

## 論文内容の要旨

**論文題目：** Formation process of Double Layered Ejecta of Martian impact craters based on experiments and areomorphological analysis  
(火星衝突クレーターにみられる  
Double Layered Ejecta の形成過程)

**氏名：** 鈴木 絢子

衝突クレーターは、固体表面を持つ天体に普遍的に見られる表面地形であるが、地下や地表の情報も豊富に含んでいる。中でも火星クレーターは、月などの他の天体では観測されていない形状のエジェクタを持つことが知られている。その特徴的な地形から、エジェクタは何らかの要因で流動化を起し、地面を這う重力流として堆積してできたと考えられている。流動化の発生機構は明らかになっていないものの、流動化を引き起こす要因として地表下にある揮発性物質（水や二酸化炭素）と大気の2つが有力視されている。このため、火星クレーターのエジェクタの形成過程を明らかにすることは、クレーターが形成された当時の火星の地表・大気環境を類推する手がかりとなる。

これまでの研究では、エジェクタの地形学的な解析を行い、その結果を直接クレーター形成当時の環境に読み替える研究が主流であった。しかし地形はあくまで結果に過ぎず、形成環境を制約するには隔たりが大きすぎる。形成環境によって形成プロセスが決まり、形成プロセスの結果として残るのが地形だからだ。そこで本研究では、形成プロセスの制約を目的として地形解析を行う。加えて、可能性のある形成プロセスをモデル化した室内流体実験を行い、その結果として得られた地形を検証する。このように、地形解析と室内実験を相補的に行うことによって、火星クレーターのエジェクタ形成過程の理解を深めようという研究はこれまでに例がない。これに伴い、本論文は大きく分けて2つのパートで構成されている。1つ目は、探査衛星が取得したデータを用いた解析、2つ目がモデルを用いた室内流体実験である。

本研究では、火星クレーターの中でも特に Double Layered Ejecta (以下、DLE) と呼ばれるタイプのエジェクタに注目している。DLE はその名の通り、二重の連続的なエジェクタ(inner lobe

/ outer lobe)を持つ。Inner lobe は厚くて体積が集中しているように見え、終端は崖となっているのに対し、outer lobe は非常に薄く、終端ははっきりしない。DLE の2つのエジェクタは、1つのクレーターに付随するにもかかわらず、非常に異なる様相を呈している。これは1回の衝突イベントで2回の異なる堆積過程が起こったと考えられ、ballistic なエジェクタ堆積過程では説明できない。また inner lobe 表面には細かい放射状の溝が無数に刻まれている。これらの溝は rim 近傍から始まり、inner lobe を超えて outer lobe の領域にまで達しているため、inner lobe の堆積後に放射状の流れがあり、それが放射状の溝と outer lobe を作ったと考えられる。

以上のことから我々は、outer lobe は inner lobe の表面を削り取るような高速の放射状の流れでできたのではないかと考えた。まず探査データの解析でこの考えの妥当性を検証する。さらにこの放射状流れを渦輪で模擬したモデルを用い、衛星データ解析で測定したエジェクタ体積と、室内流体実験で測定した渦輪による侵食体積の間に相似が成立するかを検証する。これらの研究を通して DLE の形成シナリオを描くことが、本研究の目的である。

**火星探査衛星データの解析による Ejecta Mobility (EM) と outer lobe 体積の見積り**：EM はクレーター直径で規格化したエジェクタの直径で、流れの流動度を表すパラメータである。EM が大きいほど、流れが流動化していたと考えられる。DLE が集中しているユートピア平原で DLE の EM を測定した。その測定結果は既存のモデル（エジェクタが放出されたときに持っていた運動エネルギーを流れの底面摩擦で散逸させるモデル）と非整合的であった。

エジェクタの体積も、堆積過程を理解するために重要なパラメータである。しかし、体積の見積りに必要不可欠な衝突前地形が観測不可能な量であるために、これまでエジェクタ体積の信頼性を評価できていなかった。そこで我々は、地質図と roughness 図を用いてエジェクタ体積の信頼性を評価する方法を考案した。この方法を用いて、エラーバーを含めた形で DLE の各エジェクタの体積を測定した。エラーバーを含めた形でエジェクタ体積を測定したのは本研究が初めてである。結果、outer lobe の体積はクレーター半径の 2.26 乗に比例することがわかった。

