

# 砂面上に置かれた物体周りの侵食・堆積に関する 風洞実験及びCFD解析

富永 禎秀\* 志田 貴之\*\* 大金 一二\*\*\* 寺島 正二郎\*\*\*  
佐藤 栄一\*\*\*\* 小野寺 正幸\*\*\*\*\* 竹園 恵\*\*\*\*\*

(平成18年10月31日受理)

Wind tunnel experiment and CFD Analysis for the wind erosion/deposition  
around an obstacle standing on the sand

Yoshihide TOMINAGA\* Takayuki SHIDA\*\* Katsuji OGANE\*\*\*  
Shojiro TERASHIMA\*\*\* Eiichi SATO\*\*\*\* Masayuki ONODERA\*\*\*\*\*  
and Satoshi TAKESONO\*\*\*\*\*

In this study, the wind tunnel experiment of the wind erosion/deposition around an obstacle standing on the sand is conducted in order to obtain the validation data for CFD analysis. The relationship between wind velocity, mass transport of sand and the distribution of sand depth due to wind erosion/deposition around an obstacle are investigated through the experiment. In the result of the experiment, large wind erosions are observed near windward corners of a cubic obstacle in contrast to small deposition in other areas. Furthermore, CFD analysis of wind erosion is conducted for predicting and comparing the results of the experiment.

Keywords : Blown sand, Cubic model, Wind Tunnel Experiment, CFD

## 1. はじめに

風により海岸の砂が飛散する飛砂は、特に日本海側沿岸地域などの冬季の季節風の強い地域における水域及び周辺環境の保全と再生の観点から深刻な問題である。しかしながら、これまでの飛砂防止対策は、その効果の物理的メカニズムや周辺環境への影響が確認された上で設計されたものとは必ずしも言えず、経験的に用いられているものが多かった。すなわち飛砂を伴う風、特に物体周辺の複雑な流れにおける砂の飛散や侵食・堆積性状の予測手法を整備することにより、効果的な対策が可能となると考えられるため、そのための基礎的な実験結果の蓄積やCFD (Computational Fluid Dynamics: 数値流体力学) による予測手法の確立が求められている。

本研究では、砂面上に置かれた立方体周辺の砂の侵食・堆積に関する風洞実験を行い、物体周辺の粒子の飛散・堆積に関する基礎的データを取得するとともに、同実験を対象とした砂粒子の侵食・堆積のモデルを組み込んだCFD解析を行い、第一段階としての予測

