

日欧共同水星探査計画 BepiColombo 観測システムの最新状況

早川基、笠羽康正、山川宏、小川博之、向井利典(JAXA/ISAS)、水星探査 WG

BepiColombo/Mercury Magnetospheric Orbiter の最新状況

山川宏、小川博之、早川基、笠羽康正、向井利典(JAXA/ISAS)、水星探査 WG

水星プロジェクト室: <http://www.stp.isas.jaxa.jp/mercury/>

[観測システム]

2004年度には、MMO・MPO 両探査機の「搭載観測機器チームの選定」が行われた。これは、日欧双方の科学コミュニティへ開かれた国際公募によるもので、MMOで5チーム、MPOで11チームが選抜された。今後の探査計画の立案・実施は、この観測機器開発チームを軸とした日欧研究者で構成される「BepiColombo 科学ワーキングチーム(Bepi-SWT)」で行われる。

[MMO 探査機]

次年度からの探査機予備設計(フェーズB)開始へ向け、衛星システム(基本文書作成、対ESAモジュール I/F、MMO 探査機詳細仕様など)、機械(分離機構など設計)、熱(熱数学モデル作成・解析など)、電気(電源など設計)、通信機器(HGA・MGA・XPA・トランスポンダなど設計)、推進系(熱検討など)、DH 系(DHU など仕様検討)の検討を行った。3月にフェーズB移行前の要求審査(PRR)を実施する。

1. 概要

「ベピ・コロombo(BepiColombo)」¹計画は、欧州宇宙機関(以下、ESA)との共同によって、この惑星の磁場・磁気圏・内部・表層を初めて多角的・総合的に観測しようとするプロジェクトである。

本計画の科学的意義は、以下の二つである。

- 1) 固有磁場と磁気圏を持つ地球型惑星は地球と水星だけであり、水星の詳細探査は「初の惑星磁場・磁気圏の詳細比較」の機会となる。「惑星の磁場・磁気圏の普遍性と特異性」の知見に大きな飛躍をもたらすことが期待される。
- 2) 磁場の存在と関係すると見られる巨大な中心核に代表される水星の特異な内部・表層の全球観測は、太陽系形成、特に「地球型惑星の起源と進化」の解明に貢献することが期待される。

本計画は、上記の目標に最適化された2つの周回探査機、すなわち表面・内部の観測に最適化された**水星表面探査機 Mercury Planetary Orbiter [MPO: 3軸制御、低高度極軌道]**と、磁場・磁気圏の観測に最適化された**水星磁気圏探査機 Mercury Magnetospheric Orbiter [MMO: スピン制御、楕円極軌道]**から構成される(図1)。両探査機は、一体で「ソユーズ・フレガート 2B」ロケットで2012年に打ち上げられ、水星へ伴に旅をする。2016年の水星到達後に分離し、協力して観測活動を行う。

ISAS/JAXA は、日本の得意分野である磁場・磁気圏の観測を主目標とする MMO 探査機を担当する。ESA は残りの全て、すなわち、「打ち上げ・惑星間空間の巡航・水星周回軌道への投入」

¹ マリナー10号の軌道計画や、水星の自転・公転共鳴解明などへ貢献した Giuseppe (Bepi) Colombo(1920-1984)にちなむ。

および MPO 探査機を担当することとなる。

磁場や磁気圏の様子がよくわかっている惑星は地球だけで、水星は初めて地球と比較ができる惑星となる。すなわち、この両者の比較は、磁場/磁気圏を巡る惑星環境の更なる理解に貢献するとともに、広く宇宙に存在する様々な磁気圏の特殊性・普遍性を知る大きなステップとなる。JAXA の担当する**水星磁気圏探査機 Mercury Magnetospheric Orbiter [MMO]**は、この解明に最適化されたもので、以下の特徴を持つ。

- ・軌道： 磁気圏全域をカバーするため、「夜側を包含しうる長楕円極軌道」をとる。
- ・姿勢： ワイヤアンテナ展開、粒子全方位計測のため、「スピン制御」とする。
- ・EMC 対策： 精密な磁場・プラズマ計測のため、帯磁・帯電・電磁ノイズ低減を図る

