

小型衛星計画

ERG (Energization and Radiation in Geospace)

ワーキンググループ提案書

ERG 検討チーム

代表：小野高幸（東北大学大学院理学研究科）

衛星観測グループ

粒子計測班：平原聖文、柳町朋樹、小笠原桂一（立教大）、高島健、浅村和史、齋藤義文、阿部琢美、五家建夫、風間洋一、笠原慧（JAXA）、三宅亘（NICT）、町田忍（京都大）

波動計測班：小野高幸、飯島雅英、熊本篤志、加藤雄人（東北大）、笠羽康正（JAXA）、笠原慎也、八木谷聡、井町智彦、後藤由貴（金沢大）、小嶋浩嗣、大村善治、上田義勝（京都大）、岡田敏美（富山県立大）

電場計測班：笠羽康正、早川基（JAXA）、石坂圭吾、三宅壮聡（富山県立大）

磁場計測班：松岡彩子（JAXA）、利根川豊、遠山文雄（東海大）、塩川和夫（名大）、湯元清文、篠原学（九州大）、長妻努（NICT）

衛星システム検討班：齋藤宏文（JAXA）

連携地上観測グループ：塩川和夫、西谷望、菊池崇、大塚雄一、藤井良一（名大）、湯元清文、河野英昭、吉川顕正（九州大）、佐藤夏雄、行松彰、山岸久雄、門倉昭、田口真、小川泰信（極地研）、細川敬祐（電気通信大学）、橋本久美子（吉備国際大学）

データ解析・モデリング、理論サポートグループ：関華奈子、三好由純、海老原祐輔、家田章正、増田智、松本洋介、片岡龍峰、新堀淳樹（名大）、小原隆博、島津浩哲、品川裕之、堀智之、浅井佳子（NICT）、中村雅夫（大阪府立大）、能勢正仁、家森俊彦、大村善治、町田忍（京都大学）、藤本正樹、篠原育、前澤洌、宮下幸長（JAXA）、田中高史（九州大）、渡部重十、山田学、小松研吾（北海道大）、樋口知之（統計数理研）、村田健史（愛媛大）、星野真弘（東京大）、長井嗣信、寺沢敏夫（東工大）

ERG

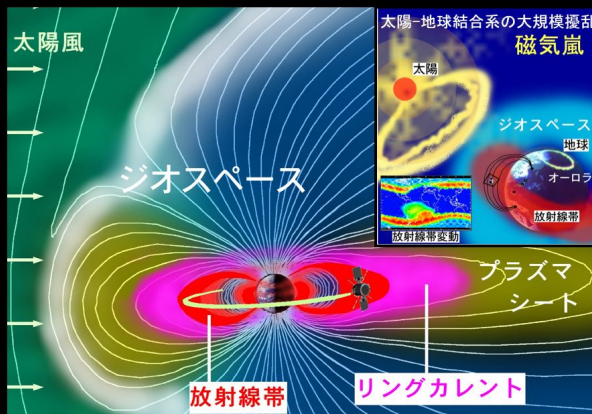
Energization and Radiation in Geospace

小型衛星による ジオスペース探査

ジオスペースにおける最高エネルギー粒子の生成過程に迫る！
～ 宇宙嵐は相対論的粒子をどのように作るのか？ ～

- 意義
- ・ 地球磁気圏における相対論的粒子の加速過程の直接観測
 - ・ ジオスペース（地球近傍宇宙空間）環境変動メカニズムの探究
 - ・ 強放射線帯下における小型衛星によるプラズマ計測の技術開発

内部磁気圏赤道面において粒子・電磁場・波動の総合観測を実現し、地上観測網・数値モデリングとの連携を活かして宇宙嵐時のジオスペース変動の物理機構を探る



- ・ 打ち上げ時期：2011年頃（太陽活動極大期）
- ・ 遠地点：-6.6Re， 近地点： $\geq 250\text{km}$
- ・ 軌道傾斜角：10度以下（赤道面）
- ・ スピン衛星（スピン軸：太陽方向）
- ・ 搭載機器
 - DC/AC磁場・電場計測器
(磁場 DC-20kHz, 電場 DC-5MHz)
 - 熱的・低・中・高エネルギーイオン
質量分析器 (1eV-1 MeV)
 - 低・中・高・超高エネルギー電子
計測器 (10eV-20MeV)

提案書目次

1. 計画の目的と特徴	3
1.1. 計画の背景	
1.2. 計画の目的	
1.3. 放射線帯研究の現状とジオスペース赤道面統合観測の重要性	
1.4. ERG 計画の科学戦略	
2. ミッション機器の構成	8
3. これまでの準備状況	11
3.1. 機器開発の進展状況	
3.2. 関連する機器開発予算獲得状況	
3.3. 実施済み機器開発ならびに飛翔実験	
3.4. 小型衛星による強放射線帯下でのミッション成立性の検討	
3.5. WG において必要とされる主な検討項目	
4. 衛星システム(に対する要求事項)	14
4.1. 軌道および姿勢	
4.2. 観測器重量・電力	
4.3. テレメトリ	
4.4. 運用要求	
4.5. その他の要求事項	
5. 研究組織	16
5.1. 衛星開発及び観測班	
5.2. 連携地上観測班	
5.3. データ解析モデリング班	
6. 開発スケジュール・予算規模	18
7. 背景コミュニティの長期計画とその中での位置づけ	19
7.1. 太陽地球系科学の長期目標とその中での位置づけ	
7.2. 中型計画との関係	
7.3. 関連する海外の計画との関係	
8. 代表者の連絡先	21

1. 計画の目的と特徴

1. 1. 計画の背景

地球をとりまく放射線帯は、1950年代後半に発見され、時間変動が少なく安定な領域と考えられてきた。しかし、1990年代における新たな衛星観測により、この領域が宇宙嵐に伴って激しく変動していることが再発見された。放射線帯は、地球磁気圏でもっともエネルギーの高い粒子が生成、捕捉されている領域である。最近の研究から、波動粒子相互作用など様々な粒子加速機構が発動している可能性が指摘されており、地球だけでなく木星など天体磁気圏に普遍的な高エネルギー現象を追求するための天然の実験室として、近年注目されている。また、高エネルギー現象が人工衛星に及ぼす影響（性能劣化・機能喪失）といった

