

〔特集〕 飛散を伴う流体现象と居住環境問題

物体周りの砂の侵食・堆積に関する風洞実験及び CFD 解析

*新潟工科大学 富永 禎 秀†

Wind tunnel experiment and CFD Analysis of Sand Erosion / Deposition around an Obstacle

Yoshihide TOMINAGA, Niigata Institute of Technology

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、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。

本稿では、筆者等が、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 解析を行った結果について報告する。

2 砂の侵食・堆積現象に関する既往の研究

風による砂の輸送の研究に関しては、Bagnold¹⁾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²⁻³⁾。CFD 解析を用いた研究としては、例えば、辻本⁴⁾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 Raupach⁵⁾は砂粒子と流体の複雑な移動プロセスを組み込んだモデルを提案している。さらに CFD 解析によ

て砂丘の形成過程を説明しようとする研究^{6,7)}や道路上の飛砂の輸送形態について検討した例⁸⁾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⁹⁾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

図 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ー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

実験対象砂は新潟県柏崎市の海岸から採取した。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、実験対象砂の含水率を測定したところ、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。砂の粒度分布を図 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 ~ 0.85 mm) が全体の 87% を占めている。

* 〒945-1195 新潟県柏崎市藤橋 1719

† E-mail: tominaga@abe.niit.ac.jp

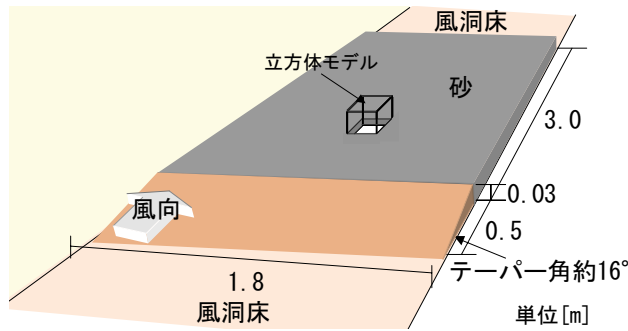


図1 風洞実験内における砂面及び物体の設置状況

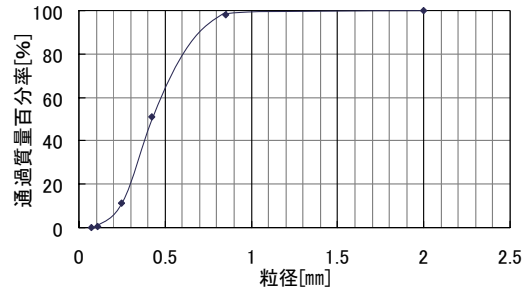


図2 実験に使用した砂の粒度分布

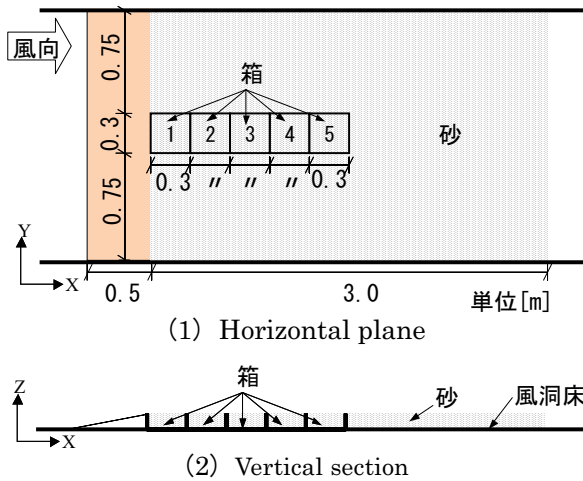


図3 飛砂量の測定方法

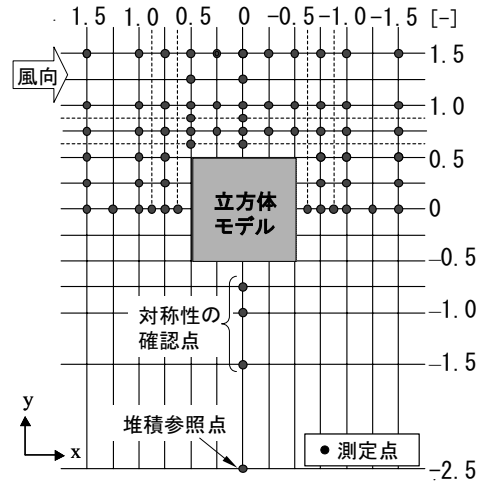


図4 砂の堆積深の測定点

3.3 測定方法

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想の砂面として、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0.3 m(地点①)、0.75 m(地点②)、1.35 m(地点③)の3地点において、それぞれ鉛直方向に9点測定した。

