

## 水星探査機 MMO「みお」の水星周回軌道投入 1 年前を迎えて

BepiColombo「みお」プロジェクトマネージャ 小川 博之

本稿では BepiColombo と MMO「みお」の概要を紹介し、これまであまり語られてこなかった「みお」(MMO)の開発エピソードや打ち上げ後の運用、水星周回軌道投入とその後の運用に向けての準備状況を中心に紹介する。最後に水星周回軌道投入 1 年前を迎えての所感を述べたい。

### BepiColombo と MMO「みお」の概要

BepiColombo は、ヨーロッパと日本がおこなう国際共同水星探査計画で、ヨーロッパ宇宙機関(ESA)の 5 番目の大型計画 (Cornerstone Mission) である。日本は水星磁気圏探査機：Mercury Magnetospheric Orbiter (MMO)のシステム設計・製作・運用を担当する (MMO には「みお」というニックネームがつけられている)。サイエンスはヨーロッパの探査機：Mercury Planetary Orbiter (MPO) も含めて日欧を中心とする国際協力で実施される。ESA は MMO 以外の①BepiColombo ミッション全体の設計、②MPO, および後述する MTM、MOSIF の設計・製作・運用、③後述する MCS の組立・試験および打ち上げを担当する。

BepiColombo は、MMO、MPO という 2 つの衛星で水星の固体内部、表面から磁気圏に至る謎に一気に迫ろうとするミッションである。その主な目的は、

- ・ 恒星に近い惑星の起源と進化を調べる

- ・惑星としての水星：形態、内部構造、地質学、組成、クレーターを調べる
- ・水星の外気圏大気：構造とダイナミクスを調べる
- ・水星の磁気圏：構造とダイナミクスを調べる
- ・水星の磁場の起源を調べる
- ・水星の極の物質：組成と起源を調べる
- ・アインシュタインの一般相対性理論の実証

である。MMO には電場・磁場を計測する装置や、プラズマ粒子や中性粒子を観測する装置、大気カメラ、ダスト観測装置が搭載され、主として水星磁気圏を調べることを目的としている。

BepiColombo を取り巻くサイエンスの状況は、長い開発とクルーズの間にも大きく変化してきた。まず NASA の MESSENGER 探査機が人類史上初となる水星周回探査を 2011 年～2015 年にかけて実施し、水星に関する多くの新たな発見を成し遂げた。しかしこれは決して BepiColombo にとってマイナスなことではなく、むしろ大きなプラスとなったと言ってもいい。搭載装置や軌道の制約などから、発見はされたが解明には至っていない新たな謎が多く残されており、水星の立ち位置が単なる「よくわからない変な惑星」から「思っていたよりもはるかに面白い惑星」といえる状況に変化したからだ。BepiColombo の観測計画策定において MESSENGER の最新成果を取り込むことは、人類として水星探査に挑むバトンをつなぐようなものだろう。また、水星を取り巻くサイエンスにおけるこの 20 年ほどの大きな変化に太陽系外惑星分野の発展が挙げられる。発見された太陽系外惑星の個数はすでに 6000 個を超えた。当然「第二の地球はあるのか？」という問いが大目標として掲げられ、恒星から適度な距離である生命居住可能領域（ハビタブルゾーン）を周回する地球型惑星が注

目される。観測手段の制約から、現時点で発見されているものの多くは低温星（赤色矮星）のごく近傍を周回する惑星であり、たとえ恒星からの熱放射が地球程度だったとしても、紫外線や恒星風の強さは地球をはるかに上回る。そうした過酷な宇宙環境において、地球型惑星が生命存在可能な環境を安定的に保持できるのかどうかを理解するためには、まず太陽系の最内縁に位置し最も過酷な水星環境を理解することが重要なステップとなった。

打ち上げから水星到達まで MMO は MPO と共に Mercury Composite Spacecraft (MCS) という形で航行する（図 1）。MCS は ESA の電気推進モジュール：Mercury Transfer Module (MTM)、MPO、MMO Sunshield and Interface structure (MOSIF)、MMO から構成されている。MCS は 3 軸安定姿勢で運用されるが、MMO はスピン衛星なので、3 軸安定姿勢では太陽に近いところで耐えられない。MOSIF は水星到着まで MMO を太陽光から防護する。MCS は Ariane 5 ロケットで打ち上げられ、電気推進と地球・金星・水星スイングバイを経て、水星に到着する。水星到着後まず MTM が切り離され、その後 MPO の化学推進により水星周回軌道に投入される。MMO の周回軌道（近水点 590km：遠水点 11630km：軌道傾斜角  $90^{\circ}$ ）で MMO が分離、その後 MOSIF を分離した MPO は遠水点高度を下げて MPO の周回軌道（近水点 480km：遠水点 1500km：軌道傾斜角  $90^{\circ}$ ）に入る。MMO の観測期間はノミナル 1 地球年、オプションでさらに 1 地球年を計画している。

