火星流動化イジェクタの形成

出村裕英

1.火星流動化イジェクタの研究 意義

衝突クレーターは、太陽系固体表面では実にあ りふれた地形である。その凹型構造は天体重力・ 強度(物性)・衝突エネルギー等々に関して体系 的に理解され、惑星科学において重要な基礎のひ とつとなっている. そのため, もはや精密なシミ ュレーション以外に手をつけるところなどないと 錯覚している者も多い.しかし太陽系を見回して みると、その凹地から放出された物質(イジェク タ) が作るイジェクタブランケット (ejecta blanket) や、凹構造の目に見える形態は多種多様で、その 多様性の体系的理解は不十分である. 衝突実験等 でクレータリングの本質はつかめたものの、それ ら表面に見える構造は各天体の表層環境に敏感で 取扱いにくく、未整理のまま残されているためで ある.しかし、別の観点に立てば、この多様なク レーターの形態は表層環境を解明する有力な情報 源となる.本記事は、そのイジェクタの一種、火 星流動化イジェクタを解説するものである.

ここで取り上げる流動化イジェクタの理解は, 火星に限らず惑星探査一般で衝突クレーターの形 態から古環境等の情報を読みとる基礎としても重 要である.一般に,「何が基本型で,何の因子がど んな派生型を生むか」を考察・理解することは, 古環境(物性)指標の認識に等しく,極めて応用 範囲が広い.現在も開拓されつつある,惑星地形

1 東京大学理学系研究科地球惑星物理学教室

学・地質学のひとつのテーマである.

火星流動化クレーター(図1)は,発見当時から 月のクレーターには見られない構造が目をひいた. 月のクレーターの主要な起伏はクレーター凹部と リムだけであるのに対し,図1にあるとおりその 外側にも特徴的な起伏が見られる.太陽は上側か ら照らしているので,それに従って凹凸が判断で きる.クレーターリムより外側のある平面として 認識できる領域はローブと呼ばれ,クレーター形 成過程で掘削され周囲に散布・堆積したイジェク タブランケットに対応している.右クレーターの



図1 火星流動化クレーターの例 Viking写真ID: VO_608A47

外側ローブが下部構造(右上に見える三つ又のリ ンクルリッジならびに左クレーターの一部)を消 していないことから、ごく薄いものであることが わかる.図1の二つのクレーターでは二重のローブ が見られるが、ほかに菊の花びらを重ねたような 多重ローブ型、一枚しか見えない一重型など、 様々なものが見つかっている.図1に見られるよう な典型的二重型では、内側の崖もしくは緩やかな 嶺に囲まれた台地状の厚い領域を内側ローブ、そ れよりも遠くの末端嶺に囲まれる薄い領域を外側 ローブと呼んでいる.末端の嶺のことをランパー ト(rampart)と呼び、内側ローブよりも外側ロー ブで著しい起伏を示す.

内外ローブとも明瞭な境界を示し、高解像度画 像では流動した痕跡が発見されていることから、 イジェクタが側方向へ流れて形成されたとされ、 月の降下性のイジェクタとは全く異なる.図2は両 者の違いを概念図に表したものである.上が月で ・見られる通常のクレーターで、イジェクタブラン ケットは外側に向かって薄化・消失する.図2右断 面図の通り、終端は不鮮明である.一方、下が火 星で見られる流動化クレーターで、イジェクタは 着地後外側に掃き寄せる流れを作り、末端で崖も しくはランパートでもって終わる.右断面図の通 り、終端の起伏が影を作ることで、低解像度であ っても境界は明瞭に区別できる.その特有の特徴 から、火星流動化クレーターをランパートクレー ターと呼ぶことも多い.



