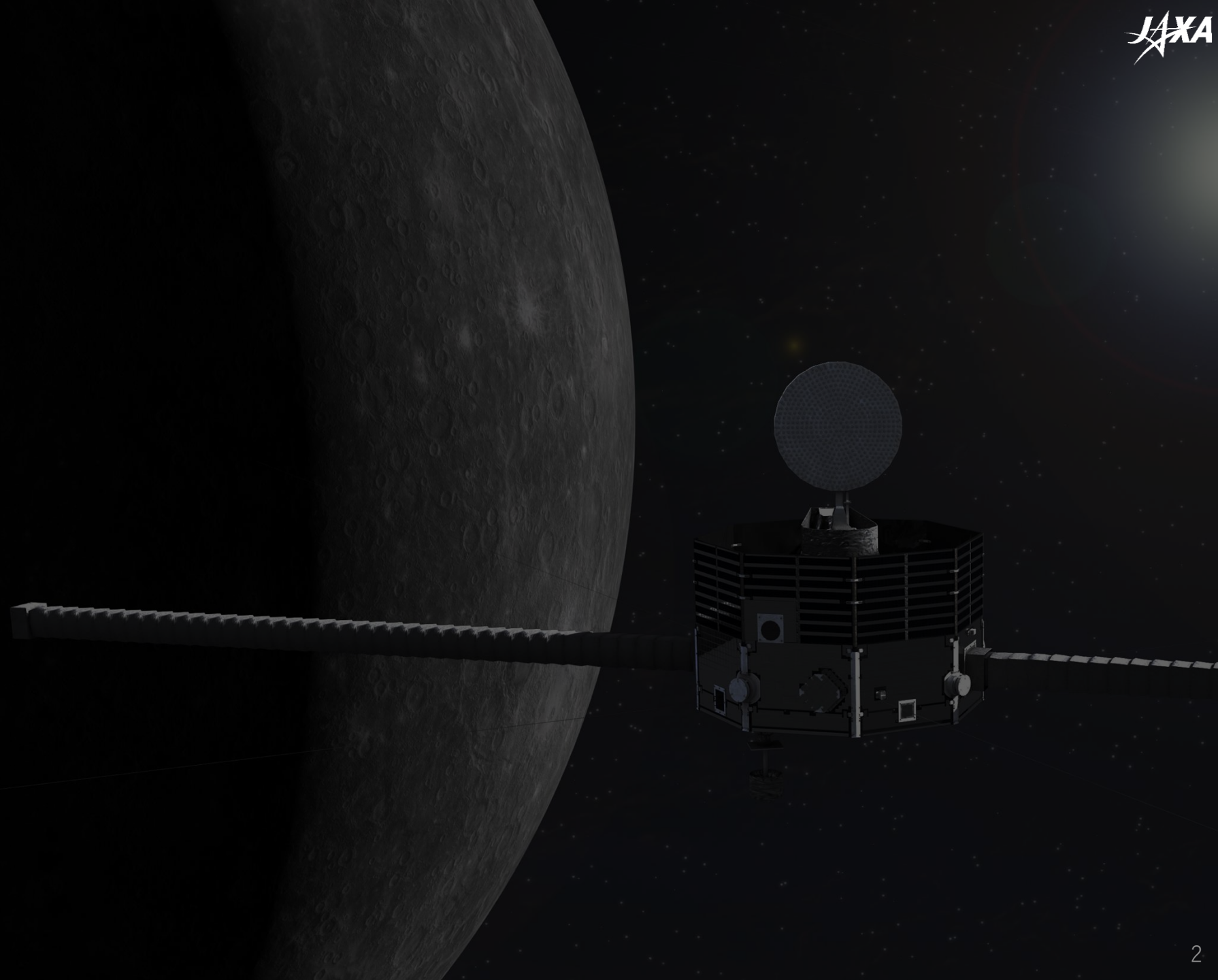


BepiColombo Project
MMO FACT SHEET

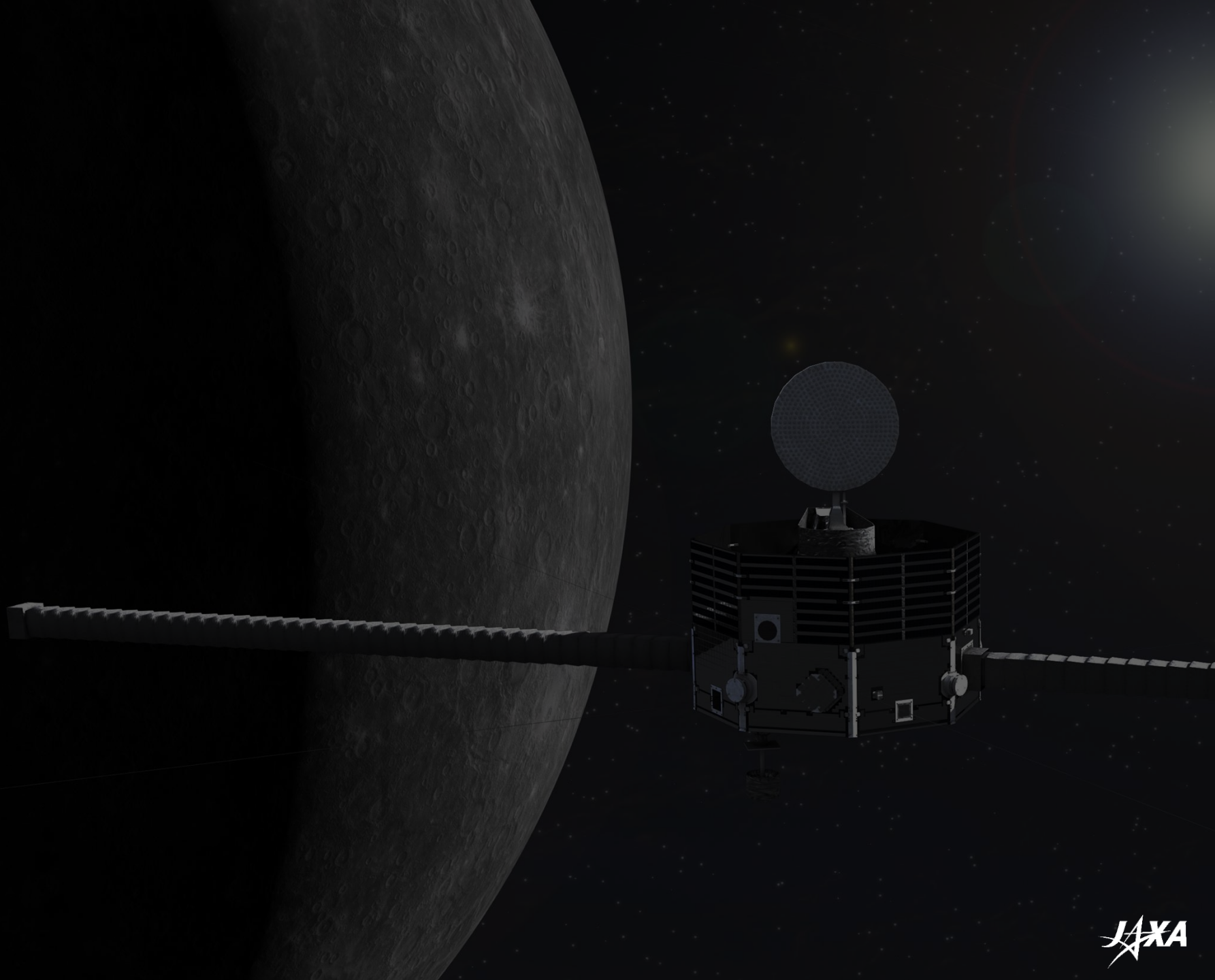
Ver. 2026年11月

0 目次

1. 概要
2. 水星探査
3. プロジェクトの経緯
4. 探査機（MMO）
5. 運用
6. マネージメント
7. トピック
8. 参考情報



1 概要



Ver. 2026年11月

1.1 ミッション目的

ミッション目的

BepiColombo（ベピコロンボ）プロジェクトは，水星の磁場・磁気圏・内部・表層を観測し，太陽系内縁部における初期惑星形成に係わる水星の起源と進化の解明を目指すと共に，惑星の磁場・磁気圏の普遍性や特異性の解明を目指すことを目的としています。

その中でJAXA（ジャクサ）が担当するMMOでは，水星固有磁場の成因，特異な磁気圏の解明，希薄大気の生成・消滅過程，太陽風との相互作用の観測を目的としています。

期待される成果と効果

地球を除き唯一の惑星固有磁場と磁気圏を持つ地球型惑星の初の総合的な精密観測により，太陽系惑星形成，惑星磁場形成要因及び太陽風と磁気圏の相互作用等についての知見獲得が図れ太陽系科学分野に大幅な飛躍をもたらし得ます。

太陽活動により変動する太陽圏・惑星圏環境の理解を進め，惑星大気プラズマのダイナミクスと進化の解明に資するものとなります。

1.1 ミッション目的

「みお」が解き明かす四つのサイエンス

1. **固有磁場の解明**

   水星のような小さな惑星は磁場を持たないと考えられていましたが、過去の探査で水星が磁場を持っていること、さらに大きく北にズレた磁場であることがわかりました。水星磁場を高精度で計測することは、磁場が作られている水星内部の金属核の情報を得る貴重な手段です。BepiColomboでは「みお」とMPOが世界初となる水星周回からの２機同時観測を行い、太陽風による激しい磁場変動と切り分けて水星固有磁場の高精度計測を実現することで、水星磁場の謎の解明と金属核の理解を目指します。

2. **地球と異なる磁気圏の解明**

   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。また地球型惑星で磁場を持っているのは地球と水星だけで、金星や火星には磁場がありません。惑星の磁場は太陽風に対してバリアの役割をすると考えられていますが、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。「みお」は、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、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。これは太陽系外惑星を含むあらゆる惑星において惑星磁場や磁気圏が惑星環境に対しどんな役割を果たすか普遍的な理解を進める上で重要なステップとなります。

3. **水星表面から出る希薄な大気の解明**

   水星にはいわゆる大気圏がありませんが、ナトリウムなどを主成分とする非常に希薄な大気が見つかっています。しかし、その主要な物理過程はいまだに理解に至っていません。ナトリウム大気の大規模な構造・変動を観測し、その生成・消滅過程を探ります。

4. **太陽近傍の惑星間空間を観測**

   「みお」は内部太陽圏探査機としても重要な役目を果たします。まだまだ観測数が少ない0.3〜0.5天文単位という内部太陽圏において、プラズマ粒子やプラズマ波動、ダストを観測し、太陽圏科学の理解の促進に貢献します。

1.2 ミッション目標

BepiColombo/MMOのサクセスクライテリア

	ミニマムサクセス	フルサクセス	エクストラサクセス
磁場	磁場計測器により88日（水星の公転周期）以上の観測を実施し，固有磁場の有無を確定	1地球年のうちに１nT以下または2%以下の計測精度，200 kmスケールでの全球（80%以上）観測を実施し，磁場起源の推定に資するデータの取得	内部起源・外部起源の磁場の分離 内部構造の推定（MPOとの共同観測）
磁気圏	粒子計測器，又は波動計測器により88日以上の観測を実施し，磁気圏構造の概要を確定	1地球年のうちに密度温度構造を水星半径の数分の１程度の分解能で求め，太陽風条件による相違を理解する また，10秒以下の速い時間変動を観測し，ダイナミクスを把握する	磁気圏現象の普遍性と水星磁気圏の特異性の理解
希薄大気	-	1地球年のうちに水星軌道の4分割以上の領域において，数分程度の間隔で数時間以上継続的に大気分布の時間変動を観測し，希薄大気構造に対する太陽光，太陽風の影響を明らかにする	ダスト分布や，MPOとの共同観測による希薄大気の生成・消滅過程の理解
衝撃波	-	-	地球軌道では観測できない高（～40）・低マッハ数（＜1）衝撃波の詳細観測

1.3 ESAとの国際協力

BepiColomboは日本の宇宙航空研究開発機構（JAXA）とヨーロッパ宇宙機関（ESA）が共同で進める国際水星探査計画です。

JAXAが水星磁気圏探査機「みお」の開発と運用を担当し，ESAは水星表面探査機（MPO）のほか推進モジュール（MTM）やMMOサンシールド（MOSIF）の開発と運用を担当します。

「みお」やMPOの各観測機器の開発チームも多くがそれぞれ国際協力の形で編成されており，国際色豊かなメンバーで進められています。

表 JAXAとESAの分担

機関	担当
JAXA	MMO（みお）の開発，運用（JAXAのアンテナ局を使用）
ESA	MPOの開発，運用（ESAのアンテナ局を使用） MTMの開発 MOSIFの開発 ロケット（ARIANE５）の打上げ 水星到着までのMMO+MPO+MTMの運用（**ESAのアンテナ局を使用**） （ESAのアンテナ局＝セブレロス局、マラルグエ局、ニューノーシア局）

1.3 ESAとの国際協力

表 国際協力プロジェクトまでの道のり

年月	出来事
1997.06	日本側で水星探査ワーキンググループ結成
1999.11	ESAから水星探査の共同検討の提案
2000.09	ISAS（旧文部省宇宙科学研究所）が国際共同水星探査への参加表明
2000.10	ESAにおいてBepiColomboがコーナーストーンミッションとして採択される
2003.07	ISASにおいて承認される
2003.10	NASDA・ISAS・NALの3機関が統合されJAXAに
	以降，JAXA-ESA共同水星探査計画として開発が進められた

1.4 全体スケジュール

※ 日付は世界標準時

FY2003～2004

► 基礎開発研究

FY2004～2009

► 衛星試作

FY2009～2014

► 衛星製作

FY2014～2015

► 総合試験

FY2015～2017

► 母船結合試験

2018.10.20

► 打上げ

► Ariane5（クルーズ）

2020.04.10

► 地球スイングバイ

2020.10.15

► 金星スイングバイ#1

2021.08.10

► 金星スイングバイ#2

2021.10.01

► 水星スイングバイ#1

2022.06.23

► 水星スイングバイ#2

2023.06.19

► 水星スイングバイ#3

2024.09.04

► 水星スイングバイ#4

2024.12.01

► 水星スイングバイ#5

2025.01.08

► 水星スイングバイ#6

2026.11.21（予定）【日本時間では11/22】

► 水星周回軌道到着

2026.12.9（予定）【日本時間では12/10】

► MMO分離

2026.12.09～2027.1月中旬（予定）

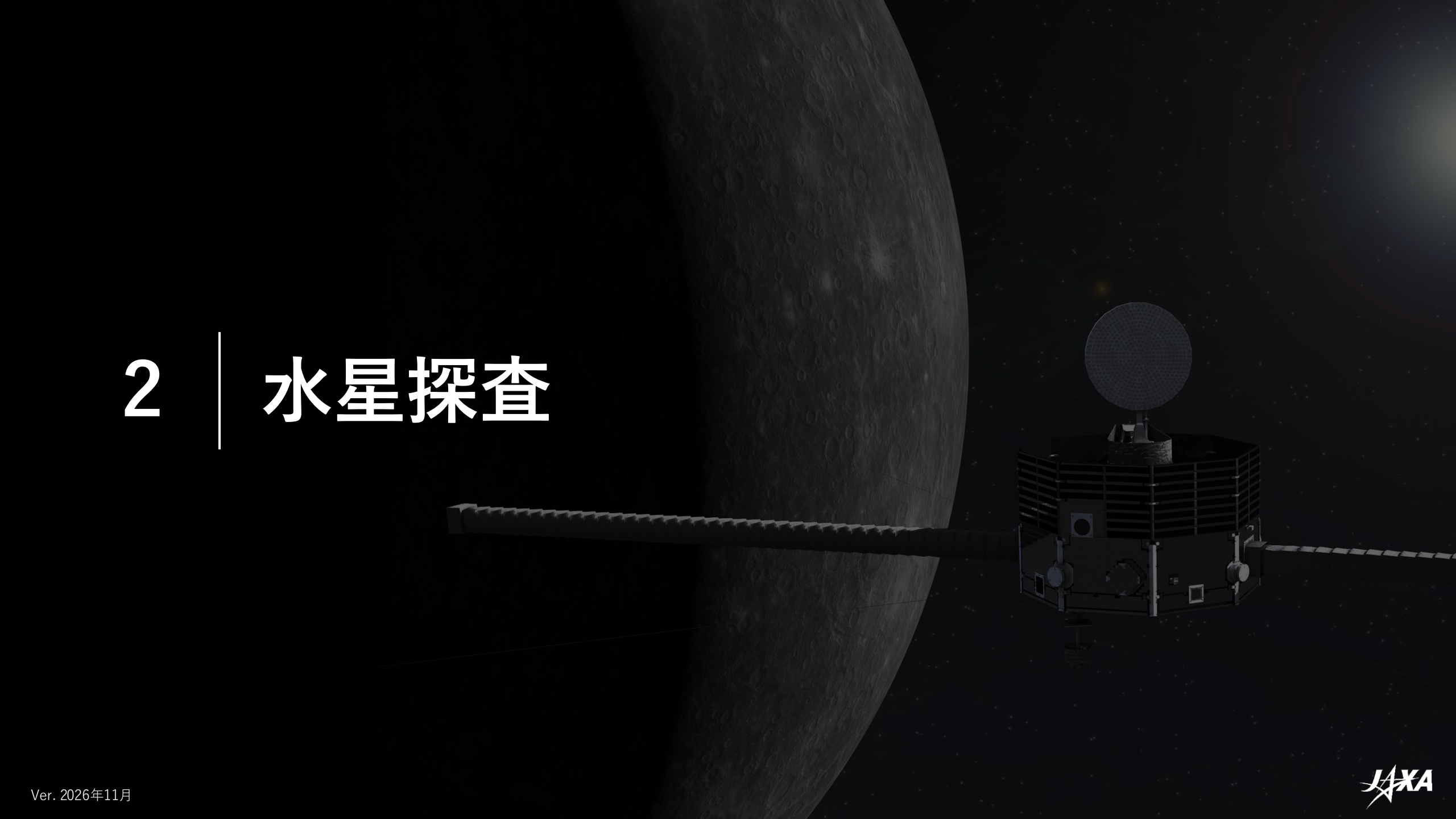
► 分離伸展運用

2027.1月中旬～2027.4月（予定）

► 初期チェックアウト運用

2027.4月（予定）

► 定常運用開始



2 水星探査

Ver. 2026年11月

2.1 水星探査の難しさ

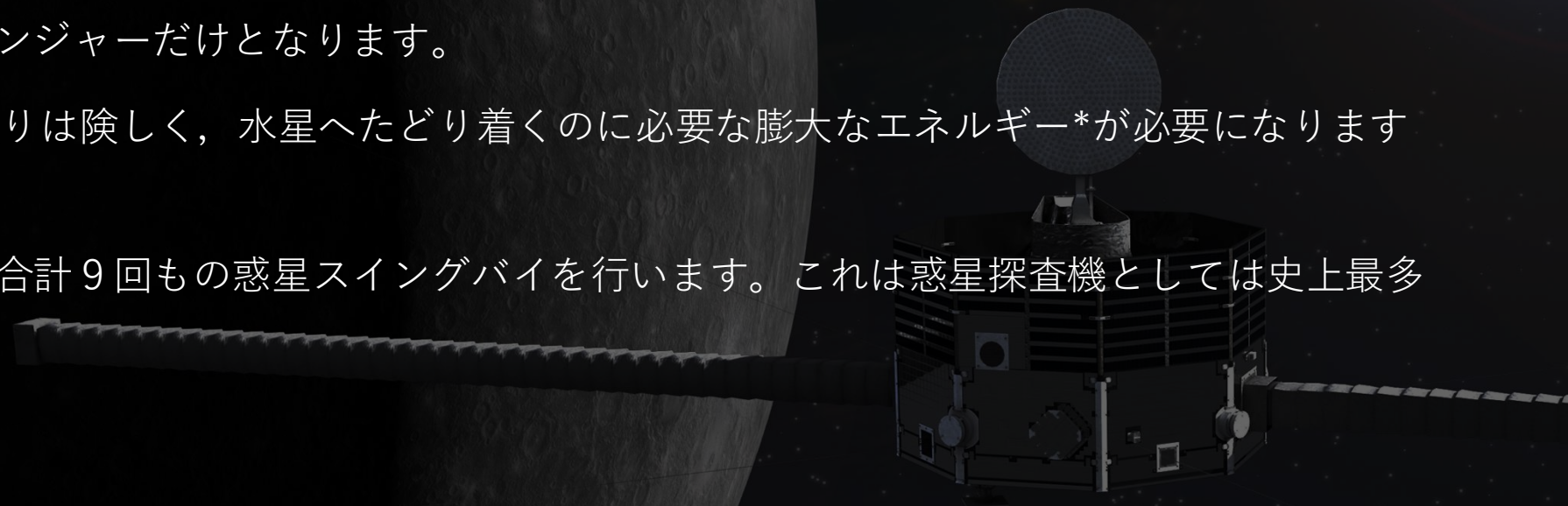
水星は実は探査が困難な惑星です

たどりつくために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の水星への道のりは険しく，水星へたどり着くのに必要な膨大なエネルギー*が必要になります（*次頁に解説）。