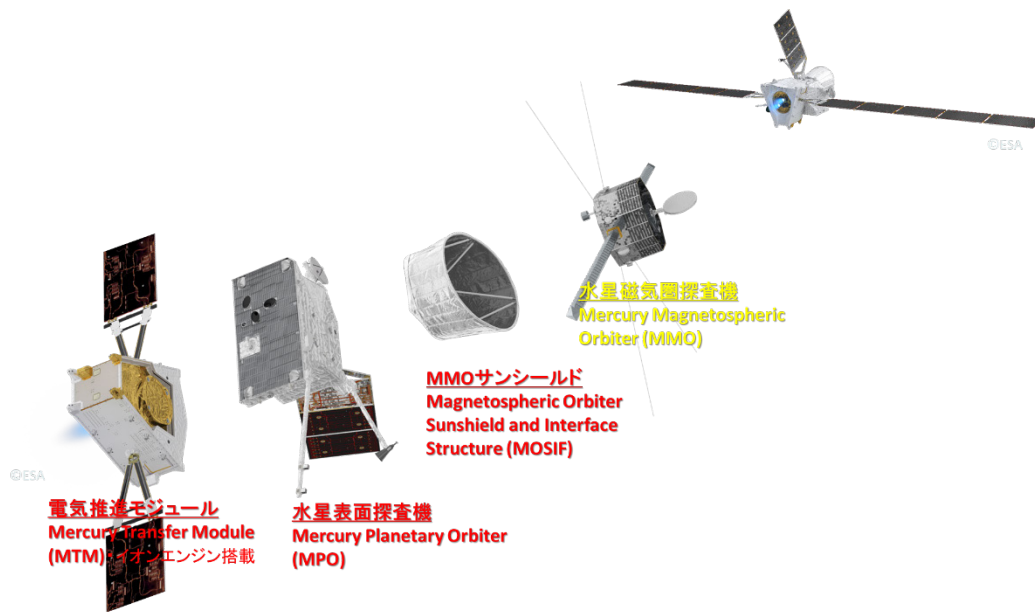


図1 Mercury Composite Spacecraft (MCS)  
(©ESA)

水星と太陽との距離は近日点で 0.3AU，遠日点で 0.47AU である (AU=天文単位：149,597,870.7km)。太陽光強度は近日点で 11 Solar、遠日点で 4.5 Solar (1 Solar = 1.37kW/m<sup>2</sup>：1 AU における太陽光強度) である。水星アルベドは 0.06 と小さいが、水星赤外は非常に大きい。水星には大気がなく自転周期も長いので、地球の月と同様に水星表面で放射平衡状態にある。近日点と遠日点におけるサブソーラー点（太陽直下点）の水星赤外強度はそれぞれ 13.6kW/m<sup>2</sup>，5.9kW/m<sup>2</sup> である。水星赤外強度はサブソーラー点から離れるに従い、太陽と地面の角度のコサインで下がっていく。夜側の水星表面温度は-180℃以下である。探査機はこのような強い太陽光とアルベド、水星赤外放射にさらされる（図 2）。探査機への熱負荷を下げるため、近日点では周回軌道の遠水点が夜側、遠日点では近水点がサブソーラー上になるような軌道を計画している（図 3）。

