

第1章 概要

水星は、地球型惑星のなかで最も未知の惑星である。この惑星に関する知識は、限られた地上観測と約30年前に行われたMariner10の3回のフライバイ観測に基づく断片的なものに過ぎないが、既にいくつか大きな謎を我々に投げかけている。この特異な惑星の全貌解明は、地球および太陽系の現在の姿、その歴史のより深い理解に直結する。[1.1節]

我々は、日欧協力によるこの惑星の探査計画を提案する。「BepiColombo（ベピ・コロンボ）国際水星探査計画」は、水星の内部・表層・大気・磁気圏にわたる総合的観測によって水星の現在と過去を明らかにすることを目的とする、史上三番目かつ最大の水星探査計画である。

「BepiColombo 計画」は、3軸姿勢制御の「MPO：Mercury Planetary Orbiter」、スピン安定型の「MMO：Mercury Magnetospheric Orbiter」の2つのオービターと、「MSE：Mercury Surface Element」というランダーから構成される。これらの探査機システムは、Soyuz-Fregat もしくはArian-5 により2009年夏に打ち上げられ、2012年秋に水星周回軌道に投入される。その後、オービターは1地球年（4水星年）ランダーは1週間以上の観測を予定している。[1.2節]

宇宙研は、BepiColombo 計画のうち「MMOの開発・運用」を主に担当する。MMOは、他の探査機・推進モジュールと一体化された複合モジュールとして打ち上げられる。このため、打ち上げの約1年前（2008年[平成20年]春～夏）までに国内での全プロセスを終了しESTECに移送、全体システムの総合試験に供する予定である。逆算すると、2003[平15]年度にPMを開始する必要がある。また、MPO・MSEを含むBepiColomboの観測装置は、国際A/Oによって選択される。[1.3節]

本提案の検討は、これまで水星探査 Working Group の行った検討を引き継いで2000年8月から開始され、MMO探査機のシステム検討と要素技術の開発を行ってきた。既に、地球軌道に比して桁大きな熱入力・放射線など厳しい環境条件への対策を考慮したうえで、実現可能な探査機システムを構成できることを明らかにした。また、現実的な機器配置を考慮した熱構造、運用モード、機上データ処理についても考慮を行ってきた。一部のクリティカルな要素技術については、構成部材の試作・試験を行いつつある。一方、BepiColombo 複合モジュールとのインターフェースに関しては、ESAで平行して行われているDefinition Studyの結果に対応したシステム検討が進行中である。[1.4節、1.5節]

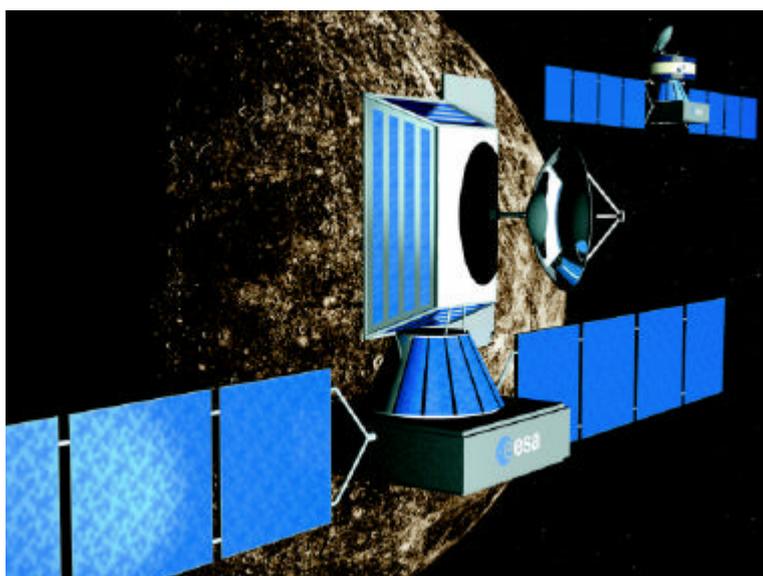


図 1.0-1 BepiColombo 衛星システムの想像図 [左下：MPO、右上：MMO]

[Courtesy: BepiColombo-ESA homepage]

1.1 水星への挑戦 ~ 太陽系最内縁の未知の世界 ~

水星は、太陽系最内縁に位置する最も小さな地球型惑星である。半径（2,440 km）は月よりわずかに大きい程度に過ぎないが、原始太陽系星雲の最内縁で最後に生成された天体と考えられ、太陽系内の最重要探査対象の一つである。

小さい図体にも関わらず、水星はこれまでも科学の進歩に重要な役割を果たしてきた。1631年には、Pierre Gassendiが水星の太陽面通過を発見した。太陽に比して圧倒的に小さい大きさは、古典的な「惑星」の概念を揺さぶるものであった。1845年には、Urbain-Jean-Joseph Le Verrierが、水星近日点がNewton力学の予測より速く移動していくことを指摘した。この解明は、Albert Einsteinが1915年に一般相対論を用いて見事に果たすこととなる。

にも関わらず、現在に至っても、我々は水星についてわずかの知識しか持ちあわせていない。過去、水星の情報は地上望遠鏡による電波・光・赤外線による限られた観測に留まってきた。水星は太陽に近いので、地球軌道からでは観測困難である。遠日点を通過する前後、即ち秋の日出前および春の日没後の限られた観測好適期ですら、地上観測は地平線近くの大気に妨害される。また、軌道望遠鏡は太陽光を避けるため太陽近傍の目標は指向し難い。強烈な光・熱・放射線によって探査機による直接探査も困難であった。過去の飛翔体による直接観測は、米国のMariner10による3回のフライバイ（1974-1975）のみに留まる。このため、古代エジプトにおいてすらその存在は知られていないにも関わらず、太陽系で最も未知の領域の一つであり続けている。

しかしこれまで得られたわずかな情報だけでも、この惑星は驚くべき特異性を示している。

最大の謎の一つが「磁場の存在」である。Mariner10は、水星が磁気双極子的な固有磁場を有することを発見した。金星には固有磁場が無く、火星も地殻の局所的残留磁場が最近ようやく発見された程度である。それにも関わらず、「より小さい水星に磁場が存在する」ことは全く予想外であった。惑星が固有磁場を持つには「溶けた中心核」が必要とされるが、小質量の水星でこれが可能なのか、十分な説明がなされないまま30年以上が経過している。この解明には、現在の磁場構造・内部構造の詳細な情報が必要である。[cf. 2.3節、3.1節]

これに関連すると思われる謎が、水星のずば抜けて高い密度（ 5.43g/cm^3 ）である。地球型惑星では、平均半径と密度との間に一定の関係が成り立つ（**図 1.1-1**）が、水星は明らかに高密度側に乖離している。このことは、全質量の70%以上を占める巨大な中心核の存在と、他惑星とは大きく異なる元素組成を示している。原因として、「巨大衝突による表層物質の喪失」、「原始太陽系最内縁における組成分布の非一様」といった提案がなされており、この起源の解明は太陽系の初期形成過程につながりうる。[cf. 2.3節、3.1節]

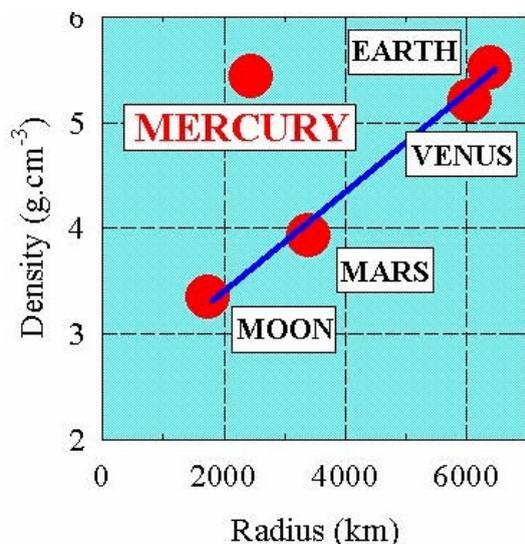


図 1.1-1 地球型惑星の半径と密度の関係

[Courtesy: BepiColombo Study Report]

