(所属・職名は2021年3月現在)

(注1):新型コロナウイルスの影響で2021年度に延期
 (注2):新型コロナウイルスの影響で中止
 * 2021年度に延期しました課題は実施後掲載

研究代表者 Principal Investigator	所属機関 Affiliation	所属部局 Department	職名 Position	研究課題名 Project Title	頁 Page	備考 Remarks
湯口 貴史	山形大学	理学部	准教授	石英中のチタン・アルミニウム濃度の定量分析に基 づく石英の結晶化プロセスの解明	57	
Siswanto Eko	海洋研究開発機構	Earth Surface System Research Center	Researcher	瀬戸内海における生物光学的要素の時空間変動	61	
小島 正宜	名古屋大学	名古屋大学	名誉教授	IPSトモグラフィー解析法の改良	63	
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	65	
笠羽 康正	東北大学	大学院理学研究科 惑 星プラズマ・大気研究 センター	教授	Arase衛星DC電場・低周波電場波動の校正データ 提供による内部磁気圏研究の促進:その2	67	
廣川 淳	北海道大学	地球環境科学研究院	准教授	炭素数2のクリーギー中間体と有機酸・水蒸気との 相対反応性の研究	69	
赤田 尚史	弘前大学	被ば<医療総合研究 所	教授	山形蔵王で観測される樹氷中宇宙線生成核種濃 度	71	
柴﨑 清登	太陽物理学研究所	研究部	所長	太陽活動現象における磁気モーメントの役割:太陽 極域増光の解明に向けて	72	
松本 淳	早稲田大学	人間科学学術院	教授	フィルタ捕集法と組み合わせた粒子状有機硝酸全 量測定の試み	74	
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	76	
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	77	
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	79	
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	81	
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	83	
渡邉 恭子	防衛大学校(総合教育学群、 人文社会科学群、応用科学 群、電気情報学群及びシステ ムエ	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	84	
村木 綏	名古屋大学	宇宙地球環境研究所	名誉教授	太陽フレアに伴うイオン加速についての研究	86	
阿部 学	海洋研究開発機構	北極環境変動総合研 究センター	技術副主任	気候モデルにおけるユーラシア北部の降水量に対 する北極海氷減少の影響メカニズム	88	

研究代表者 Principal Investigator	所属機関 Affiliation	所属部局 Department	職名 Position	研究課題名 Project Title	頁 Page	備考 Remarks
鷲見 治一	九州大学	宇宙天気科学研究・教 育センター	学術研究員	太陽圏の時間変動構造の研究	90	
今山 武志	岡山理科大学	フロンティア理工学研 究所	准教授	北西インドNidarオフィオライト層火成岩類のNd-Sr 同位体研究	91	
河野 光彦	関西学院大学	理工学部	研究員	持続的地球環境のための高校生のできる課題	93	
町田 忍	名古屋大学	宇宙地球環境研究所	名誉教授	オーロラ等価電流回路解析とデータ同化手法を用 いたAE指数の予測	95	
横田 勝一郎	大阪大学	理学(系)	准教授	あらせ衛星搭載XEPの観測データを用いた応答特 性評価	97	
栗田 怜	京都大学	生存圈研究所	准教授	地上-あらせ衛星共同観測を軸とした脈動オーロラ ステレオ観測による降下電子エネルギーの時空間 発展の推定	99	
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	101	
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	103	
中澤 文男	情報・システム研究機構 国 立極地研究所	気水圏研究グループ	助教	東南極ドームふじ観測拠点周辺で採取された雪氷 ピットのHTO分析	105	
西山 尚典	情報・システム研究機構 国 立極地研究所	研究·教育系	助教	地上光学−磁気圏衛星の同時観測に基づく脈動 オーロラの周期性および磁気圏プラズマの輸送−消 失過程の研究	107	
吉岡 和夫	東京大学	大学院新領域創成科 学研究科	講師	ひさき衛星を用いた地球磁気圏プラズマに関する 研究	109	
Suzuki Shin	愛知大学	OTHER	Associate Professor	小スケール大気重力波に伴う温度・風速変動の観 測的評価	111	
寺本 万里子	九州工業大学	大学院工学研究院	助教	あらせ衛星を用いた地磁気脈動の研究	112	
馬場 賢治	酪農学園大学	農食環境学群	准教授	冬季石狩平野の筋状対流雲下の大気場変動につ いて	114	
中島 英彰	国立環境研究所	地球環境研究センター	主席研究員	フーリエ変換赤外分光器による代替フロン HCFC/HFC類の経年変化の解析	116	
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	118	
吉崎 徳人	気象庁気象衛星センター	データ処理部解析課	課長	大気放射モデルを用いた「ひまわり」シミュレーショ ン画像の作成と応用	120	
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	122	
天野 孝伸	東京大学	理学系研究科	准教授	コヒーレントなホイッスラー波動の励起および減衰 過程	124	
浅村 和史	宇宙航空研究開発機構	宇宙科学研究所	准教授	「あらせ」衛星によるリングカレント領域低エネル ギーイオンの加熱現象の解析	125	
山本 一清	名古屋大学	大学院生命農学研究 科	教授	ドローンを利用した森林生態系のリモートセンシン グ	126	

研究代表者 Principal Investigator	所属機関 Affiliation	所属部局 Department	職名 Position	研究課題名 Project Title	頁 Page	備考 Remarks
加藤 雄人	東北大学	大学院理学研究科	教授	グローバルモデルと素過程シミュレーションによる 地球内部磁気圏での波動粒子相互作用の研究	128	
笠原 慧	東京大学	大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻	准教授	ERG衛星搭載中間エネルギー電子・イオン観測器 のデータ解析	130	
笠原 慧	東京大学	大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻	准教授	超小型探査機搭載イオン質量分析器の較正システ ム開発	132	
三澤 浩昭	東北大学	大学大学院理学研究 科	准教授	木星放射線帯長期変動要因の観測研究	134	
丸橋 克英	情報通信研究機構	電磁波研究所宇宙環 境研究室	協力研究員	地磁気嵐とその原因となる太陽・太陽風擾乱に関 する統計的研究	135	
小元 久仁夫	元日本大学	文理学部・大学院理工 学研究科	元教授	ビーチロック試料の正確な膠結年代決定方法	137	
土屋 史紀	東北大学	大学院理学研究科 惑星プラズマ・大気研 究センター	助教	VLF/LF帯標準電波を用いた中・低緯度下部電離 圏擾乱の観測	139	
中山 智喜	長崎大学	環境科学部	准教授	エアロゾル・雲相互作用の理解を目指したエアロゾ ル吸湿特性の観測研究	140	
中野 佑樹	神戸大学	大学院理学研究科	特命助教	Super-Kamiokandeを用いた太陽フレア由来の ニュートリノ探索	141	
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	143	
松岡 彩子	京都大学	理学研究科 附属地磁 気世界資料解析セン ター	教授	あらせ軌道上磁場データの評価と特性向上の検討	145	
久保 勇樹	情報通信研究機構	宇宙環境研究室	研究マネージャー	IPSデータを利用した太陽風予測シミュレーション	146	
渡邉 堯	情報通信研究機構	ソーシャルイノベー ションユニット戦略的プ ログラムオフィス	招聘専門員	流星によるVLF帯電波放射の観測的研究	149	
永田 伸一	京都大学	大学院理学研究科附 属天文台	助教	AR12673におけるMHD不安定性発達の研究	150	
野澤 恵	茨城大学	理学部	准教授	はやぶさ2の突入カプセルのプラズマ化による電波 放射の観測	153	
田中 公一	広島市立大学	情報科学研究科	教授	太陽圏における銀河宇宙線伝播の研究	154	
関 華奈子	東京大学	大学院理学系研究科	教授	数値モデリングおよびデータ解析に基づく環電流が 内部磁気圏ダイナミクスに果たす役割の研究	156	
北 和之	茨城大学	理工学研究科	教授	上空におけるバイオエアロゾルの観測と雲過程への寄与推定	157	
津田 卓雄	電気通信大学	大学院情報理工学研 究科	助教	トロムソ Na ライダーのレイリー散乱データを用いた 成層圏大気温度の計算に関する基礎検討	159	
村田 文絵	高知大学	自然科学系理学部門	講師	インド亜大陸北東部におけるプレモンスーン降水を もたらす総観場の解明	160	
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	162	

研究代表者 Principal Investigator	所属機関 Affiliation	所属部局 Department	職名 Position	研究課題名 Project Title	頁 Page	備考 Remarks
花土 弘	情報通信研究機構	電磁波研究所 リモー トセンシング研究室	研究マネージャー	地上デジタル放送波を用いた水蒸気量観測	164	
齊藤 昭則	京都大学	大学院理学研究科	准教授	中性大気風によるスポラディックE層の生成過程の 解明	165	
内藤 裕一	名古屋大学	博物館	研究員	GC-精密キャピラリー分取装置を用いた有機化合物の新たな年代測定法の開発	167	(注2)
山田広幸	琉球大学	理学部物質地球科学 科地学系	准教授	高解像数値モデルを用いた台風飛行の安全性に 関する検討	168	
篠塚 賢一	福岡工業大学	情報システム工学科	研究員	屋久島の山岳渓流水中の窒素同位体比を用いた 硝酸イオンの起源推定	170	

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

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

湯口貴史	山形大学	理学普	ß
山嵜勇人	山形大学大	、学院	理工学研究科
渡邊みのり	山形大学大	、学院	理工学研究科
加藤丈典	名古屋大学	≤ 宇宙	自地球環境研究所

1. 研究目的

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

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

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

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

2. 試料と研究方法(使用した共同利用装置・施設)

石英の CL 像取得は山形大学の SEM-CL (JEOL IT100A+Gatan mini CL) を用い,石英中の Ti 濃度定量は名 古屋大学 ISEE の EPMA (JCXA-733) を用いた。Ti 濃度定量の分析条件は,4 つの分光結晶 (PET) を Ti の検 出に割り当て,加速電圧 15 kV,照射電流 60 nA,ビーム径 20 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。AI 濃度定量の分析条件は,1 つの分光結晶 (TAP) を AI の検出に割り当て,加速電圧や測定時間などの 分析条件は Ti 濃度定量の分析条件を踏襲した。この手法により,Ti 濃度の検出限界は16 ppm,AI 濃度の検出 限界は17 ppm,それぞれの分析誤差は約 10%の精度で定量値を取得することが可能となる。このような小さ な誤差を伴う定量値の導出は、石英結晶の内部構造の Ti 濃度と Al 濃度の高精度な比較を可能にする。

研究結果・考察

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

優白質岩の Ti 濃度においては 40 点中 12 点が検出限界濃度以上の値を持ち,その濃度は 17 ± 13~75 ± 13 ppm の幅を持つ。これを仮に TiO₂の活動度を 0.5 として Wark and Watson (2006)の地質温度計を用いて計算を 行うと 17 ± 13 ppm の値は結晶化温度 632 ± 53℃となり,75 ± 13 ppm の値は結晶化温度 798 ± 25℃を示す。優 黒質岩の Ti 濃度においては 25 点中 11 点が検出限界濃度以上の値を持ち,その濃度は 20 ± 12~109 ± 13 ppm の幅を持つ。Wark and Watson (2006)の地質温度計 (TiO₂活動度を 0.5 と仮定)を用いて計算を行うと 20 ± 12 ppm の値は結晶化温度 648 ± 43℃となり,109 ± 13 ppm の値は結晶化温度 850 ± 23℃を示す。優白質岩と優黒 質岩の石英の結晶化温度の幅に大きな相違が認められないデータが得られた。一方,優白質岩の AI 濃度は 12 点の全ての分析点で検出限界濃度以上の値が得られ,AI 濃度は 118 ± 15~189 ± 14 ppm の分布を有する。図 1 は Ti 濃度と AI 濃度の対を作るように同一領域の分析を行った石英粒子の CL 像を示す。CL 像中に Ti 濃度と AI 濃度の定量分析の結果を記述した。12 地点において,その 7 地点で Ti 濃度が検出限界以下となってしまっ た。このため、AI 濃度, Ti 濃度と CL 像の関係の明確な議論は困難であった。これを可能にするためには,同 一領域の Ti 濃度と AI 濃度データの拡充が必要となる。



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

大崩山花崗岩体においては 31 点の Ti 濃度の定量分析を行った。そのうち 23 点が検出限界濃度以上の値を 持ち,その濃度は $25\pm13\sim177\pm12$ ppm の幅を持つ。これを TiO₂ の活動度を 1 として Wark and Watson (2006) の地質温度計を用いて計算を行うと 25 ± 13 ppm の値は結晶化温度 604 ± 69 Cとなり, 177 ± 12 ppm の値は結 晶化温度 821 ± 23 Cを示す。一方, Al 濃度は 10 点の全ての分析点で検出限界濃度以上の値が得られ, Al 濃度 は $182\pm14\sim616\pm13$ ppm の分布を有する。図 2 は Ti 濃度と Al 濃度の対を作るように同一領域の分析を行っ た石英粒子の CL 像を示す。CL 像中に Ti 濃度と Al 濃度の定量分析の結果を記述した。この結果, Ti 濃度と CL 像の輝度には正の相関が見て取れる(高輝度において高 Ti 濃度を有する)。それに対して, Al 濃度と CL 像の輝度には明確な関係は認められない。CL 像の輝度と微量含有元素(Ti 濃度・Al 濃度)の定量的な評価, および Ti 濃度と Al 濃度の相関関係の把握には至らなかった。これを可能にするためには,同一領域の Ti 濃 度と Al 濃度の対となるデータの拡充が今後の課題となる。



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

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



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

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

4. 引用文献

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

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

5. 成果発表(当該年度に行った口頭発表)

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

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

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

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

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



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



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

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

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

References:

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

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

小島正宜 名古屋大学

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

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



解析方法の検討

① 次式における視線積分範囲 (z1, z2) を変える。

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

2 視線積分で用いる荷重αを調整する。

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

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

$$C(\tau)_{obs} = \int_{0}^{2AU} w(z) C_{z}(\tau, V_{sw}(z) \cos[\theta(z)]) dz$$
(2)

結論

○視線積分の範囲

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

○荷重のかけ方

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



式(1)による結果

今後の検討

太陽活動全期間を通しての評価。

共同研究課題2 スペクトル解析による太陽風速度の導出についての検討

結論

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

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



課題

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

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

後藤直成、滋賀県立大学·環境科学部

【目的】

本研究では、2017年12月に打ち上げられた気候変動観測衛星(GCOM-C)に搭載された多波長光学放射計(SGLI)を利用して、琵琶湖全域におけるクロロフィルa濃度の分布を連続的に把握し、植物プランクトンの詳細な時空間分布変動を評価することを目的とした。

【方法】

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

2018年12月から2019年11月の期間において、GCOM-C/SGLIによって測定された490 nmと565 nmにおけるnLw (level-2,空間分解能 250 m)をJASMESから取得し、nLwを大気圏外太陽照度で除することで衛星リモートセンシング反射率 (Rrs(490, 565))を求めた。これらのRrsと水中生物光学アルゴリズム (式: MOD ISの標準アルゴリズムの係数を琵琶湖用に最適化した式)を用いて、琵琶湖におけるクロロフィルa濃度を算出した。

 $\begin{aligned} \text{Chl}_{\text{sate}(490/565)} &= 10^{(C_0+C_1R+C_2R^2+C_3R^3+C_4R^4)} & \text{R} &= \log(\text{Rrs}(490/565)) \\ & \text{C}_0 &= 0.126, \ \text{C}_1 &= -3.65, \ \text{C}_2 &= 12.548, \ \text{C}_3 &= 73.820, \ \text{C}_4 &= 115.896 \end{aligned}$

【結果と考察】

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

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



図 1.2019 年の琵琶湖における特徴的なクロロフィル a 濃度分布

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

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



図 2. 2020 年の琵琶湖における特徴的なクロロフィル a 濃度分布

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

【付記】本研究におけるクロロフィルa濃度のデータ処理および画像化は,株式会社サイエンスアンドテクノ ロジーの塚本浩貴氏と林正能氏と共同で行った。

【成果発表】

- Goto, N., M. Iwaki, S. Ban, K. Hayakawa (2020) Effects of disturbance events on primary production in the northern basin of Lake Biwa. JpGU-AGU Joint meeting, Online (2020年5月24日~28日).
- 後藤直成(2020)気候変動衛星(GCOM-C)を利用した琵琶湖におけるクロロフィル a 濃度の推定.名古屋 大学宇宙地球環境研究所(ISEE)コミュニティミーティング,オンライン(2020年10月26日).
- 後藤直成(2021)温暖化が琵琶湖の表層生態系に及ぼす影響~植物プランクトンの一次生産~. 京都大学生 態学研究センター・シリーズ公開講演会,オンライン(2021年2月20日).

