

月クレータ斜面地形が今も活発に変化している仕組みを解明

【本研究のポイント】

- ・ NASA の月周回衛星 Lunar Reconnaissance Orbiter（以下「LRO」）^{注1)}と日本の月周回衛星「かぐや^{注2)}」のデータを用いて、月の岩塊崩れ、斜度、新鮮領域^{注3)}の分布を調べ、小クレータ形成時の斜面の加速度分布を推定した。
- ・ 岩塊崩れの成因が衝上断層での月震ではなく、小クレータ形成時の局所的な震動によるものであることが強く示唆され、現在も月面のクレータ斜面地形は活発に変化しているものと考えられる。
- ・ 天体衝突によって、斜面上方で岩塊が生成され、衝突時の震動で岩塊が崩れることを繰り返すことで、斜面が緩和するモデルを提案した。

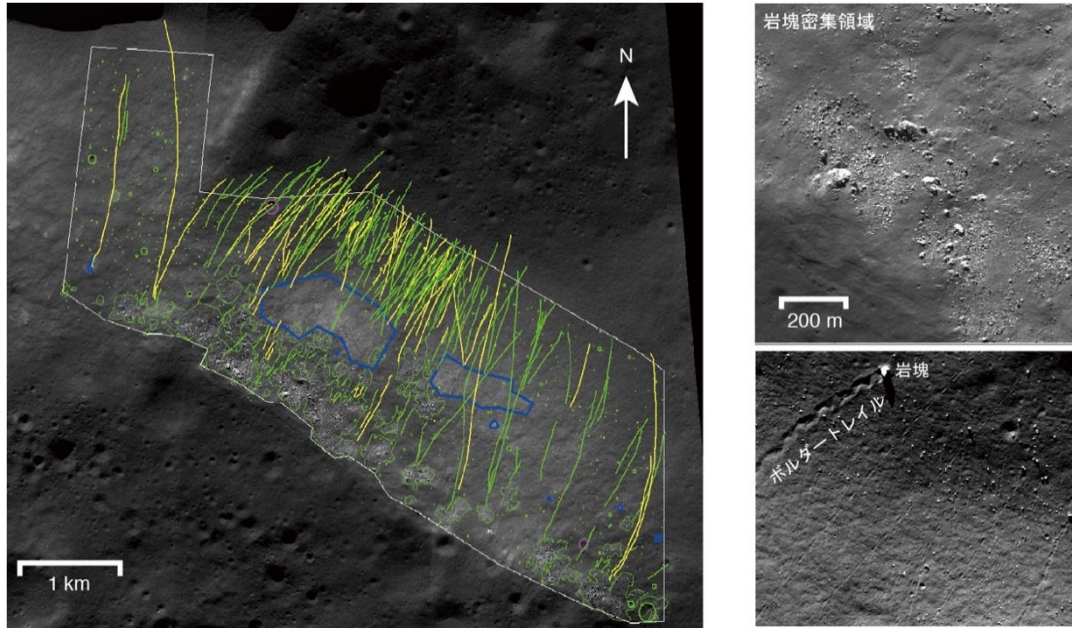
【研究概要】

国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学大学院環境学研究科の池田 あやめ 博士後期課程学生と熊谷 博之 教授は、東京大学大学院理学系研究科の諸田 智克 准教授との共同研究により、LROによって月の岩塊崩れ、小クレータ、斜度、新鮮領域の分布と小クレータ形成時の震動の大きさの推定を行い、岩塊崩れの成因を調べました。

先行研究では、断層で発生する浅発月震によって岩塊崩れが発生すると結論付けられ、斜面上の小クレータ形成時の震動による影響はこれまで定量的に評価されていませんでした。

本研究では、小クレータ形成時の加速度と岩塊が崩れ始めた地点に相関が見られたことから、小クレータ周辺で局所的に大きな加速度がかかり、岩塊崩れが発生した可能性を指摘しました。また、岩塊崩れのあるクレータの位置とアポロ探査で推定された月震の震央距離を比較すると、両者に相関は得られず、月震のみによって岩塊崩れを引き起こすのは難しいことを指摘しました。これらの結果から、岩塊崩れの成因が衝上断層での月震ではなく、小クレータ形成時の局所的な震動によるものであることが強く示唆されると結論づけました。これらの結果を基に、クレータ斜面上方で岩塊が生成され、天体衝突時の震動で崩れることを繰り返し、斜面が緩和するモデルを提案しました。

