火星の流動化エジェクタクレーターを想定した渦輪と粒子層の相互作用*

Interaction between a Vortex Ring and a Particle Layer

Assuming the Fluidized Ejecta Craters on Mars

鈴木 絢子**
SUZUKI Ayako

熊谷 一郎***
KUMAGAI Ichiro

永田 裕作***
NAGATA Yusaku

栗田 敬†
KURITA Kei

Abstract Many spacecraft in various countries have succeeded in exploring planets, satellites, and small bodies so far, and the time has come when a large amount of data can be viewed easily by friendly tools. An approach that simulates the morphologies on other celestial bodies by accessible kitchen experiments may facilitate the understanding of them by the public as well as by experts. In this article, we will introduce the fluidized ejecta craters on Mars and the kitchen experiment on the interaction between a vortex ring and a particle layer.

Keywords: Kitchen earth science, Mars, Fluidized ejecta, Multiphase flow, Planetary Science

1. はじめに

1969年にアポロ11号によって人類が初めて月に着陸してから50余年が経過した。今日では、アメリカ、ヨーロッパ、ロシア、中国、インド、UAE、日本などが、太陽系探査を次々と成功させている[1–3]。惑星や衛星、小天体の表層を撮影した高精細な画像からは、それぞれの天体で特異な地形や地球の地形によく似た地形、現在も続くアクティブな活動などがあることがわかった[4–6]。このような他天体の地形や活動のメカニズムを明らかにすることは、その天体の環境や形成過程を制約するのみならず、ひいては地球や太陽系への理解を促進する。

探査機によって取得されたデータは、一定期間経過後にウェブサイトに公開される場合が多い。例えばGoogle Marsなど、特殊で高額なソフトウェアでなくても閲覧できるものもある。インターネットとパソコンがあれば、誰でも最先端の観測データにアクセスできる時代が到来している。

「キッチン地球科学」は、身近な地学現象を理

解するためのファーストステップとして、また、それをわかりやすく披露するためのツールとして、大学・大学院教育やアウトリーチ活動の一翼を担ってきた[7]。他天体の地形や活動を模擬した「キッチン地球“惑星”科学」実験が増えることは、惑星科学の普及と発展にも資すると思われる。本稿では、形成に混相流が寄与していると考えられている火星の流動化エジェクタクレーターを対象にした実験について、特に我々のキッチン実験[8]を中心に紹介する。

2. 火星の流動化エジェクタクレーターとは

隕石などが地面に衝突してできる孔のことを衝突クレーターと言い、孔の形成に伴って放出される物質のことをエジェクタと呼ぶ。放出されたエジェクタは弾道軌道に沿って飛翔し、クレーター周囲に堆積する。月の衝突クレーターや地球上での実験クレーターの計測から、衝突クレーターのエジェクタ堆積物は、クレーターからの距離のべき乗に比例して薄くなることが知られている

* 2020.11.2 受付

** 地球流体電脳倶楽部 E-mail:suzuki.ayako.2919@gmail.com

*** 明星大学理工学部

† 東京大学地震研究所

[9]。薄くなっていくので、エジェクタ堆積物の外縁部をはっきり視認することは難しい (Fig. 1(a))。

一方で、直径数 km から数十 km の火星の衝突クレーターに付随するエジェクタ堆積物のほとんどは、厚さは一定かむしろ距離とともに厚くなっている。そしてエジェクタ堆積物の外縁部は、数十 m ～数百 m の崖やリッジで縁取られ、花びら状になっている。花びら状のエジェクタ堆積物は複数枚に及ぶことも多い[10] (Fig. 1(b))。この地形は、エジェクタが弾道軌道で飛翔して堆積した地形とは異なるため、別の堆積メカニズムで形成されたと考えられている。火星表層の高解像度の画像などを用いた地質学的・地形学的な研究により、エジェクタ堆積物が衝突前からあったと思われる小山などを回り込んで堆積している地形 [10,11] (Fig. 2) や、エジェクタ堆積物の堆積範囲が水星 (重力加速度が火星と同程度) にあるクレーターと比較して圧倒的に広いこと[13]などがわかった。そのため火星クレーターのエジェクタは、主に地面を這う重力流によって堆積したと考えられている[10]。この重力流によって堆積したと思われるエジェクタ堆積物のことを流動化エジェクタと呼ぶ。ただし、地質試料などによる、流動化の明らかな証拠は現在までのところ見つかっていない。

