

太陽系における高速度衝突現象と惑星の起源と進化

High-Velocity Impact Phenomena in the Solar System Related
to the Origin and Evolution of Planets

荒川 政彦^{1,*}

Masahiko ARAKAWA^{1,*}

保井 みなみ²

Minami YASUI²

寫生 有理³

Yu-ri SHIMAKI³

In this article, recent studies on impact cratering and impact disruption of planetary bodies are reviewed. A widely accepted scaling law for impact cratering is introduced to discuss the effects of material strength and planetary gravity on the crater formation process. A sophisticated scaling law for impact disruption is also introduced and we notice that non-dimensional impact stress is useful parameter to describe the catastrophic disruption. The impact strength of icy bodies, meteorite parent bodies and primitive asteroids are studied by using various materials simulating them, and these results are explained briefly.

[*Impact crater, Impact disruption, Impact strength, Asteroids, Planetesimals, Scaling law, High-velocity Impact*]

1. はじめに

月や地球を代表とする太陽系の固体天体の表面にはクレーターと呼ばれる窪地が普遍的に存在している。この窪地は、通常は円形をしており、そのサイズによって色々な形状を持つ。このクレーターのほとんどは、小天体の高速度衝突より形成したことが知られており、例えば月では秒速 15 km s^{-1} を超える小惑星の衝突により形成された。一方、衝突する小天体は、小惑星帯を起源とする天体の場合が多く、それらは天体同士の衝突破壊によって形成したと言われている。小惑星帯では木星重力の影響で、天体同士の相対衝突速度が $4\sim 5 \text{ km s}^{-1}$ での衝突が起きている。このような高速度では小天体同士の衝突時には天体自体の破壊が生ずる。地球上に落下する隕

石はこのような破壊により生じた小破片の一部である。

従って隕石は小惑星の一部であり、この隕石を分析することにより隕石が作られた元天体（母天体という）の情報を得ることができる。隕石の分析の結果、隕石母天体は、岩石、鉄、鉄・岩石混合物といった異なる組成を持ったものや、組成が分離した内部構造を持つものがあつたと推定されている。従って、月や地球などの固体天体の表面に観測される衝突クレーターは、岩石だけでなく鉄、鉄・岩石混合物、さらには彗星核を形成する氷等が衝突してできたと言える。

一方、小惑星を含む太陽系の惑星は、原始惑星系星雲内の固体微粒子（ダスト）が付着・成長して形成したと言われている。特にその過程でサイズ

¹ 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1 神戸大学大学院 理学研究科 地球惑星科学専攻
Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Kobe University, 1-1, Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe 657-8501

² 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1 神戸大学 自然科学系先端融合研究環重点研究部
Organization of Advanced Science and Technology, Kobe University, 1-1, Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe 657-8501

³ 〒466-8601 鳥取県東伯郡三朝町山田 827 岡山大学 地球物質科学研究センター
Institute for Study of the Earth's Interior, Okayama University, 827 Yamada, Misasa, Tottori 682-0193

* Electric address: masahiko.arakawa@penguin.kobe-u.ac.jp

数 km の微惑星と言われる小天体が形成し、その微惑星の衝突集積が、現在観測される太陽系天体の多様性を引き起こした一因である。この微惑星は、彗星核のように高い空隙率を持っていたと言われており、その名残として現在の小惑星にも高い空隙率を持つ天体が存在することが知られている。小惑星は、微惑星が惑星へと進化する過程を凍結したものであると考えられており、破壊した時期や破壊前の天体サイズにより、組成や空隙等の内部構造の多様性が生じたと考えられる。また、木星や土星などの巨大惑星の周囲にある氷衛星、海王星以遠に多数存在するカイパーベルト天体も同様に、微惑星が衝突成長する様々な段階を凍結した天体として見ることができる。

2. 天体の衝突破壊

天体の衝突破壊強度は、小惑星の形成や小惑星上の衝突による惑星間塵の供給などに関連して研究が始まった。惑星形成論の発展と共に微惑星や隕石母天体の衝突破壊、再集積条件を明らかにするために実験や理論、最近では数値シミュレーションによる研究が進んでいる。衝突破壊強度は、よく知られている静的圧縮、引っ張り実験から決まるような力学強度とは異なった視点で定義されている。すなわち、天体衝突では衝突点には衝撃波が発生する程の極めて高い圧力が発生するが、衝撃波が伝播・減衰するにつれて、その圧力は急激に減衰し、最終的には弾性波となってしまう。その過程で、動的な力学強度を超えた部分にクラックが発生し、そのクラックの成長により局所的な破壊が生ずる。衝撃波や塑性波、もしくは破壊を伴うような強い弾性波の天体内における継続時間は天体サイズによって変化するが、いずれにしろ最大でも数秒程度の短いものである。従って、衝突破壊強度の定義には、従来の引っ張り強度や圧縮強度をそのまま適用することはできない。

