

SLS搭載超小型探査機プロジェクトの状況

資料76-3

科学技術・学術審議会
研究計画・評価分科会
宇宙開発利用部会
(第76回) 2023.6.27

令和5年（2023年）6月27日

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構
SLS搭載超小型探査機プロジェクトチーム

チーム長 橋本 樹明

副チーム長 船瀬 龍



1. SLS搭載超小型探査機プロジェクトの経緯
2. EQUULEUS探査機
 - 2-1. ミッション概要
 - 2-2. これまでの運用状況
 - 2-3. これまでの成果等
 - 2-4. 今後の運用予定
3. OMOTENASHI探査機
 - 3-1. ミッション概要
 - 3-2. これまでの運用状況
 - 3-3. これまでの成果等
 - 3-4. 今後の運用予定
4. 今後の超小型探査機開発について

1. SLS搭載超小型探査機プロジェクトの経緯



NASA SLS初号機（後にArtemis Iと命名）の相乗り機会を活用し、**大学等の人材育成含め超小型探査技術の実証等に挑戦。**

- 2015年8月にNASAより、SLS初号機（後にArtemis Iと命名）の相乗りとして、各宇宙機関にキューブサットのミッション提案をするように要請があった。
- JAXAから複数案をNASAへ提案。**2016年4月にNASAによってEQUULEUSとOMOTENASHIが選定**された。（*1）
- NASA選定を受けて、2016年9月に**JAXA宇宙科学研究所の部門内プロジェクトとして「SLS搭載超小型探査機プロジェクト」が発足**。EQUULEUS探査機はJAXA若手技術者と東京大学が連携、OMOTENASHI探査機は人材育成を兼ねてJAXA若手技術者を中心に開発することとした。
- 選定当時は2018年秋の打上げ目標であり、2018年初頭には探査機の引き渡しが必要であった。
- その後、SLSロケットの開発遅れから引き渡し日程は延期され、**最終的には2019年末までに探査機を完成させて安全審査資料(*2)をNASAへ提出、2021年7月に両探査機をNASAへ引き渡し**、SLSロケットに搭載された。打上げは数回延期され、**2022年11月16日に打上げ**となった。

（*1） Artemis Iには13機の超小型探査機が搭載決定されていたが、3機は引き渡しまでに開発が間に合わず、最終的には10機が打ち上げられた。

（*2） SLS初号機のORION宇宙船は無人であるが、有人機を想定した安全要求が課せられた。



- ・太陽-地球-月圏における軌道制御実証（EQUilibriUm Lunar-Earth point 6U Spacecraft）
- ・ミッション：超小型探査機による深宇宙航行・探査の実証を行い、月ラグランジュ点を目指す。

1. 工学ミッション：太陽—地球—月圏での軌道操作技術の開発・実証

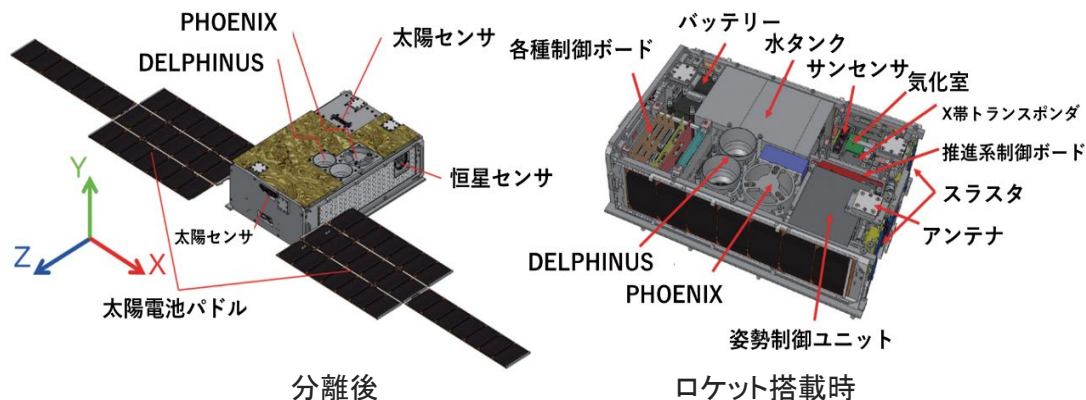
⇒水を推進剤とするレジストジェット推進系

2. 科学観測ミッション：

- ・地球磁気圏プラズマの全体像を極端紫外光による観測 ⇒プラズマ撮像装置
- ・月裏面への隕石衝突の観測により隕石サイズ・頻度の評価 ⇒閃光撮像カメラ
- ・地球から月軌道周辺までの空間におけるダスト環境の評価 ⇒ダスト計測器

・構成

- ・深宇宙探査の基本機器（50W太陽電池パドル、3軸姿勢制御、X帯トラポン、高効率推進系）
- ・3つの科学観測機器
- ・本体大きさ：長さ37cm、幅24cm、高さ11cm、重さ13kg（太陽電池パネル：30cm×6cm×8枚）



2-2.EQUULEUSの状況（これまでの運用状況）



- 初期の探査機の機能確認（ミニマムサクセス達成）と軌道制御を経て最初の月フライバイ（2022年11月22日）に成功した後、2023年4月27日までに3回の軌道変換運用（DV※運用）と11回の軌道修正運用（TCM※運用）を予定通り実施し、2023年末までの地球-月系第2ラグランジュ点（EML2※）到着に向けて順調に航行を継続してきた。
- 打上げ後3か月を経過した2023年2月に、予定にはない試みとして太陽系に飛来してきた長周期彗星（ZTF彗星）を探査機搭載の月面衝突閃光観測装置を用いて撮影し、探査機の健全性及び高い姿勢安定度を確認した。
- 観測機器（磁気圏プラズマ撮像装置、月面衝突閃光観測装置、ダスト検出器）のチェックアウトを2023年4月までに順調に終了し、磁気圏プラズマ撮像装置によるサイエンスデータ取得に成功。定期的なTCM運用を継続しながらEML2到達を目指した（ここままでフルサクセスを達成）。
- EML2到達の途上、5月18日21時からの美笹局での探査機との通信パスにおいて、探査機からの電波の入感が確認できず。18日以前の通信パス（5月16日）では探査機に問題はなかった。
- 原因の切り分けを行い、地上系ではなく、探査機側の問題と識別。搭載計算機を通さず送信機を直接操作する「特別コマンド」による送信機ON、探査機リセット等を試みるも電波の確認はできていない。
- 5月23日から5月25日にかけて、EML2への飛行軌道の中で最後の地球接近のタイミングに合わせて世界各地の大型望遠鏡（すばる望遠鏡、京都大学岡山天文台、ローウェル天文台。その他複数の機関にも観測協力をいただいた）にて探査機の光学観測を実施し、その測光観測から、5月16日時点の探査機の保有角運動量と統合的な回転速度で探査機が回転していることが示唆される結果が得られたため、探査機の電源が枯渇し無制御で回転している状態と推測している。無制御状態に陥った原因についてはFTA等により解析を実施中。
- 探査機の太陽電池パドルへ太陽光があたりバッテリーが充電されるタイミングを待ちながら、探索運用を継続しているが、現時点で探査機との通信は復帰していない。

※DV：Delta-V (Velocity)

