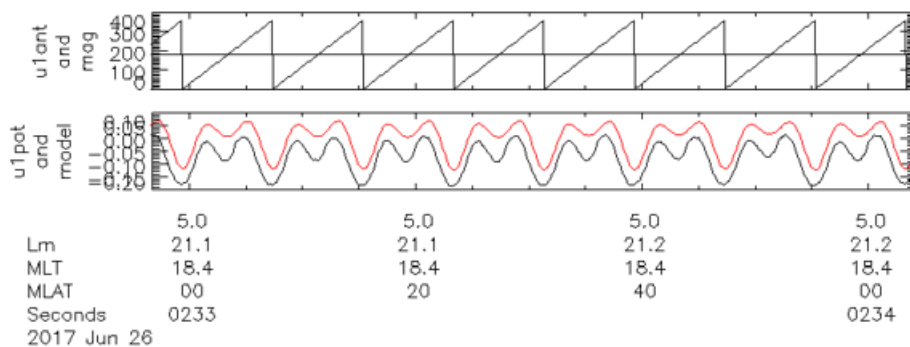


図 1 (a)あらせ衛星の u1 プローブの spin 位相と(b)プローブ衛星間の電位差。観測（黒）とモデルフィッティング（赤） [Nakagawa+ 2023]

(3) 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。

- ・高高度電子加速を生む Field-line 電場 : Imajo et al. (2021). Active auroral arc powered by accelerated electrons from very high altitudes. *Sci. Rep.* 11, 1610. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79665-5>
- ・電離圏電場と磁気圏電場との mapping : Kawai et al. (2021). First simultaneous observation of a night time medium-scale traveling ionospheric disturbance from the ground and a magnetospheric satellite. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 126, e2020JA029086. <https://doi.org/10.1029/2020JA029086>
- ・ULF 波動の Poynting vector 導出への貢献: Takahashi et al. (2021). Relative contribution of ULF waves and whistler-mode chorus to the radiation belt variation during the May 2017 storm. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 126, e2020JA028972. <https://doi.org/10.1029/2020JA028972>
- ・初の地上-衛星同時「medium-scale traveling ionospheric disturbances (MSTIDs)」の観測。比較的静穏下で電離圏変動が大きい場合、衛星側でも対応する電場・密度変動を検出。(Kawai, K., K. Shiokawa, Y. Otsuka, S. Oyama, M. G. Connors, Y. Kasahara, Y. Kasaba, S. Nakamura, F. Tsuchiya, A. Kumamoto, A. Shinbori, A. Matsuoka, I. Shinohara, Y. Miyoshi (2023). Multi-event analysis of magnetosphere-ionosphere coupling of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances from the ground and the Arase satellite. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 128, e2022JA030542. <https://doi.org/10.1029/2022JA030542>)
- ・サブストームに伴うオーロラ増光時における同磁力線上での Arase 観測により、Ballooning instability の生成を示唆。電場変動によりこの変動に伴う地球向きの Poynting vector 導出に貢献。(Chen, L., K. Shiokawa, Y. Miyoshi, S. Oyama, C.-W. Jun, Y. Ogawa, K. Hosokawa, Y. Inaba, Y. Kazama, S. Y. Wang, S. W. Y. Tam, T. F. Chang, B. J. Wang, K. Asamura, S. Kasahara, S. Yokota, T. Hori, K. Keika, Y. Kasaba, A. Kumamoto, F. Tsuchiya, M. Shoji, Y. Kasahara, A. Matsuoka, I. Shinohara, S. Imajo, S. Nakamura, M. Kitahara (2022). Observation of source plasma and field variations of a substorm brightening aurora at L ~ 6 by a ground-based camera and the Arase satellite on 12 October 2017. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 127, e2021JA030072. <https://doi.org/10.1029/2021JA030072>)
- ・磁気圏の近地球赤道域で、U 型ポテンシャルを同定。Arase 電場観測により、上向きの沿磁力線電流を伴うことを確認。(Imajo, S., Y. Miyoshi, K. Asamura, I. Shinohara, M. Nosé, K. Shiokawa, Y. Kasahara, Y. Kasaba, A. Matsuoka, S. Kasahara, S. Yokota, K. Keika, T. Hori, M. Shoji, S. Nakamura, M. Teramoto (2022). Signatures of auroral potential structure extending through the near-equatorial inner magnetosphere. *Geophys. Res. Lett.* 49, e2022GL098105. <https://doi.org/10.1029/2022GL098105>)
- ・Arase および Van Allen Probes との協調観測成果を総括報告。(Miyoshi, Y., I. Shinohara, S. Ukhorskiy, S. G. Claudepierre, T. Mitani, T. Takashima, T. Hori, O. Santolik, I. Kolmasova, S. Matsuda, Y. Kasahara, M. Teramoto, Y. Katoh, M. Hikishima, H. Kojima, S. Kurita, S. Imajo, N. Higashio,

S.Kasahara, S. Yokota, K. Asamura, Y. Kazama, S.-Y. Wang, C.-W. Jun, Y. Kasaba, A. Kumamoto, F. Tsuchiya, M. Shoji, S. Nakamura, M. Kitahara, A. Matsuoka, K. Shiokawa, K. Seki, M. Nosé, K. Takahashi, C. Martinez-Calderon, G. Hospodarsky, C. Colpitts, Craig Kletzing, J. Wygant, H. Spence, D. N. Baker, G. D. Reeves, J. B. Blake, L. Lanzerotti (2022). Collaborative research activities of the Arase and Van Allen Probes, *Space Science Rev.*, 218, 38. <https://doi.org/10.1007/s11214-022-00885-4>)

(4) 日欧合同水星探査機 BepiColombo / Mio 探査機による電場計測への展開 :

この作業は、より Telemetry や運用の制約が厳しい水星 (BepiColombo : フル観測は2025年末から2年間) ・木星 (JUICE : フル観測は2031年以降) への日本の研究展開能力の基礎を形成する。BepiColombo Mio探査機に搭載された Plasma Wave Investigation (PWI) による DC 電場 ・ 低周波電場波動観測は、Arase とほぼ同設計のアンテナとレシーバーで遂行される。Arase 衛星の校正は、同観測装置による水星電場計測につながっていく。なお、BepiColombo は2021年10月 ・ 2022年6月の flyby で水星観測を開始したが、アンテナ (WPT) が収納中のため PWI の電場観測は事実上行えない。WPT の展開は、2025年末の水星周回軌道投入後に予定されている。とはいえ、この限られた状況でも、以下の成果を上げることができた。

・ 電場ノイズから導出した第一回 flyby 時の水星磁気圏密度を試みた。 (Griton, L., K. Issautier, M. Moncuquet, F. Pantellini, Y. Kasaba, H. Kojima (2023). Electron density revealing the boundaries of Mercury's magnetosphere via serendipitous measurements by SORBET during BepiColombo first and second Mercury swing-bys. *Astron. Astrophys.* 670, A174. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202245162>)

(別紙様式 4-2)

「あらせ」衛星による内部磁気圏赤道域低エネルギーイオンの加熱現象とプラズマ波動の解析
Study of perpendicular heating of supra-thermal ions and plasma waves
in the inner magnetosphere

浅村和史、JAXA・宇宙科学研究所

あらせ衛星搭載低エネルギーイオン質量分析器 (LEPi)、磁場観測器 (MGF)、プラズマ波動観測器 (PWE) の観測データを用い、電磁イオンサイクロトロン波動 (EMIC 波動) と低エネルギーイオンとの間のエネルギー輸送量および運動量輸送量について、直接計測による検出に成功した。エネルギー・運動量輸送量の計測には波動粒子相互作用解析器 (WPIA: Wave-Particle Interaction Analyzer) の手法を用いた。今回用いた WPIA 法は (1) LEPi が観測した瞬間瞬間のエネルギー・方向毎のイオンフラックス (速度分布関数) について、同時刻に検出されたプラズマ波動の電界ベクトル、磁界ベクトルに起因するローレンツ力を求め、(2) 波動の位相角・イオンのエネルギー・ピッチ角毎にビンニングして加算し、(3) LEPi の観測方向 (イオンの速度方向) が波動の全位相角をカバーできるように、一定期間計算結果を蓄積、そして、(4) それぞれのビンに対する LEPi 観測回数を考慮した実効的感度補正を施すものである。これにより、

$$W_{Eint} = \sum_{\alpha} \sum_{\zeta} \sum_K f q E_w \cdot v [v(K)]^2 \sin \alpha \Delta \alpha \Delta \zeta \Delta v(K)$$
$$G = \sum_{\alpha} \sum_{\zeta} \sum_K f q (E_w + v \times B_w) \cdot e_{\alpha} [v(K)]^2 \sin \alpha \Delta \alpha \Delta \zeta \Delta v(K)$$

などの諸量を求めることができる。ここで、 E_w 、 B_w 、 ζ 、 q 、 v 、 K 、 α 、 f はそれぞれ波動の電界ベクトル、磁界ベクトル、位相角、イオン荷電量、速度、エネルギー、ピッチ角、速度分布関数であり、 W_{Eint} は波動からイオンへのエネルギー輸送量を表している (Katoh et al., 2013)。また、 e_{α} は背景磁場ベクトルとイオン速度ベクトルを含む平面内でイオン速度ベクトルに垂直な単位ベクトルである。このため、 G はピッチ角変化に寄与する成分のローレンツ力に伴う運動量輸送量を示している (Kitahara and Katoh, 2016)。なお、あらせ衛星はスピン軸方向の電界計測を行っていないため、計算にあたっては観測された磁界 3成分、電界 2成分を用い、その内積がゼロとなるようにスピン軸方向の電界強度を設定した。

2021年6月16日に観測された EMIC 波動に着目して WPIA 解析を行った結果、波動から粒子にエネルギーが輸送されているタイミングでイオンのピッチ角が垂直方向に近づき ($\alpha > 90^\circ$ の場合、 $G < 0$)、粒子がエネルギーを失っているタイミングでピッチ角が磁力線平行方向に近づく ($\alpha < 90^\circ$ の場合、 $G > 0$) ような G の値となった。これは EMIC 波動によるピッチ角散乱と整合的である。ただし、これまでの解析では運動量の輸送密度など、定量的な値までは導出できていない。また、EMIC 波動の伝搬方向や共鳴条件との整合性などの詳細な解析も今後の課題である。

参考文献

- Katoh, Y. et al., Significance of wave-particle interaction analyzer for direct measurement of nonlinear wave-particle interactions, *Ann. Geophys.*, doi:10.5914/angeo-31-503-2013, 2013.
- Kitahara, M. and Y. Katoh, Method for direct direction of pitch angle scattering of energetic electrons caused by whistler mode chorus waves, *JGR*, doi:10.1002/2015JA021902, 2016.

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（図1）。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。

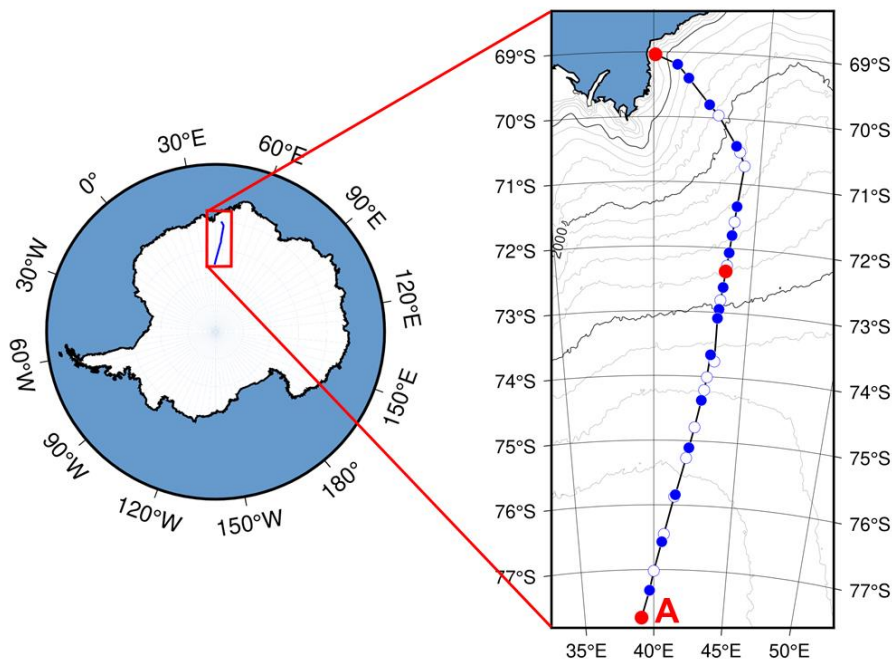


図1. 南極大陸において2018年11月から2019年1月までに携帯型中性子モニター（WENDI-II）を用いて宇宙線中性子の測定を行った地点. 往路は中空（白色）、復路は青色で示しており、これらの地点では各7時間以上の連続観測を行った. 赤で示した3か所では長期滞在し、このうちドームふじ駅付近のA地点では、約20日間にわたって中性子の観測を行った。

3. 研究結果及び考察

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。図1に示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）による予測値との関係（図2）については、往路・復路ともに広い範囲で両者には良い一致が観られた。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。

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。この結果は、モデルが潜在的に持つ不確かさを示しており、さらに計算精度を向上させる必要性を示唆している。今後は、各モデルが持つ誤差を定量化するための考察を進めるとともに、トリチウム濃度を含めた詳細なデータの総合解析作業などに取り組む。

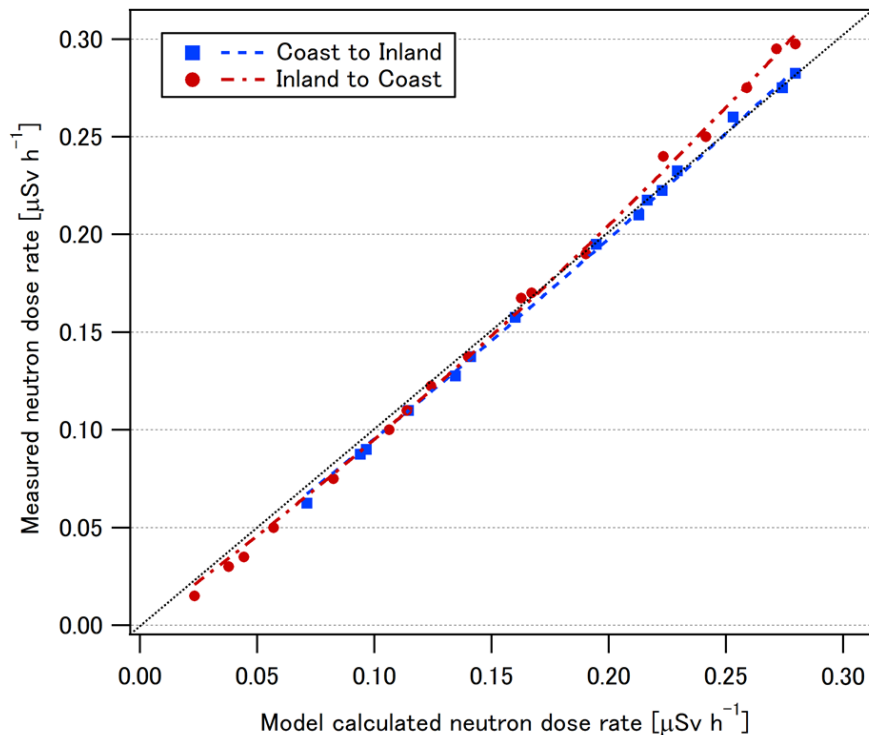


図2. 2018年11月から2019年1月までの期間において、PARMA¹⁾ を使用して計算された中性子線量率（X軸）と、図1に示すルートに沿って測定された中性子線量率（Y軸）との関係。各プロットの標準偏差は3%未満（ $\sigma < 0.03$ ）であった。

引用文献

- 1) 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.

成果発表

- Yasuda, H., Kurita, N. and Yajima, K. Verification of Estimated cosmic neutron intensities using a portable neutron monitoring system in Antarctica. Appl. Sci. 13(5), 3297, 2023.

(別紙様式 4-2)

沖積層に含まれる碎屑物を用いた堆積年代の高精度解析
High resolution analysis of the depositional ages from coastal sediments after the Last Glacial Maximum

中西利典, ふじのくに地球環境史ミュージアム・学芸課

研究目的

我が国の沖積層研究ではボーリングコアから分取した植物片や貝化石の放射性炭素年代値を堆積年代として解釈するが多い。珪藻化石群集組成や地球化学分析結果などによる堆積環境の裏打ちのあるボーリングコア試料を用いて、なるべく多くの試料を抽出して年代測定を実施することで、再堆積や生物擾乱、海洋リザーバー効果等の影響を定量的に評価した。

研究方法（使用した共同利用装置・施設等を含む）

多様な堆積環境下で再堆積の影響を評価するために鹿児島県薩摩湖および永野、静岡県浜名湖で採取された沖積層ボーリングコアを選定した。薩摩湖のSAT1コアとSAT2コア、永野のNGN3コア、浜名湖の18Hm8コアを用いて、植物片と貝化石をふじのくに地球環境史ミュージアムで抽出・選定した。それらの試料を北川研究室で試料調整をして、名古屋大学宇宙地球環境研究センターの加速器質量分析装置を用いて放射性炭素年代測定を実施している。

研究結果

鹿児島県薩摩湖および永野、静岡県浜名湖で採取された沖積層ボーリングコア（薩摩湖SAT1コアで4試料、SAT2コア5試料、永野NGN3コアで4試料、浜名湖18Hm8コアで7試料）から合計20試料の植物片と貝化石を抽出・選定した。北川研究室で試料調整をして、名古屋大学宇宙地球環境研究センターの加速器質量分析装置を用いて放射性炭素年代測定を実施している。

考察

先述の植物片と貝化石の放射性炭素年代値が届いたら、採取深度と年代値の相関を検討する。また、それらの結果を基にして地域ごとに再堆積の有無を解釈して、堆積環境ごとに再堆積かかった期間を推定する。それらの結果をこれまで実施した関東平野 (Tanabe et al., 2021) や春採湖 (Nakanishi et al., 2023a), 三陸海岸 (Nakanishi et al., 2023b) などにおける再堆積の頻度やその期間と対比する予定である。

まとめ

沖積層ボーリングコアに含まれる植物片と貝化石の再堆積の頻度と期間を定量的に評価するために放射性炭素年代値を測定中である。鹿児島県の薩摩湖 (SAT1コアの4試料, SAT2コアの5試料) および永野 (NGN3コアの4試料), 静岡県浜名湖 (18Hm8コアの7試料) から合計20試料の植物片と貝化石を抽出・選定して、年代測定を実施している。結果が届き次第、成果を公表する。

引用文献

T. Nakanishi, F. Nanayama, Y. Kondo, K. Yamada, K. Sakai, T. Yamaguchi, K. Shigeno, K. Katsuki, H. Oda, R. Furukawa, W. Hong. 2023a, 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*, doi: 10.1016/j.nimb.20

23.02.015

T. Nakanishi, Y. Niwa, W. Hong. 2023b, 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, doi: 10.1016/j.nimb.2023.02.032

S. Tanabe, T. Nakanishi, R. Nakashima, 2021, Recycling of clastics in coast areas inferred from quantitative analysis of reworked radiocarbon samples. *Scientific Reports*, 12, 650, doi: 10.1038/s41598-021-04660-3

成果発表（当該年度に行った口頭発表を含む）

中西利典・北川浩之・山田和芳，尾鉾堆積物に含まれる木片の放射性炭素年代，第32回社会地質学会シンポジウム論文集，p.125-126，2022年11月（査読無）

(別紙様式 4-2)

温暖化アナログとしての縄文海進最盛期の北海道沿岸部の水温・栄養塩循環・海流の定量的復元 Quantitative reconstruction of water temperature, nutrient cycles, and ocean currents during the Holocene Climatic Optimum as an analogue of the future global warming

窪田薫 海洋研究開発機構・海域地震火山部門

【研究目的】

地球温暖化に伴う北海道沿岸部の将来の生態系変化の正確な予測に繋げるため、比較的最近の地質学時代に起きた温暖期に着目した(縄文海進最盛期;約6,000年前)。本申請研究では、北海道東部沿岸から採取する底生有孔虫と長寿二枚貝(ピノスガイ; *Mercenaria stimpsoni*)の化石の地球化学分析を通じて、縄文海進最盛期の水温・栄養塩循環・海流を定量的に復元する。水温の復元には、酸素同位体・Mg/Ca比分析・成長線解析を、海流の復元には放射性炭素(^{14}C)・ネオジウム同位体分析を行う。

【研究手法】

分析試料は(1)厚岸湾/厚岸湖から新たに掘削する堆積物コア試料と、(2)貝塚・自然貝層から産出する二枚貝化石である。(1)の堆積物コアは、予算の都合で採取する目処が立っていないため、(2)の二枚貝化石の試料を重点的に収集した。自然貝層は、現在は道路や河道の舗装などによってアクセスできないところが多く、代わりに縄文海進時に湾化したと思われる地点で打ち上げ貝を採取した。遠別～稚内～網走にかけての道北～道東の日本海～オホーツク海沿岸をくまなく調査し、ピノスガイの死殻を採取した。北海道の日本海側の沿岸部ではほぼ全ての死殻がウバガイ(ホッキ貝)であり、ピノスガイは得られなかった。得られた試料のうち、比較的古い年代を示しそうなもの(殻の表面の摩耗度などから推測)、比較的長寿のもの(殻の厚みから推定: Kubota et al., 2017)を優先して ^{14}C 年代測定を行った。死殻の表面をグラインダーで削り、得られた炭酸カルシウムの粉末試料を分析に用いた。真空下で炭酸カルシウムをリン酸と反応させ、水を除去したのち、発生した二酸化炭素を補修し、水素還元でグラファイトに変換した。グラファイトをターゲットにプレスし、ISEEのタンデム加速器で ^{14}C 年代測定を行った。

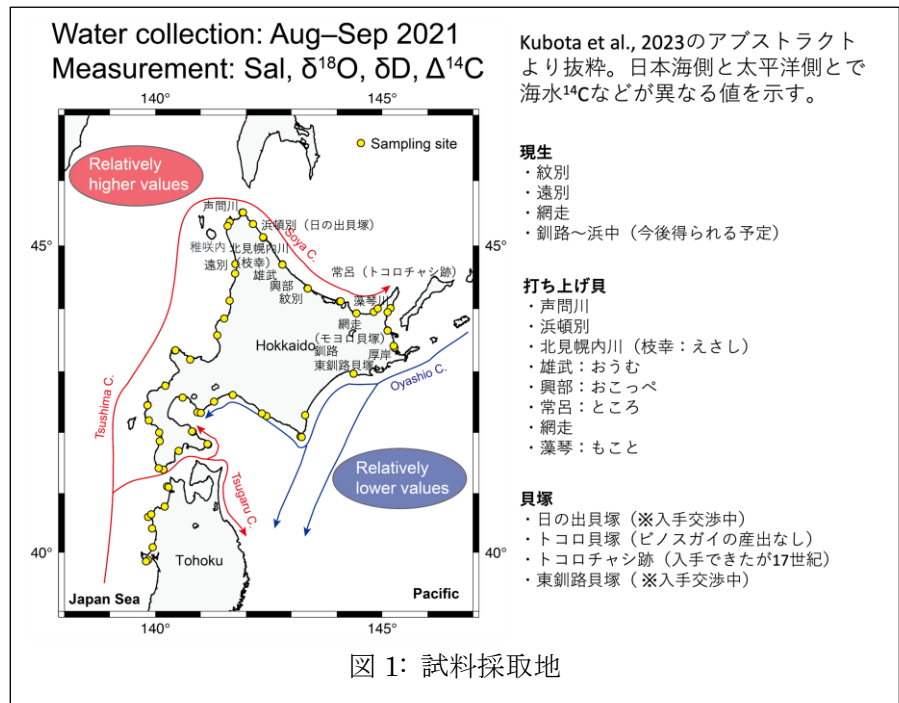


図1: 試料採取地

【研究結果】

オホーツク海側で得た試料のうち、 ^{14}C 年代測定を行ったものについては、声問川河口、常呂川河口、藻琴川河口で得たものには全てがごく最近(西暦1950年以降)の試料であることが分かった。北見幌内川河口(枝幸)の試料については、西暦1950年以降のもの、非常に古いもの(^{14}C 年代で約3,000～約4,500年前)とが混在していた。雄武川の河口付近では、比較的最近のもの(^{14}C 年代で約800年前)と、非常に古いもの(^{14}C 年代で約6,700年前)とが混在していた。興部川の河口付近では、西暦1950年以降のもの、非常に古いもの(^{14}C 年代で約5,300年前)とが混在していた。網走川の河口付近では、全て比較的最近のものであった(^{14}C 年代で約500～約600年前)。

東京大学文学部の「ところ埋蔵文化財センター」に提供いただいた、トコロチャシ跡の貝塚（新塚の西側サイト：東京大学大学院人文社会系研究科考古学研究室・常呂実習施設, 2015）から産出した3点の¹⁴C年代測定結果は、¹⁴C年代で約500～約600年前であった。小樽の¹⁴C海洋リザーバー年代推定結果（Yoneda et al., 2007）をもとに暦年較正をしたところ、西暦1600年前後という結果になった。ここで、小樽と常呂の¹⁴C海洋リザーバー年代に大きな違いがないことは、現生の海水の¹⁴C分析結果が同等の値を示すことから支持される（Kubota et al., 2023）。西暦1600年前後という年代値は、ビノスガイの産出深度の上部にある広域火山灰／テフラ（樽前火山起源、Ta-1: 西暦1739年）の年代値とも整合的である。

【考察とまとめ】

幌内川河口（枝幸）、雄武川、興部川については、縄文海進最盛期の研究を行うのに適した打ち上げ貝をさらに入手できる可能性があり、今後追加の調査を行う予定である。自然貝層と比較して、打ち上げ貝は試料の出自（すなわち貝が死亡するまで生息していた場所）が曖昧というデメリットはあるものの、試料採取が容易であるという比類ないメリットがある。¹⁴C年代測定を行った打ち上げ貝は、破片も多く含まれる。最大成長軸を残した、保存の良い試料を複数採取することで、殻の同位体分析や成長線解析を通じたより高確度の環境復元が可能であるため、今後さらなる調査が必要である。

トコロチャシ跡の貝塚および網走川河口で得た試料は、西暦1600年前後の年代値を示したが、これは古気候学的に重要な小氷期（Little Ice Age）と呼ばれる世界的な寒冷期に相当する。当初予定にはなかったが、温暖期との比較という意味で小氷期の古環境復元も重要であるため、今後分析を進めていきたい。

現生のビノスガイ試料についても、北海道の中央水産試験場の職員を通じて、新たに釧路～浜中にかけての試料が得られる見込みとなっている。東釧路貝塚から産出する、縄文海進最盛期のビノスガイ試料についても、試料供与の交渉を継続する予定である。道東の太平洋沿岸部は、千島海溝におけるプレート境界型の地震とそれに伴う津波が襲来する可能性が指摘されており、古災害研究への派生観点からもさらなる試料採集が望まれる。

【引用文献】

- Kubota, K., Sakai, K., Ohkushi, K., Higuchi, T., Shirai, K., Minami, M. Salinity, oxygen isotope, hydrogen isotope, and radiocarbon of coastal seawater of North Japan. *Geochemical Journal "Data"* **56**, 240–249 (2023).
- Kubota, K., Shirai, K., Murakami-Sugihara, N., Seike, K., Hori, M., Tanabe, K. Annual shell growth pattern of the Stimpson's hard clam *Mercenaria stimpsoni* as revealed by sclerochronological and oxygen stable isotope measurements. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **465**, 307–315 (2017).
- Takahashi, H. A., Handa, H., & Minami, M. A simple CO₂ extraction method for radiocarbon analyses of dissolved inorganic carbon in water samples without a carrier gas. *Radiocarbon* **63**, 1339–1353 (2021).
- 東京大学大学院人文社会系研究科考古学研究室・常呂実習施設. [トコロチャシ跡遺跡群（史跡常呂遺跡）～整備に伴う発掘調査報告書](#). 東京大学大学院人文社会系研究科・北見市教育委員会 (2015).
- Yoneda, M., Uno, H., Shibata, Y., Suzuki, R., Kumamoto, Y., Yoshida, K., ... & Kawahata, H. Radiocarbon marine reservoir ages in the western Pacific estimated by pre-bomb molluscan shells. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* **259**, 432–437(2007).

【成果発表】

本研究課題に関連したビノスガイの殻を用いた古環境復元研究について、国内学会においては、2件の口頭発表・1件のポスター発表を行った（共著者による発表含む）。うち1件（三木ほか、2022年、地球環境史学会）は学会の奨励賞を受賞した。また、国際学会においては、1件の口頭発表・1件のポスター発表を行った（共著者による発表含む）。

また、東北～北海道の沿岸で採取した表層海水について、塩分・水素同位体・酸素同位体・¹⁴Cを分析し（海水の¹⁴C分析は名古屋大学ISEEにおいて、ヘッドスペース法を用いて行った：Takahashi et al., 2021）、国際学術誌を通じて結果を公表した（Kubota et al., 2023）。

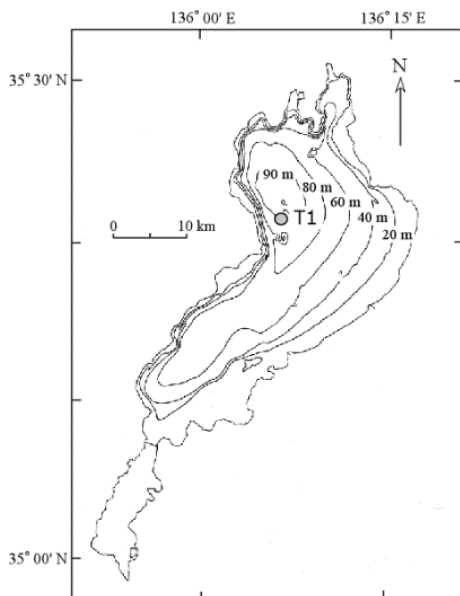
(別紙様式 4-2)

気候変動が琵琶湖における植物プランクトン群集に及ぼす影響
～衛星リモートセンシングによるモニタリング～
Impact of global warming on phytoplankton communities in Lake Biwa
-Monitoring using satellite remote sensing-

後藤直成, 滋賀県立大学・環境科学部

【目的】本研究では、琵琶湖の植物プランクトン群集に対する温暖化の影響を評価するため、気候変動観測衛星 (GCOM-C) に搭載された多波長光学放射計 (SGLI) を利用して、琵琶湖全域におけるクロロフィルa濃度分布の季節変動を捉えると共に、近年における植物プランクトンの現存量動態を考察した。

【方法】2022年4月～12月におけるGCOM-C/SGLIによって測定された490 nmと565 nmの規格化海面射出輝度 (nLw : level-2, 空間分解能 250 m) をJASMES (JAXA) から取得し、nLwを大気圏外太陽照度で除することで衛星リモートセンシング反射率 (Rrs(490, 565)) を求めた。これらのRrsと以下式の水中生物光学アルゴリズム (MODISの標準アルゴリズムの係数を琵琶湖用に最適化した式) を用いて、琵琶湖におけるクロロフィルa濃度を算出した。



$$\text{Chl}_{\text{sat}}(490/565) = 10^{(C_0+C_1R+C_2R^2+C_3R^3+C_4R^4)}$$
$$R = \log(\text{Rrs}(490/565))$$
$$C_0=0.126, C_1=-3.65, C_2=12.548, C_3=73.820, C_4=115.896$$

本研究では上記の衛星観測に加えて、2022年6月～11月 (月1回の船舶観測) の琵琶湖北湖のT1地点 (水深 90 m) において表層水 (深度 0.5, 10, 15, 20 m) を採取し、クロロフィルa濃度と栄養塩 (N, P) 濃度を測定した (図1)。

図1. 試料採取地点(T1)

【結果と考察】衛星観測で得られた2022年の各月平均クロロフィルa濃度分布を図2に示す。月平均クロロフィルa濃度は、1.4～4.0 mg m⁻³ (年平均 2.2 mg m⁻³) の範囲を変動しており、夏期 (7～9月) に低く、秋期から初冬 (10月から12月) にかけて増加する傾向を示した。6月から11月の船舶観測によって測定された湖面付近 (深度 0.5 m) のクロロフィルa濃度は、0.54～3.45 mg m⁻³ (平均1.94 mg m⁻³) の範囲にあり、衛星観測で得られた値とほぼ同じ範囲にあった。例年、琵琶湖では春期 (5～7月) と秋期 (10月～12月) に植物プランクトンのブルームが観測されるが、本年は明瞭なブルームが観察されなかった。この原因については解析中であるが、表層における栄養塩濃度 (NO₃⁻ + NO₂⁻ : 0～2.3 μmol L⁻¹, PO₄³⁻ : < 0.03 μmol L⁻¹) が、例年と比較して、年間を通じて低かったことが影響している可能性がある。

例年、琵琶湖では春季と秋季に植物プランクトンブルームが発生する。しかし、2019年と2020年に冬期全循環が停止した後、2020年に秋季ブルームが小規模化し、続く2021年にはその秋季ブルームが消失した (2020・2021年一般共同研究報告書)。さらに、本年 (2022年) は春季ブルームも観測されなくなった (図2)。これらブルームの小規模化・消失の主な要因は、温暖化に起因する成層強化・長期化に伴う深層から表層への栄養塩供給量の減少であると考えられるが、その詳細な原因についてはまだ十分に解析が進んでいない。今後、春季・秋季ブルーム消失の詳細な過程を明らかにするとともに、ブルームの消失が琵琶湖生態系にどのような影響を及ぼすのか注視していく必要がある。

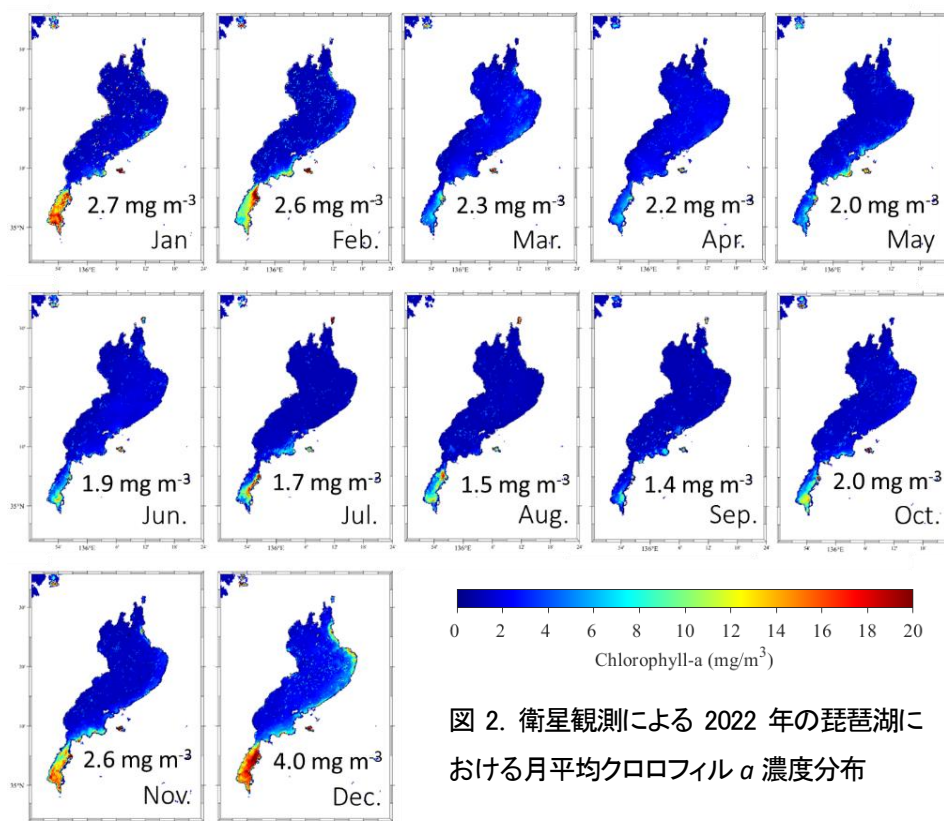


図 2. 衛星観測による 2022 年の琵琶湖における月平均クロロフィル *a* 濃度分布

衛星観測によって得られた2019年から2022年の月平均クロロフィル*a*濃度を図3に示す。本年（2022年）の月平均クロロフィル*a*濃度は、過去3年間の観測値と比較して、8月を除く全ての月でもっとも低くなった。また、本年の年平均クロロフィル*a*濃度（ 2.2 mg m^{-3} ）も過去4年間（2019年： 3.7 mg m^{-3} ，2020年： 3.5 mg m^{-3} ，2021年： 3.3 mg m^{-3} ）で最低となった。琵琶湖への全窒素（TN）と全リン（TP）の流入負荷量は1970年代から80年代にピークを示し、その後、現在まで漸減している。同様に、クロロフィル*a*濃度も1980年代以降は減少傾向を示している。前述の温暖化に起因する深層から表層への栄養塩供給量低下と集水域から琵琶湖へのTN・TP負荷量減少は、琵琶湖表層を徐々に貧栄養環境へと変化させ、ひいては、琵琶湖の水環境を大きく変える可能性がある。今後も引き続き、衛星観測と船舶観測を併用した植物プランクトン現存量モニタリングを実施する必要がある。

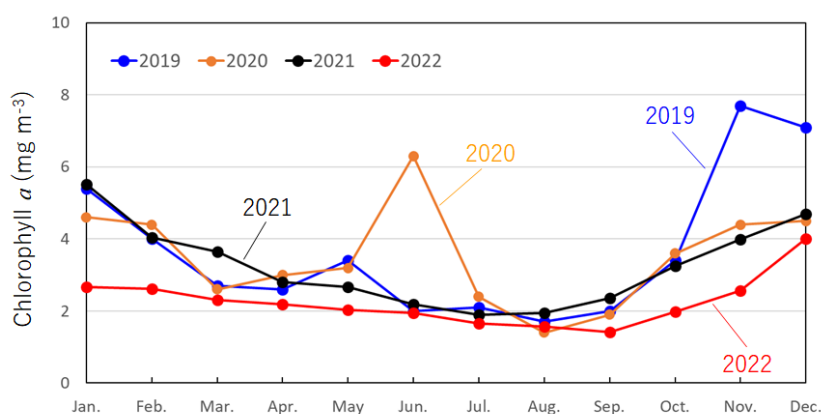


図 3. 衛星観測による近年の琵琶湖におけるクロロフィル *a* 濃度

【付記】本研究における衛星クロロフィル*a*濃度（2019年～2022年）のデータ解析処理および画像化は、株式会社サイエンスアンドテクノロジーの塚本浩貴氏と林正能氏と共同で行った。

(別紙様式 4-2)

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手法開発を試みる。

研究方法

ISEEが北極域トロムソにおいて運用するナトリウムライダーによる5ビーム観測データを使い、大気重力波のエネルギー、さらに初めての試みとなる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。比較および相互検証のため、流星エコーを利用したレーダー観測（VHFおよびMF帯の流星エコー観測）による風速観測も併用して研究を進める。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の経験から、ISEEがトロムソで共同運用するMFレーダーを利用することで、ナトリウムライダーと比肩する短周期・小空間スケールの大気波動解析が行える可能性が高いと考えている。

研究結果

大気波動エネルギーやその運動量の推定には、測定誤差の吟味が欠かせない。ナトリウムライダーによる風速データをもとに、まずは重力波解析の前段階としての品質検証を行った。併せて、トロムソMFレーダーを使った高分解能風速観測実現のため、トロムソ大学の関係者も含めたMFレーダー観測手法開発の検討を行った。本研究で行ったこれらの検討を元に、ISEE担当教員とともに科研費への応募を行ったが、残念ながら今回は採択には至らなかった。さらに検討を進めて科研費の採択につなげたい。

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る。ISEEがトロムソで運用する光学・電波観測装置をもとにその実現に向けた検討を行った。

引用文献

S. Nozawa, T. D. Kawahara, N. Saito, T. T. Tsuda, S. Wada, M. Tsutsumi, T. Takahashi, T. Kawabata, Y. Ogawa, H. Fujiwara, S. Suzuki, M. G. Johnsen, A. Brekke, The 10-year summary of the sodium lidar at Tromsø, and its future plan, ISAR-7, Tachikawa, March 6-10, 2023.