図2 クレーターイジェクタ、降下性と流下性の違い (概念図)

誤解されないよう言葉の整理をしよう、流動化 クレーター (fluidized crater) とは、クレーター凹 部構造が流動・緩和したものではなく、イジェク タが流動化したものを指している。もともと側方 向に運動量を持っているイジェクタが「流動化す る」という表現は分かりにくいが、クレーターイ ジェクタについては暗黙のうちに「月の通常のク レーターに比べてイジェクタが遠くまで走るなど, はっきりした流動の痕跡を示すもの」を流動化イ ジェクタと呼んでいる.火星以外では金星[1]・氷 衛星[2]で報告され、Ries・Sudburyといった一部の 地球クレーターにも流動化したイジェクタの痕跡 が見られる[3,4]. しかし、火星流動化クレーター に特筆されることは、ランパートの明瞭性である (図1,2参照).火星流動化イジェクタが外側に掃か れた流動堆積物であるとする最大の根拠は、地球 土石流堆積物との類似性で、このため火星表層の 水の存在の証拠としてもよく語られている.

残念ながら、流動化イジェクタの流動化機構が、 地震による液状化や土石流と同じメカニズム[5.6] であるかどうかについては、まだ統一見解がない. しかし、間隙流体が粒間すべりを潤滑しようと、 間隙圧上昇で内部摩擦を減少させようと、なんら かの流体がイジェクタの流動を支配していたこと には間違いないだろう.月クレーターと火星流動 化クレーターとのイジェクタの挙動の違いは、粒 子間に入るべき大気もしくは気化・液化した水の 有無であるとする見方が一般的である.

流動化イジェクタの成因として,現在までに 「揮発成分説」[7],「大気説」[8],が提唱されてい る.前者は先に述べたように土石流のアナロジー から始まり,実験もあるが主に地質学的事実を拠 り所にしている.例えば,イジェクタの流動性が 高緯度ほど大きいという緯度依存性[9-12]は,気候 に左右される因子,すなわち揮発成分説を支持し ている.しかし,形成物理機構はそれほど明確に 火星流動化イジェクタの形成/出村

示されてはいない(最も良い描像は[13]).後者は, クレーター形成時に広がるイジェクタカーテンが 大気と相互作用して月と違った現象が起こるだろ う,というアイデアから始まっている.イジェク タカーテンとは,放出されたイジェクタ粒子群の 先頭が前線をなした逆円錐面である.大気のある 火星では飛翔するイジェクタ粒子が大気摩擦によ ってふるい分けられ,細粒成分がイジェクタカー テンの背後に分離してひとつの流れを作り,それ がローブを作るだろう,というものである.大気 説では一貫した衝突実験でその因子の存在を示し 続けており[14-17],幾つもの検証可能なパラメー タを示して比較検討している.

両説の違いは、火星クレーターを解析すること で分離できる情報が、「火星の水」であるか「火星 の大気」であるか、に直結するので極めて重要で ある、火星の水に関する議論や重要性は、本雑誌 でも幾度か取り上げられているので省くことにす る[18,19].直径5km以上の全流動化クレーターの カタログ作成という地道な研究では、一重型・二 重型・多重型といった流動化イジェクタのローブ 枚数で分類され、その主成分が一重型であること が示されている[9,10].その形成因子が何かを巡っ てずっと争われてきたわけだが、いまだに決着が ついていないのは両方を支持する証拠や研究が示 されているためである.

本記事では,惑星地形学・地質学の観点でこの 流動化イジェクタに切り込むことにする.すなわ ち,他天体にはない特異な構造,例えば明瞭なラ ンパートや1回のクレータリングで菊の花びらを重 ねたような複数回の流動化イジェクタを形成する ことなど不可思議な点が報告されているが、これ らの認識の再検討とその意味するところを考察し, 火星流動化クレーター形成の制約と描像の提出を 試みよう.情報過多に陥らないよう,以下の三点 に焦点を当てて流動化クレーターの多様性の体系

7

的理解を示すことにする.第一に,多様な火星流 動化クレーターの中で何が基本型で何が派生型な のか.第二に,流動化イジェクタの層序と流動化 イベントの真の回数はいくつか.第三に,ランパ ートの成因である.これら三つに,現在得られつ つある探査データによる検証項目も併せて提案し てみよう.

2. 何が基本型か?