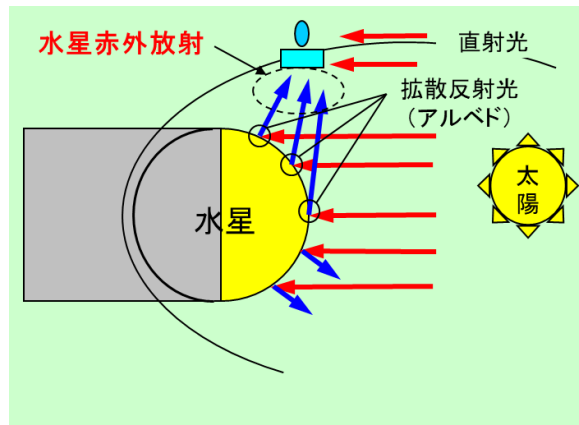


図2 水星周回軌道における熱環境

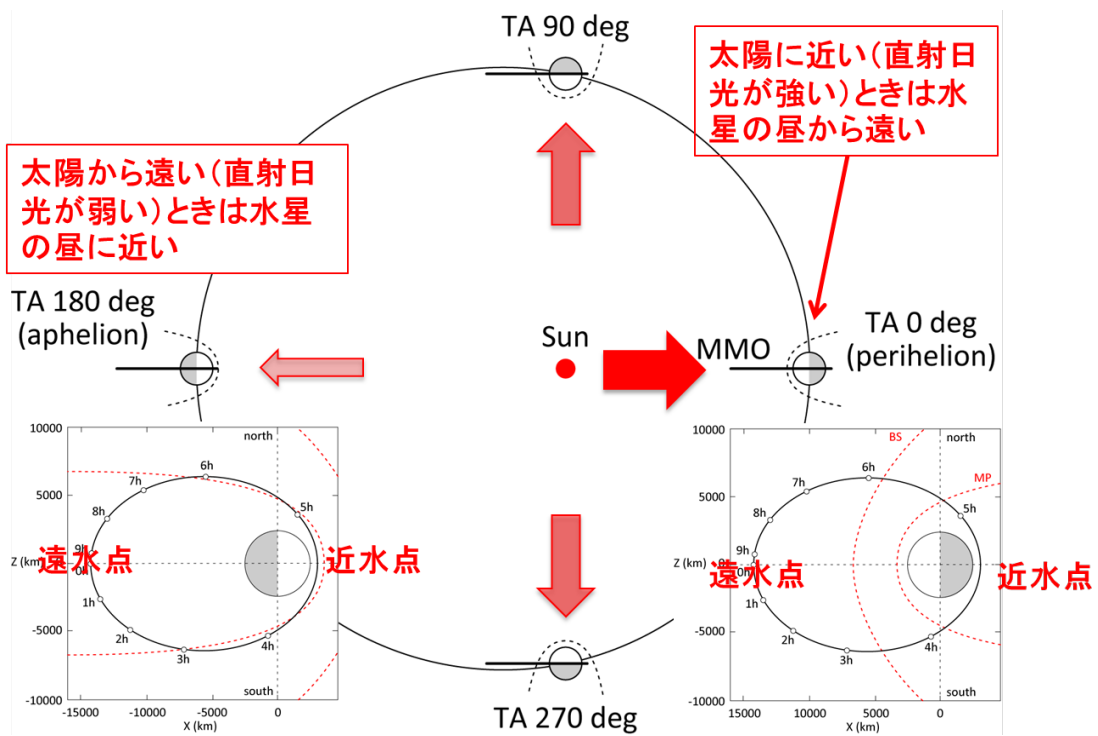


図3 水星周回軌道

MMO は観測機器のミッション要求から電場観測用の 2 対の 15m のワイヤアンテナ(WPT, MEFISTO)と磁場観測用の 2 式の 5m の伸展マスト(MAST)を有するスピン衛星である。スピン軸は太陽光に対して約 90 度、観測時のスピンレートは約 15 rpm である。図 4 に水星軌道上の MMO の予想図を示す。本体の形状は直径 1.8m に内接する 8 角柱である。側面パネルに太陽電池を搭載している。高利得アンテナ(HGA)は上部に搭載されており、デスパン機構（スピン方向とは逆に回転させる機構）で地球方向に向けられる。HGA を地球に向けられない場合は中利得アンテナ(MGA)を使用する。送信用の MGA(MGA-TX)は上面パネル上に搭載されており、受信用の MGA(MGA-RX)は下部に搭載されている(図 5)。

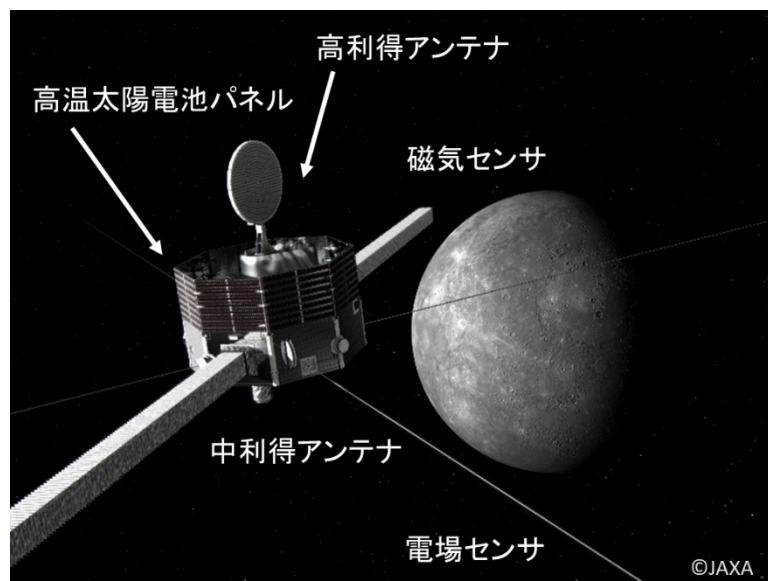


図 4 水星周回軌道上の MMO の予想図

BepiColombo は 2018 年 10 月 20 日に打ち上げられ、2026 年 11 月の到着に向けて水星に向かっていているところである。これまでに、

地球スイングバイ                      2020 年 4 月 10 日

金星スイングバイ#1                  2020 年 10 月 15 日

金星スイングバイ#2	2021 年 8 月 11 日
水星スイングバイ#1	2021 年 10 月 1 日
水星スイングバイ#2	2022 年 6 月 23 日
水星スイングバイ#3	2023 年 6 月 19 日
水星スイングバイ#4	2024 年 9 月 5 日
水星スイングバイ#5	2024 年 12 月 1 日
水星スイングバイ#6	2025 年 1 月 18 日

の 9 回もの惑星スイングバイをおこなった。MMO(「みお」)の BepiColombo からの分離・水星周回軌道投入は同年 12 月を予定している。(水星へ向かう 8 年の旅路 ～BepiColombo's cruise to Mercury～：

<https://youtu.be/vTFFUMH7Quo>)

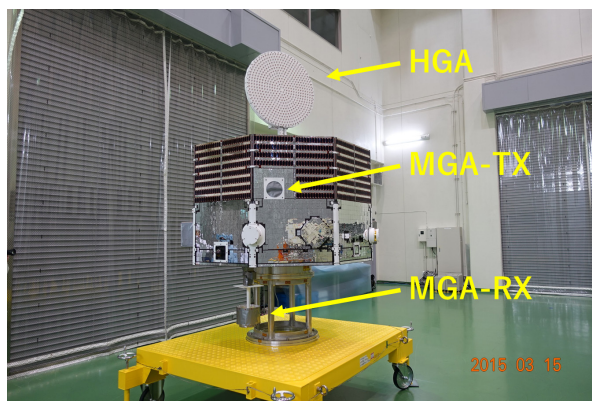


図 5：MMO のアンテナ

## MMO の開発エピソード

水星は太陽に最も近い惑星で地上からの観測が非常に限られる。水星周回軌道に入れるためには大きなエネルギーが必要であり、水星の環境も過酷な

め、探査機による観測も非常に難しい惑星である。BepiColombo 以前に水星の観測に成功した探査機は Mariner 10 と MESSENGER の 2 機である（Mariner 10 はフライバイ観測）。BepiColombo は水星周回軌道で観測を行う史上 2 番目の探査機である。

