

4. 一般共同研究 目次詳細

(所属・職名は2020年3月現在)

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
湯口貴史	山形大学	理学部	講師	石英中のTi濃度の定量分析に基づく石英の結晶化プロセスの解明: 富山県黒部川花崗岩と宮崎県大崩山花崗岩を例に	80
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	82
山崎 了	青山学院大学	理工学部	教授	高強度レーザーで生成される無衝突衝撃波の研究	84
小島正宜	名古屋大学	(旧)太陽地球環境研究所	名古屋大学名誉教授	惑星間空間シンチレーションを利用した太陽風研究	86
野村麗子	自然科学研究機構国立天文台	RISE月惑星探査検討室	特任研究員	米国観測ロケット実験LAMPに搭載の磁気インピーダンス(MI)センサMIMの研究開発	88
丸橋克英	情報通信研究機構	電磁波研究所 宇宙環境研究室	協力研究員	太陽擾乱現象の惑星間空間伝搬に関する研究	90
村木 綏	名古屋大学	宇宙地球環境研究所 宇宙線部門	名誉教授	2017年9月に観測された巨大フレアにおける高エネルギー粒子加速過程の研究	92
篠塚賢一	福岡工業大学	総合研究機構	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	93
竹内 誠	名古屋大学	大学院環境学研究科	教授	ジルコン U-Pb年代、Sr同位体分析による美濃・丹波帯堆積岩の地球化学的研究	95
鷲見治一	九州大学	国際宇宙天文学科・教育センター	学術研究員	太陽圏構造とダイナミックスの研究	97
中山智喜	長崎大学	水産・環境科学総合研究科	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	99
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 北極域気候変動予測研究ユニット	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水減少の影響メカニズム	100
エコ シスワント	海洋研究開発機構	地球環境観測研究開発センター	研究員	瀬戸内海における生物光学的要素の時空間変動	102
中野佑樹	東京大学	宇宙線研究所(附属神岡宇宙素粒子研究施設)	特任研究員	Super-Kamiokandeを用いた太陽フレア由来のニュートリノに関する研究	104
赤田尚史	自然科学研究機構 核融合科学研究所	ヘリカル研究部	准教授	山形蔵王で観測される樹水中宇宙線生成核種濃度	106
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1	107
山本一清	名古屋大学	大学院生命農学研究科	准教授	ドローンを利用した森林生態系のリモートセンシング	109

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
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	111
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	112
加藤雄人	東北大学	大学院理学研究科地球物理学専攻	教授	グローバル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	114
松本 淳	早稲田大学	人間科学学術院	教授	粒子状有機硝酸全量測定装置の湿度に対する応答の検証	116
佐藤友徳	北海道大学	大学院地球環境科学研究院	准教授	ユーラシアの積雪に対する北極海水変動の影響の評価	118
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	120
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	122
横田勝一郎	大阪大学	大学院理学研究科	准教授	宇宙機搭載用高分解能イオン質量分析器の開発	124
廣川 淳	北海道大学	大学院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	126
亀山宗彦	北海道大学	大学院地球環境科学研究院	准教授	北極海洋域におけるメタン炭素同位体比を用いた水圏環境評価	128
渡邊恭子	防衛大学校	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	130
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	132
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	133
菊池崇	名古屋大学宇宙地球環境研究所		名誉教授	磁気圏電離圏電流伝送モデルを応用した中緯度地磁気誘導電流の研究	135
寺本万里子	名古屋大学	宇宙地球環境研究所	特任助教	あらせ衛星観測データを用いた地磁気脈動の研究	137
河野光彦	関西学院千里国際キャンパス / 関西学院大学	関西学院千里国際高等部理科 / 理工学部	教諭 / 研究員	持続的地球環境のための高校生のできる課題	139
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	141
町田 忍	名古屋大学		名誉教授	2流体方程式系に基づくMMS衛星データの解析	143
細川敬祐	電気通信大学	大学院情報理工学研究科	准教授	極冠パッチに伴う磁場擾乱の観測的研究	145

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
桂華邦裕	東京大学	大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻	助教	あらせ衛星を用いた地球内部磁気圏リングカレント イオン圧力変動に関する研究	147
小元久仁夫	元日本大学	大学院理工学研究科・ 文学部	元教授	ピーチロック試料の正確な膠結年代決定方法	148
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	150
三澤浩昭	東北大学	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	152
関 華奈子	東京大学	大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻	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	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	ERG衛星搭載中間エネルギー荷電粒子観測器の データ解析	154
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	中性粒子質量分析器の開発	156
鈴木臣	愛知大学	地域政策学部	准教授	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	157
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	158
鈴木和良	海洋研究開発機構	北極環境変動総合研 究センター	主任技術研究員	凍土域における植生と水文気候の相互作用と経年 変動に関する研究	160
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	162
浅村和史	宇宙航空研究開発機構	宇宙科学研究所	助教	「あらせ」衛星および地上観測によるリングカレント イオンの散乱現象の解析	163
尾形友道	海洋研究開発機構	アプリケーションラボ	研究員	赤道波動のエネルギー伝達経路の診断による熱帯 気候の理解と海洋データの付加価値形成	164
小川泰信	国立極地研究所	国際北極環境研究セ ンター	准教授	電離圏D/E層のプラズマ温度導出と検証	165
天野孝伸	東京大学	理学系研究科地球惑 星科学専攻	准教授	温度異方性を起源とするプラズマ波動励起	167
村田文絵	高知大学	教育研究部自然科学 系理工学部門	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	168
中北英一	京都大学	防災研究所	教授	Kaバンドレーダーを用いた積乱雲の生成・発達過 程に関する研究	170
馬場賢治	酪農学園大学	酪農学研究科/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	172
竹川 暢之	首都大学東京	理学研究科	教授	雲過程はブラックカーボン混合状態の変化をもたら すか?	174

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
久保勇樹	情報通信研究機構	電磁波研究所 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	176
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	179
大野智生	気象庁 気象衛星センター	データ処理部	部長	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	181
岳藤一宏	情報通信研究機構	電磁波研究所 時空 標準研究室	主任研究員	Crabパルサーの長期変動モニターによる星間プラズマゆらぎの検出へむけて	183
サレム イブラ ヒム サレム モハメット サレ ム	東京大学	生産技術研究所	研究員	深層ニューラルネットワークと衛星データを用いた湖沼・沿岸域の連続水質モニタリング	186
太田充恒	産業技術総合研究所	地質情報研究部門	上級主任研究員	Sr同位体分布図を用いた地殻表層物質の陸海域間の移動過程の解明	188
奥山 圭一	九州工業大学	大学院工学研究院・先 端機能システム工学 研究系	教授	"あらせ"と"てんこう"を用いたジオスペース観測	191
小池 真	東京大学	大学院理学系研究科・ 地球惑星科学専攻	准教授	航空機・地上観測と数値モデル計算によるエアロゾルと雲に関する研究	192
野澤 恵	茨城大学	理学部	准教授	宇宙天気インタープリンター養成のためのプログラム開発	193
下条圭美	自然科学研究機構	国立天文台 アルマプ ロジェクト	助教	ALMAフレア観測に向けた野辺山電波ヘリオグラフによる粒子加速研究	195
津田卓雄	電気通信大学	大学院情報理工学研究 科	助教	高エネルギー降下粒子が金属原子層・金属イオン層に与える影響	196
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	197
森島邦博	名古屋大学	高等研究院	特任助教	原子核乾板を用いた宇宙線ミュオンフラックスの測定	199
田村 亨	産業技術総合研究所	地質情報研究部門	主任研究員	Development of Quaternary dating with optically stimulated luminescence methods	201
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課程への寄与推定	202
渡邊 堯	情報通信研究機構	戦略プログラムオフィ ス	招聘専門員	流星によるVLF帯電波放射の観測的研究	204
瀧 佑衣	名古屋大学	大学院環境学研究科	助教	ランプロファイアー岩脈の全岩化学組成と鉱物化学組成分析によるマグマの成因解明	205

石英中の Ti 濃度の定量分析に基づく石英の結晶化プロセスの解明：
富山県黒部川花崗岩と宮崎県大崩山花崗岩を例に

Quantitative determination of Ti concentration in quartz giving crystallization process of quartz:
An examples of Kurobegawa and Okueyama granitic plutons

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 山形大学理学部 地球環境学科
加藤丈典 名古屋大学 宇宙地球環境研究所

1. 研究目的

珪長質の深成岩体において、岩体内部での岩相が異なっても石英は共通して普遍的に産出するケースがしばしば観察される。例えば、平成 30 年度の共同研究で対象とした遠野複合深成岩では、3 岩相（主岩相、中心部相、周辺部相）に共通して石英が観察される。このため、石英の結晶化プロセスの解明は、深成岩体全体の形成プロセスの把握へと発展可能な課題である。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 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。そこで前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、遠野複合深成岩体の石英を例として Ti 濃度の高精度定量分析法の開発を実施した。2019 年度の共同研究では、これまで構築した手法を富山県の黒部川花崗岩体および宮崎県の大崩山花崗岩体の石英に対して適用する。本年度は以下の議論を実施した：1) 異なる岩体に対しても同様の手法で Ti 濃度が定量可能か。2) CL 観察に基づく内部構造と Ti 濃度との関係性の解明。

2. 試料と研究方法（使用した共同利用装置・施設）

本研究では、富山県の黒部川花崗岩体および宮崎県の大崩山花崗岩体の石英をサンプルとして用いた。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 μm、1 回の測定時間を 200 s（ピーク：100 s、バックグラウンド：50 s ずつ）とし、同一地点で 8 回（計 1600 s）カウントした値を積算することにより 1 点の定量値を得る。また、石英へのダメージの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。この手法により、Ti の検出限界は 15 ppm、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、石英結晶内部の Ti 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生成に対する定量分析結果について報告する。黒部川花崗岩体は Ti 含有鉱物が乏しく、石英はメルト中のチタンが乏しい状態で結晶化されたことが推察される。石英の CL 観察の結果、明瞭なゾーニングは発達しておらず、低輝度で均質な内部構造が多く観察される。上述の Ti 定量分析の結果、石英の破壊もなく、妥当な定量値を取得できた。Ti 濃度は 16 ± 11 ppm から 116 ± 11 ppm の幅を有し、全点の加重平均は 36 ± 6 ppm（N = 60）となった。結晶化温度の導出は、今後妥当な活動度の決定が必要となる。次に、石英粒子内部で複数点の Ti 濃度の定量を行い、CL パターンとの関係を考察した。その一例として、石英中に複数のサブグレインが観察される石英（サンプル No. 009-1a1；図 1A）を示す。この石英では CL 観察に基づく内部構造に対して明瞭な傾向を示さない。つまり、CL 像の輝度の明暗と Ti 濃度が関連しない可能性を示す。

次に、大崩山花崗岩体の石英に対する定量分析結果に関して報告する。大崩山花崗岩体はTi含有鉱物に富んでおり、石英はメルト中ではチタンに富んだ状態で結晶化されたことが推察される。石英のCL観察の結果、オシラトリーゾーニングなどの累帯構造を持つ内部構造がしばしば観察される。Ti定量分析の結果、非破壊にて定量値を取得できた。石英のTi濃度は 17 ± 11 ppmから 382 ± 10 ppmの幅を有し、全点の加重平均は 93 ± 11 ppm (N=148)となった。結晶化温度の導出は、今後妥当な活動度の決定が必要となる。仮にTiO₂の活動度を1として計算を行う

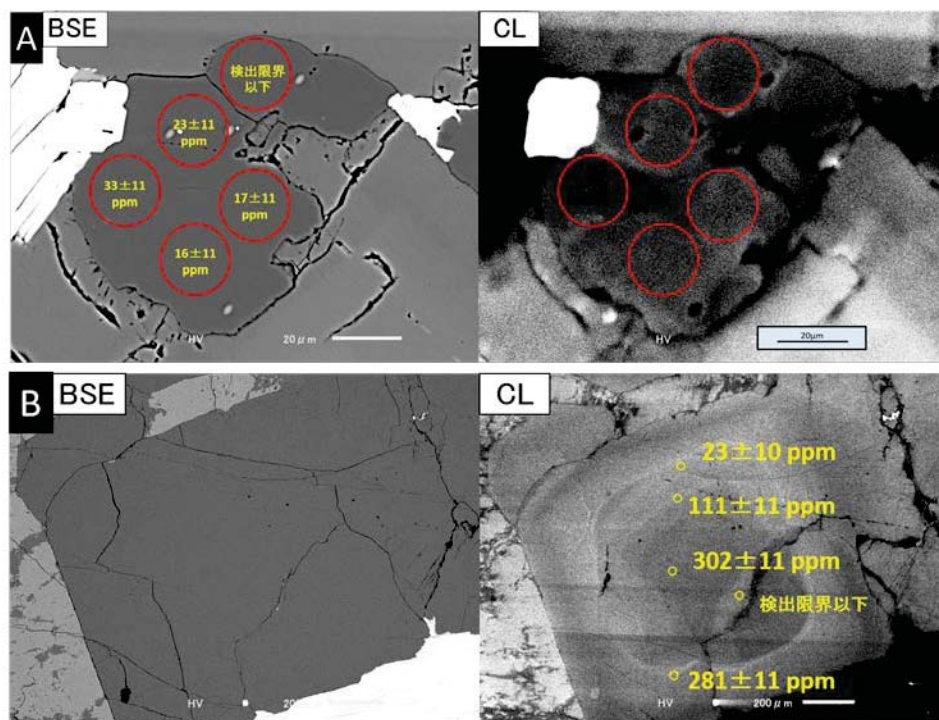


図1 黒部川花崗岩体 (A) および大崩山花崗岩体 (B) の石英の化学組成像 (BSE 像), CL 像およびチタン濃度

と 17 ± 11 ppm の値は結晶化温度 $566 \pm 93^\circ\text{C}$ となり、 382 ± 10 ppm の値は結晶化温度 $938 \pm 20^\circ\text{C}$ を示す。さらに、石英粒子内部で複数点のTi濃度の定量を行い、CLパターンとの関係を考察した。石英中にオシラトリーゾーニングが観察される石英 (サンプル No. BG-01 ; 図 1B) を例に示す。この石英では、コアのCL低輝度域において、 302 ± 11 ppm を持つのに対して、上部の高輝度域では 23 ± 10 ppm を示す。つまり、CL像の輝度の明暗とTi濃度が関連しない可能性を示す。

以上の点から、前年度までに構築した手法で、黒部川花崗岩体および大崩山花崗岩体の石英においても、妥当なTi濃度が定量可能であることを把握した。また、本年度の対象とした黒部川花崗岩体および大崩山花崗岩体の石英では、CL像の輝度に対して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。これは前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性質である。Ti濃度とCL像の輝度に相関を有する石英とそうでない石英について今後検討を続ける。

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)

小北康弘, 加藤丈典, 湯口貴史. 東北日本, 遠野複合深成岩体の冷却プロセスの推定: 石英の結晶化温度に着目したアプローチ. ESR 応用計測研究会・ルミネッセンス年代測定研究会・フィッション・トラック研究会 2019 年度 合同研究会, 岐阜県土岐市, 11 月

小北康弘, 加藤丈典, 湯口貴史. 結晶質岩体に産出する石英の結晶化温度推定. 原子力学会中部支部 2019 年度研究会, 名古屋大学, 12 月

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】

2019年5月～12月にかけて琵琶湖北湖（観測地点：5地点）において船舶観測と衛星観測を同時に行った。船舶観測では、現場クロロフィルa濃度（ $Chl_{in-situ}$ ）測定用の湖水を採取（深度1 m, 3 m）し、分析に供した。同時に、水中分光放射照度・輝度計（PRR600-610, Biospherical Instruments）を用いて現場におけるリモートセンシング反射率（ $Rrs_{in-situ}(\lambda)$ ）を測定した。なお、 $Chl_{in-situ}$ は、90 %アセトンで色素抽出を行った後、蛍光光度計（TD-700: Turner Designs）を用いたWelschmeyer (1994)の方法により測定した。

衛星観測では、GCOM-C/SGLIによって測定された正規化海水射出放射輝度 $nL_w(\lambda)$ （level-2, 空間分解能250 m）をJASMES (JAXA) から取得し、 $nL_w(\lambda)$ を大気圏外太陽照度で除することで衛星リモートセンシング反射率（ $Rrs_{sate}(\lambda)$ ）を求めた。

【結果と考察】

各波長における $Rrs_{sate}(\lambda)$ と $Rrs_{in-situ}(\lambda)$ の関係を図1に示す。 $Rrs_{sate}(490, 530, 565)$ は比較精度が高く、現場リモートセンシング反射率に近い値を示した（ただし、春期は精度が低下する傾向にあった）。一方、 $Rrs_{sate}(412, 443, 674)$ は上記の波長における値と比較して精度が低く、負の値も存在した。

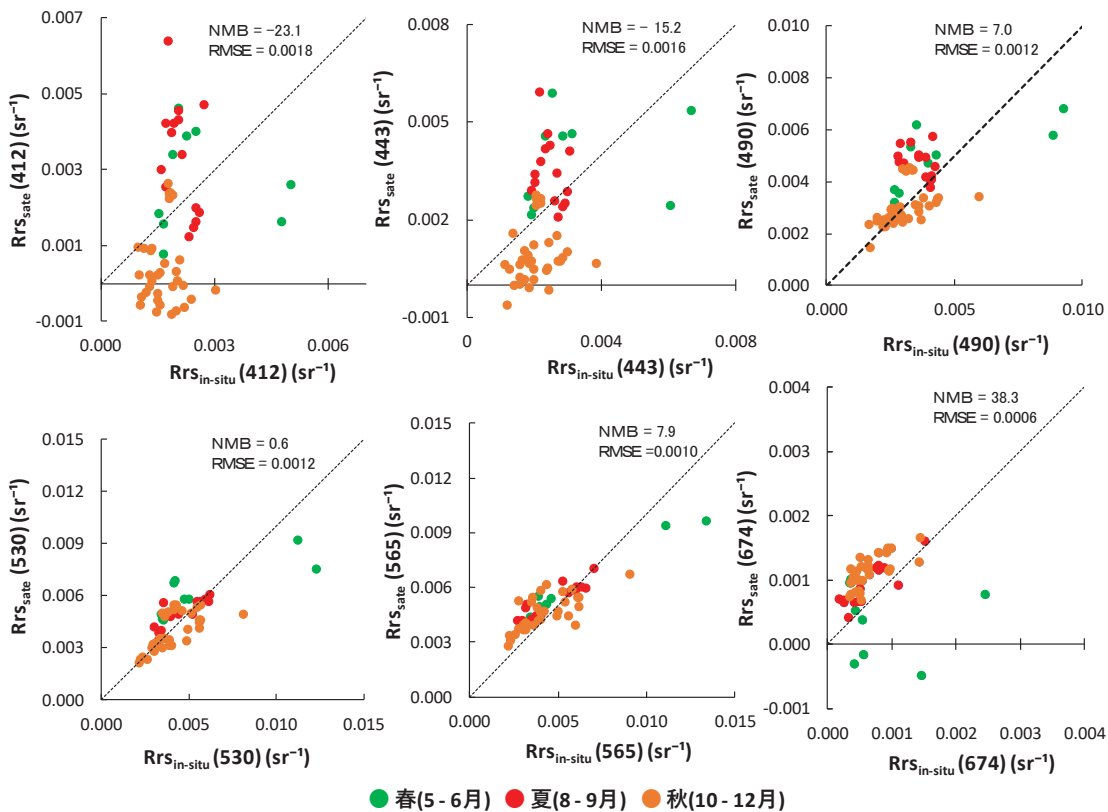


図1. 衛星リモートセンシング反射率（ $Rrs_{sate}(\lambda)$ ）と現場リモートセンシング反射率（ $Rrs_{in-situ}(\lambda)$ ）との関係． 図中の点線は1：1ラインを示す。

衛星クロロフィルa濃度の算出に用いる反射率比の波長の組み合わせを検討した結果、490 nmと565 nmの組み合わせがもっとも精度が高かったため、本研究では、衛星クロロフィルa濃度の算出にRrs_{sate}(490/565)を用いることとした。図2にRrs_{sate}(490/565)とRrs_{in-situ}(490/565)との関係を示す。Rrs_{sate}(490/565)は比較的精度が高く、現場におけるRrs_{in-situ}(490/565)に近い値を示した。

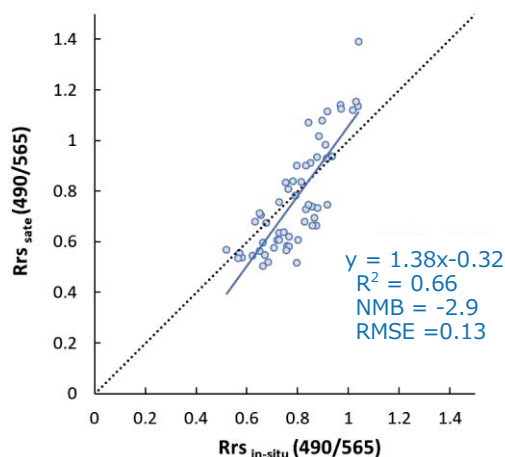


図 2. Rrs_{sate}(490/565)と Rrs_{in-situ}(490/565)との関係。
図中の点線は 1 : 1 ラインを示す。

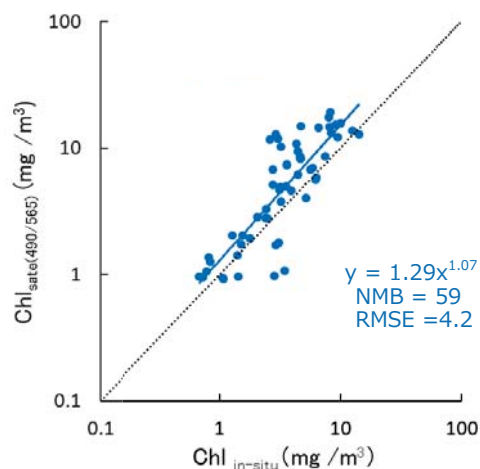


図 3. Rrs_{sate}(490/565)から推定したクロロフィル a 濃度 (Chl_{sate}(490/565)) と現場クロロフィル a 濃度 (Chl_{in-situ}) との関係。

本研究では、MODISの標準水中生物光学アルゴリズムの係数を最適化した以下の式とRrs_{sate}(490/565)から衛星クロロフィルa濃度 (Chl_{sate}(490/565)) を算出した。その結果得られたChl_{sate}(490/565)は現場におけるクロロフィルa濃度を過大評価する傾向にあった (図3)。今後は、この過大評価を抑えて精度を高めるために、水中生物光学アルゴリズムおよび衛星リモートセンシング反射率の補正法を検討する必要がある。

本研究で用いた水中生物光学アルゴリズム

$$\text{Chl}_{\text{sate}(490/565)} = 10^{(C_0 + C_1 R + C_2 R^2 + C_3 R^3 + C_4 R^4)} \quad R = \log(\text{Rrs}_{\text{sate}}(490/565)) \quad \text{式}$$

$$C_0=0.512, C_1=-9.655, C_2=18.876, C_3=90.673, C_4=108.247$$

【成果発表】

論文：塚本浩貴，後藤直成，吉原亜悠，高木裕太，新井那莉，林正能，石坂丞二 (2019) 衛星リモートセンシングを用いた琵琶湖におけるクロロフィル a 濃度の推定. リモートセンシング学会誌 39 (2) : 103-111.

発表：塚本浩貴，林正能，石坂丞二，後藤直成. 高解像度光学観測衛星「しきさい (SGLI)」を用いた湖沼における水質モニタリングの可能性. 海洋理工学会，京都大学，2019年11月20日.

大賀雄介，後藤直成，石坂丞二. 琵琶湖北湖における SGLI のリモートセンシング反射率データの検証. 日本リモートセンシング学会 海洋・湖沼リモートセンシング研究会，名古屋，2019年9月11日.

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6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：これまでレーザー実験のプラズマ自発光イメージ計測によって衝撃波面と考えられていた不連続面は、実はそうではなく電子スケールの接触不連続面であるという示唆を得ていたが (Umeda, Yamazaki et al. 2019, PoP)、実験データとの詳細比較により、このことを確認できた。PIC計算ではパラメータ探査を行い、背景磁場が3.0T以上であれば、現在の我々の実験装置でMSを生成可能であることがわかった。そこで、2019年度の実験では外部磁場を3.6Tかけたショットを行い、データを取得でき、2019年秋の日本物理学会にて発表した。現在、1次元PICシミュレーションの結果と比較しながら実験結果の物理的解釈の議論を進めている。

発表論文：

[1] "Full particle-in-cell simulation of the interaction between two plasmas for laboratory experiments on the generation of magnetized collisionless shocks with high-power lasers", T. Umeda, R. Yamazaki, Y. Ohira, N. Ishizaka, S. Kakuchi et al. (2019), *Physics of Plasmas*, 26, 032303 (8pp)

[2] "Mach number and plasma beta dependence of the ion temperature perpendicular to the external magnetic field in the transition region of perpendicular collisionless shocks", R. Yamazaki, A. Shinoda, T. Umeda, & S. Matsukiyo (2019), *AIP Advances*, 9, 125010 (4pp)

学会発表：

[1] "Shock Waves in Astrophysical and Laboratory Plasmas", R. Yamazaki, The 14th Asia-Pacific Physics Conference (November 17-22, 2019, Kuching, Malaysia)

[2] "Toward the generation of magnetized collisionless shocks with high-energy lasers", R. Yamazaki et al., Workshop to bring together experts on High Energy Astrophysics from Japan and Israel (July 18-23, 2019, RIKEN, Wako, Japan)

[3] "Full particle-in-cell simulation of the interaction between two plasmas for laboratory experiments on the generation of magnetized collisionless shocks with high-power lasers", T. Umeda, R. Yamazaki, Y. Ohira, 15th symposium of Interrelationship between Plasma Experiments in the Laboratory and in Space (September 2-6, 2019, Tokyo, Japan)

[4] 「大型レーザー激光XII号を用いた磁化プラズマ中を伝播する無衝突衝撃波の生成実験 (1)：実験デザインの決定」, 角地 真, 山崎 了, 田中 周太, 富田 沙羅, 河村 有志郎 他37名, 日本物理学会 2019年秋季大会 (2019年9月17日-20日, 山形大学)

[5] 「大型レーザー激光XII号を用いた磁化プラズマ中を伝播する無衝突衝撃波の生成実験 (2)：輻射流体およびプラズマ粒子シミュレーションの結果との比較」, 瀬井 柊人, 山崎 了, 田中 周太, 富田 沙羅, 河村 有志郎 他37名, 日本物理学会 2019年秋季大会 (2019年9月17日-20日, 山形大学)

[6] 「大型レーザー激光XII号を用いた磁化プラズマ中を伝播する無衝突衝撃波の生成実験 (3)：トムソン散乱計測の結果」, 石坂 夏槻, 山崎 了, 田中 周太, 富田 沙羅, 河村 有志郎 他37名, 日本物理学会 2019年秋季大会 (2019年9月17日-20日, 山形大学)

惑星間空間シンチレーションを利用した太陽風研究
Study of the solar wind using interplanetary scintillation

小島正宜 名古屋大学

2019年度はトモグラフィ解析法(IPS CT)改良のための考察を行った。その目的は IPS CT で得られた太陽風速度構造の高緯度に ULYSSES の観測しなかったような 850 km/s 超の高速が現れることがあるので、その信頼性を調べるのが目的である。

IPS CT では、①電波散乱は弱散乱であり②そのために厚みのある電波伝搬媒質である太陽風を多層の thin screen の重ね合わせと考え Born 近似を適用できると仮定する。そこで問題となるのは太陽風の厚みをどのように考えるかである。現在は、視線に沿い地球から 2AU の距離までの太陽風物理量が重畳されたものを IPS は観測していると仮定しているが果たしてそれで良いのかを考察する。

調べ方は、CT 解析で視線積分範囲をいろいろと変え、得られた太陽風速度構造と in situ 観測 (ULYSSES と OMNI) とを比較して評価する。まず用いる IPS データであるが、850km/s で一様分布する太陽風モデルで IPS を視線積分 2AU でシミュレートすると 750km/s 以下の速度しか得られない。しかし実際には 850km/s 超の速度が IPS で観測されているが何故かを調べたところ、惑星間空間擾乱によるもので無く共回転太陽風によるものであることが分かった。IPS が観測したこの超高速風については今後の検討事項である。

視線積分範囲が CT の結果にどのように影響するかを考える。IPS で観測された速度 $V_{IPS OBS}$ を 850 km/s とする。IPS のシミュレーションは次式で行う。視線に垂直な面に投影された速度に荷重 w を乗じたものを視線積分した結果が観測されるものである。

$$V_{ips\ simulation} = \int_0^{2AU} w(z)V_{model}(z)\cos[\theta(z)]dz$$

そこで CT 解析を始める model の 0 次近似を IPS の観測値と同じ $V_{model}=850$ km/s と仮定し上式で 2AU の積分を行うと $V_{simulate}=750$ km/s が得られる。そのため観測値とシミュレーション値の差 $\Delta = V_{IPS OBS} - V_{simulate}=100$ km/s が CT 解析での model 修正に用いられる。そのためにモデルの速度 V_{model} は 100 km/s 高く修正されてしまう。シミュレーション値 $V_{simulate}$ が V_{model} よりも低くなるのは視線積分で θ が大きくなる遠方まで積分してしまうのが一因と考えられるので、積分範囲をいろいろと変えてその効果を考察した。また荷重のかけ方も高速風ほど荷重が高くとどうなるかも考察してみた。

結果

solar minimum でかつ高緯度の Ulysses 観測がある 1995 年の観測を用いて考察を行った。

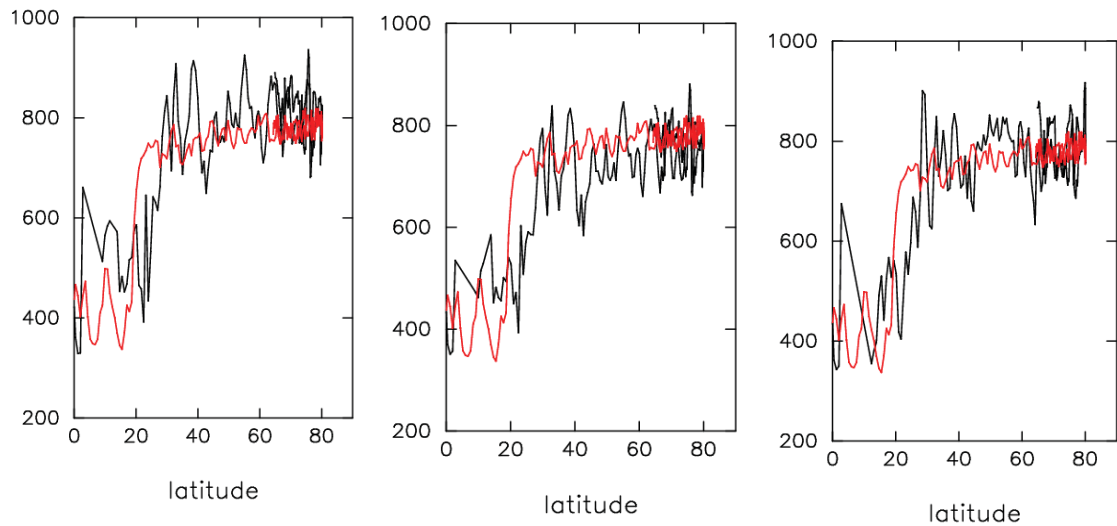
○視線積分の範囲

- ・ 現行の 0-2AU は要検討。
- ・ 荷重関数最大値の位置よりも地球側の寄与を弱める、あるいは遠方を弱めるのは効果ありそう。地球側と遠方側の両方を同様に弱めるのは良くない。

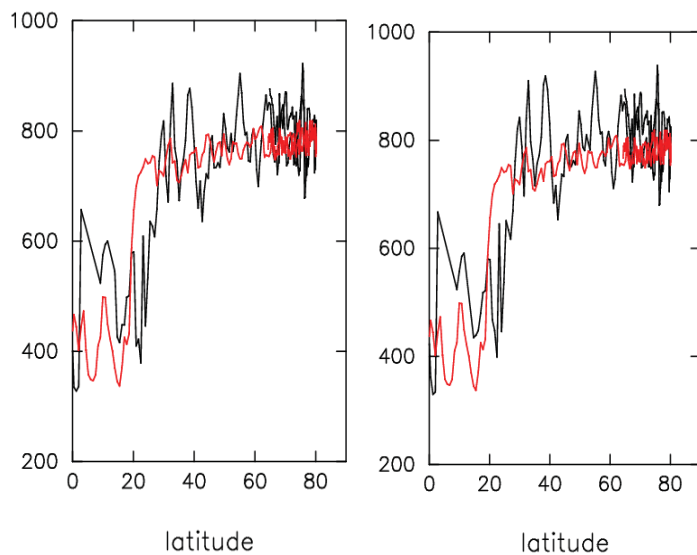
○荷重のかけ方

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。しかし要検討。

1995 年の ULYSSES の軌跡に沿って IPS CT 図から取り出した速度緯度構造。赤線は ULYSSES。左端：積分範囲を地球より 2AU まで。中央：荷重関数最大値点より地球側の寄与を減らす。右端：荷重関数最大値点より遠方の寄与を減らす。



左図：荷重関数の $\alpha = 0.2$ 右図： $\alpha = 0.5$



米国観測ロケット実験 LAMP に搭載の
磁気インピーダンス(MI)センサ MIM の研究開発
Development of the magnetic impedance (MI) sensor
on the sounding rocket experiment LAMP

野村麗子, 自然科学研究機構国立天文台 RISE 月惑星探査プロジェクト

研究目的

名古屋大学宇宙地球環境研究所の能勢准教授が、地球地磁気観測への適用を進めている MI センサは、極めて軽量小型で、省電力であることが大きな特徴である。そのため、重量やリソースへの制限が厳しい飛翔体に搭載して観測が実現すると、例えば地球地磁気をグローバルに同時多点観測するような、超多点観測への可能性が広がる。本研究では、これまで飛翔体に搭載実績のない MI センサを観測ロケットに搭載し、宇宙空間での技術実証を行うとともに、地磁気の観測からロケットの姿勢を推定する。また脈動オーロラ現象に伴う磁場変動を観測し、その成因と電離圏への影響を明らかにすることを目指す。

研究方法

2020 年冬季に打上げ予定の観測ロケット実験 LAMP では、他機器としてフラックスゲート磁力計も搭載されるため、実験によって取得された地磁気観測データを比較する。これにより、MI センサの飛翔体における有用性を確認し、将来の超小型衛星などの搭載に向けた技術的知見を得る。その実験を目指して、本年度は3つの準備①デジタル処理部と MI センサ部の噛み合わせ試験、②Raspberry Pi を用いたデジタル処理部の製作と③地上試験による MI センサの温度特性の取得を実施した。

研究結果・報告

- ① デジタル処理部と MI センサ部の噛み合わせ試験：磁場観測器 MIM として完成させるため、デジタル処理部と MI センサ部を持ち寄ってインターフェースの試験を行った。基本的には問題なく動作することがわかった。
- ② Raspberry Pi を用いたデジタル処理；MI センサから出力されたアナログ値を AD 変換した後、デジタル処理を行う仕組みを Raspberry Pi で実現する。基本的なプログラムは出来上がっているが、30 分あたり十数回異常値を取得す

ることがわかった。現在は異常値を取得した場合に、記録しない仕組みにプログラムを改良中である。

- ③ 地上試験による MI センサの温度特性の取得；地上試験にて MI センサの温度特性を取得し、温度補正がどの程度有効か、ロケット実験で実際に打上げる前に確認をする。-30 度から 50 度の範囲においてセンサの温度特性を取得した。今後温度補正がどの程度有効か、調査を進める予定である。

太陽擾乱現象の惑星間空間伝搬に関する研究
Study on propagation of solar transients in interplanetary space

丸橋克英、情報通信研究機構・電波研究所・宇宙環境研究室

【研究目的】

太陽の擾乱現象（フレアー、CME等）は太陽風中に特徴的な構造（ICMEと総称する）を形成する。ICMEが地球に到達すると地球周辺の宇宙環境に大きな擾乱を引き起こす。太陽の擾乱現象とICMEの関係が明らかにされれば、太陽の観測に基づいて地球周辺の宇宙環境擾乱を予測することが可能になり、宇宙環境擾乱を発生よりも2日程度前に予報できることになる。この研究の目的は「太陽擾乱現象によって生じるICMEがどのような（特に磁場の）構造をもち、惑星間空間をどのように伝搬するか」に関して応用可能な知見を得ることである。

【研究方法】

1. ACE, Wind等の太陽風観測データからICME内部にある磁気ロープ構造を決定し、SOHO, STEREO, SDO等の太陽観測と比較することにより、ICMEの構造と太陽擾乱の発生源の構造との関係を考察する。
2. 磁気ロープ構造の決定にはモデルが必要であり、採用するモデルにより結果が異なるのが現状である。この現状を打破するために、異なるモデルの特性を検討し、それぞれの適用条件を明確にする。
3. STEREO衛星のCME, ICME観測データ、名古屋大学その他のIPS観測データを利用して、ICMEの3次元構造、太陽風中の伝搬による変形等について解析する。特に、観測されたICME形状の非対称性の原因について考察する。

【研究結果】

飛翔体による太陽風の直接観測データからICME中の磁気ロープの3次元構造を決定するためには、モデルとの比較が不可欠である。観測データから磁気ロープ構造を推定するために、force-free (FF) 磁場モデルへのfittingとGrad-Shafranov (GS) 方程式による磁場構造の構築の方法がひろく使用されている。

GS法はFF-fittingに比べて、プラズマ圧の効果を含んでいる点、磁気ロープの断面形状と内部構造を仮定しない点ですぐれた解析法であるが、対称性に関して強い制約を課しているために解析に応用できる範囲が限定的になってしまう。これに対してFF-fittingでは、多くの拡張モデルが考案されており、適用範囲が広いという特徴がある。特に昨年度から共同研究で西村信彦（ISEEの博士課程院生）が開発したFFモデルは磁気ロープ外縁における磁場ピッチ角が多様な値をとれることを示す優れたものである。GS法では、磁気ロープ境界の選択条件が大きな問題であったが、西村のFFモデルと比較することにより、有意な検討が可能になった。また同時に、FF磁場で仮定される磁気ロープの内部構造をGS法により検定することも期待できるようになった。

Al-Haddad et al. が注意深く選んだ対称性のよい13例の磁気ロープ（Solar Phys., 2018）について簡単に検討した結果、FFモデルとGS法で決めた軸の方向がおおよそ一致するという初期結果が得られた。

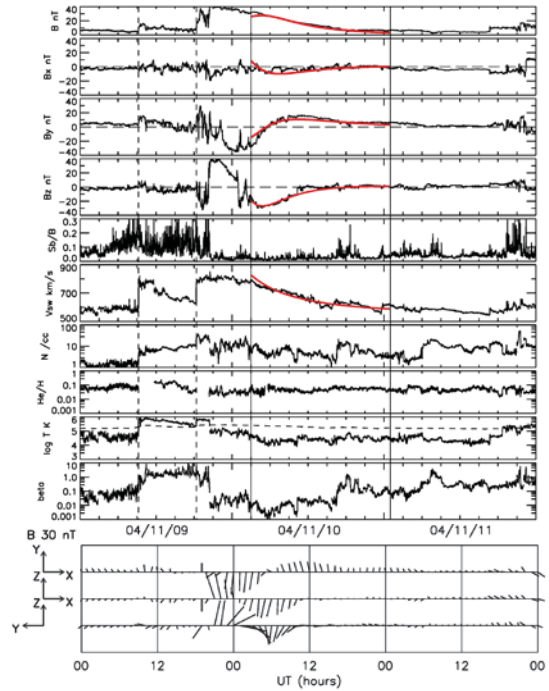
非対称性の大きい磁気ロープについても考察を進め、衛星観測で非対称に見える磁気ロープの解析には(1)磁気ロープの膨張（収縮）(2)磁気ロープを運ぶ太陽風の加速（減速）(3)周囲の太陽風との相互作用による磁気ロープの変形の効果を判別する企てを始めた。従来、この3つの効果は等価的な膨張効果で代表してきたが、それでは不十分なことを示唆する磁気ロープの事例は少なくはなかった。挿入した磁気ロープの図は、非対称性が強く膨張率が大きすぎる結果となる例で

ある。

赤線がfitting結果であり、磁気ロープの流れのスピードは690km/s、膨張率は0.084/hrs、つまり太陽-地球間の伝搬中に11倍に膨張するという結果になっている。

【考察】

GS法は数学的にすぐれた解析法であるが、本質的に2次元構造を仮定しており、対称性に関しても厳しい制限が課せられているため、適用できる磁気ロープ例が限定されるという問題がある。一方、FF磁場モデルでは、曲率をもつ磁気ロープ（トーラス型）へのfitting、磁気ロープの膨張など多様なモデルが考案されている。GS法が適用できる磁気ロープの観測例について、FFモデルfittingで得られた内部磁場分布との一致が確認できれば、FF磁場による太陽風磁気ロープの記述が一般的に正しいと考えることができると言えるだろう。



おわりに、FF法とGS法の比較をさらに進めるためには、GS法を以下のように改良する必要がある。まず、GS法をトーラス型の磁気ロープに拡張することがなによりも求められることである。つぎに、非対称な磁気ロープが扱えるように、加速（減速）の効果、膨張（収縮）の効果モデルに組み入れることが必要である。もう一つの非対称の原因となる構造の変形については、GS法では自然に求められる可能性がある。

このような改善をした上で、FF法とGS法を組み合わせることにより磁気ロープ構造の実態がさらに理解されることを期待したい。

【成果発表】

・ 論文

Nishimura, N., Marubashi, K., Tokumaru, M., Comparison of cylindrical flux rope model fittings with different boundary pitch-angle treatments, *Solar Phys* (2019) 294:49, doi: 10.1007/s11207-019-1435-5.