これまでの一重型が第一成分であるという主張 は、全数調査に基づくものである.私の調査では 最も新鮮なクレーターのみを分離して、より原形 で浸食などの影響を受けていない比率を得た、そ のクレーター選定基準の代表的なものは、クレー ターリムのエッジが保存されていて極めて新鮮で あること、周囲の起伏や勾配の影響を受けていな い等方的な広がりを持つイジェクタを伴うことで ある.両者を西経0~60度,南北緯+80~-80度の領 域で比較したものが図3である. 左が全流動化クレ ーターでの割合、右が原形を保つとされるものに ついての割合.浸食されたものも含む左のカタロ グでは一重型が過半数を占めるが、新鮮なもので は二重型が3/4を占める.この領域には直径5km以 上のクレーターが6760存在し、そのうち流動化ク レーターは678個(~10%)である.流動化クレー ターが火星上のクレーターでは新鮮な特徴である との見方はこの割合からも頷けるが、流動化クレ ーター自体を扱う際は全特徴を保存しているもの のみで議論する必要がある.最も新鮮と見なされ たのはその中の389個で、現存する流動化クレータ ーの43%が棄却されたことになる.

図3右で明らかなとおり,原形をとどめている新 鮮な流動化クレーターは75%が二重型で占められ, 残り25%が一重型であった.これは,従来の研究 とは対照的である.多重型とされていたものは,

NII-Electronic Library Service

次節の個別記載で述べるが,全て二重型に分類された.また一重型とされていても,今回高解像度 で詳細に調べた結果,二重型と分類されたものも 少なくなかった.図3左はBarlow & Bradley (1990) [10]の基にもなったBarlow & Stromのカタログにも とづく同領域のプロットである.第一成分は一重 型55%,続いて二重型・多重型が同率8.6%を占め ている.



これは、流動化クレーターが極めて浸食に弱く、 本来二重型であったものが一部欠損して一重型に 見えているクレーターも多いことを示唆している. この見方は、選抜基準から外れた幾つかのクレー ターの残存構造によっても支持され、もっとも最 近のクレーターだけが二重型を作るようになった ためとは考えにくい.

3. 流動化イジェクタの層序と フローユニット

3.1 多重型

火星流動化クレーターで最も知名度が高いYuty クレーターをまず取り上げよう.図4下概略図で, 厚い内側ローブ(ハッチ)と,断続的ランパート (破線)で囲まれた薄い外側ローブ群が示されてい る.上写真白枠は拡大図(図6)の領域である.こ のクレーターは多重型として知られ,切れ切れの ランパートを全てつないだ複数枚のローブ群が認 識されていた[20].1回の衝突でどうやって複数回 の流動化イベントを生じたのか,もっとも理解に 苦しむクレーターのひとつである. 一般に、ある領域の境界が別の境界に切られて いるか否かで、被覆・形成順序は決定され、Yuty クレーターの過去の記載もそれに従っている.し かし、流動堆積物の場合は単純ではなく、ランパ ートの位置関係を部分的に拾って決定してはいけ ないはずである.図5で簡単に説明しよう.破線枠 内での境界の交差関係は左右とも同じである.左 のフローユニットが2つ、右が1つである.これが 降下性堆積物であれば、ただ一カ所での切り方・ 切られ方で層序の判断ができるが、流下堆積物の 場合はフローユニットが1枚であるか否かも併せて 判定する必要性を示している.つまり、境界を完 全に追うかもしくはより高解像度で判定しなけれ ばならない.

この点に注意した結果,断続的ランパートで囲 まれるYutyクレーターの多重ローブは,より少な いフローユニットで認識され,その形成に従来と は逆の順序がつけられた.図6では厚い内側ローブ Aと,薄い外側ローブ群Bで,添えた数字が堆積順 序を示している.各記号がほぼ従来そう思われて



図4 Yutyクレーター全景と概略図 背景:VO_827A24, 高解像度画像: VO_003A07, VO_034A86

9





図5 部分的には同じ切り方でも流動単位数が違う例



図6 多重型の拡大図

図4の白枠領域を拡大したもの。Aが崖で囲まれる厚い内側 ローブで、Bがランパートを伴う薄い外側ローブ群。数字は 堆積の順序を示す。

いた1ローブに相当する. ランパートには断続的, もしくは頂部を削られ不鮮明となった箇所(破線) があり,決壊・溢れ出し等,薄い外側ローブ群が 実は1フローユニットであることがわかった. 最も 内側のローブはランパートではなく崖で囲まれる 厚い領域で,外側の薄いローブ群とは異なってい る. これらの特徴はすべて,これまで多重型と分 類されてきたクレーターに一般的である.