磁場の存在は、半径の 3/4 を占める巨大な中心核を持つ水星の特異な構造に関係する。水星の特異な姿の原因は、原始太陽系星雲の最も内側で最後に固まったとされるこの天体の「初期」に遡ると考えられる。ESA の担当する**水星表面探査機 Mercury Planetary Orbiter [MPO]**は、この解明に最適化されたもので、以下の特徴を持つ。

- ・軌道： 表層・内部・磁場を全球計測するため、「低高度極軌道」をとる。
- ・姿勢： 表層を高空間分解で計測するため、「3軸制御」とし、常時水星表面を指向」する。

図1(左) 水星表面探査機 Mercury Planetary Orbiter [MPO] (ESA 提供)
 (右) 水星磁気圏探査機 Mercury Magnetospheric Orbiter [MMO] (京大 RASC 提供)

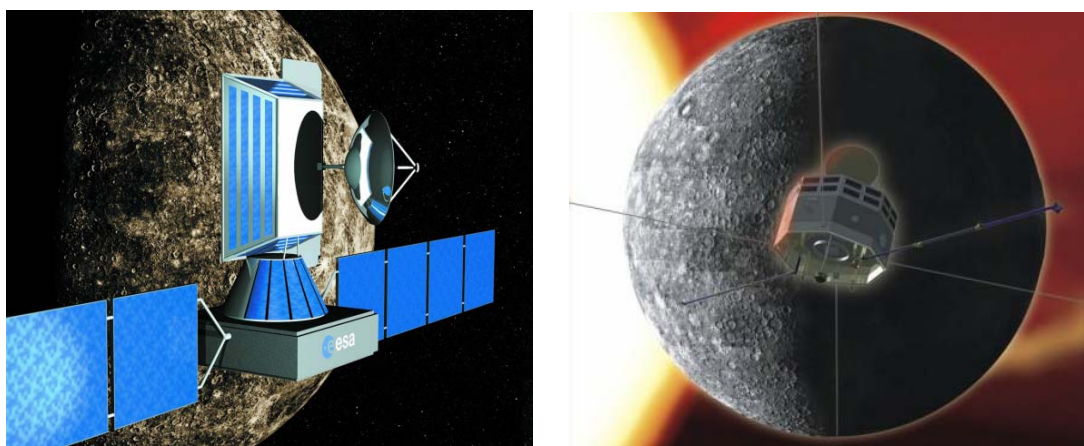


表 1 水星探査プロジェクト:2004~2016

2004FY	研究フェイズ
2004 春~	搭載機器開発公募 (MMO:4-7 月、MPO:3-5 月)
2004 Nov.	MMO・MPO の搭載観測機器チーム選定を承認
2005 Mar.	第一回 MMO Science Working Sub-Group (MMO-SWG)会合 (ISAS/JAXA) 第一回 BepiColombo Science Working Team (Bepi-SWT)会合 (ESTEC) MMO フェーズB移行前の要求審査[Preliminary Requirement Review: MMO-PRR]
試作/製作: 2005-2006FY 衛星試作フェイズ ⇒ 2007-2009FY 衛星製作フェイズ	
総合試験: 2009-2010FY MMO 総合試験 ⇒ 2010-2011FY BepiColombo 総合試験	

打上/観測：2012 打ち上げ ⇒ 2016 水星到着 ⇒ 1年間の観測 (Option: +1年)

2. MMO・MPO 搭載観測機器チームの決定

2004年11月に、MMO・MPO の搭載観測機器チームが決定した。公募は、日欧それぞれの科学コミュニティにオープンに行われた。また、選考委員会は、日欧双方の委員で構成された (MPO では日：欧=3人：6人、MMO では日：欧=6人：3人。)

MMOでは、表2に示す5つの観測装置チームが選定された。MPOとの共同も踏まえて以下の科学目標の達成を目指す。

○固有磁場の成因の解明を目指す

水星周辺の磁場を高い精度で計測し、水星本体が有する固有磁場の成因を探るとともに、水星本体・水星磁気圏の電流構造、時間変動を解明する。

○地球と異なる特異な磁気圏の解明を目指す

電離層の有無、スケールの相違、大きな太陽距離変化などを踏まえて水星磁気圏の構造・運動・高エネルギー現象を観測し、地球との比較によってその物理過程の普遍性と特異性を明らかにする。