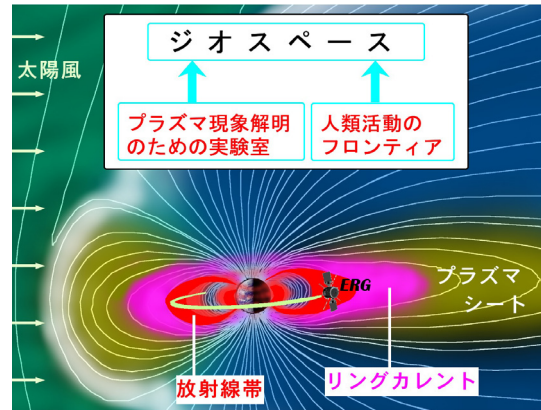


図1：「ジオスペース」：地球と強く結合した近地球の宇宙空間。貴重な宇宙の実験室であるとともに、新しい人類の活動領域でもある。

した実用面からも、放射線帯変動機構の解明の重要性が指摘されている。地球周辺の宇宙空間「ジオスペース」(図1)は、この放射線帯も含め、6桁以上のエネルギー幅を有するプラズマ・粒子が共存し、地球磁気圏における大規模エネルギー解放現象である「宇宙嵐」に伴って、相対論的高エネルギー電子が誕生するなど、非常にダイナミックに変動する領域である。宇宙空間を満たすプラズマ・粒子は、たとえ直接の衝突がなくても、背景電磁場やプラズマ波動を介して、ダイナミックにエネルギー交換をすることができる。したがって、宇宙プラズマの粒子加速機構を実証的に解明するためには、粒子・電磁場・波動の「統合観測」が不可欠である。しかし、この変動を作り出す現場となる「ジオスペース赤道面付近」での粒子・電磁場・波動の統合観測はこれまで実現しておらず、放射線帯の加速変動メカニズムについては諸説並立の状態にある。提案されている諸説を検証し、実証的に変動メカニズムを解明してゆくために、大規模な宇宙嵐が多発する次期太陽活動極大期(2011年頃)に向けて、放射線帯の中心部を含むジオスペース赤道面における粒子・電磁場・波動の統合観測の実現が、喫緊の要請となっている。

1. 2. 計画の目的

本計画は、この加速の現場であるジオスペース赤道面における「広いエネルギー範囲の粒子」と「広帯域の電磁場・波動」の統合観測を世界で初めて実現し、宇宙嵐に伴うジオスペースの大変動とそれに伴う相対論的粒子生成の物理プロセスを探ることを目的としている。そのために、あけぼの、GEOTAIL、のぞみ、れいめい、SELENE、BepiColombo/MMOなどで培ってきた小型軽量高性能な観測機器の技術を基礎とし、新たに開発する強放射線帯下で観測可能な中エネルギー帯粒子センサー(MEP)、波動粒子相関計測器、高感度磁場計測とを併せ、目標とする統合観測を短期間・低コストで実現する。

本計画は、高エネルギー粒子が大量に存在する環境下での観測に最適化した小型衛星をタイムリーに打ち上げることによって、宇宙環境変動や宇宙プラズマ物理学の分野で国際的競争力をもった

一級の科学成果を得ることを目指すものである。また、地上ネットワーク観測との連携を含めた多点観測と数値モデルを組み込んだ「統合データ解析システム」の開発を、計画の重要な一部として組み込んだ。この方法論は衛星観測データを迅速かつ最大限に活かすことができるため、SCOPE/Xscaleなどの次世代探査の構築にも資するものである。さらに、本計画はジオスペースの環境予測を目指す「宇宙天気」研究に観測的・理論的な基礎を提供するものである。国際共同研究計画の枠組みである CAUSES や ILWS(International Living With a Star)で進められつつあるこの試みに対し、実証的な粒子加速機構の理解を通じて貢献したい。

1. 3. 放射線帯研究の現状 と ジオスペース赤道面統合観測の重要性

図2の例に示すように、放射線帯外帯の高エネルギー粒子は、太陽風から磁気圏への大規模なエネルギー流入が起こる「宇宙嵐」において、特にその開始から数時間後の回復相と呼ばれる期間に、急速に再形成され、宇宙嵐前の状態よりも粒子の量が増えることが知られている。この急激な再形成機構の説明としては、断熱加速によるプロセス（外部供給説）が古典的な概念として考えられてきた。しかし1990年代以降、このプロセスのみでは、観測される粒子変動を説明できないことが指摘されつつある。そのため、現在では特にプラズマ波動を介在させた形による非断熱的加速によるプロセス（内部加速説）がクローズアップされているが、その詳細は明らかになっていない。宇宙空間の大部分は、構成粒子同士が直接衝突でエネルギー交換することはできない無衝突粒子系である。上述の内部加速は、等価的な衝突過程である波動粒子相互作用によって低エネルギー側から高エネルギー側に運動量を輸送する非断熱加速過程であり、その加速の現場における直接観測は、宇宙における粒子の加速を理解する上でも、重要な意義を持っている。以下に、これまでに粒子加速機構として提唱されているメカニズムの例を示す。

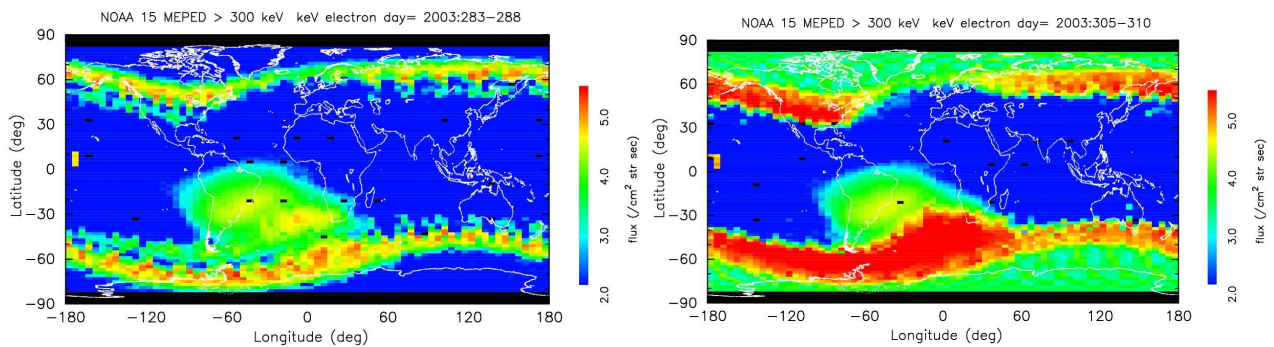


図2：2003年10月に発生した大規模な宇宙嵐の前（左）と最中（右）の放射線帯高エネルギー電子のフラックス分布。米国NOAA衛星のデータ。宇宙嵐に伴って高エネルギー電子フラックスが大きく増加している。

- (A) 外部供給説：動径方向の拡散（radial diffusion）と磁気圏対流電場による、粒子の動径方向の輸送に伴う断熱加速
- (B) 内部加速説：ホイッスラーモード波や電磁波モードなどのプラズマ波動と粒子との相互作用による放射線帯内部での非断熱加速

放射線帯の物理を正確に理解していくためには、外部供給説と内部加速説のどちらが実際に起こっているかを観測的に同定するとともに、提唱されている物理プロセスが、それぞれどのように高エ

