

〈特集〉

月着陸後の SLIM を撮影した変形型月面ロボット LEV-2 とおもちゃ技術

坂井 真一郎 平野 大地



図1 月面着陸した SLIM を捉えた写真。後述する LEV-2 が月面で撮影した。

1. はじめに

2024年1月20日（日本時間）、1機の比較的小さな着陸機が月面に降り立った。そのことが疑いようのない事実であることを示してくれる、1枚の写真（図1）がある。月面上に屹立する着陸機の姿を捉えた1枚の写真一驚くべきことに、その写真は、たった228gしかない野球ボール大の小さなローバが撮影したものである。さらに、撮影された複数の写真の中から映りが良い1枚を自分で選び出し、それを近くにいた別の小型ローバ（これも質量は約2.1kgしかない）にBluetooth通信で渡し、渡されたその別の小型ローバが地球に直接送信してくれたことで、私たちはその写真を目にすることができたのである。

これら一連の動作の間に地上からの指示は一切送られていない、宇宙で自律的に連携して動作したローバは恐らく世界でも初めて等、この2台のローバの活躍には注目すべき様々な点があるが、たった228gしかない野球ボール大のローバの方には、おもちゃメーカーの技術が使われていることも、大変ユニークな点であろう。目的のためにいわばムダを切り落として作り上げられていく宇宙機と、おもちゃ。この、一見対極を成すような組み合わせは、どのようにして生まれたのか。なぜ、おもちゃの技術が宇宙で使われることになったのか？

本稿ではまず、ローバ達を搭載していた小型月着陸実証機 SLIM^{[1][2]}の概要を紹介し、続いて、おもちゃの技術が使われたローバである LEV-2（愛称：SORA-Q）について紹介する。

2. 小型月着陸実証機 SLIM の概要

小型月着陸実証機 SLIM は、1)月への高精度着陸技術の実証を目指すこと、2)軽量な月惑星探査機システムを実現し、月惑星探査の高頻度化に貢献すること、この2つを大きな目的とする宇宙航空研究開発機構（JAXA）のプロジェクトである。正式なプロジェクトとしての開発は2016年からスタートしたが、ミッションの構想やキーとなる要素技術の研究は、既に2002年頃から開始されていた。

SLIM が目標とした着陸精度は100mであり、これまでの様々な月着陸機の着陸精度が数km～10数kmであったのに対して、1～2桁の向上を目指していた。従って、従来とは違う新しい技術が必要であり、それは例えば「画像照合航法」や「自律的な航法誘導制御」、「細かく推力調整可能な推進系」などであった。これまでの月着陸機は、予め地上で計測・予測した位置・速度の情報を元に、搭載しているセンサ（加速度計等）でその情報をアップデート（伝搬）していく方式で着陸降下中の自身の位置を推定し、それに基づき着陸降下制御を行っていた。その際、高度についてはレーザや電波を用いた計測手法が可能であったものの、水平位置については直接計測する手段がなく（例えばGPS衛星の電波は月ではごく微弱なため、月でのGPS測位は実用化されていない）、結果として高精度な着陸は実現されていなかった。SLIMでは、自身が搭載する航法カメラにより着陸降下中に月表面を撮像し、その画像から自身の位置をほぼリアルタイムに把握する「画像照合航法」と呼ばれる新しい技術を採用している。具体的には、得られた画像からクレータを抽出し、その分布パターンが一致する領域を自身が持つクレータ地図の中から探索することで、撮像時のSLIMの位置を正確に特定する技術であり、大学の専門家との長年の共同研究の成果として実用化されたものである。類似の技術はこれまでも研究・開発されているものの、実際の月着陸に適用された例はこれまで知られていない。

