

噴石模型を用いた噴石の落下性状の観測

Video Motion Analysis of Cinder Models through Fall Experiment

丸山敬・劉美智⁽¹⁾・佐々木寛介・井上実⁽²⁾・井口正人・藤田英輔⁽³⁾・西村宏昭⁽⁴⁾

Takashi MARUYAMA, Meizhi LIU⁽¹⁾, Kansuke SASAKI, Minoru INOUE⁽²⁾, Masato IGUCHI,
Eisuke FUJITA⁽³⁾ and Hiroaki NISHIMURA⁽⁴⁾

(1) 京都大学大学院工学研究科

(2) 一般財団法人 日本気象協会

(3) 国立研究開発法人 防災科学技術研究所

(4) 一般財団法人 防災研究協会

(1) Graduate School of Engineering, Kyoto University, Japan

(2) Japan Weather Association, Japan

(3) National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Japan

(4) Association for Disaster Prevention Research

Synopsis

Falling properties of cinder models, non-simple shaped objects, were measured and three-dimensional falling trajectories were obtained by using video movies. Aerodynamic characteristics of cinder models were examined by the trajectory. The falling models imitated the configuration of cinders collected at the site of the experiment, Sakurajima volcano. Two types, one with sharp edges and one without sharp edges, were selected as representatives and a sphere was selected as reference model. The results showed that the drag coefficient varied with the falling velocity becoming smaller as the velocity increased. When the models fell with terminal velocity, the drag coefficients of the cinder models without and with sharp edges were about 0.5 and 0.6, respectively. The drag coefficient of the sphere model was about 0.3.

キーワード: 動画解析, 噴石模型, 落下試験, 抗力係数

Keywords: video motion analysis, cinder models, fall experiment, drag coefficient

1. はじめに

2014年9月に噴火した御嶽山の噴火の際には63名もの死者・行方不明者を出す結果となり、被害者の多くは飛来した火山礫や火山岩塊による損傷死であった(及川ら, 2015)。さらに、噴石による飛散物はこれら人的被害だけでなく建物被害も引き起こしている。噴石の落下による衝突の被害から免れるため

に、火口近くには避難所が設置されているものの、噴石の飛散範囲や衝撃力(重さと速度)など不明な点が多いため、噴石の落下衝突に対する耐衝撃設計が十分なされているかどうか、明らかではないのが現状である。衝突時の衝撃力推定を行うためには、飛散物の衝突速度を特定することが基本となり、飛散性状を精度よく予測する必要がある。そのためにはまず、いまだ不明な部分が多い噴石の空力特性を

明らかにすることが必要である。

これまで、空力特性を明らかにする研究は風洞実験を用いて行われたものがほとんどである。立川・福山（1981）は平板について2次元的な空力特性を求め、丸山ら（2005）は、6分力天秤を用いて正方形平板の3次元的な静的空力特性を求めた。Richards et al.

（2008）は6分力天秤を用いて長方形平板と棒状の物体の静的空力特性を求めた。ただし、風洞実験により求められる物体の空力特性は、風洞内に飛散物を一定の姿勢で固定し、一様流を与えて計測されることがほとんどであった。しかし、実際の飛散物には周囲の気流性状の非定常性および自身の運動による姿勢の変化が生じるため、そのような条件下での飛散物の動的空力特性を知ることが必要になる。これに関して、松居ら（2018）は加速度センサーおよび角速度センサーが内蔵された平板状模型を用意し、ドーム内の無風状態で模型を自由落下させ、飛散物の動的空力特性を実験的に測定した。ただし、これら既往研究の飛散物の多くは単純な形状を持つ物体が多く、噴石のような不整形物体に対する研究結果が、ほとんどないのが現状である。

本研究では、噴火時の噴石の飛散運動を精度よく予測するための空力特性を明らかにすることを目的とし、不整形な形状を持つ噴石模型を用いて自然風中で落下実験を行った。落下実験は桜島の麓においてドローンにより噴石模型を上空に持ち上げて行い、計測結果を解析して落下運動を求め、噴石のもつ空力特性を得た。これにより、噴石の飛散や衝撃力のより精度の高い推定を行い、噴石に対する安全な建物の設計、避難行動計画の作成、自治体等の災害対応などに貢献することが期待される。

