



小特集 ジオスペースと実験室におけるプラズマの波動粒子相互作用研究の進展

3. あらせ衛星によるジオスペースにおける 波動粒子相互作用研究の進展

3. Recent Progress of Wave-Particle Interactions in the Space Plasma: Arase Observations

三好由純, 篠原 育¹⁾, 笠原 禎也²⁾, 松岡 彩子³⁾, 小嶋 浩嗣⁴⁾

MIYOSHI Yoshizumi, SHINOHARA Iku¹⁾, KASAHARA Yoshiya²⁾,

MATSUOKA Ayako³⁾ and KOJIMA Hirotsugu⁴⁾

名古屋大学宇宙地球環境研究所, ¹⁾宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所,

²⁾金沢大学総合メディア基盤センター, ³⁾京都大学大学院理学研究科, ⁴⁾京都大学生存圏研究所

(原稿受付: 2020年12月22日)

ジオスペースと呼ばれる地球近傍での宇宙空間における相対論的電子の変動過程と, 宇宙嵐をはじめとする様々な擾乱過程においては, その場での詳細なプラズマ粒子および電磁場の直接観測が必須となる. しかし, 強放射線環境のために, そのような観測の実現はきわめて困難であった. この問題の解決をめざして, 2016年に「あらせ」と呼ばれる新しい科学衛星がJAXAによって打ち上げられた. 「あらせ」衛星には 10 eV から MeV を超える広いエネルギー帯域と, 直流から 10 MHz の広い周波数帯域の電磁場を計測する機器が搭載されており, これまで数多くの科学成果を上げてきている. 本章では, 特にプラズマ波動粒子相互作用に焦点をあてて, 「あらせ」衛星の最新の科学成果を紹介する.

Keywords:

Arase satellite, geospace, van allen belts, whistler mode, cyclotron resonance, fast mode

3.1 はじめに

地球は固有磁場をもつ惑星であり, 太陽からの超音速プラズマ流である太陽風, 及び太陽に起源をもつ惑星間空間磁場 (Interplanetary Magnetic Field: IMF) との相互作用を通して, 磁気圏と呼ばれる領域を形成している. 磁気圏においては, 1 eV 以下から 1 MeV を超える幅広いエネルギー帯のプラズマ粒子が存在し, 太陽や太陽風の変動に応じて, 活発な変動を繰り返している. この磁気圏には, ULF 帯から HF 帯の幅広い周波数帯において, 様々なプラズマ波動が存在している [1].

磁気圏のプラズマ粒子は, その平均自由行程が極めて長いので, 粒子間の衝突は起こらず, 無衝突プラズマ系を構成している. したがって, 磁気圏のプラズマ粒子のダイナミクスにおいては, プラズマ波動との波動粒子相互作用が重要な役割を担っていると考えられている.

磁気圏において, 特に静止軌道 (高度 約 36,000 km) よりも内側の領域を内部磁気圏と呼ぶ. 図 1 は, 内部磁気圏におけるプラズマ粒子の分布を地球からの距離とエネルギーの関数として示したものである [2]. 数百 keV を超えるエネルギー帯には, 放射線帯 (ヴァン・アレン帯) と呼ばれる高エネルギーの電子, イオン群が存在している. 同じ場所において, 数 keV から ~100 keV にはリングカレン

ト, プラズマシートと呼ばれるエネルギー階層の分布が存在している. この領域は, 圧力あるいはプラズマベータに寄与している. さらに低いエネルギー階層では, プラズマ圏と呼ばれる地球の超高層領域に存在する電離圏に起源をもつ冷たい (1 eV 以下) 高密度のプラズマが存在する.

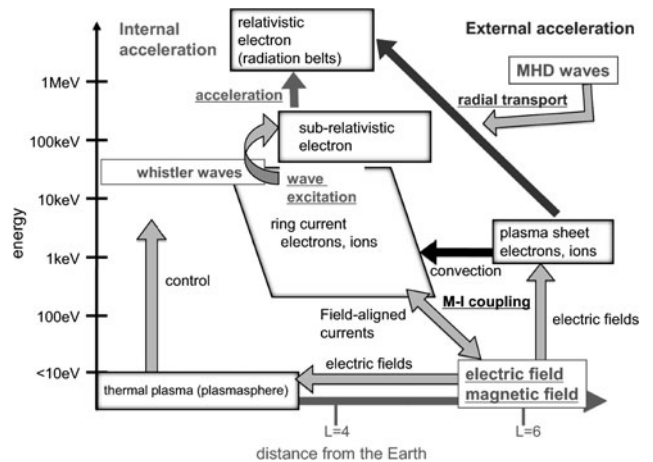


図 1 内部磁気圏における各エネルギーのプラズマ粒子の分布を地球からの距離 (横軸) とエネルギー (縦軸) で示したものである. 図中の Fast mode 波動, whistler mode 波動は, それぞれ加速に関わる波動を示す [2].

Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University,
Graduate School of Engineering, Nagoya University, NAGOYA 464-8601, Japan

corresponding author's e-mail: miyoshi@isee.nagoya-u.ac.jp

太陽風やIMFの状態は時時刻々と変化しており、特に強い南向きのIMFや速い太陽風の到来に伴って、磁気圏では電磁環境擾乱が発生する。南向きのIMFが到来した際には、サブストームと呼ばれる状態が発生し、北極や南極地方で1-2時間にわたるオーロラの爆発的な増光が起きたり、磁気圏の夜側領域から内部磁気圏に向かって高温プラズマの注入が起こる。これに対して、さらに強い南向きのIMF、また高速の太陽風が到来すると、宇宙嵐 (Geospace Storm) が起こる。宇宙嵐は、数日間にわたって続く現象であり、数十 keV のイオンのフラックスが増大し、内部磁気圏のプラズマ圧力の上昇に伴って、強い反磁性電流が流れる。これがリングカレントと呼ばれる電流であり、平均的には西向きに流れる電流によって南向きの磁場が発生し、地球表面の北向き磁場を減少させる。リングカレントが増大している期間を磁気嵐主相、増加したリングカレントが減少している期間を回復相と呼ぶ。

3.2 放射線帯を作り出す波動粒子相互作用

この宇宙嵐の時、放射線帯の相対論的なエネルギーをもつ電子は極めて不思議な変化を示す。まず、宇宙嵐の主相において、放射線帯の相対論的電子群は消失する。その後、宇宙嵐の回復相において、放射線帯の電子は、宇宙嵐開始前の状態に回復、そしてしばしば宇宙嵐開始前よりも大きなフラックスを示す。これは、相対論的電子を作り出す加速機構が磁気圏に存在していることを意味している。

無衝突プラズマ系であるジオスペースにおいては、プラズマ波動と電子との相互作用が、放射線帯を構成する相対論的エネルギーを持つ電子の加速や輸送、さらには消失過程に重要な役割を担っていると考えられてきた。

以下に、主要な波動とその役割についてまとめる。

(加速・輸送過程)

① MHD/Fastモード波動とのドリフト共鳴による動径方向輸送

磁気圏においては、太陽風の変化に起因して周期数分のFastモードの波動が存在する。また、リングカレントを担うイオンの不安定性によっても、このFastモードの波動の励起が起こる。このFastモードの周波数 ω とその経度方向の波数(モード数) m が、電子のドリフト周期 ω_d と、以下の関係を満たしているときにドリフト共鳴が起こり、電子の動径方向の加速が起こる。

$$\omega = m\omega_d \quad (1)$$

この相互作用においては、電子の第一、第二断熱不変量は保存し、第三断熱不変量のみが破れた状態で輸送が起こる。そのため、磁場強度が強い方向へ輸送が起こると、ベータトロン加速によって、電子が加速され、放射線帯の電子群の構成に寄与すると考えられてきている。

② ホイッスラーモード波動とのサイクロトロン共鳴による加速

上記の①の過程は、放射線帯が1950年代末に発見さ

れて以来、放射線帯を構成する主要な加速過程と考えられ、木星や土星といった他の惑星放射線帯においても支配的な加速過程と考えられてきた。一方、1990年代末より、周波数 数 kHz のホイッスラーモード波動によるサイクロトロン共鳴による電子の加速がクローズアップされてきた。以下にサイクロトロン共鳴条件を示す。

$$\omega - kv = n \frac{\Omega}{\gamma} \quad (2)$$

ここで、 ω はホイッスラーモード波動の周波数、 k は波数、 v は電子の速度、 Ω はサイクロトロン周波数、 γ はローレンツ因子、 n は整数である。本小特集にも掲載されているが、その後の理論的な研究によって、ホイッスラー波動のうち、周波数変調を伴う非線形のコーラス波動と電子との相互作用による電子の加速過程についての研究も急速に進められ、従来考えられてきたよりも短い時間スケールにおいて、相対論的なエネルギーを持つ電子の形成が可能であることも指摘されてきた。

この過程においては、ホイッスラーモード波動の励起は、リングカレントやプラズマシートを構成する数 keV から数十 keV のエネルギー帯の電子の温度異方性、およびその後の非線形発展によって励起する。さらに、1 eV 以下の冷たいプラズマが背景媒質として、波動の分散関係や共鳴条件を変化させるため、1 eV から放射線帯の MeV にいたる 6 桁以上の異なるエネルギー階層のプラズマ粒子群がプラズマ波動を介して、動的に結合するエネルギー階層間結合が起きている [3]。

(消失過程)

① 惑星間空間への粒子の流出

太陽風の動圧の変化に伴う昼側の磁気圏形状の変化や、磁気再結合による磁気圏の磁力線の惑星空間磁場へのつなぎ代わりなどによって、放射線帯に捕捉されていた電子が惑星間空間に消失することが考えられている。これまで、この過程で相対論的電子が惑星間空間に流出していることは実証されていないが、多くの傍証から、放射線帯の消失過程の有力な機構とされている。