「磁場の存在」の帰結として、水星は現在知られる最小スケールの磁気圏を有する惑星として、宇宙空間におけるプラズマプロセスを考える上で重要な存在となった（図1.1-2）。Mariner10は、「磁気圏」と思われる磁場構造を観測するとともに、その通過中に、地球磁気圏において「サブストーム」時に観測されるものに相似した爆発的な高エネルギー電子を観測した。しかし、Mariner10の観測は、限られた時間・空間における限られたエネルギー範囲の電子と磁場のデータしかない。このため、その磁気圏の構造・ダイナミクス・物理プロセスは未解明である。天体磁気圏は、磁場とプラズマ流の相互作用の結果として、惑星、太陽、パルサー、銀河など宇宙の様々なスケールで見られる普遍的な存在である。最小スケールの水星磁気圏における「普遍性」の解明は、地球磁気圏の理解、また天体磁気圏現象を貫く一般法則の理解に極めて重要である。

また、水星は十分な大気を有さず、また磁場がそれほど強くないため、電離圏・プラズマ圏を伴わず、磁気圏が直接惑星表面と接続する点で特異な磁気圏を有する。地球磁気圏では両者が大きな役割を果たしており、この欠如がもたらす影響は未解明である。また太陽により近く、太陽風の条件も地球近傍とは異なる。これらの明らかに異なる境界条件を有する水星磁気圏が、そもそも安定して存在できるのか、またどのようなプロセスを経て太陽風エネルギーが蓄積・開放されるのかなどの点で、多くの議論があるが定説は得られていない。この特異な磁気圏の「独自性」の理解は、それぞれの境界条件の果たす役割の解明を通して地球磁気圏・天体磁気圏のよりよき理解につながる。さらに、磁気圏を知ることは、内部磁場の構造を求めるために必要不可欠である。[cf. 2.6節、3.2節]

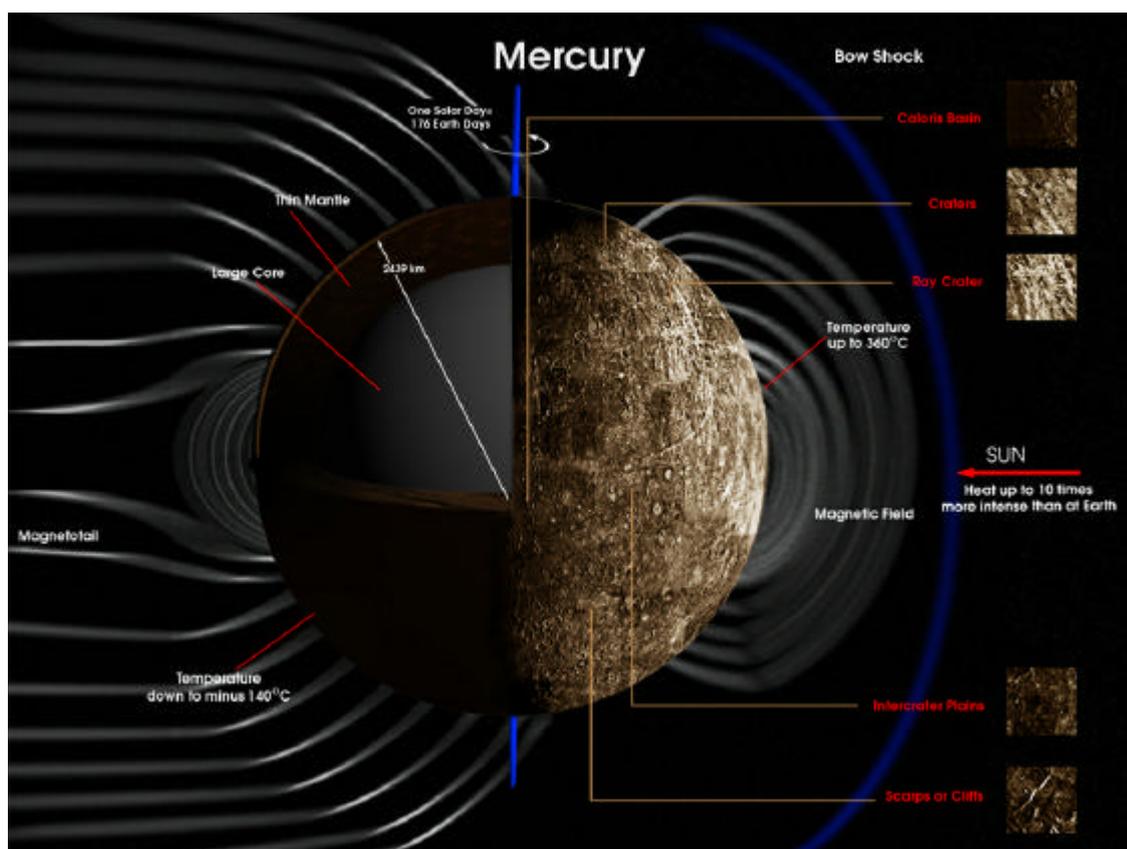


図 1.1-2 水星の内部・表層・磁気圏構造。右側が太陽方向。

[Courtesy: BepiColombo-ESA homepage]

水星磁気圏の特異性を生む要素の一つとして、近年発見されたNaを主成分とする希薄な「外圏大気」の存在がある（図1.1-3）。この大気は、その多くが水星表面への太陽光・太陽風イオン・磁気圏イオン・ダストなどの衝突の結果によって生成されると考えられている。地上からの光学観測により、この「Na大気」が水星半径の数倍にまで広がっていること、その量・分布は一日

程度で大きく変動することが明らかになってきた。このような変動から、磁気圏活動が大気生成・消失に大きな影響を与えていることが示唆されているが、詳しいことは地上からの限られた観測では明らかになっていない。この外圏大気の構造、組成、生成・消失過程の解明には、太陽風・磁気圏活動と大気変動とを同時かつ継続的に観測する必要がある。[cf. 2.5節、3.3節]

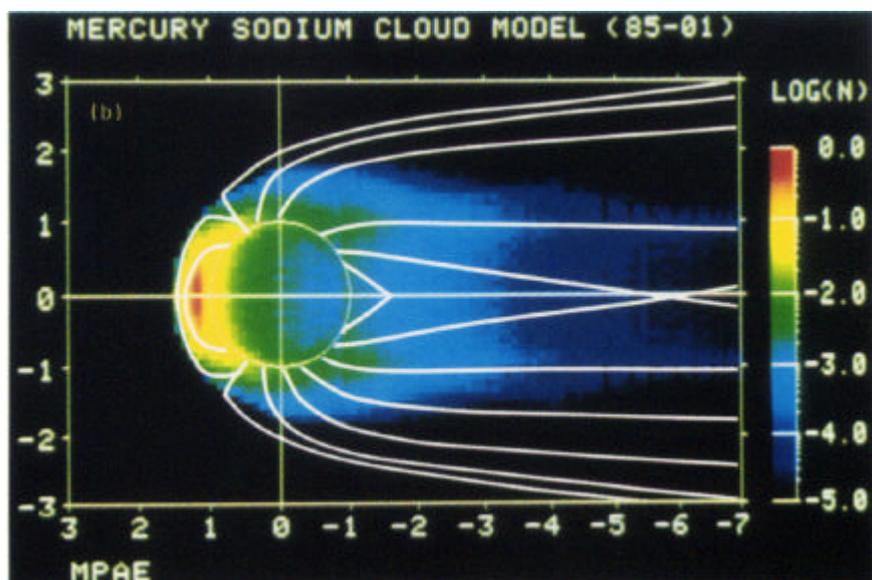


図 1.1-3 水星磁気圏とナトリウム分布モデル [Ip, 1986]

