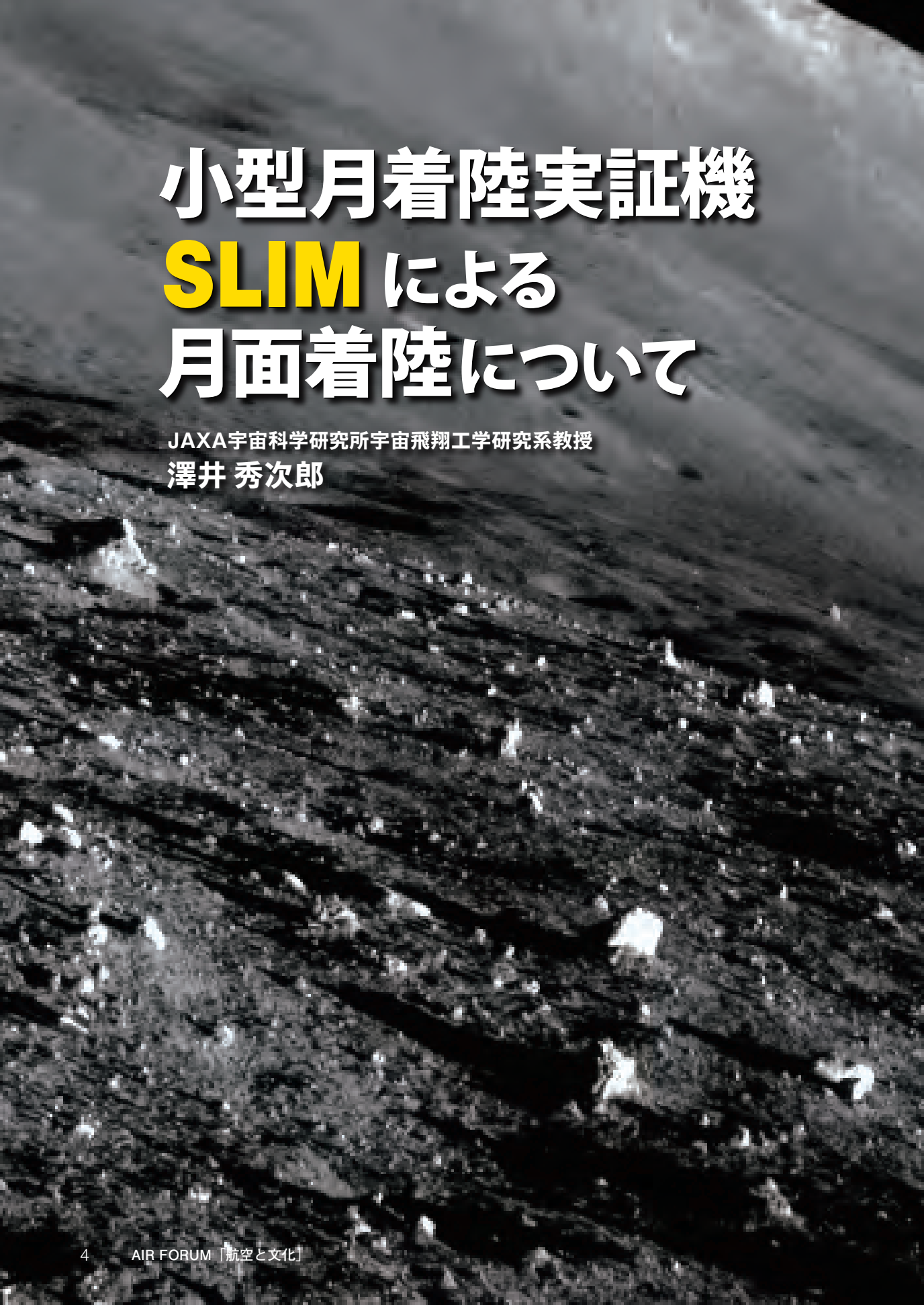
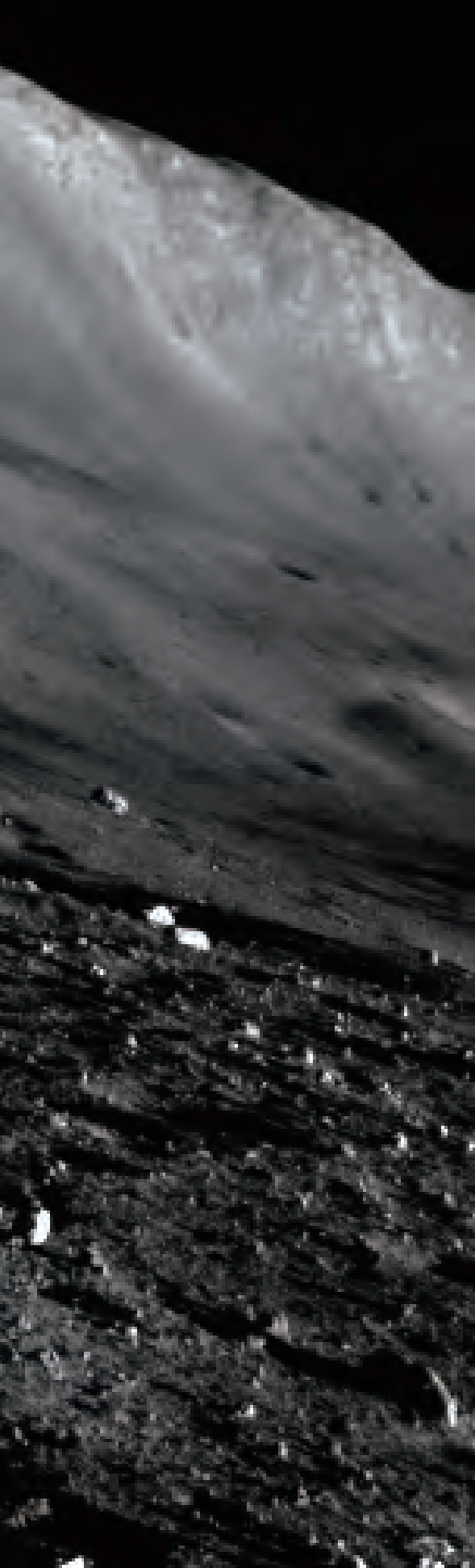