② プラズマ波動によるピッチ角散乱による大気への消失

ホイッスラーモード波動や、電磁イオンサイクロトロン波動と電子とのサイクロトロン共鳴によって、磁力線をミラー運動していた電子のピッチ角散乱が起こり、ロスコーンへと降り込むことで、大気へと消失する。数 keV、数十 keV の電子が降り込んだ場合には、ディフューズオーロラや脈動オーロラといった発光現象を伴う。一方、相対論的電子の場合には、オーロラが発光しているよりもさらに低高度の中間帯と呼ばれる領域まで降り込み、その場所の大気化学組成を変化させることが指摘されている。

3.3 「あらせ」の挑戦

3.2章で示したように、放射線帯電子の変動機構、特に加速過程においては、1990年代末に新しい加速機構が提案され、ホイッスラーモード波動を介した異なるエネルギー階層間の結合過程の重要性が指摘されてきた。しかし、放射線帯の中での人工衛星による科学計測は、放射線帯による衛星の障害や、計測する信号への雑音混入からきわめて困難であり、実現してこなかった。

放射線帯電子の加速過程と宇宙嵐の解明を主目的として、2012年に米国 NASAは、"Van Allen Probes"と呼ばれる人工衛星を、そして2016年末に JAXA 宇宙科学研究所は、「あらせ」と呼ばれる人工衛星(図2)をそれぞれ打ち

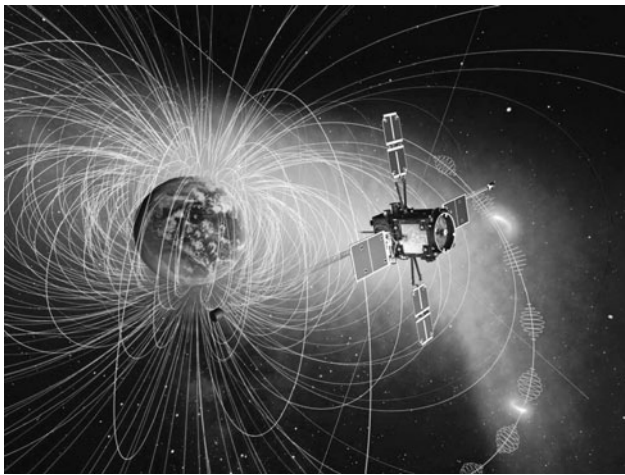


図2 内部磁気圏を観測する「あらせ」衛星の想像図[2].

上げ、放射線帯、そしてジオスペースの変動現象の直接観測をスタートした[2].

特に「あらせ」は、小型・軽量化と耐放射線向上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 eV から数 MeV にいたる広いエネルギー帯のプラズマ粒子の3次元速度分布関数観測、直流から 10 MHz 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た。観測機器群の詳細は、各観測機器に関する論文([4-15])を参考いただきたい。特に粒子分析機器においては、従来の粒子分析器の角度分解能が22度程度であったのに対し、特定のエネルギー帯、特定の方向については5度以下の角度分解能での観測を実現することに成功している。さらに、データ伝送量の関係から、従来の科学衛星におけるプラズマ波動観測は、周波数スペクトル観測が主であったのに対し、「あらせ」衛星は、Wave Form Captureと呼ばれる高いサンプリングレートでの波形観測のモードを有し[10]、テレメトリの許す限りの波形観測データの受信を実施してきている。

図3に、「あらせ」衛星が観測した内部磁気圏における様々なプラズマ波動の例を示す。プラズマ圏の中に出現する周波数数 kHz のホイッスラーモードであるヒス波動、プラズマ圏の外で発生する非線形ホイッスラーモード波動、また、イオンに関係した波として、Equatorial Noise (イオンバーンスタイン波動)、電磁イオンサイクロトロン波動、また、周期数分の MHD Fast モード波動が示されている。

