

室内衝突実験における破片形状と体積の関係

○道上達広 (近大)、アクセル・ハガーマン (スターリング大)

今回の内容は、Michikami and Hagermann, *Icarus* 357 (2021) 114282 の2章に掲載された (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103520306011>)。以下はその要旨となる。

はじめに

過去の研究において、小惑星エロス、イトカワ、リュウグウ、ベンヌ等のボルダーサイズ分布の調査は行われているが、ボルダーの定義、測定方法などが研究者によって異なるため、定量的な比較は困難である。特に探査機からの画像からは、小惑星表面に存在するボルダーの2次元的な大きさ、形が主で、ボルダーの高さを含む3次元形状を見積もることは難しい。そのため、ボルダーの2次元的な大きさ、形から実際のボルダーの体積を求めるために、ボルダーの高さを仮定し、楕円体で近似することが多い。しかしながら、ボルダーの形状は楕円体よりも角ばった形をしていることから、楕円体では実際のボルダーの体積を大きく見積もっている可能性がある。

小惑星表面のボルダーの形状は、室内実験における衝突破片形状と類似していることが指摘されている (Fujiwara et al., 1978; Capaccioni et al., 1984, 1986; Durda et al., 2015; Michikami et al., 2016, 2018, 2019)。そこで、本研究では「ボルダーの形状=衝突破片形状」と仮定して、室内実験における衝突破片の大きさ(3軸長)と体積の関係を調査した。本研究の目的は、その調査を通じて、探査機で得られた画像からボルダーの体積をより正確に見積もる方法を確認することにある。

衝突破片の大きさの定義

衝突破片の形状は直交する3軸長を考え、大きい方から長軸、中間軸、短軸とすることが多い。本研究ではそれぞれの長さを a, b, c として扱う。探査機から得られた画像から解析する際、ボルダーの定義は研究者によって異なる。そこで、衝突破片の大きさの定義をそれらに基づいて5つに分類した。

$$(1) a \quad (2) \frac{a+b}{2} \quad (3) (ab^2)^{\frac{1}{3}} \quad (4) (ab)^{\frac{1}{2}} \quad (5) (abc)^{\frac{1}{3}}$$

(1) は、小惑星イトカワ(Saito et al. (2006))、小惑星リュウグウ(Sugita et al. (2019)) の初期ボルダー解析において定義されている。(2) はイトカワ、リュウグウのその後の詳細解析(Michikami et al., 2008, 2019)で、(3) (4) はイトカワの解析、Mazrouei et al. (2014)、Tancredi et al. (2015)でそれぞれ定義されている。実際のボルダーの体積を見積もる際、測定は難しいが短軸 c の値は重要である。そこで短軸 c を含む(5)を今回追加した。以降、簡単のため、上記(1)から(5)

で定義された衝突破片の大きさをそれぞれ、 D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 と表すことにする。

用いた衝突破片（衝突実験概要）

今回用いた室内実験における衝突破片は Michikami et al. (2016)に記載された破片である。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/m³ 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。今回のデータは、Michikami et al. (2016)の s2126 を主として、衝突速度が秒速 5km/s 前後で、標的の大きさを変えた場合のショット s2129, s2130, s2131, s2570, s2572 についてのデータも加えた（実験条件および実験結果は表 1）。

表 1 (Michikami & Hagermann, 2021, Table. 1 より)

Target properties and experimental results from the data of Michikami et al. (2016). M_i , M_f and Q are initial target mass, largest fragment mass and specific energy, respectively. The mass and shapes of the fragments with $b \geq 4$ mm are measured. In s2570 and s2572, the fragment count and the mean values of b/a and c/a do not contain the largest fragment whose mass is roughly the same as the initial target mass. The definition of k_2 is given in the text.

