

機関番号：82645

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20540416

大量画像処理によるCSFD法とDL法を発展させた月微小地質区分の年代推定法研究  
研究課題名 (英文)

Model age determination for small geological units of the Moon by applying CSFD method  
and/or DL method to a large amount of image data

研究代表者

春山 純一 (HARUYAMA JUNICHI)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号：40373443

研究成果の概要 (和文)：本件研究課題では、日本の月探査機 SELENE (かぐや) の大量のカメラデータを用いて、これまで推定されてきたクレータサイズ頻度分布 (CSFD) やクレータ崩壊消滅直径 (DL) などを元にした再解析を試みるなどして、月のごく小さなユニットを含めた地質地域の年代推定法の研究を行った。その結果、年代推定精度向上が確認され、その結果を利用して、これまで十分な解像度では得られていなかった地域を含む月の海ほぼ全域の年代について、新たに再推定することが出来た。

研究成果の概要 (英文)：We studied how to estimate the model ages of small geological units, with using Crater Size Frequency Distribution Method and from a view point of crater degradation and disappearance status, based on a large amount of SELENE Terrain Camera data. As a result, it was confirmed that the data accuracy of newly estimated ages could be highly improved. We re-estimated almost all the Mare deposits of the Moon.

交付決定額

(金額単位：円)

|       | 直接経費      | 間接経費      | 合計        |
|-------|-----------|-----------|-----------|
| 20 年度 | 1,800,000 | 540,000   | 2,340,000 |
| 21 年度 | 900,000   | 270,000   | 1,170,000 |
| 22 年度 | 800,000   | 240,000   | 1,040,000 |
| 年度    |           |           |           |
| 年度    |           |           |           |
| 総計    | 3,500,000 | 1,050,000 | 4,550,000 |

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学、固体地球惑星物理学

キーワード：固体惑星、衛星、小惑星

## 1. 研究開始当初の背景

本研究の開始前年 (平成 19 年、2007 年) に、月探査機「かぐや」(SELENE) は打ち上げに成功し、SELENE 搭載地形カメラはその後順調にデータ取得を行い、2009 年に「かぐや」がミッションを終了するに至っては、月全面のデータの取得に成功した。SELENE 地形カメラによるデータが取得される前においては、10m 程度の高解像度データで撮像されていた月面は、ごく一部に限られていたが、

SELENE データにより、本研究課題である、大量画像処理による、クレータサイズ頻度分布 (CSFD) 法や、クレータの崩壊消滅直径 (DL) 法などをクレータ観察を基礎におく月微小地質区分の年代推定法研究への道が開かれた。

## 2. 研究の目的

研究は、月面上の 1 度×1 度 (約 30km x 30km 平方) 程度の微細地域 (特に Eratosthenian

(約 30 億年前～10 億年前) ならびに Copernican (約 10 億年前～現在) の微細地域) について、数億年より高い精度で、噴出年代やクレータ形成年代、地質学的詳細区分を行う手法を検討し、また適用しようとするものである。

### 3. 研究の方法

本研究では、ルナーオービターやアポロといった過去のデータに加え、我が国の月探査機「かぐや」搭載地形カメラやマルチバンドイメージャの月全球の高解像地形データ、特に地形カメラデータを利用し、これまで推定されてきたクレータサイズ頻度分布 (CSFD) やクレータ崩壊消滅直径 (DL) などを元にした再解析を試みるなどして、月の年代推定法を確認する。また、これまで、十分な解像度では得られていなかった地域の年代について、新たに、あるいは再推定する。

### 4. 研究成果

#### 1) 年代推定法の検証

クレータを利用した惑星表面の年代推定においては、画像の解像度、そして太陽高度が大きく影響するとこれまで考えられてきた。10mの画素分解能を持つ SELENE 地形カメラは、その一年半あまりにわたる観測により、月面全域について様々な太陽高度での観測に成功した。地形カメラは、解像度が 10 mあり、数百mのクレータは確実に視認できる。したがって、30km x 30km 四方程度でも、数百mのクレータ数は百以上に上る。より小さなものは、千にも至り、十分な統計量を稼ぐことができる。これらの大量データを使って、年代推定法の検討を試みた。

