

# 衝突破壊によって生じる破片のサイズ・形状分布 ～衝突可能性のある小惑星の構造を知るために～

小野瀬直美<sup>1)</sup>・長谷川直<sup>1)</sup>・奥平恭子<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>JAXA <sup>2)</sup>会津大学

Mass and shape distributions of fragments produced in impact disruptions  
～for better understanding of inner structure of asteroids which may hit the Earth～

Naomi ONOSE<sup>1)</sup>, Sunao HASEGAWA<sup>1)</sup> and Kyoko Okudaira<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>JAXA <sup>2)</sup>The University of Aizu

## Abstract

In order to protect ourselves from an asteroid hitting Earth, it is essential to understand the inner structure of it. Near-Earth asteroid 25143 Itokawa, which was observed by the Hayabusa spacecraft, is considered to be a rubble-pile body because of its low bulk density, high porosity, boulder-rich appearance, and shape (Fujiwara et al. 2006)<sup>1)</sup>. Many other asteroids are reported to be porous as shown in Britt et al (2002)<sup>2)</sup>.

Asphaug et al. (1998)<sup>3)</sup> calculated impacts on solid asteroids and rubble-pile ones. They showed rubble-pile asteroids absorb an impact generated shock well. Besides, small rubble-pile asteroids may be weakly-bounded, because the gravitational force between each rubbles are weak in them. When we push a part of such an asteroid, it may be broken.

In this study, we produced impact disruption experiments on homogeneously porous gypsum targets and measured masses and shapes of fragments as simulants of rubbles.

Key Words: Impact Disruption, Fragment, Mass Distribution, Shape Distribution, Rubble-pile

### 1 はじめに

地球に衝突する可能性のある天体が見つかった時、これに適正に対処するためには、小惑星の構成要素並びに内部構造を考慮することが不可欠である。本研究では、小惑星を形成する個々のがれきの形状、質量、速度の分布を実験的に検証することを目的として、一様な物質である石膏に対する衝突実験を行い、形成された破片を計測するものである。

### 2 ラブルパイル小惑星

2003年に打ち上げられた、小惑星探査機はやぶさの取得したデータから、近地球型小惑星イトカワの密度は $1.9\text{g/cm}^3$ である<sup>1)</sup>。この値をイトカワを構成する岩石は、はやぶさの近赤外分光観測並びに蛍光X線での観測から、普通コンドライトの組成にひとしいと考えられているが、その密度 $3.2\text{g/cm}^3$ と比べるとイトカワの密度は低く、内部に空隙を含むものと考えられる。このほかにも、数は少ないが密度を求められている小惑星のうち、空隙率の高いものは少なくない<sup>2)</sup>。これら

の小惑星は、比較的大きな母天体が破壊されて形成された破片が、自己重力で再び集積したもの、つまりラブルパイル(がれきの積み重ね)であると考えられる。図.1にFujiwara et al. (2006)の記者会見<sup>4)</sup>で使用された、小惑星イトカワの形成過程の模式図を示す。