そこで、衝突実験から得られる衝突破片のサイズ分布から強度を求める方法がとられてる。衝突破壊が起こると必ず最も大きな破片が存在する。この破片を最大破片と言い、元の標的サイズで規格化したものが規格化最大破片と言われる。この規格化最大破片と衝突条件の関係を実験的に調べることで、規格化最大破片の値が 0.5 となる衝突条件を衝突破壊強度 (Q_s^*) として定義することになっている (Fig. 1)。衝突条件としては、慣例として単位質量

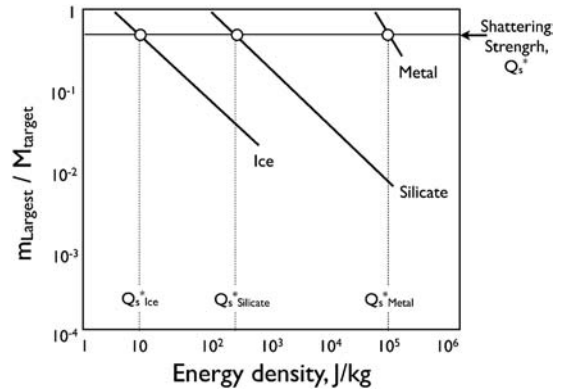


Fig. 1. Relationship between the largest fragment mass and the energy density for various materials [1].

あたりの弾丸の運動エネルギーで定義されるエネルギー密度 (Q) が使われる。 Q_s^* は、実験でしか求めることができないので、室内衝突実験から様々な種類の物質について調べられてきた (Fig. 1)。小惑星の模擬物質としては、玄武岩、モルタル、石膏などが使われており、 Q_s^* が決められている。最近では小惑星探査により得られたそれらの密度から、高い空隙率を持つものも多いことがわかってきたので、焼結した多孔質体の Q_s^* も調べられるようになってきた。また、衝突破壊の素過程を知るために静的破壊強度と Q_s^* の関係も調べられ、その結果、衝突破壊強度が静的破壊強度だけで決まっている量でないことがわかってきた。衝突破壊強度の理論的取り扱い、Mizutani *et al.* (1990) [2]や Housen and Holsapple (1990) [3]に詳しい記載があるが、いずれにしろ、衝撃波の伝播・減衰の特徴である終段階等価性に基づいた終段階有効エネルギーという概念を元に理論は構築されている。物理的素過程のわかりやすさから言えば、Mizutani *et al.* (1990) の理論であるので、この理論に基づいて説明をする。衝突破壊強度は、まず衝突点における発生圧力とその圧力の継続時間が重要となる。次に、その圧力の伝播・減衰による天体内部における最大衝撃圧力 (応力) の分布が重要であり、結果的にこの圧力分布が衝突破壊の程度を決めることになる。特に最大破片に注目するならば、衝突点の反対点側から生ずることが多く、これは圧力の最低点がこの辺りに存在することに対応している。最大破片を形成する破壊メカニズムとしては、引っ張り破壊が想定されているが、この場合、スポーリングというメカニズムで破

壊が生ずることが多くの衝突実験から知られている。この理論から、衝突破壊強度に関する物性値は、衝撃圧力に関するユゴニオ状態方程式、衝撃波の減衰率、スポーリング強度ということになる。小惑星に関してこれらの3つの値を知ることが、衝突破壊強度を決めるためには必要であるが、地上のアナログ物質を用いた実験では限界がある。小惑星が持つ内部構造により、スポール強度、衝撃波の発生と伝播は大きな影響を受けることが知られており、現実の小惑星のマクロな物性を知らない限りは、その衝突破壊強度を明らかにすることはできない。

