

# 数値流体計算による積雪・粉塵飛散の予測手法

片岡 浩人 田畑 侑一

## Numerical Prediction Method for Snowdrift and Dust Dispersion

Hiroto Kataoka Yuichi Tabata

### Abstract

Before residential developments or road constructions get under way, builders need to pay close attention to the surrounding areas. Dust dispersion into adjacent existing residential area has to be prevented to the greatest extent. In recent years, high-rise buildings have been planned in heavy snowfall regions in Japan and this has evoked public concerns about snowdrift formation caused by building storms. Dust dispersion and snowdrift can be treated effectively by a numerical flow simulation because they are both modeled numerically as a particulate matter transport process in the air. Hence, a numerical flow simulation for evaluating the effectiveness of dust-dispersion protection measures implemented at construction sites and for predicting the effect of a planned building on the neighboring snowdrift formation is developed in the same manner. In this paper, wind-tunnel experiments for obtaining the relations between dust ejection rates and the wind velocities are described. Using the experimental results, the dust protection effect of the net-fence as a measure for the mitigation of dust dispersion from the bare ground surface is simulated. Then, the outline of the snowdrift simulation is explained and the snowdrift formations predicted within a city by the present method are described.

### 概要

宅地造成や道路建設等の土木工事が住宅地の近くで行われる場合、工事に伴う粉塵飛散の抑制を求められる。一方、多雪地帯でも超高層建築物が計画されるようになり、構造物周辺で風雪による雪の吹きだまりの形成による悪影響が懸念される。これら粉塵飛散や積雪を数値流体計算で予測する場合、粒子状物質の大気中での移流拡散を取り扱うという点で、両者は同じ扱いが出来る。そこで、土木工事現場における粉塵飛散防止対策の効果確認、ならびに計画建物が市街地内の積雪深分布に与える影響の予測評価を目的として、数値流体解析手法の開発を行った。ここでは、風速と粉塵飛散速度の関係をモデル化するために行った風洞実験結果について述べ、同結果を用いた粉塵の飛散予測結果を示す。次に、積雪深予測手法について述べ、市街地内の高層建物周りに生じる積雪深分布の予測を目的とした解析事例を示す。

### 1. はじめに

宅地造成や道路建設等の土木工事が住宅地の近くで行われる場合、工事に伴う粉塵飛散の抑制を求められる。砂粒子のような粒径が大きい粉塵の場合は、強風によって巻き上げられることで初めて発生源になる。また重力沈降によって地表面付近に到達した粒子は建物風下など風の弱い場所に吹き寄せられて堆積する。

風による輸送に対して同様な挙動を示す粒子に雪粒子がある。近年、国内の多雪地帯でも超高層建築物が計画されるようになり、構造物周辺で風雪による雪の吹きだまりの形成による悪影響が懸念される。また構造物からの降雪・落雪による被害を防止するためには、庇の積雪や壁面への吹き付けによる着雪への配慮が必要である。

雪や粉塵の建物周辺でのふるまいをFig. 1に示す。これら粒子の動きを数値流体計算で予測する場合、例えば窒素酸化物といったガス状大気汚染物質の移流拡散を予測する場合と異なり、1) 重力沈降、2) 風速に応じて地表面からの粒子の巻き上げ量（飛散速度）が変化する、3) 積

雪や砂丘では吹き寄せと飛雪・飛砂の発生により地表面形状が変化する、4) 雪の場合にはバックグラウンドの降雪がある、という点を考慮しなくてはならない。

そこで数値流体計算による積雪や粉塵飛散の予測手法を開発した。本論文では、はじめに防塵ネットフェンス

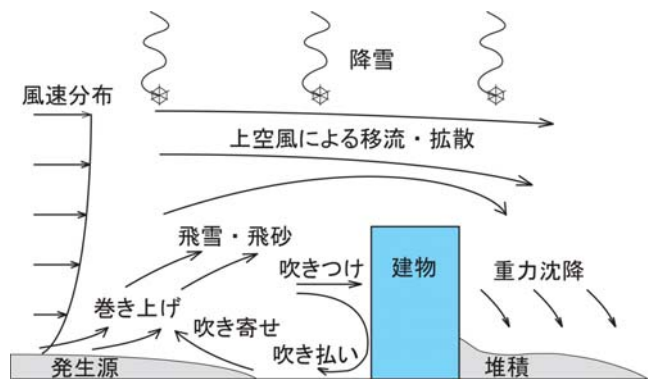


Fig. 1 建物周辺で生じる積雪・粉塵飛散の概要  
Schematic of Snow Drift and Dust Dispersion around Building

による防塵効果の予測を対象とした解析例について述べる。その際、風速と粉塵飛散速度の関係を求めた風洞実験結果についても述べる。次に、積雪深分布予測手法について述べ、市街地内での積雪深分布の予測結果を示す。

## 2. 粉塵飛散予測シミュレーション

### 2.1 地表面からの粉塵飛散速度

建設機械の稼働と車両走行による粉塵の発生を対象とし、道路工事に伴う粉塵飛散を簡易式で予測する手法が提案されている<sup>1)</sup>。しかし同手法では、裸地や処分残土からの風による粉塵の巻き上げや、防塵ネットフェンスによる飛散防止効果を予測できない。

砂漠を対象として、飛砂量と地表面摩擦速度との関係を求めたものとして、以下の河村によるモデル式<sup>2)</sup>がある。

$$q = K \frac{\rho}{g} (u^* - u^*_c)(u^* + u^*_c)^2 \quad u^* > u^*_c \quad (1)$$