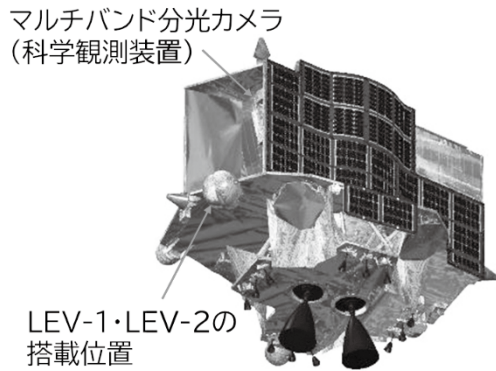


図2 小型月着陸実証機「SLIM」の外観と、2機の小型ローバLEV-1およびLEV-2搭載位置

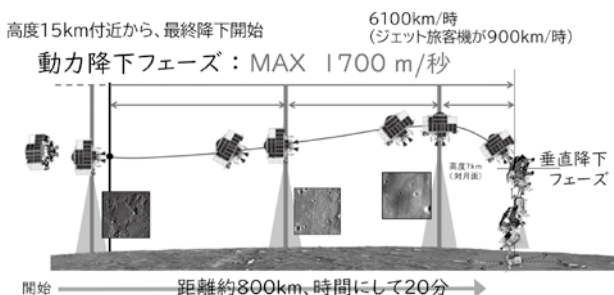


図3 着陸降下シーケンスの概要。SLIMは着陸降下開始前に3領域で各2回ずつ、開始後に4領域で各2回ずつの画像照合航法を実施し、適宜、最適な目標軌道を自律的に再計算しながら着陸目標地点に至り、降下する。

各種の設計や検証、試験等を経て完成したSLIM探査機(図2)は、2023年1月に種子島宇宙センターに輸送された後、X線分光撮像衛星XRISMと共に、2023年9月7日、H-IIAロケット47号機にて打ち上げられ、XRISMに続き、SLIMも予定通り地球周回軌道に投入された。その後、各種の軌道変更等を計画通りに実施して、SLIMは2023年12月25日に月周回軌道へと到達した。

月周回軌道投入後、徐々に高度を下げる運用などを計画通りに行った後、2024年1月20日0時頃、高度約15km、目標地点までの残り距離約800km付近において、着陸降下シーケンスがスタートし、メインエンジンによる減速噴射が開始された。図3に、着陸降下シーケンスの概要を示す。着陸降下開始後、SLIMは画像照合航法を実施しながら自律的に軌道の補正と制御を行い、着陸地点の上空約50m付近まで正常に到達した。合計14回実施した画像照合航法は全て正常に完了し、事後の評価から、その精度も良好だったことが確認されている。SLIMは、高度約50m付近では「障害物検知&回避」を行い、視野内から最も安全に着陸できると考えられる地点を識別し(障害物検知)、以降はその地点を新たな着陸目標地点として着陸降下を行う(障害物回避)設計

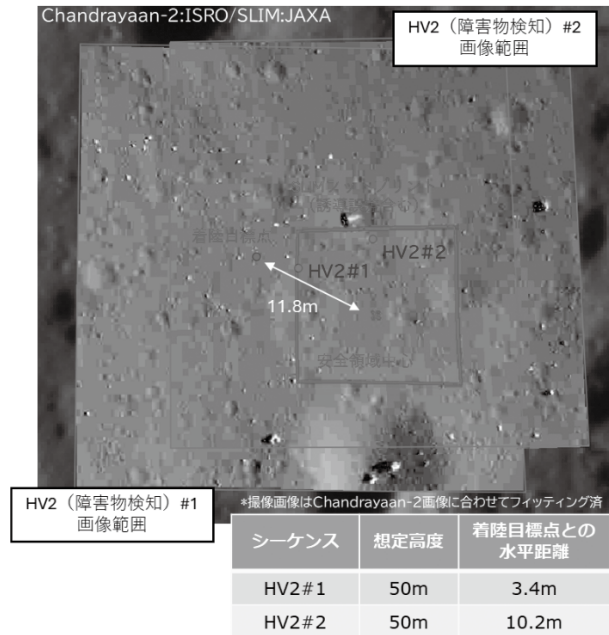


図4 SLIMのピンポイント着陸性能評価結果。着陸目標地点を定義した月面写真(Chandrayaan-2撮像)に、高度50m付近でSLIMが障害物検知用に撮像した2枚の画像を、それぞれ特徴点を一致させて重ねたもの。ここから各画像の中心位置(すなわち撮像時のSLIM位置)と着陸目標地点との距離を算出でき、その結果が表中に示されている。

