The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	3.5 課題解決のための探査項目とその実現性
Author(s)	川村, 太一; 長岡, 央; 大竹, 真紀子
Citation	月サイエンスブック 第一部. 2021, p. 82-87
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/83238
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

3.5 課題解決のための探査項目とその実現性 [川村太一，長岡央，大竹真紀子]

(a) 内部構造探査

マグマオーシャンを含めた月の進化過程を理解する上で必要な探査としてここでは主に内部構造探査に関連した探査について議論する．月のグローバルな内部構造探査については 4 章で議論されているためここでは探査対象として 1. 地殻内の層構造，2. 地殻の水平構造，に絞って議論する．マントル内の不連続境界や核の探査など重要な課題は他にも存在するがこれらについては 4 章で詳細に議論されているためここでは割愛する．

地殻内の層構造を理解することは地殻のマグマオーシャンからの晶出過程を理解する上で重要な情報となる．近年の探査により，PAN の存在が示唆されるなど (Ohtake et al. 2009)，地殻内の層構造，組成変化に注目が集まっている．このような組成の変化が地殻内の層状構造を構成している場合，その情報が地震探査で明らかにできると考えられる．地殻内の層状構造を把握するためには地殻-マントル境界面(深さ 40-60 km)までの詳細構造(数 km 分解能)を明らかにする必要がある．詳細構造の理解に必要な探査の候補としてあげられるのが，小型アレイを用いたアクティブ・パッシブ地震探査である．アクティブ探査では震源位置，発振時間が既知の人工震源を用い，走時解析によって地殻内の構造を詳細に調査することを目指す．これに対し，パッシブ探査では月内部発生および隕石衝突などに起因する自然月震を対象とし，走時解析や不連続境界面での反射波や変換波の検出することで地殻内構造を明らかにすることができる．

地殻厚を含めた地殻の構造の解明に必要な地震探査には 1. 短震央距離のイベントを用いた詳細走時解析，2. 不連続境界面からの反射波の検出，3. レシーバー関数解析による不連続面の探査が挙げられる．これらの探査手法はアポロミッションでも実施されたが，十分な S/N，観測波長帯域を有しているとは言えず，さらに月震計の校正の精度にも課題があり，現在も議論が続けられている．

核-マントルなどの深部構造の探査には月の半径程度の側線距離を有する全球的な観測が不可欠であるが，ここで目的としている比較的浅部の詳細構造を探査するには，着陸点近郊に数 100-1000 m のアレーを設置し，局地的な構造を高分解能で探査する方が適している．このような手法は地球でも用いられており，一般的な地震やノイズも含む微動を含む自然地震及び人工震源を用いた両方で実績がある．

走時解析を用いて浅部構造の探査する場合，100-数 100 km の短い震央距離での観測が重要になってくる．アポロの観測データではこのようなデータが十分には得られなかったため，走時解析から地殻厚を精密に決定することは困難であった．観測に必要な震央距離のイベントを自然地震で獲得するにはイベントを”待つ”必要があり，確実性に欠ける．もっとも適した方法は人工震源を用いたアクティブ実験を行うことである．アポロの場合は使用済みロケットの一部を軌道上から落下させる，爆薬を用いた人工震源を用いる，着陸機の着陸時の衝撃を用いる，などの方法が行われた．どのような人工震源を用いるかについては，要求深さ，精度，搭載可能性などを踏まえて今後議論が必要である．地殻境界まで観測するにはサターン IVB ロケットの落下のような大規模な震源が