小型月着陸実証機 **SLIM** による 月面着陸について

JAXA宇宙科学研究所宇宙飛翔工学研究系教授
澤井 秀次郎



はじめに

本誌発刊のちょうど1年くらい前のことです。小型月着陸実証機 SLIM (Smart Lander for Investigating Moon、図 1) は日本時間の 2024 年 1 月 20 日未明に月面に着陸しました。月面への着陸としては日本初になり、また、狙った場所に確実に着陸するための技術を実証し、ピンポイントでの着陸を達成したのは世界初となります。この SLIM には、2つの目的がありました。それは、「月へのピンポイント着陸技術の実証」と「軽量の探査機システムの実現」です。2つの「使命」を帯びた SLIM は1月20日の深夜頃に月面への着陸を目指して着陸シーケンスを開始し、メインスラスタ逆噴射。途中ドタバタがありながらもほぼ狙った通り、月面に辿り着きました。シーケンス開始から着陸までは短くも長く感じた20分でしたが、SLIM計画の提案からだと、長くも短くも感じられる20年間でした。

本稿では、この SLIM について、ミッション提案期には長く提案代表者、プロジェクト開始してからはプロジェクトサイエンティストとして携わった立場から、私見に基づいて振り返ってみたいと思います。

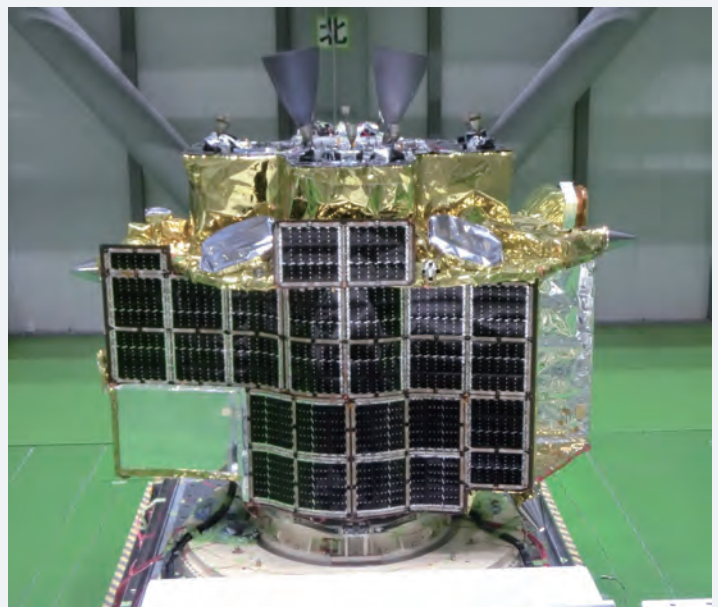


図 1 打上前に機械環境耐性をチェックしている小型月着陸実証機 SLIM
(JAXA/三菱電機株式会社)

月軟着陸実験計画
(SELENE-B)
提案書



2002年11月

月惑星表面探査技術WG



図3 提案活動中のSLIM形態の主要な変遷

図2 SELENE-B 提案書の表紙

SLIMの立ち上げ

SLIMの源流は、SELENE-B提案(図2)に遡ります。宇宙航空研究開発機構(JAXA)の発足前、後にJAXAの母体となる3つの機関である文部科学省宇宙科学研究所(ISAS)・独立行政法人航空宇宙技術研究所(NAL)・特殊法人宇宙開発事業団(NASDA)が共同して検討し、議論を経て当時のISASが実施した公募に提案した計画でした。月面へのピンポイント着陸技術を実証する、という構想はSLIMと同じものでしたが、探査機の大きさはドライ質量(推進剤を含まない探査機の質量)520kgでSLIMの2.5倍以上でした。提案グループの一人として、「良い提案ができた」、と自信を持って提案プレゼンに臨みましたが、自信は単なる過信だった、と思い知らされました。残念ながら、結果は落選でした。

この結果を受けて、SELENE-B提案グループ内では、提案をどのように改良したら良いか、議論が続きました。何回かの議論を経て、「強いて言えばSELENE-Bの大きさは中途半端で、本格的な王道の科学観測成果を出すという点で他の提案に見劣りしてしまった」、という点で多くの関係者の考えは一致しました。ところが、「それでは次の一手をどうするか」、については全会一致の方針決定には至りませんでした。関係者の中には、

より大型の探査機計画実現を模索するグループもいた一方で、私を含むグループは、SELENE-Bを限界まで小さくしたら逆に面白いことが起きるのではないか、と考えて検討をスタートしました。これがSLIMに繋がる提案活動になります。小型化することにより、より高頻度、多地点の探査が可能になりますし、その小型化技術を使えば、将来、月表面から地球に戻ってくる帰還機を設計するときにも、より小型のものを実現できることになります。つまり、月から岩石などのサンプルを地球に持ち帰るための敷居も下がります。また、探査機のサイズを小型化することで、より険しくて、広い着陸可能エリアが望めない場所への着陸を敢行することもできるようになります。周りに狭い場所しかない良質な観測対象の直近に降り立つことができれば軽量の観測装置であっても十分な観測成果を得ることだって期待できます。

ところが、小型化、軽量化、というのは、場合によってはそれほど簡単ではありません。一部では、「一般的に大型衛星は難しく、小型衛星は手軽だ」、という声も聞きます。確かにそういう面もありますし、たとえば、ちょっとした1戸建て住宅くらいの大きさの大型衛星を組み立てるにはそれだけの設備が必要で大変です。しかしながら、小型化についても、小さい携帯電話やスマートフォンのように実現するのに非常な技術革新が必

表 1 提案活動中の SLIM 形態の主要な変遷

FY	活動内容・トピック	提案	探査機質量 *1
2004	月惑星表面探査技術 (STEPS) WG 有志によりピギーバック程度の規模での小型月着陸機の検討を開始	小型衛星計画募集に計画構想を提出 (2005/1)	Dry: 66kg Wet: 217kg (図 3-a)
2005	ISAS*2 有志による PROGRESS (Prospective Roadmap for Grand Exploration of Solar System) 提案の中で小型着陸機を検討	PROGRESS 提案書「人類のフロンティアの拡大を目指す太陽系探査プログラム (提案) 一月探査を中心として」 (2006/3)	Dry: 94kg Wet: 283kg (図 3-b)
2006	小型月着陸機のスペックが「ひさき」、「あらせ」に繋がる小型科学衛星シリーズ検討の低レベル標準化の題材として取り上げられた (2006/11)		
2007	WG「小型月探査技術実験機検討グループ」設立 (2007/4) SLIM という名称を使用し始める (2007/10 頃)		
2008	「月惑星探査技術ワークショップ」を東大本郷で開催 (2009/3)	小型科学衛星 2 号機ミッション提案 (2008/9)	Dry: 98kg Wet: 428kg (図 3-c)
2009	システム・推進系の概念検討を担当する各メーカを RFP*3 選定 (2009/9)		
2010	宇科連*4 で SLIM 関係の OS*5 「小型探査機による月惑星探査の可能性」を初開催 (2010/11) (宇科連では以降も複数回 OS を開催)	検討中間報告書の作成 (2011/3)	Dry: 124kg Wet: 464kg (図 3-d)
2011	この間、JAXA/大学/メーカの力を結集し、次回提案に向け、システム/サブシステムの技術課題に対応		
2012			
2013		「イプシロン搭載小型計画」への提案 (2014/2)	Dry: 127kg Wet: 546kg (図 3-e)
2014	ISAS としてミッション選定 (2015/1~3)		
2015	プリプロジェクト移行 (2015/9)		
2016	プロジェクト移行 (2016/4)		