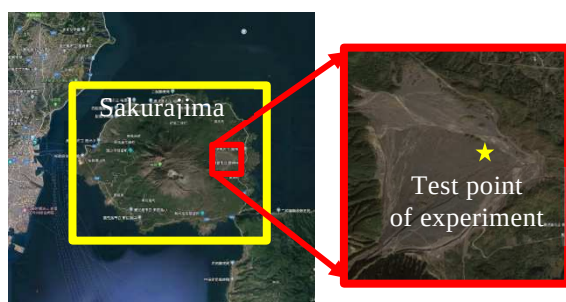


Photo 1 Experiment area

2. 実験概要

2.1 落下実験

実験は鹿児島県桜島黒神地獄河原（Photo 1）で行った。落下実験を行った場所は1946年の昭和噴火の際に溶岩が流れた場所で、現在樹木がほとんど生えておらず視界を遮るものがない。そのため、動画撮影として適切な実験地点が確保できた。実験は球体を含む3種類の噴石模型をドローンにより高度約150mまで持ち上げて（Photo 2）落下させることにより、自然風環境下での噴石の落下性状をビデオカメラで撮影するとともに、模型内に加速度センサー、角速度センサー、圧力センサーをマイコンと電池とともに組み込んだ自立型の測定ユニットにより測定した。

2.2 噴石模型

実験現場で採取された噴石は、表面に細かな凹凸があるものの、全体としては比較的滑らかな形状を持ったもの（Photo 3: Model A）と、表面に鋭角な角をもったもの（Photo 3: Model B）に大別できた。実験ではそれらを模倣し、Photo 3 に示す20cm-30cm程度の大きさの模型として発泡ウレタンで作成したものをを用いた。さらに、比較検証用には空力特性の実験データが多い球体を採用し、直径30cmの発泡スチロール製の球を用いた。Table 1 に模型の質量、見付面積、および、対応するケース番号を示す。見付面積は模型を回転させて得られた画像から求めた平均的な値を用いた。



Photo 2 State of hanging model by drone

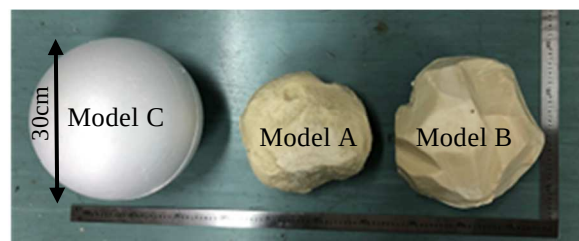


Photo 3 Cinder models

Table 1 Model and test case

ケース 番号	模型種 類およ び番号	質量 m [kg]	見付面積 A [m ²]
case.1	A1	0.41	0.05
case.2	B1	0.42	0.05
case.3	C1	0.39	0.07
case.4	A2	0.41	0.05
case.5	B2	0.46	0.05
case.6	C2	0.47	0.07

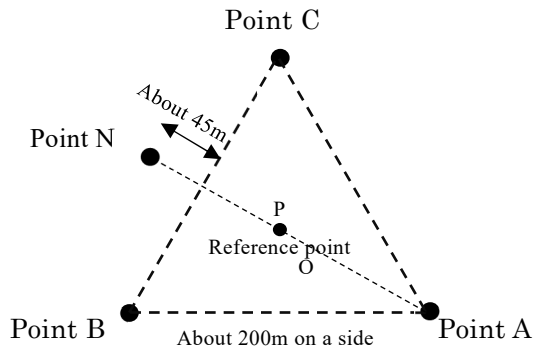


Fig. 1 The points where the video movies were taken

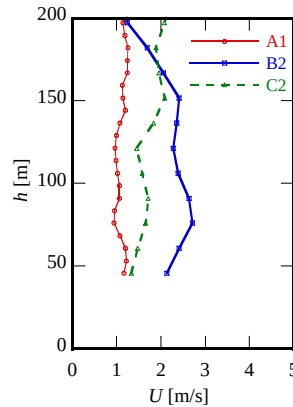
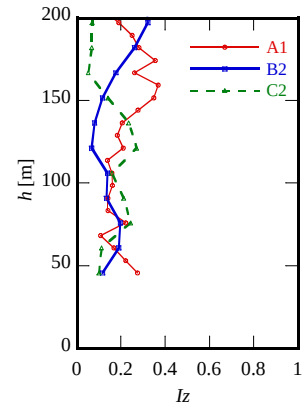
2.3 ビデオカメラによる撮影

