



解説

波動粒子相互作用による放射線帯相対論的エネルギー電子の生成機構とその人工衛星観測による実証に向けて

Study on the Generation Mechanism of Relativistic Electrons Due to Wave-Particle Interactions in the Radiation Belts Via Spacecraft Observation

三好由純¹⁾, 加藤雄人²⁾, 小嶋浩嗣³⁾, 疋島 充²⁾

MIYOSHI Yoshizumi, KATOH Yuto, KOJIMA Hirotugu, HIKISHIMA Mitsuru

¹⁾名古屋大学太陽地球環境研究所, ²⁾東北大学大学院理学研究科, ³⁾京都大学生存圏研究所

(原稿受付: 2013年 6 月 30 日)

地球の周りの宇宙空間には、放射線帯と呼ばれる MeV を超える高エネルギー粒子が捕捉されている領域が存在する。この放射線帯の相対論的高エネルギー電子の加速メカニズムについてはまだ解明されていないものの、ホイッスラーモード波と電子とのサイクロトロン共鳴による相互作用（波動・粒子相互作用）とその非線形効果が重要な役割を担っていることが指摘されている。この放射線帯電子の加速メカニズムを明らかにするために、現在、日本では科学衛星観測を中心とした、ERG (Exploration of energization and Radiation in Geospace) と呼ばれるジオスペース探査計画が推進されている。そして、この ERG 衛星に、プラズマ波動と粒子とのエネルギー交換過程を直接かつ定量的に観測する世界で初めての装置 (SWPIA) が搭載される。本解説では、ERG プロジェクトの概要について紹介した後、ホイッスラーモード波と電子との非線形相互作用の理論的背景、および現在開発中の SWPIA の概要を紹介する。

Keywords:

radiation belts, space weather, particle accelerations, wave-particle interaction, whistler mode waves, satellite observations, computer simulations

1. 放射線帯

ジオスペースとも呼ばれる地球周辺の宇宙空間、その中でも静止軌道よりも内側の領域には、図 1 に示すように MeV を超える荷電粒子が捕捉されている放射線帯（ヴァン Allen 帯）が存在する。放射線帯は、イオン、電子について存在しているが、電子放射線帯は、地球半径の約 1.5 倍を中心に分布している内帯と、約 4 Re (1 Re は地球半径) を中心に分布している外帯から構成されている。この放射線帯の電子は、人工衛星の帯電を引き起こすため、宇宙機の安全な運用に影響を及ぼす。このため、放射線帯電子フラックス変動の予測は、現在の宇宙天気研究の最重要課題の一つと位置づけられている。

図 2 上に日本の「あけぼの」衛星が観測した放射線帯電子の変動を、図 2 下に Dst 指数と呼ばれる宇宙嵐（磁気嵐）の指標を示す。宇宙嵐が起こると Dst 指数は負に大きく変化し、放射線帯外帯は消滅する。その後、Dst 指数が再び回復するのに伴って、放射線帯外帯電子のフラックスが増加をはじめ、外帯が再形成されていく。外帯が回復する過程は、放射線帯の相対論的なエネルギーの電子を作り出すなんらかの加速機構が働いていることを意味しているものの、具体的な加速機構についてはまだわかっておらず、現在の磁気圏物理学の最重要課題の一つとなっている。放射

線帯研究の現状については、文献[1-3]なども参照いただきたい。

この相対論的電子の加速機構として、大別して次の二つの機構が考えられている。一つは、断熱加速（ベータトロン加速）である。放射線帯の高エネルギー電子は、通常では第一断熱不変量（磁気モーメント）を保存するという性

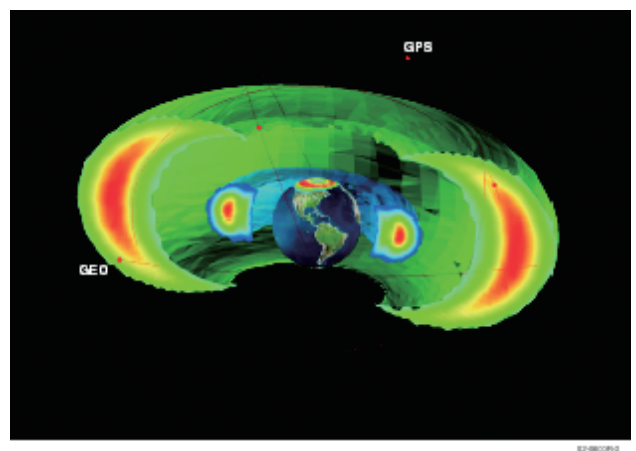


図 1 放射線帯電子フラックスの分布図。内側のベルト状の構造が内帯、外側のベルト状の構造が外帯と呼ばれる (NASA TM 2002 211613)。

Corresponding author's address: Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, Nagoya, AICHI 464-8601, Japan

Corresponding author's e-mail: miyoshi@stelab.nagoya-u.ac.jp

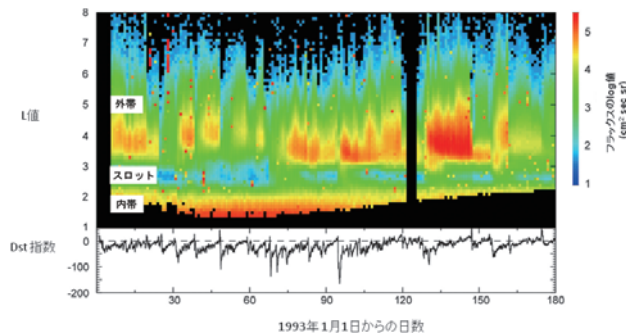


図2 「あけぼの」衛星が観測した 2500 keV 以上のエネルギーをもつ電子フラックスの変動。横軸は1993年1月1日からの日数を表す。(上段)縦軸はL値と呼ばれる磁力線を表す指標であり、たとえばL=6は赤道面で地球半径の6倍の場所を通過する磁力線に対応する。色でフラックスの量を表し、赤いほどフラックス量が多い。(下段)宇宙嵐(磁気嵐)の指標であるDst指数の変化。Dst指数が負に大きくなると、大きな宇宙嵐が起きていることを表している。