減速の燃料を節約するために合計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。



惑星スイングバイとは

惑星スイングバイとは，惑星の重力によって探査機の進む方向を変えたり加速・減速したりする航法です。

► スイングバイを利用すると，燃料を使わずに探査機を運航できるので，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。

2.1 水星探査の難しさ

「水星へたどり着くのに必要な膨大なエネルギーが必要」の解説

地球は太陽の周りを秒速約30 kmという高速で公転しています。地球が太陽の周りを円を描いて公転するのは，太陽からの「引力」と公転速度による「遠心力」が釣り合っているためです。

その地球から打ち上げる探査機は，地球と同じ速度を持ったままでは太陽に近づけません。水星にたどり着くためには以下の2段階が必要です。

- ► ① 大きく公転速度を落として（減速ΔV），水星軌道に接する楕円軌道に移る（この軌道のことをホーマン軌道と言います）
- ► ② 水星軌道に到達したら，再度大きく速度を落として（減速ΔV）水星の重力圏に捕まえてもらう（水星の公転軌道に移る）

①はロケットまたは探査機が行います。②はロケットから切り離された後の出来事なので探査機が行う必要があります。

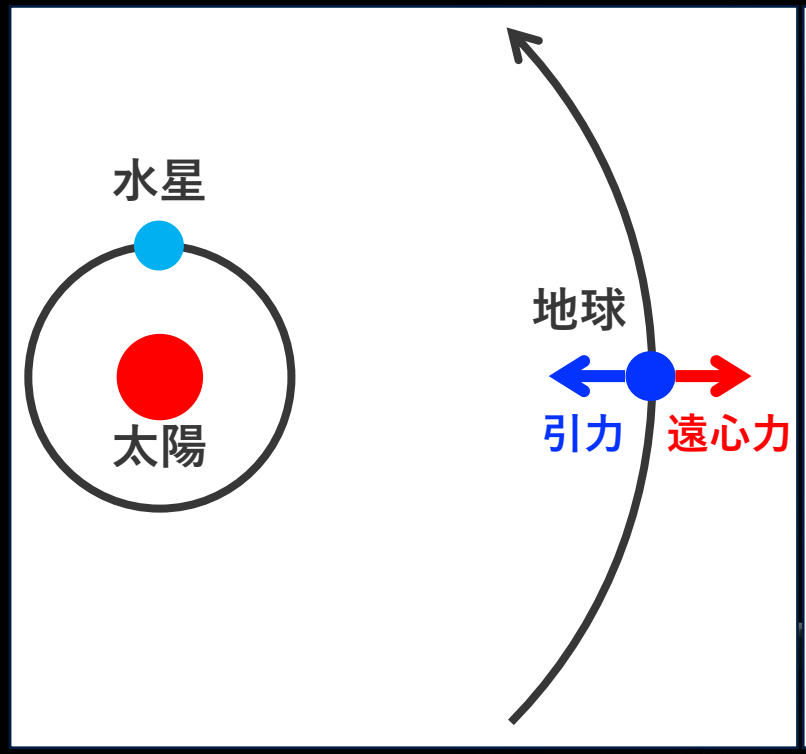
この二段階の減速には非常に大きなエネルギーが必要であり，ロケットにも探査機にも非現実的なほど大きな加速能力を求めることになってしまいます。（莫大な燃料を搭載した巨大な探査機を作らなければならなくなってしまう）

減速と加速は向きが違うだけです。冥王星に到達*するよりも，水星に到達*する方がエネルギーが必要になります。（*それぞれの太陽周回軌道への到達の意）

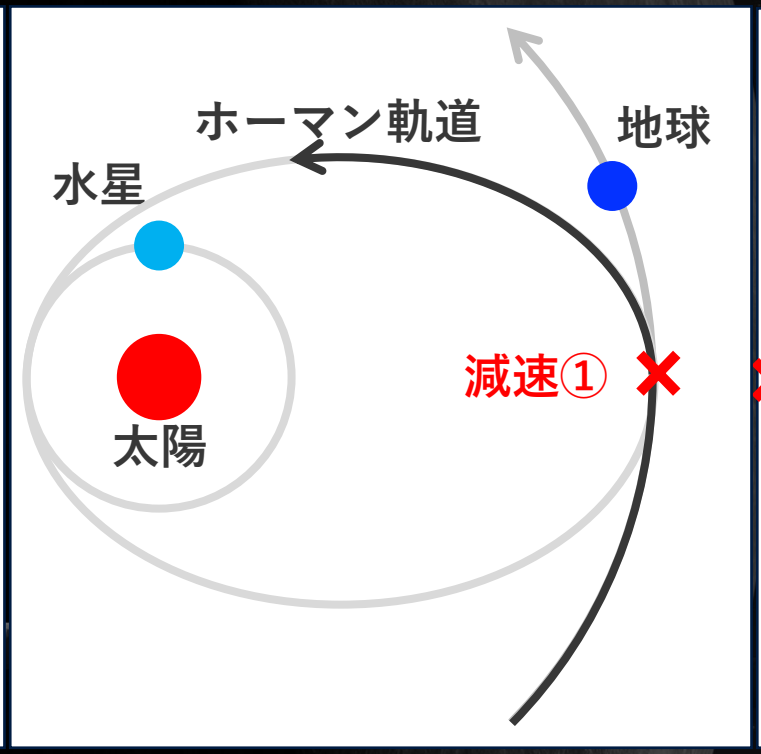
- ► 水星到達：ΔV＝計約17 km/s，冥王星到達：ΔV＝計約16 km/s（松尾 1984より）
  - https://www.jstage.jst.go.jp/article/sicejl1962/23/1/23_1_100/_article/-char/ja/

そこでBepiColomboでは，推薬の代わりに惑星によるスイングバイで何度も減速させて，水星に到達させます。

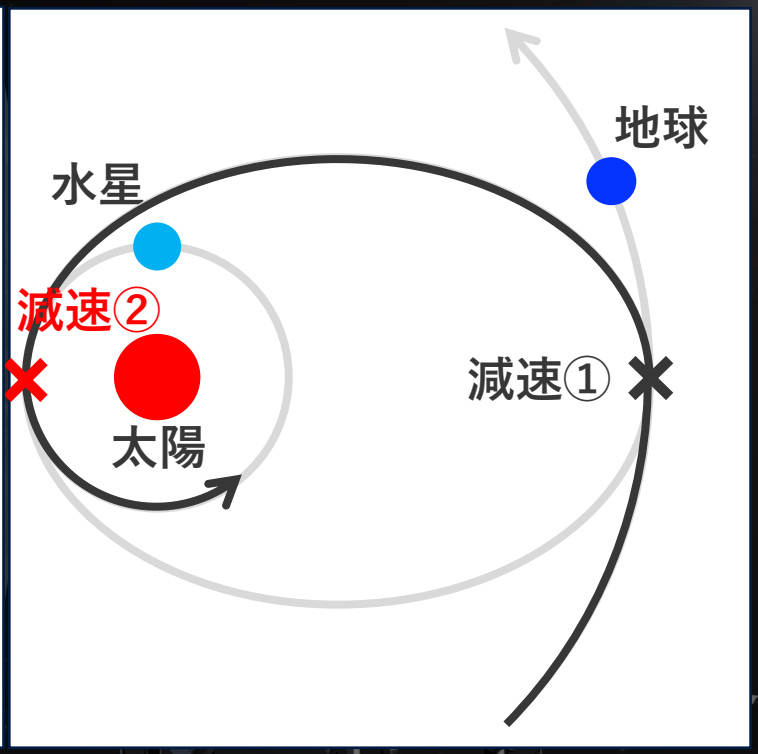
2.1 水星探査の難しさ



地球軌道を公転しているときは，「引力」と「遠心力」が釣り合っているため，太陽には近づけない。



① 減速して水星軌道に接する楕円軌道に移る（ホーマン軌道）。



② 水星軌道に到達したら，再度減速して水星公転軌道に移る。

2.1 水星探査の難しさ

参考

Why does it take so long to get to Mercury?（ESA）

- https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/BepiColombo/Why_does_it_take_so_long_to_get_to_Mercury

BepiColombo’s journey to Mercury（ESA）

- https://youtu.be/AHjqHwOOCDA

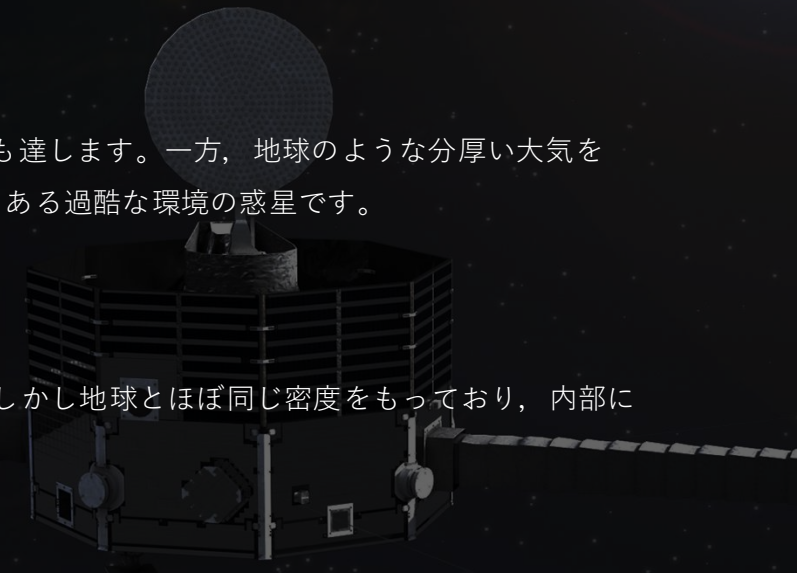
「地球1回，金星２回，水星６回：BepiColombo 水星までの壮大な旅路」

- https://cosmos.isas.jaxa.jp/ja/1-earth-2-venus-6-mercury-the-route-of-bepicolombo-to-reach-mercury-ja/

2.2 水星の環境

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。地球のような分厚い大気に守られていないので，表面は隕石によるクレーターだらけ。水星のクレーターのほとんどは芸術家の名前がつけられています（ベートーヴェン，バッハ，ブラームス，ピカソ，ゴッホ，葛飾北斎，紫式部，夏目漱石，松尾芭蕉，世阿弥など）



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側で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2,440km）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。さらに，磁気赤道が水星半径の５分の１も北側にシフトしていることがわかっており，そのメカニズムはわかっていません。

参考：https://mio.isas.jaxa.jp/mercury/

2.3 水星の謎

① 誕生の謎：どうやって生まれた？

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2,440km）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。

小さいのに重すぎる：サイズは小さいのにズバ抜けて密度が高い

② 進化の謎：どうやって育った？

現在，地球型惑星で大規模な磁場をもっているのは，地球と水星だけ

磁場をもつには，内部に溶けて対流する金属核が必要
水星は小さいため冷めやすく，内部はとっくに冷え固まっていて磁場はないというのが定説だったが，マリナー10号が磁場を発見した。なぜ磁場が存在するのか未だに分かっていない。

さらに，磁場の中心が水星半径の1/5も北にずれていることを，メッセンジャー探査機が発見した。どんな内部構造ならばこの非対称を生み出せるのか謎。
メッセンジャー探査機では南半球の詳細観測が不可能だったため，ベピコロンボに期待！

③ 環境の謎：いま，何が起きている？

水星は太陽に最も近く，水星磁場は地球よりも弱いため，強烈な太陽風にさらされている。惑星にどんな影響があるのか謎。

水星にも非常に希薄ではあるが大気が存在することが確認された（地表面からナトリウムなどのガスが宇宙空間へ飛び出している）。どのようにして大気が生成されているのか未解明。

2.4 過去の水星探査ミッションと成果

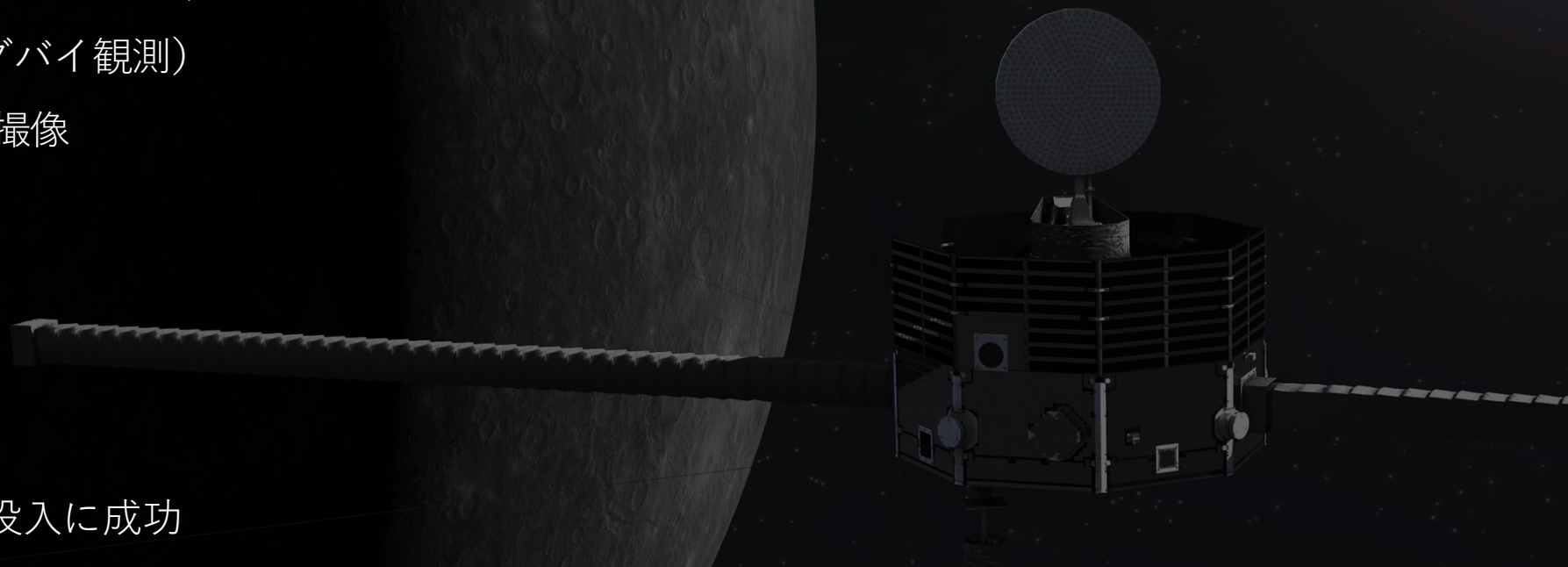
これまでの水星探査はわずか…

マリナー10号

- ► 世界初の水星探査機（1974-1975年）
- ► 3回水星へ接近（スイングバイ観測）
- ► 世界で初めての水星表面撮像
- ► 磁場の存在を発見

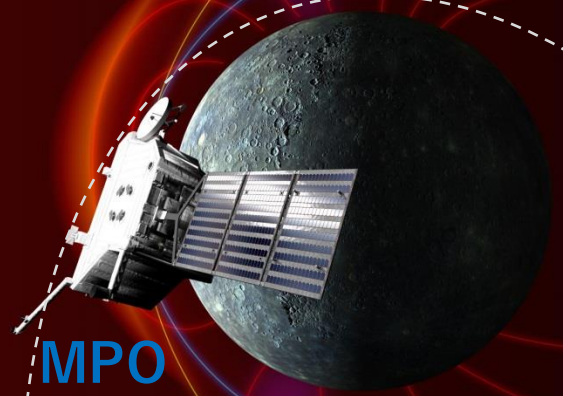
メッセンジャー

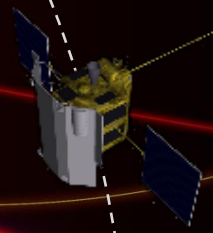
- ► 世界初の水星周回探査機
- ► 2004年8月打ち上げ
- ► 2011年3月水星周回軌道投入に成功
- ► 2015年4月水星へ制御落下
  - 4年もの定常的な観測を成し遂げ，多くの発見と新たな謎をもたらした



2.5 BepiColomboの特徴







磁気圏・環境探査に特化した「みお」

・スピン制御による全方位観測

・メッセンジャーには搭載されていない新たな観測装置

→低エネルギー電子・イオンの同時観測、高速中性粒子・プラズマ波動・ダストの観測は世界初

南北対称な極軌道

・メッセンジャーは北半球でのみ水星近傍観測

→みお、MPOによる南半球の詳細観測に期待

２機同時観測

・太陽風に起因する磁気圏擾乱を把握

・水星固有磁場をより正確に抽出

2.5 BepiColomboの特徴

【2機同時観測】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ります。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では史上初めて 2 地点から同時に観測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られるとともに、太陽風に対する水星磁気圏の応答も理解することができるのです。

