

特集「物理探査ミッションで知る月の内部構造と進化」

Lunar-Aミッションによる月のコアの検知

竹内 希¹

1. 本稿の目的

Lunar-A計画はアポロ計画でなし得なかった月深部構造の解明を、地震学的手法を用いて行う計画である。計画の概要の詳細な紹介については他の文献に譲る（例えば[1]）。本稿ではこの計画で観測されるデータの解析手法を提案し、これを用いて月のコアのサイズをどのぐらいの精度で明らかにできるかを述べる。

2. 理論波形計算によるLunar-Aデータのシミュレーション

月震波形はコーダ波（直達波の後に連なる、不均質構造により生ずる散乱波からなる波群）が長時間（数十分から1時間以上）継続するという地球の地震波形には見られない特徴があり、高いQ値と表層における強い散乱の影響とされている。

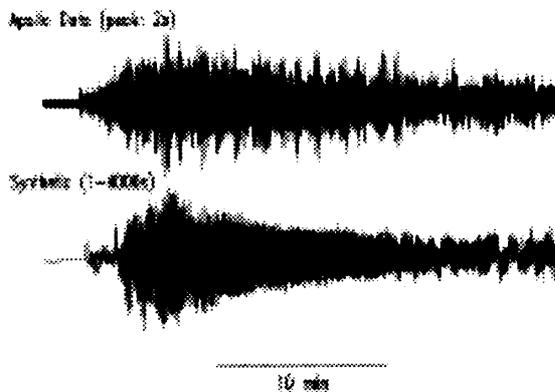


図1 アポロデータ（LP）と理論波形の比較。理論波形は1-4000sの変位波形である。

散乱性の強い媒質の1つの単純化したモデルとして、速度の速い層と遅い層が何層も交互に水平成層している構造（ラミネーション構造）を表層に入れて理論波形計算を行ったところ、この特徴を再現できた（図1）。理論波形にはアポロの地震計（LP peaked）の単振動的な特性を施しておらず、散乱構造でこの特徴を再現している。

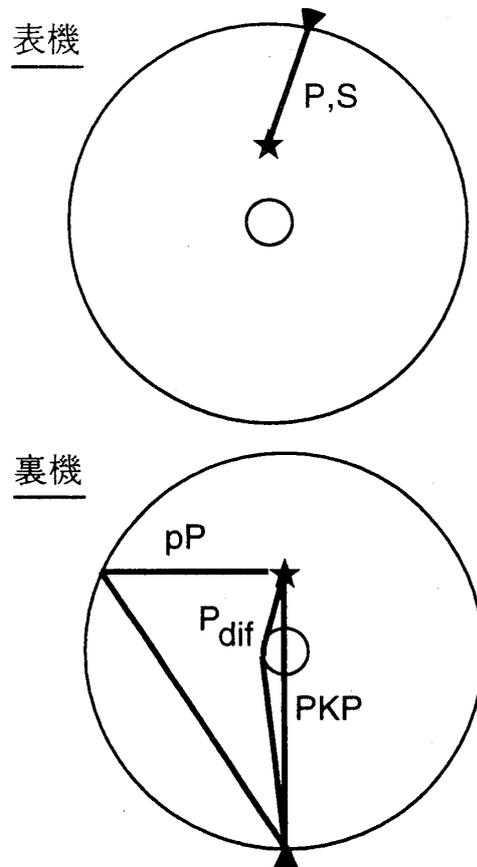


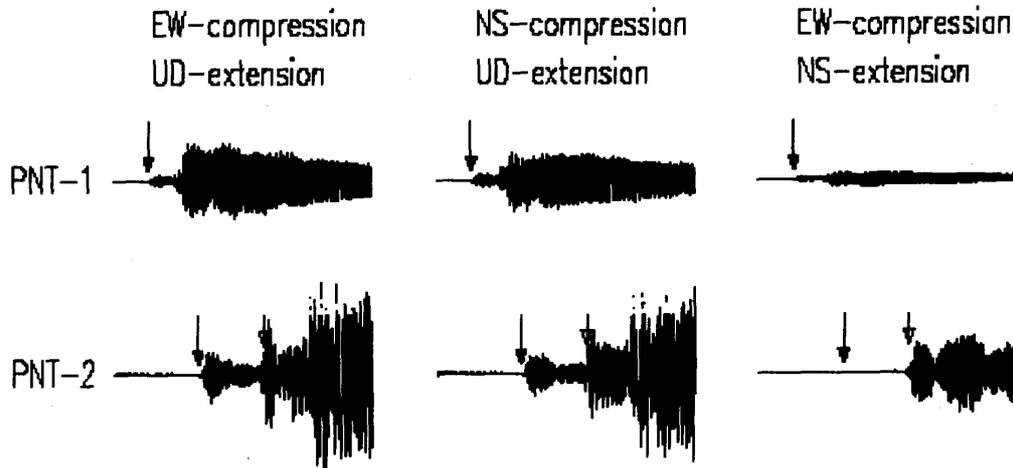
図2 A1震源（星印）と観測点（三角印）の幾何学的な位置関係及び観測される主なフェーズの波線。