「あらせ」衛星は、打ち上げ以降、多くの科学成果をあげてきているが、ここでは、紙幅の関係から「あらせ」衛

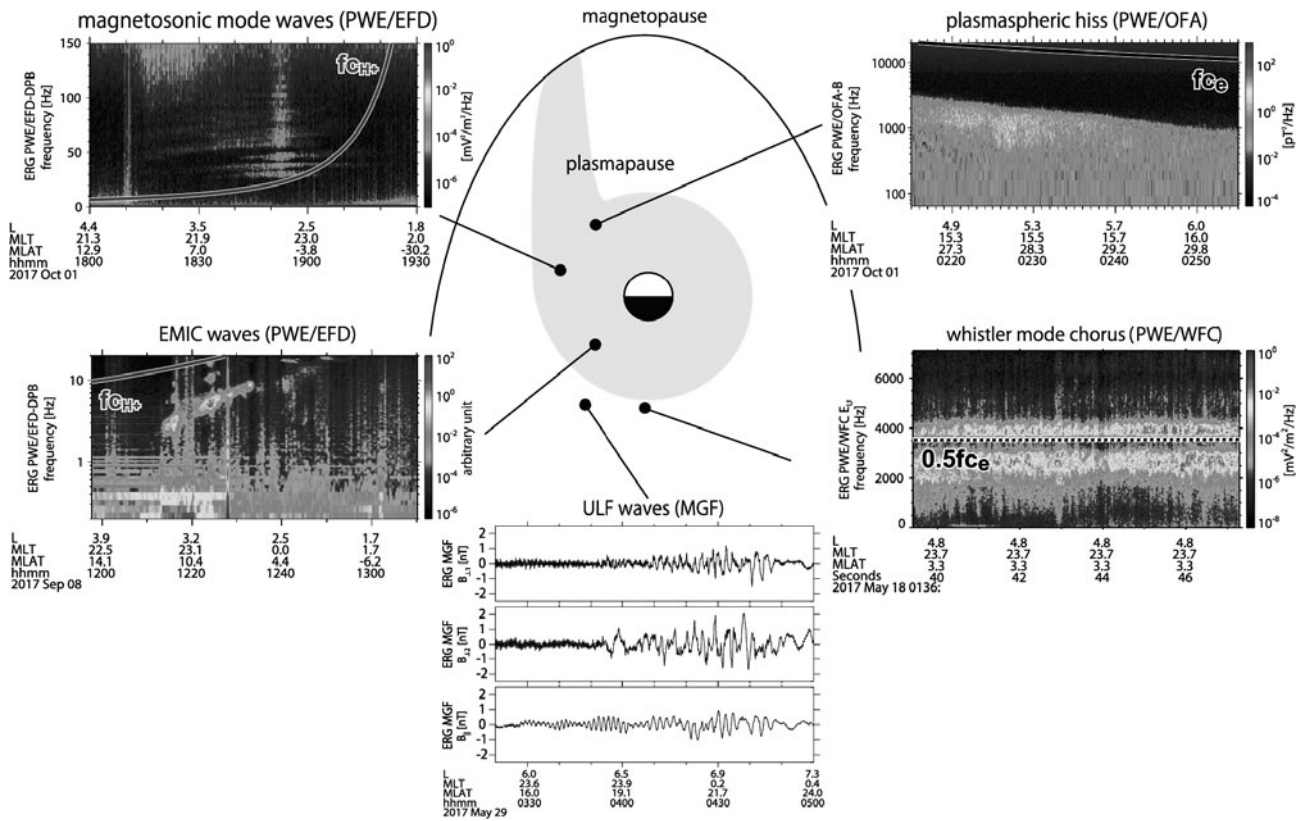


図3 「あらせ」衛星が観測したプラズマ波動の例[2].

星による成果のうち一部をとりあげて紹介する。

3.3.1 ホイッスラー波動による高エネルギー電子生成過程

図4に、「あらせ」が観測したホイッスラー波動によって、電子が加速されている例を示す。左側に示した周波数-時間ダイアグラムから、「あらせ」がホイッスラーモード波動の出現を観測していることがわかる。この前後の期間を(a)-(d)とした際の分布関数の変化を右側に示す。(a)がホイッスラー波動出現前、(b)-(d)がホイッスラー波動出現後の電子の分布関数の変化である[16]。(a)と(d)を比べた際に、(a)の図には見られていない成分が出現している。この新たに出現した成分は、同時に観測されたホイッスラー波動の周波数特性から予想されるエネルギーに一致しており、ホイッスラー波動が電子を加速して、電子量を増加させたことを意味する。このようにホイッスラー波動によって、宇宙空間で電子が加速されている実証的な証拠は、世界ではじめて「あらせ」によって得られたものである。さらに、この加速過程の素過程を明らかにするために、「あらせ」が観測したホイッスラー波動と電子の分布関数を初期条件としたシミュレーションが行われ、位相空間におけるホイッスラー波動による phase trapping が、このような強い加速を引き起こしていることが実証された[17]。

3.3.2 ホイッスラー波動による電子のピッチ角散乱の実証

次の例は、同じくホイッスラー波動が、電子を散乱させてオーロラを起こしている事例である。オーロラは、磁気圏の電子が地球の超高層大気に降り込んで起こる発光現象である。オーロラには、いくつかのタイプがあるが、ディフューズオーロラと呼ばれる淡いオーロラや周期数秒で明

滅する脈動オーロラと呼ばれるタイプのオーロラは、このホイッスラー波動によって、電子のピッチ角散乱が起こり、その結果磁力線に沿って大気へと降り注いで発生すると考えられている。

磁気圏においては、ロスコーンの角度は数度ときわめて狭い角度であり、従来の粒子検出器では、そのような小さな角度を分解することができないために、実際にピッチ角散乱が起こって、大気へと電子が降り込んでいく過程は実証されていなかった。これに対して「あらせ」は、これまでにない高い角度分解能を持つ電子分析器を搭載し、この電子を直接観測することに世界で初めて成功した[18]。

図5に、「あらせ」が高度30,000 km付近で、観測したホイッスラー波動を示す。波動が間欠的に出現したり消えたりしていることがわかる。図5の中はロスコーン方向、図5の下はロスコーン外の磁力線に捕捉されている電子の分布を示す。磁力線方向、すなわちロスコーン内部の電子は、波動にあわせてその強度が変わっていることがわかる。一方、ロスコーンの外の電子は、変化が見えていない。磁気圏ホイッスラー波動は、可聴帯の電波であり、音声信号に変換すると小鳥の声のように聞こえるため、「宙のさえずり」と呼ばれている。このとき、「あらせ」と磁力線につながったカナダ上空では、明滅するオーロラが観測されており、コーラス波動との共鳴によって、ロスコーンに散乱された電子が脈動オーロラを起こしていることが世界で初めて実証された。