*1 Dry=推進剤を含まない探査機の質量、Wet=推進剤を含む探査機の質量

*2 ISAS: 文部科学省宇宙科学研究所

*3 RFP: Request for Proposal (提案依頼書) の略。RFP 選定とは発注先として選定した候補のメーカに条件を伝えて提案を依頼すること。

*4 宇科連: 宇宙科学技術連合講演会

*5 OS: オーガナイズド・セッションの略

要なこともあります。私たちが挑んだのは、大袈裟かもしれませんが、後者の領域に踏み込んだ小型化技術の獲得でした。これが後に SLIM の 2 つある目的のひとつになっていくことになります。

小型・軽量化を目指して各技術要素の軽量化技術の検討を進めると並行して、システム形態でも贅肉をそぎ落とせないか、様々な検討を実施しました。表 1、図 3 に提案活動中の主要なシステム形態の変遷をまとめてみました。これ以外にもいくつかの派生形がありましたが、たとえば、図 3 に示したように、検討途中では探査機本体には着陸のための機構 (着陸脚など) は付けずに軽量化を目指す案もありました。この案だと SLIM 自身は無事に着陸できなくなるので、「着陸機」という言い方をしてよいか自体が微妙です。この提案は至って評判が悪かったと記憶しています。た

だし、今から振り返ると、「仮に万一 SLIM 本体の着陸がうまくいなくても、搭載した小型ロボットの LEV-1、2 が月面活動できるように予め手を打っておく」、という SLIM の最終的なシステム設計に繋がるものでした。

SLIM の着陸方式

上述のような検討・提案・不採択を経て、2014 年から 2016 年にかけての提案 (図 4) でプロジェクト化を認められることとなりますが、このときはおとなしめの 4 本脚形態での提案をしていました。一方、図 1 にあるように、最終的な SLIM の形を見ると着陸脚のようなものは見当たりません。SLIM では従来の着陸機とは異なる着陸方式を考案・採用することになります。SLIM では、これに 2 段階着陸方式 (図 5) という名前を付け



図4 SLIM 提案書の表紙

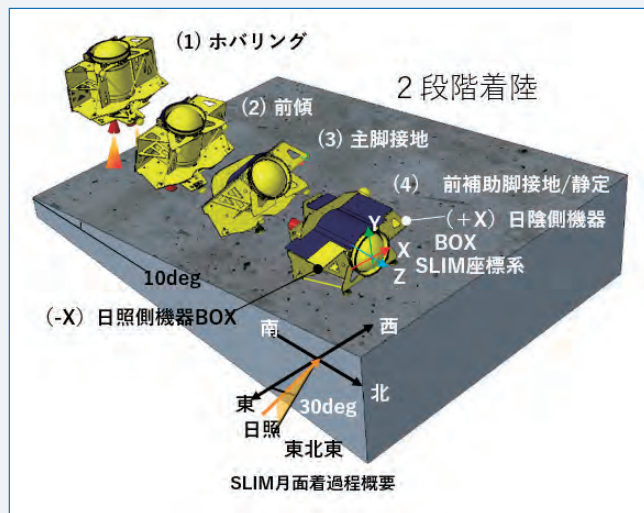


図5 SLIM で採用された2段階着陸方式

ています。いわば地面に倒れ込むような着陸になります。このメリットはいくつかありますが、なんといっても着陸姿勢の重心を低くして安定性を増しやすい、ということが挙げられます。SLIMを含めた探査機はロケットに搭載されて宇宙に飛び立ちます。ロケットで探査機を収納する「ノーズ・フェアリング」と呼ばれるロケットの先端部分は一般的に細長い形状をしています。そのため、ノーズ・フェアリングの広さを目一杯使おうとすると、探査機の形状も細長くなりがちです。この細長い形状のまま着陸しようとする、と、重心は高くなることになります。それに加えて、月着陸の場合には直前まで重力に逆らってメインスラスタを下向きに噴射し続ける必要があります。このメインスラスタのノズルは、探査機構成部品としては細長いものになります。そのノズルが地面に衝突しないようにするにはノズルよりも長く着陸脚を伸ばす必要があり、脚を張り出しにくい小型着陸機ではひよろ長い状態での着陸になりがちです。特にSLIMが目指したような斜面への着陸では重心が高い着陸姿勢だと転倒しやすくなってしまいます。

このような考察を重ねた末、SLIMでは最終的に図5のような着陸方式が合理的と判断しました。斜面に取りつくように倒れ込みながら着陸する、という方式です。「2段階着陸」と名付けたこのやり方は、やや前傾状態の姿勢で降下、まず第1段階で着陸機の「下側」にある主脚で接地した後、前に倒れ込み、第2段階目で着陸機の「側面」にある補助脚で最終的に接地します。これだと着陸した姿勢での重心を低くすることもできますの

で斜面にも安全に着陸可能になります。ただし、この方式にもデメリットがあります。まずは、着陸地点の斜面の状態を把握して、斜面の「上側」に向かって倒れ込むことが重要です。逆に「下側」に向かって倒れ込むと、斜面を転がり落ちるリスクが増します。また、その斜面の向きを理解した上で、倒れ込みやすくなるように着陸姿勢や動きを制御する必要があります。これらはSLIMがピンポイントで着陸地点を目指し、予めどのような斜面に降りるかがわかっていたら対応可能です。すなわち、SLIMで考案・採用した2段階着陸はピンポイント着陸技術と親和性が高い着陸方式と言えます。

図4にあるように、SLIM提案書の表紙を飾った探査機のイラストは4本脚でしたが、提案書作成段階では既に2段階着陸方式の検討に着手していました。とはいえ、その時点では検討が未成熟であり、提案採択後にトレードオフ検討をする項目として例示するのに留めていました。当時は、まだ、「2段階着陸方式」という固定した名称がなく、「寝転び方式」、「転倒着陸方式」、などチームメンバーが各々、自分のイメージで呼称していました。「名は体を表す」と言いますが、当時の呼び方はどれもネガティブな印象があります。「2段階着陸方式」と名付けられるのと時を同じくして検討が一気に深まり、最終的にSLIMで採用するに至ります。なんだかんだと言っても名前は重要と思い知らされました。ちなみに、SLIMという名称は「いけてる」と思う略称候補(例: SLIM)をいくつも挙げて、その中から、相応しい英語の名称(例: Small Lander...)が作れる

