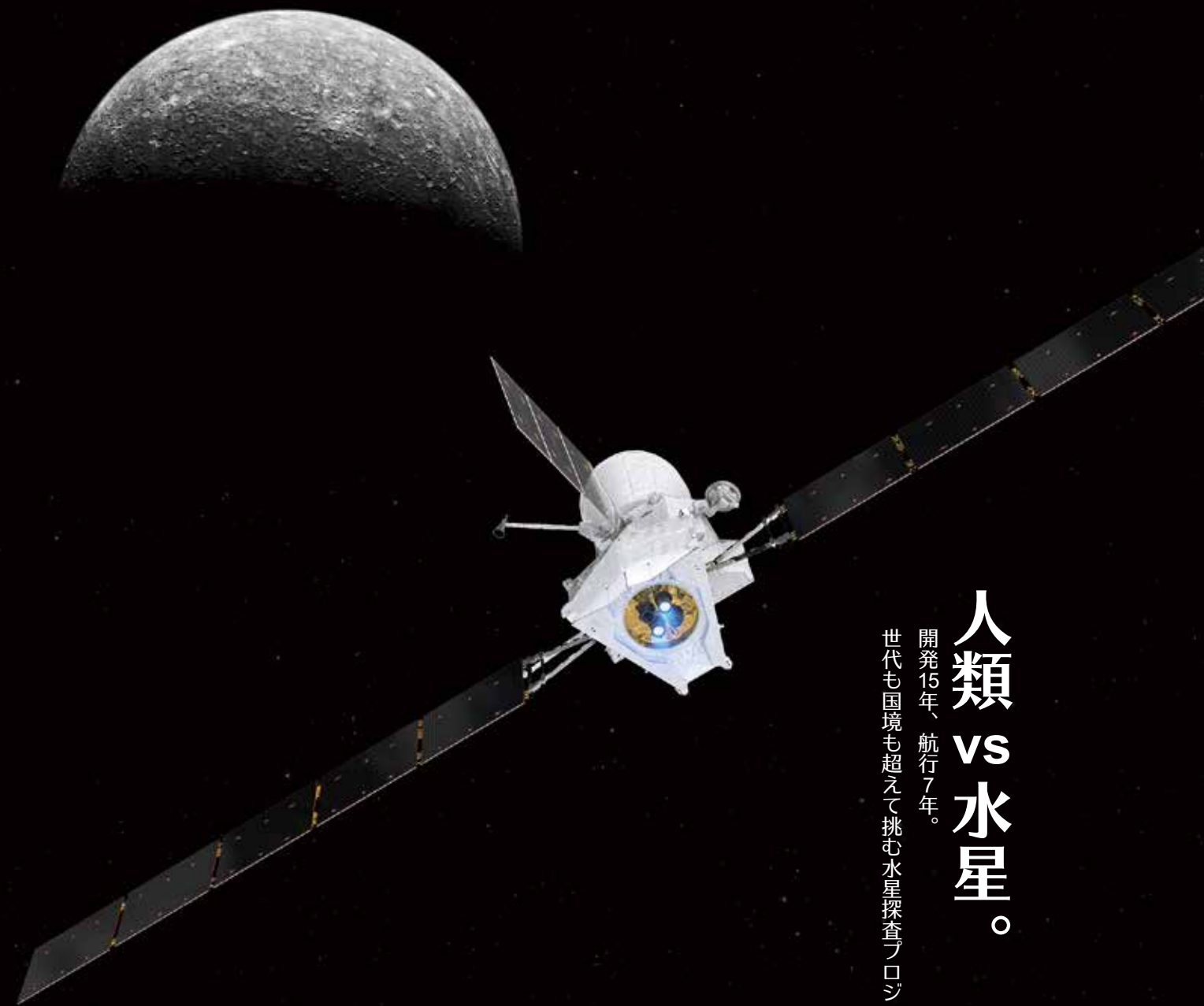


水星探査計画 BepiColombo

水星磁気圏探査機「みお」



人類 vs 水星。

開発15年、航行7年。
世代も国境も超えて挑む水星探査プロジェクト。



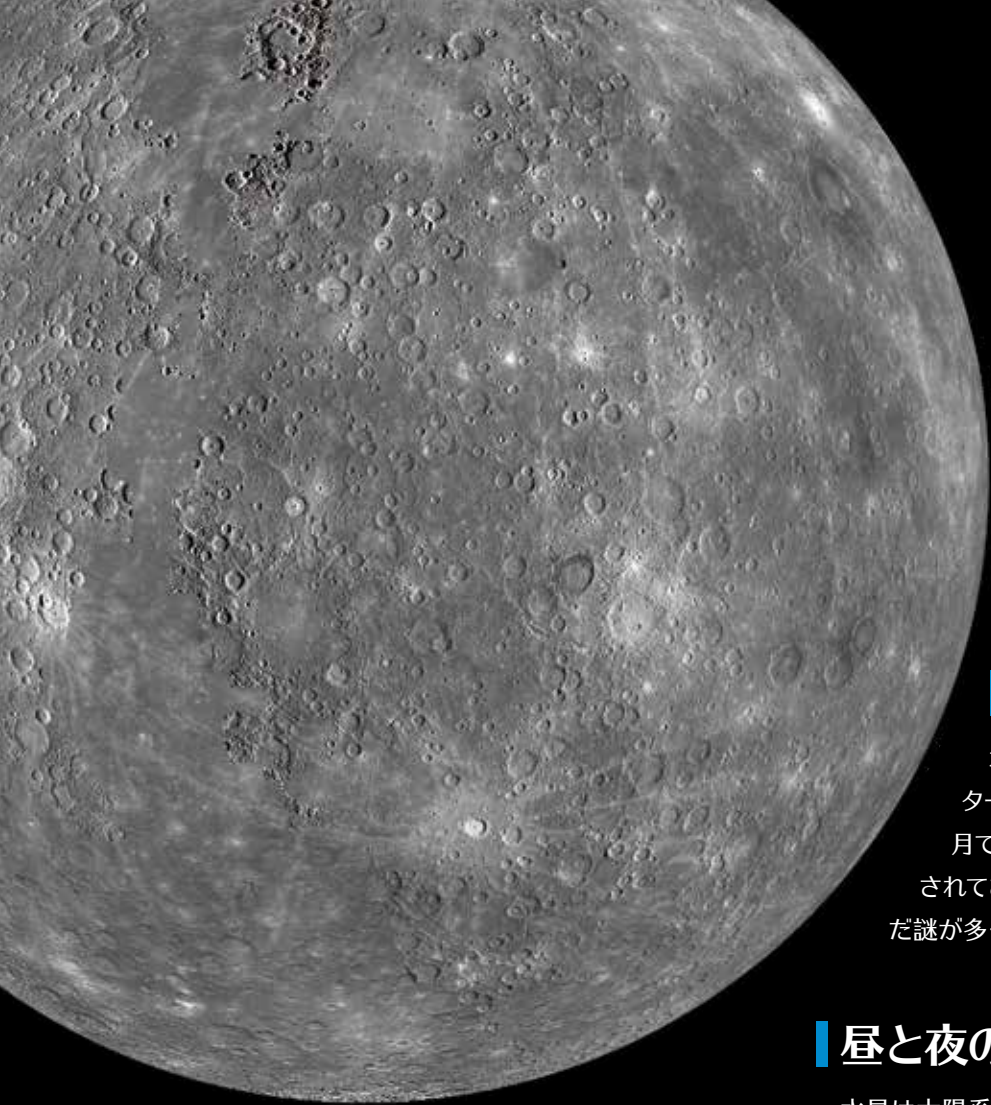
Institute of Space and Astronautical Science

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構

宇宙科学研究所

〒252-5210 相模原市中央区由野台 3-1-1

<http://www.isas.jaxa.jp/>



水星

太陽系で最も太陽に近い惑星

見た目は月にそっくり

水星の見た目は月とよく似ており、クレーターに覆われた地形を持っています。しかし月では見られない水星特有の地形も多く発見されており、それらがどうやって作られたのかまだ謎が多く残されています。

昼と夜の温度差が 600℃

水星は太陽系の惑星の中で一番内側を公転しており、地球の 10 倍以上強い日光を浴びており、昼の表面温度は約 430℃にも達します。一方、地球のような分厚い大気をもっていないため夜は熱が宇宙空間に逃げてしまい、約 -170℃まで冷えてしまいます。昼と夜の温度差が約 600℃もある過酷な環境の惑星です。

小さくてもズッシリ重い

地球と同じく岩石でできた惑星で、その大きさは太陽系で最も小さく地球の半分以下（半径 2,440 km）しかありません。しかし地球とほぼ同じ密度をもっており、内部には惑星半径の 3/4 にも及ぶ大きな鉄のコアがあると考えられています。

地球と同じく磁場がある

地球と同じように水星にも磁場があり、その強さは地球の約 1/100 です。

惑星で磁場が作られるには内部のコアが溶けて流動している必要があると考えられており、最も小さく冷え固まりやすい惑星である水星になぜ未だに磁場が存在しているのかは大きな謎となっています。

水星基礎知識

平均公転半径※	0.39 天文単位 (AU) ※太陽系で最大の離心率をもつ楕円軌道 (0.31-0.47 AU)
直径	4880km (地球の 5 分の 2)
平均密度	5.43g/cm ³
自転周期	約 59 日
公転周期	約 88 日 (自転周期：公転周期 = 2 : 3)
水星の 1 日	約 176 日



やっとここまで来ました。マラソンでいったら
スタートラインに立ったところで ミッションの完遂という
ゴールまでは まだまだ長い道のりがありますが、
謎の解明や新たな発見が数多くある事に期待しています。

