所属・職名は2022年3月現在 (注1) :新型コロナウイルスの影響で中止

2021年度 57件

| 研究代表者 Principal Investigator | 所属機関 Affiliation | 所属部局 Department | 職名 Position | 研究課題名 Project Title | 頁 Page | 備考 Remarks |
|------------------------------------|---------------------|----------------------------------|----------------|---|-----------|---------------|
| 湯口貴史 | 山形大学 | 理学部 | 准教授 | 鉱物中の微量含有成分の定量分析が導く石英の 結晶化プロセスの解明 | 70 | |
| 笠羽康正 | 東北大学 | 大学院理学研究科 惑星 プラズマ・大気研究セ ンター | 教授 | Arase衛星DC電場・低周波電場波動の校正データ 提供による内部磁気圏研究の促進:その3 | 73 | |
| 小島 正宜 | 名古屋大学 | 名古屋大学 | 名誉教授 | IPSスペクトルによる太陽風速度解析法の研究 | 75 | |
| 後藤 直成 | 滋賀県立大学 | 環境科学部 | 准教授 | 気候変動が琵琶湖における植物プランクトン群 集に及ぼす影響 ~衛星リモートセンシングに よるモニタリング~ | 77 | |
| 赤田尚史 | 弘前大学 | 被ばく医療総合研究所 | 教授 | 日本の降水中トリチウム濃度と水素酸素安定同 位体比との関係 | 79 | |
| 山田広幸 | 琉球大学 | 理学部物質地球科学科 地学系 | 准教授 | 高解像数値モデルを用いた台風飛行の安全性に 関する検討 | 80 | |
| 宗像 一起 | 信州大学 | 理学部 | 特任教授 | 宇宙線観測データの解析による宇宙天気研究 | 82 | |
| 山崎了 | 青山学院大学 | 理工学部 | 教授 | 高強度レーザーで生成される無衝突衝撃波の研 究 | 83 | |
| 横田 勝一郎 | 大阪大学 | 理学(系) | 准教授 | あらせ衛星搭載XEPの観測データを用いた応答特 性評価 | 85 | |
| 深沢 圭一郎 | 京都大学 | 学術情報メディアセン ター | 准教授 | ポスト京に向けた宇宙プラズマ流体シミュレー ションの最適化手法の研究 | 87 | |
| 松本 淳 | 早稲田大学 | 人間科学学術院 | 教授 | フィルタ捕集法と組み合わせた粒子状有機硝酸 全量測定の試み(2) | 88 | |
| 門叶冬樹 | 山形大学 | 理学部 | 教授 | 低バックグラウンドベータ線計数装置によるト リチウムの測定 | 90 | |
| 佐藤 正樹 | 東京大学 | 大気海洋研究所 | 教授 | 二重偏波レーダーのデータを利用した雲解像モ デルの改良 | 92 | |

| 研究代表者 Principal Investigator | 所属機関 Affiliation | 所属部局 Department | 職名 Position | 研究課題名 Project Title | 頁 Page | 備考 Remarks |
|------------------------------------|-----------------------------|---|----------------|--|-----------|---------------|
| 伊達 謙二 | 気象庁気象衛星セン ター | データ処理部解析課 | 課長 | 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 | 94 | |
| 堤雅基 | 情報・システム研究 機構 国立極地研究 所 | 宙空圏研究グループ | 教授 | 北極域流星レーダー網を利用したEISCAT_3Dと 相補的な下部熱圏観測体制の構築 | 96 | |
| 保田浩志 | 広島大学 | 原爆放射線医科学研究 所 | 教授 | 東南極地域における宇宙線中性子観測とその解 釈 | 98 | |
| 馬場 賢冶 | 酪農学園大学 | 農食環境学群 | 准教授 | 冬季石狩平野の筋状対流雲下の大気場変動につ いて | 100 | |
| 町田忍 | 名古屋大学 | | 名誉教授 | オーロラ等価電流回路解析とデータ同化手法を 用いたAE指数の予測 | 102 | |
| 中澤文男 | 情報・システム研究 機構 国立極地研究 所 | 気水圏研究グループ | 助教 | 東南極ドームふじ観測拠点周辺で採取された積 雪ピット試料のHTO分析 | 104 | |
| 近藤 文義 | 海上保安大学校 | 基礎教育講座 | 准教授 | 波飛沫計を用いた渦相関法による海塩粒子放出 量の直接評価のための海上試験観測 | 106 | |
| 中山 智喜 | 長崎大学 | 環境科学部 | 准教授 | 西之島火山起源のエアロゾル粒子の物理・化学 的特性の研究 | 108 | |
| Siswanto Eko | 海洋研究開発機構 | Earth Surface System Research Center | Researcher | 瀬戸内海における生物光学的要素の時空間変動 | 109 | |
| 大矢浩代 | 千葉大学 | 大学院工学研究院 | 助教 | LF/VLF帯標準電波を用いた火山噴火後のD領域 電離圏変動 | 111 | |
| 中島英彰 | 国立環境研究所 | 地球環境研究センター | 主席研究員 | フーリエ変換赤外分光器による代替フロン HCFC/HFC類の経年変化の解析 | 113 | |
| 篠塚 賢一 | 福岡工業大学 | 情報システム工学科 | 研究員 | 屋久島の山岳渓流水中の窒素同位体比を用いた 硝酸イオンの起源推定 | 115 | (注1) |
| 村田功 | 東北大学 | 大学院環境科学研究科 | 准教授 | フーリエ変換型分光計で観測された大気微量成 分高度分布の経年変化 | 116 | |
| 河野 光彦 | 関西学院大学 | 理工学部 | 研究員 | 持続的地球環境のための高校生のできる課題 | 118 | |
| 浅村和史 | 宇宙航空研究開発機 構 | 宇宙科学研究所 | 准教授 | 「あらせ」衛星による内部磁気圏赤道域低エネ ルギーイオンの加熱現象の解析 | 119 | |

| 研究代表者 Principal Investigator | 所属機関 Affiliation | 所属部局 Department | 職名 Position | 研究課題名 Project Title | 頁 Page | 備考 Remarks |
|------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|----------------|---|-----------|---------------|
| 山本 一清 | 名古屋大学 | 大学院生命農学研究科 | 教授 | 空撮及び林内撮影画像解析による森林空間3次元 モニタリング | 120 | |
| 関 華奈子 | 東京大学 | 大学院理学系研究科 | 教授 | 数値モデリングおよびデータ解析に基づく環電 流が内部磁気圏ダイナミクスに果たす役割の研 究 | 122 | |
| 中野 佑樹 | 東京大学 | 宇宙線研究所 | 特任助教 | Super-Kamiokandeを用いた太陽フレア由来の ニュートリノ探索 | 123 | |
| 土屋史紀 | 東北大学 | 大学院理学研究科 惑 星プラズマ・大気研究 センター | 准教授 | VLF/LF帯標準電波を用いた中・低緯度下部電離 圏擾乱の観測 | 125 | |
| 大塚史子 | 九州大学 | 大学院総合理工学研究 院 | 学術研究員 | 地球磁気圏尾部における斜め伝搬ホイッスラー 波動と電子の相互作用 | 126 | |
| 眞部 広紀 | 佐世保工業高等専門 学校 | 一般科目 | 准教授 | ドローンと小型センサを利用した大気微量気体 とエアロゾルの3次元計測 | 128 | |
| 西山 尚典 | 情報・システム研究 機構 国立極地研究 所 | 研究・教育系 | 助教 | 地上光学-磁気圏衛星の同時観測に基づく脈動 オーロラの周期性および磁気圏プラズマの輸送- 消失過程の研究 | 130 | |
| 河野 英昭 | 九州大学 | 国際宇宙天気科学・教 育センター | 准教授 | SI に伴い中緯度SuperDARNで観測される sea/ground backscatter 振動現象と FLR現象の関係 | 132 | |
| 小島浩司 | 中部大学 | 天文台 | 客員教授 | GSE座標系における宇宙線強度分布解析による IMF磁気中性面のトランジェントな構造変動の推 定 | 134 | |
| 天野 孝伸 | 東京大学 | 理学系研究科 | 准教授 | MMS衛星観測を用いたコヒーレントなホイッス ラー波動の研究 | 135 | (注1) |
| 八木 伸也 | 名古屋大学 | 未来材料・システム研 究所 | 教授 | 放射光施設を用いたエアロゾル化学成分分析に 向けた大気エアロゾル収集システムの開発 | 136 | |
| 林政彦 | 福岡大学 | 理学部 | 教授 | 無人航空機を用いた雲・エアロゾル・水蒸気観 測の高度化 | 138 | |
| 岳藤 一宏 | 宇宙航空研究開発機 構 | 臼田宇宙空間観測所 | 主任研究開 発員 | 低周波VLBIのさらなる技術獲得と課題解決に向 けた干渉実験 | 140 | |
| 加藤 雄人 | 東北大学 | 大学院理学研究科 | 教授 | グローバルモデルと素過程シミュレーションに よる地球内部磁気圏での波動粒子相互作用の研 究 | 145 | |
| 坂野井 健 | 東北大学 | 大学院理学研究科 | 准教授 | 衛星搭載イメージング・分光光学系の設計と開 発 | 147 | |

| 研究代表者 Principal Investigator | 所属機関 Affiliation | 所属部局 Department | 職名 Position | 研究課題名 Project Title | 頁 Page | 備考 Remarks |
|------------------------------------|---------------------|--------------------------------------|----------------|--|-----------|---------------|
| 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 | 主任研究員 | IPS観測による太陽風・CME到来予測精度向上に ついての研究 | 149 | |
| 渡邊 恭子 | 防衛大学校 | 地球海洋学科 | 准教授 | 太陽放射スペクトルの地球圏環境への影響評価 | 151 | |
| 吉岡和夫 | 東京大学 | 大学院新領域創成科学 研究科 | 講師 | ひさき衛星を用いた地球磁気圏プラズマに関す る研究 | 153 | |
| 田中公一 | 広島市立大学 | 情報科学研究科 | 教授 | 太陽圏における銀河宇宙線伝播の研究 | 155 | |
| 寺本 万里子 | 九州工業大学 | 大学院工学研究院 | 助教 | あらせ衛星を用いた地磁気脈動の研究 | 157 | |
| 笠原 慧 | 東京大学 | 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻 | 准教授 | ERG衛星搭載中間エネルギー電子・イオン観測 器のデータ解析 | 159 | |
| 渡邊 堯 | 情報通信研究機構 | ソーシャルイノベー ションユニット戦略的 プログラムオフィス | 招聘専門員 | 流星によるVLF帯電波放射の観測的研究 | 161 | |
| 栗田 怜 | 京都大学 | 生存圈研究所 | 准教授 | 地上-あらせ衛星共同観測を軸とした脈動オーロ ラステレオ観測による降下電子エネルギーの時 空間発展の推定 | 162 | |
| 野澤 恵 | 茨城大学 | 理学部 | 准教授 | 流星火球及び人工流星のプラズマ化による電波 放射の観測 | 164 | |
| 津田 卓雄 | 電気通信大学 | 大学院情報理工学研究 科 | 准教授 | トロムソ Na ライダー観測による熱圏 Na に関す る統計的研究 | 165 | |
| 松岡 彩子 | 京都大学 | 理学研究科 | 教授 | あらせ軌道上磁場データの評価と特性向上の検 討 | 166 | |
| 芳原 容英 | 電気通信大学 | 大学院情報理工学研究 科 | 教授 | 複合電波観測を用いたシビア現象の超高層への 結合過程 に関する研究 | 167 | |
| 三澤浩昭 | 東北大学 | 大学大学院理学研究科 | 准教授 | 太陽Ⅱ型電波バースト微細構造の成因の探究 | 169 | |
| 村木 綏 | 名古屋大学 | 宇宙地球環境研究所 | 名誉教授 | 太陽フレア時に発生した衝撃波に伴う高エネル ギー粒子加速の研究 | 170 | |

鉱物中の微量含有成分の定量分析が導く石英の結晶化プロセスの解明 Crystallization process of quartz deduced from the quantitative analysis of minor component in minerals within a granite

湯口貴史 山形大学 理学部渡邊みのり 山形大学大学院 理工学研究科加藤あすか 山形大学 理学部加藤丈典 名古屋大学 宇宙地球環境研究所

1. 研究目的

珪長質深成岩体において、石英は普遍的に産出する鉱物である。特に、石英は岩体内部での岩相が異なって も共通して産出するケースが多い。例えば、宮崎県の大崩山花崗岩体では3岩相(黒雲母花崗岩、ホルンブレ ンド黒雲母花崗岩、ホルンブレンド黒雲母花崗閃緑岩)に共通して石英を産出し、岩手県の遠野複合深成岩体 では3岩相(主岩相、中心部相、周辺部相)に共通して石英が観察される。このため、カソードルミネッセン ス (CL)に基づく成長構造の解明(例えば、Drivenes et al., 2016)や、結晶化温度の導出(例えば、Wark and Watson, 2006)などの情報から、石英の結晶化プロセスを解明することは、深成岩体全体の形成プロセスの把 握へと発展可能である(例えば、Yuguchi et al., 2020)。

CL像は、結晶構造の乱れや結晶中の微量な含有成分に起因する(Drivenes et al., 2016)。このため石英の結 晶成長の様式を推定可能である。石英中のチタン(Ti)濃度は石英の結晶化温度に依存するため、TitaniQ温度 計によって、その結晶化温度の推定に利用できる(Wark and Watson, 2006)。しかしながら、石英に含有される Ti濃度はごく微量で、電子プローブマイクロアナライザ(EPMA)分析での一般的な分析条件では定量が困難 である。そこで平成28年度から令和元年度の間の共同研究では、名古屋大学・宇宙地球環境研究所(ISEE) のEPMAを用いて、様々な深成岩体中に産出する石英を対象とし、Ti濃度の高精度定量分析法の開発を実施 し、その分析手法を構築した(土岐花崗岩体における成果はYuguchi et al., 2020において公表)。

令和二年度の共同研究では、石英中の Ti 濃度の定量だけでなく、アルミニウム(Al)濃度の定量分析を実施し、その分析手法を構築した。Al 濃度定量の分析条件は、1 つの分光結晶(TAP)を Al の検出に割り当て、加速電圧 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 点の定量値を得るというものである。しかし、この手法では Ti 分析点と Al 分析点が異なる地点となり、Ti 濃度と Al 濃度データの関連付けが難しいという課題が生じた(図 1)。



図 1 令和二年度に実施した黒 部川花崗岩体の優白質岩の石 英(試料番号 007-4a No.1 と No. 5)の分析結果

CL 像中に微量含有元素の分析 地点を示している(Ti 濃度:青 丸・Al 濃度:赤丸)。

そこで令和三年度は、大崩山花崗岩体および遠野複合深成岩体の岩体に加え、岩手県の久喜花崗岩体を対象 として、石英の局所領域において Ti 濃度と Al 濃度を同時定量分析する新たな測定法の開発を行った。これは CL 輝度と微量含有元素(チタン・アルミニウム)との関係を把握するだけでなく、石英が結晶化するマグマ 溜り中の物質移動特性の理解へと繋がり、石英の結晶化プロセスの解明を高度化させることが可能となる。 2. 試料と研究方法(使用した共同利用装置・施設)

石英の CL 像取得は山形大学の SEM-CL (JEOL IT100A+Gatan mini CL)を用い,石英中の Ti・Al 濃度定量 には名古屋大学 ISEE の EPMA (JCXA-733)を用いた。Ti・Al 濃度定量の分析条件は,加速電圧 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。これまでの手法で は、1 つの分光結晶 (TAP)を Si のカウントに割り当て,石英へのダメージのモニタリングを行った。しかし、 Yuguchi et al. (2020)をはじめ,これまでの石英分析で,上記の分析条件で結晶へのダメージは確認されなかっ た。このため、4 つの分光結晶 (PET)を Ti の検出に割り当て、もう1 つの分光結晶 (TAP)を Al の検出に割 り当てた。EPMA分析後の SEM 観察にて,石英の全ての分析点でダメージが生じていないことを確認した。 この手法により、Ti 濃度の検出限界は 14 ppm, Al 濃度の検出限界は 16 ppm,それぞれの分析誤差は約 10% の精度で定量値を取得できた。このような小さな誤差を伴う定量値の導出は、石英結晶の内部構造と Ti 濃度 や Al 濃度の高精度な比較を可能にする。

3. 研究結果·考察

ここでは、大崩山花崗岩体、遠野複合深成岩体、および久喜花崗岩体で得た結果について報告する。それぞれの岩体の石英の Ti 濃度は検出限界以上の値が得られたものの、Al 濃度の多くの値は検出限界以下の結果となった。このため、本章では Ti 濃度の結果を中心に論じる。

まず大崩山花崗岩体の石英に対する定量分析結果について報告する。大崩山花崗岩体においては 126 点の Ti・Al 濃度の定量分析を行った。Al 濃度は検出限界以下となり、Ti 濃度は 24±14~256±11 ppm の幅を持つ。 この Ti 濃度を TiO₂の活動度を1として Wark and Watson (2006)の地質温度計を用いて計算を行うと 24±14 ppm の値(最小値)は結晶化温度 601±81℃となり、256±11 ppm の値(最大値)は結晶化温度 874±21℃を示す。 図 2 は大崩山花崗岩中の自形を示す石英のチタン濃度のラインプロファイルを示したものである。この石英 は CL 像においてコアからリムに向けて明暗の輝度が層状に変化するオシラトリゾーニングが観察される。ラ インプロファイルより、CL 像の高輝度域で高い Ti 濃度(約 130 ppm 以上)、低輝度域で低い Ti 濃度(50 ppm ~125 ppm)を持ち、輝度と Ti 濃度の間には正の相関を有することを把握した。



図2 大崩山花崗岩体の石英の BSE 像, CL 像と微量含有元素のラインプロファイル(Ti 濃度)

久喜花崗岩体においては、6 試料中からゾーニングを有する石英を対象に 102 点の Ti・Al 濃度の定量分析 を行った。Al 濃度は検出限界以下となり、Ti 濃度は 122±11~357±11 ppm の幅を持つ。この Ti 濃度を TiO2 の活動度を1として Wark and Watson (2006)の地質温度計を用いて計算を行うと 122±11 ppm の値(最小値) は結晶化温度 772±24℃となり、357±11 ppm の値(最大値)は結晶化温度 927±20℃を示す。ゾーニングを 有する石英は 900℃前後の結晶化温度を持つことを示しており、深成岩体の石英としては比較的高温で結晶化 したことを示している。図 3 は久喜花崗岩中の石英のチタン濃度のラインプロファイルを示したものである。 図 3A はゾーニングを有した石英、図 3B はオシラトリゾーニングを有する石英を示している。それぞれのラ インプロファイルは、CL 像の輝度と Ti 濃度の間には正の相関を有することを示している。これは石英の結晶 化成長に伴って、メルト中から結晶に取り込まれる Ti 濃度の変化を反映する。



図 3 久喜花崗岩体の石英の CL 像と微量含有元素のラインプロファイル(Ti 濃度) A: サンプル No. 8-4 B: サンプル No. 6-3

遠野複合深成岩体においては、28 点の Ti・Al 濃度の定量分析を行った。Al 濃度は検出限界以下となり、Ti 濃度は $50 \pm 11 \sim 383 \pm 11$ ppm の幅を持つ。TiO₂ の活動度を 1 として Wark and Watson (2006)の地質温度計を用 いて計算を行うと 50 ± 11 ppm の値(最小値)は結晶化温度 670 ± 29 ℃となり、 383 ± 11 ppm の値(最大値)は 結晶化温度 939 ± 24 ℃を示す。また、遠野複合深成岩体においても CL 像の輝度とチタン濃度の正の相関も確 認されており、引き続きデータの拡充を続ける。

以上の点から、本共同研究において石英中の微量含有元素である Ti 濃度と Al 濃度を同時に定量する手法を 構築した。Ti・Al 濃度の同時定量分析の際に、精度よく Al 濃度を定量するかが、次年度の課題となる。また、 いずれの岩体の石英においても CL 像の輝度と Ti 濃度の間には正の相関を有することを把握した。これはビ ーム径 20 µm という局所領域分析と誤差の小さい高精度分析を両立させた重要な成果である。

4. 引用文献

- Drivenes, K., Larsen, R., Muller, A., Sorensen, B. (2016) Crystallization and uplift path of late Variscan granites evidenced by quartz chemistry and fluid inclusions: Example from the Land's End granites, SW England. Lithos, 252-253, 37-75.
- Wark, D., Watson, E. (2006) TitaniQ: a titanium-in-quartz geothermometer. Contributions to Mineralogy and Petrology, 152, 743-754.
- Yuguchi, T., Ogita, Y., Kato, T., Yokota, R., Nishiyama, T. (2020) Crystallization processes of quartz in a granitic magma: Cathodoluminescence zonation pattern controlled by temperature and titanium diffusivity. Journal of Asian Earth Sciences, 192, 104289.
- 5. 成果発表(当該年度に行った口頭発表)
- 渡邊みのり,加藤丈典,小北康弘,湯口 貴史(2021)大崩山花崗岩体中の石英におけるカソードルミネッセンス像とTi濃度およびAl濃度の関係[R6P-07],日本鉱物科学会 2021年年会(オンライン),2021年9月

 Arase衛星DC電場・低周波電場波動の校正データ提供による

 内部磁気圏研究の促進:その3

Enhancement of the Inner Magnetospheric Research

by the provision of the calibrated data

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

<u>2.研究方法・結果</u>

(1) データパイプライン設定・更新および校正

公開済の以下のLevel-2データのメンテナンス作業を順調に進めた。

- ・スピン毎(~8sec 分解能)の電場波形(double probe, EFD-E-SPIN)
- ・スピン毎の衛星ポテンシャル (single probe, EFD-SPEC-1SEC)
- ・1-sec 分解能の電場スペクトル (1~>200Hz, EFD-SPEC-1SEC)
- ・256Hz および 64Hz 電場波形(double probe, E256Hz および E64Hz)
- ・8Hz ポテンシャル波形(single probe, **pot8Hz**)

また、以下のバーストデータについてもLevel-2データの公開準備作業を進めた。

- ・電場波形データ(512Hz)
- ・ポテンシャル波形データ (128Hz)

適用するデータ校正は「周辺 plasma 環境に依存しない、センサー電気性能の反映」までと している。データに対する解説は、ERG Science Center Wiki (<u>https://ergsc.isee.nagoya-</u> <u>u.ac.jp/mw/index.php/ErgSat/Pwe/Efd</u>)で公開されている。

<u>(2)電場およびポテンシャルの評価</u>

電場導出の基礎となるポテンシャル・電場波形のスピン依存変動は、衛星 potential そのも のが spin 時間内に変動し、これが衛星形状・磁場方向等の影響で排除不能である(中川朋 子, 笠羽康正, 笠原禎也, 三好由純(2021).ジオスペース衛星「あらせ」による電場観測 データの評価に関する研究. 東北工業大学 地域連携センター・研究支援センター紀要 EOS, 33. 1. 87-96)。成果の一部を以下へまとめるとともに、引き続き調査を進めつつある。

・電場データの正しい方向からのズレとプラズマ密度の関係を調査した。地球距離が 4RE 以上のとき、プラズマ密度が 640cm⁻³ 以上のときには問題ないが、プラズマ密度が 640cm⁻³ 以下はズレにばらつきがある(武山巧,渋谷澪.東北工業大学卒業論文,2022年3月)。 ・衛星電位のスピン変調成分には、衛星本体の形状が影響していることがわかった。衛星表面帯電モデルを用いて日照面変化を考慮したところ、衛星が直方体であること、および2面にある粒子計測器が日照面変化に寄与することが示された(中村紗都子 et al. あらせ衛星の直方体形状による衛星電位スピン変調と衛星表面帯電モデルとの比較. 第150 回 地球電磁気・地球惑星圏学会総会・講演会. online. 2021年11月)。なお、電場に影響を与えるprobe 毎のばらつきについても、衛星起因光電子の非等方分布が問題を生んでいるとみられ、

(3) Arase 衛星による電場計測を用いた成果創出のサポート:

検討を継続中である。

引き続き、ISEE メンバーを始めとした以下の論文成果創出に代表されるプラズマ圏・磁気 圏電場観測、EMIC などの低周波波動や電離圏電場対応に絡み、あらせ電場観測結果の量的 基礎と信頼性評価を与えた。

・高高度電子加速を生む Field-line 電場: Imajo et al. (2021). Active auroral arc powered by accelerated electrons from very high altitudes. *Sci. Rep.* 11, 1610. https://doi.org/10.1038/s41598-020-79665-5

・電離圏電場と磁気圏電場との mapping: Kawai et al. (2021). First simultaneous observation of a night time medium-scale traveling ionospheric disturbance from the ground and a magnetospheric satellite. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 126, e2020JA029086. https://doi.org/10.1029/2020JA029086

・ULF 波動の Poynting vector 導出への貢献: Takahashi et al. (2021). Relative contribution of ULF waves and whistler-mode chorus to the radiation belt variation during the May 2017 storm. J. Geophys. Res. Space Phys. 126, e2020JA028972. https://doi.org/10.1029/2020JA028972

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

BepiColombo/Mio に搭載された Plasma Wave Investigation (PWI)による DC 電場・低周波 電場波動観測は、Arase とほぼ同設計のアンテナとレシーバーで遂行される。Arase 衛星の 校正は、以下の論文でまとめられた同観測装置による水星での電場計測につながっていく。 なお、BepiColombo は地球・金星 flyby を経て 2021 年 10 月には第一回水星 flyby を迎えて いるものの、PWI の電場観測は未だアンテナ (WPT) が収納中のため事実上行えない。この 展開は、2025 年末の水星周回軌道投入後に予定されている。

IPSスペクトルによる太陽風速度解析法の研究 IPS spectral fitting analysis of solar wind velocity

小島正宜 名古屋大学

IPS を利用した太陽風速度の導出は、豊川・富士・上松の3地点、あるいは2地点で同時に観測されたIPS信号の相関解析で行われている。しかし多点同時観測データが得られなかった場合は、観測されたIPS信号のスペクトルに最もよくフィットする太陽風モデルを作り速度を推測する。これまでこの解析方法の評価を3地点のIPS信号の相関から得られた速度 Vccrf とスペクトルフィッティングで得られた速度 Vspct を比較し行ってきた。

これまでの研究でデータのs/nが良いにも拘わらず①スペクトルフィッティグがうまく行かない場合と②スペクトルフィッティグが良くてもVccrfとVspctに大きな差がある場合が見つかってきた。今回は①について検討した中間報告である。

(1)時系列データの処理

(1-1)太陽南中時近くでIPS天体が観測されるときアンテナサイドローブに太陽がかかり下図のようなバイアスを受ける場合がある。緑縦線間のデータを1ブロックとしてフーリエ解析を行うが、その前にこのバイアスを除去する。これまでは running mean を用いた処理を行っていたが、1ブロックの全データスパーンにパラボラフィッティング処理することにより良いバイアス除去が行うことができるようになった。 → 低低周波域のスペクトル改善



(1-2)スパイク状ノイズの除去は、平均値とRMS 値を用い行う方法を改め、各ブロックのデータの 振幅頻度分布を計算して(右図)行うことに変 更。→切れのよいノイズ除去



(2)単純な最小自乗法では判別が難しいスペクトルの評価 (2-1)右図のスペクトルの場合場合モデル(赤)と観測 (緑)は概観がよく合っている。しかしLSQ解析では 0.5Hz近辺でのずれが問題となる。このようなスペクト ル勾配が大きなところでは横軸(周波数)方向への小 さなずれが縦方法(振幅)の大きな差となり、LSQ解 析に引っかかる。これを解決する方法を考案。



(2-2)右図のスペクトルの場合、0.3Hz付近① のずれは(2-1)の方法で評価を行えばモデル は観測に一致していると判断できるが、0.7Hz 付近②のずれが問題となる。すなわちこの前 後の周波数域は形状が合っているのに、スペ クトルの大きなカーブ域での不一致が見られ ることが多い。これを解決する方法を考案。



(2-3)



この観測されたスペクトル(緑)にはうねりがあり。 これに対し単純なLSQフィッティングを行ったもの が赤線である。赤線はうねる観測スペクトルを縫う ように貫いているためにLSQ解析では不合格となる。 このような場合は、モデルと観測のスペクトルの交 点を通るパラボラフィッティングを行い(黒破線)、こ れを観測スペクトルと見なし、モデルとの間でLSQ 評価を行う。