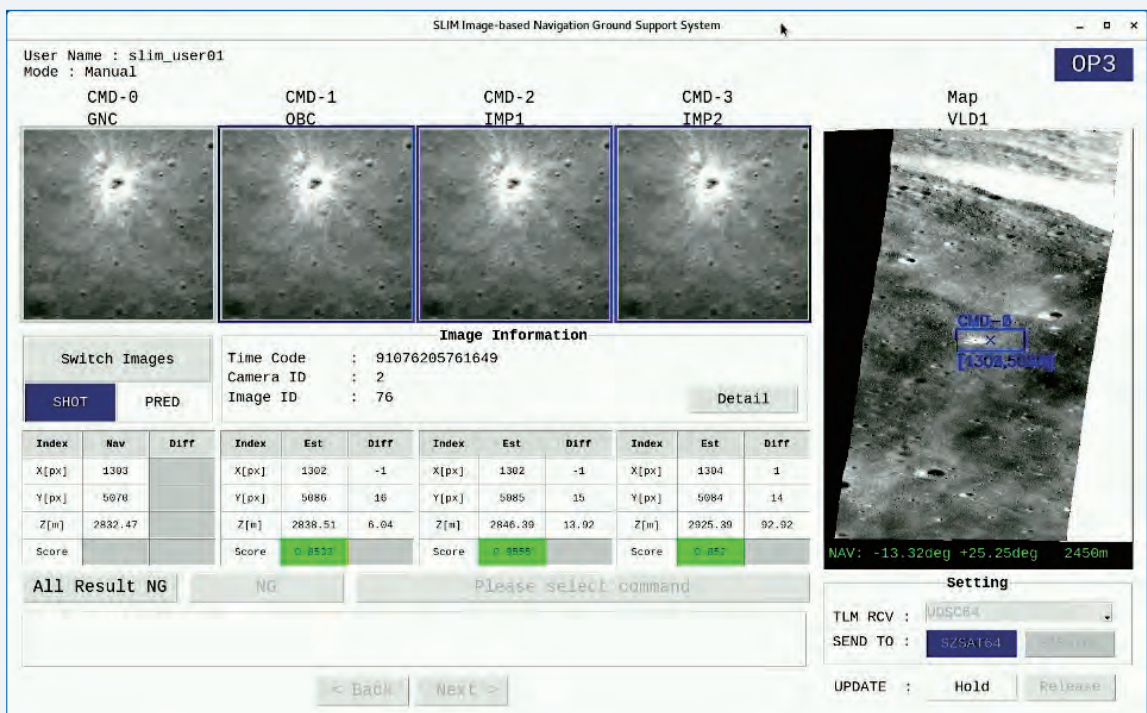


図6 SLIM 着陸中に実施した画像処理モニターの例

か、チーム内で議論して決めました。提案中、違う名称を使っていた時期もありました。

SLIM プロジェクトの2つの目的

目的A：月へのピンポイント着陸技術の実証

ひとつめの目的は、SLIM の前身の SELENE-B でも技術実証しようとしていたピンポイント着陸技術です。SELENE-B 提案から 20 年近い年月が流れ、その間、私たち SLIM メンバーもピンポイント着陸技術の重要性を様々な学会で主張し続けていましたが、それでもこの技術はまだ実現していませんでした。月探査草創期から SLIM 着陸後に至るまで諸外国では既に複数の月着陸機を月面に送り届けていますが、それらの月着陸機は基本的には 38 万 km 離れた地球から着陸機の場所を計測して、それをベースに誘導しています。そのため、狙った場所に対して、数 km から 20 km 前後の誤差を覚悟する必要がありました。中には結果として狙った場所の近くに着陸できた機体もありましたが、技術的な裏付けとしては必ずしもしっかりしたものではなかったのだと思います。これに対して、SLIM は 100 m 以下の精度で着陸する技術を開発・実装して、実際の月着陸にて実証する計画でした。高精度の着陸を実現するためのキー技術としては、たとえば、「画像照合航法」、「自律的な航法誘導制御」、「精密に推力調

整可能な推進系」、が挙げられます。

着陸目標点は月面の地形図上で設定されます。実は、地球と違い月面の場合には、この地形図と月の緯度・経度の値の間にも誤差があるため、何等かの手段で着陸機が自らの位置の緯度・経度情報を正確に得たとしても、目標点との相対関係に誤差を持ってしまいます。また、そもそも、今のところ、月には GPS のような測位システムはありません。そのため、着陸機は月面地形図のどこにいるかを知るのが重要になってきます。「画像照合航法」はそのための技術です。SLIM は着陸降下中、7 箇所 で月面を撮影し、その月面画像を解析して自らがどこを飛翔しているのか推定しました。この画像解析や位置推定は全て SLIM 自身が自律的に実施しましたが、バックアップ機能として、SLIM が撮影した月表面画像と、その画像を元に SLIM が推定した飛行位置の推定値を地上に伝送していました。地上では、SLIM が推定した位置の月面地形と撮影した画像を比較し、SLIM の自律判断が正しいかをモニターしていました。また、並行して、SLIM が送ってきた画像を元に、地上の強力なコンピュータ能力を使った高度な 2 種類の画像処理によって、SLIM の位置推定もしていました。図 6 に SLIM 着陸降下運用中のモニター画面のスクリーンショットを掲げます。4 つの正方形の月面地形が並んでいます、

一番左は、SLIM が撮影した月面地形です。そのひとつ右は SLIM が推定した位置における月面地形の CG になります。地形の見た目は太陽光条件によって大きく変化しますので、撮影した日時、太陽位置を考慮した CG になっています。運用では、一番左とそのひとつ右の隣り合う 2 つの絵が一致することを確認していました。その更に右側の 2 つは、地上でより高度な画像処理をした結果から推定した位置での月面地形の CG です。これらも全て同じ絵柄になっていることから、SLIM が自律的に推定した位置が正しい、と確信をもって判断できました。なお、万一、この 4 つの地形図に差異が生じた場合には、予め定めたルールに従って SLIM に対して推定位置補正情報を知らせることになっていました。結果として、補正指令を発動することはありませんでした。

なお、月面 CG を見て頂くと、実際の撮影した写真とかなり似ていることがわかります。この CG は、日本の月周回探査機「かぐや」を含む過去の月探査で得られた詳細な地形と表面の反射率（色味）分布を利用しています。詳しいことは省略しますが、この CG 自体が SLIM の研究成果です。このような高精度 CG を作る技術は、SLIM 搭載の画像処理を検証するために開発されたものです。

