

# 噴石などの不整形物体の空力特性の解明

## 課題責任者

野田博 近畿大学建築学部建築学科

## 著者

野田博\*1、丸山敬\*2

\*1 近畿大学建築学部

\*2 京都大学防災研究所

利用施設： 国立大学法人 京都大学防災研究所 境界層風洞  
国立研究開発法人海洋研究開発機構 大規模共有メモリシステム(UV2000)

利用期間： 平成 30 年 7 月 27 日～平成 31 年 2 月 28 日

## アブストラクト

本研究では、風洞実験と数値流体計算により噴石を想定した不整形物体の風力とその作用方法について調査した。目的は、噴石の飛散性状を推定・予測し落下衝突時の衝撃力を精度よく求めることである。不整形物体については 6 通りの形状について風洞実験により調査し、数値流体計算ではそのうち代表的な形状について、風圧の作用状況や流れの様子を詳細に調査した。

不整形物体の風力調査に先立ち、立方体などの基本的形状に作用する風力についても同様に調査した。調査の結果、噴石を想定した不整形物体の風力は立方体などの基本形状物体に比べ小さいことが判明した。更に、数値流体計算により複雑な形状に作用する風圧分布を調べることで、不整形物体の風力が立方体よりも小さくなる要因を明らかにした。

キーワード： 噴石、不整形物体、空力特性、風洞実験、大規模シミュレーション

## 1. 本プロジェクトの目的

2018 年白根山、2014 年御嶽山の火山噴火に見られた通り、近年火山噴火時の噴石による建物や人の被害が起きている。噴石の落下・衝突の被害を防ぐ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ないのが現状である。本研究では、噴石の飛散性状を推定・予測し、落下衝突時の衝撃力を精度よく求めることにより火山付近の建物や避難所の噴石の落下衝突に対する耐衝撃性能を向上させ、被害低減に貢献しようとするものである。

## 2. 風洞実験による物体の空力特性調査

### 2. 1 風洞実験概要

#### 2.1.1 実験ケースならびに実験気流

実験ケースは、基本的形状をした物体(以下、基本形状物体)として、立方体、正方形平板、棒の 3

通りの形状の風力を測定した。噴石を模した不整形物体については、6通りの形状の模型について風力を測定した。又比較のために正30面体についても風力を測定した。立方体、正方形平板、棒の模型を図-2.1に示す。

実験気流は一樣流とした。実験風速は基本形状物体の場合は5~7m/s, 不整形模型の場合は5~9m/sとした。

### 2.1.2 実験風向

実験風向は、基本形状物体（立方体、正方形平板、棒）に関しては図-2.2に示すロール角( $\alpha$ , 風軸周りの回転角)を0, 11.25, 22.5, 33.75, 45°の5通りとし、それぞれヨー角( $\beta$ , 鉛直軸まわりの回転角)を0°から90°まで毎秒0.5°で回転させながら変化させた。

不整形物体ならびに正30面体の7つの模型では、それぞれヨー角回転軸を3通りに変えて、それぞれヨー角( $\beta$ )を-180°から180°まで毎秒0.5°で回転させながら計測した。不整形物体ならびに正30面体の3通りのヨー角回転軸(No.1, No.2, No.3)における-180°, 0°の見附形状を表-2.2に示す。

### 2.1.3 測定項目

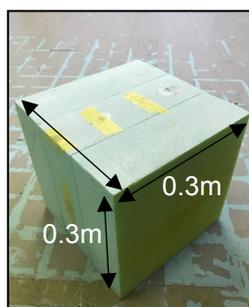
実験では、風洞床下に設置した6分力計により各模型に作用する平均風力を測定した。基本形状物体では、3方向風力と3軸周りの回転モーメントを測定した。不整形模型では、水平2成分のみ測定した。基本形状物体の風力の定義を図-2.3に、不整形模型の風力の定義を図-2.4にそれぞれ示す。風力測定では、測定対象模型を風洞壁面の影響の無い様風洞断面中央に設置するために、6分力計と模型は細い鋼製の棒（連結治具）で連結している。各模型の風力測定結果は、予め連結治具の風力を測定し、各模型の平均風力から連結治具の風力を差し引いた。

### 2.1.4 風力係数の定義

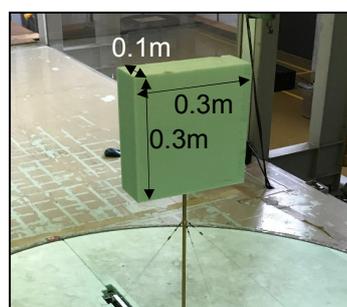
基本形状物体に関しては、測定した各平均風力を下式の通り風力係数で整理した。

$$C_{Fx} = \frac{F_x}{(1/2)\rho U^2 A}, \quad C_{Fy} = \frac{F_y}{(1/2)\rho U^2 A}, \quad C_{Fz} = \frac{F_z}{(1/2)\rho U^2 A} \quad (1a),(1b),(1c)$$

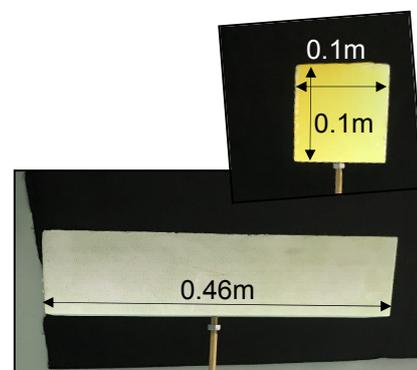
ここで、 $C_{Fx}, C_{Fy}, C_{Fz}$ :それぞれ、x方向,y方向、z方向の風力係数、 $F_x, F_y, F_z$ :それぞれ、x方向,y方向、z方向の平均風力、 $\rho$ :空気密度(1.2kg/m<sup>3</sup>),  $U$ :実験風速(5~7m/s),  $A$ :基準面積(立方体 0.09m<sup>2</sup>, 正方形平板 0.09m<sup>2</sup>, 棒 0.046m<sup>2</sup>),  $L_m$ :模型の基準長さ(立方体 0.3m, 正方形平板 0.3m, 棒 0.46m)



(a)立方体



(b)正方形平板



(c)棒

図-2.1 基本形状物体の模型

表-2.2 不整形物体模型の見附形状

	ヨ一角軸 No.1		ヨ一角軸 No.2		ヨ一角軸 No.3	
	-180°	0°	-180°	0°	-180°	0°
模型 a						
模型 b						
模型 c						
模型 d						
模型 e						
模型 f						
正 30 面体						

不整形物体ならびに正 30 面体に関しては、以下の水平 2 成分から抗力係数  $C_D$  を求めた。

$$C_D = \frac{F_D}{(1/2)\rho U^2 A_p} \quad (2)$$

$$F_D = -F_x \cos(\beta) - F_y \sin(\beta) \quad (3)$$

ここで、 $C_D$ :抗力係数、 $F_D$ :平均抗力、 $A_p$ :見附面積

見附面積  $A_p$  は、各風向角で風下からビデオ撮影をし、画像解析により見附面積を算出した。

## 2. 2 実験結果

### 2.2.1 基本形状物体の空気力係数

基本形状物体(立方体, 正方形平面, 棒)の風力係数を図-3.1 に示す。立方体, 正方形平板, 棒の  $C_{FX}$  のヨー角  $\beta$  の変化はいずれのロール角  $\alpha$  においても殆ど同じであり, ピッチ角  $\alpha$  による差異は小さい。 $C_{FX}$  に関しては, ヨー角  $\beta$  が  $30^\circ$  まではピッチ角  $\alpha$  による差異はほとんどないが, ヨー角  $\beta$  が  $30^\circ$  より大きくなると差異が現われる。その差異は立方体で大きい。棒の場合, ピッチ角  $\alpha=45^\circ$  で他のピッチ角  $\alpha$  の場合と比べ異なる変化をしている。正方形平板については,  $C_{FY}$  の変化は少ない。 $C_{FZ}$  に関しては, 全ての模型においてピッチ角  $\alpha$  により異なる。特に正方形と棒ではその差異は大きい。ピッチ角

