

連載 第1回 SLIM the Moon Sniper

降りられるところから、降りたいところへ

旅の始まり、連載の開始

今月号から、小型月着陸実証機SLIM (Smart Lander for Investigating Moon)の連載がスタートします。SLIMは、月や惑星への高精度軟着陸技術(ピンポイント着陸)を開発し月着陸により実証すること、併せて軽量化のためのシステム技術を開発することを目的としています。これまでの各国の月着陸機はいずれも、その着陸精度は数kmから10数km程度であり、そのため、「海」と呼ばれる広く平坦なところに降りてきました。SLIMが目指す100mの着陸精度が実現できると、クレータ近傍や極域など、これまで降りたくとも降りられなかった場所への安全な着陸が可能となり、次世代の月惑星探査への扉が開かれます。

図1にSLIMの外観図を、表1に探査機的主要な仕様を示します。特徴的な外観となっているのは、多量の推進薬を搭載するための大きなタンクを中心とした構造とすることで軽量化を図っていること、小型探査機でも斜面に安全に降りるために斜面に向かって機体を倒し込みながら着陸する「二段階着陸方式」を採用していること等によるものです。

ピンポイント着陸を実現するためのキー技術の1つは、搭載カメラで撮像した月面画像からSLIMがクレータを識別し、その分布をクレータ地図と見比べることで自身の現在位置を把握する「画像照合航法」技術です。また、「画像照合航法」により自身の正確な位置を把握すると、着陸目標地点上空まで効率良く到達するためSLIMは自分の判断で軌道の修正を行います(「自律的な航法誘導制御」技術)。SLIMには、この「画像照合航法」技術や「自律的な航法誘導制御」技術を始め、大学の研究者の方々とも共同で開発してきた色々な新しい技術がてんこ盛りです。

SLIMの主な目的は小型実証機によるピンポイント着陸技術実証ですが、着陸後には月面での活動にも挑戦します。SLIM

表1：SLIMの主要な仕様

質量	約200kg(推進薬なし) / 約700-730kg(打上げ時)
サイズ	高さ：約2.4m、縦：約1.7m、横：約2.7m
着陸精度	100m
打上げから着陸まで	約半年
搭載月面活動機器	分光カメラ、小型プローブ(LEV-1, LEV-2“SORA-Q”)



図1：SLIM外観図。



図2：月面着陸後のSLIM。

には「マルチバンド分光カメラ」という観測装置が搭載されており、着陸後、月内部に由来すると考えられている岩石の成分分析を行って、月の起源に関する手がかりを探る予定です。その目的に適した岩石は月面上の特定の場所にしか見つからず、それらの場所はいずれもクレータ近傍で、傾斜のある複雑な地形をしている場所です。すなわち、ピンポイント着陸技術や二段階着陸技術が実現できて初めて実現できる観測ということになります。また、着陸直前には2つの小型プローブを分離します。2つのプローブはそれぞれ、月表面移動技術の実証や、月面上での写真撮影などに挑戦します。

技術開発要素が多く、その意味でチャレンジングなSLIM開発は、長く研究開発を主導してきたベテランと、エネルギーで意欲的な若手が両輪となって進めて来ました。この後の連載に登場するのは、実際に開発に当たってきた彼ら・彼女らで、各技術やその開発過程を、時にはその長い歴史を紐解きながら紹介してくれる予定です。H-IIAロケットで打ち上げられて月へ向かいピンポイント着陸するSLIMの姿も思い浮かべながら、連載記事を楽しんで頂ければと思います。

SLIMプロジェクトマネージャ
坂井 真一郎(さかい しんいちろう)

連載 第2回 SLIM the MON SNIPER

降りられるところから、降りたいところへ

団結！SLIM推進系！

SLIMのミッション目的である「月面ピンポイント着陸」に向けて、軌道制御および姿勢制御、着陸降下時の速度制御に活躍するのが我々推進系です。推進系は探査機システムからの指令に基づいて、必要な推進力を発生させるシステムで、外観からもわかりやすい、化学反応を最終的な推力に変換するスラスタのみでなく、推進薬を貯蔵するタンクや、その推進薬を各スラスタまで導く配管、推進薬の流れを制御するバルブなど、様々なコンポーネントで構成されています。SLIM推進系は過去の探査機や衛星で採用された推進系と比べると、非常に個性的な設計になっています。すべてはSLIMのもう1つのミッション目的である「軽量の探査機システム」を実現するためであり、自分事ながら流石の特別仕様といった様相です。

SLIM推進系の系統図を図1に示します。スラスタは、500N級のメインスラスタ(OME)2基と20N級のスラスタ(THR)12基で構成され、燃料(ヒドラジン)と酸化剤(MON3)を1つの大きなタンク殻内の内部に仕込んだ金属共通隔壁で仕切る一体型タンク(TNK)になっています。タンクの内部デバイスやバルブ等の構成もシンプルなものとなっており、ダイアフラムを介した加圧による2液式ブローダウンシステムを採用しています。

いくつか、代表的なコンポーネントとその特徴を挙げると、OMEは金星探査機「あかつき」でも使用した、国産のセラミックスラスタを採用しておりますが、製造方法の信頼性向上に加えて、比推力性能も向上し推進薬量を含めた質量低減に貢献しています。THRは軌道上実績の多い金属スラスタですが、OME同様にSLIMで使用する広範囲な推力条件での使用に対して複数回の試験にて丁寧な検証を実施しました。TNKはSLIMの主構体として機体にかかる荷重を支えており、従来必要となる支持構造などが不要となることで、探査機の全体質量低減に大きく寄与しております。また、内部デバイスの1つPTFE(polytetrafluoroethylene)樹脂製の酸化剤側ダイアフラムはJAXAインハウスで開発したものであり、材料選定、要素試験、複数の設計検証試作モデル(BBM)試験を通じてその最適な設計を作り上げました。

上記に加え、書ききれない様々な質量低減、高性能化の開発を行いました。推進系を構成する各コンポーネントは、当然ながら様々なメーカーさんに関わっていただいて開発を進めてきたものです。推進系は1つのシステムでもあるので、全てのコンポーネントが組み合わさって正しく機能するように作り上げていくことが非常に重要になります。その意味でも、推進系史上特別に個性的なこのシステムは、多岐にわたるメーカーさん

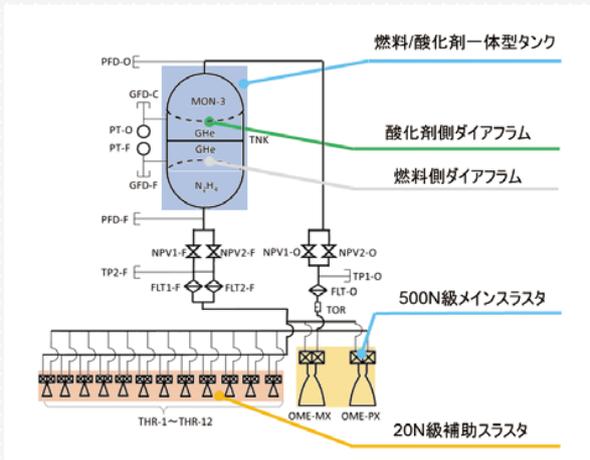


図1：推進系系統図。



図2：システム燃焼試験実施状況。

と、まさに一丸となって作り上げてきたと言えます。その象徴ともいえる1つが、システム燃焼試験(SFT、図2)でした。SFTは、フライトモデルとほぼ同一設計の推進系コンポーネントを組み合わせて、システム全体の作動特性やコンポーネントの連成挙動を検証し、問題の有無を確認する非常に重要な試験です。これはJAXAの旗振りのもと、IHIエアロスペースの試験場で、IHIエアロスペース製のTHRのみならず、三菱重工業が開発・製造したTNK及びOME、それらをつなげる三菱電機が製造した配管系を持ち込み、組み上げた上で試験を実施するという、これまで前代未聞の試験体制で実施されました。技術的なものだけでなく、企業間のルールなど様々なハードルを越えての試験でしたが、最後はSFTを成功させるという目的のもと組織の枠を超えた協力を得て、試験を良好に完了させることができたことに、ある種の感動を覚えたことを今でも記憶しています。