となっている。そのため、打ち上げ前に設定されていた着陸目標地点に対する着陸精度としては、障害物回避直前の精度で評価することが適切である。図4に、その評価結果を示す。概ね10m程度以下の水平位置誤差と評価されており、目標だった100m精度は十分に得られていることから、SLIMが世界で初めてピンポイント月着陸を実証したことが確認された。

一方、高度50m付近で2回の障害物検知を行っている間のタイミングで、2機搭載されているメインエンジンのうち1機に何らかの異常が生じて発生推力が喪失した。搭載誘導制御系は異常を検知して異常対応モードに遷移し、結果として、低い降下速度は維持されたものの徐々に東に流される挙動となり、2機のローバを分離した直後に月面に着陸した。

「LRO」及び「Chandrayaan-2」がSLIM着陸後に撮像した画像に映っているSLIMの位置から、最終的なSLIM着陸位置は当初の着陸目標地点から約60m東の地点であることが確認されている。

着陸後もSLIMと地上局間の通信は維持されており、探査機の動作は確認されたものの、探査機の姿勢は、当初の想定と約90°程度異なる、太陽電池面が西を向いた姿勢と推測された。実際、この時点で太陽はSLIMから見て東に位置していたため、太陽電池からの発生電力が得られておらず、SLIMはバッテリー電力のみで動作している状態であった。そのた

め、着陸降下中の詳細データを所定の計画通りにダウンロードし、さらに「マルチバンド分光カメラ」による科学観測も一部実施した上で、着陸から約2時間半後、永久故障防止のためにバッテリーを電氣的に切り離すコマンドを地上から送信し、SLIMは一旦電源OFFとなった。なおこの頃、月面上では分離された2機のローバが歴史に残るであろう貴重な成果を挙げているのだが、その活躍については次節で詳述する。

その後、太陽方向の変化に伴い太陽電池から再び電力が得られるようになった後、2024年1月28日には地上との通信が回復して、運用を再開することができた。以後、「マルチバンド分光カメラ」による科学観測を実施し、所期の想定を上回る量の貴重な科学観測データを取得した後、1月31日、着陸地点付近が日没を迎え、SLIMは再び電源OFFとなった。月は昼・夜がそれぞれ14日ずつ続き、また大気もないため、昼は例えば110°、夜は例えば-170°といった高温・低温に晒される。SLIMは小型軽量化も目的としていたこともあり、夜を乗り越える(越夜)ための設計は行っていなかったが、2月25日には再度通信を確立することができ、越夜後の探査機動作を確認することができた。その後も、合計3回の越夜後動作が確認されている。ラジオアイソトープヒータやラジオアイソトープ電池等の特殊な機器を搭載せずに越夜を果たした月着陸機の例は少ないことから(恐らく米国サーベイヤーのみ)、ここで得られたデータから、今後に繋がる貴重な知見が得られる可能性がある。

以上の通り、SLIMは設定された目標を上回る大きな成果を挙げることができたと考えている。

3. LEV-2(SORA-Q)搭載に至った経緯とSLIMから見たその開発

2016年のプロジェクトスタート時点では、打ち上げ手段としてはH-IIAより小型のイプシロンロケットが想定されていた。そのこともあり、当時は質量の余裕が十分になく、小型ローバはもちろんのこと、マルチバンド分光カメラですら、搭載未確定な状態であった。その後、2016年のX線天文衛星「ASTRO-H」軌道上事故を経て、「ASTRO-H」後継機とのH-IIA相乗りへ打ち上げ手段を変更する判断が下され、それに伴って若干の質量余裕が生じることとなった。これを受けて、マルチバンド分光カメラを搭載して成果の最大化を図ることとなった(2018年春頃)。しかしながらこの時点でもまだ、小型ローバについては搭載確定にまでは至っておらず、設計・製造進捗に伴う質量余裕の状況等を見ながら、最終的には2021年夏頃になって、ようやく搭載の目処を得ることができた。