その結果、まず、数百mサイズのクレータでも、きわめて良好なデータフィッティングが得られることが分かった (図 1)。地形カメラはそのデータの質 (S/N、MTF 等) が、十分に打ち上げ前検証データ等で保証されており、クレータのフィッティングが良かったということは、CSFD 法などによる年代推定法がきわめて妥当に適用されること確認された。これまで、同定個数に起因する統計量的な年代推定誤差は、数億年を下回る。

更に、数百mサイズのクレータの同定が確実に出来るようになったため、数百mにおける年代の transient (移行) が確認されることがわかった。この transient は、小さなクレータが新しく「薄い」溶岩層で隠されることによって起こると考えられる。つまり、古い年代の溶岩層の上に (薄い) 新しい溶岩層が形成されることによる。たとえば 600m～700mのあたりで、年代が変わっている場合、古い年代の溶岩層を、数 10mの新しい年代の溶岩が覆うことで、この変化が見られることになる (図 1)。

しかし、SELENE 以前のデータで数百m程度の解像度であると、この transient は確認できない。したがって、これまで、SELENE 地形カメラの解像度 10m程度で撮像されていない地域は特に、SELENE 地形カメラデータに基づく全面的な年代の再推定の必要性が出る、という重要な結果をもたらした。

#### 2) SELENE 大量データ処理による月裏側の年代決定

1) これまで、月の裏側は、かなり早い時期 (35 億年前程度) に、海を形成するような溶岩流の噴出は終了したという報告しかされていなかった。一方月の表側については、10 億年前程度まで噴出活動があるという年代決定の報告がされていた。しかしながら、月の裏側の地形データ情報は、SELENE 以前は、おおよそ 300m程度の解像度でしかなく、その精度は、1) でも明らかにされたように、月の表面の年代推定には十分とは言いがたい。本研究では、その点を念頭に、月の裏側全域にわたって、大量処理を試みて、海を形成する溶岩流の最終噴出年代を、クレータを利用した年代から推定することを行った。つまり、月の裏側の火山活動時期の推定である。

その結果、月クレータの大量処理に基づく年代決定により、北半球、南半球といずれにも、25 億年の年代を示す溶岩層の堆積を持つ海があることが発見された。見つかった若い (25 億年程度の年代を示す) 海は、数十 km x 数十 km と比較的小規模な地質ユニットであることが多く、統計数を稼ぐためにも数百 m規模の小さなクレータのカウンティング必要であった。新しい年代の導出については、これまで CSFD 法等のクレータ年代学を適用できるようなデータが全く無かったケース (たとえば、Antoniadi クレータのフロアの溶岩流ユニット) と、クレータ年代の Transient が明瞭に確認され表層の若い年代が認められたケース (たとえば、Apollo の海、モスクワの海のユニット) とがある。

この、大量データ処理による裏の火山活動のクレータ年代推定結果は、先に述べたように、これまでの報告より 10 億年も若い年代を示すものであり、月の裏の火山活動が、より長く続いていたことを示す、月の進化を研究する上で非常に重要な結果であった。本研究結果は、Science 誌 (Haruyama et al., 2009) に掲載された (図 2)。

更に、月の裏側の海の一つであるモスクワの海については、新しい溶岩によるクレータの被覆・消滅を基礎に置く詳細解析により、モスクワの海における詳細な火成活動史が明らかにされた (Morota et al., 2009) (図 3)。

### 3) SELENE 大量データ処理による月全球の若い地域の年代推定

2) と同種の研究は、月の表側の、特に若いとされたきた地域（嵐の大洋など）の年代の再推定が必要であることを、より認識させることとなった。月の表側については、アポロによって取得されたごく一部を除いては、SELENE 以前のデータは、解像度として 60m 程度のもが多い。アポロデータにおいても、opposition effect（太陽光入射角が撮像角と同一となり、突出した太陽光反射となるような効果）により、クレータの判読に堪えないものも少なからずある。加えて、ルナーオービターデータなどは、1960 年代のデータであり、昨今の探査機データに比べて質などかなり劣る。一方 SELENE データは、量・質ともに優れており、加えてデジタル化されたデータにより大量データ処理が可能なのものである。