早川 基

プロジェクトマネージャ



BepiColombo とは：初の大規模国際協力ミッション



BepiColombo（ベピコロンボ）は宇宙航空研究開発機構（JAXA）とヨーロッパ宇宙機関（ESA）が協力して進める国際水星探査計画です。JAXA が担当する水星磁気圏探査機「みお」と ESA が担当する水星表面探査機（MPO）の 2 機の探査機を同時に水星周回へ送り込み、総合的な観測を行う大規模な国際協力ミッションです。

2018 年 10 月にフランス領ギアナからアリアン5 ロケットにより打ち上げられ、合計9回もの惑星スイングバイを経て 2025 年 12 月に水星周回軌道へ投入される予定となっています。

開発期間： JAXA プロジェクト最長、15 年。

1997 年、日本で水星探査の検討が始められました。2003 年に BepiColombo プロジェクトが開始。実に 15 年もの開発期間を経て、多くの人々の想いが注がれた「みお」は、いよいよ水星へ向けて打ち上げられます。これは JAXA のプロジェクトとして最長であり、それだけ開発に携わった関係者の想いが注がれています。

また開発を担当する宇宙科学研究所としても初の大規模な国際協力ミッションであり、地球の磁気圏探査で培われた日本の得意とする観測技術がふんだんに盛り込まれています。世界の中でも日本のもつ技術の高さを証明すべく、熱い意気込みがこの探査機には込められています。

BepiColombo の名前の由来： イタリアの天文学者

BepiColombo という名前はイタリアの天体力学者である Giuseppe Colombo 氏に由来しています。水星の自転周期と公転周期が 2:3 の共鳴関係にあることを提唱したり、スイングバイを惑星探査機の航行に利用した先駆者でもあります。

世界で初めて水星を探査したマリナー 10 号の軌道を設計したのも彼であり、彼のおかげで水星探査が可能になったともいえます。その功績をたたえ、彼のニックネームである Bepi をつけて我々の水星探査計画を BepiColombo と名付けたのです。



「みお」

Mercury Magnetospheric Orbiter

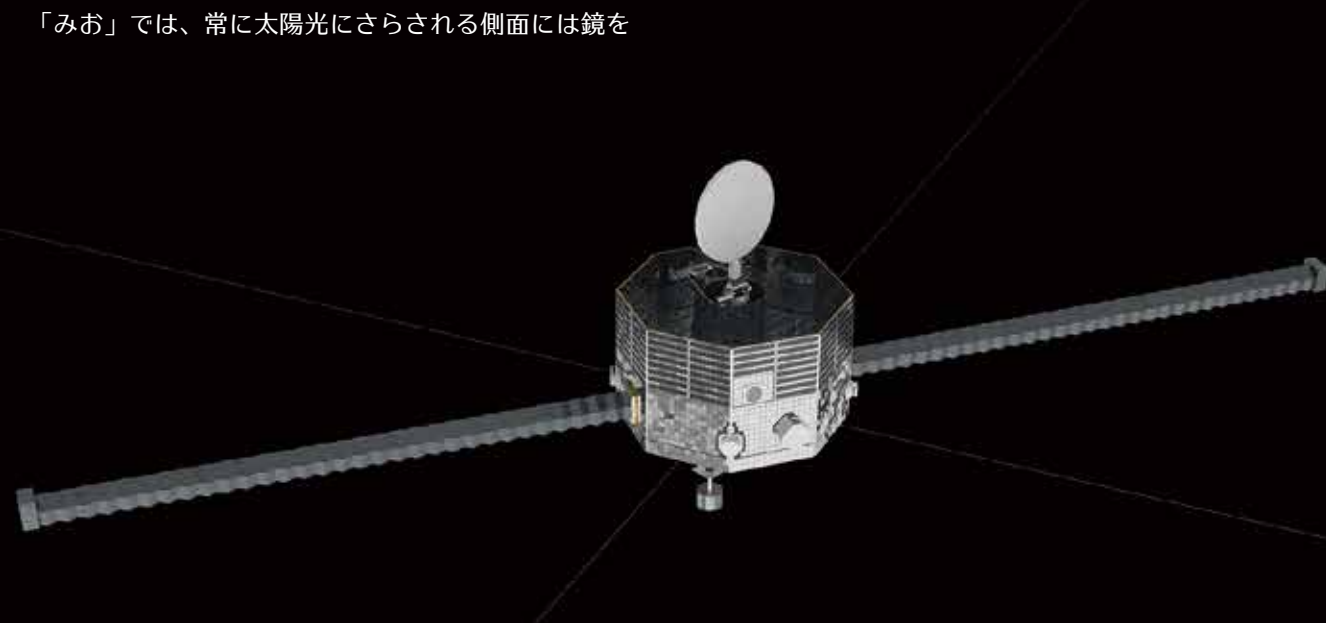
水星磁気圏探査機「みお」は JAXA が開発したスピン衛星です。磁場やプラズマ、希薄大気、ダストなど水星周辺の環境を詳細に観測することを目的としています。