ただし、 $q$ ：単位幅単位時間あたりの飛砂量 [kg/m/s]、 $K$ ：モデル定数  $2.78 \times 10^{-3}$ [-]、 $u^*_c$ ：限界摩擦速度 [m/s]、 $g$ ：重力加速度  $9.8$ [m/s<sup>2</sup>]、 $\rho$ ：空気密度[kg/m<sup>3</sup>]。ここで得られる飛砂量は風直交断面内を通過する量であり、単位面積あたりの地表面からの飛散速度とは異なる。また平衡状態を仮定した式であり、風速や地形の変化による過渡的な飛散速度の変化は評価できない。

(1)式中の限界摩擦速度  $u^*_c$  については、Bagnold<sup>3)</sup>によって評価式が提案されている。

$$u^*_c = A \sqrt{gd \frac{\rho_d - \rho}{\rho}} \quad (2)$$

ただし  $A$ ：モデル定数[-]、 $d$ ：飛砂の直径[m]、 $\rho_d$ ：飛砂の密度[kg/m<sup>3</sup>]。モデル定数  $A$  の値として約0.1が示されている。

吉崎<sup>4)</sup>は砂漠緑化の観点から、風による砂輸送現象に関する研究のレビューを行っている。それによると、粒径が0.06mm以下の粒子では粒径と限界摩擦速度の関係が逆転し、その原因として粘性低層内に埋もれて乱れによる攪乱されにくいことを挙げている。

郷ら<sup>5)</sup>は、貯炭ヤードからの炭塵飛散現象を対象とし

た風洞実験を行い、0.19mm以上の粒径の限界摩擦速度はBagnold式 ( $A=0.12$ ) で、飛散量は河村の式でそれぞれ近似できることを示した。なお、0.19mm以下の粒子で限界摩擦速度が大きくなる理由として、微細粒子では単位体積あたりの表面積が大きくなり、粒子間の摩擦力が支配的になることが原因であると推定している。

一方Shaoら<sup>6)</sup>は、気流から飛砂への運動量移動プロセスから以下の関係を導出した。

$$N = \eta(\tau - \tau_c) = \eta\rho(u^{*2} - u^{*c2}) \quad u^* > u^*_c \quad (3)$$

ただし、 $N$ ：単位時間・単位面積あたりの飛砂数 [個/m<sup>2</sup>/s]、 $\eta$ ：有次元係数[個/N/s]、 $\tau$ ：地表面への運動量フラックス [N/m<sup>2</sup>]、 $\tau_c$ ：限界せん断応力 [N/m<sup>2</sup>]。

一方で気流から飛砂にもたらされる運動量は次式で表わすことができる。

$$\frac{N}{\eta} \approx Nm u_d = Nm(cu^*) = \alpha\rho_d \frac{\pi}{6} d^3 Nu^* \quad (4)$$

ただし、 $m$ ：飛砂質量 [kg/個]、 $u_d$ ：飛砂が飛び出すときの初速 [m/s]、 $\alpha$ ：飛砂の初速と摩擦速度に対する比例係数 [-]。

以上の関係から飛散速度  $Q$  [kg/m<sup>2</sup>/s]は次式より求めることができる。

$$Q = \rho_d \frac{\pi}{6} d^3 N = \rho_d \frac{\pi}{6} d^3 \times \frac{\rho(u^{*2} - u^{*c2})}{\alpha\rho_d \frac{\pi}{6} d^3 u^*} \quad (5)$$

$$= \rho_d \zeta_d \frac{u^{*2} - u^{*c2}}{u^*} \quad u^* > u^*_c$$

ここで  $\zeta_d$ ：モデル定数[-]。

以上から、粉塵の飛散速度をモデル化するには、粒子径  $d$  や密度  $\rho_d$  と、モデル定数  $A$  および  $\zeta$  との関係を実験から求めれば良いことになる。