このように、SLIM は自分の位置を画像照合航法によって正確に把握することができるようになったのですが、もちろん、それだけではピンポイント着陸を成し遂げることはできません。場所を把握した上で、どのように飛翔させればきちんと目標点にたどり着けるかを考える誘導制御系や、その誘導制御系が想定したとおりにきめ細かく経路を調整できる推進系が必要になります。SLIM の場合には、2 つのメインスラスタと 12 個の補助スラスタを用いた調整をしていました。これらのスラスタは SLIM 機体に固定されているので、推力方向を変更するには SLIM 機体自体の姿勢を調整する必要があります。補助スラスタはその姿勢制御に利用されました。また、着陸降下中の序盤から中盤までは、メインスラスタで発生した推力と、誘導制御系が期待している推力の差を埋めるように、補助スラスタの噴射度合いを調整していました。その後、着陸降下の終盤では、誘導制御系がより高い自由度で期待する推力を指定

できるようにメインスラスタを間欠的に噴射させることで、広い範囲の推力調整ができるようにしていました。図 7 に着陸降下運用中のスラスタの噴射状況のスクリーンショットの例を示します。SLIM を「後ろ」から見た絵の周りの上下左右に 3 本ずつの合計 12 本のバーが伸びています（図 7 の f）。これは 12 基の補助スラスタの動作状況を示しています。直近の噴射時間割合をバーの長さで示しています。また、その右下の 2 つの丸いメーターは 2 基のメインスラスタの直近の噴射時間割合を示しています（図 7 の g）。このときには、100%、すなわち連続噴射していることが見て取れます。この他にも、この画面では、着陸降下パスでの大凡の現在値や探査機の姿勢運動状態、推進剤の残量の推定値、バッテリー残量の推定値、なども表示されています。また、左下の緑色のバー（図 7 の e）は、SLIM 搭載加速度計の値と、推進系の各部の状態から推定される加速度（正確には過去 1 秒の平均加速度推定値）を示しています。隣り合うこの 2 つのバーが概ね同じであることから、残推進剤量（タンクに残っている推進剤の量次第で機体の重さが変わるので同じ推力を出していても加速度は変わります）や推進系の状況が推定通りで正常である、と判断できます。このバーの搭載加速度計の値は着陸後には概ね 1/6G で一定でした。このバーからも姿勢はともかく、月面上で静止していると判断できました。

なお、この画面は、着陸当日、リアルタイムでネット配信もしていました。お陰様で多くの方に視聴頂いたようで、管制室にいる私たちプロジェクトメンバーと同じ空気感を味わって頂けたのではないかと思います。ネット配信にあたっては技術面を含めていくつか課題がありましたが、プロジェクト側のワガママな希望を受け止めて実現に漕ぎ着けるために多くの職員がボランティアで協力してくれました。同じ組織内の話題で恐縮ですが、この場でも言及させていただきます。

目的 B：軽量な探査機システムの実現

さて、SLIM の 2 つある目的のうち、2 つめは、「軽量な探査機システムの実現」です。推進剤を除いた SLIM の質量（ドライ質量という言い方をします）は 192.8kg で、地球出発時にはこの機体に推進剤を約 520kg 充填していました。複雑な

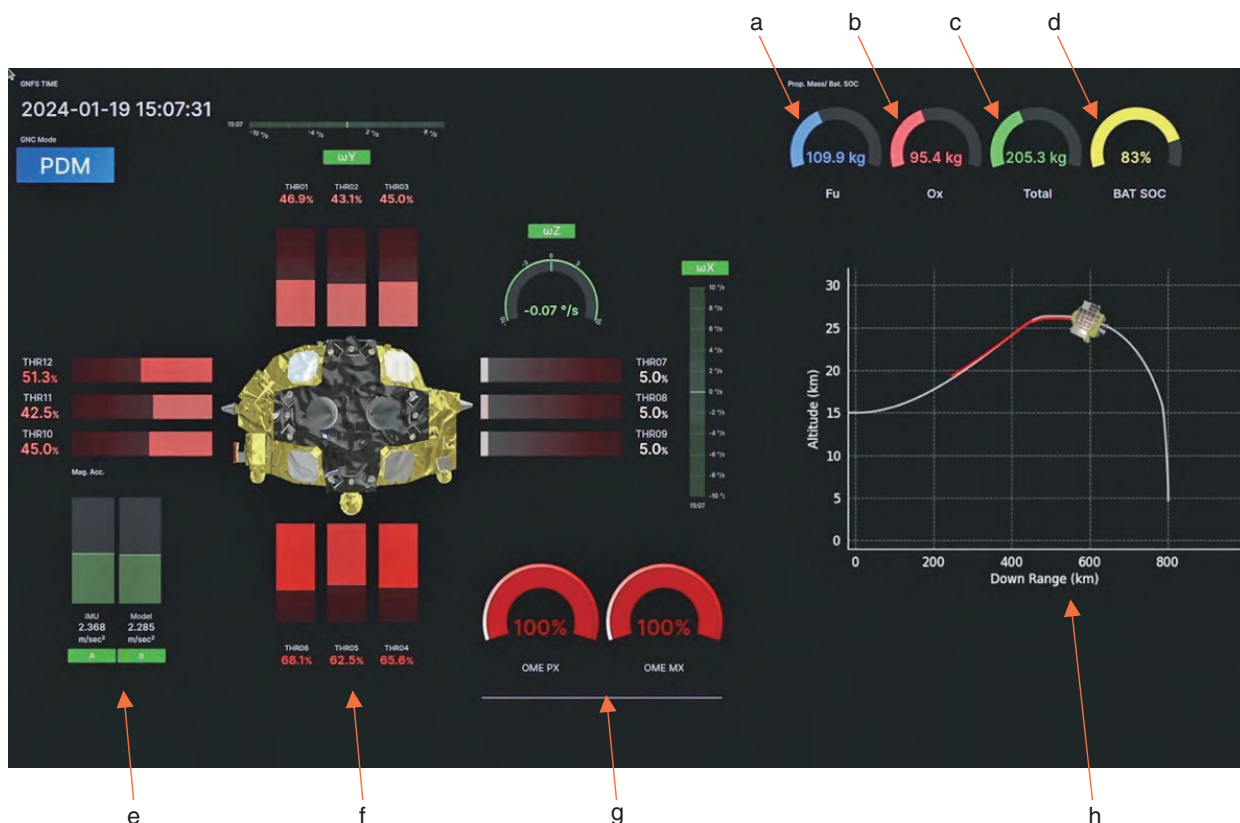


図7 着陸降下中のスラストなどの作動状況の例

a: 燃料残量、b: 酸化剤残量、c: 燃料と酸化剤の残量合計、d: バッテリーの残量、e: 搭載加速度計の値(左)と推定加速度(右)、f: 補助スラストの直近の噴射時間割合(全12個)、g: 2個のメインスラストの直近の噴射時間割合、h: 着陸降下パスで大凡の現在地と姿勢運動状態