水星周回では地球の約 10 倍強い太陽光を受ける上に、昼には約 430℃にも達する水星表面からの熱放射にも耐えなければなりません。

「みお」では、常に太陽光にさらされる側面には鏡を

多用し、反射によって少しでも熱の吸収を減らすとともに宇宙空間への放熱効率を上げています。そのため過酷な熱環境である水星で観測を行うための様々な工夫が凝らされています。

また太陽電池の裏側には機器を配置していません。太陽電池は黒色のためどうしても温度が高くなるからです。



©ESA/ATG medialab

「みお」に搭載されている科学観測装置	観測内容
プラズマ・粒子観測装置：MPPE (Mercury Plasma Particle Experiment)	計 7 つのセンサーをもち、水星周辺における様々なエネルギーの電子・イオン・高速中性粒子を計測。
磁力計：MGF (Magnetic Field Investigation)	水星本体・磁気圏・太陽風の磁場を計測。
プラズマ波動・電場観測装置：PWI (Plasma Wave Investigation)	水星磁気圏および太陽風における電場・電磁波動・電波を観測。
ダスト計測器：MDM (Mercury Dust Monitor)	太陽系内縁である水星軌道上での惑星間ダストや水星本体から放出されるダストを検出。
ナトリウム大気カメラ：MSASI (Mercury Sodium Atmosphere Spectral Imager)	水星の希薄なナトリウム大気の分布と変動を分光撮像。

姿勢	スピン安定 (4 秒周期)
形状・サイズ	直径 1.8m の円に内接する八角形柱型。高さ 2.4m(アンテナ含む)。 水星軌道上ではワイヤアンテナ 4 本 (各 15m) と磁場計測用マスト 2 本(各 5m)をそれぞれ進展する。
重量	255kg



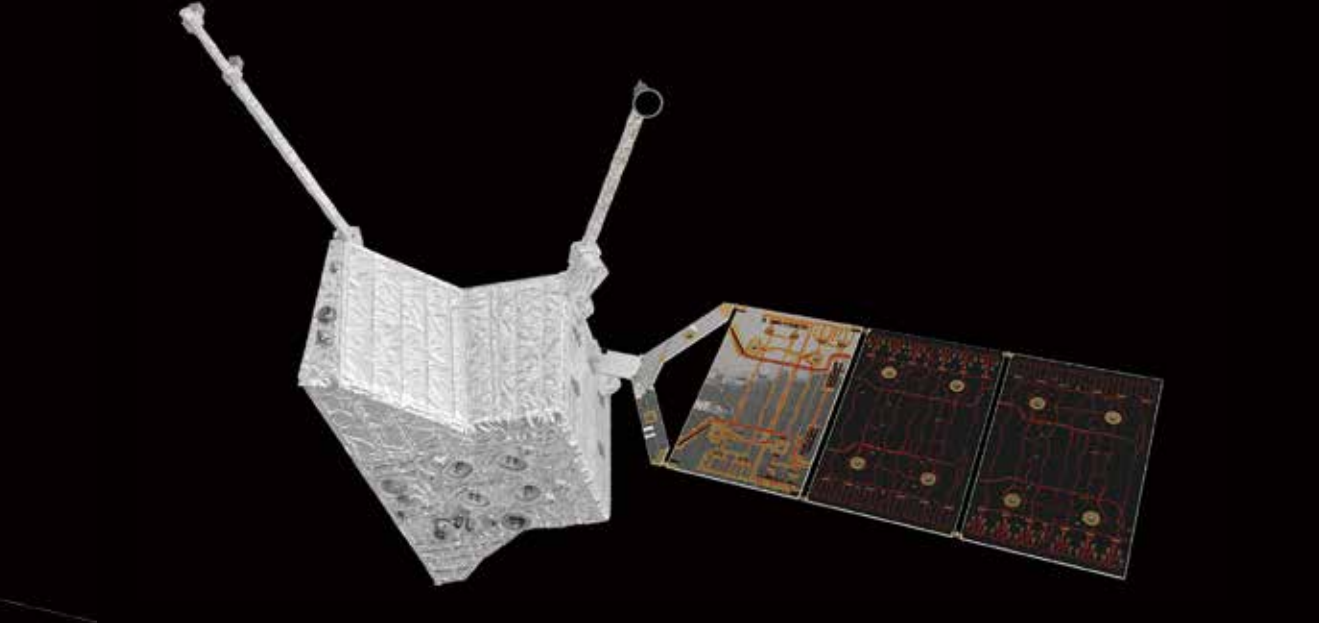
European Space Agency

MPO

Mercury Planetary Orbiter

水星表面探査機（MPO）は ESA が開発した 3 軸制御衛星です。水星の表面（地形、鉱物・化学組成）や内部（重力場、磁場）を詳細に観測することを目的としています。

