

4. 一般共同研究 目次詳細

(所属・職名は平成31年3月現在)

研究代表者 Principal Investigator	所属機関 Affiliation	所属部局 Department	職名 Position	研究課題名 Project Title	頁 Page
湯口貴史	山形大学	理学部	講師	石英中のTi濃度の定量分析に基づく石英の結晶化プロセスの解明：遠野岩体と土岐岩体を例に	94
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	元教授	ビーチロック試料の正確な膠結年代の決定方法	96
山崎 了	青山学院大学	理工学部 物理・数理学科	准教授	高ベータプラズマ中を伝播する無衝突衝撃波の研究	98
小島正宜	名古屋大学	(旧) 太陽地球環境研究所	名誉教授	惑星間空間シンチレーションを利用した太陽風研究	99
鈴木和良	海洋研究開発機構	北極環境変動総合研究センター	主任技術研究員	ユーラシア大陸における植生と水文気候の相互作用と経年変動に関する研究	101
丸橋克英	情報通信研究機構	電磁波研究所 宇宙環境研究室	協力研究員	太陽擾乱現象の惑星間空間伝搬に関する研究	103
笠羽康正	東北大学	大学院理学研究科・地球物理学専攻	教授	内部磁気圏DC電場・低周波電場波動における地上データ処理・校正手法の確立：その3	105
佐藤陽祐	名古屋大学	工学研究科総合エネルギー工学専攻	助教	雲解像モデルを用いた雲エアロゾル相互作用の見積もり	107
村木 綏	名古屋大学	宇宙地球環境研究所 宇宙線部門	名誉教授	太陽圏物理の総合的研究	109
渡邊恭子	防衛大学校	地球海洋学科	講師	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	114
鷲見治一	九州大学	国際宇宙天気科学・教育センター	客員教授	太陽圏構造とダイナミックスの研究	116
菊池 崇	名古屋大学	宇宙地球環境研究所	名誉教授	磁気圏電離圏電流伝送モデルを応用した中緯度地磁気誘導電流の研究	118
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	120
岩崎杉紀	防衛大学校	地球海洋学科	准教授	ライダーと雲粒子ゾンデによる大粒子・低個数密度の雲の観測	122
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の経年変動	124
阿部 学	海洋研究開発機構	統合的気候変動予測研究分野	技術副主任	地球システムモデルを用いたシベリア域における大気水循環の経年変動特性の解明	126
尾形友道	海洋研究開発機構	アプリケーションラボ	研究員	赤道波動のエネルギー伝達経路の診断による熱帯気候の理解と海洋データの付加価値形成	128
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	129

(所属・職名は平成31年3月現在)

研究代表者 Principal Investigator	所属機関 Affiliation	所属部局 Department	職名 Position	研究課題名 Project Title	頁 Page
太田充恒	産業技術総合研究所	地質情報研究部門	上級主任研究員	Sr同位体分布図を用いた地殻表層物質の陸海域間の移動過程の解明	131
深沢 圭一郎	京都大学	学術情報メディアセンター	准教授	宇宙プラズマ流体シミュレーションのための超並列計算フレームワークの開発	133
中田裕之	千葉大学	大学院工学研究院	准教授	火山噴火に伴う電離圏変動の解析	135
岳藤一宏	情報通信研究機構	電磁波研究所 時空標準研究室	主任研究員	Crabパルサーの長期変動モニターによる星間プラズマゆらぎの検出へむけて	137
エコ シスワン	海洋研究開発機構	地球環境観測研究開発センター	研究員	海色衛星観測による東シナ海での懸濁物質と低次生産量の時空間変動：気候変動による長江流量変化の影響	138
大矢浩代	千葉大学	大学院工学研究院	助教	LF帯標準電波を用いた地震後のD領域電離圏変動	140
堤 雅基	国立極地研究所	宙空間研究グループ	准教授	北極域流星レーダーで観測される両極性拡散係数を利用した極域中間圏の電子温度推定の検討	142
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バックグラウンド時間変動の遠隔地間の比較測定	144
根田昌典	京都大学	大学院理学研究科地球惑星科学専攻	助教	耐波浪環境シー Sprey 測器の開発と海上観測試験	146
佐藤興平	気象庁	気象大学校	非常勤講師	日本の揺籃期地殻に関する年代的な研究	150
今山武志	岡山理科大学	自然科学研究所	准教授	CHIME年代測定による隠岐・島後片麻岩類の変成年代の推定	152
山田広幸	琉球大学	理学部物質地球科学科地学系	准教授	琉球列島の地上レーダーと航空機を組み合わせた台風強度の最適推定方法の検討	154
野澤 恵	茨城大学	理学部	准教授	宇宙天気インタープリター養成のためのプログラム開発	156
細川敬祐	電気通信大学	大学院情報理工学研究科	准教授	光と電波を組み合わせた極冠域電離圏の3次元観測	158
桂華邦裕	東京大学	大学院理学系研究科地球惑星科学専攻	助教	あらせ衛星を用いた地球内部磁気圏リングカレントイオン圧力変動に関する研究	160
加藤雄人	東北大学	大学院理学研究科地球物理学専攻	准教授	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	161
柴田 隆	名古屋大学	環境学研究科	教授	GOSAT検証のための陸別観測所におけるエアロゾル・雲のライダー観測	163
久保勇樹	情報通信研究機構	電磁波研究所宇宙環境研究室	研究マネージャー	IPSデータを利用した太陽風予測シミュレーション	164

(所属・職名は平成31年3月現在)

研究代表者 Principal Investigator	所属機関 Affiliation	所属部局 Department	職名 Position	研究課題名 Project Title	頁 Page
佐藤友徳	北海道大学	大学院地球環境科学 研究院	准教授	北ユーラシアにおける降水の年々変動に対する 大気と陸面の役割	166
田中公一	広島市立大学	情報科学研究科	准教授	太陽圏における銀河宇宙線伝播の研究	168
中野佑樹	東京大学	宇宙線研究所	特任研究員	Super-Kamiokandeを用いた太陽フレア由来の ニュートリノに関する研究	170
伴場由美	宇宙航空研究開発機構	宇宙科学研究所	宇宙航空プ ロジェクト 研究員	太陽面爆発・噴出現象の発生機構解明および発 生予測を目指した統計的研究	172
能勢正仁	京都大学	大学院 理学研究科	助教	沖縄における誘導磁力計観測に基づく低緯度 Pc1地磁気脈動の解析的研究	174
笠原慧	東京大学	大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻	准教授	ERG衛星搭載中間エネルギー荷電粒子観測器の データ解析	175
大野智生	気象庁 気象衛星セン ター	データ処理部	部長	大気放射モデルを用いた「ひまわり」シミュ レーション画像の作成と応用	177
Kyoung-Sun Lee	National Astronomical Observatory of Japan	Solar Science Observatory	Spatially appointed research staff (Project research fellow)	Statistical study on the energy transport process in solar flares using multi- wavelength spectroscopic observations	179
サレム イブラヒ ム サレム モハ メット サレム	東京大学	生産技術研究所	研究員	深層ニューラルネットワークと衛星データを用 いた湖沼・沿岸域の連続水質モニタリング	181
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 FLR 現象の統計的解析	183
川村誠治	情報通信研究機構	電磁波研究所	主任研究員	地上デジタル放送波を用いた水蒸気遅延測定	185
花土 弘	情報通信研究機構	電磁波研究所	研究マネー ジャー	雲・降水観測レーダの航空機観測に関する検 討	187
塩田大幸	情報通信研究機構	電磁波研究所 宇宙環境研究室	研究員	ひので・SDO衛星磁場観測データを用いた太陽 活動領域非線形フォースフリー磁場コードの開 発	189
松田昇也	宇宙航空研究開発機構	宇宙科学研究所	宇宙航空プ ロジェクト 研究員	あらせ衛星によるプラズマ波動伝搬特性の解明 と観測戦略立案	190
関 華奈子	東京大学	大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻	教授	数値モデリングおよびデータ解析に基づく環電 流-放射線帯エネルギー階層間結合機構の研究	191
一柳錦平	熊本大学	大学院先端科学研究部	准教授	水安定同位体を用いたバングラディッシュ周辺に おける水蒸気の起源解析	193
福島あずさ	神戸学院大学	人文学部	講師	夏季インド北東部・アッサム州の豪雨に対する 季節内変動の影響	195
村田文絵	高知大学	自然科学系理学部門	講師	バングラデシュにおける長期の降水量変動 (1891-2016年)	197

(所属・職名は平成31年3月現在)

研究代表者 Principal Investigator	所属機関 Affiliation	所属部局 Department	職名 Position	研究課題名 Project Title	頁 Page
鈴木 臣	愛知大学	地域政策学部	准教授	シングルボードコンピュータを用いた超小型大気光観測装置の開発	199
中北英一	京都大学	防災研究所	教授	Kaバンドレーダーを用いた積乱雲の生成・発達過程に関する研究	200
天野孝伸	東京大学	理学系研究科 地球惑星科学専攻	准教授	高ベータプラズマ中の運動論的不安定性による低周波波動励起	202
町田 忍	名古屋大学	宇宙地球環境研究所	教授	2流体方程式系に基づくMMS衛星データの解析	203
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	沈殿法による水試料の放射性炭素分析法の信頼性	205
渡辺正和	九州大学	国際宇宙天気科学・教育センター	准教授	惑星間空間磁場朝夕成分に依存する夜側沿磁力線電流系の起源	206
津田卓雄	電気通信大学	大学院情報理工学研究科	助教	高エネルギー降下粒子が金属原子層・金属イオン層に与える影響	209
小川泰信	国立極地研究所	国際北極環境研究センター	准教授	電離圏D/E層のプラズマ温度導出と検証	210
浅村和史	宇宙航空研究開発機構	宇宙科学研究所	助教	「あらせ」衛星および地上観測によるリングカレントイオンの散乱現象の解析	212
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	213
川手朋子	宇宙航空研究開発機構	宇宙科学研究所	研究開発員	太陽フレアのリコネクション領域周辺における鉄イオン価数の調査と加熱過程⇒太陽フレアのリコネクション周辺領域における極端紫外線を用いたプラズマ診断	215
三澤浩昭	東北大学	大学院理学研究科	准教授	木星放射線帯長期変動要因の観測研究	217
竹内 誠	名古屋大学	大学院環境学研究科	教授	ジルコン U-Pb年代、Sr同位体分析による美濃・丹波帯堆積岩の地球化学的研究	218
北 和之	茨城大学	理学部	教授	航空機を用いた大気微量気体、エアロゾルのリモートセンシング	220
苗村康輔	名古屋大学	博物館	特任助教	中央アジア造山帯から見つかった古いエクロジャイトの年代測定	222
実松健造	産業技術総合研究所	地圏資源環境研究部門 鉱物資源研究グループ	主任研究員	中国西チンリン造山帯Jiagantan金鉱床中のモナザイトCHIME年代測定	224
道林克禎	名古屋大学	環境学研究科	教授	海洋底橄欖岩と造山型橄欖岩の全岩化学組成の分析	226

石英中の Ti 濃度の定量分析に基づく石英の結晶化プロセスの解明：遠野岩体と土岐岩体を例に
Quantitative determination of Ti concentration in quartz giving crystallization process of quartz: An examples of Tono
and Toki granitic plutons

小北康弘 山形大学大学院 理工学研究科
加藤丈典 名古屋大学 宇宙地球環境研究所
湯口貴史 山形大学 理学部

1. 研究目的

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, 石英の結晶化する温度に依存するため, 石英の結晶化温度の推定に利用できる (Wark and Watson, 2006). 石英に含有される Ti はごく微量で, 電子プローブマイクロアナライザ (EPMA) 分析での一般的な分析条件では定量が困難である. そこで前年度までの共同研究では, 名古屋大学・宇宙地球環境研究所 (ISEE) の EPMA を用いて, 石英中の Ti 濃度の高精度定量分析法の開発を行った.

これまでの石英の結晶化プロセス推定においては, 石英の形状や粒径などの記載岩石学的な情報と関連させた議論の例は少ない. そこで本年度の共同研究では, 遠野岩体と土岐岩体の試料に対して, CL 像解析および Ti 濃度定量の 2 つの手法に, 岩石記載の情報を組み合わせることで, マグマティックな石英の結晶化プロセスを解明し, 石英粒子同士の晶出順序に関する議論を行った.

2. 試料と研究方法 (使用した共同利用装置・施設)

本研究では, 岩手県に位置する遠野複合深成岩体と, 岐阜県に位置する土岐花崗岩体を試料として用いた. 石英の CL 像取得は, 山形大学の SEM-CL を用いた. 石英中の Ti 濃度定量は, 名古屋大学 ISEE の EPMA (JXA-733) を用いた. Ti 濃度定量の分析条件は, 分光結晶 (PET) を Ti の検出に 4 つ割り当て, 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, PET を 1 つ Si のカウントに割り当てた. この手法により, Ti の検出限界は 15 ppm, 分析値 16–472 ppm に対して誤差は 9–14 ppm の精度で定量値を取得することが可能となる. これは, 石英結晶内部の Ti 濃度の高精度な比較を可能にする.

3. 研究結果・考察

まず, 1 つの石英粒子で数点の Ti 定量を行い, CL パターンとの関係を考察した. その一例として, CL パターン C の石英 (サンプル No.26_Qtz01, 図 1) では, 明色部 (CL コア) で Ti 濃度が高く (170 ± 10 ppm), 暗色部 (リム) に向かうにしたがって Ti 濃度が低下する傾向を有する (最低濃度 27 ± 11 ppm). Wark and Watson (2006) の TitaniQ 地質温度計を用いて結晶化温度を算出すると, Ti 濃度が最も高い CL コアで 815 ± 21 °C, 最も低いリム地点で $611 \pm 54/42$ °C である. これは, 温度低下に従って, この石英の CL コアからリムへ結晶化したことを示唆する. また, CL の高輝度域で高い Ti 濃度を示すことを確認した.

次に, 粒径による Ti 濃度の相違を議論した (図 2). その結果, 比較的粗粒な石英ほど, CL コアにおいて Ti 濃度が高い傾向を有する. CL コアでの高い Ti 濃度は, CL コアが比較的高温で結晶化したことを示唆する. つまり粗粒な石英は, 細粒な石英に比べて先に晶出し, 結晶化時間も長いことを示唆する.

CL パターンと Ti 濃度の関係の議論を行った (図 3). その結果, オシラトリーゾーニングを持つ CL パターンの石英 (パターン A, B) は, Ti 濃度が比較的高い傾向を有する. このことから, オシラトリーゾーニングを持つ石英は, 他のパターンの石英に比べて先に晶出したことが示唆される

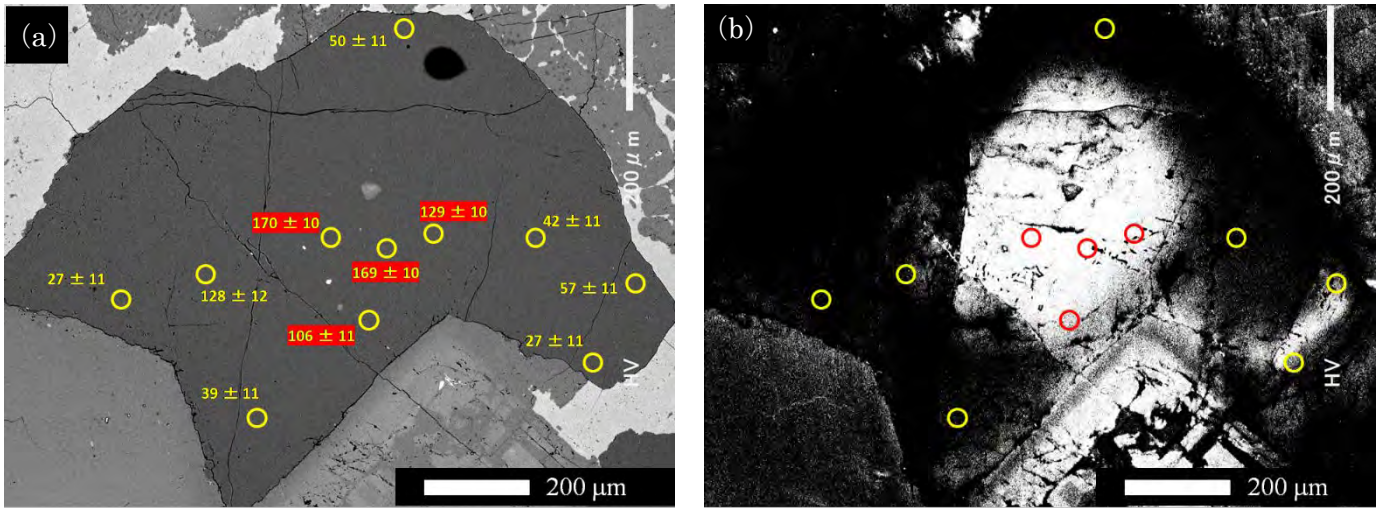


図1 1つの石英粒子内の Ti 濃度の比較

(a) BSE 像, (b) CL 像. 丸印は分析点を示す. それに伴う数字は Ti 濃度 (ppm) を示す.

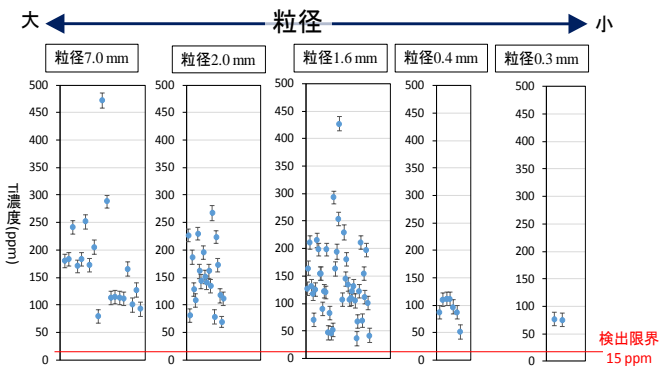


図2 粒径 (0.3 mm~7.0 mm) と Ti 濃度の関係

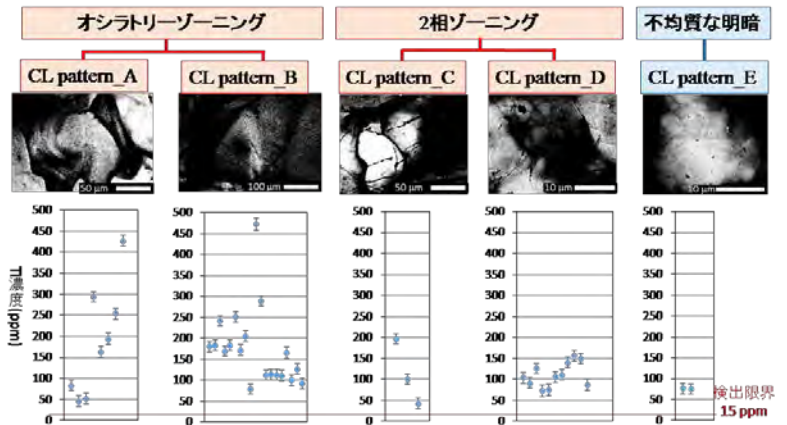


図3 CL パターン (パターン A~E) と Ti 濃度の関係

以上のことから、粗粒かつオシラトリーゾーニングを持つ石英は、マグマ溜り内の現象の温度(時間)変化をより幅広く捉えることを可能にする。今後は、取得したデータをもとに、公表論文の執筆を行う。

4. 引用文献

Drivenes, K., Larsen, R., Muller, A., Sorensen, B. (2016) Crystallization and uplift path of late Variscan granites evidenced by quartz chemistry and fluid inclusions: Example from the Land's End granites, SW England. *Lithos*, 252-253, 37-75.

Wark, D., Watson, E. (2006) TitaniQ: a titanium-in-quartz geothermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152, 743-754.

5. 成果発表 (当該年度に行った口頭発表)

小北康弘, 加藤丈典, 湯口貴史. カソードルミネッセンス像解析およびチタン濃度定量分析に基づく石英の結晶化プロセスの解明: 北上山地, 遠野複合深成岩体を例に. 日本鉱物科学会 2018 年年会, 山形大学, 9 月 19 日~21 日

小北康弘, 加藤丈典, 湯口貴史. 石英の内部構造解析および微量元素組成分析に基づく結晶化プロセス推定. 名古屋大学宇宙地球環境研究所 2018 年度年代測定研究シンポジウム, 名古屋大学, 1 月 31 日~2 月 1 日

ビーチロック試料の正確な膠結年代の決定方法

Development of Determination of Correct Concrete Age for Beachrock

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）

藁谷 哲也（日本大学大学院理工学研究科・日本大学文理学部）

塩見 昌司（日本大学生産工学部）

南 雅代（名古屋大学宇宙地球環境研究所）

1. はじめに

九州以南に発達しているビーチロック（海浜堆積物が海水や陸水中の炭酸カルシウムによって膠結されたもの）は潮間帯で形成されるため、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っている。ビーチロックの形成年代はこれまで堆積物から採取した貝化石やサンゴ化石などの ^{14}C 年代によって決定されてきた（例えば小元, 2005）。しかしその正確な形成年代は海浜堆積物を膠結した年代であり、膠結物質であるセメント物質から主成分である炭酸カルシウムを取り出して測定すれば得られるが、未だにその分離手法は未開発である。本研究の目的は①ビーチロックの細粒粒子間を膠結している炭酸カルシウムを含むセメント物質を物理的・化学的に分離する手法の開発、②分離したセメント物質の年代からビーチロックの形成年代を明らかにする、③セメント物質の年代と生物化石の年代を比較検討すること。以上を本年度の研究目的とする。

2. 研究方法

海浜堆積物を膠結している炭酸カルシウムは顕微鏡下で確認できるような微量結晶であるため、取り出せたとしても AMS でしか年代決定はできない。また有孔虫化石等の年代決定も同様に AMS に頼らざるを得ない。しかし大型の貝化石や化石サンゴの年代決定は β 線法でも年代決定が可能である。

本年度は各種試料の採取とセメント物質から年代測定試料を収集する試料調製法の開発を行い、分離したセメント物質やビーチロックに含まれていた海洋炭酸塩化石について AMS による ^{14}C 年代測定を行う。試料の採取地点は礫岩質ビーチロックが発達している海岸と、これまで各種の海洋炭酸塩試料を採取してきた宮古島を対象とする。

3. 試料の採取と分析方法

^{14}C 年代測定試料として貝化石、サンゴ化石、石灰砂岩など、最大 40 個を採取することを目標とする。名古屋大学宇宙地球環境研究所の試料調製室の使用は、ほかの研究と競合しないように調整する。年代測定試料の採取とセメント物質の分離は研究代表者の小元が行い、藁谷が試料の整形と物性分析を担当する。加速器質量分析による年代測定は南が行い、 β 線法による大型海洋化石の年代測定は塩見と小元が行う。

4. 研究の経過

礫岩質ビーチロックから試料を採取するため 2017 年 8 月に宮崎県延岡市島浦島南部の「日井の浜」において現地調査を行い、試料を採取した。同一露頭の同一層準から採取し

た試料の種類によって年代差が生ずるかどうかを明らかにするため2018年4月と6月に沖縄県宮古島で現地調査を行い、マイバーバマ、吉野海岸および大浦田原海岸から試料を採取した。

礫岩質ビーチロックからAMSで年代測定可能な炭素量を含むセメント物質を採取する方法について検討した。採取した試料は4月に日本大学文理学部地理学教室の実験室で整形作業を行い、9月に名古屋大学宇宙地球環境研究所において試料調製を行い、12月にTandetron AMSで ^{14}C 年代測定を行った。なお礫岩質ビーチロックから採取したセメント物質の構成元素を確認するため、同志社大学理工学部環境システム学科の横尾頼子先生に分析を依頼した。

5. 研究成果

礫岩質ビーチロックからAMSで測定可能な炭素量を含むセメント物質を採取する方法を考案した。この方法により収集したセメント物質についてAMS ^{14}C 年代測定を行い、ビーチロックの形成年代に関する資料を得ることができた。

すなわち本年度採取した試料から24試料を選別してTandetron AMSで ^{14}C 年代測定を行った。その結果を分析して研究成果のとりまとめと学会での発表を準備中である。礫岩質ビーチロックから採取したセメント物質の構成元素に関しては、元素分析の結果69%が炭酸カルシウムに相当することが明らかになった。この結果とAMS ^{14}C 年代測定結果から、宮崎県延岡市島浦島南部の「日井の浜」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。また宮古島の3地点から採取した異種試料について年代測定を行った結果、 $\pm 2\sigma$ をこえる年代が得られた。これらの年代は過去に宮古島に襲来した津波の年代(Omoto, 2011)と相関関係が強いことが明らかになった。

なお本研究の成果の一部は2018年5月に仙台市の東北大学理学部で開催された2018年度東北地理学会春季学術大会(小元ほか, 2018)および2019年2月に名古屋大学宇宙地球環境研究所で開催された第31回年代測定研究シンポジウムにおいて発表した。今後研究成果がまとめ次第、内外の学会で発表し、研究論文を投稿する予定である。

謝辞

本研究の遂行にあたり名古屋大学宇宙地球環境研究所年代測定部門の中村俊夫名古屋大学名誉教授、北川浩之教授、池田晃子技術員と、日本大学文理学部地球科学科の山中勝教授、同志社大学理工学部環境システム学科の横尾頼子助教、HGSG Limited, Managing Director, Dr. John Hoyes CPhys, 元兵庫県立播磨特別支援学校の田中好國先生、民宿「遊季」の結城豊広氏の皆様にお世話になった。衷心から謝意を表します。

引用文献

Omoto, K. (2011): The problem of age determination of coral boulders deposited by the Meiwa tsunami and the time of occurrence of past tsunamis. In Proceedings of LSC 2010—Advance in Liquid Scintillation Spectrometry—. *Radiocarbon*, 139-150.

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

小元久仁夫・南 雅代・藁谷哲也・塩見昌司(2019):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(3), 143-144.

高ベータプラズマ中を伝播する無衝突衝撃波の研究
Study of collisionless shocks propagating into high-beta plasma

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および高マッハ数衝撃波等で見られる磁場の増幅過程は複雑に相互作用していると考えられる。これらの物理過程を完全に解明するには、衝撃波の長時間スケールの発展を多次元モデルで追う必要がある。これまで申請者らは比較的小さなプラズマ・ベータ値をもつ上流媒質中を伝播する低マッハ数の無衝突衝撃波のシミュレーションを行い、衝撃波遷移層近傍で励起される種々の波動について調べてきた。本研究では高ベータプラズマ中を伝播する無衝突衝撃波のシミュレーションのデータを解析した。

研究方法：我々は高効率の計算手法を取り入れた2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た。本研究では、プラズマ β 値が0.08, 0.32, 1.28をもつ上流中をそれぞれ伝播するアルフベンマッハ数 $M_A = 4, 6$ の垂直衝撃波の電磁粒子シミュレーションのデータ（計6通り）を解析した。

研究結果：上記6通りのシミュレーションのデータを解析し、foot領域での背景磁場に垂直方向のイオン温度 T_{perp} の β 依存性を調べた。本共同研究により昨年10月に名古屋大学ISEEの梅田隆行を訪問し研究打合せを行った。その結果、磁場に垂直方向のイオン温度が $(M_A)^2/\beta$ に比例するという解析的表式をより明瞭な形で導出でき、さらにフル粒子シミュレーション結果と一致することを示した（図1）。この結果について論文にまとめ、Physics of Plasmas誌に投稿中である。

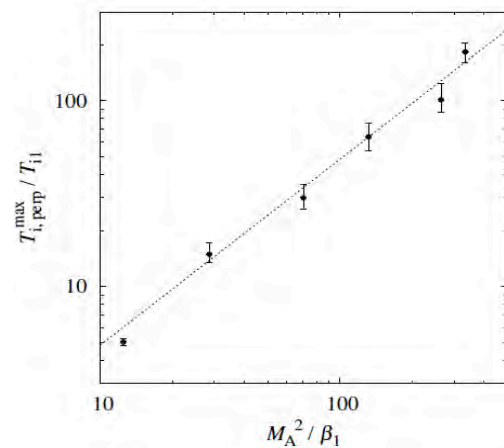


図1 : T_{perp} の $(M_A)^2/\beta$ 依存性。点線は $T_{\text{perp}} \propto (M_A)^2/\beta$ を示す。

Reference: R. Yamazaki, A. Shinoda, T. Umeda, & S. Matsukiyo, “Mach number and plasma beta dependence of ion temperature perpendicular to the external magnetic field in the transition region of perpendicular collisionless shock”, submitted.

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

小島正宜 (旧)名古屋大学太陽地球環境研究所

(1) IPS SQ-tomography の改良

J. M. Sokół が 2012 年頃から OMNI の速度と IPS tomographic analysis による速度とに大きな不一致が現れていることを見つけた。そこでその原因と解決法を調べた。

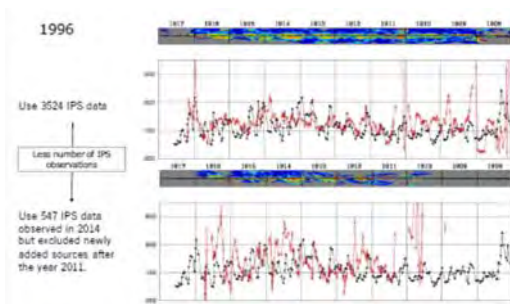


図 1

不一致の主原因は、図 1 に示すように IPS 観測数が減ったことによると思われる。そこで少ない観測数でも信頼度の高い速度図を IPS tomography で作成する方法を考えた。

最も有効な解決方法は図 2 と下表に例示するようにトモグラフィーのイタレーション初期値を 300km/s ではなく 1000km/s の高速とすることがよいことを見つけた。

CT parameters	Vips - Vomni			
initial V	>+200	+200 ~ +100	-100 ~ -200	<-200
300 km/s	12	49	0	0
1000 km/s	0	11	1	0

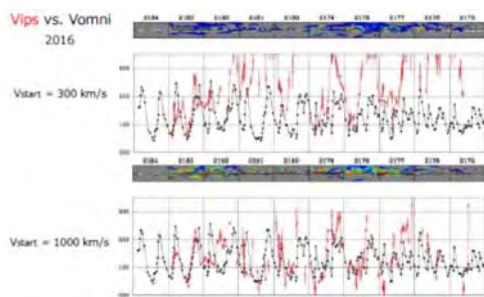


図 2

初期値を 1000 km/s としたときは OMNI の低緯度観測との比較が改善されたが高緯度高速風の観測はどうなるかをさらに調べた。

Ulysses の 1995 年と 1996 年の観測を図 3 で調べたところ系統的な速度不一致の様子はなかった。1986 年から 2017 年までの全期間における spacecraft と IPS の速度差を Carrington rotation ごとに平均して図 4 に示した。Ulysses と OMNI でその統計的な性質は似ており速度 1000 km/s を初期値としたトモグラフィー解析は全緯度、全速度領域において良い結果を得ることが分かった。

今後の課題

1. IPS 観測数が少ないときはトモグラフィーの結果が初期値により異なる原因の解明。
2. トモグラフィーのイタレーション過程で視線積分値が観測値と大きく異なるデータを除くとベターな結果が得られる傾向が見られるが、除かれるデータの素性を調べる必要がある。観測の s/n が悪いのか、一過性の太陽風速度を観測したのか等。

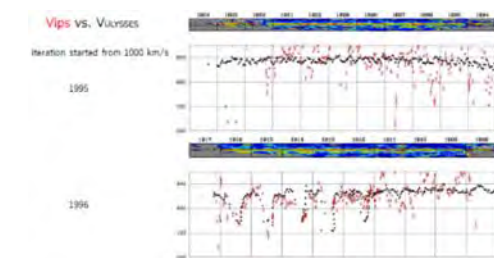


図 3

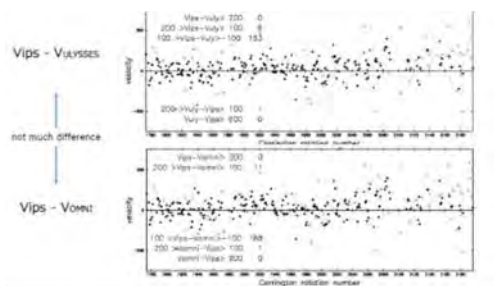


図 4

(2) pseudo-streamer 観測の可能性

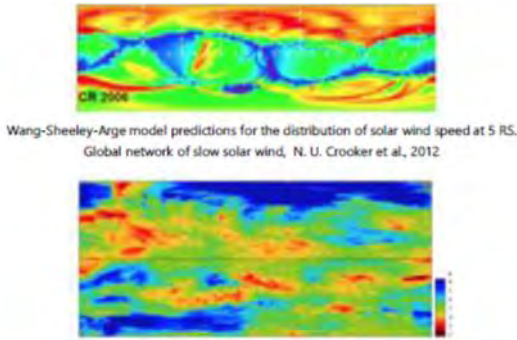


図 5

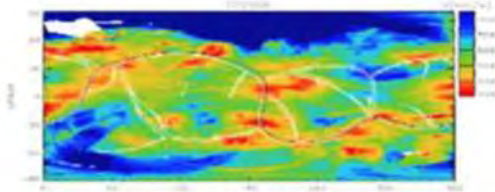


図 6

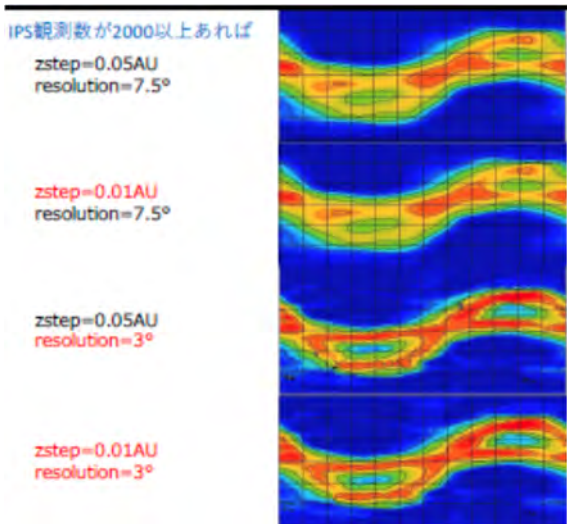
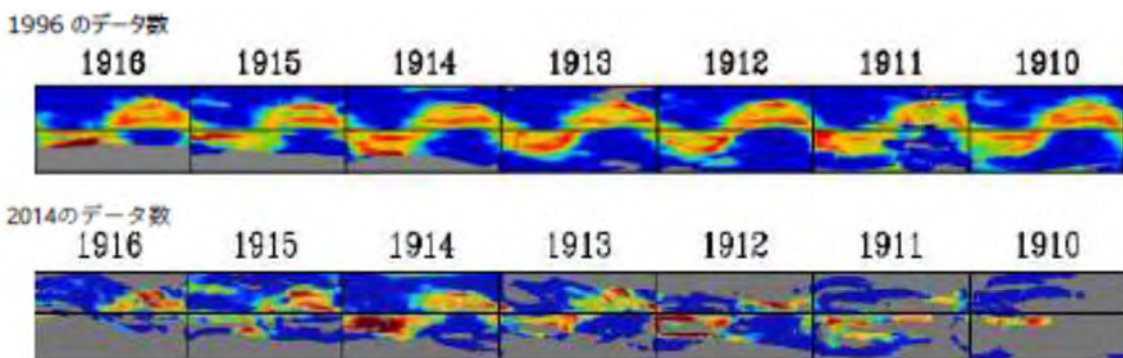


図 7



データ数

CRN	1916	1915	1914	1913	1912	1911	1910
上段	528	583	600	902	821	431	814
下段	80	152	218	163	134	76	61

図 8

図 5 の上図は Crooker et al.(2012) が太陽面磁場解析から予想した CR2006 における pseudostreamer と current sheet を伴う低速風の分布である。下図は IPS 観測で得られたもので、経度 240-360 度において低速風帯が二分している様子がよく一致している。上側の分岐が pseudostreamer に相当する低速風である。これから IPS 観測でも pseudostreamer を捉えうることが分かる。また図 6 は IPS の観測した速度図に、磁場解析から予想される磁気中性線と pseudostreamer の分布を白線で示したものでこれも低速風の分布とよく一致している。

そこで、IPS で捉えられる速度分布構造や速度値がどの程度信頼できるかを調べるために二つのサイン波状の低速風帯が存在するモデルを corotational tomography を用いて解析してみる。解析では約 2000 の IPS 観測を用いて tomography 解析の空間分解能と視線積分の z 積分刻み幅を変えてどれが最適かを調べた。その結果 IPS 観測が 2000 以上有れば分解能=3 度、z 積分刻み幅 0.01AU を用いれば、tomography によりモデルの二つのサイン波状の低速風がほぼ再現できることがわかった(図 7 最下段)。

次に SQ tomography での観測の可能性を同じモデルを用いて調べた。図 8 の上段は IPS 観測数が 1996 年と同じ場合で各ローテーション毎の観測数を下表に示す。下段の図は観測数が少ない 2014 年の場合である。この解析により 1996 年と同程度観測数があれば二本のストリーマーが分解できる。しかし分解度は十分ではない。

鈴木和良 (国立研究開発法人海洋研究開発機構・北極環境変動総合研究センター)

【研究目的】

気候は、大気－陸面相互作用を通して、植生や陸面の水文気候因子(蒸発散量, 土壌水分, 積雪, 流出量, 地下水, 湖沼面積, 活動層厚など)と密接に結びついている。そして、植生と陸面の水文気候因子も、気候に影響を与えている。特に、ユーラシア大陸の東シベリア・モンゴルなどの乾燥寒冷地域では、大気－陸面相互作用が顕著であると指摘されている(松村, 2014)。例えば、冬季の北大西洋振動(NAO)に対して、夏季のシベリアの正規化植生指数(NDVI)が1年のラグをもつことが報告されている(Wang et al., 2004)。この原因については未解明であるが、陸面の水文気候因子が前々年の冬の気候を記憶し、当該年の植生と大気に影響している可能性が高い。また、前年秋の陸水貯留量が、前年夏の気候を記憶して、当該年のレナ川の河川流出量に影響していることが報告されている(Suzuki et al., 2016)。このように、東シベリアやモンゴルでは、水が冬季に凍結保存されることで翌年に持ち越され、時間的な遅れをもって循環している。陸水貯留量は、入力因子である降水量とともに、植物による蒸発散量、湖沼などの水体貯留量などの変動により決定されるとともに、光合成や蒸発散など、植物の活動にも大きく影響する。そこで本研究では、気候－植生－陸面(水文気候因子)の相互作用を解明し、その10年程度の変動を把握することを目的とする。解析対象とする時間スケールは、地上観測データや衛星観測データが充実している2000年以降を対象とする。具体的には、現地観測データ、人工衛星データ(広域の植生指標・葉面積指数・バイオマスなど)、陸水貯留量変動に関する衛星データを用いて、主に北ユーラシアに焦点を当て、そこでの水循環と植生の時間的なラグやその関係の経年変動について検討する。さらに、シベリアの現地観測に基づく検証データによって、衛星観測の妥当性についても検討を加える。

【2018年度研究計画】

各種観測データの経年変動に対するラグ機構と植生や水循環の変動について、セミナー形式の意見交換を行う。本申請の3年目(最終年度)になるため、今後の共同研究の可能性についても議論する。

【セミナー形式による意見交換】

1件の話題提供が行われた。その概要を以下に示す。

「Characteristics of water and carbon transport from Siberian River basins」(話題提供:鈴木和良)

今年度の主要な成果として、今後まとめていく論文の内容について報告した。主要な結果としては、ロシアの4大河流域(オビ川、エニセイ川、レナ川、コリマ川)の2002年から2016年までの水・炭素循環特性、ならびにグリーンランド沿岸凍土域のツンドラにおける原野火災と水文気象状況との関連を報告した。さらに、今年度が最終年度に当たるため、今後の研究の進め方について議論した。その中で、ユーラシア大陸を対象とした成果は出始めているが、まだ植生と水文気候の相互作用と経年変動の研究の緒にすぎたばかりであり、今後さらに大きな体制で共同研究を進める重要性が指摘された。そこで、陸面モデルと陸域炭素循環の研究者2名を新たにメンバーとして追加し、さらに研究対象地域を凍土域に全体に広げた研究へと発展させる方向が確認された。新たな枠組みでは、炭素循環も陽に解析対象とし、2019年度～2021年度までの3年間で、2019年度の一般共同研究に申請を行うことで合意が得られた。

【本年度の主要な成果概要】

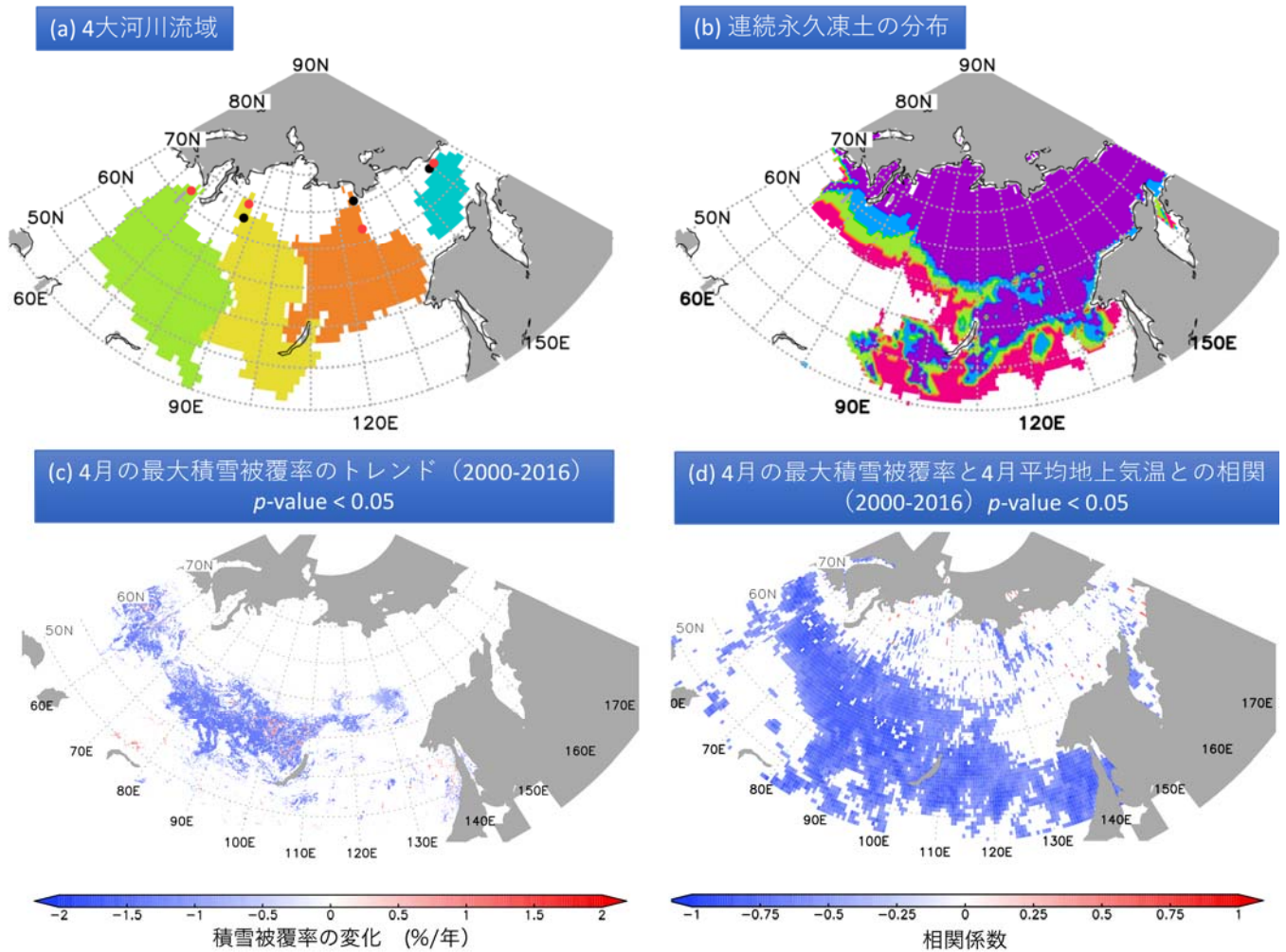


図1(a)研究対象のシベリア4大河川流域、(b)連続永久凍土の分類と分布、(c)4月の最大積雪被覆率の2000-20016年までのトレンド(信頼度95%以上)、(d)4月の最大積雪被覆率と4月の月平均地上気温との相関係数の分布(信頼度95%以上)

主要な研究成果を、図1a,1b,1c,ならびに1dに成果の図を示す。MODIS(MOD13)の積雪被覆率データとCRU TS4.02の月気温データを用いた分析結果である。図1bと1cより、永久凍土南限地域で、4月の最大積雪被覆率が17年間で有意に減少していることが明らかになった。これに応じて、4大河川流域の5月の北極海への流入量が有意に増加している。さらに図1dより、4月の平均地上気温と最大積雪被覆率との間には有意に負の相関がある。すなわち2000年以降の春の温暖化によって、永久凍土南限地域における4月の融雪量が増加し、北極海への淡水流入のピークが6月から5月にシフトしてきている可能性が示唆される。

成果発表

1. 鈴木和良(2018), 衛星観測とデータ同化, 日本リモートセンシング学会誌, 38(2), 111-113.
2. Suzuki, K., and K. Matsuo (2019), Remote Sensing of Terrestrial Water, in Ecological Studies, Vol. 236, : Water-Carbon Dynamics in Eastern Siberia, edited by Takeshi Ohta, Tetsuya Hiyama, Yoshihiro Iijima, Ayumi Kotani and T. C. Maximov, In press, Springer, Tokyo.
3. 招待講演 Suzuki K., K. Matsuo, D. Yamazaki, K. Ichii, Y. Iijima, F. Papa, Y. Yanagi, T. Hiyama, An Overview of Hydrological Variability and Changes in the Arctic Circumpolar Tundra and the Three Largest Pan-Arctic River Basins from 2002 to 2016, The 4th International Conference on Water Resource and Environment (WRE 2018), (台湾高雄市, 2018/07/19)

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

丸橋克英、情報通信研究機構・電波研究所・宇宙環境研究室

【研究目的】

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

【研究方法】

1. ACE, Wind等の太陽風観測データからICME内部にある磁気ロープ構造を決定し、SOHO, STEREO, SDO等の太陽観測と比較することにより、ICMEの構造と太陽擾乱の発生源の構造との関係を考察する。
2. STEREO衛星のCME, ICME観測データ、名古屋大学その他のIPS観測データを利用して、ICMEの3次元構造、太陽風中の伝搬による変形等について解析する。

【研究結果】

飛翔体による太陽風の直接観測データからICME中の磁気ロープの3次元構造を決定するためには、モデルとの比較が不可欠である。観測データから磁気ロープ構造を推定するために、force-free (FF) 磁場モデルへのfittingとGrad-Shafranov (GS) 方程式による磁場構造の構築の方法がひろく使用されている。この二つの方法による結果の比較は、それぞれの方法で得られた磁気ロープの軸の方向を比較することに終始していた。今年度の共同研究で西村信行（ISEEの大学院生）FF磁場モデルによる解析法を改善し、磁気ロープ外縁における磁場のピッチ角が多様な値をとれることを示した。これにより、GS方程式による解析で大きな問題点であった磁気ロープ境界の選択条件について、FFモデルから検討を加えることが可能になり、同時に、FF磁場で仮定される磁気ロープの内部構造がGS方程式から検定することも可能になった。

Al-Haddad et al. が注意深く選んだ13例の磁気ロープ (Sol. Phys., 2018) について簡単に検討した結果、FFモデルとGS法で決めた軸の方向がおよそ一致するという初期結果が得られた。今後は、磁気ロープ境界の選び方を詳細に吟味して内部磁場分布についても比較を進めたい。

【考察】

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

上記のことを確認したうえで、STEREO衛星データやIPS観測によるCME, ICMEの追

跡により、惑星間空間中の伝搬過程でICMEの構造（磁場強度を含む）がどのように変化するかを子細に検討することが今後の研究方向となる。

【成果発表】

・論文

Lee, J.-O., Cho, K.-S., Kim, R.-S., Jang, S., Marubashi, K., Effects of geometries and structures of ICMEs on Geomagnetic storms, Sol. Phys. 293, DOI: 10.1007/s11207-018-1344-z.

Nishimura, N., Marubashi, K., Tokumaru, M., Comparison of cylindrical flux rope model fittings with different boundary pitch angle treatments, Sol. Phys. (Accepted for publication, March 2019)

・口頭発表

丸橋克英、石橋弘光、「内部に衝撃波が存在する太陽風磁気ロープの形状解析」、JpGU2018, 幕張、2018年5月24日.

丸橋克英、久保勇樹、西村信行、徳丸宗利、「太陽風磁気ロープを解析するモデルの比較」、SGEPSS、名古屋大学、2018年11月26日.

丸橋克英、久保勇樹、西村信行、徳丸宗利、「太陽風磁気ロープ構造解析の問題点」、平成30年度ISEE研究集会－太陽圏・宇宙線関連共同研究成果報告会、名古屋大学、2019年2月28日.

