

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2017

課題番号：24740307

研究課題名(和文)衝突クレーターの多様なエジェクタ地形の形成過程の解明

研究課題名(英文)Formation processes of various ejecta morphology around of impact craters

研究代表者

鈴木 絢子(SUZUKI, Ayako)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・招聘職員

研究者番号：20547252

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：衝突クレーターは、固体表面を持つ様々な太陽系内天体で観測されている普遍的な表面地形であると同時に、形成条件に応じて多様な地形を示すため、衝突時の天体の表層環境を制約する手がかりとなる。

衝突クレーター地形と形成条件の関係を調べるため、クレーター形成時の周辺大気圧と標的強度に注目し、室内衝突実験を行った。周辺大気圧が高い場合は同心円状、低い場合は放射状のエジェクタ地形が形成されることがわかった。また標的強度が変わることで、衝突クレーターの形状が系統的に変化することを示した。

研究成果の概要(英文)：Impact craters and their ejecta morphologies are interpreted as a natural probe for obtaining knowledge on ancient surface and subsurface environments, because detailed morphologies of impact craters and their ejecta are sensitive to impact conditions and degradation processes.

We have conducted impact experiments on a layer of glass beads and sintering snow in the laboratory to investigate the morphology of the impact craters and their ejecta affected by the ambient pressure and target strength. Two distinct ejecta patterns were observed on the glass beads layer of both 50 and 100 micron depending on the ambient pressure. Crater morphology on sintered snow, especially the spall size, systematically depended on the target strength.

研究分野：実験惑星科学

キーワード：衝突実験 衝突銃 クレーター

## 1. 研究開始当初の背景

衝突クレーターは、固体表面を持つ様々な太陽系内天体で観測されている普遍的な表面地形である。同時に、これまでの室内衝突実験や数値シミュレーションの結果から、形成条件(標的の強度、弾丸と標的の密度比、周囲の大気圧など)に応じて異なる地形形状を示すことが知られている。普遍性と多様性を併せ持つ衝突クレーター地形は、衝突時の天体の表層環境(地表・地下・大気)を制約する手がかりの一つとして期待されている。

衝突クレーター地形から天体表層環境を制約するためには、系統的に制御された条件下での実験結果や、地形形成モデルに基づく数値シミュレーションが必要である。衝突クレーター地形は、中心の衝突孔(標的が掘削された領域)とその周囲のエジクタ領域(掘削された物質が堆積した領域)の2つの領域で特徴づけられる。衝突孔の形状と形成条件の関係はこれまでも詳しく調べられており、地表の強度が小さい(例えば凍土などに相当)と衝突孔の中央に丘が発達(Bray et al., 2008)したり、空隙率に応じて衝突孔の形状が変化する(Love et al., 1993)ことが知られている。対して、エジクタの形成メカニズムや、地形形状と形成条件の関係については理解が進んでいない。

しかし、この数十年の惑星探査によって様々な天体上の衝突クレーター地形が観測されると、エジクタ地形も非常に多様性に富んでいることがわかってきた。つまり、衝突孔と同様にエジクタも形成環境の影響を強く反映する可能性を示唆している。衝突孔の形状から形成条件を推定するためには、衝突孔の深さ(すなわち高度データ)が必要であるが、エジクタは平面的に広がった地形であり、写真からでも面積や周方向パターンなど複数のパラメータを抽出できるという長所もある。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、衝突クレーターとエジクタ地形を惑星表層環境の制約に用いるために必要な、衝突条件と地形の関係を明らかにする。以下2つの目的を設定した。(1)クレーター形成時の周辺大気圧と、できるエジクタ地形の関係を調査する。(2)標的強度を変化させた標的にできるクレーターやエジクタ地形、エジクタ放出過程の違いを調査する。

## 3. 研究の方法

(1) 実験チャンパー内の大気圧を変化させ、ガラスビーズ層にできる衝突クレーター周りに形成されるエジクタ地形を調査した。実験に先立ち、実験チャンパー内の大気圧を500Pa~1気圧に制御した。標的は3種

類のガラスビーズ層で、典型的な構成粒子サイズはそれぞれ53~63ミクロン、90~106ミクロン、355~500ミクロンであった(以下それぞれ50ミクロン、100ミクロン、500ミクロンと記載する)。2種類の金だら(直径28cm、深さ10cm;直径45cm、深さ17.5cm)にガラスビーズを注ぎ入れた。このときの標的のバルク密度は1.5g/cm<sup>3</sup>であった。弾丸は直径10mm、長さ10mmのアルミニウム円柱で、衝突速度30~120m/sに加速して標的に衝突させた。

