

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 25 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22340150

研究課題名(和文)「かぐや」のデータによる月テクトニクス研究

研究課題名(英文)Tectonic study of the Moon by means of Kaguya data

研究代表者

山路 敦(Yamaji, Atushi)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40212287

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,500,000円、(間接経費) 1,950,000円

研究成果の概要(和文)：かぐやのLISMデータなどを使い、月の雨の海北西部において、次のことが判明した。(1)約30億年前からの短縮変形が見られる。(2)逆断層で切られ水平短縮したクレータやlobate scarpの変位量から、差し渡し約500kmのこの地域において0.05%程度の短縮がおこった。これは月の半径の減少分に換算すると、約1km減少という通説より1桁程度小さい。(3)伸張テクトニクスは、この地域では地質学的に最近まであった。(4)これらのことは、従来の月成因論や月のテクトニクス原因論と不調和であり、それらが再検討されねばならないことを示す。

研究成果の概要(英文)：The timing and amount of tectonic deformations were studied in the northwestern Imbrium basin by means of LISM data of Kaguya and LROC data sets. We found that mare ridges and lobate scarps have been formed since ~3 Ga in the study area. It was evidenced by impact craters offset by thrust faults along the ridges and by the ages of mare units that the compressional tectonics has been declined since ~3 Ga. As a result, the shortening of this area was estimated to be 0.05%. The corresponding decrease in lunar radius is ~0.1 km, an order of magnitude smaller than previously assumed. In addition, two craters found to be affected by normal faults are inconsistent with widely accepted view that extensional tectonics was terminated by 3.6 Ga. These results indicate that lunar thermal history should be reexamined.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地質学

キーワード：月 テクトニクス 熱史 惑星探査

## 1. 研究開始当初の背景

米国による 1970 年代までの探査や 2000 年代のかぐや搭載のレーダー・サウンダーによって、月の表層の特に海には地層が広く存在し、ところによりそれが褶曲や断層で変形していることが明らかにされた。海において、地層は最大で数 km もの厚さを持ち、おおむね水平に横たわる。

海の表面にはリッジ(mare ridge または wrinkle ridge)とよばれるミミズ腫れ状の地形が多数見られるが(図 1)、それらは水平短縮テクトニクスの痕跡で、衝上断層や地層が褶曲してできた背斜構造が地形として現れたものである。また、海の縁辺部と海に接する高地には、直線上の谷地形がところどころに見られる。それらは水平伸張テクトニクスによりできたグラーベンである。



図 1 Apollo 15 号司令船から撮影された雨の海南西部のリッジ群。

月は地球に比べて単純な系であり、それらの地質構造の形成にはローカルなテクトニクスだけでなく、グローバルな要因にも支配されて生じたと考えられる。したがって、それらから、月の起源や進化にたいして制約を与えることができる。2 つ例をあげると、(1) 約 36 億年前に水平伸張テクトニクスが伸張したと信じられているが、それはグローバルな冷却がその頃始まったことを示すとされる。この描像は、月の起源について有力なジャイアント・インパクト説と整合性がよくない。(2) 雨の海や晴れの海など、円形の海には同心円状に連なる地質構造が見られる。その成因は、海の数 km におよぶ厚さの玄武岩層がその荷重でリソスフェアを押し下げた

こととされる(マスコン・テクトニクス説)。それならば玄武岩の堆積と構造形成は同時であるはずだが、レーダー・サウンダーの調査により、晴れの海南部では同時でなかったことが判明し、全球冷却の重要性が強調された(図 2)。このようにして、月の地質構造の研究から、月の起源や進化について言及することができるのである。