そこで、粒径分布が既知な珪砂を用いた粉塵飛散速度に関する風洞実験を行い、上記の関係を調べた。

### 2.2 風洞実験の概要

風洞実験は、大林組技術研究所の多目的大型風洞（測定胴断面3m×3m）を用いて行った。Fig. 2に粉塵飛散実

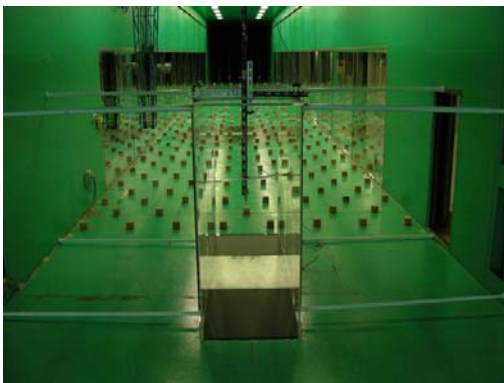


Fig. 2 粉塵飛散実験装置の設置状況  
Experimental Apparatus Installed in Wind-tunnel

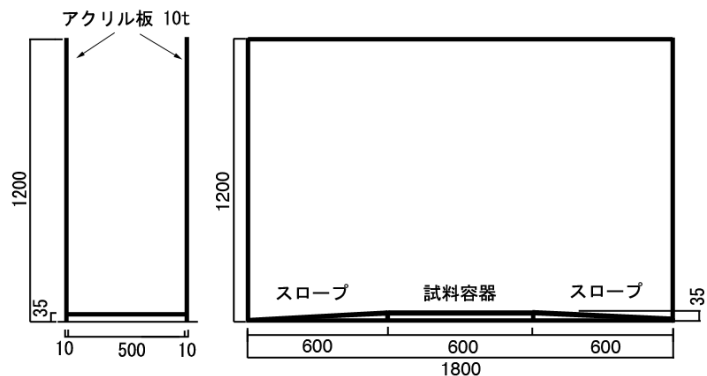


Fig. 3 粉塵飛散実験装置概要  
Schematics of Experimental Apparatus for Dust Dispersion

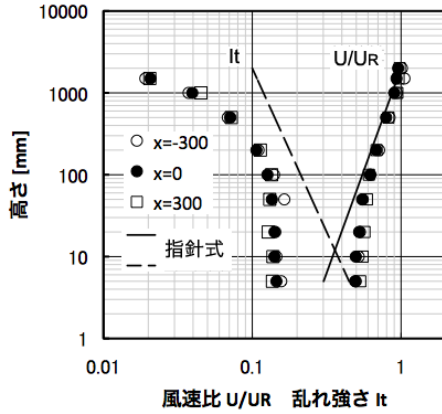


Fig. 4 実験装置内気流の鉛直分布  
Velocity Profiles within Experimental Apparatus

験装置の設置状況を示す。実験装置の風上にはスパイヤと粗度ブロックを設置し、境界層厚さ約2m、風速鉛直プロファイルのベキ指数 $\alpha=0.2$ の、建築学会荷重指針<sup>7)</sup>に規定されている粗度区分III相当の気流を作成した。

粉塵飛散実験装置の概要をFig. 3に示す。試料となる珪砂を見付幅500mm×奥行600mm×深さ35mmのステンレス製試料容器（アルミ製蓋付き）に入れる。試料容器の風上と風下にはテーパ角約3.3°のスロープを設けてある。風横方向にはアクリル透明板で出来た端版を取り付けた。

試料には粒径分布が既知である珪砂を採用し、粒径の小さい方から8号、6号、4号の三種類の珪砂を用いた。いずれの珪砂も提供された乾燥したままの状態、試料容器に移した。

実験は以下の手順で実施した。1) 珪砂を充填した試料容器の質量を計測。2) 容器を実験装置にセットし、風洞内気流が所定の風速に達した後、容器の蓋を開放し、珪砂を飛散させる。3) 1分間経過後、再び蓋を閉じ、風洞の気流が停止してから容器を取り出して質量を計測。1)と3)の差が珪砂の飛散量となる。一連の手順を1珪砂1風速あたり5回繰り返し、平均値を飛散量とした。

試料容器の上方3箇所計測した風速の鉛直分布をFig. 4に、粉塵飛散速度の測定結果をTable 1にそれぞれ示す。ここで摩擦速度は以下の方法で求めた。I型プローブが風方向( $\sigma_u$ )と鉛直方向( $\sigma_w$ )の二方向の成分を測定していることから、変動風速三成分の比を $\sigma_u:\sigma_v:\sigma_w=1:0.8:0.6$ とみなし、次式より乱れエネルギーを求める。

$$k = \frac{1}{2}(\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2) \cong 0.75(\sigma_u^2 + \sigma_w^2) \quad (6)$$

最も床上に近い測定点が大対数域にあると仮定すると、摩擦速度 $u^*$ は次式より求められる。

$$u^* = C_\mu^{1/4} \sqrt{k}, \quad C_\mu = 0.09 \quad (7)$$

### 2.3 粉塵飛散速度のモデル化

実験結果を(5)式で近似した結果をFig. 5に示す。またそ

Table 1 粉塵飛散量測定結果 (5回試験の平均値)  
Results of Dust Dispersion Rates

珪砂	粒径 [mm]	摩擦速度 $u^*$ [m/s]	飛散量 [g/min]	飛散速度 [g/m <sup>2</sup> /s]
8	0.11	0.339	7.0	0.40
		0.509	32.0	1.78
		0.678	98.2	5.46
6	0.34	0.339	0.0	0.00
		0.373	43.4	2.41
		0.407	185.6	10.31
		0.509	1124.8	62.49
4	0.75	0.339	0.0	0.00
		0.509	7.8	0.43
		0.678	32.4	1.80

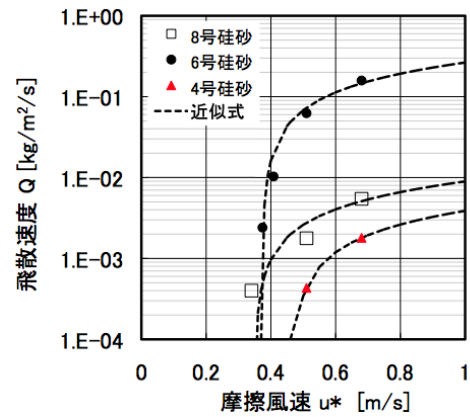


Fig. 5 珪砂の飛散速度と摩擦速度の関係  
Dispersion Rates of Silica Sands and Friction Velocity

Table 2 珪砂のパラメータ  
Physicality Values of Silica Sands

珪砂	8号	6号	4号
$d$ [mm]	0.11	0.34	0.75
$\rho_d$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2520	2620	2620
$u^*_{c}$ [m/s]	0.35	0.37	0.46
$\zeta_d$ [-]	8.51E-03	2.56E-01	4.12E-03

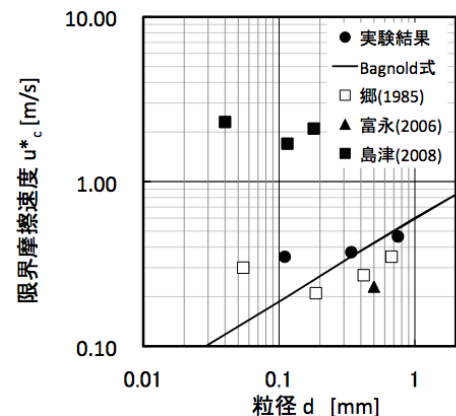


Fig. 6 珪砂の粒径と限界摩擦速度の関係  
Diameter of Silica Sands and Critical Friction Velocity

の際に用いた各珪砂のパラメータをTable 2に示す。その際、珪砂の平均粒径を粒径 $d$ とした。(5)式による近似曲線は、限界摩擦速度を超えると急激に飛散速度が立ち上がる様子を再現している。

