

特集「変遷する火星環境」

火星環境の模擬室内実験

荒川 政彦¹

1. 比較惑星学と火星

太陽系の固体惑星・衛星の多くは大気を持たないため、その表面はクレーターで覆われており、このクレーター地形がそれらの天体の基本的な地質構造を形成している。しかしながら、火星のように大気を持つ活動的な惑星では様々な地質活動、気象活動が表層地形を変化させる。ここ数年のアメリカによる集中的な火星探査は、火星に関する情報を飛躍的に増加させ、これは火星研究がバイキングの時代とは質の異なる時代に入ったことを意味する。特に重要な点は地球の観測・調査において得られるデータと比較しうる精度の高いデータが得られるようになったことである。これは、地球科学において用いられた手法をそのまま火星に適用できることを意味し、また地球と比較して火星を吟味し、その結果から再び地球を見直すことができること意味する。地球上で地質調査を行いその地域のテクトニクスを調べる手法や岩石試料を分析して火成活動や堆積環境を再現するなどの手法が、軟着陸機を用いた火星上でのリモート調査により可能になりつつある。マーズグローバルサーベイヤーに搭載された MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter) による全球観測は、火星氷床の高度プロファイルや個々の衝突クレーター、渓谷、火山等の3次元形状を詳細に浮かび上がらせることに成功し、地球物理学的手法を用いて地形解析を行なうことを可能にした。また、MOC (Mars Orbiter Camera) が観測した火星表層は、スナップショットだけでなく同一地域の微細な季節変化までも写し出した。例えば、火星の気象現象にとって最も重要な二酸化

炭素の昇華・凝結は、火星独特の地形構造を極域に形成する。また、その高い撮像能力によりダストデビルと呼ばれる火星表面で発生する竜巻をも観測している。

2. 火星の表層環境と地形

火星実験学では、火星表層環境で見られる自然現象や地形を研究対象とするが、特に他の惑星では見られず火星において特徴的な対象に焦点を当てることにする。火星気象において最も印象的なのは大気におけるダストの挙動である。火星では、ほぼ毎年全球を覆うダストストームという大嵐が発生する。このように大規模な嵐に至らなくても、局所的にダストデビルと言われる竜巻が発生し表層のダストを巻き上げる現象が観測されている。ダストが全球を覆う場合、全火星の日射量をコントロールするに至り、火星の気象システムに大きな影響を及ぼすが、同時に地表においても風成地形を形成する。火星地表の最表面はすべてが風成地形である。もちろん、地殻自身は火成活動により形成され、その後、地表に水があった時期、河川地形・堆積地形等が形成されたと思われる。また隕石衝突は常に衝突クレーターを生じさせ、火星の地形的特徴となっている。しかしながら、これらの地形はすべて火星大気における砂、ダストからの風食を受け、時々刻々とその地形的特徴を消失させている。ゆえに、この砂やダストによる風食作用は火星において最も特徴的であり、重要な地形形成メカニズムであるといえる。

火星の極地方には地球の氷床と類似した氷床の存在

1. 北海道大学・低温科学研究所

が知られている。その表面はCO₂の雪で覆われて白く見えている。この氷床は北極と南極ではその形状が大きく異なり、特に北極氷床はスパイラル構造を持つ大きな溝で特徴づけられる。一方、南極氷床は比較的対称形をなしており、地球氷床との比較論が行い易い。氷床は地球の様に大気循環がある固体惑星の寒冷域に特徴的な地形と考えられ、火星特有というわけではない。しかしながら火星環境下での氷床の起源や現在の気候メカニズムにおけるその役割を考えると、火星環境進化を解き明かす鍵となるものである。特に火星環境下における氷床構成物質のレオロジー及びその力学的性質は興味深い。

衝突クレーターは固体惑星・衛星に普遍的に観測される地形である。この火星においては地質活動が活発であり、流水による侵食や風による風食が激しく、クレーターの多くはすでに消失している。観測されるクレーターは年代の若いものに限られると思われるが、その形態から火星特有、もしくは特徴的と言われるクレーター群が存在する。一つは、クレーター孔周囲に折り重なる花びら状の構造を持つランパートクレーターであり、もう一つはピット型クレーターである。典型的な月クレーターにおいては、中央丘型、ピークリング型と複雑クレーターが変化するが、火星では、この複雑クレーターのカテゴリーに中央に深い孔を持つような異なるタイプのクレーターが含まれることになる。このように火星特有のクレーターの存在は火星表層地殻の構成物質とCO₂の薄い大気が影響しているものと考えられる。