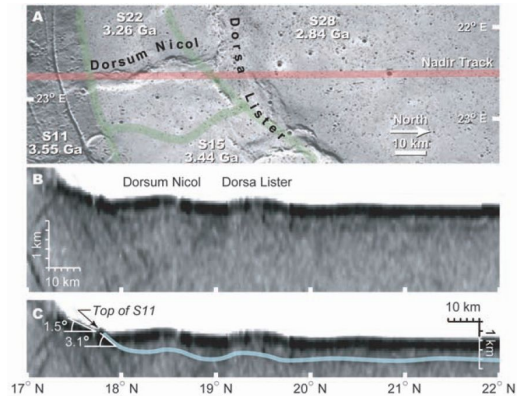


図 2 かぐや搭載レーダー・サウンダーが観測した晴れの海南部のリッジの地下構造(Ono et al., 2009)。地層が褶曲している。

月の典型的なリッジの規模は、幅 5km、高さ 0.5km とされていた(Bryan, 1973)。水平だった月面が褶曲してこれだけの起伏を作ることは、典型的リッジ一条の形成が約 0.1km の水平短縮をとまなうことを意味する。歪みにして 2%の短縮である。雨の海や晴れの海などでは、数条のリッジが併走するので、それらによる短縮を合わせれば最大 10%程度の水平短縮がおこっていることが予想された。

他方、月の全球的冷却によるリッジ群の形成で、月の表面積が減少し、月の半径は 1km 程度減少したことが、ほとんど根拠はなかったものの 1960 年代から議論されてきた。この減少量と半径の比から、これは約 0.06%の短縮歪みに相当する。これはリッジ形成による短縮歪み(Bryan, 1973)より 2 ないし 3 桁も小さい。

## 2. 研究の目的

月地殻の変形量は、月の起源や進化を考える上で重要である。全球的にほぼ一様に、高精度の月面の画像、DTM、レーダ・サウンダ

ーのデータがかぐや探査機によって得られたので、地質構造の形成で月の地殻がどれだけ歪んだか、定量的に見積もることが可能であろうとして、本研究が始まった。変形のタイミングと量を把握することにより、マスコン・テクトニクスを検証および全球冷却に、観測的な制約を与えることを目的とした。

### 3. 研究の方法

石油会社などが用いている、地球の堆積盆で使われている地層の歪み定量化法を、月の海のリッジ群に適用することを当初は目論んでいた。すなわち、

- (1) 海の玄武岩層がつくる背斜構造がリッジという地形として現れていると考え、リッジを直角に横切る側線で、地形に沿った距離と水平距離との差から、リッジ京成による水平短縮量を推定。
- (2) レーダー・サウンダーで描き出されたリッジの地下構造からバランス断面を作成し、リッジ京成による水平短縮量を推定。
- (3) 海の玄武岩の年代をクレータ密度から推定し、変形量の時代変遷を検討する。
- (4) 変形および応力を見積もる方法論の検討。

### 4. 研究成果

雨の海北西部を研究対象地域として選んだ(図3)。その理由はまず、多数のリッジが存在することである。また、約20億年まえと30数億年前の海の玄武岩がどちらも広い面積を覆っているため、20億年前をさかいにテクトニックな変形がどう変わったかが推定できるからである。

米国の重力異常探査プロジェクト GRAIL のデータが利用できるようになると、一つの海の範囲でも、セレノイドの高低差が大きいことが分かった。そこで、かぐやプロジェクトでつくられた地形データと GRAIL のデータのセレノイドの差を使って、リッジ群の地

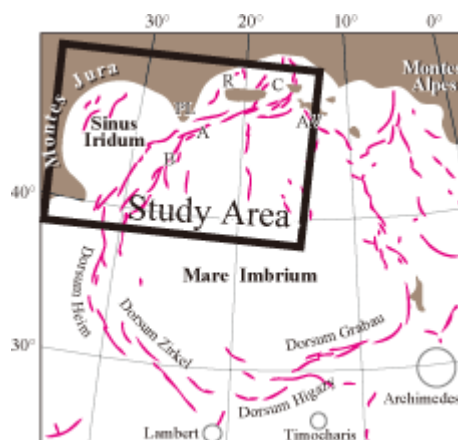


図3 雨の海のリッジ群(赤)と研究対象地域。

形断面を9本作成し(図4)、(1)の手法による短縮量の見積もりを行った。その結果は、研究対象地域の短縮歪みが  $10^{-5}$  の桁であることが分かった。これは、データが不十分な時代の Bryan (1973) の予察の見積もりより、1桁小さい。