質があるため、地球から遠く磁場の弱い場所にあった電子が、ジオスペース中の電磁流体(MHD)波動との共鳴相互作用等によって、地球に近い磁場の強い場所に運ばれてくることによってそのエネルギーが増加し、放射線帯外帯を形成する[4]。

もう一つの考え方は、ホイッスラーモード波によるサイクロトロン共鳴によって、電子の第一断熱不変量が破れることによる非断熱的な加速である。これは1990年代の終わりに提案された新しい考え方で、現在大きな注目を集めている[5,6など]。この加速過程で興味深い点は、図3に示すようにジオスペースに存在する様々なエネルギー階層のプラズマが加速に関係していることである。この過程では、もともと数百 keV の準相対論的なエネルギーの電子が、ホイッスラーモード波によって加速され MeV のエネルギーに至ったと考えられているが、このホイッスラーモード波自身は、さらに低いエネルギー階層である数 keV から数十 keV の高温電子のもつ温度異方性によって励起されているとされている。つまり、数十 keV の高温電子が持つエネルギーがプラズマ波動を介して、さらに高いエネルギー階層へと輸送されていることになる。また、ホイッスラーモード波の伝搬や共鳴条件には、背景のプラズマ密度

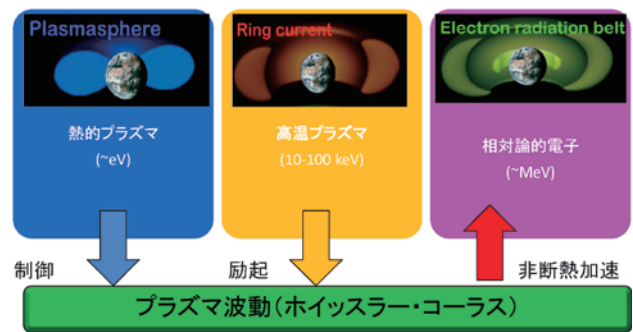


図3 内部磁気圏におけるエネルギー階層間結合の概念図。数十 keV の高温電子がホイッスラーモード波を励起し、そのホイッスラーモード波が準相対論的なエネルギーの電子を相対論的なエネルギーまで加速して、放射線帯外帯を形成する。また、背景の熱的プラズマの変化がホイッスラーモード波の伝搬や共鳴条件に大きな影響を及ぼす。したがって、eV から MeV にわたる6桁以上異なるエネルギー階層のプラズマ粒子群が、プラズマ波動を介して動的に結合するエネルギー階層間結合が放射線帯電子の変化を作り出すために重要であると考えられている(図は[1]より)。

も関係する。ジオスペースにおいては、背景プラズマ密度は、主として電離圏起源の1 eV以下の熱的プラズマによって担われており、この熱的プラズマの変化が放射線帯電子の加速に影響を及ぼすことになる。このように、放射線帯のダイナミクスには、eV から MeV までの様々なエネルギー階層のプラズマ粒子がプラズマ波動によって動的に結合し相対論的な電子を作り出す「エネルギー階層間結合」が重要であると考えられている。

2. ERG 計画

このような放射線帯電子の加速・消失機構の謎と宇宙嵐と呼ばれるジオスペースの擾乱現象を解明するため、日本では現在、ERGと呼ばれるジオスペース探査計画が進められている[7]。

このERGプロジェクトは、図4左に示すように「人工衛星」による宇宙空間プラズマの直接観測、「磁場」、「光学」、「レーダー」といった地上からのリモートセンシング観測、そしてシミュレーションによる理論・モデル計算をあわせた3つの研究グループから構成され、太陽地球系科学分野の様々な研究手法を結集して、放射線帯電子のダイナミク



図4 ジオスペース探査ERG計画の概念図。(左)ERG計画は、人工衛星による宇宙空間プラズマの直接観測、地上からの観測によるリモートセンシング、そしてシミュレーションの3つの研究チームから構成されている。(右)地球磁気圏を飛翔するERG衛星の想像図(©ERGプロジェクト)。

表1 ERG衛星に搭載される理学観測機器。
ERG衛星搭載 電磁界波動観測器。

	機器名	観測周波数範囲	計測センサー
電界	PWE	DC - 10 MHz	ワイヤーアンテナ
磁界	MGF	DC - 128 Hz	フラックスゲート磁力計
磁界	PWE	10 Hz - 100 kHz	サーチコイル磁力計

ERG衛星搭載 プラズマ粒子観測器。

	機器名	観測エネルギー範囲	計測センサー
電子	XEP-e (超高エネルギー電子観測器)	600 keV - 20 MeV	Si SSD + GSO シンチレーター
	HEP-e (高エネルギー電子観測器)	70 keV - 2 MeV	多層 Si SSD
	MEP-e (中エネルギー電子観測器)	10 keV - 80 keV	カスプ型静電分析器 (APD)
	LEP-e (低エネルギー電子観測器)	12 eV - 20 keV	トップハット型静電分析器
イオン	MEP-i (中エネルギーイオン観測器)	10 keV/q - 180 keV/q	カスプ型静電分析器 (飛行時間型質量分析器, APD)
	LEP-i (低エネルギーイオン観測器)	10 eV/q - 25 keV/q	トップハット型静電分析器 (飛行時間型質量分析器)

