

#### 4. 一般共同研究 目次詳細

(所属・職名は2021年3月現在)

(注2) : 新型コロナウイルスの影響で中止

研究代表者 Principal Investigator	所属機関 Affiliation	所属部局 Department	職名 Position	研究課題名 Project Title	頁 Page	備考 Remarks
湯口 貴史	山形大学	理学部	准教授	石英中のチタン・アルミニウム濃度の定量分析に基づく石英の結晶化プロセスの解明	80	
Siswanto Eko	海洋研究開発機構	Earth Surface System Research Center	Researcher	瀬戸内海における生物光学的要素の時空間変動	84	
小島 正宜	名古屋大学	名古屋大学	名誉教授	IPSTモグラフィ解析法の改良	86	
後藤 直成	滋賀県立大学	環境科学部	准教授	気候変動観測衛星(GCOM-C)を利用した琵琶湖におけるクロロフィルa濃度の推定	88	
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・低周波電場波動の校正データ提供による内部磁気圏研究の促進: その2	90	
廣川 淳	北海道大学	地球環境科学研究院	准教授	炭素数2のクリーギー中間体と有機酸・水蒸気との相対反応性の研究	92	
赤田 尚史	弘前大学	被ばく医療総合研究所	教授	山形蔵王で観測される樹氷中宇宙線生成核種濃度	94	
柴崎 清登	太陽物理学研究所	研究部	所長	太陽活動現象における磁気モーメントの役割: 太陽極域増光の解明に向けて	95	
松本 淳	早稲田大学	人間科学学術院	教授	フィルタ捕集法と組み合わせた粒子状有機硝酸全量測定を試み	97	
深沢 圭一郎	京都大学	学術情報メディアセンター	准教授	ポスト京に向けた宇宙プラズマ流体シミュレーションの最適化手法の研究	99	
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	100	
高橋 浩	産業技術総合研究所	活断層・火山研究部門	主任研究員	水試料の放射性炭素濃度測定のための手法改良	102	
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で観測された大気微量成分高度分布の経年変化	104	
宗像 一起	信州大学	理学部	特任教授	高エネルギー銀河宇宙線の太陽圏モジュレーション	106	
渡邊 恭子	防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工)	地球海洋学科	准教授	白色光フレアにおける多波長放射スペクトルとその特徴	107	
村木 綏	名古屋大学	宇宙地球環境研究所	名誉教授	太陽フレアに伴うイオン加速についての研究	109	
阿部 学	海洋研究開発機構	北極環境変動総合研究センター	技術副主任	気候モデルにおけるユーラシア北部の降水量に対する北極海氷減少の影響メカニズム	111	

研究代表者 Principal Investigator	所属機関 Affiliation	所属部局 Department	職名 Position	研究課題名 Project Title	頁 Page	備考 Remarks
鷺見 治一	九州大学	宇宙天気科学研究・教育センター	学術研究員	太陽圏の時間変動構造の研究	113	
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	北西インドNidarオフィオライト層火成岩類のNd-Sr同位体研究	114	
河野 光彦	関西学院大学	理工学部	研究員	持続的地球環境のための高校生のできる課題	116	
町田 忍	名古屋大学	宇宙地球環境研究所	名誉教授	オーロラ等価電流回路解析とデータ同化手法を用いたAE指数の予測	118	
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	120	
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	122	
大矢 浩代	千葉大学	大学院工学研究院	助教	LF/VLF帯標準電波を用いた火山噴火後のD領域電離圏変動	124	
近藤 文義	海上保安大学校	基礎教育講座	准教授	波飛沫計を用いた渦相関法による海塩粒子放出量の直接評価のための海上試験観測	126	
中澤 文男	情報・システム研究機構 国立極地研究所	気水圏研究グループ	助教	東南極ドームふじ観測拠点周辺で採取された雪氷ピットのHTO分析	128	
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	130	
吉岡 和夫	東京大学	大学院新領域創成科学研究科	講師	ひさき衛星を用いた地球磁気圏プラズマに関する研究	132	
Suzuki Shin	愛知大学	OTHER	Associate Professor	小スケール大気重力波に伴う温度・風速変動の観測的評価	134	
寺本 万里子	九州工業大学	大学院工学研究院	助教	あらせ衛星を用いた地磁気脈動の研究	135	
馬場 賢治	酪農学園大学	農食環境学群	准教授	冬季石狩平野の筋状対流雲下の大気場変動について	137	
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/HFC類の経年変化の解析	139	
門叶 冬樹	山形大学	理学部	教授	低バックグラウンドベータ線計数装置によるトリチウムの測定	141	
吉崎 徳人	気象庁気象衛星センター	データ処理部解析課	課長	大気放射モデルを用いた「ひまわり」シミュレーション画像の作成と応用	143	
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に伴い中緯度SuperDARNで観測されるsea/ground backscatter 振動現象とFLR現象の関係	145	
天野 孝伸	東京大学	理学系研究科	准教授	コヒーレントなホイッスラー波動の励起および減衰過程	147	
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」衛星によるリングカレント領域低エネルギーイオンの加熱現象の解析	148	
山本 一清	名古屋大学	大学院生命農学研究科	教授	ドローンを利用した森林生態系のリモートセンシング	149	

研究代表者 Principal Investigator	所属機関 Affiliation	所属部局 Department	職名 Position	研究課題名 Project Title	頁 Page	備考 Remarks
加藤 雄人	東北大学	大学院理学研究科	教授	グローバルモデルと素過程シミュレーションによる地球内部磁気圏での波動粒子相互作用の研究	151	
笠原 慧	東京大学	大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻	准教授	ERG衛星搭載中間エネルギー電子・イオン観測器のデータ解析	153	
笠原 慧	東京大学	大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻	准教授	超小型探査機搭載イオン質量分析器の較正システム開発	155	
三澤 浩昭	東北大学	大学大学院理学研究科	准教授	木星放射線帯長期変動要因の観測研究	157	
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	地磁気嵐とその原因となる太陽・太陽風擾乱に関する統計的研究	158	
小元 久仁夫	元日本大学	文理学部・大学院理工学研究科	元教授	ビーチロック試料の正確な膠結年代決定方法	160	
土屋 史紀	東北大学	大学院理学研究科 惑星プラズマ・大気研究センター	助教	VLF/LF帯標準電波を用いた中・低緯度下部電離圏擾乱の観測	162	
中山 智喜	長崎大学	環境科学部	准教授	エアロゾル・雲相互作用の理解を目指したエアロゾル吸湿特性の観測研究	163	
中野 佑樹	神戸大学	大学院理学研究科	特命助教	Super-Kamiokandeを用いた太陽フレア由来のニュートリノ探索	164	
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可視・紫外撮像光学系の設計と開発	166	
松岡 彩子	京都大学	理学研究科 附属地磁気世界資料解析センター	教授	あらせ軌道上磁場データの評価と特性向上の検討	168	
久保 勇樹	情報通信研究機構	宇宙環境研究室	研究マネージャー	IPSデータを利用した太陽風予測シミュレーション	169	
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	172	
永田 伸一	京都大学	大学院理学研究科附属天文台	助教	AR12673におけるMHD不安定性発達の研究	173	
野澤 恵	茨城大学	理学部	准教授	はやぶさ2の突入カプセルのプラズマ化による電波放射の観測	176	
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	177	
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	179	
北 和之	茨城大学	理工学研究科	教授	上空におけるバイオエアロゾルの観測と雲過程への寄与推定	180	
津田 卓雄	電気通信大学	大学院情報理工学研究科	助教	トロムソ Na ライダーのレイリー散乱データを用いた成層圏大気温度の計算に関する基礎検討	182	
村田 文絵	高知大学	自然科学系理学部門	講師	インド亜大陸北東部におけるプレモンスーン降水をもたらす総観場の解明	183	
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	185	

研究代表者 Principal Investigator	所属機関 Affiliation	所属部局 Department	職名 Position	研究課題名 Project Title	頁 Page	備考 Remarks
花土 弘	情報通信研究機構	電磁波研究所 リモートセンシング研究室	研究マネージャー	地上デジタル放送波を用いた水蒸気量観測	187	
齊藤 昭則	京都大学	大学院理学研究科	准教授	中性大気風によるスプラディックE層の生成過程の解明	188	
内藤 裕一	名古屋大学	博物館	研究員	GC-精密キャピラリー分取装置を用いた有機化合物の新たな年代測定法の開発	190	(注2)
山田広幸	琉球大学	理学部物質地球科学科地学系	准教授	高解像数値モデルを用いた台風飛行の安全性に関する検討	191	
篠塚 賢一	福岡工業大学	情報システム工学科	研究員	屋久島の山岳渓流水中の窒素同位体比を用いた硝酸イオンの起源推定	193	



## 石英中のチタン・アルミニウム濃度の定量分析に基づく石英の結晶化プロセスの解明

### Quantitative analysis of titanium and aluminum concentrations in quartz giving crystallization process of quartz

湯口貴史 山形大学 理学部  
山寄勇人 山形大学大学院 理工学研究科  
渡邊みのり 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

珪長質の深成岩体において、その岩体内部での岩相が異なっても石英は共通して産出する。例えば、平成 30 年度の共同研究で対象とした岩手県の遠野複合深成岩体では 3 岩相（主岩相，中心部相，周辺部相）に共通して石英が観察される。また平成 31 年度（令和元年度）の共同研究で対象とした富山県の黒部川花崗岩体では 2 岩相（優白質岩，優黒質岩）および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する。このため、石英から温度条件などの結晶化の際の情報を取得し、結晶化プロセスを解明することは、深成岩体全体の形成プロセスの把握へと発展可能である。

既存研究において石英の結晶化プロセス推定は、カソードルミネッセンス（CL）像およびチタン（Ti）濃度を組み合わせる方法が提案されている（例えば、[Drivenes et al., 2016](#)）。CL 像は、結晶構造の乱れや結晶中の微量な含有成分（不純物）を反映するため、結晶成長の様式を推定可能である。石英中の Ti 濃度は石英の結晶化温度の推定に利用できる（[Wark and Watson, 2006](#)）。しかしながら、石英に含有される Ti 濃度はごく微量で、電子プローブマイクロアナライザ（EPMA）分析での一般的な分析条件では定量が困難である。そこで平成 28 年度から平成 31 年度（令和元年度）までの共同研究では、名古屋大学・宇宙地球環境研究所（ISEE）の EPMA を用いて、遠野複合深成岩体や岐阜県の土岐花崗岩体の石英を対象とし Ti 濃度の高精度定量分析法の開発を実施した。これまでの研究を通じ、EPMA 分析に基づき石英中のチタン濃度を高精度で定量する分析手法を構築した（土岐花崗岩体における成果は *Journal of Asian Earth Sciences* にて令和 2 年度に公表）。

平成 31 年度（令和元年度）の共同研究で生じた課題として、黒部川花崗岩体および大崩山花崗岩体の石英では、カソードルミネッセンス（CL）像の輝度に対して、Ti 濃度が明瞭な相関を示さない可能性を有することが明らかとなった。これは平成 30 年度までに対象とした遠野岩体や土岐花崗岩体の石英とは異なる特徴である。

そこで、令和 2 年度の共同研究では、ゾーニングを有する石英を対象とし、Ti 濃度の定量だけでなく、アルミニウム（Al）濃度の定量分析を実施した。石英中の Al 成分の定量には新たな測定法の開発が必要となる。これは CL 輝度と微量含有元素（チタン・アルミニウム）との関係を把握するだけでなく、石英が結晶化するマグマ溜り中の物質移動特性の理解へと繋がり、石英の結晶化プロセスの解明を高度化させることが可能となる。本研究では、黒部川花崗岩体、大崩山花崗岩体、および遠野複合深成岩体の石英を試料として用いた。

#### 2. 試料と研究方法（使用した共同利用装置・施設）

石英の CL 像取得は山形大学の SEM-CL（JEOL IT100A+Gatan mini CL）を用い、石英中の Ti 濃度定量は名古屋大学 ISEE の EPMA（JCXA-733）を用いた。Ti 濃度定量の分析条件は、4 つの分光結晶（PET）を Ti の検出に割り当て、加速電圧 15 kV，照射電流 60 nA，ビーム径 20  $\mu\text{m}$ ，1 回の測定時間を 200 s（ピーク：100 s，バックグラウンド：50 s ずつ）とし、同一地点で 8 回（計 1600 s）カウントした値を積算することにより 1 点の定量値を得る。また、石英へのダメージのモニタリングのために、1 つの TAP を Si のカウントに割り当てた。Al 濃度定量の分析条件は、1 つの分光結晶（TAP）を Al の検出に割り当て、加速電圧や測定時間などの分析条件は Ti 濃度定量の分析条件を踏襲した。この手法により、Ti 濃度の検出限界は 16 ppm，Al 濃度の検出限界は 17 ppm，それぞれの分析誤差は約 10%の精度で定量値を取得することが可能となる。このような小さ

な誤差を伴う定量値の導出は、石英結晶の内部構造の Ti 濃度と Al 濃度の高精度な比較を可能にする。

### 3. 研究結果・考察

まず黒部川花崗岩体の石英に対する定量分析結果について報告する。分析点は優黒質岩と優白質岩の境界を有する薄片試料を用い、優白質岩では Ti 濃度 40 点、Al 濃度 12 点を選定し、優黒質岩では Ti 濃度 25 点を選定した。Al 濃度の分析に際しては、Ti 濃度と対を為すように分析点を設定し、石英の同一領域の Al と Ti 濃度の関係の評価を行った。

優白質岩の Ti 濃度においては 40 点中 12 点が検出限界濃度以上の値を持ち、その濃度は  $17 \pm 13 \sim 75 \pm 13$  ppm の幅を持つ。これを仮に  $\text{TiO}_2$  の活動度を 0.5 として Wark and Watson (2006) の地質温度計を用いて計算を行うと  $17 \pm 13$  ppm の値は結晶化温度  $632 \pm 53^\circ\text{C}$  となり、 $75 \pm 13$  ppm の値は結晶化温度  $798 \pm 25^\circ\text{C}$  を示す。優黒質岩の Ti 濃度においては 25 点中 11 点が検出限界濃度以上の値を持ち、その濃度は  $20 \pm 12 \sim 109 \pm 13$  ppm の幅を持つ。Wark and Watson (2006) の地質温度計 ( $\text{TiO}_2$  活動度を 0.5 と仮定) を用いて計算を行うと  $20 \pm 12$  ppm の値は結晶化温度  $648 \pm 43^\circ\text{C}$  となり、 $109 \pm 13$  ppm の値は結晶化温度  $850 \pm 23^\circ\text{C}$  を示す。優白質岩と優黒質岩の石英の結晶化温度の幅に大きな相違が認められないデータが得られた。一方、優白質岩の Al 濃度は 12 点の全ての分析点で検出限界濃度以上の値が得られ、Al 濃度は  $118 \pm 15 \sim 189 \pm 14$  ppm の分布を有する。図 1 は Ti 濃度と Al 濃度の対を作るように同一領域の分析を行った石英粒子の CL 像を示す。CL 像中に Ti 濃度と Al 濃度の定量分析の結果を記述した。12 地点において、その 7 地点で Ti 濃度が検出限界以下となってしまった。このため、Al 濃度、Ti 濃度と CL 像の関係の明確な議論は困難であった。これを可能にするためには、同一領域の Ti 濃度と Al 濃度データの拡充が必要となる。

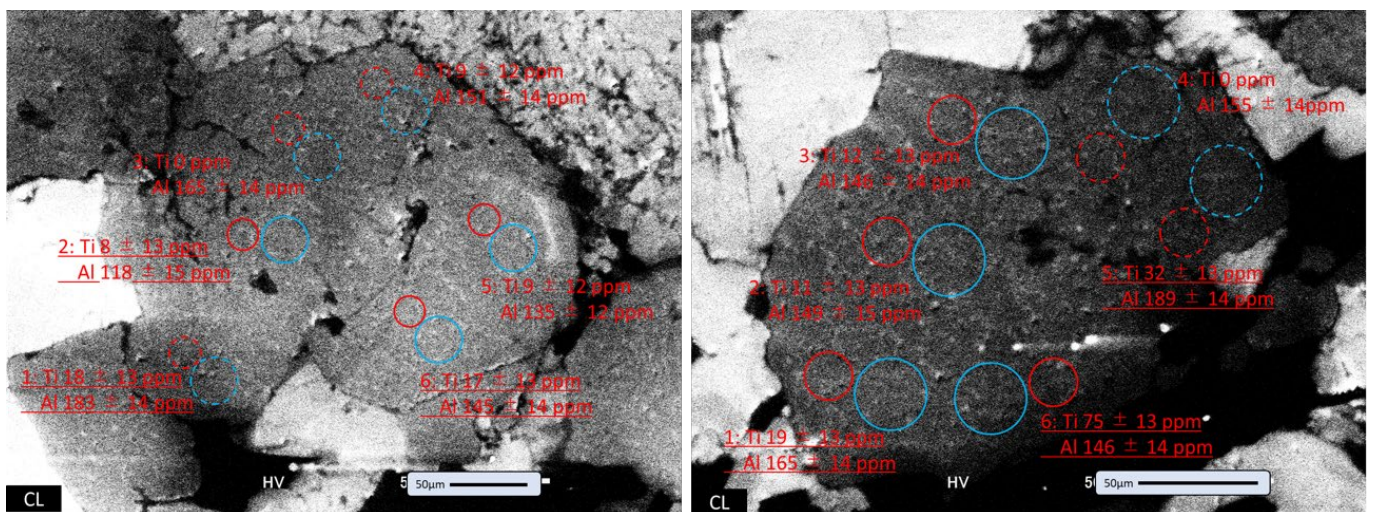


図 1 黒部川花崗岩体の優白質岩の石英 (試料番号 007-4a No.1 と No. 5) の CL 像と微量含有元素 (Ti 濃度・Al 濃度)

大崩山花崗岩体においては 31 点の Ti 濃度の定量分析を行った。そのうち 23 点が検出限界濃度以上の値を持ち、その濃度は  $25 \pm 13 \sim 177 \pm 12$  ppm の幅を持つ。これを  $\text{TiO}_2$  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  $25 \pm 13$  ppm の値は結晶化温度  $604 \pm 69^\circ\text{C}$  となり、 $177 \pm 12$  ppm の値は結晶化温度  $821 \pm 23^\circ\text{C}$  を示す。一方、Al 濃度は 10 点の全ての分析点で検出限界濃度以上の値が得られ、Al 濃度は  $182 \pm 14 \sim 616 \pm 13$  ppm の分布を有する。図 2 は Ti 濃度と Al 濃度の対を作るように同一領域の分析を行った石英粒子の CL 像を示す。CL 像中に Ti 濃度と Al 濃度の定量分析の結果を記述した。この結果、Ti 濃度と CL 像の輝度には正の相関が見て取れる (高輝度において高 Ti 濃度を有する)。それに対して、Al 濃度と CL 像の輝度には明確な関係は認められない。CL 像の輝度と微量含有元素 (Ti 濃度・Al 濃度) の定量的な評価、および Ti 濃度と Al 濃度の相関関係の把握には至らなかった。これを可能にするためには、同一領域の Ti 濃度と Al 濃度の対となるデータの拡充が今後の課題となる。



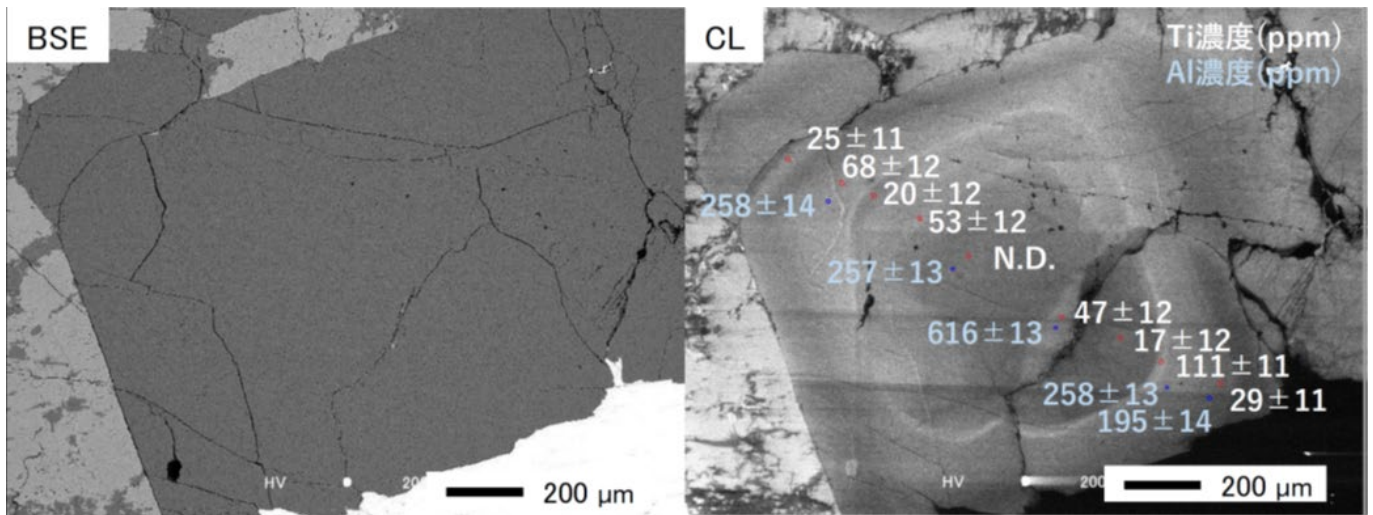


図2 大崩山花崗岩体の石英（試料番号 BG No. 1）の BSE 像，CL 像と微量含有元素（Ti 濃度・Al 濃度）

遠野複合深成岩体においては、石英 2 粒子に対して、8 点の Al 濃度の定量分析を実施した。そのうち 6 点が定量下限以下の値を有し、議論に供することができるのは 2 点のみである。このため、CL 像の輝度と微量含有元素（Ti 濃度・Al 濃度）の定量的な評価、および Ti 濃度と Al 濃度の相関関係の評価を行うことは難しい（図 3）。遠野複合深成岩体は前述の 2 岩体（黒部川花崗岩体と大崩山花崗岩）と比較して、石英中の Ti 濃度に富むことが分かっている。それに対して遠野複合深成岩体中の石英の Al 濃度は、他の 2 岩体と比較して乏しい。これはそれぞれの岩体の形成過程を検討する上で、石英生成時におけるマグマ中の Ti 含有量や Al 含有量を評価するために有用なデータとなると考える。

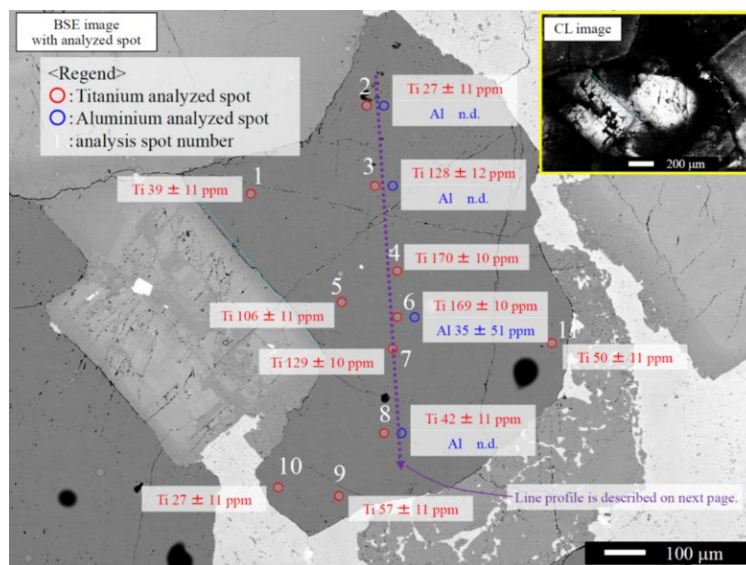


図2 遠野複合深成岩体の石英（試料番号 026 No. 1）の BSE 像，CL 像と微量含有元素（Ti 濃度・Al 濃度）

以上の点から、前年度までに構築した手法で、黒部川花崗岩体、大崩山花崗岩体および遠野複合深成岩体の石英において、Ti 濃度データの拡充と Al 濃度データの取得を行った。本共同研究において石英中の微量含有元素である Al 濃度を取得する手法を構築した。今後の課題として、CL 像の輝度と微量含有元素との関連を評価するために、データの拡充を続ける。

#### 4. 引用文献

Drivenes, K., Larsen, R., Muller, A., Sorensen, B. (2016) Crystallization and uplift path of late Variscan granites evidenced

by quartz chemistry and fluid inclusions: Example from the Land's End granites, SW England. *Lithos*, 252-253, 37-75.  
Wark, D., Watson, E. (2006) TitaniQ: a titanium-in-quartz geothermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152, 743-754.

5. 成果発表（当該年度に行った口頭発表）

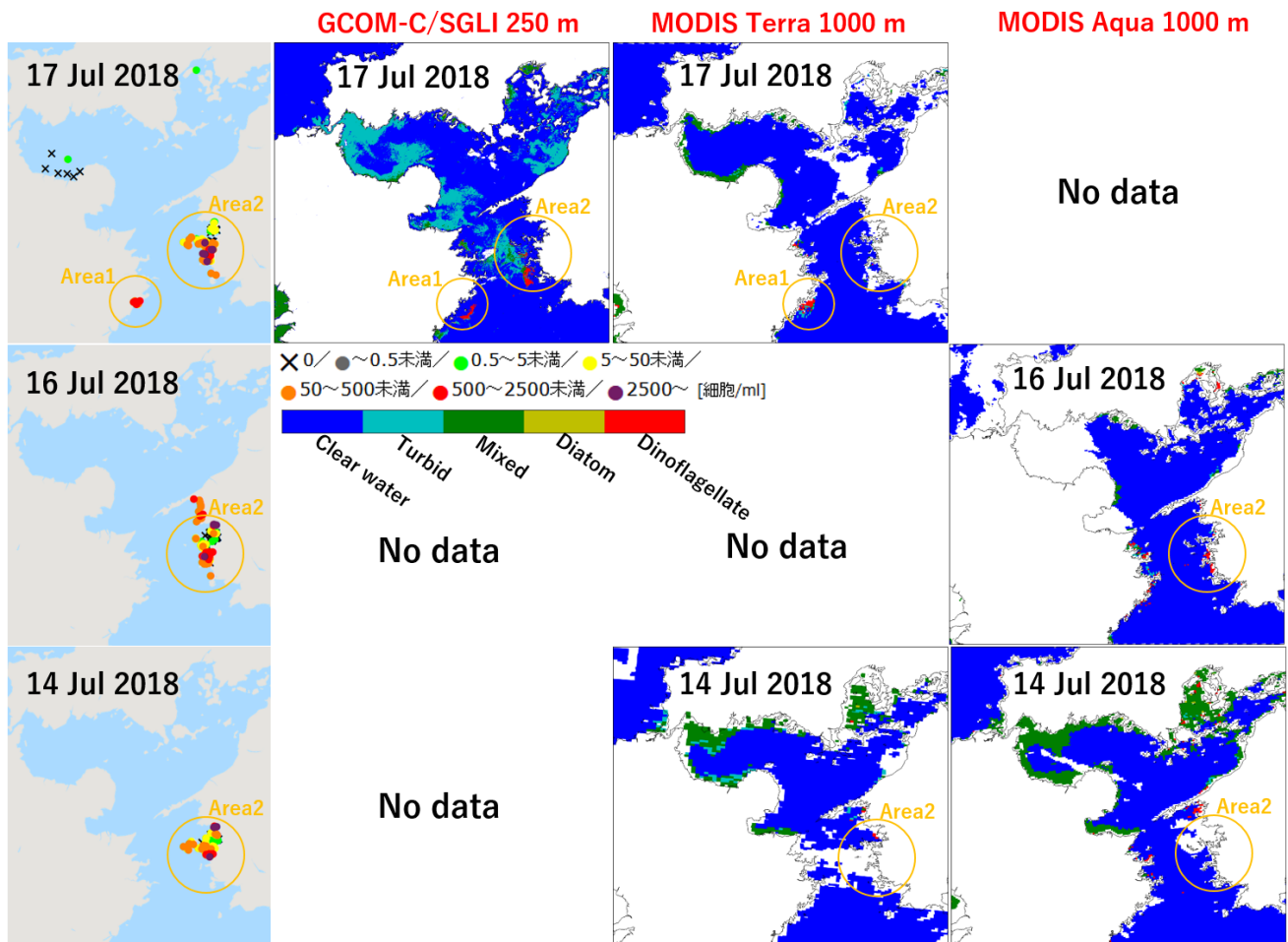
Yuguchi, T., Ogita, Y., Kato, T., Yokota, R., Nishiyama, T., 2020. Crystallization processes of quartz in a granitic magma: Cathodoluminescence zonation pattern controlled by temperature and titanium diffusivity. *Journal of Asian Earth Sciences*, 192, 104289.

瀬戸内海における生物光学的要素の時空間変動  
Spatiotemporal variability of bio-optical properties in the Seto-Inland Sea, Japan

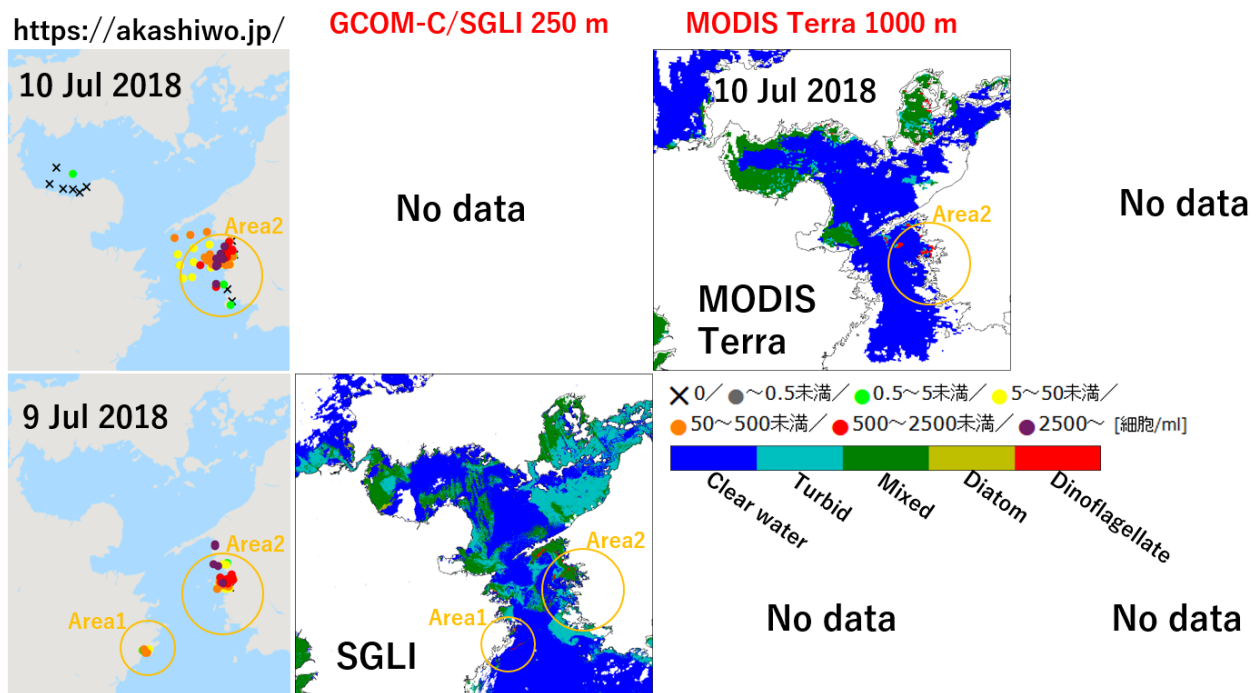
エコ シスワント、国立研究開発法人海洋研究開発機構  
地球表層システム研究センター

Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) and Second Generation Global Imager (SGLI) remote sensing reflectance (Rrs) data were used to verify a red tide algorithm proposed by Siswanto et al. (2013) to detect the bloom of dinoflagellate *Karenia mikimotoi* (hereafter *Karenia m.*) in the western part of Seto-Inland Sea. MODIS data were acquired from <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>, whereas SGLI data from [https://www.eorc.jaxa.jp/cgi-bin/jasmes/sgli\\_nrt/index.cgi?lang=ja](https://www.eorc.jaxa.jp/cgi-bin/jasmes/sgli_nrt/index.cgi?lang=ja).

The maps, from <https://akashiwo.jp/index.php>, showing the locations where the cell number of *Karenia m.* data were collected were used as a reference for verifying *Karenia m.* detection results. The red tide algorithm uses Rrs data to capture Rrs spectral shapes considered specifically belong to the water dominated by *Karenia m.* In this document, data from summer 2018 will be reported.



**Figure 1.** (First column) Maps showing locations where *Karenia m.* cell number data (colored circles) were collected on 14, 16, and 17 July 2018 (copied from <https://akashiwo.jp/index.php>). The second, third, and fourth columns are maps showing *Karenia m.* detection results respectively based on SGLI, MODIS Terra, and MODIS Aqua data on the same dates of cell number data collections. Here, SGLI and MODIS maps have 250 m and 1000 m spatial resolutions, respectively.



**Figure 2.** Same as Figure 2, but for dates 9 and 10 July 2018. There were no data from the MODIS Aqua on both dates.

With the SGLI data, the red tide algorithm produced small patches (red) of *Karenia m.* blooms on 17 July 2018 over the waters off the coastal areas 1 and 2 (Figure 1). But for now, those patches cannot be verified because no in situ data was collected there. The algorithm seemed to fail in detecting *Karenia m.* blooms in the coastal areas 1 and 2 which were confirmed by in situ observations on dates both 9 and 17 July 2018 (Figures 1 and 2). Such an underdetection by SGLI is unsurprising for the reasons that; the red tide algorithm was designed for MODIS data, SGLI and MODIS have different nominal multispectral bands, and no Rrs data conversion conducted to make SGLI Rrs compatible with MODIS Rrs. Rrs data conversion is a prerequisite, so in the near future SGLI Rrs will be converted to MODIS Rrs then the algorithm will be re-applied.

In general, both MODIS Aqua and MODIS Terra (Figures 1 and 2) produced patches of *Karenia m.* blooms in the coastal waters which were confirmed by in situ observations. But, the areas of detections seemed to underestimate the in situ bloom areas. This detection accuracy loss might be due to different data reprocessing. This Siswanto et al.'s (2013) algorithm was constructed based on the MODIS Aqua reprocessing R.2005 version, whereas the version used here is Reprocessing R.2018. Note that from R.2005 to R.2018, there are several MODIS data reprocessings that might slightly change the Rrs values and hence the spectral shapes. Therefore, algorithm redefinition must be carried out based on the current version of MODIS data.

#### References:

Siswanto, E., Ishizaka, J., Tripathy, S.C., Miyamura, K. (2013). Detection of harmful algal blooms of *Karenia mikimotoi* using MODIS measurements: A case study of Seto-Inland Sea, Japan. *Remote Sensing of Environment*, 129, 185-196. doi:10.1016/j.rse.2012.11.003

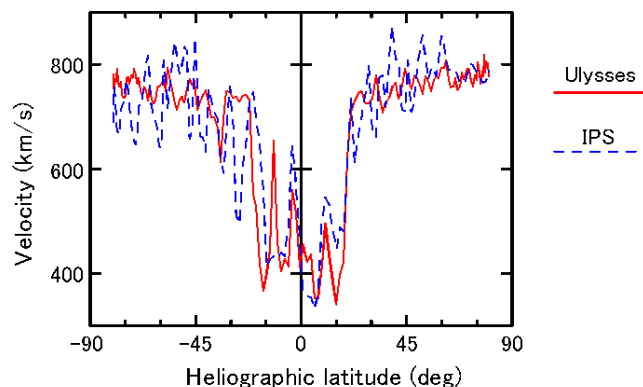
(別紙様式 4 - 2)

IPS トモグラフィ解析法の改良  
Study on the IPS tomographic analysis method

小島正宜 名古屋大学

共同研究課題 1 : IPS computer tomographic 解析法についての考察

ULYSSES の定常太陽風観測では得られなかったような 850 km/s を超す高速風がトモグラフィ解析により得られることがある。この極域からの高速太陽風の速度は実際に 800 km/s を超すのか、あるいは解析方法に問題があるのかを考察。



解析方法の検討

- ① 次式における視線積分範囲 ( $z_1, z_2$ ) を変える。

$$V_{sim} = \int_{z_1}^{z_2} w(z) V(z) \cos[\theta(z)] dz \quad (1)$$

- ② 視線積分で用いる荷重  $\alpha$  を調整する。

$$w(z) \propto \Delta N \propto NV^{-\alpha} \propto R^{-2}V^{-\alpha}$$

- ② 視線積分により IPS velocity を求める方法を式(1)の速度も直接荷重積分する方法から次式(2)による相互相関関数の積分に変える。

$$C(\tau)_{obs} = \int_0^{2AU} w(z) C_z(\tau, V_{sw}(z) \cos[\theta(z)]) dz \quad (2)$$

結論

○視線積分の範囲

- ・ 現行の 0-2AU は要検討。
- ・ 地球側の寄与を弱めるのは、効果ありそう。要検討。

○荷重のかけ方

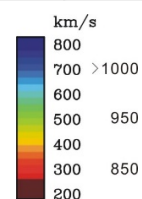
現行の  $\Delta N \propto V^{-0.5}$  は悪くはないが、 $V^{-0.2}$  の方が少しよさそう。要検討。

○視線積分は式(1) に依る方法よりは式(2)に依る方が 850 km/s 超の高速領域が現れるのが少ない。下図は 2019 年の SQ tomography の結果。850 km/s 以上の領域のみをカラー表示。

式(1)による結果



式(2)による結果



### 今後の検討

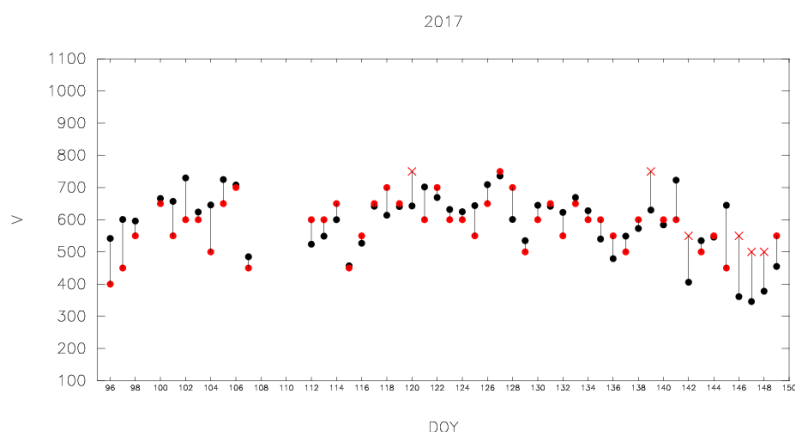
太陽活動全期間を通しての評価。

### 共同研究課題2 スペクトル解析による太陽風速度の導出についての検討

#### 結論

- ・ スペクトルの power law index は 1.5 とし、
- ・ spectrum fitting は  $V$  の 1 parameter のみで行うの良。

2017 年の解析結果を下図に示す。IPS source 3C48. 赤丸はスペクトル解析により得られた速度、黒丸は 3 点観測の相互相関解析で得られた速度



#### 課題

- ・ fitting を行う周波数範囲の選び方。
- ・ spectrum fitting を断念すべきデータの選び方。



気候変動観測衛星 (GCOM-C) を利用した琵琶湖における  
クロロフィル a 濃度の推定  
Estimation of chlorophyll-a concentration in Lake Biwa using  
the Global Change Observation Satellite (GCOM-C)

後藤直成、滋賀県立大学・環境科学部

【目的】

本研究では、2017年12月に打ち上げられた気候変動観測衛星 (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 濃度の分布を連続的に把握し、植物プランクトンの詳細な時空間分布変動を評価することを目的とした。

【方法】

2018年と2019年における研究結果から、GCOM-C/SGLIによって測定された490 nmと565 nmにおける正規化海水射出放射輝度  $nL_w$  は比較的精度が高く、現場における  $nL_w$  に近い値であることが明らかとなった。そのため本研究では、JASMES (JAXA) が提供している  $nL_w$  を補正することなく、以下に示すクロロフィル a 濃度の推定に用いた。

2018年12月から2019年11月の期間において、GCOM-C/SGLIによって測定された490 nmと565 nmにおける  $nL_w$  (level-2, 空間分解能 250 m) をJASMESから取得し、 $nL_w$  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 ( $R_{rs}(490, 565)$ ) を求めた。これらの  $R_{rs}$  と水中生物光学アルゴリズム (式: 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。

$$\text{Chl}_{\text{sate}(490/565)} = 10^{(C_0 + C_1 R + C_2 R^2 + C_3 R^3 + C_4 R^4)} \quad R = \log(R_{rs}(490/565)) \quad (\text{式})$$
$$C_0=0.126, C_1=-3.65, C_2=12.548, C_3=73.820, C_4=115.896$$

【結果と考察】

2019年の琵琶湖における特徴的なクロロフィル a 濃度分布を図1に示す。5月8日と11日のクロロフィル a 濃度分布は、東沿岸域で濃度が局所的に高く、また、その高濃度域が東岸に沿って北方へと帯状に延びている様子を詳細に示している。これは、代掻き (琵琶湖集水域では4月下旬から5月上旬に行われる) による陸域からの栄養塩供給に起因した植物プランクトン群集のブルームと湖流の影響によるものと考えられる。

琵琶湖北湖表層が貧栄養環境となる夏季 (9月9日) の分布図からは、琵琶湖のほぼ全域でクロロフィル a がおよそ  $1 \sim 3 \text{ mg m}^{-3}$  の低い濃度であることがわかる。混合層深度がより深くなる秋季 (11月8日) の分布図は、植物プランクトン秋季ブルームによる高濃度域が琵琶湖全域に広がっていることを明瞭に捉えている。特に、東沿岸域では  $20 \text{ mg m}^{-3}$  を越える高濃度域が南北に連続的に分布していることがわかる。

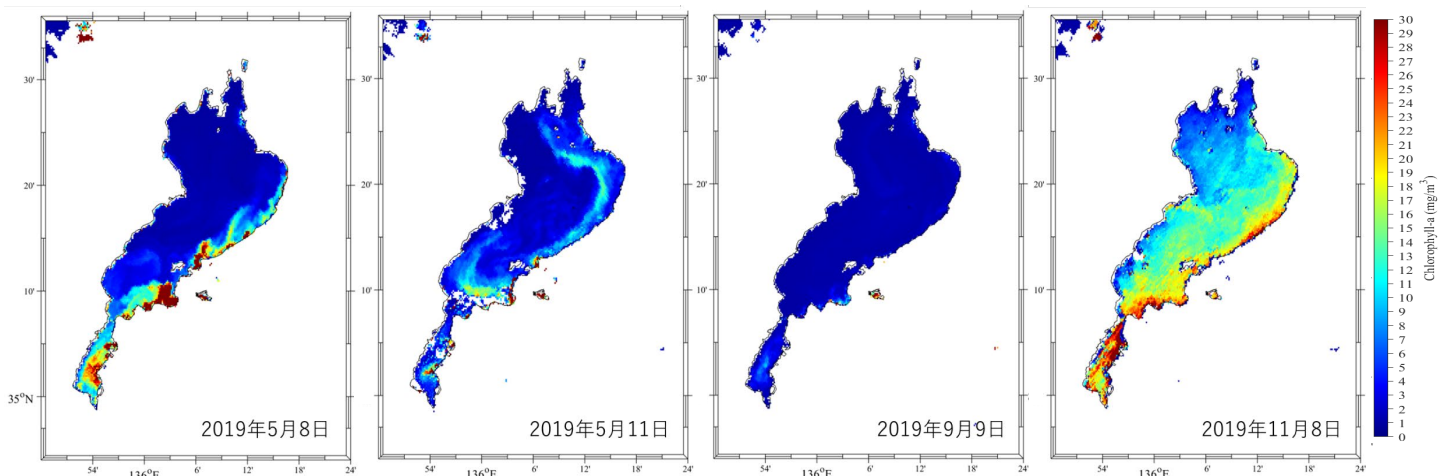


図 1. 2019 年の琵琶湖における特徴的なクロロフィル a 濃度分布

2020年における琵琶湖の特徴的なクロロフィルa濃度分布を図2に示す。冬季鉛直循環が大規模に起こる1月から3月、例年、琵琶湖のクロロフィルa濃度は低く、3月9日の分布図からは、一部の沿岸域を除き、およそ1~3 mg m<sup>-3</sup>で分布していることがわかる。その後、日射量と気温が上昇し、陸域からの栄養塩供給イベント（代掻き、降水）がある季節（5~6月）になると、琵琶湖では春季ブルームが発生する。6月8日の分布図はその様子を捉えており、全域で濃度が高くなっている。

成層期の琵琶湖北湖北部の表層では、環流（半時計回りの流れ）が発達する。10月21日の分布図は、環流によって沿岸から沖域に運ばれる植物プランクトン群集の様子を明確に捉えている。彦根沖付近で増殖した植物プランクトン群集が環流に乗って沖域へと移流し、円を描くように分布している。その後の成層構造が崩れはじめる11月になると、そのような分布はほぼ見られなくなり、琵琶湖でもっとも頻繁に観察される分布を示す日が多くなる。11月24日はその典型的なクロロフィルa濃度分布を示しており、東岸域で濃度が高く、それより沖域から西岸までは低い分布となっている。

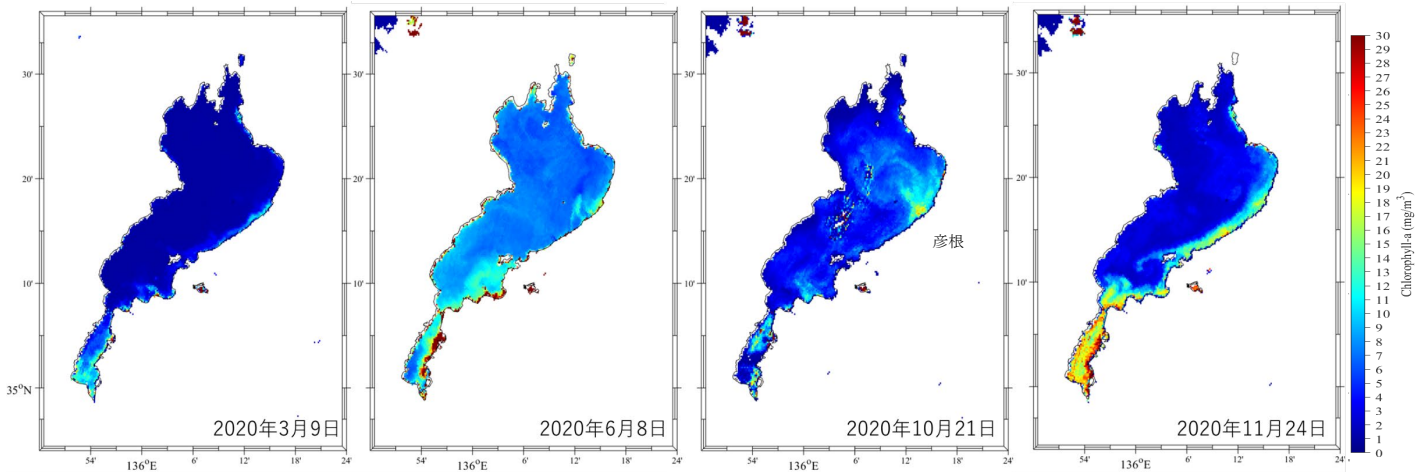


図 2. 2020 年の琵琶湖における特徴的なクロロフィル a 濃度分布

上述の2019年と2020年におけるGCOM-C/SGLI衛星データから推測したクロロフィルa濃度分布は、琵琶湖における植物プランクトン群集の分布動態を詳細に捉えていた。温暖化の影響が顕在化してきている琵琶湖において、この衛星リモートセンシング技術は植物プランクトンや物質輸送などに関する多くの知見をもたらし、今後の琵琶湖水環境の保全・再生に寄与するものと期待される。

【付記】本研究におけるクロロフィルa濃度のデータ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。

【成果発表】

Goto, N., M. Iwaki, S. Ban, K. Hayakawa (2020) Effects of disturbance events on primary production in the northern basin of Lake Biwa. JpGU-AGU Joint meeting, Online (2020年5月24日~28日) .

