

論文内容の要旨

Lunar Crustal Structure from Topography and Gravity data (重力・地形データを用いた月地殻構造の推定)

足田 肇

地殻の厚さを推定することは月の起源や月の材料物質に関する情報を与えるという意味で重要である。特に月の地殻は plagioclase に富んだアノソサイト質であると考えられるから、地殻の総質量は月のバルクの Al_2O_3 の存在度を推定する強力な情報となる。そこで本研究では重力データを用いて月の地殻構造を推定し、難揮発性元素である Al のバルク存在度を明らかにする。

過去の重力データを用いて地殻構造を推定する研究では計算パラメータである地殻の密度 ρ_{Crust} ・マンツルの密度 ρ_{Mantle} ・地殻-マンツル境界層の基準半径 R_M を簡単に仮定している (e.g. Zuber *et al.*, 1994; Neumann *et al.*, 1996; Wiczorek and Phillips, 1998)。しかし地殻-マンツル境界層におけるマンツルの起伏を決める重要な要因がマンツルと地殻の密度差であることを考えると、地殻の密度・マンツルの密度の仮定が結果に与える影響は大きい。また地殻-マンツル境界層の基準位置についても、過去の研究では月の表側の地殻の厚さが 60 km 程度であるという Apollo 時代の月震の解析結果に基づき決めているが (Toksöz *et al.*, 1974; Nakamura *et al.*, 1982)、最近の月震の再解析から月の表側の地殻の厚さを 30 – 45 km とする地殻モデルも提出されている (Khan and Mosegaard, 2002; Lognonné *et al.*, 2003)。そこで本研究ではこれら 3 つのパラメータ値の妥当性を再検討し、その結果に基づき地殻モデルを構築した。

まず地殻密度については、Lunar Prospector の γ 線の分光観測から推定された月面の鉄の存在度マップ (Lawrence *et al.*, 2002) に対して、Apollo サンプルの鉄存在度とノルム密度の関係を適用して月の水平方向の地殻密度モデルを構築した。このとき Apollo 岩石試料の空隙率の頻度分布 (Warren, 2001) から月面の地殻物質の空隙率を見積もった。鉛直方向には空隙率が圧力によって閉じていくと考えられるので、月の深さ方向の空隙率分布を Apollo 岩石試料の弾性波速度の圧力変化に関する実験結果 (Mizutani *et al.*, 1972) と固体の弾性定数と空隙率の理論 (Budiansky and O'Connell, 1976) を元に推定した。

残りのパラメータである (ρ_{Mantle} , R_M) については月の簡単な三層モデル (地殻-マンツル-コア) を用い、月の質量・慣性モーメントの制限を満たす (ρ_{Mantle} , R_M) の組み合わせを求めた。その結果、過去の研究において仮定された 3 つのパラメータ (ρ_{Crust} , ρ_{Mantle} , R_M) の組み合わせは、月の質量・慣性モーメントの組み合わせを満たさないことがわかった (e.g. Zuber *et al.*, 1994; Neumann *et al.*, 1996; Wiczorek and Phillips, 1998)。

月面の玄武岩層分布については、マスコンを作る海については Solomon and Head (1980) の basalt disk モデルを適用した。ただし、彼らのモデルにおいて玄武岩の厚さは実際より大きく見積もられていると考えられるので、玄武岩の最大の厚さをクレーターの直径-深さの関係に従い見積もり、玄武岩の厚さ分布を修正した：Pike (1974) の直径 15 km 以上のフレッ

シュクレーターに成り立つ関係と Williams and Zuber (1998)の直径 100 km 以上の形状を比較的保存しているクレーターに成り立つ関係。その他の海の領域は、月面の画像解析を基にモデル化された Wilhelms (1987)の海の分布マップを用い、海の厚さを De Hon (1974) の地形学的研究の結果から一律 400 m であると仮定した。海の領域の下に位置する高地地殻については密度を推定する方法がないので、月面の鉄存在度の最頻値である 5.5 wt% の鉄を持つ地殻である場合と、高地岩石の鉄存在度のおよその上限である 10 wt% の鉄を持つ地殻である場合の二通りを仮定した。

以上のような二通りの海の玄武岩モデル(Pike, 1974 or Williams & Zuber, 1998)・二通りの海の下地の地殻密度(5.5wt% iron crust or 10 wt% iron crust)の仮定に対し、月の質量・慣性モーメントの制限を満たす(R_M , ρ_{Mantle})の組み合わせから地殻の厚さが最大・最小になる地殻モデルを構築した。ここで地殻厚さ最大のモデルとは月の質量・慣性モーメントの制限を満たす(R_M , ρ_{Mantle})の組み合わせのうち R_M が最小になる場合を意味し、地殻厚さ最小のモデルとは全球における地殻の厚さの最小値が 0 km になる場合を意味する。その結果、地殻の平均の厚さは 46 – 82 km の範囲にあることがわかった。全てのモデルで最も地殻の薄くなる場所は Crisium basin (17 °N, 59 °E)であり、最も地殻の厚くなる場所は South-Pole Aitken basin の北東(24 °S, 129 °W)であることがわかった。また、月の表側の嵐の海周辺の地殻の厚さは 44 – 92 km であることがわかった。これは地殻の厚さ 60 km (Toksöz *et al.*, 1974; Nakamura *et al.*, 1982)や 45 km (Khan and Mosegaard, 2002)という月震の解析結果とは調和的であるが、最近の 30 km という解析結果(Lognonné *et al.*, 2003)とは相容れない結果である。

