

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2011 ~ 2012

課題番号：23840048

研究課題名（和文）

新規月探査高解像度データを用いた天体衝突史復元のための月面クレータの年代学研究

研究課題名（英文）

Lunar cratering chronology based on high-resolution image data obtained by the recent lunar explorations

研究代表者

諸田 智克 (MOROTA TOMOKATSU)

名古屋大学・環境学研究科・助教

研究者番号：30415898

研究成果の概要（和文）：

本研究の目的は近年の国内外の月探査ミッションによって蓄積されてきた高解像度画像データを利用し、月面クレータの形成年代を数億年の精度で決定することで、天体衝突史の理解に向けて基礎データを提供することである。本研究では月面の様々な年代の領域においてクレータのサイズ頻度分布計測を遂行し、月における標準クレータサイズ頻度分布関数の導出を行った。その結果、小サイズのクレータのサイズ分布形状は過去の見積もりよりも急勾配を持つ事があきらかとなった。この結果を用いてアポロ・ルナ計画で持ち帰られた岩石試料の放射年代とのキャリブレーションから、月面の年代とクレータ数密度の関係関数を得た。これによると過去 30 億年間の太陽系内側におけるクレータ生成率は時間とともに減少しており、現在の生成率は 30 億年前の半分程度であることがわかった。この天体衝突頻度の長期変化はメインベルトの総数変化を反映していると考えられ、小惑星の衝突破壊の進化履歴を理解する上で重要である。

研究成果の概要（英文）：

In order to investigate the time behavior of impact flux, I performed size-frequency measurements of small craters on ejecta blankets of lunar fresh craters using high-resolution images obtained by Kaguya and Lunar Reconnaissance Orbiter. The measured crater size-frequency distributions have a steeper slope in the diameter range of  $D \leq 100$  m compared to previous production functions. Using new crater production function, I derived the relationship between the crater frequencies and the absolute ages, suggesting that the cratering rate decreased with time.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	2,100,000	630,000	2,730,000

研究分野：惑星科学

科研費の分科・細目：数物系科学・固体地球惑星物理学

キーワード：月，クレータ，クレーター年代学，天体衝突，惑星探査

## 1. 研究開始当初の背景

月面の地質年代決定に当たっては放射年代測定によるものが信頼性が高いが、すべての領域から隈無く試料を採取し分析すること

は不可能である。それに代わって、月面画像データにもとづいた様々な年代決定手法が開発されており、その中で最も研究が進んでいるのは、クレータ数密度による年代決定法

である [e.g., Hartmann, 1970; Neukum, 1983]. これは、古い地域ほど多くのクレータを保持しているという仮定にもとづき、画像データを使って測定したクレータ数密度からその地域の年代を決定する手法で、クレータ年代学と呼ばれている。

クレータ年代学を用いてクレータの形成年代を決定する場合、クレータのフロアや周囲の放出物堆積領域の上に形成された小クレータを使う必要がある。しかし一般に、クレータフロアや放出物堆積領域の面積は小さい。年代決定精度を高めるためには、統計量を増やす必要があり、そのためには直径 100m 以下の小クレータを統計に加える必要がある。しかしながら、主にデータの欠如に起因する問題から、直径数百 m 以下の小クレータを用いたクレータ年代学は十分に確立されたとは言えない。そのため、正確に絶対年代が分かっているのは、アポロ計画で岩石試料が得られているクレータや、アポロ着陸点周辺に位置し、層序関係から年代推定が可能なクレータなど、少数のクレータに限られていた [e.g., Neukum & Ivanov, 1994]. また、相対年代に関しても直径 30km 以上のものに限定されており [Wilhelms, 1987], その信頼性も高いとは言えないのが実情であった。

一方、近年、日本が打ち上げた月周回衛星「かぐや」をはじめとして、アメリカの LRO、中国の Chang'e、インドの Chandrayaan などの月探査衛星が立て続けに打ち上げられ、かつて無いほどの膨大な高解像度画像データが取得されはじめた。それにより、より小さい月面クレータに対しても正確な年代を画像データから決定することが可能になっている。

## 2. 研究の目的

このような背景下において、本研究の目的は、近年蓄積されてきた月全球の高解像度画像データのアドバンテージを活かし、月面クレータの形成年代を数億年の精度で決定するための手法の開発・改良を行い、直径 100m 以下の小クレータを用いたクレータ年代学を確立することであった。更には、本手法を直径 10 km サイズの月面クレータへの適用を通して、月面クレータの詳細年代決定とマップ化を行った。このような月面クレータの詳細地質年代研究は、過去の地球-月系における天体衝突史復元に有効であるだけでなく、月表層の進化過程に関する研究や、将来の月探査ミッション立案においても重要な基礎データになると期待される。

