

特集 月探査・利用における化学工学への期待

運用が終了した「かぐや」における技術開発実績や科学成果、プリプロジェクトとして検討が進められているSELENE-2、さらに続く月探査の方向性に関する特集を企画した。将来月探査については、宇宙開発委員会計画部会、宇宙基本計画、宇宙開発戦略本部「月探査に関する懇談会」などでその方向性の指針が示されており、これを参考して月探査の工学的側面を主体とした特集である。

月探査は地球の誕生と進化の謎を解くばかりでなく、過酷な宇宙環境に挑戦するための先端的なロボット技術や有人宇宙技術などの研究開発は、新しい技術のブレークスルーをもたらす。そこで獲得・蓄積された技術は、将来に亘る我が国の自立的な宇宙開発利用活動を支えることが期待できる。

(編集担当：渡辺隆行)†

月探査計画の動向と必要な技術

橋本 樹明

1. はじめに

月は、地球から最も近い天体であり、目視でも満ち欠けの様子や表面の模様などは見ることができ、古来から人々の興味や信仰の対象であった。また、望遠鏡を使用すれば、クレータなどの地形まで見るができるが、月が地球を回る公転周期と自転周期が一致しているため、地球からは常に同じ面(表側)が見えるため、その裏側は謎に包まれていた。人類が探査機を打ち上げられるようになり、裏側の観測がおこなわれると、いわゆる「海」と呼ばれる平原が広がっている表側とは対照的に、裏側は高地やクレータの多い険しい地形であることがわかった。

月は、好奇心の対象のみではなく、惑星科学の観点でも極めて重要である。月がどうやってできたのかは完全には解明されていないが、現在最も有力な説は、地球に火星サ

イズの天体が衝突し、その破砕物が集積してできたとされている¹⁾。月と地球がどういう物質でできているかを知ることができれば、太陽系形成直後の地球近傍での物質分布を推定することが可能であり、惑星形成論の裏付けをすることが可能であろう。また、月は大気が無く、地殻活動も比較的早く収まっているため、隕石衝突や太陽風が吹き付けた歴史を留めている。地球上では失われてしまった、太陽系環境の歴史を見ることが出来る。つまり、月と地球は共進化をしており、月を知ることは地球の誕生と進化を知ることにつながる。地球生命の起源についても、隕石衝突が大きな役割を果たしているとも言われており、月に落下した隕石とその年代を調べることは重要な科学テーマである²⁾。

現在、国際宇宙ステーションなど地球周回軌道上では、人類が定常的な活動を続けるようになった。次の活動の舞台は月であるというのが自然な流れであり、実際、アポロ計画では、12人の宇宙飛行士が月面に到達している。これからの月探査では、単に月との往復をおこなうのみでなく、人類が月面に長期に滞在して、詳細な観測をおこなったり将来の火星探査のための練習をおこなうことが考えられている。

本稿では、世界の月探査計画の動向と、そのために必要な技術について概説する。



Trends of Moon Exploration and its Required Technologies

Tatsuaki HASHIMOTO

1990年 東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了

現在 (独)宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 宇宙機応用工学研究系 研究主幹 教授

連絡先：〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台3-1-1

E-mail hashimoto.tatsuaki@jaxa.jp

2012年4月11日受理

† Watanabe, T. 平成23, 24年度化工誌編集委員(7号特集主査) 東京工業大学大学院総合理工学研究科

2. 月探査の世界動向

1960年代～1970年代は、米国とソ連が国の威信をかけて多くの無人・有人の月探査がおこなわれ、大きな科学的成果が得られたが、その後しばらくは他の天体探査に目標が移り、多額の費用がかかる月探査はおこなわれなかった。1990年代になると、小型、低コストの探査機でも月に行けるようになり、無人の周回機による探査がおこなわれるようになった。米国のクレメンタイン探査機やルナ・プロスペクター探査機は、最新鋭の観測装置を搭載して月面の詳細観測、特に元素分布を求めた。その結果、月面は多様であり、米国のアポロ計画やソ連のルナ計画（無人サンプルリターン）が持ち帰ったサンプルの採取地点は月面上の限られた地域からのものであることがわかった。我が国では、1990年に月周回軌道投入技術、月の重力を利用した軌道変更技術（スウィングバイ）等の習得のため、工学実験探査機「ひてん」が打ち上げられた。2007年には13の観測機器と2つの子衛星を搭載した月周回衛星「かぐや」が打ち上げられ、アポロ探査以来の本格的な観測を実施した³⁾。