図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(0.3×0.3×0.03 m)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。

図4に立方体周辺の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。

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1000 mm=5H)での風速 U_R で12.0 m/sを実験風速とした。

4 実験結果

4.1 流入風の平均風速及び乱れ強さの測定結果

図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。図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

図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、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。

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

ここで U_z は高さ z における風速(今回は $z=100$ mmでの風速を用いた)、 κ はカルマン定数(0.4)、 z_0 は

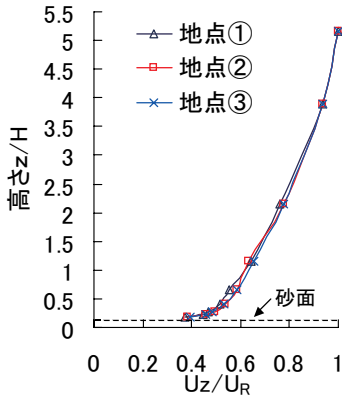


図5 流入気流の主流方向平均風速の鉛直分布

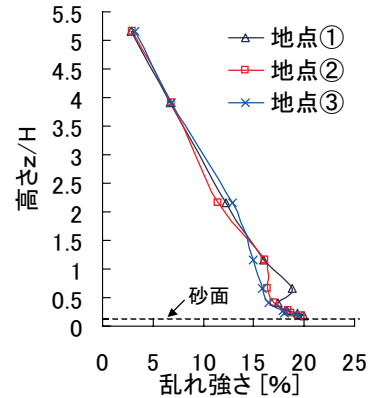


図6 流入気流の主流方向乱れ強さの鉛直分布

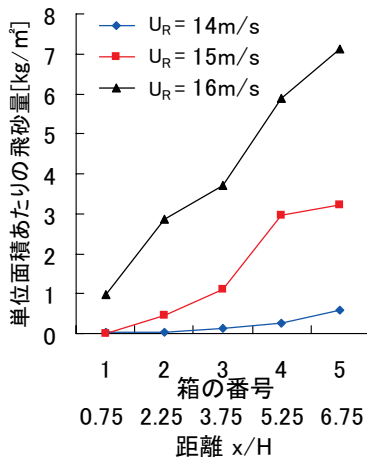


図7 吹送距離と飛砂量の関係

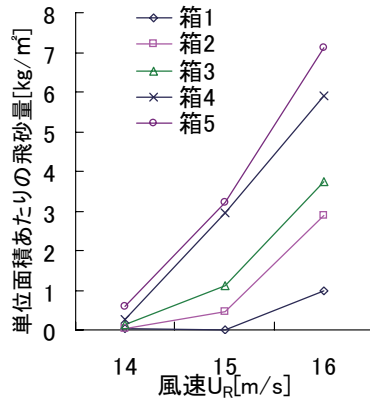


図8 測定位置別の風速と飛砂量の関係

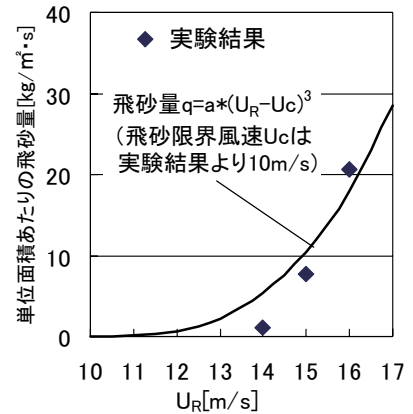


図9 風速と飛砂量の関係

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 1000 mm) の風速 U_R の関係式は以下ようになる。

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

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

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

(2) ~ (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_{*t} 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

図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。

図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。図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¹⁾。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

写真1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_{*t} 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。

図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 (図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。



