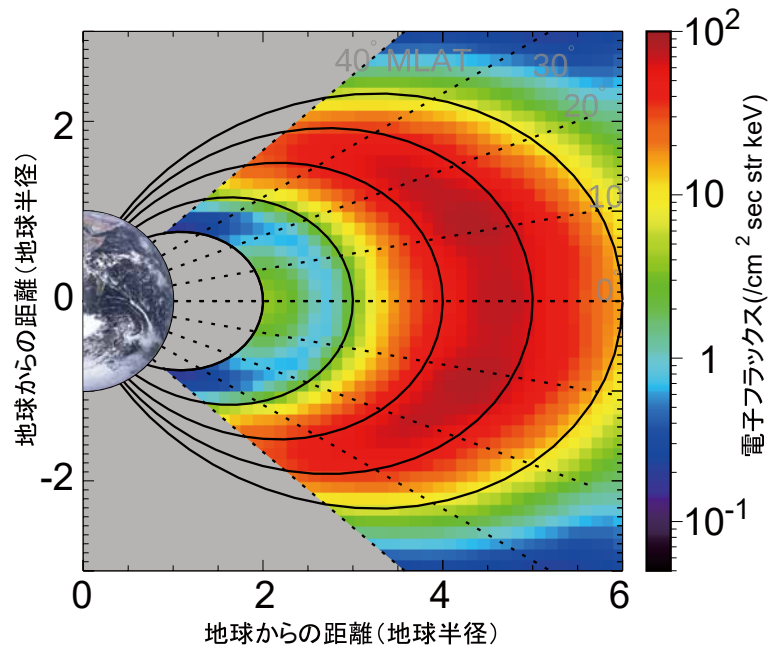


「あらせ」がみた放射線帯

「あらせ」搭載の超高エネルギー電子分析器 (XEP) が観測した2メガ電子ボルトのエネルギーを持つ電子のフラックス分布。2017年4月～2020年3月の平均値をカラーで表示している。縦軸・横軸は地球中心からの距離 (地球半径を単位とする) を表す。太陽活動下降期から極小期における放射線帯外帯の姿をくっきりと浮かび上がらせている。



打上げ5周年からさらに先へ

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 篠原 育 (しのはらいく)

はじまりは新しいミレニアムを迎える前後のことでした。当時、Geotail 衛星をはじめとする 1990 年代の国際協力による地球周辺の宇宙空間 (= ジオスペース) 探査は次のステージへ移行しつつあり、日本でも次世代計画の必要性の声があがりはじめていました。この時、最年長でも 30 代半ば以下の若手研究者・大学院生の有志が集まって将来に向けた議論を行い、温めはじめた計画の卵の 1 つが ERG です。ミッション実現までの道程すら定かではない中、小型科学衛星という道標を得、数々の困難を乗り越えた結果、「あらせ」として実を結ぶことができました。全観測機器が観測を開始し、全ての観測データを並べたプロットをはじめてみた時の感動を忘れることができません。「あらせ」はその感動から 5 年近く経った今も、素晴らしい観測データを送り届けてくれています。

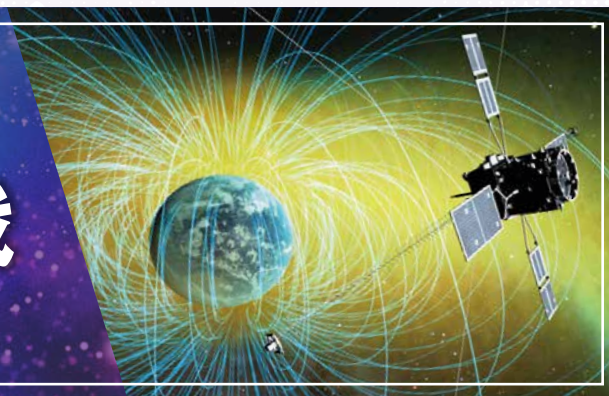
本特集号ではここまでの「あらせ」の科学成果のハイライトを紹介させていただきます。当初の科学目的である、放射線帯の高エネルギー電子の加速・消失に係る成果はもちろんのこと、私たち自身も想定していなかった驚きの発見も得られました。“プラズマ”や“電磁場”など、難

しい言葉がでてきますが、執筆をお願いした皆さんには、できるだけわかりやすく解説してもらいましたので、ご高覧頂ければ幸いです。

はじまりから約 20 年の月日が流れました。この間、故小野高幸先生をはじめとして、数え切れないぐらい多くの方々のご指導、ご支援や励ましを頂きながら、ここまでたどり着くことができました。この場をお借りして、あらためて深くお礼を申し上げるとともに、「あらせ」科学成果の報告をお届け致します。「あらせ」のこれまでの観測期間は、第 24 から 25 太陽活動サイクルに移行する太陽活動極小期に対応します。今後、太陽活動極大期に向けて太陽活動の上昇とともに「あらせ」が出会ったことのない大規模な宇宙嵐を観測するチャンスもあるでしょう。更に、世界ではじめて同一衛星で 1 太陽活動周期におよぶ放射線帯中心部の長期間観測を行い、第 25 太陽活動サイクルの全体像を「あらせ」のジオスペースの観測を通して把握することを目指します。今後の「あらせ」の科学成果にもご期待下さい。

宙の嵐の中へ： 「あらせ」の挑戦

名古屋大学 宇宙地球環境研究所 三好 由純 (みよし よしづみ)



地球周辺の宇宙空間は、「ジオスペース (Geospace)」と呼ばれています。太陽からは太陽風と呼ばれる超音速プラズマ流が吹き出し、太陽風と地球の磁場との相互作用によって、磁気圏と呼ばれる領域が作り出されています。磁気圏では、プラズマ粒子が地球の磁場に捕捉されながら飛びまわっていて、そこには、ジオスペース最高エネルギー粒子が存在する「放射線帯 (Van Allen 帯)」が存在します。太陽風が変化すると、ジオスペースは「宇宙嵐」と呼ばれる擾乱状態になることがあります。このとき、オーロラが数日間にわたって爆発的に輝くなど、ジオスペースの環境が激しく変化します。嵐が起ると、放射線帯は不思議な変化を示します。嵐の始まりとともに、放射線帯電子がすべて消えてしまい、その後、嵐が収まるにつれて電子が再び出現し、そして嵐が起る前に対して電子の数が100～1000倍くらいに増えていきます。また、放射線

帯粒子は、人工衛星の誤動作を招くなど影響が大きい。ため、その研究や予測は宇宙天気研究において最重要課題とされています。

2016年12月に内之浦宇宙空間観測所からイプシロンロケット2号機によって打ち上げられた「あらせ」(ERG)のミッションは、この放射線帯変動と宇宙嵐の謎を解明することでした。この謎の解明を目指して、「あらせ」によるプラズマ粒子や電磁場の直接観測、オーロラ観測などによる地上からの多点ネットワーク観測、そしてシミュレーション・モデリングの連携体制によるジオスペース探査計画：ERG (Exploration of energization and Radiation Geospace) がスタートしました。この特集号では、打ち上げから5年にわたって「あらせ」が成し遂げた数々の成果について、その一部を紹介していきます。

「あらせ」の成果を一言でいうと、プラズマ波動とプ

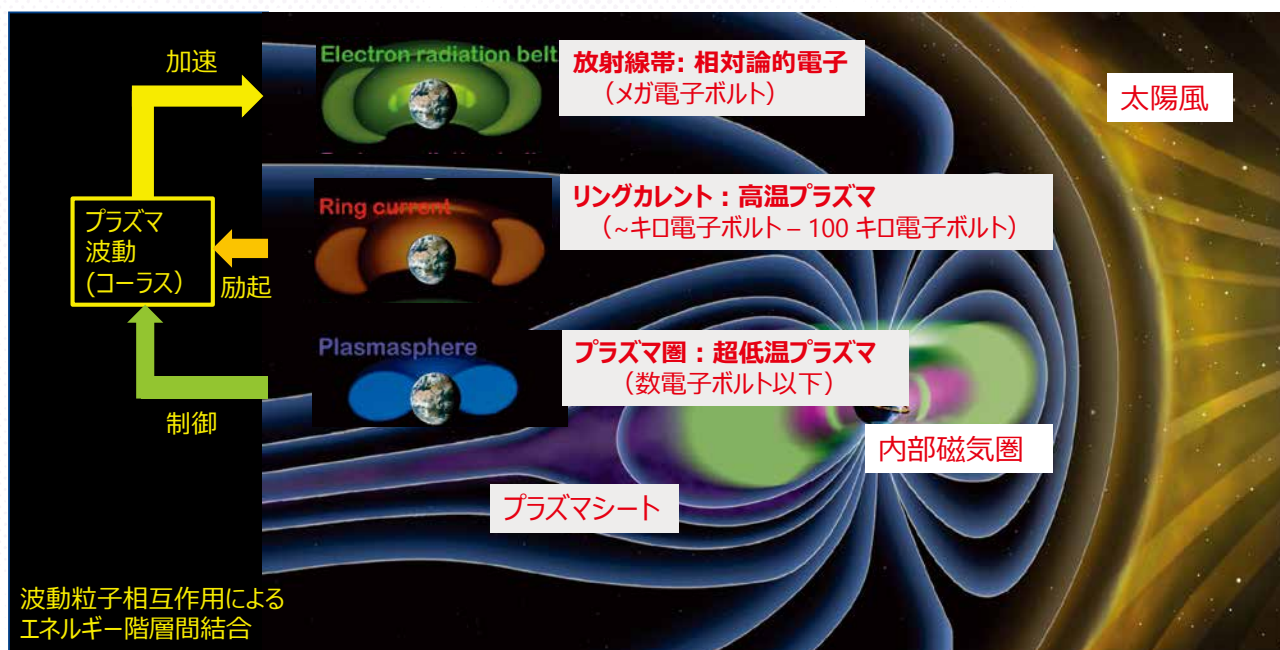


図1: ジオスペースに存在するプラズマ粒子分布と、波動粒子相互作用を介したエネルギー階層間結合の模式図(各エネルギー階層の図は、Ebihara and Miyoshi (2011) にもとづく)。6桁以上にわたって異なるエネルギー階層にプラズマ粒子が共存し、波動粒子相互作用を介して、エネルギー階層間の動的な結合が発生し、放射線帯の消長など、ジオスペースの様々なダイナミクスが作り出されています。

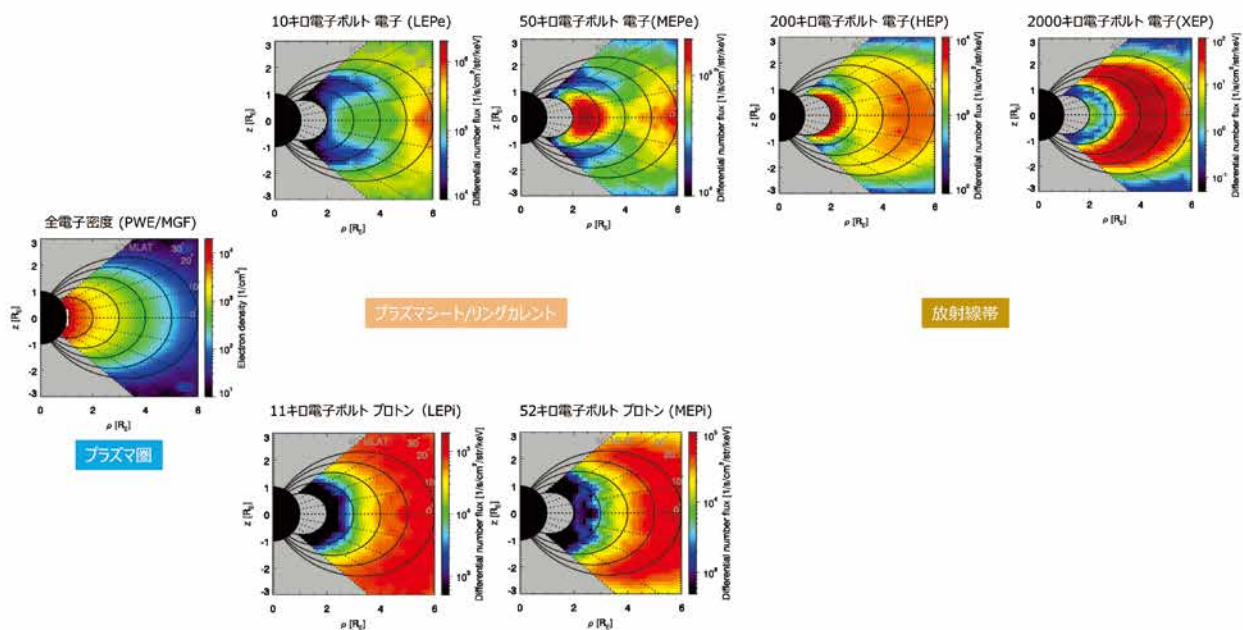


図2：あらせ衛星の6つのプラズマ粒子観測器（LEPe, LEPi, MEPe, MEPi, HEP, XEP）、およびプラズマ波動観測器(PWE)、磁場観測器(MGF)によって観測されたジオスペースの異なるエネルギー階層のプラズマ粒子の分布図。横軸、および縦軸は地球からの距離(地球半径で規格化)。また、各図の色は密度や、電子、イオンのフラックスを表しています。

ラズマ粒子の相互作用を介したエネルギー階層間結合を実証したことです。ジオスペースでは、粒子が希薄であるため、衝突がない無衝突状態となっています。では、衝突がないにも関わらず、なぜ粒子の変化が起きているのでしょうか？プラズマ中には、さまざまな周波数帯にわたるプラズマの波が存在しています。磁場中の荷電粒子は、(1) 磁力線のまわりをまわるサイクロトロン運動、(2) 磁力線に沿って往復運動するミラー運動、(3) 経度方向をドリフトするドリフト運動に伴って3つの不変量と呼ばれる量が存在します。このような荷電粒子と、数ミリヘルツのULF（極低周波）帯のプラズマ波動との相互作用が起これると、(1) と (2) の不変量を保存した状態で起こる加速や減速が生じ、その結果として、放射線帯の電子の消失や増加が起これると考えられています。一方、約20年前から、放射線帯の電子の変化には、上記のULF帯のプラズマ波動以外に、別のプラズマ波動が関与していることが指摘されてきました。プラズマ中には、コーラスと呼ばれる数百〜数千ヘルツVLF（超長波）帯のプラズマ波動が存在します。このコーラスと電子は、サイクロトロン共鳴と呼ばれる過程を通してエネルギー交換を起こします。この過程では、波動が減衰して電子が加速することあれば、逆に電子が減速して波動が成長することもあります。

放射線帯は、メガ電子ボルト（MeV）を超えるジオスペースで最高エネルギーの粒子群から構成されていますが、さらに、図1に示すように同じ場所にプラズ

マ圏と呼ばれる1電子ボルト以下のジオスペースで最も低温のプラズマ、さらにプラズマシートやリングカレントと呼ばれる数キロ〜数百キロ電子ボルト（keV）のプラズマ粒子など、6桁以上にわたるエネルギー階層のプラズマ粒子が共存しています。コーラス波動を励起するのは、リングカレント帯の電子ですが、励起したコーラス波動は、よりエネルギーが高い電子を加速します。つまり、粒子と波動の相互作用を介して、低いエネルギー階層から高いエネルギー階層の粒子群へとエネルギーの輸送が行われます。さらに、プラズマ圏の冷たいプラズマは、波動の位相速度を変化させることで、共鳴条件を変えるため、プラズマ圏も重要な役割を果たしています。このような相互作用によって、異なるエネルギー階層の粒子群が相互作用することを「エネルギー階層間結合」と呼びます。

この「エネルギー階層間結合」を解明するために、ジオスペースでの直接探査によって全エネルギー階層を連続して観測することが待ち望まれていました。放射線帯中心部での科学計測は、放射線による機体への影響や、雑音混入からこれまできわめて困難でしたが、「あらせ」は、小型・軽量化と耐放射線という相反する困難な課題を独自の技術と工夫で解決し、放射線帯中において、数十電子ボルトから数十メガ電子ボルトにいたる広いエネルギー帯のプラズマ粒子、さらに直流から10メガヘルツまでの広い周波数帯の電場と磁場観測に世界で初めて成功しました。

図2に「あらせ」搭載の粒子観測器が観測した各エ

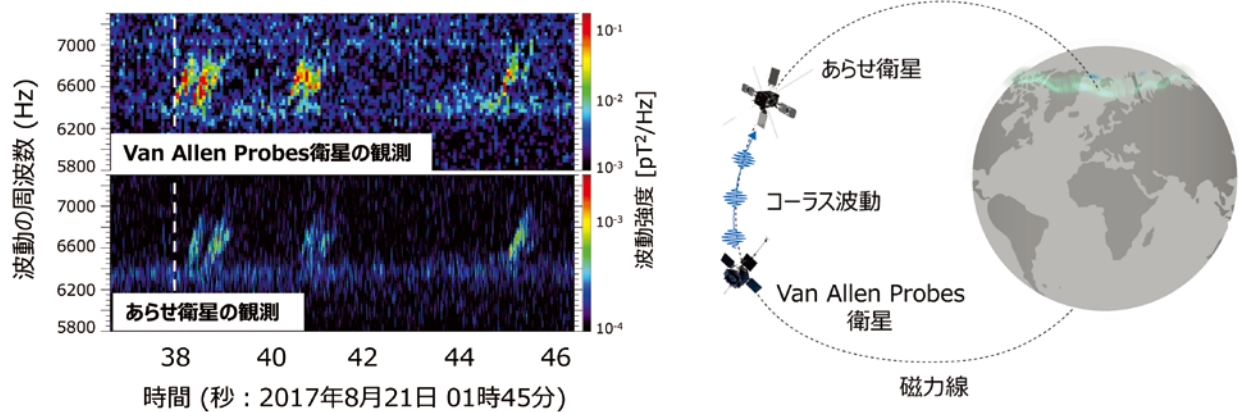


図3：Van Allen Probes衛星(上)とあらせ衛星(下)で同一磁力線上の異なる緯度で観測されたコーラス波動。赤道面で発生したコーラス波動をVan Allen Probesがとらえた後に、「あらせ」が観測していることがわかります。

エネルギーでのプラズマ粒子、そしてプラズマ波動観測器と磁場観測器から導出した背景電子密度の空間分布を示します。「あらせ」によって、ジオスペースにおける6桁以上にわたる各エネルギーのプラズマ粒子分布が、初めて実証的に観測されたのです。現在、これらの観測データは、宇宙科学研究所と名古屋大学の連携によるERGサイエンスセンターにおいて、データの標準化や付加価値のついた高次科学データの製造を行った後、世界中の研究者に公開されています。

本特集号で紹介している「あらせ」や、連携地上観測、シミュレーションによって、「エネルギー階層間結合」により放射線帯電子の増加や消失が起こることが数多くの観測事実から明らかになりました。また、超高高度のオーロラ加速域の発見など、打ち上げ前には予期していなかった発見も相次ぎ、報道発表や学術誌のハイライトといった形で、多くの方に興味を持っていただいています。

ここでは、本特集号の記事では紹介しきれない、地上観測との連携、国際共同観測の例を紹介します。「あらせ」は、地上観測点の上空を通過する際に、高時間分解能の観測モードに切り替えた運用を行っています。一方、地上観測側でも大気レーダーを同時に運用するなどの連携観測を積極的に進め、これまで8000回以上の地上との同時観測を実現してきました。その一例として、「あらせ」と地上の大型大気レーダー、さらにシミュレーションとの連携研究から、コーラスによって周期数秒で明滅する脈動オーロラと呼ばれる特殊なオーロラが起きているときに、放射線帯の超高エネルギー電子も同時に大気に降ってきていること、さらにその降り込みの結果、高度数十kmの中間圏のオゾンが10%以上減少することがみだされました。この発見は、宇宙の影響が、超高層大気だけではなく中層大

気にも及んでいることを示すもので、今後さらに長期にわたる「あらせ」の観測によってその定量的な解明が待たれています。

また、「あらせ」は、国際宇宙ステーションや海外の科学衛星との連携観測も進めてきました。2012年から2019年まで運用されていた米国NASAの衛星Van Allen Probesとは、両衛星の高時間観測モードの同時運用によるプラズマ波動の波形収集を2年間で500回以上と過去に例をみない規模で実現してきました。その一例を図3に示します。上は赤道面でVan Allen Probesがとらえたコーラス波動、下は同じ磁力線上の高緯度で「あらせ」がとらえたコーラス波動です。同じ磁力線上において、同じプラズマ波動を違う緯度で観測するという世界初の成果が国際連携によって得られたのです。

現在、「あらせ」は、順調に観測を継続しており、日本のそして世界中の研究者によって研究が進められ、打ち上げ前には想像もしていなかった新たな発見が相次ぎ、ジオスペースの描像を大きく変えつつあります。2020年より太陽活動は第25活動周期に入り、数年後には極大期となり、これまでとは違ったタイプの「宇宙嵐」が頻発することが期待されます。現在、ジオスペースでプラズマ総合観測を行っているのは「あらせ」のみで、世界中の研究者から「あらせ」のさらなる新しい発見、世界初となる太陽活動1周期を超える観測への期待、そして「あらせ」と連携した観測計画の提案などが寄せられています。極大期を迎え、宇宙で最も過酷そして激しく変化する環境の中で観測する「あらせ」のこれからの活躍を楽しみに、そしてみなさんにさらに多くの成果をお届けできるように、プロジェクトメンバー一同、力を合わせて頑張っていきたいと思っています。

2016年5月2日:9時過ぎに名大着、撤収作業後にセンサの梱包。

大阪大学大学院 理学研究科 横田 勝一郎(よこた しょういちろう)

久しぶりに「あらせ」搭載用の粒子計測器を準備していた頃の業務日誌を見直しました。打ち上げ2年前からは特に幾つものメーカーや研究機関の間を激しく飛び回っていたようです。コロナ禍の今から思うと隔世の感があります。主戦場は当時所属していた相模原の宇宙科学研究所にある粒子計測器開発室でしたが、担当メーカーのある群馬県や愛知県には足繁く(そのほとんどは日帰り)通いました。近隣の複数の工場にもセンサ部品加工、組み上げ、塗装・メッキのため何度もお邪魔しました。右から左に仕事を回すことに精一杯である一方で、様々な場所に赴くことについては楽しんでいただけを思い出しました。名古屋駅で売っているお土産の相当な種類を買い尽くしたことも記載されていました。

出張の日々を振り返ると、今さらですが私たちの機器開発に必要なものは身近に揃っていたことに感じ入ります。「あらせ」のような衛星観測計画は最先端の研究開発かもしれませんが、日本の技術インフラがあってこそだと日誌を見返すことで俯瞰できました。

最も長く滞在したのは名古屋大学宇宙地球環境研究所の

実験室です。観測対象と同程度のエネルギーを持つ粒子ビーム装置を利用するため、延べ数か月を名古屋大学で過ごしました。流石は大学キャンパスで、内外の食環境が充実していました。近場の台湾ラーメン屋もほとんど行ったようです。窓の無い煌々とした実験室で昼も夜も作業する無機質な日々の中で、夕食を何処にするかばかり思案していたことも思い出しました。

その後「あらせ」は無事に打ち上げられ、開発した機器は順調に観測を続けています。私たちの今はというと、「あらせ」観測データを眺めることは勿論ですが、別の観測計画の機器開発にも携わっています。昨今は、一日中パソコンでオンライン会議に参加したり、試験作業後にホテルの客室に戻ってお弁当を食べたりしているため、気軽に出張や食事をしていた当時の業務日誌には味わい深いものがあります。学びは何時までも尽きませんが、今なおその価値に気づかないものがあるかもしれません。

衛星運用定例会

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 三谷 烈史(みたに たけふみ)

「あらせ」が健全に科学観測運用を続けられるよう、関係する宇宙研メンバは週の初めに1度、運用実務を担う業者さんを含めた定例会を開いています。その時々には生じている課題を共有し、解決方針を決めるための打ち合わせです。定常観測が始まった頃は課題が沢山あり時間を要しましたが、安定した運用が継続し5年が経過して、発生頻度の低い事象に対しても対応方針が決まった今となつては、短時間で終わることが多くなっています。ただ、この定例会の参加者がそろって出張してしまう時に限って、なんらかの特別な運用が必要な事象が起こります。「あらせ」は少し寂しがりなようです。