○激しく変動する希薄な大気(ナトリウムが主成分)

希薄大気の大規模構造・時間変動を観測し、その生成・消滅の物理機構を調べるとともに、磁気圏・表層との相互作用を解明する。

○太陽近傍の惑星間空間の観測

直接観測可能な中で最も高マッハ数の衝撃波を観測し、そのエネルギー過程の解明を目指す。太陽系内部領域の惑星間空間ダストについて、Helios以来の観測を行う。

また、MPO探査機では表3に示す11の観測装置チームが選定された。MMOとの共同も踏まえて以下の科学目標の達成を目指す。

○鉱物・元素組成の解明を目指す

表面からの赤外-可視、X線・γ線・中性子観測、表面や大気の紫外分光、中性粒子・プラズマ直接計測によって水星全球を詳細観測し、太陽系の最も内側で起きた惑星の形成・進化に迫る。

○巨大な鉄の中心核(全体の3/4)の解明を目指す

重力場の全球詳細マッピングを行い、水星の特異な内部構造を明らかにする。

○極の氷の存在検証を目指す

γ線・中性子観測によって、非日照域に存在する可能性のある氷などを検証する。

○形成初期の姿を残す表面地形の解明を目指す

全表面、特にMESSENGERができない南半球の詳細地形撮像を行い、表面地形の成因解明を目指す。

また、両探査機の連携によって以下のより有意義な観測が可能となる。

a) **水星磁場の精密観測**：MMO による「本体近傍～磁気圏・太陽風の磁場観測」と、MPO による「本体近傍の磁場観測」の結合により、水星固有磁場の“二点同時計測による高精度決定”、および水星磁気圏の“編隊飛行による時空間分解”が初めて可能となる。

b) **磁気圏-水星表層の直接相互作用の検出**：MMO による「磁場・高エネルギー粒子（原因）の観測」と、MPO が実施する「表面からの原子・X線放射（結果）の検出」の結合によって、希

薄大気 (Na が主) の生成過程や表層風化と磁気圏活動との関連が初めて可能となる。

表2 MMO 探査機:観測機器チーム

名称 (人数)	観測内容	代表者/副代表者および機関	他の参加機関(国内)・参加国
MGF (35)	水星内部・磁気圏・太陽風の磁場観測	W. Baumjohann (IWF, オーストリア) 松岡彩子 (JAXA)	Japan: 東海大、九州大、東北工大、熊本大、東京工大、東京大、NiCT Europe 他:ドイツ、イギリス、アメリカ
MPPE (65)	電子・イオン・高速中性粒子のエネルギー・質量分析による磁気圏・大気・太陽風探査	斉藤義文 (JAXA) J.-A. Sauvaud (CESR-CNRS, フランス) 平原聖文 (立教大.) S. Barabash (IRF, スウェーデン)	Japan: 京都大、名古屋大・太陽地球環境研、東京工大、東北大、東京大、極地研、NiCT Europe: フランス、イギリス、イタリア、チェコ、ベルギー、ドイツ、スイス Others: アメリカ、台湾
PWI (45)	電場、プラズマ波動、電波電子密度・温度計測による磁気圏・大気・太陽風探査	松本紘 (京都大・生存圏研) J.-L. Bougeret (LESIA, フランス) L. Blomberg (KTH, スウェーデン) 小嶋浩嗣 (京都大・生存圏研) 八木谷聡 (金沢大)	Japan: 富山県大、愛媛大、京都産業大、東北大、JAXA Europe: フランス、スウェーデン、ノルウェー、フィンランド、ハンガリー、ESA
MSASI (20)	ナトリウム大気の撮像による大気生成・消滅の探査	吉川一朗 (JAXA) O. Korablev (IKI, ロシア)	Japan: 立教大、東北大、東京工芸大、極地研
MDM (12)	水星・惑星間・恒星間ダストの観測	野上謙一 (獨協医大)	Japan: 東京海洋大、早稲田大、京都大、大阪市大、国立天文台、JAXA Europe: ドイツ