(招待講演) 堤 雅基、MFレーダーを用いた流星エコー観測の新展開、生存圏ミッションシンポジウム、宇治、2023年3月6日

(別紙様式 4-2)

フーリエ変換赤外分光器による代替フロンHCFC-142b/HFC-134aの経年変化の解析

Trend analysis of HCFC-142b and HFC-134a observed with Fourier-transform Infrared Spectrometer

中島英彰、国立環境研究所・地球システム領域

1. はじめに

1980年代の南極オゾンホール発見以降、科学者の集約的な研究によって、人為起源のフロン（CFC: Chloro-Fluoro Carbons）が成層圏オゾン層破壊の原因であることが突き止められ、1987年には「オゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書」が締結され、特定フロン類の削減スケジュールが制定された。その中で、オゾン層破壊能力の強いCFCは、よりオゾン層を破壊しないHCFCやHFCへと徐々に切り替わりつつある。ところが、これらのHFCの中には地球温暖化係数が大きなものも含まれており、気候変動対策の観点からもその削減と世界的な分布のモニタリングが求められている。本研究では、地上設置フーリエ変換赤外分光計（FTIR）観測データからHCFC-142b及びHFC-134aの解析を行った。

2. FTIRスペクトルからのHCFC-142bの解析

HCFC-142bは、特定フロンCFC-11やCFC-12の代替物質として製造されている代替フロンのひとつである。主に発泡剤として利用されている。大気中の寿命は約18年、地球温暖化係数は2310である。1990年ごろから使用が開始されたが、塩素を含むためモントリオール議定書で2004年から規制が始まり、発展途上国でも2030年までには全廃することが決められている。本研究では1192-1195 cm^{-1} 付近の中間赤外領域にあるHCFC-142bの吸収帯をFTIR分光データから解析することにより、HCFC-142bの気柱全量の導出を行った。HCFC-142bの吸収パラメータは、Toonが作成した疑似ラインパラメータを用いた。FTIRスペクトルの解析には、SFIT4と呼ばれる解析プログラムを用いた。図1にこのようにしてFTIR分光データから得られた陸別(緑)と昭和基地(青)におけるHCFC-142bの経年変化を、NOAAのBarrow(黒)、Cape Grim(灰)の地上観測の値と比較してプロットしている。2000年代以降は、FTIRの値と地上観測の値がよく一致していることが判る。

3. FTIRスペクトルからのHFC-134aの解析

HFC-134aは、塩素を含まない冷媒の代替物質として開発された代替フロンのひとつである。主にカーエアコンの冷媒として利用されている。大気中の寿命は約14年、地球温暖化係数は1430である。1990年代半ばから使用が開始されたが、こちらは地球温暖化防止の観点から、京都議定書のキガリ改正で2015年から先進国における規制が始まった。本研究では1175-1200 cm^{-1} 付近の中間赤外領域にあるHFC-134aの吸収帯をFTIR分光データから解析することを試みた。HFC-134aの吸収パラメータは、Toonが作成した最新の疑似ラインパラメータを用いた。FTIRスペクトルの解析には、SFIT4と呼ばれる解析プログラムを用いた。図2にFTIR分光データのSFIT4によるfittingの結果を示す。今後、fittingパラメータを改善することにより、HFC-134aの経年変化の様子を導出していく予定である。

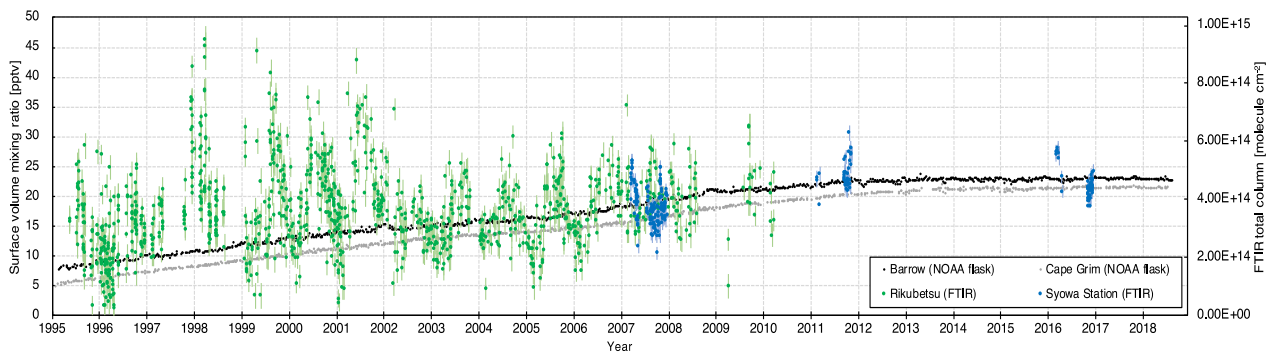


図1 HCFC-142bの経年変化の様子

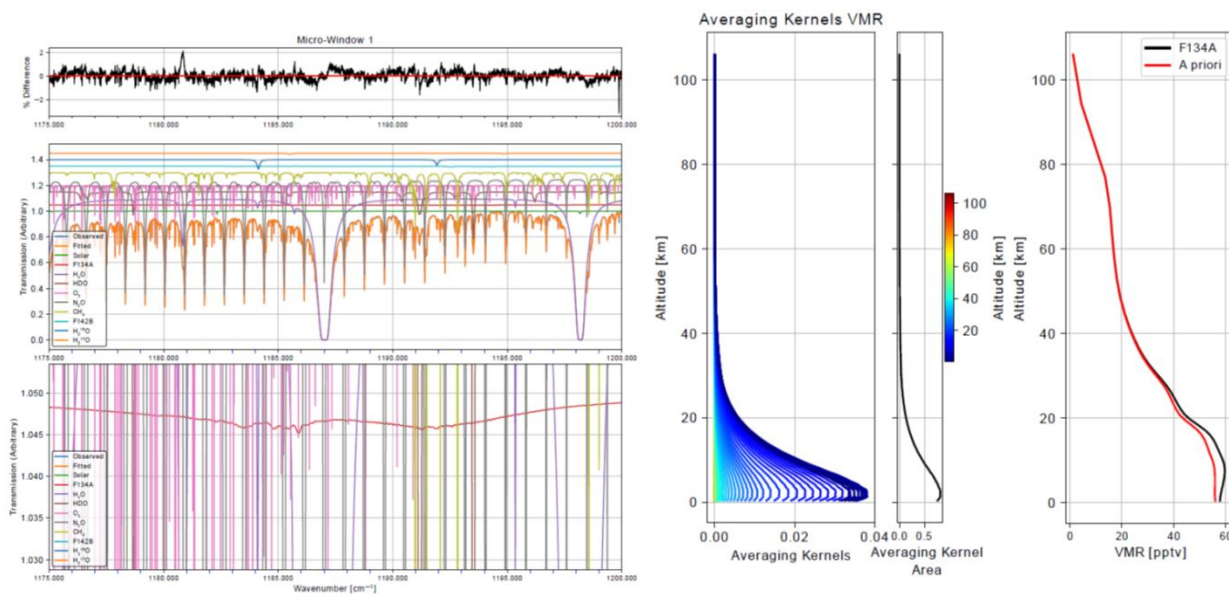


図2 HFC-134aのスペクトルフィッティングの結果

4. 成果発表

Hannigan, J. W., I. Ortega, S. B. Shams, T. Blumenstock, J. E. Campbell, S. Conway, V. Flood, O. Garcia, D. Griffith, M. Grutter, F. Hase, P. Jeseck, N. B. Jones, E. Mahieu, M. Makarova, M. De Maizière, I. Morino, I. Murata, T. Nagahama, H. Nakajima, J. Notholt, M. Palm, A. Poberovskii, M. Rettinger, J. Robinson, A. N. Röhlings, M. Schneider, C. Servais, D. Smale, W. Stremme, K. Strong, R. Sussmann, Y. Te, C. Vigouroux, and T. Wizenberg (2022), Global atmospheric OCS trend analysis from 22 NDA CC stations, *J. Geophys. Res.-Atmosphere*, 127, e2021JD035764, doi:10.1029/2021JD035764.

Nakajima, H., A. Mizuno, and T. Sugita, “Japanese NDACC-related activities since last NDACC Steering Committee Meeting in 2021”, NDACC Steering Committee Meeting, Paris, France, September 28, 2022.

Nakajima, H., “Report on 2022 NDACC Steering Committee Meeting (2022.9.26-30, Paris, France)”, 第5回地上赤外分光観測による大気組成変動検出に関する研究集会（名古屋）、2023年3月8日

【研究目的】

太陽風磁気ロープは太陽コロナの爆発現象（フレアやCME）によって生成され、コロナの磁場を運び出す。その磁場構造は太陽活動領域の磁場構造を反映し、また地球磁気圏のダイナミクスを強くコントロールする。このため、人工衛星観測で得られた太陽風データから磁気ロープ構造を選び出し、その磁場構造を決定する解析が広く行われている。解析手法としては、force-free磁場で記述される磁気ロープモデルにfittingする方法（FF法と呼ぶ）と、2次元的な磁場配位の特性から得られるGrad-Shafranov方程式による記述を応用した方法（GS法と呼ぶ）の2つの手法が広く受け入れられている。

この2つの手法はそれぞれ異なる仮定に基づいており、一長一短がある。FF法はforce-freeモデルを使用するという強い制限があるが、磁気ロープの膨張・収縮のようなダイナミクス効果が組み入れられている。一方、GS法ではダイナミクスが十分に考慮されず、観測データが示す磁場変化がすべて空間的な構造に起因するものとして扱われるという問題があるが、磁気ロープの断面構造については制約的な仮定なしに計算されるという優れた解析手法になっている。

この研究課題の目的は、FF法とGS法を組み合わせることで磁気ロープ構造の解析を高度化することである。具体的には、ダイナミクス効果を扱えるようにGS法を拡張し、磁気ロープ断面の形状を仮定しなければならないというFF法の制限を緩和した解析手法を開発する。

【GS法の拡張】

FF法では観測された磁気ロープの磁場変化は、空間的な変化（構造）を衛星が通過するために観測される磁場変化と、ダイナミクスによる時間的な変化の合成と考えてfittingを行う。このため、ある時刻（たとえば、衛星が磁気ロープにはじめて接触した時刻）における磁気ロープを記述するパラメータ群を未知数として、観測された磁場変化を説明するようにダイナミクスを求めている。従来のGS法では観測された磁場変化がすべて空間的な磁場変化（構造）と考えて計算するために、ダイナミクスの効果は誤差要因になってしまう。これを避けるためには、すべての時刻における観測データを、磁気ロープが衛星とはじめて接触したときの状態を保持していた場合に（ダイナミクス効果がないとした場合に）観測される値に引き直し、その「修正されたデータ」についてGS法を適用すればよい。

図1は2000年7月15日に観測された磁気ロープのFF法によるfitting結果を観測データに重ねてプロットしたものである。この磁気ロープに対して従来のGS法に従ってベクトルポテンシャル（A）とtransverse pressure（Pt）それぞれの変化と相互の関係を計算すると、図2のようなになる。GS法の計算が正しくなされるための要請は、図2bで赤点を繋いだグラフと青点を繋いだグラフが一致することである。物理的には衛星が磁気ロープの軸に向かって侵入する部分での観測（赤）と外に向かった出ていく部分での観測（青）で、P_vs_Aが一致するという要請であるが、両者のずれが無視できない。拡張したGS法で計算した結果が図3である。P_vs_Aが大きく改善されていることがわかる。

【研究結果と考察】

- （1）膨張する磁気ロープを正しく解析するための{拡張GS法}が開発できた。
- （2）ここで示した磁気ロープの観測例について、従来のGS法では大きな誤差を容認する必要があることがわかる。
- （3）今後、多くの磁気ロープ観測例について解析を行い、GS法の適用可能条件を明らかにすることが望まれる。特に、従来のGS法が広く使われてきたことを考えると、その結果を再検討する必要があると思われる。

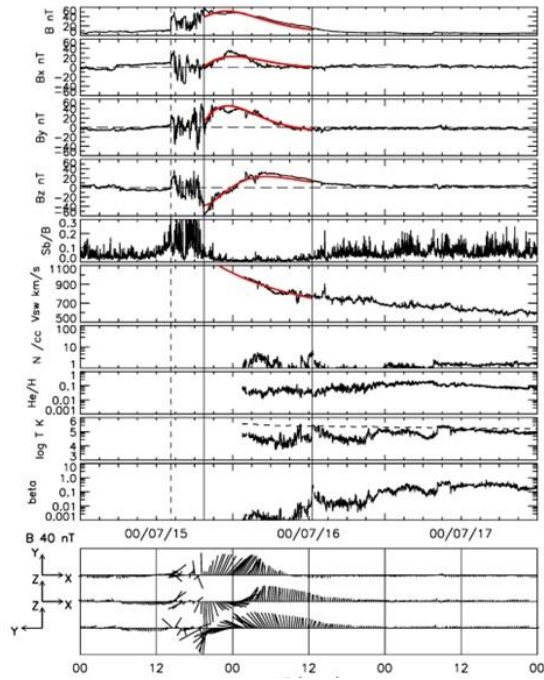


図1 2000-July-15に観測された磁気ロープ。赤線はFF法fitting結果

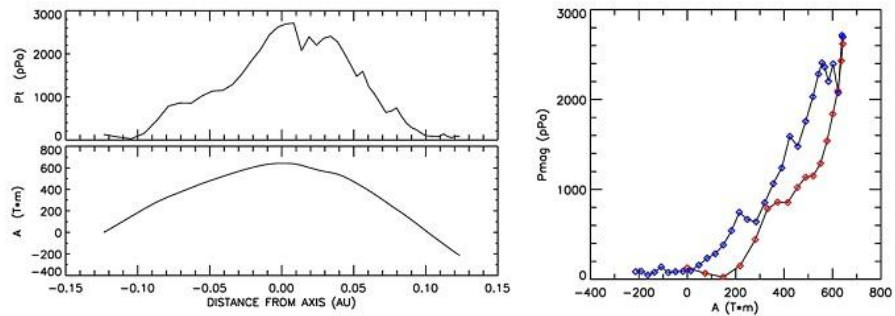


図2 従来のGS法で計算したベクトルポテンシャル (A) とPt, Pmag

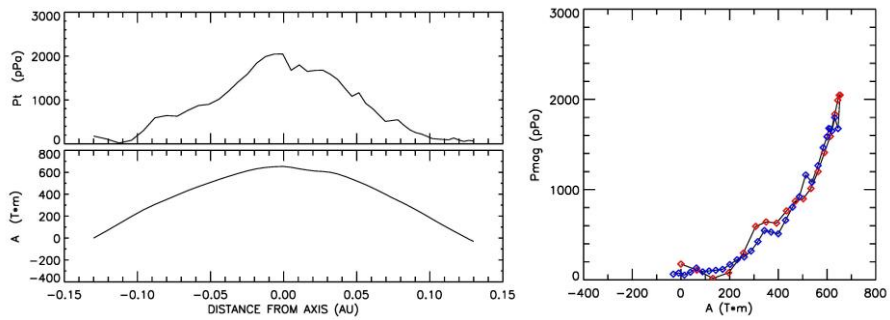


図3 拡張したGS法によるベクトルポテンシャル (A) とPt, Pmag

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

太陽からの放射は太陽地球圏環境に大きな影響をもたらしている。主に地球圏環境に影響を与えている太陽放射はX線や極紫外線 (EUV) であり、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おり、また、衛星データは観測波長や観測ケーデンスも限られている。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とは変動にズレがあることが分かってきた。

そこで本研究では、F10.7 に近いマイクロ波放射の観測を多周波数で行っている野辺山強度偏波計 (NoRP) のデータを用いて紫外線量を推測するアルゴリズムの構築を目指している。本研究を行うにあたって、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。

まず昨年度は、太陽の平穏時の NoRP の4つの周波数 (1, 2, 3.75, 9.4 GHz) の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 と SDO/EVE の衛星観測データを用いた。TIMED/SEE は 0.5-190 nm の範囲の紫外線放射スペクトルを 1 nm の分解能で、SDO/EVE は 1-1060 Åの範囲の放射を 1Åの分解能で観測している。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 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、どの周波数のマイクロ波放射においても、短波長の紫外線放射との相関がよく、長波長 (>130 nm) になるほど相関が悪くなった。紫外線の波長に関わらず、彩層起源のライン放射を多く含む放射波長ではマイクロ波放射との相関が異なり、相関係数も悪くなる様相が見られた。

太陽の紫外線放射スペクトルの中にはコロナ起源のものと彩層起源の放射が混ざっているため、コロナ起源の放射が主であると考えられるマイクロ波放射のみで幅広い波長域の紫外線放射スペクトルを再現するのは難しい。そこで上記の結果を踏まえ、今年度は機械学習の手法を用いて、どの周波数がどの紫外線波長の放射に寄与しているのかについて調べてた。その結果、55 nm 以下の短波長の紫外線では 2 GHz の寄与率が高く、55 nm 以上では 1 GHz の寄与と 2 GHz の寄与がほぼ同等になるという結果が得られた。また FUV である>130 nm では 3.75 GHz の寄与も大きくなっている様相が見られた。これらの寄与率は太陽活動度によって少々変化するが、寄与している周波数にはあまり変動が見られなかった。以上のように、紫外線放射に寄与している電波放射の周波数は様々であったが、これらの組み合わせによって、紫外線放射スペクトルは相関係数0.9以上の相関で再現できた。

これまでは、太陽活動周期における太陽紫外線放射とマイクロ波放射の関係を調べてきたが、実際は太陽フレア時の放射の方が太陽地球圏環境への影響が大きいため、来年度はフレア時におけるマイクロ波放射と紫外線放射スペクトルの関係を探っていく。太陽フレア時には、電波はジャイロシンクロトロン放射が加わり、紫外線もフレア特有の高温イオンによるライン放射が出てくるため、これらの再現には機械学習の手法を用いてアプローチしていく予定である。

成果発表

1. Shohei Nishimoto, Kyoko Watanabe, Hidekatsu Jin, Toshiki Kawai, Shinsuke Imada, Tomoko Kawate, Yuichi Otsuka, Atsuki Shinbori, Takuya Tsugawa, Michi Nishioka, "Statistical analysis for EUV dynamic spectra and their impact on the ionosphere during solar flares", Earth, Planets and Space, 75, Article number: 30 (2023)
2. Kosuke Namekata, Shin Toriumi, Vladimir S. Airapetian, Munehito Shoda, Kyoko Watanabe, Yuta Notsu, "Reconstructing the XUV Spectra of Active Sun-like Stars Using Solar Scaling Relations with Magnetic Flux", The Astrophysical Journal, 945, 147 (2023)
3. 渡邊恭子, 西本将平, 陣英克, 河合敏輝, 今田晋亮, 川手朋子, 大塚雄一, 新堀淳樹, 津川卓也, 西岡未知, "Statistical analysis for EUV dynamic spectra and their impact on the ionosphere during solar flares", JpGU Meeting 2022, Makuhari (Virtual), 2022年5月23日
4. 北島慎之典, 渡邊恭子, 荒尾宗睦, 西本将平, 陣英克, 埜千尋, 西岡未知, "The response of the Earth's ionosphere due to X-ray and EUV emissions from solar flares", JpGU Meeting 2022, Makuhari (Virtual), 2022年5月23日
5. 渡邊恭子, 河埜光貴, 城戸雄太郎, 伊野蒼汰, 北島慎之典, 西本将平, 下条圭美, 増田智, "Relationship between solar cycle variation of solar radio and EUV spectra", JpGU Meeting 2022, Makuhari (Virtual), 2022年5月31日
6. Kyoko WATANABE, Shinnosuke KITAJIMA, Shohei NISHIMOTO, Masumi SHIMOJO, Kosuke NAMEKATA, Satoshi MASUDA, "Relationships Between Microwave and EUV Spectra in Solar Cycle Variations and Their Estimation by Machine Learning", AOGS2022 19th Annual Meeting, Virtual, 2022年8月4日
7. Shohei NISHIMOTO, Kyoko WATANABE, Hidekatsu JIN, Shinsuke IMADA, Toshiki KAWAI, Tomoko KAWATE, Yuichi OTSUKA, Atsuki SHINBORI, Takuya TSUGAWA, Michi NISHIOKA, "EUV Dynamic Spectra of Large Solar Flares and Their Impact on the Ionosphere", AOGS2022 19th Annual Meeting, Virtual, 2022年8月4日
8. Shinnosuke KITAJIMA, Kyoko WATANABE, Shohei NISHIMOTO, Hidekatsu JIN, Chihiro TAO, Michi NISHIOKA, "The Variation of the Earth's Ionosphere Due to the Sudden Increase of X-ray and EUV Emissions From Solar Flares", AOGS2022 19th Annual Meeting, Virtual, 2022年8月4日
9. 北島慎之典, 渡邊恭子, 陣英克, 埜千尋, 西岡未知, "GAIAによる太陽フレア放射スペクトルの通信障害への影響評価", 日本天文学会2022年秋季年会, 新潟大学, 2022年9月13日
10. 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EUV放射スペクトルの予測", 第151回SGEPSS総会および講演会, 相模原, 2022年11月4日
11. 北島慎之典, 渡邊恭子, 西本将平, 陣英克, 埜千尋, 西岡未知, "Scale estimation of the Dellinger phenomenon using the GAIA model", 第151回SGEPSS総会および講演会, 相模原, 2022年11月5日
12. Kyoko Watanabe, Shohei Nishimoto, Hidekatsu Jin, Toshiki Kawai, Shinsuke Imada, Tomoko Kawate, Yuichi Otsuka, Atsuki Shinbori, Takuya Tsugawa, Michi Nishioka, "EUV Dynamic Spectra of Large Solar Flares and Their Effects on Total Electron Content", 2022 AGU fall meeting, 2022年12月13日
13. Shinnosuke Kitajima, Kyoko Watanabe, Shohei Nishimoto, Hidekatsu Jin, Chihiro Tao, Michi Nishioka, "Effects of solar flare X-ray, EUV, and Lyman-alpha emissions on the Dellinger phenomenon", 2022 AGU fall meeting, 2022年12月13日
14. Kyoko Watanabe, Mamoru Maeda, Shohei Nishimoto, Shinnosuke Kitajima, Masumi Shimojo, Kosuke Namekata, Satoshi Masuda, "Relationship between Microwave and EUV Emission in Solar Cycle Variations and Prediction of Solar EUV Emission Spectrum by Machine Learning Method", 2022 AGU fall meeting, 2022年12月16日
15. 北島慎之典, 渡邊恭子, 陣英克, 埜千尋, 西岡未知, "GAIAを用いたデリンジャー現象に影響する太陽フレア放射スペクトルの評価", 2022年度太陽研連シンポジウム, 名古屋大学, 2022年2月20-22日
16. 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, "太陽フレア時と非フレア時における電波とEUV放射スペクトルの関係", 2022年度太陽研連シンポジウム, 名古屋大学, 2022年2月20-22日
17. 北島慎之典, 渡邊恭子, 陣英克, 埜千尋, 西岡未知, "GAIA と F_X を用いたデリンジャー現象の規模推定", 日本天文学会2023年春季年会, 立教大学, 2023年3月14日
18. 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", 日本天文学会2023年春季年会, 立教大学, 2023年3月15日

あらせ衛星による波動・粒子観測データを用いた内部磁気圏重イオン分布に関する研究
Study on the heavy ion distribution in the inner magnetosphere: Arase observation

松田昇也 金沢大学理工研究域

地球内部磁気圏を満たす超熱的プラズマは、その大部分が電子と水素イオン（あるいはヘリウムイオン）から成ると考えられているが、米国の「Dynamic Explorer 1」や日本の「あけぼの衛星」の観測によると、特に電離圏高度に近いプラズマ圏深部では、1価の酸素イオンや2価の酸素イオンの組成比が増加することが報告されている。また、地磁気脈動周期の測定から、地球半径の4-5倍程度の領域にも「酸素イオントラス」と呼ばれる領域が存在することが指摘されている。これらの超熱的重イオンは科学衛星による直接観測が容易ではなく、空間分布や地磁気活動・太陽活動との関連性、プラズマ波動伝搬に与える影響などは研究の途上である。本研究では、これらの重イオンがプラズマ波動の伝搬に与える効果を評価するために、電磁イオンサイクロトロン（EMIC）波動の伝搬経路を逐次計算するレイトレーシングプログラムの整備を行った。宇宙プラズマ中の主要なイオン（水素イオン、ヘリウムイオン、酸素イオン）に加え、2価のヘリウムイオンや2価の酸素イオンといった任意の電荷質量比のマイナーイオンを考慮した計算を組み込み、伝搬経路を可視化するとともに、分散関係(ω - k ダイヤグラム)上に反射条件を図示することを可能とした。また、実際の観測データとの比較に向けたEMIC波動観測例の収集のために、あらせ衛星の低周波プラズマ波動およびプラズマ粒子計測データを高い時間精度で長時間連続観測可能な「EMIC-WPIAモード」の運用戦略を立案し実施した。あらせ衛星の遠地点が昼～夕頃の磁気地方時を通過する時期を狙ってEMIC-WPIAモードを実施し、数例のEMIC波動観測例を得た。第25太陽活動周期の極大に向かう時期であり、地磁気活動度毎の比較に有用なデータセットとなり得る。今後は観測を継続するとともに、観測で得られた結果をレイトレーシングの入力としてより精密なプラズマ波動伝搬を計算することや、EMIC波動と内部磁気圏重イオン・相対論的電子との関わりを理論計算と観測の両側面から紐解いていくことを目指したい。

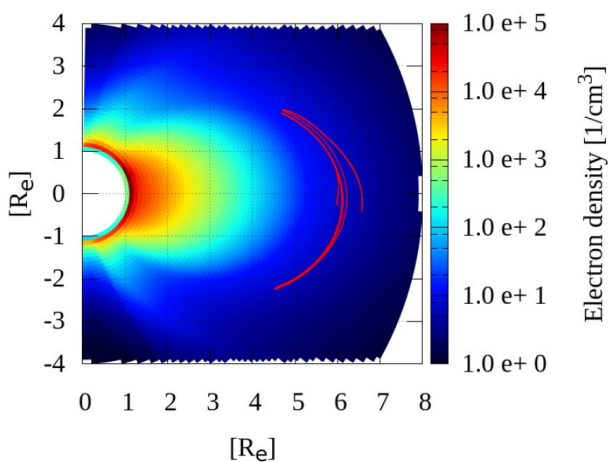


図. EMIC波動のレイトレーシング結果

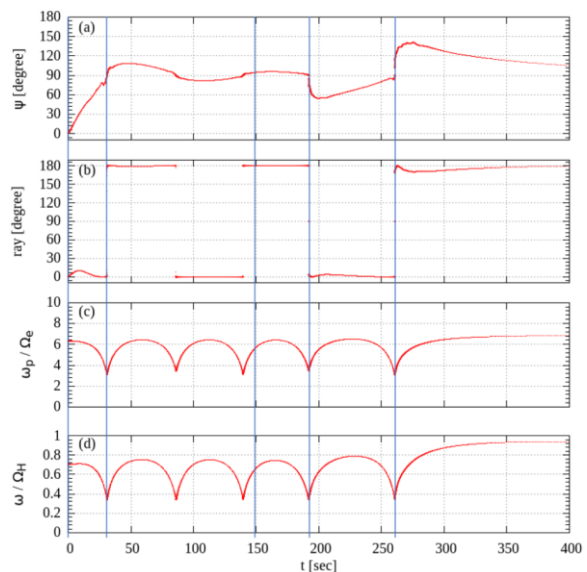


図. レイトレーシングによるEMIC波動の伝搬特性

(別紙様式 4-2)

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ている。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Hal1-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変更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、具体的には申請者の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的としている。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を行う。CoToCoAには、このような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が、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かった。また、CoToCoAのVersion2において、相互作用機能が一部実装されたが、この機能だけでは、本研究が想定している重合格子化を行えなかったため、本年度ではCoToCoAに新規機能を追加した。重合格子化には結合するコード間でデータの相互参照が必須となるため、お互いのコードから相互参照可能なバッファを考え、その基本機能の開発を行った。このバッファにそれぞれのコードにおける重合する部分をコピーすることで、複雑な並列構造や通信をコードに書くこと無く、データの相互参照が可能となる。これまでにバッファの正常動作確認ができており、さらに複数のバッファの実装方法による動作速度の評価を行った。これらの結果は、情報処理学会のHPC研究会やSTEシミュレーション研究会で成果報告を行っている。

・学会発表

Zhou Jingde, 深沢 圭一郎, 南里 豪志, Development of the data buffer holding time-series data across multiple applications, STEシミュレーション研究会: 次世代HPCにおけるSTPシミュレーション・RISH電波科学計算機実験(KDK)シンポジウム合同研究集会、京都、2023年3月8日-10日

・論文リスト

(査読無し) Zhou Jingde, 深沢圭一郎, 南里豪志, 異なるアプリケーション間で共有される時系列情報を保持可能なデータバッファの研究開発, 情報処理学会研究報告, 2022-HPC-187(16), 1-8, 2022.

(別紙様式 4-2)

共鳴散乱ライダーシステムにおける絶対周波数基準の為の飽和分光実験
Saturation spectroscopy experiments for absolute frequency standards
in resonance scattering lidar systems

津田卓雄，電気通信大学 大学院情報理工学研究科

研究目的

地球超高層領域は、地球大気から宇宙空間への遷移領域であり、地球と宇宙の関係性の解明や人工衛星に代表される地球近傍宇宙空間の高度利用の観点で環境計測が不可欠な領域である。超高層領域の環境計測手段として、流星由来の金属原子層 (Na, K, Li, Ca, Fe, etc.) を観測対象とした共鳴散乱ライダーが挙げられる。共鳴散乱ライダーは、金属原子・イオンの共鳴線を利用したレーザーセンシング (アクティブ計測) であり、対象原子の密度・温度・速度を高精度・高分解能で観測可能な計測システムである。

共鳴散乱ライダーによる温度・風速の観測原理は、原子・イオン共鳴線スペクトルのドップラー幅から温度の情報を、ドップラーシフトから速度の情報を得るというものである。その為には、送信レーザーの絶対周波数 or 絶対波長を 8-9 桁程度の高精度 (<10 MHz 程度 or <10 fm 程度) で制御することが求められる。この為に必要な絶対周波数基準を独自の飽和分光実験によって得ることが本研究の目的である。特に、Na (589 nm), K (770 nm), Rb (780 nm) の 3 種について飽和分光実験を行うことで、可視から近赤外領域において <10 MHz の精度で絶対周波数基準を得ることを目指す。

研究進展状況

Na 飽和分光を中心に研究を進めた。特に、近赤外波長の 2 種の分布帰還型 (distributed feedback: DFB) レーザーを混合して和周波発生で得た数 μW の低出力 589 nm 光源を用いた Na 飽和分光に挑戦した。DFB レーザーは、従来レーザー光源と比べて、波長選択性や安定性の観点で利点があるが、和周波発生で得られる出力が低いことが難点である。この点を克服したシステムの検討に向けて、飽和分光実験をシミュレーションする為の理論モデルを構築した。具体的には、Na 超微細構造の理論に基づき、Na 飽和分光実験における Na 蒸気セル内の Na 原子エネルギー遷移について、先行研究を参考にしながら独自にモデル化し、設定パラメータを変化させて Na 飽和条件を詳細に検討できるようにした。並行して、飽和分光実験の光学系の構築を行い、DFB レーザーの電流と温度を制御し、589 nm 光源の周波数スキャンを行った。初期実験の結果としては、Na D_2 線の固有の構造であるダブルピーク構造を得ることができたが、絶対周波数基準の為の Lamb-dip や crossover-peak を十分に発生させることは困難であった。要因と考えられるスキャン分解能とレーザー強度について改善を行った。スキャン分解能は、分解能の高い直流電源を導入し、それを 1319 nm DFB レーザーに直接印加することで、1 μA ステップ (周波数換算で 1 MHz 相当) の電流スキャンを実現した。レーザー強度は、レーザー (589 nm のコヒーレント光) のビーム径に着目して、ビーム径を変化させることで生じるレーザー強度の面積密度と移流効果の相互関係を理論シミュレーションで明らかにし、ビーム径の縮小が効果的であることを見出した。この結果を踏まえ、飽和分光系におけるレーザー伝搬軸に凸レンズを追加して、ビーム径を縮小させることでレーザー強度の面積密度を増加させる光学系を開発し、最終的に 6 μW のレーザー出力で Lamb-dip と crossover-peak を発生させることに成功した。

取得した Lamb-dip と crossover-peak の実験結果について、理論シミュレーションを用いて性能評価を行った結果、本研究で開発した飽和分光システムの絶対周波数の精度は約 30 MHz と推定され、目標精度 (<10 MHz 程度) の達成には至らなかった。絶対周波数精度の更なる改善に向けた考察から、今後の改善策として、DFB レーザーの環境温度制御の必要性を提案した。

赤潮モニタリングのためアルゴリズム開発 Algorithm development for red tide monitoring

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

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. But, 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 water pollution, eutrophication, red tide, blue tide, and water hypoxia. They cause ecosystem/biodiversity destructions, fish mortality, livelihood/economic losses, and adverse societal impacts (severe illness and fatalities to humans).

Eutrophication is an increasing rate of nutrient load to aquatic environments (Nixon, 1995) that leads to red tide, an unusual phytoplankton bloom of a dominant species (Anderson, 1994). Red tide, due to dead phytoplankton cells, frequently ends up with coastal water hypoxia. Anoxic bottom waters can also be generated by a large supply of organic pollutants favoring sulfide generation by anaerobic bacteria. Blue tide occurs when the anoxic and sulfide-rich bottom water rises to the surface layer (Higa et al., 2020). Eutrophication and 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 eutrophication and associated issues like 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, Manilla 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., 2020; Luang-on et al., 2023). Among the Japanese coastal waters, the Ariake Sea and Tokyo Bay are the waters frequently affected by red tides. While the red tide in the Ariake Sea is frequently caused by raphidophyte *Chattonella* *sp.* (Feng et al., 2020), in Tokyo Bay, it is caused mainly by the dinoflagellate group (Kusano, 2019). Recently in October 2021, a devastating red tide also occurred in the waters southeast of Hokkaido caused by dinoflagellate *Karenia selliformis* (Kuroda et al., 2023).