TCM：Trajectory Correction Maneuver

EML2：Earth-Moon L2 point

2-3. EQUULEUS探査機（これまでの成果等）



- 成果として2つの世界初を達成した。1つは、**水を推進剤とする推進系による地球低軌道以遠での軌道制御に世界で初めて成功した**。打上げ後3か月を経過した2023年2月に、予定にはない試みとして太陽系に飛来してきた長周期彗星（ZTF彗星）を探査機から撮影し、探査機の健全性及び高い姿勢安定度を確認した。**長周期彗星を超小型探査機から撮影したのはEQUULEUSが世界初である。**
- **SLSに搭載され打上げられた超小型探査機は10機（米国7機、日本2機、欧州（イタリア）1機）であるが、予定通りの能動的な軌道制御に成功しているのはEQUULEUSのみである。**
- 観測機器（磁気圏プラズマ撮像装置、月面衝突閃光観測装置、ダスト検出器）のチェックアウトが順調に終了し、磁気圏プラズマ撮像装置についてはサイエンスデータ取得に成功（今後論文発表予定）。**当初のEQUULEUSのサクセスクライテリアの中でフルサクセスまで達成。**
- EQUULEUSは月以遠での超精密軌道決定・軌道制御に成功し、世界的にも超小型探査機として大きな成果を上げている。この成果は、超小型探査機による科学成果創出のための標準的なバス技術や知見となるとともに、超小型衛星や探査機に携わる民間企業や大学に対しても参考となる成功事例や知見となっており、民間企業や大学も含めた今後の超小型衛星や探査機による宇宙科学・探査の活性化に大きな貢献を果たしている。
- EQUULEUSは東京大学との共同開発ミッションであり、**開発に参加した学生がスタートアップ企業（ベンチャー企業）を複数起業するなど、人材育成成果を上げた。**（アークエッジ・スペース社、パール・ブルー社）



- 地球・月圏での高精度な航法・誘導・制御に成功、磁気圏プラズマ撮像にも成功し、当初のEQUULEUSのサクセスクライテリアにおけるフルサクセスは全て達成した。
- 現在、探査機は電源が枯渇し無制御で回転している状態と推測される。探査機の姿勢運動・軌道運動により太陽電池パドルへ太陽光があたりバッテリーが充電されるタイミングを待ちながら、探索運用を継続している。
- EML2への到達にむけて、大きな軌道変換運用（DV運用）は必要なく、定期的な軌道修正運用（TCM）により科学観測を継続しながらEML2へ到達できる状況であった。探査機が復旧でき次第、軌道修正をおこない、EML2への航行を再開したい。



・超小型セミハード衝突機による革新的月探査技術の実証機

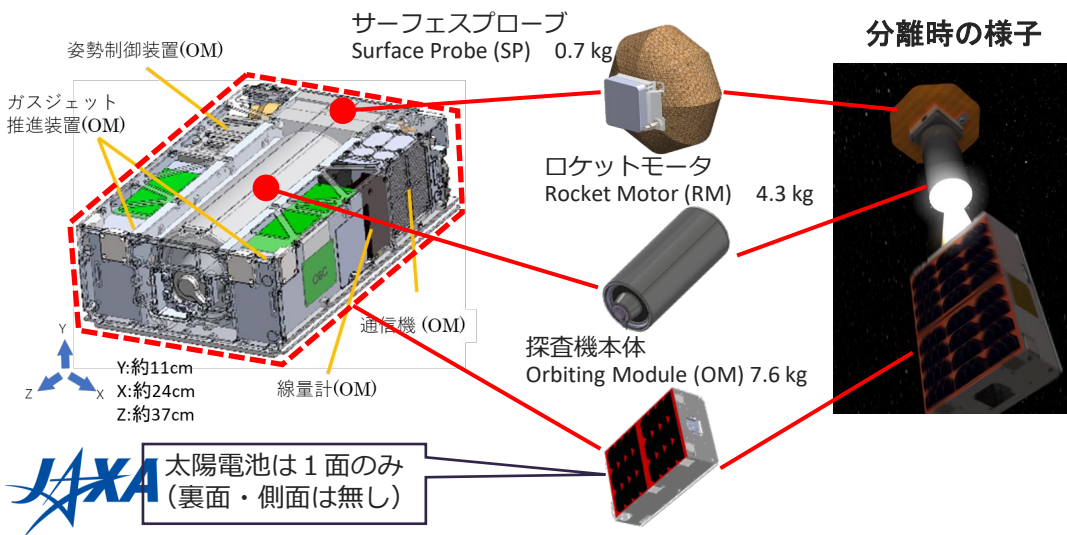
(Outstanding MOon exploration TEchnologies demonstrated by NAno Semi-Hard Impactor)

・ミッション: 超小型探査機による月面へのセミハード着陸の実証を行う。

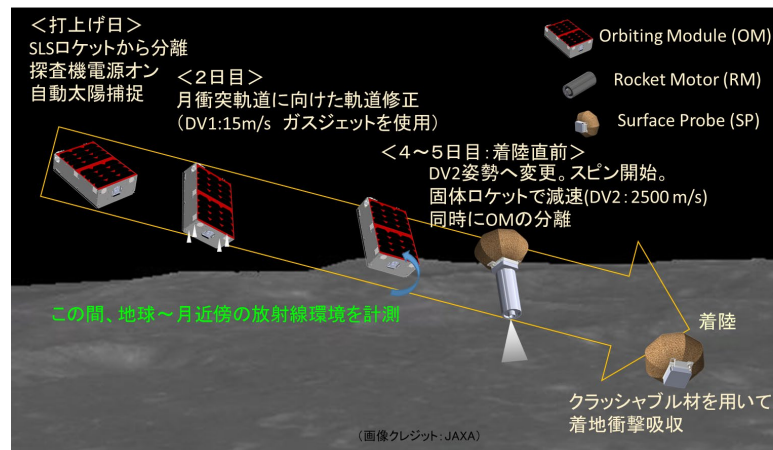
1. 超小型探査機での月面着陸技術の開発・実証
⇒超小型固体ロケットモータ、超小型低擾乱分離機構、衝撃吸収技術
2. 地球磁気圏外での放射線環境の測定
⇒超小型放射線モニタ

・構成

- ・ OMOTENASHI探査機は3つの部分から構成
- ・ 着陸直前にロケットモータ(RM)+サーフェスプローブ(SP)が探査機本体(OM)から分離される。
- ・ 大きさ: 長さ37cm、幅24cm、高さ11cm、重さ13kg



ミッションシーケンス





- OMOTENASHI探査機は、ロケットからの分離後、**第一可視であるNASA-DSN地上局（マドリッド）における通信が出来たが、それ以降、探査機との通信が出来ない状況が継続した。**
 - 月着陸に必要な軌道変更の実施時期である2022年11月22日までに、探査機との通信が回復できなかったため、**月面への着陸は行えなかった。**なお放射線環境測定については、第1可視の約30分間の計測が行われており、データの詳細評価を行っている。
 - 2023年3月頃から充電が行われ、通信が復旧する可能性があり、**2023年6月現在探索運用を継続している。**探査機との通信が回復した場合、超小型探査機としての技術実証やできるだけ長期間の放射線環境測定を実施し、一部のミッションの達成を目指す。
 - JAXA宇宙研として、対策チーム（OMOTENASHI運用異常対策チーム）を設置し、**運用異常の原因究明、教訓（レッスズラウンド）をまとめ、2022年12月20日に文部科学省宇宙開発利用部会に報告した。**
 - 原因究明結果として、ガスジェットスラスタバルブが何らかの理由で十分に閉止しなかった。そのため、ガス貯めにあった推進薬がスラスタから放出されたことで機体が回転。太陽が当たらない姿勢で回転を続けたことを推定した。
- スラスタバルブが閉止しない事象は、地上試験時には発生していない。軌道上で発生した要因候補として、推進薬充填から軌道上運用までの3年以上に及ぶ待機期間におけるバルブシール特性の劣化や、コンタミネーション(微小な異物)の影響が挙げられた。(2022/12/20 **宇宙開発利用部会既報告**)

