

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 3 月 30 日現在

機関番号：51601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22740300

研究課題名（和文）多孔質小惑星を模擬した標的における衝突破片速度の測定

研究課題名（英文）Antipodal velocity for laboratory impact experiments on porous targets.

研究代表者

道上 達広（MICHIKAMI TATSUHIRO）

福島工業高等専門学校・一般教科・准教授

研究者番号：60369931

研究成果の概要（和文）：小惑星探査機はやぶさの観測データから、小惑星イトカワのような 500m サイズの小さな天体表面にも多くの衝突破片(岩塊)によって覆われていることが明らかになった。しかしながら、低重力の小惑星が、なぜ多くの破片を捕獲、保持できたのか分かっていない。そこで本研究では、観測された小惑星の空隙率が高いことに注目し、小惑星を模擬した多孔質物質に対して高速度衝突破壊実験を行い、飛び出した破片速度が、空隙率などの衝突条件によってどのように変わるかを詳細に調べた。その結果、破片速度を代表する衝突反対点の破片速度は標的の空隙率よりも衝撃波の減衰率に強く影響を受けることが分かった。

研究成果の概要（英文）：The surface of asteroid 25143 Itokawa is covered with numerous boulders although gravity is very small compared with that of other asteroids previously observed from spacecraft. The bulk porosity of Itokawa is ~40%, which is larger than that of asteroid Eros. Impact experiments on porous targets were carried out, in order to investigate the relationship between the ejecta velocity and the porosity of the target on catastrophic disruption. The result shows that antipodal velocity is mainly dependent on the shock pressure attenuation of the target, and not so greatly on the porosity.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,200,000	360,000	1,560,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：固体地球惑星物理学

キーワード：惑星起源、進化、惑星探査

1. 研究開始当初の背景

太陽系が誕生したとき、原始太陽系には直径 10km 程度の微惑星と呼ばれる小天体が多数形成された。これらの微惑星は、互いに衝突をくりかえしながら惑星へと成長していった。小惑星はその過程で、先にできた木星の重力の影響を受けたと考えられている。現在の小惑星は、微惑星が成長しきれずにそのまま残ったものと、激しい衝突によって大きな天体が壊れてできたものが混在していると考えられている。しかしながら、形成過程について現在でも詳しいことは分かっていない。

2005 年、日本の探査機「はやぶさ」は直径 1km にも満たない小さな小惑星イトカワ到着し詳細な観測を行った。研究者の大きな驚きは、直径 1km にも満たない小さな小惑星イトカワの表面が、衝突破壊などによって形成された多数の破片（岩塊）によって覆われていたことである。以前の研究では、重力が非常に小さいため、天体の破壊によって飛び出した破片を重力的に捕獲することができず、その表面には破片はほとんどないと考えられていた。

衝突破片が再び天体表面に降り積もることができるかどうかは、天体の脱出速度と破片の速度によって決まる。過去の小惑星衝突を模擬した室内実験では、玄武岩など空隙率の低い標的に対する実験が主であり、これだと破片速度が直径 1km の天体の脱出速度を大きく上回り、降り積もることはできない。一方、近年、探査機によって観測された小惑星は空隙率が高く、小惑星イトカワの空隙率は 40% にも及ぶ。地球の一般的な岩石の空隙率が数% であると考えるといかに高い値か分かる。天体の空隙率が高いと、衝突によって飛び出す破片の速度が遅いことは以前より

予想されていた。

2. 研究の目的

小惑星表面に多数の破片が存在するのは、小惑星の空隙率が高いことが関係していると考えられる。空隙率が高いことは、衝突によって生じた衝撃波が空隙によって効率的に減衰されることを意味しており、この衝撃の緩和により破壊によって飛び出す破片の速度も遅いことが推測される。空隙率が高い標的に対する衝突実験データは、これまでの研究において十分とはいえない。そこで本研究では、空隙率の高い多孔質物質に対する衝突破壊実験を行い、実験条件を変えて衝突破片速度を調べることを目的とした。

3. 研究の方法

小惑星の衝突破壊現象を明らかにするために、小惑星模擬物質として平均粒径 0.2mm の豊浦標準砂をセメントで固めたものを使用した。かさ密度 1550kg/m^3 、圧縮強度 $3.2 \pm 0.9\text{MPa}$ 、引張強度 $\sim 0.8\text{MPa}$ 、音速 $2280 \pm 60\text{m/s}$ である。このような標的を用いた理由として、岩石に近い動的破壊強度を示すこと（後述）、空隙率が小惑星イトカワと同じ 40% であること、材料が均質で実験結果の再現性が良いこと、加工が容易であることなどが挙げられる。