2. Objectives

Rapid coastal water monitoring of eutrophication, red tide, and blue tide is thus required. But, 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 afforded by satellite remote sensing. To fully exploit remote sensing technology (for scientific and practical purposes,) establishing an end-user-friendly system from which the end-users can access the data easily and freely is very important. A near-real-time monitoring system with a high spatial resolution (250 m) is highly required by scientific communities, local societies, and relevant stakeholders in Southeast Asian countries to address the environmental and ecological adverse impacts of eutrophication, red tide, and blue tide.

Considering that to date, 1) there is no satellite observation-based near-real-time monitoring system covering the entire Asian waters, despite suffering from eutrophication and frequent red tide occurrence, and 2) addressing environmental and ecological adverse impacts of eutrophication, red

tide, and blue tide is also relevant to many targets of the United Nation-Sustainable Development Goals (UN-SDGs) 3, 6, 13, and 14, we are therefore proposing a research activity with the objectives are to; 1) develop eutrophication, red tide, and blue tide algorithms for Second Generation Global Imager (SGLI) onboard Global Change Observation Mission–Climate (GCOM-C), 2) develop SGLI observation-based near-real-time monitoring system (hereafter NRT-OS), and 3) implement developed algorithms (eutrophication, red tide, blue tide) into the SGLI observation-based NRT-OS being proposed.

3. Tentative Results

3.1. SGLI verification

Upper Gulf of Thailand

Version 3 of the SGLI remote sensing reflectances (Rrs) were verified using in situ Rrs collected in the upper Gulf of Thailand (uGoT). Of 100 in situ Rrs data collected within the 2017~2019 period only 15 pairs of in situ-SGLI data are available after the 1st screening with ± 24 -hr time window, 3-by-3 pixel averaging, and applying flags of DATAMISS, LAND, ATMFAIL, CLDICE, HIGLINT, and HISOLZ.

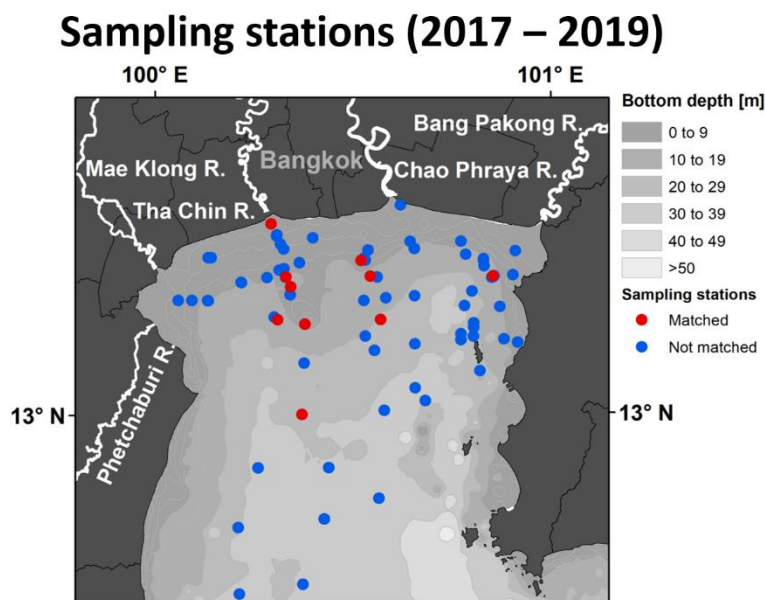


Figure 1. Sampling stations in the uGoT where in situ Rrs data (blue dots, N=100) were collected within the period from 2017 to 2019. Red dots indicate the stations where pairs of in situ and SGLI Rrs data are available (N=10) after the SGLI data quality screenings (Bailey and Werdell, 2006).

In general, from the 15 pairs of in situ-SGLI data, the SGLI Rrs overestimated in situ Rrs (**Figure 2a**), especially Rrs at 443 nm, 490 nm, 530 nm, and 565 nm (hereafter Rrs443, Rrs490, Rrs530, and Rrs565). The main input of the empirical phytoplankton chlorophyll-a (Chl-a) algorithm, the blue to green band ratios (Rrs_{λ}/Rrs_{565}) were also compared and showed SGLI data overestimation (**Figure 2b**).

To ensure high-quality SGLI Rrs the 2nd screening following Bailey and Werdell (2006) i.e., the number of good pixels (NGP) within 3 by 3 pixels > 5 pixels; mean within NGP is within $\pm 1.5x$ RMS of the median; and the coefficient of variation of selected pixels < 0.15 . After the 2nd screening was applied, the total numbers of in situ and SGLI Rrs data pairs decreased to 10 match-ups (**Figure 1**). However, even after performing the 2nd screening with 10 pairs of data, both the SGLI Rrs and blue-to-green band Rrs ratios were still overestimated (**Figure 2c, d**). To improve the accuracy of SGLI Rrs data, they were then corrected to best fit in situ Rrs by employing Type-II regression following Luang-on et al. (2021).

Figure 3 shows a comparison of in situ and SGLI Rrs in terms of their spectral shapes. Original SGLI Rrs mainly overestimated in situ Rrs at bands 443 nm ~ 565 nm. After correction using Type-II regression, SGLI corrected Rrs are in close agreement with in situ Rrs. These results thus indicate that SGLI Rrs in the uGoT should be corrected before developing local ocean color algorithms (Chl-a, red tide, etc.) for the uGoT.

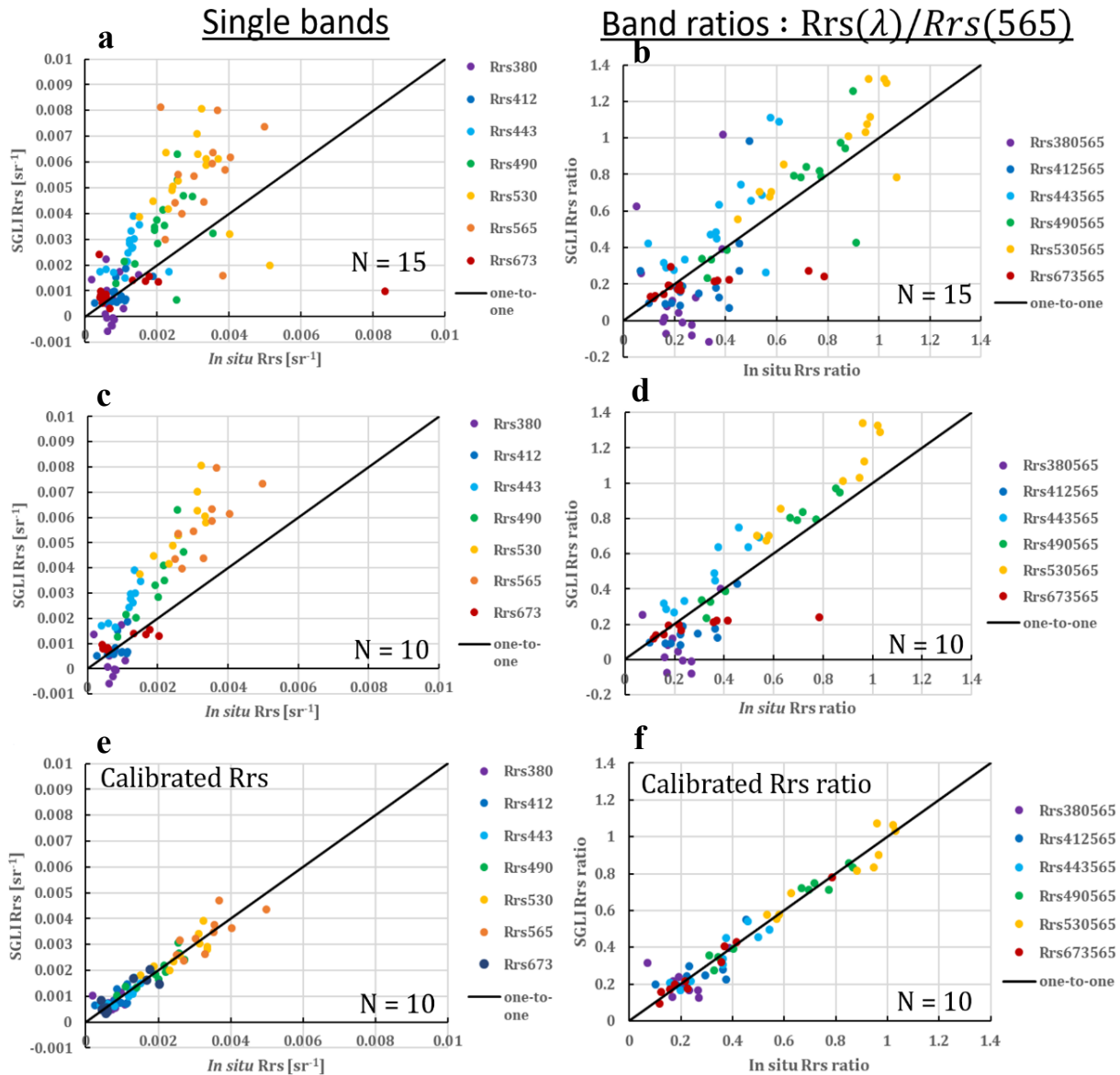


Figure 2. Comparison of in situ and SGLI Rrs (left column) and Rrs blue to green (565) band ratio (right column). The top graphs are those derived after applying SGLI data quality 1st screening (N=15). The middle graphs are those after applying the 2nd screening (N=10) following Bailey and Werdell (2006). The bottom graphs are those after corrections were made employing the Type-II regression.

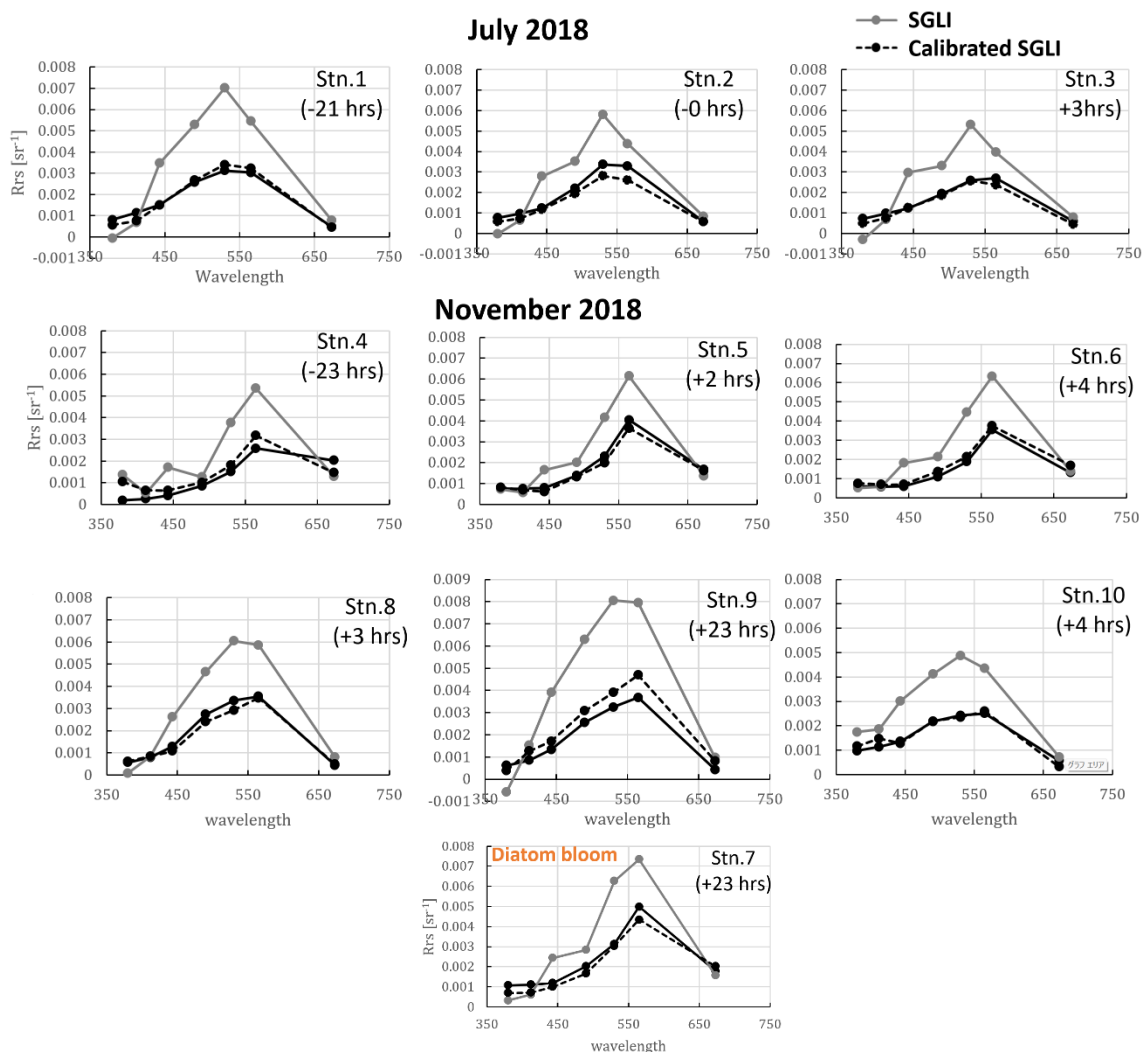


Figure 3. Spectral shapes in situ and SGLI Rrs from the uGoT (N=10). The 10 pairs of in situ and SGLI Rrs data were obtained after the SGLI Rrs data quality screenings (Bailey and Werdell, 2006). The gray line with dots indicates the original SGLI Rrs. The black solid line with dots indicates in situ Rrs, whereas the black dashed line with dots indicates corrected SGLI Rrs.

Tokyo Bay

In situ observation was carried out in Toko Bay in September 2022. Due to bad weather conditions, only 4 pairs of in situ and SGLI data were available (**Figure 4**). The observation was carried out during phytoplankton bloom (see SGLI Chl-a image in **Figure 4**). The color of surface water during observation is brownish green in stations 07, 08, and 98, but rather green at station Kemigawa AERONET-OC.

Comparing the Rrs spectral shapes, it is clear that all versions of SGLI Rrs overestimated in situ Rrs at bands 380 nm, 412 nm, and 443 nm (**Figure 4**). SGLI Rrs, especially the JASMES version, are in good agreement with in situ Rrs. Correction on the SGLI Rrs is thus necessary for better ocean color parameter retrieval or red tide detection in Tokyo Bay.

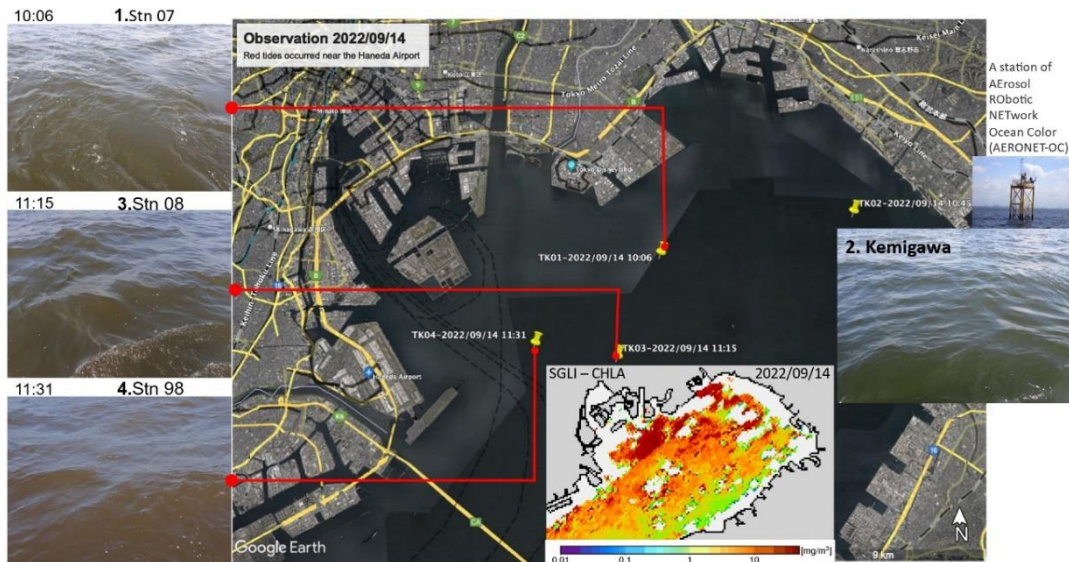


Figure 4. Stations (yellow pins) visited on September 14 in situ observation in Tokyo Bay. The photos show the color of surface water taken at 4 stations. The SGLI Chl-a image shows that observation was conducted in high Chl-a waters.

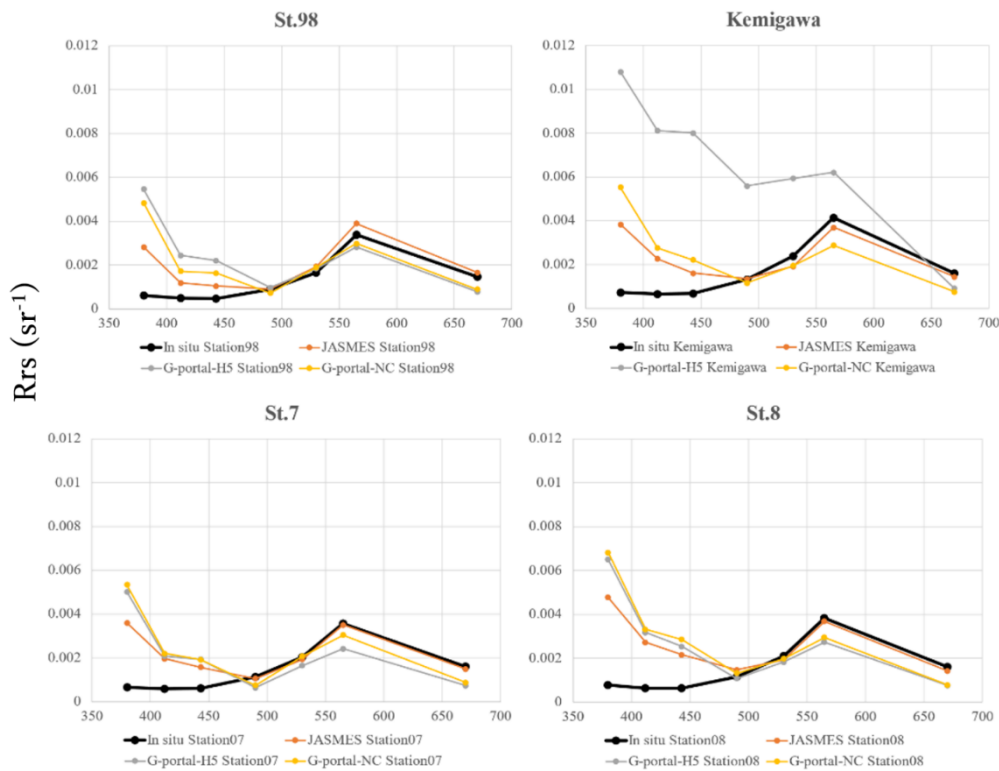


Figure 5. Spectral shapes in situ and SGLI Rrs from the Tokyo Bay (N=4). There is no flags applied to SGLI Rrs. The gray line with dots indicates the original SGLI Rrs. The black solid line with dots indicates in situ Rrs, whereas the orange dashed line with dots indicates JASMES version of SGLI Rrs. The yellow and gray lines with dots are G-portal version of SGLI Rrs extracted using different ways (yellow for mean within 3 by 3 pixels vs gray for mean within 750 by 750 m boxes).

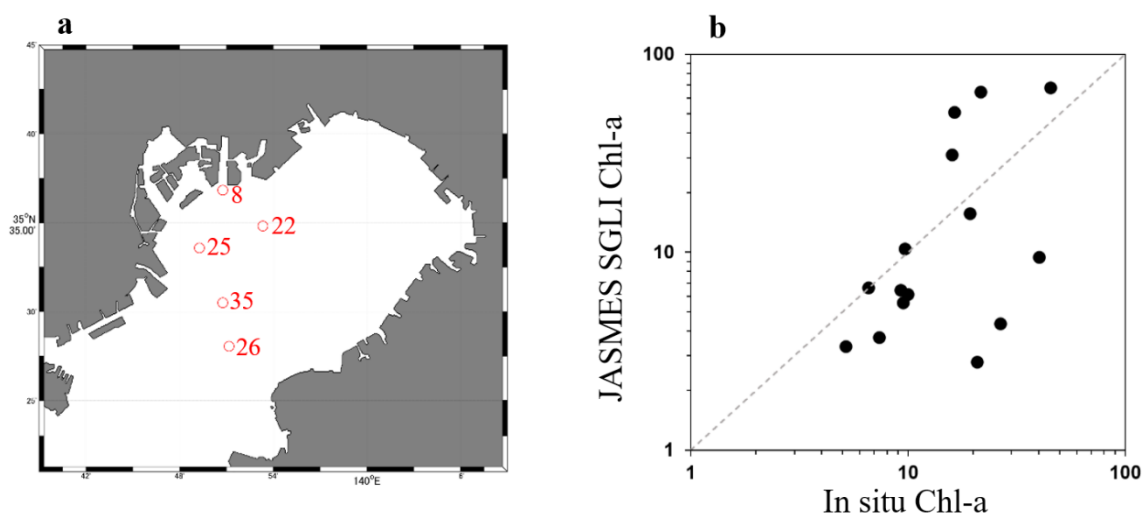


Figure 6. (a) Location of stations (no. 8, 22, 25, 26, and 35) where in situ Chl-a data were collected by Tokyo Bureau of Environment (<https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/>) during the 2019-2010 period. (b) Scatter plot comparing JASMES SGLI Chl-a with in situ Chl-a collected at stations in (a). Winter data are not included in this comparison.

Tokyo Bureau of Environment (<https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/>) is carrying out routine observations every year in Tokyo Bay (**Figure 6a**). However, they are not collecting water optical property data. There are more stations in the coastal waters (e.g., station Odaiba, etc.) sampled by Tokyo Bureau of Environment, but they are too close to the land making SGLI data retrieval inconsistent.

Comparison of JASMES SGLI and in situ Chl-a was then carried out employing data archived by Tokyo Bureau of Environment at five stations relatively far from the land. There is no winter data included in this comparison. As shown in **Figure 6b**, most of SGLI Chl-a underestimated in situ Chl-a, though they were significantly correlated ($R=0.50$, $p < 0.05$). Such an underestimation might be due to a tendency of SGLI Rrs overestimation at blue bands as shown in **Figure 5**. Incorrect SGLI Rrs at blue bands will lead to incorrect high Chl-a retrieved by empirical blue-to-green band ratio. Correction especially to SGLI Rrs at blue bands is thus necessary.

3.2. Red tide spectral library

Red tide southeastern coast of Hokkaido

During the fall of 2021, a devastating red tide that caused massive mortality of salmon and sea urchins occurred in the waters southeast of Hokkaido. The red tide was caused by phytoplankton from the dinoflagellate group mainly by *Karenia selliformis*. Therefore it is necessary to develop an algorithm to detect *Karenia selliformis* bloom. One approach to developing red tide algorithm is by recognizing the spectral shape of waters dominated by red tide causative phytoplankton meaning that a spectral library for specific phytoplankton species needs to be constructed. In this work, the spectral libraries of the waters during *Karenia selliformis* red tide and other waters without *Karenia selliformis* bloom were investigated.

One initial approach to differentiate waters with *Karenia selliformis* blooms and other water types is by capturing slope differences around the wavelength 443 nm. As can be seen in **Figure 7a**, during *Karenia selliformis* blooms, the Rrs slope between 380 nm and 443 nm (hereafter Rrs_Slope_380-443) is negative but Rrs_Slope_443-490 is positive. Such a shape was rarely observed from the waters without *Karenia selliformis* bloom (**Figure 7b**).

Taking their differences will thus produce relatively higher negative values for the waters with *Karenia selliformis* bloom than those for the waters without *Karenia selliformis* blooms (**Figure 7c**). The Rrs slope difference of about -0.00003 can be an initial threshold for separating the waters with and without *Karenia selliformis* blooms. There are three data showing the slope differences < -0.00003 which represent coastal turbid waters. But, they should be distinguishable by other common classification criteria like Rrs555 threshold at the initial stage of water type classification (Siswanto et al., 2013).

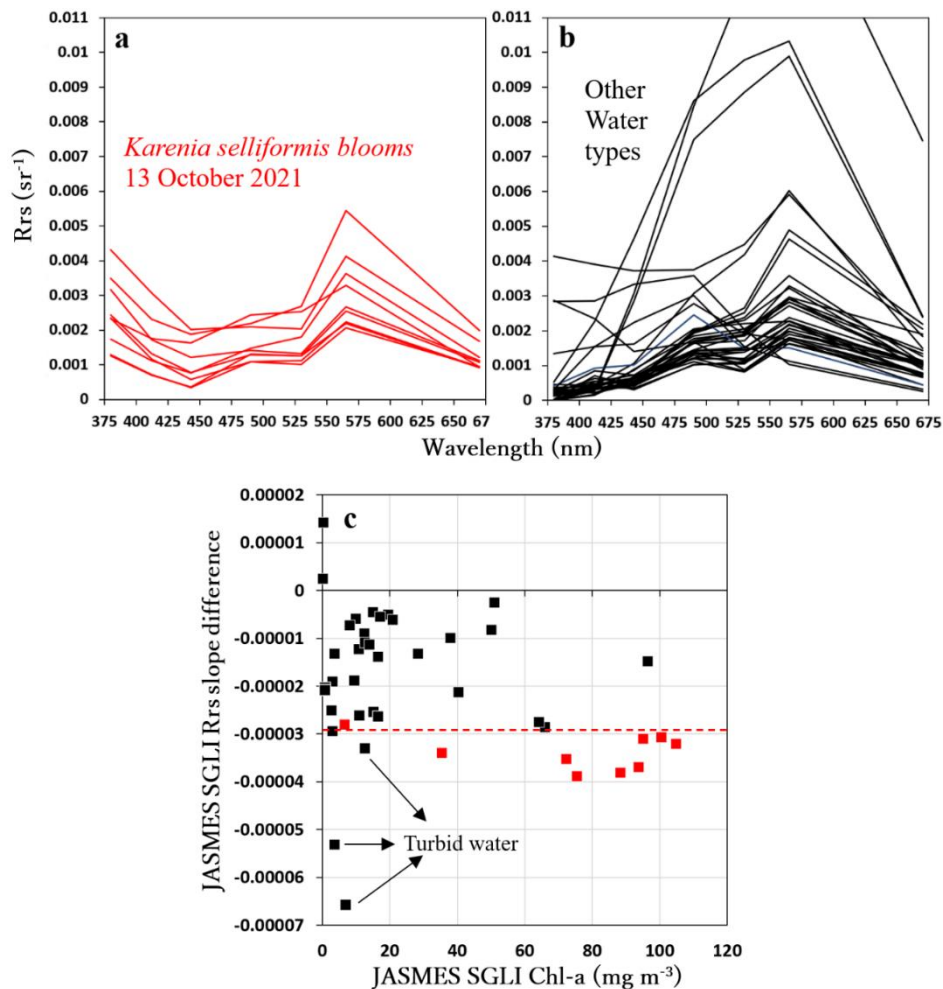


Figure 7. (a) The spectral shape of JASMES SGLI Rrs extracted from some pixels during *Karenia selliformis* red tide on 13 October 2021 from the waters southeast of Hokkaido. (b) The same as (a) except for non-*Karenia selliformis* blooms (e.g., turbid waters, spring diatom, and fall diatom blooms, etc.). (c) Scatter plot of SGLI Rrs slope difference against SGLI Chl-a. The slope difference was calculated by subtracting Rrs slope between 443 and 490 nm from Rrs slope between 380 and 443 nm. Red data are for the waters with *Karenia selliformis* blooms.

The Rrs slope difference of -0.00003 might change depending on the data number. To define a more robust Rrs slope difference threshold more data are thus needed. Thus, other SGLI data during *Karenia selliformis* blooms on dates 9 October and 12 October 2021 (see Kuroda et al., 2022) will be analyzed. The Rrs slope between 380 nm and 443 nm might also need to change to between 412 nm and 443 nm due to high uncertainty on the Rrs380. It is also worth investigating the applicability of other approaches such as applying a quasi-analytical model (Lee et al., 2002) to derive inherent optical properties (e.g., phytoplankton absorption and phytoplankton backscattering) of red tide causative phytoplankton.

Tokyo Bay

Red tide is also a common phenomenon in Tokyo Bay that occurs mainly in summer with a frequency of about 15~30 times a year and a total lifetime of 40~120 days a year. Red tide in Tokyo Bay is frequently caused by phytoplankton from the dinoflagellate group (50%), followed by raphidophyte (25%), and diatom (15%) (Kusano, 2019). We extracted JASMES SGLI Rrs to construct Rrs spectral library of waters during different types of blooms, but unfortunately only during diatom blooms are available.

Figure 8 shows JASMES SGLI Rrs spectral shapes for the waters during diatom bloom collected from the Tokyo Bureau of Environment's routine stations. Similar to diatom-dominated Rrs spectral shapes observed southeast of Hokkaido, Rrs of the waters dominated by diatom in Tokyo Bay do not form a valley V-shape around 443 nm. Whether such a shape is a typical SGLI Rrs spectral for diatom group needs to be verified with more datasets.

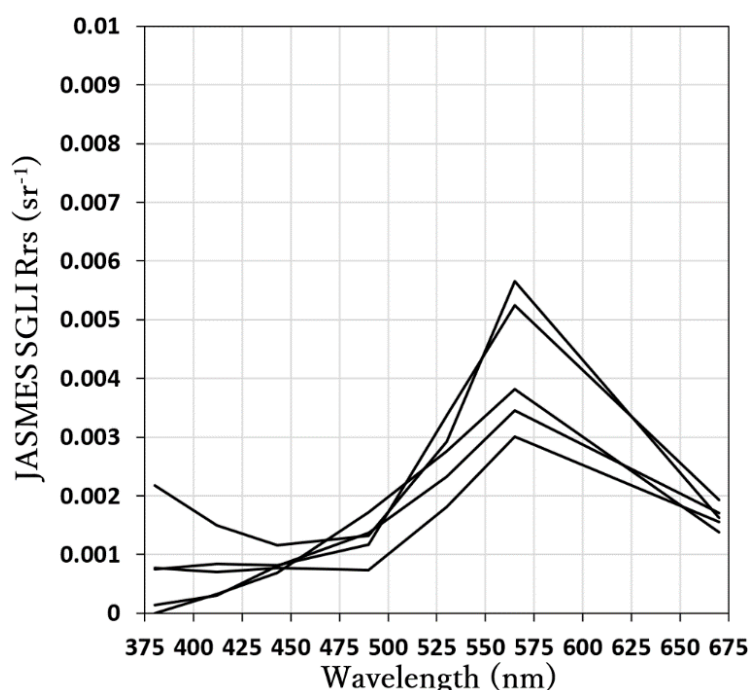


Figure 8. The spectral shape of JASMES SGLI Rrs extracted from the Tokyo Bay waters during the bloom of diatom phytoplankton group. Coastal stations like Odaiba station were discarded due to interference with the land reflectance.

4. Presentations

Luang-on, J., Siswanto, E., Higa, H., Toratani, M., Ogata, K., Ishizaka, J. (2022). GCOM-C/SGLI preliminary investigation of red tides in Asian coastal waters. 10th Asian Workshop on Ocean Color. Online, 2022/12/9.

Siswanto, E., Ogata, K., Luang-on, J., Higa, H., Ishizaka, J. (2022). Ocean Color (Harmful Algal Blooms) Research and Development. Asia Summit on Global Environmental Measurement and Monitoring. Online, 2022/12/12.

Siswanto, E. (2022). Remote Sensing Application for Harmful Algal Bloom Detection. 12th SINNTECH WEBINAR. Online, 2022/04/21.

石坂丞二, 村上浩, 飯田高大, 山口篤, 有馬大地, Eko Siswanto (2022). しきさい (SGLI) を用いた北海道沖 *Karenia selliformis* 赤潮の検出. 日本海洋学会 2022 年度秋季大会. 名古屋大学, 2022/9/4.

5. References

- Anderson (1994). Red tide. *Scientific American*, 271, 62–68.
- Bailey and Werdell (2006). A multi-sensor approach for the on-orbit validation of ocean color satellite data products. *Remote Sensing of Environment*, 102(1-2), 12–13.
- Feng et al. (2020). A novel method based on backscattering for discriminating summer bloom of raphidophyte (*Chattonella* spp.) and diatom (*Skeletonema* spp.) using MODIS images in Ariake Sea. *Remote Sensing*, 12, 1504.
- Higa et al. (2020). An estimation method for blue tide distribution in Tokyo Bay based on sulfur concentrations using Geostationary Ocean Color Imager (GOCI). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 235, 106615.
- Kuroda et al. (2022). Distribution of harmful algae (*Karenia* spp.) in October 2021 Off southeast Hokkaido, Japan. *Frontiers in Marine Science*, 9, 841364.
- Kusano (2019). Recent outbreaks of red tide in Tokyo Bay. 神水セ研報第 10 号, 51–56.
- Luang-on et al. (2021). Seasonal and interannual variations of MODIS Aqua chlorophyll-a (2003–2017) in the Upper Gulf of Thailand influenced by Asian monsoons. *Journal of Oceanography*, 78, 209–228.
- Luang-on et al. (2023). MODIS-derived green *Noctiluca* blooms in the upper Gulf of Thailand: Algorithm development and seasonal variation mapping. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1031901.
- Nixon (1995). Coastal marine eutrophication: A definition, social causes, and future concerns. *Ophelia*, 41, 199–219.
- Siswanto et al. (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.
- Yñiguez et al. (2020). Over 30 years of HABs in the Philippines and Malaysia: What have we learned? *Harmful Algae*, 101776.

(別紙様式 4-2)

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
Three-Dimensional analysis of small-scale gravity waves
based on the sodium LIDAR at Tromsø

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) で碎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。

2018年1月20日にライダーと同じ観測所の大気光観測で観測された水平波長約20-40km, 周期10分以下の小スケール大気重力波について調査し、Naライダーにおいても同程度の変動 (周期7.2分) が温度と水平風速において確認された。また、ライダー観測で得られた鉛直風変動の振幅 (0.64m/s) と大気光観測から算出される鉛直風変動の振幅 (0.72m/s) は同程度であった。さらに、Naライダー観測で得られた水平風と鉛直風の変動から計算される運動量フラックスは $0.95 \text{ m}^2/\text{s}^2$ であり、この値は小スケール大気重力波が持つ典型的な運動量フラックスの大きさである。以上のことから、Naライダーにおいて観測された変動は小スケール大気重力波によるものであることが強く示唆される。今後は、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: 20-110 km, 底面: 58×58 km の四角錐の領域) に拡張して、観測された大気重力波の3次元的な伝搬特性を議論する。なお共鳴散乱と Rayleigh 散乱の高度ギャップは大気モデルで補完する予定である。高度方向に拡張することにより、観測された大気重力波の鉛直伝搬に伴う運動量フラックスの散逸量を議論する。

成果発表:

Suzuki, S., S. Nozawa, S. Oyama, and K. Shiokawa, Observational evaluation of temperature/wind perturbations associated with small-scale AGWs: Momentum flux estimation, JpGU Meeting 2022, 2022-05-26.

