

## 加速度センサと角速度センサを用いた噴石模型の落下運動の測定 Measurement of Falling Motion of Cinder Models using Acceleration Sensors and Angular Velocity Sensors

○劉美智・丸山敬・佐々木寛介・井上実・井口正人・藤田英輔・西村宏昭

○Meizhi LIU, Takashi MARUYAMA, Kansuke SASAKI, Minoru INOUE, Masato IGUCHI, Eisuke FUJITA, Hiroaki NISHIMURA

Loss of lives and structures are caused by cinders in volcanic eruption in most cases. Aerodynamic characteristics of cinders are needed for evaluations of motion of cinders in order to reduce damage. Falling properties of cinder models, non-simple shaped objects, were measured and three-dimensional falling trajectories were obtained by stand-alone measuring system that include acceleration and angular velocity sensors in the cinder model. Two types, one with sharp edges and one without sharp edges, were selected as representative of cinder and a sphere was selected as reference model. The posture, falling velocity, and falling trajectory of the cinder model in the absolute coordinate system were obtained. The results showed that the drag coefficient tended to decrease as Reynolds number increased in all model cases.

### 1. はじめに

2014年御嶽山の噴火では63名もの死者・行方不明者を出し[1], 多くの人的被害と建物被害を引き起こしている。飛散物被害を低減するには、飛散運動を精度良く求める必要があり、そのためには対象とする飛散物の空力特性を知る必要がある。

空力特性は、物体を静止させた状態で風洞実験によって求められることが多い。対して、実現象では風向や飛散物の姿勢は時々刻々と変化するが、この状況下における動的な空力特性についてはほとんど知られていない。

本研究は、噴火時の噴石の飛散運動を精度よく予測するための動的な空力特性を明らかにすることを目的として、不整形な形状を持つ噴石の自然風中における落下実験を行い、模型内に組み込んだ加速度センサと角速度センサから、噴石模型の三次元運動を求めた。

### 2. 実験概要

実験は鹿児島県桜島黒神地獄河原で行った。図1のようにドローンで模型を上空約150mまで吊り上げ、模型を落下させた。実験現場で採取された噴石から、表面は粗いが全体的にみて丸い形(図2: 模型A), 表面に鋭角な角がある形(図2: 模型B)を代表的に選んだ。本研究の測定方法の有効性を証明するために、既存の空力特性の実験データが多い球の形状を模型Cとして用意した。同

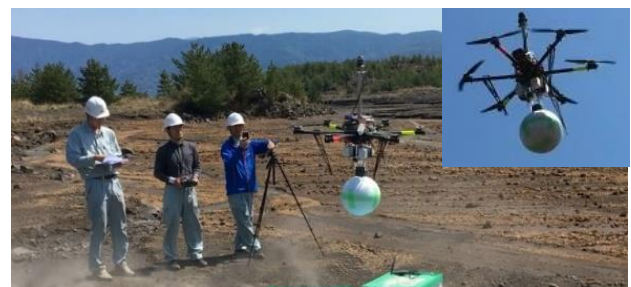


図1. ドローンで模型を吊り上げている様子



図2. 噴石模型

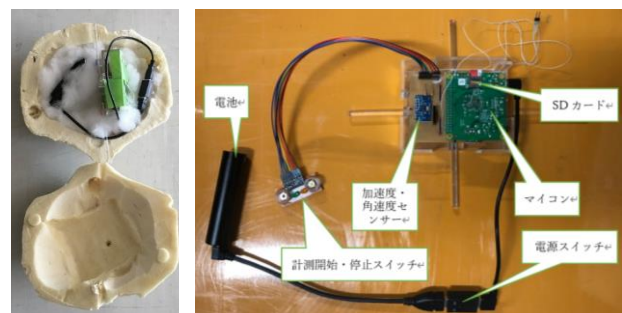


図3. 噴石模型内部の加速度・角速度センサ

じ形状の模型を各2回落とした。模型内部に組み込んだ加速度・角速度センサ(図3)は模型座標系

での値を出力しているため、座標変換して模型の姿勢を求めることが必要である。模型の姿勢は角速度の値から求めた[2]。姿勢を表現する回転行列から、絶対座標系における加速度を求め、台形公式による時間積分によって模型の姿勢、落下速度および落下軌道を算出した。

### 3. 実験結果

以下に模型 A を例として、絶対座標系での模型の落下運動について示す。模型 A の質量は 0.41kg, 見付面積は 0.048m<sup>2</sup> である。見付面積は、風洞で模型を各 3 軸ごとに固定して回転している様子を動画で撮影し、投影面積の平均をとった。この模型が落下した前後 20 秒での平均水平風速は約 2.5 m/s の軽風であった。

図 4 に示す重力加速度と空気力の z 成分の合計をみると、落下の開始から加速度が徐々に弱くなり、模型が受ける空気力が徐々に増えていることを意味する。約 3 秒以降では 0m/s<sup>2</sup> 付近の値を取っている。