さらに天体サイズの衝突破壊では、自己重力による破片の再集積過程を考慮した衝突破壊強度の推定が必要である。 Q_d^* を拡張する形で自己重力が十分に大きな天体の衝突破壊に関する破壊の**タライテリオン**が定義されている (Fig. 2)。この定義によれば、破壊した天体の衝突後の質量が自己重力による再集積を含めても元の天体質量の半分以下になるような衝突条件を衝突破壊強度としている (Q_d^*)。この場合、先に述べた物性に加えて破片の速度-質量分布が重要な**ファクター**となる。すなわち、速度の遅い破片は重力により捕獲されるので天体質量としての欠損を免れることになる。天体サイズが大きく、100 km を越えるようになると自己重力による破片の捕獲が衝突破壊強度を決めるため、小惑星を構成する物質の差はほとんど関係なくなり、単に天体質量のみで衝突破壊強度が決まるようになると言われる。しかしながら、重力支配域における衝突破

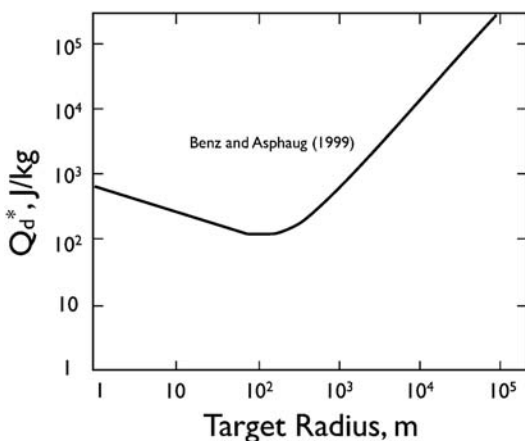


Fig. 2. Size dependence of the impact strength (dispersion strength) for a typical rocky body estimated by Benz and Asphaug (1999) [1,11].

壊強度はモデルにより大きく異なり、現在でも**コンセンサス**を得るための研究が進行中である (Fig. 2)。

3. 衝突クレーターの形成過程

クレーター形成過程は、衝突破壊過程の局在化した形と見ることができるので、その物理素過程は全く同じである。すなわち、両者から得られる知見は多くの部分において共有可能である。しかしながら、クレーターの場合は小惑星表面に地質構造として証拠を残すため、この構造の調査から衝突破壊に比べて格段に豊富な情報を引き出すことができる。クレーターの研究は惑星地質学やクレーター年代学とも関連して、惑星科学の中では重要な位置を占める。そのため研究量も多く、衝突破壊に比べて理論的な理解も進んでいる。特に砂を用いた室内実験や核爆発クレーターの野外調査などを元にまとめられた理論が現在一番よく知られている。特に、重力に支配されるようなメカニズムでクレーターサイズが決定するような場合、クレーターサイズや**イジェクタ**堆積物の量、それに**イジェクタ**速度分布などは理論的にはほぼ予想可能となっている。Holsapple や Housen らが中心となって進めてきたこの π スケーリングと言われる理論は、衝撃波の伝播・減衰に関する点源近似とカップリング**パラメータ**と言われる終段階有効エネルギーに比例する量を基礎に作られており、手法的には**次元解析**に基づいている [4] (Fig. 3)。従ってこの理論は、先験的に物理メカニズムを採り入れているわけではないので、次元解析に基づく無次元量同士の関係を実験的に調べることで、内在する物理過程があぶり出されるような論理構造となっている。重力スケージングと言われる π スケーリングの中でも最も有名な重力支配域にお

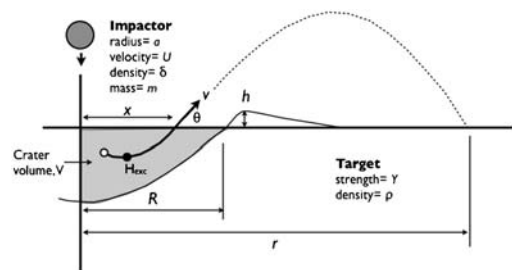


Fig. 3. Schematic illustration of a formation process of an impact crater [10].

るクレーター半径 (R) と衝突条件の関係は以下の
ような式で書けることが知られている (Fig. 3)。

$$R \left(\frac{\rho}{m} \right)^{1/3} = H_1 \left(\frac{\rho}{\delta} \right)^{(2+\mu-6\nu)/[3(2+\mu)]} \left[\frac{ga}{U^2} \right]^{-\mu/(2+\mu)} \quad (1)$$