結局,多重型のフローユニットは劇的に減少し, むしろ次に挙げる二重型の一種として認識すべき であることがわかった.すなわち,厚い内側ロー ブと,繰り返し構造の薄い外側ローブ群とで構成 されるものである.

3.2 二重型

典型的二重型は、崖もしくは緩やかなランパー トで囲まれる厚い内側ローブと、明瞭なランパー トで囲まれる厚い外側ローブからなっている.ふ たつのローブが強別できることから、小さく厚い 内側ローブが外側ローブの上に乗っていると、こ れまでは無条件に考えられてきた.しかし、二重 型の中に交叉を伴う斜め衝突クレーターが発見さ れ、両ローブの層序関係が逆であることが判明し た.名前のないクレーターだが、それを取り上げ よう.

図7上の2クレーターは同じものの全景で、太陽 光源は集成画像が西、低解像度画像が東である. 黒枠のa,b各領域は、図8の領域を示す.図7右の概 略図は、図4と同じく厚い内側ローブはハッチで、 外側ローブはランパート(破線)で囲んで示して ある.厚い内側ローブAと薄い外側ローブBの凡例 は図6と同じである.



図7 斜め衝突二重型流動化クレーターの全景と概略図 低解像度画像: VO_827A03, 集成高解像度画像: VO_010A66, VO_010A95, VO_010A97



図8 図7の黒枠領域を拡大したものと、その概略図.(a)は内外ローブの波打ち方が逆位相になっている例.(b)は多重型によ く見られるのと同じ決壊構造の例. 凡例は図6に準じる。

本クレーターの厚い内側ローブは、斜め衝突の 特徴であるバタフライ構造を示し、黒矢印で示す 入射方向が読みとれる.ランパートで囲まれる外 側ローブは内側ローブの上に乗っており、流れの 堰き止め構造であるdeceleration ridges等が見られ た.このため、二重型において厚い内側ローブの 上に薄い外側ローブが乗っていることがわかる.

また,この二重型は多重型と同じ構造や,ほか の通常の二重型に見られる特徴が随所にある.図8 左aは内外ローブ末端について波打ち方に逆位相の カップリングがみられ,二重型一般でも内側ロー ブの崖と外側ローブのランパートとが近接すると ころでよく見られる.

この逆位相カップリングは間接的に両ローブの 層序関係を示している.すなわち,もし外側ロー ブが先に形成されて内側ローブがそれを埋めた場 合は同位相に、逆に内側ローブを乗り越えて外側 ローブが流れた場合は逆位相になると考えられる. 両ローブの末端の隔たりが小さいほど、この傾向 ははっきり見える.また、図8右bは多重型と同じ 内側ローブ決壊例で、小さい構造ではあるが二 重・多重型を問わず見つかる構造である.いずれ も写真の下が概略図である.多重型と二重型には 共通特徴が多く、両者の相違は決壊・分岐の複雑 さの差に過ぎないことがわかる.



斜め衝突二重型の直接証拠と、より一般的だが 間接的な逆位相カップリングから、二重型の層序 が明らかにされた.概念図として表したものが図9 で、内側ローブを被覆する外側ローブは、内側ロ ーブの地形特徴を消さないほど薄いものである.

3.3 一重型

この扱いは実に困難である. 原形をとどめてい るとされるクレーターの1/4でしかないこともある が,浸食の結果一重になったものを完全に排除で きているか,見えないことを根拠にしているので 検証するすべがない. そこで,間接的な証拠を示 そう.