必要になると考えられる．一方，比較的浅部の地殻内構造を探査するには着陸機に搭載可能な小型の人工震源でも十分だと考えられる．例えば質量に対する加振エネルギーの点ではアポロ同様の爆発震源が最も効率が良い．しかし単発の震源よりも複数回の実験が可能な人工震源を用いる事で高精度な観測が期待される．例えば地球で実現例のある ACROSS (Accurately Controlled Routinely Operated Signal System) 型の震源は比較的小型で繰り返し，あらかじめ設定した波形を加振することが可能である．このような制御型の震源を利用することは 1. 相関法を用いることで S/N が低いデータでも反射波の探索が可能となる，2. スタッキングを行うことで S/N の低いデータから微弱なシグナルを抽出することができるなど限られたリソースの中での探査に適していると考えられる．アポロの探査では地殻内の不連続境界面からの明確な反射波を検出することはできなかった．これは境界面が存在しない可能性も考えられるがアポロの月震計では微小な反射波を検出できなかった可能性が考えられる．アクロス震源を用いた繰り返し震源波の観測で不連続層の反射波を検知する可能性は十分にある．

自然地震を用いる場合も，小型アレーで観測を行うことで，地球でもよく用いられる相関法などを用いて，表層の構造を探査することが可能となる．一般的にはアポロミッションでも実施されたと同様に数 100 m おきに 3-4 台程度の地震計を設置してアレーを構築するが，近年の地球の物理探査では数 m 間隔の超小型アレーの観測技術も発展し超小型アレーでも同様の観測データが得られるようになっておりリソースの限られた惑星探査への応用も検討が始まっている．理想的には小型アレーを複数着陸点で実施し，それぞれの着陸点の詳細な構造探査を実施することで地殻の不均質性の理解が深める上で重要である．

アポロの月震計で地殻内の明確な不連続境界面からの反射波が検出されなかった理由としては，前述の月震計の性能の問題以外に，レゴリス層の強散乱によるコーダ波で，地震波形の立ち上がりや反射波や屈折波などの後続波の S/N が下がってしまっている可能性も指摘されている．地殻内の構造を探査するためには地震計の感度の向上は不可欠だが，散乱成分を除去するための方策を検討する必要がある．それには観測波長を長くする(=低周波で観測する)方法が考えられる．Takeuchi et al. (2011) によれば 0.1 Hz 程度まで観測周波数を拡張できれば散乱波の影響を抑え，反射波などの後続波の観測が可能になると指摘している．散乱波によるコーダのメカニズム解明はこの点に限らず，月震の観測データを用いた研究全般に関係する課題であり，将来探査に向けて十分に検討される必要がある．

地殻の水平構造を明らかにするためにはアポロ着陸地点とは異なる地質構造での地震探査が鍵となる．地殻の水平構造は重力探査によって明らかになったが，重力探査で観測できるのは相対的な地殻厚であり，その結果を実際の地殻厚に変換するためには，アンカーとなる観測値が代表的な地質構造区分で必須である．これまでの多くの研究ではアポロ 12, 14 号地点の地震探査の結果や地殻が最も薄い地点を 0 km とするなどの手法

がとられてきた (e.g., Ishihara et al. 2009; Wieczorek et al. 2013)．現状ではアンカーとなる観測点が月の表側に集中しており, 観測点から離れるほど水平方向の不均質性などにより不定性が大きくなる問題が指摘されている．地震探査の結果を用いる場合，観測点はアポロ着陸点に限られ，そのほとんどが海での観測になる．アポロ 16 号を高地の観測点とみなすことができるが, 海との境界付近であったためアポロの観測点では典型的な地の観測が明らかに不足している. 特に裏側の高地での観測は地殻の水平方向の不均質性，表側地殻と裏側地殻の違いなどを考える上で重要な情報源となる．

裏側の着陸探査はヨーロッパの Farside Lander や中国の嫦娥で検討されており，日本でもペネトレーターを用いた探査が提案されているが実現には至っていない．「かぐや」の子衛星による裏側の重力探査や GRAIL の成果によって月の重力場，特に裏側の重力場の理解は飛躍的に向上した．一方で，アンカーとなる観測点はアポロ以後，改善されていない. 裏側での観測はそのような状態から月の地殻の水平構造や不均質性を理解する鍵となる．この点を進展させるために日本ではこれまで，ペネトレーターを用いたネットワーク観測計画を検討してきた. ペネトレーターは一般的なソフトランダーよりも容易にネットワークの構築が可能であり, 裏側を含めた観測ネットワークの構築における有用性は高い．裏側の着陸探査は難易度も高いがその科学的価値は極めて高く，検討を継続すべきである．

