

ジオスペース探査衛星 ERG 計画について

三好由純(名大)、高島健(JAXA)、浅村和史(JAXA)、小野高幸(東北大)、三谷烈史(JAXA)、笠原慧(JAXA)、平原聖文(名大)、松本晴久(JAXA)、東尾奈々(JAXA)、風間洋一(台湾 ASIAA)、笠羽康正(東北大)、松岡彩子(JAXA)、小嶋浩嗣(京大)、藤本正樹(JAXA)、塩川和夫(名大)、関華奈子(名大)、仁田工美(JAXA)、小川恵美子(JAXA)、村島未生(JAXA)、ERG プロジェクトグループ

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において、静止軌道よりも内側の領域には、MeV を超える粒子が捕捉されている放射線帯が存在する。放射線帯は、イオン、電子について存在しており、このうち電子放射線帯は、地球半径の約 1.5 倍を中心に分布している内帯と、約 4Re を中心に分布している外帯から構成されている。この放射線帯のある領域には、図 1 に示すような高密度の熱的プラズマ群であるプラズマ圏、また宇宙嵐の発達を担う環電流粒子群も存在しており、1eV 以下から 1MeV 以上まで 6 桁以上異なるエネルギーのプラズマ・粒子が共存する領域である。このうち、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。

放射線帯の電子は、宇宙嵐をはじめとする宇宙環境の擾乱時に大きく変化する。宇宙嵐が起こると放射線帯外帯は消滅し、その後、宇宙嵐が回復していくにしたがって、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。この消滅過程および再形成過程を引き起こすメカニズムについては未だ分かっていない部分が多く、議論が続いている。

消失機構については、これまでプラズマ波動と放射線帯電子との相互作用によって、電子が地球大気に降り込むピッチ角散乱が主要因と考えられてきた。しかし、ここ数年の研究により、消失の主要因は大気への降り込み過程ではなく、太陽風の変化によって磁気圏の形状が変化し、その結果、電子が惑星間空間へと流出している可能性も指摘され始めるようになり、どちらが消失の主要因かについてはまだ特定されていない。

一方、外帯が回復する過程については、断熱加速と呼ばれる ULF 帯のプラズマ波動が関与した加速過程と、非断熱加速と呼ばれる VLF 帯のプラズマ波動が関与した加速過程の 2 つの過程が提案されている。このうち、後者の非断熱加速過程は、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。この加速過程で興味深い点は、図 1 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与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 の高温電子の持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 1eV 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。

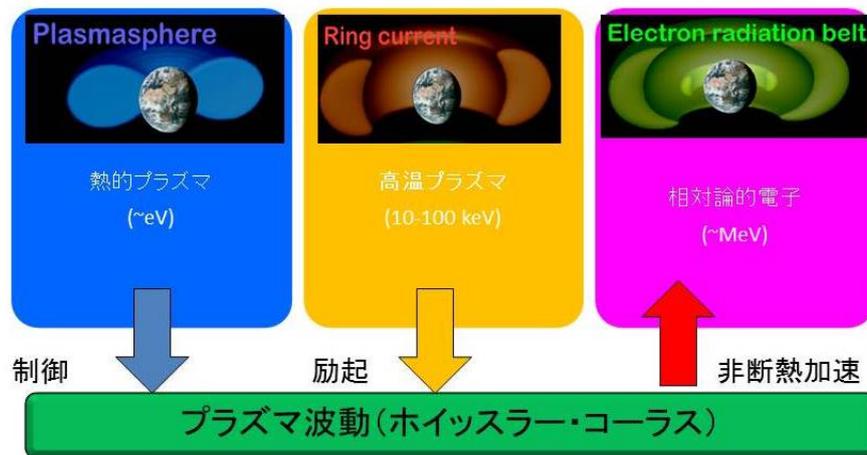


図 1: ジオスペースに存在する、様々なエネルギー階層のプラズマ・粒子群。非断熱加速過程では、高温プラズマ(10-100keV)が持つエネルギーが、プラズマ波動の励起を介して、よりエネルギーの高い電子を作り出すと考えられている。