いよいよ始まる、SLIMの運用作業ですが、十分な準備をもってしても、緊張の連続が想像されます。強固な推進系システム関係者の結束によって、強い推進力で乗り越え、ピンポイント着陸を確実に成功させたいと思います。

推進系担当：道上啓亮(みちがみけいすけ)

SLIM the Moon Sniper

降りられるところから、降りたいところへ

SLIMの構造系

今回はSLIMの構造系についてです。早速ですが、SLIMがどういった構造をしているのか、実機ではMLI (Multilayer Insulation、多層膜断熱材) と呼ばれる金色の断熱材に隠れて見えなくなっている部分も含めて概要を紹介します。図1に示すのが、打上げ形態でのSLIM構造の外観です。MLIを省いて構造を見やすくしています。若干ややこしいですが、本来SLIMの上下はメインエンジンが下であり、図1のSLIMはひっくり返った状態です。ですが、構造系は主にロケット搭載状態である図1の向きで考えることが多く、ここでもその視点から説明させていただきます。

図1で機体の下端にあるロケット結合リングがロケットとの結合部です。そこからPAF (Payload Attach Fitting) リングと呼ばれる円錐状の部材により中央にある大きな推進タンクへとつながります。なお、PAFとは積載物取り付け金具という意味で、よくロケットの部品について使われる略称です。その由来からして積載物側のSLIMの部品にPAFと表記するのは少し変なのですが、見た目がロケットのPAFに似ているということでこの部品を「PAFリング」と呼んでいます。タンクの上側にはデッキパネルと呼ばれる大きな板が接続されています。このデッキパネルはスラスターからの熱的な影響を避けつつ降下中に地面を直視できる位置にあることから、各種センサー類が多数搭載されています。また、デッキパネルからタンクの両脇に向けてはパネルで構成された箱状の構造体が配置されています。この構造体は「機器ボックス」と呼ばれており、この中には航法誘導制御、電源、通信、着陸後の科学観測用のカメラなどの各種電気機器が収められています。この機器ボックスは横揺れを防ぐためにPAFリングと軽く接続されているものの、基本的に重量はデッキパネルによって支えられており、打上げ時はいわばデッキパネルにぶら下がっている状態となります。デッキパネルの更には軌道制御や姿勢制御用のスラスター類をまとめて保持するRCS (Reaction Control System、推進系) パネルがあります。また、RCSパネルには月面への着陸時にいち早く接地する主脚と呼ばれる大きな衝撃吸収材も取り付けられています。この主脚が月面に接地した際の大荷重を受け止めるため、RCSパネルは複数の支柱によりタンクやデッキと強固に接続されています。主脚を含むSLIMの脚についてはISASニュース2019年12月号*でもご紹介していますので参照ください。その他、図1では見えにくい機体の背面には太陽電池シートを敷き詰めたパネルが取り付けられています。

図1に見るSLIMの構造の大きな特長の1つはタンクを構造材として使用していることです。一般的な衛星の構造では、中央

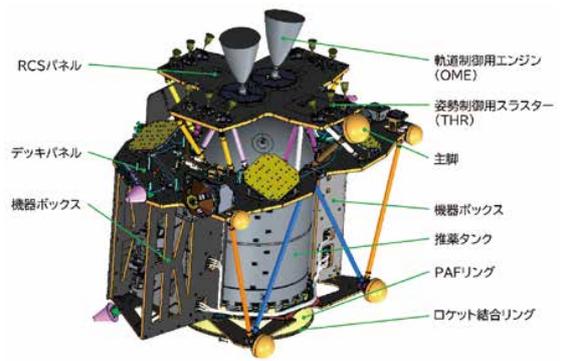


図1：SLIM構造外観。



図2：模型落下試験。

に全体を支える十字のパネルや円柱状の構造部材を立てて、タンクはそれに取り付くような形が多いですが、SLIMの場合はタンクそのものにデッキを支えさせることで構造材の質量を大幅に削減することに成功しました。SLIMのような着陸機は、降下の際に必要な燃料を確保する必要があり、質量削減は重要な要素でした。一方で、タンクは組立後に加圧充填に伴って大きく膨張します。この膨張による変形を適切に逃がしつつ、強度を保ってタンクを主構造に組み込むというのは、実は容易なことではありません。この構造の実現のために随所にメーカーさんの非常に高度な設計技術や組み立て技術が反映されています。また、一般的な人工衛星の構造にとって主要な検討対象はロケットでの打上げ時に生じる荷重ですが、月着陸実証機であるSLIMは着陸時の荷重についても考える必要がありました。そのため開発の最終段階では探査実験棟において実際に構造モデルを着陸姿勢で落下させて機体の強度を確認する試験 (図2) を実施しています。SLIMは2段階着陸という特殊な着陸方式をとることもあって、この試験も落下姿勢などが非常に特徴的な試験となりました。

以上、大まかではありますがSLIMの構造を紹介しました。今後とも応援のほど、どうかよろしくをお願いします。

SLIM構造系担当：河野 太郎 (かわの たろう)

*https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISASnews465.pdf

連載 第4回 SLIM the MON SNIPER

降りられるところから、降りたいところへ

挑戦的なSLIM電源系！

2023年9月7日8時42分11秒、遂にSLIMは打ち上げられました。打上げから1週間が経過し、探査機の状態が正常であることを確認し安心したところで、本原稿を執筆しています。

電源系は、名前の通り探査機の各機器に電力を供給する役目を担い、電源系の不具合は探査機の喪失に直結します。そのため、他のサブシステムに比べると新規技術を採用するハードルが高いことが一般的ですが、SLIMはミッション目的の1つである「軽量化探査機システム」を実現するため、電源系コンポーネントの小型・軽量化に励んだ結果、新規技術を積極的に採用した挑戦的な電源系になっています。ここでは、新規技術を盛り込んだ太陽電池パネル、バッテリー、統合化電力制御器の3つの電源系コンポーネントについて紹介します。

まずは日照中に太陽光を受けて発電する太陽電池パネルです。SLIMではシャープ株式会社が開発した軽量・高効率な薄膜3接合太陽電池シートを採用しています。薄膜3接合太陽電池シートは、13 μmと極めて薄く柔軟な太陽電池を透明な樹脂フィルムで挟んでラミネートしたものです。従来の太陽電池は10倍以上も厚く固くて脆いため、10mm程度の厚く丈夫なパネルに接着剤で貼り付けて破損を防ぐ必要がありました。しかし柔軟な薄膜太陽電池シートは薄いパネルや曲面にも貼り付けられ、しかもベルクロで簡単に固定できます。この特徴を生かして、燃料タンクを主構造としたSLIMでは、タンク周りの曲面CFRPパネル上にも太陽電池シートを設置することで支持構造物を最小限とし小型軽量化を実現しています。そもそも薄膜3接合太陽電池シートは最新の技術でフライト実績が少ないこともありますが、SLIMが飛翔する環境は通常の地球周回衛星とは異なるため、機能・性能に問題がないか、熱試験を中心に念入りにチェックした上で搭載しました。

