

マグマ破碎メカニズム抽出のための溶岩破壊実験

An experimental study for magma fragmentation in volcanic explosion

野口里奈¹，大槻静香²，鈴木絢子³，長谷川直¹

1 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所，2 産業技術総合研究所，3 所属なし

火山灰の粒子形状解析は，噴火メカニズムの推定や噴火推移の予測のために重要である．火山の噴火形態には，マグマ噴火，マグマ水蒸気噴火，水蒸気噴火，ルートレス噴火などがあり，それぞれマグマや溶岩を破碎する物理メカニズムが異なる．火山灰は噴火活動に伴ってマグマが破碎されることにより生成される．マグマの破碎メカニズムには，マグマ中の揮発性成分の発泡や外部の水による急冷破碎などがあり，その寄与の度合いによって火山灰の構成種や構成比率，粒子サイズや形状などに違いが生じる．そのため，火山灰は噴火メカニズムの推定や噴火活動の推移予測の材料として注目されてきた．近年，粒子形状解析技術の発達により，数千粒単位の粒子群の粒子サイズや形状（円形度やアスペクト比など）の測定が，自動かつ短時間で行えるようになった（例えば，[1]）．さらに，クラスター分析などの統計解析手法を用いることで多変量データの分類が容易になった．例えば，Noguchi et al., in prep.[2] では，粒子形状自動測定顕微鏡を用いて円形度や包絡度などからなる粒子形状データセットを作成し，統計分析によって火山灰粒子の分類および噴火形態との対比を行った．また，多量画像群の機械学習技術も進歩している（例えば，[3]）．一方で，火山灰粒子形状データと火山の噴火形態の関係は検証中の段階であり，さらなる検証のた

めにはメカニズムのわかっている破碎によって生成される粒子群のデータが必要である．そこで本研究では，既存の溶岩の爆発的破碎における破片形状データを抽出するため，玄武岩質溶岩を衝突破壊し，その破片形状を調べた．

本研究では二段式軽ガス銃を用いて玄武岩標的（1辺10 cm程度の立方体を用意）に弾丸を打ち込み，破片を回収した．二段式軽ガス銃の真空チャンバー内に大型ラボジャッキを置き，その上に発泡スチロールボックスを設置した（図1）．Noguchi et al., in prep.[2] の手法では100–300 μm の破片のみ解析可能なため，そのサイズの破片を中心に回収する必要がある．



図1 本実験のシステム．

破壊するサンプルは玄武岩質とデイサイト質の溶岩を用意した（図2）．いずれも静岡県の子島市立公園 楽寿園にて譲り受けたもので，玄武

岩質のものは富士山起源（三島溶岩），デイサイト質のものは棒石山に起源を持つ．このうち玄武岩質のものについては，発泡度との関連を調べるため良発泡・低発泡の２種類を準備した．



図 2 本研究のターゲット試料．黒色が玄武岩質溶岩，白色がデイサイト質溶岩．

初年度である今年度は，特に 100–300 μm の破片を回収する方法の確立を目指した．標的の表面より銃側のところに，弾丸が通る穴を開けた発泡スチロール板を設置する．ある程度高速の細かい破片が発泡スチロールに貫入するので，ショット後に回収した発泡スチロールを d-リモネンで溶かして破片を分離することにした (cf. [4])．破片飛翔の様子は高速度カメラで観察しつつ，発泡スチロールボックスや標的の置き方を変えて，目的とするサイズの破片を回収するために最適な設定を決める．これらのショットは，直径 7 mm のナイロン球，衝突速度は約 7 km/s と約 2.5 km/s で行った．高速衝突が必要なのは，目的のサイズ範囲の破片数を稼ぐためである．今年度は，衝突速度 2 通り \times (玄武岩標的 2 種類 \times 2) + デイサイト質標的 = 10 ショットを実施した (表 1)．

約 7 km/s の衝突速度の場合，標的はいずれもカタストロフィックに破壊され，発泡スチロールボックスも大破した (図 3 左)．一方で，衝突速度約 2.5 km の場合は標的にクレーター

が形成され，発泡スチロールボックスの破損も微小であった (図 3 右)．いずれの場合も，ボックス内部に飛散した溶岩片が突き刺さっており，衝突破壊時のオリジナルの形状を残していると考えられる．d-リモネンを用いてこれらの破片を発泡スチロールからの分離を試みたが，溶かした際に粘性が高くなり，回収に時間がかかることが判明した．2 ショット (1A および 4A) 分の回収結果を表 2 に示す．

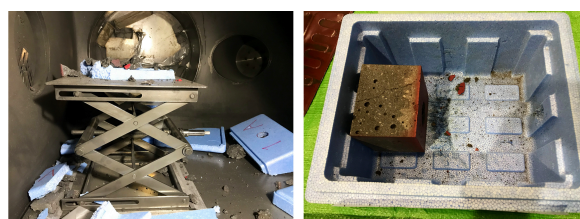


図 3 衝突速度の違いによる破壊モードの違い．左：カタストロフィック（衝突速度約 7 km/s），右：クレータリング（衝突速度約 2.5 km）

回収した 2 ショット分の試料について，産総研の粒子形状自動測定顕微鏡 (Morphologi G3STM, Malvern InstrumentsTM) を用いて粒子一つ一つの形状を測定した．粒子数は 1A で 1108 個，4A で 876 個であった．測定した形状パラメータは下記の 4 つである．

$$\text{アスペクト比} : A_r = \frac{W}{L}$$

$$\text{周囲長包絡度} : C_v = \frac{P_c}{P_g}$$

$$\text{面積包絡度} : S_d = \frac{A_g}{A_g + A_c}$$

$$\text{面積円形度} : H_c = \frac{4 \times \pi \times A_g}{P_g^2}$$

W : 短軸径, L : 長軸径, P_c : 凸包周囲長, P_g : 粒子の周囲長, A_c : 凸包面積, A_g : 粒子面積

上記 4 つの形状パラメータについて，本実験のサンプルと実際の噴火による火山灰サンプルとの比較を図 4 に示す．

表 1 実施した実験条件.

