

「月惑星探査の来たる 10 年」第一段階パネルへの意見書

確認： 本意見書は日本惑星科学会が行う「月惑星探査の来たる 10 年」検討の第一段階においてパネルリーダーが意見取りまとめを行うための資料として提出して頂きます。 **将来の月惑星科学・探査において最も重要になるであろう、第一級の科学**について提案して下さい。意見書の内容は公開討論会などで議論の対象となり、最終報告に反映されます。

締めきり： 2010 年 8 月末日

提出： **電子ファイル**（WordまたはPDF形式）で「月惑星探査の来たる 10 年」事務局（decade_sec@wakusei.jp）に送って下さい。事務局で取りまとめて、パネルリーダーに展開します。

※ 「月惑星探査の来たる 10 年」検討の詳細については、惑星科学会サーバから資料をダウンロードすることができます。

https://www.wakusei.jp/news/announce/2010/2010_03_10/2010_03_09_introduction.pdf

■ 意見提出先パネル（希望するパネルに○をつけて下さい。複数回答可）

- 地球型惑星固体探査パネル
- 地球型惑星大気・磁気圏探査パネル
- 小天体探査パネル
- 木星型惑星・氷衛星・系外惑星探査パネル

■ 提案タイトル

（月震計ネットワークによる月内部構造探査）

■ 代表者の氏名・所属・連絡先（E-mail アドレス、または電話番号と Fax 番号）

（村上英記・高知大学 murakami@kochi-u.ac.jp）

■ 共同提案者の氏名・所属（適宜追加して下さい）

- （竹内 希（東京大学））
- （岡元太郎（東工大））
- （久家慶子（京都大学））
- （石原 靖・荒木英一郎（JAMSTEC））
- （趙大鵬（東北大学））
- （山田功夫（中部大学））
- （蓬田清・小山順二（北海道大学））
- （田中 智・小林直樹・白石浩章・早川雅彦・藤村彰夫・飯島祐一・早川 基（JAXA））

■ 要約（400 字程度）

（地震学的手法を用いて詳細な月内部構造を明らかにすることにより、単に月の起源・分化の過程を解明するためだけでなく月―地球系の共進化を明らかにする上での極めて重要な制約条件を与えることができる。地震学的手法は、物質境界に関して精度の高い情報を与え、構成物質の組成に強い制約を与える。1970 年代に実施されたアポロ計画は、月震の存在を明らかにし、深さ 1000km までの構造を解明した。しかし、観測点配置や観測精度の問題で、精度の良い速度構造とは言えない。月震計ネットワークを構築することでより精度の高い月標準弾性波速度構造モデルを構築する。

）

■ 本意見書の内容（テキストおよび図表）をパネルリーダー並びに事務局がパネル討論と各種報告書へ引用することについて承諾しますか？（いずれかに○）

承諾する 承諾しない

■ （上で「承諾する」に○をされた方のみ）引用時には協力者リストを付加する場合があります。協力者リストに氏名を公表することを希望しますか？（いずれかに○）

希望する 希望しない

月の起源と分化の歴史を明らかにすることは、単に月そのものの解明だけでなく月—地球系の共進化の歴史を明らかにする上で重要である。これらを考えるための基本的な情報として、月の内部構造と構成物質の化学組成を明らかにする必要がある。「かぐや」を含むアポロ計画以降の多くのリモートセンシング的な手法により、表層の化学組成の分布については飛躍的にデータが蓄積されつつある。しかしながら、内部構造に関する探査はアポロ計画以降実施されておらず、月内部についての十分な精度の情報を得ているとは言えない。新たに地震学的手法を用いた内部構造探査を実施し精度の高い内部構造を得ることで、月の原材料物資の推定、ひいては月起源モデルに強い制約を与え、分化状態を解明することが期待できる。

1970年代に実施されたアポロ計画では、月の表側3点を頂点とする一辺が約1100kmの地震計ネットワークを構築し7年以上にわたり地震観測がおこなわれた。その結果、地球以外に地震（以下、月震）が存在することを明らかにした（図1）。そして深さ1000kmまでの地震波速度構造を得ることができた（図2）。