もちろん、SLIM開発と並行して小型ローバの開発は進められていた。但し、上記のような経緯もあり、その開発はSLIMプロジェクトチームとは別のチームにより行われていた。質量や温度条件、分離条件等のインターフェースを決め、「着陸直前または着陸後のSLIMをぜひ撮影して欲しい」ことをリクエストした上で、具体的な設計等についてはSLIMとは独立に行われたのである。SLIM自体も、これまで月着陸に成功した中では恐らく世界最軽量の機体であるが、それでも、推葉を除いても200kg程度の質量を有する着陸機と、228gしかない小型ローバとでは、適切な物作りの考え方は恐らく根本的に異なるものとなる。その観点で、チームとしての独立性、あるいはチーム構成としてのある種の“多様性”が、結果として良い効果をもたらした可能性がある。

一方で、LEV-2の設計を改めて振り返ると、「月面でのSLIM撮像」というこちらのリクエストについては、LEV-2チームでも大変真摯に受け止めてくれ、最大限の努力を払ってくれたことがよく分かる。すなわち、チームとしての独立性は維持しながら、目的や価値の共有はきちんとできていたものと思われる。

4. おもちゃ技術を使ったLEV-2の開発

LEV-2の開発のきっかけは、2016年にJAXAの宇宙探査イノベーションハブが実施した研究提案募集であった。当時、JAXAはこれまで宇宙で使われていなかった地上の技術を利用し、宇宙開発の様々な課題を解決できないか模索していた。その際に、タカラトミーから共同研究の提案があった。JAXAは日本が得意とするおもちゃ技術を活用した新しい宇宙ロボットが開発されることを期待し、タカラトミーと共同研究を開始した。

おもちゃ開発と宇宙開発は、まったく異なる分野のように思われるが、意外と共通する思考や技術が存在する。その一例として、まず「小型化」が挙げられる。宇宙機は打ち上げコストを抑えるために、小型・軽量化が求められる。同様に、おもちゃも子供たちが手に取って遊べるように、製品を小型・軽量化する必要がある。また、「部品点数を減らすこと」も2つの分野に共通する重要な技術である。宇宙機を開発する際には、故障のリスクを低減させるために可能な限りシンプルに設計し、アクチュエータ(モータ)や歯車などの機構部品から筐体を構成するプレートやネジまで、可能な限り部品点数を減らすことが求められる。同様におもちゃ開発においても、子供が扱っても故障しないように、部品の形状を工夫したり、複数の動作を1つのモータで実現する機構を用いたりして、部品点数を減らしている。さらに、この部品点数の削減は組立コストを抑える

ことにも繋がり、結果として子供たちに届きやすい低価格の製品となる。このように、おもちゃ開発で使われている技術と宇宙ロボットに求められる技術には意外と合致する要素が多く、これらのおもちゃ技術をうまく活用することでLEV-2は開発された。

2016年にタカラトミーと開始した共同研究では、球体から変形してカメラを展開する試作モデルを開発した。その後、SLIMに搭載させるための本格的な検討が始まり、さらなる小型・軽量化に加えて、打ち上げや宇宙の過酷な環境でも耐えられるように改良が実施された。

LEV-2をSLIMに搭載するには、直径80mm以下、質量250g以下に抑える必要があった。当然ながら、小型化すると車輪のサイズも小さくなり、傾斜面や障害物を乗り越えなくなる。そこで、月面に到着したあとに図5に示すように変形し、サイズを大きくする仕組みを取り入れた。