図4 雨の海北西部のリッジ群を横切る地形断面の例。かぐやのDTMとGRAILのセレノイドとの差をプロットしている。

このことは実際に短縮量が小さいと言うよりはむしろ、(1)の手法で短縮量を推定するには、かぐやの地形データ(DTM)の分解能が足りないことを意味する。(1)の手法では、地下の褶曲にしたがって月面は波打つだけで、断層で月面が切られることはないとしている。上記の結果は、月面が波打つことによる短縮量が無視できる程度であることを示すのであって、断層による短縮量を別個に見積もるべきことを示している。

実際、かぐやの画像データに、リッジに沿う逆断層で有意に短縮したインパクト・クレータを多数発見した。研究対象地域におい



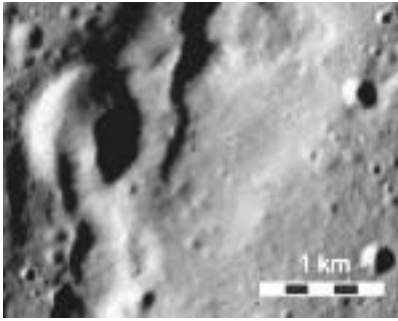


図5 リッジに沿う逆断層で水平短縮し、楕円形になったクレータ。

て、断層による短縮量が最大のクレータを図5に示す。幸い最近になって、米国の探査機の高解像度画像データ(LROC)が月の広範囲で利用できるようになり、かぐやのデータと併せて、断層で短縮したクレータのマップを作成することができた(図6)。その結果、この地域のリッジ群は、その形成により、数十～数百メートルの水平短縮をおこなっていることがわかった。それらの短縮量にもとづいて、雨の海北西部の水平短縮量が $5 \times 10^{-5}$ と見積もられた。これはマスコン・テクトニクスで期待されていたより1桁小さい。また、月の半径の減少量に換算すると0.1km前後であり、従来の1kmという推定より小さいことがわかった。

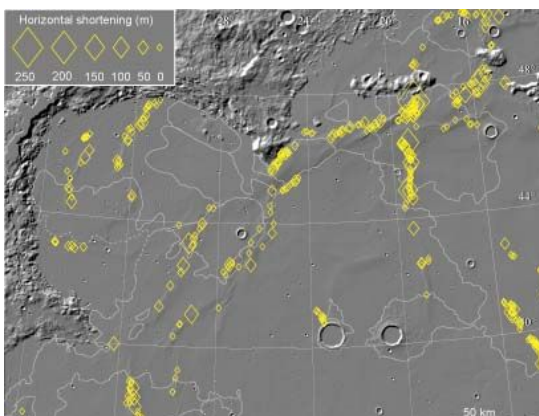


図6 雨の海北西部において、リッジに沿う逆断層で水平短縮したインパクト・クレータのマップと短縮量。

研究対象地域では、残念ながらレーダー・サウンダーで地下構造が十分透視できていない(Oshigami et al., 2009)。また、短縮量が当

初の予想より小さかったため、バランス断面を精度よく描くことができなかった。つまり、(2)の手法を適用することはできなかった。

グラーベンは幅が狭く、また、深さも十分ではないために、地形データからグラーベン形成にともなう地殻伸長量を見積もることは、当初から困難であると当初から考えていた。しかし研究対象地域の画像データを詳細に検討した結果、伸長量は不明であるが、形成が意外に若いグラーベンがあることが分かった(図7)。このことは、約36億年前に伸張テクトニクスが終了したという通説を裏切る予想外の結果である。