内部磁気圏DC電場・低周波電場波動における
地上データ処理・校正手法の確立：その3
Establishment of Data pipeline and calibration for
DC / low frequency E-field in Inner Magnetosphere: 3

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) 衛星に搭載された Plasma Wave Experiment (PWE) は、地球内部磁気圏でのプラズマ波動-粒子相互作用を的確に検出し、磁気圏内のグローバルな物質・場のエネルギー収支・交換・伝搬を定量評価する手段である。この実現には、磁気圏構造変動とプラズマ輸送の情報を握る DC 電場・低周波電場波動の精度を確実なものとし、その励起・伝搬過程の定量評価とその物理的役割の解明を可能とする必要がある。これに向け、2. に述べる作業を実施する。この成果は Arase 内部磁気圏観測の不可欠な基礎を形成し、またより制約が厳しくプラズマ環境も異なる水星 (BepiColombo: 2018/10 打上成功)・木星 (JUICE: 2022/5 打上予定) への日本の研究コミュニティによる展開体力の基礎となる。

2. 研究方法・結果

(1) Probe 表面素材の電子特性： ERG 軌道は近地点が 300km と低く、酸素原子による Probe 表面素材へのダメージ (不導体化) が米国研究者により指摘された。遠地点が高く Lobe に突入すること、また Storm 時の大規模高温 Electron 所在のため、Probe 電位も不安定化する。電場観測精度の低さはどの衛星でも問題で、この案件では 2019 年 2 月にミネソタ大を訪問し、Van Allen Probe (EFW) などと同様の問題を抱える John Wygant 教授らと深い議論を行い、現象の掌握およびありえる劣化の時間遷移推定・補償方法を検証した。

2017 年 1 月～2019 年 2 月に至る暫定解析における Probe 状況は以下の通りである。

A. AC 特性 (Capacity 成分)：高電子密度域 (>100/cc) で 80-90 pF、低密度域 (<10/cc) で ~76pF を中心に、よく電子密度と相関しており、大きな変動・劣化は見られない。

B. DC 特性 (Register 成分)：高電子密度域 (>100/cc) で 20M Ω 以下、低密度域 (<10/cc) で 50-200M Ω と大きく変動し、また 4 つのアンテナ (U1/U2/V1/V2) でそれぞれ違う値を示すと共に、この 2 年間の運用でも時間変化が生じている。評価に用いた「BIAS-SWEEP 法」(0.5sec で BIAS 値を相当範囲で動かす) では Probe 電位が Bias 電位に追従しきれない。このため「BIAS-SLOW-SWEEP 法」(4sec-step でゆっくり BIAS 値を相当範囲で動かす) をマクロ CMD で実施してきたが、後者は周辺プラズマ環境の時間変動に影響される。2019 年度には、時間変化の追跡解析とベストなデータ取得方法、および実データへの反映 (特に波形データに対する反映) を実施していく予定である。また、磁気脈動における E/B 比、電子温度との相関、 $V \times B$ から演繹される電場との比較、衛星本体の wake の影響等の評価検討が進行中の課題である。

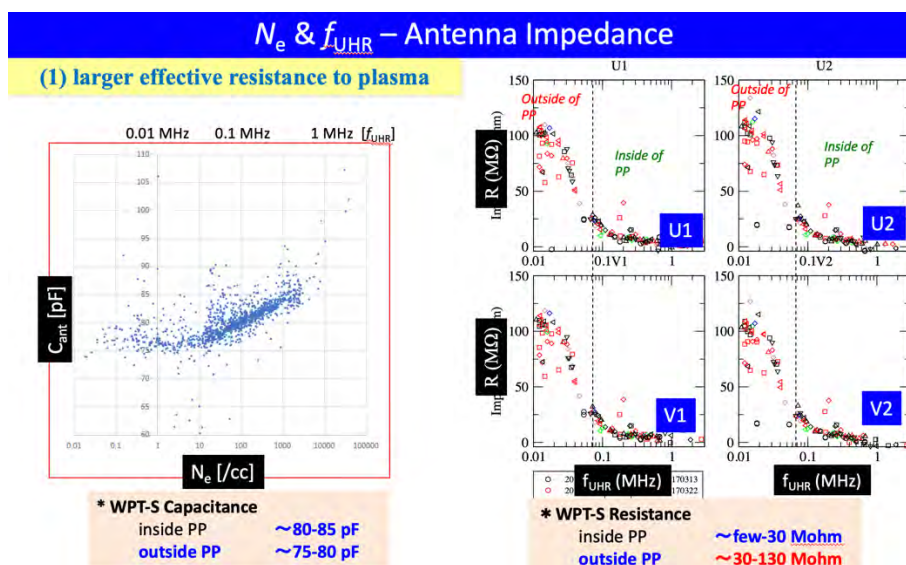


図 1: 暫定的な Probe impedance 評価結果。左:Capacity、右:Resistance

(2) BIAS 電流値の設定 : DC・低周波電場計測には、Probe に適切な Bias 電流を加えて対 Plasma impedance を適切に能動制御する必要がある。(1)の解析に絡んで、各 probe 毎の特性 (具体的には光電子 yield・二次電子 yield) の特性が時間的にも変化しており、対 plasma impedance を 100 Mohm (plasma pause 外 : UHR 周波数 < 20kHz) ~ 数 Mohm (近地点近傍 : UHR 周波数 > 100 kHz) にするには更に調整が必要であることがわかってきた。2019 年度には、(1)の作業進捗に合わせて Probe 毎に異なった bias 値を与えることも含めた検討と運用への反映を行う予定である

(4) データパイプライン設定および校正 : 2019 年度末までに、スピン毎 (~8sec 分解能) の電場波形 (double probe) および衛星ポテンシャル (single probe)、並びに 1-sec 分解能の電場スペクトル (1~>200Hz) の Level-2 データ作成・公表までを可能とした。Level-2 で適用しているデータ校正は「周辺 plasma の環境に依存しない、センサー電気性能の反映」までとすることとした。実際のサイエンス面における実用には周辺プラズマ環境に依存する校正方法の確立を要することになり、(1)の作業と直結する。なお、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については、衛星 potential そのものが spin 時間内に変動し、これがおそらくは衛星形状・磁場方向等の影響され排除不可能であることもわかってきた。粒子計測・磁場観測 (MGF および PWE/SCM) との結合や Poynting Vector などの電場-磁場双方の観測の利用に向けたデータ保証基準のあり方を含め、2019 年度に一定の指針を提示したいと考えている。また、電場波形データ (64/256/512Hz) ・ポテンシャル波形データ (8Hz/128Hz) の Level-2 公開提供も 2019 年度の課題である。

4. 成果発表

様式 4-1 を参照されたい。

雲解像モデルを用いた雲エアロゾル相互作用の見積もり

Estimation of the radiative forcing of aerosol cloud interaction by using a cloud resolving models

名古屋大学・工学研究科
佐藤陽祐

1、目的

本研究ではエアロゾル輸送モデル (SPRINTARS[1]) と全球雲解像モデル(NICAM[2])を結合した NICAM-SPRINTARS の全球実験とその結果の解析によって、気候予測の最大の不確実性要素であるエアロゾル・雲相互作用の理解の深度化を目指した。従来気候予測に用いられてきた大循環モデル (GCM) はその解像度の粗さから雲を直接計算することができず、エアロゾルが雲に及ぼす影響も直接できないため、エアロゾル・雲相互作用の見積もりには大きな不確実性が伴っている[3]。この不確実性低減に向けて、雲を全球スケールで直接解像することができる全球雲解像モデル NICAM-SPRINTARS の計算を行ってきた。本研究では平成 29 年度までに終了した計算結果を詳細に解析し、エアロゾル・雲相互作用の不確実性を評価した。

2、数値モデルと解析方法

実験に用いた数値モデルは NICAM-SPRINTARS[4]であり、全球 14km 解像度で 1 年間の積分を行った。エアロゾル・雲相互作用の指標の一つとして、Cloud Susceptibility (λ [5]) を用い、雲頂温度が 273 K よりも高い暖かい雲を対象として解析を行った。本研究では NICAM-SPRINTARS の結果から求めた λ と 2000 年代から様々な方法によって求められて、報告されている λ を比較した。

3、実験結果

まず、本研究によって求められた λ と、先行研究で報告されている λ を比較して、エアロゾル・雲相互作用の不確実性の大きさを求めた。図 1 は 2000 年代から先行研究によって求められた λ (図 1 の上から 3 番目以降) と、本研究で求めた NICAM-SPRINTARS から算出した λ の値 (図 1 の上から 2 番目) である。本研究で求められた NICAM-SPRINTARS の λ は負の値を取っており、近年の衛星観測から得られた λ [6]とも、また近年報告されている理論的な考察[7]とも矛盾しない。一方、2000 年代前半の研究では、多くの先行研究が λ を正の値と報告している。しかしながら、先行研究では負の λ を報告している研究も存在していることに加え、衛星観測を用いた最新の結果では、 λ は従来考えられていたよりも 2~3 倍程度大きな正の値になると報告されており (図 1 の一番上[8])、 λ の見積もりの不確かさは大きく、エアロゾル・雲相互作用の不確実性は依然として大きいことが示された。

4、考察と今後の課題

本研究の解析からエアロゾル・雲相互作用の指標 (λ) の見積もりの不確実性は大きいことが明らかになった。この状態で放射強制力を見積もった場合、見積もられた放射強制力にも大きな不確実性が生じるため、放射強制力の見積もりまで、いたることができなかった。このような λ の違いは λ の見積もり方にも起因している可能性があり、まずは、先行研究で求められた λ の算出方法を検証して、同じ条件で λ を算出するなどして、 λ の違いを生む要因を明らかにする必要がある。今後は λ の違いを生む要因を明確にし、その上で、放射強制力の評価を行って行く必要がある。

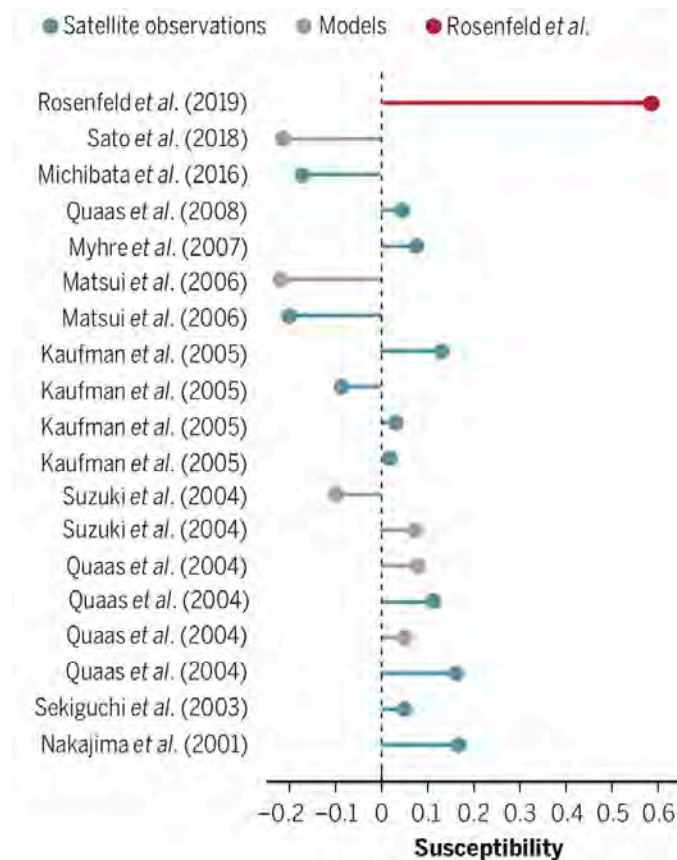


図 1 : 本研究で求めた λ (上から 2 番目) と、先行研究で求めた λ の見積もり。
(Sato and Suzuki, 2019 [9]から引用)

5、研究成果報告

本研究で得られた成果は Science 誌の一般向けの記事 (Perspective) として発表された[9]。

参考文献

1. Takemura T et al., J Geophys Res. 2005;110: D02202. doi:10.1029/2004JD005029
2. Satoh M et al., Prog Earth Planet Sci. 2014;1: 18. doi:10.1186/s40645-014-0018-1
3. Stocker TF et al., IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. IPCC. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press; 2013.
4. Suzuki K et al., Geophys Res Lett. 2008;35: L19817. doi:10.1029/2008GL035449
5. Ghan S et al., Proc Natl Acad Sci. 2016; 201514036. doi:10.1073/pnas.1514036113
6. Michibata T et al., Atmos Chem Phys. 2016;16. doi:10.5194/acp-16-15413-2016
7. Stevens B., J Clim. 2015;28: 4794–4819. doi:10.1175/JCLI-D-14-00656.1
8. Rosenfeld D et al., Science 2019;363: eaav0566. doi:10.1126/science.aav0566
9. Sato Y and Suzuki K., Science 2019;363: 580–581. doi:10.1126/science.aaw3720

研究課題名
太陽圏物理の総合的研究

Study of Solar Terrestrial Physics

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

共同利用研究者：柴田祥一(中部大)、長谷川精(高知大)、神谷浩紀、古賀清一(JAXA)

1. 研究目的と共同利用のテーマ

表題のような研究テーマで、太陽地球系に内在する物理の研究を実施している。とりわけその中でも、(1) 太陽のダイナモ活動の理解に基づき長期変動の要因の探索や、(2) 太陽フレアに伴う高エネルギー粒子の生成過程の研究を実施している。テーマ(1)に関しては、村木が実施してきた研究成果は2018年5月発行の *Journal of Astronomy Space Science* 誌に発表された。

一方 長谷川精 (高知大・理学部)氏が中心になって精力的に進めてきた蒙古白亜紀の地層縞の周期解析から、太陽活動や地球の自転軸の変動に基づく地球のグローバルな気象変動を反映する周期の存在が明らかになった。これは太陽地球環境研究所の設立趣旨の根幹に係るような重要な発見である。現在ほぼ論文原稿が完成し、共同研究者の間で回覧する段階であり、2019年度中には発表される予定なので、ここではその内容に触れることは避ける。そこで本報告書では(2)の研究テーマに絞って研究成果を報告する。

2. 太陽粒子加速過程の研究 --- ガンマ線と中性子を利用する---

太陽物理学・宇宙線研究の大きな課題の一つは高エネルギーの粒子がどのように宇宙で作られるのか、そのメカニズムを解明することにある。すなわち太陽宇宙線(Solar Cosmic Rays; SCR) や銀河宇宙線 (Galactic Cosmic Rays ; GCR) の起源を調べるのが研究の主目的の一つとなっている。太陽は地球近傍から加速過程を詳細に観測・追跡 (trace) できる可能性を秘めた天体である。それ故、どの加速モデルが太陽表面における粒子加速過程を最もよく説明できるのか、粒子加速理論を検証できる可能性を秘めた研究対象である。

上記の研究を推進するために、我々は高エネルギー粒子の内、中性のガンマ線と中性子をプローブとして選択し解析している。研究すべきフレアは沢山ある。SOL2011-03-07 flare や SOL-2011-09-25 flare、及び SOL2012-06-03 flare については現在論文を投稿中で referees とやり取りを実施中である。そこでここでは2017年9月4日から10日にかけて発生した太陽フレアについて解析した結果を述べることにする。

2017年9月6日と9月10日の両フレアで高エネルギーガンマ線と中性子がそれぞれ受信され

ているが、ここでは 2017.9.10 event が limb flare で真横から光学的観測ができ、きれいな data が取得されているので、ここでは 9 月 10 日のイベントを他波長観測と比較しながら、得られたガンマ線と中性子の data の解釈を議論する。

今回 2017.9.10 のフレアで顕著なことは、20MeV から 1000MeV 領域の高エネルギーガンマ線 (HE- γ) が、硬 X 線の peak の 2 分後に観測されたという事実で、20MeV 以下のガンマ線の生成時刻と時間差があることである[1]。

図 1 は SDO data のスケッチである。生の写真は分かりづらいので、スケッチで説明する。15:45UT から 15:55UT の 10 分間に盛んに磁気 loop 同士の衝突が見られる。これは野辺山の太陽電波観測グループが以前から主張してきた観測事実と同じである[2]。理論の坂井氏らが盛んに取り扱った X-type の衝突である[3]。

図 2 は FERMI-LAT 衛星が観測した高エネルギーガンマ線の時間発展を硬 X 線の時間発展と比較したものである[1]。高エネルギーガンマ線 (HE- γ) の peak が硬 X 線の peak と 2 分ずれている点に着目してほしい。この図はさらに粒子を加速するのに 2 分間必要であったことを示している。すなわち高エネルギーへの加速は別の場所で起こっている可能性が高い。

図 3 は低エネルギーガンマ線 (LE- γ) と高エネルギーガンマ線 (HE- γ) の時間発展を示したものである[1]。15:56UT から低・高エネルギーガンマ線の放射が同じような時間発展をしているが、15:58U から急激に高エネルギーガンマ線が放出されている。(図 3 の縦軸は対数であることに注意してほしい。) 我々が SEDA-FIB 装置で受信した中性子は、地上 station で高エネルギー中性子が受信されていないことを考慮すると、LE- γ と同時刻に作れたと考えられる。すなわち 15:58UT までは電子とイオンに対して同じような加速機構が働いていたと言えよう。

図 4 は、FERMI-GBM 計測器の観測した硬エネルギー X 線のエネルギースペクトルの時間発展を示している。すなわち上記の 15:45-15:55UT の間に電子の peak energy は数 keV から 40keV まで増加している。電子が加速されている証拠である。最も高いエネルギーの電子は 200keV に至っている。その時刻は 15:56UT である。

図 5 に SEDA-FIB で受信した中性子の微分エネルギースペクトルを示す。中性子が太陽から地球に飛来する間に崩壊する効果は補正されている。エネルギースペクトルはべき 2 乗で表され、かなり硬いスペクトルであることがわかる。

3. 加速粒子の化学組成

ここで加速された粒子の化学組成について考察する。15:58UT の前と後で比較しよう。15:58UT 以前は、加速された粒子が太陽大気を叩いて低エネルギー・ガンマ線や中性子を作った時間帯である。中性 π 粒子の生成はまだ dominant に生成されていない。293MeV の pion 生成 threshold energy に到達している粒子が非常に少ないことが図 2 と 3 からわかる。

一方 15:58UT 以降は、中性 π 粒子の生成が dominant になった時間帯である。この両時間帯について、 n/γ の flux の比をとると前者ではその比が ~ 50 であるのに対して、後者の時間帯では 1.6 ± 0.4 である。この比を GEANT4 による simulation の結果 [4]と比較すると、前の時間帯では

ヘリウム等の原子核が加速された粒子に多く含まれていたことを示唆している。(図7) これは impulsive flare の典型である。一方後の時間帯では、陽子が主成分として加速されたことを示しており、これは gradual flare の典型的な値である。今回の flare では impulsive phase の中にすでに gradual phase と同じ加速機構が含まれていたことが分かった点が新しい。言い換えると gradual phase で加速された種粒子(seed particles)が impulsive phase で準備されていたと言えよう。そして中性子と高エネルギーガンマ線の同時観測から、現象論的に説明されてきた、“impulsive flare では helium ion 等が多く含まれている”という“予測”を、観測で実証できた点が新しい。さらに gradual flare では確かに陽子が主成分となって加速されていることも分かった。我々は 1994 年来の Reames らの予測 [5]を、加速現場を反映するその場(in-situ) 観測で示した。

5. まとめと今後の課題

1. SEDA-FIB で受信している中性子は、電子とほぼ同時に加速されたヘリウムイオンが太陽大気と衝突した際破碎され、地球近傍に飛来したもので、低エネルギーガンマ線(a few MeV, LE- γ)と同時に作られた。LE- γ の方は target になった太陽大気の破碎や励起によって作られたものであろう。
2. 一方、高エネルギーガンマ線(HE- γ)はさらに加速された陽子によって作られたものである。しかしその生成場所は観測では分からなかった。加速過程には中性の衝撃波によるものがあるかもしれない。地上観測で高エネルギー中性子の観測例が少ないのは、おそらく次のステップまで加速が進むような磁場構造が太陽表面に実現されにくいからであろう。
3. 電子やイオンの加速が衝撃波波乗り加速モデルによるソリトン波の作る電場による可能性が非常に高いが[6]、その場所及び加速開始時刻が 磁気ループが盛んに衝突していた時刻なのか (15:45-15:55UT)、プラズモイドが出現した 15:55UT 以降も含むのかまでは解明できなかった。
4. 衝撃波波乗り加速理論[7]は、リコネクションから放出された jet が、jet 先端で $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ のローレンツ力を受け正イオンと負イオンに分離され、その作り出す電場により磁気 loop 内に trap され加熱されたプラズマが加速されるという考え方と等価のように思われる[8]。
5. またこの期間中に発生した X2.2, X9.3, M5.5 events の解析はまだ進んでいないので、2019 年度に何らかの加速理論に貢献するような data を導き出せればと考えている。

References

- 1) Share and Murphy(2018) AMS spring meeting での講演スライドより。
- 2) Hanaoka, Y. (1999) PASJ, 51, 483.
- 3) Sakai J.I. and Shimada, K. (2005) A&A, 436, 711-717.
- 4) Kamiya, K. et al.; Proceeding of ISVHECRI2018 (Nagoya, Japan).
- 5) Reames, D.V. (1994) Adv. Space Res. 15 (7) 41.
- 6) Amano, T. and Hoshino, M (2007) ApJ, 661, 190.
- 7) Fisk, L.A. (1978) ApJ, 224, 1048.
- 8) Chen プラズマ物理入門 page.13, (丸善出版)

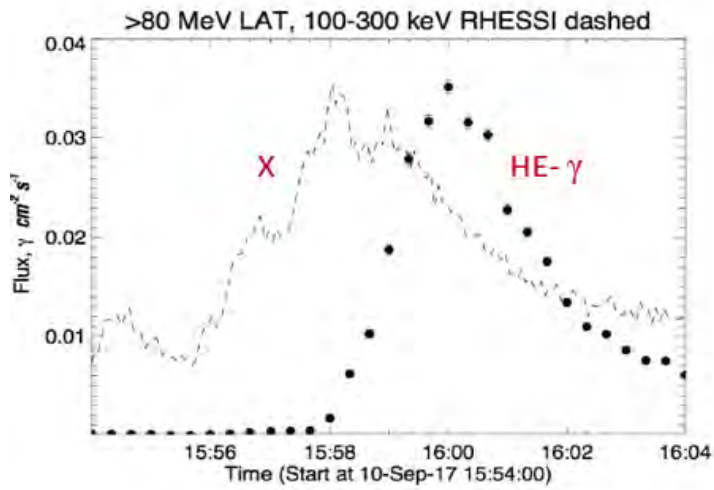


図 2. Fermi 衛星に搭載された NaI hard X-ray 計測器と LAT カロリメーターで計測された高エネルギーガンマ線の時間発展。

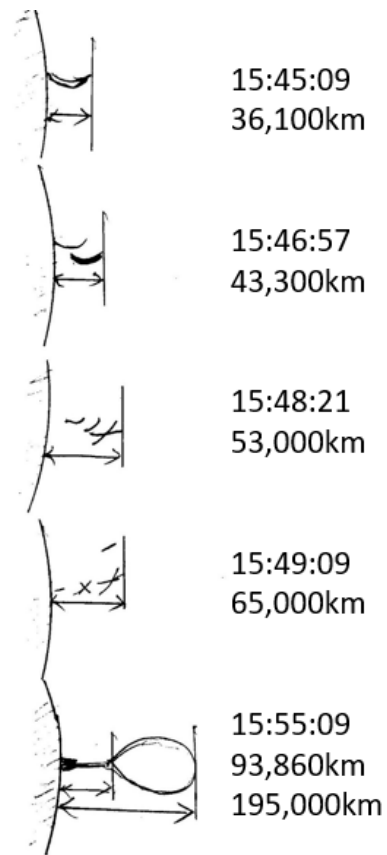


図 1. SOL2017-09-10 flare で観測された紫外線の画像。盛んに loop-loop 衝突が見られる。また Plasmoid の生成も観測された。

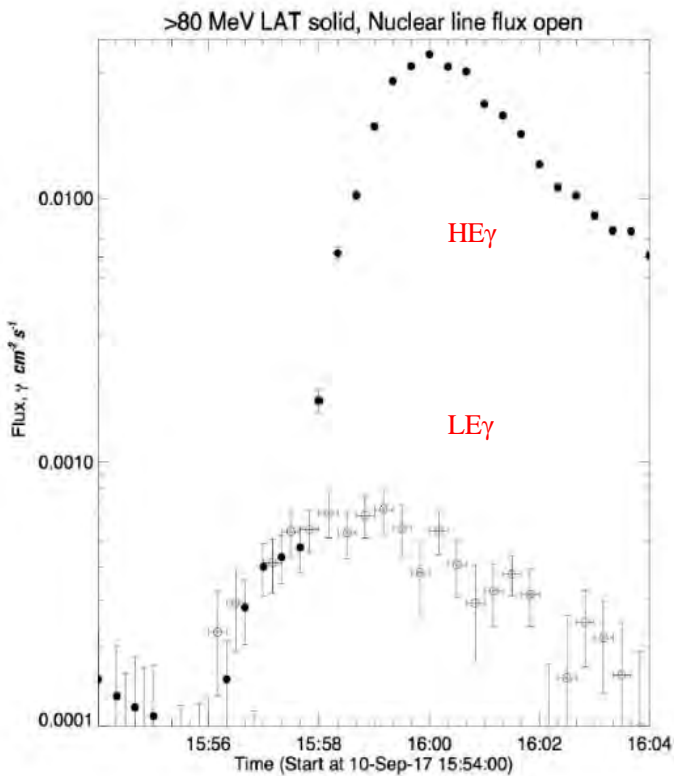


図 3. 図 3 と同じ衛星に搭載された BGO soft gamma-ray 計測器と LAT カロリメーターで計測された高エネルギーガンマ線。Peak に 2 分の時差がある。

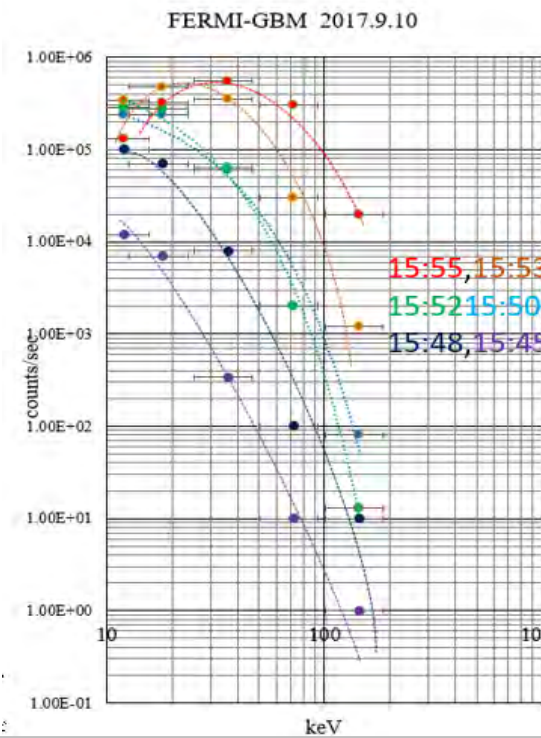


図 4 電子のエネルギースペクトルの時間発展

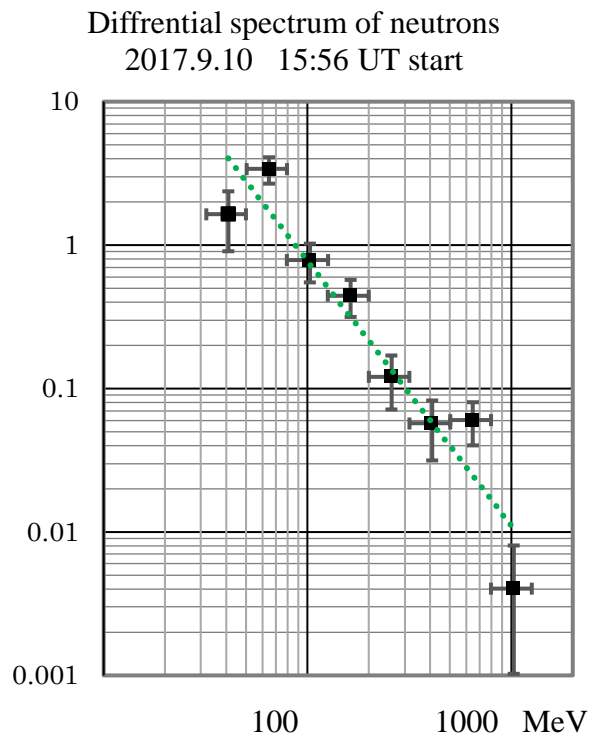


図 5. SEDA-FIB による中性子のエネルギースペクトル

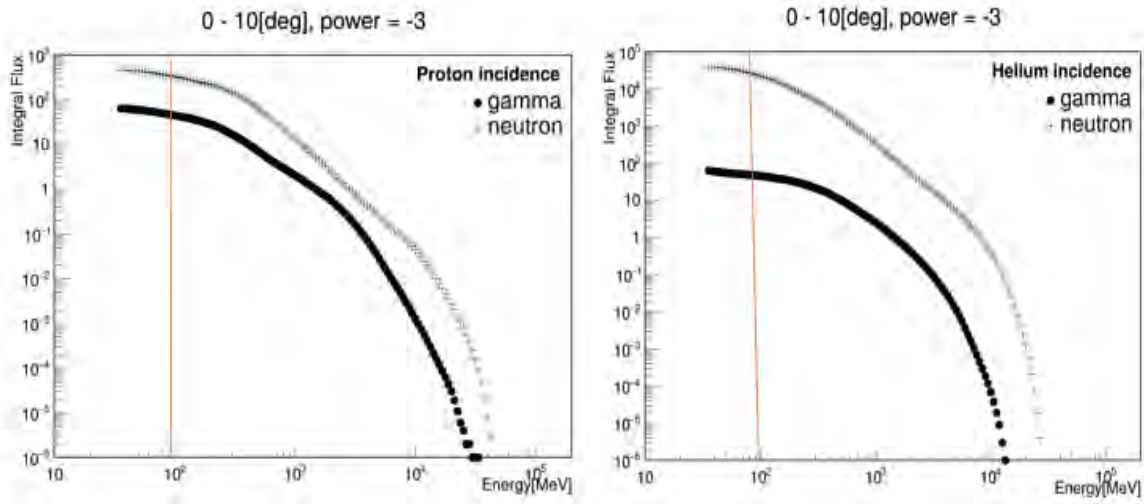


図 6 陽子(左) と ヘリウムイオン(右)が太陽大気と衝突して作り出すガンマ線 (●) と中性子 (+) の積分エネルギースペクトル。 100MeV に引かれた縦線は FERMI-LAT の観測閾値に対応している。SEDA-FIB は 35MeV 以上の中性子を検出できるが、ここでは FERMI-LAT の閾値と合わせるために >100MeV 以上の中性子を選択している。ヘリウムイオンが太陽大気に衝突した時は n/γ 比に約 1000 倍の値が予想される。これは加速された原子核が衝突により陽子と中性子に破碎され、その中性子が太陽から地球にやってくるためである。加速イオンのべきは $3 \text{乗}(E_{\text{ion}}^{-3})$ を仮定し、観測点は太陽大気の厚みは 10g/cm^2 の地点としている。現実には様々な化学組成でもって衝突するのでこのグラフのように 1000 倍にはならないだろう。

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

渡邊恭子、防衛大学校・地球海洋学科

「白色光フレア」は可視連続光の増光を伴う太陽フレアで、一般的には大規模フレアのみに伴う稀な現象である。これまでの観測・研究により、白色光フレアの起源はフレアで加速された非熱的電子であると考えられているが、その発生機構や発光メカニズムはいまだ解明されていない。この白色光フレアの発生条件を探るべく、これまでに我々は、主にひので衛星搭載の可視光・磁場望遠鏡 (SOT) の可視連続光データを用いて統計的な研究を行った。白色光の増光の有無を指標として統計的な研究を行ったところ、白色光増光には大量の非熱的な加速電子が短時間に降り込むことが重要であるという結論を得た (Watana be et al., 2017など)。また、この統計研究より、加速域の磁場強度が白色光増光に関連していることが示唆されたが、その明確な証拠は得られなかった。

フレアループトップの上部にあると考えられている加速域の磁場は、直接には測定されていない。しかし、マイクロ波スペクトルの折れ曲がり周波数を用いることによって、その磁場強度を推定することができる (Dulk 1985)。そこで我々は、2010年1月から2017年12月の間に発生したM3クラス以上のフレアにおいて、白色光の観測機器 (Hinode/SOT, SDO/HMI) と野辺山強度偏波計 (NoRP) で同時に観測されていた51例のフレアイベントを用いて、マイクロ波スペクトルの折れ曲がり周波数の統計解析を行った。本研究を行うにあたって、名古屋大学宇宙地球環境研究所の「ひのでサイエンスセンター@名古屋」と「CIDASシステム」を使用した。

上記51例のフレアイベントを、白色光フレア (WLF: 32例) と非白色光フレア (NWL: 19例) に分類し、それぞれの分類においてマイクロ波スペクトルの折れ曲がり周波数を調べたが、白色光の有無による折れ曲がり周波数の違いは見られなかった。この解析においては、NoRPのデータのみを用いたため、マイクロ波の放射場所を同定していない。このため、ループトップからの放射のみを取り出しておらず、ループ足元からのマイクロ波放射が本結果に影響を与えている可能性が考えられた。

そこで、野辺山電波ヘリオグラフ (NoRH) のマイクロ波とRHESSI衛星の硬X線のイメージをSDO/AIA 193Åのイメージと重ね合わせることで、マイクロ波の放射位置を同定した。マイクロ波放射がループトップに存在していたイベントのみ (全27例、うちWLF: 15例、NWL: 12例) を取り出し、白色光の有無による折れ曲がり周波数の違いを調べた。この結果、折れ曲がり周波数はWLF, NWL どちらでも3例ずつのみ17GHzよりも高くなっており、本解析においてもWLFとNWLで折れ曲がり周波数の違いは見られなかった。

折れ曲り周波数は磁場強度だけでなくフレアの電子密度にも比例するため (Dulk 1985)、折れ曲がり周波数を用いて加速域の磁場強度を考察するには、電子密度の影響も考慮しなければならない。そこで、上記で求めた折れ曲り周波数と、フレアの電子密度をある程度反映していると考えられるフレアの規模との関係についても調べたが、これらの間に関係は見られなかった。Dulk (1985) の関係式を用いて折れ曲り周波数より加速域の磁場強度を考察する研究は、電子密度の影響が大きいいためか、かなり難しいことがわかった。

参考文献

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

成果発表

1. Kyoko Watanabe, Shohei Nishimoto, Shinsuke Imada, Tomoko Kawate, Kyoung-Sun Lee, "Derivation of Solar Flare Total Spectra from Flare Geometrical Features", AOGS 15th Annual Meeting, Hawaii, 2018 June 3 – 8
2. Kyoko Watanabe, Kazuhiro Yamazaki, Shin Arima, Yoshimasa Hori, Satoshi Masuda, "Solar Flare Impulsivity and Its Relationship with Other Related Phenomena", AOGS 15th Annual Meeting, Hawaii, 2018 June 3 – 8
3. Kyoko Watanabe, Kosuke Tsuruda, Satoshi Masuda, Säm Krucker, "A systematic study of microwave and hard X-ray observations to search for characteristics of white-light flares", Hinode12, Granada, Spain, 2018 September 10 – 13
4. 鶴田康介, 渡邊恭子, 増田智, Säm Krucker, "マイクロ波及び硬 X 線放射の統計的研究による白色光フレア発生条件の特定", 日本天文学会 2018 年秋季年会, 兵庫県立大学 姫路工学キャンパス, 2018 年 9 月 19 - 21 日
5. 鶴田康介, 渡邊恭子, 増田智, Säm Krucker, "白色光フレア発生に関するマイクロ波スペクトルの折れ曲がり周波数の統計的研究", 太陽研連シンポジウム, 名古屋大学, 2019 年 2 月 18 - 20 日
6. 鶴田康介, 渡邊恭子, 増田智, Säm Krucker, "白色光フレア発生に関するマイクロ波スペクトルの折れ曲り周波数の統計的研究", 日本天文学会 2019 年春季年会, 法政大学 小金井キャンパス, 2019 年 3 月 14 - 17 日

太陽圏構造とダイナミクスの研究

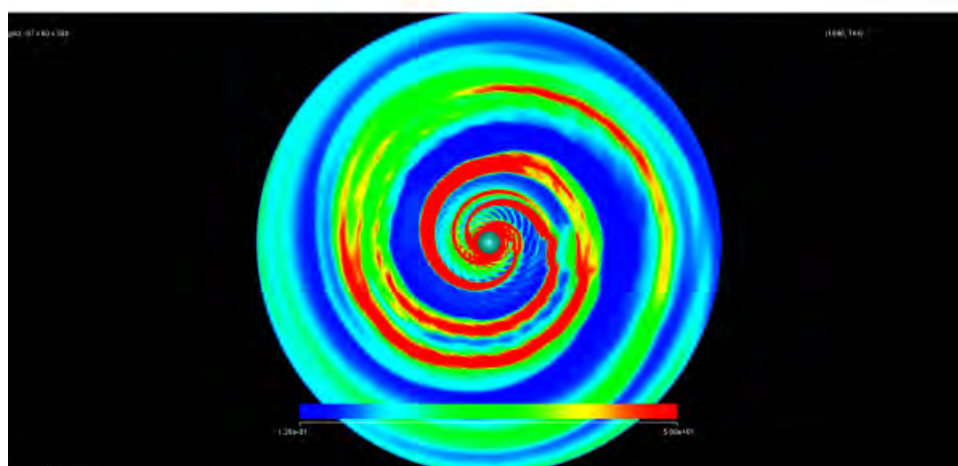
Study of the heliospheric structure and dynamical phenomena

鷲見治一 九州大学国際宇宙天気科学・教育センター

1977年に打ち上げられたVoyager機は太陽圏探査に大きく貢献して来たが、2012年に1号機が、2018年には2号機がヘリオポーズを通過し星間空間に入った。従って今後、引き続き太陽圏の研究を行っていくためには、Voyager観測に依存することは出来ず、別の方法を模索する必要がある。地球の周辺での諸探査機による太陽風プラズマの密度、速度及び磁場強度の観測から得られるOMNIデータを使用するのが、当面唯一の方法と考えられる。我々は太陽圏外圏におけるヘリオポーズの大きさ及び形状を、MHDシミュレーション解析によって高精度で得られる可能性を追求している。OMNIデータをMHDシミュレーションに於いて、太陽からの距離1 AUにて取り入れるためにはそこでの径方向メッシュサイズを0.01AU程度にせねばならない。外部境界として900AU程度までのシミュレーションを行いためにはシミュレーションボックスを2つに分けて行うことが現実的であると考えている。本研究では1-20AU間と20-900AU間との2領域のボックスに分けた3次元解析のシステムを開発している。1 AU球面上でのOMNIデータの取り込みでは、太陽風プラズマが共回転していると仮定して当日、13日先まで、及び13日後までの計27日間のdaily-dataを黄道面上にて使用する。緯度的には太陽風プラズマのラム圧が緯度依存性がないというユリシーズ観測結果に基づいた配分をしている。現在はシミュレーションプログラムの第1次モデルがほぼ整った段階であり、以下にその結果例を示す。

Preliminary result

pressure

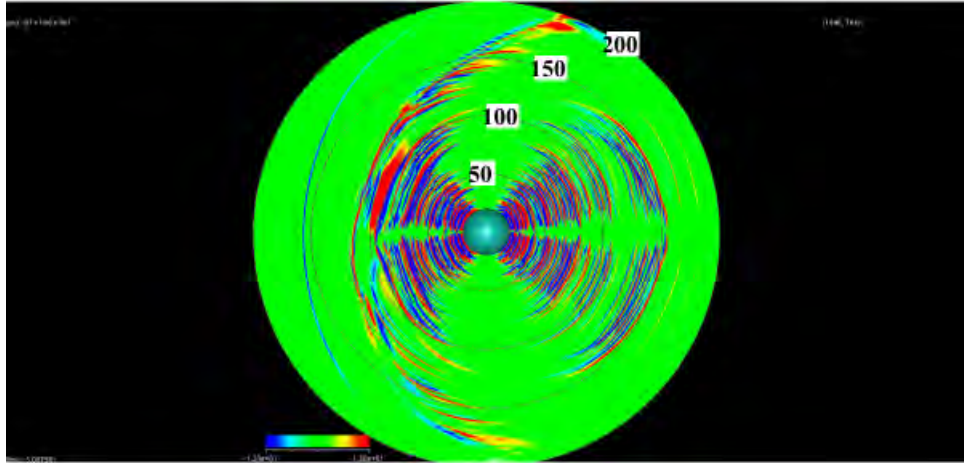


1 AU - 20 AU

Preliminary result

$\mathbf{j} \cdot \mathbf{E}$

$$\nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{\mu_0} \right) = -\mathbf{j} \cdot \mathbf{E} - \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{B^2}{2\mu_0} \right)$$



20 AU - 200 AU

第1図 preliminary results. 1-20AU、赤道面、圧力(上)、20-200AU、子午面、 $\mathbf{j} \cdot \mathbf{E}$ 、(下).

なお、第1図(下)で $\mathbf{j} \cdot \mathbf{E}$ は主にポインティングフラックスの発散を示していて、太陽風プラズマ中の擾乱間での活発なエネルギーのやり取りが太陽圈内圏から外圏へと運ばれ、継続していることを示していると考えられる。

(以上)

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

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

【研究目的と方法】

大規模磁気嵐時に、磁場変動が地面に誘導電流を流すために、地面の2地点間に電位差が生じ、電力送電網の変圧器間に準直流の電流が流れる(GIC:geomagnetically induced current)。GICは電離圏に強いジェット電流が流れるオーロラ帯で強いことが知られており、1989年3月にはカナダと米国東部の送電網において9時間におよぶ停電が発生している。我が国においても、関東地域で1989年10月に80アンペア、2003年10月には100アンペアを超える電流が記録されている。これらのGICはカナダの停電時の原因となったGICの推定値、200-300アンペアに比べて決して無視できない。我が国における予想外に強いGICの原因はいまだ不明であるが、高緯度域のGICが地磁気の時間微分(dB/dt)に比例するとされるのに対して、中緯度GICはdB/dtでなくB、その中でもY成分に比例する(Watari他2009SW)ことが鍵を握っている可能性がある。解決すべき課題として2つ挙げられる。1つは、GICとByとの比例関係が様々な時間スケールを持つ宇宙天気事象全般において成り立つかどうか？2つ目は、なぜBxでなくByなのか？これらを明らかにして、北海道GICを地磁気から再現するモデルを確立することが目標である。

【30年度の成果】

我々は、様々な時間スケールを持つ宇宙天気事象について、GICのBy依存性を調べた。その結果、SC、Pc5などの短時間変動においてByとの相関がよく(cc>0.8)、磁気嵐などの長時間変動時には相関が悪くなる(cc<0.5)ことを明らかにした。この周期依存性を理解するために、GICが地面に発生する誘導電場がつくる電位差に起因するという原点に戻り、地殻を一様導体と仮定して、Byが地殻に侵入する際に誘導する電場Exを計算した。その結果、長周期変動するGICがExと相関する(cc>0.8)結果を得た。一方で、短周期に対してはこれまでどおり、ExよりもByの相関がよいという結果であった(Kikuchi他 JpGU2018; PSTEP-3 2018)。この結果は、長周期変動磁場に対して、地中の電気伝導度が一様と見なせる一方で、短周期変動する磁場が侵入する浅い地中では電気伝導度が異なることを示唆している。短周期と長周期の両方の事象をひとつのモデルで説明するためには、地中の電気伝導度が多層構造を持つモデルを構築する必要があることを示している。多層モデルでの誘導電場の計算は31年度以降の課題であるが、まず簡単な二層モデルの伝達関数を用いた誘導電場の計算をおこなった。その結果、短周期のSC(図1)と長周期のDP2(図2)、いずれの場合もGICとのよい相関(cc>0.9)を得た。今後、二層モデルの適用性を様々な事象について調べる必要があるが、単一モデルで地磁気変動からGICを再現する手法を確立できる見込みを得た。

2つ目の課題であるGICの地磁気Y成分依存性の原因を明らかにするために、海岸線と送電線が比較的単調に東西に延びる中国地方に着目し、中国電力の協力を得て、2018年3月より山口県周南市の東山口変電所でGIC計測を開始した。また、誘導電場の計算に用いる地磁気データとして、京都大学地磁気解析センターが取得している高知県吾川の磁力計データを用いた。吾川はGIC計測点から離れているが、山口県にもっとも近くにあり、その初期解析(図3)では、GICが概ねByに依存する結果を得たことから、適正な位置と見なせると考えられる。今後、詳細な解析をおこなう。

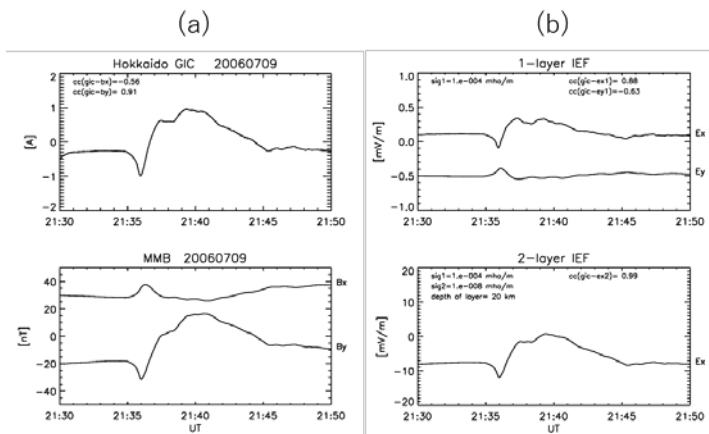


図 1a に SC 時の北海道 GIC(上段)と女満別の地磁気(下段)を示す。図 1b は、一様電気伝導度モデル(上段)と 2 層モデル(下段)で計算した誘導電場を示す。GIC は、By との相関(cc=0.91)が一様モデルの誘導電場 Ex との相関(cc=0.88)より良いが、二層モデルの Ex との相関がよい(cc=0.99)。SC 時の GIC の再現には、二層モデルが適切であることを示す。

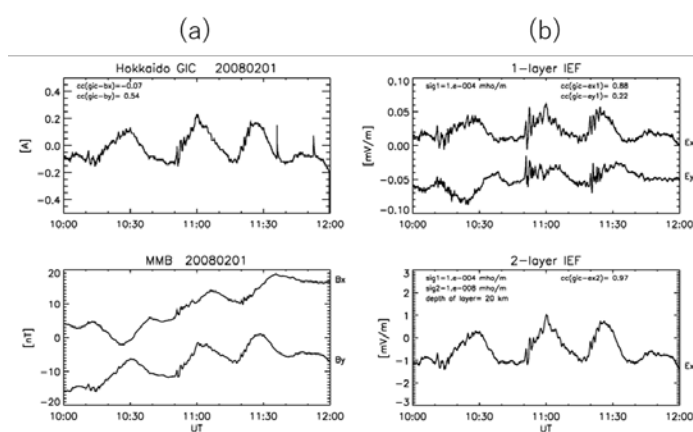


図 2a に 準周期磁場変動時の北海道 GIC(上段)と女満別の地磁気(下段)を示す。図 2b は、一様電気伝導度モデル(上段)と 2 層モデル(下段)で計算した誘導電場を示す。GIC は、By との相関(cc=0.54)がよくないが、一様モデルの誘導電場 Ex との相関(cc=0.88)がよく、さらに二層モデルの Ex との相関がよい(cc=0.97)。準周期磁場変動時の GIC の再現には、二層モデルが適切であることを示す。

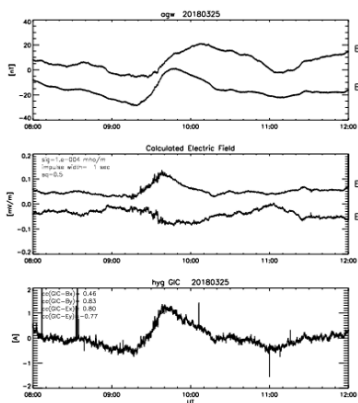


図 3 は、吾川の磁力計データ(上段)、一様モデルで計算した誘導電場(中段)、東山口変電所で計測した GIC(下段)を示す。GIC と地磁気との相関は、Bx(cc=0.46)より By(cc=0.83)がよい点は北海道 GIC と同じ傾向であるが、Ex(cc=0.80)との相関が低くなる点が異なっている。地中の電気伝導度の違いと思われるが、今後の課題である。

【本課題に関する成果発表】

(誌上)

Takashi Kikuchi (2019), Penetration of the magnetospheric electric fields to the low latitude ionosphere, *Advances in Ionospheric Research: Current Understanding and Challenges*, 4.1, Ed. C.S. Huang and G. Lu, John Wiley & Sons, Inc., in press.

(口頭)

1. Takashi Kikuchi, Yusuke Ebihara, Kumiko Hashimoto, Shin-Ichi Watari, Period dependence of reproducibility of the geomagnetically induced currents, PSTEP-3, NIC T, May 2018

2. T. Kikuchi, K. K. Hashimoto, Y. Ebihara, Y. Nishimura, I. Tomizawa, N. Nishitani, and T. Nagatsuma, Transmission of the magnetospheric electric fields to the middle and low latitude ionosphere as observed by the Hokkaido SuperDARN radar and HF Doppler sounders, JpGU2018, Makuhari.

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】

日本で最大の面積・容積を有する琵琶湖では、1990年以降、過・富栄養だった水質の改善が進んでいる一方で、漁獲量は年々減少傾向にあり、期待されたほどの在来生物群集の“賑わい”は戻ってきていない。また、琵琶湖では、温暖化に起因するさまざまな問題（貧酸素化や生物現存量・多様性の低下、有害藻類の増加など）が徐々に顕在化してきている。これらの問題には、琵琶湖生態系を根本から支えている植物プランクトンが大きく関わっていると考えられ、その動態を詳細かつ正確に把握することが喫緊の重要な課題となっている。

本研究の調査水域である琵琶湖の湖面面積（約640 km²）は愛知県三河湾とほぼ同じであるため、船舶を利用した観測では植物プランクトンの分布動態を広域的かつ連続的に捉えることが困難である。そこで本研究では、2017年12月に打ち上げられた気候変動観測衛星「しきさい」（GCOM-C）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4月～12月（観測回数：7回）、琵琶湖北湖（観測地点：5地点）において船舶観測を行った（図1）。船舶観測では、現場クロロフィルa濃度と懸濁物質濃度（SS）測定用の表層水（深度1 m, 3 m）を採取し、実験室での分析に供した。同時に、水中分光放射照度・輝度計（PRR600-610, Biospherical Instruments）を用いて湖面におけるリモートセンシング反射率を測定した。現場クロロフィルa濃度は、90 %アセトンで色素抽出を行った後、蛍光光度計（TD-700: Turner Designs）を用いたWelschmeyer (1994)の方法により測定した。

衛星観測では、気候変動観測衛星（GCOM-C）搭載の多波長光学放射計（SGLI）によって測定された衛星クロロフィルa濃度（level-2, 空間分解能 250 m）および正規化海水射出放射輝度（380～670 nm, level-2, 空間分解能 250 m）を用いた。取得した衛星データは画像解析ソフトWIM（wimsoft）を用いて解析を行った。

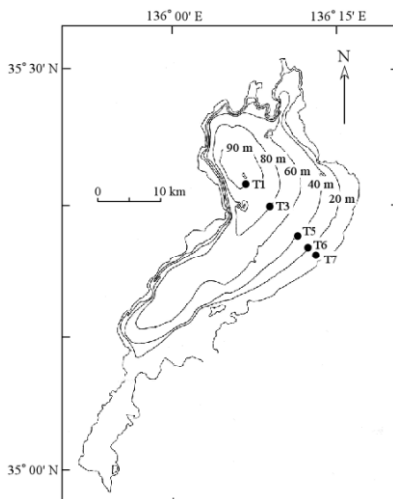


図1. 調査地点（T1～T7）

【結果と考察】

観測期間中、現場クロロフィルa濃度は、0.80（7月26日）～14.18（11月7日）mg m⁻³の範囲を変動し、秋期（11月）に大きく増加した（図2）。観測期間における現場クロロフィルa濃度の平均値は4.68 mg m⁻³であった。現場におけるリモートセンシング反射率（Rrs(λ)）は、Rrs(547)あるいはRrs(555)で最大となり、それらの波長よりも短波長・長波長になるにつれて減少する傾向を示した（図3）。

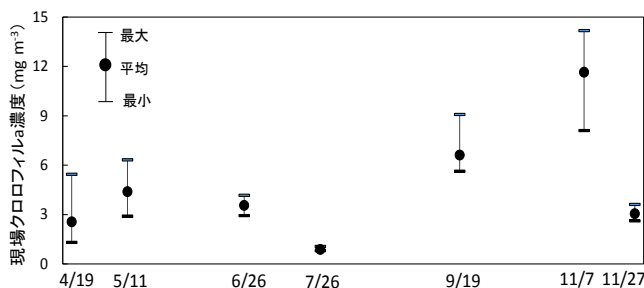


図2. 琵琶湖北湖における現場クロロフィル a 濃度

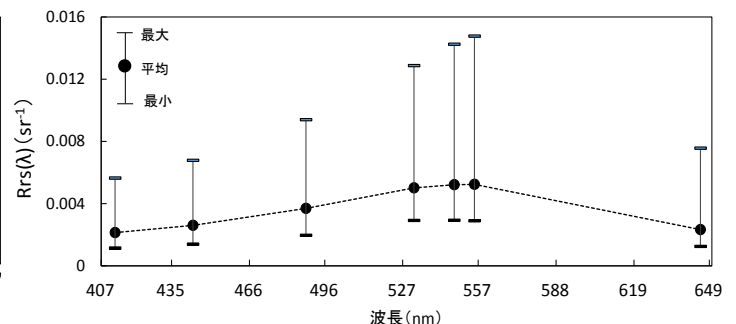


図3. 琵琶湖北湖における現場リモートセンシング反射率

2018年における現場データと衛星データのマッチアップデータ数は計4データ（2018年9月19日）のみであった。2018年9月19日における衛星クロロフィルa濃度分布を図4に示す。衛星クロロフィルa濃度は湖東沿岸域で高く、湖西沿岸域で低い傾向にあり、琵琶湖北湖で頻りに観察される典型的な分布を示した。SGLIの衛星クロロフィルa濃度（レベル2）の空間解像度は250 mであり、非常に詳細なクロロフィルa濃度分布が捉えられている。今後、本データを利用することで、琵琶湖における植物プランクトン群集の分布動態がより詳細に把握できると期待される。しかしながら、その濃度は現場クロロフィルa濃度より低く、過小評価されており、大気補正や水中生物光学アルゴリズム等の見直しが必要であると考えられる（図5）。

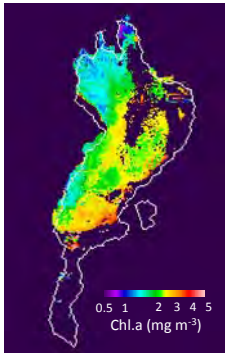


図 4. 2018 年 9 月 19 日の琵琶湖における衛星クロロフィル a 濃度分布

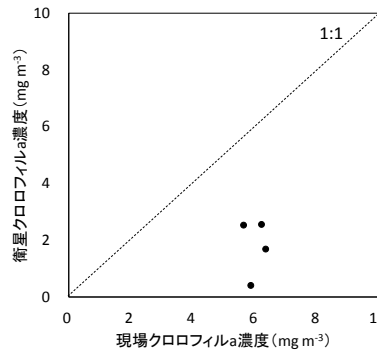


図 5. 衛星クロロフィル a 濃度と現場クロロフィル a 濃度との関係 (2018 年 9 月 19 日)

各波長における衛星リモートセンシング反射率と現場リモートセンシング反射率の関係を図6に示す。衛星Rrs(412)は過小評価されていたが、衛星Rrs(443, 490, 530, 565)は、若干の過小評価ではあるが、現場Rrsに近い値であった。一方、長波長域の衛星Rrs(674)は過大評価となっていた。

衛星データの正確な精度評価は、衛星データと現場データのマッチアップデータ数を増やすことにより可能となる。今後は、琵琶湖における観測を継続して行い、マッチアップデータ数を増やす必要がある。

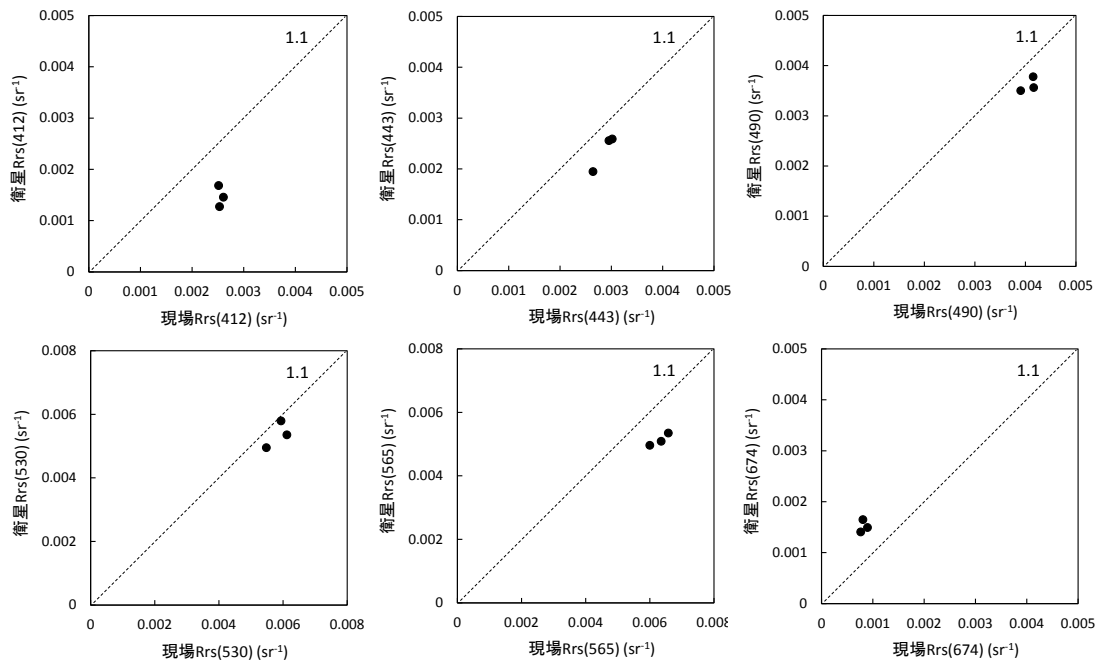


図 6. 各波長における衛星リモートセンシング反射率 (2018 年 9 月 19 日)

