

教室で行う衝突型クレーター形成の模擬実験の開発

宮城教育大学 教育学部 学校教育教員養成過程 理科教育専攻
c 9 2 7 0 須田 敏典

要旨

中・高等学校の教科書では惑星表層環境の学習の単元があるが、この単元を学習するにあたり、実験などの体験的学習が天体望遠鏡による月の観察などしかなく、惑星の姿の画像判読に頼らざるをえない。そこで惑星表層環境を大きく特徴づけるクレーターに着目して、中・高等学校の場で行えるクレーター形成実験の実験プログラムを開発した。

(1) クレーター形成実験

砂上に鉄球を自由落下させることで、クレーターの形成の瞬間を視覚化し、クレーターリングを体験する実験。形成されたクレーターの直径は衝突エネルギーに正の相関があることが理解できる実験プログラム。

(2) クレーター構造の視覚化実験

色砂を用いた標的に鉄球を自由落下させる。その後標的を寒天液で固化し、裁断することにより、エジェクタの水平方向、鉛直方向への移動の様子が視覚化でき、クレーターの地下構造を再現する実験プログラム。

(3) ランパートクレーター形成実験

主に火星に見られる特殊なクレーター“ランパートクレーター”を水やドライアイスを用い標的の乾燥粘土(tuff)に再現する実験。ドライアイスの昇華や乾燥粘土と水の混合率、層の厚さにより、ランパートクレーターに近いクレーターが形成され、火星の表層環境を再現する実験プログラム。

以上の実験プログラムをこれから紹介します。

目次

1 . はじめに	2
2 . クレーターとは	2
3 . クレーター形成模擬実験	
3 . 1 クレーター形成実験	7
3 . 1 . 1 目的	
3 . 1 . 2 器具例	
3 . 1 . 3 実験方法	
3 . 1 . 4 実験ガイド	
3 . 1 . 5 考察	
3 . 2 クレーター構造の視覚化	14
3 . 2 . 1 目的	
3 . 2 . 2 クレーターの地下構造について	
3 . 2 . 3 実験方法	
3 . 2 . 4 実験ガイド	
3 . 2 . 5 考察	
3 . 3 ランパートクレーター形成実験	23
3 . 3 . 1 目的	
3 . 3 . 2 ランパートクレーターとは	
3 . 3 . 3 ドライアイス編	
3 . 3 . 3 . 1 実験方法	
3 . 3 . 3 . 2 実験結果	
3 . 3 . 3 . 3 考察	
3 . 3 . 4 wet tuff 編	
3 . 3 . 4 . 1 実験方法	
3 . 3 . 4 . 2 実験結果	
3 . 3 . 4 . 3 考察	
3 . 3 . 5 考察	
4 . まとめ	41
5 . 謝辞	42
6 . 参考資料	43

1. はじめに

中・高等学校の惑星表層環境の授業では、惑星の姿の観察、表層の構成物質、表層の特徴、天体望遠鏡による月面の観測が行われている。体験的な学習としては望遠鏡による観測だけで、実験プログラムは乏しい。惑星表層を一番特徴つけるのはクレーターである。惑星・衛星によってその形態は異なる。クレーターは惑星・衛星がどのようにして形成されたか考える上で重要な地形である。そこでクレータリングの実験を子供たちにやらせたい。クレータリングの実験は軽ガス銃による高速度衝突や、核実験などの結果が応用されており、とても実験の規模が大きく、学校ではできません。そこで教室でできるクレータリングの実験を開発した。

2. クレーターとは

クレーターは太陽系生成以来の衝突の痕跡であり、太陽系内のガス惑星を除く全ての天体に存在する。

(1) 惑星や衛星上に見られるクレーターの形態

惑星・衛星表面に見られるクレーターの形態はおおまかにはほぼ共通していて、径の増加とともに、

おわん型 中央丘 中央丘リング盆地 多重リング盆地

というように変化する。(図.1)。月や水星などの大気のない岩石質天体の表面では、このようなクレーターの形態系列が典型的に現れる。厚い大気を持ち、かつ表面の年齢の若い金星、過去に表層や地殻内部に液体の水の存在が指摘されている火星、各種の地殻変動の盛んな地球、氷からなる外惑星の衛星では、この系列にいろいろと変化が現れる。(藤原 .1997)

1.月

月には多数の大型衝突盆地が存在し、衝突クレーターの多い古い高地と、衝突クレーターの少ない海より構成されている。

2.水星

月とよく似ている。このことは水星と月の表面構造が共通のプロセスでできたことを示唆する。水星表面の主な地質区分は

(1) 大小のクレーター地形

(2) 直径 1300 km にも及ぶカロリス盆地に代表される多重リング盆地

カロリス盆地のちょうど反対側に小高い丘と線構造が発達した地域がある。これはカロリス盆地形成時の大きな衝突で発生した衝撃波が、惑星内部を伝播して焦点を結び、地表を破壊してこのような地形を作ったとも考えられている。(藤原・1993)

3.金星

金星は常に厚い雲に覆われていて、可視光では表層の地形を伺うことができない。この濃い大気のため金星には直径 3km 以下のクレーターは形成されない。また金星でしばしば見られる双子あるいはそれ以上のマルチ・クレーターの形成も、隕石が厚い大気中を通過中に幾つかに分裂して、地表に衝突してできたものだと考えられている。(藤原・1993)

4.火星

小さなものは単純なおわん型である。直径が約 5km 以上のものでは、中央丘や内壁が崩れたり段丘状になったりして、クレーターの形も変わってくる。50~70km 付近から衝突盆地形状となる。衝突盆地にも中央丘のあるもの、リング状のピークのあるもの、多重リング状のものなどがみられる。火星のクレーターの中に“ピット(くぼみ)”をもつものがみられる。(図.2)。ピットクレーターは、ガニメデやカリストなどの氷衛星上に普遍的に見られるものである。ピットは地下の氷層の存在が原因であるといわれている。クレーター放出物(エジェクタ)の分布形状には、独特のものがみられる。クレーターの周りを囲っているもの、花弁状のもの、ふんわりしたケーキのようなものなどがある。これらは、クレーター形成期に何らかの形で表層内部に存在していた液体層、あるいは溶けて液体になりやすい物質が関与したためにできたのではないかと考えられている。(藤原・1997)

5.氷衛星

木星・土星などの外惑星の衛星にも多くのクレーターがみられる。氷衛星上のクレーターには、中央丘リングは存在せず、中央丘が形成される程度のサイズのクレーターには中央ピット型のものが多い。氷衛星上で特徴的なものに、パリンプセストと呼ばれるものがある。これは、反射能(アルベド)が周囲とは異なった円形領域で、もともとあったクレーターが緩和してしまい、地形的にはクレーターの形をとどめていないものである。

3. クレーター形成模擬実験

これから実験プログラムの紹介を行う。

クレーター形成実験では実際にクレーター形成の視覚化ができ、実際に体験することで過去に起こった隕石の衝突などを思い描くことができるようになると思う。

クレーター構造の視覚化の実験では、色砂・寒天を使うことにより、エジェクタの分布について表面そして内部から観察することができる。隕石衝突による地形の変遷を考えることができると思う。

ランパートクレーター形成実験では、火星表層に見られる特殊なクレーターであるランパートクレーターを再現することで、火星表層環境を知る手がかりにもらいたい。

3.1 クレーター形成実験

3.1.1 目的

クレータリングを視覚化し、体験することが目的である。またクレーターの大きさには何が依存しているか、鉄球の直径、落下高度などを変化させ調べる。

3.1.2 器具例

衝突体に見立てた鉄球を、十分な量の乾燥砂を入れた容器を標的とし、自由落下させ、標的表層に穴を掘らせてクレーターに見立てるという簡単な方法である。図 1.1 に使用した実験器具・実験方法を示す。しかし、これは実験後に解析したりするために使ったものなので、ただクレーター形成を実際に体験する場合は、鉄球の代わりに岩石片を使用したりすることも考えられるし、砂場で実施することも可能である。また異なった標的を用いて、標的による影響を調べるため、乾燥珪砂、湿潤珪砂、乾燥粘土を使用した。乾燥珪砂は DIY ショップで売られている珪砂を使用しました。tuff は青葉山から採取してきた粘土を乾かし、砕き、篩にかけたもの。

3.1.3 実験方法

衝突体に見立てた鉄球を、十分な量の乾燥砂を入れた容器に自由落下させる。

(1) 標的の作成

標的の砂は密度に偏りがでないように、各実験前に十分攪拌して表面を平坦にし、クレーターの特徴が明確に現れるようにする。また鉄球の質量、直径はあらかじめ測定しておく。

(2) クレーター形成

鉄球の自由落下の方法は手から落とす方法が最も簡単である。落下高度とクレーターの直径はノギス・巻き尺・定規などで計測する。数m以上から自由落下させたい場合は、学校の踊り場や階段を使用することや、釣り竿で鉄球を吊して落とすなど様々な方法が考えられる。どんな方法にしても安全面に注意を促す必要がある。

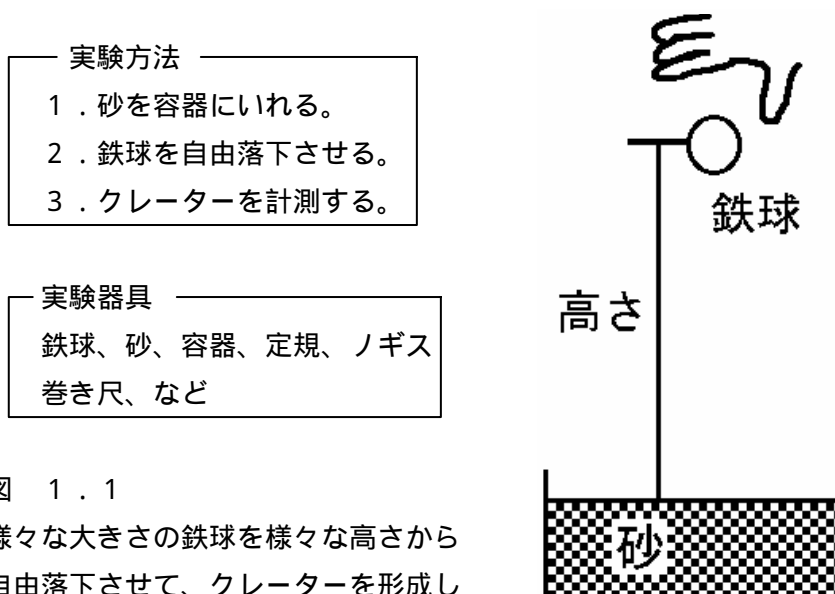


図 1.1
様々な大きさの鉄球を様々な高さから自由落下させて、クレーターを形成した。

3.1.4 実験ガイド

鉄球を自由落下させると、クレーター形成に特有のエジェクタ（クレーター放出物）が瞬時に同心円状に広がる様子が観察できる。また、掘削した穴は、実際に月面で見ることのできるお椀型クレーターの形に相似しており、リムや底といったクレーター特有の地形が再現できる。（図 1.2）クレーター形成を体験することで惑星表層に存在するクレーターが実際に衝突によってできたことを理解することができると思う。

