

＜学生が聴く、日本の惑星探査の過去・現在・未来＞ 第5回
The planetary explorations of Japan, interviewed by students.
将来計画委員会・惑星探査検討グループ企画

LUNAR-Aが切り拓く新しい世界

— 一月に向かって撃て —

Opening up the new world of the MOON by LUNAR-A — Aim for the MOON! —

インタビューワー：姫野 洋平（東工大 M2）

早いもので本企画も5回目を迎えます。ここまで続けることが出来たのも、御協力いただいたミッションマネージャーの方々、学生の方々のおかげです。感謝に堪えません。

今回は、固体惑星系としては最初の探査機になるべく企画立案された宇宙科学研究所のLUNAR-A探査計画に関して、水谷先生にお話を伺いました。インタビューワーは東工大の姫野さんをお願いいたしました。

LUNAR-A探査計画は非常に野心的で、将来の惑星探査の地平を広げると考えられるペネトレータの使用を特徴とする探査計画です。斬新な計画である為、多くの乗り越えるべき課題がありました。しかし、それらを一つ一つ粘り強く解決していき、現在2003年の打ち上げが予定されています。本稿ではその開発段階でのお話が余すことなく語られています。とかく打ち上げ時の華やかさばかりが強調されてしまう探査計画ですが、目標をしっかりと定め、それに向かってじっくりと我慢強く進んでいく、惑星探査計画の本当の姿を垣間見ることが出来る貴重なインタビューに仕上がっています。

本稿がこれから惑星探査の門に進まれるすべての方の参考になれば幸いです。

1. LUNAR-Aについて

LUNAR-Aは、宇宙科学研究所（ISAS）によって計画・準備が進められている、月内部構造探査



図1：水谷先生と筆者

を目的とした我が国初の科学衛星で、来年夏の打ち上げが予定されている。このLUNAR-Aでは、ペネトレータと呼ばれる手段によって月面に観測機器を設置し、主に地球物理学的手法によって固体月探査を行うことを目的としている。ペネトレータとは、槍型の機体に観測機器を搭載したものである。LUNAR-Aミッションでは月周回軌道を回る母衛星から月表面に向かってペネトレータを撃ちこむことによって観測機器を設置する方法が画期的である。

LUNAR-Aに搭載される主な観測機器は、ペネトレータに搭載される地震計、熱流量計と母衛星に搭載される月撮像カメラ（LIC）の3つである。それぞれ以下のような目的を持つ。

地震計：地震波観測による月の内部構造に関するデータの取得

熱流量計：地殻熱流量の観測による月内部の温度、放射性発熱元素存在度の推定

月撮像カメラ：可視光カメラによる高解像度撮像を用いた月表面の地形観測

LUNAR-Aによって得られる上記のようなデータは月の起源および進化を解明するのに不可欠なものであり, このミッションが将来の月科学の発展に大きな役割を果たすと期待されている。

2. インタビュー

来年夏に打ち上げを控えたLunar-A計画について, 同計画のプロジェクトマネージャである宇宙科学研究所の水谷先生に伺います。インタビュアーは東工大の姫野さんです。

Q：計画の経緯について教えてくださいか。

A：月探査ミッションがアポロ以降行われていなかったときに, このLUNAR-Aは計画されました。アポロ計画によって明らかになったことは数多くありますが, 月の内部については, 地殻の厚さが表側で60km程度であるとか, 月の裏側の地殻の厚さは表側よりずっと厚そうだったことでした。いまだ1000kmより深いところはほとんどわからなくて, コアがあるかどうかもわからない状態です。宇宙飛行士によって持ち帰られた岩石を使って表面の組成を調べても, 表面と内部では違った組成をしていると思われるので, 月全体の元素組成を知るには内部構造がわかってないといけません。それでは, 月探査の重要な課題として残っている月の中身を調べてみようということでLUNAR-Aは計画されました。

Q：アポロ以降何もない, というのは意外ですね。

A：LUNAR-A計画ができた後, アメリカでもアポロ計画では出来なかった月全面の探査が必要ということでクレメンタインやルナブロス

ペクターといったミッションが実施されました。それらはリモートセンシングの手法で月の表面を調べようというものだったんですね。ですからLUNAR-Aとは相補的な目標を持つことになりました。