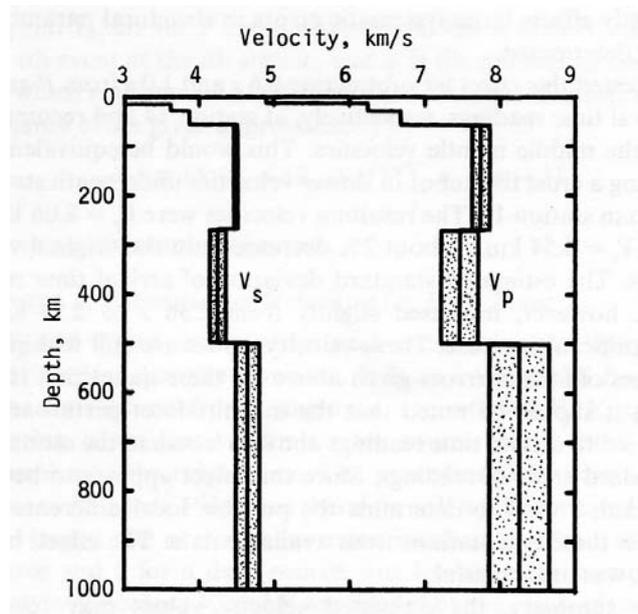
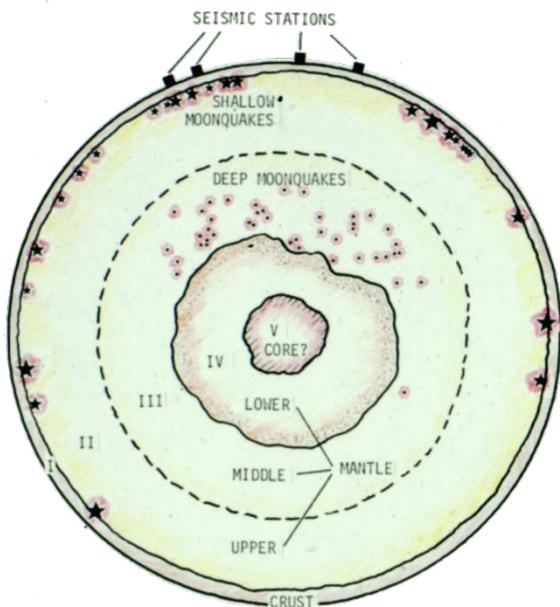


図1. 月内部構造と月震(Nakamura, 1983)

図2. 月内部の速度構造(Nakamura et al., 1982)

しかし、アポロ月震観測（短周期計1成分、長周期計3成分）ではネットワークや地震計の感度と帯域の問題で十分な精度で内部構造が得られているとは言えない。アポロ計画では、月の表側赤道域の狭い範囲にネットワークを構築したために、コアフェーズなどの月深部を通過する波線パスをほとんど観測することができていない。そのために、深さ200km以深の速度構造の誤差が大きく月内部の不連続面も明確ではない。また、月の深さ800から1000kmの深さで発生する深発月震による月面上での振幅レベルは10から数10Åと大変小さく高感度の地震計が必要であったが、1Hzの短周期計は十分な感度を擁していなかった。長周期計は感度を高めるために約0.4Hzを中心とした狭帯域にしたためにP波、S波の直達波以外の波の検出や周波数領域での解析に適した波形が得られていない。強い散乱波と共に機器由来と考えられるノイズや原因不明のグリッチ波形が定常的にみられるためにP波、S波の到着時刻の読み取り精度が悪く、震源の誤差、速度構造の精度の悪さを招いている。近年のアポロ月震データ再解析でも速度構造の精度や不連続面の明確化については改善されていない（図3）。