Nishimura, N., Marubashi, K., Tokumaru, M., Comparison of toroidal flux rope model fittings with different boundary pitch-angle treatments, *Solar Phys* (2020) 295:40, doi: 10.1007/s11207-020-01607-1

・ 口頭発表

丸橋克英、久保勇樹、西村信彦、徳丸宗利、Nada Al-Haddad、太陽風磁気ロープ構造解析の問題点：フォースフリーモデル対GS法、JpGU2019、幕張、2019年5月29日。

和文課題名

2017年9月に観測された巨大フレアにおける高エネルギー粒子の加速過程の研究

英文課題名

Study of particle acceleration processes in the flare observed on September 2017

代表者、所属機関・部局

村木 綏 名古屋大学・ISEE・名誉教授

共同利用報告書

研究分担者 柴田祥一（中部大学）、古賀清一（JAXA）、神谷浩紀（JAXA）

研究所参加教員 田島宏康、松原 豊、増田 智

実績報告

2017年9月4日から10日にかけて、太陽活動静穏期では珍しい巨大太陽フレアが何例も太陽表面で発生した。それに伴い高エネルギーガンマ線や太陽中性子が様々な宇宙観測計器によって受信された。我々はその中でも高エネルギーに加速された電子が制動放射で放出した硬X線のエネルギースペクトルの時間発展に注目した。

Fermi-LAT 衛星で観測されたエネルギースペクトルは今までの時間発展と異なるエネルギースペクトルを示した。それは各エネルギーバンドのエネルギースペクトルが同時に強度を増大させるのではなく、エネルギースペクトル全体が時間とともに高いエネルギーにシフトしていく変動であった。式で表現すると、 $P(E,t)=P_0(E_0,t_0)(1+\Delta p/p)^n$ で表現できる。ここで $P_0(E_0,t_0)$ は 時間 t_0 のエネルギー E_0 の flux を表し、そのエネルギーの flux が時間 t の時には E になることを表している。 n は衝撃波との衝突回数を表す。このような事例が X クラスのフレア 2 例に伴って観測された。

この仕事のまとめは 2019 年の 7 月米国ウイソコンシン大学で開催された第 36 回国際宇宙線・宇宙物理会議で発表した。論文は下記から down load 可能である。

Proceeding of Science (2019) 1150.pdf

また高山に設置された観測装置が太陽フレアに伴って太陽からの高エネルギーガンマ線を検出した。これは高価な衛星を用いなくても地上の高山（～高度 5,000m class）に観測装置を設置すれば、太陽ガンマ線を検出できることを示した最初の論文を、日本天文学会誌に発表した。事例は 2011 年 3 月 7 日と 2011 年 9 月 25 日に、メキシコ（4,800m）とチベット（4,300m）に設置されている太陽中性子望遠鏡で観測された。

論文は PASJ (2920)72(2)1-17 doi 10.1093/pasj/psz141 に発表された。

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、福岡工業大学情報システム工学科

研究目的：近年、化石燃料などの燃焼により、反応性の高い窒素が大気へ放出され、大気からの窒素降下物が増加傾向にある。そのため、施肥などの人為起源の窒素負荷を受けない森林域にも大きな影響を与えている。大気から沈着した窒素が渓流水へ流出するまでの窒素循環のプロセスを解明することは、下流域への森林が持つ多面的機能を評価するうえで重要である。

森林における水の循環は、降水が、土壌を浸透し地下水となり、最終的に渓流水として湧水する。この水の移動に伴い、降水に溶存して負荷された大気起源の NO_3^- は、森林内部の窒素循環に即座に取り込まれ、溪流に流出時には森林起源の NO_3^- に置き換わる。降水としてインプットした水が、森林に滞留している時間が長くなると、大気起源の NO_3^- が置き換わる割合が多いと考えられる。同時に、 NO_3^- の起源の変化は森林の生産速度は気温による影響を受けやすいため、夏と冬といった季節の違いにより森林の窒素循環速度は変化する。

森林の代表的な窒素循環は、樹冠の葉面からや森林土壌の根茎や微生物といった NO_3^- 吸収、有機物分解による硝化反応による NO_3^- 生成がある。また、嫌気的環境下では脱窒反応により森林から NO_3^- が取り除かれる。以上のように、森林の窒素循環は様々な NO_3^- 利用や NO_3^- 生成が複雑かつ可逆反応で起きている。これらのプロセスを介した起源を特定するために、安定同位体比分析手法が使われてきた。しかし、森林の NO_3^- 循環は複雑で可逆的なプロセスであるため、 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ の2種のトレーサーのみの分析では、窒素循環を解明することは困難であった。そこで、大気で生成される NO_3^- のトレーサーとして用いることができる $\Delta^{17}\text{O}$ を分析することにより、降水を介した大気起源の NO_3^- 負荷が森林起源の NO_3^- に置換される過程を $\Delta^{17}\text{O}$ の値から検討が可能である(Tsunogai et al., 2018; Nakagawa et al., 2018)。この新指標を用いることで、渓流水の NO_3^- が地形変化や季節変化から森林起源の NO_3^- に置換される過程を検討することができる。

そこで、本研究では森林へインプットした降水が土壌に水が滞留している時間が極度に短いと考えられる屋久島西部林道を通る山岳渓流を調査地とした。屋久島は、世界でも珍しい山岳島嶼であり、急勾配な河川が多くみられる。また、山岳域の年降水量は8,000mmとの報告があり、河川の伏流している滞留時間も短いと考えられる。大気期限の NO_3^- が森林起源の NO_3^- に置換される過程を、地形変化や季節変化から明らかにすることを目的とした。源流部から河口部までサンプリングを行うことで、流域面積や斜面勾配の変化の変化、夏と冬のサンプリングにより季節による変化を明らかにする。

方法：調査地は屋久島の中でも急峻な地形を持つ西部域を通る川原2号沢を調査渓流とした。川原2号沢は国割岳(1,323m)を山頂に持つ長さ2kmの渓流であり、流域の平均勾配が 40° と急勾配の斜面を持ち急勾配である。また、林道が存在していないため標高1,260mまで5時間か

けて登頂し、標高0mまで6時間かけ下山しながら標高100mごとに渓流水をサンプリングした。冬季の2018年12月18日と2019年1月14日と夏季の2019年9月4日の合計3回サンプリングを行った。渓流試料水は、研究室に持ち帰ったのちに溶存イオン成分をイオンクロマトグラフィー(Metrohm Co., Compact IC 761)で分析を行った。また、 NO_3^- 中の窒素・酸素安定同位体比($\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{18}\text{O}$, $\Delta^{17}\text{O}$)は名古屋大学角皆研究室にて安定同位体用気体質量分析計(Finnigan MAT252)にて分析を行った。

結果と考察：標高ごとにおける渓流水中の NO_3^- 濃度をFig.1に示す。 NO_3^- は、標高が高い源流部場所で $60\mu\text{mol/L}$ となり800mの標高の地点の濃度と比較して高くなる傾向がみられた。9月($21.2\mu\text{mol/L}$)と12,1月(18.4 , $27.7\mu\text{mol/L}$)となり季節による濃度の違いは見られなかった。標高における $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{18}\text{O}$, $\Delta^{17}\text{O}$ の値の変化を図.2,3,4に示す。 $\delta^{15}\text{N}$ の値は標高と関係がみられず、季節変化による違いも見られなかった。これは、森林の脱窒や硝化の影響が可逆的に進行しているためであると考えられる。しかし $\delta^{18}\text{O}$ の値は標高が高い場所から下流に行くに従い、値が減少する傾向がみられ、標高が高い場所では、大気を起源に持つ NO_3^- の流入がみられると推測される。また、同様の傾向が $\Delta^{17}\text{O}$ においても見られた。しかし、 $\Delta^{17}\text{O}$ の0mの地点では、サンプリングの季節に違いが少なくなり、9月と12,1月(0.05 , 0.94 , 1.42‰)は同程度の大気を起源に持つ NO_3^- が渓流水中に流出してきている。つまり、標高の高い場所では、季節により森林が利用する NO_3^- の循環速度の違いがみられたが、0mの地点では、季節によらず、森林窒素循環の影響を同程度受けたよく涵養された水が流出してきている。

まとめ：夏、冬と NO_3^- 濃度の変化は大きく変わらないが、季節により NO_3^- の起源が大きく異なる渓流水が流出してきていることが分かった。

成果発表：○篠塚賢一, 永淵修, 中澤曆, 奥田青州, 手塚賢至, 手塚田津子, 尾坂兼一, 金谷整一、急峻な地形が川原2号沢の水質形成に与える影響、日本地球科学会年会、沖縄、2018年9月11日

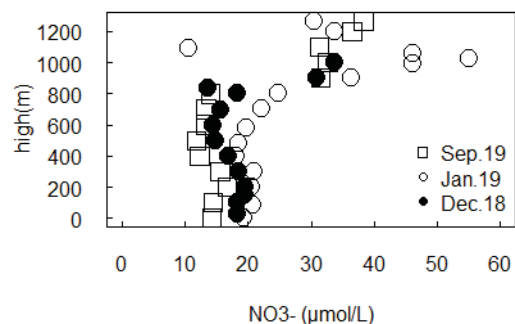


Fig.1 標高と NO_3^- 濃度の変化

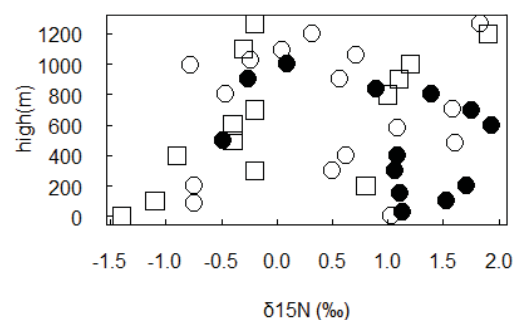


Fig.2 標高と $\delta^{15}\text{N}$ の変化

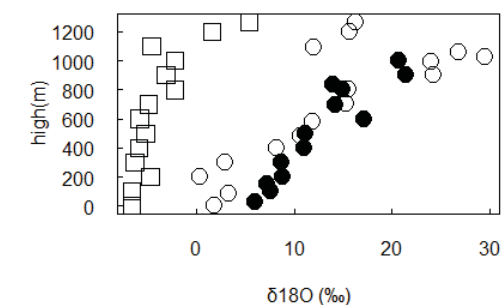


Fig.3 標高と $\delta^{18}\text{O}$ の変化

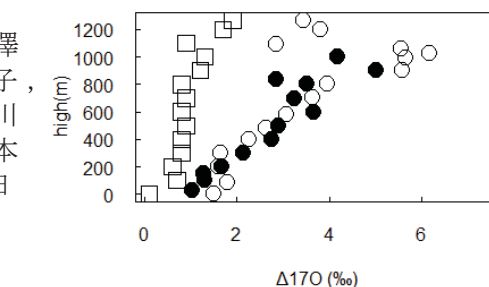


Fig.4 標高と $\Delta^{17}\text{O}$ の変化

ジルコンU-Pb年代, Sr同位体分析による美濃・丹波帯堆積岩の
地球化学的研究

Geochemical study on sedimentary rocks in the Mino-Tanba Belt
using zircon U-Pb dating and Sr isotopic analysis

竹内 誠 (名古屋大学大学院環境学研究科)

佐藤興平 (気象大学校)

柴田 賢 (元名古屋大学年代資料研究センター長)

南 雅代 (名古屋大学宇宙地球環境研究所)

【研究目的】

日本列島の形成過程を明らかにするため, ジュラ紀付加体中の碎屑物を年代学的・地球化学的に解析し, その後背地の火成作用と堆積盆形成の関係を明らかにする. 特にジュラ紀付加体中の碎屑物は高いSr初生値や先カンブリア時代の碎屑性ジルコンが報告されており, Sr同位体比やジルコンU-Pb年代を用いてその起源を探る. 本年度はジュラ紀付加体と考えられている関東山地下仁田地域の南蛇井層の地質構造と砂岩の後背地解析を行った.

【研究方法】

南蛇井層砂岩のジルコンのU-Pb年代測定のためのジルコンの分離および研磨については, 竹内ほか(2015)に従った. ジルコンU-Pb年代測定は, 宇宙地球環境研究所南 雅代教授の指導の下, 大学院環境学研究科のレーザー・アブレーション誘導結合プラズマ質量分析装置(Agilent 7700xおよびESI NWR-213レーザーシステム)を用いた.

【研究結果】

南蛇井層砂岩8試料の碎屑性ジルコンU-Pb年代を測定した. その結果, 5試料は最も若い年代はジュラ紀で, そのほかにジュラ紀から三疊紀及び1900 Maを中心とする先カンブリア時代の年代からなることがわかった. 一方, ジュラ紀付加体とされている南蛇井層分布域から採取した砂岩3資料からは, 最も若い年代が100-82 Maを示した.

ジルコンのCL像では, 2400 Maのコアを持ち, 1870 Maのリムを示す粒子が多い. また, これらの粒子は中生代の年代を示すものよりも大きく, 一部は円磨された形態を示す.

【考察】

最も若い年代がジュラ紀を示す砂岩は, ジュラ紀以降の堆積したことを示し, 従来報告されている放散虫化石が示す堆積年代と矛盾しない. よって, これらの砂岩を含む地層はジュラ系であると言える. しかし, 付加体か前弧海盆堆積物かは, 今後のさらなる検討が必要である.

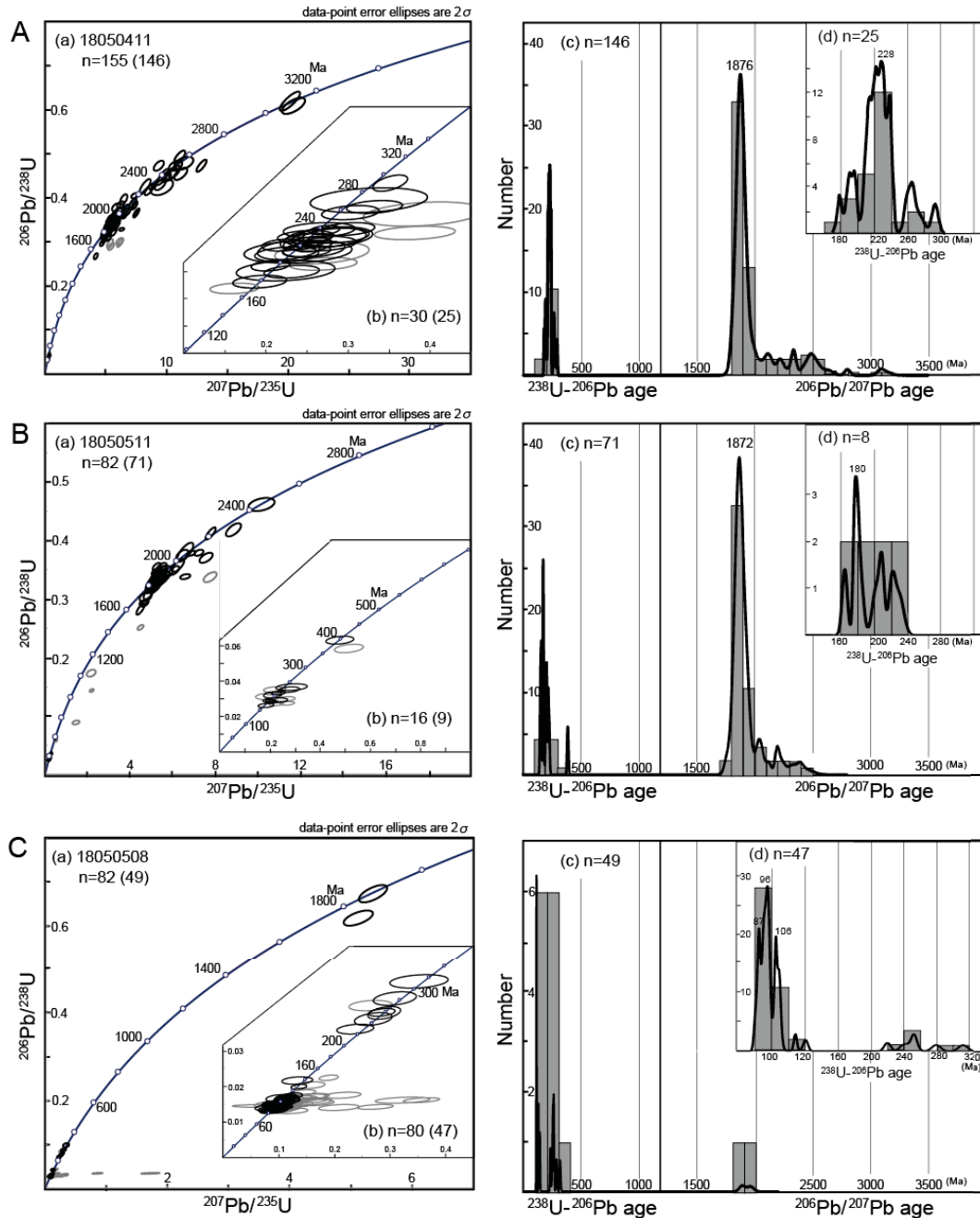
一方, 最も若い年代が後期白亜紀を示す砂岩は, 明らかに後期白亜紀以降に堆積したものである. 白亜紀の砂岩がジュラ系とされる南蛇井層分布域に存在することが新しく明らかになった. 地質調査の結果, これらの白亜紀砂岩は, ジュラ系南蛇井層中の断層に沿って挟み込まれていることが明らかになった. 南蛇井層の南側には従来知られている白亜系の他に砂岩を主体とする白亜系の存在も明らかになった.

ジルコンU-Pb年代による砂岩の後背地の結果, ジュラ紀砂岩では先カンブリア時代の1870 Maに大規模な変成・火成作用が生じた大陸地域の岩石を起源とすることが判明した. また, 先カンブリア時代の岩石に加えて, ペルム紀末から中期ジュラ紀の火成岩が分布するアジア大

陸東縁の沈み込み帯を起源とすることが明らかになった。

【成果発表】

佐藤興平・竹内 誠・李 雨嘯・南 雅代・柴田 賢（印刷中）関東山地北西縁の下仁田地域に産する南蛇井層：ジルコンのU-Pb年代による予察．群馬県立自然史博物館研究報告．



第1図 南蛇井層砂岩中の碎屑性ジルコンのU-Pb年代（分析試料8試料の内3試料を示す）
 それぞれの試料の(a)はコンコールドなデータ（黒色楕円）とディスコールドなデータ（灰色楕円）をプロットした
 コンコルディア図。nはその図にプロットされたデータ総数で、括弧内の数字はコンコールドなデータの数。(b)は(a)
 の60 Maから500 Ma部分の拡大図。(c)は全てのコンコールドなデータを用いた年代ヒストグラムおよび年代分布
 確率曲線で、1200 Maより若い年代は ^{238}U - ^{206}Pb 年代、1200 Ma以上の古い年代は $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 年代で示した。(d)は(c)の
 100 Maから320 Ma部分の拡大図。

太陽圏構造とダイナミックスの研究

Study of the Heliospheric Structure and Dynamical Phenomena
(1行スペース)

鷲見 治一 九州大学国際宇宙天気科学・教育センター
(2行スペース)

Voyager1号機は2012年、2号機は2018年に夫々、太陽圏の外部境界面（ヘリオポーズ）を越え、星間空間（銀河空間）領域に入った。ヘリオポーズの位置は太陽風プラズマのラム圧の時間的変動に伴って変動していると考えられているが、現時点でのVoyager探査機を追い越すほどの速い動きが起きる徴候はない。従ってVoyager探査機による太陽圏領域の直接観測は終了したと考えられている。

太陽圏外圏の研究は単に物理的な興味だけでなく、銀河宇宙線の太陽圏内圏への輸送という環境問題に関連しても重要であり、今後はVoyager観測に代わる観測を用いた解析が必要と考えられている。我々は昨年引き続いて、地球を周回する探査機から得られるOMNI太陽風プラズマ観測データを用いて太陽圏MHDシミュレーション解析を行い、時間変動する3次元グローバル太陽圏構造を明らかにすることをめざして解析を進めている。その中間報告を以下に行う。

単純にOMNI観測データを太陽圏空間に取り込む場合は1点観測データとしてしか扱えないので、如何に3次元データとして取り扱うかが問題となる。地球から見ると太陽自転は27日周期であるので、太陽風プラズマが太陽自転に伴って共回転していると仮定し、当該観測の日及び13日前まで及び13日後まで毎日の観測データを併せて用いることによりヘリオグラフィック座標の経度方向の2次元データとして扱うことが出来る。緯度依存性については、ユリシーズ観測で得ることが出来た、太陽風ラム圧については緯度依存性がない（McComas et al. ApJ,2008）に基づき、低緯度（南北緯度45度以下と仮定）ではOMNIプラズマ速度及び密度を利用、高緯度（45度以北及び以南）では速度を1.5倍、密度をラム圧が低緯度側と同じになる値を用いている。以上の仮定により、赤道から離れた領域での細かいプラズマ変動の再現は無理であるが、グローバル太陽圏の構造及びその時間変動の再現は可能と期待している。

MHDシミュレーションの内部境界をOMNIデータと合わせて太陽から1AUの距離の球面にせねばならない。通常動径方向のメッシュサイズは約100分の1程度の細かさにはせねばならないので、1000AUスケールの広大な領域の計算のためにはシミュレーションボックスを2つに分ける必要がある。我々は第1のボックスは1-20AU、第2のボックスは20-900AUとしている。

昨年に続く改良を重ね、第1及び第2ボックスのシミュレーション結果は改善されてきている。2000年1月1日からのOMNIデータ取り込みを開始し現在に至るまでの毎日のシミュレーションテストランを行った。その結果の途中例を図1及び図2に示す。

今後は外部境界条件である太陽から900AUの距離にある星間空間での媒質及び磁場を調整してシミュレーション結果がV1及びV2の両方のヘリオポーズ通過時に合致するような解を求めたい。それには今後も長期間の時間がかかることと推測している。惑星間空間磁場に太陽磁気モーメントのチルトアングル効果を組み入れることも検討を始めている。

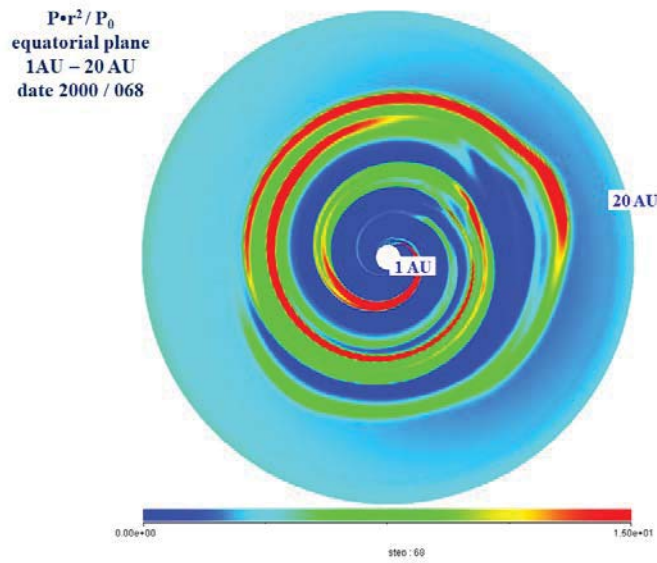


図1 第1ボックス (1-20AU) 赤道面における太陽風プラズマ圧の空間分布の例

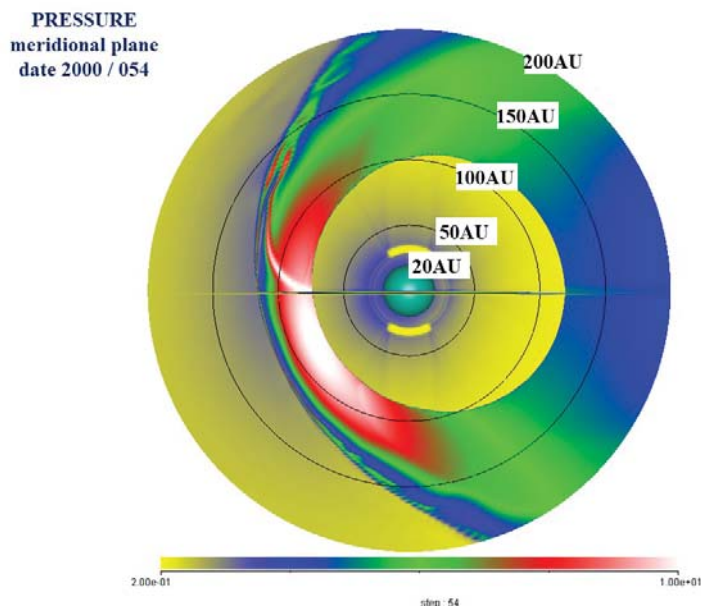


図2 第2ボックス (20-900AU) 子午面から 20-200AU 領域のみを取り出した場合の太陽風プラズマ及び星間空間媒質の圧力空間分布の例

文献 Astrophys. J. Letters 846:L9, 2017 'Time-varying heliospheric distance to the heliopause' by H. Washimi, T. Tanaka, & Gary P. Zank

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。観測の様子を図1に示した。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、2019年夏季より、パナソニック社と共同開発した小型PM2.5センサ（Nakayama *et al.*, *Aerosol Sci. Technol.* (2018)）を2台用いることで、実大気条件と乾燥条件におけるPM2.5重量濃度の連続観測を行っている。

【結果と考察】夏季もしくは秋季に沖縄近海を通過した合計7個の台風（2018年の21、25号および、2019年の9、11、13、17、18号）について、台風接近時の光学式粒子計数器で測定したエアロゾル粒子（直径0.3～10ミクロン）の粒径分布から算出したエアロゾル重量濃度と、風速との関係について調べた（図2）。その結果、平均風速が10 m/s増加するに従い、エアロゾル粒子の重量濃度が50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 程度増加することがわかった。観測されたエアロゾル重量濃度は、台風による強風で発生する海塩粒子の発生量の風速依存性を反映していると考えられる。今後、実大気条件と乾燥条件におけるPM2.5重量濃度の観測結果の解析を進める予定である。



図1：琉球大学千原キャンパスでのエアロゾル粒子の粒径分布およびPM2.5重量濃度の観測の様子

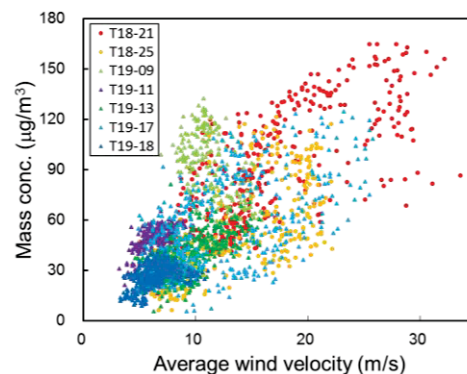


図2：7個の台風通過時に光学式粒子計数器で測定した直径0.3から10ミクロンのエアロゾル粒子の全重量濃度と平均風速の関係

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

近年、北極海ではユーラシア大陸側で海氷が大きく減少し、その傾向は年々顕著になっている。これは地球温暖化の影響の一つと考えられる。そのため、海氷減少に伴う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ことは、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必要不可欠である。ユーラシア北部では、タイガやツンドラにおいて植生と大気との間の熱や水の交換、それらと大気循環場の変化との関連性があるものと考えられており、その理解は、ユーラシア北部や北東アジアの気候変化の予測や、気候変化に対する対策を講じる上で重要である。本共同研究では、気候モデルによる実験において、北極海の高氷減少によるユーラシア北部の大気水循環の変化に伴う降水量への影響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による影響の割合を定量化することを目的としている。

研究目的

本年度は、最新の 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について解析し、その再現性や変化トレンドに関連する大気循環場の変化について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、及び、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

MIROC6 の過去再現実験 50 メンバーの 1951 年から 2014 年について、1951–1980 年、1971–2000 年、1990–2014 年という 3 期間に分けて、それぞれの期間における夏季平均降水量の線形トレンドの 50 メンバー平均値を調べ、観測データとしてデラウエア大学が提供している降水量データ(Willmott & Matsuura 2001)における同期間の線形トレンドとの比較を行った。MIROC6 では 1951–1980 年のユーラシア北部の降水量の 50 メンバーを平均したトレンドは極東からシベリア域を中心に減少トレンドを示し、1971 年以降、このトレンドの分布は反転し、極東・東シベリアを中心に増加トレンドを示している(図 1)。これらのトレンドを観測と比較すると、50 メンバーを平均しているため全体的にトレンドの値が小さい。つまり、各メンバーでトレンドの空間分布の特徴にばらつきがあることが推察される。一方、50 メンバーを平均したトレンドの空間分布については、1951–1980 年はシベリア域で減少トレンドを示し、1971 年以降はシベリア域(特に東シベリア)で降水量の増加トレンドがみられ、観測データと類似していることがわかった。

d4PDF における東シベリアー極東域の近年の降水量増加トレンド

東シベリアと極東域における降水量の長期変化傾向について、1951-2010 年間の d4PDF データを用いて、温暖化影響の評価を行った。観測された降水量はこの領域で 1990–2010 年の期間に、増加傾向が顕著であった。d4PDF の過去再現実験においても同様な増加傾向が示された。一方で、d4PDF の非温暖化実験ではこの顕著な増加傾向はみられなかった。降水量増加傾向を示すメンバーの下層循環場の解析から、1990-2010 年の期間では、北極海上において低気圧傾向が強化されており、対象領域内に西及び北西風に伴う水蒸気輸送量が増加していることが明らかになった。また、両実験の下層大気循環場トレンドのアンサンブル平均の差は、近年の温暖化影響により、北極海で低気圧傾向、中緯度帯で高気圧傾向を示す正の AO と同様な気圧パターンを示し、そのパターンが長期的に持続する傾向を示していた。そのため、対象領域では、過去再現実験で(非温暖化実験ではみられなかった)高気圧傾向を示すアンサンブルメンバーが増加しており、対象領域の降水量増加傾向に西風に伴う水蒸気輸送量が大きく寄与していた。

まとめ

気候モデルによる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は観測と完全には一致していないが、近年の温暖化に伴う降水量増加トレンドやその分布特性は観測と類似する点があることがわかった。今後は大規模アンサンブル実験というメリットを活かし、降水量の変化トレンドの空間分布特性と大気循環場や海水変化との関係性を解析し明らかにする。

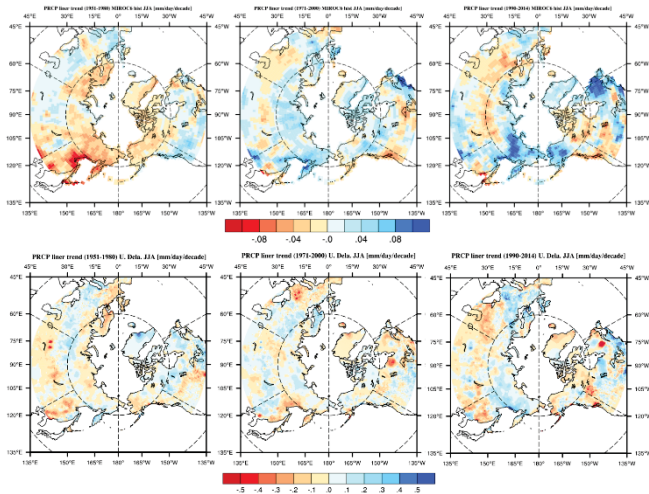


図 1 夏季降水量に関する線形トレンド。上段:MIROC6 の過去再現実験 50 メンバーの平均値。下段:デラウェア大学提供の降水量データ。左:1951-1980年、中央:1971-2000年、右:1990-2014年。単位:mm day⁻¹ decade⁻¹

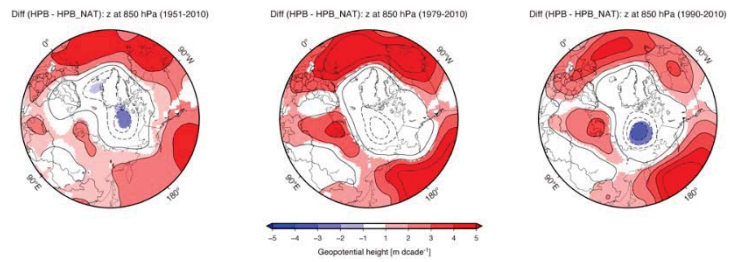


図 2 850hPa 高度場の各年代(1951-2010年、1979-2010年、1990-2010年)別のトレンドにおける過去再現実験(HPB)と非温暖化実験(HPB_NAT)のアンサンブル平均の差。カラーは有意水準98%以上で有意なグリッドを示す。

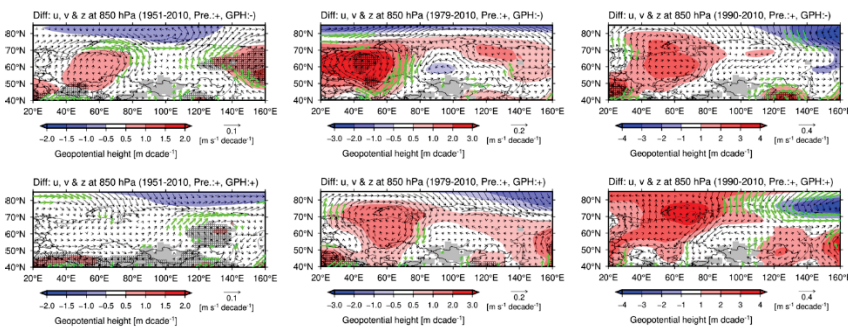


図 3 各年代(1951-2010年、1979-2010年、1990-2010年)別における、東シベリア極東域の領域平均の降水量が増加トレンドを示すアンサンブルメンバーの850hPa高度場と風系場のトレンドのコンポジット平均の過去再現実験(HPB)と非温暖化実験(HPB_NAT)の差。上段)対象領域の850hPa高度場について、低気圧傾向を示すアンサンブルメンバー

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.ghcn_ts2.html.

成果発表

Abe, M. et al., 2020: Features of spatial pattern in trend of summer precipitation over Northern Eurasia after 1950 in ensemble members of MIROC6 historical simulation, ISAR6 online meeting, March 18-April 10 2020.

Kanamori et al. 2020: Long-term in summer precipitation associated with the global warming over Siberia in a large ensemble of GCM simulations, ISAR6 online meeting, March 18-April 10 2020.

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

Three field observations during summer 2010 were carried out to measure the inherent and apparent optical properties of the western Seto-Inland Sea, Japan (**Figure 1**). The properties measured included chlorophyll-a concentration (Chl-a, mg m^{-3}), phytoplankton absorption coefficient at 440 nm ($a_{\text{ph}440}$, m^{-1}), gelbtoff absorption coefficient at 440 nm ($a_{\text{g}440}$, m^{-1}), total suspended matter (TSM, g l^{-1}), and hyperspectral remote sensing reflectance (R_{rs} , sr^{-1}). Besides optical properties, sea surface salinity (SSS) was also measured. To investigate R_{rs} spectral shape association with phytoplankton groups, especially harmful algal bloom (HAB) responsible phytoplankton, the number of dinoflagellate *Karenia mikimotoi* was counted. The first observation was conducted in July 2010 when diatoms flourished, the second was in August 2010 when dinoflagellate *K. mikimotoi* density was high in the Beppu Bay. The third observation was carried out in September 2010 when there was no phytoplankton bloom.

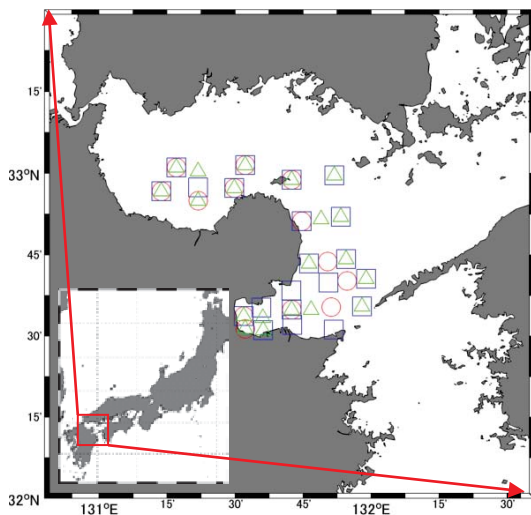


Figure 1. Location of stations at which in situ inherent and apparent optical property, SSS, and *K. mikimotoi* cell number data were collected. Red circles, blue squares, and green triangles are observation stations respectively for July 2010, August 2010, and September 2010.

Phytoplankton Chl-a was highly correlated with a_{ph} ($r = 0.97$), whereas a_{g} showed a strong correlation with surface salinity ($r = 0.88$) (**Figure 2**). The highest Chl-a measured during diatom bloom and during *K. mikimotoi* high density was 14.3 mg m^{-3} and 5 mg m^{-3} , respectively. In the blue spectral domain, a_{ph} in diatom bloom waters was about three times higher than that in waters with high density of *K. mikimotoi*. Strong $a_{\text{ph}440}$ – Chl-a correlation allows Chl-a to be retrieved semi-analytically. River plume is also possible to be tracked from ocean color observation due to strong SSS – $a_{\text{g}440}$ inverse correlation.

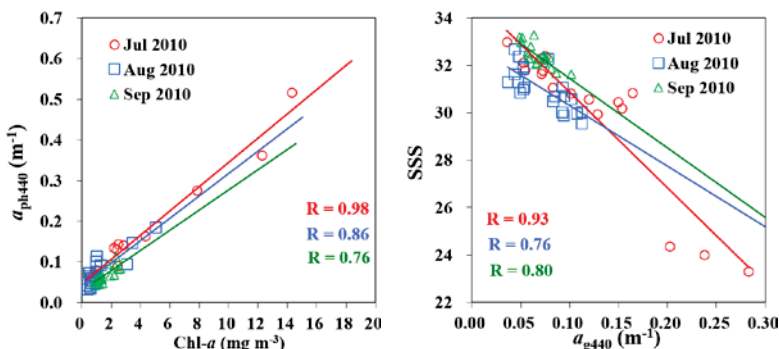


Figure 2. (Left) Scatter plot of $a_{\text{ph}440}$ against Chl-a. (Right) Scatter plot of SSS against $a_{\text{g}440}$. Red circles, blue squares, and green triangles are data respectively for July 2010, August 2010, and September 2010. Variable vs variable correlation coefficient for each cruise was also mentioned.

In situ R_{rs} measured during diatom bloom and *K. mikimotoi* high density showed different spectral shapes, particularly in the slope of R_{rs} between the blue (440 nm) and the green (550 nm) bands. The blue-green spectral slopes during diatom bloom were much steeper than that during the high density of *K. mikimotoi* (**Figure 3**). For HAB detection algorithm development, more in situ R_{rs} data are required to generate hyperspectral libraries of phytoplankton groups and other types of waters in the Seto-Inland Sea. The flatter R_{rs} spectral slope during *K. mikimotoi* bloom previously reported based on satellite ocean

color data only in the Seto-inland Sea, Japan (Siswanto et al., 2013) but also in the European coastal waters (Kurekin et al., 2014). It is thus worth investigating, with more datasets, whether such a spectral shape difference can be used universally to distinguish *K. mikimotoi* bloom from diatom bloom.

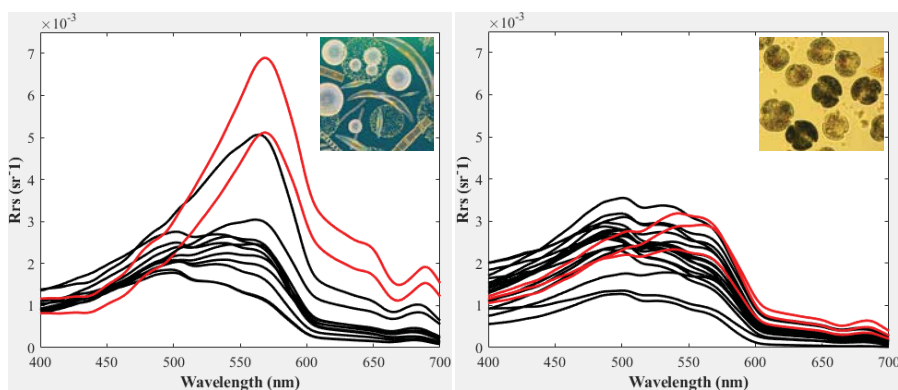


Figure 3. (Left) Rrs spectral variation collected in July 2010. (Right) Same as (left) but that collected in August 2010. Rrs of waters with high diatom (red lines) has a steep slope between blue and green bands. The spectral slopes of Rrs during high *K. mikimotoi* cell numbers are flatter (red lines) than those during high diatom concentration.

References:

- Kurekin, A.A., Miller, P.I., Van der Woerd, H.J. (2014). Satellite discrimination of *Karenia mikimotoi* and *Phaeocystis* harmful algal blooms in European coastal waters: Merged classification of ocean color data. *Harmful Algae*, 31, 163-176. doi:10.1016/j.hal.2013.11.003
- 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

Super-Kamiokandeを用いた太陽フレア由来の
ニュートリノに関する研究
Study of neutrinos from solar flare
using 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 γ 線 (RHESSI)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 γ 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 γ 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。

研究の成果

データ解析の結果、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 electrolike 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。

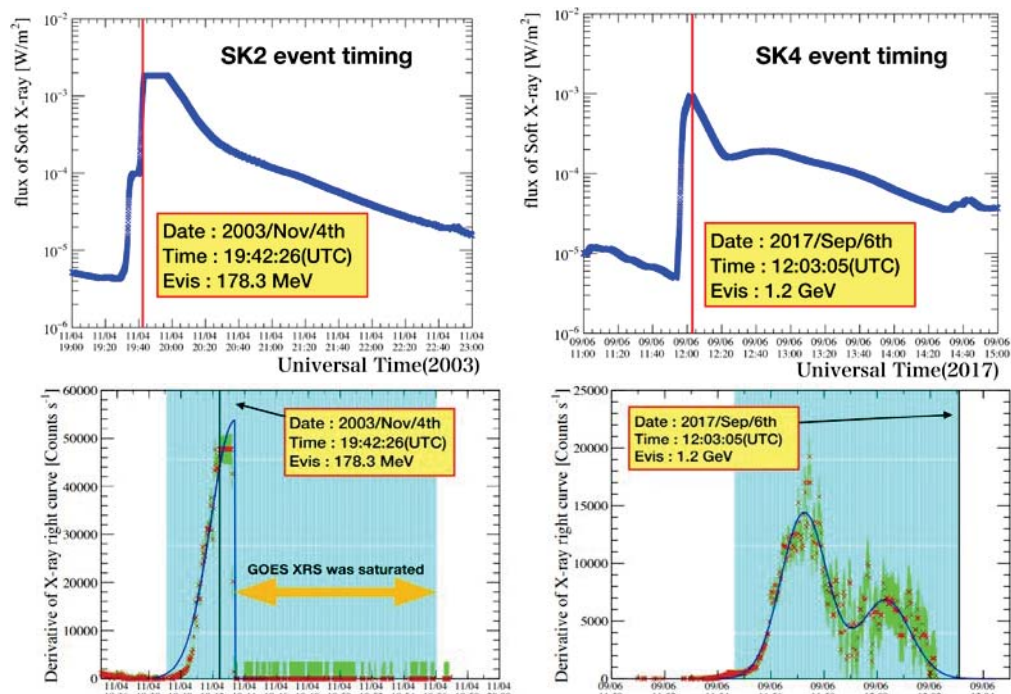


図 1. Soft X 線の光度曲線（上図）と光度曲線を微分した場合（下図）の時間分布と、Super-Kamiokande 実験で観測されたニュートリノ事象候補の時刻（縦線）。枠内は観測日時、時刻、エネルギー。下図の水色の領域はこのチャンネルで決定された探索時間幅である。

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。

研究成果発表:

- (1) 岡本 幸平 他Super-Kamiokande collaboration, 「スーパーカミオカンデ実験における太陽フレア起源のニュートリノ探索(III)~スーパーカミオカンデのデータ解析」日本物理学会 秋季大会 (2019年9月17日 山形大学) 【口頭発表】
- (2) 岡本 幸平 他Super-Kamiokande collaboration, 「Search for Neutrinos associated with Solar Flare in Super-Kamiokande」国際会議 TAUP 2019 (2019年9月9-13日 富山国際会議場) 【ポスター発表】
- (3) 岡本 幸平, 「Super-Kamiokande実験における太陽フレア由来のニュートリノ探索」宇宙素粒子若手の会 (YMAP) (2019年10月18日名古屋大学) 【口頭発表】
- (4) K. Okamoto et al., Development of a method for determining the search window for solar flare neutrinos arXiv:1909.10715 【pre-print 査読中】

参考文献: [1] R. Davis, Prog. Part. Nucl. Phys. 32 (1994) 13-32. [2] B. Aharmim, et al., Astropart.Phys. 55 (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.