本研究成果は、2022年10月4日付アメリカ地球物理学連合の雑誌「Journal of Geophysical Research: Planets」に掲載されました。



【研究背景】

月は地球に比べて表面に過去の情報が残っており、月の表面活動を理解することは地球を含めた太陽系進化の解明に貢献するだけでなく、将来的な月探査や月資源の活用時の基礎情報となります。

近年、月周回衛星に搭載された高解像度の画像によって、これまで見ることのできなかつた詳細な地形を調べることが可能になりました。LROに搭載された50 cm/pixelの高解像度の画像によって、数メートルから数十メートルの岩塊が月のクレータ周辺に多く分布していることが分かりました（Kumar et al., 2016; Bickel et al., 2020 など）。また、一部の岩塊が斜面を転がり、その跡が線状に斜面に残っていることも分かりました。このことは「岩塊崩れ」といい、岩塊崩れは重力によって物質が移動する物質移動現象のひとつであると考えられます。Xiao et al. (2013) では、天体衝突と月震の両方が物質移動の原因であるとし、天体衝突は斜面を局所的に揺らす直接的効果と、基盤岩を破壊して斜面を崩壊させる間接的効果があるほか、月震は一度では物質移動が起こるほど十分に物体を動かすことができなくても、くり返し起こると物質移動が発生すると指摘しています。また、衝上断層とよばれる低角逆断層が全球的に分布していることが分かり、その成因は、地球との潮汐力によって形成された可能性（Watters et al., 2019）や月の全球収縮による可能性（Watters et al., 2010）が指摘されていますが、地震波を出すような断層であるかどうかという点も含めて、この断層の成因や特徴は明らかにされていません。先行研究（Kumar et al., 2016; 2019）では、衝上断層と岩塊崩れの位置関係から断層で発生する浅発月震が岩塊崩れの成因であると結論づけていますが、他の要因が岩塊崩れに与える影響については定量的に議論されてきませんでした。

このように、近年発見された月面上の岩塊崩れは月表面の物質移動に伴うダイナミックなプロセスを調べるのに重要ですが、そのメカニズムは詳しく分かっていませんでした。

【研究内容】

本研究では、先行研究で岩塊崩れが発見されているふたつのクレータ斜面で岩塊崩れ、小クレータの分布を LRO の高解像度画像から、斜度と新鮮領域の分布を「かぐや」の数値地形モデルとマルチバンド画像から調べ、小クレータの分布から表面の更新年代^{注 4)}と、クレータ形成時の最大加速度の分布を推定しました。

シュレディンガー盆地^{注 5)}の南側斜面では、図 1 のようにクレータの縁に沿って岩塊が分布し、一部が崩れている様子が確認されました。斜面の更新年代を推定すると、およそ 500 万年前と推定され、シュレディンガー盆地が形成されたと考えられている 39 億年前と比較して、かなり新しい年代であることが分かりました。斜面内に存在する小クレータ形成時の揺れの加速度空間分布と、岩塊が崩れ始めた点を比較すると、両者に相関が見られることが分かりました（図 2）。この結果は、岩塊崩れが斜面に存在する小クレータ形成時の震動で発生した可能性を示しています。また、斜度の大きい領域では小クレータ密度が小さくなり、岩塊密集領域とよばれる斜面上方の領域が新鮮領域と一致することが分かりました（図 3）。

1971 年 1 月に発生したマグニチュード 4 の月震で岩塊崩れが発生したと先行研究(Kumar et al., 2019) で結論づけられているクレータ斜面周辺で、震央距離 200 km 以内にあるクレータについて岩塊崩れの有無を調べた結果、岩塊崩れが見られるクレータの位置と震央距離に相関が見られず、岩塊崩れが月震では説明できないことを示しました（図 4）。

これらの結果から、斜面の傾斜に依存した小クレータと、岩塊崩れの形成過程は次のように説明されます（図 5）。斜度の大きい領域では重力によって、斜面下にレゴリス^{注 6)}が流出し、レゴリス層が薄くなっていることが考えられます。その結果、天体衝突時に小クレータが残りやすく基盤岩を破壊しやすく、破壊された基盤岩は斜面下に崩れて、岩塊が斜面に供給されます。斜度の小さい領域では、斜面情報からレゴリスが供給されるため、レゴリス層が厚く、クレータや岩塊崩れが残りやすいことが考えられます。このモデルは、斜度の小さい領域で、小クレータ密度が高いこと、岩塊崩れの多い領域と小クレータの分布に相関がみられること、新鮮領域と岩塊密集領域の分布が一致することを整合的に説明できます。