この過程を、さらに詳しく調べるために、私たちは、北極域に超高速オーロラ撮像ネットワークを構築してきた[19, 20]。コーラス波動は、周波数の上昇を伴う継続時間数

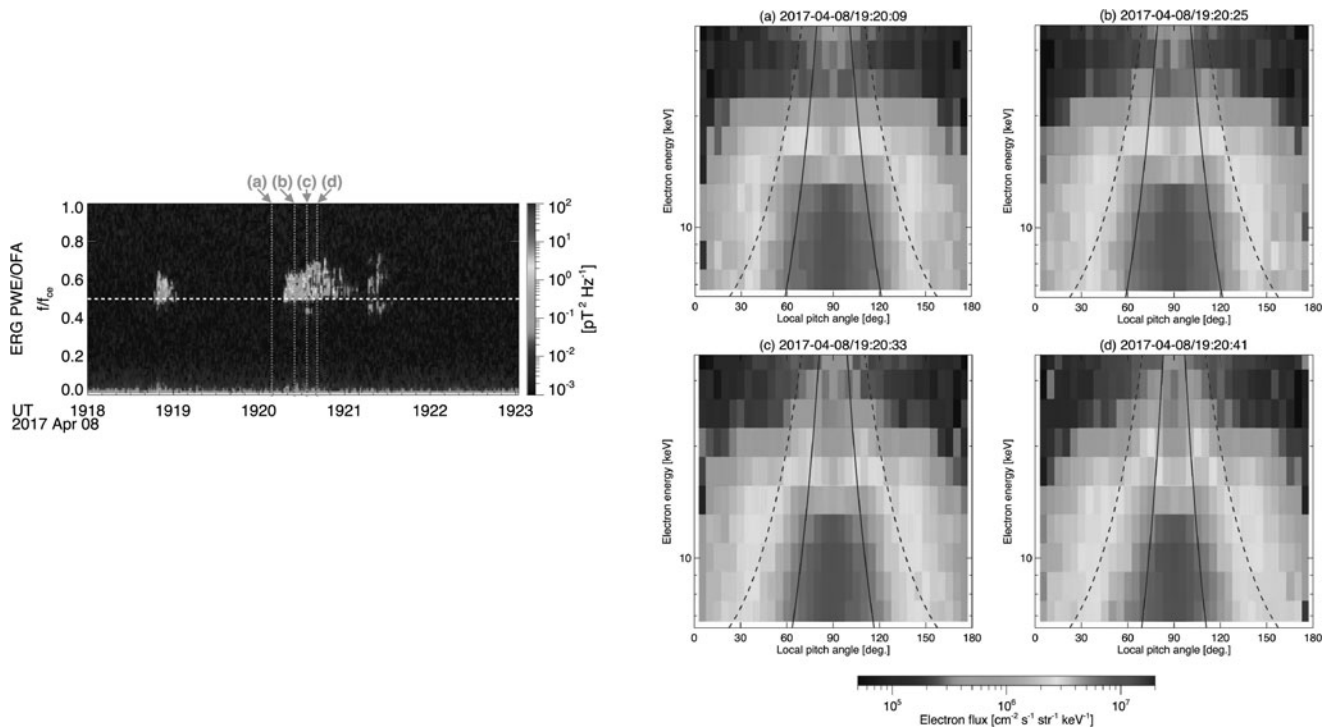


図4 「あらせ」衛星が観測したホイッスラーモード波動による電子加速の例。(上図)「あらせ」衛星が観測したプラズマ波動の周波数-時間ダイアグラム。(左下)波動が発生する前の電子の分布関数。横軸にピッチ角、縦軸にエネルギーを示す。(右下)波動が発生した後の電子の分布関数[16]。

百ミリ秒のエLEMENTが、1秒間に数回出現し、かつそのような現象が数秒間続いてバーストと呼ばれる構造を形成することが知られている。「あらせ」とこれらのオーロラ高速撮像との比較研究から、数秒ごとに明滅する脈動オーロラ、その中で1秒間に数回瞬くオーロラの変調が、コーラスバースト、そして一つ一つのコーラスELEMENT構造に対応していることが明らかになった[21]。

3.3.3 MHD 波動による高エネルギー電子変調過程

ホイッスラーモード波動と電子との相互作用に加えて、「あらせ」はMHD波動との相互作用についても多くの科学成果をあげている。

図6は、「あらせ」衛星と米国のVan Allen Probes衛星の同時観測にもとづく観測結果である。このとき、「あ

せ」衛星は、磁気圏の朝側の領域を、Van Allen Probes衛星は、同じドリフトシェル上(L値)の夕方側の領域において観測を行っていた。両方の衛星とも、周期数分での電子フラックスの変調過程を観測しているが、特に「あらせ」衛星の方では、エネルギーによって位相が異なるエネルギー分散構造が見えている。これは、変調されている領域が「あらせ」とは異なる経度帯にあり、そこから「あらせ」の場所までドリフトしてきた電子が、高エネルギーから先に到着していることを示している。一方、磁場の変動については、Van Allen Probes衛星では、粒子の変調に同期した変化が見えているものの、「あらせ」では有意な磁場の変動が見えていない。これは、磁場によるドリフト共鳴が起きている場所が、Van Allen Probes周辺に局在化してい

