

要旨

現在の月の形状は、歴史を通じて同期自転していた衛星の静水圧平衡状態からずれていることが知られており(Innanen 2006)、地球-月力学系の進化における未解決の問題になっている。Garrick-Bethell et al.(2006)はこのズレから生成間もない月の軌道が今と全く異なるものであったという大胆な仮説を提唱した。しかしこの論文では、月形成後の変形は考慮されていない。本研究では月形成後の衝突盆地形成に代表されるランダム成分が月の2次の形状に占める割合を計算し、その仮説の妥当性に疑問があることを示した。また、過去のセレノイドから地球-月力学系の進化について議論できるかを考える。月表側のマスコ盆地に溜まっている玄武岩溶岩表面の傾斜は、溶岩が冷え固まった当時のセレノイド(等ポテンシャル面)を記憶している可能性がある。かぐや搭載のレーザ高度計(LALT)で得られた地形の傾斜から過去のセレノイドの傾斜を求め、月の軌道進化における意義を議論する。

0. はじめに:カウラ則

地球の重力ポテンシャルの解析で、Kaula (1963)は重力場の球面調展開時に、重力ポテンシャルの調和係数のある次数*n*における値は、平均値がゼロでその周りの標準偏差 $s(C_{nm}, S_{nm})$ が、次数と共に下記の式のように小さくなってゆくことを経験的に見出した。
$$s(C_{nm}, S_{nm})_{earth} = [S_{nm}^2 (C_{nm}^2 + S_{nm}^2) / (2H+1)]^{1/2} \approx 10^{-5} / F$$

Kaula(1963)は、月を構成する物質が地球と同等の強度を持つという前提で、このカウラ則の月の場合の比例係数*b*を推察した。

$$s(C_{nm}, S_{nm})_{moon} \approx b * 10^{-5} / F ; \quad b=3.7$$

月では重力場を球面調展開する際に、観測データだけでは60次以降の高次になると推定値が安定しないため、拘束条件としてカウラ則を使用している(Namiki et al., 2009)。本研究で使用しているかぐやの重力場のデータSGM100hでは*b*=36としている(Matsumoto et al., 2010)。

1. Garrick-Bethell et al. (2006)の概要

月の形は大局的に見て球体からずれた三軸不等の楕円体になっている。その原因は(1)月の自転からくる遠心力による扁平と、(2)地球の潮汐力による地球-月方向の伸張だ。月は現在、自転周期:公転周期=1:1の同期軌道で地球の周りをまわっている。衛星がこの状態にある場合、二次の球面調数*P*₂₀で遠心力と潮汐力を表した場合の係数は下記の簡潔な比になる。

$$\text{遠心力ポテンシャル:潮汐ポテンシャル} = 1 : 3$$

天体がこの状態で流体から冷え固まると、縦横高さ三軸方向の半径がFig.1に示す割合の扁平を持つ三軸不等の楕円体となる。この場合、天体の二次の重力場係数*C*₂₀と*C*₂₂の大きさの比は $C_{20} / C_{22} = 3.33$ になる。一方、実際に測ったそれらの値は、 $C_{20} / C_{22} = 9.09$ (「かぐや」による値, Namiki et al. (2009)) となっていて、理論値に対しあまりに*C*₂₀が大きすぎる。Garrick-Bethell et al.(2006)はこの原因を過去の潮汐バンプに求めた。現在の形状の扁平(*C*₂₀, *C*₂₂)を実現する月形成時の運動として(1)離心率の大きい1:1の同期運動(Fig.4)、または(2)自転:公転=3:2共鳴運動(Fig.2,5)を用いた可能性を示したが、数値*C*₂₀の値がずれただけで破たんしてしまう。

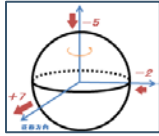


Fig.1: 期待されていたセレノイドの膨れ(へこみ)具合



Fig.2: 自転:公転(3:2)共鳴のイメージ図: 1-6が公転1週目(正面が青色)、8-14が公転2週目(正面が赤色) /Innanen (2006)