エネルギー粒子生成に寄与しているかを定量的に解明していく必要がある。(A)と(B)を切り分けるためには、次節の(1)で述べるように位相空間密度の正確な測定が必須となるが、赤道から離れた場所の計測では不確定性が大きくなるために、ジオスペース赤道面での観測は必須となる。また、(B)で想定されている加速プロセスは、ジオスペース赤道面で発動すると考えられており、この点でも赤道面での観測が本計画の鍵となる。さらに、(B)のプロセスでは、次節の(3)および図 3 で示すように、広いエネルギー範囲のプラズマ・粒子、背景電磁場、およびプラズマ波動が加速に介在するために、これらの諸物理量の統合観測が重要となる。高エネルギー粒子加速の解明のためには、ジオスペース赤道面において、精度の高い位相空間密度、広いエネルギー範囲のプラズマ・粒子、電磁場、プラズマ波動を同時に観測していくことが必要不可欠であるが、このような統合観測はこれまで実現されていない。本計画においては、十分に検討された理学機器群ならびに衛星軌道を活かし、以下のような科学戦略で、ジオスペースにおける相対論的粒子の加速過程の解明を目指す。

1. 4. ERG 計画の科学戦略

図 3 に、内部磁気圏の空間位置（地球からの規格化距離、L 値）とエネルギーで分類した粒子分布の領域関連図、および関連する電磁場、プラズマ波動を示す。図中の矢印は、それぞれ輸送や加速といったコントロール要素を示している。内部磁気圏は様々なエネルギー階層のプラズマ・粒子が共存しており、プラズマ波動を介して相互に強く結合する（cross-energy coupling）領域となっていると考えられるが、この系がどのように相対論的なエネルギーを持つ粒子を作り出しているかを解明する必要がある。本 ERG 計画では、放射線帯粒子の増大現象において、「断熱加速と非断熱加速がそれぞれどのような条件下で発動できるのか」および「非断熱加速の場合にどのような物理プロセスが粒子加速を担っているのか」という 2 つの課題を、衛星観測・地上ネットワーク観測・数値モデルを組み合わせた、以下のような科学戦略で解明することを目指す。

(1) 位相空間密度 (PSD) の高精度測定による断熱加速と非断熱加速の切り分け

特定の磁気モーメントを持った粒子の位相空間での密度(Phase Space Density: PSD)は、放射線帯の加速機構を解明する上で重要なものでありながら、これまで精度のよい実測が行われていない。PSD の高精度観測を実現するためには、ジオスペース赤道面で、連続的に数 keV から 20MeV までの粒子と背景磁場を精度良く測定することが必要である。本計画では、ジオスペース赤道面での統合観測により、PSD の動径方向の空間勾配の時間発展を、軌道半周期約 5 時間で追跡し、宇宙嵐の回復相において、PSD が外部から増える（断熱加速を示唆）か内部から増える（非断熱加速を示唆）かの切り分けを行う。このことにより、断熱加速および非断熱加速のどちらがどの領域で支配的かを同定する。

(2) 断熱加速を担う輸送プロセスの同定

断熱加速は粒子の動径方向の輸送に伴って起こるものであるが、その輸送をドライブしているプロセスは、これまでその詳細が明かになっていない。理論的には、対流電場のゆらぎ、および ULF 帯の MHD 波動が輸送を担うことが期待されている。本計画では、電場・磁場の波形観測から、輸送のドライバーを同定するとともに、高エネルギー電子の観測とあわせて、観測された電場・磁場変動によって、実際に動径方向の輸送が起こりうるかを検証する。

(3) 非断熱加速を担う加速プロセスの同定

非断熱加速を担う最有力候補と考えられているホイッスラーモード波動と電子との波動粒子相互作用を理解するために、プラズマ波動と相互作用するエネルギー範囲の粒子の同時観測を行う。ホイッスラー波動は、数十 keV 程度のエネルギーの電子によって励起され、100 keV 以上の電子を相対論的なエネルギーにまで加速することが予想されている。また、ホイッスラー波動の励起、伝搬には数 eV のエネルギーの背景プラズマが大きな影響を及ぼしている。本計画では、中エネルギー帯の電子の分布関数観測とホイッスラーモード波動の波形観測、および背景プラズマの観測により、波動の励起領域でのプラズマの分布関数とその励起プロセスを同定する。さらに、現在検討中の波動粒子相関器を用いることにより、波動粒子相互作用中のエネルギー輸送の方向を同定する。また、高エネルギー粒子のエネルギースペクトル、ピッチ角分布とホイッスラーモード波動の観測を、理論および数値シミュレーションと比較、または境界条件として組み込むことにより、宇宙嵐のときに増加した相対論的電子が、プラズマ波動による非断熱加速によるものかどうかを検証する。

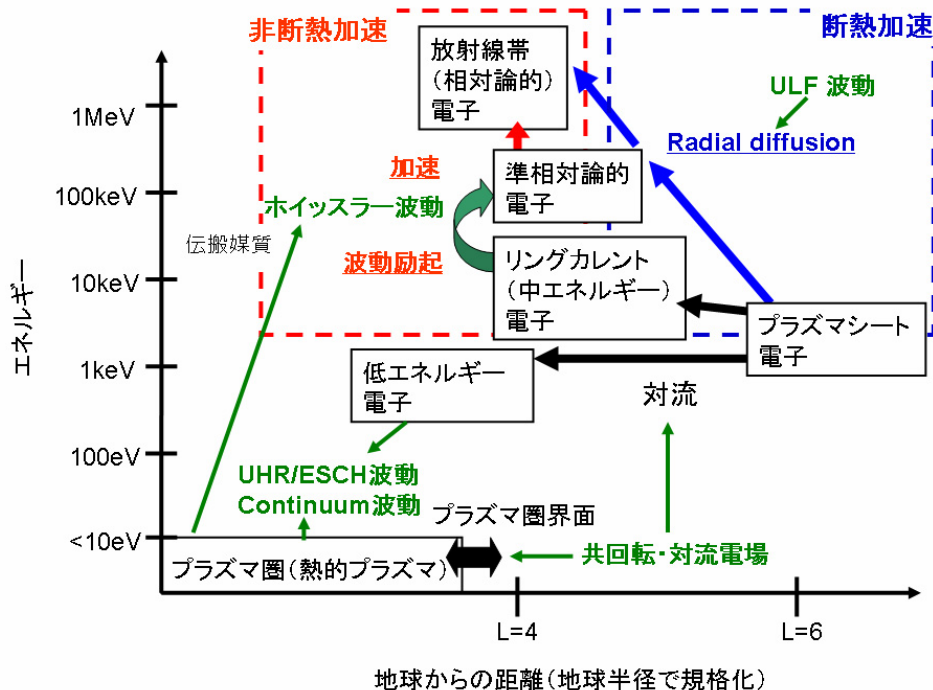


図3：地球からの距離とエネルギーの違いによる、内部磁気圏の粒子環境。黒が粒子、緑がプラズマ波動を示す。また、青囲みの中が断熱加速に関わるプロセス、赤囲みの中が非断熱加速に関わるプロセスを表している。