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。生成過程の概略を図2に示す。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、蔵王を含む東北地方の一部の山岳地帯（八甲田や八幡平など）でしか見ることができない自然現象であるため、生成過程）や化学組成等について研究が行われてきている。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⁷Be濃度の測定を行うと共に、共同利用装置（Picarro L2130-i）を用いて水の水素酸素安定同位体比分析を実施した。ここでは、⁷Be濃度について検討を行った結果について報告する。

2016-2017年冬季に採取した試料の⁷Be濃度は、12月や1月は比較的高い濃度が多く、2月や3月になると低くなる傾向にあった。最大値は2016年12月19日の13.01 Bq/L、最小値は2017年2月13日の0.52 Bq/Lであった。12月や1月は西高東低の気圧配置になることが多く、冬から春に移行していくと南岸低気圧の飛来が多くなるため、⁷Be濃度は空気塊の移流コースの違いを反映していると予想される。そこで、後方流跡線解析と衛星水蒸気画像を組み合わせたルート解析、高層天気図を用いた対流圏界面と286kの温位層の変動を合わせて解析した。その結果、高層大気で生成された⁷Beは西シベリア地域で対流圏へ供給され、その空気塊が日本に飛来した際に濃度が上昇することが示唆された。今後、2017-2018年冬季についても解析を実施したい。

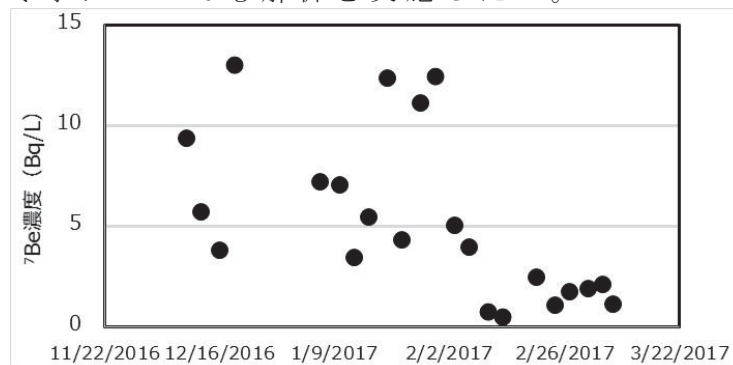


図 蔵王の着氷に含まれる⁷Be濃度の時系列変動

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1
Enhancement of the Inner Magnetospheric Research
by the provision of the calibrated data
for Arase DC and low frequency E-field: 1

笠羽 康正、東北大学 惑星大気・プラズマ研究センター

1. 研究目的

Arase (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**) の Level-2 データ作成・公表を確実に進めた。この Level-2 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。また、電場波形データ (64/256/512Hz) ・ポテンシャル波形データ (8Hz/128Hz) の Level-2 公開提供も準備を終了させている。

(2) 電場およびポテンシャルの評価

実際のサイエンス面における実用には周辺プラズマ環境に依存する校正方法の確立を要することになる。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、これがおそらくは衛星形状・磁場方向等の影響されており、一見排除不可能である。東北工大の卒業研究にご協力いただき、以下の結果を得ることができた。

A. プローブ電位波形は、正弦波からずれる。プローブ電位の増減は、電場に沿った方向へ衛星本体から光電子が流入・流出しやすい効果が出ている可能性がある。デバイ長がアンテナ長に匹敵するような状況で強調される可能性があり、調査を継続予定である。(石原 誉, 田

牧 麟太郎, ジオスペース探査衛星あらせで観測した電位差波形にひずみが見られる原因, 東北工業大学卒業論文, 2020年3月)

B. 衛星電位そのもののゆらぎが大きくなる。観測電位差の振幅に対する衛星電位のゆらぎが大きい場合、電場精度が悪化する。衛星スピン軸が太陽指向方向からずれ、衛星側面に対する太陽光の当たり方にスピン変動が生じることがその原因となる可能性があり、調査を継続予定である。(猿田 陸, 人工衛星「あらせ」の衛星電位が電場観測に与える影響, 東北工業大学卒業論文, 2020年3月)

(3) Arase 衛星による電場計測を用いた成果創出のサポート :

以下の成果創出などにおける電場計測の評価に貢献した。

・ULF 波動の電場成分計測: Takahashi et al., American Geophysical Union 2019 fall meeting, 2019年12月 など

・粒子加熱に絡む磁気音波の電場成分計測: Asamura et al., American Geophysical Union 2019 fall meeting 2019年12月 など

・電子加熱に絡む電磁イオンサイクロトロン波動の電場成分計測: Shoji et al., American Geophysical Union 2019 fall meeting 2019年12月 など

・磁気脈動の電場成分計測: Teramoto et al., Remote detection of drift resonance between energetic electrons and ultralow frequency waves: Multisatellite coordinated observation by Arase and Van Allen Probes. Geophys. Res. Lett., 46, 11642–11651 (2019), doi:10.1029/2019GL084379; Teramoto et al., American Geophysical Union 2019 fall meeting 2019年12月 など

・オーロラアーク source 領域における電場計測: Shiokawa et al., American Geophysical Union 2019 fall meeting 2019年12月 など

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。そのため、従来人が行っていた森林調査や間伐後の検査等にドローンが利用可能かについて、検討が始められているが、現状では研究例も限られ、十分な成果が得られている状況にはない。

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を対象として、ドローンによる空撮画像を利用した森林情報計測手法の有効性及び課題について知見を得ることを目的とした。

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、森林3次元計測システムOWLにより、2019年10月17日にプロット内全立木の位置座標・胸高直径（DBH）の計測を行った。

一方UAV空撮は、2019年12月4日に撮影高（離発着点からの高度差）50m, 70m, 90m, 110m, 130mにより実施した。空撮は、DJI Phantom4 Pro ver.2（DJI社製、中国）によりDJI GSPRO（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0.5m）（以後、UAV樹頂点とする）を算出した。さらに、2014年4月に同地域で観測さ

れた航空機LiDARデータを用い、UAVの処理と同様に解像度0.5mで樹冠抽出処理を行い、樹頂点座標（以後、LiDAR樹頂点とする）を算出し、両者のマッチングにより、UAV樹頂点の位置座標（X・Y座標のみ）の補正を行うとともに、樹冠抽出率及び樹頂点座標の比較を行った。なお、2014年以降に対象地で間伐等を実施した記録は残されていない。

研究結果・考察

表1. プロット別・撮影高別樹冠抽出率（単位は%）

高度	プロット						平均
	1	2	3	4	5	6	
50m	68.2	69.6	80.0	80.0	82.6	88.0	78.1
70m	63.6	78.3	85.0	75.0	82.6	84.0	78.1
90m	63.6	69.6	75.0	80.0	82.6	80.0	75.1
110m	77.3	78.3	85.0	80.0	78.3	80.0	79.8
130m	77.3	73.9	80.0	80.0	82.6	88.0	80.3

表1に示したプロット別・撮影高別樹冠抽出率が示すように、撮影高による樹冠抽出率に差異は認められなかった（ $P>0.05$ ）。しかし、撮影枚数は撮影高50m時の425枚に比べ130m時は91枚と、同じオーバーラップ率・サイドラップ率であれば撮影高とともに撮影枚数は減少する。撮影枚数の増加は撮影時間及び解析時間の増加を伴うため、撮影高による樹冠抽出率への影響がないのであれば、より高い撮影高での空撮が実用的であると考えられた。

まとめ

森林計測を前提とした空撮においては、撮影高による樹冠抽出率への影響は認められず、撮影時間及び解析時間の点から、より高い撮影高での空撮が実用的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（2020）撮影条件の差異が SfM 処理に与える影響の評価 第131回日本森林学会大会，2020年3月，名古屋大学

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

Zhang et al. (2015, 2016) で考慮されていない宇宙線粒子組成、組成ごとのエネルギースペクトラム、一次宇宙線に対する空気シャワーレイの応答性能等をすべて考慮した宇宙線粒子軌道計算を行い、Tibet空気シャワー実験による観測結果との定量的な比較を行った。太陽圏磁場モデルにはWashimi等によるMHDシミュレーション結果 (Washimi et al., ApJ, 809, 2015) を用いた。

まずZhang et al. (2015, 2016) と同様の方法による5.3 TeVの陽子のみの軌道計算による観測結果とのベストフィットは、Zhang et al.の結果と同様に1次異方性を主成分とする銀河異方性を与えるものの、 χ^2 /自由度が2544/1292=2.0であり統計的に上手くフィット出来ないことが判った。次に、宇宙線粒子組成、組成ごとのエネルギースペクトラムを考慮した計算結果と観測結果とのベストフィットを行ったが、 χ^2 /自由度は2434/1292=1.9とほとんど改善しないことが判った。この原因は1次と2次の大規模異方性のみを仮定したモデルにあり、観測結果を再現するにはより高次の異方性まで考慮する必要があることが判った。

そこで、銀河異方性を6次までのルジャンドル球関数で級数展開し、合計48個の展開係数をフリーパラメータとして求めた。その結果、 χ^2 /自由度は1874/2008=0.93に改善し、統計的に妥当なベストフィット結果を得るためには高次の異方性の寄与を考慮する必要があることが判った。一方で、展開係数から求めた異方性の振幅は次数とともに急激に減少し、高次異方性の位相は太陽活動周期で変化するMHDモデルごとに大きく異なる。これに対して3次以下の大規模異方性にはそのような変化は見られない。したがって、約10年間の平均値であるTibet空気シャワー実験による観測結果を正しく再現するためには、こうした時間変動を考慮する必要があることが判った。

これらの点を踏まえ、太陽活動周期で変動するMHDシミュレーション結果の用意を現在進めている。またZhang et al.が使用したMHDシミュレーション結果 (Pogorelov et al.) も入手し、それに基づくベストフィットを行うための準備も進めている。

学会発表等：

- Amenomori et al., Modeling of the anisotropy of galactic cosmic rays in an MHD-simulated heliosphere, Proc. of 36th International Cosmic Ray Conference (Madison), July 31st, 2019 (poster presentation).
- 佐古崇志ほか、チベット実験で観測された宇宙線異方性の太陽圏磁場による変調(1)、日本物理学会第75回年次大会 (Web 発表)。

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。本年度からの研究では、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 0.0035cm^{-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。今年度はまずメタ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<SFIT4>を用いているが、メタンの解析で得られる典型的なDOFs (Degree of Freedoms) は3程度である。これは3つの独立した高度情報を得られるということであるので、対流圏、下部成層圏、それ以上の高度、に分けてみることにした。対流圏カラム (0-8 km) について東北大学の大气海洋変動観測研究センターで観測している航空機サンプリングのデータから求めたカラムと比較したところ、質のよいデータ (RMS $\leq 1.5\%$) を選べば標準偏差1.7%程度で一致する (ただし平均で2.9%過小評価) ことが分かった。これによりメタンの高度分布の精度がある程度確認できたので、高度毎のカラムの経年変化を描いたのが図1である。増加率を見てみると、カラム全量が+0.72%/年であるのに対し、0-8 kmは+0.79%/年、8-16 kmは+0.44%/年、16-24 kmは+0.26%/年と、増加は主に対流圏で起きていることが分かる。また、季節変化の位相も対流圏と成層圏ではほぼ反転しているが、これは対流圏ではOHとの化学反応による変化が主な要因であるのに対し、成層圏では鉛直輸送が主な要因であることを反映しており、この点からも高度分布が精度よく導出できていることが分かる。

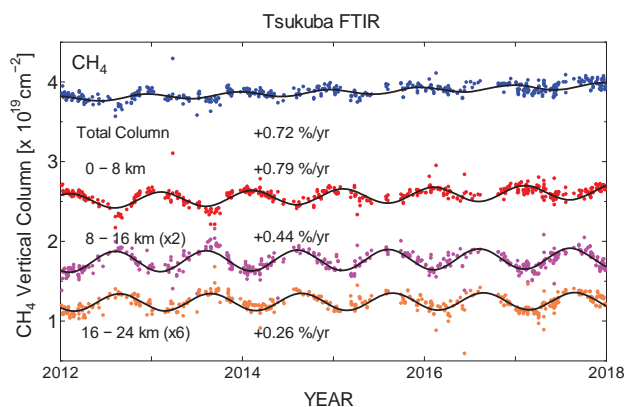


図1. メタンの高度毎のカラムの経年変化

HClとHFのカラム全量の経年変化については前年度までの研究でも報告しているが、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こと循環の加速・減速によって増減する。これまでの解析でHCl、HFともに数年単位の増減が見られ質量流線関数の変化から見た成層圏循環の減速・加速と対応していたが、2019年の解析を行って追加したところ、2017年頃からの減少傾向がはっきりした (図2にHClの結果を示す)。図3に示す4年間の増加率で見ても2018年 (2016-2019年) は負に転じている。この減少が成層圏循環で説明できるかどうかは今後調べるが、環境研秋吉英治氏らによるMIROC3.2 化学気候モデル (CCM) では2015-2017年頃の増加が再現されておらず (図3の青い棒グラフ)、この数年の増減が力学で説明可能なのかそれともCFC-11などの放出量の変化の影響が見えているのか引き続き解析を行う予定である。

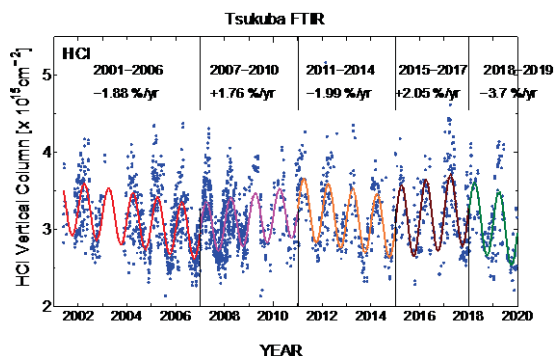


図 2. HCl カラム全量の経年変化

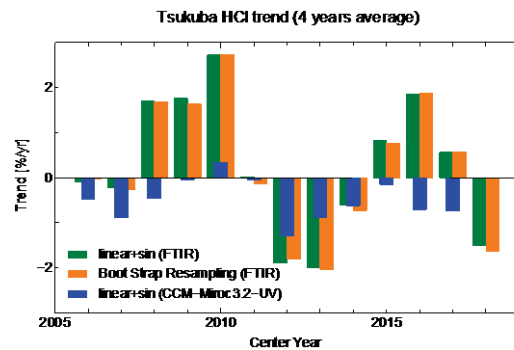


図 3. HCl 増加率の観測とモデルの比較

このほか、今年度はHCHO, NH₃, COの解析を進め、HCHOについては共著論文としてACPのディスカッション論文に公開されている。NH₃とCOについては発生源の推定などを行い、大気化学討論会で発表した。

<成果発表>

Corinne Vigouroux, Bavo Langerock, Carlos Augusto Bauer Aquino, Thomas Blumenstock, Martine De Mazière, Isabelle De Smedt, Michel Grutter, James Hannigan, Nicholas Jones, Rigel Kivi, Erik Lutsch, Emmanuel Mahieu, Maria Makarova, Jean-Marc Metzger, Isamu Morino, Isao Murata, Tomoo Nagahama, Justus Notholt, Ivan Ortega, Mathias Palm, Gaia Pinardi, Amelie Röhlings, Dan Smale, Wolfgang Stremme, Kim Strong, Ralf Sussmann, Yao Té, Michel van Roozendaal, Pucui Wang, and Holger Winkler, TROPOMI/S5P formaldehyde validation using an extensive network of ground-based FTIR stations, Atmos. Meas. Tech. Discuss., <https://doi.org/10.5194/amt-2020-30>, 2020

I. Murata, Y. Tomikawa, I. Morino, H. Nakajima, H. Akiyoshi, and Y. Dai, Temporal variation of HCl and HF at Tsukuba related to the change of the meridional circulation in the northern lower stratosphere, 2019 Joint NDACC-IRWG and TCCON Meeting, Wanaka, New Zealand, May 20 - 24, 2019.

Y. Dai, I. Murata, I. Morino, and H. Nakajima, Validation of methane tropospheric column observed by FTIR at Tsukuba with airplane sampling, 2019 Joint NDACC-IRWG and TCCON Meeting, Wanaka, New Zealand, May 20 - 24, 2019.

代 友輝、村田 功、中島 英彰、森野 勇、フーリエ変換型赤外分光計を用いた地上観測によるつくば上空メタン高度分布の精度検証、日本地球惑星科学連合2019年大会、幕張、2019年5月。

村田 功、中島 英彰、森野 勇、武田 真憲、つくばFTIRで観測されたNH₃の2018、2019年増大イベント、第24回大気化学討論会、蒲郡、2019年11月。

鈴木 大将、中島 英彰、村田 功、森野 勇、FTIR観測によるつくばにおけるCOの経年変化、第24回大気化学討論会、蒲郡、2019年11月。

I. Murata, Y. Tomikawa, I. Morino, H. Nakajima, and H. Akiyoshi, Temporal variations of HCl and HF observed at Tsukuba related to the change of the meridional circulation in the northern lower stratosphere, The 10th Symposium on Polar Science, Tokyo, Dec. 3-5, 2019.

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ラーモード・コーラス放射が重要な役割を担うとされる。近年の理論・シミュレーション研究により、コーラス放射との波動粒子相互作用においては、コヒーレントな波動による捕捉を基本とする非線形相互作用の重要性が指摘されている。放射線帯電子の生成過程を理解する上で、内部磁気圏のどの領域で、どのようなタイミングで電子加速過程が生じるかを定量的に明らかにすることは重要である。そのためには、高エネルギー電子の磁気圏内での輸送を扱うグローバルモデルが有用なツールとなるが、コーラス放射との波動粒子相互作用で本質的に重要となる非線形効果をどのように取り入れるかが課題として残されている。本研究課題は、コーラス励起過程を再現する素過程シミュレーションとグローバルモデルとの連成計算手法を確立し応用して、内部磁気圏でのコーラス放射の発生領域とその時間・空間変化を明らかにすることを目的とする。

・研究方法

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

・研究結果

3年間の研究計画として実施する本研究課題初年度の成果は以下の通りである。

連成計算1について、コーラス放射の発生と非線形効果の発生に関わる波動振幅閾値の計算モジュールを組み込んだグローバルモデルによる計算を、2017年3月に発生した磁気嵐を対象に実施した。あらせ衛星による観測結果とグローバルモデルによる計算結果を比較

するとともに、非線形波動成長理論に基づいて導出された閾値と最適振幅 (optimum amplitude) をそれぞれグローバルモデルにより示されるパラメータを用いて計算した。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錬成計算 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。以上の成果は米国地球物理学連合2019年Fall Meetingで報告された。また、関連する科研費課題が本共同研究の研究組織メンバーにより申請されている。

本共同研究により開発された錬成計算手法を、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。2020年度は衛星観測結果との比較に重点を置いて、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。

粒子状有機硝酸全量測定装置の湿度に対する応答の検証

Validation of the analyzer for particulate total organic nitrates in view of response to humidity

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。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_x と VOC の酸化反応（対流圏オゾン生成過程）にてオゾンと同時に生成する有機硝酸類 ONs (RONO₂) 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、ONs 生成特性の解明された VOC も限られる。二次生成するガス状・粒子状の ONs も多様で、個別成分分析による網羅は困難である。以上のことから、二次生成するガス状・粒子状の ONs を数え落としなく包括測定する ONs 全量測定は、エアロゾル (SOA) 評価に有用である。研究代表者はこれまでに、文献¹⁾を参考にしつつ、活性炭デニューダー (CD)、ONs の NO₂ への熱分解変換器 (TD)、キャビティ減衰位相シフト法 NO₂ 計 (CAPS-NO₂)、を組合せた粒子状有機硝酸全量 ONs(p) 測定器 CD/TD/CAPS-ONs(p) を実現し、都市郊外での大気観測に基づく有機硝酸類のガスの特性やガス-粒子分配特性の支配要因を検証した²⁻⁶⁾。その結果、ONs の粒子への分配が相対湿度に依存する可能性を示した。本研究は、試料を粒子乾燥管に導入して ONs(p) の変化を調べ、測定装置の湿度応答特性を把握して、大気観測での ONs の粒子分配比が ONs(p) 計の特性（湿度依存性）に起因するのか、実大気での ONs の挙動を反映したのか、検証する。

【研究の方法と結果・考察・まとめ】 構築済の ONs(p) 計と入手済の粒子乾燥管（東京ダイレック製ディフュージョンドライヤー3062・以下DD）および温湿度計（ヴァイサラ製HMI41指示計およびHMP45プローブ）を組合せて試料を DD に通す際の ONs(p) を調べて、測定装置の湿度に対する応答特性を実験的に検証した。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粒子状有機硝酸 ONs(p) を一定濃度含む試料を発生させつつ、試料の DD への通過／不通過、および加湿の有／無、の 2 x 2 = 4 通りについて ONs(p) を測定し、湿度変化に対する装置応答を調べた。試料の湿度は ONs(p) 計の直前で温湿度計によってモニターした。(a) DD 通過に伴う ONs(p) 信号の変化… 試料

を加湿した場合と加湿しない場合の両者とも、DD 通過によって ONs(p) 信号が約 8 % 減少した。このことから、DD 通過に伴って ONs(p) が DD の配管・継手・乾燥剤によって約 8 % 消失することがわかった。(b) 加湿による ONs(p) 信号の変化… DD を通過した場合と通過しない場合の両者とも、試料加湿によって ONs(p) 信号が約 9 % 減少した。このことから、加湿に伴って ONs(p) が約 9 % 減少することがわかった。以上を総合すると、DD 通過や加湿といった個々の要素による ONs(p) 信号の減少は見られたものの、それらを補正すると ONs(p) 計そのものには有意な湿度依存性が見られなかった (図D)。ONs(p) 計本体の特性として明確な湿度依存性を確認できなかったことから、都市郊外大気観測での ONs の粒子分配比の湿度依存性は、実大気中の ONs 挙動を反映していたものと推測される。

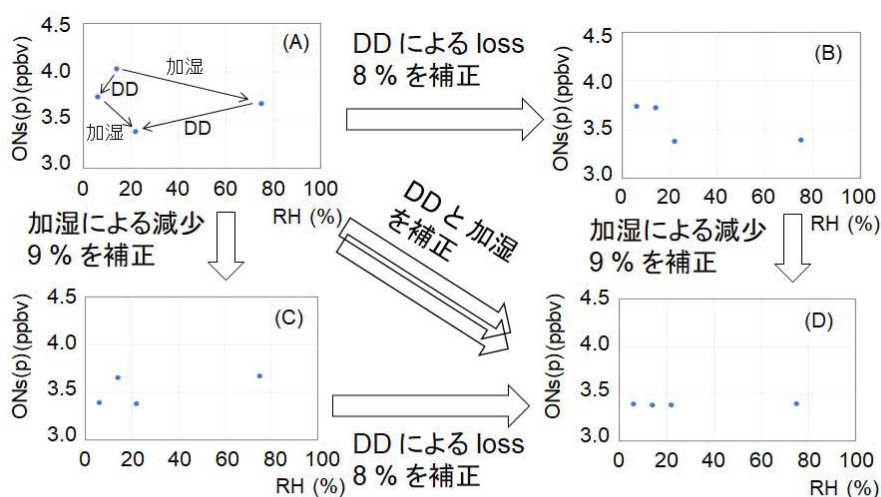


図 ONs(p) 計の湿度応答測定の結果と解釈。
 ONs(p) の湿度依存性 (A) は DD 通過と加湿の影響を受けている。
 DD 通過と加湿の影響を補正すると、ONs(p) 計には明確な湿度依存性が見られない (D)。
 ONs(p) 計本体への湿度による干渉は確認されない。

【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.

【成果発表】

- 松本淳(2019): 第24回大気化学討論会, P-29.

ユーラシアの積雪に対する北極海氷変動の影響の評価
Evaluating the influence of Arctic sea ice change
on Eurasian snow cover

北海道大学・大学院地球環境科学研究所 佐藤友徳

1. はじめに

ユーラシア大陸北部は地球全体の水・エネルギー循環や炭素循環において極めて重要な地域である。近年、北極域の温暖化増幅や北極海の海氷面積縮小に伴い、ユーラシア大陸北部を含む環北極域の環境変化が注目を集めている。大気場の特徴として、ユーラシア大陸を經由して北極海へと輸送される水蒸気が極域の温暖化増幅の原因であることが指摘されている。一方、北極海からユーラシア大陸へと輸送される水蒸気の動態はあまり研究されていない。特に、北極海の海氷面積が顕著に減少している秋には海面からの蒸発量が増加していることが観測から明らかになっているが、蒸発した水蒸気が陸域にどのような影響を与えているのか未解明の点が多い。

申請者らはバレンツ・カラ海近傍の内陸における春の積雪偏差が引き続く夏のユーラシア大陸北部の気温分布と関係していることを明らかにした (Sato and Nakamura, 2019)。しかし、この積雪偏差を形成するメカニズムは未解明であり、前述した北極海の海氷減少に関連する海から陸への水蒸気輸送との関係も否定できない。そこで、本課題では、北極海の海氷変動がユーラシア大陸北部の積雪偏差とどのように関連しているのかを明らかにすることが目的である。ただし、当該地域の積雪変動を広範囲かつ高い精度で観測することは容易ではない。そのため、ここでは寒候期の降水量の変動について調べることにする。

2. データと方法

解析にはオイラー型の2次元水蒸気輸送モデル (Yoshimura et al., 2004; Sato et al., 2007) を使用し、北極海や北大西洋などの海域とユーラシア大陸北部の間の水蒸気輸送過程を調査する。モデルの入力として必要な3時間ごとの降水量、鉛直積算水蒸気フラックス、蒸発散量、可降水量は、JRA-55再解析データの解析値および予報値を使用した。なお、3時間ごとの降水量と蒸発散量は、JRA-55の予報値をベースとしつつ、各月の気候値が参照データの気候値と一致するように補正を施している。降水量についてはGPCP降水量を、蒸発散量については大気水収支式の残差として算出される蒸発散量を補正のための参照データとしている。実験は各年の1月1日に開始した。解析期間は1982年から2008年である。

3. 結果

図1にバレンツ・カラ海の海氷面積変動とユーラシア中高緯度域の降水量変動の関係を示す。10~11月にかけて海氷面積が小さいほど沿岸海域で降水量が増加する傾向が確認できる。11月になると海岸近傍の陸域でも降水量が増加しており、両者には有意な相関がみられた。この結果は、Wegmann et al. (2015)のラグランジュモデルを用いた解析結果とも類似している。さらに、水蒸気輸送モデルの結果をみると、11月に陸域で増加した降水量に対して、北極海起源の水蒸気の割合が増加していることが分かった。

一方、陸域で降水が生じた日の大気循環場を見ると、北寄りの下層風を伴い北極海からの水蒸気輸送が強まった事例だけでなく、南寄りの下層風が卓越する日も多くみられた。今後はこれらの日にも着目し、寒候期の陸域における水蒸気輸送プロセスを調べる必要がある。

引用文献

Sato, T. and T. Nakamura, 2019: Intensification of hot Eurasian summers by climate change and land-atmosphere interactions. *Scientific Reports*, 9, 10866(2019), DOI: 10.1038/s41598-019-47291-5

Sato, T., M. Tsujimura, T. Yamanaka, H. Iwasaki, A. Sugimoto, M. Sugita, F. Kimura, G. Davaa, and D. Oyunbaatar, 2007: Water sources in semi-arid Northeast Asia as revealed by field observations and isotope transport model. *J. Geophys. Res. -Atmospheres*, 112, D17112, DOI: 10.1029/2006JD008321

Yoshimura, K., T. Oki, and K. Ichiyangi, 2004: Evaluation of two-dimensional atmospheric water circulation fields in reanalyses by using precipitation isotopes databases. *J. Geophys. Res. -Atmospheres*, 109, DOI: 10.1029/2004JD004764

Wegmannl, M. Orsolini, Y. Vázquez, M., Gimeno, L., Nieto, R., Bulygina, O., Jaiser, R., Handorf, D., Rinke, A., Dethloff, K., Sterin, A., and Brönnimannl, S., 2015: Arctic moisture source for Eurasian snow cover variations in autumn. *Env. Res. Lett.*, 10, 054015, DOI:10.1088/1748-9326/10/5/054015

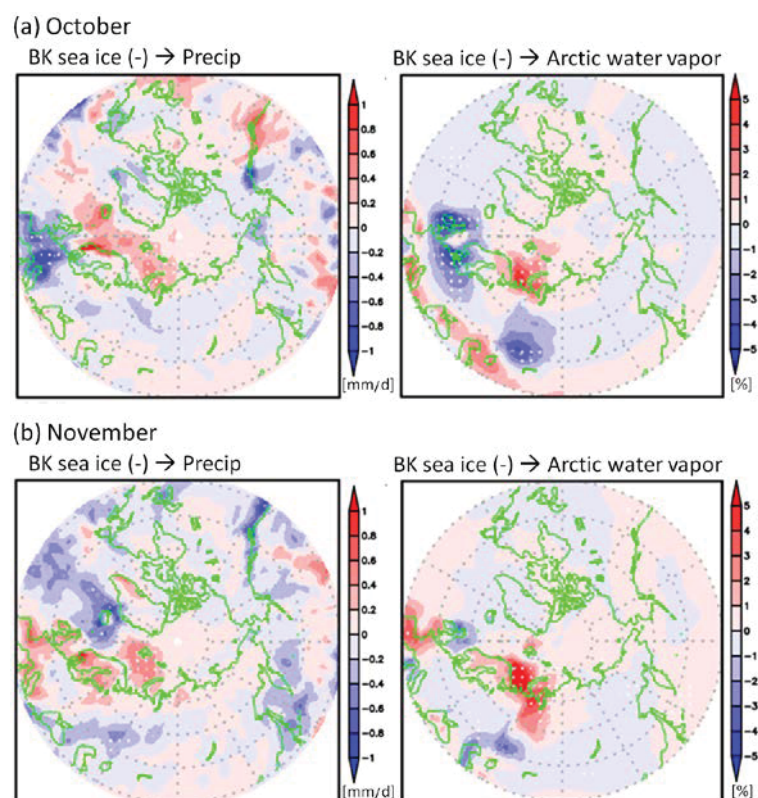


図 1: バレンツ・カラ海における(a)10月と(b)11月の海水面積率偏差に帰属した同月の(左)降水量と(右)北極海で蒸発した水蒸気の割合。海水面積率偏差は標準化し符号を反転させている。

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、昨年度は、名古屋大学・宇宙地球環境研究所・修士課程(一昨年度修了)・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、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FLRイベントの観測されたRGはHAN Beam#1とPYK Beam#13とで異なっていた。また、この他の上記

beamsについては、FLRが目視同定できたbeamsもできなかったbeamsもあり、同定出来たbeamsにおけるFLR観測RGもbeamsによって異なっていた。

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る。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。

【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, Toward the automatic identification of FLR signals in the SuperDARN data by using the gradient method, Japan Geoscience Union Meeting 2019, Makuhari Messe, Chiba, Japan, 2019.05.29.
- Hideaki Kawano, Akira Sessai Yukimatu, Nozomu Nishitani, Yoshimasa Tanaka, Satoko Saita, and Tomoaki Hori, The amplitude-ratio and the cross-phase methods to automatically identify FLR in the SuperDARN VLOS data, SuperDARN Workshop 2019, Highland Resort Hotel & Spa in Fujiyoshida, Japan, 2019.06.05.
- 河野 英昭, 行松 彰, 西谷 望, 田中 良昌, 才田 聡子, 堀 智昭, Mark Lester, Automatic identification of FLR events in the SuperDARN VLOS data by using the Gradient methods, 熊本市国際交流会館, 2019.10.13.
- Hideaki Kawano, Akira Sessai Yukimatu, Nozomu Nishitani, Yoshimasa Tanaka, Satoko Saita, Tomoaki Hori, and Mark Lester, Automatic FLR identification and density estimation from SuperDARN VLOS data to identify magnetospheric regions, National Institute of Polar Research, Tenth Symposium on Polar Science, 2019.12.04.

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CO₂/H₂O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CO₂/H₂O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、CO₂密度と混合比、H₂O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19～25日の7日間である。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のゴム製チューブを波しぶき計本体上部から折れ曲がらないように吸引口まで伸ばし、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。

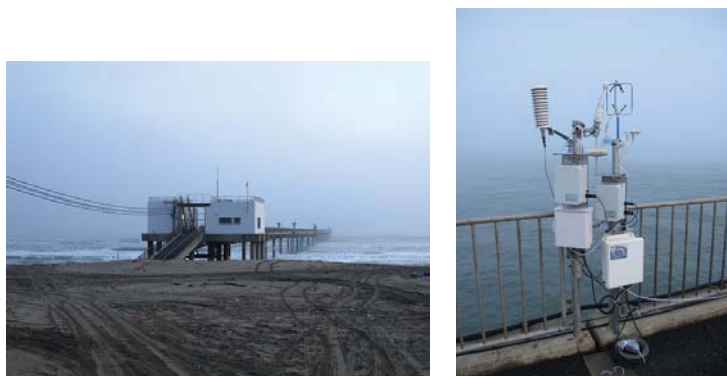


図1 波崎海洋研究施設の観測用栈橋全景（左）と栈橋先端に設置したシステム（右）

研究結果

図2左はSATによる気温、OPGAによるH₂O密度、CRDSによるH₂OとCO₂の混合比、そして波しぶき計による0.3μm以上の粒子数密度を10Hzで計測した30分間の時系列の観測例である。この図から各物理量の変動に相関、または逆相関の関係、つまり変動の相似性がみられた。気温変動は最大0.6K程度の振幅で鉛直風速とは正の相関、H₂O密度と混合比はそれぞれ最大1.8g/m³、0.16%程度の振幅で気温変動と同様に鉛直風速とは正の相関がみられた。CO₂混合比は最大1.4ppm程度の振幅で鉛直風速とは負の相関がみられた。これらから、顕熱と潜熱は海面から大気へ放出、CO₂は大気から海面へ吸収されていることが分かる。粒子数密度(10Hz間の計測粒子数)変動は、最大約300個を超える振幅で鉛直風速とは正の相関がみられ、海塩粒子が海面から大気へ放出されている様子が観測された。また粒子数密度の変動は他の物理量とは異なりスパイク状の変動がみられる。これは海面が局所的に破碎することによって放出された海塩粒子を捉えているものと思われる。

図2右は0.3、0.5、0.8、1.0、3.0、5.0μmの粒径別に表した粒子数密度変動を図2左とは異なる観測時間における時系列を示している。粒径が大きくなるにつれ、数密度の絶対値とともに変動の大きさも小さくなるものの、異なる粒径間に変動の相似性がみられた。しかしながら、10μm以上の粒径における粒子数密度は観測期間中に変動する様子を捉えることはできなかった。

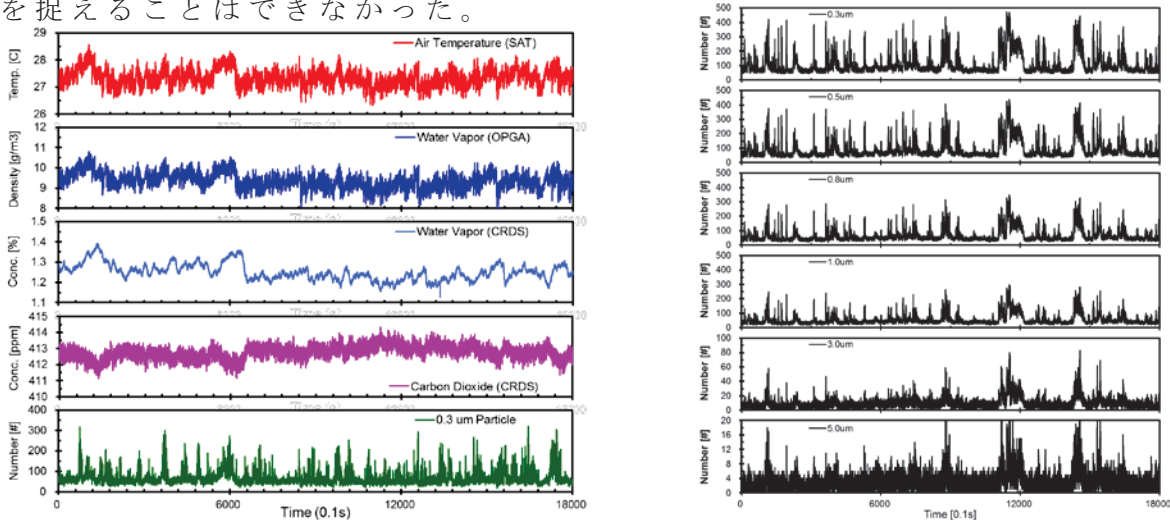


図2 大気中の気温、H₂O密度と混合比、CO₂混合比、0.3μm以上の粒子数密度変動(左)、粒径別に表した粒子数密度の変動(右)の観測例

まとめ

本研究は、宇宙地球環境研究所の共同利用機器「海上波しぶき光学粒子計」を利用し、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。1週間の観測期間中に幾度と強風を伴う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得ることができ、渦相関法における評価の精確性を示す指標となる大気乱流により生じる物理量変動の相似性について、波しぶき計において計測した粒子数密度の変動が、他の物理量の変動と相似性を示す結果を得た。一方で、粒子数密度の変動が、他の物理量間では変動が生じているにもかかわらず、生じない、また相似性がみられないといったデータもみられた。さらに、今回の観測において、吸引量の異なる2台の波しぶき計の並行観測を行い、粒径別にみると粒子数密度の絶対値また変動値の違いもみられた。後者については、放出量の評価誤差につながるため、今後、この要因についても明らかにしていく予定である。

成果発表

近藤文義, 小宮秀治郎, 登尾浩助, 相木秀則, 響田邦夫, 植松光夫, 塚本修: 微気象学的手法を用いた外洋域における海面フラックスの直接測定, 日本地球惑星科学連合2019年大会, AOS19-04, 幕張, 2019年5月

宇宙機搭載用高分解能イオン質量分析器の開発
Development of a spaceborne high-resolution ion mass spectrometer

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，高質量分解能を有した次世代型の宇宙機搭載用イオンエネルギー質量分析器の開発を行うことを目的としている．人工衛星及び観測ロケットを利用したプラズマその場観測では，3次元速度分布関数の取得と共に質量分析によるイオン種の同定もイオン計測には必須となっている．イオン種の情報はプラズマのモーメント等のパラメータ算出に対して精度を向上させるだけでなく，プラズマの起源を推定する上で有用となる．最近の地球放射線帯観測衛星「あらせ」に搭載されたイオン分析器にも質量分析器は備わっていて，数種類のイオンがそれぞれ独自の現れ方をするのが観測されている．

本研究で開発を目指すイオン質量分析器は，「あらせ」搭載の飛行時間計測（TOF：Time-of-flight）型質量分析器の発展型で，質量分解能は「あらせ」搭載品の $M/\Delta M \sim 5$ に対して， $M/\Delta M > 50-100$ を目指すものである．このような高分解能のイオン質量分析器は，太陽風・地球磁気圏のイオン種の完全に分別するだけでなく，存在比の低いイオン種の検出も可能である．比較的軽量のイオン種であれば同位体比計測も可能となるため，超高層大気物理の研究において地球化学的な考察も期待できる．

【研究方法】

前年度までに数値モデルを用いたイオン質量分析器イオン光学系の設計を完了していた．今年度は設計結果を元に試作モデルを製作し，真空槽内に設置してイオンビームを照射する性能試験を行った．複数のエネルギーにおいて， He^+ ， N^+ ， O^+ を用いて質量分析性能を検証した．

【研究結果】

1例として2keV O^+ ビームを使用した場合の質量分析結果を図1に示す．820ns程度の位置に半値幅で8ns以下の飛行時間分布が出来ている．この試験結果は数値モデルで得られた結果とほぼ等しく，設計通りの製作が実証されている．

【まとめ】

本研究成果は直近の探査計画として火星衛星搭載用イオン質量分析器開発への利用を予定している．2020年度からエンジニアリング開発が始まるため，今回の設計及び試験結果に基づき分析器の設計製造を行う予定である．

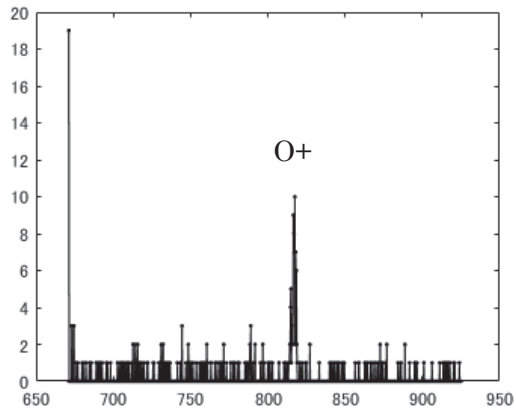


図1：2keV O⁺ ビームを用いた試験時の飛行時間分布

【成果発表】

- 出口雅樹，横田勝一郎，寺田直樹，松岡彩子，齋藤義文，火星衛星探査計画 MMX 探査機搭載用イオンエネルギー質量分析器 MS A の設計，日本惑星科学会 2019年 秋季講演会，京産大，2019. 10/7
- 横田 勝一郎，寺田 健太郎，齋藤 義文，西野 真木，清水 久芳，高橋 太，太陽風イオンによるスパッタリングを利用した小型天体の遠隔質量分析，地球電磁気・地球惑星圏学会 第146回総会・講演会，熊本，2019.10/23
- S. Yokota, Mass spectrometry in the ERG and other missions, Korea-Japan Space Weather Workshop 2019, KASI, 2019. 11/28
- 横田 勝一郎，齋藤 義文，西野 真木，浅村 和史，松岡 彩子，Secondary Ion Observations of Small Bodies for Remote SIMS Analyses, Symposium on Planetary Sciences 2020, 東北大，2020. 2/18
- 横田 勝一郎，月周回及び月面での質量分析，衛星系研究会2020，東北大，2020. 2/20

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】

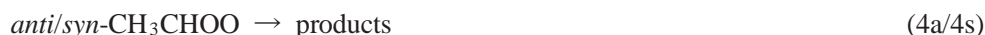
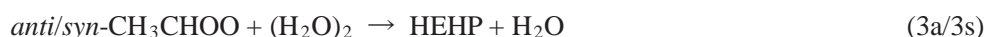
不飽和炭化水素のオゾン分解から生成するクリーギー中間体は、大気中で二酸化硫黄、水蒸気、有機酸などと反応して硫酸、ヒドロペルオキシド、オリゴマー体などを生成し、大気中の二次有機エアロゾル形成に影響を及ぼすが、その反応性に対する定量的な情報は少ない。本研究では、*anti* 体と *syn* 体の2種類の配座異性体を持つ C2 クリーギー中間体 CH_3CHOO をトランス-2-ブテンのオゾン分解反応から生成し、これらの有機酸、水蒸気に対する相対的な反応性を測定することで、クリーギー中間体の構造と反応性の関係を明らかにすることを目的とした室内実験を行った。

【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_4H_8 、オゾン O_3 、ギ酸 HCOOH 、水蒸気 H_2O 、およびシクロヘキサン C_6H_{12} 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_2Cl^- 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^{13} molecules cm^{-3} および 2.5×10^{13} molecules cm^{-3} とした。ギ酸は $0 - 9.2 \times 10^{12}$ molecules cm^{-3} 、水蒸気は $0 - 3.5 \times 10^{17}$ molecules cm^{-3} 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 $20.0 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 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_3CHOO) 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。今年度は、ギ酸をある一定濃度に固定し、水蒸気濃度を変化させて、それに伴う 1-ヒドロキシエチルヒドロペルオキシド HEHP の変化を CIMS で追跡した。これを 1 セットの実験として、固定するギ酸濃度を変えて、同様の実験を繰り返した。得ら

れた結果から速度論的な情報を得るため、2つの仮定をおいた。まず、これまでの実験的、理論的な研究から、*syn* 体と H₂O および(H₂O)₂の反応は非常に遅いことが報告されているので [1]、反応 2s および 3s を無視できると仮定した。また、解析を精度よく行うため、ひとまず *anti* 体と(H₂O)₂の反応 3a も、2a に比べて無視できると仮定した。以上の仮定の下で解析を行い、*anti* 体と H₂O との反応 2a の速度定数 k_{2a} に対する、反応 1a および 4a の速度定数の相対値を実験結果から決定したところ、それぞれ $k_{1a}/k_{2a} = (7.5 \pm 0.3) \times 10^3$ および $k_{4a}/k_{2a} = (3.5 \pm 0.2) \times 10^{15} \text{ molecules cm}^{-3}$ と求められた。

クリーギー中間体の直接検出による k_{1a} [2] および k_{2a} [3-5] の報告値から k_{1a}/k_{2a} を見積もると、本研究で得られた値より数倍大きい値、 $(2 \pm 1 \sim 5 \pm 4) \times 10^4$ となった。これは、Welz ら [2] が減圧条件 (4 Torr) 下で得た k_{1a} が、大気圧下ではより低くなっていることを示唆している。また、 k_{4a} に対して直接検出による報告値はないが、理論計算により報告されている値 [1] を用いると、 k_{4a}/k_{2a} は $(2.3 - 6.7) \times 10^{15} \text{ molecules cm}^{-3}$ と見積もられ、我々の結果はこの範囲の中に入る。ごく最近の反応速度研究 [5] は、*anti* 体と(H₂O)₂の反応が高い水蒸気濃度の下では無視できないことを報告しており、今後は、反応 3a を考慮に入れた実験と解析を行う予定である。

【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] Sheps et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **16**, 26701 - 26706, 2014.
- [5] Lin et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **18**, 28189 - 28197, 2016.