強力な太陽光に対しては、常に耐熱シールドの面が向くように姿勢を制御し、冷却を必要とする機器などを含めて探査機本体の温度を低く保つ設計をとっています。



©ESA/ATG medialab

MPO に搭載されている科学観測装置	
レーザー高度計：BELA (BepiColombo Laser Altimeter)	Ka 帯送信機：MORE (Mercury Orbiter Radio science Experiment)
加速度計：ISA (Italian Spring Accelerometer)	紫外線分光撮像器：PHEBUS (Probing of Hermean Exosphere by Ultraviolet Spectroscopy)
磁力計：MPO-MAG (Magnetic Field Investigation)	中性粒子・イオン観測装置：SERENA (Search for Exosphere Refilling and Emitted Neutral Abundances)
赤外線分光撮像器：MERTIS (Mercury Radiometer and Thermal Imaging Spectrometer)	分光・撮像複合カメラ：SIMBIO-SYS (Spectrometers and Imagers for MPO BepiColombo Integrated Observatory)
ガンマ線・中性子線検出器：MGNS (Mercury Gamma-Ray and Neutron Spectrometer)	太陽風モニター：SIXS (Solar Intensity X-ray and particle Spectrometer)
X 線分光器：MIXS (Mercury Imaging X-ray Spectrometer)	

姿勢	三軸制御
形状・サイズ	2.4 × 2.2 × 1.7m。 打上げ後に太陽電池パドル（7.5m）を展開する。
重量	1230kg

水星への旅

水星探査： 困難の多い探査

水星は実は探査が困難な惑星です。たどりつくために最も多くのエネルギーが必要な惑星だからです。そのため、これまで水星へ行ったことがある探査機はマリナー 10 号とメッセンジャーの2機のみで、水星周回軌道に投入されたのはメッセンジャーだけとなります。BepiColombo の水星への道のりも険しく、水星へたどり着くのに必要な膨大なエネルギーを賄うために合計9回もの惑星スイングバイを行います。これは惑星探査機としては史上最多です。



©NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/
Carnegie Institution of Washington

水星スイングバイ

4. 2021年10月2日
 5. 2022年6月23日
 6. 2023年6月20日
 7. 2024年9月5日
 8. 2024年12月2日
 9. 2025年1月9日
- 合計9回の惑星スイングバイを実施

2025年12月5日、水星周回軌道投入。

水星までたどり着く カギとなる技術：スイングバイ

探査機が惑星の近くを通過すると、惑星の重力によって探査機の進む方向が変わったり加速・減速したりします。このように惑星の重力を利用して探査機の変える航法をスイングバイといいます。

スイングバイを利用することで燃料を使わずに探査機を運航することができます。今では多くの惑星探査機がスイングバイを利用して目的の惑星へ向かいます。

なぜ到着まで 約7年もかかるのか？

地球と水星の距離は最も近いときで約0.5天文単位、最も遠いときでも約1.5天文単位であり、木星までの距離が4～6天文単位であることと比べてもそれほど遠い距離ではありません。

それではなぜ到着まで7年もかかるのでしょうか？その要因はスイングバイ回数の多さにあります。探査機をスイングバイさせるためには惑星に近づくタイミングを待たなければならず、そのために太陽の周りを何周することもあります。決して地球からの距離が遠いために7年もかかるわけではなく、スイングバイのための待ち時間が長いためにこれだけの期間を要してしまうのです。



