

教室で行う宇宙の実験—6：火星の表層環境を理解しよう

高田淑子*・佐々木佳恵**・松下真人***・斉藤正晴****・
佐藤 崇*****・須田敏典*****・西川洋平*****・伊藤芳春*****

Space Experiments in Classroom -6: Surface Environment of Mars

Toshiko TAKATA, Yoshie SASAKI, Masato MATSUSHITA, Masaharu SAITO,
Takashi SATO, Toshinori SUDA, Yohei NISHIKAWA and Yoshiharu ITO

要旨：惑星表層環境の学習は、比較惑星科学の見地から、地球環境を理解するための重要な環境教育のひとつである。そこで、火星の表層環境を理解する学習プログラムとして、天体望遠鏡による火星の観望をはじめ、火星の四季、極冠の形成・消失を説明する相変化の実験、火星特有のランパートクレーターと呼ばれる流動化放出物をもつクレーターの形成実験等を開発した。

Abstract: Studies of planetary surfaces, environment are one of the important environmental educations to understand the terrestrial environment from the viewpoint of the comparative planetary science. We developed the learning program to understand the surface environment of Mars. Programs include observations of Mars by astronomical telescopes, the demonstration of Martian seasons, the formation and disappearance of polar caps, and the formation of rampart craters. These in-situ experiments indicate CO₂ phase change on Martian surface, the existence of fluidized materials, and so on.

キーワード：火星、惑星環境、クレーター、相変化、教材

1. はじめに

地球は、適度な量の水、酸素、二酸化炭素が存在し、太陽の光の恵みを受け、大気と海洋の循環によって適度な温度が全球で保たれ、人間をはじめさまざまな生物が生息できる環境が整っている。生物の進化の立場から考えると、このような環境に耐えうる生物が生き残っているとみえる。この青い地球は、生命が存在する太陽系内唯一の存在と考えられているが、近年、数々の惑星探査機によって太陽系内の惑星の表層環境に新たな発見が相次いでいる。その中でも火星(図1)は、現在、欧州や米国の探査機が到達し、地形や地質等の表層環境を詳細に調査している。米国のマーズグローバルサーベイヤーは、火星全表面の詳細マッピングを行い、水の流れによって形成されたと考えられる



図1. 望遠鏡で観察できる火星 (2003年8月)

*宮城教育大学理科教育講座, **花巻市立花巻中学校, ***山梨県立科学館, ****宮城教育大学理科教育専修,
*****中田町立浅水小学校, *****一迫町立一迫中学校, *****鶯沢工業高等学校

地形を数多く発見し、米国の着陸ローバー、オポチュニティやスピリッツは、岩石の組成を分析し、水が存在しないと形成されない鉱物や岩石の結晶などを発見し、過去に液体の水が存在したことを示唆している(図2)。

2003年夏、火星が地球に大接近し、小型望遠鏡でも火星の様子が観察できる機会に恵まれた。宮城教育大学においても、親子参加型の大学開放事業における天体観望会、附属小学校の「火星観望会」等実施し、500名以上の参加者が夜空の赤い天体を見上げた。天体観望会では、天体望遠鏡を覗いて天体を観察するが、探査機から送信されるような詳細な地形の観察は不可能である。そこで、火星を観望するとともに、火星の表層環境を再現する実験を提供し、火星をはじめ、地球を含めた比較惑星表層環境の理解につなげていくプログラムを開発、実施した。一般的に宇宙・惑星科学の分野は、実験・観測が少なく、小中学校の児童・生徒にとって興味はあるが、教員が教えるのが難しいと感じている。今後、このような実験の開発普及が宇宙環境教

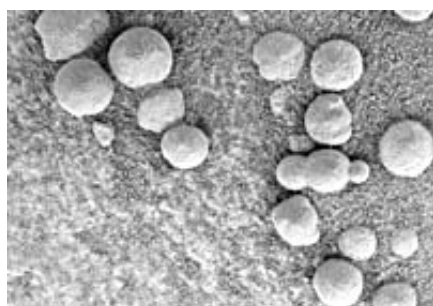
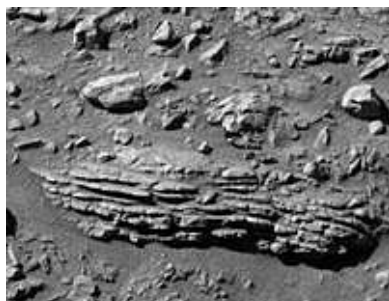