MMO では過酷な熱環境に耐えられる熱制御系の開発が最も重視された。水星環境での熱設計の妥当性を地上で検証する必要があるが、新規設備の整備は必要最小限とされ、既存の設備を利用して検証する方針がとられた。新規設備としては、水星環境と同等の模擬太陽光が照射できる「内惑星熱真空環境シミュレーター」が 2005 年度に整備された。これは液体窒素で冷却されたシュラウドを持つ直径 1m×1m の真空容器に 250mm  $\phi$  の水星環境と同等の 11 solar の模擬太陽光を照射できる設備である。また水星周回軌道上の日陰・日照で生じる温度の急降下・急上昇（熱衝撃）を模擬する「熱衝撃試験装置」も 2006 年度に整備された。これらにより機器の開発試験や要素試験がおこなわれた。

MMO の観測機器からの要求により、MMO の作る磁場が磁気センサに影響しないこと、MMO 表面が等電位になることが求められた。前者に対しては回路や配線に工夫が凝らされた。後者に対しては表面に使用される材料に導電性と構体への接地が求められ、熱制御系に対する大きな制約となった。

導電性白色塗料の開発では、まず既存の塗料を入手して内惑星熱真空環境シミュレーターで試験した。HGA は最高 400°C にも達する。入手できる限りの白色塗料を試験したが、MMO の要求に耐える塗料はなかった。宇宙材料メーカー（宇部興産）に相談したところ、そのメーカーが出している塗料をもとに MMO 用の導電性白色塗料を開発してくれることになった。何種類も調合を変え、試験評価を繰り返してできたのが、現在 MMO に使われている導電性白色塗料（UPI-WHITE）である。UPI-WHITE は MMO のサイエンティストによ



る帯電試験等の評価試験もパスしている。UPI-WHITE は後に「あらせ」でも用いられた。

太陽電池パネルの開発では、太陽電池の高太陽光強度・高温試験、パネルの耐熱試験、熱衝撃試験がおこなわれた。太陽電池パネルは高熱伝導性 CFRP アルミハニカムパネルで、太陽電池と熱制御材の Optical Solar Reflector (OSR: 鏡)が貼り付けられている。太陽電池パネルは最高 230℃にも達する。高太陽光強度・高温試験は内惑星熱真空環境シミュレーターにより高強度の光を高温の状態です太陽電池に長時間照射する試験である。この試験で太陽電池の劣化特性が把握され、カバーガラスと太陽電池面積が見直された。パネルの耐熱試験では、フライトモデルと同じプロセスで製造された要素モデルに、内惑星熱真空環境シミュレーターの模擬太陽光が照射された。太陽電池と OSR が試験中に割れる等の不具合が頻発し、何度も製造の見直しが行われた。製造には高度な技術が要求され、フライトモデルの製造にあたっては現代の名工レベルの技術者が携わったと聞いている。

システムレベルの熱制御系設計の検証には既存の設備が用いられた。水星環境の耐熱性の検証にはヨーロッパ宇宙機関 (ESA) の LSS (Large Space Simulator)が用いられた。LSS は BepiColombo の開発のために 10 solar の模擬太陽光が照射できるように改修され、試験では MMO の熱モデルをスピンさせた状態で MMO 全体に模擬太陽光が照射された。LSS では集光させて 10 solar を実現しているため、平行光による熱設計検証が LSS ではできない。そこで筑波宇宙センターの 13m スペースチャンバを用いて平行光による試験がおこなわれた。13m スペースチャンバでも MMO 熱モデルをスピンさせた状態で模擬太陽光が MMO 全体に照射された。13m スペースチャンバの模擬太陽光強度は 1 solar だが、平行光の評価検証には充分であった。しかしながら熱入力量は不足であったため、水星環境における探査機内部の温度環境は模擬できな

い。そこで探査機内部の熱設計検証には宇宙研の 4m $\phi$  スペースチャンバが用いられた。

筑波 13m スペースチャンバの試験が 2009 年 11 月、宇宙研の 4m $\phi$  スペースチャンバの試験が 2010 年 2 月、LSS での試験が 2010 年 10 月であった。MMO 熱モデルと MOSIF 熱モデルを組み合わせた試験も 2010 年 11 月に実施されている。

MMO の温度を計算する「熱数学モデル」はこれら 3 種の設備を用いた試験結果によって校正され（熱数学モデルのコリレーションと呼んでいる）、これを用いて軌道上温度予測がおこない、熱設計の妥当性を確認した。

一連の試作試験の結果を反映してフライトモデルの詳細設計・製造がおこなわれた。大きな設計変更は、(1) 太陽電池パネル面積の増加、(2) HGA 指向機構(APM)サンシェード形状変更、(3) MGA-TX の追加、である。(1) は太陽電池試験によって判明した劣化特性を反映したものであり、(2) は APM を太陽光から守るための構造を詳細設計した結果である。(1)、(2)の設計変更を検証するための追加熱試験も筑波 13m スペースチャンバでおこなわれた。(3) は、地球から遠く離れた水星をスピン衛星で探査するという、特殊事情から生じる通信上の問題を解決するために採用された。HGA はデスパンモータ(ADM)と APM を用いて地球方向に向けることで高速の通信ができるが、分離直後など地球方向が分からない場合は使用できない。当初は HGA が使用できない場合は 360 度指向性がある MGA-RX を使用する計画であった。MGA-RX を送信に使用する場合、スピンの影響（ドップラー効果）が放射される電波に乗ってしまう。そうすると、探査機の距離が遠くて地上に届く電波強度が弱い場合、通常のやり方だとテレメトリデータがうまく受け取れないことが判明した。そこで指向性の高いホーンアンテナを構体に固定して送信専用(MGA-TX)とするこ