(1) 5分後



(2) 10分後



(3) 15分後

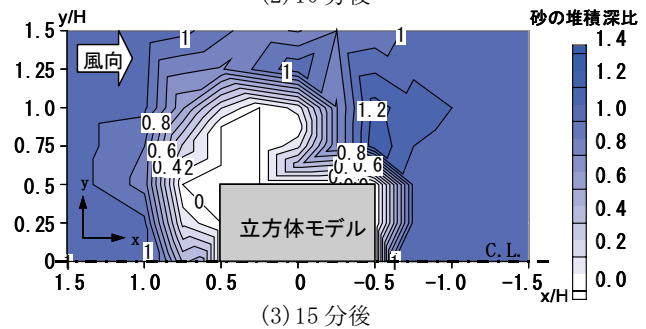
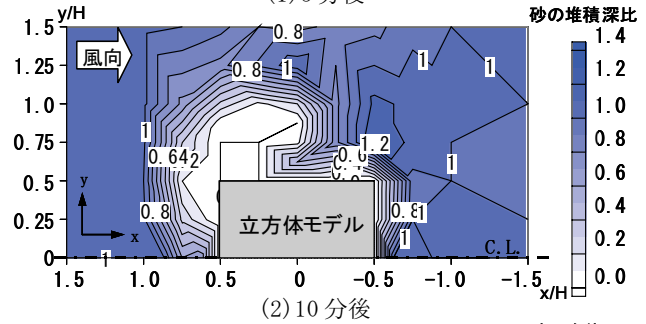
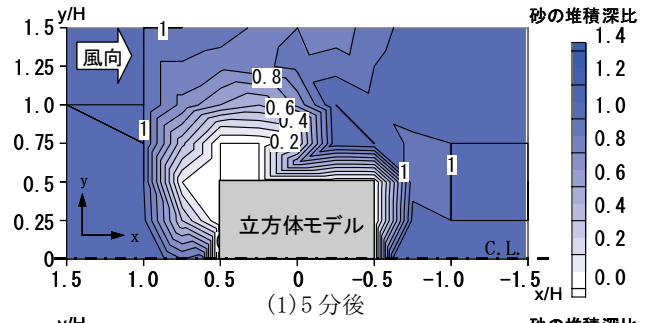
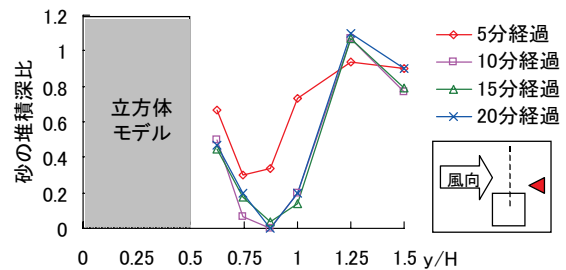
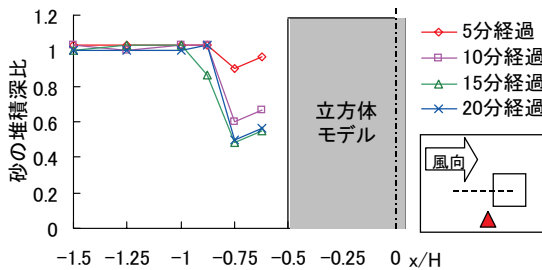


写真1 立方体周辺の砂の侵食/堆積状況

図10 堆積深の分布 (x-y断面)



(1) 立方体風上面

(2) 立方体風下面

図11 立方体中心軸上の堆積深の時間変化

図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。図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 物体周辺の砂の侵食に関するCFD解析

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表1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、表2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-ε (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

表1 CFDの解析条件

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。 εは P _k = ε 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-εモデルを使用した。

表2 CFDにおける砂粒子に係わるパラメータ

砂の密度 ρ _s	1590 [kg/m ³]
限界摩擦速度 u _{*t}	0.23 [m/s]
粗度長 z ₀	1.0×10 ⁻⁶ [m]

の流体計算の各時間ステップ毎に行った。なお砂粒子の移動形態には、大きく分けて Suspension (空気中の浮遊) と Saltation (地表面の転動) の2種類があるが、本解析では、Suspension は、風洞実験の観察結果からその寄与はかなり小さいと考えて考慮せず、Saltation のみをモデル化の対象とした。飛砂輸送量 Q [kg/m³・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²⁾による次式を用いた。

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

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

ここで、ρ は流体の密度 [kg/m³]、u_{*} は摩擦速度 [m/s]、u_{*t} は限界摩擦速度 [m/s]、g は重力加速度 [m/s²]、C は定数 (本研究では文献2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次元的に摩擦速度に応じた侵食が起きると考える^{10,11)}。その場合、砂の堆積深 z_s の変化量は砂粒子の密度 ρ_s を用いて次式で表される。

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

λ 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。

$$\rho_s \frac{dz_s}{dt} = -\frac{Q}{h_s} \quad (8)$$

なお、本研究では、h_s を空間において一定値と考え、流体第1セルの厚さをそれに合わせた。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。