(4) 地上ネットワーク観測との連携観測

外部供給説で提案されている放射線帯加速への ULF 波動などの電磁場変動の寄与を調べるためには、ERG 衛星による統合観測に加えて、グローバルな「場」の変動を把握することが重要である。本計画では、近年急速に発達してきた、多点磁場計測、レーダーによる電場観測などの地上ネットワーク観測と衛星観測とをグローバル数値モデルを介して動的に比較する。このことにより、外部供給説について、電磁場変動の空間分布に支配される粒子の動径方向の輸送効率を定量的に評価す

る。また、非断熱加速の鍵となるプラズマ圏プラズマ、中エネルギー帯粒子の挙動は対流電場に支配されるが、SuperDARN、FM-CW レーダーなど日本を中心に中緯度への拡充を進めているレーダーネットワークによって、グローバルなダイナミクスを把握する。さらに、光学観測網によって中エネルギー電子、イオンの時間・空間変化のリモートセンシングを行う。

(5) 観測・モデル統合解析ツールの開発

上述の(1)から(4)にも示されているように、ERG 衛星のデータを用いて、加速機構の実証的な切り分けを実現するためには、地上観測、数値モデル・シミュレーションの戦略的な活用が本質的である。また、プラズマ波動などのマイクロなプロセスと、ジオスペースのマクロな空間での大規模な事象を結びつけて理解していく上でも、数値モデル・シミュレーションは必須となる。このため、本計画では、衛星データ解析ツールに、関連する多点観測データと数値コードを組み込み、データ同化の手法も用いながら、観測・モデル統合解析ツールの開発を行う。組み込みを予定している ERG 衛星以外の観測データには、静止軌道、低高度で運用されているモニター衛星の粒子・磁場データも含んでいる。このための環境整備として、名古屋大学太陽地球環境研究所では GEMSIS と呼ばれるプロジェクトが、ひので衛星を含めた ILWS 計画も見据えた形で、ERG 衛星のミッションに先行してスタートする。このツールの開発と活用を通して、一点観測の欠点を補い、**粒子加速機構の理解の深化を目指すとともに、多点観測・数値モデルを用いて衛星観測データを最大限に活かす太陽地球系科学・宇宙プラズマ物理学の新しい方法論を開拓する。**

また ERG 衛星のデータは、ジオスペース変動に関わるさまざまな物理過程の探究に有用である。その具体的テーマと期待される成果の詳細については、以下の URL で公開している reference ならびに ISAS ニュース 2006 年 5 月号を参照していただきたい。

http://stdb2.stelab.nagoya-u.ac.jp/member/shiokawa/yobosho/ERG_ASR.pdf

Shiokawa et al., "ERG - A small-satellite mission to investigate the dynamics of the inner magnetosphere", *Advances in Space Research*, 38(8), 1861-1869, 2006.

http://www.isas.ac.jp/ISASnews/No.302/front_line.html

三好由純、ジオスペース最高エネルギー粒子誕生の謎を追う-放射線帯の研究
ISAS ニュース、2006 年 5 月号

2. ミッション機器の構成

2. 1. 理学機器の構成

ミッション機器は図4に示されるように4つの観測項目（粒子、波動、電場、磁場）からなる。波動、電場及び磁場観測では伸展物を必要とするが、特に電場観測と波動電界成分観測はワイヤーアンテナを共用する。観測の領域や観測時間に関する多様な要求に対しては、データレコーダを用いて必要な記憶容量を準備する。各観測装置の制御並びにデータ伝送、ミッション機器間コミュニケーションは、コマンド・テレメトリなどを担う衛星バス系との間にバスインターフェースユニットを設けてここで実施する。従って小型衛星のバスによらず、科学観測機器パッケージとして柔軟に対応する事ができるように構成されている。

バスインターフェースユニットと各観測機器間は、BepiColomboなど今後の科学衛星で採用予定である「LVDSを用いたSpaceWire高速シリアル通信」を前提にしており、各観測機器ユニットの独立性と通信の冗長性を小型ながらも確保することを考えている。またSpaceWire通信を採用することにより、低価格なPCベースでのGSE構築が可能となる。このため、大部分の試験を各機器開発機関で実施することができ、地上試験の負荷・コストを大幅に低減できる。

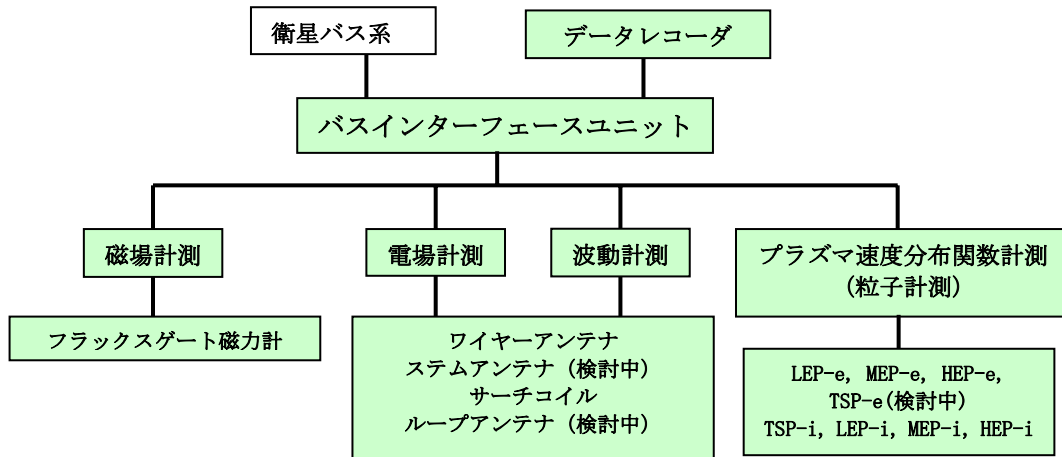


図4: ミッション機器ブロック図。緑色の部分を、本ミッションが担当。

搭載する各理学機器の構成は以下の通りである。

(1) 粒子計測器（電子・イオン速度分布関数測定器）

- ・ 視野角：スピン軸を含む面内 180 度
- ・ 重量（放射線シールド除く）：30.5kg（検討中のものをのぞく）、32kg（検討中のものを含む）
- ・ 消費電力：32.5W（検討中のものを除く）、34W（検討中のものを含む）