図2. NASAの火星探査ローバー、オポチュニティが撮像した岩石の様相。過去に液体の水が存在した可能性を示唆する。(a) 平行に多数みられる岩石上の筋(クラック)は、流水による浸食である可能性を示す。(b) 岩石表層に分布する数ミリメートルのヘマタイトと呼ばれる鉄を含む鉱物粒子。地球ではヘマタイトは湿潤な環境で形成されるため、過去の火星層には水が存在した可能性があると示唆される。写真はNASA, JPL 提供。

育分野で重要な課題となっている。

2. 火星の極冠の成長・消失

火星は地球と同様自転軸が公転面の垂直方向から約23度傾いているため、地球と同じように四季がある。南北の両極に存在する極冠と呼ばれる白い地域は、冬に向けて発達し春に向かい縮小する。この極冠は、主に二酸化炭素の氷(ドライアイス)である。極域では、大気中の二酸化炭素が冬に凝結・堆積して極冠を形成し、春から夏に向けて大気中に昇華する。そこで、水の氷とドライアイスの相変化の観察実験を実施することで、火星表層で起きている現象を体感し理解するプログラムを開発した。

1) 火星の四季

まず、四季がある理由を理解する。太陽にみたてた照明を火星儀に於て、火星の自転軸の傾きと太陽光のあたり方を説明する。また、火星の自転軸の向きを一定にして太陽(照明)を一周することで火星の公転を再現し、太陽(照明)と火星の位置関係によって火星表面への光のあたり方が南北半球ごとに異なることを確認し、火星にも春夏秋冬の四季の変化があることを説明する。

2) 極冠の形の変化

火星の極冠を天体望遠鏡で確認した後、火星の極冠の大きさの日変化の様子を見る(図3)。2003年8月頃の火星の地球への大接近時には、火星の南半球が春から夏にあたり、南の極冠次第に縮小していることを理解する。

3) 極冠は何でできているか

火星の公転軌道半径が地球の約1.5倍である環境を、地球儀と火星儀と太陽に見立てた照明を用いて再現する。照明による火星儀や地球儀の明るさを観察することで、火星にあたる太陽光が地球に比べて少なく表層温度も低いことを示す。そして、ドライアイスと水の氷をヒーターの上におき相変化を観察する(図4)。ドライアイスは小さくなり、氷は水に変化する現象を同時に確認することで、ドライアイスは液体に

ならず大気中に昇華することを確認、相変化を理解する。主な火星大気の組成は二酸化炭素であり、火星の極域は、冬になると150K前後にまで気温が下がり大気中の二酸化炭素が凝結して極冠の成長につながるこ

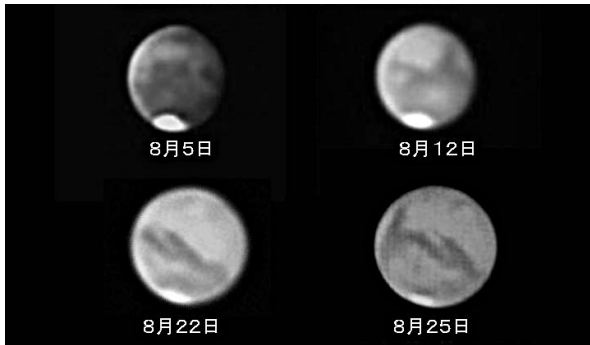


図3(a). 極冠の変化 2003年8月の火星の様子。南極冠が小さくなっていく様子や、火星の自転によって地形の様相が変化している様子がわかる。(b) 火星の極冠の変化について学生解説員の説明を受ける参加者。



図4. ドライアイスの昇華、氷の溶融実験を見守る生徒達。大学開放事業「星空探検隊」2003年9月開催。

とを示す。このように極冠の成長・消失は、二酸化炭素の相変化を示していることを観察し、地球上の気候と比較する機会を与える。

3. 流水地形の形成実験：ランパートクレーターの形成実験

火星には、水が寄与していると思われる地形が多数存在している。その中でもヴァイキング探査時代から明らかになっていた地形の一つにランパートクレーターがある。クレーターは、巨大な隕石や彗星が衝突して形成される隕石孔で、月面や他の惑星にも多数観察されている。月面で観察される一般的なクレーターの放出物（エジェクタ）の堆積形態は図5(a)のように外側に行くほど薄くなる傾向があるが、火星のクレーターの放出物の堆積形態は一般のクレーターと異なる形態をしている(図5(b), (c))。ランパートクレーターの成因としては、2つの成因が提唱されている。地下に存在している二酸化炭素の氷（ドライアイス）や水の氷が蒸発することによってエジェクタ放出物中に大量の気体が含まれ、これらの固気2層流がエジェクタとなって放出されるために形成されるという説と、地下に存在している氷の層が隕石の衝突によって溶融し、エジェクタ放出物に液体の水が含まれて流出するという説である。そこで、教室内で可能なランパートクレーターの形成実験を開発し、表層環境によって形成されるクレーターの違いを観察することで火星の表層環境を理解するプログラムを示す。

