

なぜ、宇宙研は SLIM をやらなければいけないのか？

2022年2月8日

SLIM プロジェクト 澤井秀次郎

昨今、世界的に月探査計画が盛り上がりを見せている。月の科学的な探査はもとより、月面極域の水氷が注目されている資源探査、将来の火星探査に向けたステップングストーンとしてのアルテミス計画、更には民間主導での「月観光」ともいえる計画まで、まさに目白押しである。月探査に関する検討をしてきた関係者の一人としては非常に嬉しいと思う反面、一過性のブームで終わらないよう、この機会を捉えて継続的な月探査を確実なものとするべく努力をする必要があると感じている。

このこともあり、このタイミングで、本稿にて、現在開発が進められている月探査計画のひとつである小型月着陸実証機「SLIM」について、その立ち上げまでの経緯を私個人の視点から振り返ってみたい。多分に主観が入り交じった内容であるが、今後の月探査を考える上でどこか参考になることがあれば幸いである。

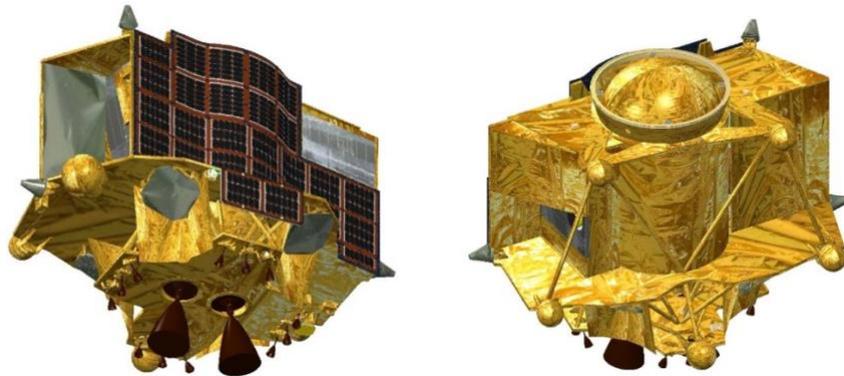


図1：小型月着陸実証機 SLIM のイメージ図。「宇宙村」の住人たる我々の目から見て、慣れるまでずいぶん時間が掛かったユニークな形状である。理学・工学の研究者のディスカッションを経て合理性を有する機体形状と自負しているが、改めて客観的に見ると、まるでセミ。ちなみに、SLIM は、Smart Lander for Investigating Moon の略。メンバーで考えた。電子版の英語辞書が出てきてからラクになった。

思い返してみると、私が月着陸探査を真剣に考え始めたのは20年以上前のこととなる。当時、小惑星探査機「はやぶさ1」の開発に一定の目処がつきつつあり、探査に関わる工学研究者の間では次の「工学実験衛星」として何を打ち立てるか、活発に議論されていた。その中では、小惑星という「微小重力天体」への着陸技術を習得した暁の次のステップとして、

月・火星など表面重力がある「重力天体」への着陸に挑むべきという意見が一定数あった。更に、月は地球から近いにも関わらずその誕生過程にもナゾが多く残されており、また月を探査することで惑星一般に関する科学的知見が得られると期待されることなどから、特に誘導制御系を専門とする工学研究者の多くが、「はやぶさ1の次の技術挑戦として月着陸探査が魅力的である」、と考えるようになっていった。