これらの改善がすべての観測データどのくらいうまく利用できるか、その統計を今後とる必要がある。 またそこで見つかる可能性のある新たな問題一つ一つを地道に解決していく。

気候変動が琵琶湖における植物プランクトン群集に及ぼす影響 ~衛星リモートセンシングによるモニタリング~

Impact of global warming on phytoplankton communities in Lake Biwa -Monitoring using satellite remote sensing-

後藤直成、滋賀県立大学·環境科学部

【目的】

本研究では、琵琶湖の植物プランクトン群集に対する温暖化の影響を評価するため、気 候変動観測衛星(GCOM-C)に搭載された多波長光学放射計(SGLI)を利用して、琵琶湖 全域におけるクロロフィルa濃度分布の季節的変動を捉えると共に、船舶観測により植物プ ランクトン群集のサイズ別現存量、種組成、光合成活性を測定した。

【方法】

2021年4月~12月におけるGCOM-C/SGLIによって測定された490 nmと565 nmの規格 化海面射出輝度(nLw: level-2, 空間分解能 250 m)をJASMES(JAXA)から取得し、 nLwを大気圏外太陽照度で除することで衛星リモートセンシング反射率(Rrs(490, 565))を 求めた。これらのRrsと水中生物光学アルゴリズム(式1: MODISの標準アルゴリズムの係 数を琵琶湖用に最適化した式)を用いて、琵琶湖におけるクロロフィルa濃度を算出した。

 $Chl_{sate(490/565)} = 10^{(C_0+C_1R+C_2R^2+C_3R^3+C_4R^4)} \qquad R = \log(Rrs(490/565))$ (式1) $C_0=0.126, \quad C_1=-3.65, \quad C_2=12.548, \quad C_3=73.820, \quad C_4=115.896$

本研究では上記の衛星観測に加えて、船舶観測を2021年4月から12月の琵琶湖北湖において、月1~2回の頻度で以下の調査を行った。3深度(5,10,15 m)から採取した3層混合湖水をプランクトンネットを用いてサイズ分画(大型:20 µm以上,中型:5 µm-20 µm,小型:5 µm以下)した後、各サイズのクロロフィルa濃度と光合成活性を測定した。また、植物プランクトン群集構造を検鏡および多波長励起蛍光計により測定した。

【結果と考察】

観測期間を通じて船舶観測によって得られたクロロフィルa濃度は、1.8~13.2 mg m⁻³ の範囲を変動し、春期(4月~6月:平均 6.8 mg m⁻³)に高く、夏期(7月~9月:平均 2.9 mg m⁻³)に低い傾向を示した。例年、春期は、冬期循環期に深層から表層に回帰した栄養 塩と代掻きに伴う陸域からの栄養塩を利用して、植物プランクトンがブルームを起こす。 春期の全植物プランクトンに対する大型植物プランクトンの割合はおよそ80%(体積比) であったことから、この時期には、大型植物プランクトンを優占種とする春季ブルームが 発生したと考えられる。一方、夏期におけるクロロフィルa濃度低下は、成層構造の強化に 伴う深層から表層への栄養塩供給量の減少が主な要因であると考えられる。

秋期(10~12月)におけるクロロフィルa濃度は、夏期とほぼ同じ濃度範囲の3.1~4.7(平均3.9 mg/m³)であり、中型の珪藻が優占した。例年、この時期は大型植物プランクトンを 優占種とする秋季ブルームが発生するが、本研究を実施した2021年はブルームを確認でき なかった。2021年の夏季から秋季は、台風等による湖水の攪乱イベントがなく、また、秋 期における降水量が例年と比較して非常に少なかった。これらの気象現象が重なり、2021 年秋期は湖内からも、陸域からも栄養塩供給がほぼ絶たれた状態に陥り、表層は夏期から 引き続いて貧栄養状態であったと推察される。このような貧栄養環境が2021年秋季のブル ームを消失させたと考えられる。 2021年と2019年の秋期(10月~12月)における衛星観測で得られたクロロフィルa濃度分 布を図1に示す。2019年秋期の平均クロロフィルa濃度は5.9 mg m⁻³(中央値5.1 mg m⁻³)と 比較的高く、特に11月と12月は琵琶湖全域で高濃度の分布を示し、秋季ブルームが発生し ていたことがわかる。一方、2021年秋期の平均クロロフィルa濃度は3.9 mg m⁻³(中央値2.3 mg m⁻³)であり、東部沿岸域と南湖を除いて、ほぼ全域において低濃度の分布となってい た。このように、衛星観測においても、例年発生する秋季ブルームが2021年は観測されな かった。一般に、温暖化は低・中緯度における湖沼の成層強化・長期化を引き起こし、表 層を貧栄養化させると予測されている。本研究結果は、今後の温暖化によって琵琶湖の大 型植物プランクトンによる秋季ブルームが消失する可能性を示唆している。



図1. 2021年と2019年の衛星観測による琵琶湖におけるクロロフィル a 濃度分布

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

【成果発表】

後藤直成,伴修平(2021)琵琶湖北湖における植物プランクトン群集動態.日本陸水学会, オンライン,9月22日.

Syuhei Ban, Xin Liu, Ken-ichi Osaka, Naoshige Goto, John C. Wells (2021) High resolution monitoring for subsidiary nutrient loadings and phytoplankton production in north basin of Lake Biwa. Japan Geoscience Union Meeting 2021, Online, May 30 - June 6.

日本の降水中トリチウム濃度と水素酸素安定同位体比との関係 Tritium concentration in Japanese monthly precipitation and its relation to δD and $\delta^{18}O$

> 赤田尚史・田副博文 弘前大学・被ばく医療総合研究所 栗田直幸 名古屋大学·宇宙地球環境研究所

降水に含まれる水素の放射性同位体である"トリチウム"は、高緯度ほど高くなる緯度分布 を示すことが知られている。南北に長い地理的特徴を有する日本では、降水中トリチウム濃 度に大きな差異が認められる。これは、降水をもたらす水蒸気の供給源の違い、海水からの 水蒸気の供給など、様々な要因が考えられる。一方、宇宙線により大気高層で生成されるト リチウムは、全球規模で約72PBqとされており、原子力施設などの人為起源トリチウムに比 べはるかに多い。水素・酸素安定同位体比は水蒸気の起源解析などに幅広く使われており、 トリチウム濃度との関係性を明らかにすることは、バックグラウンド変動を明らかにする うえで重要である。そこで、北海道から沖縄までの数地点を対象に、日本の降水中トリチウ ム濃度と水素・酸素安定同位体比を測定し、その関係性を明らかにする。ここでは、日本の 降水中トリチウム濃度の緯度分布について報告する。

月間降水試料は、北海道札幌市、青森県弘前市、岐阜県土岐市、熊本県熊本市、沖縄県西 原町で採取した。採取した試料は、蒸留・電解濃縮した後、低バックグラウンド液体シンチ レーション計数装置を用いてトリチウム濃度を測定した。また、文部科学省が環境放射能デ ータベースで公開している青森県むつ市、福島県福島市、千葉県千葉市、京都府京都市のデ ータも利用した。水素および酸素安定同位体比は、ISEEの共同利用機器である水安定同位 体分析装置(L2130·i)を用いて分析した。

図に2018年度の結果を高緯度から低緯度の順に示す(最小値、平均値、最大値)。最も高 緯度に位置する札幌では年変動幅が大きく、最も低緯度の沖縄で小さい変動幅を示した。ま た、最小値は日本全国において類似しているものの、最大値では高緯度ほど高い分布を示し た。最大値は全地点において春季に観測されており、この時期には大陸や高層大気から高い トリチウム濃度を有した気塊が流入した可能性が高い。今後、継続した観測を実施するとと もに、水素酸素安定同位体との関係を明らかにする予定である。



図 2018年度の日本の降水中トリチウム濃度の緯度分布

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

山田広幸、琉球大学・理学部

研究目的

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

研究方法

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

研究結果



らす積乱雲の回転)と同程度の大きさであり、海面近くの飛行では非常に強い揺れを伴う可能性が考えられる。このことは、米国のハリケーン航空機観測で航行に影響を与える強い揺れが海面近くの低い高度で報告されている事実と整合する。観測飛行に使用する高度14km付近

はこれらの極大域からは外れている。この高度では、中心気圧(図の下段)が低下する発達期においてやや強い渦度が表れているが、アウトフロー層の強い渦度に比べて1/2~1/3程度の強さである。このことから、スーパー台風への急速発達期間であっても、対流圏界面近くのアウトフロー層と海面付近の境界層を避ければ強い揺れを避けることができると考えられる。

成果発表(論文)

- Hirano, S., K. Ito, <u>H. Yamada</u>, S. Tsujino, K. Tsuboki, and C.-C. Wu, 2021: Deep eye clouds observed in Tropical Cyclone Trami (2018) during T-PARCII dropsonde observations. J. Atmos. Sci., 79, 683-703.
- Yamada, H., K. Ito, K. Tsuboki, T. Shinoda, T. Ohigashi, M. Yamaguchi, T. Nakazawa, N. Nagahama, and K. Shimizu, 2021: The double warm-core structure of Typhoon Lan (2017) as observed through the first Japanese eyewall-penetrating aircraft reconnaissance. J. Meteor. Soc. Japan, 99, 1297-1327.
- Tsujino, S., T. Horinouchi, T. Tsukada, H. C. Kuo, <u>H. Yamada</u>, and K. Tsuboki, 2021: Inner-core wind field in a concentric eyewall replacement of Typhoon Trami (2018): A quantitative analysis based on the Himawari - 8 satellite, J. Geophys. Res. (Atmospheres), 126, e2020JD034434. https://doi.org/10.1029/2020JD034434.

成果発表(口頭発表)

- 山田 広幸, 伊藤 耕介, 坪木 和久, 篠田 太郎, 大東 忠保, 中澤 哲夫, 山口 宗彦, 長浜 則 夫, 清水 健作, 2021: 2017 年台風第 21 号の暖気核構造の維持に関わる熱力学的特徴. 京 都大学防災研究所研究集会「台風研究会」, オンライン開催, 9 月 16 日, オンラインロ頭 発表.
- 山田 広幸, 伊藤 耕介, 坪木 和久, 篠田 太郎, 大東 忠保, 中澤 哲夫, 山口 宗彦, 長浜 則 夫, 清水 健作, 2021: 2017 年台風第 21 号の暖気核構造の維持に関わる熱力学的特徴. 日 本気象学会秋季大会, 三重大学, 12 月 2-9 日, 口頭発表.

宇宙線観測データの解析による宇宙天気研究 Space weather study with cosmic ray data analyses

宗像一起、信州大学·理学部

2018年8月25-26日にGMDNで観測されたICMEイベントを解析した。このICMEは、低速であ るにもかかわらず大きな地磁気嵐(minimum Dst=-174 nT)を引き起こした特異な事象で、ICME がコロナホール起源の高速太陽風によって背後から「圧縮」を受けたことが示唆されていた。 我々はGMDNで観測された宇宙線データを解析し、ICMEのtrailing edge付近に高い宇宙線密度領 域が形成されていることを発見した。この領域はMagnetic Flux Rope (MFR)の磁場強度が最大 となる領域に対応していることから、宇宙線が上記「圧縮」に伴うベータトロン加速を受けてい ることを明らかにした。すなわち、ICMEの「圧縮」の証拠が宇宙線観測から得られたことにな る。この領域ではピッチ角が90°の宇宙線強度が高い2次異方性が卓越しており、ベータトロン加 速を裏付けている。

上記の成果は、Space Weather誌に投稿・掲載されるとともに、オンラインで開催された第37回宇宙線国際会議(ICRC 2021)で発表された(詳細はエクセル・ファイルを参照)。

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

山崎 了、青山学院大学·理工学部

研究目的:地球磁気圏や惑星間空間、さらには若い超新星残骸などに普遍的に存在する無 衝突衝撃波において、プラズマ波動励起・粒子の散逸過程・非熱的成分の生成過程等の詳 細は未解明である。近年、高出力レーザーによる無衝突衝撃波の生成実験(実験室宇宙物 理学)が本格化し、それにより無衝突衝撃波近傍の電磁場や粒子分布関数の直接計測が可 能となった。山崎を代表とするグループでは、過去8年間、大阪大学レーザー科学研究所 の共同利用の実験提案を行って連続して採択され、測定データを蓄積してきた。現在、世 界的に盛んなのは、外部磁場の存在下でプラズマを生成し、磁化プラズマ中を伝播する無 衝突衝撃波(MS=Magnetized shocks)を生成することである。その際、得られた実験デー タから本当にMSが生成されているのか明確に判断できないことが多いため、実験データの 解釈はプラズマ電磁粒子(PIC)シミュレーションとの比較を通じて行われることが必須とな っている。そこで、我々のグループでも、実際の実験に近いパラメータで外部磁場の強度 をいろいろかえた1次元PICシミュレーションを行う。これにより、これまでの実験結果の 解釈だけでなく、今後の実験に対する指針を得ることも目指す。

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

研究結果:外部磁場3.6Tを印加した2019年度の実験で取得したデータの解析とPICシミュ レーションの結果を比較しながら、実験の物理的解釈の議論を行った。ショット前に封入 した窒素がターゲットから放出される電離光子によって磁化プラズマとなるが、プラズマ 自発光計測やトムソン散乱計測で測定できたドリフト速度をもった窒素プラズマが、プラ ズマ中を伝播するMSのfoot領域と解釈し、これらを論文[1]にまとめ、[2]-[4]の成果発表を 行なった。さらに、2021年度は外部磁場3.6 Tを印加したショットを13回、4.7 Tのショッ トを7回行うことに成功した。プラズマ自発光、トムソン散乱、B-dot計測などを行い、外 部磁場なしの場合や磁場強度の違いによる計測結果の違いを認めた。特に、無衝突磁化衝 撃波の遷移層で生じると考えられてきたイオン温度非等方性の測定に成功し、PICシミュレ ーションの計算結果と比較した。 発表論文:

 "High-Power Laser Experiment Forming a Supercritical Collisionless Shock in a Magnetized Uniform Plasma at Rest", R. Yamazaki, S. Matsukiyo, T. Morita, S. J. Tanaka, T. Umeda 他49名, Phys, Rev. E., 105, 025203 (2022).

学会発表:

- [2] "Formation of a Supercritical Collisionless Shock in a Magnetized Uniform Plasma at Rest", R. Yamazaki, High Energy Density Sciences 2021 (April 19-21, 2021, Online/Osaka, Japan)
- [3] "Forming a supercritical magnetized collisionless shocks using high-power lasers",
 R. Yamazaki, The 5th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (September 26 October 1, 2021, Online)
- [4]「希薄な磁化プラズマ中を伝播する無衝突衝撃波の生成実験」,山崎 了,他31名, 2021年度衝撃波シンポジウム (2022年3月9日-11日,立命館大)

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

横田 勝一郎, 大阪大学大学院•理学研究科

【研究目的】

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

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

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

【研究方法】

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

2020年度ではGEANT-4によるXEP数値モデルを作成し、性能較正を実施して応答関数を 作成した。加えて、観測データの一次処理及びその評価を実施した。その中で、Van Alle n Probes観測にて報告された窪みのある珍しい形のエネルギースペクトル(Zhao et al., N at. Phys., 2019, 論文中でBumpon-tail(BOT)エネルギースペクトルと呼ばれる)がXEPで も頻繁に観測されていることが新たに分かった。特殊な形をしたBOTスペクトルを特に利 用して0.4~20MeV帯の電子についてより正確な動向を導出し、XEP観測データの較正結果 について誤差などの評価を行った。 【研究結果】

Geant4による数値モデル実験の結果から入射電子のエネルギーに対するエネルギー検出応 答を評価した.その結果,観測データ較正に必要な応答関数の元となるエネルギー応答行 列を得ることが出来た(図1).

得られた応答関数にてXEP観測データの較正を観測期間全般に行った結果、図2のようなB OTスペクトルをプラズマ圏にて多数見つけることができた。



図1: 左) Geant4で作成したXEP数値モデル. 右) 数値モデルにて得た入射エネルギーに対 する検出エネルギー応答.



図2: L~3.5におけるBOTスペクト ルの時間変動.

【まとめ】

同様な時間変化のイベントは多数見 つかっているため、今後は同時に観 測されているヒス波との関わりを起 点に調査を継続する。

【成果発表】(学会研究会発表は全てリモート形式)

- 横田 勝一郎他, Nitrogen and oxygen ions from the Earth's ionosphere observed by the Arase satellite, 日本地球惑星科学連合 2021 年大会, 遠隔, 2020 年 6 月 5 日
- I. Park, …, S. Yokota et al., Characterization and calibration for High-Energy electron instruments onboard the Arase satellite, J. Geophys. Res., 126(7), e2021JA029110, 2021.
- 植田晃平,あらせ衛星搭載超高エネルギー電子観測器のエネルギー較正と放射線帯外帯電子の極小値を持ったエネルギースペクトルの観測,修士論文,2022年

ポスト京に向けた宇宙プラズマ流体シミュレーションの最適化手法の 研究

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

深沢圭一郎、京都大学・学術情報メディアセンター

現在、アメリカをはじめ中国、ヨーロッパにおいて、エクサフロップス級の計算が可能 なスーパーコンピュータ(スパコン)の開発が進められており、スパコンのランキングで あるTop500には申請されていないが、中国ではエクサフロップスの性能を達成したとの報 告もある。日本ではエクサフロップスに近い計算性能を持つ、「富岳」が開発され、2021 年3月に運用が開始されており、以前より計算性能が高い環境が揃いつつある。このような エクサフロップス級計算機では、MHD近似限界のグローバル磁気圏シミュレーションや、 流体-粒子結合シミュレーションが実現可能と想定されている。この富岳は、ARMという 新しいCPUアーキテクチャを採用し、CPUが48コア+4アシスタントコアというメニーコ ア構成となっている。また同時演算実行数に効くSIMD幅が512bitと広く、京と比べて大き な変更がある。そのため、この新しいCPU(A64FX)で既存の計算コードを走らせた場合 にうまく利用できるのかが課題となっている。そこで、本研究では、主に惑星磁気圏をシ ミュレーションする宇宙プラズマ流体シミュレーションをA64FXに代表されるメニーコア かつ高SIMD幅CPU対して最適化する手法を研究することを目的とした。

本研究では、宇宙プラズマ流体シミュレーションとして、まず、MHDシミュレーション コードを対象に最適化手法を調査している。昨年度研究により、これまでのベクトル向け 配列構造とキャッシュ利用向け配列構造をマージした配列構造が性能向上に寄与するとい うことが明らかになっていた。今回、この配列構造に関して詳しく調査を進めると、配列 構造によって計算機の消費電力が異なることが分かってきた。現在のスパコンの多くが消 費電力によってその構造を制限されている中で、計算性能を変えずに消費電力を削減でき れば、よりたくさんの計算機を利用でき、全体としてシミュレーションを早く実行できる。 そのため、配列構造が消費電力にどう影響するかを調べ、性能へどう影響するか明らかに した。

また、メニーコア高性能ため、同一システム内で複数のシミュレーションをカップリン グさせて実行しやすい環境となってきている。そのようなカップリング、連成計算を実現 するフレームワークの開発も行った。テストとして、MHDシミュレーションと電子ハイブ リッドシミュレーションの連成計算を行い、正常に動作することを確認した。

・学会発表

深沢圭一郎、加藤雄人、三宅洋平、南里豪志、"STP 数値計算コードにおける連成計算フレ ームワーク CoToCoA の実装"、 STE シミュレーション研究会:太陽系シミュレーション研 究の新展開、オンライン開催、2021 年 9 月 6 日 - 7 日.

・論文リスト

(査読無し)深沢圭一郎、南里豪志、CPU 消費電力制限印加時における電磁流体シミュレ ーションコードに対する配列構造最適化の評価、情報処理学会研究報告, 2021-HPC-180(21)、1-7、2021.

フィルタ捕集法と組み合わせた粒子状有機硝酸全量測定の試み(2) Trial on combination of the analyzer of total particulate organic nitrate with filter sampling method (2)

松本淳, 早稻田大学 · 人間科学学術院

【研究目的】対流圏における重要なエアロゾル生成過程の一つとして、揮発性有機化合物 VOC の大気ラジカルとの反応に伴う二次有機エアロゾル SOA の生成が注目されている¹⁾。 特に、半揮発性の中間生成物 SVOC の詳細把握が必要である。窒素酸化物 NOx と VOC の酸化反応 (対流圏オゾン生成過程) にてオゾンと同時生成する、有機硝酸類である ONs (RONO₂) や PANs (RO₂NO₂) は、SOA 生成に重要な SVOC の一種となりうる。そのため、 そのガスー粒子分配特性に関する研究が不可欠である。VOC は膨大な種類が存在し、個別 成分分析による網羅的な挙動把握は困難であるうえ、有機硝酸類の生成特性まで明らかと なっている VOC も限られる。二次生成するガス状・粒子状の有機硝酸類も多様で、網羅 は困難である。二次生成するガス状・粒子状の有機硝酸類を数え落としなく包括測定する 全量測定は、エアロゾル (SOA) 評価に必要である。申請者はこれまでに、活性炭デニュー ダー (CD)、有機硝酸類のNO2 への熱分解変換器 (TD)、キャビティ減衰位相シフト法 NO2 計 (CAPS-NO₂)、を組合せた粒子状有機硝酸全量 (PONs) の測定装置 CD/TD/CAPS-PONs (PONs 計) を構築し、大気観測に基づく有機硝酸類のガス-粒子分配特性を検証し、粒子 への分配が相対湿度に依存する可能性を示した2.3.45.0。以上の成果に基づき、本手法の遠隔 地での大気観測への活用を企図して、次はフィルタ捕集する PONs 試料の定量を目指す。 ただし、フィルタ捕集試料の再粒子化を想定すると、フィルタからの PONs 発生量を把握 し補正する相対標準測定法が必要と考えられる。昨年度は、再粒子化の際の PONs 発生量 把握のための相対標準測定装置 RSM を構築したうえで、気相反応により調整した PONs 試料を PONs 計と RSM にて同時測定した結果、両者間に強い正の相関が見られ、RSM が PONs 相対標準測定法として有望であることを示した。そこで本研究では引き続き、再 粒子化と PONs 計を組合せる定量法の実現を目指して、RSM の特性把握を進める。なお、 新型コロナウイルス感染症の影響を考慮して、可能な範囲で研究を実施した。

【研究の方法と結果・考察・まとめ】 まず室内実験として、反応容器にてオゾン・一酸 化窒素・リモネン蒸気を混合することで、気相反応により生成する PONs を一定濃度含む 試料を調整し、試料に対する RSM の応答を調べた。RSM は、粒子フィルタ PF の通過/ 不通過を切替えつつ市販 NOx 計 (ThermoFisher 製、42iQTL) に試料を導入する測定系で あり、PF 通過に伴う信号減少量に着目して、PONs 相対標準としての可能性を実験的に検 証した。今回は、PF なし/PF 1 段/PF 2 段の 3 モード間で測定を切り替える実験によ って、PF における PONs 除去効率を 88 % と決定した。除去効率の値を昨年度の結果に

88

適用したところ、PONs 計の測定値 ONs+PNs と RSM の測定値の間で正の相関関係を確認し (図)、RSM による PONs 相対変動把握が十分に可能であることを確認した。一方で、 ONs+PNs の回帰直線の傾きが 0.77 となった。RSM にて定量された粒子状窒素酸化物に占

める PONs の割合は 77 % に留まり、23 % は PONs 以 外の無機硝酸などの影響を受 けたものと考えられた。

次に、RSM 特性把握の一 環として外気試料に対する応 答を調べるために、都市郊外 に位置する埼玉県所沢市にて 実大気中の PONs を観測す る初期的な試験を実施した。 その結果、冬季の日中に 0.2 - 0.5 ppbv、夜間に 0.1 ppbv の PONs を観測し、光化学反



図 気相反応により生成した粒子状有機硝酸 PONs 試料に対する 相対標準測定系 RSM の測定値と PONs 計の測定値の相関プロット。 昨年度の実験結果に、今回得た PF での除去効率 88 % を考慮し改訂。 ×: PANs 全量 PNs, ◇: RONO₂ 全量 ONs, ●: ONs と PNs の和。 それぞれについての回帰直線と傾き 1 の直線も併記する。

応に伴って日中に濃度が上昇する PONs 日変化を RSM により捕捉可能であることを示 した。なお、RSM 単体による観測結果には、無機硝酸などの寄与も含む可能性がある。ま た、NO や NOx の変動が大きい時間帯は RSM による PONs 定量は困難であった。

フィルタ捕集/再粒子化/PONs 計による PONs 定量法を実現するには、RSM による PONs 相対標準測定が有望である一方で、無機硝酸など干渉成分の量や NOx 変動を、試料 調製や再粒子化の段階において低減すべきことが、今回の実験により確かめられた。

【引用文献等】

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

低バックグラウンドベータ線計数装置によるトリチウムの測定 Measurements of tritium using Quantulus counters

門叶 冬樹、山形大学·理学部

研究目的

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

研究方法

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

研究結果

本年度は、蒸留水、市販の飲料水(深層水、地下水)についてQuantulusのトリチウム測 定モードでの波高スペクトルを調べた(図1)。3水試料は、いずれも20チャネル付近にピ ークを示しトリチウム標準試料のスペクトルと合っている。標準試料とバックグランド試 料の測定値から推定した3水試料のトリチウム濃度は、各々2.27 Bq/L,1.94 Bq/L,1.99Bq/ Lと約2 Bq/Lであった。最近の日本における雨水(蒸留後)の測定値は、0.11-1.04 Bq/L(2 000-2005@熊本)などの報告がある(百島 J. Plasma Fusion Res.2009)。



図1.3水試料とトリチウム標準試料の測定波高スペクトル

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

二重偏波レーダーのデータを利用した雲解像モデルの改良 Improvement of cloud-resolving model by using data of polari metric radar

佐藤正樹 · 東京大学大気海洋研究所

研究目的

雲解像モデルの出力を「観測シミュレータ」(Joint Simulator for Satellite Sensors:東 京大学・JAXA・NASAの共同開発)にかけて、二重偏波レーダーなどのデータと比較する ことで雲解像モデルの精度向上を目指す。特にいまだ不確定要素の多い雲物理過程の精度 向上が期待できる。

研究方法

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

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

研究結果

二重偏波レーダーと全球雲解像モデル NICAM のシングルモーメントスキーム (NSW6) の比較および NSW6 改良に取り組んだ。NICAM の出力を Joint-Simulator (Hashino et al., 2013)に内蔵された POLARIS(Matsui et al., 2019)を用いフォワード計算し、二重偏波レー ダーの出力に変換し比較を行っている。NSW6 においては、最大反射強度が融解層上部で 急速に小さくなる特徴がみられた。これは霰の切片パラメータが大きいため、小さな霰し か表現できないことによるものと推測される。NSW6 は熱帯域の衛星観測で調整されたた め中緯度のレーダーとはそぐわない状況になっている。その改良として、霰の切片パラメ ータを混合比と温度に依存させたスキームと雹カテゴリの追加したスキームをテストして いる。図にその結果を示す。改良の結果、観測で得られた反射強度に近くなる。また、こ れらの改良に伴い、強い降水の頻度が増加する傾向が見られた。今後は他の事例での検証、 他の偏波パラメータの利用を通して、雲微物理スキームの改良につなげる予定である。



図 2020 年 7 月 11 日事例の最大反射強度の比較。左上:羽田空港レーダー、右上:NSW6、 左下:混合比温度依存した霰の切片パラメータ、右下:雹スキーム

また、東京大学大気海洋研究所屋上において、レーザービーム内を通過する雨滴の直径 と落下速度を測定する Laser precipitation monitor (LPM)を用いた雨滴粒径分布の観測を 行った。雨滴粒径分布、0次から6次までのモーメント、体積重み付き平均直径、median volume mean diameter、平均体積直径などを求めた。先行研究とも整合する結果を得て、 レーダーデータから回帰できる量との比較も行った。これらから NICAM の雲物理過程を改 良する方法について検討していく。

引用文献

Hashino, T., Satoh, M., Hagihara, Y., Kubota, T., Matsui, T., Nasuno, T., and Okamoto, H, 2013: Evaluating cloud microphysics from NICAM against CloudSat and CALIPSO. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118*(13), 7273 - 7292. https://doi.org/10.1002/jgrd.50564

Matsui, T., Dolan, B., Rutledge, S. A., Tao, W. K., Iguchi, T., Barnum, J., and Lang, S. E.,: 2019. POLARRIS: A polarimetric radar retrieval and instrument simulator. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *124*(8), 4634-4657.