さらに月震観測ネットワークの設置場所を提案するために、最大の地殻厚さモデル・最小の地殻厚さモデルを比較することで地殻の厚さが取り得る範囲を地域ごとに調べた。その結果、地殻厚さ最小・最大モデルの間で地殻厚さのとりうる幅が大きく、かつ各モデルにおいて水平方向の地殻厚さのバリエーションが小さい領域として Mare Fecunditatis(0°N, 50°E)周辺が挙げられる。もし月面の鉄存在度から予想される地殻密度が正しいとすると、この領域の地殻の厚さが Lunar-A 計画を含む将来の月震観測で推定されれば、重力から予想される地殻モデルの地殻厚さの取り得る範囲が大幅に制限される可能性がある。

本研究の結果から地殻の総質量は 6.3 – 11.9 wt%の範囲にあることがわかった。地殻中の Al_2O_3 の存在度をアノーソサイト質試料 Al_2O_3 存在度(平均値 21.8 – 最頻値 27.5 wt%; Papike, 1998)を元に仮定し、地殻中の Al_2O_3 の総質量を見積もったところ、月全体の 1.4 – 3.3 wt% であることがわかった。月のマントル中の Al_2O_3 存在度をマントル中の Th 存在度(0.04 ppm; Jolliff *et al.*, 2000)を元に仮定したところ、本研究の地殻モデルの結果から月のバルクの Al_2O_3 存在度は 3.4 – 5.2 wt% であるという結果を得た。これは C1 コンドライトのバルク Al_2O_3 存在度(1.6 wt%, Anders and Ebihara, 1982)より有意に大きいが、地球のバルク Al_2O_3 存在度($Al_2O_3 = 3.7$ wt%, Taylor, 1982)の 0.9 – 1.4 倍程度である。すなわち、月が地球に比べて難揮発性元素に富んでいるという特徴はこれまで信じられていたものよりはるかに小さい可能性が高い。これは月の起源に関する co-accretion 仮説(Ruskol, 1977)も宇宙化学的観点から否定されるべきではないことを示すものである。

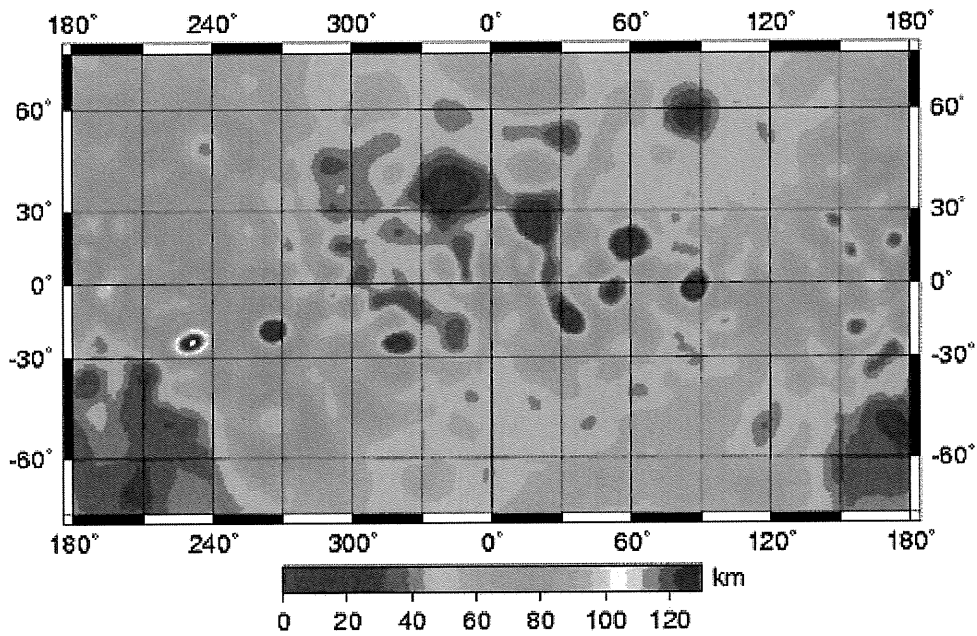


Fig. 1a. The minimum crust thickness model using the 5.5 wt% iron concentrated crust beneath mare regions (P55MIN). For the basalt thickness at major large basins, the basalt thickness model of Solomon and Head (1980) revised with the result of Pike (1974).

