

Title	1.4.1 アポロの盲点と月探査の新たなプレイヤー
Author(s)	並木, 則行
Citation	月サイエンスブック 第一部. 2021, p. 3-8
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/83224
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

1.4 再び月へ: 「かぐや」とそのライバルによる全球月マッピング

1.4.1 アポロの盲点と月探査の新たなプレイヤー [並木則行]

アポロ計画以前の月探査は旧ソビエト連邦と米国の競争であった。図 1-1 に両国が 1950 年代末からの 20 年間に計画した無人探査を示す。当初は旧ソビエト連邦が月探査を先行しており、米国の月探査は失敗の連続であった。1964 年 7 月にレインジャー 7 号のハードランディングに成功するまで、11 機の失敗があった。しかし、その後はルナ・オービターによる月周回とサーベイヤーによるソフトランディングに成功し、アポロ計画による人類月着陸(1969 年 7 月-72 年 12 月)という成功へと導いている。両国の激しい宇宙開発競争の結果、米国が最初の人類月着陸の栄誉を手に入れたのは周知の通りである (Spudis 1996; 長谷部 et al. 2013)。

で持ち帰られた試料からは月の起源と進化に関わる数多の知見が導き出された。巨大衝突による月の形成、マグマオーシャン、斜長岩地殻の形成、隕石の重爆撃 (Bottke and Norman 2017)、玄武岩溶岩の噴火など、まさに太陽系科学の主要なアイデアが月探査から生まれたと言える。しかしながら、後述するように、その知見はアポロ着陸地点の地域性(表側且つ赤道域)に強く拘束された、偏った情報であった。

表 1-1 アポロ計画の要約

	周回/着陸地点	科学観測	科学成果
8号	10周回/帰還	高解像度画像	
10号	周回/帰還	高解像度画像	
11号	静かの海	地震計, レーザー 反射板	稀な月震を観測.
12号	嵐の大洋	ALSEP (Apollo Lunar Surface Experiment Package)	表層から 40 cm までのコア回収.
14号	フラ・マウロ	ALSEP	フラ・マウロ層がインブリウム盆地からの放出物からなることを発見.
15号	インブリウム 盆地	ALSEP/小型衛星	高知-海境界, ハドリー峡谷・アペニン山脈の調査. 周回機から遠隔観測で化学組成の地図を作成.
16号	デカルト高地	ALSEP/小型衛星	衝突現象こそ月の地質の主要因であることを確認. 周回機から遠隔観測で化学組成の地図を作成.
17号	静かの海	ALSEP	月面車による 30 km の踏査, 120 kg のサンプル回収. 周回機から遠隔観測で各種の地図を作成.

アポロ計画の成果は持ち帰られたサンプルだけではない。月周回からのステレオカメラ撮像やレーザー高度測定は月の地質、形状、地形の詳細情報をもたらした。また、X線、ガンマ線測定から化学組成が調べられて、着陸地点の確認された化学的情報がどれほどの広がりを持つかを明らかにした。加えて、アポロ 15、16号では月周回機から小型衛星を放出して、月の磁場・重力測定を行い、グローバルな双極子磁場の欠如と、詳細な重力場の構造を明らかにした。ただし、アポロ周回機は赤道上空を回る軌道であったため、遠隔観測のデータは赤道域にのみ限られている。もう一つのアポロ計画の盲点である。然る後に、世界中の惑星科学者の興味は火星、金星から木星、土

星、水星、小惑星へと拡大し続け、月の科学と探査は役目を終えたかのように思われた。

20年間の空白の後に1994年に米国が打ち上げたクレメンタイン探査機は、高分解能カメラ、紫外線・可視光カメラ、近赤外線カメラ、長赤外線カメラ、荷電粒子センサー、レーザー距離計、レーダーを搭載して、極周回軌道から全球マッピングを行った。楕円軌道であったため、高分解能の科学観測は高緯度地域に限られたが、クレメンタイン探査機は南極エイトケン盆地を再発見し (Zuber et al. 1994)、全球のスペクトルマップを作成して、鉱物 (FeO, TiO₂) の分布 (Lucey et al. 1998a) と宇宙風化の定量化 (Lucey et al. 2000) を成し遂げた。

次いで、1998年1月に米国から打ち上げられたルナ・プロスペクター探査機は中性子線分光計、ガンマ線分光計、アルファ線分光計、磁力計・電子反射計、ドップラー重力計測器を搭載して、月の水資源の探査を行った。その結果ルナ・プロスペクター探査機の調査は極域に約30億トンの水が存在する可能性を示唆した (Feldman et al. 1998)。

Jolliff et al. (2000) はクレメンタイン探査機とルナ・プロスペクター探査機の科学成果をまとめ、月面が Procellarum KREEP Terrain (PKT), Feldspathic Highland Terrain (FHT), 南極エイトケン盆地 (SPA) の3地域に大別されることを明らかにした。その上で、アポロ着陸地点は PKT と FHT の境界に分布していることを指摘した。それまでは、アポロ試料に含まれる角礫岩には非常に遠方から衝突によって弾き飛ばされてきた岩石破片が含まれており、月表層は水平方向に良く攪拌されて混合が進んでいると考えられていた。つまり、アポロ試料は月全球の表層物質を平均的に代表する試料であると考えられていたのである。クレメンタイン探査機とルナ・プロスペクター探査機の全球スペクトルデータは月表層が不均質であることを明らかにし、アポロ試料が PKT 物質に強く偏った地域性、特殊性を持つことを示した (Giguere et al. 2000)。