(別紙様式04-2)

あらせ衛星搭載XEPの観測データを用いた応答特性評価
Calibration of the response characteristic of the XEP on ARASE

横田勝一郎, 大阪大学大学院・理学研究科

【研究目的】

本研究の目的は、「あらせ」衛星搭載の超高エネルギー電子分析器 (Extremely High-Energy Electron Experiment, XEP) (Higashio et al., EPS, 2018) の性能較正を行い、観測データを評価して放射線帯の動向を詳細に解析することである。2020年度と2021年度にて、「物質中における粒子の飛跡をシミュレーション」プラットフォームであるGEANT-4(GEometry ANd Tracking)を利用して、XEPフライトモデル形状の詳細を反映させた数値モデルを構築し、観測データ処理に必要な応答関数の構築までを完了した。また、「あらせ」衛星XEPによる地球放射線帯の観測データに対して応答関数による一次処理を行い、XEP観測データを他の観測機器データとの比較などを行った。2022年度は総合的に評価からXEP観測データを最大限利用して放射線帯の動向に迫る理学的研究テーマに取り組む。

XEPは地球内部磁気圏のエネルギー帯最上部に位置する0.4~20MeV電子の計測を行う観測器である。放射線帯の主成分観測を課せられた重要な機器であるが、センサーカバーをも透過して検出器に飛び込む超高エネルギー粒子を観測対象とするため機器較正への課題が多く、他の観測機器に比べて遅延している。XEP観測データに対して詳細な較正及び応答関数構築を行うことで「あらせ」観測データの最後のピースが揃い、「あらせ」による地球放射線帯の研究がさらに加速することが期待できる。較正したXEP観測データは評価のために他の観測機器による観測データとの比較も行う。高エネルギー粒子は他の観測機器に対してバックグラウンドとして影響を与えているため、他の観測機器に対しても較正に利用する参照データになりえる。

本研究で較正するXEPはこれまで日本で実績が少なかった観測機器である。高エネルギー粒子は人体に重要な影響を及ぼすため、XEPのような機器は宇宙の環境計測としても需要が高い。今後月や火星での人類の活動の計画が議論されているため、日本でも月着陸機や火星圏探査機 (MMX) でのXEP相当の観測器が搭載されている。本研究の成果は地球磁気圏の科学研究に留まらず、太陽系環境の科学への展開も既に始まりつつあり、将来の宇宙での活動における礎となる役割が期待されている。

【研究方法】

0.07-20MEV電子を観測対象とする「あらせ」搭載高エネルギー電子分析器(High-energy electron experiment: HEP)にてGEANT-4を用いた類似の較正が行われたため(Park et al., EPS, 2021)、その知見や経験を元に本研究の作業を進めている。XEPのPI (東尾氏: JAXA) 及びHEPのPI (三谷氏: JAXA/ISAS)、 「あらせ」観測データを管理する名古屋大サイエンスセンターと連携を取りながら実施した。

2020年度に作成したGEANT-4によるXEP数値モデルから得たXEP応答関数を利用し、観測データの一次処理及びその評価を実施した。その中で、Van Allen Probes観測にて報告された窪みのある珍しい形のエネルギースペクトル(Zhao et al., Nat. Phys., 2019, 論文でBump-on-tail (BOT) エネルギースペクトルと呼ばれる)に着目し、XEP観測データで得られたBOTスペクトル (図1) について評価を行った。

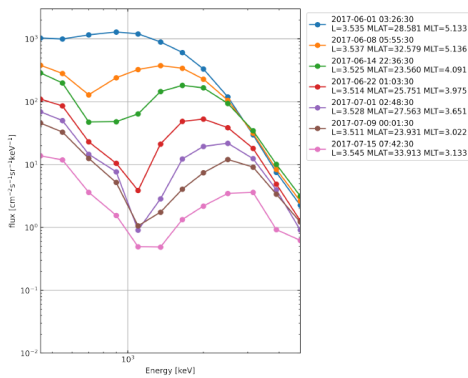


図2: 「あらせ」XEPにてL~3.5で観測されたBOTスペクトルの時間変動。

【研究結果】

2017年3月24日から2019年3月23日の期間のXEP観測データを利用し、L値2以上の観測地点においてエネルギースペクトルが右下がりではなく、図1のように極小値と極大値を持つことを条件とするBOTスペクトルを抽出し、その観測地点を調べた(図2)。観測のタイミングとしては磁気活動度が高くなるイベントと関連し、ほとんどにおいてプラズマポーズの内側で観測された。Zhao et al. (2019)で示されたように、多くの場合HISSの出現が同時に確認された。

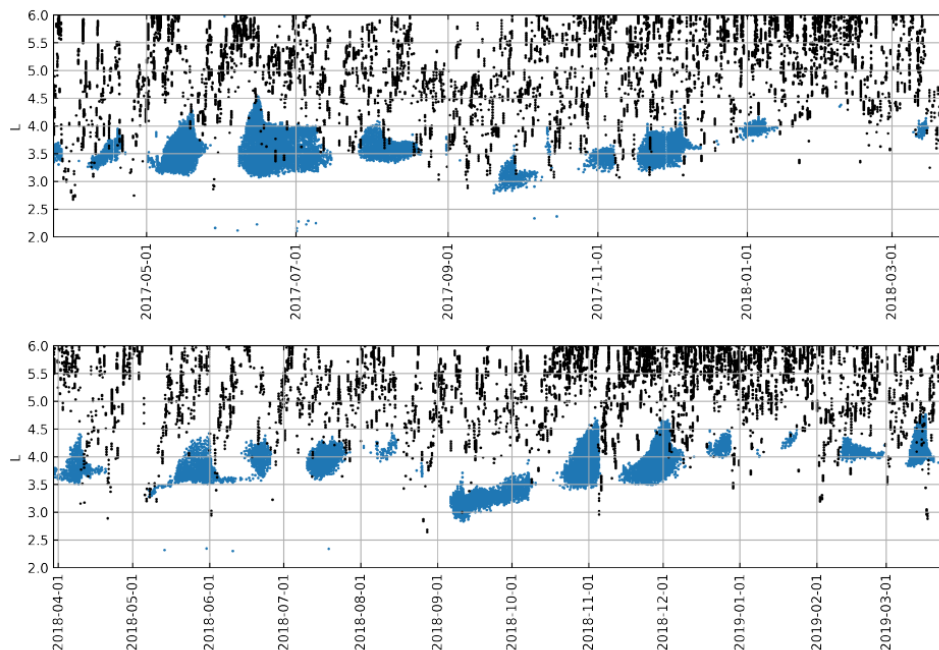


図2: BOTスペクトル(青点)のL値分布. 黒点はプラズマポーズのおよその位置を表す。

【まとめ】

本研究ではGeant4を用いた放射線数値モデルからあらせ衛星搭載XEPのエネルギー較正を行い、応答関数を作成した。エネルギー較正を行ったXEP観測データからL=3~4周辺で放射線帯外帯電子で観測されるBOTスペクトルに着目し、その分布を明らかにした。

(別紙様式 4-2)

流星によるVLF帯電波放射の観測的研究
Observation of Meteoric VLF Radio Emission

渡邊 堯、情報通信研究機構

流星及びその類似現象（宇宙機大気圏再突入など）に伴って発生するとされている、ELF/VLF帯電波放射の存在については、1981年8月のペルセウス流星群に属する非常に明るい流星（火球）の発生時における観測例があるが、通常の雷活動起源空電との区別に課題が遺されており、その後世界各地で行われた観測においても見解が分かれている。そこで本研究では顕著な流星群の発生時に、流星の高感度ビデオ観測と電波観測とを同時に実施し、流星発生時に観測されたELF/VLF電波の特性の解析によって流星発生と電波放射との因果関係を確立し、電波発生機構を解明することを目的とする。

2022年5月31日13:50~14:20 JSTには、73P/Schwassmann-Wachmann 3彗星を母天体とする、ヘルクレス座 τ 流星群の異常出現が予想されたため、5月30-31日にかけての予想出現時間帯に合わせて、豊川市と水戸市周辺においてVLF電波観測を行った。しかし出現流星数は少なく、火球クラスの流星の出現は無かったため、特筆すべき観測結果は得られなかった。しかしこの観測は、2地点における直交ループアンテナ観測による電波発生源の位置決定の試行も兼ねており、多くの空電を使ったテスト観測の機会として有効であった。2022年8月中旬に発生したペルセウス流星群については、全国的に天候不順であり、火球の観測数も例年より少なかったため、数例のみの解析に留まっている。また同年12月におけるふたご流星群での観測では、水築アンテナによる電場成分の観測も併用し、電波発生源の高度角の測定も試行した。これらの観測データは解析中である。以上のように、今年度の流星群については、電波放射に関する新しい観測結果は得られていないが、電波発生源の方向探知に対する観測装置の整備と観測データの解析ソフトの構築が進んだことにより、今後の観測の成果が期待される。

はやぶさ2サンプルリターンカプセルの再突入におけるVLF電波観測データの解析については、観測された電波の電界強度からカプセルの位置において発生すべき電流を推定した。これにはアンテナ長に相当する、電流の流れる長さを与えるが必要があるが、カプセルの後流はイオンと電子との拡散速度の相違と、カプセルが約10 km/secで移動していることから、数10mに亘る電流が鳴かれることが期待され、その場合の電流は数10アンペアとなることが推定された。この解析結果は2023年3月1日に開催されたSTE現象報告会で発表されており、現在論文を執筆中である。

(別紙様式04-2)

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・農食環境学群

(2行スペース)

【研究目的】

冬季の石狩平野においては季節風による筋状対流雲が流入しやすく、降雪がもたらされる。Shirooka and Uyeda(1990)では、同地域の地上観測などからスノーバーストに伴う数十分での急激な気温低下を報告しているが、気圧変化に関しては言及していない。馬場ら(2016他)は、気温低下に気圧上昇を伴い、一定周期のもと減衰することを示した。気圧の変化による内耳に影響については、Sato et al.(2019)などにより報告されているが、総観規模擾乱を想定した実験である。また、前述の佐藤氏によれば、降雪時に患者が多い傾向がある(口頭)ことを指摘している。そこで本研究では、共振共鳴が内耳に影響を調査する。

【研究方法】

過年度行われた共同研究と札幌市教育委員会の指示のもとに、2022年12月11日から2023年3月27日までの期間、石狩湾から札幌の領域にある小学校の百葉箱や敷地内の樹木に気象ロガーを設置し(図1)、5分ごとに気温、気圧、湿度(一部気温のみ)を観測した。これらのデータとレーダー画像を基にスノーバーストが生じている可能性の大きい場合を抽出する。その後、セル内の反射強度分布からスノーバーストが生じているか否かを確認する(例として図2)。また、地上での時系列から振動周期や強度について調査を行う。

一方、一部の協力頂いた養護教員には、子供の体調に関するアンケートを行った。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、鬱など内耳に影響される発症者の人数のみを記載する。これらの情報を基に前述の大気変動との関連を調べる。

Ishikari

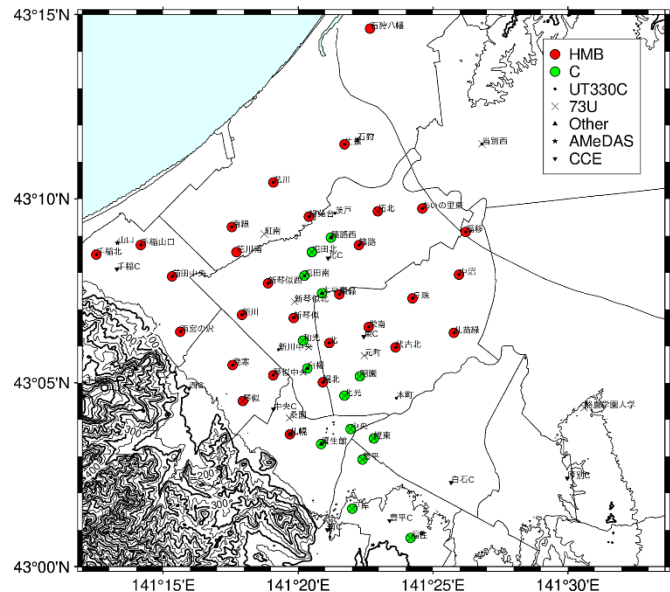


図1 2022-23年の観測網

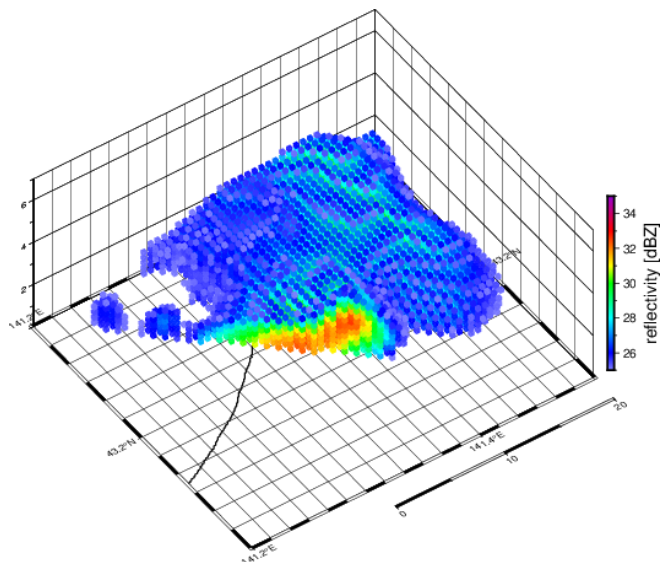


図2 レーダー断面図の例

【研究結果と考察】

本研究のテーマは冬季観測がメインであり、3月28日迄観測を行っていたため、現在はデータロガーの回収が終わったばかりである。よって、データ整理はこれからである。また、アンケート調査の書類もまだ数件しか届いておらず、主な整理や解析は4月以降になる。そのサンプルの少ない中におけるアンケート調査から、発症数の多い日（2023年1月23～25日、2月2～3日、7～9日、13～15日、21日）に西高東低による筋状の対流雲や石狩湾小低気圧の接近により対象小学校付近に入り込んでいることが認められた。

大気調査も進んでおらず、まだサンプルが少ないので、条件付きにはなるが、速報値として発症数の多い日にその小学校付近に対流雲が入り込んでいることから、何らかの可能性が考えられる。今後、アンケート結果を基に地図化し、気象観測データと比較しながら解析を進める予定である。

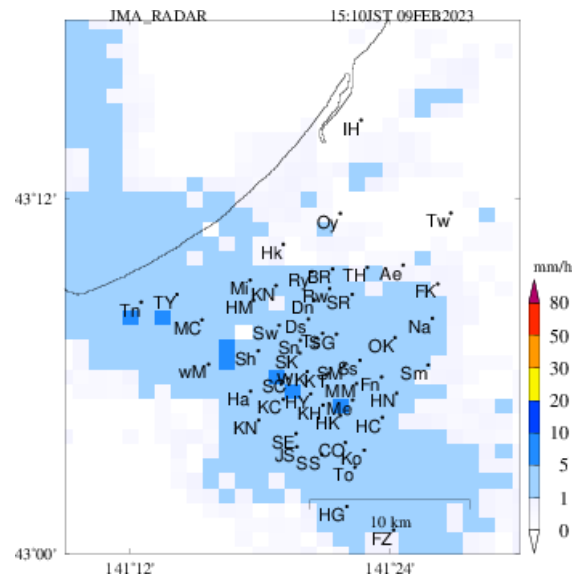


図 3 2023年2月9日のレーダー画像

【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.

【成果発表】

なし

(別紙様式 4-2)

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-PARCII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について、台風の中心まで飛行して、ドロップゾンデを中心から外側までの範囲で投下して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年計画の最初となる今年度は、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。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明らかになったため、高度のデータを補正する方法を検討する必要が生じた。このため、今年度は予定を修正し、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。その精度検証と、他の位置同定手法の検討を来年度に進める予定である。

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. Nagahama, 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 Co-Authors: The warm-core structure of typhoons as observed through the T-PARCII aircraft reconnaissance and upper-air soundings. 日本地球惑星科学連合大会, ハイブリッド開催（幕張メッセ, 千葉県千葉市）, 5月22-27日, オンライン口頭発表.
- 山田 広幸, 他16名, 2022: 航空機観測により捉えた台風Mindulle (2021)の暖気核構造. 日本気象学会春季大会, オンライン開催, 5月17-20日, オンライン口頭発表.

宇宙物体突入時の直接電波観測による太陽電波バーストの解明

Study of Solar Radio Bursts by Direct Radio Observation of Space Object Entry
野澤恵、茨城大学・理工学研究科理学野

大気に突入する宇宙物体がプラズマ化され電波放射が発生し、その検出により類似の物理過程である太陽電波バーストを解明することで本研究の目的である。過去には流星や火球からの直接的な電波放射は年に数回という低頻度のため観測が難しかったが 2010 年代から観測され始め Obenberger et al(2014) などの報告が続いている。ただし HF(短波、3-30MHz)の受信例が多く、大型干渉計の VHF(超短波、30-300MHz)の受信例はあまり多くない。その放射機構はプラズマ振動による電波放射の仮説が提唱されているが、プラズマ振動は電磁波ではないため、なんらかの変換機構が必要である。この放射機構は太陽電波バーストのメートル波放射の場合と似たものと考えられ、その解明はプラズマ物理の電磁放射の素過程の本質的な理解につながる。

流星と発光過程と同じであると考え、宇宙物体の突入時に大気抵抗により減速されるのは 100km 特に 70km 以下である。その過程でカプセルの外側が熱せられ、プラズマ化される。また、はやぶさ 2 のカプセルのような宇宙物体に関する情報(軌道、大きさ、光の明るさ等々)が十分あるので、電波強度の絶対値、時間変化を求め、また周波数スペクトルを決め、可能であれば直線偏波度の観測量を得ることができる。昨年論文では、2020 年 12 月にははやぶさ 2 の再突入するカプセルを観測したが、結果的に受信できなかったことを報告した。この経験を踏まえ、2023 年 9 月 24 日に OSIRIS-REx のカプセルが地球大気に再突入するとき、発する電波の高時間分解能の周波数と強度の直接観測を計画し、観測機器の改良や校正などの観測を計画し、火球での観測を試みた。

別な観点として、宇宙物体の大気抵抗による減速についての研究も行なっている。NORAD/NASA が提供する TLE を用いて、高度 1100km 以下の低軌道、及び真円に近い軌道の宇宙物体について注目した。過去 50 年周回している宇宙物体の軌道低下を解析した。その結果、太陽活動の指標となる相対黒点数と軌道低下には相関があり、極小となる前後三年間では 3m/day 以下の低下であったが、極大となる 5 年間では、その 10 倍となる 30m/day 程度の低下を示した。次に 1989 年 3 月に発生した太陽フレア及びそれに伴う地球磁気圏の磁気嵐の宇宙天気現象と TLE から求めた軌道低下を統計的に調べた。現象前後の軌道低下は大気密度に比例した低下率であるが、現象前に比べ現象後では低下率が大きく、特に高度 700 から 1100km ではばらつきが大きかった。また宇宙物体の高度低下の観点で地球低軌道 (LEO : Low Earth Orbit) における大気ドラッグの特徴の理解を深める為に 4 層構造に分類することを試みた。各層の大気ドラッグによる高度低下量を 2 つの衛星に注目して調べ、太陽活動周期と地磁気嵐のどちらに起因しているのかを論文として発表を行なった。

玉置晋、アルヴェリウス幸子、野澤恵、宇宙天気と地球低軌道の 4 層構造, 宇宙科学情報解析論文, 12, 51-61, 2023, <http://dx.doi.org/10.20637/00049171>

(別紙様式 4-2)

地上光学-磁気圏衛星の同時観測に基づく脈動オーロラの周期性および磁気圏
プラズマの輸送-消失過程

Investigation on periodicity of pulsating auroras associated with mag-
netospheric plasma transportation-loss processes based on ground-base
d optical observations and in-situ measurements of satellites in the
magnetosphere

西山尚典・国立極地研究所・研究教育系・助教

【研究目的】

Pulsating aurora (PsA) は、その発光が1-20秒の周期で方形波的に明滅するオーロラ現象で、電離圏でのサイズが10-200km程度のパッチ構造が代表的ではあるが様々な形態や運動も知られている[Røyrvik and Davis, 1977; Yamamoto, 1988]. この特徴的なPsAの明滅周期、いわゆるon-off周期については、磁場強度や電子密度などの周囲のプラズマ環境に依存するwhistler mode chorusの成長率によって決まる時間スケールであると、古くより理論的に提唱されているものの[e.g., Davidson, 1990], 観測に基づいて定量的にon-off周期の生成機構を説明した研究例は未だない. 近年では周期的な(2,3-20秒)電子密度や磁場の変動に伴って、whistler mode chorusやelectron cyclotron harmonics waveといった波動の励起が磁気圏衛星によって観測されており[Liang et al., 2010; Li et al., 2011], PsAのon-off周期との類似性が指摘されている.

そこで、本研究の目的はPsAを特徴づける明滅周期、そして明滅周期の継続時間に着目し、これらの磁気地方時の依存性について、地上光学観測データおよび磁気圏衛星データ(ERG, Van Allen Probesなど)に基づいて明らかにすることである. 加えて、磁気圏でのwhistler mode chorusの非線形成長との関連を調査し、波動粒子相互作用におけるスケール間結合についての描像を得る.

【研究方法】

2015年6月に発生し、主相ではDst指数が-200nTを下回った”Summer Solstice Storm”[e.g., Baker et al., 2016]の期間中の6月23日に、昭和基地では昼側から夕方側(MLT13-20)で脈動オーロラが観測されており、このイベントに注目して解析を進めた. 具体的には、

- 1) 昭和基地付近の磁力計とアイスランドの磁力計、合わせて5地点の磁場データの解析を進めた.
- 2) Summer Solstice Stormの再現を目的として、REPPU (REProduce Plasma Universe, Tanaka, 2015)コードによるグローバルMHDシミュレーションを実行し、磁気圏および地上磁場データの解析を進めた.

【研究結果・考察・今後の方針】

前年度までの解析で、昭和基地で観測されたオーロラ発光と磁場変動H成分が8分前後の周期でよく対応しており、昭和基地の地磁気共役点であるアイスランドのTjörnesやHusafellの地上磁場変動は、昭和基地と同周期の変動が卓越しているものの、その位相が180度ずれていることが明らかになった. これに加え、昭和基地周辺の2地点(H68, Amundsen Bay)の無人磁力計データの解析も行い、この結果、昭和基地周辺のH68およびAmundsen BayでもPc5帯の地磁気脈動が観測されていたことが明らかになった. また、統計数理研究所の藤田特任教授にSummer Solstice Stormの再現実験としてグローバルMHDシミュレーションの結果から、MLT昼過ぎから夕方にかけての磁気圏界面付近で、K-H不安定によるものと思われる磁場圧の波状構造が確認された. この不安定がソースとなり、地上磁場で観測された昼側から夕方側にかけて磁力線共鳴が発達していたことが予想される.

今年度は5カ所の地上磁場データに対して、独立成分分析による解析を行い、磁力線共鳴成分とそれ

と異なるスケールの磁場変動成分の分離を試みた，図1に結果を示す．図1(上)は5地点の地上磁場H成分の日変化であり，南北共役点でほぼ同様な変化が見られている．UT03-06にかけて，H成分の急峻な減少が数回観測され，UT12以降からUT21までPc5帯域の磁場変動が顕著に見える．これらの磁場データに対して独立成分分析を行った結果が図1(下)となる．H成分の急峻な減少が見えた時間帯は，振幅の大きな変動が卓越しており，様々な波の重ね合わせに分解された一方で，Pc5帯の変動が卓越していた時間帯は概ね，生データと同様な様相を示しており，より単純で単一的な波で構成されていることが示唆される．特に前半においては，地球固有磁場の変動だけではなく，外来的な擾乱による変動も重畳されていると考えられ，衛星やシミュレーションによる異なる位置での磁場データとの比較や検証が必要である．

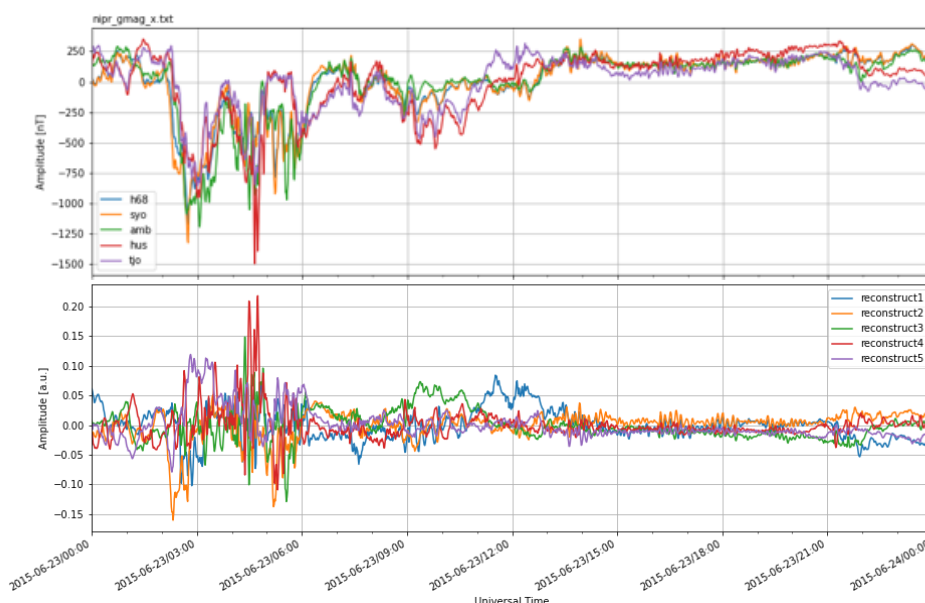


図 1(上): 5 地点 (南半球 : 昭和基地・H68・Amundsen Bay, 北半球 : Tjörnes・Husafell) における地上磁場 H 成分の 2015 年 6 月 23 日の日変化。(下): 独立成分分析によって抽出した独立な 5 つの時間変動成分の時系列変化。

また，グローバルMHDシミュレーションのアウトプットはnetCDF形式での整備が進められており，今後は地上磁場やオーロラ画像データに対する時系列解析・多変数解析に加えて，シミュレーションデータにも同様な解析を進めていく方針である．

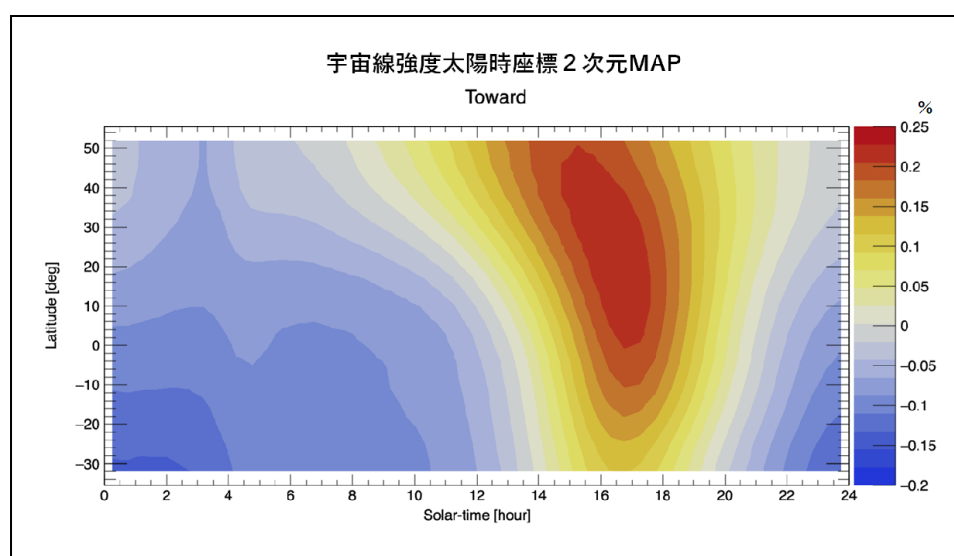
(別紙様式 4 - 2)

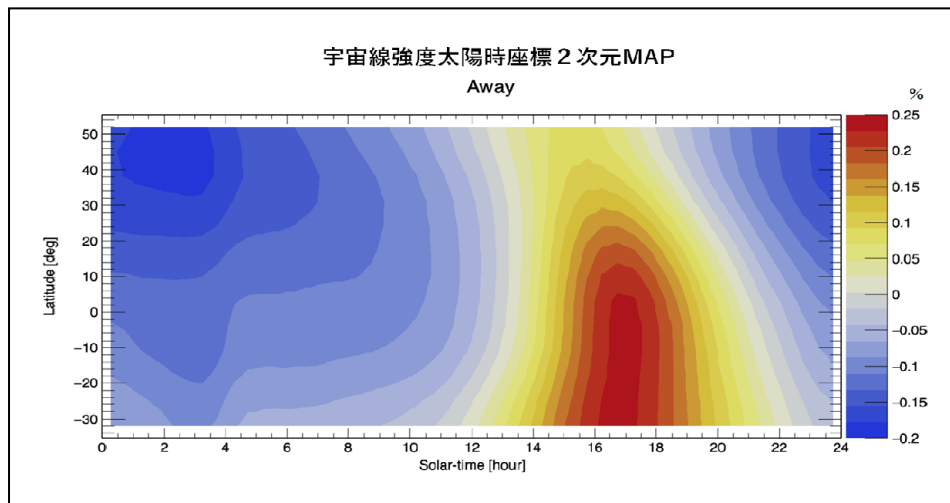
GSE座標系における宇宙線強度分布解析によるIMF磁気中性面の
トランジェントな構造変動の推定
Estimating transient structural fluctuations of the IMF magnetic Neutral Sheet by cosmic ray intensity distribution analysis in the GSE coordinate system

小島 浩司、中部大学・天文台

本研究の目的はGRAPES-3大型宇宙線望遠鏡を用いて、天空面全体の宇宙線強度分布をGSE座標系の2次元画像として可視化して、惑星間空間におけるIMFの極性 (Toward, Away) の境界面を形成する磁気中性面 (ニュートラルシート) のトランジェントな波状構造の解明を目指す事である。

IMF磁気極性(Toward: Away)転換に伴う宇宙線の変動現象としては「スインソンプロー」と呼ばれる宇宙線の恒星時異方性と長島らが示した名古屋のミュオン望遠鏡による「GGインデックス」と称した宇宙線の南北異方性がよく知られている。この変動はいずれも黄道面に垂直方向の宇宙線の流れに注目した解析から求められたものである。そこで今回は黄道面にそった方向の宇宙線の流れを表す太陽時異方性に着目し、TowardとAwayの両極性の傾向の違いについて解析を行った。この解析も長期間の集計による解析結果であり、IMF極性境界面を形成するトランジェントな波状構造と直接関連付ける宇宙線強度変動や異方性の解析とはなっていない。前年度に報告した「スインソンプロー」を表す「(Toward-Away)/2」2次元マップと比較と今後計画しているセクター境界(Boundary)領域における異方性解析等により、トランジェントな変化の抽出を試みるつもりである。本年度(2022年度)はToward領域とAway領域における太陽時異方性の2次元マップ化を行ったのでその結果を次の図に示す。





宇宙線強度太陽時座標 2次元 MAP:地磁気偏向補正無

2004年～2017年平均

【成果発表】

口頭発表

1. 小島浩司, 宇宙線強度変動とIMF極性(Toward or Away), 2022年度ISEE研究集会「太陽地球環境と宇宙線モジュレーション」および「太陽圏・宇宙線関連の共同研究成果報告会」, 2023年2月28日～3月1日 On line
2. 小島浩司他, 大面積高精度muon望遠鏡による宇宙線強度変動の研究(29), 日本物理学会2022年秋季大会, 2022年9月6日～8日, 岡山理科大学
3. 小島浩司他, 大面積高精度muon望遠鏡による宇宙線強度変動の研究(30), 日本物理学会2023年春季大会, 2023年3月22日～25日, On line

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

本課題では、名古屋大学宇宙地球環境研究所の母子里および鹿児島観測所で観測された雷放電から発生するVLF/ELF帯空電(tweek)、および陸別および鹿児島観測所で受信されたVLF/LF帯標準電波を解析することにより、太陽フレアによる下部電離圏変動を定量的に明らかにすることを目的とする。VLF/ELF帯空電の発生率および反射高度を推定し、VLF/LF帯標準電波からは反射高度変動が推定でき、複数の伝搬パスを使用することにより太陽フレアによる下部電離圏変動の水平分布を捉えることができる。本課題では、ISEEのVLF/LFデータを使用することにより、太陽フレアの下部電離圏への影響を定量的に明らかにする。

2. 研究方法

本課題では、VLF帯空電から太陽フレア前後の発生率および反射高度を推定し、VLF/LF帯標準電波から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。2022年度は太陽フレア時の標準電波の振幅および位相データと、ウェーブホップ法による理論計算結果を比較することにより、伝搬パスごとに反射高度変動を推定する。太陽フレア時の下部電離圏変動（水平分布）を求めた。

3. 研究結果および考察

2017年9月6日 08:57 UT に発生したX2.2クラスの太陽フレア時の、受信局KAGにおけるVLF/LF帯標準電波の振幅および位相の時間変化の結果を図1に示す。同様に、受信局ポーカークラットおよび陸別に関しても解析

したところ、振幅に関しては8つのパスで、その変動量が 2.65-14.73 dB、位相に関しては6つのパスで、31.0°~150.25° の変動量が観測された。特定のパスでのみ観測できたのは、対象としている太陽フレアが日本時間で日の入り付近に発生したため、D領域電離圏電子密度の減少の影響が考えられる。

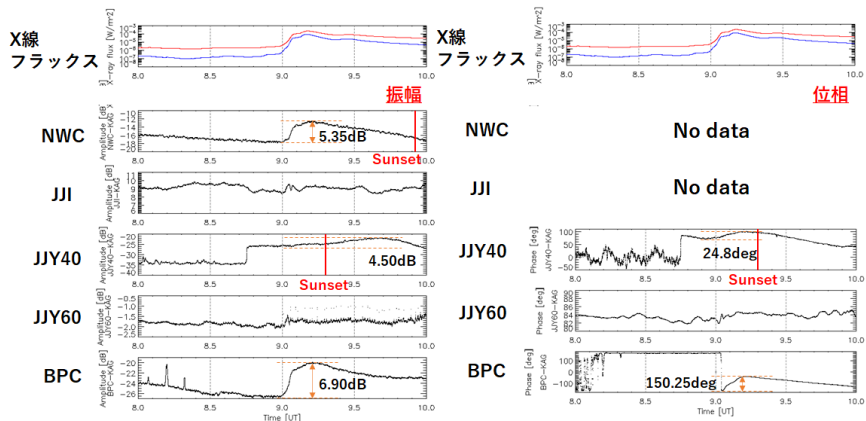


図1 2017年9月6日のX2.2クラスの太陽フレア時のVLF/LF帯標準電波の(左)振幅および(右)位相。

ウェーブホップ法により、観測された標準電波の位相変動から電離圏での反射高度変動 Δh を推定した。各パスにおける Δh を図2に示す。BPC-RKBパス、JJY60-RKBパスを加えた計3つの伝搬パ

スに関して、 ΔA 、 ΔP から推定した Δh はそれぞれパスの midpoint における太陽天頂角と相関があり、太陽に近いパスのほうが Δh が大きくなる傾向が見られた。また、IRI-2016 モデルを使用し、 ΔP から推定した Δh から太陽フレアの発生前後の電離圏の電子密度増加率 ΔN を計算したところ、高度 85 km では、BPC-KAGで最大、JJY60-RKBで最小となり、それぞれ980 %、6 %であった。これは大規模太陽フレア時に、太陽直下点に近い伝搬パスほど電離が強かったことを示している。

4. まとめ

本研究では、VLF/LF 帯標準電波の振幅・位相変動を解析することで、2017年9月6日 08:57 UT に発生したX2.2クラスの太陽フレア発生時の下部電離圏変動および反射高度の水平分布を明らかにした。VLF/LF 帯標準電波の解析を行ったところ、振幅変動量が 2.65-14.73 dB、位相変動量が 31.0°-150.25°であった。また、ウェーブホップ法により、標準電波の振幅・位相変動から電離圏反射高度変動 Δh を推定したところ、パスの midpoint における太陽天頂角と相関があるという結果が得られ、反射高度の変化には経度の差があったことを示した。最後に、IRI-2016 モデルを使用し、電離圏の電子密度増加率 ΔN は、高度 85 km では、最大で 980 %、最小で 6 %であり、太陽フレア由来の下部電離圏の電子密度増加には空間的不均一性があることが考えられる。

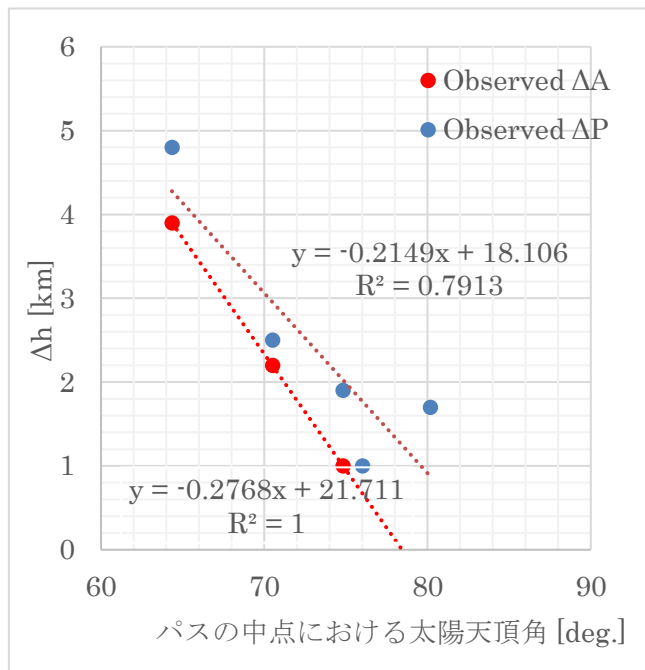


図 2 推定した電離圏反射高度変動分 Δh vs パスの midpoint における太陽天頂角。

成果発表

- [1] Nakayama, M., H. Ohya, F. Tsuchiya, K. Nozaki, K. Shiokawa, and H. Nakata, Horizontal Inhomogeneity of the D-region Ionosphere During a X-class Solar Flare by OCTAVE VLF Observations, *URSI Radio Science Letters*, 4, 2022 (accepted).
- [2] Nakayama, M., H. Ohya, F. Tsuchiya, K. Shiokawa, Large solar flare effects on the D-region ionosphere using VLF/LF transmitter signals, *JpGU2022*, Chiba, Japan, 1 June, 2022.
- [3] Nakayama, M., H. Ohya, F. Tsuchiya, K. Shiokawa, K. Nozaki, and H. Nakata, Horizontal Inhomogeneity in the D-region Ionosphere During a X-class Solar Flare Using VLF/LF Transmitter Signals, *AOGS2022*, Online, 1-5 August, 2022.
- [4] Nakayama, M., H. Ohya, F. Tsuchiya, K. Shiokawa, K. Nozaki, H. Nakata, Horizontal Inhomogeneity of Electron Density in the D-region Ionosphere During a X-class Solar Flare Using OCTAVE VLF/LF Observations, *URSI-JRSM2022*, Chuo University, Tokyo, Japan, 1 September, 2022.
- [5] Nakayama, M., H. Ohya, F. Tsuchiya, K. Shiokawa, K. Nozaki, H. Nakata, Horizontal inhomogeneity detected by OCTAVE VLF/LF observations during a X-class solar flare, 第152回SGEPSS講演会、神奈川県相模原市、2022年11月5日。
- [6] Nakayama, M., H. Ohya, F. Tsuchiya, K. Shiokawa, K. Nozaki, H. Nakata, Response of the D-region ionosphere to a X-class solar flare by OCTAVE VLF observations, *VERSIM2022*, Online, 8 November, 2022.
- [7] 中山雅晴、大矢浩代、土屋史紀、塩川和夫、野崎憲朗、中田裕之、VLF/LF帯標準電波を用いた太陽フレア時の下部電離圏電子密度の不均一性に関する研究、陸別・母子里ユースミーティング2023、ハイブリッド（現地：北海道陸別町）、2023年2月17日。