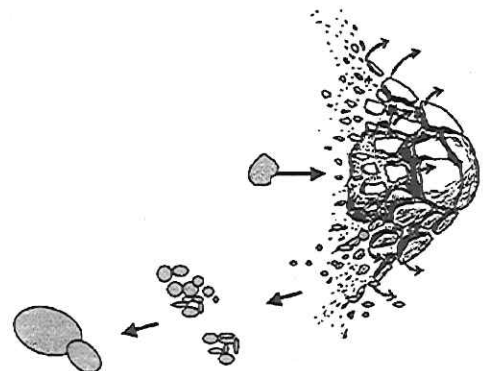


図.1 小惑星イトカワの形成過程の模式図：Fujiwara et al. (2006)より

ラブルパイル小惑星への衝突現象は、惑星科学的な、衝突による小惑星の進化の観点からも研究されてきた。ラブルパイル小惑星が個々の岩塊を集積させる力は自己重力のみであるため、とくに小さな小惑星においては、岩塊同士の結合は非常に弱いと考えられている。また、岩塊の境界や空隙によって、衝突により発生した衝撃波が散逸されやすいとも考えられている。Asphaug et al. (1998)<sup>3)</sup>は直径8mの玄武岩が衝突速度5km/secで、稠密なそしてラブルパイルなkmサイズの小惑星に衝突した場合をSPH法で計算した。稠密なターゲットへの衝突では、衝突点を中心とした衝撃波が形成され、高速度の破片が放出されているが、ラブルパイルな小惑星では、衝撃波は散乱され、放出破片の速度も小さくなっている。Asphaug et al. (1998)は、小惑星の衝突進化の研究を目的としているため、本例は衝突事案だが、地球に衝突する危険性のある小惑星の軌道をそらす際に、爆発、衝突などの手段をとる場合には、同様のことが起こりうると考えられる。また、さらに小さな小惑星の場合には、衝突によりある部分だけが放出されることもあるかもしれない。

### 3 石膏に対する衝突破壊実験

ラブルパイル小惑星を構成する個々の岩塊の形成法は、母天体の衝突破壊であると考えられる。そこで本研究では、石膏ターゲットに対する衝突破壊実験を行い、破片の質量、形状を計測した。

ターゲットは、粉末状の半水石膏を水で混和し、型に入れて固め、室温で乾燥させたもの、飛翔体は、特に断らない限り、7mmナイロン球である。宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を用い、飛翔体を1.77km/secから4.6km/secで衝突させた。

実験結果の例を図.2に示す。今回実験を行った例では、衝突後の最大破片質量を衝突前のターゲット質量で割った $m_1 / M_t$ の値が0.2から0.4の範囲である。石膏に対する衝突においては、衝突点から放射状に広がるradial crackが発達しやすいため、円錐状の破片が卓越するcone型破壊が見られる。また、衝突により発生した衝撃波がターゲット内で減衰しやすいため、ごく薄いターゲットの場合を除いて、裏面や側面からのスポールが発生しない。これに対して、玄武岩、モルタルなどのターゲットへのkm/secオーダーでの高速度衝突では、ターゲット内部で衝撃波が薄く、減衰しにくく、ターゲット表面をはがれるスポール破壊が見られるため、core型破壊と呼ばれる。一方で、低速度衝突においては、衝突により発生する衝撃波も厚くなり、radial crackが進展する時間的余裕があるため、玄武岩に対する衝突においてもcone型破壊が観測される。

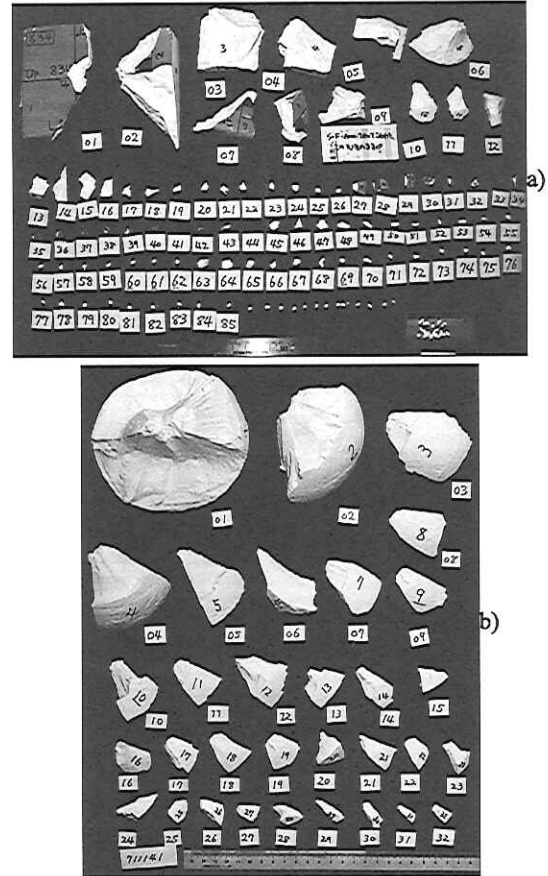


図.2 石膏ターゲットの衝突破壊により形成された破片。飛翔体はともに7mmナイロン球 a) 直方体ターゲットに対する1.77 km/secでの衝突 b) 球形のターゲットに対する3.42 km/secでの衝突