【成果発表】

川越博之, 坂本陽介, 猪俣敏, 廣川淳, 「クリーギー中間体が関与する大気反応過程の研究」, 第 24 回大気化学討論会, 蒲郡, 2019 年 11 月 5-7 日。

北極海洋域におけるメタン炭素同位体比を用いた水圏環境評価

亀山宗彦、北海道大学・大学院地球環境科学研究所

【研究目的】

ロシア北東部は陸域及び陸棚域において永久凍土が発達している。この永久凍土内には土壌有機物由来のメタンが多く蓄積されていることが知られている。近年の地球温暖化による永久凍土の融解によって、このメタンが大気に放出され、温室効果ガスであるメタンが地球温暖化に対する正のフィードバックをもたらす可能性が指摘されている。陸域における永久凍土の融解に伴うメタンの放出に関する研究は比較的行われているが、陸棚域の海底からの海水を通じたメタン放出に関する研究は近年ロシア北岸での研究結果が報告され始めたばかりであり研究例に乏しい (Shakhova et al., 2010)。最近の研究船を用いた大気観測では夏期にベーリング海峡付近で高濃度のメタンが観測されている。これは恐らく永久凍土中に含まれるメタンの一部を検出しているものであるが、それが陸域から大気中に放出されたものであるか、陸上の永久凍土から河川を通してもしくは大陸棚の海底から水塊中に放出され、それが大気中へ出たものであるか明らかではない。

本研究の目的は海水中のメタン濃度及び炭素同位体比の測定を通して北極域における陸域および陸棚域から海洋水塊中へのメタンの付加の程度を確認し、将来予測されている地球温暖化に伴う永久凍土の融解が及ぼす海水中及び大気中へのメタン放出量を推定することである。本目的を達成するために本共同研究期間内では北極海周辺で既に採取されている海水試料のメタン濃度及び炭素安定同位体比測定を行うものとする。

【研究方法】

本共同研究期間内では海洋研究開発機構「みらい」MR19-03C航海（2019年9月27日～11月10日）で採取された海水試料の分析を行った。本航海中ではベーリング海峡からチャクチ海、ポーフォート海といった北極海広域を水平・鉛直方向に網羅する約200試料の採取が行われた。本共同研究期間内ではそのうち半数の100試料の分析を行うことで海域におけるメタン分布の概要を把握した。

分析には名古屋大学大学院環境学研究科の生物地球化学グループの海水中メタン及び亜酸化窒素濃度・同位体比連続測定装置 (Hirota et al., 2010) が使用された。本装置は高純度ヘリウムを用いて試料海水中のメタンを含む微量気体を抽出し、目的種であるメタン及び亜酸化窒素のみを冷媒を用いて低温度（液体酸素・ドライアイス温度）に保たれた捕集管内に濃縮するページ&トラップ法と高感度安定同位体質量分析計を組み合わせた全自動の分析装置である。

【実施概要・結果】

2019年6月10日～16日の間で名古屋大学を訪問し、試料の分析を行った。本研究期間内で見込んでいた約100試料の分析を行った。自動分析装置では分析1試料あたり1時間を要するため、計画時点では9日間の分

析期間を設けていたが、申請者の研究室の研究生を同行させることで期間を短縮し実質5日間で分析を完了することができた。

分析の結果から、ベーリング海峡から広がる大陸棚における観測点で比較的高濃度の溶存メタンが検出された。また、炭素安定同位体比は外洋海水中で-55--50‰であった一方で、高濃度が検出された大陸棚の観測点では-65--60‰と比較的低い値であることが分かった。これは海底で生成した低い炭素同位体比を持つメタンが水塊に付加されていることを示している。さらに今後分析を進めることで広域のメタン濃度・炭素同位体分布を明らかにすることで、分布の特徴やその制限因子の解明に繋げる。

【引用文献】

Hirota, A., U. Tsunogai, D. D. Komatsu, and F. Nakagawa (2010) Simultaneous determination of $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of N_2O and $\delta^{13}\text{C}$ of CH_4 in nanomolar quantities from a single water sample. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 24, 1085-1092.

Shakhova, N., I. Semiletov, A. Salyuk, V. Yusupov, D. Kosmach, and Ö. Gustafsson (2010) Extensive Methane Venting to the Atmosphere from Sediments of the East Siberian Arctic Shelf. *Science*, 327, 1246-1250.

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現象である白色光フレアは、大量の加速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。また、白色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。これまでの研究からも、加速域における強い磁場の存在が示唆されている⁽¹⁾。これより本研究では、白色光フレアの成因を探るために、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、野辺山強度偏波計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て、加速域付近の磁場を統計的に見積もった。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(ν_{peak})が存在するが、 ν_{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⁽²⁾。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、 ν_{peak} より加速域近傍の磁場強度を見積もる統計解析を行った。この結果、WLFとNWLの間で ν_{peak} の分布に違いは確認できなかった。 ν_{peak} は放射領域の磁場強度だけでなく、フレアループ内の電子密度などによっても変化するため⁽²⁾、この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ることが分かった。

次に、ひので可視光磁場望遠鏡(SOT)で観測された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・青の可視連続光データより導出した。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(シュテファン・ボルツマンの法則が成り立っている)ことも確認できた。これより、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と考えられる。

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 and Shinsuke Imada, "White-light Emission and Chromospheric Response by an X1.8-class Flare on 2012 October 23", *The Astrophysical Journal*, Volume 891, Number 1, Article id.88, 2020
2. 鶴田康介, "白色光フレア発生に関わる多波長観測データの統計解析", 防衛大学校理工学研究科 修士論文, 2020年3月
3. 鶴田康介, 渡邊恭子, 増田智, Säm Krucker, "マイクロ波スペクトルの折れ曲り周波数と白色光放射温度の統計解析による白色光フレア発生条件の探索", JpGU Meeting 2019, Makuhari Messe, Chiba, Japan, 2019 May 26 – 30
4. Kyoko Watanabe, Kosuke Tsuruda, Satoshi Masuda, Säm Krucker, "Microwave Turn-over Frequencies, Emission Temperatures, and Impulsivity for White-light Solar Flares", AOGS 16th Annual Meeting, Singapore, 2019 June 28 – August 2
5. Kyoko Watanabe, Kosuke Tsuruda, Satoshi Masuda, Säm Krucker, "A systematic study of non-thermal emissions to search for characteristics of white-light flares and comparison with magnetic features", Hinode-13, The University of Tokyo, Japan, 2019 September 2 – 6
6. 渡邊恭子, 岩田陽介, 佐々木力椰, 北田昌也, 増田智, "太陽フレアにおける非熱的電子のスペクトルと磁場構造の関係", 日本天文学会 2019年秋季年会, 熊本大学黒髪キャンパス, 2019年9月11 - 13日
7. 鶴田康介, 渡邊恭子, 増田智, Säm Krucker, "白色光放射温度・磁場領域の統計解析による白色光フレア発生条件の探索", 日本天文学会 2019年秋季年会, 熊本大学黒髪キャンパス, 2019年9月11 - 13日
8. Kyoko Watanabe, Kosuke Tsuruda, Satoshi Masuda, Säm Krucker, "A Statistical Study of Magnetic Features of White-light Flares", 2019 AGU fall meeting, San Francisco, USA, 2019 December 9 – 13
9. Kosuke Tsuruda, Kyoko Watanabe, Satoshi Masuda, Säm Krucker, "Statistical Analysis of Magnetic Features of White-light Flares", PSTEP-4, Nagoya University, Japan, 2020 January 28 – 30
10. 鶴田康介, 渡邊恭子, 増田智, Säm Krucker, "白色光フレア発生に関わる多波長観測データの統計解析", 太陽研連シンポジウム, 国立天文台, 2020年2月17 - 18日
11. 渡邊恭子, 鶴田康介, 増田智, Säm Krucker, "白色光フレアと磁場に関する統計的研究", 日本天文学会 2020年春季年会, 筑波大学筑波キャンパス, 2020年3月16 - 19日

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、いわゆる「ポスト京（富岳）」の開発が2021年頃を目途に進められている。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「ポスト京」は、ARMという新しいCPUアーキテクチャを採用し、CPUが多数のコアから構成される。また同時演算実行数に効くSIMD幅の増大など現在存在するCPUと比べ大きな変更がある。そのため、既存のコードがこの新しいCPUをうまく利用できるのかは不明な状態である。

一方、これまで京の重点課題とされてきた分野では、この新しいCPU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このCPUに対して最適化する手法を研究し、ポスト京が利用できる際に備えることを目的とする。

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。現在ポスト京のCPUを利用することはできないが、理化学研究所にあるポスト京シミュレータを利用することで、ある程度の性能予測は可能であり、本研究でもこのシミュレータを利用した。シミュレータ利用に伴うNDAのため、詳しい結果を書くことは出来ないが、京コンピュータとは異なった最適化が有効であるということが確認できた。

また、研究代表者の所属部署においてポスト京と同様のCPUアーキテクチャを搭載した計算機システム（ThunderX2搭載サーバ）が導入され、それを利用した性能評価も行った。ポスト京のCPUとは異なり、同時演算回数が少なく、高速メモリも搭載していないが、現在主流のCPUであるXeonと比べて、8割程度の実行性能が確認できた。これらの結果により、ポスト京では新たな最適化が必要だが、CPUアーキテクチャが変わることによる性能低下は少ないことが示唆された。来年度はポスト京と同じ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、また、研究代表者の所属部署にも同CPUを搭載した性能評価用システムが導入されることになっており、これらを利用した性能評価、最適化を進めていく。

・学会発表

深沢圭一郎、加藤雄人、三宅洋平、南里豪志、Development of cross-reference framework for macro- and micro-scale simulations of the magnetosphere、STE シミュレーション研究会、2019年

・論文リスト

深沢圭一郎、惑星磁気圏 MHD シミュレーションコードによる ThunderX2 ARM プロセッサの性能評価、情報処理学会研究報告、2019-HPC-172(1)、1-6、2019.

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。2014年6月6日桜島噴火や今後アジア域で発生する火山噴火をターゲットにし、空白域となっている D 領域での高度変動により、電子密度変化を推定する。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。2019年度は、防災科学技術研究所の地震計ネットワーク(F-net)、京都大学防災研究所の空振計データも使用し、桜島火山噴火後の下部電離圏変動を調べた。

3. 研究結果

VLF/LF帯標準電波の送受信局および桜島の位置を図1に示す。JJY60kHz-TWNおよびJJI-TWNの伝搬パスのウェーブレットスペクトルを図2に示す。図2の赤の縦線は、NRLMSISE-00 中性大気モデルを用いてD領域電離圏での電波反射点に火山噴火によって励起した音波が到達する時刻を示す。JJY60kHz-TWNおよびJJI-TWN パスの振幅に噴火後04:12-04:30 UT にかけて 2-6 mHz の周波数成分が現れていた。表1に、VLF/LF波強度と地震計/空振計とのコヒーレンスで、95%有意水準を超えた周波数を示す。共通して、1.9, 4.2, および6.1 mHz の周波数成分が見られた。これらの周波数成分の音波の垂直波数を計算した

ところ、4.2 mHz は高度 102 km 以上はエバネッセントモード、それ以下は伝搬可能であり、音波による影響が考えられる。1.9 mHz は地表から高度 160 km までエバネッセントモードであり音波によるものではなく、6.1 mHz は音波がどの高度でも伝搬可能であり、音波による影響が示唆される。

成果発表

[1] Maruyama, K., H. Ohya, F. Tsuchiya, K. Nozaki, K. Yamashita, Y. Takahashi, H. Nakata, and T. Takano, Sub-ionospheric effects of volcano eruptions using VLF/LF standard radio waves, JpG U2019, Chiba (Japan), 29 May, 2019.

[2] Maruyama, K., H. Ohya, F. Tsuchiya, K. Nozaki, K. Yamashita, Y. Takahashi, H. Nakata, and T. Takano, Variations in the D-region ionosphere associated with volcanic eruptions observed by VLF/LF standard radio waves, URSI-JRSM2019, Chofu (Japan), 6 September, 2019.

[3] 丸山 慶, 大矢 浩代, 土屋 史紀, 野崎 憲朗, 山下 幸三, 高橋 幸弘, 中田 裕之, 鷹野 敏明, Sub-ionospheric effects of volcano eruptions using VLF/LF standard radio waves, 第146回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会、熊本県熊本市、2019年10月24日。

[4] 丸山 慶, 大矢 浩代, 土屋 史紀, 野崎 憲朗, 山下 幸三, 高橋 幸弘, 中田 裕之, 鷹野 敏明, 火山噴火に関連したVLF/LF帯標準電波強度変動, 日本大気電気学会第98回研究発表会、静岡県静岡市、2020年1月10日。

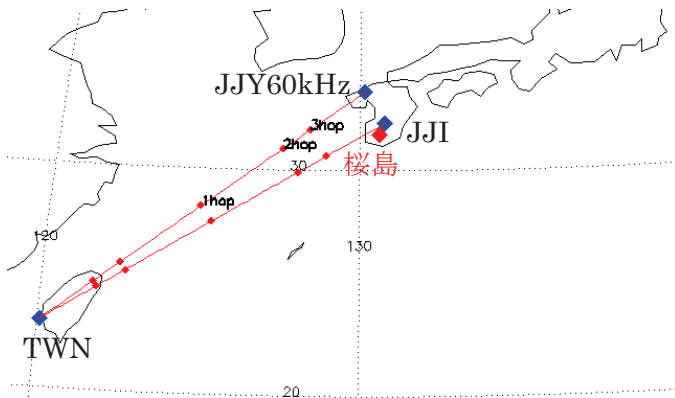


図 1 VLF/LF 帯標準電波の伝搬パスおよび桜島の位置関係

日本大気電気学会第98回研究発表会、静岡県静岡市、2020年1月10日。

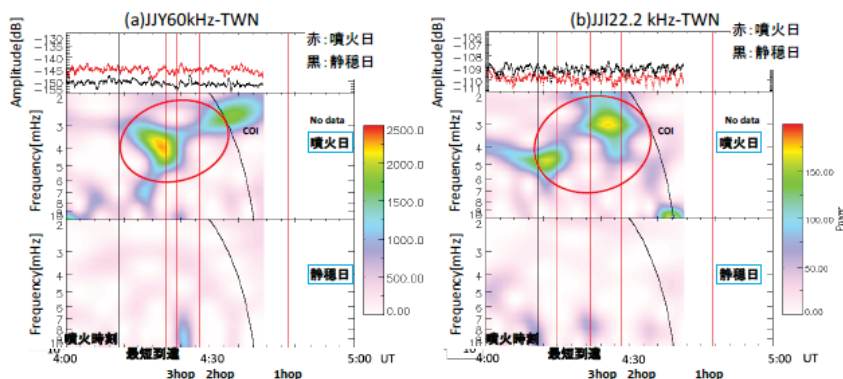


図 2 2014年6月6日 04:11 UT 桜島噴火前後の VLF/LF 波強度の

表 1 VLF/LF 波強度と地震計/空振計とのコヒーレンスで 95%有意水準を超えた周波数

		JJY60kHz-TNN	JJI
LF/VLF transmitter signals	JJY60kHz-TNN		
	JJI	1.9, 3.0, 4.2, 6.1, 9.1	
Seismic wave data F-net	SBR	1.5, 2.5, 3.9, 6.1, 7.8, 8.9	1.5, 3.4, 4.9, 6.8, 7.8, 8.2
	FUK	2.0, 3.5, 4.9, 6.1, 6.8, 7.9, 8.9	2.0, 3.4, 4.2, 8.2
	STM	1.5, 2.5, 4.9, 6.1, 7.8, 8.7	1.5, 4.0, 5.8, 7.9, 8.8
Infrasonic meter		1.9, 4.2, 6.1, 7.3	2.5, 3.8, 4.2, 5.5, 8.5

[mHz]

磁気圏電離圏電流伝送モデルを応用した中緯度地磁気誘導電流の研究
 Study of midlatitude GICs with the magnetosphere-ionosphere current transmission model

菊池崇、名古屋大学宇宙地球環境研究所
 海老原祐輔、京都大学生存圏研究所
 橋本久美子、吉備国際大学農学部

【研究目的と方法】

大規模磁気嵐時に、磁場変動が地面に誘導電流を流すために、地面の2地点間に電位差が生じ、電力送電網の変圧器間に準直流の電流が流れる(GIC: Geomagnetically Induced Current)。GICは電離圏に強いジェット電流が流れるオーロラ帯で強いことが知られており、1989年3月にはカナダと米国東部の送電網において9時間におよぶ停電が発生している。我が国においても、関東地域で1989年10月に80アンペア、2003年10月には100アンペアを超える電流が記録されている。これらのGICはオーロラ帯で記録されるGICに比べて決して無視できない。このため、大規模磁気嵐時に我が国で流れるGICを推定するモデルの確立が課題である。我々はこれまで北海道で計測されたGICが地磁気Y成分(B_y)により地中で誘導される電場と比例することを明らかにした(Kikuchi et al., JpGU2019; Kikuchi et al., Space Weather, under review)。特に、地中の電気伝導度が2層からなるモデルで計算した電場との相関がよい(相関係数 >0.9)ことを示した。

【2019年度の成果】

北海道GICの B_y 依存と海岸線効果の関係を調べるために、海岸線と送電線が東西に延びる山口県新山口変電所(SYG)でGIC測定をおこなった(図1)。初期結果を図2に示す。柿岡地磁気観測所(KAK)の地磁気 B_x , B_y (上段左)との相関を計算し、 B_x , B_y が誘導する電場 E_y , E_x を電気伝導度1層(上段右)および2層(下段右)としたモデルで計算した E_x , E_y との相関を計算した。SYGで計測されたGIC(下段左実線)は2層モデルで計算した誘導電場(下段左点線)と良く一致した($cc=0.95$)。しかし、1層モデルでの相関も0.93と高く、1層モデルでの再現性も良いことが示された。今後、東山口(図1)のGICについて、1層および2層モデルによる再現性を調べ、地磁気変動からのGIC再現モデルの確立を目指す。

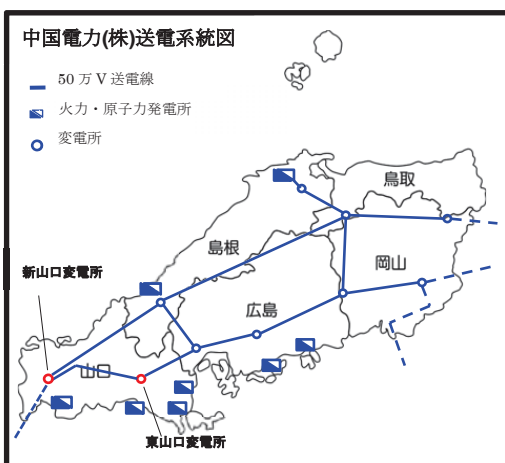


図1 中国電力送電網の東山口変電所と新山口変電所(赤印)。海岸線と送電線はほぼ地磁気緯度線に沿っており、地磁気成分依存性の海岸線効果を調べるのに適している。

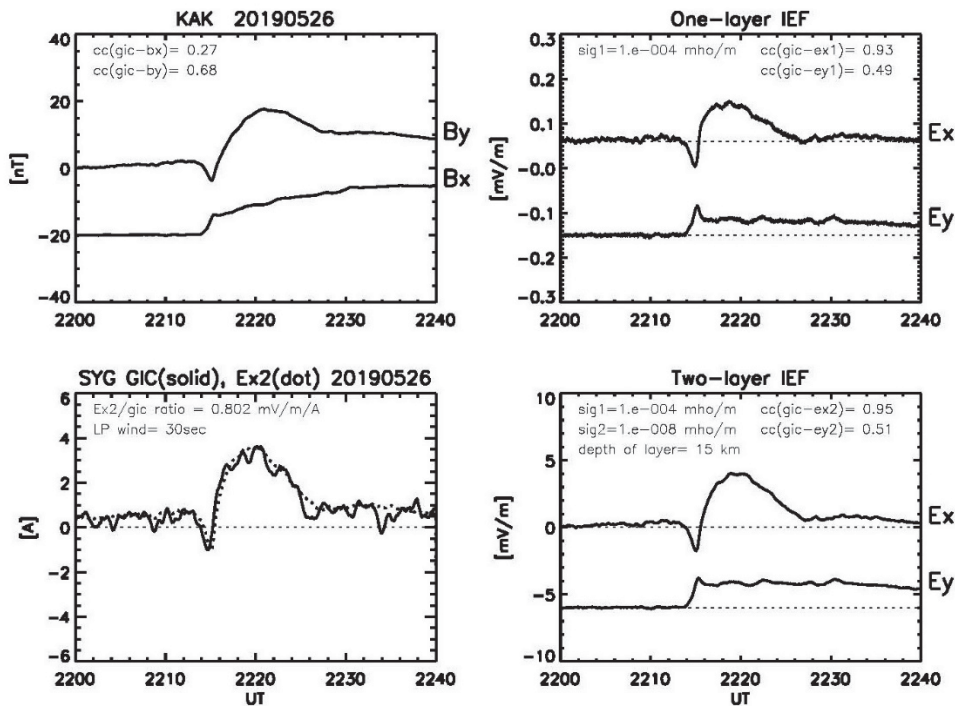


図 2. 地磁気急始(SC)時の Kakioka (KAK) の地磁気 Bx, By (上段左)、および新山口変電所 (SYG) で測定した GIC (下段左実線)。地中の電気伝導度 1 層モデルで計算した誘導電場、Ex, Ey (上段右)、および電気伝導度 2 層モデルで計算した誘導電場、Ex, Ey (下段右)。GIC と 1 層モデルの Ex と相関がよく ($cc=0.93$)、2 層モデルの Ex との相関はさらによい ($cc=0.95$)。

【本課題に関する成果発表】

Takashi Kikuchi (2020), Penetration of the magnetospheric electric fields to the low latitude ionosphere, *Advances in Ionospheric Research: Current Understanding and Challenges*, 4.1, Ed. C.S. Huang and G. Lu, John Wiley & Sons, Inc.

Kikuchi, T. Y. Ebihara, K. K. Hashimoto, and S. Watari, Reproducibility of the geomagnetically induced currents in Hokkaido with a two-layer conductivity model, *Space Weather* under review.

Hashimoto, K. K., T. Kikuchi, I. Tomizawa, K. Hosokawa, J. Chum, D. Buresova, M. Nose and K. Koga, Penetration electric fields observed at middle and low latitudes during the 22 June 2015 geomagnetic storm, *EPS* under review.

T. Kikuchi, Y. Ebihara, K.K. Hashimoto, S. Watari, Reproducibility of the geomagnetically induced currents in Hokkaido with a two-layer conductivity model, *JpGU2019*, May 26-30, 2019

Takashi Kikuchi, Penetration of the magnetospheric electric fields to the low latitude ionosphere -observations and transmission mechanism-, Seminar at AFRL, Albuquerque, USA .Jan. 16, 2020.

あらせ衛星観測データを用いた地磁気脈動の研究

Study for Ultra Low Frequency waves observed by 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】

太陽風やオーロラ爆発によって地球磁気圏内を伝搬する擾乱が、地球を取り巻く地磁気の固有振動と一致することによって、地磁気には周期 1 秒から 600 秒の正弦波が連続的に観測される。この地磁気に観測される正弦波は地磁気脈動と呼ばれている。地磁気脈動は周期やその形態によって分類されるが、本研究では放射線帯粒子の増減に関与する Pc5 脈動（周期 150–600 秒）とサブストームオンセットに伴う Pi2 脈動（周期 40–150 秒）に注目する。あらせ衛星のデータを中心として海外の内部磁気圏を飛行する衛星観測や SuperDARN や地上磁場観測などの地上観測データを組み合わせ、脈動の空間的な波動の特徴を調べ、放射線帯粒子やサブストームとの関連を明らかにする。

【方法】

2016 年 12 月に打ち上げられた、あらせ衛星は、軌道傾斜角 31 度という軌道を持つことから磁気赤道面から高緯度までの広い範囲を観測できる。この、あらせ衛星の軌道の利点を生かし、本年はあらせ衛星で観測される Pi2 脈動と Pc5 脈動の統計解析を行った。

Pi2 脈動の統計解析

地上低緯度磁場観測点から Pi2 脈動を選びだし、あらせ衛星の電場・磁場データにて観測される Pi2 脈動との相関を計算し、イベントリストを作成した。イベントリストのうち地上 Pi2 と相関の高いものを内部磁気圏で観測される Pi2 脈動とし、内部磁気圏での Pi2 脈動の存在確率、位相差、振幅の大きさの空間分布を調べた。

Pc5 脈動の統計解析

あらせの磁場データに観測される擾乱のパワーを FFT によって 5 分ごとに計算したのち、Pc5 の周波数帯で積分して、Pc5 脈動パワーの時系列データを作成した。Pc5 パワーの時系列データを太陽風データと比較し、速度や密度や動圧との関係を調べた。

【結果と考察】

Pi2 脈動の統計解析

地上磁場と相関が高い Pi2 は磁場の Compressional 成分が最も多く、観測頻度はプラズマ圏内部の磁気赤道面付近夜側が最も高かった。夜側プラズマ圏外の高緯度 (30-45 度) 付近でも Compressional 成分に Pi2 脈動が観測された。一方電場では、Pi2 脈動は radial 成分と azimuthal 成分に同程度観測され、プラズマ圏内部の磁気赤道面付近が最も観測確率が高く、磁気赤道から離れるに従い、観測確率は低くなる傾向が見られた。電場・磁場に見られる Pi2 脈動の位相差を計算したところおよそ 90 度となり、定在波の特徴を持つことがわかった。これらの結果は内部磁気圏で観測される Pi2 脈動はプラズマ圏の空洞共鳴によって引き起こされていることを示唆している。

Pc5 脈動の統計解析

Pc5 脈動のパワーを Dst 指数と比較したところ、Dst 指数が大きく変化するタイミングで Pc5 脈動のパワーも大きく変動することがわかった。一方、Pc5 脈動のパワーを太陽風速度と比較したが、過去の研究で報告されるような太陽風速度が早くなる場所で Pc5 脈動のパワーが高くなるという傾向は見られなかった。今後は、同時期に内部磁気圏の磁気赤道面での観測を行なっている RBSP 衛星で同様の解析を行い、あらせの結果と比較することで、Pc5 脈動と太陽風との関係をさらに詳細に調べていく予定である。

【成果発表】

Teramoto, M. et al., Pi2 pulsations observed by the Arase satellite inside and outside the plasmasphere, 2020 ERG Science and Space Weather Workshop, Taiwan, January 13, 2020.

Teramoto, M. et al., Pi2 pulsations observed by the Arase satellite inside and outside the plasmasphere, AGU Fall meeting 2019, San Francisco, USA, December 10, 2019.

寺本万里子ほか、あらせ衛星が観測したプラズマ圏内外の Pi2 地磁気脈動、地球電磁気・地球惑星圏学会第 146 回総会・講演会、熊本、2019 年 10 月 23 日

Teramoto, M. et al., Pi2 pulsations observed by the Arase satellite inside and outside the plasmasphere, JpGU2019, Chiba, Japan, May 29, 2019.

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，関西学院千里国際高等部
津高絵美，関西学院千里国際高等部
水野 亮，名古屋大学宇宙地球環境研究所

【はじめに】

国際社会では国連(2018)が中心となり「持続可能な開発目標 (SDGs)」という共通の目標を掲げられており、わが国でも持続可能な開発の実現に向けた努力が行われている。今後も国内および国際の両面において更なる取組を進めているところであるが、その中でも「地球」「教育」といったキーワードは最も重要視され野心的な目標要素の中核に据えられている。しかしながらSDGsにおける気候変動分野において、中等教育での取り組みではそれが科学的な内容を含むことから、遅れが目立つように思われる。

【研究目的】

本研究は、地球環境問題を取りまく様々な事象について高校生が総合的に理解するのみならず、主体的かつ継続的に問題解決のために取り組める教育方法の開発を主たる目的とする。特に地球環境を科学的本質から理解し、問題解決のための視点や方法や見出すスキルの養成に重点をおく。筆者らは平成29年度までに、地球温暖化やオゾン層破壊にかかわる問題を考えていくための教材研究ならびに教育方法・評価方法の開発と実践を行って、これらの研究では1ヶ月に満たない教育実施期間であった。よって、幅広い科学的基礎学力を持たせるための、より効果的で持続可能な教育的効果について詳細なデータが得られたと言いはし難い。そのため、本研究では教育実施期間を半年もしくはそれ以上と設定し、生徒の成長とともに適切な教育を持続させることがねらいである。これまでその効果が認められていたものと同様に、地球大気環境における国際共同研究の最前線にいる研究者から直接その基礎を学習することによって、グローバルリーダーとしての視点を培うことを重要目標とした。さらに、継続的な事前学習をすることによって生徒の意欲を引き出し、後続の学習や広がりにより効果をもたらすであろうと考えた。

【研究方法】

継続的な事前学習として、夏休み明けの8月下旬から本格的な文献輪読会をはじめた。事前学習日1回につき生徒(高校生)1人が順番に担当者となり、レジュメを作って解説していった。指導教員はそれに詳しい解説を入れていった。11月下旬に高校内で学習内容と成果の口頭発表を行った。短期的な直前学習として名古屋大学宇宙地球環境研究所への訪問に先立つ2週間前に、同研究所の水野が高校で講義した。その時、高校生には地球環境科学の基本的なキーワードについて調査・自主学習し、名古屋大学訪問時に発表する課題が課された。11名の高校生が名古屋大学を訪問し、課題を発表後フィードバックを得たほか、講義の後半部分や実験装置の見学なども行った。さらに、事後学習として訪問時に学んだことの復習や、関連する簡単な演示実験も行った。継続学習として、実験装置開発やプログラミングの学習を始めようとしたところであるが、COVID19感染拡大防止のための休校によって未実施となっている。本研究では、訪問時の記録をリフレクションの形で生徒に報告させている。内容は、「生徒の貢献度合いの自己評価」、「発見の記録」、「研究者や生徒同士でのコミュニケーション内容」、そして「感想」などである。これらのデータを自記式質問紙のデー

タとして、科学的アーギュメントの様相を分析するため、4種のコミュニケーションスタイル：①対話者間の相互に関連しない単一の理由を述べる、②自己の主張や他者の主張を関連づけたり精緻化したりする、③自己の主張が他者の示した主張と相容れない理由を述べながら反証する、④互いの主張を理解し共通基盤の観点から説明し直す、を用いて分析した。

【結果】

生徒のリフレクションからは貢献度合いの自己評価は65～88%、訪問時の講義内容はどの生徒も興味を持つものではあったが、専門的な部分もあり生徒は完全に理解できなかったことが読み取れる。一方、発見の記録は具体的になされており、第一線で活躍する科学者による講義で新たにわかった「分からないこと」を自分で学習するに足る情報は掴めている。コミュニケーションスタイルに関する記述からは、科学者による講義や生徒の課題発表の際に質問をしていた生徒とそうではない生徒によって、スタイルの多様性に違いがみられた。また、事前学習に多く参加していた生徒はより具体的に理解が深まった記述をしていた。

【考察】

生徒は日頃研究者に接する機会がなく、熱意を持った研究者に実際に会えたことが、嬉しかったと記録している生徒が多く、研究者に対する肯定的な印象を育て、将来の見通しが得られたことは生徒に対する第一の肯定的な影響であった。また、質問をしていた生徒の方が多様なコミュニケーションスタイルの記録を有しており、知識の共同的な構成が進んでいっていることが推察される。その場で質問を作るには、知識があるほど有利である。来年度に向けて、事前学習の段階で当日科学者に聞く質問を蓄積していくとさらに多くの生徒が多様なコミュニケーションスタイルを実践することにつながる可能性がある。他にも、高校の科学を学ぶ際に最前線の議論をする機会の有用性が見られた。誰もが答えを持たない問題について、他者や自身の中での科学的アーギュメントを経て納得のいく説明を導き出してゆく研究者の姿を見せられたことは、大学との共同研究だからこそ実現できたことである。

【結言】

持続的地球環境のために高校生ができる取り組みとして、事前学習の本格的な文献輪読会、学習内容と成果の口頭発表、直前学習として名古屋大学宇宙地球環境研究所の研究者による講義、同研究所訪問時の生徒による課題の発表、講義、実験装置の見学、事後学習として訪問時の講義内容の復習や、関連する演示実験を行い、学習プログラムを開発した。本年度の研究成果として、生徒の学習成果が知識面に留まらず、研究者から直接教授される機会や、研究室見学などの体験が将来の見通しを描くこと、さらに新たなことを学ぶ意欲につながっていかうとする姿勢がリフレクション記録の分析から明らかとなった。今後の課題として事前課題の際により具体的な質問を蓄積していくことが見えてきた。

【引用文献】

高垣マユミ, (2011) “認知的/社会文化的文脈を統合した学習環境のデザイン研究”, 心理学評論, vol. 54, no. 3, 2011.

United Nations, “About the Sustainable Development Goals - United Nations Sustainable Development.”, United Nations Sustainable Development, 2018, www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/. Accessed 27 Mar. 2020.

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】

サブメソスケールの大気現象観測を視野に入れて、鉛直方向（地表から上空まで）を重視したPM_{2.5}連続測定システムを構築し、性能検証のための実証実験を行う。松見豊研究室で開発された小型の低重量PM_{2.5}測定装置（図1、共同利用装置）をカプセルに封入して小型ドローンのペイロードとする（図2、共同利用装置）。測定カプセルを吊り下げたドローン（図3）は、地表に固定された観測所にはないメリット「場所を選ばない」「地表から上空まで連続計測可能」をもつ、機動的なPM_{2.5}飛行測定システムになる。

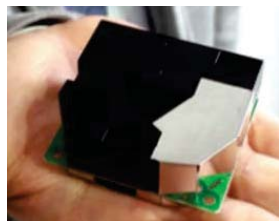
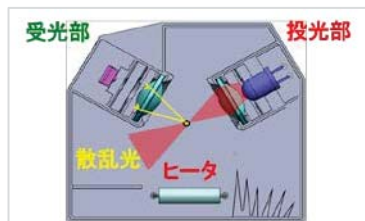


図1. PM_{2.5} 測定装置 左：構造図 右：外観



図2. 測定装置を封入したカプセルとドローン



図3. カプセルの吊り下げ



図4. PM_{2.5} 測定中のカプセル 左：高度 300m、右：高度 500m （ドローンカメラ撮影）

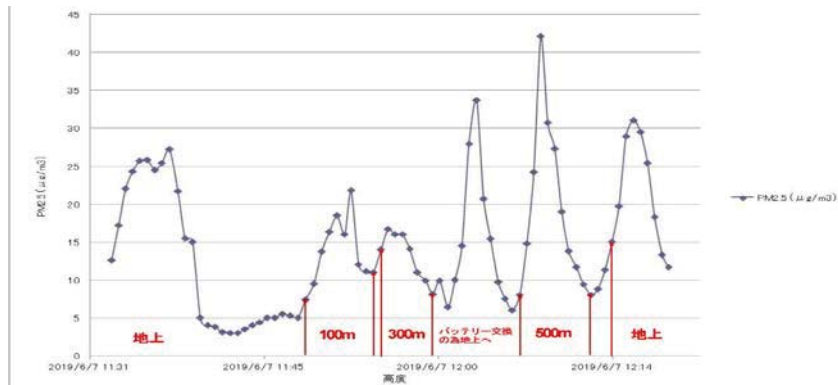


図 5. PM2.5 測定結果 (地表、高度 100m、300m、500m)



図 6. 上部マウント



図 7. 秋吉台「山焼き」の煙柱 (ドローン撮影)

【実証実験】

山口県「秋吉台」、長崎県「対馬金田城」、北海道「日勝峠」において、ドローン観測システムの実証実験を実施した。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 (高度0m) で測定を開始した。離陸後、100m、300m、500mの各高度において、5分ずつホバリングさせてPM2.5測定を行った (図3,4,5)。

【まとめと課題・展開】

実証実験では、本観測システムを使用して上空のPM2.5を測定し、鉛直方向の分布データを得ることができた。ドローンの下側に測定カプセルを配置したため、横風やドローンの気流を受けたカプセルやロープの揺動を抑えることが困難であった。改善策として、測定装置をドローンに上側に配置する上部マウント方式を採用することにした (図6)。現在はカプセル内のUSBメモリに測定データを記録しているが、テレメトリの導入を準備している。

竜巻や塵旋風など、大気中に微粒子が浮遊し視覚的にも観察しやすいサブメソスケール大気現象の3次的に観測・モデル化を目指す。予備段階として、秋吉台の「山焼き」イベントにおいて煙柱の空中撮影を行った (図7)。また、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中継通信システムの研究に着手した。

【成果発表 (口頭発表)】

岡本 渉, 眞部 広紀, 松見 豊, 中西 幸弘, 山崎 高幸 他 :
 火星UAVを想定した縦孔探査と大気観測のミッション構想、
 第63回宇宙科学技術連合講演会OS43火星の飛行探査 2019年11月8日

2 流体方程式系に基づく MMS 衛星データの解析

Analysis of MMS spacecraft data based on the frame of two-fluid equations

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

宇宙プラズマ中における異常抵抗の発生は、理論研究によってその存在が指摘されて久しいが、その一方で、観測的な検証は大幅に立ち遅れていた。しかし、近年打ち上げられた MMS 衛星で取得されたデータを 2 流体方程式に基づいて解析することにより、その解明に向け大きく道が開かれた。本研究では、太陽風磁場の向きに応じて太陽風起源のプラズマと磁気圏起源のプラズマによる非対称磁気リコネクションが起こる昼側の磁気圏境界に着目し、磁気拡散領域の構造と、その中で生起する物理過程、特に、励起された波動による異常抵抗の発生に焦点を当てて研究を実施した。

研究手法

上述の目的を達成するための鍵は、電子とイオンを別々の流体として扱う次のような 2 流体（運動）方程式を用いることにある。

$$n_e m_e \left(\frac{\partial \mathbf{v}_e}{\partial t} + \mathbf{v}_e \cdot \nabla \mathbf{v}_e \right) = -en_e (\mathbf{E} + \mathbf{v}_e \times \mathbf{B}) - \nabla \cdot \vec{p}_e + \mathbf{R}_e$$
$$n_i m_i \left(\frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial t} + \mathbf{v}_i \cdot \nabla \mathbf{v}_i \right) = en_i (\mathbf{E} + \mathbf{v}_i \times \mathbf{B}) - \nabla \cdot \vec{p}_i + \mathbf{R}_i$$

ここで、 m は質量、 n は密度、 \mathbf{v} はプラズマの並進速度、 e は電荷素量、 \mathbf{E} は電場、 \mathbf{B} は磁場、 \vec{p} はプラズマ圧力テンソル、 \mathbf{R} は波動粒子相互作用に起因する衝突項、さらに、各パラメータの添え字 e 、 i は電子、イオンに関する量であることを表している。

MMS 衛星は 4 機が立体的に配位されているため、衛星で観測されたスカラー量の空間勾配 (∇) やベクトル量の発散 ($\nabla \cdot$)、回転 ($\nabla \times$) などを差分法によって計算することができる。その特性を用いることによって、4 機の衛星の中心（重心）における電子とイオンに関する運動方程式の成立について調べることができる。その際、上式の中の衝突項 \mathbf{R} は観測データから直接求めることはできないが、他の項は観測値から直接計算できるため、 \mathbf{R} は上式の残差として求めることができる。さらに、その結果を MMS 衛星の波動データと比較することによって、励起波動に起因すると考えられる異常抵抗の存在を検証することが可能となる。

研究成果・考察

昨年度は、Burch et al. [2016] が Science 誌で報じた、MMS 衛星が電子拡散領域（Electron Diffusion Region: EDR）を通過したイベントに関する解析結果を報告した。そこで、今年度

は、さらに Webster et al. [2018] が JGR 誌で報告したイベントを加えて行なった解析結果を報告する。

図 1a は Burch et al.、図 1b は Webster et al. のイベントについて実施した解析の結果である。ともに、低域混成波帯 ($1/2 f_{LHR} < f < 3/2 f_{LHR}$) の波動強度 (青色) と、電子の衝突項を単位電荷と電子密度の積で割ったベクトルの絶対値 (赤色) が示されている。図から明らかなように、低域混成波帯の波動強度と電子の衝突項の大きさは非常に良い相関を示している。両イベントにおいて、当該の時間帯は、MMS 衛星がイオン拡散領域 (Ion Diffusion Region: IDR) の内側を飛行していた。この事実は、IDR おいて、静電的な低域混成波 (LHW) が励起され、それが異常抵抗の発生を引き起こしている可能性を示している。地球磁気圏中の無衝突磁気リコネクションにおいては、EDR 内での電子慣性あるいは、電子圧力テンソルの非対角成分で表される電子粘性に、磁場の拡散と融合の原因があるとされているが、その様な機構によって対向する磁力線を融合させるだけではなく、EDR を取り巻いて存在する IDR においても、ある一定量の磁力線が異常抵抗によって拡散され融合する可能性のある点が重要である。

さらに、イオンと電子の衝突項の時間変化を比較したところ、両者に対応するベクトルは、ほぼ反対方向を向いていた。衝突項は、異常抵抗、異常ローレンツ力、レイノルズ歪みで構成されることが示されるが、イオンと電子の衝突項が互いに打ち消し合うことを含め、得られた結果を理論的に考察することによって、衝突項は LHW による異常抵抗の効果を表していることが結論づけられた。

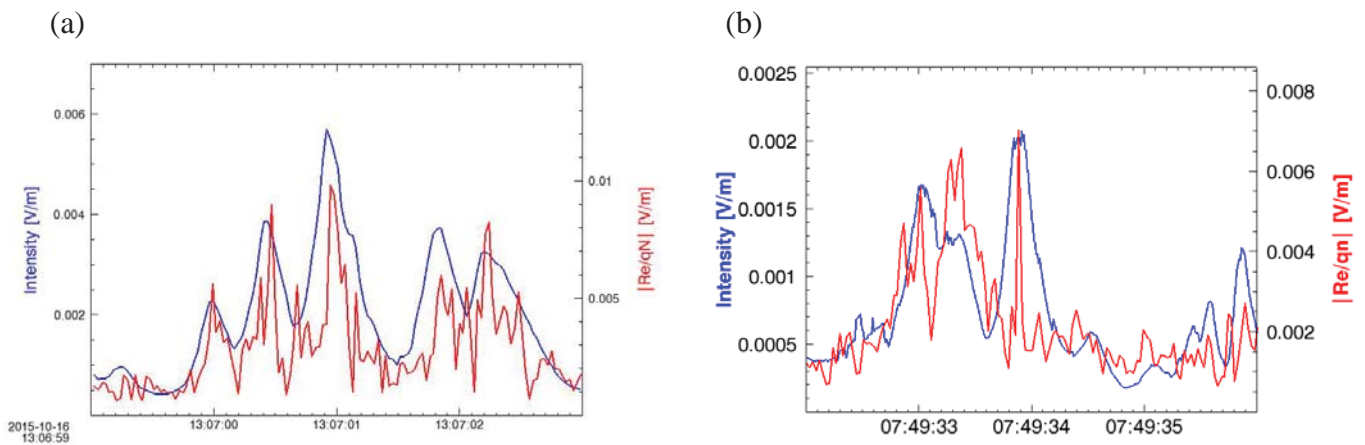


図 1. (a) Burch et al. [2016] のイベント、(b) Webster et al. [2018] のイベントにおける波動強度 (青色) と電子衝突項 (赤色) の比較

成果発表

1. Y. Kobayashi et al., Application of two-fluid equations to MMS data: A possibility of anomalous resistivity in the dayside magnetic reconnection, submitted to Geophysical Research Letters, Feb 2020.