本研究では、月の表側の海の溶岩層の年代をクレータ年代学にて再推定することを試みた。解析の結果、月では全球的に 25 億年前まで、嵐の大洋・雨の海領域では 15 億年前までマグマ噴出が起こったことが明らかになった (Morota et al., 2011) (図 4、5)。一方、月隕石の年代決定から 43 億年前にはすでにマグマ噴出活動が始まっていたことが知られている。つまり月の内部は全球的に 20 億年もの間、嵐の大洋・雨の海領域にいたっては 30 億年もの間、熱かったことを示している。なお、これまでの研究では、一部 10 億年前まで活動があったと思われる領域があったが、本研究では、もう少し古く約 15 億年前に大規模な火成活動はほぼ終焉したのではないかと推測される。先に述べたように、これは SELENE データの質の向上によるところが大きい (本研究 1 の結果より)。本研究の成果によって得られた月の海の溶岩マップ (図 4) は、今後の様々な月の地質区分を元にした研究の基礎となると期待される。

なお、非常に最近 (1000 年前) に形成されたと考えられていた月裏側北半球に存在するジョルダノブルーノクレータ (約 20km 直径) については、SELENE 地形データにおいて、クレータのリムにできていた数百 m サイズの小クレータを発見し (図 6)、それをもとにした年代推定から、ジョルダノブルーノクレータの形成が、1000 年前ということでは無く、クレータ形成年代は、数百万年前程度であることが導き出された (Morota et al., 2009)。もし、それまで考えられていたように、ジョルダノブルーノクレータが 1000 年前という極めて最近の時期に形成されていたならば、クレータサイズ頻度分布による年代推定は、大きな変更を必要とした可能性があったが、本研究の結果、そうした可能性は

否定されるに至ったといえる。

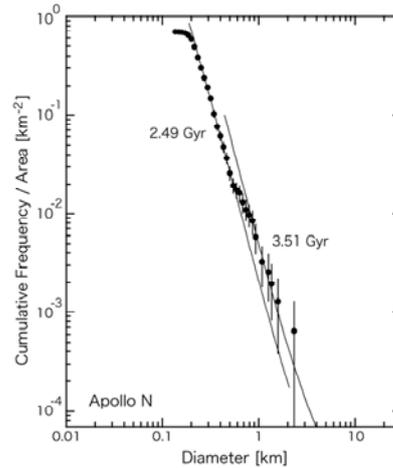


図 1 アポロの海内北部ユニットのクレータサイズ頻度分布。本研究によって明かされた、海の溶岩層上のクレータサイズ頻度分布の一例。通常、溶岩層の形成年代によって、クレータのサイズの頻度が同一べき直線に乗る。しかし、この例では、同位置の地質ユニットにもかかわらず、二つの年代を表すべき直線に乗っている。古い溶岩層 (ここでは、3.51Gyr の形成年代) が、薄く新しい溶岩層 (2.49Gyr の形成年代) で覆われ、古い時代の約 500m 以下のクレータが被覆・消滅していることを示す。この結果は、数百 m 規模のクレータが確実に同定出来ると、表面の薄い年代が新たに発見される可能性があることを示している。(Haruyama et al., Science, 2009 より)

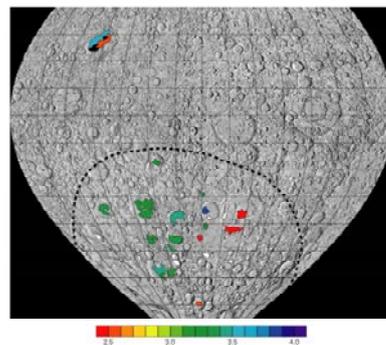


図 2 本研究によって検討されたクレータ年代学の月の裏側への適用結果。月の裏側の年代は、これまでは知られてた 35 億年前程度に終焉していたという報告しかなかったが、本結果は、それより 10 億年も長く活動が、月裏側全球規模で続いていたことを示している。月の火成活動史を根本的に見直す必要が生じる、という月の進化を研究する上で、非常に重要な結果へとつながった (Haruyama et al., Science, 2009 より)。