さて、「運用定例会」と書くと格式張って聞こえますが、この打ち合わせは自由な議論の場で、しばしば話が脱線します。重要な事項は最初に話し合い、後は少し関係のない話も含めて雑談をすることもあり、意見の出しやすい雰囲気を作られていました。私は衛星バスについて初めはあまり知識がなかったのですが、的外れな質問ができる機会があったおかげで、色々な機能を理解できました。そして、楽で、確実な観測運用を実現していくことができました。

例えば、運用に用いるコマンド群の送信頻度を週2回から1回に減らすことができました。「あらせ」の運用では、衛星位置や様々なタイミングにおける観測を実現するために、コマンドとその実行時刻をペアにしたテーブルのある期間分を地上から衛星に送信し、その間は原則としてそのテーブルに従って観測を実施しています。ただし、このテーブルの大きさには衛星バスのメモリ量による制限があります。衛星の姿勢制御や地上局との通信設定などの他に、9つの観測機器が要するコマンドを1つにまとめてテーブルを作成するのですが、定常運用の初期はこの作業が週2回必要でした。皆さんがコマンド数の削減努力をしたのですが、到底1週間分はメモリに収まりませんでした。ですが、定例会でポツと出た話から、それまで未使用の領域を使ってテーブル自体のサイズを増やせそうだとわかりました。その会話からフットワーク軽く、比較的速やかに、週1回のテーブル送信での観測を始められました。他にも、運用上の少しの工夫が沢山この定例会から生まれました。さすがにそろそろネタ切れですが、この先も「あらせ」のご機嫌を損ねないように定例会は細々と続くことでしょう。

「コーラス波動」による 電子の散乱とオーロラ

東京大学大学院 理学系研究科 笠原 慧 (かさらは さとし)

磁気圏のそこかしこで発生する「コーラス波動」が、その電磁場で電子の軌道を乱し、その影響を受けた電子が地球大気に降りこんでオーロラを発生させる、という理論が提唱されたのは今から半世紀以上も前のことです^{※1}。

そもそも地球近傍の宇宙空間(磁気圏)の電子は地球磁場のローレンツ力によって磁力線に巻き付く旋回(サイクロトロン)運動と磁力線に沿う往復運動を繰り返しており、通常は大気に降りこみません。このような電子が往復運動を破って地球大気に降りこむのは、電子が磁力線に巻き付くサイクロトロン運動の速度($v_{\perp}$)に比べて、磁力線に沿った速度($v_{\parallel}$)の方が十分に大きくなり、臨界点を越えた時です(具体的には、「あらせ」の観測しているケースでは $v_{\perp}/v_{\parallel} \sim 0.04$ が臨界点)。この臨界点の間際で少しだけ $v_{\perp}/v_{\parallel}$ の大きい電子は辛うじて磁力線に沿う往復運動を繰り返しますが、何らかの磁場擾乱に伴うローレンツ力によって電子が速度空間内で散乱され(つまり、 $v_{\parallel}$ と $v_{\perp}$ が少しずつ変化して) $v_{\perp}/v_{\parallel}$ が臨界点を突破するほど小さくなることで、往復運動が破られます。

電子の散乱の現場を実証するには、臨界点における電子の速度ベクトルと磁力線のなす角 $\tan^{-1}(0.04) \sim 2.4^{\circ}$ と同程度の角度分解能が必要です。筆者が開発責任者を務める中間エネルギー電子分析器にてこの分解能を実現するには、典型的なプラズマ分析器の設計と比べると検出器の開口面積をかなり絞る必要があり、その代償として感度を犠牲にする必要がありました。しかし、筆者らは「コーラス波動に散乱される電子」の直接検出を秘かに目論み、角度分解能優先の設計でも感度的に問題ないことを確認しつつ設計・開発を進めました(観測器の開発に関してはISASニュース2017年12月号、2019年5月号でも解説しています)。

そのような明確な指針がありつつも、不安要素はありました。広大な宇宙空間の中で、「点」に過ぎない衛星が電子散乱の現場を都合よく通過できるのか? コーラス波動以外の様々

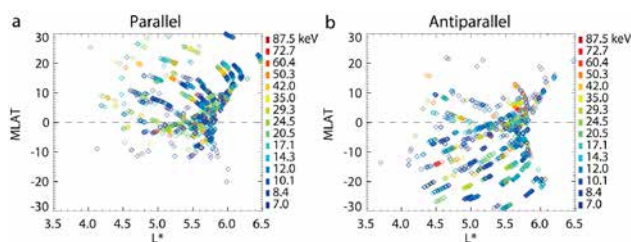


図1: (左) 地球磁場に沿って北半球の極域に降りこもうとする電子と(右) 磁力線に反平行に南半球の極域に降りこもうとする電子の検出位置分布。縦軸が磁気緯度、横軸が地球からの距離(地球半径で規格化)を示す。色は電子のエネルギーを示す[Kasahara et al., 2019, GRL]。

な電磁波動が飛び交う中、また、様々な領域から電子が運ばれてきて混沌とした複雑系の「現場」で、都合よく「コーラス波動」と「電子の散乱」の対応だけを抜き出す形でみだせるのか? という懸念は開発中、ずっと脳内に渦巻いていました。

ところが、実際に観測が始まってみると、電子が往復運動の臨界点を越えて激しく降りこむ事象は頻繁にみられることがすぐにわかり(図1)、さらに少しコツをつかむと^{※2}、降りこみ電子の量とコーラス波動の強度の高い相関も次々とみつかるようになりました。そしてその中には、電子の降りこみ先が全天オーロラカメラの観測領域に当たっている極めて幸運なケースも発見され、「コーラス波動 → 電子の散乱 → オーロラ発光」というシナリオが、半世紀以上の時を経てついに直接的に証明されることとなりました(図2)。

※1 オーロラ発生メカニズムはこの他にもあります。電子を降りこませるメカニズムの多様性がオーロラの形態の多様性につながっています。

※2 降り込み電子とコーラス波動との高い相関をみつけるには少しばかりのコツが必要でした。そのコツとは、赤道面付近(磁気緯度の絶対値が10度以下程度)を探すことです。これは、コーラス波動による強い散乱が起こる条件(共鳴条件と呼びます)が赤道面付近で満たされやすいこと、また、コーラス波動が必ずしも磁力線に平行には伝搬せず、高緯度に行くほど降り込み電子と空間的にずれていってしまうこと、という2つのことから容易に理解できることなのですが、それに気づくまでには多少の時間を要しました。

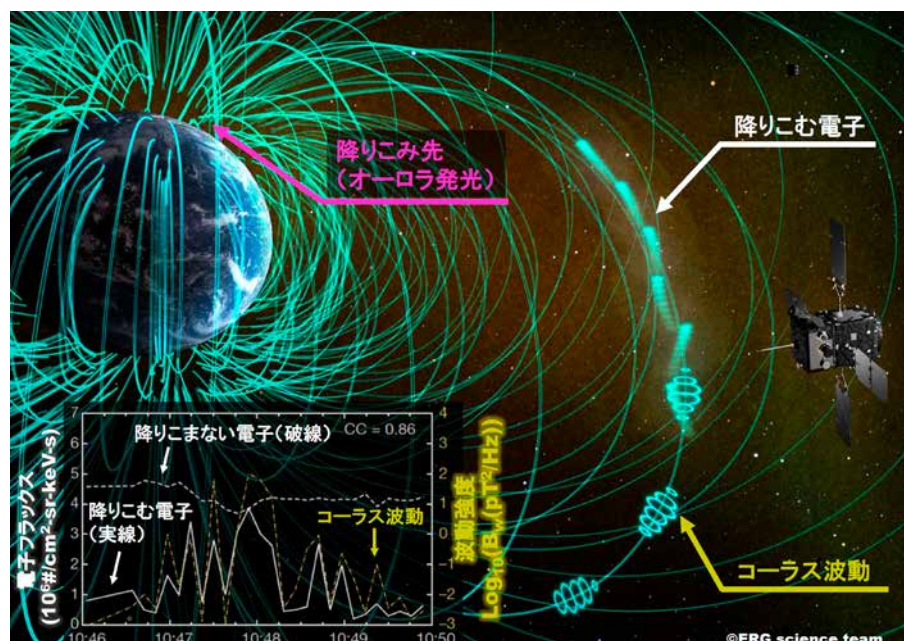


図2: コーラス波動強度(黄色)と降り込み電子の量(実線)の高い相関(0.86) [Kasahara et al., 2018, Nature]. 降りこまない(臨界点を越えない)電子に大きな変動はみられないため、波動との相互作用の直接的な検出のためには降り込み電子を識別するための高角度分解能が必要であった。本研究を説明する動画は右上のQRコードから視聴可能。



「あらせ」と数値シミュレーションによる 非線形電子加速の実証

情報通信研究機構 電磁波研究所 齊藤 慎司(さいとう しんじ)

地球磁気圏の中の放射線帯電子は数keV($\sim 10^3$ eV) から数 MeV ($\sim 10^6$ eV) にわたる幅広いエネルギーを持つことが知られています。地球の夜側(磁気圏尾部のプラズマシート)から供給される数keV程度の電子は、地球を取り囲むように東方向へ流れ、ドーナツ状の領域(電子放射線帯)を形成します。供給された電子は磁気圏の中で生じるさまざまな物理過程を経て1000倍以上のエネルギーを獲得し、ほぼ光の速さにまで加速されます。この加速要因の1つとして、プラズマ中の電磁波と荷電粒子との相互作用として知られる“波動粒子相互作用”が考えられています。しかし、理論やシミュレーションによってその重要性は長く指摘されてきましたが、これまで「その場」観測をもとにした実証が実現されていませんでした。

「あらせ」が搭載している中間エネルギー電子分析器(MEP-e)¹によって、約10 keVから80 keVまでの電子の、エネルギーと飛んでいる方向の詳細な観測が可能になりました。この観測データを用いた栗田らの解析²より、ピッチ角が60度から80度で、エネルギーが約17 keVから25 keV程度の電子フラックスが、電子放射線帯の中で有意に増加している様子が発見されました。ここでいうピッチ角とは、磁力線方向に対する電子の運動方向の角度のことです。このようなフラックス増加が観測されたのとはほぼ同時に、「あらせ」は2.5 kHz付近の周波数を持つホイッスラー波と呼ばれる電磁波を観測しました。ホイッスラー波は電子と相互作用をしやすい電磁波として知られており、栗田らの研究では、20 keV程度の電子フラックスが増えたのは、このホイッスラー波が波動粒子相互作用を介して電子を加速した結果であるとしています。しかしながら、衛星位置の1点観測から得られるデータは限られており、実際にホイッスラー波がどのようにして加速に寄与しているのかまでは明らかにされませんでした。

「あらせ」はこのような電子観測と波動観測に加え、背景磁場強度とプラズマ密度に対する詳細な観測データを提供しています。このような詳細な観測データは、より現実に近い「その場」の状況を数値モデルで再現することを可能にします。これら詳細データを用いて、テスト粒子モデル³によるシミュレーションを行い、観測とシミュレーション結果の比較を行いました。このシミュレーションによって得られた電子フラックスの時間変化は、「あらせ」による観測と良く一致するという結果が得られました(図1)。これは、「あらせ」の「その場」の状況を、シミュレーションが良く再現している、ということの意味しています。さらに、ここで得られたシミュレーションデータを解析することで、ホイッスラー波によって電子がどのように加速されているのかについて調べました。25 keV付近にまで加速

された電子の軌道について時間を約30秒さかのぼって追跡すると、これらの電子はピッチ角を約40度、エネルギーを約10 keV増加させていることがわかりました。これは、波動粒子相互作用による電子の散乱を記述する準線形理論(波同士の位相の間に相関が無く、それらによる粒子への作用が拡散過程で記述される)では説明することができないほどに大きな値でした。また、電子1つ1つのエネルギーおよびピッチ角変化を詳細に追跡してみると、1秒程度の短い時間で数keVほどのエネルギーを獲得する電子が多く存在していることがわかりました(図2)。これは、ホイッスラー波による電子の「位相捕捉」と呼ばれる非線形加速機構で説明することができ、準線形理論には含まれない急激なエネルギーとピッチ角の増加を実現します。「あらせ」によって得られた観測データをもとにしたシミュレーションにより、栗田らが発見した電子フラックス増加は、ホイッスラー波に位相捕捉された電子の非線形加速によるものであることが確かめられました。

シミュレーションによって観測データを実証することは、実際に観測された現象をより詳細に理解することだけではなく、実際に起きている物理過程をシミュレーションにより再現できるということ、つまりは数値モデルとしての有効性を実証していることにもなります。今後は「あらせ」による観測実証のための数値実験に加え、波動粒子相互作用による電子の加速/消失機構のさらなる理解、また、放射線帯電子フラックスの変化を予測する宇宙天気予報モデルへの応用へ研究を進展させていきたいと思っています。

参考文献

- [1] Kasahara, S., Yokota, S., Mitani, T. *et al.* Medium-energy particle experiments—electron analyzer (MEP-e) for the exploration of energization and radiation in geospace (ERG) mission. *Earth Planets Space* 70, 69 (2018). <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0847-z>
- [2] Kurita, S., Miyoshi, Y., Kasahara, S., Yokota, S., Kasahara, Y., Matsuda, S., *et al.* (2018). Deformation of electron pitch angle distributions caused by upper band chorus observed by the Arase satellite. *Geophysical Research Letters*, 45, 7996–8004. <https://doi.org/10.1029/2018GL079104>
- [3] Saito, S., Miyoshi, Y., and Seki, K. (2012). Relativistic electron microbursts associated with whistler chorus rising tone elements: GEMSIS-RBW simulations, *J. Geophys. Res.*, 117, A10206, doi:10.1029/2012JA018020.
- [4] Saito, S., Kurita, S., Miyoshi, Y., Kasahara, S., Yokota, S., Keika, K., *et al.* (2021). Data - Driven Simulation of Rapid Flux Enhancement of Energetic Electrons With an Upper - Band Whistler Burst. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126(4). <https://doi.org/10.1029/2020ja028979>

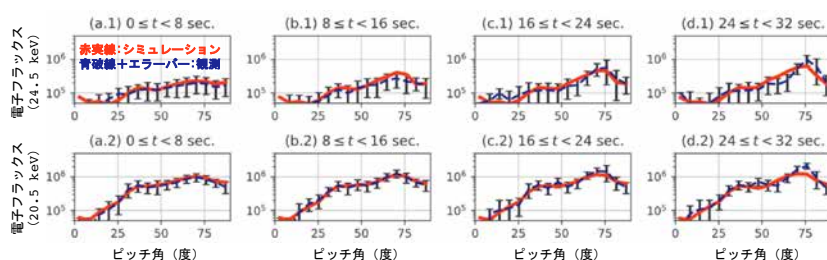


図1: ピッチ角に対する電子フラックス量を示しています。上のラインは24.5 keV、下のラインは20.5 keVのエネルギーを持つ電子フラックスを表しています。左から右へ時間変化を表しており、紺色の破線とエラーバーが観測で得られた電子フラックス、赤線がシミュレーションによって計算された電子フラックスを示しています。(参考文献[4]のFigure 3から一部を転用)

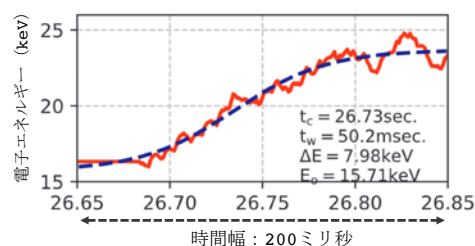


図2: ある1つの電子のエネルギーの時間変化を示しています。赤線がシミュレーションによって計算された電子のエネルギー、紺色の破線はこの変化に対する近似曲線を示しています。この近似曲線が示す特徴量より、加速前の電子エネルギー(15.71 keV)、獲得エネルギー(7.98 keV)、加速時間幅(50.2ミリ秒)、加速が生じた時間(26.73秒)を見積もっています。(参考文献[4]のFigure 8から一部を転用)

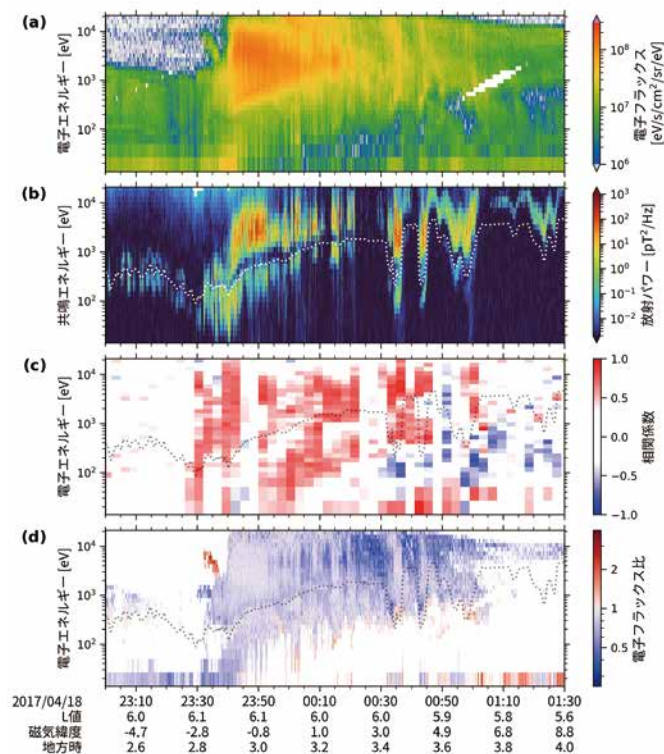
「あらせ」が観測したホイッスラー波動による 電子のピッチ角散乱

Institute of Astronomy and Astrophysics, Academia Sinica 風間 洋一(かざま よういち)

プラズマ粒子で満たされた宇宙空間には、さまざまなプラズマ波動が存在しています。地球の周辺でも、それらの波動は励起・減衰・変調を通じて周囲のプラズマ粒子と互いに影響を及ぼし合い、エネルギーの授受を行っています。この記事では、「あらせ」で観測されたホイッスラー波動と磁気圏電子の相互作用の様子を紹介します。

ホイッスラー波動は、磁気圏の磁気赤道面付近で頻繁に観測される非常に強い放射強度を持った電磁波で、サイクロトロン共鳴により電子を加速したり、ピッチ角(粒子の速度と磁場のなす角度)を変えたりすることにより、放射線帯電子の形成やオーロラの発光という惑星磁気圏での特徴的な現象に直接的に関わっています。今回「あらせ」により、ホイッスラー波動と電子の相互作用が発生しているエネルギー帯の同定や、波動による電子分布の変化、ホイッスラー波動強度の変調が観測され、波動粒子相互作用でまさに地球電離圏に落ちていく電子のエネルギーや波動強度との関係が明らかになりました。これは、波動粒子相互作用という微視的な物理過程が、磁気圏夜側でのプラズマ注入から電離圏への電子降り込みという大局的な一連の現象にどのように埋め込まれているのかを理解するための貴重な直接観測です。

図(a)は磁気赤道面近傍で観測された磁力線に平行方向の



「あらせ」で観測されたホイッスラー波動と電子のデータ。
図(a): 磁場に平行・半並行方向ピッチ角が0度から11.25度の電子エネルギーの分布。図(b): ホイッスラー波動と電子の共鳴エネルギーで示したプラズマ波動の磁場成分。図(c): 平行な電子フラックスとホイッスラー波動強度との間の相互相関係数。図(d): 平行方向の準平行方向に対する電子フラックスの比率。

電子エネルギー分布です。23:40頃から粒子インジェクションが発生して高いフラックスの電子が観測されています。図(b)は波動の磁場成分の放射強度をホイッスラー波の共鳴エネルギーで表示していますが、インジェクションと呼応してインジェクション電子と対応する共鳴エネルギーにホイッスラー波動が検出されていることが分かります。これらの電子は磁場に垂直方向のフラックスが卓越する非等方性を持っていることも同時に観測されていて、ホイッスラー波の励起が起きる条件を満たしています。

両者の関係を調べるため、平行方向の電子フラックスの各エネルギーでの時間変化と、ホイッスラー波の放射強度の時間変化の間で相互相関係数を計算したデータを図(c)で示しています。正・負の相関係数をそれぞれ赤・青で示し、無相関については白で表されています。このデータをみると、強い波動が観測されている時間帯に電子フラックスに対する正相関があり、それらの相関は波動の共鳴エネルギーとよく一致しています。これは観測場所で電子と波動がまさに共鳴していることを示しています。また、図示されていないものの、磁場に垂直方向の低エネルギー電子(約数百電子ボルト以下)フラックスと波動強度にも正の相関がみられることから、低エネルギー電子の時間的な増加がホイッスラー波動の励起を促し、その結果としてより高いエネルギーである共鳴エネルギー帯の電子を変調していると推定できます。

それでは、その電子分布の変調とはどのようなものでしょうか。図(d)では、磁場に沿って動く(ピッチ角が0度から11.25度の間の)電子フラックスの、準平行方向(ピッチ角が11.25度から33.75度)のフラックスとの比を作図しています。ホイッスラー波動が観測されていない時間帯は、青い色で示されているとおりフラックス比が1よりも小さく、強い波動が観測されるとその比が1に近づくという関係が非常に綺麗に観測から示されました。これは、もともとの電子分布が磁力線方向に少し「凹んで」いる形をしていて、強い波動が発生するとその凹みが電子で埋まることに対応しています。これは電子がホイッスラー波動と共鳴することにより、ピッチ角散乱を受けて共鳴電子が磁力線方向へ向きを変えていると解釈できます。また、ピッチ角散乱により一部の電子がロスコーンと呼ばれる非常に小さいピッチ角を持つようになることも同時に観測されており、この観測が行われた磁力線の根元にあたる地球電離圏では、まさに「あらせ」で観測された電子が引き起こしたオーロラが光っていたと考えられます。

ここでは、数百電子ボルト以下の電子と波動、また波動と10キロ電子ボルトにせまる電子との詳細な関係を「あらせ」の観測データから示してきました。「あらせ」は、基本的に途切れることなく常にすべての観測器が観測を行っているため、ここで示したように、電磁場波動とプラズマ粒子の非常に詳細な描像を磁気圏南半球から赤道を通過して北半球側に至る2時間近い時間の間観測することができました。「あらせ」の良質なデータの蓄積が今後とも磁気圏の研究を推し進めることになるかと期待しています。

Collaboration on in-situ measurements of electromagnetic waves in space plasmas

Institute of Atmospheric Physics, Czech Academy of Sciences Ondrej Santolík (オンドレイ サントリック)

Measurements of electromagnetic waves in space plasmas are an important tool for our understanding of physical processes in this environment. Arase, with its sophisticated onboard instrumentation, can be used as a state-of-the-art tool for investigation of these processes in the Earth's magnetosphere. Collaboration of the Department of Space Physics, Institute of Atmospheric Physics of the Czech Academy of Sciences with the Arase team on this subject started well before the launch of Arase and continues up to present. During our regular visits to the Nagoya University and Kanazawa University and during visits of the colleagues from different Japanese institutions to Prague, we had many fruitful discussions on diverse subjects related to measurements of electromagnetic waves in space.

Our collaboration initially started during the design phase of the project, when we discussed onboard analysis of signals from magnetic and electric antennas, leading to determination of crucial parameters describing polarization and propagation properties of measured waves. We then continued to work together on interpretation of measurements in terms of wave vectors, Poynting vectors, planarity, and coherency estimators of the wave fields. As an example of our common results, inter-calibrated measurements of intense whistlers by Arase and Van Allen Probes can be given. This work has been recently published in *Journal of Geophysical Research: Space Physics*.