最大多数の二重型について,内外ローブ直径比 の出現頻度を取った(図10).ここで注目すべきは, 内外ローブ比が連続的に分布していることである. もし比が1近傍もしくはそれ以下になった場合はど



図10 二重型内外ローブ直径比の出現頻度

うだろうか?二重型の外側ローブが被覆した内側 ローブの特徴を消さないほど薄いことを考えれば, 二重型は一重型と区別がつかないのである.この 一重型と二重型との連続遷移は,両者の形成機構 に本質的な差がないことを示している.つまり, 一重型は二重型の外側ローブが縮退したものにす ぎない,という解釈である.

3.4 火星流動化クレーターの多様性の体系的理解

以上の通り, 層序関係と流れの分岐, 多重・二 重・一重型の構造をつかんだことで, 体系的理解 が得られた.すなわち,火星流動化クレーターは 二重が基本型で,クレータリングに伴う流動化イ ベントは2回である.厚い内側ローブと薄い外側ロ ーブがあり,前者が下位にある.外側ローブは全 体を被覆し,見かけ上多数に分岐することがある. その火星特有の分流の理解は,次のランパートの 考察を待たねばならない.

4 ランパートとは何か?

図1に見られるような明瞭なランパートは、火星 特有の地形で、二重型の外側ローブを縁取るもの である.金星・氷衛星の一部にランパート様のも のが見られることもあるが、二重型としての報告 はない.これは、本当に地球土石流堆積物の末端 に見られるものと同じ構造なのだろうか?

定量的な尺度としてわかりやすいのは、ランパ ートの幅の外側ローブ走破距離依存性である.図 11は最も新鮮なクレーター群でランパートを伴う ものについてプロットしたもので、両者はほぼ比 例している.但し、極域の二重型ではランパート に欠けていて、それらは表れていない.このラン



図11 ランパート幅の外側ローブ走破距離依存性

パートが全ての新鮮な流動化クレーターで見つか るわけではないことからも興味深い情報が示唆さ れるが、それは後述する.図7をはじめとして、 個々のクレーターについて外側ローブの走破距離 が異なる分岐の先端のランパートを調べてみても、 やはり走破距離が長いものほどよく発達しており、 同じ傾向を示す.また,ランパートの連続性も, 走破距離が短いほど不良である.

これは、ランパートを構成する物質が、巻き込 まれた表層岩塊・砂礫(レゴリス)であることを 強く示唆する.仮にイジェクタそのものならば、 幾何形状からいって広がるほど小さくなるという 逆の傾向を示すはずだ.以前から、流動化イジェ クタの体積がクレーター凹部容積もしくは掘削体 積よりも大きく、何か別の供給源を考えないとい けないことは、繰り返し指摘されてきた[最新は21]. 従来は、本当に当てはめてよいかはわからないが、 月のBallistic Erosion and Sedimentation model [22]を 援用してレゴリスの巻き込みが考慮されてきた. メカニズムはともかく、外側ローブならびにラン



図12 流動化イジェクタ・ランパートの起源

パートはイジェクタ起源というよりもむしろ再配 置されたレゴリス起源であることだけは間違いな いだろう.図12はその違いがランパートの存在に どのような違いを示した概念図で、上のレゴリス 起源は流れとランパート構成物質が分離している が、下は流れと同じである.下のイジェクタ起源 の形成機構は、停止して初めてランパートが生じ るもので、後続流が乗り上げた土石流堆積物の末 端嶺と同じものである.

一方,明瞭なランパートが欠ける場合は何を意 味するだろうか.外側ローブにランパートがない 領域の代表例は,永久凍土があるとされる周氷河 地形の一種,多角形土 (polygonal ground)の分布 域である.ここでは更にもうひとつ南北緯40度ラ インを挙げよう.図13は縦軸が内外ローブとクレ ーター直径との比で,横軸が緯度である.二重型 の値をブロットしているが,一重型しか見られな い領域のみ,その値を内側ローブの値としてある. それでも緯度依存性が示せるということは,一重 型のローブが内側ローブに相当する間接的証拠で もある.このグラフで注目したいのは,外側ロー ブの内側ローブに対する比が急増する南北40度ラ インである.これを境に流動化クレーターの形状 が変わり,赤道側では明瞭なランパートを伴うが, 極側ではランパートが欠落してしまう.但し,直 径30km内外のもので幾つか例外が見られるが,そ