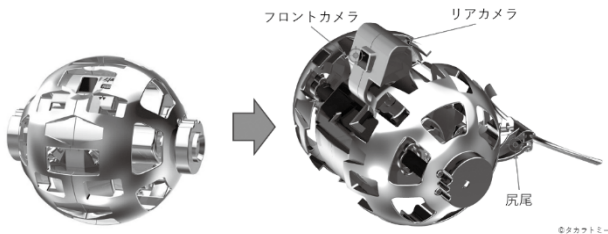


図5 おもちゃ技術を応用したローバの概要。車輪・頭部・尻尾が展開されて拡大する。

半球形の外部部が左右に割れるように拡張し、カメラを搭載した頭部や走行時の支えとなる尻尾（スタビライザー）を展開させる。この変形機構には、乗り物からロボットへ姿を変えるおもちゃの「トランスフォーマー」シリーズの技術が活用されており、変形途中で部品が引っ掛かったりしないような工夫が盛り込まれている。図6に示すように、回転シャフトには突起部分があり、その突起と同じ形をした穴が本体ボディの側面に切り抜かれている。展開前はこの突起部分が切り抜き穴と一致しないような位

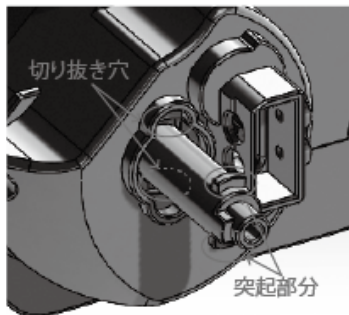


図6 伸展するシャフト。突起部分が切り抜き穴と一致するとシャフトが側面から飛び出る仕組みになっている。

相でシャフトが内部に収納されている。展開する際には、図7に示すように、シャフトを回転させ、突起部分と切り抜き穴の位相が一致すると固定が外れ、シャフトが内部から押しバネで外側に押し出される仕組みになっている。シャフトに押し出された半球型の車輪が外側に出ることで、車輪がカバーするように抑えていた頭部と尻尾がバネによって展開される。

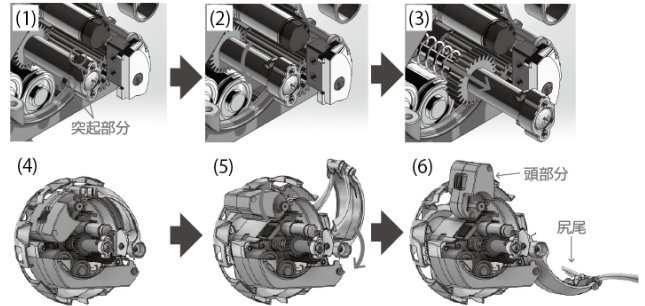


図7 LEV-2の変形機構。車輪が左右に開き、カメラを搭載した頭部と尻尾が展開される。

しかし、単に展開して拡大しただけでは、レゴリスと呼ばれる月の軟らかい砂を走行する際に、車輪の空転により地面を掘ってしまい、本体の底面が接地して動けなくなってしまう課題があった。そこで、車輪の回転軸をずらした偏心回転機構を取り入れた。これによって車輪が掻くことのできるリーチが長くなり、本体の底面を浮かせながら砂に埋もれずに走行することが可能になった。この特殊な動作は、小さいウミガメが砂浜を埋もれずに歩く動きにインスパイアされている。そして、この動きを実現するために、動物や昆虫の動きを再現するおもちゃ「ゾイド」シリーズの偏心軸の機構が活用されている。

両車輪は独立して制御することが可能で、この車輪の位相を同期するといわゆる「バタフライ走行」ができ、位相をずらすことで「クロール走行」が可能になっている。さらに、左右の車輪を逆回転させることで、左右どちらにも旋回することが可能である。搭載されているモータは2つのみで、これだけで前述の変形と前進・旋回の制御をすべて行っている。簡易的な機構を用いて部品点数や質量を抑えるおもちゃ技術が効果的に使われている。