Arase衛星DC電場・低周波電場波動の校正データ提供による 内部磁気圏研究の促進:その2

Enhancement of the Inner Magnetospheric Research

by the provision of the calibrated data

for Arase DC and low frequency E-field: 2

笠羽 康正、東北大学 惑星大気・プラズマ研究センター

1. 研究目的

Arase (ERG) 衛星搭載電場・プラズマ波動計測器 PWE は、2017 年 3 月からの本格観測開 始以降、地球内部磁気圏のプラズマ波動-粒子相互作用を的確に検出し、磁気圏内のグロー バルなエネルギー収支・交換・伝搬を定量評価する手段を提供している。磁気圏構造変動と プラズマ輸送の情報を握る DC 電場・低周波電場波動の校正済データを確実に作成し、こ れらの励起・伝搬過程の定量評価と物理的役割の解明を促進する。

<u>2.研究方法・結果</u>

(1) データパイプライン設定および校正

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

<u>(2)電場およびポテンシャルの評価</u>

電場導出の基礎となるポテンシャル・電場波形のスピン依存変動は、衛星 potential そのも のが spin 時間内に変動し、これが衛星形状・磁場方向等の影響で排除不能であることがわ かってきた。成果の一部を以下へまとめるとともに、引き続き調査を進めつつある。 人工衛星による電場観測データの評価を, 直交 2 系統のプローブシステムの結果の差と, 電場・磁場直交性の 2 つの側面から行った。衛星電位のゆらぎが相対的に大きい時に電場 観測の不整合が起こること, また, 観測された電場が正しい方向からずれていることの指 標として、衛星本体電位の変動を差し引いたプローブ電位の波形の非対称性が使用可能で あることが示された。(中川朋子, 笠羽康正, 笠原禎也, 三好由純 (2021). ジオスペース衛 星「あらせ」による電場観測データの 評価に関する研究. 東北工業大学地域連携センター・ 研究支援センター紀要 EOS. 33, 1, 87-96)

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

(3) Arase 衛星による電場計測を用いた成果創出のサポート:

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

・高高度におけるField-line 電場による電子加速の存在:Imajo et al. (2021). Active auroral arc powered by accelerated electrons from very high altitudes. Sci. Rep. 11, 1610. https://doi.org/10.1038/s41598-020-79665-5

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

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

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

2018 年に打ち上げられた BepiColombo/Mio に搭載された Plasma Wave Investigation (PWI) による DC 電場・低周波電場波動観測は、Arase とほぼ同設計のアンテナとレシーバーで遂 行される。Arase 衛星の校正は、以下の論文でまとめられた同観測装置による水星での電場 計測につながっていく。

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

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

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

廣川 淳、北海道大学·大学院地球環境科学研究院

【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 CH₃CHOO をトランス-2-ブテンのオゾン分解反応から生成し、これらの有機酸、水蒸気に対 する相対的な反応性を測定することで、クリーギー中間体の構造と反応性の関係を明らか にすることを目的とした室内実験を行った。今年度は水二量体(H₂O)₂の反応を考慮に入れた より精度の高い解析を行うとともに、トランス-2-ブテンから anti 体、syn 体それぞれが生成 する収率を決定する試みも行った。

【研究方法】

実験は、内径 4 cm、長さ 80 cm のフローチューブを用いて行った。フローチューブには、 トランス-2-ブテン C₄H₈、オゾン O₃、ギ酸 HCOOH、水蒸気 H₂O、およびシクロヘキサン C₆H₁₂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 SO₂Cl⁻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 × 10¹³ molecules cm⁻³ および 2.5 × 10¹³ molecules cm⁻³ とした。ギ酸は 0 – 9.2 × 10¹² molecules cm⁻³, 水蒸気は 0 – 3.5 × 10¹⁷ 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 ± 0.5°C に保った。フローチューブ内の反応時間は 30 秒 と見積もられる。

【研究結果と考察】

トランス-2-ブテンのオゾン分解で生成するクリーギー中間体(*anti/syn*-CH₃CHOO)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。

$anti/syn-CH_3CHOO + HCOOH \rightarrow HOOCH(CH_3)OCHO$ (HPEF)	(1a/1s)
anti/syn-CH ₃ CHOO + H ₂ O \rightarrow CH ₃ CH(OH)OOH (HEHP)	(2a/2s)
anti/syn-CH ₃ CHOO + (H ₂ O) ₂ \rightarrow HEHP + H ₂ O	(3a/3s)
anti/syn-CH ₃ CHOO \rightarrow products	(4a/4s)

ここで、反応 3a/3s はクリーギー中間体と水二量体との反応である。また、反応 4a/4s は、 クリーギー中間体の単分子的な異性化・分解反応に加え、ギ酸、水蒸気以外の化学種との 二分子反応も含む。先行研究 [1] から、*syn* 体と H₂O, (H₂O)₂の反応 2s, 3s は無視できる と考えられる。

今年度はまず, ギ酸無添加で, $(H_2O)_2$ の影響が無視できる低い水蒸気濃度の条件下におい て,反応 2a により生成する HEHP の CIMS 信号強度の水蒸気濃度に対する変化を測定し, そこから反応 2a の速度定数 k_{2a} に対する,反応 4a の速度定数の相対値 $k_{4a}/k_{2a} = (8.4 \pm 0.2) \times$ 10^{15} molecules cm⁻³を決定した。次いで,水蒸気濃度を固定してギ酸濃度を変化させ,HEHP の信号強度変化を追跡した。同様の実験を様々な水蒸気濃度で行い,そこから $k_{1a}/k_{2a} = (1.3 \pm$ $0.6) \times 10^4$ 及び $k_{3a}/k_{2a} = (1.3 \pm 1.3) \times 10^3$ を得た。また, *anti-/syn-*CH₃CHOO とギ酸の反応で生 成する HPEF の信号強度のギ酸濃度依存性から, *syn* 体に対する速度定数比, $k_{4s}/k_{1s} = (1.3 \pm$ $0.2) \times 10^{12}$ molecules cm⁻³を求めた。最後に,乾燥条件と加湿条件(相対湿度約 67%)で生 成する HPEF の量と,トランス-2-ブテンとの反応により消費されるオゾン濃度の測定値か ら, *anti* 体及び *syn* 体それぞれの生成収率を (23 ± 5)% 及び (4.3 ± 2.7)% と求めた。

減圧条件下の直接的な反応速度測定から報告されている速度定数をもとに計算すると、 $k_{1a}/k_{2a} = (5 \pm 4) \times 10^4$ [2,3], $k_{3a}/k_{2a} = (3.4 \pm 0.7) \times 10^3$ [4] と見積もられ、いずれも本研究で導いた値よりも高かった。ただし、先行研究 [2] で報告されている $k_{1a} = (5 \pm 3) \times 10^{-10}$ cm³ molecule⁻¹ s⁻¹は非常に誤差が大きく、また 4 Torr という減圧下での実験結果であるため、本研究で得られた値の方が大気圧条件下で信頼性の高い結果であると考えられる。逆に k_{3a}/k_{2a} に関しては、本研究で得られた値の誤差が大きく、今後、より精度の高い値を求める必要がある。 k_{4A} の実験値はこれまで報告されていないため、本研究は相対値ではあるが、 k_{4A} に対する情報を初めて実験的に与えたことになる。

*syn*体に対しては、Weltz ら [2] が 4 Torr、298 K の実験から報告している $k_{1s} = (2.5 \pm 0.3)$ × 10⁻¹⁰ cm³ molecule⁻¹ s⁻¹ と Li ら [5] がごく最近報告している $k_{4s} = 146 \pm 31$ s⁻¹ とから、 $k_{4s}/k_{1s} = (5.8 \pm 1.4) \times 10^{11}$ molecules cm⁻³ と見積もられ、本研究で得られた値の約半分となった。ただし Li らの報告値は、300 Torr、298 K のものであり、 k_{4s} が圧力とともに増加することが見いだされているので、圧力の違いが本研究と先行研究の差異の原因である可能性が高い。また、トランス-2-ブテンのオゾン分解から生成する *anti-/syn*-CH₃CHOO の個別の収率に対して Newland ら [6] は、*anti* 体が 21%、*syn* 体が 7%と報告しており、本研究結果はそれに非常に近いものであった。

本研究で得られた相対的な反応速度定数と収率から、CH₃CHOOのうち, anti-CH₃CHOO は相対湿度約40%でほとんどすべてが水との反応により消費されるが, syn-CH₃CHOOはギ 酸や他のカルボン酸と反応しうると見積もられる。本研究で用いた手法は、イソプレンや モノテルペンなど、大気放出量の高い不飽和炭化水素の反応系にも応用することが可能で あり、今後これらの反応に対して速度情報を得られることが期待される。

【引用文献】

[1] Khan et al., Environ. Sci.: Processes Impacts, 20, 437 - 453, 2018.

[2] Welz et al., Angew. Chem. Int. Ed., 53, 4547 - 4550, 2014.

[3] Taatjes et al., Science, 340, 177 – 180, 2013.

[4] Lin et al., Phys. Chem. Chem. Phys., 18, 28189 - 28197, 2016.

[5] Li et al., RSC Adv., 10, 8518 – 8524. 2020.

[6] Newland et al., Phys. Chem. Chem. Phys., 17, 4076-4088, 2015.

山 形 蔵 王 で 観 測 され る 樹 氷 中 宇 宙 線 生 成 核 種 濃 度 Cosmogenic radionuclide in rime samples collected at Mt.Zao, Yamagata Prefecture

> 赤田尚史 弘前大学·被ばく医療総合研究所 柳澤文孝 山形大学·学術研究院

> 栗田直幸 名古屋大学・宇宙地球環境研究所(2行スペース)

【作成要領】

山形蔵王では、この着氷が大きく成長した「樹氷」が生成される。樹 氷は、亜高山地帯に分布する常緑樹であるアオモリトドマツ(オオシ ラビソ: Abies mariesii) に雪と氷が付着してできる現象である。冬 季に冷たく乾いたシベリアからの季節風が日本海上空で水分を吸い上 げ雪雲となり、朝日連邦で大部分の水分が雪として除かれる。その後 山形盆地上空を越え、蔵王連峰の斜面を登るように吹き上げ、断熱膨 張により冷却し降雪をもたらす。残った水分は凝結し過冷却水滴とな り、物体に衝突することで着氷を生成する。この樹氷は、蔵王の他に八 甲田や八幡平など東北地方の一部の山岳地帯でしか見ることができな い自然現象である。これまでにも生成過程や化学分析結果等について 検討するため、樹氷に含まれる宇宙線生成核種⁷Beおよび³H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てきた。ここでは、蔵王の樹氷中⁷Be濃度 の変動について検討した結果について報告する。

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





図 2⁷Be 濃度最大値の日に おける後方流跡線

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

柴崎清登、太陽物理学研究所

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

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

古典物理学では磁気モーメントが生じない理由として挙げられているのは主に次のふた つである。1)「システムがある運動状態をとる確率は、exp(-U/kT)に比例する。ここで Uは運動エネルギー+ポテンシャルエネルギーであり、磁場によるローレンツ力は寄与し ない。よって、熱平衡状態では磁場があってもなくても同じである。」ファインマンの教科 書(参考文献 2.)2)Bohr-van Leeuwenの定理:統計力学によると、磁場中の熱的プラ ズマは磁気モーメントを持たない。磁気モーメントは、空間座標と速度の外積 $\mu = (q/2)\mathbf{r} \times \mathbf{v}$ であり、これは速度の一次関数なので位相空間全体で積分すると0となる(参考文献 3.)。 これらが誤りである理由は以下のようである。1)に対して:運動エネルギーが同じでも、 直線運動と円運動では運動状態は異なる。磁場中の荷電粒子はローレンツ力のために円運 動となり、角運動量および磁気モーメントを持つ。ビリアル定理を適用すればその違いは 明らかである。本研究において、ローレンツ力によるビリアルが磁気モーメントを与える ことを示した(研究会発表 1、論文)。2)に対して:**r**と**v**はひとつの粒子の物理量であ り、運動方程式を介して結びついているため磁気モーメントはゼロにはならない。Bohr お よび van Leeuwen は、運動方程式を解かずに<**v**>=0を示した。

<r \times v $> \neq <$ r>×<v>

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

引用文献:

1) Fujiki, K., Shibasaki, K., Yashiro, S., Tokumaru, M., Iwai, K., and Masuda, S.: 2019, Solar Phys. **294**, 30.

2) The Feynman Lecture on Physics II" §34-6 "Classical physics gives neither

diamagnetism nor paramagnetism"

3) J. H. Van Vleck, The Theory of Electric and Magnetic Susceptibilities (Oxford at the Clarendon Press, 1932).

成果発表:

- 研究会発表1. 柴崎清登、ビリアル定理から求めた熱的プラズマの磁気モーメント、 日本天文学会、Zoom、2020年9月9日
- 研究会発表2. 柴崎清登、磁化プラズマにおける電磁応力テンソルと運動量(Kelvin力と ExBドリフト)、日本天文学会、Zoom、2021年3月19日
- 論文: Kiyoto Shibasaki, Magnetic moment of thermal plasma derived from virial theorem, (投稿予定)

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

松本淳, 早稲田大学 · 人間科学学術院

【研究目的】対流圏における重要なエアロゾル生成過程の一つとして、揮発性有機化合物 VOC の大気ラジカルとの反応に伴う二次有機エアロゾル SOA の生成が注目されている¹⁾。 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 NOx と VOC の酸化反応(対流圏オゾン生成過程)にてオゾンと同時生成する有機硝酸類である ONs (R ONO₂) や PANs (RO₂NO₂) は、SOA 生成に重要な SVOC の一種となりうるため、その ガスー粒子分配に関する研究が不可欠である。VOC は膨大な種類が存在し、個別成分分析 による網羅的な挙動把握は困難であるうえ、有機硝酸類の生成特性が解明された VOCも限 られる。二次生成するガス状・粒子状の有機硝酸類も多様で、網羅は困難である。二次生 成するガス状・粒子状の有機硝酸類を数え落としなく包括測定する全量測定は、エアロゾ ル (SOA)評価に必要である。申請者はこれまでに、活性炭デニューダー (CD)、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 PONs 測定装置 CD/TD/CAPS-PONs (PONs 計) を構築し、大気観測に基づ く有機硝酸類のガス-粒子分配特性を検証し、粒子への分配が相対湿度に依存する可能性 を示した2.3.4.5.6)。以上の成果に基づき、本手法を遠隔地での大気観測に活用することを企図 して、次はフィルタ捕集する PONs 試料の定量を目指す。ただし、フィルタ捕集試料の再 粒子化を想定すると、PONs 発生量を把握し補正する相対標準測定法が必要と考えられる。 そこで本研究では、PONs 発生量の相対変動を簡便に把握する測定系を構築し、その基礎特 性の把握を試みた。なお、新型コロナウイルス感染症に伴う活動制限等の影響を受けたた め、可能な範囲で研究を実施した。