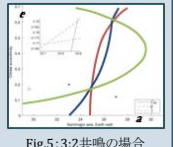
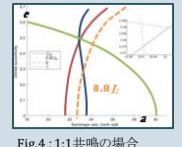
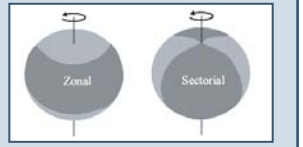


Fig.4: 1:1共鳴の場合 Fig.5: 3:2共鳴の場合
*C*₂₀を2割変化させると「交点」が消える(オレンジの破線)ため、Garrick-Bethell et al.(2006)は数値*C*₂₀のズレで破たんする

2. 2次の係数のランダム成分

Garrick-Bethell et al.(2006)は1章に示すように、月の形状の歪みは潮汐や遠心力ポテンシャルのみ起因するものとしているが、それ以外に様々な原因に起因する不均一な質量分布によるランダムな成分(Lambeck and Pullan, 1980)が考えられる。ここでカウラ則を用いて現在の2次の重力場係数の値にランダムな成分がどの程度含まれるかを考える。潮汐や遠心力ポテンシャルと無縁な3次以降の値からカウラ則の係数を推定して、それを2次の係数に外挿してみる。その大きさが、ランダム成分の次数2における大きさを越えれば、ランダム成分に比べて実際の2次の係数が十分大きい場合、2次はランダム誤差を超える信号を有する(化石バンプとしての情報を持つ)と考えられる。

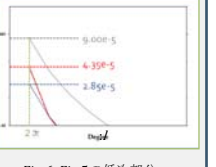
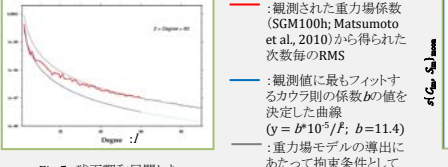


Fig.5: 球面調展開した月重力場の振幅 Fig.6: Fig.5の低次部分の拡大図
●: 観測された重力場係数(SGM100h; Matsumoto et al., 2010)から得られた次数毎のRMS
●: 観測値に最もフィットするカウラ則の係数*b*の値を決定した曲線
●: 重力場モデルの導出にあたって拘束条件として用いられたカウラ則($y = b * 10^{-5} / F$; $b=36$)

2次の実測値(赤色)と3次以降から外挿された値(青色)はRMSなので、2つの差は $\sqrt{[(4.35e-5)^2 + (2.85e-5)^2]} = 3.29e-5$ となる。これは実測値の3/4程度なので、「2次の重力場係数の3/4程度は有意である」とことを意味している。従って、2次の係数の現在の値に全面依存して過去の月軌道を推定したGarrick-Bethell et al.(2006)の結論は根拠が薄弱であることがわかる。一方この結果は二次の成分が議論の価値がある有意な成分を持つことも確かであることを意味する。

3. ランダム成分考察:衝突盆地の影響

ランダム成分の具体例として、月形成後に生じた主要な衝突盆地(Fig.7)が*C*₂₀/*C*₂₂をもたらし変化を数値計算によって見積もると(中間発表と同じ内容なので割愛。詳細は卒業論文を参照)、 $C_{20} : 14\% / C_{22} : 40\% / \beta : 19\% / \gamma : 42\%$ となり、十分大きな変化があると言える。以上のことから、Garrick-Bethell et al. (2006)で根拠とされている現在の*C*₂₀/*C*₂₂を同時に満足するものが3組存在するという事実は成立しなくなり、彼らが提唱した過去の月の軌道運動については妥当性が乏しいと結論づけることができる。

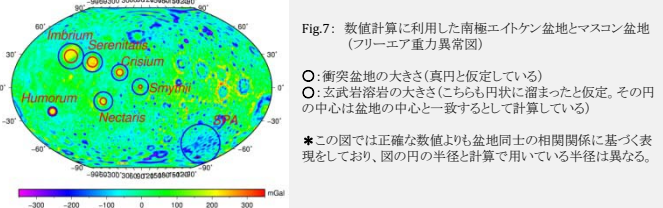


Fig.7: 数値計算に利用した南極エイトケン盆地とマスコ盆地(フリーエリア重力異常図)