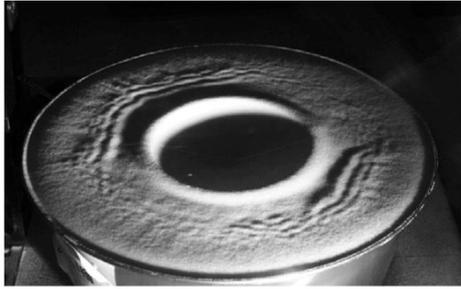
(2) 標的の強度のみを系統的に変化させるため、雪を用いて衝突クレーター形成実験を行った。雪試料は、焼結時間を変えることで、あまり空隙率を変えずに、幅広い強度を得ることができる(Shimaki et al., 2011)という利点がある。実験は、北海道大学低温科学研究所の低温室と、神戸大学理学研究科惑星学専攻の荒川研究室所有の低温実験室にて、それぞれ-10、-15の環境下で行った。雪標的の準備は以下のような手順で行った;まず、氷をバンドソーとブレンダーを用いて細かく砕き、ふるいを用いて710ミクロン以上の粒子を取り除いた。次にそれを袋詰めしたものを低温室内で数日間寝かせた。この行程は、より小さい粒子を昇華させることで、焼結度を制御しやすくするために必要であった。雪を金属容器(直径14cm、深さ約10cm)に詰め、詰めてから実験までの時間を5分~15時間に変化させた。雪標的の強度は、積雪の硬度を計測する方法の一つである木下の方法(木下, 1960)を参考に、金属円柱を試料表面に垂直に落下させ、できるくぼみの深さから求めた値を、雪試料の強度とした。弾丸は直径10mm、高さ7mmの氷円柱と、直径8mm、高さ8mmの高密度ポリエチレン円柱で、衝突速度はそれぞれ34~111m/sと約200m/sであった。

## 4. 研究成果

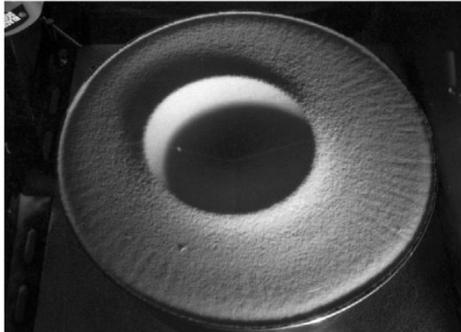
(1) 標的であるガラスビーズ層の構成粒子が50ミクロンと100ミクロンの場合、大気圧と衝突速度が小さいときは放射状の地形が、大気圧と衝突速度が大きいときは同心円状の地形が出現した(図1, 2)。標的層の構成粒子がガラスビーズ500ミクロンの場合、顕著な地形は確認されなかった。

このうちの同心円状の地形の形成過程を精査した。線香の煙を用いた大気の流れの可視化や、モデルの構築・検証を行い、弾丸が大気中を飛翔する間に発生する伴流渦がクレーターリムを崩壊させて同心円状地形を形成するという仮説を立証した。さらに惑星の衝突クレーターのスケールにまで外挿できると仮定し、このメカニズムが火星のエジクタ地形形成に寄与している可能性を示した。

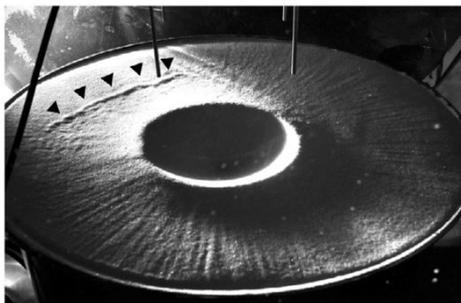
$P=1.0 \times 10^5 \text{Pa}$ ,  $v_{\text{衝突}}=58.3 \text{m/s}$



