

特集「物理探査ミッションで知る月の内部構造と進化」

レーダーサウンダー観測による海のテクトニクス研究

山路 敦¹

1. 基本戦略

月表面には断層や褶曲など、過去のテクトニクスの産物が広く見られる。それらは応力場の変遷史が可視化されて、われわれの前に提示されるとみなすことができる。ならばそれらの形成史を把握することにより、応力場の時間変化を読みとり、それから更に月の起源や進化にたいして制約を与えることができるだろう、というのが月のテクトニクスを研究する基本戦略である。地殻の変形史を、レーダーサウンダー・カメラ・重力異常などから定量的に把握することが、その手段となる。詳しくは小文[1,2]に記述した。

月の地質構造について、3つ重要なことがある。(1) 水平伸張型テクトニクス (extensional tectonics) によってできた構造は、約36億年より古い岩体のみ見られるが、水平圧縮型テクトニクス (compressional tectonics) の構造は、もっと若い岩体でも発達する。約36億年前の応力場転換は、月が集積する直前段階およびグローバル熱史に関係している。(2) 海に固有のテクトニズムがあるらしい。これは、海の規模の物性について制約を与えるだろう。(3) 水平ズレ成分を有する変形構造 (雁行した褶曲や断層) が発達する。これは軌道進化に関係しているかも知れない。

2. 約36億年前の応力場転換

月においてグラーベンは、mare basaltsのうちでも古いものおよび高地を切っている。若い地質ユニットを切ることは無いらしい。若いmare basaltsによってグラーベン構造が不整合に覆われることがあるので、そうした地域でグラーベンが切る岩体と、グラーベンを覆う岩体の年代から、グラーベン形成年代が推定できる。その結果、月では約36億年前に伸張テクトニクスが終了し、それ以降は圧縮テクトニクスの時代になったと考えられるようになった[3]。

こうした応力史は、グローバルな熱史の表層における表現であると考えられている。集積直後、月の全体が熱く、その後は単調に冷えた場合、内部の冷却収縮は、表面積の減少を生ずる。これは表層部の圧縮テクトニクスとしてしか顕れない。月の形成の約十億年後に表層の応力状態を転換させるためには、初期の温度構造は、内部が冷たく、表面にマグマオーシャンがあるという状態を想定する必要がある。そうした状態をつくるためには、月をつくった集積ディスクは、十分に冷たかった必要がある。

従来は、分解能のさほど良くない地形写真から変形年代を推定していたわけだが、セレーネ搭載の地形カメラで高分解能観測を行えば、年代決定の精度がもっと良くなるだろう。また36億年より後に伸張テクトニクスがあっても、表面に露出し

¹ 京都大学理学研究科地球惑星科学専攻

なければ、従来の観測では捕らえることができなかった。レーダサウンダーの観測は、その壁を打ち破ることができる。

3. 海盆固有のテクトニクス

伸張テクトニクスの産物であるグラーベンは、じつは海盆を取り巻くように分布しており、グローバルな熱史との関連だけではなく、海盆の形成との関係において理解すべき対象なのである。月の海盆には、同心円状にリッジとグラーベンが分布する。海盆の中央寄りではリッジをつくった圧縮テクトニクスが働き、縁辺部ではグラーベンをつくった伸張テクトニクスが働いた、というわけである。海盆におけるこうした状況は、海盆固有のテクトニズムを想定させる。従来、厚さ数kmにおよぶ海の玄武岩の荷重が弾性リソスフェアを撓ませた結果であると理解されている。レーダサウンダーの目標の一つは、このモデルを検証することである。