スと宇宙嵐の解明をめざしている。

図4右に、ERG衛星の外観図を示す。また、表1に、ERG衛星に搭載される理学観測器を示す。宇宙空間で、その場に存在するプラズマ粒子や電場・磁場・プラズマ波動を観測するためには、それぞれの特性にあわせた観測器を人工衛星に搭載する必要がある。ERG衛星は、4種類の観測器によって12 eV から20 MeV までのエネルギー帯の電子を、2種類の観測器によって10 eV/q から180 keV/q までのエネルギー帯のイオンをイオン種ごとに計測する。また、ERG衛星は、電界と磁界の観測も同時に行う。ジオスペースには、背景電磁場に加えて、MHD 波動のような低周波プラズマ波動から、ホイッスラーモード波や高域混成周波数波 (Upper Hybrid Resonance Wave) などの高周波プラズマ波動まで様々な種類のプラズマ波動が存在する。そのため、ERG衛星では、電界はDC から10 MHz まで、磁界はDC から100 kHz までを計測する機能を有している。

3. ホイッスラーモード・コーラス放射の励起と相対論的電子加速

1章で述べたように、放射線帯の相対論的なエネルギーをもつ電子の加速メカニズムの一つとして、ホイッスラーモード波による加速が考えられている。ホイッスラーモード波の中でも特に重要とされているのが、非線形波動粒子相互作用により生成される「コーラス放射」である。このコーラス放射は磁気赤道領域を発生源とし、ジオスペースをホイッスラーモードで伝搬するコヒーレントなプラズマ波動である。周波数が時間的に変化する特徴的なスペクトルを示すことで知られ、主に周波数が上昇する「ライジングトーン」 ([8]; 図5上) からなるが、周波数が減少する「フォーリングトーン」となる例も報告されている。磁力線沿いに伝搬して地上でもVLF帯の波動として計測されるコーラス放射は、周波数帯が可聴域にあることから夜明け頃に無線機に受信される「Dawn Chorus」としても知られ、半世紀以上に及ぶ研究の歴史がある [9]。時間的にその周波数が変化するという特徴的な波動スペクトルをもつコーラス放射の発生機構は未解明の問題として残されていたが、近年の計算機実験による発生過程の再現 ([10]; 図5

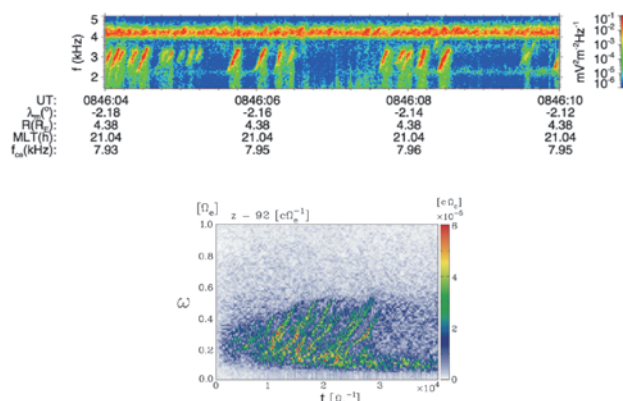


図5 (上段) クラスター衛星が内部磁気圏で観測したホイッスラーモード・コーラス放射のスペクトル [8]。 (下段) 電子ハイブリッドコードを用いた計算機実験により再現されたコーラス放射 [10]。

下) と、その結果に基づく非線形波動成長理論の提案 [11, 12] により、ホイッスラーモード波の励起からコーラス放射の発生に至るまでの物理素過程の解明が進みつつある。このコーラス放射は、地球磁気圏だけでなく、木星や土星などの惑星磁気圏においても広く観測されており、双極子型の磁場をもった磁気圏においては普遍的な存在であると考えられている [13, 14]。

近年、新たに提案されたコーラス放射発生過程のモデルでは [11, 12]、速度位相空間での「電磁電子ホール」の形成と、それに伴う「共鳴電流」の形成が重要となる。電磁電子ホールの形成過程は、波動の電磁場による共鳴電子の捕捉によって理解される。コヒーレントなホイッスラーモード波とのサイクロトロン共鳴における共鳴電子の運動については、1970年代から理論研究が進められており (例えば [8] など。また [15] のレビューを参照)、ここでは、まずその基本的な物理を述べる。

図6に、ダイポール磁場中を磁力線に平行に伝搬するホイッスラーモード波と共鳴する電子の速度位相空間上での軌道例を示す。ホイッスラーモード波の電磁場ベクトルと一定の位相関係を満たす共鳴電子は、波動により捕捉されるが、ダイポール磁場という背景磁場強度が非一様なジオスペース内での粒子運動には、背景磁場からのミラー力が

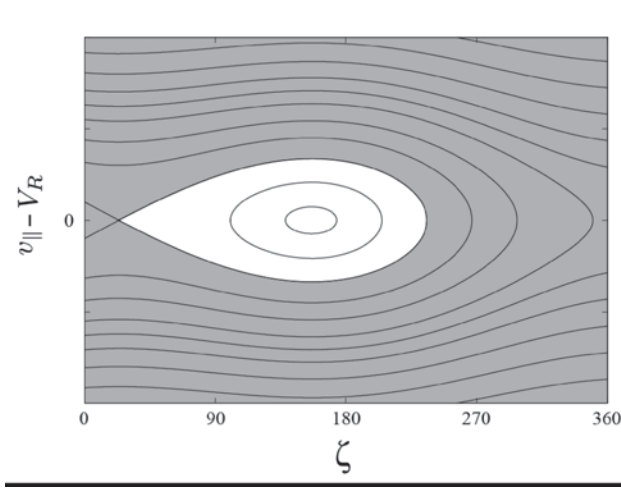


図6 コヒーレントなホイッスラーモード波と共鳴する電子の速度位相空間上での軌跡. $S = -0.4$ の条件にあたり、白抜きの領域が電子の捕捉領域となり、電磁電子ホールに相当する[11].