$P=5.0 \times 10^2 \text{Pa}$ ,  $v_{\text{衝突}}=51.9 \text{m/s}$



$P=1.0 \times 10^4 \text{Pa}$ ,  $v_{\text{衝突}}=83.3 \text{m/s}$



$P=1.0 \times 10^4 \text{Pa}$ ,  $v_{\text{衝突}}=21.9 \text{m/s}$

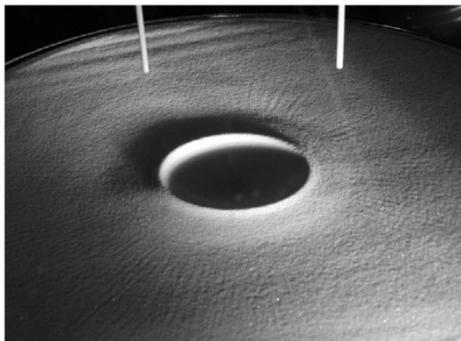


図 1: 100 ミクロンガラスビーズ層のクレーター周囲にできたエジェクタ地形の写真。チャンバ内大気圧の値と弾丸衝突速度は、それぞれ写真上部に記載。

(2)雪標的上にできたクレーターは、半楕円球状の窪み(ピットと呼ぶ)と、それを取り巻く不定形の窪み(スポール領域と呼ぶ)からできていた。これは、岩石への弾丸衝突などで観察される、典型的な強度支配域クレーターと似た形状である。

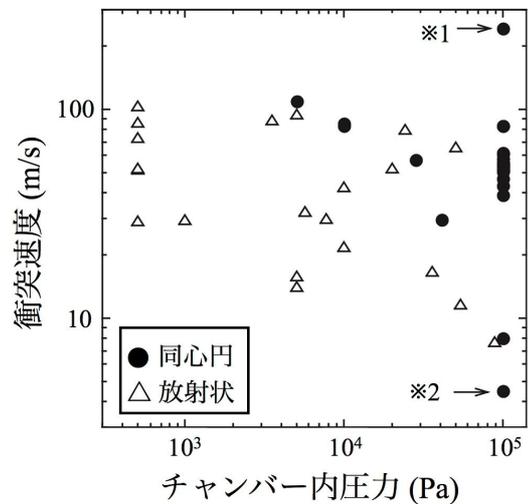


図 2: 100 ミクロンガラスビーズ層を用いた実験における相図。1,2 は検証の過程で行ったそれぞれ別の弾丸放出装置による実験。

ピットの直径と深さは、標的強度が増大するにつれて減少した。一方、スポール領域を含むクレーター全体の直径は、標的強度が小さいうちは強度と共に増大し、ピークを迎えたのちに減少に転じた。今回の実験の最長焼結時間 20 時間の場合にはスポール領域は消失し、ピットのみクレーターが形成された(図 3)。

焼結時間 15 分の標的にできたクレーターには、クレーター周囲の一部に土手のようなものが付随しており、重力支配域のクレーターで観察されるクレーターリムと似た特徴を示した。Holsapple, 1993 で提案された統合スケリング則の第 1 項(重力支配項)と第 2 項(強度支配項)の比は、0.1~1.7 の範囲になった。強度支配域項の係数を~1 と仮定すると、今回の実験条件は、強度支配域と重力支配域の境界領域にあたりと考えられる。

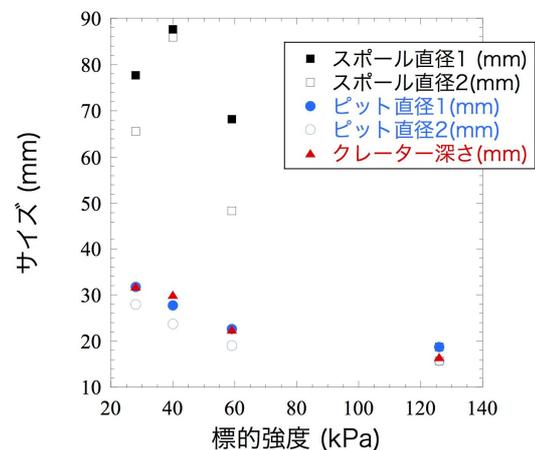


図 3: 雪標的上にできた衝突クレーターの直径や深さ。

一方で、深さ-スポール直径比は0.5~1に近く、粉体上にできる衝突クレーターの値(~0.2)より大きく、弾丸標的密度比の高い強度支配域のクレーターに近いこともわかった。さらに、Arakawa and Yasui, 2011で観察された雪標的上のクレーターよりも大きい、これは、Arakawa and Yasui, 2011よりも密度の大きい弾丸を用いているためであると考えられる。