表3 MPO探査機:観測機器チーム

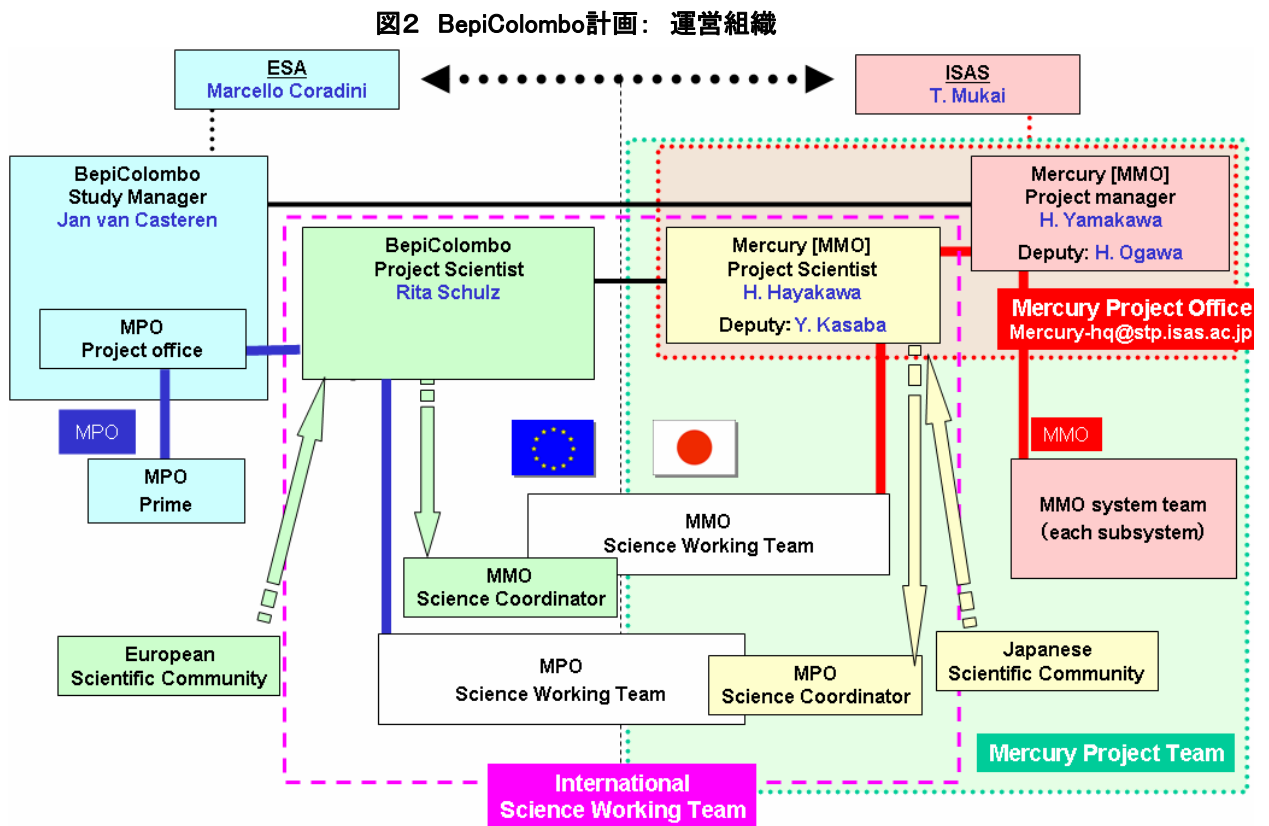
名称	観測内容	PI/Co-PI(一部略)	日本からの参加者・機関
BELA	レーザー高度計による重力場・内部構造の探査	N. Thomas (Univ. Bern, スイス) T. Spohn (DLR, Germany)	国立天文台 (検討中)
ISA MORE	電波精密測距による重力場・内部構造の探査	V. Iafolla (CNR-IFSI, Italy) L. Iess (Univ. Rome, Italy)	---
MERMAG	水星内部・磁気圏・太陽風の磁場観測	A. Balogh (ICL, UK) C.M. Carr (ICL, UK)	JAXA 他
SIMBIO- SYS	撮像および光・近赤外分光による表層地形・組成地形・組成観測	E. Flamini (ISA, Italy) F. Capaccioni (INAF-IASF, Italy)他5	---
MERTIS- TIS	赤外熱撮像	E.K. Jessberger (Univ. Munster, Germany)	
MGRS or MANGA	ガンマ線・中性子計測による表面組成 (未決: 2005 年冬に決定)	I. Mitrofanov (IKI, Russia) C. d'Uston (CESR, France)	MANGA: 長谷部信行 (早大: Co-PI) 他
MIXS SIXS	X 線計測による表面組成	S. Dunkin (RAL, UK) J. Huovelin (Univ. Helsinki, Finland)	JAXA 他
UV	紫外線分光による大気組成	E. Chassefiere(SA/IPSL, France) 岡野章一 (東北大)、O. Korablev(ロシア)	JAXA 他
SERENA	中性粒子・イオン観測による	S. Orsini (CNR-IFSI, Italy) 他	JAXA 他