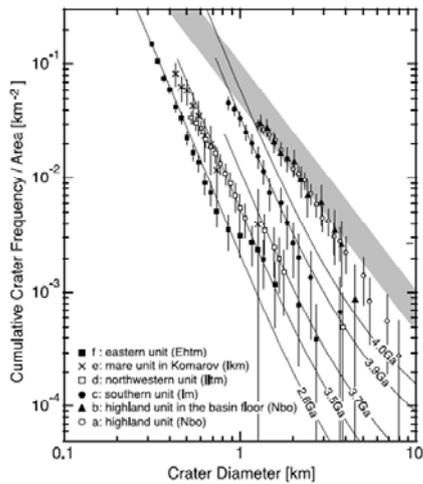


図3 モスクワの海の各地質区分における年代推定結果。この結果と、各ユニット内のクレータのリムの被覆・消滅度を詳細に計測することで、モスクワの海内の各年代における溶岩噴出量が推定された (Morota et al., GRL, 2009 より)

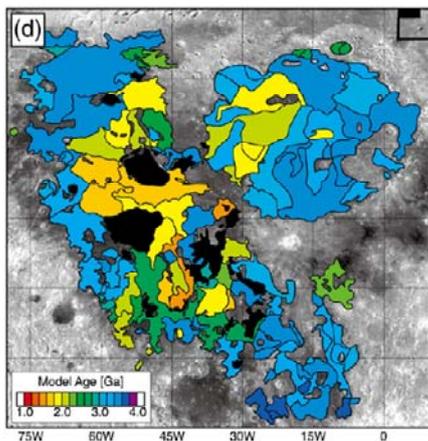


図4 月の嵐の大洋の年代分布。本研究により詳細に再評価が行われた。詳細な領域もデータの解像度の向上によって、より精度の高い年代推定が可能となった。結果、これまでの誤差は縮小するとともに、一部理論的に予想されていたように、以前より古めの年代となったところもある。特に、10億年前と推定されていたコペルニクス近傍のある地質ユニットについては、15億年ほど前と再評価されるなど、大きな進展がなされた (Morota et al., EPSL, 2011)。

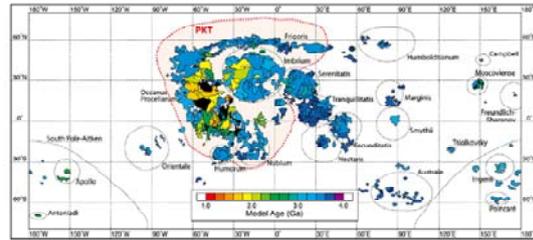


図5 月の全球の海の年代分布。図4の全球版。SELENE 地形カメラの全球の大量データを処理し、月の全球について、本研究により詳細に年代再評価が行われた。今後、この年代情報をもとに月の進化、特に火成活動史の構築が進むと期待される (Morota et al., EPSL, 2011)。

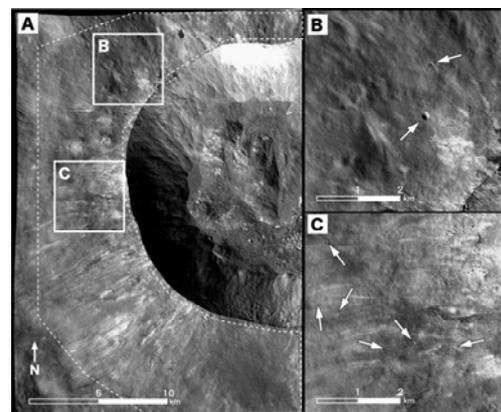


図6 ジョルダノブルーノクレータのリムの上のクレータ。1000年前に形成されたと考えられていたが、クレータのリムに数百mサイズの小クレータが発見された。それをもとにした年代推定から、ジョルダノブルーノクレータの形成は、数百万年前程度であることが導き出された。もし、それまで考えられていたように、ジョルダノブルーノクレータが1000年前という極めて最近の時期に形成されていたならば、クレータサイズ頻度分布による年代推定は、大きな変更を必要とした可能性があったが、本研究の結果、その可能性を否定するに至った。(Morota et al., MAPS, 2009)