UAV を利用した上空でのバイオエアロゾルサンプリングと
雲形成過程研究への応用
Sampling of bioaerosols aboard an UAV above a forest for
investigation of the ice cloud formation processes

北 和之、南尾健太 茨城大学 理工学研究科
牧 輝弥、近畿大学 理工学部
坪木和久、大畑 祥、名古屋大学 宇宙地球環境研究所

研究目的：

細菌・胞子・花粉などの生物由来の1次有機エアロゾル粒子はバイオエアロゾルとよばれ、植物の分布拡大だけでなく、病原体やアレルゲンとなるものを含むためヒトや植物の健康影響の観点で重要である。地球環境科学においても最近重要性が認められている。バイオエアロゾルには比較的高温で氷晶核として働くものがあり (e.g. Hoose and Möhler, 2012)、氷晶雲形成を通じ気象・気候に影響すると考えられており、また福島第一原子力発電所事故時に汚染を受けた森林からの放射性セシウムの大気への放出(再飛散)においても、バイオエアロゾルが放射性セシウムの担体として重要な役割を果たしていることが明らかになった(Igarashi et al., 2019)。

バイオエアロゾルの大気中の濃度や各種放出源からの放出量は、まだ理解が不十分である。重要な放出源の一つである森林からバイオエアロゾルの大気への放出過程と放出フラックスを明らかにする目的で、森林内から上空にかけての高度分布の観測を行うため、森林直上でバイオエアロゾルの高度分布を測定するUAV(ドローン)搭載型のバイオエアロゾルサンプラを開発しているのを報告する。

UAV搭載型バイオエアロゾルサンプラの概要：

UAV搭載型バイオエアロゾルサンプラとしては、以下のような条件を満たすことが必要になると考えた。

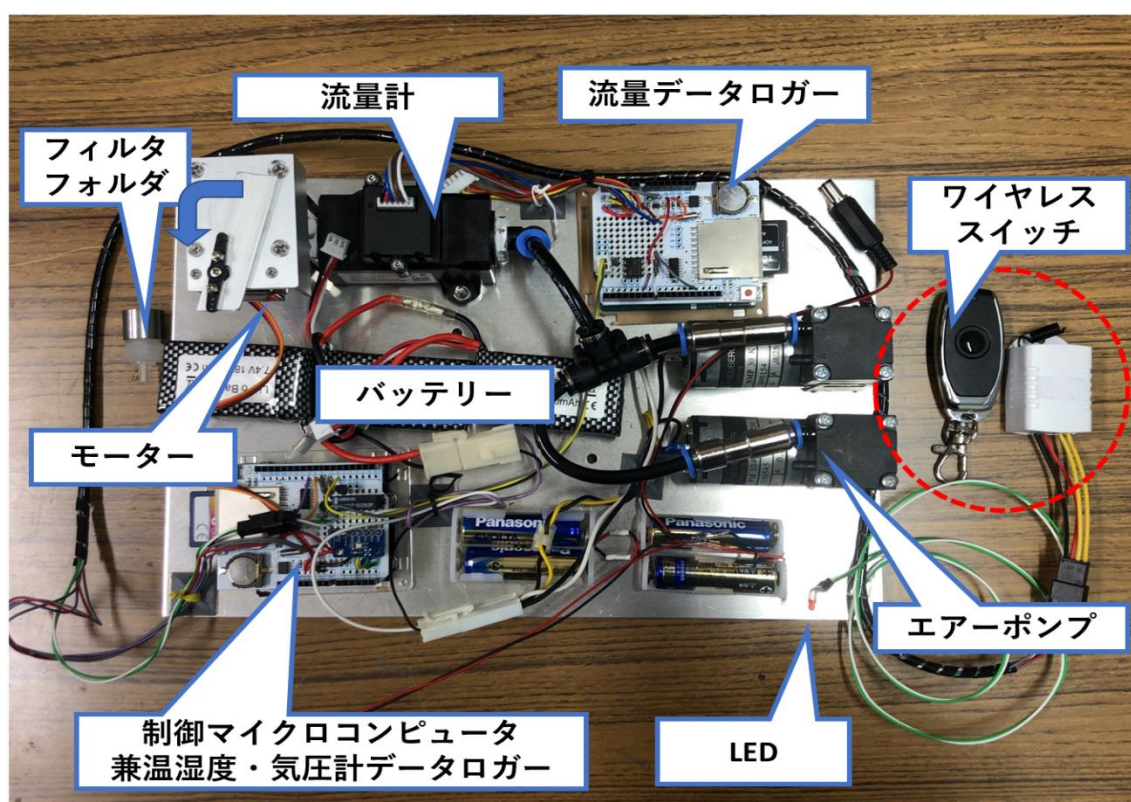
1. バイオエアロゾルを他の粒子と選別して濃度を測定することおよびメタゲノム解析などによる種類別の存在割合を推定することを可能とするため、フィルター上に捕集する。
2. ウィルスを除き、多くのバイオエアロゾルは粒径 $1\mu\text{m}$ 以上と考えられ、それ以上の粒径のエアロゾルを捕集する。
3. サンプリング装置は搭載重量制限に収めること。特に、ポンプやバッテリーの重量に注意する必要がある。
4. 高度範囲は地表 $\sim 150\text{m}$ とする。
5. 10分程度のサンプリング時間で十分な量のサンプルが確保できる。

バイオエアロゾルの典型的な数密度範囲は $10^3\sim 10^5$ 個 m^{-3} と考えられ、10分程度のサンプリング時間で採取したサンプルの顕微鏡観察により定量化できる十分な個数のバイオエアロゾルを捕集するためには、 $100\text{L}/\text{m}$ 程度の流量が必要になる。このような流量での吸引が可能なポンプは重量が大きくなり、UAV搭載用としては実用的ではない。そこで、まず漏斗状のインレットを用い、UAV自体の移動により空気を導入することを考えた。様々な形状のインレットに差圧センサーを取付け、自動車を用いUAV速度での流量を測定する実験を行った。結果、インレット形状を工夫しても十分な流量を確保することは難しいことが分かった。

そこで、小型のエアポンプ (KNF NMP830) 2台を並列にして、省電力

で流量を増やすとともに、エアロゾルを捕集するフィルタ(ポアサイズ $0.45\mu\text{m}$)上の径 $\Phi 3$ の円形領域に入気を収束させ、捕集することで、捕集されるエアロゾルのフィルタ上の密度を増すことで、短期間、小流量でも測定精度を確保することにした。

下図に、作成したバイオエアロゾルサンプラーを示す。対象の高度のみでサンプリングを行うよう、サーボモーターで操作するシャッター機構を設け、設定した高度範囲でのみサンプリングを実施できるようにした。高度は気圧、気温センサーを搭載することで推定できるが、UAV搭載のGPSからの情報が得られる。流量は、軽量なマスフローメーター(Honeywell製)を使用し測定する。各センサーの出力の記録及びシャッターやポンプの操作は、マイコンArduino unoで行うこととした。ポンプは充電式のリチウム電池で動作させる。



試運転と今後の課題：

上記のサンプラーを試作し、11月6日に福島県のUAV運航会社の敷地にてテストフライトを実施した。動作は正常で、フィルタ上にバイオエアロゾルを捕集することに成功した。

現時点で最も大きな課題は、流量センサー出力がポンプ脈動で変動すること、正確に流量を測定できるよう、バッファータンクを設けるなどの対策を行うことと、飛行中に安定にリモートコントロールが可能な、ワイヤレススイッチの実装である(図1赤枠のスイッチは高度を上げると動作不安定となった)。

今後、これら課題を解決するとともに、森林上空へのバイオエアロゾル輸送量および、捕集したバイオエアロゾルの氷晶核活性の測定を行いたい。

参考文献：

Hoose and Möhler (2012) Atmos. Chem. Phys., 12, pp. 9817-9854.

Igarashi, Kita et al. (2019) *Scientific Reports*, 9(1)/ 1954

(別紙様式 4-2)

高校生と行うビッグデータ分析による温室効果ガス排出源の探索方法の開発

Development of a Method for High School Students to Search for Sources of Greenhouse Gas Emissions through Big Data Analysis

河野光彦、関西学院千里国際キャンパス

【はじめに】

地球大気に含まれる温室効果ガスの濃度上昇によって引き起こされる気候変動問題を解決するためには、温室効果ガスの排出量を正確に評価・管理することが不可欠である。とくに大規模な排出実態が予想される都市部では、温室効果ガスの排出源や排出量を継続的にモニタリングすることが重要である。本研究の目的は、衛星観測データによる CO₂ 排出量の 2 次元分布を継続してモニタリングする手法を開発することにより、都市域での CO₂ 排出量を詳細に把握し時間変動の特徴を説明できるようにするものである。

【研究方法】

NASA の温室効果ガス観測衛星 Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2)などの公開データ解析によって、温室効果ガス発生源を特定することを試みた。さらに、可搬型小型 CO₂ センサーを開発し、将来これを用いた実測による CO₂ 排出量の 2 次元分布を観測する手法と組み合わせる計画を考えている。

【結果と考察】

申請者の勤務する学校の高校生を参加協力させ、その寄与によって効率よく研究を進めていくことができた。具体的には、生徒たちの主体的な活動によって、NASAにある大量のデータを自動的にダウンロードすることができる Python プログラムを作成に成功した。さらに、それらのデータから CO₂ 濃度とその緯度経度情報を抜き出して地図上にプロットするための Python プログラムを作成した。その結果、CO₂ 発生源の特定につながる特徴的な CO₂ 濃度分布を検知できるようになった。その典型的

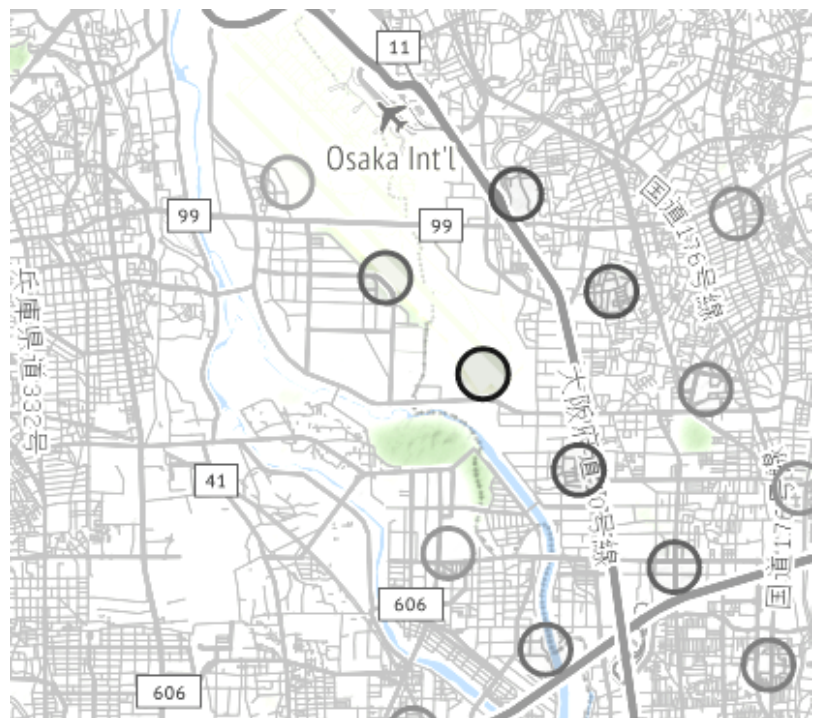


図1. OCO-2によるCO₂カラム濃度分布観測
(大阪国際空港付近2021年2月16日)

な例として大阪国際空港付近の CO₂ カラム平均濃度分布をを図 1 に示す。灰色の丸が低濃度で黒色にかけて高濃度となる。滑走路の北西の濃度が低い (411.71 ppm) のに対し南東では高く (420.32 ppm) になっているのがわかる。大阪国際空港では通常、旅客機は滑走路の南東から北西に向かって飛び立つ。離陸する旅客機はその後方に向けて CO₂ を排出する。この滑走路から離陸が繰り返されることから、上記のような特徴的な濃度分布が観測されてのではないかと考えられる。

しかし、この結果では空間分解能が 1 km 程度のしかなく時間変化が不明であるために、CO₂ 排出源を捉えきれてない。観測点の間を埋める精度の良い観測によって排出量評価の精緻化をする必要がある。そのため小型可搬式観測装置を開発し、それらを多数用いて、平面内をくまなく昼夜継続して観測することを計画している。

すでにこの小型可搬式装置の試作には成功し、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。その典型的スペクトルデータを図 2 に示す。この装置は小型エタロン分光器を用い、1350-1650 nm における太陽光源を用いた赤外スペクトルが観測できる。このうち、1600 nm 付近の CO₂ の赤外吸収によって、CO₂ カラム濃度を 1 秒ごとに決定することができる。図 2 のデータでは 4 分間程度のデータしか示していないが、今後はこれを継続して長時間観測し、信頼できる観測装置の開発を目指す予定である。

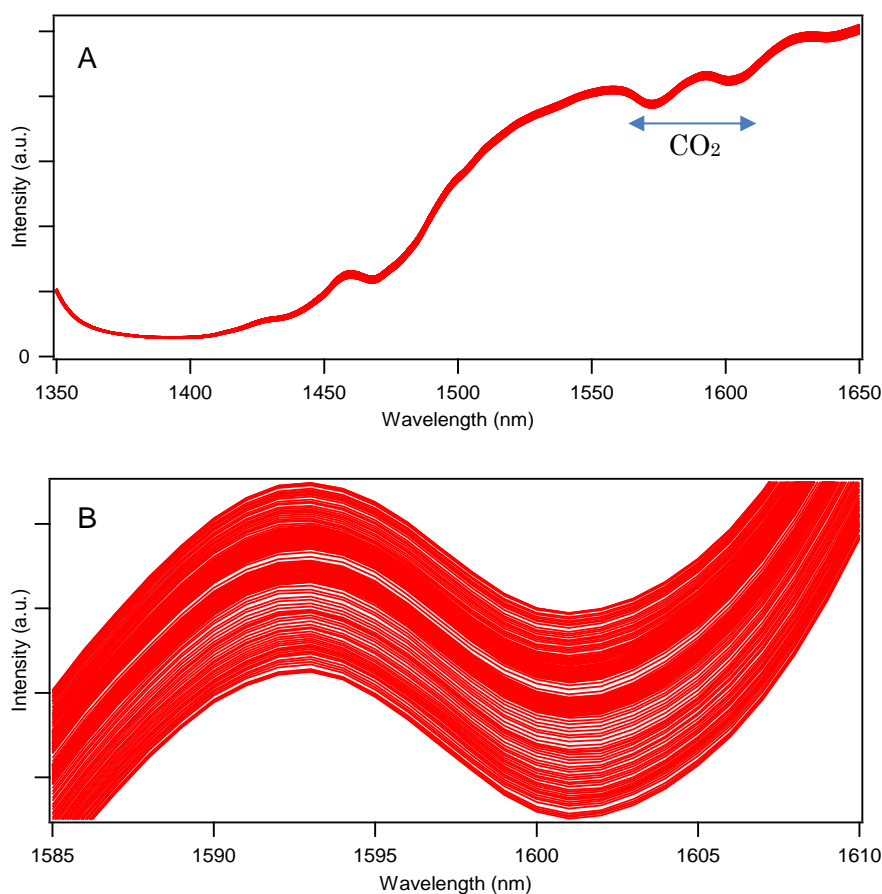


図 2. 開発中の CO₂ カラム計測器によって 1 秒毎に観測された太陽光源を用いた赤外スペクトル (A) とそれを 1585~1610 nm 領域を拡大したもの (B)

(別紙様式 4-2)

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

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、2022年度は定量的な目標値を設定せずに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。このような取り組みはこれまでなかったため、2022年度は定量的な目標値を設定せずに本手法の有効性の検証を行った。具体的には、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（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した。

3. 研究結果

図2は今年度から来年度にかけて作成中の映像IoT桜島モニタリングシステムである。現在、帯域節約のために映像を限定的（たとえば10秒映像を1分毎に送信しているが、これでは肝心な噴火を見逃すことがある（実際に、そういう事例が多くあった）。図2の仕組みにより、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に着手した。図3はインフラサウンドセンサーによる噴火期限の音波測定例（2022年7月24日）である。桜島周辺の各署の音波データをもとに波源を特定した結果、正しい位置を示していることが分かる。

4. 考察とまとめ

2022年度の成果をもとに、2023年度以降の計画は以下のとおりである。インフラサウンドデータ解析としては、6箇所目のセンサー設置（始良市を想定）による高度な音波源推定およびFDTD法

リアルタイム気象データによる電波伝搬シミュレーションとの比較を進める。映像IoTとしては、始良市にカメラを設置することで、風向きに依らない画像取得を実施する。

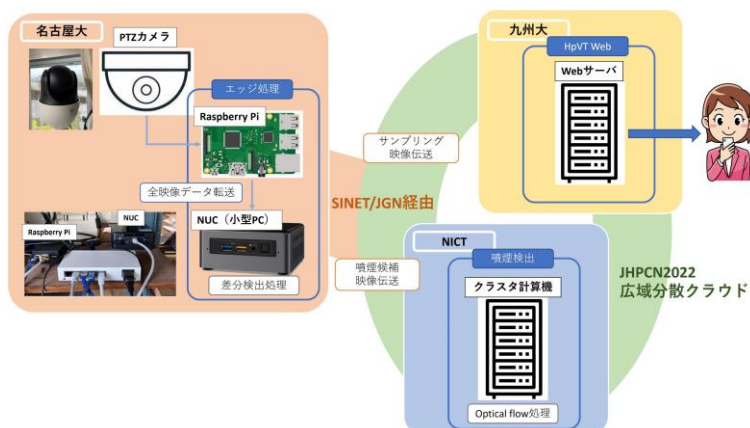


図2 桜島モニタリングシステム (映像IoT)

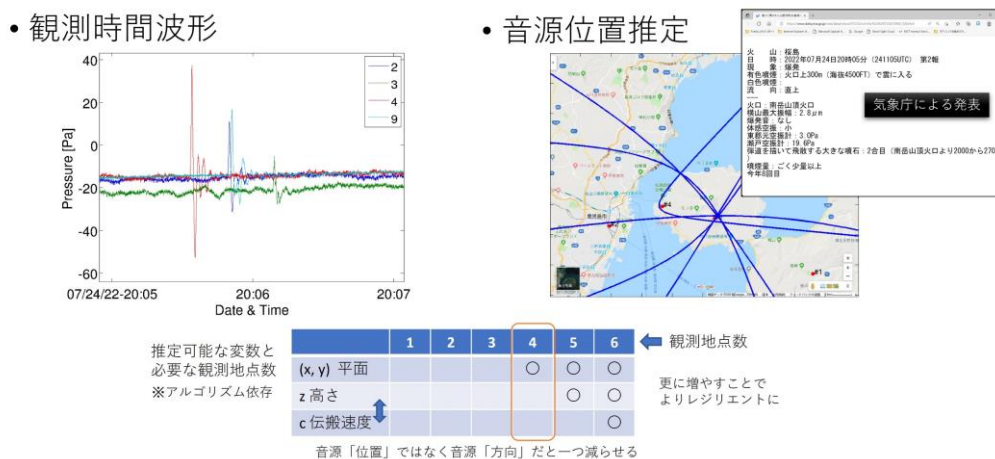


図3 桜島インフラサウンドモニタリング事例 (桜島火山噴火 (2022年7月24日20時頃))

5. 引用文献

[1] 村田健史, "レジリエント自然環境計測技術～目と耳と手で見える・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] 西村竜一, 菊田和孝, 村田健史, 滝沢賢一, 鈴木陽一, "インフラサウンドの複数地域でのアレイ観測に基づく音波推定," Japan Geoscience Union (JpGU) Meeting, MTT45-04, May 2022.

[2] 村田健史, "レジリエント自然環境計測技術～目と耳と手で見える・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.

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

太陽活動度(黒点の数)はそれぞれの周期(サイクル)で異なる事が知られており、非常に多くの黒点が出現したサイクルもあれば、マウンダー極小期のようにほとんど黒点が現れなかったサイクルもある。実際、現在の第24太陽周期は、過去100年間で最も黒点数が少ない特異な周期であった。しかし、その原因は現在もよくわかっておらず、次の第25太陽周期がマウンダー極小期のような活動が非常に弱いものになるのか、それとも第23太陽周期以前のような比較的活動が高いものになるのか注目が集まっている。本研究では、現在のサイクル25、もしくは次のサイクル26がマウンダー極小期またはダルトン極小期のような、黒点が非常に少ないサイクルになるかどうか検討する。この検討がうまくいけば、どのくらいの確率で今後の太陽地球環境がこれまでにないような極端な状況落ち込むかを予測する事ができるようになると考えている。

これまで、世界的に様々な研究者が様々な手法を用いて太陽周期予測研究に挑んできたが、その予測結果は依然混沌とした状況である。近年、次のサイクル活動を予測する方法として、次の太陽サイクルの種になると考えられている極域の磁場の強さを見積もる事で予測するという方法が注目されている。実際、太陽極小期における極域の磁場の強さと次の太陽サイクルにおける活動度との相関は、少なくとも近年のサイクルでは観測的に検証されている。本研究では近年注目されている太陽極小期の極域磁場を数値計算によって予測することで、次の太陽サイクル活動を予測する。また機械学習などの手法を用いて黒点の出現を予測し、そのインプットをもとに次のサイクルがどの程度の確率でどのくらいの活動度になるか、確率論的に予測を行い、マウンダー極小期のようなサイクルになるか議論する。この研究を行うにあたり太陽極小期の極域磁場を数値計算によって予測する必要があり、その数値モデルはすでに開発済みであるが、実装するにあたり詳細の検討が必要である。本研究はもともと科研費新学術領域(PSTEP)で行っていた、太陽周期活動予測研究を発展させたものである。またインプットする黒点パラメータを機械学習を用いて求める手法や、過去の特異なサイクル(ダルトン極小期)の黒点を再現する手法なども行っており、本年度、Shoma Uneme, Shinsuke Imada, Harim Lee, Eunsu Park, Hisashi Hayakawa, Tomoya Iju, Yong-Jae Moon, "Inference of magnetic field during the Dalton minimum: Case study with recorded sunspot areas", Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 74, Issue 4, August 2022, Pages 767-776, <https://doi.org/10.1093/pasj/psac032> にて出版した。

現在最も力を入れて行っている研究は、太陽の活動がグランドミニマムのような極端な状況にどのくらいの確率でなるかを評価することである。これまでの観測からおよそ200年に一度の確率でグランドミニマムのような特異な太陽活動状況になると考えられているが、我々の予測モデルでも同じような確率でグランドミニマムに入りうるかを検討している。これまでの計算結果から、200年に一度の割合でダルトン極小期レベルの特異な太陽活動にはなりうる事がわかった。一方で、マウンダー極小期レベルの特異な太陽活動には200年に一度の割合ではなり得ないことがわかった。今後、磁場の流れ場への影響などを取り入れ、どうしたらマウンダー極小期レベルの特異な太陽活動を再現できるか検討する。

(別紙様式 4-2)

地上-あらせ衛星共同観測を軸とした脈動オーロラステレオ観測に
よる降下電子エネルギーの時空間発展の推定

Evaluation of spatio-temporal variations in precipitating electron energy of pulsating auroras using stereoscopic imaging in conjunction with Arase observations

栗田 怜、京都大学・生存圏研究所

【研究目的】

脈動オーロラは地磁気擾乱時に一般的に現れるオーロラの形態の一つであり、数秒から数十秒の周期で明滅を繰り返すオーロラである。脈動オーロラの発生要因として、磁気圏内で自発的に励起される電磁波であるコーラス波動が、磁気圏に捕捉された電子の軌道を歪め大気に降下させる、ピッチ角散乱という過程が主要であると考えられている。脈動オーロラの発光を担う電子のエネルギーは、ディスクリートオーロラに比べ高いことが低高度衛星やロケット実験など、飛翔体の降下電子観測から示唆されている。近年の研究により、脈動オーロラに伴って、オーロラの発光を担う数keVから数十keVの電子に加え、数百keVのエネルギーを持つ電子が付随して降下していることが明らかとなってきている。これらの高エネルギー電子は、電離圏下部・中間圏高度の中性大気にまで到達し、異常電離・温度変化を引き起こすことにより、大気組成を変化させる可能性を持っており、磁気圏内で発生した電磁波が、ピッチ角散乱による電子降下を介して、地球中層大気にまで影響を及ぼす磁気圏-中層大気結合系の存在を示唆している。脈動オーロラは地磁気擾乱時に現れる一般的なオーロラであることから、磁気圏-中層大気結合系のシステムが普遍的であることが推測され、脈動オーロラに伴う高エネルギー電子の降り込みの有無を理解することは重要である。これまでの降下電子エネルギーに関する情報は、飛翔体による直接観測やレーダー施設直上の一点観測でのみ得られており、空間分布を取得することは困難であった。本研究では、北欧地域に展開された全天カメラ網によるステレオ観測を駆使して、脈動オーロラの発光高度の空間分布を推定することにより、降下電子エネルギーの非一様性を導出する。あらせ衛星と全天カメラ網の共同観測により手法の妥当性・限界を把握したのちに、全天カメラ網のデータを統計的に解析し、地磁気擾乱時における脈動オーロラに伴った降下電子エネルギーの時空間発展を明らかにする。

【研究方法】

本研究では、ERGサイエンスセンターにアーカイブされている、北欧地域に展開された全天カメラ観測網のデータと、あらせ衛星で取得された電子・プラズマ波動データを用いてデータ解析をすすめる。北欧地域に展開されたカメラの視野は互いに重なり合う部分があり、あらせ衛星がカメラの視野に対応する磁気圏領域を頻繁に観測している。あらせ衛星打ち上げ以降、北欧地域のオーロラ-あらせ衛星の共同観測が成立している事例が多く存在している。脈動オーロラのステレオ観測により、オーロラの発光高度が推定されるが、その高度がコーラス波動のピッチ角散乱によって降り込む電子のエネルギーと整合するかは、これまでの先行研究では明らかではなかった。本研究では、ステレオ観測によって得られる高度の情報が降下電子エネルギーを適切に反映しているかを検証するために、あらせ衛星が脈動オーロラの原因となるコーラス波動を観測している際のステレオ観測データを用いて、ステレオ観測による降下電子エネルギー推定手法の妥当性検証を行う。あらせ衛星のその場観測により、コーラス波動がピッチ角散乱を引き起こす電子のエネルギーを理論的に推定が可能であり、ステレオ観測によるエネルギー推定結果と理論値を比較し、ステレオ観測の妥当性と限界を検討する。

【研究結果と今後の方針】

あらせ衛星が観測する磁力線のフットプリントが、フィンランド・ソダンキラとスウェーデン・チャウジャスに設置された全天カメラの視野が重なる領域に位置している時、強度の強いコーラス波動を観測した。また、あらせ衛星に搭載された電子計測器MEP-eの観測データから、コーラス波動に伴い、数keV以上の電子がロスコーンに散乱されていることを突き止めた。このとき、地上の全天カメラでは脈動オーロラが観測されており、あらせ衛星で観測されたコーラス波動の時間変化と高い相関を示す脈動オーロラのパッチが、2地点のカメラで観測されていることがわかった。

2地点のカメラで観測された脈動オーロラのパッチの高度を推定するために、2地点のカメラの各ピクセルが観測する地理緯度・経度の情報である「マッピングテーブル」を、脈動オーロラプロジェクトと

の協力のもとに複数高度で決定した。また、この情報を付与した、オーロラデータのCommon Data Format (CDF) 形式のファイルを作成し、あらせ衛星のデータ解析ソフトウェアであるSPEDASで使用が可能な解析ソフトウェアの開発を進めた。

新たに開発した解析環境を基にして、ソダンキラ・チャウジャスに設置された2つのカメラで観測された脈動オーロラの高度を、オーロラの発光強度の相関解析により調べた。あらせ衛星で強いコーラス波動が観測され、MEP-eによってロスコーン内の電子フラックスが増大している時間帯では、オーロラの発光高度は95-100kmであることが推定された。これは、MEP-eで観測されたロスコーン内の電子フラックス増加が見られたエネルギー帯が進入できる高度と概ね一致しており、ステレオ観測により、脈動オーロラの発光高度推定が可能であることがわかった。

本研究は、名古屋大学宇宙地球環境研究所所属の大学院生との共同研究として進められてきた。大学院生との共同研究により、「オメガバンド」と呼ばれるオーロラの大規模構造に埋め込まれた脈動オーロラのパッチにおける、降下電子エネルギーの不均一性に関する議論が行われている。今後、脈動オーロラの高度推定の際にも、このような知見を活かし、研究を進めていく。

【成果報告】

- K. Toyama, Y. Miyoshi, S. Kurita, K. Hosokawa, Y. Ogawa, S. Oyama, S. Saito, K., Shiokawa, K. Asamura, T. Asano, and R. Fujii, Estimation of Precipitating Electron Energy of Pulsating Aurora Using Ground-based Multiwavelength Optical Observations, *Geophysical Research Letters*, in revision.
- 森井雄大, 三好由純, 栗田怜, 細川敬祐, 大山伸一郎, 小川泰信, 多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推定、名古屋大学ISEE研究集会「脈動オーロラ研究集会」, 2022年9月
- Yudai Morii, Satoshi Kurita, Yoshizumi Miyoshi, Kohei Toyama, Keisuke Hosokawa, Shin-ichiro Oyama, Yasunobu Ogawa, and Shinji Saito, Characteristics of precipitating electrons of the omega band based on two wavelength optical measurement, 日本地球惑星連合2022年大会, 2022年5月

(別紙様式 4 - 2)

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

田中公一、広島市立大学・情報科学研究科

【研究目的】

本研究では、インドと日本に設置した大型ミュオン望遠鏡を用いた宇宙線連続観測により、宇宙線強度変動と太陽活動との関係、及び宇宙線異方性と惑星間空間磁場 (IMF : Interplanetary Magnetic Field) の構造との関係について調べる。これから宇宙磁場中における宇宙線の加速・伝播機構の理解を深めることを目的とする。

【研究方法】

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、惑星間空間磁場 (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、宇宙磁場中における宇宙線の加速・伝播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・伝播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 程度のリジディティの宇宙線を観測することができる。これは、約 0.4 天文単位 (au) の巡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。申請者の所属するグループにより運用されている GRAPES-3 と明野観測所のミュオン望遠鏡は、共に 4 層の比例計数管の方向を交互に 90 度ずらして配置したホドスコープ型の望遠鏡であり、インドと日本の約 60 度の経度差を基に、地球の自転を利用した連続観測により、広域同時観測が実現できる。

明野ミュオン観測では 3 基のミュオン望遠鏡に大規模な再整備作業が進行中であったが、そのうちの 1 基が継続的に観測可能になった。残りの 2 基について比例計数管の改修、及びデータ収集系の更新作業を行っている。また、GRAPES-3 ミュオン観測も、検出面積を 2 倍 (1,120 m²) にする拡張作業が進行中である。

【研究活動報告】

GRAPES-3 の共同研究を行うインドにおいて、2020 年度に実験の新ミュオン望遠鏡 16 基について比例計数管の積み上げが終わり、信号計測回路の設置を行って 2022 年度に試験観測が始まった。2019 年度末に新型コロナウイルスの世界的流行が始まり、2020~2022 年度になっても依然として流行が治まらなかったため、今年度も日本人研究者のインド渡航

を断念せざるを得なかった。しかし流行が今年 1 月以降に治まってきたので、日本国よりも状況が良いインドの共同研究機関であるインド・タタ基礎研究所の研究者 (S.K.Gupta 氏と B.Hariharan 氏) が日本へ招待され、2 月～3 月に 3 年ぶりに国内共同研究者とのミーティングを行うことができた。本研究代表者も本来の目的である出張に予算を支出でき、ミーティングを行う中部大学に出張した。ミーティングでは、データ解析状況を話し合い、今後の方針を決めた。明野ミュオン観測の方針についても議論した。

明野ミュオン観測において、本年度のコロナウィルスの感染者数の減少期の 8 月 1 回、および、10 月 2 回明野観測所に本研究代表者と中部大学の 大嶋晃敏氏が出張し、3 基の明野ミュオン観測装置の再整備を行った。

【研究成果】

本研究に関する成果として、日本物理学会で 6 件の発表を行った。

【日本物理学会・その他学会発表】

1. 「GRAPES-3 空気シャワー観測の全体報告」、大嶋晃敏、小島浩司、野中敏幸、田中公一他、2022 年 9 月、日本物理学会 2022 年秋季大会、6aA124-1
2. 「GRAPES-3 実験における大型 NaI 検出器の導入について(6)」、田中公一、小島浩司、大嶋晃敏、野中敏幸他、2022 年 9 月、日本物理学会 2022 年秋季大会、6aA124-2
3. 「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(29)」、小島浩司、大嶋晃敏、野中敏幸、田中公一他、2022 年 9 月、日本物理学会 2022 年秋季大会、8pA125-9
4. 「GRAPES-3 Muon Telescopes による宇宙線強度変動の観測(7) (多点同時観測に向けて)」、野中敏幸、大嶋晃敏、小島浩司、田中公一他、2022 年 9 月、日本物理学会 2022 年秋季大会、8pA125-10
5. 「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(30)」、小島浩司、大嶋晃敏、野中敏幸、田中公一他、2023 年 3 月、日本物理学会 2023 年春季大会、23pW2-3
6. 「地上ミュオン観測における気圧変動の効果」、小河蒼太、大嶋晃敏、小島浩司、野中敏幸、田中公一他、2023 年 3 月、日本物理学会 2023 年春季大会、23pW2-4

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 (2022 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、データ量が大変多く、当時は目視でイベント同定していた為、解析の進行が遅かった。

本研究では多数の SI events について多数の 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と予想された。そこで、2018 年度後期に、FLR を自動同定する方法の開発に着手した。その方法は、各 beam の各 range gate (以下 RG と記す) 毎にその VLOS データに FFT をかけ、その後、同じ beam 上で近くに位置する 2 つの RG's の FFT'ed data に位相差法・振幅比法と呼ばれる方法を適用して FLR を自動同定する、というものである。

我々はまず、SD の 1 つの beam に対して上記の方法で FLR を自動同定する matlab 関数プログラム (以下 find_FLR.m と記す) を作成し、そのテストと完成の為に上記 SI イベントを用いた。つまり、別途 (独立に) HAN と PYK の幾つかの beams で FLR events を目視同定しておき、その 1 つ 1 つの beam に find_FLR.m を適用し、目視 events が全て自動同定されるまで find_FLR.m を改良し、これをもって完成とした。

ただ、find_FLR.m は、1 つの beam について自動同定を行う機能のみを持ち、生データファイルからの VLOS 時系列データの読み込みと FFT 適用、及び find_FLR.m が出力するデータの作図、は別のプログラム言語で過去作成したプログラムで行っていた。これでは大量のデータの解析を一括して行う事は出来ないのので、全ての codes を IDL 言語に書きかえて統合するプログラミングを行っている。しかし、技術的な問題から難航し、2022 年度中には完成に至らなかった。今後プログラミングを続行し至急完成させる計画である。

2022 年度中のそのプログラミングにおいてはまた、2021 年度に既存の codes で解析した結果の問題点を改善する解析方法の追加検討も行った。それは以下の通りである。

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、周波数分解能を上げるため zero-padding を行った。今年度は 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。2023 年度には Lomb-Scargle 解析により周波数分解能を上げる方法も検討したいと考えている。

【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, and Tomoaki Hori, Magnetospheric-density estimation from automatically identified FLR in ground and ionospheric backscatters of SuperDARN, Japan Geoscience Union Meeting 2022, 2022.05.22-05.27(Hybrid), 2022.05.29-06.03(Online Poster) (発表日 06.02), hybrid and online, Japan