この地面を這う重力流はどのようなものなのだろうか。多くのモデルでは、衝突によって地表から掘り出された固相が、気相や液相を取り込んだ混相流だろうと考えている。また、流動化エジェクタクレーターは、地形学的な特徴の違いから、いくつかのサブクラスに分類される[11,12]。最近では、サブクラスごとに異なる堆積メカニズム (または複数の堆積メカニズムの異なる寄与割合) で形成されたという考え方が多いようだ [13,14]。

一層エジェクタ (SLE: Single Layered Ejecta) や多層エジェクタ (MLE: Multiple Layered Ejecta) と呼ばれるサブクラスでは、エジェクタ堆積物と、それが回り込んでいる台地や小山の高さの差があまり大きくないことから、地面を這う重力流はある程度高密度であったと提案された[10]。流れの先端に大きな岩塊が集中して堆積していること[15, 16]も示された。このサブクラスのエジェクタ堆積の流れは、遅い火砕流かラハールのようなものであった可能性が示唆される。

Fig. 1 Visible images of lunar and Martian impact craters. (a) A lunar impact crater, Kepler. The image is clipped from Lunar Reconnaissance Orbiter Camera, Wide Angle Camera global mosaic [37]. (b) A Martian impact crater with fluidized ejecta deposit, Bacolor. The image is clipped from an image taken by Viking orbiter 1 and 2; 612A42 (Courtesy of NASA/JPL-Caltech/ASU). This figure is referred from [39].

Fig. 2 Visible images of Martian impact craters, whose ejecta deposit is diverted by the pre-existing mound or smaller crater. (Thermal Emission Imaging System [38] frames V10292014 and V27284028.) This figure is referred from [39].

低アスペクト比エジェクタクレーター (LARLE: Low-Aspect Ratio Layered Ejecta) と呼ばれるサブクラスは、アスペクト比 (エジェクタ堆積物の厚さと到達距離の比) が 10^{-5} 程度と非常に小さい。火山学の分野でアスペクト比の小さい

溶結凝灰岩を、LARI (low-aspect ratio ignimbrite) と呼ぶことに倣って名付けられた。地形的な類似から、低アスペクト比エジェクタクレーターのエジェクタ堆積物は、細かな粒子を含んだ乱流、ベースサージによって堆積したのではないかと提案されている[17]。しかし、[18]では、シンプルなエジェクタ堆積モデルを構築し、地表面の薄い氷層が非常に小さな摩擦係数 (0.001~0.05) を満たせば、低アスペクト比エジェクタクレーターの地形を再現できるとも述べている。

最後に、乾いた粉体流であっても、地表面状態によっては長距離流れることができるという研究結果もある[19]ことを付け加えておく。

3. エジェクタ流の再現実験

3.1 粘性流体を用いた実験

小山などの障害物を避けて流れ、かつ、数十 m もの高さのリッジを保持できることから、エジェクタ流はビンガム流体であったと考え、陶土と水やシリコンオイルを混合した物質でクレーター形成実験が行われた[20–22]。これらの実験では、直径数 mm のガラス・アルミニウム・鉄の球を、鉛直 (か場合によっては斜め) に据え付けられた銃身から高速度 (500 m/s~5.5 km/s) で標的物質に向かって発射する。標的物質は、バケツなどの入れ物に入れて真空チャンパー内に置かれ、チャンパー内圧は 1/100~1/20 気圧程度に減圧された。

[20]は、高速度カメラによる観察から、飛翔する泥の“破片”は、ある程度の大きさを持った板状になっていて、後端と先端で堆積するタイミングが少しずれることで、1つの破片の堆積でも流れの先端が2つある堆積地形ができると述べた。また、クレーターの孔形成後に中央部が突出し、それが崩壊することも報告された。これは身近な例では、ミルククラウンの「こけし」が崩壊するところを想像すれば良い。ミルククラウンとは、液滴を浅い流体層に落下させたときにできる王冠状の形状のことである。ある条件下では、ミルククラウンの消滅後にクラウン中央部が上方に突出することが知られており、これを「こけし」と呼ぶ[23]。当然「こけし」も消滅し、次の波を作る。[22]では、この突出部の崩壊によってできた流れが、クレーターの縁を越えて、先に堆積したエジェクタ堆積物の上に流れ広がることで、一度の衝突で複数の流れの先端が作られることが