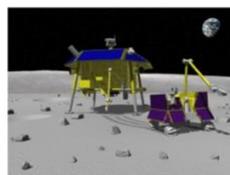
図2：小惑星探査機「はやぶさ」。「はやぶさ2」と区別するために本文中では「はやぶさ1」と表記している。月着陸探査の検討本格化当時、その関係者の多くがはやぶさの開発にも携わっていた。この探査機も理学・工学の研究者の間の議論のキャッチボールの結果、ユニークな形状となっている。たとえば、機体の下に延びている筒はサンプラー・ホーンと呼ばれており、探査機が小惑星表面に接地した際に、この筒の中で、機体の方から弾丸（プロジェクトイル）を表面に向かって打ち込み、破碎した表面の破片がこの筒内を伝って機体内部の捕集箱に収まる設計である。当初の思い込みとして、「小惑星表面が斜めになっていたら破片は表面なりに斜めに出ていく」と予想しており、捕集箱を地表面近く、押しつけるように置く必要があると思っていた。しかし実験してみると、破片は弾丸が当たってきた方向に噴き出してくるようみえた。その頃、(食堂かどこかで) たまたま目があった理学研究者にこのことを話してみたら、そんな結果、そのスジでは常識とのことであった。機体の方向から弾丸を撃てば、多くの破片は機体の方向にまっすぐ上がってくる。捕集箱を機体内部に置いても十分な量の破片が得られるとわかった。

直接関係なきそんな人といろいろな話をしている中に解決の糸口が隠れていることがある。新しいことに挑戦するとき、「雑談」という一見非効率でムダな行為は今後も重要であり続けるように思う。

ただ当時でも、月は米国のアポロ計画に代表されるように既に表面探査が多く為されており、「なぜ今更月面を探査する必要があるのか」、工学研究者の間でも疑問があった。宇宙科学研究所(ISAS)の良いところとして、工学研究者と理学研究者が1箇所に集まっておりいつでも議論できるという特徴がある。その特質がここでも活かされることになる。理学研究者によると、月面探査は今でも十分に魅力的であるとのこと。曰わく、「地質探査をするといっても決して、場所がどこでもよい、というわけではない。このことは地球上での地質調査が特定箇所でされていることから明らか」、「探査をしたい場所は崖地など険しい地形の場所が多く到達しにくい」、「かつては月表面の性状がよくわからず、まずは着陸して様子を見る、というフェーズだった。最近では月面の様子がわかるようになってきているし、日本の月周回探査機 SELENE（かぐや）が成果を出せば、どこに行くとどんなことがわかるか、益々明らかになってくる」。これらから、理学研究者がやってほしいことは、「岩だらけの斜面や崖地の中にあるわずかな隙間に向かってピンポイントで降りること」と整理された。理学研究者たち、実は今までの着陸技術で満足しているわけではなかったのか。こうなってくると、俄然、技術者魂が燃えてくる。斜面・崖地への着陸とピンポイント誘導技術をステップバイステップで獲得することとして、まずはピンポイントで着陸する技術を考えることとした。急峻な地形に着陸すると搭載予定のローバー（月面探査車）が走行できない。このことも、「斜面・崖地への着陸技術も重要だが、まずはなだらかな場所を狙って、ピンポイント着陸技術の実証にフォーカスしよう」という方針案を後押しした。月ピンポイント着陸技術への挑戦は、関係者が関与してきた「はやぶさ1」とも親和性が良い。というのも、「はやぶさ1」は小惑星に対してピンポイントでタッチダウン・着陸するもの。小惑星は重力がほとんどないのでゆっくりと慎重に接近することができる。対して、月や惑星など比較的大きな天体への着陸では、モタモタしていると重力によって墜落してしまう。サッサと降りる必要がある。素早く判断してピタッと狙ったところに着陸する。そのためには、「はやぶさ1」よりも大幅に高度な自律化機能・自動判断が必要になる。そこで、月面に対するの詳細観測結果をもとに目標とする地点を定めて、そこにドンピシャに着陸することを目指した。この構想を「SELENE-B」と命名し検討を本格化した。結果からいうと、SELENE-B のミッション提案は採択されなかった。2002年11月にISAS/NAL/NASDA という当時の宇宙3機関の関係者共同で提案書を書き上げ、その翌年、宇宙科学研究所(ISAS)の宇宙工学委員会での提案プレゼンに臨んだが、我々提案サイドの力不足であった。この事実を受け、「不合格通知」を前にして、我々の提案のどこがダメだったのか、内輪で激論が交わされることになった。あるメンバーは、「SELENE-B は中途半端である。もっと大型で、より本格的な探査計画を目指すべきである」と考え、新たな大型構想の検討へと邁進していくことになる。それに対して、私を含む数人は、「月着陸探査は世の中の理解を得られていない。そうなのであれば、社会が許容してくれるような、より小型の計画から始めるべき。どこまでストイックに小さくできるか検討してみよう」、と考え