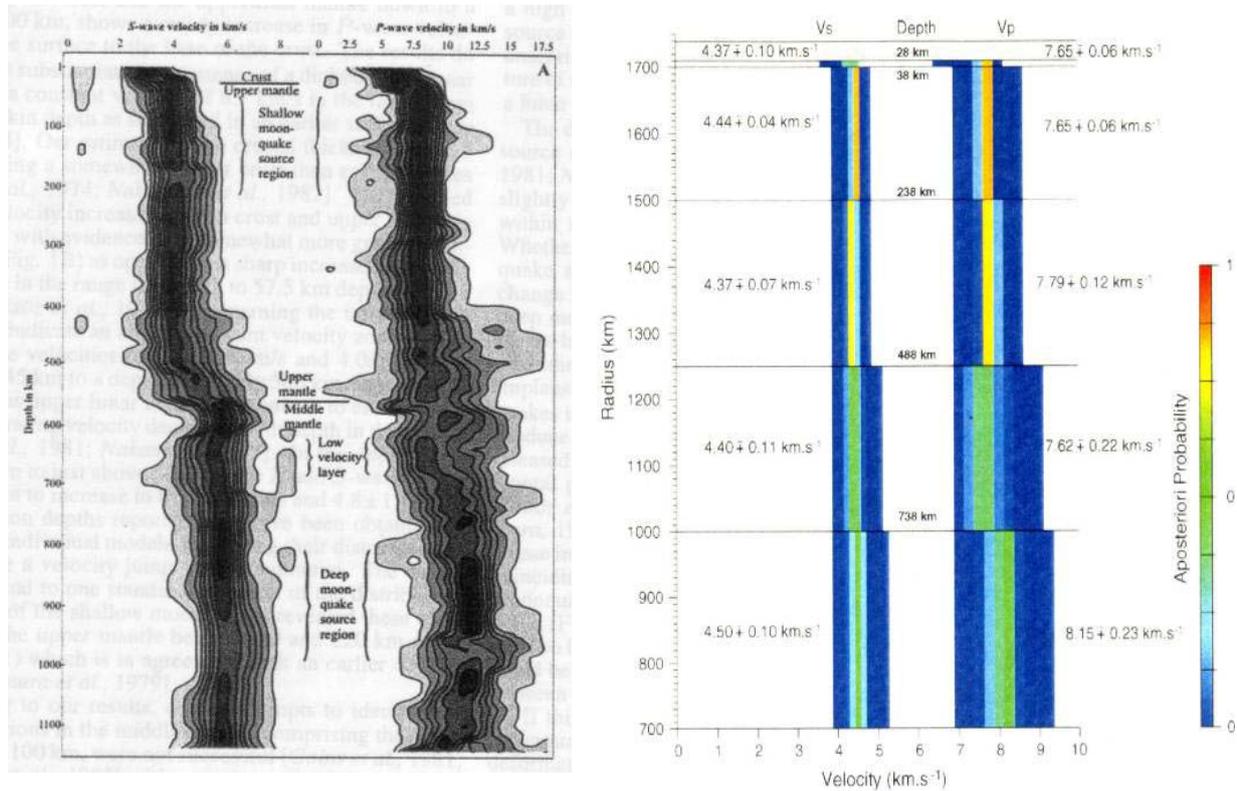


図 3.速度構造モデル (左 : Khan and Mosegaard,2002 ; 右 : Gagnepain-Beyneix et al., 2006)

アポロ計画で残された課題を解決するためには、アポロ地震計以上の高感度広帯域地震計を用いたり、月の裏側を含めた同時多点観測を実施することが必要である。高感度広帯域地震計を使用することで強い散乱波にマスクされて見えなかった後続波の検出が可能になり (図 4)、内部不連続面の詳細を知ることが可能となる。さらに同時多点観測を実施することで精密な震源決定、地殻厚さの地域性、そして地震波トモグラフィ手法によるマントル下部の不均質構造の解明なども可能となる (図 5)。コアから地殻にいたる月標準速度構造モデルの構築、さらには月の不均質構造の制約なども期待される。