大気放射モデルを用いた「ひまわり」シミュレーション画像の作成と応用 Simulation of the "Himawari" Observation using Radiative Transfer Model and its Applications

伊達謙二 (気象衛星センター データ処理部 解析課)

気象衛星センターでは、静止気象衛星ひまわりの観測データの品質管理のため、 定常的に校正及び位置合わせ等の精度評価を行っている。近年の気象衛星観測の充 実は目覚ましく、従来よりも時間・空間・波長分解能および観測精度が向上した機 器が各国の気象衛星に搭載されつつあり、複数の気象衛星のデータを複合的に利用 し気候研究等に役立てようとする機運が高まっている。複数衛星の複合利用におい てはデータ間の相互校正が不可欠である。世界気象機関(WMO)等の主導により 設置された全球衛星搭載センサー相互校正システム(GSICS)と呼ばれる枠組みで は、衛星運用機関等により衛星間での一貫した放射量の校正評価手法の開発が進め られており、気象衛星センターでも評価手法の開発などを通じてこの活動に貢献し ている。本研究では放射伝達計算を用いた手法等を中心に、ひまわり 8 号の校正評 価手法の開発を進めている。

ひまわり 8 号搭載センサーである AHI の可視近赤外バンド評価手法のひとつで は、放射伝達モデル RSTAR (Nakajima and Tanaka, 1988) を活用している。以

下、RSTAR 代替校正と呼ぶ。本手法では 大気プロファイルや MODIS の L1B デー タから得られた雲及びエアロゾルの光学 的パラメータ、及び大気プロファイル等 を入力として、放射伝達計算が比較的行 いやすい対象である海面及び水雲の雲頂 に対してひまわり 8 号の観測値をシミュ レーションし、得られた計算値と観測値 とを比較することで評価を行う(図 1)。

RSTAR 代替校正の他にも、衛星搭載 光源である太陽光拡散板の観測、VIIRS との直接比較、月観測などを参照した評 価も実施しており、それぞれの結果は概 ね整合的な結果が得られている(図 2)。 感度の経年変化の大きさはバンドによっ て異なるが、B01 (0.47 µ m) ~B04 (0.86



図1 AHI/B04 (0.86µm)の 2020 年 8 月の約1ヶ 月間のデータに基づく評価事例。横軸は観測放 射輝度、縦軸は計算値を示す。低輝度側の点の 集合は晴天海面に対する評価結果を、高輝度側 の集合は水雲の雲頂に対する評価結果を示す。 水雲側の色分けは頻度を表す。この事例の回帰 直線の傾きは切片をゼロに固定した場合・しな い場合ともに 1.00 であり、観測値と計算値は整 合的である。

μm)では年間 0.4~0.8%程度であり、
B05 (1.6μm)、B06 (2.3μm)ではさらに
小さい。なお、RSTAR 代替校正による
MTSAT-2 可視バンドの評価では年間
2.5%程度の感度変化が見られており、
AHI の可視近赤外バンドの感度は
MTSAT-2に比べて安定している。

現行の RSTAR 代替校正では、大気プ ロファイルとして気象庁による大気再解 析データセットである JRA-55 を利用し ているが、現在、次期再解析計画である JRA-3Q の整備が進められている。今般 入力を JRA-55 から JRA-3Q に移行した 場合のインパクト調査を行った。評価は Aqua/MODIS 及び Terra/MODIS それぞ れの、2020 年夏と冬の 1ヶ月ずつについ て実施した。結果の一例を図 3 に示す。 この事例では JRA-55/3Q の違いに起因す る差異は 0.2%未満、他の評価事例を含め ても 0.3%未満であった。今回のインパク



図 2 AHI/B04 (0.86 µ m)の運用開始 (2015 年 7 月) 以降の相対感度。評価に用いた手法は、 凡例の上から順に月観測、NOAA-20/VIIRS ま たは SNPP/VIIRS との直接比較、Aqua/MODIS または Terra/MODIS による RSTAR 代替校正、 及び太陽光拡散板を用いた評価結果を示す。



図3 AHIの可視近赤外6バンドの感度評価。 観測値に対する計算値の比を表す。2020年8 月の Aqua/MODIS を用いた場合について JRA-55/3Qを入力としたときの差異を示す。

ト調査の結果は RSTAR 代替校正による評価結果に見られる経年変動の大きさに比 ベて十分に小さく、トレンド評価に影響は及ぼさないと見られる。RSTAR 代替校 正等による評価結果は気象衛星センターWEB ページ*で公開しており、本結果につ いては 2022 年第 2 四半期頃の実装を予定している。RSTAR 代替校正の手法では現 在 MODIS を参照している。今後は直接比較による評価手法だけでなく、RSTAR 代 替校正についても VIIRS への対応準備を進める予定である。

気象庁では 2022 年 12 月頃に、正衛星を現在のひまわり 8 号から 9 号へと移行 する計画である。本手法による校正評価はひまわり 9 号でも引き続き実施される。

* https://www.data.jma.go.jp/mscweb/data/monitoring/gsics/vis/monit_visvical.html

参考文献 Nakajima, T. and M. Tanaka, (1988) Algorithms for radiative intensity calculations in moderately thick atmospheres using a truncation approximation, J. Quant. Spec. Rad. Trans., 40, pp. 51-69

成果発表 奥山新、小寺和貴、栄木美沙紀、伊達謙二「放射伝達計算に基づくひま わり8号校正評価と、9号正衛星交代に向けて」、GPM および衛星シミュレータ合 同研究集会(オンライン開催、2022年3月)

北極域流星レーダー網を利用したEISCAT_3Dと相補的な下部熱圏観測 体制の構築

Development of a lower thermosphere observation platform com plementary to EISCAT_3D using the Arctic meteor radar

堤雅基、国立極地研究所・宙空圏研究グループ

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。これまでに電離層電場上昇 に対応した拡散係数の異常増大と思われる現象が見出されており、さ らに詳細を調査する。

調査方法

流星により形成された円柱状の電離飛跡は、形成後に分子拡散により径方向に急速に拡散 し、そ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 *Da*を推定することができる [McKinley, 1961]。*Da* は、電子温度 *Te*およびイオンの温度 *Ti*と以下のような関係を持つ。

$$D_a \approx D_i \left(1 + \frac{T_{\theta}}{T_i}\right) \quad \exists 1$$

高度 110 km 程度以下においては、概ね Teおよび Tiは中性大気温度 Tnに等しく(Te = Ti = Tn)、Da = 2Di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]。しかしこれまでの貴研究所との共同研究を通して、北欧域の流星レーダー観測においてはこれらの温度が常に等しいとは考えにくい現象が見つかった。上部中間領域における電場増大に伴う電子密度増大により観測されるDaが異常増大するとの結論を得ている[堤他、2016]。

本研究では、ロングイヤビエン(極地研運用)、ベアアイランド(ISEE 運用)、トロムソ

(極地研運用)の流星レーダー観測データを元に、電子温度増大(中間圏電場)の水平構 造推定を試みた。

解析結果・考察

図に、2008年12月5日に観測されたデータから高度域80-100kmのDaの水平構造を推定した例 である。7分程度の時間分解能で、南北1000km以上・東西500km程度のDaの水平構造の可視 化に成功した。Da異常増大の見られる領域は時々刻々と変化し、電子温度/上部中間圏電場 には複雑な水平構造が存在することを示していると考えられる。本観測例のような構造は、 冬季には比較的頻繁に観測され、普遍的な冬季極域上部中間圏の描像と思われる。今後、 オーロラの光学観測や、EISCAT_3DおよびSuperDARNレーダーによる電場観測結果との比較 研究を行うことを検討している。



図:2008年12月5日の00UTに 観測された両極性拡散係数の水 構造推定結果。高度80-100km の流星エコーを使用した。水平 200x200kmの領域(図の左下に 大きさを示す)ごとに平均値を推 定し、水平方向に50kmずつシフ トして反復計算して水平構造を 推定した。

引用文献

Dimant et al., J. Geophys. Res., 100, 14, 605-623, 1995.
Farley, J. Geophys. Res., 68, 6083-6097, 1963.
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.
堤、小川、野澤、 C. Hall, 北極域流星レーダーで異常増大の観測 された両極性拡散係数の考察, 第30回大気圏シンポジウム講演集、2016, https://jaxa.repo.nii.ac.jp/?action=repository_uri&item_ id=19047&file_id=31&file_no=1.

成果発表

M. Tsutsumi, A new approach to expand the possibility of meteor echo measurem ents in the polar region, The 5th NIPR-UiT Online Monthly Joint Seminar, 17 Fe bruary 2022.

東南極地域における宇宙線中性子観測とその解釈 Analysis of cosmogenic neutron doses measured over the east Antarctica

> 保田浩志 広島大学·原爆放射線医科学研究所 栗田直幸 名古屋大学·宇宙地球環境研究所

1. 研究目的

航 空 飛 行 中 の 乗 務 員 は 地 上 に 比 べ て 強 い 宇 宙 線 に 常 に 曝 さ れ て お り、付加的に受ける年間の被ばく線量は一般公衆に対する線量限度 の数倍に達する場合もある。さらに、突発な太陽フレアの発生に伴 い、大気圏に侵入する高エネルギー陽子の増加により、銀河宇宙線 (GCR)が侵入しやすい極域の上空を飛行する場合には、放射線防護 上懸念されるレベルの放射線被ばくを受ける可能性も指摘されてい る。こうした状況を背景に、航空機乗務員については、航空機搭乗 時の宇宙線被ばくの線量(航路線量)が定期的に計算で評価され、 航 路 線 量 管 理 が 実 施 さ れ て い る 。 一 方 、 航 路 線 量 計 算 の 基 礎 デ ー タ となる地球磁場の強度分布や宇宙線被ばく管理上重要な極域での線 量率分布については、その詳細な実測が困難であるため、その精度 についての検証は不十分である。そこで、本研究では、航路線量計 算モデルの長期にわたる信頼性を厳密に検証することを目的として、 宇宙線強度が最も高くなる極域を対象として、独自に取得した中性 子観測でデータに基づき、現在のモデルに採用されている地球磁場 強度分布や宇宙線線量率分布の精度について解析する。また、今後 それらのモデルの基礎をなすデータの更新をどの程度の期間で行う べきか等について考察する。

2. 研究方法

本研究では、磁域上空での宇宙線による被ばくは、磁極のわずかな 移動によって大きな影響を受けること、又、民間航空機での飛行(高 度8~12 km)において宇宙線被ばく線量に最も寄与する粒子成分は 中性子であることを背景として研究方法を検討した。具体的には、 申請代表者(保田)らが航空機や山頂での宇宙線測定に整備した中 性子レムカウンタベースの放射線モニタリングシステムを用いて共 同研究者(栗田)らが第60次南極観測(2018年11月-2019年3月)にお いて現地で取得した中性子線量計測のデータと、栗田らが同時期に 同域で採取・分析した表層積雪のトリチウム濃度データ、そして研 究代表者らが開発した航路線量計算モデルの結果を厳密に比較解析 し、その相関関係について考察する。得られた解析結果から、極域 を対象に宇宙線線量評価の信頼性を検証し、精度を向上させる必要 性や地球磁場データの望ましい更新期間等について論じる。

3. 研究結果及び考察

昨年(2021年)度は、新型コロナウィルスの感染拡大の影響で議論する機会は限られたが、栗田が第60次南極観測において昭和基地か

ら内陸のドームふじ基地に至るルート上で、研究代表者らの放射線 モニタリングシステムで取得した中性子線量の実測データについて 確認し、その緯度・経度・高度・気圧依存性について解析を行った。 データの一例として、2018年12月にドームふじ基地(南緯77.7°、東 経39.1°、標高3,762m)で得られた中性子線量率と気圧の経時変化 を示す。気圧すなわち大気の厚みの低下に伴って中性子線量率が上 昇する傾向が確認でき、極低温下においても妥当なデータが得られ ていると考えられた。これらの実測値の解析を行う一方、栗田らが 現地で取得した雪中トリチウム濃度データと、研究代表者らがモデ ル計算によって求めた南極域の中性子線量分布との相関関係につい ても考察を進めた。今後は、オンライン会議のシステム等を活用し つつ、詳細なデータの総合的解析、そして論文化の作業に共同で取 り組む。



図1. 2018年12月に南極のドームふじ基地で測定した中性子線量率 と気圧の経時変化.

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

馬場賢治 酪農学園大学 農食環境学群

【研究目的】

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

【研究方法】

本研究では,筋状雲に因る地上での大気場の変遷を理解するため,数km間隔になる様に気象ロガーを小学校の百葉箱や簡易百葉箱を民間施設等に設置し,5分毎に簡易気象ロガーにより観測を行う.春にデータ回収し,その後に解析を行う.

【研究成果と考察】

本年度は2021年12月から2022年3月まで札幌市内や石狩市内の小学校,および,札幌管区気象台の百葉箱において観測を行い,3月22~23日に観測機器の回収を行った.現在はデータを整理している段階であり,過年度同様に現象の抽出を行う予定である.

今回は昨年2020年度に行われた観測結果を基に報告を行う. 札幌管区気象台の発表によれば対象地域の冬季は、気温は概ね平年並みであるが、降雪量と降水量はかなり少ない状況であった. このため、同地域に流入する対流雲は少ない傾向にあり、対象とした降雪に伴う地上での大気変動は例年になく少なく、2021年2月23日と同26日の2事例しかなかった. 23日の状況は、西高東低の気圧配置であり、同11時20分(図1a)と同11時30分(同b)の気象レーダーから分かる通り、季節風に伴う筋状雲列が西から東へ移動していた.





5分間での気温と気圧の変化の様子を図2は示しており, 対象時間の前5分(図2a)と5分後(同b)を表す.筋状雲の雲 列の前面(東側)のWM, SN, AHにおいて, 5分間の間に 0.5℃以上の気温低下と0.5hPaを超える気圧上昇が同時に みられた.先行研究のShirooka and Uyeda(1990)を捉え ている可能性が大きく,彼らの地上気温低下を伴なったダ ウンバーストを示し,且つ,気圧の上昇を確認出来た.降 雪に伴うローディングの効果や昇華による潜熱移動によ る気温低下により下降流が強化され,気温低下と気圧上昇 が地上で観測されたことが考えられる.

【今後の課題】

過年度のデータに本年度のデータを加え,事例数を増 やし、本事例の一般化を行う予定である.次年度の観測 も引き続き行う.また、格子を小さくして、CReSSを用 いたシミュレーションし、物理的なメカニズムについて 先行研究を再確認しながら、今後理解を進める予定であ る.

図 2 気温(カラー:右)と気圧(太い実線は正, 同破線は負;0.1hPa間隔)の5分間変動.

【参考文献】

・馬場 賢治,冬季石狩平野における筋状雲性降雪が齎す地上気温と気圧の短時間変動,日本生気象学会,55(3) 39-39,2018年10月.

・馬場賢治,野田真由,上田博,北海道における 2007/08~2017/18 の冬季落雷の傾向,日本気象学会大会講 演予稿集,(114) 290, 2018 年 10 月.

• Baba,K., Temporary Variation of Surface Air Temperature and Atmospheric Pressure Under Convective Clouds in Winter Monsoon, Asia Oceania Geosciences Society, 15,2018 年 6 月.

・馬場賢治, 伊藤花好, 上田博, 冬季石狩平野における筋状雲による降雪がもたらす地上気温と気圧の変化について, 日本気象学会大会講演予稿集, (110) 194 2016 年 9 月.

• Shirooka, R., and H. Uyeda, 1990: Morphological structure of snowburst in the winter monsoon surges. J. Meteor. Soc. Japan, 68, 677-686.

・札幌管区気象台 気象防災部 地球環境・海洋課「2020年12月~2021年2月北海道地方 冬の天候」 https://www.jma-net.go.jp/sapporo/tenki/kikou/weatherflush/pdf/matome20211.pdf, 2022年3月1日閲覧.
オーロラ等価電流回路解析とデータ同化手法を用いた AE 指数の予測

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

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

研究目的

太陽風のデータを入力として、電磁圏の活動度を表す AE 指数を予測することは、太陽地球 系物理学の目指すゴールの一つと考えられる。本研究では、オーロラの発生に伴って極域電離 圏を流れる電流が変化する度合いを表す AU 指数と AL 指数、また、両者の差として定義される AE 指数を、太陽風の密度、速度および磁場のデータを入力として、オーロラ等価電流回路解析 とデータ同化手法を用いて予測することを目指した。この手法の開発に成功すれば、主要な物 理過程を表現しつつ、小規模な計算資源で AE 指数を迅速に予測することが可能となる。

研究手法

本研究計画の中の AU 指数の予測ついては、Goertz et al. [JGR, 1993]によって提案され、 山本 [名古屋大学修士学位論文, 2018] によって妥当性が確認された太陽風電場が磁気圏を介 して電離圏に印加され、オーロラ電流が駆動されるモデルを採用することとし、今年度は、AL 指数の予測に焦点を絞って研究を進めた。

Baker et al. [JGR, 1997] および後続の研究によると、AL 指数を生成する電流系は、昼間 側の磁気再結合によって地球磁気圏中に侵入する電場が電流を直接駆動する Direct Driven 過 程と、磁気圏尾部に(主として磁場の形で)エネルギーを蓄え、あることを契機にそれが解放 される Loading-Unloading 過程に関連した 2 つの成分で構成されている。しかしながら、

Goertz et al. [1993]のモデルでは、Loading-Unloadingの過程が考慮されていなかった。そこで、本研究では、その点について全面的な見直しを行った。

具体的には、次に挙げる方程式群を導き、それらを数値的に解いて AL 指数の推定を行った。

$$\frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t} = -\Gamma(W - W_0) + \sqrt{\frac{2\Delta y \Delta z}{\mu_0 \Delta x}} \cdot \sqrt{W} \cdot E_t - \Gamma' W \tag{1}$$

$$I = \sqrt{\Sigma(\Delta x'/\Delta y')\eta\{\Gamma(W - W_0) + \Gamma'W\}}$$
(2)

$$B(|AL|) = \frac{\mu_0 I}{2\pi (\Delta y'/2)} tan^{-1} \left\{ \frac{(\Delta y'/2)}{h} \right\} \approx \frac{\mu_0 I}{2\pi h}$$
(3)

上式において、*W* は近尾部に蓄積されているエネルギー、*W*₀ は近尾部の基底状態のエネルギー、*E*_t は Goertz et al. [1993]によって導かれた方法で計算される近尾部領域の電場である。さらに、 $\Gamma \succeq \Gamma'$ は、それぞれ Loading–Unloading 過程、Direct Driven 過程に関わるエネルギー散逸率。 Δx , Δy , Δz は近尾部でエネルギーが蓄積される領域の *x*, *y*, *z*方向の特性長、 Σ は高度積分された電離圏ペダーセン電気伝導度、 $\Delta x'$, $\Delta y'$ はオーロラジェット電流の経度、緯 度方向の空間長、 η は近尾部のエネルギーがオーロラジェット電流を駆動するために費やされ

る割合である。式(1)の右辺第1項はサブストームによるエネルギー散逸、第2項はコンベクションによる近尾部へのエネルギー供給、第3項は常時進行するエネルギー散逸の効果を表し、式(2),(3)よってAL指数を求めることができる。

<u>研究成果・考察</u>

前節に示した方程式の中に含まれるパラメータの値を適宜設定することによって、実際のAL 指数の特徴を捉えた変動をモデル計算で再現するに至った。図1にその例を示すが、このモデ ルではLoading-Unloading 過程のエネルギー解放量を尾部に取り込まれた電場(E_t)の大きさ に比例させ、エネルギー解放のタイミング(パラメータ Γ のスイッチオン)を E_t の時間の2階 微分の大きさに関連させて計算を実行した。本来であれば、 Γ を近尾部で発生するバルーニン グ不安定など、系を不安定化させる物理過程の線形成長率と結び付けるべきであるが、本モデ ルの中で自己完結させて、その値を与えることができないため、上記のような単純な仮定のも とで計算を行っている。それに起因して、予測結果を実際の値に完全に一致させることには成 功していない。しかし、もしもエネルギー解放のタイミングと Γ の値を何らかの方法で推定で きれば、かなり正確なAL指数の予測が可能であることが、図1のパネルから期待される。

本モデルでは、10 個近いパラメータを既知として与える必要がある。それらの値の妥当性を 検討し、その結果を用いて高い精度で AE 指数の予測を可能とするためは、粒子フィルターを 用いたデータ同化法を適用する方法が有効である。研究期間中にスキームを完成させることが できなかったが、今後も研究を継続して手法の確立を目指したい。



図 1. 2000 年 4 月 19-21 日の期間(3 日間)に対する結果。上から順に、入力として与えた太陽風電場(OMINI データ)、実測に基づき公開されている AL 指数、本モデルによって計算された AL 指数(符号を反転させていることに注意)、および AL 指数を生み出す極域電離圏電流の時間変化が示されている。

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

> 中澤文男 国立極地研究所 · 研究教育系 栗田直幸 名古屋大学 · 宇宙地球環境研究所

【作成要領】

地球温暖化に伴う南極地域の気候・環境変化を捉えるためには、長期間にわたる観測データが必要となる。しかし、文明圏から遠く離れ、自然条件が厳しい南極大陸では、測器を使った気象.水文観測は困難な場合が多く、温暖化影響を評価するための観測データの蓄積は乏しい。それゆえ、氷床コアや積雪に記録されている代替指標(プロキシー)を使って過去から現在までの気候・環境変化を再現する研究が数多く行われている。例えば、南極氷床上における地上気温は積雪の酸素同位体比と相関関係を示すことから、氷床コアの酸素同位体比を使って古気温を復元する取り組みはよく知られている。しかし、プロキシーを使って気候・環境変化の影響を議論するためには避けては通れないハードルがある。それは、「氷床コアや積雪の年代決定」である。

年間積雪量が多い南極沿岸域などでは、酸素同位体比の季節変動から年代決定を容易に行うことができる。しかしながら、年間積雪深が10cmに満たない南極内陸域では酸素同位体比の季節変動が不明瞭であり、他の手法を用いる必要がある。そこで本研究では、放射性同位水素(トリチウム)を使った年代決定を行う。1950年から1963年にかけて行われた大気圏内核実験では、大量の人為起源トリチウムが環境中に放出され、核実験が禁止される直前(1963年ごろ)には降雪中に含まれるトリチウム濃度が自然状態よりも2桁も高い値となったことが知られている。南極地域では1966年ごろに降雪中のトリチウムが極大値を示したとされており、氷床コアや積雪試料のトリチウムピークはこの年代を反映していると考えられている。

本研究では、第59次南極地域観測隊(J59)においてNDFサイト(ドームふじ基地から南へ50kmの地点)で採取された積雪試料のトリチウム分析を行い、その年代決定を行うとともに、1960年代から現在までの気候変化を酸素同位体比の変動から読み解く。J59では、南極ドームふじ基地から南に50km離れたNDFサイトにて深さ4mの積雪ピットを掘削し、表層から3cm間隔で積雪試料を134試料採取した。本研究は継続課題であり、昨年に引き続き、これらの試料に含まれるトリチウム濃度分析をISEEが所有する低バックグラウンドベータ線係数装置を用いて行った。

昨年度は装置の故障により60試料の分析しか行うことができなかった。今年度は、引き続き分析を行い、134試料の分析が完了した。 結果をみると、深さ3.5m付近にトリチウム濃度のダブルピークがあ り、過去の文献を参考にしながら、3.65m付近にある極大値(131.1 T.U.)を1966年6月、3.45m付近の極大値(123.8 T.U.)を1969年と決

定した。この結果は、化 学成分分析から推定し た結果とも整合的であ った。この結果を使って 年代決定を行った結果 が図1となる。図1のト リチウム濃度は放射壊 変補正を行ったデータ である。1980年ごろまで は大気中核実験の影響 がみられるが、それ以降 は自然変動に近い変動を しているようにみえる。 これは、トリチウムの半 減期が12.3年と短いこと で説明できる。

年代決定が完了したこ とで本共同研究の目的は 達成したが、南極内陸域 におけるトリチウム変動 についても考察を行っ た。図2には、1970年代 後半から積雪ピットを採



図2.1970年代以降のトリチウム濃度変化。白丸は 各分析データ。黒線は5年移動平均値

取した2017年までの時間変動を示す。大気中核実験の影響が小さく なった後もトリチウム濃度は一定ではなく、約10年程度の周期で極 大値があらわれていることが新たに明らかとなった。太陽活動にと もなう成層圏でのトリチウム生成量の増加に対応していると思われ るケースもあるが、すべての極大値が太陽活動と一致しているわけ ではない。トリチウム濃度の変動は、大気上層での生成量の変動だ けでなく大気輸送過程の影響もうけている。南半球における大気循 環の変動と関連させた解析を行い、トリチウム極大値を引き起こす 要因の特定を今後の課題として取り組んでいきたい。

波飛沫計を用いた渦相関法による海塩粒子放出量の直接評価のための海上試験観測

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

近藤文義 海上保安大学校·基礎教育講座

研究目的

海塩粒子は海面から大気中へ放出され浮遊し、放射や雲物理、物質循環など様々な 分野において重要な物質である。しかしながら、海塩粒子の海面からの生成率を現場 で直接測定された例はあまりなく、その見積りには未だオーダーレベルのばらつきが ある。さらに除去過程も複雑であるために、大気中の濃度を精度よく推定することも 出来ていないことが現状である。

所内担当教員の相木准教授らは、これまで台風のような強風・高波発生時における エアロゾルの粒径分布と、それらと海面波砕や白波との関係を計測できるような海上 波しぶき光学粒子計(波しぶき計)を試作して、海洋観測塔や湾内に係留したブイに 試作機を設置し、海上でエアロゾルの濃度変動の実観測試験を行ってきた。その結果、 台風通過に伴う海塩粒子の劇的な増加を観測することに成功している。

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

研究方法

本研究では、貴所の共同利用機器である波しぶき計を用いて、茨城県神栖市にある 港湾空港技術研究所の波崎海洋研究施設の観測用桟橋において集中観測を実施した。 設置した観測システムは昨年度と同様に、波しぶき計、超音波風速温度計、オープン パス型NDIR式CO₂/H₂Oガス分析計、クローズドパス型CRDS式CO₂/H₂Oガス分析計から なる(図1)。これらによって、大気乱流により生じる風速、気温、粒子数密度、CO₂ 密度と混合比、H₂O密度と混合比の変動を10Hzの時間分解能で計測した。粒子数密度は、 0.3、0.5、0.8、1.0、3.0、5.0、10、15µmの粒径別で1時間毎に30分間、他は常時連続 計測した。観測期間は11月1日~12月6日の約1か月である。システムはCRDSを除いて 桟橋先端のハンドレールに固定した単管パイプを用い固定した。設置高度は平均海面 から約9mである。また波しぶき計の大気試料の吸引口として漏斗を用い、直径5mm のゴム製のチューブを波しぶき計本体上部から折れ曲がらないよう吸引口まで伸ばし、 本体内蔵のポンプにより大気試料を吸引した。吸引量は2.83L/minである。



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

研究結果

図2は風速、風向に加えて、渦相関法によって直接評価された運動量、顕熱、潜熱、 さらには0.3~0.5µmの粒径における粒子の海面フラックスの時系列変動である。風速は 観測期間中に最大で20ms⁻¹を超えるなど海面破砕が見込まれる荒天下でのフラックス 観測を幾度かすることができた。運動量フラックスは最大-1.0Nm⁻²を超えており風速

依存の様子がみられた。顕熱と潜熱の 海面フラックスも運動量と同様、風速 依存の様子がみられ、観測期間の顕熱 最大で100Wm⁻²程度、潜熱は300Wm⁻² 程度と海面から大きな熱フラックスが 放出されていた。波しぶき計によって 計測された0.3~0.5µmの粒径における 粒子の海面フラックスは常に放出方向 を示して、また運動量、顕熱と潜熱と 同様の変動を示す一方で、風向の変化 によって放出量が変化する様子みられ ており、波しぶき計により計測された 粒子の起源、また波浪の状況によって 粒子放出量が変わる可能性があること を示唆する結果を得た。本観測では、 波高や流向流速といった海象データを 計測することができていないが、今後 はこれらと海面フラックスとを同時に 観測することにより、海面フラックス に与える要因を明らかにするためにも 取り組む必要があると考えられる。