るに至った。両極端への分離であるが、何が正解かわからない以上、いろいろな方向性を模索して光明が見えてきたら再度大同団結しよう、ということだったと記憶している。

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：SELENE-B 提案書の表紙。ISAS/NAL/NASDA の3機関が統合してJAXAになる直前、3機関合同の検討チームで執筆した。岩（＝工学的には邪魔な回避対象物だけど理学的には貴重な観測対象物）がゴロゴロしているけど、あまり斜度がないところを目指した。本論と関係ないが、3機関の専門家が集まって本格的な検討を開始してみると、仕事のスタイルに各々個性があり、一緒に議論をしていて興味深かった。そのとき、よもや、近い将来この会議室に集まっている全員が同じ組織の人間になるとは予想していなかった。

後者の「小さな着陸機を目指す」という検討は、度重なる提案・不採択を経て、SLIM ミッションとして日の目を見ることになる。この間、SELENE-B 提案からの約15年間の「浪人生活」の中で、SLIMの探査機形状は何回も変わってきている。提案を審査頂いた専門家からの貴重な助言を得て少しずつシステム検討を深化・進化させてきたものであり、落ちても落ちても、何回もしつこく出てくる提案に対して毎回建設的なダメ出しを頂いた審査員の先生方も事実上、SLIMシステム検討チームのメンバーである。具体的に「何がダメか」を指摘頂いたので、チームが散り散りになることなく、検討のブラッシュアップを続けていくことができた。ここでは、長い提案期間の途中で出てきた構想のうち、2つを紹介したい。1つめは、究極に小さな着陸探査機の模索である。今から思えば、SLS ロケットで打ち上げられる予定の「OMOTENASHI」に近い構想である。この構想では着陸機を打ち上げるのは観測ロケット（衛星を打ち上げられないほど小型のロケット）に「上段固体モータ」を取

り付けたものである。観測ロケットによる飛翔とその後の上段固体モータ点火による更なる加速、というシーケンスによって探査機は地球から直接月に向かう軌道に打ち出される。数日後、月面近くにきた段階で、上段固体モータとは別のもうひとつの「固体モータ」を点火・減速した後、最後のフェーズで調整能力が高い液体推進エンジンを使って微修正の上、月面に軟着陸する、というものであった。軌道や推進系構成の観点で米国のサーベイヤー計画に類似であるが、画期的に小型化を指向しているというのが特徴的である。このシステムの検討をしていくと、観測ロケットで打ち上げることもあって質量が足りない。そこで、いくつかの思い切った省略をした。たとえば、地上から探査機への通信はなし、すなわち地上からの指令はなしにして探査機が全てを判断・動作、その様子をテレメトリデータとして地上に一方向的に送信してくるという構想であった。最初にメンバーからこの案を聞かされたとき、「コイツ、気が触れたか」と心配したが、冷静に分析すると、システムを成立させようとした場合の論理的帰結であるとわかった。こういうゲテモノ的な考え方、個人的には大好きなのだが、一方で、打ち上げた後に思わぬトラブルに見舞われたら最期、打ち手がほぼない。ポジティブに言えば、諦めが良くて清々しい。だが、案の定、一部の御所の先生からの評判は極めてよくなかった。