Fig. 6に本実験結果から得られた粒径と限界摩擦速度の関係を示す。また $A=0.13$ とおいたときのBagnold式、炭塵を用いた郷ら<sup>5)</sup>の実験結果、砂を用いた富永ら<sup>8)</sup>の実験結果、ならびに珪砂を用いた島津ら<sup>9)</sup>の実験結果をあわせて示す。本実験の6, 4号珪砂、郷らの粒径0.19mm以上の炭塵、富永の砂は(2)式とよく対応する。一方で、島津らの結果は他と大きく異なる。島津らの実験では、測定断面より小さな吹き出し口面積を持つ送風機からの気流を用いており、気流性状の違いに原因があると考えられる。なお、複数の粒子を用いた実験では、限界摩擦速度が最小となる粒径が存在することを示している。

## 2.4 防塵ネットフェンスを対象とした解析

### 2.4.1 数値解析手法

防塵ネットフェンスによる裸地からの粉塵飛散防止効果を評価するためにCFDによる予測を行った。Table 3に粉塵飛散予測のための基礎方程式を示す。擬似圧縮性定常流れの基礎方程式 ((8)~(12)式)に加えて、粉塵濃度を解くための濃度輸送方程式(13)式を組み込んでいる。ただし粉塵は流れ場に影響を与えないパッシブスカラーとして扱う。また粉塵の飛散・堆積に伴う地形の変化は無視する。乱流モデルには、フェンス端部での $k$ の過大評価を防ぐ事が出来るLaunder-Katoモデルを用いた。

基礎方程式は直交座標系上で有限体積法により離散化し、各物理量について擬似圧縮性の解法を用いて求めた。このとき、FAVOR法<sup>10)</sup>を用いてControl Volume(以下CVとする)の流体占有率ならびにCV界面における開口率を考慮する。その他、基本的な解析コードの詳細は文献11を、擬似圧縮性法については文献12を参照されたい。

### 2.4.2 解析概要

対象を風方向400m×高さ方向500mの二次元領域とした。粉塵を計算領域の全地表面で、(5)式から得られる飛散速度で粉塵を発生させる。

フェンスは高さ3m、閉塞率60%とし、計算領域の風上端から100mの位置に設置する。フェンスはセル界面の開口率のみを与えて再現し、乱れへの影響は考慮していない。フェンスがない場合の解析も同時に行った。

流入気流は粗度区分II(境界層高さ350m、べき指数0.15)の鉛直分布を与える。ただし風速は両ケースで地表面摩擦速度が近くなるように、地上10mの風速をフェンス有りの場合15m/s、無しの場合には20m/sとした。

その他の解析条件をTable 4に示す。

### 2.4.3 解析結果

ネットフェンス有りの場合のフェンス周辺濃度分布をFig. 7に示す。またフェンス有りの場合と無しの場合の比較として、地表面からの粉塵飛散速度をFig. 8に、風下方向への粉塵濃度変化のうち地表面第一セルと地

Table 3 粉塵飛散予測のための基礎方程式  
Basic Equations for Dust Dispersion

[連続式]

$$\frac{\partial \langle p \rangle}{\partial t} + \beta \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_j} = 0 \quad (8)$$

[運動方程式]

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle u_j \rangle \langle u_i \rangle}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \langle p \rangle + \frac{2}{3} k \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (2v_t S_{ij}) \quad (9)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right)$$

[ $k$ の輸送方程式]

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial \langle u_j \rangle k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \varepsilon \quad (10)$$

$$P_k = v_t S \Omega, \quad S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}, \quad \Omega = \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2}$$

[ $\varepsilon$ の輸送方程式]

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \langle u_j \rangle \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} P_k - C_{2\varepsilon} \varepsilon) \quad (11)$$

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3 \quad (12)$$

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, \quad C_{2\varepsilon} = 1.92$$

[粉塵濃度 $C$ の輸送方程式]

$$\frac{\partial \langle C \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle u_j \rangle \langle C \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle C \rangle w_g}{\partial x_3} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{v_t}{\sigma_s} \frac{\partial \langle C \rangle}{\partial x_j} \right) \quad (13)$$

$$\sigma_s = 1.0$$

ただし座標： $x_i = x, y, z$ ，速度： $u_i = u, v, w$ ， $p$ ：圧力， $k$ ：乱流エネルギー， $\varepsilon$ ：乱流エネルギーの消散率， $\langle \rangle$ ：レイノルズ平均， $\beta$ ：擬似圧縮性係数， $t$ ：物理時間， $\tau$ ：擬似時間， $w_g$ ：重力沈降速度

Table 4 粉塵飛散解析条件  
Computational Conditions for Dust Dispersion

解析領域	400[m](x)×500[m](z) 二次元
計算格子分割	2,000(x)×73(z) 鉛直方向の最小格子間隔0.02[m]
上空境界	free-slip
地表面境界条件	滑面の対数則。(5)式で粉塵飛散
建物壁面境界条件	滑面の対数則
粉塵条件	6号珪砂，重力沈降速度 $w_g = -2.4\text{m/s}$
流入境界	粗度区分II( $\alpha=0.15$ )に基づき風速， $k$ の鉛直分布を与えた 流入粉塵量は0とした。
流出境界	特性の方法 <sup>12)</sup> により境界の値を求めた
移流項スキーム	三次精度風上差分
乱流モデル	Launder-Katoモデル

