

小特集 「あけぼの」衛星の四半世紀にわたる観測で明かされたジオスペースの姿と将来展望

6. 「あけぼの」衛星による放射線帯の観測

6. Van Allen Radiation Belts; From Akebono to Arase

三好由純

MIYOSHI Yoshizumi

名古屋大学宇宙地球環境研究所

(原稿受付：2022年7月20日)

1989年に打ち上げられた「あけぼの」衛星は、極域の探査に加えて、内部磁気圏、放射線帯領域の観測も行った。放射線帯電子の加速過程は、放射線帯の発見以来、外部供給過程と呼ばれる断熱加速過程が主と考えられてきた。一方「あけぼの」衛星等の観測から、これまでとは異なる概念ある内部加速と呼ばれる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過程が存在することが示され、内部磁気圏に存在する6桁以上異なるエネルギー階層に分布するプラズマ・粒子群は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重要な役割を果たしていることがわかってきた。この問題意識は、2016年に打ち上げられた「あらせ」衛星の観測へとつながり、現在、「あらせ」衛星によって多くの新たな知見が得られてきている。

Keywords:

Akebono satellite, Radiation Belts, Electron acceleration, Cyclotron resonance, Cross-energy coupling

6.1 はじめに

地球周辺の宇宙空間であるジオスペース、特に内部磁気圏と呼ばれる地球近傍の領域には、放射線帯（ヴァン・アレン帯）と呼ばれる領域が存在する。放射線帯には、数百 ke から数十 MeV のエネルギーを持つイオン、電子から構成され、ジオスペースで一番エネルギーの高い粒子が地球の磁場に捕捉されている。

図1に、放射線帯電子の空間構造の模式図（左）と「あらせ」衛星による2 MeVの電子の観測結果（右）を示す。電子の放射線帯は、「内帯」と「外帯」という地球を取り囲む二つのトーラス状の分布と、その間に「スロット」と呼ばれる電子のフラックスが著しく少ない領域から形成されていることが知られている。なお、近年の研究から、電子の「内帯」は1 MeV以下では見られるものの、1 MeV

以上については、有意なフラックスを持つ内帯はないことがわかっている。一方、イオンの放射線帯はこのような二重構造ではなく、単一のトーラス状の分布として存在している[1,2]。

放射線帯については、「あけぼの」衛星がそのミッションを終えた後、2016年に「あらせ」衛星が打ちあがり、多くの発見を行っている。「あらせ」衛星の最新の成果については、[3,4]等をご覧いただきたい。

6.2 宇宙天気研究と放射線帯

私たちの現代生活にとって必要不可欠なGPS衛星や気象衛星の多くは、放射線帯の中あるいは放射線帯を横切るような軌道で運用されている。放射線帯のエネルギーが高い粒子は、帯電やCPUのビット反転等、人工衛星に様々な影響を及ぼす。特に、放射線帯の電子は、深部帯電と呼ばれる人工衛星内部の帯電を引き起こすことが知られている。実際、放射線帯電子のフラックスが増加した際に、人工衛星の異常が起きやすい傾向があることも指摘されている[5]。

人間活動と密接にかかわる太陽地球系科学の研究のことを「宇宙天気研究」と呼ぶが、人類が宇宙空間で安全に安心して活動していくためにも、放射線帯の研究は、宇宙天気研究において特に重要なものとされており、変動メカニズムの解明と変動の予測を目指した研究が世界で行われている。

6.3 放射線帯の時間変化

図2の上段に、「あけぼの」衛星が観測した2.5 MeV以

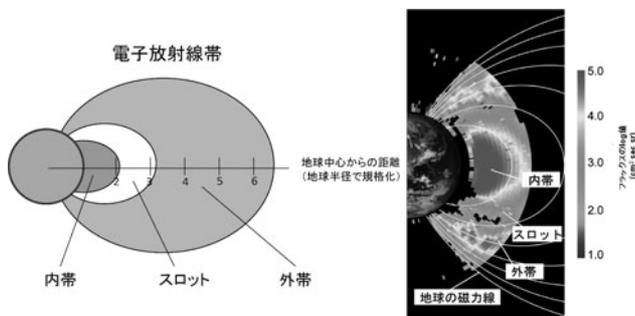


図1 (左)放射線帯電子の空間分布の模式図。(右)「あけぼの」衛星が観測した放射線帯電子(>2.5 MeV)の電子フラックスの空間分布。

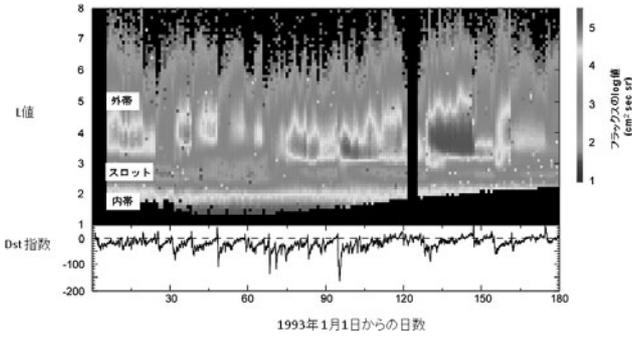


図2 「あけぼの」衛星が観測した1993年の放射線帯電子 (> 2.5 MeV) のデータ。縦軸はL値。色で電子のフラックスを表す。下段は磁気嵐の指標である Dst 指数。