図 5 の z 成分の角速度は、約 2 秒以降から徐々に増えていることから、その落下区間において模型は z 軸周りに回転しながら落下している様子が分かる。

図 6 に示す z 成分の速度に関しては、約 3 秒以降から -17m/s 付近で推移していることから終端速度に達したことが分かる。

図 7 にセンサ解析から得た模型落下軌道を示す。噴石模型の姿勢が判断しやすいよう図中長方形で表した。前述のように、z 軸周りに回転しながら落下していく様子が高さ 80m 以下でみられた。

上記で示さなかった他の実験ケースを含めた抗力係数のレイノルズ数による変化を図 8 に示す。動粘性係数は  $1.5 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$  とし、代表長さは噴石模型の平均的な見付面積と同等な円とし、直径を求めた。模型に作用する風速ベクトルは、模型落下速度ベクトルの反対向きと仮定し、周囲の平均風速ベクトルを考慮している。図 8 をみると、どの模型もレイノルズ数が大きくなると、抗力係数は減少する傾向にある。レイノルズ数が小さい場合、模型の形状によって抗力係数はばらつき。レイノルズ数が大きい場合、模型の形状による抗力係数の変化は小さく、いずれも 0.3 程度となった。

### 4. まとめ

加速度・角速度センサを内蔵した 2 種類の噴石模型を用いて、約 150m からの落下実験を行った。落下運動から、模型の姿勢および落下速度と落下

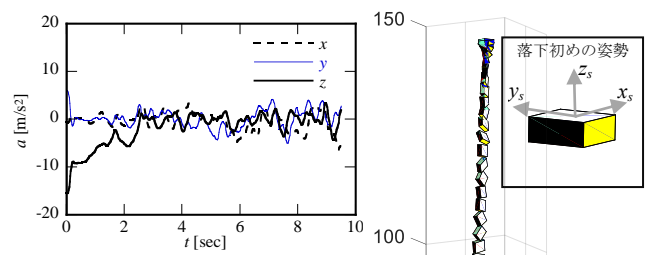


図 4. 加速度の時刻歴

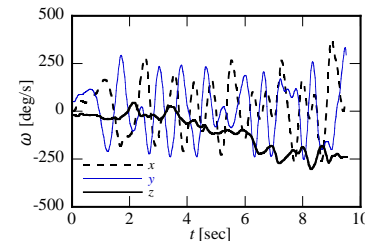


図 5. 角速度の時刻歴

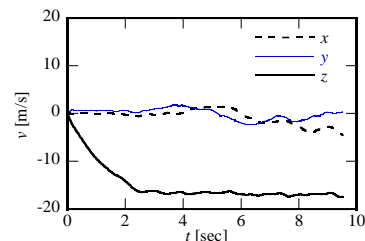


図 6. 速度の時刻歴

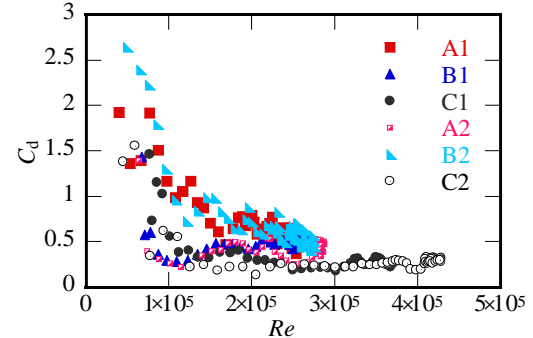


図 7. 噴石模型の落下軌道 (0.2 秒間隔, 形状は長方形で示し, 大きさは実物の約 10 倍)

図 8. 抗力係数のレイノルズ数による変化

軌道が得られ、抗力係数のレイノルズ数による変化を求めた。レイノルズ数が小さい場合、模型の形状によって抗力係数はばらつき、レイノルズ数が大きい場合は、模型の形状による抗力係数の変化が小さい結果となった。

### 謝辞

本研究は、京都大学防災研究所令和元年度一般共同研究 30G-10, および、次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト・課題 D : 火山災害対策技術の開発・サブテーマ 2 : 「リアルタイムの火山灰ハザード評価手法の開発」の補助を受けて行われたものである。

### 参考文献

- [1] T. Oikawa *et al.*, "The 2014 Eruption of Ontake Volcano, Central Japan," *Volcanol. Soc. Japan*, vol. 60, no. 3, pp. 411–415, 2015
- [2] J. M. Cooke, M. J. Zyda, D. R. Pratt, and R. B. McGhee, "NPSNET: Flight Simulation Dynamic Modeling Using Quaternions," *Presence Teleoperators Virtual Environ.*, vol. 1, no. 4, pp. 404–420, Jan. 1992