次は、日陰時や太陽電池からの電力供給だけでは足りない時に機器に電気を供給するバッテリーです。SLIMでは、宇宙科学研究所と古河電池株式会社が共同開発したSUS（ステンレス）ラミネート型リチウムイオン二次電池セルを採用しています。従来の宇宙用電池は金属缶タイプですが、SUSラミネート型二次電池セルは、名前の通りSUS材を用いたラミネート型の電池です。ラミネート電池の採用により電池の外装の重量を削減できたことに加え、組電池にするための機構重量の削減も実現しています。SLIMではSUSラミネート型二次電池セル2つをCFRPの板で挟んで拘束し、小型・軽量を維持しながら打上げ時の振動・衝撃や真空下での充放電に耐えられるようにしています。SUSラミネート型二次電池セルの宇宙機搭載は世界初であるため、宇宙環境耐性を確保した拘束条件の確立に苦労しましたが、関係メーカーとひとつになって機械環境試験を繰り返し行って最



図1：SLIM外観（前面に太陽電池パネルあり）。



図2：SUSラミネート型二次電池セルが組み込まれた電池モジュール（SLIMには4台搭載）。

終的に困難を乗り越えたことが良い思い出です。

電源系のもう1つのコンポーネントが統合化電力制御器IPCUです。従来は電力制御（太陽電池発生電力制御、バッテリー充放電制御、電力分配）、ヒーター制御、スラスタバルブ制御はそれぞれ別のコンポーネントで構成されていましたが、SLIMではこれらを1つのコンポーネントに集約しました。また、従来はアナログ回路で構成されていた制御をソフトウェア化しデジタル制御にしています。コンポーネント数の削減により筐体の重量が削減できたこと、デジタル化により部品数を削減したことで、大幅な小型軽量化を実現しました。また、電力制御系としては、太陽電池の出力電力制御であるPPT（最大電力点追尾）制御とバッテリーの充電制御をAPR（アレイパワーレギュレーター）で兼ねていることも特徴です。

ご紹介した電源系コンポーネントはどれも前例のない新規技術であるため、開発の過程には数々の困難がありました。トラブルが発生する度に部品の開発メーカーであるシャープや古河電池、システムメーカーの三菱電機とJAXAが一体となってトラブルの解決にあたり、無事に打上げを迎えることができました。月着陸、その後のミッション機器による観測まで油断できない日々が続きますが、最後まで搭載機器に電力を供給し続けられるよう、着実に運用していきたいと思えます。

電源系担当：宮澤 優（みやざわ ゆう）

連載

第5回

SLIM the Moon Sniper

降りられるところから、降りたいところへ

世界初、近未来のソフトウェア通信系！

バス機器として世界初のダイレクトインプット・アウトプット型のSバンドトランスポンダ (STRX) を搭載したSLIMが2023年9月7日に打ち上げられ、月着陸に向けた運用を開始しました。この搭載通信機はSLIMが国内外の地上局と交信し、月着陸までのコマンドやテレメトリの送受信、測距といった運用に不可欠な機能を提供するものです。タダの黒い箱にしか見えない通信機のドコが凄いのかというと、コンポーネント開発にあたった三菱電機株式会社の最先端のソフトウェア無線技術を導入し、無線通信に使用する高周波信号を直接、アナログ・デジタル変換器で入出力することができるのです。この方式を採用することで、無線に使用する高周波信号から周波数を変換して変調されたコマンドデータを復調したり、またテレメトリデータを変調して高周波信号に周波数変換したりする信号処理の全てを超高速デジタル数値演算処理で行っています。主要なアナログ高周波回路はコマンド受信のための低雑音増幅器やテレメトリ送信のための電力増幅器だけになり、専有面積が広く複雑なアナログ回路構成になっていた周波数変換系回路を削減できたので、大幅な小型軽量化が実現できました。通信機の核となる数値演算によるデジタル信号処理を担っているのがFPGA (書き換え可能集積回路) という部品です。書き換えによるファームウェアの再構成によって、細かな機能の追加修正だけでなく、将来のミッションに柔軟に対応できます。

ソフトウェア無線技術は、近年、携帯電話基地局や放送機器、アマチュア無線機、軍用通信システム等に採用され、地上でも多く利用される最先端の無線通信技術です。一般的に20年以上前の家庭用電子機器はビンテージの扱いになりますが、宇宙探査においては、技術の新しさよりも実績が極めて重視され、一度開発したコンポーネントは20年以上にわたって使用されます。近年では半導体の微細化技術の進展により宇宙用に認定を受けた古いプロセスの製造ラインが維持出来ない状況が発生しており、部品の開発サイクルも早まっています。JAXAのミッションは開発サイクルも長くミッション数も諸外国と比較しても少ないため、将来にわたって利用される部品をあらかじめ用意しておくことができません。このような少量生産の状況下では部品の枯渇とともに、新規のミッションにおいて、新しい通信機を開発しなければならない事態となってしまいます。ところがソフトウェア無線技術を導入することで、開発した設計資産の多くを次のミッシ



世界初のダイレクトインプット・アウトプット型のSバンドトランスポンダ (STRX)



宇宙研でのSTRXの試験風景

ョンで流用することができるようになり、サステナブルでスマートな技術開発が可能となりました。

ところでSLIMミッションにおいて新規開発の通信機を、日本初の月着陸に使用することに不安は無いのかとご心配されるかもしれませんが、宇宙研では、これまでの超小型探査機の通信系開発を通じて、宇宙探査の搭載通信機に不可欠な性能評価方法を軌道決定系と密接に連携をとりながら確立し、宇宙実証してきた実績があります。ミッション期間中に宇宙空間において想定される通信環境を模擬し、通信機に経験させることができます。一連の適合性試験と地上試験において、この模擬試験を実施し、通信に起因する不具合を見つけ出し、地上にある間に修正することができるので、新規開発の通信機でも極めて完成度の高いロバストな通信系をミッションに提供できるのです。この不具合の改善サイクルを、短期間かつ効率的にできるのが、国産コンポーネント開発の強みになっています。世界初の宇宙実証と、同時に技術課題に一石を投じたSLIMの搭載通信機の活躍に乞うご期待下さい。

SLIM通信系担当：富木 淳史 (とみき あつし)

連載 第6回 SLIM the Moon Sniper

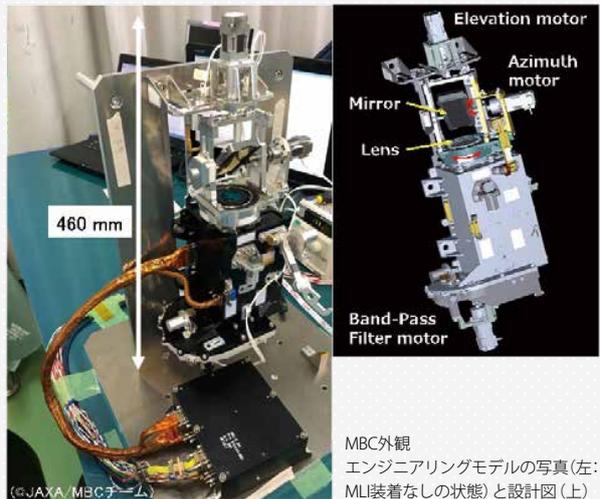
降りられるところから、降りたいところへ

マルチバンド分光カメラとその科学観測

SLIMに搭載されるマルチバンド分光カメラ(MBC)は、750nmから1,650nmまでの波長帯を10バンド、10mの距離で0.13cm/pixelの高解像度で観測するカメラです。打上げ後のチェックアウト観測により地球画像を取得し、機器の健全性を確認しました。MBCはSLIMの月面着陸後に本観測を開始し、着陸点周辺の岩石とレゴリス(月表面の土壌)を観測します。観測波長は月の主要鉱物である輝石、カンラン石、斜長石などを識別するために選定しています。