【南北対称な極軌道】北半球でのみ水星に接近する長楕円軌道だったメッセンジャー探査機と違い、BepiColomboでは「みお」とMPO両機とも南北に対称な軌道をもち、水星周回から南半球の近傍観測が初めて可能となります。南北に非対称な特徴をもつ水星表面や磁場、磁気圏の詳細をBepiColomboから明らかにすることが期待されます。

【磁気圏・環境探査に特化した「みお」】水星磁気圏探査機「みお」はその名の通り水星磁気圏や周辺宇宙環境の観測に特化した設計になっています。例えば「みお」は磁気圏探査に最適なプラットフォームであるスピン衛星として水星周回軌道に投入される世界初の探査機となります。また、過去のマリナー10号やメッセンジャーでは搭載されてこなかった、主要な磁気圏プラズマである低エネルギー電子とイオンの同時観測や、高速中性粒子、プラズマ波動、ダストの観測などは「みお」によって世界で初めて実施されます。

2.6 MMOの科学観測

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・イオンおよび高速中性粒子を計測。

磁力計（MGF：Magnetic Field Investigation）

水星本体，磁気圏，および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。

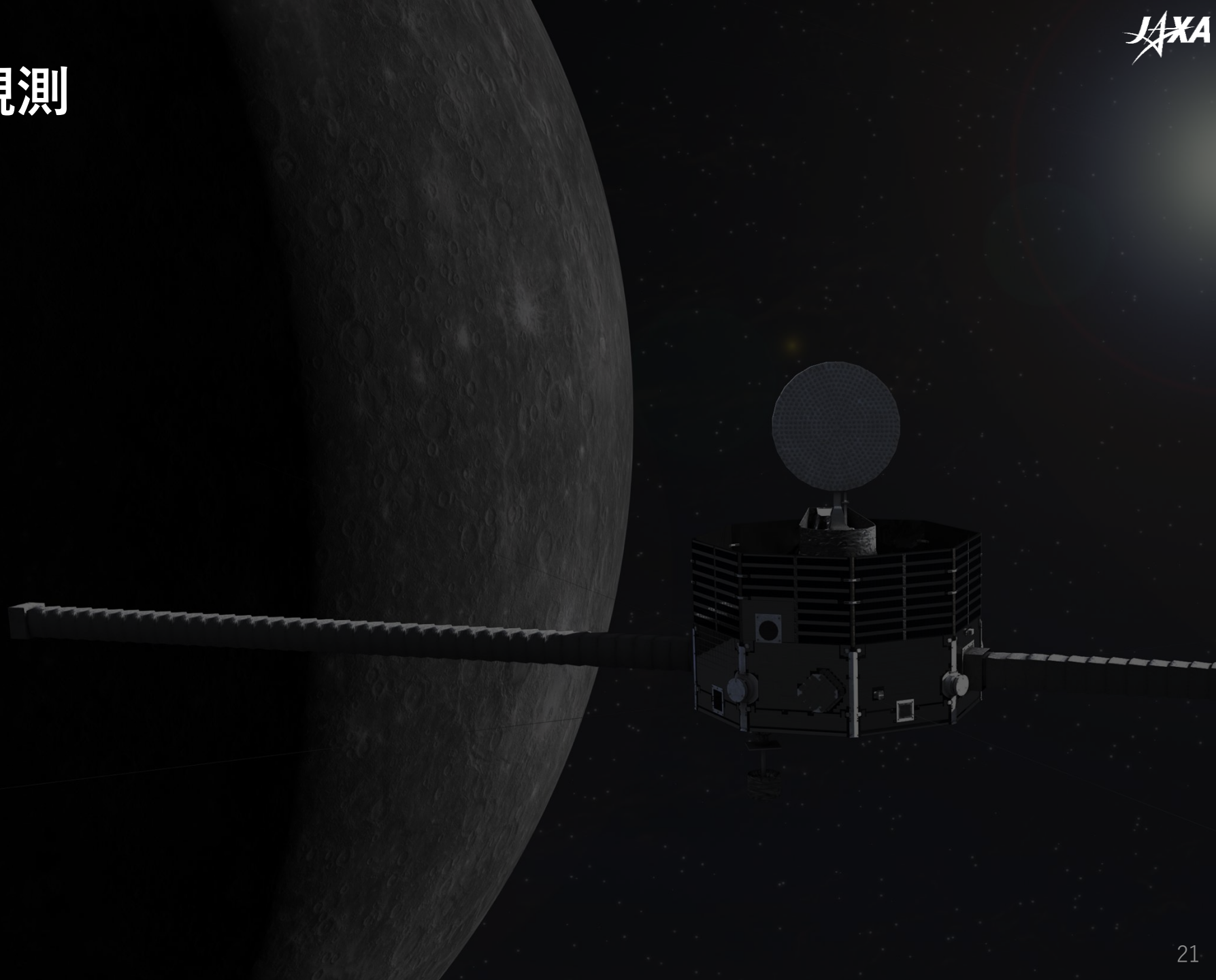
ダスト計測器（MDM：Mercury Dust Monitor）

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。

ナトリウム大気分光カメラ（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。

2.7 MPOの科学観測



レーザー高度計

Ka帯送信機

加速度計

磁力計

赤外線分光撮像器

ガンマ線・中性子線検出器

中性粒子・イオン観測装置

分光・撮像複合カメラ

太陽風モニター

X線分光器



3 プロジェクトの経緯

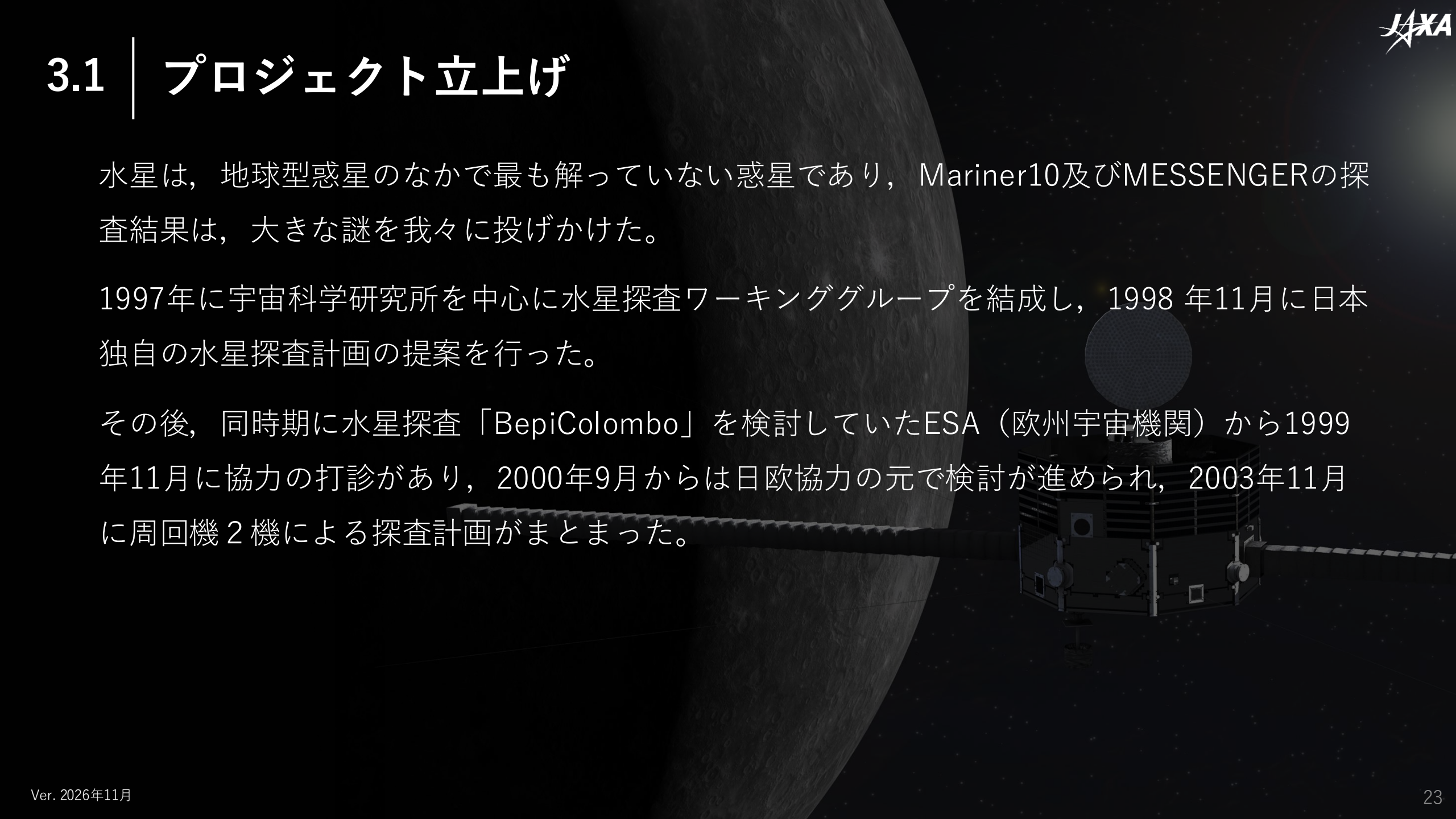
Ver. 2026年11月

3.1 プロジェクト立上げ

水星は，地球型惑星のなかで最も解っていない惑星であり，Mariner10及びMESSENGERの探査結果は，大きな謎を我々に投げかけた。

1997年に宇宙科学研究所を中心に水星探査ワーキンググループを結成し，1998 年11月に日本独自の水星探査計画の提案を行った。

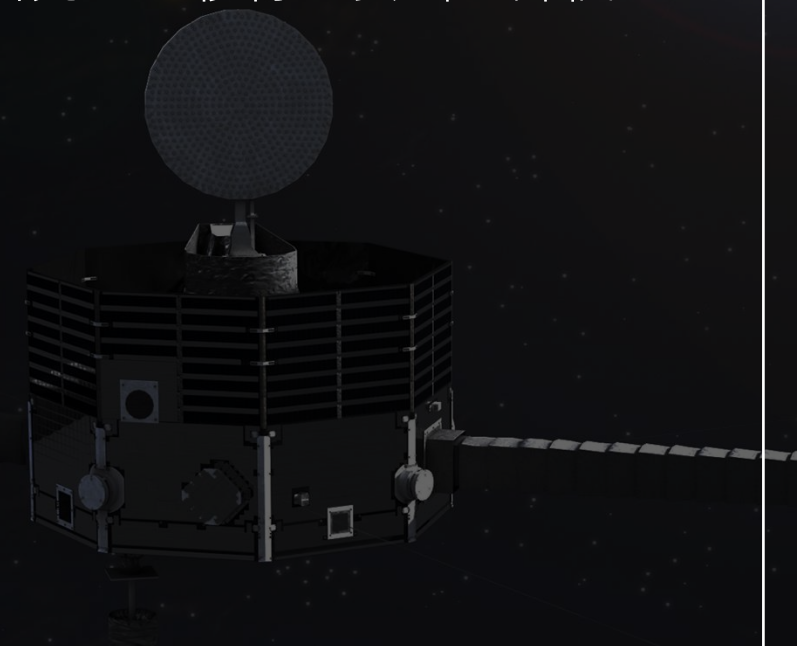
その後，同時期に水星探査「BepiColombo」を検討していたESA（欧州宇宙機関）から1999年11月に協力の打診があり，2000年9月からは日欧協力の元で検討が進められ，2003年11月に周回機２機による探査計画がまとまった。



3.2 開発フェーズ

1997年	水星探査ワーキンググループ結成
1999年	ESAから協力の打診があり，日欧で検討実施
2003年6月	宇宙開発委員会の計画・評価部会にて開発研究への移行が妥当と評価
2003年7月	BepiColomboプロジェクト開始
2008年3月	基本設計審査完了
2011年11月	詳細設計審査完了
2015年3月	総合試験完了，開発完了審査完了
2015年4月	ESA（ESTEC）に輸送
2018年3月	母船結合試験完了，射場輸送前確認会完了
2018年5月	射場輸送完了
2018年10月20日	打ち上げ成功

注：日付はUTC

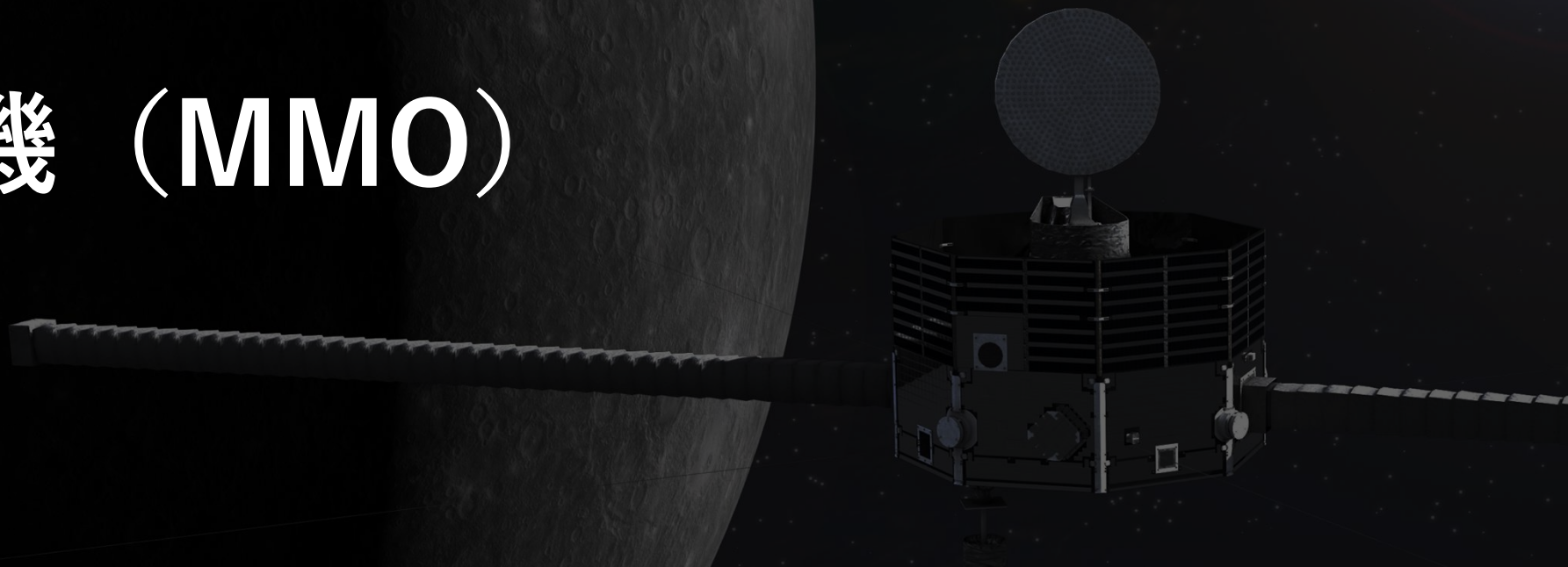


（参考：総開発費156億円）

3.3 運用フェーズ（MMO分離まで）

2020/4/10	地球フライバイ１
2020/10/15	金星フライバイ１
2021/8/10	金星フライバイ２
2021/10/2	水星フライバイ１
2022/6/23	水星フライバイ２
2023/6/19	水星フライバイ３
2024/9/5	水星フライバイ４
2024/4	MTM電源系不具合発生（水星到着が2025年12月→2026年11月に変更）
2024/12/1	水星フライバイ5
2025/1/8	水星フライバイ6
2026/9/3	MTM分離
2026/11/21	水星到着および水星周回軌道投入（予定）　【日本時間では11/22】
2026/12/9	MMO分離（予定）【日本時間では12/10】
	注：日付はUTC

4 探査機（MMO）



Ver. 2026年11月

4.1 外観写真・主要諸元

「みお」Mercury Magnetospheric Orbiter





※ 写真はJAXAデジタルアーカイブス
https://jda.jaxa.jp/index.php
より入手願います

※ 左図はワイヤーアンテナ及びマストは
収納した状態です

4.1 外観写真・主要諸元

表 「みお」Mercury Magnetospheric Orbiter諸元

項目	諸元
姿勢	スピン安定（4秒周期）
形状・サイズ	直径1.8 mの円に内接する八角形柱型。高さ2.4 m（アンテナ含む）。 水星軌道上ではワイヤーアンテナ4本（各15 m）と磁場計測用マスト2本（各5m）をそれぞれ伸展する
重量	探査機：　約260kg（推進剤約5kgを含む） 分離機構：約20kg

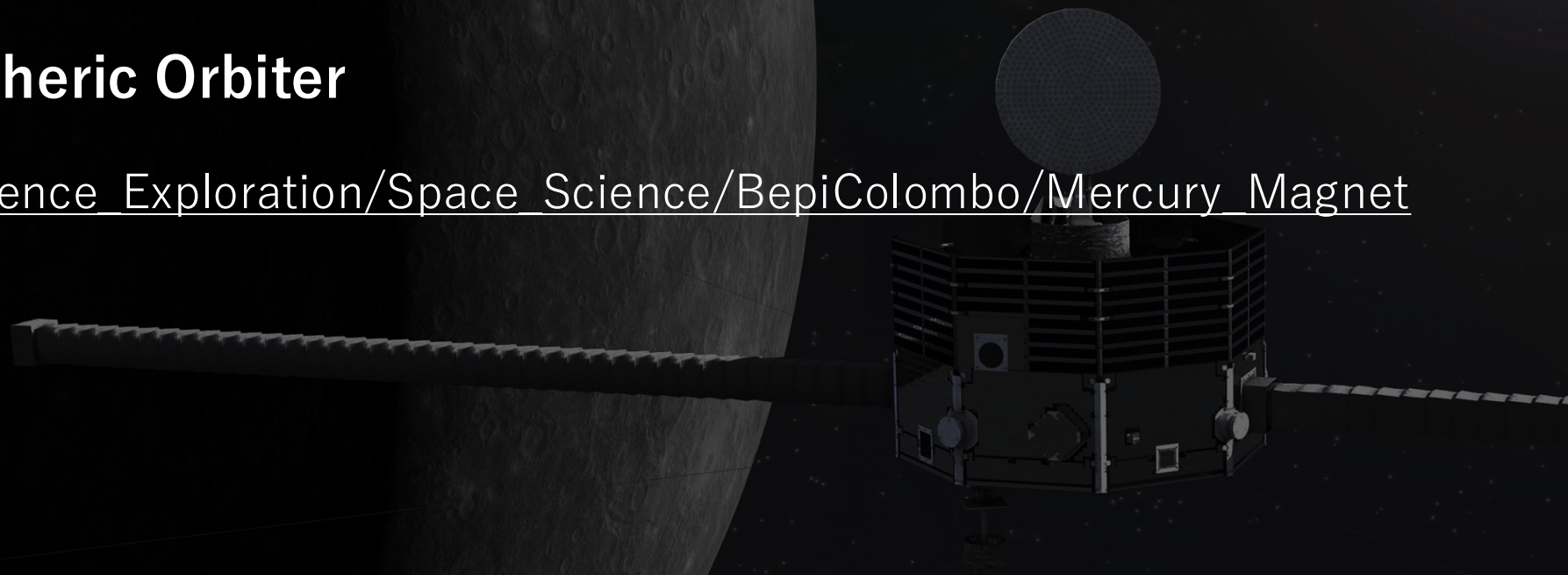
4.1 外観写真・主要諸元

探査機主要諸元

https://mio.isas.jaxa.jp/mission/#mission_06

Mercury Magnetospheric Orbiter

https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/BepiColombo/Mercury_Magnetospheric_Orbiter