このような模擬実験であっても形成したクレーターの大きさが、落下高度や衝突体の質量、標的物質というパラメーターに依存していることがわかる。鉄球の大きさや落下高度を変化させて同じ実験を試みたところ、形成したクレーターの直径と衝突エネルギーの間には正の相関関係が見られる（図 1.3）。ここで衝突エネルギーとは空気抵抗を無視した時の鉄球の質量・落下高度から求めた衝突直前の運動エネルギーのことである。ただし鉄球の初速度は0と考える。また標的物質が変化すると形成されるクレーターの大きさが変化する（図 1.4）。これは標的物質の物性がクレーター形成に大きく関わっていることを意味している。惑星・衛星の表層物質は、岩石、氷、大気、水などさまざまな物質で構成されていることから、天体の表層物質により形成されるクレーターの形が変化することが理解できる。

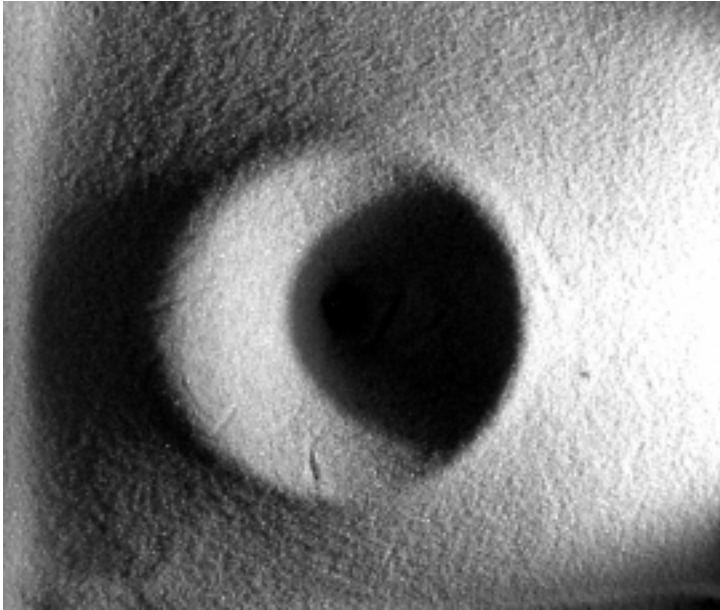
また、標的が乾燥珪砂の祭の実験結果を、衝突体の直径で規格化したクレーターの直径、衝突体の直径で規格化した落下距離を用いてグラフ化したものが図 1.5 である。衝突体の直径で規格化した落下距離は、一般的に水に浮かぶ船の運動など、流体表面における物体の運動を表す無次元量のフルード数（衝突体が衝突するときの慣性力と衝突体にかかる重力の比）の2分の1という物理的な意味を持つ。また、高速銃を用いた大型実験から得られる外捜式（Schmidt & Housen, 1987）を破線で示す。図から鉄球の自由落下による形成したクレーターの大きさは、大型実験結果の次元解析からの推測値に近い結果が得られる。

3.1.5 考察

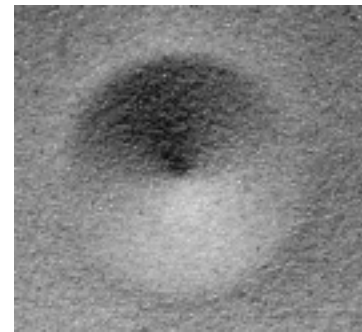
このクレーター形成の実験は、身近な材料で簡単に実験できるうえ、視覚化、体験できるという要素を含むため、中・高等学校の授業に活用できると思います。クレーターを作る体験により、実際に惑星・衛星の表層で過去におきた隕石の衝突や、それによる惑星・衛星の表層環境の変化を思い描くことが容易になると思います。

教室内で実施できる以上の結果から、月の巨大衝突盆地の形成、ジャイアントインパクトによる月形成、さらには地球で白亜紀末期に恐竜が絶滅した原因とも考えられている巨大隕石の衝突など思いをはせることができれば発展学習にもつながると思います。

(a)



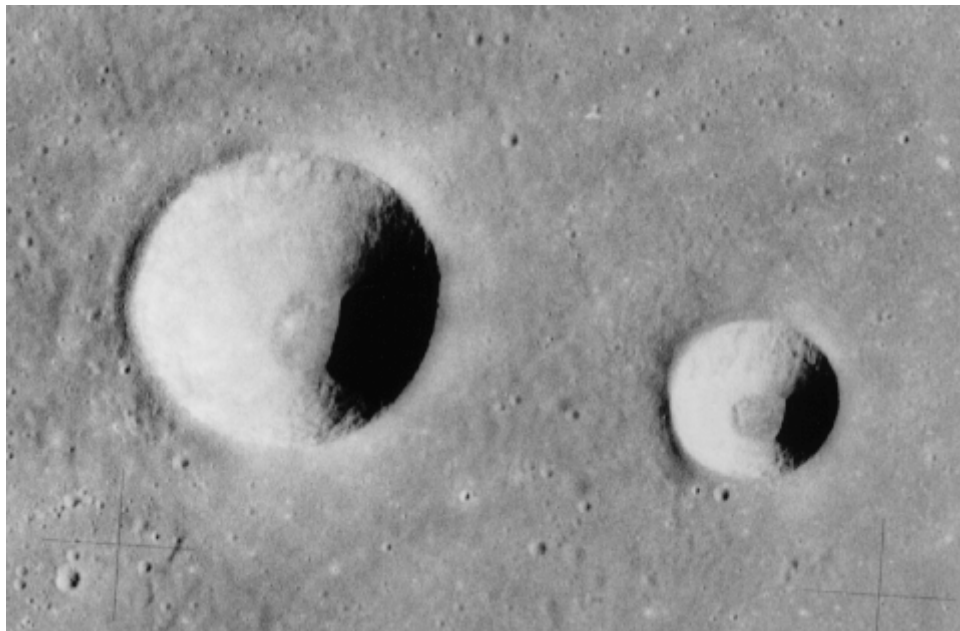
(b)



10 cm

10 cm

(c)



10 km

図 1.2 鉄球を自由落下させて形成したクレーターと月面のクレーター

(a) 鉄球直径 5 cm 落下高度 3 m クレーター直径 18 cm

(b) 鉄球直径 1.5 cm 落下高度 4.5 m クレーター直径 9 cm

(c) 月面のお椀型クレーターの例

図(a)(b)(c)を比較すると実際に月面で見られるクレーターの地形に相似しており、リム・底というクレーター特有の地形が明確に再現できる。

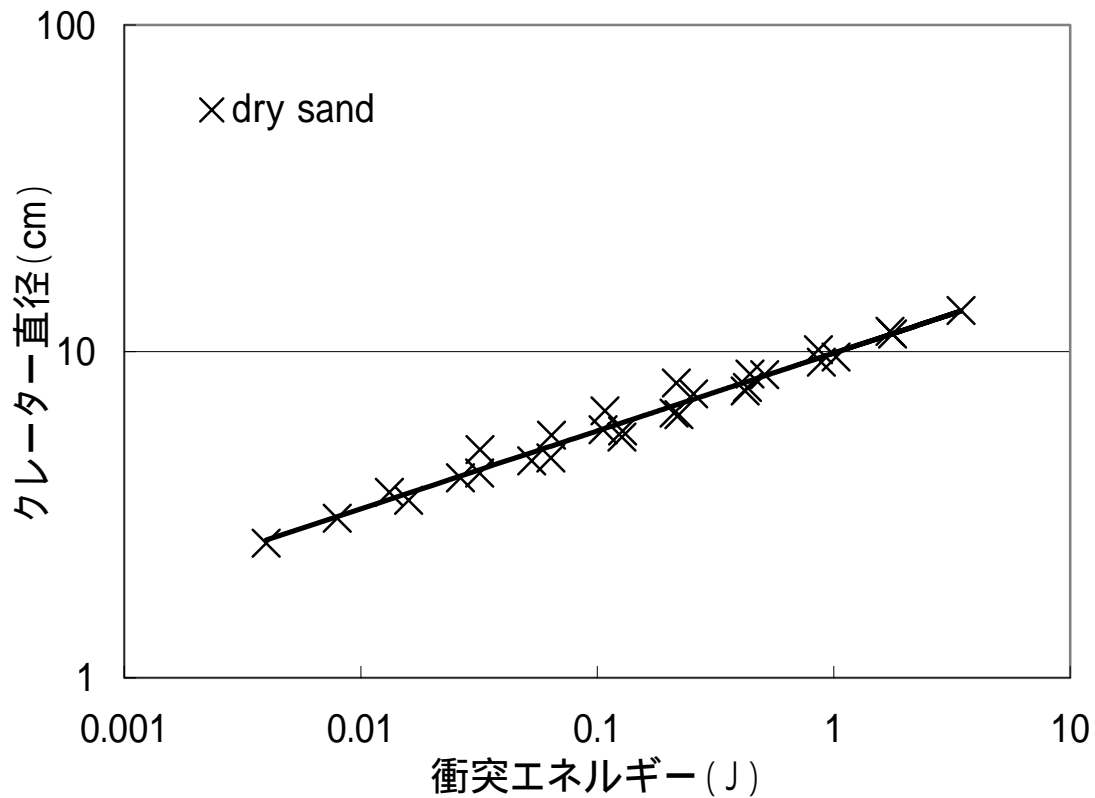


図 1.3 衝突エネルギーに対するクレーターの直径の関係

衝突体を標的に自由落下させ、形成したクレーターの直径を計測した。衝突体は、直径、1.0、1.5、2.0、3.0、4.0cm、密度 7800 kg/m^3 の鉄球を、0.1~3.2mの高さから落下させた。衝突エネルギーが大きくなると、クレーターの直径が大きくなるという相関関係が得られる。標的物質は乾燥珪砂 (dry sand : 密度 1600 kg/m^3)