【研究の方法と結果・考察・まとめ】 実験では、反応容器にてオゾン・一酸化窒素・リ モネンを混合して気相反応により生成する PONs を一定濃度含む試料を準備し、PONs 計 と新規構築した相対標準測定系 RSM に導入した。RSM として、粒子フィルタ PF の通過 /不通過を切替えつつ市販 NOx 計 (ThermoFisher 製 42iQTL) に試料を導入する測定系 を構築し、PF 通過に伴う信号減少量に着目して、PONs 相対標準としての可能性を実験的 に検証した。反応容器での一酸化窒素量の調整により試料の PONs 濃度を 0-6 ppbv の範 囲で変えて測定したところ、PONs 計の測定値 ONs+PNs と RSM の測定値の間で強い正 の相関関係が確認され(図)、RSM による PONs の相対変動把握は十分に可能であるこ とが確認された。次に、ONs および PNs と RSM との間の回帰直線の傾きから PONs の 内訳を見積もったところ、ONs:PNs = 1:5 程度であり、今回の試料は PNs が優勢であった。 これは、実験条件に起因して反応初期に NO の多くが NO₂ に変換され、PANs 生成に有 利な状況となったためと推察された。最後に、ONs+PNs の回帰直線の傾き (0.87) が 1 に 近いこと、特に 4 ppbv 以下の各点は直線 y = x の直近にあることから、RSM は PONs の相対変動のみならず絶対値も妥当に定量できたことを確認した。以上のことから、RSM が PONs の相対標準測定法として有望であることがわかった。ただし、RSM による PON s 測定のベースラインは PF 通過時の NOx 計信号に依存するため、NOx 高濃度試料では 不確定性が大きくなる点に留意が必要である。また、今後のフィルタ捕集法/再粒子化に よる PONs の定量にあたっては、HNO₃ などの NOx 計干渉成分の影響を考慮する必要が あろう。それでも、市販の NOx 計を用いた RSM による簡便な測定は、PONs 研究に新た な指標を提供する点で有意義と期待される。



図 気相反応により生成した粒子状有機硝酸 PONs 試料に対する 相対標準測定系 RSM の測定値と PONs 計の測定値の相関プロット。 ×: PANs 全量 PNs, ◇: RONO₂ 全量 ONs, ●: ONs と PNs の和。 それぞれについての回帰直線と傾き 1 の直線も併記する。

【引用文献等】

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

【本研究に関する成果発表】 なし

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 spac e plasma to Post-K computer

深沢圭一郎、京都大学・学術情報メディアセンター

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

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

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

・学会発表

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

・論文リスト

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

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

山崎 了、青山学院大学·理工学部

研究目的:地球磁気圏や惑星間空間、さらには若い超新星残骸などに普遍的に存在する無 衝突衝撃波において、プラズマ波動励起・粒子の散逸過程・非熱的成分の生成過程等の詳 細は未解明である。近年、高出力レーザーによる無衝突衝撃波の生成実験(実験室宇宙物 理学)が本格化し、それにより無衝突衝撃波近傍の電磁場や粒子分布関数の直接計測が可 能となった。山崎を代表とするグループでは、過去7年間、大阪大学レーザー科学研究所 の共同利用の実験提案を行って連続して採択され、測定データを蓄積してきた。現在、世 界的に盛んなのは、外部磁場の存在下でプラズマを生成し、磁化プラズマ中を伝播する無 衝突衝撃波(MS=Magnetized shocks)を生成することである。その際、得られた実験デー タから本当にMSが生成されているのか明確に判断できないことが多いため、実験データの 解釈はプラズマ電磁粒子(PIC)シミュレーションとの比較を通じて行われることが必須とな っている。そこで、我々のグループでも、実際の実験に近いパラメータで外部磁場の強度 をいろいろかえた1次元PICシミュレーションを行う。これにより、これまでの実験結果の 解釈だけでなく、今後の実験に対する指針を得ることも目指す。

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

研究結果: 2019年度の実験では外部磁場3.6Tをかけたショットを行ったが、そのデータ解析とPICシミュレーションの結果を比較することで、実験の物理的解釈の議論を行った。その結果、(1)ターゲット由来のプラズマがBiermann battery効果による自己生成磁場で磁化したことがMS生成過程で重要な役割をはたしていること、(2)ショット前に封入した窒素がターゲットから放出される電離光子によって磁化プラズマとなるが、プラズマ自発光計測やトムソン散乱計測で測定できたドリフト速度をもった窒素プラズマが、プラズマ中を伝播するMSのfoot領域と解釈できること、などがわかり、これらを論文[1]にまとめて投稿した(現在査読中)。

発表論文:

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

学会発表:

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

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

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

水試料の放射性炭素濃度測定のための手法改良

Method improvement of carbon extraction from water sample for radiocarbon measurement

高橋 浩、産業技術総合研究所·活断層·火山研究部門

研究目的

水試料の溶存無機炭素(DIC)の¹⁴C濃度測定のための試料処理として、水試料に酸 を添加することで発生したCO₂を回収する既存の手法に名古屋大学宇宙地球環境研 究所の実状にあった改良を実施し、処理の再現性やバックグラウンド、殺菌剤であ る塩化ベンザルコニウムを利用したときの影響についての検証を行う。

研究方法

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

考察

NaHCO₃溶液の希釈に伴う現代炭素の混入について

試薬の NaHCO₃ 溶液を検証用試料として使用するために、100~1000 倍程度の 希釈を行う必要があるが、調製した溶液の DIC 濃度が低いと¹⁴C 濃度が高くなる。 溶液の pH が高いため、大気 CO₂ の混入によるものと考えられ、¹⁴C 濃度の変化と 調和的である。調整後の溶液の DIC 濃度が低いほど影響が顕著であるため、希釈に 伴って、おおよそ一定量の炭素が混入すると考えられる。

段階希釈を行った溶液の2回の測定結果は、高濃度側の¹⁴C濃度に違いが見られたが、1と2mmol·L⁻¹で¹⁴C濃度が高く、3と4mmol·L⁻¹で低くなっている。¹⁴C濃度が非常に低いNaHCO₃溶液を用いた場合であっても、希釈による現代炭素の混入の影響は、3mmol·L⁻¹よりも高いDIC濃度の溶液を用いれば排除できると考えられる。

<u>バックグラウンドについて</u>

試薬のNaHCO₃溶液は、¹⁴Cを含まないバックグラウンド物質として使用できる か明確では無いが、改良手法により処理を行った NaHCO₃溶液の¹⁴C 濃度は、凍結 乾燥処理よりも低い値を示しており、改良手法のバックグラウンドは十分に低いこ とがうかがえる。逆に、凍結乾燥処理を実施した NaHCO₃溶液の¹⁴C 濃度は、総じ て高めであり、ばらつきも大きい。処理中の現代炭素の混入によるものと考えると、 その程度が一定ではなく、処理ごとに不確定であることが示唆される。したがって、 凍結乾燥処理は、NaHCO₃溶液の処理手法として適さないことがわかった。

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

水試料の注入による現代炭素の混入について

大気中で試料を注入した場合(Air)と、CO₂を除去したグローブボックス内で注入した場合(CO₂-free)の両者の¹⁴C 濃度の測定結果は、中央値のみの比較を行った場合、Air がやや高い¹⁴C 濃度を示しており、CO₂-free のうち¹⁴C 濃度が低い分析値

との差が 0.28 pMC となる。これが試料注入時の現代炭素の混入の影響であると仮定すると、6.6±6.3 μgC の混入量となる。しかし、CO₂-free の分析値にバラツキがあり、Air との分析値とも誤差範囲内で一致している。検証実験は試料水の pH やDIC 濃度、¹⁴C 濃度が、現代炭素の混入が起こりやすく、検出しやすい条件で実施していることからも、試料注入を大気中で実施することによる現代炭素の混入は、無視できるか、非常に小さいと思われる。

試料ガスのくみ出し(拡散とトラップ)のサイクルの数の影響

くみ出しのサイクル数が多くなるほど、CO2 ガスの回収率は高くなった。この傾向は、試料量が多いほど顕著に見られた。しかし、くみ出し回数が異なり、CO2 ガスの回収率が変化しても、¹⁴C 濃度の変化は見られない。これは、同位体分別が正しく補正されていることを示している。さらに、改良手法により処理を実施した場合の¹⁴C 濃度測定の再現性に問題がないと考えられる。

もし、試料の¹⁴C 濃度のみを分析対象としており、回収される炭素量が十分に確保できるのであれば、1回のサイクルのみの CO₂回収で十分であると言える。一方、 δ¹³C 分析を目的として、高い CO₂収率が必要である場合では、4回サイクルが推奨 される。

殺菌剤(塩化ベンザルコニウム)の影響

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

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

まとめ

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

成果発表

- 佐藤里名・高橋浩・半田宙子・南雅代「水試料の溶存無機炭素を抽出する新手法の 開発および従来法との比較」2020年度日本地球化学会第67回オンライン年会
- Takahashi, H. A., Minami, M., Handa, H. and Sato, R. A simple CO₂ extraction method for radiocarbon analyses of dissolved inorganic carbon in water samples without a carrier gas. submitted to Radiocarbon
- Sato, R. (2021) Development of a new carbon extraction method for accurate radi ocarbon analysis in water samples. Master's Thesis, Department of Earth & En vironmental Sciences, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ ersity.

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 / Infrar ed Working Group)に参加し協力して研究を進めている。本研究では、 これまでの全量の解析に加え高度分布の経年変化についても解析を進 めている。

我々のFTIRは分解能が0.0035cm⁻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。今年度はオゾ ンについて高度分布の精度を検証し、その上で高度毎の経年変化を調 べた。解析にはNDACC/IRWGで共通して用いられているプログラム<SFIT 4>を用いているが、独立した高度情報量の目安であるDOFs(Degree of Freedoms)はオゾン場合5程度である。検証には高層気象台(館野)のオ ゾンゾンデのデータを用いた。図1に2019年10月2日について比較した 例を示す。オゾンゾンデの高度分解能をFTIRに合わせた赤実線とFTIR

の結果(青線)を比較するとおよそ18-35 km の高度では10%以内で一致している。そこで、 2019年にオゾンゾンデとの同日観測のあっ た15日(58スペクトル)について0-9.8 km, 9.8-18.3 km, 18.3-27.7 kmの3層に分け て比較したところ、それぞれオゾンゾンデ に対するパーシャルカラムの比が1.02 ± 0.05, 1.11 ± 0.19, 1.03 ± 0.05とな り、数%から10%程度で一致することが確か められた。

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

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



図 1. 導出されたオゾン高度分 布のオゾンゾンデとの比較

HC1とHFのカラム全量の経年変化については昨年度も報告しているが、両者ともその主な発生源がフロン類であることからフロン規制の効果の指標となる。一方で成層圏での寿命が比較的長いため循環の加

速・減速によって増減する。今年度は陸別の結果とも比較した。図2に HC1について4年間の増加率を1年ずつずらしながら調べたトレンドの



図 2. つくばと陸別の HCI トレンドの比較

このほか、今年度はHCH0についての共著論文がAMTに出版されたほか、 HFC-23の解析手法についての論文がAMTのディスカッション論文に公 開されている。

<成果発表>

- Corinne Vigouroux, ..., Isamu Morino, Isao Murata, Tomoo Nagahama, ..., et al., TROPOMI-Sentinel-5 Precursor formaldehyde validation using an extensive network of ground-based Fourier-transform infrared stations, Atmos. Meas. Tech., 13, 3751–3767, https://doi.org/10.5194/amt-13-3751-2020, 2020.
- Takeda, M., Nakajima, H., Murata, I., Nagahama, T., Morino, I., Toon, G. C., Weiss, R. F., Mühle, J., Krummel, P. B., Fraser, P. J., and Wang, H.-J.: First ground-based FTIR observations of HFC-23 at Rikubetsu, Japan, and Syowa Station, Antarctica, Atmos. Meas. Tech. Discuss., https://doi.org/10.5194/amt-2020-505, 2021.
- I. Murata, Y. Tomikawa, I. Morino, H. Nakajima, and H. Akiyoshi, Short-term variations of HCl and HF trends observed with FTIR at Tsukuba, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, Online, Jul. 12-16, 2020.
- 村田功、冨川喜弘、森野勇、中島英彰、秋吉英治、長浜智生、つくば、 陸別のFTIRで観測されたHCl、HFの経年変化、2020年度ISEE共同 利用報告会, online, 2020/10/26.
- 村田 功, 中島 英彰, 森野 勇, 武田 真憲, つくばFTIRで観測されたオゾン高度分布の 検証, 第25回大気化学討論会, オンライン, 2020年11月.
- I. Murata, Y. Tomikawa, I. Morino, H. Nakajima, H. Akiyoshi, and T. Nagahama, Short-term variations of HCl and HF trends observed with FTIR at Tsukuba and Rikubetsu, The 11th Symposium on Polar Science, online, Nov. 16 – Dec. 18, 2020.
- 村田功、冨川喜弘、森野勇、中島英彰、秋吉英治、長浜智生、つくば、 陸別のFTIRで観測されたHC1、HFの経年変化、第3回 地上赤外分 光観測による大気組成変動検出に関する研究集会, online, 2021/03/22-23.
- 村田 功, 中島 英彰, 森野 勇, 武田 真憲, つくばFTIRで観測されたオゾン高度分布の 検証と経年変化, 第3回 地上赤外分光観測による大気組成変動検出に関する研究集会, online, 2021/03/22-23.

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

宗像一起 信州大学·理学部

チベット空気シャワー実験で観測された、平均5 TV(5×10¹² V)の宇宙線強度に見られ る銀河異方性の起源を探るためには、先ず宇宙線が太陽圏内を伝播中に被るモジュレーシ ョン効果を理解し、それを除くことが必要である。そのため、地球から打出された反粒子 のモデル太陽圏磁場中での軌道を計算し、観測された異方性を最もよく再現する太陽圏外 での銀河異方性を調べた。モデル太陽圏磁場には、Washimi等によるものとPogolerov等に よるものの二通りを用いた。

Zhang等は、Pogolerov等によるモデル太陽圏磁場中で4 TVの単色宇宙線の軌道を計算 し、異方性の太陽圏モジュレーションとチベット空気シャワー実験結果を最も良く再現す る銀河異方性を報告している(Zhang+, ApJ, 2020)。しかしながら、ベストフィットの normalized χ²は4.5(自由度は約1000)とフィットネスは極めて悪い。そこで我々は、モ ンテカルロ・シミュレーションに基づき、チベット空気シャワー実験で観測される宇宙線 のエネルギースペクトラムと原子核組成を考慮したベストフィット解析を行った。その結 果の一例を下図に示す。



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

この図の結果のnormalized χ²は1.52(自由度は2052)であり、単色宇宙線の場合より改善 はしているものの、依然としてフィットネスは極めて悪い。

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

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 邉 恭 子 、 防 衛 大 学 校 · 地 球 海 洋 学 科

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

まず本研究を進めるにあたって、WLFとNWLの分類方法を決定した。 この分類にはSDO/HMIで観測された連続光画像を用い、SDO/AIAの1 600 Åの画像においてフレアリボン領域であると同定された領域のみ を判定に用いた。このフレアリボン領域において、SDO/HMIの連続光 画像の強度が3 σ 以上となっている領域を取り出し、その領域の1ピ クセルにおける最大値と領域全体のカウント値を判定の指標とした。 本研究では、WLFはHMI連続光画像の最大値が5000DN以上、かつ領 域内における全カウント値が10⁵DN以上のものとした。また、NWLは 最大値が5000DN以下のものとした。

加速域付近の磁場強度を見積もるために、野辺山強度偏波計(NoRP) で観測されたマイクロ波スペクトルの折れ曲がり周波数を用いた。太 陽フレアのマイクロ波スペクトルには放射強度が最大になる折れ曲が り 周 波 数 (v peak)が 存 在 す る が 、 v 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(NoRH)によってループトップ のマイクロ波源が確認されていた29例のイベントを用いて、v peakより 加速域近傍の磁場強度を統計的に見積もった。この結果、WLFとNWL の間で v neakの分布に違いは確認できなかった。次に、 v neakは加速域 近傍の磁場強度だけでなく、フレアループ内の電子密度にも依存して いる(2)ため、フレアループ内の電子密度はフレアの規模と比例してい ると仮定することにより、ν peakとフレア規模との比較を行なった。こ の比較においても、WLFとNWLの間でvpeakの分布に違いは確認でき なかった。 v peakは放射領域の磁場強度・フレアループ内の電子密度だ けでなく、フレアの発生位置や観測している方向などによっても変化 するため(2)、本研究で用いた手法は加速域近傍の磁場強度を確かめる ためには単純すぎるモデルであったと考えられる。