4.2 搭載機器：バス機器

サブシステム名	概要	主な構成機器
通信系 （COM：Communication Subsystem）	地球からのコマンド（指令）を受信し、地球へテレメトリ（データなど）を送信する。	高利得アンテナ（HGA） 中利得アンテナ（MGA-RX, MGA-TX） アンテナ指向機構（APM） アンテナデスパン機構（ADM） X帯トランスポンダ（XTRP）
姿勢制御系 （ACS：Attitude Control Subsystem）	探査機の姿勢を計測し制御する。	スピン太陽角センサー（SSAS） スタースキャナー（SSC） ニューテーションダンパー（ND）
データ処理系 （DMCS：Data Management Controller System）	コマンドを処理して各サブシステムに伝達する。各サブシステムからのデータを記録するとともに、集計してテレメトリを編集する。また、姿勢制御、アンテナ指向制御、ヒータ制御、の機能も有しており、探査機の全体制御を行う。	データマネージメントコントローラ（DMC） 駆動装置（DRU）
推進系 （RCS：Reaction Control System）	姿勢制御のための推進剤を蓄え、噴射する。MMOは推進剤として窒素ガスを用いている。	タンク（TANK） 遮断弁（LV） 調圧弁（RG） スラスタ（THR）

4.3 搭載機器：ミッション機器

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・イオンおよび高速中性粒子を計測。

磁力計（MGF：Magnetic Field Investigation）

水星本体，磁気圏，および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）

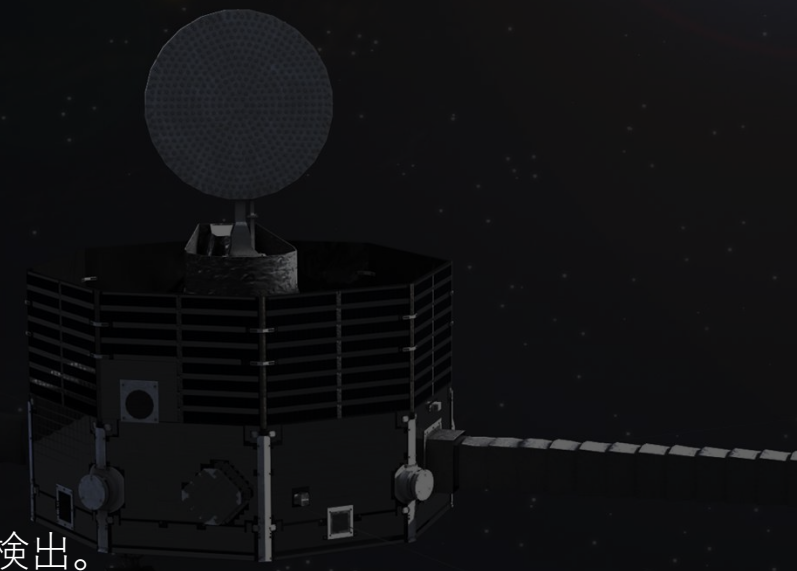
水星磁気圏および太陽風における電場・電磁波動・電波を観測。

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。

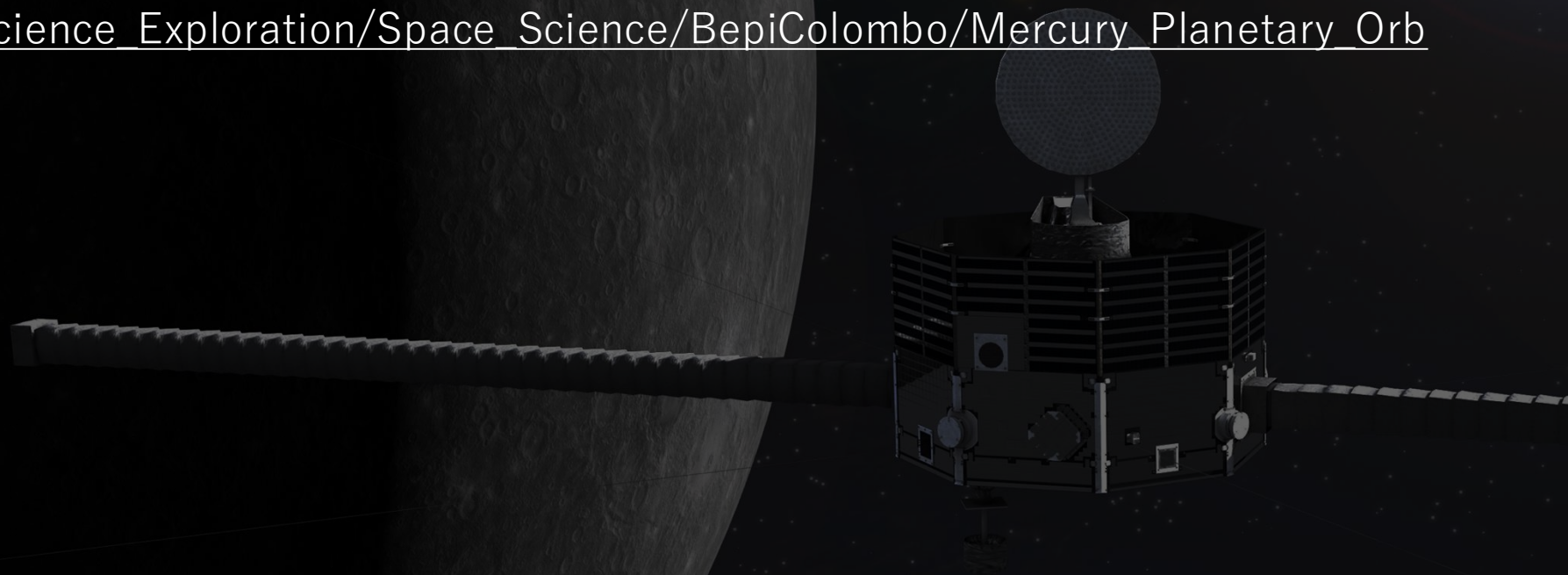


4.4 探査機（MPO）

参考

Mercury Planetary Orbiter

- https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/BepiColombo/Mercury_Planetary_Orbiter

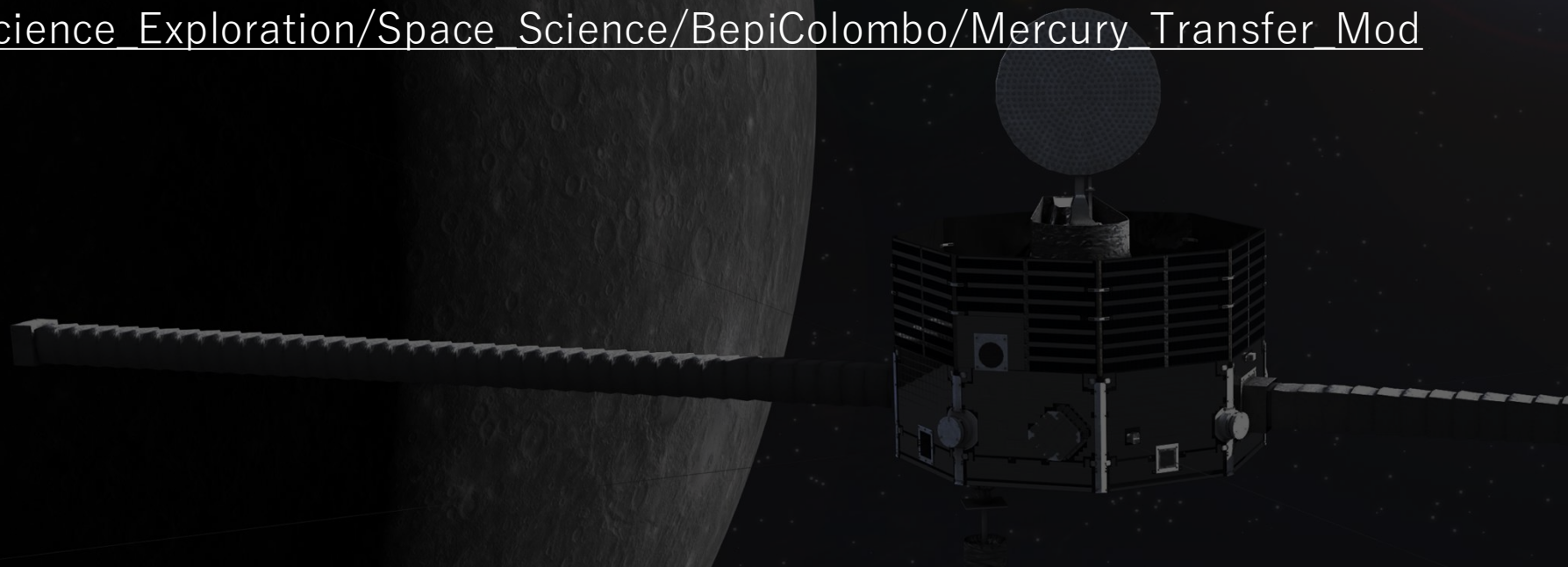


4.5 探査機（MTM）

参考

Mercury Transfer Module

- https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/BepiColombo/Mercury_Transfer_Module



4.6 探査機の運用：熱制御系

水星特有の熱環境

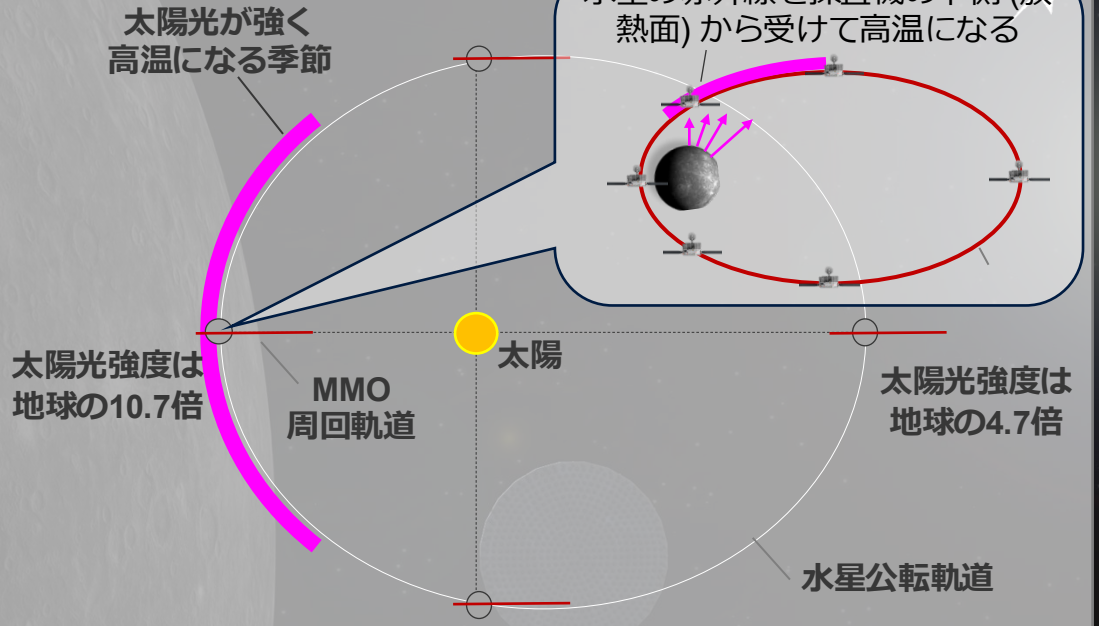
水星は公転軌道が楕円になっているため，季節によって太陽光の強度が変化します。一番寒い期間で地球の4.7倍，熱い期間では地球の10.7倍の強烈な太陽光に照らされます。

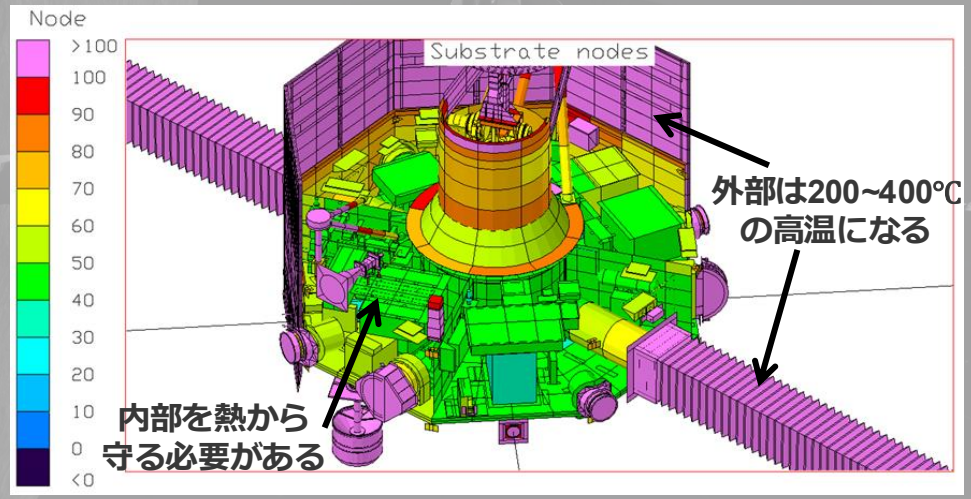
水星は太陽が当たる面（昼側）は400°C以上，太陽の当たらない面（夜側）は-170°C以下と大きな温度差があります。みおが投入される水星周回軌道上では水星の昼側に近づく際に水星地表面からの赤外線によって加熱されます。水星の上を通過するときは下から電気ヒータで炙られるようなものです。

熱制御の要求

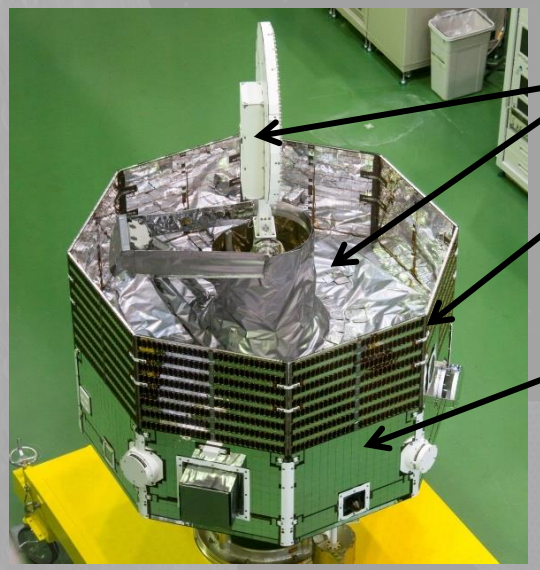
水星の厳しい熱環境に晒されると探査機の表面温度は数百℃まで上昇します。しかし搭載機器は地球で使う機器と同様，7~80°Cを超えると壊れてしまうものがほとんどです。そのため，過酷な熱環境においても内部の搭載機器は室温~50°C程度に抑えるための工夫が必要です。

地球から水星に向かうまでの間やMMOが水星の日陰に入る時は-270°Cの深宇宙に向けて放熱して冷たくなりすぎないように保温が必須です。





4.6 探査機の運用：熱制御系



MMOの熱制御（詳細は7.11章をご参照ください）

表面は太陽光を反射しつつ赤外線で熱を逃がしやすいようにガラス製の鏡：OSR（Optical Solar Reflector）で覆われています。これにより外表面でできる限り熱を反射+放熱します。

内部や外付けのアンテナ，上面パネルには真空環境で熱を防ぐことに特化した多層断熱材：MLI（Multi Layer Insulator）が用いられています。水星の強烈な太陽光に耐えることができ，電磁場観測に影響しないように導電性のある特別なMLIを使用しています。

太陽電池パネルは高温になるため裏側から輻射放熱によって冷却できるように設計されています。

機体の下面は太陽光が入射せず常に-270°Cの深宇宙方向を向くように姿勢制御することで放熱面として機能します。

内部機器が冷えすぎて壊れないように一定温度以上に保温するヒータが搭載されています。

運用

MMOは能動的に機器を冷やすことはできません。そのため機器のON/OFFのタイミングを調整することで内部機器が高温になりすぎないように運用計画を作成します。そのうえで運用中は搭載されている温度センサによる温度監視を行います。