極冠パッチに伴う磁場擾乱の観測的研究

Observational study of magnetic field variation associated with polar cap patches

細川 敬祐 (電気通信大学大学院情報理工学研究科)

★ 研究の概要

2005年1月より、極冠域に位置するカナダのレゾリュートベイ (磁気緯度 82.9 度) において、多波長高感度全天イメージャ (Optical Mesosphere Thermosphere Imagers: OMTIs) を用いた夜間大気光観測を実施している。今年度もこれまでと同様の観測を実施したが、CCD カメラにノイズが入る問題が発生していることが明らかになり、今後、現地に渡航して、対策を講じる必要性が生じている。レゾリュートベイでの観測に加える形で、2011年冬季より、京都大学/電気通信大学がノルウェーのスバルバル諸島で運用している全天大気光イメージャとの広域同時観測を実施し、極冠パッチや極冠オーロラの広域イメージングに取り組んでいる。スバルバルの全天大気光イメージャについても、ネットワーク経由での遠隔操作により、冬季の連続観測が問題なく実施できている。今年度は、冬至近くの期間に、557.7 nm と 630.0 nm の観測を短い間隔で繰り返す撮像モードを用いた観測を行い、欧州非干渉散乱レーダーとの同時観測を実施した。特に、2020年1月の昼間側の観測では、557.7 nm の画像中に昼間側の脈動オーロラが多く捉えられており、現在、その発生特性について解析を進め JpGUで発表を行うべく準備をしている。また、スバルバルでは、安価な小型カメラによる観測が国立局地研究所の小川泰信准教授が行なっており、大型の大気光カメラとのデータの比較を行なった結果を、Earth Planets and Space 誌に論文として発表した。2015年10月からは、レゾリュートベイのさらに北に位置するイウレカ (磁気緯度 89 度) において新規の大気光イメージャ観測を開始している。2017年12月にファンの故障に伴って冷却性能が低下し、光学観測ができない状態になったため、修理のためにカメラを日本に積み戻す作業を行い、メーカーによるファンの交換作業を実施したうえで、2019年10月から観測を再開している。観測再開後は、良好なデータを取得することができている。上述のように、レゾリュートベイとイウレカでの観測に関して機器のトラブルがあったものの、少なくとも2シーズンについては、北米域の2地点 (レゾリュートベイ、イウレカ) とヨーロッパ域 (スバルバル) の1地点の計3地点からの極冠域電離圏大気光計測を実施することができており、これらの光学観測機器によって観測された極冠パッチの内部を Swarm 衛星が飛翔した際に得られた磁場変動の解析を進めてきている。

★ 研究成果

イウレカにおける観測を新たに始めたことで、極冠パッチ近傍の微細な電流が作り出す磁場変動の解析を行うことが可能になった。イウレカ、レゾリュートベイにおいて、南向きの IMF のときに観測された極冠パッチについて、上空を飛翔する Swarm 衛星搭載の磁力計との同時観測事例を解析し、パッチの外縁部における磁場変動を確認した。予備的な検討では、1) 極冠パッチの外縁部に大きなプラズマ密度の勾配が存在するために流れる反磁性電流が作り出す磁場変動、2) 極冠パッチ内部の電気伝導度上昇に伴う分極がパッチの外縁部に流す沿磁力線電流によって作られる磁場変動、のいずれかが確認できることを予想していたが、現時点では、外縁部において系統的に有意な振幅をもつ磁場変動を検出するには至っていない。上記の研究と並行して、イウレカにおいて得られた 3 年分のデータを用いて、極冠パッチの輝度値の UT に対する依存性を調べたところ、イウレカのローカルタイムが夜の時間帯には、輝度値が小さい極冠パッチが多く発生するのに対して、昼側では極冠パッチの発生数は少ないが輝度値が高いものが多いことがわかった。また、イウレカでは、惑星間空間磁場 (Interplanetary Magnetic Field: IMF) の東西成分 (By 成分) が正の時に、極冠パッチが約 2 倍の頻度で発生していることも明らかになった。これは、IMF By が正の時には、夕方側の高い電子密度領域からプラズマを輸送するような極域対流パターンが形成されていることによって説明できると考えられる。この仮説の正当性を、SuperDARN レーダーのデータを統計的に解析することによって検証した。これらの結果は、極冠パッチの生成が、日照域の空間分布と極域対流の構造の双方に依存していることを強く示唆する。この結果は SuperDARN Workshop で報告されたあと、論文としてまとめられ、Polar Science 誌に投稿されている。これらに加え、これまでの極冠域での極冠パッチ、極冠オーロラの研究をまとめる形で 2 篇のレビュー論文を筆頭著者として執筆し、Space Science Review 誌に掲載された。これらの論文は、International Space Science Institute (ISSI) で取りまとめが行われている「Auroral Physics」というレビュー書籍として出版される予定である。

★ 学会発表、論文公表実績等

1. Hosokawa, K., M. Nagata, K. Shiokawa, Y. Otsuka, IMF By dependence of polar cap patch occurrence: statistics using airglow data from Eureka, Canada in comparison with SuperDARN convection patterns, SuperDARN Workshop, Fuji, Jun 6, 2019
2. Hosokawa, K., Y. Ogawa and S. Taguchi, Imaging of polar cap patches with a low-cost airglow camera: pilot observations in Svalbard, Norway, Earth, Planets and Space, 71, 2019
3. Hosokawa, K., K. Shiokawa, Y. Otsuka and S. Taguchi, What controls the luminosity of polar cap airglow patches? : implication from airglow measurement in Eureka, Canada, American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, USA, Dec 13, 2019
4. Hosokawa, K., Y. Zou and Y. Nishimura, Airglow Patches in the Polar Cap Region: A Review, Space Science Review, 215, 2019
5. Hosokawa, K., A. Kullen, S. Milan, J. Reidy, Y. Zou, H. Frey, R. Maggiolo and R. Fear, Aurora in the Polar Cap: A Review, Space Science Review, 216, 2020
6. Hosokawa, K., M. Nagata, K. Shiokawa and Y. Otsuka, What controls the luminosity of polar cap airglow patches?: implication from airglow measurements in Eureka, Canada in comparison with SuperDARN convection pattern, Polar Science, submitted

あらせ衛星を用いた地球内部磁気圏リングカレント
イオン圧力変動に関する研究

**Study on the evolution of ring current ion
pressure distributions using the ARASE spacecraft**

桂華邦裕、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 磁気嵐は、地球内部磁気圏に流れるリングカレントを規定するプラズマ圧およびその空間勾配の増加により発達する。プラズマ圧を担う粒子(リングカレントイオン)は数keVから数100 keVの水素および酸素イオンである。本研究では、あらせ衛星で得られるデータを主に用いてイオン圧の時間空間変動と質量依存を調査し、リングカレントイオンの生成に関連する磁気圏プラズマの加速および輸送過程の特徴を明らかにする。

研究方法・研究結果 本研究では、あらせ衛星搭載MEP-i粒子検出器で得られたイオンデータ (10-180 keV/q) を用いて、あらせ衛星が2017年に観測した2つの磁気嵐の主相におけるイオンエネルギー密度および、それに対して大きく寄与しているエネルギー帯について調査した。特に、近尾部領域 (静止軌道付近および以遠) について、質量と電荷が異なるイオン種 (H⁺, He⁺, He⁺⁺, O⁺, O⁺⁺) を比較した。その結果、より重いイオンが多くエネルギーを得ていること、同じ質量のイオンでは電荷が小さいイオンがよりエネルギーを得ていること、エネルギー取得率は電荷よりも質量に大きく依存すること、が明らかになった。

考察 近尾部内部磁気圏を含む磁気圏尾部には太陽風起源の電場が印加されている。イオンがこの電場ポテンシャルを横切ることによってエネルギーを得る場合、エネルギー取得量は質量に依らず電荷に正比例する。しかし、本研究で得られた上記の結果はこの性質に一致しない。この結果は、磁気圏尾部でイオン加速を引き起こす有効な電場が突発的あるいは局所的であることを示唆している。He⁺、O⁺⁺、O⁺の旋回運動や両極域低高度を往復するミラー運動に匹敵する時間空間スケールを持つ、サブストーム活動に伴う磁気リコネクションや地球向き高速流の時間空間発展が重要な役割を担っていると考えられる。

成果発表

- K. Keika et al., Ion energization in the near-Earth magnetotail observed by Arase, AGU Fall Meeting 2019, Moscone Center, San Francisco, December 9, 2019.
- K. Keika, Transport and energization of ionospheric ions in Earth's magnetotail: Recent multi-spacecraft observations, APPC 2019 14th Asia-Pacific Physics Conference, Kuching, Malaysia, November 18, 2019.
- K. Keika et al., Mass- and charge-dependent ion energization in Earth's magnetotail: Arase observations, SGEPS 2019 Fall Meeting, Kumamoto, October 26, 2019.
- K. Keika, Characteristics of ion kinetic energies dominating plasma pressure: Spatial distributions and mass dependence, Ion Composition of Sun-Earth System meeting 2019, Durango, Colorado, August 3, 2019.
- K. Keika et al., Oxygen-proton differences in ion energies dominating plasma pressure: Dependence on storm phases and solar wind drivers, JpGU Meeting 2019, Makuhari Messe, Chiba, Japan, May 29, 2019.

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・文理学部

1. 研究目的

ビーチロックは海浜堆積物が潮間帯において海水や陸水中の炭酸カルシウムによって海に侵食され、このため、その形成年代と標高なシーム変動や海岸侵食に注目された生物化石の年代は生物の死亡年代を示すのみであり、直接ビーチロックから採取した試料の年代を示すことができる。本研究においては、ビーチロックの膠結年代を直接測定すれば得ることができ、また生物化石表面に付着しているセメント物質（炭酸カルシウム）を物理的・化学的に分離する手法を確立し、分離したセメント物質の年代と生物化石の年代を比較検討することにより、ビーチロックの正確な膠結年代を決定する方法の開発を目的とする。

2. 研究方法

年代測定試料とする膠結物質は aragonite needles であり、顕微鏡下で分離しなければならぬ微量試料のため、AMS でしか年代決定はできない。有孔虫化石等の微化石も同様に AMS によらざるを得ない。しかし大型の貝化石や化石サンゴの年代決定は B 線法でも年代決定が可能である。本年度はビーチロックの存在が報告されている福井県越前海岸（東ほか、1982）、長崎県佐世保市（西村、1972）、沖縄県阿嘉島、座間味島および津波（小元、2005、2007）から試料を採取する。採取した試料は共同研究者の所属する日本大学文理学部で岩石カッターを使用して形状を整える。AMS 試料の調製は名古屋大学宇宙地球環境研究所において行う。試料の元素分析は研究分担者の所属する同志社大学理工学部に、また試料採取地点から採取した湧水および小河川水の分析は名古屋大学宇宙地球環境研究所に依頼する。上記とは別に試料の XRF（蛍光 X 線）分析を名古屋大学宇宙地球環境研究所に依頼する。

3. 研究結果

年代測定試料は 5 月に福井県越前海岸、8 月に長崎県佐世保市、10 月には沖縄県阿嘉島、座間味島、沖縄島の備瀬海岸および津波で野外調査を行い、越前海岸を除く 5 地点から採取した。採取した試料について 9 月に名古屋大学宇宙地球環境研究所において試料調製を行った。10 月に採取した試料は 12 月に日本大学文理学部で岩石カッターを使用して試料の形状を整えた。10 月に津波から採取した試料を除く全ての試料は試料調製を終えて、すでに石墨にして AMS による測定の順番待ちになった。 ^{14}C 年代測定以外の試料の分析状況は元素分析と XRF 分析は結果待ちである。湧水および小河川水の水質分析は完了した。

AMSによる年代測定結果が3月24日に届いた。その年代はすべて当初の予想年代と乖離した結果となった。その原因に関する検討は今後の課題であるが、測定結果にもとづき明らかになった事項は次の通りである。①長崎県佐世保市の海岸から採取したセメント物質は炭酸塩の含有量がきわめて低く測定不能であった。また膠結した砂礫（ビーチロック）の下位から採取した貝殻試料3個は+Modernとなった。②沖縄県阿嘉島から採取したセメント物質の年代は貝殻およびサンゴ試料の年代より古い。③座間味島のセメント物質の年代は貝殻試料やサンゴ試料の年代より新しい。④南西諸島で最古のビーチロックである沖縄県備瀬海岸のビーチロックの形成年代は7200 BPと報告されている（小元，2007）。その下位から採取した貝化石および砂質付着物，サンゴ化石の年代は，すべて上記の年代よりも新しく，年代が逆転した。

次年度に向けての課題として，①令和元年度に測定した試料の年代の検討。特に+Modern試料の多い原因の検討が必要である。②礫岩質ビーチロックに付着しているセメント物質の元素分析数を増やすこと。③大津波の影響が少ない海岸に発達するビーチロックを対象にして試料を採取し，同一層序から採取した試料の種別によってどのような年代差が生ずるのかを明らかにする必要があること。④以上の諸点について検討し，最終年度として3年間の研究を総括する必要がある。

4. 引用文献

小元久仁夫 2005年3月. 南西諸島から採取したビーチロックの ^{14}C 年代と安定同位体比($\delta^{13}\text{C}$)—測定資料とその分析—. 日本大学文理学部自然科学研究所「研究紀要」. **40**, 1-27.

小元久仁夫 (2007): 南西諸島で最古のビーチロックとその意義. 日本大学文理学部自然科学研究所「研究紀要」. **42**: 1-14.

田中好國 (2018) : 日本の温帯性ビーチロックの分布と特徴. 愛媛の地理, **25**, 37-51.

西村暉暉希 (1972) : 佐世保市にあるbeachrockと考えられる礫岩. 長崎県地学会誌, **17**, 17-18.

Stoddart, D.R. and Cann, J.R. (1965): Nature and origin of beachrock. *Journal of Sedimentary and Petrology*, **35**, 243-247.

5. 成果発表 (当該年度に行った口頭発表を含む)

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. 東北大学理学部. 2019年5月18日. 仙台市. 季刊地理学, **71(3)**, 136-137.

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}C 年代. 季刊地理学, **71(2)**, 82-88.

小元久仁夫・藁谷哲也・池田晃子・横尾頼子・塩見昌司 (2020): 宮崎県北部，島浦島南部の日井の浜に発達する礫岩質ビーチロックの ^{14}C 年代. 季刊地理学, (査読中)

小元久仁夫 (2020): 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}C 年代とその意義. 地学雑誌, (査読中)

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。これにより、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ため、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り、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 m²）にする拡張作業が進行中である。これら両観測に関する作業は近々完了する予定である。

【研究活動報告】

現時点で、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る。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っている。これを取り囲む外壁と天井も完成している（図 1）。その後、フロントエンド回路（信号増幅回路と波高弁別回路）とバックエンド回路の設置を行い、本格観測を開始する予定されている。新ミュオン検出器に向けて開発された、フロントエンド回路は、ストレージルームに置かれた比例計数管に新型フロントエンド回路が取り付けられ、試験が行われている。本年度の人的な活動としては、2019 年 11 月から 2020 年 1 月まで、本研究代表者の田中、および、



図 1 新ミュオン検出器（2019 年 11 月現在）。写真手前が北。建屋の壁や天井部の構造が完成している。この後、天井の上に吸収層の建設が行われる。

広島市立大学の2人の学生が交代で GRAPES-3 に滞在し、観測実験に立ち会った。同時期の12月に共同研究者の大嶋晃敏氏も GRAPES-3 に滞在し、観測実験に立ち会った。一方、愛知工業大学の小島浩司氏と中部大学の柴田祥一氏、大阪市立大学の川上三郎氏は、タタ基礎研究所（ムンバイ）に滞在し、インド側共同研究者らと論文のまとめ作業を行う予定であったが、世界的なコロナウィルスの影響により中止になった。また、2月から3月にかけて共同研究者であるタタ基礎研究所の S. K. Gupta 氏と P. K. Mohanty 氏が来日し、論文作成および今後の日印協力について議論を行なった。

本研究代表者が数回中部大学に出張し、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、2019年4月と6月にかけて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。そして、

【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6件の発表を行った。

【学術論文】

1. "Dependence of hadronic interaction models in atmospheric electric field simulations for GRAPES-3", B. Hariharan, et. al., Proceedings of Science PoS(ICRC2019), pp186
2. "Energy spectrum and composition measurements of cosmic rays from GRAPES-3 experiment", F. Varsi, et. Al., Proceedings of Science PoS(ICRC2019), pp449
3. "Simulation of atmospheric pressure effects on particle densities measured by GRAPES-3", M. Zuberi, et. Al., Proceedings of Science PoS(ICRC2019), pp502

【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(23)」、小島浩司、大嶋晃敏、田中公一他、日本物理学会 2019年秋季大会、19aT13-8
2. 「GRAPES-3 空気シャワーアレイ拡張の現状」、大嶋晃敏、伊藤信夫、田中公一他、日本物理学会 2019年秋季大会、17pT11-10
3. 「GRAPES-3 実験における大型 NaI 検出器の導入について(3)」、田中公一、大嶋晃敏、小島浩司他、日本物理学会 2019年秋季大会、17pT11-11
4. 「大面積高精度 muon 望遠鏡による方位別宇宙線強度変動の研究(24)」、小島浩司、大嶋晃敏、田中公一他、日本物理学会、第75回年次大会(2020年)、16pK17-12
5. 「GRAPES-3 空気シャワーアレイ拡張の現状について」、大嶋晃敏、小島浩司、田中公一他、日本物理学会、第75回年次大会(2020年)、18pK14-11
6. 「GRAPES-3 実験における大型 NaI 検出器の導入について(3)」、田中公一、大嶋晃敏、小島浩司他、日本物理学会、第75回年次大会(2020年)、18pK14-12
7. 「Temperature Dependence of NaI Detector Used for Radiation Observation」, Takuya Ueoka, Takuma Ueda, Koichi Tanaka, Akitoshi Oshima, The International Workshop on Electronics, Information and Communication (IWEIC2019), 8 Nov. 2019

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

三澤 浩昭, 東北大学・大学院理学研究科

[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、本研究では、①JSR の追加観測による長期変化(トレンド)の導出、②過去の JSR 観測で強度較正に用いていた電波星強度の再評価に基づく、高信頼度の JSR 強度の導出、③別周波数での 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、粒子エネルギーティクスも交えた変動要因の考察から、JSR 長期変動要因の査定を目的とする。

[研究方法] 上記目的達成のための具体的な研究方法は以下の通りである。

- ① ISEE 木曾観測施設の 327MHz 大型アンテナを用いた JSR 強度の追加計測。計測方法は、木星方向と、木星に近接する、強度較正用の或る電波源の方向を短時間に切替えながら交互に計測する方法で実施する。
- ② 電波星の絶対電波強度較正機能を持つ東北大学の VHF-UHF 帯大型アンテナを用いた、①の方法で JSR の強度較正に用いた(る)電波星強度の評価と、今回および過去に求めた JSR 強度の(再)評価を行う。
- ③ 研究協力者(D. Santos-Costa 氏(米国 SWRI)他提供の 1970 年代以降、および、当研究グループが実施の 1990 年代から最近までの 2.2GHz 帯の JSR 強度データと、①、②で得られるデータとの比較を通して長期変動の放射線帯粒子エネルギー依存性を確認し、長期変動要因の候補となる外因(太陽紫外線、太陽風)、内因(木星衛星イオ起源磁気圏プラズマ)の変動との関係を精査するとともに、粒子エネルギー変化に寄与する物理過程の査定、及び、木星放射線帯長期変動要因の考察を行う。

[進捗状況および 2020 年度の予定] 現在までの進捗状況と今後の予定は以下の通りである。

- ① ISEE 木曾観測施設のアンテナを用いた新規の JSR 強度計測については、観測機会の検討不足により実施に至らず、大きな反省点となった。次年度には確実に情報が得られるよう、観測計画を推敲中である。一方、1990 年代～2000 年代に観測した過去データの再検を行い、同期間に実施された 2.2GHz 帯の JSR 強度データと、長期的な変動傾向はマッチすることを見出した。本結果の最終確認は、②の結果も踏まえ、次年度に実施する。
- ② 東北大学の VHF-UHF 帯アンテナの受信系不調と、300MHz 帯の外來性広帯域人工雑音(RFI)の混入により、結果的に 2019 年度には①データの強度較正が不十分であった。次年度前半に改善出来るよう、現在、受信系改良と RFI 回避を図っている。尚、過去に JSR 強度較正に用いた電波星に対しては、①計測と同様に ISEE 木曾観測施設のアンテナでも再計測を行うことを検討しており、過去観測データとの比較から、電波星強度の永年変化の有無を確認してゆく。
- ③ JSR の変動をもたらす相対論的電子の変動過程の中で、JSR 放射によるエネルギー消失は高エネルギーの電子～高周波数帯の JSR 変動、波動-粒子相互作用によるピッチ角散乱によるエネルギー消失は低エネルギーの電子～低周波数帯の JSR 変動への寄与が想定される(de Pater and Goertz, JGR, 1990; de Pater et al., Icarus, 2003 他)。外因・内因に加え、それらの諸過程による高・低周波数の JSR 変動～高・低エネルギーの相対論的粒子変動への影響を量的に評価するために、動径拡散に基づく数値モデルの準備に着手した。次年度には、この数値モデルを用いて、①、②の定量的査定に基づく 300MHz 帯の JSR 長期変動と 2.2GHz 帯の JSR 変動を同時に説明しうる生成・消失パラメータ探索を実施し、放射線帯粒子長期変動の物理過程と変動要因候補の選別を行ってゆく。

[関連研究成果発表等]

- ・講演集録: Misawa, H. et al., Examination of the relation between Jupiter's inner magnetosphere and magnetic reconfiguration events, Proc. 21st Symp. Planet. Sci., Online Proc.: <http://pparc.tohoku.ac.jp/sympo/sps/>, 2020.
- ・学会・研究会発表: 日本地球惑星科学連合 2019 年大会(2019 年 5 月@幕張), 第 146 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会(2019 年 10 月@熊本), 第 21 回惑星圏研究会(2020 年 2 月@仙台)

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(geomagnetic storm)時には、環電流が発達し、静穏時には双極子磁場がしっかりしてあまり変動のない内部磁気圏に至るまで、磁気圏全域にダイナミックな変動が引き起こされる。環電流が内部磁気圏ダイナミクスに果たす役割は、磁気圏の形状そのものを変化させるだけでなく、磁気嵐時Pc5波動などに代表されるULF波動を励起することで、放射線帯電子の変動にも寄与すると考えられているが、環電流によるULF励起機構等には不明な点も多く、定量的な理解を得るには至っていない。世界的なジオスペース環境変動の理解を目指した動きの中で、データ解析・モデリング・シミュレーションの観点からは、観測と数値モデリングとの連携が重要となってきた。

宇宙嵐時のジオスペースのダイナミックな変動機構を理解するためには、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、2つの課題に焦点を絞って研究を進めた。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できない現象であり、世界的にみても独自性を持った取り組みである。計画初年度である本年度は、磁気圏尾部プラズマシートからのイオン入射も模した初期条件を与え、その後の高エネルギーイオンの時間発展をシミュレートすることで、ドリフト-バウンス共鳴による波の励起条件を調べた。その結果、ピッチ角が90°付近のイオンはドリフト共鳴によりPc5帯のULF波動を、より磁力線に沿ったピッチ角を持つイオンはドリフト-バウンス共鳴によりPc3-4帯のULF波動を各々励起することが明らかとなった。

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、宇宙嵐時に限定的に環電流域を含む磁気圏の広い領域で観測される分子イオンに着目し、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行った。2017年9月8日の磁気嵐中の同時観測データを解析した結果、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が示された。また、低高度からのイオンの上向き輸送を安定的に引き起こすためには、電離大気と中性大気が類似の速度を持っていることが重要であることが示唆された。

ERG衛星搭載中間エネルギー荷電粒子観測器のデータ解析
Data analyses on medium-energy charged particle 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。

【研究内容・結果】

本年度は、ERG衛星搭載中間エネルギー粒子分析器の観測について、(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)を議論した。オンラインでの定常的な打合せに加え、学会・研究集会とひもづけた直接会合の場も設け、緊密な情報共有を図った。

その結果、放射線帯領域のロスコーン内の中間エネルギー電子が赤道近傍で急増し、北向き電子は $MLAT > -10^\circ$ 、南向き電子は $MLAT < 10^\circ$ のみでロスコーンが著しく埋まる、という統計的結果を示した(図1, Kasahara et al., 2019, GRL)。これは、中間エネルギー帯電子のコーラス波動によるピッチ角散乱が $|MLAT| < 10^\circ$ で集中的に起こっていること、そしてその散乱の程度が、非線形理論からは必ずしも自明とは言えないstrong diffusionの水準に、実際に達していることを示す成果である。このほか、中間エネルギーイオン質量分析器・電子分析器のデータを用いて、複数の解析結果を論文として出版した。

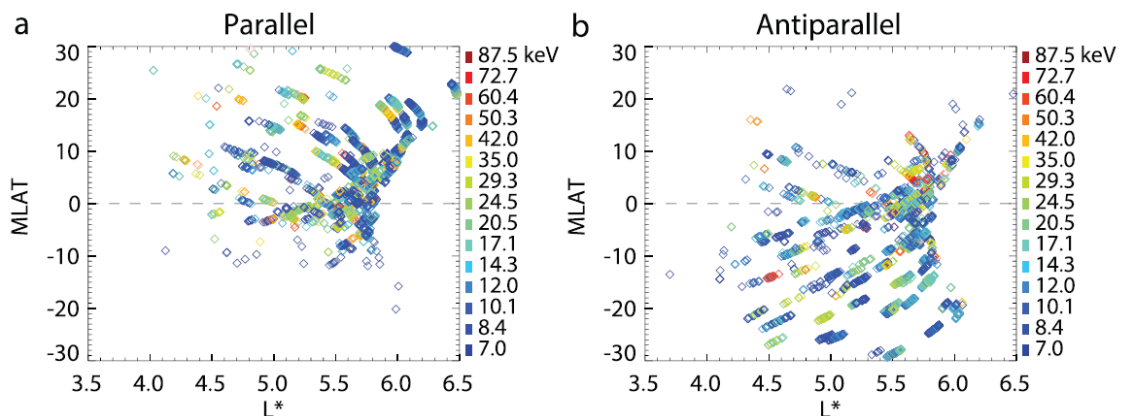


図1：ロスコーンの埋まるイベントの空間分布。

【発表成果】

- 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", *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2019GL085499, 2019.
- Liu, N., Z. Su, Z. Gao, H. Zheng, Y. Wang, S. Wang, Y. Miyoshi, I. Shinohara, Y. Kasahara, F. Tsuchiya, A. Kumamoto, S. Matsuda, M. Shoji, T. Mitani, T. Takashima, Y. Kazama, B-J. Wang, S-Y. Wang, C-W. Jun, T-F Chang, S.W.Y. Tam, S. Kasahara, S. Yokota, K. Keika, T. Hori, and A. Matsuoka, "Comprehensive observations of substorm-enhanced plasmaspheric hiss generation, propagation, and dissipation", *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2019GL086040, 2020.
- Kistler, L., C. Mouikis, K. Asamura, S. Yokota, S. Kasahara, Y. Miyoshi, K. Keika, A. Matsuoka, I. Shinohara, T. Hori, N. Kitamura, P. Steven, I. Cohen, D. Delcourt, "Cusp and Nightside Auroral Sources of O⁺ in the Plasma Sheet", *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2019JA027061, 2019.
- Seki, K., K. Keika, S. Kasahara, S. Yokota, T. Hori, K. Asamura, N. Higashio, M. Takada, Y. Ogawa, A. Matsuoka, M. Teramoto, Y. Miyoshi, and I. Shinohara, "Statistical properties of molecular ions in the ring current observed by the Arase (ERG) satellite", *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2019GL084163, 2019, [Editors' Highlights in Eos] .
- Imajo, S., M. Nose, S. Kasahara, S. Yokota, A. Matsuoka, K. Keika, T. Hori, M. Teramoto, K. Yamamoto, S. Oimatsu, R. Nomura, A. Fujimoto, I. Shinohara, and Y. Miyoshi, "Meridional Distribution of Middle-energy Protons And Pressure-Driven Currents in the Nightside Inner Magnetosphere: Arase Observations", *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2019JA026682, 2019.

中性粒子質量分析器の開発 Development of neutral particle 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】

地球の大気が超高層領域を通じて宇宙空間に流出している事実はよく知られているが、その流出メカニズムについては諸説あり、観測に基づく定量的な理解には至っていないのが現状である。これまで宇宙空間における流出イオンの観測は多く行われてきたが、それらは流出の結果を見ているようなものであり、流出を引き起こす現場の物理過程に迫りきれていない。また、これまでのイオン観測は、質量分解能が粗く、窒素と酸素の流出の違いを議論できるようなデータは限られている。この現状を打破する一つの鍵は、超高層空間の根元における中性粒子の観測である。中性粒子の密度、温度、流れは大気流出を規定する基礎的なパラメタであるため、その精密計測は非常に重要である。また、高質量分解能の観測により窒素、酸素を分離してその変動の差異を調べる事は物理過程の大きな制約となるほか、同位体比を詳しく調べる事で、時間軸を遡った過去の大気進化の歴史を紐解く事も可能になる。一方、我が国では、これまで中性粒子質量分析器の飛翔体搭載実績が極めて乏しい。そこで本研究では、(1)名古屋大学で進めている、速度分布計測可能な分析器と、(2)東京大学で準備している、高質量分解能型質量分析器および電離機構部の開発を効率的に進める事を目的とし、設計・製作・試験作業を協力して実施する。開発自体には、科研費等の資金獲得が不可欠であるため、そのための打合せ等も、本課題のスコープの一つである。

【研究内容・成果】

開発を東京大学、名古屋大学でそれぞれ進めたほか、その内容や実験設備整備、および競争的資金獲得に関する打合せを実施した。高質量分解能型質量分析器については、オービトラップ部前段のイオン時間収束部の試作・試験を実施し、 $< 1\mu\text{s}$ 程度の十分短時間の中にイオンをオービトラップ部に注入できることを実証した。また、電離機構部についても試作試験を実施した。電離機構部については、イオン電流が予想よりも1-2桁程度低く、設計時には想定していなかったフィラメントの位置ずれが問題になっていることがわかった。この部分を考慮し、修正を加えた試作機を現在設計中である。

【発表成果】

- 川島桜也, 笠原慧, 齋藤義文, 横田勝一郎, 平原聖文, 杉田精司, "In-situ太陽系探査を目指したOrbitrap質量分析器の開発", JpGU, 幕張, 2019年5月.
- 川島桜也, 笠原慧, 齋藤義文, 横田勝一郎, 平原聖文, 杉田精司, "太陽系探査を目指したOrbitrap型質量分析器の開発", 惑星科学会, 京都, 2019年10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, "Development of an Ion Source for Future Solar System Explorations", JpGU, オンライン開催, 2020年5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)で砕波して運んできた運動量を解放することで局所的あるいは全球的な温度場・風系場の形成に貢献している。特に、小スケール・短周期の大気重力波は、より多くの運動量を輸送すると指摘されており(Fritts and Vincent, 1987, JAS; 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。

初年度の2019年度は、2018年1月20日に大気光で観測された大気重力波構造(水平波長37 km, 位相速度85 m/s, 周期7分)をライダー温度データから抽出することを試みた。大気光観測視野内において、1分分解能のライダー観測では5方向すべてのビームで大気光観測と同程度(周期7分程度)の温度変動を捉えることに成功した。また、ライダーの鉛直方向ビームで得られた鉛直風速変動と、大気光観測で得られた大気重力波のパラメータおよびライダーによる水平風速場から重力波の線形理論を用いて算出された鉛直風速変動を比較した結果、変動振幅はほぼ同程度であり、その時間変化も類似していた。これらの結果から、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。しかしながら、5方向のライダーデータのみから位相速度、水平波長を同定することは今回観測された波動のスケールとライダービームのジオメトリから困難であった。今後は、大気光とライダーの同時観測から水平波長70-80 km程度の大気重力波イベントを探し、ライダー観測のみから小スケール大気重力波の同定とパラメタリゼーションを試みる。

成果発表:

Suzuki, S., and S. Nozawa, Observational evaluation of temperature and wind perturbations associated with small-scale gravity waves, SGEPS 2019, 熊本, 2019年10月24日。

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、搭載イメージャーにより可視と紫外の2波長領域で高度数千kmからリモートセンシングが行われる計画である。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開発能力向上が不可欠である。本研究は、これに必要な検討・基礎開発を国内共同研究者と推進する。2019年度は、本課題の3年計画の2年目である。

【研究方法】

紫外オーロラ撮像装置の開発に関連して、本研究では共同研究者と協力して以下の課題に取り組む。(1) FACTORSの科学目的に最適化した紫外撮像装置の仕様検討、(2) 紫外130-200nmのFUV帯に感度を持つCCDまたはCMOS2次元アレイ検出器、(3) FUV帯に特化した光学系、(4) 検出器読み出し・駆動エレクトロニクスの検討。

計画の2年目である2019年度は、(2)の紫外線検出器の課題に取り組む。特に、紫外線2次元検出器として、高圧を用いるMCPとCCDを組み合わせたICCDにするか、高圧を用いないCCDもしくはCMOSとするかを検討する(山崎・坂野井)。加えて、課題(3)の紫外FUV域に特化した光学系の設計を行う。本課題申請に関連し、2015-2016年度にISEE国際共同研究「衛星搭載イメージング光学系用 バッフル・ベーン的设计と開発」(代表者:坂野井健)において、衛星搭載紫外撮像装置の検討を行ってきた。この際、米国UCバークレー校Harald Frey氏ならびにコロラド大学Nick Schneider氏らと研究打ち合わせを行い、大型となる分光器ではなく小型軽量となるイメージャーのほうがFACTORSに相当であると判断された。本年度の研究では、これをさらに進めて、理学目的と整合的な光学設計を具体的に検討する。

また、オーロラや大気光観測波長を選択するための紫外用狭帯域バンドパスフィルターの情報収集を行う。さらに、これらの紫外カメラ設計と並行して、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(平原・浅村・三好)。本研究費は、この会合に必要な旅費と、解析・検討結果を保存するためのHDD購入のために用いる。

【研究結果】

課題(2)について、本年度の共同研究者ならびに米国NASAのIMAGE・ICON衛星等で紫外イメージャー・分光器の開発実績をもつUCバークレー校のHarald Frey博士との協議の結果、高圧を用いない紫外CCDもしくはCMOSを採用することとした。この方針により、国内ならびに国内メーカーとコンタクトをとり、複数回技術会合を開催し、検討を重ねた。この結果、130-200nmのFUV帯における感度、有効画素数、ノイズ、読み出し速度など、光学設計に有用な具体的な技術パラメータを知ることができた。今後、詳細な装置設計のために、検出器の選定を具体的に進める必要がある。

課題(3)について、本研究と関連する2015-2016年度にISEE国際共同研究において、紫外波長帯で有効なミラーのみで構成される対物光学系の検討をすすめ、長さ17cm以下に収まる広視野(45° x45°以上)の設計を達成していた。しかしながら、2019年度のFACTORSのロケット打上げ後の衛星軌道投入検討より、当初案のような昼夜太陽同期軌道ではなく、軌道面の地方時が時々刻々変化していく軌道となる可能性が増した。この軌道では、衛星日陰観測時間が低下するため、日陰時のみ観測の可視カメラの運用が限定的となる。FACTORSの理学主目的の一つはオーロラ微細構造の解明であり、可視カメラはこれに貢献する予定であったが、この観測時間は低下する見込みとなった。このような状況下で、紫外カメラは従来の45° x45°のような広角撮像ではなく、オーロラ微細構造を高速観測しうる

性能が要求されることとなった。この場合、紫外観測において空間分解能を向上させるとともに、検出効率をあげて高速撮像することが求められる。このためには、広角反射系ではなく紫外用レンズを用いた屈折系のほうが有利である。理学目的との整合性を共同研究者と検討した結果、紫外カメラには数km/pixel, 時間分解能を数フレーム/sec程度が必要とされた。この場合の視野は20° x20° 以下であるため、透過効率の高い紫外用CaF₂材料をもちいたコンパクトな屈折レンズ系で製作設計可能であることがわかった。本年度の研究では、この設計解を見いだした(坂野井)。今後さらに改良を行うことは不可欠であるが、紫外カメラで詳細・高速撮像の実現可能性に見通しがたちつつある。

また、紫外用狭帯域バンドパスフィルターについて国外業者と会合を行い、製作可能であることと技術仕様を知ることが出来た。今後、ジオコロナ(H Ly-alpha: 121nm) の迷光除去法に具体的な検討が必要である。さらに、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を解析し、画像・粒子同時観測成立性について検討した。この結果、全体の運用時間中に画像—粒子同時計測が成立する時間と、その時のカメラ視野と磁力線の傾きの角度を定量的に導出した。この解析結果は、今後の全ての機器の運用計画に役立つ。

【まとめ】

本年の研究により、理学目的達成に求められる紫外線撮像装置の仕様検討や、紫外検出器や光学系などの装置設計をすすめることができた。今後は、より具体的な理学パラメータと技術パラメータならびに製作可能性を検討し、装置設計を具体的に進めて技術成立性を向上するとともに、本年度達成できなかったジオコロナ除去法の検討などの課題について取り組む。

【成果発表】

- ・ 査読付き論文 (1件)

Nishimura, Y., M. R. Lessard, Y. Katoh, Y. Miyoshi, E. Grono, N. Partamies, N. Sivadas, K. Hosokawa, M. Fukizawa, M. Samara, R. G. Michell, R. Kataoka, T. Sakanoi, D. K. Whiter, S.-I. Oyama, Y. Ogawa, S. Kurita, Diffuse and Pulsating Aurora, Space Sci. Rev., vol 216, 4, <https://doi.org/10.1007/s11214-019-0629-3>.

- ・ 国際学会 (FACTORSの発表2件、関連オーロラ研究発表4件)

Sakanoi, T., M. Hirahara, K. Asamura, Y. Miyoshi, T-H. Watanabe, T. Nishiyama, S-I. Oyama, Y. Saito, K. Hosokawa, M. Yamauchi, H. Kojima, N. Kitamura, Y. Ogawa, A. Matsuoka, Design of Visible and Ultraviolet Imagers for FACTORS - A Future Satellite Mission for Understanding the Coupling and Transportation Processes in the Upper Atmosphere, AOGS 16th Annual Meeting, Suntec convention center, Singapore, 28 Jul -2 Aug, 2019.

Sakanoi, T., M. Hirahara, T. Tsuda, K. Asamura, Y. Miyoshi, T-H. Watanabe, T. Nishiyama, S-I. Oyama, T. Saito, K. Hosokawa, H. Kojima, N. Kitamura, Y. Ogawa, M. Yamauchi, A. Matsuoka, N. Yagi, M. Fukizawa, G. Ishizawa, Visible and ultraviolet imagers for auroral and airglow observations by FACTORS - a future satellite mission for understanding the coupling and transportation processes in the upper atmosphere, JpGU 2019, Makuhari Messe, Chiba, 26-30 May 2019.

- ・ 国内学会・シンポジウム (FACTORSの発表4件：うち3件を以下に列举、関連オーロラ研究発表6件)

平原 聖文, 齋藤 義文, 小嶋 浩嗣, 浅村 和史, 三好 由純, 北村 成寿, 坂野井 健, 宇宙地球結合系探査計画「FACTORS」 FACTORS衛星によるオーロラおよび宇宙から地球へのエネルギー流入過程の観測計画検討, 第20回宇宙科学シンポジウム, 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, 相模原, Jan. 8-9, 2020.

三好 由純, 浅村 和史, 坂野井 健, 平原 聖文, 渡邊 智彦, 西山 尚典, 海老原 祐輔, 細川 敬佑, 小川 奏信, 塩川 和夫, 八木 直志, 吹澤 瑞貴, Park InChun, FACTORS-領域間結合研究チーム, FACTORS計画におけるイオン加速, 関連計測機器の検討状況, 第20回宇宙科学シンポジウム, 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, 相模原, Jan. 8-9, 2020.

坂野井 健, 八木 直志, 平原 聖文, 浅村 和史, 三好 由純, 大山 伸一郎, 津田 卓雄, 齋藤 義文, 細川 敬佑, 渡邊 智彦, 山内 正敏, Park InChun, 小嶋 浩嗣, 北村 成寿, 松岡 彩子, FACTORS搭載可視・紫外カメラならびにオーロラロケットLAMP可視カメラによる微細-広域オーロラダイナミクス, 第146回 SGEPPSS総会および講演会 (poster), 熊本市国際交流会館, 熊本, Oct. 23-27, 2019.

凍土域における植生と水文気候の相互作用と経年変動に関する研究

Interannual variations and interaction between vegetation and hydroclimate in permafrost regions

鈴木和良(海洋研究開発機構)

【研究目的】

本研究では、気候－植生－陸面(水文気候因子)の相互作用を解明し、その10年程度の変動を把握することを目的とする。解析対象とする時間スケールは、地上観測データや衛星観測データが充実している2000年以降を対象とする。具体的には、現地観測データ、人工衛星データ(広域の植生指標・葉面積指数・バイオマスなど)、陸水貯留量変動に関する衛星データを用いて、主に北ユーラシアに焦点を当て、そこでの水循環と植生の時間的なラグやその関係の経年変動について検討する。さらに、シベリアの現地観測に基づく検証データによって、衛星観測の妥当性についても検討を加える。

【研究内容】

現地観測データ、再解析データ、衛星データ(MODIS、ALOS2、GCOM-C/W、GRACEなど)を用いて、植物活動や水文気候因子、炭素収支の指標を抽出し、大陸スケールでの相互相関について分析する。さらに、現地観測データに基づきその検証を行う。各種パラメータの経年変動に対する温暖化の影響や相互作用についても考察する。

【研究計画】

- 令和元年度:各種観測データの経年変動に対するラグ機構と植生や水・炭素循環の変動について、セミナー形式の意見交換を行う。
- 昨年度の一般共同研究の成果を論文として取りまとめる。

【2019年度実施概要】

1. セミナー形式の意見交換

4件の話題提供が行われた。その概要を以下に示す。

- 「北東ユーラシアにおける夏季降水量の長期変化傾向」金森大成(名古屋大学)

d4PDFを用いた過去再現実験と温暖化実験との比較から、シベリア域における降水量変動解析とその地理的分布特性を解析した。降水量特性のシベリア域における東西パターンの変化や南からの水蒸気移流の効果が重要という指摘であった。ただし、d4PDFの過去再現実験データと再解析データとの比較から、両者の傾向が異なっていることが分かっている。

- 「SENTINEL-1 データを用いた永久凍土融解による地表面変動」細谷篤志(千葉大学大学院)

マイクロ波合成開口レーダーによる観測データを用い、シベリア域における永久凍土融解に伴う地形変化を分析した。様々な要因による誤差を取り除き、地形変化を抽出することの問題点が指摘された。

- 「衛星降水量データからみた東シベリアの夏季降水特性」 飯島慈裕(三重大学)

JAXA の GPM プロジェクトの一環として、衛星降水量の検証を報告した。現場データは空間的に限定されるため、領域気候モデル WRF を用いた降水シミュレーションを行っている。その結果から、WRF の地表面からのフラックスを 0 と仮定すると、モデルの再現性が悪くなるという結果が示された。

- 「同位体トレーサーモデルによる水循環の成分分離の試み」 朴昊澤(JAMSTEC)

同氏の開発している陸面生態系モデル CHANGE に、同位体トレーサーを導入することで、地表面における水循環構成の成分分離の試みが示された。例えば、土壌水分の鉛直プロファイルに、降雨と降雪の寄与がどの程度あるのかや、古い水と新しい水を区別することの利点が述べられた。

- 「大陸規模融雪の早期化とシベリア 4 大河川の流出変動」 鈴木和良(JAMSTEC)

大陸規模融雪の早期化とシベリア 4 大河川の流出変動、コリマ川における流出変動解析、ならびにマイクロ波リモートセンシングによる水循環変動の監視と評価についての話題提供を行った。コリマ川流域での水循環解析から、雪氷変動やオホーツク海における海水変動とコリマ川の降水量変動が関係している可能性を指摘した。

2. 今後のシベリア域における研究展開に対する総合討論

まず「作業仮説や課題」として以下のものが挙げられた。

- 積雪変動と夏の小雨: 大気循環場の影響, 極端現象の将来予測.
- 長期または周期的変動: AO が正, 年々変動と温暖化の影響, 2010 年以降の変化に注目すべき.
- オビ川流域の長期変動: 観測データに基づく変動抽出が不可欠.
- 大スケールの現象と小スケールの現象: 流域単位, 陸域貯留量に注目した解析. CMIP6 を活用.

次いで「科学的問い等」については以下のポイントが挙げられた。

- 植生変動と水循環の関係は不明瞭: 植生変動が緩慢なため, 蒸発散推定に大きな誤差(機械学習, リモンセンの活用が必要)
- 過去~現在までの変動: ティッピングポイントに注目.
- 上層と下層植生の分離
- 朴さんのモデルに集約; マルチモデルアンサンブルや全球モデルと異なりプロセスを詳細に再現可能.

3. 論文への取りまとめ

成果発表の論文 2 として取りまとめ, 現在投稿中である。

成果発表

1. 鈴木和良・松尾功二 (2020), GRACE による陸水貯留量変動推定と水文科学分野での応用, 日本水文科学会誌, 50 巻 1 号, 1-15.
2. Suzuki, K., T. Hiyama, K. Matsuo, K. Ichii, Y. Iijima, and D. Yamazaki (2020), Accelerated continental-scale snowmelt and ecohydrological impacts in the four largest Siberian river basins in response to spring warming, Hydrological Processes, 査読中.