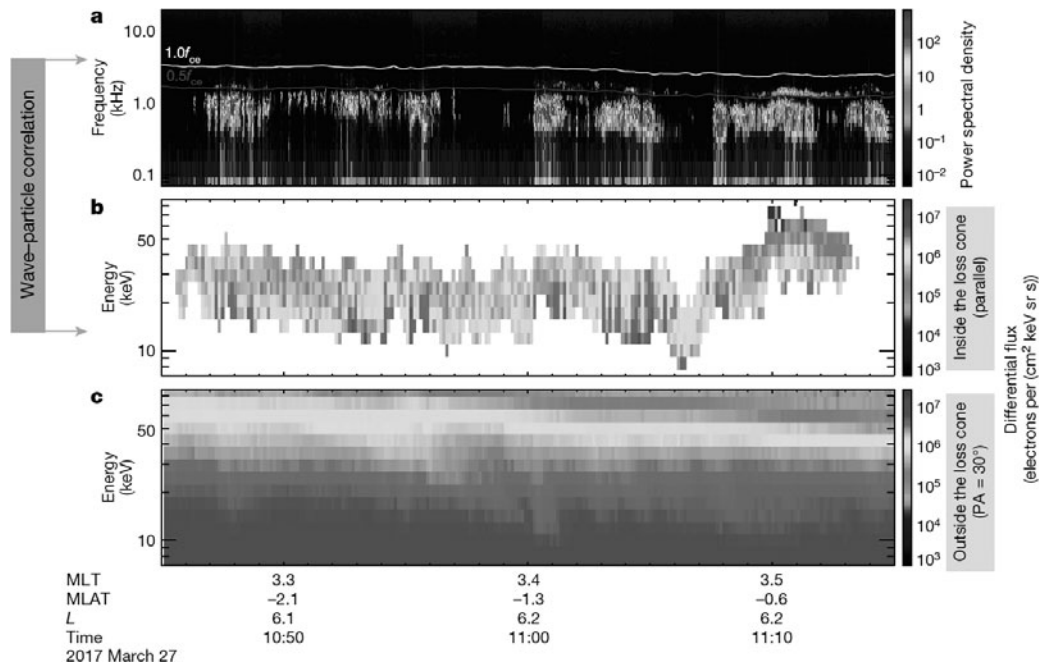


図5 (上)「あらせ」が観測したプラズマ波動の周波数-時間ダイアグラム。間欠的に発生する波動が、ホイッスラーモードコーラス波動。(中)「あらせ」が観測したロスコーン内の電子のエネルギー-時間ダイアグラム。(下)「あらせ」が観測したロスコーンの外の電子のエネルギー-時間ダイアグラム[18]。

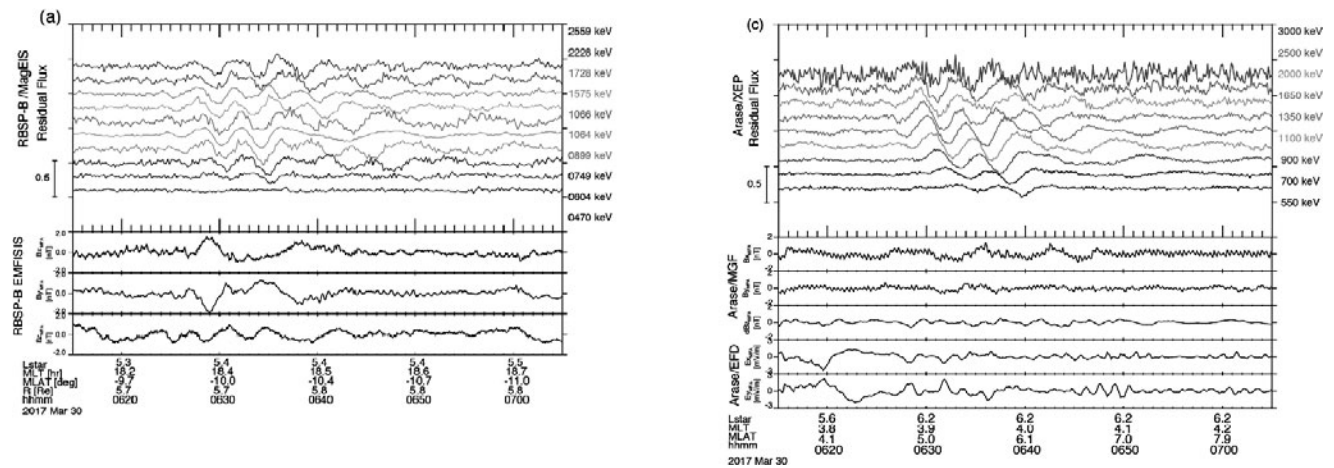


図6 (左上) Van Allen Probes衛星が観測した相対論的電子のフラックスの時間変化。(左下) 同衛星が観測した背景磁場の変化。(右上) 「あらせ」衛星が観測した相対論的電子のフラックスの時間変化。(右中) 同衛星が観測した背景磁場の変化。(右下) 同衛星が観測した電場の変化。このとき、Van Allen Probes衛星は夕方側に、「あらせ」衛星は朝側で観測を行っていた[22]。