Target ID	Vesicularity/fragmentation mode	Calculated bulk density (g/cm ³)	Target mass (kg)	Impact velocity (km/s)	Largest fragment (kg)	2nd largest fragment (kg)
1A	dence/catastrophic	2.65	2.0988	6.589	0.177732	0.154601
1B	dence/cratering	2.65	2.0969	2.455	2.0888	
1C	dence/catastrophic	2.60	2.1047	6.990	0.202000	0.146527
1D	dence/cratering	2.63	2.1483	2.481	2.1398	
3A	vesicular/catastrophic	2.22	1.8258	6.970	0.5801	0.5253
3B	vesicular/cratering	2.24	1.8437	2.474	1.8363	
4A	vesicular/catastrophic	2.18	1.7665	6.990	0.292663	0.216739
5A	vesicular/cratering	2.05	1.5842	2.486	1.1719	0.3920
7A	dacite/cratering	2.50	1.9982	2.584	1.9898	
7B	dacite/catastrophic	2.50	2.0008	6.965		

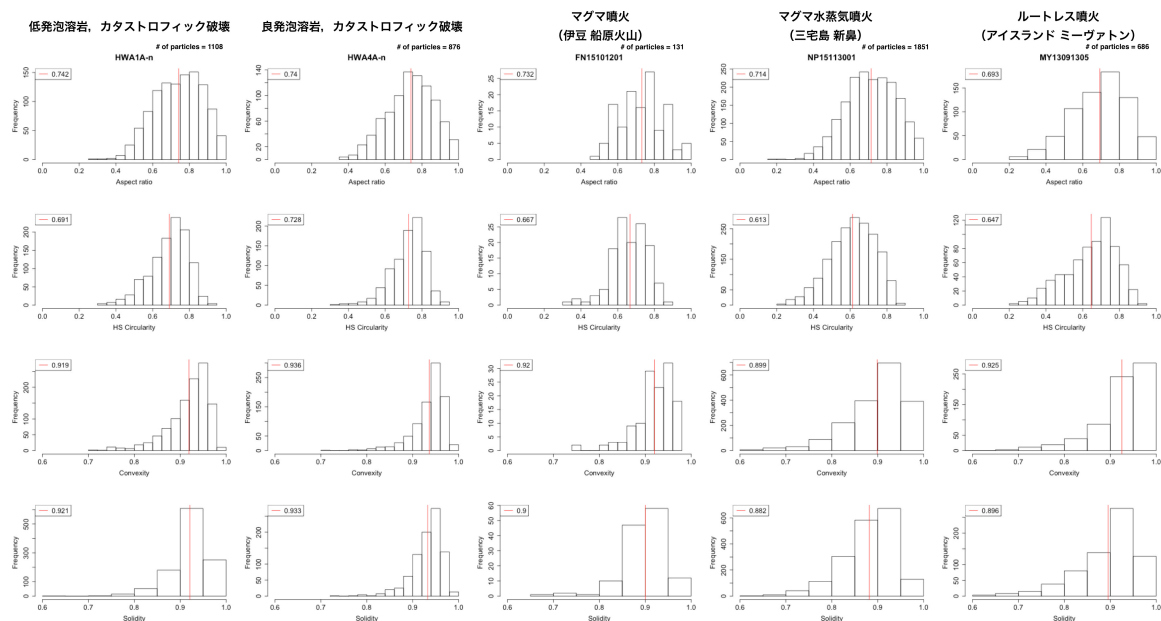


図 4 各サンプルにおける粒子形状の比較.

表 2 回収破片の粒度分布（質量 %）および質量.

Grain size	Sample name	
	1A	4A
> 1 mm	68.75	59.06
500 μ m–1mm	17.86	12.99
250–500 μ m	8.48	9.84
125–250 μ m	4.02	8.66
< 125 μ m	0.89	9.45
Total amount	2.24 g	2.54 g

今後は破片の回収処理を進め、デジタルマイクロスコープや自動粒子形状解析顕微鏡等を用いて、回収破片の形状および透明度のデータ化を行い、衝突破片の統計解析（例えば、主成分分析やクラスター分析）を遂行する。

謝辞

溶岩の採取にあたり、伊豆半島ジオパーク推進協議会の鈴木雄介専任研究員、静岡県三島市立公園 楽寿園には大変お世話になった。ターゲット試料の加工に際し、梶石材（神奈川県愛

甲郡愛川町）に協力いただいた。実験に際し、宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所の衝突実験施設を使用した。

参考文献

- [1] Leibbrandt, S., and J.L. Le Pennec, 2015, Towards fast and routine analyses of volcanic ash morphometry for eruption surveillance applications, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **297**, 11–27.
- [2] Noguchi, R., H. Hino, N. Geshi, S. Otsuki, and K. Kurita, 2017 New classification method of volcanic ash samples using statistically determined grain types it arXiv arXiv:1712.05566 [physics.geoph].
- [3] Shoji, D., R. Noguchi, S. Otsuki, and H. Hino, 2018, Classification of volcanic ash particles using a convolutional neural network and probability *Scientific Reports*, **8:8111**, doi: 10.1038/s41598-018-26200-2.
- [4] Asada, N., 1985, Fine fragments in high - velocity impact experiments **90 B14**, 12445–12453, doi: 10.1029/JB090iB14p12445