(b) マグマオーシャンの固化過程の端成分である原始地殻，KREEP 物質，マントルの地質探査

LMO の固化による生成物の各端成分について元素組成, 構成鉱物, 晶出年代を取得し，LMO のタイムスケールやマグマ組成の変遷を数値シミュレーション結果と比較することで，その妥当性を検証し，LMO の固化過程を把握することができる．端成分とは，地殻(原始地殻)，KREEP 物質(LMO の最終残液の固化物)，マントルである．これら端成分の露頭が露出している可能性が高い領域は「かぐや」により発見されており，これらの地域への着陸その場観測，もしくはサンプルリターンによる詳細な分析は LMO 固化過程に関する多くの情報をもたらすであろう．

(c) 原始地殻の探査

3.2.3 前半で指摘したように，我々が観測している地殻物質が LMO 由来か，その後の連続的な火成活動(シリアルマグマティズム)由来，角礫岩，のどれに属するものなのか，今後の試料分析研究により十分な切り分けを行うことで, それぞれの起源を議論していく必要がある．この切り分けには，試料の鉱物組織(含有量，粒径，形状)，鉱物組成，微量元素を含めた元素組成の詳細分析, 母マグマ組成の制約のために結晶化年代と同位体組成(初生値など)といった情報を高精度で取得し，議論を深める必要がある．「かぐや」やクレメンタインの観測により，苦鉄質鉱物に富む混合層と斜長石に非常に富む純粋斜長岩 (PAN) 層の存在が確認されており，それぞれの起源深度の違いが指摘されて

いる．起源深度の違いは鉱物の成長度に影響を与えるため，隕石衝突による破砕を受けていないもともとの斜長石の粒径は重要な観測対象である． PAN は LMO を検証する重要な観測ターゲットであり，中央丘に分布する PAN の詳細観測が，将来の重要な探査項目の一つとして挙げられる．中央丘の露頭に分布する PAN の鉱物組織をその場で観測し，地質情報を高精度で得ることで，その起源の解釈がより進展すると期待する．

さらに，PAN の形成過程をより確かに検証するためには，サンプルリターンによる実験室レベルでの詳細分析が必要である．中央丘から PAN の回収を行い，1) 詳細な鉱物組織の観察，2) Mg # と希土類元素の絶対量と存在度パターン(コンドライト濃度で規格化)，3) 結晶化年代，や 4) 同位体の初生値を取得し，PAN を晶出させた母マグマ組成を明らかにすることで, モデルの正当性を検証可能となる. 特に PAN の ε^{142}Nd，ε^{143}Nd 値などは, その岩石がどのような希土類元素組成を持つメルトから晶出したかを示す重要な指標であり，晶出した際の母マグマが地球マントル的であるか，コンドライト的であるかを検証でき (e.g., Nyquist et al. 2006; 三澤 2011; Borg et al. 2011)，地殻形成の要因さらには月の起源に強い制約を与えることが可能となる．

また，「かぐや」による成果から，月裏側の地殻はマグマの分化の指標である Mg#が表側の地殻に比べて高いこと，および液相農集元素である Th の濃度が低いことが示されており，その起源は LMO から最初に固化した地殻の端成分である可能性が指摘されている．月裏側の北半球のクレーター中央丘などにおいて地殻物質を採集・詳細な分析を行い，特に地殻の固化年代や Mg#，液相濃集元素の濃度を知ることは，LMO の固化過程を知る上で重要である．

(d) KREEP 物質の探査

LMO の固化過程の最終段階では, 液相濃集元素が非常に濃集した urKREEP と呼ばれる最終残液が, 地殻とマントルの間に取り残されて層をなしているものとして考えられている．この最終残液は LMO の端成分として，LMO の継続期間や液相濃集元素の最終的な濃集度，K, Th, U の濃集度から導かれる天然放射性元素由来の熱源量，といった非常に重要な情報を持っている．これまでにガンマ線観測から月面において KREEP 元素の濃集する領域が知られており (Procellarum KREEP Terrane; PKT)，PKT の中でも特に KREEP 元素が濃集している領域に着陸して分析を行い，さらにサンプルリターンすることで，その形成年代や化学組成(元素，鉱物，同位体)を明らかにする必要がある．

