

# 平成 15 年度戦略的開発研究費研究提案

## ( 1 ) 提案サマリ

**提案研究名** SCOPE ミッションによる磁気圏プラズマの高時間空間分解能観測

### 研究代表者及びワーキンググループ

前澤 洸 (宇宙科学研究所), 次期磁気圏衛星ワーキンググループ

### 研究の概要 (複数年次にわたる場合は年次計画を含む)

GEOTAIL 衛星のデータ解析研究がリードした最新研究成果から、磁気圏・宇宙プラズマにおける大規模でダイナミックな現象の本質的理解の為には、その現象全体を規定する MHD スケールのダイナミクスと、より微小なイオン・電子スケールとのダイナミックな結合・相互作用を理解しなければならないことが明確となった。この「スケール間結合」という視点に立った「その場」での観測的研究を遂行するには、(1) 衝撃波、境界層渦乱流領域、磁気リコネクション領域、といった「鍵」となる領域を観測すること、(2) 編隊を組んだ衛星群によって空間構造把握を行うこと、(3) 電子スケールに至る高時間空間分解能を持ってプラズマ観測を行うこと、が必須である。我々は、これらの要求を全て満たす計画として、Formation Flight 衛星による高時間分解能プラズマ観測ミッション (Scale COupling in Plasma universE) の検討を進めている。その成果は、磁気圏プラズマ物理の理解に貢献するのみにとどまらず、ここで捉えられる本質の普遍性を考えれば、より一般的な宇宙プラズマダイナミクスの本質理解の構築へとつながるものでもある。

SCOPE ミッションは、2012 年度打ち上げを目指して計画を進めている。SCOPE ミッションにおける最重要技術開発課題は、衛星編隊構成をいかに科学的成果最大化の実現に向けてデザインするか、にある。

平成 19 年度 (2007 年) の PM 開始に向けて、以下の項目の検討を実施する。

#### 鍵領域での衛星編隊観測を実現する技術

- 1. 軌道投入法：特に、ロケット搭載方法、衛星分離機構、分離・軌道変更手順
- 2. 軽量化：特に、子衛星システム、観測機器
- 3. 複数衛星の運用：特に、製造・試験方法の最適化、運用システムの検討

#### プラズマ高時間分解能観測を実現する技術

- 1. 時間精度の向上：特に、衛星間の距離決定・相対時刻決定、時刻保持精度の向上
- 2. 時間分解能の向上：特に、センサー高速化、ASIC 化、波動 粒子相関計測

### 所要経費概算 (複数年にわたる場合は年次計画を含む) 及びその内訳 (主要なもの)

<平成 15 年度> 30,000千円

1) 複数衛星の結合構造および分離機構の検討 ( 1 )	7,000千円
2) 衛星システム (特に子衛星) の軽量化技術の開発 ( 2 )	3,000千円
3) 衛星間の高精度距離・時刻決定方式の検討 ( 1 )	10,000千円
4) 高時間分解能観測装置の開発 ( 2、 - 2 )	10,000千円

<平成 16 年度> 55,000千円

平成 15 年度の検討を引き継ぐとともに、複数衛星の並行組立・試験方法、同時運用方法の検討 ( - 3 ) を開始する。

<平成 17 年度> 55,000千円

平成 16 年度と同予算規模で開発を継続し、PM 開始に必要な開発・検討項目を終了する。

### 今年度の到達目標

- ：衛星のハード面の検討を先行して進め、M-V を想定したシステムの基本デザインの仕様を固める。
- ：親子衛星間の時刻合わせ、距離決定方法を選定し、必要となる機器開発を開始する。
- 高時間分解能観測装置で必要となる ASIC の開発を開始する。