3. 風成地形

3.1 ダストによる風食

火星を吹く風により地表面のダストや砂は巻き上げられ、移動・堆積を繰り返す。その結果、砂丘に見られるような風紋や障害物の周囲に堆積模様が作り出される。このような模様は局所的な風の方向を知るのに有用であるだけでなく、その時間変化を調べることに

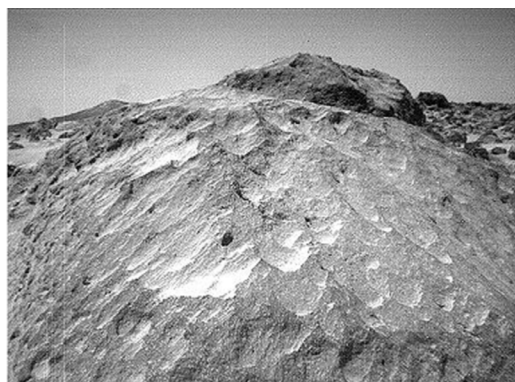


図1：Moeと名付けられた火星表面の礫の近接撮影画像。マーズバースファインダーのSojournerからの写真。Moeは～mサイズの礫である。この礫の表面に見られる波状の模様は風食によりできたと思われる。(NASA提供)。

より火星表層でのダストの水平移動量を見積もる手助けにもなる。また、火星軟着陸探査機から送られた地表のクローズアップ画像から、表面のいたるところに見られる礫の表面には溝や穴、鋭角な辺を持つものが多いことがわかる(図1)。これらは地球上で風食によりできるVentifact(三稜石)と似ており、火星上でダストの衝突による侵食を受けてできた構造である。このような侵食を通してさらにダストが生成されるので、ダスト衝突による風食は火星表面へのダスト供給メカニズムとしても作用していると思われる。この風食は、もっと大きなスケールで見るとクレーター地形の風化や風食盆地の形成などをもたらしている(図2)。ところで、火星でこのように風食が激しい理由は何であろうか?火星表面の気圧は良く知られているように6mbar程度しかない。地球上ではこのような自然環境で起こる砂嵐は存在しないため、実験室での模擬実験により確かめる必要がある。

飛砂・砂嵐や砂丘形成に関する研究は、風洞を用いて行われる。もちろん地球の砂漠・砂丘を対象にした実験であるので1気圧下での実験が主である。また、日本においては吹雪研究のため精力的に風洞実験が行われてきた。吹雪は、砂・ダストの代わりに雪が飛翔するものであり、物理的な素過程は砂嵐の場合と全く同じである。そこで吹雪に関する風洞実験を紹介し、



図2：ヤルダンと呼ばれる風食地形と風化を受けた衝突クレーター。上下に伸びる構造は風食によりできた小丘。スケールは写真の幅が3kmに相当する（NASA 提供）。

火星砂嵐との関連を議論する。

3.2 ダスト跳躍の臨界摩擦速度

砂嵐や吹雪の発達を考える上で、風によって地表の粒子がどのように運動するのかを素過程として理解する必要がある[1]。図3は、吹雪の発達を粒子の運動形態から分類したものである。風が弱い場合、粒子は地表を転がり、これをCreep（転がり）と呼ぶ。さらに風が強くなると粒子が地表から跳び出し、地表への衝突と跳ね返りを繰り返す跳躍状態になり、これをSaltation（跳躍）と呼ぶ。また粒子が衝突する時に、自分自身以外の粒子を地表面からイジェクタとして放出する。このイジェクタ粒子の放出をSplashingと呼び、このSplashingにより吹雪は発達することになる。発達した吹雪では、粒子は風に乗って舞い上がり、地