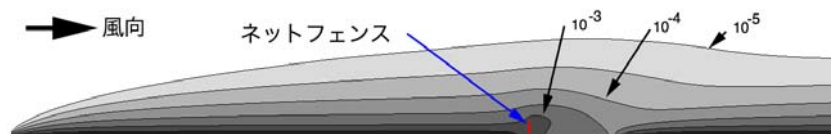


Fig. 7 防塵ネットフェンス周りの粉塵濃度分布[kg/kg]  
Dust Density Distribution around Net-fence

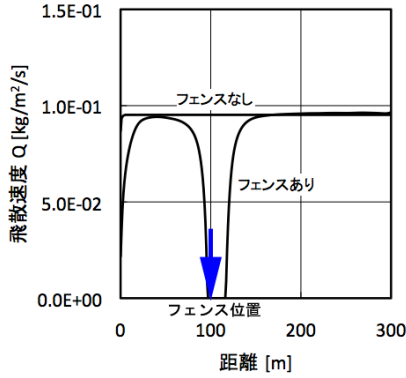


Fig. 7 粉塵飛散速度の分布  
Distributions of Dust Dispersion Rates

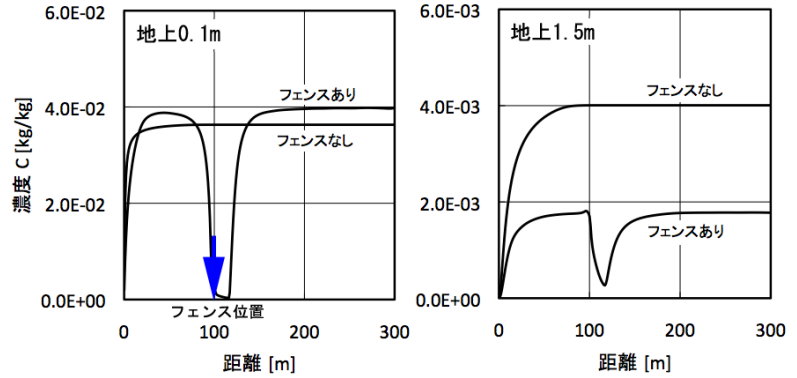


Fig. 8 ネットフェンスによる空間濃度の変化  
Dust Protection Effect of Net-fence (Left; GL+0.1m, Right; GL+1.5m)

上1.5mでの値をFig. 9にそれぞれ示す。

ネットフェンス無しの場合、地表面摩擦速度が均一であることから、粉塵飛散速度ならびに地上第一セル内の濃度はほぼ一定である。ただし上空では、濃度が平衡状態に達するまで約100mの吹走距離となっている。一方フェンス有りの場合には、フェンス前後の風速低下に伴い、粉塵飛散速度が低下する。そのため、地表面第一セルの濃度ならびに上空の濃度もフェンスの前後で減少する。このようにネットフェンスによる防塵効果は、ネットによる粉塵粒子の捕集よりも、むしろ地表面付近の風速低減による飛散抑制効果の方が大きい。

### 3. 積雪深分布予測シミュレーション

#### 3.1 飛雪モデル概要

Table 5に飛雪モデルの基礎方程式を示す。粉塵飛散解析と同様に、飛雪現象を解くために飛雪空間密度 $\langle\Phi\rangle$ の輸送方程式 ((19)式) を組み込み、雪粒子の空間分布を算出している。飛雪は流れ場に影響を与えないパッシブスカラーとして扱う。ただし堆積・浸食に伴う地形の時間変化を考慮するため、擬似圧縮性非正常流れ場の基礎式を用いた。乱流モデルには、建物風上軒先での $k$ の過大評価を避ける事ができ、かつより精度の高いDurbinモデルを用いる。

#### 3.2 雪面変化量モデル

Table 6に雪の堆積・浸食モデルを示す。雪面変化量モデルに関しては、Shaoら<sup>6)</sup>のモデルを基にした大風ら<sup>13)</sup>のモデルを用いた。(21)式中の $u_t^*$ は雪面上の雪粒子に対する限界摩擦速度で、地表面摩擦速度 $u^*$ が $u_t^*$ を超えると雪面から雪が舞い上げられ、浸食が起こる。大風らのモデルでは、雪面第一セルにおいて降雪による堆積と削剥による侵食を加味した雪粒子の収支をとり、積雪深を算出している (Table 6)。また、雪面の侵食が生じる場合には、(24)式を用いて $\langle\Phi\rangle$ の輸送方程式の雪面における境界条件とした。

Table 5 飛雪分布予測のための基礎方程式  
Basic Equations for Snowdrift

[連続式]

$$\frac{\partial\langle p\rangle}{\partial\tau} + \beta \frac{\partial\langle u_j\rangle}{\partial x_j} = 0 \quad (14)$$

[運動方程式]

$$\frac{\partial\langle u_i\rangle}{\partial\tau} + \frac{\partial\langle u_i\rangle}{\partial t} + \frac{\partial\langle u_j\rangle\langle u_i\rangle}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \langle p\rangle + \frac{2}{3}k \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\nu_t S_{ij}) \quad (15)$$

[ $k$ の輸送方程式]

$$\frac{\partial k}{\partial\tau} + \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial\langle u_j\rangle k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \varepsilon \quad (16)$$

$$P_k = \nu_t S^2 = 2\nu_t S_{ij} S_{ij}$$

[ $\varepsilon$ の輸送方程式]

$$\frac{\partial\varepsilon}{\partial\tau} + \frac{\partial\varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial\langle u_j\rangle\varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} P_k - C_{2\varepsilon} \varepsilon) \quad (17)$$

$$\nu_t = C_\mu k T, \quad T = \min \left( \frac{k}{\varepsilon}, \frac{1}{C_\mu \sqrt{3S}} \right) \quad (18)$$

[飛雪空間密度 $\langle\Phi\rangle$ の輸送方程式]

$$\frac{\partial\langle\Phi\rangle}{\partial\tau} + \frac{\partial\langle\Phi\rangle}{\partial t} + \frac{\partial\langle u_j\rangle\langle\Phi\rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial\langle\Phi\rangle w_f}{\partial x_3} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_s} \frac{\partial\langle\Phi\rangle}{\partial x_j} \right) \quad (19)$$