・センサー部詳細：

センサー名	エネルギー帯域	重量 (シールド除く)	寸法 (衛星表面パネルからの露出部)		電力
電子計測部					
TSP-e	0.1eV-10eV	検討中 (1.5 kg)	検討中	検討中	検討中 (1.5 W)
LEP-e	10eV-30keV	1.5 kg	180mm×180mm×250mm	(125mm φ ×20mm)	2.5 W
MEP-e	10keV-100keV	4.5 kg	300mm φ ×300mm	(220mm φ ×50mm)	5 W
HEP-e	30keV-2MeV	2.5 kg	100mm×50mm×145mm	(40×80× 25mm ³)	4 W
XEP	1MeV-20MeV	2 kg	300mm×200mm×200mm		1.5 W
イオン計測部 (イオン質量分析器)					
TSP-i	0.1eV-30eV	3 kg	検討中	検討中	2.5 W
LEP-i	10eV/q-30keV/q	4.5 kg	180mm×180mm×250mm	(125mm φ ×20mm)	5 W
MEP-i	10keV/q-180keV/q	9 kg	300mm φ ×300mm	(220mm φ ×50mm)	8 W
HEP-i	30keV-1MeV(H+) 60keV-1MeV(O+)	3.5 kg	260mm φ ×250mm	(260mm φ ×70mm)	4 W

(2) 波動・電場計測器

- ・ 重量：7.84kg (検討中のものを除く)、17.08kg(検討中のものを含む)
- ・ 消費電力：10W (検討中のものを除く)、12W (検討中のものを含む)
- ・ 計測器詳細：

アンテナ・マスト	4.94kg	(検討中のものを除く)
ワイヤーアンテナ(Ex,Ey)	0.6kg×4	15m×4 units / Wire: 0.14mmf stainless /Sphere probe: 6cm φ ,50g
Z 軸ステムアンテナ(Ez)	検討中 (2.2kg×2)	5m×2 units
サーチコイル (Bx,By,Bz)	0.3kg	10cm×3 axis
サーチコイル用マスト	2.24kg	3m
ループアンテナ(Bx,By,Bz)	検討中 (2.0kg)	60cm×60cm×3 axis
ループアンテナ用マスト	検討中 (2.24kg)	3m

電子回路部	2.9kg	(検討中のものを除く)
電界プリアンプ	0.15kg×4 (検討中×2)	DC～5MHz / 4 units (Z 軸を実施の場合 6 Units)
サーチコイル プリアンプ	0.3kg	0.1Hz～20kHz / 3 ch
ループアンテナ プリアンプ	検討中 (0.3kg)	10kHz～400kHz / 3 ch

受信機 (シャーシ・電源を除く)	2.0kg	受信機ユニット	
		EFD	DC-64Hz Amp+LPF+A/D: 128Hz sampling
		WFC/ OFA	10Hz-180kHz (Wave/Spectrum) Amp+LPF+A/D: 360kHz sampling
		DDC	10kHz-5MHz (Wave/Spectrum) Amp+LPF+A/D: 10MHz sampling
		WPC	波動粒子相関計測回路(仕様検討中)
		ANT	アンテナ駆動回路

(3) 磁場計測器

- ・ 伸展物重量： 2.24 kg (フラックスゲート用。マスト 3m の場合)
- ・ フラックスゲート磁力計重量： 300 g ・ 消費電力： 2 W
- ・ 計測器詳細：

センサー	リングコア型フラックスゲート磁力計 (直交三成分)	
ドライブ周波数	11 kHz	
サンプリング周波数	128 Hz	
センサー重量	150 g	
エレクトロニクス重量	400 g (* 共通処理回路部に含む)	
ケーブル重量	150 g	3mマストの場合
センサースケール	40 × 40 × 80 mm	
測定レンジ nT	精度(20 bit)	pT
±60000		114
±10000		19
±2000		4

(4) 共通処理回路部 (データ処理電子回路) + データレコーダ

- ・ サイズ： 180mm×250mm×150mm
- ・ 重量： 5kg ・ 消費電力： 15W 以下

(5) オプション

衛星本体の空間・重量・電力・データ伝送の詳細検討次第では、地球中性水素ガス (ジオコロナ) 計測用の中性粒子検出器、およびブーメラン法による電場計測機器の搭載を視野に入れる。

(6) 理学機器重量・電力

理学機器重量 (検討中のものをのぞく) 約 41.4 kg (センサー・電子回路部)
4.48 kg (マスト)
(検討中のものを含む) 約 50.3 kg (センサー・電子回路部)
6.72 kg (マスト)

理学機器消費電力： 60W (検討中のものをのぞく)、63W (検討中のものをふくむ)

3. これまでの準備状況

3. 1. 機器開発の進展状況

(1) 粒子計測器（電子・イオン速度分布関数測定器）

広いエネルギー帯域と全ピッチ角範囲にわたる電子・イオンの統合観測は本 ERG 計画の最大の特徴である。日本のこれまでの経験・実績に鑑みると、数 10keV 以下の低エネルギー粒子計測器に関する開発技術はほぼ完成の域に達していると言える。また、のぞみや BepiColombo/MMO における高エネルギー粒子計測器の開発では、SSD や TOF 等の基礎技術を習得し、確実に将来に生かせる実績になりつつある。また現在は、これらの低・高エネルギー粒子計測器の測定原理・技術を統合して開発される中エネルギー帯粒子センサー(MEP)の基礎設計を行っている段階である。

ERG 計画では、高エネルギー粒子の衛星搭載機器への影響を評価し、観測上の問題とならない様に対策を施す必要がある。この為、passive・active なシールド技術を適用する予定であり、特に active shield としては、MCP 電極と SSD の共通化によるハイブリッド検出器の開発、低・中エネルギー粒子計測器では静電分析部へのシンチレーター素材の適用、等を検討している。

(2) 波動・電場計測器

ERG 衛星では、イオン波から高周波電子波に至るまでの波動電磁界成分を計測して、波動のモード、振幅、位相速度に関する物理量を絶対値として得ることを目指している。装置としては、1978 年打ち上げの「じきけん衛星」以来、おおぞら、あけぼの、GEOTAIL などの観測実績を積んでおり成熟した段階にある。小型軽量化・デジタル信号処理技術や衛星 EMC 性能の確立などの基礎技術は、のぞみ衛星・SELENE・BepiColombo における装置開発、多くのロケット観測を通じて確立されている。また、波形受信器と粒子計測器を μsec オーダーの時間スケールで連携させ、波動粒子相互作用により生じる静電波-粒子エネルギー交換を高時間分解能で直接検出する「波動粒子相関計測器」の開発を進めている。