4.7 探査機の運用：姿勢系

スピン安定

MMOはスピンをすることで姿勢を安定化します。

- スピンの周期は4秒で1回転程度で，HGAが搭載されている方向から見て反時計回りです。
- 姿勢は水星の公転面にほぼ垂直を保ちます。

姿勢決定

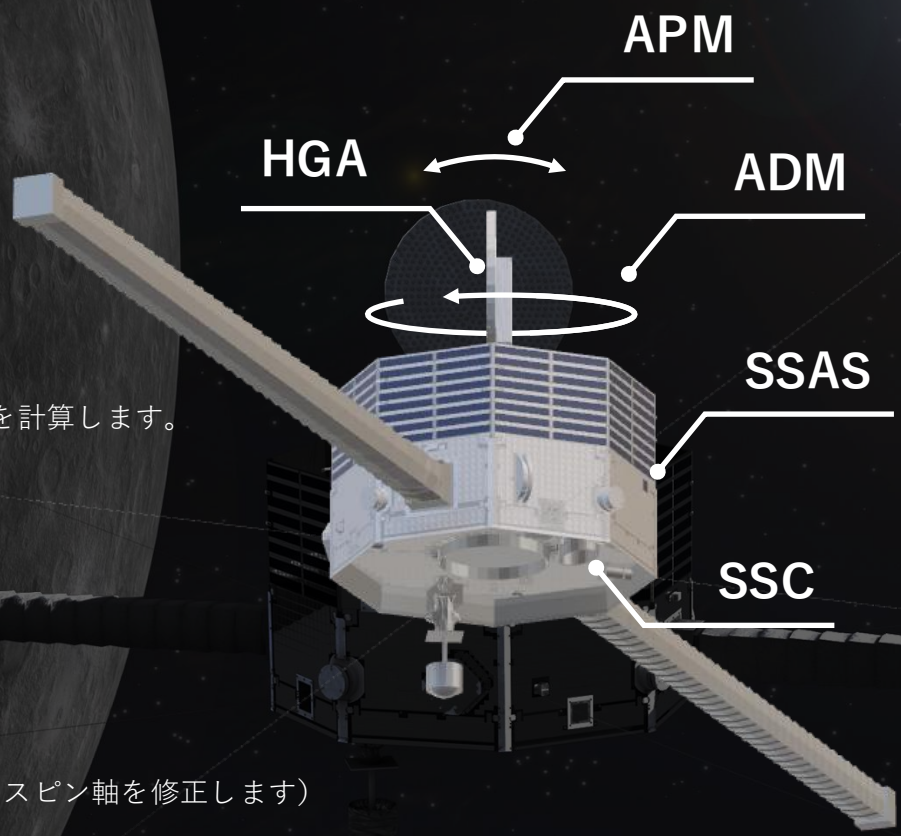
MMOは太陽と恒星の方向から自分の姿勢を把握します。

- SSASで太陽の方向，SSCでカノープスなどの恒星の方向を検知し，スピン軸方向とスピン周期を計算します。

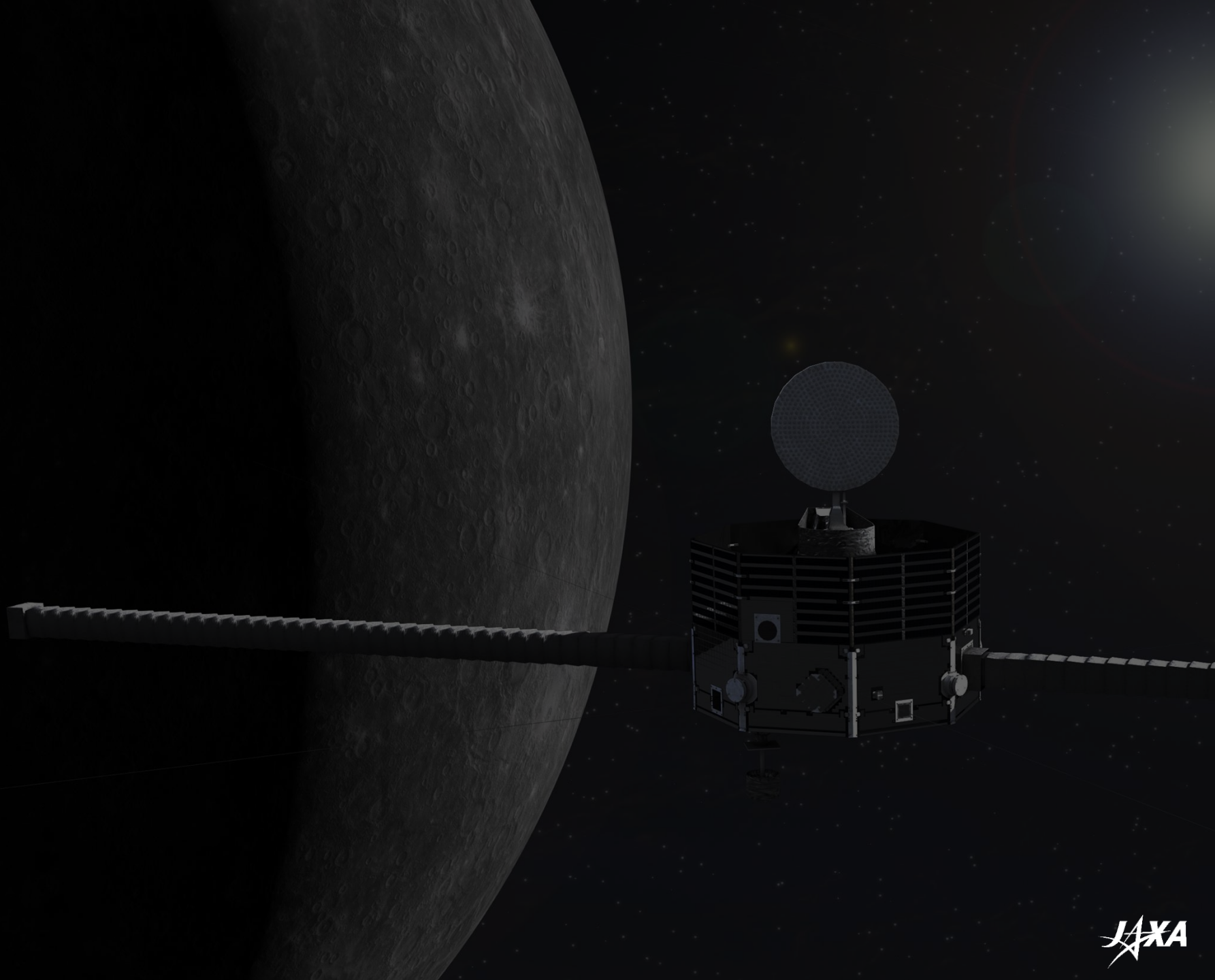
姿勢系運用

MMOの姿勢系の運用は主に以下の通りです。

- スピンレート制御：RCSでスピン周期を変える運用
- 姿勢決定：SSASとSSCでスピン軸の方向を計算する運用
- スピン軸制御：RCSでスピン軸の方向を変更する運用（熱・通信の制約を守るように，定期的にスピン軸を修正します）
- 伸展：WPT・MEFISTO・MASTを伸展する運用（伸展中は姿勢が不安定になりやすいので，とてもクリティカルな運用になります）
- HGA指向：HGAをデスパン（逆回転）させ地球を向くように制御する運用



5 運用



Ver. 2026年11月

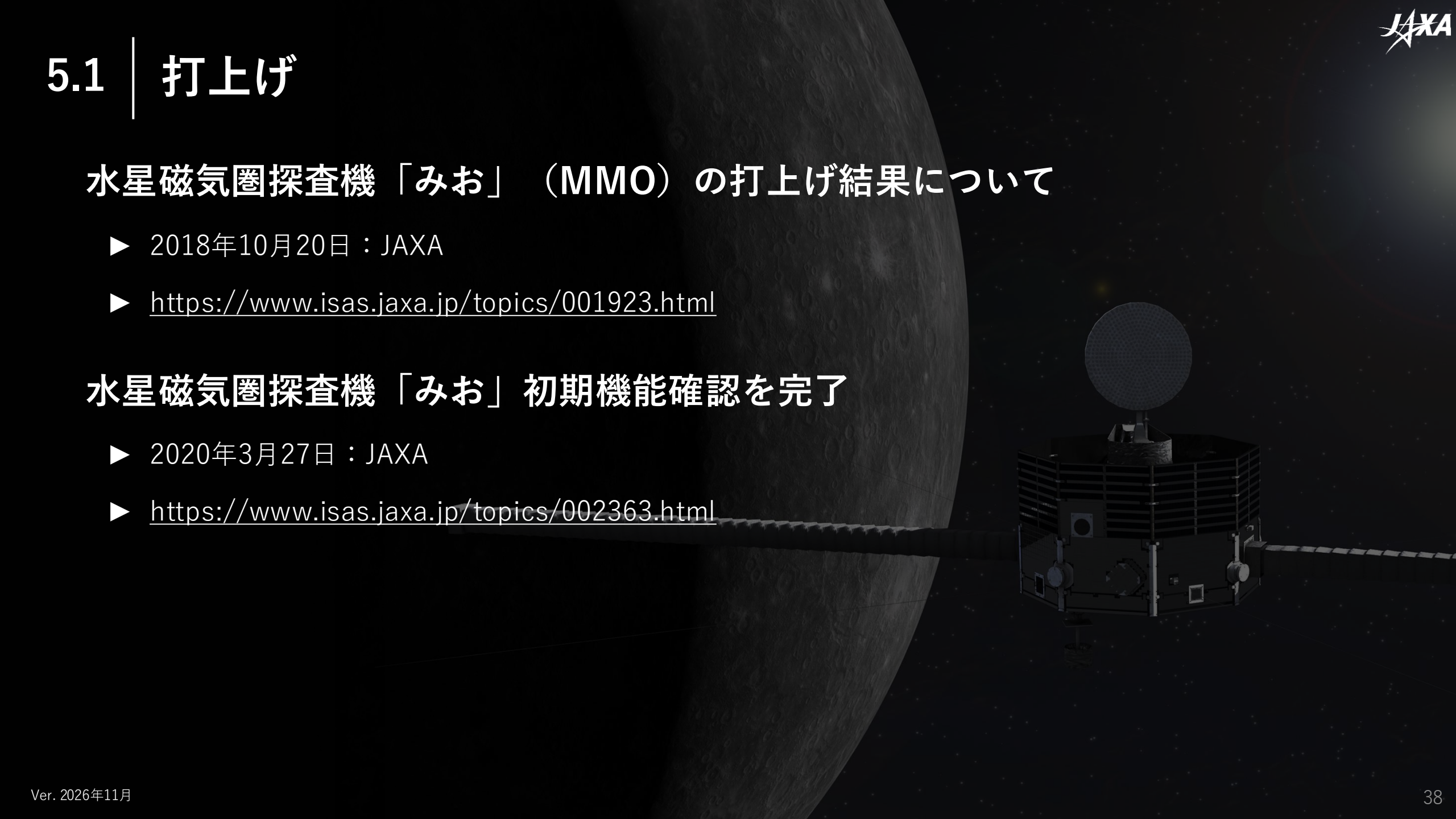
5.1 打上げ

水星磁気圏探査機「みお」（MMO）の打上げ結果について

- 2018年10月20日：JAXA
- https://www.isas.jaxa.jp/topics/001923.html

水星磁気圏探査機「みお」初期機能確認を完了

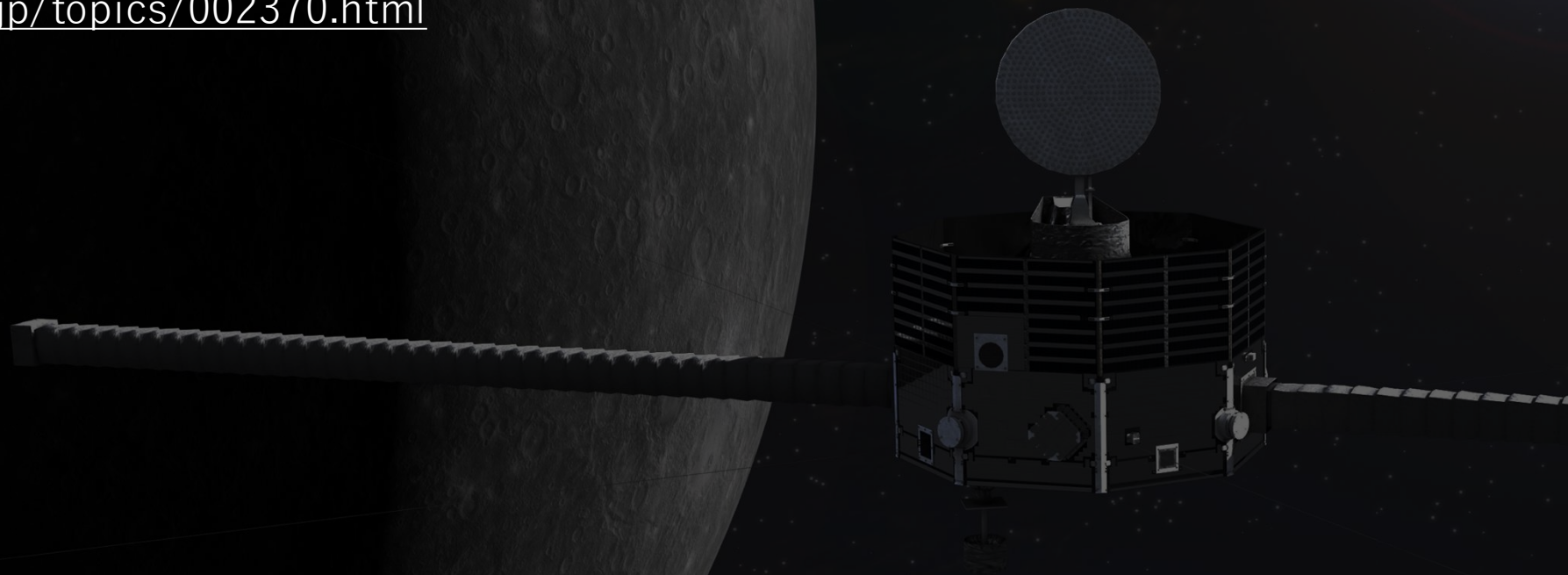
- 2020年3月27日：JAXA
- https://www.isas.jaxa.jp/topics/002363.html



5.2 地球スイングバイ

水星磁気圏探査機「みお」の地球スイングバイ実施結果について

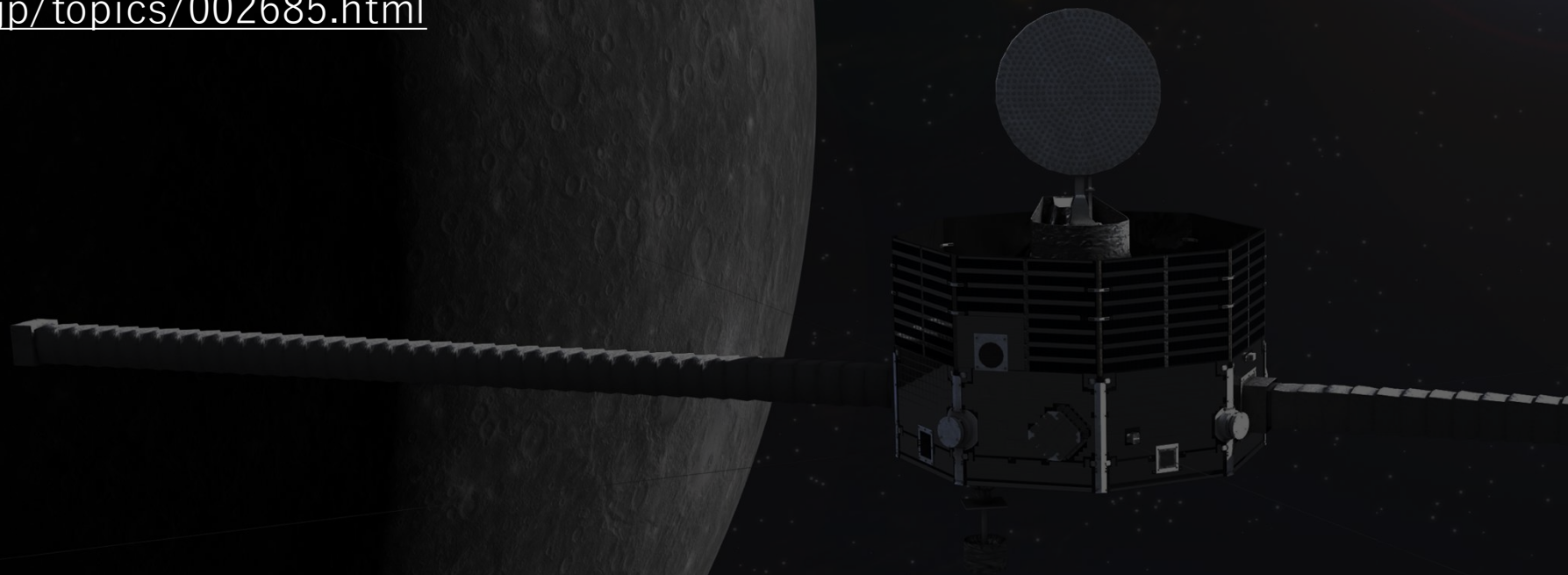
- 2020年4月22日：JAXA
- https://www.isas.jaxa.jp/topics/002370.html



5.3 金星スイングバイ

ベピ・コロンボの二回目の金星スイングバイは、高度550KMをかすめるもの

- 2021年8月10日：JAXA
- https://www.isas.jaxa.jp/topics/002685.html



5.4 水星スイングバイ

「ベピコロンボ」水星探査機は金星スイングバイを終え、いよいよ水星へ接近

- 2021年10月1日：JAXA
- https://www.isas.jaxa.jp/topics/002747.html

BepiColombo’s first views of Mercury

- 2021/10/2：ESA
- https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/BepiColombo/BepiColombo_s_first_views_of_Mercury

BepiColombo’s second Mercury flyby

- 2022/6/20：ESA
- https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2022/06/BepiColombo_s_second_Mercury_flyby

BepiColombo’s third Mercury flyby

- 2023/6/14：ESA
- https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2023/06/BepiColombo_s_third_Mercury_flyby

5.4 水星スイングバイ

Fourth Mercury flyby begins BepiColombo’s new trajectory

- 2024/9/2：ESA
- https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/BepiColombo/Fourth_Mercury_flyby_begins_BepiColombo_s_new_trajectory

BepiColombo‘s fifth Mercury flyby

- 2024/11/29：ESA
- https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2024/11/BepiColombo_s_fifth_Mercury_flyby