Q：では, LUNAR-Aの計画としてはアメリカのこの2つのミッションより先だったんですね。

A：ええ, そうです。ただし日本の月探査の最初の想定としては, 内部構造をねらったミッションとリモートセンシングによる表面観測をねらったミッションの2機の探査機を飛ばす予定でスタートしたんです。したがってもしこの2機の探査機が実現されていれば, クレメンタインやルナブロスペクターよりも先に月の全面観測が出来たかもしれません。ところが日本で2機飛ばすというのは資金的にも難しく, そこで当時まったくやられていなかった内部構造を先にやろうということになったんですね。

Q：今のLUNAR-Aの現状, 流れについて教えてください。

A：内部構造を調べるにはある種の観測のネットワークを作らなければいけなくて, 少なくとも地震計を複数置かなければいけません。そのためには, 人間が行くか, ランダーを用いる方法が考えられますが, どちらにしても, 相当大きなロケットを使って1回のミッションにつき1個しか地震計を置けないわけです。複数置くのは難しい。そこで, ペネトレータという新しい道具が必要だと考えました。この2機のペネトレータ(まあ最初は3機だったものが計画途中で2機になったわけですが)を作るのが技術的にチャレンジだったわけですね。と言うのは, 衛星から投げ下ろすわけですが, ぶつかったときの速度が時速1000km位, 衝撃は7000-10000Gもあるわけです。それに耐え

て、システムが健全な状態で観測できるような機器を開発することが、とても技術的に難しい部分だったんです。それで、結局ペネトレータを作るのに10年位かかってしまいました。それが今だいたい完成して、あとは最後に実際に飛ばす物と同じような物を実際の速さでぶつけて、衝撃に耐えるかどうかを試験しようとしています。衛星本体はもう最後の段階まで来ていて、今年の秋から総合試験を始めます。それでその試験を約1年やって、来年の夏に打ち上げたいと思っています。

Q：ということは、もう技術的な問題点は現状ではほぼ克服したということですね。

A：はい、そうです。

Q：当初1997年に打ち上げだったのが何度か延期された理由は、

A：まず一番最初の延期の原因は、母船の分離機構です。分離メカニズムの部分の機械的強度が考えていた仕様に達していなかったんです。というのは切り離し自体はできるのだけど、擾乱を与えないで正しく切り離しすることができない。この分離機構の改修のために打ち上げが遅れて、それを解決してよくなったかと思ったら、今度はペネトレータの最終試験でペネトレータそのものに衝撃による不具合が起きてさらに1-2年遅れました。計測機器を包んでいるポッティング材にひびが入ってしまったからです。その他にM-Vの失敗などもあってさらにスケジュールを見直して、結局2003年に打ち上げになってしまったというわけです。

Q：水谷先生は総責任者としてこのミッションに関わっていらっしゃるわけですが、その際に苦勞されたことというのはどのような点でし

ょうか。

A：そういう不具合が出ないようにすることですね（笑）。ペネトレータというのは一種の衛星みたいなものでセンサーから始まり、各種のエレクトロニクス、コンピュータ、メモリ、送受信機などを備えています。それらが全て正常に動いているかどうか、ありとあらゆることをチェックしなければいけないんですね。

Q：開発担当の方というのは、例えば計測器なら計測器を専門にやったり、送受信機なら送受信機だけに携わるというわけではないんですか。

A：いや、全然細かく分かれているなんてことはなくて、全員1つの同じことを全てやっているわけ。簡単にこのミッションの体制について説明しておきましょう。まず人からいうと、LUNAR-Aのチームは全部で、宇宙研の外の人間も含めて30人位かな。内訳は、LICというカメラを母船に積むのでそのチームが10人位、ペネトレータに関する方が10人位、それがサイエンスのチームで、それを支援する宇宙研の工学系のチームが別にいて、それがまた10人位かな。これら合わせて3チームの30人程度で、このLUNAR-Aミッションを進めています。さらに、それとは別にこれと同程度の数のメーカー側の方がいます。