上の電子の時間変化を示す。この図は、横軸に時間、縦軸にL値と呼ばれる地球からの距離をとり、カラーで電子のフラックスを示したものである。ここでL値とは、赤道面を通る磁力線の位置を地球半径で規格化したもので、たとえばL = 4の場合、地球半径の4倍の場所をとる磁力線を表している。下のパネルは、Dst 指数と呼ばれる磁気嵐の指標であり、この指数がマイナスに大きく振れると、磁気嵐が発生していることを意味する。

図2は、1993年の1月1日から6月30日までの期間に対応しているが、この間、磁気嵐が起きると、外帯の電子はいったん消失し、その後ゆっくりと増加し、外帯が再形成されていることが何度も起きていることが分かる。このように外帯の再形成の際、電子フラックスは2桁以上も増大することもあるが、一方でフラックスの増加が起きない磁気嵐や、磁気嵐前に比べてフラックスが減少する場合など、磁気嵐時の外帯の変化は多様な変化を示す[6]。

6.4 エネルギー階層間結合による粒子加速

それでは、放射線帯外帯の電子フラックスは、どのようなメカニズムによって変動するのだろうか。磁場中を運動する荷電粒子は、断熱不変量と呼ばれる保存量が存在しており、第一断熱不変量(サイクロトロン運動に対応)、第二断熱不変量(磁力線に沿った往復運動に対応)、第三断熱不変量(地球の周りを周回するドリフト運動に対応)を定義することができる。このうち第一断熱不変量Mは(非相対論の場合)、以下のように荷電粒子の磁力線に垂直方向のエネルギーE_⊥と、背景磁場Bの比で与えられる。

$$M = \frac{E_{\perp}}{B}$$

このため、地球に近く磁場の強い場所に電子が輸送されると、電子のエネルギーが上昇する(ベータトロン加速)。この輸送においては、上記の3つの断熱不変量のうち、第三断熱不変量のみが破れて、他の2つの不変量は保存している。この過程を「断熱過程」あるいは「外部供給過程」と呼び、1950年代末の放射線帯の発見以来、放射線帯電子加速の主要因として考えられてきた。このとき、電子の輸送を引き起こしているのは、磁気圏に存在するULF帯のMHD波動(Fast mode波動)と考えられており、1990年代

以降の理論研究やシミュレーション研究において、このMHD波動との相互作用の素過程の理解も進み、効率的な電子の加速が可能であることも示されている[7]。

一方、1990年代末に、放射線帯の内部でプラズマ波動とのサイクロトロン共鳴によって電子を加速するという考え方が提案された[8]。サイクロトロン共鳴の条件は、次式で与えられる。

$$\omega - k \cdot v = \frac{n\Omega_e}{\gamma}$$

ここでωは波動の周波数、kは波動の波数ベクトル、vは電子の速度ベクトル、Ω_eは電子のサイクロトロン周波数、γはローレンツファクター、nは整数である。この過程では、特にVLF帯のホイッスラーモード帯の波動との相互作用による加速が重要な役割を担っていると考えられている。また、この過程はすべての断熱不変量が破れるため「非断熱加速」あるいは「内部加速説」と呼ばれる。

この「内部加速」においては、

- 1) ホイッスラーモード波動によって加速される種となる電子群(～数百keV)
- 2) ホイッスラーモード波動を励起する電子群(～数十keV)
- 3) 背景プラズマ媒質として、ホイッスラーモード波動の伝搬特性を決める冷たいプラズマ群(～eV)
- 4) 加速された生成した放射線帯電子(～MeV)

と、6桁以上にわたるエネルギー範囲に存在するプラズマ・粒子群が、波動粒子相互作用によって動的に結合しながら、放射線帯電子を作り出していく。このことを「エネルギー階層間結合(cross-energy coupling)」と呼び[9]、放射線帯電子加速を理解する重要なコンセプトとなっている。

図3に、内部磁気圏に存在する各エネルギー階層のプラズマ・粒子群の分布と概形と「外部供給」、「内部加速」それぞれのつながりを示す。背景媒質として密度を担う冷た

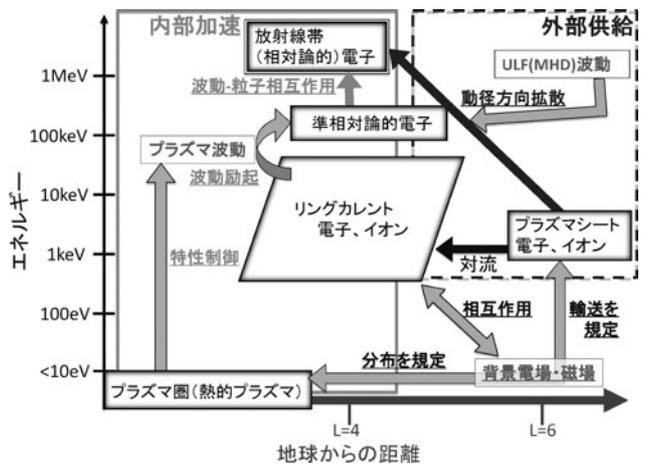


図3 内部磁気圏に分布するプラズマ・粒子群を地球からの距離(L値)とエネルギーとで分類したダイアグラム。放射線帯外帯の形成過程として、MHD波動による外部供給過程と、VLF帯のプラズマ波動による内部加速過程を示し、それぞれの加速過程にどのエネルギー階層のプラズマ・粒子が関わっているかを図示している[1]。