図2 風速・風向、運動量・顕熱・潜熱・粒子の海面フラックスの時系列

まとめ

本研究は、宇宙地球環境研究所の共同利用機器「海上波しぶき光学粒子計」を利用 して、昨年度に引き続き沿岸域において渦相関法により海塩粒子の放出量を直接評価 するための試験観測を実施した。約1か月にわたる観測期間中に20ms⁻¹を超える風速 を伴い海面破砕や白波の発生といった海塩粒子の放出が見込まれる状況下でのデータ を昨年度に引き続き取得することができた。今年度は、これまで独立してデータ収録 をしていた波しぶき計からのシリアル出力信号を分岐させ、超音波風速計やNDIRガス 分析計などからの複数のシリアル出力を10Hzで高速同期させる計測システムも構築し、 本観測で試験を実施した。本システムは、様々なプラットフォームに搭載することを 目的としたモバイルシステムとしての活用を見据えたもので、2月には水産大学校の 練習船「耕洋丸」にも試験的に導入し、外洋域における海面フラックスの観測をする こともできた。来年度は「新青丸」や「しらせ」に導入し、外洋域における海塩粒子 放出量の直接観測を実施する予定である。

成果発表

岩本洋子,相木秀則,磯口治,大林由美子,近藤文義,近藤能子,西岡純:海洋学の10年展望2021:大気海洋境 界,海の研究, Vol. 30, No. 5, pp. 199-225, 2021 相木秀則,近藤 文義,民田 晴也:産業用ミリ波レーダーと光学式粒径別計数装置を用いた海面砕波観測システ ムの開発: JpGU 2021, MIS24-P02, 2021

西之島火山起源のエアロゾル粒子の物理・化学的特性の研究 Research on physical and chemical properties of aerosol particles originated from Nishinoshima volcano

中山智喜、長崎大学・水産・環境科学総合研究科

【研究目的】 火山からはエアロゾル粒子には、火山灰に加えて、火山から 放出された二酸化硫黄(SO₂)などの火山性ガスが放出されている。SO₂ は、大気中での輸送中に酸化反応により硫酸(H₂SO₄)を生成し、二次粒 子の生成に関与する可能性がある。これらは、大気環境や気候に及ぼ す影響を及ぼしていると考えられるが、その物理化学特性や輸送中の 変質過程については、観測できる機会が限られていることから、十分 解明されていない。小笠原諸島に位置する西之島(北緯27.247度,東経 140.874度)では、2019年後半から2020年後半にかけて、爆発的な噴火 が繰り返し発生した。本研究では、2020年8月に西之島の西方1300 km あまりに位置する沖縄本島で観測した西之島起源のエアロゾル粒子の 物理化学特性について解析した。

【研究方法】本研究では、2020年8月上旬に琉球大学において光学式粒子計数器(TSI, OPS3330)で連続観測した粒径分布データおよび、同時に捕集した総浮遊粒子状物質(TSP)の化学成分分析を行った。

【結果と考察】2020年8月4~6日に西之島起源の空気塊が沖縄本島に到 達したと考えられ、大気常時監視測定局の沖縄局(琉球大学から北北 東に12.1 km)において、8月5日12~13時に167 μg/m³の浮遊粒子状物 質 (SPM, 概 ね PM7に 相 当)および 86 µg/m³の 微 小 粒 子 状 物 質 (PM2.5)が 観 測 され た 。 こ れ ら の 濃 度 は 、 8 月 4 ~ 6 日 を 除 く 8 月 1 ~ 15 日 の 平 均 濃 度 (SPM: 25.7 µg/m³, PM2.5: 7.3 µg/m³) に比べて6倍以上高かった。 琉球大学において8月5日12~13時に測定したエアロゾルの重量基準の 粒径分布は、直径0.5 µm以下と直径2.4 µmに極大値をもつ二峰性であ り、それぞれ、火山起源のSO2などから生成した二次粒子と、長距離輸 送された火山灰粒子に対応すると考えられる。8月4日~5日に捕集した TSPの化学成分分析の結果、高濃度の硫酸イオンが検出された一方で、 アンモニウムイオンの濃度は硫酸イオンの1/20程度であることがわか った。硫酸イオンに対するアンモニウムイオンのモル比は0.27であり、 硫酸イオンがアンモニウムイオンで十分中和された場合のモル比の2 に比べて極めて小さく、SO2から生成したH2SO4がアンモニアにより中 和されずに沖縄本島に到達したと考えられる。本研究により、火山起 源のプリュームがアンモニアの発生源が少ない海上を輸送された場合、 酸性度の高い微小粒子が二次生成され、風下域の大気環境に影響を及 ぼしうることが示唆された。

【謝辞】 捕集した粒子の化学成分分析において、 長崎県環境保健研究センターの前田卓磨氏 に協力頂いた。

【成果発表】T. Nakayama, R. Harada, T. Maeda, T. Arakaki, H. Yamada, F. Ikemori, K. T suboki, Observation of plume of Nishinoshima volcano eruption on August 2020 at Okinawa and Nagasaki, Japan, JpGU meeting 2022, May 29-June 3, 2022. (口頭発表)

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

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

Last year, the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) and Second-Generation Global Imager (SGLI) remote sensing reflectance (Rrs) data were used to verify a red tide algorithm proposed by Siswanto et al. (2013) to detect the bloom of dinoflagellate *Karenia mikimotoi* (*Karenia m.*) in the western part of Seto-Inland Sea (Figure 1). Figure 1, 1st column, are the maps showing the locations where the cell number of *Karenia m.* data were collected and used as a reference for verifying *Karenia m.* detection results. The red tide algorithm uses Rrs data to capture Rrs spectral shapes considered specifically belong to the water dominated by *Karenia m.* In this document, data from summer 2018 will be reported.



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

As can be seen from Fig. 1, both SGLI and MODIS produced small patches of *Karenia m*. bloom but not exactly in the region where *Karenia m*. blooms were observed in situ (Fig. 1, 1st column). Especially, the bloom of *Karenia m*. in area 2 reported on 17 July 2018 was undetected by both SGLI and MODIS Terra (MODIS/T) (Fig. 1, 1st row). The SGLI and MODIS/T-derived normalized water-leaving radiance (nLw) in some stations of *Karenia m*. bloom (density > 2,500 cells/ml) were shown in Fig. 2. The MODIS/T and especially SGLI derived nLw shown in Fig. 2 have different nLw spectral shapes as those reported in Siswanto et al. (2013).

In addition, those nLw spectral shapes during Karenia m. blooms are in general similar to those during normal phytoplankton blooms dominated by diatom (data not shown). The difference between the nLw spectral shapes observed by MODIS/T and SGLI shown in Fig. 2 and those reported in Siswanto et al. (2013) makes Siswanto et al.'s (2013) *Karenia m.* algorithm fail to map the bloom on *Karenia m.* bloom on 17 July 2018. Further study with more satellite and red tide in situ match-up data is needed to develop *Karenia m.* bloom algorithms specifically applicable with SGLI and a new version of MODIS data.



Fig. 2. The spectral shape of nLw observed by MODIS/T (inside the blue frame) and SGLI (inside the green frame) in some stations of *Karenia m*. bloom (area 2 in Fig. 1).

References:

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

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

大矢 浩代、千葉大学·大学院工学研究院

1. 研究目的

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

研究方法(使用した共同利用装置・施設 等を含む)

2016年度に東北大学がISEE鹿児島観測所にて新規 にLF帯標準電波観測を開始し,以前は名大ISEEがJJY 福島(40 kHz)の送信電波のみ受信していたが,現在で はJJY福島に加え,JJY佐賀(60 kHz),JJI(22.2 kHz), BPC(中国,68.5 kHz),NWC(オーストラリア,19. 8 kHz)等複数の送信局の電波を受信できるようになっ た。つまり,観測している伝搬パスが増え,広範囲のア ジアの火山(九州、フィリピン(ピナツボ山)、ケルー ト山(インドネシア)等)をターゲットとすることがで きるため,ISEEおよび東北大学と連携し、AVONデー タとあわせて共同研究を進める必要がある。2021年度 は,気圧データと防災科学技術研究所F-netの地震波デ ータもあわせて、2016年10月7日阿蘇山噴火および



図 1 2016年10月7日16:54-17:00 UT の(上) JJY60kHz-SGR パスの標準電波の振幅および (下) そのウェーブレットスペクトル。

3. 研究結果

2016年10月7日 16:46 UT に、阿蘇山(32.533°N、 131.614°E)が噴火し、噴煙の高さは11 km、VEI (火山 爆発指数:0-8の9段階)は3だった。使用した観測デ ータは、福島(JJY,40 kHz)- 篠栗(SGR)パス、佐賀 (JJY,60 kHz)-SGRパスおよび中国(BPC,68.5 kHz)-SGR パスのデータである。JJY60kHz-SGRパスの振幅と、そ のウェーブレットスペクトルを図1に示す。青の線が阿 蘇山の火口から励起された音波のJJY60kHz-SGRパス上 の下部電離圏最短到達時刻を示す。ピンクの線が音波の 最長到達時刻を示す。この音波の到達時刻後に、50-80 mHz の周波数の変動が見られた。また浮鞭(高知)での インフラサウンドデータでも2種類の変動が音波の到 達時刻に見られ、その周波数が約100 mHz と 80-300 mHz だった(図2)。阿蘇山近くのF-net 竹田(大分県) サイトで観測された地震波の上下動速度成分にも2種



図 2 2016年10月7日16:54-17:00 UT の(上) 浮鞭(高知) でのインフラサウンド波形および (下) そのウェーブレットスペクトル。

類の変動が見られ、その変動の周波数は80-500 mHz だった。地震波とインフラサウンドデータから、この2種類の変動の伝搬速度は 280 m/s 260 m/s であり、噴火により励起された音波により下部電離圏の 電子密度が変動したことが考えられる。

2022 年1月15日04:10 UT 頃に発生したトンガ噴火に関しては、1月15日08:00 UT 頃から千葉大に おける大気電場が上昇していた。この変化がグローバルサーキットを介した下部電離圏変動に対応して いるかどうかを調べるため、鹿児島における標準電波データを今後解析し、ISEE 関連研究集会や学会等 で発表する予定である。

成果発表

- Ohya, H., Y. Orito, F. Tsuchiya, M. Yamamoto, H. Nakata, and A. Yoshikawa, D-region ionospheric effects for 2016 eruptions of Mt. Aso using LF transmitter signals, JpGU2021, Online, May 30-June 6, 2021.
- [2] Ohya, H., Y. Orito, F. Tsuchiya, M. Yamamoto, H. Nakata, and A. Yoshikawa, RESPONSE OF THE D-REGION IONOSPHERE TO 2016 VOLCANIC ERUPTIONS OF MT. ASO USING LF TRANSMITTER SIGNALS, AOGS2021, Online, 1-6 August, 2021.
- [3] Ohya, H., Y. Orito, F. Tsuchiya, M. Yamamoto, H. Nakata, and A. Yoshikawa, Ionospheric effects of the 2016 Mt. Aso volcanic eruption based on subionospheric LF observations, IAGA-IASPEI2021, Online, 21-27 August, 2021.
- [4] 大矢浩代、土屋史紀、J. Chum、高村民雄、塩川和夫、2022年1月15日トンガ噴火に関連した大気 電場および VLF/LF 帯標準電波の変動について、2021年度第2回STE現象報告会、オンライン、 2022年3月8日。

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

中島英彰、国立環境研究所・地球システム領域

<u>1. はじめに</u>

1980年代の南極オゾンホール発見以降、科学者の集約的な研究によって、人為起源のフロン(CFC: Chloro-Fluoro Carbons)が成層圏オゾン層破壊の原因であることが突き止められ、1987年には「オゾ ン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書」が締結され、特定フロン類の削減スケジュール が制定された。その中で、オゾン層破壊能力の強いCFCは、よりオゾン層を破壊しないHCFCやHFC へと徐々に切り替わりつつある。ところが、これらのHFCの中には地球温暖化係数が大きなものも含 まれており、気候変動対策の観点からもその削減と世界的な分布のモニタリングが求められている。 本研究では、地上設置フーリエ変換赤外分光計(FTIR)観測データからHFC-23の解析方法を世界に 先駆けて開発し、その手法を北海道陸別及び昭和基地におけるFTIR観測データに適応してその経年変 化を求めた。またHCFC-22についても解析し、HFC-23との相関について解析を行った。

<u>2. FTIRスペクトルからのHFC-23の解析</u>

HFC-23は、特定フロンの代替物質であるHCFC-22の製造過程で数%の割合で放出される副生産物であ る。CO2の12,690倍の温室効果を持つ長寿命物質である。大気中には2020年段階で約30 pptvしか存在しな い微量成分であり、従来はGC/MSなどの分析器でないと測定することができなかった。本研究では1150 cm⁻¹ 付近の中間赤外領域にあるHFC-23の吸収線をFTIR分光データから解析することにより、HFC-23の気柱全 量の導出を行った。HFC-23の吸収パラメータは、Harrison (2013, JQSRT)らの実験データをもとにToonが 作成した疑似ラインパラメータを用いた。FTIRスペクトルの解析には、SFIT4と呼ばれる解析プログラムを用い た。解析対象マイクロウィンドウ内に弱い吸収線を持つH2O, HDO, CH4に関しては、それぞれ825, 1209, 1202 cm⁻¹付近の別の領域で解いたプロファイルを用い、CH4に関しては値も固定して解析を行った。図1にこ のようにしてFTIR分光データから得られた陸別(緑)、昭和基地(青)におけるHFC-23の経年変化を、 AGAGEのCape Grim(赤)、Trinidad Head(橙)の値と比較してプロットしている。FTIRの値の方が、数%低 く導出されているが、増加トレンドは同様の値が求められていることがわかる。

<u>3. FTIRスペクトルからのHCFC-22の解析</u>

HFC-23との相関を解析するため、FTIR分光データからHCFC-22の解析も行った。解析には、Prognon et al. (2019, ACP)と同じ波数領域(828.75-829.40 cm⁻¹)を用いた。HFC-23の解析の時と同じく、Tikhonov regularizationの手法を用い、aの値としては50を用いた。図2にこのようにしてFTIR分光データから得られた 陸別(緑)、昭和基地(青)におけるHFC-23の経年変化を、AGAGEのMace Head(黒)、Cape Grim(灰色) の値と比較してプロットしている。陸別の値はMace Headの値と、昭和基地の値はCape Grimの値とよく一致 しており、南北両半球の増加傾向の遅延(数年)を表しているものと考えられる。

<u>4. HFC-23とHCFC-22の相関解析</u>

今回解析されたデータのうち、陸別におけるHFC-23とHCFC-22のデータには、中国国

内におけるHCFC-22の製造に伴う放出が相当の割合で含まれていると考えられる。そこで、1998-2009年の陸別での観測があった日時から10日間の後方粒跡線解析を行い、空気塊が中国由来であるデータに対して、HFC-23とHCFC-22の相関を取ってみた。その結果、2000年のHFC-23とHCFC-22の観測値の間に、有意な正の相関関係が得られた。この相関の傾きは0.12±0.04であり、相関係数R=0.45, P=7.35e-03であった。これから見積もられたHFC-23の排出量は0.83±0.28 Gg/yであり、この値はSimmonds et al. (2018, ACP)の報告値(2.83 Gg/y)の約1/3の値であった。



Date





図 2 FTIRとAGAGEによるHCFC-22の経年トレンド

屋久島の山岳渓流水中の窒素同位体比を用いた

硝酸イオンの起源推定

篠塚 賢一福岡工業大学情報システム工学科

新型コロナウイルスの影響で中止

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

村田 功、東北大学·大学院環境科学研究科

東北大学では国立環境研究所との共同研究として、フーリエ変換型分光計(FTIR)を用いた赤外分光観測により1998年からつくばにおいて大気中の様々な微量成分を観測している。 また、名古屋大学宇宙地球環境研究所とともに国際的な観測ネットワークNDACC/IRWG (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change / Infrared Working Group)に参加し協力して研究を進めている。本研究では、これまでの全量の解析に加え高 度分布の経年変化についても解析を進めた。我々のFTIRは分解能が0.0035cm⁻¹と非常に高 いため、吸収線の圧力幅による広がりからインバージョン法を用いて高度分布を導出可能 である。ただし、成分によって得られる高度情報は異なる。今年は新たにNO₂、HNO₃、 N₂Oの解析を進めた。

NO₂は主に成層圏に分布する活性な窒素酸化物のひとつで、オゾン破壊等の反応に関わる 重要な成分である。また、都市域では大気汚染成分として地表付近の濃度も高くなり、光 化学スモッグの要因となる。図1につくばにおける2つの高度領域での2012-2020年のNO₂ の経年変化を示す。地上赤外分光ではNO₂に関しては主に成層圏成分(上図)に感度があり 対流圏成分(下図)に対する感度は低いため対流圏成分についてはばらつきが大きいが、 全体としては特に大きな経年変化は見られず、季節変化については成層圏と対流圏で位相 が異なることがわかる。このデータは現在ヨーロッパの共同研究者に提供しTROPOMI衛星 の検証に使われている。

HNO₃は窒素酸化物のリザーバー分子であり対流圏では酸性雨等の原因物質のひとつで あるが、これによって大気中からは除去されるため対流圏での濃度は一般に低くなる。図2 にHNO₃カラム全量の2018年6月-2021年4月の経年変化を示す。これを見ると2019年1-5 月には日によって値が二極分化したように見える。これまでに解析したO₃, HCl, HFでも 同様の傾向が見えることから、2019年は極渦の変形によって高緯度性の空気塊と低緯度性



図 1. 2012-2020 年の NO₂の経年変化



の空気塊が交互に日本上空に入ってきたものを観測しているためと考えられる。2020年お よび2021年はこのような二極分化は見られず、極渦が安定していたためつくばでは変動が 少なかったと考えられる。

 N_2O は温室効果気体として知られており、土壌中の微生物から排出され寿命が長いため対 流圏ではかなり一様に分布する。図3に2つの高度領域での2001-2021年の N_2O の経年変化を示す。ここでは8kmを境に主に対流圏となる下層と主に成層圏となる上層に 分けているが、いずれの高度領域でも全期間の平均としては0.2%/年の増加傾向が見られ、 2010年以降に限るとさらに大きな増加率となっている。これはIPCC第6次評価報告書に報 告されている結果と一致し、 N_2O に関しては近年増加率が上昇していることが我々の観測で も確認された。



図 3.2 つの高度領域での 2001-2021 年の N₂O の経年変化

このほか、昨年度AMT誌に投稿したHFC-23の解析手法についての論文が無事出版された。

<成果論文>

Takeda, M., <u>Nakajima, H., Murata, I., Nagahama, T., Morino, I.</u>, Toon, G. C., Weiss, R. F., Mühle, J., Krummel, P. B., Fraser, P. J., and Wang, H.-J.: First ground-based Fourier transform infrared (FTIR) spectrometer observations of HFC-23 at Rikubetsu, Japan, and Syowa Station, Antarctica, *Atmos. Meas. Tech.*, 14, 5955–5976, https://doi.org/10.5194/amt-14-5955-2021, 2021.

持続的地球環境のための高校生のできる課題
Environmental and Sustainable Development Education
on Earth Sciences for High School Students
河野光彦,関西学院千里国際キャンパス
鈴木ゆみ,関西学院千里国際キャンパス

齊藤誠一,神戸大学大学院人間発達環境学研究科
水野 亮,名古屋大学宇宙地球環境研究所

【はじめに】

2020 年から段階的に始まっている新しい学習指導要領では、「未知の状況にも対応 できる思考力・判断力・表現力」を獲得できるよう「総合的な探究」という観点が、 高校の教育カリキュラムに組み込まれた。本研究では、高校生の地球環境学習におけ る実証的なデータに基づいた学習方法や探究課題の開発を目的とした。より教育的な 探究課題として適切なのは、生徒自身が抱えている問題から思考を進めて、さらにグ ローバルな問題にまでアプローチしてゆくような経験ができるものを考えた。

【研究方法】

COVID-19のパンデミックによって、生徒の課外活動が全くできない状況が 11 月ま で続き、期待していた研究所訪問もできずに終わった。そのため、活動制限が続く中 でも生徒たち自身が主体的にできる課題を 12 月より始めた。具体的には、温室効果ガ ス観測衛星による観測データの解析を目標として、週 1 時間の活動を行った。NASA の温室効果ガス観測衛星 Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) や国際宇宙ステー ションにある Orbiting Carbon Observatory-3 (OCO-3) などの公開データ解析によっ て、温室効果ガス発生源を特定できないかと考えたからである。

【結果と考察】

集まった生徒たちに、英文で書かれている User Guide for OCO-2 and OCO-3 を輪 読させてようとしたところ、生徒たちは自主的に役割を決め担当箇所を解説していっ た。ただ、この活動は具体的な探究活動とは程遠いことから、生徒たちの学習意欲が 続かなくなっていった。そのため、実際にデータにアクセスして探究活動をしている 実感を持てるように仕向けて行った。これまでの活動時間は短いものの、生徒たちの 主体的な活動によって、NASA のデータにアクセスするためのユーザー登録と、ダウ ンロードのための解説書の解読から、生徒自身のデバイスに実際ダウンロードまでで きるようになった。一方、データ表示ソフトウェア Panoply のための JAVA 登録やイ ンストールなども生徒自身が積極的にできるようになっていった。Panoply によって データをプロットし表示できるようになったことから、次の段階はデータの分析方法 の学習と大量データのダウンロードと考えている。このように、本研究から探究活動 を進めることによって、生徒の積極性や主体性が喚起されてゆく様子が顕著に表れて くるのだということがわかった。 (別紙様式1-2)

「あらせ」衛星による内部磁気圏赤道域低エネルギーイオンの加熱現 象の解析

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

浅村和史、宇宙航空研究開発機構·宇宙科学研究所

本年度の主たる成果を以下に示す。

1) あらせ衛星の低エネルギーイオン観測器(LEPi)、磁場観測器、波動観測器のデータを用いて、低エネルギーイオンの磁力線垂直方向加熱、磁気音波(MSW)、電磁イオンサイクロトロン(EMIC)波が同時に観測されたイベントについて、波動粒子相互作用解析を行った。その結果、磁気音波から低エネルギーイオン(~100eV)へのエネルギー輸送、低エネルギーイオンから EMIC 波へのエネルギー輸送が同定された。MSW は10keV 帯のイオンの速度分布関数におけるリング分布で励起されると考えられている。本研究は10keV 帯のイオンから MSW、~100eV 帯のイオンを介して EMIC へと至るエネルギー輸送経路の存在を実証的に示したものであり、磁気圏における領域間エネルギー輸送の一端を明らかにした(*1,2)。



図:本研究で解析した観測イベントについて、プラズマ波動から冷エネルギーイオンに 渡される正味のエネルギー流量を示したプロットと模式図。(a) MSW の場合、(b) EMIC 波の場合。プロットされている3本の線は計算値と信頼区間を表す。(c)本研究で明らか になったジオスペースでのエネルギーの流れの模式図。

- 2) あらせ衛星 LEPi の飛行時間分析データを用いた重イオン、分子 イオンフラックスの導出手法の開発を行い、分子イオンフラックス の増減と地磁気指数との相関関係を導いた。本研究成果は、名古屋 大学工学部学生の卒業論文としてまとめられた。
- (*1) Asamura, K. et al., Cross-energy couplings from magnetosonic waves to electromagnetic ion cyclotron waves through cold ion heating inside the plasmasphere, Phys. Rev. Lett., doi:10.1103/PhysRevLett.127.245101, 2021.
- (*2) <u>https://www.isas.jaxa.jp/topics/002885.html</u> (ウェブリリース)

空撮及び林内撮影画像解析による森林空間3次元モニタリング Three-dimensional monitoring of forest space using images ta ken aerial and within the forest

山本一清、名古屋大学・大学院生命農学研究科・教授

研究目的

日本の森林の約4割を占める人工林の多くが、現在成熟期を迎えている。適切な森林管理 及び利用には正確な森林の情報が必要であるが、森林情報の不正確性はこれまでも多く指 摘されてきたように、社会的な問題となっている。しかし、広大な森林域の情報をマンパ ワーのみにより計測することは不可能であるため、森林を迅速に観測・モニタリングする 方法としてリモートセンシング技術が急速に実利用されつつある。特に、適切な管理が行 われて来なかった森林の公益的機能回復・増進を目的とした間伐が、日本各地で行われて いるが、その多くに国や各県等の補助金が利用されている。そのため、適切な間伐実施が 行われているか、またその成果としての林内下層植生等の状況把握等が今後必要不可欠と なる。

一方、近年UAV (無人航空機、通称ドローン)とSfM (Structure from Motion:複数枚 の画像から対象の3 次元形状を復元する技術)を併用した測量技術 (以下UAV-SfM測量と する)を利用した森林計測技術の開発が進められてきた。しかし、上空からの撮影だけでは 森林内における樹冠下の被圧木や下層植生等を把握することは不可能である。以上のこと から、本研究では名古屋大学大学院生命農学研究科附属フィールド科学教育研究センター 稲武フィールド及び愛知県北設楽郡設楽町内の民有林内の間伐地を対象として、森林内に おけるケーブルカメラ写真測量の撮影方法を確立させ、森林施業における間伐検査への適 用可能性を検討する。

研究方法

愛知県北設楽郡設楽町内の民有林(以下、「設楽サイト」とする)(図2)及び名古屋大 学大学院生命農学研究科附属フィールド科学教育研究センター稲武フィールド(以下、「稲 武サイト」とする)(図5)を試験地とし、各試験地の間伐前後にケーブルカメラによる動 画撮影を行った。ケーブルカメラには動力付き滑車としてwiral LITE(Wiral Technologi es AS社製、ノルウェー)、カメラにはアクションカメラのGoPro HERO 7 Black(GoP ro社製、アメリカ)を使用し、以下の手順で動画を取得した。

- ① 撮影範囲(プロット)を決定し、撮影範囲内のいくつかの立木に検証データ取得に 利用した地上レーザー計測で取得される立木位置との対応をとりやすくするために 反射材を巻き付けた。
- ② 撮影範囲が撮影可能かつケーブルカメラが走行可能な空間のある、互いに視認できる2立木を支柱木として定めた。ただし、視差のある画像を取得するため、支柱木間の距離は少なくとも10 m程度離れるようにした。
- ③ 支柱木にワイヤーを取り付けるためのバンドを巻き(樹皮を傷つけないようにするため)、支柱木間にワイヤーを張り、たるまないように強く引っ張って固定した。 このワイヤーを設置した位置を以後「撮影ライン」と呼ぶ。

④ 設置したワイヤーにwiral LITEを取り付け、撮影を行った。

撮影された動画を静止画に変換し、Metashape(Agisoft社製、ロシア)によりSfM処理を行い、3次元点群を生成し、さらに3次元点群からDTM (Digital Terrain Model)を生成し、 胸高位置(地上1.2m)近辺の点群を切り出した。最後に、間伐前後の胸高位置近辺の点群 の比較により、間伐木の目視検出を行い、間伐木検出精度を検討した。 研究結果・考察



ケーブルカメラを用いた間伐木抽出においては、高密度下層植生区及び斜面区の斜面下 向き撮影区を除き、撮影ラインからの距離が 0~10 m の範囲であれば高精度な間伐木抽出 が可能であった。したがって、撮影ラインを 10 m 間隔で設定をし、撮影を行うことで高精 度な間伐検査が実施可能と考えられた。特に、同じ斜面区でも斜面下向き撮影と上向き撮 影で間伐木検出精度が大きく異なり、斜面上向き撮影では 20m 程度まで高い間伐木検出精 度が維持されていた。したがって、斜面地においては地形に沿って斜面上向きに動画撮影 を行うことが、高精度な間伐木検出に有効な手法であることが示唆された。

成果発表

大槻峻介 ・山本一清、Deep Learningによるヒノキ植栽木検出手法の検討、第 11 回中部 森林学会大会、オンライン、2021年 11 月 14 日

西山明慶 ・山本一清、オルソ画像による竹林の抽出可能性の検討討、第 11 回中部森林学 会大会、オンライン、2021年 11 月 14 日

今枝 大・山本一清、ケーブルカメラを用いた森林計測 一間伐木の抽出精度一、第133回日 本森林学会大会、オンライン、2022年3月27日~29日

数 値 モ デ リ ン グ お よ び デ ー タ 解 析 に 基 づ く 環 電 流 が 内 部 磁 気 圏 ダ イ ナ ミ ク ス に 果 た す 役 割 の 研 究