加わるため、粒子の捕捉される領域は図6に示されるように限定的となる。捕捉領域の偏りは、次式で与えられるパラメータ S により評価できる。

$$S = -\frac{1}{s_0 \omega \Omega_w} \left\{ s_1 \frac{\partial \omega}{\partial t} + c s_2 \frac{\partial \Omega_e}{\partial h} \right\} \quad (1)$$

ここで $s_0 = \frac{\chi}{\xi} \frac{V_{\perp 0}}{c}$, $s_1 = \gamma \left(1 - \frac{V_R}{V_g} \right)^2$,

$$s_2 = \frac{1}{2\xi\chi} \left\{ \frac{\gamma\omega}{\Omega_e} \left(\frac{V_{\perp 0}}{c} \right)^2 - \left[2 + \Lambda \frac{\chi^2 (\Omega_e - \gamma\omega)}{\Omega_e - \omega} \right] \frac{V_R V_p}{c^2} \right\},$$

$\Omega_w = qB_w/m_e$, $\chi^2 = 1/(1+\xi^2)$, $\xi^2 = \omega(\Omega_e - \omega)/\omega_{pe}^2$, $\gamma = [1 - (v_{\parallel}^2 + v_{\perp}^2)/c^2]^{-1/2}$, V_R は共鳴速度, V_g および V_p はホイッスラーモード波の群速度および位相速度, Λ は電子密度の空間変化に関連付けるパラメータ[12], ω および k はホイッスラーモード波の周波数および波数, Ω_e は電子のジャイロ周波数, h は磁力線に沿った磁気赤道からの距離を示す。捕捉領域は S の絶対値が1以下の場合に存在し、図6は $S = -0.4$ の条件に対応する。ここで、大半の共鳴電子は捕捉領域の外を運動する非捕捉電子となり、捕捉領域を取り巻くようにして位相空間を流れ去る。その結果、少数の捕捉電子が存在する捕捉領域内と、捕捉領域外との間に粒子数の不均一が生じ、速度位相空間内に低密度領域、すなわち電磁電子ホールが形成される。電磁電子ホールは、図6に示されるように位相空間内に非対称な構造を形成することから、非ジャイロトロピックな成分が生じることとなり、結果として実効的な電流が形成される。この電流は共鳴電流と呼ばれ、共鳴電流の形成が、コーラス放射の非線形な成長過程において重要な役割を果たすと考えられてきた。このことから従来の理論では、磁気赤道よりも高緯度側の一定の磁気ミラー力が期待される領域において、コーラス放射が発生するものとされてきた。

近年、計算機実験によってコーラス放射の発生過程が再現されたが[10]、その結果、従来の理論的な予想とは異なり、磁気赤道その場からコーラス放射が発生する様相が明

らかになった。この結果を受けて、新たな非線形波動成長理論が提案され[11,12]、波動の周波数が時間的に変化することにより、共鳴電子の運動に対してミラー力と同様な影響を及ぼすことが明らかにされた。ここで、あらためて(1)式に着目すると、右辺は周波数の時間変化に関連する項と、背景磁場強度の空間変化に関連する項に分けられることがわかる。磁気赤道では背景磁場の空間勾配が無視できるとし、 S の値を共鳴電流の値が最大となる $S = -0.4$ とすると、(1)式は次のように書き換えられる。

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = 0.4 \frac{\omega_i^2 \chi^2}{\gamma} \left(1 - \frac{V_R}{V_g} \right)^{-2} \quad (2)$$

共鳴電流は波動の位相に対して特定の位相関係にある共鳴粒子により形成されること、さらに、形成された共鳴電流による波動振幅の成長は、 $S = -0.4$ の条件を満たす特定の波動エレメントに対してもたらされることに注意すると、(2)式は、特定の周波数変化率をもつ波動エレメントが選択的に成長することを示している。このモデルは、コーラス放射の発生が背景磁場強度のほぼ一様な磁気赤道において生じている事を示す計算機実験の結果を説明できる。また、このモデルは、発生した波動エレメントの周波数変化が理論に基づく予測と一致するなど、計算機実験結果をよく説明することが示されている。非線形波動成長理論の詳細については、[17,18]によるレビューも参照されたい。新たに提唱されたこのモデルは、その後、計算機実験[19]および衛星観測結果[20]と比較することで検証が進められている。

コーラス放射の発生ならびに相対論的電子加速の双方の物理過程で重要となる電磁電子ホールは、まだ観測的な実証は行われていない。この電磁電子ホールの存在が、宇宙空間において直接観測から実証されれば、宇宙プラズマ物理学における波動粒子相互作用の理解が飛躍的に進むことになる。

ここで、実際のジオスペースで生じていると考えられる、波動粒子相互作用による速度分布関数の変化を考えてみる。宇宙プラズマ中でのプラズマ波動-粒子間相互作用は、典型的には粒子のジャイロ周期やプラズマ振動周期などに代表される、プラズマの特性周波数に関連した時間スケールで推移する。ホイッスラーモード波と高エネルギー電子とのサイクロトロン共鳴を取り上げると、波動が一定の振幅をもち、コヒーレントな場合には、波動電磁場ベクトルと一定の位相関係を持つ共鳴電子が、波動電磁場によるポテンシャルに捕捉される。波動により捕捉された電子の速度位相空間上での運動をみると、共鳴速度を中心に、捕捉周波数の時間スケールで振動することとなる。この捕捉電子の運動により、電子の速度分布関数は拡散し、その過程で生じる波動-粒子間のエネルギー交換の結果として、波動振幅が飽和する。これら一連の相互作用は、典型的には電子のサイクロトロン周期の数百倍の時間スケールで推移する。