ここで ρ , δ は、標的、弾丸の密度, g , a , U は、天体の重力加速度, 衝突体の半径, 衝突速度である。実験から, H_1 と μ , ν を決める必要があるが, それぞれの物理的意味はこの式からだけでは不明である。他の研究からの推測により, μ は衝撃発生圧力の速度依存性や衝撃波の減衰率に関係する量であることが示唆されており, H_1 に関しては, 粒子間摩擦力や付着力に関係する量であると推測される。このスケール則の注目すべき点は, g の変化に対して, クレーター半径がどのような感度を持つかであるが, その依存性を調べる実験は実際には困難である。これまで, 遠心加速器を用いて高 g に対して依存性を調べる研究が行われており, この結果を低 g にまで適用してきた。実際には, ga/U^2 という無次元量が効くので, g 単独で議論する意味があるかどうかは微妙であるが, g が小さい場合, 粒子間付着力が摩擦力を越えるようになり, このスケール則が適用できるそもそもの仮定が崩れることになる。従って, 低 g における実験は必須であると言える。しかしながら, 落下塔を使用した無重力実験は世界でも限られた場所しかできなくなっており, 少なくとも日本ではほぼ不可能な状態である。微小重力下でのクレーター形成過程は, 微惑星やラブルパイル天体の衝突破壊とも関連して重要な物理過程である。同様なスケール則の式は岩石等の物質強度がクレーターサイズを支配する条件下においても提案されており, 以下のように書かれることが知られている (Fig. 4)。

$$R \left(\frac{\rho}{m} \right)^{1/3} = H_2 \left(\frac{\rho}{\delta} \right)^{(1-3\nu)/3} \left[\frac{Y}{\rho U^2} \right]^{-\mu/2} \quad (2)$$

この式の Y は物質強度であるが, 実はどのような条件における強度なのかは定かでない。また H_2 は実験的に決めるべきパラメータであり, 衝撃発生圧力に関係するパラメータであろうと推測される。強度域のクレーターの場合, その実験例も砂ほど多くなく確認すべきパラメータ依存性が多いわりには研究が進んでいないので, この式を小惑星等に適用するにはさらなる研究が必要である。

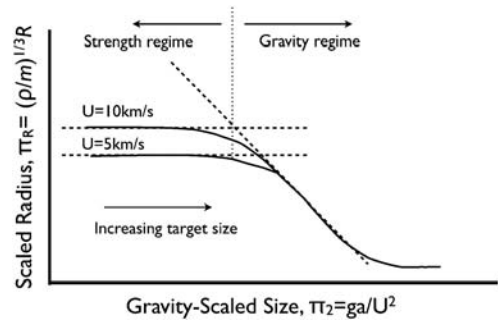


Fig. 4. Schematic illustration of gravity dependence of an impact crater radius. Each curve shows the relationship between crater radius and gravity at a constant impact velocity.

4. 雪の破壊様式

海王星以遠の外惑星領域ではカイパーベルト天体と呼ばれる氷天体が数多く存在することが知られている。これらの天体は現在でも衝突を繰り返し, デブリ円盤と呼ばれる氷小破片や氷ダストからなる領域を形成している。また, 木星や土星などの巨大ガス惑星は数多くの氷衛星を持ち, 平均密度や表面地形は非常に多様性に富んでいる。この多様性の原因の一つは天体衝突であるため, 衛星の起源と進化を研究する上で, 氷天体に関する衝突実験は欠かせない。大きさ 1000 km 以下の氷衛星は平均密度が低く内部に空隙を含むものが多い。従って雪のように高い空隙率を持つ氷に対する実験が必要である。そこで, 我々の研究グループでは, 氷点下の低温室内に衝突実験装置を設置して, 雪の衝突破壊強度を計測する実験を行ってきた。

Fig. 5 に Shimaki and Arakawa (2012) [5] による空隙率を 40% から 70% に変化させた時の衝突破壊実験の結果を示す。Fig. 1 と同様に横軸はエネルギー密度 (Q), 縦軸は規格化最大破片を示している。これらの実験の衝突速度は約 2 m s^{-1} から 500 m s^{-1} であり, 弾丸には直径 15 mm, 高さ 10 mm の円筒氷や直径 15 mm の雪球 (空隙率 30%), それに直径 10 mm, 高さ 10 mm の円筒氷を用いている。標的試料は直径 60 mm の雪球であり, 弾丸は標的にはほぼ正面衝突している。実験データのばらつきは大きい, 解析すると空隙率が大きいものの方が, 同じエネルギー密度を与えても, 最大破片は小さくなっていることがわかる。ただし, 最大破片

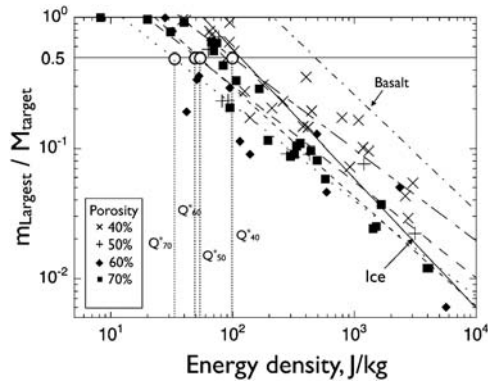


Fig. 5. Relationship between the largest fragment mass and the energy density for snow with various porosities [5].

