

EXPLORATION PROGRAMS TO THE MOON
-WHY DON'T YOU RETURN TO THE MOON?-

Jun'ichi HARUYAMA

Lunar Mission Research Center, National Space Development Agency of Japan
2-1 Sengen, Tsukuba-City, Ibaraki 305-8505, Japan
Fax: 0298-68-2984; E-mail: Haruyama.Junichi@NASDA.GO.JP

(Received 14 June, 2002, Accepted 30 July, 2002)

Abstract

More than 30 years ago, American astronauts arrived at the Moon and left their steps as first ones of human beings. At that time, we believed that everyone who wants would be able to go to the space without any problem in the 21st century. However, we can't visit even the Moon again, today. We, Japan, are preparing Moon explorations steadily. In this paper, we introduce the current status and future plans of the Moon explorations and discuss the role of the Moon explorations to studies of the origin and evolution of life.

(Key word: Moon, Exploration, SELENE)

月探査の現状と将来
- 再び月を目指しませんか? -

春山 純一

宇宙開発事業団 月利用研究センター

305-8505 茨城県つくば市千現 2-1

Fax: 0298-68-2984; E-mail: Haruyama.Junichi@NASDA.GO.JP

1. はじめに

アポロ計画で人が月に降りたってから、すでに30年以上が経過した。30年前のその頃、2001年には、宇宙に多くの人が旅立ち、21世紀という時代は、誰でも気軽に安全に宇宙へ飛び立ち、更には宇宙の大海原を探検する者にも望めば成れる時代になる、と信じていた。しかしながら、アポロ計画から30年余りも経ち21世紀に入った今でも、惑星に人がいくことはおろか、月にさえ人は再び訪れることが出来ないでいる。

こんな状況ではあるが、実のところ、日本は着実に再び月を目指している。本稿では日本、そして世界の月探査の現状と将来を紹介する。また、月探査が生命の起源と進化の研究において、どのような役割を担えうるかも述べてみたい。

(キーワード: Moon, Exploration, SELENE)

2. 日本の月探査計画

日本が最初に月を目指したのは、宇宙科学研究所(宇宙研)の工学試験衛星「ひてん」(打上1990年)である。「ひてん」は、地球の重力を利用して加速するスイングバイ技術の確立に成功し、月へと到達した。(余談であるが、「ひてん」は最後月に向かって衝突した。「ひてん」は衝突の最後まで月の映像を送ってきた。私は当時大学院生で宇宙研に所属していて、「ひてん」の最後は管制室にいれさせてもらった。だんだん近づく月の映像、それは「ひてん」が最後の力を振り絞って送るものであり、感動を覚えた。。と同時にその画像は特に月面を撮像用カメラによるものではなかったこともあり、ひどく荒いものであった。それについては正直NASAが公開する美しい月面画像とついつい比較して無責任にも、「なんとまた日本の探査技術の後れている事よ」、と心の奥でつぶやいたものである。)

その後、宇宙研が開発した地球磁気圏を調査するためのGeotail衛星(打上1992年)も月軌道にまで達している。(これもまた余談であるが、Geotail衛星の打ち上げは、実は日本のロケットによってではない。アメリカのデルタロケットというものであり、その打上能力は当時の

宇宙研のM-3S2ロケットを上回るものであった。実際、宇宙研の学生であった私は、Geotail衛星の模型を見たとき、そのほかでかさ(直径2.2m、高さ1.6m)には驚かされた。大きいと思っていた「ひてん」は、直径1.5m、高さは1m弱であり、Geotailはその約1.5倍の大きさだったのである。しかし、ちょうどこの時期、宇宙研とは所轄官庁の違う宇宙開発事業団が、H-2ロケットの打上に成功しており、日本もデルタロケット並以上の打上能力を確保しつつあった。当時の指導教官でLunar-A計画(後述)を手がけていた水谷(仁)先生に、「惑星探査をするのに、なんでH-2ロケットを使わないのですか」と言ったが、「そうもいかんのだ」と一蹴されてしまった。しかし、その状況もその後すぐに、一変することになる。このことは後述。なお、Geotailの大きさに対する驚きも、その後、初めて宇宙開発事業団の地球観測衛星を「見あげた」ときには、吹っ飛んでしまった。)