Fig.1 に示すように、基準点Oをほぼ正三角形に配置されたA, B, C地点の中心に設け、その周囲4ヶ所A, B, C, N地点に4Kビデオカメラ（Panasonic社製HC-VX985M）を配置した。ビデオカメラの画素数は3840pixel×2160pixel、フレームレートは29.97fpsである。基準点Oには地上高さ1mにマーカーとなる白い球体を設置し、その横をドローンの発着場所Pとした。噴石模型は、Pからドローンにより上空に持ち上げ、ほぼ真上から落下させた。カメラの画角は噴石模型の落下軌道が画像内に入るように調整した。

Table 2 に落下実験が撮影された場所を示す。表内の「○」は良好な画像が得られた場所であり、「-」は適切な画像が得られなかった場所である。適切な画像が得られなかった理由としては、模型に焦点が合わない。逆光のためコントラストが下がり、地面近くで背景と模型の区別がつかず、模型の位置が判別できない等である。case.2（模型B1）およびcase.3（模型C1）の場合、模型が風に流されて撮影範囲の外に出てしまい地面近くのデータが大きく欠如した。以下には上記のような不都合が少なく、解析に条件の良い測定結果のうちcase.1の模型A1, case.5の模型B2, case.6の模型C2）に関する解析結果を示す。

Table 2 The photographing points for video motion analysis

ケース 番号	地点 A	地点 B	地点 N	地点 C
case.1	○	○	○	-
case.2	-	-	○	○
case.3	○	-	-	○
case.4	-	○	○	-
case.5	○	○	○	-
case.6	○	○	○	-

Fig. 2 Average horizontal wind speed U Fig. 3 Intensity of turbulence I_z

2.4 風速プロフィール

噴石模型の落下実験に際して、ドップラーライダー（三菱電機社製DIABREZZA）により上空の風速鉛直分布を測定した。Fig.2, Fig.3 に噴石模型（A1, B2, C2）投下時刻における、前後20秒の平均水平風速 U と乱れ強さ I_z のプロフィールを示す。今回の実験の範囲は高度0m-150mであり、実験時の落下の範囲内において周囲の水平風速 U 最大値は、模型A1, 模型B2, 模型C2の落下に関して、それぞれ約1.0m/s, 2.4m/s, 1.7m/sとほぼ静穏な状況であった。噴石模型落下直後の高度150m近くにおける乱れ強さに関しては、模型A1の乱れ強さが、模型B2模型C2より大きい結果となった。

2.5 模型投下に用いたドローン

Photo 4 に噴石模型を吊り上げ、投下に使ったドローン（ルーチェサーチ社製SPIDER CS-6）を示す。ドローンには模型投下装置と位置情報記録用スマートフォンが搭載されており、Fig.4に示すようにドローンの飛行記録から噴石模型の移動経路を求めると落下高度は約150mとなった。さらに、模型に内蔵された気圧センサーの出力もFig.5に示すように同様な高度を示した。



Photo 4 Drone used for experiment

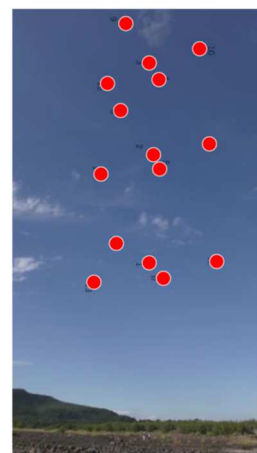


Photo 5 The reference points viewed from point A

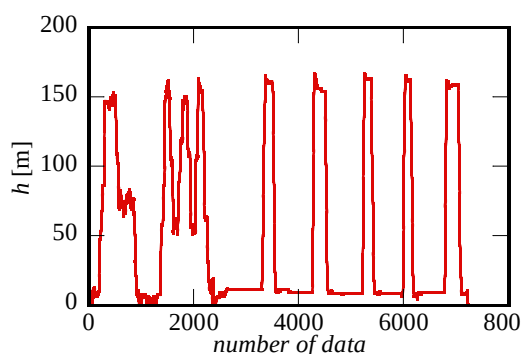


Fig. 4 Flight record of drone (vertical displacement)