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

関華奈子、東京大学大学院理学系研究科

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

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

本研究計画では本年度、2つの課題に焦点をしぼって研究を進めた。1つめの課題は、内 部磁気圏での粒子と電磁場を自己無撞着に記述可能なGEMSIS-RCモデルの特徴を活かし たもので、計画第3年度である本年度は、電離圏磁気圏相互作用をモデルに組み込むため、 GEMSIS-POTという電離圏電場ポテンシャルを全球で解くモデルとGEMSIS-RCモデルの 結合計算のための開発を進めた。この開発により、より現実的な形で磁気圏尾部からのイオ ン入射をシミュレートすることが可能となり、2つの特徴的なULF波動が励起されること などが明らかとなっている。

2つ目の課題は、電離圏から内部磁気圏へのイオン供給課題をあらせ衛星と地上レーダー観測に基づいて研究し、その結果を、上述の環電流モデルの電離圏側境界条件の改善に役立てるというものである。昨年度に得た、EISCATレーダー観測局所的に強まった電場に起因するイオン加熱が分子イオンが存在する低高度(高度300km以下)からのイオン上昇流に着目し、約20年間のEISCATによる電離圏の長期観測データを用いて磁気嵐のドライバータイプ別(CMEもしくはCIR)の電離圏での低高度アップフロー現象の出現条件に着目して、統計解析を行った。その結果、磁気嵐の規模によって、低高度からのイオン上昇流を引き起こすメカニズムが異なることなどが明らかとなった。

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

中野 佑樹、神戸大学大学院 理学研究科

研究の背景と目的

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

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

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

研究の手法

前述のように、太陽フレア由来のニュートリノは、大気ニュートリノとエネルギーが重複する。そのため、ニュートリノ検出器では原理的に両者を区別できない。このような問題点を解決するため、 我々は太陽フレア発生時にニュートリノ探索用の時間幅を設定することで、大気ニュートリノによる 背景事象を抑え、signal/noise比を向上させるという手法を新たに提案した。

名古屋大学宇宙地球環境研究所結合データサイエンスセンターのCIDASシステムを用いて、RHES SI衛星、GOES衛星の観測データを解析した。具体的には、Soft X線 (GOES)、Hard X線 (RHESS I)、Line γ 線 (RHESSI)の光度曲線から、荷電粒子の加速や原子核反応が起こっている時刻を抽出し、 ニュートリノ生成時刻を推定した。また、同時に外部の研究者と協力して、GEOTAIL衛星の観測デ ータも同様の物理解析を実施した。 この研究により、X5.0を超える大きな太陽フレアに関して、So ft X線、Hard X線、Line γ 線の光度曲線から、ニュートリノの探索時間幅はそれぞれ4,178秒、944 秒、1,586秒と決定した。また、Soft X線の光度曲線を微分し電子の加速時刻を抽出する手法では、時 間探索幅は700秒と決定した。ここまでの研究成果を2019年度までに得ており、2020年にSolar Physics 誌にて公表した。

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

研究の成果

2020年度は上記の探索時間幅の中にSuper-Kamiokande検出器で観測事象が存在するかを調べた。

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

一方で、太陽の裏側で発生した太陽フレアに関してもデータ解析を実施し、4回の太陽フレアで計6 個のニュートリノ候補事象を観測した。探索時間幅(7238秒)におけるバックグラウンドの観測頻度は 0.62事象であるため、太陽フレア由来の優位な信号を得ることはできなかった。

2021年度はこれまでに解析していたデータから、太陽フレア由来のニュートリノ流束量を評価した。 まず、太陽フレア由来のニュートリノに関して、100 MeV未満で特別なエネルギー分布を仮定しない 場合の流束量を評価したところ、図1の結果を得た。本研究では、これまでのニュートリノ実験で得ら れていた結果よりも1桁以上厳しい制限を得た。



図 1: ニュートリノ流束量のエネルギー依存性。赤色の線が、本研究で得られた流束量の上限値である。

次に、太陽フレア由来のニュートリノに関する物理モデル3種類[4, 6, 7,]に対して、エネルギー分 布を仮定した場合のニュートリノ流束量を評価し、図2の結果を得た。この結果、[4]のモデルを90% で棄却した。一方で、[6, 7]のモデルに関しては、次世代の大型ニュートリノ検出器での検証が必要で あることが分かった。これらの研究成果に関する論文を2022年に公表予定である。



図 2: ニュートリノのエネルギー分布を仮定した場合の太陽フレア由来のニュートリノ流束量の上限値。 黒線が本研究で得たニュートリノ流束量の 90%上限値、赤線が物理モデルから予想される流束量。

参考文献: [1] R. Davis, Prog. Part. Nucl. Phys. 32 (1994) 13·32. [2] B. Aharmim, et al., Astropart.Phys. 5 5 (2014) 1·7. [3] K.S. Hirata, et al., Phys. Rev. Lett. 61 (1988) 2653. [4] D. Fargion, et al., Astrophy. 3 (2 003) 75·86. [5] Y. Fukuda, et al., Nucl. Instrum. Meth. A 501 (2003) 418·462. [6] Kocharov, et al., NCim C, 14 (1991) 417. [7] Takeishi, et al., ICRC (2013) proceedings, 33, 3656.

VLF/LF帯標準電波を用いた中 · 低緯度下部電離圏擾乱の観測 Perturbations in the lower ionosphere observed by VLF/LF radio wave propagation

土屋史紀 東北大学大学院理学研究科

2006年3月より陸別観測所、2016年12月より鹿児島観測所にて、VLF/ LF帯標準電波観測を用いた中・低緯度下部電離圏擾乱の連続観測を実施している。VLF/LF帯の電波は地表と下部電離圏を導波管モードによって長距離伝搬し、伝搬経路上での下部電離圏を増波管モードによって長距離伝搬し、伝搬経路上での下部電離圏擾乱を高時間分解能でモニタリングすることができる。中間圏・下部熱圏での電離現象として、太陽フレアやSEPにより伴い飛来する太陽X線・高エネルギー粒子、 雷起源のホイッスラー波や磁気圏擾乱に伴う放射線帯電子降下、雷放電により雷雲の上空に発生する準静電場や電波パルスによる電離度の変調、重力波・音波により生じる下部熱圏電離度の変調、銀河系外のガンマ線源から発生するガンマ線バーストなどが観測対象となるが、これらの下部電離圏電離度の変調要因は発生の事前予測が容易ではないため、高品質な連続観測が必要となる。

2021年度は連続観測を実施するのための保守作業として陸別、鹿児 島両観測所の観測用PCの交換とアンテナ修理を行った他、観測システ ムの較正とノイズ環境調査を行い、観測装置の健全性を確認した(図1)。 陸別、鹿児島観測所での観測に加え、東北大学蔵王観測所、九州大学 笹栗観測所、福島県田村市の星の村天文台で過去に実施した観測を合 わせたネットワーク観測データを用いた下部電離圏擾乱の研究を行い、 主に千葉大学のグループによって、火球や地震が励起した音波による 電子密度擾乱の事例解析、太陽フレアX線により生じる下部電離圏電 離の空間非一様性の研究、長期間の蓄積データを用いた下部電離圏の 季節変動及びその年変動の解析が進められた。



図1:ISEE陸別観測所(左)と鹿児島観測所(右)に設置されている垂直電界アンテナと較正の様子。

地球磁気圏尾部における斜め伝搬ホイッスラー波動と電子の相互作用 Interaction between oblique whistler waves and electrons at Earth's magnetotail

大塚 史 子 、 九 州 大 学 · 大 学 院 総 合 理 工 学 研 究 院

【背景・目的】

地球磁気圏尾部では、磁気再結合やその後の磁場の双極化に伴い、温度異方性を持った電 子が生成されると共に、ホイッスラー波動の励起も観測されている。本研究では、2008年2 月 19 日に THEMIS 衛星が観測した磁場双極子化直後の波動・粒子データにもとづき数値シ ミュレーションを行い、磁気圏尾部の双極子化に伴うホイッスラー波動と電子の相互作用 のメカニズムを解明することを目的としている。

双極子磁場のもとでは、波動・粒子相互作用として波動と電子旋回運動との共鳴に加え、 波動と電子バウンス運動との共鳴が起こり得る。共鳴条件はそれぞれ以下のように書ける。

旋回共鳴: $\omega - k_{\parallel}v_{\parallel} = n\Omega_{e0}/\gamma$, バウンス共鳴: $\omega = m\omega_{b}$

ここで、 ω は波の周波数、 k_{\parallel} は波の磁力線方向の波数、 v_{\parallel} は電子の磁力線方向の速度、 Ω_{ce0} は 電子の旋回周波数、 γ は電子ローレンツ因子、 ω_b は電子のバウンス周波数、n,mは共鳴の次 数を表す。磁気双極子化の直後には、双極子磁場が尾部まで引き伸ばされた形状となり、バ ウンス周期が通常の地球双極子磁場より短くなり、ホイッスラー波動と電子のバウンス共 鳴が起こりやすくなることが期待できる。本年度はとくに 20keV の電子のピッチ角散乱過 程として、バウンス共鳴と旋回共鳴に着目し、テスト粒子計算による解析を行った。

【方法・結果】

テスト粒子計算の背景磁場モデルとして、通常の地球双極子磁場、引き伸ばされた双極子磁場の2つを用いた。また観測データに基づき、斜め伝搬のホイッスラー波動(周波数 ω =0.02-0.5 Ω_{e0} , 伝搬角20度)を、地球半径の10倍の夜側赤道域の磁気中性面近傍に与えた。ここで Ω_{e0} は地球半径の10倍の夜側に位置する背景磁場強度31.2nTで定義し、 Ω_{ce0} =5485/sである。

図1(a)は計算で用いた引き伸ばされた双極子磁場の形状である。図1(b)は地球半径の10 倍の夜側赤道域における拡大図であり、緑は磁力線を示し、青がテスト粒子の初期位置、黒 が0.1秒後の粒子位置を示す。電子は基本的に磁力線に沿ったバウンス運動をしており、粒 子の空間分布は、赤道域で疎になる磁力線分布を反映している。図1(c)は速度空間におけ る0.1秒後の電子分布を示す。初期に20keVのエネルギーの粒子をピッチ角等方に置いた。 カラーで示した領域は、与えたホイッスラー波動と旋回共鳴できる領域であり、赤、青と緑 の領域はそれぞれ n=1、n=-1のサイクロトロン共鳴、および n=0 のランダウ共鳴を示す。旋 回共鳴できる領域以外の広範囲な領域でピッチ角の変化が観測された[1]。

バウンス共鳴が起こるか検証するために、引き伸ばされた双極子磁場のもと、単色な斜め 伝搬ホイッスラー波動の周波数を変化させて、ピッチ角やエネルギーの変化を評価した[2]。 バウンス周期は電子の初期ピッチ角に依存するため、まず磁気中性面での初期ピッチ角α。 の関数としてバウンス周期を数値的に評価した。その結果 20keV の電子では、通常の地球双極子磁場のバウンス周期 1-10s 程度と比べ、 α_{eq} >50° でバウンス周期が 0.01s - 0.1s と短くなる。この短いバウンス周期では、周波数 ω =0.01-0.1 Ω_{ce0} 程度の波動と共鳴できる。実際にテスト粒子計算によって、とくに 90度に近い初期ピッチ角の粒子と低周波の波動において m<5のバウンス共鳴が起きることを明らかにした(図 2, 3)。また、高周波の波動ではサイクロトロン共鳴によって、ピッチ角の変化が最大 40度程度に達した(図 3)。

【まとめ】

磁気圏尾部側の引き伸ばされた双極子磁場のもとで、バウンス運動する電子とホイッス ラー波動との相互作用をテスト粒子計算によって議論した。双極子磁場が引き伸ばされる ことによりバウンス周期が短くなり、観測される周波数帯のホイッスラー波動とバウンス 共鳴し、とくに90度に近いピッチ角の電子が効率的にピッチ角散乱されることを明らか にした。また、線形共鳴の予測通り、周波数が高くなるほどサイクロトロン共鳴も起きやす くなる。今後は、バウンス共鳴やサイクロトロン共鳴によるピッチ角散乱によって、電子ピ ッチ角分布の変化を観測データと比較する。また、cross-tail 電場を考慮した計算を行う。

【成果発表】

[1] 大塚史子, Wang Kaiti, Girgis Kirolosse, 羽田亨, 「Interaction between whistler waves and electrons at Earth's magnetotail: Test particle simulation and THEMIS observation」日本地球惑星科学連合 2021年大会, オンライン, 2021年6月(PEM12-P06)

[2] 大塚史子, Wang Kaiti, Girgis Kirolosse, 羽田亨,「Effect of whistler waves on electron bounce motion in the Earth's magnetotail」地球電磁気・地球惑星圏学会第 150 回講演会, オンライン, 2021 年 11 月 (R006-39)



図1.引き伸ばされた双極子磁場のもとで のテスト粒子計算結果(a)磁場形状(b)電 子工空間分布(c)電子速度空間分布.



図3. ピッチ角とエネルギーの最大変化量の波動周波数依存性.

ドローンと小型センサを利用した

大気微量気体とエアロゾルの3次元計測

Three Dimensional Measurements of Atmospheric Trace Gas and Aerosol using UAV and Compact Sensors

真部広紀、佐世保工業高等専門学校

・基幹教育科

【本研究の目的と目標】

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

[ミニマムサクセス A] 地形計測システム

[ミニマムサクセス B] 上空大気観測システム

[フルサクセス] 地形計測と上空大気観測のドローン遠隔操縦飛行システム

]エクストラサクセス] 地形計測と上空大気観測のドローン自律飛行システム

【1:地形計測システム】

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



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

【2:上空大気観測システム】

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



 $\boxtimes 2$

図 3

図 4

【まとめと課題】

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

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

【参考文献(URL)】

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

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

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

『UAV を組み込んだ火星の縦孔・地下空洞探査構想と穴ノ原溶岩洞穴における

進入離脱飛行実験の解析』

第65回宇宙科学技術連合講演会(山形大会)

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

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

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

西山尚典 · 国立極地研究所 · 研究教育系 · 助教

【研究目的】

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

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

【研究方法】

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

1)昭和基地付近の磁力計とアイスランドの磁力計,合わせて5地点の磁場データの解析を進めた.

2) Summer Solstice Stormの再現を目的として, REPPU (REProdu ce Plasma Universe, Tanaka, 2015) コードによるグローバルMHD シミュレーションを実行し,磁気圏および地上磁場データの解析を進めた.

【研究結果・考察・今後の方針】

前年度までの解析で、昭和基地で観測されたオーロラ発光と磁場変動H成分が8分前後の周



図 1(上):5 地点(南半球:昭和基地・H68・Amundsen Bay, 北半球: Tjörnes・Husafell) における 地上磁場 H 成分の 2015 年 6 月 23 日の日変化。(下): 3mHz のローパスフィルタによる処理を施した 5 地点の地上磁場 H 成分

期でよく対応しており、昭和基地の地磁気共役点であるアイスランドのTjörnesやHusafell の地上磁場変動は、昭和基地と同周期の変動が卓越しているものの、その位相が180度ずれ ていることが明らかになった。本年度ではこれに加えて、昭和基地周辺の2地点(H68, A mundsen Bay)の無人磁力計データの解析も行った。この結果、昭和基地周辺のH68およ びAmundsen BayでもPc5帯の地磁気脈動が観測されており、昼側から夕方側にかけて磁力 線共鳴が発達していたことが予想される。今後は、クロススペクトル法を用いてこの磁力 線共鳴の特徴量を抽出するとともに、オーロラ画像に関しても、さらに短いスケールの変 動に着目した周波数解析や主成分解析を実施して、脈動オーロラ周期と磁力線共鳴との対 応を調査する。

また,統計数理研究所の藤田特任教授にSummer Solstice Stormの再現実験としてグロー バルMHDシミュレーションを実行して頂き,その磁気圏および地上磁場のデータを確認し た.その結果,MLT昼過ぎから夕方にかけての磁気圏界面付近で,K-H不安定によるもの と思われる磁場圧の波状構造が確認され,これが地上で観測された磁力線共鳴のソースと なった可能性が示された.今後はシミュレーションデータの解析を進め,昭和基地付近で 観測を行っていたVan Allen Probesの磁気圏プラズマ観測データとの比較等も進める予定 である. SIに伴い中緯度 SuperDARNで観測される sea/ground backscatter振動現象とFLR現象の 関係

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

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

【研究目的】

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

一方高緯度SuperDARN radars (以下 SD と記す) においては、その受信信号から得られる電離圏プラズマ のVLOS (視線方向速度)のうち sea/ground backscattered signals (以下 SGBS と記す)のVLOS中に 長期間(4-5 時間)継続する単一周期の波動が頻繁に観測されている [e.g., Ponomarenko et al., 2005]。SGBSのVLOSは電離 層の鉛直運動によってしか時間変化しないので、磁気圏の動経方向の振動が上記波動の成因と考えられる。 また、上記のSGBS長時間振動期間中にFLRが観測された例も報告されており [e.g., Ponomarenko et al., 2005]、 それにより生じる磁力線固有振動は poloidal mode (動経方向の振動)とされている。上記論文中のeventsでは SI との関連は見られなかった。

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

【研究方法】

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

【研究結果】

この研究は本報告書の対象年度(2021年度)より前に、名古屋大学・宇宙地球環境研究所・修士課程(2019 度修了)・飯田剛平氏(指導教員:西谷准教授)が発見したSIイベント1例の解析から開始した。このイベント はHankasalmi, Finland(以下HANと記す)のSDでもPykkvibaer, Iceland(以下PYKと記す)のSDでも観測されて おり、特にHAN Beam#1とPYK Beam#13において明瞭に観測され、~14hr UT以降 SGBS が定常的に観測さ れ、~15:10UT開始のSIとほぼ同時にVLOSの強い波動現象が開始し~30分継続した。その波動現象は SGBS の見られたrange gates(以下RGと記す)範囲内において観測された。そのVLOSの振幅と位相は、HAN Beam#1 においてもPYK Beam#13においてもFLRに典型的にみられる緯度依存性を持っていたので、この波動現象は FLRにより生じたと考えられる。ただ、HAN Beam#1でもPYK Beam#13でもVLOSの最大値が100m/sを超えて いたため、SGBS 領域内ではあるがionospheric backscattered signals が混在していたと考えるに至った。

その後HANとPYKの他のbeamsの解析も進めたが、データ量が大変多く、当時は目視でイベント同定していた為、解析の進行が遅かった。本研究では多数のSI eventsについて多数のSDのデータの解析を行う事を目指しているが、目視同定では時間がかかりすぎて目標達成が難しいと予想された。そこで、2019年度から、FLRを自動同定する方法の開発に着手した。その方法は、各beam、各RG毎にそのVLOSデータにFFTをかけ、

その後、同じbeam上で近接した2つのRG'sのデータに位相差法・振幅比法と呼ばれる方法を適用してFLRを 自動同定する、というものである。(以下、高緯度側のRGをRG1、低緯度側のRGをRG2と記す。)

位相差法とは、RG1の位相 (FFT結果データに含まれる) からRG2の位相を引き、その位相差が有意な極 小値を取る周波数をFLR周波数と同定するものである。

振幅比法とは、RG1の振幅をRG2の振幅で割り、その振幅比に有意な極大値と有意な極小値があり、その2つの周波数が隣接していれば、その2つの周波数の中間の周波数をFLR周波数と同定するものである。

上記の性質はFLRの理論から導出されるものであり、位相差法で同定される周波数と振幅比法で同定される周波数は理論上一致する筈のものなので、振幅比極大の周波数と振幅比極小の周波数の間に 位相極小の 周波数 が位置すれば、FLRと同定する。

我々はまず、SDの1つのbeamのVLOSにFFTをかけたデータに位相差法・振幅比法を適用してFLRを自動 同定する関数プログラム(以下 find_FLR.m と記す)を作成し、一通り出来た find_FLR.m が目的通りに動 くかのテストとして、別途(独立に) HANとPYKの幾つかのbeamsでのFLR eventsを目視同定しておき、同 じbeamsに find_FLR.m を適用し、目視eventsが全て自動同定されるところまで find_FLR.m を改良した。そ して、これを以て、その時点での find_FLR.m が正確であるとした。

その際判った事として、その自動同定が成功したのは、RG1とRG2の間隔が2 (例: RG#15と#17) (距離に して約80km)の場合であった。これは、このテストに用いたFLR eventsの共鳴幅 (FLRに伴う電磁エネルギ ーの拡散散逸の空間スケールを反映する重要な物理量)を観測同定したものと考えられる。

ただ、find_FLR.mは、引数指定して読み込んだ2つのFFT結果データについて自動同定を行うという機能 のみを持ち、生データファイルからのVLOS時系列データの読み込みとFFT適用、及び自動同定プログラムが 出力する結果データの作図、は別のproceduresで行っていた。かつそれらは全て別のプログラム言語で過去に 作成したものであった。これでは大量のデータの解析を一括して行う事は出来ないので、全てのcodesを

IDL言語のfunctions/proceduresに書きかえて統合する作業を開始した。しかし、技術的な問題から難航し、本 共同研究期間中には完成に至らなかった。今後プログラミングを続行し完成させる計画である。

また、上述の統合プログラム作成と並行して、2021年度には、上述のfunctions/proceduresをそのまま使い、(その為)時間はかかったが、上述の脈動イベントについてHANとPYKの全てのbeams中のFLR eventsを全ての RG'sについて自動同定した。その結果、目視では同定できなかったeventsも複数同定され、その中には ionospheric backscattered events も sea-backscattered events も 含まれていた (|VLOS|>190m/s の events と |VLOS|<35m/sのeventsに2分されていた)事が判った。そして、sea-backscattered eventsについては電離層での反 射点を計算し、FLRの実際の位置はそこであるとして、同定された全てのFLR eventsについて対応する磁気 圏赤道面位置での密度を推定した(その推定には Schulz [1996] の近似式(dipole磁場を想定し、磁力線に沿 っては等密度と仮定した場合の式)を用いた)。その結果は、全体としては、低緯度ほど密度が高い、とい う傾向を示した。しかし、そのパターンからの数値的なずれが目立つFLR eventsもあり、現在それについて 調査中である。また、このイベントがSI-triggered eventである事の影響についても今後調べていく計画である。

【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】

- Hideaki Kawano, Akira Sessai Yukimatu, Nozomu Nishitani, Yoshimasa Tanaka, Satoko Saita, and Tomoaki Hori, Progress in the full-automatic identification of FLR events in VLOS of multiple SuperDARN radars, Japan Geoscience Union Meeting 2021, 2021.05.30-06.06 (発表日 06.06), online, Japan
- Hideaki Kawano, Akira Sessai Yukimatu, Nozomu Nishitani, Yoshimasa Tanaka, Satoko Saita, and Tomoaki Hori, Automatic FLR identification in ionospheric and ground/sea back-scatters from multiple SuperDARN radars, and density estimation, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第 150 回 総会・講演会、2021.10.31-11.04 (発表日 04), online, Japan
- Hideaki Kawano, Akira Sessai Yukimatu, Nozomu Nishitani, Yoshimasa Tanaka, Satoko Saita, and Tomoaki Hori, Magnetospheric-density estimation from SuperDARN VLOS data to identify magnetospheric regions, by identifying FLR events in ionospheric or ground/sea backscatters, 11th Symposium on Polar Science, 2021.11.15-18 (発表日 17), online, Japan
- 河野英昭、行松彰、西谷望、田中良昌、才田聡子、堀智昭、SuperDARN 地上/電離圏 backscatters 中の同 時観測 FLR の自動同定・密度推定の進展報告、2021 年度極域・中緯度 SuperDARN 研究集会、2022.02.22 (発表日 22), オンライン、日本

GSE座標系における宇宙線強度分布解析によるIMF磁気中性面の トランジェントな構造変動の推定 Estimating transient structural fluctuations of the IMF magn

etic Neutral Sheet by cosmic ray intensity distribution analy sis in the GSE coordinate system

小島 浩司、中部大学・天文台

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

IMF極性反転に伴う宇宙線の変動現象としては「スインソンフロー」と呼ばれる宇宙線の恒星時異方性と長島らが示した名古屋のミュオン望遠鏡による「GGインデックス」と称した宇宙線の南北異方性がよく知られている。しかしこれまでの研究では長期間の集計による解析が大部分で、IMF極性境界面を形成するトランジェントな波状構造と直接関連付ける宇宙線強度変動や異方性の解析はほとんど行われていない。その理由としては「スインソンフロー」及び「GGインデックス」どちらにも宇宙線の太陽時異方性等の他の要因による系統的な変動が存在して、それをを除去するのにある程度の期間のデータを重ね合わせる必要があった。我々は上記2つの現象をこれまであまり行われていない2次元マップ化することによりトランジェントな変化の抽出を試みるつもりである。その変化の抽出にあたり、これまで行われた「スインソンフロー」及び「GGインデックス(南北異方性)」の平均的な構造の2次元マップ作製して、それを他のIMF事象と比較分類し、その特徴を考察する。本年度(2021年度)はまずスインソンフローの2次元マップ化の解析を行ったのでその結果を次の図に示す。



宇宙線強度恒星時座標2次元 MAP:地磁気偏向補正無

2004年~2017年平均

MMS 衛星観測を用いたコヒーレントなホイッスラー波動の研究

天野 孝伸 東京大学 理学系研究科

新型コロナウイルスの影響で中止

放射光施設を用いたエアロゾル化学成分分析に向けた大気エアロゾル収集システムの開発

Development of ambient aerosol sampling system for chemical analysis

using synchrotron orbital radiation facility

代表者、所属機関・部局

八木 伸也、未来材料・システム研究所 高度計測技術実践センター

研究分担者

- 名古屋大学、宇宙地球環境研究所 檜山 哲哉
 - 名古屋大学、宇宙地球環境研究所 松見 豊
 - 名古屋大学、全学技術センター 岡本 渉
 - 名古屋大学、全学技術センター 山崎 高幸

背景•研究目的•研究方法:

大気中のエアロゾルの化学分析にあたっては、元素分析に近い大まかな科学分析 とその分類研究がなされているのみである。エアロゾルの低減や健康影響を解明す るうえで、エアロゾルに含まれている様々な成分の化学形態を解明することが重要 である。また、エアロゾルの発生源や変質過程を探るうえで化学形態の解明は不可 欠である。例えばエアロゾル中の硫黄が酸化型であるのか還元型であるのかを調べ ることにより、発生源や大気中の変質過程を解明することが可能になる。化学形態 を調べるには、放射光によるX線吸収微細構造 (XAFS)を測定すれば明確になる。 放射光施設(本研究ではあいちシンクロトロン光施設 (あいちSR)を利用)で大気エ アロゾルを測定するには、分析に必要なエアロゾルの収集量や化学形態を変質させ ないようなエアロゾルのサンプリング法を確立する必要がある。そこで、本研究で は放射光分析に適したエアロゾルのサンプリング法の開発を行う。また、空間的な 化学形態の違いの解明を行うためにドローンを用いた3次元的なサンプリング法の 開発を行う。

エアロゾルの捕集補法:

エアロゾルの捕集については、4ローター型ドローンにエアポンプを活用した捕 集装置をぶら下げる形で取り付けたものを設計し取り付けを行った。この捕集装置 は、リモートでエアロゾルの捕集時間を制御することが可能である。 エアロゾルの捕集は、小貝川周辺(茨城県常総市の大和橋下流)で2022年1月23日 に実施された「野焼き場所」で行った。捕集高さは、地上「15-20 ft」と「300 f t」の2か所を選び、その位置で3分間のエアロゾル捕集を行った。また、エアロゾル の捕集は、コットンパフを捕集フィルタとして用いた。

XAFS測 定の結果:

エアロゾルについては、野焼きによって放出された物質の硫黄成分に注目したため、XAFS測定は硫黄K吸収端についてスペクトルの取得を目指し、あいちSRの軟X線分光ビームラインであるBL6N1にて行った。分析試料は,先述したコットンパフであり、絶縁体のため、He・パスシステムを利用し、蛍光X線収量法により実施した。この測定手段により、絶縁体試料に対してもチャージアップすることなくXAFSスペクトルの取得が可能である。Fig.1に先述した2つの高度にて捕集したエアロゾルに対するXAFSスペクトルを示す。

Fig.1に見られるピークは、(a)硫化炭素、(b)二酸化硫黄に起因するピークである。一方で、2481 eV付近に見られる大きなピークは、硫酸(S04)に由来するピークであり、コットンパフを漂白する製造過程で使用された硫酸の残渣であると考えられる。



これらのXAFSスペ クトルからは、高度 がエアロゾルの発生 場所に近いほど(a)、 (b)各成分は濃いこと がわかる。しかしな がら、300ftの高度で あっ硫黄化合物が捕集 さてあった。