後藤直成 (2020) 気候変動衛星 (GCOM-C) を利用した琵琶湖におけるクロロフィル a 濃度の推定. 名古屋大学宇宙地球環境研究所 (ISEE) コミュニティミーティング, オンライン (2020年10月26日).

後藤直成 (2021) 温暖化が琵琶湖の表層生態系に及ぼす影響~植物プランクトンの一次生産~. 京都大学生態学研究センター・シリーズ公開講演会, オンライン (2021年2月20日).

(別紙様式 4 - 2)

Arase 衛星 DC 電場・低周波電場波動の校正データ提供による  
内部磁気圏研究の促進：その 2  
Enhancement of the Inner Magnetospheric Research  
by the provision of the calibrated data  
for Arase DC and low frequency E-field: 2

笠羽 康正、東北大学 惑星大気・プラズマ研究センター

## 1. 研究目的

Arase (ERG) 衛星搭載電場・プラズマ波動計測器 PWE は、2017 年 3 月からの本格観測開始以降、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。磁気圏構造変動とプラズマ輸送の情報を握る DC 電場・低周波電場波動の校正済データを確実に作成し、これらの励起・伝搬過程の定量評価と物理的役割の解明を促進する。

## 2. 研究方法・結果

### (1) データパイプライン設定および校正

スピン毎 (~8sec 分解能) の電場波形 (double probe, **EFD-E-SPIN**) および衛星ポテンシャル (single probe, **EFD-SPEC-1SEC**)、並びに 1-sec 分解能の電場スペクトル (1~>200Hz, **EFD-SPEC-1SEC**) に加え、それらの源泉情報でもある 256Hz および 64Hz 電場波形 (double probe, **E256Hz** および **E64Hz**) および 8Hz ポテンシャル波形 (single probe, **pot8Hz**) を含め、全 L2 データ公開へこぎつけた。これらで適用するデータ校正は「周辺 plasma の環境に依存しない、センサー電気性能の反映」までとしている。バーストデータである電場波形データ (512Hz)・ポテンシャル波形データ (128Hz) の Level-2 公開も需要があれば可能である。これらのデータに対する解説は、ERG Science Center Wiki (<https://ergsc.isee.nagoya-u.ac.jp/mw/index.php/ErgSat/Pwe/Efd>) で公開されている。

### (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・電場波形のスピン依存変動は、衛星 potential そのものが spin 時間内に変動し、これが衛星形状・磁場方向等の影響で排除不能であることがわかってきた。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。  
人工衛星による電場観測データの評価を、直交 2 系統のプローブシステムの結果の差と、電場・磁場直交性の 2 つの側面から行った。衛星電位のゆらぎが相対的に大きい時に電場観測の不整合が起こること、また、観測された電場が正しい方向からずれていることの指

標として、衛星本体電位の変動を差し引いたプローブ電位の波形の非対称性が使用可能であることが示された。(中川朋子, 笠羽康正, 笠原禎也, 三好由純 (2021). ジオスペース衛星「あらせ」による電場観測データの 評価に関する研究. 東北工業大学地域連携センター・研究支援センター紀要 EOS. 33, 1, 87-96)

また、観測磁場と観測電場の直交性が必ずしも保障されていないため、この直交性を用いた電場データの信頼性評価 (菅野翔太 武田祐汰、渥美拓馬. 東北工業大学卒業論文, 2020 年 3 月) および公開電場データの正誤基準判定 (青木光明、八田夏海、脇山雄太. 東北工業大学卒業論文, 2020 年 3 月) を進めた。

### (3) Arase 衛星による電場計測を用いた成果創出のサポート :

以下の論文に代表されるプラズマ圏・磁気圏電場観測の評価に貢献した。また、EMIC などの低周波波動や電離圏電場との対応などに対しても量的基礎と信頼性評価を与えた。

・高高度における Field-line 電場による電子加速の存在: 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>

・高緯度磁気圏における電子加速: Kazama et al. (2021). Extremely collimated electron beams in the high latitude magnetosphere observed by Arase. Geophys. Res. Lett. 48, e2020GL090522. <https://doi.org/10.1029/2020GL090522>

・SAR Arc の source 領域における電磁場・Plasma 観測: Inaba et al. (2020), Plasma and Field Observations in the Magnetospheric Source Region of a Stable Auroral Red (SAR) Arc by the Arase Satellite on 28 March 2017. J. Geophys. R. Space Phys. 125, e2020JA028068. <https://doi.org/10.1029/2020JA028068>

### (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 :

2018 年に打ち上げられた BepiColombo/Mio 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、以下の論文でまとめられた同観測装置による水星での電場計測につながっていく。

・BepiColombo/Mio PWI 総括初期論文: Kasaba et al. (2020) Plasma Wave Investigation (PWI) aboard Mio/BepiColombo Mercury Magnetospheric Orbiter (MMO) on the trip to the first measurement of electric fields, electromagnetic waves, and radio waves around Mercury. Space Sci. Rev. 216:65. <https://doi.org/10.1007/s11214-020-00692-9>

・BepiColombo/Mio PWI の電場アンテナ WPT・MEFISTO 初期論文: Karlsson et al. (2020). The MEFISTO and WPT electric field sensors of the Plasma Wave Investigation on the BepiColombo Mio spacecraft. Space Sci. Rev. 216:132. <https://doi.org/10.1007/s11214-020-00760-0>

炭素数2のクリーギー中間体と有機酸・水蒸気との相対反応性の研究  
Studies on relative reactivities of C2-Criegee intermediates  
toward organic acids and water vapor

廣川 淳、北海道大学・大学院地球環境科学研究所

【目的】

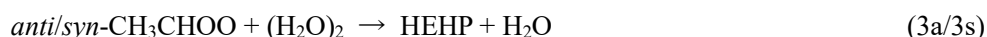
不飽和炭化水素のオゾン分解から生成するクリーギー中間体は、大気中で二酸化硫黄、水蒸気、有機酸などと反応して硫酸、ヒドロペルオキシド、オリゴマー体などを生成し、大気中の二次有機エアロゾル形成に影響を及ぼすが、その反応性に対する定量的な情報は少ない。本研究では、*anti* 体と *syn* 体の2種類の配座異性体を持つ C2 クリーギー中間体 CH<sub>3</sub>CHOO をトランス-2-ブテンのオゾン分解反応から生成し、これらの有機酸、水蒸気に対する相対的な反応性を測定することで、クリーギー中間体の構造と反応性の関係を明らかにすることを目的とした室内実験を行った。今年度は水二量体(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>の反応を考慮に入れたより精度の高い解析を行うとともに、トランス-2-ブテンから *anti* 体、*syn* 体それぞれが生成する収率を決定する試みも行った。

【研究方法】

実験は、内径 4 cm、長さ 80 cm のフローチューブを用いて行った。フローチューブには、トランス-2-ブテン C<sub>4</sub>H<sub>8</sub>、オゾン O<sub>3</sub>、ギ酸 HCOOH、水蒸気 H<sub>2</sub>O、およびシクロヘキサン C<sub>6</sub>H<sub>12</sub> を導入し、トランス-2-ブテンのオゾン分解反応とそこから生成するクリーギー中間体の反応を起こした。フローチューブを出た気体はオゾン計および化学イオン化質量分析計 CIMS に導入した。CIMS では SO<sub>2</sub>Cl<sup>-</sup>を試薬イオンとして用い、ギ酸、水蒸気、およびこれらとクリーギー中間体との反応生成物を測定した。トランス-2-ブテンおよびオゾンの初期濃度はそれぞれ約 1.8 × 10<sup>13</sup> molecules cm<sup>-3</sup> および 2.5 × 10<sup>13</sup> molecules cm<sup>-3</sup> とした。ギ酸は 0 – 9.2 × 10<sup>12</sup> molecules cm<sup>-3</sup>、水蒸気は 0 – 3.5 × 10<sup>17</sup> molecules cm<sup>-3</sup> の濃度範囲でそれぞれ変化させた。シクロヘキサンは、オゾン分解反応で生成する OH ラジカルを捕捉するために添加した。フローチューブの温度は 20.0 ± 0.5°C に保った。フローチューブ内の反応時間は 30 秒と見積もられる。

【研究結果と考察】

トランス-2-ブテンのオゾン分解で生成するクリーギー中間体 (*anti/syn*-CH<sub>3</sub>CHOO) は、フローチューブ内で以下のような反応を起こすことが予想される。



ここで、反応 3a/3s はクリーギー中間体と水二量体との反応である。また、反応 4a/4s は、クリーギー中間体の単分子的な異性化・分解反応に加え、ギ酸、水蒸気以外の化学種との二分子反応も含む。先行研究 [1] から、*syn* 体と H<sub>2</sub>O、(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub> の反応 2s、3s は無視できる

と考えられる。

今年度はまず、ギ酸無添加で、 $(\text{H}_2\text{O})_2$ の影響が無視できる低い水蒸気濃度の条件下において、反応 2a により生成する HEHP の CIMS 信号強度の水蒸気濃度に対する変化を測定し、そこから反応 2a の速度定数  $k_{2a}$  に対する、反応 4a の速度定数の相対値  $k_{4a}/k_{2a} = (8.4 \pm 0.2) \times 10^{15} \text{ molecules cm}^{-3}$  を決定した。次いで、水蒸気濃度を固定してギ酸濃度を変化させ、HEHP の信号強度変化を追跡した。同様の実験を様々な水蒸気濃度で行い、そこから  $k_{1a}/k_{2a} = (1.3 \pm 0.6) \times 10^4$  及び  $k_{3a}/k_{2a} = (1.3 \pm 1.3) \times 10^3$  を得た。また、*anti*-/*syn*- $\text{CH}_3\text{CHOO}$  とギ酸の反応で生成する HPEF の信号強度のギ酸濃度依存性から、*syn* 体に対する速度定数比、 $k_{4s}/k_{1s} = (1.3 \pm 0.2) \times 10^{12} \text{ molecules cm}^{-3}$  を求めた。最後に、乾燥条件と加湿条件（相対湿度約 67%）で生成する HPEF の量と、トランス-2-ブテンとの反応により消費されるオゾン濃度の測定値から、*anti* 体及び *syn* 体それぞれの生成収率を  $(23 \pm 5)\%$  及び  $(4.3 \pm 2.7)\%$  と求めた。

減圧条件下の直接的な反応速度測定から報告されている速度定数をもとに計算すると、 $k_{1a}/k_{2a} = (5 \pm 4) \times 10^4$  [2,3]、 $k_{3a}/k_{2a} = (3.4 \pm 0.7) \times 10^3$  [4] と見積もられ、いずれも本研究で導いた値よりも高かった。ただし、先行研究 [2] で報告されている  $k_{1a} = (5 \pm 3) \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ molecule}^{-1} \text{ s}^{-1}$  は非常に誤差が大きく、また 4 Torr という減圧下での実験結果であるため、本研究で得られた値の方が大気圧条件下で信頼性の高い結果であると考えられる。逆に  $k_{3a}/k_{2a}$  に関しては、本研究で得られた値の誤差が大きく、今後、より精度の高い値を求める必要がある。 $k_{4A}$  の実験値はこれまで報告されていないため、本研究は相対値ではあるが、 $k_{4A}$  に対する情報を初めて実験的に与えたことになる。

*syn* 体に対しては、Weltz ら [2] が 4 Torr, 298 K の実験から報告している  $k_{1s} = (2.5 \pm 0.3) \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ molecule}^{-1} \text{ s}^{-1}$  と Li ら [5] がごく最近報告している  $k_{4s} = 146 \pm 31 \text{ s}^{-1}$  とから、 $k_{4s}/k_{1s} = (5.8 \pm 1.4) \times 10^{11} \text{ molecules cm}^{-3}$  と見積もられ、本研究で得られた値の約半分となった。ただし Li らの報告値は、300 Torr, 298 K のものであり、 $k_{4s}$  が圧力とともに増加することが見いだされているので、圧力の違いが本研究と先行研究の差異の原因である可能性が高い。また、トランス-2-ブテンのオゾン分解から生成する *anti*-/*syn*- $\text{CH}_3\text{CHOO}$  の個別の収率に対して Newland ら [6] は、*anti* 体が 21%、*syn* 体が 7%と報告しており、本研究結果はそれに非常に近いものであった。

本研究で得られた相対的な反応速度定数と収率から、 $\text{CH}_3\text{CHOO}$  のうち、*anti*- $\text{CH}_3\text{CHOO}$  は相対湿度約 40%でほとんどすべてが水との反応により消費されるが、*syn*- $\text{CH}_3\text{CHOO}$  はギ酸や他のカルボン酸と反応しようと見積もられる。本研究で用いた手法は、イソプレンやモノテルペンなど、大気放出量の高い不飽和炭化水素の反応系にも応用することが可能であり、今後これらの反応に対して速度情報を得られることが期待される。

#### 【引用文献】

- [1] Khan et al., *Environ. Sci.:Processes Impacts*, **20**, 437 - 453, 2018.
- [2] Welz et al., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **53**, 4547 – 4550, 2014.
- [3] Taatjes et al., *Science*, **340**, 177 – 180, 2013.
- [4] Lin et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **18**, 28189 – 28197, 2016.
- [5] Li et al., *RSC Adv.*, **10**, 8518 – 8524, 2020.
- [6] Newland et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **17**, 4076 – 4088, 2015.



(別紙様式 4 - 2)

山形蔵王で観測される樹氷中宇宙線生成核種濃度  
Cosmogenic radionuclide in rime samples collected at Mt.Zao,  
Yamagata Prefecture

赤田尚史 弘前大学・被ばく医療総合研究所  
柳澤文孝 山形大学・学術研究院  
栗田直幸 名古屋大学・宇宙地球環境研究所  
(2行スペース)

【作成要領】

山形蔵王では、この着氷が大きく成長した「樹氷」が生成される。樹氷は、亜高山地帯に分布する常緑樹であるアオモリトドマツ（オオシラビソ：*Abies mariesii*）に雪と氷が付着してできる現象である。冬季に冷たく乾いたシベリアからの季節風が日本海上空で水分を吸い上げ雪雲となり、朝日連邦で大部分の水分が雪として除かれる。その後山形盆地上空を越え、蔵王連峰の斜面を登るように吹き上げ、断熱膨張により冷却し降雪をもたらす。残った水分は凝結し過冷却水滴となり、物体に衝突することで着氷を生成する。この樹氷は、蔵王の他に八甲田や八幡平など東北地方の一部の山岳地帯でしか見ることができない自然現象である。これまでも生成過程や化学分析結果等についていくつか報告されている。本研究では、大気高層からの寄与について検討するため、樹氷に含まれる宇宙線生成核種<sup>7</sup>Beおよび<sup>3</sup>H濃度の測定を行うと共に、共同利用装置（Picarro L2130-i）を用いて水の酸素安定同位体比分析を実施してきた。ここでは、蔵王の樹氷中<sup>7</sup>Be濃度の変動について検討した結果について報告する。

昨年報告した2016-2017年冬季のデータに加え、2017-2018年冬季および2018-2019年冬季に採取した試料の<sup>7</sup>Be濃度を図1に示す。最小値は2017年2月13日の0.5 Bq/L、最大値は2019年1月15日の43.1 Bq/Lであった。全期間においておおよそ5-10Bq/Lで推移しており、2018-2019年冬季に比較的高い濃度が観測された。最大値を示した2019年1月15日は空気塊がバイカル湖周辺から飛来しており、このときは高気圧により成層圏大気が対流圏に輸送されていた。このことから高い<sup>7</sup>Be濃度はこのような条件下の空気塊の飛来と山形蔵王での樹氷の形成が重なった際にみられると言える。

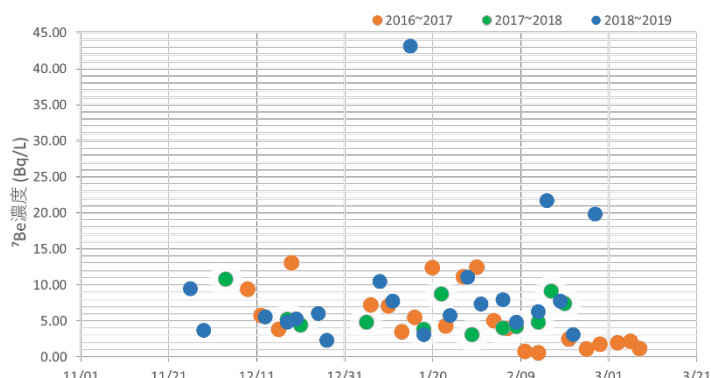


図1 樹氷中<sup>7</sup>Be濃度の時系列変動(3冬季)

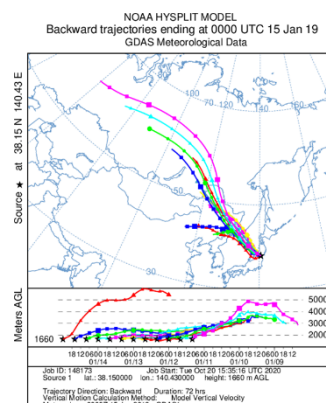


図2 <sup>7</sup>Be濃度最大値の日における後方流跡線

(別紙様式 4 - 2)

太陽活動現象における磁気モーメントの役割：太陽極域増光の解明に向けて  
Roles of magnetic moment in solar activity: Possible mechanism of microwave polar  
brightening

柴崎清登、太陽物理学研究所

荷電粒子が磁場中で運動するとローレンツ力のために周りの磁場と逆向きの磁気モーメントを生ずる。このため荷電粒子は磁力線に沿って磁場の弱い方向に力を受ける。しかし、プラズマを熱平衡状態にある多粒子系にとらえると、古典物理学では磁気モーメントは生じないとされている。磁気現象は量子力学的現象であり古典物理学では常磁性も反磁性も発生しないとされている。固体の磁性体の場合は量子力学を用いればよいが、プラズマの場合はそうはいかない。このため、プラズマを流体として扱う MHD 方程式には磁気モーメントは含まれず、マクスウェル方程式は真空中の方程式を用いている。物質の磁気的性質は磁気モーメントに含まれるが、プラズマが磁気モーメントを持たないということは、プラズマが磁場と相互作用しないことになって矛盾を生ずる。これを補うために、プラズマを完全導体（電導度無限大）と仮定して磁場がプラズマに凍結していっしょに運動するとしている。しかし、完全導体中では磁場は時間変化できず動けないはずである。また、磁場方向に磁気的な力が働かず、磁力線に沿ったプラズマの定常的運動および平衡状態は、重力とガス圧のみによって支配されることになっている。

プラズマが磁気モーメントを持つことを認めれば、その磁気モーメント（反磁性）のために磁場の弱い太陽大気の上空に向かう力を受け、その温度依存性のために高温プラズマは重力に打ち勝って流れ出す。流れなくても実質的に重力加速度が弱くなったようにふるまい、静水圧平衡のスケールハイトが長くなり、マイクロ波での周辺増光が増長される。太陽極域では磁場が揃って開いており、ほぼいつも太陽面の周辺に位置するので増光が理解できる。また、増光と太陽風速度とのよい相関（参考文献 1.）も理解できる。そのほか、軟 X 線や EUV で観測される温度に依存する上昇・下降流や、閉じた磁力線の頂上付近での圧力の増加が特別な機構を導入することなく説明できる。そのほかにも多くの現象を理解することができる。よって、本研究の一番重要な課題はなぜ古典物理学では磁気モーメントがなくなるとされているのかの理由を明らかにし、古典物理学においても反磁性が発生することを示すことである。

古典物理学では磁気モーメントが生じない理由として挙げられているのは主に次のふたつである。1) 「システムがある運動状態をとる確率は、 $\exp(-U/kT)$  に比例する。ここで  $U$  は運動エネルギー+ポテンシャルエネルギーであり、磁場によるローレンツ力は寄与し



ない。よって、熱平衡状態では磁場があってもなくても同じである。」フラインマンの教科書（参考文献 2.） 2) Bohr-van Leeuwen の定理：統計力学によると、磁場中の熱的プラズマは磁気モーメントを持たない。磁気モーメントは、空間座標と速度の外積  $\boldsymbol{\mu} = (q/2)\mathbf{r} \times \mathbf{v}$  であり、これは速度の一次関数なので位相空間全体で積分すると 0 となる（参考文献 3.）。これらが誤りである理由は以下のようなものである。1) に対して：運動エネルギーが同じでも、直線運動と円運動では運動状態は異なる。磁場中の荷電粒子はローレンツ力のために円運動となり、角運動量および磁気モーメントを持つ。ビリアル定理を適用すればその違いは明らかである。本研究において、ローレンツ力によるビリアルが磁気モーメントを与えることを示した（研究会発表 1、論文）。2) に対して： $\mathbf{r}$  と  $\mathbf{v}$  はひとつの粒子の物理量であり、運動方程式を介して結びついているため磁気モーメントはゼロにはならない。Bohr および van Leeuwen は、運動方程式を解かずに  $\langle \mathbf{v} \rangle = 0$  を示した。

$$\langle \mathbf{r} \times \mathbf{v} \rangle \neq \langle \mathbf{r} \rangle \times \langle \mathbf{v} \rangle$$

プラズマの持つ単位体積あたりの磁気モーメントは  $\mathbf{M} = -(\mathbf{P}/B) \mathbf{b}$  ( $\mathbf{P}$  はガス圧、 $B$  は磁場の絶対値、 $\mathbf{b}$  は磁場方向の単位ベクトル) である。プラズマは非線形の磁性体なので、通常の線形磁性体の電磁気学がそのまま利用できないため、磁気モーメントに働く力をマクスウェル方程式から独自に導出した（研究発表 2.）。磁気モーメントに働く力は、磁場方向にはケルビン力、直角方向には  $\mathbf{P}$  の勾配力であることが導かれた。副産物として、プラズマの  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  ドリフト運動が、磁気モーメントに起因する「隠れた電磁エネルギー流束」であることを示した。

引用文献：

- 1) Fujiki, K., Shibasaki, K., Yashiro, S., Tokumaru, M., Iwai, K., and Masuda, S.: 2019, *Solar Phys.* **294**, 30.
- 2) The Feynman Lecture on Physics II” §34-6 “Classical physics gives neither diamagnetism nor paramagnetism”
- 3) J. H. Van Vleck, *The Theory of Electric and Magnetic Susceptibilities* (Oxford at the Clarendon Press, 1932).

成果発表：

研究会発表 1. 柴崎清登、ビリアル定理から求めた熱的プラズマの磁気モーメント、日本天文学会、Zoom、2020年9月9日

研究会発表 2. 柴崎清登、磁化プラズマにおける電磁応力テンソルと運動量（Kelvin力と  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフト）、日本天文学会、Zoom、2021年3月19日

論文：Kiyoto Shibasaki, Magnetic moment of thermal plasma derived from virial theorem, (投稿予定)

(別紙様式 4 - 2)

フィルタ捕集法と組み合わせた粒子状有機硝酸全量測定を試み  
Trial on combination of the analyzer of total particulate  
organic nitrate with filter sampling method

松本 淳, 早稲田大学・人間科学学術院

【研究目的】対流圏における重要なエアロゾル生成過程の一つとして、揮発性有機化合物 VOC の大気ラジカルとの反応に伴う二次有機エアロゾル SOA の生成が注目されている<sup>1)</sup>。特に、半揮発性の中間生成物 SVOC の詳細把握が必要である。窒素酸化物 NO<sub>x</sub> と VOC の酸化反応(対流圏オゾン生成過程)にてオゾンと同時生成する有機硝酸類である ONs (RONO<sub>2</sub>) や PANs (RO<sub>2</sub>NO<sub>2</sub>) は、SOA 生成に重要な SVOC の一種となりうるため、そのガス-粒子分配に関する研究が不可欠である。VOC は膨大な種類が存在し、個別成分分析による網羅的な挙動把握は困難であるうえ、有機硝酸類の生成特性が解明された VOC も限られる。二次生成するガス状・粒子状の有機硝酸類も多様で、網羅は困難である。二次生成するガス状・粒子状の有機硝酸類を数え落としなく包括測定する全量測定は、エアロゾル (SOA) 評価に必要である。申請者はこれまでに、活性炭デニューダー (CD)、NO<sub>2</sub> への熱分解変換器 (TD)、キャビティ減衰位相シフト法 NO<sub>2</sub> 計 (CAPS-NO<sub>2</sub>)、を組合せた粒子状有機硝酸全量 PONs 測定装置 CD/TD/CAPS-PONs (PONs 計) を構築し、大気観測に基づく有機硝酸類のガス-粒子分配特性を検証し、粒子への分配が相対湿度に依存する可能性を示した<sup>2,3,4,5,6)</sup>。以上の成果に基づき、本手法を遠隔地での大気観測に活用することを企図して、次はフィルタ捕集する PONs 試料の定量を目指す。ただし、フィルタ捕集試料の再粒子化を想定すると、PONs 発生量を把握し補正する相対標準測定法が必要と考えられる。そこで本研究では、PONs 発生量の相対変動を簡便に把握する測定系を構築し、その基礎特性の把握を試みた。なお、新型コロナウイルス感染症に伴う活動制限等の影響を受けたため、可能な範囲で研究を実施した。

【研究の方法と結果・考察・まとめ】 実験では、反応容器にてオゾン・一酸化窒素・リモネンを混合して気相反応により生成する PONs を一定濃度含む試料を準備し、PONs 計と新規構築した相対標準測定系 RSM に導入した。RSM として、粒子フィルタ PF の通過/不通過を切替えつつ市販 NO<sub>x</sub> 計 (ThermoFisher 製 42iQTL) に試料を導入する測定系を構築し、PF 通過に伴う信号減少量に着目して、PONs 相対標準としての可能性を実験的に検証した。反応容器での一酸化窒素量の調整により試料の PONs 濃度を 0-6 ppbv の範囲で変えて測定したところ、PONs 計の測定値 ONs+PNs と RSM の測定値の間で強い正の相関関係が確認され (図)、RSM による PONs の相対変動把握は十分に可能であることが確認された。次に、ONs および PNs と RSM との間の回帰直線の傾きから PONs の内訳を見積もったところ、ONs:PNs = 1:5 程度であり、今回の試料は PNs が優勢であった。

これは、実験条件に起因して反応初期に NO の多くが NO<sub>2</sub> に変換され、PANs 生成に有利な状況となったためと推察された。最後に、ONs+PNs の回帰直線の傾き (0.87) が 1 に近いこと、特に 4 ppbv 以下の各点は直線  $y = x$  の直近にあることから、RSM は PONs の相対変動のみならず絶対値も妥当に定量できたことを確認した。以上のことから、RSM が PONs の相対標準測定法として有望であることがわかった。ただし、RSM による PONs 測定のベースラインは PF 通過時の NO<sub>x</sub> 計信号に依存するため、NO<sub>x</sub> 高濃度試料では不確実性が大きくなる点に留意が必要である。また、今後のフィルタ捕集法/再粒子化による PONs の定量にあたっては、HNO<sub>3</sub> などの NO<sub>x</sub> 計干渉成分の影響を考慮する必要がある。それでも、市販の NO<sub>x</sub> 計を用いた RSM による簡便な測定は、PONs 研究に新たな指標を提供する点で有意義と期待される。

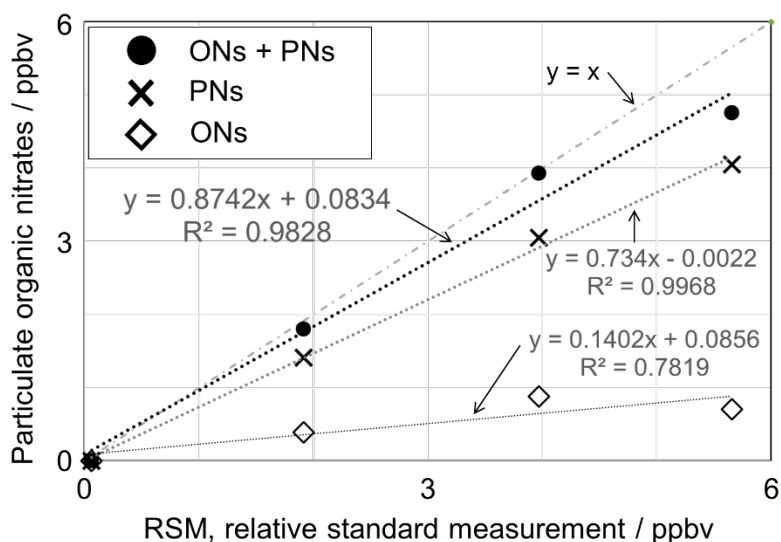


図 気相反応により生成した粒子状有機硝酸 PONs 試料に対する相対標準測定系 RSM の測定値と PONs 計の測定値の相関プロット。  
 ×: PANs 全量 PNs, ◇: RONO<sub>2</sub> 全量 ONs, ●: ONs と PNs の和。  
 それぞれについての回帰直線と傾き 1 の直線も併記する。

#### 【引用文献等】

- 1) A.E.Perring, et al.(2013): Chem. Rev., 113, 5848-5870.
- 2) 松本淳(2014): エアロゾル研究, 29(S1), 47-54.
- 3) 松本淳(2015): 第21回大気化学討論会, P-7.
- 4) 洪征翌、松本淳(2016): 第22回大気化学討論会, P-41.
- 5) 洪征翌、松本淳(2017): 第23回大気化学討論会, P-24.
- 6) 松本淳(2018): 大気環境学会誌, 53, 1-12.

【本研究に関する成果発表】 なし

(別紙様式 4 - 2)

ポスト京に向けた宇宙プラズマ流体シミュレーションの最適化手法の研究

Research of optimization method for fluid simulation of space plasma to Post-K computer

深沢圭一郎、京都大学・学術情報メディアセンター

現在、アメリカをはじめ中国、ヨーロッパにおいて、エクサフロップス級の計算が可能なスーパーコンピュータの開発が進められており、日本ではエクサフロップスに近い計算性能を持つ、「富岳」の開発が進められ、2021年3月に運用が開始されている。エクサフロップス級計算機では、MHD近似限界のグローバル磁気圏シミュレーションや、流体-粒子結合シミュレーションが実現可能と想定されている。この富岳は、ARMという新しいCPUアーキテクチャを採用し、CPUが48コア+4アシスタントコアというメニーコア構成となっている。また同時演算実行数に効くSIMD幅が512bitと広く、京と比べて大きな変更がある。そのため、既存のコードがこの新しいCPU (A64FX) をうまく利用できるのかは、本研究の開始時点 (2020年4月) では不明な状態であった。

一方、これまで京の重点課題とされてきた分野では、A64FXに向けたコード開発の取り組みが進んでいるが、いわゆるSTP分野は重点分野に含まれていない。そこで、主に惑星磁気圏をシミュレーションする宇宙プラズマ流体シミュレーションをA64FXに対して最適化する手法を研究し、富岳の利用が開始される際に備えることを目的とした。

本研究では、宇宙プラズマ流体シミュレーションとして、まず、MHDシミュレーションコードを対象に最適化手法を調査している。今回は、研究代表者の所属部署において富岳と同様のCPUであるA64FXを搭載した計算機システム (FX700) が2020年3月導入され、それを利用した性能評価を行った。京と大きく異なる結果として、キャッシュを効率的に利用する配列形式の性能が低く、京向けコードの大きな変更が必要と分かった。また、SIMD幅が広いということで、ベクトル化が重要になるが、キャッシュもうまく利用する必要があり、これまでのベクトル向け配列構造とキャッシュ利用向け配列構造をマージした配列構造が性能向上に寄与するということも明らかになった。さらに、A64FXはレジスタと呼ばれる記憶領域が、京に比べて減少しているために、計算ループをうまく分割することが性能向上に重要だということも分かった。富岳と同じCPUを持つ計算機システムが名古屋大学情報基盤センターに導入されているので、今後はこれらを利用した大並列計算の性能評価、最適化を進めていく。

・学会発表

深沢 圭一郎、三吉 郁夫、吉川 英作、"A64FX プロセッサ(FX700)における MHD コードの性能評価と最適化"、STE シミュレーション研究会・KDK シンポジウム 合同研究会、オンライン開催、2021年3月29-31日

・論文リスト

(査読無し) 深沢圭一郎、三吉郁夫、惑星磁気圏 MHD シミュレーションコードによる A64FX プロセッサ (FX700) の性能評価、情報処理学会研究報告, 2020-HPC-175(15), 1-9, 2020.

(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7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**：2019年度の実験では外部磁場3.6Tをかけたショットを行ったが、そのデータ解析とPICシミュレーションの結果を比較することで、実験の物理的解釈の議論を行った。その結果、(1)ターゲット由来のプラズマがBiermann battery効果による自己生成磁場で磁化したことがMS生成過程で重要な役割をはたしていること、(2)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で測定できたドリフト速度をもった窒素プラズマが、プラズマ中を伝播するMSのfoot領域と解釈できること、などがわかり、これらを論文[1]にまとめて投稿した(現在査読中)。

発表論文：

[1] "High-Power Laser Experiment Forming a Supercritical Collisionless Shock in a Magnetized Uniform Plasma at Rest", R. Yamazaki, S. Matsukiyo, T. Morita, S. J. Tanaka, T. Umeda 他48名, submitted.

学会発表：

[1] "Generation of Magnetized Collisionless Shock with High-Power lasers", R. Yamazaki, 43rd COSPAR Scientific Assembly (January 28 - February 4, 2021, online/Sydney), oral talk.