Inter-calibration of data from different spacecraft missions is necessary for combining their measurements in empirical models or in case studies. We showed results collected during a close conjunction of the Van Allen Probes and Arase. (An example is shown in Figure 1.) The inter-calibration was based on a fortuitous case of common observations of strong whistlers at frequencies between a few hundred hertz and 10 kHz, which were generated by the same lightning strokes and which propagated along very similar paths to the two spacecraft. Measured amplitudes of the magnetic field fluctuations were the same within $\sim 14\%$ precision of our analysis, corresponding to 1.2 dB. Electric field measurements showed twice larger amplitudes on Arase compared to Van Allen Probes but they started to match within $\sim 33\%$ precision (2.5 dB) once the newest results on the interface of the antennas to the surrounding plasma were included in the calibration procedures. Ray tracing simulations helped us to build a consistent scenario of wave propagation to both spacecraft. We thus successfully inter-calibrated the polarization and propagation parameters obtained from multicomponent measurements. We also succeed in linking the spacecraft observations to localizations of lightning return strokes by two different ground based networks which independently verified the correctness of the Universal Time

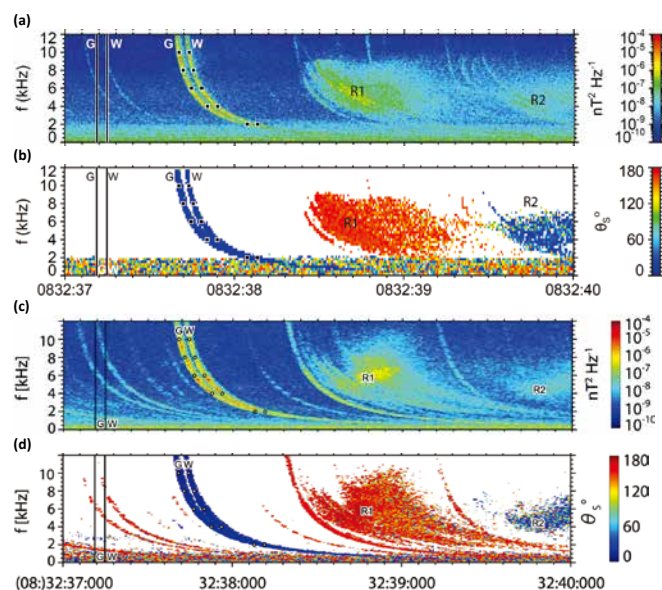


Figure 1: Observations of strong whistlers by (a,b) the Van Allen Probe B and (c,d) Arase on August 14, 2017. (a,c) : total power spectral density of magnetic field fluctuations obtained as the trace of the magnetic spectral matrix; (b,d) : angle between the spectral estimate of the Poynting vector and the vector of the background magnetic field.

tags of waveform measurements by both spacecraft missions, with an uncertainty better than 10 ms.

We are looking forward to our future collaboration on the Arase mission during the current solar cycle 25, part of which will be also covered by simultaneous measurements of the European Cluster mission, on which we actively participate. During our approach to the anticipated maximum of this cycle, and later on, during the anticipated declining phase, we can expect observations of many events of strongly amplified electromagnetic waves. These events have established links to dangerous phenomena leading to particle acceleration in the Earth's magnetosphere, and to potential risks for telecommunication spacecraft in the heart of the outer Van Allen belt. Our goal for future collaboration on analysis of data from the Arase mission is to contribute to our understanding of these fascinating natural processes.

Reference: Santolík, O., Miyoshi, Y., Kolmašová, I., Matsuda, S., Hospodarsky, G. B., Hartley, D. P., et al. (2021). Inter-calibrated Measurements of Intense Whistlers by Arase and Van Allen Probes. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126, e2021JA029700. <https://doi.org/10.1029/2021JA029700>

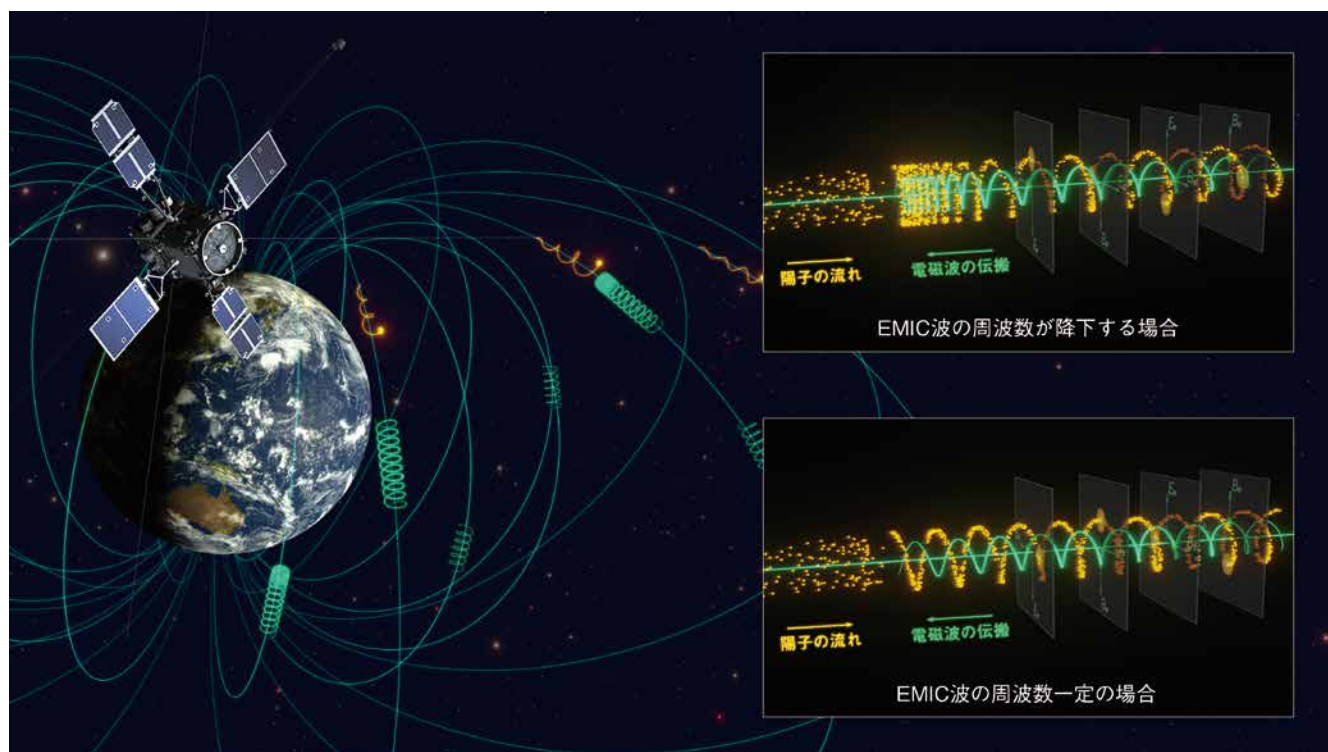
「プロトン・ヒル」の発見

名古屋大学 宇宙地球環境研究所 小路 真史(しょうじ まさふみ)

地球周囲の宇宙空間、ジオスペースに存在する電子とイオンからなるプラズマからは、様々な電磁波(プラズマ波動)が自然発生しており、プラズマの分布やエネルギーを変えてしまうことが知られています。特に周波数1Hz程度の「電磁イオンサイクロトロン波動(以下、EMIC波と呼びます。)」と呼ばれる電磁波は、数MeVのエネルギーを持つ放射線(放射線帯の電子)を散乱させて消失させたり、プロトン(陽子)の散乱によって極域でのプロトンオーロラの発生に寄与したりすると考えられています。理論解析やスーパーコンピュータによる大型数値実験により、EMIC波は数10keV程度のプロトンとの共鳴現象によって発生すると考えられていました。特に、周波数の上昇や降下を伴うEMIC波はイオンと非線形な相互作用を起こし、プラズマの散乱や加速を非常に効率良く起こすといわれています。エネルギー源となるプロトンはEMIC波によって分布を不均一な形に歪められ、その歪な分布が電流となってEMIC波の周波数変調や急激な成長を引き起こすと理論的には考えられています。しかしながら、これまで、宇宙空間での衛星観測において、プラズマの中からEMIC波が発生し、非線形な相互作用を起こす直接的な証拠は捉えられていませんでした。我々の研究グループは、EMIC波の電磁場とプロトンのサイクロトロン運動の位相関係からプロトンの密度分布の揺らぎを特定し、電磁波-プラズマ間の相互のエネルギー授受を直接計測する新しい解析手法「WPIA」を開発しました。我々はまず、「あらせ」に搭載されている磁場計測器「MGF」とプラズマ波動観測器「PWE」の一部である電場計測器「EFD」がそれぞれ観測した電磁場ベクトルデータからEMIC

波、とりわけ周波数変動を伴うような非線形な波動を探しました。中でも比較的珍しく、理論やシミュレーションでも発生原理の解明が不十分な周波数降下を伴うEMIC波を発見できたため、WPIAを用いてエネルギー授受の現場と発生メカニズムの詳細な解析を行いました。「あらせ」に搭載されている低エネルギーイオン観測器「LEP-i」が観測したイオンの3次元速度分布関数データと電磁場のデータを組み合わせてWPIAを行い、EMIC波の周波数を下げる、成長を引き起こすと考えられているそれぞれの電流を世界で初めて発見することができました。また、これらの電流を形成すると考えられているプロトンの分布の歪み「プロトン・ヒル」を発見しました。そして、プロトン・ヒルが時間的に変化する様子を捉えることに成功しました。「あらせ」が捉えた波の成長とともに時間変化するプロトン・ヒルの模式図を下に示します。この時間変化は数秒の間で起きる現象であり、「あらせ」の高時間分解能での常時観測によって初めて捉えることができたものです。これによって、理論的に予見されていたEMIC波の非線形な成長のシナリオを証明しました。WPIAは今後、宇宙プラズマの中で発生している様々な種類の電波の分析に応用されていくことが考えられています。特に、「あらせ」の電子の高時間分解能データに本解析手法を適用することにより、明滅するオーロラを作り出している起源といわれる、周波数数千ヘルツの電波：「ホイッスラー波動・コーラス」が生まれる様子が解明されると期待されています。本成果は下記の名古屋大学ウェブサイトにてプレスリリースされております。

(<https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/news/research-results/2021/20210713.html>)



図：「電磁イオンサイクロトロン波」発生の様子。右上の図は周波数下がる電磁イオンサイクロトロン波との共鳴の様子、右下の図は周波数が変わらない電磁イオンサイクロトロン波が発生した時のイオンとの共鳴の様子を示します。どちらも密度の不均一(山)が観測されますが、周波数が一定の場合から降下するものに変化した時、山が位相角の小さい方へ移動することが示唆されています。© ERG science team

プラズマ波動を介してエネルギーをやり取りするイオンの観測

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 浅村 和史(あさむら かずし)

地球周辺の宇宙空間では、低エネルギーイオンや電子が豊富に存在するプラズマ圏や相対論的な超高エネルギー粒子が捕捉されているバン・アレン帯などが重なり合って存在しています。そして、粒子が大幅な増減を繰り返したり、領域の形が変化したりするなど、それぞれの領域はダイナミックに変動しています。これらの変動の理由を説明するためには異なる領域間の結合を考える必要があり、プラズマ波動を介したエネルギーの流入・流出がメカニズムの候補となっています。

私たちは「あらせ」の観測データに「波動粒子相互作用解析」と呼ばれる新しい手法を適用し、プラズマ波動とイオンの運動を対応づけることで、プラズマ波動とイオンがやり取りするエネルギー量を明らかにすることとしました。例えば、プラズマ波動を構成する電界と同じ向きに運動する正イオンは電界によって加速されるため、プラズマ波動からエネルギーを受け取ります。逆にプラズマ波動の電界と反対方向に運動する正イオンは減速され、プラズマ波動にエネルギーを渡してプラズマ波動が強まります。実際にはイオンや電子は多数存在し、プラズマ波動からエネルギーを得る粒子も渡す粒子も存在します。しかし、粒子の運動方向の分布に偏りがあると、全体的にみてプラズマ波動から粒子、または粒子からプラズマ波動へのエネルギーの流れが発生し、これが正味のエネルギー流量となります。

私たちは「あらせ」に搭載された低エネルギーイオン質量分析器 (LEP-i) と波動観測器 (PWE)、磁場観測器 (MGF) の 15.6 ミリ秒ごとの観測データを用い、観測タイミング、イオンのエネルギー、そして運動方向ごとに整理されたデータ一つ一つと、同じタイミングで観測されたプラズマ波動の電界との対応をとっていきました。図1 (a) (b) は冷たいイオンの加熱に加え、2種類のプラズマ波動 (プラズマ中を伝搬するプラズマ波動の一種である磁気音波と電磁イオンサイクロトロン波) も同時に検出された観測イベントに対し、「波動粒子相互作用解析」を適用した結果です。図1 (a) から、エネルギー輸送の向きに変動があるものの、全体的には磁気音波が冷たいイオンにエネルギーを与えていることが分かります。一方、図1 (b) では、冷たいイオンから電磁イオンサイクロトロン波へのエネルギー輸送が検出され、プラズマ波動の発生・成長が示されて

います。この結果を模式的に表したものが図1 (c) です。本研究はこれまで考えられていなかった、①磁気音波の生成→②冷たいイオンの加熱→③電磁イオンサイクロトロン波の発生と成長、というプラズマ波動とイオンの連鎖反応によるエネルギーの流れが宇宙空間に存在することを実証的に示しました(*1)。なお、電磁イオンサイクロトロン波はイオンを散乱することによってプロトンオーロラを発光させると考えられるので、図1 (c) には④プロトンオーロラの発光も描かれています。

エネルギーの流れの全体像を知るためには、プラズマ波動自体が運搬するエネルギーやイオン・電子が運動することによって運ぶエネルギーについても考慮する必要があります。プラズマ波動が運ぶエネルギー量はポインティングベクトルと呼ばれる量で表され、これは観測値から計算することができます。また、イオン・電子が運ぶエネルギーも観測から導出可能です。ところが、これらの量は観測場所を通過するエネルギー量であって、観測場所で消費または受領するエネルギー量ではありません。ある場所で受け渡しされるエネルギーの収支を考える場合、

- (1) プラズマ波動からイオン・電子、またはイオン・電子からプラズマ波動へ受け渡しされるエネルギー量
- (2) プラズマ波動の持つエネルギー密度
- (3) イオン・電子の持つエネルギー密度
- (4) プラズマ波動によってその場に流入、流出するエネルギー量
- (5) イオン・電子によってその場に流入、流出するエネルギー量

を考える必要があります。本研究のような単一衛星での観測の場合、(1) (2) (3) は導出可能です。しかし、(4) (5) は単一衛星での観測では求められず、複数衛星での観測結果の差をとる必要があります。今後、天体周辺の宇宙空間プラズマのダイナミクスとエネルギー輸送を考える上で、複数衛星・編隊飛行ミッションの実現が望まれます。

(*1) Asamura, K. et al., Phys. Rev. Lett., 127, 245101, doi: 10.1103/PhysRevLett.127.245101 (2021)

ウェブリリースのリンク

<https://www.isas.jaxa.jp/topics/002885.html>

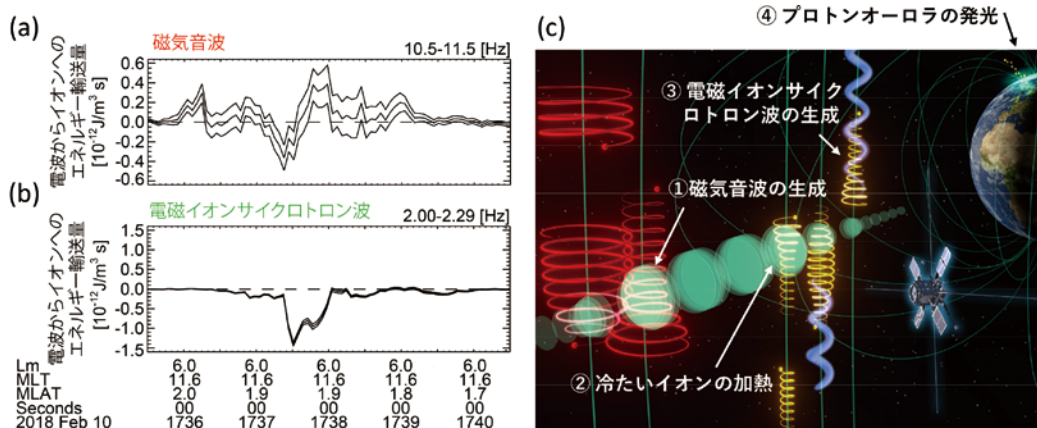


図1: 本研究で解析した観測イベントについて、プラズマ波動から冷たいイオンに渡される正味のエネルギー流量を示したプロットと模式図。(a) 磁気音波の場合、(b) 電磁イオンサイクロトロン波の場合。それぞれのパネルに線が3本プロットされており、真ん中が計算値を示し、上側と下側の線は信頼区間を表します。(c) 本研究で明らかになったジオスペースでのエネルギーの流れの模式図。

© ERG science team

Van Allen Probes衛星と「あらせ」によるULF波動による放射線帯電子加速領域の特定

九州工業大学 工学部宇宙システム工学科 寺本 万里子(てらもと まりこ)

ULF波動は、数十から数百秒の周期を持つ地磁気の固有振動です。ULF波動は磁力線沿いに伝搬する波が南北半球それぞれの電離圏で反射され、地磁気の磁力線が弦のように振動することによって引き起こされると考えられています。ULF波動は、宇宙空間に磁場と電場の変化を引き起こし、ULF波動は衛星や地上で取得される磁場データ上で、正弦波のような特徴のある波形として観測されます。このULF波動が引き起こす電磁場の変化は宇宙空間を運動しているプラズマに影響を及ぼします。

地球周辺の宇宙空間には数MeVの高いエネルギーを持つプラズマが集まる「放射線帯」と呼ばれる領域が存在します。この放射線帯を構成する電子は、数百秒程度で地球をぐるりと一周する東向きドリフト運動をしています。この電子がドリフトする周期とULF波動の周期がおおよそ一致していることから、電子はULF波動からエネルギーを授受し加速を受けると考えられています。ULF波動は放射線帯電子の加速機構の一つです。

ULFによって電子が加速を受けている場合、電子と電磁場観測には、数秒周期の振動がみられるはずですが、しかし、打ち上げ直後の「あらせ」の観測データを確認したところ、電子フラックスには特徴的な振動がみえていたにもかかわらず、電場・磁場データにはULF波動が観測されないという不思議な事例が多く観測されました。我々はこの現象がなぜ起きているかを解明するために、「あらせ」とNASAのVan Allen Probes衛星、ロシア-北米-ヨーロッパの地磁気観測網を用いた国際協調観測を実施しました(図1上)。

図1下に、放射線帯の朝側に位置する「あらせ」が実際に宇宙空間で観測した電子と磁場・電場を示しています。電場・磁場には同周期のULF波動は全く観測されていない一方で、電子には0.5 MeVから3.0 MeVの高いエネルギー帯で、特徴的な振動が観測されていることがわかります。また電子データにみられる振動をよくみると、高いエネルギーを持つ電子ほど早く振動が起きていることがわかります。地球周りをぐるりと一周するドリフト運動の速度は、電子が高いエネルギーを持つほど速いことが知られています。「あらせ」の観測は、「あらせ」衛星とは別の場所で加速を受けた電子が、その「履歴」を残したまま放射線帯をドリフト運動した結果、高いエネルギーを持つ電子の振動から順に「あらせ」で観測したことを示唆しています。

我々は加速領域を特定するために、地球を挟んで「あらせ」とは反対側・放射線帯夕方側に位置するVan Allen Probes衛星のデータを確認しました。その結果、高エネルギー電子データに100秒周期の振動を観測すると共に、磁場データにはULF波動を観測しました。これはVan Allen Probes衛星の位置でULFによる電子の加速が起きていることを示しています。またロシア-北米-ヨーロッパの全経度方向をカバーする地上磁場の観測網によって、このULF波動の発生領域を特定したところ、夕方側のごく限られた領域でULF波動が発生していることがわかりました。これまでの研究では、ULF波動は経度方向の広範囲で励起

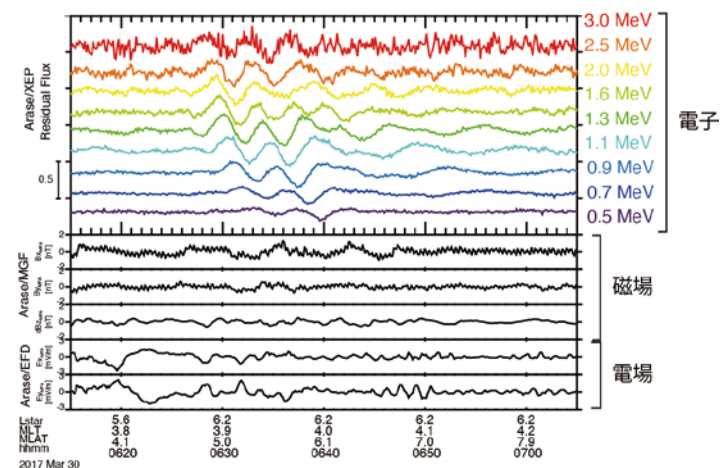
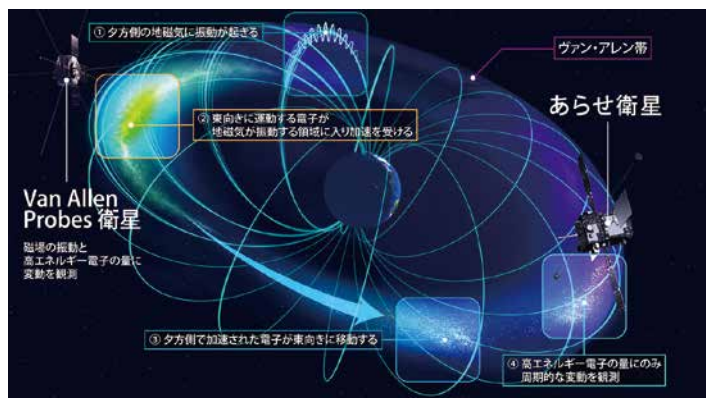


図1：(上図) 本研究内容をまとめた概略図。宇宙空間の夜側から地球と放射線帯をみている。夕方側に広がっているULF波動によって、放射線帯の電子は夕方側で加速される。その現場をVan Allen Probes衛星で観測した。一方加速領域から離れた朝側にいた「あらせ」は放射線帯電子に加速の「履歴」を観測した(下図上段)。電子の0.5 MeVから3.0 MeVに100秒周期の変動が観測されているが、磁場・電場には同周期のULF波動は観測されていない。電子で観測される変動のタイミングが高エネルギーほど早く起きているのは、高いエネルギーの電子ほどドリフト速度が速く、加速領域から離れた位置にいた「あらせ」に早く到達できるためである(上図：© ERG science team)。

され、広範囲で放射線帯の電子を加速すると考えられてきましたが、この研究によってULF波動による放射線帯電子の加速はごく限られた局所的な領域で起きていることがわかりました。

ULF波動によって加速を受けた放射線帯の電子を、異なる経度で精度良く同時に観測した研究は過去に例がありません。本研究は、放射線帯電子を精度良く観測できる計測器を搭載したVan Allen Probesと「あらせ」の協調観測によって世界で初めて実現されたといえます。残念ながらVan Allen Probesは2019年に運用を終了しました。そのため、放射線帯の電子と磁場を精度良く計測できる衛星は「あらせ」のみとなりました。「あらせ」は、現在も順調に放射線帯電子と宇宙空間の磁場や電場の計測を続けています。「あらせ」が積み重ねた長期観測データを解析することによって、ULF波動による放射線帯電子の加速メカニズムの解明が期待されます。

【プレスリリース】

<https://www.kyutech.ac.jp/whats-new/press/entry-6994.html>
<https://www.isas.jaxa.jp/topics/002259.html>

二つの衛星の同時観測データを用いたプラズマ圏緯度方向の密度構造の解明

大阪電気通信大学 工学部基礎理工学科 尾花 由紀(おばな ゆき)