形なので寸法を言うのは難しいのですが、図1の視点で、高さ2.4m程度、横幅2.7m、奥行き1.7m程度の大きさです。これは諸外国の月着陸機と比べても小型・軽量になります。その中にピンポイント着陸するための技術を詰め込んだという点で技術的にはかなりの挑戦で、SELENE-B提案からSLIM提案にかけての大きな変更点でもあります。

そのためのポイントはいくつかあります。たとえば、構造設計では、推進剤タンク(図8)を着陸機の主構体にする、という衛星・探査機ではかなり珍しい形態を採用しています。衛星・探査機の構造設計を考えるひとつの大きな要素はロケット打上時です。ロケットで打ち上げられるとき、載っている衛星・探査機は大きな加速や振動を受けます。SLIMの場合、打上のときには全体質量の3/4がタンクに入っている推進剤です。また、タンクは推進剤を勢いよくスラストに送り出すために加圧されており、丈夫な压力容器でもありま



図8 SLIMの推進剤タンク(写真提供:三菱重工株式会社)

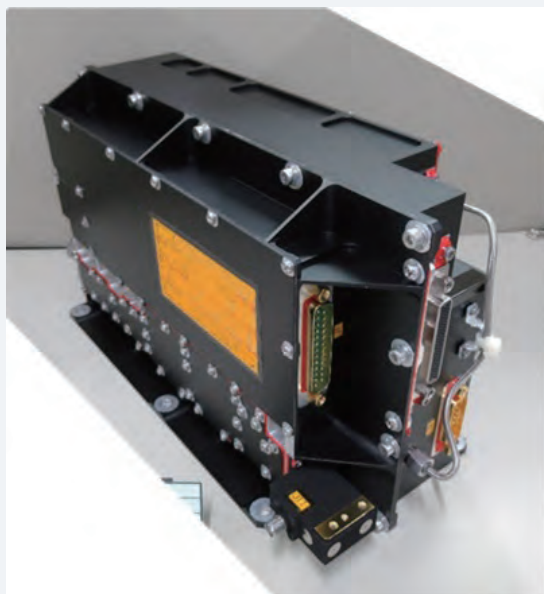


図9 通信装置 (写真提供：三菱電機株式会社)



図10 デジタル方式の電力制御器 (写真提供：三菱電機株式会社)

す。そのため、丈夫な構造であり、また、内容物である推進剤を含めると質量の大半を占めるタンクそのものを「大黒柱」としてそこにいろいろな機器を付けていく、というような構造設計をしました。このような、タンクを主構体にする、という考え方はロケットではごく普通に行われています。SLIM ではそれを衛星・探査機設計の世界で採用した、ということになります。

また、搭載電子機器では思い切ったデジタル化を進めました。宇宙の厳しい環境に耐えられる必要があるという制約もあり、開発は一筋縄でいか

ないものもありました。たとえば、無線装置のデジタル化（ソフトウェア無線）や電力制御システムのデジタル化など、少なくとも宇宙分野では類例がない技術への挑戦を伴うものでした（図9、10）。

月面への着陸運用

このような2つの目的をもったSLIMは、前述のように2024年1月20日の未明に月面への着陸降下シーケンスを実施しました。シーケンスの概要を図11に示します。メインスラスタの逆噴射