電場センサーとなるワイヤーアンテナは、GEOTAIL・のぞみを基礎とし BepiColombo で軽量化開発を行ったものがベースである。正確な電場計測を期するため、日本型・欧米型を融合した新たなセンサーを用いることも検討中である。また、次期磁気圏編隊探査計画「SCOPE」に向けて開発してきたリジッド型アンテナによるスピニング方向観測をオプションとして検討する。

磁場センサーは、BepiColombo で軽量化開発中のサーチコイルを採用する。オプション機器である「ループアンテナ」による交流磁場計測では、約 20dB の SN 向上によってより高感度計測が実現する。

(3) 磁場計測器

装置としては、あけぼの、GEOTAIL、のぞみ、MDS-1 衛星等での観測実績を積んでおり、高い耐放射線性を持つセンサーの設計は BepiColombo/MMO で先行している。伸展マストは WEOS で使用実績があるものを使用することができる。

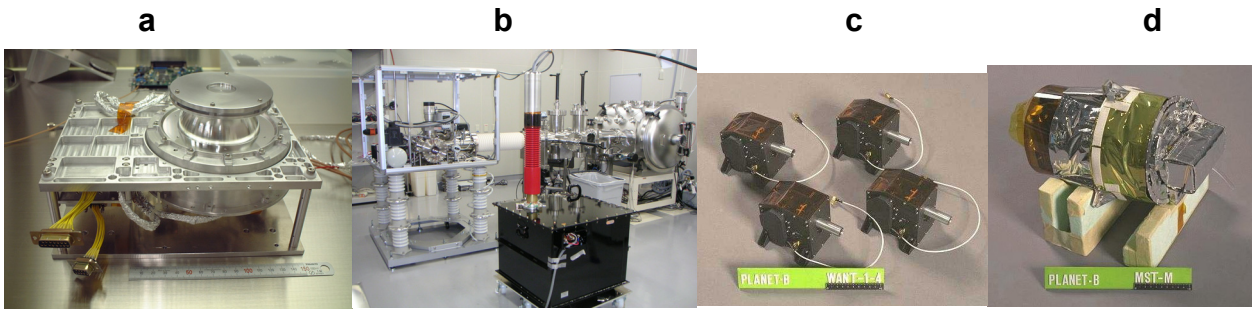


図5：a) 小型ピギーバック衛星れいめい搭載用低エネルギー粒子センサー。b) 粒子計測器校正実験室（クリーンルーム）に設置されたイオンビームライン（立教大学）。c) 火星探査機のぞみ搭載用電場・波動センサー。d) 火星探査機のぞみ搭載用磁力計センサー。

3. 2. 関連する機器開発予算獲得状況

(1) 搭載機器基礎開発実験費

- ・研究課題名：次期磁気圏観測衛星用プラズマ粒子計測器の開発（平成13-14年度）
研究代表者：齋藤義文・宇宙科学研究所 研究経費：H13: 3,000千円 H14:3,900千円
- ・研究課題名：磁気圏観測用高エネルギーレンジプラズマ粒子計測装置の開発（平成15-17年度）
研究代表者：齋藤義文・宇宙科学研究所 研究経費：H15: 3,800千円 H16:2,500千円
- ・研究課題名：ジオスペース・惑星磁気圏探査用中・高エネルギー粒子イメージャーの研究・開発（平成18-20年度）
研究代表者：高島健・宇宙科学研究本部 研究経費：H18: 2,500 千円
- ・研究課題名：惑星電波探査用超軽量受信機の開発（平成16-18年度）
研究代表者：熊本篤志・東北大学・理学研究科 研究経費：H16: 1,500千円 H17: 2,400千円
- ・研究課題名：宇宙空間電場・電波計測センサの高精度化・軽量化：
新回路の基礎開発(平成17-18年度)
研究代表者：笠羽康正・宇宙科学研究本部 研究経費：H17-18、4,700千円
- ・研究課題名：将来衛星搭載用フラックスゲート磁力計の開発研究（平成15-17年度）
研究代表者：遠山文雄・東海大学・工学部 研究経費：H15：2,550千円 H16：4,230千円
- ・研究課題名：将来衛星搭載用フラックスゲート磁力計の開発研究（平成18年度）
研究代表者：松岡彩子・宇宙科学研究本部 研究経費：H18：3,800千円

(2) 科学研究費補助金（1000万円以上のもの）

- ・基盤研究(A)：広エネルギー帯多成分宇宙プラズマの計測手法確立と相互作用解明を目指す発展的研究
研究代表者：平原聖文（立教大学）（平成16-19年度）経費総額：36,300千円

3. 3. 実施済み機器開発並びに飛翔実験

- 平成17年 れいめい 小型衛星 (ESA,ISA)
- 平成16年 S310-35 ロケット観測 (NEI,APD)
- 平成15年 欧州MarsExpress (ASPERA-3)
- 平成14年 S310-32、S310-31 SEEK-2ロケット観測 (NEI,PWM)
- 平成12年 SS520-2 ロケット観測 (NEI,ESA,ISA)
- 平成12年 米国IMAGE衛星 (MENA)
- 平成11年 S310-28 ロケット観測 (NEI,SDR)
- 平成10年 SS520-1 ロケット観測 (NEI,PWM,ENA,HEP)

3. 4. 小型衛星による強放射線帯下でのミッション成立性の検討

平成 16-17 年に、三菱重工名古屋誘導推進システム製作所が、現在情報通信研究機構と共同で開発している小型衛星 SmartSat-1 をベースにして、GTO で 240kg クラスの小型衛星での ERG 計画の実現性の検討を行った。海外の衛星メーカーとも小型衛星の衛星バス系の構成、打ち上げコストの低減策などについて情報交換・検討を行い、ERG 衛星の実現の可能性を探っている。また、強放射線環境下での科学観測の実施に向けて、過去に GTO に長期滞在した MDS-1 と ETS-VI の放射線被爆の実情を踏まえ、低コストかつ小型衛星でも GTO において 1 年以上の観測を実現可能な、放射線対策の考え方を検討している。

3. 5. WG において必要とされる主な検討項目

(1) 小型衛星としての成立性

衛星姿勢、衛星内機器配置（粒子観測機器の視野干渉）、衛星重量積算、衛星電力積算と太陽電池パネルサイジング、軌道設計と可視時間、日陰時間、通信方式、通信レート、が主な検討項目として挙げられる。これらの検討項目については、上記 3.4 のように、三菱重工業による既存の小型衛星 SmartSat-1 をベースにした検討が行われ、具体的な値が得られており、今後はこれらの基礎研究結果を基に小型衛星計画の成立性を検討する。

(2) 耐放射線対策

6mm 厚相当のアルミシールドにより、dose レベルは 10krad/6 ヶ月以下になることが算出されており、この基準に基づいた実際の衛星への具体的な検討を行う。また、特に低・中エネルギー粒子計測器の高エネルギー放射線帯粒子によるコンタミノイズへの対策に関する開発が必要となる。また、太陽電池の被爆による電力低下を考慮した電力設計への考慮を要する。