1) 実験方法

たらいに標的物質をひきつめ、鉄球を標的に向けて自由落下させクレーターを形成する。落下高度により、形成クレーターの大きさを調節する(図6)。乾燥した珪砂を標的物質に用いると、月のクレーターに類似したクレーターを形成するが、ランパートクレーターのようなエジェクタ形態は形成できない(図7(a))。そこで、火星表層の土壌環境を再現するために、極細粒(#100)メッシュのふるいでふるった火山灰質泥岩(仙台市青葉山で採取)を利用して、2種類の標的物質を用意する。一つは細粒火山灰とピレット型ドライアイス进行細かく粉碎した粒状ドライアイスの混合層

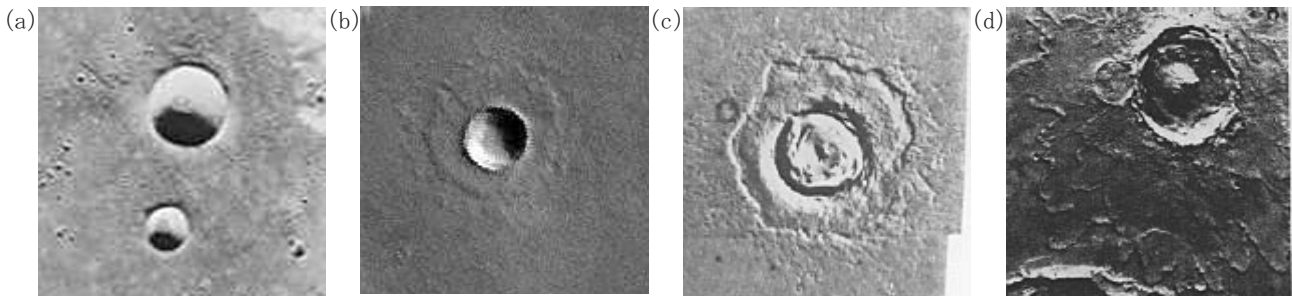


図5. 衝突クレーターの例 (NASA 提供)。(a) 月のお椀型クレーターの例。レゴリスと呼ばれる月の砂に形成され典型的な衝突クレーターのエジェクタ放出物の形態を示している。(b) パンケーキ型のエジェクタ放出物を成す、火星の典型的なランパートクレーター。(c) エジェクタが流れて堰き止められた形状をなし、ローブ型ランパートクレーターと呼ばれる火星のクレーター。(d) エジェクタが二重に流れた形状をなし、二重ローブ型ランパートクレーターと呼ばれる火星の典型的なクレーター。

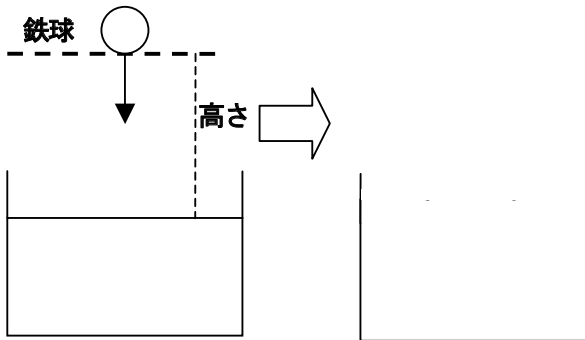


図6. 実験概要。たらいに標的物質をひきつめ、鉄球を標的に向けて自由落下させて、クレーターを形成する(左)。落下高度によって衝突速度を変化させ、形成クレーターの大きさを調節する(右)(高田他、2000)。

(ドライアイス混合火山灰層)の標的と、細粒火山灰と水の混合層を砂上に敷き詰めた標的(水混合火山灰層)である。

2) パンケーキ型ランパートクレーターの形成：ドライアイス混合層の活用

ドライアイス混合層の標的に鉄球を落下させると、図7(b)のようにパンケーキ型ランパートクレーターに類似したクレーターが形成できる。外気温と標的の温度差から、クレーター形成時にドライアイスの昇華量が多いとパンケーキ型のランパートクレーターが形成できる。ドライアイスの昇華により粒子間に空気層ができ、空隙率が高い放出物が堆積すると考えられる。常温で実験する場合には、標的がドライアイスによって固化すると、高温の鉄球を落下させてもパンケーキ型ランパートクレーターを形成するのは困難なため、