図13 内外ローブ直径の緯度依存性

れらも赤道域のランパートに比べればかなり弱々 しい.この40度ラインを境にローブの直径が急増 して代わりにランパートが消失する傾向は,図11 の外側ローブ走破距離が伸びるほどランパートが 成長するという傾向とは全く異なる特徴で,何ら かの機構上の変化が生じたと考えられる.この40 度近傍は南北両半球境界とも地質境界とも無関係 だが,永久凍土出現が予想・推定されている境界 と一致する[23-25].永久凍土があるとランパート が消える何かが起こるのだろうか?

前段を考えれば、ランパートがなくなるという のは、表層レゴリスの供給が絶たれた事を意味す る.それはあまり不自然なことではない.表層の 凍結は、削剥を抑制する因子だからだ.また、走 るほど巻き込んで成長するはずのランパートが、 消失した途端に内外ローブ直径比が急増するとい う点は、ランパートの存在がローブ拡大を抑制す る因子であり、かつ流れている実態と分離してい ることも示唆している.すなわち、流動化イジェ クタの流れが表層レゴリスをブルドーザーのよう に掻き取りつつ、先頭にランパートを伴いながら 進行していく描像である.表層レゴリスが巻き込 めずランパートが作れなくなると、ローブ伸展へ の抵抗が無くなって流れが急に大きく広がるのだ ろう.

この描像は、多重型の生成機構にも示唆を与える かもしれない.土石流の末端嶺は、流れの停止時に 後続流が乗り上げて、程度の差こそあれ必ず形成さ れる.もし土石流のような流れで多重型の分流を作 ろうとすると、ランパートが停止時にしか生じない ことから複数回の停止・決壊を考えなければならな い.しかし、ランパートは流れの先頭にあって流れ そのものと分離していれば、ひとつの流れがランパ ートという障壁に規制されつつ、速度差によって階 段状扇形に分岐・迂回してもよいだろう.それが多 重型だとする見方は、それほど無理なものでもな い.しかし、これらのランパートの見方は現状では ひとつの仮説に過ぎず、次節で挙げるように、より 具体的な検証が必要である.

5. 火星流動化クレーター形成の 描像と探査検証項目

こうして,三つの重要な点について述べてきた が,これらは火星流動化クレーター形成のどんな 描像を与えるだろうか?

わかっていることは次の通りである.火星流動 化クレーターの基本型は二重型である.厚い内側 ローブと薄い外側ローブのふたつからなり,前者 が先に堆積して後者がそれを薄く被覆している. 流動化イベントならびにフローユニットは2つで, ローブとされてきた単位の枚数が必ずしも流動化 イベント回数を示すものではない.また,ランパ 13

ートの発達の度合いは外側ローブの走破距離と正 の相関を持ち、レゴリスの流れへの巻き込みを強 く示唆している。そして原形をとどめながらもラ ンパートが見られない領域は、レゴリスの削剥が 困難であろう永久凍土帯と一致しているのである。

ここで内外ローブ2つの起源を考察してみよう. 斜め衝突二重型の記載で, 普通のイジェクタパタ ーンを示したのは厚い内側ローブである、従って、 厚い内側ローブが通常のイジェクタカーテン起源 で、着地後も流動性を保って側方向にいくらか流 れたと考えるのが自然である。とすると後から薄 く被覆する外側ローブは何だろうか?大気起源説 に立った実験によれば、イジェクタカーテンの背 後に細粒のイジェクタが分離し、それが流れてロ ーブを形成すると主張している.この生成と順序 は今回明らかになった二重型の層序を考えるとは じめて意味を持ってくる。今までは厚い内側ロー ブがイジェクタ起源と思った人は多かったろうが. 外側ローブがそれより先に堆積していたとされて いたために惑わされていたのだろう. すなわち, この大気の作り出した流れが初めに着地したイジ ェクタフローの上を流れて追い越し, 表層レゴリ スを削剥・再配置して外側ローブとランパートを 作ったと考えられる.結局,揮発成分説・大気説 はそれぞれ内側ローブ・外側ローブを説明するも のであり、両者のいずれかが正しいと一方を否定 する必要はない.