©ESA

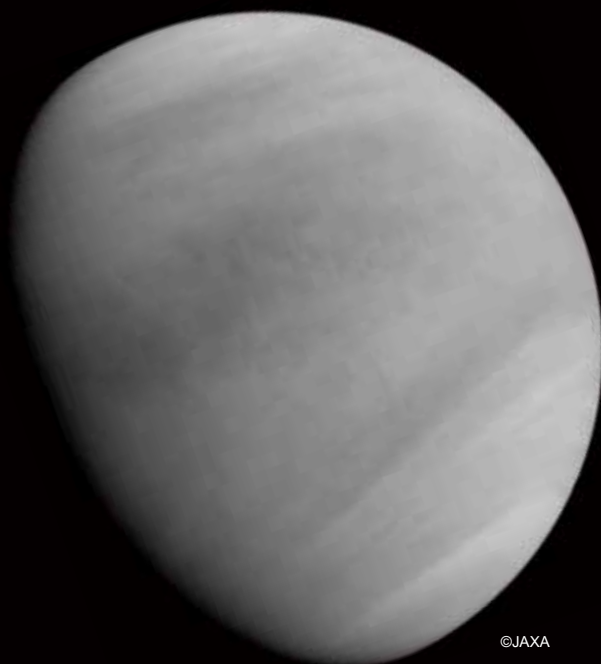
▲アリアン5ロケット

2018年10月

ー 打ち上げ（日本時間）

地球スイングバイ

1. 2020年4月13日



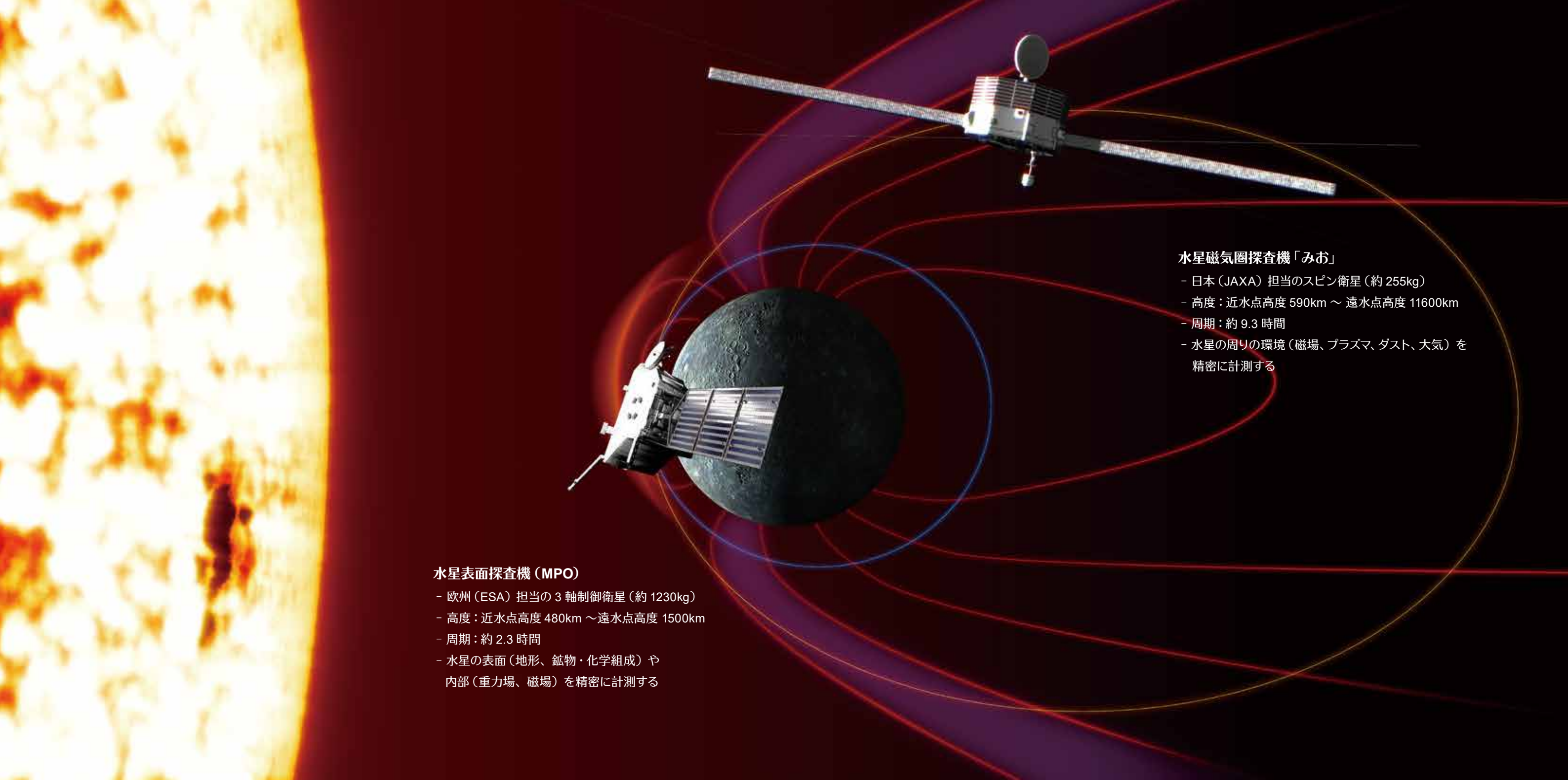
©JAXA

金星スイングバイ

2. 2020年10月16日
3. 2021年8月11日

©JAXA/NHK

※予定日時は2018年9月現在のものです



水星表面探査機（MPO）

- 欧州（ESA）担当の3軸制御衛星（約1230kg）
- 高度：近水点高度480km～遠水点高度1500km
- 周期：約2.3時間
- 水星の表面（地形、鉱物・化学組成）や内部（重力場、磁場）を精密に計測する

水星磁気圏探査機「みお」

- 日本（JAXA）担当のスピン衛星（約255kg）
- 高度：近水点高度590km～遠水点高度11600km
- 周期：約9.3時間
- 水星の周りの環境（磁場、プラズマ、ダスト、大気）を精密に計測する