正規化海水射出放射輝度と平均太陽照度 ($W/m^2/sr/um$) [412nm:1712, 443nm:1898, 490:1938, 530nm:1850, 565:1797, 674:1502]から算出

【成果発表】

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

発表：後藤直成（2018）衛星リモートセンシングを用いた琵琶湖におけるクロロフィルa濃度の推定．日本リモートセンシング学会 海洋・湖沼リモートセンシング研究会，静岡市，9月5日．

ライダーと雲粒子ゾンデによる大粒子・低個数密度の雲の観測
Large sparse cloud observations by lidar and cloud particle sondes

岩崎杉紀、防衛大学校・地球海洋学科

目的

本研究は、衛星搭載センサのライダー CALIOP やイメージャ(例、ひまわり 8 号や MODIS)では信号がほぼノイズ以下で観測が難しいが、雲レーダ CloudSat では有意に観測できる雲の成因や特性を地上観測によって明らかにすることを目的とする。CALIOPとCloudSatを用いる雲粒径分布の中では、このような雲は粒径が大きく個数密度が少なければならない。本報告書では、この雲を便宜上 Large-and-Sparse particle Cloud (LSC)と呼ぶ。Radar-lidar 法より、LSC の粒径分布の上下限は、半径が $50 \mu\text{m}$ 以上で個数密度は 10L^{-1} 以下である。Pruppacher and Klett (1997)といった先行研究と比較すると、典型的な巻雲より 1 桁程度個数密度は少ない。LSC は巻雲の一種と考えられる。CALIOP と CloudSat の同時観測の事例から、LSC はその下の過冷却の水雲は消散していることが分かっている。過冷却の水雲はどの緯度にも存在し、LSC は高緯度に存在している。このため、LSC は高緯度の放射や水循環に寄与する可能性がある。

研究方法

雲粒子センサ (Cloud Particle Sensor) 搭載ゾンデ (以降、CPS) を使い、名古屋大学太陽地球環境研究所の陸別観測所 (北海道) を拠点とし夜間に CPS 観測を行った。観測期間は 2019 年 1 月 21 日から 25 日まで、放球日は 21 日 (月齢 15) と 25 日 (月齢 19) である。また、前年度の 2018 年 3 月 22 日 (月齢 4) の放球結果も本報告書で述べる。これらと同時にライダー観測も行った。なお、CPS は夜間しか観測できない。

CPS は内部にレーザ光が出ており、それを粒子が通過するとその散乱強度を計測する。データは 1 秒ごとに CPS センサを通過する粒子の個数、最初の 6 個の散乱強度と偏光成分の散乱強度である。粒径は $2 \mu\text{m}$ 以上で有意に計測できる。LSC の個数密度は CPS の観測限界に近い。そのため、次のように二項検定を用いて信号が有意か否か検定した。

圏界面の 3km 上から風船がバースト高度より 1km 下 (または風船が上昇しているが電波が途絶え観測終了したまでの高度) の間に粒子が計測される確率を p とする。雲が通常存在しない高度であれば、3km や 1km は適当な値でよい。これらで検定結果はほとんど変わらない。通常 p は 10^{-4} 個/s 前後である。成層圏には雲粒子がないので、粒子は計測されることはないはずだが、まれに観測される。これはおそらくトーテックス株式会社の風船 TA-600 に付着しているタルク (浅田製粉株式会社・SW-A) と思われる。タルクの粒径は $5 \mu\text{m}$ 程度で、その粒径 $20\text{--}30 \mu\text{m}$ 以上の凝集体は簡単な振動で落下する。放球作業のことを考えると、放球後に風船に付着しているものは $20 \mu\text{m}$ 以下と考えるのが妥当と考えられる。

帰無仮説として、ある高度で信号がタルクによるものである仮定する。ある高度の信号の出現確率がタルクである確率が 1% 以下であったら帰無仮説を棄却し、その高度の信号が雲によるものとする。このような二項検定を用いることで、雲による信号かそれ以外のものか推定することができる。この結果をライダーと比較し、妥当な結果を得られることができた (図示していない)。

観測結果

2019 年 1 月 21 日は、全体に空が白みかかっていたが、CPS ではほとんど粒子を観測できなかった。月齢 15 で月光による大気散乱が強く、白みが雲によるものか大気によるものか判別できなかった。22 日の天候は 21 日と同じ、23 と

24日は降雪のため観測は中止した。25日は下層に雲があるが、ときおり晴れ間も見られていた。高度1,800mに過冷却の水雲(個数密度:200個/L)があり、そのすぐ下に大きな氷、さらにその下に小さい氷が測定されていた。過冷却の水雲で生成された氷が落下し、昇華により小さくなっていったと考えられる。過冷却の水雲の直上には雲粒は有意に観測されなかった。高度3,000m付近に厚さ100mの小粒径の氷粒の雲(個数密度:数個/L)、7,200mに厚さ8mの水雲(個数密度:数十個/L)があった。通常は厚さ8mの雲はリモートセンシングでは測定することができない。上昇速度がおよそ1m/sであったため、8mの雲厚も連続的に有意に変化していた。

2018年3月22日は快晴ののち霞が出ていた。高度6-10kmに1-10個/Lの氷粒が測定され、高度10-11kmに氷に対する相対湿度が104-105%の層が観測された。この個数密度は、ほぼCPSの観測限界である。ライドの信号からは、水平一様な雲を仮定すると1.4m/sで粒子が落下していた。球形粒子であれば、落下粒子の大きさは130 μ mに相当する。

解析結果

パーセルモデルを用いて2018年の過冷却層で氷粒子が生成された事例を解析した。このモデルは、Lin et al. (2004, JAS)のパーセルモデルの相互比較論文の結果と整合的な結果が得られることは確認している。Homogeneous nucleationが始まると氷粒が大量に生成され観測結果が再現できないので、それを引き起こさないよう氷に対する相対湿度が140%までの計算とした。Heterogeneous nucleationはいまだ解明されていないので、その代わりに半径1 μ mの氷粒を観測と整合的な個数を入れて計算した。放射や衝突併合といった気候は考慮していない。図1はその結果である。結果から、相対湿度が140%であっても落下速度が速いため粒子は半径100 μ mまで達せず、粒子が1km落下した後は相対湿度が減少し次に同程度の大きさの粒子を成長させることができない。このため、落下速度を遅く水蒸気を供給するためには、上昇気流があったと考えることが妥当である。

まとめ

2018年と2019年に計3発のCPS観測を行った。2018年の事例はLSCの可能性がある。月齢が0前後の方が空の状態が分かりやすいためLSC観測には適していた。二項検定を用いて低個数密度のCPSデータを解析した。観測結果を踏まえたパーセルモデルの結果から、上昇気流によって圏界面付近で氷過飽和となり、そこで半径100 μ mの氷粒子が生成され落下していることが推察された。今後は、観測を再現できる妥当な上昇速度、この過程で生成された氷粒子が昇華せずに過冷却の水雲まで達する過程、過冷却の水雲と氷粒子の相互作用を検証していきたい。

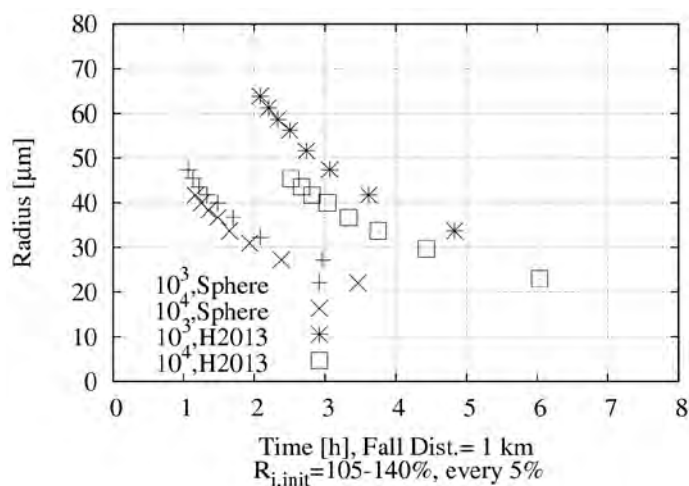


図1. 粒子が1km降下する時間とその時間で成長した粒子半径の関係。終端速度は球形粒子と非球形粒子(H2013)の2種類で計算した。初期条件は、氷に対する相対湿度は105%から140%の間で5%の刻み、1 μ mの氷粒の個数密度を 10^3 と 10^4 /Lとした。気温は-60度で固定している。観測で、高度10-11kmの気温が-60度でほぼ一定であったためである。

フーリエ変換型分光計で観測された大気微量成分の経年変動
Trend of the atmospheric trace species
observed with Fourier transform spectrometer

村田 功、東北大学・大学院環境科学研究科

東北大学では国立環境研究所との共同研究として、フーリエ変換型分光計(FTIR)を用いた赤外分光観測により1998年からつくばにおいて大気中の様々な微量成分を観測している。また、名古屋大学宇宙地球環境研究所とともに国際的な観測ネットワーク NDACC/IRWG (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change / Infrared Working Group)に参加し協力して研究を進めている。今年度はOCSの経年変化、及びHCl、HFの近年の経年変化について報告する。

OCSは対流圏大気中の主な硫黄化合物であり、ユンゲ層などの成層圏エアロゾルの主なソースである。発生源は海洋微生物のほか、人工発生源が多くあるがまだ不明な点も多い。FTIRでは $5\mu\text{m}$ 付近に吸収線が複数あり、この付近のスペクトルから高度分布を求めることが出来る。図1につくばで観測されたOCS全量の2001–2017年の経年変化を示す。観測の関係上2003–2009年に欠測があるが、そのギャップを挟んで増加していること、また2014年頃からは減少に転じていることがわかる。このデータは名古屋大学の陸別の観測結果とともにNDACC/IRWGに提供して共同で解析中であるが、20カ所ほどの世界各地の観測結果は観測地点によってかなり変化の様子が異なっており、今後も引き続き解析を進める予定である。

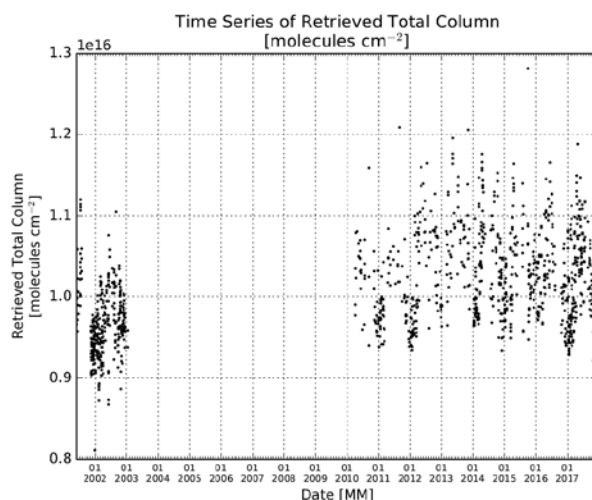


図1. つくばで観測されたOCS全量の2001–2017年の経年変化

HClについては昨年度も報告しているが、今年度はHFも解析した。HFはHCl同様フロン類が主な発生源であるが、代替フロンにも含まれるためHClよりも発生源が多い。そのため経年的な増減に関してはHClとはずれが生じると考えられるが、両者及び気象データから求めた輸送の指標（質量流線関数など）から経年変化の要因が探れるのではと考えた。図2につくばで観測されたHCl全量（左）とHF全量（右）の2001–2018年の経年変化を示す。HFは前述のように発生源が多い分増加傾向がHClより大きめに出るが、2007年を境にした減少から増加の傾向はHClと同様に見られ、その後の減少への転換はHClより若干遅れてみられる。ただ、2017年までの解析の時点で見られていた2015年以降の再増加は、2018年の解析結果を追加したところむしろHCl、HFともに減少傾向となった。2015年までのHCl、HFの減少、増加、減少については今のところ質量流線関数の変化から見た成層圏循環の減速、加速と対応しているが、2015年以降については引き続き観測結果を見ていく必要があるであろう。また、3次元化学輸送モデルとの比較も今後行いたいと考えている。

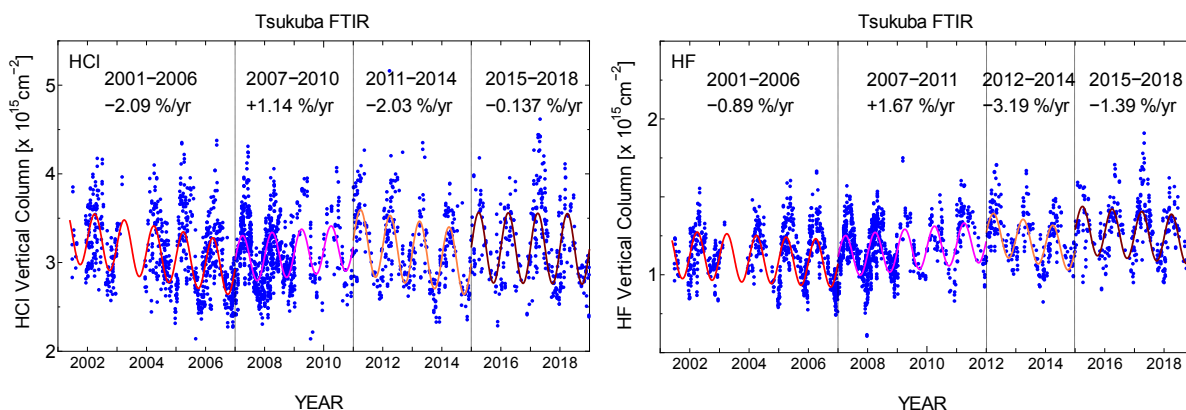


図2. つくばで観測されたHCl全量（左）とHF全量（右）の2001–2018年の経年変化。点線で区切った4つの期間についてのフィッティング曲線と年変化率も示してある。

<成果発表>

村田 功, 中島 英彰, 森野 勇, FTIRで観測されたつくばにおける硫化カルボニル(OCS)の増加, 日本地球惑星科学連合 2018年大会, 幕張, 2018年5月.

I. Murata, Y. Tomikawa, I. Morino, H. Nakajima, and Y. Dai, Temporal variation of HCl observed at Tsukuba related to the change of the meridional circulation in the northern lower stratosphere, NDACC Infrared Working Group Meeting, Cocoyoc, Mexico, June, 2018.

I. Murata, Y. Tomikawa, I. Morino, H. Nakajima, Y. Inai, and Y. Dai, Temporal variation of HCl and HF related to the change of the meridional circulation in the northern lower stratosphere, iCACGP-IGAC 2018, Sep. 25-29, 2018.

地球システムモデルを用いたシベリア域における大気水循環の経年変動特性の解明 Study on interannual variations of atmospheric water circulation in Siberia using earth system model

阿部 学 海洋研究開発機構・統合的気候変動予測分野

はじめに

地球温暖化やそれに伴う北極海氷減少は、北半球高緯度域の気象や環境に影響を与える。ユーラシア北部においては、降水量と関連する水循環の経年変動特性が温暖化や海氷減少によって変調している可能性が指摘されている（例えば Fujinami et al. 2016; Hiyama et al. 2016）。将来予測に用いられるモデル群におけるこのような経年変動特性の変調や長期トレンドに関する再現性は、最も気候変動の影響が大きいと言われている北極圏周辺の環境変化や局地的な極端現象の予測を考える上で重要である。しかし、将来の気候変化を予測する気候モデルや地球システムモデルにおける、ユーラシア北部の水循環の経年変動に関する再現性の評価やメカニズムの理解は不十分である。

研究目的

本研究は、気候変動の将来予測に用いられている気候/地球システムモデル実験の結果におけるユーラシア北部の、特にシベリア域における夏季降水量の経年変動の空間パターンの再現性やモデル間の変動メカニズムの差異を調べ、モデルの不確実性や経年変動メカニズムの理解向上を目的とする。

研究方法

本研究では、気候変動の将来予測に用いられている 15 の気候/地球システムモデルによる過去の気候変動再現実験データを解析する。また、モデルの内部変動に関する不確実性を低減させるため、海面温度 (SST) や海氷の観測値を与えた大気大循環モデルのデータを用いる。また、観測値として GPCP 降水量データを用いる。解析期間は 1979 年から 2008 年までの 30 年間である。

各モデルは水平解像度が異なるため、全モデルデータと GPCP データを $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ の解像度に統一して解析を行った。各モデルについて、シベリア域を中心としたユーラシア北部における夏季平均降水量データに EOF 解析を適用し、経年変動の主要モードの時空間特性を抽出した。各モデルの上位 3 つと GPCP の上位 4 つの EOF モードの空間パターンに対し、クラスター解析を適用してグループ化し、各グループの大気循環の空間パターンの特徴について解析を行った。

研究結果

昨年度は、各モデルの上位 3 つの EOF モードの空間パターンのすべてに対してクラスター分析（ワード法）を適用し、空間パターンの類似性を基準にグループ化を行った。本年度は、観測値の経年変動特性との関係性を考慮するため、GPCP における上位 4 つの EOF パターンを加えて、昨年度と同様のクラスター分析を適用した。クラスター分析の結果から、GPCP の 4 つの EOF パターンがそれぞれに含まれる 4 つのグループ（Cluster A, B, C, D）に分類し、類似した空間パターンごとに特性をまとめた（図 1）。

Cluster A の EOF パターンの特徴は、東シベリアの正のシグナルである。ここには GPCP の EOF3 が含まれている。関係する大気循環場の特徴を調べた結果、このグループはシベリア域の東西ダイポールのな循環場変動と関連しており、Fujinami et al. (2016) の EOF2 と類似する特徴を示した。

Cluster B の EOF パターンの特徴はシベリア域全体で広く正のシグナルがあることである。ここには GPCP の EOF1 が含まれている。ただし、このグループに含まれるモデルの EOF パターンは 5 つと少ない。このことは多くのモデルが、観測される最も主要な変動特性を十分に再現できていないことを示している。

Cluster C に含まれる EOF パターンの特徴は、シベリア中央部から西部に正のシグナルがあることである。このグループの多くの EOF パターンには、シベリア中央部付近の低気圧性循環が関係していることがわかった。また、このグループの EOF パターンや大気循環の特徴は、Fujinami et al. (2016) の EOF1 に類似するも

のであった。このグループに含まれている GPCP の EOF2 パターンとモデルの EOF パターンとの類似性が特に高く、空間パターンに限ればモデルの再現性が良い。

Cluster D に含まれるモデルの EOF パターンの多くが EOF1 である。それに対し、GPCP の EOF4 がこのグループに含まれている (図 2)。これは多くのモデルが共通して、観測値の EOF4 に類似するパターンを最も主要な変動の空間パターンとして持っていることになる。しかし、この要因については本研究では明らかにできなかった。

まとめ

15 の気候/地球システムモデルから得られるユーラシア北部の降水量の経年変動の主要モードは、観測値 (GPCP) から得られる経年変動の主要モードに類似している。しかし、多くのモデルが観測値の EOF1 の空間パターンを再現できていないという課題があることがわかった。また、多くのモデルが共通して、観測値の EOF4 と類似する空間パターンを最も主要な変動の空間パターンとして持っていることが明らかになった。

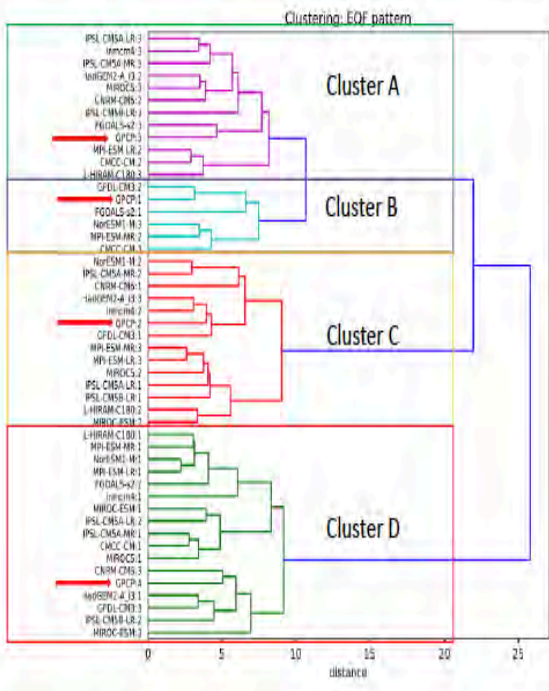


図 1: 各モデルの EOF1-3 の空間パターンと GPCP の EOF1 の空間パターンに対してクラスター分析を行った結果を示すデンドログラム。各項目はモデル名 : EOF の順位を示す。

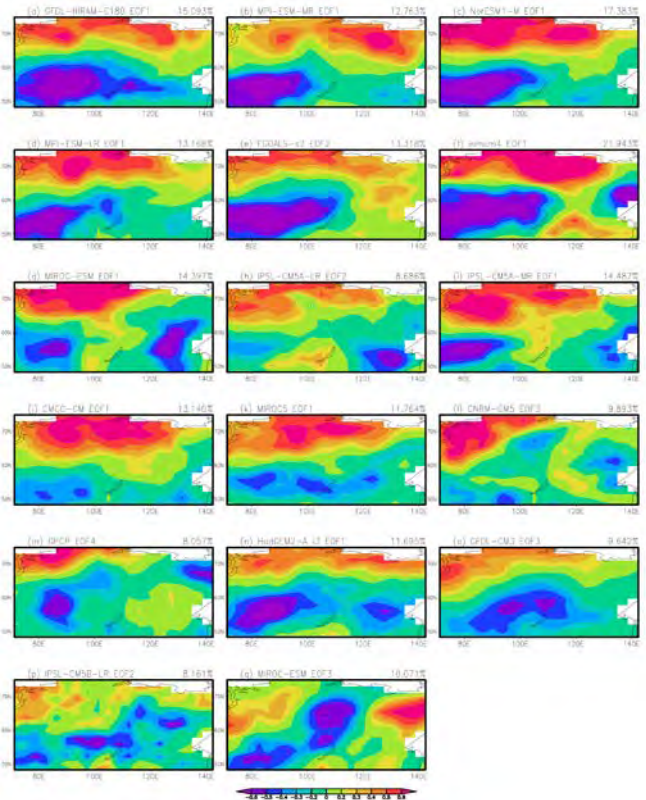


図 2 : Cluster D にグループ化された EOF の空間パターン。各モデルの図の右肩に寄与率を示す。

引用文献

Fujinami, H., Yasunari, T. and Watanabe, T. (2016), Trend and interannual variation in summer precipitation in eastern Siberia in recent decades. *Int. J. Climatol.*, 36: 355–368. doi:10.1002/joc.4352
 Hiyama, T., H. Fujinami, H. Kanamori, T. Ishige, and K. Oshima (2016), Recent interdecadal changes in the interannual variability of precipitation and atmospheric circulation over northern Eurasia, *Environmental Research Letters*, 11(6), 065001, doi:10.1088/1748-9326/11/6/065001.

成果発表

Abe, M., H. Fujinami, and T. Hiyama (2018), Interannual variability of summer precipitation over northern Eurasia in multiple climate models: Part II, *JpGU 2018*, May 24, Chiba, JAPAN.

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

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

尾形 友道(海洋研究開発機構・アプリケーションラボ)

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

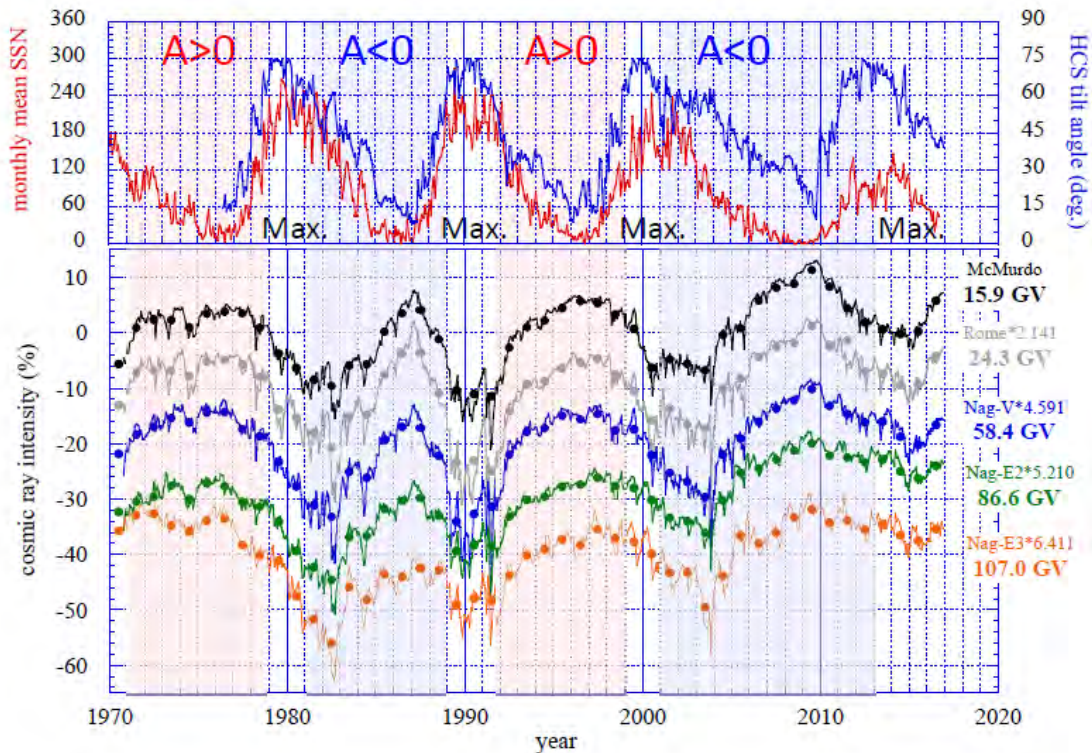
本研究では、今までの研究から課題として残された、1)新しく開発された解析手法(エネルギーフラックス)を用いた海洋波動伝播の解析、2)気候モデルにおける季節内スケール変動とIODなどの気候変動モードの相互作用の解析を行い、熱帯海洋研究の進展を目指す。申請者が従来から取り組んできた赤道域における特徴的な海洋波動(混合ロスビー重力波:例えば Ogata et al. 2008 JGR-O, Ogata et al. 2017 JPO)に新しいエネルギーフラックスを適用したところ、新しいエネルギーフラックスの赤道域での有効性・優位性が確かめられた。本研究では、この解析結果を足掛かりにして、(先行研究で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

今年度は、現実的な海洋シミュレーションにおける季節内変動(尾形)および季節変動(相木)にエネルギーフラックスを適用し、赤道海洋波動のエネルギー伝播の特定における新しいエネルギーフラックス(Aiki et al. 2017 PEPS)の優位性を検証した。季節内変動に関する研究成果として、1)鉛直モード展開を用いた、より厳密な三次元場からの二次元場への射影 2)三次元にも適用可能な、新しいエネルギーフラックス表現の展開を行なった。1)の鉛直モード展開により、赤道インド洋での90日周期の海洋変動は鉛直第二モードのみで説明でき、風のエネルギー注入によるケルビン波/ロスビー波伝播が主要である事が示された。一方、30日周期の混合ロスビー重力波による海洋変動は、複数の鉛直モードが寄与しており、モードの重ね合わせによる鉛直伝播が重要である事が示唆された。これは2)の三次元にも適用可能な、新しいエネルギーフラックス表現の展開を促す結果であり、これらの追加解析結果を踏まえた論文を執筆中である。

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

我々は、地表ミュオン強度に対する大気気温効果の補正法を、多方向ミュオン計の汎世界的観測ネットワーク（GMDN）を用いて開発した。この補正法を1970年から連続観測を継続している名古屋ミュオン計による観測データに適用し、50–100GVの高リジディティ銀河宇宙線強度の長周期変動を世界で初めて導いた。この結果、従来は中性子計による数10GV以下のリジディティ領域に限られていた長周期変動の解析を、100GVにまで拡張して行うことが可能となった。結果を下図に示す。



図の下のパネルが1970–2016に観測された銀河宇宙線強度で、黒色と灰色がMcMurdo及びRome中性子計による観測結果、青・緑・橙が補正後の名古屋ミュオン計により観測結果（17方向計の内3方向計のデータのみを示してある）で、一次宇宙線のリジディティの順に上下にずらしてプロットしてある。●が年平均値、線がCarrington Rotation（CR）平均値である。また、リジディティとともに減少する変動幅を揃えてプロットするため、それぞれ一定の係数倍してある（各カーブの凡例を参照）。この結果から、長周期変動の概要が中性子計とミュオン計で似通っており、変動の振幅がリジディティの約-0.8乗で、リジディティとともに減少していることが判った。

一方でミュオン計による観測結果は、中性子計による結果と異なる様相も呈している。例えば、中性子計による観測で太陽活動極小期に繰返し観られる「peaky top」と「flat top」の様相が、ミュオン計による観測結果ではリジディティの上昇とともにあまり目立たなくなっている。また、中性子計で観測された1970年代半ばの太陽活動極小期 ($A > 0$) の宇宙線強度は、1980年代半ばの太陽活動極小期 ($A < 0$) の宇宙線強度より低いが、ミュオン計で観測された結果ではリジディティの上昇とともにこの大小関係が逆転していることが判る。このことは、銀河宇宙線強度のリジディティ依存性がこの二つの期間で変化していることを意味している。

中性子計を用いたlatitude surveyの結果、同期間にリジディティ依存性が変化しており、数GV近辺でスペクトラムに「cross over」が観られることが過去にも報告されているが(Moraal et al., JGR, 94, 1989)、ミュオン計による図の結果はより高い数十GeV近辺にも「cross over」があることを示唆している。こうした「cross over」はドリフトモデルからも予見されていたが(Reinecke & Potgieter, JGR, 99, 1994)、本研究の結果初めて観測的に確認された。

図の結果を用いると、銀河宇宙線のリジディティ・スペクトラムを年毎またはCR毎に導くことも可能であり、「cross over」と太陽活動の関連も調べることができる。今後この方向での研究を進め、結果を報告して行く予定である。

関連する論文発表：

- K.Munakata et. al., Cosmic-Ray Short Burst Observed with the Global Muon Detector Network (GMDN) on 2015 June 22, ApJ, 862:170 (9pp), 2018 August

関連する学会発表：

- K. Munakata et al., Long-term variation of cosmic ray intensity observed with Nagoya muon detector, ISEE symposium, ISEE, Feb. 26, 2019.
- 宗像一起他、多方向ミュオン計で観測された宇宙線強度の長周期変動、2019年日本物理学会年会、九州大学、2019年3月14日

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

太田充恒、産業技術総合研究所・地質情報研究部門

1. 研究目的

産業技術総合研究所地質調査総合センターは、地殻表層における環境評価の基準図とすべく、河川堆積物・海洋堆積物を用いて、陸海域にまたがる広域元素濃度分布図の整備を進めてきた(今井ほか, 2004, 2010)。2010–2014年度には名古屋大学宇宙地球環境研究所と共同で、食品や考古学資料の産地推定(起源解析)を目的とした、陸域のストロンチウム(Sr)同位体分布図作成に取り組んだ。この結果、1)河川堆積物中のSr同位体比は母岩の値と類似する事、2)Sr同位体比分布は地質図と良く対応する事、3)動植物組織の産地・起源推定には、堆積物中の交換態Srが有効である事、などが明らかとなり、産地推定図としての有効性が明らかとなった(Jomori *et al.*, 2017; Minami *et al.*, 2017)。本研究課題では、これら環境評価・産地推定に継ぐ新たな課題として、堆積物・堆積岩の起源推定や物質移動過程解明へのSr同位体分布図の応用を目指す。今回は、河川堆積物中のSr同位体比が風化・続成作用、運搬・堆積過程で変動が少ないという特徴と、地理情報システムを用いた地形や地質情報の空間解析結果を組み合わせることで、堆積物・堆積岩の起源(母材)推定や背景地質から供給される物質の混合比率の算出への可能性を検討する。

2. 研究方法

調査地域として、北部に白亜紀花崗岩類(領家花崗岩類)、南部に白亜紀堆積岩類(和泉層群)が分布する比較的単順な地質構造を持つ淡路島を選んだ。試料として、淡路島の河床23地点から河川堆積物約2 kgを採取した。河川堆積物は実験室内にて風乾後、ふるいを用いて180 μm以下の細粒砂を分別し、分析試料として用いた。試料をフッ酸－硝酸－過塩素酸を用いて加熱分解し、ICP発光分析装置及びICP質量分析装置にてRbやSrを含む51元素の濃度を測定した。Sr同位体比は、試料を950°Cの高温で加熱して有機物を取り除いた後、フッ酸－過塩素酸を用いて分解した。分解物は塩酸に溶解した後、陽イオン交換樹脂を用いて、Srを分離回収し、名古屋大学表面電離型磁場型質量分析計(VG Sector 54-30)で⁸⁷Sr/⁸⁶Sr同位体比の測定を行った。河川堆積物の母材である各種岩相が河川流域に占める面積比率については、地理情報システムソフトウェア(ESRI社 ArcGIS 10.5)を用いて解析を行った。

3. 研究結果

母岩から河川堆積物形成に至る風化過程の評価として、化学的風化度の評価指標であるChemical Index of Alteration (CIA)を算出した(Nesbitt and Young, 1982)。その結果、河川堆積物のCIAは母岩の値に対して系統的に高い値を示すものの、その差は僅かであることから、著し

く化学風化を受けておらず、母岩の化学組成・Sr同位体比を忠実に反映していると考えられた。実際に、河川堆積物の $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 及び $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ データは、その母岩である花崗岩類および白亜紀堆積岩の値とよく一致した。さらに、花崗岩類および和泉層群を起源として形成された新第三紀・第四紀堆積層が流域に広く分布する河川堆積物試料の $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 及び $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ データは、初期母岩の花崗岩類および白亜紀堆積岩の $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 及び $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ を保持していることも明らかとなった。

次に、流域に花崗岩および白亜紀堆積岩を含む河川堆積物試料中の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ を、花崗岩・白亜紀堆積岩それぞれが流域に単独に分布する河川堆積物試料の流域面積と同位体比を用いて再現することを試みた。その結果、砕屑粒子の供給が各岩石の露出面積に単純に比例するモデルでは再現ができなかった。これは岩石の種類によって風化・削剥への耐性が異なることや地形形状・植生が異なるためと考えられる。淡路島においては、白亜紀堆積岩地帯に比べて花崗岩地帯の方が約10倍風化・削剥されると仮定した時、河川堆積物の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ が最も正確に再現できた。

以上の結果より、河川堆積物はその母岩の同位体比を忠実に反映しており、堆積物・堆積岩の起源推定に使えることが明らかとなった。また、流域に占める岩石の分布面積比率とそのSr同位体比を用いることで、岩石別の風化・削剥に対する耐性評価や土砂供給量算出への応用も可能となることが明らかとなった。

4. 成果発表

今井登, 寺島滋, 太田充恒・南雅代, 多段階の堆積サイクルを経た堆積物・堆積岩における源岩の初期 Sr 同位体比の保持—淡路島の細粒河川堆積物を例に一、地球化学 (in press).

5. 引用文献

- 今井登, 寺島滋, 太田充恒, 御子柴, 岡井貴司, 富樫茂子, 松久幸敬, 金井豊, 上岡晃, 谷口政碩. (2004) 日本の地球化学図. 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 今井登, 寺島滋, 太田充恒, 御子柴(氏家)真澄, 岡井貴司, 立花好子, 富樫茂子, 松久幸敬, 金井豊, 上岡晃. (2010) 海と陸の地球化学図. 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- Jomori, Y., Minami, M., Sakurai-Goto, A. and Ohta, A. (2017) Comparing the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ of the bulk and exchangeable fractions in stream sediments: Implications for $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ mapping in provenance studies. *Applied Geochemistry*, **86**, 70–83.
- Minami, M., Jomori, Y., Suzuki, K. and Ohta, A. (2017) Grain-size variations in $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and elemental concentrations of stream sediments in a granitic area: Fundamental study on $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ spatial distribution mapping. *Geochemical Journal*, **51**, 469–484.
- Nesbitt, H. W. and Young, G. M. (1982) Early proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, **299**, 715–717.

宇宙プラズマ流体シミュレーションのための超並列計算フレームワークの開発

Development of massively parallel computing framework for fluid simulation of space plasma

深沢 圭一郎、京都大学・学術情報メディアセンター

現在、世界中で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2020年頃にエクサフロップスに近い計算性能を持ついわゆる「ポスト京」の開発が進められている。エクサフロップス級計算機では、MHD近似限界のグローバル磁気圏シミュレーションや、流体-粒子結合シミュレーションが実現可能と想定されている。この「ポスト京」は、CPU周波数向上の限界から、48コアを持つCPUが数百万台以上並列に接続された計算機システムになると発表されている。しかしながら、数百万以上の高い並列化効率を維持して「ポスト京」を利用できる宇宙プラズマアプリケーションがあるか不明な状態である。

一般に宇宙プラズマを流体的に数値計算で解く場合は、格子計算であり、空間格子を分割することで並列計算を行い、並列計算機の性能を活用してきた。しかし、京コンピュータ上の高並列環境で計算を実行すると、並列化に伴う通信・同期により10%の計算性能劣化が見えてきている。この値を元に「ポスト京」レベルの並列計算環境での計算性能劣化を見積もると、性能劣化が50%程度になると予測される。この問題を解決するために、我々は並列化効率の劣化を必要最低限に抑え、エクサフロップス級計算機に対応した磁気圏MHDシミュレーションコードを開発している。この中でHaloスレッドという通信と計算を担当するスレッドの考えとHalo関数と用ばれる領域分割通信に最適化した通信関数を提案したが、本研究ではこのHaloスレッドを一般化し、宇宙プラズマ流体シミュレーション全般に適用できるフレームワークを作成することを目的としている。

本年度は通信最適化されたVlasovコードにHaloスレッド、Halo関数を導入し、その性能評価を行った。Vlasovコードに利用されていた通信はMPIであり、Halo関数内で実際に利用されている通信と同じだが、Halo関数では、通信に伴うデータパッキング/アンパッキングの最適化・通信と他の通信・計算等とのオーバーラップが関数内部的に可能となっている。これらの効果により、Halo関数を導入すると、通信が30%以上高速化されることが確認できた。これによりMHDシミュレーションだけでなく次数の高いVlasovシミュレーションでも効果があり、汎用性の確認がある程度できたと考えられる

・国内研究会発表など

(査読有) Fukazawa, K., T. Soga, T. Umeda, T. Nanri, Performance Evaluation and Optimization of MagnetoHydroDynamic Simulation for Planetary Magnetosphere with Xeon Phi KNL, Parallel Computing is Everywhere: Accelerating Computational Science and Engineering (CSE), Advances in Parallel Computing, 178 - 187, DOI:10.3233/978-1-61499-843-3-178, 2018.

(査読有) K. Fukazawa, M. Ueda, Y. Inadomi, M. Aoyagi, T. Umeda and K. Inoue, "Performance Analysis of CPU and DRAM Power Constrained Systems with Magnetohydrodynamic Simulation Code," HPCC, 2018, pp. 626-631. doi: 10.1109/HPCC/SmartCity/DSS.

2018.00113

深沢圭一郎、梅田隆行、"MHD, VlasovシミュレーションにおけるHalo通信の最適化"、STEシミュレーション研究会 - プラズマ-大気複合システムのシミュレーション研究 - 、東京、2018年9月3日 - 5日.

火山噴火に伴う電離圏変動の解析

Analysis of ionospheric disturbances associated with volcanic eruptions

中田裕之，千葉大学大学院工学研究院

1. 背景

地震や台風などの下層大気が発生する大規模な現象に伴い、大気波動が生じ、これによって電離圏擾乱が引き起こされることが知られている。火山噴火もまた同様に大気波動を発生させるが、火山噴火に伴う電離圏擾乱に関する報告はHeki (2006)などの事例があるものの、まだ十分な解析は行われていない。そこで本研究では、火山噴火に伴う電離圏の変動について、桜島の噴火を対象として、全電子数 (Total Electron Content, 以下TEC) を用いて、解析を行った。

2. 研究方法

本研究では、国土地理院のGNSS連続観測システム (GNSS Earth Observation Network : GEONET) より導出されたTECデータを使用した。電離圏貫通点は300kmと仮定し、仰角30度以上に位置する衛星より導出したデータを用いた。

噴火発生日	時間 [UT]	最大値 [Pa]
2009/10/3	07:45	294.5
2012/9/19	01:07	49.8
2012/12/3	20:25	24.0
2014/2/12	20:21	71.9

解析対象とした噴火は上の表に示した桜島噴火4事例である。これは、噴火の規模を、桜島の西に位置する東郡元において観測された空振データが利用できたためである。表1にも、空振計の最大値を示しており、本研究では、噴火の規模をこの値で評価した。

3. 研究結果

それぞれの事例において観測されたTEC変動量と噴火の規模（空振の最大値）との関係を図1に示す。これより、空振計の圧力変動が大きいほど、TEC変動が大きくなる傾向があることがわかる。さらに、TEC変動と火口から貫通点までの距離との関係について解析を行った。これは、噴火により発生した大気波動がエネルギーが火口からの距離に応じて減衰していくため電離圏の変動が火口からの距離と逆相関関係を取ることが考えられるためである。最も規模の大きい2009/10/3の事例について、TEC変動の大きさと、噴火口からのその貫通点の距離の関係を図2に示す。図中の点線は、最小二乗法により求めた回帰直線である。データ点の横の数値は、「衛星番号-受信機番号」を示しているが、11-729や11-735などは、回帰直線からかなり下の方に位置しており、その貫通点の位置で期待される値に比べかなり変動が小さいことがわかる。この原因として、(1) 波動の伝搬方向が地磁気の磁場方向とは平行でないこと (e.g., Otsuka et al., 2006), (2) 変動の波面と衛星-受信機の視線方向が直角でないこと (e.g., Heki et al., 2006), の2つの影響が考えられる。そこで、これらの影響を取り除くため、火口からの波動の伝搬を音

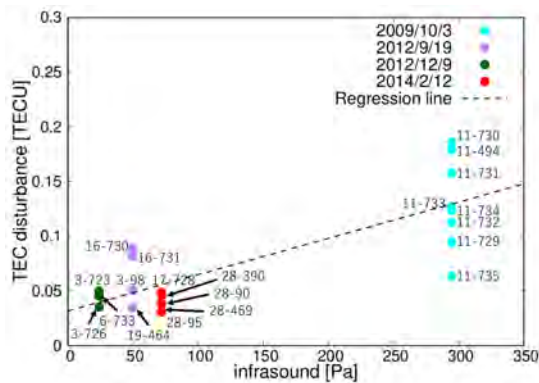


図 1：桜島噴火に伴う空振計による圧力変動最大値（横軸）と TEC 変動（縦軸）

火山噴火との間に相関があることが明らかとなった。ただし、定量的な関係性については、衛星と受信機の位置関係などの影響をより詳細に考慮し、解析を進めていく必要があると考えられる。

5. 参考文献

Heki, K. (2006), Explosion energy of the 2004 eruption of the Asama Volcano, central Japan, inferred from ionospheric disturbances, *Geophys. Res. Lett.*, *33*(14), 1933, doi:10.1029/2006GL026249.

Heki et al. (2006), Detection of ruptures of Andaman fault segments in the 2004 great Sumatra earthquake with coseismic ionospheric disturbances, *J. Geophys. Res.*, *111*(B9), 1133, doi:10.1029/2005JB004202.

Otsuka, Y. et al. (2006), GPS detection of total electron content variations over Indonesia and Thailand following the 26 December 2004 earthquake, *Earth Planet Space*, *58* (2), 159-165, doi:10.1186/BF03353373.

波レイトレーシングにより算出し、補正を行った。地磁気ベクトルは IGRF-12 より導出した。その結果を図 2 (b) に示す。補正したデータに対し、補正前のデータと同様に TEC 変動と火口から貫通点までの距離との相関を求めたところ、相関係数は -0.35 から -0.84 となり、TEC 変動の大きさと距離との逆相関が明確となった。

4. まとめ

火山噴火に伴う TEC 変動について、桜島噴火を対象として解析を進めた。その結果、TEC 変動と

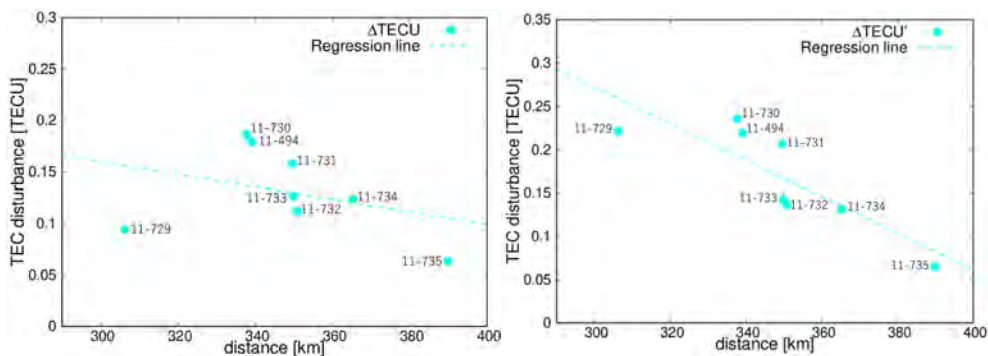


図 2：火口からの距離（横軸）と TEC 変動との相関。左 (a) は補正前、右 (b) は補正後の結果。

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

情報通信研究機構・電磁波研究所 岳藤一宏

Crabパルサーは2600ほど発見されているパルサー天体のなかでも10例ほどしかないGiant Radio Burst (GRP)が放射されている特異なパルサーである (Knight, H. S., ChJAS 2006)。パルサーは数十kmほどの非常にコンパクトな中性子星であると考えられており、このパルサーと地球間に存在する星間プラズマのゆらぎ (Inter-stellar scintillation, ISS)を検出することができる (Rickett, Nature1969)。Crabパルサー@327MHz帯ではISSは日単位で揺らいでおり、Crabパルサーの長期のモニタリングは非常に重要である。我々は名古屋大学豊川電波観測所のデジタルバックエンドを整備してCrabパルサーの観測を実用化することに成功した。そこで毎日得られたGRPの検出率とGRPの尾の長さから得られたScattering時間が下記図である (俵海人、2018年度修士論文より引用)。ここでScattering時間は数ミリ秒の単発GRPの形から指数関数的に強度をフィッティングして遅延時間を計算している。

図からも分かるように非常に高い精度でGRPの検出率と遅延時間が決定できている。また500 μ 秒近くまでScattering時間が伸びているのはJodrell Bank@610MHzの数十年にわたる観測でも6-7回であり、貴重なデータである。Scattering時間は観測周波数の-4乗に比例するスクリーンモデルや-2.8乗 (Löhmerら2001)とも言われるが、豊川電波観測所の観測周波数327MHzが低い分、遅延が引き延ばされ、よく精度良く決定できると考えられる。

Mckeeら (MNRAS, 2018)はそのJodrell bank観測所での長期にわたる観測から同様にScattering時間とDispersion measureが正の相関があることを報告している。Scattering時間は15日分の積分をおこなったパルサープロファイルから導出している。一方、豊川電波観測所では単発のGRPからScattering時間を計測しているため、より短時間スケールの変動量を測定できるかもしれない。Scattering時間の変動はCrabパルサーを含む星雲での変動が大きく寄与すると考えられており、GRPの頻度揺らぎやScattering時間変化、これらの観測量のスケールファクターなどを今後調査していきたい。同時にCrabパルサーのディスパージョンがScattering時間に大きく影響するため、ディスパージョンの決定精度を高めることを次年度の課題として解決していきたい。

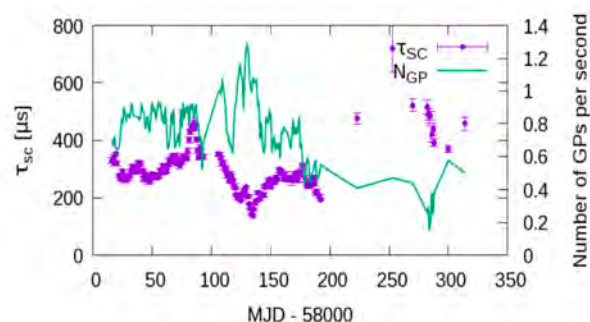


図1 GRP検出率 (緑)とGRPそれぞれのScattering時間 (緑)

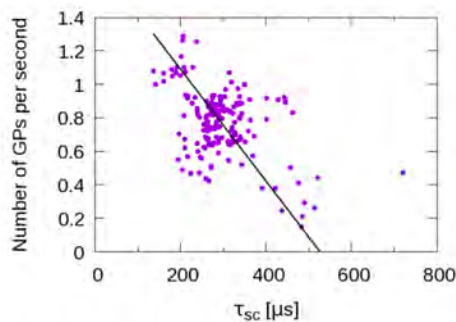


図2 GRP検出率とScattering時間の相関

海色衛星観測による東シナ海での懸濁物質と低次生産量の時空間変動：
気候変動による長江流量変化の影響

**Dispersion of high-gelbstoff and low-salinity water in the East China Sea in summer:
Influence of the ENSO**

エコ シスワント、国立研究開発法人海洋研究開発機構
地球環境観測研究開発センター
地球表層物質循環研究グループ

Research Objectives

Based on satellite ocean color data, Sasaki et al. (2014) have shown an unusual dispersion of the colored dissolved organic matter absorption coefficient (hereinafter a_g , a proxy of dissolved organic matter concentration) during the summer 2010. This study revisited the ECS to investigate interannual variation of, not only a_g , but also sea surface salinity (SSS) and primary production (PP), as the Changjiang fresh (low salinity) water highly correspond to high dissolved organic matter and inorganic nutrients. Study did not investigated only summer 2010, but also all summer data within the 1997 to 2010 period. This study is thus to see interannual variation of dispersion of Changjiang water characterized by low SSS, high a_g , and high PP. Probable responsible factors determining dispersion of Changjiang water and possible teleconnection to climate variation were also investigated.

Methodology

This study utilized SeaWiFS photosynthetically available radiance (PAR, Einstein $m^{-2} d^{-1}$) and remote sensing reflectance (R_{rs} , sr^{-1} , acquired from <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cms>). The MODIS and AVHRR sea surface temperature (SST, $^{\circ}C$, acquired from <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cms> and <http://podaac.jpl.nasa.gov/AVHRR-Pathfinder>) were also used. Phytoplankton biomass (Chl-a, $mg m^{-3}$) and a_g were estimated by means of local ocean color algorithms (Siswanto et al., 2011). Local PP model by Gong and Liu's (2003) was also used. The SSS was estimated from a_g as they are highly correlated (e.g., Sasaki et al., 2014). Other datasets are the Changjiang discharge ($m^3 s^{-1}$) acquired from <http://www.hydroinfo.gov.cn>, precipitation rate ($mm d^{-1}$) from <http://apdrc.soest.hawaii.edu>, and Nino3.4 index from <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/sstoi.indices>.

Results and Discussion

Fig. 1 shows spatial distribution of a_g , SSS, PP, and wind field during the summer (July) 1998, 2003, 2009, and 2010. High- a_g and low-SSS water in July 2010 dispersed farther southeastward to the center of the ECS, and turned northeastward to the area south of Kyushu Island, Japan (Fig. 1a, b) which was likely driven by the Kuroshio current (white dashed line). Because the low-SSS water contains high nutrients, similar dispersion pattern also applied to PP (Fig. 1c). Similar southeastward dispersion of low-SSS, high- a_g , high-PP water (hereafter Changjiang-influenced water, CIF) was also observed during July 2003, but no northeastward elongated pattern (Fig. 1i-k). Offshore dispersion of CIF in July 1998 and 2009 was rather limited (Fig. 1e-g, m-o). Wind field spatial patterns during July 2003, 2009, and 2010 were similar (Fig. 1d, h, l).

Meridional dispersions of SSS (Fig. 2a), a_g (Fig. 2b), and PP (Fig. 2c) showed remarkable interannual variations. The farthest southeastward dispersion of CIF was indeed observed during July 2010. Such a unique dispersion was attributed to southeastwery winds (Fig. 2d, e) and high Changjiang discharge (white line in Fig. 2a) due to high precipitation rate (yellow line in Fig. 2a). High discharge in July 2010 was associated with El Nino event peaking in previous winter (e.g., Hardiman et al., 2018).