標的が固化しない環境(室温を高くし、標的製作直後に実験する等)作りが必要である。

3) ローブ型ランパートクレーターの形成：水混合層の活用

乾燥した細粒火山灰層の標的の場合、もともとの空隙率が高いため鉄球が落下すると落下地点の標的が圧縮されるのみでエジェクタの放出は見られない。また、標的が水混合火山灰層だけの場合も鉄球が埋もれてエジェクタは放出しない。そこで、容器の底に厚さ4cmの乾燥砂層をひき、その上に水混合火山灰層の水が砂層に移動しないようにし、ビニールシートを敷き、その上に水混合火山灰層を敷き詰めた標的を作成する。

ランパートと呼ばれるようなエジェクタ層を形成するためには、混合層は、1対1.8の水と火山灰の重量比が最適であった。水の混合比率が高いと水中に水滴を落下させたように波紋が広がるのみで落下痕が残存せず、また、水の混合比率が少ないとエジェクタが放出しない。

混合層の厚さによるエジェクタの形態の変化については、厚さ1cmの場合、エジェクタが飛び散りクレーターの端が緩やか堆積し一重のローブ型ランパートクレーターに類似のクレーターが形成され(図7(c))、厚さ2cmになると、同心円のカーテン状にエジェクタが飛び散り、二重のローブ型ランパートクレーターが形成できた(図7(d))。水混合層の厚さが4cm以上では、エジェクタ層の放出自体が観察されない。標的が流動的に振る舞い、かつ薄い層構造が薄い場合のみ、ローブ型のランパートクレーターが再現できる。

これらの条件は、利用する土質に依存するが、水の混合比率、混合層の厚さの違いにより形成されるクレーターの形態が異なることが観察できる。

4) ランパートクレーターの形成実験からわかる火星の表層環境

乾燥した砂地では、ランパートクレーターの形態は模擬できず、ドライアイスの昇華による気体か液体の水の流体との混合によりランパートクレーターの形態が再現でき、さらに、気体か液体かによりエジェクタ放出物の堆積形態が異なることが理解できる。このような簡単な実験からも、隕石が衝突した当時の火星表