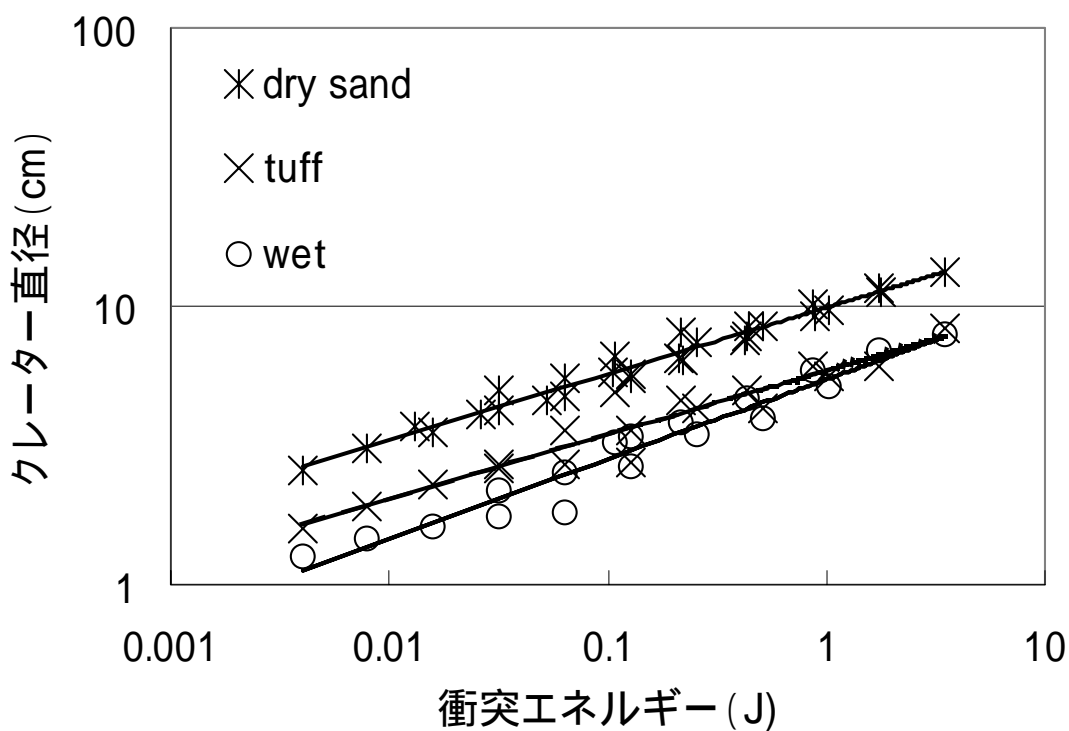


図 1.4 標的によるクレーター直径の変化

衝突体を標的に自由落下させ、形成したクレーターの直径を計測した。衝突体は、直径、1.0、1.5、2.0、3.0、4.0cm、密度 7800 kg/m^3 の鉄球を、0.1 ~ 3.2mの高さから落下させた。衝突エネルギーが大きくなると、クレーターの直径が大きくなるという相関関係が得られる。標的物質は乾燥珪砂 (dry sand: 密度 1600 kg/m^3)、乾燥粘土 (dry tuff: 密度 900 kg/m^3)、湿潤珪砂 (wet sand: 密度 2000 kg/m^3) の3種類を用い、それぞれ*印、×印、○印で示している。珪砂はDIY用品店で市販されているセメント用の砂、粘土は青葉山から採取した山土を乾燥させ、#100メッシュの篩で篩ったもので間隙率が高い。

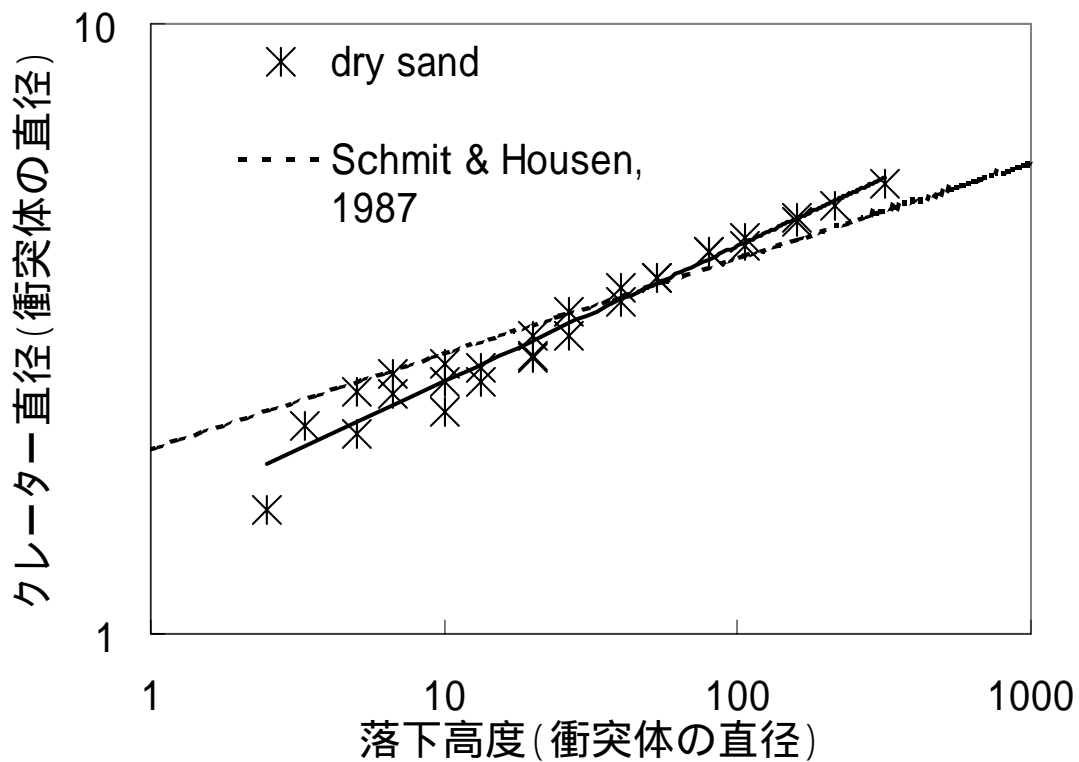


図1.5 高速銃を用いた大型実験の結果との比較。

縦軸は形成されたクレーターの直径、横軸は落下距離で、それぞれ衝突体の直径で規格化している。乾燥珪砂に鉄球を自由落下させた実験結果を*印で示し、珪砂を標的とし、高速銃で弾丸を撃ち込む実験から得られた外捜式 (Schmidt & Housen, 1987) を破線で示す。このように、簡単な実験にもかかわらず、大型実験の結果から推測される値に近い結果が得られた。

3.2 クレーター構造の視覚化実験

3.2.1 目的

前章のクレーター形成実験では、実際にクレータリングを体験することができました。この章では、色砂や寒天を使用し、衝突時のエジェクタの移動を視覚化し、クレーター地下構造の再現を目的とする。

3.2.2 クレーター構造の地下構造について

ボーリング調査や、地震波調査によって、クレーターの下の地下構造を調査するとクレーター中心部には隕石物質を含む様々な地層から由来する角礫岩が堆積しており、周辺部は、リム付近で全体的に表層付近の地層が上方向にそり、リムを境にして遠方では層序が逆転していることがわかる（図 2.1）。このような層の逆転を視覚化して、そのメカニズムを理解しやすくする教育用実験の開発を述べる。



(a) バリンガー・クレーター

(b) 断面図

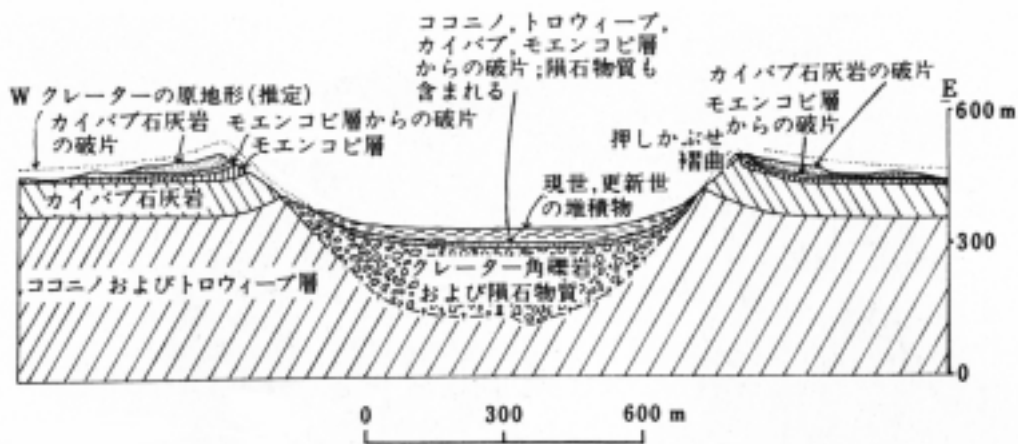


図 2.1 地球の隕石孔の例。バリンガー・クレーター。
アメリカ合衆国アリゾナ州にある直径 1200m の隕石孔。

(a) 上から見た図。(メテオクレーター博物館提供)

(b) 断面図 (Mutch, 1972)

3.2.3 実験方法

前章 2.1 クレーター形成実験 (p.7) と同様に、乾燥珪砂の標的に鉄球を自由落下させてクレーターを形成する。ただし標的はクレーター形成における標的物質の移動と、クレーターの形態を視覚化するために、色砂を使用した。以下に実験方法の例の詳細を述べる。図 2.2 に使用した実験器具・実験方法を示す。

