

降雪粒子追跡による防雪柵まわりの積雪の数値シミュレーション

Numerical simulation of the snowdrift around a snow fence by a particle method

山下 四郎,環境流体研究所, 〒198-0036 東京都青梅市河辺町 8-16-15

河村 哲也, お茶の水女子大学, 〒112-8610 東京都文京区大塚 2-1-1, E-mail: kawamura@is.ocha.ac.jp

Sirou YAMASHITA, Institute of Environmental Fluid Dynamics, 8-16-15 Kabe-cho, Ome, Tokyo 198-0036

Tetuya KAWAMURA, Ochanomizu University, 2-1-1 Ootsuka, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8610

Flow with snowfall past a snow fence is computed numerically and the generation of the snowdrift is investigated. The numerical method employed in this study can be divided into the following four parts: calculation of the air flow around the snow fence by using the MAC method with a generalized coordinate system; calculation of the movement of the snowfall; estimation of the snow transfer on the ground; determination of the shape of the snow surface. These computational procedures are repeated in every time step since the shape of the region is changed due to . It is step that is newly developed in this study. The results are compared with the field observation and the agreement is satisfactory.

1. はじめに

吹雪や吹き溜まりは建造物の周囲や道路, 鉄道, 空港などで交通障害を引き起こし社会問題になっている。このような問題を解決するために, 野外実験や風洞実験などがおこなわれているが, これらの実験では結果を得るのに多くの時間がかかり, 経済的にも費用がかさむという欠点がある。そこで実験・実測を補う有力な方法として, 近年数値シミュレーションが注目されてきた。

今まで, 吹雪や吹き溜まりの数値シミュレーションには Uematsu et al. ⁽⁵⁾, Liston et al. ⁽⁶⁾, 山下・河村 ⁽⁷⁾ などの研究があるが, これらの論文では, 雪粒子の分布は拡散方程式を用いて計算している。拡散方程式には位置の関数である拡散係数が含まれており, その値を正確に評価することは難しく, 定数として取り扱っていることが多い。そのため, 値の取り方によっては計算結果が大きく変化する可能性がある。

このような状況から, 本研究では降雪する雪粒子に着目し, 防雪柵まわりの流れ場の計算結果を利用して雪粒子に運動の法則を当てはめ, 雪粒子を追跡して着地点を求める方法を用いた。

特に今回のシミュレーションでは雪面に凹凸があるため複雑であること, そして複雑な形状をもつ防雪柵も取り扱うことなどから, 流れ場の計算では一般座標を用いて境界に適合

する格子上で計算を行った。

計算例として, 道路上の自動車や鉄道等を雪害から守るための防雪柵をとりあげ, これまで多くの研究がなされている直立密閉柵を基本例とし, また座標変換の特長を生かした解析柵として忍び返し密閉柵の2種類を選び, 柵まわりの流れの解析と堆雪形状の解析を行ない, 降雪時における雪粒子の追跡運動の有効性を調べた。

2. 計算方法

堆雪形状を数値的に求めるために, 堆雪の過程を次の四段階に分けて計算を行う。

防雪柵まわりの流れ

降雪における雪粒子の運動

吹雪における雪粒子の移動

吹雪による堆雪形状の変化

以下, それぞれについて説明する。

(1) 防雪柵まわりの流れ

吹雪における空気の流速は小さいので流れの解析においては, "非圧縮性"を仮定し, さらに複雑な剥離流を取り扱うため"粘性流体"とする。

一方, 実際の流れのレイノズル数は十分高いため, 流れは乱流状態になっていると考えられる。本計算法に乱流モデルを組み込むことはそれほど困難なことではないが, 本研究の

目的の一つは降雪時の雪粒子の運動を追跡する手法の有効性を確認することであるため、他の複雑な条件はなるべく簡単化した。

従って、乱流モデルの適用はひとまず次の課題として、本研究ではレイノズル数が比較的低い層流計算を行って乱流計算の基礎データを得ることにした。乱流モデルの立場からいえば、これはもっとも簡単な渦粘性モデルを適用したともいえる。

非圧縮性粘性流体の流れの基礎方程式は以下に示す連続の式と運動方程式である。

連続の式(質量保存の法則)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

運動方程式(ナビエ・ストークスの方程式)

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \end{cases} \quad (2)$$

ただし

u, v : x, y 方向の流速

ν : 動粘性係数 + 渦動粘性係数

p : 圧力

t : 時間

ρ : 流体の密度

である。に関しては渦粘性を考慮して一定値 0.28 を使用した (Table 1)。

本研究は、これらの方程式を標準的なMAC法を用いて解いた。すなわち、基礎方程式は式(2)および式(2)の両辺に発散をとり、式(1)を考慮して得られる圧力のポアソン方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = & -\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 - \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 - 2\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} \\ & + \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

である。ただし、 Δt は式(2)を差分化したときの時間刻み幅である。MAC法では与えられた速度場から式(3)の右辺を計算し圧力場を求めた上で式(2)から新しい時間での速度場を計算する。

(2) 降雪における雪粒子の運動

自然落下する雪粒子には重力と粘性抵抗および浮力が働く。これらの力が釣り合うと仮定したときの終端速度 v_p は雪粒子が球形の場合、Stokes の法則から求めることができるが、実際には雪粒子の形状や、大きさ、密度等が雪の種類や気象条件により異なるため、正確に評価することが難しい。そこで本研究では v_p の値の決定には実験を利用した。