	表面・大気組成	
--	---------	--

BepiColombo 運営組織を図2に示す。

今後の観測機器開発および観測計画の立案・実施は、観測機器開発チームを軸に構成する「BepiColombo 国際科学ワーキングチーム(BepiColombo SWT)」で行われる。また、そのサブグループとして、MMO サイエンスワーキングサブグループ(MMO-SWG)およびMPO サイエンスワーキンググループ(MPO-SWG)が置かれる。第一回 MPO-SWG は 2005 年1月に開かれた。MMO-SWG および Bepi-SWT は、2005年3月に開かれる。これにより、「BepiColombo 観測チーム」が本格始動することになる。

「MMO システムチーム」は、現段階の構成がそのまま継続される。ESA 側では、2006年頭にプライムメーカーの選定が予定されており、MPO を含めた ESA 側モジュールの仕様はそれを待つて初めて確定することとなる。



3. MESSENGER計画とBepiColombo計画 ～初サーベイから全貌解明へ～

2004年7月に無事打ち上げられた米国MESSENGER(2011年水星到着予定)は、近水点を高緯度に取り、衛星姿勢を太陽角準固定する(いずれも熟設計に起因)ため制約があるが、「全球の低分解初サーベイ」と「北半球高緯度の詳細観測」を行うこととなる。

表4に、MESSENGERとBepiColomboの関係を示す。BepiColombo計画は、MESSENGERの「初サーベイ」の成果を拡大し、かつ新観測項目(特に磁場・磁気圏)により水星の全貌解明を行う。このため、2010年代初頭における両者の密接な競争・協力が重要となる。

表 4 MESSENGER と BepiColombo

	MESSENGER	BepiColombo
水星環境(主にMMO) : Bepiで初めて明かされる		
水星磁場の成因の解明	北半球高緯度の比較的低精度な観測 → 成因は未決着	2探査機で全球磁場構造解明 → 成因解明、地球との初の比較
水星磁気圏の解明	主目的ではない	高精度・高時間分解 (MMO) による全解明 → 比較磁気圏学 (普遍性と特異性) の創出
激しく変動する希薄な大気の解明	一部の元素組成 (北半球高緯度に限定)	元素組成、空間構造、時間変化 → 生成・消失機構の解明
太陽近傍の惑星間空間の観測	なし (太陽シールドの後ろにいるので観測できない)	高マッハ数衝撃波を初めて直接観測 (MMO)
内部・表層(主にMPO) : BepiColomboでMessengerのもたらす謎を解明する		
鉱物・元素組成の解明 極の水の存在検証	全球平均と、北半球高緯度の詳細を、低精度 (~30%) で観測 → 岩石の種類分類には不足。水星の起源解明に足がかり。	全球で高空間分解の組成比を、高精度 (~10%) で明らかに。 → 水星の起源、地殻形成・火成活動史について決定打を得る。
巨大な鉄の中心核 (全体の3/4) の解明	北半球高緯度で、潮汐変形や歳差・章動の検出を目指す。	重力場検出 & 軌道変化検出 → 地殻厚・中心核の大きさを初決定。
形成初期の姿を残す表面地形の解明	北半球高緯度の詳細地形と大まかな全球地形を明らかに。	全球を最適条件で。南半球解像度は一桁以上高。→ 全球情報で初期史解明。