示された。

3.2 粉体と気体の混合を想定した実験

火星流動化エジェクタクレーターの形成において、周辺大気の寄与を確かめるため、[24]は圧力と密度 (則ちガス種) を変化させたチャンパー内で、アルミニウム弾丸を高速で粉体層に衝突させて、そのときの放出物の振る舞いや、エジェクタ堆積物の地形の違いを観察した。大気圧が十分に低い環境では、エジェクタは全体として逆円錐形を呈しながら堆積する。エジェクタは逆円錐形の側面部に面状に存在しており、これをエジェクタカーテンと呼ぶ。しかし、大気圧 (大気密度) が高い場合には、逆円錐形ではなく、上部はすばまって下部は丸くなる巾着のような形となることを示した[24]。エジェクタ堆積物は、0.06 bar 以上で同心円状のリッジや、長く伸びた葉状の地形を示した。そして彼らは、高速度カメラによる衝突現象のその場観察やできた地形の観察を通じて、大気中で拡大するエジェクタカーテンの上端部にできる渦 (輪) の役割を提案した[24, 25]。渦輪が、細粒のエジェクタを取り込みながら発達し、地面へ下降して地表面を削り取ったり、取り込んだ細粒エジェクタを運搬して堆積させたりしたというわけだ。エジェクタカーテンの上端部にできる渦 (輪) とは、例えば水中に置いた板を、板の面にたいして垂直方向に移動させたとき、板の端から回り込む水によって板の後方に渦ができることを想像すれば良い。

4. キッチン地球“惑星”科学による模擬実験

4.1 渦輪と粒子層の相互作用

[24]らの実験は、高速衝突実験を実施し、現象を観察している点で強みがあるが、エジェクタが視界を遮り、渦輪自身の振る舞いを観察することが難しかった。そこで[8]では、衝突現象を扱わず渦輪の存在を自明のものとし、渦輪と粉体層との相互作用のみに着目した。

4.2 実験セットアップ

実験は、36 cm × 25 cm、高さ 26.4 cm の透明な直方体の水槽内で実施した。水槽は塩や砂糖を溶かした水道水で満たした。水槽の底には、6種類の粒子 (Table 1) を 1~2 センチ程度敷き詰め、実験前にアクリル棒でできるだけ平らにならした。

Table 1 The density and diameter of the particles used in this study.

	密 度 (g/cm ³)	平均粒径 (mm)
もちきび	1.372	2.2
リョクトウムング	1.361	5.1
ポピーシード	1.056	1.0
BB 弾	1.021	6.0
EPMA ビーズ	1.025	1.5
ガラスビーズ	2.460	0.1

水槽上部に円筒と円柱から成る渦輪発生装置を設置した。2組の円筒と円柱を用い、円柱の外径と円筒の内径はそれぞれ、7.47 cm/8.57 cm と 6.09 cm/6.49 cm であった。リニアアクチュエーターを用いて円柱を円筒内で下降させると、円筒内の水塊が押し出され、円筒の端に渦輪が発生した。その後渦輪は円筒を離れて下降した。円柱を下降させる速度と距離を変えることで、渦輪の初期速度を変えた。下降する渦輪は、粒子層付近で粒子を巻き上げて再堆積させた (Fig. 3)。

渦輪の可視化のため、50 ミクロンのトレーサーを水道水に混ぜた。シリンドリカルレンズを用いて緑色レーザーを垂直のシート状にし、渦輪発生装置の中心を通るように照射した。商用ビデオカメラと高速度カメラ (Photron, 1024 x 1024 pixels, 1000 frames/sec) を用いて実験の様子を撮影した。デジタルカメラを用いて、水槽の斜め上から実験前後の粒子層を撮影し、粒子層表面の地形変化を観察した。

Fig. 3 A photograph of the experimental tank from the front. The head of the vortex ring generator is seen at the top. Particles are entrained by a vortex ring.

