The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	4.4 重要な観測
Author(s)	小河, 正基; 石原, 吉明
Citation	月サイエンスブック 第一部. 2021, p. 171-173
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/83246
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

4.4　重要な観測［小河正基，石原吉明］

形成直後の月の内部の熱的状態を観測から制約し，地球の起源，ひいては太陽系形成過程を制約するためには，今後どのような観測が必要とされているのであろうか．

(a) まず重要なことはマグマオーシャンの深さを特定することであり，このためには地殻の厚さやマントル内層構造を地震学的に決定することが必要である．アポロ計画で取得された地震データ（ALSEP）は比較的短周期の限られた周波数帯の記録であり，レゴリス・メガレゴリスのような短波長不均質構造による地震波の散乱の影響を強く受けている．このため，地殻・マントル境界であるモホ面での変換波があったとしても散乱波に埋もれてしまい，現状の月震記録からは同定することが出来ない．また，マントル内層構造や核・マントル境界での変換波・反射波についても確実な検出は出来ずにいる．このため，地震学的な月内部構造の解析には直達波走時データのみを用いた走時解析により行われてきた．しかしながら，直達波の走時であってもフェーズの読み取り精度の面で大きな問題を抱えている．地殻厚およびマントル以深の構造を求めるためには，高感度の広帯域地震計を用い散乱の影響を受けにくい長周期の地震波を観測する必要がある．また，地殻厚に関しては，人工震源を用いたアクティブ地震観測や，月面衝突発光観測と組み合わせたセミアクティブな観測を行うことにより，震源位置・震源時の誤差を実効的にゼロと見なせる観測を行うことも有効である．

(b) 次に重要なことは，現在の内部の温度構造をより高精度で求めることである．特に，測地探査（4.2.2 節）と電磁探査（4.2.5 節）により中心部分に存在すると言われる部分溶融層の有無を確定することは，月の熱史の見積もりにおいて，温度の時間変化のみならず現在という特定の時点における温度の絶対値を確定するという意味でも重要である．また同時に，熱史を見積もるためには，月内部での熱輸送の様式を知ることも重要である．この情報も熱流量探査（4.2.1 節）電磁探査（4.2.5 節）により月のマントルの温度構造を明らかにすることにより制約される．図 4-33 とその脚注で論じたように，この目的で温度の見積もりに要求される精度は，マントル全域にわたって±100ºC 程度である．この精度を達成するためには，月面および周回機に搭載した磁力計を用いた電磁探査が欠かせない．また，電磁探査から温度情報に変換する際に仮定するマントルを構成する鉱物の各深さによる量比等の情報の確度の向上も必要である．このため，月マントルの地震波速度および構造を 1 %の精度で求めることが求められる．

この観測において特に意識すべき点は，過去の全てのその場観測が PKT とその周辺という特別放射性元素が多く熱流量の大きな地域に偏っているということである．この地域からはなれた地点を含む多点で観測を行う必要がある．

(c) 膨張収縮の歴史をより高い精度で明らかにし，これと同時に海の火山活動に関するより徹底的な情報を得ることも月の熱史を正確に見積もる上で意義深い. この目的を達成するために必要な観測は 4.2.3 (b)節に詳しく論じられているが，要約すると以下の通りである.

(c-1) 月の歴史の初期に於ける膨張量を知るためには「線状の重力異常 (LGA)」として観測される地殻中の岩脈の厚さを，どこか一つの典型的な岩脈で± 1 km の精度で求める必要がある. このデータがあれば, 他の岩脈の厚さは重力測定の結果を使って換算することができる．この「典型的な岩脈」の厚さの測定には人工震源と地震計アレーを用いた屈折法によるアクティブ地震探査が必要となる.

(c-2) 海の火山活動の歴史を定量的に見積もるためには, 月で最も大きな直径を持つ雨の海の中心で海のトータル深さを± 100 m の精度で, また構成する溶岩流層数を求める必要がある．これにより海の深さの上限があたえられ，他の海の深さは，盆地の形状に関する一般則から推定することができる．この為には，大出力 GPR による電磁波サウンディングおよびアクティブ・パッシブ地震探査の複合探査による多周波数での地震波干渉法およびレシーバ函数解析を行い，地下境界面を精度よく検出することが必要となる.

(d) PKT に代表される水平不均質構造の原因を探るためには，この地域直下と遠くはなれた地域（例えば裏側）のマントルの地震波速度構造の決定が必要である．この為には，PKT を中心とする表側領域と裏側高地領域において，それぞれ最低 4 点の 3 成分高感度広帯域地震計からなる地震観測網を構築し，P 波・S 波およびモホ面や核・マントル境界やマントル内の構造境界面での変換波・反射波走時を用いた複合走時解析を行い，各領域での 1 次元地震波速度構造を得る必要がある.

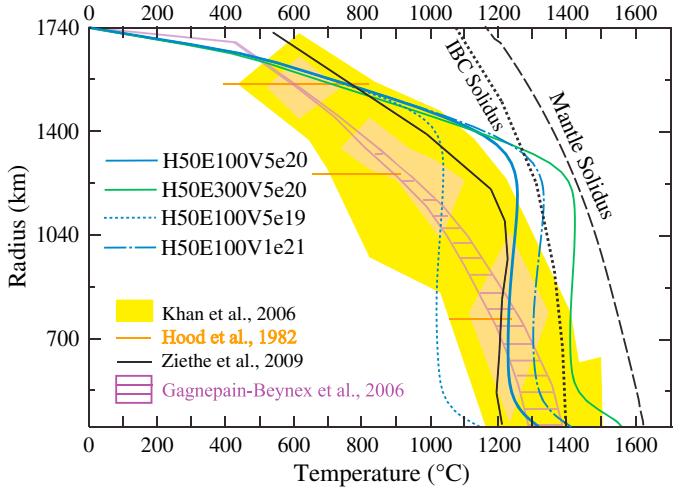

図 4-33　月のマントルで対流が起こっていると仮定した場合にモデルから期待される水平平均温度の深さ（radius で表示）に対するプロット（黒，青，緑の実線や点線, 一点鎖線参照）. Radius = 1740 km が地表面に対応. Khan et al (2006b), Hood et al (1982), Gagnepain-Beyex et al (2006)のデータは観測値．観測された温度分布は，マントル対流が起きていず月内部の熱輸送は伝導のみで起きているとした時に典型的に期待されるパターンであり，モデルの予言とは明らかに定性的な形が異なっているが，観測誤差が大きいためこの食い違いが有意であるかどうか確定できない. この図から, 月内部の温度の見積もりに要求される観測制度は± 100℃程度と見積もられる．（Zhang et al. (2013)より転載．）