---

\* 建築学科 教授

\*\* 大学院工学研究科 自然・社会環境システム工学専攻 大学院生

\*\*\* 機械制御システム工学科 助教授

\*\*\*\* 情報電子工学科 助教授

\*\*\*\*\* 物質生物システム工学科 助教授

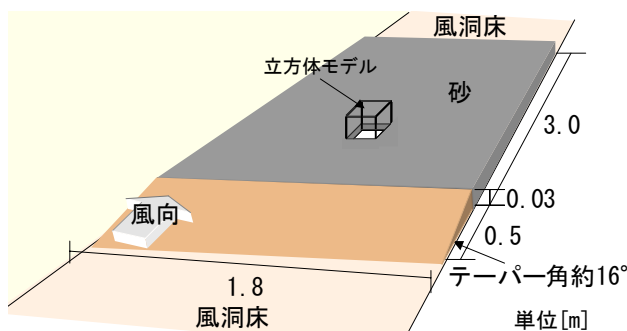


Fig.1 Setup of the experiment

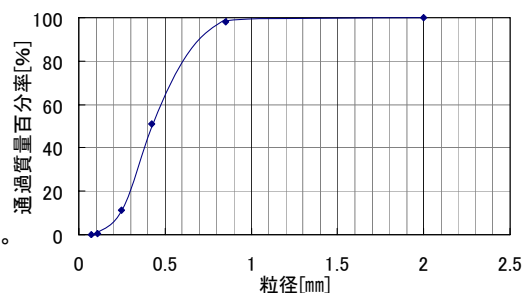


Fig.2 Grain distribution of sand

精度を確認することを目的とする。

## 2. 本研究に関連する既往の研究

風による砂の輸送の研究に関しては、Bagnold<sup>2)</sup>の先駆的な研究があり、風速と砂の輸送量の関係を実験的に求めている。その後、様々な研究者がこの関係式を修正あるいは精緻化している<sup>3)</sup>。CFD解析を用いた研究としては、例えば、辻本<sup>4)</sup>は、流体と砂粒子の相互作用をモデル化した乱流数値解析を行い、飛砂を含む風速分布と飛砂濃度分布の解析を行っている。またCFD解析によって砂丘の形成過程を説明しようとする研究<sup>5)</sup>や道路上の飛砂の輸送形態について検討した例<sup>6)</sup>もあるが、物体周辺の流れと砂の堆積・侵食の関係について詳細に検討した例は少ない。河村ら<sup>7)</sup>は、砂面上に立てられた円柱まわりの流れと砂の動きに関するCFD解析を行っているが、乱流モデルは使用されておらず、また結果について実験・実測等との比較は行われていない。

## 3. 風洞実験の概要

### 3.1 実験装置の概要

Fig.1に実験状況を示す。新潟工科大学所属の測定洞1.8m(高さ)×1.8m(幅)×13.0m(長さ)の境界層流型風洞の床面に養生用のシートを敷き、その上に実験領域前方から後方10H(H:立方体高さ=0.2m)まで砂を0.03m厚に均等に敷きつめ、飛砂量の測定を行った。風洞床面と実験領域の砂面とで生じる高低差はテーパを設置することで補った。その後、実験領域の砂面の風上端から5Hの位置に立方体モデルを置き、その周辺に砂が0.03m厚に敷きつめられた状況において風を吹かせ、立方体周辺の砂の堆積深の測定を行った。なお砂面の風上側にはラフネスを設置し、概ねべき指数0.25のべき乗則に従う流入風の鉛直プロファイルを作成した。

### 3.2 実験対象砂の性状

- 1) 含水率 地盤工学会基準(JSF T 121-1990)の土の含水比試験方法に基づき測定したところ、実験前・後の含水率はともに0.9%であり、ほぼ絶乾状態であった。
- 2) 粒度分布 実験で使用した砂の粒度分布をFig.2に示す。実験領域の離れた2箇所から採取した試料の平均の分布を調べた。中砂分(粒径0.25~0.85mm)が全体の87%を占めている。

### 3.3 測定方法

#### 1) 流入風の平均風速と乱れ強さの測定

熱線風速計を用いて流入風の平均風速と乱れの強さの測定を行った。センサーが飛散砂

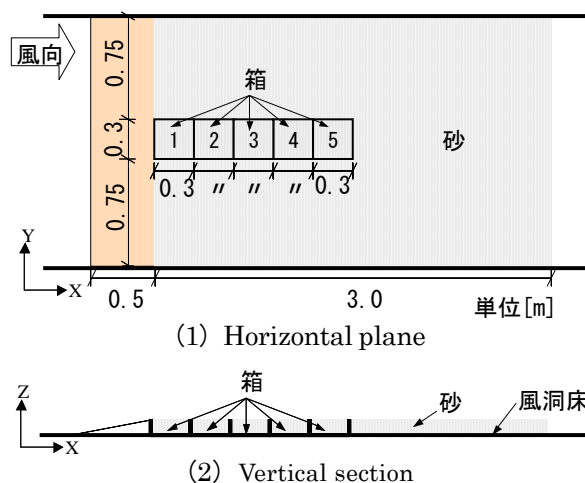


Fig.3 Location of the boxes for measuring the blown sand

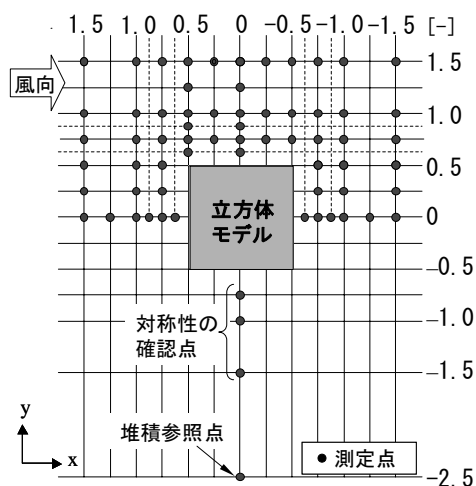


Fig.4 Measurement points for sand depth

粒子による影響を受けないように、スプレーのりを吹きつけ砂を固定した板を仮定の砂面として、風洞床面からの高さが実際の砂と同じになるように設置して測定を行った。測定点は、流れ方向の砂面風上端から0.3m、0.75m、1.35mの3地点において、それぞれ鉛直方向に9点測定した。