ベースとなる機構が決まったあとは、宇宙環境でも確実に動作できるように、通常のおもちゃ開発では実施しないような様々な環境試験を行い、改良を重ねた。まず、レゴリスの模擬砂を走らせる試験を行い、機構や制御を検証した。レゴリスは粒径が非常に小さいため、軟らかい砂を走行することだけでなく、レゴリスがローバ内部に入り込んで車輪をロックしたり内部機器が壊れたりしないような工夫も重要になる。シャフトの展開バネの自由長を長め

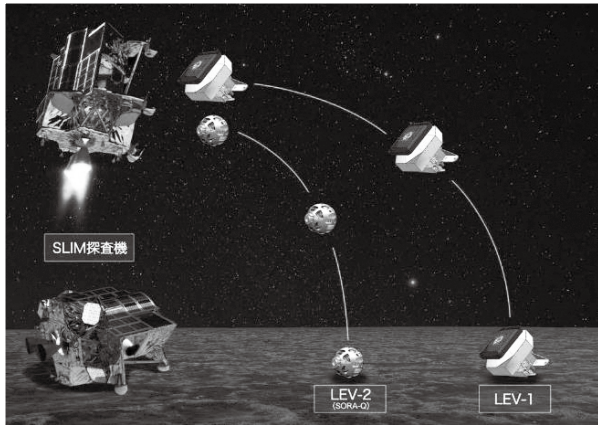


図8 LEV-1 および LEV-2 の分離シーケンス。月面着陸直前に放出される。

に取り、変形後に本体壁面とシャフトの歯車側面を押し付けて隙間を無くすことにより、内部にレゴリスが極力入らないような設計を行った。また、内部に入り込んだレゴリスが悪影響を及ぼさないように、宇宙で使える特殊なコーティングや制御を実装した。さらに、宇宙の特殊な熱・真空環境でも動作できるように、真空対応のグリスを使ったモータや断熱性の優れた材料を採用し、真空チャンバを使った試験でその実用性を確認した。これらの対策に加えて、ロケットの打ち上げ振動や月面に着陸する衝撃に耐えられるように振動試験・落下試験を複数回行い、構造の強化を実施した。

5. LEV-2 のミッションと画像処理機能

LEV-2 は、もう 1 台の超小型月面探査ローバ LEV-1 と共に SLIM に搭載され、SLIM が月面に着陸する寸前に放出される(図8)。その後、月面で LEV-2 は自動で展開し、月面を移動しながら、SLIM の着陸状況が分かる画像を撮影する。LEV-2 は SLIM と通信を行わず、取得したデータを LEV-1 に無線送信し、LEV-1 が直接地上に転送する仕様になっている(図9)。わざわざ SLIM とは別の通信ラインを使うのは、万が一 SLIM が着陸失敗などで通信不具合が発生した場合に地上にデータを送信できなくなることを避けるためであった。しかし、LEV-1 も超小型ローバな

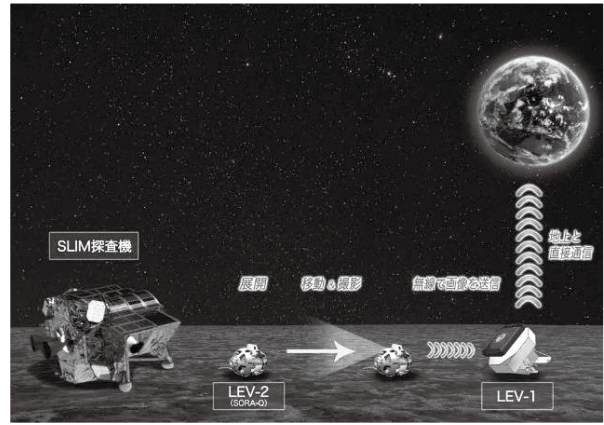


図9 LEV-2 の月面動作シーケンス。完全自律制御で移動・撮影・データ送信を行う。

ので、消費電力や熱の制約で地上と通信できる時間やデータ量は限られている。LEV-1 を経由して LEV-2 を地上からコマンド操作するのは難しいため、LEV-2 は完全自律制御を採用した。つまり、人間のサポートは一切受けず、自力で SLIM を見つけて画像を撮って送らないといけない。さらに、データ量の制約から送信できるのは多くて 2~3 枚程度で、たくさん画像を撮ってもすべてのデータを地上に転送することはできないため、SLIM の着陸状況や周辺環境が適切に写っている画像、いわゆる「見栄えの良い写真」を選定して送る必要があった。