(2) 個別説明

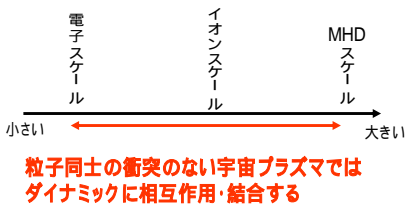
a. 研究の目的と意義

プラズマで満たされた宇宙空間は、ダイナミックな現象に満ちている。太陽フレアを見ると、我々はその大規模な様相を意識すると同時に、X線やガンマ線を光らせる高エネルギー粒子加速にも興味を持つ。太陽フレアによって地球磁気圏空間も乱され、それはオーロラ活動に反映される。そこで我々が興味を持つのは、磁気圏が乱される大規模な様相とともに、オーロラを光らせる電子の加速機構は何か、ということである。

宇宙プラズマにおける大規模ダイナミクスの大雑把な把握には、電磁流体方程式(MHD)が便利である。しかし、上の例からわかるように、この常識とされる体系は現在の我々の問題意識に100%応えてくれなくなってきた。つまり、MHDを超えた新しい体系が必要であることがわかる。

我々は「スケール間結合」こそがその候補であると考えている。無数のイオンと電子が電磁場を介して「無衝突的」に相互作用する宇宙プラズマにおいては、様々な時空スケールが存在し、MHDスケールはその中で最大のものである。「スケール間結合」とは、ダイナミックな現象において起こる、MHDスケール、イオンスケール、さらに電子スケールでのダイナミクスが動的に連携する事実を、正面から捉える問題意識である。宇宙プラズマ中のダイナミックな現象においては、ある「鍵」となる領域が発生し、ここではMHDでは捉えきれない「鍵」となるプロセスが進行する。「鍵となる領域での鍵となるプロセス」を真に理解するためには、電子スケールまで跨ったスケール間結合という視点が必須となるのである。これは、宇宙プラズマの無衝突性の故であり、地上での常識が通用しない、宇宙ならではの現象が展開する。つまり、宇宙プラズマダイナミクスの本質 - 大規模ダイナミクスの非線形発展とともに鋭い空間構造ができ、そこで電子ダイナミクスが発動して散逸が発生する、あるいは、イオン・電子の粒子加速が起きる - に迫るには、「スケール間結合」という視点が必須である。

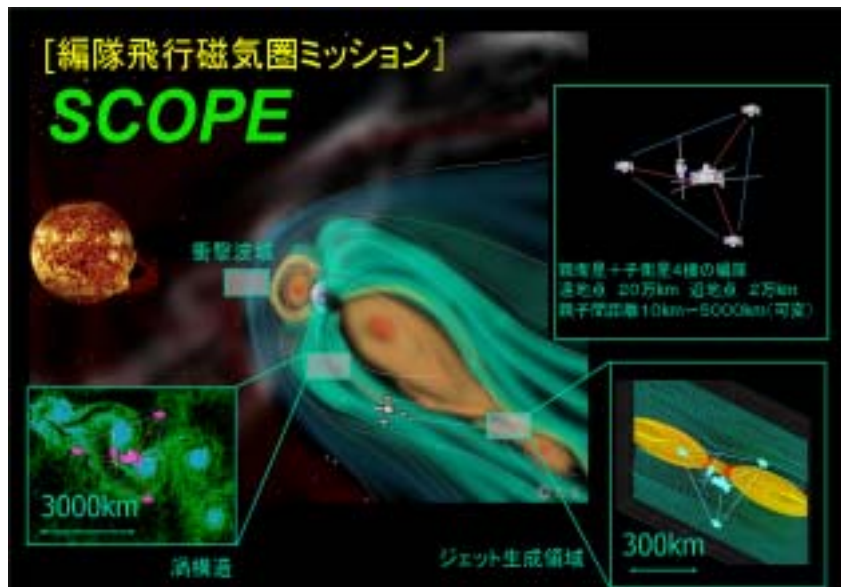
スケール間結合とは何か？



自然科学における理解とは、観測による実証が伴って初めてなされる、と言えるであろう。磁気圏・宇宙プラズマという自然科学分野において、「スケール間結合」という視点からの理論研究は盛んに行われつつある。