いプラズマ群は「プラズマ圏」と呼ばれており、プラズマ圏界面 (plasmopause) と呼ばれる場所より内側で高密度の領域を形成している。また、ホイッスラーモード波動を励起する電子群は、プラズマシート (plasma sheet) および環電流 (ring current) 群と呼ばれており、その場所のプラズマ圧力を担っている。

この図からもわかるように、「内部加速」においては、広いエネルギー階層のプラズマ・粒子群が相互作用するため、その過程の実証には、広いエネルギー階層のプラズマ・粒子群の観測、またプラズマ波動の観測が重要となる。

「内部加速」が提唱された当初は、内部磁気圏のプラズマ環境や加速効率を考えた場合に、放射線帯の形成には不十分であると思われてきた。1990年代末から2000年代にかけて、「内部加速」の過程の研究が進み、その概念が確立していく際に、「あけぼの」衛星は大きな役割を果たした。次に、その「あけぼの」衛星が観測した放射線帯変動について紹介していく。

6.5 あけぼの衛星による観測

6.5.1 あけぼの衛星

本小特集の他稿で紹介されているように、「あけぼの」衛星は、オーロラ粒子加速過程の解明をめざして、1989年に打ち上げられ、2015年まで継続した観測を行った。「あ

けぼの」衛星の軌道は極軌道と呼ばれるものである。その探査領域は極域だけではなく、図1に示されているように内部磁気圏の領域 (L値) を広くカバーしており、放射線帯の観測も行った[10-12]。なお、衛星の(初期)遠地点高度が約10000 kmであるため、「あけぼの」衛星は放射線帯外帯の赤道面の計測は行うことはできない。

「あけぼの」衛星には、9つの観測器が搭載されている。そのうちの一つである放射線モニター (RDM) によって[13,14]、放射線帯の粒子のフラックスの計測を行っていた。また、低周波プラズマ波動計測器 (VLF) によってホイッスラーモード波動の観測が行われるとともに[15]、高周波プラズマ波動計測器 (PWS) によって、高域混成周波数 (Upper Hybrid Resonance Wave: UHR) の観測が継続的に行われていた[16]。このUHR波動の周波数は、その場所のプラズマ周波数と電子サイクロトロン周波数によって決まるため、UHR波動の周波数からその場のプラズマ密度を決めることができる。

6.5.2 あけぼの衛星による磁気嵐時の観測

図4に1993年11月の磁気嵐時に、「あけぼの」衛星が内部磁気圏を観測した結果を示す。下段には、プラズマ波動の周波数スペクトルと放射線帯電子のフラックスのL値の分布を示している。この図から、放射線帯電子の増加過程は、プラズマ圏の外側で発生しており、また、その場所