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の放射性炭素濃度は、環境中での炭素動態、特に人為起源炭素の循環の理解や水の年代測定にとって重要な指標である。これまで、名古屋大学では、水試料から二酸化炭素を抽出する手法として、炭酸塩沈殿を生成させる手法（沈殿法）を用いてきたが、沈殿生成に必要な時間が長いことから、ヘッドスペース法による二酸化炭素の分離手法を採用し、名古屋大学における処理ラインの確立を目指す。

研究結果

沈殿法やキャリアーガスを用いたヘッドスペース法処理による水試料の放射性炭素濃度測定 of 相互比較を行うと、基本的には妥当な結果を得ることができたが、硫酸イオン濃度が高い水では沈殿法による処理に不確実性があった（論文公表）。沈殿法では、処理に必要な時間が長いこと以外にも問題点があることがわかった。一方、従来のヘッドスペース法による試料処理では、キャリアーガスを使用しており、通常、高純度ガスのボンベが必要となる。しかし、事業所で使用できる高圧ガスの量には上限があり、導入の妨げとなっている。名古屋大学においても例外ではなく、高圧ガスボンベを使用せずに試料処理を可能とするために、産業技術総合研究所で行なっている手法を採用した。この手法では、反応容器の試料ガスは、真空ライン内との圧力差を利用した拡散によって導入される。

反応容器は、真空コックとセプタム口を備えたジョイントとフラスコの組み合わせで構成される。容器にリン酸と回転子を入れて真空引きした後、セプタムから注射針を使って試料を注入する。真空ラインに接続して、拡散によりガスを導入し、冷媒トラップによる捕集と精製を行なった。ガスの拡散範囲に冷媒トラップを含まないように設定することで、反応容器から真空ラインに入り込む水の量を最低限に抑えた。実験により、このシステムのブランクは無視できるほど小さいことや、抽出された二酸化炭素ガスの炭素同位体比の再現性が十分に高いことが示され、国際学会において発表を行った。また、本研究で検証した手法を、寒冷地における地下氷の年代測定に関する研究に適用し、その成果を国際学会において発表した。

成果発表（論文）

Takahashi HA, Minami M, Aramaki T, Handa H, Saito-Kokubu Y, Itoh S, Kumamoto Y. (2019) A suitable procedure for preparing of water samples used in radiocarbon intercomparison. *Radiocarbon*, 61, 1879-1887.

Takahashi HA, Minami M, Aramaki T, Handa H, Matsushita, M. (2019) Radiocarbon changes of unpoisoned water samples during long-term storage, *Nucl. Instruments Meth. Phys. Res. B* 455, 195-200.

成果発表（学会発表）

Takahashi, H. A., Handa, H. Minami, M., Sato, R. Nakamura, T. New procedure of CO₂ extraction for radiocarbon analysis of DIC in water samples at Nagoya University and Geological Survey of Japan. The 8th East Asia Accelerator Mass Spectrometry Symposium, Nagoya Univ., 2019/12/03.

Sato, R., Minami, M., Iwahana, G., Hiyama T. Radiocarbon ages of POC, DOC, and DIC in ground ice in Siberian permafrost. The 8th East Asia Accelerator Mass Spectrometry Symposium, Nagoya Univ., 2019/12/03.

「あらせ」衛星および地上観測によるリングカレントイオンの散乱現象の解析

Study of scattering process of ring current ions observed by the Arase satellite and ground-based observations

浅村和史、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所

磁気嵐時には、内部磁気圏に存在する数keVから100keV以上に存在するイオンのフラックスが増加し、環電流の発達が起こる。この環電流を担うイオンは、速度分布関数における温度異方性やリング分布と呼ばれる異方性によって、電磁イオンサイクロトロン (EMIC) 波動や磁気音波波動といったプラズマ波動を励起する。その一方で、環電流イオンはプラズマ波動によってピッチ角散乱を受け、ロスコーン内に散乱されたイオンは大気へと降りこみプロトンオーロラを引き起こすなどによって消失する。この消失過程は電荷交換反応やクーロン衝突などとともに内部磁気圏イオンの主要な消失過程の一つと考えられている。

昨年度までに「あらせ」衛星が取得したイオン種毎の速度分布関数と電界/磁界波動周波数スペクトルを用い、 $10-1000\text{eV/q}$ 程度のイオンフラックスが磁力線垂直方向に急峻なピークを持つイベントについて、プラズマ波動との関係を調べた。その結果、このイベントはそのほとんどが磁気赤道付近で検出されていること、また、高い確率で磁気音波と同時に観測されることが分かった。磁気音波はローカルなアルフベンエネルギー程度のエネルギーをもつイオンのリング分布によって生成されると考えられている。一方、本イベントにおけるイオンのエネルギーはアルフベンエネルギーより十分低いため、磁気音波の生成に寄与するとは考えにくく、プラズマ圏に存在する熱的エネルギーイオンが磁気音波によって磁力線垂直方向に加熱されているのではないかと考えられる。

このため、本年度は本イベントの中から磁気音波波動の一次周波数が $2-10\text{Hz}$ 程度と低いイベントを選択し、電界/磁界の波形データとイオンの三次元速度分布関数データを用いて WPIA (波動粒子相互作用解析) 手法を用いた解析を行った。「あらせ」衛星搭載低エネルギーイオン質量分析器 (LEPi) の出力データはカウントデータであり、そのサンプリングタイムは 15ms 程度であるため、高周波波動に対して WPIA 手法を用いることは困難である。このため、解析にあたっては低周波で波動が観測されたイベントを選択している。バンドパスフィルタにより磁気音波の一次周波数帯のみを取り出し、WPIA 法によって $W = \Sigma f(\mathbf{E} \cdot \mathbf{v})$ (f : 速度分布関数、 \mathbf{E} : 電界ベクトル、 \mathbf{v} : イオンの速度ベクトル) を求めたところ、磁気音波が $10-100\text{eV/q}$ 程度のイオンを加熱しているという結果を得た。また、近傍の周波数帯において EMIC 波動が観測されていたため同様の解析を行ったところ、イオンが波動にエネルギーを与えているとの結果を得た。このことは、磁気音波波動が低エネルギーイオンの加熱を介して EMIC 波動を励起するエネルギー輸送過程が存在することを示唆している。現在はまだ数例の解析にとどまっているが、今後、他のイベントについても解析を試みる。

また、以上の研究に加えて、名古屋大学宇宙地球環境研究所所属の大学院生 (理学研究科)、学部学生 (工学部) と LEPi データを用いた共同研究を実施し、それらの成果は学位論文としてまとめられた。

赤道波動のエネルギー伝達経路の診断による熱帯気候の理解と
海洋データの付加価値形成

Identification of energy transfer route by oceanic equatorial waves
for understanding tropical climate

尾形 友道(海洋研究開発機構・アプリケーションラボ)

大気と海洋の様々な長周期(季節内～季節間スケール)波動は熱帯域の気候変動現象(MJO/ENSO/IOD)の発達・終息において重要な役割を担う。これらの波動を解析する際に従来の準地衡流近似に基づく診断理論は中緯度域と熱帯域の接続を統合的に取り扱えないという問題があった。研究代表者の最近の理論研究によってエネルギーフラックスの診断式のブレークスルーがもたらされた(Aiki et al. 2017 PEPS)。これは大気海洋中の擾乱エネルギーのライフサイクル(発達・伝達・消散過程)を緯度帯の制限なくトレースするための強力なツールである。これによって擾乱エネルギーの流れを可視化して定性的に理解するだけでなく、厳密な定量化により各力学過程の最重要なものを明確化することができる。本研究ではこれを適用して、熱帯と中緯度の波動をその相互作用も含めて連続的にトレースすることで、熱帯の主要な気候変動イベントの発達・終息メカニズムを解明する。

本研究では、今までの研究から課題として残された、1)新しく開発された解析手法(エネルギーフラックス)を用いた海洋波動伝播の解析、2)気候モデルにおける季節内スケール変動とIODなどの気候変動モードの相互作用の解析を行い、熱帯海洋研究の進展を目指す。申請者が従来から取り組んできた赤道域における特徴的な海洋波動(混合ロスビー重力波:例えば Ogata et al. 2008 JGR-O, Ogata et al. 2017 JPO)に新しいエネルギーフラックスを適用したところ、新しいエネルギーフラックスの赤道域での有効性・優位性が確かめられた。本研究では、この解析結果を足掛かりにして、(先行研究では理想化した地形や外力に制限されていた)エネルギーフラックスの適用を、現実的な海洋シミュレーションにも適用し、各種赤道波動における有効性・優位性を検証する。

今年度は、現実的な海洋シミュレーションにおける季節内変動(尾形)および季節変動(相木)にエネルギーフラックスを適用し、赤道海洋波動のエネルギー伝播の特定における新しいエネルギーフラックス(Aiki et al. 2017 PEPS)の優位性を検証した。季節内変動に関する研究成果として、鉛直モード展開により、赤道インド洋での90日周期の表層(0-100m深)での海洋変動は、鉛直第二モードのみで説明でき、風のエネルギー注入によるケルビン波/ロスビー波伝播が主要である事が示された。一方、30日周期の混合ロスビー重力波による海洋変動は、鉛直第一と第二モードの双方が寄与していた。これはモードの重ね合わせによるエネルギーの鉛直伝播を示唆しており、三次元にも適用可能な、新しいエネルギーフラックス表現の展開を促す結果である(Aiki et al. in preparation)。新しいエネルギーフラックスではエネルギー注入域からのエネルギー伝播を適切に表現しており、優位性が確かめられた。解析結果は国際的な査読誌に受理された(Ogata, T., & Aiki, H. (2019).

The pathway of intraseasonal wave energy in the tropical Indian Ocean as identified by a seamless diagnostic scheme. SOLA.)。

電離圏D/E層のプラズマ温度導出と検証

Derivation and verification of plasma temperature in the D- and E-regions

小川泰信、国立極地研究所・国際北極環境研究センター

研究目的：

太陽風エネルギーの多くは磁気圏を經由して極域超高層大気に流入する。その流入するエネルギーは、激しい時空間変化を有しながら、超高層大気の運動エネルギーや熱エネルギーなどに変換されることが特徴として挙げられる。極域の非干渉散乱（IS）レーダーは、このエネルギー変換過程を知る上で最も強力な観測手法の一つである。ただし、ISレーダーを用いた電離圏D層及びE層におけるプラズマ温度導出には、観測上の様々な制限があることが過去に報告されている。本研究では、平成28-29年度の一般共同研究に引き続き、EISCATトロムソUHF及びVHFレーダーシステムを用いた電離圏D層及びE層のISスペクトルデータを見直すと共に、多変数フィッティング手法を改善することにより、プラズマ物理量導出精度（特にイオン温度導出の下限高度）の向上を目指すことを目的とする。この研究で得られる成果と経験は、次期計画であるEISCAT_3D（送信周波数233MHzのフェーズドアレイ式多点VHFレーダーシステム）における物理量導出プロセスを構築する上で有益である。

研究内容・計画：

- (1) 2018年1月及び2019年1月のEISCAT共通実験（CP）で得られた電離圏D層及びE層のISスペクトルデータを用いて、成層圏突然昇温発生前後の中間圏・下部熱圏におけるイオン温度及び速度変動を導出する。
- (2) EISCATレーダーによるイオン温度観測と同時刻・同高度のトロムソナトリウムライダー観測データで得られる中性大気温度との比較研究を実施する。

2019年度の成果内容：

- (1) 2018年1月10-31日08-20UT及び、2019年1月2-10日08-20UTに実施されたEISCAT共通実験で得られたデータを重点的に解析した。あいにく両CP観測期間は共に、成層圏突然昇温（SSW）の発生日を含んではいない。初期解析の結果、2018年1月のSSW発生前の期間には、(i) 1時間分のデータを積分してISスペクトルフィッティングを行うことにより、高度90 km付近までのイ

オン温度を精度良く導出できること、(ii) 高度 86-100 km ではイオンの下降流が継続して生じていたこと(各日の平均速度は約 2m/s)などを明らかにした。

(2) 2020年1月より名大ISEEで研究を進めているAudrey Schillings博士との共同研究の一環で、太陽風擾乱時の極域電離圏・下部熱圏変動に着目して、EISCAT-ナトリウムライダー同時観測イベントのサーベイ及び、総合解析のための準備を進めた。具体的には、2013年12月8日及び2015年11月10日の両CMEイベント時に得られたEISCAT及びナトリウムライダーデータを用いて、磁気圏から電離圏へのエネルギー注入量及び、ジュール加熱率の変化を定量的に調査している。

主な論文：

Ogawa, Y., Y. Tanaka, A. Kadokura, K. Hosokawa, Y. Ebihara, T. Motoba, B. Gustavsson, U. Brandstrom, Y. Sato, S. Oyama, M. Ozaki, T. Raita, F. Sigernes, S. Nozawa, K. Shiokawa, M. Kosch, K. Kauristie, C. Hall, S. Suzuki, Y. Miyoshi, A. Gerrard, H. Miyaoka, and R. Fujii, Development of low-cost multi-wavelength imager system for studies of aurora and airglow, Polar Science, POLAR_2019_29, March, 2020.

主な学会講演：

Ogawa, Y., S. Nozawa, M. Tsutsumi, Y. Tomikawa, C. Hall, and I. Haggstrom, Ion temperature variations in the D- and E-region polar ionosphere during stratospheric sudden warming, The 146th SGEPS fall meeting, 2019年10月24日.

温度異方性を起源とするプラズマ波動励起
Excitation of plasma waves driven by
temperature anisotropy

天野孝伸（東京大学・理学系研究科）

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存在し、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を考えると、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不安定となる。これらはそれぞれ電子、イオン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。今年度は主に、地球バウショックの遷移層および磁気シース領域におけるホイッスラー波について、MMS衛星によって得られたデータを用いて波動解析および分布関数解析を行った。

衝撃波においては、上流（太陽風）から衝撃波下流にかけての磁場増大に伴う断熱圧縮によって温度異方性が生じ、ホイッスラー波が励起されていると定性的には理解できる。しかし、実際の電磁場の波形観測データからは、コヒーレントで微細な波束構造が多数発見された。また、100ms程度以下という非常に短い時間で電子の温度異方性（分布関数）が変動する様子が観測された。これは断熱圧縮による異方性生成と波動励起およびそれに伴う電子散乱による異方性解消が準定常的に起こっているのではなく、両者のダイナミックなせめぎ合いが起こっていることを示唆する結果である。

磁気シースのホイッスラー波は、イオンの温度異方性が作ったと思われるミラーモードと呼ばれる磁場強度の強弱に伴い観測されるコヒーレントな波動である。観測的には磁場強度の極小領域でホイッスラー波が観測されていることから、波の励起源が磁場極小領域であると考えられていた。やはりMMS衛星によって得られた観測データの詳細解析を行い、磁場強度の極小とポインティングフラックスの反転するタイミングが一致することを示した。この性質は過去の研究の予想と一致するが、観測的に同定された波動励起領域は想像以上に小さな領域に局在化していることが分かった。なお、ミラーモード中のホイッスラー波励起の特徴は、定性的には内部磁気圏におけるコーラス波動の励起と同じ構造であるものの、磁気シースではコーラス波動のような周波数変動は観測されない。この差の原因については今後の更なる研究により明らかにする必要がある。

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。これまで我々の研究グループではこの地域のモンスーン季の季節内変動に着目し、この地域において顕著な準2週間周期変動が卓越し、特徴的な総観規模スケールの変動が本地域に降水活発期をもたらすことを示した。その一方でプレモンスーン季におけるこの地域の総観規模スケールの変動の理解はまだ不足している。本年は主にプレモンスーン降水の特徴を新しいデータも用いて明らかにした。

2. データ

本研究ではバングラデシュにおける1891-2016年の23地点における日降水量データと共に2010-2014年にCox's BazarとKheppuparaで観測されたバングラデシュ気象局のS帯気象レーダー画像とGSMaPを用いた。また2010-2012年の間のThe World Wide Lightning Location Network(WWLLN) (Rodger et al. 2006)による雷位置標定データを用いた。総観場の調査にはJRA55再解析データを用いた。

3. 研究結果

バングラデシュに23地点ある長期(1891-2016年)日降水量データに対して主成分分析を行うと、南北に差がある降水分布を示す第2主成分(寄与率7.4%), 及び北東部とそれ以外に差がある降水分布を示す第4主成分(寄与率3.8%)の季節変化から、プレモンスーン季に特徴的に北部、或いは北東部で降水が卓越する分布が多く観測されることを示す。

バングラデシュで2010-2014年に観測されたS帯降雨レーダーをRafiuddin et al. (2010)を参考に弧状型、線状型、分散型、広域型の4つにわけて分類して月別発生数を調べた。その結果、プレモンスーン季に特徴的に弧状型が卓越する一方で、分散型と広域型はモンスーン季に卓越することを示す。ただ、レーダー観測のほとんどは8-18LSTに行われている。VLF帯の電波を検知して世界中の落雷位置と時刻を観測する雷ネットワークのひとつであるThe World Wide Lightning Location Network (WWLLN)の2010-2012年のデータを用いてバングラデシュの降雨レーダーと比較したところ、レーダーによる降水分布と落雷位置はよく一致する。一方WWLLNデータはおそらくセンサー数とセンサー分布が変化するために、年により雷検出数は大きく異なっていた。落雷位置のクラスターを降水システムとみなして降水システムの数とその発生位置の分布を解析した結果、プレモンスーン季は特徴的にバングラデシュ北東部で降水システム発生が多く、また降水システムのほとんどは北西から南東方向へ移動する。

GSMaP日降水量分布とJRA55再解析データを用いて、2007-2013年の間で顕著だったプレモンスーン降水について総観場の事例解析を行った。Yamane et al. (2013)等で指摘されているバングラデシュへの925hPaでの南からの高相当温位の空気の流入、500hPaでの北西からの低相当温位の空気の流入、500hPaや200hPaにおけるトラフがみられた。ま

た、日本でみられる温帯低気圧に伴う降水変動と比べて雨が降りやすい期間が長く3-5日程度続く事例が多くみられた。

4. 考察と今後の課題

バングラデシュにおけるプレモンスーン降水はメガラヤ高原に隣接する北東部やヒマラヤ山脈周辺に現れるものが多いことから、地形をトリガーとして発生する降水システムが多いと示唆される。下層での相対的に暖湿な南風の流入は潜在不安定な大気安定度を形成し、地形性上昇を対流発生のトリガーをするために必要と考えられる。一方下層での南風の流入はインド亜大陸上の熱的低気圧の形成に伴ってプレモンスーン季には850hPaより下層に持続的に現れる。プレモンスーン降水時は上層が低気圧偏差であることが多いことから偏西風擾乱の影響は示唆されるものの日本とは異なり数日以上にわたって降水が生じやすい期間が続くことも多い。今後はバングラデシュ上空における上層の偏西風擾乱の特徴に着目した解析が必要である。

6. 引用文献

Rafiuddin et al., 2010: Characteristics of monsoon precipitation systems in and around Bangladesh, *Int. J. Climatol.*, 30, 1042-1055.

Rodger et al., 2006: Detection efficiency of the VLF World-Wide Lightning Location Network (WWLLN): initial case study, *Ann. Geophys.*, 24., 3197-3214.

Yamane et al. 2013: Synoptic situations of severe local convective storms during the pre-monsoon season in Bangladesh, *Int. J. Climatol.*, 33, 725-734.

7. 成果発表

Murata, F., S. Azuma, 2019: Preferred environmental conditions of precipitation systems around Bangladesh observed by ground-based radars, AOGS, シンガポール (2019年7月29日), 口頭発表

村田文絵, 寺尾徹, 木口雅司, 福島あずさ, 田上雅浩, 林泰一, 井上知栄, 松本淳, バングラデシュにおけるプレモンスーン降水をもたらす総観場, 日本気象学会秋季大会, 福岡(2019年10月30日), ポスター発表

Murata, F., S. Kashiramoto: Characteristics of thunderstorms in Bangladesh based on WWLLN dataset, 2nd International workshop on “Extreme severe storms and disaster mitigation strategy”, ラジャスタン(インド) (2020年2月27日), 口頭発表

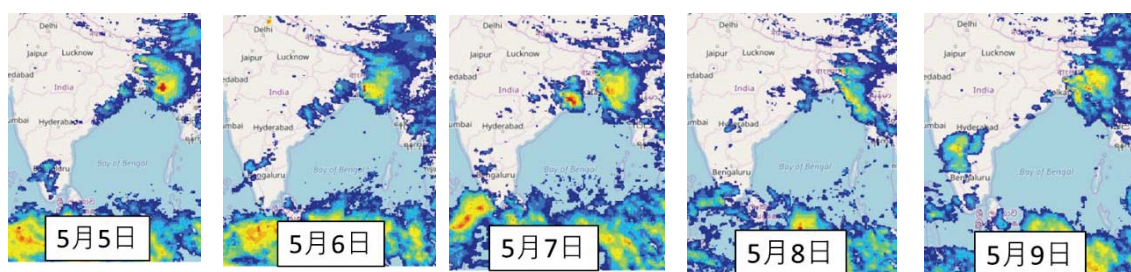


図1: GSMaPによるバングラデシュ周辺の日降水量分布。コンターが赤に青, 黄, 赤に変化するにつれて降水強度が強い。2013年5月5日から9日まで継続してバングラデシュ周辺で降水が続いている。

Kaバンドレーダーを用いた積乱雲の生成・発達過程に関する研究 Study on initiation and development of cumulonimbus cloud using Ka-band radar

中北英一 京都大学・防災研究所

1. 研究目的

積乱雲の生成・発達段階に関してKaバンドレーダーを主とした現地観測を実施し、①雲粒子の形成・成長特性を調べて積乱雲の生成・発達物理的メカニズムを明らかにすること、②雲粒子形成段階における気流解析を行い、今後発達する防災上危険な積乱雲の特徴を見つけること、を目的とした。

2. 研究方法

2年計画の2年度目である2019年度には、夏季熱雷と積雲生成を対象として、神戸エリアにて名古屋大学が所有するKaバンドレーダーによる観測を実施した。加えて、申請者が別途研究プロジェクトで神戸市に展開するマルチセンサー観測（GNSS可降水量、ドップラーライダー、境界層レーダー、Xバンドレーダー、フェーズドアレイレーダー、ゾンデ観測）と連携し、積乱雲の生成・発達段階を捉える観測を実施した。Kaバンドレーダーによる雲粒子観測があることで積乱雲の成長過程をシームレスに捉えることが可能となる。本年度は、昨年度に実施したKaバンドレーダーを主眼にした解析に加えて、Xバンドレーダーであるパラボラアンテナ型のレーダー（以降XバンドMPレーダー）とフェーズドアレイレーダーの3者を総合的に用いて、渦管解析を行った。

3. KaバンドレーダーとXバンドレーダーで捉えた積乱雲の渦管解析

(1) フェーズドアレイレーダーを用いた渦管解析

鉛直方向の空間分解能および時間分解能に優れたXバンドフェーズドアレイレーダー（以降PAR）を用いて更なる詳しい渦度分布の解析を行った。まず、PARで捉えた積乱雲の渦度分布の鉛直断面を調べたところ、水平スケール1km程比較的小さな渦度分布が鉛直に数kmほどつながった渦管構造を捉えていることがわかった。Kaバンドレーダーほど感度と水平分解能に優れてはいないために数百メートルスケールの渦管を捉えてはいないものの、鉛直分解能に優れたPARを使うことで、比較的小規模の小さな1km程の渦管構造を捉えることができたと考えられる。また、図1に小規模渦度の30秒毎の変化を示すが、小規模渦度の詳細な時間変化を追えることがわかった。この変化は時間分解能が5分のXバンドMPレーダーでは観測できず、PARの渦管探知が有用であることを示した。

次いで、反射強度でも小規模の現象を捉えられると考え高時間分解能PARを使って解析を行った。図2にPARで捉えた2分ごとの反射強度の時間変化を示す。赤い四角で囲んだPARで観測できる3つのエコーの塊が、上下しながら急激に発達する様子がわかる。この3つのエコーの塊は、水平スケールが2km程度であることから、水平スケールが1km程度の塔状の雲の塊であるタレット内の降水粒子を捉えていると考えられる。以上から時間・鉛直分解能に優れたPARを用いることで、積乱雲の小さな要素であるタレットを捉えていることが示唆される。さらに内部の渦度分布を調べた。図3は2つのタレットが時間変化する様子の一瞬間を切り取った図を示す。この後右のタレット②はそのまま勢力が衰えた一方、左のタレット①はその後上空10kmまで急激に発達した。左右のタレット内の渦度分布

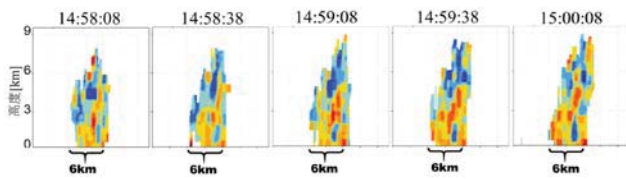


図1: 小スケール渦度の30秒毎変化

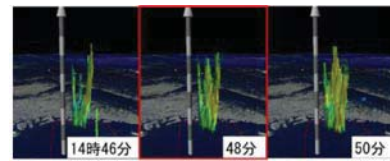


図2: PARで捉えたタレット構造

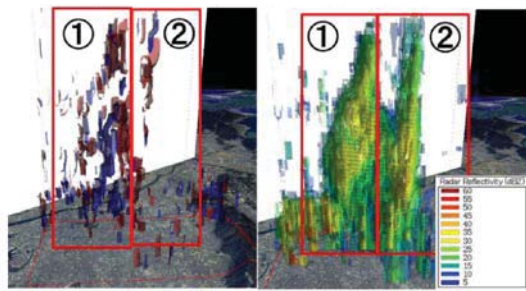


図3: タレットの比較
(左: 渦度、右: エコー)

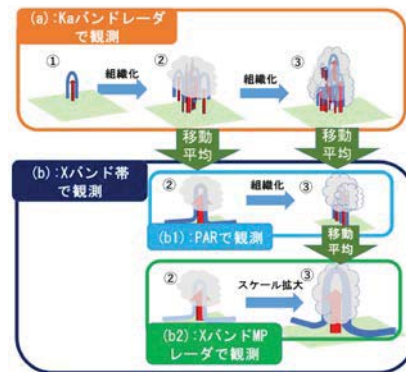


図4: 渦管発達の統合理解

を調べると急激に発達するタレットの渦度分布は、勢力が衰えるタレットに比べて値が大きく、鉛直に高く伸びていることがわかる。このことから積乱雲内の小さなスケールの渦度分布が、同様に小さなスケールの現象であるタレットの発達と関連があるとわかった。

(2) KaバンドレーダーとXバンドレーダーで捉えた積乱雲の渦管の統合解析

昨年度から調べてきたKaバンドレーダーにPARとXバンドMPレーダーを加えて総合的に渦管解析を行い、以下のようなメカニズムの理解に至った。概念図を図4に示す。近くの上昇流が互いに混じりあい大スケール上昇流として融合し、渦管も同様に組織化、融合化すると考えられる。渦度の融合の過程については近接する渦が相互に影響しあい、互いの周りを回るように変化しながら融合するプロセスにより大スケールの渦度へと変化すると考えられる。Kaバンドレーダーで観測できる雲粒子のみの発達初期段階で、強い上昇流によって複数の小スケールの渦管が組織化するイメージが(a)に示されている。大スケールの渦管は、Xバンドレーダーによって観測でき、(b1②)(b2②)のようにPAR, XバンドMPレーダーによって観測できる。その際XバンドMPレーダーは鉛直分解能がPARに比べて低いため、PARで捉えられる渦管の一部のみを捉えることになる。さらに上昇流・渦管の融合プロセスによって、(b1)のように渦管の組織化、(b2)のようにスケールの拡大化が起こり、PARはXバンドMPレーダーでは捉えきれない小スケールの渦管を捉えることになる。また、積乱雲発達初期のタレット内の反射強度、渦管の変動は(b-1)(b-2)の上昇流・渦管の融合過程を捉えたと推測される。

4. 成果発表

【査読付論文】

- 中北英一・高尾充政・新保友啓・山口弘誠・中川勝広, Kaバンドレーダとフェーズドアレイレーダを用いたゲリラ豪雨発達初期の積乱雲詳細解析, 土木学会論文集B1 (水工学), Vol.75, No.2, pp.1171-1176, 2019.

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
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、そのご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、数キロ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、2.5分毎に観測を行う。春にデータ回収し、その後解析を行う。特出した擾乱時について気象モデルCReSSを用いて、場の物理的な解釈する。

【研究成果と考察】

本年度は2019年11月から2020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30箇所あまりに気象ロガーを設置し、観測を行った。機器の回収を行ったばかりであるため、データの収集作業中である。そのため、本年度は過去のデータを用いて解析を進めた。図は気象レーダー（カラートーン）、および、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 Ueda(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うと、同

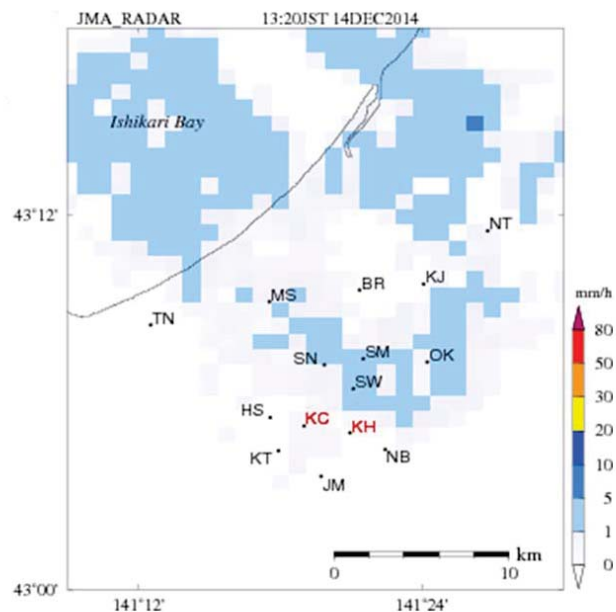


図 気象レーダー（カラートーン）、および
気温低下と気圧上昇地点（赤文字）

規模の水平スケールで現象が再現された。一部は、2019年度気象学会秋季大会においてポスター発表を行った。

【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理解を進める予定である。さらに、気圧場の変化が内耳に影響を与えることから、疾病との関係を調査したいと考える。

【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.

雲過程はブラックカーボン混合状態の変化をもたらすか？
Does cloud processing alter the mixing state of black carbon aerosols?

竹川 暢之 (首都大学東京・理学研究科)

1. 研究目的

ブラックカーボン (BC) 粒子は地球大気の放射収支に複雑かつ重大な影響を与える。BCの気候影響を考える上で、内部混合状態 (BCと他成分が同一粒子に存在するか否か) が重要なパラメータである (Jacobson, 2001)。BCの光吸収効率はその内部混合状態に強く依存し、コア・シェル型のときに光吸収増幅効果が大きくなると推定されている (Adachi et al., 2010)。

大気中のBC混合状態は様々な要因で決まり、都市域ではコア・シェル型だけでなく付着型も一定頻度で観測されている (Moteki et al., 2014)。従来の研究では、大気化学反応や雲過程の進行とともにBCが被覆されてコア・シェル型の内部混合状態が形成されると考えられてきた。この考え方に従えば、大陸の発生源近傍から離れた領域スケールの汚染空気では、ほとんどのBCはコア・シェル型として存在することになる。一方、首都大が近年東アジアで実施した大気観測の結果によれば、大陸から1,000 km程度以上離れた場所でも、無視できない頻度で付着型BCが見出された (Sun et al., submitted)。付着型BCではコア・シェル型のような光吸収増幅効果がないため、その生成過程および大気中の実態を解明することは、BC放射効果を推定する上で重要である。

付着型BCを生成する過程として、BCと他粒子の凝集と、雲の蒸発に伴う再結晶が考えられる。前者は著しい高濃度条件を除けば無視できるはずである。そこで、雲過程がBC混合状態を変化させるという仮説を考えた。本研究は、実験室において本仮説を検証することを目的としている。

2. 研究方法

当初計画では、実験室でBCと硫酸塩のコア・シェル型粒子を生成し、この粒子を雲凝結核カウンタ (CCN計) に通して雲粒化・乾燥させた後に、混合状態の変化をレーザー誘起白熱光BC検出装置 (SP2) により測定する計画であった。しかしながら、凝縮法による粒子生成条件の最適化が困難であったため、当初目的を達成しうる範囲で、より簡便な方法に切り替えた。

図1に実験セットアップを示す。実験室においてBC粒子 (Fullerene soot) と硫酸アンモニウムの混合溶液をネブライザで噴霧して液滴粒子を生成する。この粒子を拡散ドライヤで乾燥させた後にインパクトで捕集し、走査型電子顕微鏡 (SEM, VE-9800, Keyence, Inc.) で観察を行う。これにより、コア・シェル型粒子の潮解過程は再現できないものの、液滴生成後の再結晶を模擬することができる。本方法では、解析できるサンプル数に限りがあることが難点であるが、研究試行段階としては効率的かつ確実な方法であると判断した。また、SEMの観察に先立って、BC粒子のみの場合の粒径分布を走査型電気移動度分級装置 (SMPS) で測定した。

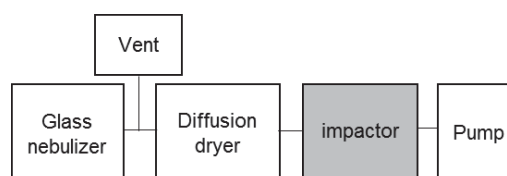


図 1. 実験セットアップの概念図。BC 粒子と硫酸アンモニウムの混合溶液をネブライザで噴霧し、拡散ドライヤで乾燥させた後にインパクトで捕集する。捕集した粒子を走査型電子顕微鏡で観察する。

3. 結果と考察

BC粒子の粒径分布は粒径100 nm以下にピークを持つ分布となっており、大気中のBC粒子に概ね近いことが確認できた。インパクトの捕集面には石英繊維フィルタとカーボンテープを試行した。石英繊維フィルタは粒子捕集効率が高いものの、SEMでの観察が困難であることから、カーボンテープを採用した。BCと硫酸アンモニウムの混合比を変化させて観察を行い、BC濃度0.1 wt%、硫酸アンモニウム濃度50 mM (~0.7 wt%) を暫定的な最適条件とした。この濃度比は、おおよそ大気中の質量濃度比に近い。図2に観察結果の例を示す。粒子総数に対しては、BCを含まない硫酸アンモニウム粒子が多かったが、これは濃度比を反映していると考えられる。元素分析は行っていないため、原理的にはBCか硫酸アンモニウムか区別することはできないが、電子線の照射によって後者は徐々に揮発することを利用すれば区別が可能である。前述の通り解析できる粒子数に限りがあるものの、混合粒子の中ではコア・シェル型より付着型の方が多く観察された。

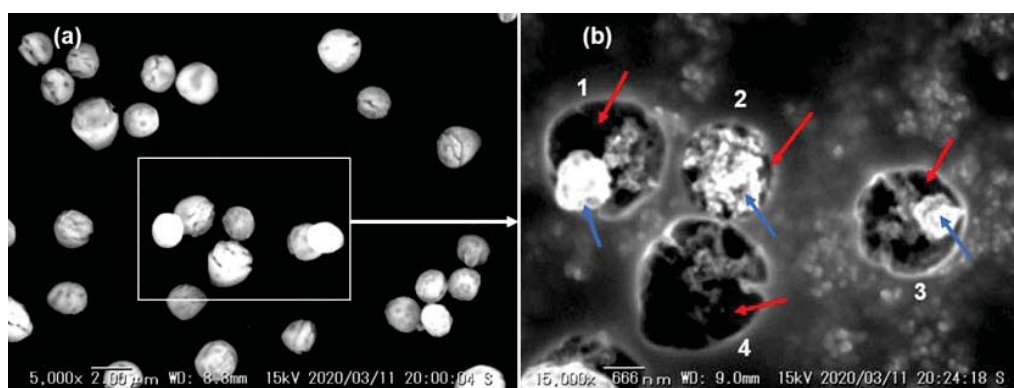


図2. BCと硫酸アンモニウム混合粒子 (液滴から乾燥) のSEM画像の例。左は電子線の集中照射前、右は照射後の拡大像を表す。右図で、青がBC粒子、赤が硫酸アンモニウム粒子であり、粒子1と3は付着型、粒子2はコア・シェル型と推定される。電子照射により硫酸アンモニウムが揮発する過程で物理的な位置関係にも変化が見られるため、遷移過程の注意深い観察が必要である。

4. まとめ

本研究では、BCと硫酸アンモニウムを含む液滴を乾燥させて粒子化することにより、雲過程を模擬した再結晶に伴う混合状態変化を調べた。初期解析では付着型粒子が多く観察され、当初仮説を裏付ける結果が得られた。ただし、サンプル数が限られているために一般化することは難しい。今後は、オンライン装置との併用により様々な条件でデータを取得し、仮説の検証を目指す。

引用文献

- Adachi, K., S. H. Chung, and P. R. Buseck (2010), Shapes of soot aerosol particles and implications for their effects on climate, *J. Geophys. Res.*, 115, D15206.
- Jacobson, M. Z. (2001), Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols, *Nature*, 409, 695-697.
- Moteki, N., Y. Kondo, and K. Adachi (2014), Identification by single-particle soot photometer of black carbon particles attached to other particles: Laboratory experiments and ground observations in Tokyo, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 1031-1043.
- Sun, C., K. Adachi, K. Misawa, H. Cheung, C. Chou, and N. Takegawa, Mixing state of black carbon particles in Asian outflow observed at a remote site in Taiwan in the spring of 2017, *J. Geophys. Res. Atmos.*, submitted.

成果発表

なし

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、昨年度開発した、太陽風予測シミュレーション(SUSAN00)によってCMEが惑星間空間を伝搬していく様子を計算し、その結果を用いて疑似的にIPS観測を作り出し、実際のIPS観測データとの比較を行うという方法(SUSAN00-IPS予測シミュレーション)を、複数のCME現象に適用して、この手法の有効性の検証を実施した。また、SUSAN00が経験モデルを用いて簡略化している約20太陽半径程度までを数値シミュレーションで計算することで、太陽風予測精度の向上が期待されるが、そのため、コロナー太陽風遷移領域の数値シミュレーションと、IPSの観測の比較を行った。

3. 研究成果

本研究では、2017年9月5日にX9.3フレアに伴って発生したCMEを含む十数例のハローCME現象を対象に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、SUSAN00-IPS予測シミュレーションでは、CME到来予測時間の平均誤差はおおよそ5時間未満にまで減少させることが可能ということが分かった。この結果は、複数の初期条件を用いて同時にシミュレーションを行い、誤差の情報などを含んだ予報を行うアンサンブル予報システムが、単一のCME伝搬シミュレーションによるCME到来予測よりも高い予測精度を示す可能性を示唆しており、重要な結果と言える。また、本シミュレーションを、NICTの宇宙天気予報センターに常時準リアルタイムに表示し、宇宙天気予報業務への実利用が2019年5月より開始された。また、SUSAN00が簡略化しているコロナー太陽風遷移領域を数値シミュレーションの結果が置き換えることによる更なる予測精度の向上を目指し、コロナー太陽風遷移領域のシミュレーション結果とIPS観測の比較を実施した。

その結果、現状では、IPSとシミュレーションの速度にあまり良い相関は見えず、コロナ太陽風シミュレーションとIPS観測の定量的な比較を行うためには、IPSデータの取り扱い方法や、数値シミュレーションの更なる改良を含めて、まだまだ課題がたくさんあることが示された。



NICT 宇宙天気予報センターでの実利用の様子。

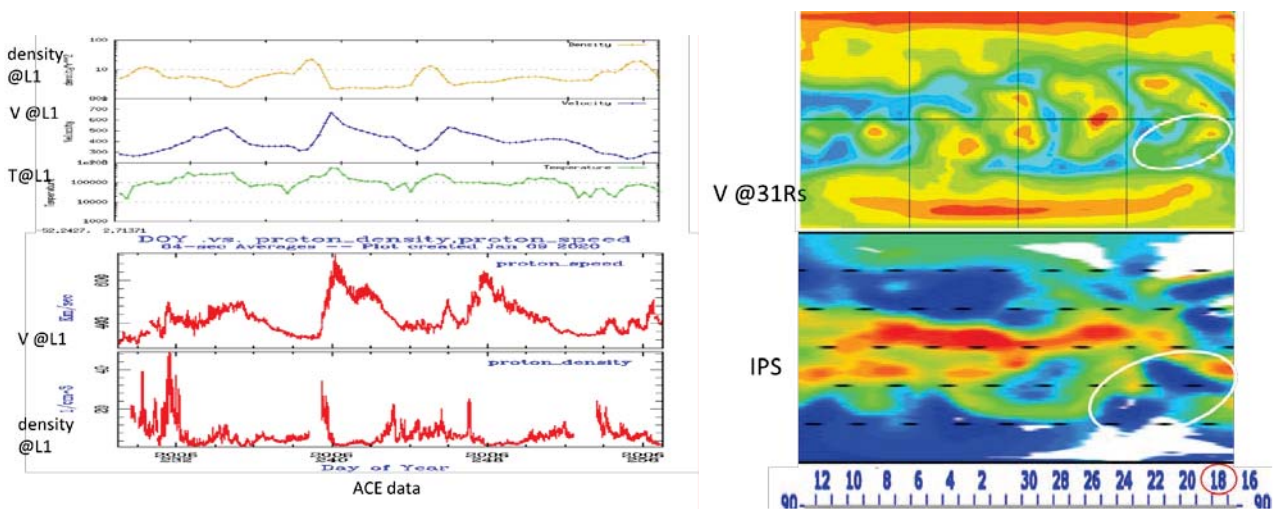


図 1 : コロナ太陽風シミュレーション結果。(左) L1 点での太陽風観測との比較。(右) 31Rs での IPS との比較。定性的な傾向は比較的一致しているように見える。

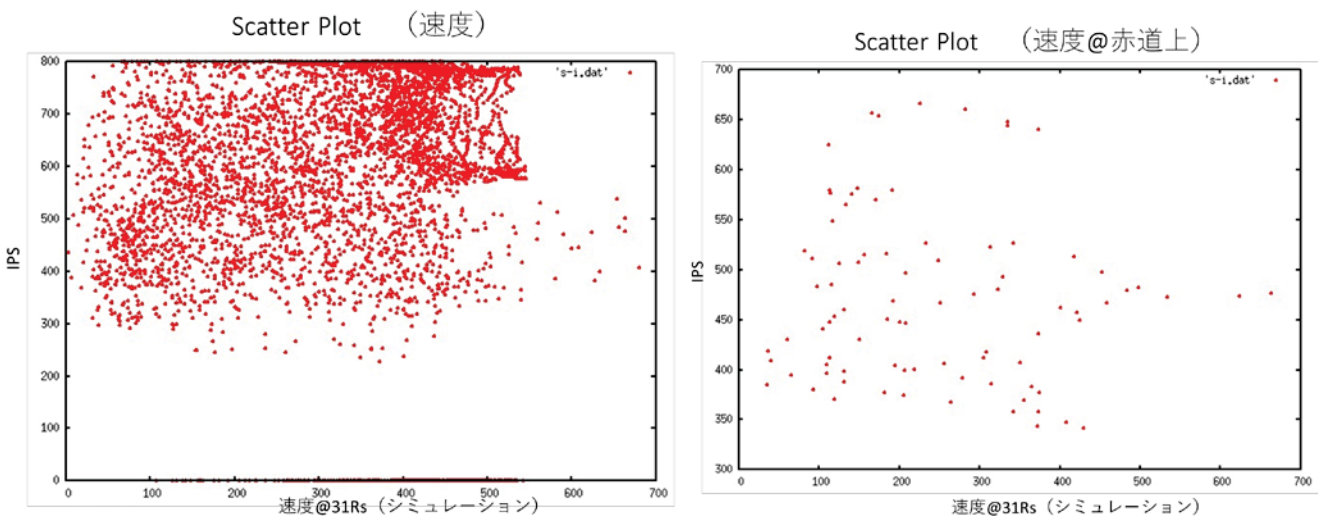


図 2 : 定量的な速度を比較。あまりきれいな相関らしきものは見えない。数値シミュレーションの改良はもちろんのこと、IPS データの取り扱い方法などにもまだ検討の余地があることが示唆される。

4. 成果発表

① 誌上発表

1. Iwai, K., Shiota, D., Tokumaru, M., Fujiki, K., Den, M., and Kubo, Y., Development of a coronal mass ejection arrival time forecasting system using interplanetary scintillation observations, EPS, 71, 39, 2019

