

衝突破片の形状分布と小惑星イトカワ母天体の天体衝突

○道上達広（近畿大学）、アクセル・ハグーマン（オープン大学）、門川隆進（京都大学）、吉田明史（近畿大学）、島田玲（京都大学）、長谷川直（JAXA）、土山明（京都大学）

はじめに

室内実験において、衝突破壊における破片の形状の分布は、実験条件に依らず、特徴的かつ普遍的な分布であると言われていた。それは破片の長軸 a : 中間軸 b : 短軸 c の比が、分布に広がりはあるものの、平均で $2:\sqrt{2}:1$ になっていることである。すなわち平均で b/a が 0.7 、 c/a が 0.5 程度になっている[1]。しかしながら、この破片形状は、衝突エネルギー密度 Q が 4000J/kg 以上と大きく、激しいカタストロフィック破壊によって得られたデータであった（ここで Q は標的が単位質量あたりに受ける弾丸の運動エネルギーで、弾丸の運動エネルギー ÷ 標的の質量 で定義される）。一方、クレーター形成 (Q が 200J/kg 以下) における衝突破壊メカニズムは、カタストロフィック破壊のそれと大きく異なり、クレーター形成によって飛び出した破片は、一般的に平べったいものが多い。すなわち、 c/a の平均値は小さいが、なぜこのような小さい値をとるのかよく分かっていない。過去の研究において、クレーター形成からカタストロフィック破壊まで、破壊によって飛び出した岩石の破片の形状を系統的に調べた実験的研究はない。そこで、本研究では、衝突エネルギー密度 Q を 150J/kg (クレーター形成) から 15000J/kg (カタストロフィック破壊) の広い範囲で衝突実験を行い、玄武岩の衝突破片形状の変化を調べることを目的とした。なお、本論文は Michikami et al. (2016)[2]の要旨になる。

実験概要

実験は JAXA 宇宙科学研究所にある 2 段式軽ガス銃を使用し、弾丸に直径 7.14mm 、質量 0.218g のナイロン球を用いた。標的の材料として密度 3000kg/m^3 の玄武岩を用い、一辺が 5cm から 15cm の立方体に対して衝突実験を 23 ショット行った。弾丸の衝突速度は 1.60km/s から 7.13km/s の範囲である。衝突の際の真空度は 200Pa 以下で、高速度カメラで撮影することによって、放出された破片の様子を調べた。衝突破壊によって生じた破片は、 b 軸の大きさが 4mm 以上のものをノギスで直接測定した。実験は 3 回に分けて行い、2 回目と 3 回目については飛び出した破片がチャンバーにぶつかって 2 次破壊が起こらないようにチャンバー内をウレタンシートで覆った。なお、標的の形状を立方体だけでな

く、球、直方体、平板についても 5 ショット行ったが、この結果については[2]を参照して頂きたい。

実験結果

今回の実験では、衝突エネルギー密度 Q ごとに 4 つのタイプに分けることができた。

タイプ I : クレーター形成 ($Q < 250 \text{ J/kg}$)

タイプ II : 標的の表面、側面、背面だけが壊れる破壊 ($250 \leq Q < 1050 \text{ J/kg}$)

タイプ III : コア型破壊 ($1050 \leq Q < 8000 \text{ J/kg}$)

タイプ IV : 中心にコアも残らず、完全に粉々になる破壊 ($8000 \text{ J/kg} \leq Q$)

各タイプ別の典型的な 3 軸比のダイヤグラムは、図 1 になる。横軸に c/a の値、縦軸に b/a の値を示している。図 1 の各ショットは衝突速度が $s2572$ を除いて、約 5km/s で、標的サイズの一辺は 5cm から 15cm まで変えてある。ここで分かることは、破片形状の b/a の平均値は Q に依存しないものの、 c/a の平均値は Q が小さくなるにつれて、小さくなる傾向にある。

立方体の標的 23 ショットにおいて、破片軸比の平均値と Q の関係を示したのが、図 2 である。横軸に Q の値、縦軸に各ショットにおける b/a の平均値と c/a の平均値を示してある。図 1 と同じく、破片形状の b/a の平均値は Q にあまり依存せず、一定もしくは、若干の左下がりのようにみえる。一方、破片形状の c/a の平均値は、 Q が 1000 J/kg 以下において、 Q が小さくなるにつれて、小さくなっていることが分かる。すなわち、 $Q \sim 1000 \text{ J/kg}$ の破壊は、オリジナルの標的質量に対して、壊れた後の最大破片が半分になるカタストロフィック破壊を意味するので、カタストロフィック破壊でない破壊では、 Q が小さくなるにつれて、破片が平べったくなっている傾向を意味している。例えば、図 2 の一番左下のプロットされる c/a の平均値 0.17 は、 $Q=150 \text{ J/kg}$ のときの破壊であり、過去の実験の c/a の平均値 ~ 0.5 よりも極端に小さい。