[2] 「大型レーザー激光XII号を用いた磁化プラズマ中を伝播する無衝突衝撃波の生成実験(4)：2019-2020年度の進捗状況」, 山崎 了, 田中 周太, 河村 有志郎, 正治 圭崇, 富谷 聡志 他44名, 日本物理学会 第76回年次大会 (2021年3月12日-15日, オンライン開催)

[3] 「大型レーザー激光XII号を用いた磁化プラズマ中を伝播する無衝突衝撃波の生成実験(5)：2019年度の実験結果と理論的解釈」, 田中 周太, 山崎 了, 河村 有志郎, 正治 圭崇, 富谷 聡志 他44名, 日本物理学会 第76回年次大会 (2021年3月12日-15日, オンライン開催)

(別紙様式 4 - 2)

水試料の放射性炭素濃度測定のための手法改良  
Method improvement of carbon extraction from water sample for radiocarbon measurement

高橋 浩、産業技術総合研究所・活断層・火山研究部門

### 研究目的

水試料の溶存無機炭素(DIC)の $^{14}\text{C}$ 濃度測定のための試料処理として、水試料に酸を添加することで発生した $\text{CO}_2$ を回収する既存の手法に名古屋大学宇宙地球環境研究所の実状にあった改良を実施し、処理の再現性やバックグラウンド、殺菌剤である塩化ベンザルコニウムを利用したときの影響についての検証を行う。

### 研究方法

2019年度と2020年度加速器質量分析装置等利用(共同利用)で実施した $^{14}\text{C}$ 測定の結果を利用して、手法の再現性やバックグラウンド、塩化ベンザルコニウムの添加の影響についての検討を行った。

### 考察

#### NaHCO<sub>3</sub> 溶液の希釈に伴う現代炭素の混入について

試薬の NaHCO<sub>3</sub> 溶液を検証用試料として使用するために、100~1000 倍程度の希釈を行う必要があるが、調製した溶液の DIC 濃度が低いと  $^{14}\text{C}$  濃度が高くなる。溶液の pH が高いため、大気  $\text{CO}_2$  の混入によるものと考えられ、 $^{14}\text{C}$  濃度の変化と調和的である。調整後の溶液の DIC 濃度が低いほど影響が顕著であるため、希釈に伴って、おおよそ一定量の炭素が混入すると考えられる。

段階希釈を行った溶液の 2 回の測定結果は、高濃度側の  $^{14}\text{C}$  濃度に違いが見られたが、1 と 2 mmol·L<sup>-1</sup> で  $^{14}\text{C}$  濃度が高く、3 と 4 mmol·L<sup>-1</sup> で低くなっている。 $^{14}\text{C}$  濃度が非常に低い NaHCO<sub>3</sub> 溶液を用いた場合であっても、希釈による現代炭素の混入の影響は、3 mmol·L<sup>-1</sup> よりも高い DIC 濃度の溶液を用いれば排除できると考えられる。

#### バックグラウンドについて

試薬の NaHCO<sub>3</sub> 溶液は、 $^{14}\text{C}$  を含まないバックグラウンド物質として使用できるか明確では無いが、改良手法により処理を行った NaHCO<sub>3</sub> 溶液の  $^{14}\text{C}$  濃度は、凍結乾燥処理よりも低い値を示しており、改良手法のバックグラウンドは十分に低いことがうかがえる。逆に、凍結乾燥処理を実施した NaHCO<sub>3</sub> 溶液の  $^{14}\text{C}$  濃度は、総じて高めであり、ばらつきも大きい。処理中の現代炭素の混入によるものと考えると、その程度が一定ではなく、処理ごとに不確定であることが示唆される。したがって、凍結乾燥処理は、NaHCO<sub>3</sub> 溶液の処理手法として適さないことがわかった。

別に行った実験によって、処理システムのバックグラウンドは  $0.1 \pm 1.9 \mu\text{gC}$  であることが推定され、仮に  $^{14}\text{C}$  を含まない 1 mgC の試料に現代炭素として混入したとしたら、0.01 pMC の  $^{14}\text{C}$  濃度上昇に相当し、誤差範囲の最大値を考慮した場合は 0.2 pMC となる。

#### 水試料の注入による現代炭素の混入について

大気中で試料を注入した場合 (Air) と、 $\text{CO}_2$  を除去したグローブボックス内で注入した場合 ( $\text{CO}_2$ -free) の両者の  $^{14}\text{C}$  濃度の測定結果は、中央値のみの比較を行った場合、Air がやや高い  $^{14}\text{C}$  濃度を示しており、 $\text{CO}_2$ -free のうち  $^{14}\text{C}$  濃度が低い分析値

との差が 0.28 pMC となる。これが試料注入時の現代炭素の混入の影響であると仮定すると、 $6.6 \pm 6.3 \mu\text{gC}$  の混入量となる。しかし、CO<sub>2</sub>-free の分析値にバラツキがあり、Air との分析値とも誤差範囲内で一致している。検証実験は試料水の pH や DIC 濃度、<sup>14</sup>C 濃度が、現代炭素の混入が起こりやすく、検出しやすい条件で実施していることから、試料注入を大気中で実施することによる現代炭素の混入は、無視できるか、非常に小さいと思われる。

#### 試料ガスのくみ出し（拡散とトラップ）のサイクルの数の影響

くみ出しのサイクル数が多くなるほど、CO<sub>2</sub> ガスの回収率は高くなった。この傾向は、試料量が多いほど顕著に見られた。しかし、くみ出し回数が異なり、CO<sub>2</sub> ガスの回収率が変化しても、<sup>14</sup>C 濃度の変化は見られない。これは、同位体分別が正しく補正されていることを示している。さらに、改良手法により処理を実施した場合の <sup>14</sup>C 濃度測定の実現性に問題がないと考えられる。

もし、試料の <sup>14</sup>C 濃度のみを分析対象としており、回収される炭素量が十分に確保できるのであれば、1 回のサイクルのみの CO<sub>2</sub> 回収で十分であると言える。一方、 $\delta^{13}\text{C}$  分析を目的として、高い CO<sub>2</sub> 収率が必要である場合では、4 回サイクルが推奨される。

#### 殺菌剤（塩化ベンザルコニウム）の影響

表層海水以外の試料は試薬を溶解させて作成した試料水であるため、生物活動による DIC 変化が生じない。そのため、塩化ベンザルコニウム (BAC) の添加の有無に関わらず、初期値と 1 ヶ月の保管後の測定値は一致するはずであり、測定結果もそれを裏付ける値を示し、両者は誤差範囲内で一致している。

表層海水では、BAC 添加試料で <sup>14</sup>C 濃度の変化は見られず、未添加試料においては、やや <sup>14</sup>C 濃度上昇が見られたものの、初期値と 1 ヶ月の保管後の測定値は誤差範囲内で一致している。表層海水を採取してから数年が経過しており、生物活動が停滞していたため、BAC の添加が無くても、生物活動による DIC の変化が起きなかったことが原意にだと考えられる。これらの結果から、BAC 添加が <sup>14</sup>C 分析に影響を与えないと判断できる。

#### **まとめ**

処理手法に関する検証を実施した結果、手法として用いることに問題が無いことが確認された。ここで示した成果と他のデータや解析結果をまとめ、Radiocarbon 誌に投稿し、査読中である。また、水試料の殺菌を目的として、BAC の添加を実施しても、<sup>14</sup>C 分析に影響を与えないことが示された。

#### **成果発表**

佐藤里名・高橋浩・半田宙子・南雅代「水試料の溶存無機炭素を抽出する新手法の開発および従来法との比較」2020年度日本地球化学会第67回オンライン年会

Takahashi, H. A., Minami, M., Handa, H. and Sato, R. A simple CO<sub>2</sub> extraction method for radiocarbon analyses of dissolved inorganic carbon in water samples without a carrier gas. submitted to Radiocarbon

Sato, R. (2021) Development of a new carbon extraction method for accurate radiocarbon analysis in water samples. Master's Thesis, Department of Earth & Environmental Sciences, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University.



(別紙様式 4 - 2)

## フーリエ変換型分光計で観測された大気微量成分高度分布の経年変化 Trend of the profile of the atmospheric trace species observed with Fourier transform spectrometer

村田 功、東北大学・大学院環境科学研究科

東北大学では国立環境研究所との共同研究として、フーリエ変換型分光計 (FTIR) を用いた赤外分光観測により 1998 年からはつくばにおいて大気中の様々な微量成分を観測している。また、名古屋大学宇宙地球環境研究所とともに国際的な観測ネットワーク NDACC/IRWG (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change / Infrared Working Group) に参加し協力して研究を進めている。本研究では、これまでの全量の解析に加え高度分布の経年変化についても解析を進めている。

我々の FTIR は分解能が  $0.0035\text{cm}^{-1}$  と非常に高いため、吸収線の圧力幅による広がりからインバージョン法を用いて高度分布を導出可能である。ただし、成分によって得られる高度情報は異なる。今年度はオゾンについて高度分布の精度を検証し、その上で高度毎の経年変化を調べた。解析には NDACC/IRWG で共通して用いられているプログラム <SFIT 4> を用いているが、独立した高度情報量の目安である DOFs (Degree of Freedoms) はオゾン場合 5 程度である。検証には高層気象台 (館野) のオゾンゾンデのデータを用いた。図 1 に 2019 年 10 月 2 日について比較した例を示す。オゾンゾンデの高度分解能を FTIR に合わせた赤実線と FTIR の結果 (青線) を比較するとおよそ 18-35 km の高度では 10% 以内で一致している。そこで、2019 年にオゾンゾンデとの同日観測のあった 15 日 (58 スペクトル) について 0-9.8 km, 9.8-18.3 km, 18.3-27.7 km の 3 層に分けて比較したところ、それぞれオゾンゾンデに対するパーシャルカラムの比が  $1.02 \pm 0.05$ ,  $1.11 \pm 0.19$ ,  $1.03 \pm 0.05$  となり、数% から 10% 程度で一致することが確かめられた。

次に、2014 - 2020 年について上記の 3 層に 27.7 km 以上を加えた 4 層及び全量の時系列に直線をフィットして経年変化を調べた。いずれも期間全体としては  $-0.4 \sim -2.8\%$  / 年の減少傾向を示した。この減少の要因は

今のところ不明であるが、気象庁のオゾン全量の経年変化を見ても、札幌、つくば、那覇とともに 2014 年以降はそれ以前より減少している傾向が見られ、今後解析を進める予定である。

HCl と HF のカラム全量の経年変化については昨年度も報告しているが、両者ともその主な発生源がフロン類であることからフロン規制の効果の指標となる。一方で成層圏での寿命が比較的に長いいため循環の加

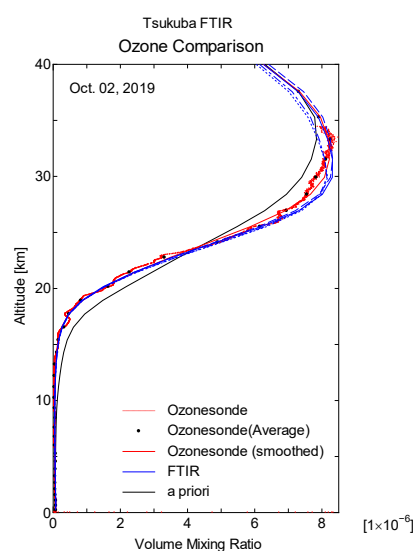


図 1. 導出されたオゾン高度分布のオゾンゾンデとの比較

速・減速によって増減する。今年度は陸別の結果とも比較した。図2にHClについて4年間の増加率を1年ずつずらしながら調べたトレンドのつくばと陸別の比較結果を示す。観測の抜けている期間などがあるものの、およそ同じ傾向を示すことが確かめられた。このトレンドの変化は基本的に成層圏の循環の変化で説明できるが、2015年付近での増加についてはCFC-11などの放出量の変化による可能性があり、来年度には環境研秋吉英治氏らによる化学気候モデル(CCM)によるCFC-11放出量変化のあるなしによる再現実験との比較を予定している。

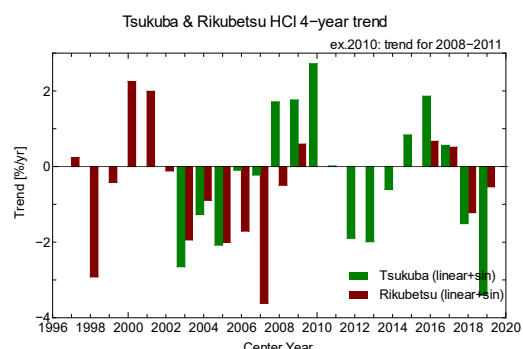


図2. つくばと陸別のHClトレンドの比較

このほか、今年度はHCHOについての共著論文がAMTに出版されたほか、HFC-23の解析手法についての論文がAMTのディスカッション論文に公開されている。

< 成果発表 >

Corinne Vigouroux, ..., Isamu Morino, Isao Murata, Tomoo Nagahama, ..., et al., TROPOMI-Sentinel-5 Precursor formaldehyde validation using an extensive network of ground-based Fourier-transform infrared stations, *Atmos. Meas. Tech.*, 13, 3751–3767, <https://doi.org/10.5194/amt-13-3751-2020>, 2020.

Takeda, M., Nakajima, H., Murata, I., Nagahama, T., Morino, I., Toon, G. C., Weiss, R. F., Mühle, J., Krummel, P. B., Fraser, P. J., and Wang, H.-J.: First ground-based FTIR observations of HFC-23 at Rikubetsu, Japan, and Syowa Station, Antarctica, *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/amt-2020-505>, 2021.

I. Murata, Y. Tomikawa, I. Morino, H. Nakajima, and H. Akiyoshi, Short-term variations of HCl and HF trends observed with FTIR at Tsukuba, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, Online, Jul. 12-16, 2020.

村田 功、富川喜弘、森野勇、中島英彰、秋吉英治、長浜智生、つくば、陸別のFTIRで観測されたHCl、HFの経年変化、2020年度ISEE共同利用報告会, online, 2020/10/26.

村田 功、中島 英彰、森野 勇、武田 真憲、つくばFTIRで観測されたオゾン高度分布の検証、第25回大気化学討論会, オンライン, 2020年11月.

I. Murata, Y. Tomikawa, I. Morino, H. Nakajima, H. Akiyoshi, and T. Nagahama, Short-term variations of HCl and HF trends observed with FTIR at Tsukuba and Rikubetsu, The 11th Symposium on Polar Science, online, Nov. 16 – Dec. 18, 2020.

村田 功、富川喜弘、森野勇、中島英彰、秋吉英治、長浜智生、つくば、陸別のFTIRで観測されたHCl、HFの経年変化、第3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, online, 2021/03/22-23.

村田 功、中島 英彰、森野 勇、武田 真憲、つくばFTIRで観測されたオゾン高度分布の検証と経年変化、第3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, online, 2021/03/22-23.

(別紙様式 4 - 2)

高エネルギー銀河宇宙線の太陽圏モジュレーション  
Heliospheric modulation of high-energy galactic cosmic rays

宗像 一起 信州大学・理学部

チベット空気シャワー実験で観測された、平均5 TV ( $5 \times 10^{12}$  V) の宇宙線強度に見られる銀河異方性の起源を探るためには、先ず宇宙線が太陽圏内を伝播中に被るモジュレーション効果を理解し、それを除くことが必要である。そのため、地球から打出された反粒子のモデル太陽圏磁場中での軌道を計算し、観測された異方性を最もよく再現する太陽圏外での銀河異方性を調べた。モデル太陽圏磁場には、Washimi等によるものとPogolerov等によるものの二通りを用いた。

Zhang等は、Pogolerov等によるモデル太陽圏磁場中で4 TVの単色宇宙線の軌道を計算し、異方性の太陽圏モジュレーションとチベット空気シャワー実験結果を最も良く再現する銀河異方性を報告している (Zhang+, ApJ, 2020)。しかしながら、ベストフィットのnormalized  $\chi^2$ は4.5 (自由度は約1000) とフィットネスは極めて悪い。そこで我々は、モンテカルロ・シミュレーションに基づき、チベット空気シャワー実験で観測される宇宙線のエネルギースペクトラムと原子核組成を考慮したベストフィット解析を行った。その結果の一例を下図に示す。

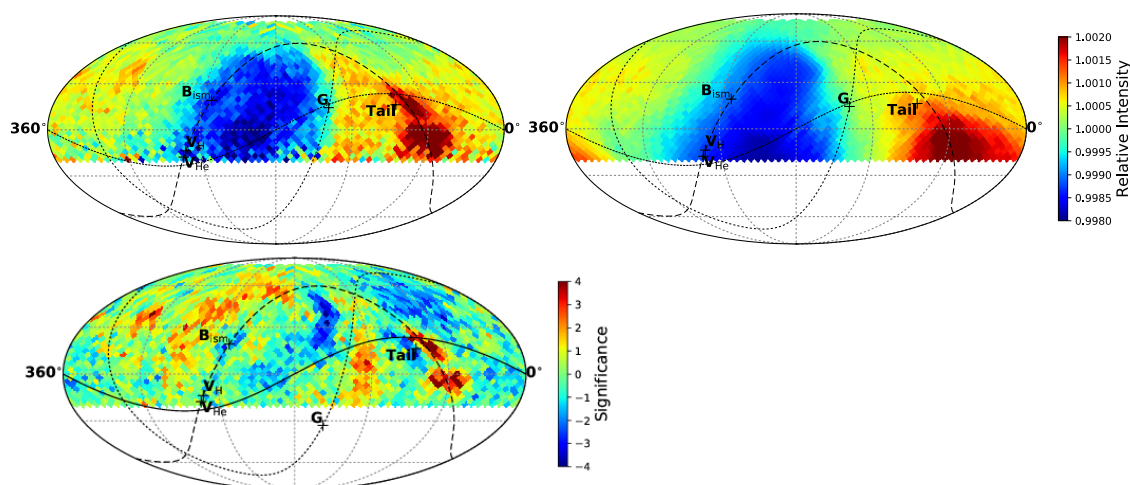


図 本研究で得られたベストフィット結果の一例。宇宙線強度と残差の分布を赤経・赤緯空間のカラーマップで示したもの。左上 (観測結果)、右上 (ベストフィット結果)、左下 (残差の significance)。描かれている曲線は、実線が黄道面、破線が銀河磁場(B)と恒星間風を含む hydrogen deflection plane

この図の結果のnormalized  $\chi^2$ は1.52 (自由度は2052) であり、単色宇宙線の場合より改善はしているものの、依然としてフィットネスは極めて悪い。

左下の残差マップを見ると、heliotailの方向近くに強度超過が見られ、それが $\chi^2$ を悪くしている一因である。これらの強度超過はMilagro hot spots (region A, B)と知られているが、我々はそれらが太陽圏モジュレーションによってhydrogen deflection planeに沿って現れる強度超過であるとした (Amenomori+ Astrophys. Space Sci. Trans., 2010)。したがって、フィットネスが不十分な原因は、モデル太陽圏磁場がこうしたモジュレーションを再現出来ていないことにあると考えられる。

(別紙様式 4 - 2)

白色光フレアにおける多波長放射スペクトルとその特徴  
Solar flare spectra and characteristics of  
particle acceleration in white-light flares

渡邊 恭子、防衛大学校・地球海洋学科

太陽フレアにおいて可視連続光の増光が観測される「白色光フレア」現象は、フレアによって加速された大量の電子が光球面近くまで降り込み、その場が急激に加熱されることによって発生していると考えられている。白色光の増光を発生させるような高エネルギーまで加速されている電子を大量に発生させるためには、加速域において強い磁場が必要であるとも考えられる。これまでに行われた統計研究<sup>(1)</sup>においても、エミッションメジャーと温度の関係などから、加速域における強い磁場の存在が示唆されている。そこで本研究では、白色光フレアの発生条件を探るために、観測された太陽フレアを白色光フレア(WLF)と非白色光フレア(NWL)に分類して、白色光フレア発生領域の磁場強度と温度分布に関して統計解析を行った。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。

まず本研究を進めるにあたって、WLFとNWLの分類方法を決定した。この分類にはSDO/HMIで観測された連続光画像を用い、SDO/AIAの1600 Åの画像においてフレアリボン領域であると同定された領域のみを判定に用いた。このフレアリボン領域において、SDO/HMIの連続光画像の強度が $3\sigma$ 以上となっている領域を取り出し、その領域の1ピクセルにおける最大値と領域全体のカウント値を判定の指標とした。本研究では、WLFはHMI連続光画像の最大値が5000DN以上、かつ領域内における全カウント値が $10^5$ DN以上のものとした。また、NWLは最大値が5000DN以下のものとした。

加速域付近の磁場強度を見積もるために、野辺山強度偏波計(NoRP)で観測されたマイクロ波スペクトルの折れ曲がり周波数を用いた。太陽フレアのマイクロ波スペクトルには放射強度が最大になる折れ曲がり周波数( $\nu_{\text{peak}}$ )が存在するが、 $\nu_{\text{peak}}$ は、放射領域の磁場強度に依存することが知られている<sup>(2)</sup>。2011年以降に発生したM3クラス以上のフレアのうち、野辺山電波ヘリオグラフ(NoRH)によってループトップのマイクロ波源が確認されていた29例のイベントを用いて、 $\nu_{\text{peak}}$ より加速域近傍の磁場強度を統計的に見積もった。この結果、WLFとNWLの間で $\nu_{\text{peak}}$ の分布に違いは確認できなかった。次に、 $\nu_{\text{peak}}$ は加速域近傍の磁場強度だけでなく、フレアループ内の電子密度にも依存している<sup>(2)</sup>ため、フレアループ内の電子密度はフレアの規模と比例していると仮定することにより、 $\nu_{\text{peak}}$ とフレア規模との比較を行なった。この比較においても、WLFとNWLの間で $\nu_{\text{peak}}$ の分布に違いは確認できなかった。 $\nu_{\text{peak}}$ は放射領域の磁場強度・フレアループ内の電子密度だけでなく、フレアの発生位置や観測している方向などによっても変化する<sup>(2)</sup>ため、本研究で用いた手法は加速域近傍の磁場強度を確かめるためには単純すぎるモデルであったと考えられる。

次に、ひので可視光磁場望遠鏡(SOT)で可視連続光バンド(赤・緑・青)を用いて観測されたM1クラス以上のフレア35例を用いて、白色光放射領域における磁場強度及び放射温度について統計解析を行った。磁場強度はSDO/HMIで得られた磁場強度データを用い、放射温度はSOTで観測された赤・緑・青の3つの可視連続光データを用いて導出した。この結果、白色光放射領域の最大磁場強度と最大白色光強度との間には比例関係が見られることが分かった。光球面の磁場強度がループトップ(加速域)の磁場強度と比例していると仮定すると、白色光フレアでは大量の電子が強い磁場によって加速されていると考えられる。また、白色光の最大放射強度が白色光放射領域の最大放射温度の4乗に概ね比例していることも確認できた。これはシュテファン・ボルツマンの法則が成り立っていることを意味している。これより、フレアにおける白色光の増光は黒体放射で説明できる。

以上より、白色光フレアでは、強い磁場によって加速された大量の電子が光球面近くのフットポイントに降り込み、その領域が加熱された結果、黒体放射によって白色光が放射されていることが分かった。

#### 参考文献

- (1) Watanabe K., Kitagawa J., Masuda S., 2017, The Astrophysical Journal, 850, 204
- (2) Dulk G. A., 1985, Annual review of astronomy and astrophysics, 23 (A86-14507 04-90) Annual Reviews, 169-224

#### 成果発表

1. Kyoko Watanabe, Kosuke Tsuruda, Satoshi Masuda, Säm Krucker, "Statistical investigation of magnetic and temperature properties of white-light flares", JpGU-AGU Joint Meeting 2020, 2020年7月12-16日
2. Kyoko Watanabe, "Energetic Protons Inferred from White-light Flares", 43rd COSPAR Scientific Assembly, 2021年2月2日
3. Kyoko Watanabe, Kosuke Tsuruda, Satoshi Masuda, Säm Krucker, "Statistical Investigation of Magnetic Features in White-light Flares", 43rd COSPAR Scientific Assembly, 2021年2月3日
4. Kyoko Watanabe, "Source region dynamics of white light flares", IIA-50 Conference "Advances in Observations and Modelling of Solar Magnetism and Variability", 2021年3月1-4日

(別紙様式 4 - 2)

## 太陽フレアに伴うイオン加速の研究 Ion acceleration into high energies in solar flares

代表者、所属機関・部局

村木 綏・名古屋大学宇宙地球環境研究所・宇宙線部門

名大宇宙地球環境研究所の研究課題の一つに、太陽表面の爆発現象が地球や周辺の宇宙空間にどのような影響を与えるかという研究課題がある。宇宙線グループはこの課題に、粒子線というプローブを用いて研究している。我々はこの研究のために電氣的に中性の太陽中性子の信号を捉えて、フレアの構造変化と対応させ、高エネルギー粒子(Solar Energetic Particles, 略して SEP) がいつ、どのように作られるのかを解明したいと考えている。言い換えれば SEP の起源の研究 である。この研究を続ければ、どのように太陽の磁場構造が変化した時に、宇宙で活躍する宇宙飛行士に影響を与えるような SEP が作られるのか、予知できるようになると考える。

このような路線に深くかかわるであろうと考えられるイベントが 2004 年 11 月 7 日の X2.0 のフレアに伴って観測された。このイベントの解析を 2020 年度の共同利用の研究テーマとして実施した。その結果は arXiv に公開した。(arXiv:2012.15623v1) [astroph-SR] (2012 年 12 月 31 日号)。 また 7 月 Berlin で開催される宇宙線国際会議で発表の予定であり現在準備中である。

現象の大略を記述する。フレアに伴って作られた太陽中性子が高度 5,250m の Bolivia Chacaltaya 山上に設置された名大太陽中性子観測装置で受信された。一方ほぼ同じ経度に設置されたメキシコの太陽中性子望遠鏡(4,600m)には、太陽中性子が崩壊して作られた陽子が観測された。さらに磁気圏内部に滞在する GOES 衛星では太陽中性子崩壊陽子が、また磁気圏外部の Lagrange point L1 に滞在する SOHO 衛星では太陽中性子崩壊陽子が観測された。この快挙は 1989 年以来 15 年ぶりである。

このイベントは先行する CME に秒速 1,500km の高速の CME が追いついた写真が SOHO-LASCO 測定器にて撮影されている。この衝突により、衝撃波が形成されたことは間違いない。しかしこの衝撃波が地球近傍に到達したのは名大の太陽風観測装置の観測結果や GOES 衛星の磁場の data から判断すると 11 月 9 日の 9UT であった。一方 11 月 7 日の 18:30UT には GOES 衛星の磁力計はショックの到来を示唆している。16UT に発生した X2.0 のフレアに伴う衝撃波が 2 時間半後に地球に到来することは考えにくい。これもまた名大太陽風観測装置の観測結果から判断して、このショックは 1 日前の 11 月 6 日の 12UT に発生した、M9.3 のフレアによるものと考えられる。すなわち CME が ~1,500km/sec で太陽地球間を走れば、この時間に地球近傍に到達する。この shock の到来と同時に Chacaltaya や Sierra Negra 山の太陽中性子観測装置は、増加を示している。この増加をどう解釈すべきか？ さらに 21UT, 23:30UT にも増加が見られる。次年度はこの課題を解明したい。

現在の段階での解釈は 18:30UT の増加は 11 月 6 日に発生した CME に捕らわれていた X2.0 のフレアで作られた SEP 粒子が到来し、21UT のものはその後ショックで加速された陽子が到来したと考えている。Forbush Decrease の谷の中にインドの muon detector の東側から到来した成分が増大している。なお東側からの muon の cut-off energy は 25GV, 平均の陽子のエネルギーは 80GV である。これはすなわち陽子が衝撃波で 100GeV まで加速されたことを示唆している。いずれにしても大変面白いイベントであることは間違いない。

気候モデルにおけるユーラシア北部の降水量に対する北極海氷減少の影響メカニズム  
Impact of Arctic sea ice reduction on precipitation over Northern Eurasia in the climate model

阿部 学 海洋研究開発機構・北極環境変動総合研究センター

## はじめに

北極海では、地球温暖化の影響による顕著な海氷減少が報告されている。北極域や低・中緯度を含む地球規模の将来の環境変化への対応を検討するためには、海氷減少に関連する降水量変化のメカニズムを理解し、陸域環境への影響を把握する必要がある。また、ユーラシア北部や北東アジアの気候変化予測や、気候変化に対する対策を講じるためには、タイガやツンドラにおける植生-大気間の熱・水の交換、それらと大気循環場の変化との関連性の理解が重要である。本共同研究では、複数の気候モデル実験を用いて、地球温暖化や北極海の海氷減少によるユーラシア北部の大気水循環変動に関連する降水量変化のメカニズムを解析するとともに、ユーラシア北部の各地域における、近年から将来の降水量変化に対する北極海氷減少の影響を定量化することを目的としている。

## 研究目的

本年度は CMIP6 実験や地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース(d4PDF)における、ユーラシア北部の夏季降水量の長期変化トレンドやその地理分布特性の複数メンバー間のばらつき(不確定性)に着目し、ばらつきに関連する大気循環場や陸・海洋と大気間の熱・水の交換に関する特徴を明らかにすることを目的とした。

## 研究方法

本研究では気候モデル MIROC6 (Tatebe et al. 2019) による 1850-2014 年までの過去の気候再現実験の初期値の異なる 50 メンバーのデータおよび d4PDF (Mizuta et al. 2017) の過去再現実験(HPB)と非温暖化実験(HPB\_NAT)の 100 メンバーの実験データについて、統計的に解析した。

## 研究結果

### MIROC6 の過去再現実験におけるユーラシア北部の降水量長期変化トレンドの地理分布に関する不確定性

50 メンバーある MIROC6 による過去再現実験を利用し、ユーラシア北部の夏季平均降水量の線形トレンド(1951-1980 年、1971-2000 年、1990-2014 年の 3 期間)の空間分布について、メンバー間のばらつきの特性を EOF 解析により抽出した。3 つの期間について別々に EOF 解析を実施したが、各期間で上位 4 つまでに見られる EOF パターンは、寄与率や順位は異なるものの、類似しているものが抽出された。1990-2014 年の EOF1 は西シベリアとその南の中央アジアを含めた地域において南北で符号が振動するパターン、EOF2 は中央シベリアを中心に変動するパターンであった(図 1)。EOF1 に関連するような、西シベリアの降水量が増加トレンドを示す場合、カラ海からよりも、バレンツ海からの蒸発による水蒸気供給が関係していることがわかった。また EOF2 に関連するような、中央シベリアを中心に降水量が増加トレンドを示す場合、ユーラシア北部に東西方向の波列構造が見られ、低気圧性循環が中央シベリアに位置していた。したがって北極海からの水蒸気輸送量の増加が降水量増加の要因の一つと推定できるが、北極海の海氷減少や蒸発による水蒸気供給の増加との関係性はみられなかった。

### d4PDF における東シベリア-極東域の近年の降水量増加トレンド

シベリアにおける降水量の長期変化傾向について、1951-2010 年(60 年間)の d4PDF データを用いて、温暖化影響の評価を行った。特に、地上気温と北極海の海氷面積が大きく変化した 1990-2010 年に着目し、解析を行った。過去再現実験(HPB)と非温暖化実験(HPB\_NAT)のそれぞれ 100 メンバーの降水量変化傾向を調べた結果、HPB では西シベリアから東シベリアにかけて増加傾向を示し、増加量は東シベリアほど大きいというような東西傾度が顕著であり、観測データとも整合的であった(図 2)。一方、HPB\_NAT では顕著な東西傾度は見られなかった。また、中緯度に位置するモンゴル領域では、メンバー間のばらつきが大きかった。両実験のメンバー間の変化傾向の空間特性を EOF 解析より抽出した結果、EOF1 では観測データと整合的な南北に夏季降水量の変化傾向の符号が逆転する空間パターンが抽出された。抽出された空間特性から、東シベリアにおける降水量増加傾向が顕著なメンバーを用いたコンポジット解析(図 3)より、HPB ではモンゴルで地表面気温がより上昇する傾向を示した。その結果、南北の気圧シーソーパターンが強化され、西シベリアからの水蒸気流入が増加し、夏季降水量の増加傾向に寄与することが明らかになった。今後はメンバー間の内部変動の違いに焦点を当てることにより、陸面状態の差異が大気に与える



影響を評価する予定である。

まとめ

気候モデルの過去再現実験におけるユーラシア北部の夏季降水量の変化トレンドの地理分布特性は不確実性が大きいこと、そして特徴的な空間分布のばらつきと関連する大気循環場が明らかになった。d4PDFの解析からは、東シベリアの降水量増加傾向に温暖化が大きく関わっている可能性が示唆された。そして他地域でも観測と類似した降水量変化トレンドのパターンがあること、そのパターンに関連する大気循環場の特徴を説明することができた。

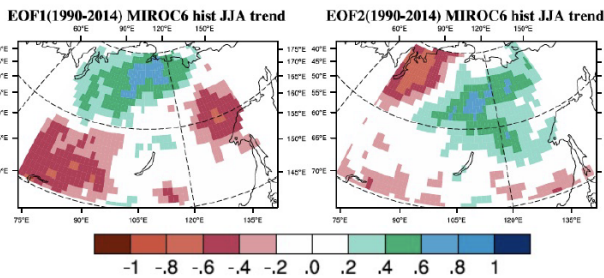


図 1: MIROC6 の過去再現実験 50 メンバーにおける、1990-2014 年の夏季(JJA)平均降水量トレンドに関する EOF1 と EOF2 の空間パターン。

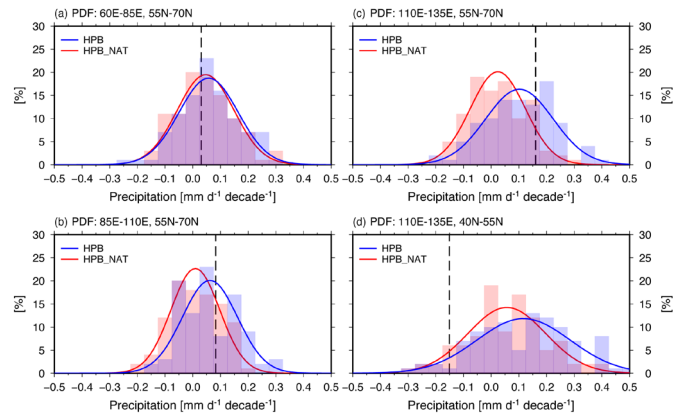


図 2: d4PDF の過去再現実験(HPB)、非温暖化実験(HPB\_NAT)のそれぞれ 100 メンバーにおける、1990-2010 年の夏季(JJA)平均降水量トレンドの領域毎の頻度分布。

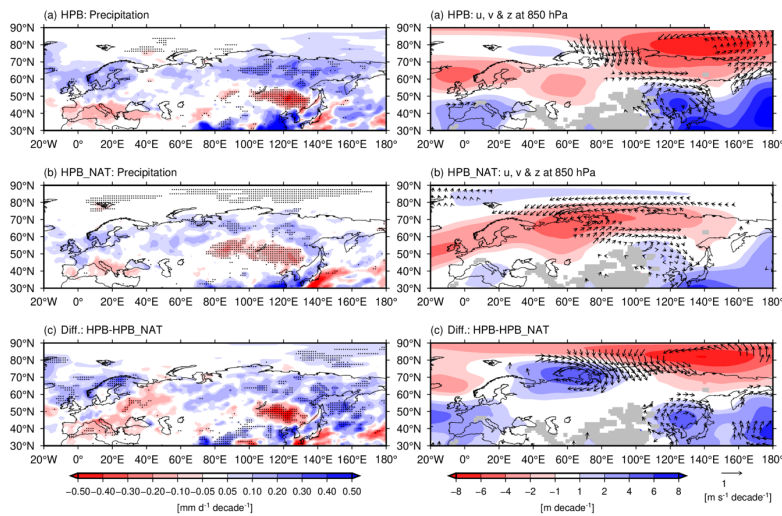


図 3: d4PDF の過去再現実験、非温暖化実験の 1990-2010 年の夏季(JJA)平均降水量トレンドに関する EOF1 から抽出したメンバーのコンポジット平均及び、両実験の差。左図は降水量トレンド。右図は 850 hPa における水平風及び高度場。

引用文献

Tatebe, H., et al., 2019: Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6. *Geosci. Model Dev.*, **12**: 2727–2765, <https://doi.org/10.5194/gmd-12-2727-2019>

Mizuta, R., et al., 2017: Over 5,000 Years of Ensemble Future Climate Simulations by 60-km Global and 20-km Regional Atmospheric Models. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **98**, 1383–1398, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0099.1>

Willmott, C. J. & Matsuura K., 2001: Terrestrial Air Temperature and Precipitation: Monthly and Annual Time Series (1950 - 1999), [http://climate.geog.udel.edu/~climate/html\\_pages/README.gchcn\\_ts2.html](http://climate.geog.udel.edu/~climate/html_pages/README.gchcn_ts2.html).

成果発表

Abe et al., 2020: Trends of summer precipitation over northern Eurasia in historical simulations with MIROC6, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, Online, July 16 2020.

金森 他 2020, 東シベリア域における近年の夏季降水量の増加傾向に対する温暖化の影響、日本気象学会 2020年度秋季大会, オンライン, 2020年10月27日.

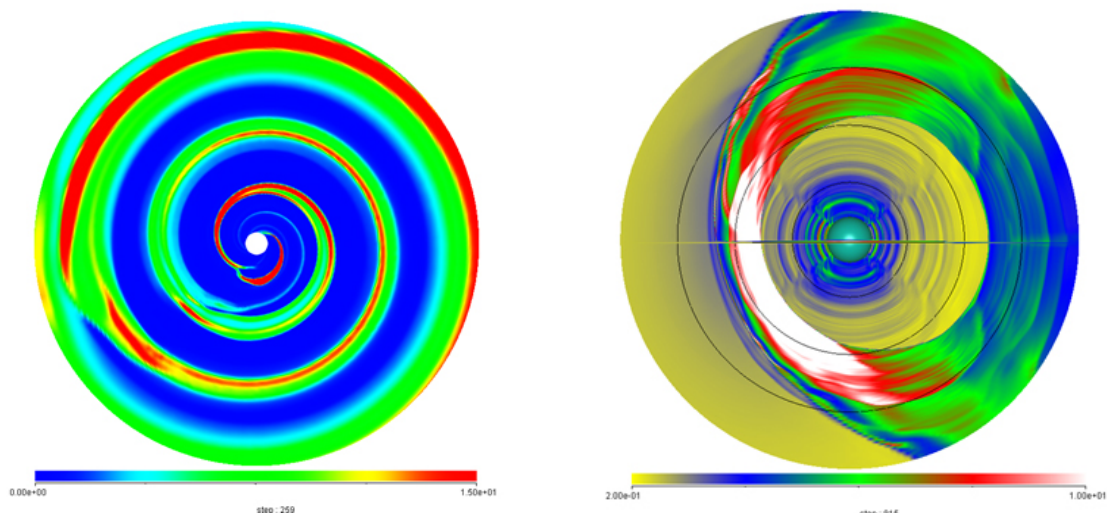
(別紙様式 4 - 2)

太陽圏の時間変動構造の研究  
Study of Time-Varying Structure of the Heliosphere

鷲見 治一 九州大学国際宇宙天気科学・教育センター

Voyager探査機は打ち上げから約40年を経て1号機,2号機ともに太陽圏の外部境界面(ヘリオポーズ(HP))を越え、現在は星間空間(銀河空間)を飛翔している。両機が夫々にHPと交差した時間及び位置は太陽圏の大きさ及び形状を知るための唯一の直接観測である。一方、地球を周回する多くの探査機から長期間にわたり纏められている太陽風プラズマ及び磁場のデータがOMNIデータとしてまとめられている。我々はVoyagerデータを基礎とし、OMNI日変化太陽風プラズマデータを活用して3次元MHDシミュレーション解析を行い、時間的に変動する太陽圏の3次元構造を初めて明らかにすることを本研究の目的としている。

OMNIデータを3次元太陽圏構造のMHD解析の内部境界条件として用いるためには、1点観測データであるOMNIデータから3次元解析用の内部条件を用意せねばならない。このため経度的には、太陽風プラズマ流が太陽自転とともに共回転していると仮定し、緯度的には、太陽風プラズマ流のラム圧強度には緯度依存性がないというユリシーズ観測結果に従うとする。MHDシミュレーションの規模は1 AUから900AUまでとしているが、1ボックスでは解析できないので1-20AUと20-900AUの2ボックスに分けて解析を行っている。シミュレーション解析は複雑で長時間を要している。日ごとのOMNIデータの取り込みは2000年初頭分から始めている。第1ボックスの赤道面上の図及び第2ボックスの子午面上の図の夫々の例を以下の左及び右に示す。



# 北西インドNidarオフィオライト層火成岩類のNd-Sr同位体研究 Nd-Sr isotopic study of igneous rocks from the Nidar ophiolite in northwestern India

今山武志、岡山理科大学・フロンティア理工学研究所

## 1. はじめに

ヒマラヤ造山運動は、約5000万年前のインドーアジア大陸の衝突から現在まで続き、世界中の多くの研究者がその形成過程に注目する。Nidarオフィオライトは、インドーアジア大陸衝突の地質学的境界であるインダスーツァンポ縫合帯内部の西側に分布し、大陸衝突前に形成された海洋地殻の断片である。Nidarオフィオライトは、玄武岩、ドレライト、斑れい岩、橄欖岩とチャートや火山砕屑性堆積物から主に構成され、緑色片岩相一角閃岩相下部程度の変成作用を被っている (e.g., Buchs and Epard, 2018)。全岩化学組成などの地球化学的研究からは、これらのオフィオライト層火成岩類は、supra-subduction zoneで形成されたとされている (Ahmad et al., 2008; Mahéo et al., 2004)。また、斑れい岩の角閃石からのAr/Ar年代は約124 Ma、斑れい岩のSm-Nd全岩アイソクロン年代は約140 Maを示し、白亜紀前期に形成したとされている。しかし、インダスーツァンポ縫合帯の他オフィオライトは、ジュラ紀後期から白亜紀後期の生成年代を示し (Persons et al., 2020)、複数の火成活動が関わっており、これらの単一の火成活動モデルが妥当であるかは検討を要する。そこで、申請者は、Nidarオフィオライトの詳細な地質調査を実施して、岩石学的・年代学的研究に加えて、Nd-Sr同位体比分析を行ない、インドーアジア大陸衝突前の火成活動の実体を明らかにすることが主な研究目的である。

## 2. 試料と研究手法

火成岩石試料の薄片を作成し、偏光顕微鏡観察を行い、EPMAを用いて各鉱物の定量化学組成分析を行った。また、9試料の全岩化学組成分析を行い、主要元素と微量元素成分から、火成岩類の分類および成因を推定した。さらに、9試料のNd同位体比と11試料のSr同位体比を分析した。

## 3. 結果

火成岩分析試料は、斑れい岩、粗粒玄武岩、玄武岩、安山岩の4つに分類される。斑れい岩は輝石と斜長石から主に構成され、構成鉱物の量比によりType1とType2に区分した。Type1は輝石に富む一方、Type2は斜長石に富み、加えて緑簾石、緑泥石を含む。粗粒玄武岩は斜長石と角閃石から成り、輝石は稀である。玄武岩は、斜長石、単斜輝石、角閃石、緑簾石から構成される。輝石のフェロシライト成分は、斑れい岩で(10%程度)、粗粒玄武岩(15%)、玄武岩(25%)と徐々に増加する。すなわち、層序的上位ほど、輝石の鉄の割合が高くなる傾向がある。粗粒玄武岩と玄武岩の角閃石は、Siが高いアクチノ閃石とSiが低い普通角閃石を含む。角閃石のMg/(Mg+Fe<sup>2+</sup>)比は、粗粒玄武岩で(0.67-0.84)、玄武岩で(0.6)と変化する。普通角閃石は、累帯化学組成構造を示し、中心部で鉄に富む。非変成の斑れい岩斜長石は、灰長石成分が70-90%と高いが、粗粒玄武岩斜長石の灰長石成分(5-89%)はばらつきが高い。玄武岩斜長石は灰長石と曹長石の2種類が観察される。

斑れい岩Type1は、SiO<sub>2</sub>成分が55wt%と高く、Type2はSiO<sub>2</sub>成分が45wt%と低い。ハー

カー図では、SiO<sub>2</sub>が増加するにつれて、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、CaO成分は減少し、他の主要元素は増加する。Type1 斑レイ岩を含む6 試料は、平坦な希土類元素パターンを示す。一方、Type2 斑レイ岩を含む3 試料は希土類元素濃度が低く、軽希土類元素に著しく乏しい。

9 試料のNd 同位体比は0.513022–0.513145 の範囲で系統的な違いは観察されず、枯渇した中央海嶺起源マントルに比較的近い値を示す。一方、11 試料のSr 同位体比は、0.702957–0.706713 の間で幅広い値を示し、特に変質・変成作用を被っている試料で高くなる傾向がある。

#### 4. 考察

薄片観察と鉱物化学組成の結果から、非変成斑レイ岩 Type1 の輝石、灰長石成分に富む斜長石は、火成鉱物と考えられる。一方、粗粒玄武岩と玄武岩は、曹長石成分に富む斜長石、アクチノ角閃石、緑簾石、緑泥石などの変成鉱物を含み、緑色片岩相–角閃岩相下部程度の変成作用を被っている。普通角閃石は、火成鉱物か変成鉱物か今後の検討が必要である。

Type1 斑レイ岩を含む6 試料の平坦な希土類元素パターンは、Ahmad et al.(2008)の沈み込み型火成岩類の特徴と一致する。一方、軽希土類元素に乏しい Type2 斑レイ岩を含む3 試料は、中央海嶺型火成岩の特徴であり、沈み込み型火成岩類の特徴とは大きく異なる。このことから、Nidar オフィオライト層火成岩類は、沈み込みによる単一の火成活動で形成したというよりは、中央海嶺火成活動も伴う複数の火成活動が関わっている可能性が高い。

Nd-Sr 同位体比の変化は、マントルアレー上には乗らず、変質・変成作用によって Sr 同位体比が高くなっている。Nd 同位体比の初生値は、中央海嶺起源マントルの値に比較的近いことから、最初に海嶺で生成された海洋地殻が、海嶺付近の沈み込み帯形成に伴って、Sr 同位体比や希土類元素パターンが変化した可能性がある。今後は、放射年代を利用してマグマの生成年代と変成年代を推定して、テクトニックモデルを構築する。

#### 引用文献

Ahmad, T., Tanaka, T., Sachan, H. K., Asahara, Y., Islam, R., & Khanna, P. P. (2008). Geochemical and isotopic constraints on the Age and origin of the Nidar Ophiolitic complex, Ladakh, India: Implications for the Neo-Tethyan subduction along the Indus suture zone. *Tectonophysics*, 451(1–4), 206–224.