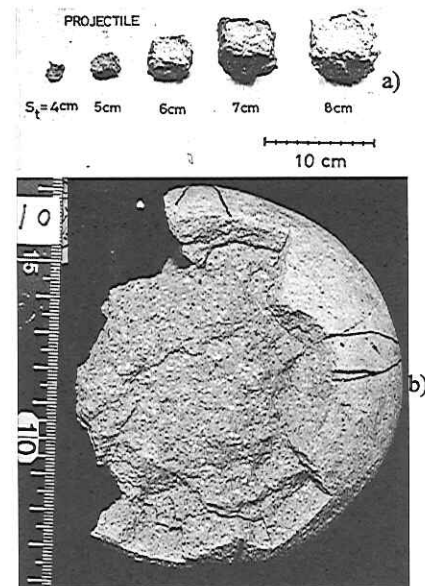


図.3 core型破壊例 a) 玄武岩への2.6km/secでの高速度衝突(Fujiwara et al. 1977)<sup>5)</sup> b) モルタルへの3km/secでの高速度衝突

個々の破片の質量を横軸にとり、その質量より重い破片の個数を縦軸にとると、図.4になる。衝突破壊により得られた破片はクレーター形成により得られたものよりも大きく、その質量分布の傾きはなだらかになる。

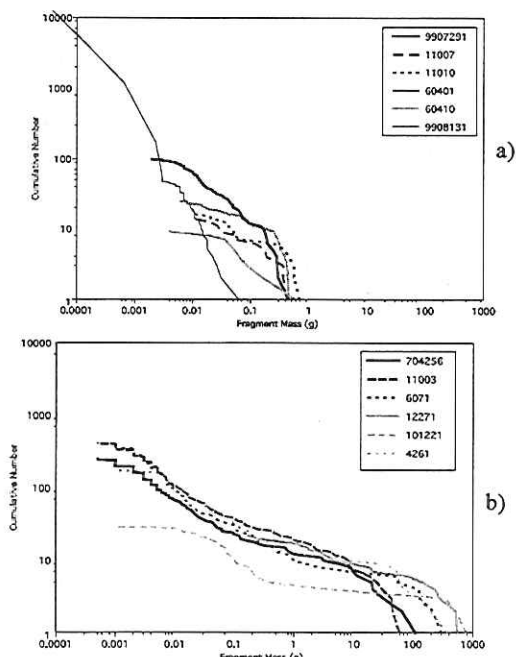
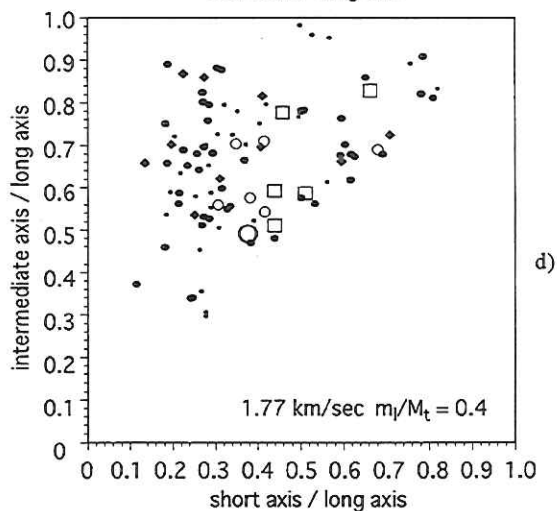
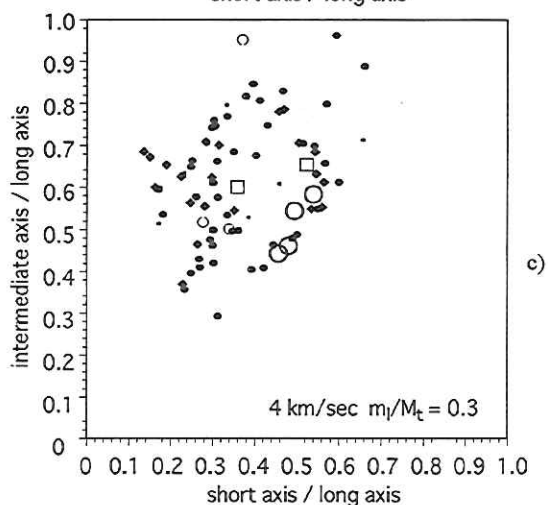
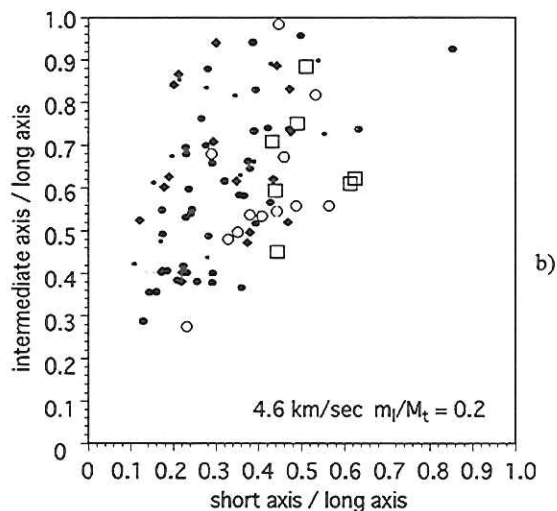