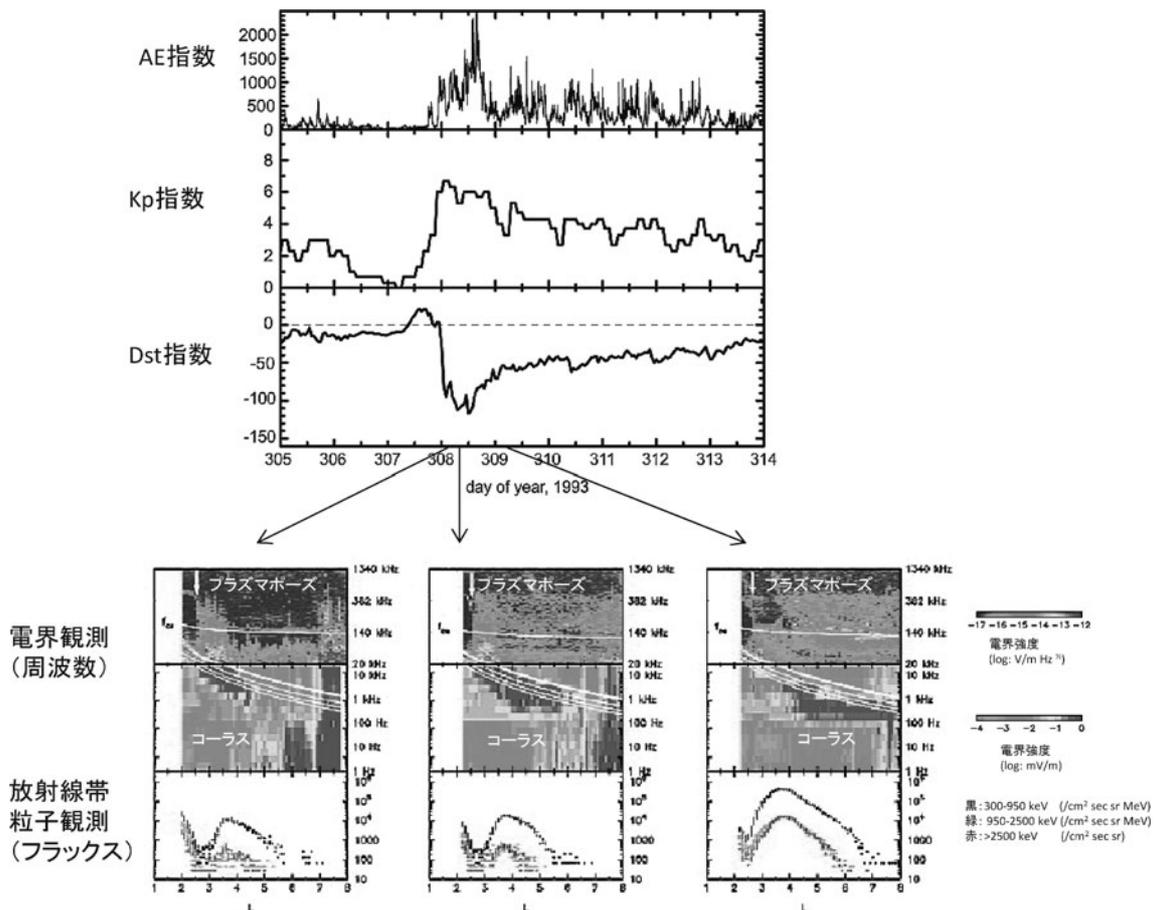


図4 1993年11月におきた磁気嵐期間について、「あけぼの」衛星による内部磁気圏の観測結果。上図は、地磁気活動の指数であるAE, Kp, Dstの各指数を表す。下段は、それぞれの期間に対応する「あけぼの」衛星の観測結果で、プラズマ波動のデータと放射線帯電子フラックスのデータをL値に対してプロットしている。波動のデータは色でその強度を表し、赤く示されているのがホイッスラーモード波動に対応する。また、矢印で、UHR周波数から読み取られたプラズマポーズの位置が示されている。

は強いホイッスラーモード波動が、持続して励起していることも観測されている[17]. さらに、「あけぼの」衛星による電子のピッチ角分布の観測やエネルギースペクトルの観測からも、ホイッスラーモード波動による加速過程が、放射線帯電子フラックスの増加に重要であることを示す結果が得られている. このような事例は、「あけぼの」衛星でしばしば観測されており、ホイッスラーモード波動による内部加速過程を示す結果となっている[17, 18].

図5は、図4の期間を含む1993年11月の「あけぼの」衛星の観測結果を示したものである[19]. この期間、2つの磁気嵐が観測されており、前半(図4に対応する期間)の磁気嵐では放射線帯電子が増大するのに対し、後半の磁気嵐では顕著な増加が起きていない事例を示している. 前半に発生した磁気嵐では、「あけぼの」衛星は強いホイッスラーモード波動が持続的に観測したのに対し、後半に発生した磁気嵐では、観測されたホイッスラーモード波動の活動は限定的なものとなっている. また、低高度衛星の観測データからは、前半の期間ではホイッスラーモード波動を励起する電子群が連続的に内部磁気圏に注入されているのに対し、後半の磁気嵐では電子群の注入がほとんど起きていないことが示されている. ここで示された放射線帯電子の増加の違いは、放射線帯電子の加速がホイッスラーモード波動によって起こるとする「内部加速」でうまく説明することができ、「内部加速」が加速に重要な役割を果たしていることを示すものである. 一方、別の研究からは、この2つの期間の両方において、外部供給に係るULF帯の波動の強度が増加していたことが示されており[20]、「外部供給」では、この2つの磁気嵐における放射線帯電子の増加の違いを説明することは困難である. このような研究を通して、「あけぼの」衛星の観測は、「内部加速」の概念の確立と実証に大きな役割を果たした.

6.5.3 あけぼの衛星による電子急増過程の観測

「あけぼの」衛星は、放射線帯外帯内側およびスロット領

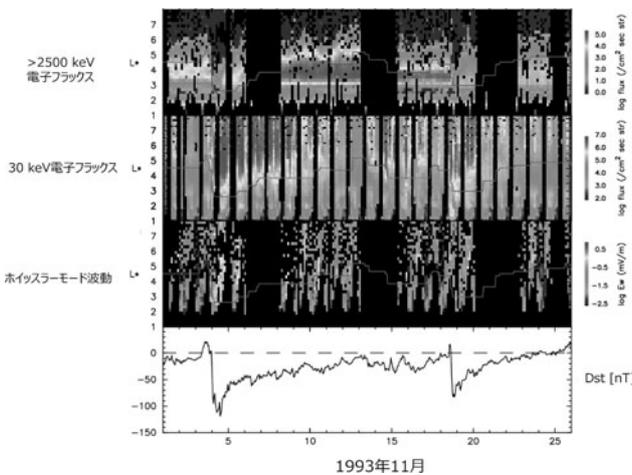


図5 1993年11月に起こった2つの磁気嵐時の内部磁気圏の変動を時間とL値について示したもの. 上から「あけぼの」衛星が観測した放射線帯電子(> 2.5 MeV), 低高度衛星が観測した30 keVの電子, 「あけぼの」衛星が観測したホイッスラーモード波動を示す. 下段は、Dst指数であり、この期間に2回磁気嵐が発生していることがわかる.