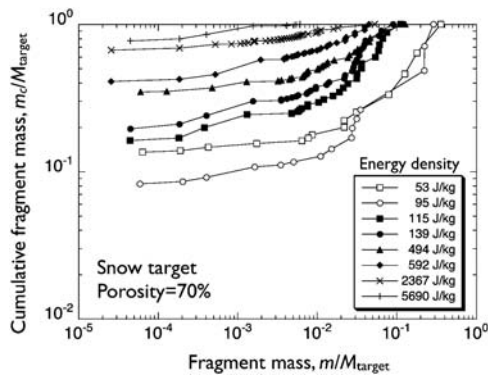


Fig. 6. Cumulative mass distribution of impact fragments for snow originated from a snow target with a porosity of 70% [5].

を基準として衝突破壊の程度を比較すると、氷と雪とでは大きな違いは見られない。一方、衝突破片のサイズ分布には破壊に対する空隙率の影響がもっとはっきりと現れる。Fig. 6に空隙率70%試料の回収破片の積算質量分布を示す。衝突速度が大きくなると共に、最大破片は小さくなり、同時に小破片の量が系統的に増加する様子がよくわかる。また、規格化破片質量が 10^{-3} 以下ではどの実験でも破片の変化がほとんどなくなり、この領域の破片が少ないことがわかる。これは雪のような粒子集合体の特徴である。つまり、岩石のように緻密な脆性固体であれば、破片サイズのべき乗で個数が増える特徴が知られているが、雪のような粒子焼結体では、衝突の衝撃により、粒子間結合が壊れて、大量に個々の構成粒子にまで分解してしまうことを示している。そ

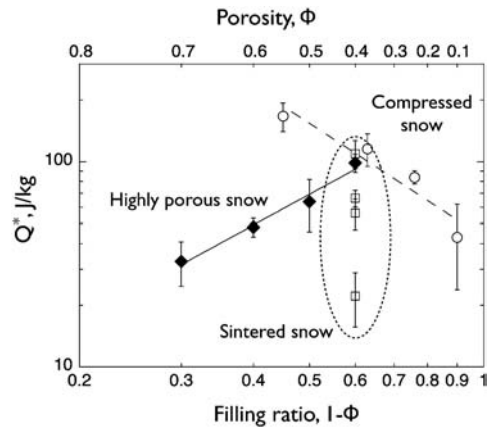


Fig. 7. Porosity dependence of impact strength for snow [5].

の量は、衝突速度とともに大きくなっているのですが、この粒子間結合の破壊領域が、衝突速度と共にある相関を持って広がっていることがわかる。

雪の衝突破壊強度を整理すると Fig. 7 のようになる。Arakawa and Tomizuka (2004) の低空隙率の結果も含めて見てみると、衝突破壊強度が空隙率に対して複雑な挙動を示していることがわかる[6]。すなわち、空隙率0%の氷から徐々に空隙を増やして行くと、その衝突破壊強度は増加するようになる。この増加は以前の Arakawa らの実験では空隙率55%まで続いていたが、高空隙率雪を用いた Shimaki らの実験では、空隙率40%から空隙率の増加と共に単純に衝突破壊強度は減少していることがわかる[7]。これは、空隙率40~60%の間に衝突破壊強度の最大値が存在することを示唆しており、衝突破壊強度を決めるメカニズムが一つでないことを示している。これまでの研究から、衝突破壊強度は、発生衝撃圧の大きさ、衝撃圧力の減衰率、結合強度により決まると言われているが、雪の結果は、低空隙率では、衝撃圧力の減衰率の空隙率依存性が主に衝突破壊強度を決めており、高空隙率では、結合強度の空隙率依存性が衝突破壊強度を決めていることを示唆している。