一方、コーラス放射と高エネルギー電子との波動粒子相互作用に深く関わる、速度位相空間に形成される電磁電子

ホールは、ホイッスラーモード波の電磁場ベクトルに対して、ある相対位相の範囲に形成されることから、速度位相空間をホイッスラーモード波と同じ周波数で回転する構造となる。たとえば、放射線帯外帯中心部である地球半径の4倍程度の距離では、電子のサイクロトロン周期は約100 μsec となる。典型的なコーラス放射の周波数は、電子サイクロトロン周波数の0.2~0.8倍であることから、電子サイクロトロン周期の数倍程度となる。この時間スケールは、従来の人工衛星観測で用いられてきたプラズマ計測器の時間分解能（典型的には衛星のスピン周期：数秒）に比べて非常に小さいため、これまでの計測器においては、電磁電子ホールの形成に起因してプラズマの速度分布関数に現れる変動を検出することは不可能である。

このような宇宙プラズマ計測技術の限界を突破し、波動粒子相互作用によるプラズマ粒子とプラズマ波動間のエネルギー授受を直接計測しようとするのが、波動粒子相互作用解析装置(Wave-Particle Interaction Analyzer; WPIA)である[21]。WPIAは、プラズマ波動計測器により計測される3次元の電磁場ベクトルと、プラズマ粒子計測器の検出する個々のプラズマ粒子の3次元の速度ベクトルとを用いて、波動粒子相互作用によるエネルギー交換量を直接かつ定量的に測定する計測装置である。計測量の一例としては、波動電場ベクトル E と速度ベクトル v との内積演算が挙げられる。この演算により得られる計測量 $W = qE \cdot v$ は、

$$\frac{dK}{dt} = m_0 v \frac{d(\gamma v)}{dt} = qE \cdot v = W \quad (3)$$

と表せるように粒子の運動エネルギー K の時間変化量を示す物理量であり、個々の粒子に対する演算により得られた

W_i を積算し、 $W_{\text{int}} = \sum_{i=1}^N W_i$ を求める事により、計測したその場における波動-粒子間のエネルギー交換量が計測できる。ここで m_0 は電子の静止質量、 v は電子の速度ベクトルである。有限の数のプラズマ粒子を用いることから、求めた W_{int} には統計的なゆらぎが重畳するため、演算と同時に W_{int} の統計的ゆらぎの指標となる標準偏差 σ を計算し比較することで、得られたエネルギー交換量の統計的有意性が評価できる[22]。したがって、このWPIA観測により、コーラス放射の発生においてはどのエネルギー帯でどのピッチ角を持つ電子が最も寄与しているかを、定量的に示すことが、初めて実現される。また、WPIAは波動電磁場ベクトルと個々の粒子の速度ベクトルとの位相差を求めることができるため、波動に対して特定の位相空間に形成される電磁電子ホールに起因する速度分布関数の変動を、直接計測することが可能となる。WPIAにより、ジオスペースのどの領域で、いつ、どのように波動粒子相互作用が発生し、その結果、どの程度のエネルギー交換が波動と粒子の間で行われるか、そして放射線帯の相対論的エネルギー電子の形成にどのような役割を果たしているかを、直接かつ定量的に計測することが実現される。

4. ERG衛星におけるSWPIA

本章では、ここまで述べてきたWPIAの処理をERG衛星で実現する仕組みについて述べる。すでに述べたように、WPIAは粒子観測器による観測粒子一粒毎の速度ベクトル情報とプラズマ波動観測器による波動ベクトル瞬時値との位相差を捉えることにより、 $E \cdot v$ の計算を可能にする。ERG衛星では、このWPIA処理を衛星に搭載したCPUを用いてソフトウェアで行う。そのため、ERG衛星に搭載されるWPIAのことをSoftware-type WPIA (SWPIA)と呼んでいる。

SWPIAを実現するためのブロック図を、図7に示す。SWPIAプログラムは、CPUとSDRAMおよびFlash memoryから構成されるMDR (Mission Data Recorder) と呼ばれるコンポーネント上で実行される。ERG衛星では、SDRAMが256 Mbytes、Flash memoryは32 Gbytesを搭載している。このMDR Flash memoryに対して、衛星内通信ネットワークで接続された粒子観測器、プラズマ波動観測器から、 $E \cdot v$ を計算する上で必要な観測データが書き込まれていく。

ERG衛星においてSWPIAが利用する粒子データは、図7に示すようにエネルギー順にXEP-e, HEP-e, MEP-eの各粒子観測器から供給される。一方、プラズマ波動データは、PWEから供給される。各機器の仕様については表1での記述通りであるが、特に、粒子観測器については、粒子加速を引き起こすと考えているコーラス放射を励起する低エネルギー電子からその波動によって加速された高エネ