【1】標的の作成

(1) 色砂の作成

乾燥砂をスプレー型ペンキで着色する。

(2) ビニールシートの貼り付け

クレーター形成後、標的を容器から取り出しやすくするため、容器の型に切ったビニールシートを敷く。

(3) 基礎砂層の形成

鉄球衝突の影響が底面に伝わらないように、標的容器の底に無着色の砂を多量に敷き詰める。

(4) アクリル板の差し込み

クレーターの形が崩れるのを防ぎ、容器全体に寒天溶液がしみこむように、アクリル板を図 2.3 のように差し込む。

(5) 層構造の形成

基礎砂層の上に色砂を順次層状に敷き詰める。色砂の量や数、厚さなどは形成するクレーターの大きさによるが、層の厚さは薄すぎると均一に層構造を作することは難しくなるため、直径が数 cm の鉄球・自由落下高度が数 m であれば、約 3 mm ~ 5 mm くらいが適当と考える。

【2】クレーターの形成

前章のクレーター形成実験の結果 (p.11、図 1.3) に従いクレーターの大きさは鉄球の大きさ、落下距離と相関がある。形成するクレーターの大きさは、エジェクタの分布を確認するため、標的容器の 1/2 以下の大きさになるよう、落下高度を調節する。

クレーター表層の観察

表層のクレーター放出物（エジェクタ）の分布を観察する。

【3】クレーター断面の観察

表層観察後、寒天液で標的を固め、切断する。

（1）寒天液の作成

砂を接合するため寒天液を作る。砂の間隙率分の容積(砂全体の容積の約 30%)以上の寒天液が必要である。

（2）寒天液の注入

この寒天液を、クレーターの形態に影響を与えないように標的容器のビニールシートとアクリル板の間に注意深く、素早く注入する。この時寒天液の温度が下がり、固化しないように高温を保つ必要がある。全体に寒天液が行き渡ったら、そのまま自然乾燥させる。

（3）標的の切断

ある程度固化したところで、容器からビニールシートごと標的が崩れないように取り出す。カッターナイフなどを使い切断する。

（4）クレーター断面の観察

層構造の変化を観察する。

3.2.4 実験ガイド

この方法で形成したクレーターを上から撮影したものとその模式図を図 2.3 に、さらにその断面、断面の模式図を図 2.5 に示す。クレーターを横（断面）から観察することにより、地形を含めた地層の構造を考えることができる。

形成されたクレーターの直径は 13cm、深さは 2.5cm であった。図 2.6 からエジェクタが同心円状に分布しているのがわかる。上の層から層番号を 1,2,とすると第 2 層のエジェクタが広く分布しており、その内側に第 3 層のエジェクタが分布している。実際は第 1 層から放出したエジェクタは第 2 層よりも広く分布していると考えられるが、判断できない。第 4 層以下の物質は表層には表れなかったことから、エジェクタ層を構成しているのは主に第 3 層から上部の領域を起源にしていることがわかる。これはクレーターの深さの約 2 分の 1 である。

表層部分では、クレーターの中心からクレーターのリムにかけて第 1 層から第 3 層までの地層が反転している様子が観察できる。これは、エジェクタが衝突地点に近く表層に近い方が大きいエネルギーをもち、遠方まで飛ぶためである。これにより 1、2、3 層の順に減速しつつ放出したことがわかり、図のような反転層が形成されたと考えられる。

3.2.5 考察

惑星表層に隕石が高速度で衝突すると図 2.6(a)でみるように衝突点を中心とする高温・高圧力の領域が発生する。時間が経つと弾丸は更に標的中に潜り込もうとするが、この時、弾丸の周辺から高温・高圧の水しぶきのような噴流が発生する。(図 2.6(b))この噴流はジェットまたは、この現象のことをジェット流現象と呼んでいる。このジェットの速度は大変大きい。この現象によっても少量の物質が放出されるが、これは、全放出量の1%にみたない。ジェット流現象に引き続き、標的物質からもっと低速で粒子が放出する段階が次にくる。(図 2.6(c))この段階では衝突で作られた高温・高圧の状態が衝撃波となって標的中にほぼ球面波的に広がっていく。衝撃波が進行していくと圧力を逃がそうと自由表面へのリバウンドが起こり、物質は内部からえぐられるように放出していく。結果、図 2.6(d)に見られるように、標的の中心部で深いところから放出される物質は遠方で表層付近に堆積し、層の反転が起こる。(藤原・1993)

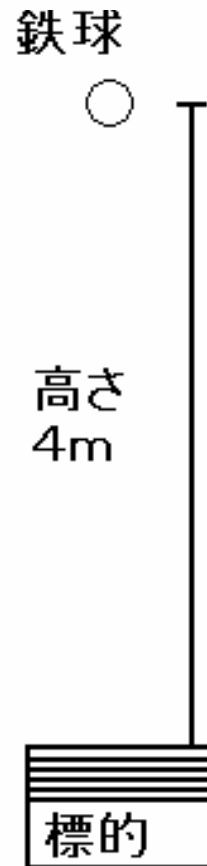
その後長い時間の中に土砂崩れやアイソスタシーによってクレーターが変形する変形段階がある。

実際の惑星表層におけるクレーター形成では、高速度衝突のため衝突時に高圧力・高密度の衝撃波が発生する。今回の実験では低速度のため衝撃波は発生しないし、長期間の変化もないが、圧縮と自由表面における圧縮の解放によっておこる標的粒子の運動は実演が可能である。

- 実験手順
1. 色砂を層構造に堆積させた標的を作る。
 2. 鉄球を自由落下させクレーターを作る。
 3. クレーター表層を上部より観察する。
 4. 寒天液で標的を固化し、切断する。
 5. クレーター断面を観察する。

- 実験器具
- 乾燥砂、鉄球、箱、定規・ノギス、巻き尺
油性速乾性カラーペンキスプレー、ビニール袋
ノコギリ・カッターナイフ、寒天、鍋、水、
ガスコンロ、アクリル板

図 2.3 実験器具・実験方法
直径 3cm の鉄球を高さ 4m より自由落下させる。



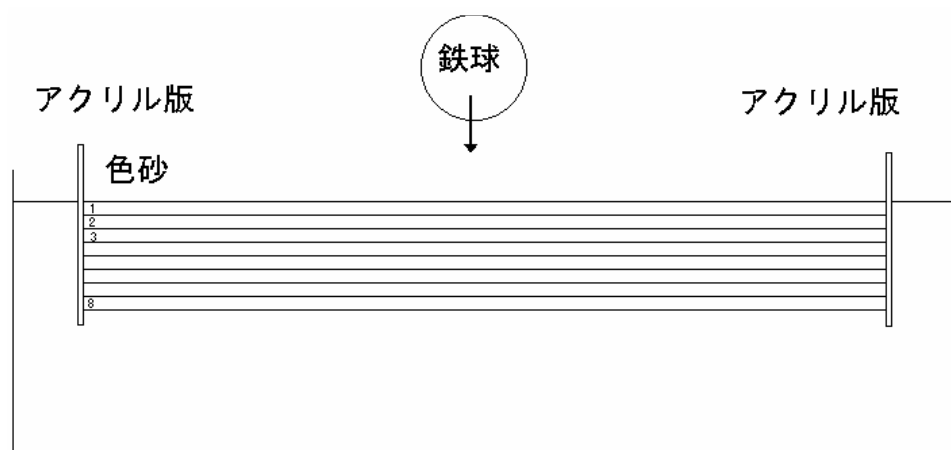
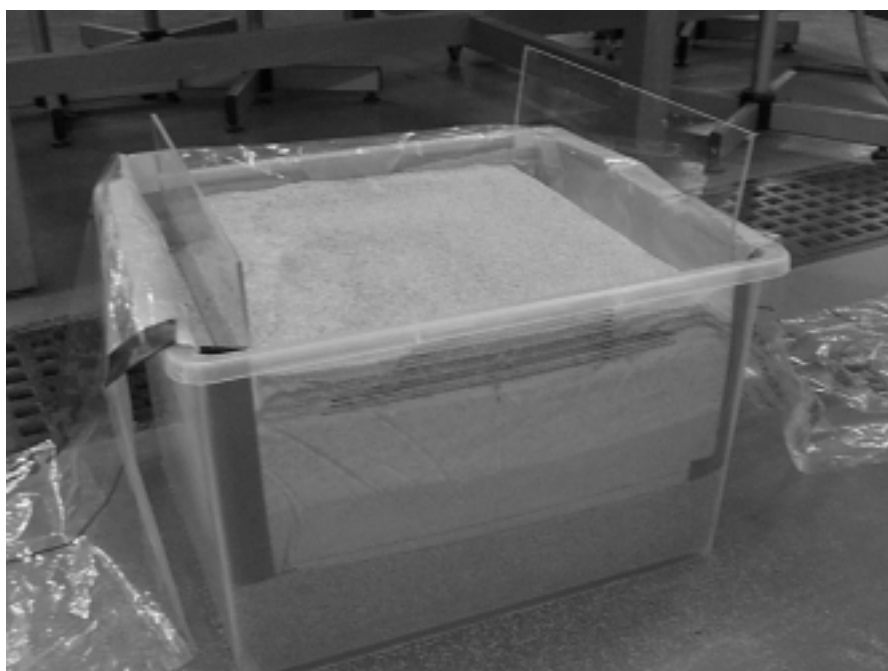


図 2 . 4 初期段階

標的の初期状態の写真（上）と模式図（下）。

深さ約 30cm の無着色層の上に、厚さ 4mm の 8 種類の色砂層を層構造に堆積させた。また、寒天液注入時のクレーターの变形を防ぐために、両脇にアクリル板をさしてある。