Buchs, N., & Epard, J. –L. (2018). Geology of the eastern part of the Tso Moriri nappe, the Nidar Ophiolite and the surrounding tectonic units (NW Himalaya, India). *Journal of Maps*, <https://doi.org/10.1080/17445647.2018.1541196>.

Mahéo, G., Bertrand, H., Guillot, S., Villa, I. V., Keller, F., & Capiez, P. (2004). The South Ladakh ophiolites (NW Himalaya, India): An intra-oceanic tholeiitic arc origin with implication for the closure of the Neo-Tethys. *Chemical Geology*, 203(3–4), 273–303.

Parsons, A. J., Hosseini, K., Palin, R. M., & Sigloch, K. (2020). Geological, geophysical and plate kinematic constraints for models of the India-Asia collision and the post-Triassic central Tethys oceans. *Earth-Science Reviews*, 207, <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103084>.

#### 学会発表

佐藤成修・今山武志・Dutta Dripta. 北西インド Nidar オフィオライト層火成岩類の岩石学的研究. 第2回 OUS フロンティアセミナー, 岡山理科大学, 2021年3月.

(別紙様式 4 - 2)

持続的地球環境のための高校生のできる課題  
Environmental and Sustainable Development Education  
on Earth Sciences for High School Students

河野光彦，関西学院千里国際キャンパス  
鈴木ゆみ，関西学院千里国際キャンパス  
齊藤誠一，神戸大学大学院人間発達環境学研究所  
水野 亮，名古屋大学宇宙地球環境研究所

【はじめに】

持続可能社会のための地球環境教育や学習において注目されているのが科学的リテラシーという概念である。文部科学省もこの概念をもとに各教育施策を展開しており，授業での教科学習にとどまらず，総合的な学習で地球環境問題への取り組みを扱ったり，研究機関との連携による教育を行ったりするなどの実践が行われている。とりわけ，研究機関は専門的研究者を多数有し，専門的知識を一般市民や教育機関に還元することを役割の一つとしてきた。したがって，専門性の高い科学的リテラシーを中等教育機関で学習する場合において，こうした研究機関との連携はますます期待されつつある。しかしながら，これまでの連携においては見学などの活動にとどまり，科学的リテラシー学習に対する効果測定はされてこなかった。

【研究目的】

本研究では，地球環境問題にかかわる科学的研究をしている研究所と中等教育機関が連携し科学的リテラシー学習をしている活動について，その教育的効果を心理学的および教育学的視点から実証的な検討をすることを目的としている。したがって，その成果から，高校生の地球環境学習における科学的リテラシーの向上させる効率的方法を見つけ出すことが可能となると期待できる。

【研究方法】

昨年度の本研究と同様に，関西学院千里国際高等部と名古屋大学宇宙地球環境研究所との連携による教育活動を行った。この活動に参加することによる生徒たちへの学習動機や自尊感情などの教育効果について調査するため，参加群と統制群にたいして Web によるアンケート調査を行った。アンケート内容は，(1) 参加群に対する参加理由・目的，(2) 科学的リテラシーへの関心，(3) 学習動機尺度 5 件法 36 項目，(4) 自尊感情尺度 5 件法 10 項目であった。

【結果と考察】

アンケート内容の(1)と(2)の結果については詳細な分析は必要であることから，ここでは省略し，(3)と(4)についてのみ報告する。学習動機と自尊感情の相関関係について調べた結果を FIG.1 に示す。これからわかるように，参加群と統制群ともに有意義な結果は得られなかった。また，学習動機尺度について，「充実」「訓練」「実用」「関係」「自尊」「報酬」の要素を分析したが，いずれも  $t$  検定による有意差は見られなかった。同じように自尊感情尺度についても分析したが，参加群の平均値が多少大きかったものの， $t$  検定による有意差は確認できなかった。

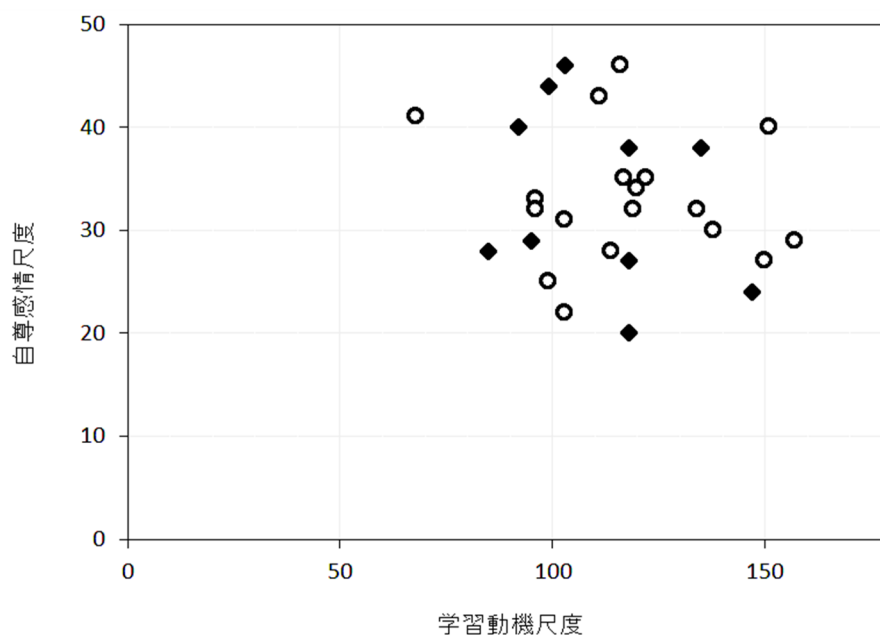


FIG.1. 自尊感情と学習動機  
◆は参加群, ○は統制群

このことは、参加群と統制群の学習動機には差がみられなかったことを意味する。これは、どのような学習動機をもっている、科学的リテラシーを学習し発展させていくことができることを意味している。今後、活動への参加理由や目的についての分析、および科学的リテラシーへの関心についての質的分析を行う予定である。しかしながら今回は、フィールドスタディーが実施不可能であったこともあり、その効果についての検討も限定的であると考えられる。その理由は、COVID-19のパンデミックによって、期待していた研究所訪問や研究者と触れ合いが制限されたことも関係していると思われる。

その結果をふまえて活動内容の振り返りと修正を行う必要がある。また今回の分析では、参加群と統制群ともに標本の数が十分ではなく、信頼できるデータ数が得られなかった。次年度以降は、調査方法を工夫してアンケート回答率を上げる必要がある。このことを次年度の継続研究への課題としたい。

#### 【参考文献】

市川伸一 (2001) 学習と教育の心理学 岩波書店

市川伸一(1995) 学習動機の構造と学習観との関連 日本教育心理学会発表論文集、p.177.

Rosenberg, M. (1965) Society and the adolescent self image. Princeton Univ,Press.

山本真理子・松井 豊・山成由紀子(1982). 認知された自己の諸側面の構造 教育心理学研究, 30,64-68.



# オーロラ等価電流回路解析とデータ同化手法を用いた AE 指数の予測

Prediction of AE Index Based on Auroral Equivalent-Current Circuit and Data Assimilation

町田 忍 名古屋大学 宇宙地球環境研究所  
三好 由純 名古屋大学 宇宙地球環境研究所

## 研究目的

太陽風のデータを入力として、電磁圏の活動度を表す指標の一つである AE 指数を予測することは、太陽地球系物理学の目指す到達点の一つと考えられる。過去において、太陽風データと AE 指数の相関や両者を結び付ける近似関数を求めて、その結果を予測に活用する試みや、ニューラルネットワークを用いた予測が数多く行われ、一定の成功を収めた。しかし、それらの技法では、途中に含まれる物理過程を解明することがかなわなかった。そこで、その問題を解決するために、物理学の第一原理に基づいて 3 次元 MHD 方程式をスーパーコンピュータで解いて AE 指数を予測する試みが行われ、大きな成功を収めつつある。しかし、それを実行するためには極めて大規模な計算資源が求められる。そこで、本研究では、オーロラの発生に伴って極域電離圏を流れる電流が変化する度合いを表す AU 指数と AL 指数、また、両者の差として定義される AE 指数を、太陽風の密度、速度および磁場のデータを入力として、オーロラ等価電流回路解析とデータ同化手法を用いて予測することを試みる。そのような手法の開発に成功すれば、主要な物理過程を表現しつつ、小規模な計算資源で AE 指数を迅速に予測することが可能となる。

## 研究手法

本研究における AU 指数の予測は、Goertz et al. [JGR, 1993] によって提案され、山本 [名古屋大学修士学位論文, 2018] によって妥当性が確認された太陽風中の電場の一部が磁気圏の磁力線に沿って電離圏に印加され、オーロラ電流が駆動されるモデルを採用することとした。その上で、本年度は、AL 指数に焦点を絞って課題の解明に取り組んだ。

Baker et al. [JGR, 1997] や後続の研究によると、AL 指数を生成する電流系は昼間側の磁気再結合によって地球磁気圏中に取り込まれた電場が直接電流を駆動する Driven 過程と、磁気圏尾部に（主として磁場の形で）エネルギーを蓄え、あることをきっかけにそれが解放される Loading-Unloading 過程に関連した 2 つの成分で構成されている。しかし、Goertz et al. [1993] のモデルでは、Loading-Unloading の過程が取り入れられていなかったため、本研究においては、その点について全面的に見直しを行った。具体的には、尾部に取り込まれた電場に依拠して蓄積され、何らかの物理過程（恐らく、バルーニング不安定と、近尾部での磁気再結合）によって解放されるエネルギーを記述する方程式を、Driven 過程と Loading-Unloading 過程を考慮したオーロラ等価電流回路解析に基づいて立て、太陽風の OMNI データを入力として解き進めた。その結果として得られた電流から、地上の磁場変動 (AU, AL, AE 指数) を求めた。

## 研究成果・考察

前項で述べた作業を多くのイベントについて進め、現在は、実際の AL 指数の特徴をとらえた変動をモデル計算で再現するに至っている。図 1 に Loading-Unloading 過程のエネルギー解放量を尾部に取り込まれた電場 (Et) の大きさに比例させ、エネルギー解放のタイミングを Et の時間の 2 階微分の大きさに関連させて実行した計算の一例を示す。現時点では、まだそのような単純な仮定を行っているため、計算値を実際の値に完全に一致させることには成功していない。また、電離圏の電気伝導度を電流の増加とともに高くなるように仮定しているが、その関数形の与え方にも改良の余地がありそうである。しかし、もしも、エネルギー解放のタイミングを何らかの方法で正確に推定できたり、電離圏電気伝導度の関数形の改良に成功すれば、より定量的に正しい結果の得られる可能性のあることが、図 1 の (特に 4 番目の) パネルから予想することができる。

本モデルでは、10 個近いパラメータを既知として与える必要がある。その妥当性を検討し、その結果を用いて高い精度で AE 指数の予測を可能とするためには、粒子フィルター法を用いたデータ同化法を適用する方法が有効である。次年度は本格的にその作業に取り組んで、AE 指数の予測スキームを完成させることを目指す。

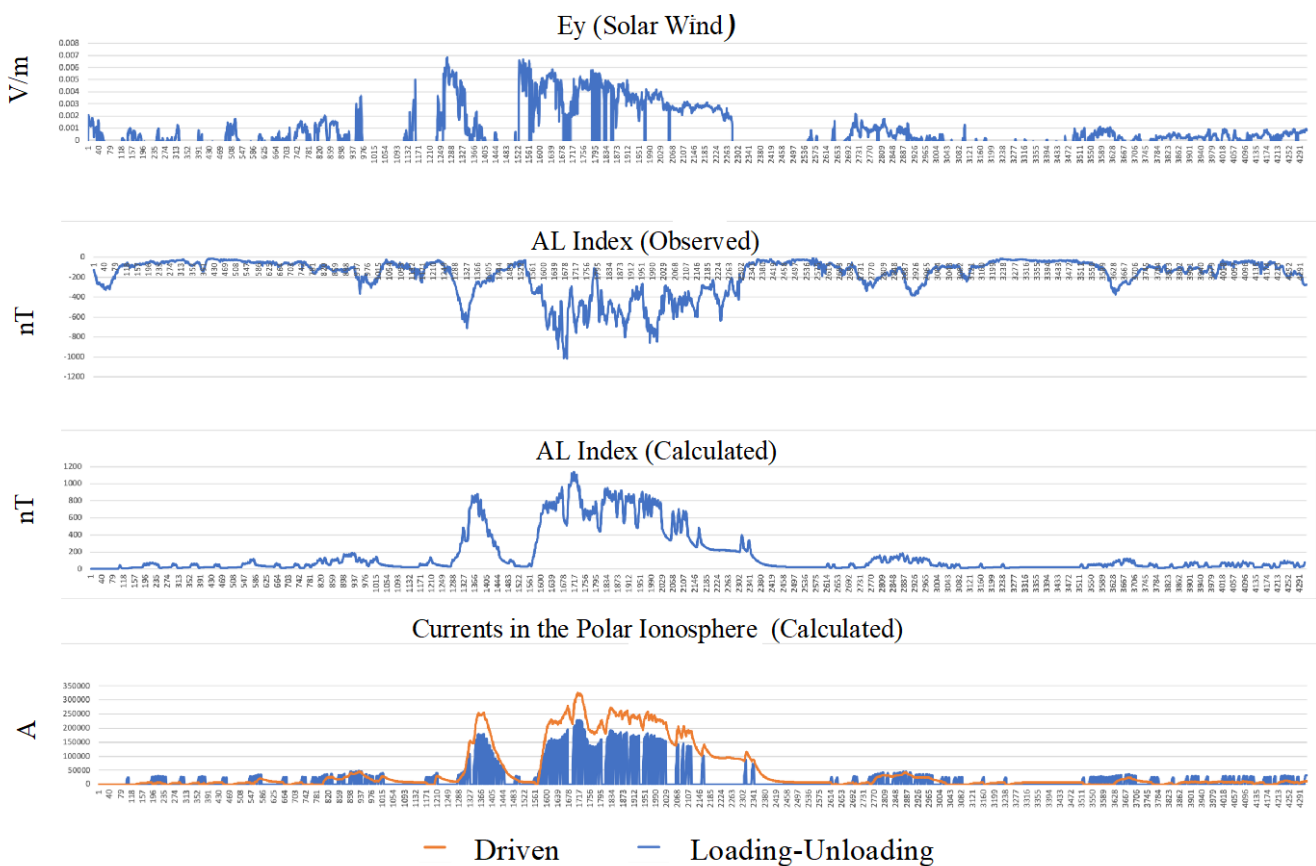


図 1. 2000 年 7 月 19-21 日の期間 (3 日間) に対する結果。上から順番に、入力として与えた太陽風電場 (OMINI データ)、実測に基づき公開されている AL 指数、本モデルによって計算された AL 指数 (符号を反転させていることに注意)、および AL 指数を生み出す極域電離圏電流の時間変化。



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】

本研究は「あらせ」衛星搭載の超高エネルギー電子分析器 (XEP) (Higashio et al., 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を目的とする。形状数学モデルを構築して高エネルギー粒子に対するXEPの特性を精査し、観測データ処理に必要な応答関数を構築する。現在も行われている「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構築した応答関数にて一次処理を行う。較正されたXEP観測データを他の観測機器データとの比較などから評価するとともに、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た。XEPはこれまで日本で経験が少なかった観測機器であるが、宇宙環境下で高エネルギー粒子は人体に重要な影響を及ぼすため、XEPのような機器は今後の宇宙環境計測において高い需要が予測されている。日本でも月着陸機や火星圏探査機 (MMX) でのXEP相当の観測器の搭載が予定されている。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】

「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Geant4(Geometry AND Tracking)を利用して、フライトモデ形状の詳細を反映させた形状モデルを構築した(図1左)。そのモデルの中で高エネルギー粒子を無数に照射してXEPのエネルギー応答特性を精査した(図1右)。観測データ処理に必要な応答関数を構築した。

【研究結果】

Geant4による数値モデル実験の結果から入射電子のエネルギーに対するエネルギー検出応答を評価した。その結果、観測データ較正に必要な応答関数の元となるエネルギー応答行列(図2左)を得ることが出来た。高エネルギー側で期待より検出効率が低い結果となった。

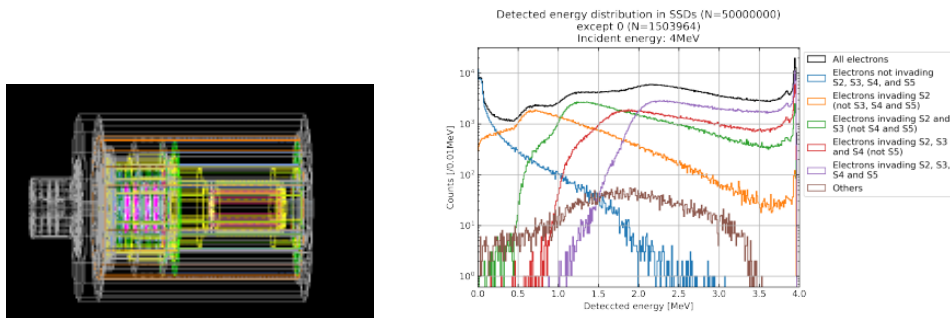


図1: 左) Geant4で作成したXEP数値モデル. 右) 4MeV電子の等方フラックスに対する半導体検出器 (SSD2—5) のエネルギー応答.

【まとめ】

応答関数を用いて観測データ較正を実施して, 図2左の窪みのあるエネルギー分布も見つかっている. 今後も引き続き応答関数及び較正作業の評価を行う.

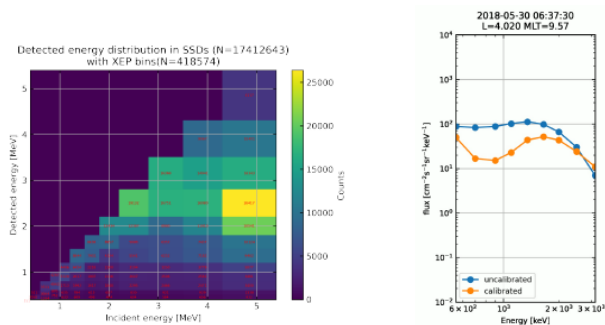


図1: 左) 数値モデルから得た入射エネルギー(x軸)vs検出エネルギー(y軸). 右) 観測データの較正前(青)と較正後(橙).

【成果発表】(学会研究会発表は全てリモート形式)

- 津田 洸一郎, 横田 勝一郎他, Geomagnetic N+/O+ variation in the Ring Current Observed by the Arase (ERG) Satellite, 日本地球惑星科学連合 2020 年大会, 2020 年 7 月 12-15 日
- 植田 晃平, ..., 横田 勝一郎他, Evaluation of response characteristics of the XEP onboard the Arase spacecraft, 日本地球惑星科学連合 2020 年大会, 2020 年 7 月 12-15 日
- N. Thomas, ..., S. Yokota, et al, Investigation of small-scale electron density irregularities observed by the Arase and Van Allen Probes satellites inside and outside the plasma sphere, J. Geophys. Res., Accepted. doi.org/10.1029/2020JA027917
- Y. Inaba, ..., S. Yokota, et al., Plasma and field observations in the magnetospheric source region of a Stable Auroral Red (SAR) arc by the Arase satellite on 28 March 2017, J. Geophys. Res., 125(10), 2020. doi.org/10.1029/2020JA028068
- K. Shiokawa, ..., S. Yokota, et al., Arase observation of the source region of auroral arcs and diffuse auroras in the inner magnetosphere, J. Geophys. Res., 125(8), 2020. doi.org/10.1029/2019JA027310

(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、ディスクリッ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た。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することで、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、スウェーデン・ソダンキラとチャウジヤ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。

今後は、この高い相関を持つ脈動オーロラのパッチの高度を同定するために、2地点のカメラを地理座標系に投影した際、形状が一致するような高度を調べる予定である。地上観測から推定されたオーロラの発光高度と、あらせ衛星で観測された降下電子のエネルギーを比較し、ステレオ観測による降下電子エネルギー推定方法の妥当性を検証する。

#### 【成果発表】

・栗田 怜、三好 由純、Feasibility of estimating the energy of precipitating electrons from stereo observations of pulsating aurora、名古屋大学ISEE研究集会「脈動オーロラ研究集会」、オンライン開催、2021年1月20日

(別紙様式 4 - 2)

LF/VLF帯標準電波を用いた火山噴火後のD領域電離圏変動  
Variations in the D-region ionosphere after volcanic eruptions using LF/  
VLF standard radio waves

大矢 浩代、千葉大学・大学院工学研究院

### 1. 研究目的

本課題の研究目的は、東南アジア VLF 帯電磁波観測ネットワーク(AVON: Asia VLF Observation Network)、東北大学および名古屋大学宇宙地球環境研究所(ISEE)鹿児島観測所で観測している LF 帯標準電波のデータを用いて、火山噴火後の D 領域電離圏変動を明らかにすることである。火山噴火後の電離圏変動はこれまで、GPS-電離圏全電子数(TEC)や HF ドップラーを用いた研究がなされている[e.g., Ogawa et al., 1982; Igarashi et al., 1994; Heki, 2006; Dautermann et al., 2009]。これらは火山噴火から励起した音波あるいは大気重力波が F 領域電離圏に影響を及ぼしていることを示す報告である。しかし、火山噴火後の D 領域変動の報告はほとんどない。それは、もともと D 領域がプラズマと中性大気の衝突周波数が高く観測が難しいためであることと、下からの音波・大気重力波の振幅が D 領域高度では F 領域ほど大きくないために、電子密度変動量が非常に小さく検出が難しいためであると思われる。そこで本研究では、電子密度変動を高感度に検出できる AVON、ISEE 鹿児島観測所および東北大学の観測で得られた LF 帯標準電波のデータを用いて、桜島、阿蘇山やケルート山(インドネシア)等の火山噴火後の D 領域電離圏変動を調べた。地上で観測している地震計(火山性地震)、空振計や TEC 観測データと比較することにより、火山(固体地球)~大気圏~電離圏結合解明に貢献できるものと思われる。

### 2. 研究方法(使用した共同利用装置・施設等を含む)

平成28年度に東北大学がISEE鹿児島観測所にて新規にLF帯標準電波観測を開始し、以前は名大ISEEがJJY福島(40 kHz)の送信電波のみ受信していたが、現在ではJJY福島, JJY佐賀(60 kHz), JJI(22.2 kHz), BPC(中国, 68.5 kHz), NWC(オーストラリア, 19.8 kHz)等複数の送信局の電波を受信できるようになった。つまり、観測している伝搬パスが増え、広範囲のアジアの火山(九州、フィリピン(ピナツボ山)、ケルート山(インドネシア)等)をターゲットとすることができるため、ISEEおよび東北大学と連携し、AVONデータとあわせて共同研究を進める必要がある。2020年度は、防災科学技術研究所の地震計ネットワーク(F-net: Full Range Seismograph Network of Japan), 高知工科大学が運営するインフラサウンド観測ネットワークシステムも使用し、阿蘇山噴火後の下部電離圏変動を調べた。

### 3. 研究結果

本研究ではLF帯標準電波を利用して、2016年10月7日16:46 UTの阿蘇山(32.533°N, 131.614°E)噴火に関連した下部電離圏変動を明らかにした。使用した観測データは、福島(JJY, 40 kHz)-篠栗(SGR)パス、佐賀(JJY, 60 kHz)-篠栗パスおよび中国(BPC, 68.5 kHz)-篠栗パスのデータである(図1)。それぞれ各送受信点間におけるLF波の振幅とそのウェーブレット変換を行った結果、16:50~17:00 UTにかけて3つの伝搬パスのLF波の振幅に変動があり、150~300sの周期成分があることがわかった(図2)。高知工科大学が運営するインフラサウンド観測ネットワークシステムでのインフラサウンド(微気

圧)の観測では、高知県の嵯川の観測点で噴火による音波の到達時刻直後の16:55~17:00 UT にかけて150~250 s の周期成分が見られた(図3)。

防災科学技術研究所が運営する広帯域地震観測網(F-net)による地震計の上下動速度の観測では、LF波パス付近の3か所(INN, TKD, およびTMC)の観測点で噴火直後から16:55 UT にかけて150~300 s の周期成分が見られた。



図1 阿蘇山とLF帯標準電波パスの位置

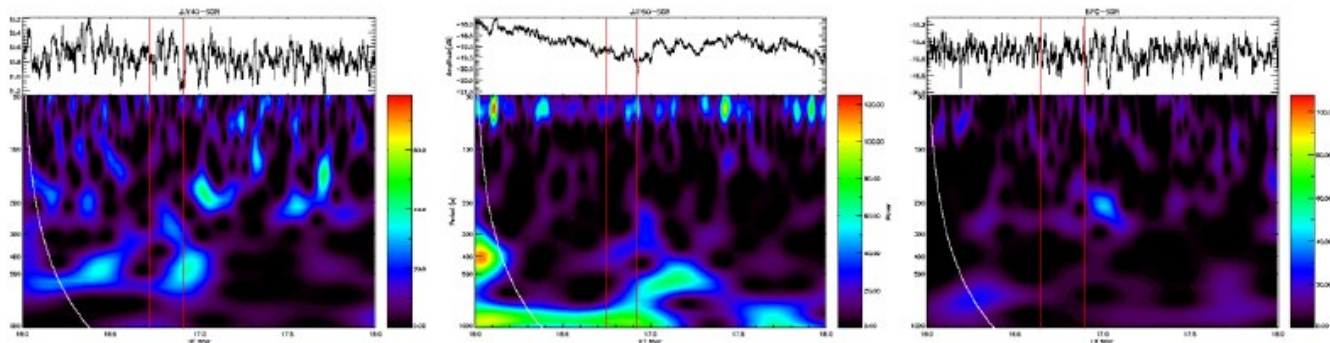


図2 2016年10月7日阿蘇山噴火時の(左)JY40-GRパス、(中)JY60-GRパス、(右)BPC-GRパスの(上)振幅と(下)そのウェーブレットスペクトル。左側と右側の縦の赤線は、それぞれ噴火時刻および音波の到達時刻を示す。白い曲線はCOI(Cone of influence)を表す。

3つのLF波の振幅間に、周期(110~115s, 150s, 200~205s, 290~300s, 615~620s)でコヒーレンスがあり、その位相差が0になっていることがわかった。また、LF波と各観測機器とのコヒーレンスを取り、インフラサウンドでは150sの周期成分がJY60と嵯川で、170sの周期がJY40およびBPCと嵯川での組み合わせで確認された。地震計では155sの周期成分がJY40とTKD・TMC、JY60と3つの地震計、BPCとINN・TMCの組み合わせで共通して確認された。この周期はLF波同士のコヒーレンスで得られた150sの周期と類似している。これより、150~170sの周期成分は火山噴火によって励起した音波が、下部電離圏変動をもたらし、LF帯標準電波が変動したと考えられる。

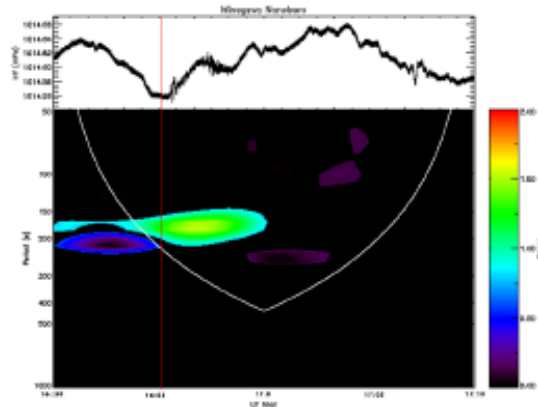


図3 2016年10月7日阿蘇山噴火時のインフラサウンドの(上)波形と(下)そのウェーブレットスペクトル。縦の赤線は音波の到達時刻を示す。白い曲線は、COI(cone of influence)を示す。

#### 成果発表

[1] 折戸 雄飛、LF帯標準電波を用いた2016年阿蘇山噴火に伴う下部電離圏擾乱、千葉大学工学部総合工学科電気電子工学コース令和3年度卒業論文、2020 (指導教員: 大矢)。



(別紙様式 4 - 2)

波飛沫計を用いた渦相関法による海塩粒子放出量の直接評価のための海上試験観測

Direct measurement tests of sea salt particle flux by eddy covariance  
using sea-spray spectrometer probe

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ことが現状である。

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、洋上において大気乱流による濃度変動を10Hzの時間分解能で計測し、渦相関法によって海面から放出される海塩粒子の放出量を直接評価することを目的として、沿岸域における観測試験を実施した。

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、茨城県神栖市にある港湾空港技術研究所の波崎海洋研究施設の観測用栈橋において集中観測を実施した。観測システムは波しぶき計の他に、超音波風速温度計（SAT）、オープンパス型赤外線方式CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>Oガス分析計（OPGA）、クローズドパス型波長スキャンキャビティリングダウン分光方式CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>Oガス分析計（CRDS）からなる（図1）。これらにより、大気乱流によって生じる風速、気温、粒子数密度、CO<sub>2</sub>密度と混合比、H<sub>2</sub>O密度と混合比の変動を10Hzの時間分解能で計測することができる。粒子数密度は、0.3、0.5、0.8、1.0、3.0、5.0、10、15μmの粒径別に、1時間おきに30分間、その他は常時、連続計測した。観測期間は11月4日～12月1日の約1か月である。システムはCRDSを除いて栈橋先端のハンドレールに固定した単管パイプを用いて設置した。設置高度は平均海面から約9mである。また波しぶき計の大気試料の吸引口として漏斗を用い、直径5mmのゴム製の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 波崎海洋研究施設の観測用栈橋全景（左）と栈橋先端に設置したシステム（右）

## 研究結果

図2は0.3~0.5 $\mu\text{m}$ の粒径における粒子の海面フラックスと大気中の数密度の時系列変動を示している。粒子の海面フラックスは局所的に $10^5\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ を超える値を示し、海面からの供給量の増加とともに大気中の粒子の数密度の増加がみられた。このことから大気中の主な粒子成分は海面から放出される海塩粒子であると考えられる。一方で、大気中の数密度は海面からの供給量の減少に半日程度遅れて減少している様子がみられた。このことは海面から放出された海塩粒子が大気で滞留する、または海面からの放出量と海面への沈着量とが平衡状態となっている、つまり正味のフラックスが零であることが原因かもしれない。

また海塩粒子の海面フラックスと、熱や気体の海面フラックスを支配する風速との間には明瞭な関係性がみられなかった。海面から放出される海塩粒子は、先に述べた通り、大気に滞留し続けず海面に沈着する、また風速のみならず海面の状態や風向と波向の関係から海塩粒子の生成率が異なると考えられる。これらの関係性は0.3~0.5 $\mu\text{m}$ の粒径のみならず、昨年度の観測でもみられた大気乱流によって生じる気温や水蒸気密度との変動の相似性を示した10 $\mu\text{m}$ までの粒径においてもみられた。一方で乱流変動を捉えることができないため渦相関法でフラックスの定量が難しい10 $\mu\text{m}$ を超える粒子についても、大気中の数密度の変動の様子は10 $\mu\text{m}$ までの粒径と同様であることから、フラックスの変動も同様であると推測される。

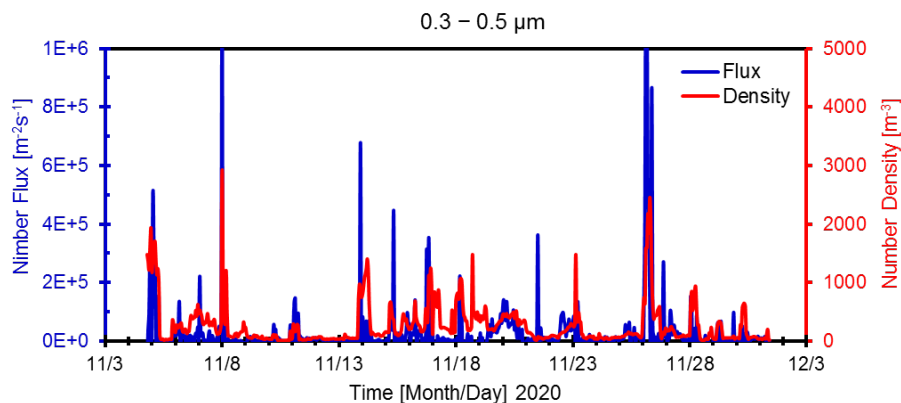


図2 0.3~0.5 $\mu\text{m}$ の粒径における粒子の海面フラックス（青）と数密度（赤）の時系列

## 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」を利用して、昨年度に引き続き沿岸域において渦相関法により海塩粒子の放出量を直接評価するための試験観測を実施した。約1か月にわたる観測期間中に $10\text{m}\text{s}^{-1}$ を超える風速を伴い海面破碎や白波の発生といった海塩粒子の放出が見込まれる状況下でのデータを今年度も得ることができた。昨年度に引き続いて粒子と気温、水蒸気との間に大気乱流により生じる変動の相似性がみられ、渦相関法において海塩粒子のフラックスを算出することができた。一方で、昨年度は10Hzの粒子数密度変動に局所的な海面破碎を伴うスパイク状の変動がみられたものの、今年度はみられなかった。この原因は、波しぶき計に大気試料を吸引するために用いるチューブの長さや設置形状にあるかもしれない。また今年度は、粒子数を検出する核となるレーザーの出力の異なる2台の波しぶき計の並行観測も実施し、高出力レーザーの方が粒径の大きい粒子の乱流変動を捉えることができるようになった一方で、小さい粒子の変動がなまって計測される結果も得られた。後者については、放出量の過小評価につながるため、今後この要因について明らかにしていく予定である。

## 成果発表

相木秀則, 近藤文義, 根田昌典, 田中 潔, 藤田敏男: 10Hz測定光学粒子計による海上波浪境界層観測, エアロゾル研究, Vol. 35, No. 3, pp. 160-169, 2020



(別紙様式4-2)

東南極ドームふじ観測拠点周辺で採取された雪氷ピットのHTO分析  
Analysis of HTO in snow pit samples taken from the Dome Fuji in East Antarctica

中澤文男、国立極地研究所・気水圏研究グループ

南極地域の気候・環境変化を捉えるためには、長期間にわたるモニタリング観測が必要不可欠である。しかし文明圏から遠く離れ、自然条件が厳しい南極大陸では、測器を使った気象・水文観測点は限られており、観測自体の困難さも相俟って、観測データの蓄積は乏しい。そのため氷床コアや積雪に記録されている代替指標(プロキシ)を使って、過去から現在までの気候・環境変化を再構築する研究が数多く行われている。

例えば、南極氷床上における地上気温は積雪の酸素同位体比と相関関係を示すことから、氷床コアの酸素同位体比を使って古気温を復元する取り組みはよく知られている。氷床コアや積雪試料の解析では、最初に試料の年代を正確に決める必要がある。

年間積雪量が多い南極沿岸域などでは、試料の酸素同位体比の深さプロファイルから、季節変動シグナルの数をカウントし年代決定を容易に行うことができる。しかし年間積雪量が10 cmに満たない南極内陸域では酸素同位体比の季節変動シグナルは不明瞭となり、他の手法を用いる必要がある。そこで本研究では、放射性同位水素(トリチウム)を指標とした年代決定を試みた。1950年代から1960年代初めにかけて行われた大気圏内核実験では、大量の人為起源トリチウムが環境中に放出され、核実験が禁止される直前(1963年ごろ)の降雪中のトリチウム濃度は、実験開始前よりも2桁も高い値となったことが知られている。南極地域では1966年ごろに降雪中のトリチウム濃度が最大となり、氷床コアや積雪試料のトリチウム濃度ピークはこの年代を反映していると考えられている。

本研究では、第59次南極地域観測隊(JARE59)で採取された積雪試料のトリチウム分析を行い、その年代決定を行うとともに、1960年代から現在までの気候変化を酸素同位体比の変動から読み解くことを目的として進めてきた。JARE59では、南極ドームふじ基地から南に約50 km離れたNDFサイトにて深さ4 mの積雪ピット観測を実施し、表層から3cm間隔で積雪試料を計134試料採取した。本研究では、これらの試料に含まれるトリチウム濃度分析をISEEが所有する低バックグラウンドベータ線係数装置を用いて行うとともに、同じくISEEが所有するPicarro L2130-iを用いて酸素同位体比分析を行った。

今年度は、分析を開始した6月に低バックグラウンドベータ線係数装置が故障し、コロナ禍の影響で修理が遅れたため、トリチウム試料の分析は約60試料に留まった。しかしながら、分析した試料からは深さ3.5 mにトリチウム濃度ピーク(130 TU)を検出することができ(図1a)、この深度が1966年前後の堆積層と考えられた。酸素同位体比の深さプロファイル(図1b)は、季節変動は見られないが、数年から数十年周期で発生していると思われる長期的な変動が見られた。また、表層付近では、高い酸素同位体比がみられ、この時期は温暖であった可能性がある。今年度の研究は試料の化学分析を中心に行ったため、データ解析まで十分に進めることはできなかったが、近年の温暖化を示唆するような興味深い結果を得ることができた。今後は、先行研究の結果と比較しながら試料の各層(深さ)の年代を詳細に決定し、酸素同位体比についてもより詳細な解析を行っていくことを計画している。

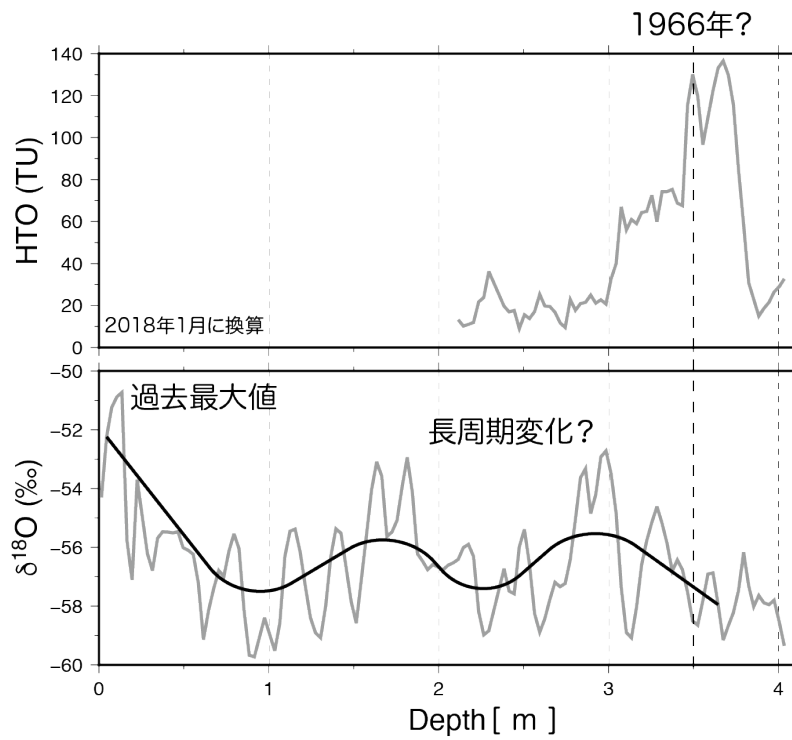


図1 ピット観測で採取された積雪試料中の (a) トリチウム濃度と、 (b) 酸素同位体比 ( $\delta^{18}\text{O}$ ) の深さプロファイル。トリチウム濃度値 (TU値) は放射壊変を考慮し、試料採取時 (2018年1月) の値に換算してある。

(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 magnetospheric plasma transportation-loss processes based on ground-based 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】

1) 時間方向に連続な画像データからその時空間特性によってPsAを検出し、on-off周期を抽出し、必要に応じて新たな画像解析手法も開発する. また地上磁場データにも同様な周期性が見られるか調査する.  
2) 衛星観測データにおいても、磁場や電子密度などの周期性を取り出し、PsAの周期性との比較を行うことで、類似性/非類似性について議論する.

### 【研究結果・考察・今後の方針】

昭和基地で取得された全天白色オーロラカメラ画像およびフラックスゲート磁力計における地上磁場変動を比較したところ、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いることが分かった. また、昭和基地の地磁気共役点であるアイスランドのTjörnes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. 前年度までの調査により、昭和基地からMLT1時間程離れ

ていたVan Allen Probes(VAPs)ではHissおよびWhistler mode chorusが観測されていることが分かっており，地上磁場で観測された地磁気脈動 (Pc5相当) がVAPsでも観測されているのか，また地磁気脈動とプラズマ波動との関連性を精査することが今後の重要な課題である．オーロラ画像に関しても，さらに短いスケールの変動に着目した周波数解析や主成分解析を実施して，脈動オーロラ周期の階層性について考察を進める．

これに加えて，近年発展の著しいグローバルMHDシミュレーションによって，このイベントにおける地磁気脈動を始めとする内部磁気圏内のダイナミクスを解析することを検討しており，地上・衛星における複数点における観測事実を4次元で理解することを目指す．

#### 【引用文献】

Davidson, G. T. (1990), Pitch-angle diffusion and the origin of temporal and spatial structures in morningside aurorae, *Space Sci. Rev.*, 53, 45-82.

