

もう一つの月世界へ： 火星衛星探査計画MMX その13 ～フォボス表層に触れて理解する：MMX小型 ローバIDEFIXの狙い～

宮本 英昭¹, ステファン・ウラメック², パトリック・ミシェル³

(要旨) 火星衛星探査計画MMXでは、小型ローバIDEFIXによるその場探査が計画されている。本稿では、IDEFIXの2人の主任研究者(PI)であるステファン・ウラメック博士とパトリック・ミシェル博士との対談を通じて、MMXミッションにおいてローバ探査が果たす位置づけと役割に焦点を当て、フォボス表層に対して設定されている表層科学的・地質学的な問いと、それらに対する観測および運用戦略を、IDEFIXの設計思想や科学目標とあわせて概説する。

1. MMXミッションにおける ローバIDEFIXの位置づけ

宮本:MMXのサイエンスの全体像は既に過去の連載で共有されています[1-3など]。今回はMMX搭載小型ローバIDEFIX [4-6]に焦点を当てましょう。ちょうどMMXの会合の関係で共同主任研究者(Co-PI)であるステファン・ウラメック博士、パトリック・ミシェル博士に宇宙科学研究所に来ていただきましたので、皆で食事に行く前に自由に討論する時間を確保しました。私が聞き役として、IDEFIXについて伺ってまいります。

さて、おふたりとも、本日はありがとうございます。早速ですが、IDEFIXはMMXの中でどのように位置づけられるか、という点からはじめていただけますか？

ウラメック:こんにちは、本日はよろしくお願ひします。そうですね、最初に強調したい重要な役割は、工学的なリスク低減とリコネサンス(偵察)です。母船が

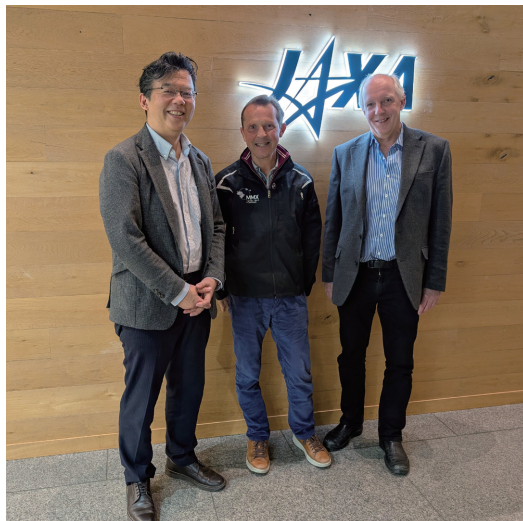


図1: 左から、宮本、ミシェル、ウラメック。2026年1月15日、JAXAで行われた会合の後に対談した。

着陸やサンプル採取を行う前に、フォボス表面が「軟らかいのか硬いのか」「どれほど沈むのか」「滑るのか」といったことを、あらかじめ調べられるという点です。母船も最終的には表面と相互作用しますが、ローバが先に情報を返すことで、着陸・採取運用の調整につながる点が重要な点です。

1. 東京大学大学院

2. ドイツ航空宇宙センター

3. CNRS/コートダジュール天文台

hm@sys.t.u-tokyo.ac.jp

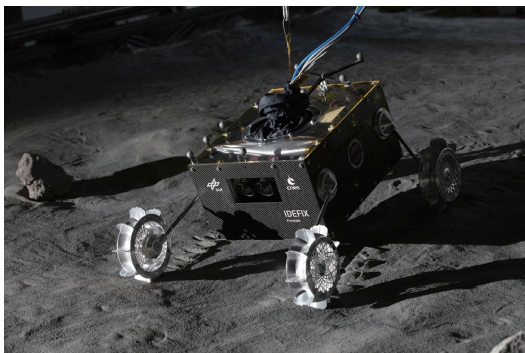


図2: IDEFIXローバの移動テストモデル(Image courtesy DLR).

ミシェル:こんにちは, お招き下さりありがとうございます。そうですね, ローバには表面に到達でき, 滞在でき, さらに移動できるという三つの強みがあります。とくに母船の遠隔観測と, 地上での試料分析の間を埋めるグラウンド・ツールズを, ローバが与えるという役割が期待されています。

さらにローバは, ただ“見る”だけでなく, 走行することで表面を擾乱します。つまり地下にある物質を露出させることができるのです。これは母船単独ではやりにくい, ユニークな活動ですね。

宮本:母船が最終的には接地して情報を得るとしても, ローバがフォボスに先に触って確かめることで, 着陸やサンプルリターンの成功確率と科学的価値が向上する, という整理ですね。

ウラメック:その通りです。ちなみにローバの車輪で得られる応答と, 母船が脚や採取で起こす相互作用は, 性質が異なります。その二つを合わせて理解することで, 表層の機械特性をより良く制約できるのです。

2. IDEFIXが立ち向かう科学的な問い

宮本:ローバで迫る科学的な問いについて, もう少し具体的に議論しましょう。まずレゴリスの物性についてですが, 何がどう重要なのでしょうか?