従来の研究では、岩塊崩れが月震で起こると結論づけていましたが、本研究では、天体衝突の影響が、岩塊崩れとクレータの緩和に大きな役割を果たしていることを示しました。このようなプロセスは、現在も月表面で起こっており、クレータ斜面地形は活発に変化していると考えられます。

本研究は、名古屋大学及び JST 科学技術イノベーション創出に向けた大学フェローシップ創設事業 JPMJFS2120 による「名古屋大学融合フロンティアフェローシップ」と科学研究費助成事業・基盤研究（A）（20H00194）の支援のもとで行われたものです。

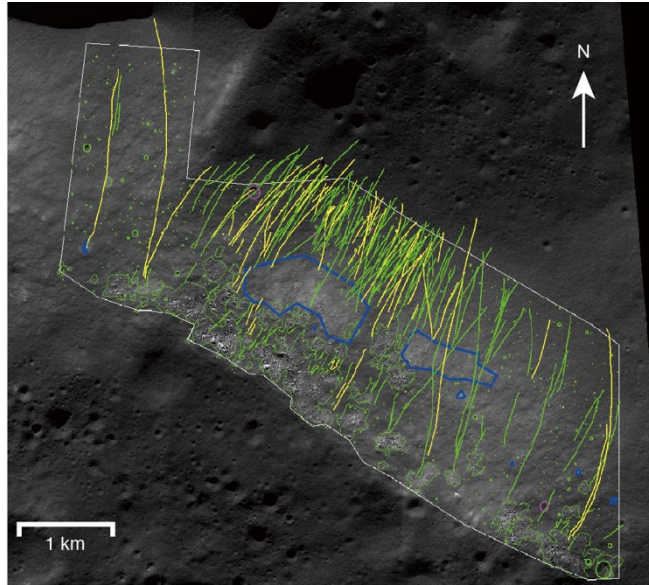


図 1 : LRO の高解像度画像によるシュレディンガー盆地の南側斜面の様子。岩塊密集領域を緑の多角形で、岩塊が崩れた跡を黄色と緑の線で、直径 5 m 以上の小クレータを黄色と緑とマゼンタの円で示している。北東方向が斜面の下方向。画像クレジット : NASA/LROC/GSFC/ASU

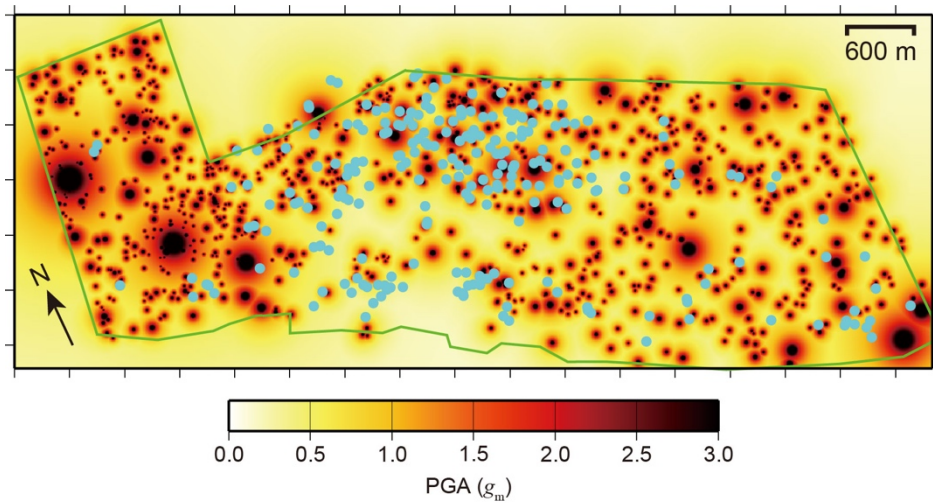


図 2 : 解析領域に存在する小クレータ形成時に斜面が経験する最大の加速度（月の重力加速度で規格化）と、岩塊崩れが起こり始めた地点（水色点）の空間分布。図 1 の領域を西へ 25°回転させている。