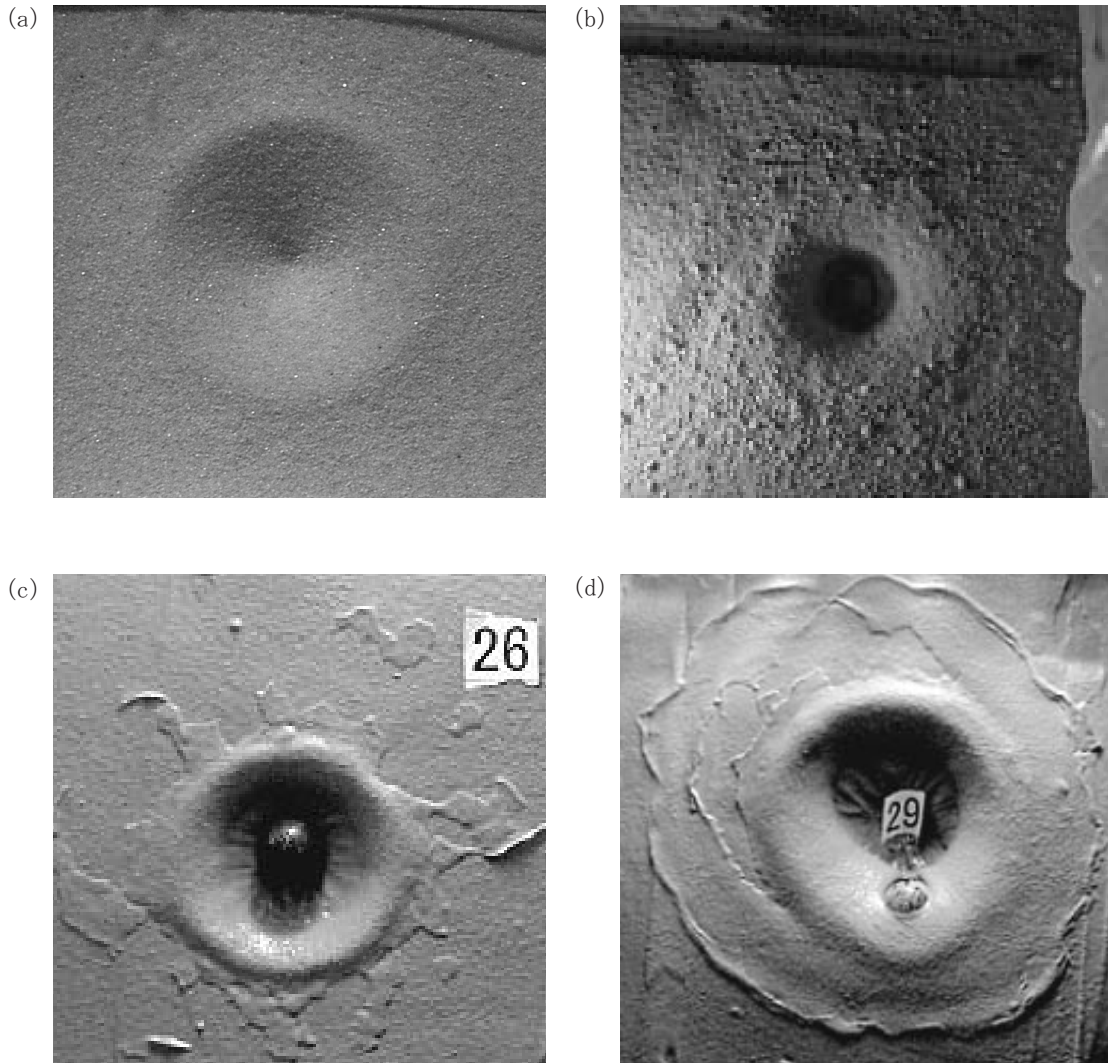


図7. クレーター形成実験の結果。(a) 珪砂の標的に直径1.5cmの鉄球を高さ4.5mから落下させ形成したクレーター。クレーターの直径は9cm。月の表層にみられるお椀型クレーターが形成できる。(b) 細粒火山灰に粉碎したドライアイスを混合した標的に直径3cmの鉄球を高さ4mから自由落下させ形成したクレーター。クレーター直径7cm。パンケーキ型ランパートといわれる台地型クレーターが形成される。(c) 直径3cmの鉄球を厚さ1cmの細粒火山灰と水の混合層の標的に高さ2mから自由落下させ形成したクレーター。クレーター直径8cmの一重ローブ型ランパートクレーターが形成される。(d) 直径3cmの鉄球を厚さ2cmの火山灰層の混合層の標的に高さ2mから自由落下させ形成したクレーター。エジェクタの直径は約20cm、クレーター直径は10cm。エジェクタ放出物が流れてせき止められたような二重の放出物(ダブルローブ型)ランパートクレーターに近い形態が再現される。

層には、流体になりやすい物質が存在していたことが理解できる。

実際の隕石の衝突を考えると、衝突地点周辺域では標的物質の温度が上昇するため、火星表層付近に氷やドライアイスなどが層を形成して地下に存在するとすれば、衝突によって、昇華・蒸発・液化して、気体の二酸化炭素や水蒸気、水がエジェクタに混合する。今回の実験では衝突による発熱はないが、これらの流体がエジェクタに混合すれば、エジェクタ物質の運動が弾道的に放出するのではなく流動的に動くことが再現できる。これらの実験を通して、ランパートクレーターが形成できる表層環境条件として、ドライアイスや水の氷等、流体起源の物質が表層付近にあることがあげられる。これらの実験から地球以外の惑星・衛星の表層環境を理解し、過去から現在に至る惑星表層環境の変化を考える機会を与えることができる。

4. おわりに

惑星表層環境の学習は、比較惑星科学の見地から、地球環境を理解するための重要な環境教育のひとつである。今回は、人類が次に到達するかもしれない火星の表層環境を理解するプログラムを生徒児童と実施することで、最終的には、我々の住む地球環境に思いを馳せることを促したい。地表は水と大地からなり、さらに大気を含めた地球システムとして生物の繁栄を支えている。現在、木星の衛星のエウロパや土星の衛星のタイタンの表層には液体の存在も示唆されており惑星・衛星の表層環境から第2の地球の存在の理解も近いかもしれない。

参考文献

高田淑子・須田敏典・西川洋平, 2000. 教室で行う宇宙の実験 - 1 : クレーター形成実験. 宮城教育大学紀要, 35 : 95-99.