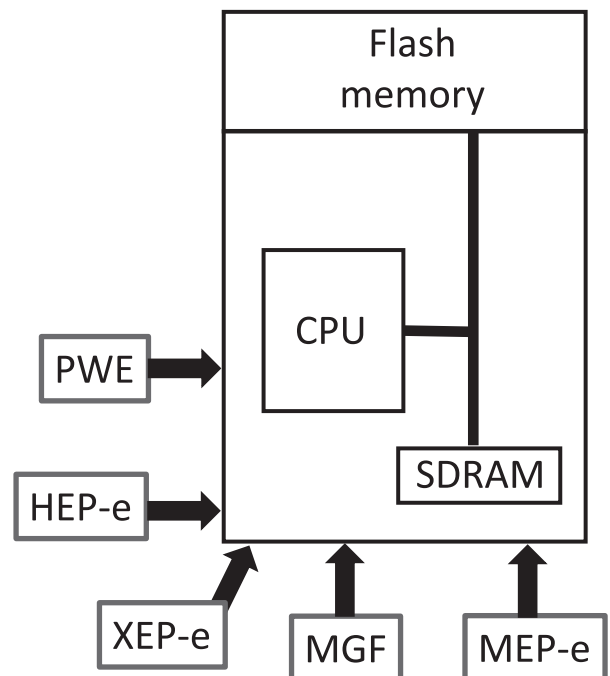


図7 SWPIA システムのブロックダイアグラム。SWPIA システムは、衛星に搭載されるCPU上で動作するソフトウェアとして実現される。各種電子観測器(XEP-e, HEP-e, MEP-e)、プラズマ波動観測器(PWE)および、磁場観測器(MGF)は衛星内ネットワークで接続され、観測データは順次Flash memory (32 Gbytes)へと保管される。CPUはFlash memoryからデータを読み出しながら、演算処理を行う。

ルギーの電子までを観測する機器が選ばれている。

一方、ERG 衛星における SWPIA の計算を行う場合、ホイッスラーモード波であるコーラス放射と粒子のサイクロトロン運動の関係が鍵となるため、外部磁場に垂直方向のプラズマ波動成分と粒子の速度ベクトル成分の計算が重要である。そのため地球磁場を観測している磁場観測器 (MGF) のデータも必要となる。

次に、SWPIA がこれらのデータをどのように処理を行うかについて述べる。上述の粒子観測器は、観測した電子一つ一つの「観測時間 (t_p)」、「エネルギー (ϵ)」、「セクター (s)」情報等を MDR に伝送する (セクター情報は粒子センサーの視野内でどの方向からの粒子を観測したかという情報となる)。一方、プラズマ波動観測器は、プラズマ波動電界 (2 成分: E_1, E_2)、磁界 (3 成分: B_1, B_2, B_3) の波形を連続サンプリングし、その瞬時値を MDR に、観測時間とともに伝送する (ERG 衛星のようなスピン衛星ではスピン軸方向に電界センサーを伸展するのが難しく、電界はスピン面内の 2 成分のみの計測となる。この場合、残りの 1 成分は、単色波であることと、プラズマ波動モードを仮定することによって、計測している電磁界 5 成分から算出する)。MDR はデータを受け取ると、32 GBytes の Flash memory に保存していく。すなわち、Flash memory には、時系列により粒子、プラズマ波動の観測情報が記録されていくが、重要なのはこの粒子の時系列とプラズマ波動のデータ時系列は、非同期であることである。すなわち、粒子観測器が粒子を捕捉したその瞬間に、プラズマ波動観測器の A/D コンバーターが波形をサンプリングしている保証はない。既述のように ERG 衛星においてコーラス放射と粒子間の位相差情報をエネルギー授受の観点で知ろうとすると、その時刻精度は最低でも 10 μsec が必要である。そのため非同期データになる粒子とプラズマ波動の観測時間情報には、それぞれ独自に 10 μsec 以内の精度が必要となる。これを実現するために、粒子観測器、プラズマ波動観測器には 1.9 μsec 毎にカウントアップする時刻カウンタをもたせている。この時刻カウンタはプラズマ波動観測器の波形サンプリングクロックに同期させており、これにより 1.9 μsec の時間分解能で粒子観測データとプラズマ波動観測データとの時間を決めることができる。

図 8 は、SWPIA が実際にソフトウェアとして処理を行う流れを表している。粒子観測器データは、座標変換 (磁場に垂直成分を求める) を行えばよいが、プラズマ波動については複雑である。 $E \cdot v$ の計算において、当然ながら E そのものの振幅・位相精度が重要である。プラズマ波動観測器は電子回路であり、内部には各種フィルタ、アンプをもつ。また、電界センサーの特性を示すインピーダンスも複素数である。したがって、A/D コンバーターに至るまでに、観測された波形の振幅や位相は変化してしまうため、A/D コンバーターでデジタル化された波形は、振幅・位相補正をして実際の電界値に変換する必要がある (これを較正 (calibration) とよぶ)。このような観測装置による振幅・位相の変化は周波数の関数であるため、較正を行うためには、フーリエ変換を行い周波数空間に変換する必要

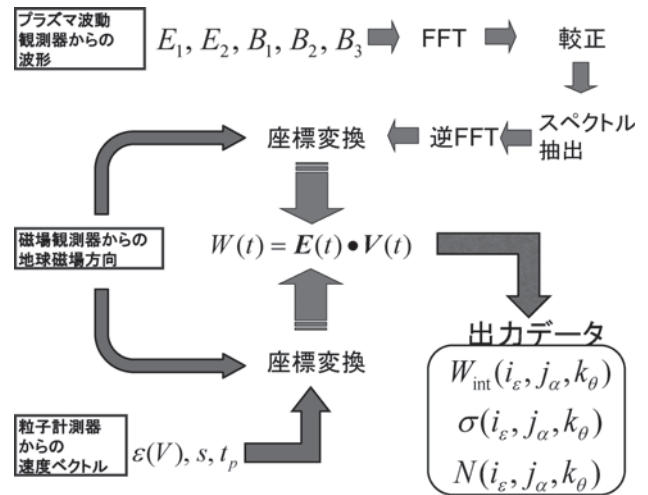


図 8 SWPIA の処理フローの例。プラズマ波動観測器で取得された波形データは、センサーや観測器の影響を受けているため、振幅・位相に関する較正が必要である。そのためには波形を一旦、FFT により周波数空間に変換し、較正後、逆 FFT で時間波形に戻す、という処理を行う。SWPIA の出力データとして、エネルギー、ピッチ角、波動ベクトルと粒子速度ベクトルの位相差のそれぞれを適切な数に分割し、そのレンジ毎に計算結果を集約したものが検討されている。