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

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

参考文献

- 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

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

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

代表者、所属機関・部局 村木 綏・名古屋大学宇宙地球環境研究所・宇宙線部門

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

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

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

このイベントは先行する CME に秒速 1,500km の高速の CME が追いついた写真が SOHO-LASCO 測定器にて撮影されている。この衝突により、衝撃波が形成されたことは間違いない。 しかしこの衝撃波が地球近傍に到達したのは名大の太陽風観測装置の観測結果や GOES 衛星の 磁場の data から判断すると 11 月 9 日の 9UT であった。一方 11 月 7 日の 18:30UT には GOES 衛星の磁力計はショックの到来を示唆している。16UT に発生した X2.0 のフレアに伴う衝撃波 が 2 時間半後に地球に到来することは考えにくい。これもまた名大太陽風観測装置の観測結果 から判断して、このショックは1 日前の 11 月 6 日の 12UT に発生した、M9.3 のフレアによる ものと考えられる。すなわち CME が~1,500km/sec で太陽地球間を走れば、この時間に地球近 傍に到達する。この shock の到来と同時に Chacaltaya や Sierra Negra 山の太陽中性子観測装 置は、増加を示している。この増加をどう解釈すべきか? さらに 21UT, 23:30UT にも増加が 見られる。次年度はこの課題を解明したい。 現在の段階での解釈は 18:30UT の増加は 11 月 6 日に発生した CME に捕らわれていた X2.0 のフレアで作られた SEP 粒子が到来し、21UT のものはその後ショックで加速された陽子 が到来したと考えている。Forbush Decrease の谷の中にインドの muon detector の東側から到 来した成分が増大している。なお東側からの muon の cut-off energy は 25GV, 平均の陽子のエ ネルギーは 80GV である。これはすなわち陽子が衝撃波で 100GeV まで加速されたことを示唆 している。いずれにしても大変面白いイベントであることは間違いない。

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

阿部 学 海洋研究開発機構・北極環境変動総合研究センター

はじめに

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

研究目的

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

研究方法

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

研究結果

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

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

d4PDF における東シベリアー極東域の近年の降水量増加トレンド

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

まとめ

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



引用文献

-0.50-0.40-0.30-0.20-0.10-0.05 0.05 0.10 0.20 0.30 0.40 0.50 [mm d⁻¹ decade⁻¹]

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

[m s⁻¹ decade⁻¹]

- 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 et al., 2020: Trends of summer precipitation over northern Eurasia in historical simulations with MIROC6, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, Online, July 16 2020.
- 金森 他 2020, 東シベリア域における近年の夏季降水量の増加傾向に対する温暖化の影響、日本気象学会 2020年度秋季大会, オンライン, 2020年10月27日.

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

鷲見治一 九州大学国際宇宙天気科学・教育センター

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

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



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

今山武志、岡山理科大学・フロンティア理工学研究所

1. はじめに

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

2. 試料と研究手法

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

3. 結果

火成岩分析試料は、斑レイ岩、粗粒玄武岩、玄武岩、安山岩の4つに分類される。斑レ イ岩は輝石と斜長石から主に構成され、構成鉱物の量比によりTypelとType2に区分した。 Typelは輝石に富む一方、Type2は斜長石に富み、加えて緑簾石、緑泥石を含む。粗粒玄武 岩は斜長石と角閃石から成り、輝石は稀である。玄武岩は、斜長石、単斜輝石、角閃石、 緑簾石から構成される。輝石のフェロシライト成分は、斑レイ岩で(10%程度)、粗粒玄武岩 (15%)、玄武岩(25%)と徐々に増加する。すなわち、層序的上位ほど、輝石の鉄の割合 が高くなる傾向がある。粗粒玄武岩と玄武岩の角閃石は、Siが高いアクチノ閃石とSiが低 い普通角閃石を含む。角閃石の Mg/(Mg+Fe²⁺)比は、粗粒玄武岩で(0.67-0.84)、玄武岩で(0.6) と変化する。普通角閃石は、累帯化学組成構造を示し、中心部で鉄に富む。非変成の斑レ イ岩斜長石は、灰長石成分が70-90%と高いが、粗粒玄武岩斜長石の灰長石成分(5-89%) はばらつきが高い。玄武岩斜長石は灰長石と曹長石の2種類が観察される。

斑レイ岩 Type1 は、SiO2成分が 55wt%と高く、Type2 は SiO2成分が 45wt%と低い。ハー

カー図では、SiO₂が増加するにつれて、Al₂O₃、MgO、CaO成分は減少し、他の主要元素は 増加する。Typel 斑レイ岩を含む 6 試料は、平坦な希土類元素パターン示す。一方、Type2 斑レイ岩を含む 3 試料は希土類元素濃度が低く、軽希土類元素に著しく乏しい。

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

4. 考察

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

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

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

引用文献

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

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

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

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

学会発表

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

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

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

【はじめに】

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

【研究目的】

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

【研究方法】

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

【結果と考察】

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



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

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

【参考文献】

市川伸一(2001) 学習と教育の心理学 岩波書店

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

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

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

オーロラ等価電流回路解析とデータ同化手法を用いた AE 指数の予測

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

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

<u>研究目的</u>

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

研究手法

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

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

研究成果・考察

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

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



図 1. 2000 年 7 月 19-21 日の期間(3 日間)に対する結果。上から順番に、入力として与えた 太陽風電場(OMINI データ)、実測に基づき公開されている AL 指数、本モデルによって計算さ れた AL 指数(符号を反転させていることに注意)、および AL 指数を生み出す極域電離圏電流 の時間変化。 あらせ衛星搭載 XEPの観測データを用いた応答特性評価 Calibration of the response characteristic of the XEP on ARASE

横田 勝一郎, 大阪大学大学院•理学研究科

【研究目的】

本研究は「あらせ」衛星搭載の超高エネルギー電子分析器(XEP)(Higashio et al., 2018) の性能較正を行い,観測データを評価して放射線帯の動向を詳細に解析することを目的と する.形状数学モデルを構築して高エネルギー粒子に対するXEPの特性を精査し,観測デ ータ処理に必要な応答関数を構築する.現在も行われている「あらせ」衛星XEPによる地球 放射線帯の観測データに対して構築した応答関数にて一次処理を行う.較正されたXEP観 測データを他の観測機器データとの比較などから評価するとともに,XEP観測データを最 大限利用して放射線帯の動向に迫る理学的研究テーマに取り組む.

XEPは地球内部磁気圏のエネルギー帯最上部に位置する0.4~20MeV電子の計測を行う観 測器である.放射線帯の主成分観測を課せられた重要な機器であるが、センサーカバーを も透過して検出器に飛び込む超高エネルギー粒子を観測対象とするため、機器較正への課 題が多く他の観測機器に比べて遅延していた.XEPはこれまで日本で経験が少なかった観 測機器であるが、宇宙環境下で高エネルギー粒子は人体に重要な影響を及ぼすため、XEP のような機器は今後の宇宙環境計測において高い需要が予測されている.日本でも月着陸 機や火星圏探査機(MMX)でのXEP相当の観測器の搭載が予定されている.本研究の成果 は地球磁気圏の科学研究に留まらず、太陽系環境の科学への展開も既に始まりつつあり、 将来の宇宙での活動における礎となる役割が期待されている.

【研究方法】

「物質中における粒子の飛跡をシミュレーション」プラットフォームであるGeant4(GE ometry ANd Tracking)を利用して、フライトモデ形状の詳細を反映させた形状モデルを 構築した(図1左). そのモデルの中で高エネルギー粒子を無数に照射してXEPのエネルギー 応答特性を精査した(図1右). 観測データ処理に必要な応答関数を構築した.

【研究結果】

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



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

【まとめ】

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



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

【成果発表】(学会研究会発表は全てリモート形式)

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

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

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

栗田怜、京都大学・生存圈研究所

【研究目的】

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

【研究方法】

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

【研究結果と今後の方針】

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

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

【成果発表】

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

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

大矢 浩代、千葉大学·大学院工学研究院

1. 研究目的

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

研究方法(使用した共同利用装置・施設等を含む)

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

3. 研究結果

本研究ではLF帯標準電波を利用して、2016 年10 月7 日16:46 UT の阿蘇山(32.533 °N、131.614 ° E) 噴火に関連した下部電離圏変動を明らかにした。使用した観測データは、福島(JJY,40 kHz)- 篠栗 (SGR) パス、佐賀(JJY,60 kHz)-篠栗パスおよび中国(BPC,68.5 kHz) -篠栗パスのデータである(図1)。 それぞれ各送受信点間におけるLF 波の振幅とそのウェーブレット変換を行った結果、16:50~17:00 UT にかけて3 つの伝搬パスのLF 波の振幅に変動があり、150~300 s の周期成分があることがわかった(図 2) 。高知工科大学が運営するインフラサウンド観測ネットワークシステムでのインフラサウンド(微気 圧)の観測では、高知県の蜷川の観測点で噴火による音波の到達時刻直後の16:55~17:00 UT にかけて 150~250 sの周期成分が見られた(図3)。

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



図 1 阿蘇山と LF 帯標準電波パスの位置



図 2 2016年10月7日阿蘇山噴火時の(左)JJY40-SGRパス、(中)JJY60-SGRパス、(右)BPC-SGRパスの(上)振幅と(下)そのウェーブレットスペクトル。左側と右側の縦の赤線は、それぞれ噴火時刻および音波の到達時刻を示す。白い曲線はCOI(Cone of influence)を表す。

3 つのLF 波の振幅間に、周期(110~115s, 150s, 200~ 205s, 290~300s, 615~620s) でコヒーレンスがあり、 その位相差が0 になっていることがわかった。また、LF 波と各観測機器とのコヒーレンスをとり、インフラサウ ンドでは150 s の周期成分がJJY60 と蜷川で、170 s の 周期がJJY40 およびBPC と蜷川での組み合わせで確認さ れた。地震計では 155 s の周期成分がJJY40 とTKD・TMC 、 JJY60 と3 つの地震計、BPCとINN・TMC の組み合わせで 共通して確認された。この周期はLF 波同士のコヒーレン スで得られた150 s の周期と類似している。これより、 150~170 s の周期成分は火山噴火によって励起した音波 が、下部電離圏変動をもたらし、LF 帯標準電波が変動し たと考えられる。



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

成果発表

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

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桟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4日~12月1日の約1か月である。システムはCRDSを除いて桟橋先端の ハンドレールに固定した単管パイプを用いて設置した。設置高度は平均海面から約9m である。また波しぶき計の大気試料の吸引口として漏斗を用い、直径5mmのゴム製の チューブを波しぶき計本体上部から折れ曲がらないよう吸引口まで伸ばし、本体内蔵 のポンプにより大気試料を吸引した。吸引量は2.83L/minである。





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

研究結果

図2は0.3~0.5µmの粒径における粒子の海面フラックスと大気中の数密度の時系列 変動を示している。粒子の海面フラックスは局所的に10⁵m⁻²s⁻¹を超える値を示し、海面 からの供給量の増加とともに大気中の粒子の数密度の増加がみられた。このことから 大気中の主な粒子成分は海面から放出される海塩粒子であると考えられる。一方で、 大気中の数密度は海面からの供給量の減少に半日程度遅れて減少している様子がみら れた。このことは海面から放出された海塩粒子が大気で滞留する、または海面からの 放出量と海面への沈着量とが平衡状態となっている、つまり正味のフラックスが零で あることが原因かもしれない。

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



図 2 0.3~0.5µmの粒径における粒子の海面フラックス(青)と数密度(赤)の時系列

まとめ

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

成果発表

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

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

中澤文男、国立極地研究所・気水圏研究グループ

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

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

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

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

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



図1 ピット観測で採取された積雪試料中の(a)トリチウム濃度と、(b)酸素同位体比(δ¹⁸O)の深さプロファイル。トリチウム濃度値(TU値)は放射壊変を考慮し、試料採取時(2018年1月)の値に換算してある。

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

Investigation on periodicity of pulsating auroras associated with magnetospheric plasma transportation-loss processes bas ed on ground-based optical observations and in-situ measurem ents of satellites in the magnetosphere

西山尚典 · 国立極地研究所 · 研究教育系 · 助教

【研究目的】

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

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

【研究方法】

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

【研究結果・考察・今後の方針】

昭和基地で取得された全天白色オーロラカメラ画像およびフラックスゲート磁力計における地上磁場変動を比較したところ、オーロラ発光と磁場変動H成分が8分前後の周期でよく対応していることが分かった.また、昭和基地の地磁気共役点であるアイスランドのTjörn esの地上磁場変動は、昭和基地と同周期の変動が卓越しているものの、その位相が180度ずれていることが明らかになった.前年度までの調査により、昭和基地からMLT1時間程離れ

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

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

【引用文献】

- Davidson, G. T. (1990), Pitch-angle diffusion and the origin of temporal and spatial structures in morningside aurorae, Space Sci. Rev., 53, 45-82.
- Li, W., J. Bortnik, R. M. Thorne, Y. Nishimura, V. Angelopoulos, and L. Chen (2011), Modulation of whistler mode chorus waves: 2. Role of density variations, *J. Geophys. Res.*, *116*, A06206, doi:10.1029/2010JA016313.
- Liang, J., V. Uritsky, E. Donovan, B. Ni, E. Spanswick, T. Trondsen, J. Bonnell, A. Roux, U. Auster, and D. Larson (2010), THEMIS observations of electron cyclotron harmonic emissions, ULF waves, and pulsating auroras, *J. Geophys. Res.*, 115, A10235, doi:10.1029/2009JA015148.

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

Yamamoto, T. (1988), On the temporal fluctuations of pulsating auroral luminosit y, J. Geophys. Res., 93, 897–911.

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

吉岡和夫 東京大学大学院·新領域創成科学研究科

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

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



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

このように、ひさき衛星が捉えたノイズデータのトレンドは太陽活

動度の変化によって説明できることが分かった.このことは逆に,ひ さき衛星の軌道(高度1000km付近,L=1-2)においても太陽活動度に依 存した高エネルギー陽子の変動が見られることが分かったとも言える. 本研究の成果は,そもそも放射線を観測すらために設計された衛星 でなくても,そのノイズデータを使うことで衛星軌道に沿った放射線 情報を抽出できることを示しており,ひさき衛星に限らず,特殊な軌 道(例えば超低高度衛星など)のデータも放射線帯や熱圏における放 射線のデータとして活用できる可能性を示している点で重要である. 本研究は米学会誌「Space Weather」に掲載され,編集者のピックア ップ論文にも採択されており,その手法の独自性を含めて当該研究分 野の研究者に注目を得ている.

【成果発表】

(学術論文)

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

(国内学会発表)

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

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

鈴木臣 愛知大学·地域政策学部

名古屋大学宇宙地球環境研究所がTromsø(69.6°N, 19.2°E)において運用しているNaライダー は、オーロラ活動に伴う超高層大気の温度変化の空間構造や極域の超高層大気波動観測に用 いられている. 観測は冬季に限られるものの、数時間~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.

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

成果発表:

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

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

寺本万里子、九州工業大学・大学院工学研究院

研究目的

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

研究方法

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

<u>研究結果</u>

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

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

考察

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

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

まとめ

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

<u>成果発表</u>

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

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 Ishikar i plain in winter

馬場賢治 酪農学園大学 酪農学研究科/農食環境学群

【研究目的】

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

【研究方法】

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

【研究成果と考察】

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

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



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



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

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

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

【今後の課題】

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

【参考文献】

Shirooka, R., and H. Uyeda, 1990: Morphological structure of snowbur st 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 Atmospher ic Pressure Under Convective Clouds in Winter Monsoon, Asia Oceania Ge osciences 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.