3-2.OMOTENASHI探査機（これまでの運用状況）



- OMOTENASHI探査機の探索のため、以下の作業を実施した。
 1. 第一可視時の姿勢情報から、各日付における太陽電池に太陽光が当たる角度とその際の発生電力を推定した。その結果、2023年3月頃から探査機が起動する可能性があるかと予想した。
 2. 探査機シミュレータを用いて、それぞれの発生電力における探査機が自動的に立ち上がる際の状態を測定した。各状態において、復旧させるのに適切なコマンド列を検討した。
 3. 精密な軌道決定ができていない状態で月をフライバイしたため、月の重力により軌道誤差が非常に大きくなった。地上局のアンテナビーム内（臼田局の場合は0.04 deg）に探査機を捉えるためには膨大な探索時間がかかるため、同時に打ち上がった他の超小型探査機の軌道と、各探査機の分離装置の搭載位相の関係から、OMOTENASHIの軌道推定精度を上げた。また数十分の限られた追跡データから軌道決定を試み、両者が一致することを確認した。
 4. 2項の探査機状態（探査機の回転周期）を考慮すると、1方向に2分間程度滞留する必要があり、軌道誤差に応じた角度範囲（5deg×120deg程度）を逐次探索すると膨大な時間がかかることから、軌道力学の制約条件（未知パラメータはSLSロケットからの分離速度のみ）を考慮した探索法を考案した。
 5. この方法に基づき、2023年2月より試験運用、同年3月より探索運用を開始している。
 6. 効率的な探索運用を行うため、電波の使用法の変更（送信周波数を変えながらコマンド送信する）申請を行い2023年5月26日に認可された。また太陽周回軌道にて軌道上実験を行うため、衛星管理許可の変更申請を行い2023年5月16日に認可された。



- ミッション目的の一つであった地球磁気圏外での放射線環境測定について、第一可視でのテレメトリにてデータ受信することができ、観測に成功した。データ詳細解析中であるが、超小型の放射線モニタが軌道上で十分に動作する機能することが確認できた。また、OMOTENASHI探査機のジオメトリや宇宙環境を高精度に反映した放射線挙動シミュレーション解析とも一致する結果が得られており、国際宇宙探査に向けた放射線遮蔽設計や線量予測などに貢献できた。
- 軌道上不具合から得られた教訓として、大きさや重量が限られ、短期開発が必要な超小型衛星（キューブサット）開発では既製品が使用されるが、調達後の機器の試験だけでなく、特性等につきメーカーとの十分なコミュニケーションが事前に必要。また、相乗り宇宙機は想定以上の長期にわたり待機・保管を要することが起こり得るため、各機器への影響について十分な評価を事前に行う必要がある。（2022/12/20 **宇宙開発利用部会既報告**）
→当該機器を使用しているJAXAプロジェクトはないが、本事象の知見についてJAXA内や超小型探査機コミュニティ内で共有・対話を行い、今後の研究開発に役立てることとした。
- OMOTENASHIの探索運用のために開発した諸技術は、同様の事例にも適用可能と考えられ、学会発表等を行って知見の共有を行っている。



- 引き続き、通信リンクが可能な9月末まで探索運用を継続する。軌道により地球からの距離が異なるため、発見時の状況に応じて以下の運用を計画している。
- 通信回復時にテレメトリ受信が可能であれば、下記の運用を行う。
 - ✓ 各機器の状態の確認
 - ✓ 薄膜太陽電池の発生電力確認
 - ✓ 地球磁気圏外の放射線計測の継続
 - ✓ 固体ロケットモータ点火実験
- テレメトリ受信が不可能な場合は、通信回復時の電波の受信方向から、その方向に見える場合の軌道パラメータがわかる。これまでの軌道推定法の妥当性を検証する。

【参考】他機関のSLS搭載超小型探査機の状況



- **SLSに搭載され打上げられた他機関の超小型探査機（8機）について予定通りのミッションを完全に実施できているものは無し。**
- **特に超小型探査機による深宇宙探査に必須な能動的軌道制御は難度が高く、成功したのはEQUULEUSのみ。**

打上げ有無	探査機名	主な開発機関	ミッション	探査機の状況
打ち上げられた探査機	Argo Moon	ASI ArgoTec社	高解像度画像の高速伝送技術実証。SLSロケット上段等の撮影。	月と地球の撮像に成功したが、推進系不具合により地球近傍に留められなかった。
	LunarH-Map	Arizona State Univ.	月の極域の水氷の観測	観測機器は正常に動作したが、推進系の不具合により月周回軌道に投入できなかった。
	Bio Sentinel	NASA Ames	生物細胞の放射線による劣化の測定	打上げ前1年以上装置にアクセスできなかったため、細胞の劣化が懸念されている。
	Lunar Ice Cube	Morehead State Univ. NASA GSFC	高周波イオンエンジンの技術実証。月の極域の水氷観測。	正常な通信が確立しなかった。
	NEA Scout	NASA MSFC NASA JPL	ソーラセイルの技術実証。小惑星フライバイ観測。	正常な通信が確立しなかった。
	Lun IR	Lockheed Martin社	コロイドスラスターの技術実証。月極域の氷の観測。	正常な通信が確立しなかった。
	Team Miles	Miles Space	月面の中間赤外観測	正常な通信が確立しなかった。
	CuSP	Southwest Research Institute	宇宙プラズマ環境の計測	正常な通信が確立しなかった。
引き渡しに間に合わなかった探査機	CU-E3	Univ. of Colorado Boulder	深宇宙通信、太陽光圧を使った姿勢制御などの技術実証。	/
	CisLunar Explorers	Cornell Univ.	水電気推進技術と2機のL型3U合体CubeSatの技術実証。	
	Lunar Flashlight	NASA MSFC JPL	月面の水氷観測	

※報道情報等を踏まえ整理



- 昨今、衛星計画が大規模化・長期化し、頻度の低下による人材・産業技術基盤の脆弱化が課題となっています。キューブサット等の超小型宇宙機は大きさや重量が限られ、リスクは伴うものの、低コスト・高頻度で挑戦的なミッションを行える可能性があり、引き続き重要と考えております。(2022/12/20 宇宙開発利用部会既報告)
- 具体的には、超小型探査技術を戦略的に発展させ、深宇宙探査で世界をリードし、ゲームチェンジを起こすプログラム（次ページ参照）を立て、ステップバイステップで技術を高めていきたいと考えております。
- 宇宙研にとってもキューブサット等の超小型探査機への取り組みは始まったばかりです。EQUULEUS及びOMOTENASHIにおいて貴重な技術データを獲得できました。これら得られた成果・教訓をレッスンズラーンとし、超小型探査機の強みを失わず、より確実な開発が実現できるよう、ご理解をいただく取り組みも続けながら、努めて参りたいと存じます。

超小型探査技術を戦略的に発展させ、深宇宙探査で世界をリードする。

技術・実績・教訓を蓄積

より遠く・より興味深い天体へ

2014年打上げ

2022年打上げ

2029年打上げ予定

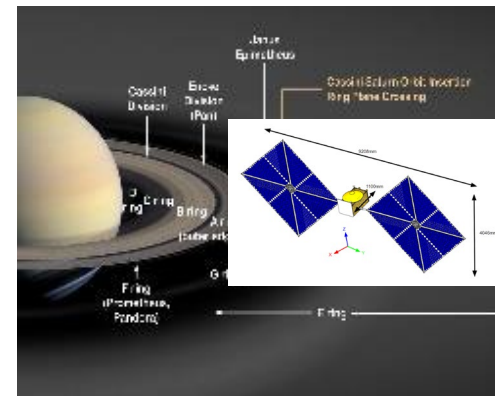
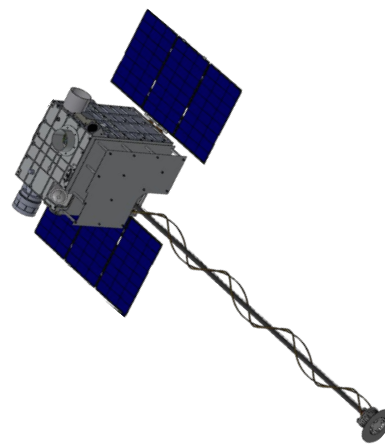
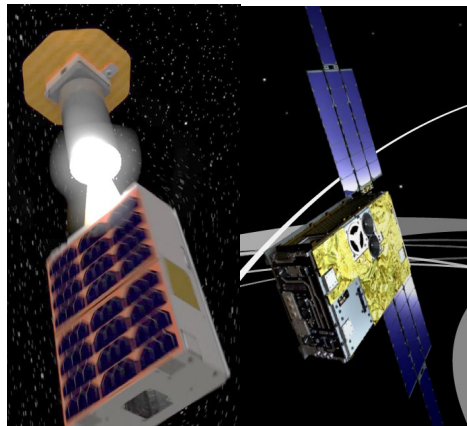
将来計画