では、この視点からの実証的研究に必要なことは何であろうか。まず、「鍵」となる領域で観測を行う必要がある。また、それらの領域で「鍵」となる過程を電子スケールまで分解して観測しなければならず、それも空間構造を把握した上で行いたい。これらの要請を全て満たすものとして、我々はSCOPE (Scale COupling in Plasma universE) 計画を検討している。この計画では、ショック、磁気圏尾部リコネクション領域、磁気圏境界渦乱流輸送領域、といった「鍵」領域での「鍵」プロセスを、電子スケールまでに跨ったスケール間結合の視点から理解することを可能にする。このことは、磁気圏物理における最重要領域の本質的理解をもたらすのはもちろん、これらのプロセスの宇宙における一般性を考えれば、そこで得られる理解は普遍的価値をもつ。

この計画では、編隊衛星観測による時空解析、および、プラズマ高時間分解能観測が大きな柱である。科学的成果を最大化すべく、いかに編隊構成をデザインするか、いかに観測器を軽量化を伴って高機能化させるか、技術検討上の最大のポイントであり、この研究計画のテーマである。



## b. 研究の必要性、緊急性（想定するミッションとその打ち上げ時期）

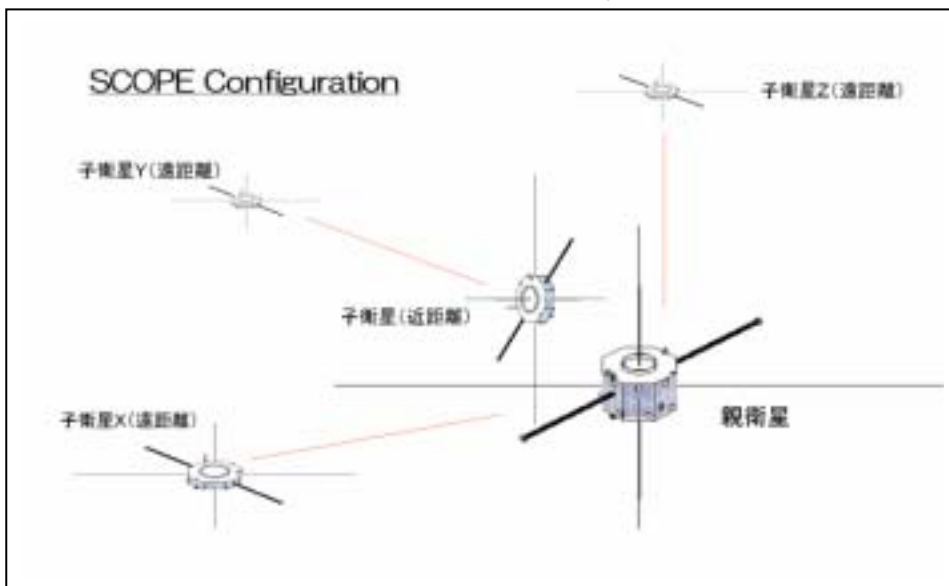
上記にのべたミッションを実現するには、わが国初めての編隊飛行衛星観測のための衛星システム開発が必要である。また、電子ダイナミクスの解明には、粒子観測器に 10 msec という高い時間分解能、波動観測と関連して高精度の相対距離・時間の決定が必要である。WG における議論から、科学成果を最大にするための衛星軌道および衛星飛行形態についての要求は、以下の通りである。

### I. 鍵領域での衛星編隊観測

- (1) 遠地点 30 Re の長楕円軌道に、親衛星と少なくとも 4 機の子衛星からなる編隊飛行衛星を投入する。尾部磁気中性面に近接する軌道面に入れて、尾部磁気リコネクションを狙うとともに、昼側で衝撃波加速、境界面物理なども観測する。近地点は高度 1000km 以上とする。
- (2) 編隊のうち子機 3 機は、親機から数十 km から数千 km の範囲で、距離を可変に 3 次元的に配置し、周囲プラズマのミクロからマクロスケールにわたる空間構造を決定する。

