

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

月の死の湖と虹の入り江の陥没地形周辺の年代測定

櫛田 果鈴, 齋藤 優里, 春山 純一

2016年3月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

月の死の湖と虹の入り江の陥没地形周辺の年代測定

櫛田 果鈴¹⁾²⁾ 齋藤 優里¹⁾²⁾ 春山 純一¹⁾

Model age determination of the areas around the Lacus Mortis pit and the Sinus Iridium pit on the Moon

by

Karin Kushida¹⁾²⁾, Yuri Saito¹⁾²⁾, Junichi Haruyama¹⁾

Abstract

We report the results of model age determination for the areas around two pits that were discovered in the middle latitude of the Moon: 1) in the Lacus Mortis (44.962N, 25.610E) and 2) in the Sinus Iridium (45.63N, -28.80E). The pits at middle latitudes are sites favorite for lunar base construction and more advantageous than those at lower latitudes because the temperature oscillation at the middle latitudes is smaller than that at lower latitudes. We determined the model ages of the areas based on the crater chronology, measuring crater size frequency distributions using image data acquired by the SELENE Terrain Camera (TC) of 10 m/pixel resolution. We performed the discrimination of geological units using 415, 750, and 950 nm spectral band image data from the SELENE Multi-band Imager, in addition to the TC image data. We obtained model ages of 3.3, 3.5, and 3.8 billion years ago for the areas around Lacus Mortis pit and 3.6 billion years ago for the area around the Sinus Iridium pit. From the view point of variety of lava eruption dates, the area around the Lacus Mortis pit is more interesting than that around the Sinuous Iridium pit. An area around the Lacus Mortis pit has a lower cumulative crater number density for craters of 100 m to 500 m in diameter than that around the Sinuous Iridium pit, which means the area is easier to land near and approach to the pit from the landing point than that around the Sinuous Iridium pit. However, we note the area has a higher crater number density for craters of > 500 m in diameter than that around the Sinuous Iridium pit; such larger craters should be paid attention when the Lacus Mortis pit will be explored.

*平成 27 年 12 月 16 日受付 (Received December 16, 2015)

¹⁾宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 太陽系科学研究系 (Department of Solar System Science, Institute of Space Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency)

²⁾青山学院大学 理工学部 機械創造工学科 (Department of Mechanical Engineering, Collage of Science and Engineering, Aoyama Gakuin University)

Keywords: Lacus Mortis, Sinus Iridium, Moon, pit, hole, cave, crater, model age, SELENE, Terrain Camera, Multi-band Imager

概 要

本稿では、月の中緯度帯にみつかった2つの陥没地形 (pit) 1) 死の湖 (44.962N, 25.610E) の陥没地形と、2) 虹の入り江 (45.63N, -28.80E) の陥没地形について、その周辺の溶岩噴出年代決定を行ったことを報告する。こうした陥没地形は、科学的にも興味深く、また、将来の基地候補である。さらに、中緯度の陥没地形は、低緯度に比べて温度の振幅が小さい点で基地候補としてはより優れていると考えられる。我々は、10 m/画素の解像度を持つ SELENE 搭載地形カメラによる画像データを用いて、陥没地形周りのクレータ個数密度分布を測定し、クレータ年代学を適用することで、年代の決定を行った。地質の分類には、地形カメラデータに加えて、SELENE 搭載マルチバンドイメージャの 415, 750, 950 nm バンドのデータを利用した。死の湖の陥没地形の周りは 33, 35, 38 億年前の少なくとも3回、虹の入り江の周りは 36 億年前に噴出した溶岩流の存在が示唆された。年代の多様性という点で、死の湖の陥没地形の周辺領域が科学的に興味深い。また、死の湖の陥没地形の周辺領域は、虹の入り江の陥没地形の周辺領域よりも直径 100~500 m のクレータの個数密度が低くなっていることから、虹の入り江の陥没地形周辺領域に比べ、着陸や陥没地形への接近において、容易であると考えられる。ただし、この死の湖の陥没地形周辺領域では虹の入り江の陥没地形の周辺領域に比べ、直径 500 m 以上のクレータの個数密度が高く、探査においては注意を要する。

Keywords: 死の湖, 虹の入り江, 月, 陥没地形, 縦孔, 空洞, クレータ, 年代, セレーネ, 地形カメラ, マルチバンドイメージャ

1. はじめに

将来の月面基地という点でも、科学探査対象という点でも、非常に重要な場所である月の陥没地形のうち、基地建設に有用な中緯度帯でみつかった2つの陥没地形 1) 死の湖 (Lacus Mortis) の陥没地形 (44.962N, 25.610E) と、2) 虹の入り江 (Sinus Iridium) の陥没地形 (45.63N, -28.80E) について、その周辺領域のモデル年代測定結果を、本稿は報告するものである。

月惑星 (地球, 月, 水星, 火星, 冥王星, 小惑星, 彗星) には、通常のクレータより「深さ/直径」が大きい (すなわち直径に比して深い) 陥没地形 (pit) と呼ばれる地形が存在する (例えば 地球: Halliday 1998¹⁾; Okubo and Martel 1998²⁾. 月: Haruyama et al., 2009³⁾, 2010⁴⁾, 2012⁵⁾; Robinson et al., 2012⁶⁾; Asheley et al., 2012⁷⁾; Wagner and Robinson, 2014⁸⁾. 火星:

Cushing et al., 2007⁹⁾, 2010¹⁰⁾. 水星 : Gillis-Davis et al., 2009¹¹⁾. 冥王星 : Ken Sterns/http://blogs.nasa.gov/pluto. 小惑星 (ヴェスタ) : Denevi et al., 2012¹²⁾. 彗星 : Mousis et al., 2015¹³⁾). 陥没地形の多くは切り立った壁を持つ. しかし中には, 例えば月の死の湖の陥没地形⁶⁾のように, 壁の一部が崩落し, 砂状の物質が垂直に切り立った壁の底にまで達してしまっているものもある (図 1). 或いは, 陥没地形の中には, 壁と床の間に張り出し部分があり, その張り出し部分の下に空間が広がっているような縦孔 (hole) 地形も見つかっている (図 2). 例えば, 日本の月周回衛星 SELENE (SELENE, 愛称「かぐや」) によって見つかったマリウスヒルの縦孔, 静の海の縦孔, 賢者の海の縦孔³⁻⁵⁾ がそれらにあたる. Wagner and Robinson (2014)⁸⁾は, 月に発見された陥没地形を, 海における陥没地形 (Mare Pit), 高地における陥没地形 (Highland Pit), 衝突溶融岩における陥没地形 (Impact Melt Pit) の 3 つに分類している. SELENE によって発見された縦孔は, Mare Pit に分類されている.