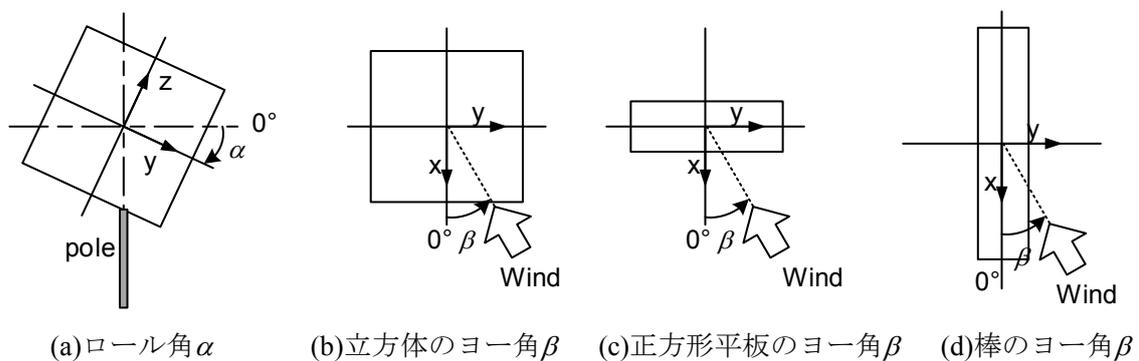


図-2.2 基本形状模型の風向角の定義

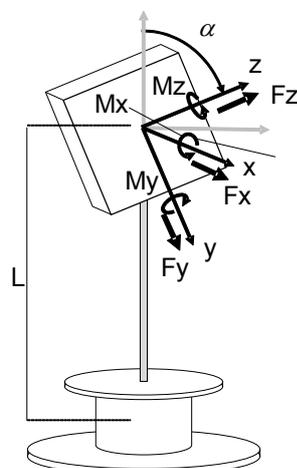


図-2.3 基本形状模型の風力の定義

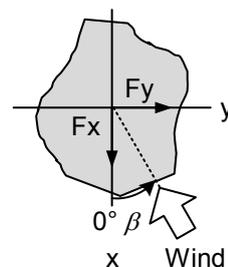


図-2.4 不整形模型の風力の定義

$\alpha=0^\circ$ の場合  $C_{Fz}$  は鉛直方向成分となり、形状が鉛直方向で対称のため  $C_{Fz}$  はいずれのヨー角  $\beta$  においてもほぼ 0 となる。ピッチ角  $\alpha$  が大きくなるに従い、 $C_{Fz}$  の値は 0 とは異なる値となる。何れの模型においても、ピッチ角  $\alpha=45^\circ$  の場合には形状の左右対称性により  $C_{Fy}$  の値と概ね等しくなる。

図示しないがモーメント係数に関してはほとんどの場合ピッチ角  $\alpha$  による差異は少ない。立方体の場合、 $C_{Fx}$ 、 $C_{Fy}$ 、 $C_{Fz}$  とともにピッチ角  $\alpha=45^\circ$  で他のピッチ角の場合の値とは異なる値となっている。

### 2.2.2 噴石を模した不整形物体の抗力係数

不整形物体の抗力係数  $C_D$  と見附面積  $A_p$  を図-3.3(1),(2)に示す。物体 a はいずれのヨー角  $\beta$  においてもほぼ  $C_D=0.5$  である。これは 3 通りのヨー角軸全てにおいて言える。概して、この性状は全ての不整形物体についていえる。ただし、細かく見ればその性状とは異なる場合もある。物体 f はヨー角  $\beta$  による抵抗係数の変化が他の物体よりも変化が大きい。その一因として、ヨー角  $\beta$  による見附面積の変化が大きいことが考えられる。ただし、物体 e も見附面積の変化は大きい、物体 f ほど抗力係数の変化はおおきくない。物体 d はヨー角  $\beta$  による変化は少ないが、ヨー角軸 No.2 の場合  $C_D$  の値が 1.0 に近く、他の場合に比べてかなり大きな値となっている。正 30 面体は、何れのヨー角においても抗力係数  $C_D=0.5$  である。ヨー角  $\beta$  による見附面積の変化も極めて小さい。球の抗力係数  $C_D$  は、 $0.42(\text{Re}$