¹ 東京大学理学部

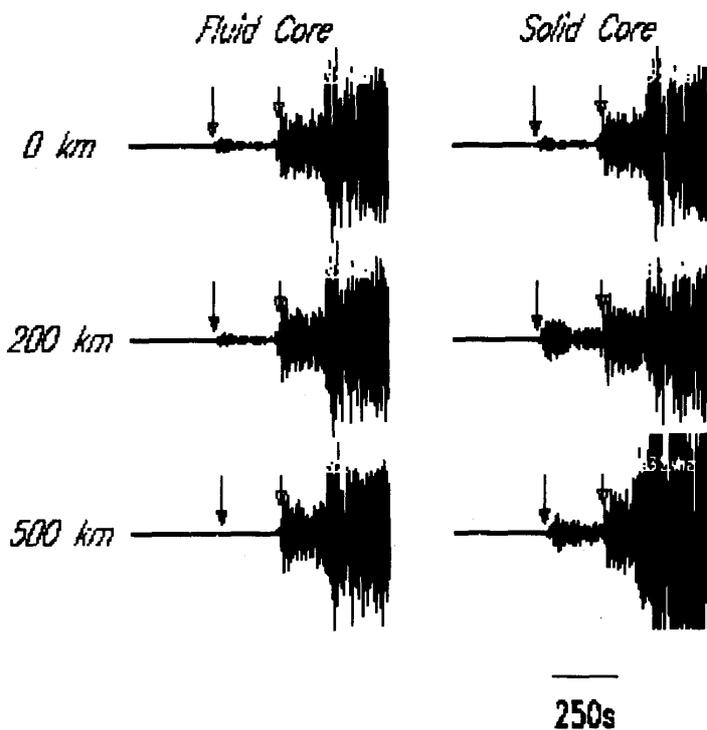
この手法を用いてLunar-A観測点における理論波形を計算した。計算手法はDirect Solution Method[2],

計算した周波数帯域は1-4000sである。構造モデルは星ら[3]の月モデルを用いた。これはOkuchiの月組

(a)



(b)



(c)

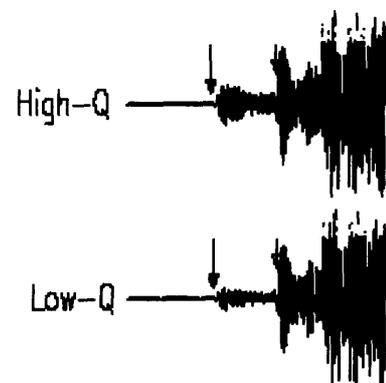


図3 (a) 代表的なメカニズムに対する表機 (PNT-1) 及び裏機 (PNT-2) の理論波形。200kmの固体コア、深部High-Q構造を仮定した。(b) 様々なコアの構造に対する裏機の理論波形。南北圧縮・上下引っ張りのメカニズム、深部High-Q構造を仮定した。(c) 深部High-Q構造(全マントル $Q=3000$)及び深部Low-Q構造(1100km以深マントル及びコア $Q=100$; 1100km以浅マントル $Q=3000$)に対する理論波形。200km固体コア、南北圧縮・上下引っ張りのメカニズムを仮定した。すべての波形に対し、初動の到達時刻を黒い矢印、 pP の到達時刻を白い矢印で示した。すべての波形は同じ振幅スケールで示している。