ることを意味している[22]. これまで、相対論的電子のドリフト運動と MHD 波動との共鳴についての報告は行われていたが、その相互作用が起きている経度幅については、単一の衛星観測では困難であるためわかっていなかった。「あらせ」衛星と Van Allen Probes 衛星という 2 つの衛星が同時に同じドリフト軌道を異なる経度帯で観測するという好機を活かした観測によって、はじめて、ドリフト共鳴が起きている経度帯が局在化していることが明らかになった。

3.3.4 イオンによる MHD 波動の励起

磁気圏における Fast モード波動は、太陽風の変化に伴った磁気圏界面で磁気音波が励起するプロセスの他、数十 keV のイオンの持つ不安定性で励起する可能性が指摘されている。

経度方向をドリフトするイオンと Fast モード波動の共鳴条件は

$$\omega - m\omega_d = N\omega_b \tag{3}$$

で与えられる。ここで ω_b はイオンのバウンス周期、 N は整数である。イオンの持つプラズマ不安定性で、Fast モードの波動が励起する場合、分布関数 f のエネルギーおよび空間（動径方向）の勾配構造が重要となる。

$$\frac{df}{dW} = \frac{\partial f}{\partial W} + \frac{dL}{dW} \frac{\partial f}{\partial L} \tag{4}$$

そのため、このエネルギー方向および空間方向の勾配を計測することによって、どの項が実際の波動の成長に寄与しているかを特定することが可能となる。

「あらせ」衛星は、10 eV/q から 180 keV/q までの各種のイオンについて 3 次元速度分布関数を行っており、イオンサウンディングと呼ばれる手法を用いることで、ジャイロ運動をしているイオンのジャイロ位相も特定可能である。

この観測を活かすと、「あらせ」衛星に対して離れた場所に旋回中心を持つイオンを方向ごとに分けることで、たとえば「あらせ」に対して地球側に旋回中心を持つイオンと、反地球側に旋回中心を持つイオンの分布の違いを調べることが可能になる。

図 7 に、「あらせ」衛星が計測した 109.6 keV のプロトンの動径方向の勾配、ならびにエネルギー方向の勾配を示す[24]。このとき、「あらせ」衛星は強い Fast mode 波動を観測していた。動径方向の勾配からは、地球方向に勾配があること、またエネルギースペクトルからは、40 keV/q から 100 keV/q にかけて bump があることがわかる。成長率の計算から、観測された Fast モード波動は、イオンの分布の空間勾配によって成長していることが示され、内部磁気圏の Fast mode 波動の励起には磁気圏のプラズマ不安定性も寄与していることを実証した。なお、この励起過程については、ドリフト運動論に基づくシミュレーション[25]によっても同定されている。

3.4 むすびにかえて

本章では、紙幅の都合で、「あらせ」の観測結果のごく一部の成果しかご紹介できなかったが、「あらせ」は、2016年の打ち上げ以来、順調に観測を継続しており、多くの新しい成果をあげ、ジオスペースの描像を大きく変えつつある。特に、MHD 波動、イオンサイクロトロン波動、ホイッスラー波動と、様々な周波数帯におけるプラズマ波動との粒子との相互作用について、これまでの衛星では実現されてこなかった精密な観測に成功し、波動の励起過程や粒子の加速、散乱過程の実証を行っている。また、磁気圏では、プラズマ周波数とサイクロトロン周波数の比やイオン組成が場所や太陽風の状況によって大きく変化し、様々な波動の分散関係の状態における波動粒子相互作用が発現している。このような波動粒子相互作用過程は、