観測 水星での

2機の探査機を異なる軌道へ投入

BepiColomboは水星へ到着すると、いよいよ世界初となる2機の探査機の水星周回軌道への同時投入を行います。役目を終えた電気推進モジュールを分離した状態で水星周回軌道投入を行い、まず「みお」を遠水点高度の高い長楕円軌道へ投入します。

その後「みお」を護っていたサンシールドも分離したMPOは徐々に高度を下げ、高度の低い軌道へと投入されます。以降、「みお」とMPOは同じ軌道面上を異なる高度で周回しながら、それぞれ科学観測を行います。

「みお」の観測

「みお」に搭載されたプラズマ・粒子観測装置、磁力計およびプラズマ波動・電場観測装置は連動して観測を行い、水星周辺の宇宙環境、特に磁気圏で起こる様々な物理現象を捉えます。

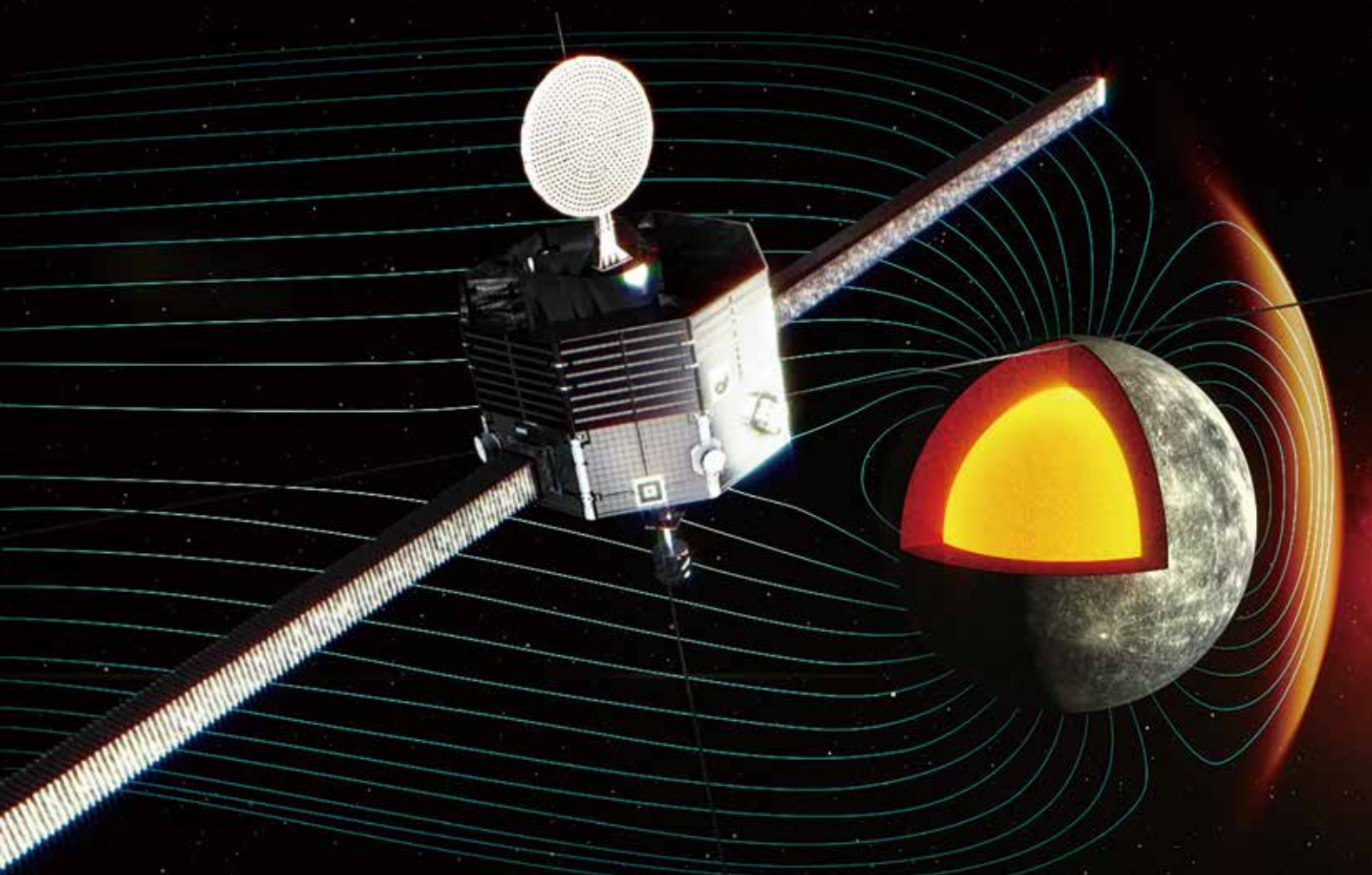
またナトリウム大気カメラは水星がもつ希薄なナトリウムの大気の発光を捉え、その分布と時間変化から大気生成メカニズムの謎を明らかにします。さらに水星ダスト計測器はほとんど未知である太陽系最内縁でのダスト分布を観測します。