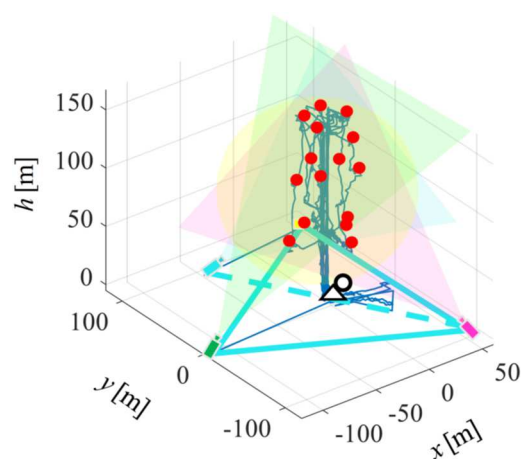


Fig. 6 The reference points by drone data

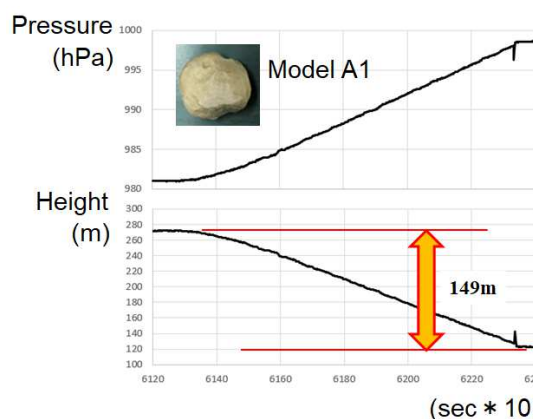


Fig. 5 Record of pressure sensor (vertical displacement)

3. ビデオカメラによる落下軌跡の解析

噴石模型の落下の様子を複数のビデオカメラを用いて撮影し、ビデオ映像を解析することにより、噴石模型の軌跡を求めた。動画解析には3次元運動解析ソフト（DITECT社製 Dipp-Motion V）を用いて、噴石模型の落下運動の3次元軌跡を求めた。画像解析ア

ルゴリズムには、DLT（Direct Linear Transformation）法（Shapiro, 1978）を用いた。これは、複数台のカメラと空間座標が既知である基準点を用いて映像内の3次元空間を推定する方法であり、解法上、計測空間内に6点以上の基準点を配置する必要がある。

今回の実験では、模型落下の直前にドローンをビデオ画像中で移動させて暫く静止させ、飛行記録からその座標を求めて、画像解析に必要となる基準点を定めた。Photo 5 に撮影したビデオ画像内の基準点の例を示す。

画像解析用の基準点は、ドローン発着地点Pから真上に150mまで上昇させ暫く静止させた後、東西南北、4方向に水平移動させ、さらに、上下にドローンを移動させて記録した。上下移動に際しては高度50m, 100m, 150mの3高度で静止して合計15の基準点を記録した後、再び発着地点Pに戻る順序で基準点を記録した。Fig.6 に示すドローン飛行記録の立体図中、基準点位置は赤丸で示してある。さらに、白抜き三角で示したドローン着地点P近くに設置したマーカー

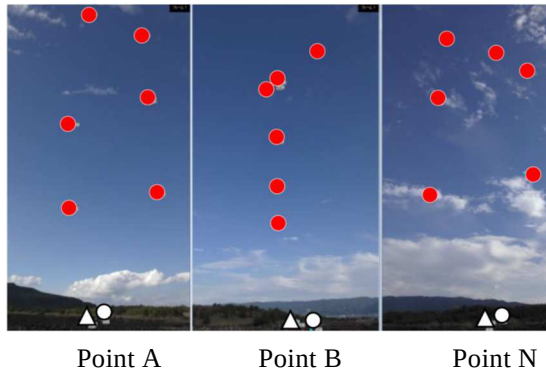


Photo 6 The reference points used for video analysis

と、白抜き丸で示した落下後に計測した模型の着地点を地面付近の基準点として加えた。得られた基準点全てを解析に取り込むと、上空のデータの重みが増し、求めた落下軌道の精度が悪くなる場合があったので、Photo 6 のように上空の基準点はできるだけ各基準点が離れるように6つ使用し、地上の基準点を含めて合計で8つの基準点を用いて解析した。