Shot number	Dimension [cm]	M_i [g]	Impact features			Fragments			k_2
			Velocity [km/s]	Q [J/kg]	M_f/M_i	Mean value of b/a	Mean value of c/a	Counted number ($b \geq 4$ mm)	
s2126	7.5 × 7.5 × 7.5	1240.4	6.99	4280	0.051	0.71	0.41	1659	0.65
s2129	5 × 5 × 5	360.9	5.32	3540	0.018	0.74	0.45	756	0.67
s2130	7.5 × 7.5 × 7.5	1227.1	5.27	2470	0.088	0.71	0.41	1194	0.65
s2131	10 × 10 × 10	2948.9	5.32	1050	0.211	0.71	0.38	686	0.65
s2570	15 × 15 × 15	10031.0	5.01	270	0.944	0.71	0.26	118	0.59
s2572	15 × 15 × 15	10058.0	3.72	150	0.997	0.66	0.17	23	0.47

結果と考察

飛び出した各破片の質量と 3 軸長 a, b, c を測定した。破片の体積は質量を密度 3000kg/m³ で割って求め、その体積から球相当径 D_s を求めた ($D_s = (\frac{6m}{\rho\pi})^{\frac{1}{3}}$, ここで m は質量、 ρ は密度)。図 1 に球相当径 D_s とノギスで測定した $D_1 - D_5$ の値の関係を示した。相関係数 R は、 D_1 では 1 軸長で定義しているため、若干低いものの、 $D_1 - D_5$ 全体として、 D_s と強い相関がある。とくに、 D_5 では 3 軸長で定義しているため、相関係数が 1 に近い。 k_x は D_s との関係における補正值を表し ($D_s = k_x D_x$, $x=1,2,3,4,5$)、 $k_x=1$ のとき、 $D_s=D_x$ となる。しかしながら、 $D_1 - D_5$ すべてにおいて、 k_x は 1 より小さい。これは次のことを意味する。過去の研究では、ボルダの大きさを $D_1 - D_4$ のいずれかで定義し、それらを球相当径として、 $\frac{\pi}{6} D_x^3$ ($x=1,2,3,4$) で体積を見積もっていた。実際の破片の体積は、 $\frac{\pi}{6} D_s^3$ となるため、 $k_x=1$ で、 $\frac{\pi}{6} D_x^3 = \frac{\pi}{6} D_s^3$ であれば問題ないが、 k_x は 1 以下であるため、 $\frac{\pi}{6} D_x^3$ ($x=1,2,3,4$) で体積を見積もった場合、実際の体積よりも大きく見積もっていることになる。