ただし $\tau$ : 擬似時間,  $w_f$ : 降雪速度

Table 6 雪の堆積・浸食モデル<sup>13)</sup>  
Model Equations for Erosion and Deposition of Snow

[雪の堆積・浸食モデル]

$$M_{dep} = -\langle\Phi\rangle\langle w_f\rangle\Delta x\Delta y \quad (20)$$

$$M_{ero} = -\frac{\pi\zeta_s}{6} \rho_i u^* \left( 1 - \frac{u^*{}^2}{u_t^*{}^2} \right) \Delta x\Delta y \quad u^* > u_t^* \quad (21)$$

$$M_{ero} = 0 \quad u^* \leq u_t^*$$

$$M_{total} = M_{dep} + M_{ero} \quad (22) \quad \Delta z_s = \frac{M_{total}}{\rho_s \Delta x \Delta y} \quad (23)$$

ただし $u_t^*$ : 限界摩擦速度[m/s],  $\zeta_s$ : モデル定数[-] ( $=1.0 \times 10^{-3}$ ),  
 $M_{dep}$ : 単位時間あたりの雪面への堆積量[kg/s],  
 $M_{ero}$ : 単位時間あたりの雪面浸食量[kg/s],  
 $M_{total}$ : 単位時間あたりの正味の堆積量[kg/s]  
 $\Delta z_s$ : 雪面変化量[m],  $\rho_s$ : 積雪密度[kg/m<sup>3</sup>],  $\rho_i$ : 氷の密度[kg/m<sup>3</sup>]

Table 7 屋外観測を対象とした解析条件

Computational Conditions for Snowdrift	
解析領域	15H(x)×10H(y)×8H(z)
計算格子分割	Grid1 : 60(x)×40(y)×58(z) Grid2 : 160(x)×100(y)×58(z) 鉛直方向の最小格子間隔0.05[m]
側面・上空境界	free-slip
地表面境界条件	z <sub>0</sub> 型の対数則 z <sub>0</sub> =3×10 <sup>-5</sup> [m]
建物壁面境界条件	滑面の対数則
流入境界	粗度区分Ⅱ(α=0.15)に基づき風速, kの鉛直分布を与えた 飛雪空間密度<Φ <sub>m</sub> >:上空で0.05[kg/m <sup>3</sup> ]
流出境界	特性の方法 <sup>12)</sup> により境界の値を求めた
移流項スキーム	三次精度風上差分
乱流モデル	Durbinモデル

Table 8 雪の物性値  
Physicality Values of Snow

降雪速度w <sub>f</sub>	-1.0[m/s]	積雪密度ρ <sub>s</sub>	150.0[kg/m <sup>3</sup> ]
氷の密度ρ <sub>i</sub>	900[kg/m <sup>3</sup> ]	限界摩擦速度u* <sub>t</sub>	0.15[m/s]

$$\frac{v_t}{\sigma_s} \left( \frac{\partial \langle \Phi \rangle}{\partial x_3} \right) \Big|_{ground} = \frac{|M_{ero}|}{\Delta x \Delta y} \quad (24)$$

雪面形状はCV内の流体占有率ならびにCV界面における開口率で表現し、時々刻々の雪面形状変化を流れ場の計算に反映させる。

### 3.3 屋外観測結果を対象とした精度検証

**3.3.1 解析概要** 解析結果の再現性の確認を目的として、既往の研究において積雪深の屋外観測結果が報告されている立方体建物モデル<sup>14)</sup>を対象に解析を実施した。Table 7に解析条件、Table 8に解析に用いた雪の物性値を示す。風速は立方体高さH=1.0[m]において<u<sub>H</sub>>=4.0[m/s]とした。また、解析時間は無次元時間t\* (実時間をHと<u<sub>H</sub>>を用いて無次元化したもの)を用いてt\*=100とした。

**3.3.2 解析結果** Fig. 9に屋外観測結果<sup>14)</sup>、Fig. 10に積雪深分布の解析結果をそれぞれ示す。なお、ここで示す積雪深分布の解析結果は領域内の積雪深は文献15を参考に、(25)式に示す基準積雪深h\* (無風時における建物の影響のない領域での積雪深)を用いて無次元化している。

$$h^* = \frac{\langle \Phi_{in} \rangle w_f \Delta t_s}{\rho_s} \quad (25)$$

Fig. 10を見ると、立方体前方及び後方に吹き溜まりが生じており、立方体前方のやや風上側に積雪深のピークが見られる。一方、側方部には風上側隅角部からの剥離によって風速が増加するため吹き払いが生じており、Fig. 9に示す屋外観測結果の大きな特徴は捉えているといえる。ただし屋外観測で見られる建物風上での雪の吹き払いは解析では再現されていない。同様な傾向は他の研究<sup>15)</sup>でも得られている。平均流れ場の予測を対象とするRANSモデルを用いた解析では、建物風上で生じる間欠的な吹き下ろし気流

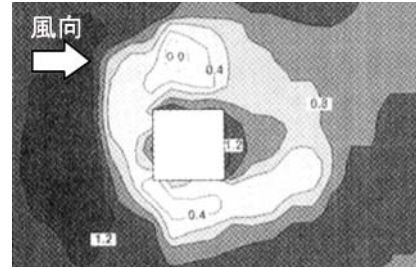


Fig. 9 屋外観測における積雪深比<sup>14)</sup>  
Field Observation of Snow Depth

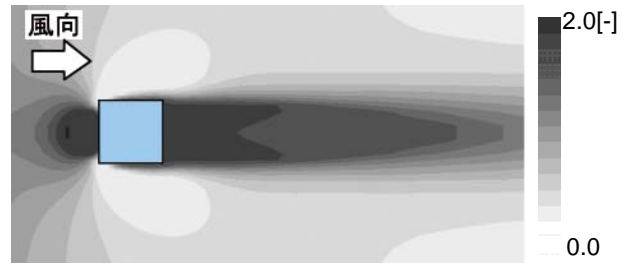


Fig. 10 積雪深比の水平分布  
Horizontal Distribution of Normalized Snow Depth

Table 9 都市部を対象とした解析の格子分割  
Grid Resolutions for Snowdrift Computation in Urban Area