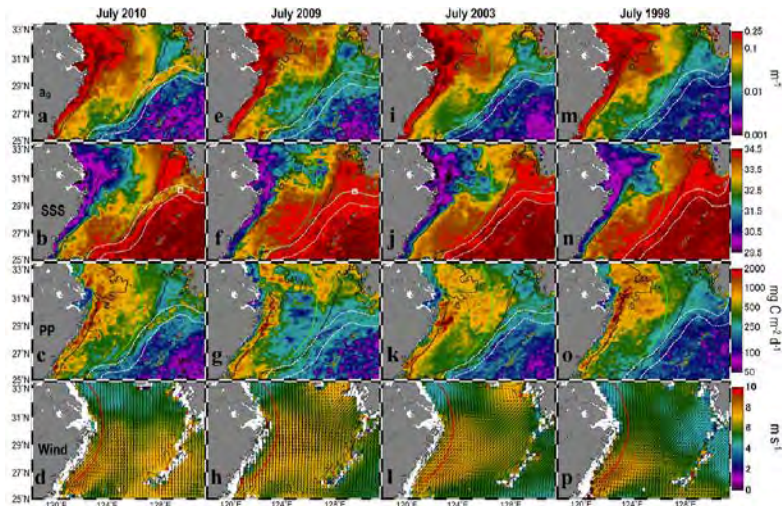


Fig 1. Spatial variations of a_g (a), SSS (b), PP (c), and wind field (d) in July 2010. Panels (e–h), (i–l), and (m–p) are the same as panels (a–d), but for 2009, 2003, and 1998, respectively. White dashed lines indicate the approximate edges of the Kuroshio Current axis. Black dashed lines indicate the 50-m and 200-m isobaths. Green arc is a transect for time series of SSS, a_g , and PP shown in Fig. 2. Red arc is a transect for wind field shown in Fig.2

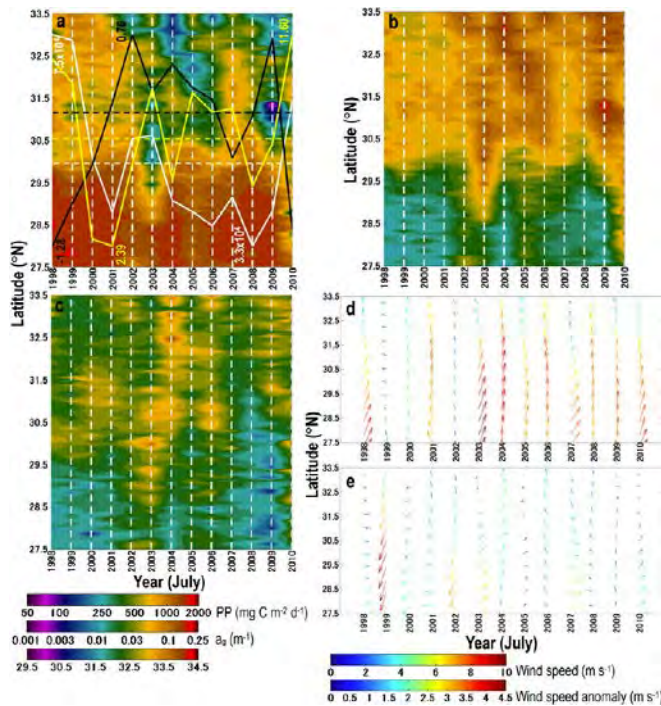


Fig 2. Time series of July SSS (a) from 1998 to 2010 along the green arc shown in Fig. 1. Plots (b) and (c) are the same as (a), but show a_g and PP, respectively. Plot (d) is wind vector (color scale indicates wind speed) derived from red arc shown in Fig. 1. Plot (e) is the same as (d), except for wind vector anomaly. Black, yellow, and white lines in (a) indicate Nino3.4 index, Changjiang discharge, and precipitation rate, respectively.

Southeastward dispersion of CIF was also observed in July 2003, but not as far as that during July 2010. This farther offshore dispersion in 2003 was also likely caused by southwesterly winds, though discharge and precipitation rate were low. But, in July 1998 and 1999, although discharge and precipitation reached the highest, farther southeastward dispersion of CIF was not observed. This was likely caused mainly by direction of wind anomaly, especially in 1999, when wind anomaly was northeasterly and likely to be associated with La Nina event peaking in the previous winter.

References

- Gong, G.-C., and G.-J. Liu (2003), An empirical primary production model for the East China Sea, *Continental Shelf Research*, 23:213-224.
- Hardiman, S.C., et al., (2018), The asymmetric response of Yangtze river basin summer rainfall to El Niño/La Niña, *Environ. Res. Lett.*, accepted, doi:10.1088/1748-9326/aaa172.
- Sasaki, H., et al., (2014), Unique dispersal of the Changjiang-Diluted Water plume in the East China Sea revealed from satellite monitoring of colored dissolved organic matter (CDOM), *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 25(2), 279-287.
- Siswanto, E., et al., (2008), The long-term freshening and nutrients increases in summer surface water in the northern East China Sea in relation to Changjiang discharge variation, *Journal of Geophysical Research*, 113, C10030.
- Siswanto, E., et al., (2011), Empirical ocean-color algorithms to retrieve chlorophyll-a, total suspended sediment matter, and colored dissolved organic matter absorption coefficient in the Yellow and East China Seas, *Journal of Oceanography*, 67:627, doi:10.1007/s10872-011-0062-z.

Achievements

Eko Siswanto, Yongjiu Xu, Joji Ishizaka, 2018, A Rare Dispersion of Low - Salinity, High - Gelbstoff, High - Primary Production Water in the East China Sea During the Summer of 2010: Possible Influence of the ENSO, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123, 2757-2767, doi:10.1002/2017JC013319.

LF帯標準電波を用いた地震後のD領域電離圏変動

Variations in the D-region ionosphere after earthquakes using LF transmitter signals

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、東北大学が名古屋大学宇宙地球環境研究所鹿児島観測所等で観測している LF 帯標準電波のデータを用いて、地震後の D 領域電離圏変動を明らかにすることである。地震後の電離圏変動はこれまで、GPS-電離圏全電子数 (TEC) データを用いた研究が精力的になされており、たとえば 2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) の約 7 分後から数時間の間、震源域付近から同心円状に伝搬する大気波動の報告がある [Tsugawa et al., 2011]。これは地震地表波 (レイリー波) や津波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ものである。しかし、地震後の 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 LF 帯標準電波のデータを用いて、地震後の D 領域電離圏変動を明らかにする。地震波の観測データと比較することにより、地震 (固体地球) ~大気圏~電離圏結合解明に貢献できるものと思われる。

2. 観測の概要

本課題では、2011 年 3 月 11 日 05 : 46 UT に発生した東北地方太平洋沖地震を研究対象とした。図 1 に、震央、LF 帯標準電波の伝搬パス、および防災科学技術研究所が運用する F-net 広帯域地震観測網の地震計の位置を示す。LF 帯標準電波の送信局は、JJY60kHz と BPC (68.5 kHz, 中国)、受信局は北海道陸別(RKB)である。強度および位相を観測しており、サンプリング時間は 0.1 s で、高周波のノイズ除去のため 10 s の移動平均を取っている。

3. 研究結果および考察

図 2 に、2011 年 3 月 11 日 05 : 48-06 : 00 UT の (a) JJY60kHz-RKB 伝搬パスおよび (b) BPC-RKB 伝搬パスの LF 波の強度を示す。カラーの線は、Wave hop 法で計算した各パスの各反射波の強度である。たとえば、茶色の線は地表波のみ、青の線は地表波 +1 回反射波、緑の線は地表波 +1 回反射波 +2 回反射波、…、赤い線は地表波 +1 回反射波 +2 回反射波 +… +10 回反射波の合成電界強度を示す。図 2(a) では、05 : 51-05 : 57 UT に 0.1 dB の 100 s 周期の変動が見られ、観測値 (黒い線) と Wave hop 法で計算した 10 回反射波までの合成電界強度 (赤い線) とよく一致している。図 2(b) では、(a) のような 100 s 周期の変動は見られなかった。Wave hop 法の計算結果では、各反射波が逆位相であり、打ち消しあってしまうため、強度の変動量が非常に小さく、観測で地震による変動が見られなかったものと思われる。

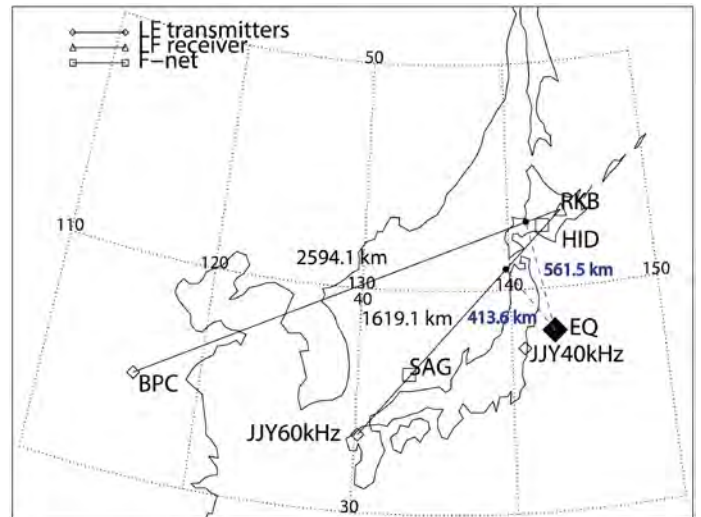


図 1 LF 帯標準電波の伝搬パス、F-net 地震計および震央(EQ)の位置。

図 3 は、2011 年 3 月 11 日 05 : 48-05 : 58 UT の(a) および (b) は図 2 と同じ、(c)は F-net 地震計(HID)で観測された地震波の上下動速度を入力したときの中性大気数値シミュレーション結果を示す。図 3 (c) のカラーは、背景電子密度に対する電子密度の変動分 (%) を示す。LF 波強度の変動が始まる 05 : 52 UT に、LF 波の昼間の反射高度である高度 70 km 前後で、電子密度の変動が始まっている。電子密度の変動分は背景電子密度に対して約 1 % だった。

図 4 は 2011 年 3 月 11 日 05:48-06:00 UT の(a)JJY60kHz パスの強度、(b) (a)のウェーブレットスペクトル、(c)BPC-RKB パスの強度、および(d) (c)のウェーブレットスペクトルを示す。JJY60kHz-RKB パスの振動が 100 s 周期を持つことを示している。

4. 結論

2011 年東北地方太平洋沖地震本震の約 4 分 40 s 後に、JJY60kHz-RKB パスで 100 s 周期の LF 波強度の振動が見られた。地震後の D 領域電離圏変動としては本研究が世界で初めての報告である。F-net 地震計で観測された地震波データとの比較、中性大気シミュレーションおよび Wave hop 法により、この 100 s 周期の振動は地震のレイリー波が震源から JJY60kHz-RKB パスまで地球表面を伝搬し、そこで音波を励起させ、その音波が上昇し、高度 70 km 付近の電子密度を約 1 % 揺らしたことにより発生したものであることが分かった。

成果発表

[1] (論文) **Ohya, H., Tsuchiya, F.,** Takishita, Y., Shinagawa, H., Nozaki, K., and **Shiokawa, K.**, Periodic oscillations in the D region ionosphere after the 2011 Tohoku earthquake using LF standard radio waves, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123, doi.org/10.1029/2018JA025289, 2018.

[2] (口頭発表) **大矢 浩代, 土屋 史紀**、陸別での LF 帯標準電波観測による 2011 年東北地方太平洋沖地震後の下部電離圏変動、H30 年度陸別ユーザーズミーティング、北海道陸別町、H31 年 2 月 15 日。

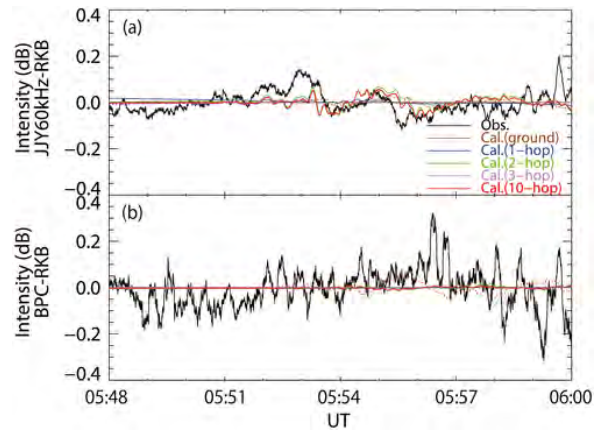


図 2 2011 年 3 月 11 日 05:48-06:00 UT の (a) JJY60kHz-RKB 伝搬パスおよび (b) BPC-RKB 伝搬パスの LF 波の強度。

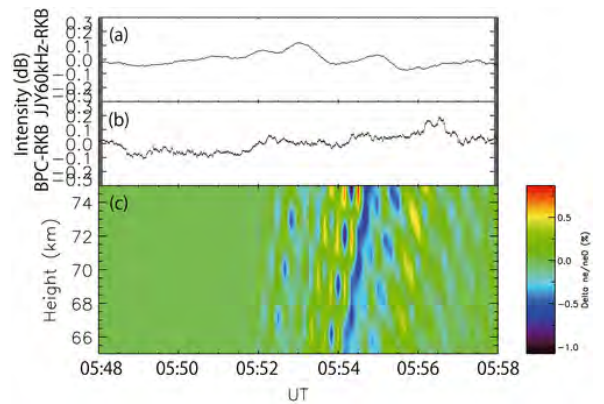


図 3 2011 年 3 月 11 日 05 : 48-05 : 58 UT の (a) および (b) は図 2 と同じ、(c)は F-net 地震計(HID)で観測された地震波の上下動速度を入力したときの中性大気数値シミュレーション結果。

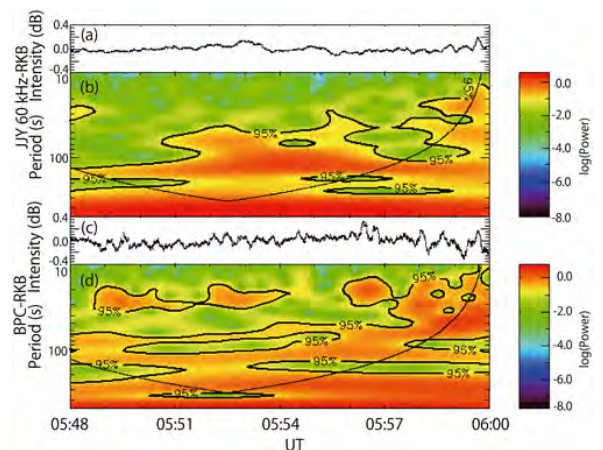


図 4 2011 年 3 月 11 日 05:48-06:00 UT の (a)JJY60kHz パスの強度、(b) (a)のウェーブレットスペクトル、(c)BPC-RKB パスの強度、および(d) (c)のウェーブレットスペクトル。

北極域流星レーダーで観測される両極性拡散係数を利用した極域中間圏の電子温度推定の検討

An electron temperature measurement technique in the polar mesosphere using meteor radars

堤 雅基¹、高橋 透¹、小川泰信¹、野澤悟徳²
1国立極地研究所・宙空圏研究グループ
2名古屋大学宇宙地球環境研究所

研究目的

流星レーダーにより観測される両極性分子拡散係数を用いて上部中間圏から下部熱圏域の大気温度を観測する手法が開発され大気波動研究などに応用されている。本研究ではその手法をさらに発展させた極域での電子温度推定法の開発を目的とする。H30年度においては、特に、昨年度までに見出した電離層電場上昇に対応した拡散係数の異常増大現象について詳細を調査する。

調査方法

流星により形成された円柱状の電離飛跡からのレーダーエコー強度は時間とともに指数関数的に減衰する。その減衰時定数から流星飛跡中プラズマの両極性拡散係数 D_a を推定することができる [McKinley, 1961]。 D_a は、電子温度 T_e およびイオンの温度 T_i と以下のような関係を持つ。

$$D_a \approx D_i \left(1 + \frac{T_e}{T_i} \right) \quad \text{式 1}$$

高度 110 km 程度以下においては、概ね T_e および T_i は中性大気温度 T_n に等しく ($T_e = T_i = T_n$)、 $D_a = 2D_i$ の関係が成り立つとされ、この関係を元に中性大気温度情報を取り出す手法が開発され実用化されている [e.g. Tsutsumi et al., 1994; 1996; Hocking et al., 1999]。ところが、昨年度までの我々の研究から、電離層電場の上昇に伴う電子温度上昇によると考えられる D_a の異常増大現象 (中性温度上昇によるとは考えにくい増大) が見出された。これを応用した広域の流星レーダーネットワークにより、電離層電場の水平 2 次元構造に関する知見が得られる可能性がある。極地研、ISEE およびノルウェー北極圏の共同運用により得られたトロムソ (69.6N, 19.2E)、ベアアイランド (74.5N, 19.0E)、ロングイヤビン (78.2N, 16.2E) の南北ネットワーク観測データを元に異常増大の空間分布の解析を試みた。

初期結果

統計的に拡散係数の異常増大現象の発生頻度の時刻分布を調べたところ、3 観測地点とも

に夕刻から夜半において緩やかなピークを持つことがわかった。またロンゲイヤビン、ベアアイランド、トロムソの順に発生頻度極大が現れており、高緯度ほど早い時間帯に異常増大がピークを持っており、電離層電場の空間構造を反映したものと想像される。また地磁気活動度によっても、異常増大の出現頻度や時間帯には変化が見られる。

まとめ

両極性拡散係数の異常増大現象から電離層電場の知見が得られる可能性がある。流星レーダーによるネットワーク観測データをもとに、異常増大現象の統計的な振る舞いの調査に着手した。初期成果は日本地球惑星科学連合2019年大会にて発表を予定している。

引用文献

- Hocking, Geophys. Res. Lett., 26, 3297-3330, 1999.
McKinley, Meteor Science and Engineering, McGraw-Hill, New York, 1961.
Tsutsumi et al., Radio Sci., 29, 599- 610, 1994.
Tsutsumi et al., J. Geophys. Res., 101, 9425-9432, 1996.

成果発表

- 高橋 透、堤 雅基、小川 泰信、野澤 悟徳、Chris Hall、宮岡 宏、
北欧に展開された 3 つの流星レーダーを用いた両極性拡散係数の
異常増大、地球電磁気・地球惑星圏学会、名古屋、2018年11月。
高橋 透、堤 雅基、小川 泰信、野澤 悟徳、Chris Hall、宮岡 宏、
北欧に展開された 流星レーダーによる両極性拡散係数の異常増大
の時間・空間分布の研究、日本地球惑星科学連合2019年大会、幕張、
2019年5月(予定)。

低バックグラウンドベータ線計数装置によるバックグラウンド時間変動の
遠隔地間の比較測定

Measurements of background rates using Quantulus counters located in distant place

門叶冬樹、山形大学・理学部

研究目的

本研究は、名古屋大学宇宙地球環境研究所 (ISEE) と山形大学 (YU) に設置している低バックグラウンドベータ線計数装置 (Quantulus) を用いて、地表付近での宇宙線中性子強度及びミュオン強度の時間変動に起因する地表付近の放射線強度変動を測定し、中性子モニターデータ及び山形大学で連続観測している宇宙線生成核種 ^7Be の日変動と比較することを目的としている。Quantulus は、液体シンチレータ試料を鉛遮蔽体 (約 670 kg) 及びガード用液体シンチレーションカウンターで囲まれた測定室に置き、バックグラウンドを極力除去して試料からベータ線を測定する装置である。データはガード・カウンターからの信号、ガード・カウンターと試料との同時計数信号、そしてこれらの信号との反同時計数信号が試料から取得できる。ガード・カウンターは中性子にも感度があり、且つガード・カウンターと試料との同期信号はほとんどミュオンであると考えられる。

本研究では 2 地点の Quantulus を同時期に稼働させ、ガード・カウンター及び同期信号の計数値変化を記録して約 600 km 離れた 2 地点でのバックグラウンドの時間プロファイルを調べる。その結果を宇宙線生成核種データ及び中性子モニターデータと比較し、遠隔地の地表付近での放射線環境における宇宙線の短時間での時間変動について調べる。

研究方法

2018 年 12 月 28 日から 2019 年 1 月 6 日まで YU の Quantulus を用いてバックグラウンドの測定を行った。バックグラウンドは鉛遮蔽されたガード・カウンターの計数値であり、時間分解能は 1 日に設定している。また、2018 年度に ISEE の Quantulus は、新しい建物に移設され遠隔操作が可能となった。

研究結果

図 1 は YU で測定されたバックグラウンド計数値の約 10 日間の時間変化と山形市の気圧の時間変化を比較したものである。気圧の増加・減少に伴って計数値が減少・増加していることが分かる。12 月 29 日から 30 日にかけての計数値の減少率は 1hPa 当たり 0.3%であった。

耐波浪環境シー Sprey 測器の開発と海上試験 Marine-field Tests of an Experimental Sea-Spray Spectrometer Probe

根田 昌典, 京都大学・大学院理学研究科

研究目的

従来の大気化学研究では衛星や地上ライダー観測によって上空数百mから数kmにかけてのエアロゾル分布と雲物理の関係解明を推進してきた。ところが海洋性エアロゾルの生成源である海面近傍（海面から海上数mまでの範囲）のシー Sprey 観測は国内ではあまり行われていない。本申請は台風のような強風・高波下における粒径分布と海面波砕や白波との関係を計測できるようなシー Sprey 装置の実用化をめざし、昨年度完成した試作機を海洋観測塔に設置し、夏季海上での連続観測試験を行う。海面近傍のシー Sprey 観測の実現に向けて段階的な試験観測を実施し、試作機の検証や精度の確認、高頻度観測（10Hz）化に伴う技術的な問題点の抽出と解決方法の検討を行うことが本研究の目的である。将来的に観測結果をシー Sprey のバルク式と照合し、ISEE気象学・海洋学研究室で運用している大気・海洋・波浪（CReSS-NHOES）結合数値シミュレーションの機能拡張に応用する予定である。

研究内容

H30年度は、所内担当教員の相木准教授と共同で開発した、宇宙地球環境研究所の共同利用機器である海上波しぶき光学粒子計（8粒径レンジ、10Hz）を用いて、和歌山県田辺湾湾口にある京都大学防災研究所白浜海象観測所管理の田辺中島高潮観測塔において連続観測試験を実施した。観測システムは完全独立方式で、DC鉛バッテリーを外部電源とし、測器筐体内部にデータロガー（メモリーカード）を内蔵し、測器回収時に蓋を開けて測定結果を解析した。

H31年度は、将来的に海塩粒子の鉛直フラックスを見積もるための測器再設計を行った。フラックスを見積もるためには【波しぶき光学粒子計】の隣に【超音波風速計】を設置し、粒子数と風速を10Hzの時間刻みで30分間測定し、両者の時系列の相関を計算する。これを実現するためには測器内蔵の時計の時刻同士を精密に同期する必要がある。本研究では次の3つのアプローチを比較検討し、最終的に3番目を採用するに至った。

- 1, 【波しぶき光学粒子計】の信号出力を【超音波風速計】の信号出力と同じ（1つの）データロガーで記録する
- 2, 【波しぶき光学粒子計】内蔵の時計と【超音波風速計】付属の時計の時刻を正確に合わせ、別々のデータロガーに記録する
- 3, 【波しぶき光学粒子計】内蔵の時計の時刻情報を【超音波風速計】付属のデータロガーに記録する（図2）

将来的に海洋観測船の塔上でフラックス測定を行う場合、アプローチ1が実現可能性かどうかを検証するために、新青丸航海（KS-18-13, 和歌山県沖11日間, PI: 東京大学大気海洋研究所・小松准教授）に参加した。船上で【超音波風速計】周辺のデータロガー・配線設備を調査したところ、【波しぶき光学粒子計】は8流計レンジあるので8本以上の信号線が必要なのに対し、【超音波風速計】データロガーの信号入力線には空きが数本しかない状況であった。また船上観測塔における測器設置においても、ケーブル類をできるだけ簡単にして、腐食や漏電を防ぐことが望まれることがわかった。一方、【波しぶき光学粒子計】側の事情としては既にAD変換回路が搭載されているところに、シリアル出力信号（1粒子に対して短いパルス1個）に直して外部のデータロガーに繋ぐのは、内蔵計算処理ソフトウェアの開発がさらに複雑になる可能性がある。これまで【波しぶき光学粒子計】の開発にあたり0.1秒あたり100万個のオーダーの粒子を数えられるよう内蔵ソフトウェアを丹念に改良してきた経緯があるため、計数処理に関する部分を複雑化することに重篤な懸念が生じた。以上の理由によりアプローチ1は採用しないことにした。

アプローチ2は、GPS時計基板を【波しぶき光学粒子計】に組み込むことで実現する可能性があったが、GPS時計基板の信号出力がシリアルであるのに対し、【波しぶき光学粒子計】に既に組み込まれているデータロガーのシリアル入力ポートの空きがないという問題があり中止とした。

最後にアプローチ3として、【波しぶき光学粒子計】に2芯ケーブルソケットを増設し、毎時00分からの30分間の測定の開始から終了時までDC5.0Vの電圧をかけ、アイドル時は無電圧とする案を採用した。この時刻パルスケーブルを【超音波風速計】側のデータロガーに接続することで、2つの測器の時計の時刻を同期することができる(図3)。この設計を用いて本年度は新しい【波しぶき光学粒子計】(4号機)を製作した。

成果発表

相木秀則、田中潔、根田昌典、馬場康之、藤田敏男(2018):海上波しぶき光学粒子計による波浪境界層観測:海面砕波と海洋性エアロゾル生成の時空間構造を捉える、日本地球惑星科学連合2018年大会:海洋と大気の波動・渦・循環力学(A-OS15)、2018年5月20日、幕張メッセ、千葉

https://confit.atlas.jp/guide/event/jpgu2018/session/AOS15_20PO1/detail

<https://confit.atlas.jp/guide/event-img/jpgu2018/AOS15-P01/public/pdf>

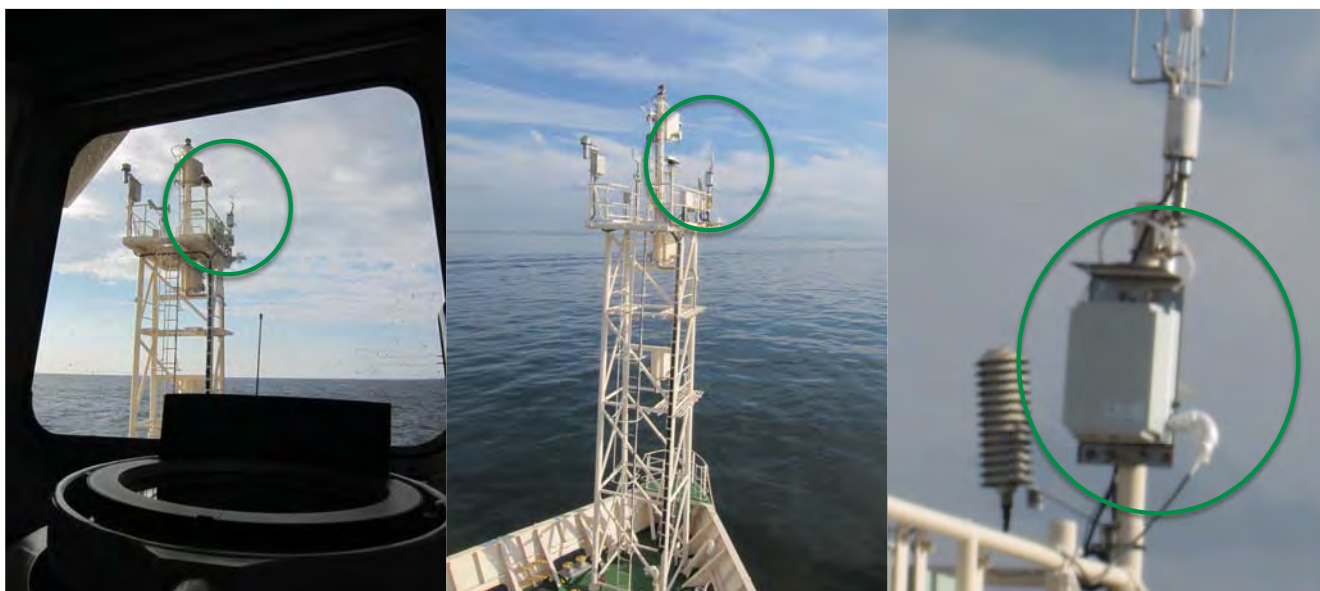


図1:新青丸(和歌山県沖KS-18-13航海)の船首観測塔に【海洋波しぶき光学粒子計】を取り付けた様子。

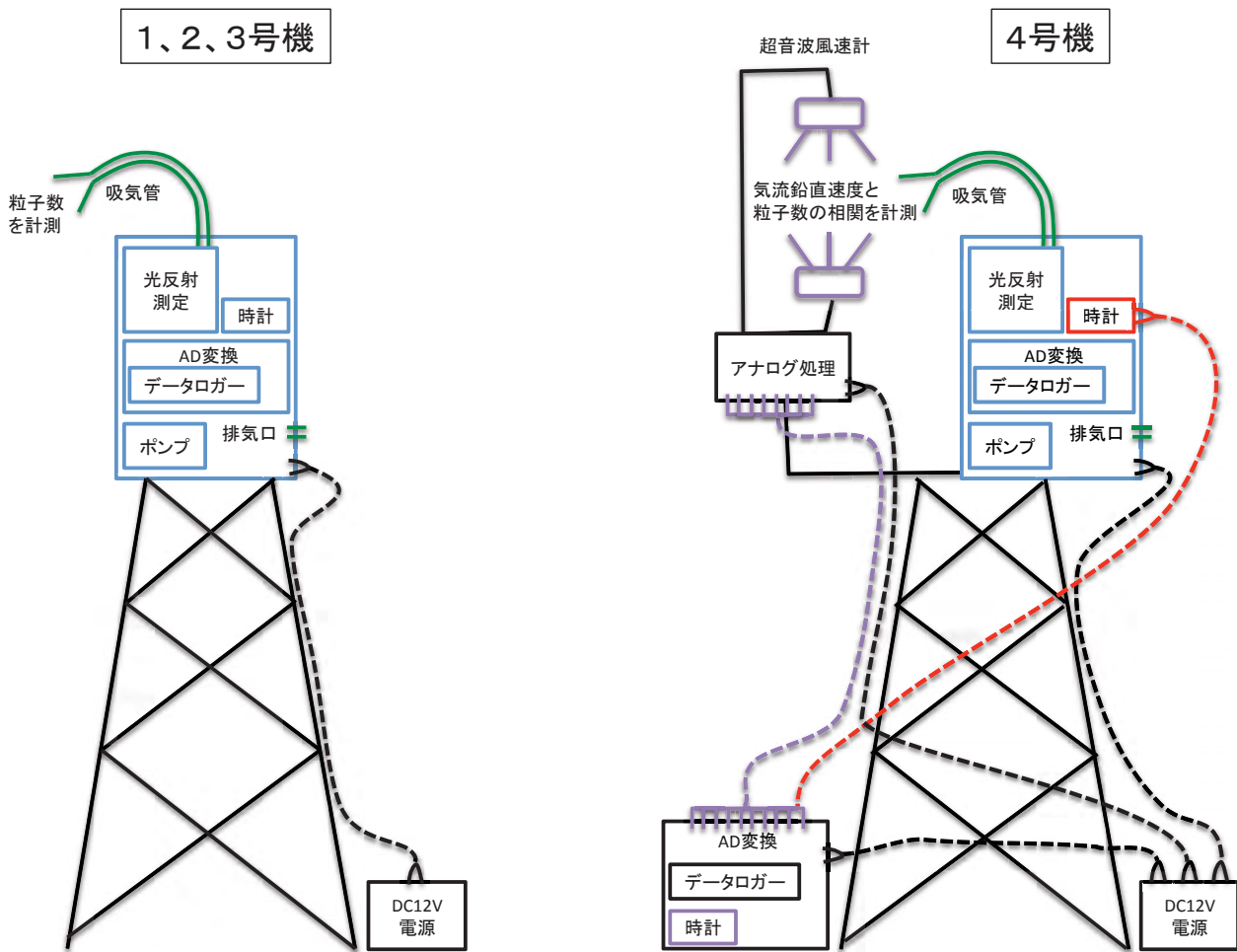


図2：【海洋波しぶき光学粒子計】と【超音波風速計】の信号出力を同期するための配線図（本文：アプローチ3を参照）。

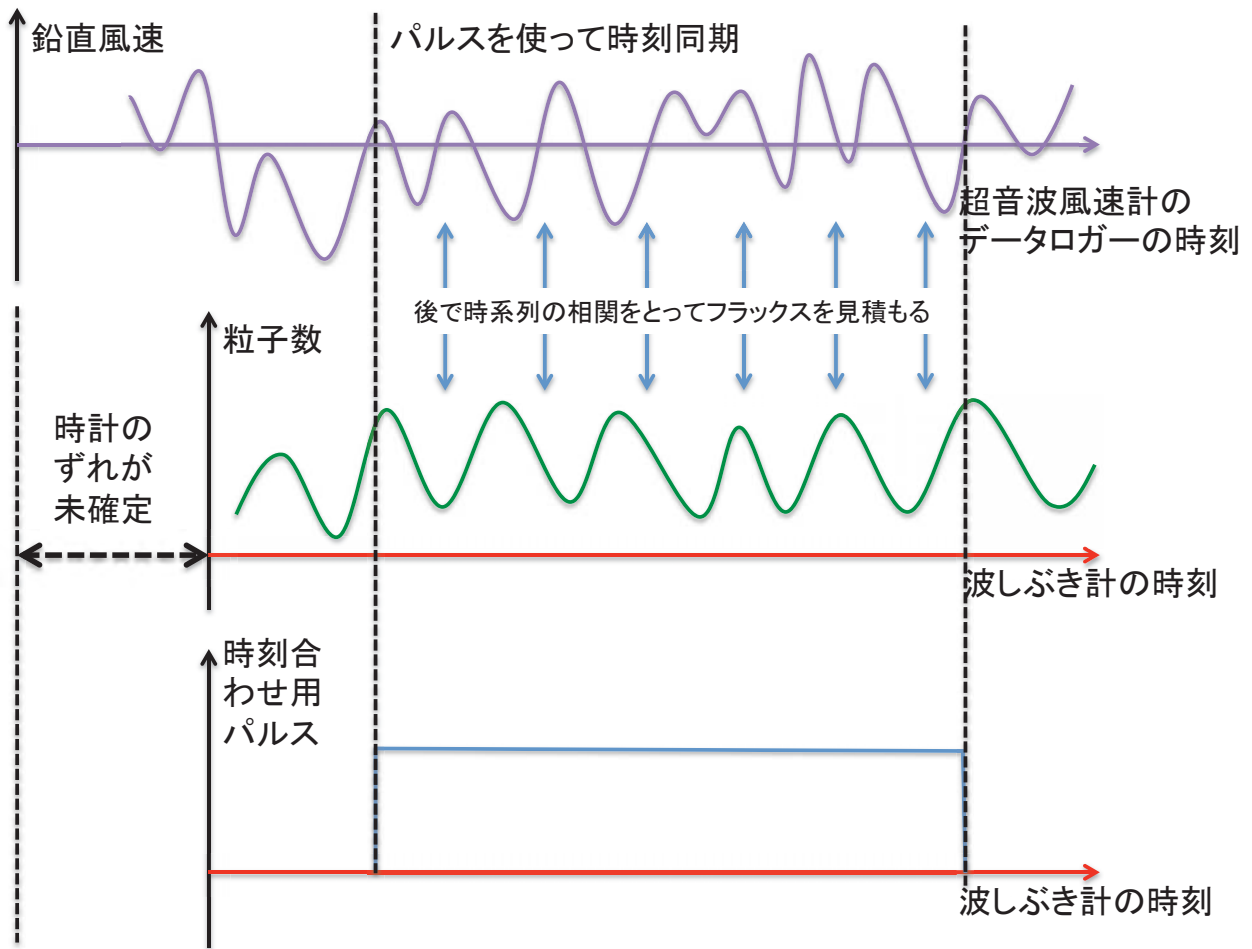


図 3 : 【海洋波しぶき光学粒子計】と【超音波風速計】の信号出力を同期するために必要な信号時系列の模式図 (本文 : アプローチ 3 を参照) .

日本の揺籃期地殻に関する年代的研究

Chronological study on the Japanese earth's crust in its infancy

代表者：佐藤興平（気象庁気象大学校）

1. 研究目的

日本の大地を構成する岩石や地層のほとんどは2億年よりも若い中生代以降のものである。しかし、その一部には5.5～2.5億年も前の古生代のものが含まれている。古い地質体の産出は散点的で、後の造山運動に捲き込まれて原形を留めていないものが多く、既存の年代測定法では形成年代を正確に知ることができなかった。本研究では、後生的な影響を受けにくいジルコンのU-Pb年代を求めて、日本の初期地殻形成史を解き明かすことを目的とする。既存のK-Ar法やRb-Sr法あるいはフィッシュン・トラック法による年代測定では、閉鎖温度が低いため2次的な熱的影響を完全に除外することが難しく、得られた結果は年代の上限を示すに過ぎないという限界があった。これに対して、名古屋大学で開発されたモナザイト・ジルコンのCHIME年代測定法は、ミクロン・オーダーの高分解能をもつ迅速な微小領域年代測定法として威力を発揮しつつあり、近年開発されたジルコンのLA-ICP-MSによる年代測定法は、空間分解能の点ではCHIME法に及ばないが、比較的若い年代も鉱物ごとの測定が可能になってきた。本研究では、これらの新手法を駆使して、関東山地の試料を中心としてジルコンの年代を求め、日本列島の地殻形成史をさぐる。

2. 研究方法

関東山地の花崗岩体や地層を中心に、既存の手法で年代付けされた試料あるいは年代不明の岩体から新たに採取した岩石からジルコンを分離し、名古屋大学大学院環境学研究科のLA-ICP-MSを用いてU-Pb年代を測定する。この手法はジルコン1粒ごとの年代測定が可能だけに、鉱物分離過程での汚染は絶対に避けなければならない。このため、岩石粉碎過程を含めて異質ジルコン混入の可能性を排除すべく細心の注意を払った。ジルコンの抽出はパンニング法によった。無作為に抽出した約100粒のジルコン結晶を接着剤でスライドガラスにマウントして研磨し、研磨面のCL(カソード・ルミネッセンス)画像を観察して、火成岩起源なのか捕獲結晶なのかを判定した。火成岩の年代を得るために主にジルコン結晶の外形に調和的なオシラトリー累帯構造を示す部分にレーザー・プローブ(径25 μ m)を当てて年代を測定したが、結晶の核部に見出された捕獲結晶についても可能な限り測定した。

3. 研究結果

今回検討対象とした年代不明の岩体は、ナップ・テクトニクス研究発祥の地である関東山地北縁部の下仁田地域で重要な位置を占めながら、破碎や変質によって信頼のおける年代値が得られていなかった時代不明の珪長質火成岩体およびそれらと共存する地層(南蛇井層)の砂岩類である。代表的な4試料(珪長質火山岩1, 凝灰質砂岩1, 砂岩2)について得られた年代は、約0.7億年前から約25億年前の広い範囲にわたる。約0.7億年前の珪長質火山岩は、昨年度の研究で明らかになった後期白亜紀の2期の火成活動のうちの新規活動に対応する。約15-25億年前の先カンブリア時代のジルコンが卓越する砂岩はアジア大陸に起源をもつことを物語る。約1億年前のジルコンが卓越する凝灰質砂岩は、これまでジュラ紀とされてきた地層の年代に修正を迫る結果となった。

4. 考察

関東山地北縁部は西南日本の外帯と内帯の境界をなす中央構造線の東方延長部にあたり、日本列島の生い立ちを探る重要な地域として長年研究が続けられてきたが、複雑な地質構造と岩石や地層の時代判定の難しさ故に、多くの謎が残されている。その中でも比較的大きくまとまった分布をしながら年代が不明であった火成岩体の年代が昨年度と今年度の研究で判明した。既存のデータも合わせて、この地域に(1)古生代ペルム紀、(2)中生代前期白亜紀、および(3)後期白亜紀のca. 95Ma、(4)後期白亜紀のca. 70Maの少なくとも4期の珪長質火成活動の記録が残されていることが確定した。今回新たに検討対象に加えた南蛇井層は、これまでジルコンのU-Pb年代について検討されたことがなく、初めての年代データとなった。約15-25億年前のジルコンが卓越する砂岩は、その主たる供給源が現在の日本列島ではなく遠く離れたアジア大陸にあったことを浮かび上がらせた。一方、ジュラ紀(145-

201Ma)と推定されてきた南蛇井層の堆積時期は、凝灰質砂岩について得られた ca. 100Ma の年代により、見直しを迫られることになった。測定試料を追加して、この地層の時空分布と碎屑物の供給源を確定する必要がある。

5. まとめ

今回検討した下仁田地域の珪長質火成岩体については、昨年度までの研究と合わせて、少なくとも4期の火成活動史が判明した。しかし、ジュラ紀とされた地層から約100Ma(約1億年前の白亜紀)の碎屑性ジルコンが見出されたことで時代や地質構造の見直しを迫られることになり、さらなる検討を要するという課題が浮かび上がってきた。

6. 引用文献

柴田 賢・高木秀雄(1989): 関東山地北部の花崗岩類の年代。同位体からみた中央構造線と棚倉構造線の関係。地質雑, vol. 95, 687-700.

佐藤興平・柴田 賢・内海 茂(2015): 関東山地北縁部の異地性岩塊や礫岩に含まれる珪長質火成岩類の年代: 跡倉ナップ実像解明の歴史と今後の課題。群馬県立自然史博物館研究報告, No. 19, 69-94.

佐藤興平・竹内 誠・鈴木和博・南 雅代・柴田 賢(2018): 関東山地北西縁下仁田地域に産する珪長質火成岩体のU-Pbジルコン年代。群馬県立自然史博物館研究報告, No. 22, 79-94.

CHIME年代測定による隠岐・島後片麻岩類の変成年代の推定 Metamorphic ages of gneisses in the Oki-Dogo Island using CHIME age dating

今山武志、岡山理科大学・自然科学研究所

1. はじめに

島根県の日本海沖に位置する隠岐・島後には、隠岐片麻岩とよばれる高温型の広域変成岩類が島北東部の半径約8 kmのほぼ円形の地域に分布している(山内ほか, 2009)。これらの変成岩類は、主にミグマタイト質片麻岩、泥質片麻岩、花崗岩質片麻岩、角閃岩などからなり、角閃岩相以上の変成作用を広域的に被っている。両輝石マフィック岩やスピネルやコランダムを含む泥質片麻岩なども報告されており、少なくとも一部の変成岩体の変成度は、グラニュライト相まで達している(Hoshino, 1979)。角閃岩相とグラニュライト相の変成作用は、変成時期の異なる複数変成作用、一つの変成作用におけるピーク時と後退時の記録あるいは原岩組成による鉱物組み合わせの違い(浜田ほか, 1996)などにより説明される。しかし、定量的な圧力-温度条件と変成年代の関連性は詳細には得られておらず、どちらの説が正しいのかは未だ不明である。Suzuki and Adachi (1998)によれば、隠岐片麻岩の広域的な変成作用は、約250Maにおきている。また、Tsutsumi et al. (2006)は、わずかに一点ではあるが、片麻岩のジルコンの変成リムから、 $236 \text{ Ma} \pm 3 \text{ Ma}$ の変成年代を得ている。しかし、これらの変成年代が、どの変成圧力-温度条件の時期を示しているのかは、明確ではない。そこで、本研究では、圧力-温度条件に関連する岩石組織と対応付けたCHIME年代測定を実施して、変成圧力-温度条件と変成年代の正確なリンクを行なう。

2. 試料と研究手法

隠岐・島後の野外調査を実施して、ミグマタイト質片麻岩や泥質片麻岩などの試料を採取した。これらの片麻岩類の代表的な鉱物組み合わせは、黒雲母+白雲母+石英+斜長石+カリ長石 ± ザクロ石 ± 珪線石であり、角閃岩相上部から一部グラニュライト相までの変成作用を被っていると推定される。隠岐島後の東郷川、銚子川から採集してきた4試料の片麻岩類について、偏光顕微鏡観察、各鉱物の定量化学組成分析、ザクロ石とモナズ石の組成マッピングを行なった。また、ザクロ石-黒雲母-斜長石-石英地質温度圧力計(Perchuk, 1985; Hoisch, 1990)により変成圧力温度条件を推定した。その後、モナズ石のマッピングと組織に基づいて、名古屋大学宇宙地球環境研究所にてCHIME年代を測定した。

3. 結果

隠岐片麻岩類のザクロ石の累帯組成構造は、コアでMg濃度が高く均質であり(M1)、包有物境界を挟んで内側リム(M2)から最外殻リム(M3)に向かいMg濃度が徐々に低くなる。このことから、隠岐片麻岩類のザクロ石は、少なくとも3回の変成作用により形成された可能性が高い。M1変成時とM3変成時の圧力温度条件は、ザクロ石のコアと最外殻リムの組成およびそれらと平衡とみなされる黒雲母や斜長石の組成を用いて計算した。その結果、推定したM1変成時条件は、東郷川試料で740-755 °C, 9.1-11.1 kbar, 銚子川試料で800-830 °C, 9.0-12.3 kbarであり、後者の変成度がやや高い。一方、M3変成時の圧力温度条件は、東郷川試料で508-654 °C, 2.1-6.6 kbar, 銚子川沿い試料で638-695 °C, 4.4-5.9 kbarであった。また、相

平衡計算から得られた東郷川試料の M1 時変成条件は, 740-755 °C, 11.0-11.5 kbar であり地質温度圧力計の結果と調和的である。加えて, 全岩組成からザクロ石のコアの組成を取り除いて計算した内側リムが成長したときの M2 時変成条件は, 740-820 °C, 7.0-10.5 kbar であった。

東郷川沿いの試料の大きなザクロ石斑晶コアに包有されるモナズ石の Y_2O_3 濃度は 1.7-2.2 wt. % であり, 1.78-2.12 Ga の原生代の CHIME 年代を示した。これらは, 約 1.83Ga と 2.00 Ga に年代ピークを示す。一方, ザクロ石斑晶リムや小さなザクロ石斑晶に包有されるモナズ石は, 原生代の年代に加えて約 259 Ma の年代値が得られ, 後者の Y_2O_3 濃度は相対的に低い。ザクロ石周辺部のモナズ石は, ペルム-三畳紀 (約 232-250 Ma) やジュラ紀 (162-168 Ma) の年代値が得られ, 後者は相対的に高い Y_2O_3 濃度を示す。これらの結果は, 隠岐片麻岩類は, ペルム-三畳紀の低圧型高温変成作用(M2)に加えて, 古原生代の中圧型高温変成作用(M1) やジュラ紀の後退変成作用(M3)を被っていることを示唆する。古原生代変成作用の存在は, 隠岐片麻岩類の原岩年代は, 従来推定されている古生代初期の年代よりも著しく古いことを意味する。

引用文献

- 浜田耕一・藤原奈都子・角替敏昭 (1996) 隠岐・島後の銿子・有木川流域に分布する隠岐変成岩の岩相記載と変成履歴。島根大学教育学部紀要 (自然科学), 30, 53-72.
- Hoisch, T. D. (1990) Empirical calibration of six geobarometers for the mineral assemblage quartz + muscovite + biotite + plagioclase + garnet. *Contributions to mineral and petrology*, v. 104. p. 225-234.
- Hoshino, M. (1979) Two-pyroxene amphibolites in Dogo, Oki islands, Shimane-ken, Japan. *Jour. Japan, Assoc. Min. Petr. Econ. Geol.*, 74, 87-99.
- Perchuk, L. L., Aranovich, L. Y., Podel'skii, K. K., Lavrant'eva, I. V., Gerasimov, V. Y., and Fed'kin, V. V. (1985) Precambrian granulites of the Aldan shield, eastern Siberia, USSR. *Journal of Metamorphic Geology*, 3, 265-310.
- Suzuki, K., Adachi, M. (1994) Middle Precambrian detrital monazite and zircon from the Hida gneiss on Oki-Dogo Island, Japan: their origin and implication for the correlation of basement gneiss of Southwest Japan and Korea. *Tectonophysics*, 235, 277-292.
- Tsutsumi, Y., Yokoyama, K., Horie, K., Terada, K., and Hidaka, H., 2006. Contrasting ages between isotopic chronometers in granulites: monazite dating and metamorphism in the Higo Complex, Japan. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, v. 101, p. 289-298.
- 山内靖喜・沢田順弘・高須 晃・小室裕明・村上 久・小林伸治・田山良一, 2009. 西郷地域の地質。地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 産総研地質調査総合センター, 121p.

学会発表

川端凌市・今山武志・加藤丈典. 隠岐片麻岩類の変成圧力温度条件と変成年代の推定: 古原生代高温変成作用の可能性について. 第 31 回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, 名古屋大学, 2019 年 1 月.

Kawabata, R., Imayama, T., and Kato, K.: Estimation of the Metamorphic P-T Condition and Age of the Oki Gneisses: Implication for the Paleoproterozoic High-Temperature Metamorphism. 地球惑星科学連合大会, 幕張メッセ, 2018 年 5 月.

琉球列島の地上レーダーと航空機を組み合わせた台風強度の最適推定方法の検討

Investigation of an optimal method to estimate typhoon intensity using an airplane and ground-based radars in the Ryukyu Islands

山田 広幸 (琉球大学理学部)

研究目的

2020年に計画される、琉球列島周辺の梅雨前線と台風に関する国際共同観測プロジェクト(PRECIP2020)に向け、航空機ドロップゾンデ観測と地上のドップラー気象レーダーを組み合わせ、台風の風速分布と中心気圧を精度良く推定する最適な方法を構築することを目的とする。北西太平洋における台風の位置と強度の推定は、海上の観測が乏しいため、主に静止気象衛星の画像を用いて行われるが、衛星による推定は主観を排除できないことと、強度の急激な変化に対応できない問題がある。このため、南西諸島で運用されるドップラーレーダーを用いて風速分布と中心気圧を推定することを目指す。レーダーで得られる風速分布は地球の曲率の関係で地表より上空の高度2kmのものになるため、航空機ドロップゾンデ観測で得られる気圧と風速の鉛直プロファイルをもとに、地上の風速・気圧に換算する方法を検討する。これらは台風の構造と強度の関係を理解するうえで役立つだけでなく、将来的には台風強度の推定値を予想進路上にある島や陸に対する早期警戒情報として活用することが期待される。

研究方法

ドップラー速度データを用いて高度2kmの風速分布を推定し、次に傾度風平衡を仮定して中心気圧を推定する。中心気圧の推定には、中心から離れた場所の気圧の観測値が必要であるが、陸地の観測点から離れた場所では気圧の観測値を得ることが難しい。本研究では航空機ドロップゾンデ観測で得られる気圧を基準に中心気圧の推定を行う。最大風速に関しては、高度2kmの推定値から地上の風速を得る必要がある。本研究ではドロップゾンデ観測により得られる風の鉛直分布データを用いて2つの高度間の風速の関係を経験的に求め、高度2kmの推定分布をもとに地上の最大風速の水平分布を推定する。航空機ドロップゾンデのデータは、科研費基盤研究(S)「豪雨と暴風をもたらす台風の力学的・熱力学的・雲物理学的構造の量的解析」(研究代表者:坪木和久)の航空機観測で得られるものを使用する。本年度は特に、高度2kmと地上の間の風速分布について調査を行った。

研究結果と今後の課題

2017年台風21号の最盛期におけるドロップゾンデデータを用いて風速の鉛直プロファイルを作成し、高度2kmと地上の風速分布を調べた結果、高度0.5~2.0kmの間での変動は小さく、高度0.5km以下の大気境界層内での風速の減少が多く事例で見られた。これは、過去の研究で指摘されている地表摩擦の影響によるものである。特に、台風強度の指標となる、最大風速が得られる壁雲では、風速が地上と高度1.0kmの間で約15m/sの違いがみられた。これらの結果をもとに、2kmと地表との間での風速の減少率(係数)を算出す

ることになるが、より多くの事例でデータを取得する必要がある。

経費の使途

本研究の経費は、航空機観測専門委員会の経費としてイリノイ大学の Deanna Hence 博士を招聘する旅費に流用したため、経費の使用はない。

成果発表（論文・著書）

山田 広幸, 2018: 世界気象カレンダー2019, (10月担当), ジャムハウス, pp 28.

Wada, A., S. Kanada, and **H. Yamada**, 2018: Effect of air-sea environmental conditions and interfacial processes on extremely intense typhoon Haiyan (2013). *J. Geophys. Res. (Atmospheres)*, **123**, 10.1029/2017JD028139.

山田 広幸, 2018: 台風についてわかっていることと知らないこと, (筆保弘徳 編著, 第1章担当), ベレ出版, pp 22-49. (8月)

Ito, K., **H. Yamada**, M. Yamaguchi, T. Nakazawa, N. Nagahama, K. Shimizu, T. Ohigashi, T. Shinoda, and K. Tsuboki, 2018: Analysis and forecast using dropsonde data from the inner-core region of Tropical Cyclone Lan (2017) obtained during the first aircraft missions of T-PARCII. *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, **14**, 105-110.

成果発表（口頭発表）

Yamada, H., 2018: New observation strategies for typhoon intensity over the western North Pacific. 9th World Meteorological Organization International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC-IX), Honolulu, Hawaii, 12月4日.

Yamada, H., 2018: New observation strategies for typhoon intensity over the western North Pacific. APEC Research Center for Typhoon and Society 2018 Workshop, Taipei, Taiwan, 11月26日.

Yamada, H., K. Tsuboki, N. Nagahama, K. Shimizu, T. Ohigashi, T. Shinoda, K. Ito, M. Yamaguchi, and T. Nakazawa, 2018: Double Warm-Core Structure of Typhoon Lan (2017) Observed by Dropsondes during T-PARCII. AOGS 15th Annual Meeting, Honolulu, Hawaii, 6月4日.

山田 広幸、坪木 和久、長浜 則夫、清水 健作、大東 忠保、篠田 太郎、伊藤 耕介、山口宗彦、中澤 哲夫, 2018: 民間ジェット機を利用して台風の強度測定を継続して行うための検討. 日本地球惑星科学連合 2018年大会, 幕張メッセ, 千葉県千葉市, 5月22日.

Yamada, H., K. Tsuboki, N. Nagahama, K. Shimizu, T. Ohigashi, T. Shinoda, and K. Ito, 2018: Double warm-core structure of Typhoon Lan (2017) observed by dropsondes during T-PARCII. JpGU meeting, Makuhari Messe, Chiba, Japan. 5月23日.

山田 広幸, 坪木 和久, 篠田 太郎, 長浜 則夫, 清水 健作, 大東 忠保, 伊藤 耕介, 中澤 哲夫, 山口 宗彦, 2018: 航空機観測で捉えた2017年台風第21号の二重暖気核構造. 日本気象学会春季大会, つくば国際会議場, 茨城県つくば市, 5月16日.