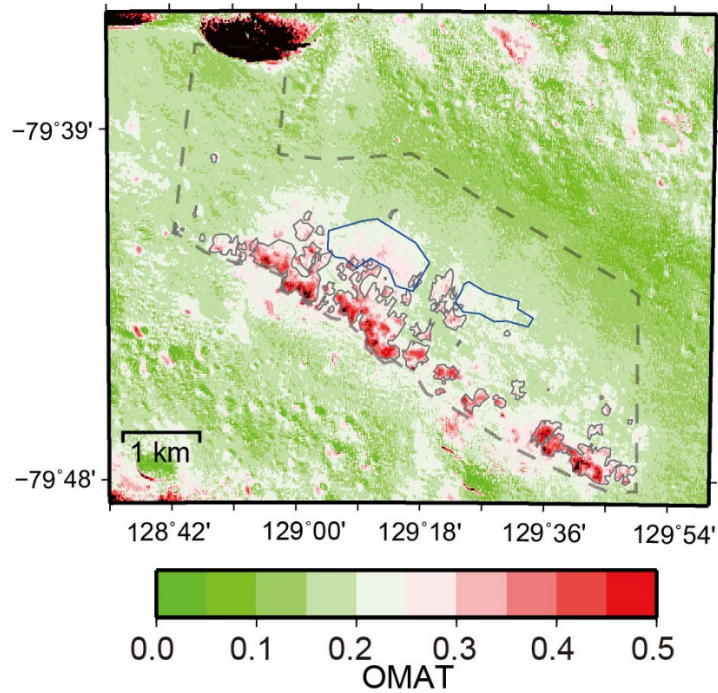


図 3 : 図 1 の領域で表面の新鮮度を推定したもの。赤い領域ほど周辺と比べ相対的に新鮮であることを示す。

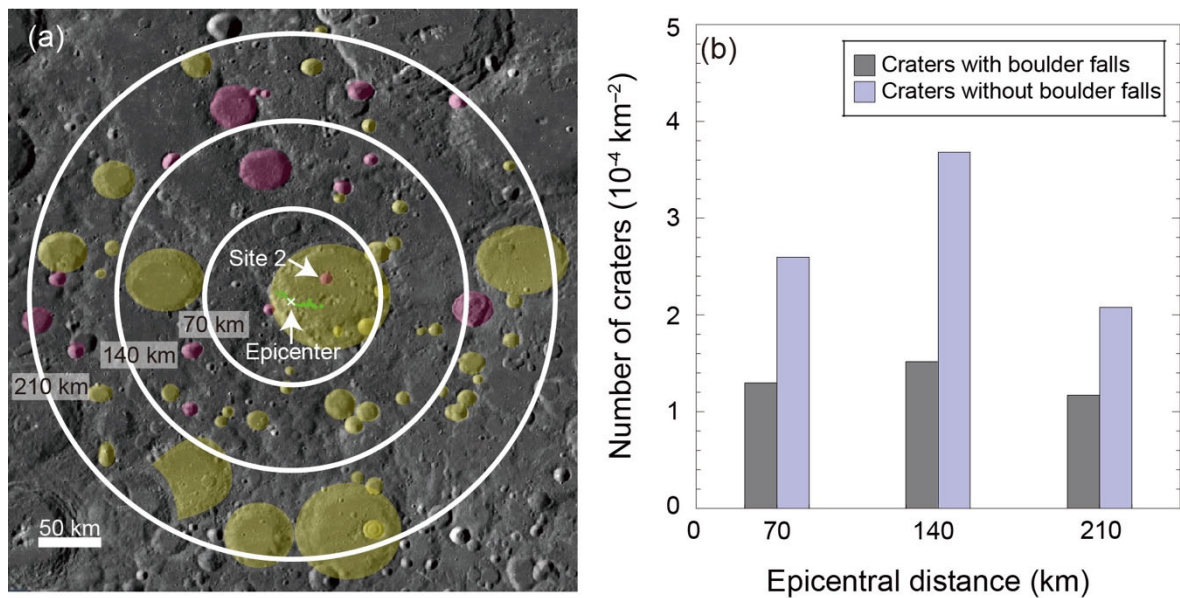


図 4 : (a) 先行研究で推定された震央から約 200 km までで岩塊崩れのあるクレータ (赤) とないクレータ (黄) の空間分布を示したもの。(b) 震央距離 70 km ごとに岩塊崩れのあるクレータとないクレータの数密度を比較したもの。画像クレジット : NASA/LROC/GSFC/ASU