小型・軽量が特徴のSLIMに搭載するために、MBCにもサイズや質量などの厳しい制約があります(外観図)。それらを守りつつ科学目標を達成するために、MBCはレンズなど光学系に加えて4つのモータによる稼働部(カメラの視野よりも広い月面領域を観測するためのミラーを2軸で回転するための機構、高い空間分解能を確保するためのフォーカス機構、多バンド観測を行うためのバンドパスフィルタの切り替え機構)と、それを支えるロンチロックを持っており、それら技術がぎゅっと詰め込まれた観測機器なのです。ミラーの回転機構やフォーカス機構は、国内の月惑星探査用カメラとして初めて搭載しています。そんなわけで、SLIM探査機本体がとても挑戦的な新しい技術の塊であることは、皆さんご存知だと思いますが、搭載されるMBCも劣らず挑戦的な観測機器だと思います。開発に困難を伴ったことは想像いただけと思いますが、それをここで書き切ることとはとてもできません。この辺りのお話に興味のある方は、機器開発チームのリーダーである佐伯 和人先生(立命館大学)を見つけて質問してみてください。

さて、そんなMBCを使って我々が観測するのは、月深部にあるマントル物質が大型の天体衝突により掘削・放出され、月表面に露出したと考えられるカンラン石に富む岩石です。カンラン石に富む岩石の全球的な分布は、月周回衛星SELENE(「かぐや」)に搭載したスペクトルプロファイラの観測結果から初めて報告されており、分布地点の中から理学的な目的と着陸技術の観点での制約の両方を満たす場所として、SHIOLクレータの近くをSLIMの着陸点として選定しています。ここでMBC観測によって得られる情報がどう重要なのかを説明しましょう。現在、月の起源は巨大衝突説(成長途中の地球に別の天体が衝突し、形成された破片やダスト、ガスなどが集積して月ができる説)が有力です。ただし、巨大衝突がどのような条件で起こったのか、例えば衝突天体のサイズや化学組成、またそもそも月の原材料が主に地球由来なのか、衝突天体由来なのかはわかっていません。地球と月を形成した巨大衝突がどのようにし



MBC外観
エンジニアリングモデルの写真(左: MLI装着なしの状態)と設計図(上)



SLIM着陸後のMBC観測イメージ
赤いハッチの領域を観測しています。MBCはSLIM側面の向こう側に取り付けられているので、このイラストでは見えていません。

て起こり、衝突で生じた破片やガスがどう惑星と衛星に再分配されるのかを知ることは、巨大衝突が惑星の内部構造や化学組成に与える影響、さらには現在の地球環境の成り立ちを理解する上でも重要です。また衝突天体のサイズや衝突の頻度を推定することにも繋がります。これを知る上での重要な情報が、月のマントルの組成(鉱物量比や鉄とマグネシウムの比など)です。月の体積の9割以上を占めるマントルの組成が分かれば、それと地球マントルの比較、巨大衝突の計算シミュレーションとの比較などにより、巨大衝突によって起こる惑星と衛星の再分配や衝突条件に制約を与えることができます。MBCは着陸点周辺の岩石やレゴリスを観測し、岩石に含まれる鉱物の種類や量比、鉱物の鉄とマグネシウム量比を推定することで、月のマントルの組成推定を目指します(観測イメージ図)。

ここまでMBC観測機器の特徴と科学目標を紹介しましたが、この後、SLIMが着陸した後、MBCがどんな月面を我々に見せてくれるのか、観測機器チーム皆はワクワクが止まりません。皆さんにも大いに期待して待っていて欲しいと思いますし、時には、今頃SLIMとMBCはどこを飛んでいるのかなあ、と考えながら月を見上げてみてはいかがでしょうか。

SLIMパイロードマネージャ:大竹 真紀子(おおたけ まきこ)

連載 第7回 SLIM the Moon Sniper

降りられるところから、降りたいところへ

自動操縦で着陸！ 誘導航法制御系

日本時間2024年1月20日午前0時20分頃、SLIMは日本初の月面軟着陸を達成しました。高度50m付近以下で推進系にトラブルが生じたものの、世界初となる月面ピンポイント着陸を実現しました。第7回では、誘導航法制御系の簡単な紹介と共に、担当者の視点で運用現場の様子を振り返りたいと思います。

SLIMのピンポイント着陸実現には、探査機のみである「画像照合航法」と、探査機の頭脳である「誘導航法制御」がキー技術でした。特に誘導航法制御系（英語ではGuidance, Navigation, and Control; GNC（ジー・エヌ・シー））は、探査機のスマートな目「画像照合」などの情報から、現在の位置や速度などを素早く推定し（航法）、その場で飛行予定経路を作り出し、目的地へと導く能力（誘導制御）が求められます（解説記事：ISASニュース2022年9月号）。SLIMの着陸降下シーケンスは日本上空で例えると、北海道の新千歳空港を秒速1.7 kmの速度（旅客機の数倍！）で出発し、20分後に兵庫県の阪神甲子園球場内（100m以内）に着陸するイメージです。このダイナミックかつ正確な着陸を、自動操縦で実現することが、GNC系の使命でした。

管制室では着陸降下開始の約30分前から数分前にかけて、各サブシステム担当者が探査機状態を最終確認し、最終Go/NoGo判断結果をコールしていきます。ここで万が一問題が見つかれば、シーケンス中断の提言もあり得る、緊張感のある判断ポイントです。熱系OK、電源系OK、画像系OKといった形でコールが進む中、GNC系は各系の中で最後に判断を行うため、気が抜けません。降下開始の数分前に誘導計算が自動実行され、目標地点までのルート（軌道）が正しく計算されたことを確認し、「よし、いくぞ！」という気持ちを込めて「誘導OK！」とコールしました。

着陸降下が始まってからの20分間はあっという間でした。各系が定期的に状態を報告し、「次シーケンスまであと●分」と周知がある中、GNC系からも「軌道・姿勢OK」と報告を挟んでいきます。「(このまま上手く降りてくれよ...)」と祈るような心境でテレメトリ画面(図1)を見守ります。前半の動力降下フェーズが順調に進み、後半の垂直降下フェーズに移行してからは、さらにあっという間でした。垂直降下フェーズに入ってから間もなく、着陸レーダ(月面からの距離や速度を測るセンサ)の担当から「レーダ、ロックオン！」のコールがあり、月面はすぐそこだと感じると共に、ここまで上手く



図1：動力降下フェーズ中のテレメトリ画面(例)。画面作成はJAXA職員の横田健太郎氏(研究開発部門、第一研究ユニット)、後藤健太氏(研究開発部門、第二研究ユニット)、中平聡志氏(宇宙科学研究所、科学衛星運用・データ利用ユニット)らの貢献が大きい。

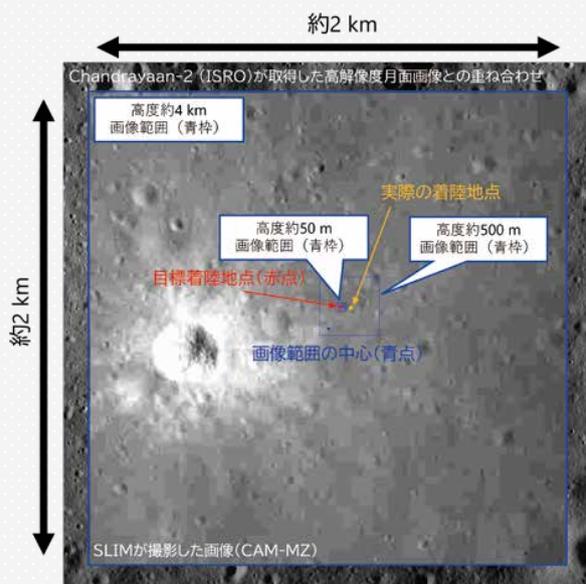


図2：垂直降下フェーズ中の月面画像。着陸後にデータ評価したもの。

飛んで来られたのだと期待が高まります。垂直降下中に何回か行う水平位置の修正も順調に進んでいきます。タッチダウン時は想定と異なる着陸姿勢で静定しており、しばらく緊張と動揺で溢れましたが、探査機の生存を確認できた時には心底、安堵しました。垂直降下フェーズ中に撮影した画像(図2)からは、まるで目標地点に吸い寄せられるかのように降りていく様子が分かります。