H. Kawano, A.S. Yukimatu, N. Nishitani, Y. Tanaka, S. Saita, T. Hori, Increasing the resolution of the FFT for more precise FLR-frequency determination in VLOS, 2022 年度 SuperDARN 研究集会, 2022.03.09, hybrid, 日本

都市および森林におけるPM_{2.5}中の有機成分の
光学特性と化学特性のオフライン分析

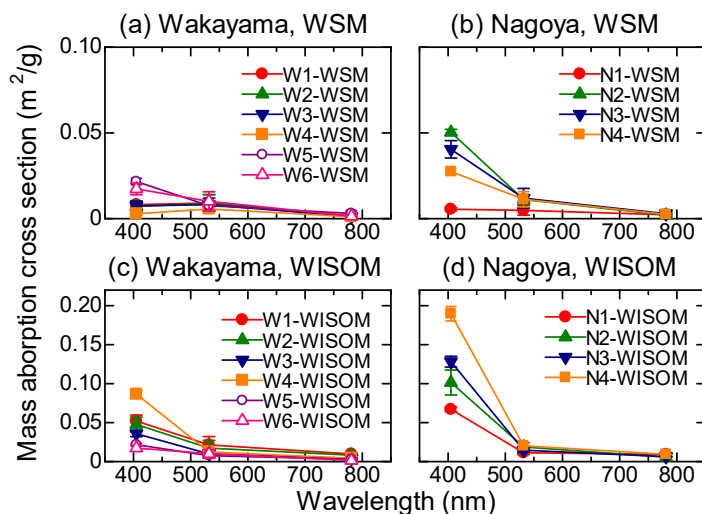
Offline analyses of optical and chemical properties of organic compounds in PM_{2.5} collected
at urban and forest sites

中山 智喜、長崎大学・水産・環境科学総合研究科

大気中のエアロゾル粒子は、太陽光を吸収もしくは散乱することにより、大気を加熱もしくは冷却し、気候変動や大気環境に影響を及ぼしている。近年、黒色炭素粒子に加えて、粒子中の一部の有機炭素成分（ブラウンカーボン）が、短波長可視域から近紫外域に光吸収性を有し、大気の放射収支や光化学反応に有意な寄与を持つことが指摘されている。そのため、様々な大気環境下におけるブラウンカーボンの光吸収特性の解明が必要である。

申請代表者と分担者の名古屋大学ISEEの持田陸宏教授のグループのこれまでの共同研究により、森林よび都市で捕集された粒子から抽出された水溶性成分および非水溶性有機成分を、実験室内で再度粒子化し、その光学特性および粒子径分布を測定してきた。本研究では、光音響分光法により連続測定された波長405, 532, 781 nmにおける光吸収係数と走査型モビリティパーティクルサイザーで測定された粒径分布データから、粒子が浮遊した状態での質量光吸収断面積 (m^2/g) を導出した。

図に、夏季に和歌山県有田川市の森林サイトおよび愛知県名古屋市の都市サイトで捕集した微小粒子（6および4サンプル）中の水溶性成分(WSM)と非水溶性有機成分(WISOM)の質量吸収断面積の波長依存性を示した。その結果、WSM、WISOMのいずれについても、都市サイトで捕集された粒子の方が、森林サイトで捕集された粒子に比べて短波長可視領域における質量光吸収係数が数倍大きいことがわかった。持田グループにより分析された同一サンプルのO/C比およびN/C比はWSMについては名古屋の方が高く、WISOMについては和歌山の方が高かったことから、WSMとWISOMで光吸収特性の決定要因が異なることが示唆された。WSMについては窒素含有有機化合物やより酸化の進んだ有機成分が寄与している可能性がある一方で、WISOMについては重合反応等により生成された高分子化合物が寄与している可能性が考えられた。



図：(a, c)和歌山県有田川市および(b, d)において夏季に捕集された微小エアロゾル粒子中の(a, b)水溶性成分および(c, d)非水溶性有機成分を再粒子化した際の質量吸収断面積の波長依存性

(別紙様式 4 - 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

【本研究の目的と目標】

「場所を選ばない」「地表から上空まで連続計測可能」というメリットに優れた地形表面～上空を計測範囲とする PM2.5 等測定自律飛行システムの開発・検証を目的とする。将来的な火星ドローンによる気象観測・大気成分測定・縦孔-地下空洞探査システム¹⁾の開発・検証を目標として、3つのサクセスレベルを設定する：

[ミニマムサクセス A] 地形計測システム

[ミニマムサクセス B] 上空大気観測システム

[フルサクセス] 地形計測と上空大気観測のドローン遠隔操縦飛行システム

]エクストラサクセス] 地形計測と上空大気観測のドローン自律飛行システム

【1：地形計測システム】

地表地形の計測はドローンのナビゲーション・自律飛行に必要な情報獲得手段である。021年度はドローン写真測量システム/レーザースキャナ測定システムの実証実験を縦穴の実験地（静岡県大室山山麓「穴の原溶岩洞穴」）において行った（図1）²⁾。

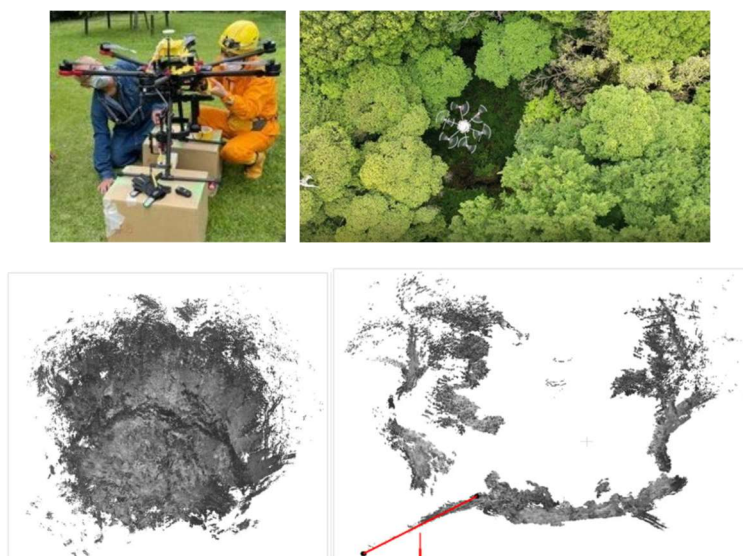


図1：(左上)ドローン測定システム (右上)縦穴降下計測
(下)縦穴の3次元点群モデル

【2：上空大気観測システム】

PM2.5 測定システム（図 2）をドローンにより上空に運び、その場でホバリングさせて測定を行う。2020 年度はドローンと吊り下げペイロード（測定システムを封入したカプセル）で構成した（図 3）。2021 年度（図 3）はドローンにマウント装着させたペイロード（測定システムを覆うカプセル）で構成した（図 4）。

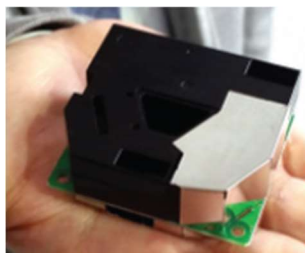


図 2



図 3



図 4

【まとめと課題】

地形計測についてはおおむね順調に進捗している。上空大気観測については、2020 年度ではドローンの機体下方に大気観測装置を位置させる構成にした。しかしながら、スラストの気流の影響を受けない程度に大気観測装置を機体から離す必要があるため、ローブ長が長くなり全体として横風の影響を受け易くなってしまった。2021 年度ではドローンの機体上方に大気観測装置を固定させる構成にした。しかしながら、全体の重心位置が上がったため、空中のバランスの安定が悪くなった。

2022 年度は機体中央に大気観測装置を位置させる構成を計画している。具体的には、大気観測装置だけでなくレーザースキャナ装置等の各種ペイロードを換装できるような機体デザインとするプラットフォームバスのコンセプトで設計することにした。

【参考文献（URL）】

- 1) 眞部広紀, 久間英樹, 岡本渉, 稲川直裕, 阿依ダニシ, 堀江潔, 大浦龍二

『穴ノ原溶岩洞穴における UAV のレーザースキャナ測量・写真測量と深奥部探査の検討』
佐世保工業高等専門学校研究報告第 58 号 pp86-93 (2022 年 01 月 31 日)

- 2) 岡本 渉, 眞部 広紀, 久間 英樹, 堀江 潔, 大浦 龍二, 堀井 樹, 阿依 ダニシ

『UAV を組み込んだ火星の縦孔-地下空洞探査構想と穴ノ原溶岩洞穴における
進入離脱飛行実験の解析』

第 65 回宇宙科学技術連合講演会（山形大会）

OS-15 月惑星の縦孔・地下空洞探査 UZUME 計画, 2021 年 11 月 12 日

(別紙様式 4-2)

積乱雲の発生過程解明のための大気環境場観測 Observation of Atmospheric Environmental Fields for Clarifying the Generation Process of Cumulonimbus Clouds

代表者：大東忠保 防災科学技術研究所・水・土砂防災研究部門

研究目的

夏季晴天日には小規模な対流性の積雲が多く発達する。積雲は降水をもたらさないが、この多くの積雲の中から鉛直方向に深く発達した積乱雲が選択的に発達し、短時間に強い降水をもたらす。しかしながら、積雲から積乱雲に発達するための過程（積乱雲発生過程）は十分に明らかになっていない。そこで、本研究では最終的に、積乱雲発生に関する詳細な過程を明らかにすることを目標としている。この過程の解明は、積乱雲のライフサイクルの解明に貢献するものである。積乱雲は単体で激しい雨をもたらすとともに、豪雨をもたらす対流システムの構成要素でもある。したがって、対流システムの構造と発達の素過程解明への寄与も期待される。

最終目標である積乱雲発生過程の解明のためには、雲のスケールより十分大きな時空間スケールの大気場（大気環境場）の変動過程（例えばSeino et al., 2018; Sugawara et al., 2018; Nelson et al., 2021）を明らかにした上で、雲過程を含む対流現象が大気環境場と相互作用しながら発達していく過程（例えばKhairoutdinov and Randall, 2006）を明らかにする必要がある。本共同研究課題では、前者の大気環境場の詳細な変動過程を調べた。

研究方法

大気環境場を把握するため、気球に取り付けて飛揚させるゾンデ観測を行った。気象庁等が実施する現業観測は通常1日2回（12時間間隔）であり、1時間程度の寿命しかもたない積乱雲の時間スケールと比較して時間分解能が粗い。そこで、本共同研究では高時間分解能の大気環境場を得るために高頻度のゾンデ観測を行った。

使用したゾンデは明星電気製のiMS-100である。iMS-100では、気温、露点温度、高度、気圧、風向・風速を1秒毎に取得し、400MHz帯の周波数を用いて送信されたデータを地上で受信する。

観測は2022年8月18日から27日の10日間、つくば市の防災科学技術研究所（以下、防災科研）で行った（図1上）。連続的な観測を行うため2台の受信機を用い（図1下）、朝8時から夕方17時の間に放球を行った。放球の時間間隔は最短で1時間、1日最大10回の放球を行った（23日、24日、25日、27日）。全部で62回の放球を行い、地面からの加熱の影響が大きい高度5km以下についてはこのうち60回でデータを取得した。また、うち51回では気象庁館野の高層気象観測点における8月の対流圏海面高度に近い16.5kmよりも高い高度まで観測した。ゾンデ観測と同期させて防災科研のKaバンド雲レーダー、Xバンド降水レーダー、走査型ライダー、タイムラプスカメラ、雷放電経路3次元観測システムLMA等を用いて、雲の内部構造や発達過程に関してもデータを取得した。

研究結果

2022年8月18日から27日の10日間のうち、前半はつくばを含む関東で低気圧や前線に伴う降水が多かった。19日は気象庁つくば観測点の観測時間帯（8～17時）のうち、日照時間1時間の時間帯も多く、日最高気温も32.8℃と高くなったが、1時間値の相対湿度の最高が68%（8時）、最低が41%（13時）と低く対流活動は活発ではなかった。後半5日間ではつくばで30℃を越えた日が3日あり、関東域における積

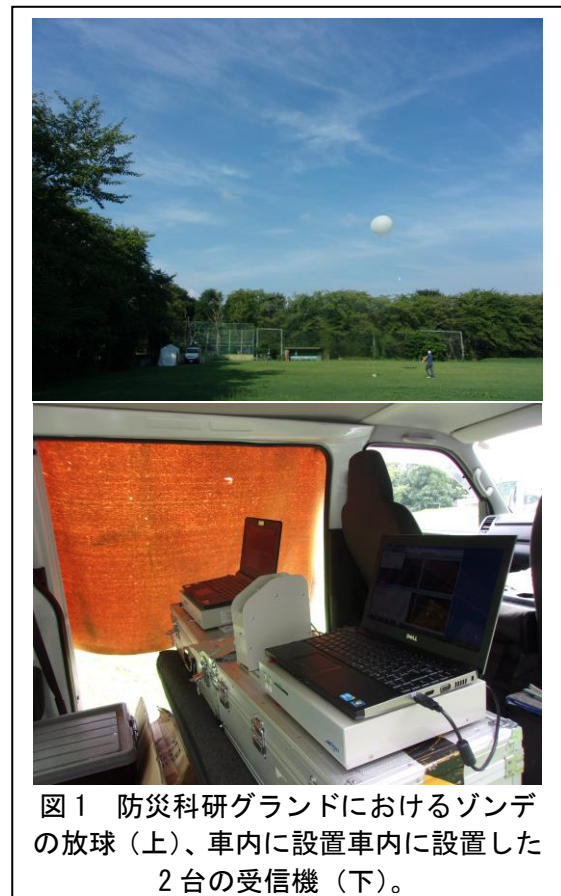


図1 防災科研グラウンドにおけるゾンデの放球（上）、車内に設置車内に設置した2台の受信機（下）。

乱雲による雷活動も前半より活発であった。今回は1日10回の放球を実施し、地上での日最高気温もほぼ同じであったが日射がかなり異なった23日（日最高気温33.4℃、8～17時の相対湿度62～87%、日照時間0～0.8h）と、27日（日最高気温33.6℃、8～17時相対湿度63～96%、11～17時日照時間 \geq 0.8）のゾンデ観測結果を示す。タイムラプスカメラや気象庁の観測から23日は層状の雲が広い時間で覆っていたが、27日は昼前から日照も多く対流性の雲が多く見られた。

図2に8月23日（左）と8月27日（右）における、8時から17時まで1時間ごと温度と露点温度の高度分布を示す。23日は高度2km以下で、27日は1km以下で午前中、時間とともに温度が上昇し、これに伴って同高度が不安定化している。それより上空での温度の時間変化は大きくない。両日を比べると高度1.5kmよりも上空で27日の方が温度が低く不安定な成層を示す。このことが、27日の方が対流性の雲が発達した原因と思われる。したがって、日射によって下層が暖められることが日変化を引き起こすものの、両日の対流の発生のしやすさについては変動の少ない中・上層の温度が重要であった。また、両日の違いとして27日のほうが1.5～4kmの露点温度の変動が大きい。これは対流活動と積雲の発生の結果であるかもしれないが、新たに発生する対流に対しては湿度に対する環境場の違いを与えており、先に生じた積雲が後に生じる対流の発達のしやすさに影響を与えているものと考えられる。

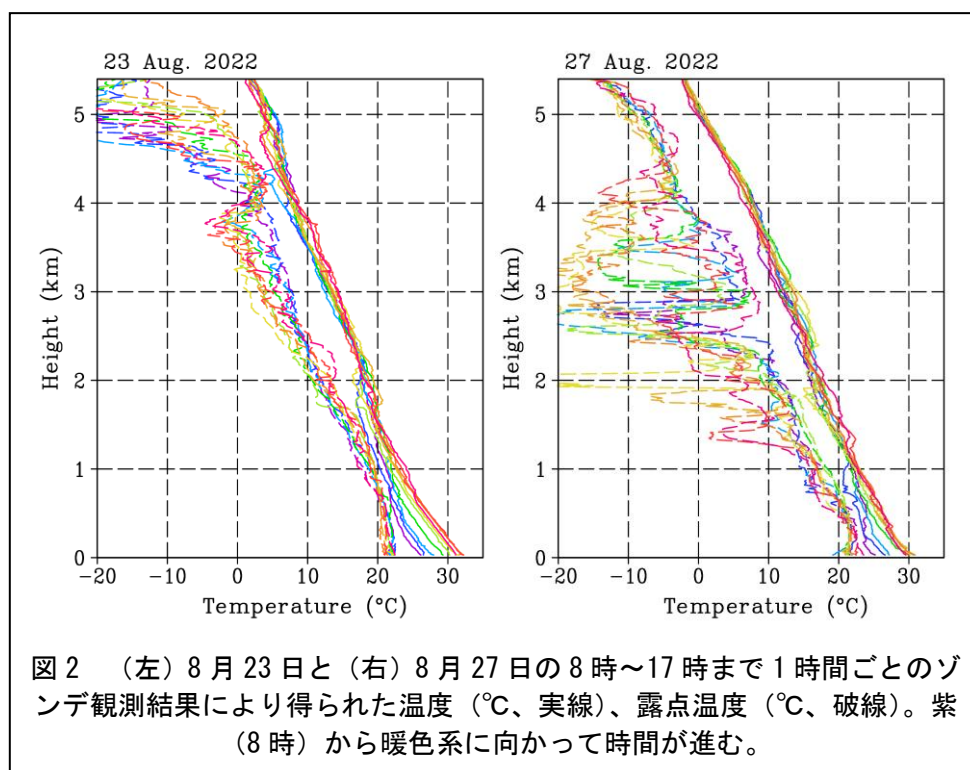


図2 (左) 8月23日と(右) 8月27日の8時～17時まで1時間ごとのゾンデ観測結果により得られた温度(°C、実線)、露点温度(°C、破線)。紫(8時)から暖色系に向かって時間が進む。

まとめ

積乱雲の発生過程の解明に向けて、雲のスケールより十分大きな時空間スケールの大気場（大気環境場）の変動過程を得るために、2022年8月につくばにおいてゾンデ観測を行った。最短1時間間隔での観測を行い、時間分解能の高いデータを取得した。層状の雲が長時間存在した23日と、対流的な雲が多く見られた27日を比べると、後者の方が下層から中層において低温で不安定であった。また、同高度の水蒸気量の時間変動が大きいことから、対流性の雲の発達により水蒸気の水平非一様性が生じ、そのことが新たな対流の発達のしやすさに寄与しているものと考えられる。今後は、他の観測データと総合したデータ解析を進めるとともに、得られた大気鉛直プロファイルを初期値とした数値シミュレーションを行うことによって、積乱雲発生過程の解明に向けた研究を行う予定である。

引用文献

- Khairoutdinov, M., and D. Randall, 2006: High-resolution simulation of shallow-to-deep convection transition over land. *J. Atmos. Sci.*, **63**, 3421-3436. <https://doi.org/10.1175/JAS3810.1>
- Nelson, T. C., J. Marquis, A. Varble, and K. Friedrich, 2021: Radiosonde observations of environments supporting deep moist convection initiation during RELAMPAGO-CACTI. *Mon. Wea. Rev.*, **149**, 289-309. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-20-0148.1>
- Seino, N., R. Oda, H. Sugawara, and T. Aoyagi, 2018: Observations and simulations of the mesoscale environment in TOMACS urban heavy rain events. *J. Meteor. Soc. Japan*, **96A**, 221-245. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2018-029>
- Sugawara, H., R. Oda, and N. Seino, 2018: Urban thermal influence on the background environment of convective precipitation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **96A**, 67-76. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2018-010>

(別紙様式 4-2)

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。今年度はその初期結果について報告する。

同位体比は発生源によって異なるほか、化学反応でも分別が起こることがあり、大気中の同位体比を測定することでこれらの情報が得られる。ただし、同位体比を求めるには高精度な観測が必要で、これまで大気中の同位体を利用した研究は主にサンプリングデータの高精度な分析によって発展し、大気中の成分の分布における発生源や化学反応の寄与に関する新たな知見が得られるようになってきた。

一方、赤外分光では絶対量の少ない同位体でも吸収強度の強い吸収線を用いれば解析は可能であるが、吸収線の強度などに数%程度の不確実性があることが多く、‰単位の微少な絶対値を精度よく求めることは難しい。しかし、同位体比の相対的な変動は%オーダーであることも多く、吸収線強度の不確実性はバイアスとして全てのデータに同様に効くため相対変動には影響しない。そこで、ノイズ等によるランダム誤差を%程度に抑えられれば、相対的な変動から発生源等に関する議論は可能ではないかと考え、検討を始めた。

メタンには¹²CH₄の他に¹³CH₄、¹²CH₃Dといった安定同位体が存在する。¹²CH₄では3 μm付近の3つの波長領域を合わせて解析しているが、同位体の¹³CH₄、¹²CH₃Dについても同じく3 μm付近のほか8 μm付近にも解析に使えるような吸収線がある。図1に、8 μm帯の1233.9 – 1234.6 cm⁻¹の波数領域で¹³CH₄を解析してみたフィッティングの結果を示す。解析にはNDACC/IRWG(InfraRed Working Group)で共通して用いられているロジャーズ法を用いたスペクトルフィッティングプログラムSFIT4を使用している。これは2021年1月に観測した15スペクトルの平均であるが、中央付近の最も大きな吸収が¹³CH₄によるもので、上部のフィッティング残差のグラフを見るとほぼゼロの周辺に分布しており、まずまずフィッティングできていることが分かる。試しにこの¹³CH₄の結果と同期間の¹²CH₄の解析結果から対流圏（ここでは0 - 8 km）カラムのδ¹³Cを求めてみたところ -55‰となり、地表付近で観測される値の範囲であった。まだ他の結果との比較などによる検証が必要であるが、今後最適な波長領域の組み合わせや吸収の重なっている干渉成分（特に水蒸気）の影響を最小化する手法などを検討していく予定である。また、¹²CH₄の解析では3層程度の高度情報が得られているが、図1の¹³CH₄の解析でも2層程度の高度分解は出来ており、対流圏成分と成層圏成分を分離した議論も可能になるのではないかと考えている。

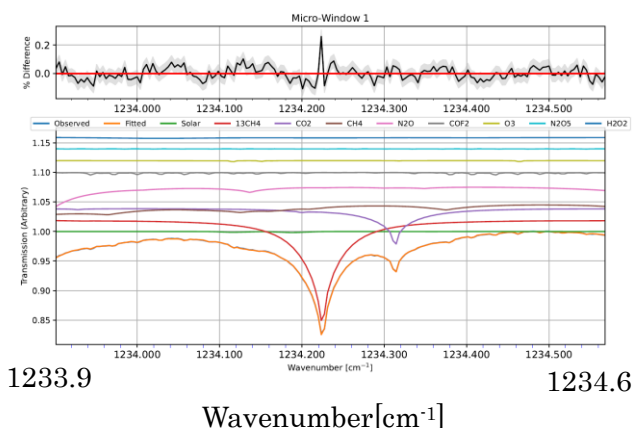


図1. ¹³CH₄の試験的なフィッティング結果

【成果発表】

村田 功、長浜 智生、中島 英彰、森野 勇、FTIR観測によるメタン同位体導出、第27回大気化学討論会、つくば、2022年11月。

村田 功、長浜 智生、中島 英彰、森野 勇、FTIR観測スペクトルからのメタン同位体導出、第5回地上赤外分光観測による大気組成変動検出に関する研究集会、名古屋、2023/3/8-9。

(別紙様式 4-2)

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 gl
obal-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

2022年度における研究課題の成果は以下の通りである。

連成計算1について、前年度に引き続き、2017年3月に発生した磁気嵐を対象に実施したグローバルモデルによる計算結果の解析を進めた。グローバルモデルの計算結果に示される高エネルギー電子の速度分布関数を用いた連成計算2により、コーラス放射が発生する条件のサーベイ計算を実施した。さらに、コーラス放射発生条件に関するサーベイ計算として、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ている。以上の成果を国内外の学会・研究会で報告した。また、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2020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。2023年度はコーラス放射発生条件に関するサーベイ計算を継続するとともに、衛星観測結果を初期条件として連成計算2を実施して、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。

(別紙様式 4-2)

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

GMDN (Global Muon Detector Network) と中性子計ネットワーク (NM network) で観測された 2021 年 11 月の ICME イベントの解析を行い、MFR の中心付近に磁力線に沿った大振幅の双方向流が存在し、宇宙線密度と一次異方性のレジディティ・スペクトラムがダイナミックに変動している様子を明らかにした。これは、muon 計と中性子計の汎世界的ネットワーク観測データに基づく世界初の成果である。この成果は *Astrophysical Journal* に学術論文として掲載されるとともに、日本物理学会および地球電磁気・地球惑星圏学会で発表された。

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

本研究では、名古屋大学大学院生命農学研究科附属フィールド科学教育研究センター稲武フィールド及び三重県内の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UAV (Marvic2 Pro、DJI社製)により空撮を行い、合わせてプロット内の全立木位置をGNSSのSP20 (Spectra Geo spatial社製)及び森林3次元計測システム OWL (株アドイン研究所製)により、測高器Trupuls (Laser Technology社製)により樹高を計測した。また、空撮画像を利用して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、開発中の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。RTK等の機能を搭載しないUAVでは、一般的に位置精度が低いため、本研究では同地域の航空レーザ測量成果を利用し、UAV点群から抽出した樹頂点の位置補正方法を検討し、現地調査とのマッチングを行った。位置補正方法としては、抽出樹頂点全て、最適樹冠傾斜 (樹冠形状の指標) の一定上限以下の樹頂点のみを利用する場合について、現地調査との比較により精度の比較を行い、最適な上空・地上データのマッチング手法について検討を行った。

結果及び考察

図1に示したとおり、最適樹冠傾斜の上限を設けない場合 (全樹頂点を位置補正に利用する) 場合に比べ、一定の上限を利用した場合の方が検出率 (現地調査結果との一致) が安定して高く、かつ樹高の推定精度も高かった。また、僅かな差ではあるが、上限は30度前後が安定しており、この条件による樹頂点を利用することにより最適な上空・地上データのマッチングが可能となることが示唆された。

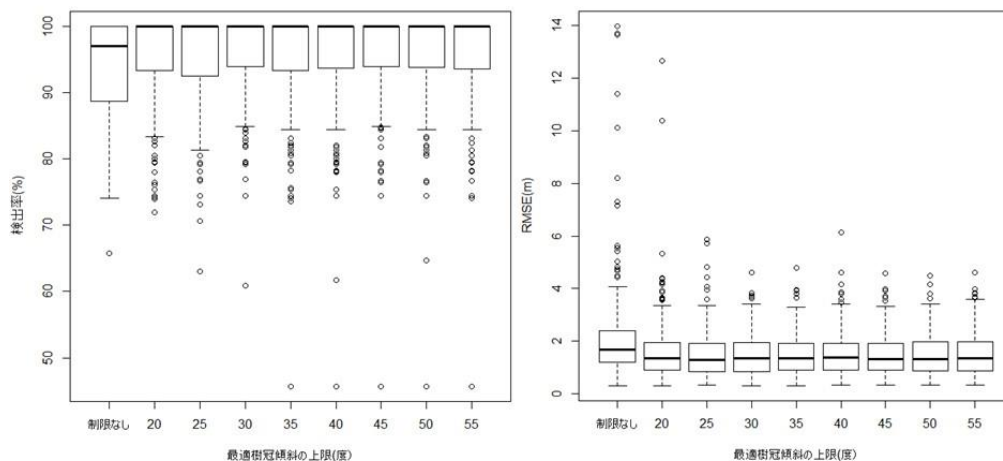


図1. 最適樹冠傾斜上限と検出率(左)・樹高RMSE(右)の比較

(別紙様式 4-2)

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

天野孝伸 東京大学大学院・理学系研究科地球惑星科学専攻

研究目的

無衝突な宇宙空間プラズマ中においてはプラズマ波動を介してエネルギー・運動量の輸送が起こると考えられており、プラズマ波動の理解は太陽風・地球磁気圏を始めとする様々な領域でプラズマ粒子の加熱や加速に重要な役割を果たす。本研究では特にホイッスラー波、イオンサイクロトロン波、ミラーモードなどの電磁的な波動について、その励起過程、非線形なコヒーレント構造の形成、波動に伴う粒子の散乱、加熱、加速、またそれらの相互の関係性について理解することを目的とする。このような波動は太陽風、衝撃波、磁気シース、磁気圏界面、磁気圏尾部、内部磁気圏などあらゆる領域で見られる。物理素過程の理解を通して、これらの領域間で見られる波動現象の共通性や多様性の理解が進むことが期待される。

研究内容

本年度は特に中性粒子がプラズマ中で電離されることによって作られるピックアップイオンが励起する不安定性に着目した。ピックアップイオンは電離された直後には速度空間において特徴的なリング・ビーム分布を持つことが期待されるが、この分布は一般には不安定であり、等方分布に緩和すると考えられている。このピックアップイオン起源の不安定性やその緩和過程の重要性は太陽風と惑星・彗星の相互作用や太陽圏外縁部において指摘されているが、本研究はその物理素過程に着目して数値シミュレーションと理論的な考察を行った。

数値シミュレーションでは電子・イオン共に運動論的に扱うParticle-In-Cell (PIC) 法と電子を流体近似したハイブリッド法を用いた数値シミュレーションの両方のモデルを用いて比較を行った。ただし、ハイブリッド法は有限電子慣性モデル（電子を有限の慣性を持つ流体として近似）を用いた。どちらのモデルにおいても数値シミュレーションは1次元および2次元モデルを状況に応じて使い分けた。

特に、ピックアップが磁力線に垂直方向に起こった場合のリング分布（ビーム成分はゼロ）を仮定し、一様系のPICおよびハイブリッドシミュレーションを行った。その結果、長波長のAlfvén-Ion-Cyclotron (AIC) モードやミラーモードについては両方で波数や強度が一致している一方で、高周波・短波長で斜め伝播のIon Bernstein (IB) モードについては両者に大きな違いが見られた。これは短波長のIBモードにおいては一般に電子のLandau減衰の効果が無視できないため、Landau減衰の効果が含まれていないハイブリッドシミュレーションでは、より短波長成分の強度が強くなったと考えられる。なお、同様の違いは線形解析からも確認されている。パラメータサーベイの結果から、Landau減衰の効果はピックアップイオンの密度が大きい、またリング速度が大きい場合に特に顕著になることが分かった。これはすなわち適用対象によって適切なモデルを使い分ける必要があることを示唆する。例えば、太陽圏外縁部のようなピックアップイオンの密度が低い場合についてはハイブリッドが適したモデルであると言える。一方で、彗星近傍のような比較的ピックアップイオンの密度が高い場合にはPICを用いなければならない。

上記に加えて、MMS衛星の観測データを用いたホイッスラー波の解析も行った。地球バウショックのバーストモード観測データを用いて、衝撃波遷移層領域における高周波 ($f/f_{ce}=0.1-0.5$) のホイッスラー波の強度と衝撃波パラメータの相関を統計的に調べ、衝撃波のAlfvénマッハ数とホイッスラー波強度の間に顕著な相関があることが分かった。一方で、ホイッスラー波の励起過程の同定には至っておらず、今後はさらなる詳細解析および理論・数値シミュレーションとの相補的な研究が必要になると考えられる。

研究発表

1. 岡田卓郎, 天野孝伸, ピックアップイオンが励起する不安定性のハイブリッドシミュレーション, Japan Geoscience Union (JpGU) Meeting 2022, 幕張, 2022年5月
2. 岡田卓郎, 天野孝伸, 寺境太樹, Outer Heliosheathのリング分布の安定性におけるion-Bernsteinモードの影響, 第152回地球電磁気・地球惑星圏学会, 相模原, 2022年11月

(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

研究目的

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、渦相関法により海面から放出される海塩粒子の放出量を直接評価することを目的として、「新青丸」と「しらせ」で観測を実施した。

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2隻ともに波しぶき計の他、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）。これらによって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、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、15 μ m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。またシステムは新青丸ではフォアマスト、しらせではコンパスデッキのハンドレールを利用し設置した。波しぶき計の大気試料の吸引口として漏斗を用い、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吸引口まで伸ばし、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。

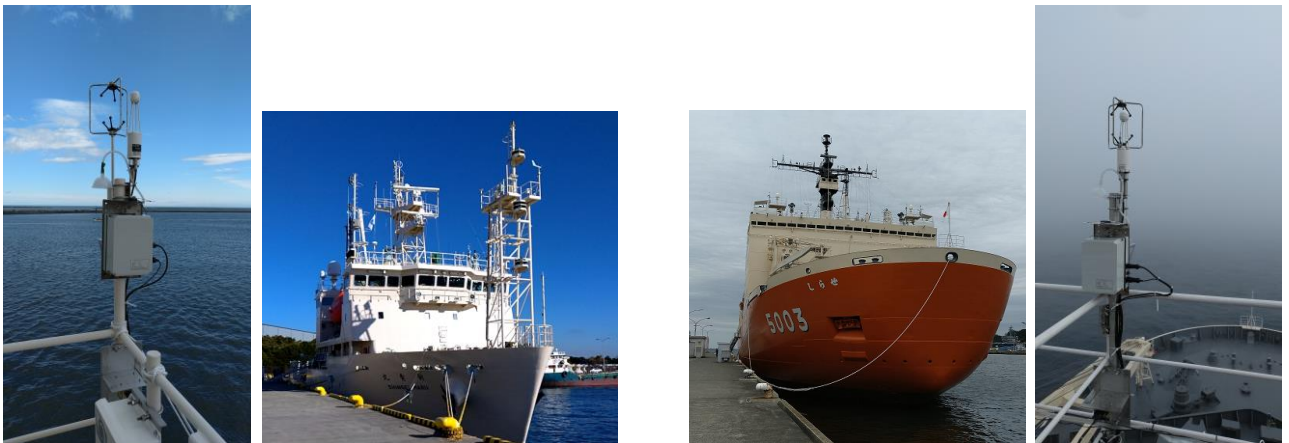


図1 新青丸（左）としらせ（右）に設置した乱流フラックス観測システム

研究結果

図2は新青丸KS-22-10航海における風速、そして渦相関法によって直接評価された運動量、顕熱、潜熱、 $1.0\sim 3.0\mu\text{m}$ の粒径における粒子の海面フラックスの時系列変動である。風速は観測期間中に最大で 10ms^{-1} 程度と、海面破碎が見込まれる荒天下でのフラックスを観測することがあまりできなかった。運動量フラックスは最大 -0.8Nm^{-2} で風速に依存する様子がみられた。顕熱と潜熱のフラックスは同様の変動がみられ、観測期間中の顕熱は最大で 40Wm^{-2} 程度、潜熱は 160Wm^{-2} 程度と海面から熱の放出量は大きくなく、顕熱については吸収される様子もみられた。また波しぶき計により計測された粒子の海面フラックスは最大で $160\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 程度で、運動量がある程度大きい時に海面から粒子が放出される様子がみられた。しかしながら、従来の報告例（例えば Norris et al., 2012ほか）とは異なり、昨年度の沿岸域での観測と同様に風速依存性はみられなかった。また本観測航海では、波高や流向流速といった海象データの観測、タイムラプスカメラによる海面状態の撮影も同時に実施していたため、今後は粒子の海面フラックスの変動要因を明らかにすることに取り組んでいく予定である。

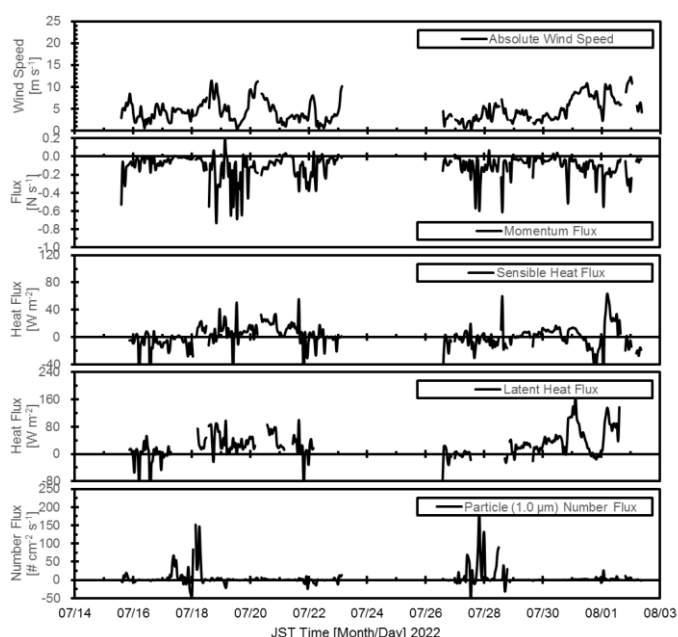


図2 風速、運動量・顕熱・潜熱・粒子の海面フラックスの時系列

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、今年度は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 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ ガス分析計で計測される CO_2 と H_2O 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が生じ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これまでの観測からはみられていない。また新青丸での観測では、風速が最大で 10ms^{-1} 程度と海面破碎が見込まれる荒天下でのフラックスを観測することができなかったものの、しらせでは 20ms^{-1} を超える風速が観測されていると報告を受けており、来年度4月に帰港次第データを回収して解析に着手する予定である。