もう1つの例は、民間企業との積極的な協力である。調べてみると、いくつかの一流大企業が支出する広告宣伝費は、宇宙工学しか知らない我々では予想できないような大きな金額であった。そこから着想を得て、月着陸を宣伝イベントとして活用して頂く構想を考えた。月着陸ミッションにとってクライマックスは当然着陸降下中である。しかし、それでは広告宣伝として「旬」の期間があまりに短い。そのため、協力頂ける企業から開発現場や運用現場に要員を派遣して頂き、適宜、その要員が開発・運用に関する情報を「現地レポート」として発信する、という枠組み・構想であった。こうすることで数年に及ぶ開発期間中も一定の宣伝効果を期待できる。特に当該企業のサイト経由で情報配信することでその会社のオンラインサービスへのアクセス増などに貢献できるのでは、と考えた。開発チームにとっても、重要だけどなかなか手が回らない広報活動の負担を軽減できる、というメリットも狙っていた。この構想に対して興味を持って頂いた企業もあったが、情報セキュリティを含めていくつかの観点で実現しなかった。実現性を見通す前にお声掛けしてしまい、結果として当該企業にご迷惑をお掛けしたと反省している。

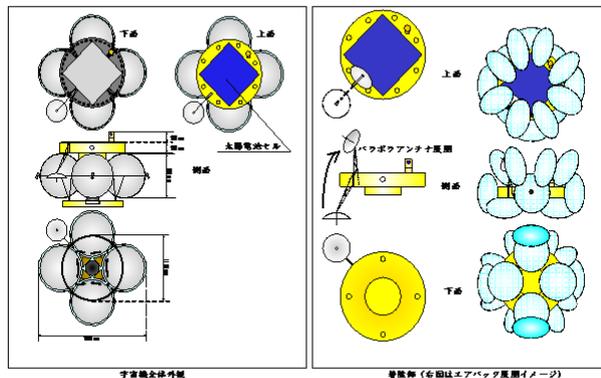
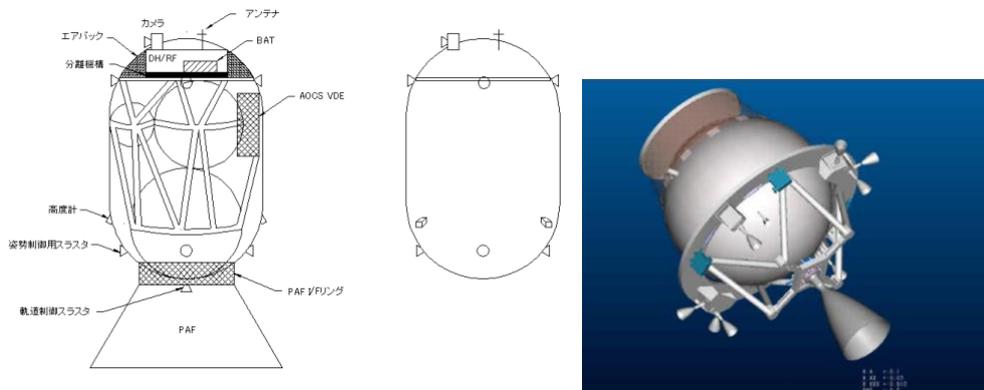


図4：2005年前後に検討していたSLIM形態のいくつかの例。エアバックを使う案や思い切った脚を無くしたものなど、ストイックな小型化・軽量化を目指した多くの検討を回していた。この頃、ミッション提案の先が見通せず、また、一部の宇宙システムメーカーの技術者の方からも、「検討を続けたってムダですよ」と言われココロが折れそうな中、思いつくものを片っ端から検討していたように記憶している。今回改めて当時の資料を眺めてみると、このクオリティの絵だったら、「ムダですよ」、と言われるのは仕方ないのかもしれない。ようやく自覚できつつあるかもしれないような、そうでもないような気がだんだんしてきたようにも思えてきたのかもしれないけど、やはりそうでもないかもしれず、とはいえ、やすやすと認めるわけにもいかないようにも思えてきたのかもしれない・・・。