#### ・プラズマ高時間分解能観測を実現

- (1) 親衛星にはフルスペックの観測器をのせ最先端のプラズマ観測を可能とする。特に新規開発の高時間分解能粒子観測器で 10 msec の時間分解能を達成する。更には波動粒子相関器によりプラズマ周波数に近い電子スケールの現象の解明を行う。
- (2) 子機のうち 1 機は親衛星に非常に近い距離（最短距離 1 km）に置き、親機との共同観測により電子スケールのミクロプロセス（波動—粒子相互作用）の観測に専用化する。



これらの要求を満たす編隊飛行形態の衛星群を、M-V での一括打ち上げを想定して、現在システム検討を行っている。

（現段階での、打ち上げシークエンス（子機分離手順）、M-V への搭載配置、衛星形状、重量、電力などの案を付録として付ける。）この編隊軌道を達成するための  $\Delta V$  能力の搭載を、M-V で打ち上げられる重量範囲内で実現することは、さらなる検討を要する事項である。最大の科学的成果をもたらすミッションを成立させるべく、その軽量化検討のための予算を請求する。

編隊飛行を高時間分解能プラズマ観測に最大限活用する上での重要な開発項目は親子間通信である。子衛星のうち、最も親機に近いものは、親機から数 km から数十 km の距離にあり、その相対位置制御のためには、親子間のレンジングによる衛星間距離測定技術が必要である。また、この子機が取得するデータは親機経由で地上に伝送するため、親子間通信はそのためにも欠かせない。親子間のデータ比較には、 $\mu$  sec レベルの高精度相対時間決定技術も必要である。

SCOPE 衛星打ち上げは 2012 年度を目標とする。2012 年度に打ち上げれば、米国の衛星計画との国際協力により、把握できる空間スケールの幅が大幅に増大するという大きな利点がある。米国ではナノサテライトを磁気圏内の広い領域に大量に配置して MHD パラメータを観測し、磁気圏のグローバルな様相を把握するミッション（MC: Magnetospheric Constellation 計画）を計画しており、2012 年打ち上げを予定している。SCOPE と MC の同時観測により、SCOPE ミッションによる数 km から数千 km の空間スケールと、MC による数千 km 以上数十万 km までの空間スケールの現象が同時に把握される事になり、合わせて 5 桁のスケールにわたって展開するプラズマダイナミクスの透視図を手になることになる。

## c. 国内外の関連研究動向

編隊衛星観測による現象の時空分離・解析は、2000 年に打ち上げられた ESA の Cluster-II により始まった。その衛星間距離は 1,000 km 程度であり、単一衛星では間接的にしか推測できなかった電流層の厚みを決定することが可能となり、電流層の全体構造を把握した上で、衛星位置におけるイオン・電子の局所的振る舞いを捉える、ということが行われつつある。これは、編隊衛星観測の有効性を実証していると言っ

てもよいであろう。また、GEOTAIL 衛星との共同観測によって、Cluster-II 編隊がカバーする範囲の外側で発展するダイナミクスとの関連も研究されつつある。これは広大な磁気圏空間におけるわずか2点(この場合は Cluster-II 編隊をまとめて1と数える)での観測であるが、それまでの単一衛星観測に比べればはるかに確度の高い新たな知見を与えつつあり、グローバルダイナミクスの研究における複数点観測の有効性を示唆している。この点に関しては、SCOPE 計画において共同観測が考慮されている NASA Magnetospheric Constellation (MC) 計画について述べる際に再び触れる。

Cluster-II に続く編隊衛星観測計画である NASA THEMIS は、5つの衛星でオーロラ爆発の起源領域を囲むように観測し、その様相を明らかにしようとするものである。ここでは、衛星間距離は大きく、編隊の配置は因果関係の把握に重点が置かれている。