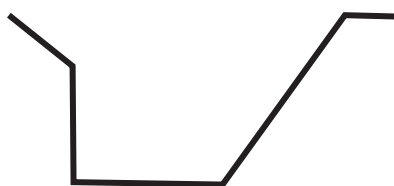


図 1 陥没地形の概観. 通常のクレータに比べ, 直径に比べ深い構造を持つ



図 2 縦孔地形の概観. 縦孔地形は, 陥没地形の一つで, 底で空洞に続いている.

陥没地形の底は, 通常の月面表面に比べて, 宇宙空間を見込む立体角が小さいことから, 隕石衝突率, 宇宙放射線被曝率が低く, また, 温度の変化率も小さい⁵⁾. また, 地下空洞は, 隕石衝突, 宇宙船被曝から完全に防護され, また温度は極めて定常であることが予想される⁵⁾. つまり, 縦孔, そして縦孔の底で連なる地下空洞は, 将来の月基地として, 月面では最適の場所である.

陥没地形は, 月基地としての有用性以外に, 科学観測場所としても多くの重要性を持つことがこれまでに指摘されている⁵⁾. LRO の斜め観測では, 縦孔の壁には溶岩層が見られている^{5,6)}. これまでの研究では, SELENE で見つかった 3 つの縦孔近傍周りの表面の年代は, 大凡 35 億年前と推定されている³⁻⁵⁾. すなわち, これらの縦孔の壁に見られる溶岩層は, 35 億年前より過去に流れ出て, 冷え固まった溶岩によるものである. 月の表層では隕石重爆撃により, 溶岩層は破碎され, 角礫化しており, 初期の状態を保っていないことが殆どである. その点, 縦孔壁の溶岩層は形成当時のそのままの「新鮮」な状態であり, 35 億年前以前の月の火成活動における噴出量や噴出率, 温度や物質の変遷の歴史をよく残していることになる. また, 溶岩噴出の休止期間が長きにわたっていた場合, レゴリス層が発達

しているはずであるが、そのレゴリス層には過去の太陽風粒子が捕獲されている可能性があり、過去の太陽活動史を調べることができるという点でも大変特異で科学的に重要な場所である。このように、縦孔を含む陥没地形の壁は、月の進化過程の解明には、極めて重要な場所といえる。縦孔が天窓となっている地下空洞もまた、陥没地形の壁同様に、過去の月の火成活動史の解明に関わる重要な情報を提供する場所である。地下空洞は更に、人類の滞在基地として以外にも、その安全性、熱や振動の面での静謐さから、月震計、熱流量計、ミュオン観測装置などの、科学観測機器を設置し観測する場所としても非常に適した場所である。

月の陥没地形はその底で地下空洞に連なっているということは、必ずしもすべての陥没地形について確認されてはいるわけではない。しかし、特に海の陥没地形は、地下の空洞の上に形成されたと考えるのが自然である。というのも、月の海を構成する玄武岩質溶岩流は、地球では容易に溶岩チューブのような地下空洞を形成することが分かっているからである（たとえば、Keszthelyi, 1993¹⁴⁾； Pinkerton and Wilson, 1993¹⁵⁾）。海の陥没地形は、将来の科学探査地点、そして、有人・無人の基地建設場所候補として、月面で最も探査が優先される場所である。

以上述べたように、月の海の陥没地形は地下空洞に連なる可能性が高く、科学的な探査対象という点でも、将来の月面基地建設場所候補という点でも、非常に重要な場所である。そうした、月の海の陥没地形の中でも、中緯度の存在するものが将来基地候補としては望ましいと考えられる。中緯度では、低緯度に比べ表面温度の触れ幅がより小さく、一方、高緯度ほどは平均温度が低くなりすぎない^{5,16)}からである。そこで今回、月の中緯度帯の「海」領域にこれまで見つかった2つの陥没地形、1) 死の湖 (44.962N, 25.610E) の陥没地形と、2) 虹の入り江の陥没地形 (45.63N, -28.80E) について、将来探査を念頭に、その周辺のクレータ分布を調査し、溶岩噴出年代の決定とアクセシビリティ検討を行った。

死の湖の陥没地形は、中緯度地域の陥没地形での最大級の径をもつものであり⁸⁾、中緯度虹の入り江の陥没地形は、最近発見されたものである^{17,18)}。この地域の年代を決定することは、将来の科学探査における事前情報として重要であり、また、年代はクレータの個数密度でもあり、小さくなることなどから、これら二つの陥没地形の着陸点からの到達可能性（アクセシビリティ）を論じる点でも検討必須事項である。

これまで、死の湖付近の年代測定は、SELENEに搭載された地形カメラからの10 m/画素の画像データを用いて Morota et al. (2011)¹⁹⁾によってなされており、年代としては36億～38億年前と推定されているが、陥没地形の周りに特に着目しては行っていない。また、安田 (2015)²⁰⁾は、死の湖周りのクレータの分布を調査しているが、年代の導出までは至っていない。一方、虹の入り江の年代測定は、Qiao et al. (2014)²¹⁾によって求められているが（陥没地形を含む領域は～33億年前）、やはり、陥没地形周りに着目してのものではない。溶岩流の噴出は、年代差を持つものであり、また、アクセシビリティ検討のためには、より領域を狭めた形でのクレータ分布の確認が重要となる。

2. 測定手法

2.1 データ (TC, MI)

前節で述べたように、これまでの、死の湖と虹の入り江の陥没地形周辺については、先行研究では、特に陥没地域周辺に着目して年代測定がされたものはない。そこで今回、SELENE に搭載されたマルチバンドイメージャデータ (MI: 可視域バンド 20 m/画素, 近赤外域バンド 60 m/画素解像度)^{22, 23)} を利用して、陥没地形周りの数 100 km² 程度の領域について分光的に同一の地質を抽出し、SELENE 搭載地形カメラのデータを利用して、年代の測定を行うこととした。クレータの抽出については、SELENE 搭載地形カメラデータ (10 m/画素分解能) を利用した。これらデータは、かぐや (SELENE) データアーカイブ (<http://l2db.selene.darts.isas.jaxa.jp/index.html.ja>) にて公開されているものを利用した。データプロダクトはすべて等緯度経度図法 (Simple Cylindrical: SC) が用いられており、緯度が高くなるほど同間隔の緯度経度帯で歪みが生じる。そのため、その歪みを本来の距離に修正した Transverse Mercator 図法 (TM) に変換してデータを扱った。