超小型深宇宙探査機
PROCYON

超小型月探査機
OMOTENASHI/EQUULEUS

長周期彗星探査計画
(Comet Interceptor)

超小型外惑星
(土星圏) 探査計画
(OPENS)



<計画の狙い>

- 超小型衛星の深宇宙進出技術実証
- 東京大学主体+JAXA (大学発技術！)

<計画の狙い>

- 超小型探査機の小型化/高度化
- JAXAインハウス+東京大学

<計画の狙い>

- 超小型探査機のさらなる高度化
- プロジェクトマネジメントを超小型探査機規模に照らして効率化
- JAXA主体+企業

<計画の狙い>

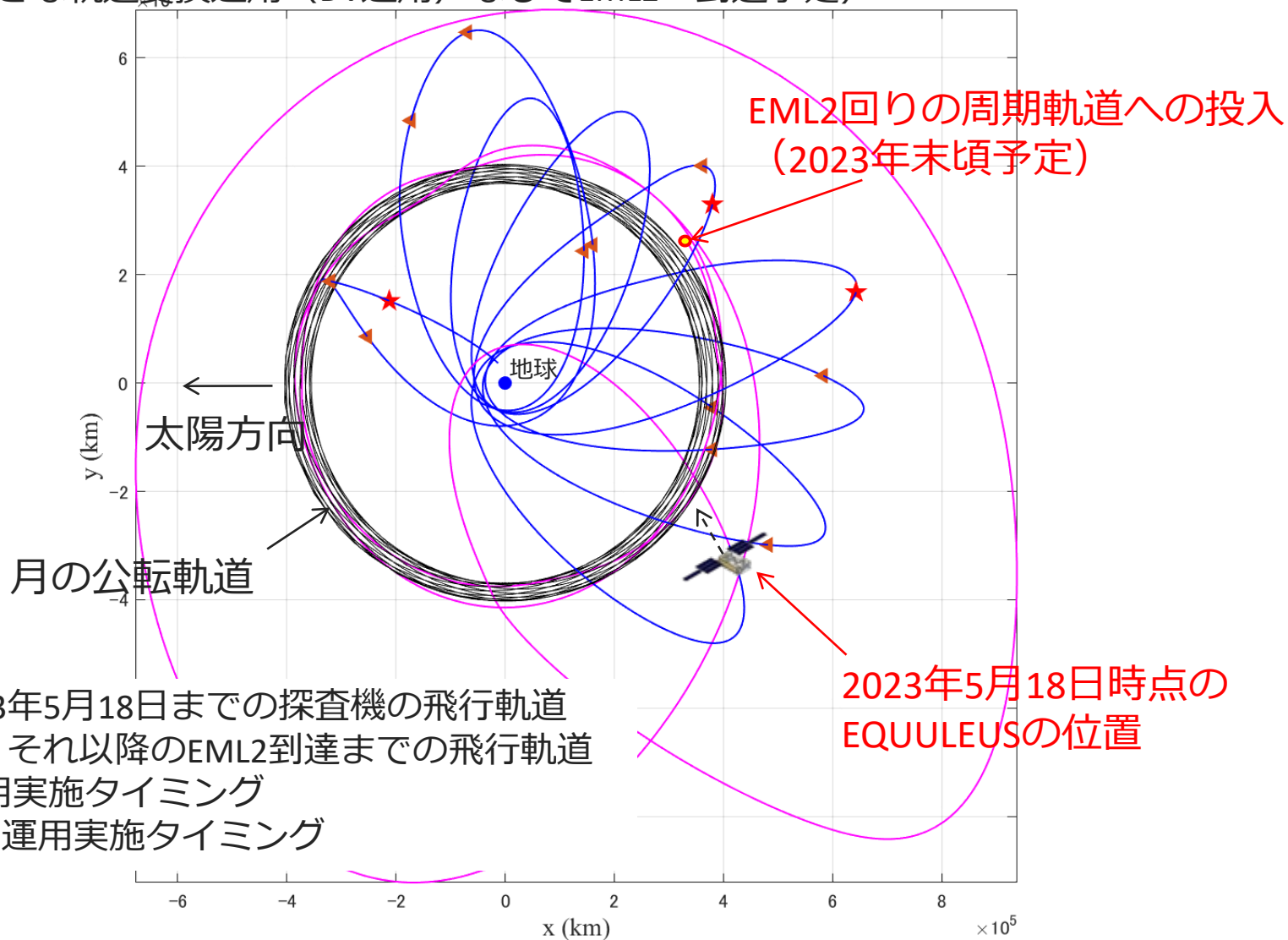
- 日本単独での外惑星探査へ挑戦

参 考

【参考】 EQUULEUSの飛行状況



2023年4月27日までに3回のDV運用，11回のTCM運用に成功し，2023年末にL2到着予定
(これ以降大きな軌道変換運用（DV運用）なしでEML2へ到達予定)



青実線：2023年5月18日までの探査機の飛行軌道
ピンク実線：それ以降のEML2到達までの飛行軌道
赤星：DV運用実施タイミング
赤三角：TCM運用実施タイミング

2023年5月18日時点の
EQUULEUSの位置

EML2回りの周期軌道への投入
(2023年末頃予定)

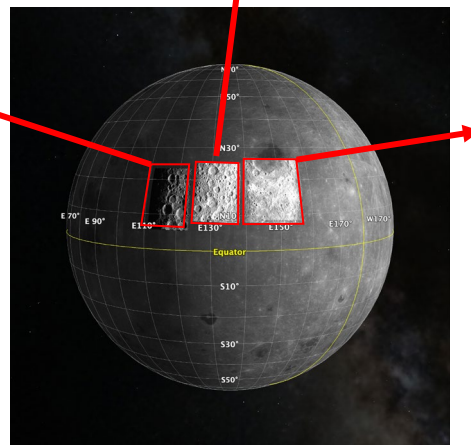
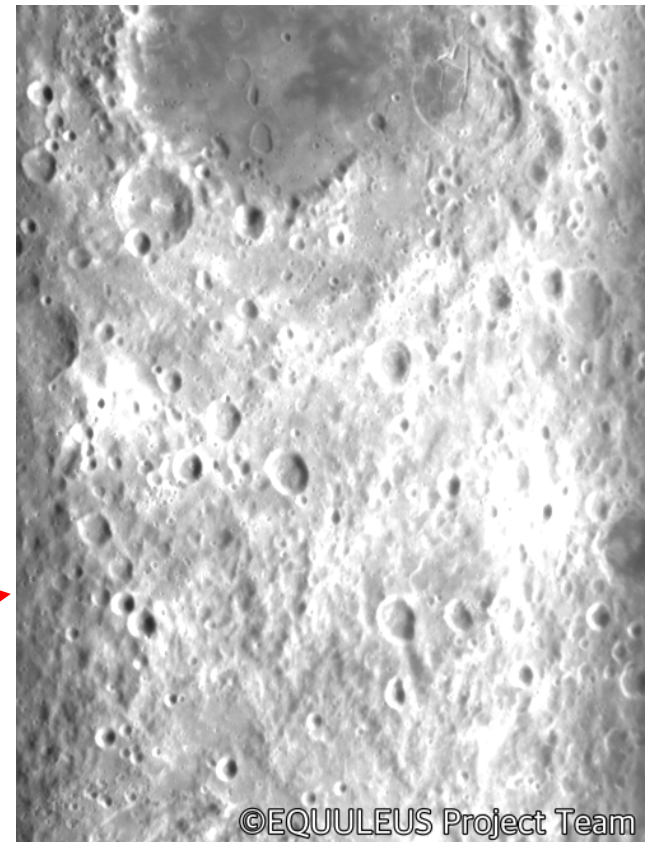
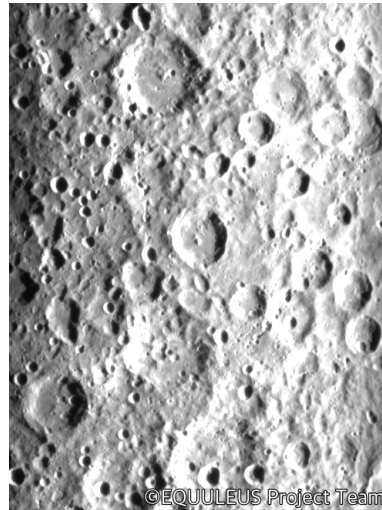
太陽—地球固定回転座標系におけるEQUULEUSの飛行軌道