がある。変換後、振幅・位相の較正を行い、逆フーリエ変換をして正確な波形にもどすことになる (この際、ターゲットとなる波動が観測されているスペクトルだけを抽出してから逆変換を行う)。

観測している電磁界 5 成分に対して較正を行うには、フーリエ変換と逆変換を合計 10 回行う必要がある。この較正を経た後、外部磁場に対する座標変換を行い $E \cdot v$ などの SWPIA 計算を行う。コーラス放射は、そのスペクトルの下限周波数から上限周波数までの変化は、速いものだと 100 msec 程度である。そのため SWPIA 処理は、この周波数変化に対し十分に短い時間分解能で行う必要がある。この処理をリアルタイムで行うには電力・重量のリソース制限が厳しい衛星上の CPU では困難である。しかし、SWPIA がターゲットとするコーラス放射は主に磁気赤道付近で観測されることが予想されるため、ERG 衛星が磁気赤道付近を通過中にデータを Flash memory 上に記録し、その後コーラス放射が観測されない時間帯において SWPIA 処理を行う、という観測計画が検討されている。

図 8 に示すように、SWPIA では地上に伝送する観測結果の代表的な出力として、 W_{int} , σ , N が検討されている。ここで、 W_{int} , σ , N は、 W の時間積分、標準偏差、およびカウントした粒子の個数であり、3 次元の配列である。3 次元配列になっている理由は、それぞれの物理量を、粒子エネルギー (ϵ)、粒子のピッチ角 (α)、そして波動と粒子の位相角 (θ) において、適切な分解能で分割して計算を集約するからである。これによって、物理的な意味を失うことなく出力データ量を減らすことができる。この分解能およびこれらの計算を行う際の時間分解能については、ターゲットとなる物理現象の時間スケールと衛星テレメータ回線幅によって、最適な値を選ぶことが可能である。

図9はSWPIAの原理検証を行うために、本解説3節において述べている計算機シミュレーション[10]で得られたプラズマ波動と電子のデータを用いて実際に W_{int} の時間変化を計算した例である。ここではエネルギー200–400 keVでピッチ角が100–110度の電子とプラズマ波動とから W_{int} を計算している。実線は、シミュレーションで得られる W_{int} であり、2本の点線は $W_{\text{int}} \pm 1.96\sigma$ を示している。このエネルギー領域の電子は共鳴によりホイッスラーモード波にそのエネルギーをあたえるが、図9では W_{int} が時間とともに大きな負の値に遷移しており、粒子がエネルギーを失って波動を励起していることが、このSWPIAの計算によって示されている。SWPIAの観測では、図9のような W_{int} の時間変化だけではなく、波動ベクトルと粒子ベクトルの位相差分布も得ることができるため、図6で示したような速度位相空間内における電磁電子ホールの存在も検出できると期待される。

本研究グループでは、現在、ERG衛星搭載用のSWPIAシステムの開発を進めている。また、より確実に波動粒子相互作用を捉えることができる計算アルゴリズムの考案・検証のため、本解説で紹介した計算機シミュレーションに加え、プラズマチェンバー実験にも並行して取り組んでいる。

5. まとめ

本解説では、放射線帯の相対論的エネルギー電子の加速に関する研究の現状、特にホイッスラーモード波と電子との非線形波動粒子相互作用に関する最近の研究成果について述べてきた。また、その波動粒子相互作用を宇宙空間において直接検出するSWPIAシステムの原理と構成を紹介した。SWPIAシステムは2015年打ち上げ予定のERG衛星に搭載される予定であり、共鳴電磁電子ホールの直接検出を通して、宇宙プラズマにおけるプラズマ波動と粒子とのエネルギー交換過程を、直接かつ定量的に世界で初めて観測する。

また、このSWPIAシステムは、将来の惑星磁気圏探査への応用も検討されている。惑星探査においてはテレメトリの制限がきわめて厳しいため、波形データ等のサイズの大きなデータの取得には制限がある。SWPIAシステムは、衛星機上で波動と粒子の相関処理を行うことで、きわめて小さいデータサイズにおいて非線形の波動粒子相互作用の有無を同定することが可能である。したがって、SWPIAシステムは、将来の惑星探査機などに搭載されることにより、惑星磁気圏におけるプラズマ波動粒子相互作用の理解にも貢献していくことが期待されている。

謝 辞

ジオスペース探査衛星（ERG）は、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所において2015年度の打ち上げに向けて準備が進められています。本研究はJSPS科研費23224011、23340146、および東レ科学振興会の助成を受けたものです。