衝突実験は JAXA 宇宙科学研究所の 2 段式軽ガス銃を用い、衝突条件（衝突速度、標的サイズ）を変化させ、標的を完全破壊させた。弾丸には物性の良く分かっている直径 7mm のナイロン球（質量 0.213g）を用い、衝突角度は標的面に対して垂直である。衝突の際の真空度は 0.40Torr 以下で、2 台の高速度カメラ（共に 2000 コマ/秒以上）を互いに垂直な方向から撮影することによって、衝突破片速

度を測定することが可能である。

今回行った実験は、大きく分けて以下の3つである。(1) まず、標的サイズ一定(直径 9.0cm の球)のもとで弾丸の衝突速度を 2.48-6.76km/s の範囲で変化させ、実験を行った。(2) 次に衝突速度一定(約 2.8km/s)のもとで標的サイズを直径 5.3cm, 7.6cm, 8.9cm で変化させ、実験を行った。

(3) 続いて衝突破片速度の空隙率依存性を調べるために、標的として先行研究(クレーター形成実験; Michikami et al., 2007) で使用したガラスビーズ焼結体を作成した。ガラスビーズは、焼結温度を変えることで、空隙率を広い範囲にわたって変えられる人工物体であり、高温電気炉に入れて加熱し、焼結させて固める。今回は直径 8cm、高さ 4cm の円柱形で、空隙率 2.4% から 60% までの標的を用いた。弾丸は上記と同じ直径 7mm のナイロン球を用いた。

4. 研究成果

衝突破片速度の代表値として、衝突の反対点での破片速度(反対点破片速度)が先行研究でもよく調べられている。このため、過去の玄武岩などの実験結果と比較するには、反対点破片速度を測定することが重要である。また、Fujiwara and Tsukamoto (1980)によれば、総質量にして 70-80% を占める破片の速度は、反対点破片速度の 2 倍以下であることが報告されている。このように、反対点破片速度を測定することで、衝突条件の違いによる破片速度全体の傾向を知ることができる。実験結果は以下になる。

(1) 標的サイズ一定(直径 9.0cm の球)のもとで弾丸の衝突速度と反対点破片速度の関係を示したのが Fig. 1 になる。ここで、反対点破片速度は弾丸の衝突速度に比例していることが分かる。これは衝突点付近での

発生圧力が衝突速度の増加により大きくなるためであると考えられる。

一般に小惑星帯における小惑星同士の天体衝突速度は平均 5km/s であり、仮に今回の実験結果をそのまま、天体衝突に適用できたとすると、小惑星帯における反対点破片速度は~4m/s ということになる。この結果はもちろん仮の見積もりで、今回の弾丸、標的物質で、弾丸直径 7mm に対して標的(球)が直径 9cm の場合である。特に、反対点破片速度は、衝突点付近の発生圧力、標的中における衝撃波の減衰率、標的の形状、および標的/弾丸の大きさの比などによって決まることが推測される。

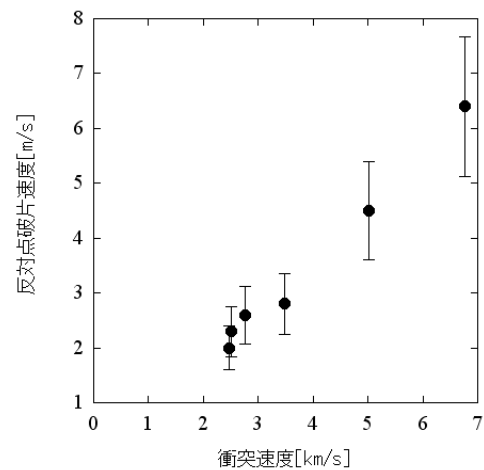


Fig. 1. 弾丸の衝突速度と反対点破片速度。標的は直径 9cm の砂をセメント固めた人工物。今回の破片速度は実験室における速度であり、弾丸と標的の重心速度ではないが、その場合でも誤差の範囲に含まれる。破片全体では、衝突速度 5km/s においても、小惑星イトカワの脱出速度(0.2m/s)以下の破片が一部観測された。また同じ方向に飛び出した破片の中にも、相対速度がイトカワの脱出速度よりも遅い破片もあった。破片全体の速度については、今後も詳細に解析を続ける予定である。