Fig.1 2つの高度にて捕集したエアロゾルに対する 硫黄K吸収端XAFSスペクトル

まとめ:

本研究の成果として、以下のことが挙げられる。 1:ドローンに取付可能なエアロゾル捕集機器の設計・調整・動作の確認ができた。 2:捕集したエアロゾルの化学形態として、硫化炭素と二酸化硫黄が確認された。 3:捕集高度に依存した硫黄化合物の濃度分布に関する知見が得られると考えられる。

今後は、野焼き場以外でのエアロゾル捕集を実施し、エアロゾル発生源に依存した化学状態種に関する知見 を得ることを実施したい。また、捕集高度に依存したエアロゾル成分の濃度に関する情報についてもトライを 継続する予定である。

学会発表予定: 2023年1月7-9日開催予定の日本放射光学会にて発表予定。
無人航空機を用いた雲・エアロゾル・水蒸気観測の高度化 Improvement of cloud/aerosol/water observation using Unmanned Aerial Vehicles

林 政彦、福岡大学·理学部

1. 目的と計画

無人航空機に様々な観測装置の搭載することで大気現象の多面的な科学的な理解が進むことが期待される。 また、飛行特性が異なる様々なタイプの無人航空機がある。これらを組み合わせて多様な観測が展開され ることが期待される。本研究では、小型ロガロ翼無人航空機(カイトプレーン)に雲粒と氷晶の分別が可 能な偏光光学粒子計数装置(偏光 OPC)を搭載し、雲,エアロゾル過程の観測手法の高度化を図る。搭載, 観測にあたり,高効率で安定性の高い,国産メーカーにより新たに開発されたインジェクションタイプの エンジンの搭載を行う。このことにより,安定して,高度3km程度までの雲の観測を可能にする。また、 気象要素として、直接測定が困難な飛行経路上の風を in-situ 計測として得るようにする。

2021年度は、計測機器の性能評価と搭載プラットホームの高度化のために以下の3項目の実験、観測を計画した。

- 1) 偏光OPCの1~10 µmの氷晶および雲粒に対する応答特性の室内実験
- 2) 福岡大学が所有するカイトプレーンのエンジンの新型インジェクションエンジンへの換装と試験飛行 によるエンジン設定の最適化
- 3) 久住グライダー滑空場において偏光OPC搭載カイトプレーンによる雲の試験観測による粒径分布等の 計測性能の評価

新型コロナウイルス感染症拡大の影響により、共同研究者の移動の制限などがされた。上記3項目を進めることが困難であったため、第62次南極地域観測隊越冬隊および㈱四門の協力を得て、上記の第2項と in-situ 風計測に関する研究開発をおこなうこととした。

2. 方法

昭和基地においてエアロゾルの越冬観測に使用されているインジェクションエンジン(小川精機、80c c)を搭載したカイトプレーンの動作状況のデータ解析により、低温条件における動作状況を解析し、エ ンジンコントロールソフトの改修および設定パラメータの最適化を図る。エアロゾルの観測装置を搭載し たカイトプレーンの昭和基地における観測時の観測データおよび自動制御装置のログデータ(GPS位置 情報等を含む)のデータセット化とともに、GPS位置情報から得られる対地速度データから、ホドグラフ 法¹⁾を用いて対気速度およびin-situ風向・風速を計算するソフトウェアを開発する。

- 3. 結果とまとめ
 - インジェクションエンジン搭載カイトプレーンの運用とソフトウェア改修 昭和基地において実施しているカイトプレーンによるエアロゾル観測時、および地上テスト時のロ グデータ、稼働状況の映像等を国内で解析し、設定パラメータの最適化を行うことができた。運用気 温としては、観測装置の安定的な運用は気温―20℃以上の条件に限定された。この温度条件でのイン ジェクションエンジン搭載カイトプレーンの安定運用が可能であることを確認した。

In-situ風向風速計測ソフトウェアの開発 凝結核計数装置(TSI 社製 CPC3007:d>10nm)、光散乱粒子計数装置(RION 社製 KR12:d>0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 2.0, 5.0 μm)、気象センサ(温度、相対湿度)による観測データ、カイトプレーン搭載

自動制御装置(ゼノクロス航空宇宙システム製 XENO4: GPS 位置時間,加速度・角速度等)のデー タを統合し、GPS による位置情報を用いて、エアロゾル、気象データおよび風向・風速の鉛直分布 の統合データを得ることができるようになった。



図1 昭和基地におけるカイトプレーンの飛行経路上のエアロゾル濃度および気象要素の時間変化



図 2 カイトプレーンによって得られた昭和基地上空、海抜500mまでの エアロゾル(d > 0.01, 0.3, 1.0 μm)の数濃度、気温、湿度、および風向風速の鉛直分布

【参考文献】

1) 小野原智之,小型無人航空機のin-situ情報による測風,2018年度福岡大学理学部地球圏科学科卒業論 文,2019年3月

【成果発表】

口頭発表

1. 林政彦,福岡平野の地表付近の超微粒子の日周変動,第38回エアロゾル科学・技術研究討論会,オン ライン(熊本県立大学),2021年8月26~27日

2. 林 政彦, 無人航空機サンプルリターンによる中緯度圏界面近傍のエアロゾル, 2021年度「航空機観 測による気候・地球システム科学研究の推進」研究集会, オンライン(名古屋大学), 2021年12月21日

低周波VLBIのさらなる技術獲得と課題解決に向けた干渉実験

宇宙航空研究開発機構 臼田宇宙空間観測所 岳藤一宏

これまでに、我々は名古屋大学豊川電波観測所におけるデジタルバックエンドの整備 を行い、Crab パルサーからのジャイアントパルス検出の成功、さらに東北大学飯舘観 測所と干渉実験を成功させた。2022 年度は 2 回東北大学飯舘観測所との干渉実験を実 施し、技術的な知見を高めたので報告する。

観測天体は、シンチレーション(IPS)測定用のクエーサーから、インドの GMRT で作成されたコンパクトクエーサーカタログ(TGSS, 150MHz)を比較しコンパクトかつ任意の強度より強い天体を選び、スケジュールを作成している。もちろん IPS 観測でもコンパクト天体を選出しているが、450km の干渉実験ではさらにコンパクトな天体が必要となる。

今年度、1回目はバックエンド記録不具合で失敗。2回目は干渉(以降、フリンジ)を 得ることに成功した。Table1 と2はその結果である。3 日間連続した2回目の実験で明 らかになった知見として、次の3点があげられる。①:複数日の観測で得られたフリン ジは SNR と遅延量ともに再現性があること。②: TGSS の天体強度と得られた SNR は相 関性が低いこと。③: 3C273 と 3C298 の遅延量が大きく外れている。まず、①について、 3日間連続している天体(3C255, 3C273, 3C461, 3C10)の結果では複数日ともほぼ同じ SNR と遅延量が得られた。つまり、両局のシステムは安定していたことがわかる。また、 ②について TGSS カタログ値と SNR の相関性の低さは、実験前はシステムに起因する可 能性も考えられたが①の結果から棄却され、天体起因であることがわかる。もちろん、 いくらかの天体については強度が高いため、アンプの飽和の可能性も考えられるが、 3C255 のような 15.Jy 程度の天体であっても SNR100 を超えるような結果もあり、つじつ まが合わない。結局、天体の構造や天体自体のフラックス変動が強く影響している可能 性が高い。また、③について、3C273 や 3C298 はジェットをもつ天体であり、天体構造 により遅延差が発生している可能性もある。例えば 3C273 は 23 秒角にも広がったジェ ット(Perley 2016)を持つ。例えば 450km 基線で単純に適応すると最大 8m(約 26 ナノ 秒)の遅延差となり、我々の結果と2倍異なるがオーダーは合う。一方、3C298 は 1.5 秒角ほどのジェット(Dallacasa&Orienti 2021)を持つため、2 ナノ秒程度の遅延に なるはずが、結果と大きく異なり、まだ原因は不明である。

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

| steep-spectrum s | sources(CSS |)である。 |
|------------------|-------------|-------|
|------------------|-------------|-------|

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

 Table 2
 Table1の天体で得られた遅延量。網掛けの 3C273 と 3C298 で大きく遅延が飛んでいる。

| Delay [ns] in 60s integration | Source | Mirror A H-pol | Mirror B H-pol | Mirror A V-pol | Mirror B V-pol |
|----------------------------------|---------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 2021/332 21:37:18 | 3C255 | 1.83335 | 1.84142 | 1.83804 | 1.83992 |
| 2021/332 22:46:48 | 3C273 | -59.4304 | -59.5991 | -59.5856 | -59.584 |
| 2021/333 09:38:53 | 3C461 | N | n | n | n |
| 2021/333 10:41:00 | 3C10 | n | n | n | n |
| 2021/333 21:33:22 | 3C255 | 1.83721 | 1.83294 | 1.82589 | 1.82739 |
| 2021/333 21:53:04 | 1136-13 | n | n | 4.98761 | 4.99 |
| 2021/333 22:42:52 | 3C273 | -59.4292 | -59.5902 | -59.5816 | -59.58 |
| 2021/333 22:56:03 | 3C275 | n | n | 1.89536 | 1.89554 |
| 2021/333 23:09:52 | 3C279 | 1.89151 | 1.89136 | 1.8906 | 1.8937 |
| 2021/333 23:25:21 | 3C283 | n | n | 2.06353 | 2.07611 |
| 2021/333 23:44:37 | 3C286 | n | n | n | n |
| 2021/334 00:32:35 | 3C298 | -191.4 | -191.405 | -191.407 | -191.406 |
| 2021/334 01:33:16 | 3C318 | n | n | n | n |
| 2021/334 05:53:58 | 1938-15 | 1.95741 | 1.95763 | 1.9534 | 1.95581 |
| 2021/334 09:34:57 | 3C461 | n | n | n | n |
| 2021/334 10:37:04 | 3C10 | n | n | n | n |
| 2021/334 21:29:27 | 3C255 | 1.82854 | 1.81642 | 1.82041 | 1.81341 |
| 2021/334 21:49:08 | 1136-13 | n | n | 4.99316 | 4.99192 |
| 2021/334 22:38:57 | 3C273 | -59.6021 | -59.457 | -59.6157 | -59.6146 |
| 2021/334 22:52:07 | 3C275 | n | n | 1.86298 | 1.8701 |
| 2021/335 09:31:01 | 3C461 | n | n | n | n |
| 2021/335 10:33:08 | 3C10 | n | n | n | n |

この VLBI 実験では Crab パルサーの観測も同時に実施した(図 1)。主に、両局の時刻 差を正確に把握するためである。図 1 をみると、豊川局と飯舘局で同様に Crab パルサ ーからのジャイアントパルスとよばれる強力なパルスが得られ、それらの到達時刻は 1.024 秒の差があることがわかった。もちろん、観測局の地球上における位置が異なる ため、その幾何学的な遅延差が含まれるが日本では高々ミリ秒のオーダーであり、両局 どちらかの基準時計がずれていたことが把握できた。通常の VLBI 処理ではこの大きな 差はあらかじめ把握できないとパラメータサーチが膨大となり、フリンジの検出が難し いが、Crab パルサーで時刻差が得られることは非常に重要で、今後も VLBI 観測に Crab パルサーをスケジュールする必要性がある。



図 1 Crab パルサーの同時検出(緑:豊川観測所、紫:飯舘観測所 A 面 H 偏波、DOY332)。 横軸 UT0 時からの経過秒、縦軸がパルサー位相。

図2と図3は観測期間中に最大のジャイアントパルス(D0Y333、豊川での受信S/N480)から、最適なディスパージョンメジャーを調査した結果である。最大のジャイアントパルスに対して、微少(ここでは0.01程度)を振ったときの時系列データの標準偏差をプロットした。図をみると、Gaussianではなく、Lorentzianのようなカーブであった。そこで、図2の関数に対してフィッティングを行った結果が図3である。フィット後、ピークセンターは56.7444+/-0.0007で決定することができた。もちろん、超強力な1発のジャイアントパルスを用いたこともあるが、1発のGRPだけで、ひと桁DMの決定精度を向上できる可能性がある。



図 2 DM 最適値を得るため、DM を振った様子。横軸は DM。縦軸は規格化した標準偏差である。



図3図2の結果にたいして、Lorentz 関数でフィットした様子。

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

Study of wave-particle interactions in the inner magnetosphe re by global model and PIC simulations

加藤雄人、東北大学 大学院理学研究科

・研究目的

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

<u>・研究方法</u>

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

<u>・研究結果</u>

2021年度における研究課題の成果は以下の通りである。

連成計算1について、2020年度に引き続き、2017年3月に発生した磁気嵐を対象に実施 したグローバルモデルによる計算結果の解析を進めた。グローバルモデルの計算結果に示 される高エネルギー電子の速度分布関数を用いた連成計算2により、コーラス放射が発生 する条件のサーベイ計算を実施した。さらに、コーラス放射発生条件に関するサーベイ計 算として、同イベント時のあらせ衛星によるkeV帯高エネルギー粒子計測結果に基づいた素 過程計算を実施している。以上の成果は2022年5月に開催される日本地球惑星科学連合 2022年大会で報告を予定している。また、本申請に関連する科研費・基盤B課題(代表:三 好、分担:加藤他)が2020年度より開始し、あらせ衛星とモデル計算結果との詳細比較が 進められている。

共同研究により開発された連成計算手法を、あらせ衛星を始めとする衛星観測結果との 比較・考察に活用することにより、放射線帯領域での電子加速過程ならびに波動励起過程 における非線形効果の定量的な究明が可能となる。2022年度からは新たな3ヶ年計画の一 般共同研究を申請しており、衛星観測結果を初期条件として連成計算2を実施して、宇宙 天気現象時の内部磁気圏における非線形波動粒子相互作用の発生領域とその時間・空間発 展を明らかにすることを計画している。 衛星搭載イメージング・分光光学系の設計と開発 Design and development of visible and ultra-violet imaging spectrograph

坂野井健、東北大学·理学研究科

【研究目的と意義】

現在、磁気圏・電離圏・熱圏コミュニティでは、将来観測のためのISAS/JAXA小型衛星計画FACTORSの検討が 行われている。これは極域低~中高度を複数個の衛星が編隊飛行で周回する計画であり、オーロラ・大気光カ メラが搭載される予定である。特に、微細オーロラの高速変動とそれを引き起こす宇宙空間プラズマ波動現象 の解明に取り組む。一方、NICTを中心に静止軌道衛星に宇宙環境計測機器を搭載する将来計画の議論が現在行 われており、これに紫外イメージャーを搭載してプラズマバブルなどの電離圏擾乱を監視する検討を進めて いる。本研究は、これらの将来衛星に搭載し、オーロラや大気光の微弱発光を観測可能なイメージングカメラ の基礎開発を行うことを目的とする。とくに、我が国では欧米と比較して紫外波長隊域によるオーロラ・大気 光観測の経験が乏しい。今後の研究発展のためには、最新技術と知見に基づく衛星搭載用の紫外カメラと可視 高感度・高速カメラの技術向上が不可欠である。

FACTORS衛星によるオーロラ観測には、数千kmの高度かられいめい衛星以上の時間・空間分解能を達成する ことが求められており、約一桁高い感度(受光フォトン数とノイズの比)が必要である。現在、可視カメラは日 陰時のみに400x400km程度(視野約8x8度)を空間分解能約1x1kmで詳細観測を行う計画である。紫外カメラは、 当初可視カメラ視野周辺の広域を撮像する計画だったが、昨年度までの検討から、紫外カメラにも可視カメラ 同様に比較的狭い視野を高速・高空間分解する性能要求をすることとなった。昨年度までのISEE共同利用経費 (一般・国際)やISAS/JAXA、NICTの競争的資金をもとに、紫外カメラの光学設計、CCDセンサ試験パッケージな らびに紫外カメラ筐体真空チャンバと紫外用レンズ光学系を調達し、試験の準備が整いつつある。今後は、こ れらを用いた実験、すなわち紫外センサの電気試験、紫外分光感度試験を行う計画である。一方、可視カメラ については、センサ候補の具体的な検討が行われているものの、実験は進んでいない。今後、光学系検討、な らびに可視センサ試験品をもちいた動作試験を行う必要がある。また、可視・紫外センサともに宇宙環境対策 として放射線試験を実施する必要がある。これらの課題に対して、本研究経費用いて分担者との間で装置仕様 と科学意義の検討と情報共有をはかり、プロジェクト成立性に見通しを立てる。また、開発実験は外部資金を 活用して行う。

【 研究方法 】

本研究は、ISAS/JAXAが主導する小型衛星FACTORSと、NICTが主導する静止衛星に可視・紫外カメラの基礎検 討を国内共同研究者と推進する。具体的に本研究経費は、(以下敬称略)三好由純、平原聖文、大山伸一郎(名 大ISEE)、浅村和史、山崎敦(ISAS/JAXA)、津田卓雄(電通大)、坂口歌織(NICT)が研究分担者である。

2020年度までに、FACTORS衛星計画に関連してISEE国際共同研究経費(一般:2018~2020、ならびに国際:201 9-2021)を活用して、オーロラ微細構造の科学課題の検討、オーロラの粒子ー画像同時観測に最適な軌道検討、 紫外用広角対物ミラー光学系の設計、大気光観測に基づく中性大気-電離圏結合解明の戦略について議論と開 発が進められた。また、ISEE国際共同利用経費と外部経費(ISAS戦略開発経費,NICT-東北大マッチングファン ド)を用いて紫外用CCDセンサと真空チャンバ筐体ならびに紫外屈折レンズ光学系を開発した。本年度は、昨 年度までに開発された紫外カメラシステムを、ISAS/JAXAの既存の紫外分光器にとりつけて、紫外検出器の動 作試験と分光感度特性測定を行う計画である。また、本年度は可視カメラの概念設計に着手し、高速撮像可能 なCCDまたはsCMOSセンサの選定、高空間分解可能な結像レンズの設計を進める。これらの目標に対し、ISEE共 同研究経費と外部経費を適切に用いながら実現を図る。具体的には、本研究経費は名古屋大学の分担者と研究 うち合わせのための旅費、ならびに光学実験に必要な治具やレンズ・ミラー等の材料調達に用いる。さらに、 可視試験用センサや可視光学系設計など金額が大きな開発項目についてはは、外部の大型の競争的資金獲得 により行う。

【研究結果】

2021年度は、前年度に製作した紫外カメラ試験器を動作させるために、紫外検出器特注品と自作ソケット基板を嵌合させようとした。この自作ソケットは、検出器を駆動する電気回路は真空中でなく大気側に設置する必要があり、延長ケーブルを用いてチャンバ内の検出器とチャンバ外の駆動エレキ回路を結像するために自作したものである。しかしながら、図1のとおり検出器のピンがソケット途中までしか入らず、この原因究明と対策に時間を要した。このため、本年度②予定していた紫外撮像試験や分光感度特性測定ならびに放射線試験は延期された。

【今後の方針】

現在、検出器ソケットへの嵌合問題の解決策は見いだしており、新しくソケット基板を製作中である。この 製作と嵌合試験は本年度内に終了する予定である。よって、紫外カメラの電気試験と真空試験、ならびにISA Sの真空紫外分光光源をもちいた紫外分光感度測定試験は2022年度に実施する計画である。また、耐放射線試 験も2022年度に予定している。これらの実証試験により、紫外用CCDもしくはCMOS検出器の開発に目処をつけ ることができる。



図1.(左)2020年度に製作された紫外カメラ試験モデルの真空チャンバ外観。(中)紫外用 CCD 検出器と 試験基板、(右)試験基板ソケットに紫外用 CCD を嵌合させた状況。本来ならば右側の赤線がソケット奥 まで嵌合する必要があるが、半田づけによるソケットのアライメントが目視で確認できない程度にずれて いたため、奥まで嵌合させることができなかった。

【 成果発表 】

<著書>

Auroral Physics (Space Sciences Series of ISSI, 78), Ed. by D. J. Knudsen, J. E. Borovsky, T. Kar lsson, R. Kataoka, N. Partamies, T. Sakanoi co-authored one chapter, ISBN 9402421211, ISBN-13 978-9402421217, August 27, 2021.

<査読論文>

- Fukizawa, M., T. Sakanoi, Y. Miyoshi, Y. Kazama, Y. Katoh, Y. Kasahara, S. Matsuda, A. Kumamoto, F. Tsuch iya, A. Matsuoka, S. Kurita, S. Nakamura, M. Shoji, M. Teramoto, S. Imajo, I. Shinohara, S.-Y. Wang, S. W.-Y. Tam, T.-F. Chang, B.-J. Wang, C.-W. Jun, Statistical Study of Approaching Strong Diffusion of Low-Energy Electrons by Chorus and ECH Waves Based on In Situ Observations, J. Geophys. Sp ace Res. Space Phys., 127, 3, 2022. https://doi.org/10.1029/2022JA030269
- Fukizawa, M., T. Sakanoi, Y. Ogawa, T. T. Tsuda, K. Hosokawa, Statistical Study of Electron Density E nhancements in the Ionospheric F Region Associated With Pulsating Auroras, J. Geophys. Space R es. Space Phys., 126, 12, 2021. https://doi.org/10.1029/2021JA029601
- Kawamura, M., T. Sakanoi, M. Fukizawa, Y. Miyoshi, K. Hosokawa, F. Tsuchiya, Y. Katoh, Y. Ogawa, K. Asamura, S. Saito, H. Spence, A. Johnson, S-I. Oyama, U. Brändström, Simultaneous Pulsating A urora and Microburst Observations With Ground-Based Fast Auroral Imagers and CubeSat FIREBIRD-II, 48, 18, 2021. https://doi.org/10.1029/2021GL094494
- Namekawa, T. Mitani, K. Asamura, Y. Miyoshi, K. Hosokawa, Y. Ogawa, S. Saito, T. Hori, S. Sugo, O. Kawashi ma, S. Kasahara, R. Nomura, N. Yagi, M. Fukizawa, T. Sakanoi, Y. Saito, A. Matsuoka, I. Shinohara, Y. F edorenko, A. Nikitenko, C. Koehler, Rocket Observation of Sub-Relativistic Electrons in the Quie t Dayside Auroral Ionosphere, J. Geophys. Space Res. Space Phys., 126, 7, 2021. https://doi.org /10.1029/2020JA028633
- Sugo, S., O. Kawashima, S. Kasahara, K. Asamura, R. Nomura, Y. Miyoshi, Y. Ogawa, K. Hosokawa, T. Mitan i, T. Namekawa, T. Sakanoi, M. Fukizawa, N. Yagi, Y. Fedorenko, A. Nikitenko, S. Yokota, K. Keika, T. H ori, C. KoehlerEnergy-Resolved Detection of Precipitating Electrons of 30-100 keV by a Sounding Rocket Associated With Dayside Chorus Waves, J. Geophys. Space Res. Space Phys., 126, 3, 2021. https://doi.org/10.1029/2020JA028477
- Kataoka, R., C. C. Chaston, K. A. Knudsen, K. A. Lynch, R. L. Lysak, R. Rankin, K. Murase, T. Saka noi, J. Semeter, T-H. Watanabe, D. Whiter, Small-Scale Dynamic Aurora. Space Sci Rev 217, 17 (2021). https://doi.org/10.1007/s11214-021-00796-w

<国際学会(計3件)、国内学会/シンポジウム等(計5件)、ここでは国際学会1件のみ記載> Sakanoi, T., M. Fukizawa, M. Hirahara, Y. Miyoshi, K. Asamura, Y. Saito, H. Kojima, N. Kitamura, T. Nishiyama, K. Murase, M. Kawamura, K. Sakaguchi, M. Ishii, H. U. Frey, N. Schneider, Future formation-flight satellite mission FACTORS: Development of far-ultra-violet imagers and simul ation of Alfven wave observations, JpGU Meeting 2021, Online meeting, 30 May-26 June 2021.

IPS観測による太陽風・CME到来予測精度向上についての研究 Studies for improved prediction of arrivals of CME and CIR (1行スペース)

> 塩 田 大 幸 、 情 報 通 信 研 究 機 構 ・ 電 磁 波 研 究 所 (2 行 スペース)

情報通信研究機構(NICT)では、コロナ質量放出(CME)および共回転相 互作用領域(CIR)の到来の予測 を目的として、数値シミュレーション (SUSANOO) を用いた予測システムの開発を進めている。図1に示すよ うに名古屋大学宇宙地球環境研究所が公開している直近のIPS観測デ ータをSUSANOOのリアルタイム予測結果と重ね合わせて表示すること で、毎日の予報会議の太陽風・CMEの到来予測の参照情報として活用さ れている。



図1 NICT宇宙天気予報センターに表示されたSUSAN00の結果とIPS観測 データ。

SUSAN00の太陽風・CME予測性能の向上のためには、内部境界に与える太陽風の分布をよ り高精度なものに改良する必要がある。本研究では、観測に基づくポテンシャル磁場モデ ルから計算した磁力線情報と磁力線に沿った1次元のWave/Turbulence-driven(WTD) MHD simulationを組み合わせて実行し(図2左)、IPS観測から得られる太陽風速度と比較(図2 右)することでこのモデルの検証を進めた。その結果高緯度では、SUSAN00で使用されてい る従来のWang-Sheeleyモデルで推定される速度に比較し、MHD simulationから推定される 速度がIPS観測とよく一致した。この結果から、高緯度領域の太陽風は波動・乱流による加 速で駆動されている可能性を示唆しており、このような磁場モデルと組み合わせた物理に 基づく太陽風速度予測が将来的に実現し得ることを示している。



図2. (左) ポテンシャル磁場の全体像と磁力線に沿ったWTD MHD simulation 領域の概念 図。(右) MHD simulation から得られた太陽風速度と、IPS観測で得られた太陽風速度の比 較。(Shoda, Iwai, Shiota 2022, ApJ in press)

太陽放射スペクトルの地球圏環境への影響評価 Impact of solar irradiance spectra on the terrestrial environment

渡 邉 恭 子 、 防 衛 大 学 校 · 地 球 海 洋 学 科

太陽からの放射は太陽地球圏環境やその変動に大きな影響をもたら している源である。主に地球圏環境に影響を与えている太陽放射はX 線や極紫外線(EUV)であり、これらの放射が急激に変化すると、デ リンジャー現象(通信障害)などの宇宙天気現象が発生することが知 られている。これらの太陽放射の地球圏環境変動への影響を正しく見 積もるためには太陽放射スペクトルの観測値が必要であるが、X線もE UV放射も地上までは届かないため、観測データは衛星が観測を行って いた期間に限られており、また、観測波長も限られている。このため、 地球 圏 環境への太陽放射の影響を見積もる時には、地上観測できるF1 0.7という2.8GHzのマイクロ波観測が伝統的に用いられてきた。F10.7 は太陽コロナからの熱制動放射と黒点磁場の磁気共鳴放射が元となっ て い る 放 射 で 、 太 陽 活 動 度 を 示 す 相 対 黒 点 数 と 良 い 相 関 が あ る こ と が 知られている。このため、F10.7は太陽活動度を示す良い指標であった が、近年のX線やEUV放射の衛星観測などにより、実際に地球圏環境に 影響している放射とは変動にズレがあることが分かってきた。これが 現在、F10.7では太陽の変動による地球圏環境変動を正しく記述できて いない要因となっている。

そこで本研究では、F10.7に近いマイクロ波放射の観測を多周波数で 行っている野辺山強度偏波計(NoRP)のデータを用いて紫外線量を推 測するアルゴリズムの構築を目指した。本研究を行うにあたって、名 古屋大学宇宙地球環境研究所の「ひのでサイエンスセンター@名古屋」 と「CIDASシステム」を使用した。また、データ解析の進め方やその 解釈などについて議論を行うために、名大ISEEを訪問した。

まず本年度は、太陽の平穏時のNoRPの4つの周波数(1,2,3.759. 4GHz)の観測と衛星による紫外線観測データの比較を行った。紫外線 観測データはTIMED/SEEやSDO/EVEなどのスペクトル分解能の良い衛 星観測データを用いた。TIMED/SEEは0.5-190nmの範囲のEUV放射スペ クトルを1nmの分解能で、SDO/EVEは1-1060Åの範囲の放射を1Åの分 解能で観測している。これらのマイクロ波と紫外線放射スペクトルを 比較した結果、低周波数(1GHz)の方が紫外線放射との相関が良いこ とが分かった。また、どの周波数のマイクロ波放射においても、短波 長のEUV放射との相関がよく、長波長(>130nm)になるほど相関が悪 くなった。紫外線の波長に関わらず、彩層起源のライン放射を多く含 むEUV放射の波長ではマイクロ波放射との相関が異なり、相関係数も 悪くなる様相が見られた。