## 3. 研究の方法

微小クレータを用いた年代決定における本質的な問題は、これまで微小クレータを同定するに堪えうる高解像度画像が欠落してい

たために、月面における微小クレータの標準サイズ頻度分布形状が精度よく決定されていなかったことである。そこで本研究では、(1)「かぐや」画像、LRO 画像を用いて直径 4m~300m のクレータに対してサイズ頻度分布を調査し、月面クレータの標準サイズ頻度分布をより小さいクレータまで拡張した。次に、(2) 新たな標準サイズ分布を用いて、絶対年代とクレータ数密度の関係式の再導出を行うことで、微小クレータを用いた年代決定手法を確立した。更には、(3) 年代決定手法を実データに適用し、直径 20km 以上のクレータの年代決定を行った。

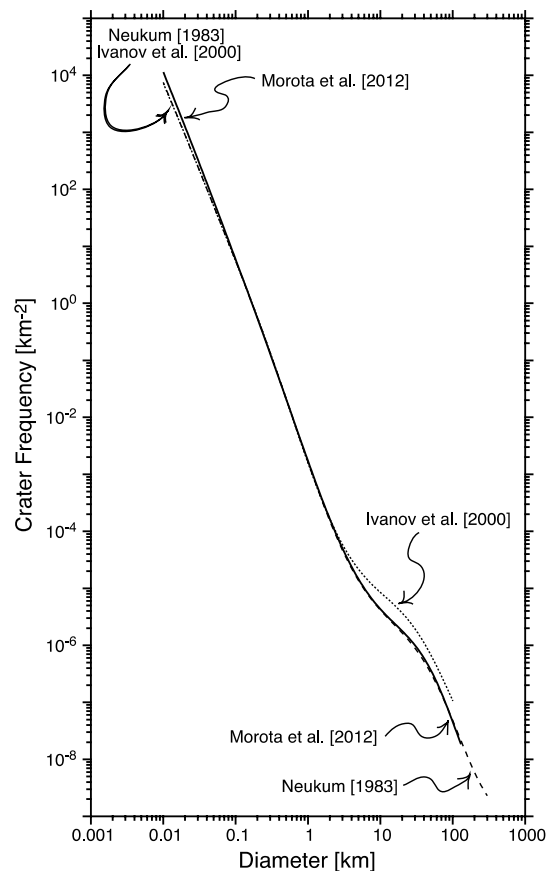


図1 月における標準クレータサイズ頻度分布関数. 本研究で得られたサイズ分布関数(実線)は過去の関数に比べて直径 100m 以下において急勾配となっている。

## 4. 研究成果

月面の様々な年代の領域においてクレータのサイズ頻度分布計測を遂行し、月における標準クレータサイズ頻度分布関数の導出を行った(図1)。その結果、小サイズのクレータのサイズ分布形状は過去の見積もりよりも急勾配を持つ事があきらかとなった。この結果を用いてアポロ・ルナ計画で持ち帰られた岩石試料の放射年代とのキャリブレーション

ションから、月面の年代とクレータ数密度の関係関数を得た(図2)。これによると過去30億年間の太陽系内側におけるクレータ生成率は時間とともに減少しており、現在の生成率は30億年前の半分程度であることがわかった(図3)。この天体衝突頻度の長期変化はメインベルトの総数変化を反映していると考えられ、小惑星の衝突破壊の進化履歴を理解する上で重要である。

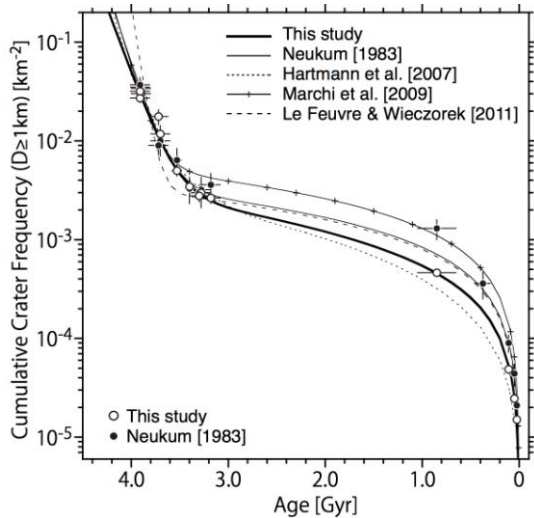


図2 月面の絶対年代とクレータ数密度の関係。

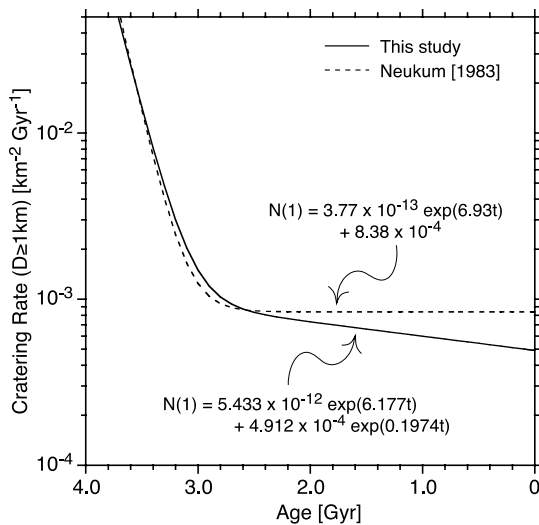


図3 クレータ年代学関数(図2)から見積もられるクレータ生成率の時間変化。本研究でえられたクレータ生成率(実線)は過去30億年において緩やかに減少していることがわかる。