Q：これらのチームのプロジェクト管理も水谷先生がされていらっしゃるわけですね。

A：プロジェクト管理は工学の方の中島先生がやっています。その人と一緒にミッションを進めています。まあどこで仕事に分かれているかっていうのも非常に難しいところです。宇宙研のミッション、特に惑星系のミッションは工学的なものや理学的なものやを明確に区別できるものではないんでね。

Q：では次に月探査の話に入らせていただきます。

このLUNAR-Aミッションの一番の特徴はペネトレータを用いて月震計や熱流量計といった観測機器を月面に置くことだと思うんですが，この方法の長所，短所を教えてください。

A：まずは1回で月面の複数箇所に機器を設置できることですね。先ほど話したように，人間が直接行っても，ランダーを用いてもそれは難しいですからね。それと，観測機器をレゴリスの中に設置できるので，機器の温度制御が楽になる上に，熱流量の測定もできるようになります。これをほかの方法でやろうとすると，穴を掘らなければいけなくなるんですが，ペネトレータでは自動的にできるので，地震や熱流量観測には大きなメリットがあります。さらに，コスト的な面からみても，ランダーを作ったりするよりははるかに安いでしょうね。短所としては，先ほど言ったように大きな衝撃があるので，それに耐えられるように作らなければいけないという点ですね。

Q：着弾点に硬い石があった場合，壊れてしまったりすることはないのですか。

A：10000Gの強い衝撃に耐えられるようになってしまうと，石にぶつかっても石の方が割れるようになっているはずなので，それは大丈夫です。ただ，あまりに大きな石があってそこに衝突すると，石の中にもぐってしまってそこで観測をすることになってしまうので，それは問題になります。しかしそのような確率はとても小さいので，あまり心配していません。確率は0ではないですけどね。落下点の制御できる精度はだいたい10km程度ですが，月面に衝突した後は1kmの精度で測れることになっています。

Q：搭載する機器が主に3つあるんですが，それぞれの理学的な意味を教えてください。まず

月震計からお願いします。

A：月震計は月内部で起きている深発月震というものを測定します。深発月震というのは，だいたい震源の深さが500-1000kmのところにある地震です。この深発地震は月内部にある地震の巣で起きている，巣は100箇所程度あります。それぞれの巣で起こる月震には決まった周期があって，だいたい27-28日です。この周期性から，深発月震はおそらく地球の潮汐力が引き金になって起きているんだろうと考えられています。そのおかげで月震が起こる時期が予測しやすいんですね。さらに，その深発月震の巣ではそれぞれ特有の波形の震動を発生していることが分かっています。だから，起こる時刻と地震波の形から震源を予測できるわけです。これがLUNAR-Aの月震観測の特徴で，これがないと観測点が2点しかないのLUNAR-Aの観測だけで震源を決めるのは難しくなります。本当は地震計だけで震源を決めるには3点での観測でも難しく，4点以上観測点がないと難しいんですね。アポロでも同じように月震を観測していたんですが，アポロの場合月の表側にしか月震計を設置しなかった事が関係して，深さ1000km以上の構造は求まりませんでした。今回は月の表側と裏側両方に月震計を設置するので，表側の深発月震を使えば，月の中心部を通る地震波も観測できます。それを使えば中心部の構造もわかることになります。

Q：次に熱流量計についてですが。

A：アポロで2地点の月面での熱流量が測られているんですが，2点の値が大きく違うんですね。そこで月全体を代表する平均的な熱流量を知りたいので，あと2点観測点を付け加えて熱流量を測定すれば，かなり平均に近い値がわかるのではないかとということですね。

熱流量がわかると何が面白いかということの説明しましょう。熱は月内部の温度の高い部分から低い部分に流れるので、熱流量から月内部の温度構造がわかるということと、熱が発生している根本原因になっているUやThなどの放射性元素が月内部にどれくらいあるのか、ということがわかるようになります。それらの存在度がどれくらいあるのか、これは月表面を見ただけではわからないんです。表面にはこれらの元素は濃集されているので、でも重要なのは月全体としてそれらの元素がどのくらいの量あるのかということなので、それは熱流量の測定を通して調べて初めてわかる、ということになります。