太陽の紫外線放射スペクトルの中にはコロナ起源のものと彩層起源の放射が混ざっているため、コロナ起源の放射が主であると考えられるマイクロ波放射のみで幅広い波長域の紫外線放射スペクトルを再現するのは難しい。そこで、機械学習の手法を用いて、どの周波数の組み合わせがどの紫外線波長の放射と主に関連しているのかについて調

べてみた。その結果、どの紫外線波長にどのマイクロ波周波数が主に 効いているのかという重みが、どの紫外線波長においても機械学習の 試行毎に異なった。これより、NoRPの4つの周波数のみではマイクロ 波と紫外線放射の関係を解明することはできなかった。

本年の結果より今後は、Ca II K(彩層起源)などの放射の起源が異なり、かつ地上観測できる放射のデータも用いて機械学習を進める予定である。また、今回は太陽の平穏時のみを取り扱ったが、フレア時の放射の方が太陽地球圏環境への影響が大きいため、フレア時におけるマイクロ波放射と紫外線放射スペクトルの関係も探ってゆく。

成果発表

- Kyoko Watanabe, Munechika Arao, Shohei Nishimoto, Chihiro Tao, Michi Nishioka, "Relationship between X-ray and EUV solar flare emissions and the Dellinger phenomenon", JpGU Meeting 2021, 2021 年 6 月 5 日
- Kyoko Watanabe, Louise Harra, Shinsuke Imada, Tomoko Kawate, Hirohisa Hara, Toshifumi Shimizu, Yoshizumi Miyoshi, Nozomu Nishitani, Tomoaki Hori, Akimasa Ieda, Toshiki Kawai, Hidekatsu Jin, Chihiro Tao, Shohei Nishimoto, "Solar-C(EUVST)/SoSpIM development status and scientific studies", JpGU Meeting 2021, 2021 年 6 月 6 日
- Kyoko Watanabe, Shohei Nishimoto, Chihiro Tao, Michi Nishioka, "Relationship Between Solar Flare Spectra and the Dellinger Phenomenon", AOGS2021 18th Annual Meeting, Virtual, 2021 年 8 月 6 日
- 北島慎之典,渡邉恭子,荒尾宗睦,西本将平,垰千尋,西岡未知,"太陽フレア X 線・ EUV 放射とデリンジャー現象の関係",日本天文学会 2021 年秋季年会,2021 年 9 月 13 日
- 北島慎之典,渡邉恭子,西本将平,荒尾宗睦,垰千尋,西岡未知,"太陽フレア X 線・ EUV・ライマンα線放射とデリンジャー現象の関係",第150回 SGEPSS 総会および 講演会,2021年11月4日
- Shinnosuke Kitajima, Kyoko Watanabe, Munechika Arao, Shohei Nishimoto, Chihiro Tao, Michi Nishioka, "Effects of solar flare X-ray, EUV, and Lyman-alpha emissions on the Dellinger phenomenon", 2021 AGU fall meeting, 2021 年 12 月 15 日
- 北島慎之典,渡邉恭子,荒尾宗睦,西本将平,陣英克,垰千尋,西岡未知,"太陽フレ ア放射スペクトルの地球電離圏への影響評価",2021 年度太陽研連シンポジウム, 2022 年 2 月 14-15 日
- 8. 北島慎之典,渡邉恭子,荒尾宗睦,陣英克,垰千尋,西岡未知,"太陽フレア EUV 放射 によるデリンジャー現象への影響",日本天文学会 2022 年春季年会,2022 年 3 月 3 日
- 渡邉恭子,河埜光貴,城戸雄太郎,伊野蒼汰,北島慎之典,西本将平,下条圭美,増田 智,"太陽電波放射の太陽周期活動変動と EUV 放射スペクトルの関係",日本天文学 会 2022 年春季年会,2022 年 3 月 3 日

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

吉岡和夫 東京大学大学院·新領域創成科学研究科

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

昨年度(2020年度)は、ひさき衛星の質量モデルを用いた放射線解 析を行い、光検出器に生じるノイズ成分において、30MeV以上の陽子の 影響が支配的であることを明らかにした.さらに2014年から2019年ま での6年間のデータを詳細に解析し、ひさきの軌道における高エネルギ ー陽子フラックスの変動(特に太陽活動依存性)について議論した. さらに本年度(2021年度)は、昨年度の成果をベースとして2021年ま で蓄積した8年分のデータの整理と解析コードの改修を行った.

さらに本研究の成果をもとに、将来の地球周回宇宙望遠鏡(LAPYUTA 計画)に向けた検討として、軌道上の放射線による影響を見積もった. ここでは、高度が高いほどジオコロナの影響を避けて観測に有利に働 くという観点に加えて、放射線による影響の軌道高度依存性を考慮し て最適な軌道(高度)を推定した.その結果、図1に示すように、近地 点高度250km、遠地点高度20,000kmの長楕円軌道が最適であるという結 論を得た.この解はイプシロンロケットの打ち上げ能力を考慮しても 十分到達可能であり、また軌道の大半の時間でジオコロナの影響を無 視できる高高度を維持出来るため、今後のミッション検討のベースと なる.



【成果発表】

(学会発表)

- Yoshioka, K., F. Tsuchiya, M. Kagitani, F. Bagenal, N. Schneider, G. Murakami, T. Kimura, A. Yamazaki, H. Kita, E. Nerney, I. Yoshikawa, and R. Hikida, Temporal variation of the Io plasma torus seen from Hisaki satellite, OP meeting 2021, online, July 2021
- 吉岡和夫、惑星大気・プラズマの光学観測、日本表面真空学会, online、2021年11月(招待講演)

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

田中公一、広島市立大学·情報科学研究科

【研究目的】

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

【研究方法】

エネルギーの低い銀河宇宙線は、内部太陽圏において太陽活動の影響を受け、惑星間空 間磁場(IMF)との相互作用などにより複雑な流れを形成している。これは、地球上で宇宙 線の異方性として観測される。こうした宇宙線の流れは、宇宙磁場中における宇宙線の加 速・伝播現象を反映しているので、地球上に展開される多数の宇宙線観測装置から得られ るデータに対して異方性やモジュレーション解析を施すことによって、宇宙線の加速・伝 播機構の理解を深めることができる。我々が用いるミューオン望遠鏡は、およそ数+ GV 程 度のリジディティの宇宙線を観測することができる。これは、約 0.4 天文単位(au)の旋 回半径に相当する空間領域を観測することになり、IMFの構造の観測にもつながる。

本研究では、GRAPES-3 実験(インド)、本研究所(東山)、および東京大学宇宙線研究 所明野観測所の各ミューオン望遠鏡を用いて、銀河宇宙線の連続観測を実施する。GRAPES-3 と明野観測所のミューオン望遠鏡は、共に4層の比例計数管の方向を交互に90度ずらして 配置したホドスコープ型の望遠鏡であり、申請者のグループにより運用されている。イン ドと日本では経度で約60度の差異があり、この差異と地球の自転を利用した連続観測によ り、広域同時観測が実現できる。

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

【研究活動報告】

GRAPES-3 の共同研究を行うインドにおいて、2020 年度に実験の新ミューオン望遠鏡 16 基について比例計数管の積み上げが終わった。2021 年度に信号計測回路の設置を行って本 格観測を開始する予定であった。2019 年度末に始まった新型コロナウィルスの世界的流行 が始まり、2020~2021 年度になっても依然として流行が治まらなかったために研究活動が 計画通りに進めることができなかったが、2020 年3月から新ミューオン望遠鏡の建設が再 開することになった。インドでは日本国以上に状況が悪く、GRAPES-3のある Ooty への移 動が著しく制限されていたため、共同研究機関であるインド・タタ基礎研究所所属のイン ド人研究者でさえ観測施設に行くことが困難な状況が続いた。また、研究者の交流となる インド人研究者の日本への招待や日本人研究者のインド渡航も断念せざるを得なかった。 そのような状況下で感染拡大の第6波となり、本研究代表者も中部大学に出張することが できなくなり、予算の支出目的を、データの記録メディアなどに変更し、ハードディスク 購入した。

一方、GPRAES-3 及び明野ミューオン観測のデータ解析について議論した。さらに、本研 究代表者と中部大学の大嶋晃敏氏が、コロナ禍の中、感染者数の減少期であった今年度 12 月、および、3月に明野観測所に出張し、3基の明野ミューオン観測装置の再整備を行った。

【研究成果】

本研究に関する成果として、日本物理学会で4件、宇宙線国際会議(ICRC2021)で1件 の発表を行った。

【日本物理学会・その他学会発表】

1. 「大面積高精度 muon 望遠鏡による方位別宇宙線強度変動の研究(27)」、小島浩司、大 嶋晃敏、田中公一他、2021年9月、日本物理学会秋季大会、16pW2-10

2. 「大面積高精度 muon 望遠鏡による方位別宇宙線強度変動の研究(28)」、小島浩司、大嶋晃敏、田中公一他、2022 年 3 月、日本物理学会第 77 回年次大会、17pA431-2

3. 「大型ミューオンテレスコープを用いた宇宙天気観測」、大嶋晃敏、小島浩司、田中公 一他、2022 年 3 月、日本物理学会第 77 回年次大会、17pA431-4

4. 「GRAPES-3 実験における大型 NaI 検出器の導入について」、曳野豪人、小島浩司、大嶋 晃敏、田中公一他、2022 年 3 月、日本物理学会第 77 回年次大会、16aA431-9

5. [High-resolution two-dimensional map of the solar-time anisotropy obtained by the GRAPES-3 large-area muon telescope], PoS(ICRC2021)1303, H. Kojima, et. al.

あらせ衛星観測データを用いた地磁気脈動の研究

Study for Ultra Low Frequency waves observed by Arase satellite

寺本万里子·九州工業大学大学院工学研究院

【研究目的】

太陽風やオーロラ爆発によって地球磁気圏内を伝搬する擾乱が、地球を取り巻く地磁気の 固有振動と一致することによって、地磁気には周期1秒から600秒の正弦波が連続的に観 測される。この地磁気に観測される正弦波は地磁気脈動と呼ばれている。地磁気脈動は周 期やその形態によって分類されるが、本研究ではサブストームオンセットに伴うPi2地磁 気脈動(周期40-150秒)に注目する。あらせ衛星のデータを中心として地上観測データ を組み合わせ、Pi2地磁気脈動の空間的な波動の特徴を調べ、サブストームとの関連を明 らかにする。

【方法】

あらせ衛星が観測した内部磁気圏の磁場と電子密度データと、ホノルル、グアム、サンフ アンなどの地上低緯度の地磁気観測所の地磁気データを用いて、あらせ衛星で観測される Pi2 地磁気脈動と低緯度 Pi2 地磁気脈動と相関を調べ、内部磁気圏で観測される Pi2 地磁 気脈動とプラズマポーズとの関係を統計的に調べた。

【結果と考察】

地上磁場と相関が高い Pi2 地磁気脈動は磁場の Compressional 成分に最も多く観測され、 その頻度は衛星がプラズマ圏内部の磁気赤道面付近夜側に位置する場合が最も高かった。 一方 Poloidal 成分にも地上 Pi2 地磁気脈動と相関がみられ、衛星が夜側磁気赤道面付近 のプラズマ圏界面近くに位置している場合に集中して観測された。この結果から、夜側プ ラズマ圏外の高緯度(30-45 度)付近でも Compressional 成分に Pi2 地磁気脈動が観測さ れるのに対して、Poloidal 成分に見られる Pi2 地磁気脈動はプラズマ圏界面近辺に制限さ れていることがわかった。過去の極軌道衛星を用いた Pi2 地磁気脈動の研究[Teramoto et al., 2008;2011]では Poloidal 成分に Pi2 地磁気脈動は多く観測されなかったのに対し、 本研究では Poloidal 成分にも Pi2 地磁気脈動は多く観測されなかったのに対し、 本研究では Poloidal 成分にも Pi2 地磁気脈動が多く観測された。Lee and Takahashi [2006]の数値計算によると、内部磁気圏で観測される Poloidal 成分の Pi2 地磁気脈動の 振幅は、プラズマ圏界面近辺の高緯度で大きくなると示唆されている。あらせ衛星はその 軌道から、高緯度プラズマ圏界面に位置することが多い。そのため、あらせ衛星では Poloidal 成分にも Pi2 地磁気脈動を多く観測できたと考えられる。また、プラズマ圏界面 に対する Pi2 地磁気脈動の位相・振幅分布を調べたところ Lee and Takahashi [2006]の数 値計算の結果とよく一致した。以上から、本研究で観測した Pi2 地磁気脈動は Virtual Resonance mode で起きていると考えられる。

【引用論文】

Teramoto M., Nosé M., Sutcliffe P., "Statistical analysis of Pi2 pulsations inside and outside the plasmasphere observed by the polar orbiting DE-1 satellite", Journal of Geophysical Research: Space Physics, Vol.113, No.7, doi:10.1029/2007JA012740,2008. Teramoto M., Takahashi K., Nosé M., Lee D., Sutcliffe P., "Pi2 pulsations in the inner magnetosphere simultaneously observed by the Active Magnetospheric Particle Tracer Explorers/Charge Composition Explorer and Dynamics Explorer 1 satellites", Journal of Geophysical Research: Space Physics, Vol.116, No.7, doi:10.1029/2010JA016199, 2011. Lee D.-H. and Takahashi K. "MHD eigenmodes in the inner magnetosphere in Magnetospheric ULF Waves: Synthesis and New Directions", Geophys. Monogr. Ser., vol.169, edited by K. Takahashi et al., pp73-90, AGU, Washington, D. C., 2006.

【成果発表】

Teramoto M., Miyoshi Y., Matsuoka A., Kasahara Y., Kumamoto A., Tsuchiya F., Nosé M., Imajo S., Shoji M., Nakamura S., Kitahara M., Shnohara I., "Off-equatorial Pi2 pulsations Inside and Outside the plasmapause observed by the Arase satellite", Journal of Geophysical Research, Vol. 127, No. 1, 2022.

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

笠原 慧、東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻)

研究目的

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

<u>研究方法</u>

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

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

隔月でオンラインでの定例会を実施し、緊密な情報共有を図った.

研究結果

軌道の変化に合わせた運用計画の立案などと並行してデータ整備も進め,JGR誌その他国際誌に多数(20件弱)の論文を投稿することができた.

成果発表

- K. Keika, S. Kasahara, S. Yokota, M. Hoshino, K. Seki, T. Amano, L. M. Kistler, M. Nose, Y. Miyoshi, T. Hori, I. Shinohara, "Preferential energization of lower-charge-state heavier ions in the near-Earth magnetotail", J. Geophys. Res., doi:10.1029/2021JA029786, 2022.
- Yokota, S., N. Terada, A. Matsuoka, N. Murata, Y. Saito, D. Delcourt, Y. Futaana, K.Seki, M.J. Schaible, K. Asamura, S. Kasahara, H. Nakagawa, M.N. Nishino, R. Nomura, K. Keika, Y. Harada, S. Imajo, "In situ observations of ions and magnetic field around Phobos: The Mass Spectrum Analyzer (MSA) for the Martian Moons eXploration (MMX) mission", Space Sci. Rev., doi:10.21203/rs.3.rs-130696/v1, 2021.
- Yadav, S., "Study of an equatorward detachment of auroral arc from the oval using ground-space observations and the BATS-R-US CIMI model", J. Geophys. Res., doi:10.1029/2020JA029080, 2021.
- Artemyev, A., A.G. Demekhov, X.-J. Zhang, V. Angelopoulos, D. Mourenas, Yu. V. Fedorenko, J. Maninnen, E. Tsai, C. Wilkins, S. Kasahara, Y. Miyoshi, A. Matsuoka, Y. Kasahara, T. Mitani, S. Yokota, K. Keika, T. Hori, S. Matsuda, S. Nakamura, M. Kitahara, T. Takashima, I. Shinohara, "Role of ducting in relativistic electron loss by whistler-mode wave scattering", J. Geophys. Res., doi:10.1029/2021JA029851, in press.
- Artemyev, A., I. Zimovets, I. Sharykin, Y. Nishimura, C. Downs, J. Weygand, R. Fiori, X.-J. Zhang, A. Runov, M. Velli, V. Angelopoulos, O. Panasenco, C. T. Russell, Y. Miyoshi, S. Kasahara, A. Matsuoka, S. Yokota, K. Keika, T. Hori, Y. Kazama, S.-Y. Wang, I. Shinohara, and Y. Ogawa, "Comparative study of electric currents and energetic particle fluxes in a solar flare and earth magnetospheric substorm", Astron. Phys. J.,

doi:10.3847/1538-4357/ac2dfc, 2021.

- Takahashi, N., K. Seki, M.-C. Fok, Y. Zheng, Y. Miyoshi, S. Kasahara, K. Keika, D. Hartley, Y. Kasahara, Y. Kasaba, N. Higashio, A. Matsuoka, S. Yokota, T. Hori, M. Shoji, S. Nakamura, S. Imajo, I. Shinohara, "Relative Contribution of ULF Waves and Whistler-mode Chorus to the Radiation Belt Variation during the May 2017 Storm", J. Geophys. Res., doi:10.1029/2020JA028972, 2021.
- Miyashita, Y., T.-F. Chang, Y. Miyoshi, T. Hori, A. Kadokura, S. Kasahara, S.-Y. Wang, K. Keika, A. Matsuoka, Y. Tanaka, Y. Kasahara, M. Teramoto, C.-W. Jun, K. Asamura, Y. Kazama, S.W.Y. Tam, B.-J. Wang, S. Yokota, A. Kumamoto, F. Tsuchiya, M. Shoji, S. Kurita, S. Imajo, I. Shinohara, "Magnetic field and energetic particle flux oscillations and high-frequency waves deep in the inner magnetosphere during substorm dipolarization: ERG observations" J. Geophys. Res. https://doi.org/10.1029/2020JA029095, 2021
- Goetz, C., H. Gunell, M. Volwerk, A. Beth, A. Eriksson, M. Galand, P. Henri, H. Nilsson, C. Simon Wedlund, M. Alho, L. Andersson, N. Andre, J. De Keyser, J. Deca, Y. Ge, K.-H. Glassmeier, R. Hajra, T. Karlsson, S. Kasahara, I. Kolmasova, K. LLera, H. Madanian, I. Mann, C. Mazelle, E. Odelstad, F. Plaschke, M. Rubin, B. Sanchez-Cano, C. Snodgrass, E. Vigren, "Cometary Plasma Science", Experimental Astronomy, doi:10.1007/s10686-021-09783-z, 2021.
- Kazama, Y., Y. Miyoshi, H. Kojima, Y. Kasahara, S. Kasahara, H. Usui, B.-J. Wang, S.-Y. Wang, S. W. Y. Tam, T. F. Chang, K. Asamura, S. Matsuda, A. Kumamoto, F. Tsuchiya, Y. Kasaba, M. Shoji, A. Matsuoka, M. Teramoto, T. Takashima, I. Shinohara, "Arase observation of simultaneous electron scatterings by upper-band and lower-band chorus emissions", Geophys. Res. Lett., doi:10.1029/2021GL093708, 2021.
- Kawai, K., K. Shiokawa, Y. Otsuka, S. Oyama, Y. Kasaba, Y. Kasahara, F.Tsuchiya, A. Kumamoto, S. Nakamura, A. Matsuoka, S. Imajo, Y. Kazama, S.-Y., Wang, S.W.Y. Tam, T. F. Chang, B. J. Wang, K. Asamura, S. Kasahara, S. Yokota, K. Keika, T. Hori, Y. Miyoshi, C. Jun, M. Shoji, I. Shinohara, "First simultaneous observation of a nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbance from the ground and a magnetospheric satellite", J. Geophys. Res., doi:10.1029/2020JA029086, 2021.
- Park, I., Y. Miyoshi, T. Mitani, T. Hori, T. Takashima, S. Kurita, I. Shinohara, S. Kasahara, S. Yokota, K. Keika, S. G. Claudepierre, M. D. Looper, "Characterization and calibration of high-energy electron instruments onboard the Arase satellite", J. Geophys. Res., doi:10.1029/2021JA029110, 2021.
- Miyoshi, Y., K. Hosokawa, S. Kurita, S.-I. Oyama, Y. Ogawa, S. Saito, I. Shinohara, A. Kero, E. Turunen, P. T. Verronen, S. Kasahara, S. Yokota, T. Mitani, T. Takashima, N. Higashio, Y. Kasahara, S. Matsuda, F. Tsuchiya, A. Kumamoto, A. Matsuoka, T. Hori, K. Keika, M. Shoji, M. Teramoto, S. Imajo, C. Jun and S. Nakamura, "Penetration of MeV electrons into the mesosphere accompanying pulsating aurorae", Sci. Reports., doi:10.1038/s41598-021-92611-3, 2021.
- Szabo-Roberts, M., Y. Y. Shprits, H. J. Allison, R. Vasile, A. G. Smirnov, N. A. Aseev, A. Y. Drozdov, Y. Miyoshi, S. G. Claudepierre, S. Kasahara, S. Yokota, T. Mitani, T. Takashima, N. Higashio, T. Hori, K. Keika, S. Imajo, I. Shinohara, "Preliminary Statistical Comparisons of Spin-Averaged Electron Data from Arase and Van Allen Probes Instruments", J. Geophys. Res., doi:10.1029/2020JA028929, 2021.
- Namekawa, T., T. Mitani, K. Asamura, Y. Miyoshi, K. Hosokawa, Y. Ogawa, S.Saito, T. Hori, S. Sugo, O. Kawashima, S. Kasahara, R. Nomura, N. Yagi, M.Fukizawa, T. Sakanoi, Y. Saito, A. Matsuoka, I. Shinohara, Y. Fedorenko, A.Nikitenko, C. Koehler, "Rocket Observation of sub-relativistic electrons in the quiet dayside auroral ionosphere", J. Geophys. Res., doi:10.1029/2020JA028633, 2021.
- Yahnin, A. G., T. A. Popova, A. G. Demekhov, A. A. Lubchich, A. Matsuoka, K.Asamura, Y. Miyoshi, S. Yokota, S. Kasahara, K. Keika, T. Hori, F. Tsuchiya, A.Kumamoto, Y. Kasahara, M. Shoji, Y. Kasaba, S. Nakamura, I. Shinohara, H. Kim, S. Noh, T. Raita, "Evening side EMIC waves and related proton precipitation induced by a substorm", J. Geophys. Res., doi:10.1029/2020JA029091, 2021.
- Kumar, S., Y. Miyoshi, V. K. Jordanova, M. Engel, K. Asamura, S. Yokota, S. Kasahara, Y. Kazama, S-Y. Wang, T. Mitani, K. Keika, T. Hori, C. Jun, I. Shinohara, "Contribution of electron pressure to ring current and ground magnetic depression using RAM-SCB simulations and Arase observations during 7-8 November 2017 magnetic storm", J. Geophys. Res., doi:10.1029/2021JA029109, 2021.
- Verscharen, D., R.T. Wicks, O. Alexandrova, R. Bruno, D. Burgess, C. H. K. Chen, R. D'Amicis, J. De Keyser, T. Dudok de Wit, L. Franci, J. He, P. Henri, S. Kasahara, Y. Khotyaintsev, K. G. Klein, B. Lavraud, B. A. Maruca, M. Maksimovic, F. Plaschke, S. Poedts, C. S. Reynolds, O. Roberts, F. Sahraoui, S. Saito, C. S. Salem, J. Saur, S. Servidio, J. E. Stawarz, S. Stverak, and D. Told, "A Case for Electron-Astrophysics", Experimental Astronomy, doi:10.1007/s10686-021-09761-5, 2021.
- Takada,M., K. Seki, Y. Ogawa, K. Keika, S. Kasahara, S. Yokota, T. Hori, K. Asamura, Y. Miyoshi, and I. Shinohara, "Low-altitude ion upflow observed by EISCAT and its effects on supply of molecular ions in the ring current detected by Arase (ERG)", J. Geophys. Res., doi:10.1029/2020JA028951, 2021.
- 笠原慧, 横田勝一郎, 桂華邦裕, 堀智昭, 山本和弘, "Performance of Medium-Energy Particle experiments (MEPs) onboard ERG: a long-term view", SGEPSS, □頭発表, virtual, 2021 年 11 月 3 日.