2) 飛砂量の測定 Fig.3に飛砂量の測定状況を示す。解析領域前方から砂の入った箱(0.3×0.3×0.03m)を5個、周辺と砂表面が均一になるように埋設し、風を吹かせる前の箱毎の質量と3分間風を吹かせた後の質量の変化を測定した。

### 3) 立方体周辺の砂の堆積深分布の測定

Fig.4に砂の堆積深の測定点を示す。実験は5分間、10分間、15分間、20分間風を吹かせた4回の実験を行い、それぞれにおいて、合計67点の測定点で砂の堆積深の測定を行った。砂の堆積深の測定方法は、まずトラバース装置を基準となる高さまで移動させ、風洞床面からトラバースの先端までの距離を計測する。各測定点にトラバースを平行移動させ、トラバースの先端から砂面までの距離を計測し、基準高さから差し引いて砂の堆積深を算出した。

4) 実験風速 予備実験により、吹き払い、吹き溜まりの成長が10分程度で安定し、定常状態となる風速として、境界層高さ(床面から1000mm=5H)での風速 $U_R$ で12.0m/sを実験風速とした。

## 4. 実験結果

### 4.1 流入風のパワー平均風速及び乱れ強さの測定結果

#### 1) 平均風速

Fig.5に平均風速を $U_R$ で基準化した風速比の鉛直分布を示す。各地点での風速の差はほとんどないが、地表面付近においては地点①の風速が地点②、③よりも若干弱い。