放射性元素の量がわかることが月の科学にとってどのように重要なことかを次に説明しましょう。アポロの結果による熱流量観測に基づく推定によると、月全体に含まれるU、Thの存在度は地球やCIコンドライトより多いということになっています。これらの元素は蒸発しにくい難揮発性元素なので、それが濃集されているということになれば月の材料物質は高温にさらされたということがわかります。しかしこれらの元素が本当に多いのかどうかはまだ明確になっていないので、熱流量観測にもとづいて難揮発性元素の存在度の推定精度を上げて、月形成のメカニズムに制限をつけたいと思っています。つまり、高温にさらされたということがわかれば月形成のメカニズムとして巨大衝突があったと考えやすくなるし、そうでなければまた別のメカニズムが必要かもしれない。これは先ほどの月震観測についても言えて、月震観測によって月のコアが小さいということがわかれば、巨大衝突を考えやすくなります。異なる観測からそれぞれ同じような結果になれば面白いと思っています。

Q：月撮像カメラ (LIC) についてお願いします。

A：アポロでもまだ十分な画像が取られていない地域があるということと、最近のクレメンタインなどに積まれている画像は全て太陽を背にして撮っているので起伏がはっきりしないという欠点があります。LUNAR-Aでは太陽の光が横からあたっている時、朝とか夕方の時に分解能30m程度の画像を撮ろうとしています。今までは、アポロで数～数百m、クレメンタインでは数十mの分解能だけど起伏がはっきりしない状態でした。そこでLICでは起伏をよく見られるように画像を撮って、例えば玄武岩の流れ出し地形なんかを見てみよう。ちなみにこのカメラは可視光で白黒ですので、クレメンタイン衛星が行った分光観測のような事はできません。

Q：次に、ペネトレータを3機から2機に変更した理由は何なのでしょう。

A：M-Vの能力から3機乗せられない、という重量の問題ですね。ペネトレータ1機が45kg位あって、月面に最終的に投入するのは13kg位です。M-Vの打ち上げ能力としては540kg位あって、そのうち衛星の本体の推進系、熱制御系、通信系、姿勢制御系など様々な部分に使われるので、結局ペネトレータに割り当てられる重量は90kg位になってしまったのです。この事情の背景には、打ち上げが当初予定していた時期から遅れることによって、月を周回する母船が予定よりも長い日陰の期間をしのがなくてはならないことになったことが上げられます。電力が供給できない日陰の期間を生きながらえるためには、電池が必要で、この余分の電池を母船に搭載することになると3機のペネトレータをもって行くのが困難になってしまったということです。

Q：2機にして困るようなことは。

A：1機失敗したときには困りますね。3機あれば、1機失敗してももう2機残っているんだけれども、2機だと、失敗したときに1機しか残らないからです。ただし2機のペネトレータがあれば、当初予定していた深発月震を使って月の中心核の大きさを推定する目標は達成できるので、LUNAR-A計画そのものは2機のペネトレータを使った探査に変わってきました。

Q：観測できる期間というのはどのくらいなのでしょう。

A：ペネトレータの寿命は1年を想定しています。これはペネトレータの中のバッテリーの容量で決まっています。内部の観測機器は全てバッテリーで動かしています。ペネトレータは地中に潜り込むので、太陽電池では動かせません。バッテリーは容量の大きいスーパーリチウム電池というものを使っています。母船の方は、基本的には寿命はありません。軌道が乱れて、月面に衝突するまで観測できると思います。

Q：観測終了後の衛星、観測機器というのはどうなるのでしょうか。

A：そのまま放置することになりますね。というのは誰かの邪魔になるわけでもないし、悪影響も考えづらいので、スペースデブリの問題ともまた別の話ですから、今のところ、一度出したものをまた取りに行くことの面倒さを考えると、それをしようという人もいませんね。ただ火星探査の場合、火星は生命探査の関係もあるので、なるべく地球からの運んでいったもの、観測機器も含めてですがそれを置いておくのは避けたいですね。