○: 衝突盆地の大きさ(真円と仮定している)
○: 玄武岩溶岩の大きさ(こちも円状に溜まったと仮定。その円の中心は盆地の中心と一致すると仮定している)
*この図では正確な数値よりも盆地同士の相関関係に基づく表現をしており、図の円の半径と計算で用いている半径は異なる。

4. 過去のセレノイドと月の軌道進化

玄武岩溶岩は粘性が低いため、この溶岩表面の傾斜は、溶岩が冷え固まった当時のセレノイド(等ポテンシャル面)を記憶している可能性がある。今回はマスコ盆地の中でも比較的平らで傾斜を求めやすい4つの盆地について、LALTから得られた地形データ(Araki, et al., 2009)を用いて傾斜を推定する。さらにそれらから過去のセレノイドを推察し、当時の月の公転軌道や自転について議論する。

4-1. 玄武岩溶岩表面の傾斜

今回はImbrium, Serenitatis, Humorum, Nectarisの4つのマスコ盆地を利用する。今回は簡単のために、盆地表面が緯度方向、経度方向に(十字のように)それぞれ断面をとり、それぞれの高度断面について最小二乗法で最もよく合う直線を求める。

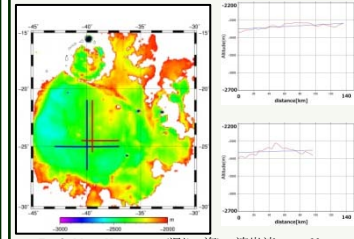
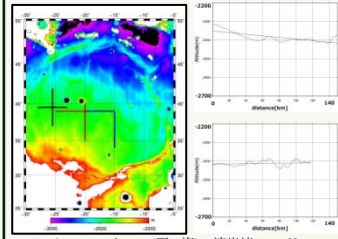


Fig.8: Mare Imbrium(雨の海)の溶岩流のprofile。上が緯度方向、下が経度方向。赤色の直線の範囲の断面図を例として載せた。

Fig.9: Mare Humorum(湿りの海)の溶岩流のprofile。上が緯度方向、下が経度方向。赤色の直線の範囲の断面図を例として載せた。

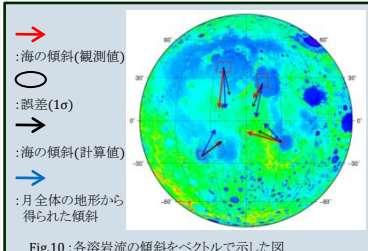


Fig.10: 各溶岩流の傾斜をベクトルで示した図

Table 1 4つのマスコ盆地で得られた地形の傾斜。緯度方向は北に向かって高くなれば正、経度方向は東に向かって高くなれば正と定義する。単位はm/km。

盆地名/傾斜	緯度方向	経度方向
Imbrium	-0.710	0.025
Serenitatis	-0.260	-0.176
Humorum	0.254	0.371
Nectaris	0.170	-0.608

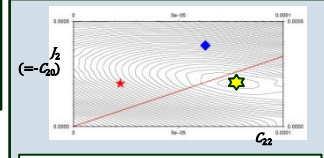


Fig.11: ささまざまな*C*₂₀(横軸)と*C*₂₂(縦軸)の値から計算される傾斜と各溶岩流の傾斜との差のRMSの分布。
★: RMSの値が最小となる*C*₂₀, *C*₂₂の組み合わせ
★: 現在の重力の2次の係数
◆: 現在の月地形の2次の係数
—: *C*₂₀/*C*₂₂の比が同期自転の理想的な値(=3.33)である組み合わせ