また、表層・地殻における月との明らかな相違、すなわち「火山性平原があるのに火山跡が無い」、「高地と海の表面反射率に差がない」なども謎である(図1.1-4)。また、惑星形成初期の冷却に伴う収縮で形成されたとされる大規模地形の存在も指摘されている。しかし、Mariner10で撮像された水星表面は約45%に留まり、また物質分布・化学鉱物組成は未知で、解明は進んでいない。このため、水星全表面の地形・組成の詳細な情報は、この惑星の初期形成過程の解明に直接繋がる可能性がある。また、地球からのレーダー観測は、「未撮像箇所の巨大火山跡」や「極域クレーター底の氷」など、未確認の重要な存在を示唆している。[cf. 2.4節、3.4節]



図1.1-4 Mariner10による水星像 [Courtesy: NASA/JPL]

この特異な惑星の全貌解明は、地球および太陽系の現在の姿とその歴史のより深い理解に直結する。宇宙研では、水星探査ワーキンググループにおいて、単独ミッションによる実現可能性の検討を行ってきた。その後、1999年秋に行われた「ISAS-ESA 会議」において ESA 側から協力の打診がなされ、共同ミッションを前提とした検討を進めてきた。

我々は、日欧協力による水星探査計画を提案する。「BepiColombo 国際水星探査計画」は、水星の内部・表層・大気・磁気圏の総合的観測によって水星の謎の解明を目指す、史上三番目かつ最大の水星探査計画となる。

1.2 「BepiColombo」水星探査計画

これまで水星に到達した探査機は、1974~75にかけ3回のフライバイを行ったMariner10のみである。この時の軌道は、イタリアの応用数学者Guiseppe(Bepi) Colombo氏(1920-1984：図1.2-1)によってNASAに提案された。彼は、水星の自転周期(58日)と公転周期(88日)が正確に2:3の関係にある事を説明した事や、2つの衛星を結合するテザーシステムの発明でも知られる。

彼にちなんでESA側で名づけられた「BepiColombo計画」は、水星の内部構造・表層・大気・磁気圏の多岐にわたる問題の解明を目指す大型計画である。ESAの科学プログラム委員会は、本ミッションを2000年10月に「コーナーストーン」ミッションとして正式に認定した。

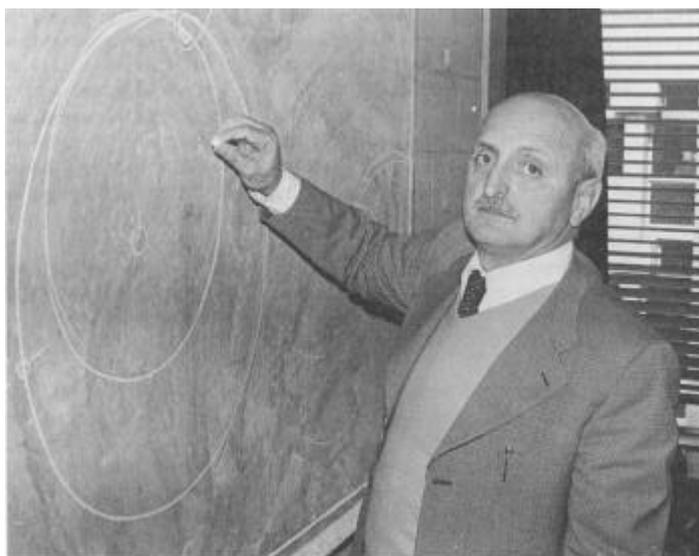


図 1.2-1 ジョゼッペ・コロombo氏
[Courtesy:BepiColombo Study Report]

「BepiColombo 計画」は、広範な科学目的をカバーするため、3軸姿勢制御の「MPO: Mercury Planetary Orbiter」、スピン安定型の「MMO: Mercury Magnetospheric Orbiter」の2つのオービターと、「MSE: Mercury Surface Element」というランダーから構成される(図1.2-2)。

- 1) MPO: Mercury Planetary Orbiter (全重量: 約 360kg[TBD]、観測装置: 約 60kg[TBD])
ESA 担当の3軸制御衛星。
400km×1500km、軌道傾斜角 90°の極軌道に投入される。
目的: 水星の表面地形、鉱物・化学組成、重力場の精密計測を目的とする。
- 2) MMO: Mercury Magnetospheric Orbiter (全重量: 約 200kg[TBD]、観測装置: 約 35kg[TBD])
宇宙研担当のスピン衛星。
軌道: 400km×12000km、軌道傾斜角 90°の極軌道に投入される。
目的: 水星の固有磁場、磁気圏、大気、大規模地形の観測を目的とする。

3) MSE: Mercury Surface Element (全重量：約 45kg[TBD]、観測装置：約 7kg[TBD])

ESA 担当の着陸機。

水星の高緯度(緯度 85°)表面に着陸する。

着陸後、マイクロ・ローバーを出し、周辺表面の地形、化学組成、地殻熱流量、地震等を計測する。データは MPO・MMO を経由して地球に伝送される。

これら 3 つのモジュールは、2 機の Soyuz-Fregat (一機が MPO、他機が MMO+MSE) もしくは 1 機の Arian-5 (MPO+MMO+MSE を一体で) によって 2009 年夏に打ち上げられ、2012 年秋に水星周回軌道に投入される。その後、オービターは 1 地球年 (4 水星年) ランダーは 1 週間程度の観測を予定している。MPO と MMO の軌道は、同一軌道面をとり、軌道周期をそれぞれ 2.3 時間と 9.2 時間、1:4 の関係を持って同期させ、相互の共同観測を容易とする (図 1.2-3)。

打ち上げ時には、各モジュールは電気推進モジュール (SEPM = Solar Electric Propulsion Module ESA 担当)、化学推進モジュール (CPM = Chemical Propulsion Module : ESA 担当) と結合され、「複合モジュール」(MCCS) を構成する。複合モジュールは「三軸制御衛星」として一体運用され、月・金星・水星スイングバイを経て電気推進で水星軌道まで運ばれる。その後 SEPM を分離、CPM による 2 液化学推進によって水星周回軌道へ投入される。その後、MMO (と MPO) は全体モジュールから分離され、独立運用が開始される。MPO・MMO の軌道面は、「水星表面からの反射・熱輻射が最大となる近日点で、近水点が夜側となる」ように設定し、過酷な熱環境を回避している (図 1.2-4)。MSE は、CPM によって減速を受けた後、水星表面に着陸する。

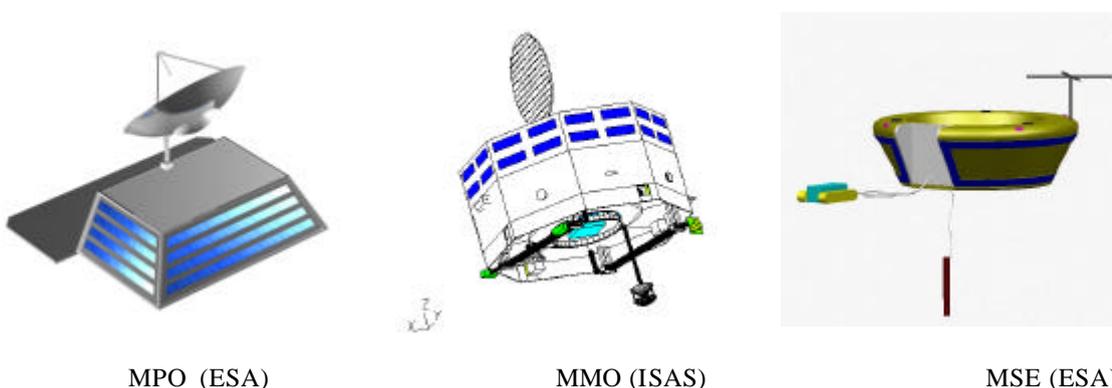


図 1.2-2 BepiColombo を構成する 3 つのモジュール [Courtesy of MPO/MSE: BepiColombo Study Report]