5. 隕石母天体の衝突破壊

普通コンドライト隕石母天体は、微惑星の衝突によって生じた衝突破片やその衝突破片の再集積によって形成した天体（主にS型小惑星）であると考

えられている。普通コンドライト隕石はミリサイズのコンドリュールと呼ばれる球状粒子と、マトリックスと呼ばれるサブミクロンサイズのシリケートダストから構成されるため、普通コンドライト隕石母天体を形成した微惑星は、コンドリュールとマトリックスからなると予測される。そのため、普通コンドライト隕石母天体の形成条件を考える上で、上記のような微惑星の衝突破壊と再集積過程を調べることが重要となる。そこで Yasui and Arakawa (2011) では、コンドリュールおよびマトリックスを球形ガラスビーズ、石膏で模擬した混合試料を用いて衝突実験を行い、普通コンドライト隕石母天体の衝突破壊強 Q_s^* を調べている [8]。

標的試料は、石膏に直径 100 μm , 1 mm, 3 mm の球形ガラスビーズを混ぜて作成し、ガラスビーズの体積含有率は約 60% としている。標的試料は、直径 30 mm, 高さ 20–40 mm の円筒形と、1 辺 10–30 mm の立方体を用意している。直径 10 mm, 質量 0.5 g のナイロン球の弾丸では、衝突速度は 60–180 m s^{-1} であり、直径 1.6 mm, 高さ 2.5 mm, 質量 7 mg の円筒形ナイロンの弾丸では、衝突速度は 3.3–4.2 km s^{-1} である。

実験後に回収した衝突破片の最大破片質量 m_1 を調べ、エネルギー密度 Q との関係性を調べた。衝突速度範囲が同じ場合、同じエネルギー密度では石膏の m_1/M_t がビーズ混合物の m_1/M_t よりも 5–10 倍大きくなることがわかった。一方、同じ標的であれば、高速度衝突の m_1/M_t が低速度衝突の m_1/M_t よりも約 1 桁大きくなった (Fig. 8)。各標的の Q_s^* を調べた結果、低速度衝突の場合はビーズの有無やサイズにより Q_s^* は大きく変化して約 56–450 J kg^{-1} となることがわかった。この実験では石膏標的が最大で、3 mm ビーズを含む標的が最小となった。

このように低速度衝突と高速度衝突で Q_s^* が異なるのは、衝突時の発生圧力と衝撃圧力の減衰率の衝突速度範囲によって異なるからだと推測される。エネルギー密度は発生圧力や減衰率を考慮した量ではない。そこで、発生圧力 P_0 と減衰率 α を考慮した無次元衝突応力 P_1 を用いて実験結果を再解析し、低速度衝突と高速度衝突の結果が矛盾なくスケールアップされるかを調べた。 P_1 は Mizutani *et al.* (1990) [2] によって提案されたパラメータで、固体物質中の衝撃波生成と伝播を基に作られた。その形は、 $P_1 = (P_0/Y)(m_p\rho/M_t\delta)^{\alpha/\lambda}$ (Y は引張強度) と表記される。 P_0 値は、インピーダンスマッチング法を

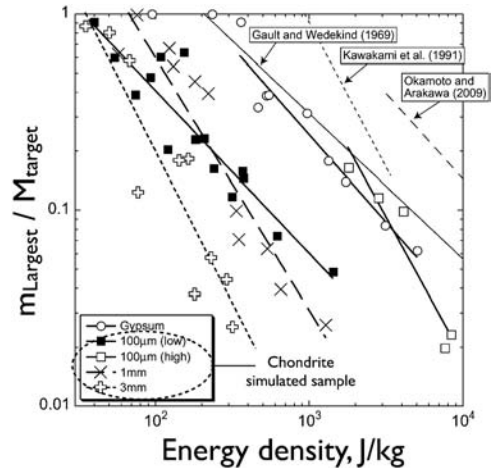


Fig. 8. Relationship between the largest fragment mass and the energy density for simulated ordinary chondrite material [8].

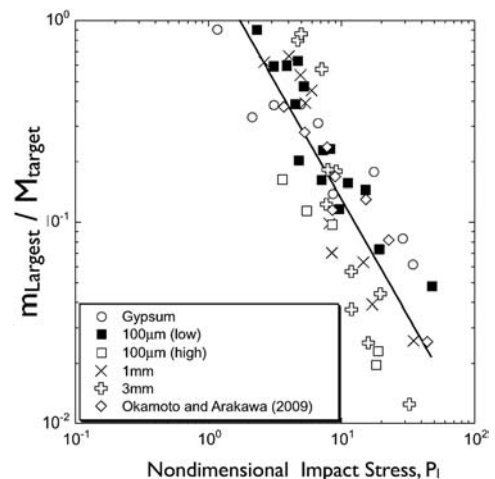


Fig. 9. Relationship between the largest fragment mass and the non-dimensional impact strength for simulated ordinary chondrite material [8].