2.2 年代測定

月表面には多くの隕石衝突クレータが形成されているが、月の進化過程において、火山活動により噴き出た溶岩が地表面を覆い、その領域のクレータが消されるということが起きる。即ち、クレータの個数密度が小さい領域ほどより最近新たな溶岩で覆われた「若い」領域であり、クレータ個数密度が大きいほど「古い」領域と言える。月試料の放射年代解析で、試料が採取された地域のクレータ数密度と年代の関係性が明らかにされており、年代決定のための関数が樹立されている。これによって得られる年代を「モデル年代」ともいう²³⁾。本研究では最も多く用いられている Neukum and Ivanov (1994)²⁴⁾ の 2) の関数を使用して年代決定を行った。以下使用したクレータサイズ分布関数とクレータ年代関数である。

$$\log N = a_0 + a_1 \log D + a_2 (\log D)^2 + \dots + a_{11} (\log D)^{11} \quad (1)$$

$$N(D \geq 1) = 5.44 \times 10^{-14} [\exp(6.93 \times t) - 1] + 8.38 \times 10^{-4} t \quad (2)$$

ここで、 a_n は定数、 N は累計クレータ個数 (/1km²)、 D はクレータ直径 (km)、 t は決定年代 (10⁹year) である。

まず、対象となっている陥没地形の周りについて、クレータ抽出を行った。クレータ抽出の結果の例を図 3 に示す。

クレータの抽出後、年代を測定する地質ユニットを決定する。ユニットの決定には MI 画像データと TC 画像データの比較の他、TC 画像から判別できる地形の違いやクレータの密度差も参考とした。ところで、月面には隕石衝突によって作られた「一次」クレータ以

外に、一次クレータが形成された際に放出された物質によって形成される「二次」クレータも存在する．このような二次クレータを含めて年代測定を行うと、実際の火成領域の年代より古い値が算出される．よって測定ユニットは二次クレータを除いて決定した．二次クレータの判断においては、巨大クレータの周囲に放射状かつ不自然にクレータが多くなっている領域であることを基準とした．

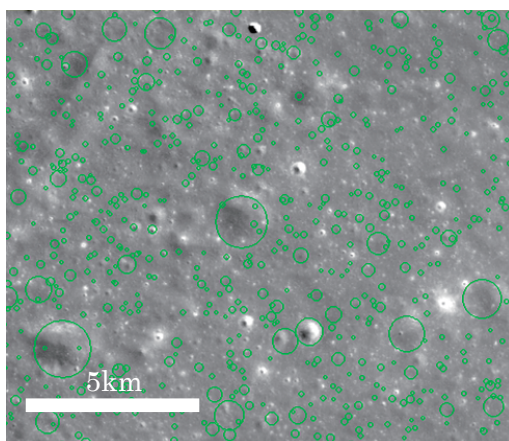


図3 クレータカウンティング例．領域は死の湖の周辺．

クレータカウンティングの結果から、測定領域のクレータ個数を求め、それから単位面積あたりのクレータ個数密度を得る．そして、これらの値から図4のようにx軸を直径[km]、y軸をクレータ積算個数密度[km⁻²]とした指数関数グラフを作成する．ここで年代関数(1)式を最も確からしい年代に合わせてフィッティングを行う．確かな精度を得るために、統計量として十分であろうと思われる1000個以上のクレータの個数が存在する領域を計測した．また、直径は100m以下では、クレータがクレータによりかき消される「飽和」が見られていたので、直径100m以上のクレータにおいて年代測定を行うこととした．

分布のうち傾きの変化が一定な部分ごとに、年代測定を行うこととした．つまり、すべてのクレータ直径についてクレータ積算個数密度範囲の傾きがほぼ一定のグラフであれば、ひとつの年代結果が出るが、場合により、1つの地点の年代測定で複数の年代がでることにもなる．

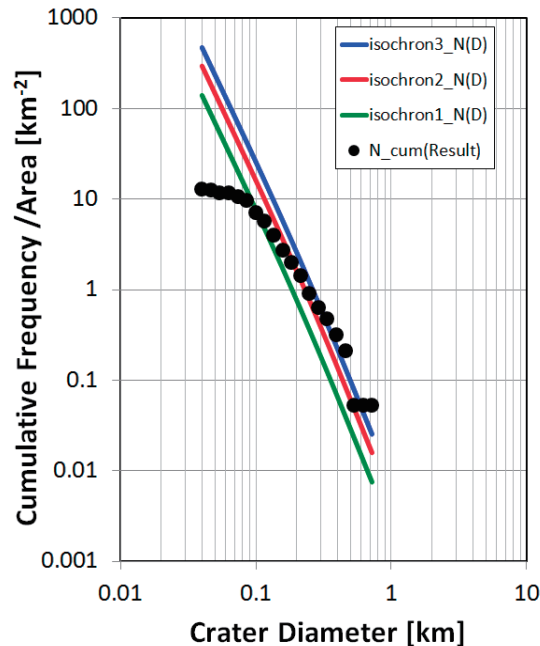


図4 直径とクレータ積算個数密度の分布の例.
領域は死の湖の周辺.

3. 結果

3.1 死の湖の陥没地形周辺領域の年代測定結果

死の湖の陥没地形は (44.962N, 25.610E) に存在し、長径約 285m である⁸⁾. 図 5-a (TC グレイスケールデータ) に、その位置を記す. また、図 5-b は、MI 比演算画像データ (赤に 750nm 画像/415nm 画像を、緑に 750nm 画像/950nm 画像、青に 415nm 画像/750nm 画像を割り当てた) である. これら、TC データと MI データを参考に、陥没地形の周辺地域の年代測定領域を、図 6 で示した M-1 領域と、M-2 領域とした. 陥没地形は、M-1 領域と M-2 領域の境界付近に存在する. これらの領域のクレータの積算個数密度を図 7,8 に示す.

測定の結果、M-1 領域では直径 500m~700m のクレータについて、M-2 領域では直径 500m~1km のクレータについて、そのクレータ積算個数密度から、いずれの領域も 38 億年前というモデル年代が示唆された (図 7 の青線).