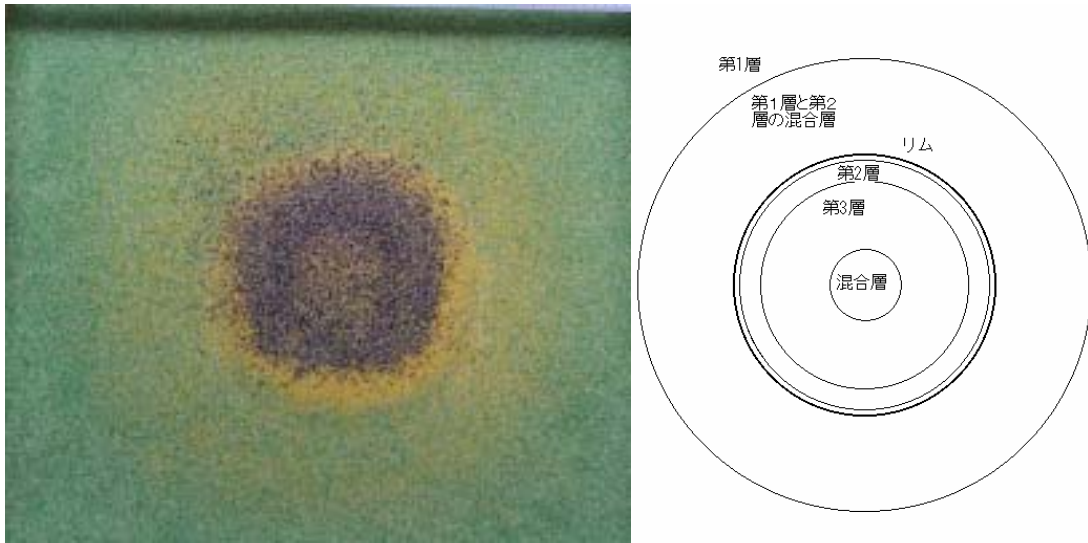


図 . 2.5 クレーターエジェクタ分布

上から撮影した写真（左）とその模式図（右）

直径 3cm の鉄球を高さ 4m から自由落下させて形成したクレーター。直径 13cm、深さ 2.5cm のクレーターが形成。クレーター周辺にはクレーターからの放出物（エジェクタ）が同心円状に広がる。写真の縦の長さ 26cm。第 3 層までは表層で見ることができる。第 4 層以下は表層に表れなかった。

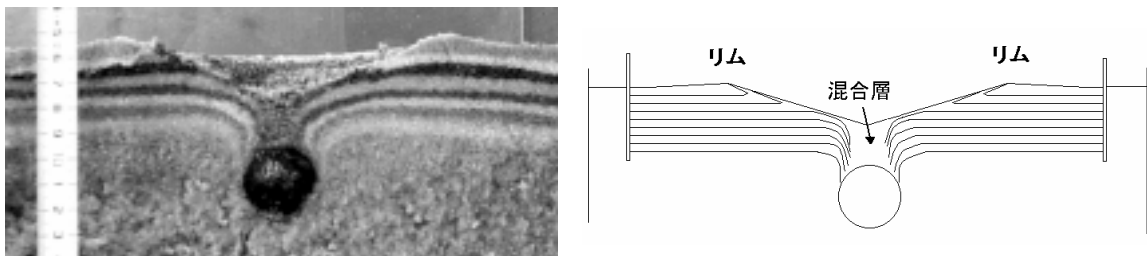


図 . 2.6 クレーター断面図

断面の写真（左）とその模式図（右）

図のクレーターをクレーターの中心を通るように切断したもの。層構造の変化が観察できます。クレーターの中心からクレーターのリムにかけて第 1 層から第 3 層までの地層が反転している様子が分かります。

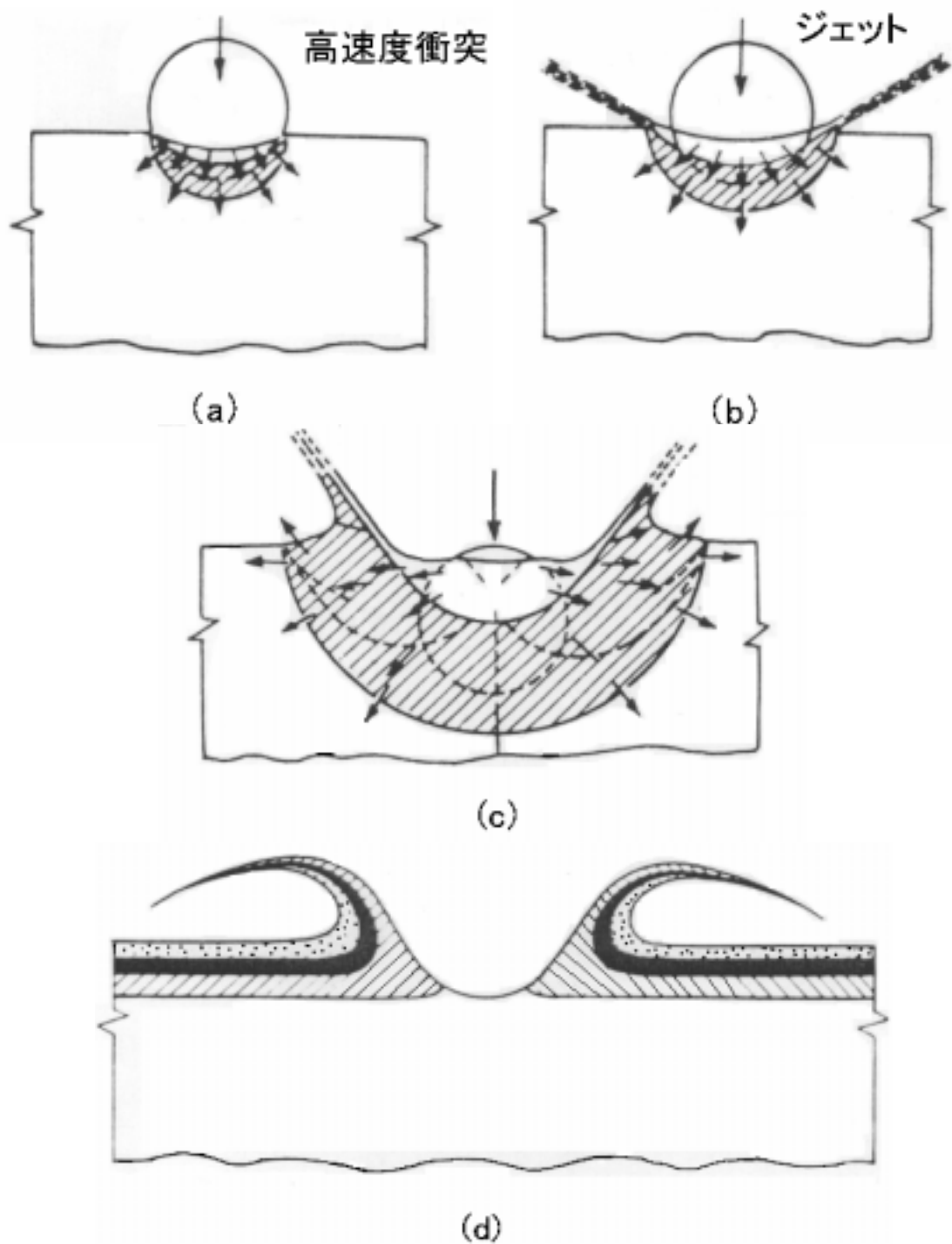


図 2.6 高速度衝突現象の模式図 (藤原 . 1993)

- (a) 弾丸が標的に衝突した瞬間。高温・高圧の衝撃波が発生する。
- (b) 衝突点の側面からジェット流が噴出。
- (c) 衝撃波が標的内に広がると同時に、標的物質が表面から放出される。
- (d) 標的物質が放出され、クレーターを形成する。

3.3 ランパートクレーター形成実験

3.3.1 目的

どのような要因がランパートクレーター形成に寄与しているのか調べることで、火星表層構造・表層環境を考えることができるようにする。

3.3.2 ランパートクレーターとは

火星には他の惑星や衛星にはあまり見ることのできない通称“ランパート”と呼ばれるクレーターが存在する。形態により詳細分類されている。

【1】ランパートクレーターの分類（Strom, et al.1992 による）

(1) Single-lobe Rampart [別名 Rampart (Viking) 意味“囲い”]

特徴：エジェクタが同心円状に広がっており、エジェクタの端が小高い丘になっている。

断面図



実際の画像



上から見た図

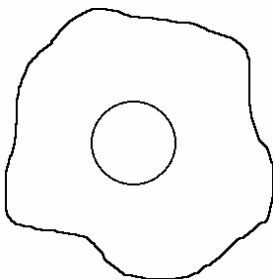


図 3.1 Single-lobe Rampart

クレーター直径 7km (Mars, # 06A93)

(2) Double-lobe Rampart [別名 なし]

特徴：エジェクタが二重に同心円状に広がっており、それぞれのエジェクタの端が小高い丘になっている。

断面図

実際の画像



上から見た図

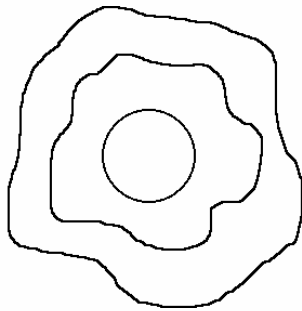


図 3.2 Double-lobe Rampart (図中央)

クレーター直径 16km (Mars,# 10B81)

(3) Multiple-lobe Rampart [別名 Flower(比較惑星学 .藤原 .1997)意味“花卉”]
特徴：エジェクタが花びらのように広がっている。