域付近において、しばしば、磁気嵐中のサブストームに関連して電子フラックスの急激な増加が起こることを観測している[12, 19]. 図6は、 $L < 3$ のスロット領域において、放射線帯電子フラックスが増加した例を示したものである[21]. この増加の時間スケールは、「外部供給」および「内部加速」で予想される時間スケールよりも短い場合があり、磁気嵐中におこるサブストームの誘導電場が大きな役割を果たしている可能性が指摘されている.

6.5.4 あけぼの衛星によるピッチ角分布の観測

図7に、「あけぼの」衛星が観測した2.5 MeVの電子のフラックスとピッチ角分布を示す[22]. ここで、正の値の場合は、ピッチ角90度付近の電子のフラックスが高いパンケーキ型のピッチ角分布であることを、逆に負の値の場合には、ピッチ角90度付近のフラックスが低いバタフライ型の分布であることを示している. $L = 1.8$ から2.5の赤道面付近において、バタフライ型の分布が発達している領域があることがわかる. 内帯からスロット領域において、このような特徴的なピッチ角分布が存在することを観測したのは「あけぼの」衛星が初めてである. 「あらせ」衛星の観測からもバタフライ型の分布の存在が指摘されており[23], データ駆動型のシミュレーションによってプラズマ波動による散乱によって、このようなピッチ角分布が形成されていることが実証されている[24].

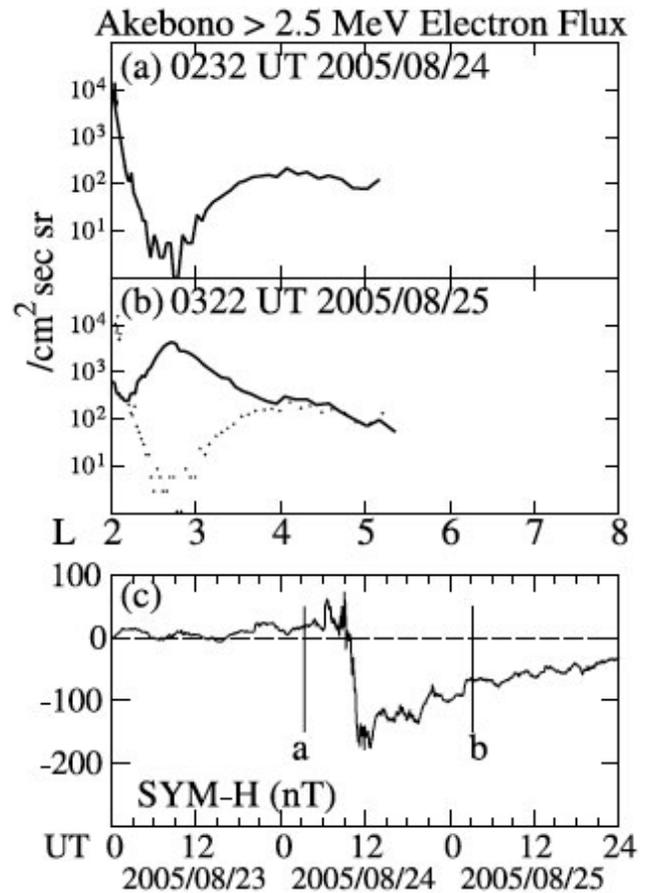


図6 2005年8月に「あけぼの」衛星によって観測されたスロット領域での外帯電子増加の例. 下段のaからbの期間の間に、 $L = 2.5$ 付近を中心に、> 2.5 MeVの電子フラックスが3桁以上増加していることがわかる[21].

EXOS-D RDM : > 2500 keV

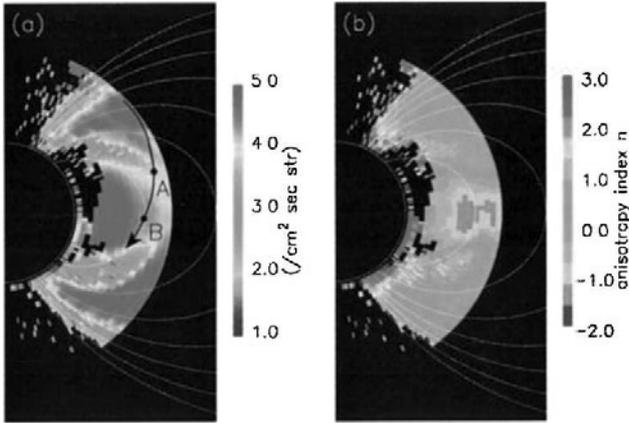


図7 「あけぼの」衛星が観測した放射線帯におけるピッチ角分布の空間分布. (左)>2.5 MeV 電子のフラックスの分布. (右)ピッチ角 α について、ピッチ角分布 $\sin^n \alpha$ をで表したときの n の分布. 正の場合だと、ピッチ角90度付近のフラックスが多いパンケーキ型の分布を、負の場合だと、ピッチ角90度付近のフラックスが少ないダンベル型の分布を示す[22].

6.6 太陽風の変化と放射線帯の関係

6.6.1 放射線帯の増加を引き起こす太陽風

放射線帯外帯の電子の増加は、太陽風の速度とよい関係があり、高速の太陽風が到来した際に、放射線帯外帯電子フラックスは増加する傾向を持つ[25]. また、南向きの惑星間空間磁場 (IMF) も、外帯電子フラックスの増加には重要な影響を及ぼす[26]. 高速太陽風は、惑星間空間においては、Coronal Mass Ejection (CME) や Coronal Hole Stream (CHS) に対応しており、特に南向きの IMF を含む CHS が到来した際に、外帯電子は大きく増加することも知られている [26, 27].