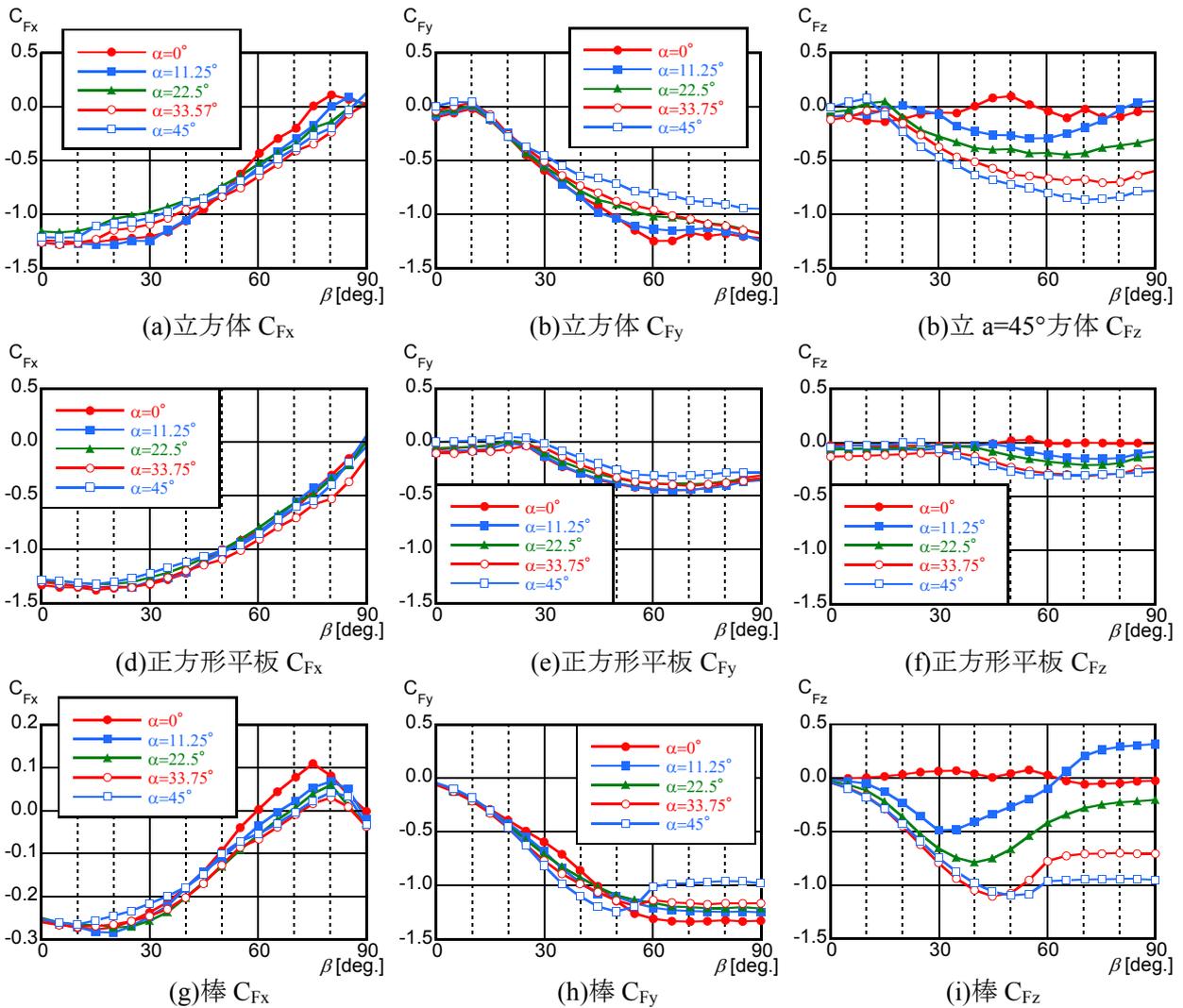


図-3.1 基本形状物体の風力係数

$\approx 10^{+5}$ )<sup>1)</sup>であり、球の抗力係数に比べると 2 割程度大きい。図-3.4 にロール角  $\alpha=0^\circ$  の場合の基本形状モデルの抗力係数と見附面積を示す。立方体と正方形平板の抗力係数は概ね 1.0 以上であり不整形物体の抗力係数  $C_D$  は立方体や正方形平板よりも小さい。

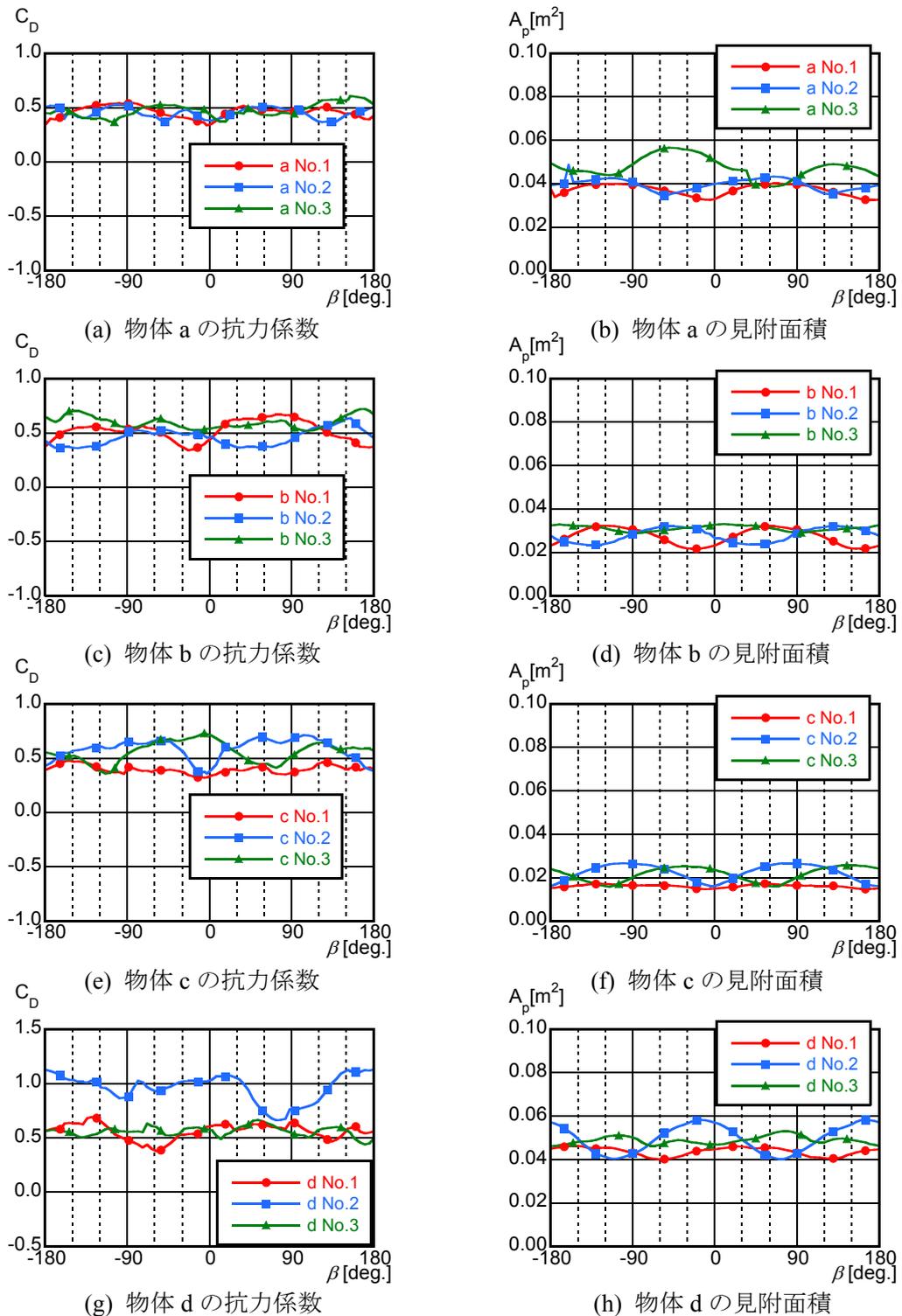
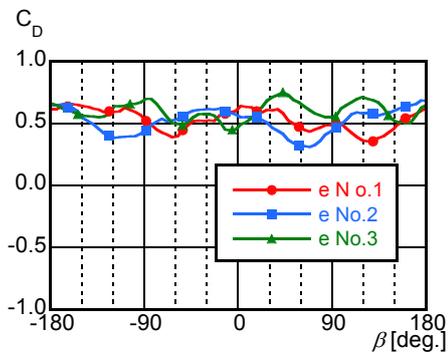
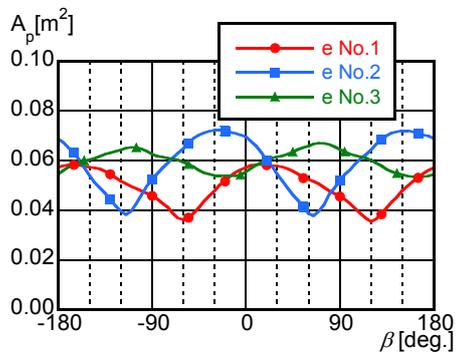


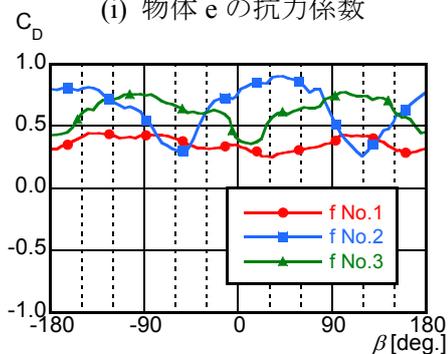
図-3.3(1) 不整形物体の抗力係数  $C_D$  と見附面積  $A_p$