技術的な中身に加えて絵心も重要だという点については強く同意する。

このような紆余曲折の末に SLIM は開発着手にまで漕ぎ着けるに至った。現在の SLIM は小型探査機で、ピンポイント着陸技術と急傾斜地への着陸技術を実証する。SELENE-B の頃からみると、システムを小型化した上に探査技術としての実証項目は「全部盛り」。技術

的には欲張った計画となっている。

特に、急傾斜地への到達能力は SELENE-B の提案当時には実現の先送りを決めていたものである。普通に 4 本脚の着陸機だと、よほど脚を拡げないと転んでしまいかねない。だけど、脚を拡げようとする機構・構造がどうしても重たくなって、システムの成立しない。どうすべきか、SLIM 提案チーム内で白熱した議論が繰り広げられていた。当初有力だったのは、「斜面を検知したらその斜面なりに接近速度や姿勢を調整して、なるべくコケないように近づき接地する」という案である。この案は私を含めた誘導制御屋の腕の見せ所とも言えるもので、チーム内でもずっと最有力案として扱われていた。実際、SLIM ミッション提案書でも、後述するゲテモノ案を提示するリスクを恐れて、この案をベースラインとして提示している。

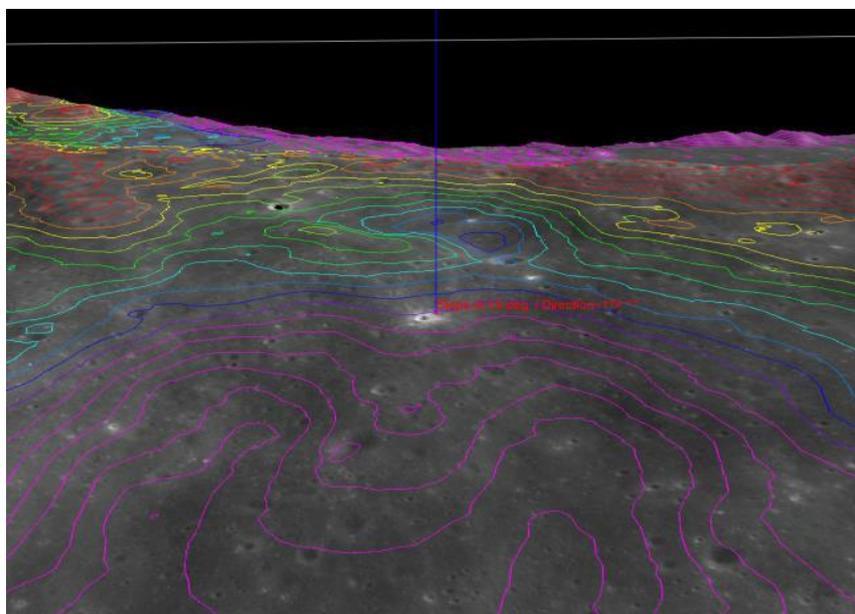


図5：着陸地点の様子。概ね 10 度程度の北向き斜面。SLIM が最終的に採用した二段階着陸方式は、もっと急な斜面でも着陸可能。ただし、急勾配を攻めすぎると一旦着陸した後に地盤が崩壊・機体が滑落する懸念があり、着地点の地質に関する詳細な評価が必要となる。

着陸点付近の白っぽい色味のクレータは SLIM 関係者によって、「しおり」と名付けられた。これは、「月探査の葉となって、末永く参考にしてもらえる場所になる」とか何とかいう雰囲気の高な思いによるもの。間違っても、「週末の昼に王様気分でごランチしていたら天啓が降りてきた」という類のことではない。「誤解」はないと確信している。