4. 衛星システム（に対する要求事項）

4. 1 軌道及び姿勢

- ・ 軌道（想定）：perigee: 250km, apogee: 6.6Re (静止軌道付近)、軌道傾斜角: 10 度以下
- ・ 姿勢：太陽指向
- ・ 姿勢決定精度：0.5 度以内
- ・ スピン周期：4 s 程度
- ・ 推進系：初期捕捉、アンテナ展開、太陽指向維持のために必要
- ・ 衛星寿命：設計寿命 6 ヶ月以上（1 年以上の運用を目指す）

4. 2 観測器重量・電力

理学機器重量（検討中のものをのぞく）	約 41.4 kg (センサー・電子回路部)
	4.48 kg (マスト)
(検討中のものを含む)	約 50.3 kg (センサー・電子回路部)
	6.72 kg (マスト)

理学機器消費電力：60W (検討中のものをのぞく)、63W (検討中のものをふくむ)

4. 3 テレメトリ

- ・ 必要伝送速度：0.66Mbps 程度（オンボード処理による伝送レート低減化を検討中）
 データ生成量：55kbps + burst mode
 粒子 --- $8\text{bit} \times 32\text{ch} \times 5\text{ion/ele} \times 8\text{angle} \times 16\text{angle} / 4\text{s} \times 3\text{inst} / 3\text{compress} = 41\text{kbps}$
 電場 --- 1kbps+burst mode（検討中）
 波動 --- $6\text{kbps}(\text{WFC/OFA}) + 4\text{kbps}(\text{DDC}) + 1\text{kbps}(\text{WPC}) + \text{burst mode}(\text{All})$
 = 11kbps+burst mode（検討中）
 磁場 --- $16\text{bit} \times 3\text{ch} \times 128\text{Hz} / 3\text{compress} = 2\text{kbps}$
 データ伝送レート（1日2時間の運用の場合）： $55\text{kbps} \times 86400\text{s} / 7200\text{s} = 0.66\text{Mbps}$
- ・ ビットレートは 0.66Mbps の他、リアルタイム運用時に 8-64kbps 可変の低速モードを持つこと。リアルタイムテレメトリ受信は福井工業大学をはじめ国内外の 10m アンテナクラスの受信システムを持つ共同研究機関にて行われる。
- ・ 3.4 の三菱重工名古屋誘導推進システム製作所による検討において、国内大学の保持する 10m 程度のアンテナで受信したケースを想定し、実際の ERG 衛星軌道、搭載が想定される通信アンテナおよび PFD 制限を加味して、通信レートの初期的な試算を行った。その結果、ERG 衛星の要求通信レートは、9 割方満たしていることが判明している。

4. 4 運用要求

- 衛星オンボードで1週間以上の運用計画コマンド（バス制御+ミッション機器制御）が実行可能なシステムが必要。
- HKデータ監視による自律化機能（Safe-Hold等）が必要。
- 地上との測距機能を有すること。

4. 5 その他の要求事項

- 電磁干渉（EMC）制限：以下を暫定的な目標として考えている。
磁界（DC～数十Hz低周波）は、伸展マスト先端（3m）で0.5nT以下
AC磁界、AC電界も制限あり（SELENE, BepiColombo/MMOと同程度）。

5. 研究組織

5. 1. 衛星開発及び観測班

(1) 粒子計測器（高・中・低・熱的エネルギーイオン・電子計測器）

- ・ 構成員：平原聖文、柳町朋樹、小笠原桂一（立教大）、高島健、浅村和史、齋藤義文、阿部琢美、五家建夫、風間洋一、笠原慧（JAXA）、三宅亘（NICT）、町田忍（京都大）
- ・ 機器製作経験：あけぼの、GEOTAIL、のぞみ、れいめい、SELENE、BepiColombo

(2) 波動計測器

- ・ 構成員：小野高幸、飯島雅英、熊本篤志、加藤雄人（東北大）、笠羽康正（JAXA）、笠原禎也、八木谷聡、井町智彦、後藤由貴（金沢大）、小嶋浩嗣、大村善治、上田義勝（京都大）、岡田敏美（富山県立大）
- ・ 機器製作経験：じきけん、あけぼの、GEOTAIL、のぞみ、SELENE、BepiColombo

(3) 電場計測器

- ・ 構成員：笠羽康正、早川基（JAXA）、石坂圭吾、三宅壮聡（富山県立大）
- ・ 機器製作経験：あけぼの、GEOTAIL、のぞみ、BepiColombo

(4) 磁場計測器

- ・ 構成員：松岡彩子（JAXA）、利根川豊、遠山文雄（東海大）、塩川和夫（名大）、湯元清文、篠原学（九州大）、長妻努（NICT）
- ・ 機器製作経験：あけぼの、GEOTAIL、のぞみ、れいめい、SELENE、BepiColombo

(5) 小型衛星バスシステムに関するアドバイス：齋藤宏文（JAXA）

5. 2. 連携地上観測班

(6) 光学多点ネットワーク、磁場・電離層電場多点観測、HF レーダーネットワーク

- ・ 構成員：塩川和夫、西谷望、菊池崇、大塚雄一、藤井良一（名大）、湯元清文、河野英昭、吉川顕正（九州大）、佐藤夏雄、行松彰、山岸久雄、門倉昭、田口真、小川泰信（極地研）、細川敬祐（電気通信大学）、橋本久美子（吉備国際大学）
- ・ 実績：超高層大気イメージングシステム（国内・海外 6 点の光学観測ネットワーク）、210 度地磁気多点観測網（国内・海外 25 点）、CPMN 多点観測ネットワーク（国内・海外 50 点）、SuperDARN 国際レーダーネットワーク（海外観測点 10 点以上）

5. 3. データ解析・モデリング班（観測・数値モデル統合データ解析ツール開発班）

(7) 統合データ解析ツール開発、数値モデリング・シミュレーション、理論サポート

- ・ 構成員：関華奈子、三好由純、海老原祐輔、家田章正、増田智、松本洋介、片岡龍峰、新堀淳樹（名大）、小原隆博、島津浩哲、中村雅夫、品川裕之、堀智之、浅井佳子（NICT）、能勢正仁、家森俊彦、大村善治、町田忍（京都大学）、藤本正樹、篠原育、前澤冽、宮下幸長（JAXA）、田中高史（九州大）、渡部重十、山田学、小松研吾（北海道大）、

樋口知之（統計数理研）、村田健史（愛媛大）、星野真弘（東京大）、長井嗣信、寺沢敏夫（東工大）

- 実績：あけぼの、GEOTAIL、のぞみ、れいめい、FAST、POLAR 等衛星データ解析、グローバル MHD シミュレーション、粒子シミュレーション、リングカレント・放射線帯モデリング、プラズマ圏モデリング、データ同化コードの開発