成果発表

Jun Inoue, Kazutoshi Sato, Atsushi Yoshida, Yutaka Tobo, Yoshihiro Tomikawa, Yuji Yoshida, **Fumiyoshi Kondo**, Yasushi Uji, Shingo Shimizu, Kosuke Noborio, Takuji Waseda: Clouds, aerosols, and atmospheric circulations over the Southern Ocean, The 13th Symposium on Polar Science, so8, online, November 2022

(別紙様式 4-2)

豊川太陽電波強度偏波計データベースを使った過去の大フレアにおける粒子加速の研究
Study of particle acceleration in 1950s - 1970s flares
based on the database of Toyokawa Radio Polarimeters

下条圭美、自然科学研究機構 国立天文台・アルマプロジェクト

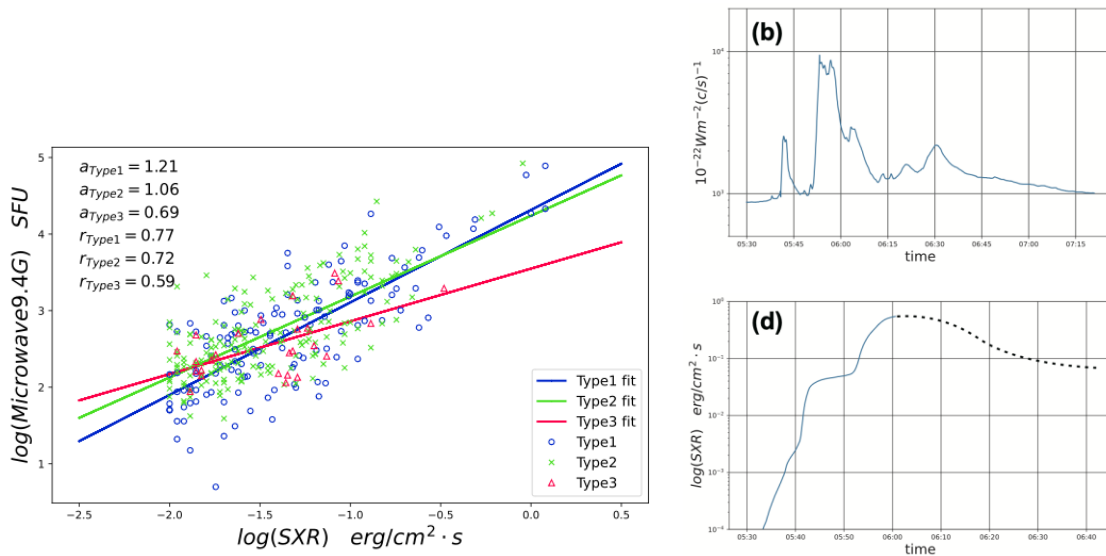
名古屋大学空電研究所(豊川市)では1951年より太陽マイクロ波観測が開始され、1994年にアンテナを国立天文台野辺山キャンパスに移設した後も国立天文台が観測を継続し、全観測期間が70年、太陽周期6周期分を超える太陽マイクロ波強度・偏波データが蓄積されている。野辺山にアンテナが移設される際、1958年から1978年までの強度・円偏波の時系列プロットを記録したマイクロフィルムも野辺山に搬送された。この20年間には、最近の太陽周期より太陽活動が激しかった第19・21太陽周期が含まれおり、地球への影響が非常に大きかった太陽フレアも含まれる。

これら特徴的な太陽フレアを、現在の太陽フレアと比較し、また地上への影響を現在の知見にて解釈するためには、発生当時には観測できなかった軟X線強度などの観測量を、豊川マイクロ波データを基に推測する必要がある。本研究では、GOES衛星による太陽軟X線強度観測が定期的に行われており、デジタルデータがすでに存在する野辺山でのマイクロ波観測のデータがある期間、具体的には1990年代から2010年代に発生した太陽フレアのX線とマイクロ波強度を比較した。

先行研究にて太陽フレアにおける17 GHz強度と硬X線強度との比例関係が示されていたが(小杉ら1988)、10 GHz以下の周波数では、マイクロ波に対する光学的厚みによる影響を考慮しなければならず、これまで真剣に議論されてこなかった。光学的厚みによる傾向を多周波による観測にて明らかにし、10 GHz以下でのマイクロ波強度と軟X線強度との比例関係を明らかにしたことは、本研究の特色である。

本研究で導かれた比例関係を基に、1956年2月14日と23日の大フレアの軟X線最大強度を推定し、さらにマイクロ波強度の時間変化とニューパート効果(熱的放射の時間変動は非熱的放射の時間積分値に比例する)から、フレア初期の軟X線強度変動を推定することができた。

本研究の結果を、第19・21太陽周期に発生した多くの大フレアに適応することにより、大フレアが発生した時の地上への影響をより良く理解し、地球近傍の宇宙や高層大気環境の予測することに貢献できると考えている。



左図：太陽フレアの9.4 GHz最大強度と軟X線最大強度の散布図と光学的厚さを考慮してフレアを分類したあとのfitting結果。

右上図：豊川強度偏波計が観測した、1956年2月14日の太陽フレアの9.4 GHz強度変動

右下図：豊川強度偏波計9.4 GHz強度変動から推測された軟X線強度変動

(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。

2022年度の主な成果：

本研究計画では、2つの課題に焦点を絞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、ULF 波動の記述性能を高めるため、電離圏側境界について、全球で電場ポテンシャルを解くことが可能なポテンシャルソルバー (GEMSIS-POT) と結合して境界条件を与えるとともに、主に背景密度を与えるプラズマ圏を環電流とは分けて解く低温プラズマモジュールを開発した。その初期結果として、夜側の粒子注入・環電流の形成・環電流イオンとの波動粒子間相互作用による ULF 波動の励起という一連の物理過程を再現することに成功し、プラズマシートからの単純な粒子注入に伴い4種類の内部起源の ULF 波動が励起されること、および各々の波動の励起機構を明らかとした。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 EISCAT の長期観測データの統計解析を進めた結果、磁気嵐時に夜側で分子イオンが主に降り込みによって流出していること、さらに CME 駆動型などの強い磁気嵐になると夕方側から朝側にかけて広い領域から摩擦加熱により分子イオンが追加で流出することなどが明らかとなった。なお、本研究では、東京大学の大学院生が内部磁気圏研究の専門家の多い名古屋大学を訪問して共同研究を行うことを重要と位置づけて共同研究を実施し、これらの共同研究は2本の博士論文の一部となった。

(別紙様式 4 - 2)

低周波 VLBI による Crab パルサーの精密な DM 決定にむけて

宇宙航空研究開発機構 臼田宇宙空間観測所 岳藤一宏

これまでに、我々は名古屋大学豊川電波観測所におけるデジタルバックエンドの整備を行い、Crab パルサーからのジャイアントパルス検出の成功、さらに東北大学飯館観測所と干渉実験を成功させた。また東北大学飯館観測所との干渉実験（以下 VLBI 実験）を実施し、技術的な知見を高めてきた。しかしながら、2022 年度 4 月飯館電波望遠鏡の駆動系が不具合を起こし、2023 年 3 月現在も復旧しておらず、2022 年度の VLBI 実験は実施できなかった。そこで、今年度は 2021 年度の実験で得られたデータの再解析を報告する。

2021 年は 11/29—12/1 に複数日の VLBI 実験を行った。表 1 はそのフリッジ SNR の結果である。このうち、フリッジの出ていない 3C10 (B cas, 約 8 分角), 3C461 (Cas A, 約 3 分角) は強度が高く、IPS 校正天体で利用されているサイズの大きい超新星残骸である。一方、同じくフリッジが得られなかった 3C286 (26Jy@318MHz, NASA NED) と 3C318 (9.2Jy@365MHz, NASA NED) はコンパクトかつ強度も高いため、フリッジが得られていない原因が不明である。考えられる原因として、アンテナのポインティングエラー、クロックオフセットの mismatch (相関処理で ± 1 秒、 ± 2 秒までオフセットをかけ、約 15m 秒の幅で実施している)、記録ミス、太陽等の影響、天体構造、その他諸々が考えられる。

そこで、この 2 点のスキャンについて詳細に調査をおこなった。図 1 と 2 は飯館と豊川それぞれの天体強度で、相関処理を 10kHz ごとに行い、50ms の単位時間ごとに m 中央値を取った自己相関強度である。この図から、下記 2 つのことが分かる。超新星残骸 3C461 (CasA) は強度が高いためか、豊川では自動的に中間周波数 (IF) で減衰が施されているようで、最も強度が低いレベルとなっている。また、フリッジの出ていない 3C286 はどちらもフリッジの得られている両隣の 3C283 と 3C298 の間に豊川では見られるが、飯館ではレベルの低いことがわかる。ただし、それでもバックグラウンドレベルよりは強いため、ポインティングエラーとなった可能性は低く、記録ミスの可能性も排除できる。

次に太陽の影響、特に直達してアンテナビームに入るような離角について調べる。太陽とそれぞれ IPS にスケジュールされた天体の離角は、フリッジの得られていない 3C318 が最も近いが、それでも南中時間より 1 時間半ずれているため 20 度以上離れており、アンテナビームに直接太陽が影響する可能性は低い。しかしながら、それぞれの

帯域をFFTしてスペクトルを表示すると、帯域内にリップルが見える。図4は豊川電波望遠鏡の天体スキャンごとの16MHz幅のスペクトルを表示したものである。10MHz付近にやや強い外来からのノイズが含まれ、多くの天体が含まれており複雑に見えるが、興味深いことにそれぞれの天体のスペクトルは非常に類似しており、複数日でも再現性があることがわかる。つまり、何らかの外部からの影響で、スペクトルを変動させる起因があるようだ。しかしながら、フリッジが得られない原因とは別であると思われる。同じく図3は天体ごとの標準偏差を導出したものである。太陽からのシンチレーションの影響を受けると、時系列データでの変動が大きくなる。そこで標準偏差を導出し、シンチレーションの影響を調べた。しかしながら、フリッジの得られていない3C286と3C318で標準偏差がたのフリッジが得られている天体と大きくは変わらず、太陽からのシンチレーションでフリッジが得られない可能性は低い。

図5はEVN+MARLINのLバンドによる3C286と3C318の天体マップである。それぞれ、数秒角の構造を持つが、同日にフリッジが得られている天体とそのサイズはファクタで同規模のため、天体構造がフリッジの出ない原因とは成らない。

以上、フリッジが検出できない各種の原因を調査したが、確定的なことが未だ不明である。しかしながら、本調査が今後役に立つことになるだろう。

表 1 干渉実験結果(2021年11月29日から12月1日)。数字があるものはその天体の60秒ごとに分割し、観測時間中の最大SNRである。“N”と表示された結果は不検出である。1chは豊川V偏波と飯舘A面H偏波の組み合わせで、2chは飯舘側がB面H偏波、3chは飯舘側がA面V偏波、4chは飯舘側はB面V偏波である。緑の網掛けは豊川観測所でIPS観測の校正天体(3C10, 3C461(CasA)ともに超新星残骸)として用いられるものである。オレンジの網掛けはFRINGEが得られない観測で、3C286はクエーサー、3C318はcompact steep-spectrum sources(CSS)である。

Maximum SNR in 60s integration	Source	Flux density in TGSS[Jy]	Mirror A H-pol	Mirror B H-pol	Mirror A V-pol	Mirror B V-pol
2021/332 21:37:18	3C255	15.1	7.4	16.5	134.1	133
2021/332 22:46:48	3C273	115.7	13.9	15.3	226.1	227.7
2021/333 09:38:53	3C461	20.3	N	N	N	N
2021/333 10:41:00	3C10	18.2	N	N	N	N
2021/333 21:33:22	3C255	15.1	10.1	11.3	136.2	134.6
2021/333 21:53:04	1136-13	22.3	N	N	22.2	22.2
2021/333 22:42:52	3C273	115.7	15.2	19.1	235.5	256.3
2021/333 22:56:03	3C275	18.0	N	N	18.5	19.5
2021/333 23:09:52	3C279	20.7	7.5	7.8	116.2	114.6
2021/333 23:25:21	3C283	56.3	N	N	27.1	28.2
2021/333 23:44:37	3C286	17.1	N	n	n	n
2021/334 00:32:35	3C298	68.5	6	10.6	94.1	91.6
2021/334 01:33:16	3C318	18.6	N	n	n	n
2021/334 05:53:58	1938-15	26.7	11.4	7.7	43.7	43.9
2021/334 09:34:57	3C461	20.3	N	n	n	n
2021/334 10:37:04	3C10	18.2	N	n	n	n
2021/334 21:29:27	3C255	15.1	15.1	10.3	144.3	141
2021/334 21:49:08	1136-13	22.3	N	N	23.4	23.3
2021/334 22:38:57	3C273	115.7	27.9	15.5	264.5	249.8
2021/334 22:52:07	3C275	18.0	n	n	22.9	20.7
2021/335 09:31:01	3C461	20.3	N	n	n	n
2021/335 10:33:08	3C10	18.2	N	n	n	n

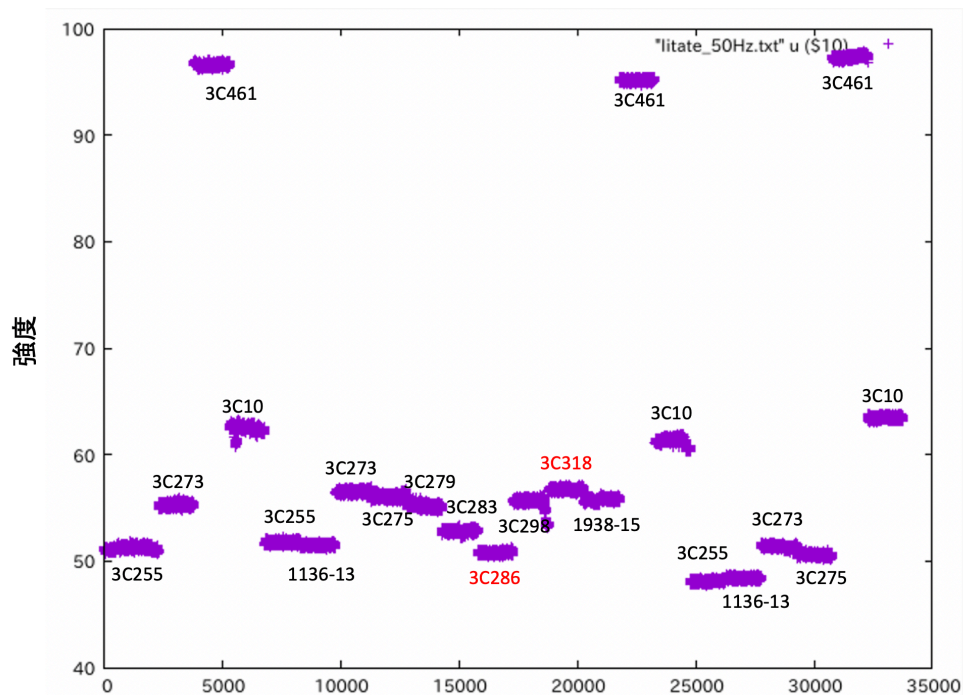


図 1 飯館の電波強度変動（赤文字はFRINGEが出ていないデータである）

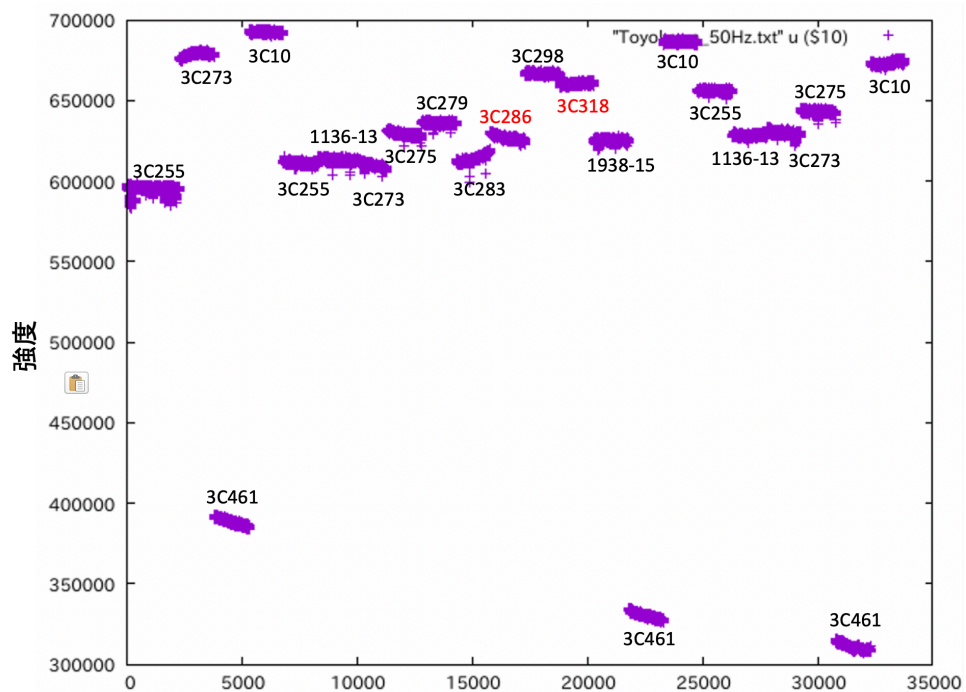


図 2 豊川電波観測所の電波強度変動（赤文字はFRINGEが出ていないデータである）。3C461 (GasA) は減衰されてためか、最も強度が低い。

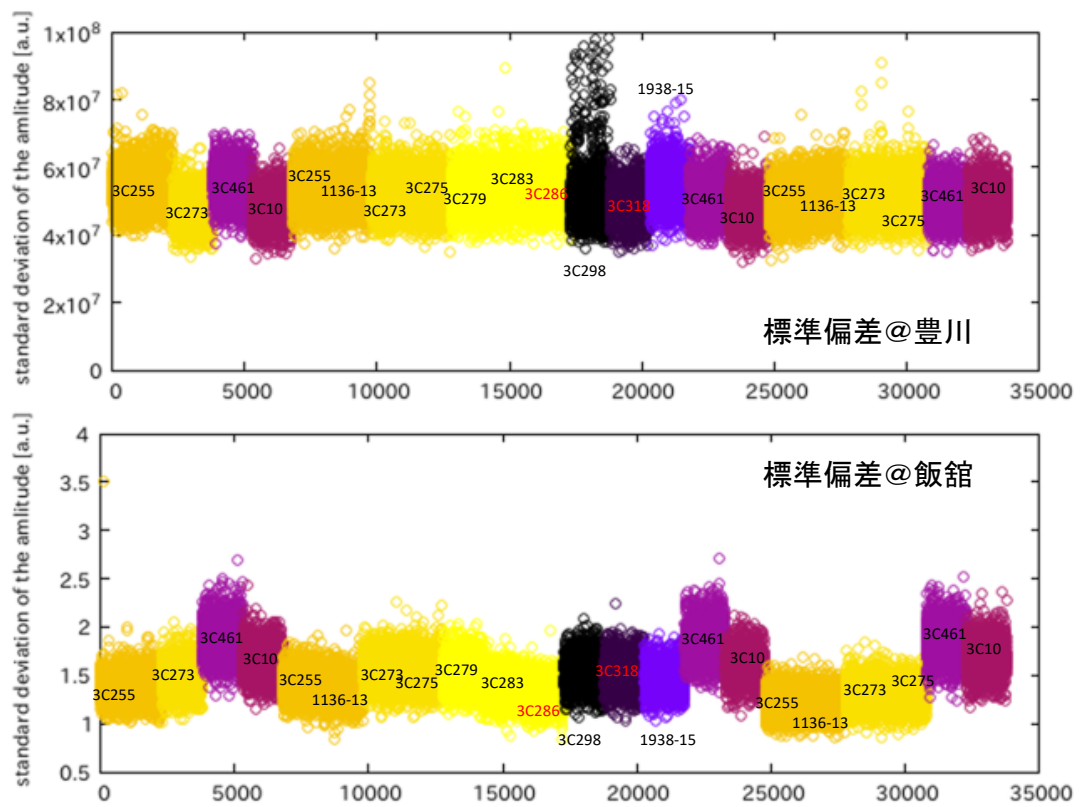


図 3 図 2 のデータの標準偏差

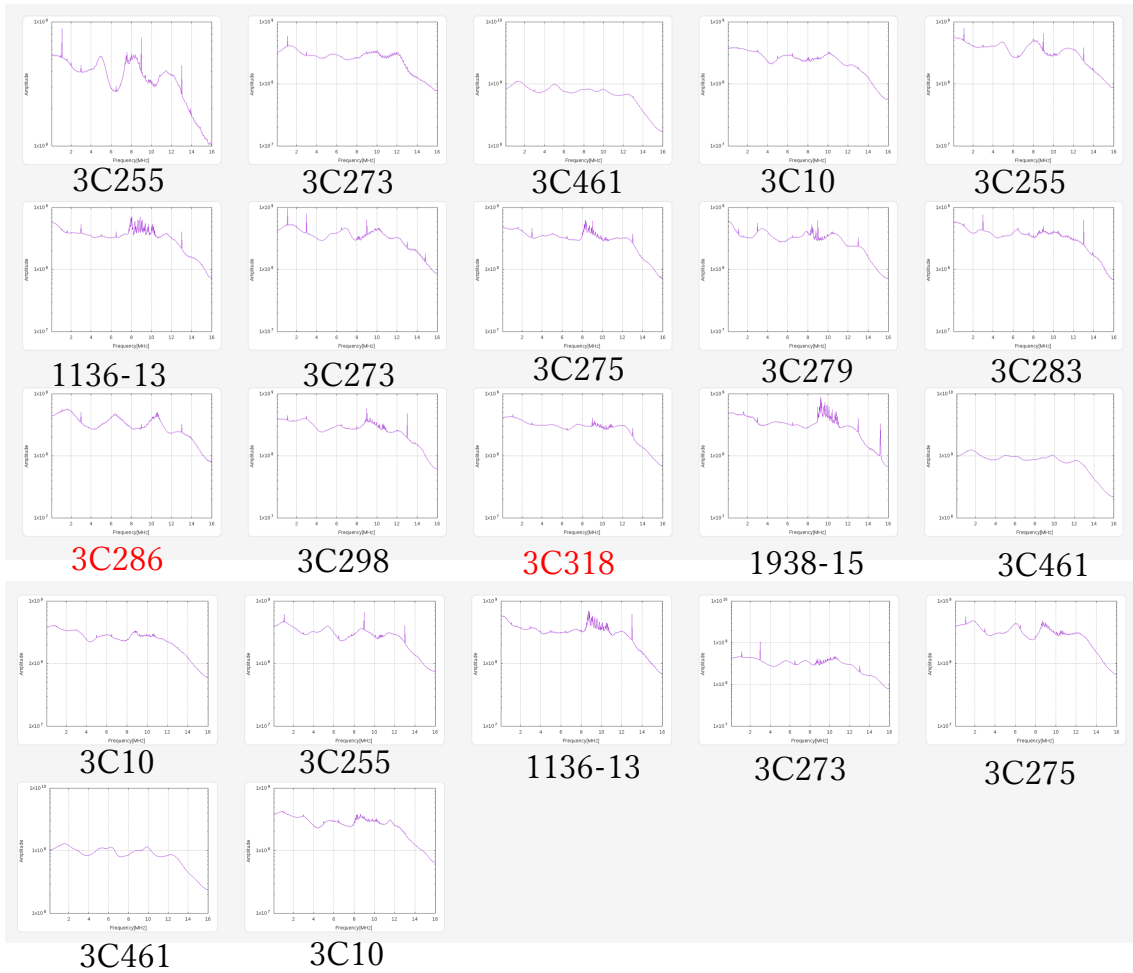


図 4 豊川電波望遠鏡のスペクトル変動 (左上→右上の順で時系列で並んでいる)

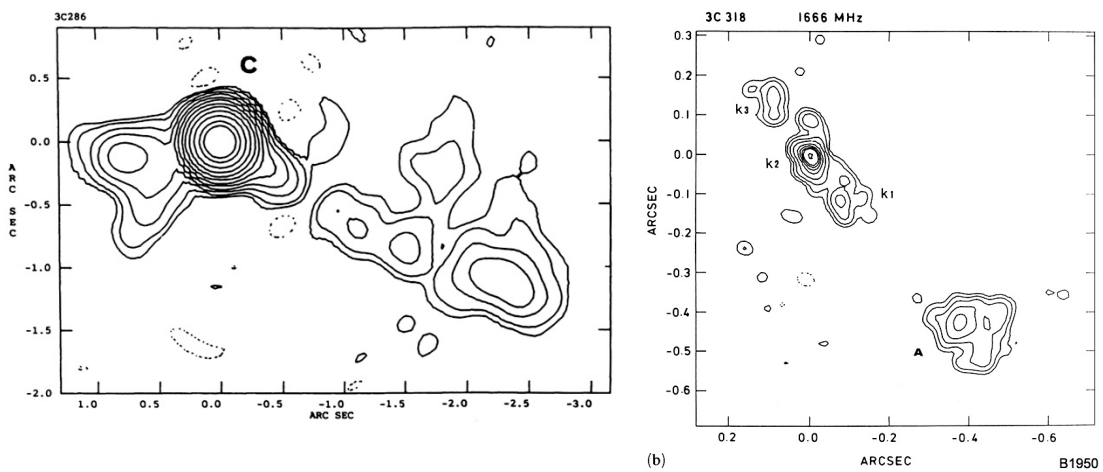


図 5 3C286 と 3C318 の天体マップデータは EVN+MARLIN の L バンドの結果である。それぞれ数秒程度のサイズがあることがわかる。

3C286 : 1994A&AS. .105. .247A, 3C318:1991MNRAS.250. .225S

□Crab パルサーの Dispersion の精密決定について

この VLBI 実験では両局の時刻差を正確に把握するため Crab パルサーの観測も同時に実施した。図 6 は観測期間中に最大のジャイアントパルス (DOY333、豊川での受信 S/N : 480) から、最適なディスページョンメジャーを測定した結果である。最大のジャイアントパルスに対して、微小 (ここでは 0.01 程度) を振ったときの時系列データの標準偏差をプロットした。図をみると、Gaussian ではなく、Lorentzian のようなカーブであった。フィット後、ピークセンターは 56.7444 ± 0.0007 で決定することができた。もちろん、超強力な 1 発のジャイアントパルスを用いたこともあるが、1 発の GRP だけで、ひと桁 DM の決定精度を向上できる可能性がある。そこで、本観測期間の SNR40 以上であった 8 発の GRP についてローレンツフィットを実施した。その結果が図 7 である。SNR40 以上の GRP が受信できれば、GRP1 発でも DM の決定精度が 0.004 以内である。

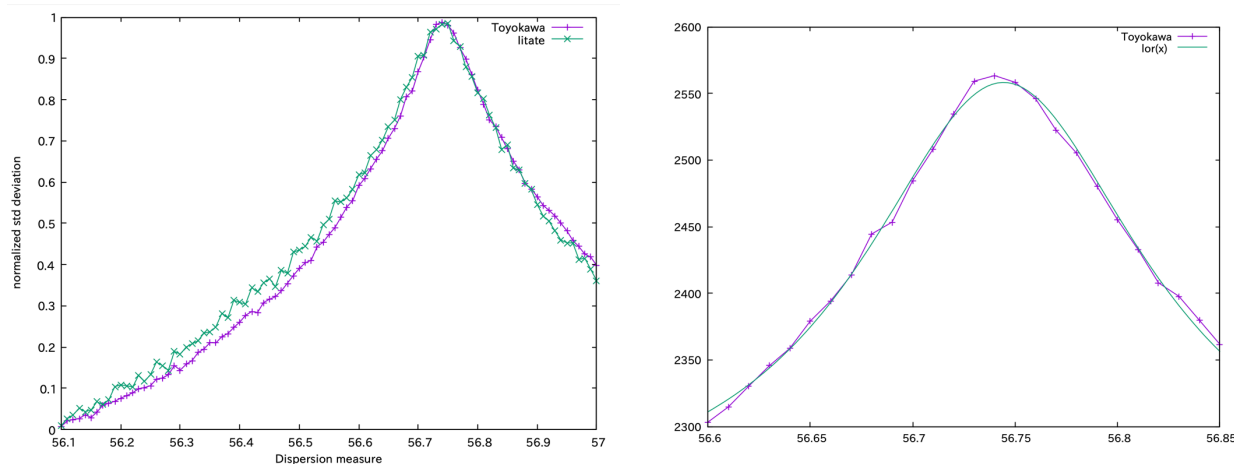


図 6 DM 最適値を得るため、DM を振った様子。横軸は DM。縦軸は規格化した標準偏差である。

図 8 はローレンツフィットと Bezier 補間によるピーク値 (2019 年俵さんの修論と同様の方法) を比較した結果である。どちらの手法も 3 日間の中日である DOY333 で DM が約 0.05 大きい。Crab パルサーが 6 月の太陽を近接する時期に太陽によるシンチレーションで DM が変動することは知られており、観測を行った 12 月でこの変化の原因は分からないが、同日 6 分間の GRP ごとでも微小に変動が見られるため、Crab パルサー近傍か、星間によるシンチレーションの可能性もある。

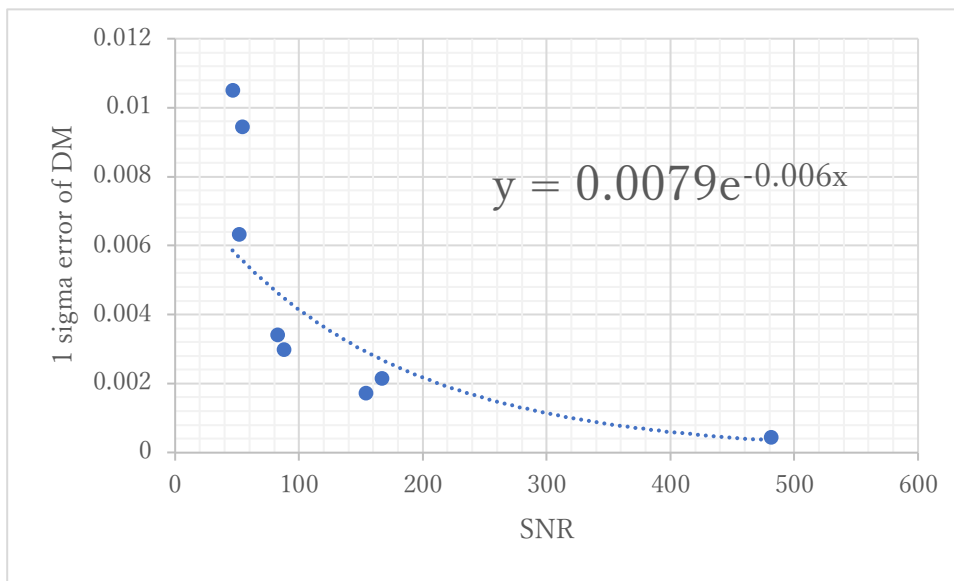


図 7 SNR が 40 以上の GRP (8 発) に対して、DM を 56.5 から 56.9 の間で 0.01 の刻みでパラメータを変え、そのときの時系列データから標準偏差を計算。DM 変動値に対する標準偏差についてローレンツフィットを実施した結果

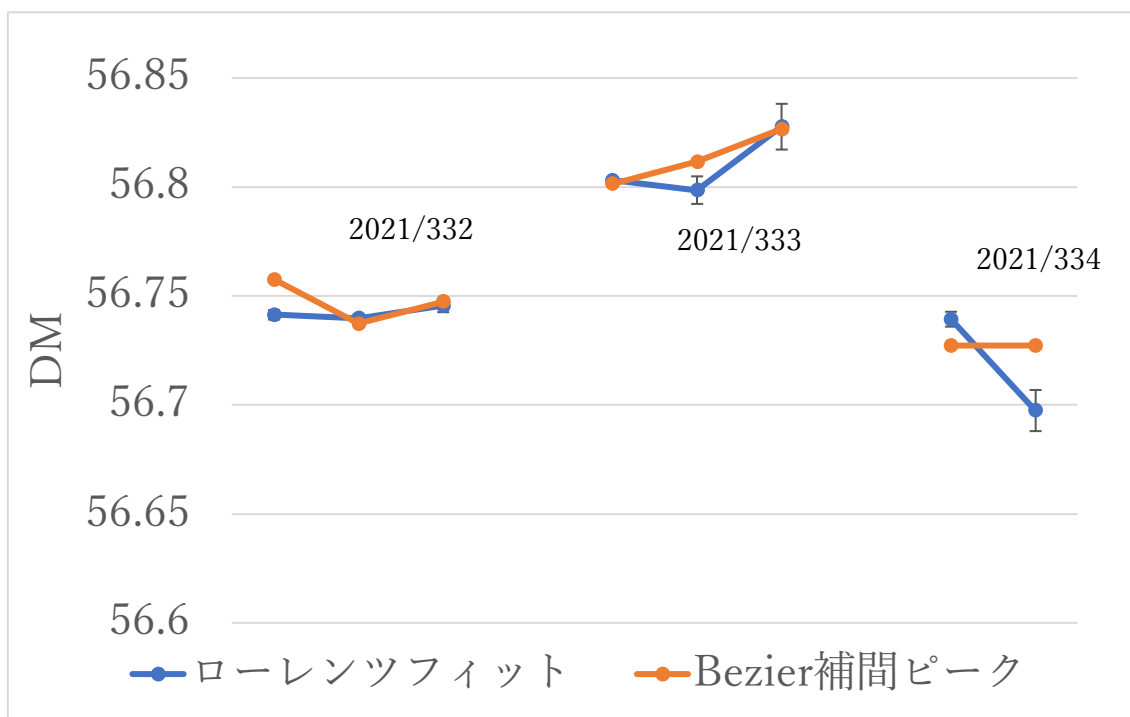


図 8 ローレンツフィットと Bezier 補間によるピーク値との比較

(別紙様式 4-2)

あらせ軌道上磁場データの評価と特性向上の検討
Evaluation and improvement of in-flight 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2017年3月の定常観測開始以降約5年間データの取得をほぼ連続的に継続し、データを使った多くのサイエンス成果が得られつつある。従来の衛星観測による結論を超える成果を得るためには、観測した磁場データの較正が重要である。あらせで得た磁場データを高精度で較正するには、地上較正試験の結果だけでなく、軌道上のデータの評価も必要である。継続的に評価することにより、経年変化を含んだ較正パラメータを導出する作業は重要である。軌道上データの高精度の評価と較正を行うことにより、ロスコーンに降り込むプラズマ粒子の詳細な観測、電流の方向や量の同定、EMIC波動、ULF波動などのサイエンス課題で詳細な議論が可能となる。放射線帯や内部磁気圏の研究の推進への貢献が期待される。

あらせの磁場データは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、較正される。軌道上のあらせ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、較正に必要なパラメータを導出している。較正したデータは、名古屋大学宇宙地球環境研究所あらせサイエンスセンターのデータサーバによってあらせチーム内外の研究者に提供され、多くのサイエンス成果があがっている。本研究では、引き続き較正パラメータの経年変化の評価を行うとともに、他衛星や地上観測との同時観測データ解析を行うために重要な、時刻付けの精度の評価を行うことを目的とした。

【研究方法】

軌道上のあらせ磁場データの較正方法の妥当性の検討、経年変化の評価を行い、磁場分解能、時間分解能、周波数特性、クオリティフラグによるデータ品質分別などの、データ特性の向上をはかった。データの評価は、あらせ衛星の特性、磁場観測器の性能や、内部磁気圏で観測される磁場データの特徴について高度な知見を持つ専門家によって行われることが望まれる。磁場計測機器PIである研究代表者が、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、データ評価のためのプロット印刷のインクカートリッジ代に使用した。

【研究結果・考察】

2022年度には、それ以前からの継続作業として、オフセットやアライメントの経年変化の評価を行った。2022年のあらせ磁場データは、それまでの5年とは異なり、スピン面にほぼ平行な測定軸成分のオフセットの較正が出来ないケースが頻発した。この成分のオフセットは、スピン軸方向の磁場が小さい条件にあるデータを用いて求めている。オフセットが較正出来ないケースは、軌道条件が要因と考えられるが、原因および対処方法の検討は、年度末時点でまだ続行中である。オフセットが較正できているケースについては、それまでのオフセット値と良く整合しており、幸い、オフセットのドリフトは起きていないと考えられる。

現在太陽活動度が上昇傾向にあり、プラズマ粒子や波動のデータの解析のためにも磁場データの提供が必要とされる状況にあり、引き続き解決に尽力する。

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、CME 発生時に頻出する、数 100MHz 帯では数分にわたって出現し、負の緩やかな周波数ドリフトを示す II 型と呼ばれるバーストがある。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、電波源と目される CME の何処がこの II 型バーストの生成域か?、が新たな課題となっている。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の同定を行うことを主目的とする。近年、フレア発生時にも本研究対象の微細構造と類似のスペクトル様相を持つ微細なバーストが存在することが示され、それらはループトップ域の衝撃波で生成された可能性が示唆されている(Chen+, Science, 2015)。本研究は観測データ解析のアプローチから、フレアと CME で働く粒子加速過程の類似性・相違性を量り考察してゆくことも副目的とする。

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)メートル波帯スペクトル観測装置(AMATERAS)の電波データ、太陽コロナ状態については科学衛星ひので(SXR)、SDO(EUV)等の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域の CME の様相について精査する計画を持ち、研究を進めている(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)。II 型バーストの微細構造の解析では、特にその周波数ドリフト率に着目した解析を行っている。発生域については、II 型バースト生成に関わる粒子加速域として CME のフロントやフランクが候補と目されるが、X 線と EUV のイメージデータ解析から粒子生成の場所とそこでの変動(～速度)に着目した解析を行い、II 型バーストの微細構造の周波数ドリフト率、バースト全体の周波数ドリフト率を同時に満たしうる“II 型バーストの生成候補域”の同定を行う。

これまで、AMATERAS で 2010 年～2022 年に取得した 30 余例の II 型電波バーストの解析から、微細構造を形成するバースト群の周波数ドリフト率の平均と分散、バースト群全体の周波数ドリフト率(CME の伝搬速度と考え合わせることで、電波生成域のプラズマ密度情報が得られる)についてデータベースを作成してきた。この結果、微細構造の主な特徴として、微細構造を形成するバースト群の平均的な周波数ドリフト率はフレア発生時等に生じる III 型バーストに匹敵する程大きいこと(数 100MHz/s@～200MHz)に加えて、正負の符号成分も含む大きい分散を持つこと(～電波放射に関わる粒子の運動方向が太陽向き・反太陽向きの両方を含むことを示唆)が示され、衝撃波加速過程の存在を想起させる結果となっている。現在、特に明確な微細構造を示すバースト、更には、代表者らが所属機関で兼任する宙空災害科学の背景から SEP 現象を伴うイベントを優先解析対象として、II 型バーストのスペクトル様相とコロナ様相とを SDO/AIA のデータを用いて照合解析を進めている。また、AMATERAS とともに代表者が観測を行っている数 10MHz 帯の電波スペクトル観測のデータ(太陽から概ね 3 太陽半径以内で生成)も使い、SOHO のコロナグラフのデータも交えた照合解析にも着手しており、微細構造生成に関わる粒子生成過程の探索を継続中である。

3. 成果報告等

・研究会等発表: 三澤他, 太陽研連シンポジウム, 名古屋大学, 2023 年 2 月.