(2) 次に標的/弾丸の大きさの比によって、衝突点破片速度がどのように変わるのかを調べるために、衝突速度一定(約 2.8km/s)のもとで標的サイズを直径 5.3cm, 7.6cm, 8.9cm で変化させ、実験を行った結果が表 1 である。

標的/弾丸の大きさ比が大きくなるにつれて、反対点破片速度は小さくなるのが分かる。過去の天体衝突の数値計算(Love and Ahrens, 1996)では、標的/弾丸の大きさ比が2倍で、衝突破片速度が1桁近く大きくなることが知られているが、空隙率の高い標的で行った今回の実験結果も、それと矛盾しない結果となっている。

表1 衝突速度一定(~2.8km/s)で標的直径 D_T [cm]を変えた場合の反対点破片速度。弾丸直径 $D_p=0.7$ cm。標的は砂をセメント固めた人工物。

	球の直径 D_T [cm]	D_T/D_p	反対点破片速度[m/s]
s1260	5.32±0.06	7.6	11.0±2.0
s1261	7.56±0.12	10.8	4.3±0.8
s1263	8.89±0.08	12.7	2.6±0.5

(3) 続いて衝突破片速度の空隙率依存性を調べるために、ガラスビーズ焼結体で行った衝突実験の結果を表2に示す。今回の実験では、初めに衝突実験結果の再現性を見るために、空隙率~40%の標的に対して同じ衝突速度で3回実験を行った(s4,s5,s6)。反対点破片速度は(20-25)±3m/sと良い再現性が見られた。

表2 ガラスビーズ焼結体における反対点破片速度。焼結温度を変えることで空隙率を変えることができる。s9とs10は砂をセメント固めた人工物の反対点破片速度を示す。標的は直径8cm、高さ4cmの円柱形。

	空隙率 [%]	衝突速度 [km/s]	圧縮強度 [MPa]	反対点破片速度 [m/s]
s1	2.4	2.14	245±31	33±6
s2	10	4.18	245±31	70±14
s3	23	3.80	34.2±4.6	33±6
s4	38	1.32	5.5±2.5	25±5
s5	38	1.36	5.5±2.5	20±4
s6	40	1.30	5.5±2.5	23±4
s7	40	2.33	5.5±2.5	28±5
s8	60	1.22	0.8±0.4	20±5
s9(*)	40	1.30	3.2±0.9	3.8±0.4
s10(*)	40	2.36	3.2±0.9	13±2

今回の実験結果では、衝突速度 2.4km/s 以下だと空隙率の違いによる反対点破片速度の大きな違いは見られなかった。

反対点破片速度は、空隙率よりも衝撃波の減衰率の方が影響が大きいことが予想される。ガラスビーズ焼結体は先行研究により衝撃波の減衰率は-2乗であることが分かっている。減衰率は玄武岩と(約-1.8乗)同程度である。砂をセメントで固めた標的の衝撃波の減衰率を見積もるために、同じ材料を用いて、1cmから6cmの厚みの異なる平板を作成し、衝突条件が同じで厚みだけ変えて反対点破片速度を測定した。その結果、反対点破片速度は平板の厚みの-3乗に比例して遅くなっていることが分かり、この標的における衝撃波の減衰率は-3であることがわかった。

そこで、空隙率が同じで、衝撃波の減衰率が異なる空隙率40%のガラスビーズ焼結体と砂をセメントで固めた人工物(円柱形に加工、空隙率は40%)の衝突実験の結果を比較した(s9とs4,s5,s6 or s7とs10)。その結果、砂をセメントで固めた標的の方が、反対点破片速度はかなり遅く、空隙率よりも衝撃波の減衰率の方が影響が大きいことが分かった。

過去の実験結果との比較

今回得られた結果を、過去の実験結果と比較する。衝突条件を比較する方法として、単位質量あたりの運動エネルギー(エネルギー密度)が挙げられる。エネルギー密度と反対点破片速度の関係を示したのがFig. 2になる。反対点破片速度は材質によって大きく異なり、同じ材質の標的だとエネルギー密度の0.7-0.8乗に比例することが先行研究により知られている。今回の実験も、その傾向を裏付ける結果となった。今回用いた砂をセメントで固めた標的は、反対点破片速度が遅く、

空隙率 50%の石膏(Okamoto and Arakawa 2009)とほぼ同じ値を持つことが分かった。また、ガラスビーズ焼結体は玄武岩よりも反対点破片速度が大きいことが分かった。