ミシェル:フォボス表層の進化過程を知るためには, レゴリスの特徴を理解することはとても重要です。とくに粒径分布, 締め具合(compactness), 空隙率(porosity), 凝集(cohesion)などを知ることが重要です。

ウラメック:ここでとくに重要なのが, 未擾乱の表面状態の把握です。レゴリスの粒子配列や空隙構造, 微細な締め具合, 凝集の効き方は, 外力によって変化しやすい。だからこそ, 試料分析の前に現地状態で状態を把握することが重要になるでしょう。

ミシェル:しかもローバは, 走行しながら高解像度でレゴリスを観測でき, 車輪で表面に外力を与えることができます。だから, 単なる見かけによる推定ではなく, 直接応答を見ることで物性を制約できるのです。はやぶさ2など過去のミッションで, レゴリスの機械特性が, 見た目とは大きく異なり驚いた経験があります。そこで直接応答を見るのが, とても重要と考えているのです。

ウラメック:これは工学的にも重要な価値があります。表面の強度や沈下のしやすさは, 母船の着陸・採取の前提条件です。だからこそ母船着陸より前に偵察する意義が大きいのです。

宮本:レゴリスの不均質性に関する情報も得られますね。サンプルの採取点がどの程度天体を代表するか, という点はどうか?

ミシェル:母船は最大でも2地点という限られた地域でしかサンプルの採取ができません。ローバが数十メートルの移動を試みることは, 周辺でどれくらいレゴリスに変化があるかを示せる意味で, 大きな意義があるでしょう。

フォボスには, 青色・赤色の領域がありますが, ローバが走行した際に表層を少し削ることで, 下から別の性質の物質が露出するかもしれません。つまり轍(わだち)は, フォボス表面における風化の度合いや, 表層土砂の堆積状況を知るのに役立つでしょう。こうして, 青色の領域が, はたして想定されているような比較的新鮮なものなのか, そうではないのか, 理解できるでしょう。

宮本:ローバによるその場観測は, 母船のスペクトル観測を解釈する上でも重要です。

ミシェル:その通りです。表面レゴリスの粒子形状や粒度分布が分かれば, スペクトル観測を解釈する際の確度が上がります。母船による観測と試料分析をつなぐ意味でも, ローバの近接観測は大きいと思います。

宮本:その試料分析に期待することについても, 教えてくださいませんか?

ミシェル:やはり直接採取した試料の分析は、ローバや母船では成しえない決断力を持っています。同位体や年代測定、衝突履歴、熱・化学変性史など、サンプル分析であれば確定的な議論ができる。ローバはそれを期待しつつ、その試料が「どんな場から来たのか」を明らかにし、試料の意味づけを強くする役割を果たすのです。

3. 微小重力下で探査するということ

宮本:ローバが降りるフォボス表面は、領域にも依存しますがおよそ地球重力の2千分の1程度という微小重力環境ですが、これはローバの運用の何を難しくするのでしょうか。

ウラムメック:もっとも直感に反することは、質量や慣性そのままなのに、重量が極端に小さくなる、ということです。移動には表面と車輪の間の摩擦を使いますが、その摩擦はローバの重量があつてこそ生まれます。フォボスでは重力という前提が地球と大きく異なりますから、車輪のグリップ、滑り、沈下、すべてが地上と違う。だから走行速度も、毎秒数ミリメートルというような、ゆっくりした世界になります。

しかもローバのスケールでの微地形や岩塊分布は、現時点の画像解像度ではわかっていません。いまある画像で滑らかな見かけをしていても、実際にはローバサイズの岩塊が多い可能性すらある。もしそうなら「走る」より「その場で科学する」ことになってしまうかもしれない。それでも重要な科学ができるように準備しています。

ミシェル:科学として重要なのは、まさにその未知性です。もちろん、フルード数などのスケーリング則を用いてローバの設計や運用計画を検討してきましたが、この重力下でのレゴリスがローバのスケールでどのような振る舞いをするか、人類はまだ実地で観察したことがないのです。

過去の小天体探査でも、事前の想定と違うことが繰り返し生じてきました。たとえば色と新鮮さの関係、たとえば熱慣性への粒径の影響。到着前には確信できず、到着してデータを見て学び直してきた。フォボスも、サプライズがある前提で臨むべきです。