4. 解析結果

4.1 画像解析による3次元軌跡

画像解析により得られた噴石模型A1・case.1, 模型B2・case.5, 模型C2・case.6の3次元軌跡の結果をFig.7に示す。図の座標はドローン発着地点Pを原点としている。x軸の正方向は東、y軸の正方向は北、z軸は地上からの高さを表している。どの模型も地面近くまでの軌跡が捉えられている。画像解析から得られた軌跡最低点の水平面地点 (x_a, y_a) , および模型落下地点の実測値 (x_m, y_m) をTable 3に示す。軌跡が着地時点まで得られなかったのは、地形の段差や前

Table 3 Model drop point

model	measured data (x_m, y_m) [m]		analyzed data (x_a, y_a) [m]	
A1	-4.26	-10.44	-4.12	-9.85
B2	-6.25	-11.00	-4.60	-12.19
C2	-9.09	-12.89	-9.01	-14.82

後の草などで遮られたために、ビデオ画像では着地までの映像が映っていないためである。一方、模型落下地点の実測値は、噴石模型が地面に到達後、落下地点に行きGPSにより求めた。したがって、落下した際に模型が跳ねたり転がったりして、落下地点から移動した後の位置である。

Table 3より、模型A1の落下地点が $(x_m, y_m) = (-4.26\text{m}, -10.44\text{m})$ であるのに対し、画像解析で得られた落下地点は $(x_a, y_a) = (-4.12\text{m}, -9.85\text{m})$ となっており、約0.6mの誤差を生じた。模型B2では約2mの誤差、模型C2では約2mの誤差となっている。これらの画像解析は、最大約2mの誤差を生じた。

4.2 変位、速度、加速度

Fig.8~Fig.10 にビデオ画像から求めた噴石模型A1, B2, C2の変位、速度、加速度を示す。速度ベクトルは画像解析から求めた変位の時刻歴から差分で求め、1秒の移動平均を取った。加速度ベクトルは上記の移動平均後の速度ベクトルから差分で求め、1秒の移動平均を取った。

Fig.8は模型ごとの変位を示している。Fig.8(a)より、模型A1はx軸方向とy軸方向にほとんど移動せず、ほぼ真下に落下したことが分かる。模型B2は、落下開始地点から水平に約9mずれて落下した。模型C2は、落下開始地点から水平に約14mずれて落下した。