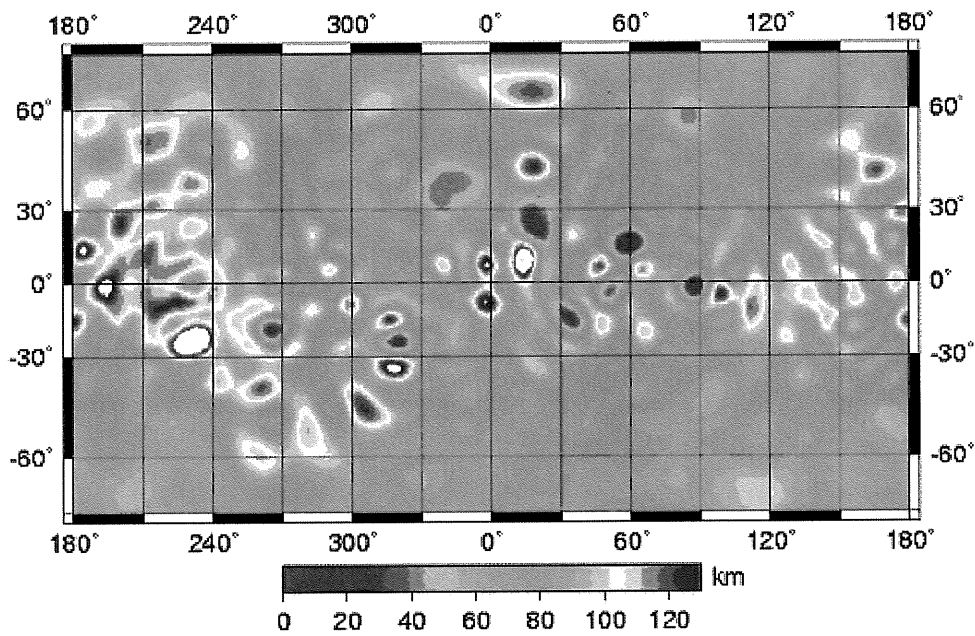


Fig. 1b. The maximum crust thickness model using the 5.5 wt% iron concentrated crust beneath mare regions (P55MAX). For the basalt thickness at major large basins, the basalt thickness model of Solomon and Head (1980) revised with the result of Pike (1974).

Table 2a. The characteristic summary of the minimum and maximum crust thickness model for the case of 5.5 wt% iron concentrated crust beneath mare regions.

| Basalt thickness model | Predicted from Pike (1974) | | Predicted from Williams and Zuber (1998) | |
|--|-------------------------------|----------------------------|---|----------------------------|
| | Minimum thickness model | Maximum thickness model | Minimum thickness model | Maximum thickness model |
| | [P55MIN] | [P55MAX] | [W55MIN] | [W55MAX] |
| ρ_{Mantle} , kg/m ³ | 3396 | 3437 | 3388 | 3437 |
| R_M , km | 1680 | 1654 | 1685 | 1654 |
| Thickness at Apollo 12, km | 49 | 74 | 44 | 74 |
| Thinnest crust, km | 0 | 9 | 0 | 9 |
| Thickest, km | 132 | 178 | 124 | 171 |
| Average, km | 55 | 79 | 50 | 79 |
| Crust mass, wt% | 7.7 | 11.2 | 7.0 | 11.2 |
| Crust volume, vol% | 9.5 | 13.6 | 8.7 | 13.6 |
| Mean crust density, kg/m ³ | 2701 | 2763 | 2686 | 2763 |

Table 2b. The characteristic summary of the minimum and maximum crust thickness model for the case of 10 wt% iron concentrated crust beneath mare regions.

| Basalt thickness model | Predicted from Pike (1974) | | Predicted from Williams and Zuber (1998) | |
|--|-------------------------------|----------------------------|---|----------------------------|
| | Minimum thickness model | Maximum thickness model | Minimum thickness model | Maximum thickness model |
| | [P10MIN] | [P10MAX] | [W10MIN] | [W10MAX] |
| ρ_{Mantle} , kg/m ³ | 3384 | 3437 | 3377 | 3437 |
| R_M , km | 1685 | 1650 | 1690 | 1650 |
| Thickness at Apollo 12, km | 51 | 92 | 45 | 91 |
| Thinnest crust, km | 0 | 16 | 0 | 17 |
| Thickest, km | 127 | 179 | 119 | 181 |
| Average, km | 50 | 82 | 46 | 82 |
| Crust mass, wt% | 7.0 | 11.9 | 6.3 | 11.9 |
| Crust volume, vol% | 8.7 | 14.2 | 7.9 | 14.2 |
| Mean crust density, kg/m ³ | 2704 | 2791 | 2687 | 2791 |