また、M-1, M-2 領域いずれも、38 億年前以後に、溶岩流が覆ったことが示唆される. 直径 500m 以下の年代測定から、M-1 領域では、35 億年前 (図 7 の緑線) に最後の溶岩流被覆が起きたことが示唆される. また M-2 領域では、35 億年前 (図 8 の赤線) に溶岩流被覆が起きた後、更に 33 億年前 (図 8 の緑線) にも最後の溶岩流被覆が起きたことが示唆される.

ここで、M-1,M-2 領域ともに、38 億年前以後の溶岩では覆いきれなかったクレータが存在していることは注意をしておきたい。M-1 領域では直径 7~800m 以上のクレータが、M-2 領域では 1km 以上のクレータが完全には消されてはいない。

死の湖の陥没地形周りの M-1,M-2 領域の年代測定結果を、表 1 にまとめておく。

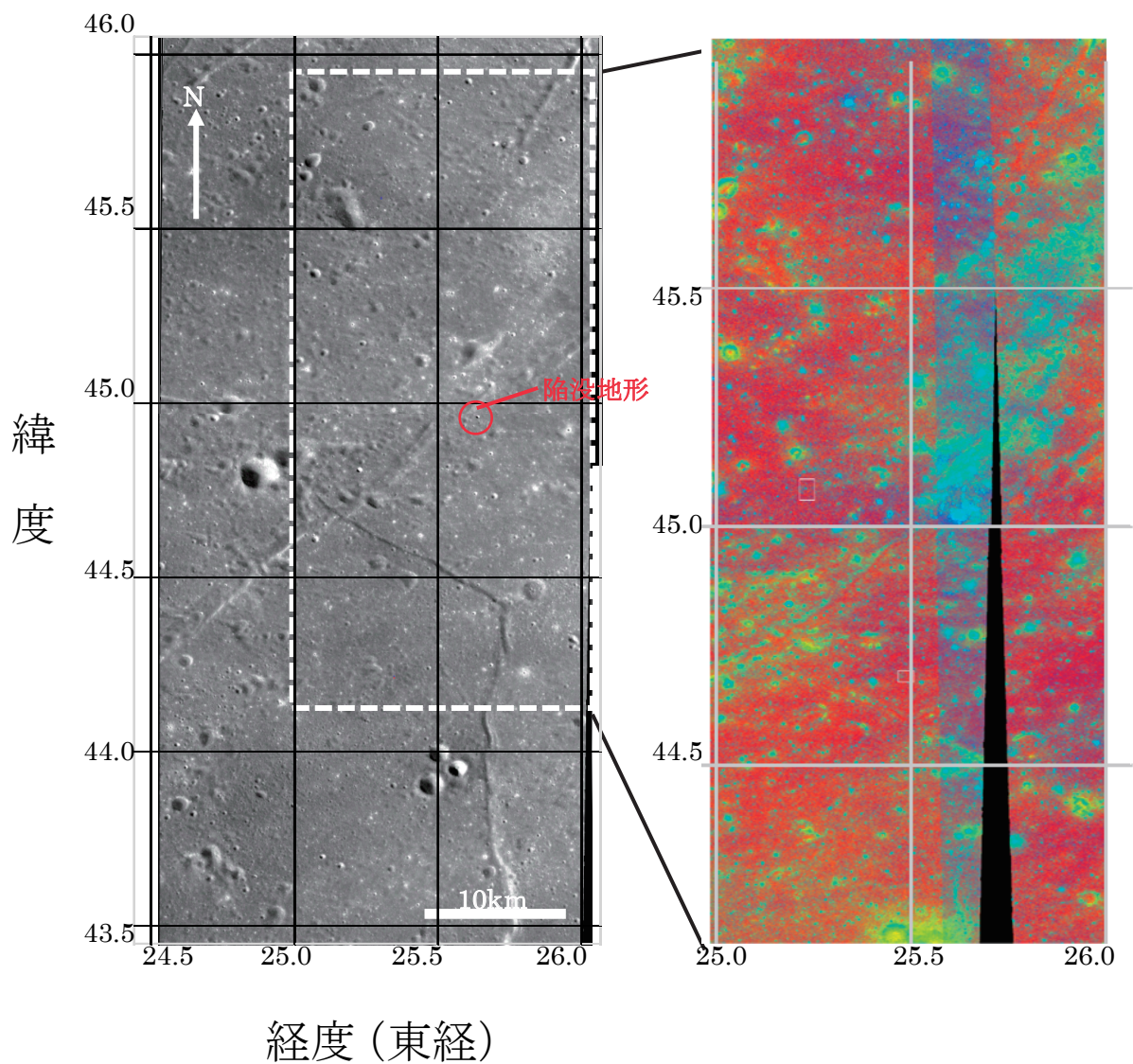


図 5-a 死の湖の陥没地形周辺の
TC 画像

図 5-b 死の湖の陥没地形周辺の
MI 画像

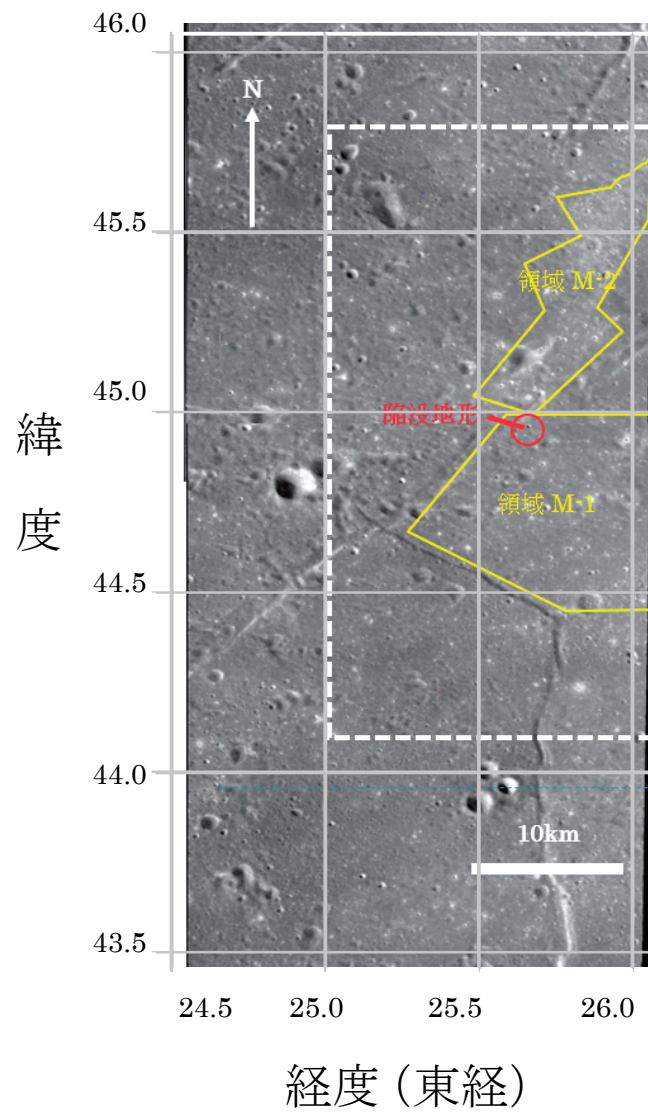


図 6 死の湖の陥没地形と測定領域

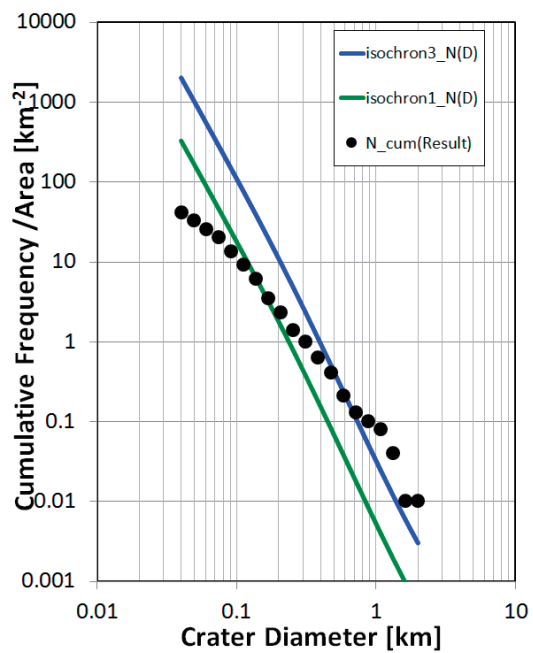


図 7 死の湖の M-1 領域におけるクレータ直径とクレータ積算個数密度の関係.
青，緑がフィッティングした関数

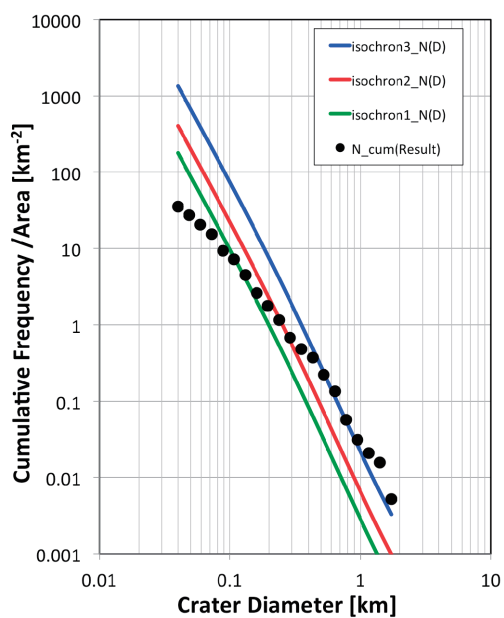


図 8 死の湖の M-2 領域におけるクレータ直径とクレータ積算個数密度の関係.
青，赤，緑がフィッティングした関数

表 1 死の湖の陥没地形周辺の年代

領域名	領域面積[km ²]	クレータ積算個数		測定年代[×10 億年前]		
		直径 100m 以上	直径 200m 以上	緑	赤	青
M-1 領域	209.485	1798	464	3.5		3.8
M-2 領域	192.935	1395	340	3.3	3.5	3.8