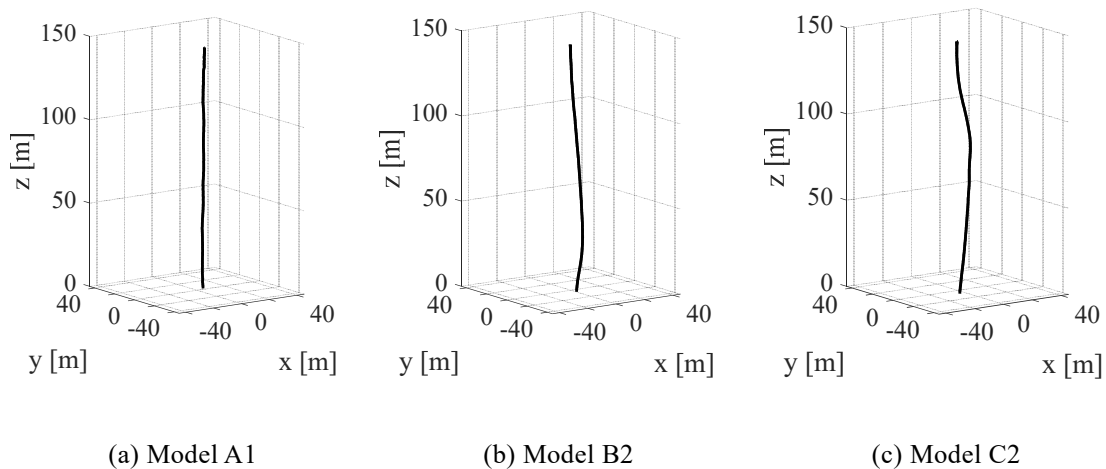


Fig.7 Falling trajectory of cinder models obtained from image analysis

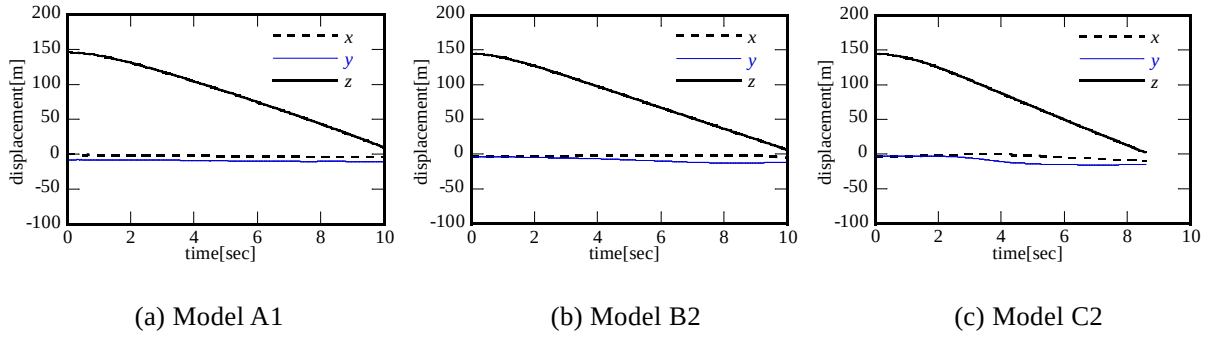


Fig. 8 Displacement of cinder model A1, B2, C2 [m]

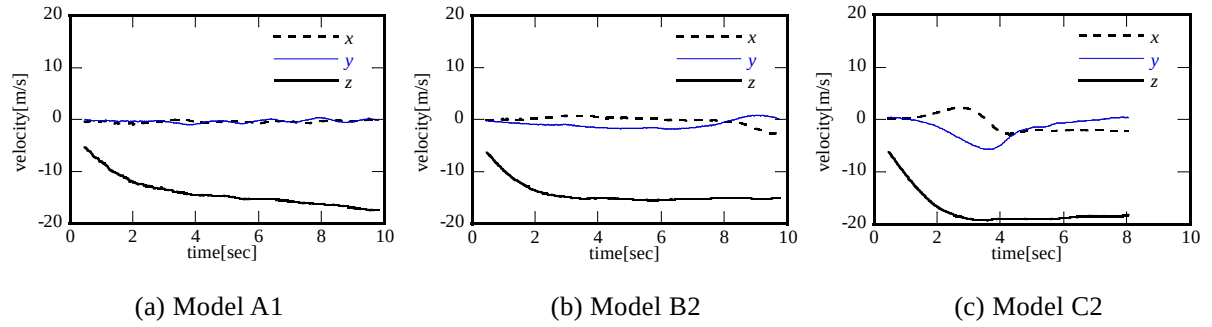


Fig. 9 Velocity of cinder model A1, B2, C2 [m/s]