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(Exploration of energization and Radiation in Geospace)と呼ばれるジオスペース探査計画が進められている。

この ERG プロジェクトは、図 2 左に示すように「人工衛星」による宇宙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スと宇宙嵐の解明を目指している。

図 2 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。

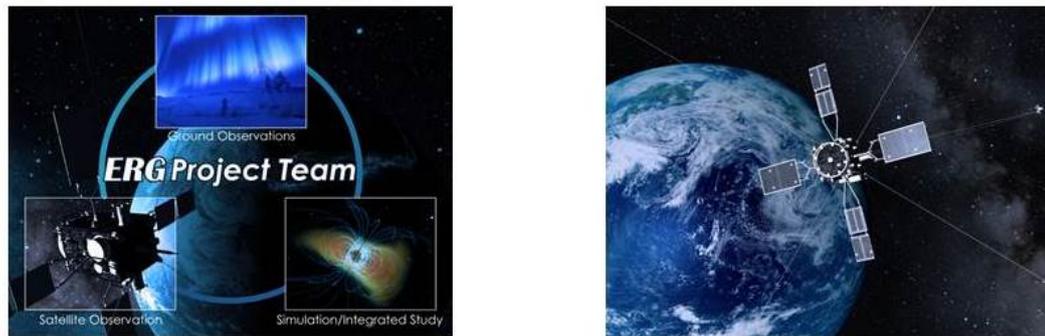


図 2: (左) ERG プロジェクトチームの概念図。ERG 衛星による宇宙空間の直接観測、連携地上観測、シミュレーション・統合解析チームの 3 つから構成される。(右) ジオスペースを飛翔する ERG 衛星の想像図。

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。

さらに ERG 衛星には、世界で初めてプラズマ波動と粒子との相互作用過程を直接検出する波動粒子相互作用解析装置が搭載される。この装置は約 10 マイクロ秒の時間精度で電子を計測し、電子とプラズマ波動との相対位相を導出することによって、プラズマ波動が粒子を加速しているのか、逆に粒子がプラズマ波動を励起しているのかを明らかにしていくことを目指している。

これらの科学データを迅速に公開し、各種データを組み合わせた統合解析を実現するために、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所と名古屋大学太陽地球環境研究所による宇宙科学連携拠点により ERG サイエンスセンターが設置され、科学データのアーカイブと公開、および統合解析ソフトウェアの開発と公開を行っている (<http://ergsc.stelab.nagoya-u.ac.jp>)。

表 1：ERG 衛星搭載 電磁界波動観測器

	機器名	観測周波数範囲	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-SC	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)	200 keV - 20 MeV	Si SSD + GSO シンチレータ
	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、SSD)
	LEP-i(低エネルギーイオン観測器)	10 keV/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)

3: 国際ジオスペース探査と宇宙天気研究

ERG 衛星と同時期には、世界各国でジオスペース探査が計画されている。たとえば、米国 NASA は 2012 年に Van Allen Probes 衛星を打ち上げ、放射線帯の最新のデータを取得しつつある。また、米国空軍やロシアも独自の放射線帯探査衛星を打ち上げる予定であり、新しいデータが続々とでてくることが期待される。さらに、近年、地上からのレーダー観測や光学観測が急速にネットワーク化されつつあり、国際共同計画として、地上観測の拡充が進んでいる。このような国際的な計画と ERG 計画が連携することによって、ジオスペースの包括的な理解に大きく貢献していく。

一方 ERG プロジェクトは、宇宙天気、宇宙天気予報研究への貢献も期待されている。ERG 衛星は放射線帯の中心部において、広いエネルギー帯のプラズマ・粒子観測と、広い周波数帯の電磁場の総合観測を行う。このようなデータは、ジオスペースの宇宙放射線や電磁場の現況を把握する上で重要であり、宇宙天気の現況把握や予測のための基礎データとして活用していくことが期待されており、今後打ち上げに向けてさらに議論を重ねていく予定である。