	EQUULEUS
ミニマムサクセス	[打上後1週間] ・ 打上げ後に通信を確立し探査機の生存と基本的な探査機バス機能を確認できること
フルサクセス	[打上後数ヶ月] ・ 磁気圏プラズマ撮像できること ・ 地球・月圏で所定の精度で航法・誘導・制御ができること
エクストラサクセス	[L2点到達後1ヶ月] ・ EML2へ到達すること ・ Cis-lunar空間における固体天体の存在が確認できること（月面衝突閃光観測あるいはダスト観測を通じて）

**EQUULEUS探査機が撮影した月裏面の写真
月フライバイ中の最接近時付近に月裏面の昼夜境界領域の撮像に成功**

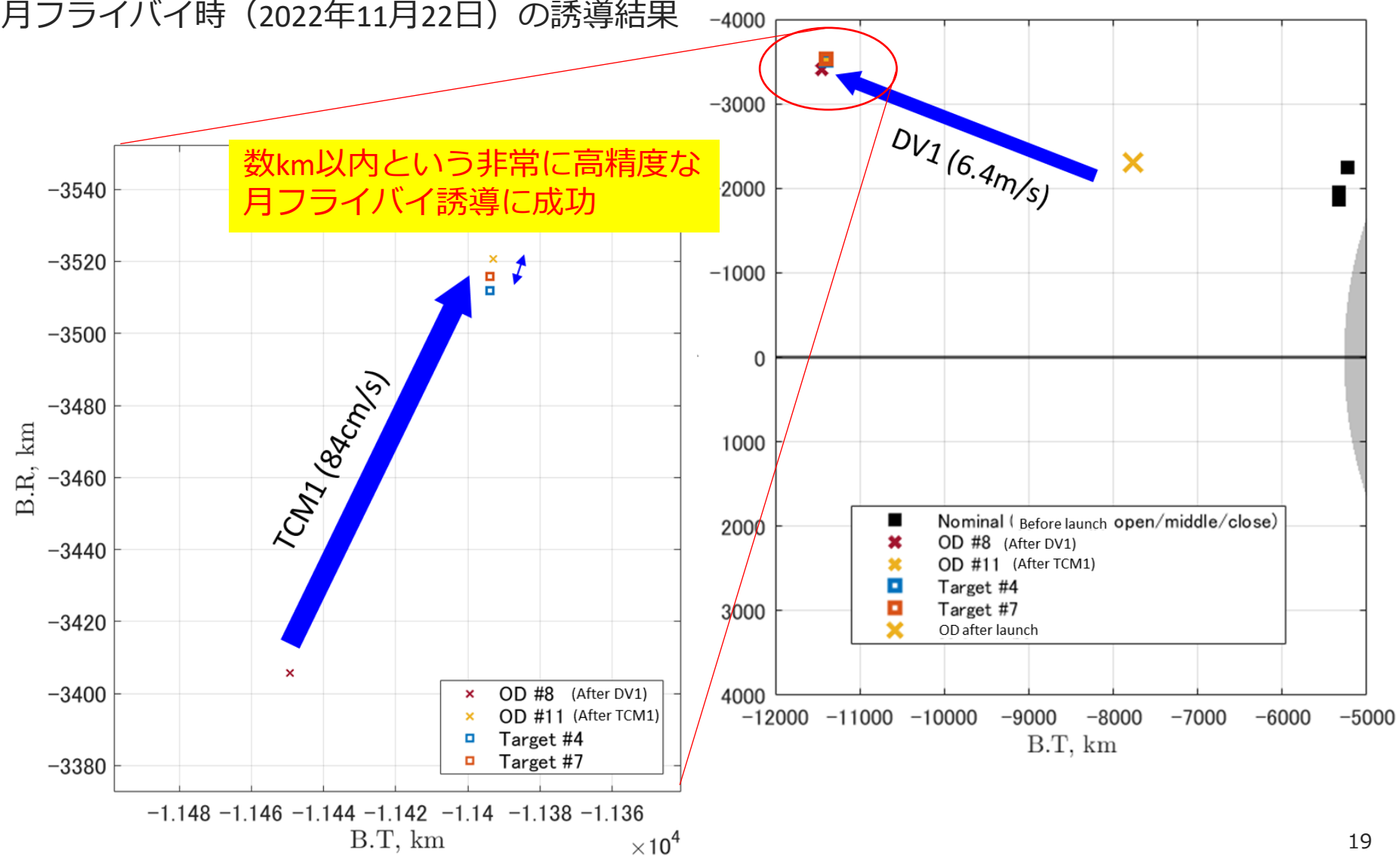


月裏面（撮影範囲）