② 口頭発表

1. Kazumasa Iwai, Daikou Shiota, Munetoshi Tokumaru, Kenichi Fujiki, Mitsue Den, and Yūki Kubo, Development of coronal mass ejection arrival time forecasting system using interplanetary scintillation observations, 日本地球惑星科学連合2019年大会, 幕張メッセ, 2019/05/27
2. 岩井一正, 電波観測を用いたデータ同化型太陽嵐到来予測モデルの構築, 第7回PSTEP領域会議, JAMSTEC横浜研究所, 2019.10.09-11
3. Kazumasa Iwai, Heliospheric physics and space weather using IPS, Korea-Japan Space Weather Workshop 2019, KASI (韓国), 2019/11/28
4. 岩井一正, 塩田大幸, IPS 観測データを用いた太陽嵐到来予測モデルの開発と内部太陽圏研究, 「太陽地球圏環境予測のためのモデル研究の展望」第4回, 名古屋大学, 2019.12.26-27
5. Kazumasa Iwai, D. Shiota, M. Tokumaru, K. Fujiki, M. Den, and K. Kubo, Development and operation of a coronal mass ejection arrival time forecasting system using interplanetary scintillation observations, The 4th PSTEP International Symposium (PSTEP-4) and the 2nd ISEE Symposium “Toward the Solar-Terrestrial Environmental Prediction as Science and Social Infrastructure”, 名古屋大学, 2020.01.28-30
6. Daikou Shiota, Seiji Yashiro, Kazumasa Iwai, Development of real-time prediction system of CME arrival and magnetic field with SUSAN00-CME MHD simulation, 日本地球惑星科学連合2019年大会, 幕張メッセ, 2019/05/27
7. 塩田大幸, 八代誠司, 岩井一正, 片岡龍峰, 宇宙天気予報での利用を目的とした太陽圏MHDシミュレーションの開発進捗と今後の方向性, STEシミュレーション研究会 広島大学, 2019/09/24
8. Daikou Shiota, Seiji Yashiro, Kazumasa Iwai, Operational MHD simulation of inner heliosphere to predict CME arrival and its internal magnetic field, L5 Consortium meeting, Stanford University, CA, USA, 2-10/10/02
9. 塩田大幸, 八代誠司, 岩井一正, Angelous Vourlidas, Carlos R Braga, Neel Savani, 内部太陽圏MHDシミュレーション (SUSAN00) を用いた太陽嵐影響予測システムの開発とデータ同化に向けた取り組み, 宇宙地球環境の理解に向けての統計数理的アプローチ, 名古屋大学, 2019.12.19
10. 塩田大幸, 八代誠司, 岩井一正, 片岡龍峰, 内部太陽圏MHDモデルSUSAN00-CMEを用いた宇宙天気予測システムの開発状況と今後の展望, 「太陽地球圏環境予測のためのモデル研究の展望」第4回, 名古屋大学, 2019/12/26
11. Daikou Shiota, Seiji Yashiro, Kazumasa Iwai, Ryuho Kataoka, Development of real-time prediction system of CME arrival and magnetic field with SUSAN00-CME MHD simulation, The 4th PSTEP International Symposium (PSTEP-4) and the 2nd ISEE Symposium “Toward the Solar-Terrestrial Environmental Prediction as Science and Social Infrastructure”, 名古屋大学, 2020/01/29

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 3H)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こと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 β 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の検出効率測定および水道水試料についてテスト測定を行った。図1は、山形大学のQuantulusによりトリチウム標準試料を測定した結果である。標準試料トリチウムは約100チャンネル付近にピークをもち、200チャンネルまで分布している。標準試料の強度から検出効率は60.7%であった。さらに水道水試料5 mlにシンチレータ5 mlを入れた測定スペクトルを図1に示す。標準試料のスペクトルに近い形を示している。計数率は、0.038 cpsであった。今後、雨水等について測定を行い比較する。

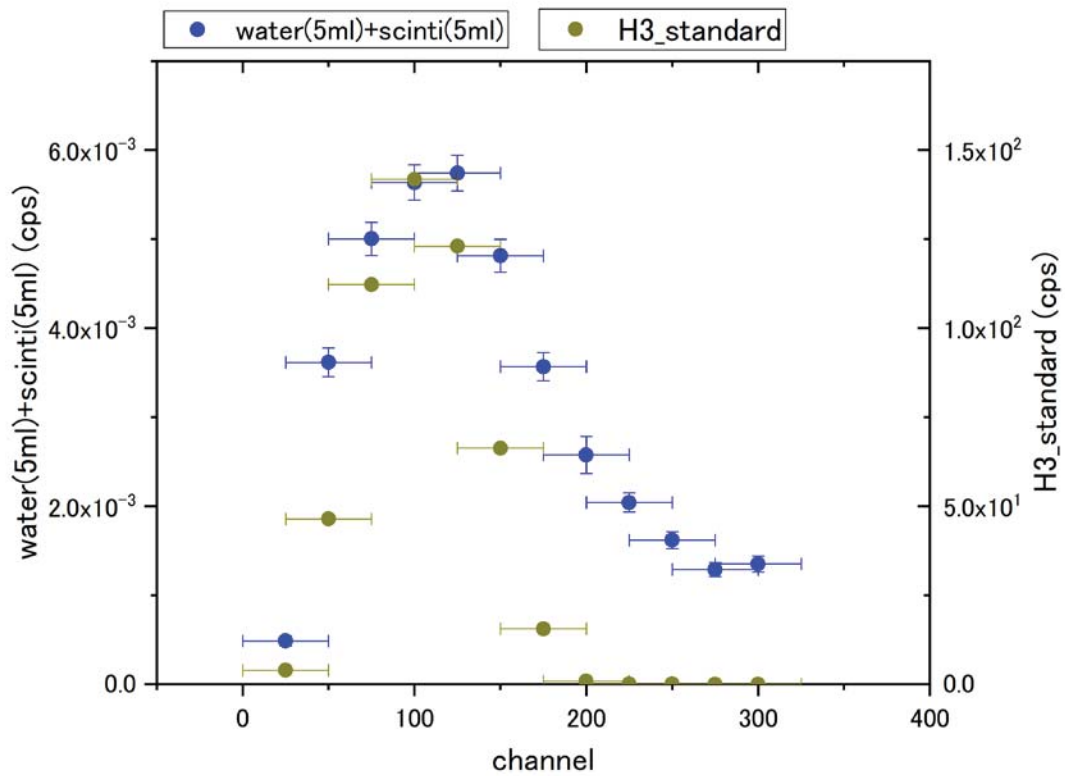


図1. 山形大学Quantulusで測定したトリチウム標準試料および水道水試料の計数スペクトル

Voronoi粒子の氷雲放射計算への導入と
ひまわり8号観測データ放射量校正への応用
Introduction of Voronoi-aggregate Particle into Ice Cloud
Radiative Transfer Calculation and Application for
Radiometric Calibration of Himawari-8 Observation Data

大野智生 気象庁気象衛星センターデータ処理部

本研究は、氷雲の放射伝達計算に関する新たな知見である「Voronoi粒子」と呼ばれる粒子形状を導入することで、静止気象衛星ひまわり8号（及び9号）の放射量校正の不確かさを低減できることを示し、ひまわり観測データの定量的な利用に資するものである。

近年の気象衛星観測の充実は著しく、中でも静止気象衛星においては2015年に正式運用を開始したひまわり8号を皮切りに時間・空間・波長分解能および観測精度が大幅に改良された新世代の光学イメージャが次々搭載されている。このため、定性的な利用の多かった従来よりも定量的なデータ利用のニーズが一層高まっている。更に、気候監視や全球モデルへのデータ同化を目的に世界中の複数の気象衛星観測を一つのデータセットにまとめ上げる試みも近年盛んになっている。これらの要望を的確に満たすためには、放射量校正すなわち観測放射輝度の定量評価を適切に実施し、利用者に情報を提供する必要がある。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（GSI CS）と呼ばれる枠組みでは、世界中の気象衛星運用機関が集い、不確かさが小さく且つ衛星間で一貫した放射量校正手法の開発が議論されている。同枠組み内で可視近赤外バンドについて提案されている手法の一つに、赤道付近の至る所で見られ安定した太陽光反射率を示す発達した対流雲（以下、発達対流雲）の観測を校正に利用する手法が挙げられる。

上記手法においては、観測幾何条件を考慮するために発達対流雲の双方向反射率分布関数（BRDF）を放射計算等により把握する必要があるが、発達対流雲内に存在する氷晶粒子は、六角柱等の単純形状の粒子が凝集した複雑且つ非対称の形状を持つことが知られており（図1a）、この形状による散乱特性が放射計算を困難にしている。そうした形状を再現するためVoronoi分割を用いて作成されたのがVoronoi粒子である（図1b右上）。本研究では、RSTAR7にてVoronoi粒子やその他形状（球形、六角柱）で構成された氷雲を仮定した放射伝達計算を行い、散乱特性の差異を検討した。更に各粒子形状を用いた氷雲のBRDFを作成し、他衛星による観測事実に基づいたBRDF（Bhatt et al., 2017）と比較を行ったところ、Voronoi粒子のBRDFが最も良く整合していることを確認した（図2）。このBRDFを上記校正手法に適用することにより、発達対流雲の観測角度条件による放射輝度差を適切に打ち消し、より不確かさの小さい校正が実施可能になると考えられる。

参考文献

- Bhatt et al. (2017): Development of Seasonal BRDF Models to Extend the Use of Deep Convective Clouds as Invariant Targets for Satellite SWIR-Band Calibration. <https://doi.org/10.3390/rs9101061>
- Schmitt and Heymsfield (2010): The Dimensional Characteristics of Ice Crystal Aggregates from Fractal Geometry. <https://doi.org/10.1175/2009JAS3187.1>
- Ishimoto et al. (2012): Irregularly shaped ice aggregates in optical modeling of convectively generated ice clouds. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jqsrt.2012.01.017>

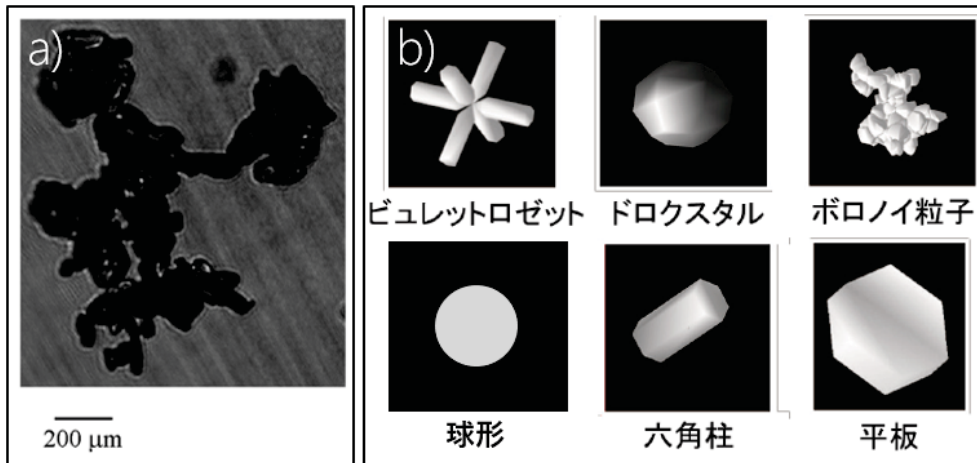


図1. a)観測された氷雲粒子の例 (Schmitt and Heymsfield, 2010)。b)氷雲の放射計算時に仮定される粒子形状の例 (Ishimoto et al., 2012)。図中右上がVoronoi粒子に該当する。

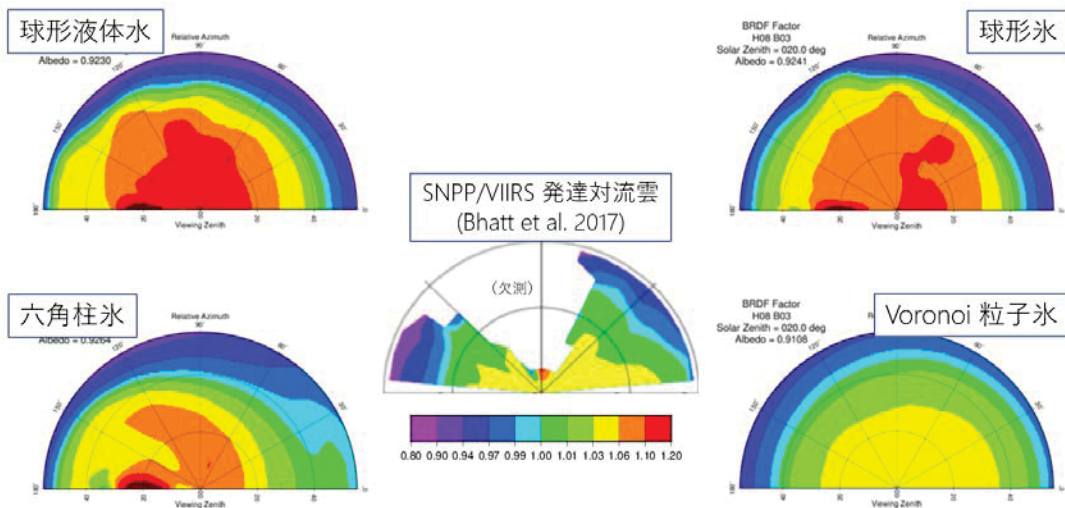


図2. 各粒子形状を仮定した放射計算により得られた、雲頂のBRDF (周囲)とSNPP/VIIRSによる発達対流雲観測に基づき生成されたBRDF (中央)。各図の極座標動径は衛星天頂角 ($0\sim 55^\circ$)、偏角は相対方位角 ($0\sim 180^\circ$)を示す。領域内の平均値を1として規格化している。算出時の条件は対象波長= $0.64\ \mu\text{m}$ 、雲の光学的厚さ=200、雲粒有効半径= $20\ \mu\text{m}$ 、太陽天頂角= 20° (中央のみ 22.5°)とした。

Crabパルサーの長期変動モニターによる星間プラズマゆらぎの検出へ
むけて Measuring the variation of the inter-stellar scintillation
by long-term Crab pulsar monitoring

宇宙航空研究開発機構 白田宇宙空間観測所 岳藤一宏

Crabパルサーは2600ほど発見されているパルサー天体のなかでも10例ほどしかない Giant Radio Burst (GRP) が放射されている特異なパルサーである (Knight, H. S., ChJAS 2006)。パルサーは数十 km ほどの非常にコンパクトな中性子星であると考えられており、このパルサーと地球間に存在する星間プラズマのゆらぎ (Inter-stellar scintillation, ISS) を検出することができる (Rickett, Nature1969)。Crabパルサー@327MHz帯ではISSは日単位で揺らいでおり、Crabパルサーの長期のモニタリングは非常に重要である。

我々は名古屋大学豊川電波観測所におけるデジタルバックエンドの整備を行い、Crabパルサーからのジャイアントパルス検出の成功、さらに東北大学飯館観測所と干渉実験を成功させた。2019年度は複数回、東北大学飯館観測所との干渉実験を実施した。名古屋大学豊川観測所ではクエーサを観測して、その受信振幅の揺らぎを太陽風によるシンチレーション (IPS) と捉え、通過する複数のクエーサから太陽風を推定している。このIPS観測で使用されるスケジュール、インドのGMRTで作成されたコンパクトクエーサーカタログ (TGSS, 150MHz) を比較しコンパクトかつ任意の強度より強い天体を選んだスケジュールを作成している。もちろんIPS観測でもコンパクト天体を選出しているが、450kmの干渉実験ではさらにコンパクトな天体が必要となる。作成したスケジュールに従って飯館電波望遠鏡と豊川観測所の間で干渉実験を実施した。Table1はその結果である。通常であれば、天体強度とSNRは相関性を持つが、この結果は相関性が低い。この要因はもちろんシステムに起因する可能性もあるが、感度が1日で数倍も変動する可能性は低いと考えられるため、太陽近傍を観測したことによる可能性が考えられる。結論としては、UT3時あたりの南中時付近 (3C152, 3C158, 3C48, 3C119) でフリッジが出ていない。豊川観測所が南中する天体をドリフトスキャンするため、太陽の影響を受けており、干渉計実験でその影響が出ていると推測できる。逆に言えばフラックスから太陽の影響を計測できる可能性もあり、この原因についても今後追及したい。

Table 1 干渉実験結果(2019年6月25日)。数字があるものはその天体の60秒で積分したSNR (\propto 天体強度)である。“N”と表示された結果は不検出である。1chは豊川V偏波と飯館A面H偏波の組み合わせで、2chは飯館側がB面H偏波、3chは飯館側がA面V偏波、飯館側はB面V偏波である

UT DOY176	source	1ch	2ch	3ch	4ch	TGSS[Jy]
2:42	3C152	n	n	n	n	24.0
2:59	3C158	n	n	n	n	25.9
4:39	3C190	n	n	21.3	16.1	20.8
5:30	3C208	n	n	10.8	7.6	23.1
5:47	3C216	7.9	7.3	12.3	7.2	28.4
6:29	3C230	n	n	31.4	26.3	26.9
6:45	3C237	8.7	n	74.3	70.1	27.0
7:56	3C255	8.8	n	56.1	39.5	15.1
8:20	3C263	n	n	13.7	11.1	20.5
11:25	1448+638	n	n	n	n	20.6
22:15	3C48	n	n	n	n	67.0
23:20	3C119	n	n	n	n	18.0

この実験ではCrabパルサーの観測も同時に実施している(Table2の3C144、Taurus-A)。Crabパルサーの観測はUT 2時(日本時間お昼11時)に行われ、南中から15度以内であった。興味深いことに、Crabパルサー近辺の3C152や3C158のフリッジが検出できていないにもかかわらず、Crabパルサーからのジャイアントパルス(GP)は検出できている(図1はその結果で、豊川観測所と飯館観測所(2ビーム、2偏波の4合成)の比較である)。Crabパルサーのジャイアントパルスは300MHz帯ではミリ秒の時間幅であるが、VLBIは数秒以上の積分時間が必要となる。まだ推測段階ではあるが2つの可能性を考えている。まず1点目は太陽シンチレーションの時間スケールがちょうど干渉計の数秒から数十秒とするところに最もインパクトがある。2点目は、空間スケールで300MHz帯の電波望遠鏡で観測できるでは問題なく、450kmの干渉計ではシンチレーションの影響がある。もちろんCrabパルサーのGRPをそれぞれの局で観測した結果も受信傾向が異なっており、短時間であっても何らかの影響があったと考えている。

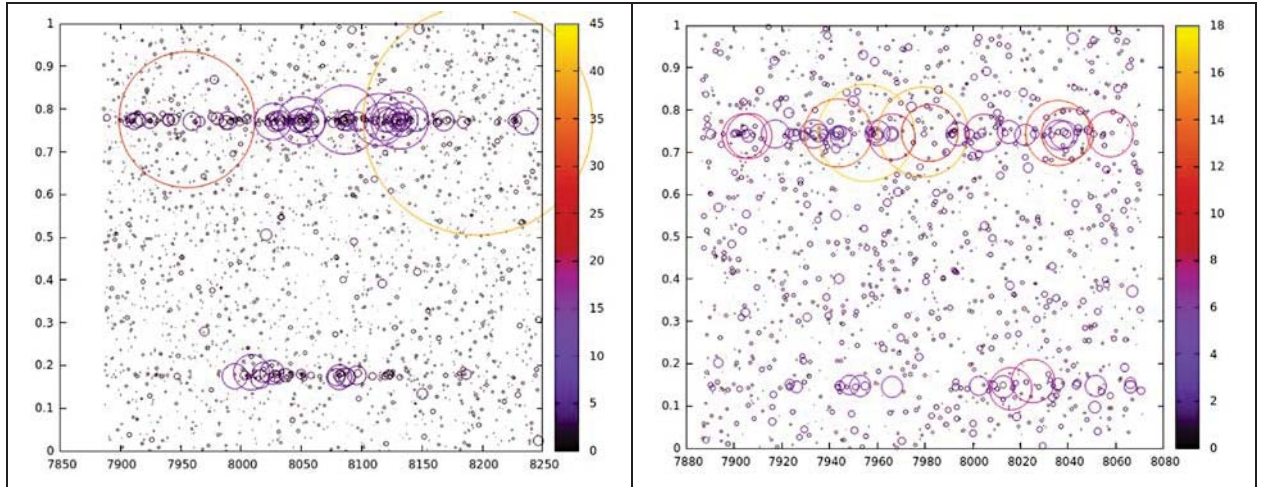


図 1 Crab パルサーの同時検出（左：豊川観測所、右：飯館観測所 4ch を合成）。横軸 UT0 時からの経過秒、縦軸がパルサー位相。

Water quality monitoring is vital tool to determine the pollution-prone areas which will help to conserve our planet. Contrary to open oceans, monitoring inland lakes and coastal areas is relatively a challenging task due to the presence of nutrients and organic matters that flows with a huge amount from the land. Researchers have been developing algorithms and techniques to monitor various waterbodies using satellite data. Deep neural network (DNN) is one of the promising techniques for water quality particularly with the recent advantages in this field such as overcome the vanishing gradient issue. Training & testing DNN required huge amount of dataset. However, one of the main obstacles is the limitation of in-situ measurements that cover various trophic statuses. The simulated dataset could provide a proper solution for that limitation. Therefore, the main objectives of our research are to 1) evaluate the current technique to simulate water leaving reflectance (Rrs) and 2) provide a reliable simulated dataset that represents various trophic statuses on a global scale.

The in-situ dataset that used to evaluate the current techniques was collected from global sites (i.e., East China Sea “ECS” & NASA “NOMAD”) as well as Japanese sites (i.e., Ise Bay & Ariake Bay). The in-situ dataset represents a wide range of trophic statuses with a chlorophyll-a (Chl_a) concentration ranged between 0.001 to 60 mg.m⁻³. Ciotti et al., [2002] proposed one of the famous techniques to simulate specific phytoplankton absorption (a_{ph}^s). Our evaluation for Ciotti technique showed its limitation to represent a_{ph}^s as shown in Fig. 1a, in which the simulated a_{ph}^s spectra using Ciotti technique shown in black, whereas in-situ a_{ph}^s spectra at different sites shown in other colors. Ciotti technique failed to represent the a_{ph}^s spectra magnitude at 450nm & 680nm and a_{ph}^s spectra shape between 520nm and 660nm. Thus, the in-situ a_{ph}^s spectra were classified into 10 classes using Hierarchical clustering technique (Fig. 1b). Ternary plot shown in Fig. 2 illustrates the relative contributions (percent) of absorption of phytoplankton, NAP and CDOM to the total absorption in case of various sites (Fig. 2a) and among 10 classes (Fig. 2b). In the case of global sites, the NAP represented < 15 % of total absorption (Fig. 2a). Most of classes 1-4 belonged to Global sites, whereas, classes 6-10 represented Japanese sites (Fig. 2b). To improve the simulation of Rrs, new algorithms to select phytoplankton absorption (a_{ph}) and a_{ph}^s at 440 nm based on Chl_a were proposed to replace Ciotti technique. the scatter plots in Fig. 3 show high correlation between Chl_a and a_{ph} & a_{ph}^s with R² of 0.73 and 0.70, respectively. Using these algorithms will provide a realistic selection of a_{ph}^s , resulting in an improvement in the simulation of Rrs.

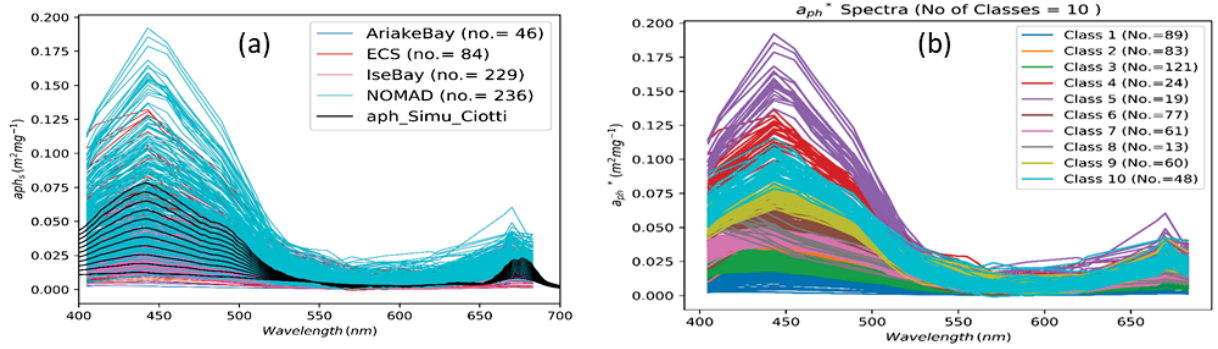


Fig. 1. (a) comparison between the simulated Specific absorption spectra (a_{ph}^S) (in black) comparing with in-situ a_{ph}^S . (b) The spectra of in-situ a_{ph}^S were classified into 10 classes using hierarchical clustering.

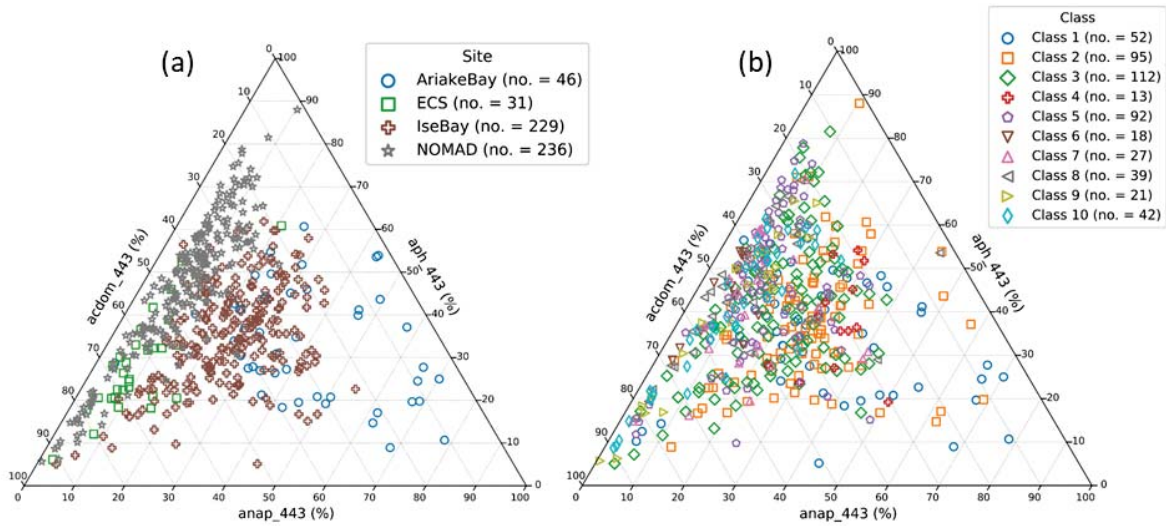


Fig. 2. Ternary plot showing the relative contributions (percent) of absorption of phytoplankton, NAP and CDM to total absorption. The color and symbol represent the (a) sampling site and (b) class corresponding to the 10 classes shown in Fig. 1.

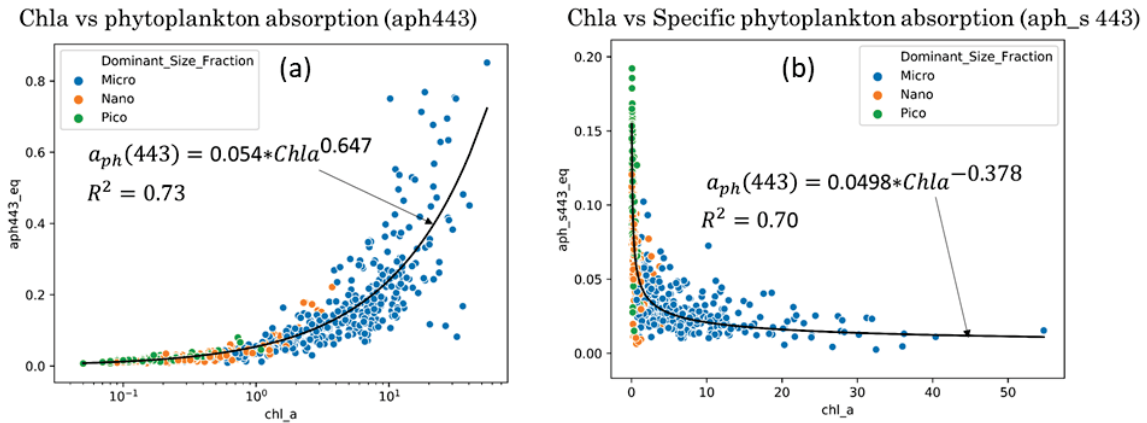


Fig. 3. Scatter plots of chlorophyll-a (Chl_a) versus (a) absorption of Chl_a at 443 nm and (b) specific absorption of Chl_a at 443 nm.

Sr 同位体分布図を用いた地殻表層物質の陸海域間の移動過程の解明
Elucidation of the transfer process of Earth's surface materials between land and sea using Sr
isotopic map

太田充恒、産業技術総合研究所・地質情報研究部門

1. 研究目的

産業技術総合研究所地質調査総合センターは、地殻表層における環境評価の基準図とすべく、河川堆積物・海洋堆積物を用いて、陸海域にまたがる広域元素濃度分布図の整備を進めてきた(今井ほか, 2004, 2010)。2010–2014年度には名古屋大学宇宙地球環境研究所と共同で、食品や考古学資料の産地推定(起源解析)を目的とした、陸域のストロンチウム(Sr)同位体分布図作成に取り組んだ。この結果、1)河川堆積物中のSr同位体比は母岩の値と類似する事、2)Sr同位体比分布は地質図と良く対応する事、3)動植物組織の産地・起源推定には、堆積物中の交換態Srが有効である事、などが明らかとなり、産地推定図としての有効性が明らかとなった(Jomori *et al.*, 2017; Minami *et al.*, 2017)。本研究課題では、これら環境評価・産地推定に継ぐ新たな課題として、堆積物・堆積岩の起源推定や物質移動過程解明へのSr同位体分布図の応用を目指す。2018年度の一般共同研究では、地質構造が比較的単純な淡路島を対象とし、河川堆積物はその母岩の同位体比を忠実に反映しており、堆積物・堆積岩の起源推定に使えることを明らかにした(太田・南, 2019)。今年度は、九州地方全域と広域のSr同位体分布図を用いて、詳細な背景地質と河川堆積物のSr同位体比の関係や、Sr同位体分布図を用いた“もの”の産地推定に応用できるかについて検討を行った。

2. 研究方法

調査地域は天草島・屋久島などの離島域を含む九州地方である。試料として、河床307地点から採取した河川堆積物を用いた。現地で2kgほど採取した河川堆積物は実験室内にて風乾後、ふるいを用いて180 μm以下の細粒砂を分別し、分析試料として用いた。試料をフッ酸－硝酸－過塩素酸を用いて加熱分解し、ICP発光分析装置及びICP質量分析装置にてRbやSrを含む51元素の濃度を測定した。Sr同位体比は、試料を950°Cの高温で加熱して有機物を取り除いた後、フッ酸－過塩素酸を用いて分解した。分解物は塩酸に溶解した後、陽イオン交換樹脂を用いて、Srを分離回収し、名古屋大学表面電離型磁場型質量分析計(VG Sector 54-30)で⁸⁷Sr/⁸⁶Sr同位体比の測定を行った。河川堆積物の母材である各種岩相が河川流域に占める面積比率については、地理情報システムソフトウェア(ESRI社 ArcGIS 10.5)を用いて解析を行った。

3. 研究結果

九州地方は、北部に白亜紀以前の変成岩や白亜紀花崗岩を基盤とし、南部はジュラ紀-新第三紀の付加体を基盤とする。これらの基盤岩を阿蘇火砕流堆積物や入戸火砕流堆積物など、主

に第四紀の火山性物質で広く覆われる。九州本島の河川堆積物は、100 km²に1点の割合と非常に粗い空間密度で採取されているが、白亜紀および古第三紀の花崗岩、白亜紀高圧変成岩、第四紀火山岩類を母岩とする河川堆積物の⁸⁷Rb/⁸⁶Sr及び⁸⁷Sr/⁸⁶Srデータは、それぞれの母岩の値とよく一致した。このことから、河川堆積物を用いて作成したSr広域分布図は、背景地質を忠実に反映した分布を示すことが明らかとなった。

次に、ジュラ紀付加体および白亜紀-古第三紀付加体由来の河川堆積物の⁸⁷Rb/⁸⁶Sr及び⁸⁷Sr/⁸⁶Srデータは、四国や紀伊半島で得られたこれらの付加体由来の河川堆積物と類似した値を示した。今後、中部、関東地方の付加体由来の河川堆積物の⁸⁷Rb/⁸⁶Sr及び⁸⁷Sr/⁸⁶Srデータについて系統的な変化を調べることで、付加体形成時における空間的および時間的な後背地の地質の変化を知る手がかりになる可能性がある。

九州地方北部には、筑豊炭田など炭層を伴う古第三紀の正常堆積物が分布している。この地域で採取された河川堆積物は、古第三紀付加体由来の河川堆積物の⁸⁷Rb/⁸⁶Sr及び⁸⁷Sr/⁸⁶Srとほぼ同じ値を示した。この結果は、古第三紀の付加体および正常堆積物の起源物質が共通しており、その堆積(形成)場が海溝域であったか浅海域であったかの違いに過ぎないことを反映していると解釈された。以上の結果より、河川堆積物はその母岩の同位体比を忠実に反映しており、空間精度の粗い広域Sr分布図でも堆積物・堆積岩の起源推定に使えることが明らかとなった。

4. 成果発表

太田充恒・南雅代「考古学資料・農作物の来歴・産地推定に向けた広域Sr同位体比図の作成」、表示・起源分析技術研究懇談会第21回講演会、東京電機大学、2019年8月8日(依頼講演)。

太田充恒「日本の地球化学図を用いた物質の起源・産地推定への応用」、プラズマ分光研究会第106回講演会、堀場製作所東京セールスオフィス、2019年5月31日(依頼講演)。

5. 引用文献

今井登, 寺島滋, 太田充恒, 御子柴, 岡井貴司, 富樫茂子, 松久幸敬, 金井豊, 上岡晃, 谷口政碩. (2004) 日本の地球化学図. 産業技術総合研究所地質調査総合センター.

今井登, 寺島滋, 太田充恒, 御子柴(氏家)真澄, 岡井貴司, 立花好子, 富樫茂子, 松久幸敬, 金井豊, 上岡晃. (2010) 海と陸の地球化学図. 産業技術総合研究所地質調査総合センター.

Jomori, Y., Minami, M., Sakurai-Goto, A. and Ohta, A. (2017) Comparing the ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr of the bulk and exchangeable fractions in stream sediments: Implications for ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr mapping in provenance studies. *Applied Geochemistry*, **86**, 70–83.

Minami, M., Jomori, Y., Suzuki, K. and Ohta, A. (2017) Grain-size variations in ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr and elemental concentrations of stream sediments in a granitic area: Fundamental study on ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr spatial distribution mapping. *Geochemical Journal*, **51**, 469–484.

太田充恒, 南雅代 (2019) 多段階の堆積サイクルを経た堆積物・堆積岩における源岩の初期 Sr 同位体比の保持—淡路島の細粒河川堆積物を例に—. 地球化学 **53**, 59–70.

” あらせ” と ” てんこう” を用いたジオスペース観測 Geospace observations by ”Arase” and ”Ten-koh”

Isai Fajardo Tapia, 奥山圭一, 九州工業大学院,
宇宙システム工学研究系

Abstract
This report summary presents the observation results of the space environment obtained by the Ten-Koh satellite and during the conjugation operation with the ARASE satellite. A brief overview of the Ten-Koh satellite mission is presented followed by the results summary obtained from the Liulin detector. The extended report contains additional information about the satellite operations history, satellite observations, and failure events and their correlation with some space weather parameters.

The Ten-Koh satellite mission overview

The Ten-Koh satellite is a small satellite of 23.5 Kg mass, that was developed over a period of 16 months mainly at Kyushu Institute of Technology (Kyutech), while some payload instruments were designed and developed in parallel in Australia, Bulgaria, and the USA [1]. Ten-Koh is based on the platform of a previous small deep-space probe Shimen-2, developed and launched by Kyutech in 2014. The main structure of Ten-Koh is composed of a CFRP composite shell with a rigid internal load-bearing structure made of aluminum alloy (Al 6061-T6). The satellite was launched on 29 October 2019, as a piggyback of the GOBAT-2 launch on-board the H2-A rocket F40. After the launch, the final orbit was confirmed to have a quasi-Sunynchronous orbit with an inclination of 97.8 degree, an orbital period of 96.6 minutes, 4 revisit times per day over the Kyutech ground station, a revisit cycle of 9 days, and a local equator crossing time of descending node at 13:00 hours. The satellite mission have the following primary objectives:

- To characterize the plasma environment around a spinning spacecraft
- To detect MeV-range electrons in LRO and investigate the space environment in the presence of an extreme low solar activity
- To investigate the change of physical properties of LATS (Lightweight Ablator series for Transfer vehicle) and CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) material samples exposed to the space environment

One of the main payload instruments is the charged particle detector (CPD), composed by 8 CMOS detectors and the Liulin spectrometer, all mounted on a 3D-printed structure made of polyether ether ketone (PEEK) for static guard. The present report includes the data observed by the Liulin spectrometer, which uses the definition of the absorbed dose to measure the deposited energy in 256 channels.

$$Dose : D [Gy] = \frac{K \cdot 256 \cdot \sum_{i=1}^{256} E_i \cdot I_i}{A \cdot D \cdot t} \quad (1)$$

Where D is the measured dose (in Gy); K is a coefficient that relates the conversion of joules into MeV, Gy into μ Gy and time in seconds into hours; E_i is the energy loss in the channel i in the detector. The particles flux is computed as the sum of the events number in channel i divided by the area of the detector and the real exposition time

$$Flux : \Phi = \frac{\sum_{i=1}^{256} \text{particles}}{cm^2 \cdot s} = \frac{\sum_{i=1}^{256} A_i}{S_d \cdot \Delta t} \quad (2)$$

Where Φ is the flux (in particles/cm²/s), A_i is the number of events in channel i , S_d is the detector area (in cm²), and Δt is the Liulin real exposition time.

Ten-Koh satellite observations from the CPD-Liulin detector

The determination of the particle type contribution to the data was performed following the procedure showed in [2] and by using equations 1 and 2. Using 198 Liulin spectra data available, the particle type separation resulted in the latitudinal distribution of figure 1.

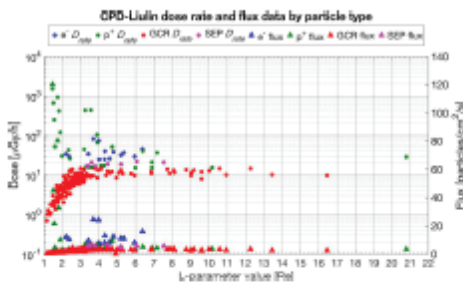


Figure 1: Liulin major particle distribution from the spectra data. 198 spectra data were measured between 19 Nov 2019 and 19 Jan 2020.

The averaged spectra for the dose rate and the integral flux of the separated particle contribution (as a function of the deposited energy), is presented in figure 2.

TID effects inside of the satellite

The TID effects are directly evaluated by computing the dose rate from the Liulin spectrometer and presented in a latitudinal distribution along the satellite orbit. Each spectrum has an average exposition time of 29.6 seconds, or a spatial separation of 222 km. When considering the cumulative dose, GCR becomes the second-highest source after protons, which is presented in figure 3.

The dose rate distribution for electrons agrees with the presence of those in the outer belt region. It is approximately evenly distributed for $3 < L < 7$ (the outer radiation belt) and presents an increased dose rate value for $3 < L < 4$. This increased value comes from spectra data measured when the satellite was flying outward from the SAA. In the case of protons, the highest dose rate occurs at $1 < L < 2$ due to the inner belt trapped protons from the SAA. This is expected even behind the shielding of the external structure of the satellite (presence of protons with energies > 29 MeV). SEP events are present at higher latitudes ($L > 3$). Due to the solar conditions at the time of the data acquisition, a low number of SEP events were expected to encounter. From the dose rate measured data, the cumulative dose from the 198 spectra obtained provides the average dose contribution of each particle and the total dose latitudinal distributions presented in figure 4.

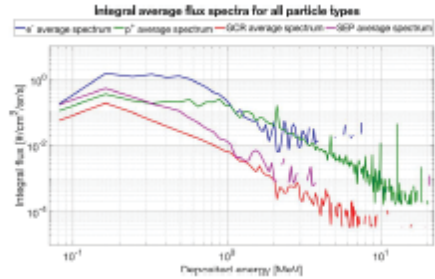


Figure 2: Liulin major particle contribution from the average spectra data. 198 spectra were analyzed.

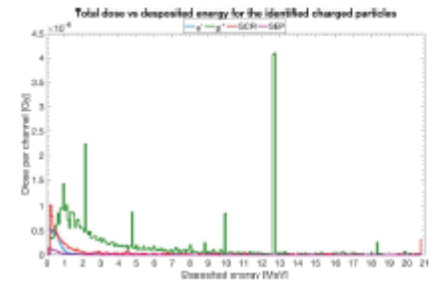


Figure 3: Total dose as a function of the deposited energy for each of the four major particle contributors.

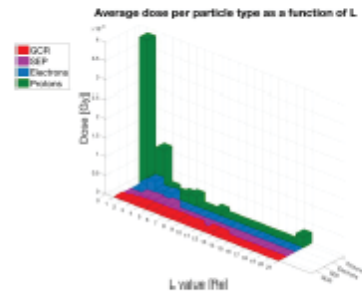


Figure 4: Average dose per particle as a function of L.

Conclusions

Preliminary analysis of the CPD-Liulin data has shown that this main mission was able to acquire data within the expected ranges. The Liulin detector has detected electrons, protons and galactic cosmic rays, which provides information about the radiation environment inside the spacecraft. Above all, the in-orbit data have shown that the university-built satellite worked as intended, which is a success in its own right due to the limited resources that were available for its development.

The joint observations with the ARASE satellite were carried out for short periods of time due to the limited conjunction points (typically in the order of 3 minutes or less for the period between Dec 2018 and Jan 2019). However, the Liulin observations showed that small-satellites could be used as a complement to other missions investigating the space environment.

References

1. Isai Fajardo, Aleksander A. Lidlin, Sili Ahmed Bendoukha, Jesus Gonzalez-Lorenzo, Rafael Rodríguez, Rigoberto Morales, Dmytro Fezulin, Mizuru Matsuoaka, Naoya Urakami, Ryo Kawachi, Masayuki Miyazaki, Naofumi Yamagata, Ken Hatanaka, Farhan Abdallah, Juan J. Rojas, Mohamed Elbady Kenik, Krutik Coorras, Tagulak Uairbayev, Premkumar Sagarti, Doug Holland, Tevetan Dachev, Sean Tuttle, Roger Dudriak, and Kei-ichi Okuyama. Design, Implementation, and Operation of a Small Satellite Mission to Explore the Space Weather Effects in Leo. *Aerospace* 2019, 6(10):108, oct 2019.
2. T. P. Dachev, N. G. Bankov, B. T. Tomov, Yu. N. Matvichuk, P. G. Dimitrov, D.-P. Hider, and G. Horneck. Overview of the ISS Radiation Environment Observed during the ESA EXPOSE-R2 Mission in 2014–2016. *Space Weather*, 15(11):1475–1489, 2017.