3.2 虹の入り江の陥没地形周辺領域の年代測定結果

虹の入り江の陥没地形は (45.63N, -28.80E) に存在し、長径約 127m である¹⁷⁾。図 9-a (TC グレイスケールデータ) に、その位置を記す。また、図 9-b は、MI 比演算画像データ (赤に 750nm 画像／415nm 画像を、緑に 750nm 画像／950nm 画像、青に 415nm 画像／750nm 画像を割り当てた) である。これら、TC データと MI データを参考に、陥没地形の周辺地域の年代測定領域を、図 10 で示した R 領域とした。

R 領域 (図 9 参照) については、直径 200m～1km のクレータについて、そのクレータ積算個数密度から 36 億年前というモデル年代が示唆される (図 11)。また、この R 領域については、死の湖の陥没地形周りの M-1, M-2 領域と違い、クレータの積算個数密度からは、複数のモデル年代は見えて取りにくい (比較のため、図 15 に、死の湖の M-1, M-2 領域と、虹の入り江の R 領域の積算個数密度を一緒に記したものを示す)。このことから、R 領域の溶岩流被覆は、36 億年前のものが最後であったといえる。

また、死の湖の陥没地形周りの M-1 領域では、800m 以上のクレータは、38 億年前の溶岩流で覆い切れていなかったが、この虹の入り江の陥没地形周りの R 領域を覆った溶岩流は 800m 以上のクレータでも、36 億年の溶岩流が覆いきっている。つまり、死の湖の陥没地形周りの M-1 領域の 38 億年前の溶岩流より、虹の入り江の陥没地形周りの R 領域の 36 億年前の溶岩流のほうが大規模だったと言える。なお、R 領域の溶岩流の規模は、直径 1km 以上のクレータが確認出来ないため、死の湖の M-2 領域を 38 億年前に覆った (しかし直径 1km 以上のクレータを覆い隠し切れていない) 溶岩流との規模との比較はできない。