**渦輪が粒子層を侵食する系の室内流体実験**：水槽(40cm×40cm×40cm)の底に敷き詰めたナイロンビーズと、水の渦輪の相互作用を観察する室内実験を行った。底部にオリフィスを持つシリンダーを一定速度で上昇させて渦輪を発生させ、粒子層との相互作用の様子やできた堆積物の形状をデジタルビデオカメラや高速ビデオカメラによって撮影して解析した。また、レーザー変位計とリニアアクチュエータを用いて、粒子層表面の高さを面的に測定する 2次元スキャンシステムを開発した。この 2次元スキャンシステムにより渦輪が粒子層を侵食した体積を定量的に測定することができた。

**実験室と火星の比較と今後の展望：**実験室と火星を比較するため、渦輪の循環を統一的なパラメータとして議論に用いる。火星では、エジェクタカーテンの後ろ側にできる渦輪の循環を見積もったモデルを用いた。すると、循環はクレーター半径の1.5乗に比例することがわかった。そのため、outer lobeの体積は循環の $(1.51 \pm 0.30)$ 乗に比例する。実験室では、Kelvinの公式により渦輪の並進速度と循環の関係が与えられる。これにより、実験室系で渦輪が粒子層の表面を侵食し、運搬した体積は、循環の $(1.25 \pm 0.17)$ 乗に比例することがわかった。

ベキ乗の値の比較から、大気のある天体への衝突現象によって引き起こされる渦輪は、outer lobe の形成プロセスとして可能性があることがわかった。本研究で用いた衝突によって引き起こされる渦輪のモデルでは、循環の強さはエジェクタカーテンの角度に依存する。大気圧や大気密度が高くなることや衝突地点の粘性が上がることでエジェクタカーテンの角度が大きくなることが知られている。循環が outer lobe の体積に比例する際の係数を詳細に検討できれば、outer lobe の体積から大気圧・大気密度・衝突地点の物性など、形成環境を議論できるようになるかもしれない。

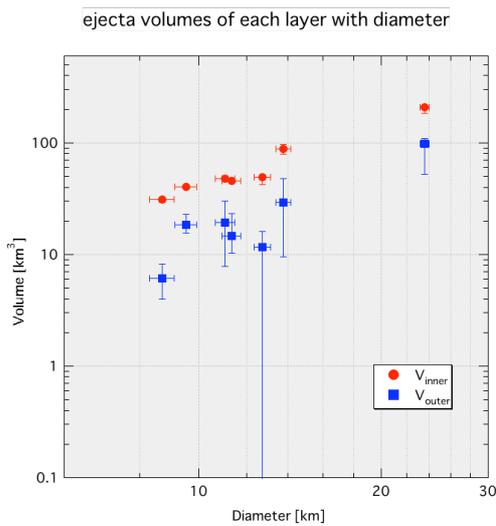


Fig.1) DLE の inner lobe と outer lobe の体積

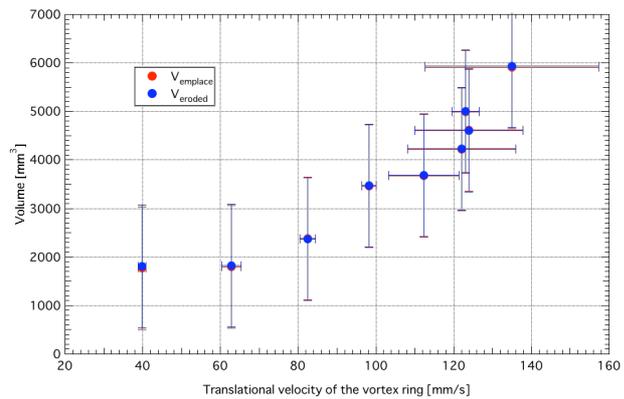


Fig.2) 実験室で、渦輪によって移動させられた体積