フーリエ変換赤外分光器による代替フロンHCFC/HFC類の経年変化の解析 Trend analysis of HCFCs and HFCs observed with Fourier-Transform Infrared Spectrometer

中島英彰、国立環境研究所・地球環境研究センター

<研究目的>

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

<研究方法>

今年度は、HCFC-22とHFC-23の2つの代替フロンを、sfit4と呼ばれる解析プロ グラムを用いて解析した。HCFC-22は、モントリオール議定書で規制されたCFC-11やCFC-12などの特定フロンの代替物質である。HFC-23はHCFC-22生産時の副産 物として放出されるガスであり(McCulloch and Lindley, 2007)、100年間の地 球温暖化係数(GWP-100 years)が12,690と非常に大きい温室効果ガスである(M ontzka et al., 2019)。用いた赤外観測スペクトルは、北海道陸別町で得られ た1997年から2020年までの観測スペクトルと、南極昭和基地で得られた2007, 2 011, 2016年の3年間の観測スペクトルである。その結果を、北半球や南半球に おける地上観測の値と比較し、観測精度の比較検証を行った。

<研究結果>



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

図1に、今回の解析で得られたHFC-23の月平均値の時系列変化を示す。緑丸が 陸別におけるFTIRの解析値、青丸が昭和基地におけるFTIRの解析値を示す。両観 測点とも、1997年の観測開始から最近まで一貫したHFC-23の増加傾向をとらえ ることに成功している。図1中の赤色で示したのはオーストラリア・Cape Grim (CGO: 41°S, 145°E)の、オレンジ色で示したのは米国カリフォルニア州・Tri nidad Head (THD: 41°N, 124°W)で地上設置ガスクロマトグラフィー・質量分 析計 (GC/MS)で測定されたHFC-23のモル混合比を示す。これらの地上連続観測 データは2007年からしか存在しないが、それ以前の年に所々データがあるのは、 Cape Grimで過去にサンプリングされたアーカイブ空気を後に解析したデータ である。FTIR観測値とこれら地上観測値の間には、おおむね良い一致が見られた が、南極のFTIR観測値には約25%の、陸別のFTIR観測値には約15%の負のバイアス が存在することも判った。これらのバイアスの原因に関しては、HFC-23の解析に 用いている実験室データから作られた疑似スペクトル線パラメータの系統的誤 差や、温度依存性の誤差などの原因が考えられ、現在のその原因に関して考察を 行っているところである。

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

くまとめ>

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

<引用文献> McCulloch, A. and Lindley, A. A.: Global emissions of HFC-23 estima-ted t o year 2015, Atmos. Environ., 41, 1560-1566, 2007.

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

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

< 成 果 発 表 >Nakajima, H., I. Murata, et al., Chlorine partitioning near the polar vortex edge observed with ground-based FTIR and satellites at Syowa Station, Anta rctica in 2007 and 2011, Atmos. Chem. Phys., 20, 1043-1074, 2020.

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

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

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での波高スペクトルについて水道水試料を 用いてシンチレータと試料の比率の依存性を調べた。また、2021年12月の降雪試料のテスト 測定を行った。図1は、山形大学のQuantulus によりシンチレータ(S(ml))と水道水(W(ml)) の割合が各々10:0, 9:1, 7:3, 5:5, 3:7, 1:9の場合の測定波高スペクトルをトリチウム 標準試料スペクトルと共に示している。標準試料は30チャネル付近にピークを示し、幅が7 0チャネルの分布となっている。水道水試料は、いずれも30チャネル付近にピークを示し、 シンチレータのみに比べて計数率は大きい。さらに水試料の割合が大きくなるにつれて70 チャネル以上の計数率が減衰しているが、十分には落ち切っていない。図2は、シンチレー タ(S(m1))と水(W(m1))の割合を3:7にしたときの降雪水と水道水の試料の波高スペクトルであり、ほぼ同様の分布であった。

最近の日本における雨水(蒸留後)の測定値は、0.11-1.04 Bq/L(2000-2005@熊本)などの報告がある(百島 J. Plasma Fusion Res. 2009)。我々の測定結果は0.2~2 Bq/Lの間程度と思われるが、未だバックグランドの差っ引きの不定性が大きい。試料水中のトリチウム濃度を良い精度で求めるためには、さらに正確なバックグランドスペクトルを求める必要がある。そのためには、水試料に含まれる微量イオンなどによるケミルミネッセンスの効果

(蒸留水との比較)の推定とトリチウムを含まない水試料(深層水や深い地下水など)の測 定を行う必要があり、今後これらの測定を行う。



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



📥 tap water

³H_standard

図2. 降雪水と水道水の測定波高スペクトル

[参考文献] 環境トリチウムの現状と分布:2雨のトリチウム 百島則幸 J. Plasma Fusion Res. Vol.85, No.7 (2009) 426-428

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

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

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

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

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

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

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

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



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

参考文献

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

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

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

成果発表

田中秀昂、奥山新、吉崎徳人「VIIRSを基準として放射計算を用いたひまわり8号の代替え 校正手法の開発」、GPMおよび衛星シミュレータ合同研究集会、名古屋大学(2021年3月) SIに伴い中緯度 SuperDARNで観測される sea/ground backscatter振動現象とFLR現象の 関係

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

研究代表者:河野英昭、九州大学・国際宇宙天気科学・教育センター 研究所担当教員・共同研究者:西谷 望、名古屋大学・宇宙地球環境研究所 共同研究者:堀 智昭、名古屋大学・宇宙地球環境研究所 行松 彰、国立極地研究所・教育研究系 田中良昌、国立極地研究所・教育研究系 才田聡子、北九州工業高等専門学校・生産デザイン工学科

【研究目的】

SI (Sudden Impulse) は太陽風動圧の急増現象で、地上では磁場強度の急増として観測される。SIは圧縮性 波動fast mode wavesとして磁気圏内を伝わる。それが近地球磁気圏の磁場・プラズマを(座標原点=地球とし て)動経方向に振動(poloidal-mode oscillation)させうる事、そしてそれが磁力線固有振動(Alfven modeでの振動) と共鳴(Field Line Resonance, FLR)しうる事が報告されている [e.g., Southwood and Kivelson, 1990]。しかしFLR においてこれまで主に注目されていた磁力線固有振動はtoroidal mode (東西方向の振動)であった。地上磁場 ではこの成分が頻繁に観測されるためである。

一方高緯度SuperDARN radars (以下 SD 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。上記論文中の eventsでは SI との関連は見られなかった。

一方、中緯度(高緯度より磁力線が鉛直方向から傾いている。また沿磁力線プラズマ質量総和がより大き い為固有振動しにくい)の SGBS も同じ特徴を示すか否かはまだ調査されていない。そこで、中低緯度でも 磁気圏プラズマの振動を引き起こしやすいSI 現象の期間においてそれを調査し、またFLRが観測された場合 について その固有振動周波数から近地球磁気圏プラズマ密度を推定するのが本研究の主目的である。

【研究方法】

出来るだけ多くのeventsを集めるために、SuperDARN Hokkaido East and West radars(中緯度に位置)を中心 とするが それ以外の多くのSD radarsのデータも見る。まずSIの事例を集め、それらについて SGBS-VLOS 中 に波動が見られているか調べ、見られている場合は更にFLR現象が見られているか調べ、見られている場合 はその固有振動周波数から近地球磁気圏内プラズマ密度を推定する。そしてその値を太陽風動圧値、太陽風 速度・密度、磁気圏活動度指標、等と比較する。

【研究結果】

本研究は昨年度までにも行っており、一昨年度は、名古屋大学・宇宙地球環境研究所・修士課程(2019度 修了)・飯田剛平氏 (指導教員:西谷准教授) が発見したSIイベント1例の解析研究を行った。このイベントは Hankasalmi, Finland (磁気緯度59.1°N、磁気経度104.5°E。以下HANと記す) のSD radarでもPykkvibaer, Iceland (磁気緯度64.6°N、磁気経度57.3°E。以下PYKと記す) のSD radarでも観測されており、一昨年度はHAN Beam#1,4,7、PYK Beam#0,3,8,13 を解析した。

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

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

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

ただ、各radarともbeam数は#0から#15までの16あるのに全てのbeamsを一昨年度中に解析できなかったのは、 密度を求めるまでの解析の各ステップで目視による確認を行わなければならない為時間がかかった為であ った。本研究では多数のSI eventsについて多数のSD radarsのデータの解析を行う事を目指しているが、目視 同定では時間がかかりすぎて目標達成が難しいと予想された。そこで、昨年度は、目視確認に要する時間の 短縮のため、FLRを自動同定する方法の開発とそのテストに着手した。その方法は、各beam、各RG毎にその VLOSデータにFFTをかけ、その後、同じbeam上で近接した2つのRG'sのデータに位相差法・振幅比法と呼ば れる方法を適用してFLRを自動同定する、というものである。

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

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

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

【引用文献】

Schulz, JGR, p17385, 1996. Ponomarenko, Menk, Waters, and Sciffer, Ann. Geophys., p1271, 2005. Southwood and Kivelson, JGR, p2301, 1990.

【成果発表】

- Hideaki Kawano, Akira Sessai Yukimatu, Nozomu Nishitani, Yoshimasa Tanaka, Satoko Saita, and Tomoaki Hori, Automatic identification of FLR events in VLOS data of multiple SuperDARN radars, Japan Geoscience Union Meeting 2020, JpGU-AGU Joint Meeting, 2020.07.12-16, Virtual Meeting.
- Hideaki Kawano, Akira Sessai Yukimatu, Nozomu Nishitani, Yoshimasa Tanaka, Satoko Saita, and Tomoaki Hori, Toward automatic identification of FLR simultaneously observed by multiple SuperDARN radars, 地球電磁 気・地球惑星圏学会 第148 回 総会・講演会、2020.11.02, Virtual Meeting.

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

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

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

天野孝伸(東京大学·理学系研究科)

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

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

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

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

浅村和史(JAXA 宇宙科学研究所)

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

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

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利用さ 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U AV (無人航空機、通称ドローン)とSfM (Structure from Motion:複数枚の画像から対象の3次元形状を復元する技術)を併用した測量 (以下UAV-SfM測量とする) を利用した森林計測技術の開発が進められている。従来の衛星画像や航空機による観測と異なり、ドローンは小面積を対象とした観測に適しており柔軟な運用が可能である。しかし、ドローンによる森林計測結果がどの程度安定して取得できるかについて検討された例は殆どない。

以上のことから、本研究では名古屋大学大学院生命農学研究科附属 フィールド科学教育研究センター稲武フィールドに設置した試験地を 継続して空撮し、ドローンによる森林計測結果の安定性について検討 した。

研究方法

対象地は、名古屋大学大学院生命農学研究科附属フィールド科学教育研究センター稲武フィールド(以後、稲武サイト)内のヒノキ人工林である。対象地において、10m×15m(0.015ha)の方形プロット6つ設置し、2019年10月に森林3次元計測システム0WLにより、立木位置座標の計測を行った。

一方UAV空撮は、2020年6月~2021年3月の期間に6回に撮影高(離発着点からの高度差)90m,110m,130mにより実施した。空撮は、DJI Mavic2 Professional(DJI社製、中国)によりDJI 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、空撮画像のアラインメント及び高密度点群生成におけるモードは全て「高」で行った。また、得られた高密度点群から林冠復元解析手法(中武ら,2018)による高密度点群解析システムにより樹頂点座標(解像度1/3m)(以後、UAV樹頂点とする)を算出した。さらに、2014年に同地域内を観測した航空機LiDARデータを用いてUAV樹頂点の補正行った。

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

研究結果·考察

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



図 1. 空 撮 日 ごとの検 出 精 度

まとめ

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

引用文献

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

成果発表

山本一清・吉田圭佑・島田博匡、撮影条件の差異がSfM処理に与える影響の評価(2)、第1 32回日本森林学会大会、2021年3月19日~2021年3月23日,Web開催 吉田圭佑・山本一清・島田博匡、UAVによる森林計測精度の評価、第10回中部森林学会大 会、2020年12月6日,オンライン開催

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 magnetosphe re 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と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、P IC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。

<u>・研究結果</u>

2020年度における研究課題の成果は以下の通りである。

連成計算1について、2017年3月に発生した磁気嵐を対象に実施したグローバルモデルに よる計算結果の解析をさらに進めた。さらに、グローバルモデルの計算結果に示される高 エネルギー電子の速度分布関数を用いた連成計算2により、コーラス放射が発生する条件 のサーベイ計算を実施した。以上の成果はJpGU-AGU Joint Meeting 2020で報告された。 また、本申請に関連する科研費・基盤B課題(代表:三好、分担:加藤他)が2020年度より 開始し、あらせ衛星とモデル計算結果との詳細比較が進められている。

本共同研究により開発された連成計算手法を、あらせ衛星を始めとする衛星観測結果と の比較・考察に活用することにより、放射線帯領域での電子加速過程ならびに波動励起過 程における非線形効果の定量的な究明が可能となる。2021年度は衛星観測結果を初期条件 として連成計算2を実施して、モデル計算結果の有効性を検証することを計画している。

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

笠原 慧、東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻)

研究目的

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

<u>研究方法</u>

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

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

隔月でオンラインでの定例会を実施し、緊密な情報共有を図った.

研究結果

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

成果発表

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

ciated with dayside chorus", J. Geophys. Res., doi:10.1029/2020JA028477, 2021.

- Thomas, N., K. Shiokawa, Y. Miyoshi, Y. Kasahara, I. Shinohara, A. Kumamoto, F. Tsuchiya, A. Matsuoka, S. Kasahara, S. Yokota, K. Keika, T. Hori, K. Asamur a, S.-Y. Wang, Y. Kazama, S. W.-Y. Tam, T.-F. Chang, B.-J. Wang, J. Wygant, A. Breneman, G. Reeves, "Investigation of small-scale electron density irregularities observed by the Arase and Van Allen Probes satellites inside and outside the pla smasphere", J. Geophys. Res., doi:10.1029/2020JA027917, 2021.
- Kazama, Y., H. Kojima, Y. Miyoshi, Y. Kasahara, S. Kasahara, H. Usui, B.-J. Wa ng, S.-Y. Wang, S. W. Y. Tam, T.-F. Chang, K. Asamura, Y. Kasaba, S. Matsuda, M. Shoji, A. Matsuoka, M. Teramoto, T. Takashima, and I. Shinohara, "Extremel y Collimated Electron Beams in the High Latitude Magnetosphere Observed by A rase", Geophys. Res. Lett., doi:10.1029/2020GL090522, 2021.
- Inaba, Y., K. Shiokawa, S. Oyama, Y. Otsuka, A. Oksanen, A. Shinbori, A. Y. Golobov, Y. Miyoshi, Y. Kazama, S-Y. Wang, S. W. Y. Tam, T-F Chang, B-J Wang, S. Yokota, S. Kasahara, K. Keika, T. Hori, A. Matsuoka, Y. Kasahara, A. Kuma moto, Y. Kasaba, F. Tuchiya, M. Shoji, I. Shinohara, and C. Stolle, "Plasma and field observations in the magnetospheric source region of a stable auroral red (SA R) arc by the Arase satellite on 28 March 2017", J. Geophys. Res., doi:10.1029/20 20JA028068, 2020.
- Shiokawa, K., M. Nose, S. Imajo, Y. Tanaka, Y. Miyoshi, K. Hosokawa, M. Conno rs, M. Engebretson, Y. Kazama, S.-Y. Wang, S. W. Y. Tam, Tzu-Fang Chang, Bo-Jhou Wang, K. Asamura, S. Kasahara, S. Yokota, T. Hori, K. Keika, Y. Kasaba, M. Shoji, Y. Kasahara, A. Matsuoka and I. Shinohara, "Arase observation of the source region of auroral arcs and diffuse auroras in the inner magnetosphere", J. Geophys. Res., doi:10.1029/2019JA027310, 2020.
- Kasahara, S., Y. Miyoshi, S. Kurita, S. Yokota, K. Keika, T. Hori, Y. Kasahara, S. Matsuda, A. Kumamoto, A. Matsuoka, K. Seki, I. Shinohara, "Strong diffusion of energetic electrons by equatorial chorus waves in the midnight-to-dawn sector", VLF/ELF Remote Sensing of Ionospheres and Magnetospheres Workshop, Oral (i nvited), Virtual, 17 Nov. 2020.