虹の入り江の陥没地形周りの R 領域について得られたモデル年代測定結果を、表 2 にまとめておく。

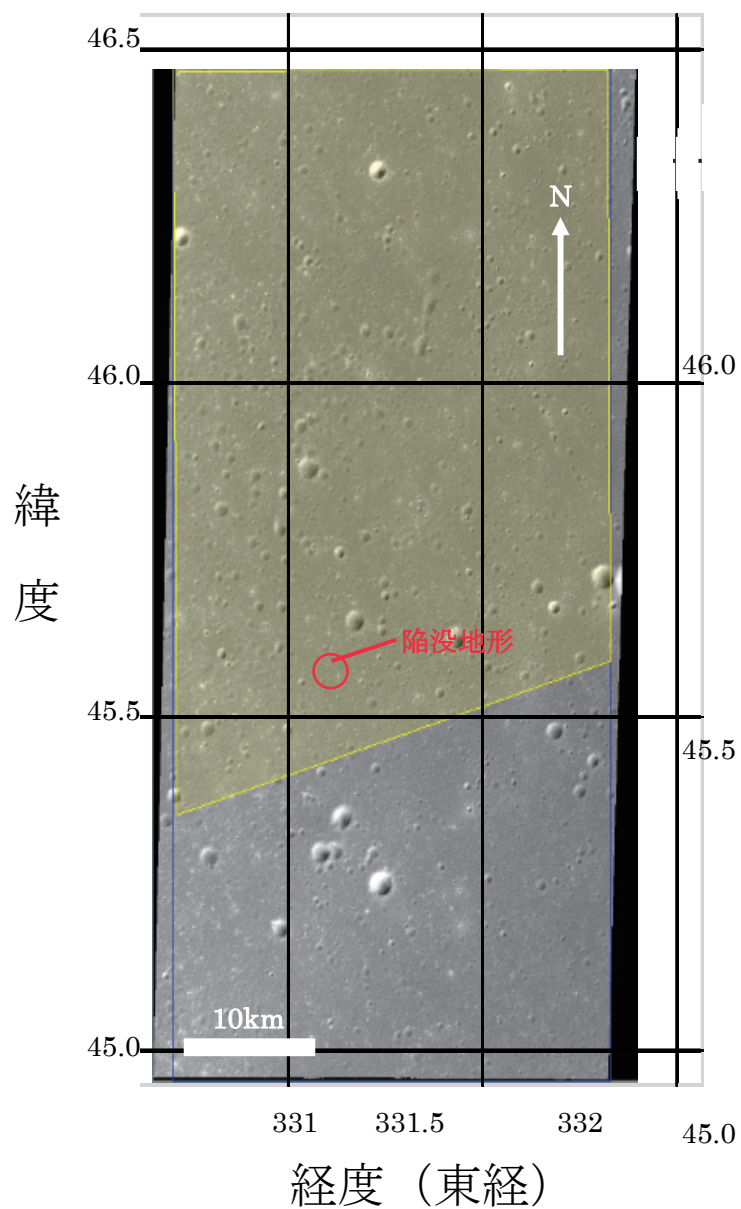


図 9-a 虹の入り江の陥没地形周辺の TC 画像

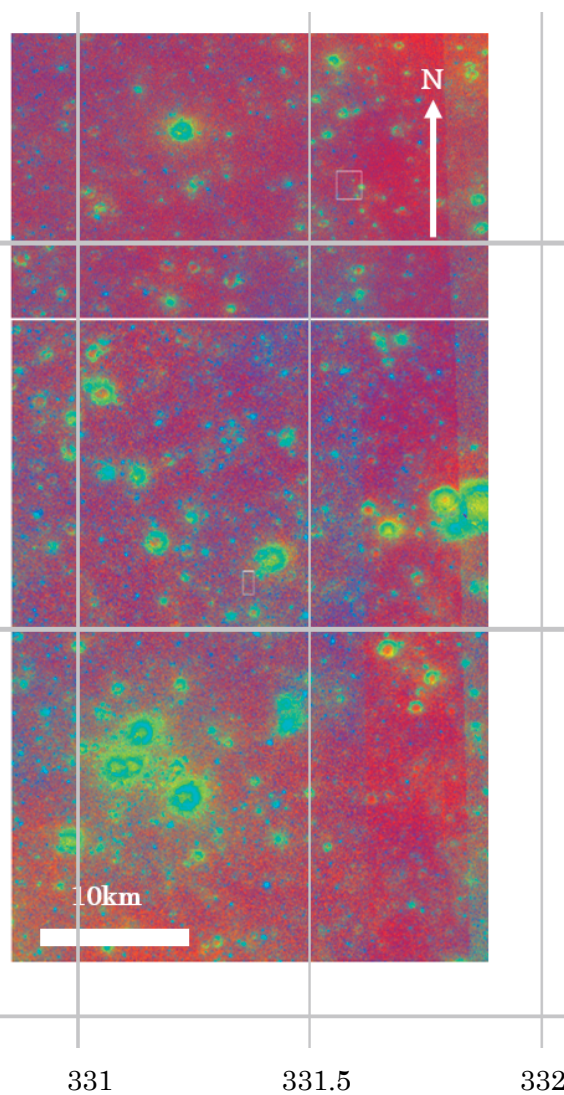


図 9-b 虹の入り江の陥没地形周辺の MI 画像

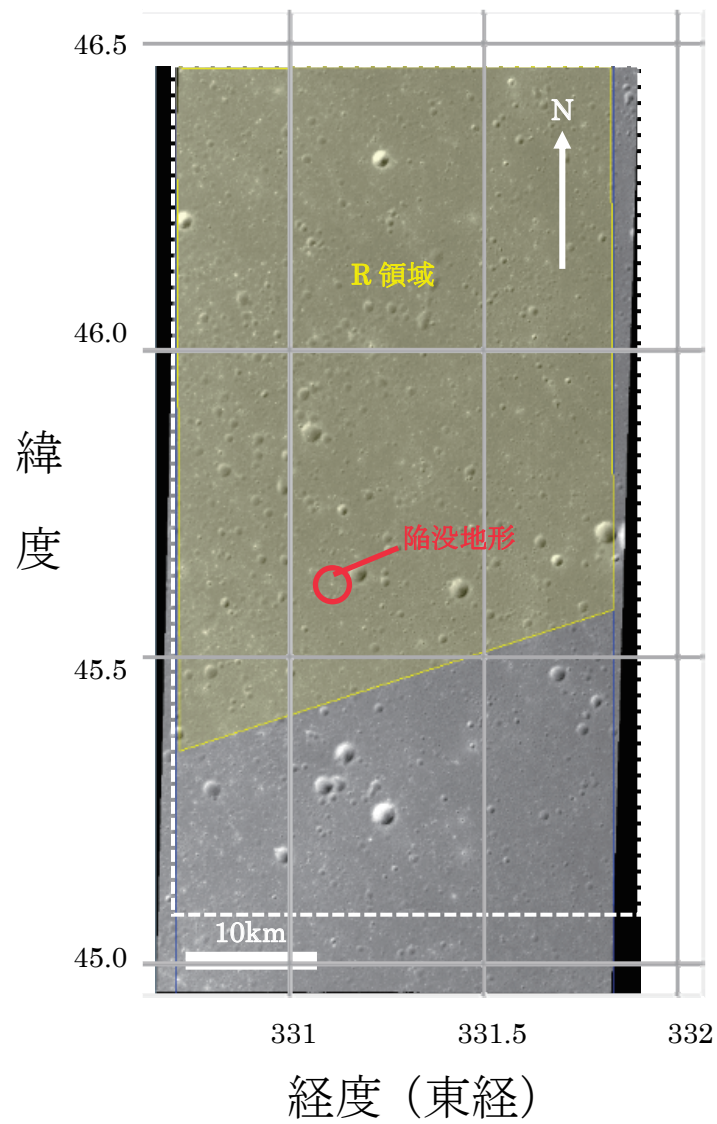


図 10 虹の入り江の陥没地形と測定領域. 黄枠線内が領域範囲(R 領域)

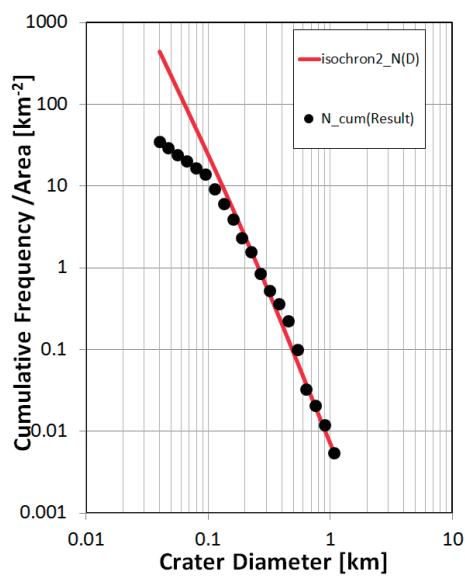


図 11 虹の入り江の R 領域におけるクレータ直径とクレータ積算個数密度の関係.
赤線がフィッティングした関数

表 2 虹の入り江の陥没地形の年代測定結果

領域	領域面積[km ²]	クレータ積算個数		測定年代[×10 億年前]
		直径 100m 以上	直径 200m 以上	
R 領域	682.424	6161	1664	3.6

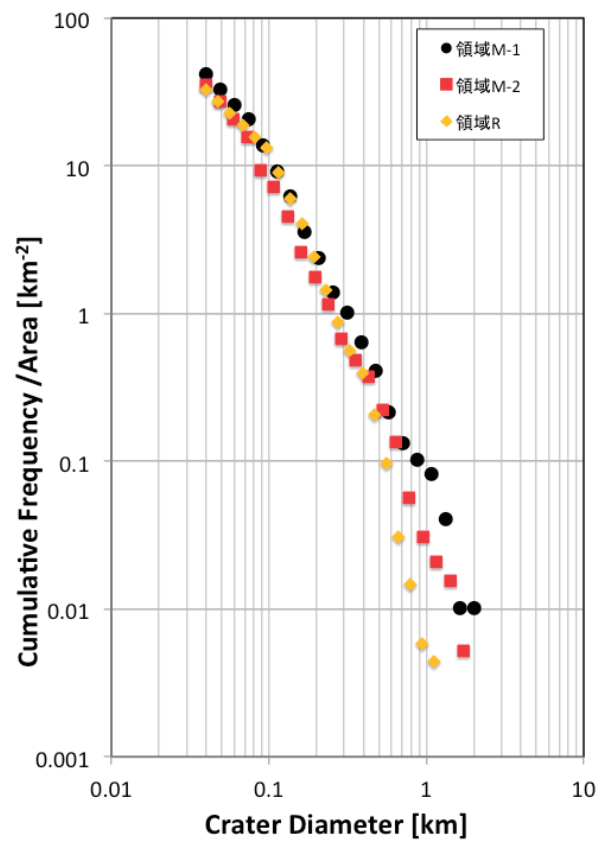


図 12 死の湖の M-1,M-2 領域, 虹の入り江の R 領域におけるクレータ直径とクレータ積算
個数密度をまとめたもの

4. 考察

死の湖と虹の入り江の、それぞれの陥没地形の探査について、科学的にはどちらが先に探査が望まれるであろうか。科学的な意義は様々なので一概には言えない。