話を戻そう。チーム内で急傾斜地への着陸の議論を闘わせているときである。ある日、突然、ぶっ飛んだアイデアが持ち込まれた。言い出したメンバーは、ローバーや機構の専門家。彼の研究室は至極散らかっており足の踏み場もない。実際、私も彼の部屋に入るときは、1歩ずつ慎重に足の置き場を探すことになる。彼の机に辿り着くまで常に片足立ちで次の足の踏み場を見定める必要がある。その彼が言うには、「この際、着陸脚は1本にしてしまおう。1本の脚が接地するだけのスペースがあれば着陸できるようになる。着陸後に転倒しないよう、暫くは探査機姿勢制御用の小型ロケットエンジンを噴射し続ければ良いではないか。燃料が切れる前に必要な機器を1本脚の本体から地面に放り出せばよい」。さすがにこの方法は厳しいと思った私は、彼よりも相当に頭が堅いのだろうか。それとも、研究室があまりに乱雑でいつも1本脚で移動している（と勝手に想像している）彼の日常の生態の為せるワザなのだろうか。どちらなのか。それは今度、機会を改めて考察してみようと思う。それはともかくとして、このアイデア、とにかく面白い。往年のホームラン王を彷彿とさせる1本脚。これをヒントに、後に「二段階着陸方式」と呼ばれることになる着陸方式が生まれることになった。

二段階着陸方式は、まず主脚と呼ばれる脚が月面に接地する。このあたり、某氏の1本脚着陸そのものであるが、その先が違う。主脚が接地した時点で地面についている脚は1本だけ。機体はそのうち転倒する運命にある。でも、接地するときの速度や姿勢を上手に調整していれば、転倒する方向を予め決めておくことができる。それならば、斜面にしがみつ়方向に意図的に転倒させて、更に転倒して斜面にぶつかりそうなアタリに着陸パッドを配置してみよう。そうすれば安全に寝転ぶことができるのではなかろうか。そう考えてこの案を実際に検討してみると、意外と良い。いや。「意外と良い」、というよりも「凄く良い」。チーム内の構造・ダイナミクス担当者の目がパツと輝いた。

とはいえ、二段階着陸方式を実現させるべくシステム検討をすると、未だかつて見たことがないようなヘンテコな形の探査機になる。また、当時のネーミングで、「寝転び方式」とか、「転倒着陸方式」とか呼んでいたのも、実にネガティブな語感。その上、である。主脚は、何とか英単語の羅列をこじつけて略称「SADAHARU」とでも名付けたくなるような1本脚だったはず。それがいつの間にか2本になっているではないか。挙げ句の果てに、「どうせ横倒しになるのだったら、倒れて横向きになった着陸用エンジンを思いっきり吹かしてみたい。スイスイ月面を滑れる気がする」、と言い出す不逞の輩まで登場する始末。そうでなくても怪しげな構想な上にドタバタ、かつ、はっちゃけた内情。こちらの舞台裏が透けて見えたのかもしれない。こういうのも「内憂外患」と言って良いのだろうか。恐る恐る打診してみたシニアの先生からの評判は散々だった。

そのこともあり、提出したSLIM ミッション提案書では、「王道の4本脚」の機体形状を提示し、「着陸接地の速度・姿勢条件を調整することで何とか斜面にもたどり着けます」、という案をベースラインとしていた。その後、ゲテモノ着陸案は「二段階着陸方式」というネーミングを得て、ネガティブな印象を少しずつ払拭する地道な努力を重ねていった。カジュア

ルな服装の人は思考回路も自由なのだろうか。フランクな服装と流暢な英語がトレードマークの大物研究者がいち早く二段階着陸方式の価値を認めて下さったことが追い風となって徐々に理解が広がっていき、現在とうとう、SLIM の正式な着陸方式となるに至っている。名は体を表すというが、二段階着陸方式という命名もちょっと難しげで、何となくそれっぽい響き。「寝転び方式」なんていう名前とは全然違う印象。技術の中味だけでなく、その呼び名でも議論の方向性は変わってくる。今回、改めて実感した。必要となったら、こんな名称をサクッと考えてくるメンバーまで揃っている SLIM チーム。なかなか懐が深いと自画自賛している。