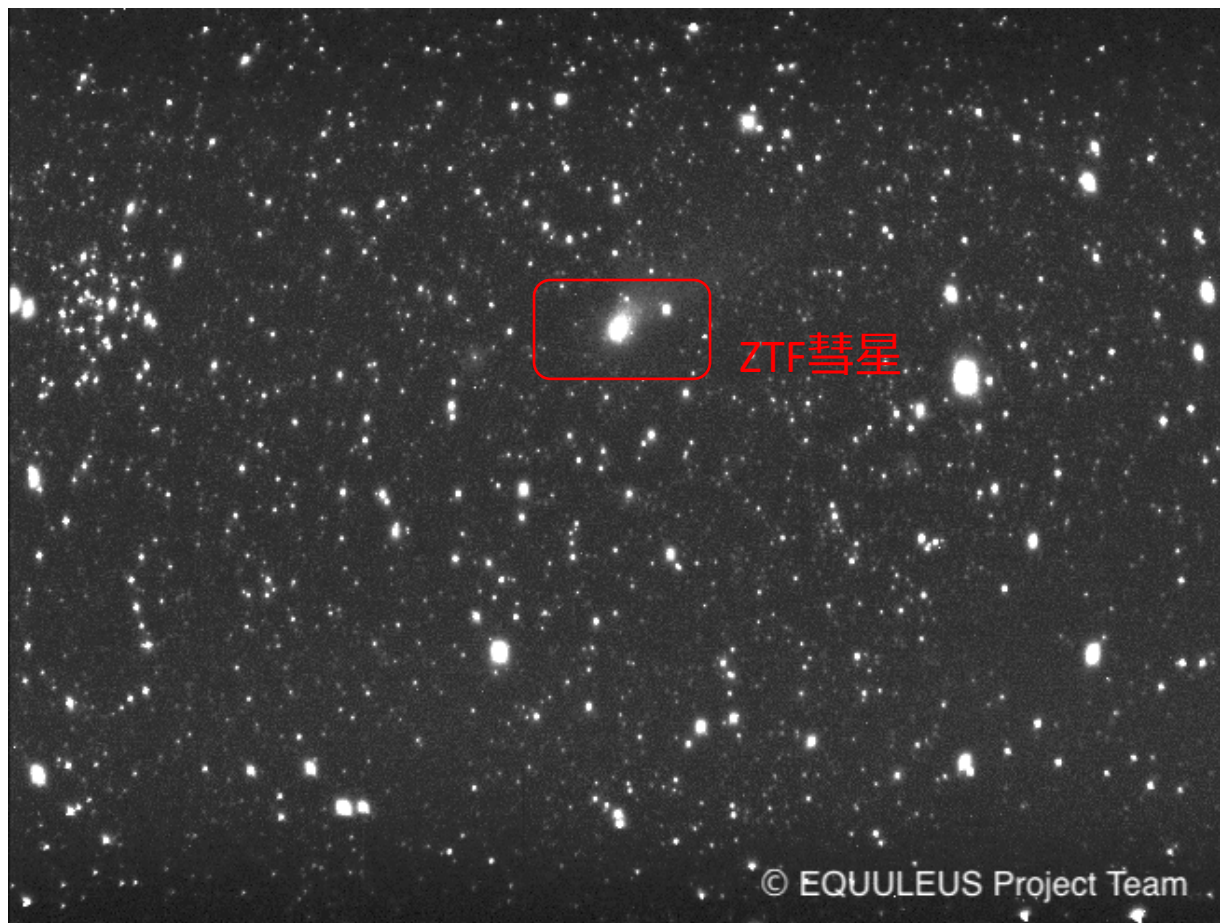
水を推進剤とする推進系による地球低軌道以遠での軌道制御に世界で初めて成功。

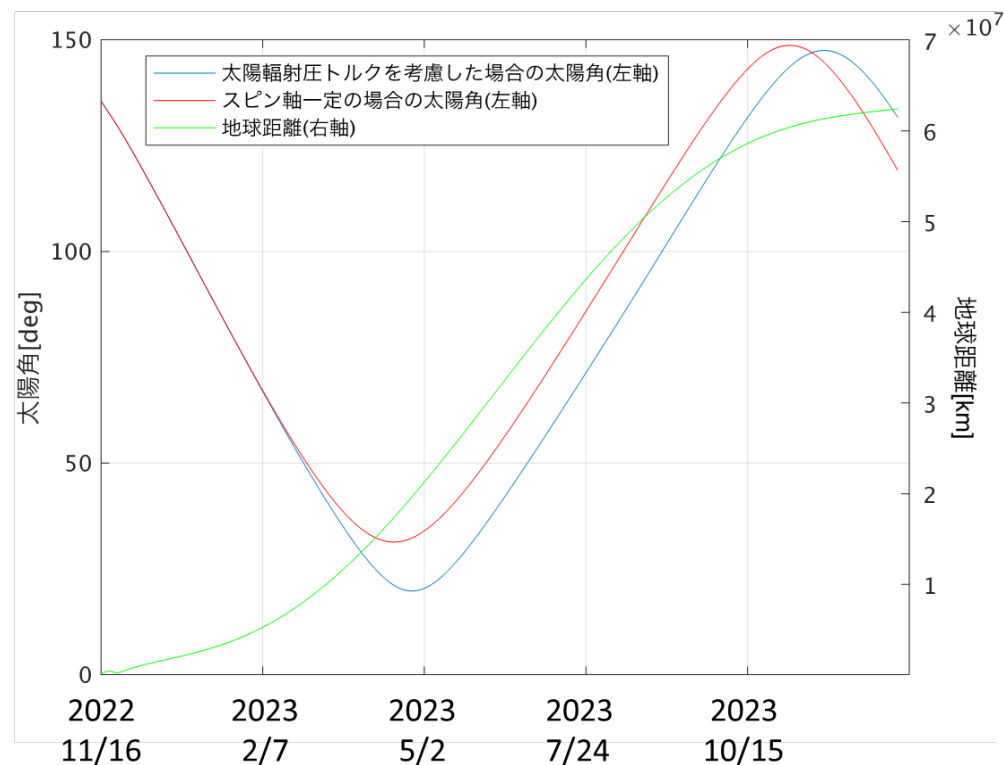
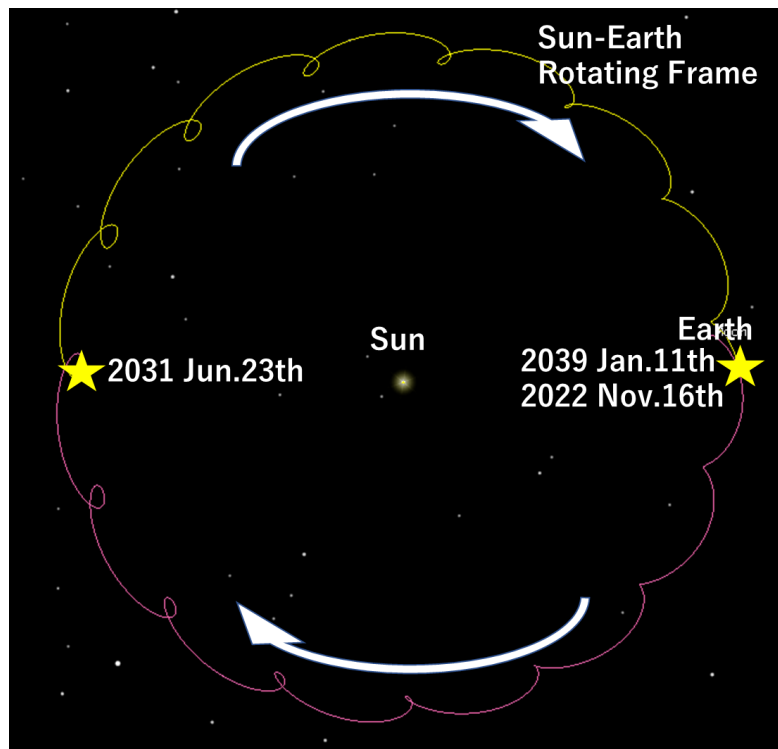
月フライバイ時（2022年11月22日）の誘導結果



長周期彗星を世界で初めて超小型探査機から撮影。

太陽系の果てのオールト雲からおよそ5万年ぶりに太陽に接近し、2023年2月2日に地球に最接近したZTF彗星（Comet C/2022 E3）をEQUULEUS搭載月面衝突閃光観測装置で撮像に成功。長時間の連続撮像において背景の恒星が動いていないことから、探査機の高い姿勢安定度があらためて確認できた。