4.3 実験結果

渦輪と相互作用した後の粒子層の表面にできた典型的な地形を Fig. 4 に示した。Fig. 4(a)-(c) は、水槽の斜め上から撮影した実験前後のデジタルカメラ画像を、Adobe Photoshop を用いて差し引きして、地形変化のあった部分を際立たせたものである。渦輪発生装置を黒いハッチで隠してある。Fig. 5(a)では、粒子の移動があった部分が花びら状になっている。デジタルビデオカメラによるその場観察から、これは粒子が巻き上げられて運搬され、再堆積したモードであることがわかり、リフトモードと名付けた。Fig. 5(b)では粒子の移動があった部分は円形である。このモードでは、粒子の顕著な巻き上げは見られなかったため、スライドモードと呼ぶことにした。Fig. 5(c)は、渦輪による粒子の移動がなかった、動きなしモードである。Fig. 5(d)は、ガラスビーズ上にできたリフトモードの地形である (画像の差し引き処理はしていない)。花びら状であることは他の粒子層と共通だが、内側に円や放射状の線などの微細構造が見られた。これらの構造は微細であるために、ガラスビーズ以外の粒径の大きい粒子で構成された層の場合には見えなかったと考えられる。

Fig. 4 Typical resultant morphologies on particle layer after the interaction with a vortex ring. (a)-(c) and (d) are referred from [8] and [39], respectively.

Fig. 5 (a)-(d) Oblique image sequence of the interaction between a vortex ring and glass beads layer taken in 500 fps. (e) A schematic view of streamwise vortices. This figure is referred from [39].

Fig. 5(a)-(d)は、渦輪とガラスビーズ層の相互作用を、斜めから高速度ビデオカメラでその場観察した様子である。それぞれ、渦輪による粒子の移動開始後 0.56、1.5、2.02、4.04 秒後の画像である。Fig. 5(a)、(b)で黒矢印で示したのは、放射状の縦渦である。放射状の縦渦は、相互作用の初期段階から発生した (Fig. 5(a))。次に、渦輪が粒子を掃き寄せることによって円構造ができ、直径を拡大させながら発達した (Fig. 5(b)、(c))。粒子は、円構造の縁から巻き上げられているが、放射状の縦渦によっても巻き上げられた。これらの巻き上げられた粒子は、円構造よりも広い範囲に再堆積した (Fig. 5(d))。Fig. 5(e)は、放射状の縦渦の様子を模式的に示したものである。バツ印は渦輪の中心部、楕円は円構造を斜めから見たところを意図し、例として 3 本の線構造を描いた。最初、縦渦は互い違いの向きに回転しながら方位角方向にゆっくり移動 (青矢印) していた。その後、円構造の縁に沿って立ち上がり、巻き上げた粒子を外側へ運搬した。外側まで運ばれなかった粒子が残し、放射状の線構造を形作った。

この実験のリフトモードにおいて観察された

地形の花びら状の外縁形状や放射状の線構造は、火星の流動化エジェクタクレーターの花びら状のエジェクタ堆積物や、その上に形成されている放射状の線構造と定性的によく似ていた。

4.4 無次元数について

流体による粒子の移動をつかさどるのは、シー ルズ数とレイノルズ数の 2 つの無次元数である [26]。シー ルズ数は、1 粒の粒子に働く抗力と重力の比、レイノルズ数は慣性力と粘性力の比であり、それぞれ以下のように表すことができる。

$$\theta = \frac{\rho_f U^2}{(\rho_p - \rho_f) g r} \quad (1)$$

$$Re = \frac{2rU}{\nu} \quad (2)$$

ここで、 U は流れの速度、 g は重力加速度、 r は粒子の半径、 ν は流体の動粘性係数、 ρ_p と ρ_f は粒子と流体の密度である。[27]は、水中で球を動かしたときにできる伴流と粒子層との相互作用の研究において、これらの 2 つの無次元数を用いて地形の違いを説明した。Fig. 6 は[8]の各実験時のシー ルズ数とレイノルズ数を、モードごとにプロットしたものである。図上で各モードはきれいに分かれており、シー ルズ数が大きい領域で巻き上げが発生している。巻き上げ発生の境界は、レイノルズ数が 50 程度で折れ曲がりが見られる。[27]は、流れの速度境界層 δ と粒子直径 $2r$ の比較によって、モードの違いが説明できるとしている。速度境界層より粒径が大きい領域 ($\delta < 2r$ 、レイノルズ数の大きい領域) では、粒子が感じる流れの速度は U となるので、流れが粒子を巻き上げるかどうかはレイノルズ数に依らない。一方、速度境界層より粒径が小さい領域 ($\delta > 2r$ 、レイノルズ数の小さい領域) では、粒子が感じる流れの速度は $2rU^2/\nu$ に比例する。すると流れが粒子を巻き上げるかどうかは Re^2 に比例することが期待される。Fig. 6 に Re^2 の点線を描き示してみると、実験結果のモード境界とよく一致した。