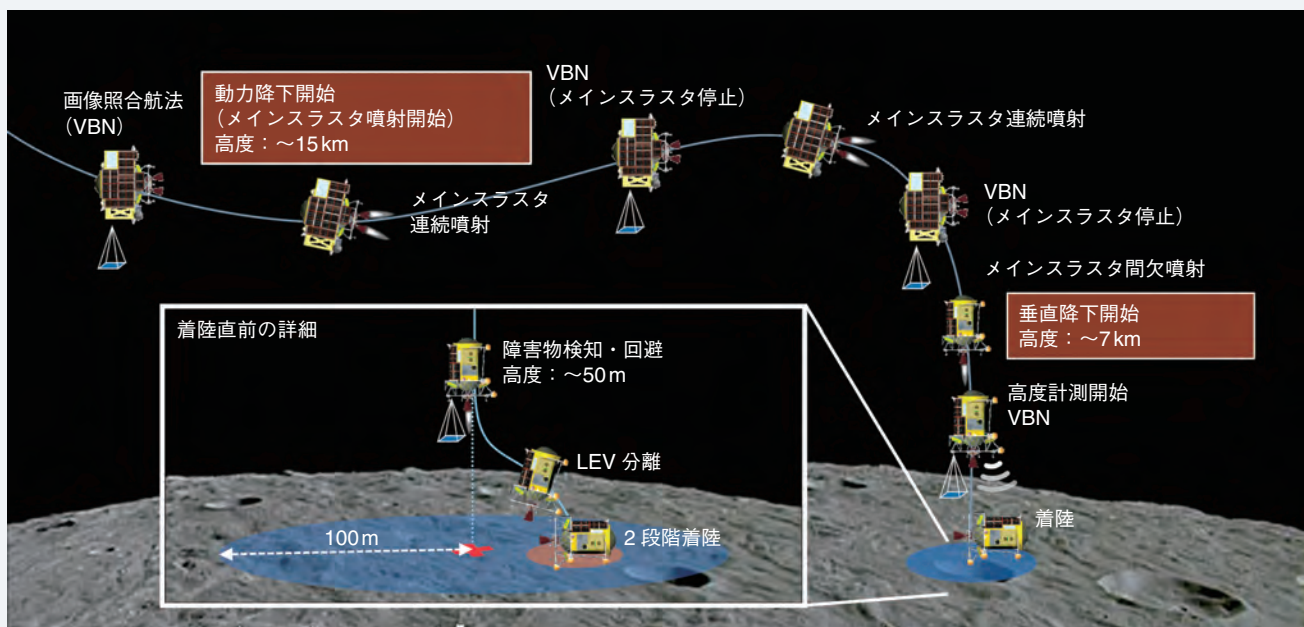


図11 SLIM 着陸シーケンス

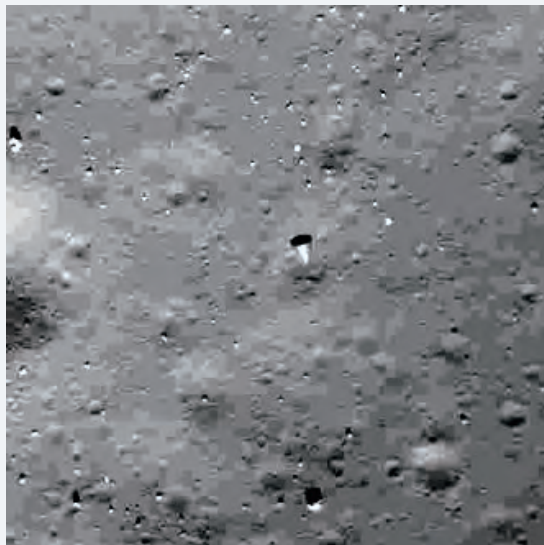


図 12 50 m ホバリングフェーズの最中に月面に落下していくノズル（画像のほぼ中央の円錐状の物体）

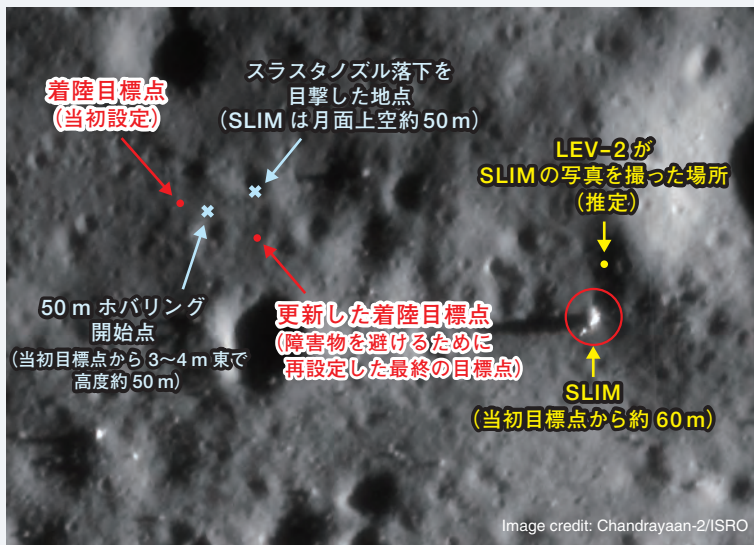


図 13 SLIM 着陸点近傍の様子（月面写真提供：インド ISRO）

を開始してから着陸までは約 20 分。この間に月面上を約 800 km 飛翔し、狙ったところにピンポイントに着陸することを目指しました。シーケンスのほとんどは非常に順調に推移していました。しかし、着陸直前の「50 m ホバリング」と言われるフェーズで思わぬことが発生してしまいました。この「50 m ホバリング」では、着陸直前に周辺の要素を確認して、着陸に障害になるような岩や穴ほこがない場所を探し、最終着陸目標点を決定します。後に解析したところ、ホバリングモードに入った時点で SLIM の位置は当初目標地点から水平方向に 3.4 m 程度の精度でした。SLIM 機体サイズと同程度の精度でピンポイントに目標上空まで辿り着いたことになります。その位置で障害物検知をしました。当初設定の目標地点近傍には SLIM を打ち上げる前にはわからなかった障害物があるかもしれません。そのため、その近傍で最も安全な場所を SLIM が自律的に判断し、着陸目標を切り替えます。実際、SLIM は当初目標から約 10 m 離れた場所を最終目標点に設定しています。

ところが、このホバリング中に予想しなかったことが起きました。2 本あるメインスラスタのうちの 1 本が脱落してしまったのです。その様子は、SLIM が撮影した月表面写真に写っていました。図 12 を見ると、月面に向かって落下していくスラスタノズルが写っていました。この事象によって SLIM は誘導制御系が指令したとおりの推力が発生できなくなり、設定した最終目標点に向

かうことができなくなりました。しかし、SLIM 自身の自律制御機能により、機体は徐々に東側に流れていきながらも制御された姿勢を維持しつつ緩降下を継続し、当初目標地点から 50~60 m 程度の地点で接地しました。また、接地の直前には搭載していた小型ロボット LEV-1、2 の放出指令も自動発行されています。なお、保存できるテレメトリデータに制約があったため、このあたりのフェーズで何が起きたのか詳細はわかっていないところもありますが、メインスラスタ脱落については、推進剤をスラスタに供給する配管系内で意図せぬ変動が発生した結果、設計仕様を大きく上回る燃焼荷重がメインスラスタに掛かってしまった可能性が考えられています。

SLIM 着陸後、インド探査機チャンドラヤーン 2 号機が着陸点付近を撮影して下さいました。図 13 にその写真を掲げます。ここまで説明してきた各ポイントの大凡の位置関係も写真上で示しています。この図中、SLIM 機体のやや上（北になります）に、「LEV-2 が SLIM の写真を撮った場所」という点をプロットしました。これは、SLIM に搭載し、着陸直前に月面に放出した 2 台の小型ロボット LEV-1、2 のうちの後者が SLIM の写真を撮影した大凡の場所を示しています。撮影された写真（図 14）を見ると、SLIM は逆立ちをしたような姿勢で月面上に立っていることが見て取れます。この姿勢は意図したものではなく、メインスラスタ脱落の影響で着陸接地の際の速度・姿勢の条件が設計範囲を逸脱していたために

いわば横転したような形になりました。すなわち、前述のとおり、「2段階着陸方式」では、着陸時の速度・姿勢条件を制御して、斜面にしがみつくように倒れ込むことを促す必要があるのですが、このときのSLIMはメインスラスタ1本の脱落の影響で、姿勢の破綻を避けつつ降下速度を制御して緩降下を継続することに精一杯で、「受け身」の着陸姿勢を取ることができませんでした。

なお、図14のLEV-2の写真は、SLIMを全く介さずにLEV-1を経由して地上に送られてきています。たとえSLIMが着陸に失敗したとしてもLEV-1、2を放出できれば一定の月面活動が遂行できることを企図したシステム設計になっていました。

着陸後のSLIMの様子

着陸直前にメインスラスタの脱落に見舞われたものの、着陸後もSLIMの状態は健全で、搭載した地質調査用カメラ(MBC)で周辺岩石の調査を実施できました。図15にMBCで撮影した周辺地形のスキャン画像の例を示します。このスキャン画像の中で、地質学的に価値が高そうな岩石には犬の名前を付して識別した上で詳細な分光観測を実施しています。この中に月の内部から噴出した物質があつてその組成がわかれば、月の起源をより深く理解できるようになると期待しています。たとえば、地球の内部物質の組成については既に多くの知見があることから、それと比較することで大きなヒントが得られると考えています。