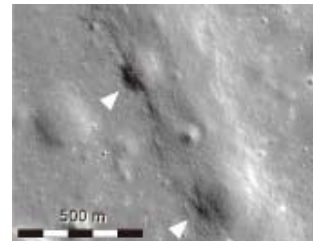


図7 小さく若いクレータを切る正断層が、グラーベンを縁取る。

研究対象地域の海の玄武岩を反射スペクトルにもとづいてユニット分けし、各ユニットでクレータ年代を推定した。結果は従来の推定年代(Hiesinger et al., 2000; Bugiolacchi and Guest, 2009; Morota et al., 2011)と大きな矛盾のない年代値が得られた。

ユニットの年代値と図6の短縮したクレータの分布を比べることにより、古いユニットほど短縮量の大きなクレータが分布することがわかった。すなわち、リッジに沿う逆断層は、30億年もかけてしだいに変位を増大させたことがわかった。

このことは、海におけるリッジ群形成を説明するマスコン・テクトニクス説とは不調和であり、全球冷却によるテクトニクスが地質学的には最近まで続いていることを示唆する。また、若い正断層が発見されたことは、従来の月のテクトニクス原因論が不十分であることを示す。

レーダー・サウンダーで地下構造が明瞭に見えない地域を今回取り上げたので、結局、月に適用する機会はなかったが、変形と応力

を地下断面などに現れた地質構造から推定する方法論についても進展をみた。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計9件)

1. Oshigami, S., Watanabe, S., Yamaguchi, Y., Yamaji, A., Kobayashi, T., Kumamoto, A., Ishiyama, K. and Ono, T., 2014. Mare volcanism: Reinterpretation based on Kaguya Lunar Radar Sounder data. *Journal of Geophysical Research*, 119, 1037–1045. (査読あり)
2. Yamaji, A. and Maeda, H., 2013. Determination of 2D strain from a fragmented single ammonoid. *Island Arc*, 22, 126–132. (査読あり)
3. Yamaji, A., 2013. Comparison of methods of algebraic strain estimation from  $Rf/\phi$  data: A unified theory of 2D strain analysis, *Journal of Structural Geology*, 49, 4–12. (査読あり)
4. Yamaji, A., 2013. Two-dimensional finite deformations evaluated from pre- and post-deformation markers: Application to balanced cross sections. *Journal of Structural Geology*, 51, 144–155.
5. Kobayashi, T., Kim, J. H., Lee, S. R., Kumamoto, A., Nakagawa, H., Oshigami, S., Oya, H., Yamaguchi, Y., Yamaji, A. and Ono, T., 2012. Synthetic aperture radar processing of Kaguya Lunar Radar Sounder data for lunar subsurface imaging. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50, 2161–2174. (査読あり)
6. Yamaji, A. and Sato, K., 2012. A spherical code and stress tensor inversion. *Computers & Geosciences*, 38, 164–167. (査読あり)
7. Yamaji, A. and Sato, K., 2011. Clustering of fracture orientations using a mixed Bingham distribution and its application to paleostress analysis from dike or vein orientations. *Journal of Structural Geology*, 33, 1148–1157. (査読あり)
8. Ono, T., Kumamoto, A., Kasahara, Y., Yamaguchi, Y., Yamaji, A., Kobayashi, T., Oshigami, S., Nakagawa, H., Goto, Y., Hashimoto, H., Omura, Y., Imachi, T., Matsumoto, H., Oya, H., 2010. The Lunar Radar Sounder (LRS) onboard the KAGUYA (SELENE) spacecraft. *Space Science Reviews*, 154, 145–192. (査読あり)
9. Haruyama, J., Ohtake, M., Matsunaga, T., Morota, T., Kawasaki, H., Honda, C., Yokota, Y., Torii, M., Abe, M., Otake, H., Nimura, T., Ogawa, Y., Yamaji, A., Takeda, H., Shirao, M., Asada, N., Demura, H., Hirata, N., Terazono, J.,

Kodama, S., Nakamura, R., Minami, S., Iwasaki, A., Miyamoto, H., Arai, T., Sugihara, T., Yamaguchi, Y., Saiki, K., Hiroi, T., Sasaki, S., Akiyama, H., Hara, S., Hioki, K., Hashimoto, M., Kurashina, Y., Torii, K., Yoshizawa, A., Nakanotani, S., Inoue, J., Masuda, N., Jossset, J.-L., Pieters, C. M., 2010. Preliminary Results of the SELENE Terrain Camera. *Transactions of Space Technology Japan*, Volume 7, pp. Tk\_61-Tk\_66 (査読あり).