実験におけるシー ルズ数はおおよそ $10^{-2} < \theta < 10^2$ 、レイノルズ数は $10^1 < Re < 10^3$ の範囲であった。一方で火星は大気の 95% が二酸化炭素で構成されている。215 K、560 Pa の二酸化炭素の密度と動粘度を見積もると、それぞれ 14 kg/m^3 、 $7.8 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ となる。これらの値を用いて、実験と

同じシールズ数、レイノルズ数の範囲をとる風速、粒子半径を見積もると、風速がおおよそ 0.2~40 m/s、粒子半径がおおよそ 0.2~450 mm の範囲となる。エジェクタ堆積物表面のこれらのサイズの破片は、巻き上げられ、より広い範囲に堆積したのかもしれない。

Fig. 6 Regime diagram of the experimental results between θ and Re . This figure is referred from [8, 39].

4.5 キッチン実験ならではの注意点

火星クレーターのような、数十億年前にでき、その姿をあまり変えていないと思われる地形を対象としていても、目の前の素材達は別のタイムスケールで生きていることを忘れてはならない。本実験では、種たちから 1、2 日後に細いひげ状の根が発現し、粒子の形状が変わってしまった (Fig. 8)。その後さらに放置していたら、粒子層が水槽中で腐敗してしまい、実験室内外に異臭を放つ結果となってしまった。

Fig. 7 A germinated mung bean in a glass beaker.

5. 流動化エジェクタクレーター研究の最近の動向とキッチン実験の意義

特に最近、様々な天体上で流動化エジェクタクレーターの存在が報告されている。ガニメデ、エウロパ、ディオネ、カロン、ケレスなど、表層に氷があると考えられている天体で、流動化エジェクタクレーターと地形的に類似のエジェクタ堆積物を持つクレーターが多数観察されている [28–31]。このことは、エジェクタの流動化に地表や地下の氷が寄与しているのではないかと示唆すること。しかし、表層に十分な大気も氷もない水星でも、先端にリッジのあるエジェクタ堆積物を伴う Hokusai クレーターが見つかった [32]。地球でも衝突構造の周囲で、流動化エジェクタクレーターではないと思われる構造が指摘されている。例えば、ドイツの Ries クレーター [33]、アメリカの Meteor クレーター [34]、ガーナの Bosumtwi クレーター [35, 36] などである。衛星画像を用いた調査は鉛直方向の構造や物質科学的な情報を得ることが難しい。地球上の流動化エジェクタクレーターの現地調査によって、新しい知見がもたらされる可能性がある。

衝突現象は、最も基礎的な物体間相互作用の一つである。中学・高校などの理科教育の場でも実践されており [40]、キッチン実験においても取り組みやすいテーマであると考えられる。キッチン地球“惑星”科学を通して、惑星科学の興味深い現象・地形を広く知ってもらうことで、研究の裾野が広がり、30 年後、50 年後の惑星探査の礎が築かれると期待している。

謝 辞

このような執筆の機会を下さった「混相流」編集委員および関係者の皆様に感謝いたします。査読者の方にお礼申し上げます。高速度ビデオカメラのデモンストレーション撮影にご協力くださった日本ローパーと株式会社フォトロンに感謝いたします。

参考文献

- [1] Pieters, C. M., Goswami, J. N., Clark, R. N., Annadurai, M., Boardman, J., Buratti, B., Combe, J. P., Dyar, M. D., Green, R., Head, J. W., Hibbitts, C., Hicks, M., Isaacson, P., Klima, R., Kramer, G., Kumar, S., Livo, E., Lundeen, S., Malaret, E., McCord, T. B., Mustard, J. F., Nettles, J., Petro, N., Runyon, C., Staid, M., Sunshine, J., Taylor, L.