GNC系は世界初となるピンポイント月面軟着陸の自律飛行を司るがゆえ、開発フェーズでは多くの困難に直面しました。その際、SLIMチーム内外の方々にご支援を頂いたお蔭で、開発を完遂することができました。また、世間の皆様から頂いた暖かい声援には、大変励まされました。心よりお礼申し上げます。

伊藤 琢博(いとう たかひろ)

連載 第10回 SLIM the MOON SNIPER

降りられるところから、降りたいところへ

—SLIMは1日にして成らず！ 軌道計画系—

2024年1月19日23時35分、着陸開始の25分前、SLIMピンポイント着陸に向けた最後の運用が始まりました。管制室では各担当がSLIMの状態を確認し、報告していきます。軌道決定担当から「簡易軌道決定結果 +0.4秒」という報告が淡々と、しかし自信に満ちた声でありました。これは着陸に向けて計画した軌道からのずれを示す数値で、0秒に近いということはほぼ計画通りの軌道でSLIMはやってきた、ということを示します。打上げから約4か月半の期間を経て、SLIMはついに着陸のためのスタート地点にやってきたのです。その後は大変な緊張感の中、誘導航法制御系担当として着陸運用を進めたことを覚えています。そして、SLIMはピンポイント月面着陸を達成しました。詳細はISASニュース2024年3月号をご覧ください。

今回は、打上げから着陸までの壮大な一筆書きとも言える「軌道計画」についてご紹介します。SLIMはH-IIAロケット47号機により、種子島宇宙センターから2023年9月7日に打ち上げられました。旅の始まりとなるこの時点ではSLIMは地球を周回する軌道にあり、このままでは月に到達しません。この後、SLIM自身の持つエンジンを使って月に向かう軌道に乗せます。月に向かう軌道にうまく乗せられる良いタイミングがあり、その瞬間に全力で軌道を変更するためのエンジン噴射（「軌道制御」と言います）を行います。この方式を使って、SLIMは地球周回軌道から月遷移軌道への軌道制御を2023年10月1日に実施し、続いて、10月4日に月の重力を活用してスイングバイを行いました。この月スイングバイにより月軌道の外側、最も地球から遠いところで約130万kmとなる軌道に沿ってSLIMを飛ばします。月軌道の外側では太陽の重力の影響を大きく受けるのでその力に引っ張ってもらうことで、

月軌道への投入時の消費燃料を節約することができます（図1）。2023年12月25日に月回軌道投入のための軌道制御を実施し、その後は着陸に向けて軌道高度を下げる軌道制御を行っていき、着陸開始直前となる2024年1月19日22時40分ごろ、最後の軌道制御を完了しました（図2）。

ここで、「軌道制御」の方法についてご紹介しましょう。軌道制御の目的は、現在飛行している軌道から、目標とする別の軌道に移ることです。まずは、現在飛行している軌道を精密に割り出す「軌道決定」を行います。地上からアンテナを使ってSLIMを追跡し、地上局とSLIMとの電波の往復時間と電波のドップラーシフト量を使って軌道を把握します。軌道決定の次は、エンジン噴射量と向きを決める計算を行います。目標地点までの一筆書きの計算を繰り返し行い、うまくいく計画を採用します。計画を終えたら、必要となる情報をコマンド計画としてまとめ、地上局から送信していきます。そして、いよいよ軌道制御を実施するタイミングでは、SLIMのデータを見守り、何かあった場合にすぐ対応することができるよう万全を期します。軌道制御が終わると、軌道制御が想定通り実行できたことを確認し、一連の流れが完了、となります。

SLIMの打上げから着陸開始まで、この軌道制御を合計で16回行い、エンジン噴射の際の機体の応答がどうなるか、軌道はどうなるかなどを見極めながら、運用を着実に進めてきました。エンジンを噴射して軌道を変更するという一連の操作は着陸時の操作と本質的には同じです。軌道制御の運用を通して機体の特性を把握し、運用方法を磨き上げ、着陸を迎えるころにはSLIMを自在に操ることのできる百戦錬磨の運用チームとなっていたのでした。

SLIMでは最新の研究成果と日本の宇宙開発で積み重ねてきた軌道制御のような手堅い技術が相乗効果を発揮しています。4か月半のミッションの前にはさらに長い歴史がある。SLIMは一日にして成らず。ここに、先人の努力やミッションを支えて奮闘したメンバーに敬意を表します。

軌道計画担当：植田 聡史（うへだ さとし）

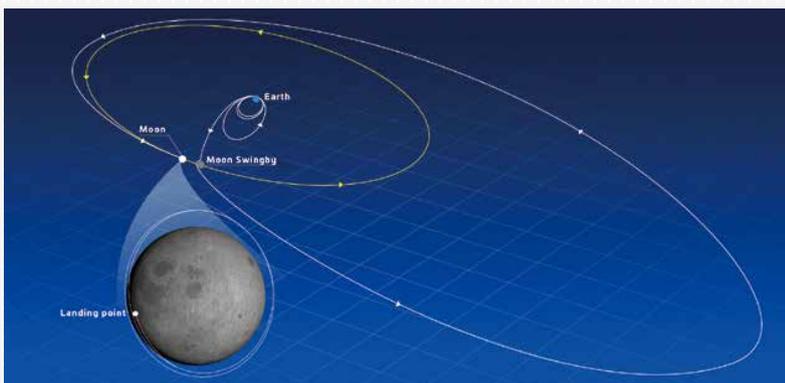


図1：SLIMの軌道計画（打上げ～月周回軌道投入）

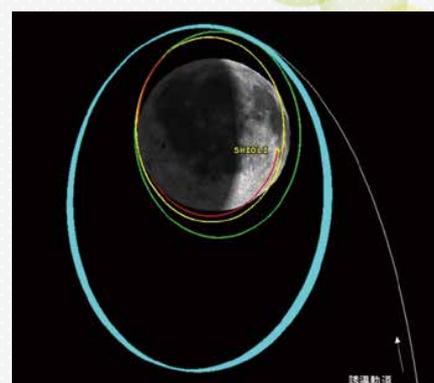


図2：SLIMの軌道計画（月周回軌道投入～着陸）

連載 第9回 SLIM the Moon Sniper

降りられるところから、降りたいところへ

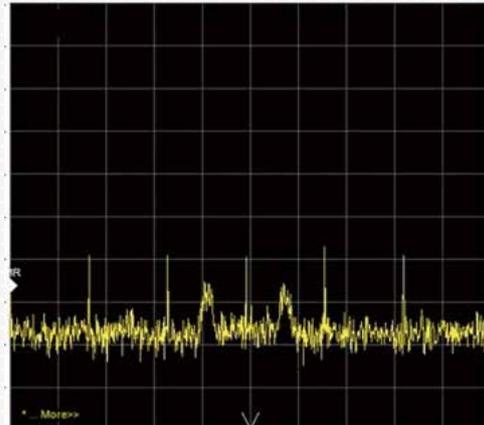
仲良し！ 超小型月面探査ローバLEV-1&2

日本時間2024年1月20日0時20分20.20秒、内之浦局と臼田局にてLEV-1からの電波を受信しました(図1)。その約1.3秒前に、月面でLEV-1の背中に付いたパッチアンテナから発信された電波が地上に届いたのです。第9回では、SLIMから分離され月面で勝手に動いてSLIMをパシャパシャ、その活動結果と共にLEV-1とLEV-2を紹介します。