航空機・地上観測と数値モデル計算による
エアロゾルと雲に関する研究
Study of aerosol-cloud interactions using aircraft and
ground-based measurements and numerical modeling

小池真、東京大学、理学系研究科

1. 研究目的

エアロゾルは雲凝結核や氷晶核として働くことにより、雲粒の相（水滴/氷晶）やその粒径分布に影響を与える。このような雲微物理特性の変化は、降水や雲粒の蒸発などを介して雲の厚さや雲量といった雲のマクロな構造に影響を与える。アジアは世界的に見ても人間活動により大気中のエアロゾル濃度が高いレベルにあり、雲・降水に対し他の領域よりも強く影響していると考えられる。また黄砂として知られるダスト濃度も高く、氷晶核として強く影響している可能性がある。一方において、北極は近年において急激な地球環境変化が起きており、エアロゾルや雲の影響が注目されている。本研究の目的は、今後の西太平洋や北極での航空機観測においてどのような観測を実施、その結果、どのような成果があがるのか、研究計画を作成することである。

2. 研究方法

これまでの東アジアや北極で私たちや他の研究グループが実施してきた航空機観測や地上観測をレビューするとともに、今後の観測研究の在り方について検討する。このような検討により、今後さまざまな観測計画を立案するための科学的戦略を立てられるとともに、必要な観測機や数値モデルの整備などを実施するための知見を得る。

3. 結果・考察・まとめ・成果発表

東アジアおよび北極で日本の航空機が観測可能なエリアの再調査を実施した。また今後のエアロゾル・雲研究の重要な課題について整理した。そしてこれらの課題を解決するための測定項目・機器および観測戦略についてまとめた。

これらの研究成果は、日本気象学会、日本大気化学会、日本航空宇宙学会が日本学術会議の大型研究マスタープラン2020に共同提案した「航空機観測による気候・地球システム科学研究の推進」計画の立案に反映された。

小池真，航空機観測による気候・地球システム科学研究の推進，日本地球惑星連合2019年大会，幕張メッセ，2019年5月26-30日。

小池，高橋暢宏，岩崎俊樹，伊藤健，航空機観測による気候・地球システム科学研究の推進：大型研究マスタープラン2020への提案，大気化学討論会，愛知，11月5日-7日。

小池真，高橋暢宏，岩崎俊樹，伊藤健，航空機観測による気候・地球システム科学研究の推進：大型研究マスタープラン2020への提案，日本雪氷学会・日本雪工学会共済 2019年雪氷研究大会，山形，2019年9月9日。

宇宙天気インタプリタ養成のためのプログラム開発
Program development for Space Weather Interpreter training
野澤恵、茨城大学・理学部

1.研究目的

科学成果還元の情報活動やアウトリーチは重要と認識され、その内容も研究者から一方的発信でなく、一般社会からのフィードバックと双方向性が必要となっている。その双方向性を担うインタプリタ（翻訳者、解説者と訳されることもあるが、ここでは広義の仲介者とし、これからはIPと略す）が必要とされている。本研究では、その宇宙天気及び宇宙気候のIPの養成をゴールとして、まず宇宙天気の影響を受けやすい人工衛星運用でのIPを検討する。

2.研究方法

本研究では、タウンミーティング形式の議論の場を形成し、最新の研究成果の発表を研究者が行い、その成果である科学的な知見が実際の宇宙環境に反映されるかの解説をIPが行うことが理想の形であるが、その前段階としての簡易的な取り組みを考え、その養成プログラムの開発を行う。

3.活動報告

3.1 第64回宇宙科学技術連合講演会

第64回宇宙科学技術連合講演会（2019年11月7日、徳島県徳島市、アスティ徳島）の宇宙教育セッションにて「宇宙天気インタプリタの実践報告と育成計画」と題し¹⁾、宇宙天気IP構想の紹介を行った。研究と社会の間に死の谷（デスバレー）が存在し、大学等の研究機関での素晴らしい研究成果も残念ながら、社会の現場には届いていない現実とその打開策として宇宙天気IPの役割が重要であると述べた。

3.2 第16回宇宙環境シンポジウム

第16回宇宙環境シンポジウム（2019年11月13日、神奈川県横浜市、東京都市大横浜キャンパス）にて「社会インフラを護る宇宙天気インタプリタ」と題し²⁾、宇宙天気IP構想の紹介を行った。宇宙環境の理工学研究、実務利用者が集まる中で3.1で述べた「死の谷」問題、特に宇宙天気災害に対する衛星運用現場への杞憂を述べた。現状では、宇宙天気擾乱時には有志が衛星オペレータに対して注意喚起を行っている状況に、関係者は危機感を募らせた。

3.3 宇宙天気防災勉強会

タウンミーティング形式の議論の場の形成の準備段階として、月一回ネットミーティング形式で宇宙天気防災勉強会を実施している。参加者は、宇宙天気研究者・学生、宇宙開発、宇宙教育、宇宙事業投資関係者等である。



宇宙天気研究と実務間の2つの死の谷 (デスバレー)

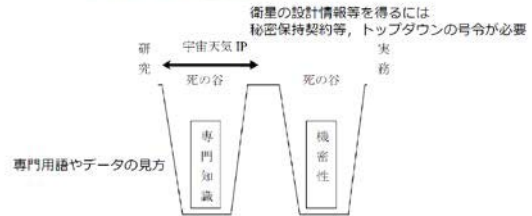


図1 宇宙天気における研究と実務の死の谷
宇宙天気研究が現場に伝わらない、現場の情報が研究者に伝わらない。

宇宙天気擾乱時の対応プロトコル (参考情報として提供)

上流：太陽太陽フレア 影響の有無

下流：地球磁気嵐 影響の有無

現在の対応：宇宙天気アナリスト(私)がウォッチし、極端オペレータに注意喚起ヒトが判断し、ヒトに指示を与えるのが効率的

将来的仕事：宇宙天気インタプリタが、研究者と協力してノウハウをAIに学習させ、その判断結果を確認する事が主な任務に

対応内容	対応内容
【対応1】 G0ES 衛星 太陽黒点観測衛星 (G0ES) 太陽フレア発生	【対応1】 G0ES 衛星 静止軌道の衛星プラットフォームをウォッチ、プロトコルに従って対応
【対応2】 G0ES 衛星 静止軌道の衛星プラットフォームをウォッチ、プロトコルに従って対応	【対応2】 G0ES 衛星 静止軌道の衛星プラットフォームをウォッチ、プロトコルに従って対応
【対応3】 SOHO 探査機 コロナグラフをウォッチ、衛星運用に支障を及ぼす現象を監視	【対応3】 SOHO 探査機 コロナグラフをウォッチ、衛星運用に支障を及ぼす現象を監視
【対応4】 ACE 探査機 太陽風データをウォッチ、サブシステムに支障を及ぼす現象を監視	【対応4】 ACE 探査機 太陽風データをウォッチ、サブシステムに支障を及ぼす現象を監視
【対応5】 G0ES 衛星 静止軌道の衛星プラットフォームをウォッチ、プロトコルに従って対応	【対応5】 G0ES 衛星 静止軌道の衛星プラットフォームをウォッチ、プロトコルに従って対応

衛星運用現場の宇宙天気IP

- ▶ 研究者の言葉を人工衛星オペレータに翻訳
- ▶ 人工衛星オペレータから研究者へのフィードバック
- ▶ 宇宙天気災害と人工衛星の両方の知見 組織の垣根を越えた役割



宇宙天気災害を体系的に学べる教育機関が欲しい!

- ▶ 衛星運用現場の宇宙天気IPに必要な知見
 - ▶ 天文・地球物理 (太陽物理学, 地球電磁気)
 - ▶ 航空宇宙 (衛星設計, 衛星運用, リスク評価)
- ▶ 突き詰めた研究を目指すというより
- ▶ 専門職大学院の様な

宇宙天気予報が当たり前の時代

地理学と宇宙天気に夢中な 40年後 (2059年) 未来の宇宙天気予報士 気象予報のように日常的に利用される時代になったら?

宇宙天気予報が当たり前の時代 与 電気や通信に命が大きく関わる時代 ↓ 精度や予報の丁寧さが求められる

電力障害 <ul style="list-style-type: none"> 生活のほぼ全てに必要 (医療, 交通, 空調など) 利用高度化, 地球規模で長期停電 	測位障害 <ul style="list-style-type: none"> 自動運転が主流に 位置情報の誤差で迷子, 交通事故
宇宙放射線被曝 <ul style="list-style-type: none"> 一般人でも宇宙へ行ったり, 宇宙で働くように 宇宙天気予報の正確さ, 長期の被曝予想, 被曝量の管理 (問い合わせなど) 	通信障害 <ul style="list-style-type: none"> 現在では問題にならない小さな擾乱でも人命に関わるのでは

4. 成果論文

- 1) 玉置晋, 石田彩貴, 野澤恵., 宇宙天気災害から社会インフラを守る～宇宙天気インタプリタ～, 第63回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2H04 (JSASS-2019-4352), 2019年.
- 2) 玉置晋, 石田彩貴, 野澤恵., 社会インフラを守る宇宙天気インタプリタ, 第16回宇宙環境シンポジウム講演論文集 (ISSN 2433-2232(Online) JAXA-SP-19-009), p65-67, 2020年.

ALMAフレア観測に向けた野辺山電波ヘリオグラフによる粒子加速研究
Study of particle acceleration using NoRH forward
the preparation of ALMA flare observations

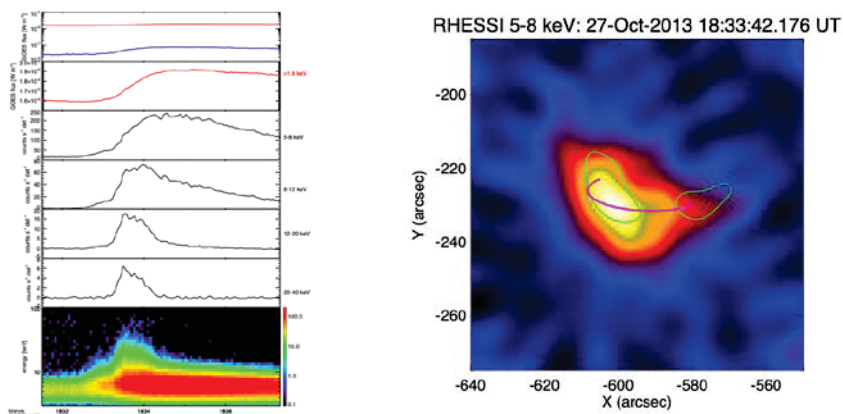
下条圭美、国立天文台・アルマプロジェクト

ミリ波による太陽観測における科学目標は、太陽フレアによって加速される電子を観測し、太陽フレアにおける粒子加速過程を明らかにすることである。太陽における粒子加速を理解することは、太陽圏の高エネルギー粒子環境を理解する上で重要なだけでなく、宇宙の至る所で起きている粒子加速の理解にも重要である。

2000年代以降、他波長の観測では1秒角をきる空間分解能の観測が当たり前となり、10秒角の空間分解能の野辺山電波ヘリオグラフ (NoRH) の電波画像データと他波長画像データとの比較による科学成果の創出が難しくなっている。2016年から太陽観測提案の受付を始めたアタカマ大型ミリ波/サブミリ波干渉計 (ALMA) は、66台のアンテナにより、これまでにない高空間分解能でのミリ波太陽画像を提供している。この空間分解能を用いて太陽フレア内の加速された電子の空間分布を得ることができ、他波長の観測の比較により太陽フレアの中でどのループに加速電子が局所化しており、そのループの磁場構造や物理状態を調べることができるだろう。このような解析により、太陽の粒子加速研究は大きく進展すると思われる。しかし、ALMAの科学観測ではいまだフレアの観測例は存在していない。ALMAが太陽専用の観測装置ではないため太陽観測時間が短いことと、ALMA太陽観測が開始したのが太陽極小期に近く減衰期であったためである。次期太陽極大期にむけ、これまでのNoRHにて観測されたフレアデータとALMAの静穏領域の観測データを基に、優れた観測提案をALMA観測所へ提出すべく、事前準備を行うのが、本共同研究の目的である。

本年度は、客員でISEEに滞在されていた、RHESSI衛星計画のPIでありSolar Orbiter搭載の硬X線太陽望遠鏡(STIX)のPIでもあるSäm Krucker博士(FHNW, UCB)とも共同研究し、ALMAの太陽コミッション(観測手法開発)キャンペーン中において、不完全ながら観測された小さなフレア(GOESクラス C1.9)[1]のRHESSI衛星による硬X線画像合成およびスペクトル解析を行った(下図)。その結果、ALMAにより非熱的放射を捉えている可能性があることがわかった。今後は、このデータの詳細解析を行い、ALMAへの観測提案を洗練していく予定である。

[1] 下条圭美「アルマ望遠鏡による太陽観測」天文月報2018年5月号



高エネルギー降下粒子が金属原子層・金属イオン層に与える影響 Impact of the energetic particle precipitation on the metallic atom/ion layers

津田卓雄, 電気通信大学・情報理工学研究科

研究目的

中間圏/下部熱圏領域には流星起源とされるNa原子/Naイオンなどの金属原子層/金属イオン層が分布している。当該高度範囲は、電離圏D/E領域に位置し、磁気圏からの高エネルギー降下粒子による金属原子層/金属イオン層への直接的な影響が予想されるが、その詳細については不明な点が多い。

本研究では、磁気圏から超高層大気へと降り注ぐ高エネルギー降下粒子がNa原子層/Naイオン層などの金属原子層/金属イオン層に与える影響に関する理解を前進させることを目指している。特に、現在入手可能な長期の(複数年以上の)データセットの収集と解析を行い、統計的描像に関する調査を中心に進めていく。

研究進展状況

昨年度に引続いて、複数の金属原子層・金属イオン層について並行的にデータ収集を進め、順次データの解析を進めている。

南極昭和基地 Na ライダー観測から得られた Na データ (2000-2002年) の収集と解析を進め、昨年度のデータ解析でオーロラ活動活発時に Na 密度が減少する傾向を確認した。この傾向は、一昨年度の調査結果(極軌道衛星 Odin/OSIRIS による Na データを用いた調査結果)と整合的であった。今年度は、昭和基地の CNA データを併用して、高エネルギー降下粒子と Na 密度の直接比較を進めた。その結果、CNA の増大に呼応する Na 密度の顕著な減少を見出した。更に、定点観測データである昭和基地 Na データの特徴を活かし、MLT 変化に着目した調査を進めた結果、夕方から真夜中、朝方へと MLT が進むにつれて Na 密度の減少率が大きくなることが判明した。Na 密度減少率の MLT 変化特性は、磁気圏における高エネルギー電子の朝側方向へのドリフトに対応する傾向であると解釈される。以上に関して学術論文 (Tsuda et al., EPS, in prep.) を執筆中である。

Envisat/SCIAMACHY による Mg, Mg⁺ データ (2002-2008年) の収集と解析を進め、オーロラ活動活発時に Mg⁺ 密度が増大する傾向を見出した。一方で、Mg 密度には顕著なオーロラ応答の兆候は確認できなかったが、Mg 密度データについてはデータクオリティが十分ではなかった可能性もあり、より詳細な追加調査/検討が必要な状況にある。

高エネルギー電子に対する Na の応答プロセスに関する理解を深める為、観測データの解析に加えて、モデル計算の取組みを進めている。具体的には、大気電離モデルと金属組成化学モデルを組み合わせ、高エネルギー電子による大気電離効果が駆動する金属組成化学過程のモデル計算を試みている。モデル計算に用いる大気電離効果と Na/Na⁺ 化学過程, Mg/Mg⁺ 化学過程に関する計算コードの基礎的な開発は完了しており、今後は、現実的な範囲で様々な条件を与えて計算実験を繰り返すことで、高エネルギー電子に対する Na/Na⁺, Mg/Mg⁺ の応答プロセスに関して詳細に調査していくことを予定している。

研究発表

津田卓雄, 中村卓司, 江尻省, 西山尚典, 津野克彦, 野澤悟徳, 斎藤徳人, 川原琢也, 川端哲也, 高橋透, 阿保真, 和田智之, 光リモートセンシングによる地球超高層領域の大気組成の観測, レーザー学会 学術講演会 第40回年次大会, 宮城, 2020年1月. (招待講演)

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-PARCI」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いる。これまで非常に強い勢力の2017年台風第21号、そして猛烈な勢力の2018年台風第24号の中心で観測を行うことに成功し、台風の力学的・熱力学過程に関する重要なデータを取得している。台風の中心を貫通する飛行は、これらの過程だけでなく雲物理過程、放射過程の理解の上でも重要であり、様々な測器を用いた観測の発展が期待される。しかし、飛行の安全性については確証が得られていない。上記の2事例では、台風の強度がピークに達した後に観測が行われているが、米国における過去の飛行実績によると、強度が急速に増加する「急発達」の期間において、対流圏下層で非常に強い揺れが報告されている。米国と異なり、上記のプロジェクトでは対流圏上層を飛行するため、下層の非常に強い風の影響は受けないものの、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、対流圏上層にも飛行に影響をもたらす大気現象の存在が想定される。これらの現象を観測するのは非常に難しく、安全性の検討は困難である。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

雲解像モデルを用いて台風が急発達して猛烈な勢力に至るまで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水平シアと鉛直速度の水平勾配の分布を調べる。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。本年度は台風の急発達の数値シミュレーションの実績がある2008年台風第6号(Fengshen)について、全球雲解像モデルNICAMの計算結果を用いて解析を行った。水平解像度は3.5kmである。

研究結果と今後の課題

中心気圧が911hPaまで低下する急発達時において、台風の中心から200kmの範囲にある各格子点で相対渦度と鉛直速度を計算し、その3次元ヒストグラム(Contoured Frequency by Altitude Diagram, CFAD)を作成し、ピーク値の高度分布を調べた。その結果、強い渦度のピークは高度0.5km付近にあり、その強度はメソサイクロン（竜巻をもたらす積乱雲の回転）と同程度であり、高度の増加とともに急速に

弱まることが分かった。米国NOAAによるハリケーン観測で使用される飛行高度3kmと、T-PARCIIで使用した飛行高度13.8kmとを比較すると、後者の強さは前者の半分程度であることがわかった。

この強度が小型ジェット機の航行にどの程度の影響を与えるかはさらなる調査が必要であるが、安全に航行できる高度を見出すことは、台風航空機観測の計画立案や、観測用航空機の機種選定において有用であると考えられる。さらに、汎用的な民間旅客機で台風の中を安全に通過する航空路を開拓する上でも役立ち、年々逼迫するアジア域の航空輸送効率の向上にも貢献すると期待される。

成果発表（論文・著書）

Ohigashi, T., K. Tsuboki, Y. Suzuki, **H. Yamada**, K. Nakagawa, 2019: Characteristics of upper-tropospheric outflow-layer clouds of Typhoon Francisco (2013) observed by hydrometeor videosonde. *Atmospheric Research*, **235**, 104736, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104736> (12月受理)

成果発表（口頭発表）

山田 広幸, 2019: 琉球列島の地上レーダーと航空機を組み合わせた台風強度の最適推定方法の検討。「航空機観測による気候・地球システム科学研究の推進」研究集会, 東京大学理学部, 東京都文京区, (12月23日), 口頭発表.

Yamada, H., N. Ito, A. Morita, 2019: Discrete Propagation of Convective Rainbands Observed in the Ryukyu Islands, Severe Weather and TAHOPE Planning Workshop, Taipei, Taiwan, (10月14日), 口頭発表.

山田 広幸, 2019: 琉球列島の地上レーダーと航空機を組み合わせた台風強度の最適推定方法の検討, 名古屋大学宇宙地球環境研究所 ISEE コミッティーミーティング, 名古屋大学, 名古屋市, (6月19日), 招待講演.

Yamada, H., K. Tsuboki, T. Shinoda, H. Kubota, Y. Takahashi, N. Nagahama, K. Shimizu, T. Ohigashi, K. Ito, M. Yamaguchi, and T. Nakazawa: 2019: A change in the inner-core structure of Typhoon Trami (2018) as observed through upper-tropospheric aircraft reconnaissance of T-PARCII. 日本地球惑星科学連合 2019年大会, 千葉市, (5月30日), 招待講演.

山田 広幸, 坪木 和久, 篠田 太郎, 久保田 尚之, 高橋 幸弘, 長浜 則夫, 清水 健作, 大東 忠保, 伊藤 耕介, 山口 宗彦, 中澤 哲夫, 2019: New observation strategies for typhoon intensity over the western North Pacific. 日本地球惑星科学連合 2019年大会, 千葉市, (5月28日), 口頭発表.

山田 広幸, 坪木 和久, 篠田 太郎, 久保田 尚之, 高橋 幸弘, 長浜 則夫, 清水 健作, 大東 忠保, 伊藤 耕介, 中澤 哲夫, 山口 宗彦, 2019: 航空機観測で捉えた 2018 年台風第 24 号の内部構造の変化, 日本気象学会春季大会, 東京都渋谷区, (5月18日), 口頭発表.

原子核乾板を用いた宇宙線ミュオンフラックスの測定
Measurement of cosmic-ray muon flux with nuclear emulsion
(1行スペース)

森島邦博、名古屋大学・理学研究科
(2行スペース)

研究目的

本研究では、原子核乾板を用いた宇宙線ミュオンのエネルギースペクトルの測定手法の開発を行う。

代表者らは宇宙線ミュオンを利用した巨大物体内部の可視化技術「宇宙線ミュオンラジオグラフィ」の技術開発を進めており、これまでに原子炉やピラミッドなどに適用し、その手法はさまざまな分野へと広がりがつつある。宇宙線ミュオンラジオグラフィは、観測対象を通過する宇宙線ミュオンの飛来方向を3次元的に検出する事で行う。検出したミュオンの飛来方向分布から観測対象を通過した際の宇宙線ミュオンの吸収量を推定する事で観測対象内部に存在する物質質量(密度長)を求める事が出来る。この吸収量の推定のためには、観測対象へ入射する宇宙線ミュオンの特性(飛来方向分布とエネルギースペクトル)を理解する必要がある。特に、宇宙線ミュオンのエネルギースペクトルは低エネルギー領域(10GeV以下)において実測データが十分ではない。このエネルギー領域は、石造構造物(密度2g/cm³程度)の場合には厚さ20m程度に相当する。このような厚さの対象としては、高速道路の盛土、堤防などが考えられるため、低エネルギー領域のミュオンフラックスの実測は、社会インフラの老朽化検査などへの応用に資する貴重なデータとなる。また、これまでに得られている他の実験データやモデルとの比較においても重要なデータとなる。

研究方法

一様性が高い物質でありその厚さを自由に変えた試験が容易な水と水中での観測に適した原子核乾板を組み合わせることで、宇宙線のエネルギー分布とその天頂角依存性を測定するための手法の確立および測定を行う。

原子核乾板は、銀塩写真フィルム的一种であり、電源不要・軽量・コンパクトな検出器である。防水・防塵性を備えた遮光フィルム(アールミラミネートフィルム)に入れて用いる事で水中での使用も含めた任意の場所での宇宙線の測定が可能である。また、原子核乾板は広い天頂角に渡ってそのフラックスの測定が容易である。これらの特徴を生かし、水中の異なる深度に原子核乾板を設置して宇宙線を観測する事で、各々の原子核乾板の設置深度に対応するエネルギーを閾値とした宇宙線ミュオンの積分フラックスを測定して任意の方向のエネルギー分布を導出する。

結果とまとめ

名古屋大学理学部C館前に水深83cmの簡易プールを設置して宇宙線

を観測した。水深0cm、6cm、31cm、53.5cm、76.5cmに原子核乾板検出器を設置して4日間（94.8時間）にわたり宇宙線を観測した。例えば、水深76.5cmでは196MeV以上のエネルギーのミュオンが原子核乾板により検出される。観測中の気温平均は26.9℃、水温平均は26.4℃、気圧平均は1012.3hPaであった。図1に観測装置の概観、図2に各々の水深に設置した原子核乾板から得られた天頂方向の積分フラックスを示す。この結果は、電子なども同時に計測している事が考えられるが、本研究により、水中でのミュオンのエネルギースペクトル観測の手法を確立した。今後は、天頂角依存性の導出及びより深い水深での観測を進める計画である。

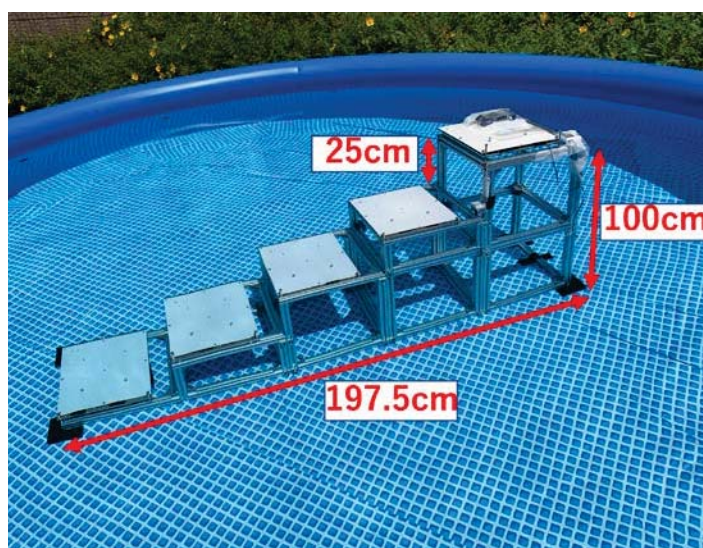


図1. 簡易プールに設置した原子核乾板検出器の概観

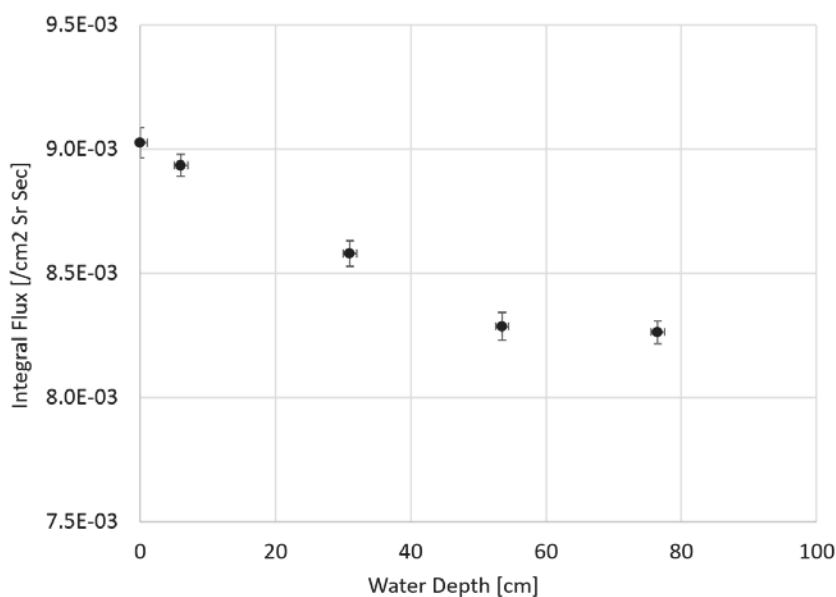


図2. 観測結果

光励起ルミネッセンス (OSL) 年代測定法による第四紀編年の高度化 Development of Quaternary dating with optically stimulated luminescence methods

田村 亨、産業技術総合研究所・地質情報研究部門

研究目的

光励起ルミネッセンス (OSL: Optically-Stimulated Luminescence) 年代測定法は、自然放射線による鉱物粒子の損傷に起因する発光現象を利用した年代測定方法である。放射性炭素年代測定に比べて適用年代範囲が数十年～数十万年と広いこと、また石英や長石の堆積物粒子に直接適用できることが特徴で、非常に汎用的な第四紀年代測定法である。その一方で、放射性炭素年代測定が適用できる200～4万年前の地層では、放射性炭素年代よりも精度の面で劣る。また、信頼性の結果が得られるには、粒子が堆積直前に太陽光に露光してルミネッセンス信号がリセットされている必要があるため、河川や海底、湖底などでは信頼性が十分に保証されない。そこで、名古屋大学宇宙地球環境研究所で得られる放射性炭素年代と比較することで、沿岸域の沖積層等のOSL年代の妥当性を検証し、信頼性の高い年代値の評価方法の検討を行った。

研究方法

本研究で用いた堆積物・貝殻・植物片の試料は、ベトナム中部Hoi An近傍のThu Bong川三角洲、ベトナム南部Can Gioのマングローブ林地下の沖積層から採取した。それぞれの地域においてボーリングにより深度40mまでの堆積物試料を掘削し、堆積物の記載に基づく柱状図を作成した上でOSL年代測定用の堆積物と、貝殻・植物片を採取した。OSL年代のための試料処理と測定は産業技術総合研究所で行い、放射性炭素年代のための試料処理は名古屋大学宇宙地球環境研究所において行い測定は同研究所のタンデム加速器において行った。得られたOSL年代と放射性炭素年代を比較し、両地域の浅海域の堆積物に応用した場合のOSL年代の妥当性を検討した。

研究結果

Thu Bong川、Can Gioともに、OSL年代は放射性炭素年代によく一致した。Thu Bong川では1000～9000年前、Can Gioでは現在～5000年前の年代が得られた。Thu Bong川では最大20 m、Can Gioでは最大25 mの水深で形成された堆積物が認められたが、OSL年代は全体に放射性炭素に整合的であった。また両地域ともに石英だけでなく、露光によるリセットが起こりにくい長石についてもOSL年代を求めたが、両者はよく一致した。

考察・まとめ

浅海環境、特にMekong河三角洲の近傍であるCan Gioでは浅海域の濁度が高く、浅海底では太陽光への露光が期待できないが、今回石英と長石のOSL年代と放射性炭素年代との整合的な結果は、粒子が浅海底に運搬される前の海岸や河川を通過する時に露光したと考えられる。また、石英と長石のOSL年代の比較は、露光状態を確かめるのに有用と考えられているが、それがベトナムの2つの地域の浅海底でも有効であることがしめされた。今後さらに同様の研究を積み重ねることで、OSL年代測定の精度・信頼性を高めることができる。今年度の成果のうち、Can Gioでの結果を国際学会でポスター発表した (Collins et al., 2019)。

引用文献

Collin DN, Tamura T, Nguyen VL, Ta TKO, Mao L, Ishii Y, Kitagawa H, Nakashima R, 2019. Palaeoenvironmental evolution of Holocene-Modern back-barrier mangroves in the northern Mekong River delta, Vietnam. INQUA2019, Dublin, 2019年7月26日。

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

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(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。バイオエアロゾルが、氷晶核として重要な役割を果たしているか理解するためには、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必要がある、森林内と上空での観測と、多層陸面モデルを用いて林床から発生した孢子の放出の仮想実験を行った。

研究方法：

観測は、2018年6月25日から7月4日にかけて、つくば実験植物園とその上空で行った。植物園内の樹林(高さ約15m)の林床(高さ1.2m)と直上(約20m)でバイオエアロゾル濃度の測定を実施し、また森林直上では緩和渦集積法によるバイオエアロゾルフラックス推定も実施した。さらに、ヘリコプターによる樹林の上空高さ500mでのバイオエアロゾルのサンプリングも実施した。バイオエアロゾルの濃度は、サンプリングフィルタ上のバイオエアロゾルを、DAPI色素によりDNAを染色することで検出し、顕微鏡観察で個数密度を求め、数密度に換算した。その大きさから主要なバイオエアロゾルは真菌孢子と考え、以下のモデルでは半径 $3\mu\text{m}$ (Wittmaack, 2005)を中心とする粒子として扱うことにした。

観測結果からフラックスを推定するため、森林内部のエアロゾルの乱流拡散や沈着過程の鉛直分布を計算できる多層大気-植生-土壌モデル SOLVEG (Katata and Ota, 2017) を用いた。樹林上で観測された風速・気温・摩擦速度(運動量フラックス)・顕熱フラックスの観測データとモデル計算を比較し、観測結果が早朝を除きほぼ一致していることから、モデルにより樹林内での微気象学的状況はほぼ再現できているものと考えられる。

研究結果：

予想と異なり、林床と樹林直上でのバイオエアロゾル濃度はほぼ等しく、また樹林直上でのバイオエアロゾルフラックス観測値はしばしば下向きで、大気から森林内に沈着している状況であった。こ

のことは、観測地点の風上により強いバイオエアロゾル放出域があり、観測地点の森林からの放出と、上空からの沈着が拮抗している状況と推測される。

2高度での観測値に整合するように、モデル内で地上0.1mの高度にバイオエアロゾル放出フラックスを与えた。その結果、観測期間平均で林床からのバイオエアロゾルの放出率は $3.3 \pm 2.8 \times 10^{-2} \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ と推定され、また林床から樹林内を通過し、その上空へのバイオエアロゾルの潜在的な放出フラックスは、放出の約6割に当たる $2.0 \pm 1.8 \times 10^{-2} \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ と推計された。この結果は、過去の大気化学輸送シミュレーションで示された値の範囲内であった。

まとめ：

地上観測と森林上空での観測を実施し、モデル計算と組み合わせることにより、林床から樹林上の大気へのバイオエアロゾルフラックスを推定することが可能であることが分かった。しかし、今回観測を実施した樹林は不均一性が高く、フラックス推定には必ずしも適していないことが分かった。また、その後、林床と樹林直上、およびヘリコプターでサンプリングしたバイオエアロゾルの構成種が一致しないことがわかり、樹冠からのバイオエアロゾル放出や、風上からの輸送の影響も考慮する必要があることが分かった。今後は、それらのことも考慮した観測と解析が必要になる。森林直上とヘリコプター高度とのギャップを埋めるために、係留気球やドローンなどで、その間の高度でのサンプリングも実施する日宇町があると考えられる。

参考文献：

Hoose and Möhler (2012) *Atmos. Chem. Phys.*, 12, pp. 9817-9854.
Katata and Ota (2017) *JAEA-Data/Code 2016-014*, JAEA., pp. 35.
Wittmaack (2005) *Sci. Total Environ.*, 346, 244-255.

成果発表：

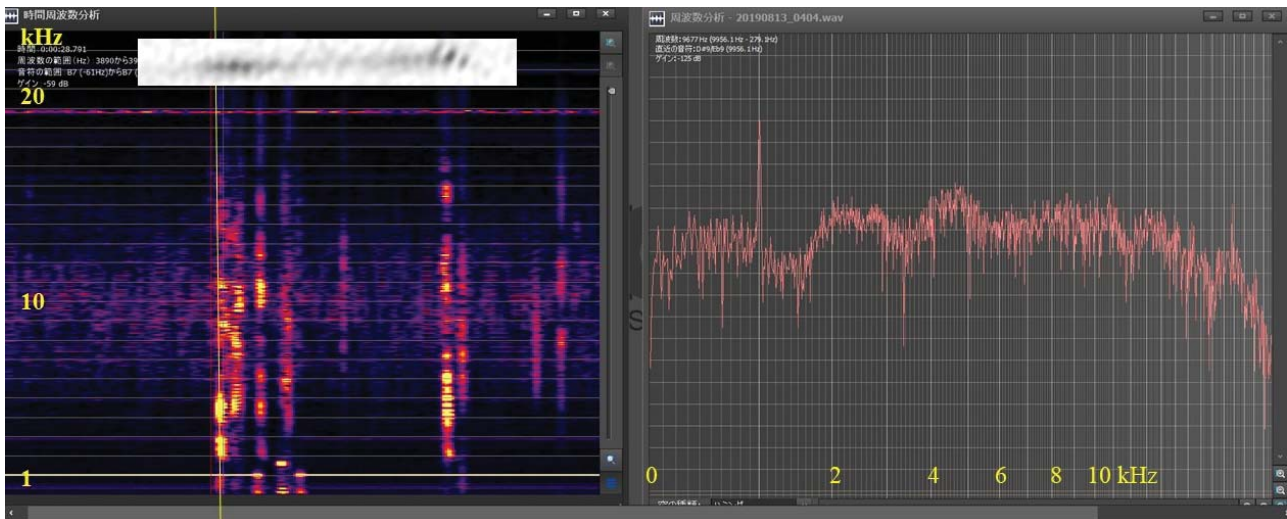
Yasuhito Igarashi, Kazuyuki Kita et al., Fungal spore involvement in the resuspension of radiocaesium in summer, *Scientific Reports*, 9(1)/ 1954, 2019

南光太郎， 堅田元喜， 北和之， 反町篤行， 保坂健太郎 多層陸面モデルを用いた真菌胞子の森林上空への乱流拡散過程の解析
第60回大気環境学会 東京農工大学 府中キャンパス 2019年9月18-20日

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・戦略プログラムオフィス

明るい流星(火球)伴って発生すると言われているELF/VLF領域の電波については、観測例が少ない上、発生機構も不明であるため、多くの観測事例を集めることが、本研究の主な目的である。そこで8月13日早朝に極大となるペルセウス流星群などの流星群の活動期においてVLF電波観測を行い(豊川市)、日本流星研究会会員による流星ビデオ観測との比較を行った。特にペルセウス流星群については、いくつかの火球について観測例が得られたが、火球の光度の極大時に通常の雷起源の空電とは異なる周波数特性を持つ強いパルス状の電波放射が観測された。地面と電離層下面との間の空間を、導波管モードで伝わる雷空電の場合は、遮断周波数である約1.8 kHzとその高調波において、電波強度の増大が見られることが多いが、流星起源と思われる電波の場合は、それよりも高い2.5 kHzあたりとその高調波を中心とした±5 kHzのスペクトル領域で電波強度の増大が見られる例が複数個得られた(下図参照)。また同様の現象が、12月に発生したふたご座流星群についても観測されている。しかしこのような周波数領域における電波強度の増大は、これまで知られている電離層電波伝播における特性周波数には見られないものであり、電波発生機構の考察を進めるとともに、更に多くの観測事例を収集する必要がある。なお今回の観測において、アマチュアによる流星ビデオ観測の時刻精度に、最大1秒程度の時刻偏差が認められたケースが多かったため、次年度においては時刻管理の徹底を要請する必要がある



2019年8月13日04:24:24 (JST)前後に出現した、-4等級の火球に伴って観測されたELF/VLF電波。左図：電波放射のダイナミック・スペクトル。上はビデオ観測による火球の光度変化。約0.4秒の間隔で2回の爆発的増光が発生し、それぞれに対応して強い電波パルス群が見られる(一部は雷起源の空電)。右図：最初に観測された強い電波パルスの周波数スペクトル。横軸は周波数、縦軸は相対電波強度。2.5 kHzとその高調波を中心とした±5 kHzのスペクトル領域で、電波強度の増大が見られる

ランプロファイアー岩脈の全岩化学組成と鉱物化学組成分析による
マグマの成因解明

Elucidation of magma origin of Lamprophyre dykes by whole rock
chemical composition and mineral chemical composition analysis

額 纈 佑 衣 (名古屋大学・環境学研究科)

【研究目的】 岐阜県揖斐郡揖斐川町の旧春日村(春日地域)にはランプロファイアーと呼ばれる高Mg安山岩岩脈が産する。Suzuki and Shiraki (1980)によると、ランプロファイアー岩脈のマグマの成因はマンツルの直接溶融であるとしているが、その後本地域でのランプロファイアーの詳細な研究はなされていない。そのため、春日地域のランプロファイアーは複数のマグマの貫入による複合ランプロファイアーであるが、どのようなマグマがどのようなタイミングで貫入したのかは明らかになっていない。

本研究では、春日地域において露頭の保存状態が良い複合ランプロファイアー岩脈について、全岩化学組成と鉱物化学組成を分析することによって、マグマの起源や固結した環境を推定することを目的とする。中部地域に産する白亜紀後期のランプロファイアーを、地球化学及び岩石学的な視点から解析することによって、島弧—海洋系プレート収束域における地下深部におけるマグマ活動の理解につなげることを目的とする。

【研究方法】 全岩化学組成は、名古屋大学宇宙地球環境研究所所有のXRF(株式会社島津製作所製XRF-1800)を用いた。主要元素は管電圧40kV、管電流70mA、微量元素は管電圧40kV、管電流95mAにて分析した。詳細な分析条件は、中崎ほか(2004)及び吉田ほか(2016)に従った。鉱物の化学組成は、名古屋大学岩石鉱物学研究室所有のEPMA(日本電子株式会社製JXA-8800R)を用いて、15kV、12nAで分析を行った。

【研究試料】 春日地域の粕川沿いに塩基性ホルンフェルスを切ってほぼNS 走向を持つランプロファイアー岩脈が認められる。分析対象とした岩脈は、幅が1m以上あり、川に沿って走る県道からもよく観察できる(図1)。この岩脈は外側部から内部部に向かって岩石の色が変化し、塩基性ホルンフェルスとの境界面に平行に発達する幅20–30 cm の外側部分(KSN05-1)と岩脈の内側部分(KSN05-2a, KSN05-2b, KSN05-3)に区分できる。内側岩脈の中央部はその周縁部や外側岩脈に比べて斑晶を含めてより粗粒である。

【研究結果】 全岩化学組成から、分析したランプロファイアー岩脈はSiO₂が53–55 wt.%の中性的な組成を示した(表1)。一方で、高いMgO (4–6 wt.%), Cr (51–157 ppm), Ni (14–51 ppm)量を示す。鉱物の化学組成を分析した結果、クロムスピネルのCr#[=Cr/(Cr + Al)]及びMg#[=Mg/(Mg+Fe²⁺)]値は、それぞれ0.40–0.82および0.25–0.65であった。斑晶として産する角閃石は、Si < 6.25 apfuのパーガス閃石であり、石基部のものは斑晶に比べてややSiO₂に富む。TiO₂濃度は3 wt.%に達する。これらの結果は、Suzuki and Shiraki (1980)と調和的な結果である。

【考察・まとめ】 Suzuki and Shiraki (1980) は、ランプロファイアーマグマの成因を高H₂O 分圧下でのマンツルの直接溶融に求めている。なお、斎藤・沢田 (2000) は、石英閃緑岩-閃緑斑岩として記載した岩脈のいくつかは、ランプロファイアーと類似して高いMgO (6.9–8.5 wt%), Cr (180–422 ppm) およびNi (89–109 ppm) 含有量を示すことに着目し、Suzuki and Shiraki (1980) と同様に、それらはマンツルと共存可能なメルトに由来するとしている。これらの石英閃緑岩-閃緑斑岩岩脈は 80–70 Ma のK-Ar 年代を示しており、それらと化学組成が類似するランプロファイアー岩脈も、同じ時期に活動した可能性が高い。

【引用文献】

中崎峰子・壺井基裕・金川和世・加藤丈典・鈴木和博, 2004, X線分析装置XRF-1800による岩石の定量化学分析. 名古屋大学博物館報告, 20, 79-91.

斎藤 眞・沢田順弘, 2000, 横山地域の地質. 地域地質研究報告 (5万分の1 地質図幅). 地質調査所, 126p.

Suzuki, K. and Shiraki, K., 1980, Chromite-bearing spessartites from Kasuga-mura, Japan, and their bearing on possible mantle origin andesite. Contrib. Mineral. Petrol., 71, 313-322.

吉田澪代・加藤丈典・南 雅代・榎並正樹, 2016, 蛍光X線分析法による岩石試料の定量化学分析: (1) 主成分元素. 名古屋大学年代測定研究, 1, 66-71.

【成果発表】

榎並正樹・瀬瀬佑衣・加藤丈典・壺井基裕・丹羽健文, 「岐阜県西部・揖斐川町春日地域の火成岩と接触変成岩」 地質学雑誌 巡検案内書, in press

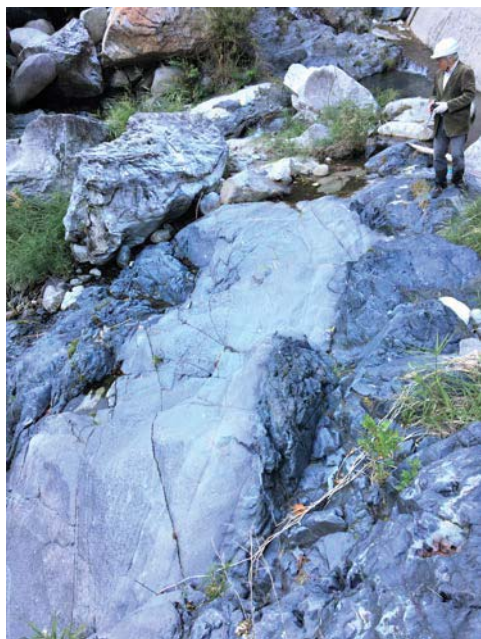


図1 ランプロファイアー岩脈

表1 全岩化学組成の分析結果

Sample	KSN02a	KSN05-1	KSN05-2a	KSN05-2b	KSN05-3
Major elements	40kV, 70mA				
wt. %					
SiO ₂	47.8	55.3	54.7	53.8	53.0
TiO ₂	2.93	0.98	1.01	1.00	0.95
Al ₂ O ₃	12.8	18.4	18.6	18.3	17.0
Fe ₂ O ₃ *	14.4	6.63	6.19	6.95	7.51
MnO	0.21	0.12	0.12	0.14	0.14
MgO	4.87	3.91	4.01	4.59	6.21
CaO	8.94	7.40	7.43	7.61	7.79
Na ₂ O	3.45	3.12	3.07	2.91	2.62
K ₂ O	2.26	1.77	2.09	2.01	1.94
P ₂ O ₅	0.41	0.30	0.31	0.31	0.29
Total	98.1	97.9	97.5	97.6	97.5
*: total iron as Fe ₂ O ₃					
Trace elements	40kV, 95mA				
ppm					
As	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1
Ba	556	630	750	649	511
Co	54	28	26	30	36
Cr	126	51	52	76	157
Cu	n.d.	27	n.d.	n.d.	19
Nb	22	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Ni	39	14	17	22	51
Pb	4	6	7	4	6
Rb	21	58	68	65	60
S	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Sr	198	440	445	421	392
Th	5	8	9	9	8
V	310	163	162	169	181
Y	36	24	25	24	23
Zn	123	62	69	69	77
Zr	164	132	130	121	115