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

渡邉 堯、情報通信研究機構(2行スペース)

今年度もペルセウス流星群(8月)などの流星群活動期に合わせた ELF/VLF 帯電波観測 を実施したが、天候不順により光学観測との対比が困難であった。また光多くの学観測(ビ デオ)では(アマチュア観測者による)、時刻情報をパソコン内蔵クロックに依存しており、 常に1-2秒程度の不確定さがあるため(ほぼランダムに変化)、GPS による時刻発生装置の 自作により、時間精度確保のための改善を行った。

2020 年 12 月 6 日 02 時 (JST) にオーストラリア南部で実施された、はやぶさ2 サンプ ルリターンカプセル再突入時における ELF/VLF 電波観測データの解析を継続した。昨年度 に於ける予備的な解析に於いて、数十 msec の継続性を持ち、比較的平らな周波数特性を持 つ微弱ノイズが、カプセルの火球フェイズ極大期にで有意に多く発生していることが判明 したが、今年度はこれらのノイズの高分解能スペクトル解析を行い、電離層・地表導波管 伝播の遮断周波数(約 1.7 kHz) における分散のが極めて小さい近距離ノイズが、カプセル 火球フェイズの極大時に多く発生していることが確認された。しかし同様のノイズはカプ セル再突入に関係の無い時間帯でも、稀ではあるが検出されるため、雷雲中の非常に弱い 放電によって発生したものも混入していることが予想される。一方カプセル起源である場 合は、電波の発生高度が約 60-200 km であるのに対して、気象現象の場合は精々数 km で あることから、直接波と電離層・地表間の反射波との間の遅延時間に大きな差が発生する ため、両者の判別は可能である。そこでノイズ波形の自己相関解析によって得られる遅延 時間と、カプセル軌道データによる予想値とを比較したところ、カプセル火球フェイズで 検出された事例の多くで良い一致が見られた。以上の解析から、カプセル再突入に際して 受信可能レベルの ELF/VLF 電波が放射されていた可能性は高いと思われる。また電波の発 生は、激しいアブレーションを起こしているカプセルとその周辺領域における、高電圧場 の形成と放電によるもの解されるが、流星においても同様の現象が起こっていることが推 測された。これらの解析結果は地球電磁気・惑星圏学会(2022 年 11 月)、日本天文学会春 季年会(2021年3月4日)で発表を行った。

地上-あらせ衛星共同観測を軸とした脈動オーロラステレオ観測に

よる降下電子エネルギーの時空間発展の推定

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

栗田怜、京都大学・生存圏研究所

【研究目的】

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

【研究方法】

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

【研究結果と今後の方針】

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

2地点のカメラで観測された脈動オーロラのパッチの高度を推定するために、2地点のカメラの各ピク セルが観測する地理緯度・経度の情報である「マッピングテーブル」を、脈動オーロラプロジェクトと の協力のもとに複数高度で決定した。また、この情報を付与した、オーロラデータのCommon Data For mat (CDF) 形式のファイルを作成し、あらせ衛星のデータ解析ソフトウェアであるSPEDASで使用が可能な解析ソフトウェアの開発を進め、あらせ衛星とオーロラデータの統合的な解析環境が整いつつある。 今後、この解析環境をベースとして、脈動オーロラの高度決定を進めていく予定である。

本研究は、名古屋大学宇宙地球環境研究所所属の大学院生との共同研究として進められてきた。大学院生との共同研究により、脈動オーロラのパッチ内部で、降下電子エネルギーの不均一が存在する可能性が示唆されてきている。この成果を含めた共同研究の内容は、修士論文としてまとめられ、国際学術誌へ投稿をおこなっている。今後、脈動オーロラの高度推定の際にも、この知見を活かし、研究を進めていく。

【成果報告】

- 遠山 航平、栗田 怜、三好 由純、細川 敬祐、小川 泰信、大山 伸一郎、齊藤 慎司、野澤 悟徳、 川端 哲也、浅村 和史、多波長から推定する脈動オーロラの降下電子エネルギー、第150回地球電磁 気・地球惑星圏学会総会・講演会、2021年11月4日
- K. Toyama, Y. Miyoshi, S. Kurita, K. Hosokawa, Y. Ogawa, S. Oyama, S. Saito, K., Shiokawa, K. Asamura, T. Asano, and R. Fujii, Estimation of Precipitating Electron Energy of Pulsating Aurora Using Ground-based Multiwavelength Optical Observations, submitted to Geophysical Research Letters

流星火球及び人工流星のプラズマ化による電波放射の観測 Radio observation from the plasma of fireball and artificiale space object 野澤恵、茨城大学・理学部

本研究の目的は、大気に突入する宇宙物体がプラズマ化され電波放射が発生し、その検 出により類似の物理過程である太陽電波バーストを解明することである。流星や火球から の直接的な電波放射は年に数回という低頻度のため観測が難しかったが、2010年代から観 測され始め Obenberger et al(2014) などの報告がある。ただし HF(短波、3-30MHz)の受 信例が多く、大型干渉計の VHF(超短波、30-300MHz)の受信例はあまり多くない。その放 射機構はプラズマ振動による電波放射の仮説が提唱されているが、プラズマ振動は電磁波 ではないため変換機構が必要である。この放射機構は太陽電波バーストのメートル波放射 の場合と似たものと考えられ、その解明はプラズマ物理の電磁放射の素過程の本質的な理 解につながる。そこで、2020年12月にはやぶさ2の再突入するカプセルを観測した。こ こでは大気抵抗により減速されるのは 100km 特に 70km 以下である。その過程でカプセ ルの外側が熱せされ、プラズマ化される。これは流星と発光過程と同じであると考えてい る。また、はやぶさ2のカプセルに関する情報(軌道、大きさ、光の明るさ等々)が十分ある ので、電波強度の絶対値、時間変化を求め、また周波数スペクトルを決め、可能であれば 直線偏波度の観測量を得ることができる。

観測装置は、プラズマ化したのちの電波放射をログペリアンテナ(ログペリオディックア ンテナ、対数周期アンテナ)を用いる。受信機は e-callisto(http://www.e-callisto.org/, International Network of Solar Radio Spectrometers)を改良したものである。取得した データは、電波放射におけるプラズマの素過程を明らかにする。実際の観測はコロナ禍の ためにオーストラリア現地に行くことができなかったため、現地の Curtin 大学に協力を得 て観測に臨んだ。しかし受信設定にトラブルがあり、受信は行えなかった。

初期成果をまとめた論文が Sansom et al(2022)として出版された。これには超音速で突入するカプセルが発する空振現象を捉えた信号や、発光現象を分光したデータなどを盛り込んだものである。本研究では観測機器の説明を行い、受信が失敗したことを記載した。

加えて 2023 年 9 月 24 日に OSIRIS-REx のカプセルが地球大気に再突入するとき、発す る電波の高時間分解能の周波数と強度の直接観測を計画し、観測機器の改良や較正などを 行なっている。

Sansom et al., The scientific observation campaign of the Hayabusa-2 capsule re-entry, Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 74, Issue 1, February 2022, Pages 50–63, https://doi.org/10.1093/pasj/psab109

トロムソ Na ライダー観測による熱圏 Na に関する統計的研究 Statistical investigation on thermospheric Na based on Tromsø Na lidar observation

津田卓雄, 電気通信大学 大学院情報理工学研究科

研究目的

共鳴散乱ライダー観測は、レーダー観測では捉えられない中性大気の情報を得ることが できる貴重な手段として半世紀以上発展を続けているが、観測高度範囲は金属原子層 (Na, Fe, K, etc.) の分布高度に限定される. 金属原子層の通常の分布高度は 80-110 km であ り、これが観測高度範囲の限界であると考えられてきた. 一方で、近年、それよりも高い高 度領域 (熱圏高度) に低密度の金属原子層が分布する事例が世界各地において、また様々な 金属原子について報告された. 例えば、南極マクマード基地 (77.8°S, 166.7°E) では高度 155 km に達する Fe 層 [Chu et al., GRL, 2011], 南極昭和基地 (69.0°S, 39.6°E) では 高度 140 km に達する Na 層が観測されている [Tsuda et al., GRL, 2015a]. アンデス山 脈のセロパチョン (30.3°S, 70.7°W) の例では、熱圏領域に分布する Na 層を利用して、高 度 140 km までの温度・風速の観測に成功している [Liu et al., GRL, 2016].

熱圏高度に分布する金属原子層の存在は、従来観測が困難であった熱圏領域への観測高度の拡張という観点において重要な意義を有しているが、常時存在するものではない.前述の先行研究における観測報告は散発的な観測データセットによるものであり、熱圏金属原子層の消長について統計的な理解が十分に得られていない.そこで本研究では、北極域に位置するノルウェー、トロムソ(69.6^oN、19.2^oE)の Na 共鳴散乱ライダーの観測データを解析することで、熱圏 Na 層の消長について統計的な性質を明らかにすることを目的とする.

研究進展状況

本研究では、2015-2019 年の冬季 5 シーズン分の観測データの解析を中心に研究を進 めた.低密度の熱圏 Na 層を捉える為、SNR 向上を目的とした事前データ処理として、デ ータ積分範囲の調整を行い、最終的に、3600-s x 3840-m の積分範囲(分解能)を設定し た.導出した SNR は、晴天データの抽出にも用いることにした.具体的には、高度 30 km の SNR を参照し、晴天時の高 SNR が確保されている時間のデータを晴天データとして 抽出した.抽出した全ての晴天データについて Na 密度、Na 密度誤差を導出し、誤差評価 に基づいて、有意な Na 密度データの数を求め、全データ数で規格化することで、Na 存在 確率を算出した.その結果、Na 存在確率は、高度 80-110 km で ~100%、高度 121 km で ~78%、高度 128 km で ~44% であった.このように、高度の上昇と共に、Na 存在確率 が低下する傾向を確認した.更に、Na 存在確率の LT 依存性を調査したが、顕著な LT 特 性は確認できなかった.概ね一様な LT 特性であったことから、熱圏 Na の生成機構とし て、分子拡散のような恒常的な効果が重要な寄与を及ぼしている可能性が示唆された. あらせ軌道上磁場データの評価と特性向上の検討 Evaluation and improvement of in-flight magnetic field data of Arase

松 岡 彩 子 、 京 都 大 学 · 理 学 研 究 科

【研究目的】

あらせ衛星は2017年3月の定常観測開始以降約5年間データの取得をほぼ連続的に継続し、データを使った多 くのサイエンス成果が得られつつある。従来の衛星観測による結論を超える成果を得るためには、観測した磁 場データの高精度較正が重要である。あらせで得た磁場データの高精度較正には、地上較正試験の結果だけで なく、打ち上げ後のデータを評価した結果も用い、軌道上データから較正パラメータを導出する作業は重要で ある。軌道上データの高精度の評価と較正をを行うことにより、ロスコーンに降り込むプラズマ粒子の詳細な 観測、電流の方向や量の同定、EMIC波動、ULF波動などのサイエンス課題で詳細な議論が可能となる。放射 線帯や内部磁気圏の研究の推進への貢献が期待される。

【研究方法】

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

【研究結果】

磁場データ較正のオフセット、アライメント、クオリティフラグ 等の結果は、図1にあるような結果表示プロットによって確認し、 更に詳細な確認が必要な場合には個別のデータの調査を行った。 新型感染症の影響により、出張を伴う会合を持つことは出来なか ったが、研究組織のメンバーがそれぞれの専門を生かす役割分担 を行い、メール等で綿密に結果を共有することによって研究を進 めた。2021年度は、「あらせ」MGFデータを用いた論文が32本 発表された。

【考察・まとめ】

現状、ほぼ定常的に科学的研究に資するクオリティを持つ「あら せ」MGFデータを生成する体制を維持できている。一方で、時刻 や衛星運用の事情等で例外的な状況の時にはスポット的に正常な データ処理が出来ない事例も発生している。今後そのような事例 も自動で処理できるように、プログラムを変更する必要がある。

【成果発表】

Matsuoka Ayako, Nose Masahito, Miyoshi Yoshizumi, Teramoto Mariko, Nomura Reiko, Fujimoto Akiko, Tanaka Yoshim asa, Shinohara Manabu, Kurita Satoshi, Imajo Shun, S hinohara Iku, Statistical characteristics of the mag



netic field variations observed by Arase, JpGU 2021, Virtual, 2021/6/5 [口頭発表]

- Ayako Matsuoka, Mariko Teramoto, Reiko Nomura; Yoshizumi Miyoshi, Masahito Nose, Akiko Fujimoto, Yoshimasa Tanaka, Manabu Shinohara, Yuki Obana, Satoshi Kurita, Shun Imajo, Masahiro Kitaha ra, Iku Shinohara, The magnetic field investigation on the ARASE (ERG) mission: Data charac teristics and scientific results, IAGA-IASPEI 2021, Virtual, 2021/08/24 [口頭発表]
- 松岡彩子 「磁気圏内外を駆ける電磁流体波/人工衛星の磁場測定」(田中舘賞受賞講演)地球電磁気・地球 惑星圏学会 第150 回講演会、オンライン、2021/11/04 [ロ頭発表]

複合電波観測を用いたシビア現象の超高層への結合過程に関する研究 Effect of severe meteorological phenomena to upper atmosphere and ionosphere

芳原容英, 電気通信大学·大学院情報理工学研究科

1. 研究目的:

近年,世界的にシビア現象による深刻な被害が多発している.多くの シビア現象は,雷嵐を伴っているが,雷嵐を構成する大気圏中の雷雲 や雷活動の気象学的,電気的特性を含めた高高度への影響等を包括的 に捉えた研究は極めて少ない.そこで本研究では,日本国内および, 周辺領域で観測されるシビア現象の発生から衰退に至る期間に渡り, 電磁気的手法による大気圏の雷嵐と電離層の同時観測から気象擾乱の 電離圏への結合過程を調査する.

2021年度は、シビア現象のうち主に台風に関連した、大気-電離圏結 合過程に関する研究成果について下記に報告する.

2. 研究方法:

2019年に発生した台風15号(8月31日~9月10日)と19号(10月3日~10月1 4日) について、それぞれ4つの期間(発生期・発達期・成熟期・衰退期) 毎に、台風に伴う雷活動特性(JTLN, ELF帯磁場観測),気象学的特性 (気象衛星),下部電離圈(VLF送信電波観測)の応答についての時空 間特性を包括的に詳細に調査した。

3. 研究結果:

図1(a)に台風15号の負極性対地放電について、台風のアイウォール (中心から距離0~100 km)付近の解析結果を示す.図より、台風の強度(最大風速)が最大になる2日前に雷放電頻度が最大となることが確認された.



図1台風15号のアイウォール付近の(a)負極性落雷頻度, (b) 負極性高エネルギー落雷頻度 また、図1(b)よりRI(急速発達期であるRapid Intensification)期間にELF帯観測より同定された高エネルギーの雷放電(CMC>500Ckm)が、極性に関わらず集中して発生する傾向が示され、高エネルギーの雷放電発生が、台風の急速な発達期間であることの指標となる可能性も示している.

次に、図2にVLF帯送信局(NPMハワイ)と受信局(北海道母子里)で観測 されたデータより導出された下部電離層擾乱強度と、台風の中心から5 00 km以内に雷頻度の急上昇が発生した時間(LJ)や高高度まで発達し た雷雲の空間スケールとの関連性を調査した結果をまとめた.図2より、 発達時において、高高度の雷雲の存在時期に対応して、活発な雷活動 と、電離層擾乱が卓越して発生していることがわかる、また、電離層 擾乱強度の最大時期は、高高度の雷雲や雷放電の最大時期より1日程 度遅れている.さらに、発生期にも、強い擾乱が見られる.



図2 台風15号の電離層擾乱強度と気象擾乱との関係 (MSR-NPM)

4.まとめ:

本研究では、台風の発生から衰退にかけて、台風に伴う雷活動特性、 気象学的特性、下部電離圏の応答について時空間特性を包括的に詳細 に調査した.その結果、台風のステージ毎で領域別に、雷放電頻度や 放電極性、雷雲の発達度の解析により、台風の強度予測精度の向上に 貢献できる可能性が示唆された.また、観測された台風による雷嵐の 気象学的、電気的特性と電離層擾乱の時空間特性の時空間的対応は、 大気波動や電磁波による台風に伴う大気圏一電離圏結合過程を強く示 唆している.

成果発表:

[1] 平井 周, 芳原 容英, 菊池 博史, マイケル ストック, "複合電波観測を用いた台風に伴う大気圏と電離圏の関連性に関する研究," 信学技報, vol. 121, no. 6, EMCJ2021-6, pp. 27-30, 2021年4月.

[2] 平井周, 芳原容英, 菊池博史, Michael Stock, "台風に伴う大規模気象擾乱の電離圏 への結合過程に関する研究," JpGU2022, MIS25-P09, 2021年6月.

太陽Ⅱ型電波バースト微細構造の成因の究明

Investigations on origin of the fine structures forming solar type II bursts

代表者:三澤浩昭(東北大学大学院理学研究科)

1. 研究目的

太陽嵐(~フレア/コロナ質量放出(CME))の発露に伴い、KHz~GHz 帯に多様な電波バーストが出現する。この中で、 CME 発生時に頻出する、数 100MHz 帯では数分にわたって出現し、負の緩やかな周波数ドリフトを示す II 型と呼ばれ るバーストがある。II 型バーストに対する申請者らによる数 100MHz 帯での高時間・周波数分解のスペクトル観測か ら、ほぼ全てのバーストは継続時間が約 100msec 程の微細構造から形成されており、微細構造は大きな周波数ドリ フト率を示すことが明らかになっている。この周波数ドリフト率の解析から、微細構造の起源について、解釈①:一般 的なコロナ密度より数倍濃密なプラズマ中を光速に漸近する速度を持つ電子が移動して放射、解釈②:一般的なコロ ナ密度中を光速の 3~4 割の速度を持つ電子が移動して放射、の 2 つの可能性が考案されているが、電波源と目さ れる CME の何処がこの II 型バーストの生成域か?、が新たな課題となっている。本研究は、太陽コロナ域について の光学・電波観測に基づき、微細構造で構成される II 型バーストの生成域の同定を行うことを主目的とする。近年、 フレア発生時にも本研究対象の微細構造と類似のスペクトル様相を持つ微細なバーストが存在することが示され、そ れらはループトップ域の衝撃波で生成された可能性が示唆されている(Chen+, Science, 2015)。本研究は観測データ 解析のアプローチから、フレアと CME で働く粒子加速過程の類似性・相違性を量り考察してゆくことも副目的とする。

2. 研究内容·結果

電波については東北大の高時間・高周波数分解能(10msec, 61KHz)の数 100MHz 帯のスペクトル観測装置 (AMATERAS)の太陽電波データ、太陽コロナ状態については科学衛星ひので(SXR)、SDO(EUV), RHESSI(HXR)等の イメージデータを用いて、II型バースト出現のタイミングに対応する太陽コロナ域の CME の様相について精査する計 画を持ち、研究を進めている(メートル波帯の電波は太陽から概ね 1.5 太陽半径以内で生成される)。II型バーストの 微細構造の解析では、特にその周波数ドリフト率に着目した解析を行っている。発生域については、II型バーストチ 成に関わる粒子加速域として CME のフロントやフランクが候補と目されるが、特に X 線のイメージデータ解析から粒 子生成の場所とそこでの変動(~速度)に着目した解析を行い、II型バーストの微細構造の周波数ドリフト率、バース ト全体の周波数ドリフト率を同時に満たしうる″II型バーストの生成候補域″の同定を行う。

研究初年度の 2021 年度は、特に II 型電波バースト 微細構造の周波数ドリフト率の詳細解析を行ってきた。データ は、上述の AMATERAS で取得したデータを用いている。 II 型バーストの出現は、申請者らが観測を開始した 2010 年 以降、現在迄 30 例余同定されており、この中から S/N の良いデータをピックアップし、微細構造を形成するバースト 群の周波数ドリフト率の平均と分散、バースト群全体の周波数ドリフト率(CME の伝搬速度と考え合わせることで、電 波生成域のプラズマ密度情報が得られる)を求め、データベースを作成している。これまでの解析から、微細構造を形 成するバースト群の周波数ドリフト率は平均値として大きいこと(数 100MHz/s@~200MHz)に加えて、正負の符号成分 も含む大きい分散を持つこと(~電波放射に関わる粒子の運動方向が太陽向き・反太陽向きの両方を含んでいること を示唆)が見えてきており、衝撃波加速過程の存在を想起させる結果となっている。本結果を用い、今後、微細構造 出現時のイメージデータとのイベント毎の照合解析を行い、微細構造生成に関わる粒子生成域の探索を進めてゆく。

3. 成果報告等

・研究会等発表: 三澤, Space-Sun-Earth ランチセミナー, 2021 年 6 (on line 開催)); 三澤他, 太陽研連シンポジウム,
 2022 年 2 月(on line 公開)・同集録

研究課題名

太陽フレア時に発生した衝撃波に伴う高エネルギー粒子加速の研究 Study of particle acceleration into high-energies by the shock acceleration with large flares

代表者、所属機関・部局

村木 綏、名古屋大学·宇宙地球環境研究所

名大宇宙地球環境研究所の研究課題の一つに、太陽表面の爆発現象が地球や周辺の宇宙空間にどのような影響を与えるかという研究課題がある。宇宙線グループはこの課題に、粒子線というプローベを用いて研究している。 我々はこの研究のために電気的に中性の太陽中性子の信号を捉えて、フレアの構造変化と対応させ、高エネルギー粒子(SEP)がいつ、どのように作られるのかを解明したいと考えている。言い換えれば SEP の起源の研究である。

この研究を通して近年明白になってきたことは、gradual flare における粒子加速は衝撃波 加速によると解釈できるという認識である。先行する CME に後発の早い CME が追いつき衝撃 波が作られた例が SOHO 衛星の観測で多数見つかっているからである。一方 impulsive flare に 関しては、諸説あるものの、決定的な理論はまだ無いと言えよう。例えば我々の観測で見つかっ た 2012 年 6 月 3 日のイベントでは、陽子が 1 分間に 150keV から 10GeV まで加速されたと考 えられるが、これを衝撃波加速模型では説明するのは困難である。詳細は日本天文学会英文誌 PASJ (2021) volume 73, page 1443 にて公表した。

今回のイベントは 2004 年 11 月 7 日の X2.0 のフレアに伴って観測されたものである。 イベントの解析は 2020 年度の共同利用の研究テーマとして実施した。またその結果は 2021 年 7 月 Berlin で開催された第 37 回宇宙線国際会議(on-line)でも口頭発表した。その内容は会議の Proceeding に公開されている。[Proceeding of the 37th ICRC (Berlin); Proceeding of Science PoS (ICRC2021) 1264.]

2004.11.7 イベントの概要

ここで 2004 年 11 月 7 日のイベントを紹介する。X線の増加に同期して加速された陽子が 作り出した太陽中性子が高度 5,250m の Bolivia, Chacaltaya 山に設置されていた名大太陽中性 子観測装置で受信された。信号の継続時間は 20 分であった。一方ほぼ同じ経度に設置されたメ キシコの太陽中性子望遠鏡(4,600m)にも、同時刻に信号の増加が認められた。ただしこの信号は 78 分間も継続した。太陽中性子であれば 25 分以上信号は増加しないはずである。Mexico の信 号は太陽中性子が崩壊して作った陽子が観測されたものと我々は解釈した。

しかしここで一つ問題が生じた。メキシコの荷電粒子に対する地磁気の剛度は 8GV と言われている。すなわちその親の中性子のスペクトルがこのような高いエネルギーまで伸びている

のか、そもそも中性子が崩壊するのかという問題である。EPS 誌の referee の一人から、 extraordinary な現象を説明するために、extraordinary な仮定を導入していると言われた。こ れは読み方によって、こんな高エネルギーの中性子が崩壊した陽子が受信できるはずがないと いう批判とも取れるし、また別の見方をすればそのくらい STE の大事件であるとも言えよう。

この問題を真面目に考えるために、2021 年度は茨城高専の三宅晶子さんに依頼して、彼女 の反陽子の運動方程式のプログラムを駆使し、数 GeV のエネルギーを有している太陽中性子崩 壊陽子(Solar Neutron Decay Protons の頭文字をとって SNDPs と以後略することにする。) が果たして磁気圏に侵入できるか否かを調べた。その結果、いわゆる公称剛度(rigidity)の 8GeV より低いエネルギーの陽子もメキシコ上空に侵入することが分った。従ってより正確にこ のエネルギー領域の陽子の侵入確率を計算することが、現象の正確な解釈に必須であることが 分った。結果がどうなったかを報告する前に当日の太陽地球間空間の様相を紹介する。

2004.11.7 の太陽地球空間の様相

このイベントの1日前に発生した巨大な CME に、その後放出された高速(秒速 1,500km) CME が追いついた写真が SOHO- LASCO 測定器にて撮影された。この衝突により、衝撃波が 形成されたことは間違いない。しかしこの衝撃波が地球近傍に到達したのは名大の太陽風観測 装置の観測結果や GOES 衛星の磁場の data から判断すると 11 月 9 日の 9UT であった。一方 11 月 7 日の 18:30UT には GOES 衛星の磁力計はショックの到来を示唆している。16UT に発 生した X2.0 のフレアに伴う衝撃波が 2 時間半後に地球に到来することは考えにくい。これもま た名大太陽風観測装置の観測結果から判断して、このショックは1日前の 11 月 6 日の 12UT に 発生した、M9.3 のフレアによるものと考えられる。すなわち CME が~1,500km/sec で太陽地球 間を走れば、この時間に地球近傍に到達する。この shock の到来と同時に Chacaltaya や Sierra Negra 山の太陽中性子観測装置も、信号の増加を示している。

アメリカ大陸の2か所に設置された太陽中性子観測装置に記憶された増加をどう解釈すべき か? まず Chacaltaya の data の >40MeV,>80MeV の2 channel の Local Time (LT) 9時 の peak は丁度 IMF の到来方向と一致するので、この増加は宇宙線の対流(convection)によるも のと考えられる。 一方 LT 14時 30 分 (18:30UT)の増加は、11 月 6 日に発生した CME に捕 らわれていた SEP 粒子が到来し、21UT の増加はその後のショックで加速された陽子が到来し たと考えてよいのであろう。

今問題にしているのは、X線の急速な増加と同期して作られた12時 local time (正午)(16UT) の peak である。これは impulsive flare で加速された陽子が太陽表面を叩いて作られた中性子 とそれが崩壊して作り出した陽子(SNDP)が両検出器に検出されたと考えた。また 23:30UT に も増加が見られる。Forbush Decrease の谷の中にインドの muon detector の東側から到来した 成分が増大している。なお東側からの muon の cut-off energy は 25GV, 平均の陽子のエネルギーは 80GV である。これはすなわち陽子が衝撃波で 100GeV まで加速されたことを示唆している。いずれにしても大変面白いイベントであることは間違いない。

2021 年度の共同研究成果の具体例

2021 年度本イベントに関連して認識が一歩前進した点を列挙しておく。概要は3月1日の 共同利用成果発表会で説明した。

- 1) メキシコの剛度はいままで 8GV と言われていたが、4GV まで陽子が侵入可能である。
- 2) 6GV までは侵入できる可能性が高いので threshold energy は 6GV として議論を進める。
- 前日の M9 のフレアと共に発生した CME が 16UT には地球の 0.04AU まで接近していた。
 0.04AU は 10⁷km である。これを飛行距離(ℓ)とする。
- 4) ℓ~0.04AU を光速度に近い速度で飛来する中性子(En~6GeV)の崩壊確率は 0.0031 である。
 非常に少ないが 0 ではない。
- 5) SNDP が地球大気に突入したとき、大気で吸収される。その信号がガンマ線や中性子となっ て高山で受信される確率を GEANT4 で計算した。計算は中部大の小井辰己さんが行った。 その結果、6GeV の陽子が侵入した場合、32MeV 以上の channel で受信される確率は 0.5 で あることが分った。これは2個 6GeV の陽子が大気 top に侵入すれば1回は検出器が反応す ることを意味する。また anti-counter の上部には 5mm の鉛が、side は 1cm 厚の鉄板で囲ま れている。そのためガンマ線は電子に変換され比例計数管で検出される。その確率は 1.0、す なわち検出効率は 100%であることがわかる。実際 Mexico の太陽中性子望遠鏡で 2004.11.7 に観測されたイベントの強度比は、この予測と一致しており、信号強度は anti-counter > S1 channel (>30MeV) となっている。
- 6) 更に考慮しないといけないのは、大気中への入射角度によって、信号の減衰度が異なるという点である。斜めに大気上空に入射すれば、山の上に信号が到達するまでにより深く大気を通過する必要があるので、減衰が激しくなる。GEANT4による計算では、Ep=6GeV, En>32MeVの信号が受信される確率は、垂直入射の時は 0.5 であるが、20 度になると 0.4 に、40 度になると半分の 0.2 に減衰する。60 度になると更に減衰して 0.1 と予想される。
- 7) 太陽中性子が崩壊する確率は 4)に述べたように非常に少ない。しかし崩壊する空間が巨大な ので結構な数の SNDP が地球の磁気圏前面に到来することが予測される。そこで磁気圏前面 の magneto-sheath, magnetopause を太陽側から見た時の面積(S)を求める必要がある。ここ では target S の中に入射してきた陽子は、その侵入角度が天頂角 45 以内であれば高山の装 置に信号を作り出すと考えた。この標的 S の面積はここでは magnetopause の面積と仮定し た。magnetopause までの距離は地球の中心からおよそ 8R_E なので、磁気圏を球と近似して、 $S~\pi(8R_E)^2$ とした。その値は $S\approx 8\times 10^9 \text{km}^2 \approx 8\times 10^{15} \text{m}^2$ となる。

- 8) さて磁気圏先端部の magnetopause に飛来した陽子は本当に Sierra Negra 山の真上まで 到達できるだろうか?そこで Sierra Negra 山の 20km 上空から反陽子を打ち出し、磁気圏境 界面まで到達できるか否かを調査した。 その結果 6GeV の陽子の 10%が生き残って到来す ることが判明した。ただしエネルギーが低くなり、5GeV に近づくと入射確率も減り、かつ陽 子は地球の tail 方向から多くやってくることも分った。太陽方向から入射できる陽子の割合 はおよそ 6-8GeV で 2% (0.02)である。すなわち地球の磁気圏前面の magnetopause から Mexico 上空に侵入できる SNDP は約 2%であることを示している。逆に 2%もの陽子が地磁 気による遮蔽をかいくぐって侵入できることを示している。楽器のホルンのように集積効果 がある。この結果は三宅晶子さんによって調べられた。
- 9) 上記の全ての侵入確率や生き残り確率を掛け算すると、1.0×10¹¹ 個の SNDP が期待される。
 (0.0031× 0.5 × 0.4 × (8×10¹⁵m²) ×0.02=1.0×10¹¹) この値を Chacaltaya の中性子測定器の値 と比べることになる。

Chacaltaya の flux との比較

上記の値は膨大であり、そのような 6GeV の陽子が本当に Mexico の上空に飛来するはずが ないと思われるであろう。しかし今までの議論には energy spectrum が含まれていない。 100MeV の太陽中性子と 6GeV の太陽中性子の flux の値は大きく異なる。上記の議論はあくま で energy spectrum が flat であるときの議論である。Chacaltaya の中性子の energy spectrum は微分でべき γ =-4 (積分で γ =-3)で記述できる。そこで 100MeV から 6GeV で期待さ れる値を求めると、4×10⁻⁶少ないことが予測される。この値を上記の値と掛け算すると 4×10⁵ 個が期待値となる。Chacaltaya の中性子の flux は 8×10⁴ なので、5倍ほど SNDP の観測値が 強いが、このような議論でもかなり現実に近い値が得られた。そこでさらに親の energy spectrum を考慮する。

Chacaltaya の中性子の energy spectrum は 100-1000MeV の範囲の中性子に対するもので あって 1000MeV を越えても、べき乗が同じ γ =-4 で伸びているかどうかは不明である。そこで 1GeV を越えるとべきがソフトになると考える。1GeV より先では γ =-5 となると仮定すると、 7×10⁻⁷倍 6 GeV の flux が低くなると期待される。これを掛けると、7×10⁴ となり、Sierra Negra の flux と Chacaltaya の flux は一致する。

Chacaltaya の信号は太陽中性子によって、Sierra Negra の信号は太陽中性子崩壊陽子によって作られたと言えよう。このような高エネルギーの SNDP が受信されたのは世界で初めてであり、今までのイベントえられた中性子イベントの再解釈も必要になる可能性が高い。