6. 開発スケジュール・予算規模

・開発スケジュール

- 2006年 : 予備実験、個々の理学観測機器の試験製作
- 2007年 : ロケット、バスシステムのインターフェースを含むシステム検討
- 2008年 : FM設計
- 2009年 : FM機器製作
- 2010年 : 総合試験
- 2011年9月 : 打ち上げ

・理学機器の予算規模：8億円程度

(粒子：4億円、電場・波動：2.5億円、磁場+ブーム：1.5億円)

7. 背景のコミュニティの長期計画と其中での位置づけ

7. 1. 長期計画の中での位置づけ

これまで、太陽地球系科学(STP)分野では、あけぼの衛星や GEOTAIL 衛星によるオーロラ加速機構や磁気再結合機構など基本プロセスの解明に大きな実績を残し、さらに宇宙嵐に伴う古典的なプラズマダイナミクス理解に対し重要な問題提起を行うなど、ようこう衛星による太陽物理学の研究とともに、世界の研究をリードして来た。さらに、STP 分野では、現在、開発・計画中のミッションとして以下の2つがある。(1) BepiColombo : 欧州との共同の水星探査計画。2013年打ち上げ予定で、水星の磁気圏を初めて本格的に観測するミッションとなる。(2)SCOPE/Xscale : 高時間分解能・編隊飛行による地球磁気圏探査計画。また、これらの計画の先に、2020年代初頭の実現を目指して欧州研究者と将来の木星探査の議論をはじめている。

本計画は、あけぼの衛星による放射線帯・内部磁気圏観測の成果を拡大し、GEOTAILが提示したマクロ現象における非線形・ミクロプロセスの重要性の認識の上に立つものであり、初の電子・イオン・MHDスケールの包括観測を目指すSCOPE/XScaleによるスケール間結合物理の解明にもつながるものである。さらに、ERG衛星の課題である粒子加速の問題は、BepiColomboの柱の一つである「水星磁気圏観測」および将来の木星探査による「木星型磁気圏における巨大粒子加速機構の解明」に発展し、「惑星磁気圏の中での高エネルギー粒子加速」という比較惑星磁気圏研究の一環をなすものである。

また、本計画の特徴のひとつである、関連する多点観測と数値シミュレーションを組み込み、さらにデータ同化の機能もあわせもつ観測・モデル統合解析ツールの開発は、地球磁気圏研究の新しい方法論開拓という性格を持つ。これは衛星観測データを最大限に活かすことで、宇宙空間の普遍的・根源的理解の推進にブレークスルーをもたらさうるもので、SCOPE/Xscaleなどの将来計画においても不可欠となるものである。

一方、放射線帯粒子は人工衛星などの機器へ障害を引き起こすことが知られており、その変動機構の解明は、現代の宇宙天気研究の中で急務の課題となっている。本計画は、この放射線帯粒子の変動機構の解明を目的としており、この成果を宇宙空間における人間の安全な活動の確保を目指した実用的側面の研究(宇宙天気予報)の理論的・観測的基礎を提供することにもなる。

衛星の技術的な側面では、ERG衛星の遂行には強放射線環境下での粒子・電磁場・波動の計測技術の開発が必要不可欠であり、将来の木星探査で必要となる「強放射線下での衛星観測」の確立に資する。

7. 2. 関連する海外の計画との関係

関連する海外の人工衛星計画として、米国では、NOAA や LANL などの国立機関によってジオスペース環境モニター目的の衛星が運用されており、静止軌道および低高度極軌道から特定のエネルギーの粒子や磁場データを取得している。一方、大規模な放射線帯変動が見られる宇宙嵐においては、加速機構の経度依存性の重要性が指摘されている。そのため、加速機構をより定量的に理解するためには、ジオスペースの多点において同時観測を行い、異なる経度の粒子・波動の分布を把握することが好ましい。上述のモニター衛星群は、科学観測が主目的ではないため、観測できる物理

量や衛星軌道に制約があるが、加速の現場で統合観測を行う ERG 衛星のデータと組み合わせることで、グローバルな変動現象の把握に威力を発揮する。

また、図 6 に示すように、現在海外で RBSP 衛星（米国、NASA の LWS 計画の一部）、ORBITALS 衛星（カナダ）等がジオスペースへの同時期の打ち上げを目指して進められており、これらの衛星計画と国際的な協力関係を強化することによって、更に大きな科学的成果が得られることが期待される。このため、これらの海外ミッションとの連携の可能性の検討を始めている。また最近では 2006 年 11 月に行われた立教大学での国際会議や、その直後の地球電磁気・地球惑星圏学会において RBSP の Program Scientist や ORBITALS の Principal Investigator と具体的な協力関係の議論を行った。今後とも積極的に国際協力の枠組みを探ってゆく予定である。

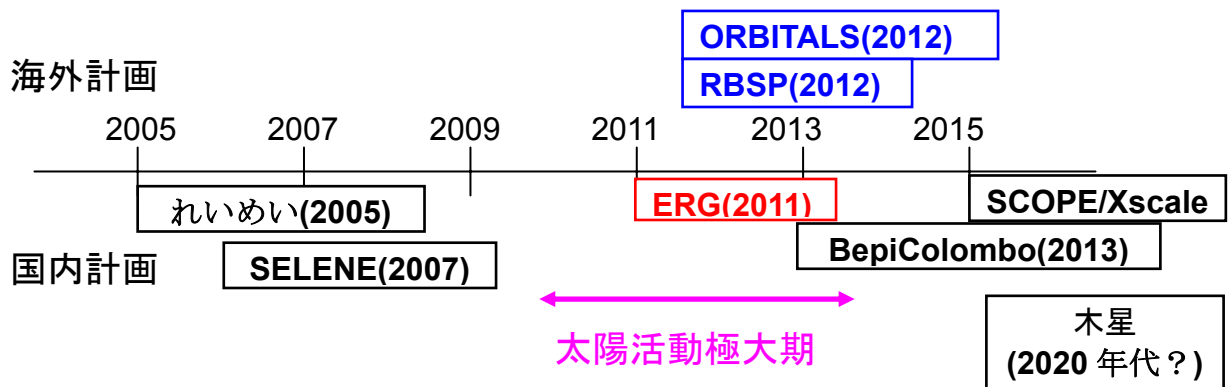


図 6 : ERG 計画に関連した国内外の将来衛星計画。

8. 代表者の連絡先

氏名： 小野 高幸

住所： 〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻

電話： 022-795-6514, FAX: 022-795-6517

電子メール： ono@stpp1.geophys.tohoku.ac.jp