6.6.2 太陽風とエネルギー階層間結合の関係

6.5章において、放射線帯外帯電子の増加には、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内部加速が重要な役割を果たしていることを紹介した. それでは、上記のように放射線帯の増加を引き起こす太陽風が到来した際に、内部磁気圏では内部加速による加速は起きているのであろうか? また、逆に放射線帯の増加があまり起きない北向き IMF を含む CHS が到来した際には、内部加速は起きていないのであろうか? この問いにこたえるためには、数多くの CHS 到来イベントを集め、それらのイベントを南向き IMF を含むイベントと、北向き IMF を含むイベントとに分類して、そのときに放射線帯で何が起きているかを調べる必要がある. 十分な数のイベントを解析するためには、数年にわたって均質な観測データセットを用意する必要がある. 「あけぼの」衛星は、1989年以来、長期間にわたって放射線帯、ジオスペースの観測を行っている. したがって「あけぼの」衛星のデータを用いることで、このような統計解析を実施することが可能となる.

[28]は、1994年から2008年において発生した約200例の CHS イベントを用いた統計解析を行った. 図8の左側

は、南向きの IMF が支配的な CHS, 右側は北向きの IMF が支配的な CHS に対応する. これは、Superposed Epoch Analysis と呼ばれる解析手法で、特定の時間原点を基準として、複数のイベントデータを重ね合わせ、変化の平均描像を抽出するものである. ここでは、Stream Interface (流れの接触面) と呼ばれる低速の太陽風と高速の太陽風が切り替わるタイミングを $t=0$ として、様々な種類のデータに対して Superposed Epoch Analysis を行っている. 図は、上から (a) (f) ホイッスラーモード波動を励起する電子群のフラックス, (b) (g) 背景プラズマ密度, (c) (h) ホイッスラーモード波動の強度, (d) (i) 2.5 MeV 電子のフラックス, そして (e) (j) 静止軌道の 2 MeV 電子フラックスを示している. このうち、(b), (c), (d) ((g), (h), (i)) が「あけぼの衛星」によって取得されたデータで、縦軸を地球からの距離 (L 値) として表示されている.

左側と右側を比較すると、南向き IMF が支配的な CHS が到来すると、その後、数日間にわたって、地球から遠い場所 (L 値が大きい場所) から地球に近い場所において、ホイッスラーモード波動を励起する電子群のフラックスが増大していることがわかる. また、このとき、プラズマ圏の縮小が起こり、プラズマ密度が低下している. この場所において、ホイッスラーモード波動が励起し、その活動は数日間持続し、放射線帯外帯の電子フラックスの増加も起きている. 一方、このような変化は、北向き IMF が支配的な CHS については見られないものである. Stream Interface

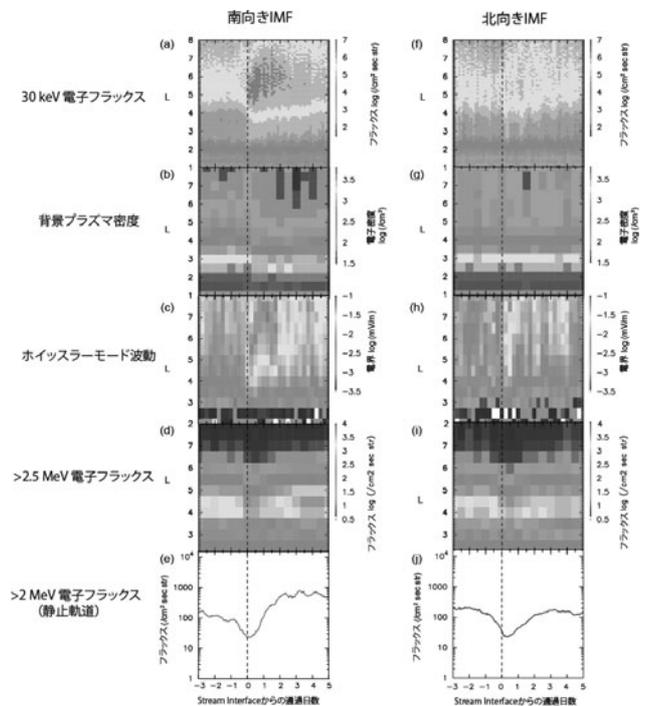


図8 南向き IMF が支配的な高速太陽風 (左) と北向き IMF が支配的な高速太陽風 (右) について、Stream Interface を時間原点として、放射線帯の電子加速に係るキーパラメータに対して Superposed epoch analysis を行ったもの. (a) (f) 30 keV 電子フラックス, (b) (g) 背景のプラズマ密度, (c) (h) ホイッスラーモードの波動, (d) (i) >2.5 MeV 電子フラックス, (e) (j) 静止軌道での >2 MeV 電子フラックス [28].