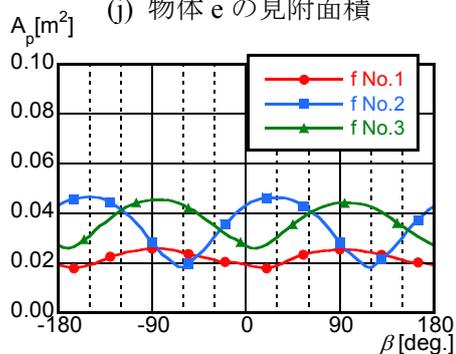
(i) 物体 e の抗力係数



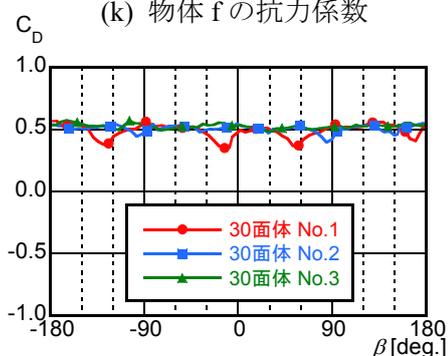
(j) 物体 e の見附面積



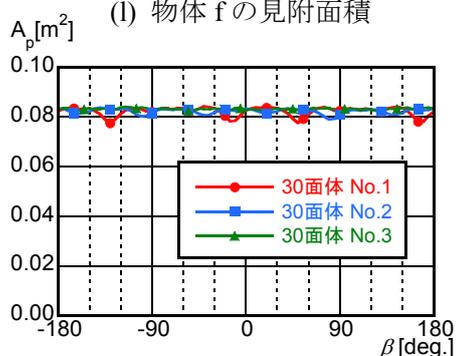
(k) 物体 f の抗力係数



(l) 物体 f の見附面積

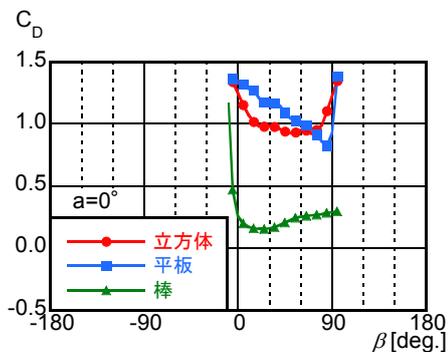


(m) 30面体の抗力係数

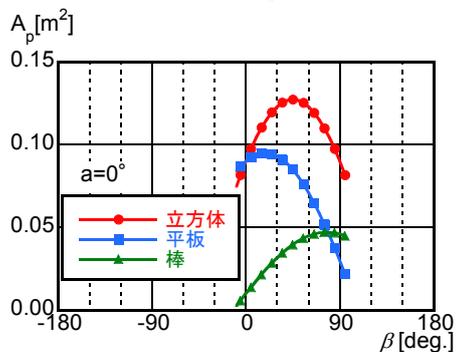


(n) 30面体の見附面積

図-3.3(2) 不整形物体の抗力係数  $C_D$  と見附面積  $A_p$



(a) 基本形状模型の抗力係数



(b) 基本形状模型の見附面積

図-3.4 基本形状模型の抗力係数  $C_D$  と見附面積  $A_p$  ( $\alpha=0^\circ$ )

### 3. 数値流体解析による物体周りの流れと風圧分布特性調査

本研究では、基本形状物体ならびに不整形物体に作用する風力とその周りの流れを詳細に検討することを目的とし、数値流体計算を実施した。

#### 3. 1 数値流体計算概要

##### 3.1.1 使用計算機ならびに計算コード

計算に使用した計算機は、国立研究開発法人海洋研究開発機構所有の大規模共有メモリシステム UV2000 である。使用した数値流体計算コードは UV2000 にインストール済みの HELYX Core (OpenFOAM)である。

##### 3.1.2 計算条件

本研究では、物体に作用する風力や物体周りの流れを詳細に検討するために、時々刻々の風速と圧力を算出する Large Eddy Simulation(LES)による計算を採用した。乱流モデルは、標準 Smagorinsky モデルである。計算条件を表-3.1 に示す。計算時間は 25 秒とし、風力の平均化は流れ場が定常化した 5~25 秒の結果を用いた。

##### 3.1.3 計算領域ならびに計算格子

計算領域は表-3.1 に示す通り、x 方向(主流方向)に-1.6~4.8m、y 方向(主流直交方向)に-2.4~2.4m、z 方向(鉛直方向)に-1.6~1.6m とした。座標原点(0,0,0)と物体中心を一致させた。計算領域概観を図-3.1 に示す。

物体近傍の計算格子状況を図-3.2 に示す。計算格子は、全体を  $N_x \times N_y \times N_z = 40 \times 30 \times 20$ (各方向メッシュ幅 0.16m)で分割し、その後物体に近づくに従い 5 回の八分木により計算格子を細かくし(ネスティング)、最終的に物体近傍の計算格子幅は各方向とも 0.005m とした。

表-3.1 計算条件概要

空間差分	移流項：振動除去線形補間(filterdLinear) その他：TVD法(limitedLinear)
時間進行法	2次後退差分(backward)
計算アルゴリズム	Piso法
乱流モデル	標準Smagorinsky(Cs=0.13)
計算領域	x方向(主流方向) :-1.6~4.8m y方向(主流直交方向) :-2.4~2.4m z方向(鉛直方向) :-1.6~1.6m
最小格子幅	dx=dy=dz=0.005m
物体寸法	風洞実験模型と同じ
時間刻み	dt=0.001秒
計算時間	T=25秒(平均化には5~25秒の結果を使用)
流入風速	U=1m/s
Re数	Re=10000

### 3.1.4 計算ケース

計算対象とした物体は、基本形状物体（立方体，正方形平板，棒）と不整形物体(模型 a)の 4 体である。実験風向はそれぞれに示す通りである。基本形状物体ではヨー角 $\alpha$ は，0，22.5，45°，3 通り，ピッチ角は 0，30，45° の 3 通りのそれぞれ計 9 ケース，不整形物体は a についてのみヨー角軸 No.1 でヨー角 $\beta=0,30,45,60,90$  の計 5 ケースとした。計算ケースを表-3.2 に示す。

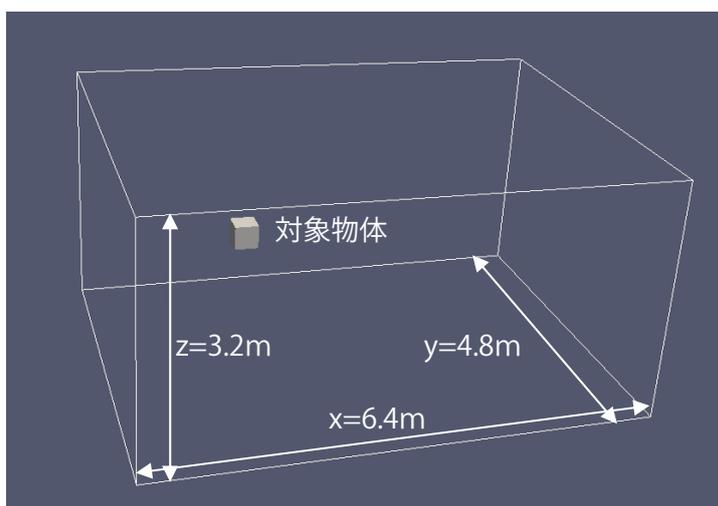
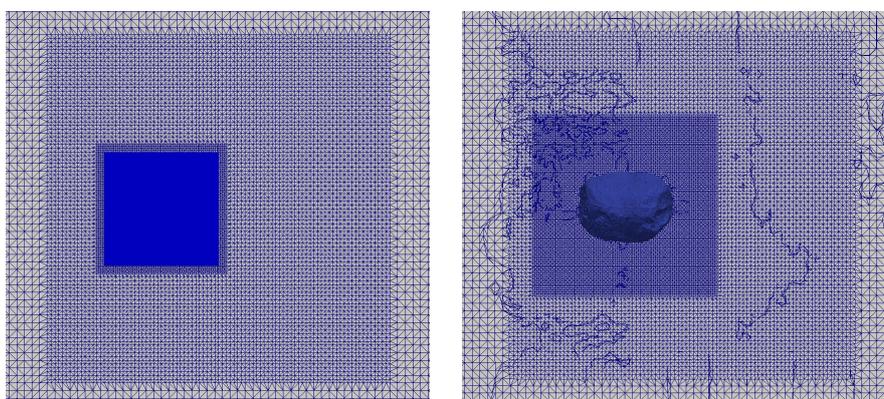