とにした。この場合 MGA-TX はスピンとともに回転するので、MGA-TX が地球方向を向いた瞬間の電波のみが地球に届くことになる。放射する電波に強弱を与えることで信号を送信する。スピン周期は 4 秒なので、4 秒に 1 回信号が 0.2 秒間地上で受信される。データの通信速度は約 1 分間に 1bit とした。我々はこの通信方式を ONOFF KEYING (OOK) とかセマフォ（手旗）通信とよんでいる。MGA-RX は受信専用となった。

熱以外にも次世代の科学衛星や惑星探査に向けた新しい試み（当時）が MMO に投入されている。(1) 衛星情報ベース 2(SIB2)の採用、(2) SpaceWire の採用、(3)ターボ符号の導入、(4) Mission Data Processor (MDP)の開発、(5) 平面アンテナの採用、(6) 統合化プラットフォームアーキテクチャの採用、(7) サバイバルヒータの採用、などである。(1)～(4)は MMO 開発開始以降に開発がスタートした科学衛星に継承されている。(5)の MMO の平面アンテナは 2001 年の計画当初から採用されている。形式は異なるものの平面アンテナの有用性から、後続の探査機（あかつき、はやぶさ 2）に平面アンテナが採用されている。(6)は MMO に対する厳しい軽量化要求から生まれたもので、システム全体のハードウェアリソースの最適化、搭載ソフトウェアの開発最適化および維持性の向上を目的として、統合化したハードウェアとソフトウェアのプラットフォームを定義し、その上で動作するアプリケーションソフトウェアにより、データ処理系機能、姿勢制御系機能、熱制御系機能、等を提供するアーキテクチャである。(7) は「のぞみ」などの運用経験により、電力さえあれば最低限の保温機能を持たせることが探査機の生存可能性を上げるという考えのもと採用された。残念ながら(6)(7)については以降の科学衛星には採用されていない。予算上の理由だと推測する。

重量に関しては、ESA が MMO への質量割り当てにさらにマージンを要求したこともあり、極めて厳しい軽量化要求があった。ESA に逐一質量を報告する

ことが求められ、グラム単位の細かい軽量化がおこなわれた。MMO はスピン衛星のため、質量が変更になるたびに機器配置を見直さなければならなかった。

詳細設計審査で高温環境下での材料からのアウトガスの影響について評価すべきだとの指摘を受けた。指摘を受けて、材料の高温下でのアウトガス試験、熱制御材料に付着したアウトガス（コンタミネーション）に対して高強度の紫外線を照射して熱光学特性の変化を調べる試験、アウトガスの探査機への付着量の解析がおこなわれた。また探査機システムのアウトガスを地上で放出して宇宙空間で発生するアウトガスを少なくするためのベーキングが入念におこなわれた。宇宙空間でのアウトガスの影響を最小限に抑え込めたと考えている。

実は LSS 試験においてかなりの量のアウトガスが発生し、低温部に凝縮していたことがみられていた。ESA の技術者には、LSS 試験前後の MMO 各部の熱光学特性を測定してもらったほか、地球の人工衛星を前提として構築されたアウトガス評価の標準的な方法は水星環境下では通用しないこと、ベーキングのやり方などをアドバイスしてもらった。前述の MMO のアウトガス試験、ベーキングでは、SOLAR-B「ひので」でアウトガス評価・ベーキングに携わった技術者に協力してもらった。

詳細設計ののち探査機が製造され、試験に供された。様々なことがあったが、本稿では一つだけ紹介する。太陽電池パネルの熱真空試験において太陽電池が白濁するという現象がみられた。開発試験ではみられなかったもので、特別チームが結成され、原因究明のための活動が実施された。様々な試験検証と解析がおこなわれ、そのまま使用して問題ないという結論となった。

MMO は宇宙研での単体の総合試験を経てヨーロッパ宇宙技術センター

(ESTEC)に輸送され、ESA のモジュールと組み合わせた様々な試験がおこなわれた。そこでも様々なことがあったが、本稿では一つだけ紹介する。ESA のモジュールを覆っている多層断熱材（MLI：Multi-Layer Insulation）の表面はセラミック繊維の布だが、ESA のモジュールと組み合わせた MCS の振動試験でセラミック線維が分離し、MMO に付着するという事象があった。見た目にはわからないくらい微小な繊維で量としてはわずかではあったが、宇宙空間で不具合を起こす可能性を少しでも下げるために観測機器も含めて清掃することにした。特殊なライトを当てて視認しつつ特殊な綿棒で繊維を一つ一つ除去するという気が遠くなる作業をおこなった。



図6 ESTEC での総合試験の様子（©ESA-Philippe Sebirot）

ESA から打ち上げ後の軌道が提示され、ESTEC での総合試験と平行して、MCS から分離以降の MMO の単独運用の検討がおこなわれた。MMO の分離時期は、水星や太陽による通信断（水星蝕や合）がなく、日本の地上局か

ら可視時間が分離の 1 時間前から 7 時間後まで確保できることが条件だった。提示された ESA の軌道ではその条件が満たされない。それでは分離伸展に必要な運用時間が不足するため、提示された軌道を了承する代わりに MMO の分離伸展運用時に ESTRACK 局を割り当ててもらおうよう ESA に要求することになった。MMO 側も詳細な検討の結果、ワイヤアンテナやマストの伸展時に HGA を使用するのリスクが高いことが判明し、伸展時には MGA を用いることになった。このため MDP のソフトウェアの改修が必要となった。