上記の理由から、図10に示すように、LEV-2 のカメラで撮影した画像の中から SLIM を検出できる画像処理アルゴリズムを開発した。一般的な宇宙機には、過酷な熱環境から機器を守るために、MLI と呼ばれる金色の断熱材シートが取り付けられている。画像の中からこの MLI の色相を検出し、SLIM までの距離や姿勢を推定するアルゴリズムを実装した。これにより、LEV-2 は自分自身で SLIM を探し出して周辺を走行したり、SLIM と周辺環境が適度に写っている「見栄えの良い写真」を選定して送信したりできる。このような画像処理は、一般に計算コストが高く、リソースが限られる LEV-2 のような超小型ロボットに実装するのは難しいが、SPRESENSE™ という低消費電力で処理能力の高い最新のマイコンボードを採用することで、このような高機能を実現した^[3]。

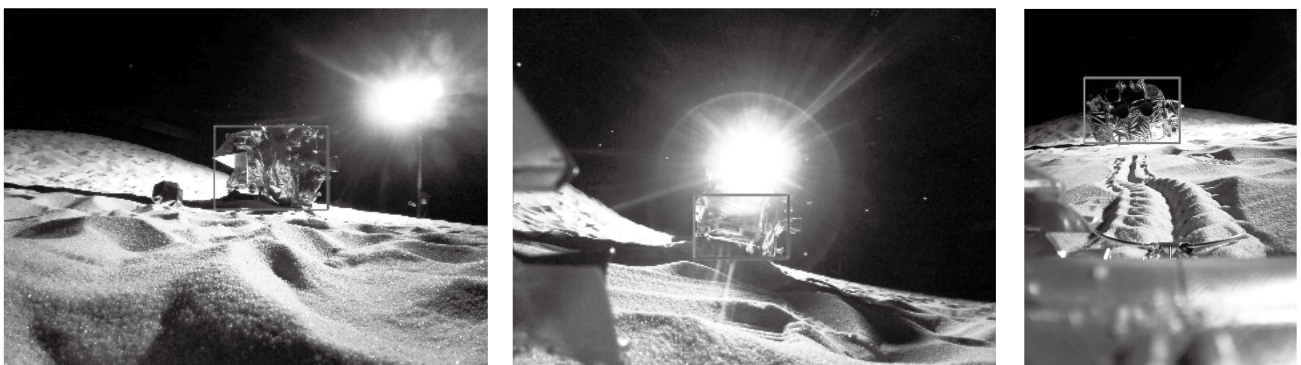


図10 月面を模擬したフィールドで試験した画像処理結果。矩形が SLIM の検出結果を示している。

6. LEV-2 の月面活動結果

前述の通り、2024年1月20日（日本時間）にSLIMは月面に着陸し、その直前にLEV-1とLEV-2は同時に月面に放出された。LEV-2は月面に着陸したあとに自動で展開して、リアカメラの画像をもとにSLIMを探し出し、SLIMから遠ざかるように動作した。この動作の間、LEV-2は前述の画像処理を用いてSLIMまでの距離や姿勢を推定し続けており、約5m離れるまで向きを調整しつつ、複数枚の画像を撮影した。さらに、LEV-2がSLIMから約5m離れたところで旋回して、フロントカメラで複数枚の画像を撮影した。その後、撮影済み画像の中から、「見栄えの良い写真」を選定し、そのデータをLEV-1へ無線で送信した。LEV-1は、SLIMを介さずに、受け取ったデータを直接地球に向けて転送した。LEV-1から送信されたデータは、大型アンテナ設備がある地上の観測所で受信し、それらを復元することで、動作結果や画像を確認した。