図-3.1 計算領域



(a) 立方体

(b) 不整形物体 a

図-3.2 物体近傍の計算格子の状況

表-3.2 計算ケース

形状	ヨー角 $\alpha$	ピッチ角 $\beta$
立方体	0	0, 30, 45
	22.5	〃
	45	〃
正方形平板	0	〃
	22.5	〃
	45	〃
棒	0	〃
	22.5	〃
	45	〃
不整形物体a	No.1	0, 30, 45, 60, 90

### 3. 2 数値流体計算結果

#### 3.2.1 風力係数の再現性

基本形状物体の風力係数  $C_{FX}, C_{FY}, C_{FZ}$  とヨ一角  $\beta$  の関係を図-3.3 に不整形物体の抗力係数  $C_D$  を図-3.4

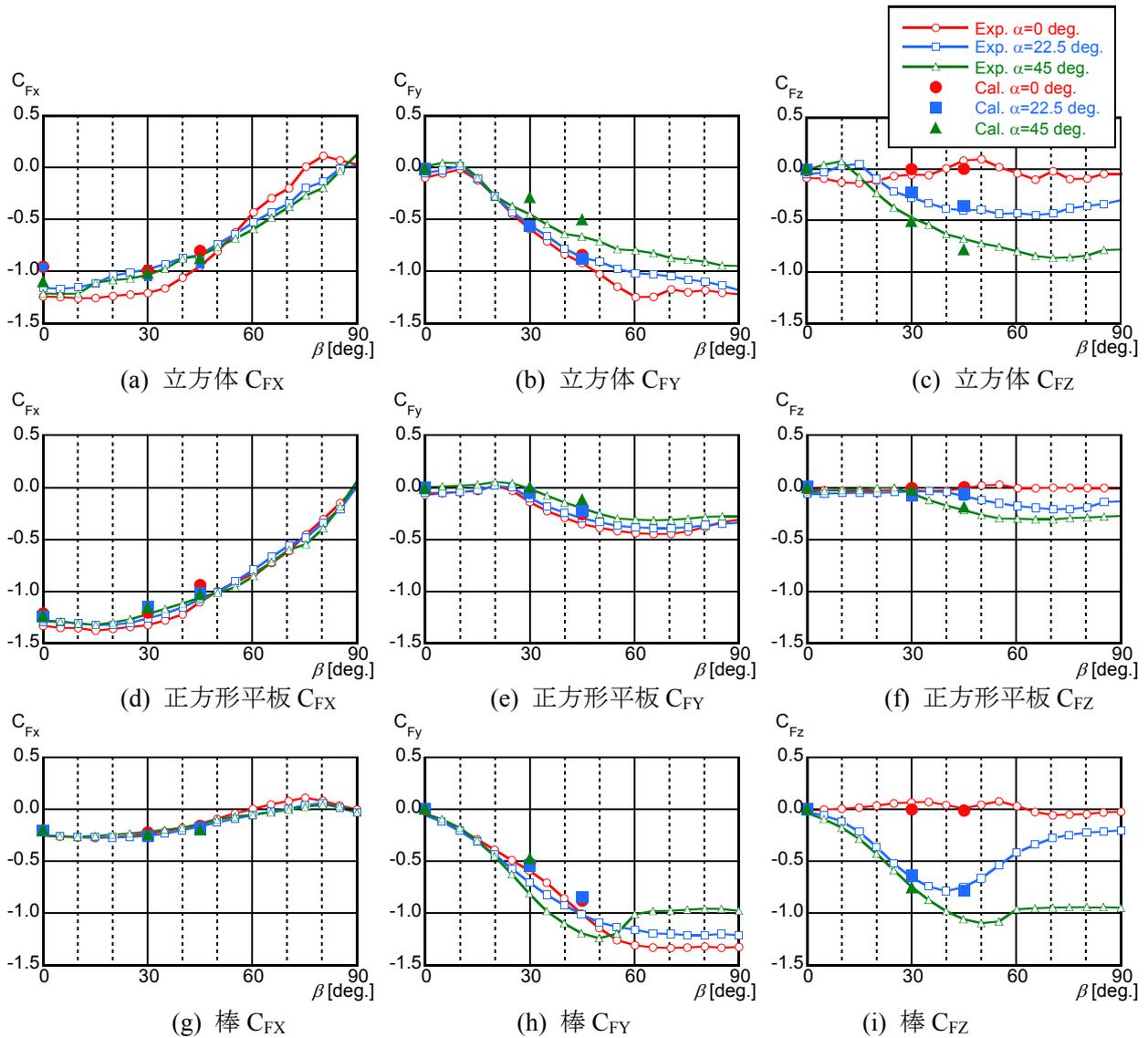


図-3.3 基本形状物体の風力係数(実験結果との比較)

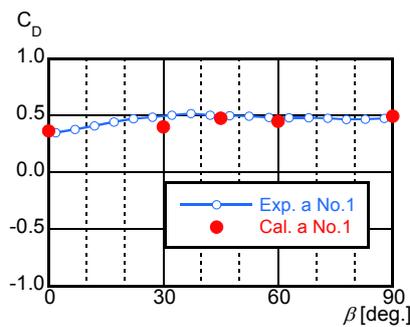


図-3.4 不整形物体 a の風力係数(実験結果との比較)

にそれぞれ示す。図中には風洞実験結果も付記する。風力係数の定義は、風洞実験と同じである(式(1a,1b,1c),(3))。ただし、U は実験風速の代わりに流入風速(1m/s)とした。図-3.3 より、数値流体計算結果は、実験結果を概ね再現していると言える。一部、立方体、ロール角 $\alpha=0^\circ$  の  $C_{FX}$  において数値流体計算結果が風洞実験結果よりも小さい値となった。野田ら<sup>2)</sup>によれば、標準 Smagrinisky モデルを用いた LES で 2次元正方形角柱を計算した場合、背面の圧力が小さめになるため抗力も小さくなると報告している。立方体ロール角 $\alpha=0^\circ$  のは2次元正方形角柱に近い形状となっており、本計算でもその性状が現われたものと考えられる。図-3.4 より、不整形物体の抗力係数  $C_D$  は概ね風洞実験結果と良い一致を示している。これらのことより、今回の数値流体計算結果は風洞実験をよく再現していると言える。