これらの編隊衛星観測計画においては高時間分解能の観測は無く、SCOPE 計画の目標とは明らかに異なるものである。一方、2002年3月にA/Oが締め切られたNASAのMMS計画も編隊衛星による観測計画であり、これは高時間分解能観測を狙っているものの、複数衛星で磁気圏のすべての領域を探索する事を目指している為、ある領域の探索期間は短く、観測されるイベント数も少ないため、我々が目標とする「スケール間結合」という視点による理解構築への貢献は限られている。また、プラズマ波動の効果を積極的に取り入れる視点がない。

SCOPE ミッションでは、さらに、全スケールにまたがるダイナミクスの結合という視点における必要性から波動観測に重点を置く。また、全スケールにわたっての把握という意味で、SCOPE 計画では NASA MC 計画との共同観測を考慮する。MC 計画とは、MHD パラメータのみを計測する超小型衛星を、磁気圏空間に多数配置して、MHD レベルでグローバルな様相を把握しようとする計画である。これに、「鍵領域」で「鍵プロセス」を把握する SCOPE 衛星を組み合わせることで、我々は全スケールにわたって展開する磁気圏・宇宙プラズマダイナミクスの描像を初めて手に入れることができる。

このように、世界の最先端をリードする計画においては編隊衛星観測が当然視され、また、科学的成果を最大にするデザインが求められている。この事実は、本研究計画での検討事項の重要性を示している。

#### **d. これまでの準備状況**

WGのこれまでの会合で、サイエンス面から要求される測定器スペック(性能と時間分解能)、衛星軌道、Formation Flightにおける衛星配置と相対距離などミッションの前提条件を検討し、必要とされる衛星および観測器のスペックを基本案としてまとめた。

これを元に、2003年1月から月1回ペースでシステム検討会合を持ち、具体的な衛星システム検討を開始した(具体的な現在の検討状況については付録参照)。観測器については、WGで議論された測定器のスペックに基づいて、低エネルギー粒子観測器・波動計測器の概念設計を2001年度から進めており、本年度は詳細設計と試作を行う予定である。また、両者の結合によって実現する「波動-粒子相関」について、双方のデータ受け渡しインターフェースを検討してきており、今年度に一部試作を開始する。

#### **e. 研究推進にあたっての基本的考え方(他ミッションとの関連および年次計画)**

SCOPE 計画は、これまでに大きな成功を収め、さらに Cluster-II などとの共同観測で成果を出し続けている GEOTAIL 衛星の後継にあたる。GEOTAIL 衛星の最大の成果は、詳細なプラズマ粒子観測から MHD スケールとイオンスケールとの結合を明らかにし、そういった研究が実証的に可能であることを世界で初めて示したことにある。SCOPE 計画では、編隊を組み、時間分解能を3桁上げることで、空間構造を把握しながら電子スケール観測を行い、MHD スケールから電子スケールに跨るダイナミクスの結合様式を明らかにする。

SCOPE 計画の科学目標は、普遍的な宇宙プラズマダイナミクスの理解体系を構築することである。その意味において、2010年度に打ち上げを予定している水星探査機 Bepi Colombo と有機的に結合して研究を展開する。また、観測器開発上も共通化できる側面があり、協力して開発を進める。日程的には、Bepi Colombo の MMO モジュールは、打ち上げより1年前に ESA に向けて送り出すので、ほとんど SCOPE 計画の FM 製作と重ならず、打ち上げ直前の人的資源の競合はミニマムに抑えられる予定である。人的には、GEOTAIL で育ち、「のぞみ」の開発で経験を積んだ若手が中堅になっており、所外も入れると、これから10年は人材に事欠かない。

NASA MC 計画との共同観測を念頭に、SCOPE 衛星の打ち上げを 2012 年度冬期とし、それまでの年次計画として、2005 年にミッション提案、2007-2008 年に PM、2009-2011 年に FM、2012 年に総合試験、を想定している。