現在は、宇宙研が、月に地震計を搭載した貫入機(ペネトレータ)打ち込んで月の内部構造を地震波を使って調べようというLunar-A衛星を2003年の打上を目指し開発に取り組んでいる。ペネトレータには、地震計の他、熱流量計も積まれ、内部の熱的な進化についての貴重な情報をもたらしてくれるだろう。

そして、SELENE(セレーネ、SELEnological and ENgineering Explorer(月学と工学の探査機)が、今計画進行中である。SELENEとは、月の女神の意味である。このSELENEについて、すこし詳しく紹介しよう。

3. SELENE計画

SELENEは、2005年に、H-2ロケットの改良版であるH-2Aロケットにより打上られる予定の2トンクラスの大型月探査衛星である。

(Fig. 1)

宇宙研と宇宙開発事業団が協力して探査計画を遂行する、ということころにも、我が国の月惑星科学、天文学には大きな意味がある。これまで、宇宙研は科学衛星を打ち上げ、宇宙開発事業団は実用衛星を打ち上げる、という区分があった。そのためできれば大型のロケットを使いたい月惑星探査に、日本の誇る大型ロケットが



Fig. 1. SELENE (SELenological and ENgineering Explorer) Configuration. The SELENE will be launched in 2005 by H-IIA rocket of NASDA. It is a 2-ton-class explorer. It will investigate the Moon by 15 mission instruments.

使えないという状況で、先に述べたように私なども歯がみしていた。それが、H-2（正確にはH-2A）を使って惑星探査に一步踏み出したのだから、我々は幸運な世代と言える。（こうした協力関係ができるようになったのかは、月探査を積極的に進められた方々の努力があった。そこには、実際には省庁再編の動きなども関連したともいえないであろうが、宇宙研出身で現在宇宙開発事業団でSELENE計画に携わっている私も全容を知らないし、どこかでどなたが書くであろうから、ここでは述べまい。しかし、世の中は奇妙きてれつであり、事実は歴史に残らないのかもしれない。ともかく、月探査にH-2Aロケット利用という道が拓かれた、これが事実である。）

SELENEの目的は、月の起源と進化の解明のための科学データ、月からの地球を含む宇宙の科学データを収集すること、そして、将来の月の利用の可能性の調査のためのデータを収集することである。アポロ以後の月探査機には、月の地質や地形高度情報などを取得したクレメンタイン衛星（1994年打上）と月の磁場の観測や月からのガンマ線や中性子線の観測を行ったルナープロスペクター衛星（1998年打上）がある。それに対し、SELENEは、これらの衛星に比較して非常に多角的な調査を行うことが可能な、アポロ以来の本格的な月探査計画といってよい。SELENEには15のミッション機器が搭載される。そのうちのいくつかを簡単に紹介しよう。

・蛍光X線分光計：太陽からのX線を月は反射するが、そのX線を捉える。普通の光と同じように、X線の反射も物質によって異なるので、X線を捉えることによって、表面物質を構成する元素(特に、マグネシウム、アルミニウム、ケ

イ素、鉄など)の量を調べることができる。

・ガンマ線分光計：月の表層には、特にカリウムやウラン、トリウムなどから放出されるガンマ線の量を捉える。月の極に水素が濃集しているかどうかもガンマ線分光計で調べられる。

・マルチバンドイメージャ：可視域5バンド、近赤外域4バンドのフィルターを持つ撮像カメラで、それぞれのフィルターを通して得られた画像を処理することで、月の地質分布を調べる。クレメンタイン衛星でも同様のバンドで撮像するカメラが積まれていたが、マルチバンドイメージャの水平解像度は、そのカメラの解像度より一桁上で、より詳細な地質分布の調査が可能になる。

・スペクトルプロファイラー：鉱物は、それぞれ特徴ある反射スペクトルを持つ。スペクトルプロファイラーは、可視域から近赤外域の鉱物反射スペクトルを波長解像度6-8nmで取得する。これによって、表層の鉱物の同定を行うことが可能になる。

・地形カメラ：分解能10mという高解像度で、月全表層について画像データを取得する。また、二つの望遠鏡によりステレオペアを取得することも行い、数10m程度の高さ分解能の立体視画像を作成することも可能である。