### 3.2.2 物体に作用する風圧係数分布

図-3.5 に立方体の風圧係数分布を示す。また、図-3.6 に不整形物体の風圧係数分布を示す。風圧係数の定義は以下の通りである。

$$C_{pi} = \frac{(p_i - p_0)}{1/2\rho U^2} \quad (5)$$

ここで、 $C_{pi}$ : $i$  点の風圧係数、 $p_i$ : $i$  点の平均風圧係数、 $p_0$ :基準圧力(流入面近傍中央部)、 $\rho$ :空気密度、 $U$ :流入風速(1m/s)

立方体の前面の風圧係数分布は、ロール角 $\alpha=0^\circ$ 、ヨー角 $\beta=0^\circ$  の場合、ほとんどの領域で正の値となっている。中央部は概ね1の値(赤い部分)となり、四端に進むに従い小さくなる。ただし、多くの領域で風圧係数は1に近い値となっている。ヨー角 $\beta$ が $30^\circ$ 、 $45^\circ$  と大きくなるに従い、風圧係数の値が1に近い部位は少なくなっている。図-3.4 の風洞実験による抗力係数  $C_D$  は、ヨー角 $\beta=0^\circ$  から $45^\circ$  に進むに従い小さくなっていることから、抗力係数  $C_D$  の値は物体前面の風圧分布に強く関連していると言える。

図-3.5 に不整形物体 a の風圧係数分布を示す。図-3.5 より、物体前面の中央部の風圧係数は概ね1に近い値となっている。ただし、前面の風圧係数が概ね1に近い領域(赤い部分)は、形状が不整形のため、立方体に比較して狭い。その結果、不整形物体の抗力係数は立方体に比べて小さくなったものと考えられる。不整形物体で特徴的な性状として、側面や上面で正の値が生じたり、強い負圧(青い部分)が生じている。これは表面に凹凸があるためであり、この凹凸の状況により表面風圧の分布が決定されている。更にその表面風圧分布の結果より全体風力も決定付けられている。ただし、不整形物体では、その表面の凹凸により風圧分布は異なるが、抗力係数の値はそれほど大きく異なることはなく、概ね0.5程度の値となる。

### 3.2.3 物体周りの流れの様子

立方体、正方形平板、棒、ならびに不整形物体 a の平均風速分布を図-3.6 に示す。図-3.6 より、物体背後の死水領域(物体背後の風速が概ね0となる領域。物体背後の青い部分。)の広さは、正方形平板、立方体、不整形物体 a、棒の順となっている。立方体と正方形平板とでは、前面の風圧係数分布が同様なのに抗力係数は正方形平板の方が大きくなる理由は、背面の負圧が正方形平板のほうが大きいためであるが(紙面の都合上図示していない。)、その背面の負圧が大きくなるのは、図-3.6 に示すように死水領域が大きいことに起因している。

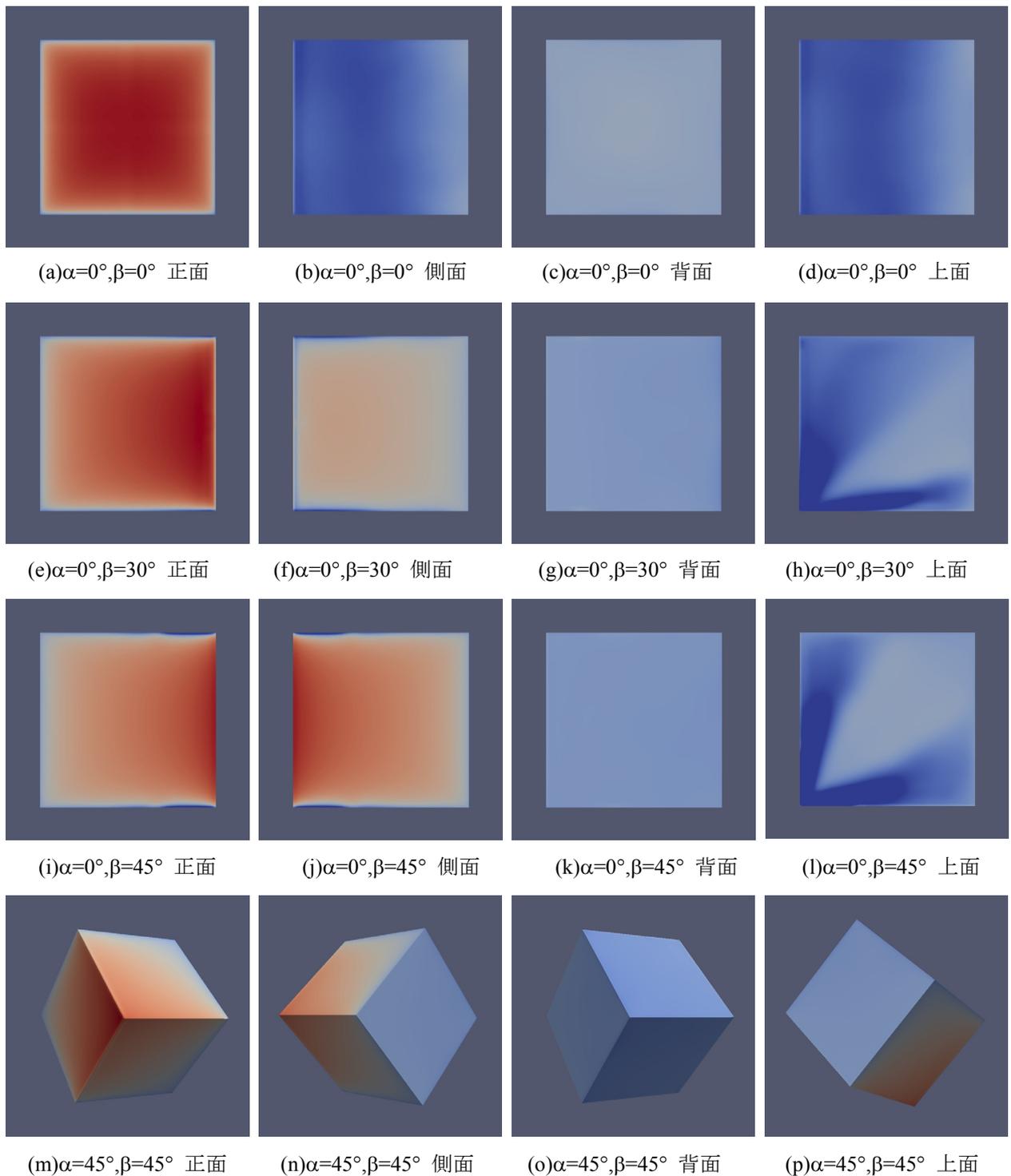
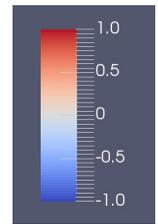
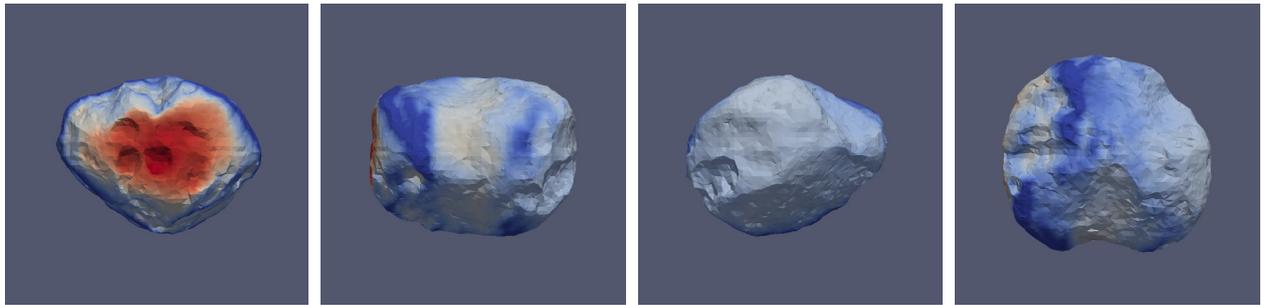
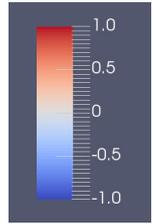