これに加えて、月隕石の詳細な化学分析が進むにつれて、アポロ試料には見られなかった月の多様性や複雑性が明らかになってきた (Arai et al. 2008)。アポロ計画で持ち帰られた試料は約400 kg であるのに対して、月隕石は100個程度、合計55 kg に過ぎない。しかし、アポロ試料の多数を占める PKT 由来の隕石は全体の15%であり、全球から偏りのない集合である。また、隕石試料の中には、由来が同じもの(母天体上の同じ衝突現象で射出された破片)が別々の隕石として地球に飛来していることも多いが、月隕石に関して少なくとも56箇所の別々の地点から地球に到達したと考えられている。その中でも、ドーフアー 489 は月の裏側からの放出破片と考えられており (Takeda et al. 2006)、アポロ試料とリモートセンシング観測の間を繋ぐ貴重なサンプルとなっている。また、年代的にもアポロ試料が38 ~ 32億年前に集中しているのに対して、月隕石は43.5 ~ 28.7億年前と幅を持っている。従って現在では、限定的な地

域から回収されたアポロ試料だけから、月の起源と進化を語ることの危険性が広く認識されるようになっていく。

月表層の物質の組成は一様ではないが、内部はどうだろうか？表 1-1 の ALSEP には月震計、ダスト検出器、レーザー反射鏡、太陽風組成分析器、太陽風スペクトロメータ、熱流量計、磁力計、超熱的イオン検出器、冷陰極イオンゲージ、荷電粒子環境計測器、重力計、衝突放出物・微小隕石検出器、大気組成分析器、宇宙線検出器、中性子線プローブ、表面電子特性検出器が搭載された

(<https://www.hq.nasa.gov/alsj/HamishALSEP.html>)。中でも、地震計は 11, 12, 14, 15, 16 号によって設置され、能動観測やプロファイル観測を含めて通算 8 年 10 ヶ月にわたり、12,558 回の地震を記録した。またレーザー反射鏡は、月と地球の距離変化から物理秤動を精密に測定し、月回転が減速していることを明らかにした (Williams et al. 2001, 2006)。これらの観測から推測される月内部モデルでは、月のマントル-コア境界付近には低粘性・高密度の減衰源があり、中心には半径 400 km 以下のコアがあると考えられる。

しかし、ここでもアポロ計画の地域性が限界となっている。アポロの着陸地点が表側の中低緯度に集まっているために、地震計のネットワークを全球に展開することができなかった。このため、月震データからは 1000 km 以上深い領域については、地震波の速度構造が分からない。他方でレーザー測距は、深部では運動エネルギーが減衰するプロセスが働いていることを明らかにしている。また、月内部の不均一性を示唆するデータがある。月震データの再解析により、月内部構造の理解は大きく進んだが、月内部構造については大きな不確定性が残されている。

クレメンタイン探査機、ルナ・プロスペクター探査機以降は月探査の国際化と多様化が進んだ。2003 年 9 月にはヨーロッパ宇宙機関が SMART-1、2007 年 9 月には日本が「かぐや」(セレーネ)、同年 10 月には中国が嫦娥 1 号、2009 年 10 月にはインドがチャンドラヤーン 1 号をそれぞれ打ち上げている。さらに中国はその後嫦娥 2, 3, 4 号と着々と月探査を継続している。他方、米国は少し送れて 2009 年 6 月にルナ・リコネッサンス・オービター (LRO)、2011 年にグレイル、2013 年にラディーを次々と打ち上げた。これらの探査機が行った科学観測は周回軌道からの遠隔観測による全球マッピングがほとんどである。もちろん、それぞれの科学観測は貴重な月の起源と進化に関する貴重な科学データを提供しているが、月隕石の射出地点を推定し、隕石分析結果を特定地域の地殻構造と結びつけるには至っていない。そのギャップを埋めるためには、将来の月着陸探査が必須である。

2013 年から始まった国際月探査は、そのような着陸探査の機会をもたらすものと、科学的に大きく期待される (International Space Exploration Coordination Group 2018)。しかしながら、アポロ計画と同じ轍を踏まないよう、われわれ月科学研究者は注意する必要がある。アポロ計画までの米国の月探査は旧ソビエト連邦との競争に勝つことが主

目的であったため、アポロ試料は地域的に偏った情報をもたらすことになった。同様に、2020年台から始まるであろう国際月探査 (International Space Exploration Coordination Group 2018) では資源開発が最大の目的になると考えられ、着陸地点は極域から中緯度域に限定されている。科学的には全球的な観測ネットワークを構築する事が最も重要であり、各国がことごとく極域を目指して競争する状況は甚だしく不都合である。科学的観点から、将来月探査の戦略を明確化して日本と世界の宇宙探査政策に訴えて行く必要がある (地球電磁気・地球惑星圏学会 2018; 日本惑星科学会 2018)。