#### f. 今年度の研究題目の内容、主要経費使途内訳及び担当者

これまでの検討では、親 1 機、子 4 機を M-V のフェアリングにおさめ、暫定軌道へ移行後に子衛星を順次分離、編隊を形成する方法の成立を見ているものの、重量に殆ど余裕がない。1) 複数衛星の結合構造および分離機構の検討、および 2) 衛星システム（特に子衛星）の軽量化技術の開発によって、現実的な衛星設計を進め、M-V 打ち上げに必要な重量マージンを確保する。

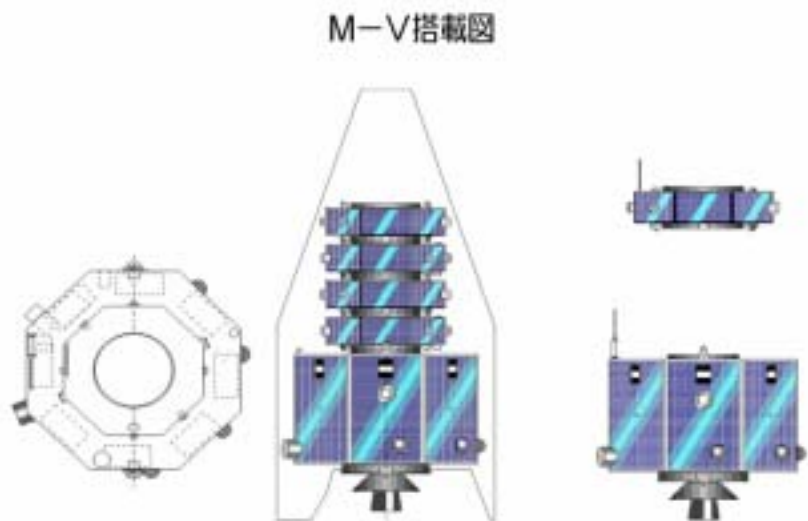
また、このミッションの鍵となる、「編隊飛行による  $\mu$  秒オーダーの高時間分解観測」を実現するため、3) 衛星間の高精度距離・時刻決定方式の検討、および 4) 高時間分解観測装置の開発を実施する。

##### 1) 複数衛星の結合構造および分離機構の検討

(7,000 千円)

これまでの検討では、M-V による打ち上げを想定した場合、最も現実的な衛星群の構成は、親衛星の上に 4 つの子衛星を段重ねで搭載することである。しかし、このような結合・分離構成を持つ衛星はこれまで我が国では経験のないものである。平成 15 年度には、複数衛星の結合構造について、構造解析を含めた詳細な検討を開始する。

現在の想定では、衛星姿勢の安定性の観点から、子衛星分離までの初期フェーズでは、衛星結合システムは 3 軸姿勢制御とすることを想定している。平成 15 年度には、100kg 弱の子衛星を順次分離することができる分離機構の初期検討を行い、前記構造



親衛星 + 子衛星 4 機

##### (2) 衛星システム（特に子衛星）の軽量化技術の開発

(3,000 千円、齋藤（宏文）、福田）

限られた資源で最大の科学的成果を得るために、衛星システム、特に子衛星は、軌道制御能力を含む必要最低限の機能を持ちつつ、ぎりぎりのところまで小型軽量化することが要求される。

軽量化の具体的な方策として、a) 共通系機器のうち、DHU・AOCE・DR の機能を統合して 1 ユニット化する、b) 耐放射線 SOI 化 CPU を使用することで、デジタル部の重量・電力を減らす、c) 小型のピギーバック衛星をターゲットにして開発中の、CMOS センサーを使用した太陽センサー、スターセンサーや S-BAND transponder を開発する、などの検討を開始する。