太陽のインパルスフレアで生成された太陽宇宙線の加速機構の研究

Study of particle acceleration into high energies with impulsive solar flares

代表者：村木 綏・名古屋大学・宇宙地球環境研究所

1. 前置き

2004年11月4日に発生したX2.0のフレアに伴って飛来した太陽中性子が崩壊して作り出した陽子(SNDP)に関する共同研究成果を報告する。X2.0のフレアに伴って、5,250mのBolivia Chacaltaya山に設置された名大STE研の太陽中性子計測器と4,600mのMexico Sierra Negra山に設置された日本・メキシコ太陽中性子望遠鏡、およびFinland Ouluの中性子モニターに有意な信号が受信された。

Chacaltayaで受信された信号は太陽中性子によるものであり、Sierra Negra山の信号は太陽中性子崩壊陽子(SNDP)によるものであると解釈ができたので、2022の夏、インドのタタ研究所が主催した国際会議 ISVHE-CRI 2022 (online)で報告した。解析の結果、impulsive flareで陽子が1分以内に10GeVまで加速されることが分った。また反陽子の軌道計算の結果から、公称のRigidity 8.2GVよりも低い6GeVまでMexico上空に陽子が侵入することも分った。

本原稿では、もう一つの信号、Finland Ouluに設置されている中性子モニター(9NM64)で観測された 5.15σ の信号について解析したのでその結果を述べる。なおOuluの剛度は低く、0.78GVと言われている。南極点に設置されている中性子モニターにも有意な信号があるか否かも調べたが、5分値には 1σ 程度の増加しか見られなかった。

2. 反陽子軌道計算の結果

前回と同様に、Finland上空20kmから天頂角、方位角、東西・南北それぞれ1度ずつ ± 90 度の方向に反陽子を打ち出し、その軌道が $8R_E$ や $15R_E$ に到達するか調べた。各エネルギーについて32,761回試行した。Mexicoの場合と大きく異なる点は、約半数の0.4GeVの反陽子が、地球の磁気圏を通り抜け $8R_E$ や $15R_E$ に到達したという点である。言い換えると、0.4GeVという剛度よりかなり低いエネルギーの陽子も、極域のFinland上空には侵入できる可能性があることを三宅晶子による軌道計算は示した。

反陽子軌道計算の結果を詳しく紹介する。地表20km上空から45度(または30,15度)以内に打ち出されたエネルギー400MeVの反陽子は、磁気圏境界面の $8\sim 15R_E$ の球面上の狭い範囲に分布することを示した。逆に、この狭い領域に入射した陽子は、地表20km上空に到達する可能性があることを示唆している。

なお入射可能領域の中心と Oulu の垂線からのずれの角度は X-Y 平面で約 10 度である。軌道の広がりには地磁気による曲がりの効果と、地球から離れると球面上の表面積が増大する効果の積を反映している。ここではこの効果を ロート効果、又はホルン効果と呼ぶことにする。(Funnel form effect or Horn effect).

3. 侵入確率の計算

磁気圏境界面には地表に到達できる”小さ窓(入射口)”が開いていると言える。しかしこの穴に到達した陽子が、すべて地表に到達できるわけではない。特定の運動量空間の成分を有した陽子のみが、地表に到達できることを計算結果は示している。運動量空間の制限から、約 5 万個に 1 個の陽子が地表に侵入できると言える (1.7×10^{-5})。以下に詳細な検討結果を述べる。(ここでは天頂から 15 度以内に打ち出された場合の数字のみ紹介する。30 度 45 度以内に打ち出された場合も計算をしたが煩雑になるのでこの文中では紹介しない。)

中性子の崩壊により作られた陽子は、そく惑星間磁場に捕獲され、円運動をしながら地球近傍に飛来する。当日の惑星間磁場の地球近傍の値は 10nT であった。中性子の崩壊によって作られた陽子は、崩壊前の中性子の運動量をほぼ有している。従って陽子の V_x 成分は GSE 座標系でマイナス(反太陽方向)である。よって位相空間のプラス成分は、今回は考慮しないこととする。すると添付図のような半径 400MeV の 3 次元位相空間の半分を考えればよい。一方陽子の V_y , V_z 成分は、磁場に trap され回転するので様々な方向成分を有することとなる。

$(4\pi/3) \cdot (400\text{km})^3/2$ より位相空間の単位体積 [km/s^3] あたりの格子点数はおよそ $2.8 \times 10^8/2 \approx 1.4 \times 10^8$ 個と推定される。一方磁気圏境界の $8R_E$ に到達した反陽子の運動量は V_x , V_y , V_z のそれぞれの領域図から 15, 15, 10km/s 以内の領域にあることが分る。よって ΔV_x , ΔV_y , ΔV_z の積をとると運動量空間での小体積成分は 2.3×10^3 個 [2,250 個] となる。この部分空間の体積(小体積空間)を全運動量空間の半分の体積で割ると、地球に入射可能な位相空間中の陽子のうち約 1.7×10^{-5} ($\approx 1/60,000$) が入射可能な運動量を有していることが分る。すなわちこの条件を有した陽子のみが地表に侵入する。次に幾何学的な acceptance よりくる制限について考察する。

もう一つの制限因子(damping factor)は入射窓の広さに由来する。図にも示したように、磁気圏外側のすべての個所から観測点に入射できるわけではない。反陽子の軌道計算から、地球の中心から $8R_E$ 離れた領域の”開口窓”の広がり、(X, Y, Z 軸上の計算結果の広がりから dx , dy , dz を見積もると)、それぞれ 0.08, 0.08, 0.30 R_E 程度広がっていると考えられる。軌道計算の結果は X-Y 平面上で

は狭いが、X-Z 平面上では広がっているように見える。これは入射口が東側に偏っているためである。すると $dx \cdot dz$ 平面の入射窓面積は、ほぼ $0.024R_E^2$ 程度となる。磁気圏の全表面積は $4\pi(15R_E)^2$ で近似する。(実際には磁気圏はマイナス X 方向に吹き流しのよう広がっているがここでは、それは考えないことにする)。入射窓の面積を全面積で規格化すると、磁気圏の入射口が制限されているための damping factor が 3.0×10^{-5} と見積もられる。従って両制限因子の積をとると $(1.7 \times 10^{-5}) \times (3.0 \times 10^{-5}) \approx 5.1 \times 10^{-10}$ と求められる。すなわち 5.1×10^{-10} (for $<15^\circ$) が、全体の陽子の流れに対する damping factor である。

次に増幅因子(boosting factor)の方を考える。増幅される要因は地磁気により、入射陽子の軌道が広がることに由来する。(イメージとして入射口が、ホルンの開口部のように広がっていることを想定するとよいだろう。)すると開口部の面積は反陽子発射点よりはるかに広く、有効面積は $0.97 \times 10^{12} \text{m}^2$ の広領域になる。逆に 10^{12}m^2 にの磁気圏境界面入射した中性子崩壊陽子(SNDP)は、受信されることを意味している。これは 1m^2 の中性子の flux が acceptance が増えるので、 10^{12} 倍増幅されることを意味している。

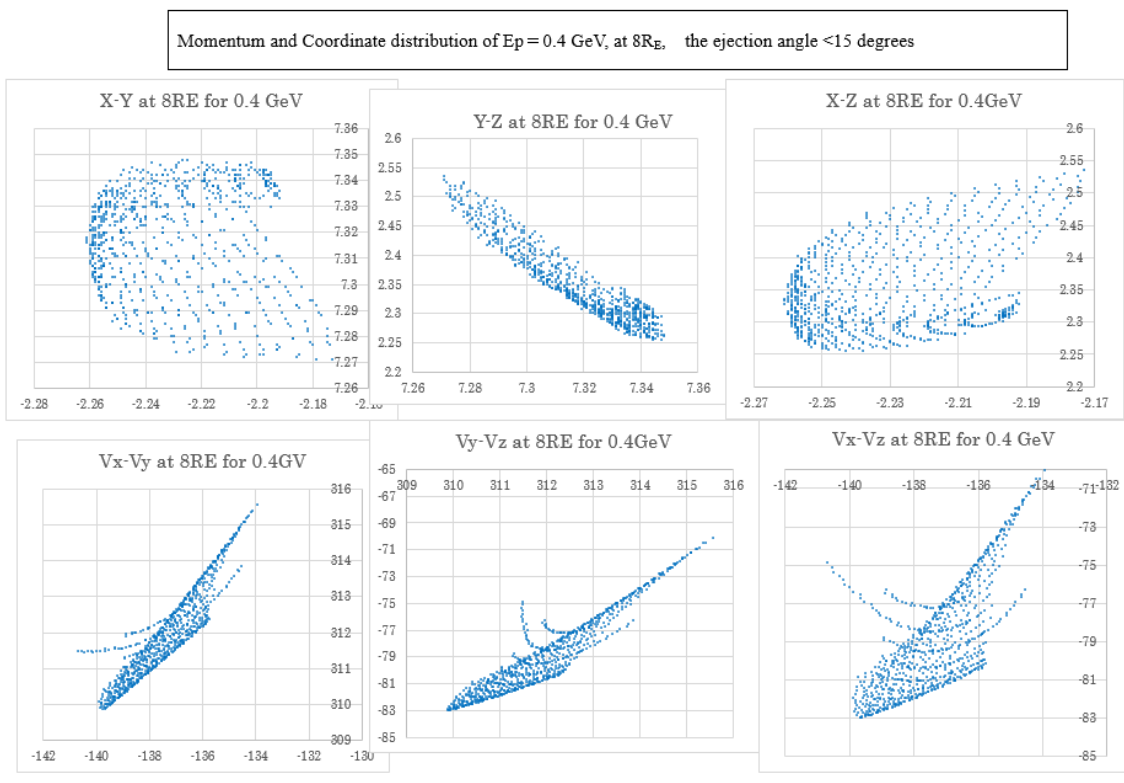
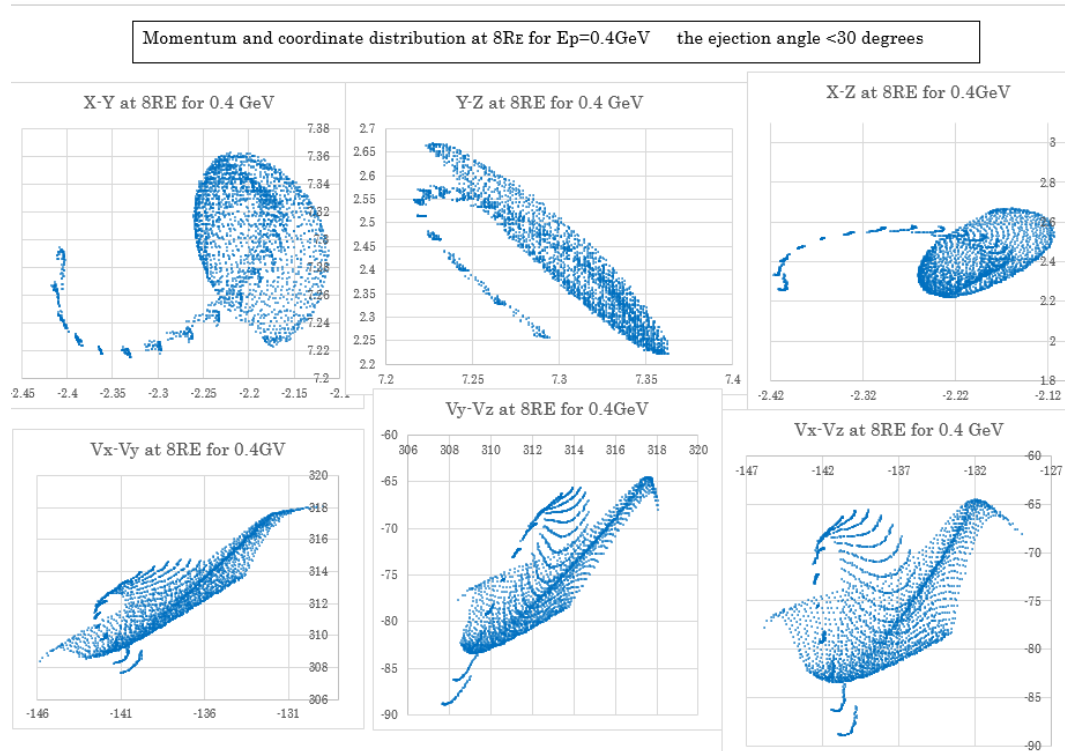
この $8R_E$ で $<15^\circ$ 以内に発射された反陽子の広がり値に、先の damping factor を掛ると全体としての増幅率が求められる。その値は次に示すように、 $(0.97 \times 10^{12}) \times (5.1 \times 10^{-10}) \approx 5.0 \times 10^2$ 。約 500 倍 である。

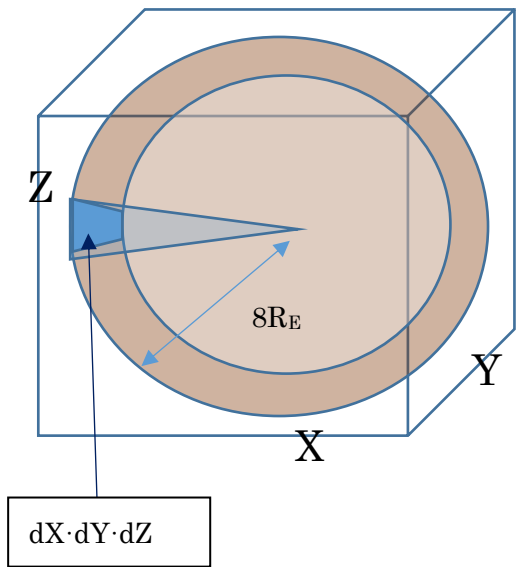
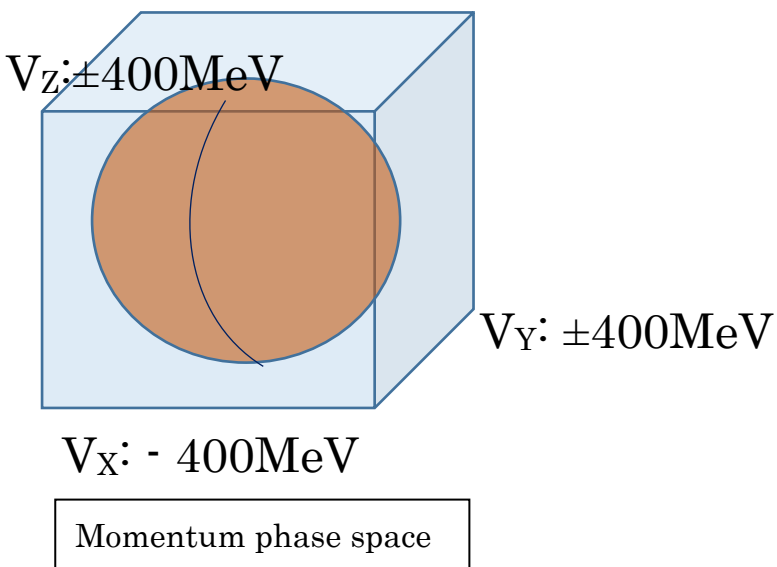
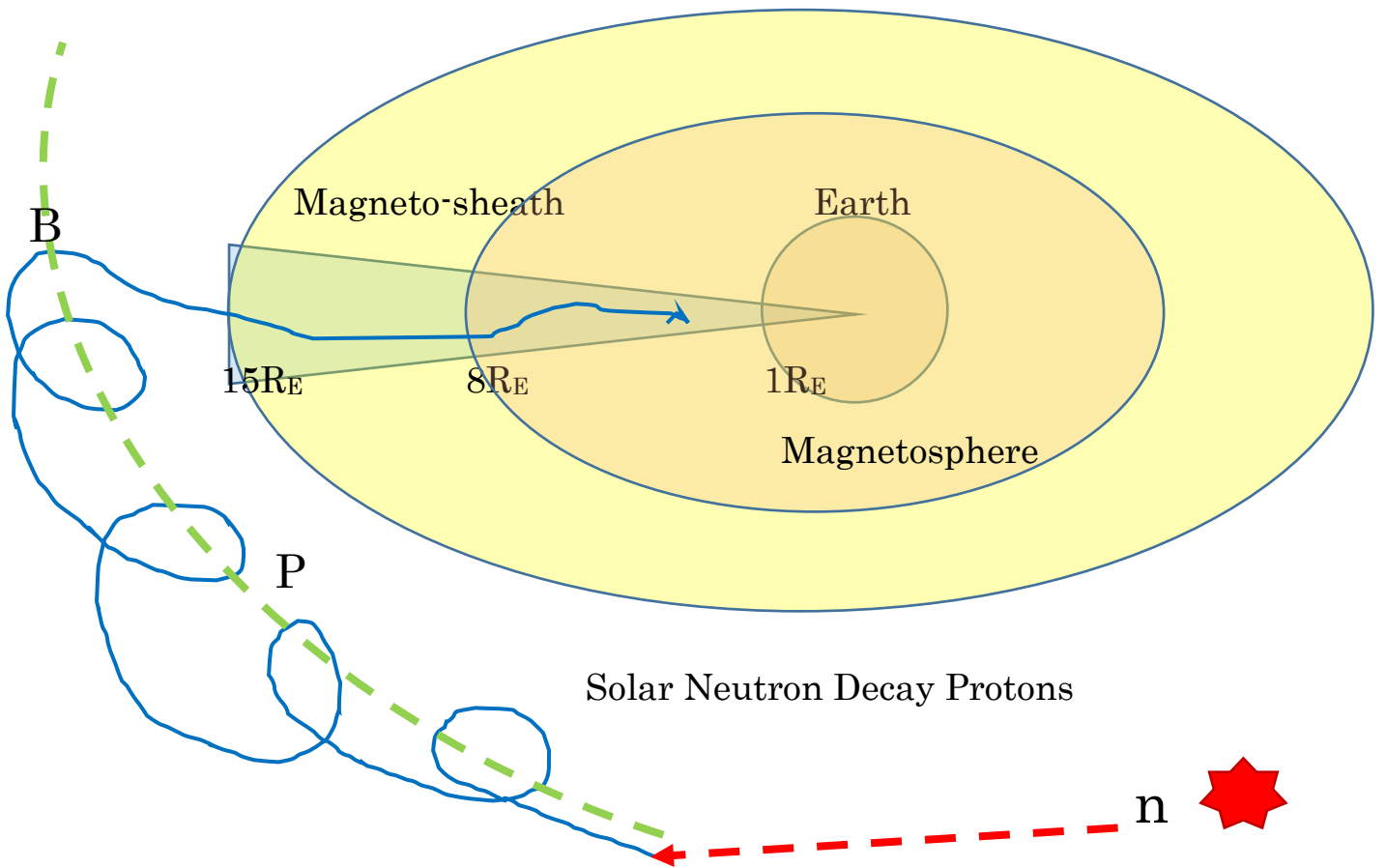
一方 Oulu の中性子の観測結果から、大気 top で太陽中性子崩壊陽子(SNDP)の数は $(3.8 \pm 0.7) \times 10^5 \text{protons/m}^2$ と推定される。この値には中性子モニターの陽子に対する受信効率 0.3 がまだ含まれていない。(阪大核物理センターの中性子 beam 実験の結果、200MeV に対するニュートロンモニターの検出効率は 0.3 であった(Shibata et al. NIM A463 (2001) 316)。)そこで受信効率でさらに補正すると $(1.3 \pm 0.2) \times 10^6 \text{protons/m}^2$ が大気 top に飛来した陽子(SNDP)であると言える。この観測値と次の予想値を比較することになる。

SNDP の予想値は、Chacaltaya の中性子の観測が 200MeV 以上で、 2.5×10^5 個/ m^2 であり、これに中性子が 0.067AU 走行する間に崩壊する確率 0.033 を掛けると求められる。その flux の予想値は 8.25×10^3 個/ m^2 と推定される。この値に 500 倍の増幅率を掛けると、結果として 4.1×10^6 個/ m^2 が予想値である。観測値(1.3×10^6 個/ m^2)と比較すると、予想値(推定値)の方が約 3 倍観測値よりも多い。しかし上記のようなかなり荒い計算を考慮すれば factor 3 で会っているというのは、まずまずと言えるのではないだろうか。

4. 結論

Finland Oulu で観測された 5.15σ の excess は Mexico で同時刻に観測された信号増加と同じように、太陽中性子が崩壊して作った陽子 (SNDP) によると考えられる。





Phase space and Coordinate on the surface of the magnetosphere at $8R_E$

(別紙様式 4-2)

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・大学院理学研究科

＜ 研究目的 ＞

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。これは極域低～中高度を複数機の衛星が編隊飛行で周回する計画であり、オーロラ・大気光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宇宙空間プラズマ波動現象の解明に取り組む。一方、NICTを中心に静止軌道衛星に宇宙環境計測機器を搭載する将来計画が検討されており、これに紫外イメージャーを搭載してプラズマバブルなどの電離圏擾乱を監視する可能性を議論している。本研究は、これらの将来衛星に搭載し、オーロラや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。とくに、我が国では欧米と比較して紫外波長領域によるオーロラ・大気光観測の経験が乏しい。今後の研究発展のためには、最新技術と知見に基づく衛星搭載用の紫外カメラと可視高感度・高速カメラの技術向上が不可欠である。

＜ 研究方法 ＞

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500x500km程度(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、当初可視カメラ視野周辺の広域を撮像する計画だったが、これまでの検討から、紫外カメラにも可視カメラ同様に比較的狭い視野を高速・高空間分解する性能を要求することとなった。昨年度までのISEE共同利用経費(一般・国際)やISAS/JAXA、NICTの競争的資金をもとに、紫外カメラの光学設計、CCDセンサ試験パッケージならびに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、試験の準備が整いつつある。本研究では、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。一方、可視カメラについては、センサ候補の検討が行われているものの、試験品の調達および光学実験は進んでいない。今後、光学系検討、ならびに可視センサ試験品を用いた動作試験を行う必要がある。これらの可視カメラと紫外カメラの開発課題に対して、本研究経費を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、開発にかかる費用は外部資金を活用する。

＜ 成果と今後の予定 ＞

2022年3月に、北米ポーカーフラットよりLAMPロケットが打ち上げられた。これには2台のオーロラカメラ(670nmと845nm)が搭載されており、飛行中継続して脈動オーロラの連続観測に成功した。この成果は本年度国内外の学会で報告されており、現在論文を執筆中である。また、飛行実証されたオーロラカメラの機器設計は、今後の飛行体への搭載オーロラカメラの開発に反映される。

紫外カメラの試験品開発について、前年度までに外部経費を用いて開発した紫外カメラの真空チャンバ、紫外光用対物レンズ、および紫外用CCD検出器を用いてカメラが組み上げられた。しかしながら、検出器電気回路系を組み上げる際に想定外の不具合が発生し、作業が遅延しているのが現状である。代替の紫外用CCD検出器を調達できたこと、電気回路配線を再度実装したことにより、真空紫外光試験を今後実施する。当該CCD検出器は可視光にも感度を持つため、まず可視光を用いた結像試験を行った後に真空紫外光(130-200nm)の分光試験をISAS/JAXAの既存の紫外分光器を用いて翌年度以降に実施する。一方、可視カメラについては、本年度外部資金により背面照射型の宇宙利用実績を持つ科学CMOS(sCMOS, Caleste社ELFIS)の試験パッケージ(検出器および読み出しエレキパッケージ)を調達した。今後この試験パッケージを用いて可視分光感度特性やノイズ特性を計測する計画である。

さらに、上記紫外カメラと可視カメラの試験品については、今後放射線試験を行うため東北大・北大などの関係者と基礎的な検討を開始した。

< 成果発表 >

・査読論文

Oyama, S-I., H. Vanhamaki, L. Cai, A. Aikio, M. Rietveld, Y. Ogawa, T. Raita, M. Kellinsalmi, K. Kauristie, B. Kozelov, A. Shinbori, K. Shiokawa, T. T. Tsuda, T. Sakanoi (2022), Thermospheric wind response to a sudden ionospheric variation in the trough: event at a pseudo-breakup during geomagnetically quiet conditions. *Earth Planets Space*, Vol. 74,154,doi: 10.1186/s40623-022-01710-6.

Fukizawa M., T. Sakanoi, Y. Tanaka, Y. Ogawa K. Hosokawa, B. Gustavsson, K. Kauristie, A. Kozlovsky, T. Raita, U. Brandstrom, T. Sergienko (2022), Reconstruction of precipitating electrons and three-dimensional structure of a pulsating auroral patch from monochromatic auroral images obtained from multiple observation points, *Ann. Geophys.*, vol 40, 4, pp. 475 - 484. doi: 10.5194/angeo-40-475-2022

Fukizawa, M., T. Sakanoi, Y. Miyoshi, Y. Kazama, Y. Katoh, Y. Kasahara, S. Matsuda, A. Kumamoto, F. Tsuchiya, A. Matsuoka, S. Kurita, S. Nakamura, M. Shoji, M. Teramoto, S. Imajo, I. Shinohara, S.-Y. Wang, S. W.-Y. Tam, T.-F. Chang, B.-J. Wang, C.-W. Jun (2022), Statistical Study of Approaching Strong Diffusion of Low-Energy Electrons by Chorus and ECH Waves Based on In Situ Observations, *J. Geophys. Space Res. Space Phys.*, 127, 3. doi: 10.1029/2022JA030269.

・著書

坂野井健, 諸岡倫子, 「あけぼの」で観測されたオーロラ加速機構, *プラズマ・核融合学会誌*, 第98巻第11号, p 460, 2022年11月

・学会・シンポジウム発表(国際学会7件、国内学会5件の計12件)

Sakanoi, T., K. Asamura, M. Lessard, A. Halford, Y. Miyoshi, et al., Observation of pulsating auroras with a multi-spectral auroral camera AIC2 on the LAMP rocket, AGU Fall meeting 2022, Hybrid (McCormick Place Convention Center, Chicago and online), USA, 12-16 December 2022.

Miyoshi, Y. K. Asamura, K. Hosokawa, T. Mitani, T. Namekawa, S. Saito, K. Takahashi, T. Sakanoi, et al., Wide energy electron precipitation during pulsating aurora: LAMP sounding rocket experiment and computer simulation, AGU Fall meeting 2022, Hybrid (McCormick Place Convention Center, Chicago and online), USA, 12-16 December 2022.

Mandyam, M., et al., Spatial and Temporal Scales of Pulsating Aurora during the Loss Through Auroral Microburst Pulsations (LAMP) Rocket Mission, AGU Fall meeting 2022, Hybrid (McCormick Place Convention Center, Chicago and online), USA, 12-16 December 2022.

Lessard, M., et al., Overview of the “Loss through Auroral Microburst Pulsations” (LAMP) Sounding Rocket Mission, AGU Fall meeting 2022, Hybrid (McCormick Place Convention Center, Chicago and online), USA, 12-16 December 2022.

Namekawa, T., et al., LAMP-HEP Observation of Microburst Precipitation associated with Pulsating Aurora, AGU Fall meeting 2022, Hybrid (McCormick Place Convention Center, Chicago and online), USA, 12-16 December 2022.

Halford, A., et al., The Loss through Auroral Microburst Pulsations (LAMP) rocket mission: Multiplatform, multipoint measurements to study microbursts and pulsating aurora, AGU Fall meeting 2022, Hybrid (McCormick Place Convention Center, Chicago and online), USA, 12-16 December 2022.

Sakanoi, T., M. Kawamura, K. Asamura, Y. Miyoshi, K. Hosokawa, A. Halford, M. Lessard, Initial result of pulsating aurora observation with a multi-spectral auroral camera AIC2 on the LAMP rocket, JpGU Meeting 2022, Hybrid (Makuhari Messe - online), Chiba, Japan, 22-27 May 2022.

浅村和史, 三好由純, 細川敬祐, 滑川拓, 三谷烈史, 坂野井健, 他, The LAMP sounding rocket mission; in-situ observations of microburst electron precipitations associated with pulsating aurorae, SGEPS第152回総会・講演会, 相模原市立産業会館, 相模原, Nov. 3-7, 2022.

坂野井健, 浅村和史, 三好由純, 他, LAMPロケット搭載多波長オーロラカメラAIC2による脈動オーロラの観測, SGEPS第152回総会・講演会, 相模原市立産業会館, 相模原, Nov. 3-7, 2022.

能勢正仁, 他, Field-aligned currents associated with pulsating auroral patches: Observation with Magneto-Impedance Magnetometer on board LAMP, SGEPS第152回総会・講演会, 相模原市立産業会館, 相模原, Nov. 3-7, 2022.

滑川拓, 他, 観測パッケージPARM-HEPによる脈動オーロラに伴うマイクロバースト現象の観測, SGEPS第152回総会・講演会, 相模原市立産業会館, 相模原, Nov. 3-7, 2022.

平原 聖文, 斎藤 義文, 小嶋 浩嗣, 浅村和史, 坂野井 健, 三好由純, 北村 成寿, 山内 正敏, Next Space Exploration Mission for the Space-Earth Coupling System Research: FACTORS, 日本地球惑星科学連合2022年大会, ハイブリッド開催(幕張メッセ-オンライン), 千葉, May 22-27, 2022.

(別紙様式 4-2)

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所

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．

2022年度は，2021年度に実施したシビア現象のうち，主に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し，VLF/LF帯送信電波受信ネットワークにより観測された下部電離層擾乱について，台風に伴って大気圏で発生した，大気重力波 (AGW) の観点から VLF/LF 帯送信電波の大地-電離層導波管伝搬の数値解析について FDTD 手法を用いてモデリングを実施したので下記に報告する．

2. 研究方法：

2019年に発生した台風15号(8月31日～9月10日)と19号(10月3日～10月14日)について，VLF/LF帯送信電波の受信電界強度の時間的変動(下部電離圏擾乱)から，台風によるAGWs発生の可能性が示唆される．そこで，台風による下部電離層擾乱の空間依存性について2次元有限差分時間領域(FDTD)法を用いてモデル化した．

3. 研究結果：

図1に示されるように，台風から発生した大気重力波 (AGW) に関連すると考えられる VLF/LF 帯送信電波の受信電界振幅について，ウェーブレットスペクトル強度を計算したところ，特に60-80分周期の強度の増加が観測された．また，このスペクトル強度と，台風を構成する雷雲の雲頂高度を示す輝度温度と雷活動の相関が観測されたことから，台風内の上昇気流による雷雲の成長とAGWとの関連性が示唆される．

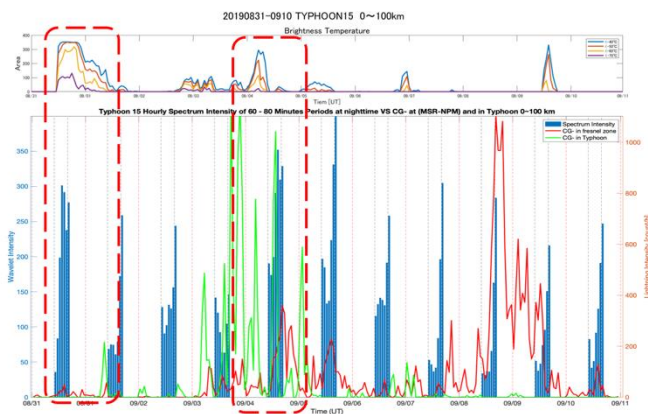


図1：台風15号における夜間のウェーブレットスペクトラム強度(周期60-80分)と輝度温度、雷活動との関連性(MSR-NPM送受信点パス)。

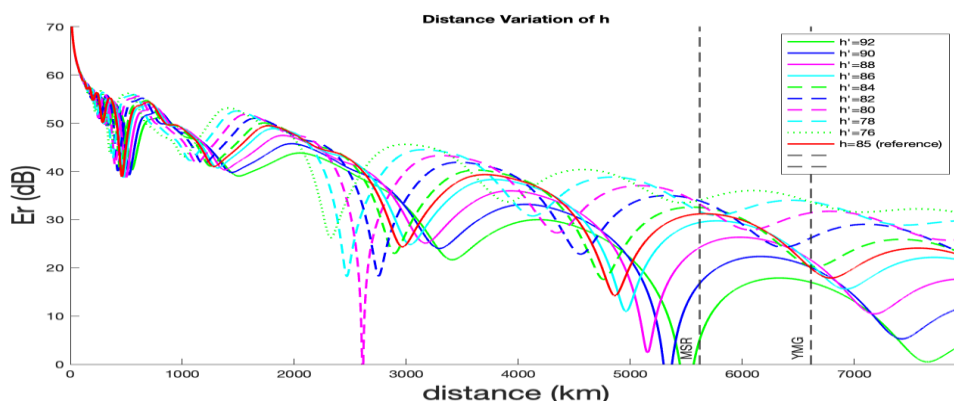


図 2 : 2次元FDTDモデルによるNPM送信電波局からの受信電界振幅の距離依存性 (夜間電離層の基準高度を85kmとし、台風による電離層擾乱高度を78km~92kmの範囲で変化)

次に、VLF/LF帯送信電波の受信電界強度の変動をもたらす電離層擾乱の高度変化を計算するために、2次元FDTD法を用いてVLF帯送信電波の伝搬モデルを作成した。本研究では、簡単化のためAGWは台風の中心から発生し同心円状に伝搬すると仮定するとともに、下部電離層高度は70kmから92kmを変化させつつも、送受信点間にて一定の電離層高度を使用した。図2に数値計算結果の一例として、様々な擾乱高度に対するNPM送信局からのVLF帯受信電界振幅の距離依存性を示す。図より、YMGとMSRの2つの受信点について、夜間電離層の基準高度(台風による擾乱なし)を85kmとした場合、AGWによる電離層高度の変動により、VLF帯電界振幅が顕著に増減する可能性があることが分かった。

今後、本モデルによって得られた振幅変化の擾乱高度依存性とVLF観測結果(VLF帯電界振幅)を比較することで、対流圏起源のAGWの下部離層への結合に関わる定量的調査をさらに進める予定である。

成果発表：

- [1] A. D. Setiawan, Y. Hobara and S. Hirai, Modeling Lower Ionospheric Perturbations During Typhoons 15 and 19 Using 2D FDTD Method, AT-AP-RASC 2022, Gran Canaria, Spain, 1st June
- [2] K. Misu, M. Watanabe, H. Kikuchi and Y. Hobara, Lower Ionospheric Fluctuations and Atmospheric Electric Field Immediately around Earthquake, URSI-JRSM2022, Tokyo, 1st Sep. 2022
- [3] H. Kikuchi, E. Yoshikawa, Y. Nakamura, T. Morimoto, T. Ushio and Y. Hobara, Observations of Precipitation Cores with X-band Dual Polarized Phased Array Weather Radar and LF Band Lightning Location System, URSI-JRSM2022, Tokyo, 2nd Sep.2022
- [4] D. Mondal, Y. Hobara, H. Kikuchi and J. Lapierre, Thunderstorms and Total Lightning Characteristics Causing Heavy Precipitation in Japan: A Case Study, URSI-JRSM2022, Tokyo, 2nd Sep.2022