を用いて計算できる。また Y 値は、衝突実験で用いた標的と同じ試料 (直径 30 mm, 高さ 12–18 mm) を用いてブラジリアン試験により決定した。そして、各関係において、衝突速度に依存せず全ての結果が最も良く一致する α 値を求めた。その結果を、Fig. 9 に示す。計算した結果、 α 値が 2 になると各関係において全ての結果が良い一致を示すことがわかった。そして、規格化最大破片質量は、 $m_1/M_t = 12.26 P_1^{-1.35}$ という経験式で表されることがわかった。

た。

6. 多孔質天体上のクレーター形成過程

これまで見てきたように、小惑星は密度が低くて多孔質である物が多い。そのため、表面に見られるクレーターは、その空隙率の影響を受けている。よって、多孔質小惑星上にできる衝突クレーターの形成過程を解明するには、その物理素過程を知る必要がある。そこで Yasui *et al.* (2012) では、フラッシュ X 線を用いて、クレーター形成中の内部構造の可視化を試みた[9]。フラッシュ X 線は、可視光でとらえられない試料内部の高速現象を静止画像として得ることが可能である。Yasui らは、この手法により岩石物質のクレーター形成における弾丸貫入と孔の拡大を初めて観察し、クレーターサイズの時間変化を調べることに成功した。

この実験では、標的として空隙率 50% の石膏を用いている。サイズは直径 34 mm、高さ 65 mm、もしくは、直径 64 mm、高さ 70 mm である。弾丸は、直径 1.6 mm 及び 3.2 mm のステンレス球 (s.s.)、直径 3.2 mm のアルミニウム球 (Al) とナイロン球 (Ny) を用いた。直径 3.2 mm の s.s. 弾丸のみ小試料と大試料を用い、他は全て小試料とした。実験は、宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を使用した。衝突速度は $1.9\text{--}2.4\text{ km s}^{-1}$ (低速)、 $5.6\text{--}6.4\text{ km s}^{-1}$ (高速) とした。

この実験では、エネルギー密度 Q によって 2 つのクレーター形成モードに分けることができた。エネルギー密度が小さい場合 (6500 J kg^{-1} 以下: Fig. 10a)、半球型のクレーターが形成され、周囲に圧密層が見られた。また、弾丸は円盤型に変形 (Al 球, Ny 球)、もしくは数個に分裂した (s.s. 球)。エネルギー密度が大きい場合 (9000 J kg^{-1} 以上: Fig. 10b)、弾丸は変形分裂し、標的は半球型クレーターの形成後に、孔先端から分裂した弾丸が飛び出してピットを形成した。このような X 線画像を用いて、クレーターサイズの時間変化や最終クレーターサイズの計測を行った。

最終クレーターのサイズは、石膏のような強度を持つ物質に関しては式 (2) により衝突条件と関係づけられる。そこでこの実験から得られた結果を Fig. 11 に示す。ここで、縦軸は規格化クレーター体積 $\pi_V = V_c \rho / m_p$ 、横軸は規格化標的強度 $\pi_Y = Y / \delta U^2$ であり、 V_c はクレーター体積、 m_p は弾丸の質量で

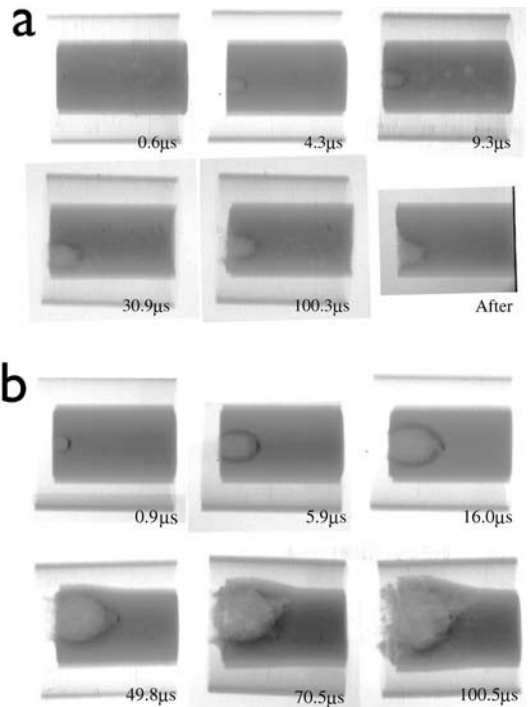


Fig. 10. Flash X-Ray images recording the growing process of the impact crater. (a) Gypsum target was not disrupted. (b) Gypsum target was catastrophically disrupted [9].