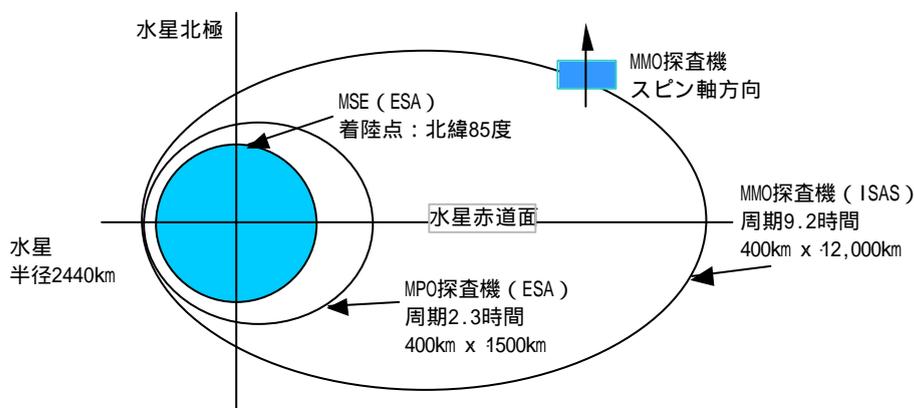


図 1.2-3 MPO, MMO, MSE の想定軌道

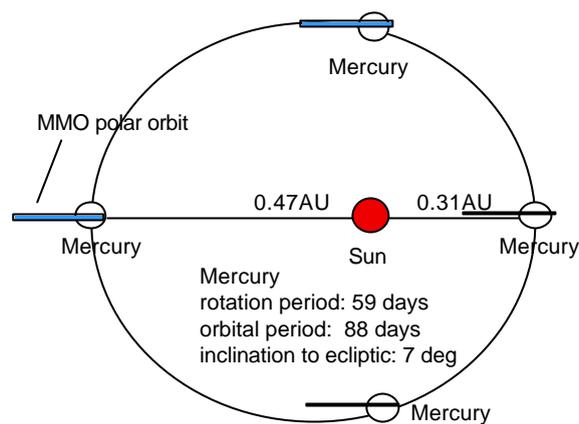


図 1.2-4 MPO, MMO の想定軌道面

水星の周回軌道への探査機投入には、いくつかの技術的困難を解決する必要がある。

- 地球とは公転速度が大きく異なる上に、惑星の質量が小さいため、水星周回軌道への投入には高い推進能力を持つエンジンが必須である。化学推進を用いる過去の検討では、水星に到達するには金星・水星の多重フライバイを含めて4年以上を要するとされてきた。
- 水星軌道では、太陽からの可視光・紫外線・放射線（太陽活動極大期でもある）は、最大で地球軌道の一桁上に達する。また、水星の表面温度は昼間側で最高700Kにも達し、赤外線によるその熱放射も大きい。この為、熱対策・放射線対策が必須である。

しかし、近年の技術の進展によって、これらの問題は克服されつつある。前者は、電気推進システムの導入によって解決された。後者も、これまでの検討によって条件を満たしうることを示してきており、更なる検討が継続されている。

水星探査計画としては、米国/NASAのDiscoveryミッションとして「MESSENGER計画」が存在する。MESSENGERは、2004年に打ち上げ予定の3軸制御衛星で、5年間かけて水星に到着、2009年4月から約1地球年にわたり観測を行う予定である。

このミッションは水星表層の観測を主目的としており、「ステレオカメラ」、「可視紫外分光計」、「X線分光器」、「線・中性子線検出器」、「レーザー高度計」、「磁力計」、「プラズマ粒子計測器」を搭載する予定である。しかし、観測項目は限られており（特にプラズマ観測は貧弱）本格的な水星観測はBepiColomboによって初めて可能となる。とはいえ、MESSENGERのデータはBepiColomboによる観測計画・運用上貴重であり、共同研究を進める予定である。その1つは、MESSENGERの撮像する地表面データをMSEの着陸地点決定に利用しようとするものである。

1.3 MMO: Mercury Magnetospheric Orbiter

宇宙科学研究所の主な役割は、MMO探査機の開発と運用である。MMOは重量約200kgで、水星の磁場・磁気圏・大気・大規模地形の探査を目標とする探査機である。

観測機器（約35kg）として、電子計測器（ESA）、イオン質量分析器（MSA）、太陽風イオン計測器（SWA）、高エネルギー粒子検出器（HEP）、高速中性粒子検出器（ENA）、磁場計測器（MGF）、電場・プラズマ波動・電波観測器（PWI）、ダスト検出器（MDM）、大気カメラ（MIC-A）、地形カメラ（MIC-S）の10種の観測機器が3つのコンポーネントにまとめられて搭載される予定である。MMOは、これらの観測器によって、以下の研究課題の解明を目指す（図1.3-1）。

1. 水星磁場の構造・起源

水星の磁場構造を詳細に解明する。これにより、水星固有磁場の形成機構と、それに直結す

水星の内部構造、形成過程、進化を明らかにすることができる。この際、磁気圏に起因する「外部磁場」を解明し、これを「固有磁場」から分離することが不可欠である。

2. 水星磁気圏の構造・ダイナミクス・物理プロセス

水星磁気圏の「普遍性」と「特異性」を探求する。天体磁気圏は、磁場とプラズマ流がぶつかり合う宇宙の様々な領域で見られる。水星磁気圏の普遍性の解明は、普遍的な宇宙プラズマの物理を知る事に通じる。また、水星磁気圏は「電離圏の欠如」、「相対的な固体惑星のサイズ」など、磁気圏を支配する基本的なパラメータが地球とは大きく異なっている。水星磁気圏の現象を地球磁気圏と比較する事により、磁気圏の物理現象を多面的に解明することができる。

3. 水星大気の生成・消失機構

水星には、Na を主成分の一つとする希薄な「外圏大気」が存在する。地上観測から、その分布・量が大きく時間変動をする事が判ってきたが、これ以上の解明は困難である。水星大気の構造・組成・分布・時間変動を調べることによって、表面における生成過程、太陽風・磁気圏における消滅過程を明らかにすることができる。

4. 水星表層のグローバル構造

水星表層の地形・組成は MPO (及び MESSENGER) の主目的だが、水星は公転・自転が同期しているため、直下点に集中した観測は位置と「太陽高度」がリンクしてしまう。MMO は、スピン衛星であること、遠水点が遠いことを生かして、視野の柔軟な変更と広さを生かし、好撮像条件でのグローバル構造の観測を行い、MPO・MESSENGER の観測を補完する。

5. 太陽系最内縁の環境

地球軌道より内側の惑星間空間は、1970年代の Helios 探査機を除くとわずかな観測しかない。水星軌道近傍の惑星間空間の定点観測を行えるこの貴重な機会を生かし、太陽活動・太陽風構造・太陽圏現象・基礎プラズマ現象・惑星間ダストなど、太陽系最内縁の環境を解明することが期待される。