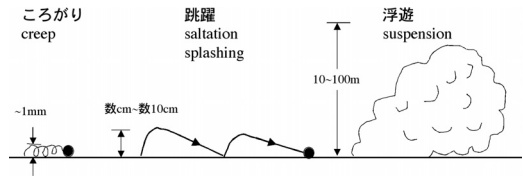


図3：吹雪の発生・発達メカニズムと雪粒子の運動（前野他（2000）から一部変更）。

面と衝突することなく浮遊運動する。これをSuspension（浮遊）と呼ぶ。それぞれの運動形態で支配物理過程が異なるので、個々の運動に対する物理係数を実験的に決める研究がなされている。ここで吹雪の発生という観点で見ると、跳躍に遷移する風の条件が最も重要であると考えられ、風洞実験により研究されてきた。観測・実験から地表面付近の風速分布 $V(Z)$ は、以下のような対数分布になっていることが知られている。

$$V(Z) = \frac{u_*}{0.4} \ln \left(\frac{Z}{Z_0} \right)$$

ここで Z は地表面高度、 Z_0 は粗度、 u_* は摩擦速度である。この摩擦速度が風速分布を決める鍵となるパラメータであり、摩擦速度を用いると地表面での風によるせん断応力（ τ_b ）を見積もることができる。

$$\tau_b = \rho_a \cdot u_*^2$$

ここで ρ_a は大気密度である。このせん断応力が粒子間の付着力に勝るとSaltationが起こる。そこでこの応力時の摩擦速度を u_{*c} （臨界摩擦速度）と定義する。 u_{*c} は、実験や屋外観測から0.2~0.3m/s程度であると言われており、この時のせん断応力は、0.04~0.1Paと見積もられる。一方、 u_{*c} は粒径や重力により変化する値であり、理論的考察から以下のような式で表されている[1]。

$$u_{*c} = A \sqrt{\frac{(\rho_p - \rho_a)}{\rho_a} \cdot g \cdot d}$$

ここで ρ_p 、 d はそれぞれ粒子密度、サイズ、 g は重力定数、吹雪の場合 $A=0.21$ である。この式を用いて仮想的に火星での吹雪の発生条件を求めてみる。粒子密度2000kg/m³、粒径0.1mm、火星重力0.38g、CO₂大気

の密度 0.014kg/m^3 を仮定すると臨界摩擦速度は 1.5m/s 程度となる。

3.3 火星の砂あらし発生条件

火星表面環境を模擬した風洞実験は、これまでアリゾナ州立大の Greely らを中心に行なわれてきた[2]。彼らは減圧室に設置した風洞を用いて低圧下におけるダスト跳躍に関する臨界速度を求める研究を行った。その結果、砂粒子の場合、臨界摩擦速度は 2m/s 程度であることを報告しており、対応するせん断応力は 0.05Pa 程度となる。一方、地表面において砂粒子にかかる正味のせん断応力を考慮すると、さらに高い摩擦速度が必要であることがわかる、 $u_{*c} = 4.5\text{m/s}$ [3]。地表面にかかる風応力は、ダストと風により動かない礫の両方に分配される。実験室で求めた臨界摩擦速度は礫のない理想的な状態で得られているので、火星表面のように両者がある場合、その面積比率に応じた応力の分配を考慮し補正する必要がある。また、マーズパスファインダーの Windsock 観測装置により、火星地表面の風速計測が行われ、粗度が 0.03m と求まっている。この粗度と先程求めた $u_{*c} = 4.5\text{m/s}$ から、跳躍が起こる時の風速を求めてみると、地表高 1.6m で 45m/s という高速になることがわかる。また、 100m 以上の上層では 100m/s を超える風速が予想される。上記の議論から火星表面で砂粒子の跳躍が起こる時、地表付近でも 50m/s 程度の高速度の風が吹いており、 100m 以上の上層では 100m/s 以上の風が吹くことが示される。このような高速度の風に乗って運ばれる砂粒子の衝突削剥が、火星に見られる激しい風食の原因になっていると思われる。しかしながら、火星環境における風洞実験は今後さらに発展させるべき課題であると思われる。それは、火星大気の大循環モデルや局所気象モデルを構築する上で、ダスト巻き上げのモデル化が急務とされているからである。例えば、Greely らは最近の論文でダストデビル（竜巻）を実験室で再現する試みを始めている[4]。