プラズマ圏は、ジオスペースの中に存在する、冷たい高密度のプラズマで満たされた領域です。電離層上層から流出した電子、陽子、ヘリウムイオン、酸素イオン等の荷電粒子が地球の磁場にとらえられ、プラズマの濃い領域が形成されています。プラズマ圏はジオスペースの中で最もエネルギーが低いプラズマ群であり、これ自体が宇宙機や宇宙飛行士の安全を脅かすものではありません。しかし存在比が高いため、ジオスペースの背景環境を決める役割を担っています。ジオスペースで最も高エネルギーで危険といわれる放射線帯粒子は、その生成・消失メカニズムにプラズマ波動が関与しているといわれており、その波動の発達や伝搬の条件を決めるのがプラズマ圏です。このようにジオスペースの複雑なプラズマ環境を理解するためには、低エネルギーのプラズマ圏の研究が欠かせません。

プラズマ圏の荷電粒子が電離層からどのような物理過程を経て供給されているのか知るためには、磁力線沿いのプラズマ密度分布を調べる必要があります。しかし、多くの衛星が赤道面付近を飛行するために、観測も赤道面付近に偏っており、磁力線沿いのプラズマ分布に関する情報は不足しています。

「あらせ」とVan Allen Probes衛星は、同じ磁力線上の異なる二点をほぼ同時に通過することがあり(共役イベントと呼びます)、Van Allen Probesは赤道付近を、「あらせ」は高緯度側の場所を飛行します(図1)。この時、それぞれの衛星の位置におけるプラズマ密度を比較すれば、磁力線沿いのプラズマ分布を調べることができるはずだ、と私たちは考えました。

図2(a)は2017年9月8日23:30 UT頃の「あらせ」(赤線)とVan Allen Probe-B(青線)の位置を示しています。数分の時間差でほぼ同一の磁力線を通過していることが分かります。図2(b)は「あらせ」、Van Allen Probe-Bそれぞれで観測された波動を使って算出した電子密度です。横軸はL値(磁力線が最も遠方を通過する点の地心距離を、地球半径を1としてあらわした数値)です。Lが3.3~3.4付近では電子密度が50~100個/cm³と低い値を示しているのに対し、Lが3.5以上の領域では、150~300個/cm³と高い値を示しています。これらはそれぞれ、プラズマ圏の外側の低密度領域(プラズマトラフ)と、プラズマ圏が細長く伸びた高密度領域(プリューム)をみ

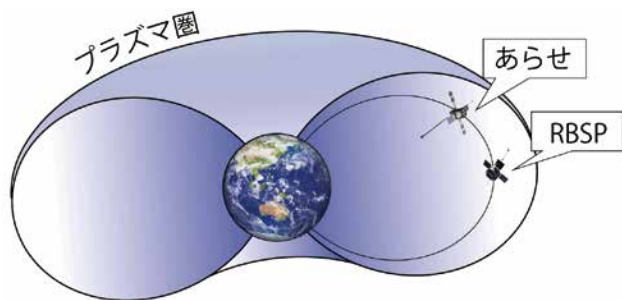


図1: 観測の概念図。同一の磁力線上の赤道付近をVan Allen Probes(RBSPのラベルで示してある)が、高緯度領域を「あらせ」が同時に飛行した時に、それぞれの場所の電子密度を比較することで、磁力線沿いの電子密度分布の情報が得られる。

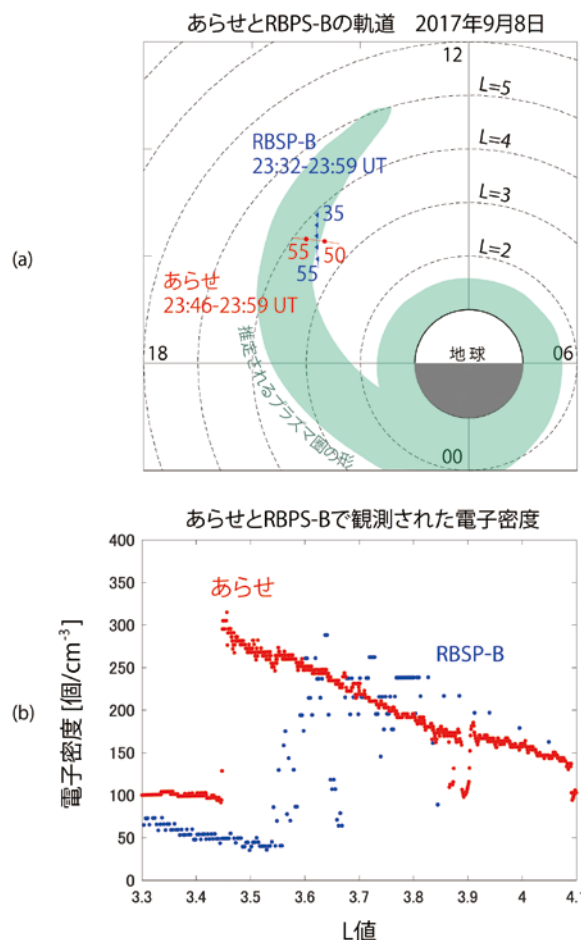


図2: (a) 2017年9月8日23:30 UT頃の「あらせ」(赤線)とVan Allen Probe-B(青線)の位置。L値-磁気地方時平面への投影で上方が太陽方向。緑色の領域は電子密度の観測結果から推定されるプラズマ圏の形状を示す。(b) 「あらせ」(赤点)とVan Allen Probe-B(青点)の位置における電子密度。横軸はL値(磁力線が最も遠方を通過する点の地心距離を、地球半径を1としてあらわした数値)。

ていると考えられます。図2(a)に、推定されるプラズマ圏の形状を緑色で示しましたので参考にしてください。

二つの衛星で電子密度を比較すると、低密度領域では密度に倍近くの差があります。この情報から、低密度領域は電子密度が磁力線沿いに急激に変化する「無衝突状態」に近い状態であることが分かりました。また高密度領域ではVan Allen Probe-Bの電子密度がやや拡散していて分かりにくいですが、密度の差がそれほど大きくありません。この情報から、高密度領域は電子密度の変化が小さい「拡散平衡状態」に近い状態であることが分かりました。

同様の解析をほかの共役イベントについても行い、磁気嵐の後に刻々と変化するプラズマ圏のさまざまな密度構造を明らかにしました。その中には磁気嵐によって磁束管中のプラズマが失われた後、元の状態に回復していく途中のプラズマ圏もありました。この時、赤道付近の方が高緯度よりも電子密度が高い、奇妙な現象もみつけられました(プラズマ圏の源は電離層なので、本来は地球近い高緯度側の方が高密度になります)。今後の更なる研究が必要とされています。

複数衛星・地上観測網の連携で捉えた、 EMIC波動で消えゆく放射線帯

京都大学 生存圏研究所 栗田 怜(くりた さとし)

地球周辺を周回する放射線帯の高エネルギー電子は、地磁気擾乱時にその数が減少・増大することが知られています。その原因は、磁気圏の中に偏って存在している、様々なプラズマ波動との相互作用の結果であると考えられています。磁気圏の朝側で励起される、コーラスと呼ばれる波動との相互作用によりエネルギーを獲得する過程が、放射線帯電子の生成メカニズムとして重要視されています。また、磁気圏の夕方側で励起される電磁イオンサイクロトロン (EMIC) 波動は、放射線帯に存在する高エネルギー電子を効率的に消失させる能力があることが知られています。

コーラス波動は、磁力線に対して右回りの偏波特性を持つ波動であり、同じく磁力線に対して右回りの旋回運動をする電子と、サイクロトロン共鳴によって効率的にエネルギーのやりとりを行います。一方で、EMIC波動は、磁力線に対して左回りの偏波特性を持ち、左回りの旋回運動をする陽子などのイオンと効率的にエネルギーのやりとりを行います。左回りの偏波特性を持つEMIC波動は、電子とは相互作用ができないように思われますが、電子のエネルギーが高く、左回り偏波のEMIC波動を追い抜く場合、電子にとっては右回り偏波にみえます。この「異常共鳴」という過程を経て、効率的にエネルギーのやりとりを行います。このEMIC波動との相互作用により、電子の運動が乱され、電子が大気へと突入し、磁気圏からは消滅してしまいます。これが、放射線帯の高エネルギー電子がEMIC波動によって消失する素過程の概要であり、1970年代に、この可能性が指摘されました。

EMIC波動による消失の可能性は理論的な側面からの研究が先行し、EMIC波動と出会った高エネルギー電子は、すぐに大気へと消失してしまうような高い消失率が提案されてきました。2000年代に入り、このEMIC波動による消失の観測的実証がなされ、この実証には、地上観測が有効活用されました。EMIC波動は、磁気圏の赤道域で励起された後、磁力線をつたって地上まで伝搬し、地上に設置された磁力計で、磁場の振動として観測されることが知られています。また、EMIC波動の励起に伴い、数keV程度の陽子が大気へと降り込み、その結果、特徴的な色のオーロラ(陽子オーロラ)が発光することが知られています。上述の実証の際には、地上の磁力計で磁場の振動がみられるのに伴って出現した陽子オーロラの上空に、放射線帯電子が同時に降り込んでいることが確認されたことが決め手となっています。

EMIC波動が放射線帯電子を消失させる、という点は実証されましたが、その効率の良さに関しては議論の余地があります。消失の効率の良さ、つまり、どれくらい早く放射線帯の電子が消えていくのか、を理解するためには、(1) EMIC波動の出現のタイミングを同定し、(2) EMIC波動の出現後、捕捉された電子数が減っていく様子を捉える必要があります。近年、EMIC波動の出現をモニターできる装置が設置された地上観測点が急速に発達しており、(1)のポイントを明らかにするために、この地上観測網の活用が不可欠です。また、(2)のポイントは、放射線帯を観測する複数の衛星が必須となります。2012年9月、NASAのVan Allen Probes 2機が、放射線帯を観測するために打ち上げられました。2016年12月に「あらせ」が打ち上げられたことにより、Van Allen Probesとあわせて3機体制で、放射線帯を観測することができるようになりました。これらの衛星が入れ替わりで放射線帯を通過することで、放射線帯電子の数の時間発展を、詳細に議論することが可能となりました。

図1に示すのは、「あらせ」と2機のVan Allen Probesで観測された、2.5 MeVの電子フラックスの動径方向分布です。Van Allen Probe-Aが放射線帯を通過した直後、地上観測網では、EMIC波動の出現が確認されました。その後、「あらせ」とVan Allen Probe-Bがそれぞれ放射線帯を通過し、放射線帯の電子数が減っていく様子を捉えています。この時、それぞれの衛星が放射線帯を通過した時間の差は、数分から数十分程度であり、EMIC波動によって放射線帯の電子数が短時間で変化したことを示しています。このような短い時間スケールでの変化は、従来の単一衛星による観測ではなし得なかったものです。また、地上観測網を有効に活用したことにより、EMIC波動の出現タイミングを正確に同定できたことも、重要なポイントです。理論的には、EMIC波動による消失の早さは電子のエネルギーに依存する、とされています。今後、さらなる調査で、EMIC波動による放射線帯電子変動について、理解を深めていきたいと考えています。

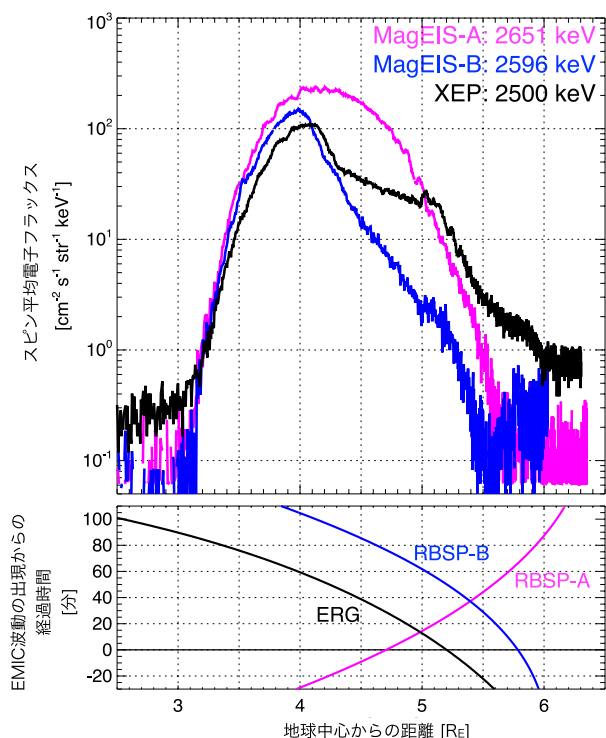


図1:「あらせ」(黒)、Van Allen Probe-A(マゼンタ)、Van Allen Probe-B(青)が観測した、放射線帯通過時の2.5 MeVの電子フラックスの動径方向分布。下: この時間帯における、「あらせ」とVan Allen Probesが通過した動径距離の時間発展の図。Van Allen Probe-Aが放射線帯の領域から離れていった後に、「あらせ」とVan Allen Probe-Bが放射線帯の中を通過していき、EMIC波動の出現に対応した放射線帯電子フラックスの減少を観測した。

超高エネルギー分析器(XEP)開発の現実

宇宙航空研究開発機構 経営推進部 東尾 奈々 (ひがしお なな)

私が担当していたXEPはERG(「あらせ」)の電子観測の中で一番高いエネルギーの電子(400 keV-20 MeV)を観測する役割をもつ装置です。JAXAに入って初めて経験した長い苦しい衛星開発において、楽しみにしていたシーンが2つありました。1つ目は自分の開発した装置が載ったロケットの打ち上げをみて感動すること。2つ目はXEPが初めて宇宙でONになったとき管制室で大勢の関係者と感動を分かちあうこと。一般の人がJAXA職員に対してとても想像しやすいシーンだと思います。しかし私の場合、現実とは全く異なるものでした。1つ目については、内之浦で打ち上げはみることができたものの、実際は感動して涙するどころか、もう直せないということを目の当たりにして緊張がより高まっただけでした。自分の関係する打ち上げは感動できないのだと悟りました。

2つ目に関しては、沢山ある「あらせ」の搭載観測機器のなかでも最後の方だったXEPの初めての立ち上げ運用の時、管制室には私を含めて3名だけというとてもさみしい状況でした。初めてONした時は感動したものの、関係者との想像していた感動のハグや歓喜もなく、高電圧装置を3つ抱えていたXEPは、淡々と長時間にも及ぶ苦行のような昇圧作業を続

け、長時間の作業にくたくたになって帰宅、というこれもまた想像と違うものでした。そして、装置が稼働し始めると今度は畳みかけるように取得データの健全性確認の作業に追われました。初めてXEPのデータを図にし、放射線帯がしっかりと確認できた瞬間は、安堵で疲れが一気に吹き飛んだのを鮮明に覚えています。「放射線帯があるのは分かっている観測できて当たり前。科学的にどんな新しいことが分かったのか」と成果を急がれがちですが、装置開発をする人としては決して当たり前は当たり前ではなく、感動するものだと思えました。また、初めての図をみてプロジェクトサイエンティストの三好先生と一緒に感動し、褒めてくださったことは、XEPにとっても自信をもてるきっかけとなる思い出です。XEPが引き続き科学者の皆さんの役に立てば本望です。

XEPを支えてくれた仲間たち



Collaboration Between the Arase and Van Allen Probe (NASA) Mission Teams

Space Science Applications Laboratory, The Aerospace Corporation
Seth Claudepierre and Mark Looper (セス クロードピエール/マーク ルーパー)

Determining the physical mechanisms that produce electron flux enhancements in the Earth's radiation belts is one of the most important unresolved questions in inner magnetospheric physics. This was emphasized as the primary mission-level science question for both the Arase and Van Allen Probes missions. To address these types of questions and to enable joint science between the two missions, it is imperative that the electron measurements be carefully cross calibrated with one another to ensure a high degree of confidence in both datasets. This involves careful consideration of the particle instruments' behavior during on-orbit operation and detailed computer modeling of the instruments' characteristics.

The MagEIS (Van Allen Probes) and HEP/XEP (Arase) instrument teams collaborated closely since the launch of

Arase in 2017 to perform such work. This was first achieved through informal gatherings at Fall AGU meetings between the Arase and Van Allen Probes energetic particle teams (Figure 1). These meetings, where instrument cross calibrations between the two missions were discussed in great detail, were beneficial to both groups and have had a lasting impact on the quality of the energetic particle measurements from both missions. These activities also led to coordinated science campaigns to improve cross calibrations and to two week-long visits by the authors to Nagoya University to further collaborate and dig deeper into the intercalibration questions. Importantly, the results of this work have enabled a number of important scientific studies that would not have been possible using the particle data only from one mission alone. Unlocking the mysteries of the Earth's radiation belt is truly an international effort and we are forever grateful to the Arase team for their hard work on these difficult problems. Our collaborative efforts and the relationships established greatly enhanced the scientific return from both missions.

Figure 1. Members of the MagEIS and HEP/XEP instrument teams engaged in a lively discussion at the 2017 Fall AGU Meeting.



プラズマ不安定性で励起する地磁気脈動の 地上・衛星同時観測

東京大学大学院 理学系研究科 山本 和弘(やまもと かずひろ)

皆さんは、方位磁石が地球の作る磁場(地磁気)の方向を向いていることを知っているかと思います。それでは、その地磁気の向きがゆらゆら波打つことがあるのはご存じでしょうか。地磁気がどのように変化し、その原因は何なのかについて、古くから多くの科学者が観測や研究を続けてきました。数秒～数分の周期を持った地磁気の微小な振動(地磁気脈動)が初めて注目されたのは19世紀のことです。当時は、地上に設置された磁力計での地磁気観測が唯一の観測データでした。1960年頃に人工衛星によるプラズマ観測が始まると、地磁気脈動を含めた様々な現象と、地球周辺のプラズマや太陽風プラズマとの関係が解明されるようになりました。そのため、地磁気は磁気圏プラズマ環境を知るための地上の窓口と言えるでしょう。地磁気脈動の多くでは、プラズマの振る舞いを流体とみなす磁気流体力学(MHD)を適用することで、太陽風によって磁気圏が揺さぶられたときの固有振動がみえていたことが分かりました。一方で、内部磁気圏(地球中心から地球半径の約10倍以内)にある、リングカレントと呼ばれる高エネルギーイオンが集中している領域では、イオン分布が引き起こすプラズマ不安定性によって地磁気脈動が発生している可能性が指摘されました。

本来、地球の内部磁気圏は磁気圧に対してプラズマ圧が大きくなく、MHD的なプラズマ不安定性が発生しにくい環境です。それでは、MHD不安定の代わりにプラズマの不安定性を引き起こしているものは何でしょうか？地磁気脈動が生じるメカニズムとしては、MHD理論では無視されていたイオンの運動論的效果の一つである、drift-bounce共鳴が注目されてきました。粒子のdrift運動でドップラーシフトしてみえる電磁場変動がbounce運動の周期と一致すると、粒子と電磁場変動が同期してdrift-bounce共鳴が起こります。また、特殊な共鳴条件として、粒子のdrift速度と電磁場変動の位相速度($v_{ph} = \omega/k$, ω は角振動数、 k は波数)が一致するとdrift共鳴が起こります。このことから、drift-bounce共鳴を検証する際は、地磁気脈動の波数を求めなければならないという課題がありました。

私たちの研究では、幸運なことに、プラズマ不安定性が起きやすい磁気赤道で「あらせ」が地磁気脈動を観測した際に、地上の観測点でも同様の地磁気脈動を捉えた事例がありまし

た(参考文献1)。衛星のデータからは、地磁気脈動が発生しているその場のイオンの詳細な分布を得ることができ、地上の複数観測点のデータからは地磁気脈動の東西波数を推定することができたのです。図1(a)に、「あらせ」が観測した約110 keV(脚注1)の高エネルギープロトンの位相空間密度を示します。青線と赤線はそれぞれ内側(地球方向)と外側(反地球方向)からやってきたプロトンの位相空間密度を表しており、黒線は外側から内側を差し引いたものをプロットしています。ちょうど内側(地球方向)への勾配が強くなった時間帯に、図1(b)にみられる地磁気脈動が発生していることが分かります。drift-bounce共鳴の理論では、地磁気脈動のエネルギー源として1)イオンの速度分布による不安定性、2)イオンの空間勾配による不安定性の二つを候補として挙げることができますが、この事例ではイオンの空間勾配によって地磁気脈動が発生したと考えられます。また、図1(c)には、「あらせ」の位置から磁力線でつながっているフィンランドの地磁気観測点(赤線:Sodankylä, 黒線:Muonio)の磁場データを示しています。SodankyläとMuonioは緯度がほぼ同じですが、経度が2度ほど離れた地点に位置しており、地磁気脈動の東西波数を推定するのに適していました。SodankyläとMuonioで、脈動の位相は90度程度ずれているため、地磁気脈動が細かい東西方向の空間構造を持っていることが分かります。地上の観測から得られた東西波数を110 keVのプロトンのdrift共鳴に当てはめてみると、共鳴条件を非常によく満たすことが分かりました。以上の衛星と地上の観測から、プラズマ不安定によって地磁気脈動が生じる様子を明らかにすることができました。すると、次のような疑問が新たに生じてきます。どのような過程を経て、内部磁気圏でイオンの不安定な分布が形成されるのでしょうか？これを解明するには、磁気圏全体での粒子分布をみていく必要があります。今後は、「あらせ」とVan Allen Probesとの共同観測や、磁気圏を模した数値シミュレーションなどを通じて、グローバルな描像を明らかにしたいと考えています。

参考文献1) Yamamoto, K., Nosé, M., Kasahara, S., Yokota, S., Keika, K., Matsuoka, A., et al. (2018). Giant pulsations excited by a steep earthward gradient of proton phase space density: Arase observation. *Geophysical Research Letters*, 45, 6773–6781. <https://doi.org/10.1029/2018GL078293>

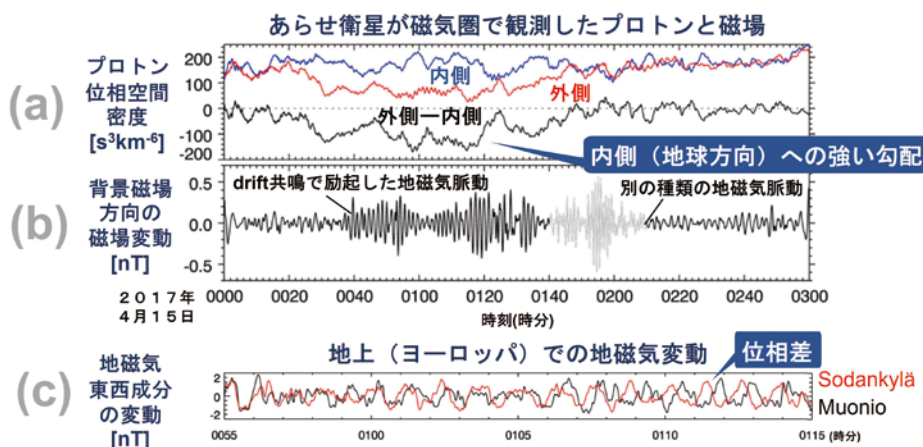


図1: (a)「あらせ」が観測したプロトン(約110 keV)の位相空間密度とその地球-反地球方向の勾配。(b)「あらせ」が観測した背景磁場方向の磁場変動。内側(地球方向)への勾配が強い時間帯で地磁気脈動が観測されています。(c)「あらせ」の位置の磁力線につながる地上観測点での地磁気東西成分の変動(赤線:Sodankylä, 青線:Muonio)。位相差が大きいほど、地磁気脈動の波数が大きいことを意味します。

「あらせ」による分子イオン観測： 電離大気流出のなぞに迫る

東京大学大学院 理学系研究科 関 華奈子(せき かなこ)