成モデル[4]を地震波速度構造に直したもので、地震学的証拠から得られたNakamuraら[5]のモデルと整合的である。現在の予定では表機はアポロ12号の着陸地点近傍に、裏機はA1の震源の真裏に設置する[1]。震源及び観測点の幾何学的な位置関係、主なフェーズの波線を図2に示す。波形はまだよくわかっていない月震のメカニズム、コアのサイズ・物理状態、深部減衰構造に強く依存する。それぞれのパラメータをとりうる範囲で様々に変化させた場合のA1に対する理論波形を図3a-cに示す。どの場合でも裏機で2番目に到達するフェーズ (pP) が常に初動より大きいこと、初動部 (PdifとPKPのコンタミネーションフェーズ) の振幅は最大で表機のP波振幅の数倍に達するが、極めて小さい振幅の場合もあることがわかった。初動部が検知できればコアの情報を含む位相情報が得られる。

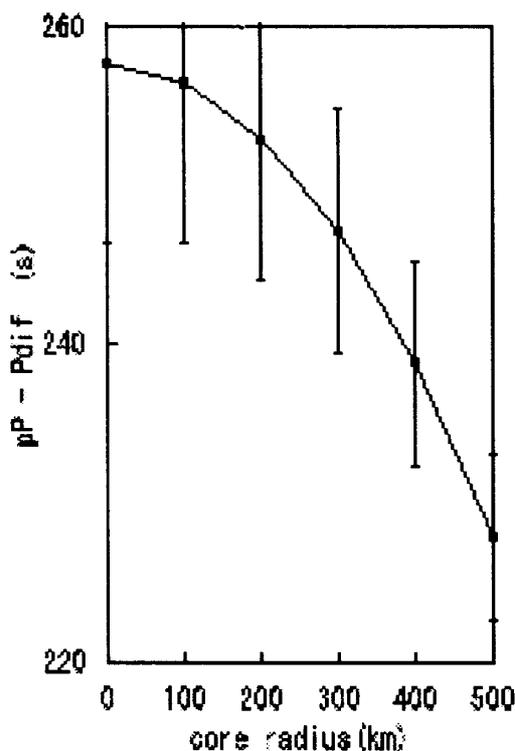


図4 様々なコアサイズに対するpP-Pdifの値の変化。震源の誤差に起因するpP-Pdifの不確定性をerror barで示した。

3. コアサイズの推定法とその不確定性

ここではpPとPdifの到達時間差 (pP-Pdif) という位相情報に注目したコアサイズの推定法を述べる。2つのフェーズの到達時間差に注目するのは発震時刻を決定する必要がないからである。他の位相情報 (例えば裏機のPdifと表機のPの到達時間差) に比べると裏機だけの観測の場合でも利用できる可能性があるという長所がある。またray focusingやshadow zoneから推定する方法[1]に比べると少数のデータからでも容易に推定できるという長所がある。

コアサイズを変化させた場合のA1に対するpP-Pdifの値の変化、及び震源の不確定性に起因するばらつきの度合いを図4に示す。一般的にコアのサイズが大きいほどPdifは遅く到達し、pP-Pdifの値は小さくなる。震源はアポロデータから決定された震源をそのまま用いることとし、震源の不確定性はNakamuraら[5]で与えられている値を用いた。A1の場合は水平方向に6.0度、深さ方向に29kmである。S/Nの良いデータが得られることを仮定し、到達時刻の読みとり誤差は無視しうるとした。

小さいコア (200km以下) は高精度の推定が困難であるが、300km程度のコアであれば100-150kmの精度で推定が可能である。500km程度のコアならば50kmの精度で推定できる。この値はA1のみを用いた場合の推定精度であり、実際の推定精度は何種類の月震のコアフェーズを検知できるかに依存する。他の位相情報を併用すればさらに推定精度が向上する。多くの種類のコアフェーズを検知するための観測戦略を立てることが今後の課題であろう。

参考文献

- [1] LUNAR-Aサイエンスチーム (代表・水谷仁), 1997: Lunar-A計画・科学観測計画と期待される成果, 平成9年11月理学委員会資料.
- [2] Takeuchi, N., Geller, R. J. and Cummins, P. R., 1996: Highly accurate P-SV complete synthetic seismograms using modified DSM operators, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 1175-1178.
- [3] 星陽介, 奥村克利, 小林直樹, 竹内希, 1998: DSMを用いた月震理論波形の計算, 地球惑星科学関連学会1998年合同大会予稿集, pp. 55.
- [4] Okuchi, T., 1995: The Moon from the terrestrial magma ocean, Master thesis of Faculty of Science, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, JAPAN.
- [5] Nakamura, Y., Latham, G. V. and Dorman, H. J., 1982: Apollo lunar seismic experiment - final summary, *Proc. 13th Lunar Planet. Sci. Conf.*, *J. Geophys. Res.*, 87, Suppl., A117-A123.