LEV-2が月面で撮影して送信した画像が冒頭に紹介した図1である。無機質で色彩のない月面で金色に輝くSLIMを捉えることに成功し、LEV-2はミッションを見事に達成した。画像の中央付近には、データ送受信中に発生したと思われるデータ欠損が出ているが、SLIMの全体像やその周辺環境は十分に捉えられており、SLIMが当初の想定とは異なる姿勢で月面に着陸していたことがこの画像から確認できた。これらの情報は、その後に実施した科学観測や運用に役立てられた。画像の左右の下部には、展開後のLEV-2の車輪が写り込んでおり、このことからもちや技術を活用した変形機構も正常に動作したことが確認できた。また、テレメトリの結果から、画像処理機能によってSLIMを正常に検出できたことも確認された。さらに、事後の画像解析から、LEV-2がSLIMを撮影したのは、当初の予定通り約5m離れたところであったことが判明し、画像処理アルゴリズムに加えて自律制御機能も正常に動作したことが分かった。月面で実証したこれらの超小型ローバの移動技術や画像処理を含む自律制御技術は、将来の月・火星探査や有人拠点建設などのミッションに必要な不可欠なものであり、その活用が大いに期待できる。

今回の月面実証を通して、LEV-1とLEV-2は共に日本初の月面探査ローバになり、世界初の完全自律ローバの月面探査および世界初の複数ローバによる同時月面探査を達成した。さらに、LEV-2は世界最小・最軽量の月面探査ローバになった。

7. 終わりに

SLIMは日本初の月面着陸を達成すると共に、着陸精度について誤差約10mという性能評価結果となっており、高精度でピンポイントに着陸する技術を世界で初めて実証した。その機体は、これまで月着陸に成功した中では恐らく世界最軽量である。また、マルチバンド分光カメラによる科学観測を行い、さらに3回の越夜にも成功した。これらの成果は、今後の月惑星探査の発展に貢献するものである。

SLIMに搭載されたLEV-1とLEV-2の2台のローバは、月面着陸の直前に放出され、月面で探査技術の実証やSLIMが着陸した環境の調査を行った。LEV-2には、多くのおもちゃ技術が活用されており、変形機構や車輪の偏心回転機構を採用することで、軟らかい砂に覆われた月面でも超小型ながら安定して走行することを可能にした。これらの技術は、SLIMミッションの成功に大きく貢献し、さらに今後の宇宙探査ミッションへの活用が期待できるものである。

LEV-2にはSORA-Qという愛称が付いており、そのQには、Question（問い）やQuest（探求）の意味が込められている^[4]。月を見上げる機会があれば、「SLIMはどうやって月まで行ったのだろうか?」「SORA-Qはなんであんな形をしていて、どうやって月で動いたのだろうか?」と考えてみてほしい。その問いや探求心の答えには、様々な科学技術が詰まっている。今回のSLIMやSORA-Qの挑戦が、皆さんにとって科学技術への興味を広げるきっかけになることを心から願っている。

参考文献

- [1] 澤井秀次郎ほか、小型月着陸実証機SLIMのシステム設計、航空宇宙技術、Vol.17、pp.35-43、2018
- [2] 小型月着陸実証機SLIMプロジェクトサイト <https://www.isas.jaxa.jp/home/slim/SLIM/>
- [3] Daichi Hirano, et al., “Transformable Nano Rover for Space Exploration”, IEEE Robotics and Automation Letters (RA-L), Vol.9, No.4, 2024, pp.3139-3146.
- [4] 超小型の変形型月面ロボット「SORA-Q（ソラキュー）」のキッズサイト <https://www.takaratomy.co.jp/products/sora-q/kids/>

さかい・しんいちろう

（宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 宇宙機応用工学研究系 教授）

ひらの・だいち

（宇宙航空研究開発機構 宇宙探査イノベーションハブ 主任研究開発員）