Bepi, Mio and MTM complete their final Mercury flyby

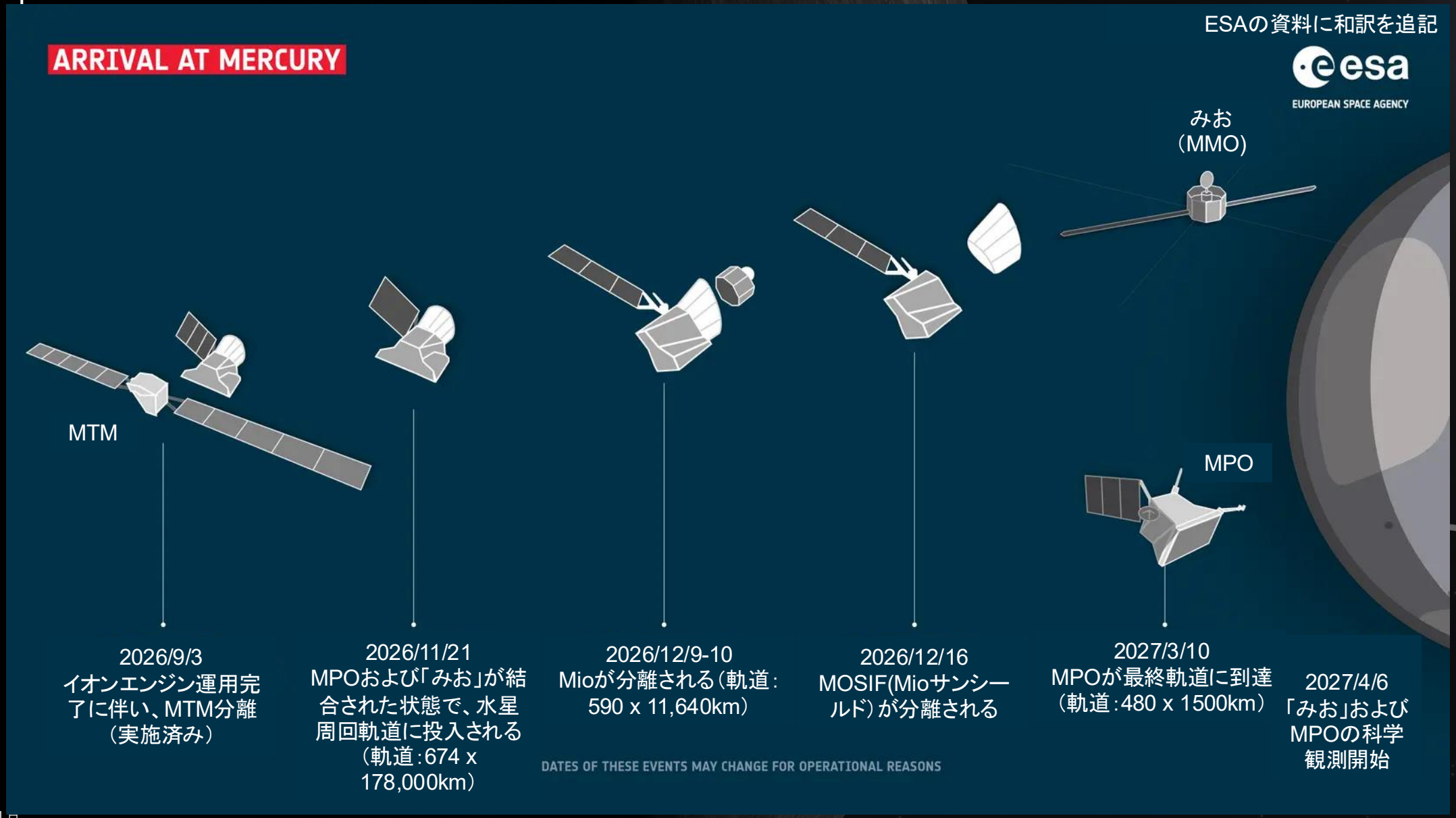
- 2025/1/8：ESA
- https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/BepiColombo/Top_three_images_from_BepiColombo_s_sixth_Mercury_flyby

Top three images from BepiColombo‘s sixth Mercury flyby (ESA)

- 2025/1/9：ESA
- https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/BepiColombo/Top_three_images_from_BepiColombo_s_sixth_Mercury_flyby



5.5 運用概要：分離前運用



https://www.esa.int/articles/about-us/directorates/operations/bepicolombo-begins-mercury-arrival-with-mtm-separation-success

5.6 運用概要：分離伸展運用

基本的に1日2回運用する（JAXA局：臼田、美笹、ESA局：セブレロス局）

分離直後および伸展運用中はHGAが使用できないため、MGAによるセマフォ通信にて運用する。

通信速度が非常に遅いため（約0.02bps）、分離伸展運用は時間を要する。

分離伸展運用期間中に以下の期間がある

- 日陰期間：水星の影に入る時間がある期間。日陰中はバッテリを使用する。
  日陰明けはバッテリ充電優先のため、日陰期間は伸展運用は行わない。
- 合期間：地球からみて水星が太陽と重なる期間。地上のアンテナが太陽を直視することになる。
  太陽によるノイズのため通信できないため、伸展運用は行わない。

また分離伸展運用の直後には以下の期間がある。

- 熱制約期間：水星が太陽に近づき、探査機の温度が上昇する。モーター等の発熱機器が使用できないため、ノミナルでは伸展運用は行わない。伸展運用が長引いた場合には、熱制約期間中も可能な範囲で伸展運用を実施する。または熱制約期間後に伸展運用を再開する。

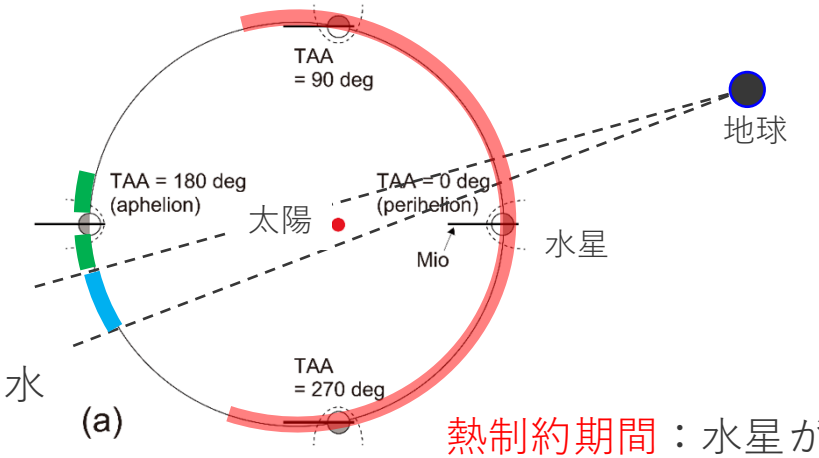
5.6 運用概要：分離伸展運用

日陰、合、熱制約期間の概念図（参考）

TAA = True anomaly angle

日陰期間：探査機が水星の影に入る時間がある期間（１週間ほど）

合期間：地球からみて水星が太陽と重なる期間



熱制約期間：水星が太陽に近づき、探査機の温度が上昇する期間

太陽と水星を北極側から見ている図

5.6 運用概要：分離伸展運用（予定）

月日（日付は日本時間）	イベント	概要
2026/9/3	MTM分離	イオンエンジン運用完了に伴い、MTMを分離
2026/11/22	水星周回軌道投入	「みお」とMPOが結合された状態で水星周回軌道に投入
2026/12/9～10	「みお」分離	「みお」分離（JAXAによる運用開始）
2026/12/9 ～2027/1月中旬	分離伸展運用	分離後の運用（MGAの展開など）、ワイヤーアンテナおよびマストの伸展などを行う
2027/1月中旬～4月	初期チェックアウト運用	バス系およびミッション機器のチェックを行う
2027/4月～	定常運用開始	1年間（地球年）、ミッション機器による科学観測を行う

注記）上記は計画であり、探査機トラブルや天候状況によっては日程を変更することがある

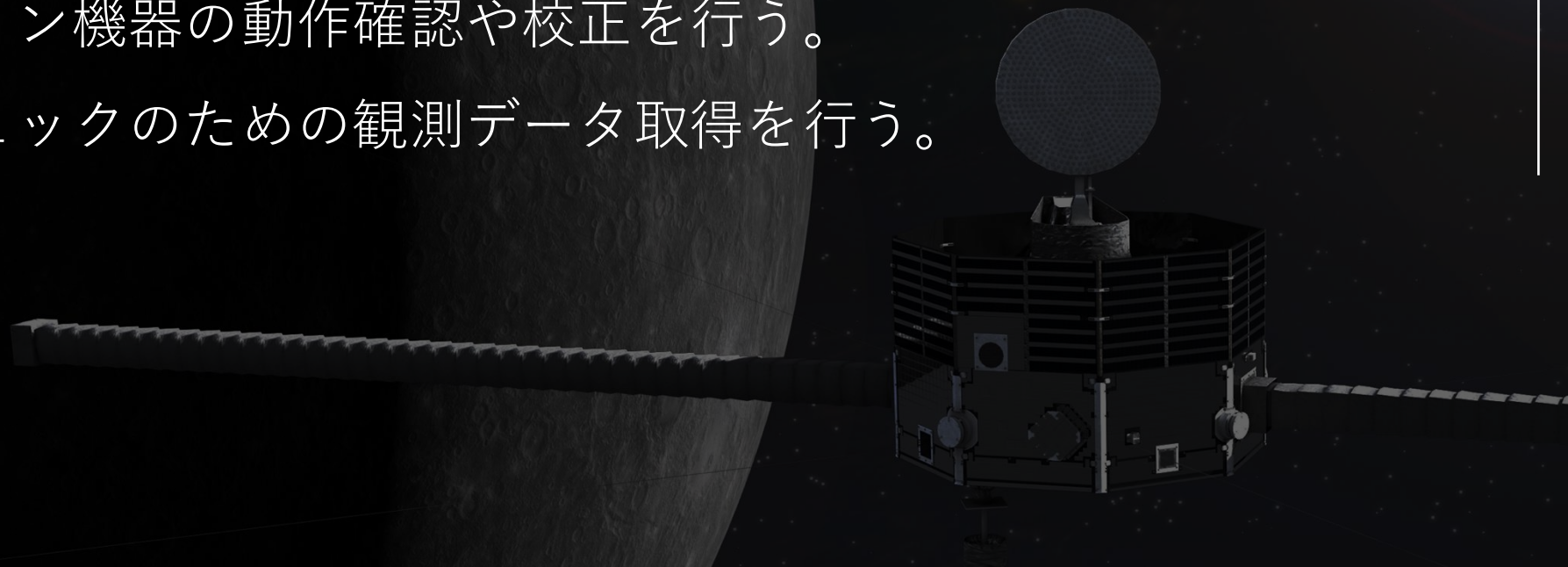
5.7 運用概要：分離後初期チェックアウト

分離伸展運用完了後、初期チェックアウトを行う

期間：2027年1月～4月5日

バス系およびミッション機器の動作確認や校正を行う。

ミッション機器はチェックのための観測データ取得を行う。



5.8 運用概要：定常観測

- 初期チェックアウトを完了させた後、以下よりMPOと合わせて定常運用を開始する。

  2027年4月6日

  定常運用期間は約１年間（１地球年）。
- 水星環境は厳しく、熱制約・電力制約のために観測時間・データ送信時間が限定される。

  許容できる範囲で観測・通信するように運用計画をたてる（観測データの全ては送信できない）。
- 定常観測では１水星年ごとに区切って観測方針を立てる（１水星年＝地球の約88日）

  １水星年目：　　磁気圏内の観測を優先

  ２水星年目以降：　　未定（１水星年目の結果にて調整する）
- 定常運用中の各距離など：

  探査機–地球間距離：約0.6～約1.45au　　→伝搬遅延時間（片道）：約320～720秒

  探査機-太陽間距離：約0.31～約0.47au　　→太陽光強度：地球の約4.7～10.7倍
- MPOとの協調観測：MPOと同時に観測したデータは優先的に地球に送信する。



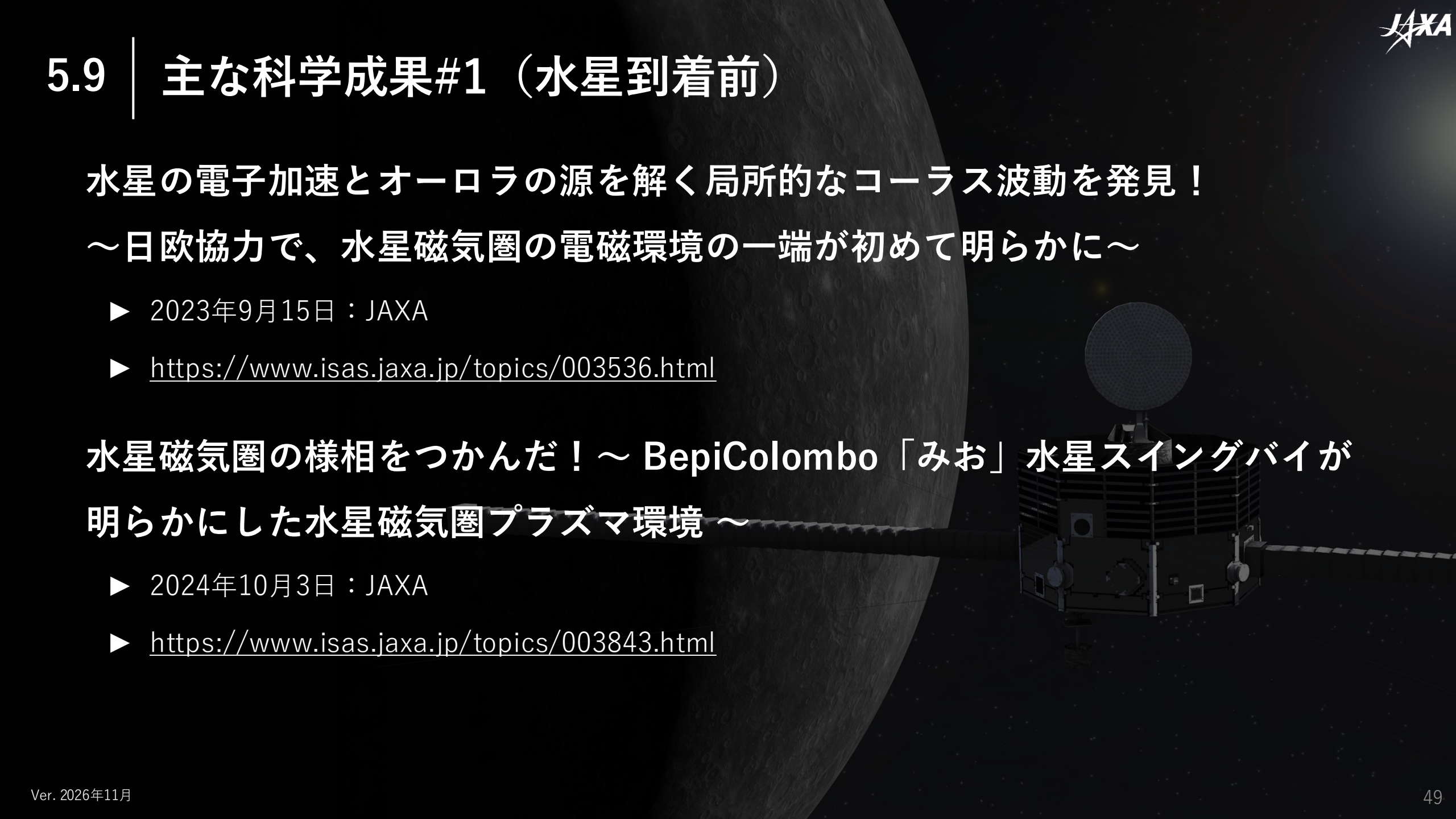
5.9 主な科学成果#1（水星到着前）

水星の電子加速とオーロラの源を解く局所的なコーラス波動を発見！
～日欧協力で、水星磁気圏の電磁環境の一端が初めて明らかに～

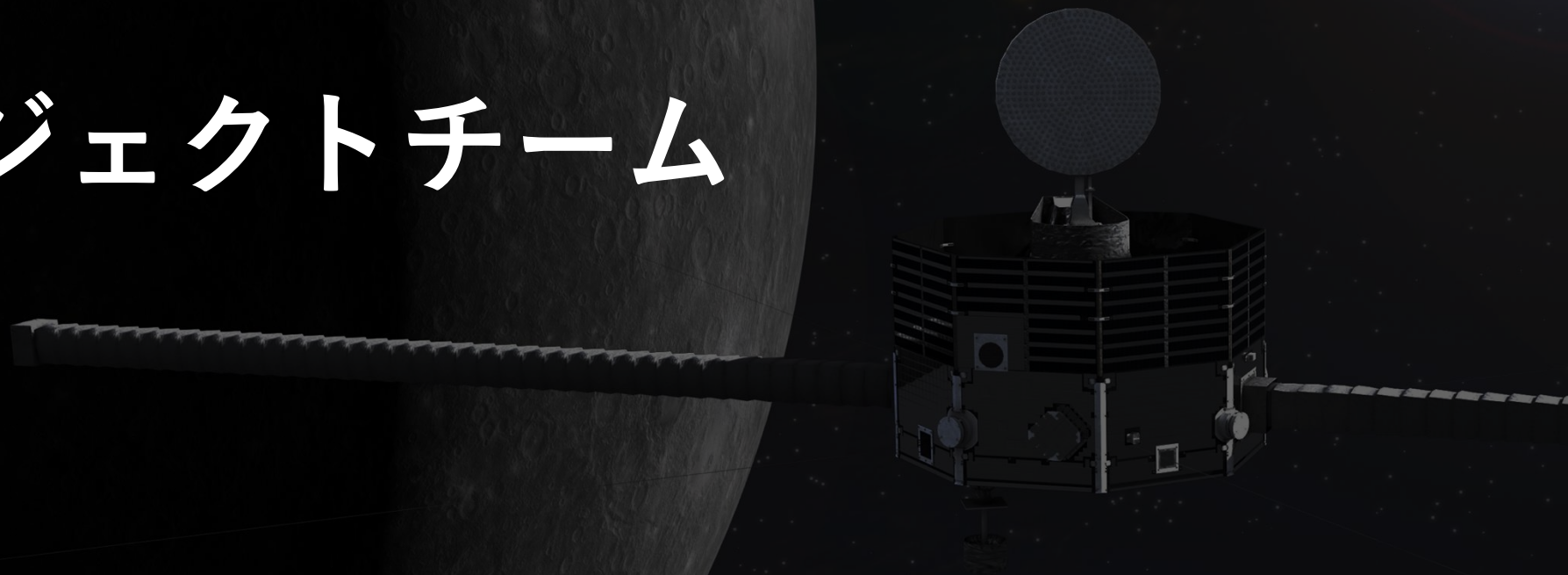
- 2023年9月15日：JAXA
- https://www.isas.jaxa.jp/topics/003536.html

水星磁気圏の様相をつかんだ！～ BepiColombo「みお」水星スイングバイが明らかにした水星磁気圏プラズマ環境 ～

- 2024年10月3日：JAXA
- https://www.isas.jaxa.jp/topics/003843.html



6 プロジェクトチーム



Ver. 2026年11月

6.1 サイエンスチーム

観測機器のPI（研究代表者）

担当機器	PI（研究代表者）
プラズマ・粒子観測装置(MPPE)	斎藤 義文（JAXA）
磁力計(MGF)	Wolfgang Baumjohann（ÖAW）* (*Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences)
プラズマ波動・電場観測装置(PWI)	笠羽 康正（東北大学）
ダスト計測器(MDM)	小林 正規（千葉工業大学）
ナトリウム大気カメラ(MSASI)	吉川 一朗（東京大学）