- A., Tompkins, S. and Varanasi, P., Character and Spatial Distribution of OH/H₂O on the Surface of the Moon Seen by M³ on Chandrayaan-1, *Science*, Vol. 326, 568–572 (2009) (doi:10.1126/science.1178658).
- [2] Cartier, K. M. S., A Month of Milestones for Mars Missions, *Eos*, Vol. 101, (2020) (doi:10.1029/2020EO147099).
- [3] Tsuda, Y., Saiki, T., Terui, F., Nakazawa, S., Yoshikawa, M., Watanabe, S. and Hayabusa2 Project team, Hayabusa2 Mission Status: Landing, Roving and Cratering on Asteroid Ryugu, *Acta Astronautica*, Vol. 171, 42–54 (2020) (doi:10.1016/j.actaastro.2020.02.035).
- [4] Haruyama, J., Hioki, K., Shirao, M., Morota, T., Hiesinger, H., van der Bogert, C. H., Miyamoto, H., Iwasaki, A., Yokota, Y., Ohtake, M., Matsunaga, T., Hara, S., Nakanotani, S. and Pieters, C. M., Possible Lunar Lava Tube Skylight Observed by SELENE Cameras, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 36, L21206 (2009) (doi:10.1029/2009GL040635).
- [5] McEwen, A. S., Ojha, L., Dundas, C. M., Mattson, S. S., Byrne, S., Wray, J. J., Cull, S. C., Murchie, S. L., Thomas, N. and Gulick, V. C., Seasonal Flows on Warm Martian Slopes, *Science*, Vol. 333, 740–743 (2011) (doi:10.1126/science.1204816).
- [6] Porco, C. C., Helfenstein, P., Thomas, P. C., Ingersoll, A. P., Wisdom, J., West, R., Neukum, G., Denk, T., Wagner, R., Roatsch, T., Kieffer, S., Turtle, E. P., McEwen, A., Johnson, T. V., Rathbun, J., Veverka, J., Wilson, D., Perry, J., Spitale, J., Brahic, A., Burns, J. A., DelGenio, A. D., Dones, L., Murray, C. D. and Squyres, S. W., Cassini Observes the Active South Pole of Enceladus, *Science*, Vol. 311, 1393–1401 (2006) (doi:10.1126/science.1123013).
- [7] Kumagai, I., Ichihara, M., Kuri, M. and Kurita, K., Multiphase Flow in Earth and Planetary Sciences Viewed from Kitchen Earth Science, *Japanese Journal of Multiphase Flow*, Vol. 34, 389–394 (2020) (doi:10.3811/jjmf.2020.T010).
- [8] Suzuki, A., Kumagai, I., Nagata, Y., Kurita, K. and Barnouin-Jha, O. S., Modes of Ejecta Emplacement at Martian Craters from Laboratory Experiments of an Expanding Vortex Ring Interacting with a Particle Layer, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 34, L05203 (2007) (doi:10.1029/2006GL028372).
- [9] McGetchin, T. R., Settle, M. and Head, J. W., Radial Thickness Variation in Impact Crater Ejecta - Implications for Lunar Basin Deposits, *Earth Planet. Sci. Lett.*, Vol. 20, 226–236 (1973) (doi:10.1016/0012-821X(73)90162-3).
- [10] Carr, M. H., Crumpler, L. S., Cutts, J. A., Greeley, R., Guest, J. E. and Masursky, H., Martian Impact Craters and Emplacement of Ejecta by Surface Flow, *J. Geophys. Res.*, Vol. 82, 4055–4065 (1977) (doi:10.1029/JS082i028p04055).