が通過した直後に、一時的にホイッスラーモード波動の強度増加が起こるものの、その後、ホイッスラーモード波動は元のレベルへと戻る。また、放射線帯外帯の電子フラックスの増加も起こっていないことがわかる。

これらの結果をふまえて、筆者らが提案している太陽風-放射線帯電子の加速に関するモデルの模式図を図9に示す[28]。詳細は割愛するが、南向きのIMFが支配的なCHSが到来すると、ジオスペースではオーロラ活動に代表される活動度が高い状態が数日にわたって発生し、地球から遠いところから内部磁気圏に向かって、ホイッスラーモード波動を励起させる高温電子が連続的に注入される。このような注入に起因して、ホイッスラーモード波動が数日間にわたって励起を続け、その結果、放射線帯外帯電子の加速が起こると考えられる。一方、北向きIMFが支配的な際には、ジオスペースの活動度が低く、高温電子の注入も限定的にしか発生しないため、「内部加速」が起こらず、放射線帯外帯電子の増加も起こらないと考えられる。なお、IMFの南北の向きに関わらず、高速太陽風が到来した際には、「外部供給」に係るMHD波動は活性化することが予想される。このように、IMFの南北の向きで、放射線帯外帯電子フラックスの増加に顕著な差が生じるのは、「内部加速」が支配的な加速機構であることを示すものである。

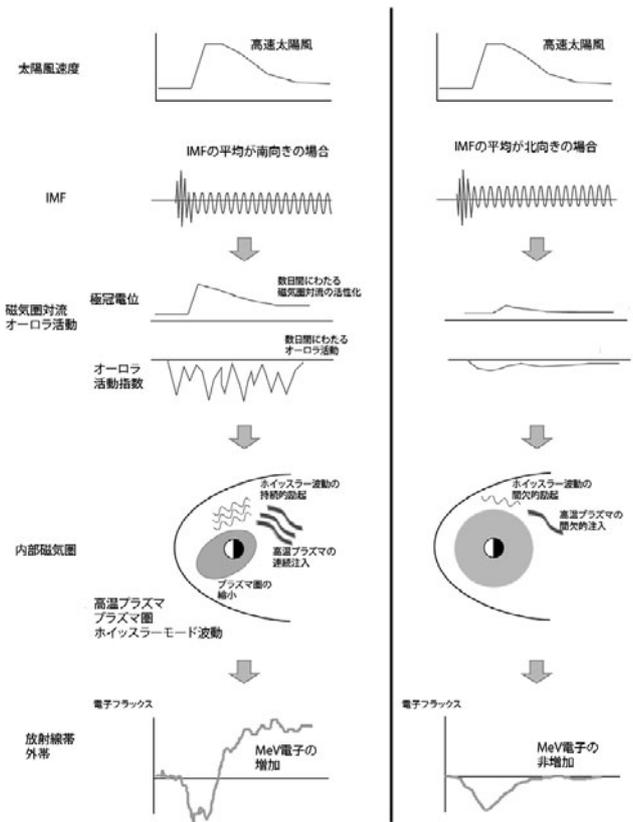


図9 南向きIMFが支配的な高速太陽風(左)と北向きIMFが支配的な高速太陽風(右)におけるジオスペースの違い。南向きIMFが支配的な高速太陽風の場合には、オーロラ活動等に伴って、高温プラズマが内部磁気圏に連続注入され、その結果、ホイッスラーモード波動の励起と高エネルギー電子の加速が促進され、放射線帯電子の増加が起こる[28]。

6.7 ジオスペース探査衛星あらせへ

「あけぼの」衛星は、26年以上にわたり、放射線帯、ジオスペースの観測の長期間の観測を行った。「あけぼの」衛星が示した放射線帯外帯電子の「内部加速」、そしてエネルギー階層間結合の概念は、放射線帯外帯電子のダイナミクスを理解するための基本的な考え方として認識されている。

一方、「あけぼの」衛星は、磁気赤道面での観測を行っていないため、ホイッスラーモード波動による加速が起きている現場そのもの観測を行うことはできなかった。また、「あけぼの」衛星は、波動励起を担うと考えられているエネルギー帯の粒子観測器は搭載されておらず、また低エネルギー粒子の観測器は放射線帯の中では機器をOFFにするため、エネルギー階層間結合を担う分布のいくつかのエネルギー帯のプラズマ・粒子の観測は行われていない。このため、内部加速およびエネルギー階層間結合の素過程を解明するためには、放射線帯の内部、特に赤道面付近で広いエネルギー帯にわたるプラズマ・粒子、および電磁場の総合観測を実現する必要がある。

2000年代以降、放射線帯の研究は、ジオスペース研究および宇宙天気研究の最重要課題とされ、新たな科学衛星観測も計画、推進されている。2012年に米国NASAによって打ち上げられた科学衛星Van Allen Probes [29]は、放射線帯の赤道面付近において詳細な粒子と電磁場の観測を行い、位相空間密度と呼ばれる量を正確に計測することによって、「内部加速」が存在していることを実証した[30]。

一方、内部加速を担うサイクロトロン共鳴については、その後の理論的な研究の進展により、コーラスと呼ばれる非線形ホイッスラーモード波動の励起過程や、コーラスによる電子加速過程が研究されている[31, 32]。このような非線形波動粒子相互作用を観測的に実証するためには、詳細なプラズマ波動の波形観測や、高い時間分解能での粒子分布関数の観測が必要となる。