Q：LUNAR-A後の月探査，ペネトレータを用いた探査計画について教えてください。

A：次の月のミッションというのはSELENEがありますよね。これは2005年打ち上げで、月面の表面探査をするミッションですね。一方LUNAR-Aのように月の内部構造を調べるミッションも、LUNAR-Aで終わるとは思えません。ですから、またペネトレータを主体として、それと着陸船を使ったようなミッションを考え始めています。こちらはまだ検討段階ですが、また地質学的にもっと詳しく月を調べるために、ローバーを使った探査も考えられています。さらに、月面に天文台を作る計画や、月の自転軸のふらつきを観測して内部構造を調べたりする計画などが挙がっています。これらが次期月探査ワーキンググループというところで検討中です。

他の惑星の探査としては、火星ですね。2007年か2008年にフランスが火星に地震計を置く計画をしています。我々もその計画に科学面で参加しようとしています。またそれを受けて、ペネトレータを用いた火星の内部構造探査なども話題にあがっています。このようなミッションもそう遠い将来ではないと思います。次に内部構造探査で面白いのは水星ですね。こちらはいろいろと難しい点もありますが。

Q：国内関連機関の統合についてはどうお考えですか。

A：そうですね、まだ実はよくわかっていませんけれども、サイエンスに関することは今後も今の宇宙研が中心になると思います。その点ではあまり変わらないと思いますが、宇宙開発技術に関することについては3機関が統合するとやりやすくなるかもしれません。惑星探査としてはよりよく発展していく方向にあ

と思います。

アメリカのNASAでもいろいろなところに研究所を持っていて、ミッションごとに別々にやっているし、日本も別々にやっても特に不都合はなかったと思います。しかし、ただ国の政策として「いっしょにやりなさい」と言われると、それをうまく利用していかなければいけないということになります。

Q：次に水谷先生ご自身のことについて少し伺ってもよろしいでしょうか。水谷先生は以前名古屋大学にいらっしゃったということですが、宇宙研に来てみて苦労されたことはどのようなことでしょうか。

A：宇宙研に来たのは10年位前かな。大学でも、宇宙研のような研究所でも、研究をすることに関してはそうは変わらないと思います。ただひとつ違うのは、宇宙のミッションというのは、一度失敗したらやり直しがきかないということですね。当初はそのような考え方に変わるのに苦労しましたね。大学の研究は、例えば実験をしていて失敗したとしても、次の日にやり直せばいいじゃないですか。ところがこういう大きな惑星探査ミッションでは

そうはいかない。絶対に失敗しないようにしなければいけない。非常にたくさんの人が働いていて、協力しながらやっているのだから後戻りができない。その辺をしっかりと考えていかなければいけないというのが大変なことですね。

Q：学生の研究、教育、指導について水谷先生はどのように考えていらっしゃるのでしょうか。

A：僕はだいたい、まあ基本的には自由に好きにやったらよい、というか、学生の自主性に任せています。ただせつかく宇宙研にいるんだから、そこでのミッションに関わるような、役立つような研究、それはここでしかできないわけですから、そういう研究をしてほしいと思っていますけれどね。

それと、ミッションのデータが来ないと書けないような修士論文、博士論文は現在ではまだ難しいので、なるべくやらないようにしています。それ以外のこと、例えば機器開発に関する研究で論文を書いてもらって、実際にデータが出たらそれはまた別の論文にするという考え方にしています。その意味では、仮にミッションが延期されてデータが出なくなって論文が書けなくなるというようなことは