4. BepiColombo 全体計画

全体計画には大きな変更はない。

MPO・MMO 両探査機は、惑星間軌道で使用される**電気推進モジュール (SEPM = Solar Electric Propulsion Module)**、および水星への周回軌道投入に用いる**化学推進モジュール (CPM = Chemical Propulsion Module)**と結合させた、単一の「統合モジュール」として打ち上げられる。打ち上げは、ソユーズ・フレガート2B (現「ソユーズ・フレガート」の増強型) により2012年に実施する。複数回の金星・水星フライバイを含めた惑星間空間巡航は、電気推進モジュール (SEPM) にて行い、約4年後に水星に到着する。大きな推力を要する水星周回軌道投入は、化学推進モジュール (CPM) によって行う。この間の「統合モジュール」の制御・運用は MPO が司り、ESA によって実施される。この間、JAXA が担当する MMO 探査機は基本的に電源 OFF に近い状態で (温度維持機能を除く)、最低限のヘルスチェック運用のみを実施する。

最初に投入される軌道は、MMO の周回軌道 (高度: 400x12,000km, 周期: 9.2 時間) である。ここで MMO は起動され、十分なヘルスチェックの後に複合モジュールからスピン分離して、臼田 64m による独自の運用・観測活動を開始する。MPO は、再度の化学推進モジュール (CPM) の噴射によって更に高度を下げ、ほぼ円軌道 (高度: 400x1,500km, 周期: 2.3 時間) に至る。これにより、MPO/MMO 探査機は、同一軌道面を4倍の軌道周期で周回し、特に磁場連携観測に寄与する。

5. MMO 探査機の検討・開発状況: 2004年度 (研究フェイズ)

2005年度からの探査機予備設計開始へ向けて、2005年3月にフェーズB移行前の要求審査 (PRR) を実施する。これへ向け、探査機仕様・開発計画の確定および検討課題の洗い出しを進めている。これらの検討は、先行する Planet-C との「共通化」、および次ミッションへの展開を念頭においた「汎化」も念頭において実施している。

1) BepiColombo計画全体:ESA-ISAS協力・分担体制の確立

日欧共同ミッションに必要な各種枠組み整備をESA-JAXA間で進めてきた。なお、2004年10月に締結されたLOA(Letter of Agreement)によって、紳士協定で行ってきたJAXA・ESA間の協力は公式化を見ており、共同ミッションとしての責任範囲が確定した。2006年のESA側プライムメーカーの確定を目指して、BepiColombo-MMO間のI/F文書の確立、品質保証の基準・方法、相互の開発スケジュール調整など多岐にわたる事項の検討・決定を引き続き実施していく。

2) MMOシステム検討:開発計画の総括とCritical Pointの洗い出し

2003年度を受け継ぎ、「MMO探査機の基本仕様決定」を目指した詳細検討・試作を進めてきた。2004年度の最大の目標は、年度末のPRRへ向けてMMO探査機を「重量的・熱的に成立させる」とともに「開発計画を確定すること」である。

これに伴い、以下の検討などを進めてきた。一部については試作を実施している。

① 機械設計

有限要素モデルを作成し、ESAモジュールと結合させた構造解析によって必要振動レベルの評価を行いつつある。従来、ESA側要求はISAS側の元想定を上回っており、機械設計の進行上、早急な評価を目指している。

また、BepiColombo全体の重量軽減を目指した分離機構方式のトレードオフ検討を行ったが、現状で「軽量・高精度・高確実性」をもっとも満たすものは現想定¹のSpin分離機構であることが確定した。これをベースにSpin分離機構の検討を進める。