この描像は、なぜ金星・氷衛星では火星型の明 瞭なランパートが見られないか、をも暗示してい る.すなわち、たとえ大気もしくは表面物質の気 化・膨張があって、大気摩擦でイジェクタカーテ ンから分離する2次流が生じたとしても、火星永久 凍土地域のように表層が緻密であれば削剥できず 外側ローブとそのランパートが生じない、という シナリオである.金星表層は風化が進まず新鮮で あるか、もしくは焼結していてレゴリスといえる 状態ではないのかもしれない.

結局,これまで相たたかわれてきた両因子は共 に存在し,両者がカップルしたシステムとして火 星流動化クレーターは理解すべきである,と私は 考える.それを示したのが図14である.左はShultz



図14 火星流動化クレーター形成の描像

& Gault (1979) で提出されたアイデアで, イジェ クタが大気摩擦のために分級・分離する様子を示 している.右はイジェクタカーテンの背後に分離 したのち.イジェクタの大半はそのまま着地し, 含んでいた揮発成分ガスが粒間を埋めて流動性を 維持,1次流を形成する.上空に取り残された細粒 成分が,その1次流の後から下りてきて被覆する, という描像である.厚い内側ローブが図12でいう ところのイジェクタ起源で,薄い外側ローブがレ ゴリス起源と理解される.

この描像は、次に何を探査すべきか、何を検証 すれば確認できるかの指針を与える.すなわち、 火星揮発成分の分布を調べようとすれば、これま でのように流動化クレーター自体が永久凍土層存 在指標である[14, 26]、といった単純な見方を捨て なければならない.二重型の厚い内側ローブこそ



図15 探査対象としての二重型最小直径

が揮発成分存在指標であろう(図15). 衝突実験で 再現されているのは一重型だが,それは単に1次流 が形成されない例である. Schultzらの一連の実験 は,内側ローブが流動化せず月と同じ挙動を示し た場合に相当する. すなわち,図15の左側の一重 型である. 但し,直径5km以上のクレーターの一 重型は全て厚く,この薄い一重型は発見されてい ない.火星流動化クレーター最小直径に関して, 従来いわれてきたkmスケールの値よりも一桁小さ いクレーター[26]が報告されているが,それに該当 する可能性がある.

こうした描像を検証できる対象として,第一は 内側ローブと最外縁ランパートとの間の外側ロー ブである.新鮮な二重型クレーターでは,高解像 度画像で削込みの特徴が見られるかどうか,高度 計などで周囲の原面よりも低くなっていないかど うか,調べるべきである.そして第二は,ランパ ート構成物質が周囲のレゴリスと同じかどうかを 光学・熱赤外測器で調査することである.現在稼 働中の火星探査機マースグローバルサーベイヤー の新データ公開が待ち望まれる.

謝辞

執筆を促し或いはコメントして頂けた高田淑子 さん,井田茂さん,栗田敬さん,匿名査読者ほか 皆様ありがとうございました.博論審査会等で議 論して頂けた水谷仁さん,濱野洋三さん,松井孝 典さん,阿部豊さんにもお礼申しあげます.また, 参考として電子化済み生データを提供して下さっ たBarlow, N. G., Strom, R. G.両氏にも感謝の意を表 します.

火星流動化イジェクタの形成/出村

附録.探査データの取得方法と 処理方法の紹介

Viking画像に限らないが、近年の太陽系探査デー タは検索・処理ツールと一体化した供給システム (PDS: Planetary Data System) としてアクセスでき る. その結果,惑星地形・地質学の作業環境は,ア ナログからデジタルへと大きく変化しつつある.高 木(1992) [27]の紹介より現在では遙かにインター ネットに依存した環境となり、誰もがすぐに始めら れる基盤が整っている.もし画像処理枚数が二桁程 度と少なければオンラインで全てが片づいてしまう 現状である. 私の場合, CDROMを取り寄せてSolaris WSにデータを落とし、較正・基本画像処理ソフト ウエアISIS (右を参照 http://wwwflag.wr.usgs.gov/ isis-bin/isis.cgi) で処理した上で解析を行っている. PDS (Planetary Data System) の概要やツールにつ いては以下の参考文献&ホームページを参照すると よい(2000.1現在).