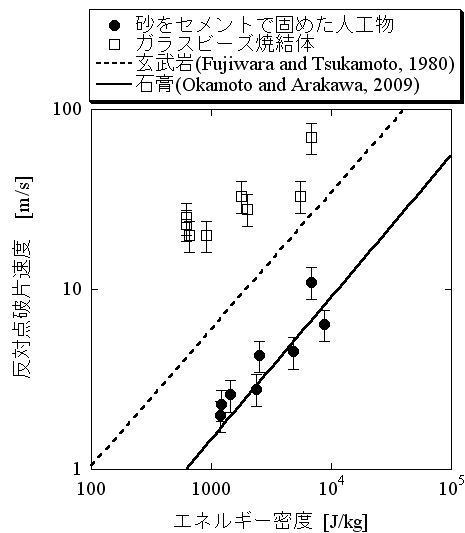


Fig. 2. エネルギー密度と反対点破片速度

過去の実験的研究では、エネルギー密度と最大破片質量/標的質量の関係も良く調べられている。砂をセメントで固めた標的のエネルギー密度と最大破片質量/標的質量の関係を調べたところ、玄武岩のサイズ分布(Takagai et al., 1984)と非常に近いことが分かった。これは、今回用いた標的が岩石に近い動的破壊強度を示すことを意味している。

今回の実験で関連した実験結果

今回の実験に関連して破片形状(3軸比)も調べた。室内実験における多孔質物質の破片の形状は、これまで実験データがなかったからである。その結果、多孔質物質の破片の形状も、実験条件によらず玄武岩などの実験結果と同じ法則が成り立つことがわかった。この新たな知見は、小惑星探査機「はやぶさ」が持ち帰ったサンプル粒子の形状の解析に

も役立てることができ、米国雑誌サイエンスにも共著者として掲載された。

まとめ

本研究では、完全衝突破壊における反対点破片速度を中心に測定し、反対点破片速度は標的の空隙率よりも衝撃波の減衰率に強く影響を受けることが分かった。砂をセメントで固めた標的は、空隙率、衝撃波の減衰率、動的破壊強度、および反対点破片速度が遅いことなどから考えても、小惑星を模擬する物質として妥当と言える。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] 査読有のみ(計2件)

(1) A.Tschiyama¹, M.Uesugi, T.Matsushima, T. Michikami, T. Kadono, T. Nakamura, K. Uesugi, T. Nakano, S. A. Sandford, R. Noguchi, T. Matsumoto, J. Matsuno, T. Nagano, Y. Imai, A.Takeuchi, Y. Suzuki, T. Ogami, J. Katagiri, M. Ebihara, T. R. Ireland, F. Kitajima, K. Nagao, H. Naraoka, T. Noguchi, R. Okazaki, H. Yurimoto, M. E. Zolensky, T. Mukai, M. Abe, T. Yada, A. Fujimura, M. Yoshikawa, J. Kawaguchi “Three dimensional Structure of Hayabusa Samples: Origin and Evolution of Itokawa Regolith” *Science* 333, 1125-1128. 2011

(2) T. Michikami, A.M. Nakamura, N.Hirat-a, “The shape distribution of boulders on asteroid 25143Itokawa: Comparison with fragments from impact experiments” *Icarus* 207,277-284. 2010

[学会発表] 関連する発表のみ(計5件)

道上達広 「衝突破片の形状分布と天体表面の粒子の形状」平成23年度スペース・プラズマ研究会 JAXA 宇宙科学研究所 (2012.2)

道上達広 「弾丸・標的のサイズ比と衝突破片速度の測定」第7回天体の衝突物理の解明 北海道大学低温科学研究所 (2011.11)

道上達広、城野信一 「脆性体の破片形状分布

とモデル計算」
地球惑星科学関連学会 2011 年合同大会 幕
張メッセ (2011.5)

道上達広、城野信一「衝突破片の形状と数値
モデル」日本惑星学会 2010 年秋季講演会 名
古屋大学 (2010.10)

T.Michikami, S.Sirono, “The shape distribution
of fragments in dynamic fragmentation:
Geometric approach.” poster presentation.
B04-0091-10 COSPAR 2010, Bremen, Germany
(2010.7) (国際学会)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

道上 達広 (MICHIKAMI TATSUHIRO)
福島工業高等専門学校・一般教科・准教授
研究者番号：60369931