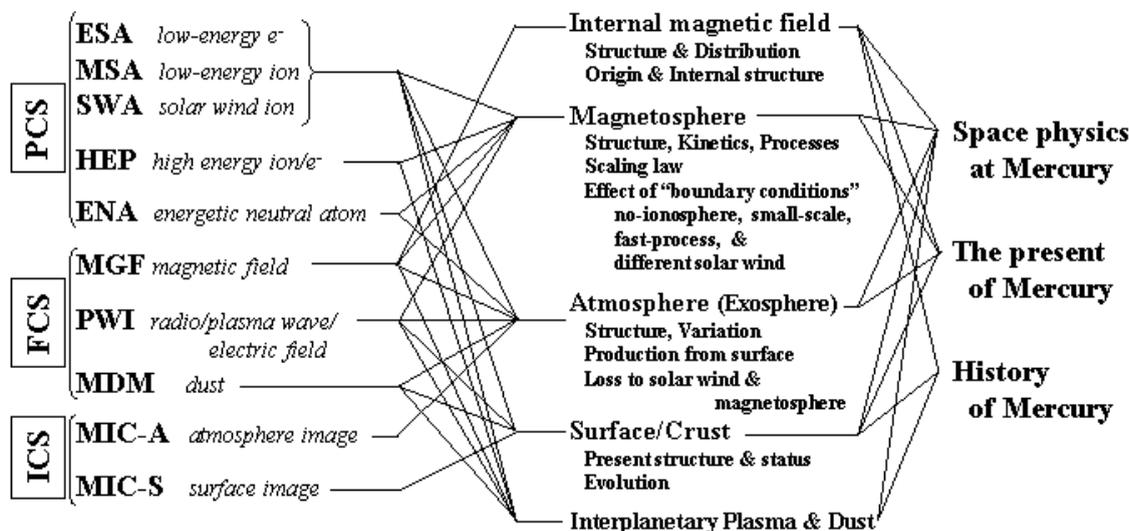


図 1.3-1 MMO のモデル観測器と関連する研究分野

MMO (図 1.3-2) はスピン衛星である。これにより、「粒子の 3 次元分布計測」、及び「電場計測用のワイヤアンテナ 2 対 4 本 (一本 15m) の伸展」を可能としている。スピン軸は、水星赤道面にほぼ垂直とする。これは、強い太陽放射が衛星上面・下面へ直射しない姿勢とするため、また高利得アンテナのデスパンによる地球指向を最小限の姿勢変更で可能とする為である。ただし、探査機本体が電場観測用ワイヤアンテナへ陰を落とさないよう、スピン軸 - 太陽間角度を 92 度として若干傾けている。スピンレートは 15 rpm を予定している。

MMOの軌道は、全球のマッピング及び水星磁気圏全域の観測が可能となるように、「近水点 400km、遠水点 12,000km」の極軌道が選択されている（図 1.3-3）。軌道周期は 9.2 時間となる。この軌道を取る事で、緯度 85° に着陸する着陸機(MSE)からのテレメータデータを中継し、地球へ送信する事も毎周回可能である。また、MPO の軌道と同一平面、かつ周期（MPO：2.3 時間）を 4 倍としてあり、MPO との協調観測を容易に行うことができる。

MMO は、打ち上げ後の巡航フェーズにおいては「複合モジュール」の一部として三軸制御され、ESA 側で運用される。水星周回軌道投入後にスピン分離され、独立した探査機となって臼田からの運用が開始される。

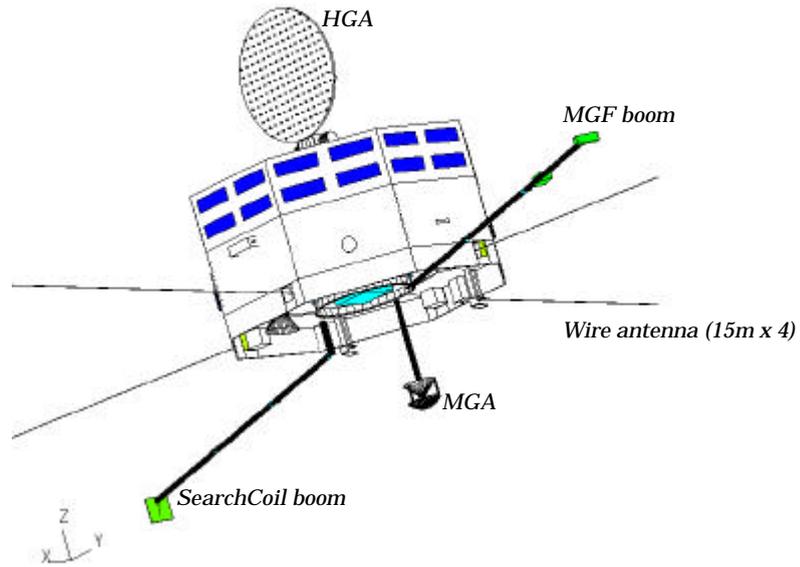


図 1.3-2 MMO 探査機：外観

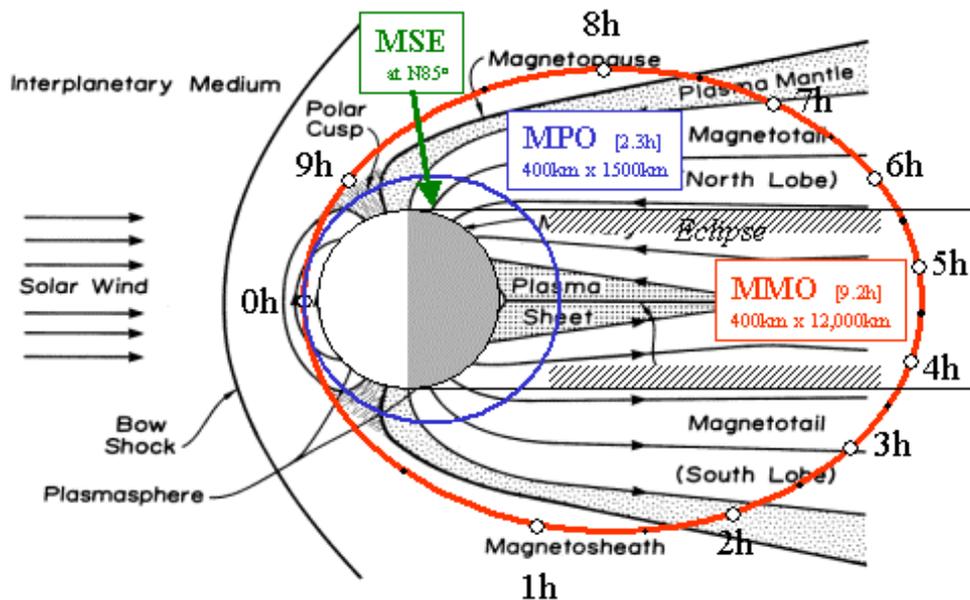


図 1.3-3 MMO・MPO 軌道と水星磁気圏 [遠水点が夜側に来る時期]

MMO 軌道には、近水点通過後の経過時間による衛星位置を付記している。

[磁気圏：Russel et al., 1988]

MMOは他の探査機・推進システムと一体化した「複合モジュール」として打ち上げられるため、開発は全体スケジュールとの同調を要する。BepiColomboの打上げ予定は2009年夏だが、MMOは約1年前(2008年春～夏)に国内での全プロセスを終了してESTECに移送、全体システムの総合試験に供する予定である。逆算すると、2003[平15]年度にPMを開始する必要がある。