Li, W., J. Bortnik, R. M. Thorne, Y. Nishimura, V. Angelopoulos, and L. Chen (2011), Modulation of whistler mode chorus waves: 2. Role of density variations, *J. Geophys. Res.*, 116, A06206, doi:10.1029/2010JA016313.

Liang, J., V. Uritsky, E. Donovan, B. Ni, E. Spanswick, T. Trondsen, J. Bonnell, A. Roux, U. Auster, and D. Larson (2010), THEMIS observations of electron cyclotron harmonic emissions, ULF waves, and pulsating auroras, *J. Geophys. Res.*, 115, A10235, doi:10.1029/2009JA015148.

Røyrvik, O., and T. N. Davis (1977), Pulsating aurora: Local and global morphology, *J. Geophys. Res.*, 82, 4720-4740.

Yamamoto, T. (1988), On the temporal fluctuations of pulsating auroral luminosity, *J. Geophys. Res.*, 93, 897-911.

(別紙様式 4 - 2)

ひさき衛星を用いた地球磁気圏プラズマに関する研究  
The study for magnetospheric plasmas using Hisaki satellite.

吉岡和夫 東京大学大学院・新領域創成科学研究科

本研究は、高度950-1150kmを周回する惑星分光観測衛星（ひさき）に搭載されている極端紫外光検出器のノイズデータを用いて、地球周辺（L=1-2）の放射線環境（特に高エネルギー陽子）を理解することを目的としている。

本年度はまず、ひさき衛星の構造質量モデルを構築し、Geant4シミュレーションにより、光検出器（MCP）に計数として影響を及ぼす放射線が30MeV以上の陽子であることを示した。さらに、2014年から2019年にかけて準連続的（SAA通過時は除く）に得られたひさき衛星の惑星観測データから、惑星由来の光ではなく、衛星近傍の放射線由来のノイズ成分だけを抽出し、ひさき衛星軌道に沿った陽子フラックス時系列データを作成した（図1）。

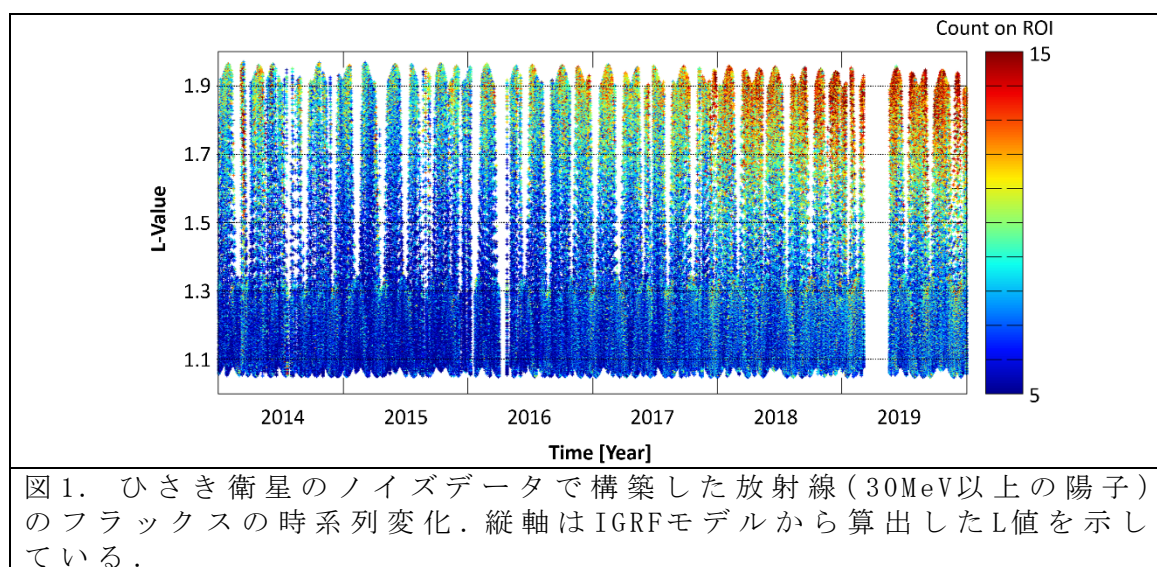


図1. ひさき衛星のノイズデータで構築した放射線（30MeV以上の陽子）のフラックスの時系列変化。縦軸はIGRFモデルから算出したL値を示している。

図1で示した陽子フラックスの時系列変化と太陽活動度の年変動から、いわゆる放射線帯の底に相当する熱圏領域（高度1000km, L=1-2）においてもCRAND粒子が多く存在していること、かつその増減が太陽活動度に依存していることが明確に示された。また、L値に依存してその増減にも大小がある（特にL値が大きいほど年変動が激しい）ことがわかる。これは、高エネルギー陽子の消失（高層大気との衝突）と供給（銀河宇宙線による中性大気加速）プロセスの変動で説明できる。すなわち、太陽活動度が低い時期（図1における2018年以降に相当）は、高層大気の密度が低下するため陽子の寿命が延び、さらに銀河宇宙線のフラックスは増えるため、熱圏における高エネルギー陽子も増える傾向にある。

このように、ひさき衛星が捉えたノイズデータのトレンドは太陽活

動度の変化によって説明できることが分かった。このことは逆に、ひさき衛星の軌道（高度1000km付近， $L=1-2$ ）においても太陽活動度に依存した高エネルギー陽子の変動が見られることが分かったとも言える。

本研究の成果は、そもそも放射線を観測すらために設計された衛星でなくても、そのノイズデータを使うことで衛星軌道に沿った放射線情報を抽出できることを示しており、ひさき衛星に限らず、特殊な軌道（例えば超低高度衛星など）のデータも放射線帯や熱圏における放射線のデータとして活用できる可能性を示している点で重要である。

本研究は米学会誌「Space Weather」に掲載され、編集者のピックアップ論文にも採択されており、その手法の独自性を含めて当該研究分野の研究者に注目を得ている。

### 【成果発表】

(学術論文)

Yoshioka, K., Miyoshi, Y., Kurita, S., Teramoto, M., Tsuchiya, F., Yamazaki, A., Murakami, G., Kimura, T., Kita, H., Yoshikawa, I., and Kasaba, Y., (2021). Long-term monitoring of energetic protons at the bottom of Earth's radiation belt. *Space Weather*, 19, e2020SW002611. <https://doi.org/10.1029/2020SW002611>.

(国内学会発表)

吉岡和夫、吉川一朗、山崎敦、村上豪、木村智樹、北元、土屋史紀、三好由純、栗田怜、寺本万里子、吉川一朗、The observational study for high energy particles below  $L=2.1$  using Hisaki, 日本地球惑星科学連合2020年大会、Virtual、2020年07月

小スケール大気重力波に伴う温度・風速変動の観測的評価  
Observational evaluation of temperature and wind perturbations  
associated with small-scale gravity waves

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～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(高度100 kmにおける東西南北方向のビーム間隔は58 kmあるいは22 km)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、より短周期・小スケール(周期1時間以下、波長数十km)の大気重力波の伝播を5方向ライダー観測から観測的に明らかにすることを目的とする。大気重力波は中間圏・下部熱圏(MLT: 80~120 km)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; Nastorm 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。

1分分解能で天頂と天頂角30°の5方向ライダー観測が実施されている2017年、2018年の冬季2シーズンにおいて、イベントを検索した。トロムソ観測所で稼働している大気光イメージング観測(OMTIs)を用いて「ライダーとの同時観測が実施されている」「空が晴れている」、「オーロラ活動が静穏」、「波動構造が確認できる」ことを条件に、10晩のイベントを抽出し解析をおこなったところ、おおよそ波長20-40 km、周期10分以下の変動をライダー温度で捉えることに成功した。これらの波動構造は大気光観測と整合性があり、OH大気光とライダーで観測された大気重力波は同一のものであることが示唆される。ただし、波動の空間スケールが水平空間(高度85 kmのOH大気光高度)におけるライダービームの間隔より小さいため、ライダー観測のみから、大気重力波の水平波長、伝搬方向を特定することはできなかった。一方で、ライダー観測で得られた鉛直風と大気光観測から算出される鉛直風は同程度の振幅であることがわかった。これは、2つの測器で観測された大気重力波構造が同一のものであることを強く支持する結果である。今後は、水平波長50-200 km程度の小スケール・メソスケール大気重力波を検出し、ライダー観測のみから大気重力波のパラメタリゼーションを試みる。

成果発表：

鈴木臣, 野沢悟徳, 小スケール大気重力波に伴う温度・風速変動の観測的評価：波動パラメータの検証, JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (オンライン開催), 2020.07.12-16.

別紙様式 4 - 2 )

あらせ衛星を用いた地磁気脈動の研究  
Study on Ultra Low Frequency waves using Arase satellite

寺本万里子、九州工業大学・大学院工学研究院

### 研究目的

あらせ衛星とVan Allen Probe衛星が観測した磁場データからPc5脈動指数を導出し、静止軌道より内側の内部磁気圏でのPc5脈動の活動度の長期トレンドについて調べる。また、太陽風との長期変化と比較することによって、Pc5指数と太陽風との関連を明らかにする。

### 研究方法

広いL値での観測を行なっている、あらせ衛星の磁場データに、FFTによって周波数スペクトルを導出し、Pc5帯の周波数のパワースペクトルを積分することでPc5指数を導出する。Van Allen Probes衛星とあらせ衛星の各観測から導出したPc5指数を比較し調整することによって、2012年から2020年にかけて単一でPc5指数を導出することを試みる。あらせ衛星・Van Allen Probes衛星によって導出されたPc5指数をL値ごとに分け、各L値でのPc5の活動度の長期トレンドを調べる。また、太陽風OMNIデータの動圧と太陽風との関係を調べる。

### 研究結果

静止衛星であるGOSE衛星磁場データから導出されたULF index [Kozyr et al., 2007]と、L値5~6であらせ衛星とVan Allen Probes衛星の磁場データで導出したPc5 indexを比較したところ、0.5以上の高い相関を示した。

あらせ衛星とVan Allen Probes衛星のPc5 indexのピークと太陽風動圧上昇・太陽風速度上昇との相関を調べたところ、高い相関を示し、相関係数は0.5以上であった。動圧上昇はindexよりも0-1.5日早く変化する一方で、太陽風上昇はPc5 indexよりも0-2日程度遅れることがわかった。

### 考察

太陽風速度上昇・動圧上昇は、Pc5 indexの変化と高い相関を持つ。特に動圧の上昇は、Pc5 indexよりも0.5-1.5日早く起きることから、太陽風動圧上昇によって、内部磁気圏でのPc5 band帯の変化が引き起こされると考えられる。CIRが起きている場合には地球近傍に置いて、動圧上昇に対して高速風が遅れて観測される。今回の解析によって、動圧変化が



太陽風上昇より早く起きたことは、平均的に CIR のイベントが多かったということが考えられる。

### まとめ

あらせ衛星、Van Allen Probes衛星の磁場データからPc5 indexを導出し、太陽風速度変化と太陽風動圧変化とを比較をした。Pc5 indexのピークと、太陽風動圧上昇と太陽風速度上昇は高い相関があり、太陽風動圧は、Pc5 indexのピークのタイミングと比較して、0-1.5日早く上昇することがわかった。

### 成果発表

- Teramoto, M., Y. Miyoshi, A. Matsuoka, N. Higashio, C. A. Kletzing, T. Takashima, R. Nomura, S. Kurita, S. Imajo, and I. Shinohara, Ultra low frequency wave index in the inner magnetosphere derived from Arase and RBSP satellites, 第148回 SGEPS 総会及び講演会, オンライン, 2 November 2020.
- Miyoshi, Y., S. Kurita, I. Park, T. Mitani, I. Shinohara, S. Kasahara, T. Hori, N. Higashio, S. Imajo, C. W. Jun, A. Matsuoka, Y. Kasahara, S. Matsuda, F. Tsuchiya, A. Kumamoto, M. Shoji, and D. L. Turner, Statistical investigation of cross energy coupling during magnetic storms: Arase observations, AGU Fall meeting 2020, online, 11 December 2020.

(別紙様式 4 - 2)

冬季石狩平野の筋状対流雲下の大気場変動について  
Atmospheric fields variability under the developed clouds at Ishikari  
i plain in winter

馬場賢治 酪農学園大学 酪農学研究科/農食環境学群

【研究目的】

冬季の石狩平野には、西高東低型の気圧配置による季節風により、筋状の対流雲が入り込み降雪をもたらす。この対流雲に関しては、先行研究が数多く存在し、現地観測やレーダー観測、気象モデルを利用したシミュレーション解析などが行われてきた。Shirooka and Ueda(1990)では、同地域において観測を行い、石狩湾から流入する対流性筋状積乱雲が陸地に流入する際、しゅう雪による下降流（スノーバースト）を捉え、数分から数十分の間に気温低下が生じることを示した。馬場ら（2016, 他）は、同地域の小学校の百葉箱を中心に簡易気象ロガーを展開し、10分間隔で計測を行い、筋状の積乱雲が流入した下では、気温低下に留まらず、気圧上昇が生じていることを捉え、その後振動が小さくなることを示した。しかしながら、筋状対流雲からの下降気流の可否や条件、メカニズムなど未知な部分が多く、一層の解析や調査が必要である。これらは事例を増やし、客観的に捉えることが重要である。本研究では、対流雲が引き起こす地上の大気場の変動を明らかにするために、より稠密な観測網を展開し、場の変遷を理解する。同時に気象モデル等を利用して物理的な解釈を行う。

【研究方法】

本研究では、筋状雲に因る地上での大気場の変遷を理解するため、数km間隔になる様に気象ロガーを小学校の百葉箱や簡易百葉箱を民間施設等に設置し、5分毎に観測を行う。春にデータ回収し、その後に解析を行う。特出した擾乱時について気象モデルCReSSを用いて、大気場の物理的な解釈する。

【研究成果と考察】

本年度は2020年12月から2021年3月の間に札幌・江別・当別・石狩・小樽の小学校を始めとした20箇所あまりに簡易気象ロガーを設置し、観測を行った。現在はデータを整理中であり、過年度の様な現象の洗い出しを行っている。

今回は、過年度のデータを用いて、結果を紹介する。図1は2015年2月14日13時10分の気象レーダー（カラートーン）、および、13時10分～同20分迄の10分間で気温低下（0.5℃～）と気圧上昇（0.5hPa～）が同時に生じた地点を赤で示してある。筋状雲（降水強度の大きい箇所）移動方向の前面付近において、変動が生じた箇所が存在しており、先行研究のShirooka and Uyeda(1990)を捉えている可能性が大きく、彼らの地上気温低下を伴ったダウンバーストを示し、且つ、気圧の上昇を確認出来た。降雪に伴うローディングの効果や昇華による潜熱移動による気温低下により下降流が強化され、気温低下と気圧上昇が地上で観測されたことが考えられる。この現象について、雲解像モデルのCReSSを用いて概ね500m格子のシミュレーションを行い、解析を進めている。対象時間には、石狩湾からの筋状雲に相当する場が再現さ

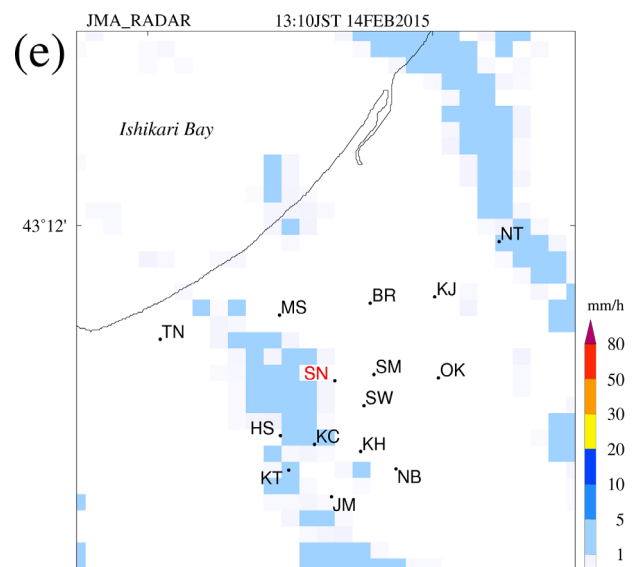


図1 気象レーダーと地上観測地点。

気象レーダーは13時10分。赤い地点は、13時10分から20分の10分間に0.5hPa増加且つ0.5℃低下の地点。

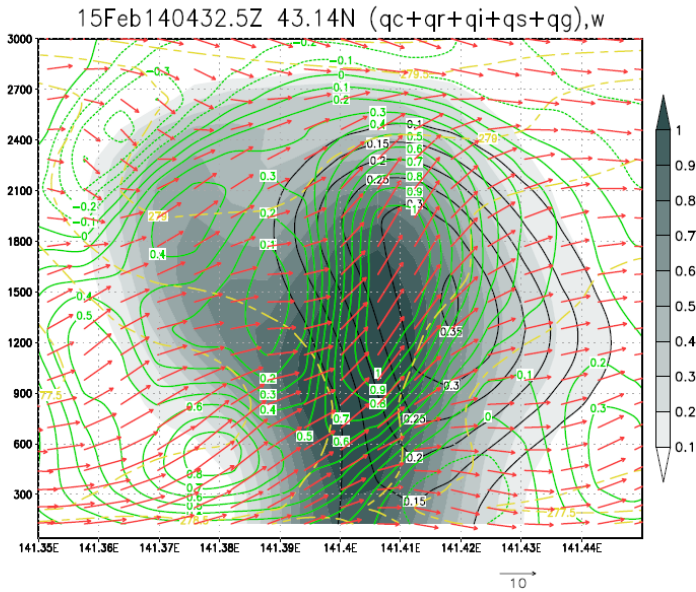


図2 CReSSによる2015年2月14日13時32.5分の北緯43.14N鉛直東西断面図.

矢羽根は東西と鉛直(10倍), シェードは $qr+qi+qs+qg(g/kg)$ , 黒実線は $qs(g/kg)$ , 緑線は鉛直速度(m/s), および黄線は相当温位(K)を示す.

れており, その場に沿って, 地域的な気圧上昇がみられる場合も確認された. その地域の東西鉛直断面の一部を図2に示す. シェードは,  $qr$ (rain water mixing ratio),  $qi$ (cloud ice),  $qs$ (snow), および $qg$ (graupel)の積算(g/kg), 黒実線は $qs(g/kg)$ , 緑線は $w$ (z components velocity), 黄色線は相当温位, 矢羽根は $u$ (zonal velocity)と $w*10$ (m/s)を表している. この図からは進行方向の東側に雪の割合が多く, その下に下降流が存在している. その場の最下層では気圧上昇が現れていた.

#### 【今後の課題】

過年度のデータに本年度のデータを加え, 事例数を増やし, 本事例の一般化を行う予定である. 次年度の観測も引き続き行う. また, CReSSのシミュレーションにより現象が再現されていることから, 物理的なメカニズムについて先行研究を再確認しながら, 今後理解を進める予定である.

#### 【参考文献】

- ・Shirooka, R., and H. Uyeda, 1990: Morphological structure of snowburst in the winter monsoon surges. J. Meteor. Soc. Japan, 68, 677-686.
- ・馬場 賢治, 冬季石狩平野における筋状雲性降雪が齎す地上気温と気圧の短時間変動, 日本生気象学会, 55(3) 39-39, 2018年10月.
- ・馬場賢治, 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.
- ・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.

(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/HFC類の経年変化の解析  
Trend analysis of HCFCs and HFCs observed with Fourier-Transform  
Infrared Spectrometer

中島英彰、国立環境研究所・地球環境研究センター

< 研究目的 >

フーリエ変換赤外分光器 (FTIR) を用いて、太陽光を光源に赤外分光観測を行うと、上空の様々な大気微量成分の鉛直カラム量や高度分布を導出することが可能となる (Nakajima et al., 2020)。名古屋大学宇宙地球環境研究所では、1995年より北海道・陸別町においてFTIRを用いた大気微量成分の観測を行ってきており、長年の観測スペクトルの蓄積がされている。南極昭和基地でも2007, 2011, 2016年の3年間、FTIRを用いた同様の観測を行ってきており、合わせると20年以上にわたる長期観測データがある。本研究では、北海道・陸別及び南極昭和基地で観測された分光スペクトルを用い、最近特定フロンの代替物質として大気中濃度が増加してきている、HCFCやHFCの気柱全量や高度分布を導出し、その経年変化を調べようとするものである。

< 研究方法 >

今年度は、HCFC-22とHFC-23の2つの代替フロンを、sfit4と呼ばれる解析プログラムを用いて解析した。HCFC-22は、モントリオール議定書で規制されたCFC-11やCFC-12などの特定フロンの代替物質である。HFC-23はHCFC-22生産時の副産物として放出されるガスであり (McCulloch and Lindley, 2007)、100年間の地球温暖化係数 (GWP-100 years) が12,690と非常に大きい温室効果ガスである (Montzka et al., 2019)。用いた赤外観測スペクトルは、北海道陸別町で得られた1997年から2020年までの観測スペクトルと、南極昭和基地で得られた2007, 2011, 2016年の3年間の観測スペクトルである。その結果を、北半球や南半球における地上観測の値と比較し、観測精度の比較検証を行った。

< 研究結果 >

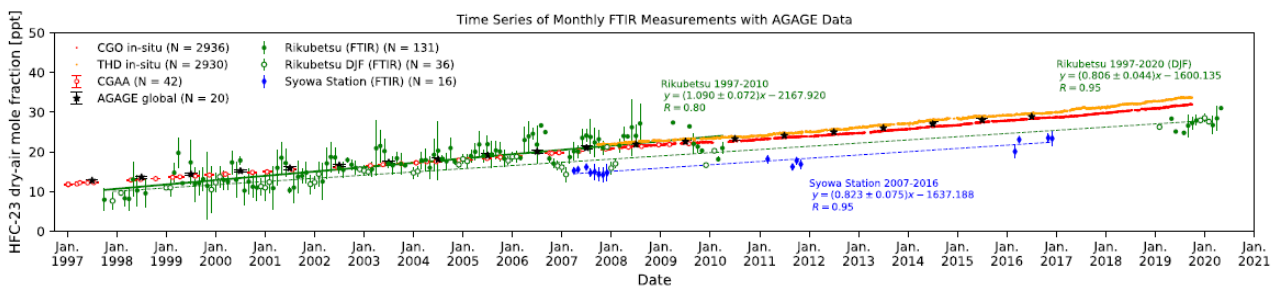


図 1 陸別及び昭和基地の FTIR と CGO, THD における GC/MS による HFC-23 の時系列

図 1 に、今回の解析で得られた HFC-23 の月平均値の時系列変化を示す。緑丸が陸別における FTIR の解析値、青丸が昭和基地における FTIR の解析値を示す。両観測点とも、1997 年の観測開始から最近まで一貫した HFC-23 の増加傾向をとらえることに成功している。図 1 中の赤色で示したのはオーストラリア・Cape Grim (CGO: 41°S, 145°E) の、オレンジ色で示したのは米国カリフォルニア州・Trinidad Head (THD: 41°N, 124°W) で地上設置ガスクロマトグラフィー・質量分析計 (GC/MS) で測定された HFC-23 のモル混合比を示す。これらの地上連続観測データは 2007 年からしか存在しないが、それ以前の年に所々データがあるのは、Cape Grim で過去にサンプリングされたアーカイブ空気を後に解析したデータである。FTIR 観測値とこれら地上観測値の間には、おおむね良い一致が見られた

が、南極のFTIR観測値には約25%の、陸別のFTIR観測値には約15%の負のバイアスが存在することも判った。これらのバイアスの原因に関しては、HFC-23の解析に用いている実験室データから作られた疑似スペクトル線パラメータの系統的誤差や、温度依存性の誤差などの原因が考えられ、現在のその原因に関して考察を行っているところである。

またここでは詳しくは述べないが、HCFC-22の解析も併せて行っており、こちらには最近になって増加傾向の鎮静化がみられてきている。これは、HCFC-22の生産を大量に行っている中国など東アジア諸国で、モントリオール議定書に従ってHCFCの生産が減少し、HFCへ切り替わってきていることを示唆するものと考えられる。

#### <まとめ>

これまで地上FTIR観測スペクトルからHFC-23を導出した例は世界的に見てもなく、本研究が世界初である。今後は本解析手法を世界各国のFTIR研究者と共有し、世界で数10か所存在するFTIR観測点における観測スペクトルを解析することで、HFC-23の世界的な分布をより詳細に明らかにすることが出来るものと期待される。

#### <引用文献>

McCulloch, A. and Lindley, A. A.: Global emissions of HFC-23 estimated to year 2015, *Atmos. Environ.*, 41, 1560-1566, 2007.

Montzka, S. A., et al.: Hydrofluorocarbons (HFCs), Chapter 2 in *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018, Global Ozone Research and Monitoring Project-Report No. 58*, WMO, 2019.

Nakajima et al.: Chlorine partitioning near the polar vortex edge observed with ground-based FTIR and satellites at Syowa Station, Antarctica, in 2007 and 2011, *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 1043-1074, 2020.

#### <成果発表>

Nakajima, H., I. Murata, et al., Chlorine partitioning near the polar vortex edge observed with ground-based FTIR and satellites at Syowa Station, Antarctica in 2007 and 2011, *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 1043-1074, 2020.

Takeda, M., H. Nakajima, I. Murata, T. Nagahama, I. Morino, et al., First ground-based FTIR observations of HFC-23 at Rikubetsu, Japan, and Syowa Station, Antarctica, *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, doi:10.5194/amt-2020-505, 2021.

Nakajima, H., I. Murata, Y., et al., Chlorine partitioning near the polar vortex edge observed with ground-based FTIR and satellites at Syowa Station, Antarctica in 2007 and 2011, *EGU 2020 General Assembly, On-line*, May 4, 2020.

(別紙様式 4 - 2)

## 低バックグラウンドベータ線計数装置によるトリチウムの測定

Measurements of tritium using Quantulus counters

門叶 冬樹、山形大学・理学部

### 研究目的

トリチウム (T or  $^3\text{H}$ ) は、大気中の窒素、酸素をターゲットとして宇宙線による破砕反応によって生成される最も軽い宇宙線生成核種である。宇宙線生成核種であるBe-7やBe-10は、エアロゾルに付着して地表に降下する生成核種であり、C-14は気体(二酸化炭素)の生成核種である。トリチウムは水蒸気の形状のトリチウム水 (HTO) であるため、降水や降雪として地表に降下し河川、湖、海洋に移行し、蒸発して大気と循環する。このため、エアロゾルや気体と異なる水蒸気の大気中挙動を調べるための宇宙線生成核種として重要である。トリチウムは宇宙線生成核種であるため、その生成強度は太陽活動の変調を受けると考えられ、またその半減期が12.3年のため、毎年サンプルを採取して11年周期活動を調べることは原理的には可能である。しかしながら、トリチウムの宇宙線生成核種としての強度変動を調べた例はほとんど無い。降水中のトリチウム濃度の強度変動を調べるのが本研究の目的である。

### 研究方法

トリチウムは最大エネルギーが約18 keVの $\beta$ 線核種であるため、低バックグラウンドの放射線測定が必要である。Quantulusは名古屋大学ISEEおよび山形大学が有する世界最高感度の超低バックグラウンド液体シンチレーションカウンターであり、低バックグラウンド特性に優れたトリチウム測定モードをもっている。Quantulusを用いて降水・降雪中のトリチウム濃度測定を行い、トリチウムによる宇宙線強度変動測定の可能性を調べる。

### 研究結果

本年度は、Quantulusのトリチウム測定モードでの波高スペクトルについて水道水試料を用いてシンチレータと試料の比率の依存性を調べた。また、2021年12月の降雪試料のテスト測定を行った。図1は、山形大学のQuantulusによりシンチレータ(S(ml))と水道水(W(ml))の割合が各々10:0, 9:1, 7:3, 5:5, 3:7, 1:9の場合の測定波高スペクトルをトリチウム標準試料スペクトルと共に示している。標準試料は30チャンネル付近にピークを示し、幅が70チャンネルの分布となっている。水道水試料は、いずれも30チャンネル付近にピークを示し、シンチレータのみに比べて計数率は大きい。さらに水試料の割合が大きくなるにつれて70チャンネル以上の計数率が減衰しているが、十分には落ち切っていない。図2は、シンチレー

タ(S(ml))と水(W(ml))の割合を3:7にしたときの降雪水と水道水の試料の波高スペクトルであり、ほぼ同様の分布であった。

最近の日本における雨水(蒸留後)の測定値は、0.11-1.04 Bq/L(2000-2005@熊本)などの報告がある(百島 J. Plasma Fusion Res. 2009)。我々の測定結果は0.2~2 Bq/Lの間程度と思われるが、未だバックグラウンドの差引きの不定性が大きい。試料水中のトリチウム濃度を良い精度で求めるためには、さらに正確なバックグラウンドスペクトルを求める必要がある。そのためには、水試料に含まれる微量イオンなどによるケミルミネッセンスの効果(蒸留水との比較)の推定とトリチウムを含まない水試料(深層水や深い地下水など)の測定を行う必要があり、今後これらの測定を行う。

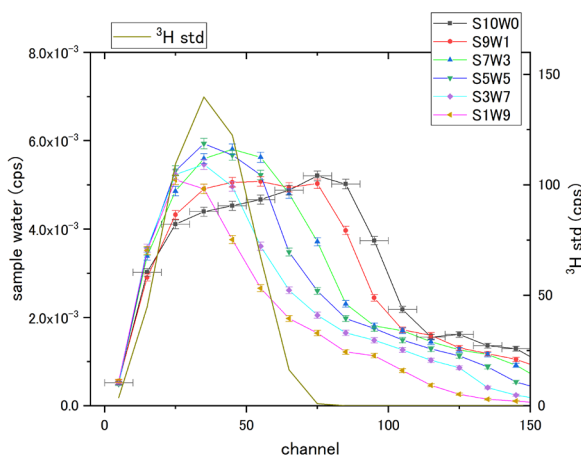


図1. シンチレータ(S(ml))と水道水(W(ml))の割合が異なる場合の測定波高スペクトル

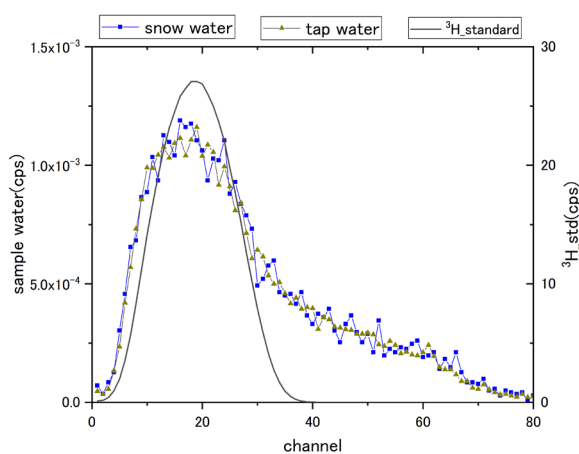


図2. 降雪水と水道水の測定波高スペクトル

[参考文献]

環境トリチウムの現状と分布: 2 雨のトリチウム

百島則幸 J. Plasma Fusion Res. Vol. 85, No. 7 (2009) 426-428



(別紙様式 4 - 2)

大気放射モデルを用いた  
「ひまわり」シミュレーション画像の作成と応用  
Simulation of the "Himawari" Observation  
using Radiative Transfer Model and its Applications  
吉崎徳人 気象庁気象衛星センターデータ処理部解析課

本研究は、ひまわり8号、9号の観測値の従来の評価手法の検証、改修を行い、「ひまわり」観測値の品質管理の高度化を目指したものである。

近年の気象衛星観測の充実は著しく、従来よりも時間・空間・波長分解能および観測精度が改良された観測機器が各国の気象衛星に搭載されている。このため、近年は定性的な画像としての利用だけでなく、定量的なデータとしても観測値が利用されるようになった。しかし、世界各国が運用している気象衛星に搭載されている観測機器の性質は必ずしも一様ではなく、気候モデルや長期解析に利用するためには、世界中の複数の気象衛星の観測値を一つの均質なデータセットにまとめる必要がある。

世界気象機関(WMO)等の傘下に設置された全球衛星搭載センサー相互校正システム(GSICS)と呼ばれる枠組みでは、不確かさが小さく且つ衛星間で一貫した放射量の校正、評価手法の開発が議論されている。同枠組み内では、可視近赤外バンドを評価する際の基準となるセンサーとして、長年NASAの運用するAqua/MODISが利用されてきた。しかし、Aquaは打ち上げから約20年が経過し、センサーの感度劣化が懸念されるため、Aqua/MODISに代わる基準センサーとして、NOAA20/VIIRSまたはS-NPP/VIIRSを利用することが提唱されている。

ひまわり8号搭載センサーであるAHIの可視近赤外バンドの評価手法として、放射伝達モデルRSTARを用いたRSTAR代替校正と呼ばれる手法を採っている(Nakajima and Tanaka, 1988)。本手法では、Aqua/MODISの観測値から得られた物理要素を入力値として、ひまわり8号の観測値をシミュレーションし、得られた計算値と実際に観測された観測値を比較することで観測値の評価を行う。

当センターでは、基準となるセンサーの更新に対応するため、Aqua/MODISの代わりにS-NPP/VIIRSを用いたRSTAR代替校正の開発を行っており、数%の違いはあるが、S-NPP/VIIRSを用いた場合でもAqua/MODISを用いた場合と同等の結果が得られることが確認されている(Yogo, 2019)。本研究では、観測データの特性をより詳細に考慮して入力する物理要素の値の品質確認を厳格化することにより、従来のAqua/MODISを用いた評価よりも同程度以上の精度でひまわり8号の観測値を評価することを目的とした。

今回は、水雲を対象とした計算を行い(Nakajima and Tanaka, 1988)、ひまわりB03の放射輝度、B13の輝度温度、雲の光学的厚さ、雲粒有効半径についての検討を行った。厳格化した品質管理の下で得られた評価結果を図1左に示す。図1右は従来のAqua/MODISを用いた評価結果である。本研究の評価結果の方が従来の評価結果に比べて相関係数が改善している一方、回帰直線の傾きは過大となっていることが分かった。計算結果を解析すると、傾きの過大傾向は光学的厚さが大きくなるほど著しくなることが分かった。要因としては、雲の3次元的な不均質性など、RSTARによる計算で取り入れられていない効果による影響等が考えられる。

今後、品質管理手法についてはさらに検討を行う必要がある。また、今回の計算は7日分の特定時刻の観測値に対して行ったが、実際の評価は30日分の観測値に対して行うため、さらに期間を延ばした計算結果による検討も必要である。

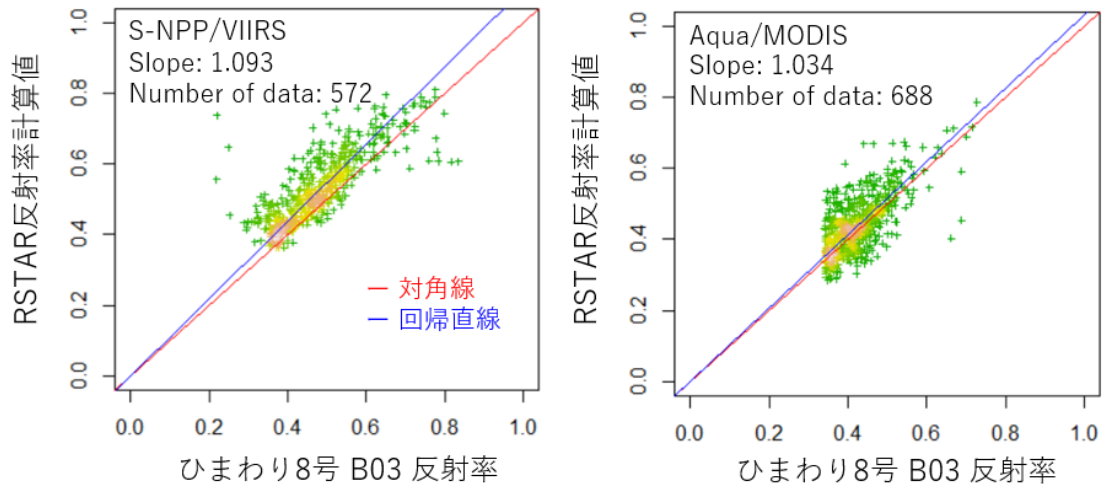


図1 左) ひまわり8号B03反射率とS-NPP/VIIRS観測値を入力値としたRSTARによるシミュレーション結果の散布図、右) ひまわり8号B03反射率とAqua/MODIS観測値を入力値としたRSTARによるシミュレーション結果の散布図  
いずれも2021年1月20-26日の03-04UTCの観測値を用いた。

参考文献

Nakajima, T. and M. Tanaka, (1988) Algorithms for radiative intensity calculation s in moderately thick atmospheres using a truncation approximation, J. Quant. S pec. Rad. Trans., 40, pp. 51-69

Y. Yogo, (2019) Use of VIIRS in AHI vicarious calibration, <http://gsics.atmos.umd.edu/bin/view/Development/AnnualMeeting2019> (最終アクセス日：2021年3月30日)

Nakajima, T. Y. and T. Nakajima, (1995) Wide area determination of cloud micro physical properties from NOAA AVHRR measurement for FIRE and ASTEX regions, J. Atmos. Sci., 52, pp. 4043-4059

成果発表

田中秀昂、奥山新、吉崎徳人「VIIRSを基準として放射計算を用いたひまわり8号の代替え校正手法の開発」、GPMおよび衛星シミュレータ合同研究集会、名古屋大学(2021年3月)

## SIに伴い中緯度 SuperDARNで観測される sea/ground backscatter 振動現象と FLR 現象の 関係

### SI-associated FLR and their relation to oscillations in the sea/ground-backscatters observed by mid-latitude SuperDARN radars

研究代表者：河野英昭、九州大学・国際宇宙天気科学・教育センター  
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・教育研究系  
田中良昌、国立極地研究所・教育研究系  
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(Alfvén modeでの振動)と共鳴(Field Line Resonance, **FLR**)しうる事が報告されている [e.g., Southwood and Kivelson, 1990]。しかしFLRにおいてこれまで主に注目されていた磁力線固有振動はtoroidal mode (東西方向の振動)であった。地上磁場ではこの成分が頻繁に観測されるためである。

一方高緯度SuperDARN radars (以下 **SD radars** 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 sea/ground backscattered signals (以下 **SGBS** 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]。SGBS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振動が上記波動の成因と考えられる。また、上記のSGBS長時間振動期間中にFLRが観測された例も報告されており [e.g., Ponomarenko et al., 2005]、それにより生じる磁力線固有振動は poloidal mode (動経方向の振動)とされている。上記論文の中のeventsでは **SI** との関連は見られなかった。

一方、中緯度(高緯度より磁力線が鉛直方向から傾いている。また沿磁力線プラズマ質量総和がより大きい為固有振動しにくい)の **SGBS** 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、中低緯度でも磁気圏プラズマの振動を引き起こしやすい**SI** 現象の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 radarsのデータも見る。まずSIの事例を集め、それらについて **SGBS-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】

本研究は昨年度までにも行っており、一昨年度は、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例の解析研究を行った。このイベントはHankasalmi, Finland (磁気緯度59.1°N、磁気経度104.5°E。以下HANと記す) のSD radarでもPykkvibaer, Iceland (磁気緯度64.6°N、磁気経度57.3°E。以下PYKと記す) のSD radarでも観測されており、一昨年度はHAN Beam#1,4,7、PYK Beam#0,3,8,13 を解析した。

このイベントは特にHAN Beam#1とPYK Beam#13において明瞭に観測され、~14hr UT以降 **SGBS** が定常的に観測され、~15:10UT開始のSIとほぼ同時に**VLOS**の波動現象が開始し~30分継続した。その波動現象は**SGBS** の見られたrange gates (以下RGと記す) 範囲内において観測された。その**VLOS**の振幅と位相は、HAN Beam#1においてもPYK Beam#13においても、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、HAN Beam#1でもPYK Beam#13でも**VLOS**の最大値が100m/sを超えていたため、**SGBS** 領域内ではあるがionospheric backscattered signals が混在したものである可能性が高いと考えるに至った。

この波動現象の周波数からSchulz [1996] の近似式 (磁力線に沿っては等密度と仮定した場合の式) を用

いて推定したプラズマ密度は、正午子午面から遠いほど小さい、という傾向を示した。これは、SIによる磁気圏の圧縮が磁気圏正面(nose)から開始し尾部に伝わっていく事とconsistentである。

ただ、各radarともbeam数は#0から#15までの16あるのに全てのbeamsを一昨年度中に解析できなかったのは、密度を求めるまでの解析の各ステップで目視による確認を行わなければならない為時間がかかった為であった。本研究では多数のSI eventsについて多数のSD radars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、昨年度は、目視確認に要する時間の短縮のため、FLRを自動同定する方法の開発とそのテストに着手した。その方法は、各beam、各RG毎にそのVLOSデータにFFTをかけ、その後、同じbeam上で近接した2つのRG'sのデータに位相差法・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。

位相差法・振幅比法は隣接した地上磁力計2点のデータからFLRを同定する方法として確立しており、SD radarのVLOSデータにも適用可能である。ただ、位相差法・振幅比法によるFLR同定の自動化についてはこれまで様々な方法が提案されているが確立した方法は無い。我々はSD radarの1つのbeamのVLOSデータに位相差法・振幅比法を適用してFLRを自動同定するプログラムの開発を開始した。そのプログラムが目的通りに動くかのテストとして、上記の7 beamsにそれを適用し、昨年度にその7 beamsのVLOSデータの目視で同定していたFLR locations (sets of the beam number and the RG number)が自動同定されたかどうかを調べながらプログラムを改良していき、殆どのFLR locationsが自動同定されるまで進めた。

その際判った事として、その自動同定が成功したのは、使用する2つのRG'sの間隔が2(例:RG#15と#17)(距離にして約80km)の場合であった。これは、FLRのresonance width(共鳴幅; FLRに伴う電磁エネルギーの拡散散逸の空間スケールを反映する重要な物理量)を観測同定したものと考えられる。

上記の後、上記プログラムは1つのbeamのみに適用できるものである事から、全beamsに一括適用できるプログラムへの改良を進めた。現時点でまだ完成には至っていないが、途中経過として、上記FLR eventのHAN, PYKの全てのbeamsのdataについて自動同定を行うに至っており、その結果、目視では見落としていたeventsが数例同定された。それらはVLOSの最大値が20~50m/sであった事から電離層の鉛直運動を見ているのではないかと考えられ、現在そのより詳しい解析を行っている。

#### 【引用文献】

Schulz, JGR, p17385, 1996.