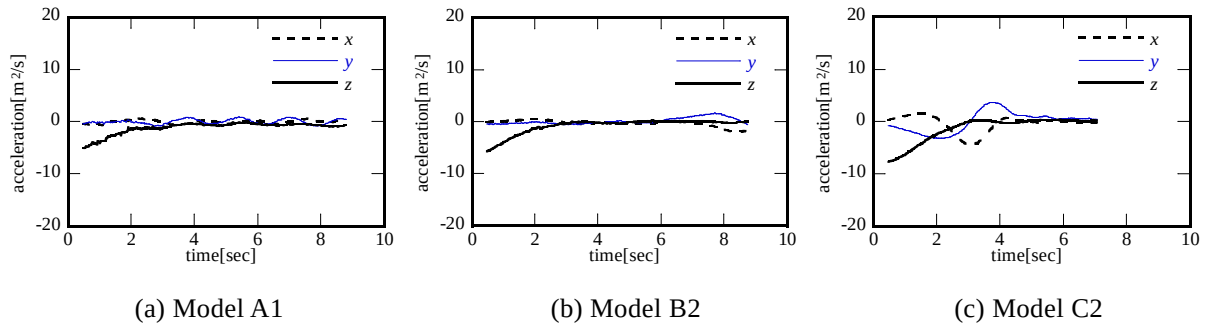


Fig. 10 Acceleration of cinder model A1, B2, C2 [m²/s²]

Fig.9に模型ごとの速度を示す。鉛直方向z成分の速度に関しては、模型B2および模型C2は約3秒後からほぼ一定となる。模型A1に関しては、3秒以前より変化は少ないが、少しずつ速度が増えている。3秒以降の鉛直方向速度の平均を取ると、模型A1, B2に関しては約-15m/sとなった。模型C2では、約-19m/sとなり、模型A1, B2よりも早い速度で落下していることが分かる。

Fig.10に示す重力加速度と空気力のz成分の合計をみると、いずれの模型も、3秒まで加速度が徐々に弱くなって、最終的に0m²/s²近くの値となっている。これは、模型が受ける空気力が徐々に増えていき重力とつり合って終端速度に達していることに対応する。水平方向（x成分とy成分）をみると、3秒以降では、

水平成分の加速度の変化は鉛直成分より大きい。特に模型C2の水平方向の変化が顕著である。

4.3 抗力係数および風向と風力の向きの偏差

噴石模型A1, B2, C2の抗力係数 C_d と相対風速の向きと風力の向きの偏差 θ を求め、それぞれFig.11(a), (b), (c)に示す。抗力係数 C_d を求める際の見つけ面積は、全方向からみた見つけ面積の平均値とした。相対風速の大きさは、物体の落下速度とし、向きは落下の方向と反対向きとした。このとき、周囲の風速は小さいものとして無視した。

Fig.11をみると、落下後約3秒以内では、模型A1, B2, C2どちらも時間とともに抗力係数の値が小さくなっている。模型A1に関しては、落下後3秒以降では

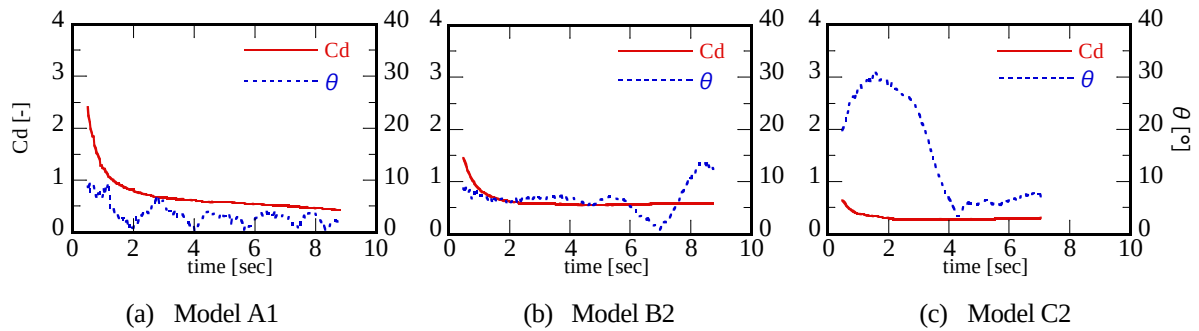


Fig. 11 Time variation of drag coefficient C_d and deviation of direction between wind and wind force θ [°]

抗力係数の変化が小さくなり、地面に到達する際には約0.5となった。模型B2、C2に関しては、3秒以降ではほぼ一定となり、抗力係数の値はそれぞれ約0.6、0.3となった。

相対風速と模型に加わる風力の方向の偏差 θ を見ると、模型A1の場合、落ち始めて1秒後には約10°であるが、2秒後には約1°と小さくなり、その後0°から6°の範囲で交互に変化している。模型B2の場合は、落下後6秒近くまでは、偏差は約7°と一定の値を保っているが、その後大きく変化した。模型C2の場合は、落下後一旦大きくなって約30°となった後、小さくなって4秒以降では約7°と一定の値になった。