・レーザ高度計：緯度方向に1.6kmおき、経度方向にも赤道で約1.5kmおきに高さ分解能5mの分解能月の表層の起伏データを取得する。

・レーダサウンダー：5MHzの電磁波をSELENEから発射し、月の表層下数kmでの反射面を調査する。表層下の層状構造を調べ、月の表層の成因やその形成過程を調べる。

その他、磁力計、プラズマ観測器、粒子線計測器、プラズマイメージャ、リレー衛星、VRAD（相対VLBI電波源）衛星、ハイビジョンカメラ、電波科学観測機器が搭載される。（日本の月探査については、日本の宇宙機関と筑波大学とで共催している「月探査情報ステーション」などに情報を掲載しているのので、ご参照ください：<http://moon.nasda.go.jp/ja/index.shtml>）

5.. 将来の月計画

これからの海外の月探査の動向は、どうだろうか。

今年（2002年）の10月には、ヨーロッパ宇宙機関（ESA）が、小型機器の宇宙利用の実証を目指してSmart-1衛星を月に打ち上げる予定だ。Smart-1は、小型カメラによる観測や、10ヶ月から15ヶ月もかかるが電気推進によって月に向かうなど、本格的な科学ミッションというよりはむしろ今後の惑星探査に向けた技術の習得を狙う要素が大きい。

アメリカでは、月探査ミッションは今のところ具体化してはいないが、「より早く、より安

く、より良く」をモットーとするディスカバリープログラムにサンプルリターンミッションが提案されている。インドでも、月周回探査機の開発を目指そうという機運がある。

中国は、噂では、近いうちに人を宇宙に打ち上げる計画という。またそうした技術力を背景に、月探査にも乗り出すとの噂が絶えない。この噂の実態はよく分からないが、ロシアからの技術供与をかなり受けているとすれば、一躍中国が月惑星探査の中心になっていく可能性がある。（中国の月探査の動向については、http://moon.nasda.go.jp/ja/topics/2001_Jan.html にも記載しています。）

しかし、いずれにせよ、SELENE による本格的なリモートセンシング探査が行われると、諸外国では SELENE を越える成果を期待される。しかし一方で、宇宙探査予算は諸外国でも苦しい状況であることには変わりなく、SELENE がある故に、月探査を本格的に出来ないという状況になっているともいえない。それゆえ、SELENE への期待と責務は大きい。

日本では、SELENE 以後に向けても研究が行われている。宇宙開発事業団、宇宙科学研究所、航空宇宙技術研究所が協力しあって、月（無人）軟着陸実験を目指した研究がその最先鋒である。着陸探査機は、SELENE-B と名付けられている。月軟着陸実験は、本来は SELENE に組み込まれていたが、開発の最適化などを勘案して、周回探査機（SELENE）と別途打上とされたものである。月軟着陸実験では、着陸のみならず、月の科学や将来の月利用の可能性調査もミッションに加えられる予定である。

6. 月探査と、生命の起源と進化

月は、地球にもっとも近い天体である。しかしながら、地球には大気があり、海洋があり、そして生命に満ちあふれている。一方、月はすでに内部の活動を終え、クレーターに覆われた「死んだ」星である。なぜ、このような違いが生じているのか。こうした観点からも、月は、地球を知る上で最も重要な探査対象である。その意味で、月の起源と進化を探ることは、必須である。

例えば、SELENE では、月の表層の 20 億年より最近の比較的「新しい」ところを調査しようとしている。20 億年が比較的新しいところというのは、少し抵抗があるかも知れないが、月がおおよそ 30 億年前に内部活動を終えてしまったことから、それ以降は、「新しい」と言おう。この「新しい」時期は、殆ど内部活動を終えた、といっても多少は噴火活動があったと考えられている。溶岩の広がった地域で小さな領域ながら、比較的クレーターが少なかったり、クレーターがあまり壊れていなかったりするの

である。こうした地域を調べることで、月の内部活動の終焉期における物質分化の様子が解明され、ひいては固体惑星の熱史の解明に寄与しよう。月の比較的「新しい」時代は、狭い領域であることもあり、これまでの解像度のデータでは十分に調べられないといってよい。これまでのデータを解像度でも大きく上回る SELENE のデータに期待が集まる理由である。