超小型探査機搭載イオン質量分析器の較正システム開発 Development of a calibration facility for miniaturized ion mass spectrometers

笠原 慧、東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻)

研究目的

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

研究方法

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

研究結果

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

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

成果発表

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

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

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

木星放射線帯長期変動要因の観測研究

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

代表者:三澤浩昭(東北大学大学院理学研究科)

1. 研究目的

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

2. 研究結果·考察

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

- 強度変動量: Shoemaker-Levy9 彗星の木星衝突により特異的な flux 強度増大が見られた 1994 年(平均 flux 強度の約 1.8 倍 @July, 1994)を除いた期間での平均 flux とその標準偏差 σは 4.5±1.6Jy@4.04AU (1Jy=10⁻²⁶W/m²/Hz) 程であった。この値は、同時期に NASA の DSN アンテナや GAVRT で得られている 2.2GHz 帯での JSR flux 強度計測の結果(Santos-Costa et al., JGR, 2008)と比較し、平均強度は約 10%大きい程度である 一方、σは 5 倍程大きく、JSR の長期変動は低周波数で大きい事が確認された。これは当研究グループが示して きた日~週スケールの短期変動が低周波数程大きいことと同傾向であり(Misawa & Morioka, ASR, 2000; Tsuchiya et al., JGR, 2011)、放射線帯粒子変動が低エネルギー程大きいことを示唆する(放射線帯域の磁場強度値に基づ いて想定される、JSR の各周波数帯に寄与する粒子エネルギーは、~5MeV@327MHz、~15MeV@2.2GHz)。
- ② 強度変動傾向と想定要因: 1994~2005年の JSR flux 強度は、概要、1994→減小→1998→増加→2001→減小→2002→増加→2005年の変動を示したが、この変動は 2.2GHz 帯の変動傾向と良い相関を示していた(相関係数~0.7; time lag~0(僅かに 327MHz 帯変動が先行))。このことから、5~15MeVの広エネルギー範囲に亘り、放射線帯粒子に作用した共通の物理過程の存在を示唆する。2.2GHz 帯の長期変動の原因として、太陽風変動(動圧)に誘起される動径拡散変化が示唆されている(Han et al., 2018:以下、論文 1)。本研究で示された 327MHz と 2.2GHz帯JSR長期変動の相似性は、低エネルギー放射線帯粒子にも、より高エネルギー粒子に働く変動過程が寄与している可能性を示唆する。一方、論文 1 では太陽風変動誘起の拡散過程における粒子エネルギー依存性の重要性も示唆されてもおり、①で示した変動量のエネルギー依存性も含めて、327MHz 帯の長期変動様相が太陽風変動過程で誘起される動径拡散で説明し得るか否かは、数値モデルも用いた定量的な評価が必要になる。この評価は研究期間内には為し得ず将来課題となかったが、本研究の観測結果に基づき継続して実施してゆく。

3. 研究報告等

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

地磁気嵐とその原因となる太陽・太陽風擾乱に関する統計的研究

Study of geomagnetic storms and related solar-interplanetary phenomen

а

丸橋克英、情報通信研究機構 · 電磁波研究所 · 宇宙環境研究室

【研究目的】

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

【研究方法】

1. 大型の地磁気嵐(Dst最小値≦-150 nT)を選んで、Dstの発達に関与する太陽風磁場の時間変化を、磁気ロープモデルによるfitting解析を実行する。

2. 磁気ロープモデルとしては従来の伝統的なforce-free model (Marubashi a nd Lepping, 2007)を基本に、昨年度までのISEE一般共同研究で開発した改良型 モデル (Nishimura et al., 2019)を使用する。

3. fitting結果によるモデル値が観測データを再現する程度を見て、ICMEの磁 場構造が磁気ロープ構造をもっていることを確認する。

4. それぞれの磁気嵐に対応するICME全体を構成する磁気ロープについて考察する。

【研究結果】

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

1. 33例の磁気嵐のうち、33例について、Dstの発達に関与する南向き太陽風磁場は磁気ロープとして伝搬してきたものである。(唯一の例外では非常に特異な磁場変動がみられ、特殊イベントと考えられる)

2. 32例の磁気嵐のうち、8例について、関連したICMEの内部に2つの磁気ロープ が連続的に到達していることが確認された。大部分である24例では、磁気ロー プの継続時間1日程度であるのに対して、8例に見られた磁気ロープのスケール は数時間の程度であり、小型磁気ロープとして最近注目されているものと思わ れる。

【考察】

1. この研究結果は、大型の地磁気嵐に関わるICMEの磁場構造が磁気ロープで説明できることを明らかに示した最初のものであ。この分野ではある程度の予想はされてきたが、実証した意味は大きい。

2. 大型の地磁気嵐の発生に小型磁気ロープが関わっていることが示され、小型磁気ロープの発生メカニズム研究の重要性が広く認識されることが期待される。
 3. この研究には、Nishimura et al. (2019, 2020)によるモデル改良が大きな役割を果たした。今後、この改良モデルが広く使われることを期待したい、

4. 今回、さらなる改良として、観測された磁気ロープの非対称性を重視した手法を追加した。このモデルが磁気ロープの伝搬途中における変化の説明に有効なことが理解されることも期待したい。

【引用文献】

Marubashi, K. and R.P. Lepping, Long-duration magnetic clouds: a comparison of analyses using torus- and cylinder-flux rope model s, Ann. Geophys., 25, 2453, 2007.
Nishimura, N., K. Marubashi and M. Tokumaru, Comaprison of Cylindric al interplanetary flux-rope model fitting with different Boundary

pitch-angle treatments, *Solar Phys.*, **294**, 49, 2019. Nishimura, N., M. Marubashi and M. Tokumaru, Comparison of toroidal Interplanetary flux-rope model fitting with different boundary

Pitch-angle treatments, Solar Phys., 295, 40, 2020.

【成果発表】

・口頭発表

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

ビーチロック試料の正確な膠結年代決定方法

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

小元久仁夫(元日本大学大学院理工学研究科・日本大学文理学部)

Keywords : conglomeratic beachrock, $AMS^{14}C$ dating, pretreatment technique, elemental analysis

1. はじめに

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

2. 研究方法

2020 年度(令和2年度)は、礫岩質ビーチロックが存在する長崎県奈留島、沖縄県慶留間島、渡嘉敷島、渡 名喜島および伊平屋島を対象として野外調査を行い、試料を採取する。採取した試料は、共同研究者が所属する 日本大学文理学部で岩石カッターを使用して整形し、試料調製とAMS¹⁴C年代測定は名古屋大学宇宙地球環境研 究所で行う。元素分析は研究分担者が所属する同志社大学理工学部で行い、また採取した湧水の分析は南山大学 総合政策部で行う。上記とは別に、試料のXRF(蛍光X線)分析は名古屋大学宇宙地球環境研究所で行う。

3. 試料の採取と分析

2020年3月11日に、沖縄県渡嘉敷島で野外調査を実施し試料を採取した。10月15日には慶留間島で現地調 査を行い、試料を採取した。10月16日には、コロナウィルス蔓延のため渡島許可が下りなかった渡名喜島に代 えて伊平屋島で現地調査を行い、試料を採取した。なお、同じ事情により、沖縄県渡名喜島や長崎県奈留島にお ける渡島調査ができなかった。採取した¹⁴C年代測定試料は、名古屋大学宇宙地球環境研究所において試料調製 を行い、AMS¹⁴C年代測定を行う予定である。また、セメント物質の元素分析は同志社大学理工学部で行う予定 である。2019年度までに行った元素分析結果を表1に示す。渡嘉敷島から採水した検水の水質分析は秋田大学 大学院理工学研究科で行った。なおセメント物質のXRF分析は未着手である。

4. 研究成果

2018 年度から3年間にわたる野外調査により、合計15地点から46件のAMS¹⁴C年代測定試料を採取した。 AMSによる¹⁴C年代測定の結果、宮崎県島浦島南部の日井の浜、沖縄県阿嘉島と座間味島の礫岩質ビーチロックの形成年代を決定することができた(小元ほか、2019,2020)。しかし、長崎県佐世保のビーチロックは炭酸塩の含有量が少なくAMS¹⁴C年代測定ができなかった。また固結した礫の直下から採取したin situの貝化石(*Claudiconcha japonica*)の¹⁴C年代は、Modern(101.6~102.5 pMC)であった。今後、沖縄県慶留間諸島の渡嘉敷島や慶留間島と、伊平屋島の礫岩質ビーチロックの形成年代や元素分析結果が明らかになる予定である。

海浜堆積物が固結した原因やビーチロックの形成過程を考察するため、宮古島の吉野海岸で固結砂層、非固結 砂層および湧水を採取して、¹⁴C 濃度、δ¹³C および湧水の水質分析を行った。また宮古島のマイバーバマにおい て、同一堆積層の直径 10cm 以内から採取した貝化石とその両面の付着物、サンゴ化石、石灰砂岩などを採取し て AMS¹⁴C 年代測定を行い、異なる試料間で年代差が生ずるかどうかを検討した(小元、2021)。さらにビーチ ロックの形成年代と津波石の年代を比較する研究(小元・南、2017)を行った。

礫岩質ビーチロックの形成年代を AMS¹⁴C 年代測定により決定するため、必要な試料調整法を開発したこと (小元ほか、2019, 2020) は評価されるであろう。また本研究で行った礫岩質ビーチロックから採取したセメン ト物質の元素分析結果、δ¹³C、¹⁴C年代(¹⁴C濃度)の測定結果は、今後ビーチロックの形成過程を考察する際 に有意義な資料となろう。同一層から採取した異種試料間で年代差が生じたことや、ビーチロックの堆積物の中 に津波堆積物が混入していたことが明らかになったことは、ビーチロックの形成年代を考察する際に検討を要す るとして警鐘を鳴らした(小元、2021)。

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

引用文献(研究成果から引用した文献は次項に記載した)

American Geological Institute (1957) *Glossary of Geology and Related Sciences*. Kaufmann Printing Inc. Washington, D.C. 28.

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

本研究の成果

1. 学会および学術研究会発表

- 小元久仁夫・南 雅代 (2017) ビーチロックの形成年代とは?. 2016 年度名古屋大学宇宙地球環境研究所年代測定 研究シンポジウム. 2017 年 1 月 30 日.名古屋大学.名古屋市.
- 小元久仁夫・南 雅代 (2017) 宮古島マイバーバマのビーチロックに半埋没しているハマサンゴの AMS¹⁴C 年代. 季刊地理学. 69,153. 東北地理学会. 2017 年 5 月 21 日. 仙台市戦災復興記念館. 仙台市.
- 小元久仁夫・南 雅代(2018) 宮古島南東,マイバーバマ東部に打ち上げられたハマサンゴの¹⁴C年代とその意 義. 2017年度名古屋大学宇宙地球環境研究所年代測定研究シンポジウム. 2018年2月1日.名古屋大学. 名古屋市.
- 小元久仁夫・南 雅代・藁谷哲也・塩見昌司(2018)ビーチロックの正確な膠結年代決定法の開発(予報)―宮崎 県島浦島のビーチロックの形成年代―.季刊地理学. 70,143-144. 東北地理学会. 2018 年 5 月 19 日. 東北大 学理学部. 仙台市.
- 小元久仁夫・藁谷哲也・南 雅代・池田晃子・横尾頼子・塩見昌司(2019)ビーチロックの年代を決定する際の問 題点. 2018年度名古屋大学宇宙地球環境研究所年代測定研究シンポジウム. 2019年2月1日.名古屋大学. 名古屋市.
- 小元久仁夫・南雅代・大八木英夫・池田晃子(2019) 宮古島南東海岸に発達する固結砂層と湧水の特徴.季刊地理学. 71,136-137. 東北地理学会. 2019 年 5 月 18 日. 東北大学理学部. 仙台市.

2. 学術出版物

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

VLF/LF 帯標準電波を用いた中・低緯度下部電離圏擾乱の観測

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

土屋史紀(東北大学大学院理学研究科)

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

研究成果

学会発表等

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

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

- 山野辺晃大,大矢浩代,土屋史紀,山下幸三,高橋幸弘,塩川和夫,中田裕之, Solar flare effects on the D-region ionosphere using VLF-LF transmitter signals,地球電磁気・地球惑星圏学会第148回総会・講演会,2020年11月 1日
- 鈴木威流,大矢浩代,土屋史紀,塩川和夫,中田裕之, Variations in the D-region ionosphere observed in fireballs using VLF-LF transmitter signals,地球電磁気・地球惑星圏学会第 148 回総会・講演会, 2020 年 11 月 1 日
- Takeru Suzuki, Hiroyo Ohya, Fuminori Tsuchiya, Kazuo Shiokawa, Hiroyuki Nakata, Fireball-associated variations in the D-region ionosphere observed using VLF-LF transmitter signals, JPGU-AGU Joint meeting 2020, 2020 年 7 月 12 日
- Tekkan Akashi, Hiroyo Ohya, Hiroyuki Nakata, Fuminori Tsuchiya, Study of variations in the D-region ionosphere after the 2016 Kumamoto earthquakes using VLF-LF transmitter signals, JPGU-AGU Joint meeting 2020, 2020 年 7月12日

エアロゾル・雲相互作用の理解を目指したエアロゾル吸湿特性の 観測研究

Observational study of aerosol hygroscopicity toward understanding aerosol-cloud interactions

中山智喜、長崎大学・水産・環境科学総合研究科

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

【研究方法】本研究では、名古屋大学ISEEおよび琉球大学と共同で、琉球大学千原キャン パスにおいて観測を実施した。台風が沖縄の近海を通過する夏季に光学式粒子計数器(TSI 社製、OPS3330)を用いて、直径0.3から10ミクロンのエアロゾル粒子の粒径分布を測定し た。また、パナソニック社と共同開発した小型PM2.5センサを2台用いることで、実大気条 件と湿度低下条件におけるPM2.5重量濃度の連続観測を行った。

【結果と考察】図1に、2018年から2020年に沖縄近海を通過した合計11個の台風について、 台風接近時の風速とエアロゾル粒子(直径0.3~10ミクロン)の重量濃度の関係を示した。 いずれの台風についても、エアロゾル粒子の重量濃度が風速に対して、ほぼ同様の割合で 増加し、風速が海塩粒子の発生量を決定づけていることが示唆された。図2に、外気温度・ 湿度条件下で測定したPM2.5と、筐体内を10°C程度加熱し相対湿度を低下させた条件下で測 定した際のPM2.5センサの出力濃度の比の、非加熱時の相対湿度に対する依存性を示した。 その結果、同じ相対湿度条件においては、冬季に比べ、夏季に比が大きくなることがわか った。沖縄において夏季には、海塩粒子の相対寄与が増加し、PM2.5全体の吸湿性が増加し た可能性が示唆された。



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



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

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

中野 佑樹、神戸大学大学院 理学研究科

研究の背景と目的

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

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

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

研究の手法

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

名古屋大学宇宙地球環境研究所結合データサイエンスセンターのCIDASシステムを用いて、RHES SI衛星、GOES衛星の観測データを解析した。具体的には、Soft X線 (GOES)、Hard X線 (RHESS I)、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。

2020年度は、上記の研究を応用して、太陽の側面や裏側で発生した太陽フレアに関する時間探索幅 の決定手法に関する研究を実施した。太陽の裏側では、監視衛星が限られるため、太陽フレアの直接 的な観測は困難であるが、SOHO衛星やLASCO衛星 によるCoronal mass ejections (CMEs)の観測 データを利用した。CMEsは太陽フレアに伴って発生した例が複数回あるため、我々の表側で見積も った時間探索幅 (Soft X線の4,178秒)の範囲をCMEsの観測時刻周辺の時間に関して応用した。また、 CMEsによるプラズマの放出速度は、CMEsの放出規模を測る指標となる。本研究では放出速度が20 00 km/sを超える10回のCMEsを対象として選択した。

研究の成果

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

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



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

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

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

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

研究成果発表:

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

参考文献: [1] R. Davis, Prog. Part. Nucl. Phys. 32 (1994) 13-32. [2] B. Aharmim, et al., Astropart.Phys. 5 5 (2014) 1-7. [3] K.S. Hirata, et al., Phys. Rev. Lett. 61 (1988) 2653. [4] D. Fargion, et al., Astrophy. 3 (2 003) 75-86. [5] Y. Fukuda, et al., Nucl. Instrum. Meth. A 501 (2003) 418-462.