宮本:重要な運用イベントとしては、そうした移動や観測の前のSLUD、つまりSeparation(分離)、Landing



図3: ユーモアあふれる語り口で話すウラムメック博士。

(着地)、Uprighting(起き上がり)、Deployment(展開)がありますね。

ウラムメック:その通りです。小型のローバですけれども、実は運用は複雑です。この最初のシーケンスが成立して初めて観測と移動ができます。投下高度については、跳ね返りを抑える観点から、例えば100 m以下、できれば40 m程度以下といった低高度が望ましい、という考え方になります。低いほどバウンスが減り、衝撃も小さいですから。ローバの活動については、アニメーションにまとめてみました[7]ので、是非ご覧ください。

ミシェル:この映像で想定しているような地表面がどれほど現実的なのかは、ほんとうはわかりません。小惑星ベヌーヤリュウグウでも、全球的には岩塊間の凝集力(cohesion)は小さいと考えられる一方で、局所的には凝集し、ある程度強度を持つものがあり、いっけん矛盾してみえます。ローバがゆっくり走行し、その場の粒子の動き(ダイナミクス)を観察できれば、こうした問題に新しい情報が加わるわけですが、これを着陸前に想定して設計していかなければなら

ない難しさがあります。

なおローバで初めて達成される観測には、機械的な応答だけではありません。昼夜の温度変化の追跡もそうです。熱伝導や空隙率、凝集への制約になる科学的に興味深い観測ですが、現段階ではこれらを想定して設計するしかないのです。

4. どのような体制で、どう作り、どう運用するのか

宮本：フランス・ドイツに2人のPIを置くという、独特の国際協力体制でローバ開発を進めてこられたわけですが、実際にはどのような困難やメリットがあったのでしょうか。

ウラメック：難しさはありましたが、責任分担とインターフェースを明確にする、ということで着実に開発を進めてきました。構造、カメラ、熱、電力など、パッケージごとに担当を置き、定例の会合で擦り合わせる。国際協力であっても、こうしたやり方自体は、単独組織による工業プロジェクトと同様だと思います。

その一方で、国ごとの事情で運用拠点が複数置かれることになるなど、最適化されているようには見えない側面もあります。それでも関係する各国機関において最大限の可視性を確保しているとも言えます。パートナー機関の間で優れたシナジーを生み出すという利点は大きいです。

宮本：PIが2人という体制は問題になりませんでしたか？

ミシェル：私たちは、齟齬を作らないために「なんでも全部話す」ようにしています。それに私たちは、いくつものプロジェクトで長いこと共に協力してきました。このような背景による信頼関係は重要です、言いくいことも含めて共有します。だからPI間で問題になることはなかったのです。

ウラメック：そうですね、そういう当惑がないのは、とてもやりやすいです。

宮本：日本側との調整も必要だったわけですが、難しかった点はありますか？

ミシェル：最初に強調しておきたいのは、国際協調として日本と共に働くことは、私たちにとって大変有意義であるということです。もちろん文化的な違いはあり、これが物事を複雑にすることもあります。むしろと



図4: 常に明るくポジティブなミシェル博士。

ても良い経験をさせてもらっていると感じています。

ウラメック：その通りです。ややこしくなった部分を探すとすれば、たとえばJAXAを介して合意したと思っていたことが、日本国内側での議論を経て別の結論で返ってくるように見える、というケースがあったことなどでしょうか。このようなことは、対面で詰めて話せば原因もすぐにわかるのですが、ビデオ会議中心だと齟齬が残ることがある。言語やニュアンスも絡むので、こういう部分には丁寧さが必要ですね。

ミシェル：ちなみに、こうした齟齬は欧州内だけでも生じるのです。最終的にはIDEFIXが技術実証 (technical demonstration) でもある、という原点に立ち返り、「技術的に可能か不可能か」「推奨か非推奨か」を論理で決める。結果として、システム側の判断が強くなる局面があるのは自然なことです。

ウラメック：言語の壁と見えたところに、文化差を感じるのも面白いですよ。“May be difficult”と日本側に言うと、ほぼ不可能と言われた、というように解釈されるようですが、ドイツでは「難しいが頑張ろう」という意味での発言だったりします。こういう差は、対面であれば雑談で補正できますが、コロナ禍で対面が途切れた時期は困難がありました。

宮本：さて、ローバに与えられたIDEFIXという愛称

の由来を教えてください。

ウラメック:フランスの漫画『アステリックス』に出てくる犬の名前です。小柄ながらも行動範囲が広く、主人公たちに寄り添って動き回る存在として描かれており、「本隊(母船)を支え、現地で先行して働くローバ」というIDFIXの役割とも重なるのです。「FIX」という語が含まれているにもかかわらず動く、という点はちょっとしたジョークでもあります。