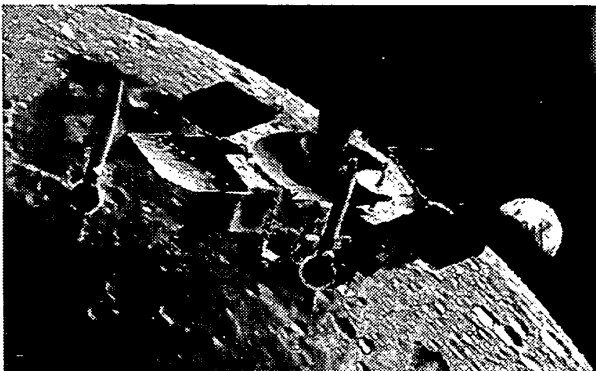
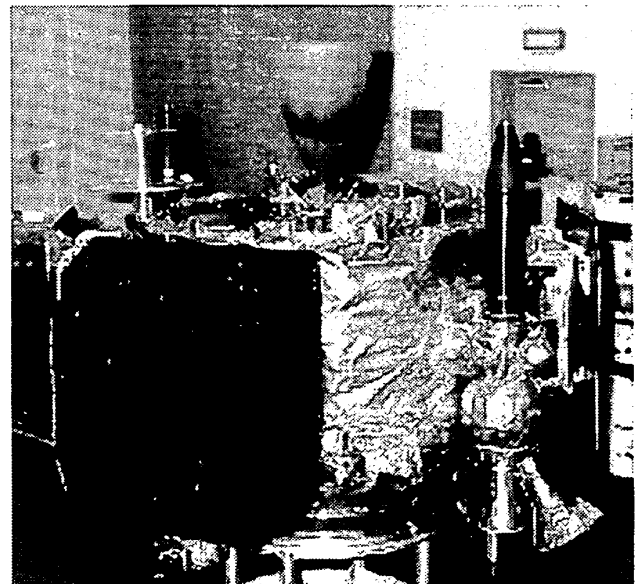


図2：LUNAR-A探査機（ISAS提供）

右図はLUNAR-Aの探査想像図。ペネトレータが分離された直後を示す。右図はLUNAR-Aの実機。ペネトレータ部分はダミー品が装着されている。



心配なくていいです。今までそれで困った学生もいません。

Q：最後に、惑星科学を志す学生に対してメッセージをお願いします。

A：今まで惑星科学を志した人たちは、自前のデータを取りたくても取れなかったのだけれど、今年MUSES-Cが打ち上げられ、そして来年LUNAR-Aが打ち上げられる。自分たちで惑星そのもののデータが取れるような時代に突入したんです。自分たちの作った機体でとったデータを自分たちで解析して自分たちで発見する、そういう心意気を持って惑星科学を志して欲しいですね。今まではやりたくてもできなかったことなんです。きっとそれが新しい時代を切り拓くことになると思います。

3. おわりに

宇宙に探査機を打ち上げること、この巨大プロジェクトもそれに携わる方々の膨大な努力と苦勞の積み重ねです。今回宇宙研に来てインタビューをして、そのことをひしひしと感じました。自分で作った探査機を使ってデータを取りそれを自分で解析し発見をする、昔は研究者の夢に過ぎなかったことが今現実のものとなりつつあります。

水谷先生へのインタビューでは、その夢の実現に向けた心意気を私は強く感じました。

LUNAR-Aは数度の打ち上げ延期を乗り越え、ここまで来ました。それは夢の実現に努力を惜しまない研究者の方々の作り上げた結晶なのでしょう。

そしてそれはきっと私たちに月の新たな素顔を教えてくれるはずです。LUNAR-Aは新たな世界を切り拓き私たちに見せてくれるのです。それがまた次の夢を実現する原動力になることでしょう。

LUNAR-Aが成功し、日本の惑星探査と惑星科学の発展に大きな役割を果たしてくれることを願っ

ています。

最後になりましたが、インタビューを快く引き受けてくださった水谷先生、インタビューを支えてくださった宇宙研の関係者の皆様、将来惑星探査検討WGの皆様ならびに遊星人編集部の皆様に心より御礼申し上げます。

人物紹介

水谷 仁：宇宙科学研究所 惑星研究系主幹。専門は惑星科学、地球物理学。カリフォルニア工科大学上級研究員、コロラド大学客員教授、NASAのアポロ計画・月岩石主任研究者などを歴任され、LUNAR-A探査機を指揮する傍ら多くの探査計画にも指導力を発揮し、日本の惑星探査界の重鎮。現在、惑星学会長も勤められている。訳書ではあるが、“月の科学-月探査の歴史とその将来”は訳者のコメントが随所に光るちょっと変わった訳本も出されており、発刊された年は修学希望学生の数が多いに増えたとの噂も。

姫野 洋平：東京工業大学大学院 理工学研究科 地球惑星科学専攻 在籍。太陽系形成論を学び、原始太陽系円盤中で塵サイズから微惑星サイズまでどのような成長過程となるか、流体力学を用いて解析を試みる研究に従事している。来年は就職予定。