図-3.4 立方体表面の風圧係数分布

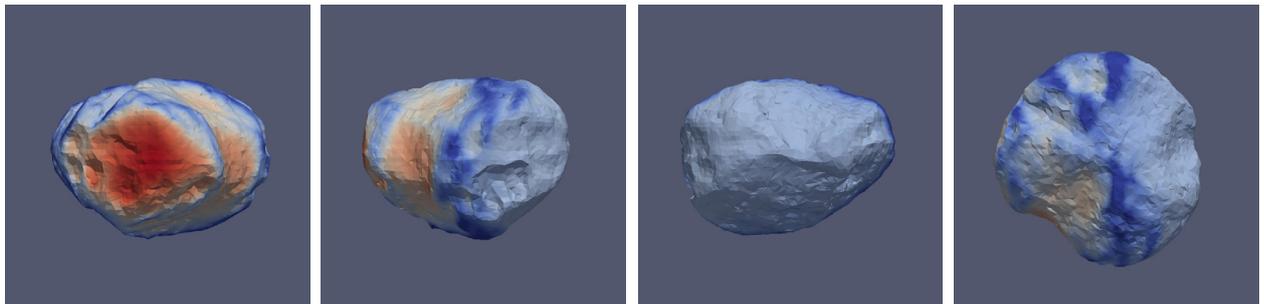


(a)  $\alpha=0^\circ, \beta=0^\circ$  正面

(b)  $\alpha=0^\circ, \beta=0^\circ$  側面

(c)  $\alpha=0^\circ, \beta=0^\circ$  背面

(d)  $\alpha=0^\circ, \beta=0^\circ$  上面

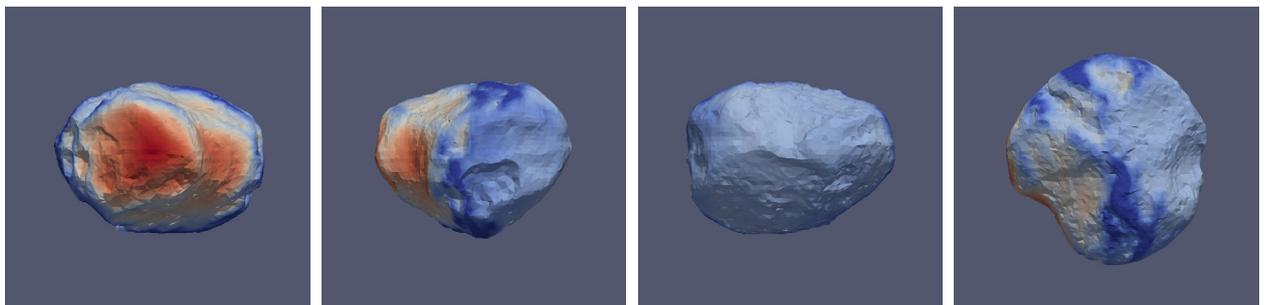


(e)  $\alpha=0^\circ, \beta=30^\circ$  正面

(f)  $\alpha=0^\circ, \beta=30^\circ$  側面

(g)  $\alpha=0^\circ, \beta=30^\circ$  背面

(h)  $\alpha=0^\circ, \beta=30^\circ$  上面

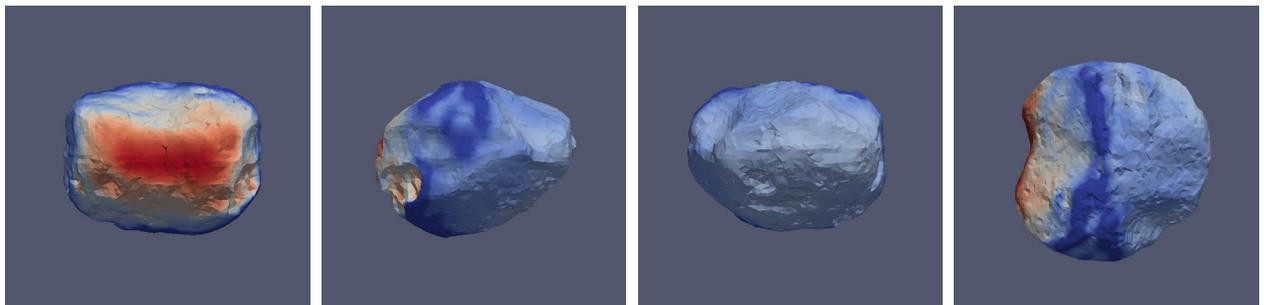


(i)  $\alpha=0^\circ, \beta=45^\circ$  正面

(j)  $\alpha=0^\circ, \beta=45^\circ$  側面

(k)  $\alpha=0^\circ, \beta=45^\circ$  背面

(l)  $\alpha=0^\circ, \beta=45^\circ$  上面



(m)  $\alpha=0^\circ, \beta=90^\circ$  正面

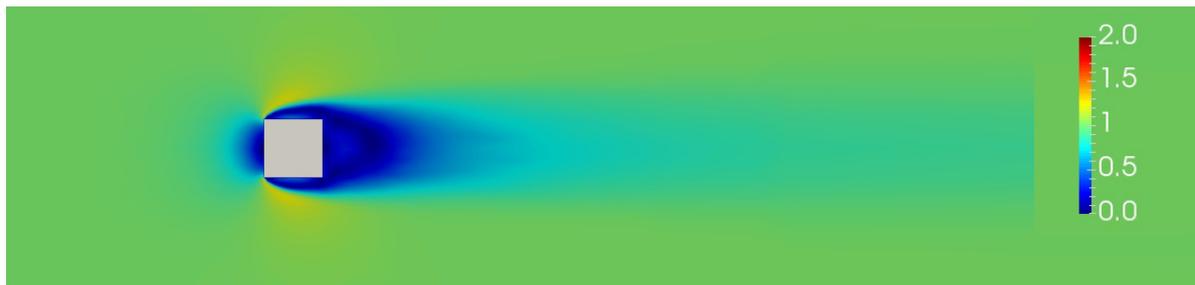
(n)  $\alpha=0^\circ, \beta=90^\circ$  側面