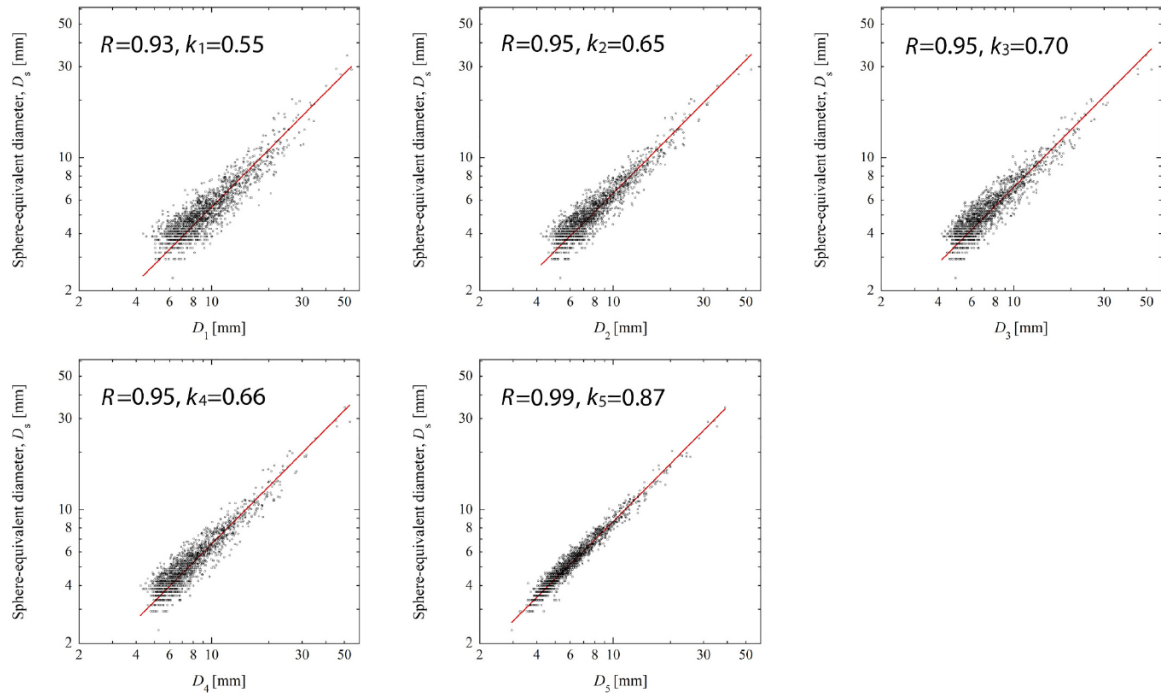


Fig. 1. Diagrams for the sphere-equivalent diameter, D_s vs. fragment sizes $D_1 - D_5$, where $D_1=a$, $D_2=a^2/b$, $D_3=(ab^2)^{1/3}$, $D_4=(ab)^{1/2}$ and $D_5=(abc)^{1/3}$, with a , b and c the maximum dimensions of the fragment in three mutually orthogonal planes ($a \geq b \geq c$). The correlation coefficients R are listed. When the sphere-equivalent diameter, D_s , is expressed as $k_x D_x$ (where $x = 1, 2, 3, 4, 5$), the value of k_x is calculated using least-squares and is listed for each fragment size. These fragments are obtained from shot s2126 in Michikami et al. (2016).

図1 (Michikami & Hagermann, 2021, Fig. 1): 球相当径 D_s と $D_1 - D_5$ の大きさの関係。 R は相関係数、 k_x は各図の平均の補正値を表し、 $k_x=1$ のとき、 $D_s=D_x$ となる。

軸長から実際の破片の体積を見積もる際、上記に示した補正値 k_x を用いれば、より正確に見積もることができる。例えば、今回 s2126 で測定した破片の総体積は 315cm^3 であり、 D_2 の補正値 $k_2=0.65$ を用いて総体積を見積もったところ 322cm^3 となった。今回の補正値を用いれば、かなり正確に破片の総体積を見積もれることを確認した。

次に $D_1 - D_5$ における破片のサイズ分布を D_s のサイズ分布と比較した (図2)。得られたべき指数 α は、 D_2 の場合がもっとも D_s に近いことが分かる (s2126 の場合)。 s2126 以外の実験条件におけるショットでの最適な破片の大きさの定義を調べるために、表1に示した他の5ショットのサイズ分布を調べ、図3に示した。横軸に破片の各ショットの軸比 c/a の平均値、縦軸にサイズ分布のべき指数を示してある。この結果から、破片のサイズの定義は、条件を変えても D_2 である程度、表せることが分かった。今回の室内衝突破片の解析から得られた知見は、探査機による小惑星ボルダーの定義に役立つと考えられる。つまり、ボルダーの大きさの定義として D_2 を用い、補正値 $k_2=0.65$ を用いれば、ボルダーの総体積をより正確に求めることができる。