BepiColomboの観測装置は、MPO・MSEも含めて国際A/O(Announcement of Opportunity)に基づいて選択される。MMOのA/Oアナウンスは2003[平15]年初頭に出される(締切:同年4月、選定:同年6月)予定で、この時点でMMOのシステム構成・制限条件を明示することになる。なお、MPO・MSEのA/Oアナウンスは、これより早く2002[平14]年3月に出される(締切:同年6月、選定:同年10月)。全観測装置の応募は日・欧双方に開かれている。本提案書は、MMO観測装置(第4章)だけでなく、MPOの観測装置提案(第5章)も一部含んでいる。

1.4 MMO: 探査機システム構成

図1.4-1および図1.4-2にMMO探査機の外観を示す。表1.4-1に重量を示す。重量マージンとして、既存品では5%、マイナーチェンジでは10%、新規開発部品では20%、姿勢制御用燃料では100%を見込んでいる。図1.4-3はシステム構成である。詳細は、6章を参照されたい。

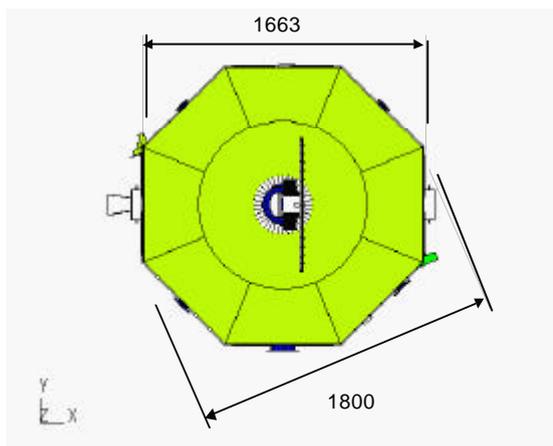


図 1.4-1 MMO Configuration (Top View)

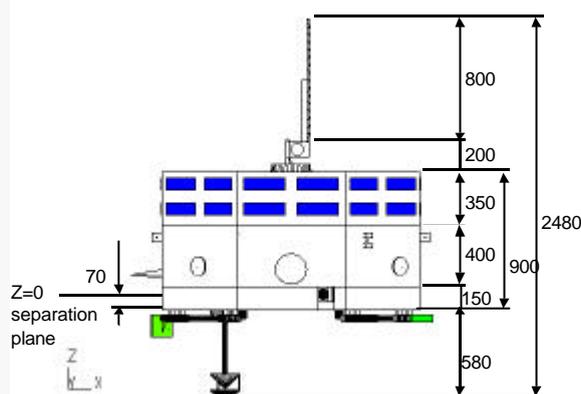


図 1.4-2 MMO Configuration (Side View)

Science Instruments	38.0 kg
Including Probe Antenna	3.0 kg
Boom	3.4 kg x 2
Common Instruments	154.0 kg
Power	28.3 kg
Communication	26.9 kg
MSE Interface	5.5 kg
Command & Data Handling	7.3 kg
Attitude Control	22.3 kg
Wire Harness	16.0 kg
Structure	37.2 kg
Thermal	10.5 kg
Total MMO (After Separation)	192.0 kg
Separation Mechanism	7.0 kg
MMO Total Mass	199.0 kg

表 1.4-1 MMO: 重量 [cf. 6.3 節]

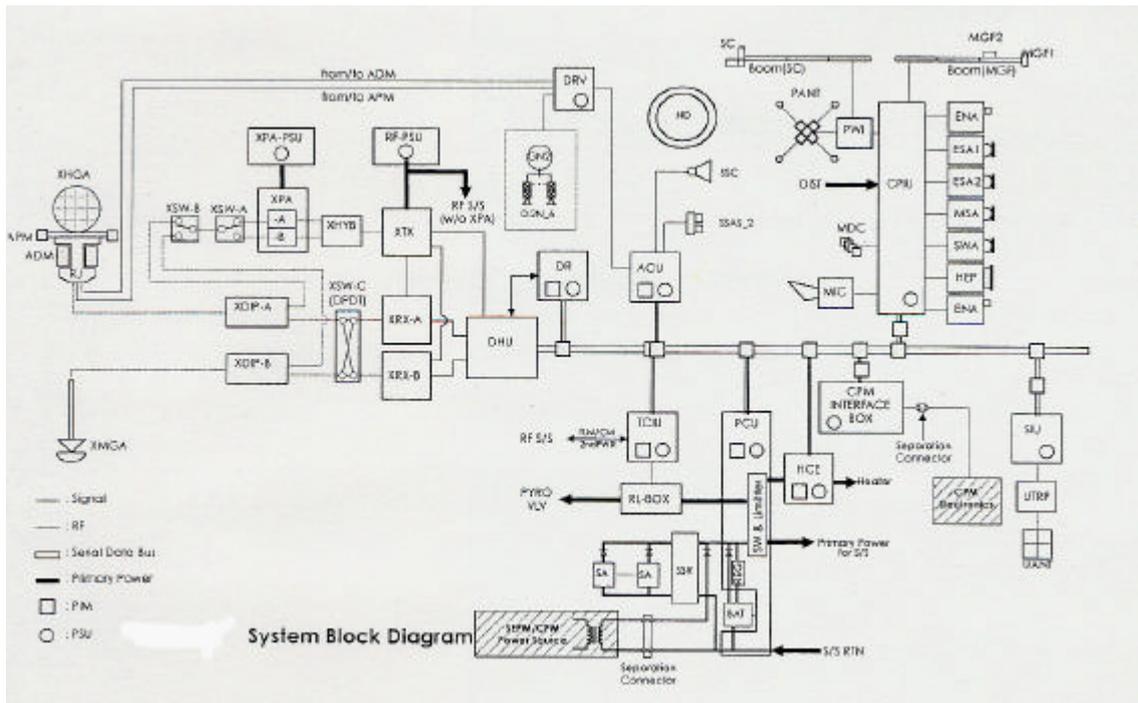


図 1.4-3 MMO システム構成

1.4.1 探査機の基本構成 [6.2 節]

探査機の外観は八角柱である（図 1.4-1、図 1.4-2）。側面のサブストレートの上部約 1/3 には、太陽電池セル・SSM（Second Surface Mirror）を半々に実装する。

機器は上下部デッキに搭載される。下部デッキは放熱面で、外表面に SSM または SRD（Smart Radiation Device）が実装される。ここでは、スタースカナ（SSC）通信用中利得アンテナ（MGA）、磁場センサ用展開型ブーム 1 対が搭載される。上部デッキの外表面は MLI で覆って断熱されており、通信用高利得アンテナ（HGA）が配置される。HGA には直接太陽光が当る。また、初期姿勢確立・外乱トルク補正用の姿勢制御用 GN2 コールドガスジェットが側面に搭載されるが、軌道制御能力は要求されない。

観測機器の視野は、主にスピン軸と垂直方向を基準としている。要求条件に基づき、粒子センサ、カメラフード、2 対の電場観測用ワイヤアンテナ（tip-to-tip：32m）、3 つ折り展開型の磁場観測用伸張ブーム（2 本）を有する。

1.4.2 MMO 構造系 [6.4 節]

簡易構造解析に基づいて、BepiColombo 複合体からの要求（共振周波数を 50Hz 以上）を満足させるため、中央のスラストチューブの周りに 4 つのバルクヘッドを配置する事とした。なお、飛翔時の環境（振動、衝撃等）は Soyuz-Fregat および Arian-5 の双方の打ち上げを想定するため、両者を包絡する必要がある。

1.4.3 MMO 熱制御系 [6.5 節]

MMO 探査機の最大の課題は水星近傍での 11 Solar という熱環境である。さらに、水星表面からの反射光（太陽光の 6%）最高 700K に達する水星表面からの赤外輻射の考慮も要する。熱解析で重要なのは、最大 300W 程度の内部機器の発熱、HGA から探査機上面への反射、および観測機器・太陽センサ等の開口部からの熱入力である。