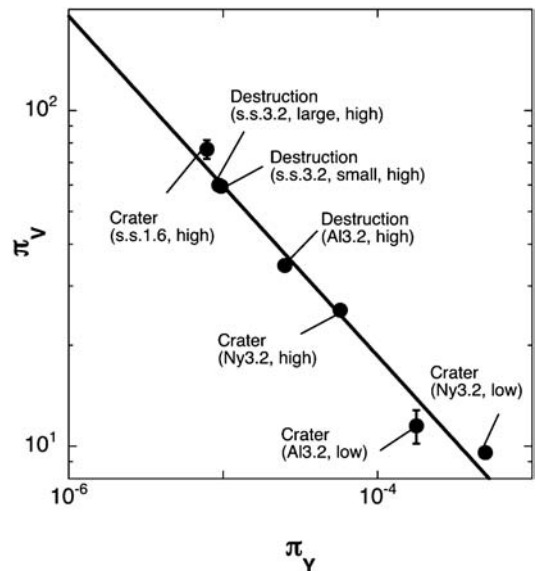


Fig. 11. Relationship between a crater volume and a normalized target strength for gypsum [9].

ある。この様に石膏クレーターは、玄武岩と比べると同じ体積のクレーター孔をあけるために必要な π_Y が小さいことがわかる[10]。これは、石膏のような多孔質物質では玄武岩のような緻密な岩石に比べて、クレーターの形成には、より大きな衝突速度が必要とすることを意味している。

7. おわりに

ここで紹介した惑星科学に関する衝突実験以外にも数多くの研究が理論・実験により行われている。特に最近のトピックスとしては、 10 km s^{-1} を超える超高速の衝突実験がレーザー照射加速により可能になったことである。この技術は阪大レーザー研の高強度レーザーを用いた技術であり、 $100 \mu\text{m}$ 程度の金属球にレーザーを照射し、照射点から発生するプラズマにより、金属球を加速する。地球や月に衝突する小惑星の平均速度は 15 km s^{-1} を超えていることを考えると、このような新しい技術を用いた惑星衝突の研究が今後大きく発展すると思われる。月のクレーターなどでよく観察される衝突メルトが作る地形などは、このような高速度衝突による研究が必須である。また、白亜紀の恐竜絶滅を引き起こしたと言われる地球への小惑星衝突の研究には、衝突蒸気雲という衝突時に発生する岩石蒸気に関する実験が必要である。この蒸気雲発生には地球脱出速度を超える高速度での衝突が必須であり、このような速度での定常実験が今後のこの分野の課題であると言える。

謝 辞

本論を執筆するに際し、実験装置の製作を担当して下さった北海道大学低温科学研究所技術部の中坪俊一氏に深く謝意を表します。

参考文献

- [1] K. Holsapple, I. Giblin, K. Housen, A. Nakamura, E. Ryan: in *Asteroids III*, eds. W.F. Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi, R. Binzel (Univ. Arizona Press, Tucson, 2002), pp. 443.
- [2] H. Mizutani, Y. Takagi, S. Kawakami: *Icarus*, **87**, 307 (1990).
- [3] K.R. Housen, K.A. Holsapple: *Icarus*, **84**, 226 (1990).
- [4] K.R. Housen, K.A. Holsapple: *Icarus*, **163**, 102 (2003).
- [5] Y. Shimaki, M. Arakawa: *Icarus*, **218**, 737 (2012).
- [6] M. Arakawa, D. Tomizuka: *Icarus*, **170**, 193 (2004).
- [7] M. Arakawa, J. Leliwa-Kopystynski, N. Maeno: *Icarus*, **158**, 516 (2002).
- [8] M. Yasui, M. Arakawa: *Icarus*, **214**, 754 (2011).
- [9] M. Yasui, M. Arakawa, S. Hasegawa, Y. Fujita, T. Kadono: *Icarus*, **221**, 646 (2012).
- [10] K.R. Housen, K.A. Holsapple: *Icarus*, **211**, 856 (2011).
- [11] W. Benz, E. Asphaug: *Icarus*, **142**, 5 (1999).

[2014年1月7日受付, 2014年1月14日受理]

© 2014 日本高圧力学会