しかしながら周回軌道からの観測では、月物質の詳細や月の内部構造を知ることは難しい。次世代の月探査は、着陸して表面で観測をおこない、あるいは岩石サンプルを地球に持ち帰ることが期待されている。中国は、2013年に嫦娥3号を月面に着陸する計画がある。また、ロシアとインドが共同で月面着陸探査の計画をしている。我が国では、「かぐや」後継機であるSELENE-2によって、月面に着陸し、探査ロボット（ローバ）による移動表面探査をおこない、越夜システムにより2週間の夜を越して観測を続けることを2010年代後半に実施するべく、研究開発を続けている（図1）⁴⁾。さらにSELENE-3では、月からの無人サンプルリターンも検討されている。

有人月探査に関しては、2004年に米国ブッシュ大統領が、将来の火星有人探査を目指しつつ再び人類を月に送り込むコンステレーション計画を発表し、国際協力で大規模な月面基地を建設すべく世界各国へ参加の呼びかけがなされた。これを受けて、14の宇宙機関により国際宇宙探査を議論するISECG（International Space Exploration Coordination Group）が組織され、検討が進められている⁵⁾。我が国も、宇宙航空研究開発機構（JAXA）がISECGに主導的に参加し（本稿執筆時点では、JAXAが議長機関）、国内でも無人探査によるSELENEシリーズからどのように有人探査につなげていくかの検討が政府レベルでもおこなわれている⁶⁾。2010年、米国オバマ大統領はコンステレーション計画を中止し、将来の有人火星探査に至るまでの道筋を柔軟に検討することとした。ISECGでも「次の目的地」について議論が続けられ、2011



図1 SELENE-2表面探査の想像図

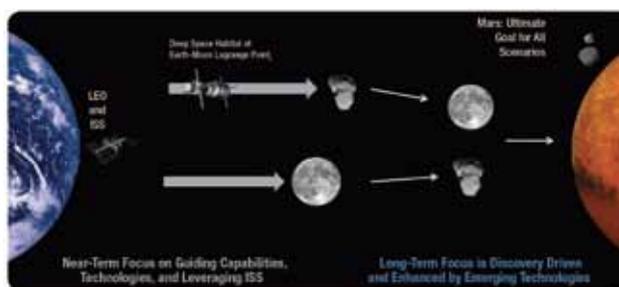


図2 ISECGのGlobal Exploration Roadmap⁵⁾

年に発表されたロードマップでは、「次は月」と「次は小惑星」の2つのオプションが示されている（図2）。コンステレーション計画に比べると規模は小さくなってきたが、有人月探査は依然、次の目的地として有力であり、そのための技術開発は急がれるところである。

3. 月面探査に必要な技術

3.1 月面着陸・離陸技術

月には、地球の1/6の大きさではあるが重力が存在する。このため、軟着陸したり離陸したりするためには、重力に抗して推力を出し続ける必要がある。すなわち、大きな推力で燃費が良く、精密な推力制御が可能なエンジンが必要となる。現在のところ、単位質量あたりの加速量（比推力という）が最も大きな燃料・酸化剤は、液体水素と液体酸素の組み合わせであり、我が国のH2AロケットやNASAのスペースシャトルにも使われている。しかしながら、燃料・酸化剤ともに極低温に冷却する必要があり、到達まで数日かかる月探査では、燃料・酸化剤の蒸発をいかに最小減とするかが課題である。長期にわたる探査では、常温で保存できるヒドラジン（N2H4）あるいはモノメチルヒドラジン（MMH）を燃料とし、四酸化二窒素（NTO）を酸化剤とする組み合わせがよく使われている。将来的には惑星探査の帰り

の燃料(メタンなど)を現地調達し、これを燃料としようという研究もおこなわれている。燃料や酸化剤用のタンクや、液体と加圧ガスを分離する膜は軽量で信頼性が高いものが必要である。一般に反応性の高い液体を、どのような膜で遮断すべきか、化学的研究が重要となっている。

安全に高精度に着陸するためには、レーザ高度計、電波高度速度計、航法カメラ、障害物検知センサなどの誘導制御機器の開発も必要である⁷⁾。また着陸時の衝撃を吸収する着陸脚も重要である。アポロ探査機では、ハニカム構造のアルミをクラッシュさせることにより衝撃吸収をしていたが、最近では形状記憶合金や発泡アルミニウムを用いることも提案されている。