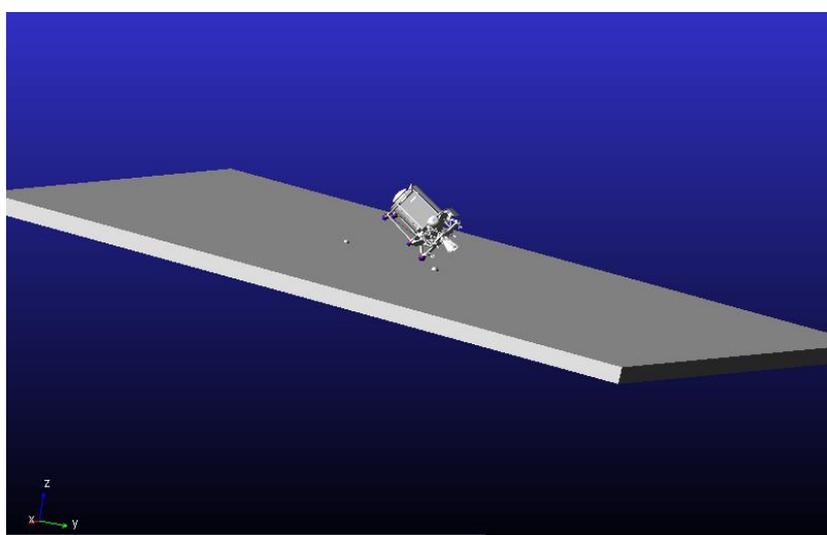


図6：二段階着陸方式の様子。斜面にしがみつくように降りるというトリッキーな方法。論理的にはこれが正しそうだ、という結論を得てからも、関係者内ですら、「本当に採用して大丈夫か」、しばらく議論が続いていた。この方式のごく初期の外部向けプレゼンのとき、心拍数が上がったことを覚えている。プレゼンが終わったとき、居合わせた SLIM 関係者が誰一人として急性心臓疾患で倒れていなかったのは僥倖という他ない。

なお、検討の変遷を辿ると、主脚は最初のアイデア段階では1本だったものが、その後、「『横』に2本並べたほうがまっすぐ綺麗に倒せる」ということで主脚2本になった後、最終的にはシステム判断で1本に戻っている。

動画：https://www.isas.jaxa.jp/home/slim/SLIM/assets/img/movie/SLIM_landing.mp4

SLIM における新技術というと、実は、「小型化」そのものも新しい。SLIM において小型化を実現するためのキーワードのひとつは「デジタル化」。たとえば、電力制御装置や通信装置は従来の宇宙機ではアナログ回路で実現していた。これを SLIM ではデジタル化するこ

とで機器の大幅な小型化を目指している。携帯電話にたとえば、きっと、一昔前の「ショルダーフォン」から「ガラケー」への変革のようなもの。この部分、曖昧な上に、私と同年代以上、老眼に苦しむ同志諸氏にしか通じない隠語のような例示で恐縮だが、他に思い浮かばなかった。ご勘弁いただきたい。

その他、SLIM では小型軽量化のため、電子機器の思い切った機能統合やロケット様式を応用した構造設計など、いくつもの新機軸を試行する計画となっている。これらは、それぞれに趣深いものであり、各メンバーの閃きと努力の上に成り立っている。また、小型軽量化とは違うが、月の上空を飛んでいる SLIM が下の地形を見て、自分がどこを飛行しているのかを推定する方法も新しい。この技術を考えるに当たって、「きっとデジカメの顔認識機能が応用できる気がする」と踏んで、それまで面識がなかった大学の先生の研究室を無謀にも急襲し、「一緒に画像処理の研究やりましょう」、と口説いた。当時、宇宙関連の研究をしたことがなかったその先生はさぞたまげただろうと同情する。この作戦、私が行ったのではダメだっただろうが、説得に長けたメンバーで訪問したのが奏功したと思っている。詳細は割愛するが、SLIM ではこれを含めて多くの大学研究者に重要な局面でご参加頂き、SLIM 成立に必須の成果を挙げてきて頂いている。