## 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15件)

- (1) Kawamura, T., T. Morota, N. Kobayashi, and S. Tanaka (2011) Lunar cratering asymmetry: a new insight from the Apollo passive seismic experiment, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L15201, doi:10.1029/2011GL048047, 査読有.
- (2) Kimura, J., T. Kawamura, H. Morito, T. Morota, C. Honda, K. Kuramoto, and T. Okada (2011) Sublimation's impact on temporal change of albedo dichotomy on Iapetus, *Icarus*, 214, 596-605, 査読有.
- (3) Ogawa, Y., T. Matsunaga, R. Nakamura, K. Saiki, M. Ohtake, T. Hiroi, H. Takeda, T. Arai, Y. Yokota, S. Yamamoto, N. Hirata, T. Sugihara, S. Sasaki, J. Haruyama, T. Morota, C. Honda, H. Demura, K. Kitazato, J. Terazono, N. Asada (2011) The widespread occurrence of high-calcium pyroxene in bright-ray craters on the Moon and implications for lunar-crust composition, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L17202, doi:10.1029/2011GL048569, 査読有.
- (4) Yokota, Y., T. Matsunaga, M. Ohtake, J. Haruyama, R. Nakamura, S. Yamamoto, Y. Ogawa, T. Morota, C. Honda, K. Saiki, K. Nagasawa, K. Kitazato, S. Sasaki, A. Iwasaki, H. Demura, N. Hirata, T. Hiroi, R. Honda, Y. Iijima, H. Mizutani (2011) Lunar photometric properties at wavelengths 0.5-1.6  $\mu\text{m}$  acquired by SELENE Spectral Profiler and their dependency on local albedo and latitudinal zones, *Icarus*, 215, 639-660, 査読有.
- (5) Yamamoto, S., T. Matsunaga, Y. Ogawa, R. Nakamura, Y. Yokota, M. Ohtake, J. Haruyama, T. Morota, C. Honda, T. Hiroi, S. Kodama (2011) Preflight and infight calibration of the Spectral Profiler onboard SELENE (Kaguya), *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 49, 4660-4676, 査読有.
- (6) 諸田智克 (2011) 「かぐや」が切り開く月面年代学, *日本惑星科学会誌・遊星人*, 20, 324-333, 査読有.
- (7) Yamamoto, S., R. Nakamura, T. Matsunaga, Y. Ogawa, Y. Ishihara, T. Morota, N. Hirata, M. Ohtake, T. Hiroi, Y. Yokota, and J. Haruyama (2012) Olivine-rich exposures in the South Pole-Aitken basin, *Icarus*, 218, 331-344, 査読有.
- (8) Ohtake, M., H. Takeda, T. Matsunaga, Y. Yokota, J. Haruyama, T. Morota, S. Yamamoto, Y. Ogawa, T. Hiroi,