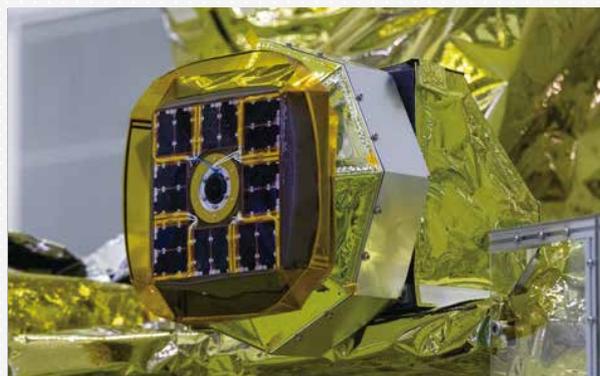
LEVシステムは、日本初の月着陸機SLIMに搭載され、月の表層へ運ばれました。2023年9月の打上げから4か月の間、SLIM探査機本体がマルチバンド分光カメラエレキを通じて、電圧が低下したLEV-1の電池を30回にわたって充電してくれました。LEVシステムはLEV-M、LEV-1(図2)、LEV-2(図3)で構成されます。LEV-Mは2つのローバを月面へ展開する装置で、SLIM探査機本体の着陸直前自由落下開始時(同日0時19分50秒頃)にLEV-1とLEV-2をそれぞれを独立した状態で月面へ展開しました。

LEV-1&2は、低重力下での新しい移動方法や自律機能の工学実証を主ミッションとして、SLIM探査機本体の状況記録や着陸地点付近の岩石や地盤の産状記録(ISASニュース2024年2月号表紙画像参照)を行いました。LEV-1はSLIM探査機本体からの分離展開成功の後、単一の車輪による姿勢制御から方位指向そして跳躍移動を連続して行い、その一連の動きを繰り返しました。その間、太陽電池で発電しながら画像記録や温度計測等環境状態の観測を試みています。LEV-2は展開後、SLIM探査機本体を探し出し、その姿を撮影、LEV-1へ2回分の画像データを送りつつSLIM探査機本体周りを走査し続けたと推測されます。LEV-1は、LEV-2の状態や撮像画像含めた記録データをSLIM探査機本体を経由せずに直接地球へ送信し、臼田と内之浦の地上局でその電波を受信することができました。

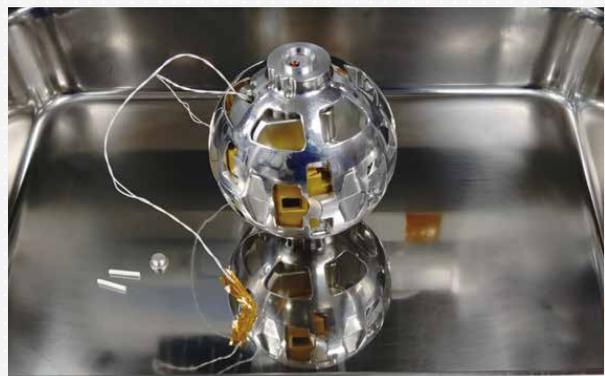
これらの活動により、LEV-1&2は同時に日本初の月面探査ローバとなり、LEV-1は世界初の跳躍移動型探査ローバ、LEV-2は世界最小・最軽量の月惑星探査ローバになりました。また、LEV-1&2の一連の行動が地球から人間が介在することなく自律で行われたこと、月面におけるLEV-1&2のローバ間通信を成功したことも世界で初めて実証されました。さらに、アウトリーチ活動としてLEV-1が発信したUHF帯の電波が地上に届き、世界初の月面アマチュア無線局となりました。跳躍移動を7回繰り返した後、同日2時10分に海外のアマチュア無線家がLEV-1からの電波を受信して以降、理解できるデータが地上に届くことはありませんでした。



(図1) LEV-1からのS帯受信電波の振幅スペクトル



(図2) SLIM打上げ前、SLIM探査機本体搭載状態にあるLEV-1



(図3) フライトモデル引渡し前、最終組立の計量時に収納状態にあるLEV-2

今回LEV-1&2が行った月面での活動により、小さなロボットでも「自立した月探査ができる」ということが証明され、将来の月惑星表面でのロボット活動の高頻度化につながる貢献ができました。最後に、世界の皆様からの熱いご声援、世界から届いた電波受信の報告は、次の探査ローバ開発への励みとなりました。心よりお礼申し上げます。

大槻 真嗣(おおつき まさつぐ)

連載 第10回 SLIM the Moon Sniper

降りられるところから、降りたいところへ

与えられた時間は5秒。 画像航法支援系

月面動力降下開始7分前、SLIMが最初の画像照合航法を実施。数秒後、航法カメラの撮像画像と画像照合航法結果が管制室画面に表示されました。訓練通り確認。オペレータからは“OK”のサイン。大丈夫、SLIMは完璧に自身の位置を把握している。私はそれらを確認し「よし」と強くコールしました。SLIMは動力降下開始直前3つの領域で画像照合航法を実施し、その成否が最終GO判断の大きなポイントとなりました。今回は地上側で画像照合航法の成否判断に重要な役割を果たした「画像航法支援系」に焦点を当てます。

SLIMのピンポイント着陸のキー技術のひとつが「画像照合航法」です。これによりSLIMは月軌道上での自身の位置を精密に把握し、自律的に軌道修正して降下していきます(詳細はISASニュース2022年9月号をご覧ください)。では、なぜ「画像航法支援系」という地上システムが開発されたの

でしょうか?十分な検証・試験を通じて、当然我々は自信を持って画像照合航法をSLIMに搭載しています。しかしながら一発勝負の新規技術、万が一、位置を誤認識したらSLIMは明後日の方向に飛んでいってしまいます。事前検討では、地上の計算機能力をフル活用すれば地上からコマンドを送ることで救えるケースがあることもわかりました。こうした背景からもしものときは可能な限り地上から救う、という思想で画像航法支援系の開発が始まりました。

画像航法支援系の大きな役割は「搭載系の画像照合航法のモニタ」と「画像照合航法が万が一失敗した場合のコマンド送信」です。画像照合航法実施直後、ダウンリンクされた画像(図1左)と照合結果から地上で生成した模擬画像(図1左から2番目)の一致を見てその成否をオペレータ1が判断します。また、ダウンリンク画像を使って2つの独立した画像処理を地上の計算機で行い位置を推定した結果(図1左から3,4番目)の成否判断をオペレータ2,3が行います。そのオペレータ達の判断結果をもとにスーパーバイザがコマンド送信要否を判断、承認者が即座にダブルチェックし必要なら画像照合航法の結果を地上計算機の計算結果で上書きするようなコマンドを送ります。これらの一連の判断・動作を「5秒以内」に行います。半ば無茶に聞こえますが着陸シーケンスを成立させるにはこれ以上の時間はかけられません。そのため画像航法支援系には様々な工夫が込められています。例えば新規開発した運用画面には短時間で判断に必要なかつ最低限の情報を詰め込んでいます。また、成否の判断が最小動作でできるよう専用のキーボードも導入しました。あとはひたすら模擬データを使った訓練を重ねて習熟を図りました。

運用本番では終始緊張を強いられたもののオペレータは訓練通り冷静かつ確かな判断を短時間で行うことができました。画像照合航法は7領域でそれぞれ2回ずつ、計14回実施しましたが、その全てが正しく動作していることを画像航法支援系の画面上で確認することができ、結果的に地上からコマンドで介入することはありませんでした。着陸目標点周辺には目立つクレータがいくつかあるのですが、上空500mで実施した最後の画像照合航法の際にそれらのクレータが訓練通り見えたときは本当にピンポイントで降りていることを確信しました。