解析領域	795[m](x)×795[m](y)×600[m](z)
水平方向格子分割	Grid1 : 53(x)×53(y) Δx=Δy=15[m] Grid2 : 80(x)×80(y) Δx=Δy=5[m] Grid3 : 133(x)×133(y) Δx=Δy=1.5[m]
鉛直方向格子分割	不等間隔 42(z), 最小格子間隔0.1[m]

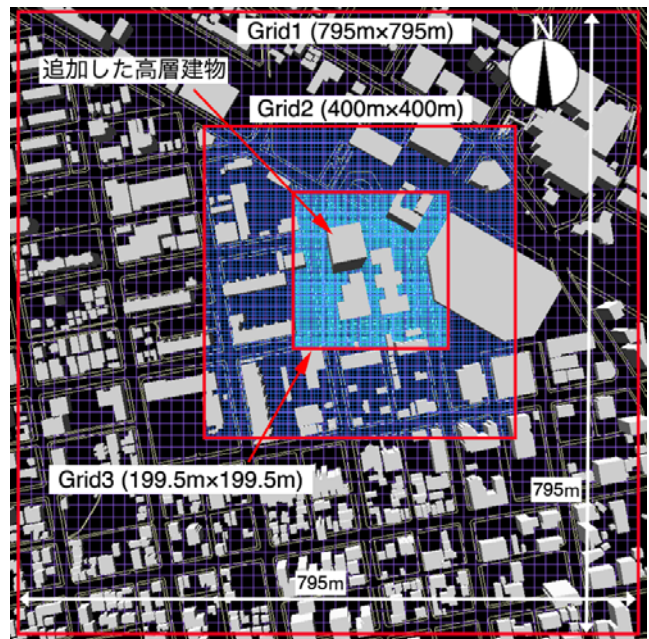


Fig. 11 都市部を対象とした解析領域  
Computational Domain for Urban Area  
©2010 ZENRIN CO., LTD. (Z09KA第039号)

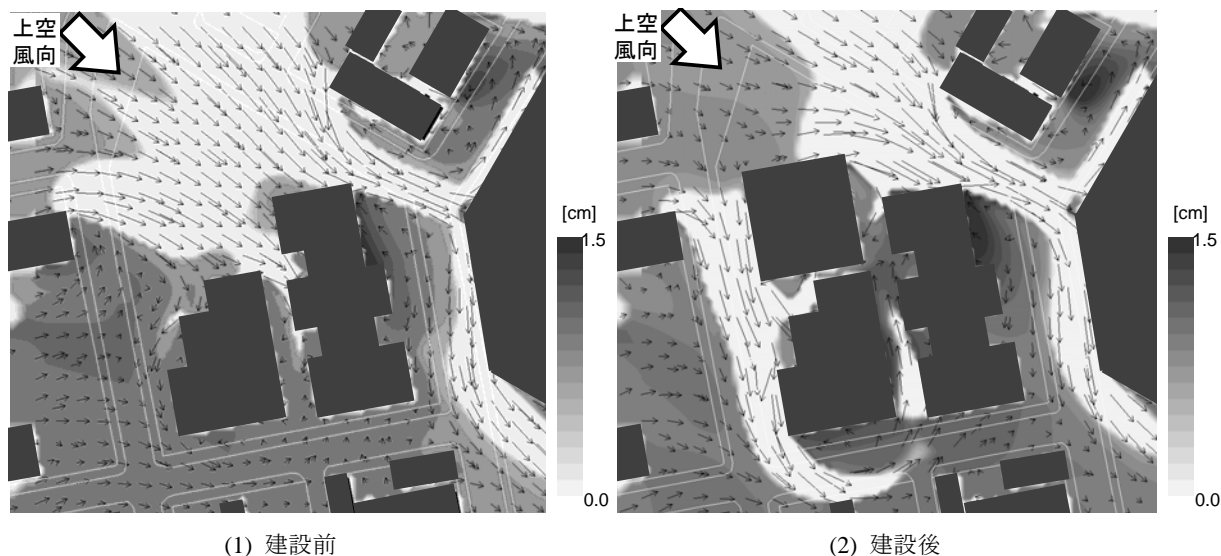


Fig. 12 積雪深と風速ベクトルの水平分布 (高さ1.2m)  
Horizontal Distribution of Snow Depth and Wind Velocity Vectors

とそれに伴う吹き払いが十分に再現できないことが、原因であると考えられる。

### 3.4 都市部を対象とした解析例

**3.4.1 解析概要** 冬季に積雪が観測される札幌市の都市部を対象として、積雪深分布の予測を試みた。Fig. 11に解析領域を示す。解析領域の中心に高さ150mの仮想の建物を建設することとして、建設前後で周辺の積雪深分布の比較を行った。周辺建物及び道路に関しては電子地図情報より抽出したデータをもとに形状をモデル化している。

解析領域は計画建物を中心とした約800m四方の領域に対して3段階のネスティングを行っており、最内側領域における水平方向メッシュは等間隔で1.5m、鉛直方向は不等間隔で最小格子間隔は0.1mとした。格子分割の詳細をTable 9に示す。

風向は札幌市の冬季の卓越風向である北西とした。流入気流は札幌管区気象台高さ31.5mにおいて6[m/s]とし、学会指針<sup>7)</sup>の粗度区分Ⅲ(べき指数 $a=0.2$ )に基づく風速及び乱れの鉛直分布を与えた。時間降雪量は5[cm/hour]、計算時間は実時間で10分間。なお、その他の解析条件に関してはTable 7, 8に示したものと同様である。