こうしたモデルは、構造地質学的には2つ不都合がある(図1)。(1)海盆において堆積作用の進行

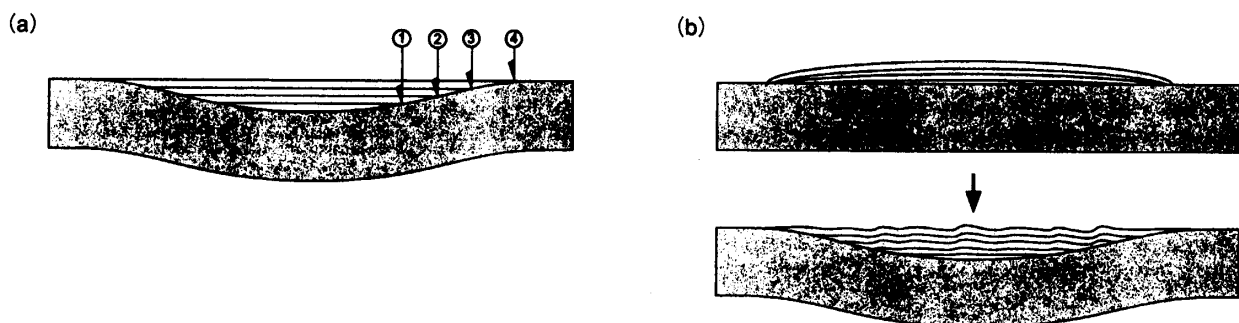


図1 堆積物荷重によるリソスフェアの撓みモデルが抱える困難。

(a) 冷却しつつあるリソスフェアのうえにできた海盆の堆積過程。堆積物の荷重でリソスフェアが押し下げられるなら、リソスフェアの有効弾性厚がおおきいほど、沈降域は広い。荷重が同じでも、薄い弾性板は短波長で撓み、厚い弾性板は長波長で撓むからである。有効弾性厚はリソスフェアの冷却とともに厚くなるから、同時に堆積域(リソスフェアが撓んでできた窪地)も次第に拡大したはずである。この図には、古い方から地層に番号がふってある。新しい地層ほど、基盤をより広く覆うことになる。地球の海盆にたとえるなら、これは「海進」のプロセスである。(b) 荷重モデルでうまく説明できそうにない現象のひとつとして、最上部堆積物に変形していることが挙げられる。観測によると、海の表面をおおっている最後の溶岩流が、しばしば変形している。その場合、変形時階は同溶岩の堆積後である。荷重モデルが正しいなら、海盆を埋める地層がすべて堆積し終わって、しかる後にリソスフェアがその荷重で押し下げられたことになる。

する堆積域は、時間とともに拡大する事が、このモデルの一つの帰結である。ところが表面の地質を見る限り、逆のプロセスが起こったらしい。検証のためには、新期堆積物のしたに伏在する地層の分布をサウンダーで把握する必要がある。(2)最新期のmare basaltsにもリッジが発達する。このモデルが正しいなら、最後に堆積した岩体は、自分自身を変形させることができない。

もうひとつ、海盆固有の地質構造として挙げなければならないのが、多重リング構造である。多重リング構造は、巨大な衝突クレーターに普遍的に見られるが、その成因はよくわかっていない。サウンダーでリング周辺の地下構造を観測することにより、解明できるかも知れない。

4. 水平ずれ成分の起源

断層や褶曲軸の分布を見ると、それらが雁行状に規則正しく配列することが珍しくないことがわかる。嵐の大洋南西部は、その典型である。こうした雁行配列は、構造地質学的には水平横ずれ成分のマーカ―と理解される。嵐の大洋南西部では、

NW-SEに並ぶ構造群は左横ズレ、NE-SWに並ぶ構造群は右横ズレをしめす。こうした横ずれ成分の成因の一つとして、月の軌道進化が挙げられる。月は同期回転しているので潮汐によるリソスフェアの変形は、緯度経度により常に一定であるが、月が地球から受ける潮汐は、月公転軌道の拡大とともに弱くなる。したがって地球から月が離れるに従い、リソスフェアはあらたな潮汐楕円体にフィットするよう強制変形を受ける。それが表層部の変形として記録されるわけである。潮汐効果の簡単な見積もりによると、インブリア紀の前半あるいはそれ以前にできた岩体は、こうした変形が十分大きくなっている可能性がある。つまり、こうしたプロセスでできた構造が観測にかかる可能性がある。

地質構造から軌道進化を制約するためには、いつから月が同期回転するようになったかが問題になる。月の地質構造は、遅くともインブリア紀の後半には、同期回転になっていたことを示唆しているように見える。同期回転でなければ、軌道進化にともなう月リソスフェアの歪み場は、自転軸に対して対称になるだろう。ところがこれまでに得られている地形写真から定性的に判断する限り、そうならないように見えるということである。

5. 観測の戦略

いくつか海盆のテクトニクスで重要な問題を挙げたが、それらを理解する上で重要なのは、「いつ、どこで、どれだけの変形が起こったか」を精確に把握することである。月の地殻を歪ませる原因は幾つも考えられるが、それらを分離するためには、変形史の定量的解明が必要である。さらにその基礎として、変形状態の細かな把握が要る。そのためには、サウンダー・カメラ・重力異常のデータを総合する必要がある。

月のテクトニクスに関する議論で、これまで取り上げられることが少なかったのが緩和の効果である。海盆固有のテクトニズムのところで挙げた問題点も、リソスフェアの非弾性的緩和が鍵になるだろう。つまりモデルに時間を導入せねばならぬ、ということである。そうした時間発展モデルを制約するためには、変形の歴史を定量的に把握する必要がある。

参考文献

- [1] 山路 敦, 1997: 月のテクトニクス: 構造地質学的アプローチ. 遊星人, 6, 249-257.
- [2] 山路 敦・佐々木 晶・山口 靖・小野高幸・春山純一・岡田達明, 1998. 月の起源・進化・テクトニクス. 地質学論集, 50, 213-226.
- [3] Lucchitta, B. K. and Watkins, J. A., 1978: Age of graben systems on the moon. Proc. Lunar Sci. Conf. 7th, 2761-2782.