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

1.研究目的

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

2.研究方法

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

3.活動報告

3.1 宇宙天気IPの紹介

第62回宇宙科学技術連合講演会の宇宙教育セッションにて「宇宙天気災害から社会インフラを護る～宇宙天気インタプリタ～」と題し、宇宙天気IP構想の紹介を行い、聴衆と活発な議論を行った。宇宙天気インタプリタ以前に非宇宙天気コミュニティにおける宇宙天気の認知度が低いことが明らかになった。

3.2 宇宙天気防災アウトリーチ活動

宇宙天気による災害に関する一般向けの講演活動やコラムの執筆活動を行った。本活動は講演地の地元メディアに取り上げられた（図1参照）。地道なアウトリーチ活動により、草の根から宇宙天気の認知度向上に努めている。



図1 岩手県の地元紙 東海新報の記事（2018年10月16日朝刊）

3.3 宇宙天気が社会インフラに対する影響に関する研究

宇宙天気災害の原因となる現象の分類とその影響を整理し、社会インフラへの影響フロー、現象の規模毎の発生確率等を明らかにした（図2～図4に例を示す）。本研究は、共同研究者の玉置が放送大学大学院修士論文「宇宙天気現象の社会インフラに対する影響に関する研究～ハロウィン・イベント後の宇宙天気災害の整理～」にてまとめた。²⁾

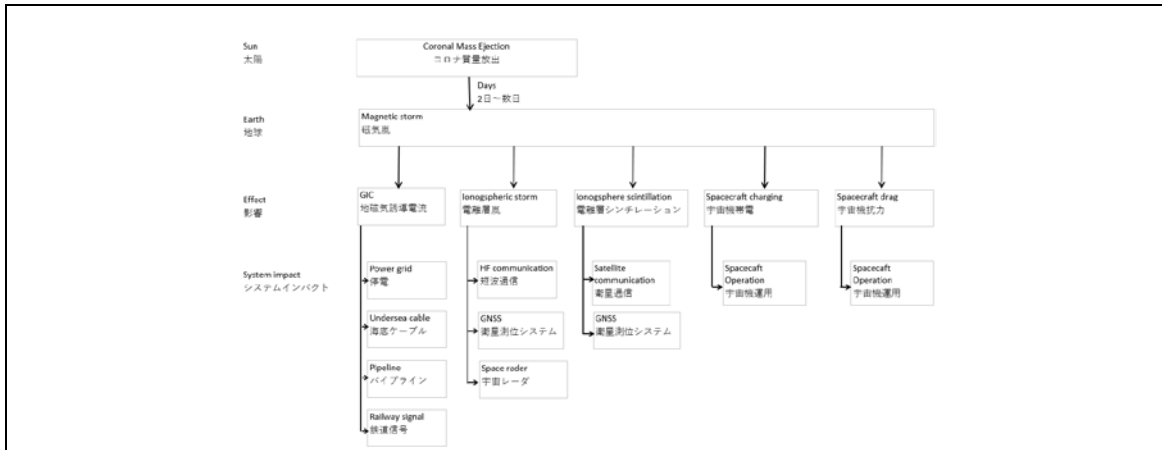


図2 宇宙天気が社会インフラに与える影響フローの例

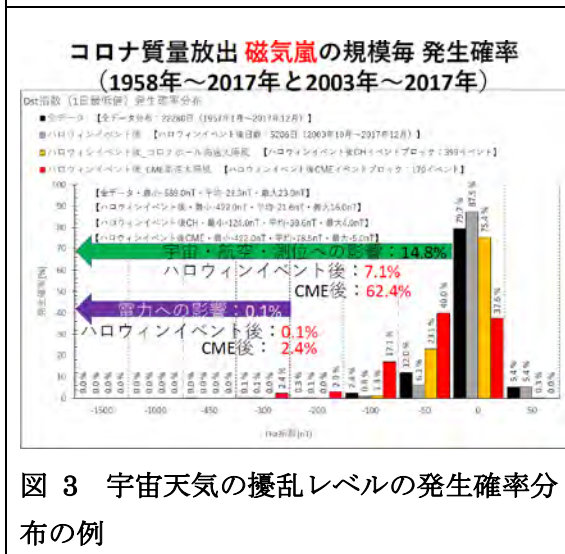


図3 宇宙天気の擾乱レベルの発生確率分布の例

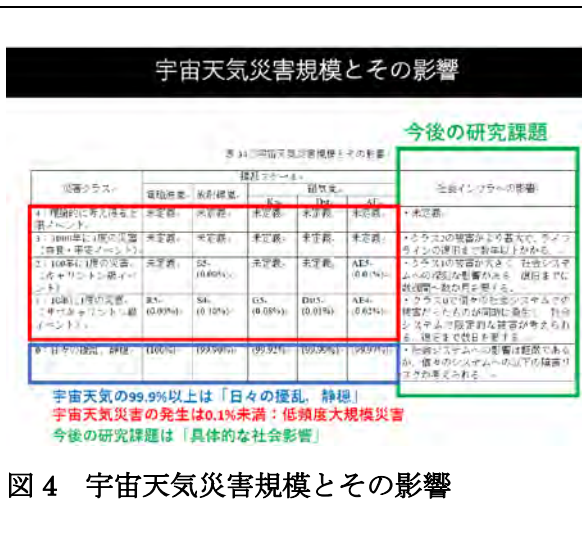


図4 宇宙天気災害規模とその影響

4. 成果論文

- 1) 玉置晋・野澤恵., 宇宙天気災害から社会インフラを守る～宇宙天気インタプリタ～、第62回宇宙科学技術連合講演会講演集、1K07 (JSASS-2018-4241)、2018年。
- 2) 玉置晋、宇宙天気現象の社会インフラに対する影響に関する研究～ハロウィン・イベント後の宇宙天気災害の整理～、放送大学大学院修士論文、2019年。

光と電波を組み合わせた極冠域電離圏の 3 次元観測

3D observations of polar cap ionosphere with radar and optics

細川 敬祐 (電気通信大学大学院情報理工学研究科)

★ 研究の概要

2005 年 1 月より、極冠域に位置するカナダのレゾリュートベイ (磁気緯度 82.9 度) において、多波長高感度全天イメージャ (Optical Mesosphere Thermosphere Imagers: OMTIs) を用いた夜間大気光観測を実施している。今年度も、SRI International, ボストン大学, サスカチュワン大学などと共同で Resolute Bay Incoherent Scatter Radar (RISR-N) と、レゾリュートベイ OMTIs 全天イメージャによる「光と電波を組み合わせた極冠域電離圏の 3 次元観測」を実施した。これらに加える形で、2011 年冬季より、京都大学/電気通信大学がノルウェーのスバルバル諸島で運用している全天大気光イメージャとの広域同時観測を実施し、極冠パッチや極冠オーロラの広域イメージングに取り組んでいる。スバルバルの全天大気光イメージャについても、ネットワーク経由での遠隔操作により、冬季の連続観測が問題なく実施できている。今年度は、冬至近くの期間に、557.7 nm と 630.0 nm の観測を短い間隔で繰り返す撮像モードを用いた観測を行い、欧州非干渉散乱レーダーとの同時観測を実施した。2015 年 10 月からは、レゾリュートベイのさらに北に位置するイウレカ (磁気緯度 89 度) において新規の大気光イメージャ観測を開始している。2017 年 12 月にファンの故障に伴って冷却性能が低下し、光学観測ができない状態になったため、現地で観測所のメンテナンスをしている Toronto 大学の Pierre Fogal 博士と連絡を取りながら、修理のためにカメラを日本に積み戻す作業を行い、メーカーによるファンの交換作業を実施した。2019 年 10 月に、修理が完了したカメラをイウレカに持ち込み、観測システムに復帰させる作業を行った。以降、連続的に観測を行うことができている。上述のように、イウレカについて機器のトラブルがあり、連続観測が安定的にできていない時期が短期間生じているが、北米域の 2 地点 (レゾリュートベイ, イウレカ) とヨーロッパ域 (スバルバル) の 1 地点の計 3 地点からの極冠域電離圏大気光計測を実施した希少な広域データが揃いつつある。現在、これらの光学観測機器と、Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN) や EISCAT, AMISR (RISR-N) などの非干渉散乱レーダー、GPS 全電子数観測といった電波による電離圏観測を組み合わせ、極冠域超高層大気現象の構造を広域に、かつ 3 次元的に明らかにするための研究を進めている。

★ 研究成果

イウレカにおいて得られた3年分のデータを用いて、極冠パッチの輝度値のUTに対する依存性を調べたところ、イウレカのローカルタイムが夜の時間帯には、輝度値が小さい極冠パッチが多く発生するのに対して、昼側では極冠パッチの発生数は少ないが輝度値が高いものが多いことがわかった。また、イウレカでは、惑星間空間磁場 (Interplanetary Magnetic Field: IMF) の東西成分 (By 成分) が正の時に、極冠パッチが約2倍の頻度で発生していることも明らかになった。これは、IMF By が正の時には、夕方側の高い電子密度領域からプラズマを輸送するような極域対流パターンが形成されていることによって説明できると考えられる。この仮説の正当性を、SuperDARN レーダーのデータを統計的に解析することによって検証した。これらの結果は、極冠パッチの生成が、日照域の空間分布と極域対流の構造の双方に依存していることを強く示唆する。この結果は、地球電磁気・地球惑星圏学会において永田らによって報告された [1]。

イウレカにおける観測を新たに始めたことで、極冠オーロラ近傍の電流系、特に沿磁力線の空間構造に関しても理解を深めることができた。イウレカ、レゾリュートベイにおいて、北向きの IMF のときに観測された Sun-aligned arc について、上空を飛行する Swarm 衛星搭載の磁力計との同時観測事例を解析し、複数機の磁場変動データからアンペアの法則の積分形を用いて算出された沿磁力線電流が光学観測で見られるアークの構造と良く整合することを示した。この結果を受けて、複数機の編隊飛行衛星による磁場観測データを用いた沿磁力線電流の統計解析を実施し、北向き IMF 時には極冠域において細かい沿磁力線電流が発生していることが明らかになった。これらの沿磁力線電流は、そのほとんどが Sun-aligned arc に関係しているものと考えられる。この結果は、地球電磁気・地球惑星圏学会において山内らによって報告された [2]。

これらに加え、レゾリュートベイと南極における地上光学観測、Swarm 衛星による電子密度計測を統計的に処理することによって、極冠パッチの発生頻度がターミネータとカスピの相対的な位置関係によって決まることを明らかにした。この結果は、香川らによって、地球電磁気・地球惑星圏学会、および AGU Fall Meeting において報告された [3, 4]。

★ 学会発表, 論文公表実績等

1. 永田倫太郎, 細川敬祐, 塩川和夫, 大塚雄一, Relationship between the By component of Interplanetary Magnetic Field and occurrence of polar cap patches, 地球電磁気・地球惑星圏学会 (SGEPSS) 第144回総会及び講演会, 名古屋大学, 2018年11月25日
2. 山内淑寛, 細川敬祐, Ohtani Shinichi, 塩川和夫, 大塚雄一, Swarm 衛星を用いた北半球極冠域の沿磁力線電流の統計解析, 地球電磁気・地球惑星圏学会 (SGEPSS) 第144回総会及び講演会, 名古屋大学, 2018年11月25日
3. 香川亜希子, 細川敬祐, 小川泰信, 門倉昭, 海老原祐輔, 陣英克, 塩川和夫, 大塚雄一, Investigation of inter hemispheric asymmetry of polar cap patch occurrence, 地球電磁気・地球惑星圏学会 (SGEPSS) 第144回総会及び講演会, 名古屋大学, 2018年11月25日
4. Kagawa A., K. Hosokawa, Y. Ogawa, A. Kadokura, Y. Ebihara, H. Jin, K. Shiokawa and Y. Otsuka, Interhemispheric asymmetry of polar cap patches: Effect of offset between the geographic and magnetic poles, American Geophysical Union (AGU Fall Meeting), Dec 14, 2018, Washington, D.C.

あらせ衛星を用いた地球内部磁気圏リングカレント
イオン圧力変動に関する研究

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

桂華邦裕、東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

研究目的

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

研究方法・研究結果

本研究では、あらせ衛星搭載MEP-i粒子検出器で得られたイオンデータ (10-180 keV/q) を用いて、あらせ衛星が2017年に観測した6つの磁気嵐の主相における、水素イオンと酸素イオンのエネルギー密度比の空間分布を調べた。エネルギー密度比は平均的には0.3から1.0の間で、過去の衛星観測と大きな差異は見られなかった。一方で、地心距離に依存する傾向が見られた。特にL値が4より小さい深内部磁気圏では、エネルギー密度比が1.0を大きく超え、5から10に達する場合があった。また、L値が6付近の近地球プラズマシートに近い領域でもエネルギー密度比が1を超える粒子注入(インジェクション)が見られた。

考察

Keika et al. [2018]は、今回と同じ磁気嵐について、深内部磁気圏まで侵入したイオンは主に断熱的に輸送されていることを示した。イオンが輸送中に地球ジオコロナと衝突して消失する(電荷交換によって電荷を失い中性化する)時間スケールは、~50 keV以下では酸素イオンが水素イオンよりも1桁近く長い。深内部磁気圏でエネルギー密度比が極端に大きくなる理由は、断熱輸送中に水素イオンがより早く消失するためと考えられる。一方、大きいL値域の高いエネルギー密度比は、サブストーム活動などに伴い効率的に加速を受けた酸素イオンが内部磁気圏圧力増加に影響を与えていることを示唆している。

成果発表

- Keika, K., et al. (2018). Ion energies dominating energy density in the inner magnetosphere: Spatial distributions and composition, observed by Arase/MEP-i. *Geophysical Research Letters*, 45. doi: 10.1029/2018GL080047
- Keika, K., Mass and Charge Dependent Characteristics of Earth's Magnetospheric Plasma, 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, Kanazawa, Ishikawa, November 12, 2018.
- Keika, K., et al., Contribution from proton and oxygen ions to plasma pressure in the Earth's inner magnetosphere: Arase (ERG) observations, 2nd URSI AT-RASC meeting, Gran Canaria, May 28, 2018.
- Keika, K., et al., Spatial distribution of the contributions from electrons, protons, and oxygen ions to energy density in the inner magnetosphere, JpGU 2018 meeting, Makuhari Messe, Chiba, May 22, 2018.

グローバルモデルと素過程シミュレーションによる地球内部磁気圏での波動粒子相互作用の研究
Study of wave-particle interactions in the inner magnetosphere by global model and PIC simulations

加藤 雄人、東北大学 大学院理学研究科

・研究目的

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

・研究方法

内部磁気圏赤道領域におけるkeV帯の電子のダイナミクスを解くグローバルモデルと、PIC法を用いて波動粒子相互作用を解き進める素過程シミュレーションとの連携計算を実施する。具体的な連携計算としては、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（連携計算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（連携計算2）とを検討する。さらに、モデルの計算結果を衛星観測結果と比較することにより、本手法の有効性を検証する。本課題で提案する手法により、内部磁気圏においてコーラス放射の励起過程ならびに相対論的電子加速の生じる領域の時間・空間発展を定量的に議論することが可能となる。

・研究結果

3年間の研究計画として実施された本研究課題の成果として、第一に、コーラス放射の発生と非線形効果の発生に関わる波動振幅閾値の計算モジュールを開発したことが挙げられる（連携計算1）。このモジュールをグローバルモデルに組み込んで実施されたテスト計算では、ホイッスラーモード波動の線形成長率とともに閾値を計算することで、コーラ

ス放射が発生しうる領域と波動スペクトルの考察に資する結果が得られることが示された。第二に、グローバルモデルの計算結果を初期値として素過程シミュレーションを実施する手法を確立したことが挙げられる。これにより、宇宙天気現象時の内部磁気圏を対象とした連携計算を実施することが可能となった（連携計算2）。

さらに、高エネルギー電子の初期速度分布に与える温度異方性と数密度を広いパラメータレンジでサーベイ計算を実施した結果について整理しまとめたことも重要な成果となった。素過程シミュレーションを様々な初期条件を用いて実施して、コーラス放射の発生条件に関わるパラメータを定量的に明らかとした。この成果に基づいて、グローバルモデルの結果から得られる内部磁気圏での高エネルギー電子フラックスならびにホイッスラーモード波動の線形成長率の空間分布から、どの領域でコーラス放射が発生し得るかの評価に用いることができると期待される。

本共同研究により開発された連携計算手法を、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。2019年度より開始する共同研究課題ではこの課題に取り組み、衛星観測結果との比較に重点を置いて、モデル計算結果の有効性を検証することを計画している。

GOSAT検証のための陸別観測所におけるエアロゾル・雲のライダー観測
Lidar observations of aerosols and clouds at Rikubetsu
observatory as the validation for GOSAT

柴田隆, 名古屋大学・環境学研究所
内野修, 国立環境研究所

目的

2009年1月に打ち上げられた温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」(GOSAT)は、搭載されたフーリエ変換分光器(FTS)で測定された地球からの放射スペクトルより、二酸化炭素やメタンなどの温室効果気体の濃度分布を求める。濃度を導出する際、大気中に存在する粒子状物質(エアロゾルや雲)は濃度の精度を大きく左右する。このため、衛星観測に与えるエアロゾルや雲の影響を正しく評価するには、これらの実測データが必須である。本研究はGOSAT衛星の検証のため、エアロゾルと雲を観測するために、ライダーを陸別観測所に設置し、これらの高度分布を観測することを目的とする。

方法

観測は検証に晴天率が高く、その他好立地条件を満たす陸別観測所にライダーを設置し、衛星が上空を通過するタイミング(三日に一度、午後1時)に合わせてその前後2時間、合計4時間観測して、エアロゾルや雲の高度分布を求める。観測所に設置したライダーはNd:YAGレーザを光源とする2波長のMie偏光ライダーで、受信系は平行偏光成分を強弱2系統で受信することによりダイナミックレンジを1桁以上改善している。測定はPCで自動制御されるが、レーザの電源投入と制御プログラムの実行開始は手動で行う必要があり、ネットワークを介して遠隔操作を行う。ライダー観測はネットワークを介して行うが昨年度から主な操作は国立環境研究所から操作するような体制とした。

結果

昨年度に引き続き観測を続行し、2018年全体で約80日の観測を実施し、その内の約半分は衛星通過日であった。GOSAT衛星の検証のためのデータを提供し続けている。

1. 研究目的

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

2. 研究方法

研究の方法としては複数考えられるが、今年度は、NICTで運用している太陽風予測シミュレーション(SUSAN00)によってCMEが惑星間空間を伝搬していく様子を計算し、その結果を用いて疑似的にIPS観測を作り出し、実際のIPS観測データとの比較を行った。

3. 研究成果

本研究では、2017年9月5日にX9.3フレアに伴って発生したCMEをターゲットとして、4種類のCME初期速度(1,000、1,500、2,000、2,500 km/s)でのシミュレーションを行い、疑似IPSデータと観測データとの比較を行った。その結果、IPS観測データを最も良く再現するのは初期速度を1,500km/sとして計算したものであることが分かった。この結果は、複数の初期条件を用いて同時にシミュレーションを行い、誤差の情報などを含んだ予報を行うアンサンブル予報システム開発の第一歩として、重要な結果と言える。

4. 成果発表

① 誌上発表

-Iwai, K., Shiota, D., Tokumaru, M., Fujiki, K., Den, M., and Kubo, Y., Development of a coronal mass ejection arrival time forecasting system using interplanetary scintillation observations, Submitted for publication in EPS

② 口頭発表

-Iwai, K., Shiota, D., Tokumaru, M., Fujiki, K., Den, M., and Kubo, Y., Development of space weather forecast syst

em using interplanetary scintillation (IPS) observations, The 3rd PSTEP International Symposium (PSTEP-3), May 16-18, 2018, Koganei, Japan

-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を用いたデータ同化型太陽嵐到来予測モデルの開発, 日本天文学会2018年秋季年会, 9月21日, 兵庫県立大学

-岩井一正, 塩田大幸, 徳丸宗利, 藤木謙一, 田光江, 久保勇樹, 惑星間空間シンチレーション観測を用いた内部太陽圏の可視化と太陽嵐到来予測, 第144回地球電磁気・地球惑星圏学会, 11月26日, 名古屋大学

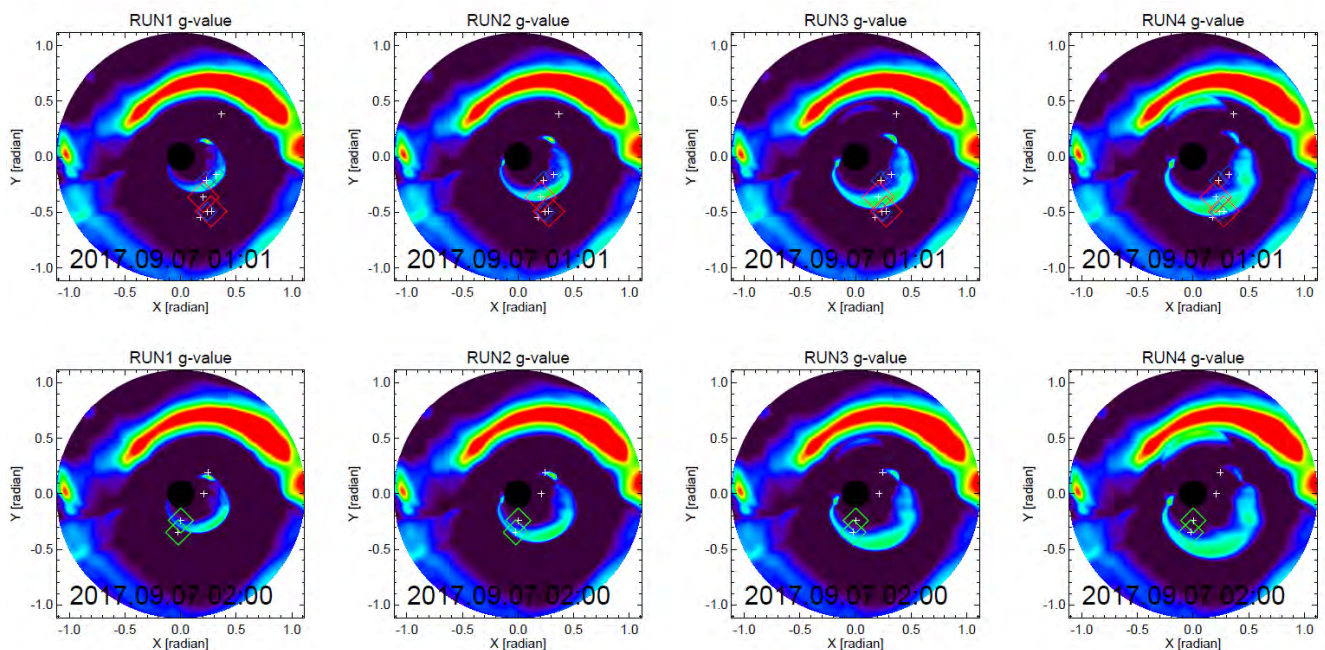
-岩井一正, データ同化シミュレーションによる内部太陽圏の可視化, PSTEPモデル研究会

-岩井一正, 塩田大幸, 徳丸宗利, 藤木謙一, 田光江, 久保勇樹, データ同化シミュレーションによる内部太陽圏の可視化, 太陽研究者連絡会シンポジウム, 2019年2月20日, 名古屋大学

-Iwai, K., Shiota, D., Tokumaru, M., Fujiki, K., Den, M., and Kubo, Y., Development of coronal mass ejection arrival time forecasting system using interplanetary scintillation observations, The 1st International ISEE symposium, Feb. 25, 2019, Nagoya University, Japan

-Shiota Daikou, Three-dimensional MHD modeling of solar corona and inner heliosphere for space weather forecast, International ISEE symposium "Recent progress in heliospheric physics by direct measurements of unexplored space plasmas", Feb. 2019, Nagoya Univ., Japan

-塩田大幸, 岩井一正, 井上諭, 草野完也, 八代誠司, 松本倫明, 太陽圏モデルの取り組み, PSTEP・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」, 2019年1月, 小金井



CME の初期速度を 1,000、1,500、2,000、2,500 km/s の 4 種類を仮定して計算した、疑似 IPS データと IPS 観測データの比較。RUN2 (1,500 km/s) が最も良く IPS 観測を再現している。

北ユーラシアにおける降水の年々変動に対する大気と陸面の役割
Roles of atmosphere and land processes on interannual
variation of precipitation over Northern Eurasia

佐藤友徳 北海道大学大学院地球環境科学研究院

1. 背景と研究目的

ユーラシア大陸北部は地球規模の水・エネルギー循環において極めて重要な地域である。このうち、北東アジア地域は半乾燥地域であるにも関わらず、夏季を中心に発達した積雲対流がしばしば発生し、強い降水が観測されている。このような積雲対流は不安定成層下で発生しやすいことが知られているが、陸面状態がどのように関与しているのか分かっていない。そこで本研究では、北東アジア地域で発生する深い積雲対流と陸面状態との関係を明らかにすることを目的とする。

2. 研究方法

本研究では、静止気象衛星(GMS-5、GOES-9、MTSAT-1R、MTSAT-2、Himawari-8)を用いて、メソ対流系(MCS)を客観的に抽出した。さらに、MCSが発生した地点において、MCSの発生数時間前における地温分布の特徴を調べた。解析期間は、1996年から2018年までの6月から8月である。解析手法の詳細はTeramura et al. (2019)を参照されたい。

3. 結果

図1にMCSの発生位置の地理的分布と発生日の午前10時における地温の標準偏差($\sigma\text{LST}_{\text{BB}}$)を示す。標準偏差はMCS発生地点の周囲0.35度四方の地温データを用いて算出しており、 $\sigma\text{LST}_{\text{BB}}$ が大きいほど地温が空間的に不均一に分布していることを表す(図1a)。モンゴル東部と中国東部を比較すると、MCS発生日の $\sigma\text{LST}_{\text{BB}}$ はモンゴル東部で高く、中国東部で低い傾向があるが、これは両地域の $\sigma\text{LST}_{\text{BB}}$ の気候値を反映している可能性がある。そこで、図1bではMCS発生日の $\sigma\text{LST}_{\text{BB}}$ が各地点における $\sigma\text{LST}_{\text{BB}}$ のうち上位、中位、下位のどの階級に属しているかを、それぞれ赤点、黒点、青点で示した。モンゴル東部ではMCS発生日における $\sigma\text{LST}_{\text{BB}}$ は通常よりも高い場合(赤点)が多いことが分かる。赤点と青点の数の比を2.5度格子内で算出した結果が図1cである。モンゴル東部では、赤点は青点のおよそ2倍であり、地温の空間不均一性が強くなるにつれて、MCSの発生確率が増加していることが分かる。一方、中国東部では、赤点と青点の比はほぼ1であり、地温の不均一性はMCSの発生確率に影響を与えていないことが分かった。

4. まとめと考察

静止気象衛星データから客観的に検出されたMCSのデータベースを用いて統計解析を行うことで、MCSの発生確率が地温の空間分布と関係していることが示された。一般的にMCSの発生は大気総観場に強く依存するため、トラフや前線の通過を診断することでMCSの発生可能性を総観スケールで評価することは可能である。本研究で明らかにな

った陸面状態がMCSの発生確率に与える影響は、総観規模よりも小さな空間スケールでMCSが発生しやすい場所を特定する際の手がかりとなる可能性がある。一般的な短時間降水の予報では、下層風の収束や水蒸気量の増加など、対流活動の前兆現象であるメソスケール循環を観測によって捕えることが重要である。予報モデルで陸面諸量を考慮することにより、メソ対流系が発生・発達しやすい場所をメソスケール循環が生じる前に特定することが可能になるなど、本成果の応用が期待される。

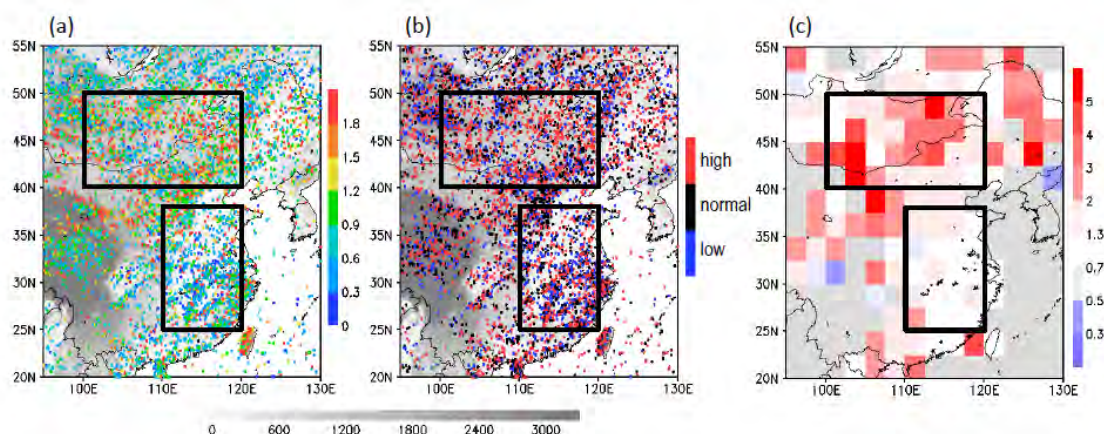


図1: (a)MCSの発生位置の分布と発生日の午前10時における地温空間分布の標準偏差 ($\sigma_{LST_{BB}}$)。 (b) $\sigma_{LST_{BB}}$ の全サンプルに対するMCS発生日における $\sigma_{LST_{BB}}$ の階級。 (c) MCS発生確率の地温空間不均一性に対する感度。

成果発表

- Erdenebat, E. and T. Sato, 2018: Role of soil moisture-atmosphere feedback during high temperature events in 2002 over North east Eurasia. *Progress in Earth and Planetary Science*, 5:37, DOI:<https://doi.org/10.1186/s40645-018-0195-4>
- Sato, T., E. Erdenebat, and T. Nakamura, 2018: Investigating a possible contribution of land surface processes on extreme hot event in Northeast Eurasia in recent summer. 8th GEWEX Open Science Conference, (Canmore, 2018.05.07)
- Teramura, H., T. Sato, and K. Tamura, 2019: Observed evidence of enhanced probability of mesoscale convective system initiations due to land surface heterogeneity in semiarid East Asia. Submitted.
- 佐藤友徳, 中村 哲, エルデンバト エンフバト, 寺村 大輝, 2019: 総観気象と大気-陸面相互作用, *低温科学*, 77, 印刷中.
- 寺村大輝, 佐藤友徳, 2018: 北東アジア半乾燥地域におけるメソ対流系の発達に対する大気と陸面の寄与. 日本気象学会2018年秋季大会. (仙台, 2018.10.31)

太陽圏における銀河宇宙線伝播の研究
Study on Galactic Cosmic Ray Propagation in the Heliosphere

田中公一、広島市立大学・情報科学研究科

【研究目的】

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

【研究方法】

内部太陽圏において太陽活動の影響を受けるエネルギーの低い銀河宇宙線は、IMF との相互作用などにより複雑な流れを形成している。これを地球上で観測すると、さまざまな宇宙線の異方性として観測される。このような宇宙線の流れは、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観測装置を用いて行う宇宙線観測により、異方性やモジュレーション解析を施すことによって、宇宙線の加速・伝播機構の理解を深めることができる。我々が用いるミュオン望遠鏡は、およそ数十 GV 程度のリジディティの宇宙線を観測することができる。これは、約 0.4 au の巡回半径に相当する空間領域を観測することになり、IMF の構造の観測にもつながる。

本研究では、GRAPES-3 実験（インド）、本研究所（東山）、および東京大学宇宙線研究所明野観測所の各ミュオン望遠鏡を用いて、銀河宇宙線の連続観測を実施する。GRAPES-3 と明野観測所のミュオン検出器は、共に比例計数管を 4 層に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。両者間は地理経度で約 60 度の差異があり、この差異と地球の自転を利用した連続観測により、広域同時観測が実現できる。

現在、明野ミュオン観測では、大規模な再整備作業が進行中であり、比例計数管の改修、及びデータ収集系の更新作業を行っている。また、GRAPES-3 ミュオン観測も、検出面積を 2 倍（1,120 m²）にする拡張作業が進行中である。これら両観測に関する作業は近々完了する予定である。

【研究活動報告】

現時点で、GRAPES-3 実験のミュオン検出器の拡張作業は大詰めを迎えつつある。新ミュオン検出器 16 基のうち 13 基について比例計数管の積み上げが終わり、残すところ 3 基の 5 層のみとなっている。これを取り囲む外壁もほぼ完成している。その後、フロントエンド回路（信号増幅回路と波高弁別回路）とバックエンド回路の設置を行い、本格観測を開始する予定である。（図 1）。新ミュオン検出器に向けて開発された、フロントエンド回路（図 2）は、ストレージルームに置かれた比例計数管に新型フロントエンド回路が取り付けられ、試験が行われている。本年度の人的



図 1 新ミュオン検出器（2018 年 8 月現在）。写真手前が北。建屋の壁構造の大半が完成している。この後、天井部（吸収層）の建設が行われる。

な活動としては、2018年8月から2018年9月まで、大阪市立大学の林嘉夫名誉教授が GRAPES-3 に滞在し、新ミュオン検出器建設の指導を行った。これにより、比例計数管の製作もほぼ完了し、比例計数管の積み上げも5層を残すのみとなっている。同時期に本研究代表者の田中も GRAPES-3 に滞在し、新ミュオン検出器建設に立ち会った。同時期の8月には、愛知工業大学の小島浩司氏と中部大学の柴田祥一氏、大嶋晃敏氏、大阪市立大学の川上三郎氏が、タタ基礎研究所（ムンバイ）に滞在し、インド側共同研究者らと論文のまとめ作業を行った。さらに、川上三郎氏は GRAPES-3 にも訪れた。



図2 ストレージルームに置かれた比例計数管に新型フロントエンド回路が取り付けられ、試験が行われている。

2018年中及び2019年3月にかけて、本研究代表者と学部4年生、および、中部大学の大嶋晃敏氏らが複数回にわたり明野宇宙線観測所に出張し、3基の明野ミュオン観測装置の再整備を進め、データサーバの故障対応、UPSバッテリーの交換を行い、日理絵計数管の時定数、PWAの測定を行なった。そして、本研究代表者が数回中部大学に出張し、GPRAES-3及び明野ミュオン観測のデータ解析について議論した。

【研究成果】

本研究に関する成果として、3篇の査読論文 [1] が出版された。また、日本物理学会で6件の発表を行った。

【学術論文】

1. "比例計数管のシミュレーション (Simulation Study of Proportional Counter Output)", 植田拓真その他, 第20回IEEE広島支部学生シンポジウム"
2. "Measurement of the radial diffusion coefficient of galactic cosmic rays near the Earth by the GRAPES-3 experiment", H.Kojima et al., Phys.Rev.D, Vol. 98, 022004(2018)
3. "Was the cosmic ray burst detected by the GRAPES-3 muon telescope on 22 June 2015 caused by a transient weakening of the geomagnetic field or by an interplanetary anisotropy?", P.K.Mohanty et al., Phys.Rev.D, Vol.97, 082001 (2018)

【日本物理学会・その他学会発表】

1. 「大面積高精度 muon 望遠鏡による方位別宇宙線強度変動の研究 (21)」
小島浩司、大嶋晃敏、田中公一他、日本物理学会 2018年秋季大会、H14aS37-2
2. 「GRAPES-3 実験における新ミュオン検出器の建設の現状について」
大嶋晃敏、伊藤信夫、田中公一他、日本物理学会 2018年秋季大会、14aS37-9
3. 「GRAPES-3 実験における大型 NaI 検出器の導入について」
田中公一、大嶋晃敏、小島浩司他、日本物理学会 2018年秋季大会、14aS37-10
4. 「大面積高精度 muon 望遠鏡による方位別宇宙線強度変動の研究 (22)」
小島浩司、大嶋晃敏、田中公一他、日本物理学会、第74回年次大会(2019年)、14aK407-5
5. 「GRAPES-3 空気シャワーアレイ拡張の現状について」
大嶋晃敏、小島浩司、田中公一他、日本物理学会、第74回年次大会(2019年)、16pK106-7
6. 「GRAPES-3 実験における大型 NaI 検出器の導入について (2)」
田中公一、大嶋晃敏、小島浩司他、日本物理学会、第74回年次大会(2019年)、16pK106-8

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

中野 佑樹、 東京大学 宇宙線研究所

導入・研究目的

太陽フレアは太陽表面で起きる爆発現象であり、磁気エネルギーが熱エネルギーや粒子加速のエネルギーに変換される過程であると考えられている。典型的な太陽フレアでは 10^{29} - 10^{32} ergのエネルギーが100-1000秒の間に解放される。

太陽フレアに伴い大量の粒子が放出されるが、その際の粒子加速機構は未だに解明されていない。X線やガンマ線、中性子などの中性粒子は惑星間磁場の影響を受けないため、粒子加速場所や発生時刻など粒子加速機構を理解する上で重要な役割を果たす。

太陽フレアに伴うニュートリノはHomestake, SN0, Kamiokandeなどでの探索結果が報告されているが有意なシグナルは得られていない[1-3]。一方で、ある理論モデルではSuper-Kamiokande検出器で1つ程度のニュートリノ事象を観測できる可能性が議論されている[4]。

本研究では、Super-Kamiokande(SK)[5]を用いて太陽フレア由来のニュートリノ探索を行い、太陽フレアにおける粒子加速機構に新たな知見を得る事である。

研究方法(太陽フレアニュートリノ探索のためのTime Window設定)

太陽フレア由来のニュートリノの生成過程は大気ニュートリノの生成過程と非常に似通っており、両者のエネルギー帯は重なっている。大気ニュートリノは定常的に観測されるイベントである一方で、太陽フレア由来のニュートリノは太陽フレアにおける粒子加速のタイムスケール程度の間だけ放出されると考えられる。従って、適切なTime Windowを設定することで太陽フレア起源のニュートリノ探索のsignal/noise比を向上させることが期待される。

本研究では、ニュートリノ探索用のTime Windowを決定するために、CIDASシステム(宇宙地球環境研究所統合データサイエンスセンター)において管理されているRHESSIとGOESの観測データを解析した。以下でそれぞれTime Windowの決定方法について述べる。

・軟X線、軟X線ライトカーブの時間微分(GOES)

GOESで観測された軟X線1-8Åのフラックスのピーク値は太陽フレアのクラス分けの指標として広く使用されており、 10^{-4} W/m²以上のピーク値を持つ太陽フレアは最大規模のものであると考えられている。GOES衛星で観測される典型的な軟X線のライトカーブは図1の1段目のようになっている。本研究において対象とする太陽フレアは軟X線のフラックスが 5×10^{-4} W/m²以上のピークをもつ23個の太陽フレアを選んだ。また軟X線のフラックスが 10^{-4} W/m²以上となっている時刻を Time Windowとした。

また、軟X線の情報から粒子加速と相関のある増光部分を取り出すため、軟X線ライトカーブの時間微分を用いた。本研究では、ライトカーブの時間微分をガウス関数でフィットをし、ピークの時間 t_0 からの領域をTime Windowとした。(図1、2段目)

・硬X線、ラインガンマ線(RHESSI)

硬X線に関してはRHESSI衛星のwebサイト¹にあるflare listの中から対象の23フレアについて観測データがあるものを抜き出した。(図1、3段目)

ラインガンマ線に関しては、2.218-2.228MeVのエネルギーを持つ光子のライトカーブをプロットし、増光が見られる直前をBack Groundとして定数フィット、増光部分を一次関数フィット、減光部分を指数関数でフィットした。フィットの結果からBack Groundと増光部分の交点を求め始点とし、また減光部分とBack Groundより 2σ 以上大きい点を求め終点とした。そして、中性子捕獲のタイムラグ[6]を考慮し、始点の100秒前から終点までの間をTime Windowとした。(図1、4段目)

¹ <https://hesperia.gsfc.nasa.gov/rhessi3/data-access/rhessi-data/flare-list/index.html>

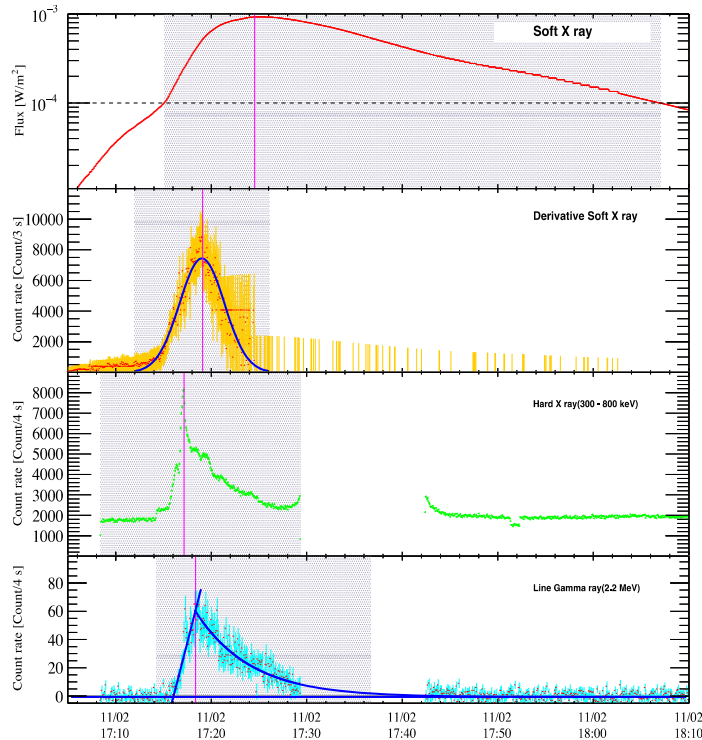


図 1:2003 年 11 月 2 日のイベントに対するライトカーブ。上から順に軟 X 線、軟 X 線の時間微分、硬 X 線、ラインガンマ線。ピンク色の縦線はピークのタイミングを表し、青線はフィットの結果を表す。灰色領域が、本研究で得られた Time Window である。

研究結果・今後の展望

表 1 に本研究で決定した Time Window の情報をまとめた。本研究で決定した Time Window は SK でのニュートリノ探索を想定して作成したものであるが、他のニュートリノ検出器でも利用可能である。今後、本研究で得た Time Window を用いて SK でのニュートリノ探索を行う。また、Time Window の決定手法と結果を合わせて論文として公表予定である。

表 1: Time Window のまとめ

光学的情報	決定可能なフレアの数	1 フレアの平均時間	大気ニュートリノ事象数(SK)
軟 X 線	23/23	2958 秒/flare	0.27 event/ flare
軟 X 線の時間微分	22/23	700 秒/flare	0.07 event/ flare
硬 X 線	13/23	2002 秒/flare	0.19 event/ flare
ラインガンマ線	5/23	1618 秒/flare	0.18 event/ flare

成果発表

1. 日本物理学会秋季大会 (2018 年 9 月 14 日 信州大学) 東京大学 宇宙線研究所 岡本 幸平
2. 日本物理学会春季大会 (2019 年 3 月 16 日 九州大学) 東京大学 宇宙線研究所 岡本 幸平
3. 修士博士発表会 (2 月 22 日 東京大学 宇宙線研究所) 東京大学 宇宙線研究所 岡本 幸平
4. 2018 年度 修士論文 (東京大学大学院) 岡本 幸平

参考文献

- [1] R. Davis, Prog. Part. Nucl. Phys. 32 (1994) 13–32. [2] B. Aharmim et al., Astropart. Phys. 55 (2014) 1–7.
 [3] K. S. Hirata et al., Phys. Rev. Lett. 61 (1988) 2653–2656. [4] D. Fargion et al., Astrophys. J. 3 (2003) 75–86.
 [5] Y. Fukuda et al., Nucl. Instrum. Meth. A 501 (2003) 418–462. [6] W. Q. Gan, The Astrophysical Journal 496 (1998) 992.

太陽面爆発・噴出現象の発生機構解明
および発生予測を目指した統計的研究
Statistical Study of Solar Explosive and Eruptive Phenomena
for Its Triggering Process and Prediction

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
伴場 由美

1. 研究目的・方法

本研究では、太陽面爆発・噴出現象の発生予測精度向上を目指し、フレア・CMEのトリガ過程およびその発生条件を定量的に明らかにすることを目的とする。このため、以下の手法を用いて、フレア・CME発生予測にとって真に有効なパラメータとその臨界値を定量的に決定し、各パラメータのフレア・CME発生の物理過程の各段階における寄与を明らかにする。

- ① 個々のイベント解析および理論モデルとの比較による、フレア・CME発生の物理過程の理解、およびその発生の指標となり得るパラメータの候補の決定：

ひので・SDO・IRISなどの太陽観測衛星による活動領域データを詳細に解析し、地球面における小規模磁場構造による擾乱などが、どのようにして活動領域の大規模磁場構造のトポロジー変化を引き起こすのかを調べる。また、フレア・CME発生の原因となりうる小規模な擾乱現象を特徴づける、観測データから導出可能なパラメータの候補を決定する。

- ② フレア・CMEイベントの統計解析による、予測パラメータの評価：

①で候補としてあげたパラメータを、SDO衛星データを用いて自動的に測定し、それぞれのパラメータのフレア・CMEとの相関を調べることで、予測に有効なパラメータとその臨界値を決定する。

2. 平成30年度における研究成果・考察

昨年度より継続して行っているイベント解析(上記①)として、2015年3月15日に発生した小規模フレアに伴うフィラメント噴出の発生過程に関する詳細研究を投稿論文としてまとめ、The Astrophysical Journal から出版された。本研究は、2015年3月に発生した太陽活動サイクル24最大の磁気嵐の原因となった、太陽表面からの大規模フィラメント噴出の発生過程を明らかにしたものである。一般的に、大規模な磁気嵐などの多くはXクラスフレアと関係して起こるといった経験的印象があるが、このイベントの規模はC9.1と小規模であった。我々はHinode衛星・SDO衛星による観測データとNon-linear Force Free Field (NLFFF) Modelingを組み合わせて、この大規模フィラメント噴出発生に至る、太陽表面の微細構造および噴出するフィラメント周辺の大規模な磁場構造の変化を詳細に調べた。

観測データ解析の結果、(1) 噴出したフィラメントを支えていた大規模なアーケード磁場の足元に、局所的に強いねじれを持った小規模な磁場構造(太陽面上で約2万kmの領域)が存在していたこと、(2) その局所的にねじれの強い領域では、大規模フィラメント噴出を伴うC9.1フレアの約40分前に、別のC2.4フレアと別の小規模なフィラメント噴出が発生していたこと、(3) さらにC2.4フレアの約1時間半程度前に、C2.4

フレアに伴い噴出する小規模フィラメントの足元で、太陽面上で 700km 程度という微小な発光現象が発生していたこと、を見出した。さらに、NLFFF Modeling の結果から、C2.4 フレア発生直前に、大規模フィラメントを支えていたアーケード磁場の一部がトラス不安定性の臨界条件である decay index $n \sim 1.5$ に達していた。しかし、アーケード磁場に閉じ込められている磁気フラックスロープの軸は $n < 1.5$ に存在していたと考えられ、少なくともこの段階ではトラス不安定性に対して安定であった可能性が高い。一方で、C9.1 フレアに伴って噴出した大規模フィラメント構造の噴出前 24 時間程度に渡る時間変化を観察すると、フィラメントは安定的に、徐々に上昇しているように見えた。しかし、(3)の微小な発光現象が見られた直後に、フィラメントのプラズマの擾乱が観測され、その後噴出した。これらのことから、少なくとも C2.4 フレア発生直後に大規模なフィラメント噴出 (C9.1 フレア) が発生するためには、フィラメントの不安定化を促進する何らかのトリガが必要な可能性が必要であると考えられ、(3)の微小な発光現象を生じた何らかの微小な磁気擾乱がそのトリガの候補として考えられる。

したがって、本研究では、太陽面上でわずか 700km 程度の微細な磁場擾乱が、十万 km スケールの大規模構造 (フィラメント) の不安定化の原因となり、地球に大きな磁気嵐をもたらしたフィラメント噴出の原因となったというシナリオを提案した。これは、大規模フレアのみならず、太陽表面の小規模な擾乱であっても、地球に影響を与える宇宙天気現象の原因となりうることを示唆する例である。

本年度は上記の他に、2017 年 9 月初旬に NOAA12673 領域で連続的に発生した X クラスフレアの発生過程についての研究、草野教授の行う MHD 不安定性の臨界条件に基づく大規模フレア発生予測スキームの開発協力なども実施した。

3. 成果発表

・ 論文発表

- [2] **Y. Bamba**, S. Inoue, and K. Hayashi, "the Role of a Tiny Brightening in a Huge Geo-effective Solar Eruption Leading to the St Patrick's Day Storm", *The Astrophysical Journal*, 874:73 (11pp), 2019

・ 学会発表

- [1] 伴場由美、井上諭、今田晋亮、草野完也、塩田大幸、「サイクル 24 最大の太陽フレアに伴う宇宙環境擾乱:I. 連続 X クラスフレアの発生過程」、地球電磁気・地球惑星圏学会、名古屋、2018 年 11 月 23-27 日
- [2] 井上諭、塩田大幸、伴場由美、Sung-Hong Park、「サイクル 24 最大の太陽フレアに伴う宇宙環境擾乱: II. 太陽磁場噴出の電磁流体シミュレーション」、地球電磁気・地球惑星圏学会、名古屋、2018 年 11 月 23-27 日
- [3] 塩田大幸、八代誠司、井上諭、伴場由美、「サイクル 24 最大の太陽フレアに伴う宇宙環境擾乱:III. 南向き磁場のモデリング」、地球電磁気・地球惑星圏学会、名古屋、2018 年 11 月 23-27 日
- [4] **Y. Bamba**, S. Inoue, and K. Hayashi, "the Role of a Tiny Brightening in a Huge Geo-effective Solar Eruption Leading to the St Patrick's Day Storm", 太陽研連シンポジウム, 名古屋, 2019 年 2 月 18-20 日

沖縄における誘導磁力計観測に基づく低緯度Pc1地磁気脈動の
解析的研究

Analytical study of low-latitude Pc1 pulsations observed
by induction magnetometer at Okinawa

能勢正仁、名古屋大学・宇宙地球環境研究所

【研究目的】

地磁気が周期0.2-5秒で正弦波的に変動する現象は「Pc1地磁気脈動」または「EMIC(Electromagnetic ion cyclotron)波動」と呼ばれており、それが放射線帯電子・リングカレントの発達や減衰に及ぼす影響という観点から、近年、国内・国外において活発に研究が行われている。

低緯度におけるPc1地磁気脈動については、先駆的な研究がKawamura et al. [1981]によってなされた。それによると、低緯度Pc1脈動の発生頻度は、真夜中から明け方にかけてピークを示し、高緯度Pc1脈動や磁気圏中のPc1脈動(EMIC波動)の発生頻度とは全く異なっている。そのため、低緯度Pc1脈動に関しては、「プラズマ圏とリングカレントの相互作用により夜側で励起されたEMIC波動が、磁力線に沿って電離層に入射後、電離層F層ダクトを通過して低緯度へ伝搬し、Pc1脈動として観測される」というシナリオが提案された。しかし、低緯度Pc1脈動の研究はそれ以降、Webster and Fraser [1985], Bortnik et al. [2008], Nomura et al. [2011]による報告が存在する程度で、あまり活発には行われてこなかった。Kawamura et al. [1981]による低緯度での観測結果と、衛星では真夜中から明け方の内部磁気圏(L<4)ではほとんどEMIC波動は観測されないという結果との整合性を説明する必要がある、上記のシナリオは観測データに基づいた更なる検証が求められている。

そこで、この研究では、(1)低緯度(沖縄県)で誘導磁力計による定常観測を行う、(2)誘導磁力計のデータを解析し、低緯度におけるPc1波動の振幅・偏波特性や発生頻度地方時分布を明らかにする、(3)沖縄でPc1波動が観測されているときにArase衛星が夜側内部磁気圏に位置しているようなイベントに着目し、ダクト伝搬EMIC波動の有無や、存在するのならその伝搬・減衰をコントロールする要素を調べる、ことを目的とする。

【研究の経緯】

2017年末に沖縄県国頭村にて誘導磁力計を設置したが、給電が安定せず定常的なデータ取得を開始できなかった。2018年初夏には落雷により、データロガーがダメージを受け、観測が停止してしまっている。観測装置はドイツ製のため、日本の代理店を通して修理などを依頼するのに時間が掛かり、今年度内に観測を再開することができなかった。

以上のような状況に加え、研究代表者が2018年8月に名古屋大学に異動したため、8月1日をもって研究費の使用ができなくなった。そのため、研究費として59,000円の配分を受けたが、最終的に研究費の利用は行わなかった。

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

笠原慧、東京大学・大学院理学系研究科・地球惑星科学専攻

【研究目的】

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

【研究内容・結果】

本年度は, (1)観測開始から1年経過した観測器の感度経年変化を踏まえたデータ較正, および(2)ERGサイエンスセンターから公開するデータファイルの内容の議論などを実施した.

結果の一例として, (1)で得られたMEP-iの感度の経年変化を図1に示す. 時間とともに感度が低下していく様子, および2018/2/5に実施した検出器の印加高圧上昇オペレーションを境に感度が回復している様子がわかる.

また, (2)の結果, MEP-i, MEP-eのデータを国内外のコミュニティに広く公開し, それを用いた研究成果が多数得られた.

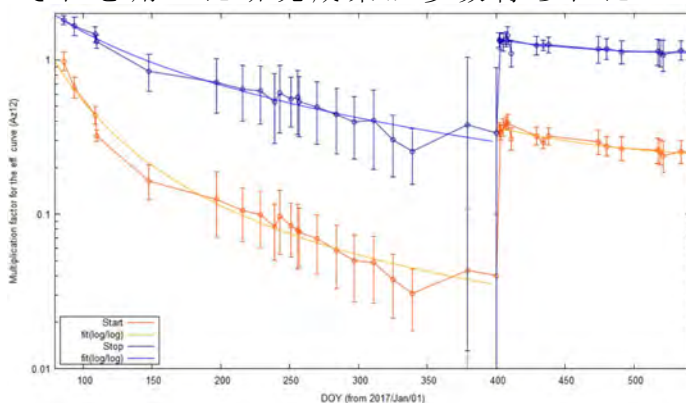


図1 : MEP-i の感度の経年変化.