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, Automatic identification of FLR events in VLOS data of multiple SuperDARN radars, Japan Geoscience Union Meeting 2020, JpGU-AGU Joint Meeting, 2020.07.12-16, Virtual Meeting.

Hideaki Kawano, Akira Sessai Yukimatu, Nozomu Nishitani, Yoshimasa Tanaka, Satoko Saita, and Tomoaki Hori, Toward automatic identification of FLR simultaneously observed by multiple SuperDARN radars, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第148回 総会・講演会、2020.11.02, Virtual Meeting.

Hideaki Kawano, Akira Sessai Yukimatu, Nozomu Nishitani, Yoshimasa Tanaka, Satoko Saita, and Tomoaki Hori, Toward full-automatic FLR identification and density estimation from SuperDARN VLOS data to identify magnetospheric regions, The 11th Symposium on Polar Science, 2020.12.14, Virtual Meeting.

河野 英昭、行松 彰、西谷 望、田中 良昌、才田 聡子、堀 智昭、SuperDARN radarの1 scan中の全FLR events自動同定の進展報告、SuperDARN研究集会、2021.03.05, Virtual Meeting.

(別紙様式 4 - 2)

コヒーレントなホイッスラー波の励起および減衰過程  
Excitation and damping processes of  
coherent whistler waves

天野孝伸 (東京大学・理学系研究科)

無衝突の磁化プラズマ中では、一般に磁力線平行方向と垂直方向で温度が異なる温度異方性が衝突による緩和を受けずに長時間維持される。実際に宇宙空間の様々な領域において温度異方性が観測されている。垂直方向の温度が平行方向の温度よりも高い場合には、異方性を持つ成分が電子の場合にはホイッスラー波が、イオンの場合にはイオンサイクロトロン波がそれぞれサイクロトロン共鳴を介した不安定によって励起される。これらは粒子の散乱や加速において重要な役割を果たすと考えられている。本研究では特に電子が励起するホイッスラー波について、MMS衛星による観測データを用いた議論を行った。また、磁気シースでは、イオンの温度異方性を起源とする磁気ミラー構造にホイッスラー波の励起領域が埋め込まれていると考えられているが、この磁気ミラー構造の基本的な性質について観測的に調査した。

磁気シースにおけるホイッスラー波は磁気ミラー構造中の磁場強度の極小点付近に局在化して観測されることが知られている。これは波の励起領域がこの領域に局在化していると同時に、それ以外の領域では強い減衰を受けていることを示唆している。MMS衛星のバーストモード観測データを用いたホイッスラー波の詳細解析から、磁場強度の極小点付近において明瞭なポインティングフラックスの反転が見出され、確かに波動が局在化した領域から放射されていることが確かめられた。また、詳細な波形の解析から波動は非常に速い成長率を持つことや、励起領域が一様ではなく、ある程度の構造を持つことを示唆する結果を得た。

磁気ミラー構造はミラー不安定性の非線形発展の結果として生成されることが考えられているものの、観測的な裏付けは難しく、また数値シミュレーションでも再現されているとは言い難い状況にある。そこで、MMS衛星観測データを用いて、観測された磁気ミラー構造の性質を調べた。ミラー不安定性はゆっくりと進行するため、粒子の運動エネルギーと第一断熱不変量が保存しながら時間発展すると考えることができ。一方で、不安定性が飽和し、準定常な磁気ミラー構造が形成されるには、この仮定が破れ、粒子の冷却が起らなければならないと理論的に予想されていた。MMS衛星のデータから保存量の解析を行い、特に磁場強度の極小点付近で粒子の冷却が起きていることを示唆する結果が得られた。

(別紙様式 4 - 2)

「あらせ」衛星によるリングカレント領域低エネルギーイオンの加熱  
現象の解析

Study of perpendicular heating of supra-thermal ions in the  
inner magnetosphere

浅村和史(JAXA 宇宙科学研究所)

コロナ禍のため、経費として計上していた出張による対面での会合は実施できなかったが、Zoomを用いた共同研究を実施した。本年度の主たる成果は以下である。

- 1) あらせ衛星の低エネルギーイオン観測器、磁場観測器、波動観測器のデータを用いて、低エネルギーイオンが磁力線垂直方向に加熱されている現象とMSWと呼ばれるプラズマ波動との対応関係の研究を実施した。さらに波動と粒子の位相差を直接検出して、両者の内積を計算し、波動と粒子のエネルギー交換過程を定量的に導出した。得られた成果は、国際会議(ISEEシンポジウム)で報告した。
- 2) あらせ衛星低エネルギーイオン観測器(LEPi)における飛行時間分析データを用いた重イオン、分子イオンの導出手法の開発を行った。本研究成果は、名古屋大学工学部学生の卒業論文としてまとめられた。

(別紙様式4-2)

ドローンを利用した森林生態系のリモートセンシング  
Remote sensing of forest ecosystem using drone

山本一清、名古屋大学・大学院生命農学研究科・教授

## 研究目的

日本の森林の約4割を占める人工林の多くが、現在成熟期を迎えている。適切な森林管理及び利用には正確な森林の情報が必要であるが、森林情報の不正確性はこれまでも多く指摘されてきたように、社会的な問題となっている。しかし、広大な森林域の情報をマンパワーのみにより計測することは不可能である。そのため、森林を迅速に観測・モニタリングする方法としてリモートセンシング技術が急速に実用されつつある。

一方、国内の森林所有者の多くは小規模林家が占めており、実施される間伐等の森林管理も小規模で時期も分散していることから、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(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いる。従来の衛星画像や航空機による観測と異なり、ドローンは小面積を対象とした観測に適しており柔軟な運用が可能である。しかし、ドローンによる森林計測結果がどの程度安定して取得できるかについて検討された例は殆どない。

以上のことから、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に設置した試験地を継続して空撮し、ドローンによる森林計測結果の安定性について検討した。

## 研究方法

対象地は、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(以後、稲武サイト)内のヒノキ人工林である。対象地において、10m×15m(0.015ha)の方形プロット6つ設置し、2019年10月に森林3次元計測システムOWLにより、立木位置座標の計測を行った。

一方UAV空撮は、2020年6月～2021年3月の期間に6回に撮影高(離発着点からの高度差)90m,110m,130mにより実施した。空撮は、DJI Mavic2 Professional(DJI社製、中国)によりDJI GS PRO(DJI社製、中国)のオートパイロットモードで、オーバーラップ率・サイドラップ率を90%に設定して実施した。なお、空撮は全て技術職員の岡本渉氏により各種許可を得た上で実施した。

空撮により得られた画像(以後、空撮画像とする)は、MetashapeによりSfM処理を実施し、高密度点群を生成した。なお、空撮画像のアライメント及び高密度点群生成におけるモードは全て「高」で行った。また、得られた高密度点群から林冠復元解析手法(中武ら,2018)による高密度点群解析システムにより樹頂点座標(解像度1/3m)(以後、UAV樹頂点とする)を算出した。さらに、2014年に同地域内を観測した航空機LiDARデータを用いてUAV樹頂点の補正を行った。



得られた樹頂点を立木位置座標と比較して立木検出精度について、各測定回間の比較を行った。

## 研究結果・考察

図1に示したように、撮影日による多少の変動はあるものの、いずれの空撮高度においても、空撮日間の検出率に有意な差は認められなかった( $P>0.05$ )。したがって、撮影条件(オーバーラップ率・サイドラップ率)が同じであれば、撮影時期に関わらず安定した立木検出が可能であると考えられた。

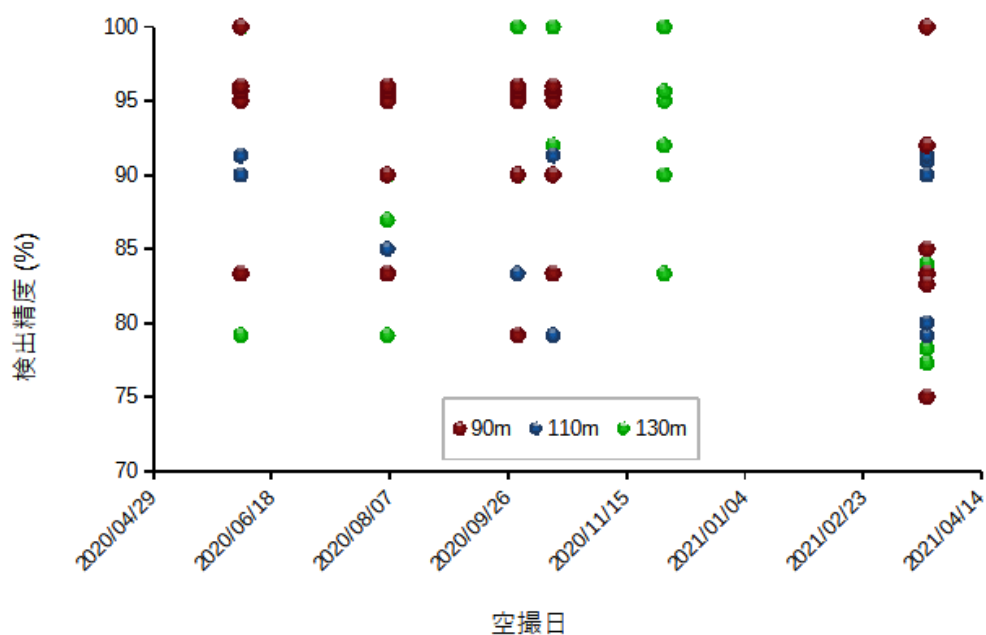


図1. 空撮日ごとの検出精度

## まとめ

ドローン空撮による森林計測は、撮影時期に関わらず安定した立木検出が可能であると考えられた。

## 引用文献

中武修一・山本一清・吉田夏樹・山口温・宇野女草太 (2018) 航空機LiDARによる単木樹種分類手法の開発. 日本森林学会誌 Vol.100(5), p.149-157.

## 成果発表

山本一清・吉田圭佑・島田博匡、撮影条件の差異がSfM処理に与える影響の評価(2)、第132回日本森林学会大会、2021年3月19日～2021年3月23日、Web開催

吉田圭佑・山本一清・島田博匡、UAVによる森林計測精度の評価、第10回中部森林学会大会、2020年12月6日、オンライン開催

(別紙様式 4 - 2)

グローバルモデルと素過程シミュレーションによる地球内部磁気圏での波動粒子相互作用の研究

Study of wave-particle interactions in the inner magnetosphere by global model and PIC 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スターモード・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

2020年度における研究課題の成果は以下の通りである。

連成計算1について、2017年3月に発生した磁気嵐を対象に実施したグローバルモデルによる計算結果の解析をさらに進めた。さらに、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。以上の成果は **JpGU-AGU Joint Meeting 2020** で報告された。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ている。

本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。2021年度は衛星観測結果を初期条件として連成計算 2 を実施して、モデル計算結果の有効性を検証することを計画している。

(別紙様式 4 - 2)

ERG衛星搭載中間エネルギー電子・イオン観測器のデータ解析  
Data analyses on medium-energy electron and ion sensors onboard ERG

笠原 慧、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

ジオスペース探査衛星ERGの基幹的観測器である、中間エネルギー帯(10-200 keV)のイオン分析器、電子分析器のデータ解析に関する議論を行う。ERG衛星のターゲットは放射線帯における相対論的電子の加速・消失であるが、そのメカニズムとして有力な候補が波動粒子相互作用である。相対論的電子を加速・消失する電磁波動を励起するのが中間エネルギー帯のイオン・電子であると考えられているが、実証的な観測結果はこれまで乏しい。この極めて重要なトピックに対して新たな知見を生み出すべく、中間エネルギー粒子分析器のデータ解析を推進する事が本研究課題の目的である。

### 研究方法

ERG衛星搭載中間エネルギー粒子分析器の観測について、以下の3点を中心に議論した。

- (1)データの較正状況の確認、運用計画へのフィードバック
- (2)データプロダクトの整備
- (3)データの解析状況(科学的観点)

隔月でオンラインでの定例会を実施し、緊密な情報共有を図った。

### 研究結果

軌道の変化に合わせた運用計画の立案などと並行してデータ整備も進め、JGR誌のERG衛星特集号に多数(10件程度)の論文を投稿することができた。

### 成果発表

- Inaba, Y., K. Shiokawa, S. Oyama, Y. Otsuka, M. Connors, I. Schofield, Y. Miyoshi, S. Imajo, Atsuki Shinbori, A. Gololobov, Y. Kazama, S.-Y. Wang, S. Tam, T.-F. Chang, B.-J. Wang, K. Asamura, S. Yokota, S. Kasahara, K. Keika, T. Hori, A. Matsuoka, Y. Kasahara, A. Kumamoto, S. Matsuda, Y. Kasaba, F. Tsuchiya, M. S. hoji, M. Kitahara, S. Nakamura, I. Shinohara, H.E. Spence, G. D. Reeves, R. J. Macdowall, C. W. Smith, J. R. Wygant, J. W. Bonnell, "Multi-event Analysis of Plasma and Field Variations in Source of Stable Auroral Red (SAR) Arcs in Inner Magnetosphere during Non-storm-time Substorms", J. Geophys. Res., doi:10.1029/10.1029, 2021.
- Sugo, S., O. Kawashima, S. Kasahara, K. Asamura, R. Nomura, Y. Miyoshi, Y. O. gawa, K. Hosokawa, T. Mitani, T. Namekawa, T. Sakanoi, M. Fukizawa, N. Yagi, Y. Fedorenko, A. Nikitenko, S.Yokota, K. Keika, T. Hori, C. Koehler, "Energy-resolved detection of precipitating electrons of 30-100 keV by a sounding rocket asso

- ciated with dayside chorus", *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2020JA028477, 2021.
- Thomas, N., K. Shiokawa, Y. Miyoshi, Y. Kasahara, I. Shinohara, A. Kumamoto, F. Tsuchiya, A. Matsuoka, S. Kasahara, S. Yokota, K. Keika, T. Hori, K. Asamura, S.-Y. Wang, Y. Kazama, S. W.-Y. Tam, T.-F. Chang, B.-J. Wang, J. Wygant, A. Breneman, G. Reeves, "Investigation of small-scale electron density irregularities observed by the Arase and Van Allen Probes satellites inside and outside the plasmasphere", *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2020JA027917, 2021.
  - Kazama, Y., H. Kojima, Y. Miyoshi, Y. Kasahara, S. Kasahara, H. Usui, B.-J. Wang, S.-Y. Wang, S. W. Y. Tam, T.-F. Chang, K. Asamura, Y. Kasaba, S. Matsuda, M. Shoji, A. Matsuoka, M. Teramoto, T. Takashima, and I. Shinohara, "Extremely Collimated Electron Beams in the High Latitude Magnetosphere Observed by Arase", *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2020GL090522, 2021.
  - Inaba, Y., K. Shiokawa, S. Oyama, Y. Otsuka, A. Oksanen, A. Shinbori, A. Y. Golobov, Y. Miyoshi, Y. Kazama, S.-Y. Wang, S. W. Y. Tam, T.-F. Chang, B.-J. Wang, S. Yokota, S. Kasahara, K. Keika, T. Hori, A. Matsuoka, Y. Kasahara, A. Kumamoto, Y. Kasaba, F. Tsuchiya, M. Shoji, I. Shinohara, and C. Stolle, "Plasma and field observations in the magnetospheric source region of a stable auroral red (SAR) arc by the Arase satellite on 28 March 2017", *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2020JA028068, 2020.
  - Shiokawa, K., M. Nose, S. Imajo, Y. Tanaka, Y. Miyoshi, K. Hosokawa, M. Connors, M. Engebretson, Y. Kazama, S.-Y. Wang, S. W. Y. Tam, Tzu-Fang Chang, Bo-Jhou Wang, K. Asamura, S. Kasahara, S. Yokota, T. Hori, K. Keika, Y. Kasaba, M. Shoji, Y. Kasahara, A. Matsuoka and I. Shinohara, "Arase observation of the source region of auroral arcs and diffuse auroras in the inner magnetosphere", *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2019JA027310, 2020.
  - Kasahara, S., Y. Miyoshi, S. Kurita, S. Yokota, K. Keika, T. Hori, Y. Kasahara, S. Matsuda, A. Kumamoto, A. Matsuoka, K. Seki, I. Shinohara, "Strong diffusion of energetic electrons by equatorial chorus waves in the midnight-to-dawn sector", VLF/ELF Remote Sensing of Ionospheres and Magnetospheres Workshop, Oral (invited), Virtual, 17 Nov. 2020.

(別紙様式 4 - 2)

## 超小型探査機搭載イオン質量分析器の較正システム開発

Development of a calibration facility for miniaturized ion mass spectrometers

笠原 慧、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

近年、超小型探査機を用いた深宇宙探査という新たな潮流が生まれつつあり、そこでは大学が主要な機能の一部を担おうとしている。JAXAと大学が協力して超小型探査機を月や彗星といった小天体に送り込む計画が2020年代のミッションとして具体的に検討されており、将来的には様々な惑星探査にも応用されると期待されている。申請代表者のグループでは、この潮流を太陽系探査科学に生かすべく、キューブサット規格にマッチするサイズの小型イオン質量分析器を開発している。ところが、申請代表者の研究室は数年前に立ち上がったばかりであり、実験室の開発環境は発展途上である。具体的には、イオン質量分析器の開発に必要な較正システムが未構築であり、これは搭載機器の開発において致命的である。そこで本研究では、代表者の東京大学の実験室に、イオン分析器の較正設備を整備する。これは地道な開発であるが、上述の2020年代の探査で理学成果を出すために不可欠なものである。

### 研究方法

東京大学の実験室(クリーンルーム)に校正用イオンビームを設置する。特に、電子銃による試料ガスのイオン化からビーム加速部までのオプティクスが肝であり、今年度は電子銃の素材選定およびオプティクス設計に重点を置いた。

### 研究結果

イオン化機構については、小型フィラメント・オプティクスを製作・試験し、初期の性能(電子エミッション電流1mA, イオンエミッション $>10\text{nA}$ )を確認できた。また、名大・東大間の相互の実験により、消費電力を5-6Wから3W未満にまで下げられる見通しを得た。

さらに、ここで新たに開発したフィラメントを月探査計画LUPEX搭載質量分析器に組み込むことを想定して振動試験も実施し、月探査衛星かぐや搭載機器に課されたレベルの振動に耐えられることを確認した。

### 成果発表

・柳瀬 菜穂、笠原 慧、斎藤 義文、横田 勝一郎、平原 聖文、川島 桜也, " Developme

nt of an Ion Source for Future Solar System Explorations”, JpGU, virtual, 2020年7月

・柳瀬 菜穂，笠原 慧，齋藤 義文，横田 勝一郎，平原 聖文，川島 桜也，”月極域探査の質量分析に資するタンデム型イオン源の開発”，日本惑星科学会秋季講演会（オンライン開催），2020年11月



## 木星放射線帯長期変動要因の観測研究

Observational study of causality of long-term variations of Jupiter's radiation belt

代表者: 三澤浩昭(東北大学大学院理学研究科)

### 1. 研究目的

木星から放射されるシンクロtron電波(JSR)は、直接観測のほぼ不可能な木星放射線帯の粒子ダイナミクスの情報を持つ。申請者らはこれまで JSR 強度の連続観測に基づき、数日～週程度の短期の時間スケールの原因を探り、それが太陽変動起因と木星磁気圏変動起因の 2 種あることを示唆してきた。一方、より長い時間スケール、特に数ヶ月～年スケールの変動については、申請者らのグループや米国の研究者らが独立に太陽変動起因の可能性を示唆してきているが、データ取得期間が限定的であることや、十分な観測精度が保証されていないこと等から、変動要因は未解明である。申請者らは過去に ISEE 他の観測施設で JSR 観測を断続的に行ってきたが、本研究は、JSR 観測で強度較正に用いていた電波星強度の査定等に基づく JSR flux 強度の再評価、他周波数での JSR(～別エネルギーの放射線帯粒子の情報を反映)観測結果との比較も加えた変動過程の考察から、JSR 長期変動要因の査定を目的として実施された。

### 2. 研究結果・考察

本研究では、ISEE 木曾・富士観測施設の 327MHz 大型アンテナを用いて行ってきた JSR 観測の中で、特に年に数週以上のスケールで継続的な観測が毎年実施された 1994～2005 年について、JSR flux 強度の再評価を実施した。この結果、327MHz 帯 JSR の年スケールの長期変動について、以下の結果を得た。

- ① 強度変動量: Shoemaker-Levy9 彗星の木星衝突により特異的な flux 強度増大が見られた 1994 年(平均 flux 強度の約 1.8 倍 @July, 1994)を除いた期間での平均 flux とその標準偏差  $\sigma$  は  $4.5 \pm 1.6 \text{ Jy} @ 4.0 \text{ AU}$  ( $1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W/m}^2/\text{Hz}$ ) 程であった。この値は、同時期に NASA の DSN アンテナや GAVRT で得られている 2.2GHz 帯での JSR flux 強度計測の結果(Santos-Costa et al., JGR, 2008)と比較し、平均強度は約 10%大きい程度である一方、 $\sigma$  は 5 倍程大きく、JSR の長期変動は低周波数で大きい事が確認された。これは当研究グループが示してきた日～週スケールの短期変動が低周波数程大きいことと同傾向であり(Misawa & Morioka, ASR, 2000; Tsuchiya et al., JGR, 2011)、放射線帯粒子変動が低エネルギー程大きいことを示唆する(放射線帯域の磁場強度値に基づいて想定される、JSR の各周波数帯に寄与する粒子エネルギーは、 $\sim 5 \text{ MeV} @ 327 \text{ MHz}$ 、 $\sim 15 \text{ MeV} @ 2.2 \text{ GHz}$ )。
- ② 強度変動傾向と想定要因: 1994～2005 年の JSR flux 強度は、概要、1994→減小→1998→増加→2001→減小→2002→増加→2005 年の変動を示したが、この変動は 2.2GHz 帯の変動傾向と良い相関を示していた(相関係数 $\sim 0.7$ ; time lag $\sim 0$ (僅かに 327MHz 帯変動が先行))。このことから、5～15MeV の広エネルギー範囲に亘り、放射線帯粒子に作用した共通の物理過程の存在を示唆する。2.2GHz 帯の長期変動の原因として、太陽風変動(動圧)に誘起される動径拡散変化が示唆されている(Han et al., 2018: 以下、論文 1)。本研究で示された 327MHz と 2.2GHz 帯 JSR 長期変動の相似性は、低エネルギー放射線帯粒子にも、より高エネルギー粒子に働く変動過程が寄与している可能性を示唆する。一方、論文 1 では太陽風変動誘起の拡散過程における粒子エネルギー依存性の重要性も示唆されてもおり、①で示した変動量のエネルギー依存性も含めて、327MHz 帯の長期変動様相が太陽風変動過程で誘起される動径拡散で説明し得るか否かは、数値モデルも用いた定量的な評価が必要になる。この評価は研究期間内には為し得ず将来課題となかったが、本研究の観測結果に基づき継続して実施してゆく。

### 3. 研究報告等

・研究会報告: 三澤他, 第 22 回惑星圏研究会 (2021 年 2 月(on line 開催)) / 同 集録(on line 公開), 2021.

地磁気嵐とその原因となる太陽・太陽風擾乱に関する統計的研究  
Study of geomagnetic storms and related solar-interplanetary phenomena  
a

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

### 【研究目的】

地磁気嵐は太陽風擾乱と磁気圏の相互作用により発生する。とくに大型の地磁気嵐については、太陽のコロナガス噴出（CME）を起源とするが惑星間CME（ICME）が原因であると説明されている。しかしながら、ICMEは概念的に定義されているのみで、その実態は明確にされていない。この研究の目的は、「CMEの磁場構造を解明し、地磁気嵐の発達に関与する南向き太陽風磁場の時間発展を予測することを可能にすること」である。

### 【研究方法】

1. 大型の地磁気嵐（Dst最小値 $\leq -150$  nT）を選んで、Dstの発達に関与する太陽風磁場の時間変化を、磁気ロープモデルによるfitting解析を実行する。
2. 磁気ロープモデルとしては従来の伝統的なforce-free model (Marubashi and Lepping, 2007)を基本に、昨年度までのISEE一般共同研究で開発した改良型モデル (Nishimura et al., 2019) を使用する。
3. fitting結果によるモデル値が観測データを再現する程度を見て、ICMEの磁場構造が磁気ロープ構造をもっていることを確認する。
4. それぞれの磁気嵐に対応するICME全体を構成する磁気ロープについて考察する。

### 【研究結果】

1998年から2018年までに発生した大型の地磁気嵐（Dst最小値 $\leq -150$  nT）33例について解析し、以下の結果を得た。

1. 33例の磁気嵐のうち、33例について、Dstの発達に関与する南向き太陽風磁場は磁気ロープとして伝搬してきたものである。（唯一の例外では非常に特異な磁場変動がみられ、特殊イベントと考えられる）
2. 32例の磁気嵐のうち、8例について、関連したICMEの内部に2つの磁気ロープが連続的に到達していることが確認された。大部分である24例では、磁気ロープの継続時間1日程度であるのに対して、8例に見られた磁気ロープのスケールは数時間の程度であり、小型磁気ロープとして最近注目されているものと思われる。

### 【考察】

1. この研究結果は、大型の地磁気嵐に関わるICMEの磁場構造が磁気ロープで説明できることを明らかに示した最初のものである。この分野ではある程度の予想はされてきたが、実証した意味は大きい。
2. 大型の地磁気嵐の発生に小型磁気ロープが関わっていることが示され、小型磁気ロープの発生メカニズム研究の重要性が広く認識されることが期待される。
3. この研究には、Nishimura et al. (2019, 2020)によるモデル改良が大きな役割を果たした。今後、この改良モデルが広く使われることを期待したい。
4. 今回、さらなる改良として、観測された磁気ロープの非対称性を重視した手法を追加した。このモデルが磁気ロープの伝搬途中における変化の説明に有効なことが理解されることも期待したい。

### 【引用文献】

- Marubashi, K. and R.P. Lepping, Long-duration magnetic clouds:  
a comparison of analyses using torus- and cylinder-flux rope models,  
*Ann. Geophys.*, **25**, 2453, 2007.
- Nishimura, N., K. Marubashi and M. Tokumaru, Comparison of Cylindrical  
interplanetary flux-rope model fitting with different Boundary  
pitch-angle treatments, *Solar Phys.*, **294**, 49, 2019.
- Nishimura, N., M. Marubashi and M. Tokumaru, Comparison of toroidal  
Interplanetary flux-rope model fitting with different boundary  
Pitch-angle treatments, *Solar Phys.*, **295**, 40, 2020.

### 【成果発表】

・口頭発表

- 丸橋克英、「太陽風磁気ロープの観測される非対称構造の解析」、第148回SGEPSS講演会、  
2020年11月1日。

## ビーチロック試料の正確な膠結年代決定方法

### Development of Physical and Chemical Analysis to Obtain Correct Concrete Age for Beachrock Sample

小元久仁夫（元日本大学大学院理工学研究科・日本大学文理学部）

**Keywords** : conglomeratic beachrock, AMS<sup>14</sup>C dating, pretreatment technique, elemental analysis

#### 1. はじめに

ビーチロックは、潮間帯の堆積物が海水や陸水中の炭酸カルシウムによって固結されて形成される (AGI, 1957; Stoddart and Cann, 1965)。このため、その形成年代と標高は、地殻変動や海水準変動を示す重要な指標となる。従来、ビーチロックの形成年代は、ビーチロックから採取した生物化石の年代から推定されてきた。しかし、その年代は生物の死亡年代を示すのみであり、堆積物が固結した年代と乖離している可能性が高い。ビーチロックの形成年代を正確に決定するためには、セメント物質の年代を測定することが望まれる。本研究の目的は、形成年代の決定が困難視されてきた、礫岩質ビーチロックの正確な形成年代を決定する方法を開発することである。

#### 2. 研究方法

2020 年度（令和 2 年度）は、礫岩質ビーチロックが存在する長崎県奈留島、沖縄県慶留間島、渡嘉敷島、渡名喜島および伊平屋島を対象として野外調査を行い、試料を採取する。採取した試料は、共同研究者が所属する日本大学文理学部で岩石カッターを使用して整形し、試料調製と AMS<sup>14</sup>C 年代測定は名古屋大学宇宙地球環境研究所で行う。元素分析は研究分担者が所属する同志社大学理工学部で行い、また採取した湧水の分析は南山大学総合政策部で行う。上記とは別に、試料の XRF（蛍光 X 線）分析は名古屋大学宇宙地球環境研究所で行う。

#### 3. 試料の採取と分析

2020 年 3 月 11 日に、沖縄県渡嘉敷島で野外調査を実施し試料を採取した。10 月 15 日には慶留間島で現地調査を行い、試料を採取した。10 月 16 日には、コロナウィルス蔓延のため渡島許可が下りなかった渡名喜島に代えて伊平屋島で現地調査を行い、試料を採取した。なお、同じ事情により、沖縄県渡名喜島や長崎県奈留島における渡島調査ができなかった。採取した <sup>14</sup>C 年代測定試料は、名古屋大学宇宙地球環境研究所において試料調製を行い、AMS<sup>14</sup>C 年代測定を行う予定である。また、セメント物質の元素分析は同志社大学理工学部で行う予定である。2019 年度までに行った元素分析結果を表 1 に示す。渡嘉敷島から採水した検水の水質分析は秋田大学大学院理工学研究科で行った。なおセメント物質の XRF 分析は未着手である。

#### 4. 研究成果

2018 年度から 3 年間にわたる野外調査により、合計 15 地点から 46 件の AMS<sup>14</sup>C 年代測定試料を採取した。AMS による <sup>14</sup>C 年代測定の結果、宮崎県島浦島南部の日井の浜、沖縄県阿嘉島と座間味島の礫岩質ビーチロックの形成年代を決定することができた (小元ほか、2019, 2020)。しかし、長崎県佐世保のビーチロックは炭酸塩の含有量が少なく AMS<sup>14</sup>C 年代測定ができなかった。また固結した礫の直下から採取した *in situ* の貝化石 (*Claudiconcha japonica*) の <sup>14</sup>C 年代は、Modern (101.6~102.5 pMC) であった。今後、沖縄県慶留間諸島の渡嘉敷島や慶留間島と、伊平屋島の礫岩質ビーチロックの形成年代や元素分析結果が明らかになる予定である。

海浜堆積物が固結した原因やビーチロックの形成過程を考察するため、宮古島の吉野海岸で固結砂層、非固結砂層および湧水を採取して、<sup>14</sup>C 濃度、 $\delta^{13}\text{C}$  および湧水の水質分析を行った。また宮古島のマイバーバマにおいて、同一堆積層の直径 10cm 以内から採取した貝化石とその両面の付着物、サンゴ化石、石灰砂岩などを採取して AMS<sup>14</sup>C 年代測定を行い、異なる試料間で年代差が生ずるかどうかを検討した (小元、2021)。さらにビーチロックの形成年代と津波石の年代を比較する研究 (小元・南、2017) を行った。

礫岩質ビーチロックの形成年代を AMS<sup>14</sup>C 年代測定により決定するため、必要な試料調整法を開発したこと (小元ほか、2019, 2020) は評価されるであろう。また本研究で行った礫岩質ビーチロックから採取したセメン

ト物質の元素分析結果、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $^{14}\text{C}$ 年代 ( $^{14}\text{C}$ 濃度)の測定結果は、今後ビーチロックの形成過程を考察する際に有意義な資料となろう。同一層から採取した異種試料間で年代差が生じたことや、ビーチロックの堆積物の中に津波堆積物が混入していたことが明らかになったことは、ビーチロックの形成年代を考察する際に検討を要するとして警鐘を鳴らした(小元、2021)。

今後は、これまで報告事例の少ないセメント物質に関する元素分析資料を増加させることと、セメント物質のXRF分析や電子顕微鏡写真撮影を行って、セメント物質の解析と検討を行う必要がある。また、礫岩質ビーチロックが発達している海岸において、干潮時に地下水が湧出している地点が多くみられた。このため、これらの湧水の水質分析を行い海浜堆積物の固結との関連について検討する必要がある。以上が今後解決するために取り組むべき問題点である。

## 引用文献(研究成果から引用した文献は次項に記載した)

American Geological Institute (1957) *Glossary of Geology and Related Sciences*. Kaufmann Printing Inc. Washington, D.C. 28.  
Stoddart, D.R. and Cann, J.R. (1965) Nature and origin of beachrock. *Journal of Sedimentology and Petrology*. **35**, 243-247.

## 本研究の成果

### 1. 学会および学術研究会発表

- 小元久仁夫・南 雅代 (2017) ビーチロックの形成年代とは?. 2016年度名古屋大学宇宙地球環境研究所年代測定研究シンポジウム. 2017年1月30日. 名古屋大学. 名古屋市.
- 小元久仁夫・南 雅代 (2017) 宮古島マイバーバマのビーチロックに半埋没しているハマサンゴのAMS $^{14}\text{C}$ 年代. 季刊地理学. **69**, 153. 東北地理学会. 2017年5月21日. 仙台市戦災復興記念館. 仙台市.
- 小元久仁夫・南 雅代 (2018) 宮古島南東, マイバーバマ東部に打ち上げられたハマサンゴの $^{14}\text{C}$ 年代とその意義. 2017年度名古屋大学宇宙地球環境研究所年代測定研究シンポジウム. 2018年2月1日. 名古屋大学. 名古屋市.
- 小元久仁夫・南 雅代・藁谷哲也・塩見昌司 (2018) ビーチロックの正確な膠結年代決定法の開発(予報)―宮崎県島浦島のビーチロックの形成年代―. 季刊地理学. **70**, 143-144. 東北地理学会. 2018年5月19日. 東北大学理学部. 仙台市.
- 小元久仁夫・藁谷哲也・南 雅代・池田晃子・横尾頼子・塩見昌司 (2019) ビーチロックの年代を決定する際の課題点. 2018年度名古屋大学宇宙地球環境研究所年代測定研究シンポジウム. 2019年2月1日. 名古屋大学. 名古屋市.
- 小元久仁夫・南 雅代・大八木英夫・池田晃子 (2019) 宮古島南東海岸に発達する固結砂層と湧水の特徴. 季刊地理学. **71**, 136-137. 東北地理学会. 2019年5月18日. 東北大学理学部. 仙台市.

### 2. 学術出版物

- 小元久仁夫・南 雅代 (2017) 宮古島南東マイバーバマ東岸に打ち上げられたハマサンゴ岩塊の $^{14}\text{C}$ 年代とその意義. 季刊地理学. **69**, 119-127.
- 小元久仁夫・藁谷哲也・塩見昌司・南 雅代 (2018) ビーチロック試料の正確な膠結年代決定法の開発. 名古屋大学年代測定研究. **2**, 7-11.
- 小元久仁夫 (2019) 南西諸島宮古島南東のマイバーバマ東部および吉野海岸に打ち上げられたサンゴ岩塊の $^{14}\text{C}$ 年代. 季刊地理学. **71**, 82-88.
- 小元久仁夫・藁谷哲也・塩見昌司・南 雅代 (2019) ビーチロック試料の正確な膠結年代の決定方法. 名古屋大学年代測定研究. **3**, 41-43.
- 小元久仁夫・藁谷哲也・塩見昌司・大八木英夫・横尾頼子・池田晃子 (2020) ビーチロック試料の正確な膠結年代の決定方法(2). 名古屋大学宇宙地球環境研究所年代測定報告. **4**, 9-15.
- 小元久仁夫 (2021) 宮古島南東, マイバーバマ東部のビーチロックから採取した試料の $^{14}\text{C}$ 年代とその意義. 地学雑誌. **130**, 95-101.

## VLF/LF 帯標準電波を用いた中・低緯度下部電離圏擾乱の観測

Perturbations in the lower ionosphere observed by VLF/LF radio wave propagation.