サブストレート外側面では、太陽セル温度を低減するために OSR およびセルを 50%：50% の割合で張り付ける。また、探査機上面は MLI で覆い、HGA からの熱入力を回避する。下面は OSR（あるいはメカニカルな部分を持たない Smart Radiation Device）で覆い、放熱を行う（図

1.4-4) なお、惑星間巡行フェーズは、複合モジュールの一部として三軸制御されるので、サンシールドにより直接の太陽光から遮蔽される。

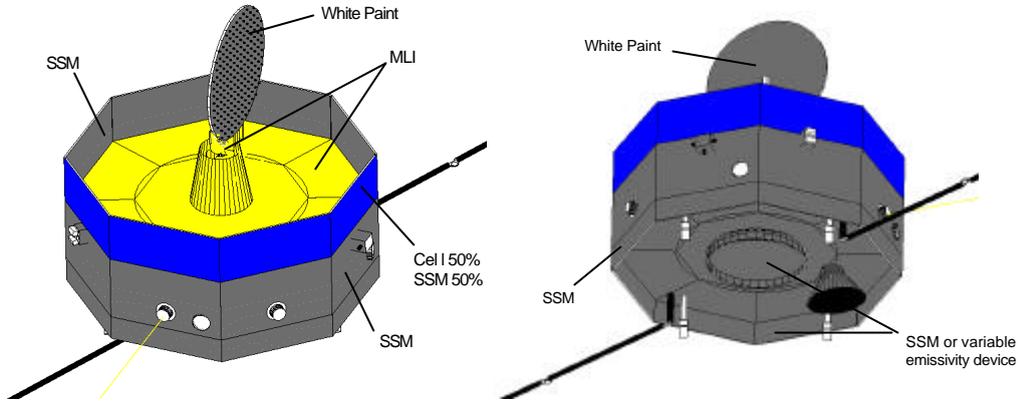


図 1.4-4 熱制御系 (左:上面、右:下部)

1.4.4 MMO 通信系 [6.6 節、6.7 節]

MMO は、uplink/downlink 共に X-band を使用する。アンテナとしては、有効直径 80cm の高利得アンテナ (HGA)、非常時テレメトリおよびコマンド用の中利得アンテナ (MGA) を搭載する (図 1.4-5)。HGA は、デスパン機構 (ADM) およびエレベーション制御機構 (APM) により地球指向される。平均的ビットレートは 16kbps となり (図 1.4-5)、1 日の間の通信時間を 6 時間とすると約 40Mbyte/day となる。

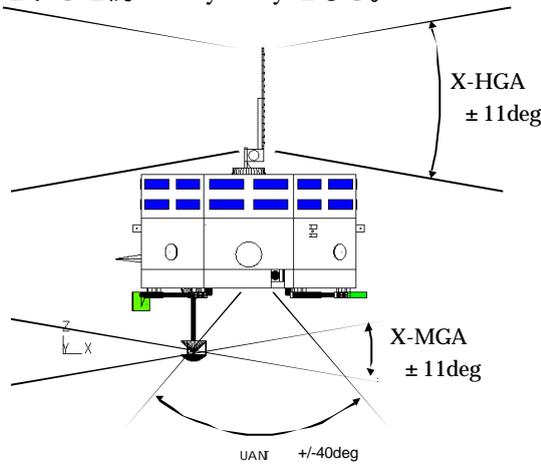


図1.4-5 MMO antenna coverage

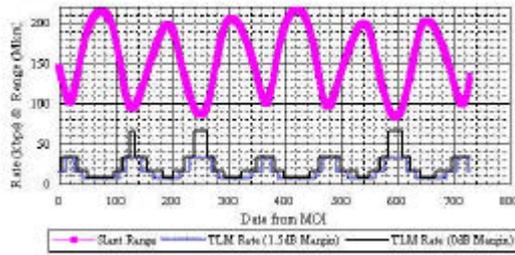


図1.4-6 Telemetry rate after Mercury orbit insertion

1.4.5 MMO 姿勢制御系 [6.8 節]

姿勢センサとしては、探査機下面にスタースカナおよびスピン太陽センサを用意する。

姿勢制御アクチュエータとしては「GN2 コールドガスジェット」を用い、タンクを探査機中心に配置する。スピン軸方向 (axial 方向) スラスタが 2 基、スピン調整用 (tangential) スラスタが 4 基、合計 6 基のシステムを考えている。ガス重量は MMO 分離後の姿勢確立、スピンアップ、外乱トルクの補正量によって決まる。また、ニューテーションダンパも搭載される。合運用の頻度が高いため、外乱トルク環境下の姿勢保持等、探査機に自律運用機能が求められる。

1.4.6 MMO 電源系 [6.9 節]

水星の公転に伴う太陽距離の大きな変化(0.31-0.47AU)のため、太陽電池温度は大きく変動する。

これに対応するため「シリーズスイッチングレギュレータ」を用いる。太陽電池としては、変換効率 28%の「マルチジャンクションセル」を利用し、水星が遠日点（太陽距離：0.47AU）にあるときの発生電力として 400W 程度を想定している。水星周回軌道における最大 2 時間の日陰では、リチウムイオン電池（暫定的に 15AH）を使用する。

1.4.7 MMO テレメトリ・コマンド系 [6.10 節]

各機器は、「のぞみ」で使用された PIM（Peripheral Interface Module）によってシリアルデータバスに接続される。テレメトリ・コマンドは、MUSES-C と同様に CCSDS 規格に準拠する。データレコーダの容量としては、0.5~2.0Gbyte 程度を想定している。

1.5 本プロジェクトの進め方：ISAS-ESA 共同体制

日欧協力による「BepiColombo 水星探査計画」の検討は、1999 年 11 月に行われた ISAS-ESA 会議における ESA 側から宇宙研への協力打診から開始された。向井利典（宇宙研）と Dr. M. Coradini（ESTEC）をコンタクトパーソンとした両者間での情報交換・会談を経て、2000 年 6 月に ESA 側代表 3 名が宇宙研を訪問し、具体的な協議が行われた。その席上、「Senior Partner」を ESA、「Junior Partner」を宇宙研とする共同ミッションの位置付けが行われた。この方式は、土星探査ミッション CASSINI における NASA-ESA 間の位置付け（Senior Partner：NASA、Junior Partner：ESA）を踏襲したものである。

2000 年 9 月に、BepiColombo 計画は ESA の Science Program Committee において第 5 番目の「コーナーストーン」（3-4 年に一度程度の大型科学ミッション）として正式に認定された。この認定は「共同ミッション」を前提に行われたが、宇宙研側の事情を配慮し「日本との協力」という表現に留まっている。

これを受け、宇宙研では MMO 探査機のシステム検討を本格的に開始した。従来からの水星探査 Working Group における「スピン衛星による単独ミッション」の検討を引き継いだものの、「ESA との共同ミッションであること」、「打ち上げ・巡航フェーズにて未経験の複合探査機構成をとること」などの為、再出発に近い作業を行ってきた。

これまで、衛星の熱設計、高温環境下で使用可能な材料の検討、モデル搭載観測器の見直しが行われた。既に、地球軌道に比して一桁大きな熱入力・放射線など厳しい環境条件への対策を考慮したうえで、実現可能な探査機システムを構成できることを明らかにしている。また、現実的な機器配置を考慮した熱構造、運用モード、機上データ処理についても考慮を行ってきた。一部の不可欠な要素技術については、構成部材の試作・試験を行いつつある。