**3.4.2 解析結果** Fig. 12に最内側領域における建設前後の積雪深分布と風速ベクトルの解析結果を示す。どちらのケースにおいても建物後方の弱風域に吹き溜まりが生じ、積雪深の大きな場所が見られる一方で、北西から南東に通る道路部分では風向と道路軸が一致しているため地表面付近の風速が大きく、雪は殆ど堆積していない。

高層建物建設前後の比較では、追加された建物隅角部より剥離した流れによる風速増加によって、西側道路上

での雪の吹き払いが顕著である。吹き払われた雪は、風下側の建物背面に吹き寄せられ、一部で建設前と比べて吹き溜まりの積雪深の増加につながっている。追加された建物の風上側には、建設前にはない吹き溜まりが、比較的広い範囲で生じている。

## 4. まとめ

積雪と粉塵飛散は、大気中の粒子状物質の移流・拡散を伴う現象とみなすことができる。そこで、土木工事に伴う粉塵飛散の抑制対策効果確認と、高層建物の建設による市街地の積雪深分布に与える影響予測を目的として、数値流体解析手法の開発を行なった。本論文で得られた知見を以下にまとめて示す。

- 1) 珪砂を用いた粉塵飛散速度に関する風洞実験を行ったところ、地表面摩擦速度と粉塵飛散速度の関係はShaoら<sup>6)</sup>のモデル式で近似できる。
- 2) 粉塵飛散が開始する限界摩擦速度と粒径の関係は、炭塵による既往の実験結果と同様の傾向を示した。いずれも粒径約0.2mm以上の粒子ではBagnold式<sup>2)</sup>と良く対応する。
- 3) 非定常非圧縮性流れ場の解析コードに粒子状拡散物質の輸送方程式を加え、風洞実験結果から得られた地表面摩擦速度と飛散速度の関係式を裸地からの粉塵飛散の境界条件として用いた。
- 4) 解析コードを用いて防塵ネットフェンスによる裸地からの粉塵飛散防止効果の検討を行った。その結果、フェンス設置により地表面摩擦速度が低下することで、フェンス両側で発塵が抑制され、粉塵濃度が低下するのが捉えられた。

- 5) 飛雪を対象とした解析では、雪表面の堆積・浸食に大風ら<sup>13)</sup>のモデルを採用した。屋外観測結果を対象とした精度検証では、建物風上面・風下面での吹き溜まり、側壁面での吹き払いが再現され、建物周辺の積雪深分布に関して、定性的な特徴を捉えることが出来た。
- 6) 都市部を対象とした解析例では、建物群の風下に吹き溜まりが形成される一方で、風方向に平行な道路では吹き払いにより積雪深は小さい。同市街地内に仮想の高層建物を建てたことによる影響は、隅角部からの剥離流による雪の吹き払いが顕著である。また一部の風下側建物背面や高層建物の風上側で、積雪深の増加や、新たな吹き溜まりの形成がみられる。

#### 参考文献

- 1) 道路環境研究所, 道路環境影響評価の技術手法 2, (2007)
- 2) Bagnold, R. A. : The Physics of Blown Sand Desert Dunes, Methuen London, (1941)
- 3) 河村龍馬: 飛砂の研究, 東京大学理工学部研究報告 Vol. 5 No. 3, pp. 95-112, (1951)
- 4) 吉崎真司: 乾燥・半乾燥地域における風食のメカニズムと治砂漠緑化法, 武蔵工業大学紀要 No.6, pp.113-122, (2005)
- 5) 郷浩視, 篠原俊夫, 中村陽一, 堀内啓司: 炭じん飛散とその防止策に関する研究 第1報, 限界摩擦速度と飛散流量, 日本機械学会論文集B, Vol. 51, No. 468, pp.2664-2671, (1985)
- 6) Shao, Y. and Li, A. : Numerical modeling of saltation in the atmospheric surface layer, Boundary-Layer Meteorology Vol. 91, pp.199-225, (1999)
- 7) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, p. 22, 丸善, (2004)
- 8) 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: 砂面上に置かれた物体周りの浸食・堆積に関する風洞実験及びCFD解析, 風工学シンポジウム, pp.109-114, (2006)
- 9) 島津翔太, 塚原隆裕, 山本誠, 川口靖夫: 砂移動の限界摩擦速度の実験的調査, 日本流体力学会年会, (2008)
- 10) Hirt, C. W. : Volume-fraction techniques: powerful tools for wind engineering, 日本風工学会誌, No.52, pp.333-344, (1992)
- 11) 片岡浩人, 川口彰久, 木梨智子: 風環境シミュレータ「Zephyrus (ゼフィルス)」の開発, 大林組研究所報, No.64, pp.49-54, (2002)
- 12) 片岡浩人, 水野稔: 擬似圧縮性法による物体周りの剥離流れの数値解析, 日本建築学会計画系論文集, No.504, pp.63-70, (1998)
- 13) 大風翼, 持田灯, 富永禎秀, 吉野博, 伊藤優: 雪粒子の流れ場への影響を組み込んだ新たな飛雪モデルの提案, 第20回風工学シンポジウム, pp.73-78, (2008)
- 14) 老川進, 苫米地司, 石原孟: モデル建物近傍における積雪深の日別観測, 日本雪工学会, Vol.15, No.4, pp.283-291, (1999)
- 15) 大風翼, 持田灯, 富永禎秀, 伊藤優, 吉野博: 建物周辺の飛雪現象の数値開発手法の開発 -2つの飛雪空間密度の輸送方程式を解く新たな飛雪モデルの提案-, 第23回数値流体シンポジウム, (2009)