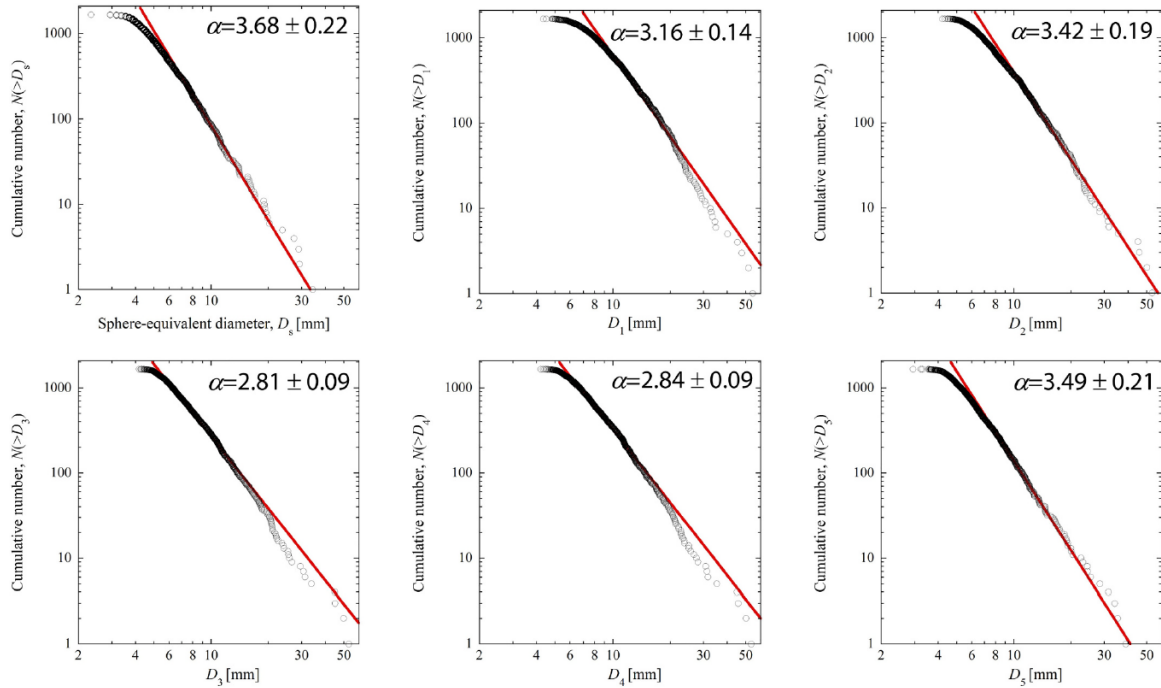


Fig. 2. Cumulative fragment size distributions for sphere-equivalent diameter, D_s and fragment sizes $D_1 - D_5$ for the data in Fig. 1. The value of the power-index α to the upper right of each graph is obtained by combining a maximum-likelihood fitting method with goodness-of-fit tests based on the Kolmogorov-Smirnov statistic and likelihood ratios (Clauset et al., 2009; Tancredi et al., 2015). The red line corresponds to the best fit power law for each data set. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

図 2 (Michikami & Hagermann, 2021, Fig. 2): 球相当径 D_s と $D_1 - D_5$ における破片のサイズ分布。

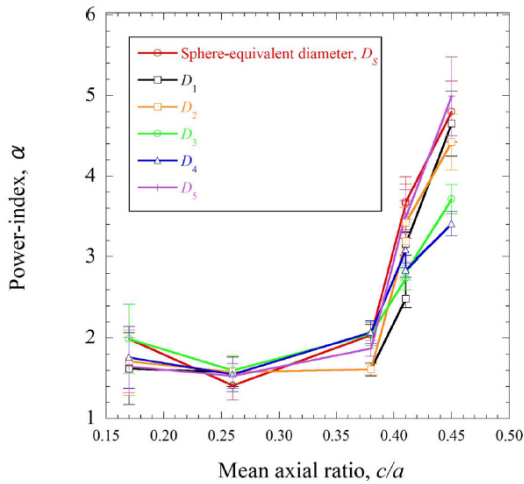


Fig. 3. Relationship between mean c/a ratio and power-index of the size distributions for the sphere-equivalent diameter, D_s and the fragment sizes, $D_1 - D_5$ of laboratory impact fragments obtained from shots s2126, s2129, s2130, s2131, s2570 and s2572 in Michikami et al. (2016). In s2570 and s2572, the fragment count, the power-indices and the mean values of b/a and c/a do not contain the largest fragment whose mass is roughly the same as the initial target mass. Even if the data of s2570 and s2572 processed including the largest fragments, almost all values of the power-indices fall within the error range shown (even when a data has the power-index of the outside of the error range, for the very few exceptions falling outside the error range the excess from the error range is very small).

図 3 (Michikami & Hagermann, 2021, Fig. 3): 各ショットごとの D_s と $D_1 - D_5$ のサイズ分布のべき指数

参考文献

- Capaccioni et al., 1984, Nature 308, 832-834.
- Capaccioni et al., 1986, Icarus 66, 487-514.
- Durda et al., 2015, Planet. Space Sci. 107, 77-83.
- Fujiwara et al., 1978, Nature 272, 602-603.
- Mazrouei et al., 2014, Icarus 229, 181-189.
- Michikami et al., 2016, Icarus 264, 316-330.
- Michikami, T. et al., 2018, Icarus 302, 109-125.
- Michikami, T. et al., 2019, Icarus 331, 179-191.
- Michikami & Hagermann, 2021, Icarus 357, 114282
- Saito et al., 2006, Science 312, 1341-1344.
- Sugita et al., 2019, Science 364. <https://doi.org/10.1126/science.aaw0422>.
- Tancredi et al., 2015, Icarus 247, 279-290.