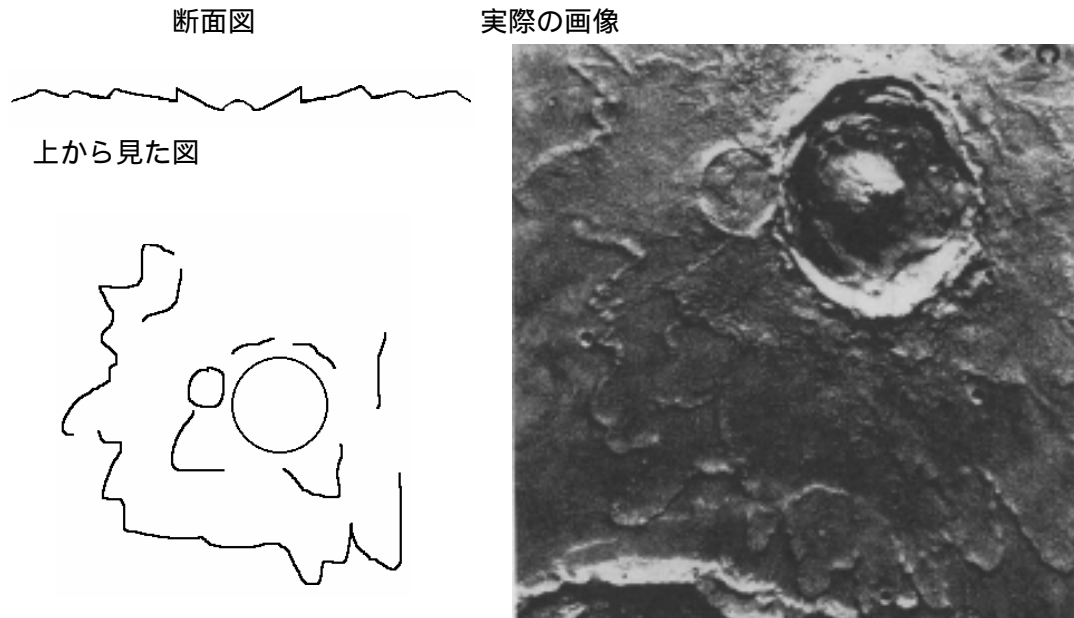


図 3.3 Multiple-lobe Rampart
クレーター直径 18km (Mars,# 022A54)

(4) Pancake [別名 Pedestal (Viking) 意味“台地”]

特徴：エジェクタがほぼ同心円状に広がっている。ふんわりしたケーキのように少し盛り上がった大地のような地形である。

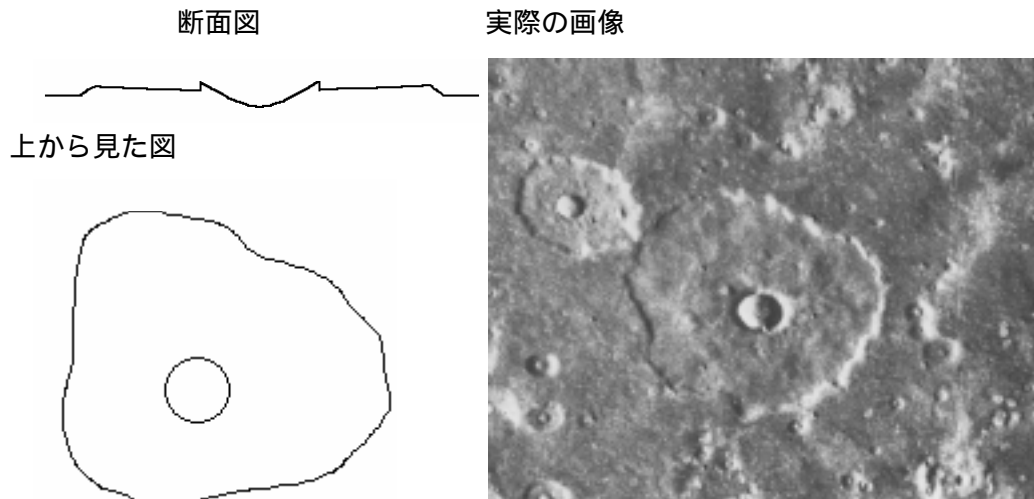


図 3.4 Pancake (図中央)

クレーター直径 3km (Mars, # 060A53)

【2】ランパートクレーターの起源

火星にこのようなクレーターがある原因として考えられているのの一つに、過去に火星表層付近に水あるいは二酸化炭素の氷が存在した可能性が有ることがあげられている。隕石衝突によりこれらの物質が、液状化し、泥水状にエジェクタが流出（液体説）あるいは、昇華し気流がエジェクタ流出を促進（気体説）してランパートクレーターのようなエジェクタ堆積様式になったと考えられている。

【3】ランパートクレーター模擬実験

液体説の模擬実験として tuff に水を混合したものを標的とし、気体説の模擬実験として tuff にドライアイスを混合したものを標的としてクレーターの形状を観察する。

これらの実験は過去の表層地下の環境を推定する方法の例となる。

3.3.3 ドライアイス編

3.3.3.1 実験方法

衝突体に見立てた鉄球を、ドライアイスと dry tuff を混合した標的物質に自由落下させて形成したクレーターのエジェクタの形態を観察する。図 3.5 に実験手順・実験器具の例を示す。

【1】標的の作成

(1) ドライアイスの細粒化

直径約 3mm、高さ約 2 cm の円柱状の市販のドライアイスを、ハンマーで砕き、篩をかけて直径約 2mm の粒にする。

(2) 混合

dry tuff に (1) のドライアイスを質量比 3 : 1 の割合で混ぜ、攪拌する。

(3) 標的の形成

鉄球衝突の影響が底面に伝わらないようにするために容器の底に dry sand の層を形成する。dry sand の層は厚さ 4 cm。tuff と dry sand が混ざらないように層の間にビニールシートを入れる。dry tuff ドライアイスの混合層は約 10 cm (図 3.5)

(4) 計量

混合の割合は衝突前に計量カップで標的物質を少量とり、質量を測る。今回は tuff の量、測定精度をから約 50g とり出した。ドライアイスがすべて昇華した後の質量を測り、その質量の変化から混合比を算出する。さらに標的全体の質量を測ることで、ドライアイスと dry tuff の混合比率を算出する。混合比は算出したドライアイスの質量を tuff + ドライアイスの質量で割ったものです。

(5) 攪拌

鉄球衝突ごとによく攪拌して、標的内の混合率を一定にする。

【2】クレーターの作成

標的に鉄球を自由落下させる。

実験手順例

1. 標的を作成する。
2. 混合物を計量カップに取る。
3. 熱した鉄球を落とし、クレーターを形成する。
4. 形成したクレーターを観察する。
5. 攪拌して、手順1から繰り返す。
6. ドライアイスが無くなった時点で終了。

実験器具例

- 上：鉄球、なべ、ガスコンロ、鉛直おもり、巻尺、茶こし、タオル、軍手
- 下：乾燥粘土、底上げ用砂、ビニール、容器、ライト黒紙、ドライアイス、測定器、攪拌用シャベル、計量カップ、ハンマー、アクリル板、篩、ライト

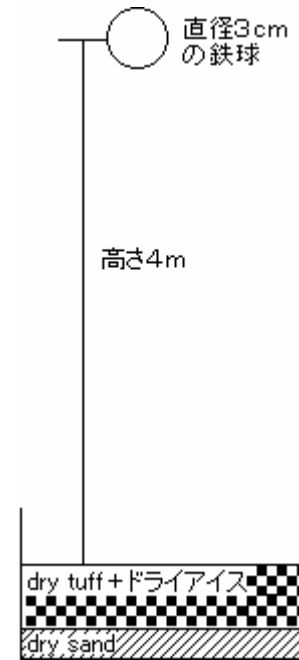


図 3.5 実験器具・実験方法例

鉄球を熱するためにガスコンロ、なべを使用した。

熱した鉄球を取り出すのに茶こしを使用した。

高さ4mから直径3cmの鉄球を自由落下させる。

dry tuff とドライアイスの混合層の高さは約10cm

dry sand の層は約4cm

3.3.3.2 実験結果

ドライアイスは時間の経過とともに昇華していくため、混合比率が変化していく。そこで

【1】ドライアイスの混合比率によるエジェクタ分布の変化

【2】標的の温度によるエジェクタ分布の変化

【3】衝突体の温度変化によるエジェクタ分布の変化

【4】標的の圧密状態の違いによるエジェクタ分布の変化

を併せて実験し、どのような要因がランパートクレター形成に寄与しているかを追求した。

【1】 混合比率について

混合比率約 30%：ドライアイスが昇華し、流動的な標的になる。パンケーキ型のランパートクレターが形成される。

混合比率約 20%：ドライアイスが昇華しない。流動的な標的にはならない。パンケーキ型のランパートクレター形成されず。

混合比率約 10%：ドライアイスが昇華し、流動的な標的になる。パンケーキ型のランパートクレターが作成される。

【2】 標的の温度

【1】において混合比率 30%と 10%のときは標的の温度が外気温と同等であったが、混合比率が 20%のときは、標的がドライアイスで冷却し、固化していた。その結果から、標的の温度の違いに昇華のしやすさ = 標的の粒性率によってパンケーキ型のクレターが形成可能であると結論付けられる。

【3】 鉄球の温度について

熱した鉄球は衝突後埋もれたままドライアイス昇華していき、リムの部分が崩れていくが、冷たい鉄球ではリムが保存された。鉄球の温度に関わらず、パンケーキのようなクレターは形成される。そのため鉄球の温度は、パンケーキ型のランパートクレター形成に直接寄与しない可能性が高い。

【4】標的の圧縮について

圧密した標的に鉄球を落下させた実験では、鉄球は標的表層で止まり、エジェクタもあまり飛ばなかった。

3.3.3.3 考察

実験の結果から、ドライアイスの含有率は関係なく、ドライアイスの昇華の速度、間隙率がパンケーキを作るのに必要なのではないかと考えられる。ドライアイスの昇華により tuff 粒子の間に空気の層ができ、間隙率が高い流動的な標的が形成される。この標的に鉄球を衝突させると、衝突エネルギーは水平方向では波のように伝わる。