## 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8件) 以下、主なもの5件を記す。

- 1) Tomokatsu Morota, Junichi Haruyama, Makiko Ohtake, Tsuneo Matsunaga, Taichi Kawamura, Yasuhiro Yokota, Chikatoshi Honda, Jun Kimura, Naru Hirata, Hirohide

Demura, Akira Iwasaki, Takamitsu Sugihara, and LISM Working Group, "Timing and Duration of Mare Volcanism in the Central Region of the Northern Farside of the Moon", *Earth and Planetary Science Letters* 302, Issue 3-4, p.255-266 doi:10.1016/j.epsl.

2010.12.028.201, 2011 査読有り

2) Asada, N., N. Hirata, H. Demura, N. Harada, Y. Shibata, S. Kikuchi, T. Hodokuma, J. Haruyama, M. Ohtake, T. Matsunaga, Y. Yokota, T. Morota, C. Honda, Y. Ogawa, M. Torii, T. Nimura, H. Araki, and S. Tazawa, "Computational Geology for Lunar Data Analysis", *Advances in Geosciences*, vol. 19, pp. 77-88, 2010 査読有り

3) Tomokatsu Morota, Junichi Haruyama, Chikatoshi Honda, Makiko Ohtake, Yasuhiro Yokota, Jun Kimura, Tsuneo Matsunaga, Yoshiko Ogawa, Naru Hirata, Hirohide Demura, Akira Iwasaki, Hideaki Miyamoto, Ryosuke Nakamura, Hiroshi Takeda, Yoshiaki Ishihara, and Sho Sasaki, "Mare volcanism in the lunar farside Moscoviense region: Implication for lateral variation in magma production of the Moon", *Geophysical Research Letter*, VOL. 36, L21202, doi:10.1029/2009GL 040472, 2009 査読有り

4) Morota, T., J. Haruyama, H. Miyamoto, C. Honda, M. Ohtake, Y. Yokota, T. Matsunaga, N. Hirata, H. Demura, H. Takeda, Y. Ogawa, and Jun Kimura, "Formation age of the 22-km-diameter lunar crater Giordano Bruno", *Meteoritics & Planetary Science* 44, No. 8, 1115-1120, 2009 査読有り

5) Haruyama, J., M. Ohtake, T. Matsunaga, T. Morota, C. Honda, Y. Yokota, M. Abe, Y. Ogawa, H. Miyamoto, A. Iwasaki, C. M. Pieters, N. Asada, H. Demura, N. Hirata, J. Terazono, S. Sasaki, K. Saiki, A. Yamaji, M. Torii, J. -L. Josset, "Long-Lived Volcanism on the Lunar Farside Revealed by SELENE Terrain Camera", *Science*, 323, 905-908, 2009 査読有り

[学会発表] (計 10 件) 国際学会 (国内学会は多数)

1) T. Morota, J. Haruyama, M. Ohtake, T. Matsunaga, S. Yamamoto, Y. Ishihara, C.

Honda, S. Kobayashi, Y. Yokota, M. Furumoto, and H. Takeda, "EJECTA THICKNESS OF LUNAR IMPACT BASIN," 42nd, Lunar Planetary Science Conference, March 7-11, 2011, The Woodlands, Texas, USA.

2) Jolliff, B., L. C. Shearer, L. R. Gaddis, L. R. C. M. Pieters, J. W. Head, J. Haruyama, J., R. Jaumann, M. Ohtake, G. Osinski, D. A. Papanastassiou, "MoonRise: Sampling South Pole-Aitken Basin as a Recorder of Solar System Events (Invited)" AGU fall meeting, December 13-17, 2010, San Francisco, California, USA.

3) Suzuki, S., C. Honda, J. Haruyama, N. Hirata, N. Asada, H. Demura, K. Kitazato, Y. Ogawa, J. Terazono, T. Moroda, M. Ohtake, "Retention time of rays around small lunar craters", American Geophysical Union fall meeting, Meeting, December 13-17, 2010, San Francisco, California, USA.