##### (3) 衛星間の高精度距離・時刻決定方式の検討

(10,000 千円、齋藤（宏文）、福田）

プラズマ波形の親子間相関観測を実現するためには、親衛星と近傍子衛星間で、距離を 10m、時刻をマイクロ秒の精度で決定する必要がある。

相対距離決定の方法として、地上 - 親衛星 - 子衛星間の 4-way レンズング方式を検討する。具体的には、従来のベントパイプ方式のレンズングで親衛星 - 子衛星間距離が必要な精度で決定できるかどうか評価し、精度が不足する場合には、現在金星ミッション用に開発中の再生中継方式レンズングを用いることを

検討する。

また、相対時刻合わせについて、地球近傍で GPS を用いて時刻合わせを行い、その後は衛星の持つ発信器で時刻を保持する方法を検討する。この方式では、「衛星搭載用 GPS 受信機」および「超安定発振器(USO)」が必要となる。後者は、衛星軌道周期の約 4 日間でマイクロ秒の安定度を持つ必要がある。USO は、従来海外で開発されたものを輸入して使用しているが、将来の科学衛星・惑星ミッションにおいて必要となる重要な機器であり、この国内開発に着手したい。

平成 15 年度には、上記の衛星間相対距離決定を含む親子衛星間通信、親子衛星間の時刻合わせの方式について具体的な検討および他方法とのトレードオフ評価を行うとともに、USO など必要となる機器の基礎開発を開始する。

#### (4) 高時間分解観測装置の開発

(10,000 千円、齋藤、小嶋)

SCOPE ミッションでは、親衛星におけるプラズマ波動観測装置、低エネルギー粒子観測器による高時間分解能観測の成否が科学目的達成の鍵を握る。平成 15 年度には、これらの高時間分解能観測装置開発において特に重要であるアナログ ASIC・デジタル ASIC を用いた電子回路部のワンチップ化に先行着手する。

低エネルギー電子(数 eV ~ 数 10keV)観測器は、時間分解能を従来の「GEOTAIL」衛星や「のぞみ」衛星搭載の観測器(時間分解能:約 10 秒)に比べて約 1000 倍上げることが要求される。これには高速動作する高機能の荷電粒子検出器が必要であるが、従来の延長でこれを実現するには大電力が必要で、観測器が多数台必要となる SCOPE ミッションへの搭載は現実的でない。このため、アナログ ASIC を検出器の信号検出に用いた新しいタイプの検出器開発を行い、可能な限り省電力・小型化を進める。この技術は衛星搭載用機器に広く応用できる重要な技術である。

一方、直接波動・粒子エネルギー交換過程を検出することを目的とする WPC(Wave Particle Correlator)の開発を行う。これは、電子・イオンの検出パルスと電磁場の波形データの間で直接相互相関をとる事によって、波動と直接エネルギーをやり取りして変化している粒子の分布関数の 1 次変動量を機上で求めるものである。この観測器には大量のデータを高速処理できるデジタル回路が必要であり、これに必要なデジタル ASIC の開発を行う。

#### g. 研究組織(平成 15 年 4 月現在)

##### [全般]

計画総括	前澤洵(宇宙研)
システム検討・親衛星総括	齋藤義文(宇宙研)
子衛星総括	笠羽康正(宇宙研)

##### [工学側検討]

編隊軌道検討	川口淳一郎(宇宙研)
軽量化技術	齋藤宏文(宇宙研)

##### [観測器検討]

電場・波動計測	小嶋浩嗣(京大宙空電波)、笠羽康正(宇宙研) 八木谷聡(金沢大工)、笠原禎也(金沢大工)
磁場計測	松岡彩子(宇宙研)、湯元清文(九州大)、遠山文雄(東海大工)
低エネルギー粒子計測	齋藤義文(宇宙研)、浅村和史(宇宙研)
高エネルギー粒子計測	高島健(宇宙研)、平原聖文(立教大理)

##### [サイエンス検討]

総括	藤本正樹(東工大)、大村善治(京大宙空電波)
同サブ	篠原育(宇宙研)、関華奈子(名大 STE 研)

[ワーキンググループ名簿は付録資料参照]