ESTEC での総合試験後バッテリーをフライト用に交換し、ESA の他のモジュールとともに MMO は南米フランス領ギアナにあるアリアンロケットの射場に輸送された。輸送には大型の輸送機が必要となり、ウクライナのアントノフ 124 が用いられた。射場では射場輸送後の健全性確認、最終動作チェック、最終組立整備、推進剤最終充填（MMO は窒素ガス）、ESA モジュールとの結合、ロケットへの結合が行われた。最終組立整備では長年溜まった埃も含めて入念に清掃し、MLI をフライト用に交換、フライトハードウェアが設計と齟齬がないことを最終確認した。MOSIF はロケットの上で最後の最後に結合され、MOSIF MLI の最終縫製がおこなわれた。最初の縫製では MOSIF に許容できない隙間ができてしまっていたが、その場で現場作業者に指摘し、縫製をやり直してもらった。ノンフライトアイテムの取り外しも確認し、ハードウェアとして設計通りであることを最終確認した。



図7 アントノフ 124 (©ESA-C.Carreau)

ロケットを整備棟から射点に移動する際に、MMO の分離を検出するマイクロスイッチとマルマンクランプバンドの分離を検出するマイクロスイッチのそれぞれ一つが異常値を示すという不具合があった。ロケットが射点に移動してしまっているのに、その対応について非常に激しく厳しい議論があった。MMO もマルマンクランプバンドも分離していないことはテレメータデータから明らかであり、この不具合事象はマイクロスイッチの異常であること、当該スイッチに依らずに MMO の分離運用が可能であろうことから、そのまま打ち上げることになった。射点移動後のタイミングで不具合を出してしまったことは誠に遺憾で申し訳なかったが、打ち上げという判断がなされ、一同安堵した。



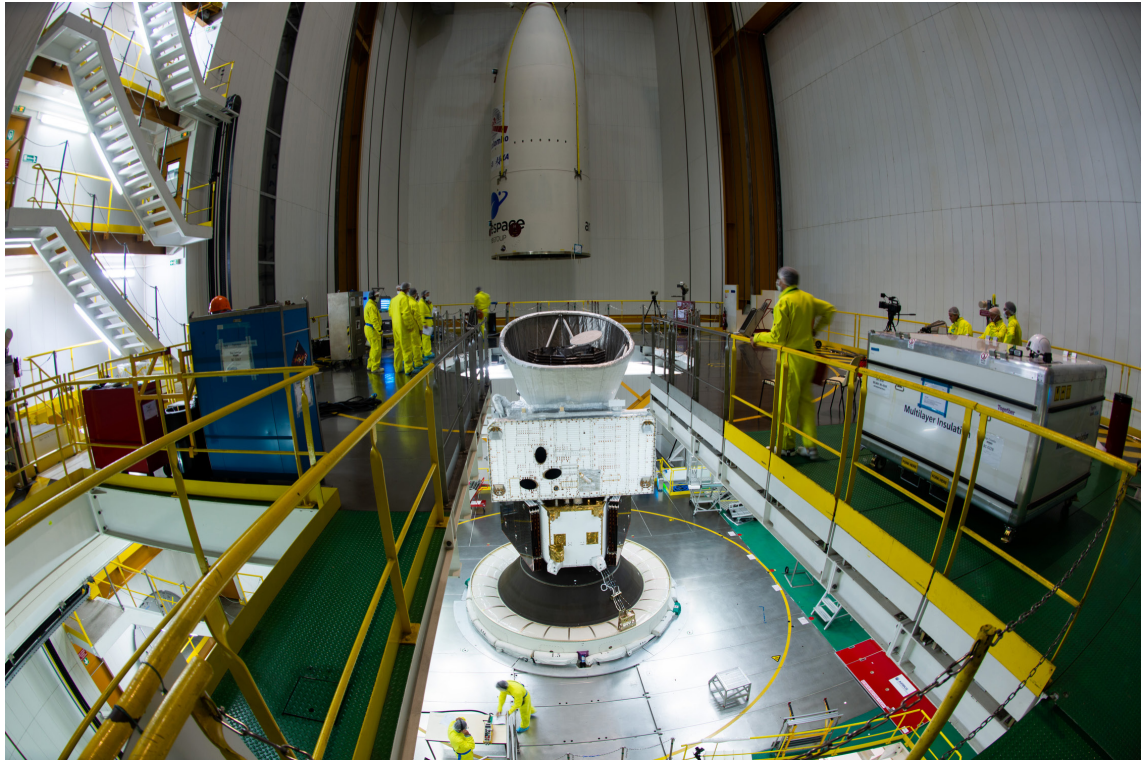


図8 BepiColombo フェアリング組付け(EESA-Manuel Pedoussaut)





図9 BepiColombo リフトオフ(©2018 ESA-CNES-Arianespace)

## BepiColombo の打ち上げとその後の運用

2018 年 10 月 20 日に BepiColombo は予定通り打ち上げられた。ロケットから分離された後も BepiColombo は順調で、MMO の温度・状態・動作も想定 の範囲内であった。

打ち上げ 1 か月後に MMO の初期チェックアウトがおこなわれた。計画では 高電圧以外の各機器のチェック、および MAST と WPT のローンチロック（打 ち上げ時の荷重に耐えるための機構）解除をおこなう予定だった。高電圧以外 の各機器のチェックは問題なく終えられたが、MAST のローンチロック解除は 温度条件を満たさず見送られ、WPT もローンチロック解除ができなかった。

2019 年 6 月から 8 月にかけて MMO の高電圧機器のチェックアウトが行わ

れた。MAST のローンチロック解除は、チェックアウトの後、温度条件を実現するための運用の後におこなわれ、解除に成功した。MAST は MMO 単体の振動試験時にローンチロックが外れるという不具合を経験していたため、心配していたが解除に成功して安堵した。WPT についても、半年以上にもわたって慎重に検討された手順により、解除に成功することができた。