3.4 北極氷床の風食

北極氷床には非常に特徴的なパターンが見られる。そのパターンは真上から見ると渦巻き状に配置し、周辺から中心部に向けて入り込んでいるように見える。MOLA により得られた3次元立体画像から、この渦巻きのような構造はそれぞれが深い渓谷に対応していることがわかった(図4)。この渦巻き状渓谷の成因に関しては、洪水による流水侵食説[5]や層状堆積層の放射消耗説[6]などが提案され議論的となっているが、先に述べた衝突削剥と関連して考えてみると面白い。南極氷床にはサスツルギと呼ばれる地形が観測される。このサスツルギはカタバ風という南極で良く見られる強い斜面下降流により氷床表面が削剥されて形成される。カタバ風による吹雪粒子が雪面を削り取るのである。削り残された先端が、鋭利にとんがった形状をしており、サイズこそ3桁近く異なるが、北極氷床の渦巻き地形と類似している。先に述べたように火星のダストストームでは 100m/s 以上の速度で砂やダストが跳躍・浮遊すると思われるので、極域にまでこのような砂粒がやってきて、氷床に衝突し削剥することが考えられる。ダストストーム時になぜ北極域で渦巻き状の風が吹くかという問題はあがあるが、そのような風が吹くと仮定して砂粒子による氷床の衝突削剥という素過程を実験的に調べる価値はある。現在まで、該当する条件での砂による氷の衝突削剥実験はないが、衝突速度が 60m/s 程度のクレタリング実験の例なら

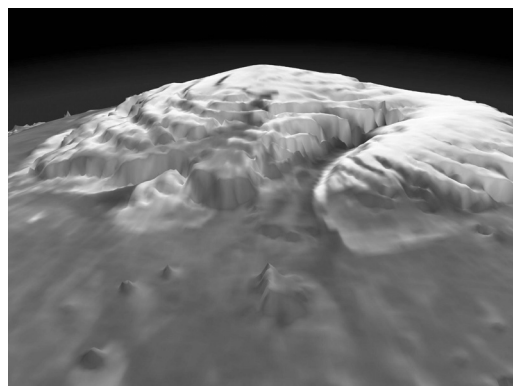


図4：MOLAによるデータをもとに構築した北極氷床の3次元画像（NASA提供）。

存在する. Kato et al. (1995) で, サイズ15mmの玄武岩を速度60m/sで氷衝突させたところ, 2.2cm³のクレーター孔が観察された[7]. 弾丸の運動エネルギーにより, このクレーター体積を割ると, 0.24cm³/Jとなり, これは衝突削剥効率 (E_{st}) を示す. これを直径10 μ mの火星ダストに適応すると, ダストの速度を100m/sと仮定するなら, 一粒の衝突当たり削られる体積 (V_c) は, 以下のように書くことができる.

$$V_c = \frac{1}{2} m_p \cdot v_i^2 \cdot E_{st}$$

ここで m_p は密度2000kg/m³を仮定した時の一粒当たりの質量である. 計算の結果, 一衝突当たり 1.3×10^{-16} m³の孔が空くことになり, 1m³の削剥には, 8×10^{14} 個の粒子が必要となることがわかる. もしもダストストームにおけるダストの流量がわかれば, 衝突削剥により氷床が削られるタイムスケールを見積もることができる. このタイムスケールを, 氷床流動速度や積雪量と比較することにより, 渦巻き状地形の成因を議論することができる. たとえば, White et al. (1997) によれば, 火星環境下における摩擦速度2m/sでのダストフラックスは, 3.7×10^7 g/cm²sと見積もられている[2]. この値を用いると, 1m³の削剥には約7地球年ですむことになる. このタイムスケールは洪水による侵食よりは長く, 放射消耗と同オーダーのタイムスケールだと思われる. 今後, 北極域のマイクロな大気循環に関する数値シミュレーションとともに, 火星環境下における砂粒子の氷衝突削剥実験が期待される.

4. 火星氷床の流動

MOLA により火星氷床の高さプロファイルが明らかになり, 地球氷床の研究者らが, その形状から火星氷床に関する流動・進化モデルを活発に提案している. その中で最も良く知られているのが Nye らの研究である[8]. 彼らは積雪のない氷床の流動モデルを理論的に考察し, その氷床の緩和時間と流動則の関係を導き出した. それによると氷床の緩和時間 (C) は,

$$C = \frac{2A(\rho \cdot g)^n}{n+2}$$

と導かれ, この時用いた流動則は以下のように書き表せる.