雪標的のエジェクタカーテンは、始めは砂などの重力支配域でのクレーター形成で典型的に見られるコーン状に発達し、数~数10ms後にピラー状へと時間変化した。スポール破片はエジェクタカーテンがコーン状からピラー状に変化する時刻を中心に、クレーター外縁部で観測された。エジェクタ放出速度と位置の関係は、3000fpsで撮影した高速度ビデオカメラのエジェクタ粒子の軌跡から求めた。ただし、カメラの視線方向に速度成分を持たないと考えられるエジェクタカーテン端部の粒子のみを用いた。放出位置 $y$ と放出速度の関係は、 $v_{放出}/v_{衝突} = k\{y/r_{弾丸(標的/弾丸)}\}^{(-1/\mu)}$ と近似することができる。ただし $v$ は速度、 $r$ は半径、 $\rho$ は密度、 $\mu$ はカップリングパラメータのべき、 $k$ は係数である。実験結果より、雪試料において、木下式で測定した標的強度が11~59kPa、衝突速度が43~111m/sのとき、 $k=0.18 \pm 0.03$ 、 $-1/\mu = -2.0 \pm 0.2$ となることがわかった(ただし $\mu=0.4$ )。またクレーター外縁近傍ではこの関係にオフセットが生じて放出速度が遅くなるが、速度一定( $v_{衝突} = 105\text{m/s}$ )で強度を変化させた時、オフセットが効き始める点での放出速度は、強度とともに増加し、 $v_{放出} = (0.21 \pm 0.03)(Y/\rho_{標的})^{1/2}$ となることがわかった。 $Y$ は標的強度である。この関係は $Y \propto v_{放出}^2$ と表すことができ、クレーター外縁においてエジェクタ粒子は雪の強度を振り切ることができずに飛び出せなくなるという、強度支配域のクレーター形成モデルとよく一致する。

#### 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2件)

1, 鈴木絢子, 栗田敬, 火星衝突クレーターの特異なエジェクタ地形と劣化過程. 地学雑誌, 125(1), 13 - 33, 2016. doi: 10.5026/jgeography.125.13. 査読あり.

2, Suzuki, A.I., Nakamura, A.M., Kadono, T., Wada, K., Yamamoto, S., Arakawa, M., 2013. A formation mechanism for concentric ridges in ejecta surrounding impact craters in a layer of fine glass beads. Icarus 225, 298-307.

doi:10.1016/j.icarus.2013.03.027. 査読あり.

[学会発表](計7件)

- 1, 鈴木絢子, 保井みなみ, 荒川政彦, 長谷川直, 雪標的への衝突でみられるクレーター周りのスポール地形. 天体の衝突物理の解明(XII)~太陽系の進化過程におけるダストの役割~, 2017
- 2, 鈴木絢子, 保井みなみ, 荒川政彦, 長谷川直, 雪標的に作られる衝突クレーター地形. 日本惑星科学会2017年秋季講演会, 2017
- 3, 鈴木絢子, 長谷川直, 荒川政彦, 小型ガス銃開発の現状報告. 天体の衝突物理の解明(XII)~水質変成から探る太陽系物質進化~, 2016.
- 4, 鈴木絢子, 岡本千里, 黒澤耕介, 平井隆之, 長谷川直, 石膏球面にできる衝突クレーターからのエジェクタ破片放出過程に関する実験的研究. 日本惑星科学会2016年秋季講演会, 2016.
- 5, 鈴木絢子, 衝突クレーターのエジェクタに関する研究紹介. 第9回月地殻研究会, 2015.
- 6, 鈴木絢子, 荒川政彦, 保井みなみ, 強度を変えた焼結雪標的への衝突におけるエジェクタ速度. 天体の衝突物理の解明(VIII)~小天体の衝突・軌道進化~, 2012.
- 7, 鈴木絢子, 荒川政彦, 保井みなみ, 焼結雪への衝突におけるエジェクタ速度計測. 日本惑星科学会2012年秋季講演会, 2012.

[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

鈴木絢子のウェブサイト-研究活動

<https://www.cps-jp.org/~ayako/research.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鈴木 絢子 (Suzuki Ayako)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・  
招聘職員

研究者番号：20547252

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：

### (4) 研究協力者

( )