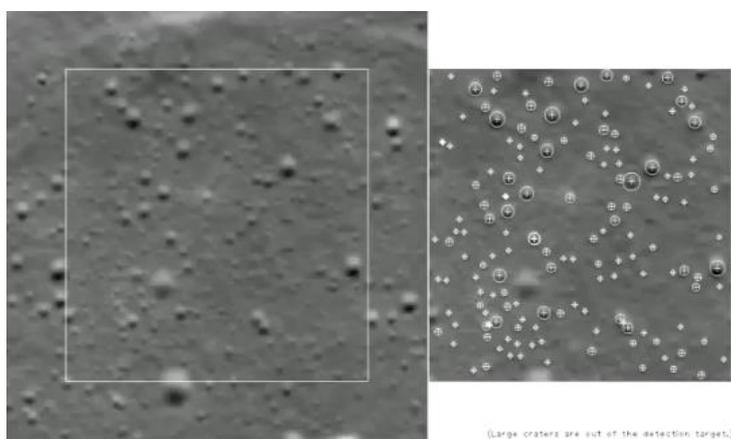


図7：地形照合の様子。SLIM は飛行途中で月面地形を参照して自分がどこを飛んでいるのかを把握・調整する機能を持っている。GPS もない月表面に対して高精度のピンポイント着陸をしようというときには必須の画像処理技術となる。この検討を始めたときは、「デジカメの顔認識みたいなもの」と言えばよかったが、最近入ってくる学生相手だと、デジカメをスマホと言い替えないと一瞬キョトンとされたりする。「宇宙村」と違って民生技術の進歩は早いという現実を突きつけられる思いである。

動画：https://www.isas.jaxa.jp/home/slim/SLIM/assets/img/movie/SLIM_navi.mp4

このように SLIM は多くの新規技術を採用している。一方で、失敗しないよう、ミッションを確実に成功させたいのであれば、できるだけ実績のある古い技術を使ったほうがよい。しかしながらそれでは将来の発展がない。SLIM のように質量などのリソースに強い制約があることで新たな挑戦が生まれてくる。我々技術陣も、毎回毎回、SLIM のように新技術のショーケースのようなミッションをやっていたのでは胃に穴が空く。しかし、何回かに 1 回、「挑戦」をキーワードとしたミッションを手がけたい。社会的に負担可能なリソースの範囲内で最大の成果を得るべく挑戦することで将来の幅広い宇宙活動に貢献できると信じている。

SLIM が何とか始まった後、歳月を経た現在、月探査は大きな盛り上がりを見せている。これは非常に有り難いことであり、月探査の全体計画の中で SLIM の役割を位置づけて頂けたのは関係者として大変光栄である。ただし、急遽盛り上がった流れは時として一過性のブームとして忘れ去られる懸念もある。SLIM を着実に実現することで、月探査が流行ではなく継続的な活動になることを望んでいる。

万物に共通のこととして、宇宙ミッションにも絶対はない。SLIM の成功は絶対ではなく、特に新技術への挑戦が多い場合、失敗もあり得るとというのが統計的事実である。しかしながら、SLIM の成功によって月探査の盛り上がりを実感にする必要がある。物事に絶対はないとわかっているが、「絶対に成功させたい」と思っている。応援いただければ幸いである。

関連リンク：

- ・ 小型月着陸実証機 SLIM <https://www.isas.jaxa.jp/home/slim/SLIM/index.html>
- ・ SLIM への期待 ～将来の月面活動に向けてシナリオ検討を進める：佐伯孝尚氏・森治氏インタビュー～ <https://www.isas.jaxa.jp/home/research-portal/people/20220311/>