本研究では、破片軸比の Q 依存性以外にも、破片軸比の破片質量依存性、標的形状依存性を調べたが、結局のところ、破片軸比は Q に一番強く依存することが分かった。過去の岩石を用いた実験ではこのような系統的な傾向は示されず、今回の実験で初めて明らかになった。

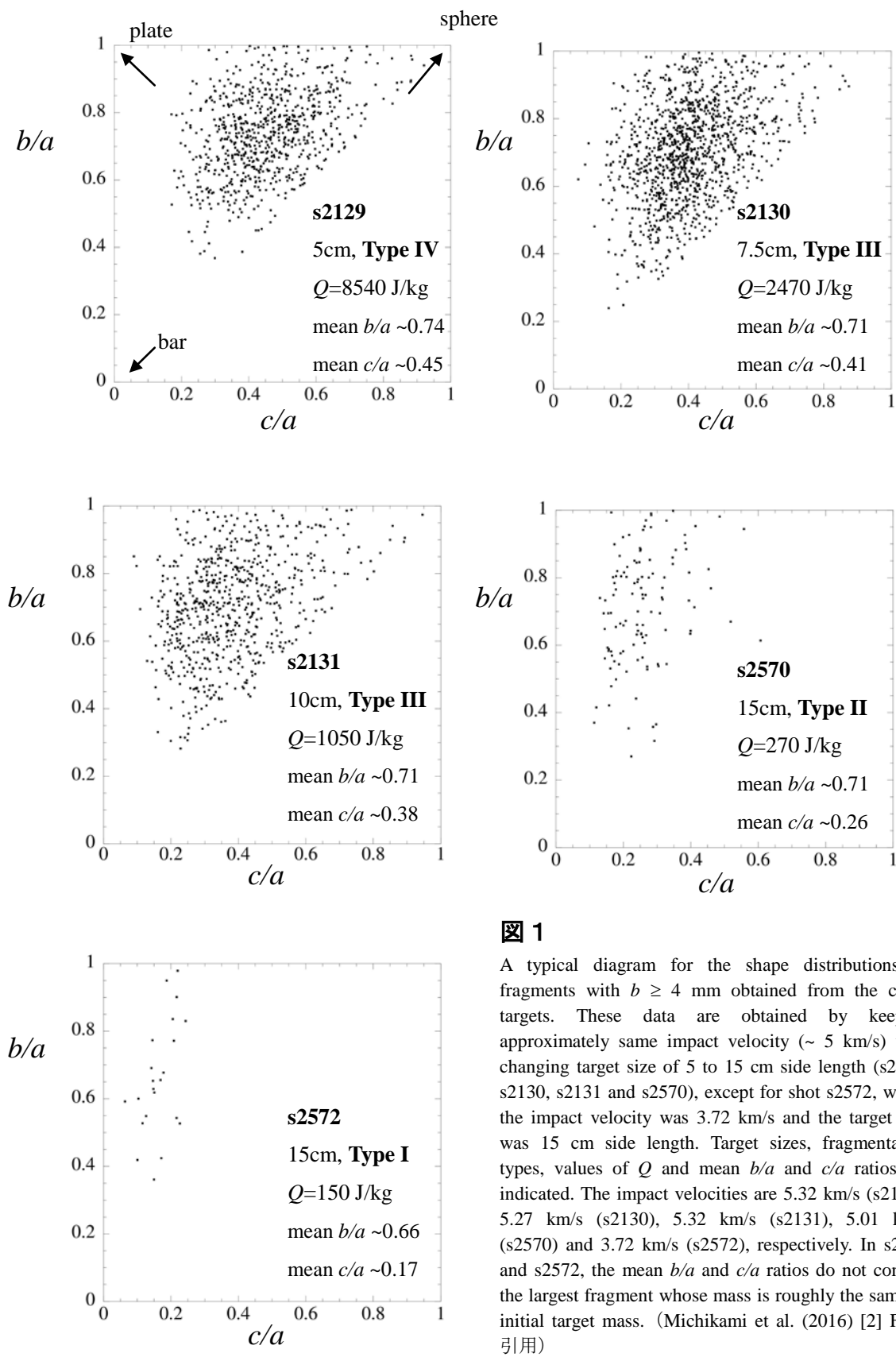


図 1

A typical diagram for the shape distributions of fragments with $b \geq 4$ mm obtained from the cubic targets. These data are obtained by keeping approximately same impact velocity (~ 5 km/s) with changing target size of 5 to 15 cm side length (s2129, s2130, s2131 and s2570), except for shot s2572, where the impact velocity was 3.72 km/s and the target size was 15 cm side length. Target sizes, fragmentation types, values of Q and mean b/a and c/a ratios are indicated. The impact velocities are 5.32 km/s (s2129), 5.27 km/s (s2130), 5.32 km/s (s2131), 5.01 km/s (s2570) and 3.72 km/s (s2572), respectively. In s2570 and s2572, the mean b/a and c/a ratios do not contain the largest fragment whose mass is roughly the same as initial target mass. (Michikami et al. (2016) [2] Fig.5 引用)

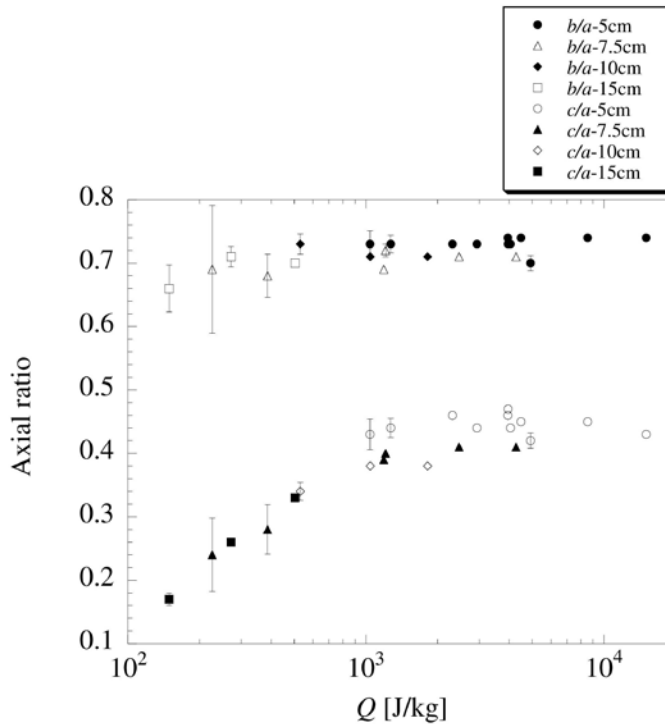


図 2