【発表成果】

- Kasahara, S., S. Yokota, T. Mitani, K. Asamura, M. Hirahara, Y. Shibano, T. Takeshi, "Medium-Energy Particle experiments - electron analyzer (MEP-e) for the Exploration of energization and Radiation in Geospace (ERG) mission", Earth, Planets and Space, doi:10.1186/s40623-018-0847-z, 2018 [Highlighted Papers 2018].
- Smirnov, A. G., E. A. Kronberg, F. Latallerie, P. W. Daly, N. A. Aseev, Y. Y. Shprits, A. Kellerman, S. Kasahara, D. Turner, M. G. G. T. Taylor, "Electron intensity measurements by the Cluster/RAPID/IES instrument in Earth's radiation belts and

- ring current", *Space weather*, doi:10.1029/2018SW001989, 2019.
- Keika, K., S. Kasahara, S. Yokota, M. Hoshino, K. Seki, M. Nose, T. Amano, Y. Miyoshi, I. Shinohara, "Ion Energies Dominating Energy Density in the Inner Magnetosphere: Spatial Distributions and Composition, Observed by Arase/MEP-i", *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2018GL080047, 2018.
 - Imajo, S., M. Nose, A. Matsuoka, S. Kasahara, S. Yokota, M. Teramoto, K. Keika, T. Motoba, B. Anderson, R. Nomura, A. Fujimoto, I. Shinohara, and Y. Miyoshi, "Magnetosphere-ionosphere connection of storm-time Region-2 field-aligned current and ring current: Arase and AMPERE observations", *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2018JA025865, 2018.
 - Ezoe, Y., Y. Miyoshi, S. Kasahara, T. Kimura, K. Ishikawa, M. Fujimoto, K. Mitsuda, H. Sahara, N. Isobe, H. Nakajima, T. Ohashi, H. Nagata, R. Funase, M. Ueno, G. Branduardi-Raymont, "Ultra light-weight X-ray telescope missions : ORBIS and GEO-X", *J. Astron. Telesc., Instrum. Systems.*, doi:10.1117/1.JATIS.4.4.046001, 2018.
 - Hori, T., N. Nishitani, S. G. Shepherd, J. M. Ruohoniemi, M. Connors, M. Teramoto, S. Nakano, K. Seki, N. Takahashi, S. Kasahara, S. Yokota, T. Mitani, T. Takashima, N. Higashio, A. Matsuoka, K. Asamura, Y. Kazama, S.-Y. Wang, S. W. Y. Tam, T.-F. Chang, B.-J. Wang, Y. Miyoshi, and I. Shinohara, "Substorm-associated ionospheric flow fluctuations during the 27 March 2017 magnetic storm: SuperDARN-Arase conjunction", *Geophys. Res. Lett.*, DOI:10.1029/2018GL079777, 2018.
 - Nose, M., A. Matsuoka, S. Kasahara, S. Yokota, M. Teramoto, K. Keika, K. Yamamoto, R. Nomura, A. Fujimoto, N. Higashio, H. Koshiishi, S. Imajo, S. Oimatsu, Y. -M. Tanaka, M. Shinohara, I. Shinohara, and Y. Miyoshi, "Magnetic field dipolarization and its associated ion flux variations in the dawn side deep inner magnetosphere: Arase observations", *Geophys. Res. Lett.*, DOI:10.1029/2018GL078825, 2018.
 - Kurita, S., Y. Miyoshi, S. Kasahara, S. Yokota, Y. Kasahara, S. Matsuda, A. Kumamoto, A. Matsuoka, and I. Shinohara, "Deformation of electron pitch angle distributions caused by upper-band chorus observed by the Arase satellite", *Geophys. Res. Lett.*, DOI:10.1029/2018GL079104, 2018.
 - Oimatsu, S., M. Nose, M. Teramoto, K. Yamamoto, A. Matsuoka, S. Kasahara, S. Yokota, K. Keika, G. Le, R. Nomura, A. Fujimoto, D. Sormakov, O. Troshichev, Y.-M. Tanaka, M. Shinohara, I. Shinohara, Y. Miyoshi, J. A. Slavin, R. E. Ergun, and P.-A. Lindqvist, "Drift-bounce resonance between Pc5 pulsations and ions at multiple energies in the nightside magnetosphere: Arase and MMS observations", *Geophys. Res. Lett.*, DOI:10.1029/2018GL078961, 2018.
 - Yamamoto, K., M. Nose, S. Kasahara, S. Yokota, K. Keika, A. Matsuoka, M. Teramoto, K. Takahashi, S. Oimatsu, R. Nomura, M. Vellante, B. Heilig, A. Fujimoto, Y. Tanaka, M. Shinohara, I. Shinohara, Y. Miyoshi, "Giant Pulsations Excited by a Steep Earthward Gradient of Proton Phase Space Density: Arase Observation", *Geophys. Res. Lett.*, DOI: 10.1029/2018GL078293, 2018.
 - Miyoshi, Y., T. Hori, M. Shoji, M. Teramoto, T-F. Chang, T. Segawa, N. Umemura, S. Matsuda, S. Kurita, K. Keika, Y. Miyashita, K. Seki, Y. Tanaka, N. Nishitani, S. Kasahara, S. Yokota, A. Matsuoka, Y. Kasahara, K. Asamura, T. Takashima, I. Shinohara, "The ERG Science Center", *Earth, Planets and Space*, DOI: 10.1186/s40623-018-0867-8, 2018.
 - Miyoshi, Y., I. Shinohara, T. Takashima, K. Asamura, N. Higashio, T. Mitani, S. Kasahara, S. Yokota, Y. Kazama, S.-Y. Wang, S. Tam, P.T.P., Ho, Y. Kasahara, Y. Kasaba, S. Yagitani, A. Matsuoka, H. Kojima, Y. Katoh, K. Shiokawa, K. Seki, "Geospace Exploration Project ERG", *Earth, Planets and Space*, doi:10.1186/s40623-018-0862-0, 2018.
 - Mitani, T., T. Takashima, S. Kasahara, W. Miyake and M. Hirahara, "High-energy electron experiments (HEP) aboard the ERG (Arase) satellite", *Earth, Planets and Space*, doi:10.1186/s40623-018-0853-1, 2018.
 - Hikishima, M., H. Kojima, Y. Katoh, Y. Kasahara, S. Kasahara, T. Mitani, N. Higashio, A. Matsuoka, Y. Miyoshi, K. Asamura, T. Takashima, S. Yokota, M. Kitahara and S. Matsuda, "Data Processing in the Software-type Wave-Particle Interaction Analyzer on board the Arase Satellite", *Earth, Planets and Space*, doi:10.1186/s40623-018-0856-y, 2018.
 - Asamura, K., Y. Kazama, S. Yokota, S. Kasahara, and Y. Miyoshi, "Low-energy particle experiments - ion mass analyzer (LEPi) onboard the ERG (Arase) satellite", *Earth, Planets and Space*, doi:10.1186/s40623-018-0846-0, 2018.

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
Simulation of the "Himawari" Observation
using Radiative Transfer Model and its Applications

大野智生 気象庁気象衛星センターデータ処理部

本研究は、静止気象衛星ひまわり8号及び9号データの特長である高時空間解像度観測データを活用し、雲・エアロゾル過程の高度な理解を得、ひいては同データを数値予報に適切に同化させて予報精度の向上に資するための開発を行うものである。本年度の研究においては、衛星データ活用において、その基礎となる放射伝達計算の手法開発・改良に関する研究の一環として、3次元放射伝達のための計算手法を開発した。また、開発した手法を高解像度大気モデルによるシミュレーション結果に適用し、10mオーダーの水平変動を持つ空間不均質雲が放射収支に与える影響について調査した。

雲の空間的な変動は、雲粒子による非等方散乱などと相まって放射伝達過程を複雑にし、特に局地的な放射収支に影響する(雲の3次元効果)。しかし、雲の3次元効果の理論的な定量評価には放射伝達計算への入力として雲物理特性を現すパラメータが必要になるが、これらのパラメータ作成のための細かい空間スケールにおける妥当な雲空間分布の取得は一般に困難である。近年、空間解像度が10mオーダーのLarge Eddy Simulation (LES)モデルが理化学研究所において開発されており(SCALE-LES)、物理法則に基づいた雲の空間変動部分の計算が可能となっている。本研究では、SCALE-LESモデルによる海上の低層水滴雲(晴天積雲・層積雲)の発達・衰退過程の計算結果をオフラインで利用して局地的な雲の3次元効果を調査した。SCALE-LESモデルは気圧・気温などとともに雲水量と雲粒子数密度の空間分布を出力する。本研究では、それらから雲粒の粒径分布を仮定して雲の光学特性(消散係数など)、及び大気分子の吸収係数を導出した。また、雲の水平不均質性を加味した放射伝達計算は平行平板近似よりも計算量が非常に増大するため、放射計算の実践には種々の近似や工夫が必要になる。本研究では、球面調和関数による角度方向離散化及び有限体積法による空間離散化に基づく明示的解法を使用した。この解法は放射エネルギーの保存を確約する点が特徴のひとつであり、放射収支の評価に適している。また、赤外放射など、強い大気分子吸収が存在する場合の放射伝達を効率的に計算できる。

SCALE-LESモデルによる雲場の時系列計算結果を入力として算出した広帯域赤外放射フラックス空間分布の結果の一部として、雲層内の放射エネルギー発散・収束の、あるx-z断面でのスナップショットを図1に示す。赤外放射の水平発散による雲の側面や薄い雲の内部の放射冷却が再現され、一方、雲の間隙(即ち晴天域)には水平収束が存在して放射冷却を緩和していることが分る。これらの放射フラックス空間分布の特徴は、平行平板近似では評価できないものである。水平収束・発散の絶対値は最大で約 0.1Wm^{-3} に達している。これは当大気において約 7K/day の加熱・冷却率に対応し、雲の3次元効果による放射冷却・加熱は、雲の成長・衰退過程において無視できない規模であることが示唆される。

今後は巻雲などの他の雲種や気象条件における高解像度大気モデル結果を利用することにより、雲の三次元効果の更なる解明が期待される。その知見は衛星による雲特性リモートセンシング手法改良の一助になると考えられる。

本成果については、名古屋大学宇宙地球環境研究所において平成31年3月18日～19日にかけて行われた「GPMおよび衛星シミュレータ合同研究会」の場で発表を行っている。

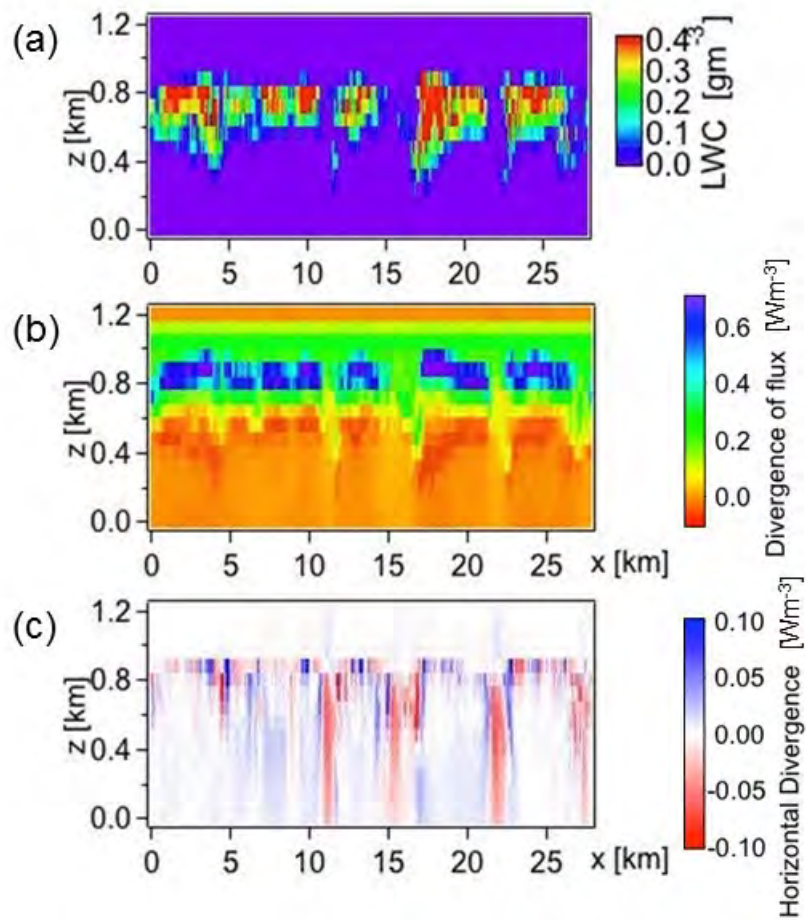


図1. 雲層内の広帯域赤外放射エネルギー発散・収束の、あるx-z断面でのスナップショット。(a)SCALE-LESシミュレーションより得られた雲水量、(b)赤外放射エネルギー発散(負値は収束を表す)、(c)赤外放射エネルギー発散のうちの水平成分。

Statistical study on the energy transport process in solar flares using multi-wavelength spectroscopic observations

Kyoung-Sun Lee (NAOJ)

1. Purpose

In the solar atmosphere, we observe various kinds of the energy release phenomena powered from the solar interior to outer atmosphere by magnetic reconnection, such as, flares and CMEs. Especially, solar flares produce from continuum, to X-ray, whole multiple wavelengths responses, and it is still not well understood how the energy is transported in the whole solar atmosphere and heat the flares as the high temperature (~several 10 million K). There are several different mechanisms for the energy transport process in solar flares has been proposed; 1) electron beam, 2) thermal conduction, and 3) Alfvén wave. The investigation of these energy transport process and the physical mechanisms in solar flares is important to understand not only the heating process in the flares but also the heating process in the solar atmosphere, such as chromosphere to corona. Therefore, we planned to investigate the multi-wavelength spectra in spacecraft observations statistically to confirm which mechanisms are the important role for the energy transport in the solar flares and heating in the solar flare. For this, we have investigated flares which are observed by different spectra from optical to X-ray, and compare the spectra in multi-wavelengths temporally and spatially in statistical way. From the statistical investigation of the flares, first, we tried to understand the dynamics of the plasma during the flare. Second, we tried to understand the low atmospheric response and which energy transport process is dominant in different flares.

2. Methods

We planned to investigate the flare plasma properties in chromosphere and corona using the multi-wavelength (UV-EUV-X-ray) spectroscopy and other imaging and magnetic field data in statistical way. In the previous year, we collected a flare list which is observed by IRIS and Hinode together and appropriate for investigating the energy transport process through the solar atmosphere.

1) Investigation of the evaporation flows dynamics and the energy flux estimation

We used the Hinode/EIS, IRIS, and RHESSI for the spectroscopic observations. From the spectroscopic observations, we can examine the plasma dynamics from measuring the Doppler shift of the spectra, which were formed in different temperatures.

2) Investigation of the energy transport process

We also used the SDO/AIA and SDO/HMI, Hinode/SOT for measuring the low atmosphere response and magnetic field strength. Then, we tried to checking the low atmospheric response using the chromospheric spectra (Mg II from IRIS), WL continuum (SDO/HMI and Hinode/SOT). We also investigated the spatial and temporal evolution and correlation of a low atmospheric response and flaring plasma together with magnetic field variation. We tried to examine the evaporation strength with HXR emission and magnetic field strength to confirm the energy transport process, thermal conduction or electron beam.

3) Collaborative research

For this research, I visited ISEE in October to discuss the research with Imada-san (research collaboration in ISEE) who has been investigating flares with observation and simulation. We discussed about the evaporation flows in a flare and temporal evolution of the different temperature of plasma intensity related to the cooling process after the impulsive heating of the flare.

3. Results

From the investigation of a limb flare and flares in a flare list we made,

- We investigated a limb flare and found the hot loop-top source shows the strong outflows during the impulsive phase and it could be observed evaporation flows between the double loop-top sources.
- From the statistical investigation of the X-ray light curve of the flares and Mg II spectra (chromospheric response) and white light emission (photospheric response), we found a temporal correlation between of the X-ray emission and low atmospheric response depending on the existence of the white light flares.
- We plan to investigate the abundances of the loop-top source for understanding the origin of the heated plasma.
- We plan to investigate relationship of the flare dynamics and the low atmospheric responses more detail. The study could be helpful for understanding the white light flares origins (energy transfer process) and heating mechanism.

4. Periods of stay in ISEE

I visited ISEE at Nagoya University during the period from October 31 to November 2. During the visit, I discussed a flare's dynamics and its temporal evolution of the plasma intensity in different temperature plasma with Dr. Imada to understand their heating and cooling process. We also discussed about the abundances for understanding their hot plasma origin and energy transport process.

5. List of publications (including submitted)

- David M. Long, Louise K. Harra, Sarah A. Matthews, Harry P. Warren, Kyoung-Sun Lee, George A. Doschek, Hirohisa Hara, and Jack M. Jenkins, "Plasma Evolution within an Erupting Coronal Cavity", *ApJ*, 855, 74 (2018)
- Jae-Ok Lee, Kyoung-Sun Lee, Sujin Kim, Kyung-Suk Cho, and Jin-Yi Lee, "The First Observation of Low-Frequency Alfvénic Wave Produced by solar coronal jet on 2017 August 21", *Solar physics*, submitted.
- Louise Hara, Takahiro Hasegawa, Kyoung-Sun Lee, David M. Long, Toshifumi Shimizu, Sarah Matthews, Hirohisa Hara, and Magnus Woods, "Tracking the evolution of hot coronal plasma through 'overlappograms' in response to magnetic flux emergence building up to an M2 flare", *ApJ*, submitted.

Continuous water quality monitoring of lakes and coastal areas using deep neural network and satellite data

サレム イブラヒム サレム モハメット サレム (東京大学)

Ocean color satellites provide a valuable tool for monitoring water quality from space. The missions of ocean color satellites started in 1978 with the launch of Coastal Zone Color Scanner (CZCS) satellite. Since then, there is almost continuous data over water resources. Ocean color satellites measure the water leaving reflectance (Rrs) of water bodies. Converting Rrs to water quality parameters (e.g., chlorophyll-a concentration, absorption, backscattering, etc.) is a challenging task due to two main reasons. Firstly, the scattering of atmospheric gases and aerosols represent ~90% of the recorded signal by satellite over water bodies. Secondly, separation the contribution of each water constituents into the Rrs still require a lot of effort to overcome. Consequently, the proposed research trying to make use of the recent advantages of deep neural network (DNN) to accurately retrieve the constituents' concentrations from Rrs. Deep neural network (DNN) model was created to receive Rrs from different ocean color satellite. The output of the DNN model were seven water quality parameters chlorophyll-a (Chla), nonalgal particles (NAP), absorption coefficients at 442 nm of chlorophyll-a ($a_{ph}(442)$), nonalgal particles ($a_{nap}(442)$) and color dissolved oxygen ($a_{cdom}(442)$) and backscattering coefficients at 2nm of phytoplankton ($bb_{ph}(442)$) and nonalgal particles ($bb_{nap}(442)$). The number of hidden layers were seven layers. The DNN parameters (i.e., weight and bias values) will be determined through the backpropagation method. These parameters will be iteratively adjusted to minimize an objective function (e.g., mean square error) between the NN outputs and the reference outputs. Two simulated datasets each of 100,000 reflectance spectra were used to train and test the DNN model, respectively. Independent simulated dataset based on Hydrolight simulation was used to evaluate the performance of DNN model. In addition, in-situ datasets from East China Sea and NASA bio-Optical Marine Algorithm Dataset (NOMAD) which they represent open ocean and coastal water bodies.

Results reveal that the DNN model had a great potential to overcome the complexity of water bodies to retrieve accurate water quality parameters. The retrieval accuracy during the validation process using simulated dataset was above 90% for all water quality parameters (Fig. 1). The DNN model also provided relatively better retrieval accuracy for total absorption at 442 nm ($R^2 = 0.92$, RMSE = 10.8 $mg.m^{-3}$, Fig. 2a) and absorption of nonalgal particles and color dissolved organic matter at 442 nm ($R^2 = 0.88$, RMSE = 0.3 m^{-1} , Fig. 2b). whereas, both of backscattering of particles and Chla showed high retrieval accuracy with overestimation trend with increasing the concentrations as shown in Figs. 2c and 2d. Currently, we are trying to identify the reason of this overestimation trend. Finally, the $a_{cdom}(442)$ retrieval accuracies were very high for Hydrolight simulation ($R^2 = 0.91$, RMSE = 0.2 $mg.m^{-3}$, Fig. 2a), NOMAD dataset ($R^2 = 0.63$, RMSE = 0.2 $mg.m^{-3}$, Fig. 2b) and East China Sea dataset ($R^2 = 0.64$, RMSE = 0.1 $mg.m^{-3}$, Fig. 2c).

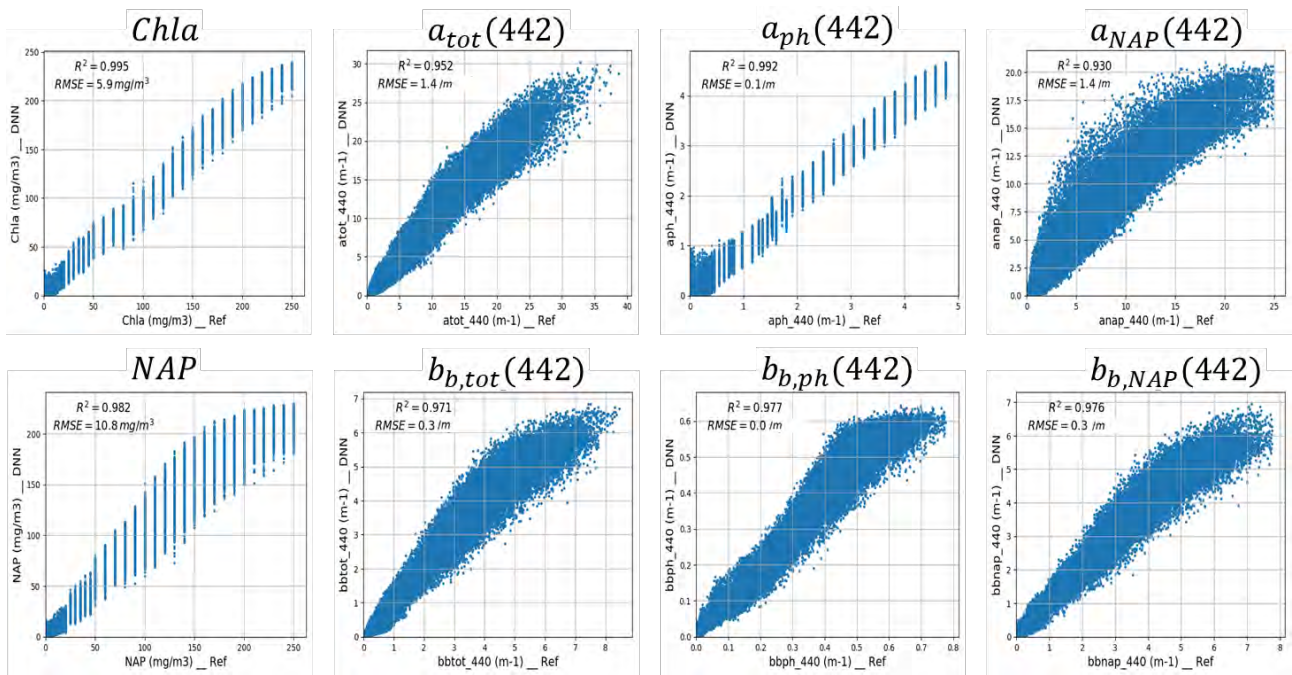


Fig. 1. Validation of DNN model using 100,000 simulated spectra for various water quality parameters.

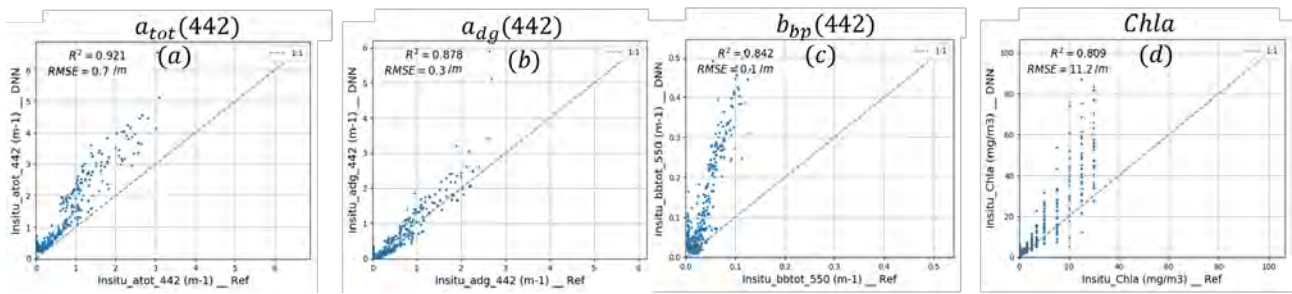


Fig. 2. Validation of DNN model using Hdrolight simulated dataset. a) total absorption at 442 nm; b) absorption of nonalgal particles and color dissolved organic matter; c) backscattering of particles and d) chlorophyll-a concentration.

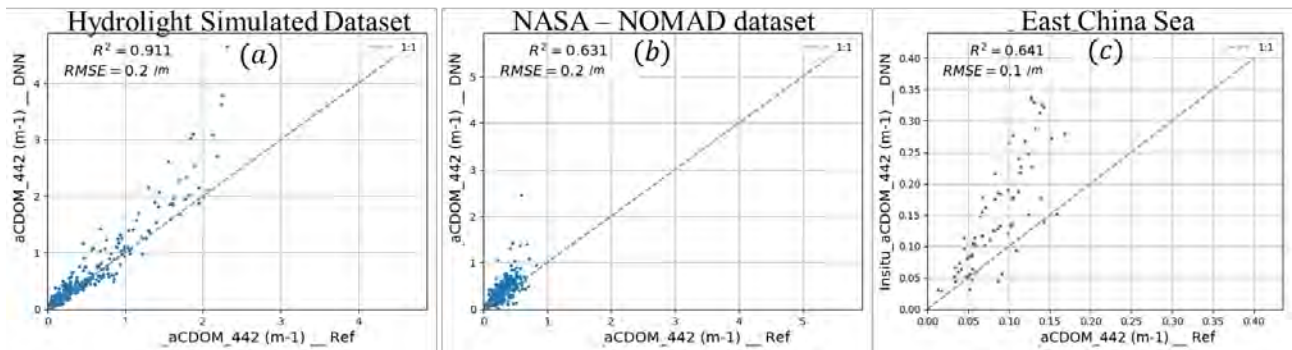


Fig. 3. Validation of DNN model using the absorption of color dissolved organic matter at 442 nm ($a_{cdom}(442)$) for a) Hydrolight simulation; b) NASA-NOMAD and c) East China Sea datasets.

SIに伴い中緯度 SuperDARNで観測されるFLR現象の統計的解析 SI-associated FLR phenomena observed by mid-latitude SuperDARN radars

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

【研究目的】

SI (Sudden Impulse) は太陽風動圧の急増現象で、地上では磁場強度の急増として観測される。SIは圧縮性波動fast mode wavesとして磁気圏内を伝わる。それが近地球磁気圏の磁場・プラズマを(座標原点=地球として)動経方向に振動(poloidal-mode oscillation)させる事、そしてそれが磁力線固有振動(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、その受信信号のうち sea/ground backscattered signals (以下 SGBS と記す)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 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。上記論文のeventsではSIとの関連は見られなかった。また同eventsにおいて SGBS 中にFLRの観測例も報告されており、そのFLRにより生じる磁力線固有振動もpoloidal modeと解釈されている。しかし、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 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。

【研究結果と考察】

今年度前半までは、一昨年度後半に開始した、名古屋大学・宇宙地球環境研究所・修士課程・飯田剛平氏(指導教員：西谷准教授)が発見した 1 event についての解析研究を継続発展させた。このイベントは Hankasalmi, Finland (磁気緯度59.1°N、磁気経度104.5°E。以下HANと記す) のSD radarでもPykkvibaer, Iceland (磁気緯度64.6°N、磁気経度57.3°E。以下PYKと記す) のSD radarでも観測されており、昨年度はHAN Beam#1とPYK Beam#13のデータのみ解析したが、今年度はHAN Beam#4,7, PYK Beam#0,3,8 も解析した。

このイベントでは、~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。その振幅と位相はFLRに典型的にみられる緯度依存性を持っていたので、この波動現象はFLRにより生じたと考えられる。ただ、HAN Beam#1のみならずPYK Beam#13においてもVLOS(視線方向速度)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あるのにまだ全てのbeamsを解析できていないのは、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り、また、(practicalな問題として) 解析用codesを汎用的に書いていなかったためbeam毎のcode変更が必要となり時間を取られ

た為である。そこで、今年度後半は、プログラムの汎用化を本格的に開始した。また、より本質的な問題：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を行った。その方法は、各beam、各RG毎にそのデータに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の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。我々は現時点までに自動同定のテストプログラムを作成し、1つのbeamにそれを適用し、favorableな結果を得ている。今後はこのプログラムを完成させ、自動で多くのイベントを同定して統計解析を行えるようにする計画である。

【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】

Kawano, Hideaki, Akira Sessai Yukimatu, Nozomu Nishitani, Yoshimasa Tanaka, Satoko Saita, Tomoaki Hori, and Kouhei Iida, Two-dimensional magnetospheric mass-density estimation from FLR events simultaneously observed by two SuperDARN radars, Japan Geoscience Union Meeting 2018, Makuhari Messe, 2018.05.20.

河野 英昭, 行松 彰, 西谷 望, 田中 良昌, 才田 聡子, 堀 智昭, SuperDARN データへの位相差法・振幅比法の適用による FLR の高精度同定, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第 144 回 総会・講演会, 名古屋大学 東山キャンパス, 2018.11.27.

Kawano, Hideaki, Akira Sessai Yukimatu, Nozomu Nishitani, Yoshimasa Tanaka, Satoko Saita and Tomoaki Hori, Toward magnetospheric region identification from the SuperDARN data by using FLR signals identified in the data by the gradient method, The Ninth Symposium on Polar Science, Ninth Symposium on Polar Science, National Institute of Polar Research, 2018.12.06.

地上デジタル放送波を用いた水蒸気遅延測定
Measurement of propagation delay due to water vapor
using digital terrestrial broadcasting waves

川村 誠治、情報通信研究機構・電磁波研究所

1. 研究目的

情報通信研究機構 (NICT) では、地デジ放送波の伝搬遅延を精密に測定することで水蒸気を推定する手法の研究開発を進めている[1]。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することが可能となり、局地的大雨(通称ゲリラ豪雨)などの時空間スケールの小さな極端現象の予測精度向上も期待できる。

NICTでは既に首都圏で観測を開始しているが、本研究では、この装置を名古屋に持ち込んで観測を行う。東京とは異なるエリアで異なる電波塔からの地デジ放送波を観測することで新たに遭遇する課題に対応し、観測システムの改良を進めること、及び、実際の観測データを継続して取得し、気象予測へつなげる観測研究を行うことを目的としている。近い将来、観測装置をより小型化して都市部で多点展開することを計画しており、本課題は名古屋域での展開の足がかりとなるものである。

2. 手法

名古屋大学宇宙地球環境研究所(ISEE)・研究所共同館Iの屋上に地デジアンテナ及びNICTで開発している地デジ波遅延測定装置を設置し、伝搬遅延測定を実施する。名古屋大学から約10 km離れている瀬戸デジタルタワー(送信出力3 kW)から送信されている地デジ放送波の直達派と反射波を同時に受けて、直達波と反射波の遅延差から、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。昨年度までの実験で、同建物屋上に設置されているX帯気象レーダーが動作している場合に測定結果に大きな変動成分が乗ることが分かっている。今回は同レーダーが稼働していない状態で実験を行った。

3. 結果

得られた遅延プロファイルの一例を図1に示す(物理チャンネル20、周波数515 MHz)。赤線が実際の遅延プロファイルで、青線は形状を分かりやすくするために移動平均を取ったものである(視認性のため30 dB下げて表示)。遅延時間ほぼ0 μs にあるピークがISEEで受信された直達波である。それ以外に3つのピークを反射体1~3からの反射波として選択した。各ピークの位置関係から反射体のおよその位置が推定可能であり、その結果を図2に示す。厳密には反射波の到来方向を決める必要があるが、反射体2は名鉄神宮駅近くの

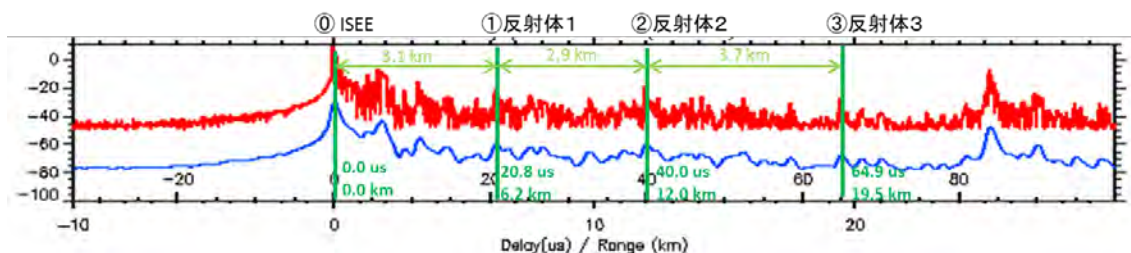


図1：遅延プロファイルの一例(物理チャンネル20、周波数515 MHz)。

ビル、反射体3はららぽーと名古屋みなとアルクス近辺であると思われる。直達波+3つの反射波、合計4つの信号の位相の時間変化をプロットしたのが図3である。各線は非常に似通った大きな変動を示しているが、これは主に放送局と我々の観測装置の局部発信器の位相雑音差が見えているものである。各位相の差を取ることで、図2に示



図2: 観測域の位置関係。瀬戸デジタルタワーからの地デジ波を①ISEEで受信。①~③の各反射体からの反射波も同時に①で受信してエリアA~Cの伝搬遅延を測定する。

す各エリア (A~C) の伝搬遅延変動を得ることができる。今回の観測で得られた水蒸気変動に起因する伝搬遅延変動を図4に示す。各エリアの長さが異なるため、1 km 当たりの遅延量に換算し、視認性のため 100 ps ずつオフセットを付けて表示している。

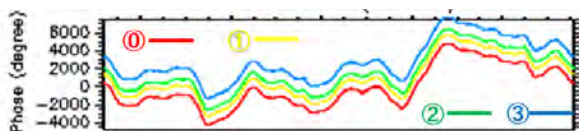


図3: 4つの信号(直達波+3つの反射波)の位相の時間変化。

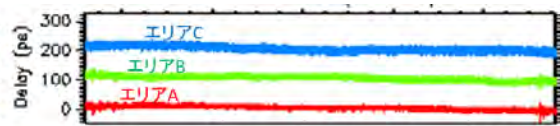


図4: 図3の各位相の差から求めたエリアA~Cの伝搬遅延変動。

4. まとめ

観測時間が約1時間だけだったため変動は大きくは見えていないが、水蒸気による伝搬遅延変動を得ることができた。今後も観測を継続できるように体制を検討したい。

参考文献

1. Kawamura, S., et al. (2017), Water vapor estimation using digital terrestrial broadcasting waves, *Radio Sci.*, 52, doi:10.1002/2016RS006191.

成果発表 (口頭発表)

1. 瀧瀬他、地デジ放送波を使った水蒸気量推定手法開発の現状、URSI-F 研究集会、東京工業大学、2018/5/9.
2. 川村他、地デジ放送波を用いた水蒸気量推定手法の研究開発—首都圏展開の現状と今後の展望—、日本気象学会 2017 年度春季大会、つくば、2018/5/17.
3. 川村他、地デジ放送波を用いた水蒸気量観測の現状、JpGU2018、千葉、2018/5/22.
4. Kawamura et al., Water vapor estimation using digital terrestrial broadcasting waves for prediction of localized heavy rainstorms, AOGS 15th Annual Meeting, Honolulu, 2018/6/6.
5. 川村他、地上デジタル放送波を用いた水蒸気量推定、映像情報メディア学会技術報告、42, 17-20, 2018.
6. 川村他、地デジ放送波を用いた水蒸気量推定手法の研究開発—首都圏観測展開とその初期結果—、気象学会 2018 年秋季大会、仙台、2018/10/31.
7. 清水他、地上デジタル放送波を用いた水蒸気遅延量の同化手法の開発—観測演算子の設計—、気象学会 2018 年秋季大会、仙台、2018/10/31.

雲・降水観測レーダの航空機観測に関する検討

Feasibility study on cloud and precipitation observation with airborne radar

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

1. 研究目的

本課題は、情報通信研究機構（NICT）が開発したW帯の地上設置型雲レーダ、Ka帯の衛星搭載降水レーダ部分モデルなどの、航空機観測への利用可能性に関して検討するものである。W帯の雲レーダは、2021年度に打上が予定されている衛星搭載雲レーダ（Earthcare/CPR）の地上検証実験に向けて開発されており、従来のレーダにない電子走査機能を有するなど航空機搭載のメリットがある一方で、重量・寸法・形状・機械環境・レドーム・無線局免許などの点で、航空機搭載を行うためには解決すべき課題が多数存在する。Ka帯の衛星搭載降水レーダ部分モデルは、2014年に打ち上げられ、現在軌道上で運用中の衛星搭載二周波降水レーダ（GPM/DPR）のKa帯レーダの部分モデルで、こちらについても同様の利点と課題が存在する。本課題では、これら課題の洗い出しを行い、航空機搭載の実現に向けての解決策を検討する。これらのレーダの航空機搭載が実現できれば、上空からの雲・降水システムの詳細観測が可能となる。

2. 研究方法

EarthCARE/CPRの校正・検証用として、NICTではW帯地上設置型雲観測レーダ開発を実施し、その中では校正検証のふたつの要求に対応して、2台のレーダを開発している。一つは EarthCARE/CPR の最小検出感度より高感度の高感度雲観測レーダ（HG-SPIDER）であり、もう一つは EarthCARE/CPRで衛星搭載雲レーダ、衛星搭載降水レーダでは世界初となるドップラー速度計測の検証に関係して、アンテナビーム内の雲分布の不均一性を観測可能な電子走査雲観測レーダ（ES-SPIDER）である。図1に実験用コンテナに設置された状態の二つのレーダを示す。



図1 高感度雲観測レーダ（HG-SPIDER）と電子走査雲観測レーダ（ES-SPIDER）

ES-SPIDER は地上観測時には天頂方向からある鉛直断面内で ± 4.5 度の範囲を一次元的に走査可能である。送信はファンビームで行い、受信のみをフェーズドアレイアンテナで送信ファンビーム内を電子走査可能なシステムとなっている。現在、受信ビームの切替は位相器制御による逐次走査方式での観測を行っているが、航空機搭載時には飛翔体の移動を考慮すると、高速のビーム走査が必要であり、そのためには 32 チャンネルの受信素子それぞれに独立して受信可能なデジタル受信器を用意し、計算処理により受信ビームの合成を行うデジタルビームフォーミング(DBF)機能が必要で、現在、デジタル受信機の調整作業を実施している。この DBF 機能が整備できれば、同時に全受信ビームのデータ取得が可能であり、航空機・衛星などの高速で移動する飛翔体搭載時の効率的な観測が可能となる。2018 年度はこの ES-SPIDER への DBF 機能の整備を実施し、2018 年度日本気象学会秋季大会で発表した。

成果発表（口頭発表）

1. 堀江宏昭・大野裕一・花土弘・久保田実(情報通信研究機構), "EarthCARE/CPR検証用地上設置雲観測レーダの開発状況とテスト観測結果", 日本気象学会 2018年度秋季大会, 仙台国際センター, 2018年10月31日.

ひので・SDO衛星磁場観測データを用いた太陽活動領域非線形フォース
フリー磁場コードの開発

Nonlinear force-free field code of active region coronal
magnetic field with Hinode and SDO observations

塩田大幸、情報通信研究機構・電磁波研究所・宇宙環境研究室

太陽フレア・コロナ質量放出は活動領域上空の太陽コロナ磁場に蓄積された磁気エネルギーが解放されることで発生する爆発現象である。しかし、コロナの磁場の直接観測は困難であるため、光球で観測される磁場の分布をもとに、何らかの磁場モデルを用いて外挿する必要がある。本研究では、太陽の観測データを解析するライブラリ Solar Software (SSW) と Interactive Data Language (IDL) が利用できる CIDAS スーパーコンピュータシステムを利用して、半自動的に非線形フォースフリー磁場を計算する環境を整備した。さらに、米国の Solar Dynamics Observatory (SDO) 衛星が観測した太陽表面磁場データを利用し、2010 年以降に現れた比較的大型の太陽活動領域の非線形フォースフリー磁場を計算し、太陽活動領域の 3 次元磁場に関するデータベースの作成を進めている。このシステムはひので衛星可視光磁場望遠鏡で観測されたベクトル磁場も入力として利用可能になっている。このデータベースを利用した活動領域の 3 次元磁場構造の解析を総合解析研究部の林沛萱氏とともに進めている。

また、上記と活動領域の並行し、ひので衛星可視光磁場望遠鏡が観測した太陽極域磁場の解析環境システムの移植を進めた。2018 年 2 月に国立天文台太陽データ解析システム (SDAS) の運用が停止された。これに先立ちこれまで SDAS で進めていた極域磁場データの解析環境を CIDAS に移した。CIDAS システムで動作させるためのプログラムの整備を本年度進めた。2019 年 3 月の太陽の南極の磁場観測データを解析可能になり次第、第 24 太陽活動周期における極域磁場の変動の様子を論文にまとめる予定である。

あらせ衛星によるプラズマ波動伝搬特性の解明と観測戦略立案
Study on plasma wave propagation
in the inner magnetosphere using Arase data

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構
宇宙科学研究所 松田昇也

「あらせ衛星」は、内部磁気圏の物理解明を目的として2016年12月に打ち上げられ、申請者が開発に携わったプラズマ波動観測装置(PWE)をはじめ、6つのプラズマ粒子観測器・磁場観測装置らによる統合観測によって、世界で初めて波動粒子相互作用のその場観測を目指している。特に、PWEには波動粒子相互作用に関わるプラズマ波動の伝搬特性を24時間連続で観測できる工夫を施しており、内部磁気圏物理に対するプラズマ波動の寄与の理解が劇的に進むことが期待されている。

本共同研究では、下記の三つの内容について研究を行った。

i) PWEの観測データを用いた、プラズマ圏EMIC波動の特性解析

電磁イオンサイクロトロン(EMIC)波動は、内部磁気圏で見られるプラズマ波動の一種である。本研究では、特にプラズマ圏内で特徴的な励起要因によって発生する「プラズマ圏EMIC波動」に着目し、その特性解析を行った。磁力線を横切って地球方向に伝搬可能なX-mode whistler wave(magnetic equatorial noise)が、プラズマ圏EMIC波動の励起源となることを観測から示し、励起の要因として、地球周辺の特徴的な重イオン環境が寄与していることを解明した。

ii) 観測機器の高次レベル科学プロダクトの公開に向けたデータ処理系の整備

PWE/WFCは高サンプリングレートで電磁界波形を取得しており、観測開始からの総取得データ量は数百GBにも及ぶ。電磁界波形は、プラズマ波動の高時間・高周波数分解能解析に欠かすことができない重要なデータである。本共同研究では、電磁界波形データ・および高時間・高周波数分解能スペクトルデータの高次レベル科学プロダクト(Level 2 CDF)の公開に向けて、ERGサイエンスセンターと議論を実施し、データ生成パイプラインと公開スキームを確立した。

iii) 地上-衛星間・衛星-衛星間連携観測に向けた観測戦略の立案

あらせ衛星は、高機能な搭載装置によるその場観測だけにとどまらず、ジオスペースを飛翔する他の科学衛星(Van Allen probes, MMS, Geotailなど)との同時多点観測や、地上に設置されたオーロラ全天カメラやVLFアンテナ・誘導磁力計との連携観測を通して物理過程の時間/空間変化を分離し、現象が宇宙空間を伝搬していく様子や地上へと伝わる様子を解明することに貢献している。今後の地上-衛星連携観測や、海外衛星との同時多点観測の機会に集中的にデータを取得するために、特にプラズマ波動の高サンプリングレート波形観測の指針について議論を行った。

数値モデリングおよびデータ解析に基づく
環電流-放射線帯エネルギー階層間結合機構の研究
Study of the ring current and radiation belt couplings based on numerical modeling and data analysis

関 華奈子、東京大学・大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

平成30年度は本研究の最終年度にあたり、これまでの研究をまとめ、主に下記の2つの成果を得た。なお、本研究遂行にあたっては、名古屋大学の大学院生2名の教育研究も本共同研究の一部として実施し、二編の博士論文としてまとめられた。

1. Van Allen Probes衛星観測に基づく磁気嵐時環電流への高エネルギー酸素イオン供給過程の研究

地球周辺の宇宙空間のうち、地球固有の双極子磁場が支配的に効いている領域を内部磁気圏と呼ぶ。地球磁気圏で最大規模の変動現象が磁気嵐であり、磁気嵐は、内部磁気圏に発達する西向き環電流（リングカレント）によって引き起こされるため、リングカレントの発達過程の解明は、宇宙環境の変動を理解するための重要課題である。リングカレントは主に水素イオン(H⁺)と酸素イオン(O⁺)によって担われており、リングカレントの発達を理解するためには、これら二つのイオン種の供給過程を知ることが不可欠である。本研究では、これまでその供給過程がよくわかっていなかった高エネルギー(>150keV)酸素イオンの供給機構を理解するため、二機のVan Allen Probes (VAPs)衛星によるプラズマ観測データを用いて位相空間密度の空間分布を導出し、H⁺とO⁺を比較することで、高エネルギーO⁺のみが増加する(SOI)現象を発見した。さらに、このSOI現象とグローバルな地磁気脈動(低周波ULF波動)との関連性を調べるために、多点地上磁場観測データを解析し、リングカレントへの高エネルギーO⁺の新たな供給過程を提唱した。

まず、2013年4月23日から始まった磁気嵐中のSOI現象の事例研究を行い、VAPs衛星データの解析結果から、H⁺よりも地球に近い領域で高エネルギーO⁺の位相空間密度が増加するSOI現象を発見した。同時期に、VAPs衛星と地上磁場観測点の両方でULF波動が観測され、経度方向の波数は10以下と同定された。SOI現象時に観測されたULF波動は、内部磁気圏外側では高エネルギーO⁺のドリフト-バウンス運動との共鳴(ドリフト-バウンス共鳴)条件を、より内側ではドリフト運動との共鳴(ドリフト共鳴)条件を満たしていた。これらの結果から、上記二つの共鳴機構の組み合わせによってSOI現象を説明でき、これがリングカレントへの高エネルギーO⁺の供給機構であるとの仮説を提唱した [Mitani et al., *JGR*, 2018]。

次に、供給機構の発生頻度を検証するため、SOI現象の統計解析を行った。その結果、2013年から2017年にVAPs衛星が観測した磁気嵐90例のうち30例でSOI現象が同定された。SOI現象は広い経度範囲で観測され、大きな磁気嵐中ほど長時間にわたってより地球に近い領域で発生することが明らかになった。さらに、同時期の多点地上磁場観測網の大規模データ解析の結果、SOI現象発生時には、内部磁気圏外側領域でPc4帯(6.7-22 mHz)が、より内側ではPc5帯(1.7-6.7 mHz)のULF波動が各々強まることが示された。これらの

結果と共鳴条件の考察から、対流輸送の内側限界と Pc5 波動とのドリフト共鳴領域との間にはギャップがあり、高エネルギー0+のみがそのギャップを埋める形で Pc4 波動とドリフト-バウンス共鳴可能であることが示され、第三章で提唱した仮説が SOI 現象の主な発生機構であることが示された。なお平均的には、SOI 現象は磁気嵐時のリングカレントの約 9% を担っていることも明らかとなった [Mitani et al., *JGR*, 2019]。

2. 内部磁気圏モデル結合シミュレーションに基づく Pc5 帯 ULF 波動との相互作用による放射線帯電子の動径輸送とピッチ角分布形成

地球磁気圏最大規模の変動現象である磁気嵐時には、放射線帯が大きく変動することが知られており、この変動に伴う相対論的電子の加速機構の解明は、磁気圏物理学上の重要課題の一つである。有力な仮説として内部加速説と外部供給説があるが、各々の機構が放射線帯の変動にどの程度寄与しているかについては不明な点が多い。外部供給説は、1.6-6.7 mHz の周波数 (Pc5) 帯の低周波 (ULF) 波動と粒子のドリフト運動との共鳴 (ドリフト共鳴) により、内部磁気圏の外側から磁場が強い地球動径方向に輸送され準断熱的に加速される機構である。放射線帯変動の理解が進まない原因の一つとして、観測される位相空間密度 (PSD) から 2 つの仮説を切り分けるのは難しいことがある。本研究は、この困難点を解消するため、新しい数値モデル結合シミュレーションを開発し、内部磁気圏における 3 次元 Pc5 波動分布を導出して、ドリフト共鳴が放射線帯変動に及ぼす影響について PSD 分布を含めて調べることを可能にした。その結果、外部供給説では従来形成されないと考えられていたバタフライ型のピッチ角分布 (磁場に垂直な速度成分より平行な速度成分の粒子フラックスが卓越する分布) が形成されることを見出した。

研究遂行にあたっては、まず理想的な単色 Pc5 波動を仮定し、ドリフト共鳴に伴って形成されるピッチ角分布の特徴の基本的な性質を調べた。Pc5 波動のシミュレーションには、高エネルギーイオンのドリフト運動論に基づく 5 次元分布関数と電磁場変動を同時に解くことができる数値モデル (GEMSIS-RC) を用い、3 次元 Pc5 波動分布を導出した。さらに得られた電磁場変動を、案内中心近似で相対論的電子の運動方程式を高精度で解くことができるテスト粒子モデル (GEMSIS-RB) に入力として与え、Pc5 波動と相対論的電子の相互作用を調べた。その結果、特定の条件下でバタフライ型分布が形成されることを明らかにするとともに、ドリフト共鳴条件の考察に基づき、バタフライ型分布の形成条件を解析的に定式化することに成功した [Kamiya et al., *JGR*, 2018]。

次に、より現実的な Pc5 波動の空間分布を再現するため、太陽風から外部磁気圏までを記述するグローバル MHD モデル (BATS-R-US+CIMI) の結果を、上述の GEMSIS-RC モデルの外部境界条件として用いるモデル結合の計算手法を開発した。開発にあたっては 2 つのモデル間の温度条件及び境界条件の設定を工夫し、外部磁気圏から内部磁気圏に Pc5 波動をシームレスに伝搬させる手法を考案した。こうして得られた 3 次元 Pc5 波動分布を GEMSIS-RB の背景電磁場として用い、放射線帯電子とのドリフト共鳴による動径方向輸送を計算した結果、波動の緯度分布に起因して、単色波との共鳴よりも短い時間スケールでバタフライ型ピッチ角分布が形成されることを示した。この結果は前段落で述べた解析解のうち粒子の最大輸送距離の緯度依存性とも整合している。本研究では、Pc5 波動による放射線帯電子加速をピッチ角分布で評価できる可能性を示すと同時に、モデル結合による Pc5 波動の励起・伝搬過程の新たな研究手段の基盤を開発することができたため、今後、外部、内部励起の Pc5 波動の放射線帯加速への寄与を定量的に調べる研究等に応用したい。

水安定同位体を用いたバングラディッシュ周辺における水蒸気の 起源解析

Analysis of water vapor origin around Bangladesh by using stable water isotopes

一柳 錦平，熊本大学・大学院先端科学研究部

研究目的

これまでの研究では，バングラディッシュにおける降水の安定同位体比の観測と，モデルによる水蒸気の起源解析を行った．その結果，降水の安定同位体比の変動は，水蒸気起源の変遷で説明できることが示された．そこで，今年度はインド洋の対流活動についても考察に加え，降水の安定同位体比の決定要因を明らかにすることを目的とする．

研究方法

バングラディッシュの3地点（シレット，ダッカ，チッタゴン）において，2010年に降水の安定同位体比の観測を行った．また，同位体大循環モデル（Global Spectral Model；IsoGSM）による降水同位体比の再現，および水蒸気の起源解析を行った．さらに，NOAAの外向き長波放射量（Outgoing Longwave Radiation；OLR）を85°E-97.5°Eまで帯状平均し，対流活動の季節進行も加えて考察した．

研究結果および考察

赤道付近から研究地域までのOLR，シレットにおける降水量と酸素安定同位体比（ $\delta^{18}\text{O}$ ），IsoGSMによる水蒸気の起源解析について，2010年の経日変化を図1に示す．5月から10月までの夏季モンスーン期には，北緯10°付近から組織化された対流活動域（図の青色； $\text{OLR}<220\text{W/m}^2$ ）が北進しているのが分かる．また，シレットにおける降水の $\delta^{18}\text{O}$ は，プレモンスーン期には-5~0‰であったが，夏季モンスーン期にはOLRの北進に伴って-15‰付近まで低くなる．水蒸気の起源解析では，プレモンスーン期にはベンガル湾やアラビア海起源が多いが，夏季モンスーン期にはインド洋北部および南部起源が多くなる．ポストモンスーン期には太平洋起源や，陸域起源が多くなる．図には示していないが，降水量と同位体比の相関（降水量効果）はチッタゴン以外では認められなかった．

まとめ

これらを総合的に考察すると，プレモンスーン期にはベンガル湾やアラビア海など近海から蒸発した同位体比が高い水蒸気が多く，降水の同位体比も高い．夏季モンスーン期には，インド洋の赤道付近から水蒸気が移動する間にレインアウトによって同位体比が低くなるため，降水の同位体比も徐々に低下する．ポストモンスーン期には，同様に蒸発域から遠く離れた太平洋起源や，陸域起源の低い同位体比を持つ水蒸気が多いため，降水の同位体比は低いことが示された．

以上のように，本研究地域における降水の安定同位体比は，水蒸気の履歴（蒸発域から降水域までのレインアウト効果）が主な決定要因であると考えられる．

成果発表

Tanoue, M., K. Ichiyanagi, K. Yoshimura, M. Kiguchi, T. Terao, T. Hayashi, Seasonal variation in isotopic composition and origins of precipitation over Bangladesh. Progress in Earth and Planetary Science 2018 5:77.