3.2 月面滞在技術

月面では昼が2週間、夜が2週間続くので、夜間のエネルギー確保は重要な課題である。これまでの米露の月探査では、原子力電源(核分裂による熱を電気エネルギーに変換)あるいは原子力熱源(核分裂による熱をそのまま利用)が利用されてきたが、放射性物質を積んだ探査機を打ち上げることは賛否両論ある。そこで、太陽電池と2次電池のみで越夜をする技術について研究がなされている。詳細は本特集の別稿に譲るが、数W程度の観測機器であれば、徹底した断熱をおこなうことにより数十kgのリチウムイオン電池を用いて2週間の越夜が可能である目処は立っている。更に大規模なシステムの場合は、再生型燃料電池など、蓄電エネルギー密度の高いデバイスが必要となろう。

人間が月面あるいは惑星間空間に長期間滞在するためには、放射線防御の技術や水、空気、食料の循環再利用技術も重要となっている。国際宇宙ステーションが飛翔している高度約400kmの軌道は地球磁気圏の内側であるため、放射線のシールド効果があるが、その外側での人間に対する放射線環境は1桁大きいとも言われている。まずは正確な放射線環境の測定が重要であるが、どのように防御するかの研究も必要となっている。例えば、月面に洞窟を作り、月の砂による遮蔽効果を期待する検討もおこなわれている。

人間が生活するためには、大量の水や空気が必要となる。これを全て地上から運ぶことは困難であり、再生利用が必須である。現在の国際宇宙ステーションでもある程度の再利用はおこなわれているが、さらに効率を高める必要がある。酸素は月の土壤中に酸化剤として存在するので、これを抽出する研究もおこなわれている。また長期的には、食料も自給できることが望ましい。太陽エネルギーを用いて植物を育て、それを食料として動物を育て、排泄物を肥料として植物を育てるような閉鎖サイクルについての研究もなされている。

3.3 月面移動探査技術

月や火星の探査では、ローバと呼ばれる自動車型のロボットが用いられている。無人探査の場合は地上からの遠隔操縦あるいはローバの自律機能により移動し、アポロ探査の場合は宇宙飛行士が乗車して運転した。ローバも探査機同様の宇宙機であり、電力、通信、誘導制御、熱制御などのサブシステムを有するが、表面移動特有の問題として表面の地形や土壌にあった走行機構が必要であり、また機構部の大敵である砂塵からの防御が重要となっている。そのためには、土壌と機械とのインタラクション、すなわちテラメカニクスの研究も重要となっている⁸⁾。

3.4 月面資源利用技術

月にはウラン、トリウム、ヘリウム3などの稀少物質が存在すると言われており、将来的にはこれらの資源を地球に運び利用することも考えられているが、地球と天体間の輸送コストを考えると、そう近い将来にはあり得ないと思われる。一方で、探査活動で使用する材料を現地で調達する、いわゆるその場資源利用(ISRU: In Situ Resource Utilization)はもう少し現実的である。地上から大量の物質を運ぶコストと、現地にて採掘、精錬、加工するコストとの比較となり、輸送コストが大きな比率を占める現状では、経済性が出る可能性もある。例えば月面活動に必要な水や酸素を月の土壌から抽出する、月の砂をセメント代わりに構造物建設に使用するなどの研究がおこなわれている。

4. おわりに

本稿では、最近の月探査計画の動向と、その実現に必要な技術を概説した。各技術の詳細は本特集号の別稿を参照いただきたい。月探査を実現するためには、様々な技術が必要である。特に物質科学、化学工学の役割は重要であり、当該分野の今後の発展が期待される。

- 1) Dpudis, P.D., 水谷仁訳: 月の科学, シュプリンガー・フェアラーク東京(2000)
- 2) 渡辺潤一: 最新・月の科学, NHKブックス(2008)
- 3) 滝澤悦貞, 佐々木進, 加藤学: 日本航空宇宙学会誌, **56**(656), 223-228(2008)
- 4) 橋本樹明, 星野健, 田中智, 大槻真嗣: 日本航空宇宙学会誌, **57**(661), 54-57(2009)
- 5) SECG ホームページ: <http://www.globalspaceexploration.org/>
- 6) 我が国の月探査戦略(月探査に関する懇談会) <http://www.kantei.go.jp/jp/singi/utyuu/tukitansa/100730houkokusho.pdf>
- 7) Hashimoto, T.: 27th International Symposium on Spacecraft Technology and Science, ISTS2009-o-4-04v, Tsukuba, Japan(2009)
- 8) Wakabayashi, S., H. Sato and S. Nishida: *Journal of Terramechanics*, **46**(3), 105-114(2009)