私たちに最も身近な宇宙、地球磁場の影響がおよぶ宇宙空間である磁気圏は、荷電粒子が飛び交うプラズマの世界です。地表付近では中性の酸素分子や窒素分子が主成分の地球大気ですが、高度90kmよりも上空になると太陽からのX線や極端紫外線放射により電離され、高度とともに電離度は上がります。こうした電離大気は高度250km付近に密度の極大を持ち、電離圏と呼ばれます。一方で、惑星間空間には、太陽大気の一部が常に吹き出しており、電子と陽子が主成分の平均400km/sという高速なプラズマの流れ、太陽風が吹いています。この太陽風が固有磁場を持つ惑星に吹きつけると磁気圏が形成され、磁気圏内には太陽起源と地球起源のプラズマの両方が存在しています。この2つの起源を持つプラズマの割合は、宇宙環境の荒れ具合によって大きく変動し、静穏時は太陽起源のプラズマが支配的な地球磁気圏ですが、宇宙環境が非常に荒れた状態である大磁気嵐時には、地球起源プラズマの寄与が各段に上がることが、「あらせ」(ERG)の打ち上げ前から指摘されてきました。その原因は、磁気嵐により地球からの電離大気流出が大きく増加するからですが、そのメカニズムはよくわかっていません。

私たちの住む地球が、海を持ち、快適な気温を保っていられるのは、ちょうどよい気圧と組成を持つ大気があるからです。広く宇宙に目を向けると、系外惑星がたくさんみつっていますが、大気を持続けることができるかを判断する重要な要素に、主星からの放射や星風(太陽の場合は太陽風)によって駆動される大気流出が激し過ぎないことが挙げられます。たとえハビタブル(生命生存可能)ゾーンと呼ばれる領域に地球サイズの系外惑星があったとしても、大気がなければ液体の水を安定に表層に保持することはできず、地球のような海を持つハビタブル惑星にはならないからです。地球程度の重力を持ち、強い固有磁場を持つ惑星の場合、酸素や窒素などの比較的重い大気成分の流出は、主に極域からの電離大気流出の形で起こります。すなわち、磁気嵐時の地球からの電離大気流出メカニズムを理解することは、固有磁場を持つ地球型惑星の大気進化を考える上でも重要な知見を与えます。

観測的には、磁気嵐時に大きく増えることが知られている地球起源プラズマの主成分は酸素原子イオン(O^+)です。 O^+ は電離圏の密度極大高度付近の主成分であり、これまでに多くの科学衛星により地球大気起源プラズマのトレーサーとして観測されてきました。一方で、より低高度の電離圏の主成分は O_2^+ や NO^+ のような分子イオンです。しかし、原子イオンに比べて重い分子イオンは、大気流出が通常始まると考えられている高度400kmより上には殆ど存在しません。ところが、非常に宇宙環境が荒れている大磁気嵐時には、磁気圏にも分子イオンが存在することが、過去の衛星観測で数例報告されてきました。このことは、大磁気嵐時には、より地球大気の深いところ、低高度から大気流出が起こっていることを示唆していますが、微量成分である分子イオンの計測の難しさも相まって、その頻度や流出メカニズムは、長年なぞのままでした。

磁気圏における分子イオンの観測頻度を知ることは、低高度

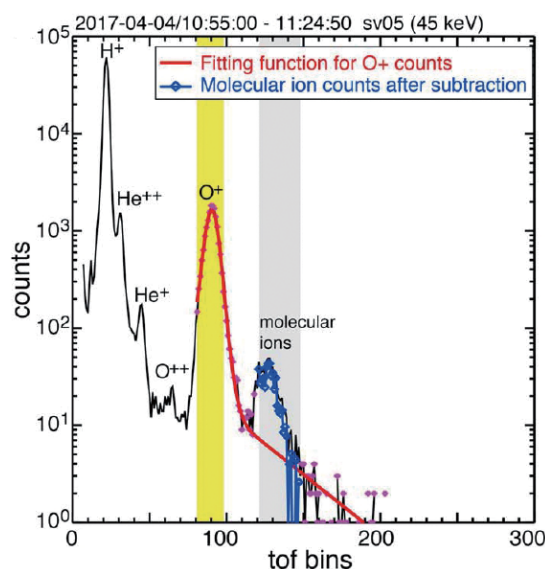


図:「あらせ」が観測した45 keVのイオンの飛行時間(TOF) スペクトル分布。2017年4月4日の小規模な宇宙嵐開始時の30分間のスペクトル。宇宙嵐開始前にみられなかった分子イオンが、宇宙嵐開始時に検出された。

電離圏からの大気流出の効率のよさの指標になります。今回、私たちは「あらせ」搭載の2つのイオン観測機器MEPiとLEPiの観測を用いて、磁気圏での分子イオンの出現頻度を明らかにすることに挑戦しました。分子イオンを確実に計測するためには、TOFモードという特殊な観測データが必要です。この観測は、同じエネルギーの粒子だけを取り出した場合、質量により速度が違ふことを利用して、到達時間の違いから質量を分別するもので、イオン種毎に検出器に到達する時間が異なる様子を示すデータから、分子イオンの存在を確実に同定することができます。このようなTOFモード観測を長期間実施することにより、「あらせ」は、磁気圏にはこれまで思われていたよりもずっと高頻度に分子イオンが存在すること(図を参照)を明らかにしました。このことは、大磁気嵐時だけでなく、弱い磁気嵐時にも、分子イオンが頻繁に磁気圏に流出していることを意味しており、地球からの電離大気流出メカニズムの再考を迫っています[Seki et al., GRL, 2019]。

なぜ磁気嵐時には頻繁に低高度電離圏から大気流出が起こるのでしょうか?そのメカニズムを調べるために、電離圏を測定する非干渉散乱レーダー EISCATと「あらせ」の同時観測を実施しました。その結果、分子イオンが磁気圏に存在しているのと同時期に、磁気嵐時の特殊な電場によるジュール加熱が、低高度からのイオン上昇流を引き起こすことが示されました[Takada et al., JGR, 2021]。さらに、長期間のEISCAT観測データ解析を実施した結果、磁気嵐時には夜側電離圏への電子の降り込みが低高度からのイオン上昇流を引き起こし、分子イオンをより上空に持ち上げることで大気流出に寄与していることもわかりつつあります。今後、EISCAT-3Dという次世代レーダーによる電離圏観測も計画されており、「あらせ」と地上レーダー観測とのさらなる連携により、新たな地球大気流出の描像が明らかになることが期待されています。

ジオスペースにおける O^+ イオン高密度領域の形成について

名古屋大学 宇宙地球環境研究所 能勢 正仁(のせ まさひと)

ジオスペースにおけるプラズマは、時として、 O^+ イオンの密度が急激に増加し、イオン組成が大きく変わることがあります。背景プラズマのイオン組成は、その場所で生起する数多くの電磁気現象の性質を支配するパラメータであるため、その変化原因や変化領域を明らかにすることが極めて重要です。1980年代後半以降、高度20000 km ~ 25000 kmあたり(GPS衛星が飛翔する高度)の朝側を中心とする「 O^+ イオン高密度領域」の存在が指摘されてきました。その生成機構については、リングカレント高エネルギー粒子とプラズマ圏低エネルギー電子の相互作用の結果、熱エネルギーが電離層に輸送され、それによって電離層の O^+ イオンがジオスペースに漏れ出してくるというアイデアが提唱されてきましたが、このアイデアでは、 O^+ イオン高密度領域が朝側に集中する理由を説明できないため、新たな観測やアイデアの提唱が望まれていました。

「あらせ」の観測により、サブストームが起こった時に、真夜中のオーロラ帯から非常に多くの低エネルギー O^+ イオン (~10 eV) がジオスペースに向かって流れ出していることが明らかになりました。図1は、その一例を示しています。Wp指数はサブストームの発生を示す指数で、赤矢印で示したように連続して3回サブストームが起こっていることが分かります。この時、高度約30000 kmのほぼ真夜中辺りを飛翔していた「あらせ」は、サブストームに伴って磁場双極子化(ΔH の増加)が発生していることを観測していました。この磁場双極子

化に伴って、 O^+ イオンの増加が現れており、そのエネルギーは1 keVくらいから始まって10 eV辺りまでゆっくりと変化していました。これは、オーロラ帯の電離層から「あらせ」の位置まで O^+ イオンが磁力線に沿って飛んでくる間に、イオンの速度によって到達時間が変わっていくという速度フィルター効果によるものと考えられます。一方、 H^+ イオンについてはあまり明確な増加はみられませんでした。すなわち、サブストームが起こるたびに、 O^+ イオンのみが選択的に電離層からジオスペースに供給されていることが示されています。このような例は、「あらせ」が夜半球を飛翔している14か月分のデータから55例みつかっており、一般的に起こっている現象と考えられます。さらに、計算機シミュレーションを実施することにより、ジオスペースに供給されたこれらの O^+ イオンはゆっくりと朝側に動いていき、その空間分布は、これまでに報告されてきたような O^+ イオン高密度領域の形状と非常に似ていることが明らかになりました。これは、電離層から出てきた O^+ イオンが低エネルギーであるため、共回転電場による西向きのドリフト効果が強く現れ、真夜中から西へ向かって朝側に移動することによって考えられます。ジオスペースにおける O^+ イオン高密度領域分布の朝夕非対称性をうまく説明することのできる、この新たな形成機構の提唱は、「あらせ」の観測データ解析と計算機シミュレーションの両面から可能となったものです。

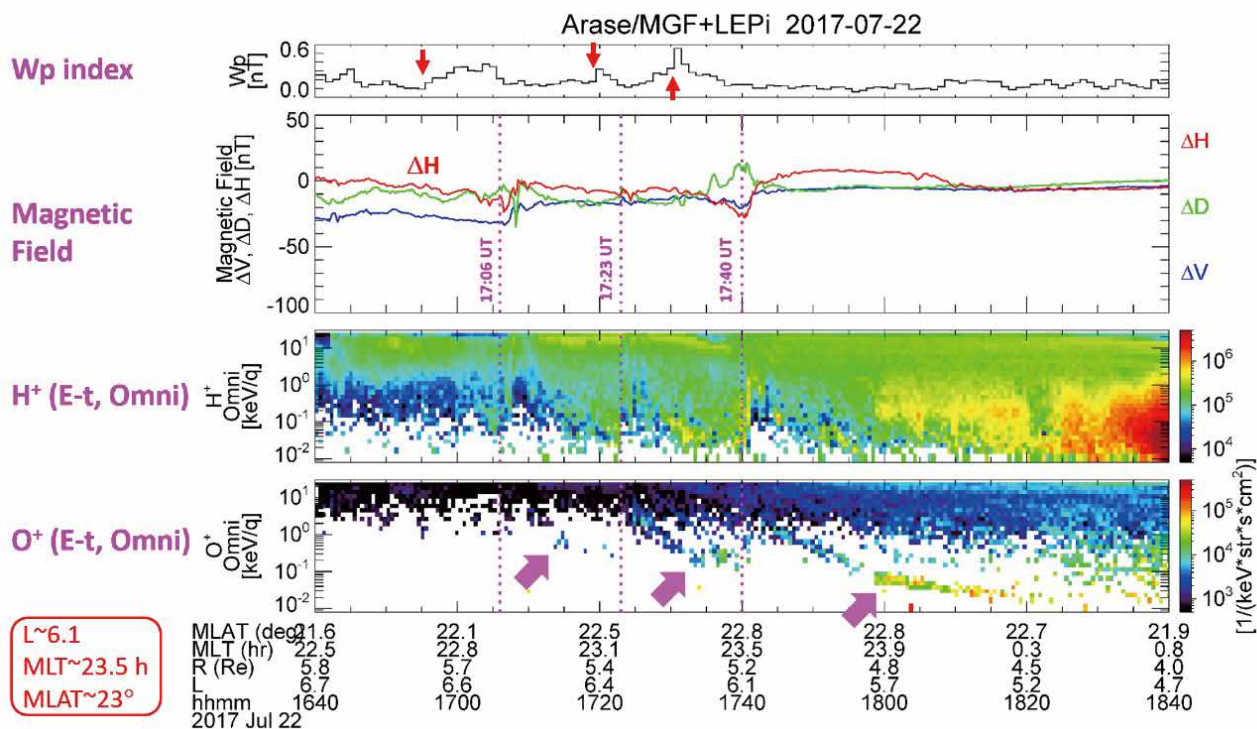


図1: サブストームの発生に伴って真夜中のオーロラ帯からジオスペースに流れ出した低エネルギー O^+ イオンの観測例。上から順に、サブストームの発生を示すWp指数、「あらせ」が観測した磁場変動、 H^+ イオンフラックス、 O^+ イオンフラックスを表示している。サブストーム(Wp指数の増加)が連続して3回発生した時に、「あらせ」は磁場双極子化(ΔH の増加)と1 keVから10 eVあたりまでエネルギーが変化する O^+ イオンフラックスの増加を観測していた。

The Change in the Plasma Sheet Source During a Large Storm

Physics and Space Science Center, University of New Hampshire* Lynn Kistler (リンキスラー)

Recent simulations [Glocer et al., 2020] have indicated that the source of the nightside plasmasheet can change substantially from solar wind to the ionospheric as a storm develops. The source of the plasma sheet can be determined from the composition. While both the solar wind and ionospheric plasma sources contribute significant H^+ , the solar wind minor species consist of high charge state ions such as He^{++} and O^{+6} , while the ionospheric heavy ions are singly charged. Both Arase and Magnetospheric Multiscale mission (MMS) are able to measure He^{++} , so He^{++} can be used as a solar wind tracer. Comparing the He^{++}/H^+ ratio in the solar wind with that in the plasma sheet allows us to determine the fraction of the H^+ that comes from the ionosphere.

During a storm on Sept 7-9, 2017, the Arase apogee was on the nightside, while MMS was coming inbound through the nightside plasma sheet pre-storm, and outbound towards the dawnside magnetosheath during the recovery phase. Figure 1 summarizes the event. The top two panels show the IMF B_z and the SYM-H index. There are two time periods when IMF B_z turns strongly southward, indicated with orange vertical lines, and both time periods correspond with a drop in the Sym-H index, indicating storm main phase time periods.

The next three panels show the Arase H^+ energy spectra from MEP-i and LEP-i, and the H^+ and He^{++} densities. These are followed by the MMS/HPCA H^+ energy spectrum and H^+ and He^{++} densities. The bottom panel compares the He^{++}/H^+ ratio at MMS and Arase with that measured in the solar wind

by Wind/SWE. Prior to the first main phase, the agreement between the three spacecraft is very good, indicating a predominantly solar wind source for the plasma sheet. During the first storm main phase, when B_z is negative, the He^{++}/H^+ measured by Arase is significantly lower than that in the solar wind, indicating a strong ionospheric contribution to the H^+ . During the recovery phase, MMS moves into the magnetosheath, and so measures a solar wind population, but Arase shows that the plasma sheet has transitioned back to a predominantly solar wind source. During the second southward B_z time period, Arase measures two additional time periods with a strong ionospheric contribution.

These measurements have shown that during a storm, the plasma sheet source changes dramatically from predominantly solar wind to predominantly ionospheric, in agreement with the Glocer et al. [2020] simulations. Arase plays a key role in this study by providing the plasma sheet composition during the storm main phases, when MMS is off or in the magnetosheath.

Reference:

Glocer, A., Welling, D., Chappell, C. R., Toth, G., Fok, M.-C., Komar, C., et al. (2020). A Case Study on the Origin of Near-Earth Plasma. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 125(1), e28205. <http://doi.org/10.1029/2020JA028205>

* also at Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University

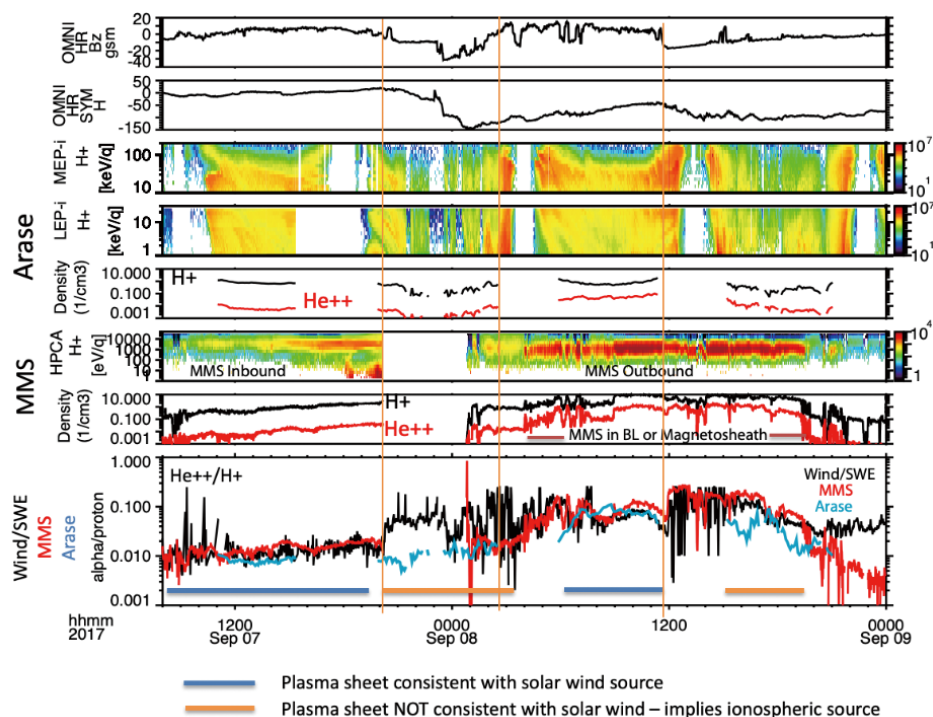


Figure 1. Data during the Sept 7-8, 2017 geomagnetic storm.

ノイズとの戦いと共存

京都大学 生存圏研究所 小嶋 浩嗣(こじま ひろつぐ)

「あらせ」のように、電磁場を捉える観測器が搭載される場合は、厳しいEMC基準が設定されます。EMC(ElectroMagnetic Compatibility)は、「他の機器の性能劣化や誤動作を起こすノイズを出さないで下さいね」というものです。本来、EMCは、「ノイズに対して強くする」という、逆の項目もあります。ただ科学衛星のEMCの場合、観測対象は微弱な自然現象であることが多く、結局、「ノイズを出さないようにする」、という立場でEMCを考えることが多いです。「あらせ」でも相当な時間がEMCに費やされました。なぜEMCに時間がかかるかというと、搭載機器一つ一つを、宇宙研の磁気シールドルーム内に持ち込んで、ノイズを測定するからです(EMもFMも)。単体EMCと呼ぶこの試験では、「試験系設定」、「供試体の動作確認」、「供試体offで背景ノイズの測定」、「供試体からのノイズ測定」、「高いレベルのノイズがみつかった場合の原因究明と対策」、という作業を行います。測定を担当するのはJAXAのみなさんと、ノイズの影響を一番受ける、プラズマ波動・磁場観測チームです。一つの機器に3~7日かかりっきりになります。合計すると、チーム担当者は、自分の機器の試験をしているより、EMC試験をしている時間の方が長いのではな

いかと思います。上のプロセスの中で一番時間がかかるのが、「高いレベルのノイズがみつかった場合の原因究明と対策」です。特に対策は、担当メーカーの方々と議論して軽減方法を探ります。EMCは、多くの人たちの時間と体力と予算を消耗しながら進んでいきますが、私としては、「搭載機器を一つ一つ」みられることと、対策を練る段階で、それぞれの機器の仕組みや機能を知ることができて、とても勉強になったと思っています。

対策と測定を繰り返すEMCですが、いくつかのノイズは残ってしまいます。観測データをみると明らかに、ノイズとみられるスペクトルが現れています。中には、宇宙に行ってからみつけるノイズもあります。このようなノイズは結局、原因はわからないまま共存、ということになります。1992年のGEOTAILから本格的に始まった科学衛星EMCですが、それ以後の衛星で繰り返し対策や設計方針の改訂が行われ、「あらせ」ではEMC試験で発見されるノイズはかなり減ったと思います。EMC技術は衛星に限ったものではなく奥が深いです。科学衛星においても今後ますます技術的に進歩していくのではないかと期待しているところです。

デジタルトランスフォーメーションと「あらせ」

金沢大学 学術メディア創成センター 笠原 禎也(かさらは よしや)

「あらせ」搭載のプラズマ波動・電場観測器(PWE)は、宇宙空間の電磁場の振動(波)を捉え、観測結果を地上伝送します。PWEは常時、毎秒約6メガビット(6×10^6 個)のデータを生成しており、これをさばくために2つの専用CPU上で計14個の「アプリ」が、相互連携しながら働いています。動画アプリでおなじみのデータ圧縮や、ドライブレコーダーのように大振幅の波を検知して前後の時刻のデータを詳細記録するトリガ機能など種々の機能が搭載され、スマホアプリと同様、衛星打上げ後もアップデートを重ねてPWEは進化しました。

観測領域の放射線環境は非常に厳しく、CPUとPWE各コンポーネント間の通信ラインのリンク切れやメモリの1bitエラー等が頻発し、運用初期は深夜でも携帯電話に緊急連絡が来ることが茶飯事でした。PWE班は主要メンバーが金沢・仙台・京都・名古屋・富山など各地に分散し、即座に相模原に駆け付けられないため、宇宙研とWeb会議ツールで音声・映像を共有しつつ、復帰手順を打つ臨時運用をたびたび実施させてもらいました。

PWEの観測データは、常時取得する通常データと、衛星

上のデータレコーダーにいったん蓄積し、選別したデータだけを地上に下ろすバーストデータがあります。バーストデータは、毎週のWeb会議で、先行して地上伝送した通常データを1週間前までさかのぼって確認し、興味深い観測イベントを厳選してから次週に地上伝送します。海外出張を含め、メンバーが世界中のどこにいても開催する毎週のWeb会議が多くの科学成果に結びつきました。

新型コロナ感染症拡大のさなかでも、「あらせ」が変わりなく運用できるのは、このように当初から積極的にデジタル技術を採用してきた賜物でしょう。とはいえ、宇宙研に何日も引きこもって行った動作検証試験、打上げ後の機器立上げ・アンテナ伸展など、声をかけあって手順を進めた日々が懐かしく思い出されます。作業終了後に、みんなで成功を分かち合うあの雰囲気は、やはり対面でなければ味わえません。コロナ禍が早く収束し、「あらせ」打上げ6周年をみんなで盛大にお祝いしたいと心から願っております。

2017年3月、奇跡の衛星・地上同時観測

電気通信大学大学院 情報理工学研究科 細川 敬祐 (ほそかわ けいすけ)

極地方の夜空を彩るオーロラは、高さ100 km付近に存在する酸素や窒素などの大気が発光する現象です。オーロラが光っている場所には、ジオスペースから地球の磁気に関連して高いエネルギーを持った電子(オーロラ電子)が落ちてきています。オーロラは、渦巻いたり、脈を打ったり、多種多様な形態・変化を示しますが、それらの変動を支配する物理過程を理解するためには、オーロラ電子の巣であるジオスペースの直接探査が不可欠です。特に、衛星によってジオスペースを直接探査しながら、対応する地上の領域をカメラで同時に撮像することが重要になります。しかし、衛星観測と地上観測のそれぞれを専門とする研究者が、密に連携して同時観測を立案・実施することは、あまり行われてきませんでした。私たちは、「あらせ」が打ち上げられる数年前から、世界でもあまり例がない衛星・地上連携観測を行うための準備を進めてきました。オールジャパンの体制で、北欧およびアラスカに計8式の高速撮像カメラを設置し、「あらせ」の探査領域と磁力線で繋がった場所を広くカバーするオーロラ観測網をつくりあげました。しかし、「あらせ」がカメラの観測視野の中を通過する機会はそれほど多い訳ではありません。また、地上からのオーロラ観測には、観測の成否が天候に左右されるという大きなハンデもあります。良い同時観測を行うためには、数年間の「しんぼう」が必要になることを覚悟しながら、衛星の打ち上げを迎えました。「あらせ」が定常観測を開始したのは2017年3月の終わり頃でした。北極では、4月に入ると夜はどんどん短くなり、オーロラ観測を実施できる時間が急速に減っていきます。最初のシーズンで残されたチャンスは3月末の10日間、このチャンスを逃せば、翌年の冬まで同時観測の機会を待たなければなりません。その10日間も終わりにさしかかった頃、千載一遇のチャンスが巡ってきました。まず、3月29日に北欧のカメラの観測視野内を「あらせ」が通過しているときに、活動的なオーロラが数時間にわたって観測されました。その翌日にはアラスカ、さらにその翌日には再び北欧において、「あらせ」との同時観測を達成することができました。わずか10日間のチャンスの最後の3晩に良い観測事例が得られたのです。図1に、オーロラの時間変化(白黒のプロット)と、同時刻に「あらせ」によって観測された「コーラス」と呼