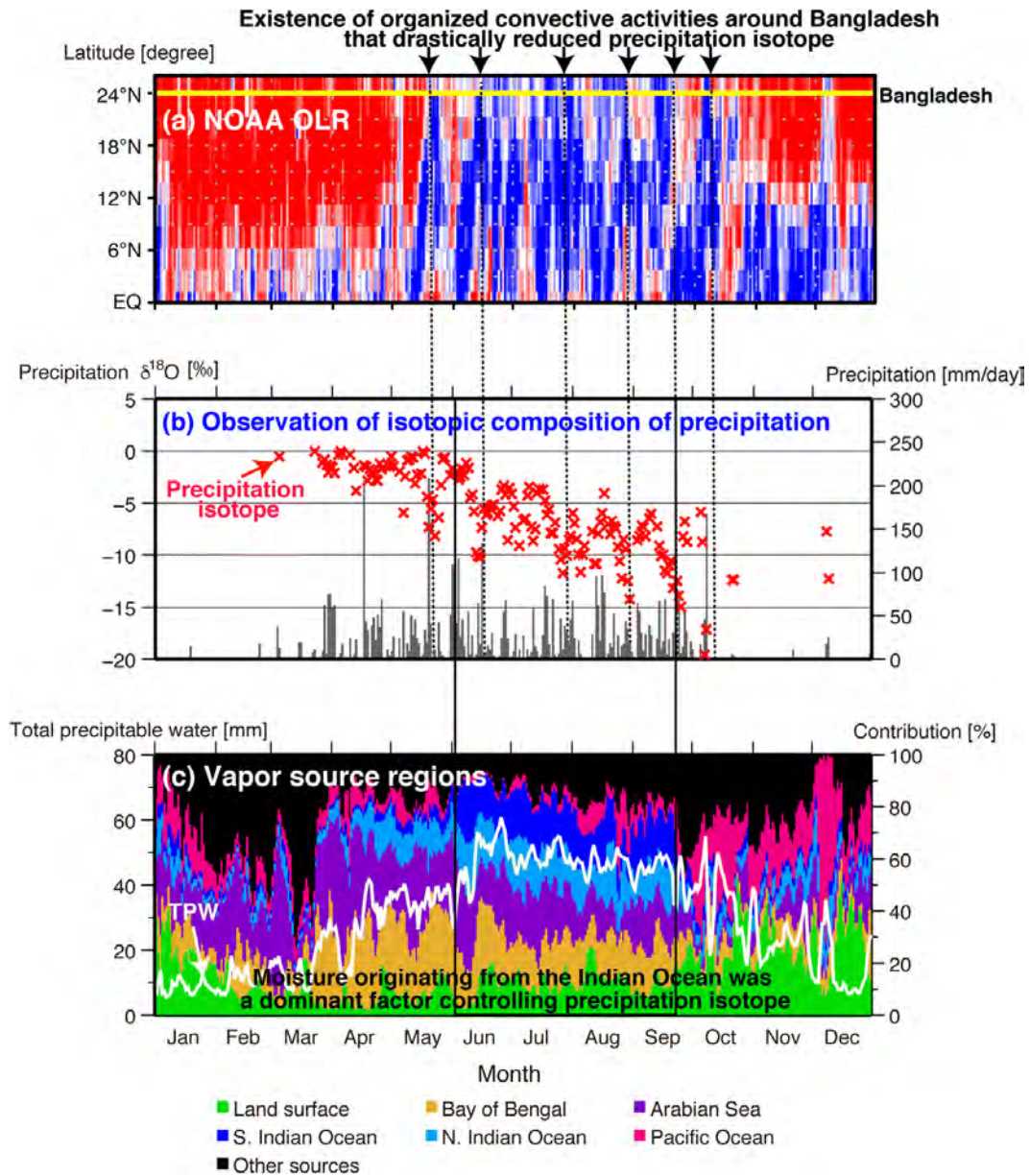


図1 (a)バングラディッシュ周辺の外向き長波放射.(b)シレットにおける降水量と酸素安定同位体比.(c)水蒸気の起源解析の結果.

夏季インド北東部・アッサム州の豪雨に対する季節内変動の影響
Effects of intraseasonal oscillations on heavy rainfall over Assam, India during summer

福島 あずさ（神戸学院大学人文学部・講師）

1. 研究目的

本研究は、インド北東部に独自に設置した雨量計により、地上観測に基づく降水現象の地域特性と季節内変動との関連性を明らかにすることを目的とする。特にアッサム州内のブラマプトラ川北岸でモンスーン季に頻発する大雨（日雨量 100-200mm 程度）の要因に着目し、ヒマラヤ南縁での降水現象に対する大気循環場の季節内変動（準2週間周期変動等）の影響について解析する。今年度は、大雨事例の循環場についてコンポジット解析を進め、モンスーン季にベンガル湾付近で卓越する季節内変動（Active-Break サイクル）と関係していることが示唆されたことから、季節内変動の振幅と大雨発生日の対応関係を分析し、ブラマプトラ川北岸およびメガラヤ丘陵北側地域で、ベンガル湾付近の対流活動の Break 期と対応した大雨事例が数多く起きていることを明らかにした。

2. 研究方法

インド・アッサム州内に設置している15地点の転倒ます型雨量計のデータを用いた（図1）。対象期間はQCの済んでいる2007年1月-2016年12月とした。またデータの検証及び比較のため、インド気象局が作成した1901-2013年の日降水量グリッドデータセット（IMD4）（Pai *et al.* 2014）を利用した。

降水特性を把握するため、各地点の降水強度別頻度を求め、地域差を比較した。その後各地点で日降水量99パーセント値の事例を抽出し、グリッドデータと降雨特性を比較した上で、循環場のコンポジット図を作成した（循環場データはERA Interimを利用）。さらに、OLRから抽出した対流活動における季節内変動（準2週間周期変動）と各地点での大雨事例との関係について分析した。

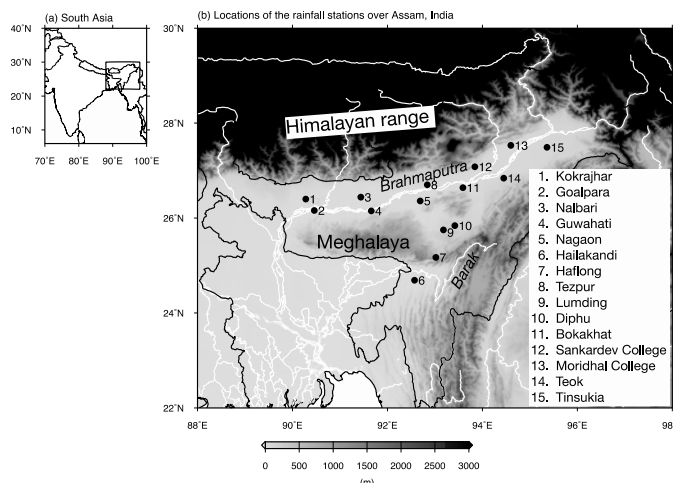


図1 対象観測地点の位置（陰影は標高を表す）

3. 結果と考察

① IMD4グリッドデータと観測における極端な大雨の比較

各観測地点における極端な大雨事例（90, 95, 99パーセント値）について、グリッドデータと雨量計観測値の比較を行ったところ、多くのケースでIMD4のデータは観測値を下回っており、その傾向はより極端な大雨現象を意味する99パーセント値で特に大きいことがわかった。また、強雨頻度が大きい地点（Kokrajhar, Sankardev College, Haflong）を中心に、2つのデータ間でのパーセント値の乖離が大きい（図2）。この結果は成果論文2にて発表した。

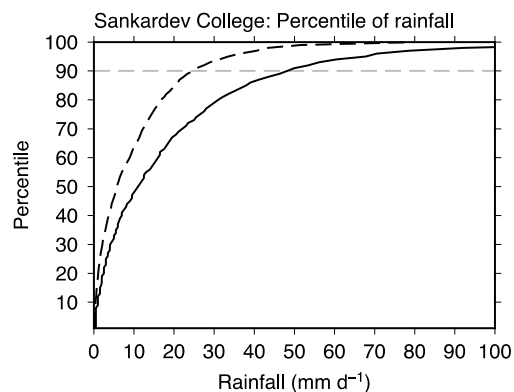


図2 Sankardev Collegeにおけるパーセント値（点線）IMD4、（実線）雨量計観測値

② 豪雨事例のコンポジット解析

99パーセンタイル値を超える事例について、大気循環場のコンポジット図（およびラグコンポジット）を作成して特徴的な循環場を分析したところ、最も大雨頻度の高いKokrajhar（メガラヤ丘陵の北面）、ブラマプトラ川北岸（ヒマラヤ山脈南麓）のSankardev College, Moridhal Collegeなどの地点で、ベンガル湾北部を中心に850hPa高度場が高気圧性偏差となり、かつヒマラヤ南麓を中心に、強い西寄りの水蒸気フラックス偏差が見られる時に、大雨が発生していることが明らかになった。これは、モンスーン季におけるモンスーントラフ（低気圧）の活動が、ベンガル湾北部で弱まっている状態（ベンガル湾におけるいわゆるBreak期）に該当する。

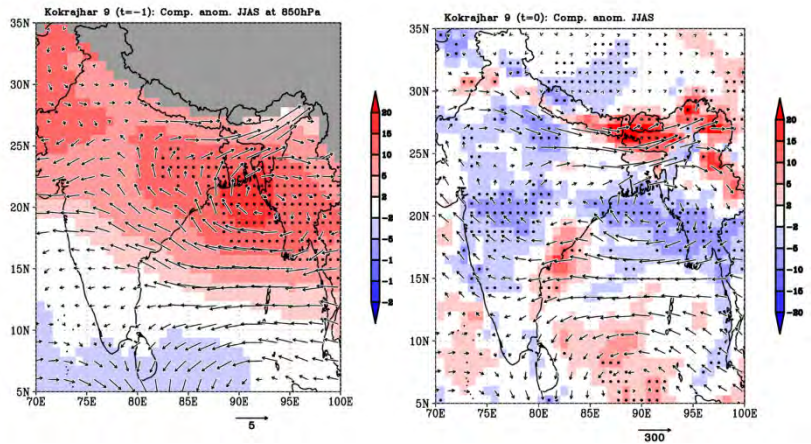


図3 Kokrajhar における 99 パーセンタイル事例の循環場のコンポジット（気候値からの偏差, 99%で統計的有意なグリッドに黒点）左図：事例日1日前の850hPa高度差と風ベクトル, 右図：事例日当日の鉛直積算水蒸気フラックスとその収束

③ 季節内変動（ベンガル湾におけるActive-Breakサイクル）と大雨の関係

ベンガル湾北部のOLRから抽出した対流活動における準2週間周期の季節内変動サイクル（7-25日周期成分）と、大雨の関係について分析を進めた。モンスーン季（JJAS）における準2週間周期成分と、全地点での99パーセンタイル以上の大雨事例日の対応を調べたところ、ベンガル湾北部で対流活動が弱まったタイミング（ベンガル湾におけるBreak期）に対応する大雨事例が数多く抽出された（図4）。今後は各大雨事例の循環場の違いを、ベンガル湾におけるActive-Breakサイクルとの関係からまとめ、本研究の最終的な結果を成果論文として発表する予定である。

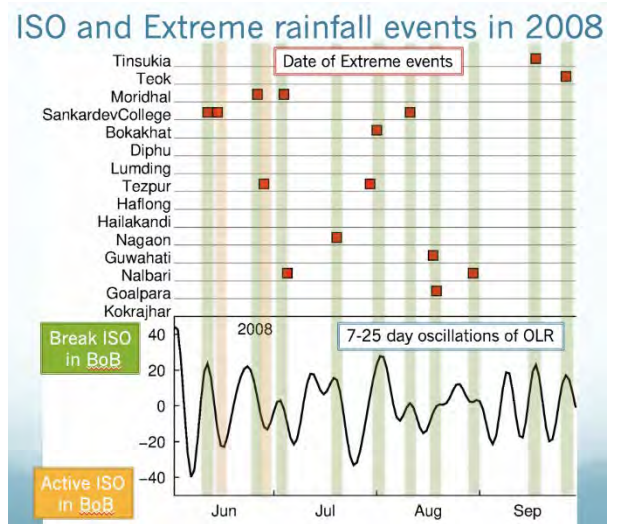


図4 アッサム各地における 99 パーセンタイルを超える大雨日と季節内変動の関係（2008年の例）横軸が日を表す。上図：各地点における6~9月の大雨事例日（赤四角）、下図：OLRから求めた7-25日季節内変動成分の振幅（黒実線）

4. 引用文献

Pai DS, Sridhar L, Rajeevan M, Sreejith OP, Satbhai NS, Mukopadyay M, 2014: Development of a new high spatial resolution (0.25° × 0.25°) Long Period (1901-2010) Daily gridded rainfall data set over India and its comparison with existing data sets over the region. *MAUSAM*, **65**, 1-18.

5. 成果発表

（成果論文）

1. [Fukushima A](#), H Kanamori, J Matsumoto (2019) Regionality of long-term trends and interannual variation of seasonal precipitation over India. *Progress in Earth and Planetary Science*, 6:20, <https://doi.org/10.1186/s40645-019-0255-4>
2. [福島あずさ](#) (2019) インド・アッサム州の大雨特性-雨量計とグリッドデータセットの比較より-. 神戸学院大学人文学部紀要 39:49-60. (国際研究会発表)
1. [Fukushima A](#), T Hayashi, T Terao, F Murata, M Kiguchi, Y Yamane, M Tanoue, H Fujinami "Heavy rainfall characteristics and related synoptic conditions in Assam, India" International Workshop on "Extreme Severe Storms and Disaster Mitigation Strategies", Central University of Rajasthan, India, 24-26th Dec. 2018.
2. [Fukushima A](#), "Regionality of long-term trends and interannual variation of seasonal precipitation over India." Inter-Institutional Symposium on Meteorological Research for Improved Water Resources Management, Cotton University, Assam, India, 3rd Mar. 2019.

バンングラデシュにおける長期の降水量変動(1891-2016年)
Long-term rainfall variability over Bangladesh
during 1891-2016

村田 文絵
高知大学・教育研究部自然科学系理工学部

【研究目的】バンングラデシュは国土の大部分が低地であり、かつ世界一の年降水量記録をもつメガラヤ高原をはじめとした大雨地域を上流にもち、毎年のように洪水が生じる一方その水を利用した生活が営まれている。そのため降水変動の変化に対する脆弱性が大きい。バンングラデシュは、1947年以前は英領インドであり雨量観測が行われていた。しかしそのデータはインド等において紙媒体で保存されており、長期にわたる降水変動の解析はこれまで行われていない。本研究は科研費基盤研究S「過去120年におけるアジアモンスーン変動の解明」(代表:松本淳)において昨年度デジタル化が完了した1891-1947年とバンングラデシュ気象局から入手した1947年以降の雨量データを接続し、過去126年の降水変動を明らかにすることを目的とする。本報告ではEndo et al. (2015)が実施した1950-2008年(59年間)の日降水量を用いた13の降水指標のトレンド解析に基づき、同様の解析を126年のデータにわたって行い、Endo et al. (2015)の結果と比較した。

【研究方法】バンングラデシュ国内の23地点で1891-2016年のデータセットが作成された。データは1950年代と1970年代に欠損が多い。これらのデータセットについて、Wijngaard et al. (2003)によって推奨された4つの統計テストを日降水量データについて行い、1%の有意水準でデータが均質であると判定された15地点をトレンド解析に用いた。

【研究結果】図1に解析結果を示す。Endo et al. (2015)と同様に弱い降水に相当するR03(日雨量1-3mmの降水日数)に大きな増加傾向がみられた。一方RX1day, RX5day(それぞれ年最大日雨量と年5日雨量)はEndo et al. (2015)では減少傾向であった一方で、半数の地点が増加傾向を示した。R10mm, R20mm, R50mm(それぞれ10mm, 20mm, 50mm以上の降水日数)はバンングラデシュ南部で増加傾向である一方で、その他の地域で減少傾向がみられた(傾向は有意ではない)。PRECTOT(年雨量)は3-5月のプレモンスーン季に増加傾向、10-11月のポストモンスーン季に減少傾向を示す地点が多く、季節によって傾向が異なっていた。WDAY(日雨量1mm以上の日数)は6-9月の雨季に他の季節より減少傾向を示す地点が多くみられた。

【まとめと議論】バンングラデシュの15地点について126年間の日雨量データを用いて13の降水指標に関するトレンド解析を行った。最も顕著な傾向を示した指標はR03であり、弱い雨が有意に増加傾向を示す。一方総雨量(PRECTOT)や大雨の発生頻度(R*mm)には増加傾向を示す地点と減少傾向を示す地点の両方が同数程度ありバンングラデシュ全体として顕著な傾向はみられなかった。これはEndo et al. (2015)の結果と同様である一方で、Shahid(2010, 2011)による総雨量及び強雨の頻度が増加傾向にあるという結果とは異なる。隣接するインド北東部では総雨量(Fukushima et al. 2019)及び強雨の頻度(Dash et al. 2

009; Goswami et al. 2010) の減少傾向が指摘されている。

【引用文献】

Endo, N., J. Matsumoto, T. Hayashi, T. Terao, F. Murata, M. Kiguchi, Y. Yamane, and Md. Shah Alam, 2015: Trends in precipitation characteristics in Bangladesh from 1950 to 2008, *SOLA*, **11**, 113-117.

Wijngaard, J.B. et al. 2003: Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series. *Int. J. Climatol.*, **23**, 679-692.

【成果発表】

Masashi Kiguchi, Change of rainfall characteristics in Bangladesh using 126-years record, The 11th annual ACRE meeting, ACRE Japan, ACRE SE Asia, ACRE China-3, and C3S data rescue service (DRS) workshops, 八王子, 2018年11月15日

Kasashi Kiguchi, Change of rainfall characteristics in Bangladesh using 126-years records, Inter-Institutional Symposium on meteorological research for improved water resources management, グワハティ(インド), 2019年3月3日

木口 雅司, バングラデシュにおける126年日降水量を用いた降水特性の変化, 日本地理学会2019年春季大会, 川崎市, 2019年3月20日

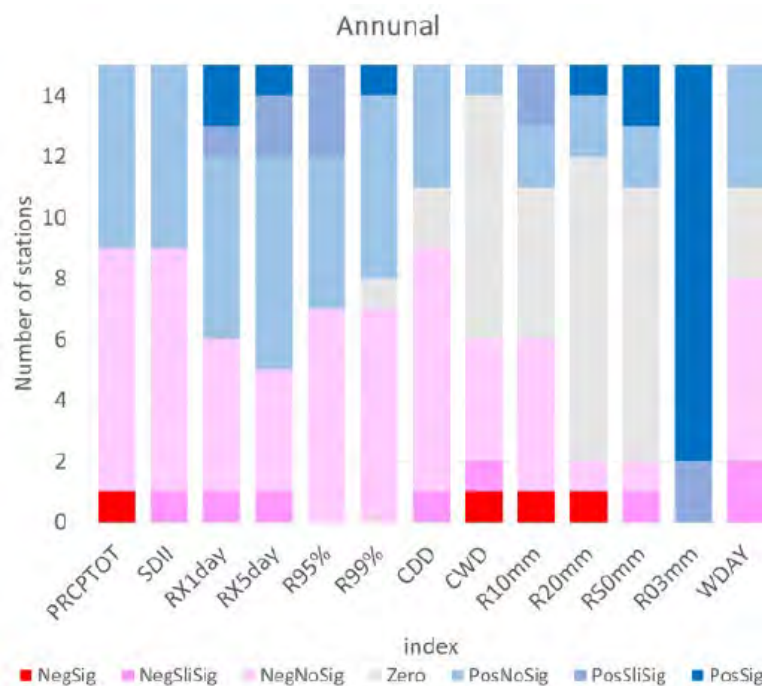


図1. 13の降水指標についてのトレンド解析の結果。青色が増加傾向を示す地点数，赤が減少傾向を示す地点数を示す。濃い色は5%有意水準で有意な地点数。

シングルボードコンピュータを用いた超小型大気光観測装置の開発
Development of ultra-small airglow camera using a single-board computer

鈴木臣 愛知大学・地域政策学部

下層大気で励起される大気波動は、運動量やエネルギーを運ぶことで中間圏・下部熱圏 (MLT) へ大気変動に大きく寄与する。MLT 領域は中性大気と電離大気の境界として大気の上下結合を考える上で重要な意味を持つ。大気光カメラによるイメージング観測は、超高層大気における大気波動の水平二次元情報が得られるユニークな手法である。特に近年、数千 km に渡って波動が伝搬する様子や、台風起源の重力波が日本を覆う規模で同心円状に熱圏高度まで達している描像が得られているが、これは複数台の光学機器による同時イメージング観測の成果である。多地点化において、観測機の価格を抑え、システムを小型化することが求められる。

本研究は、超小型シングルボードコンピュータである Raspberry Pi を用いた新たな OH 大気光 (700 nm 以上の近赤外域) カメラを開発することで、これまでになく小型化・低廉化された大気光観測システムを検証した。本研究の成功は、理科教育や発展途上国での観測にもつながるため、大気光カメラの速やかな多地点展開が期待できる。名古屋大学が運用している超高層大気イメージングシステム (OMTI) の観測空白を埋め相補的に展開・運用していくことで、観測点直上の悪天候によるデータ取得の機会損失を軽減するとともにこれまでになく超広域観測への展望が開ける。

まずはじめに、高感度 CCD ビデオカメラ (WATEC 910HX) を使用したシステムを Raspberry Pi (RP3 Model B) でコントロールする装置を組み上げた。このシステムでは、カメラで得られるアナログ映像はビデオエンコーダを通して jpeg 画像に変換される。Raspberry Pi は、jpeg 画像 (OH 大気光画像) をデータサーバに転送する役割を担う。その際、観測視野内 (天頂角 90 度) に太陽および月が入らない時間のデータのみを転送する設計をおこなった。太陽や月は微弱な大気光画像を汚染する光源となるため解析に適したデータのみがサーバに蓄積されていく。転送するデータ量をなるべく小さくすることでシステムにかかる負荷を圧え、安定した運用を目指した。

次に、上記システムをさらに小型・低廉化するため、CCD ビデオカメラおよびビデオエンコーダ部分を Raspberry Pi 用のカメラモジュール (NoIR Camera V2: アイオーデータ) へ換装することを試みた。このカメラモジュールは IR フィルタが入っていないため、ゼラチンフィルタ (カットオン波長 700 nm) との組み合わせで安価に OH 大気光観測が可能になると考えた。しかしながら、OH 大気光の構造 (大気波動による縞模様) を得るには至らなかった。ひとつの原因として従来のカメラに比べて感度が弱いことが考えられる。今後は、どの程度画像の精度が低いのかを定量的に評価するとともに、より感度の良いカメラモジュールを用いたシステムの構築を試みる。

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

中北英一 京都大学・防災研究所

1. 研究目的

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

2. 研究方法

2年計画の1年度目である平成30年度には、夏季熱雷を対象として、神戸エリアにて名古屋大学が所有するKaバンドレーダーによる観測を実施した。加えて、申請者が別途研究プロジェクトで神戸市に展開するマルチセンサー観測(GNSS可降水量、ドップラーライダー、境界層レーダー、Xバンドレーダー、フェーズドアレイレーダー、ゾンデ観測)と連携し、積乱雲の生成・発達段階を捉える観測を実施した。Kaバンドレーダーによる雲粒子観測があることで積乱雲の成長過程をシームレスに捉えることが可能となる。本年度は、Kaバンドレーダー観測によって得られる偏波特性から、発達する積乱雲とそうでない雲における雲粒子の形状特性や粒径分布特性を解析した。加えて、ドップラー風速を用いた渦度解析を行い、発達する積乱雲の特徴を解析した。

3. Kaバンドレーダーで捉えた初期積乱雲の特徴解析

2018年8月16日8時から10時にかけて六甲山系上空で発生・発達した4つの積乱雲を対象とした。Kaバンドレーダーで観測されたエコー頂高度の時間変化を調べた。発達したA, C, Dのセルではエコー頂高度が急上昇する時刻があるのに対して、最大降雨強度が最も小さいセルBではエコー頂高度は緩やかに上昇している。エコー頂の急上昇が発達の特徴であると考えられる。CFAD解析(各高度におけるレーダー反射因子Zhの頻度分布を高度方向に並べた図)の結果を図1に示す。Zhが主に粒子の粒径に依存することからCFADは雲内部の粒径分布を示したものと考えられる。発達するセルの発達段階において高い高度ほどZhが大きい値に分布しているが、エコー頂が上昇すると分布の傾向が変化し、ある高度から上ではZhが小さな値に分布している。これは、粒子が上昇し続ける場合には、併合過程が上層ほど進むため粒径が大きくなるが、落下速度が大きな大粒径の粒子が生成すると、小さな粒子のみが上層に運ばれるため上層に行くほど粒径が小さくなると考えられる。発達するセルにおいてエコー頂高度が急上昇することとその段階で粒子の分布が大きく変化することから、発達するセルにおいて、降水セルへの遷移の段階で強い上昇流が発生し、降水粒子の生成が進むことが示唆された。

4. Kaバンドレーダーで捉えた初期積乱雲の渦度解析

都市気象LESモデルの計算結果を利用してレーダー観測による擬似観測値を作成し、レーダー観測による渦度を検証した。観測方向、観測分解能の影響をそれぞれ評価し、Kaバンドレーダーの分解能であれば、数百mスケールの上昇流の周囲に生成する渦度を探知できることを示した。さらにKaバンドレーダーの1分毎の高頻度観測みより渦度の時間変化の

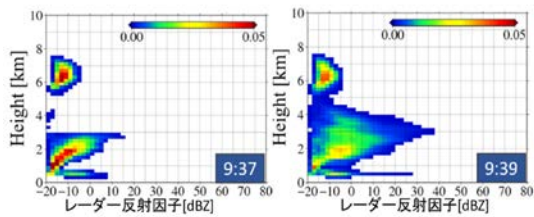


図1:セルD の発達時刻前後におけるCFAD

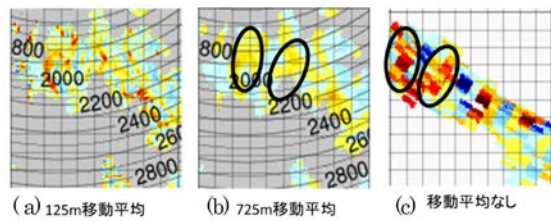


図2: 渦度 (a),(b)Kaレーダー,(c)PAWR

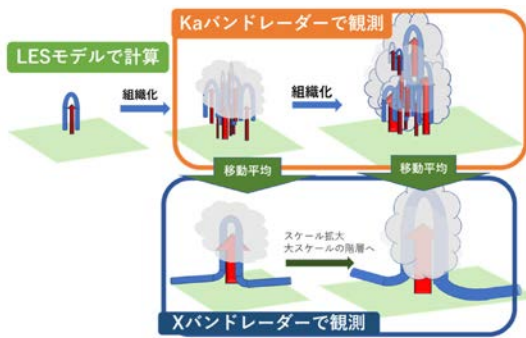


図3:渦度・上昇流のスケール変化の概念図

追跡が可能であることを示した。これは、Kaバンドレーダーの空間分解能の有効性を時間空間スケールの両面において示している。Kaバンドレーダーで捉えられた細かな現象とXバンドレーダー等の分解能で観測した現象とつなげるためにKaバンドレーダーの移動平均を用いたアップスケールリングを行った。図2に示すように、移動平均を施すことでより大きいスケールの現象のみが残り、Xバンドレーダーで観測されたものと対応している。図3に検証を踏まえた上昇流の発生から積乱雲の発達に至るまでの過程の概念図を示す。LESモデルで示される上昇流は発生後組織化し、積雲や積乱雲のスケールへと変化する。Kaバンドレーダーではセル内部の下部構造を捉えているため渦度分布が複雑である。Xバンドレーダーで観測すると大きなスケールの現象を捉えることになる。これはKaバンドレーダーの観測値を移動平均したものと概ね一致すると考えられる。したがってセルの発生から発達への過程における渦管構造の発展を追跡するためにはセルのスケールに対応したスケールで現象を抽出することが必要であると考えられる。

5. 成果発表

【査読付論文】

- 中北英一・新保友啓・佐藤悠人・山口弘誠・大東忠保：Kaバンドレーダーを利用した積乱雲生成段階に関する研究，土木学会論文集，B1（水工学），第74巻，No.4，pp.55-60，2018.

【講演】

- Nakakita, Eiichi: Kenote Speech, "Overview of fundamental and practical researches on generation and development of baby-rain-cell aloft in a severe storm for urban flash flood risk reduction using various types of weather radars and gestationary satellite", 4th International Conference on Water Resources (ICWR 2018), Bayview Hotel, Langkawi, Malaysia, Nov 28, 2018.
- 中北英一：講演「豪雨のしくみを理解して豪雨災害に備えるーゲリラ豪雨の早期探知と危険性予測を交えてー」、建築物防災講演会、建設交流会館グリーンホール、大阪、2018年9月5日。
- 中北英一：講演「豪雨災害を知るーゲリラ豪雨の早期探知・危険性予測から温暖化による影響までー」、科学技術に関する調査プロジェクト、国立国会図書館調査及び立法考査局科学技術室、国立国会図書館、東京、2018年9月7日。

高ベータプラズマ中の運動論的不安定性による低周波波動励起
Excitation of low-frequency waves by
kinetic instabilities in high beta plasmas

天野孝伸（東京大学・理学系研究科）

地球磁気圏で見られる周期数分程度の低周波電磁流体波動(Pc5波動)の励起要因の一つとして運動論的なプラズマ不安定性が考えられている。線形理論の枠組みは提唱されているものの、励起された波動がプラズマ輸送(拡散)に及ぼす影響については必ずしも理解されていない。磁気圏における不安定性の自由エネルギーとしては圧力勾配や温度異方性が考えられるが、本研究では簡単化のため一様系を用いて温度異方性が励起する不安定性の線形・非線形発展の性質について、ハイブリッドコードを用いた数値シミュレーションによって調べた。具体的には圧力のほぼ無視できる冷たい等方成分を流体として、温度異方性を持った熱い成分を運動論的に扱う手法を用いて、初期に垂直方向の温度が卓越する場合について2次元の数値シミュレーションを行った。このような場合には電磁イオンサイクロトロン不安定性(EMIC)とミラー不安定性という性質の異なる2種類の不安定性が共に存在し、パラメータ依存性はあるものの、通常は前者の方が優勢であることが知られている。しかし数値シミュレーションでは、振幅は小さいものの非線形段階においてミラー不安定性に特徴的な磁気圧とプラズマ圧の負相関が現れることが分かった。シミュレーション結果の解析から、これはEMIC波動によるピッチ角散乱の結果として形成される非Maxwell分布によってミラー不安定性の条件が満たされるためであると結論付けた。一方で、シミュレーションによって再現された振幅は観測を説明するには小さすぎることも明らかになった。この過程のパラメータ依存性の調査や、磁気圏物理への応用については今後の課題である。

2 流体方程式系に基づく MMS 衛星データの解析

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

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

研究目的

昼側の磁気圏境界では、太陽風磁場の向きに応じて太陽風起源のプラズマと磁気圏起源のプラズマによる非対称磁気リコネクションが起こることが知られている。本研究では、磁気リコネクションの中央部において磁力線同士を繋ぎ替える、磁気拡散領域の構造と、その中で生起している物理過程、特に、励起された波動による異常抵抗発生の可能性に焦点を当てて研究を実施した。

研究手法

上述の目的を達成するために、次のような2流体（運動）方程式と呼ばれる電子とイオンを別々の流体として扱う枠組みを用いて、問題の解明に取り組んだ。

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

ここで、 m は質量、 n は密度、 \mathbf{v} はプラズマの並進速度、 e は電荷素量、 \mathbf{E} は電場、 \mathbf{B} は磁場、 \vec{p} はプラズマ圧力テンソル、 \mathbf{R} は波動粒子相互作用に起因する衝突項、さらに、各パラメータの添え字 e 、 i は電子、イオンに関する量であることを表している。MMS 衛星は4機が立体的に配位されることから、衛星で観測されたスカラー量の空間勾配 (∇) やベクトル量の発散 ($\nabla \cdot$)、回転 ($\nabla \times$) などを差分法によって計算することができる。その特性を用いることによって、4機の衛星の中心（重心）における電子とイオンに関する運動方程式の成立について調べることができる。その際、上式中の衝突項 \mathbf{R} は観測データから直接求めることはできないが、他の項は観測値から直接計算できるため、 \mathbf{R} は式の残差として求めることができる。

研究成果・考察

本研究では、Science 誌で Burch et al. [2016] が、また、JGR 誌で Webster et al. [2018] が報告している、MMS 衛星が電子拡散領域 (Electron Diffusion Region: EDR) の近傍を通過している2つのイベントについて、われわれの考案した方法を適用した。図1は Burch et al. のイベントに関する解析結果で、低域混成波帯 ($1/2 f_{LHR} < f < 3/2 f_{LHR}$) の波動強度 (青色) と、電子の衝突項を単位電荷と電子密度の積で割ったベクトルの絶対値 (赤色) がプロットされている。この図から明らかのように、両者は非常に良い相関を示しており、相関係数は 0.74 であった。当該

の時間帯は、MMS 衛星が EDR に最接近する直前に南側ジェット領域から上流側の昼間側磁気圏に出て行った時に対応し、イオン拡散領域 (Ion Diffusion Region: IDR) の内部に相当する領域で見いだされた現象である点が鍵である。この事実は、IDR おいて、静電的な低域混成波 (LHW) が励起され、それが異常抵抗の発生を引き起こしている可能性を示している。地球磁気圏中の無衝突磁気リコネクションにおいては、電子慣性あるいは、電子圧力テンソルの非対角成分で表される電子粘性に原因があるとされているが、その様な機構によって対向する磁力線を融合させる EDR ではなく、それを取り巻くように存在する IDR において発生する異常抵抗も、磁力線を拡散させ融合させることに関して、ある一定の割合で寄与している可能性を示している点が重要である。

さらに、イオンと電子の衝突項の時間変化を比較したところ、両者に対応するベクトルは、ほぼ反対方向を向いていた。紙面の関係で詳細は省くが、衝突項は、異常抵抗、異常ローレンツ力、レイノルズの歪みで構成されることが示される。イオンと電子の衝突項が互いに打ち消し合うことを含め、得られた結果を理論的に考察することによって、衝突項は LHW による異常抵抗の効果を表していることが結論づけられた。上述した2つのことより、昼側磁気リコネクションの磁気中性線付近で、LHW が異常抵抗に寄与しているという結論を得ることができた。

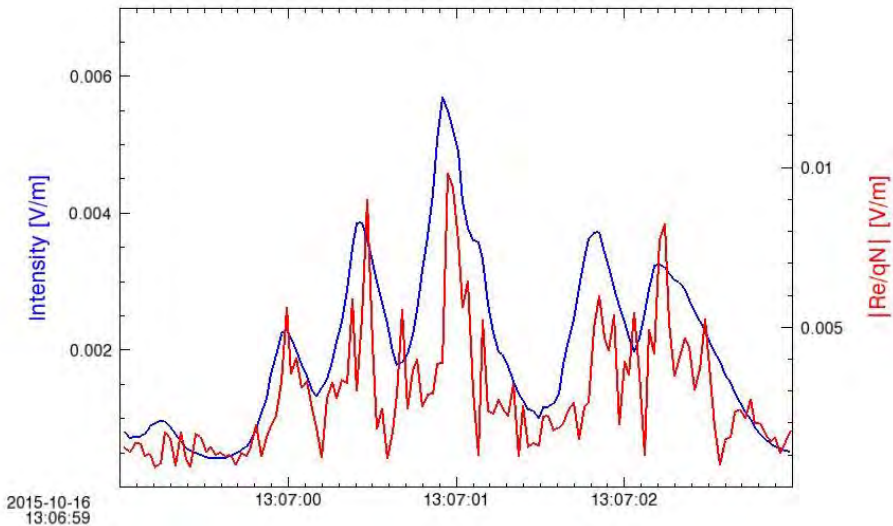


図 1. Burch et al. のイベントにおける波動強度 (青色) と電子衝突項 (赤色) の比較

成果発表

1. Kobayashi, Y. et al., Investigation of the magnetic neutral line region with the frame of two-fluid equations: A possibility of anomalous resistivity inferred from MMS observations, JpGU Meeting 2018, 千葉, 2018 年 5 月 21 日
2. Kobayashi, Y. et al., Investigation of the magnetic neutral line region with the frame of two-fluid equations, 第 144 回 SGEPPS 総会及び講演会, 名古屋, 2018 年 11 月 27 日
3. Kobayashi, Y. et al., Investigation of the magnetic neutral line region with the frame of two-fluid equations, AGU Fall meeting 2018, Washington DC, USA, Dec 10, 2018

沈殿法による水試料の放射性炭素分析法の信頼性

Reliability of radiocarbon analysis for water samples by precipitation method

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

水試料の正確な ^{14}C 濃度分析のためには、試料中の生物活動による炭素成分への影響を排除する必要があり、そのための処理として、毒物添加が行われている。しかし、調査環境によっては、毒物の使用ができないこともあるため、水試料中の溶存炭素を、炭酸塩の沈殿として固定する「沈殿法」が代替措置として期待される。しかし、水中の硫酸濃度とDIC濃度の比が高くなると、炭酸塩の沈殿が形成しにくくなることが報告されており (Kusakabe, 2001)、試料の化学組成によっては沈殿法による措置がとれない可能性がある。

これまでに、毒物添加を行わない天然試料について、どの程度の時間でどの程度の ^{14}C 濃度の変化が生じるのか、高い硫酸濃度を含む様々な化学組成の水試料について、沈殿法処理による ^{14}C 濃度測定を実施している。本年度は、それらの分析値と他の機関による分析結果を合わせて解析することで、沈殿法処理の信頼性について検証を行い、論文公表を目指した。

研究結果

毒物添加を行わない5つの天然試料について、よりDIC濃度の低い試料で、 ^{14}C 濃度・DIC濃度・ $\delta^{13}\text{C}$ の変化が大きかった。その原因として、試料中の有機物が分解したと想定される試料と、含有するメタンの酸化が想定される試料があることがわかった。これらの結果と水試料を保管する容器の材質についての基礎的なデータを論文として公表した (Takahashi et al., 2019)。

また、様々な化学組成の水試料に対して、沈殿法とヘッドスペース法やバブリング法といった他の手法との分析値を比較すると、硫酸濃度の高い試料では、 ^{14}C 濃度・ $\delta^{13}\text{C}$ ともに大きく結果が外れる分析値もあったが、多くの分析結果で、 $\delta^{13}\text{C}$ がばらつく傾向があったが、 ^{14}C 濃度のばらつきは小さいものであった。この $\delta^{13}\text{C}$ のばらつきは、沈殿法以外の手法においても見られたことから、硫酸が沈殿形成以外の試料処理にも影響しているものと考えられる。DIC濃度が非常に高かったり、低かったりする試料でも、分析値のばらつきが見られた。その原因としては、前者では試料から抽出した CO_2 から適切な量を分離する際に同位体分別を生じたため、後者では外来炭素の混入の影響が大きいためと考えられる。これらの結果をThe 23rd International Radiocarbon Conferenceにて発表し、Radiocarbon誌に投稿を行った。

成果発表 (論文)

Takahashi HA, Minami M, Aramaki T, Handa H, Matsushita M. 2019. Radiocarbon changes of unpoisoned water samples during long-term storage. Nucl Instrum Meth B. doi: 10.1016/j.nimb.2018.11.029.

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

成果発表 (学会発表)

Takahashi HA, Minami M, Aramaki T, Handa H, Saito-Kokubu Y, Itoh S, Kumamoto Y. Suitable procedure in preparing water samples for radiocarbon inter-comparison. The 23rd International Radiocarbon Conference, ノルウェー工科大学, 2018/06/20.

惑星間空間磁場朝夕成分に依存する夜側沿磁力線電流系の起源 Origin of the interplanetary magnetic field By-dependent field-aligned current system on the nightside

渡辺正和 九州大学 国際宇宙天気科学・教育センター

研究目的

電離圏高度において、昼側カusp領域に惑星間空間磁場朝夕成分 (IMF By) に依存する対流・沿磁力線電流系が存在することはよく知られているが、同様の対流・沿磁力線電流系が夜側にも存在する。IMF南向き時にIMF Byがあると対流セルに朝夕非対称性が現れ、一方が丸く (round cell) もう一方が三日月形 (crescent cell) になる。IMFの向きが朝夕方向から有限北向きになると三日月セルが分裂し、分かれた夜側のセルが真夜中付近まで張り出すことで前述のIMF By依存性を作っているように思える。これを模式的に表したものが図1である。この分裂三日月セルのパターンは、開磁力線と閉磁力線がリコネクションを起こすことで理論上は一応説明できるが、そもそも現象論として分裂三日月セルは確立していない。まず分裂三日月セルの存在を示すことが必要である。本課題の第一歩として、SuperDARNデータを用いて分裂三日月セルの現象論を確立することを目指す。

研究方法

SuperDARNデータを用いて電離圏ポテンシャルを求める。グローバルなポテンシャルパターンを見るためには、極域全体から数多くのレーダエコーが得られていることが必要である。経験的にレーダエコーが多いのは太陽活動極大期の冬半球である。また北半球のほうが南半球よりレーダがカバーする領域が広い。そこで解析を北半球のレーダで期間を2001年11-12月と2002年11-12月に絞り、IMFデータを参照しながら数時間分裂三日月セルのパターンが継続する事象を探した。事象の探索は組織的・網羅的なものではなかったが、IMF By<0の事象を2例、By>0の事象を2例見つけることが出来た。その4例について事例解析を行った。

解析結果

図2から図5に4事象で得られたポテンシャルパターンの例を示す。いずれも北半球のポテンシャルである。図2は2002年12月21日 (事象1)、図3は2001年12月1日 (事象2)、図4は2001年11月16日 (事象3)、図4は2002年12月19日 (事象4) で得られた。事象1と事象2はIMF By<0の事例で、事象3と事象4はIMF By>0の事例である。曲線は等ポテンシャル線 (数値の単位はキロボルト) を表し、点はレーダ観測が存在することを示している。いずれも図1に予想した分裂三日月セルのパターンを示している。

考察

解析結果をみると分裂三日月セルの現象論が確立したように思えるが、実は重大な問題を含んでいる。ポイントは三日月セルが本当に2つに分かれているか否かである。詳しくみると、4事象いずれにおいても、分裂した2つのセルの接点 (流れのよどみ点) 近傍ではエコーがないか、あるいは一方向からの視線速度データしかないことが分かった。すなわちフィッティングされたポテンシャル等高線が現実のものを表していない可能性がある。これは解析した4事象では如何ともしがたい。この困難を克服するためには、よどみ点近傍で十分な数のレーダエコーが複数の方向から観測されている事象を見つけなければならない。事象探索は組織的・網羅的ではなかったが、解析期間をざっと眺めた感じでは、その

ような理想的な事象は見つけられなかった。レーダの位置に偏りがあるので、理想的な観測が可能なUTが限られてしまうという事情もある。

一方数値シミュレーションで分裂三日月セルの再現を試みているが、田中高史氏が開発されたREPPUコードではうまくいっていない。ではシミュレーションでは再現できないのかと言うと、そうでもなさそうだ。田中高史氏の古いコードではそれらしいものが再現されている (Tanaka, *Journal of Geophysical Research*, vol. 104, pp 14,683–14,690, 1999)。また海外のMHDシミュレーショングループの結果でもそれらしいものがある (Fenrich et al., personal communication)。REPPUコードで再現できない理由は不明だが、REPPUコードが極めて数値粘性が低いコードであることが関係しているかもしれない。コード内で人工粘性を増やすことは試みる価値がある。

今後の方針

分裂三日月セルの問題は、観測的アプローチもシミュレーションからのアプローチも壁に当たっており、戦略を練り直す必要がある。本課題は2年計画で申請し本年度はその1年目であったが、一旦休止して出直すことにした。

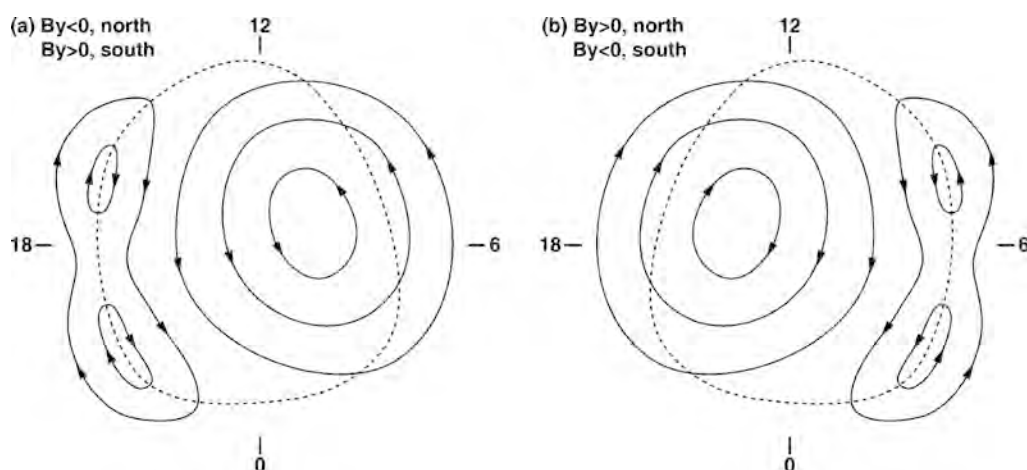


図1 分裂三日月セル（対流）の模式図。点線は磁力線閉閉境界。

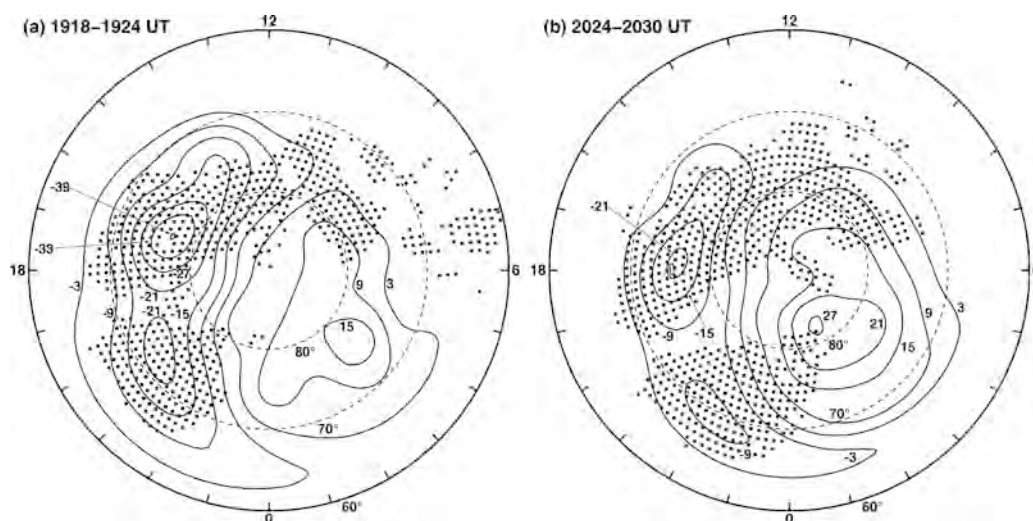


図2 事象1（2002年12月21日, IMF $B_y < 0$ ）におけるポテンシャル観測例

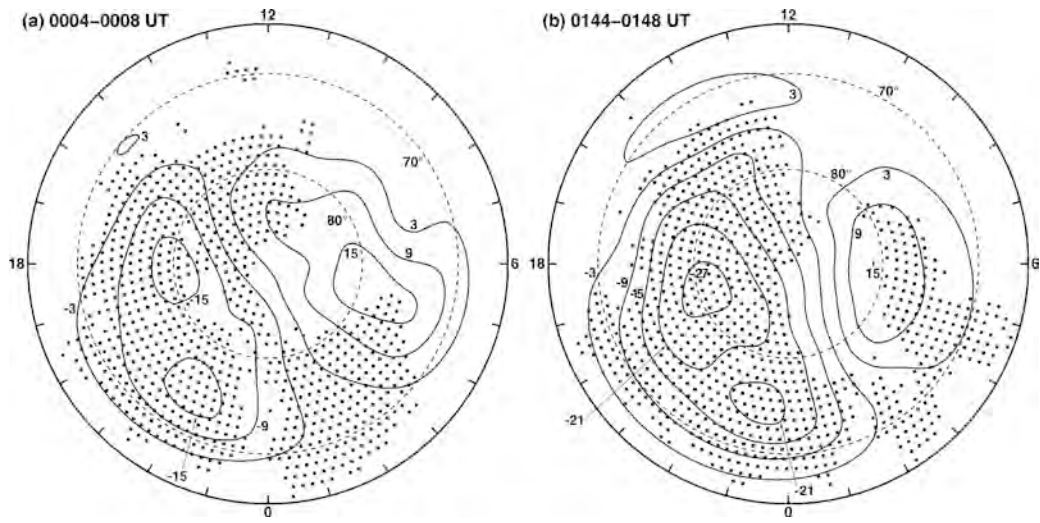


図3 事象2 (2001年12月1日, IMF $B_y < 0$) におけるポテンシャル観測例

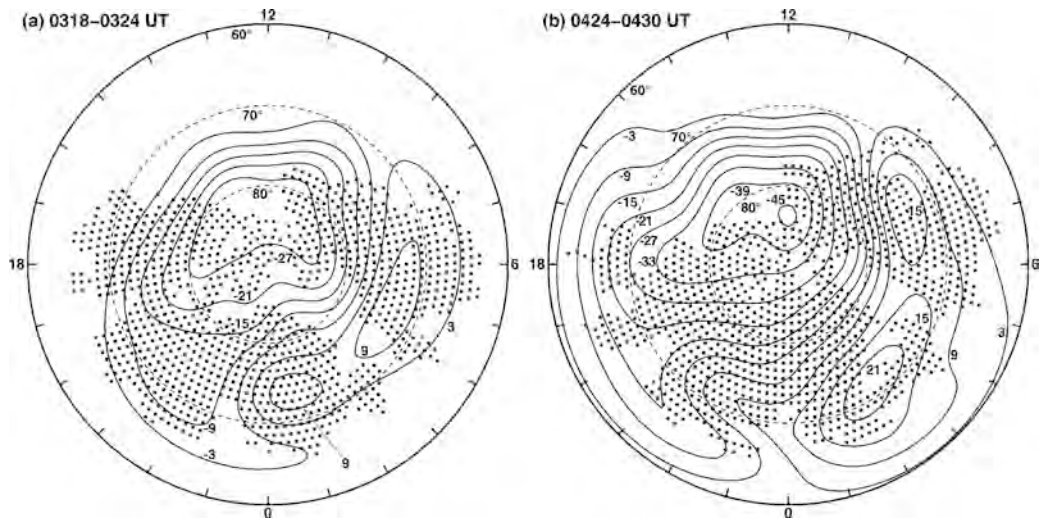


図4 事象3 (2001年11月16日, IMF $B_y > 0$) におけるポテンシャル観測例

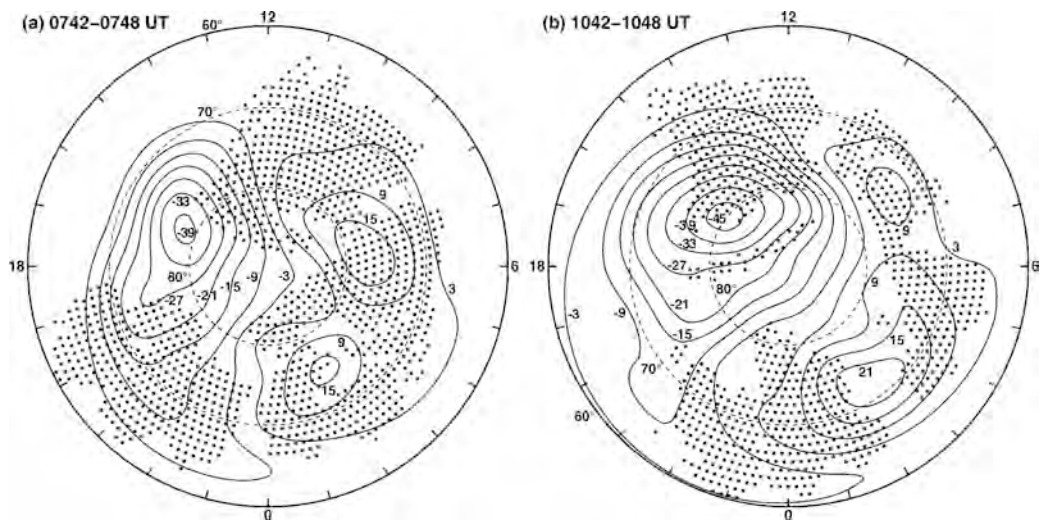


図5 事象4 (2002年12月19日, IMF $B_y > 0$) におけるポテンシャル観測例

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

津田卓雄, 電気通信大学・情報理工学研究所

研究目的

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

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

研究進展状況

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

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

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

Envisat/SCIAMACHY による Mg, Mg⁺ データ（2002-2008年）の収集と解析を進め、オーロラ活動活発時に Mg⁺ 密度が増大する傾向を見出した。一方で、Mg 密度には顕著なオーロラ応答の兆候は確認できなかったが、Mg 密度データについてはデータクオリティが十分ではなかった可能性もあり、より詳細な追加調査/検討が必要な状況にある。また、Na と同様に Mg/ Mg⁺ の応答プロセスを調査する為のモデルを開発することを検討している。

受賞

滝沢響吾（電通大 津田研），地球電磁気・地球惑星圏学会 第 144 回講演会 学生発表賞（オーロラモデル），高エネルギー降下粒子が Na 層に与える影響の化学モデル計算，2018 年 11 月。

電離圏D/E層のプラズマ温度導出と検証
Derivation and verification of plasma temperature in the D- and E-
regions

小川泰信、国立極地研究所・国際北極環境研究センター

研究目的：

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

研究内容・計画：

（1）2017年1-2月の成層圏突然昇温時のEISCATキャンペーン観測で得られた電離圏D層及びE層のISスペクトルデータを用いて、フィッティング変数を様々に変化させた多変数スペクトル解析を、平成29年度に引き続き実施する。

（2）（1）で得られた結果の信頼性を把握するために、同時刻・同高度のトロムソナトリウムライダーや流星レーダーなどの観測データで導出される中性大気温度変動との比較研究を実施する。その解析研究及び検証結果を基に、成層圏突然昇温時の電離圏D層及びE層のイオン温度及び鉛直イオン速度の導出を進め、研究成果として論文にまとめて出版する。

平成30年度の成果内容：

平成28-30年度には、頭脳循環を加速する戦略的国際研究ネットワーク推進プログラム「太陽地球環境における高エネルギー粒子の生成と役割：気候変動への影響を探る」（平成26-28年度、代表：水野亮教授）も活用してEISCATレーダー観測及び解析研究を進め、電離圏D層及びE層イオン温度の導出手法の改善とトロムソ流星レーダーデータを組み合わせた検証を実施した。その結果、2017年1-2月のEISCAT観測による長時間積分データを用いて、成層圏突然昇温時のD層及びE層イオン温度の日変化及び、鉛直イオン速度との対応関係を明らかにした。得られた研究成果を各種学会・シンポジウムで報告すると共に、投稿論文を現在執筆中である。

主な論文：

Nozawa, S., T. Kawabata, K. Hosokawa, Y. Ogawa, T. Tsuda, A. Mizuno, R. Fujii, and C. Hall, A new five-wavelength photometer operated in Tromso (69.6°N, 19.2°E), *Earth, Planets and Space*, EPSP-D-18-00228R1, 70:193, December, 2018.