$$\dot{\gamma} = A \cdot \sigma^n$$

ここでは $\dot{\gamma}$ は歪速度, σ は応力, A は温度に依存する物質定数である. Nye らはこの理論式と実験から得られたドライアイスと氷の流動則を用いて, 氷床を構成する物質を議論した. ここで, 流動則を求めるために行う変形実験について簡単に紹介することにする. 惑星科学の分野において, 氷衛星や火星に存在する揮発性物質のレオロジーを系統的に研究しているグループがある. Durham と Kirby を中心とするグループで, 1980年代から高压相氷のレオロジーを高封圧下の圧縮変形実験により調べてきた[9]. 彼らは火星氷床の構成物質の候補である CO₂の変形実験も低温下で行っている[10]. その結果によれば, 図5に見られようすべての温度範囲において氷よりも CO₂が柔らかいことがわかった. この実験で得られた CO₂の流動則を用いて緩和時間を求めると, クレーター年代学で決められる氷床の年齢よりもはるかに短い時間で氷床は緩和・消失してしまうことがわかった. このことから, 火星南極氷床は CO₂ではなく H₂O 氷でできていると信じられている (H₂O 氷だと緩和時間は氷床年齢よりかな

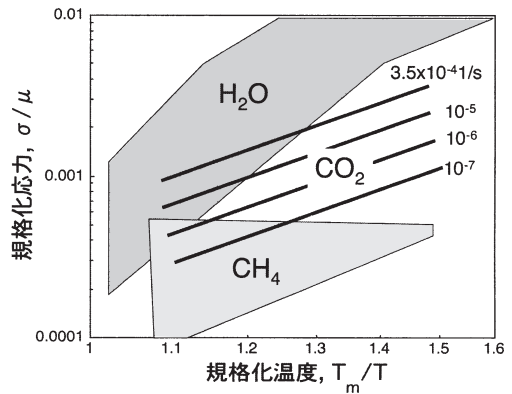


図5 : ドライアイスの流動則. 図中の数値は歪速度を表す. μ は剛性率, T_m は融点 (Durham et al. (1999)から一部変更).

り長い).

しかしながら最近になって氷の流動則に関する新しい発見があり、地質学的タイムスケールにおける氷のレオロジーの見直しがなされている。氷の塑性変形メカニズムは、大きく分けて拡散クリープと転移クリープに分類できる。地上の氷河・氷床においては、転移クリープによる塑性変形が卓越し、これに関しては詳細な研究がなされている。一方、火星を始めとする氷衛星などの低応力・低温下においては、拡散クリープが卓越し、異なる流動則を持つと言われてきた。しかしながら、その実験的困難さから便宜的に転移クリープの流動則を流用していることが多かった。実験室において扱える歪速度は $10^0 \sim 10^3 \text{ 1/s}$ が限度である。Goldsby らは数ミクロンの微小な粒子サイズの氷を用いて実験を行うことにより、この困難を克服した[11]。拡散クリープは本質的に粒子サイズ依存性を持つ流動メカニズムであるので、微小サイズの粒子からなる多結晶氷を用いて実験を行うと実験室でも変形観測が可能である。彼らは氷について粒子サイズ依存性を持つ新しい流動則を見いだした。結果的には意図していた拡散クリープではなく、粒子境界における滑りを変形のメカニズムとするような流動則であったが、これまでの転移クリープメカニズムによる流動則と較べて格段に早い流動速度をもたらす可能性を示している

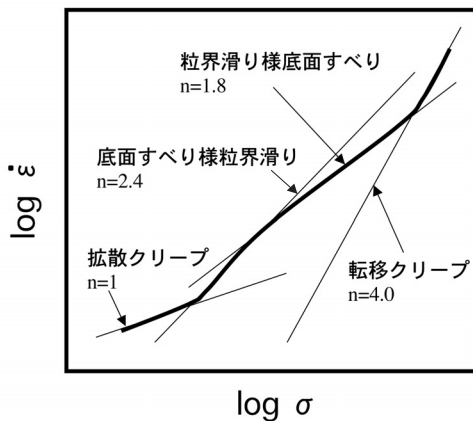


図6：氷の塑性変形メカニズムと流動則のべき指数 n の関係 (Goldsby and Kohlstedt (2001)から一部変更)。

(図6)。これを火星氷床や氷衛星に応用すれば、様々な構造運動のタイムスケールが変わってくる可能性がある。今のところ、火星氷床における結晶粒径がわからないので定量的な議論は難しいが、火星氷床環境下で H_2O 氷が CO_2 氷よりも柔らかくなるのは難しいと思われる。しかしながら、より精密な議論のために構成する結晶粒径を調べる探査が望まれる。