侵食が進行し、砂の侵食分が砂面下の仮想的なCFD解析セルの厚みの半分以下になった場合には、そのセルを流体とみなし、その逆に、堆積が進行し砂の堆積厚が流体第1セルの厚みの半分を超えた場合には、そのセルを固体とみなす。このようにして、侵食・堆積による砂面形状の変化に伴う流れ場の変化を計算に組み込んだ。

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¹²⁾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。

図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、写真2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。

図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^{注)}。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

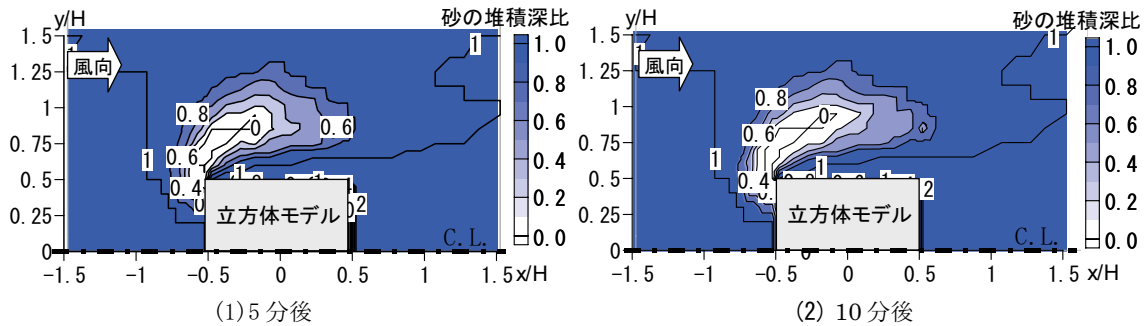


図12 CFDにより得られた堆積深の分布



写真2 実験により得られた立方体周辺の砂の侵食/堆積のパターン (5分後)

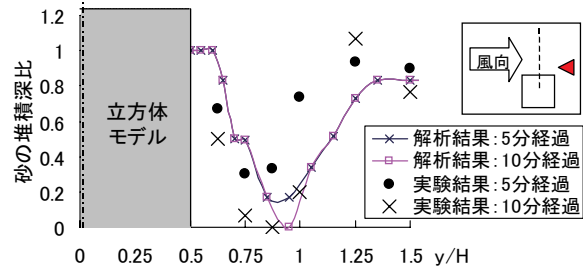


図13 堆積深の風洞実験とCFDの比較

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。

謝辞

本研究は、東北大学大学院工学研究科・持田灯教授、吉野博教授との共同で行われたものである。また実施に当たっては新潟工科大学大学院生・志田貴之氏、東北大学大学院生・大風翼氏のご協力を得た。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。

引用文献

1) Bagnold, R.A. : The Physics of Blown Sand and Desert Dunes, Mathuen, London (1941)
 2) 河村：飛砂の研究，東京大学理工学研究所報告 5 (1951) 95-112
 3) Y. Shao and M.R. Raupach, The Overshoot and Equilibra-

tion of Saltation, Journal of Geophysical Research, vol. 97, No. D18, 20, 559-20, 564
 4) 辻本：飛砂層を伴う風と飛砂濃度分布，第13回風工学シンポジウム論文集 (1994) 85-90
 5) M. R. Raupach, Hua Lu, Representation of land-surface processes in aeolian transport models, Environmental Modelling & Software 19 (2004) 93-112
 6) Wippermann, F. K., Gross G. : The wind-induced shaping and migration of an isolated dune a numerical experiment, Boundary-Layer Meteorol. 36 (1986) 319-334
 7) Hermann, H. J., Sauermann, G. : The shape of dunes, Physica A 283 (2000) 24-30
 8) Alhajraf, S. et al. : Numerical and Experimental Modeling of Drifting Sand on Roads, Proceedings of the 11th International Conference on Wind Engineering, Texas Tech University, Lubbock, June 2-5 (2003)
 9) 河村，菅，林：砂面上に立てられた円柱まわりの流れと砂の動きの数値的研究，日本機械学会論文集 (B編)，65巻，629号 (1999) 124-129
 10) Uematsu, T. et al. : Three-dimensional numerical simulation of snowdrift Cold Regions Science and Technology 20 (1991) 65-73
 11) Beyers, J. M. H. et al. : Numerical simulation of three-dimensional, transient snow drifting around a cube, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 92 (2004) 725-747
 12) 富永，持田，村上，佐脇：高層建物周辺気流のCFD解析における各種改良 $k-\epsilon$ モデルの比較，日本建築学会計画系論文集，第556号 (2002) 47-54