主な学会講演：

Ogawa, Y., S. Nozawa, M. Tsutsumi, Y. Tomikawa, C. Hall, and I. Haggstrom, Ion temperature variations in the D- and E-region polar ionosphere during stratospheric sudden warming, JpGU2018 meeting, Makuhari Messe, Chiba, Japan, May 20, 2018.

Ogawa, Y., S. Nozawa, M. Tsutsumi, Y. Tomikawa, C. Hall, and I. Haggstrom, Temperature and velocity variations of polar ionosphere during stratospheric sudden warming (SSW), Polar2018 Open Science Conference, Davos, Switzerland, June 20, 2018.

「あらせ」衛星および地上観測によるリングカレント散乱現象の解析
Study of scattering process of ring current ions observed by
the Arase satellite

浅村和史、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所

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

今年度は「あらせ」衛星が取得したイオン種毎の速度分布関数と電界/磁界波動周波数スペクトルを用い、 $10 - 1000\text{eV/q}$ 程度のイオンフラックスが磁力線垂直方向に急峻なピークを持つイベントについて、プラズマ波動との関係を調べた。その結果、このイベントはそのほとんどが磁気赤道付近で検出されていること、また、高い確率で磁気音波と同時に観測されることが分かった。磁気音波はローカルなアルフベンエネルギー程度のエネルギーをもつイオンのリング分布によって生成されると考えられている。一方、本イベントにおけるイオンのエネルギーはアルフベンエネルギーより十分低いため、磁気音波の生成に寄与するとは考えにくく、プラズマ圏に存在する熱的エネルギーイオンが磁気音波によって磁力線垂直方向に加熱されているのではないかと考えられる。ただし、磁気圏イオンがバウンス運動をする中で、電荷交換反応 / クーロン散乱によってロスし、磁気赤道においては磁力線垂直方向成分が残留するなど、異なるメカニズムの可能性も残っており、今後検討を行ってゆく。

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 >

現在、電磁圏・熱圏研究のコミュニティでは、将来電磁圏・熱圏観測小型衛星計画FACTORSの検討が行われている。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・熱圏の物理現象の理解のために、リモートセンシングは重要な手段である。とくに、微細オーロラの高速度詳細変動や、広域撮像によるサブストーム関連現象等の中規模～グローバル変動、紫外大気光の全緯度域観測が求められている。将来小型衛星FACTORSによる中高度リモートセンシングは可視と紫外の2波長領域で行われる予定であり、本研究は特にオーロラ発光と大気光発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観測によるオーロラ・大気光などの微弱光観測の経験が乏しいため、最新技術と知見に基づく科学衛星搭載可能な小型軽量の紫外オーロラ・大気光撮像を可能とする装置の検討・基礎開発を行うことが必要である。

< 研究方法 >

本研究課題であるFACTORS衛星からの可視・紫外カメラ撮像装置の検討を具体的に進めるために、衛星高度範囲300～4000km、昼夜の太陽同期軌道、日照時と日陰時のいずれの観測も想定する。地球周回の場合600nm付近の太陽直達光は60TR/nm、地球日照面は460MR/nmと見積もられる。現実的に使用可能な2nm程度のバンドパスフィルターを用いる場合、これらは地球オーロラに比べてそれぞれ 10^{10} 倍、 10^5 倍明るい。この強烈な光による迷光を低減させるためには、ベーンやバッフルによる遮光光学系が必要である。また、紫外（130-160nm付近）では相対的に太陽光が弱くなり、オーロラ・大気光観測に有利である。

これまでH27-28年度に研究代表者はISEE国際共同研究「衛星搭載イメージング光学系用バッフル・ベーン的设计と開発」に基づき将来電磁圏・熱圏小型衛星のための紫外撮像装置の検討を進めてきた。この際にUSB/SSLのFrey氏ならびにColorado大学Schnieder氏らと研究打ち合わせを行い、本計画には分光器ではなく小型軽量となる単色カメラのほうが適当であると判断された。また、紫外光はレンズを透過しないため、ミラーのみで構成される紫外用対物光学系の検討をすすめた。この結果、良好な収差特性をもち、長さ17cm以下の小型軽量の広視野（40x40度以上）対物系の設計を達成した。本研究では、これらの成果を引き継ぎ、さらに可視・紫外撮像装置を実現するために求められる技術課題の検討と識別ならびに基礎開発を進める。

< 研究結果とまとめ >

本研究では、前年度までの検討を踏まえて、オーロラ（坂野井・平原・三好・浅村）ならびに大気光（大山・津田・山崎）についてそれぞれ会合を行い、FACTORS衛星の科学ターゲットと機器性能の最適化を推し進めた。

特に、熱圏中性大気・電離圏ダイナミクスに関する会合を定期的実施した。ここでは、酸素原子135.6nmと窒素分子LBH-L/LBH-Sから得られるN2/Oの熱圏観測の意義について、NASA/GOLDの静止軌道上から得られた最新データに基づく議論がなされた。

また、紫外線撮像2次元検出器として、MCPとCCDまたはCMOSを組み合わせたIICCDとIICMOS、ならびにMCPを用いない紫外用CCDとCMOSについて、複数のメーカーと交渉しつつ調査した。とくに着目した点は、観測波長(130-180nm)に感度を有することと、耐放射線性能、および入手性と価格である。この結果、紫外CCDもしくはCMOSで対象波長域の量子効率20-30%のものが入手できることが分かった。坂野井・平原・浅村・山崎が検討した結果、高圧電源を必要としない紫外CCDないしはCMOSが適していると判断された。これらの入手性について今後継続的な調査を要する。また、耐放射線性については、来年度以降試験用検出器セットを用いて、若狭湾エネルギー研究センター、または放医研もしくは高崎量子応用研にて試験を行う予定である。

さらに、可視撮像装置について、紫外と比較してより狭い範囲の高空間分解能(～1x1km)が要求されるが、これを達成する視野は8x8°程度であり、れいめい衛星搭載オーロラカメラ(MAC)の対物レンズ性能と一致する。従って、光学系はこれまでの実績に基づく開発が可能と判断された。一方で、可視検出器については高速・低ノイズ特性をもつ科学CMOSの検討が必要である。本年度は、試験用のCMOSカメラを当経費で購入し、基礎的な光学試験を開始した。

< 成果発表 >

Sakanoi, T., M. Hirahara, T. M. Yamauchi, T. Sergienko, K. Asamura, Y. Saito, Shin-ichiro Oyama, H. Kojima, N. Kitamura, Yuichi Tsuda, A. Matsuoka, Y. Miyoshi, K. Hosokawa, N. Yagi, M. Fujiizawa, FACTORS: A future satellite mission for understanding the coupling and transportation processes in the upper atmosphere, 45th Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods, IRF, Kiruna, Sweden 27-31 August 2018.

Sakanoi, T. Y. Miyoshi, M. Hirahara, K. Asamura, and the Reimei Science Team, Small-scale auroras associated with Alfvén waves and pitch-angle scattering, Auroral Physics: International Space Science Institute Workshop, ISSI, Bern, Switzerland, 6-10 Aug., 2018.

Sakanoi, T., Y. Miyoshi, K. Asamura, K. Hosokawa, M. Hirahara, Y. Saito, T. Tsuda, M. Fukizawa N. Yagi, Auroral and Airglow Imagers in Visible and Far Ultra-Violet Wavelengths for of Future Sounding Rocket and Small Satellite Missions, AOGS the 15th Annual Meeting, Honolulu, USA, 03-08 June 2018.

坂野井 健, 浅村 和史, 平原 聖文, 山内 正敏, Sergienko Tima, 斎藤 義文, 大山 伸一郎, 三好 由純, 細川 敬祐, 八木 直志, 吹澤 瑞貴, 小嶋 浩嗣, 北村 成寿, 津田 卓雄, 松岡 彩子, 脈動オーロラロケット Rocsat-XN と LAMP の開発ならびに将来超高大気観測衛星計画 FACTORS, 第144回 SGPSS総会および講演会, 名古屋大学, 名古屋, Nov. 23-27, 2018.

他、本課題に関係する衛星・飛行体搭載光学・紫外線撮像装置検討・開発に関する成果発表は、国際学会発表合計12件、国内学会発表合計8件行った。

太陽フレアのリコネクション周辺領域における極端紫外線を用いたプラズマ診断

Plasma diagnostics around a reconnection region by extreme ultraviolet lines in a solar flare

川手 朋子、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所

○ 研究目的

本研究の目的は太陽フレアにおいて磁気リコネクション領域を観測的に特定し、極端紫外線の輝線形状の成因に制限をつけることである。フレアに伴い、ループ上部において紫外線・X線の高温輝線の輝線幅が広がる現象が見られる。輝線幅増加の要因はMHD乱流・プラズマ乱流・イオン加熱などが考えられるが、その要因は特定されていない。輝線幅増加は特に、粒子加速との関連性が議論されている(Kawate & Imada 2013)が、リコネクション領域周辺の空間構造との対応が詳細に議論されていなかった。本研究は多波長観測により、非熱的電子分布の空間構造から輝線幅増加の原因に制限をつけるものである。

○ 研究方法

我々はReuven Ramaty High-Energy Spectroscopic Imager (RHESSI)、Nobeyama Radioheliograph (NoRH)、Atmospheric Imaging Assembly (AIA/SDO)、EUV Imaging Spectrometer (EIS/Hinode)により同時観測されたリムフレアを特定した。フレアは2015年1月14日に発生したGOES C7.7クラスであり、GOES 1-8Åフラックスのピーク時刻は04:56 UTであった。

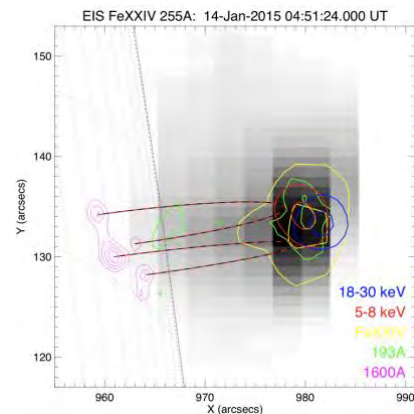


図1 リムフレアのループ構造。

○ 研究結果

RHESSIの観測より、X線スペクトルは熱制動放射とべき乗分布の制動放射によりよく説明できた。また軟X線源と硬X線源は両方ともコロナにあり、軟X線源の上空に硬X線源が位置していた。一方AIAの観測から、フレアの足元はディスク面上にあることが特定できた(図1)。これらの結果から、数10keV程度のほとんどの加速電子はループ上部周辺で散逸していることがわかった。

EISによる極端紫外線スペクトルから、特に硬X線源のさらに上部でFe XXIV輝線が幅の広い輝線形状を持つことがわかった(図2)。輝線形状を2成分ガウスフィットした結果、幅は60-70km s⁻¹と200-250km s⁻¹に対応していた。

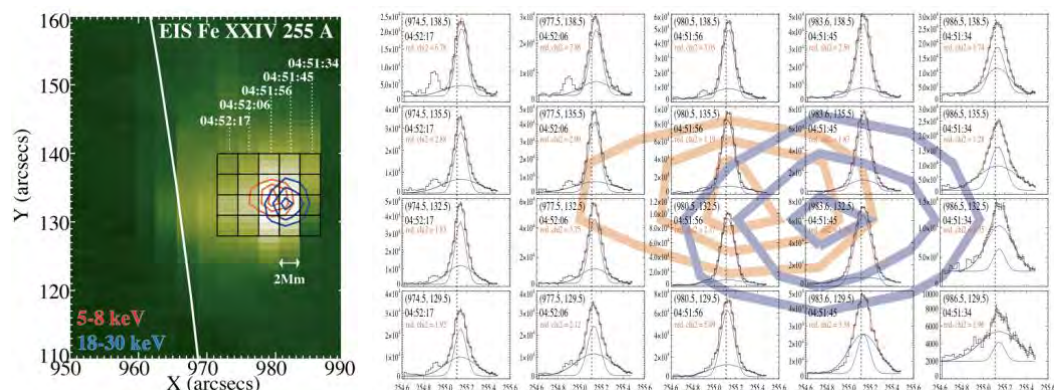


図2 コロナX線源周辺におけるEIS Fe XXIVスペクトル。左右の図ともに、軟X線源(赤)、硬X線源(青)の空間分布を示している。

○考察

RHESSIのスペクトルから熱プラズマの体積エミッションメジャーは $1.8 \times 10^{47} \text{ cm}^{-3}$ であり、硬X線放射領域の密度は $2.4 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ であると推定される。

X線・極端紫外線の観測から、リコネクション領域は極端紫外線の輝線幅の広い領域よりさらに上空に位置していると考えられる。Fe XXIVの輝線幅について、 $60\text{--}70 \text{ km s}^{-1}$ はFe XXIVの典型的な熱運動により発生する幅であると解釈できる。 $200\text{--}250 \text{ km s}^{-1}$ については、次のように考えられる。コロナ磁場を $B \sim 20 \text{ G}$ と仮定するとX線スペクトルから得られた密度をもちいて $v_A \sim 250 \text{ km s}^{-1}$ となり、リコネクションアウトフローに伴うアルフヴェン乱流としてよく説明できる。また、 $200\text{--}250 \text{ km s}^{-1}$ に対応するイオン温度は $40\text{--}50 \text{ MK}$ であり、選択的なイオン加熱として考えられる範囲の値である。一方、明確な構造のないプラズモイドは考えづらい。高エネルギー電子を励起しているプラズマ乱流を考えると、硬X線源と輝線幅の広い構造は一致しておらず、否定できる。また輝線幅増加の要因としてリコネクション電場によるシュタルク効果が挙げられるが、今回の観測結果に相当する電場は $\sim \text{MV m}^{-1}$ であり、現実的ではない。これらの考察から、輝線幅増加の要因はMHD乱流または高温イオンであることが制限できた。

○成果発表

- T. Kawate, S. Krucker, S. Masuda, S. Imada, S. Ishikawa, "Dynamics of high-energy electrons near the reconnection region in a solar flare", Magnetic reconnection 2018, Princeton University, 2018年9月4-8日
- 川手朋子, S. Krucker, 増田智, 今田晋亮, 石川真之介, "コロナ硬X線源周辺領域における極端紫外線を用いたプラズマ診断", 日本天文学会秋季年会2018, 兵庫県立大学, 2018年9月19-21日

木星放射線帯長期変動要因の観測研究

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

三澤 浩昭, 東北大学・大学院理学研究科

[研究目的] 木星から放射されるシンクロtron電波(JSR)は、直接観測のほぼ不可能な木星放射線帯の粒子ダイナミクスの情報を持つ。申請者らはこれまで JSR 強度の連続観測に基づき、数日～週程度の短期の時間スケールの原因を探り、それが太陽変動起因と木星磁気圏変動起因の 2 種あることを示唆してきた。一方、より長い時間スケール、特に数ヶ月～年スケールの変動については、申請者らのグループや米国の研究者らが独立に太陽変動起因の可能性を示唆してきているが、データ取得期間が限定的であることや、十分な観測精度が保証されていないこと等から、変動要因は未解明である。申請者らは過去に ISEE 他 の観測施設で JSR 観測を断続的に行ってきたが、本研究では、①JSR の追加観測による長期変化(トレンド)の導出、②過去の JSR 観測で強度較正に用いていた電波星強度の再評価に基づく、高信頼度の JSR 強度の導出、③別周波数での JSR(～別エネルギーの放射線帯粒子の情報)を反映)観測結果との比較も加えた、粒子エネルギーテクスも交えた変動要因の考察から、JSR 長期変動要因の査定を目的とする。

[研究方法] 上記目的達成のための具体的な研究方法是以下の通りである。

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

[進捗状況および第 2 年度以降の予定] 研究初年度の進捗状況と今後の予定は以下の通りである。

- ① 2018 年 7, 8 月に ISEE の木曾観測施設のアンテナを用い、JSR 強度計測を実施した。強度較正用電波源として 1500-147(インド Ooty 観測所カタログ強度 2.7Jy)を使用した。JSR の絶対強度評価には、木星電波に重畳する、銀河背景放射強度の評価が必要であり、この評価を 2019 年度に実施予定である。
- ② 東北大学の VHF-UHF 帯アンテナが、アンテナ駆動系の故障(2018 年 12 月迄)と受信系の不調(2019 年 3 月初旬迄)により、過去の JSR 観測で用いてきた強度較正用電波源の絶対強度計測は 2019 年度以降実施に繰り越しとなった。
- ③ 1970 年代以降の 2.2GHz 帯の JSR 強度データについて、米国の複数の観測所で計測されたデータを入手するとともに、当研究グループが 1990 年代後半から断続的に行ってきた観測結果を加えて、長期的な変動傾向を把握した。このデータと、①、②から今後得られる 300MHz 帯の JSR 強度データとの比較に基づく、木星放射線帯粒子のエネルギーテクス考察が 2019 年度以降の課題となる。尚、2.2GHz 帯の JSR 長期計測に基づく、木星放射線帯粒子のダイナミクスについては、本研究グループも共著者として加わった研究が国際誌に掲載された(Han et al., JGR, doi: 10.1029/2018JA025849, 2018)。この研究では、2.2GHz 帯の JSR 長期変動では、太陽紫外線変動に加えて、太陽風動圧変動が重要であることを示している。本研究では、この成果を踏まえ、300MHz 帯計測で得られる、2.2GHz の JSR より低エネルギーの木星放射線帯粒子でも同様のプロセスが関係しているか、その査定も行ってゆく。

[成果発表等]

- ・学会・研究会発表: 第 144 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会(2018 年 11 月@名古屋)、第 20 回惑星圏研究会(2019 年 2 月@仙台)、(日本地球惑星科学連合 2019 年大会(2019 年 5 月@幕張: 予定))

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

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

竹内 誠, 名古屋大学・大学院環境学研究科

【研究目的】

日本列島の形成過程を明らかにするため, ジュラ紀付加体中の碎屑物を年代学的・地球化学的に解析し, その後背地の火成作用と堆積盆形成の関係を明らかにする. 特にジュラ紀付加体中の碎屑物は高いSr初生値や先カンブリア時代の碎屑性ジルコンが報告されており, Sr同位体比やジルコンU-Pb年代を用いてその起源を探る. 本年度は花崗岩類から先カンブリア時代の年代が報告されている, ジュラ紀付加体の碎屑物の起源の1つと考えられる, 隣接する飛驒帯の花崗岩類のジルコンU-Pb年代測定を行う.

【研究方法】

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

【研究結果】

Shibata and Nozawa (1986) で先カンブリア時代の年代が報告された飛驒帯花崗岩試料のうち, 工業技術院地質調査所地質標本館(現産業技術総合研究所地質調査総合センター地質標本館)に登録済みの中粒花崗閃緑岩1203D(登録番号R37017), 2901B(R37073), 粗粒花崗岩2901E(R37076)を使用した.

1203D: 本試料のU-Pb年代は, 約230 Maに集中し, 1570, 1920, 1960, 2050, 2550 Maの年代を含む. ジルコン年代の加重平均は 229.3 ± 1.9 Maである. 先カンブリア時代の年代は, ディスコードナントなデータも含めると9点すべてがジルコン粒子のコアの年代である.

2901B: 本試料のU-Pb年代は, 約240 Maに集中し, 1652 Maの年代を含む. ジルコン年代の加重平均は 241.3 ± 3.0 Maである. 先カンブリア時代の年代は, ディスコードナントなデータも含めると3点がジルコン粒子のコアの年代である.

2901E: 本試料のU-Pb年代は, 約240 Maに集中し, 先カンブリア時代の年代は含まない. ジルコン年代の加重平均は 241.4 ± 2.0 Maである.

【考察】

それぞれの試料で最も大きなクラスターからなる年代の加重平均は230~240 Maを示し, 三疊紀の花崗岩マグマの貫入年代を示す. 1203Dと2901BはShibata and Nozawa (1986) で同じ中粒花崗閃緑岩とされたものであるが, 加重平均年代に約10 m.y.差があり, 先カンブリア時代の年代を示すコアをもつジルコン粒子の含有量にも差があり, 別の岩体の可能性がある. また,

Shibata and Nozawa (1986) で粗粒花崗岩とされた2901Eの加重平均年代は2901Bと類似するが, ジルコンの含有量や岩相で大きな差がある.

先カンブリア時代の年代は全て粒子のコアをなすもので, 花崗岩マ

グマに取り込まれた外来ジルコンであり，花崗岩マグマの起源物質が先カンブリア時代の岩石だったか，あるいは先カンブリア時代の岩石が分布する地域に貫入し，取り込んだものと考えられる．よって，Shibata and Nozawa (1986)で報告された先カンブリア時代の年代は貫入年代ではないといえる．

【まとめ】

富山県の飛騨帯加賀沢露頭の Shibata and Nozawa (1986) で中粒花崗閃緑岩とされた2試料 (1203Dと2901B) と粗粒花崗岩とされた1試料 (2901E) について，レーザー・アブレーション誘導結合プラズマ質量分析装置にてジルコン U-Pb 年代を測定した．いずれも貫入年代は230~240 Maを示し，三疊紀の花崗岩である．先カンブリア時代の年代は全て粒子のコアをなすもので，花崗岩マグマに取り込まれた外来ジルコンである．

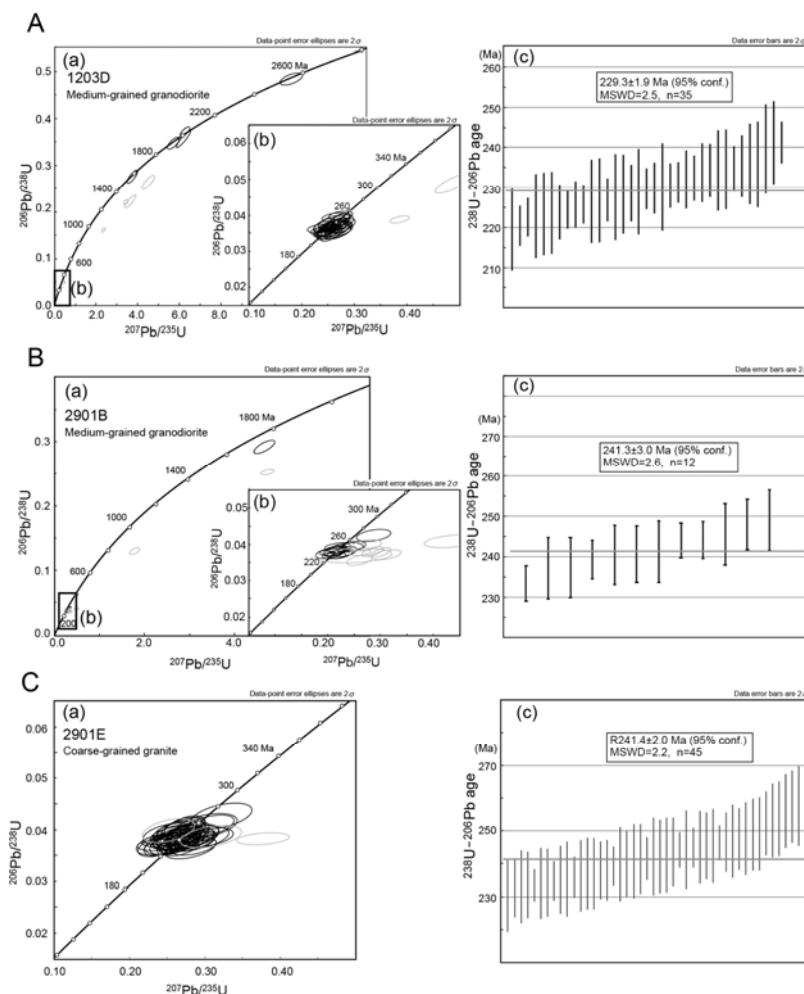
【引用文献】

Shibata, K. and Nozawa, T., 1986, Late Precambrian ages for granitic rocks intruding the Hida Metamorphic Rocks. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **37**, 43-51.

竹内 誠・大川真弘・川原健太郎・富田 覚・横田秀晴・常盤哲也・古川竜太 (Takeuchi, M., Okawa, M., Kawahara, K., Tomita, S., Yokota, H., Tokiwa, T. and Furukawa, R.), 2015, ジルコン U-Pb 年代からみた富山県北東部白亜系陸成層の再定義 (Redefinition of the Cretaceous terrigenous strata in the northeastern Toyama Prefecture based on U-Pb ages of zircon). *地質雑 (Jour. Geol. Soc. Japan)*, **121**, 1-17.

【成果発表】

竹内ほか (印刷中) 飛騨山地加賀沢の花崗岩類のジルコン U-Pb 年代. *地質学雑誌*.



航空機を用いた大気微量気体、エアロゾルのリモートセンシング
Remote sensing of trace gases and aerosols onboard an aircraft

北 和之、茨城大学理学部
金谷 有剛、海洋研究開発機構
小池 真、東京大学
入江 仁士、千葉大学
松見 豊、坪木和久、名古屋大学

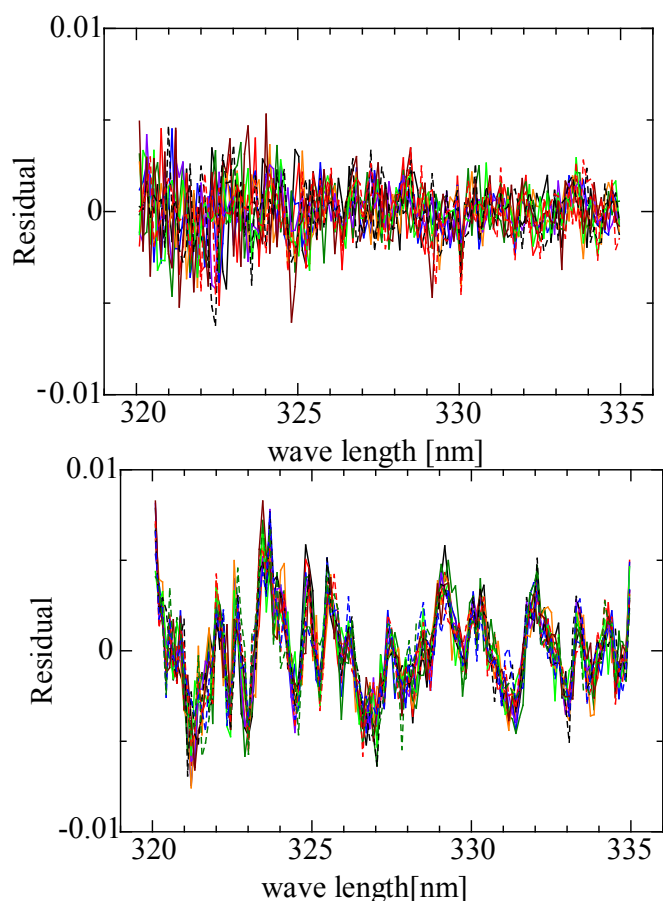
対流圏オゾン、化石燃料の燃焼などで放出される窒素酸化物等のオゾン前駆気体から光化学反応で生成する。日本では、各種規制によりオゾン前駆気体の放出量・大気中濃度ともに減少傾向にあるが、1980年代後半より対流圏オゾン濃度は逆に増加傾向にある。その原因として、アジア大陸などからの越境汚染の影響などが挙げられているが、正確にはまだよくわかっていない。また各種エアロゾルは、その気候影響の重要性から、近年研究が進められており、とくにアジア新興国からの多量の放出の広域影響が注目されている。PM2.5による健康影響も一般に認知されて久しい。

オゾン、窒素酸化物のような微量気体およびエアロゾルの、アジア新興国などからの広域影響を理解するには、地上モニタリングネットワークなどによる観測だけでは不十分で、人工衛星からのモニタリングが望まれている。航空機からのリモートセンシングも、人工衛星観測の試験観測および検証という意味でも、また輸送中の変化を理解するためのプロセス研究の上でも重要な役割を果たしうる。本研究では、航空機から、特に地表付近のオゾンや二酸化窒素、エアロゾルのリモートセンシングを高精度で行う可能性について、検討を行っている。

2012年9月に航空機観測をつくば市上空にて実施した。可視・紫外域分光器 Maya2000Pro 2台、オゾン計 2台を航空機に搭載し、高高度約 8.9km と低高度約 800m の 2 高度で実施した。航空機からの分光観測は、成層圏成分を分離するため、天頂散乱光と地表散乱・反射光の 2 方向について行った。成層圏成分による太陽光吸収は両方向で共通と考えられるため、2 方向で測定した太陽散乱光スペクトルから求めたカラム量の差分をとることで、成層圏成分を除去でき、中一下部対流圏成分のみが検出できると期待していた。しかし、観測時の条件では、天頂散乱光には観測高度直上からの多重散乱光の寄与が非常に大きくなったため、下部成層圏オゾンによる吸収が地表散乱光でのそれに比べ非常に大きいため光路長差が小さくなり、放射伝達モデル計算と観測値は誤差範囲内で一致したものの、期待していた精度で対流圏オゾンカラム濃度を求めることは難しかった。この問題を解決する一つの方法として、天頂散乱光の代わりに太陽直達光を用いて航空機高度から上でのカラム量を求めることがあげられる。しかし通常太陽直達光は太陽を追尾して分光器に導入して測定するが、姿勢が短期間のうちに大きく変化する航空機からは難しい。そこで、太陽を追尾するのではなく、テフロン板など拡散板を用いて太陽直達光をサンプリングする方法を考えた。まず地上で MAX-DOAS 分光観測装置に天頂方向に設置した拡散板からの直達光も測定できる装置を開発することにした。拡散板からは散乱光も散乱され

てはいつてくるが、雲の影響が小さい条件では、直達光成分が数桁強いため無視してよい。今年度は、前年度に引き続き、試作装置を改良するとともに、模擬観測と放射伝達シミュレーションによりその効果を検討することにした。

茨城大学水戸キャンパスの理学部 G 棟の屋上に設置されている観測室内にて観測を行った。分光器は Ocean Optics 社 MAYA2000-pro を使用し、昼から夕方にかけて、太陽直達光および仰角 20 度および 70 度からの散乱光のスペクトルを測定した。直達光と散乱光の太陽スペクトルの比から、オゾンなどの各分子種のカラム濃度を差分吸光フィッティングで求める際に、各分子種による吸収・散乱以外の残差に着目した。直達光と散乱光を組み合わせた際に、散乱光のみで行う従来 MAX-DOAS 法(上図)に対しランダム成分は減少するが、下図のような、系統的な残差スペクトルが現れることが分かった。これが、求める結果に影響するか、する場合どのようにして除去すべきかを検討している。この系統的な構造の発生原因としては、直達光と散乱光を組み合わせたときのみ現れ、同じスペクトルでも直達光同士あるいは散乱光同士では見られないことから、Ring effect の除去など解析上の問題、散乱光の偏光など観測上の問題の両面から現在検討を進めている。



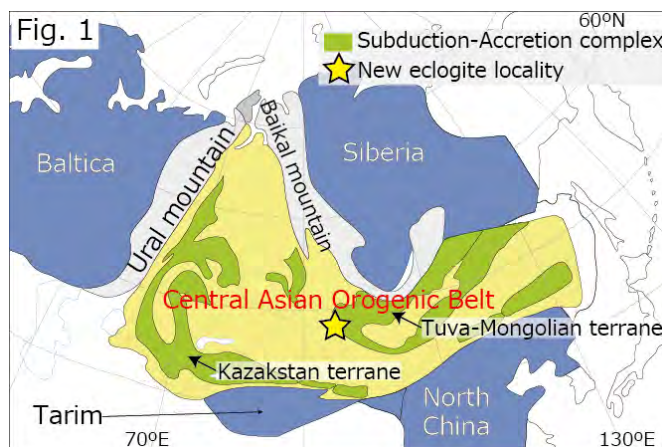
図(上)散乱光のみで行った MAX-DOAS での残差スペクトル、(下) 直達光と散乱光での残差スペクトル

中央アジア造山帯から見つかった古いエクロジヤイトの年代測定
 Age determination of eclogite from the
 Neoproterozoic basement in the CAOB

苗村 康輔

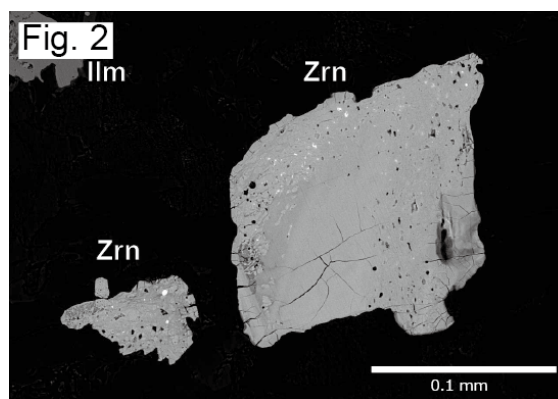
名古屋大学博物館 (2019年4月より京都大学理学部)

モンゴルを含む中央アジア地域には、タリム地塊・シベリア地塊・ヨーロッパ楯状地に囲まれた「中央アジア造山帯」が存在する。中央アジア造山帯の基盤岩はロディニア超大陸の周囲に形成されたモンゴル弧とカザフスタン弧であり、7億年以前の年代値を有する花崗岩質地殻で構成される。7億年頃の地質時代は新原生代と呼ばれ、地殻上で最古のエクロジヤイト(50km以上の深度に沈み込んだ玄武岩)の形成された時代である。



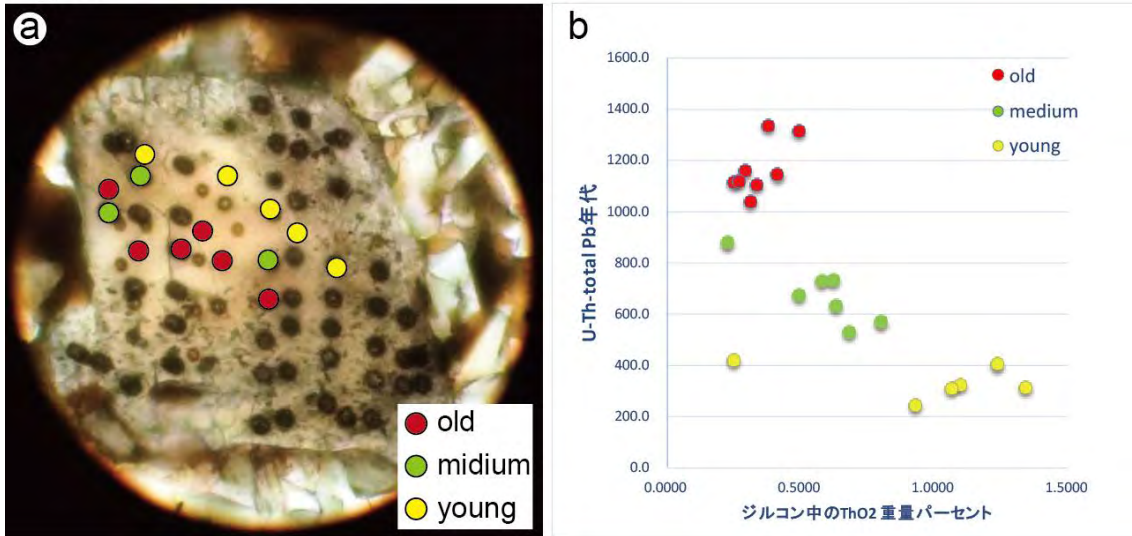
こうした古い地質帯にエクロジヤイトが産出することは稀である。

申請者は、モンゴル北西部のザブハン県から新たにエクロジヤイトを見いだした。ザブハン県には新原生代のモンゴル弧の岩石(Tuva-Mongolia弧という地質帯)が広く分布しており、当該地域も新原生代地殻とされてきた地域だった(図1)。当該地域の主要岩石は石英片岩であり、エクロジヤイトは10メートルサイズのレンズ状に取り込まれて産する。Kozakovほか(2017)は当該地域の変成年代を7億年前と制約した。従って、エクロジヤイトも同様の古い変成年代を持つと推測できるだろう。さらに、当該地域のエクロジヤイトには異様にトリウムに富むジルコン(Th₂O₂=1重量パーセント)が産することが判明した。このトリウム由来の鉛が10億年以上蓄積されれば、電子プローブマイクロアナライザーで分析可能な濃度に到達すると予想される。そこで、我々は当該地域のエクロジヤイト由来のジルコンのU-Th-total Pb年代をEPMAで測定した(鈴木・加藤, 2008)。モンゴル産エクロジヤイトの試料8028には多数のジルコン粒子が観察される。ジルコンは特徴的な内部構造を示し、コア部は均質だがリム部は無数のトリウム酸化物・燐灰石を包有する(図2の白いスポットがトリウム酸化物)。

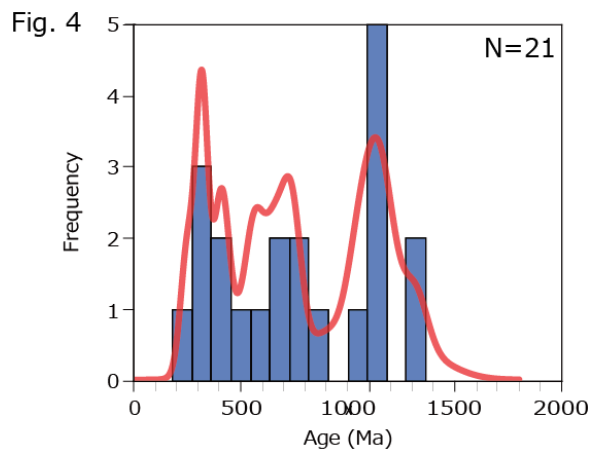


このような特徴は、ジルコンが放射壊変により変質した際に見られるものである。このような変質部は放射鉛が閉鎖系になっていない可能性があるため、年代測定を行うことはできない。今回、ジルコン5粒子からランダムに119点の分析を行った。図3aには分析後のジル

Fig. 3



コン粒子を示した。ジルコン粒子のリム部(変質部)も測定したが、(a)微細な包有物を混在した分析、(b)クラックや変質部を引っかけていない分析点を精査した結果、98点の分析点は棄却された。ジルコンの大部分が変質されているため、年代値をジルコンの成長ゾーニングと関連づけることは困難である。図3bに示したように、ジルコンの年代値はトリウム濃度と負の相関を持つことが分かる。古い年代値を示すジルコンコアはトリウム濃度が0.5重量パーセント以下だが、若い年代値を示す部位は1wt%以上のトリウムを含む。ジルコン中のトリウム含有量はカルシウム濃度と正の相関を示す。ジルコンリムに見られる変質部はトリウムに富む若いジルコンが放射壊変により分解し、トリウム酸化物を析出して形成されたと考えられる。図4では、得られたU-Pb年代値(21点)の誤差を考慮した確率密度分布曲線を赤線で与えている(計算法はSambridge & Compston, 1994に基づく)。確率密度分布に基づいてジルコンの年代値を3つのグループに分類すると、それぞれ



それぞれ 1141 ± 74 Ma, 527 ± 39 Ma, 270 ± 15 Ma という3つの年代値が得られる(誤差は 2σ)。今回、得られたジルコン年代値では、古い年代値は火成作用の年代と考えられる。エクロジャイト変成作用の年代値は、おそらくトリウムに富む若いジルコンの年代値と考えられる。ジルコンは沈み込みプレート内部で起きた炭酸流体活動による溶解-再結晶化作用で変成作用時に若くてトリウムに富むジルコンへと再結晶化したのだろう。従って、エクロジャイト変成作用が起きたのはおそらく新原生代ではなく、古生代後期であり、モンゴルオホーツク海の消滅に伴う沈み込み運動がエクロジャイトを形成した可能性が示唆された。

中国西チンリン造山帯 Jiagantan 金鉱床中のモナザイト CHIME 年代測定 CHIME dating of monazite from the Jiagantan gold deposit in West Qinling Orogen, China

実松 健造 産業技術総合研究所・地圏資源環境研究部門
大鹿 淳也 中国地質大学・地球資源学院

<研究目的>

西チンリン山脈は、顕生代を通じた北中国地塊と揚子地塊の衝突によって生じた造山帯である。また近年、大型金鉱床の発見が相次いでいる中国有数の産金地帯でもある。研究対象地域は西チンリン造山帯の西縁に位置する。本地域には貫入岩関連型金鉱床、スカルン、造山型金鉱床が分布する。貫入岩に関連した鉱床については248Ma~238Maの年代値が報告されている (Sui et al., 2018) もの、その他の鉱床形成年代は明らかになっていない。2005年に発見されたJiagantan金鉱床は下部三疊紀のLong-wuhe砂泥互層を母岩とする堆積岩胚胎性の造山型金鉱床である。鉱床形成に関連する貫入岩の存在は認められず、鉱化は北西—南東の逆断層によって構造的に規制されている。

変質鉱物は主として石英、アンケル石、方解石、絹雲母であるが、変質が極めて弱いため、絹雲母を使ったアルゴン—アルゴン年代測定が行えない。一方、鉱石、変質母岩には碎屑起源、熱水起源のモナザイトやゼノタイム等のウラン—鉛年代測定が可能なリン酸塩鉱物が含まれる。熱水起源のモナザイトから高分解能の年代を得ることができれば、正確な鉱化年代を測定することができる (Suzuki and Kato, 2008)。

レーザアブレーションICP質量分析法や二次イオン質量分析法を用いた金鉱床のウラン—鉛年代測定については複数の報告 (例えばRasmussen et al., 2001) が存在するが、CHIME法を用いたものは極めて少ない。本研究では、変質鉱物が未発達な金鉱床におけるモナザイトCHIME年代測定の適応性を検証する。

<研究方法>

鉱石サンプルの薄片観察、BSE像観察から、鉱化との関連を示す熱水起源のモナザイトを抽出した。熱水起源のモナザイトの特徴として、ゼノタイムやチタン石との共生関係、黄鉄鉱中の包有物、碎屑性モナザイトの変質・交代、石英硫化物脈中に見られる20 μm以下の粒子が挙げられる (Fig.1)。50~100 μmの碎屑性に対し、熱水起源のモナザイトは最大径40 μm以下である。これら微細な熱水起源のモナザイトをCHIME年代測定に供した。

分析は名古屋大学宇宙地球環境研究所年代測定研究部の日本電子JCXA-733電子線マイクロプローブを用いて、加速電圧15kV・プローブ径5 μm・プローブ電流 1.7×10^{-8} Aの条件で行い、X線はピーク、バックグラウンドともに1200秒間積算した。CHIME年代はKato et al. (1999) によるプログラムを用いて計算した。

<結果>

14のモナザイト粒子に対し41点の分析を行い、うち29点について年代値を得た。モナザイトは REEPO_4 , (Th, U)Ca(PO₄)₂, (Th, U)SiO₄, CaSO₄の4端成分で表わされるので、 $(\text{Ca} + \text{Si}) / (\text{Th} + \text{U} + \text{Pb} + \text{S})$ は1になることが期待されるが (鈴木, 2011)、13測定点で大きく1からはずれた (>4.0)。 $(\text{Ca} + \text{Si}) / (\text{Th} + \text{U} + \text{Pb} + \text{S}) < 3$ の測定結果をTable 1.に示す。結果は69Maから477Maを示し、鉱床の形成年代を制約するには至らなかった。

<考察>

年代が計算できなかった試料についてはPbO含有量が検出下限以下であった。全体にウラン及び鉛の含有量が小さいことが年代値の精度に影響していると考えられる。一部のモナザイト粒子は電子線の照射痕が大きくなっているため、メタミクト化している可能性もある (鈴木, 2011; Fig.1)。また、 $(\text{Ca} + \text{Si}) / (\text{Th} + \text{U} + \text{Pb} + \text{S})$ が1を大きく超える試料についてはSiO₂含有量が高く、石英包有物ないし周辺の石英を測定している可能性が考えられる。モナザイトの粒径に制約があるため、包有物や平滑な表面を測定できなかった可能性が高い (Fig.1)。

<まとめ>

変質鉱物が未発達な造山型金鉱床中のモナザイトを用いてCHIME年代の測定を試みた。ウラン、鉛の含有量が小さい測定点は年代値の誤差が大きい。正確な年代決定にはより多くの測定点が必要であるが、特に粒径20 μm以上で包有物の少ないモナザイト試料が不可欠である。

Table1. CHIME U-Th-Pb data of hydrothermal monazite from the Jiagantan gold deposit. The contents are presented in percentage. Ratio represents (Ca+Si)/(Th+U+Pb+S).

Sample	ThO ₂	UO ₂	PbO	Y ₂ O ₃	CaO	S	SiO ₂	K ₂ O	Nb ₂ O ₅	La ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	ratio	Age/Ma
1413 mon1	2.5408	0.0919	0.0339	1.0240	0.3374	0.0028	0.2804	0.0528	0.0246	15.04	30.25	1.047	282.5
1413 mon1	1.2590	0.0328	0.0277	1.2554	0.2908	1.5295	0.2656	0.0102	0.0000	14.39	27.00	0.182	477.7
1413 mon2	0.8880	0.0164	0.0100	1.0910	0.2534	2.3771	0.5673	0.0148	0.0079	15.83	27.31	0.180	252.5
1413 mon3	0.5780	0.0058	0.0063	0.8743	0.2252	0.1309	0.0775	0.0029	0.0000	16.24	29.74	0.839	248.9
1413 mon3	0.7901	0.0124	0.0117	1.1278	0.3403	0.0851	0.1104	0.0024	0.0000	14.68	29.38	1.376	333.0
1413 mon3	0.6875	0.0137	0.0046	1.0503	0.3003	0.0906	0.0657	0.0022	0.0000	14.57	29.65	1.172	150.2
1413 mon3	0.5904	0.0102	0.0018	0.9844	0.2869	0.1208	0.0811	0.0051	0.0083	15.00	29.71	1.069	69.1
1413 mon3	0.7547	0.0235	0.0083	1.7207	0.2888	0.0977	0.1275	0.0089	0.0102	12.73	27.06	1.206	237.3
1413 mon3	1.4906	0.0533	0.0060	1.2744	0.3516	0.1158	0.1338	0.0075	0.0000	12.44	26.83	0.896	85.3
1413 mon3	0.7600	0.0588	0.0067	1.8842	0.2007	0.1045	0.1215	0.0062	0.0000	12.26	27.04	0.877	167.0
1413 mon3	1.0764	0.0479	0.0052	1.0296	0.2360	0.1209	0.1027	0.0064	0.0000	12.47	27.51	0.735	100.7
OO06 mon7	2.5743	0.0906	0.0237	1.3010	0.5146	0.0075	0.4760	0.0640	0.0152	16.14	29.59	1.640	196.1
OO10 mon9	0.2327	0.0026	0.0017	0.9798	0.1005	0.0135	0.5287	0.0200	0.0095	15.40	27.78	8.025	170.4
OO10 mon14	0.9677	0.0110	0.0124	1.8679	0.4874	0.0268	0.3075	0.0092	0.0000	14.26	27.68	3.004	293.3
OO10 mon14	0.9364	0.0090	0.0066	1.3650	0.4501	0.0181	0.1446	0.0080	0.0072	15.27	28.82	2.499	161.8
OO10 mon14	1.1024	0.0171	0.0100	1.4589	0.4168	0.0344	0.1466	0.0041	0.0000	14.69	28.23	1.843	203.8

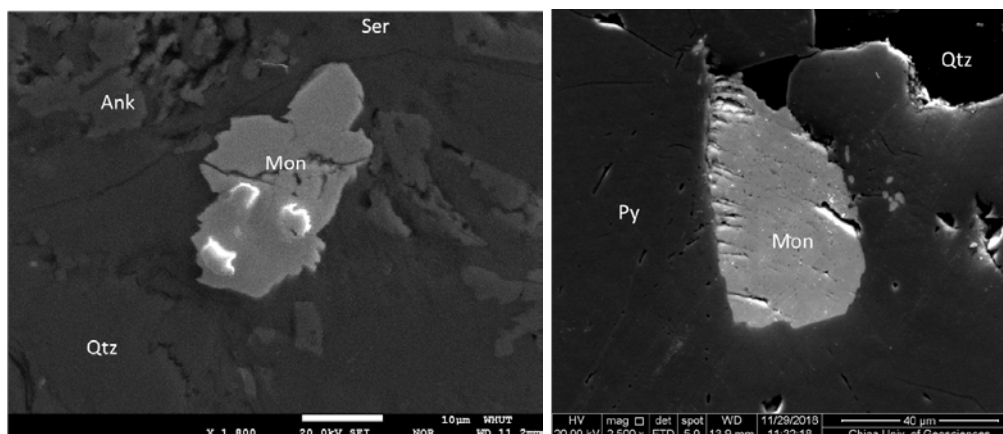


Fig. 1 Back-scattered electron images of monazite grains from the Jiagantan gold deposit.

<引用文献>

KATO, T., SUZUKI, K. and ADACHI, M. (1999) The computer program for the CHIME age calculation. *Journal of Earth and Planetary Sciences Nagoya University*, 46, 49-56.

SUI, J., LI, J., JIN, X., VASCONCELOS, P. and ZHU, R. (2008) ⁴⁰Ar/³⁹Ar and U-Pb constraints on the age of the Zaozigou disseminated gold deposit, Xiahe-Hezuo district, West Qinling orogen, China: Implications for the early Triassic reduced intrusion-related gold metallogeny. *Ore Geology Reviews*, 101, 85-899

Suzuki, K. and Kato, T. (2008) CHIME dating of monazite, xenotime, zircon and polycrase: protocol, pitfalls and chemical criterion of possibly discordant age data. *Gondwana Research*, 14, 569-586

鈴木和博 (2011) EPMAによるTh-U-Pb 化学アイソクロン年代測定法の開発と鉱物粒子年代測定への展開. *地球化学*, 45, 113-128

RASMUSSEN B., FLETCHER I. R. and MCNAUGHTON N. J. (2001) Dating low-grade metamorphic events by SHRIMP U-Pb analysis of monazite in shales. *Geology*; October 2001; v. 29; no. 10; p. 963-966.

海洋底橄欖岩と造山型橄欖岩の全岩化学組成の分析

Whole rock analyses of mantle peridotites derived from oceanic
and continental mantle

道林克禎・加藤丈典、名古屋大学・環境学研究科

研究目的

本研究では、蛍光エックス線分析装置を用いて海洋底橄欖岩と造山型橄欖岩の全岩化学組成分析を実施して、橄欖岩の岩石学的特徴を明らかにすることを目的とした。使用した岩石試料は1983年にProtea.5航海で南西インド洋海嶺マリオントランスフォーム断層から採取されたかんらん岩である。このかんらん岩には含水鉱物として多量の角閃石が含まれていることから全岩化学組成が元のかんらん岩から大きく変化している可能性がある。

研究方法

かんらん岩試料を粉砕して粉末状にした後にガラスビードを作成した。その後、蛍光エックス線分析装置によって主要元素組成を分析した。

研究結果

測定したかんらん岩試料の全岩化学組成は、超塩基性から塩基性の化学組成を示した。今後は、この結果を元にしてかんらん岩の吸水反応系を明らかにしていく。

関連した学会発表

柿畑優季, 2019. 南西インド洋海嶺 Marion transform 断層で採取された変形かんらん岩の構造岩石学的特徴. 変成岩などシンポジウム 2019, ホテル竹島, 蒲郡, 3月18日.

Kakihata, Y., Michibayashi, K., Dick, H. J., 2018. Direct evidence of water infiltration from a transform fault: Marion transform fault, Southwest Indian Ridge. AGU Fall Meeting 2018, T21D-0242, Walter E. Washington Convention Center, Washington D.C., USA, 11 December.

柿畑優季・道林克禎・Dick Henry, 2018. トランスフォーム断層下の含水条件におけるマントル延性変形メカニズム. 日本地質学会第125年学術大会(2018つくば特別大会), R2-O-2, 産業総合研究所, つくば, 12月2日.