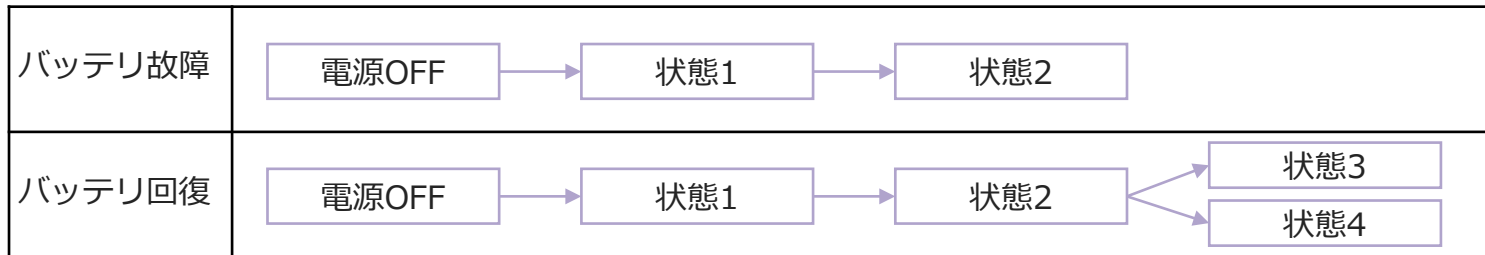




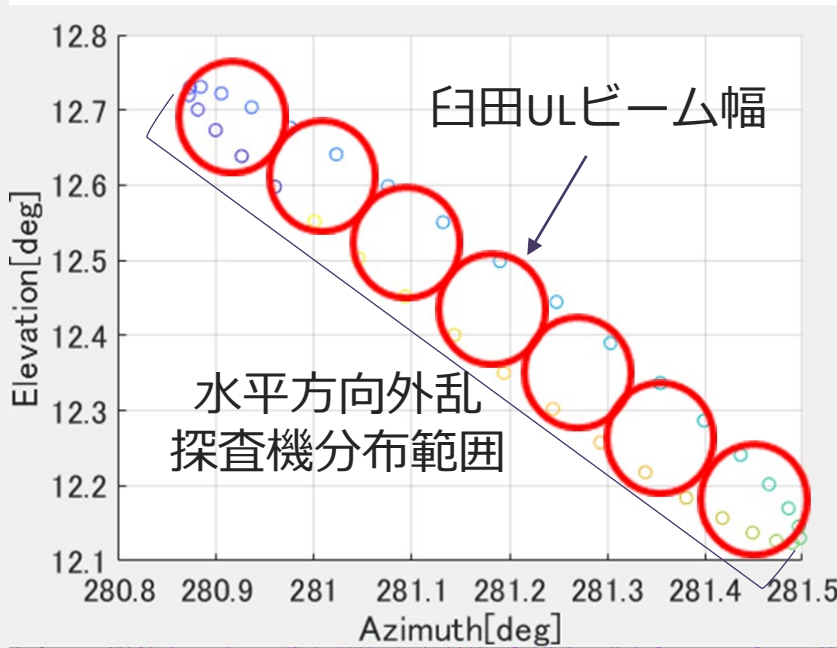
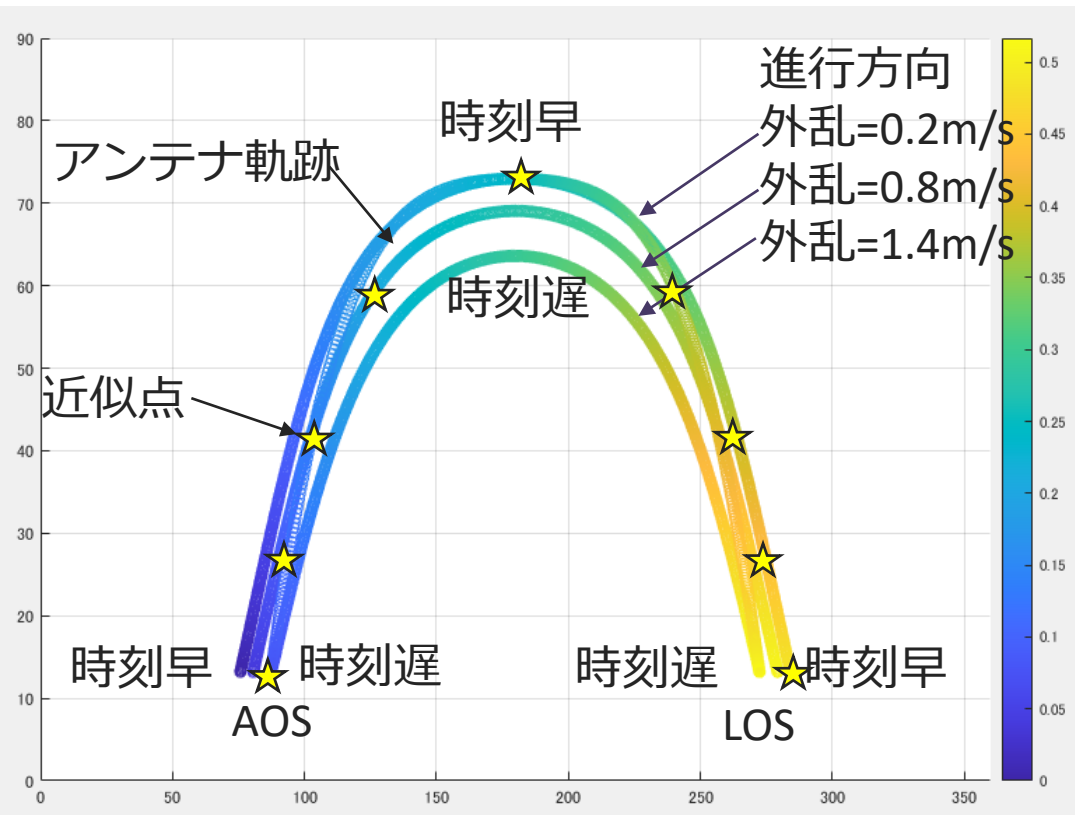
- OMOTENASHIは月をフライバイ後、地球から遠ざかる軌道に入っている。
- OMOTENASHIの回転軸方向が2022年11月16日の状態から変わらないとすれば、2023年1月中旬から太陽電池に太陽光が当たり始め、2023年2月頃から探査機が起動すると考えられる。なお、実際には初期の姿勢推定誤差、太陽輻射圧トルクの推定誤差等が10 deg程度はあるものと想定される。

No.	探査機状態	時期			送信機状態	OBC起動状態	回転周期	姿勢	探索運用の指針
		~2/17	3/3	3/19~					
1	OBC起動時にOBCリセット	○	○	×	オフ	1秒以下周期でリセット	7.2秒	電波ロス時の姿勢	対応策なし
2	MiPS起動時にOBCリセット	×	○	○	オン	30秒周期でリセット	7.2秒	電波ロス時の姿勢	TEST_MODEコマンドを送信してMiPSを起動させない設定にする。送信機をハイパワーモードとする。
3	MiPSへの電源供給不足によりレートダンプが終わらない	×	○	○	オン	安定起動	7.2秒	電波ロス時の姿勢	送信機をハイパワーモードとする。通信リンク回復後に次の対応を考える。
4	レートダンプ完了	×	○	○	オン	安定軌道	720秒	太陽指向	回転周期を120秒まで加速させる。送信機をハイパワーモードとする。各探索領域に120秒以上滞留させながら探索する。

※OBC: On Board Computer 搭載計算機 MiPS: ガスジェット推進装置 ○/×: 実験の結果存在したケース/存在しなかったケース



- 太陽電池の発生電力と、その場合にどの機器まで立ち上がるかを探査機シミュレータを用いた実験から求め、想定される探査機の状態を場合分けした。
- 状態2~4に応じた対応策を考え、どの状態であっても対応できるコマンド列を考案して、送信し続けている。



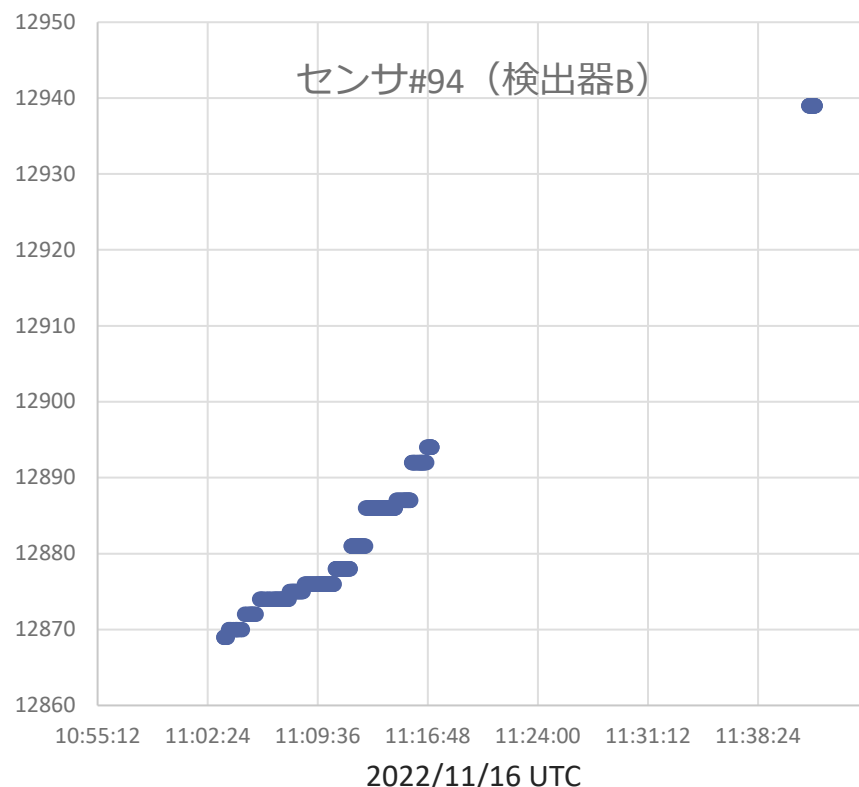
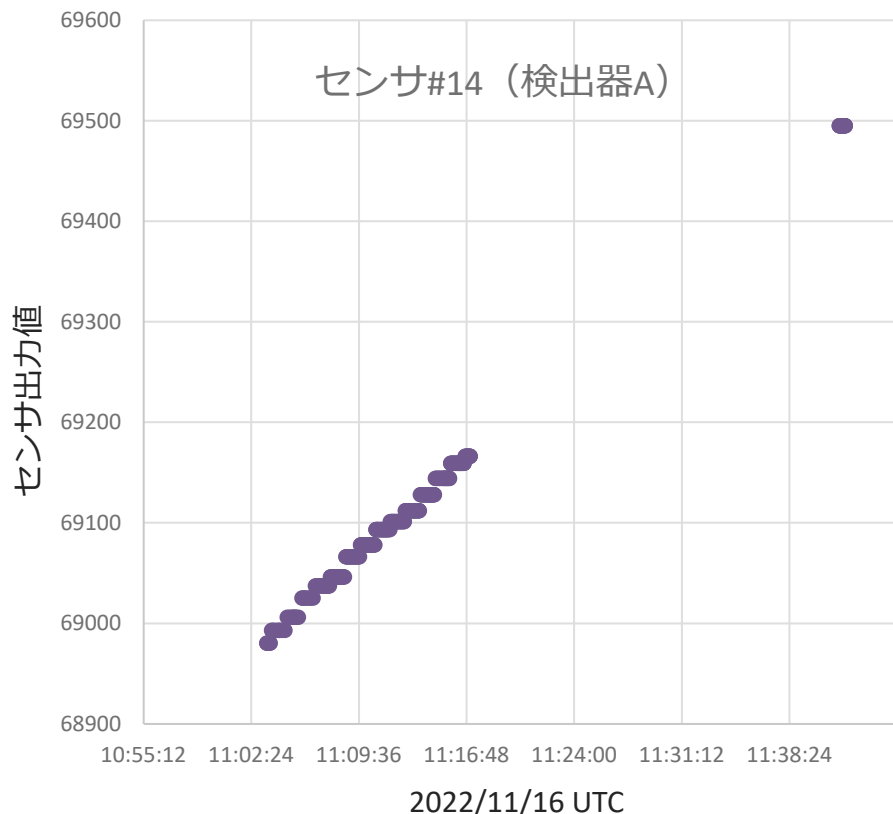
- ロケットからの分離速度方向の違いにより、ある時刻での探査機の見える方向は数deg x 150deg程度の幅があり、各方向を探索するには膨大な時間がかかる。
- 軌道に大きく影響するのはロケットからの分離速度のロケット進行方向成分であるので、これをパラメータとして徐々に変化させて、その場合に想定される軌道をつないだ擬似軌道を生成し、これを追跡することとした。この方法であれば、7運用日程度で存在確率の高い領域を探索することは可能。