この他、火星氷床の構成物質の特徴として氷やドライアイスへのダストの混入が考えられる。実際、氷床のクローズアップ写真を見ると濃淡のある縞模様が観測され、暗い部分はダストが含まれた層であると推測されている。ダストを含む氷の流動則はDurham らにより調べられており、その複雑な挙動が目を引いている[12]。特にダスト濃度が小さい時、ダストの影響により堅くなるのか柔らかくなるのかがはっきりしない。これはダストそのものより、ダストとともに氷に入る各種イオンが氷の変形に影響を与えるからだと思われる。一方、ダスト濃度が高いと明らかに氷は堅くなるようである。さらに火星では CO_2 大気が卓越するため、この大気やドライアイスが氷を取り込んで、氷床内部の高圧で CO_2 のクラスレート氷を形成している可能性がある。 CO_2 を含むクラスレート氷の変形実験もすでにDurham らにより試験的に行われている。その一報によれば、氷よりはかなり堅いという結果になった[13]。氷床はドライアイスではその形状を維持できないが、 CO_2 クラスレート氷なら十分に現在の形状を保持することが可能である。氷床に CO_2 が埋蔵されているとするとクラスレートとしてかもしれない。

5. 衝突クレーター

火星の衝突クレーターの特徴は、単純クレーターから複雑クレーターへと遷移するクレーターサイズが他の固体惑星のトレンドからずれていることである。惑星の重力と遷移クレーターのサイズを示した図では、明らかにより小さなクレーターで複雑クレーターへの遷移が起きている。この遷移は重力によるクレーター

孔の変形により起こると考えられているので、火星ではその地殻が他の惑星より強度が小さいことを示している。この理由として火星表層の凍土層があげられており、凍土層に含まれる水、もしくは他の揮発性成分が火星に見られる特徴的なクレーターの成因となっている可能性がある。その一つが、ピット型クレーターである(図7a)。このピット型クレーターは氷衛星でも普遍的に観測されるため、氷がその形成メカニズムに重要な役割を果たしているのではないかとされている。

室内でクレーターを再現する実験は、衝突実験と呼ばれ、惑星科学の分野では盛んに行われてきた。北大・低温研には低温室中に衝突銃が設置されているので、氷を含む試料の実験には最適である。現在、氷に岩石(蛇紋岩パウダー)を様々な割合で混ぜ合わせ、火星凍土の模擬試料とし、それを用いた衝突実験を行っている。同様な実験は、Koschny and Grun (2001)によっても行われており、岩石の含有率が大きくなるとクレーターサイズが徐々に小さくなる傾向が明らかになってきた[14]。しかしながら、回収された試料に観察されるクレーター形状からは、岩石の含有率にかかわらず、明らかなピット型クレーターは見つかっていない。ピット型クレーターは中央丘型クレーターにおいて、その中央丘がなんらかの理由で爆発し、火口が形成されたとも推測される。この場合、この爆発を起こすメカニズムと揮発性物質がどのように関連しているのか、またクレーター形成がその爆発とどのような関連があるかを今後調べる必要がある。

もう一つの特徴的なクレーターはランバートクレーターである。クレーター周囲に花びら状に衝突堆積物が分布し、その先端は周囲の地形に対して明らかに盛り上がりを示す(図7b)。このクレーターの成因には大きく分けて2つの仮説がある。一つは火星大気と衝突イジェクタの相互作用である。Oliver and Schultz (1998)は大気中でダスト層への衝突実験を行い、クレーター形成過程を観測した[15]。その結果、イジェクタカーテンの先端で大気との相互作用により渦が発