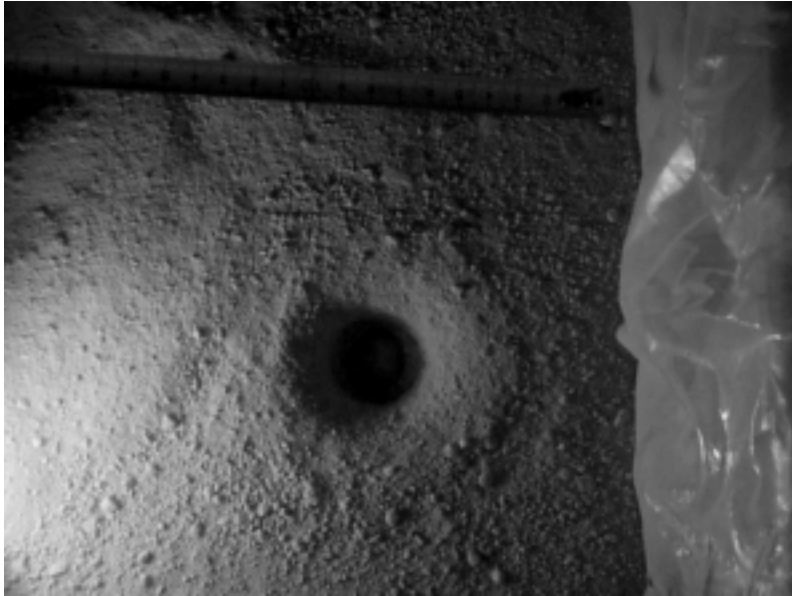


図 3.6

クレーター直径 7cm。直径 3cm の冷たい鉄球を高さ 4m から自由落下させ形成したクレーター。



図 3.7

クレーター直径 6cm。直径 3cm の熱した鉄球を高さ 4m から自由落下させ形成したクレーター。熱した鉄球によりリムが少し崩れている。

3.3.4 wet tuff 編

3.3.4.1 実験方法

衝突体に見立てた鉄球を、湿潤粘土 (wet tuff) を入れた容器に自由落下させて、形成したクレーターのエジェクタの形態を観察する。粘土は青葉山から採取した山土を乾燥させ、砕き #100 メッシュで篩ったもの。3.3.2 で述べた流体説を考慮して湿潤粘土を使用した。図 3.8 に実験器具、実験手順の例を示す。衝突エネルギーの変化・水の混合率の変化によるクレーター形態の変化を見るため下記の点に注意した。

【1】標的の作成

(1) wet tuff の作成

tuff と水との混合率は、質量比で計算し、tuff : 水で表す。水と混ぜる時は、偏りがないように混ぜる。

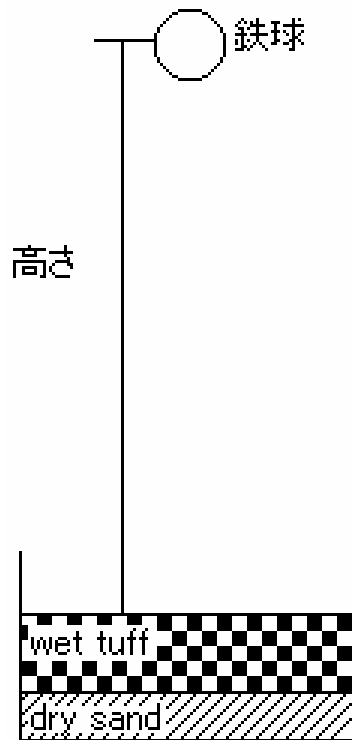
(2) 標的の形成

鉄球衝突の影響が底面に伝わらないようにするために容器の底に dry sand の層を形成する。dry sand の層の厚さは 4cm。水の混合率を変えて実験するために混ぜられないように、wet tuff と dry sand の層の間にビニールシートを敷く。

【2】クレーターの作成

鉄球を標的に自由落下させる。

衝突の際に標的が飛び散るので、容器の下にブルーシートなどを敷いて行うと良いだろう。



実験手順

- 1 wet tuff の標的を作成する。
- 2 鉄球を自由落下させクレーターを形成する。
- 3 クレーター表層を観察する。

実験器具

tuff、鉄球、容器、スケール、
巻尺、ビニール、水、ビーカー

図 3.8 実験手順・実験器具

直径 2、3、4cm の鉄球を高さ 2m、4m から自由落下させてクレーターを形成。wet tuff の層の厚さは約 10cm。dry sand の層の厚さ約 4cm。

3.3.4.2 実験結果

【1】 水の混合率の違いによるエジェクタ分布の変化

【2】 wet tuff 層の厚さによるエジェクタ分布の変化

を併せて実験し、どのような要因がランパートクレーター形成に寄与しているかを追求した。

【1】 水の混合率について

水なし	衝突エネルギーは鉛直方向に伝わり、dry sand と比べ、深さの大きいクレーターが形成された。(図 3.9)
tuff : 水 = 2 : 1	粘性があり、エジェクタが少ししか飛ばず、エジェクタの端が丸いクレーターが形成された。鉛直方向ではリバウンドが起きた。(図 3.12)
tuff : 水 = 1.8 : 1	粘性が低くなり、エジェクタが飛び散り模様を描いた。鉛直方向ではリバウンドがとて大きくなる。高さ 2m の時には Multiple-lobe Rampart の様な模様が形成された。(図 3.10、図 3.11) 衝突エネルギーを大きくするとリムが表れず、波紋として残る。(図 3.13)

【2】 層の厚さについて

tuff : 水 = 1.8 : 1 の wet tuff を用い、層の厚さを変化させ実験した。

wet tuff 層 1cm : エジェクタが飛び、模様を描く。(図 3.14)

wet tuff 層 2cm : 同心円状にカーテンの様にエジェクタが飛び散り、lobe 型の Rampart のようなクレーターが形成された。(図 3.15)

wet tuff 層 3cm : エジェクタの端が丸い、パンケーキのようなクレーターが形成された。(図 3.16)

3.3.4.3 考察

乾燥した tuff では、鉄球を衝突させると間隙率が高いため標的を鉛直方向に圧縮し、dry sand と比べ、深さの大きいクレーターが形成された(図 3.9)。水を加えることで標的は流動的になり、エジェクタがはっきりしたクレーターを形成する。層の厚さを変えた実験から、層を薄くすることによりリバウンドが小さくなることわかる。図 3.10、

図 3.11、図 3.15 の lobe 型 Ramprat の模様は、水平方向に飛んだエジェクタによって形成されたと考えられる。しかし、図 3.10、図 3.11 では層が厚いためリバウンドが起き、消されてしまったと考える。

標的が流動体で、薄い層構造をしていた場合、ランパートのようなクレーターが明確に再現できると考えられる。

3.3.5 考察

実際の隕石の衝突を考えた場合、衝突により衝突地点周辺域では標的物質の温度が上昇する。もし火星表層付近に氷やドライアイスなどが層を形成して表層下部に存在するとすれば、衝突により物体変化を起こし、蒸発・液化したりする。今回の実験では衝突により熱は発生しないが、しかし、衝突により物質が流動的に動いたと考えるならば、ドライアイスの実験、wet の実験でランパートクレーターは実演可能なのではないかと思われる。

また wet tuff の実験では水の量、層の厚さを調節すれば、お椀型、中央丘、多重リングのクレーターを形成することができるため、「2.クレーターとは」で述べた“惑星上に見られるクレーターの形態”の変化を見ることができる。これは、火星も他の惑星・衛星同様に系列に従ったクレーター形態をするということである。ドライアイスや水といったものが表層付近にあるためランパートクレーターが形成されたとするならば、に形態が変化したという。

これらの実験から惑星・衛星の表層地形を思い描き、過去に起きた衝突による表層環境の変化・惑星の表層構造を考えることができる。

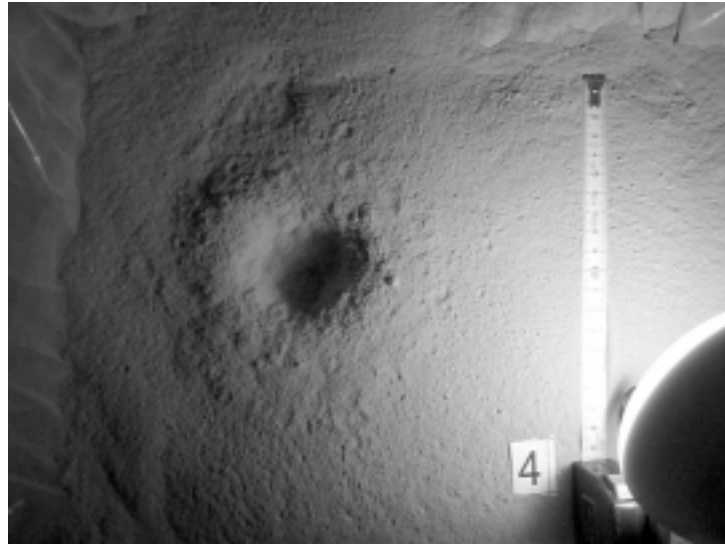


図 3.9

クレーター直径 7cm。直径 2cm の鉄球を高さ 4m から自由落下させたもの。標的は dry tuff

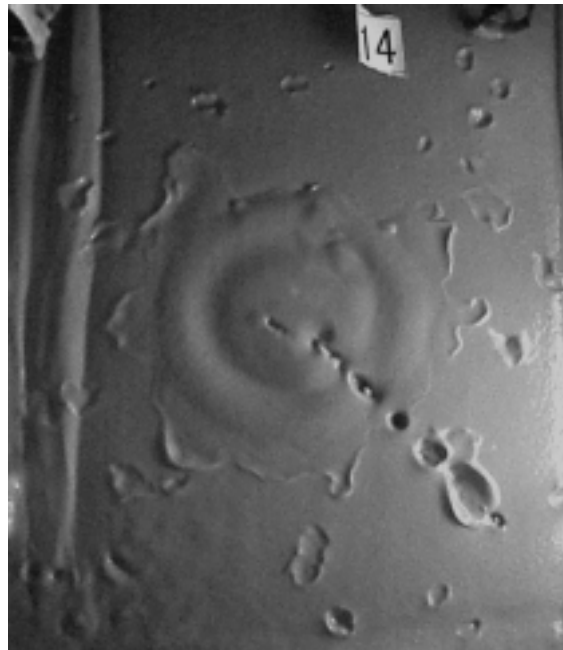


図 3.10

エジェクタ直径 16cm。直径 3cm の鉄球を高さ 2m から自由落下させたもの。水の混合率は tuff : 水 = 1.8 : 1。粘性は低くなり、エジェクタは飛び散るように広がった。