しかし、たとえば、虹の入り江の陥没地形周辺は 36 億前の溶岩で一律に覆われているのに対して、死の湖の陥没地形周辺は、M-1 領域にしろ、M-2 領域にしろ、38 億年前から 35 億年前、或いは 33 億年前までの複数回の溶岩流の被覆があることから、死の湖の陥没地形周辺の方が、数億年にわたる溶岩流の多様性を調べられるという点で、科学的に興味深いといえよう。

一方、探査の可能性からいうとどうであろうか？通常は、年代が若い溶岩層ほど、クレータの個数密度が小さくなり、着陸の安全性、着陸点から目的地点へのルート確保がし易いことになる。しかし、ここで注意しなければならないことは、最後に流れた溶岩流の多さである。溶岩流の量が少なかった場合、最後の溶岩がクレータを隠しきれない可能性がある。今回調査した、死の湖の陥没地形周辺の M-1, M-2 領域では、そのような状態であった。そこで、探査のしやすさについては、死の湖の陥没地形周辺の M-1, M-2 領域と虹の入り江の陥没地形周辺の R 領域とにおいて、それぞれのクレータ積算個数を比較することにする。図 12 を見ると、直径 100m 以下のクレータについては、ほぼ同様の分布であることがわかる。ただし、33 億年前の溶岩が覆った M-2 領域の方が、直径 100~400m のクレータ個数密度が若干低いことが見て取れる。このことから、M-2 領域が比較的着陸は安全であり、またルートの確保もし易いといえる。ただし、虹の入り江の R 領域のクレータ個数密度と比べて分かるように、M-2 領域では、400m 以上の大きなクレータについては最新の溶岩では隠しきれていない。M-2 領域に着陸し、陥没地形を探査するときは、こうした大きなクレータの存在には注意をする必要がある。