ばれる電磁波のデータ(カラーのプロット)を示します。左側の北欧の例では、数秒の周期で明滅をくりかえす「脈動オーロラ」とコーラス波の強度が1対1に対応していることがみて取れます¹。これは、コーラス波動によって電子がリズミカルに地球大気にたたき落とされ、そのリズムがオーロラの「脈打ち」をつくりだしていることを示しています。右側のアラスカの事例は、秒以下の時間スケールにズームインして両者の対応をみたものですが、オーロラの「またたき」がコーラス波動の「さえざり」によって完璧にコントロールされていることが分かります。この他にも、3月末の奇跡の3日間に得られたデータによって、脈動オーロラに関する様々な実証的研究を行うことができています²⁻⁷。「あらせ」と地上の協調観測は、国際連携の枠組みに発展する形で継続され、さらに多くの同時観測事例が積み上がっています。ジオスペースと地球大気との「目ではみえない繋がり」を、これらの「奇跡の同時観測」によってさらに詳しく調べていければと考えています。

関連論文：

1. Hosokawa, K., et al., Scientific Reports, 10, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59642-8>, 2020
2. Ozaki, M., et al., Geophysical Research Letters, 45, <https://doi.org/10.1029/2018GL079812>, 2018
3. Hosokawa, K., et al., Journal of Geophysical Research, 126, <https://doi.org/10.1029/2020JA028838>, 2021
4. Fukuzawa, M., et al., Geophysical Research Letters, 45, <https://doi.org/10.1029/2018GL080145>, 2018
5. Ozaki, M., et al., Nature Communications, 10, <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07996-z>, 2019
6. Kawamura, S., et al., Journal of Geophysical Research, 124, <https://doi.org/10.1029/2019JA026496>, 2019
7. Miyoshi, Y., et al., Scientific Reports, 10, <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92611-3>, 2021

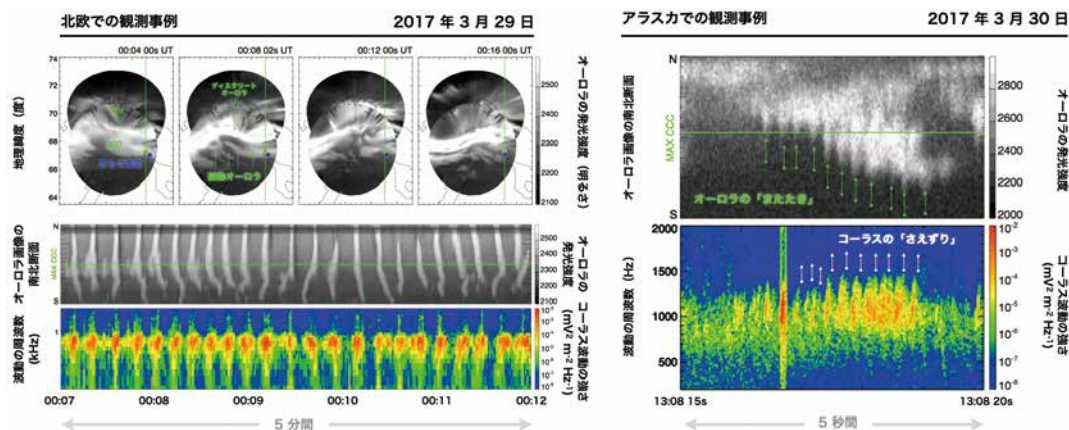
プレスリリース:

宇宙の電磁波の「さえざり」がオーロラの「またたき」を制御(電気通信大学)

https://www.uec.ac.jp/about/publicity/news_release/pdf/20200305.pdf

動画:

脈動オーロラの主脈動とコーラスバーストの対応関係を示した動画

https://static-content.springer.com/esm/art%3A10.1038%2F541598-020-59642-8/MediaObjects/41598_2020_59642_MOESM3_ESM.mov


図：北欧(左)、アラスカ(右)における脈動オーロラとコーラス波動の同時観測事例、オーロラ画像の南北断面を時系列にした白黒の図はオーロラの脈打ちを示す。カラーの図で示されているコーラス波動の強度と1対1の対応があることが分かる。

一瞬だけ光る少し珍しいオーロラ☆

金沢大学 理工研究域電子情報通信学系 尾崎 光紀(おざき みつり)

オーロラは、カーテン状や雲状などさまざまな形態があり、発光時間も数秒から数時間輝くものなど多様な出現時間を示します。アラスカでは、わずか数百ミリ秒しか発光しない雲状のフラッシュオーロラが観測されていました。フラッシュオーロラは、1970年代よりジオスペースの孤立コーラス波動と高エネルギー電子のピッチ角散乱によって生じていると予想されていました。ここで、孤立コーラス波動は、数百ミリ秒の存続時間を示し、背景磁場の約1%に到達することもあるほど大振幅かつ周波数変動を伴う非線形な電磁波です。このため、孤立コーラス波動とフラッシュオーロラの対応を明らかにすることができれば、非線形な波動粒子相互作用過程の瞬間(ミリ秒オーダー)をオーロラとして可視化でき、ジオスペースにおける高エネルギープラズマの瞬時的な生成と消失の理解に大きく貢献します。これを実現するには、地上ネットワーク観測と協力し(国際協調により、世界各地に地上ネットワーク観測が構築される様子は、<https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/dimr/PWING/>の観測日よりからご覧ください)、フラッシュオーロラと同じ磁力線で結ばれるジオスペースで、孤立コーラス波動の一つ一つの波束を分解する高時間分解能・高い電磁界検出感度かつ電磁的にクリーンな衛星環境での、その場観測が必要です。「あらせ」は、「あけぼの」、「GEOTAIL」に搭載されたプラズマ波動観測装置開発より脈々と築き上げられてきたEMC対策技術(コラム「ノイズとの戦いと共存」をご参照ください)の集大成として、世界トップクラスのクリーンな電磁環境を有する科学衛星です。さらに、機上デジタル処理による高時間分解能の膨大な観測データを限られた容量に抑えるデータ圧縮技術などにより、定常観測開始直後の2017年3月30日に、「あらせ」は離散的な孤立コーラス波動を捉えました。同時に、「あらせ」と3万km以上離れた磁力線でつながるアラスカ付近では、まるでストロボ発光のようなフラッシュオーロラを検出していました。こうして、フラッシュオーロラの数百ミリ秒という短い出現時間は、最新の「あらせ」と地上ネットワーク観測との協調観測(図1参照)により解明されました^{*1,2}。

しかし、なぜフラッシュオーロラがちぎれた雲状の形状を

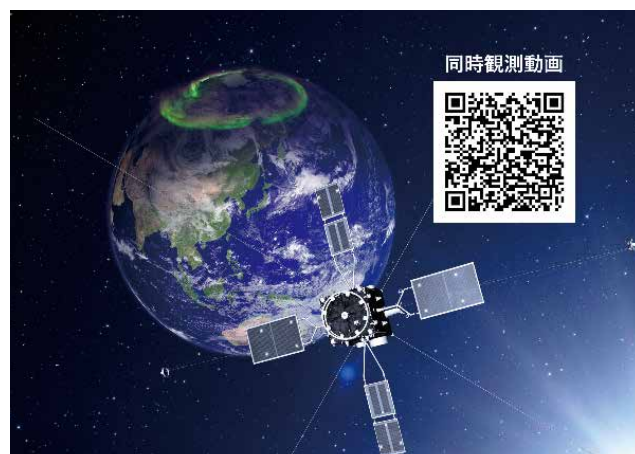


図1:「あらせ」と地上ネットワーク観測による協調観測イメージ(QRコードより、孤立コーラス波動とフラッシュオーロラの同時観測例をご覧ください)
© ERG science team



図2:フラッシュオーロラの数値計算イメージ
(QRコードより、解説動画をご覧ください)

示すのかは、「あらせ」と地上観測だけでは分かりませんでした。これを理解するには、孤立コーラス波動の発生域からの伝搬過程が重要と考え、我々は磁気圏での孤立コーラス波動の詳細な伝搬解析と電離圏でのオーロラ発光計算を組み合わせた計算モデルを新たに開発しました。そして、コンピュータ上で地上より観測されたフラッシュオーロラの形状変化と時間特性を再現することに成功しました(図2参照)。数値計算の結果、フラッシュオーロラが雲状に低緯度側に拡大するのは、磁気圏の孤立コーラス波動が発生域につながる磁力線から少しずつ逸脱し地球側に偏って伝搬するためであるということを示しました^{*3,4}。

コーラス波動と電子群との波動粒子相互作用は、地球だけでなく木星や土星など固有磁場をもつ惑星においても生じていることが知られています。地球磁場強度の約1%の固有磁場しかもたない水星では、まだコーラス波動は観測されていません。しかし、磁化惑星である水星でもコーラス波動は水星磁気圏における電子ダイナミクスに深く関与していると考えられます。「あらせ」が明らかにする最新のジオスペース描像と水星に向けて航行中の水星磁気圏探査機「みお」(2018年打上げ)による水星でのプラズマ波動観測^{*5}から、水星磁気圏理解への応用がこれから期待されます。

※1 Ozaki, M., Miyoshi, Y., Shiokawa, K. et al. Visualization of rapid electron precipitation via chorus element wave-particle interactions. Nat Commun 10, 257 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07996-z>

※2 金沢大学ウェブサイト <https://www.kanazawa-u.ac.jp/rd/63906>

※3 Ozaki, M., Inoue, T., Tanaka, Y., Yagitani, S., Kasahara, Y., Shiokawa, K., et al. (2021). Spatial evolution of wave-particle interaction region deduced from flash-type auroras and chorus-ray tracing. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 126, e2021JA029254. <https://doi.org/10.1029/2021JA029254>

※4 金沢大学ウェブサイト <https://www.kanazawa-u.ac.jp/rd/94176>

※5 Yagitani, S., Ozaki, M., Sahraoui, F. et al. Measurements of Magnetic Field Fluctuations for Plasma Wave Investigation by the Search Coil Magnetometers (SCM) Onboard Bepicolombo Mio (Mercury Magnetospheric Orbiter). Space Sci Rev 216, 111 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11214-020-00734-2>

「あらせ」と地上観測による赤いオーロラの発生原因の探査

名古屋大学 宇宙地球環境研究所 塩川 和夫(しおかわかずお)

オーロラは北極や南極で緯度が70度付近に地球を一周するようにベルト状に現れることが知られています。これをオーロラ帯と呼びます。このオーロラ帯よりも少し低緯度側に、特に磁気嵐の時に赤いオーロラが現れることが知られており、Stable Auroral Red (SAR) アークと呼ばれてきました。このSARアークは、大磁気嵐の時に日本で観測される赤いオーロラの原因の一つとも考えられています。

なぜ低緯度側に特異な赤いSARアークが光るのでしょうか？オーロラが赤く光る原因は、数十電子ボルト以下の低いエネルギーの電子が大量に降り込むことで、地球大気酸素原子が励起されて光っているためです。このエネルギーは、オーロラ帯のオーロラを作る電子のエネルギーの10-100分の1以下です。このように低いエネルギーの電子だけを大量に降りこませるメカニズムとして、これまでは、クーロン衝突と波動粒子相互作用という2つの説が提案されていました。磁気嵐で地球近くまで侵入してきた数千から数万電子ボルトという高エネルギーのイオンが、クーロン力を通じた間接的な衝突やイオンが立てる電磁波動を介して、地球近くに大量に存在する地球大気起源の電子を加熱することで、この大量の低エネルギー電子ができる、という考え方です。しかしクーロン衝突と波動粒子相互作用は全く異なるメカニズムで、どちらが効いているかを直接観測で同定する研究はこれまでほとんど行われていませんでした。

「あらせ」は、このSARアークの原因となるメカニズムが発生している内部磁気圏を飛翔して、広いエネルギーのイオンや電子、電磁波動を観測しています。そこで、SARアークが発生しているときに、その上空をうまく「あらせ」が通過している例をみつけ出せば、このSARアークの発生原因の議論に決

着をつけることができると考えられます。しかし、「あらせ」はどんどん動いて行ってしまうので、「あらせ」が上空を通過している際にうまくSARアークが現れている例を見いだすことは容易ではありません。私たちは、「あらせ」の2016年度の打ち上げに合わせて、SARアークが発生しやすいオーロラ帯のすぐ低緯度側にあたる緯度60度付近のロシア、カナダ、アイスランド、アラスカ、北欧2か国に、合計8台の高感度全天カメラを設置して観測を続けてきました¹。この結果、うまくSARアークの上空を「あらせ」が通過しているケースをこれまでに2例得ることができ、これらを2つの論文として発表することができました^{2,3}。これらの研究により、SARアークは主にクーロン衝突による電子の加熱で発生していること、発生直後のSARアークには電磁波動も関与していることが新たに示されました。これらの結果は、直接観測を使ってSARアークの生成メカニズムを世界で初めて同定した結果であり、日本でみられる赤いオーロラの発生原因の解明にも貢献しています。今後はさらにこのような観測例を増やすとともに、同じ緯度帯で近年注目されているSTEVEという特殊な紫色のオーロラの衛星-地上同時観測にも挑戦しています。「あらせ」が観測している内部磁気圏には、STEVEの原因となるような未知の現象が存在している可能性があり、今後の観測成果が期待されます。

1. K. Shiokawa et al., Earth, Planets and Space, 69:160, doi: 10.1186/s40623-017-0745-9, (2017).

2. Y. Inaba et al., J. Geophys. Res., 125, <https://doi.org/10.1029/2020JA028068> (2020).

3. Y. Inaba et al., J. Geophys. Res., 126, <https://doi.org/10.1029/2020JA029081> (2021).

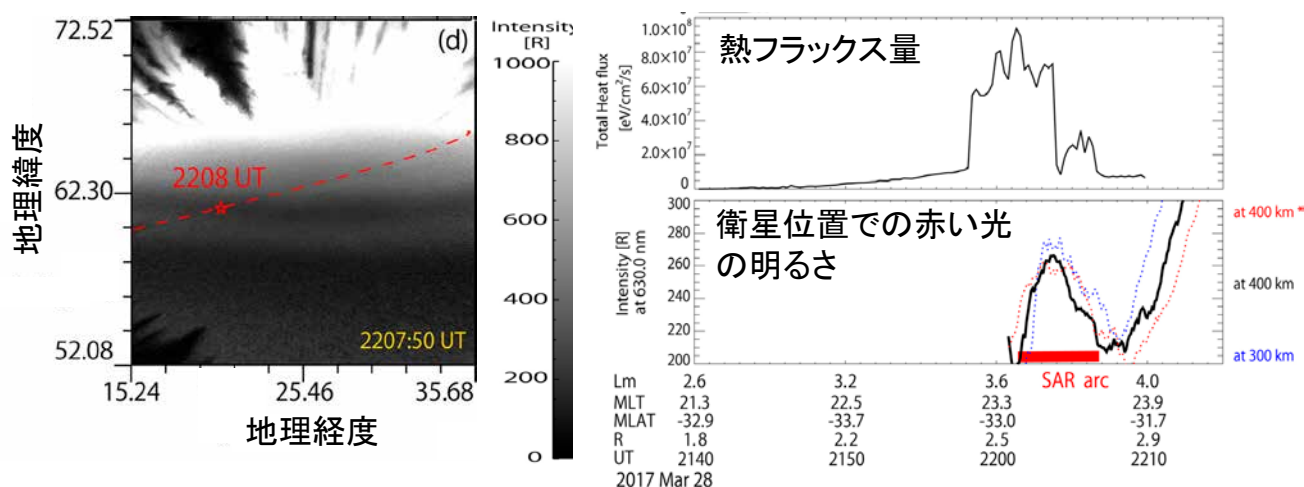


図1：(左) 2017年3月28日にフィンランドのニロラ観測点で観測されたSARアークとその上空を横切った「あらせ」の軌道。赤い光のみを透過させるフィルターを装着したカメラで観測しており、光の強さをレイリー(R)という単位で表している。画面の上半分の白い部分がオーロラ帯のオーロラ。その南側の緯度60度付近で東西に延びた薄い白い帯がSARアーク。画面の上端や下端に見える黒い影はカメラの周囲の森林。22時08分頃に衛星がSARアーク上空を通過していることがわかる。(右) 上のパネルは、「あらせ」で観測された高エネルギーイオン量と地球大気起源の電子量から、クーロン衝突を仮定して計算された電子の熱フラックス量。下のパネルは左の画像データから抽出された衛星位置での赤い光の明るさ。赤・黒・青の3本の線は、発光高度の仮定や磁場モデルを変えて抽出したもので、どれもほぼ同じ曲線になっており、モデルや高度仮定に依存しないことがわかる。熱フラックス量と比べてピーク位置が少しずれているのは、衛星位置をカメラ画像上に投影する際に使用したモデル磁力線の不確実性によると思われる。この「あらせ」のSARアーク上空通過の際は、電子を加熱することができる電磁波動は観測されており、クーロン衝突がSARアークの原因と考えられる。Inaba et al. (2020)の図を本稿用に加工。

国際宇宙ステーションや昭和基地との 磁気共役観測例

国立極地研究所 宙空間研究グループ 片岡 龍峰(かたおか りゅうほう)

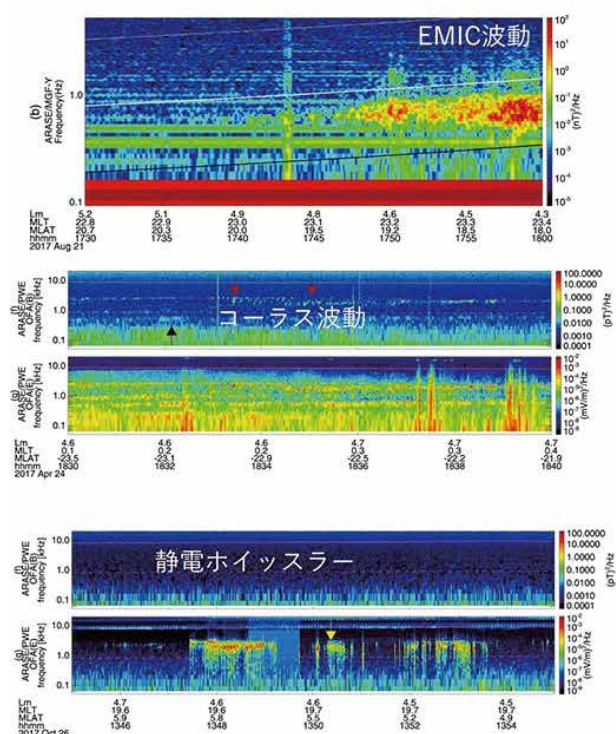
国際宇宙ステーション (ISS) で宇宙線の観測を行っているカロリメータ型宇宙電子線望遠鏡 (CALET) の運用データを見ると、高緯度地域を通過する際にMeV電子が大量に降り注いで来る現象 (Relativistic Electron Precipitation=相対論的電子降下) が起こっていることに気が付きます。REPは、ISS船外活動中の被ばく要因の一つとしても注目されているため (Ueno et al., 2019, Space Weather)、その成因を明らかにすることは、有人宇宙活動を支える研究課題でもあります。このISSで観測されるREPの成因については、「あらせ」とISSが同じ磁力線上に配置される磁気共役同時観測によって、コーラスやEMICといったプラズマ波動であること、また、プラズマ波動の種類によって、ISSで観測されるREPの時系列の特徴が異なることが明らかになりました (Kataoka et al., 2020, JGR)。

磁気共役同時観測というのは、昭和基地と磁力線のつながったアイランドにおいて、国立極地研究所が長期にわたりオーロラ観測を展開している最大の理由でもあります。「あらせ」・昭和基地・アイランドが磁気共役となった絶好のタイミングで、オーロラ爆発が起こった、という例もありました。驚いたことに、オーロラ爆発は南北半球で非対称に発展し、その一因である主磁場の歪みが「あらせ」で捉えられています (Uchida et al., 2020, GRL)。また、昭和基地の大型大気レーダー PANSYが、オーロラ爆発の瞬間に、普段は電離のみられない中間圏65 km高度が電離する、という珍しい現象を

捉えた際にも、その中間圏電離の直接的な原因であるMeV電子のスパイクを「あらせ」が観測していた、という幸運な例もあります (Kataoka et al., 2019 EPS、極地研プレスリリース2、<https://www.nipr.ac.jp/info/notice/20190208.html>、エディターハイライト)。PANSYと「あらせ」の共役観測研究は、その後も発展しており、オーロラ爆発が始まる前のgrowth phaseの時点で、活発なプラズマ波動の影響によらないMeV電子の降り込みによる中間圏電離が普遍的にみられる、ということも明らかになりつつあります (Murase et al., 2021, submitted to JWSWC)。

これらの例のように、ISSや地上で観測される高エネルギー現象の具体的な成因は、磁気圏の直接観測データから明確に絞り込まれ、ひとつひとつ謎が解き明かせる時代となっており、そのためにも「あらせ」は欠かせない存在となっています。また、紹介した例は、単なる幸運という話ではなく、計画準備の当時から長期にわたって、そういった磁気共役観測実現のチャンスを最大化する努力を重ねてこられた「あらせ」関係者の先見と、その恩恵のひとつにあらせられた例であることも申し添えたいと思います。

プラズマ波動の観測@「あらせ」



MeV電子の観測@国際宇宙ステーション

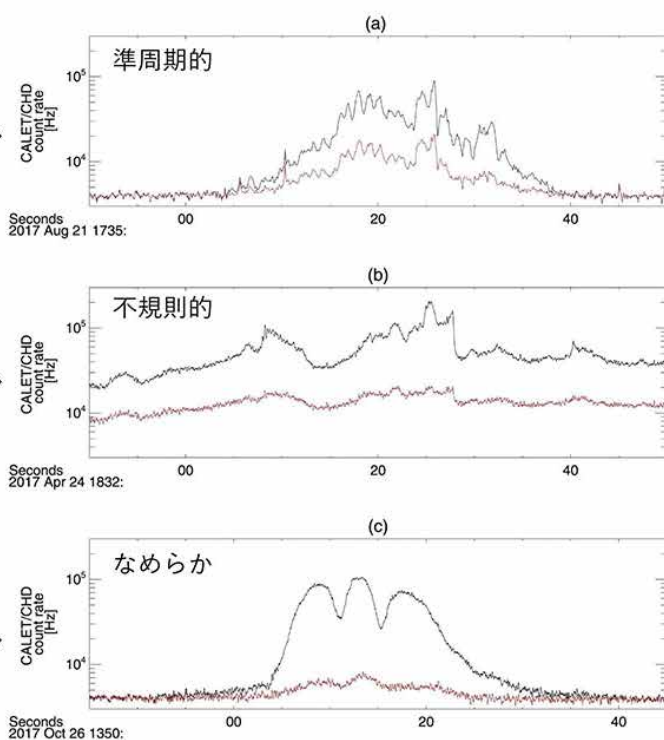


図1：(極地研プレスリリース1:<https://www.nipr.ac.jp/info/notice/20200904.html>, Kataoka et al., 2020, JGR) あらせ衛星のプラズマ波動観測データ(左)と、国際宇宙ステーションでのREPの観測データ(右)。上から順に、EMIC波動によるREP、コーラス波動によるREP、静電ホイッスラー波動によるREP。

「あらせ」と北欧EISCATレーダーとの共同観測から、EISCAT_3Dレーダーとの連携へ

国立極地研究所 国際北極環境研究センター 小川 泰信(おがわ やすのぶ)