ミシェル:フランス語で*idée fixe*とは、固定観念という意味なので、これもユーモアに重なります。さらにこのアニメの英語版ではDogmatixとなっていて、dogmatic、つまり独断的という意味を掛けた言葉遊びになっていて、それもまた面白いでしょ。

宮本:あはは、とくにミシェル博士が犬好きなのを知っているの、その名前がわかる気がしていました、ウラメック博士も犬好きでしたっけ？

ウラメック:いえ実は私はネコ派なんです(笑)。

5. 日本コミュニティへのメッセージ

宮本:MMXに係る研究者や、これから参加する若手に対して、ローバPIとして何か伝えたいことはありますか？

ミシェル:IDFIXも含めてMMXミッションは、地質学・表層科学・物性工学・熱工学・リモートセンシング・データ解析・サンプル解析など幅広い分野の専門性が同じテーブルで噛み合っ初めて成果が出ます。多くの研究者がかかわるミッションですから、関係している研究者の方々には、ぜひ自分の専門を持ち込みつつ、異分野の言葉を学んで参加してほしいですね。

ウラメック:運用・制約・現場の判断まで含めて理解できる人は、次の探査を作る人です。ローバ探査は、科学としても工学としても学びが大きい。そこで得た“当たり前前の更新”が、次のミッションの基盤になります。

宮本:最後に日本の科学コミュニティへも、メッセージをお願いします。

ミシェル:日本が小天体サンプルリターン分野を開拓し築いてきたことは、本当に素晴らしいと思います。成功を単発で終わらせず火星衛星へ進むことで、技術や知見が継承され、さらに高度化していく。

その先として、トロヤ群や彗星サンプルリターンのよ

うな、より遠方の天体に進むでしょう。比較的近場であるS型小惑星イトカワから始まり、より遠い場所からのサンプル取得に向かっていくというロードマップに従ったビジョン、戦略性に私は敬意を持っています。これまでの積み上げは必ず基盤になります。日本は分野横断で多様な研究者が参加し、国際協調にも積極的である点も強みです。そうした流れを、ぜひ次世代へ繋いでほしいですね。

ウラメック:ヨーロッパからみた国際協力の観点でも、日本は非常に重要なパートナーです。文化の違いを乗り越えて協力するプロセス自体が、科学・工学の両面で資産になります。宇宙探査は、地上の状況が難しいときほど、「それでも協力できる」ことを示す場にもなり得る。MMXとIDFIXは、その意味でも象徴的だと思います。

宮本:お忙しい中、素晴らしいお話をありがとうございました！

次号へ続く。

参考文献

- [1] 倉本佳, 2023, 遊星人 32, 123.
- [2] 中村智樹ほか, 2023, 遊星人 33, 216.
- [3] 宮本英昭, 2023, 遊星人 32, 296.
- [4] Ulamec, S. et al., 2025, Progress in Earth and Planetary Science 12, 97.
- [5] Michel, P. et al., 2022, Earth, Planets and Space 74, 37.
- [6] Murdoch, N. et al., 2025, Progress in Earth and Planetary Science 12, 54.
- [7] <https://www.youtube.com/watch?v=-a0e8A-KOWg0>

著者紹介

宮本英昭



東京大学大学院教授。東京大学大学院理学系研究科博士課程を中退し、東京大学工学系研究科助手となる、博士(理学)。アリゾナ大学客員研究員、東京大学総合研究博物館准教授などを経て2015年より現職。MMXでは科学戦略チーム「Surface Science and Geology」のPIを務める。

ステファン・ウラメック

地球物理学の博士号を持つドイツ航空宇宙センター(DLR)の研究員。小天体および惑星表層探査における着陸機・ローバの開発および運用に長年携わり、ロゼッタ計画の着陸機フィラエではプロジェクトマネージャーを務めたほか、「はやぶさ2」に搭載された小型着陸機MASCOTでは主任研究者(パイロッドマネージャー)を務めた。MMXでは小型ローバIDEFIXのPIの一人として、科学活動の統括、設計思想の策定、および科学運用戦略の立案を主導している。

パトリック・ミシェル

コート・ダジュール天文台に所属するフランス国立科学研究中心(CNRS)研究ディレクター。東大のグローバルフェローも務める。理論天文学・惑星科学を専門とし、小惑星および小天体の形成・進化、衝突過程、表層物理に関する研究で国際的に活躍している。小惑星探査機はやぶさ2の科学チームメンバーを務め、欧州を中心とした複数の小天体探査ミッションに深く関与。とくにHERAミッションやESA-JAXA協調によるRAMSESミッションのPI。MMXでは小型ローバIDEFIXのPIの一人として、フォボス表層に関する科学的問いの設定とローバ観測による表層物性理解を主導している。