- [11] Barlow, N. G., Boyce, J. M., Costard, F. M., Craddock, R. A., Garvin, J. B., Sakimoto, S. E. H., Kuzmin, R. O., Roddy, D. J. and Soderblom, L. A., Standardizing the Nomenclature of Martian Impact Crater Ejecta Morphologies, *J. Geophys. Res.*, Vol. 105, 26733–26738 (2000) (doi:10.1029/2000JE001258).
- [12] Suzuki, A. I. and Kurita, K., Fluidized Ejecta Morphologies and Degradation Processes of Martian Impact Craters, *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, Vol. 125, 13–33 (2016) (doi:10.5026/jgeography.125.13).
- [13] Barlow, N. G., A Review of Martian Impact Crater Ejecta Structures and Their Implications for Target Properties, in: *Large Meteorite Impacts III*, Geological Society of America (2005) (doi:10.1130/0-8137-2384-1.433).
- [14] Komatsu, G., Ori, G. G., Di Lorenzo, S., Rossi, A. P. and Neukum, G., Combinations of Processes Responsible for Martian Impact Crater “Layered Ejecta Structures” Emplacement, *J. Geophys. Res.*, Vol. 112, E06005 (2007) (doi:10.1029/2006JE002787).
- [15] Baratoux, D., Mangold, N., Pinet, P. and Costard, F., Thermal Properties of Lobate Ejecta in Syrtis Major, Mars: Implications for the Mechanisms of Formation, *J. Geophys. Res.*, Vol. 110, E04011 (2005) (doi:10.1029/2004JE002314).
- [16] Mouginiis-Mark, P. J. and Baloga, S. M., Morphology and Geometry of the Distal Ramparts of Martian Impact Craters, *Meteorit. Planet. Sci.*, Vol. 41, 1469–1482 (2006) (doi:10.1111/j.1945-5100.2006.tb00430.x).
- [17] Boyce, J. M., Wilson, L. and Barlow, N. G., Origin of the Outer Layer of Martian Low-Aspect Ratio Layered Ejecta Craters, *Icarus*, Vol. 245, 263–272 (2015) (doi:10.1016/j.icarus.2014.07.032).
- [18] Weiss, D. K. and Head, J. W., Ejecta Mobility of Layered Ejecta Craters on Mars: Assessing the Influence of Snow and Ice Deposits, *Icarus*, Vol. 233, 131–146 (2014) (doi:10.1016/j.icarus.2014.01.038).
- [19] Wada, K. and Barnouin-Jha, O. S., The Formation of Fluidized Ejecta on Mars by Granular Flows, *Meteorit. Planet. Sci.*, Vol. 41, 1551–1569 (2006) (doi:10.1111/j.1945-5100.2006.tb00435.x).
- [20] Gault, D. E. and Greeley, R., Exploratory Experiments of Impact Craters Formed in Viscous-Liquid Targets: Analogs for Martian Rampart Craters, *Icarus*, Vol. 34, 486–495 (1978) (doi:10.1016/0019-1035(78)90040-4).
- [21] Fink, J. H., Greeley, R. and Gault, D. E., Impact Cratering Experiments in Bingham Materials and the Morphology of Craters on Mars and Ganymede, *Proc. Lunar Planet. Sci.* 12th, 1649–1666 (1981).