衛星搭載イメージング可視・紫外撮像光学系の設計と開発

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

坂野井健、東北大学·大学院理学研究科

【研究目的】

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

【研究方法】

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

【研究結果】

これまでの紫外線検出器の検討から、国内メーカーのCCD検出器が観測要求を実現する可能性が示された。 これに基づき、2020年度は外部経費を用いて試験用紫外検出器パッケージを調達した。これには、読み出し・ 駆動用のエレキとPCソフトウェアも附属している。また、紫外光学系について、新たな高空間・高時間分解 カメラに要求される視野は20x20度以下と比較的狭いため、近年開発された130nm付近でも透過効率の高いC aF2材料による対物レンズを用いることが出来る。この対物レンズに近年の非球面精密加工技術を採用すれば、 小型軽量化が見込まれる。2020年度は、この非球面対物レンズによる空間分解能や、130nm帯の透過率を実 証するため、外部経費を用いて製造を行った。

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

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

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

【成果発表(坂野井に下線)】

<査読付き論文>

1. Kataoka, R., C. Chaston, D. Knudsen, K. A. Lynch, R. L. Lysak, Y. Song, R. Rankin, K. Murase, <u>T. Sakanoi</u>, J. Semeter, T. H. Watanabe, D. Whiter (2021), Small-Scale Dynamic Aurora, Space Sci. Rev., vol. 217, 1, 17, https://doi.org/10.1007/s11214-021-00796-w.

Fukizawa, M., <u>T. Sakanoi</u>, Y. Miyoshi, Y. Kazama, Y. Katoh, Y. Kasahara, S. Matsuda, A. Matsuoka, S. Kurita, M. Shoji, M. Teramoto, S. Imajo, I. Sinohara, S. Y. Wang, S. W. Y. Tam, T. F. Chang, B. J. Wang, C. W. Jun (2020), Pitch-Angle Scattering of Inner Magnetospheric Elec trons Caused by ECH Waves Obtained With the Arase Satellite, Geophys. Res. Lett., vol. 47, 21, e2020GL089926, https://doi.org/10.1029/2020GL089926.

3. Miyoshi, Y., S. Saito, S. Kurita, K. Asamura, Kl Hosokawa, <u>T. Sakanoi</u>, T. Mitani, Y. Oga wa, S. Oyama, F. Tsuchiya, S. L. Jones, A. N. Jaynes, J. B. Blake (2020), Relativistic Electron Microbursts as High-Energy Tail of Pulsating Aurora Electrons, Geophys. Res. Lett., vol. 47, 21, e 2020GL090360, https://doi.org/10.1029/2020GL090360.

 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, <u>T. Sakanoi</u>, D. K. Whiter, S. I. Oyama, Y. Ogawa, S. Kurita (2020), Diffuse and Pulsating Aurora, Space Sci. Rev., vol 216, 4, https://doi.org/10.1007/s11214-019-0629-3.

<学会発表>

1. M. Hirahara, M. Yamauchi, Y. Saito, H. Kojima, K. Asamura, <u>T. Sakanoi</u>, Y. Miyoshi, an d N. Kitamura, and An international multi-point space exploration mission for integrated observat ions in the space-Earth coupling system, 日本地球惑星科学連合2020年大会, ポスター発表, May 24-29, 2020.

2. <u>T. Sakanoi</u>, M. Hirahara. Y. Miyoshi, K. Asamura, K. Hosokawa, Y. Saito, H. Kojima, N. Kitamura, M. Fukizawa, S.-I. Oyama, T. Tsuda, A. Saito, H. Frey, and N. Schneider, Auroral ima ging at visible and far-ultra-violet wavelengths for the future polar orbiting satellite mission FAC TORS, 日本地球惑星科学連合2020年大会, ポスター発表, May 24-29, 2020.

3. 平原 聖文、齋藤 義文、小嶋 浩嗣、浅村 和史、山内 正敏、<u>坂野井 健</u>、三好 由純、北村 成寿、杉 本 理英、宇宙地球結合系探査「FACTORS」計画の現状:編隊飛行衛星群と軌道擾乱・制御、第21回宇宙科 学シンポジウム、ポスター発表, Jan. 6-7, 2021.

4. 三好 由純、北村 成寿、平原 聖文、浅村 和史、<u>坂野井 健</u>、西山 尚典、小嶋 浩嗣、FACTORSオー ロラ観測チーム、大気加熱・流出検討チーム、FACTORS計画における科学検討の現状報告、第21回宇宙科学 シンポジウム、ポスター発表, Jan. 6-7, 2021.

5. 浅村 和史、小嶋 浩嗣、<u>坂野井 健</u>、FACTORS 計画検討チーム、FACTORS計画における観測機器 開発の現状報告告、第21回宇宙科学シンポジウム、ポスター発表, Jan. 6-7, 2021. あらせ軌道上磁場データの評価と特性向上の検討 Evaluation and improvement of in-flight magnetic field data of Arase

松岡彩子、京都大学·理学研究科

【研究目的】

あらせ衛星は2017年3月の定常観測開始以降約4年間データの取得をほぼ連続的に継続し、データを使った 多くのサイエンス成果が得られつつある。従来の衛星観測による結論を超える成果を得るためには、観測し た磁場データの高精度較正が重要である。あらせで得た磁場データの高精度較正には、地上較正試験の結果 だけでなく、打ち上げ後のデータを評価した結果も用い、軌道上データから較正パラメータを導出する作業 は重要である。軌道上データの高精度の評価と較正をを行うことにより、ロスコーンに降り込むプラズマ粒 子の詳細な観測、電流の方向や量の同定、EMIC波動、ULF波動などのサイエンス課題で詳細な議論が可能 となる。放射線帯や内部磁気圏の研究の推進への貢献が期待される。

【研究方法】

軌道上のあらせ磁場データの評価と較正の妥当性の検討を行い、磁場分解能、時間分解能、周波数特性、ク オリティフラグによるデータ品質分別などの、データ特性の向上をはかった。磁力計機器PIである研究代 表者が、あらせサイエンスセンターメンバー、磁場データを主に用い内部磁気圏の研究を行う研究者と協同 して行った。

【研究結果】

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

【考察・まとめ】

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

【成果発表】

松岡彩子,能勢正仁,三好由純,寺本万里子,野村麗子,藤 本晶子,田中良昌,篠原学,栗田怜,今城峻,篠原育、 Characteristics of the magnetic field variations



図1 「あらせ」磁場データ較正結果 確認用サマリープロットの例

observed by Arase、地球電磁気・地球惑星圏学会 第148 回講演会、オンライン、2020/11/04 Matsuoka Ayako, Nose Masahito, Miyoshi Yoshizumi, Teramoto Mariko, Nomura Reiko, Fujimoto Akiko, Tanaka Yoshimasa, Shinohara Manabu, Kurita Satoshi, Imajo Shun, Shinohara Iku、Character istics of the magnetic field variations at and above proton cyclotron frequency observed by Arase、AGU、Virtual, 2020/12/15 IPSデータを利用した太陽風予測シミュレーション Solar wind forecast simulation using IPS data

久保勇樹、情報通信研究機構·宇宙環境研究室

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

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

3. 研究成果

本研究では、2013年から2017年にかけての12個のCMEイベントを 対象にSUSANOO-IPS予測シミュレーションを適用し、CMEの地球へ の到来時間の評価を行った。その結果、IPSを用いないSUSANOOシ ミュレーションによるCME到来時刻の予測到来時刻誤差(約7時間 程度)と比較して、予測到来時刻誤差を約5時間程度に小さくす ることに成功した。なお、NASA/CCMCで行われているCME Scoreb oardによる予測到来時刻誤差が約12時間程度であることを考え ると、この結果は、驚異的な数字であることがわかる。現在、NI CTでは、SUSANOO-IPS予測シミュレーションを実際の宇宙天気予 報に導入するためのシステム開発を進めており、誤差の情報など を含んだ予報を行うアンサンブル予報の実現が間近に迫ってき ている。



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

- 4. 成果発表
 - 誌上発表
 - Iwai, K., Shiota, D., Tokumaru, M., Fujiki, K., Den, M., and Kubo, Y., Validation of Coronal Mas s Ejection Arrival-Time Forecasts by Magnetohydro dynamic Simulations based on Interplanetary Scint illation Observations, EPS, 73, 9, 2021
 - ② 口頭発表
 - 岩井 一正、塩田 大幸、徳丸 宗利、藤木 謙一、田 光 江、久保 勇樹、Validation and operation of a coro nal mass ejection arrival time forecasting syste m using interplanetary scintillation observation s、JpGU - AGU Joint Meeting 2020:Virtual、オンラ

イン、7月13日

- 2. 岩井 一正、塩田大幸、久保勇樹、田光江、徳丸宗利、藤 木謙一、惑星間空間シンチレーション観測データを取り 込んだMHDシミュレーションによる太陽嵐到来予報の精 度評価、日本天文学会2020年秋季年会、オンライン、9月 8日
- 3. Shiota D., Yashiro S., Kataoka R., Iwai K., Ebih ara Y., Development of real-time prediction syste m of CME arrival and magnetic field with ensembl e SUSANOO-CME simulation、43rd COSPAR Scientific Assembly、オンライン、2月2日、招待講演
- Iwai K., Shiota D., Tokumaru M., Fujiki K., Den M., Kubo T., Validation of CME arrival-time forec asted by MHD simulations based on interplanetary scintillation observations、43rd COSPAR Scientif ic Assembly、オンライン、2月3日、招待講演
- 5. 塩田大幸、太陽風・コロナ質量放出到来予測モデルの課題と展望、ISEE研究集会「太陽地球圏環境予測のための モデル研究の展望」、オンライン、2021年3月26日
- 6. 久保勇樹、岩井一正、塩田大幸、徳丸宗利、藤木謙一、 田光江、IPSデータを利用した太陽風予測シミュレーション(SUSAN00-IPS)、2020年度ISEEコミュニティミーティ ング、オンライン、2020年10月26日

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

渡邉 堯、情報通信研究機構

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

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

永田伸一、京都大学大学院理学研究科附属天文台

【研究目的】

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

【研究方法】

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

【研究結果】

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

【考察】

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

Berger, M. A., & Prior, C. 2006, Journal of Physics A

Inoue, S., Magara, T., Pandey, V., S. et al. 2014, The Astrophysical Journal

Inoue, S., Shiota, D., Bamba, Y., et al. 2018, The Astrophysical Journal

Lemen, J. R., Title, A. M., Akin, D. J., et al. 2012, Solar Physics

Liu, L., Cheng, X., Wang, Y., & Zhou, Z. 2019, The Astrophysical Journal

Pesnell, W. D., Thompson, B. J., & Chamberlin, P. C. 2012, Solar Physics

Scherrer, P. H., Schou, J., Bush, R. I., et al. 2012, Solar Physics

Vemareddy, P. 2019, The Astrophysical Journal

Yamasaki, D., Inoue, S., Nagata, S., & Ichimoto, K., 2021, The Astrophysical Jour nal

Yang, S., Zhang, J., Zhu, X., & Song, Q. 2017, The Astrophysical Journal Letters

【成果発表】

(1) 学術雑誌に発表した論文、著書

- 1. 著者: Yamasaki, D., Inoue, S., Nagata, S., & Ichimoto, K.
 - 題目: "Evolution of the Nonpotential Magnetic Field in the Solar Active Region 12673 Based on a Nonlinear force-free Modeling"
 - 誌名: The Astrophysical Journal, 908, 132, 9pp, 2021
- (2) 国際会議における発表
 - 1. 著者: Yamasaki, D., Inoue, S., Nagata, S., & Ichimoto, K.
 - 題目: "Nonlinear force-free field modeling of the flare-productive magnetic field observed in the solar active region 12673" (iPoster) 学会名: JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, online, 2020 Jul.

(3) 国内学会、シンポジウムにおける発表

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

学会名:日本天文学会2021年春季年会、オンライン、2021年3月



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



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

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

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

Obenberger et al(2014) など、流星や火球からの電波放射は昔から考えられてはいたが、 実際に検出されたのは 2010 年代に入ってからである。ただし、HF(短波、3·30MHz)の受 信例が多く、大型干渉計でも VHF(超短波、30·300MHz)の受信例はあまり多くない。その 放射機構はプラズマ振動による電波放射の仮説が提唱されているが、プラズマ振動は電磁 波ではないので変換機構が必要である。この放射機構は太陽のメートル波放射の場合と似 たものと考えられ、プラズマ物理の電磁放射の素過程の本質的な理解につながる。

はやぶさ2の再突入するカプセルが大気抵抗により減速されるのは100km 特に70km 以下である。その過程でカプセルの外側が熱せされ、プラズマ化される。これは流星と発 光過程と同じであり、Obenberger et al(2014)で報告されるように、プラズマ放射が発生 することが考えられる。そこで、この電波放射を直接観測することにより、プラズマから の放射機構を明らかにする。特にはやぶさ2のカプセルに関する情報(軌道、大きさ、光の 明るさ等々)が十分あるので、電波強度の絶対値、時間変化を求め、また周波数スペクトル を決め、可能であれば直線偏波度の観測量がわかれば、まだ不明である電波放射機構につ いて詳細な議論が可能となる。

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



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

太陽圏における銀河宇宙線伝播の研究 Study on Galactic Comic 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ーオン望遠鏡を用いた宇宙線連続観測に より、宇宙線強度変動と太陽活動との関係、及び宇宙線異方性と惑星間空間磁場(IMF: Interplanetary Magnetic Field)の構造との関係について調べる。これから宇宙磁場中に おける宇宙線の加速・伝播機構の理解を深めることを目的とする。

【研究方法】

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

本研究では、GRAPES-3 実験(インド)、本研究所(東山)、および東京大学宇宙線研究 所明野観測所の各ミュー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ーオン検出器は、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、明野ミューオン観測では、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 ミューオン観測も、検出 面積を2倍(1,120 m²)にする拡張作業が進行中である。

【研究活動報告】

2019年度の時点でGRAPES-3実験のミューオン検出器の拡張作業は大詰めを迎えつつあった。新ミューオン検出器 16 基について比例計数管の積み上げが終わり、信号計測回路の設置を行って本格観測を開始する予定であった。2019年度末に新型コロナウィルスの世界的流行が始まり、2020年度になっても依然として流行が治まらなかったため、研究活動が計画通りに進めることができなかった。共同研究を行うインドにおいても日本国以上に状況

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

一方、GPRAES-3 及び明野ミュー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、中部大学の大嶋晃敏氏らが、2020 年秋に複数回にわたり明野宇宙線観 測所に出張し、3 基の明野ミューオン観測装置の再整備を進め、比例計数管の時定数、PWA の測定および性能のチェックを行なった。

【研究成果】

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

【日本物理学会・その他学会発表】

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

数値モデリングおよびデータ解析に基づく環電流が内部磁気圏ダイナ ミクスに果たす役割の研究

Study of role of the ring current in the inner magnetospheric dynamics based on numerical modeling and data analysis

関華奈子、東京大学大学院理学系研究科

ジオスペース最大規模の変動現象である宇宙嵐(geospace storm)時には、環電流が発達 し、静穏時には双極子磁場がしっかりしてい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ている。

宇宙嵐時のジオスペースのダイナミックな変動機構を理解するためには、内部磁気圏に おける電磁場と粒子の変動を理解することが不可欠であるが、申請者らはこれまでに、両者 を自己無撞着に解くことが可能な環電流モデル(GEMSIS-RC)を開発してきた[Amano et al., 2011]。この環電流モデルの特徴は、世界で初めてULF波動を含む電磁場の変動と環電 流イオンのダイナミクスを同時に物理方程式に基づき記述可能にした点である。本研究で は、この新モデルを基軸として、環電流によって引き起こされる磁場変形やPc5帯のULF波 動の励起が放射線帯粒子加速に果たす役割を明らかにすることを目的としている。