2機同時観測の強み

2015年に観測を終えたメッセンジャー探査機との大きな違いは、異なる軌道を周回する2機による同時観測にあるといえます。水星の内部で何が起きているか知るには磁場の分布を精密に測定することが重要です。

一方、水星周辺では強い太陽風により電磁場環境の乱れが引き起こされており、水星そのものがもつ磁場の測定の妨げとなります。BepiColomboでは2地点から同時に磁場を測定することで両者を切り分け、これまでよりも精密に水星内部の情報を得ることができるのです。

BepiColomboが 目指すサイエンス



周辺環境から読み解く

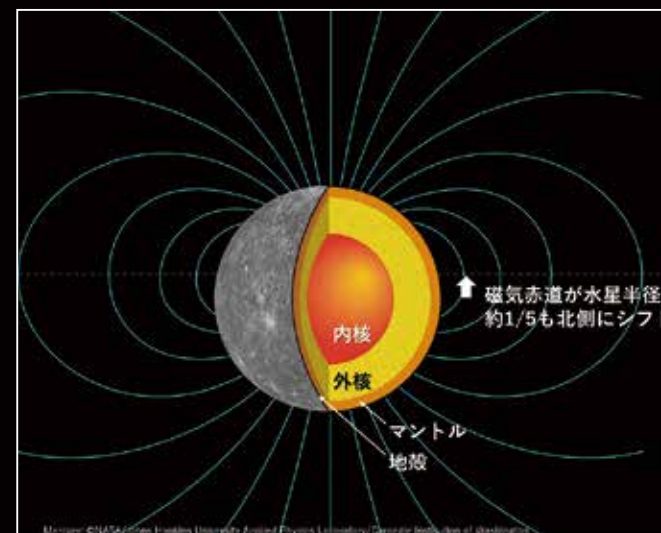
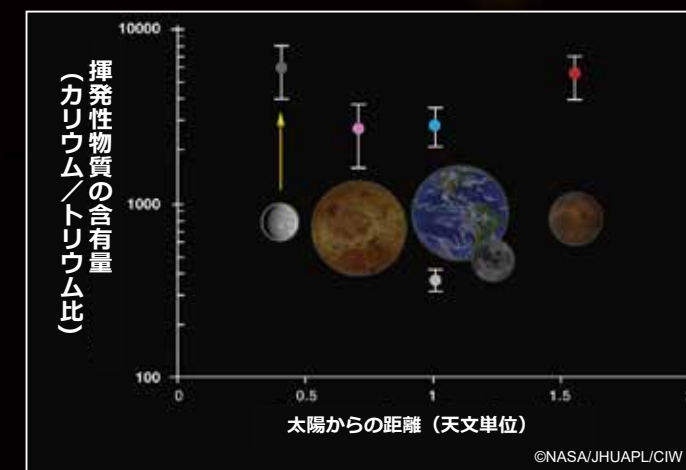
水星は太陽に最も近く、磁場をもつ惑星です。太陽系の惑星は常に太陽が放出する高速のガス流である太陽風にさらされています。地球のように惑星がもつ磁場は太陽風に対してバリアの役割をしますが、水星がもつ磁場は地球よりも弱く(1/100程度)、しかもはるかに強烈な太陽風にさらされています。

このような地球と異なる過酷な環境でどのような現象が起きているかを知ることで、惑星磁場が太陽風に対して果たす役割を明らかにします。そして将来的には、その理解は太陽系以外の惑星における生命存在可能性を探るのに役立てられると考えられています。

地質から読み解く

水星は太陽に最も近い惑星であるにもかかわらず、表面の鉱物組成には予想よりはるかに多い揮発性元素をもつことが発見されました。またメッセンジャー探査機が発見した水星特有の不思議なくぼ地も、地表から揮発性物質が抜けた痕跡ではないかと考えられています。

これらの結果は水星がいまよりも外側で生まれたことを示す可能性もあり、惑星形成論の再検討にもつながるカギを水星が握っているかもしれません。



磁場から読み解く

地球のもつ磁場の研究から、惑星が磁場を生むには内部に溶けた金属核をもち、それらが対流することで電流を発生させる必要があると考えられています。太陽系で最も小さい惑星で、冷え固まりやすいはずの水星になぜまだ溶けた金属核が存在するのかは大きな謎のままです。さらに、メッセンジャー探査機の観測により水星磁場の中心は赤道から大きく北にズれていることがわかりました。

どのような内部構造があればこのような非対称の固有磁場ができるのか? BepiColomboでは2機による詳細な磁場観測から水星内部を解き明かし、惑星「進化」の情報を読み解きます。