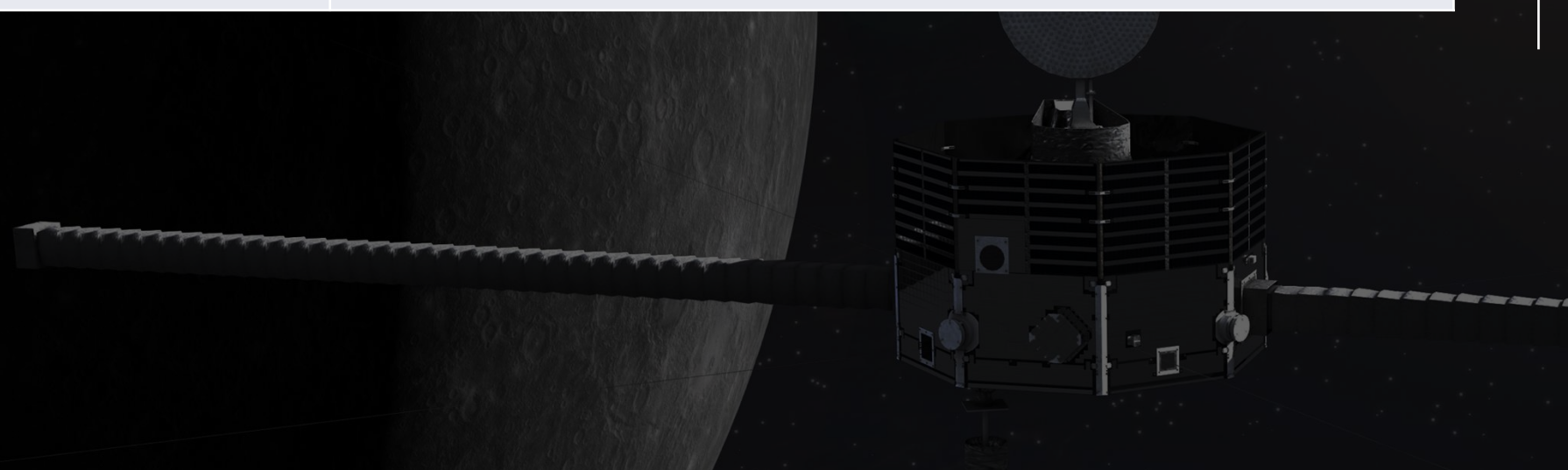
6.2 開発メーカ

主な開発担当メーカ

メーカ	担当システム、担当機器
NEC	衛星システム
日本飛行機	伸展機器（WPT、MAST）、MMO分離機構（SED）
MHI長崎	推進系（RCS）
MHI名誘	ミッションデータプロセッサ（MDP）、PWI-MGFエレクトロニカルボックス（PME）
明星電気	粒子観測装置（MPPE）、ダスト計測器（MDM）、ナトリウム大気カメラ（MSASI）
住友重機械工業	磁力計（MGF）

6.3 歴代プロジェクトマネージャ

	プロジェクトマネージャ	時期
初代	向井利典	～2003年（水星探査ワーキンググループ時）
2代目	山川宏	2003年～2006年
3代目	早川基	2006年～2020年3月
4代目	小川博之	2020年4月～



7 トピック



Ver. 2026年11月

7.1 分離伸展運用の難しさ#1

「探査機の分離伸展運用が打上げ8年後」

通常の衛星に例えると「ロケットは打ち上げられたが，衛星分離はまだ」の状態がとても長い。

宇宙空間では電源OFFの電子機器の劣化は考えにくく，固着などもしない設計にはしています。それでも 8 年間保管していた機器が確実に動作するか一般的には不安です。

分離伸展運用はクリティカルな運用で慎重に行う必要があります。しかし，開発時にいろいろ検討したベテランメンバーは退職しています。開発時のノウハウを文書で残してもらっています。

7.2 分離伸展運用の難しさ#2

「分離時にHGA使用不可，MGAで運用しなければならない」

水星軌道面と地球軌道面は約7°の傾斜があり，探査機姿勢は基本的には水星軌道面に垂直です。地球は通常は探査機の水平面にはいないため，地球と通信するためにはAPMでHGAを上下に向ける必要があります。

高速スピンしているときにHGAを傾けると遠心力で引っ張られます。MMOで採用したAPMの保持トルクでは，20rpmにスピンアップした状態では1°以上は傾けられないため，分離伸展運用ではHGAを地球に向けられません。

また，スピンレートが変化すると途中でADMの制御モードが切り替わりますが，その際に大きなトルクが発生して衛星姿勢を乱してしまいます。そのため，スピンレートが変化する運用ではADMを駆動できず，地球を追尾できません。

したがって，**MMOの分離伸展運用中はMGAしか使用できません。**

7.3 分離伸展運用の難しさ#3（1/3）

「分離伸展時のテレメトリは，On/Off Keying（ビーコン通信）で受信しなければならない」

MMOのMGAの送信電波は弱いため，最低のTLMビットレート（8bps）でも地球で受信できません。そのためビーコン通信を用います。

MMO下面には360°全方位に視野を持つMGA-RXがありますが，スピン軸中心に取り付けられなかったため，ドップラ効果の影響を受けてしまい，テレメトリ送信に使えません。そのため，探査機側面に取り付けられている別のテレメトリ送信用のMGA-TXを用います。

（つづく）

7.3 分離伸展運用の難しさ#3（2/3）



高利得アンテナ
HGA
(送受に使用)

中利得アンテナ
MGA-TX
(送信専用)

中利得アンテナ
MGA-RX
(受信専用)

7.3 分離伸展運用の難しさ#3（3/3）

「分離伸展時のテレメトリは，On/Off Keying（ビーコン通信）で受信しなければならない」

探査機側は32秒毎に“0/1”を送信しますが，MGA-TX（送信アンテナ）は側面についていて探査機はスピンしているため，地球を向いたときしか受信できません。結果としてビーコン信号は間欠的になります（15rpmでスピンしていると4秒毎に0.2秒間だけ信号を受信する）。

他の探査機のビーコン通信とは異なるため，MMOのこの通信を「**On/Off Keying**」，その受信システムを「**セマフォ受信システム**」と呼んでいます。
（セマフォ＝semaphore：手旗信号の意）

間欠的になるため，通常のビーコン通信
よりも読解が難しくなります。



7.4 分離伸展運用の難しさ#4

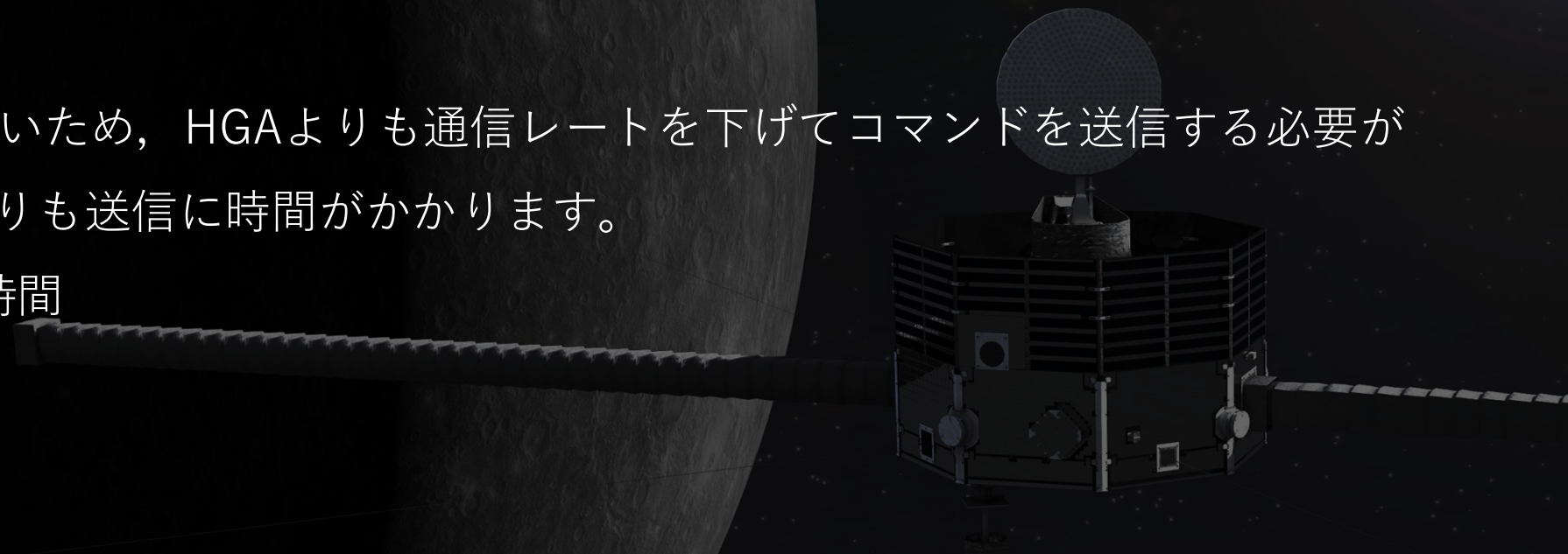
「分離伸展時のコマンドは，低レートで送信しなければならない」

分離伸展運用中は地球から送信したコマンドを探査機はMGA-RX（受信アンテナ）で受け取ります。

HGAにくらべて性能が低いため，HGAよりも通信レートを下げてコマンドを送信する必要があり，結果として通常よりも送信に時間がかかります。

1コマンド送信にかかる時間

- ► 通常　　約1秒
- ► MMO　　最大90秒



なお分離伸展運用の途中と完了後はHGA通信が可能になり，通常のコマンド送信が可能になります。

7.5 分離伸展運用の難しさ#5

「分離伸展運用中に日陰の期間が発生する」

太陽と反対方向に水星の影のゾーンがあります。MMOは水星の極軌道を周回しますが，探査機は時々この影に入ります。この状態を日陰と言います。

日陰中は太陽光で発電できないため，充電していたバッテリで探査機の電力をまかないます。

日陰期間中も通信はできますが，探査機は冷えるのでヒータの電力も必要になります。バッテリが枯渇しないように最低限の運用にして，アンテナやマストの伸展運用は中断します。

2026年12月下旬から約１週間MMOは日陰の期間に入りますので，アンテナ伸展運用は一旦中断します。中断することは大きなリスクではありませんが，切りのいい状態で中断する必要があり，運用は少々複雑です。

7.6 分離伸展運用の難しさ#6

「分離伸展運用中に合の期間が発生する」

地球から見て二つの天体が同じ方向に重なる状態を「合」と言います。

太陽と探査機が重なると，太陽が放射する電波や太陽周辺のプラズマによって探査機との通信ができなくなります。しばらく通信ができなくても問題無いように，一般的には事前に慎重に，通信系や熱制御系，姿勢系などの設定をしておいて備えます。

2026年12月末から太陽と水星は合の状態になり，MMOとは約１週間通信ができなくなります。MMOはまだ定常運用に移行する前，分離伸展運用の途中に１週間テレメトリ受信もコマンド送信もできないのは一般的にはリスクがあります。MMO分離後すぐに探査機の実際の温度や姿勢の挙動（くせ）を確認して，合期間に備える必要があります。

7.7 探査機の熱対策#1

「みお」 vs「熱」

みおは地表温度が430℃にも達する水星からの赤外線と地球周辺の約10.7倍にもなる強い太陽光を浴びます。過酷な環境下で機体を強烈な熱から守るため様々な熱設計が施され，試験検証，熱解析を含む入念な準備が進められてきました。

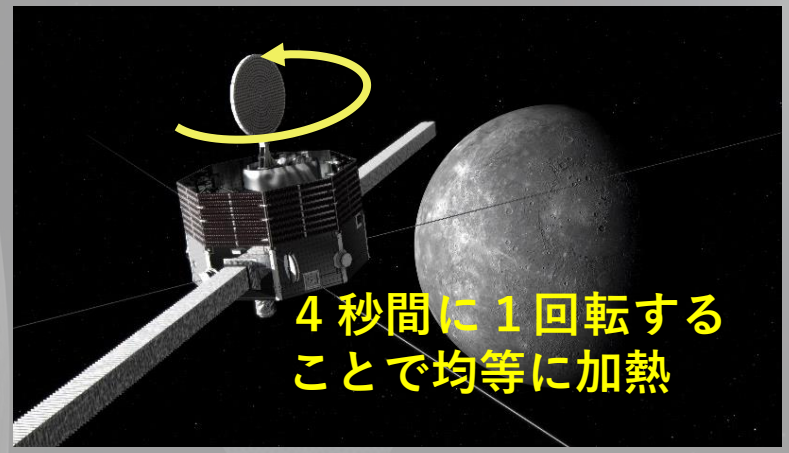
回転姿勢制御

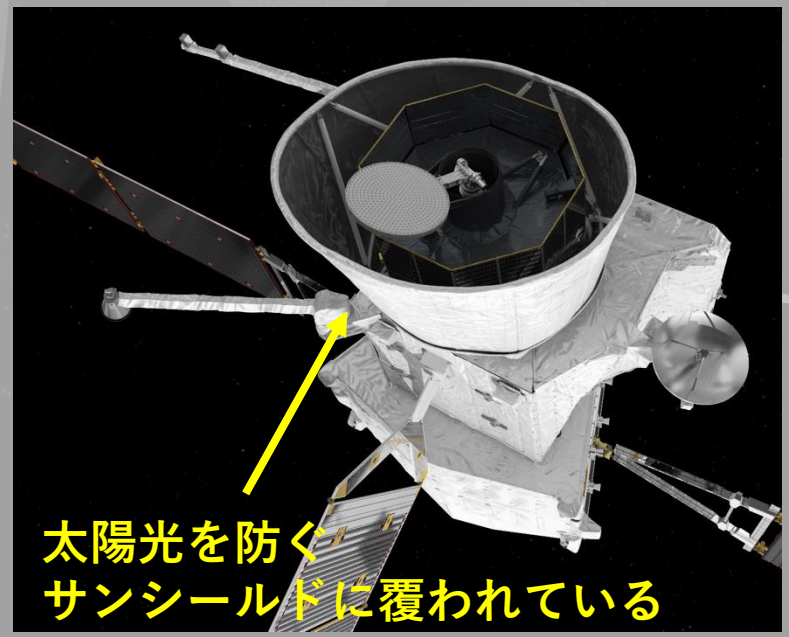
磁気センサによるスキャン観測を実施するため，回転制御を用いた姿勢制御方式が採用されています。これにより，一面が長時間太陽光にさらされるのを防ぎ，機体の各面が均等に加熱される仕組みです。

クルーズ中の熱対策

水星に向けたクルーズ中はみおはESAの探査機MPOに取り付けられているため回転することができません。一方向から太陽光を受けて一部が高温になりすぎることがないようにMOSIF(Magnetospheric Orbiter and Sunshield Interface)と呼ばれるサンシールドに覆われています。

熱と姿勢制御





7.8 探査機の熱対策#2

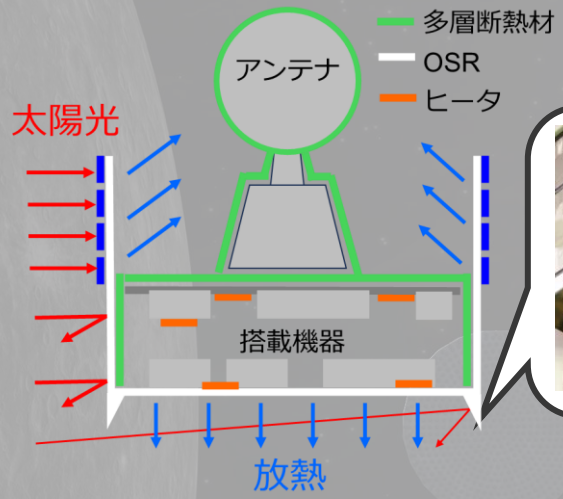
太陽光を防ぐ

みおの表面は太陽光を反射し赤外線で熱を逃がす特性を持つガラス製の鏡 (OSR) により覆われています。パネル内部には多層断熱材 (MLI) を用いることで周辺環境から内部への熱の侵入を防ぐ設計が施されてきました。直接太陽光に晒される外部には導電性があり太陽光吸収率が小さいゲルマニウム蒸着カプトンや高温に耐えられるチタンフォイルを用いた特殊なMLIが採用されています。また横側からの太陽光入射が放熱面に反射しないように5° の角度がついたひさしが取り付けられています。パネルの隙間から太陽光侵入や外付け機器の保護を目的に白色のカバーが取り付けられています。

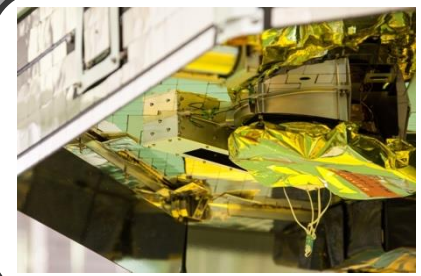
機体を冷ます / 保温する

探査機の内部で発熱する機器の排熱を行うために-270°Cの深宇宙に向けて下面から放熱します。逆に太陽光が当たらない時，機体はマイナス数十度まで冷えこみます。この時に機器が壊れないように各所に保温用のヒータが配置されています。ヒータはピークパワー制御によって電力要求を守るようソフトウェアで管理されています。また，機械式サーモスタットによるサバイバルヒータが搭載され，制御コンピュータがダウンした場合でも保温が途切れないように工夫されています。

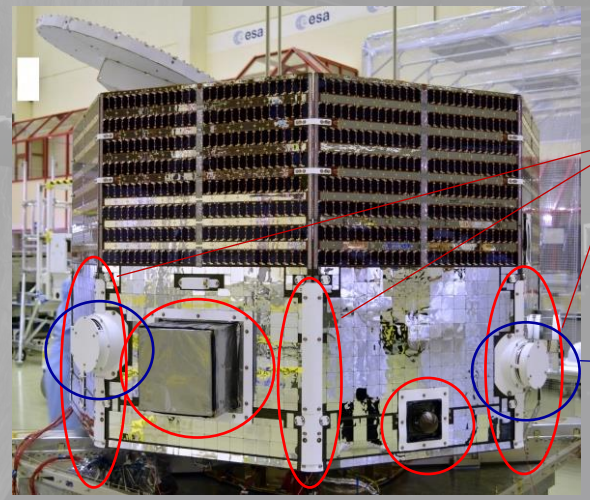
熱の出入りと温度調整



熱の出入り



5° の角度付き
ひさし



白色のカバーによって隙間からの内部への太陽光侵入を防ぐ

機器を保護するひさし

7.9 探査機の熱対策#3

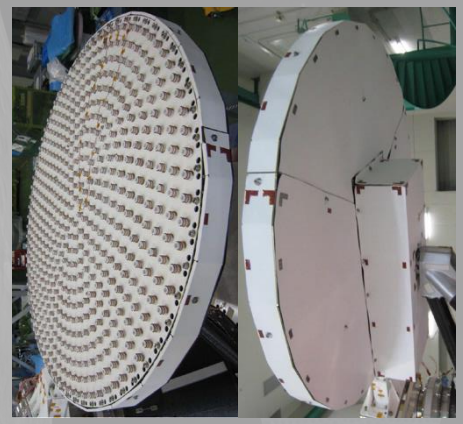
高温に晒されるアンテナの熱対策

機体外部に取り付けられたアンテナは強烈な直射日光に晒されます。高利得アンテナには一般的なパラボラ形状と異なり太陽光を集光しないよう平面形状のヘリカルアレイアンテナが採用されました。特別に開発された導電性の白色塗料により太陽光吸収を抑えるように設計されていますが，それでもアンテナの裏面は400°Cにも達します。そのため内側には高温に耐えられるチタン箔を用いた特殊な多層断熱材が用いられています。中利得アンテナは表面には太陽光吸収率が低く導電性のあるゲルマニウム蒸着カプトンで保護されています。