一方で、高電圧機器チェック中に MDP が不意に停止する事象が発生した。軌道上での試験や試作品を用いた試験により原因が究明され、MDP のソフトウェアの不具合であることが判明した。軌道上でソフトウェアの修正がなされたが、この原因究明と対策に 1 年以上を要した。

MMO は当初は水星到着までのクルーズ中は、惑星フライバイ時も含めて、基本的には電源 OFF の Dormant モードで過ごし、半年に 1 回程度電源を ON してバッテリー充電と定期チェックのみをおこなう予定であった。これに対してサイエンスチームから、許される範囲でクルーズ中の太陽風の観測と惑星フライバイ時の観測をおこないたいと要望があった。ヨーロッパの探査機 MPO も MMO もそれに応じることとなった。

地球フライバイでは MMO の電源を ON して、観測機器が地球磁気圏で正常に動作することを初めて確認した。1 回目の金星フライバイではソーラーオービターの金星フライバイと 1 日の時間差で金星の観測がおこなわれた。2021 年 3 月には、あかつき、ひので、MMO の 3 機同時観測を実現した。太陽風の観測では太陽系内各所にある世界中の探査機との共同観測を実施している。彗星が残っていた塵の観測も試みられた。2 回目の金星フライバイ、6 回の水星フライバイでも観測がおこなわれた。金星フライバイ、水星フライバイにおける観測では新しい発見がいくつかあり、科学論文として公表されている。水星や金星のフライバイ観測や太陽風の観測もあって、若い世代のサイエンティ

ストが BepiColombo のサイエンスコミュニティに参入し、活発に活動することとなった。

クルーズ中および惑星フライバイ時の温度測定結果を用いて熱数学モデルの再評価をおこなっている。その結果、熱数学モデルに若干の修正が必要となった。再評価・修正された熱数学モデルによって水星周回軌道投入後の温度を予測すると、打ち上げ前の予測温度より 5~10 度高くなることが判明した。当初より熱数学モデルの温度予測に合わせて MMO を運用する計画であったので、修正された熱数学モデルを用いて水星周回軌道投入後の観測運用計画の見直しをおこなっている。

2020 年から始まった新型コロナウイルス感染症 COVID-19 の対策として、日本から完全にリモートでクルーズ中の MMO の運用ができるように体制を整備した。コロナ禍で移動が制限される中でも安全かつ着実に運用することができた。

## MMO「みお」と美笹深宇宙探査用地上局の整備

老朽化していた臼田宇宙空間観測所 64m アンテナの後継局として 2014 年頃から美笹深宇宙探査用地上局の検討が始まった。MMO は臼田 64m アンテナの性能を前提として設計されている。このため MMO の要求を満たすことが美笹深宇宙探査用地上局の設計において要求された。極めて厳しいコスト制約があったために美笹深宇宙探査用地上局プロジェクトには大変な苦労があったが、美笹深宇宙探査用地上局は 54m のアンテナ口径にもかかわらず臼田 64m アンテナ以上の性能が実現され、MMO の要求を満たすこととなった。

## 水星到着時期延期

2024 年 5 月に ESA の電気推進モジュールの太陽電池パネルの電力供給に不具合が発生し、電気推進が最大出力を出せないことが明らかになった。そのため BepiColombo の水星到着が 2025 年度から 2026 年 11 月に延期となった。

## MMO「みお」の水星到着後の運用とその準備

クルーズ中運用と平行して水星到着後の MMO 分離伸展運用、初期チェックアウト運用、定常運用に向けて準備を進めてきた。ASTRO-H の Lessons Learned を受けて MMO の BBM や EM を用いてハードウェアシミュレータを構築し、運用手順の事前検証や運用訓練ができるようにした。定常運用時の観測計画作成をおこなうツールや事前に温度予測を行うツール、MGA を用いた ONOFF KYG 通信とその運用を支援するツールなどの整備をおこなった。ESA と具体的かつ詳細な調整も進め、分離伸展時に ESTRACK による支援が受けられることになった。

BepiColombo の MCS の水星到着後はまず MTM が分離され、その後 MMO のマルマンバンドが解放される。マルマンバンド解放後は、MMO は 1 本のワイヤと分離コネクタで MOSIF と繋がった状態となる。当初は打ち上げ後すみやかにマルマンバンドを解放する計画だったが、後にワイヤが MTM の分離衝撃に耐えられないことが判明し、マルマンバンド解放が MTM 分離後となった。

分離の数日前には MMO の電源が ON となり、MMO の健全性確認とバッテリー充電が分離前までにおこなわれる。分離直前に HGA を展開・直立し、MMO の分離準備完了が確認されると、MPO の OBCP (On-Board Control

Procedure)により自動的にコネクタ分離・ワイヤ切断が実行される。コネクタが分離されワイヤが切断されると、分離機構のスパイラルばねによって MMO はスピンしながら MOSIF から分離する。

MMO の分離伸展運用はシステム上の制約により、ほとんどの期間で HGA が使えず MGA を用いた運用となる。おおよそ 1bit/分という超低速のセマフォ通信によるダウンリンク（テレメトリ）と、15.6bps という超低速のアップリンク（コマンド）のため、分離伸展というクリティカルな運用が長時間におよぶとともに、可視時間の制約が大きく影響する。また探査機運用が機器の許容温度で制約される「熱制約」によって分離伸展運用が可能な期間が限られる。分離後、熱制約が始まる前までに分離伸展運用を終える必要がある。悪いことに、分離と熱制約の始まりの間には、探査機が水星によって隠されて通信が出来なくなる「水星蝕」が存在する期間、太陽-地球-探査機の角度が狭くなって通信ができなくなる「合」の期間、探査機の日陰が発生する「日陰期間」が存在する。日陰期間中は電力不足で伸展運用ができない等、システムの制約で伸展運用ができない。これらの事情により、美笹局・臼田局だけでは分離伸展運用を熱制約期間開始までに終えることができないことから、ESTRACK 局による支援が必須となっている。