#### 2) 乱れ強さ

Fig.6に乱れ強さの鉛直分布を示す。下方ほど乱れが大きく、地表面付近で20%近い。

### 4.2 限界摩擦速度の算出

Fig.5の平均風速の鉛直プロファイル測定結果を各地点ごとに片対数軸でプロットして、

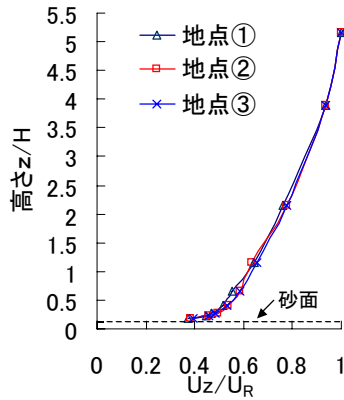


Fig.5 Mean velocity profiles

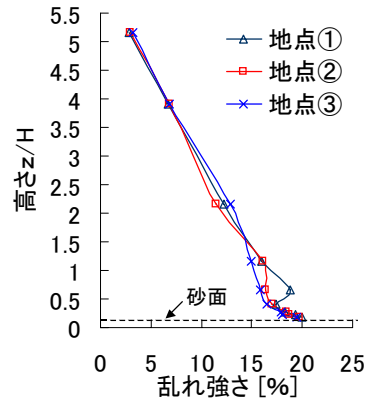


Fig.6 Turbulent intensity profiles

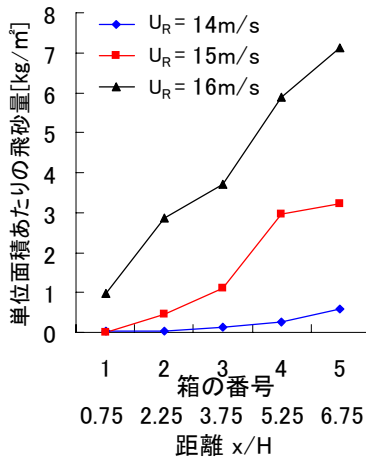


Fig.7 Relationship between the fetch distance and the transport rate of sand

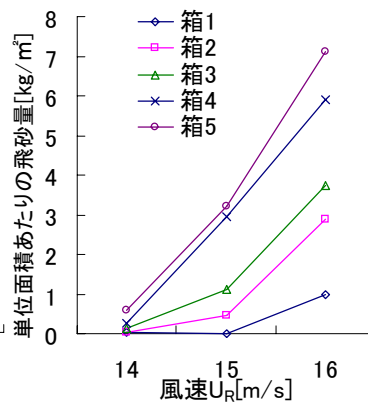


Fig.8 Transport rates of sand with various wind velocities

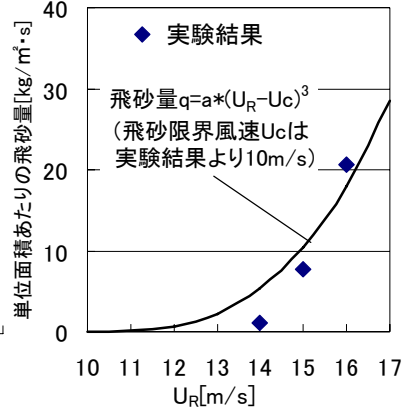


Fig.9 Relationship between the transport rate of sand and the wind velocity

風速が0となる位置の $z$ の値から粗度長 $z_0$ を推定し、以下の式より摩擦速度 $u^*$ を求めた。

$$\frac{U_z}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (1)$$

ここで $U_z$ は高さ $z$ における風速(今回は $z=100\text{mm}$ での風速を用いた),  $\kappa$ はカルマン定数(0.4),  $z_0$ は粗度長,  $u^*$ は摩擦速度である。実験結果より各地点における $u^*$ と境界層高さ(床面から1000mm)の風速 $U_R$ の関係式は以下のようなになる。

$$\text{地点①} : u^* = 0.0237U_R \quad (2) \quad \text{地点②} : u^* = 0.0266U_R \quad (3) \quad \text{地点③} : u^* = 0.0253U_R \quad (4)$$

(2) から (4) 式に実験時の風速 $U_R$ を代入し、測定時の $u^*$ を算出した。模型を設置しない状態で、風速を段階的に変化させながら飛砂の発生が目視で確認できた風速(限界風速) $U_R$ は10m/sであった。よって基準点を地点①として、限界摩擦速度 $u_{*c}$ を(2)式から求めると、0.23m/sとなる。

### 4.3 飛砂量の測定結果

Fig.7に吹送距離(砂面風上端から対象とする飛砂量測定箱中心までの距離)と飛砂量(実験前後での箱内の砂の質量の変化)の関係を示す。横軸には飛砂量測定箱1~5の番

号及び吹送距離を示し、縦軸には箱内の砂の変化量を飛砂量として示す。どの実験風速でも風下側の測定箱ほど飛砂量が多い結果となった。

Fig.8に実験風速による飛砂量の変化を示す。風速が大きくなるに従い、飛砂量が急激に増加する様子が確認できる。

Fig.9に飛砂量と風速の関係を示す。一般に、飛砂量は風速の3乗に比例するといわれている<sup>1)</sup>。図中の線は、今回の結果を風速の3乗で近似したものである。今回の測定結果では、低風速において相対的に飛砂量がやや多い結果となった。この点については、測定方法の問題も含めて今後さらに検討したい。

#### 4.4 砂の堆積深の空間分布の時間変化の測定結果

Photo1に立方体モデル周辺の砂の堆積深の時間変化の様子を示す。測定時の $U_R$ は12.0m/s、(2)式より推定される基準点の $u_*$ は0.28m/sであるので、限界摩擦速度を超えており、場全体で砂粒子が動いている状況である。立方体風上角部から側面に沿い後方へ伸びる吹き払いが形成されている。また10分経過以降は吹き払い域の大きさにはほとんど変化が見られない。

Fig.10に立方体周辺の砂の堆積深の測定結果を等値線図で示す。各測定点の砂の堆積深を実験前の堆積参照点(Fig.4)の堆積深で基準化した砂の堆積深比で示す。なお堆積参照点の値は、実験前後でほとんど変化はなかった。立方体前面から側面にかけての大きな吹き払いの風下側に吹き溜まりが形成されていることがわかる。

Fig.11に立方体モデル中心を通る断面の砂の堆積深の水平分布を示す。Fig.10と同様に砂の堆積深比で示す。流れ(x)方向を見ると、立方体前面の吹き払いが時間の経過に伴い成長する様子が観察される。立方体前方から $0.25x/H$ 離れた位置で最も侵食が大きい。一方、流れ直交(y)方向を見ると、側面では、 $0.85y/H$ の位置をピークとする大きな侵食を示し、10分経過以降は吹き払い形状及び吹き溜まり形状に大きな変化は見られない。