図7 a : ピット型クレーターの MOC による撮影画像。クレーターのサイズは約30km (NASA 提供)。

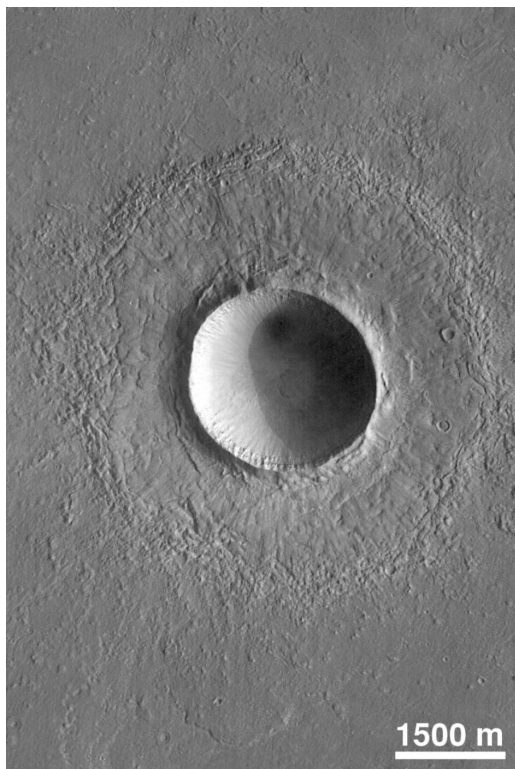


図7 b : ランバートクレーターの MOC による撮影画像 (NASA 提供)。

生し、その渦の影響でイジェクタは下方に力を受け先端において厚い堆積層を作るという。一方、火星表層の凍土層にその原因を求めるものもある。実際、これまでの多くの火星表層の水分布の研究に対して、ランパートクレーターが凍土層を示すマーカーとして扱われてきた。この考えでは、衝突加熱により凍土が融解し、スラッシュ状になったイジェクタが周囲に広がり花びら状の堆積物を形成する。もしくは、凍土層の氷やドライアイスが衝突加熱により蒸発をおこし、そのガスによってイジェクタが周囲に広がり堆積物を作ることも考えられる。しかしながら、これまで室内実験では凍土の衝突蒸発・溶融とクレーター形態を関連づけた研究は行なわれていない。クレーターの形態をそのイジェクタ分布まで含めて調べるためには、重力の効果を考慮して縦型の衝突装置が必要である。一方、衝突蒸発や溶融を充分におこさせるには3km/sを超える速度が必要とされる。現在の技術ではこの速度範囲の実験には二段式軽ガス銃が必要であるが、そのほとんどは水平撃ちである。そこで、この研究にはNASAのAmes研究所に設置されているような垂直に発射できる二段式軽ガス銃が必要である。火星環境におけるランパートクレーターの成因を明らかにするには、日本の惑星科学グループでも、是非とも縦型二段式軽ガス銃を利用可能にすべきである。

6. 火星実験学

火星表層に関する情報が増大する中、これらの情報を整理・統合し、火星の気候システムを理解し、その表層進化を明らかにするため室内実験が必要とされている。地球科学で培った様々な手法・理論は多くの場合、そのまま火星で利用可能である。ただし、地球環境において最適化されたものを火星環境にまで拡張する必要がある。素過程が同じであるならば、室内実験では火星環境下まで外挿できるパラメーターを求めることが研究目的となる。一方、物質、温度・圧力条件、タイムスケール、速度等々が異なることにより、現象

を引き起すメカニズムそのものが変わることもある。このような場合、これまでの地球科学における蓄積を超えて火星環境に最適化した理論構築のため、それに見合った室内実験を行なう必要がある。

今回紹介した模擬室内実験は、残念ながらすべてが火星をターゲットとしたものではない。火星も含めた寒冷・希薄大気環境下を模擬したものや、地球上の現象を再現したに過ぎないものもある。しかしながら、これらの実験は、今後火星に最適化した実験を行なっていく上での出発点となるべき実験であると思われる。我々は、これらの土台のもとに、独自の工夫とアイデアを用いて火星実験学を発展させて行きたいと考えている。

7. 謝辞

本稿執筆にあたり、有意義な査読意見をいただきました山本聡氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] 前野紀一他, 2000, 雪崩と吹雪, 基礎雪氷学講座 III, 古今書院.
- [2] White et al., 1997, J. Geophys. Res. 25, 25629.
- [3] Sullivan, 2002, Lunar and Planetary Science Conference XXXIII, Huston.
- [4] Greely et al., 2003, J. Geophys. Res. 108, doi:10.1029/2002JE001987.
- [5] Fishbaugh et al., 2002, J. Geophys. Res. 107, 10.1029/2000JE001351.
- [6] Howard, 2000, Icarus 144, 267.
- [7] Kato et al., 1995, Icarus 113, 423.
- [8] Nye et al., 2000, Icarus 144, 449.
- [9] Durham et al., 1997, J. Geophys. Res. 102, 16293.
- [10] Durham et al., 1999, Geophys. Res. Lett. 26, 3493.
- [11] Goldsby and Kohlstedt, 2001, J. Geophys. Res. 106,

11017.

- [12] Durham et al., 1992, J. Geophys. Res. 97, 20883.
- [13] Durham et al., 2003, Third Mars Polar Science Conference, Alberta.
- [14] Koschny and Grün, 2001, Icarus 154, 391.
- [15] Oliver and Schultz, 1998, J. Geophys. Res. 103, 25739.