最後に、上で示さなかった落下実験のケースも含めて、抗力係数のレイノルズ数による変化を求め、Fig.12に示す。ここで、動粘性係数は乾燥空気20℃の値 $1.5 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ とし、代表長さは、模型を全方向からみた見付面積の平均値を球の見付面積(円)とし、その半径として求めた。Fig.12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。模型の形状が異なると抗力係数はばらつくことが分かる。実験を行った模型の中で、球体C2の場合が最も小さな抗力係数の値を示した。

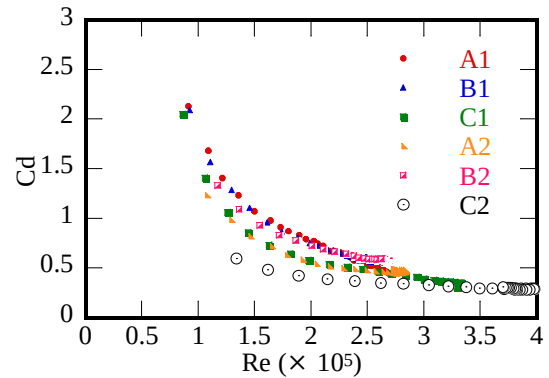


Fig.12 Relationship between Reynolds number and drag coefficient for each model

角のある噴石模型で約0.6となった。一方、比較として用いた球体の抗力係数は不整形な噴石模型よりも小さい値となり、レイノルズ数が最も大きくなった場合に約0.3となった。

ここで求めた抗力係数とレイノルズ数の関係を強風災害時の飛散物の数値シミュレーション等に有効に活用する予定である。

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。実験にあたっては小宮拓海氏、瀧下恒星氏、米田格氏、山崎友也氏、加茂正人氏、土井こずえ氏の協力を得た。ドローン操作にあたっては、志村智也氏、依田隆志氏、二宮裕之氏の協力を得た。ここに記し、謝意を表します。

参考文献

及川輝樹・山岡耕春・吉本充宏・中田節也・竹下欣

5. おわりに

噴石模型をドローンにより自然風中で約150m上空まで持ち上げて落下実験を行い、内蔵された加速度、角速度、圧力センサー、および、ビデオカメラで落下運動を記録した。本報では、ビデオカメラで撮影された動画を用いて模型の落下の3次元運動を解析し、得られた落下の軌跡から噴石のような不整形物体の持つ空力特性を求めた。噴石模型の形状は、現地で採取された噴石を模し、鋭角な角のあるものとなないものの2種類を代表として選んだ。実験結果から求めた抗力係数の値は、レイノルズ数の増加に伴って減少し、その大きさは噴石の形状によってばらついたが、鋭角な角のない噴石模型で約0.5、鋭角な

- 宏・前野 深・石塚吉浩・小森次郎・嶋野岳人・中野 俊 (2015) : 御嶽山2014年噴火, 火山, 第60巻, 第3号, pp.411-415.
- 立川正夫・福山雅弘 (1981) : 台風時の飛散物の軌跡と速度に関する研究 -その1 平板の空力特性と運動方程式-, 日本建築学会論文報告集, 第302号, pp.1-11.
- 松居健人・丸山 敬・西村宏昭・野田 博 (2018) : 自立型計測装置を用いた飛散物模型の空力特性の直接計測の試み, 第25回風工学シンポジウム論文集, pp.169-174.
- 丸山 敬・河合宏允・樋本圭佑 (2005) : 6分力天秤を用いた正方形平板の空気力特性の測定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.177-178.
- Richards, P.J., Williams, N., Laing B., McCarty, M. and Pond, M. (2008): Numerical calculation of the three-dimensional motion of wind-borne debris, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.96, pp.2188-2202.
- Shapiro, R. (1978): Direct Linear Transformation Method for Three-Dimensional Cinematography, *Research Quarterly*, Vol. 49, No. 2, pp.197-205.

(論文受理日 : 2020年8月31日)