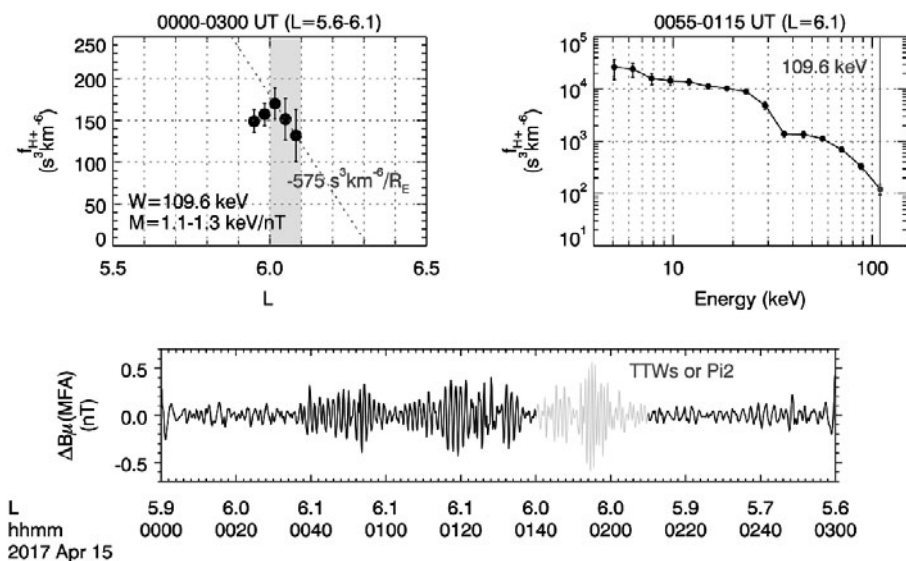


図 7 (左)「あらせ」衛星が観測した 109.6 keV のエネルギーのイオンの空間分布。横軸は地心距離、縦軸は位相空間密度を表す。ここでは、イオンサウンディングという手法を用いて、「あらせ」よりも地球側と反地球側に旋回中心を持つイオンの空間分布を導出している。(右)イオンのエネルギースペクトル。横軸がエネルギー、縦軸が位相空間密度。(下)「あらせ」衛星が観測した Fast モード波動[24].

エネルギー階層間結合を通して、磁気圏における広いエネルギー帯の粒子群のダイナミクスに影響を与えるとともに、大気への降り込みなどを通して、異なる領域間の結合も引き起こす。

「あらせ」計画を含む ERG プロジェクトにおいては、衛星観測と地上観測との連携観測によって、異なる領域における結合過程の研究を進め、波動粒子相互作用が、磁気圏、そして電離圏や大気圏にどのような影響を及ぼすかの実証的な研究を進めている[2]。さらに、ERG プロジェクトでは、シミュレーション研究も活発に進められており、「あらせ」が観測した波動粒子相互作用について、素過程また磁気圏全体におけるシミュレーションなどが行われている[26]。

現在、「あらせ」は打ち上げ4年目を迎え、順調にジオスペースの探査を行っている。2020年からは、第25太陽活動周期がはじまり、今後、太陽の擾乱に伴う宇宙嵐の発生頻度も上がっていくことが期待される。引き続き、様々な観測を実施し、ジオスペース、そして宇宙プラズマにおける波動粒子相互作用の研究の進展に大きく貢献できることが期待される。

参考文献

- [1] Y. Ebihara and Y. Miyoshi, *IGA Special Book Series* (Springer, 2011).
- [2] Y. Miyoshi *et al.*, *Earth Planet Space* **70**, 101 (2018).
- [3] 三好由純 他：プラズマ・核融合学会誌 **89**, 536 (2013).
- [4] Y. Kazama *et al.*, *Earth Planet Space* **69**, 165 (2017).
- [5] S. Kasahara *et al.*, *Earth Planet Space* **70**, 69 (2018).
- [6] T. Mitani *et al.*, *Earth Planet Space* **70**, 77 (2018).
- [7] N. Higashio *et al.*, *Earth Planet Space* **70**, 134 (2018).
- [8] Y. Kasahara *et al.*, *Earth Planet Space* **70**, 86 (2018).
- [9] Y. Kasaba *et al.*, *Earth Planet Space* **69**, 174 (2017).
- [10] S. Matsuda *et al.*, *Earth Planet Space* **70**, 75 (2018).
- [11] A. Kumamoto *et al.*, *Earth Planet Space* **70**, 82 (2018).
- [12] M. Ozaki *et al.*, *Earth Planet Space* **70**, 76 (2018).
- [13] A. Matsuoka *et al.*, *Earth Planet Space* **70**, 43 (2018).
- [14] Y. Katoh *et al.*, *Earth Planet Space* **70**, 4 (2018).
- [15] M. Hikishima *et al.*, *Earth Planet Space* **70**, 80 (2018).
- [16] S. Kurita *et al.*, *Geophys. Res. Lett.* **45**, 12720 (2018).
- [17] S. Saito *et al.*, *J. Geophys. Res.*, **126**, e2020JA028979 (2021).
- [18] S. Kasahara *et al.*, *Nature* **554**, 337 (2018).
- [19] K. Shiokawa *et al.*, *Earth Planet Space* **69**, 160 (2017).
- [20] M. Ozaki *et al.*, *Nature Comm.* **10**, 257 (2019).
- [21] K. Hosokawa, *Sci. Rep.* **10**, 3380 (2020).
- [22] M. Teramoto *et al.*, *Geophys. Res. Lett.* **46**, 11642 (2019).
- [23] D. Southwood *et al.*, *Planet. Space Sci.* **17**, 349 (1969).
- [24] K. Yamamoto *et al.*, *Geophys. Res. Lett.* **45**, 6773 (2018).
- [25] T. Yamakawa *et al.*, *Geophys. Res. Lett.* **46**, 1911 (2019).
- [26] Y. Takeshita *et al.*, *J. Geophys. Res.* **126**, e2020JA028216 (2021).