*PDSの概要

Special Issue: Planetary Data System (1996) Planet. Space Sci. vol.44, no.1, pp.1-70

*PDSの画像関係ホームページ

Planetary Data System Home:

http://pds.jpl.nasa.gov/

PDS Catalogs and On-Line Data:

http://pds.jpl.nasa.gov/resources.html

PDS Imaging Node Home:

totes a recommendation of a solid second

http://www-pdsimage.jpl.nasa.gov/PDS/

画像検索(Planetary Image Atlas):

http://www-pdsimage.jpl.nasa.gov/PDS/public/Atlas/ Online CD-ROMs:

۰.

...

. . .

http://wwwpdsimage.jpl.nasa.gov/PDS/public/ jukebox.html

ソフトウエア:

http://wwwpdsimage.jpl.nasa.gov/PDS/public/ software/software.html

*メディア供給:

http://nssdc.gsfc.nasa.gov/cd-rom/set_bd/mdim.html

参考文献

- Schultz, P. H., 1992c: J. Geophys. Res 97, E10, 16183.
- [2] Horner, V. M. and Greeley, R., 1982: Icarus 51, 549.
- [3] Hörz, F. et al., 1997: Rev. Geophys. 21, 8, 1667.
- [4] Lowman Jr., P. D., 1992: Rev. Geophys. 30, 3, 227.
- [5] Iverson, R. M., 1997: Rev. Geophys. 35, 245.
- [6] Iverson, R. M. et al., 1997: Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 25, 85.
- [7] Carr, M. H. et al., 1977: J. Geophys. Res. 82, 28, 4055.
- [8] Schultz, P. H. and Gault, D. E., 1979: J. Geophys. Res. 84, B13, 7669.
- [9] Mouginis-Mark, P. J., 1979: J. Geophys. Res 84, B14, 8011.
- [10] Barlow, N. G. and Bradley, T. L., 1990: Icarus 87, 156.
- [11] Costard, F. M., 1989: Earth Moon Planets 45, 265.
- [12] Kuzmin, R. O. et al., 1989: Solar System Research 22, 121.
- [13] Kieffer, S. W. and Simonds, C. H., 1980: Rev. Geophys. Space Phys. 18, 143.
- [14] Schultz, P. H., 1992a: J. Geophys. Res. 97, E1, 975.

16

- [15] Schultz, P. H., 1992b: J. Geophys. Res. 97, E7, 11623.
- [16] Barnouin-Jha, O. S. and Schultz, P. H., 1996:J. Geophys. Res. 101, E9, 21099.
- [17] Barnouin-Jha, O. S. and Schultz, P. H., 1998:J. Geophys. Res. 103, E11, 25739.
- [18] 倉本圭, 1995: 遊星人 4, 4, 201.
- [19] 佐々木晶, 1997: 遊星人 16, 1, 70.
- [20] Wohletz, K. H. and Sheridan, M. F., 1983: Icarus 56, 15.
- [21] Garvin, J. B. and Frawley, J. J., 1998:Geophys. Res. Lett. 25, 24, 4405.
- [22] Oberbeck, V. R., 1975: Rev. Geophys. Space Phys. 13, 377.
- [23] Fanale, F. P. et al., 1986: Icarus 67, 1.
- [24] Zent, A. P. et al., 1986: Icarus 67, 19.
- [25] Squyres, S. W. and Carr, M. H., 1986: Science 231, 249.
- [26] Demura, H. and Kurita, K., 1998: Earth Planets Space 50, 423.
- [27] 高木靖彦, 1992: 遊星人 1, 2, 60.