The mean b/a and c/a ratios vs. Q . These data are for fragment shapes from the 23 impact experiments on cubic targets, and cover a wide range of Q (150-15000 J/kg). The standard error bar of each shot is given. In the case of small (i.e. < 0.01) standard errors, the error bar is smaller than the size of each symbol. The relatively large standard errors seen at small Q with less than 1000 J/kg are due to the small number of fragments with $b \geq 4$ mm. Note that the mean c/a ratios decrease with decreasing Q when Q is less than 1000 J/kg. (Michikami et al. (2016) [2] Fig.8 引用)

小惑星イトカワへの応用

今回の実験結果を小惑星イトカワに応用することを考える。小惑星探査機はやぶさのホームポジションにおける画像データから、小惑星イトカワの任意の大きなボルダー21個の見かけ上の3軸比を測定した。小惑星イトカワ表面にあるボルダーは、より大きなイトカワ母天体から、衝突破壊によって生じた破片と見なすことができる。21個のボルダーの c/a の平均値は0.46であった。これはカタストロフィック破壊と同程度の値である。つまり、小惑星イトカワの母天体は、かなり激しい破壊を受けた可能性がある。イトカワ母天体が激しい破壊を経験したことは、イトカワ微粒子の化学組成の分析結果からも指摘されている[3]。今回の実験結果とボルダーの軸比から予想される結論は、それを支持する結果となった。

参考文献

- [1] Fujiwara, et al. (1978) Nature 272, 602-603.
- [2] Michikami, et al. (2016) Icarus 264, 316-330.
- [3] Nakamura, et al. (2011) Science 333, 1113-1116.