Cutoff Frequencies and Detectability of ScS

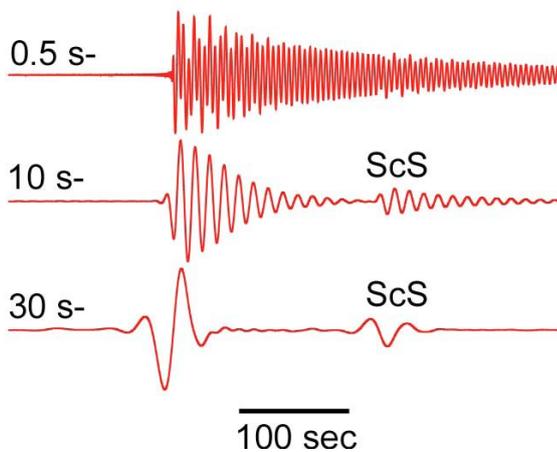


図 4. コアで反射した後続波(ScS)の検出可能性
周期 10 秒より低周波成分を取り出せば強い散乱波の影響を受けず検出できる。

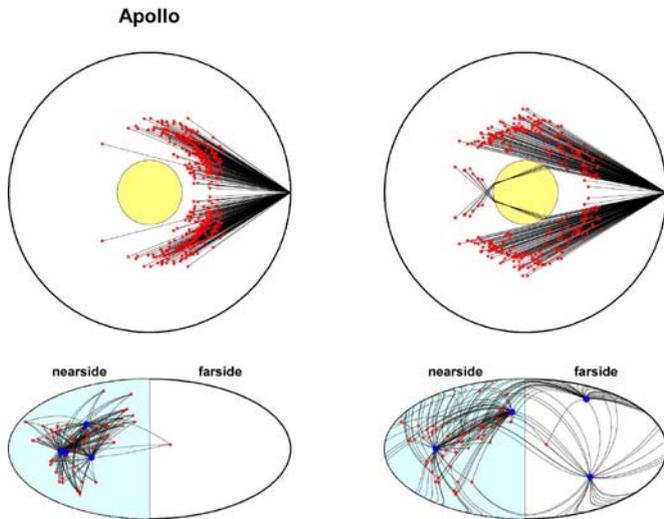


図5. 地震波のパスカバレッジの比較

月震の震源と観測点の組み合わせについて波線を計算し、観測点を1箇所にとめた場合を図示。左：アポロ観測の場合、右：表側2箇所・裏側2箇所に観測点を置いた場合

内部構造以外にアポロの残した課題として、月裏側での月震活動、月震のメカニズムなどがある。月深発月震の活動には周期性があり、それは月潮汐と相関があることが知られている。しかし、深発月震の発生する深さは地球でいえばアセノスフェアのような塑性変形領域に相当する。なぜこのような領域で月震が起きるのかは必ずしも解明されていない。また、表層の強い散乱波など、地震学的に興味深い問題である。惑星科学のコミュニティーのみならず、地震学会コミュニティとの連携を図り解明してゆく必要がある。

アポロ計画では飛行士による月面への地震計の設置であったが、アポロ地震計の性能を上回り着陸機等に搭載可能な地震計の開発もおこなわれ無人探査が可能な状況にある。日本が月探査用に開発した軽量・小型・低消費電力の短周期地震計、ヨーロッパのグループにより火星探査用に開発した長周期地震計も実用レベルに達している。現在、2つの地震計を組み合わせた広帯域地震観測システムを月探査（SELENE-2）用に改良を実施している。

地震学的手法で内部構造を解明するためには同時多点観測が理想である。これまで各国が独自に月探査計画を立案してきたが、国際的に協調して探査を進めようという動きがある。その一つは、アメリカが主導する **International Lunar Network** で無人着陸機を使ったネットワーク観測計画であり、地震計、レーザー測距、熱流量などの地球物理観測を実施することを提案している。また、ディスカバリー・ミッションの一つとして上記の短周期地震計と長周期地震計を搭載した無人着陸機を展開する **Lunette** というミッションも提案されている。日本独自の単独ミッションでは設置できる点数は限られているが、国際協調により同時多点観測ができれば得られる内部構造の精度は飛躍的に向上する。

Gagnepain-Beyneix, J, P.Lognonné, H.Chenet, D.Lombardi and T.Spohn(2006), A seismic model of the lunar mantle and constraints on temperature and mineralogy, *PEPI*, **159**, 140–166.

Khan A, K. Mosegaard and K.L. Rasmussen(2000) A new seismic velocity model for the Moon from a Monte Carlo inversion of the Apollo lunar seismic data, *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 1591-1594.

Nakamura, Y., Latnam, G. V., and Dorman, H. J. (1982) Apollo Lunar Seismic Experiment—Final Summary, *J.Geophys.Res.*,**87**(SP1),A117-A123.

Nakamura, Y.(1983) Seismic velocity structure of the Lunar Mantle, *J.Geophys.Res.*,**88**(B1),677-686.