ところで、図15を見ると左側は全面が撮影されているのに右側は2本のスジの部分しか撮影されていません。これは、実は着陸姿勢が予定していたものから概ね90度転んでしまったことと関係があります。予定通りの姿勢であれば、右側の2本のスジは上に向かって伸びていたことになります。左側の「全面」が写っている領域でSLIM近傍の地面を撮影するとともに、そこから上に向けて伸ばした2本のスジで宇宙空間を撮影するこ



図14 着陸直前のSLIMから放出されたLEV-2が撮影した月面に着陸したSLIM

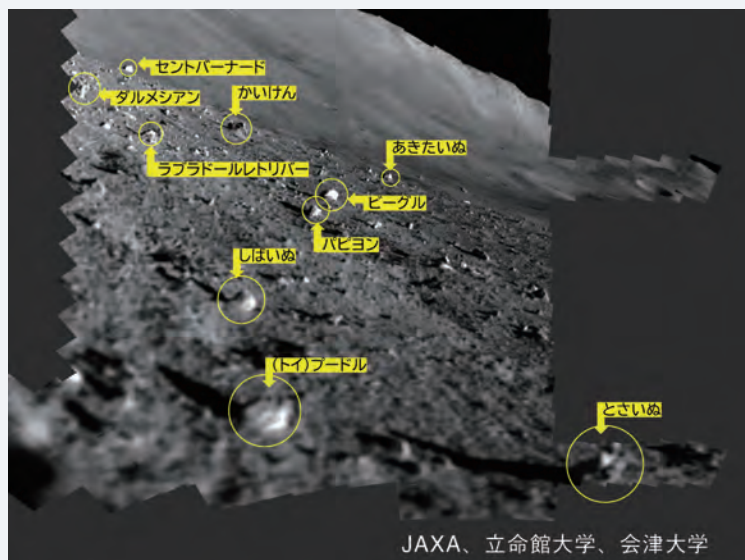


図15 地質観測用カメラ(MBC)で撮影した月面

とにしていました。宇宙空間は「真っ黒」です。スジの上のほうにあるであろう真っ黒の宇宙空間をわざとMBCに撮影させて、センサ出力を補正するつもりでした。この画像からもSLIMが当初予定と違う着陸をしていることがわかります。

ただし、後からの解析によれば、SLIM着陸位置・姿勢では偶然、MBCの視野は地質調査対象が比較的濃密に存在している方向を向いていました。また、太陽電池がほぼ真西を向いていたことから、当初予想したよりも長期間の地質観測ができました。着陸直後は予定通りの姿勢ではなかったことから私自身を含めたチームの雰囲気は完全に沈み込んでいましたが、神がかりともいえる幸



図 16 1 回目の越夜後の真昼 (2024/2/26) に SLIM が撮影した月面 (圧縮画像)

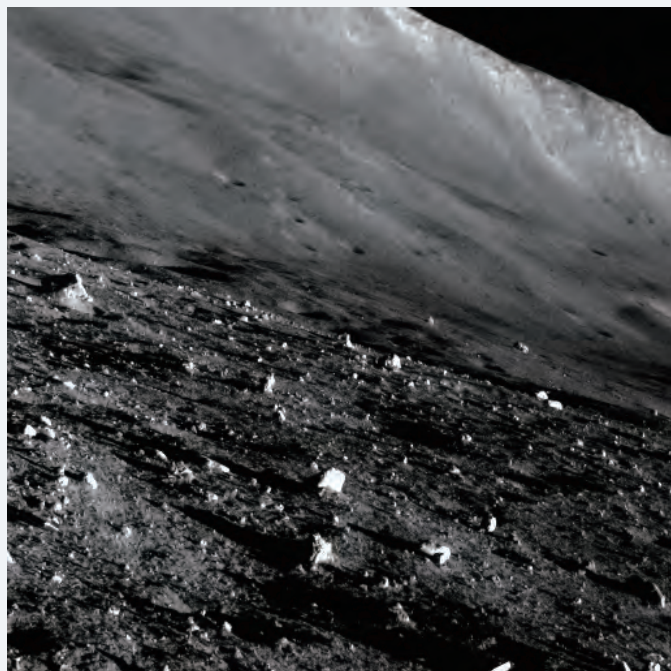


図 17 2 回目の越夜後の日没直前 (2024/3/29) に SLIM が撮影した月面

運でした。一昔前にホームセンターで買って以来、使い回してきた神棚を SLIM 管制室に設置し、日々拝んでいた効果が最後の最後に役立ったのかもしれません。もし、ケチな事を言わずに、SLIM のために新しい神棚を買っていたらどうなったのか。たまに自問自答することもあります。が、「たられば」の話をしても詮無いことです。余談ですが、この神棚は連戦連勝です。

さて、その後ですが、SLIM の着陸地点は月の夜を迎えました。月は約 1 ヶ月周期で昼と夜を繰り返します。すなわち、月の表面は、大気という温度変化を抑制する衣がない状況で地球よりも 30 倍近く長い昼間や夜間を繰り返すことになります。これにより、極端に熱い昼と極端に低温の夜を繰り返すことになります。つまり、月表面の 1 日は、大きな温度の変化を伴うものになります。

月の夜を越えて活動することを「越夜」(えつや)と呼びますが、SLIM は越夜を考えた設計をしていませんでした。越夜をするには原子力電池を使うなど、特殊な技術の採用が常道になりますが、SLIM ではそこまで踏み込んでいませんでした。とはいえ、越夜後、SLIM にいる方向に電波で指令を送ったところ、2 月期、3 月期、4 月期の 3 回、越夜後のデータを取得することができました。それらの運用では、たとえば、SLIM 着陸の際に使用した航法カメラで月面を撮影 (図 16、

17) しました。越夜を考慮した設計をしていないため、「なぜ越夜ができたのか?」、その理由は不明ですが、一方で、複数回の越夜でのトレンドデータは取得できているため、今後、このデータを解析することで、「越夜をすると探査機はどうなっていくのか?」、について、情報が得られるかもしれないと期待しています。

最後に

以上、小型月着陸実証機 SLIM について紹介してきました。SLIM は技術実証を大きな目的としたミッションで、着陸直前に思わぬことも発生しましたが、何とか月面に降り立つことができました。今後、これをひとつの契機として月惑星探査分野が大いに盛り上がり、次々に新たな挑戦が出てくることを願っています。SLIM で実証した技術は、提案開始からの 20 年以上にわたって世界的に見ても「最新技術」であり続けましたが、それは必ずしも 100% 歓迎すべきことではありません。この間、月惑星探査分野の技術進歩が停滞してしまっていたとも言えます。これまでの 20 年とは違って今からの 20 年では大きな進展があり、近い将来、技術実証機としての SLIM が忘れ去られるほどの変革が果たされることが、少し寂しいながらも、SLIM 実施の最大の願いでもあります。