- Y. Karouji, K. Saiki, and P.G. Lucey (2012) Dichotomic crustal formation 1 of the Moon indicated by Mg# under the influence of the Earth, *Nature Geosci.*, 5, 384-388, 査読有.
- (9) Cho, Y., T. Morota, M. Yasui, N. Hirata, J. Haruyama, and S. Sugita (2012) Young mare volcanism in the Orientale region contemporary with the Procellarum KREEP Terrane (PKT) volcanism peak period ~2 billion years ago, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L11203, doi:10.1029/2012GL05183, 査読有.
- (10) Kobayashi, S., Y. Karouji, T. Morota, H. Takeda, N. Hasebe, M. Hareyama, M. Kobayashi, E. Shibamura, N. Yamashita, C. d'Uston, O. Gasnault, O. Forni, R.C. Reedy, K.L. Kim, and Y. Ishihara (2012) Lunar farside Th distribution measured by Kaguya gamma-ray spectrometer, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 337-338, 10-16, 査読有.
- (11) Yamamoto, S., R. Nakamura, T. Matsunaga, Y. Ogawa, Y. Ishihara, T. Morota, N. Hirata, M. Ohtake, T. Hiroi, Y. Yokota, and J. Haruyama (2012) Massive production of pure anorthosite on the Moon by the giant impact, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L13201, doi:10.1029/2012GL052098, 査読有.
- (12) 大竹真紀子, 荒井朋子, 武田弘, 唐牛讓, 佐伯和人, 諸田智克, 小林進悟, 大槻真嗣, 國井康晴 (2012) 月裏側高地物質サンプルリターン, *日本惑星科学会誌・遊星人*, 21, 217-223, 査読有.
- (13) 長勇一郎, 諸田智克, 三浦弥生, 亀田真吾, 吉岡和夫, 岡崎隆司, 並木則行, 荒井朋子, 小林正規, 石橋高, 大野宗祐, 千秋博紀, 和田浩二, 橘省吾, 渡邊誠一郎, 古本宗充, 本田親寿, 杉原孝充, 石原吉明, 大竹真紀子, 小林直樹, 唐牛讓, 武田弘, 寺田健太郎, 鎌田俊一, 佐伯和人, 小林進悟, 國井康晴, 大槻真嗣, 杉田精司 (2012) その場年代計測装置による月惑星年代学探査, *日本惑星科学会誌・遊星人*, 21, 267-275, 査読有.
- (14) Nakamura, R., S. Yamamoto, T. Matsunaga, Y. Ishihara, T. Morota, T. Hiroi, H. Takeda, Y. Ogawa, Y. Yokota, N. Hirata, M. Ohtake, and K. Saiki (2012) Compositional evidence for an impact origin of the Moon's Procellarum basin, *Nature Geosci.*, 5, 775-778, 査読有.
- (15) Kamata, S., S. Sugita, Y. Abe, Y. Ishihara, Y. Harada, T. Morota, N. Namiki, T. Iwata, H. Hanada, H. Araki, K. Matsumoto, E. Tajika (2013) Viscoelastic deformation of lunar impact basins: Implications for heterogeneity in the deep crustal paleo-thermal state and radioactive element concentration, *J. Geophys. Res.*, 118, 1-18, doi:10.1002/jgre.20056, 査読有.
- [学会発表] (計 5 6 件)
- (1) 諸田智克, 春山純一, 大竹真紀子, 松永恒雄, 山本聡, 石原吉明, 本田親寿, 小林進悟, 横田康弘, 古本宗充, 武田弘, 月の衝突盆地の層序と月初期の衝突史, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 幕張, 2011/05 (PPS024-10).
- (2) 諸田智克, 石原吉明, 若手の目から見た惑星探査の将来像, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 幕張, 2011/05 (PPS023-10).
- (3) 諸田智克, 石原吉明, 佐々木晶, ホーセンス・サンダー, 松本晃治, 野田寛大, 荒木博志, 花田英夫, 田澤誠一, 菊池冬彦, 石川利昭, 鶴田誠逸, 春山純一, 大竹真紀子, 月の海の火成活動と地殻構造との関係, 第 44 回月・惑星シンポジウム, 相模原, 2011/08.
- (4) 諸田智克, 月面年代学から太陽系, 地球型惑星の進化を探る, 日本惑星科学会秋季大会, 相模原, 2011/10
- (5) 諸田智克, 春山純一, 本田親寿, 大竹真紀子, 平田成, 出村裕英, 山本聡, 松永恒雄, 横田康弘, 中村良介, 石原吉明, 渡邊誠一郎, 古本宗充, 月の小クレータを用いたクレータ年代学, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 幕張, 2012/05 (PPS025-10).
- (6) 諸田智克, 渡邊誠一郎, 古本宗充, 本田親寿, 杉原孝充, 石原吉明, 大竹真紀子, 小林直樹, 唐牛讓, 荒井朋子, 武田弘, 寺田健太郎, 杉田精司, 鎌田俊一, 長勇一郎, 三浦弥生, 佐伯和人, 月面年代学シリーズ探査, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 幕張, 2012/05 (PPS023-03).
- (7) 諸田智克, 春山純一, 本田親寿, 大竹真紀子, 平田成, 出村裕英, 山本聡, 松永恒雄, 横田康弘, 中村良介, 石原吉明, 渡邊誠一郎, 古本宗充, 地球-月系における過去 30 億年の天体衝突史とクレータ年代学モデルの修正, 日本惑星科学会秋季大会, 神戸, 2012/10 (01-03).
- (8) Morota, T., S. Kato, J. Haruyama, M. Ohtake, and T. Matsunaga, Mare volcanism in Oceanus Procellarum and Mare Imbrium: Timing and characteristics of the latest mare

eruption of the Moon, SELENE Symposium  
2013, Sagamihara, 2013/01.

〔図書〕（計0件）  
無し

〔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

6. 研究組織  
(1) 研究代表者  
諸田 智克 (MOROTA TOMOKATSU)  
研究者番号：30415898  
(2) 研究分担者なし  
( )  
研究者番号：  
(3) 連携研究者なし  
( )  
研究者番号：