② 熱設計

モデル観測装置を含めたMMO探査機全体の熱数学モデルを作成し、巡航フェイズ・観測フェイズ双方の熱解析を行った。巡航フェイズでは、ESA側解析と結果が一致せず、巡航中の必要ヒーター電力算定に影響している。「熱数学モデルの違い」だけでなく「熱数学ツールの違い」にも遠因があり、ESA側へ提供する熱数学モデルのフォーマットをESAツールで作成することを検討する。観測フェイズでは、短時間を除いて衛星内部は平均20～40℃を維持できている。しかし「ピーク時温度の低下」および「高温時の運用検討」(一部機器Off)が引き続き必要である。また、耐熱導電表面素材(MLI、白色塗料)の確立が急務である。

また、巡航中および分離後の双方を満足できかつ低重量のヒーター制御方式について、ESA側の議論途上にある。また、火工品などの環境試験を引き続き実施した。

また、2005年度からの稼働を目標に、ソーラーシミュレータの製造を行っている。

③ 電気設計

Liバッテリーの検討を、Planet-Cとともに行っている。また、低EMI、高信頼性、低電力などを目指した電源電圧、電圧制御方式、セル配線などの本格的なトレードオフ検討を開始した。ESA側との電気I/F(HKモニター方式を含)は、巡航中のMMO運用形態とも直結するため詳細な方式検討の詰めを行いつつある。

④ 通信系

HGAの熱・構造検討を引き続き行い、要求される広い温度範囲に耐える構造に目処がつつある。また、1/1電気モデルを作成し、所定性能が達成可能であることを確認した。また、打ち上げConfigurationおよび熱条件を満たしうるADM・APM構造の検討を行っている。

MGAについても基本設計を実施している。また、省電力を目指したTWTA、デジタルトランス

ポンダの検討に、Planet-Cと共同で着手した。

⑤ 姿勢制御系・推進系

軽量化のため姿勢系制御エレキ(ACE)のデータ制御エレキ(DHU)との統合を目指した検討を行っている。また耐熱条件を満たす太陽センサー、衛星構体外に露出するスラスターの検討を実施した。後者については、まだ機器温度条件を満たす設計に至っていない。

⑥ データ処理系

HAYABUSA-DHUをベースとし、運用要求を念頭においたデータ処理系の仕様検討を行っている。この検討は、姿勢系制御およびデータレコーダとの統合も念頭においている。またデータI/Fとして、PIMのLVDS化(およびSpaceWire化)の基礎検討を、次世代衛星への適用も視野にいれつつ行っている。

⑧ 試験および運用法式の検討

ISAS・ESTECにおける試験、およびESA側・ISAS側における運用を矛盾なくかつスムーズに行うことを目指して、試験内容、スケジュール、シーケンス、データ・コマンドフロー、試験系・地上系構築などの素案について、ESA側と調整・議論を開始した。

⑦ システム基本文書の作成

PRRを目処に、文書体系を確立するとともに、MMO設計仕様書、各設計基準書などの必要な文書の作成を行いつつある。なお、各サブシステムとのI/F文書については、先端ITセンターとの協力を踏まえた電子化検討も行っている。

3) MMO/MPO観測装置：国際公募に耐えうる設計へ

各観測装置チームにおいては、機器選定を経てより詳細な検討に入りつつある。以下、共通機器の検討状況について総括する。

① PCS(Payload Common System)

MMO では、PCS(DPU[データ処理部]・MEM[メモリ部]、及び PSU[電源ユニット]・SWT[分配器]からなる)に、各センサーがシリアル I/F(SpaceWire I/Fを採用予定)を介して接続する形をとる。年度末を目指して、DPU・MEM・SWT の基本要件機能を確定することを目指している。また、PSUについては、低 EMC 要求を満たしうる設計検討を進めている。

② MAST伸展

軽量化・耐熱化を目指した部材・機械構成の検討を進めている。

表5 MMOの現想定重量(各機器重量は、5-20%のマーヅンを含む)

Science (including probe antenna and mast) :	41.0kg
Power:	34.4kg
Communication:	37.3kg
C&DH	6.7kg
Attitude control	23.7kg
Wire Harness	16.0kg
Structure:	34.8kg
Thermal:	10.9kg
Total MMO(After separation):	204.7kg
Spin Ejection Device	17.8kg
MMO Total:	222.6kg