分離運用は MGA 通信で、1) 分離後自動シーケンス（MGA 展開、スピニアップ、太陽角制御、通信系 ON）、2) 簡易ヘルスチェック・姿勢決定・HGA 通信確立、がおこなわれる。ここで一旦 HGA 通信によって MMO の健全性を確認したのち MGA 通信に戻し、伸展運用に入る。伸展運用は、3) スピニアップ(20rpm)、4) MEFISTO 5m 伸展、5) WPT 5m 伸展、6) MEFISTO 10m 伸展、7) WPT 10m 伸展、8) MEFISTO 15m 伸展、9) WPT 15m 伸展、10) HGA 通信確立・MAST 伸展準備、11) MGA 通信への切替・MAST 伸展、12) スピニアップ、13) HGA 通信確立、と進む。様々な制約がある中で熱制約期間

開始までに分離伸展運用が終えられるよう詳細な手順を準備している。前述の水星蝕や合、日陰を考慮に入れながら、超低速の通信環境で、電波の伝播遅延（探査機と地上局の間で電波が伝わる時間）も考慮しなければならないため、運用手順は非常に複雑で、秒単位のスケジュールとなっている。また、あらゆる不具合が分離伸展中に生じることを想定し、その際の対応手順についても詳細な手順を準備している。

分離伸展運用を終え、初期チェックアウトが終わった後の定常運用については専用の計画・運用ツール（MPACT/姿勢固有部）が整備されている。週7日間の運用で、週2回コマンド・タイムラインをアップロードする。観測したデータをすべて地上にダウンロードすることはできないため、低レートでダウンロードしたデータをみて、データレコーダ上に高レートで記録されているデータを選択してダウンロードするという運用となっている。また太陽に近い季節では、送信機や観測器をONできる時間に熱的な制約が生じる。このため、温度予測をおこなって、各機器の許容温度を超えないように送信機や観測機器のONスケジュールを調整する。さらに太陽から遠い季節では、2時間を超える長時間の日陰期間が発生し電力による制約が生じる。熱的制約や電力制約の下でサイエンティストが望む観測をし、必要なデータをダウンロードして成果を最大化するための支援を行うのが専用の計画・運用ツール(MPACT)と温度予測ツールである。定常運用に向けた訓練においては、これらのツールをいかに使いこなし、安全かつ最大限の科学成果を生める運用計画を立てられるかの習熟に取り組んできた。複雑なツールの操作に慣れるだけでも一苦労だが、それだけでなくサイエンティストと熱エンジニア、ツールを操作する計画作成担当の間での密な連携が必要な作業であり、そこも含めて訓練として意味のあるものになっている。

MMO の運用では往復伝搬遅延が10～20分かかるため、地上試験のように

個々のコマンドのレスポンスを待つわけにはいかない。分離伸展運用では MGA-RX を用いることから低レートでコマンドを送信する必要があるため、一連のコマンドを送信するのに数十分かかる。HGA による高速（高ビットレート）のテレメトリが受信できないため、MGA-TX による ONOFF KYG 運用（ビーコン運用の一種）となる。

これらの運用には習熟が必要なため、ハードウェアシミュレータを製作して 2022 年度から訓練を積み重ねてきた。深宇宙の運用では、地上のコマンド送信・探査機上の動作・地上のテレメトリ受信、これら 3 つがずれて同時に進行するので慣れるまではとても混乱した。打上げ後に合流したメンバーは総合試験に参加していないので運用にむけた経験を積めないが、ハードウェアシミュレータによる運用訓練でかなりカバーすることができた。ハードウェアシミュレータを用いた運用訓練は長期プロジェクトでは重要であることをつくづく感じた。



図 10 運用訓練の様子



## MMO 分離 1 年前にあたって

本稿では BepiColombo の概要とともに、水星という我々にとって未知の厳しい環境に適合する MMO の開発のエピソードを紹介した。また打ち上げ後の運用経過とこれからの予定、MMO 分離以降の運用とその準備状況についても紹介した。

2026 年 12 月に MMO が分離されると、1997 年に最初に検討されてから苦労して構築してきた MMO が水星で実際に動作し始める。MMO の開発手法の成否が試されることになる。1998 年以来ずっと携わってきた筆者にとってとても楽しみであるとともに、恐れも正直感じている。MMO の分離伸展では、遠く離れた水星において、難しい分離伸展運用を厳しい通信環境・熱環境の下で行うという、前例のない「離れ業」に挑戦する。今後も気を緩めずに、あらゆる状況を検討し、できる限り訓練を行って運用に習熟し、準備万端の状態での分離を迎えたい。

もっと知りたい方は

BepiColombo 「みお」 プロジェクトページ：<https://mio.isas.jaxa.jp>

ISAS ニュース連載記事「みおつくし」：

<https://www.isas.jaxa.jp/feature/mio/>

ISAS ニュース宇宙科学の最前線「BepiColombo MMO の熱制御系」：

<https://www.isas.jaxa.jp/j/forefront/2011/ogawa/index.shtml>

「衛星システムの熱制御最前線～水星探査機の熱制御～」伝熱 57(238) 2-8, 巻頭 1p 2018 年



水星へ向かう 8 年の旅路 ～BepiColombo's cruise to Mercury～：

<https://youtu.be/vTFFUMH7Quo>