

I. BepiColombo プロジェクトチーム

II-4-I-1

国際共同水星探査計画「BepiColombo (ベピ・コロンボ)」の研究

プロジェクトマネジャー

助教授 山川 宏

コアメンバー

助教授 早川 基
助教授 曾根理嗣
助 手 高島 健

助教授 小川博之
教 授 向井利典
教 授 水谷 仁

助教授 笠羽康正
京都・理 松本 紘

プロジェクトメンバー

助教授 山川 宏	助教授 早川 基	助 手 吉川一朗
教 授 小山孝一郎	助教授 橋本樹明	(MMO/MSASI:PI)
教 授 加藤 學	助教授 廣瀬和之	技術職員 川原康介
教 授 小松敬治	助教授 堀 恵一	技術職員 鎌田幸男
教 授 齋藤宏文	助教授 水野貴秀	技術職員 志田真樹
教 授 田島道夫	助教授 峯杉賢治	技術職員 太刀川純孝
教 授 中村正人	助教授 山田隆弘	技術職員 廣川英治
教 授 八田博志	助教授 横田力男	教 授 森田泰弘
教 授 藤村彰夫	助教授 吉川 真	COE 研究員 阿部新助
教 授 藤原 顯	助教授 澤井秀次郎	COE 研究員 石黒正晃
教 授 前澤 洸	助 手 浅村和史	COE 研究員 野澤宏大 (年度途中転出)
教 授 水谷 仁	助 手 安部正真	COE 研究員 長谷川直
教 授 向井利典	助 手 飯島祐一	学振特別研究員 見崎一民
教 授 山本善一	助 手 大西 晃	受託研究員 北澤幸人
助教授 小川博之	助 手 大竹真紀子	研究員 中村良介
助教授 笠羽康正	助 手 岡田達明	研究員 松本晴久
助教授 加藤隆二	助 手 後藤 健	副主任研究員 岡田 (上田) 裕子
助教授 北村良実	助 手 高島 健	本部長 鶴田浩一郎
助教授 齋藤義文	助 手 戸田知朗	名誉教授 西田篤弘
(MMO/MPPE:PI)	助 手 早川雅彦	
助教授 佐藤英一	助 手 春山純一	
助教授 篠原 育	助 手 松岡彩子	
助教授 曾根理嗣	(MMO/MGF:Co-PI)	
助教授 田中 智	助 手 矢野 創	

～～以下、観測装置の JAXA 外主要メンバー～～

オーストリア, IWF	W. Baumjohann	(MMO/MGF:PI)
立教大 助教授	平原聖文	(MMO/MPPE:Co-PI)
フランス, CESR-CNRS	J.-A.Sauvaud	(MMO/MPPE:Co-PI)
スウェーデン, IRF	S.Barabash	(MMO/MPPE:Co-PI)
京都大・生存圏研 教授	松本 紘	(MMO/PWI:PI)
京都大・生存圏研 助教授	小嶋浩嗣	(MMO/PWI:Co-PI)
金沢大 助教授	八木谷聡	(MMO/PWI:Co-PI)
フランス, LESIA	J.-L.Bougeret	(MMO/PWI:Co-PI)
スウェーデン, KTH	L. Blomberg	(MMO/PWI:Co-PI)

ロシア, IKI O. Korablev (MMO/MSASI: Co-PI)
 獨協医大 教授 野上謙一 (MMO/MDM: PI)
 早稲田大 教授 長谷部信行 (MPO/MANGA: Co-PI)
 東北大 教授 岡野章一 (MPO/PHEBUS: Co-PI)

1. 2004年度活動の概要

[観測システム]

2004年度には、JAXA が担当する水星磁気圏探査機「MMO (Mercury Magnetospheric Orbiter)」, ESA が担当する水星表面探査機「MPO (Mercury Planetary Orbiter)」の両方について「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「Bepi-Colombo 科学ワーキングチーム (Bepi-SWT)」で行われ、第1回会合がESAにて2005年3月16-17日に開催された。それに先立ち、2005年2月にはMPO 科学ワーキンググループ会合 (Bepi-SWG) がESAにて、2005年3月にはMMO 科学ワーキンググループ会合がJAXAにて開催された。

[MMO 探査機]

2005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 モジュールインターフェース、「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 (高利得アンテナ・中利得アンテナ・X帯パワーアンプ・トランスポンダなど設計)、推進系 (熱検討など)、データ処理系 (データ処理装置など仕様検討) の検討を行った。2005年3月8-9日にフェーズB移行前審査 (Preliminary Requirements Review) を実施し、フェーズBに移行することが承認された。その前の1ヵ月間に約20のサブシステム毎のレビュー会議が開催された。

2. ベピ・コロombo (BepiColombo) 計画

「ベピ・コロombo (BepiColombo)」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。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。2017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」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。

MPO・MMO 両探査機は、惑星間軌道で使用す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5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: $400 \times 12,000 \text{ km}$, 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: $400 \times 1,500 \text{ km}$, 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。

3. 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、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水などを検証する。

○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。

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	齋藤義文 (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

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
PHEBUS	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・イオン観測による表面・大気組成	S. Orsini (CNR-IFSI, Italy) 他	JAXA 他

4. 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）を実施した。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た。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「汎用化」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。2005年11月の ESA 側プライムメーカーの確定を目指して、BepiColombo-MMO 間のインターフェース文書の確立、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」であった。

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た。

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 of Spin 分離機構であることが確定した。これをベースにスピン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 側解析と結果が厳密には一致せず、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した。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」（一部機器オフ）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た。

③ 電気設計

Li バッテリーの検討を、「PLANET-C」とともに行った。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 側との電気インターフェース（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うる構造に目処が付きつつある。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 構造の検討を行った。

MGA についても基本設計を実施した。また、省電力を目指した TWTA（通信系パワーアンプ）、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た。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た。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た。

またデータインターフェースとして、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た。

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

フェーズ B 移行前審査を目処に、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った。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た。

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 MDP（Mission Data Processor）

MMO では、MDP（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）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。

m. 観測ロケットプロジェクトチーム

II-4-m-1

S-310-35号機の観測による極域下部熱圏における大気力学と熱エネルギー収支に関する研究

助教授	早川 基	教授	小山孝一郎	東大理	岩上直幹
助教授	石井信明	プロジェクト研究員	栗原純一	名大 STE 研	藤井良一
助教授	阿部琢美	教授	向井利典	助手	浅村和史
名大 STE 研	小川泰信	東北大理	小野高幸		
オスロ大学	E. V. Thrane	名大 STE 研	野澤悟徳		

オーロラ現象を誘起するエネルギー入力に伴って生じる極域熱圏における大気力学現象の解明を目的とした観測ロケットキャンペーンが2004年12月にノルウェーアンドーヤロケット実験場にて行われた。目的の達成のために必要な観測機器は開発、較正試験、環境試験を経た後ロケットに搭載され、所期の計画通りに観測を実行した。取得