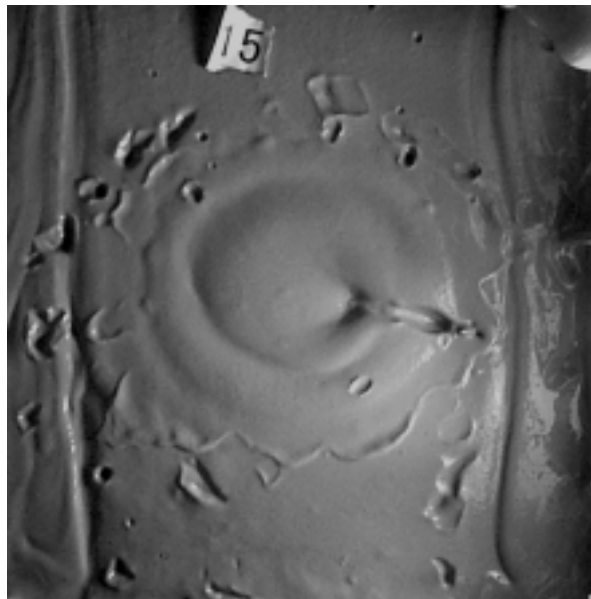


図 3.11

エジェクタ直径 20cm。直径 4cm の鉄球を高さ 2m から自由落下させたもの。水の混合率は tuff : 水 = 1.8 : 1。粘性は低くなり、エジェクタは飛び散るように広がった。



図 3.12

エジェクタ直径 13cm。直径 3cm の鉄球を高さ 2m から自由落下させたもの。水の混合率は tuff : 水 = 2 : 1。粘性がまだあるためエジェクタは波のように伝わった。またリバウンドにより中央丘が形成された。

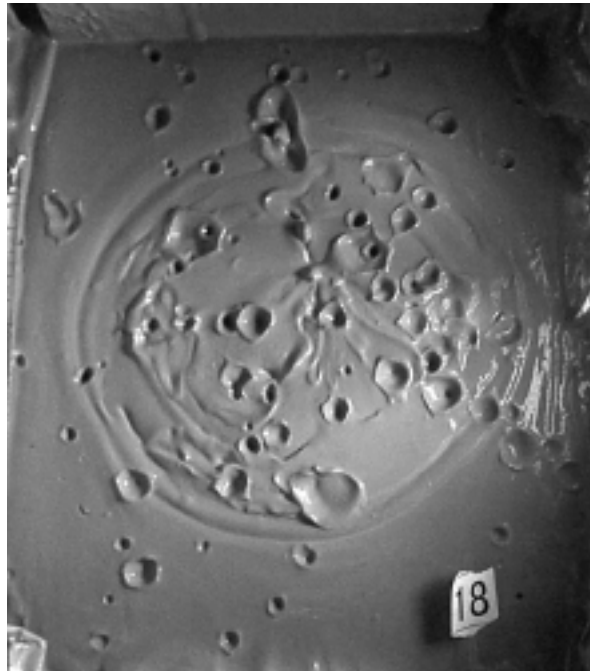


図 3.13

エジェクタ直径 16cm。直径 4cm の鉄球を高さ 4m から自由落下させたもの。水の混合率は tuff : 水 = 1.8 : 1。

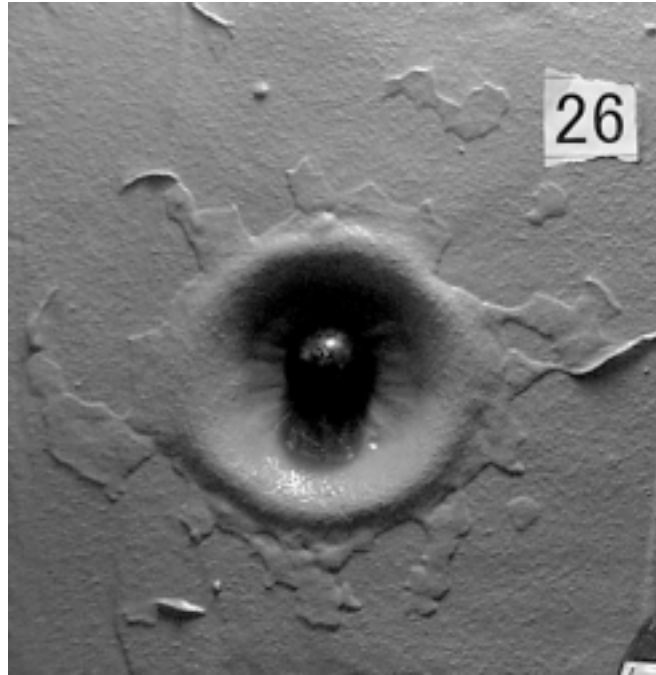


図 3.14

クレーター直径 8cm。直径 3cm の鉄球を、厚さ 1cm の wet tuff の標的に高さ 2m から自由落下させ形成したクレーター。

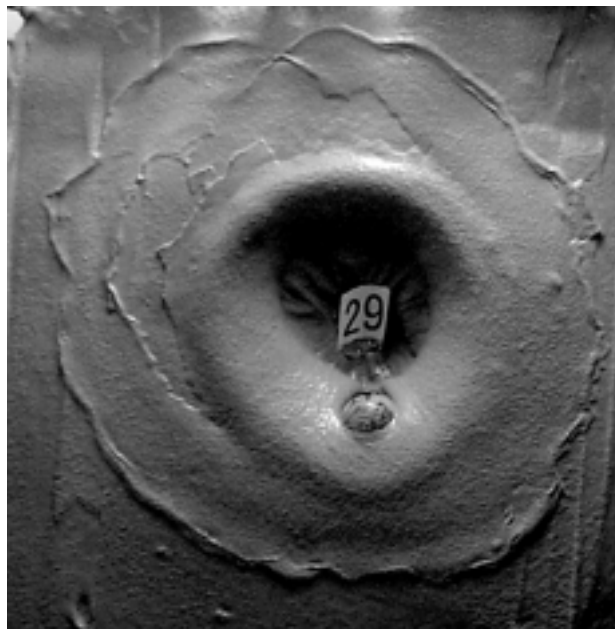


図 3.15

エジェクタ直径 20cm。クレーター直径 10cm。直径 3cm の鉄球を、厚さ 2cm の wet tuff の標的に高さ 2m から自由落下させ形成したクレーター。

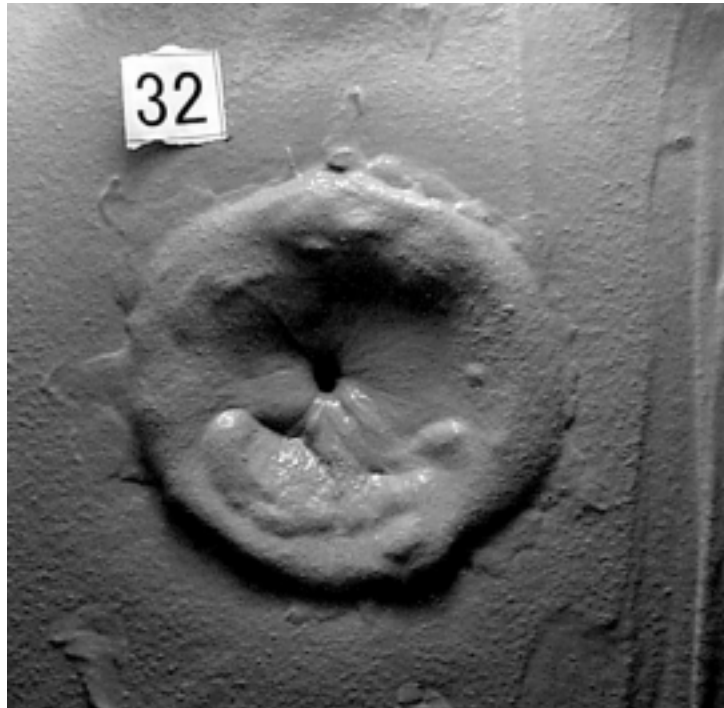


図 3.16

エジェクタ直径 12cm。直径 3cm の鉄球を、厚さ 3cm の wet tuff の標的に高さ 2m から自由落下させ形成したクレーター。

4.まとめ

これらのクレーター形成の実験は、身近な材料で簡単にできるため学校などでも可能です。また楽しみながらできる実験です。これらの実験をしているときは、私は小学生に戻った気分でした。クレーター構造の視覚化の実験では、砂に色を付け、wet tuffの実験では泥を作り、と砂場で遊んでいるようでした。遊びの中から学ぶということはとても良いことです。遊びが惑星環境の学習につながり、惑星表層環境というものを自らの手で作り、自らの目で観察することにつながるようになります。そのため視覚化だけならば小学校でも行えると考えます。中・高等学校の地学分野の授業への活用方法としては、

これらの実験は中・高等学校の地学分野の授業に活用できると考えます。またクレーターを作る体験から実際に惑星・衛星表層で過去に起きた隕石の衝突や、衝突による表層環境の変遷を思い描くことがより容易になるだろう。

謝辞

本研究を行うにあたり、懇切丁寧なご指導をいただいた宮城教育大学教育学部理科教育講座（地学科）の高田淑子助教授に深く感謝いたします。

また同大学地学科の青木守弘教授、森洋介教授、川村寿朗助教授、菅原敏氏には、日頃から親切なご助言をいただいたことに深く感謝します。

最後に、研究並びに卒業論文を作成にあたり、様々なご援助いただいた、小山裕幸さん、西川洋平君、隅山智子さん、小島志穂さん、堀籠直人君、中堤康友君、松下真人君のほか関係者の皆様に誠意を表します。

参考資料

藤原彰夫 (1993): 「惑星の科学」第3章 表層および内部構造 p102 ~ p145
朝倉書店

藤原 顕 (1997): 岩波講座地球惑星科学 12 「比較惑星学」第2章 惑星上の衝突過程
p118 ~ p128 岩波書店

水谷 仁 (1980): 「クレーターの科学」, 東京大学出版会

Carr, M.H et al (1980): 「VIKING ORBITER VIEWS OF MARS」 Craters p73 ~ p82
NASA

GAULT, D.E et al (1978): ICARUS 34, 486-495

Exploratory Experiments of Impact Craters Formed in Viscous-Liquid Targets :
Analogues for Martian Rampart Craters?

Schmidt, R.M and Housen, K.R (1987): J.IMPACT ENGNG. 5, 543-560
Some recent advances in the scaling of impact and explosion cratering

STROM, R.G et al : (1992) 「MARS」 12. THE MARTIAN IMPACT CRATERING
RECORD

WOHLETZ, K.H and SHERIDAN, M.F (1983): ICARUS 56, 15-37

Martian Rampart Crater Ejecta : experiments and Analysis of Melt-Water Interaction