本研究計画では本年度、昨年度に引き続き2つの課題に焦点をしぼって研究を進めた。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 デルでは記述的ない現象であり、世界的にみても独自性を持った取り組みである。計画第2 年度である本年度は、非対称バタフライ型のピッチ角分布を持つ内部磁気圏へのイオン入 射を模擬したシミュレーション結果から、ドリフト・バウンス共鳴による波の励起条件を調 べ、結果を国際学術誌に出版した。また、電離圏側の電場ポテンシャルを解くGEMSIS-PO Tとのモデル結合計算の開発を行った。

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

北 和之、茨城大学 理工学研究科 鈴木 湧平、茨城大学 理学部 牧 輝弥、近畿大学 理工学部 松見 豊、坪木和久、大畑 祥、名古屋大学 宇宙地球環境研究所

研究目的:

細菌・胞子・花粉などの生物由来の1次有機エアロゾル粒子はバイ オエアロゾルとよばれ、比較的高温で氷晶核となるものを含むため 気象・気候への影響がありうること、また病原体やアレルゲンとな るものを含むためヒトや植物の健康影響の観点で重要である (e.g. Hoose and Möhler, 2012)。また、福島第一原子力発電所事故時に汚 染を受けた森林からの放射性セシウムの大気への放出(再飛散)にも、 バイオエアロゾルが放射性セシウムの担体として重要な役割を果た していることが明らかになった(Igarashi et al., 2019)。

バイオエアロゾルの放出源の一つとして、森林が重要であるが、 そこから大気への放出量を定量的に見積もった研究はまだ少ない。 バイオエアロゾルの森林から大気への放出過程と放出フラックスを 明らかにするため、森林内から上空にかけての高度分布の観測を行 う必要があり、森林直上でのバイオエアロゾルの高度分布を測定す るため、UAV(ドローン)搭載型のバイオエアロゾルサンプラを開発 しているので報告する。

UAV搭載型バイオエアロゾルサンプラの概要:

- UAV搭載型バイオエアロゾルサンプラとしては、以下のような条件を満たすことが必要になると考えた。
 - バイオエアロゾルを他の粒子と選別して濃度を測定することおよびメタゲノム解析などによる種類別の存在割合を推定することを可能とするため、それをさらなる分析を行うことが可能な形で捕集する。
 - ウィルスを除き、多くのバイオエアロゾルは粒径1µm以上と 考えられ、それ以上の粒径のエアロゾルを捕集する。
 - サンプリング装置は搭載重量制限に収めること。特に、ポンプやバッテリの重量に注意する必要がある。
 - 4. 高度範囲は地表~150mとする。
 - 5. UAVの速度は50m/s程度
 - 6. 飛行時間は30分以内程度

バイオエアロゾルの典型的な数密度範囲は10³~10⁵個m⁻³と考えられ、10分程度のサンプリング時間で採取したサンプルの顕微鏡観察により定量化できる十分な個数のバイオエアロゾルを捕集するためには、100L/m程度の流量が必要になる。このような流量での吸引が可能なポンプは重量が大きくなり、UAV搭載用としては実用的ではない。そこで、漏斗状のインレットを用い、UAV自体の移動により空気を導入することを考えた。必要なインレット直径は約7cmと見積もられ、十分現実的な大きさである。漏斗状インレット

の出口は直径12mmとし、出口と捕集プレート間の間隔を約1cmと することで、インパクタとして粒径1µm以上の粒子が捕集できると 考えた。

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

まとめと今後の課題:

以上のようなサンプラーを試作し、各構成要素ごとにテストを行い、 期待通りの動作をすることを確認した。今後は、全体をシステムとし て動作させるようまとめて試験観測により性能を確認し、早ければ 2021年夏に実際にUAVに搭載しての試験を行いたいと考えている。 現時点で最も大きな課題は、姿勢が変わっても安定にバイオエアロ ゾルを保持でき、かつサンプリング後に実験室で捕集した粒子を脱離 させられるような捕集プレート素材の選定であり、各種の粘着性ゲル シートなどをテストしている。

参考文献:

Hoose and Möhler (2012) Atmos. Chem. Phys., 12, pp. 9817-9854. Igarashi, Kita et al. (2019) Scientific Reports, 9(1)/ 1954

成果発表:

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

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

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

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

津田卓雄, 電気通信大学・情報理工学研究科

研究目的

ノルウェー,トロムソのナトリウム (Na) ライダーは,主として中間圏・下部熱圏高度に分布 する Na の 計測を目的とした観測装置であるが,Na 観測時の副産物として成層圏高度の主成 分大気粒子 (N₂, etc.) によるレイリー散乱データも同時に取得されている.本研究では,この レイリー散乱データを有効活用して成層圏大気温度を求める手法の検討と実装を目的とする.

研究進展状況

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

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

研究発表

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

インド亜大陸北東部における

プレモンスーン降水をもたらす総観場の解明

Study of synoptic conditions during

premonsoon season in the northeast Indian subcontinent

村田 文絵、高知大学·理工学部

1. はじめに

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

2. データ

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

3. 研究結果

インドアッサム州の雨量計地点はヒマラヤ東部の南に広がるブラマプトラ谷の中と南部 のメガラヤ高原の東隣に位置する丘陵地帯にあるが、全て夜間に降水の極大を示す。プレ モンスーン季とモンスーン季を比較すると、プレモンスーン季は降水が夕方18LT頃に開始 し、翌日の12LTまでの間にみられ、00-03LTに降水量が極大となる。一方モンスーン季は2 1LT頃に開始し、翌日の12LTまでの間にみられ、03-05LTに降水量が極大となる。またGS MaPをみると、プレモンスーン季はブラマプトラ谷の中で西から東に降水システムが移動 する傾向(移動速度約7m/s)がみられたのに対し、モンスーン季はブラマプトラ谷の中での降 水システムの移動はみられない。GSMaPでみるとブラマプトラ谷の周辺にわたって降水日 変化は顕著であり、谷では日中午後の降水量が抑制される一方で、ヒマラヤの標高が高い 地域とメガラヤ高原上で日中午後に降水が卓越する。

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

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

6. 引用文献

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

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

7. 成果発表

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



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

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

真部広紀、佐世保工業高等専門学校·基幹教育科

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





図 1. PM2.5 測定装置 左:構造図 右:外観

図 2. 左:ドローン 右:カプセル

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



図 3. 実験風景 (C:カプセル D:ドローン)

【2:ドローンによる地形計測実験】

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



図4 大室山



図5 大室山の3次元モデル(スクリーンショット)

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

【参考文献(URL)】

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

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

> 花 土 弘 、国 立 研 究 開 発 法 人 情 報 通 信 研 究 機 構 電 磁 波 研 究 所 電 磁 波 伝 搬 研 究 センター リモートセンシング研 究 室

1. 研究目的

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

2. 研究方法

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

3. 研究結果

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

4. 考察

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

5. まとめ

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

6. 引用文献

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

7. 成果発表

花土ら、"地デジ放送波を用いた地表付近の水蒸気量観測-首都圏観測網の整備と九州実証実験への準備状況-", 日本気象学会2020年度秋季大会、オンライン開催、2020年10月27日 花土ら、"地デジ放送波を用いた地表付近の水蒸気量観測-山岳域での反射法の利用について-",日本気象学会20 20年度秋季大会、オンライン開催、2020年10月28日

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

齊藤昭則、京都大学·大学院理学研究科

目的

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

方法

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

結果・考察

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

まとめ

中性大気を入力とした3次元モデルによる金属イオン分布の結果は 観測と高い一致を示した。これは、数値モデルを用いたEs層の発生 予測への可能性を示す結果であるが、今後、小規模な風や電場など 現在のモデルには含まれていない過程も取り込むことで、より高い 再現が期待できる。

成果発表

- Andoh, S., Saito, A., Shinagawa, H., Ejiri, M.K. and Miyazaki, S., Three-dimen sional ionospheric simulation of the Es layer: Physical mechanism of the sporadic appearance, JpGU -AGU Joint Meeting 2020, オンライン, 2020年7月12 日-15日
- 安藤慧, 齊藤昭則, 品川裕之, 中緯度スポラディックE層の発生に及ぼす電気力学的影響に関する数値シミュレーション, 地球電磁気・地球惑星圏学会第148回 総会・講演会, オンライン, 2020年11月2日
- Andoh, S., Saito, A., Shinagawa, H. and Ejiri, M.K., First simulations of dayto-day variability of mid-latitude sporadic E layer structures, American G eophysical Union fall meeting 2020, オンライン, 2020年12月1日-17日
- Andoh, S., Saito, A., Shinagawa, H. and Ejiri, M.K., First simulations of dayto-day variability of mid-latitude sporadic E layer structures. Earth Plan ets Space 72, 165 (2020). https://doi.org/10.1186/s40623-020-01299-8

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

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

内藤裕一、名古屋大学・博物館

コロナ禍のため研究を実施できなかった。

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

山田広幸、琉球大学・理学部

研究目的

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

研究方法

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

研究結果

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



熟段階においても渦度がほとんど強まっていないことがわかる。つまり、これまで実績のある高度14km付近を飛行する場合、非常に強い勢力でもスーパー台風でも同程度の揺れで飛行できると考えられる。 なお、高度0.5km付近にある渦度の極大は、メソサイクロン(竜巻をもたらす積乱雲の回転)と同程度の大きさであり、海面近くの飛行では非常に強い揺れを伴う可能性が考えられる。このことは、米国のハリケーン航空機観測で航行に影響を与える強い揺れが海面近くの低い高度で報告されている事実と整合する。

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

成果発表 (論文)

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

成果発表 (口頭発表)

- 山田 広幸, 2020: 台風の航空機観測 ~米国の流儀、日本の挑戦~, 琉球大学島嶼防災研究 センター第14回防災・環境シンポジウム 一安全・安心への取り組み一, 琉球大学 50 周 年記念会館, 12月17日, 口頭発表.
- 細川 椿, <u>山田 広幸</u>, and Ben Jong-Dao Jou, 2020: 台風 Maria (2018)のレインバンドに関 する地形性降雨強化の解析, 日本気象学会秋季大会, オンライン開催, (10 月 25-31 日), オンライン発表.
- 平野 創一朗, 伊藤 耕介, <u>山田 広幸</u>, 2020: 2018 年台風第 24 号の眼の領域における深い 対流雲の出現, 日本気象学会秋季大会, オンライン開催, (10 月 25-31 日), オンデマンド 発表.

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 usin g nitrogen isotope ratio on mountain stream water in Yaku Island

篠 塚 賢 一 、 福 岡 工 業 大 学 · 情 報 工 学 部

研究目的

近年、日本の森林では、大気からの窒素沈着が増大し、森林の窒素循環メカニズムが変化 している。そのため、通常低濃度の硝酸イオン(NO₃)流出しか見られなかった森林渓流水に おいても高濃度のNO₃:流出が見られている。さらに、近隣に人為的な窒素負荷源が存在し ない、山岳域や島嶼部においても渓流水中のNO₃:濃度の上昇がみられている。国内でも稀 な高い標高を持つ山岳島嶼の屋久島でも、1990年から2010年にかけて渓流水中のNO₃:濃度 が増加傾向にある(Nakano et al., 2001; 海老瀬・永淵, 2002)。これは、大陸からの窒素酸 化物が運ばれ、大気からの窒素沈着の増大が渓流水質の変化に影響を及ぼしていると考え られる。

屋久島の島の直径は30kmであり、標高1,931mの宮之浦岳をはじめ1,800m以上を7座持 つことから、島内を流れる渓流は急峻な地形を一気に流れる渓流が多数存在している。この ように、急勾配な渓流、日本の中でも高い降水量、風化した花崗岩流域を持つ屋久島の渓流 水に含まれるNO3⁻は、陸上生物の影響を受にくく、雨の成分を多く含んだ水が渓流水とし て流出しやすいと考えられる。そのため、屋久島のような急勾配な地形を持つ渓流水は、大 気からの化学成分の沈着に対して感受性が高い可能性が高い。

既往の同位体比分析では、窒素・酸素同位体比(δ^{15} N, δ^{18} O)を用いた解析手法が用いられてきた。大気からの窒素沈着,生物の硝化による硝酸の供給,同化・脱窒による窒素除去といった、森林の窒素循環プロセスを δ^{15} N, δ^{18} O値のみで起源を特定することは困難であった。しかし、既往の測定である δ^{15} N, δ^{18} Oに Δ^{17} Oの安定同位体比分析手法を加えることにより大気からの窒素沈着を特定することができるようになった。渓流域でのNO3 濃度の増加影響を大気と陸域のプロセス起源で生じたものを特定することができる。

本研究では屋久島の渓流水において、大気生成由来のNO₃割合を算出し、大気・陸域で生成されるNO₃の起源をΔ¹⁷Oの安定同位体比分析手法を用いて明らかにする。急勾配から緩勾配を流れる大小さまざまな渓流を比較することにより、地形の違いが渓流水中の大気由来のNO₃の割合に与える影響を評価する。

·研究方法

屋久島の試料水に含まれるNO3⁻中の δ^{15} N, δ^{18} O, Δ^{17} Oの分析を行う。今年度は、COVI D-19の影響と島内で感染者が出たため、実際に渡航しサンプリングを行うことが困難であった。そのため、2017年に採取した屋久島試料、福岡近隣の山岳渓流水、山岳地下水、樹 氷、雪の試料分析を行った。また、2021年の屋久島の試料は、冬季の北部渓流水試料を登山 家に依頼した。これらの試料を福岡工業大学にあるイオンクロマトグラフィーで分析を行 い、NO3⁻濃度を測定した。その後、名古屋大学に冷蔵郵送しNO3⁻中の δ^{15} N, δ^{18} O, Δ^{17} Oの 分析を質量分析計(CF-IRMS)で測定を行った。

・研究結果と考察

2017年に採取した屋久島試料の結果からは、2018,2019年に同地点で継続的に採取、分析を行っている値に近い値を示した。加えて、渓流本流(2.5~4.0‰)では、支流部(1.0~2.7‰) とは異なり、Δ¹⁷Oの値が高くなる傾向を示した。これは、本流の集水域の地形が急勾配で あることが原因と考えられる。福岡近隣の渓流域では窒素飽和状態の森林であることが知 られている。これらの渓流水中のNO3濃度は高い傾向 (2.0~6.1‰) を示すが、 Δ^{17} Oの値は、 先行研究の渓流域と類似した値を示した(Nakagawa et al., 2018)。しかしながら、湧水は 高い値を示した。本来、地下水に近い値をとる湧水の Δ^{17} O値は低い値を示すが、本調査地 では高い値を示すことが明らかになった。この原因については、今後解析を行っていく。樹 氷、雪の Δ^{17} Oの値は、大気で生じたNO3が大半を占めているため、 Δ^{17} Oの値は高い傾向(1 7.6~23.5‰)を示した。また、2021年の屋久島の北部渓流域試料は、既往の報告にある渓流 水中の Δ^{17} O値と比較して高い傾向(2.2~6.6‰)を示した。2017年の西部域の試料よりも高い 値を示した。屋久島は高い降水量と急勾配地形であるため、大気を起源に持つNO3が高い 割合で含まれていることが考えられる。今年度の測定で、得られた結果を元に継続的なサン プリング調査と分析を行っていく。

・引用文献

1. Nakano, T., Okumura, M., Yamanaka, M., atake, K. Geochemical characteristi cs of acidic stream water on Yakushima Island, a world natural heritage site. Wa ter. Air. Soil Pollut. 130, 869–874 (2001).

2. 海老瀬 潜一, 永淵 修, 川村 裕紀. 東シナ海・日本海側の湿性沈着負荷と高山・離 島渓流群水質の関係. 環境科学学会誌. 32, 125-140 (2019).

3. Nakagawa, F., Tsunogai, U., Obata, Y., Ando, K., Yamashita, N., Saito, T., Uc hiyama, S., Morohashi, M., & Sase, H. (2018). Export flux of unprocessed atmosp heric nitrate from temperate forested catchments: a possible new index for nitroge n saturation. BIOGEOSCIENCES, 15(22), 7025–7042. https://doi.org/10.5194/bg-15-7025-2018

・成果発表

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