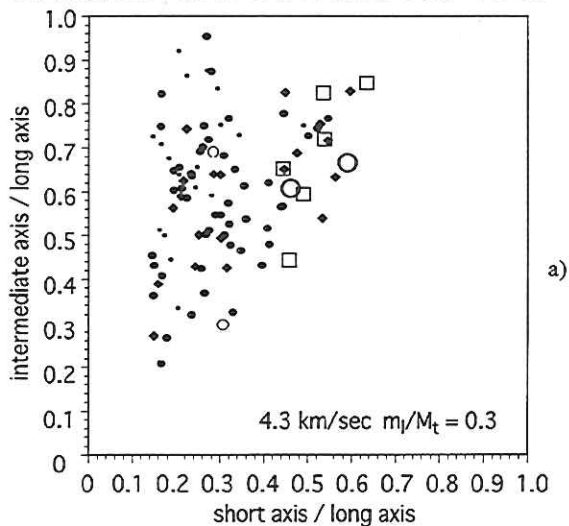


図. 4 破片の質量分布 a)衝突クレーター形成によるもの。ひとつだけ細かい領域まで計測した例は篩によるもの。b) 衝突破壊によるもの。

破片の形状を比較すると、衝突クレーター形成においては、形が計測できるほどの大きな破片の多くがスポール破片であるため、そのほとんどが板状から棒状であるが、破壊により形成された破片は、比較的一様に分布している。サイズの大きな破片は、radial crackにより分割されたターゲットの本体であるため、3軸の値が比較的近い傾向にあると考えることができる。



Fragment Mass (g)

- $m < 0.01$
- $0.01 < m < 0.1$
- ◆  $0.1 < m < 1$
- $1 < m < 10$
- $10 < m < 100$
- $100 < m$