他に類を見ない特殊なシステムとなった画像航法支援系。淡々と進んでいるように見えたSLIMの着陸シーケンスの裏側ではこうしたハラハラドキドキの運用があったのでした。

地上画像航法担当:石田 貴行(いしだ たかゆき)

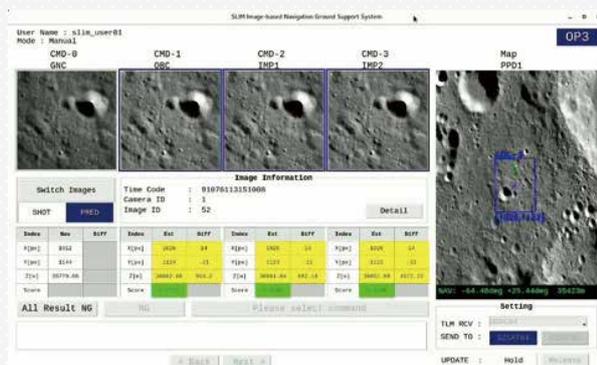


図1: 動力降下開始直前、SLIMが月軌道上で画像照合航法を初めて成功させた瞬間の画像航法支援系画面。最も左が航法カメラ画像、その右が画像照合航法結果をもとに地上で自動生成した模擬画像。2つの中心が一致していることから、画像照合航法が成功していると判断できる。



図2: (左) 画面手前左からオペレータ3人、スーパーバイザ(筆者)と承認者。(右) 画像航法支援系で使用していた専用キーボード。

連載 第11回 SLIM the Moon Sniper

降りられるところから、降りたいところへ

SLIM画像航法の研究開発を振り返って

画像航法の話の続けます。前号では石田さんが息を飲むような着陸運用の緊張感を伝えてくれましたが、今回は書き手を年配担当者にスイッチし、15年ほど昔にタイムスリップしながら、SLIM検討初期の雰囲気を取り返してみます。この当時、画像航法については以下が課題でした。

- 情報量が非常に多い光学カメラ画像の多様な処理手法が研究され得る中で、搭載性やロバスト性も含めたアルゴリズムの見極め
- SLIMの目的である小型軽量化に適したハードウェアの具体的な開発計画の策定
- 一発勝負となる着陸運用を見据えた事前の万全な検証スキームの確立

これらを解決するため、2009年頃から各方面の有識者や企業にアクセスし、SLIMが拓く「降りたいところに降りる」世界の意義を共有して、研究開発体制を整えていきました。

画像処理アルゴリズムの検討には、宇宙工学研究以外の分野の専門家も含め、複数の大学の先生方に参加をお願いしました。SLIMの画像照合航法にはクレータ抽出とクレータマッチングの各処理が必要ですが、明治大の鎌田研究室では前者を、電気通信大の高玉研究室では後者の研究を実施されました。また、着陸直前の最終段階に実施する障害物検知処理は、東京都立大の小島研究室に担当頂きました。ただし、SLIMの搭載計算機の演算能力は地上の汎用PCなどと比較すると非常に貧弱ですので、常に性能と搭載性をセットで検討する必要がありました。SLIMでは画像処理をMPUではなくFPGA上で動作させて演算能力を確保する方針としましたが、JAXAや大学のアイデアをハードウェア言語で都度記述・検証していくのは開発の見通しが悪いため、国産の高位合成ツールベンダ((株)ソリトンシステムズ)と協働し、FPGA実装性を含めた評価を円滑に進めました。JAXA・大学・ベンダの枠組みでの「SLIM画像分科会」の開催回数は、合計60回にも及びました。

航法カメラ開発の初期検討を始めたのも2010年度あたりです。撮像画像を地球に伝送するための効率の良い圧縮回路((株)シキノハイテック)や、民生用のカメラで培った光学レンズ((株)nittoh)など、特色ある技術を有する企業の協力を得つつ、最終的には経験豊富な搭載機器ベンダ(明星電気(株))の取りまとめで盤石な開発のスクラムが組まれました。軌道速度が速い時に撮像画像が平行四辺形などに歪むのを避けるため、搭載品としては先進的なグローバルシャッタータイプのCMOS



図1: SLIM航法カメラが撮像した着陸地点周辺の風景(3回の越夜後の2024年4月26日撮像)。



図2: FMシステム試験での画像航法系の総合確認の様子。

センサを採用したこともあり、部品実装の信頼性には大変気を揉みましたが、複数回の月の夜を越えて着陸地点周辺の撮像に成功したことは、関係者の努力の賜物と思います(図1)。

画像航法の検証にあたっては、太陽条件等を考慮しつつ、さもSLIMの航法カメラで月面を撮ったかのような模擬画像を生成することが大きなテーマでしたが、「かぐや」で経験を積んだ解析ベンダ((株)NTTデータCCS)に協力を依頼したのも15年ほど前でした。以来、地形データへの小さいクレータ(ある部分は手動での!)掘り込みや、画像の色味(反射率マップ)の忠実な再現など、無理難題に完璧に対応頂きました。実際の着陸運用で得られた月面画像と模擬画像が極めて酷似していたのは、この活動の誇らしい成果です(前号参照*)。打上げ前にこのような模擬画像を何万枚も生成して検証を重ね、さらにはシステム試験でSLIM実機に月面タペストリを見せた総合確認までに行い(図2)、SLIMを軌道の上に送り出しました。

画像航法という新しい技術を実証し、世界初の月面ピンポイント着陸を実現したことはもとより、それを継承・発展させる技術コミュニティを構築できたことが、SLIMが工学実験ミッションとして達成した大きな意義と自負するところです。関係者の協力と努力に心よりの敬意と感謝を表して、今回の昔話を終わりにします。

SLIMシステムマネージャ: 福田盛介(ふくだ せいすけ)

* https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISA5news519.pdf

連載 第12回 SLIM the Moon Sniper

降りられるところから、降りたいところへ

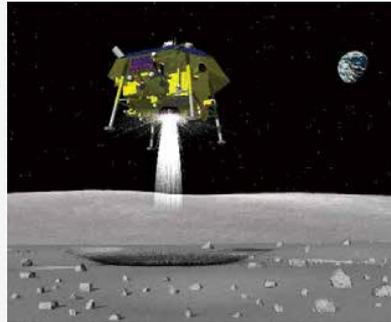
SLIM立ち上げの歴史

小型月着陸技術実証機SLIMIは2023年9月7日に打ち上げられ、翌年1月19日 15:00 UTCに月面への着陸降下シーケンスを開始、最終段階で思わぬことが起きつつも月面に降り立つことができました。着陸シーケンス開始から着陸までは長く感じた20分でしたが、SLIMミッションの検討開始から着陸までは紆余曲折の20年でした。

SLIM検討の源流は2002年11月提出のSELENE-B提案にまで遡ります。SELENE(かぐや)に続く月探査ミッションとして月面着陸を目指す構想で、JAXA発足前のISAS/NAL/NASDAの旧3機関関係者が集まって議論を重ねていました。オンライン会議が珍しかった当時、毎月のように会議室に集まっては話し合いが続けられていたことを思い出します。どのような探査機にすべきか。最初のうちは組織対組織で議論を闘わせていましたが、回数を重ねるにつれて所属組織を越えて考えが近い者同士が意気投合して自らが信じることを主張するようになっていきました。ある意味、JAXA統合前に現在の状況を先取りしたような雰囲気。参加者一人一人が真摯にSELENE-B実現に全力を傾けていたとともに、当時のSELENE-Bチームを率いておられた旧3機関の先輩方の度量の大きさもあったのだろうと推察します。このSELENE-B計画、SLIMが実証したピンポイント着陸技術の実現を1つの目玉とした宇宙科学ミッションとして、2002年、当時のISASに提案しました。探査機のドライ質量は500kg強でSLIMの2.5倍くらい。個人的にはよい提案だと思っていましたが、残念。結果は落選。