土屋史紀（東北大学大学院理学研究科）

VLF/LF 帯標準電波の伝搬特性を用いた中・低緯度下部電離圏擾乱の連続観測を名古屋大学・宇宙地球環境研究所附属陸別観測所と鹿児島観測所で実施している。10kHz-100kHz の低周波電波を垂直電界アンテナにより受信し、標準電波信号の周波数における信号強度と位相を 0.1 秒の時間分解能で記録している。良観測所で受信している主な標準電波送信局は、JJY (40kHz/福島, 60kHz/福岡・佐賀)、JJI(22.1kHz/宮崎)、NWC(19.8kHz/オーストラリア)、BPC(68.5kHz/中国)である。これらの送信電波を国内 2 局で観測することにより、日本上空をカバーする観測ネットワークが構築されている。中・低緯度で出現する下部電離圏擾乱のうち、太陽フレア(X 線)・SEP による中間圏・下部熱圏電離現象、地震・火山現象や、火球の発生に伴い発生し、上方に伝搬する音波により生じる下部熱圏電離度の変調について研究を実施した。鹿児島観測所では、観測は継続して実施できているものの、データを記録する PC に問題が生じているが、2020 年度はコロナ禍の出張制約のため PC の交換を実施できなかった。2021 年度には可能となり次第、PC の交換作業を行う予定である。

### 研究成果

#### 学会発表等

明石徹寛, 大矢浩代, 土屋 史紀, 中田裕之, VLF-LF 帯標準電波を用いた 2015 年ネパール地震後の D 領域電離圏変動の解析, 日本大気電気学会第 99 回研究発表会, 2021 年 1 月 8 日

山野辺晃大, 大矢浩代, 土屋史紀, 山下幸三, 高橋幸弘, 塩川和夫, 中田裕之, VLF-LF 帯標準電波を用いた太陽フレアによる D 領域電離圏変動に関する研究, 日本大気電気学会第 99 回研究発表会, 2021 年 1 月 8 日

山野辺晃大, 大矢浩代, 土屋史紀, 山下幸三, 高橋幸弘, 塩川和夫, 中田裕之, Solar flare effects on the D-region ionosphere using VLF-LF transmitter signals, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 148 回総会・講演会, 2020 年 11 月 1 日

鈴木威流, 大矢浩代, 土屋史紀, 塩川和夫, 中田裕之, Variations in the D-region ionosphere observed in fireballs using VLF-LF transmitter signals, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 148 回総会・講演会, 2020 年 11 月 1 日

Takeru Suzuki, Hiroyo Ohya, Fuminori Tsuchiya, Kazuo Shiokawa, Hiroyuki Nakata, Fireball-associated variations in the D-region ionosphere observed using VLF-LF transmitter signals, JPGU-AGU Joint meeting 2020, 2020 年 7 月 12 日

Tekkan Akashi, Hiroyo Ohya, Hiroyuki Nakata, Fuminori Tsuchiya, Study of variations in the D-region ionosphere after the 2016 Kumamoto earthquakes using VLF-LF transmitter signals, JPGU-AGU Joint meeting 2020, 2020 年 7 月 12 日

(別紙様式 4 - 2)

エアロゾル・雲相互作用の理解を目指したエアロゾル吸湿特性の  
観測研究

Observational study of aerosol hygroscopicity  
toward understanding aerosol-cloud interactions

中山智喜、長崎大学・水産・環境科学総合研究科

【研究目的】大気中のエアロゾル粒子は、雲凝結核として働き、雲生成に関与している。特に、台風の生成・発達においては、海上から巻き上げられた海塩粒子が重要な寄与を持つ可能性が指摘されている。また、雲粒に取り込まれてエアロゾルが除去されたり、雲粒中での液相反応により、低蒸気圧の化学成分が生成した後、水分が蒸発することで、新たにエアロゾル粒子が生成したりする可能性もある。しかしながら、計測における技術的な困難さからエアロゾルと雲との相互作用の理解は十分進んでおらず、種々の人間活動や自然活動が気候変動に及ぼす影響の推定における大きな不確実性の要因となっている。そこで、沖縄において観測を実施し、台風通過時にエアロゾルの粒径分布および吸湿特性がどのように変化するかを調べることを目指した。

【研究方法】本研究では、名古屋大学ISEEおよび琉球大学と共同で、琉球大学千原キャンパスにおいて観測を実施した。台風が沖縄の近海を通過する夏季に光学式粒子計数器 (TSI社製、OPS3330) を用いて、直径0.3から10ミクロンのエアロゾル粒子の粒径分布を測定した。また、パナソニック社と共同開発した小型PM<sub>2.5</sub>センサを2台用いることで、実大気条件と湿度低下条件におけるPM<sub>2.5</sub>重量濃度の連続観測を行った。

【結果と考察】図1に、2018年から2020年に沖縄近海を通過した合計11個の台風について、台風接近時の風速とエアロゾル粒子 (直径0.3~10ミクロン) の重量濃度の関係を示した。いずれの台風についても、エアロゾル粒子の重量濃度が風速に対して、ほぼ同様の割合で増加し、風速が海塩粒子の発生量を決定づけていることが示唆された。図2に、外気温度・湿度条件下で測定したPM<sub>2.5</sub>と、筐体内を10°C程度加熱し相対湿度を低下させた条件下で測定した際のPM<sub>2.5</sub>センサの出力濃度の比の、非加熱時の相対湿度に対する依存性を示した。その結果、同じ相対湿度条件においては、冬季に比べ、夏季に比が大きくなることがわかった。沖縄において夏季には、海塩粒子の相対寄与が増加し、PM<sub>2.5</sub>全体の吸湿性が増加した可能性が示唆された。

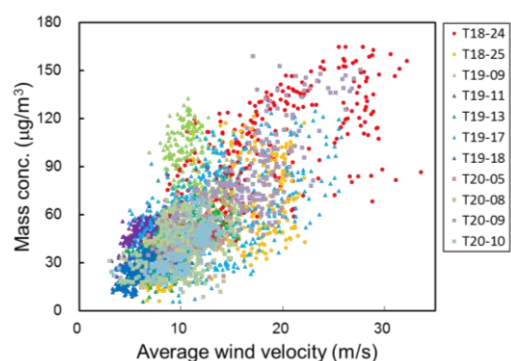


図 1: 11 個の台風通過時に光学式粒子計数器で測定した直径 0.3 から 10 ミクロンのエアロゾル粒子の全重量濃度と平均風速の関係

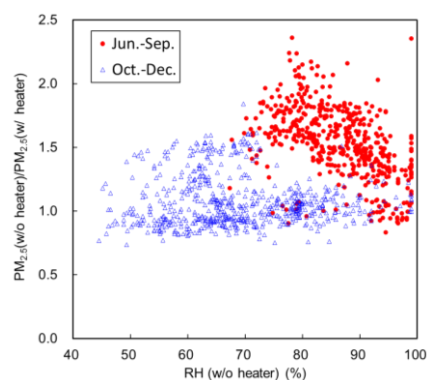


図 2: 非加熱時の加熱時に対する PM<sub>2.5</sub> センサの出力濃度の比の非加熱時相対湿度依存性 (赤: 2020 年 6~9 月、青: 2020 年 10~12 月)



Super-Kamiokandeを用いた太陽フレア由来の  
ニュートリノ探索  
Search for neutrinos from solar flare  
with Super-Kamiokande

中野 佑樹、神戸大学大学院 理学研究科

## 研究の背景と目的

太陽フレアは太陽表面で発生する爆発現象である。太陽フレアでは磁気リコネクションにより、磁気エネルギーが熱エネルギーや運動エネルギーに変換すると考えられている。太陽フレアに伴う粒子の加速機構は未だに解明されていないため、その時間スケールや空間分布が研究対象となっている。

太陽フレアによって陽子が加速され、300 MeVを超える運動エネルギーを持つと、太陽周辺の原子核との衝突によりパイオンが生成する。このうち、荷電パイオンが崩壊すると、ニュートリノが生成され、その一部が地球に到来する。したがって、ニュートリノ検出器を用いて、太陽フレア発生時刻周辺のニュートリノ事象を探索することで、陽子の加速機構に関する情報が得られる。

太陽フレアに伴うニュートリノ生成は1980年代から議論が始まり、Homestake実験 [1]、SNO 実験 [2]、Kamiokande 実験 [3] によりニュートリノ探索が実施されてきた。しかし、太陽フレア由来のニュートリノは、大気ニュートリノと生成過程が同じであり、エネルギーも重複するため、未だに有意な観測例は報告されていない。現在、いくつかのグループが太陽フレア由来のニュートリノ生成率に関するモデル構築を実施しており、Super-Kamiokande 実験やIceCube 実験での観測可能性が議論されている [4]。このような背景から、本研究ではSuper-Kamiokande 実験 [5] を用いて太陽フレア由来のニュートリノ探索に関する研究を実施した。

## 研究の手法

Super-Kamiokande 実験がデータ取得を開始した1996年以降に起きたX5.0 class以上の太陽フレア (計23回)に対して、太陽フレア由来のニュートリノ探索を実施した。前述のように、太陽フレア由来のニュートリノは、大気ニュートリノとエネルギーが重複する。そのため、ニュートリノ検出器では原理的に両者を区別できない。このような問題点を解決するため、我々は太陽フレア発生時にニュートリノ探索用の時間幅を設定することで、大気ニュートリノによる背景事象を抑え、signal/noise比を向上させるという手法を新たに提案した。以下にその概略と成果を述べる。

名古屋大学宇宙地球環境研究所結合データサイエンスセンターのCIDASシステムを用いて、RHES SI衛星、GOES衛星の観測データを解析した。具体的には、Soft X線 (GOES)、Hard X線 (RHES D)、Line  $\gamma$ 線 (RHESI)の光度曲線から、荷電粒子の加速や原子核反応が起こっている時刻を抽出し、ニュートリノ生成時刻を推定した。また、同時に外部の研究者と協力して、GEOTAIL衛星の観測データも同様の物理解析を実施した。

この研究により、Soft X線、Hard X線、Line  $\gamma$ 線の光度曲線から、ニュートリノの探索時間幅はそれぞれ4,178秒、944秒、1,586秒と決定した。また、Soft X線の光度曲線を微分し電子の加速時刻を抽出する手法では、時間探索幅は700秒と決定した。GEOTAIL衛星によるHard X線 (+Soft  $\gamma$ 線)の観測頻度から、時間探索幅は776秒と決定した。最終的に、決定した探索時間幅を用いて、Super-Kamiokande 実験で観測されたニュートリノ事象を探索した。

2020年度は、上記の研究を応用して、太陽の側面や裏側で発生した太陽フレアに関する時間探索幅の決定手法に関する研究を実施した。太陽の裏側では、監視衛星が限られるため、太陽フレアの直接的な観測は困難であるが、SOHO衛星やLASCO衛星によるCoronal mass ejections (CMEs)の観測データを利用した。CMEsは太陽フレアに伴って発生した例が複数回あるため、我々の表側で見積もった時間探索幅 (Soft X線の4,178秒)の範囲をCMEsの観測時刻周辺の時間に関して応用した。また、CMEsによるプラズマの放出速度は、CMEsの放出規模を測る指標となる。本研究では放出速度が2000 km/sを超える10回のCMEsを対象として選択した。

## 研究の成果

太陽の表側で発生した太陽フレアに関して、SK実験のデータ解析を実施した結果、2003年11月4日 (X 28.0)と2017年9月6日 (X 9.4)に発生した太陽フレアに関して、ニュートリノ事象候補が観測されていた。1つ目の候補はエネルギー178.3 MeVの2 rings electron-like 事象、2つ目の候補はエネルギー1.2 GeVの1 ring muon-like 事象である。

図1にSoft X線の光度曲線と光度曲線を時間で微分した時間分布、およびニュートリノ事象が観測された時刻を示す。1つ目の候補では光度曲線が立ち上がっている時間帯にニュートリノ事象候補が観測された。一方で、2つ目の候補では光度曲線が減少に転じ始める時間帯にニュートリノ事象候補が観測された。

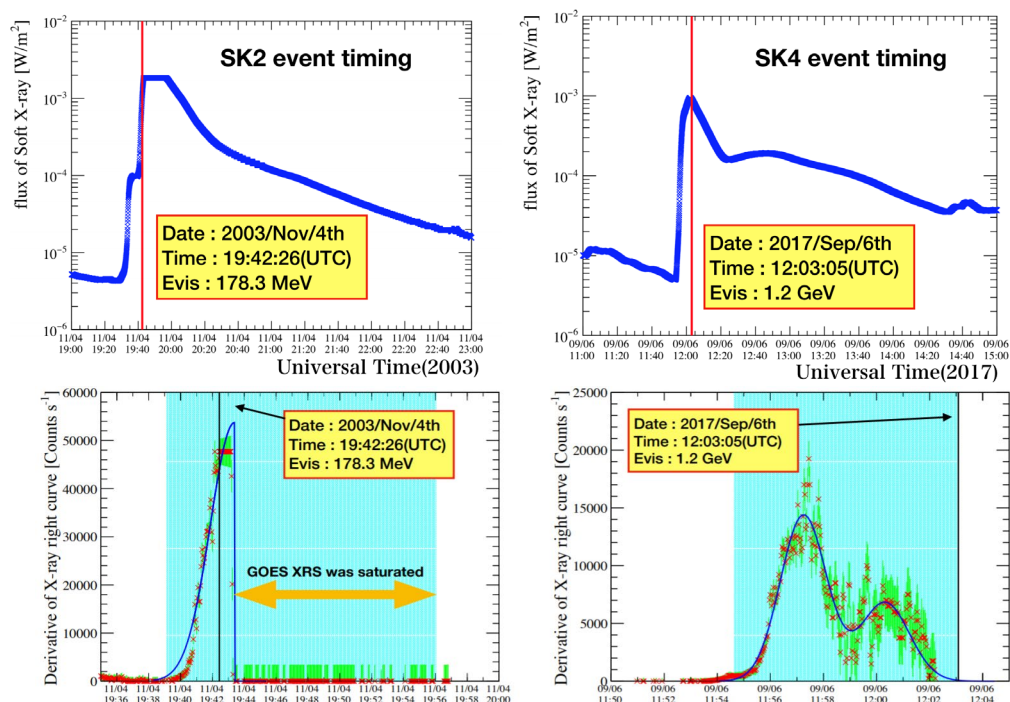


図 1. Soft X線の光度曲線（上図）と光度曲線を微分した場合（下図）の時間分布と、Super-Kamiokande 実験で観測されたニュートリノ事象候補の時刻（縦線）。枠内は観測日時、時刻、エネルギー。下図の水色の領域はこのチャンネルで決定された探索時間幅である。

大気ニュートリノの観測データから、設定した探索時間幅の中で期待される背景事象は、1つ目の候補が0.58 事象、2つ目の候補が0.25 事象と見積もった。この背景事象の観測頻度を想定した場合、1つのニュートリノ事象候補が探索時間幅の中で観測される確率はそれぞれ、32.2%と21.8%である。

以上のようなデータ解析から、太陽フレア由来のニュートリノ事象を、有意な統計数で観測することはできなかった。今後、本研究で得られた成果を論文として公表予定である。

太陽の裏側で発生した(CMEsを伴っていると仮定した)太陽フレア由来のニュートリノ探索も同様に実施した。探索結果の公表を2021年度に予定している。

## 研究成果発表:

(1) K. Okamoto et al., Development of a method for determining the search window for solar flare neutrinos] Solar Physics 295, 133 (2020).

参考文献: [1] R. Davis, Prog. Part. Nucl. Phys. 32 (1994) 13-32. [2] B. Aharmim, et al., Astropart.Phys. 5 5 (2014) 1-7. [3] K.S. Hirata, et al., Phys. Rev. Lett. 61 (1988) 2653. [4] D. Fargion, et al., Astrophys. J. 3 (2003) 75-86. [5] Y. Fukuda, et al., Nucl. Instrum. Meth. A 501 (2003) 418-462.

衛星搭載イメージング可視・紫外撮像光学系の設計と開発

Design and development of visible and ultra-violet optical imaging system

坂野井健、東北大学・大学院理学研究科

【研究目的】

将来電磁圏・熱圏観測小型衛星計画FACTORSの検討が、現在電磁圏・熱圏コミュニティで行われている。その搭載装置候補の一つに、オーロラ・大気光撮像装置がある。電磁圏・熱圏発光現象のリモートセンシングは、物理過程を知るための重要な手段である。とくに、FACTORSでは微細オーロラの高速詳細変動や紫外大気光の広域・グローバル変動の解明を目的に、高度数千kmから搭載イメージャーにより可視と紫外の2波長領域で撮像することが計画されている。本研究は、オーロラ発光と大気光発光の紫外観測を達成するために必要な技術検討と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域におけるオーロラ・大気光観測の経験が乏しいため、最新技術と知見に基づき、紫外オーロラ・大気光撮像を可能とする衛星搭載装置の技術向上が不可欠である。本研究は、これに必要な検討・基礎開発を推進する。2020年度は、本課題の3年計画の3年目である。

【研究方法】

本研究では、これまで研究分担者と共同で、紫外用広角対物ミラー光学系設計と観測ターゲットであるオーロラ発光の酸素原子輝線135.6nmと窒素分子LBH(long and/or short)の利点・欠点の整理検討が行われた。また、熱圏大気光についてN2/O観測の意義を調査した。さらに2019年度の検討から、紫外線2次元撮像検出器として、MCPとCCDを組み合わせたICCDと紫外用CCDの双方について比較検討し、高圧電源を用いない紫外CCDもしくはCMOSを採用することとした。2020年度は、昨年度に新たな課題となった紫外カメラに長時間(数Hzのフレームレート)高空間(数km x 数km)分解能を持たせるため、抜本的な設計改良案を見いだす。また、紫外検出器としてCCDまたはCMOSについて選定を行い、試験用検出器パッケージを購入する。これにより、今後の紫外試験に用いられる試験用カメラの開発を達成する。この紫外カメラ開発と並行して、衛星の軌道と磁力線フットプリントならびにカメラ視野角との関係や画像・粒子同時観測成立性について検討する。

【研究結果】

これまでの紫外線検出器の検討から、国内メーカーのCCD検出器が観測要求を実現する可能性が示された。これに基づき、2020年度は外部経費を用いて試験用紫外検出器パッケージを調達した。これには、読み出し・駆動用のエレキとPCソフトウェアも附属している。また、紫外光学系について、新たな高空間・長時間分解カメラに要求される視野は20x20度以下と比較的狭いため、近年開発された130nm付近でも透過効率の高いCaF<sub>2</sub>材料による対物レンズを用いることが出来る。この対物レンズに近年の非球面精密加工技術を採用すれば、小型軽量化が見込まれる。2020年度は、この非球面对物レンズによる空間分解能や、130nm帯の透過率を実証するため、外部経費を用いて製造を行った。

これらの紫外検出器と対物レンズに加え、本年度のISEE国際共同研究経費や外部経費を用いて、カメラ筐体真空チャンバとレンズ視野回転ステージ等を製作し、紫外カメラ一式を開発した。以上により、検出器電気試験や結像性能試験、紫外分光感度試験や放射線試験の準備を整えることが出来た。来年度以降にJAXA/ISA Sの紫外分光光源を用いた高分感度特性測定試験と検出器・レンズの耐放射線試験を実施する計画である。

さらに、衛星軌道計算ソフトウェアとカメラ視野角ならびに磁力線モデルを組み合わせ、フットプリントにおけるオーロラ発光の画像・粒子同時観測の成立性について調べた。軌道傾斜角などの条件を変化させながら2年間の画像・粒子同時観測の合計時間を見積もった結果、軌道傾斜角が90°のとき300時間に達し、十分な観測機会が得られることがわかった。

本研究は本年度で終了するが、紫外カメラ開発において重要な検出器選定と対物レンズ設計を具体的に進めて試験用カメラ一式を開発し、計画を前に進めることに貢献した。

【成果発表（坂野井に下線）】

<査読付き論文>

1. Kataoka, R., C. Chaston, D. Knudsen, K. A. Lynch, R. L. Lysak, Y. Song, R. Rankin, K. Murase, T. Sakanoi, J. Semeter, T. H. Watanabe, D. Whiter (2021), Small-Scale Dynamic Aurora, *Space Sci. Rev.*, vol. 217, 1, 17, <https://doi.org/10.1007/s11214-021-00796-w>.
2. Fukizawa, M., T. Sakanoi, Y. Miyoshi, Y. Kazama, Y. Katoh, Y. Kasahara, S. Matsuda, A. Matsuoka, S. Kurita, M. Shoji, M. Teramoto, S. Imajo, I. Sinohara, S. Y. Wang, S. W. Y. Tam, T. F. Chang, B. J. Wang, C. W. Jun (2020), Pitch-Angle Scattering of Inner Magnetospheric Electrons Caused by ECH Waves Obtained With the Arase Satellite, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 47, 21, e2020GL089926, <https://doi.org/10.1029/2020GL089926>.
3. Miyoshi, Y., S. Saito, S. Kurita, K. Asamura, K. Hosokawa, T. Sakanoi, T. Mitani, Y. Ogawa, S. Oyama, F. Tsuchiya, S. L. Jones, A. N. Jaynes, J. B. Blake (2020), Relativistic Electron Microbursts as High-Energy Tail of Pulsating Aurora Electrons, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 47, 21, e2020GL090360, <https://doi.org/10.1029/2020GL090360>.
4. Nishimura, Y., M. R. Lessard, Y. Katoh, Y. Miyoshi, E. Grono, N. Partamies, N. Sivasdas, K. Hosokawa, M. Fukizawa, M. Samara, R. G. Michell, R. Kataoka, T. Sakanoi, D. K. Whiter, S.-I. Oyama, Y. Ogawa, S. Kurita (2020), Diffuse and Pulsating Aurora, *Space Sci. Rev.*, vol 216, 4, <https://doi.org/10.1007/s11214-019-0629-3>.

<学会発表>

1. M. Hirahara, M. Yamauchi, Y. Saito, H. Kojima, K. Asamura, T. Sakanoi, Y. Miyoshi, and N. Kitamura, and An international multi-point space exploration mission for integrated observations in the space-Earth coupling system, 日本地球惑星科学連合2020年大会, ポスター発表, May 24-29, 2020.
2. T. Sakanoi, M. Hirahara, Y. Miyoshi, K. Asamura, K. Hosokawa, Y. Saito, H. Kojima, N. Kitamura, M. Fukizawa, S.-I. Oyama, T. Tsuda, A. Saito, H. Frey, and N. Schneider, Auroral imaging at visible and far-ultra-violet wavelengths for the future polar orbiting satellite mission FACTORS, 日本地球惑星科学連合2020年大会, ポスター発表, May 24-29, 2020.
3. 平原 聖文、齋藤 義文、小嶋 浩嗣、浅村 和史、山内 正敏、坂野井 健、三好 由純、北村 成寿、杉本 理英、宇宙地球結合系探査「FACTORS」計画の現状：編隊飛行衛星群と軌道擾乱・制御、第21回宇宙科学シンポジウム、ポスター発表, Jan. 6-7, 2021.
4. 三好 由純、北村 成寿、平原 聖文、浅村 和史、坂野井 健、西山 尚典、小嶋 浩嗣、FACTORSオーロラ観測チーム、大気加熱・流出検討チーム、FACTORS計画における科学検討の現状報告、第21回宇宙科学シンポジウム、ポスター発表, Jan. 6-7, 2021.
5. 浅村 和史、小嶋 浩嗣、坂野井 健、FACTORS 計画検討チーム、FACTORS計画における観測機器開発の現状報告、第21回宇宙科学シンポジウム、ポスター発表, Jan. 6-7, 2021.

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

【研究目的】

あらせ衛星は2017年3月の定常観測開始以降約4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高精度較正が重要である。あらせで得た磁場データの高精度較正には、地上較正試験の結果だけでなく、打ち上げ後のデータを評価した結果も使い、軌道上データから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。

【研究方法】

軌道上のあらせ磁場データの評価と較正の妥当性の検討を行い、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。磁力計機器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行った。

【研究結果】

磁場データ較正のオフセット、アライメント、クオリティフラグ等の結果は、図1にあるような結果表示プロットによって確認し、更に詳細な確認が必要な場合には個別のデータの調査を行った。新型コロナウイルスの影響により、出張を伴う会合を持つことは出来なかったが、研究組織のメンバーがそれぞれの専門を生かす役割分担を行い、メール等で綿密に結果を共有することによって研究を進めた。2020年度は、「あらせ」MGFデータをを用いた論文が16本発表された。

【考察・まとめ】

現状、ほぼ定常的に科学研究に資するクオリティを持つ「あらせ」MGFデータを生成する体制が出来た。一方で、現在の処理プログラムでは目標とする精度でオフセットや時刻補正がスポット的に出来ていない事例も発生している。今後そのような事例も目標の精度を達成する較正手法を開発する必要がある。

【成果発表】

松岡彩子, 能勢正仁, 三好由純, 寺本万里子, 野村麗子, 藤本晶子, 田中良昌, 篠原学, 栗田怜, 今城峻, 篠原育, Characteristics of the magnetic field variations observed by Arase、地球電磁気・地球惑星圏学会 第148 回講演会、オンライン、2020/11/04  
Matsuoka Ayako, Nose Masahito, Miyoshi Yoshizumi, Teramoto Mariko, Nomura Reiko, Fujimoto Akiko, Tanaka Yoshimasa, Shinohara Manabu, Kurita Satoshi, Imajo Shun, Shinohara Iku, Characteristics of the magnetic field variations at and above proton cyclotron frequency observed by Arase, AGU, Virtual, 2020/12/15

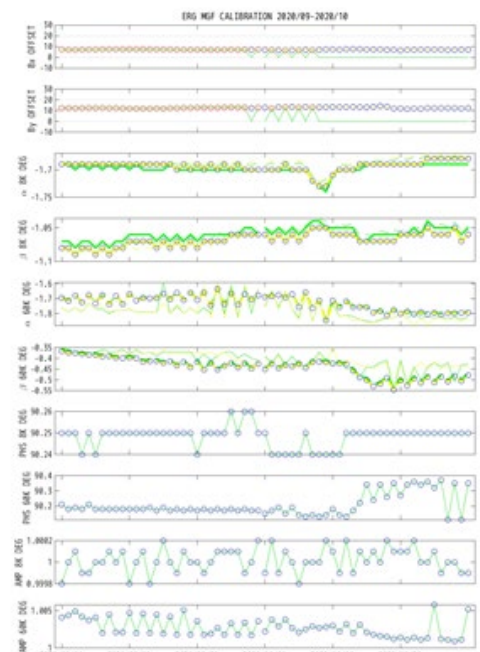


図1 「あらせ」磁場データ較正結果確認用サマリープロットの例

IPSデータを利用した太陽風予測シミュレーション  
Solar wind forecast simulation using IPS data

久保勇樹、情報通信研究機構・宇宙環境研究室

1. 研究目的

情報通信研究機構(NICT)では、宇宙天気予報リードタイムの延伸を目的として、太陽風予測シミュレーションの開発を行っている。太陽地球間には、DSCOVRと呼ばれる太陽風を定常観測している人工衛星が存在しているが、DSCOVRは地球からわずか150万キロほど太陽側の第一ラグランジュ点(L1点)に位置しているため、DSCOVRのデータを利用するだけでは、太陽風が地球に到来までのわずか1時間程度の予測リードタイムしか確保できない。そのため、予測リードタイムを延伸し、将来的に長期予報を実現するためには、太陽風構造を数値シミュレーションによって予測することが必須である。現在NICTで稼働している太陽風予測シミュレーションは、太陽光球における磁場の観測データを境界条件として用いて電磁流体力学シミュレーションを行うことにより、太陽圏内の太陽風構造を再現し、リアルタイム運用することで太陽風構造の予測をしている。しかしながら、この太陽風予測シミュレーションは、実際の予報業務での運用に耐えうるだけの予測精度には達しておらず、予報業務内では参考情報として利用されているに過ぎないのが現状である。予測精度を向上するための一つの方法としては、L1点よりも太陽近傍での信頼できる太陽風観測データを利用することであるが、現状ではL1点よりも太陽近傍で太陽風を定常的に観測している人工衛星は存在していないため、地上からの太陽風観測データを利用する必要がある。名古屋大学のIPS観測はこの用途にまさに最適の観測データを与えてくれる国内唯一の装置であるため、このデータを利用した、宇宙天気予報業務での実運用に耐えうるだけの予測精度を持った、太陽風予測シミュレーションの開発を目的とする。

2. 研究方法

今年度は、一昨年度から昨年度にかけて開発した、太陽嵐予測シミュレーション(SUSAN00)の結果から疑似IPS観測を作成し、実際のIPS観測と比較する手法(SUSAN00-IPS予測シミュレーション)を、多数のCMEイベントに適用し、SUSAN00-IPS予測シミュレーションの予測精度を統計的に評価した。

3. 研究成果

本研究では、2013年から2017年にかけての12個のCMEイベントを対象にSUSAN00-IPS予測シミュレーションを適用し、CMEの地球への到来時間の評価を行った。その結果、IPSを用いないSUSAN00シミュレーションによるCME到来時刻の予測到来時刻誤差(約7時間程度)と比較して、予測到来時刻誤差を約5時間程度に小さくすることに成功した。なお、NASA/CCMCで行われているCME Scoreboardによる予測到来時刻誤差が約12時間程度であることを考え

ると、この結果は、驚異的な数字であることがわかる。現在、NICTでは、SUSANOO-IPS予測シミュレーションを実際の宇宙天気予報に導入するためのシステム開発を進めており、誤差の情報などを含んだ予報を行うアンサンブル予報の実現が間近に迫ってきている。

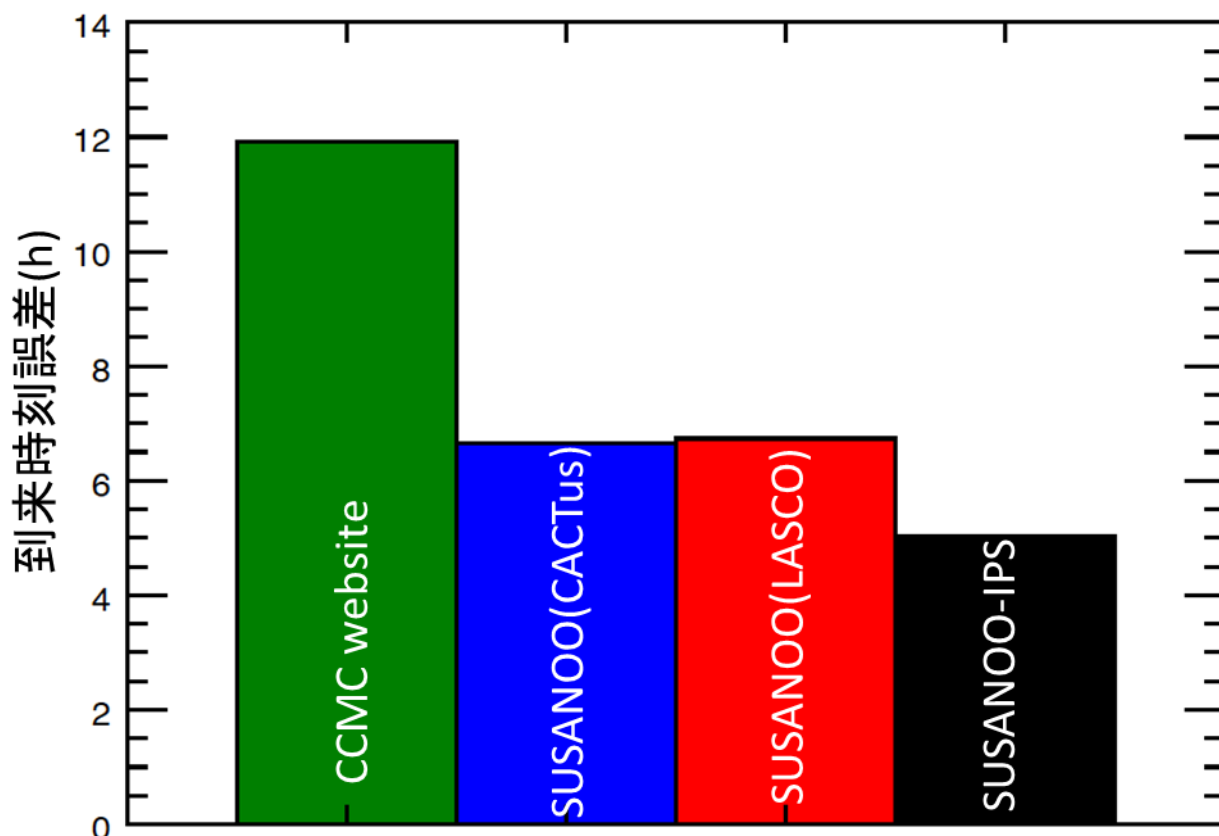


図1：SUSANOO-IPSによるCME到来時刻予測精度の比較。SUSANOO-IPSによる予測到来時刻誤差は約5時間で、もっとく小さいことがわかる。

#### 4. 成果発表

##### ① 誌上発表

1. Iwai, K., Shiota, D., Tokumaru, M., Fujiki, K., Den, M., and Kubo, Y., Validation of Coronal Mass Ejection Arrival-Time Forecasts by Magnetohydrodynamic Simulations based on Interplanetary Scintillation Observations, EPS, 73, 9, 2021

##### ② 口頭発表

1. 岩井 一正、塩田 大幸、徳丸 宗利、藤木 謙一、田 光江、久保 勇樹、Validation and operation of a coronal mass ejection arrival time forecasting system using interplanetary scintillation observations, JpGU - AGU Joint Meeting 2020:Virtual、オンラ



イン、7月13日

2. 岩井 一正、塩田大幸、久保勇樹、田光江、徳丸宗利、藤木謙一、惑星間空間シンチレーション観測データを取り込んだMHDシミュレーションによる太陽嵐到来予報の精度評価、日本天文学会2020年秋季年会、オンライン、9月8日
3. Shiota D., Yashiro S., Kataoka R., Iwai K., Ebihara Y., Development of real-time prediction system of CME arrival and magnetic field with ensemble SUSANOO-CME simulation, 43rd COSPAR Scientific Assembly, オンライン、2月2日、招待講演
4. Iwai K., Shiota D., Tokumaru M., Fujiki K., Den M., Kubo T., Validation of CME arrival-time forecasted by MHD simulations based on interplanetary scintillation observations, 43rd COSPAR Scientific Assembly, オンライン、2月3日、招待講演
5. 塩田大幸、太陽風・コロナ質量放出到来予測モデルの課題と展望、ISEE研究集会「太陽地球圏環境予測のためのモデル研究の展望」、オンライン、2021年3月26日
6. 久保勇樹、岩井一正、塩田大幸、徳丸宗利、藤木謙一、田光江、IPSデータを利用した太陽風予測シミュレーション(SUSANOO-IPS)、2020年度ISEEコミュニティミーティング、オンライン、2020年10月26日

(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

今年度は2020年8月中旬におけるペルセウス流星群の重点観測を、豊川市内よ岐阜県内の2ヶ所に於いて実施し、火球クラスの明るい流星について観測データの解析を行った。今回の流星活動レベルは比較的低調であり、VLF電波放射が期待されるような事例は観測されなかった。しかし同年8月21日に関東南部上空で発生した大火球に伴い、最大光度時にVLF電波レベルの上昇が観測された。この結果は同年9月28日にオンライン開催されたSTE現象報告会で報告されている。また同年12月6日に実施された「はやぶさ2」カプセルリターンについては、流星と類似の現象としてVLF電波放射の発生が期待されたため、オーストラリア南部におけるカプセル回収活動の一環として、現地における代行観測がJAXA回収チームによって実施された。観測地は電波環境が極めて優れており、ELF帯からVLF帯を含む広い周波数領域において、殆ど人工ノイズが見られない記録が得られた。解析はまだ進行中であるが、カプセルやその周辺領域における放電現象によると思われる低レベルのVLFノイズが断続的に観測されている。現在、これらの現象がカプセル起源であるかどうかの検証を行っているとのことである。これについては2021年3月4日にオンライン開催された、STE現象報告会で報告されている。

(別紙様式 4 - 2)

AR12673におけるMHD不安定性発達の研究  
A study on MHD instability in AR12673

永田伸一、京都大学大学院理学研究科附属天文台

【研究目的】

2017年9月に出現した活動領域12673は、9月6日のX9.3フレアをはじめとする大規模フレアを複数引き起こし、太陽活動周期24で最も活動的であった (Yang et al. 2017)。先行研究から、X9.3フレア発生2日前における急速な磁気フラックスの注入が大規模フレアの発生に寄与したことが示唆された (Vemareddy 2019)。また、X9.3フレアの発生機構については、Inoue et al. (2018)による磁気流体シミュレーションから、活動領域に形成された磁気フラックスロープ (MFR)の噴出によることが明らかになった。しかし、大規模フレア発生に至る3次元磁場構造の時空間発展については、明らかになっていない。特に、X9.3フレアに先行して連続的に発生したMフレアの発生機構については未解明である。本研究では、X9.3フレア発生2日前から連続的に発生した、Mフレアの発生機構を明らかにすることを目的とした。

【研究方法】

本活動領域について、我々はSolar Dynamics Observatory (SDO; Pesnell et al. 2012) / Helioseismic and Magnetic Imager (HMI; Scherrer et al. 2012) による光球ベクトル磁場を境界条件とした非線形フォースフリー磁場外挿 (Inoue et al. 2014) を施し、9月4日から9月6日までの3日間を12時間刻みで、磁力線の捻れ (Berger & Prior 2006) の時系列変化の定量的な解析を行った。また、SDO / Atmospheric Imaging Assembly (AIA; Lemen et al. 2012) による紫外線1600ÅでのMフレアの撮像観測データによる増光箇所と外挿された磁場構造の対応を調査した。

【研究結果】

図1に示した通り、9月4日20:24UTの時点で3本の磁気フラックスロープ (MFR A, B, C) が形成されていた。先行研究から、MFR Aは9月6日のX9.3フレアの発生に関与している (Liu et al. 2019)。また、MFR Bは他2本と捻れの方向が異なり、9月4日12:00UT頃から急成長する様子が再現された。さらに、9月4日から5日にかけて、Mフレアが連続して発生している間、AIA 1600Åでは主にMFR Bの周辺で顕著な増光を示すことが確認された。

【考察】

9月4日20:24UTの時点で、MFR Aが形成されていたことから、X9.3フレア発生2日前の段階で、すでに大規模フレア発生の可能性があったことが示唆される。また、MFR Bの形成発展過程についての結果から、連続するMフレアは、MFR Bの急成長に起因すると考えられる。さらに、連続するMフレアの中で最も大規模な、9月4日20:30UT頃発生のM5.5フレアについて、外挿された磁場構造とAIA 1600Åの初期発光及びフレアリボンの位置の詳細な比較から、図2に示した様に、MFR B上空の「ヌル点」での磁気リコネクションが、MFR Bの上昇および、それに伴うM5.5フレアの発生に寄与したとするシナリオが考えられる。

## 【引用文献】

- Berger, M. A., & Prior, C. 2006, Journal of Physics A  
Inoue, S., Magara, T., Pandey, V., S. et al. 2014, The Astrophysical Journal  
Inoue, S., Shiota, D., Bamba, Y., et al. 2018, The Astrophysical Journal  
Lemen, J. R., Title, A. M., Akin, D. J., et al. 2012, Solar Physics  
Liu, L., Cheng, X., Wang, Y., & Zhou, Z. 2019, The Astrophysical Journal  
Pesnell, W. D., Thompson, B. J., & Chamberlin, P. C. 2012, Solar Physics  
Scherrer, P. H., Schou, J., Bush, R. I., et al. 2012, Solar Physics  
Vemareddy, P. 2019, The Astrophysical Journal  
Yamasaki, D., Inoue, S., **Nagata, S.**, & Ichimoto, K., 2021, The Astrophysical Journal  
Yang, S., Zhang, J., Zhu, X., & Song, Q. 2017, The Astrophysical Journal Letters

## 【成果発表】

### (1) 学術雑誌に発表した論文、著書

1. 著者: Yamasaki, D., Inoue, S., **Nagata, S.**, & Ichimoto, K.  
題目: “Evolution of the Nonpotential Magnetic Field in the Solar Active Region 12673 Based on a Nonlinear force-free Modeling”  
誌名: The Astrophysical Journal, 908, 132, 9pp, 2021

### (2) 国際会議における発表

1. 著者: Yamasaki, D., Inoue, S., **Nagata, S.**, & Ichimoto, K.  
題目: “Nonlinear force-free field modeling of the flare-productive magnetic field observed in the solar active region 12673” (iPoster)  
学会名: JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, online, 2020 Jul.

### (3) 国内学会、シンポジウムにおける発表

1. 著者: 山崎大輝、井上諭、石井貴子、浅井歩、**永田伸一**、一本潔  
題目: 「非線形フォースフリー磁場外挿を用いた活動領域NOAA 12673における連続するM5.5とM4.2フレア発生機構の比較」 (ポスター発表)  
学会名: 太陽研究者連絡会シンポジウム、オンライン、2020年12月
2. 著者: 山崎大輝、井上諭、石井貴子、浅井歩、**永田伸一**、一本潔  
題目: 「活動領域NOAA 12673における連続するM5.5、M4.2フレア発生機構の比較」 (口頭発表)  
学会名: 日本天文学会2021年春季年会、オンライン、2021年3月

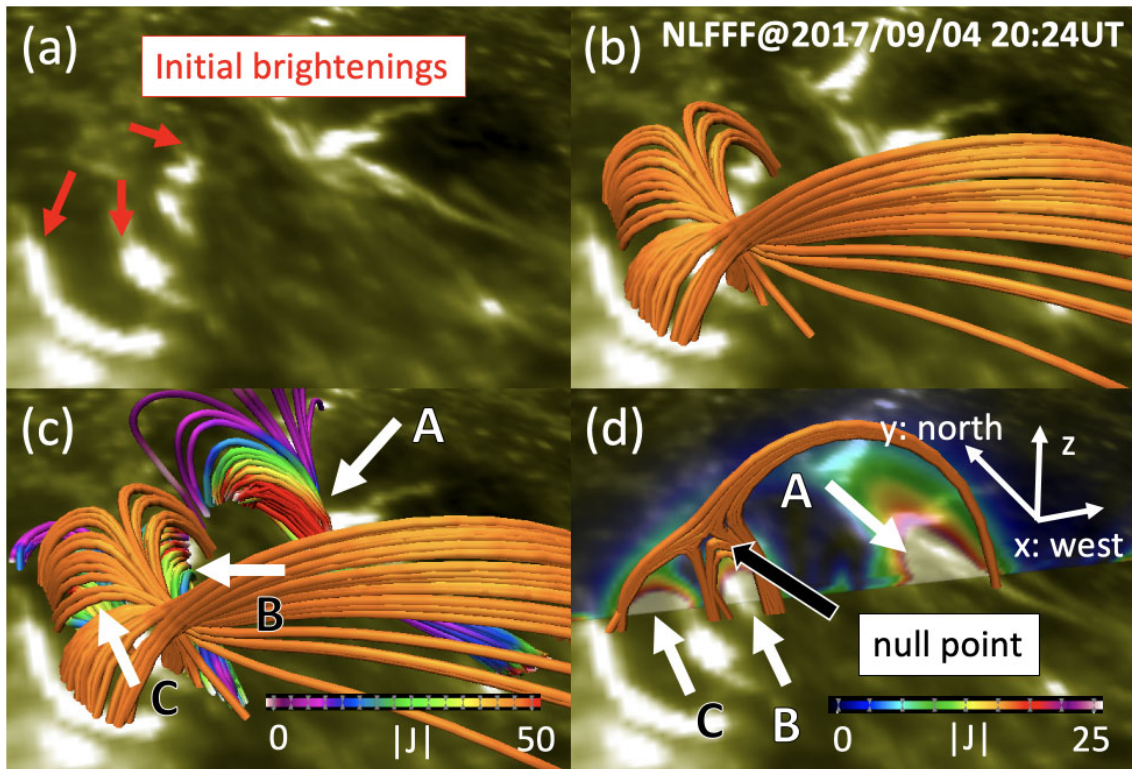


図 1. AIA 1600 Å 撮像データおよびコロナ磁場外挿結果の比較, (a) M5.5 フレアの初期発光, (b) 初期発光と大局的な磁場構造, (c) MFR A, B, C と大局的な磁場構造, (d) 垂直面内に射影した大局的な磁場構造と MFR A, B, C の位置関係.

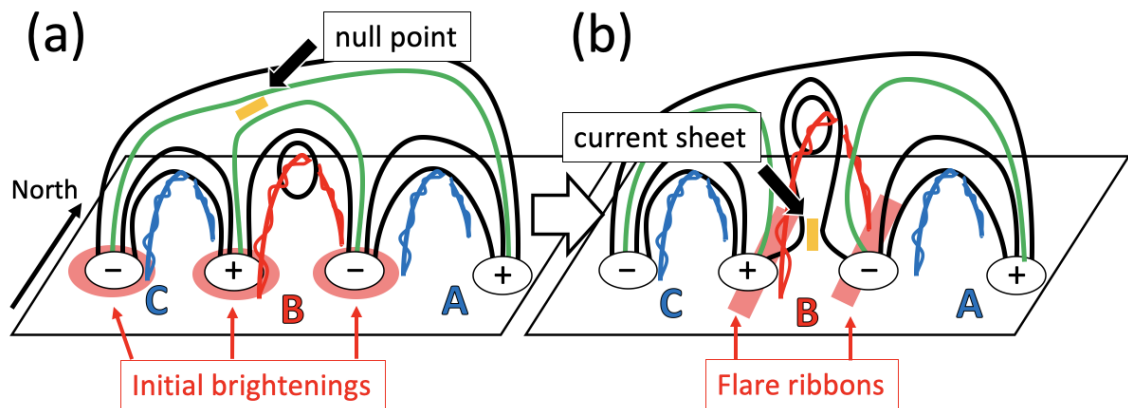


図 2. M5.5 フレアの発生シナリオ, 黒線は大局的な磁場構造, 緑線は磁気リコネクションに関わる磁力線, 捻れた青線及び赤線は磁気フラックスロープ A, B, C, 黄色で示したのは電流シート. (a) M5.5 フレア発生前の磁場構造, (b) M5.5 フレア発生後の磁場構造.