太陽電池セル

太陽光電池セルは太陽光を吸収し高温になるため背面から上側に向けて放熱できるように設計されています。（前項上図参照）それでも温度は230°Cに達することから高温に耐えられる特殊な接着剤で取り付けられました。また，MPOからの分離時にみおがサンシールドから出ると最大-180°C~+200°Cの急激な温度変化が生じる過酷な環境に晒されます。そのため熱衝撃試験や高温環境で発電をするための耐久試験が行われてきました。

太陽光に晒される機器たち



高利得アンテナ



中利得アンテナ



太陽電池セル

7.10 探査機の熱対策#4

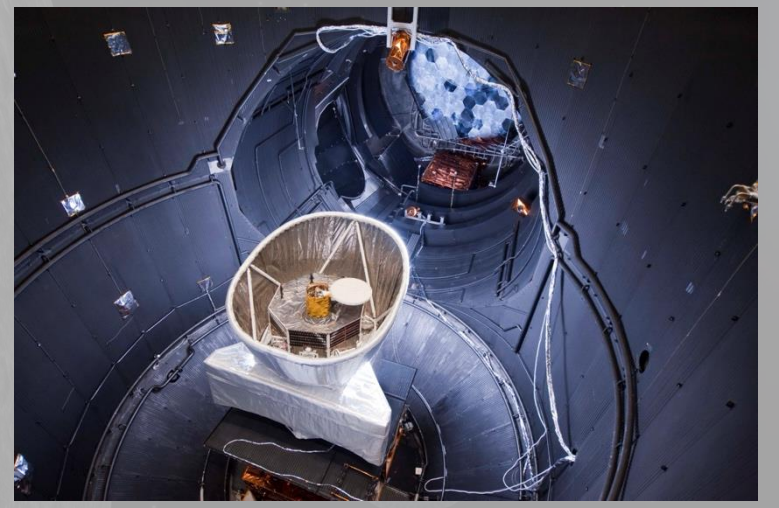
地上検証

入念に設計されたみおは，地上で試験検証によってその性能の確認が行われました。熱真空試験と呼ばれる宇宙空間を模擬した試験で水星周辺の厳しい熱環境を模擬することは簡単ではありません。そのためBepiColomboミッションのために特別に開発されたソーラーシミュレータ（太陽光模擬装置）を用いて地球軌道比の10倍の太陽光を機体に照射する試験が実施されました。このように地球上で水星に近い環境を再現することで設計した機体の動作確認や温度の確認，熱数学モデルの調整が行われました。

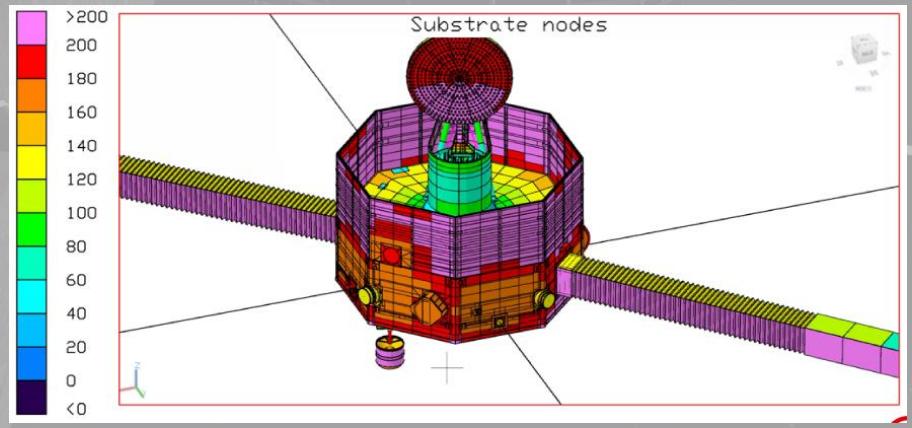
温度予測

機体を安全な温度の範囲内で運用できるように熱数学モデルを用いた温度予測シミュレーションを行います。モデル内では水星周辺での熱環境を模擬し，搭載機器のON/OFF状態や太陽電池セルの発電の有無も加味した解析が行われます。これまでに，より高精度な温度予測を行うために水星赤外の模擬方法の改善やモデルと地上試験およびフライトデータとの合わせ込みが行われてきました。

熱検証と温度予測



10倍の太陽光を当てる熱真空試験



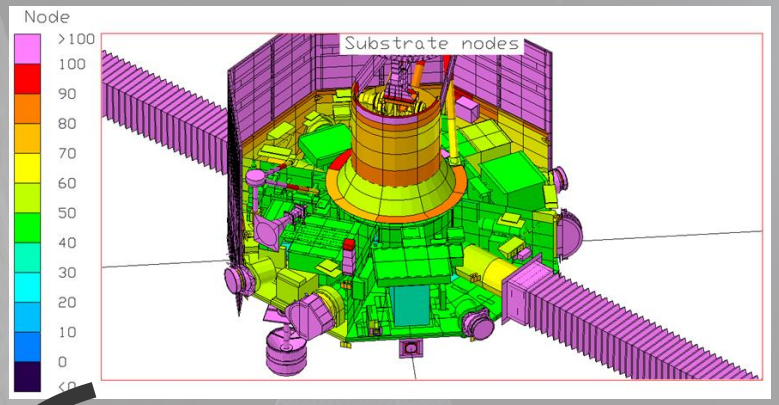
熱数学モデルを用いた温度予測

7.11 探査機の熱対策#5

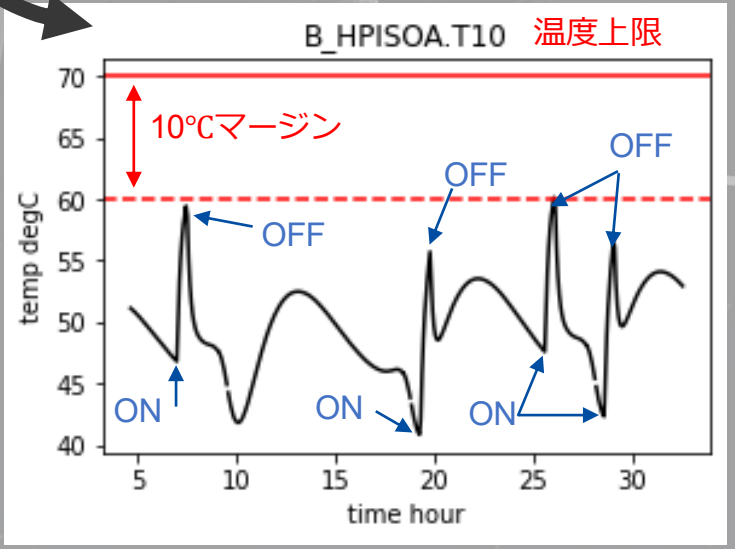
MMOの運用

運用ではとにかく機体の温度を上げすぎないことが大切です。そのため，熱数学モデルを使ったシミュレーションで綿密に温度を予測し，危険な状態を未然に防ぐ運用計画を立てます。搭載機器は電源を入れると発熱して温度が上がるため機器が壊れないようにON/OFFのタイミングを細かく調整する必要があります。科学観測や地球との通信のタイミングも「機器の温度を許容範囲に収めること」が最優先で決められます。また熱数学モデルの予測誤差として10°Cの温度マージンを設定し，それを超えないように運用計画を作成します。

水星に到着するまでの間や，水星の影に隠れて太陽光が当たらない寒い期間はヒータによって機器を保存します。



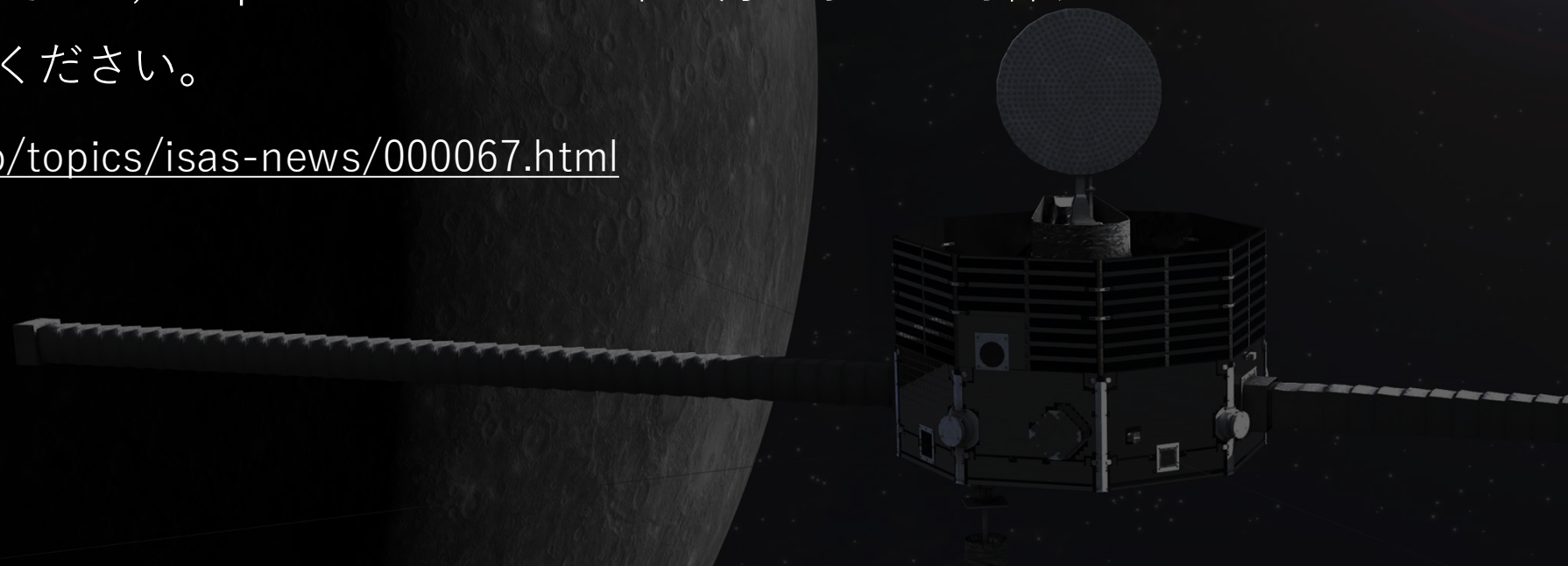
温度予測シミュレーション
⇓
安全な運用計画を立てる

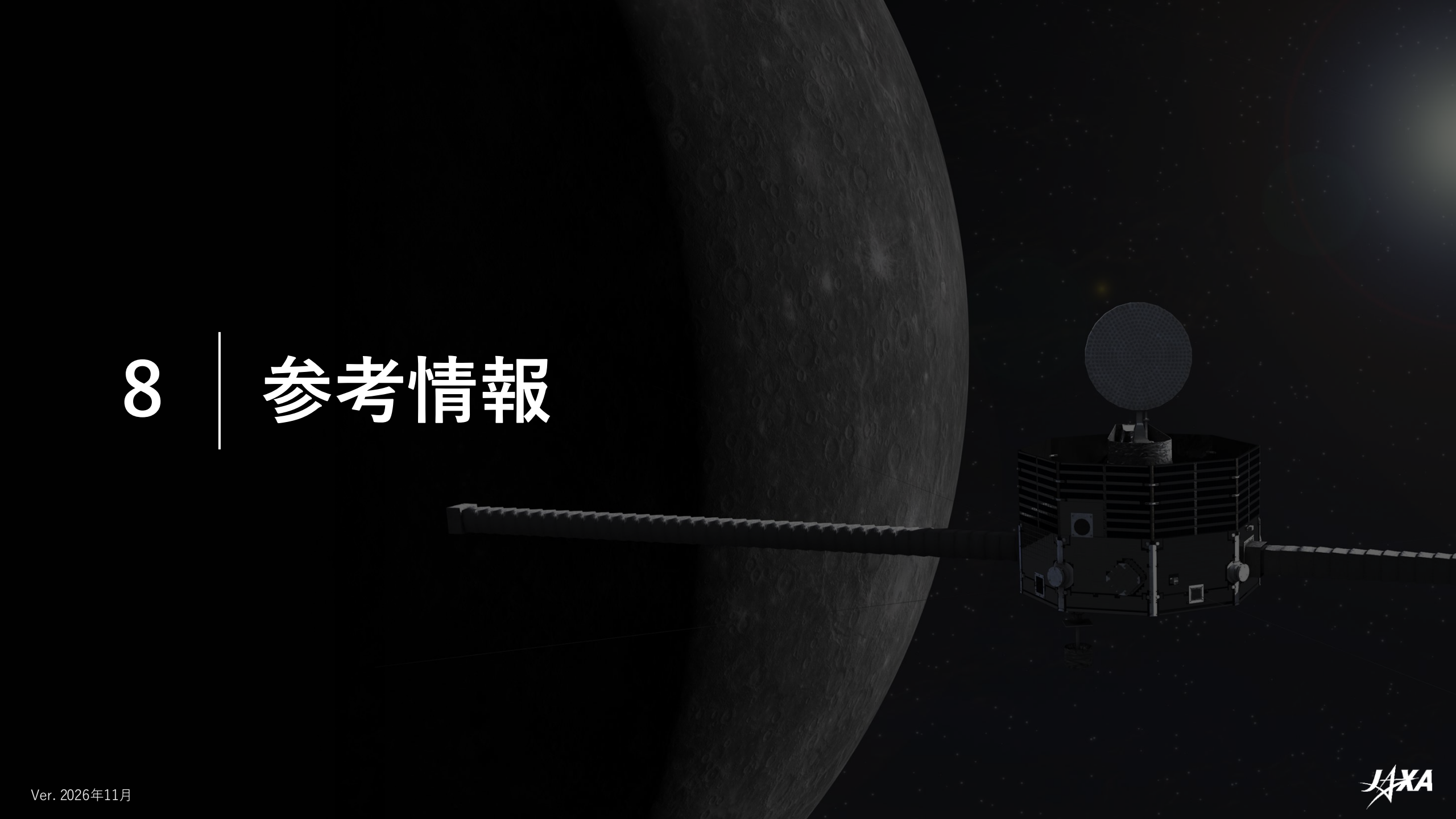


7.14 水星到着時期変更

2024年5月に欧州宇宙機関（ESA）より，BepiColomboの電気推進モジュール（MTM）の電源系に不具合が発生し，イオンエンジンを最大出力で噴射できないことが報告されました。そのため当初計画から変更され，BepiColomboは2026年11月に水星に到着することになりました。詳細は以下を参照ください。

► https://mio.isas.jaxa.jp/topics/isas-news/000067.html





8 参考情報

Ver. 2026年11月

8.1 略語表

表 略語

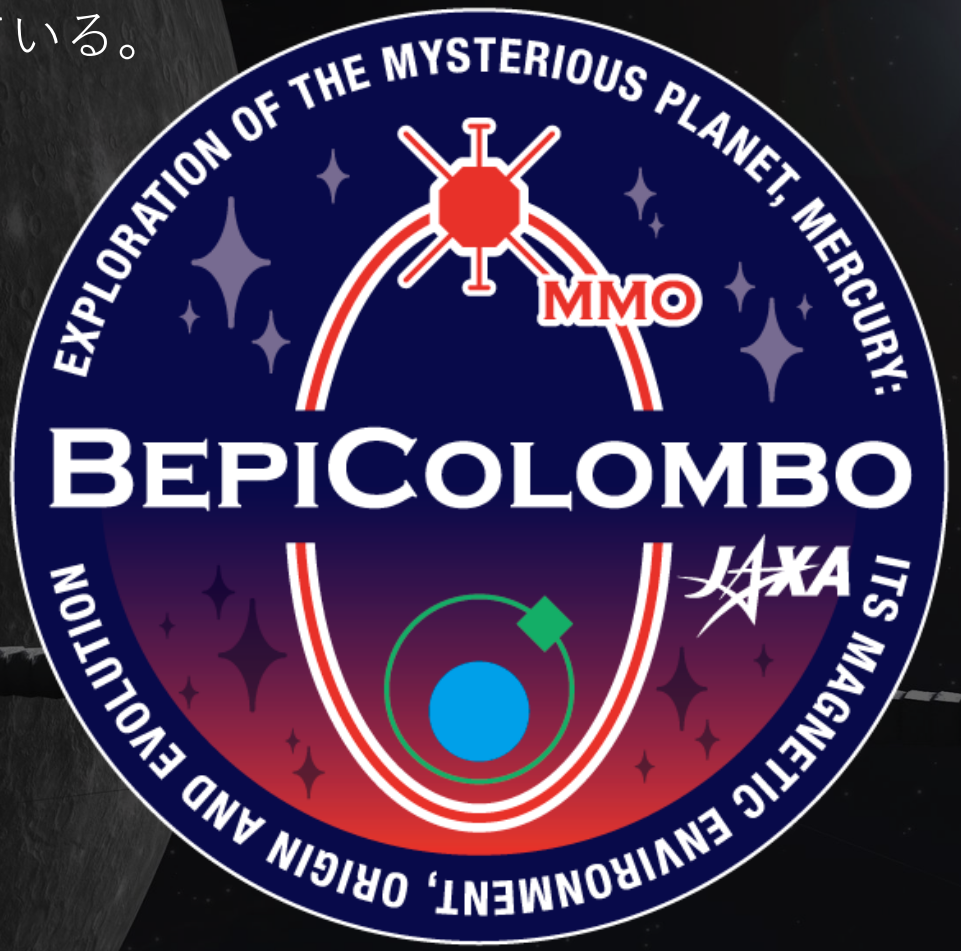
略語	英語	説明
ADM	Antenna Despun Motor	アンテナデスパンモータ
APM	Antenna Pointing Motor	アンテナ指向モータ
HGA	High Gain Antenna	高利得アンテナ
MGA	Medium Gain Antenna	中利得アンテナ

8.2 ミッションロゴ

水星を周回するMMO（およびMPO）をデザインしている。

背景下側の赤みは太陽からの熱を表している。

2012年度に製作した。



8.3 「BepiColombo」

BepiColombo（ベピコロンボ）は，ESA/JAXA共同のミッション名であり，JAXAのプロジェクトチーム名です。

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。

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。



8.4 愛称「みお」

「みお」は探査機MMOの愛称です。開発中はMMOと呼んでいましたが，新たに愛称をつけました。

「みお」は河川や海で船が航行する水路や航跡の意味をもちます。

これまでの探査機の研究開発の道のりを示すとともに，これからの航海安全への祈りが込められています。

また，古くより船が航行するときの目印にする標識を澪標（みおつくし）と云い，和歌では「身を尽くし」の掛詞になることから，努力と挑戦を続けるプロジェクトメンバーの思いを表しています。

この愛称は2018年に公募で選ばれました。

► 参考

- 水星磁気圏探査機MMOの愛称決定について（JAXA）



Copyright : JAXA