月に残された地形は地球-月系が過去に受けた隕石重爆撃の履歴そのものである。すなわち、太陽系がその昔どのような状況であったかということを知る上で、月は重要な情報を持っていることも月が重用視される理由の一つだ。

太陽系の初期において、彗星の地球への落下は、非常に重要な意味を持つ。たとえば、希ガスの存在量パターンや重水素-水素比、炭素-窒素比などから考えて、地球集積後期においては、彗星（落下）が地球の惑星としての進化に大きな影響を与えたとも考えられている[1,2]。また、ハレー彗星の探査により彗星に有機物が存在している可能性も示唆されている[3]。大量の彗星が地球の形成初期に降ってきた、ということはこれらの有機物も地球に大量に供給されたということの意味する。更に、彗星、隕石の落下は、地球の生命の誕生、生物の栄枯盛衰にも大きくかかわってきたであろうことは、言うまでもない。月には、地球に降ってきた隕石や彗星の足跡が残されている。月を調べることで、いつどれだけの隕石や彗星の落下があったのかの手がかりが得られ、ひいては地球の生命の誕生や進化或いは絶滅、そしてこれからの行く末を研究するのに重要な情報になるであろう。地球には大気があり海洋があり、そしてプレートの動きにより、表層はすでに過去のものとは大きくこ異なってしまう。過去の情報の多くは、地球においては失われている。それに対して、月こそは、太陽系の過去のそして未来の情報の宝庫である。月を調べる理由はそこにある。

月の永久陰に存在が示唆されている氷[4]は、地球の生命の起源にも係わる鍵を握っているかも知れない。月の極の氷の起源として、以下のような説がある。「月には多量の水を含む彗星が降ってくる。彗星は月に衝突してその水の大半を失うが、ある割合で水が残る。これらの水は分子となり、表面で熱せられ、温度に見合った速度分布を持って月の表面を飛び跳ねるようにして移動する。その多くはやがて宇宙空間へと飛び去るが、月の極に辿り着くものもある。月の極にあるクレーターの底には、日が当たらない箇所（永久陰）がある。永久陰は極低温であり、そこに入り込んだ水分子はトラップされて（移動距離が殆どなくなって）しまう。これが月の極の水の起源である。」[5,6] 月の極の氷

がこのようにして供給されたのだとしたら、そこには、水素、酸素以外にも彗星によってもたらされた炭素や窒素も供給されてしかるべきである。供給された炭素や窒素は、水の氷と共存しているが、そこには紫外線や宇宙線が降り注いでいる。紫外線や宇宙線により氷の中で有機物の生成消滅が繰り返されるかも知れない。もし、有機物が成長していれば、それがあつた地球に降ってきて、、、というようなこともあつたかもしれない。月の極の水探査はいそがれるべきであろう。(ただし、ここで、月の極の水の氷説について、注意を述べておきたい。まず、月の極に水の氷が見つかった、というのは正確ではない。正確には、月の極に水素だと思われる原子レベルの濃集が米国の上げたルナープロスペクター衛星の中性子観測で見つかったのである[4]。人によっては、水素が濃集しているから、それはきっと水であろう、というのである。しかし、先に述べたような飛び跳ねて月の極に到達するといつても、とびはねているうちに、太陽紫外線により壊されてしまう確率が高く、実際極にたどり着けるのか甚だ疑問である。更に、月の秤動を考えると、永久陰にもいづれ太陽光が当たることになる。今の永久陰はもつて10億年と言われる[5]。最近の10億年は、明らかに彗星衝突も減っている。量的には苦しいかも知れない。最近、極に見つかったのは水素であることで説明する説が出された[7]。地球の磁気圏に捉えられた水素が、磁力線を往復運動しているとき磁気圏尾部に入り込んできたときに極に「打ち込まれた」とする説である。量的にも適うらしく、個人的には水素説が説得力あると感じている。ただし、実は太陽に最も近い惑星である水星の極にもレーダー観測から水の氷の存在が示唆されている[8]。こちらは、地球からのレーダー観測によるもので、かなり信頼性が高い。とすると、こちらをどう説明したものか。やはり月にも水の氷が存在しているのかも知れない。)