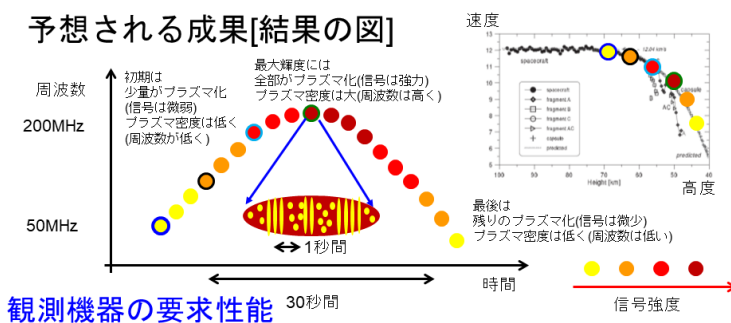
はやぶさ2の突入カプセルのプラズマ化による電波放射の観測  
 Radio observation from the plasma of Hayabusa2 capsule  
 野澤恵、茨城大学・理学部

はやぶさ2の再突入するカプセルがプラズマ化するとき発する電波放射を直接捉えることを目的としている。

Obenberger et al(2014) など、流星や火球からの電波放射は昔から考えられてはいたが、実際に検出されたのは2010年代に入ってからである。ただし、HF(短波、3-30MHz)の受信例が多く、大型干渉計でも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ので変換機構が必要である。この放射機構は太陽のメートル波放射の場合と似たものと考えられ、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。

はやぶさ2の再突入するカプセルが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され、プラズマ化される。これは流星と発光過程と同じであり、Obenberger et al(2014) で報告されるように、プラズマ放射が発生することが考えられる。そこで、この電波放射を直接観測することにより、プラズマからの放射機構を明らかにする。特にはやぶさ2のカプセルに関する情報(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がわかれば、まだ不明である電波放射機構について詳細な議論が可能となる。

以下の図は予想される観測量で、横軸に時間、縦軸に周波数、そしてその強度である。



**観測機器の要求性能**  
 広い周波数帯を**スペクトル**で**高時間分解能**で受信  
 [50-200MHzを10-100msで捉える]  
 callisto受信機(~10万円)とスペアナ(~50万円)  
 可能であれば複数地点で観測(信号強度 $\sim 1/r^2$ )

未知のプラズマ電波放射の解明  
 微細構造の原因のプラズマ不安定の同定  
 プラズマ物理の進展に寄与



そこで受信周波数 50-1300MHz をカバーするログペリアンテナと e-callisto(<http://www.e-callisto.org/>)が提供する受信機を改良したものをを用いる。そして観測はコロナ禍のためにオーストラリア現地に行くことができなかったため、現地の Curtin 大学に協力を得て観測に臨んだ。しかし受信設定にトラブルがあり、受信は行えなかった。

(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。GRAPES-3 と明野観測所のミュオン検出器は、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検出器であり、申請者のグループにより運用されている。インドと日本では経度で約 60 度の差異があり、この差異と地球の自転を利用した連続観測により、広域同時観測が実現できる。

現在、明野ミュオン観測では、大規模な再整備作業が進行中であり、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 m<sup>2</sup>) にする拡張作業が進行中である。

【研究活動報告】

2019 年度の時点で GRAPES-3 実験のミュオン検出器の拡張作業は大詰めを迎えつつあった。新ミュオン検出器 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本格観測を開始する予定であった。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 年度になっても依然として流行が治まらなかったため、研究活動が計画通りに進めることができなかった。共同研究を行うインドにおいても日本国以上に状況



が悪く、外国人の入国も認められていない。さらにインド国内においても、永らく全土におよぶ都市封鎖が長期に亘ったこと、とくに GRAPES-3 のある Ooty への移動が著しく制限されていたため、共同研究機関であるインド・タタ基礎研究所においても、共同研究者は観測施設に行くことが困難な状況が続いた。そのような状況のため、本研究代表者も中部大学に出張することができなくなり、予算の支出目的を、データの記録メディアなどに変更し、ハードディスク購入した。

一方、GPRAES-3 及び明野ミュオン観測のデータ解析について議論した。さらに、本研究代表者、および、中部大学の嶋晃敏氏らが、2020 年秋に複数回にわたり明野宇宙線観測所に出張し、3 基の明野ミュオン観測装置の再整備を進め、比例計数管の時定数、PWA の測定および性能のチェックを行なった。

#### 【研究成果】

本研究に関する成果として、3 篇の国際会議論文が出版された。また、日本物理学会で 5 件の発表を行った。

#### 【日本物理学会・その他学会発表】

1. 「大面積高精度 muon 望遠鏡による方位別宇宙線強度変動の研究(25)」、小島浩司、嶋晃敏、田中公一他、日本物理学会 2020 年秋季大会 オンライン開催、17pSN-3
2. 「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(26)」、小島浩司、嶋晃敏、田中公一他、日本物理学会 第 76 回年次大会(2021 年) オンライン開催、12pW3-3
3. 「GRAPES-3 型ミュオンテレスコープを用いた宇宙天気研究」、嶋晃敏、伊藤信夫、田中公一他、日本物理学会 第 76 回年次大会(2021 年) オンライン開催、12pW3-4
4. 「大型ミュオンテレスコープによる銀河宇宙線強度の観測」  
2021年2月 東京大学宇宙線研究所共同利用成果発表会
5. 「GRAPES-3 大気ミュオン観測による宇宙天気研究」  
2021年2月 令和2年度ISEE合同研究会

(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

ジオスペース最大規模の変動現象である宇宙嵐(geospace 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は、内部磁気圏における電磁場と粒子の変動を理解することが不可欠であるが、申請者らはこれまでに、両者を自己無撞着に解くことが可能な環電流モデル(GEMSIS-RC)を開発してきた[Amano et al., 2011]。この環電流モデルの特徴は、世界で初めて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、この新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。

本研究計画では本年度、昨年度に引き続き2つの課題に焦点をしばって研究を進めた。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を目的としている。この課題は、内部磁気圏での粒子と電磁場を自己無撞着に記述可能なGEMSIS-RCモデルの特徴を活かしたもので、電磁場を経験モデルや平衡モデルで仮定する従来の環電流モデルでは記述のない現象であり、世界的にみても独自性を持った取り組みである。計画第2年度である本年度は、非対称バタフライ型のピッチ角分布を持つ内部磁気圏へのイオン入射を模擬したシミュレーション結果から、ドリフト-バウンス共鳴による波の励起条件を調べ、結果を国際学術誌に出版した。また、電離圏側の電場ポテンシャルを解くGEMSIS-PO Tとのモデル結合計算の開発を行った。

2つ目の課題は、電離圏から内部磁気圏へのイオン供給課題をあらせ衛星と地上レーダー観測に基づいて研究し、その結果を、上述の環電流モデルの電離圏側境界条件の改善に役立てるといふものである。具体的には、昨年度から行っているEISCATレーダー観測とあらせ衛星によるイオン質量分析観測の比較によるデータ解析研究をさらに進めた。その結果、局所的に強まった電場に起因するイオン加熱が分子イオンが存在する低高度(高度300km以下)からのイオン上昇流を引き起こしている可能性などが明らかとなり、2017年9月8日の磁気嵐中の同時観測結果を学術誌に投稿した。また、磁気嵐のドライバータイプ別(CMEもしくはCIR)の電離圏での低高度アップフロー現象の出現条件に着目して、統計解析を開始した。

上空におけるバイオエアロゾルの観測と雲課程への寄与推定  
Airborne observation of bioaerosols to estimate contribution in the  
cloud processes

北 和之、茨城大学 理工学研究科  
鈴木 湧平、茨城大学 理学部  
牧 輝弥、近畿大学 理工学部  
松見 豊、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・孢子・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、比較的高温で氷晶核となるものを含むため気象・気候への影響がありうること、また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 (e.g. Hoose and Möhler, 2012)。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放出源の一つとして、森林が重要であるが、そこから大気への放出量を定量的に見積もった研究はまだ少ない。バイオエアロゾルの森林から大気への放出過程と放出フラックスを明らかにするため、森林内から上空にかけての高度分布の観測を行う必要がある、森林直上でのバイオエアロゾルの高度分布を測定するため、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、それをさらなる分析を行うことが可能な形で捕集する。
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. UAVの速度は $50\text{m/s}$ 程度
6. 飛行時間は30分以内程度

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  $\text{m}^{-3}$ 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、 $100\text{L/m}$ 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、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。必要なインレット直径は約 $7\text{cm}$ と見積もられ、十分現実的な大きさである。漏斗状インレット

の出口は直径12mmとし、出口と捕集プレート間の間隔を約1cmとすることで、インパクトとして粒径 $1\mu\text{m}$ 以上の粒子が捕集できると考えた。

他に必須な情報として、高度とインレットを通過する空気流量がある。また、対象の高度のみでサンプリングを行うよう、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する必要がある。高度は小型GPSモジュールや気圧、気温センサーを搭載することで、十分な精度で得ることができる。流量は、最初軽量なマスフローメーター(Honeywell製)の利用を考えたが、粒径が数 $\mu\text{m}$ 以上の粒子の損失が認められ、漏斗状インレットをベンチュリー管とみなし、差圧センサを用い、径の大きい部分と小さい部分での気圧差から推定することとした。各センサーの出力は、IoT入門でよくつかわれるマイコンArduino unoに取り込み記録し、設定高度でサーボモーターでシャッターを動作させることとした。

まとめと今後の課題：

以上のようなサンプラーを試作し、各構成要素ごとにテストを行い、期待通りの動作をすることを確認した。今後は、全体をシステムとして動作させるようまとめて試験観測により性能を確認し、早ければ2021年夏に実際にUAVに搭載しての試験を行いたいと考えている。

現時点で最も大きな課題は、姿勢が変わっても安定にバイオエアロゾルを保持でき、かつサンプリング後に実験室で捕集した粒子を脱離させられるような捕集プレート素材の選定であり、各種の粘着性ゲルシートなどをテストしている。

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

成果発表：

SUZUKI Yuhei and KITA Kazuyuki, Development of Bio-aerosol sampler onboard UAV (Drone), Southeast Asia Research-based Network on Climate Change Adaptation Science (SARNCCAR) International Seminar, Nov.17, 2020.

Kazuyuki Kita, Yasuhito Igarashi, Takeshi Kinase, Naho Hayashi, Masahide Ishizuka, Kouji Adachi, Motoo Koitabashi, Tsuyoshi Thomas Sekiyama and Yuichi Onda, Rain-induced bioecological resuspension of radiocaesium in a polluted forest in Japan, Scientific Reports, 10:15330, doi.org/10.1038/s41598-020-72029-z, 2020.

(別紙様式 4 - 2)

## トロムソ Na ライダーのレイリー散乱データを用いた成層圏大気温度の計算に関する 基礎検討

Consideration on stratospheric temperature calculation utilizing Rayleigh  
scattering data from Tromsø Na lidar

津田卓雄, 電気通信大学・情報理工学研究所

### 研究目的

ノルウェー, トロムソのナトリウム (Na) ライダーは, 主として中間圏・下部熱圏高度に分布する Na の計測を目的とした観測装置であるが, Na 観測時の副産物として成層圏高度の主成分大気粒子 ( $N_2$ , etc.) によるレイリー散乱データも同時に取得されている. 本研究では, このレイリー散乱データを有効活用して成層圏大気温度を求める手法の検討と実装を目的とする.

### 研究進展状況

レイリー散乱データから大気温度を求める代表的な手法 [Hauchecorne and Chanin, GRL, 1980] は, ライダー方程式と大気の物理方程式を組み合わせるレイリー散乱データと大気温度の関係式を導出し, レイリー散乱データ (計測量) をその関係式に入力して大気温度 (物理量) を求めるシンプルでロバストな手法であり, 当時から現在まで広く使用されている. 本研究では, 同手法を採用して, トロムソ Na ライダーのレイリー散乱データを用いた成層圏大気温度の計算手法について基礎検討を進めることを目的とし, 特に, トロムソ Na ライダーの特徴である 5 方向斜めビーム観測に関して, 鉛直ビーム観測に対して正確な補正を行えるように複数の計算方法の試験を進めた. 最終的には, 約 10 年分の全データセットについて試験的なデータ処理を行い, 成層圏大気温度データベース (version 1) を作成するところまで進めた.

今後の課題として, 作成した成層圏大気温度データベースの検証が挙げられる. 大気温度観測で実績のある人工衛星 (TIMED/SABER, Aura/MLS, etc.) の大気温度データを利用し, 本研究で導出した大気温度データの有用性について, 定量的な検証を進めていくことを予定している. また, 一方で, 近年の手法研究において, 統計数理的な理論をベースにした複数の新手法が提案されている [Khanna et al., Applied Optics, 2012; Sica and Haefele, Applied Optics, 2015]. しかしながら, これらの新手法の実利用はあまり進んでいない. 今回採用した従来法と新手法 (及びそれらの改良) を含む視点で, レイリー散乱データを用いた成層圏大気温度の計算手法について, より詳細な追加調査/検討を進めることが今後重要であると考え.

### 研究発表

- (1) T. T. Tsuda, S. Nozawa, N. Saito, T. D. Kawahara, T. Kawabata, T. Takahashi, S. Wada, T. Nakamura, M. K. Ejiri, T. Nishiyama, K. Tsuno, and M. Abo, Observations of metallic layers in the Earth's upper atmosphere based on resonance-scattering lidars, The review of laser engineering, 48, 580-584, 2020. (in Japanese)

(別紙様式 4 - 2)

インド亜大陸北東部における  
プレモンスーン降水をもたらす総観場の解明  
Study of synoptic conditions during  
premonsoon season in the northeast Indian subcontinent

村田 文絵、高知大学・理工学部

## 1. はじめに

インド亜大陸北東部はインドモンスーン域の中で最も湿った地域である。この地域の降水はインドモンスーン域の他の地域と同様6・9月のモンスーン季に集中するものの、3・5月のプレモンスーン季から降水量が顕著に増える特徴を持つ。今年度は、本研究グループが継続的に転倒マス雨量計で観測を行ってきたインド・アッサム州について、降水システムの特徴をモンスーン季とプレモンスーン季で比較しつつ、卓越している降水日変化の特徴を解析した。

## 2. データ

本研究ではインド・アッサム州において2014～2018年の5年間の間に観測された15地点の転倒マス雨量計データを用いた。面的な降水量分布の変動を把握するためGSMaP MVK V7の時間雨量データを使用した。日変化について各雨量計観測点のGSMaPグリッド値と雨量計データの期間平均の日変化を比較したところ、ある程度一致していた。また総観場の解析にはERA5を用いた。本報告の時刻はLT=UTC+6時間を用いる。これはアッサム州が位置する90° E付近の標準時刻であり、インド標準時UTC+5.5時間とは異なることに注意して下さい。

## 3. 研究結果

インドアッサム州の雨量計地点はヒマラヤ東部の南に広がるブラマプトラ谷の中と南部のメガラヤ高原の東隣に位置する丘陵地帯にあるが、全て夜間に降水の極大を示す。プレモンスーン季とモンスーン季を比較すると、プレモンスーン季は降水が夕方18LT頃に開始し、翌日の12LTまでの間にみられ、00-03LTに降水量が極大となる。一方モンスーン季は21LT頃に開始し、翌日の12LTまでの間にみられ、03-05LTに降水量が極大となる。またGSMaPをみると、プレモンスーン季はブラマプトラ谷の中で西から東に降水システムが移動する傾向(移動速度約7m/s)がみられたのに対し、モンスーン季はブラマプトラ谷の中での降水システムの移動はみられない。GSMaPでみるとブラマプトラ谷の周辺にわたって降水日変化は顕著であり、谷では日中午後降水量が抑制される一方で、ヒマラヤの標高が高い地域とメガラヤ高原上で日中後に降水が卓越する。

プレモンスーン季はモンスーン季より降水の開始が早い傾向がみられた。プレモンスーン季は降水システムが西から東に移動する傾向があるので、西に当たるブラマプトラ谷入口付近のプレモンスーン季の環境場を調査した。南のベンガル平野にわたって大気境界層内では一日を通して湿った南風が卓越している。一方、谷の西側に広がるガンジス川流域にわたって大気境界層の発達に伴う乾いた西風が夕方強化され、ベンガル平野上の南風との間に顕著なドライラインを夕方形成する。さらに、ブラマプトラ谷の入口付近では、日中後部のヒマラヤ上の対流システムに伴う冷氣プールの可能性がある北寄りの風が強まっている。

#### 4. 考察と今後の課題

谷の中の降水は他地域でも夜間に観測されることが多い。(e.g. Chen et al. 2012; Bedoya-Soto et al. 2019) ERA5で山谷風循環がみられることから、ブラマプトラ谷も日中の谷風循環が日中の対流発達を抑制していると考えられる。プレモンスーン季もモンスーン季も夜間降水が卓越するが、プレモンスーン季は降水システムの移動が顕著であり、また降水はモンスーン季より早く発生する傾向がある。プレモンスーン季はモンスーン季に比べて湿った南風の層が薄いため山岳を超えて流入する水蒸気量は多くなく、主に西の谷の入口から流入する可能性がある。また、谷の入口付の西側に広がる平野上で夕方ドライラインが形成され対流がトリガーされやすい要因があること、プレモンスーン季の方が冷氣プールが形成されやすく組織化した降水システムを形成しやすいこと等が違いとして考えられるが、より根拠の強化が必要である。

#### 6. 引用文献

Bedoya-Soto, J. M., Aristizabal E., Carmona, A. M., Poveda, G. 2019: Seasonal shift of the diurnal cycle of rainfall over Medellin's valley, Central Andes of Colombia (1998-2005), *Front. Earth Sci.*, 7, 92.

Chen, G. Sha, W. Iwasaki, T., Ueno, K. 2012: Diurnal variation of rainfall in the Yangtze river valley during the spring-summer transition from TRMM measurements. *J. Geophys. Res.*, 117, D06106.

#### 7. 成果発表

栗山匡一朗, 村田文絵, 寺尾徹, 山根悠介, 木口雅司, 福島あずさ, 田上雅浩, 林泰一, インド・アッサム州における2014-2018年の降水の特徴と日変化, 日本気象学会関西支部例会, オンライン, 2020年12月18日, 口頭発表

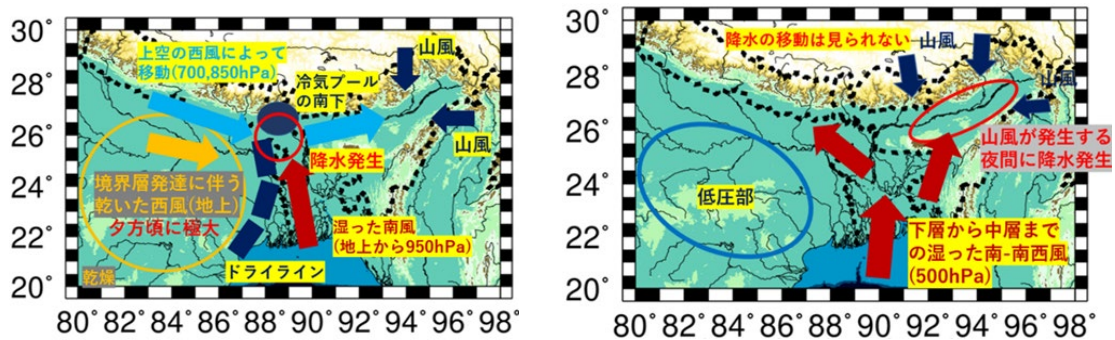


図1: (左)プレモンスーン季と(右)モンスーン季におけるブラマプトラ谷の降水日変化に寄与する可能性がある要因の模式図。



(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

【本研究の目的と方法】前年度に続き、小型低重量 PM2.5 測定装置 (図 1 左・中、共同利用装置: 松見豊先生の研究室で開発) を核としたエアロゾル連続測定システムの性能検証を目的とする空中観測実験を行う。この飛行測定システムはドローン (図 2 左、共同利用装置) と吊り下げペイロード (図 2 右、測定システムを封入したカプセル、共同利用装置) で構成され、「場所を選ばない」「地表から上空まで連続計測可能」という地表に固定された観測所にはない機動性に優れたメリットがある。

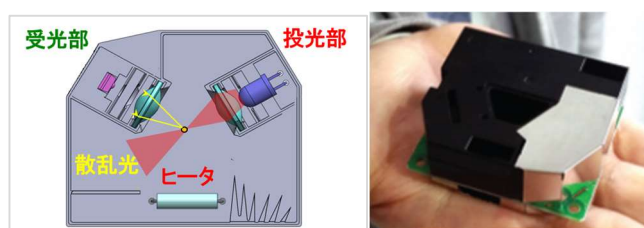


図 1. PM2.5 測定装置 左: 構造図 右: 外観



図 2. 左: ドローン 右: カプセル

【1: ドローンによる鉛直 PM2.5 観測実験】2019 年度までの測定システムが改良されて、2020 年度は新型システムを使用した。標高 272.2m の HP (離発着点、京都府舞鶴市) から対地高度 500m (海拔 772.2m) までの鉛直方向を段階的に計測した (図 3)。上空との比較対照データを取得するため、ドローンの離陸前に地表 (対地高度 0m) で測定を開始し、離陸後に 100m、300m、500m の各高度において、5 分ずつホバリングさせて測定を行った。

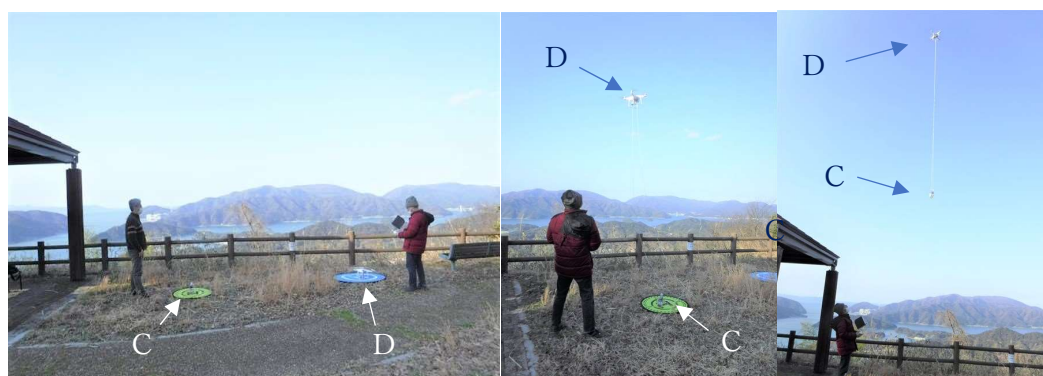


図 3. 実験風景 (C:カプセル D:ドローン)

## 【2：ドローンによる地形計測実験】

長野県日本アルプス一帯において実施された、エアロゾル輸送の山岳地形効果を解明する大規模プロジェクト『DRAGON J-ALPS』には、ドローンによる PM2.5 鉛直観測が含まれている<sup>1)</sup>。本一般共同研究では、小規模で単純な形の山地形（孤立峰であるスコリア丘）において連動自律飛行させた複数機ドローンによる空中 PM2.5 観測を行い、地形効果の詳細な観測・検証を目指す。第一段階として、自律飛行中に一定の対地高度をドローンに維持させるため、当該地形の 3 次元標高データを取得する。2020 年度は静岡県伊東市「大室山」においてドローン写真測量実験を行い、3 次元モデルを作成した（図 4、図 5）。スコリア丘を撮影対象にするメリットは、2019 年度に撮影対象としたカルスト台地の山口県「秋吉台」のように年 1 回の野焼きにより樹木が殆ど無い草地が保たれていて、樹木が覆う山岳に較べて地表を撮影しやすい点にある。



図 4 大室山

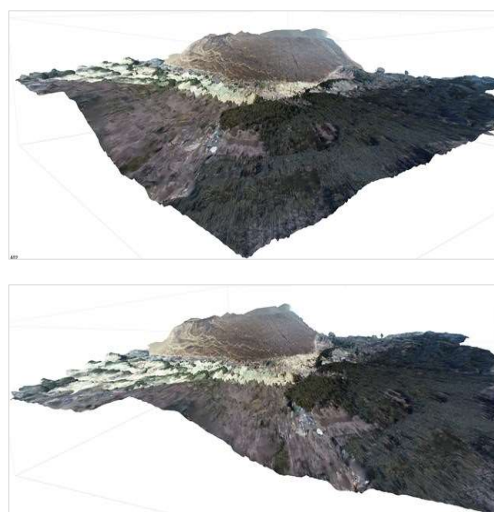


図 5 大室山の 3 次元モデル（スクリーンショット）

【まとめと課題】1 の実証実験では、測定システムの回路の不具合のため、上空の鉛直方向の PM2.5 分布データを十分に得ることができなかった。次年度に改善を行う。前年度に提案された上部マウント方式は飛行中の安定性に問題があり、次年度の検討課題になった。2 の実証実験では、「煙柱」のような動的な対象を 3 次元モデル化する準備として、複数ドローンによる同時撮影を目的とした地形データ取得を行った。

## 【参考文献（URL）】

- 1) 『エアロゾル輸送における山岳地形効果の解明』 研究代表者：佐野到  
(科研費研究課題/領域番号 19H04242 基盤研究(B))  
<https://kaken.nii.ac.jp/ja/grant/KAKENHI-PROJECT-19H04242/>

地上デジタル放送波を用いた水蒸気量観測  
Measurement of water vapor using digital terrestrial broadcasting waves

花土弘、国立研究開発法人情報通信研究機構  
電磁波研究所電磁波伝搬研究センター  
リモートセンシング研究室

1. 研究目的

情報通信研究機構(NICT)が開発した地デジ放送波を用いた水蒸気量推定手法の開発・改良と観測されたデータの利活用を実施するものである。地デジ波を用いた水蒸気推定の原理は、地デジ放送波が伝搬時に受ける大気の大気温度、気圧、及び水蒸気量による遅延を精密に測定することであり、NICTが開発した手法は送信塔からの直達波と周辺事物からの反射波を同時受信し、その位相差を測定する方法で水蒸気量による伝搬遅延量の精密測定を実現する。現在、地表付近の水蒸気量をリモートセンシングで広範囲に測定する手法は限られていて、本手法が確立して多点展開が進めば、水蒸気を面的に常時モニター可能となり、局地的大雨等の時空間スケールの小さな極端現象の予測精度向上への寄与が期待できる。

2. 研究方法

名古屋大学宇宙地球環境研究所の屋上に、地デジアンテナ及び地デジ波遅延測定装置を設置し、伝搬遅延量の精密測定を実施する。具体的には、瀬戸デジタルタワーから送信されている地デジ放送波の直達波と周辺事物からの反射波を同時受信し、直達波と反射波の位相差から受信地点と反射体との間の水蒸気変動量を伝播遅延量変動という形で推定する。名古屋大学は瀬戸デジタルタワーから約10 kmに位置し、宇宙地球環境計測研究所の屋上から同タワーの目視が可能で直達波の受信可能で、名古屋市中心部にある建物などの反射波の受信も容易であり、本観測に適している。

3. 研究結果

地デジ波遅延測定装置は、同時に4つの周波数を独立に観測可能である。通常、受信アンテナを共通にし、複数の放送局からの地上デジタル放送波を違う周波数で受信する形での実験を実施するが、今回、試験的に方向の異なるふたつのアンテナを使用し、それぞれふたつの周波数で受信を行うことで地上デジタル放送波の反射体の分布を変更し、水蒸気量推定の面的分布の測定可能性に関して検討を実施した。

4. 考察

今回の測定結果ではふたつのアンテナのビーム幅がかなりブロードなことも有り、明瞭に水蒸気量の面的分布を捉えることができていない。受信アンテナのビームを鋭くする方法としては設置場所を少し変えた複数のアンテナで記録された複素受信信号を数値的に足し合わせる時に位相を考慮することでビームを合成するデジタルビームフォーミングが利用可能と考えられるので、その方法での解析可能な実験データの取得を今後検討する。

5. まとめ

名古屋大学宇宙地球環境研究所の屋上で、瀬戸デジタルタワーから送信されている地上デジタル放送波を用いて面的水蒸気量推定を試みた。今回使用した受信用アンテナはビームが鋭くないアンテナで十分な方位分解能が得られず、面的な水蒸気量推定には不十分であった。

6. 引用文献

川村ら、"地上デジタル放送波を用いた水蒸気量推定手法の研究開発", 情報通信研究機構研究報告 Vol. 65, No. 1, pp.15-19, 2019年9月.

7. 成果発表

花土ら、"地デジ放送波を用いた地表付近の水蒸気量観測-首都圏観測網の整備と九州実証実験への準備状況-", 日本気象学会2020年度秋季大会, オンライン開催, 2020年10月27日  
花土ら、"地デジ放送波を用いた地表付近の水蒸気量観測-山岳域での反射法の利用について-", 日本気象学会2020年度秋季大会, オンライン開催, 2020年10月28日

(別紙様式 4 - 2)

中性大気風によるスポラディックE層の生成過程の解明  
Generation process of the sporadic E layer  
by the neutral wind

齊藤昭則、京都大学・大学院理学研究科

### 目的

中性大気風によって高度150km-100kmの領域に生成されるスポラディックE層(Es層)の生成過程に関して、数値モデルと観測データの比較により解明を行なった。Es層は突発的に発生する高電子密度層であり、中性大気が支配的な高度領域からプラズマ大気が支配的な高度領域の遷移領域に発生するため、その生成過程は複雑であり、その名称が示すsporadic(散発的な、不定期な)振る舞いは十分に理解されていない。そこで、3次元数値モデルを開発し、その結果と観測との比較により、その物理過程の解明を進めた。

### 方法

過去の研究より、中性大気風の高度シアにより金属イオンの集積が起こることが明らかになっており、その金属イオンの集積・散逸に関する3次元数値モデルの開発と、現実的な中性大気風を与えた数値モデルの結果と共鳴散乱ライダーによる金属イオンの高度分布との比較を行なった。中性大気風としては全大気モデルであるGAIAモデルの中性大気風を用いた。GAIAモデルでは下層大気は再解析データをナッジングすることにより、日々の下層大気における変動を取り込んでおり、中層大気、超高層大気の実験の日時での変動の再現を行なっている。Es層として比較する観測データとしては国立極地研究所が実施したCaイオンの共鳴散乱ライダーを用いた。

### 結果・考察

2014年8月から2016年8月までに、共鳴散乱ライダーの観測が実施された6晩について、数値モデルによるCaイオン3次元分布の時間変化と、ライダーによるCaイオン高度分布の時間変化との比較を行なった。ライダーによる高度分布の時間変化においてEs層は、(1)時間とともに高度110km程度から100km程度まで下降する層の有無(2)高度100km付近で停滞し時間による高度の変化が少ない層の有無、の2点で特徴付けられるが、6晩においてこれら2つの特徴は様々な様相を示し、Es層の日々変動の強さを示した。数値モデルによるEs層の構造でも、これら2つの層の振る舞いについて、観測に対応した特徴が再現されており、Es層の日々の変化の大部分の構造が中性大気の変動によって作られていることが明らかになった。ただし、観測には現れるが、数値モデルには現れない付加的なEs層も見られ、これは数値モデルに含まれない大気重力波のような小さなスケールの風構造によるものと推定される。

### まとめ

中性大気を入力とした3次元モデルによる金属イオン分布の結果は観測と高い一致を示した。これは、数値モデルを用いたEs層の発生

予測への可能性を示す結果であるが、今後、小規模な風や電場など現在のモデルには含まれていない過程も取り込むことで、より高い再現が期待できる。

## **成果発表**

Andoh, S., Saito, A., Shinagawa, H., Ejiri, M.K. and Miyazaki, S., Three-dimensional ionospheric simulation of the Es layer: Physical mechanism of the sporadic appearance, JpGU -AGU Joint Meeting 2020, オンライン, 2020年7月12日-15日

安藤慧, 齊藤昭則, 品川裕之, 中緯度スポラディックE層の発生に及ぼす電気力学的影響に関する数値シミュレーション, 地球電磁気・地球惑星圏学会第148回 総会・講演会, オンライン, 2020年11月2日

Andoh, S., Saito, A., Shinagawa, H. and Ejiri, M.K., First simulations of day-to-day variability of mid-latitude sporadic E layer structures, American Geophysical Union fall meeting 2020, オンライン, 2020年12月1日-17日

Andoh, S., Saito, A., Shinagawa, H. and Ejiri, M.K., First simulations of day-to-day variability of mid-latitude sporadic E layer structures. Earth Planets Space 72, 165 (2020). <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01299-8>

(別紙様式 4 - 2)

GC - 精密キャピラリー分取装置を用いた有機化合物の新たな年代測定  
法の開発

Developments of new dating protocols on organic molecules us  
ing GC-capillary fraction collector

内藤裕一、名古屋大学・博物館

コロナ禍のため研究を実施できなかった。

高解像数値モデルを用いた台風飛行の安全性に関する検討  
An investigation of the safety of flights in a typhoon  
using a high-resolution numerical model

山田広幸、琉球大学・理学部

## 研究目的

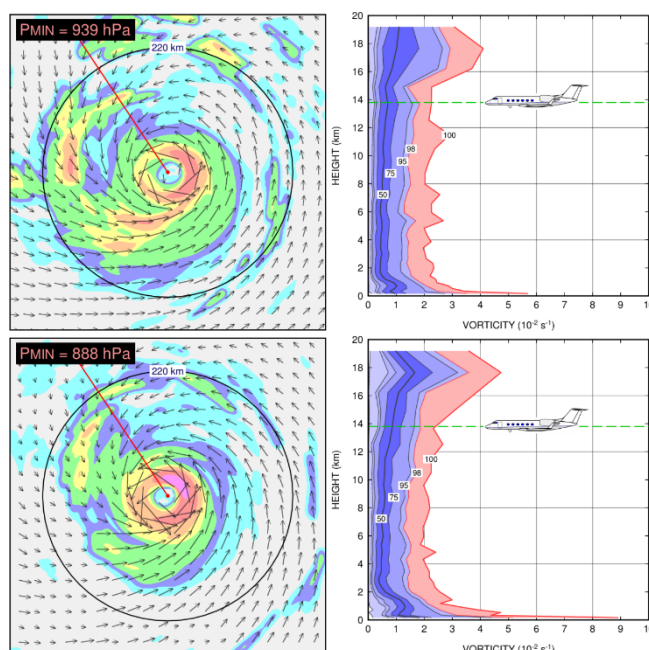
航空機を用いて台風の強度を直接観測するためのプロジェクト「T-P ARCI II」が、名古屋大学を主体とする科研費共同研究として実施されており、猛烈な勢力の台風の中心を貫通する観測に成功している。地球温暖化に伴う海水温上昇により台風の勢力が増強する可能性が指摘されている今日において、今後は「スーパー台風」とよばれる中心が900 hPaを下回る台風の貫通観測も必要だと考えられるが、飛行の安全性についてはまだ確証が得られていない。対流圏上層における飛行に影響を与える現象として、強い上昇流を伴う積乱雲（通称“対流バースト”）に伴う鉛直流や、そこから励起される内部重力波による振動、上部アウトフローに伴う鉛直シアの強化などが考えられるが、これらの現象を観測するのは非常に難しく、安全性の検討は難しい。そこで本研究では、雲解像非静力学モデルを用いて台風の超高解像シミュレーションを行い、その出力結果を用いて飛行に対する影響を評価する。

## 研究方法

全球雲解像モデルNICAM（水平解像度は3.5km）の出力結果を用いて、台風が急発達して猛烈な勢力に至るまでの過程を数値的にシミュレートし、出力結果を用いてジェット機の水平航行に影響を与える3次元渦度の分布を調べる。これにより航空機で安全に航行できる領域や高度、台風の発達段階などを明らかにする。

## 研究結果

本研究では中心気圧が888 hPaまで低下した台風のシミュレーション結果を使用した。中心気圧が939 hPaの発達途中の段階（図の上段）と成熟段階（図の下段）において、風の変化の指標となる渦度3次元成分のスカラー量を計算し、各高度における頻度分布を作成した（右段）。どちらの段階でも、渦度の極大は高度17km付近のアウトフロー層と地表付近に現れており、成熟段階において渦度が強まっていることがわかる。一方、観測飛行に使用する高度14km付近はこれらの極大域からは外れており、成





熟段階においても渦度がほとんど強まっていないことがわかる。つまり、これまで実績のある高度14km付近を飛行する場合、非常に強い勢力でもスーパー台風でも同程度の揺れで飛行できると考えられる。

なお、高度0.5km付近にある渦度の極大は、メソサイクロン（竜巻をもたらす積乱雲の回転）と同程度の大きさであり、海面近くの飛行では非常に強い揺れを伴う可能性が考えられる。このことは、米国のハリケーン航空機観測で航行に影響を与える強い揺れが海面近くの低い高度で報告されている事実と整合する。

今後はさらに異なる台風のシミュレーション結果を用いて検討を進める予定である。

#### 成果発表（論文）

Tsujino, S., K. Tsuboki, H. Yamada, T. Ohigashi, K. Ito, and N. Nagahama, 2021: Intensification and Maintenance of a Double Warm-Core Structure in Typhoon Lan (2017) Simulated by a Cloud-Resolving Model, *J. Atmos. Sci.*, **78**, 595-617. DOI: <https://doi.org/10.1175/JAS-D-20-0049.1>

#### 成果発表（口頭発表）

山田 広幸, 2020: 台風の航空機観測 ～米国の流儀、日本の挑戦～, 琉球大学島嶼防災研究センター第14回防災・環境シンポジウム ―安全・安心への取り組み―, 琉球大学50周年記念会館, 12月17日, 口頭発表.

細川 椿, 山田 広幸, and Ben Jong-Dao Jou, 2020: 台風 Maria (2018) のレインバンドに関する地形性降雨強化の解析, 日本気象学会秋季大会, オンライン開催, (10月25-31日), オンライン発表.

平野 創一郎, 伊藤 耕介, 山田 広幸, 2020: 2018年台風第24号の眼の領域における深い対流雲の出現, 日本気象学会秋季大会, オンライン開催, (10月25-31日), オンデマンド発表.

(別紙様式 4 - 2)

屋久島の山岳渓流水中の窒素同位体比を用いた硝酸イオンの起源推定  
Estimation of deposition nitrogen origin from atmosphere using nitrogen isotope ratio on mountain stream water in Yaku Island

篠塚賢一、福岡工業大学・情報工学部

研究目的

近年、日本の森林では、大気からの窒素沈着が増大し、森林の窒素循環メカニズムが変化している。そのため、通常低濃度の硝酸イオン( $\text{NO}_3^-$ )流出しか見られなかった森林渓流水においても高濃度の $\text{NO}_3^-$ 流出が見られている。さらに、近隣に人為的な窒素負荷源が存在しない、山岳域や島嶼部においても渓流水中の $\text{NO}_3^-$ 濃度の上昇がみられている。国内でも稀な高い標高を持つ山岳島嶼の屋久島でも、1990年から2010年にかけて渓流水中の $\text{NO}_3^-$ 濃度が増加傾向にある(Nakano et al., 2001; 海老瀬・永淵, 2002)。これは、大陸からの窒素酸化物が運ばれ、大気からの窒素沈着の増大が渓流水質の変化に影響を及ぼしていると考えられる。

屋久島の島の直径は30kmであり、標高1,931mの宮之浦岳をはじめ1,800m以上を7座持つことから、島内を流れる溪流は急峻な地形を一気に流れる溪流が多数存在している。このように、急勾配な溪流、日本の中でも高い降水量、風化した花崗岩流域を持つ屋久島の渓流水に含まれる $\text{NO}_3^-$ は、陸上生物の影響を受にくく、雨の成分を多く含んだ水が渓流水として流出しやすいと考えられる。そのため、屋久島のような急勾配な地形を持つ渓流水は、大気からの化学成分の沈着に対して感受性が高い可能性が高い。

既往の同位体比分析では、窒素・酸素同位体比( $\delta^{15}\text{N}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ )を用いた解析手法が用いられてきた。大気からの窒素沈着、生物の硝化による硝酸の供給、同化・脱窒による窒素除去といった、森林の窒素循環プロセスを $\delta^{15}\text{N}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ 値のみで起源を特定することは困難であった。しかし、既往の測定である $\delta^{15}\text{N}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ に $\Delta^{17}\text{O}$ の安定同位体比分析手法を加えることにより大気からの窒素沈着を特定することができるようになった。渓流域での $\text{NO}_3^-$ 濃度の増加影響を大気と陸域のプロセス起源で生じたものを特定することができる。

本研究では屋久島の渓流水において、大気生成由来の $\text{NO}_3^-$ 割合を算出し、大気・陸域で生成される $\text{NO}_3^-$ の起源を $\Delta^{17}\text{O}$ の安定同位体比分析手法を用いて明らかにする。急勾配から緩勾配を流れる大小さまざまな溪流を比較することにより、地形の違いが渓流水中の大気由来の $\text{NO}_3^-$ の割合に与える影響を評価する。

・研究方法

屋久島の試料水に含まれる $\text{NO}_3^-$ 中の $\delta^{15}\text{N}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\Delta^{17}\text{O}$ の分析を行う。今年度は、COVID-19の影響と島内で感染者が出たため、実際に渡航しサンプリングを行うことが困難であった。そのため、2017年に採取した屋久島試料、福岡近隣の山岳渓流水、山岳地下水、樹氷、雪の試料分析を行った。また、2021年の屋久島の試料は、冬季の北部渓流水試料を登山家に依頼した。これらの試料を福岡工業大学にあるイオンクロマトグラフィーで分析を行い、 $\text{NO}_3^-$ 濃度を測定した。その後、名古屋大学に冷蔵郵送し $\text{NO}_3^-$ 中の $\delta^{15}\text{N}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\Delta^{17}\text{O}$ の分析を質量分析計(CF-IRMS)で測定を行った。

・研究結果と考察

2017年に採取した屋久島試料の結果からは、2018, 2019年に同地点で継続的に採取、分析を行っている値に近い値を示した。加えて、溪流本流(2.5~4.0‰)では、支流部(1.0~2.7‰)とは異なり、 $\Delta^{17}\text{O}$ の値が高くなる傾向を示した。これは、本流の集水域の地形が急勾配であることが原因と考えられる。福岡近隣の渓流域では窒素飽和状態の森林であることが知

られている。これらの渓流水中の $\text{NO}_3^-$ 濃度は高い傾向(2.0~6.1%)を示すが、 $\Delta^{17}\text{O}$ の値は、先行研究の渓流域と類似した値を示した(Nakagawa et al., 2018)。しかしながら、湧水は高い値を示した。本来、地下水に近い値をとる湧水の $\Delta^{17}\text{O}$ 値は低い値を示すが、本調査地では高い値を示すことが明らかになった。この原因については、今後解析を行っていく。樹氷、雪の $\Delta^{17}\text{O}$ の値は、大気で生じた $\text{NO}_3^-$ が大半を占めているため、 $\Delta^{17}\text{O}$ の値は高い傾向(17.6~23.5%)を示した。また、2021年の屋久島の北部渓流域試料は、既往の報告にある渓流水中の $\Delta^{17}\text{O}$ 値と比較して高い傾向(2.2~6.6%)を示した。2017年の西部域の試料よりも高い値を示した。屋久島は高い降水量と急勾配地形であるため、大気を起源に持つ $\text{NO}_3^-$ が高い割合で含まれていることが考えられる。今年度の測定で、得られた結果を元に継続的なサンプリング調査と分析を行っていく。

#### ・引用文献

1. Nakano, T., Okumura, M., Yamanaka, M., atake, K. Geochemical characteristics of acidic stream water on Yakushima Island, a world natural heritage site. *Water, Air, Soil Pollut.* 130, 869–874 (2001).
2. 海老瀬 潜一, 永淵 修, 川村 裕紀. 東シナ海・日本海側の湿性沈着負荷と高山・離島渓流域群水質の関係. *環境科学学会誌.* 32, 125-140 (2019).
3. Nakagawa, F., Tsunogai, U., Obata, Y., Ando, K., Yamashita, N., Saito, T., Uchiyama, S., Morohashi, M., & Sase, H. (2018). Export flux of unprocessed atmospheric nitrate from temperate forested catchments: a possible new index for nitrogen saturation. *BIOGEOSCIENCES*, 15(22), 7025–7042. <https://doi.org/10.5194/bg-15-7025-2018>

#### ・成果発表

篠塚賢一\*, 永淵修, 中澤暦, 角皆潤, 中川書子, 手塚賢至. 渓流水の窒素同位体比からみた硝酸性窒素の起源推定(口頭発表) 第8回屋久島ソサエティー 2020年12月12日 web開催.