### 5. Saltationによる砂の侵食に関するCFD解析の概要

#### 5.1 解析対象

風洞実験を行った流れ場の砂面部分を対象に実スケールでCFD解析を行った。流れ場の計算条件をTable1に示す。流入条件は実験値に基づき与えた。また風洞実験結果から、Table2のように各パラメータを与えた。

#### 5.2 解析モデルの概要

乱流モデルとして改良 $k-\epsilon$  (Durbin) モデルを使用した。最初に、実験と同様に砂粒子が $0.03m (=0.15H)$  堆積していて移動がない状態で定常流れ場を計算し、その結果を初期条件として、以下に示す風による砂の輸送に伴う堆積深の変化の計算を、非定常の流体計算の各時間ステップ毎に行った。本解析では、砂粒子のSuspension (浮遊) は考慮せず、Saltationのみをモデル化した。飛砂輸送量 $Q$  [ $kg/m \cdot s$ ]の予測式として、砂の場合の定数等がわかっている河村<sup>3)</sup>による次式を用いた。

$$Q = C \frac{\rho}{g} (u_* - u_{*c}) (u_* + u_{*c})^2 \quad u_* > u_{*c} \quad (5)$$

$$Q = 0 \quad u_* \leq u_{*c} \quad (6)$$

ここで、 $\rho$  は流体の密度 [ $kg/m^3$ ]、 $u_*$  は摩擦速度 [ $m/s$ ]、 $u_{*c}$  は限界摩擦速度 [ $m/s$ ]、 $g$  は