このような観測を実現するために、日本のJAXAは、ジオスペース探査衛星(ERG/あらせ)を開発し、2016年に打ち上げ、現在観測を行っている[33]。「あらせ」衛星は、広いエネルギー帯域のプラズマ・粒子の観測と、広い周波数帯にわたって電磁場の観測を実現し、放射線帯、ジオスペースの描像を大きく塗り替えている。「あらせ」衛星は、コーラス波動による放射線帯電子の内部加速を実証するとともに[34]、特に非線形波動粒子相互作用が、放射線帯粒子の加速や散乱を担っていることを、様々な観測から実証的に明らかにしている[35]。さらに、世界で初めて、無衝突プラズマ系で波動粒子相互作用がピッチ角散乱を担っていることを実証するとともに[36]、波動と粒子のエネルギー交換過程の実証的な観測にも成功する[37]など、数多くの成果を上げている。また、波動粒子相互作用によるピッチ角散乱によって、放射線帯高エネルギー電子が中層大気に降り込み、オゾン層を破壊していることも見いだされ、新たにプラズマ波動を介した磁気圏-大気圏結合という問題意識へとつながっている[34]。最近のあらせの成果については、[3, 4, 38]などの総説も参考いただきたい。

「あけぼの」衛星は、2015年4月にその観測を終了した。「あけぼの」衛星は、放射線帯がダイナミックに変化し、プラズマ波動による加速過程が重要であることを示した。「あけぼの」衛星が提示した内部加速、エネルギー階層間結合に関する課題が、新たな科学衛星である「あらせ」に受け継がれ、新たな発見によって放射線帯そしてジオスペースの描像を大きく変革しつつある。

参考文献

- [1] 三好由純：放射線帯，「総説宇宙天気」（柴田一成，上出洋介編）（京都大学出版会，2011）p329.
- [2] 小野高幸，三好由純：太陽地球圏（共立出版，2012）.
- [3] 三好由純他：プラズマ・核融合学会誌 **97**, 269 (2021).
- [4] Y. Miyoshi *et al.*, Space Sci. Rev. **218**, 38 (2022).
- [5] V. Pilipenko *et al.*, Adv. Space Sci. **37**, 1192 (2006).
- [6] G.D. Reeves *et al.*, Geophys. Res. Lett. **30**, 1529 (2003).
- [7] S.R. Elkington *et al.*, Geophys. Res. Lett. **26**, 3273 (1999).
- [8] D. Summers *et al.*, J. Geophys. Res., **103**, 20487 (1998).
- [9] Y. Miyoshi *et al.*, AGU monograph, **199**, 103 (2012).
- [10] T. Obara *et al.*, Earth Planet Space, **52**, 41 (2000).
- [11] T. Obara *et al.*, J. Atm.Solar-Terr. Phys. **62**, 1405 (2000).
- [12] T. Obara *et al.*, Earth Planet Space **53**, 1163 (2001).
- [13] T. Kohno, AGU monograph **97**, 217 (1996).
- [14] T. Nagai, AGU monograph **199**, 177 (2012).
- [15] I. Kimura *et al.*, J. Geomag. Geoelectr. **42**, 459 (1990).
- [16] H. Oya *et al.*, J. Geomag. Geoelectr. **42**, 411 (1990).
- [17] Y. Miyoshi *et al.*, J. Geophys. Res. **108**, 1004 (2003).
- [18] Y. Kasahara *et al.*, Geophys. Res. Lett. **36**, L01106 (2009).
- [19] Y. Miyoshi *et al.*, J. Geophys. Res. **112**, A05210 (2007).
- [20] G. Rostoker *et al.*, Geophys. Res. Lett. **25**, 3701 (1998).
- [21] T. Nagai *et al.*, J. Geophys. Res. **111**, D15216 (2006).
- [22] A. Morioka *et al.*, Geophys. Res. Lett. **28**, 931 (2001).
- [23] S. Kurita *et al.*, Geophys. Res. Lett. **45**, 7996 (2018).
- [24] S. Saito *et al.*, J. Geophys. Res. **126** (2021).
- [25] G. A. Paulikas and J. B. Blake, AGU monograph **21** (1979).
- [26] Y. Miyoshi and R. Kataoka, J. Geophys. Res. **113**, A03S09 (2008).
- [27] Y. Miyoshi and R. Kataoka, Geophys. Res. Lett. **32** (2005).
- [28] Y. Miyoshi *et al.*, Geophys. Res. Lett. **40** (2013).
- [29] B. Mauk *et al.*, Space Sci. Rev. **179**, 3 (2012).
- [30] G. Reeves *et al.*, Science **341**, 991 (2013).
- [31] Y. Katoh and Y. Omura, Geophys. Res. Lett. **34** (2007).
- [32] Y. Omura *et al.*, J. Geophys. Res. **114** (2009).
- [33] Y. Miyoshi *et al.*, Earth Planet Space **70** (2018).
- [34] Y. Miyoshi *et al.*, Sci. Rep. **11** (2021).
- [35] S. Saito *et al.*, J. Geophys. Res. **126** (2021).
- [36] S. Kasahara *et al.*, Nature **554**, 337 (2018).
- [37] K. Asamura *et al.*, Phys. Rev. Lett. **127**, 245101 (2021).
- [38] S. Kanekal and Y. Miyoshi, Prog. Earth Planet. Sci. **8**, 35 (2021).