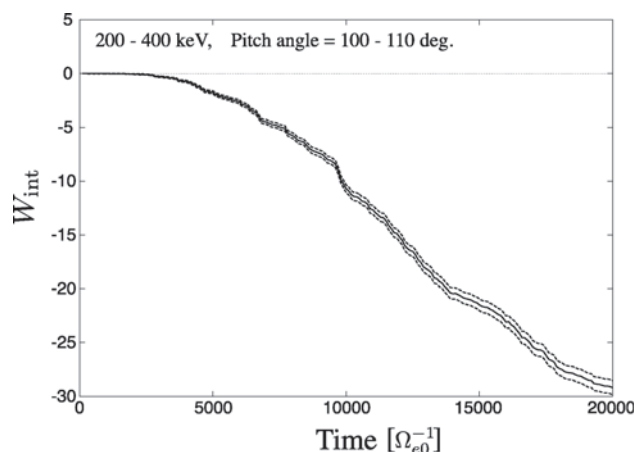


図9 コーラス放射の発生過程を再現する計算機実験の結果を用いて、SWPIAの疑似計測を行った結果の一例[19]。エネルギー200–400 keVでピッチ角が100–110度の電子とプラズマ波動とから W_{int} を計算している。実線は計算で得られる W_{int} であり、2本の点線は $W_{\text{int}} \pm 1.96\sigma$ を示している。

参考文献

- [1] Y. Ebihara and Y. Miyoshi, The Dynamic Magnetosphere, edited by W. Liu and M. Fujimoto, IAGA Special Sopron Book Series 3, doi:10.1007/978-94-007-0501-2 sub size 6 down 10 9, Springer Science+Business Media B. V. (2011).
- [2] 小野高幸, 三好由純: 太陽地球圏 (共立出版, 2012).
- [3] 三好由純: 放射線帯, 総説: 宇宙天気 (柴田一成, 上出洋介編著) (京都大学出版会, 2011).
- [4] S.R. Elkington *et al.*, Geophys. Res. Lett. **26**, 3273 (1999).
- [5] D. Summers *et al.*, J. Geophys. Res. **103**, 20487 (1998).
- [6] Y. Miyoshi *et al.*, J. Geophys. Res. **108** (2003).
- [7] Y. Miyoshi *et al.*, "Dynamics of the Earth's Radiation Belts and Inner Magnetosphere", Geophys. Monogr. Ser., 199, edited by D. Summers *et al.*, 103-116, AGU, Washington, D.C. (2012).
- [8] O. Santolik *et al.*, Ann. Geophys. **26**, 1665 (2008).
- [9] L.R.O. Storey, Phil. Trans. Roy. Soc. London, A **246**, 113 (1953).
- [10] Y. Katoh and Y. Omura, Geophys. Res. Lett., **34**, L03102 (2007).
- [11] Y. Omura *et al.*, J. Geophys. Res. **113**, A04223 (2008).
- [12] Y. Omura *et al.*, J. Geophys. Res. **114**, A07217 (2009).
- [13] Y. Katoh *et al.*, J. Geophys. Res. **116**, A02215 (2011).
- [14] G. B. Hospodarsky *et al.*, "Dynamics of the Earth's Radiation Belts and Inner Magnetosphere", Geophys. Monogr. Ser., 199, edited by D. Summers *et al.*, 415-430, AGU, Washington, D.C. (2012).
- [15] D. Nunn, Planet. Space Sci. **22**, 349-378 (1974).
- [16] Y. Omura *et al.*, J. Atmos. Terr. Phys. **53**, 351 (1991).
- [17] Y. Omura *et al.*, "Dynamics of the Earth's Radiation Belts and Inner Magnetosphere", Geophys. Monogr. Ser., 199, edited by D. Summers *et al.*, 243-254, AGU, Washington, D.C. (2012).
- [18] 大村善治: 地球磁気圏からの電磁放射, 総説: 宇宙天気 (柴田一成, 上出洋介編著) (京都大学出版会, 2011).
- [19] Y. Katoh and Y. Omura, J. Geophys. Res. **116**, A07201

(2011).

[20] S. Kurita *et al.*, J. Geophys. Res. **117**, A11223 (2012).[21] H. Fukuhara *et al.*, Earth Planets Space, **61**, 765 (2009).[22] Y. Katoh *et al.*, Ann. Geophys. **31**, 503 (2013).
 み よ し よ し ず み
 三 好 由 純

名古屋大学太陽地球環境研究所准教授。ジオスペースにおける粒子加速、プラズマ波動についての研究を進めるとともに、宇宙天気予報アルゴリズムの開発なども行っています。また、ERG計画のプロジェクトサイエンスマネージャーとして、同計画の推進にあたっています。著書に「太陽地球圏」(共立出版)など。文部科学大臣表彰若手科学者賞(H25年度)受賞。スターバックスのシティマグを集めるのが趣味で、現在70個になりました。


 か と う ゆ う と
 加 藤 雄 人

東北大学大学院理学研究科准教授。宇宙プラズマ中での波動粒子相互作用について、主に計算機実験による研究を進めています。本稿で紹介した波動粒子相互作用計測装置(WPIA)のERG衛星での実現に、使命感を持って取り組んでいます。WPIAの実験室プラズマへの応用もねらって共同研究者の方々と議論を重ねています。運動不足を解消しようと週末に自転車でそぞろ歩きしています。


 こ じ ま ひ ろ つ ぐ
 小 嶋 浩 嗣

京都大学生存圏研究所准教授。科学衛星観測による宇宙空間プラズマ波動現象の研究を行っています。装置開発からデータ解析まで衛星計画に広く関わることで、うれしいかぎりです。そんな中で、WPIAを構想してはや12年になります。ERG衛星でその性能が発揮されるのを楽しみにしています。


 ひ き し ま み つ ぐ
 疋 島 充

東北大学大学院理学研究科、研究員。研究分野：宇宙プラズマ波動に関するシミュレーション研究。現在はSWPIAのソフトウェア開発を行なっています。出身地は(UFOの町)石川県羽咋市。周囲が自然にあふれた地域であり、趣味を兼ねてアウトドアを始めようと思っているが、何を始めようかここ半年以上考えています...