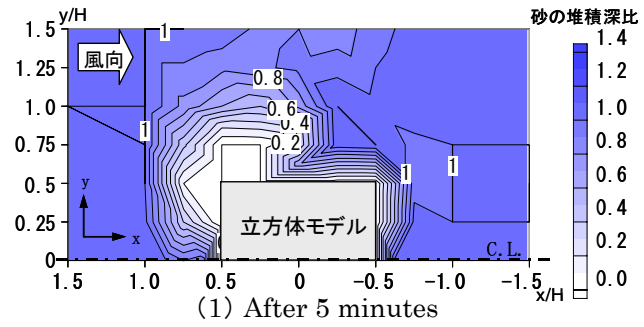
(1) After 5 minutes



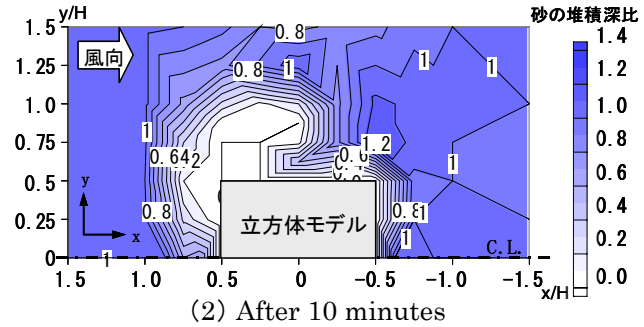
(2) After 10 minutes



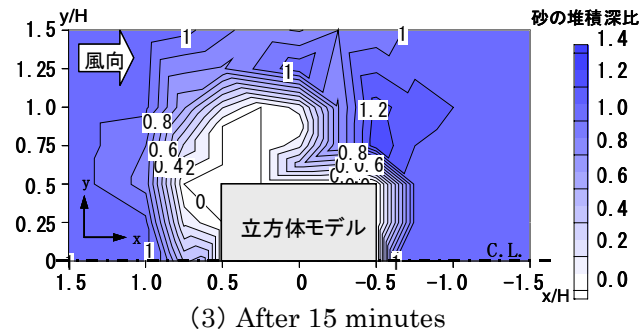
(3) After 15 minutes



(1) After 5 minutes



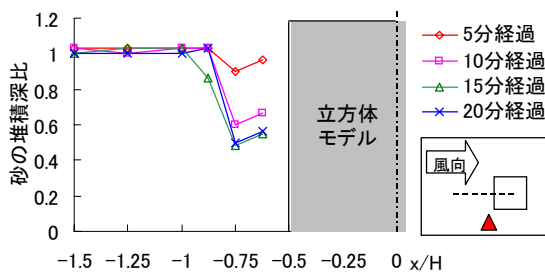
(2) After 10 minutes



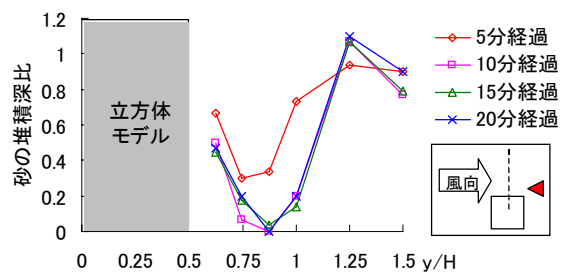
(3) After 15 minutes

Photo1 Distribution of sand erosion/ deposition around the cube

Fig.10 Measurement distribution of sand depth around the cube (x-y section)



(1) In front of the cube



(2) Side of the cube

Fig.11 Time evolution of sand distribution at centerline of the cube

重力加速度[m/s<sup>2</sup>], Cは定数(本研究では文献3の2.78をそのまま使用)である。

侵食のモデルについては,各点において1次的に摩擦速度に応じた侵食が起きると考える<sup>8,9)</sup>.その場合,砂の堆積深 $z_s$ の変化量は砂粒子の密度 $\rho_s$ を用いて次式で表される.

$$\rho_s \frac{dz_s}{dt} = -\frac{Q}{l} \quad (7)$$

$\ell$  は任意の長さスケールであるが、Saltation 層の厚さ  $h_s$  に相当すると考えると (8) 式となる。

$$\Delta z_s = -\Delta t \left( \frac{Q}{h_s \cdot \rho_s} \right) \quad (8)$$

なお、本研究では、 $h_s$  は流体第 1 セルの厚さに相当すると仮定した。本モデルでは、 $Q$  は必ず正となるので侵食のみが発生することとなる。

## 6. CFD 解析結果

流れ場の解析結果については、スペースの都合上省略するが、本研究で使用した数値解析手法及び乱流モデルの物体周辺流れの予測精度については、風洞実験結果との比較に基づき、文献<sup>10)</sup>で詳細に検討している。その結果、今回の主たる検討対象である建物角部周辺の強風域の風速分布については、高い精度の予測が可能であることを確認している。

Fig.12 に 5 分及び 10 分経過後（立方体高さとその高さの流入風速で定義された無次元時間  $t^*$  で 720, 1440）の砂の堆積深比の水平分布を示す。また、Photo2 に 5 分経過時の砂の堆積・侵食状況を示す。堆積深比の水平分布をみると、立方体風上側角部に吹き払いによる侵食が生じ、楕円状に後方へ広がっており、実験とよく対応している。

Fig.13 に立方体側方における砂の堆積深比の比較を示す。実験結果とほぼ同位置で侵食のピークとなっている。しかし、解析結果の方が侵食領域が横方向にやや広がっており、また解析結果の空間分布が、実験に比べて急峻となっている<sup>注)</sup>。本解析で使用した侵食のモデルは、風速の絶対値の大小に対応して侵食量が決まる。今回の実験風速では、場全体の摩擦速度が限界摩擦速度を超えている条件であり、一度移動した砂粒子は殆ど再堆積せず下流に飛散するため、実験結果との対応が良かったものと考えられる。

## 7. まとめ

砂面上に置かれた立方体周辺の砂の侵食・堆積に関する風洞実験を行い、砂の堆積深の空間分布等のデータを取得した。飛砂量の測定結果から、風速が大きくなると、飛砂量が急激に増加することを確認した。また立方体周辺では、風上側角部に大きな吹き払いが形成され、その吹き払い域の風下側に若干の堆積が確認された。また飛砂実験で取得したデータを基に砂の Saltation による侵食の CFD 解析を行った。今回使用したような比較的単純なモデル化であっても、実験で見られた立方体風上側角部の大きな吹き払い域の形状をよく再現することが確認された。今後、本実験結果を用いて、砂粒子や雪粒子の飛散・侵食のモデル化についてさらに検討していく予定である。