一方、BepiColombo 複合モジュールとのインターフェースについては、ESA で平行して行われている「Definition Study」の進行をにらみつつ、これに対応したシステム検討を行っている。

宇宙研は MMO の開発・運用を行うが、MMO は単独の計画ではなく「BepiColombo 計画」の一部であり、ESA-ISAS 間で情報交換・技術協力を行う。協力体制は、以下をベースとして行われる（図 1.5-1、図 1.5-2）

- 1) 「MMO のシステム開発及び運用」は、宇宙研が担当する。
- 2) 「搭載機器の開発」は、MPO・MSE も含めて日欧双方の協力体制の下で進める。
- 3) 双方のプロジェクト責任者として、次の 3 名が連絡を取り合い、検討を進める。

Planetary Mission Coordinator :	水谷 仁、	Marcello Coradini
BepiColombo Study Scientist :	向井利典、	Rejean Grard
BepiColombo Study Manager :	山川 宏、	Mauro Novara

また、搭載機器の選定は、MPO・MMO・MSE のいずれも日欧双方から公募を行い、双方からメンバーを出して構成された「選択委員会」において選定を行う。現在予定されているスケジュールは以下の通りである。

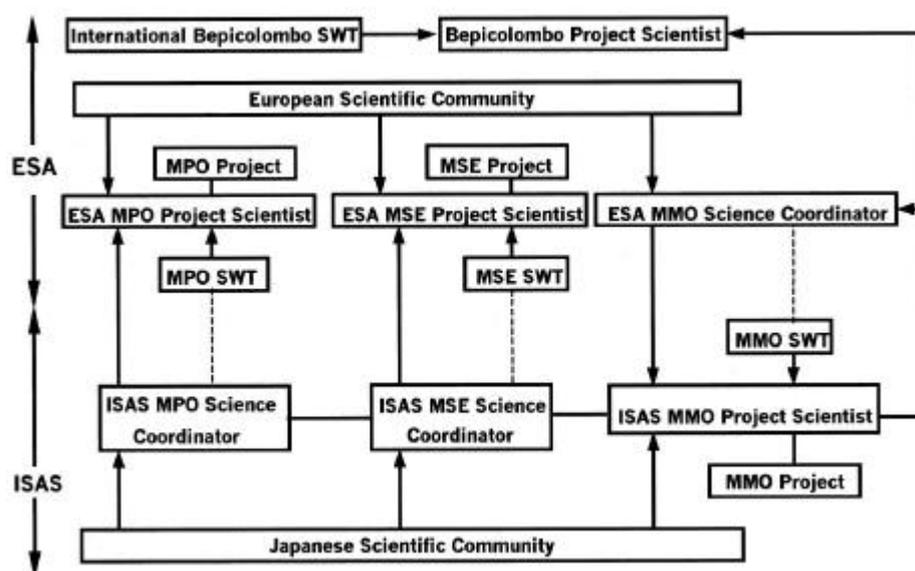
	MPO/MSE	MMO
アナウンス	2002年3月	2003年1月
締切	2002年6月	2003年4月
選定	2002年10月	2003年6月

上記は機器を担当する「Principal or Co-Investigator」(PI/Co-I)に関するものだが、これ以外に、モデル解析や運用に参加する「Interdisciplinary Scientist」(IDS)、データ解析に参加する「Guest Investigator」(GI)、「Recognized Co-operating Laboratory」(RCL)の募集が後日行われる予定である。

既に ESA との間では、

- 2000年12月 第1回 ESA-ISAS 共同会議 (ESTEC)
- 2001年4月 第2回 ESA-ISAS 共同会議 (ESTEC)
- 2001年5月 BepiColombo 計画キックオフミーティング (ESTEC)
- 2001年10月 第3回 ESA-ISAS 合同会議 (宇宙研)

などが行われ、マネージメント体制、開発スケジュール、技術的な問題点などに関する協議を行ってきた。また、2001年9月には「BepiColombo Science Workshop」を宇宙研で開催し、日欧の研究者による水星探査の目標と期待について活発な議論が行われた。今後も、ESA-ISAS 会議は年に3、4回程度の割で ESTEC と宇宙研で交互に開催し、協議を重ねて行く予定である。



BepiColombo Science Working Team Chaired by ESA, co-Chaired by ISAS + All Mission PIs (MPO PIs, MMO PIs, MSE PIs)		
MPO SWT ESA Chair (MPO Project Scientist) + MPO PIs	MMO SWT ISAS Chair (MMO Project Scientist) + MMO PIs	MSE SWT ESA Chair (MSE Project Scientist) + MSE PIs

図 1.5-1 BepiColombo プロジェクトの ISAS-ESA Science 共同体制案 (プロジェクトスタート後)

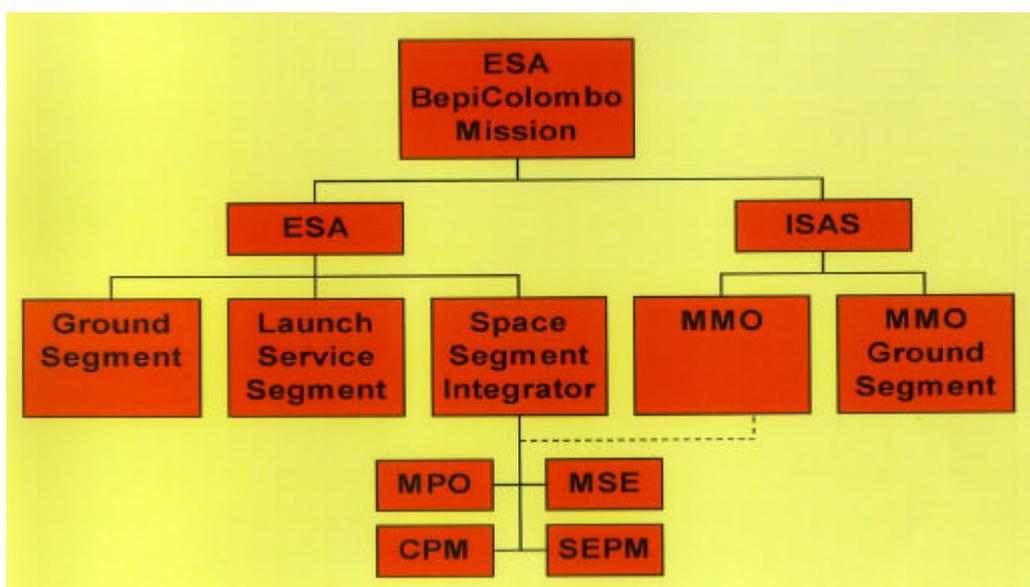


図 1.5-2 BepiColombo プロジェクトの ISAS-ESA 共同運用体制案（打ち上げ時以降）

1.6 タイムテーブル

2001 年 9 月以降のタイムテーブルを示す（図 1.6-1）。 [cf. 7 章]

ミッション提案 in ISAS	September	2001
概算要求	April	2002
MPO/MSE A/O アナウンス	March	2002
MPO/MSE A/O 締切	June	2002
MMO A/O アナウンス	January	2003
MMO PM start	April	2003
MMO A/O 締切	April	2003
MMO PRR	June	2003
MMO PM design fix	December	2003
MMO PDR	June	2004
MCCS PDR	July	2004
EM test (ISAS)	March	2005
STM test (ISAS)	May	2005
TTM test (ISAS)	July	2005
MCCS/STM-TTM test (ESTEC)	Sept.- Dec.	2005
MMO CDR	February	2006
MCCS CDR	August	2006
QR	April	2008
Shipment to ESTEC	June	2008
Transport to launch site	May	2009
Launch Campaign	May - August	2009
Mercury Orbit Insertion	<fall>	2011