【参考】超小型放射線モニタ 検出器A,Bの出力



検出器A（センサ#14）は、全粒子（陽子と銀河宇宙線の荷電粒子の合計）を計測する。時間経過とともにほぼ比例して値が増えており、宇宙放射線環境に大きな変動がなかったことを示す。OMOTENASHIに搭載した超小型放射線モニタの測定から、打上当日の放射線環境は約0.6 $\mu\text{Gy}/\text{min}$ と推定される。なお、打上げ当日の太陽活動は静穏レベルでの推移であったことがわかる。

今後、D-Space線量計による長期変動観測や太陽フレア発生時などの実測ができると、国際宇宙探査に向けた、地球磁気圏外での放射線環境に関する知見を深め、更なる宇宙放射線防護技術の獲得機会となることが期待される。



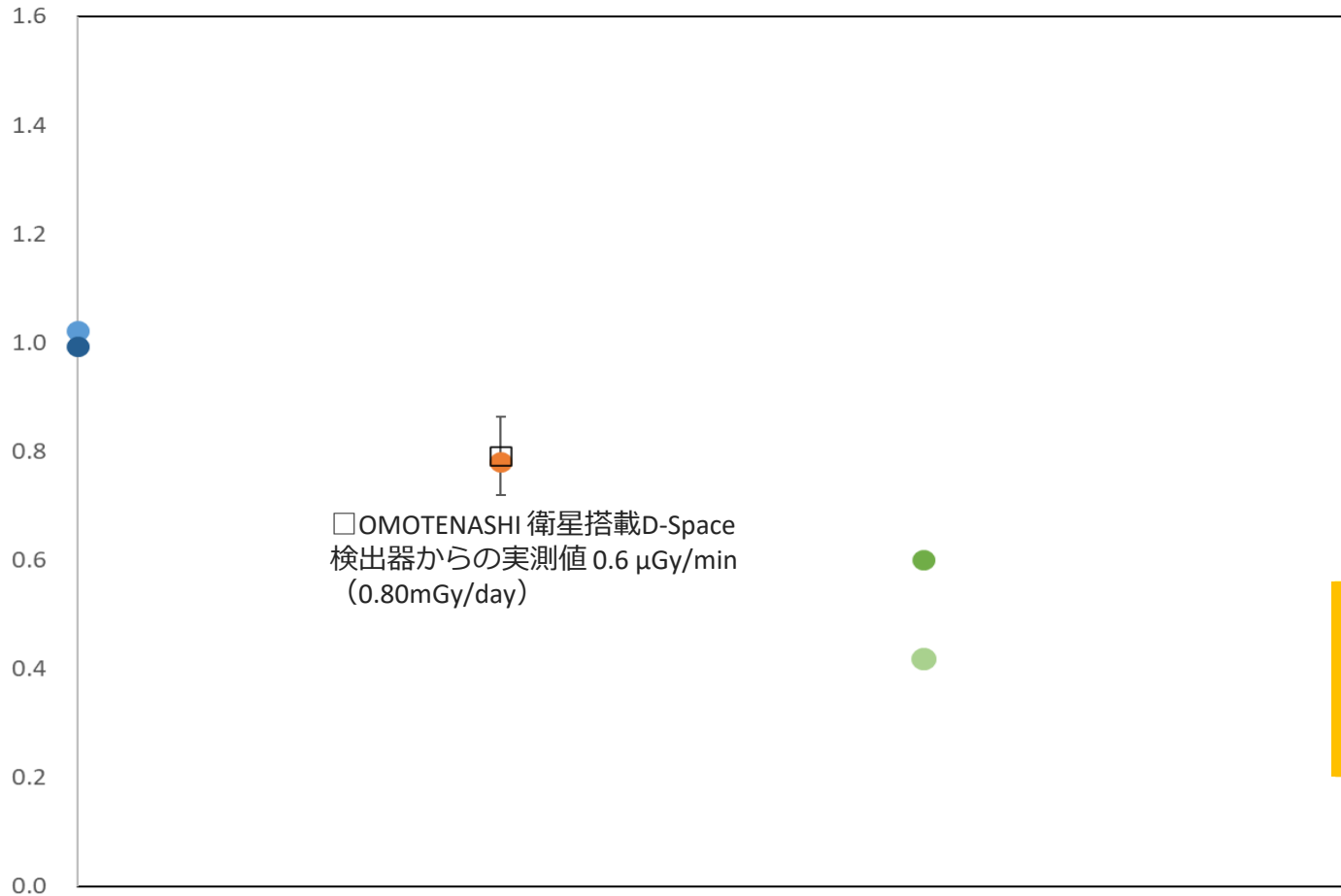
検出器A（センサ#14）は、全粒子（陽子と銀河宇宙線の荷電粒子の合計）を計測する。時間経過とともにほぼ比例して値が増えており、宇宙放射線環境に大きな変動がなかったことを示す。

検出器B（センサ#94）は、閾値以上の高エネルギー粒子（銀河宇宙線の重粒子）を計測する。時間にほぼ比例しているが、一部小さくなっている時間帯があり、現在、原因を検討中。検出器Aと検出器Bの出力の差が陽子の寄与に相当するので、地球磁気圏外における陽子と銀河宇宙線の寄与の比率を評価し、全線量が評価できた。



OMOTENASHI搭載D-Spaceのシミュレーション評価と実測の比較

A.U.



● OMOTENASHI打上期間中の
最大の太陽活動変動を想定
したPHITSシミュレーション評価

● 打上当日の太陽活動を
反映したPHITSシミュ
レーション評価

● OMOTENASH打上期間中の
最小の太陽活動変動を想定
したPHITSシミュレーション評価

参考：ISSきぼう実測
(JAXA PADLES線量計による
太陽活動23～24期)