4-2. 過去のセレノイドの推察

溶岩流の表面が、それらの噴出当時のセレノイドを表すと仮定し、それらの傾斜を満足する二次の係数を求めてみる。具体的には各盆地の溶岩流の傾斜との差の二乗平均平方根(RMS)の合計値を最小とする*C*₂₀, *C*₂₂の組み合わせを求め、ここでは単純に二つの係数を動かすグリッドサーチを行うこととする。さまざまな*C*₂₀, *C*₂₂の組み合わせに対する、各盆地の溶岩流の傾斜との差の二乗平均平方根(RMS)の合計値の分布をFig.11に示す。

4-3. 考察:過去のセレノイドから推察する月の軌道進化

Fig.11を見ると、月の全体的な2次の係数と比べて、溶岩流から推定された過去のセレノイドの2次の係数は同期自転衛星の理想的な*C*₂₀/*C*₂₂の比に近い値を示す(赤い直線に近い)ことが分かる。このことから月の軌道進化について、例えば月が形成された時には特殊な軌道をとっていたかもしれないが、重層撃期(海の形成期)には同期軌道にあったというストーリーを考えることができる。すなわち、たとえ月全体の傾斜が決定された初期の月はGarrick-Bethell et al. (2006)の主張するような離心率の大きな1:1同期軌道や3:2同期軌道にあったとしても、約40億年前にマスコ盆地が形成された当時にはすでに現在のような離心率の小さな1:1の同期軌道にあったという仮説である。もちろんこのストーリーの時系列的流れに決定的な根拠はなく、この手法単独での月の軌道進化を解き明かすことはできない。また、観測量として用いたマスコ盆地の玄武岩溶岩の傾斜の情報量が少ないため計算結果の誤差も多い。より正確に行うためには傾斜の情報だけでなく、玄武岩溶岩の噴出年代の情報なども集めなければならない。しかしながらこの結果は、この手法が月の軌道進化を考える上で少なくとも一つのアプローチとして有意であることを示すものといえる。

結論

- Garrick-Bethell et al. (2006)は月の大局的形狀のアンバランスを説明するため月が現在と全く異なる運動をしていた可能性を示唆した。
- カウラ則により2次の重力場係数の内、衝突盆地の形成などのランダム成分が占める割合は無視できない大きさであることを示した。
- ランダム成分を考慮していないGarrick-Bethell et al.(2006)の結論は根拠が薄弱で、月の過去の軌道進化を解き明かすものとして適当ではないことが分かった。
- かぐやのLALTから得られた地形データを用いてマスコ盆地の玄武岩溶岩の傾斜を求め、当時のセレノイドを部分的に復元した。
- 復元した過去のセレノイドから、40億年前は現在のような離心率の小さな1:1の同期軌道にあったと考えられた。
- 誤差の大きさや等問題もあるが、少なくとも月の軌道進化を考えるアプローチとして、過去のセレノイドを知ることは有意である。

参考文献
*Araki, H. et al. 2009. Lunar Global Shape and Polar Topography Derived from Kaguya-LALT Laser Altimetry. *Science*, 323, 897-900
*Garrick-Bethell, L, Wisdom, J, Zuber, M. T., 2006. Evidence for a Past High-Eccentricity Lunar Orbit. *Science*, 313, 652-655
*日置幸介, 2010. 地球内部物理学講義ノート, http://www.epsci.hokudai.ac.jp/~hkei/pdf/Phys_inter.pdf
*Innanen, K., 2006. Solving Laplace's Lunar Puzzle. *Science*, 313, 622-623
*Kaula, W. M., 1963. The investigation of the gravitational fields of the moon and planets with artificial satellites. *Adv. Space Sci. Technol.*, 5, 210-230.
*Lambeck, K and Pullan, S., 1980. The lunar fossil bulge hypothesis revisited. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 22, 29-35
*Matsumoto, K. et al., 2010. An improved lunar gravity field model from SELENE and historical tracking data: Revealing the farside gravity features. *J. Geophys. Res.*, 115, E06007. doi:10.1029/2010JE003499.
*Namiki, N. et al., 2009. Far-side Gravity of the Moon from Four-Way Doppler Measurements of SELENE(Kaguya). *Science*, 323, 900-905