「あらせ」が観測する磁気圏内のプラズマや波動が、地球の大気とどのように影響しているかを調べる上で、地上の光学機器ネットワーク観測等に加え、地上レーダーとの連携観測が重要です。特に、北欧のEISCAT (欧州非干渉散乱) レーダーは、磁気圏から極域電離圏に降り込む電子のエネルギー分布や、磁気圏に流出し始める電離圏イオンの動きや温度を測定可能な大型観測装置です。「あらせ」と共同で観測を行うことにより、地球大気と磁気圏との繋がりへの定量的な理解が深まります (図1の左側参照)。

この「あらせ」とEISCATレーダーによる共同観測の研究対象としては、(1) 朝側における脈動オーロラとコーラス波動/ピッチ角散乱との関係の研究、(2) 夜側における電離圏イオンの磁気圏への流出現象、(3) オーロラサブストーム発生時の降下粒子の研究、等が挙げられます。これらの研究内容と共同観測におけるデータポリシーをまとめた白書を、「あらせ」打ち上げ前の2016年9月、10月に用意し、EISCAT科学協会(6つの加盟国と5つの準加盟機関で現在構成)で議論・検討を重ねました。その結果、EISCAT科学協会全体で「あらせ」との共同観測の支援体制を確立しました。具体的には、「あらせ」との共同観測を、EISCAT科学協会の全加盟国による特別実験として実施することにより、2017年6月以降(2021年10月まで)に、合計110回(合計約440時間)の同時観測データを取得しています。さらに、日本を含む各国の特別実験やEISCAT科学協会の公募するピアレビュー実験、共通実験などを組み合わせることにより、これまでに150回を超える共同観測を実施しました。

これらの共同観測データを基に、「あらせ」が磁気圏内でプラズマコーラス波動を観測した同時刻に、EISCATレーダーにより高度65 kmまでの大気電離を直接観測した研究結果(Miyoshi et al., 2021)が得られています。脈動するオーロラ活動に伴う成層圏上部・中間圏のオゾン破壊促進を示唆する研究成果として、太陽地球系科学分野の進展に大きなインパクトを与えています。また、磁気嵐の発生時に、極域電離圏内の分子イオンの上向き輸送と内部磁気圏内の分子イオンの増

加を同時に比較した研究結果(Takada et al., 2021)は、分子イオンが磁気圏にどのように供給されるかを理解する上で重要な研究成果と言えます。その他に、昼側での高エネルギー降下粒子の起源や、サブストーム時の磁気圏から電離圏への降下粒子の特徴などの研究成果も、この共同観測から得られつつあります。

この「あらせ」とEISCATレーダーとの共同観測の主な弱点としては、EISCATレーダーの観測領域が磁力線に沿った1方向(線観測)の電離圏のみであることが挙げられます。この磁力線に沿った同一領域を「あらせ」が上空で観測する時間は非常に限られており、「あらせ」とEISCATレーダーで同じ現象をみているかどうかの問題は多くの共同観測イベントで生じます。それを克服できる新たな大型観測施設がEISCAT_3Dレーダーです(図1の右側参照)。EISCAT_3Dレーダーは極域電離圏を3次元的に観測可能であり、それにより、「あらせ」の観測領域から磁力線を辿った電離圏のプラズマ物理量を広い範囲で測定可能となります。さらに、EISCAT_3Dレーダーは降下粒子による大気電離を世界最高の精度で測定可能です。日本を含む国際共同で北欧に建設中であり、2023年から運用を開始予定です。「あらせ」とEISCAT_3Dレーダーとの新たな連携観測・共同研究により、磁気圏と電離圏・熱圏・中間圏との繋がりに関する新たな科学的知見が数多く得られることを期待しています。

参考論文:

Miyoshi, Y., K. Hosokawa, S. Kurita, S.-I. Oyama, Y. Ogawa, S. Saito, I. Shinohara, A. Kero, E. Turunen, 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, and C. Jun, Penetration of MeV electrons into the mesosphere accompanying pulsating aurorae, Scientific Reports, 11, 13724, 2021.

プレスリリース:

<https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/news/research-results/2021/20210714-2.html>

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), Journal of Geophysical Research: Space Physics, doi:10.1029/2020JA028951, 2021.

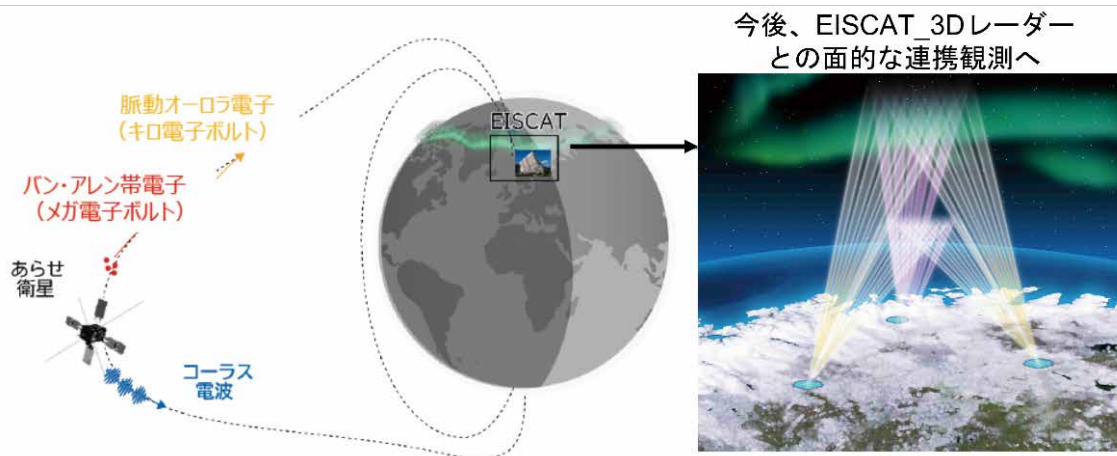


図1: 左側は、「あらせ」とEISCATレーダーとの共同観測の模式図(Miyoshi et al., 2021のプレスリリースより抜粋)。右側は、EISCAT_3Dレーダーによる多局式立体観測のイメージ図。

国際連携による同時多地点観測で 自然電磁波の道のりを解明

金沢大学 理工研究域電子情報通信学系 松田 昇也(まつだしょうや)

ジオスペースで発生する多種多様な自然電磁波(電場・磁場の振動)は、放射線帯の形成・消失を始めとした宇宙のプラズマ環境変動を引き起こす重要な役割を担っています。北極圏などの人里離れた静かな地域にアンテナを設置すると、それらの自然電磁波が地球上でも観測されることがあります。では、一体それらは宇宙のどこで生まれて、どのように宇宙空間を伝わっていくのでしょうか?それを明らかにするには、宇宙から現象を観測するとともに、複数の観測拠点を連携させた同時多地点観測によって、現象を三次元的に捉える必要がありました。

日本・アメリカ・カナダの研究者らから構成される国際共同研究グループは、「あらせ」(日本)とVan Allen Probes(アメリカ)による宇宙からの観測と、PWINGプロジェクト(日本)とCARISMA magnetometer array(カナダ)による地球からの観測を連携させることで、宇宙の自然電磁波の一つである「電磁イオンサイクロトロン波」の同時多点観測を実現させ、波が伝わる様子や宇宙環境の変動を引き起こす様子を三次元的に捉えることに成功しました^{1,2}。自然電磁波の同時多地点観測を成功させるためには、次の3つの条件が整っている必要がありました。①科学衛星に搭載、あるいは地上観測拠点に設置した観測装置が、微弱な自然電磁波を捉える能力を有すること。②各観測拠点が、自然電磁波の“通り道”上でフォーメーション(連携観測体制)を組んでいること。③発生タイミングの予測が難しい自然電磁波が、フォーメーション上に発生していること。——2012年から2016年ごろ、筆者は「あらせ」に搭載したプラズマ波動・電場観測器(Plasma Wave Experiment; PWE)の開発メンバーとして、観測能力の高度化に力を注いできました。2017年に「あらせ」が定常観測を開始し、自然電磁波を的確に捉えていることが分かってから、今回のような科学成果を生み出す機会を心待ちにしてきました(→①)。さらに、今日に至るまでの約5年間、軌道上を高速で移動する複数の衛星と、地球上に固定された地上観測拠点の位置関係を予測し、条件が整った場合に「あらせ」が最高のパフォーマンスで科学観測を行うための、日々の観測計画立案を続けてきました(→②)。「準備は整った!来たれ電磁波!」あとはひたすら神に祈るのみです(→③)。まさに人事を尽くして天命を待ち、実現したのが2019年4月の電磁イオンサイクロトロン波の同地多地点観測だったのです。

図1は、4拠点を観測された電磁イオンサイクロトロン波の様子です。地磁気赤道付近のVan Allen Probesと地上のPWING、CARISMAでは、極めて類似性が高い電磁イオンサイクロトロン波が観測されていることから、地磁気赤道と地上とを繋ぐ約50000 kmの長さの“通り道”が形成されていることが分かります。さらに、その中間(中緯度帯)に位置する「あ

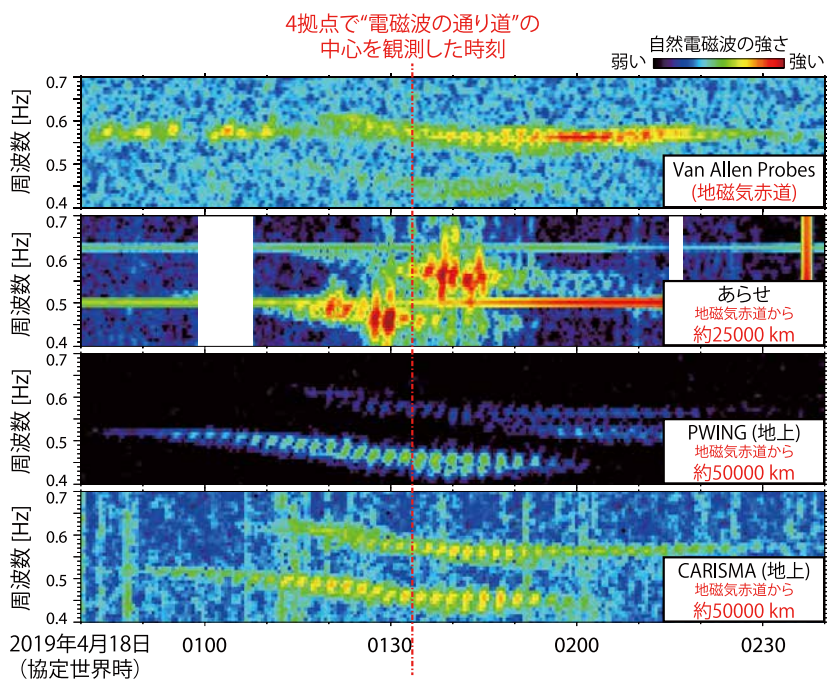


図1: 衛星と地上の計4拠点を電磁イオンサイクロトロン波の同時多地点観測結果

らせ」が“通り道”を横切って観測することで、“通り道”が有限の太さ(断面の大きさ)を有していることを明らかにしました。“通り道”の太さは、通り道の地球側出口となる電離圏の高度では直径約80 km程度しかなく、細長いストロー状の“通り道”が極めて局所的に存在していることが分かったのです。さらに、「あらせ」とVan Allen Probesでは、“通り道”の中の電磁イオンサイクロトロン波によって、冷たいプラズマが加熱される様子も同時に観測され、“通り道”の中で宇宙の環境変動が起きている様子を捉えることができました。また、電磁イオンサイクロトロン波は、高エネルギーイオンを散乱させ、地球大気へと降り込ませます。これによって生まれるのが、地上でも観測される「プロトンオーロラ」と呼ばれる青色のオーロラです。つまり、本国際共同研究の成果は「プロトンオーロラのエネルギー源が生まれる領域を明らかにした」とも言い換えることができます。この成果をもとにして、宇宙のプラズマ環境変動がさまざまな場所で同時に起きるメカニズムの解明、すなわち、安全な宇宙利用に向けた「宇宙天気予報」の精度向上への貢献が期待されます。

国際連携なくして、このような研究を成功させることはできませんでした。各国が開発した高性能な科学衛星や地上観測装置が連携することで、宇宙環境を立体的にモニタリングできることを示したのです。打ち上げ後5年を経てもなお健康体の「あらせ」が、次の観測好機を迎えることを心待ちにしつつ、将来の科学衛星ミッションでは宇宙の立体視が当たり前になる世界を夢んでいます。

¹ S. Matsuda et al., Geophys. Res. Lett., 48, doi: 10.1029/2021GL096488 (2021)

² プレスリリース: <https://www.se.kanazawa-u.ac.jp/news/20211208.html>

地球磁気圏で発生するプラズマ波動と放射線帯変動の関係

情報通信研究機構 電磁波研究所 高橋 直子(たかはし なおこ)

地球の磁気圏の中でも地球中心の約2～7倍の領域には、数100keV～数10MeVと非常に高いエネルギーを持つ電子が数多く分布しています。このドーナツ形状の領域は「放射線帯」と呼ばれており、特に磁気圏内の環境が荒れる「宇宙嵐(ここでは磁気嵐と呼ぶ)」が発生した際には放射線帯にある電子のフラックスが大きく変動します。

放射線帯にある高エネルギー電子は、磁気圏の尾部にある数keV程度の荷電粒子が地球方向に輸送されることで生成されます。荷電粒子は磁場強度と粒子のエネルギーの比を保つような性質を持ちます。そのため、荷電粒子が地球方向に移動すると背景の磁場強度が強くなるため、荷電粒子のエネルギーが増加します(断熱加速)。しかしながら、この方法だと数100keVまでしか加速されないため、恒常的にMeV帯のエネルギーを持つ電子が存在するためには別の方法で加速される必要があります。近年の研究により、磁気圏内で発生したプラズマ波動との相互作用によってMeV帯まで加速されていることが明らかとなりました。特に、周期的な変化を伴うULF帯(ULF波動)やVLF帯(ホイッスラーモード波動)のプラズマ波動が数MeVの電子に寄与していることが知られています。両

者の波動が引き起こす加速過程は異なり、ULF波動は主に動径方向への拡散に伴う加速、ホイッスラーモード波動はサイクロトロン共鳴に起因する加速を引き起こすとされています。しかしながら、「磁気圏内にあるプラズマ波動が、磁気嵐中のどのタイミングで、どの場所で放射線帯変動に寄与するのか?」については明確になっておらず、未だ研究者の間で議論が交わされています。

私たちは、磁気圏観測衛星「あらせ」、同じく磁気圏観測衛星で2012年にNASAが打ち上げたVan Allen Probes、および数値シミュレーションを用いて、ある磁気嵐における放射線帯変動とプラズマ波動の寄与のタイミング、およびその波動を励起させる原因について研究を進めてきました。図1(a)は2017年5月の磁気嵐時に「あらせ」(夜側に位置)およびVan Allen Probes(夕方側に位置)が観測した1.1MeV電子のフラックスの時間変化を示しています。「あらせ」、Van Allen Probesともに、磁気嵐主相では放射線帯電子のフラックスが大きく減少し、その後回復相に移行するにつれて電子フラックスが増加していく様子を観測しています。特に、回復相初期では広い領域で電子フラックスが増える一方、回復相後期では放射線帯の中の特定の領域でのフラックス増加が顕著

にみられます。図1(b)は数値シミュレーションから求めたULF波動の強度およびホイッスラーモード波動に関連する物理パラメータを磁気赤道面上に描いたものです。ULF波動の分布をみると、磁気嵐主相と回復相初期のタイミングで全経度に関わり強く、回復相後期のタイミングで全経度に関わり弱くなっています。このシミュレーションでは太陽風起因の磁気圏圧縮に伴うULF波動を再現しているため、今回の磁気嵐の回復相初期では太陽風起因のULF波動が電子フラックスの増加に寄与していることが示唆されます。一方、ホイッスラーモード波動を引き起こす要因である数10keV電子の異方性の分布をみると、それぞれの時間帯で異方性が大きくなる領域が異なることが分かります。この経度方向の依存性は、「あらせ」、Van Allen Probesでホイッスラーモード波動を観測したタイミングとよく一致しています。また、ホイッスラーモード波動は背景磁場の曲率が小さいほど励起されやすいことが過去の理論研究から明らかになっています。今回のシミュレーションによる磁力線曲率の分布では昼間側で磁力線曲率が小さくなっており、先行研究で提唱されていた理論を裏付ける結果となりました。

本研究では、放射線帯変動の全容を理解する上で欠かせない「プラズマ波動の寄与についての時間的・空間的な考察」を行い、どちらか単一の波動がフラックス増加を引き起こしているのではなく、両者の波が各々のタイミングで放射線帯変動に寄与していることが判明しました。今後は波動の成長率などを含めた議論を行うことで、より定量的な放射線帯変動の理解が進むと考えられます。

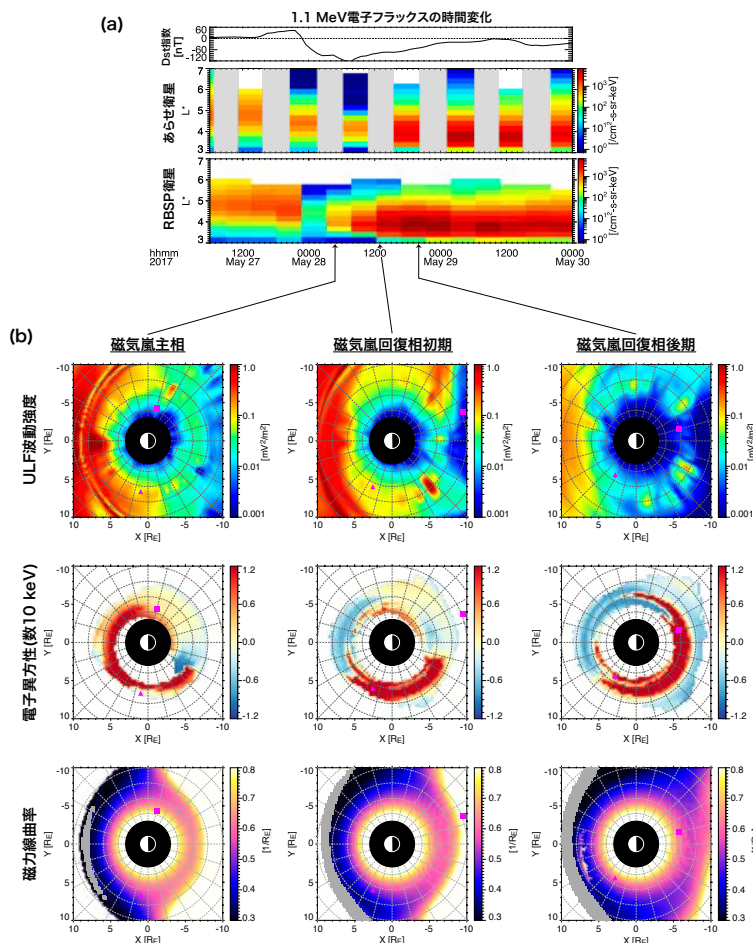


図1: (a) 2017年5月に発生した磁気嵐における1.1MeV電子フラックスの時間変化。上段のDst指数は磁気嵐の規模を表す。(b) MHDシミュレーションから求めたULF波動強度およびホイッスラーモード波動に関連するパラメータを磁気赤道面上に描いたもの。

超高高度からのオーロラ電子の加速の始まり

京都大学 地磁気世界資料解析センター 今城 峻(いまじょう しゅん)

オーロラアークの発光は、そのさらに上空の静電場のあるオーロラ加速域で下向きに加速された電子と、大気の衝突、励起・緩和により起こります。静電場が生成する原因は未だはっきりとは特定されておらず、電子がどの高さで加速されているかがその謎を解く鍵とされてきました。過去50年間にわたるロケットや人工衛星の観測から、オーロラ加速域は電離圏のプラズマと磁気圏の熱いプラズマが混じり合う高度数千kmの領域を主に、高度20000km以下までは存在しうるものの、高高度側の寄与は小さいと考えられていました。これまでのオーロラ加速の理論はこういった低い高度を中心とした加速域の高度分布を前提としていました。

「あらせ」はその独特の軌道により、これまで加速域の上限とされていた高度の一段上の領域を頻繁に飛翔します。高高度から加速されて発光高度まで降り込み、消失する電子は極めて狭い角度分布を持っていますが、「あらせ」は非常に高い角度分解能を持った電子観測機器を搭載しているためこれを捉えることができます。2017年9月15日、広域視野と高空間分解能を持った米国THEMIS全天カ

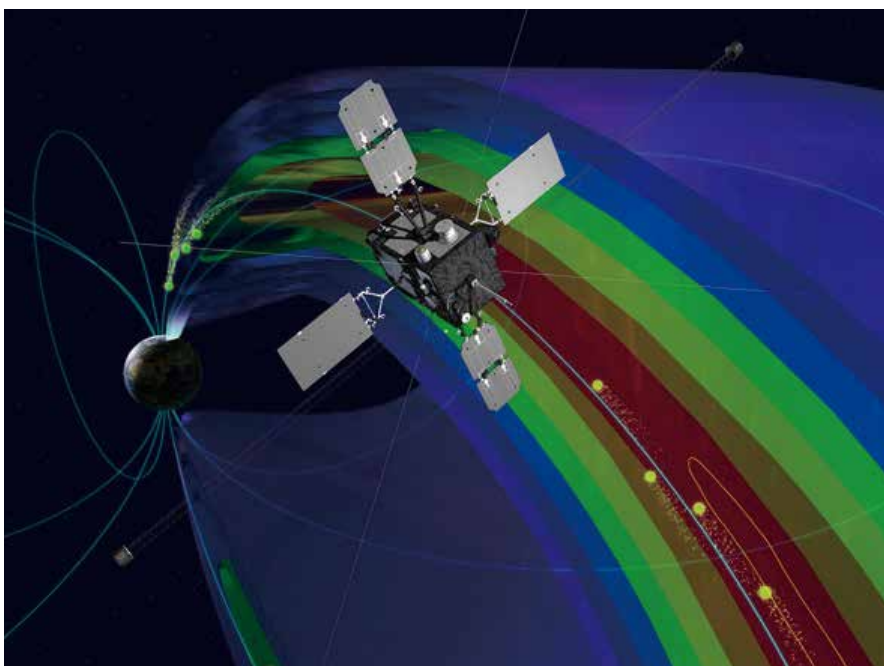


図2: 超高高度から加速された電子がオーロラ発光領域まで降り注ぐイメージ。© ERG science team

メラによってオーロラアークが観測されているときに、「あらせ」がその上空高度約30000kmで観測するという極めて稀な同時観測が実現し、「あらせ」のいる超高高度でも電子が加速されているのか、加速された電子が実際にオーロラの発光領域まで降り込んでいるかどうかをみるユニークな機会を得ることができました。その結果、これまで低高度で観測されてきた典型的な加速域の特徴と非常によく似た粒子、電磁場の変動が、オーロラアークに繋がる磁力線の高度30000km付近もの超高高度でも発見されるという予想外の結果がもたらされました。特に、単一エネルギーを持った下向きの電子が観測されたことは、衛星より上側での静電的な加速の強い証拠です。そのエネルギーから推定される、衛星より上側の加速のオーロラ発光域までの加速全体への寄与は20～45%にも及びます。さらに、「あらせ」の低エネルギー電子分析器LEP-eの持つ高角度分解能チャンネルにより、下向きに加速された電子がオーロラ発光高度で消失し、対応する上向き電子が欠損する様子を高高度で初めて捉えました(図1、2)。これらの結果は高度数千kmの領域を中心として高度20000km以下までと考えられていた加速域の高度方向の広がり定説を覆すものです。典型的な加速域高度と全く異なるプラズマ・磁場環境である超高高度で、なぜ静電的加速メカニズムが存在しうるのかを明らかにすることが今後の課題です。また、超高高度加速域はオーロラのエネルギー源である磁気圏赤道面付近とエネルギーの流れ込む電離圏を繋ぐ磁力線の中間地点にあり、この研究を深めて得られる知見は、磁気圏と電離圏の結合過程を理解するうえでも重要となるでしょう。