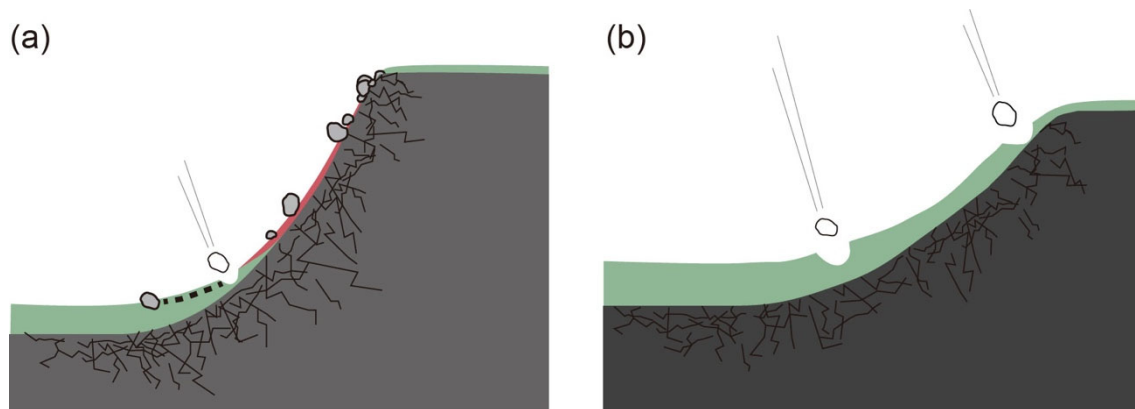


図 5 : クレータ斜面における緩和過程のイメージ図。赤と緑の層がレゴリス層を示す。(a) 岩塊が天体衝突によって地下の岩盤が破碎されて生成され、震動で崩れて斜面に供給される。(b)これを繰り返すことでのような緩和した、厚いレゴリス層をもつ斜面が形成され、天体衝突時に岩盤を破碎できなくなり、岩塊が生成されなくなる。

図 1～5 は Ikeda et al. (2022)の図 2、5、8、13、14 より引用し改変したものです。

【用語説明】

注 1) Lunar Reconnaissance Orbiter :

2009 年に打ち上げられ、現在も運用中の NASA の月周回衛星。高解像度のカメラの他、レーザー高度計や熱放射温度計などを搭載している。

注 2) かぐや :

JAXA が 2007 年～2009 年まで運用していた月周回衛星。岩石組成の観測や重力場観測を全球で行った。

注 3) 新鮮領域 :

宇宙風化とよばれる現象によって反射率が全体に下がり、1000 nm 付近の吸収が弱くなるなどの、天体表面の光学特性が変化する特徴を用いて定式化した指標。大きい値ほど新鮮であることを示す。

注 4) 表面の更新年代 :

月表面に見られるクレータの累積個数密度と、クレータ形成頻度のモデルから推定される年代。一般に、直径の大きなクレータの密度が大きくなると古い年代が推定される。

注 5) 盆地

月表面に見られるクレータのうち特に直径 300 km を超える大きなものを指す。

注 6) レゴリス

月表面を覆う細粒の粒子。

【引用文献】

- Bickel et al. (2020). *Nature Communications*, 11(2862). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16653-3>
- Kumar et al. (2019). *Geophysical Research Letters*, 46(14), 7972–7981.
<https://doi.org/10.1029/2019GL083580>
- Kumar et al. (2016). *Journal of Geophysical Research: Planets*, 121(2), 147–179.
<https://doi.org/10.1002/2015JE004850>
- Watters et al. (2010). *Science*, 329(5994), 936–940.
<https://doi.org/10.1126/science.1189590>
- Xiao et al. (2013). *Earth and Planetary Science Letters*, 376, 1–11.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.06.015>

【論文情報】

雑誌名 : Journal of Geophysical Research: Planets

論文タイトル : Topographic degradation processes of lunar crater walls inferred from boulder falls

著者 :

池田 あやめ 名古屋大学大学院環境学研究科 博士後期課程 2 年

熊谷 博之 名古屋大学大学院環境学研究科 教授

諸田 智克 東京大学大学院理学系研究科 准教授

※本学関係者は下線

DOI: <http://doi.org/10.1029/2021JE007176>

URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2021JE007176>