- [22] Greeley, R., Fink, J., Gault, D. E., Snyder, D. B., Guest, J. E. and Schultz, P. H., Impact Cratering in Viscous Targets: Laboratory Experiment, *Proc. Lunar Planet. Sci.* 11th, 2075–2097 (1980).
- [23] Gunji, H., Ishii, H., Saito, A. and Sakai, S., Study of Milk Crown, *Nagare*, Vol. 22, 499–500 (2003) (<https://www2.nagare.or.jp/mm/2003/gunji/standard.htm>, October 27, 2020).
- [24] Schultz, P. H., Atmospheric Effects on Ejecta Emplacement, *J. Geophys. Res.*, Vol. 97, 11623–11662 (1992) (doi:10.1029/92JE00613).
- [25] Barnouin-Jha, O. S. and Schultz, P. H., Ejecta Entrainment by Impact-Generated Ring Vortices: Theory and Experiments, *J. Geophys. Res.*, Vol. 101, 21099–21115 (1996) (doi:10.1029/96JE01949).
- [26] Bagnold, R. A., *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*, Mathuen, London (1941).
- [27] Eames, I. and Dalziel, S. B., Dust Resuspension by the Flow around an Impacting Sphere, *J. Fluid Mech.*, Vol. 403, 305–328 (2000) (10.1017/S0022112099007120).
- [28] Jaumann, R., Clark, R. N., Nimmo, F., Hendrix, A. R., Buratti, B. J., Denk, T., Moore, J. M., Schenk, P. M., Ostro, S. J., Srama, R., *Icy Satellites: Geological Evolution and Surface Processes*, in: Saturn from Cassini-Huygens, 637–681, Springer Netherlands, Dordrecht (2009) (doi:10.1007/978-1-4020-9217-6_20).
- [29] Schenk, P. M., *Atlas of the Galilean Satellites*, Cambridge University Press., (2010) (doi:10.1017/CBO9780511676468).
- [30] Robbins, S. J., Runyon, K., Singer, K. N., Bray, V. J., Beyer, R. A., Schenk, P. M., McKinnon, W. B., Grundy, W. M., Nimmo, F., Moore, J. M., Spencer, J. R., White, O. L., Binzel, R. P., Buie, M. W., Buratti, B. J., Cheng, A. F., Linscott, I. R., Reitsema, H. J., Reuter, D. C., Showalter, M. R., Tyler, G. L., Young, L. A., Olkin, C. B., Ennico, K. S., Weaver, H. A. and Stern, S. A., Investigation of Charon's Craters with Abrupt Terminus Ejecta, Comparisons with Other Icy Bodies, and Formation Implications, *J. Geophys. Res. Planet.*, Vol. 123, 20–36 (2018) (doi:10.1002/2017JE005287).
- [31] Hughson, K. H. G., Russell, C. T., Schmidt, B. E., Chilton, H. T., Sizemore, H. G., Schenk, P. M. and Raymond, C. A., Fluidized Appearing Ejecta on Ceres: Implications for the Mechanical Properties, Frictional Properties, and Composition of its Shallow Subsurface, *J. Geophys. Res. Planet.*, Vol. 124, 1819–1839 (2019) (doi:10.1029/2018JE005666).
- [32] Ernst, C. M., Chabot, N. L. and Barnouin, O. S., Examining the Potential Contribution of the Hokusai Impact to Water Ice on Mercury, *J. Geophys. Res. Planet.*, Vol. 123, 2628–2646 (2018) (doi:10.1029/2018JE005552).
- [33] Sturm, S., Wulf, G., Jung, D. and Kenkmann, T., The Ries Impact, a Double-Layer Rampart Crater on Earth, *Geology*, Vol. 41, 531–534 (2013) (doi:10.1130/G33934.1).
- [34] Wulf, G. and Kenkmann, T., Meteor (Barringer) Impact Crater, AZ, USA: Indications for Rampart-Like Ejecta Morphologies?, 49th Lunar Planet. Sci. Conf., #2619 (2018).
- [35] Baratoux, D., Niang, C. A. B., Reimold, W. U., Sapah, M. S., Jessell, M. W., Boamah, D., Faye, G., Bouley, S. and Vanderhaeghe, O., Bosumtwi Impact Structure, Ghana: Evidence for Fluidized Emplacement of the Ejecta, *Meteorit. Planet. Sci.*, Vol. 54, 2541–2556 (2019) (doi:10.1111/maps.13253).
- [36] Wulf, G., Hergarten, S. and Kenkmann, T., Combined Remote Sensing Analyses and Landform Evolution Modeling Reveal the Terrestrial Bosumtwi Impact Structure as a Mars-like Rampart Crater, *Earth Planet. Sci. Lett.*, Vol. 506, 209–220 (2019) (doi:10.1016/j.epsl.2018.11.009).
- [37] Speyerer, E. J., Robinson, M. S., Denevi, B. W., and the LROC Science Team, Lunar Reconnaissance Orbiter Camera Global Morphological Map of the Moon, 42nd Lunar Planet. Sci. Conf., #2387 (2011).
- [38] Christensen, P. R., Jakosky, B. M., Kieffer, H. H., Malin, M. C., McSween, H. Y., Nealon, K., Mehall, G. L., Silverman, S. H., Ferry, S., Caplinger, M. and Ravine, M., The Thermal Emission Imaging System (THEMIS) for the Mars 2001 Odyssey Mission, *Space Sci. Rev.*, Vol. 110, 85–130 (2004) (doi:10.1023/B:SPAC.0000021008.16305.94).
- [39] Suzuki, A., Experimental Study on the Formation Process of Martian Craters, Master Thesis, Univ. Tokyo (2005).
- [40] Hisayoshi, K., Taniguchi, M. and Esuga, J., Aim for a Magician of Gravity ~ Microgravity Generator and Gravity Control Apparatus ~, JpGU – AGU Joint Meeting 2020, O-06, (2020).