月と生命の起源と進化についてもう一点述べておこう。近い将来、月は探査の対象から、人類の活動の拠点へと変貌するであろう。問題は、月面環境という過酷な環境で人類が恒久的に活動をしていけるか、ということである。しかし、どうやら月には素晴らしい天然の基地候補が用意されているようなのである。それは、溶岩チューブと呼ばれる穴である。溶岩チューブは、火山から噴出した溶岩が、穴を作って流れていくことにより出来るもので、地球でも見られる。日本では、たとえば富士山の麓の青木ヶ原に多数存在する。この溶岩チューブ内は、隕石や宇宙線から、機器や人を守ってくれるであろう。太陽の熱変動も中には到達せず、数百度も変動

する表面に比べて、摂氏0度付近(Haruyama et al. in prep.)ときわめて穏やかである。そして、チューブの底は溶岩が流れ削るため非常に滑らかである。しかも、このチューブは大きいもので、横幅数百m、高さ数十mにも及ぶ[9]。これだけの安全で巨大な空間が天然に用意されているのである。人類が月へ進出するための障害が一気に解消される可能性がある。SELENEでは高解像度カメラで、その入り口を発見しようと考えている。また低高度からのレーダ探査ができれば、チューブを発見できるかも知れない[9]。月への進出、それは、人類、もつといえは生命の新たな「進化」につながるであろう。月探査は、人類の進化に密接に結びついているのである。

7. 最後に

私は、宇宙には生命の起源と進化の謎を解く鍵がたくさんつまっていると思っている。それは純粋に過去を知り、何故我々はここにいるのか、ということをあきらかにするだけでなく、更に進んで、我々が如何に進化するか、或いは如何に自らを進化させるべきか、という問いに対する答えを得るための鍵でもある。私は、月探査に携わるまで、月ほどつまらない研究対象はないと、正直考えていた(水谷先生、すみません)。しかし、月探査を通して、月の魅力は彗星、火星に勝るとも劣らないと思うようになってきた。月へは、H-2Aを使えば5日で探査機を到達させられる。とにかくこんなにも身近に未知の扉を開く鍵をたくさん持って我々を待っている天体が存在するのである。月探査は、決して月惑星物理学や月惑星地質学の為だけにあるのではない。少なくとも私は月探査を通して、生命の起源と進化の解明、そして人類の進化に役立てるようなデータを出し研究したいと望んでいる。

謝辞：今回の講演を通して、生命の起源と進化学会の方々に月探査の現状と将来を知っていただき、いつかともに月探査、惑星探査を介して生命の偉大な謎を解き明かせる日がくることをのぞんでいます。本講演会にご招待いただきましたこと、事務局の三田肇氏らに感謝いたします。

References

1. Owen, T.C. and Bar-Nun, A. Comets, Impacts, and Atmospheres. ICARUS 116, 215-226 (1995)
2. Meier, R. and Owen, T.C. Cometary Deuterium. in Composition and Origin of Cometary Materials. Space Science Review 90,

- 33-43 (1999)
3. Kissel, J., et al. Composition of comet Halley dust particles from Giotto observations. *Nature* 321, 336-337 (1986)
 4. Feldman, W.C., et al.. Fluxes of Fast and Epithermal Neutrons from Lunar Prospector: Evidence for Water Ice at the Lunar Poles. *Science* 281, 1496-1500 (1998)
 5. Arnold, J.R. Ice in the Lunar Polar Regions. *J.G.R.* 84, No.B10, 5659-5668 (1979)
 6. Butler, B.J. The migration of volatiles on the surfaces of Mercury and the Moon. *J.G.R.* 102, No.E8, 19283-19291 (1997)
 7. Starukhina, L.V. and Shkuratov, Y.G. The Lunar Poles: Water Ice or Chemically Trapped Hydrogen? *ICARUS* 147(2), 585-587 (2000)
 8. Butler, B.J. and Muhleman, D.O. Mercury:Full-Disk Radar Images and the Detection and Stability of Ice at the North Pole. *J.G.R.* 98, No.E8, 15003-15023 (1993)
 9. Miyamoto, H. et al. A Study of the Ground Penetrating Radar for Future Lunar Landing Exploration. *ISTS 2002-k-08* (2002)