[学会発表](計10件)

1. Oshigami, S., Watanabe, S., Yamaguchi, Y., Yamaji, A., Kobayashi, T., Kumamoto, A., Ishiyama, K. and Ono, T., 2014. Mare Volcanism: Reinterpretation based on Kaguya Lunar Radar Sounder Data. 45th Lunar and Planetary Science Conference, Woodlands, Texas. Contribution No. 1777, p.1065. (2014/03/17)
2. Daket, Y., Yamaji, A., Sato, K., Morota, T., Haruyama, J., Ohtake, M. and Matsunaga, T., 2013. Formation and reactivation ages of a lunar mare ridge in northern Imbrium. (EGU Meeting, 2013/04/12).
3. Oshigami, S., Watanabe, S., Yamaguchi, Y., Yamaji, A., Kobayashi, T., Kumamoto, A., Ono, T., 2012. Mare Volcanism in the nearside of the Moon: Reinterpretation based on Kaguya LRS data. American Geophysical Union, Fall Meeting 2012, abstract #P53A-2050 (2012/12/07).
4. 嵩 由美子・山路 敦・佐藤活志・諸田智克・春山純一・松永恒雄・大竹真紀子, 2012. クレータ年代を用いた雨の海北西部に位置するリッジの形成年代制約 (日本惑星科学会, 神戸大, 2012/10/24).
5. 山路 敦, 2011. 衛星のテクトニクス (日本地質学会第118年学術大会 S107, 茨城大学, 2011/09/10).
6. 熊本篤志・小野高幸・山口 靖・山路 敦・小林敬生・押上祥子・笠原禎也, 2011. かぐや月レーダサウンダによる月地下構造・木星ヘクトメータ波の観測 (地球惑星科学連合大会, 幕張メッセ, 2011/05/22)
7. Kubo, N., Namiki, N., Ohtake, M., Yamaji, A., Haruyama, J., Matsunaga, T., 2010. Layering and thickness of basaltic lava flows in Mare Humorum; new spectral analysis of Multiband Imager data of Kaguya (SELENE). Abstracts of Papers Submitted to the Lunar and Planetary Science Conference. 41; Pages: 1915 (2010/03/01).
8. 上岡周平・山路 敦・佐藤活志・春山純一・大竹真紀子・松永恒雄, 2010. 月の詳細地形 (DTM) から推定されたグラーベンの地下構造モデル (O-153) (日本地質学会第117年学術大会講演要旨, 112, 富山大学,

2010/09/20)

9. 上岡周平・山路 敦・佐藤活志・春山純一・大竹真紀子・松永恒雄, 2010. 月の詳細地形 (DTM) から推定されたグラーベン下のマグマだまり (日本惑星科学会秋季講演会, P028, 名大野依学术交流館, 2010/10/06).
10. 熊本篤志・小野高幸・山口 靖・山路 敦・小林敬生・押上祥子・中川広務・笠原禎也・大家 寛, 2010. かぐや月レーダサウンダによる月地表・地下構造の観測 (日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 幕張, 2010/05/24).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.kueps.kyoto-u.ac.jp/~web-bs/yamaji/index.htm>

## 6. 研究組織

- (1) 研究代表者 山路 敦  
京都大学大学院理学研究科 (教授)  
研究者番号：40212287
- (2) 研究分担者 佐藤活志  
京都大学大学院理学研究科 (助教)  
研究者番号：70509942