4) J. Haruyama, M. Ohtake, T. Matsunaga, T. Morota, H. Kawasaki, C. Honda, Y. Yokota, M. Abe, H. Otake, T. Nimura, Y. Ogawa, A. Yamaji, H. Takeda, M. Shirao, N. Asada, H. Demura, N. Hirata, J. Terazono, S. Kodama, R. Nakamura, S. Minami, A. Iwasaki, H. Miyamoto, T. Arai, T. Sugihara, Y. Yamaguchi, K. Saiki, T. Hiroi, S. Sasaki, H. Akiyama, S. Hara, K. Hioki, M. Hashimoto, Y. Kurashina, K. Torii, A. Yoshizawa, S. Nakanotani, J. Inoue, M. Torii, N. Masuda, M. Yokomizo, Jean-Luc Josset, and C. M. Pieters, "New Views of the Moon from the SELENE (KAGUYA)/LISM/Terrain Camera one-year observation", 27th. Int. Sym. Tec. Space Sci., July 5-12, 2010, Tsukuba, Japan,

5) Morota T. J. Haruyama, M. Ohtake, T. Matsunaga, Y. Yokota, C. Honda, T. Sugihara, J. Kimura, Y. Ishihara, T. Kawamura, A. Iwasaki, K. Saiki, H. Takeda, "Mare Volcanism on the Farside and in the Orientale Region of the Moon", 40th Lunar planetary Science Conference, March 23-27, 2009, The Woodlands, Texas, USA.

6) T. Morota, J. Haruyama, C. Honda, M. Ohtake, Y. Yokota, J. Kimura, T. Matsunaga, Y. Ogawa, N. Hirata, H. Demura, A. Iwasaki, H. Miyamoto, R. Nakamura, Y. Ishihara, and S. Sasaki, "AGES AND THICKNESSES OF MARE BASALTS IN MARE MOSCOVIENSE: RESULTS FROM SELENE (KAGUYA) TERRAIN CAMERA DATA", 40th Lunar planetary Science Conference, 2009

7) J. Haruyama, M. Ohtake, T. Matunaga, T. Morota, C. Honda, Y. Yokota, Y. Ogawa, LISM work-ing group SELENE (KAGUYA),

“TERRAIN CAMERA OBSERVATION RESULTS OF NOMINAL MISSION PERIOD”, 40th Lunar planetary Science Conference, March 23-27, 2009, The Woodlands, Texas, USA.

8) N. Hirata, J. Haruyama, M. Ohtake, T. Matsunaga, Y. Yokota, T. Morota, C. Honda, Y. Ogawa, T. Sugihara, H. Miyamoto, H. Demura, and N. Asada “MORPHOLOGICAL ANALYSES OF TYCHO CRATER WITH KAGUYA DATA”, 40th Lunar planetary Science Conference, March 23-27, 2009, The Woodlands, Texas, USA.

9) J. Haruyama, T. Matsunaga, M. Ohtake, T. Morota, C. Honda, Y. Yokota, Y. Ogawa, T. Nimura, M. Abe, M. Torii, and LISM WG, “Lunar Surface Morphology: Initial results of SELENE/Terrain Camera”, Asia Oceania Geosciences Society, June 16-20, 2008, Busan, Korea.

10) J. Haruyama, M. Ohtake, T. Matunaga, T. Morota, C. Honda, M. Torii, Y. Yokota, Y. Ogawa, M. Abe, “First Results from LISM on Kaguya”, 2008 European Geoscience Union, April 13-18, 2008, Vienna, Austria.

[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

N/A

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

春山 純一 (Haruyama Junichi )

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号 : 40373443

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号 :

### (3) 連携研究者

本田 親寿 (HONDA CHIKATOSHI )

福島県立会津大学大学院コンピュータ理工学研究科、准教授

研究者番号 : 40435805

横田 康弘 (YOKOTA YASUHIRO)

国立環境研、環境計測研究センター、NIES  
フェロー研究員

研究者番号 : 30443279