(e) マントルの探査

マントル組成をターゲットとした場合, 我々はまだ月マントル物質といえる試料を持ち得ていないのが現状である．したがって，まずは「かぐや」により発見されたカンラン石岩体を目指し, その岩体が本当にマントル起源かどうかを検証する直接探査が求められる．「かぐや」が見つけたカンラン石岩体が，マントル起源なのかを明確に判別する必要がある．LMO モデルから推測されるマントルの鉱物相は，大部分がカンラン石，

斜方輝石と予想され，鉱物のモード量が重要な指標となる．一方で，カンラン石を比較的多く含む試料としてトロクトライトがアポロ計画により回収された．トロクトライトは，カンラン石と斜長石によりモードの大部分が占められる．またアポロで回収されたトロクトライトの中には，希土類存在度パターンが負の Eu 異常をもち，重希土類元素が枯渇しているものが存在し，この特徴は成因に KREEP が関与していることを示唆している．また結晶化年代は 44 億年以降と若く，やはり KREEP の関与も示唆される．したがって，LMO から沈積したカンラン石が表層に掘り返される時に年代系のリセットがかかっていなければ，マントル起源のカンラン石はより古い年代を示すはずである．したがって，1) 鉱物のモード比，2) 全岩での Al, Ca 量，3) 希土類元素量とその存在度パターン，4) 結晶化年代や同位体組成などが，両者切り分けの判断材料となる．1) と 2) に関しては観測装置を選定することで，着陸探査によるその場分析でも検証可能である．

月科学において最重要目標の一つが“月のバルク組成”の決定であるが，月の難揮発性元素(Al, Th 等)の量は，文献により異なり解決にはいたっていない (Jolliff et al. 2000; Warren 2005; Taylor et al. 2006)．先行研究ではマントルに取り込まれた難揮発性元素量は，海玄武岩等からの推量でしかなかった．マントル物質の組成情報はマグマオーシャンの初期組成や月バルク組成を知る重要な手がかりである．また揮発性元素の観測においてもカンラン石への探査は注目されている．将来的には，(1) 赤外分光法や SIMS などを複合的に用いた精度, 信頼性の高い揮発性成分の存在形態同定や質量･同位体分析, (2) 初期から末期の LMO を起源とするアポロ試料を体系的に測定, (3) カンラン石とアポロ試料の分析結果を比較検討することによる LMO に関する各種モデルの再検討，この三つの課題を解決することで LMO における揮発性成分の描像が明らかになるであろう．アポロ試料分析により近年報告されている揮発性成分の含有量に対して，現在もっとも受け入れられている月形成に関する仮説である巨大衝突仮説は整合しない．マントル物質中の揮発性成分の詳細な理解は月形成過程に重大な制約を与える．ここではアポロ試料のサンプリングバイアスという点に注意を払う必要がある．月表側の特に液相濃集元素が多く存在する PKT 付近から回収された試料が，本当に月マントル組成を代表しうるかどうかは今後検証を進めるべきである．将来のサンプルリターン計画を構想すると，アポロ計画とは異なる着陸地点から LMO に由来するマントル試料を回収することで LMO の揮発性成分に関する議論をより全球的に行うことが可能となる．最たる目標は，LMO から固化したマントル物質をサンプルリターンすることであり 2 章で述べたマントルとここで紹介した LMO の揮発性成分に関する両方の問題を解決することが期待される．マントル試料の情報は，未だ推測に過ぎなかった我々のマントル組成への知識理解を飛躍的に向上させるものとなるだろう．マントルの組成をダイレクトに得ることは，月バルク組成の 90 ％近くの組成を制約したことになり，月バルク組成を導く上で非常に強い制約を与える．