5. まとめ

将来の月面基地という点でも、科学的な探査対象という点でも、非常に重要な場所である月の陥没地形のうち、基地建設に有用な中緯度帯でみつかった 2 つの陥没地形 1) 死の湖 (44.962N, 25.610E) の陥没地形と、2) 虹の入り江 (45.63N, -28.80E) の陥没地形について、その周辺の溶岩噴出年代決定を行った。

死の湖の陥没地形付近には、二つの分光的に異なる領域 M-1, M-2 が存在し、それぞれについて、クレータ年代学より年代決定を試みたところ、その両者に 38 億年前の溶岩流が認められた。さらに、35 億年前の溶岩流も両者に認められた。また、M-2 領域には、33 億年前の溶岩流による被覆も示唆された。

虹の入り江の陥没地形付近、数 100km² は分光的に同一の地質領域であった。クレータの分布から、この領域では、36 億年前に溶岩流によって覆われ、それ以前のクレータは消し

去られていたことが分かった。

年代の多様性という点では、死の湖の陥没地形の周辺領域が興味深い。さらに、死の湖の陥没地形周辺には、虹の入り江の陥没地形周辺よりも直径 100~400m のクレータの個数密度が低い M-2 領域がある。したがって、M-2 領域に着陸し陥没地形に接近探査することが、虹の入り江の陥没地形周辺の探査に比べ、容易である。ただし、M-2 領域では、虹の入り江の陥没地形周辺に比べ、直径 400m 以上のクレータについてはクレータの個数密度が高く、探査において注意を要する。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 26400459 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Halliday, W. R., "Pit craters, lava tubes, and open vertical conduits in Hawaii: A problem in terminology", Bull. Nat. Speleo. Soc., 27B(1/4), 113-124, 1998.
- [2] Okubo, C. H. and Martel, S. J., "Pit crater formation on Kilauea volcano, Hawaii", Journal of Volcanology and Geothermal Research, Volume 86, Issues 1-4, November 1998, 1-18, ISSN 0377-0273, 1998.
- [3] Haruyama, J. et al., "Possible lunar lava tube skylight observed by SELENE cameras", Geophys. Res. Lett. 36, L21206, doi:10.1029/2009GL 040635, 2009.
- [4] Haruyama, J. et al., "New Discoveries of Lunar Holes in Mare Tranquillitatis and Mare Ingenii". 41st Lunar and Planet. Symp. abst.#1285, 2010.
- [5] Haruyama, J. et al., "Lunar Holes and Lava Tubes as Resources for Lunar Science and Exploration", in: Badescu, V. (Eds.), Moon-Prospective Energy and Material Resources, Springer, 139-164, 2012.
- [6] Robinson, M. S. et al., "Confirmation of sublunarean voids and thin layering in mare deposits", Planet. Spac. Sci. 69, <http://dx.doi.org/10.1016/j.pss.2012.05.008>, 2012.
- [7] Ashley, J. W. et al., "Geology of the King crater region: New insights into impact melt dynamics on the Moon", J. Geophys. Res. 117, E00H29, doi:10.1029/2011JE003990, 2012.
- [8] Wagner, R. V. and Robinson, M. S., "Distribution, Formation Mechanisms, and Significance of Lunar Pits", Icarus 237, 52-60, 2014.
- [9] Cushing, G. E. et al., "THEMIS observes possible cave skylights on Mars", Geophys. Res. Lett., 34, L17201, <http://dx.doi.org/10.1029/2007GL030709>, 2007.

- [10] Cushing, G. E., “Candidate cave entrances on Mars”, *J. Cave and Karst Studies* 74(1), 33-47, DOI: 10.4311/2010EX0167R, 2010.
- [11] Gillis-Davis, J. J. et al., “Pit-floor craters on Mercury: Evidence of near-surface igneous activity”, *Earth and Planet. Sci.Lett.* 285, 243-250, 2009.
- [12] Denevi, B. W. et al., “Pitted Terrain on Vesta and Implications for the Presence of Volatiles”, *Science*, Volume 338, Issue 6104, 246-249, 2012.
- [13] Mousis, O. et al., “Pits Formation from Volatile Outgassing on 67P/Churyumov–Gerasimenko”, *Astrophys. J.Lett.* 814, Issue 1, article id. L5, 5 pp, 2015.
- [14] Keszthelyi, L., “A preliminary thermal budget for lava tubes”, *J. Geophys. Res.* 100, 20,411-20,420, 1995.
- [15] Pinkerton, H. and Wilson, L., “Factors controlling the lengths of channel-fed lava flows”, *Bull. Volcanol.* 56, 108-120, 1994.
- [16] Vasavada, A. R. et al., “Near-Surface Temperatures on Mercury and the Moon and the Stability of Polar Ice Deposits”, *Icarus* 141, 179-193, 1999.
- [17] 横田康弘ら, 「月の海の縦孔における浸食シナリオ」, 日本惑星科学 2015 年度周期講演会アブストラクト, 2015 年 10 月東京工業大学, 2015.
- [18] Wagner, R. V. and Robinson, M. S., “Update: The search for lunar pits”, 2nd int. Planet. Caves Conf. abst. #9021, 2015.
- [19] Morota, T. et al., “Timing and Duration of Mare Volcanism in the Central Region of the Northern Farside of the Moon”, *Earth Planet. Sci. Lett.* 302, Issue 3-4, 255-266, doi:10.1016/j.epsl.2010.12.028., 2011.
- [20] 安田遼, 「将来探査・基地建設の意義・可能性の観点からの月縦孔の比較検討」, 2014 年度東海大学卒業研究論文, 2015.
- [21] Qiao, L. et al., “Geological features and evolution history of Sinus Iridium, the Moon”, *Planet. Spac. Sci.* 101, 37-52, 2014.
- [22] Haruyama, J. et al., “Global Lunar-Surface Mapping Experiment by the Lunar Imager/Spectrometer on SELENE”, *Earth Planets Space* 60 (4), 243-256, 2008.
- [23] Ohtake, M. et al., “Performance and scientific objectives of the SELENE (KAGUYA) Multiband Imager”, *Earth Planets Space* 60 (4), 257-264, 2008.
- [24] Neukum, G. and Ivanov, B. A., “Cratering size distributions and impact probabilities on Earth from lunar, terrestrial-planet, and asteroid cratering data”. In: Gehrels, T. (Ed.), *Hazards Due to Comet and Asteroids*. Univ. of Arizona Press, Tucson, 359-416, 2014.