(o)  $\alpha=0^\circ, \beta=90^\circ$  背面

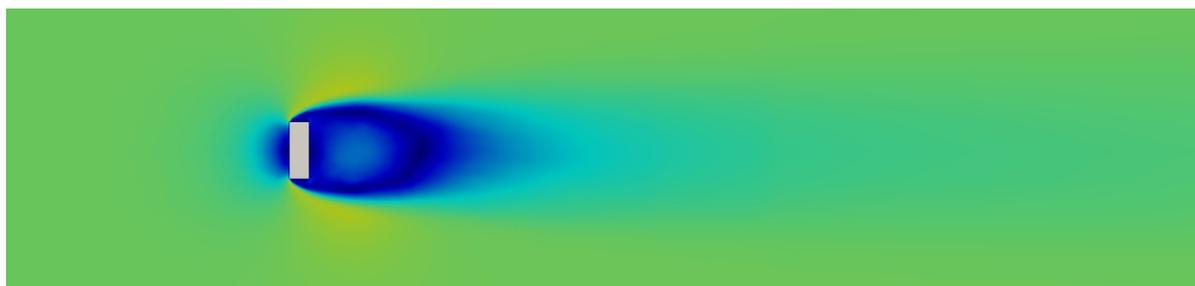
(p)  $\alpha=0^\circ, \beta=90^\circ$  上面

図-3.5 不整形物体 a 表面の風圧係数分布

このことを考慮して、不整形物体 a の死水領域の大きさ(物体自身の大きさとの相対的な大きさ)を他の物体と比較すると、立方体や正方形平板に比べて小さいことがわかる。ただし、抗力係数の小さい棒よりは大きい。また、前面の風速が低くなる領域(青い部分)も立方体や正方形平板に比べて小さい(物体自身の大きさとの相対的な大きさ)。このことは、前面の風圧係数が1に近い値となる領域が小さいことに関連する。すなわち、不整形物体の抗力係数が立方体や正方形平板に比較して小さいのは、前面の風速が低くなる領域と背面の死水領域が自身の大きさと比較して相対的に小さくなるためと考えられる。物体前後の風速が低くなる領域の傾向は瞬間的にも現われている。



(a) 立方体  $\alpha=0^\circ, \beta=0^\circ$



(b) 正方形平板  $\alpha=0^\circ, \beta=0^\circ$



(c) 棒  $\alpha=0^\circ, \beta=0^\circ$



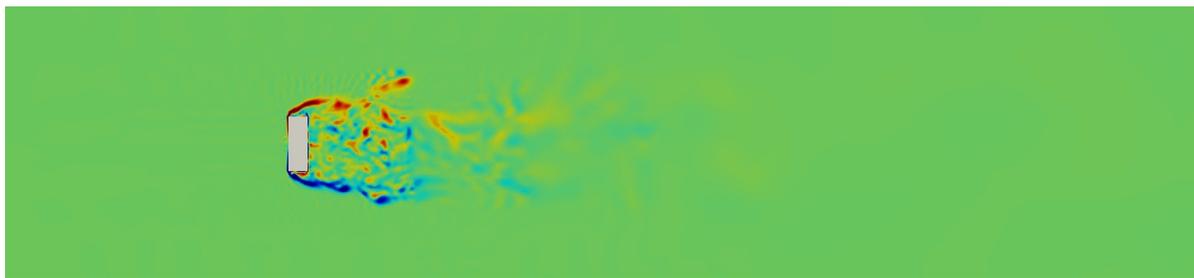
(d) 不整形物体 a ヨ一角軸 No.1  $\alpha=0^\circ$

図-3.6 平均風速分布(T=25sec.)

立方体，正方形平板，棒，ならびに不整形物体 a の瞬間渦度分布を図-3.7 に示す。抗力係数  $C_D$  が大きい立方体，正方形平板の瞬間渦度分布では，風上側隅角部からの剥離渦が物体側面から少し離れた場所に形成されていることが分かる。一方，不整形物体 a では，風上側からの剥離渦の形成場所は物体側面付近である。剥離渦が比較的物体側面近くに形成されているために物体背後の死水領域も小さくなっているものと思われる。



(a) 立方体  $\alpha=0^\circ, \beta=0^\circ$



(b) 正方形平板  $\alpha=0^\circ, \beta=0^\circ$



(c) 棒  $\alpha=0^\circ, \beta=0^\circ$



(d) 不整形物体 a ヨ一角軸 No.1  $\alpha=0^\circ$

図-3.7 瞬間渦度分布(T=25sec.)

#### 4. おわりに

本研究では、噴石の飛散性状を推定・予測し、落下衝突時の衝撃力を精度よく求めることを目的として、風洞実験により噴石を想定した不整形物体の風力を測定した。同時に立方体、正方形平板、棒といった基本的形状の物体の風力も測定し、不整形物体の風力と比較した。またこれら物体周りの流れを対象とした数値流体計算も実施し、不整形物体や基本的形状の物体に作用する風力を詳細に調査した。本研究の結果、以下の知見が得られた。

- ・噴石のような不整形な物体に作用する風力特性ならびに風圧分布特性を明らかにした。
- ・立方体、平板、棒といった一般的な整形物体に関しても系統的な風力係数データを取得することが出来た。
- ・不整形な物体の抗力係数は、立方体や平板などの値よりも小さく、その値は概ね0.5である。
- ・風向に正対する見附面積で定義された不整形物体の抗力係数は、風向による差異は小さい。
- ・不整形な物体の抗力係数が比較的小さいのは、立方体や平板に比べて前面の風圧係数が概ね1となる領域が小さいためと背面の死水領域が小さいためと考えられる。

#### 参考文献

- 1) R. B. Bird, W. Stewart, and E. Lightfoot, Transport Phenomena, 2<sup>nd</sup> edition (John Wiley & Sons: New York, 2002).
- 2)野田,中山, LES による一様乱流中における 2 次元角柱周りの流れの再現性, 日本建築学会構造系論文集, (538), 57-64, 2000 年 12 月

# Aerodynamic characteristics of irregularly shaped objects assuming eruption stone

## Project Representative

Hiroshi Noda

Faculty of Architecture, Kindai University

## Authors

Hiroshi Noda<sup>\*1</sup>, Takashi Maruyama<sup>\*2</sup>

\*1 Faculty of Architecture, Kindai University

\*2 Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

## Abstract

In this paper, wind forces of irregularly shaped objects assuming eruption stone was measured by wind tunnel experiment with the aim of estimating the impact properties of eruption stone at the time of a collision. The wind forces of objects of simple shapes such as cubes, square flat plates, and rods were also measured and compared with the wind forces of irregular objects.

The authors also conducted computational fluid dynamics targeting flows around these objects, and investigated the wind forces acting on irregularly shaped objects and simple shaped objects in detail. As a result of this research, the following knowledge were obtained.

- The characteristics of wind force and wind pressure acting on irregularly shaped objects are clarified.
- The wind force coefficient of simple shaped objects such as cubes, flat plates, and bars could be also obtained systematically.
- The drag coefficients of irregularly shaped objects are smaller than those of simple shaped objects such as cubes and flat plates. Those values are approximately 0.5.
- There are few differences for drag coefficient of irregularly shaped objects defined by the projection area with yaw angle.
- It is considered that the drag coefficient of the irregularly shaped object is relatively small because the region where the wind pressure coefficient on front surface is approximately 1 is smaller than those of the cube or the flat plate, and the dead water region of the back side is also small.

**Keywords:** eruption stone, irregular shape objects, aerodynamic characteristics,

この報告書に掲載の記事・写真等の二次使用を禁じます。  
著作権は、国立研究開発法人海洋研究開発機構及び報告書作成者にあります。これらの情報は、「私的使用」又は「引用」など著作権法上認められた場合を除き、国立研究開発法人海洋研究開発機構に無断で転載、複製、放送、公衆送信、翻訳、販売、貸与などの利用をすることはできません。国立研究開発法人海洋研究開発機構以外の著作権者がいる場合は著作権者の許諾も必要です。