落選という現実を前に、提案チームでは「何がいけなかったのか」の分析が行われました。本当の原因はわからないものの、「提案した探査機のサイズが中途半端だった」という見立てが大半。そこまでは一致しても、それでは、大きくすべきか、小さくすべきか。意見は分かれまじりました。「より大きな探査機にして多くの観測機器を搭載、本格的な探査を行うべき」と主張する人も多い中、私を含めた数名は、「極限まで小型化してみよう。小型化が実現すれば、将来、サンプルリターン探査をするときの帰還機にその技術を利用することで、手軽にサンプルリターンができるようになるかも」として、SELENE-Bをどこまで小さくできるか検討を始めました。

しかし、いざ検討に着手してみると、想像以上に技術的なハードルは高いものでした。SELENE-B提案でさえ月着陸機としては小型の部類で、そこに当時、誰も実現していないピンポイント着陸技術を詰め込んだ計画でした。それを更に数分の1までサイズダウンしようというのだから、今までの常識は通用しません。多くの衛星・探査機技術者から、「成立していない」、「できるわけない」と窘められていました。



SELENE-B構想：普通の4本脚での着陸を目指していました。

成功祈願：運も実力のうち。運を引き寄せるのに、神様にも助けて頂きました。



きっとそうなのでしょう。少なくとも当時、私たちが考えていたものは成立していなかったのかもしれない。ただ、そう言われると益々挑戦してみたくなる。我ながら天邪鬼。とは言っても、その挑戦にはより多くの専門家・研究者の知恵が必要。そこで当時、いくつかの学会・シンポジウムに出没し、発表会場にはあまり顔を出さず廊下や展示会場をうろつき、顔見知りや声を掛けたりしていました。これぞ正に「ロビー」活動。研究者の中には、難しそうで成立しているかどうか怪しげな新しい技術が好きでいる人もいて、時を経るにつれて、検討する仲間が徐々に増えていきました。

こういった経緯を経てSLIMIは提案に漕ぎ着け、その後プロジェクト化。曲がりなりにも月面に到達することができました。お陰様で当初の着陸目標点から50mくらいの場所に降り立つことができ、ピンポイント着陸技術の実証として一定の評価も頂けたと自負していますが、個人的には小型化を実現した技術にも思い入れがあります。キーワードとしては、デジタル化、統合化などですが、詳細についてご興味があれば、この連載の過去の記事などをご参照下さい。私からひとつ言うとしたら、私たちが取り組んだのは技術であって芸術ではありません。優れた芸術とは違い、全ての先端技術は未来において陳腐化する運命にあります。関係者の一人としてSLIMIに対する強い思いがあると同時に、SLIMをひとつの契機として月惑星探査分野で技術が長足の進歩を遂げ、技術実証機としてのSLIMが早期に忘れ去られることが最大の願いでもあります。

SLIMプロジェクトサイエンティスト：
澤井 秀次郎(さわい しゅうじろう)

連載 第13回 SLIM the MOON SNIPER

降りられるところから、降りたいところへ

旅の終わり。

「ありがとう、おやすみなさい」

— 2024年6月某日午後

運用時の正装である赤ジャケットを着用したSLIMプロジェクトメンバーは、宇宙研に程近い「新田稲荷神社しんでん」に集まっていた。境内の小さな丘は「呼ばわり山」と言われ、迷い子や行方不明の者が出たとき、鐘や太鼓をたたいて呼ばわると、必ず現れるという民間信仰で有名な場所で、「はやぶさ」が宇宙で消息を絶った際に川口 淳一郎プロマネ（当時）が毎晩この地を訪れ「発見祈願」をされた場所。

ほとんど奇跡と思われる月着陸後3度の越夜を成功させたSLIMも、5月の呼びかけには応えることがなかった。行方不明ではない。38万キロ離れた月面、SHIOLIKレータの脇に居ることは判っている。ただちょっと声掛けのタイミングが合わなかっただけだ。通信再確立のために出来ることは全てやる。「お願いします。復活しますように。そしてまた月面の写真を撮ろう。」神様に対してなのかSLIMへのメッセージなのかよく判らないが、一途に手を合わせ心の中で唱えた。

— 2024年6月27日午前2時

月面上のSLIMに“復活の呪文”を懸命に送り続けた。過酷な月の温度環境。日に日に探査機の状況は悪くなると皆、頭では判っている。並外れた強運を持ち、数々の奇跡を起こしてきた。今回もきっと。沈黙の時間が流れる。。。

「本日の運用は以上で終了です。」

今月も応答はなかった。運用リーダーの発声に、管制室のメンバーから自然と拍手が起こった。期待が大きかった反動の落胆で気持ちが沈む。「本当にお疲れさま」、「ここまでよく頑張ったよ」、「これで永遠にお別れなのか」、「いや、まだ判らない。来月もトライしてみよう」。宇宙研宿泊施設ロジの自室に戻っても、いろんな思いが去来し、その日はなかなか寝付けなかった。

— 2024年7月16日夕方

SLIMのミッション実現は、多くの方々の献身的な尽力によって為しえたものである。プロジェクト終結作業の一環として、SLIMの研究、開発、運用などに大きな貢献を頂いた関連大学、企業、海外機関など、約100件にも及ぶ方々に感謝状を作成し、発送作業を先ほど終えた。直接出向いて対面での手渡しも企画しているため、全てに行き渡るのはもう少し時間を要するかもしれない。

SLIMは多くのおみなさまから応援、激励のお言葉を頂いた。あらためてお礼申し上げたい。ソーシャルメディアを活用し、探査機の状況などにかく丁寧にかつ迅速に情報発信するこ



SLIMプロジェクトから、応援頂いた全ての方々に向けての感謝状。

とに努めてきた。どうかこうにか着陸に漕ぎ着けたSLIMに対して、“よく踏ん張った、偉い”と声掛け頂いた。日没とともに運用を終えると、“おやすみなさい”、越夜後再起動すれば、“おはよう”と、まるで探査機が人格を持った存在として親しみを込めて接して頂けていること、倒立姿勢で着陸したことすら、“転けてて可愛い”、“ドジっ娘ですごく愛おしい”と前向きに捉えて頂けている状況は、当初われわれが望んだ危機管理広報の想定を遙かに超えたものであり、感謝しかない。一緒にハラハラドキドキをもってSLIMを見守り、応援頂いた全ての方々に心より感謝し、ここに皆さま宛の感謝状を掲載させていただきます。本当にありがとうございました。

— 2024年8月23日 22時40分 終わりの時

役目を終えた人工衛星、宇宙機の終わり方は様々である。大気や重力の影響を受け徐々に軌道を落とし大気圏に再突入するもの、旅先の惑星を回り続け文字通り衛星となるもの、後続の衛星に軌道を明け渡すために墓場軌道への退避をおこなうもの。

SLIMはどうだろう。

「パトラッシュ… 疲れたろう…。僕も疲れたんだ。なんだかとても眠いんだ。」昭和のおじさん世代には懐かしい「フランダースの犬」の様な悲しい終わり方ではない。地球からは月を見上げるたびにわれわれから思いを馳せられ、月では多くのお犬様達がそばで見守ってくれている。そしてまるで月の静寂を守るかのようにじっとそこに佇んでいるのだ。なんて幸せな探査機なんだろう。

2023年8月から始まった本連載も(着陸運用前後の2回は連載中断させて頂きましたが)全13回、この記事をもって無事に最終回を迎えることができました。長きにわたりご覧頂きありがとうございました。

サブマネージャ：櫛木 賢一(くしき けんいち)