Table1 Computational conditions for CFD

解析領域	15H (x) × 10H (y) × 5H (z)
メッシュ分割	72 (x) × 61 (y) × 42 (z)
流入境界	<u>, k : 実験結果より与えた。 <v> = <w> = 0 とした。 $\varepsilon$ は $P_k = \varepsilon$ を仮定した。
側面・上空境界	諸量に関して法線方向の勾配をゼロとした。
流出境界	諸量に関して法線方向の勾配をゼロとした。
地表面境界	$z_0$ を含む形の対数則より与えた。 $z_0$ は実験における風速分布より推定した。
建物壁面境界	一般化対数則より与えた。
移流項スキーム	全輸送方程式に QUICK を使用した。
時間スキーム	一次精度後退差分を使用した。
乱流モデル	Durbin 型改良 $k-\varepsilon$ モデルを使用した。

Table2 Parameters of sand

砂の密度 $\rho_s$	1590 [kg/m <sup>3</sup> ]
限界摩擦速度 $u_{*t}$	0.23 [m/s]
粗度長 $z_0$	$1.0 \times 10^{-6}$ [m]



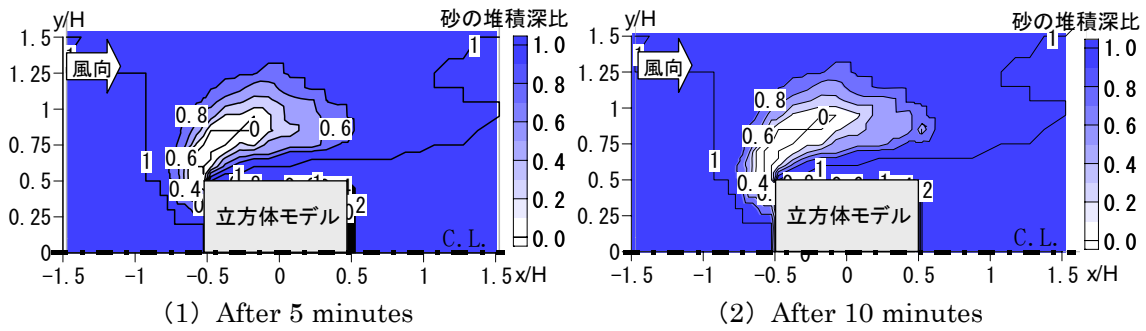


Fig.12 Distributions of sand depth obtained by CFD



Photo2 Distribution of sand erosion/deposition around the cube after 5min.

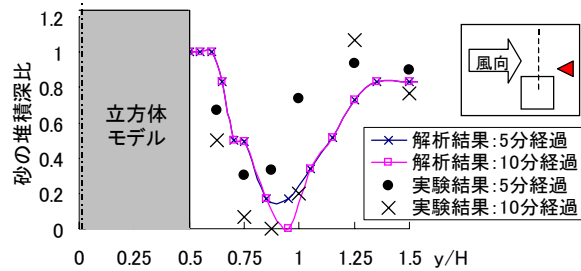


Fig.13 Distribution of sand depth at the side of the cube

### 謝辞

本研究は、平成17年度新潟工科大学学内共同研究費の助成を受けて行われた。記して関係各位に謝意を表す。

注) これらの主な要因は、本解析では、砂面の収支をセルごとに考えているため、安息角に関連する砂粒子の水平方向の移動が考慮されていないためと思われる。この点については、より詳細な砂の堆積モデルを考える必要がある。

### 参考文献

- 1) 富永, 持田, 吉野, 大風, 志田 : 第19回数値流体力学シンポジウム, C1-6, 2005.12
- 2) Bagnold, R.A., : The Physics of Blown Sand and Desert Dunes, Mathuen, London, (1941)
- 3) 例えば、河村: 飛砂の研究, 東京大学工学研究所報告, 5 (1951), 95-112
- 4) 辻本 : 第13回風工学シンポジウム論文集, 85-90
- 5) F.K.Wippermann.et al., : The wind-induced shaping and migration of an isolated dune a numerical experiment, Boundary-Layer Meteorol. 36 (1986), 319-334
- 6) Alhajraf, S. et al., : Proceedings of the 11th International Conference on Wind Engineering, Texas Tech University, Lubbock, June 2-5 (2003)
- 7) 河村, 菅, 林 : 日本機械学会論文集(B編), 65巻629号(1999-1), 124-129
- 8) T.Uematsu.et al., : Cold Regions Science and Technology, 20, 1991, pp65-73
- 9) J.H.M.Beyers.et al., : Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 92 (2004) pp725-747
- 10) 富永, 持田, 村上, 佐脇 : 日本建築学会計画系論文集, 第556号, 47-54, 2002.6