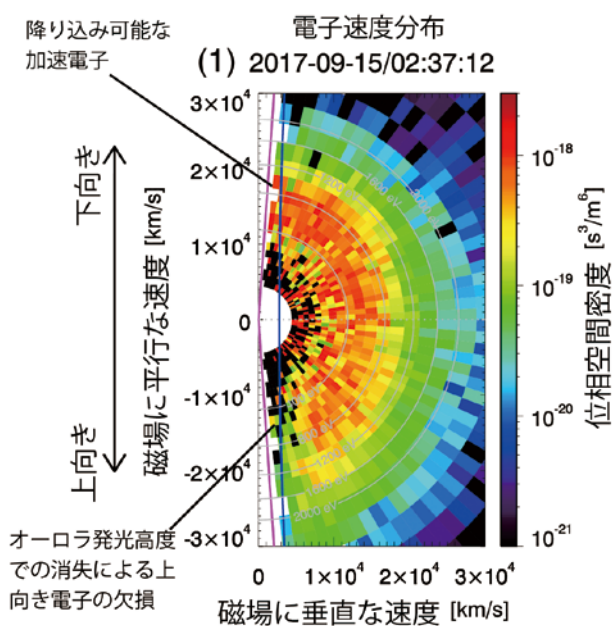


図1: 電子の位相空間密度の速度分布(ある速度を持った電子の数の分布)と、衛星より下側の加速から予測される降り込み可能な領域の境界(青線)。下向き加速された電子が、降り込み可能な領域の内側で観測され、さらに対応するオーロラ発光高度での消失による上向き電子の欠損が観測された。

(名古屋大学からのプレスリリース:https://www.nagoya-u.ac.jp/about-nu/public-relations/researchinfo/upload_images/20210119_isee1.pdf)

宇宙天気データによる放射線帯変動予測

情報通信研究機構 電磁波研究所 坂口 歌織(さかぐち かおり)

「宇宙天気」という言葉をご存知でしょうか？まだ聞きなれない人も多いかと思います。宇宙で雨や雪、台風が発生することはありませんが、宇宙では人工衛星が放射線やプラズマにさらされた環境にあります。そして時には、それらの増大により、衛星機器が電気を帯び放電したり、ビット反転する等の不具合が生じたりすることがあります。このような宇宙環境の変化は、地球の天気になぞらえて宇宙天気と呼ばれています。「あらせ」の観測ターゲットである放射線帯の高エネルギー粒子の変動は、地球周回軌道の人工衛星にとって最大の脅威であり、宇宙天気研究の最重要課題の1つ挙げられています。特に近年は、生活に欠かせない位置情報サービスや天気予報、通信など、様々なサービスが人工衛星等の宇宙インフラにより支えられています。国連の統計によると2019年現在、地球近傍で運用中の人工衛星の数は5200機以上に達しており、安全な衛星運用のために宇宙天気の監視・予測を強化することが急務となっています。

情報通信研究機構(NICT)宇宙天気予報グループでは、「あらせ」から送られてくる「現在」の放射線帯の分布や強さを示す宇宙天気データを利用して、「未来」の放射線帯がどのように変化するかを予測する研究に取り組んでいます。図1は私たちが開発した予測システムによる計算の実運用結果の例です。左側が入力に利用した2020年9月30日までの観測値データで、右側がその翌日(10月1日)以降の電子フラックスの予測値を示します。高速太陽風の到来により、 $L=4.5$ 付近にあった放射線帯電子フラックスは10月24日頃に消失し、その後、 $L=5$ 付近から増大し始めているのが観測データから分かります。予測値はその増大が10月2日頃まで続き、 L が高い場所から徐々に減少に転じることを推定しています。この予測が当たったかどうかの観測結果はここでは示していませんが、この予測は観測を非常によく再現していました。予測には、現在のデータの質が非常に重要であり、より新しくかつより精度のよいデータを入力することで予測の質が高まります。「あらせ」の宇宙天気データには、XEPによるエネルギー0.4～5.4 MeVの電子フラックス、HEPによるエネルギー100～2000 keVの電子フラックス、MGFによる磁場強度の観測値が含まれており、これらは宇宙で観測されてから数分以内という早さでJAXAのSEES(宇宙環境計測情報システム<<https://sees.tksk.jaxa.jp/>>)から提供されています。NICTはこれらのデータを入力に利用し、「あらせ」の衛星軌道上の電子フラックスの予測計算結果をWebサイトで公開しています<<https://radi.nict.go.jp/arase-spaceweather/forecast.html>>。

図2に2018年から2020年までの予測精度を示します。 L 値ごとに予測の精度が異なりますが、リードタイム1日の1日先

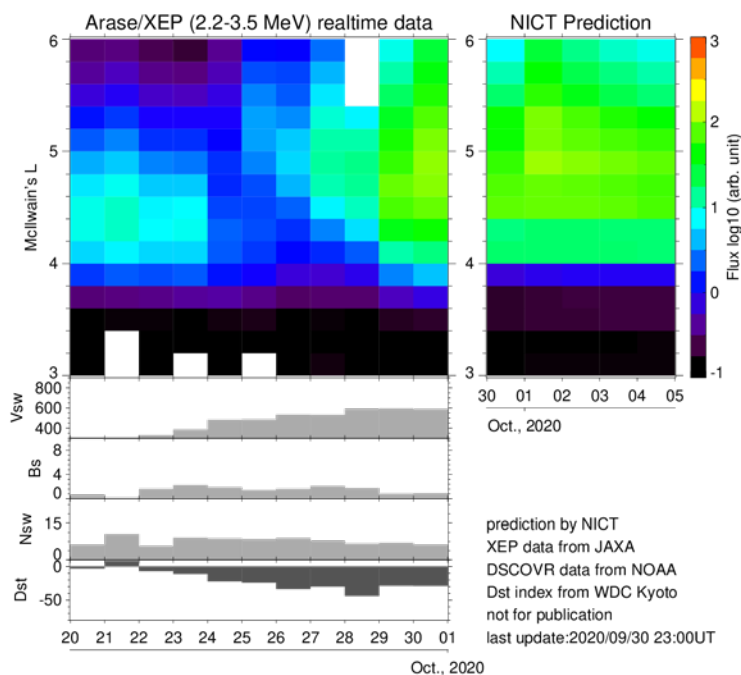


図1: 放射線帯電子・太陽風・地磁気乱のリアルタイム観測値(2020年10月20日～30日)とこれらを入力して計算した放射線帯電子フラックスの予測値(2020年11月1日～4日)

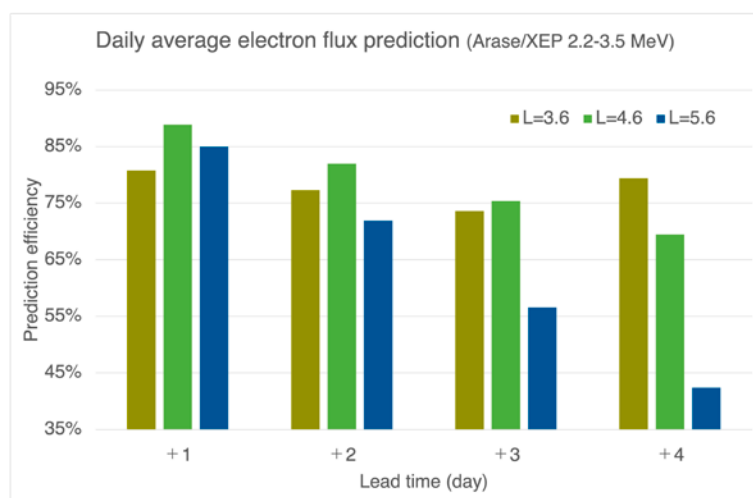


図2: 放射線帯予測モデルの予測精度(2018～2020年の3年間)

予測の精度は概ね全ての L 値で80%を超えることに成功しています。ただし、2日先、3日先とリードタイムが延びるごとにやはり予測精度は下がり、特に L 値が高い場所では4日先以降の予測精度は50%を下回っています。そのため、精度向上にむけたさらなる研究開発を進めています。一度、宇宙空間に打上げられた人工衛星は、放射線帯を避けるために軌道を変えることも、故障を直しに行くこともできません。しかしながら、監視と予報を強化すること未来の危険を人工衛星によるサービスを担う事業者や衛星運用者へ伝え、衛星不具合による私たちの生活への影響を最小限に止めることに役立てばという思いで、今後も予測精度向上にむけた研究開発に取り組みたいと思います。

ERGサイエンスセンター

名古屋大学 宇宙地球環境研究所 堀 智昭(ほり ともあき)

ジオスペース探査を行うERG(「あらせ」)プロジェクトの縁の下の力持的な存在であるERGサイエンスセンター(ERG-SC: <https://ergsc.isee.nagoya-u.ac.jp>)は、「あらせ」に関連する研究を行っている国内外の研究者・学生の皆さんに、日々色々な形で利用して頂いています。ここでは、ERG-SCとは何なのか、また実際にどのようなことをやっているかについて、簡単に紹介させて頂きたいと思います。

ERG-SCと言えば、ジオスペース研究に携わっている人達の中では、「あらせ」関係の科学データやその解析ツールを公開しているところ、というイメージが強いと思います。しかしそれ以外にも、国内外の関連プロジェクトとの各種調整を行って共同観測を立案・実施したり、またそれを「あらせ」の観測計画に反映させたりするなど、衛星自体の運用にも携わっています。さらにサイエンスセンターのメンバー自身も「あらせ」に関連する研究を多くの共同研究者と一緒にを行っています。つまりERG-SCは、プロジェクトの研究活動を担う研究センター(の1つ)であり、科学データや解析ツールをアーカイブ・公開する科学データセンターであり、また関連研究プロジェクト間の協働を推進するコーディネーションセンターでもあるのです。

マルチな役割を果たしている中でも、やはりERG-SCの中心をなしているのは「あらせ」の科学データアーカイブと統合データ解析ツールの開発・公開です。「あらせ」を含む人工衛星の観測データは、地上受信局で受け取った際には通常衛星独自のファイル形式で保存されますが、そのままではデータのユーザー(具体的には国内外の研究者)にとって使いにくい状態になっています。そのような観測データについて、まず補正された時刻情報など必要な付属データを付与して、また観測器が直接出力する工学値データの場合は、科学解析に使

用できるようにしかなるべきデータ較正を適用して物理量に変換します。さらにデータ自体を説明するための様々な情報(メタデータと呼ばれます)を業界標準の形式に沿って追加した上で、Common Data Format(CDF)と呼ばれる、やはりジオスペース研究業界で標準的に使われているファイル形式の1つに変換します。これをERG-SCのオンラインデータリポジトリから公開することで、世界中の研究者がダウンロードして各自が得意とするツールで読み込むことができ、そしてそこに含まれる情報を基にただちに科学データ解析を行うことができるのです。

またこのようにデータを整備することによって得られるもう1つの大きなメリットは、全世界で多くのジオスペース研究者が使っている統合データ解析ツール、Space Physics Environment Data Analysis System(SPEDAS)に容易に組み込み可能となる点です。これにより、国内外の関連衛星データや地上観測データをシームレスに組み合わせた解析が容易に行えます。またERG-SCでは、日本のジオスペース業界初の試みとして、国内研究機関から提供される様々な関連地上観測データを同じ基準でCDF形式のデータファイルに変換して、統一的なデータリポジトリから衛星データと一緒に公開しました。これにより、独自ファイル形式等の理由でSPEDASに組み込まれていなかった多くの国内地上観測データが、SPEDAS上で解析可能になりました。その効果は絶大で、この特集号で紹介されているような、「あらせ」と地上観測とを組み合わせた多くの先端的な研究成果を生み出す、原動力の1つになりました。

また、これらは単なる技術的な仕事として行われたのではなく、サイエンスセンターのメンバーや共同研究者による科学研究との両輪で進められていきました。結果として、大変

創造的かつ実践的な開発と整備を行うことができ、そのため研究活動へのフィードバックが最大化されて多くの研究成果につながったのです。

これらの活動を通して、ERG-SCは、データアーカイブやデータシステムを研究と融合させていくためのテストベッドとしての役割を果たしつつ、その過程で、多くのデータ処理・解析・整備の手法、そしてそのような経験・技術を持つ人材を生み出す「ゆりかご」になったと思います。今後は、これまでに得られた知識・技術・経験とまたそれを持つ人材がさらなる発展を遂げることで、このサイエンスセンターが、太陽圏科学の探査プロジェクトを推進する拠点として引き続き発展していったらと期待しています。

ERGプロジェクトとERG Science Center (ERG-SC)

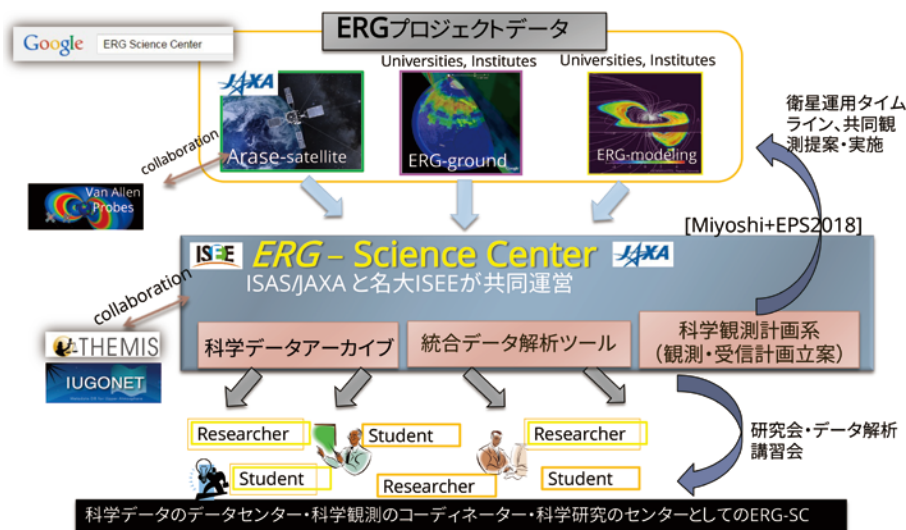


図1: ERGサイエンスセンターが果たしている役割

Collaboration between Japan and Taiwan

Institute of Astronomy and Astrophysics, Academia Sinica Shiang-Yu Wang (ジャンユ ワン)

The Arase mission is an important science collaboration between Japan and Taiwan. It is the first project in Taiwan to develop a payload on a pure science satellite. The Arase collaboration gave the Taiwanese space science community a great opportunity to access the first-hand measurement data from an advanced mission and develop a science payload that has to survive under very high radiation conditions.

Luckily, we successfully grasped the opportunity and turned it into a nice experience. The development of our payload, the LEP-e (Low-Energy Particle Experiments - Electron Analyzer), was on time, and it functioned as expected. After the launch, our team worked with the Arase team to operate the LEP-e according to the observation schedule and modified the operational mode when needed. The calibration of electron flux measured from LEP-e was also carefully calibrated. Science-wise, Taiwanese scientists have used the Arase data to study the electron density variation respected to the wave and electric field distribution to understand correlations between electrons in

the magnetosphere and the observed aurora. With the high angular resolution of the LEP-e, the detailed physics between aurora and electrons far from the earth was revealed.

As a partner, we are very pleased to see the LEP-e instrument is still working properly after the launch for five years. Furthermore, it is a great success that the whole satellite is still in a healthy condition to provide precious science data. I hope to see more science output of ERG data from Taiwan, especially more science collaboration between Japan and Taiwan.



Figure: A group photo taken at the 4th ERG Taiwan Workshop held in January 2020.

みんなで作り上げて、あらせの成功を支えたMDP

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 高島 健 (たかしま たけし)

「あらせ」搭載のMDP (Mission Data Processor) は多くの人の協力を経て生まれてきました。CPU採用については、国産にこだわりました。技術立国日本へのこだわりがあったのかもしれませんが、宇宙科学研究所 廣瀬教授と三菱重工が共同開発したSOI-SOCをその心臓部に据えました。ソフトウェアも国産のReal-Time OSを乗せるべく、元東大教授でTRONの生みの親である坂村先生のもとを訪ねました。「最新のReal-Time OSを宇宙で使えるようにカスタマイズして欲しい。静的メモリ割付、不使用の関数ライブラリは、リンク時に関数レベルでリンクしないようにして欲しい。物理タイマーもつけて欲しい。」という無茶な要求に「よし!」と笑顔でこたえて頂きました。Real-Time OSの開発はUCテクノロジーの全面的バックアップによって、「民生技術」の結晶としてReal Time OS T-Kernel2 AeroSpaceは出来上がりました。ハードウェア的に新しい技術にも挑戦しました。科学衛星では初めてCGA (Column Grid Array) を採用しFPGAの占有面積を約半分にし、またメモリチップを立体構造に実装する3D-Plus (フランス) のメモリを採用することでA5基板に収まるサイズのCPUボードが完成しました。その実装

は、研開本部部品グループの全面的な協力によるものです。

そして一番の感謝は、MDPを中心におこなったミッション部試験に、長時間お付き合い頂いたことです。ノミナルな手順はもちろんのこと、多岐にわたる異常ケースへの対応手順を作り上げていくことに、試験時間を気にせずにつき合って頂いたMASC (MHIエアロスペースシステムズ) やミッション機器担当者に本当に感謝します。インターフェースを切った開発、手順書通りの試験はもちろん大事ですが、問題発生時に一体となって解決する雰囲気が一番大事だと思っています。「高島さん、不具合が出ると嬉しそうにみえますよ。」と言われたことを思い出します。地上で出る不具合は「今みつかったよかった。」がいつしか合言葉となっていました。

国内・海外ベンダーのエンジニアとFace to Faceのやり取りで生まれてきたのが、MDPです。一度も止まることなく5年を迎えたMDPの開発に携わって頂いた、すべての人に感謝致します。ありがとうございます!



う

▶宇宙嵐（うちゅうあらし）

太陽面の爆発現象（太陽フレア）の発生など、太陽活動に起因する大規模な太陽風擾乱が惑星間空間を伝わり、地球や惑星周辺の宇宙環境を大きく乱す現象のこと。

▶宇宙天気予報（うちゅうてんきよほう）

太陽活動に伴って発生する地球周辺の宇宙環境の乱れを予測する技術のこと。

え

▶L 値（えるち）

ある場所からその場所を通る磁力線をたどって磁気赤道までたどり着いたとき、その場所の地球中心からの（地球半径を単位とした）距離のことを、ある場所の L 値と呼ぶ。L 値が大きい程、磁気赤道では地球からの距離が遠くなり、地上では高緯度に対応する。

か

▶荷電粒子（かでんりゅうし）

正の電気を帯びたイオンと負の電気を帯びた電子のこと。

こ

▶高エネルギー粒子（こうえねるぎーりゅうし）

プラズマ中の荷電粒子の平均的なエネルギーよりもずっと高いエネルギーを持つ荷電粒子のこと。

▶コーラスエレメント（こうらすえれめんと）

秒以下の繰り返し周期でコーラス波動が周波数を変えながら発生すること。電子との非線形相互作用によって波動の振幅が成長することで発生すると考えられている。

▶コーラス波動（こうらすはどう）

宇宙空間で自然発生するプラズマ波動の一種。宇宙空間に存在する高温電子の磁力線周りの旋回運動と共鳴することで発生すると考えられている。地球周辺では周波数が数千ヘルツの可聴帯の電磁波であり、第一次世界大戦のころから、“小鳥のさえずり”のように聞こえる電磁波として知られていた。

し

▶ジオスペース（じおすぺーす）

地球をとりまく宇宙空間のこと。人類の活動領域になりつつある。

▶磁気音波（じきおんぱ）

磁力線を横切りながら宇宙空間を伝搬するプラズマ波動の一種。地球周辺では、磁気赤道付近で 10 ヘルツから数十ヘルツの周波数帯で観測される。

▶磁気赤道（じきせきどう）

地球の自転軸を基準とする地理赤道に対し、地球磁場を基準とした赤道のこと。

た

▶太陽風（たいようふう）

太陽から吹き出すプラズマの風のこと。平均的な速度は秒速 400km 程度。プラズマが太陽の磁場を引きずり出しながら地球磁気圏に吹きつけることで、太陽風のエネルギーの一部が地球磁気圏内に蓄えられる。

▶太陽フレア（たいようふれあ）

太陽表面で発生する大規模な爆発現象のこと。

て

▶電子ボルト（でんしぼると）

エネルギーの単位で eV と表される。1 電子ボルトは素電荷（電子 1 個の持つ電荷の符号を + に代えた量）が 1 ボルトの電位差で加速されるときエネルギー。1 keV（キロ電子ボルト）= 1000 eV。1 MeV（メガ電子ボルト）= 1000000 eV。

▶電磁イオンサイクロトロン波（でんじいおんさいくろとろんは）

宇宙空間で自然発生するプラズマ波動の一種。宇宙空間に存在する高温イオンの磁力線周りの旋回運動と共鳴することで発生すると考えられており、磁場に沿う方向に伝搬しやすい性質を持っている。地球周辺では数百ミリヘルツから数ヘルツで観測される。イオンや超高エネルギー電子を散乱し、地球大気に落下させるという重要な役割を担っていると考えられている。

は

▶波動粒子相互作用（はどうりゅうしそうごさよう）

宇宙プラズマ中で、電磁波動と荷電粒子（電子・イオン）との間でエネルギーの授受が行われる過程のこと。荷電粒子が加速されたり、粒子の運動が乱されたりするなどの要因となる。

ふ

▶フットプリント（ふつとぷりんと）

衛星の位置を、磁力線を辿って地球の電離圏高度まで投影したときの終点。プラズマ中の荷電粒子は磁力線に沿って運動するため、衛星のフットプリントが地上カメラの視野に入っている場合、地上と衛星で対応したプラズマ現象を観測していることになる。

▶プラズマ（ぶらずま）

荷電粒子（イオンと電子）からなる電氣的に準中性のガスのこと。荷電粒子から構成されるので、プラズマの運動は電磁気的な力の影響をうける。宇宙空間はプラズマで充たされている。

▶プラズマ波動（ぶらずまはどう）

プラズマ中に特有にみられる電磁波動のこと。本特集号で扱われる、コーラス波動、電磁イオンサイクロトロン波、磁気音波などはプラズマ波動の一種である。

▶フラックス（ふらっくす）

単位時間単位面積あたりに流れるプラズマの量を表す。

▶プロトンオーロラ（ぶるとんおーらーら）

水素イオン（プロトン）が大気に向かって降り込み、大気粒子と衝突することによって発生するオーロラ。電磁イオンサイクロトロン波が宇宙空間でイオンを散乱すると、散乱されたイオンの一部が大気に向かって降り込み、プロトンオーロラを発生させると考えられている。

ほ

▶放射線帯（ほうしゃせんたい）

地球を取り囲むドーナツ状の領域で、ジオスペースで一番エネルギーの高い荷電粒子が充滿している。高エネルギー粒子が人工衛星の障害の原因となることから、宇宙の中でも特に注意が必要な領域として知られる。発見者の名前にちなんで、ヴァン・アレン帯とも呼ばれる。

み

▶脈動オーロラ（みゃくどうおーらーら）

形があいまいなディフューズオーロラの種類で、明るさが準周期的に変動するオーロラ。その明るさの変化には、数秒から数十秒のビートで明滅する主脈動と、1 秒間に 3 回くらいの内部変調（またたき）が重なり合う階層的な構造がある。「あらせ」の観測によって、コーラス波動が原因となっていることが実証された。

編集後記

ISAS 伝統の研究対象である磁気圏は、われわれの生活にも密接に関わっている一方、分野外の者にはなかなか理解しがたい領域という印象があります。このたび、プロジェクトの全面的な協力を受けて、5 年間の「あらせ」の成果をまとめる事が出来ました。本特集が、読者の興味を呼び起こし、未来へ続く研究への一里塚となることを願います。（山村一誠）



ISASニュース あらせ特集号

ISSN 0285-2861

発行／国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
発行責任者／宇宙科学広報・普及主幹 藤本 正樹
編集責任者／ISAS ニュース編集委員長 山村 一誠
デザイン制作協力／株式会社アズディップ
〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1
E-mail: isasnews@isas.jaxa.jp FAX: 042-759-4251

ISASニュースはインターネットでもご覧いただけます。▶ <https://www.isas.jaxa.jp/>