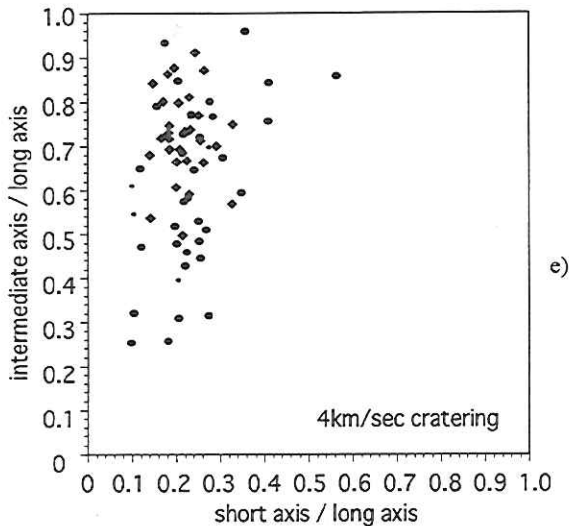


図.5 破片の形状分布 a)からd)は衝突破壊によるもの。e)は衝突クレーター形成をいくつかまとめたもの。点の大きさと種類は破片のサイズを表している。

#### 4 まとめ

石膏に対する衝突破壊により形成される破片は、軸比のバリエーションに富んでいる。これは、衝突クレーター形成により放出される破片のうち大きなもののほとんどが薄いスポール破片であることと対照的である。大きくて、軸比がともに1に近い破片はradial crackによりターゲットが分割されてできたcone型であると考えられる。

破片の質量分布では、ほぼ同じ大きさの破片が10個程度あり、グラフの急激な立ち上がりが見られるが、その後やや緩やかな部分がみられ、さらに細かい領域では、急激な増加がみられる。これはそれぞれ、radial crackにより比較的均等に分割された大きな破片、表面から放出されたspall破片、細かくて内部から放出された破片の質量分布に依存していると考えられる<sup>6)</sup>。ただ、本研究では、最大破片の質量が元のターゲットの0.3程度であるものばかりであるため、より広い範囲での実験が望まれる。

Takagi et al. (1984)<sup>7)</sup>による、玄武岩と葉鱗石に対する低速度衝突破壊実験も、本実験と同じく3領域に分かれているが、お互いにデータのばらつきが大きいので、詳細な検討が必要である。

#### 5 謝辞

この実験は、JAXA宇宙科学研究所の共同利用設備、新型2段式系ガス銃を用いて行いました。スペースプラズマ委員会の皆様、銃のオペレーターの皆様に深く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) Fujiwara, A., Kawaguchi, J., Yeomans, D. K., Abe, M., Mukai, T., Okada, T., Saito, J., Yano, H., Yoshikawa, M., Scheeres, D. J., Barnouin-Jha, O., Cheng, A. F., Demura, H., Gaskell, R. W., Hirata, N., Ikeda, H., Kominato, T., Miyamoto, H., Nakamura, A. M., Nakamura, R., Sasaki, S., and Uesugi, K., *The Rubble-Pile Asteroid Itokawa as Observed by Hayabusa*, Science, Vol. 312 no. 5778 pp. 1330-1334, 2006.
- 2) Britt, D. T., Yeomans, D., Housen, K., and Consolmagno, G., Asteroid density, porosity, and structure, Asteroid III, pp. 485 – 500, 2002.
- 3) Asphaug, E., Ostro, S. J., Hudson, R. S., Scheeres, D. J., and Benz, W., *Disruption of kilometer-sized asteroids by energetic collisions*, Nature 393, pp.437-440,1998.
- 4) Fujiwara, A. Science記者会見用スライドより, 2006.
- 5) Fujiwara A., Kamimoto G., and Tsukamoto A. 1977. Destruction of basaltic bodies by high-velocity impact. Icarus 31: 277-288
- 6) Onose 2007 Dr. thesis
- 7) Takagi Y., Mizutani H., and Kawakami S. 1984. Impact fragmentation experiments of basalts and pyrophanites. Icarus 59: 462-477

(2011年1月25日受付, 2011年5月1日受理)