雪粒子が風の吹いている領域に存在するとき、時間 t の間に雪粒子の速さが v_1 から v_2 に変化するとする。このとき雪粒子の加速度は

$$= \frac{v_2 - v_1}{2S}$$

となる。ここで S は時間 t の間の移動距離である。また、 t 秒後に雪粒子が S 変位したとすると

$$S = (v_1 + at)\Delta t = v_1 t + \frac{v_2 - v_1}{4S} t^2 \quad (4)$$

となる。ここで、 S は差分格子間の2点の座標から求めることができ、 v_1, v_2 はナビエ・ストークス方程式から求められた結果を用いる。

$$t \text{ が小さい場合には, } t \approx \frac{2S}{v_1 + v_2} \text{ であるから式(4)は} \quad S = \frac{v_1 + v_2}{2} t \quad (5)$$

と近似される。

任意の点 $p (X_p, Y_p)$ での雪粒子の X 方向の速度を u 、 Y 方向の速度を v としたとき、 t 秒後の X 方向の位置は

$$X = X_p + u t \quad (6)$$

となる。 Y 方向の位置は終端速度 v_p であるから

$$Y = Y_p + \left(v + \frac{v_p}{2} \right) t \quad (7)$$

となる。ただし、 Y 方向の下向きを負とした。

(3) 飛雪粒子の補間速度

格子分割された計算領域内に雪粒子が存在するとき、格子節点以外の四角形要素内では流速を補間しなければならない。

本解析では流速の補間計算にアイソパラメトリックの考え方を取り入れる。一般座標系を (x, y) 、アイソパラメトリック系の座標を (m, n) としたとき、両者間の座標変換公式は

$$\begin{cases} x = N_1 x_1 + N_2 x_2 + N_3 x_3 + N_4 x_4 \\ y = N_1 y_1 + N_2 y_2 + N_3 y_3 + N_4 y_4 \end{cases} \quad (8)$$

である。ただし、形状関数 N は

$$\begin{cases} N_1 = (1-m)(1-n)/4 & N_2 = (1+m)(1-n)/4 \\ N_3 = (1+m)(1+n)/4 & N_4 = (1-m)(1+n)/4 \end{cases} \quad (9)$$

$$-1 \leq m, n \leq 1$$

で与えられる。そこで流速も式(8)と同様に、式(9)の変換公式に従うとして、

$$\begin{cases} u = N_1 u_1 + N_2 u_2 + N_3 u_3 + N_4 u_4 \\ v = N_1 v_1 + N_2 v_2 + N_3 v_3 + N_4 v_4 \end{cases} \quad (10)$$

とする。ここで、 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), (x_4, y_4)$ は四角形要素を構成する節点番号のそれぞれの座標値であり、 (x, y) は四角形要素内の任意の点における座標値を意味する。また、 $(u_1, v_1), (u_2, v_2), (u_3, v_3), (u_4, v_4)$ は要素を構成する節点番号に対応した流速であり、 (u, v) は座標 (x, y) における流速である。

(4) 吹雪における雪粒子の移動

吹雪における雪粒子の移動には降雪のほか堆雪から生じるサルテーション、サスペンション、クリープの三種類がある。飛砂の研究、地吹雪の研究によると、雪表面から発生する移動形態の中で最も量的に寄与しているのがサルテーションである。そこで、本解析では堆雪からの雪の輸送量はサルテーションのみによるとして計算を行った。

サルテーション現象については Bagnold⁽¹⁾、河村⁽²⁾ による飛砂の研究があり、また小林⁽³⁾ らの地吹雪量の研究結果もある。これらの研究によれば輸送量は次のように表される。まず、Bagnold は次式を提案している。

$$q_s = c \frac{\rho}{g} u_*^3 \quad (11)$$

ただし、

q_s : 砂の移動量 (g/ms), u_* : 摩擦速度 (m/s)

g : 重力 (9.8 m/s^2), ρ : 空気密度 (1200 g/m^3)

c : 実験的に定まる係数

である。また河村は

$$q_s = k \frac{\rho}{g} (u_* - u_{*t})(u_* + u_{*t})^2 \quad (12)$$

ただし、

q_s : 砂の移動量 (g/ms), u_* : 摩擦速度 (m/s)

g : 重力 (9.8 m/s^2), ρ : 空気密度 (1200 g/m^3)

u_{*t} : 砂が移動を開始する限界摩擦速度 (m/s)

k : 砂の形状を考慮した係数

を提案している。さらに小林らは

$$q = 0.03 u_*^3 \quad (13)$$

ただし

u : 1 m の高さの速度 (m/s), ($5 \leq u \leq 10$)

q : 雪面上の風向に垂直な単位幅の上を単位時間に通過する全高度の地吹雪量 (g/ms)

を用いている。強風下では、 $u_* \gg u_{*t}$ が成り立つことから

式(11), (12), (13)は

$$q_s \propto u_*^3 \quad (14)$$

となり、上記の3式の違いが結果に及ぼす影響は小さいと思われる。

本研究では、Kobayashi⁽¹¹⁾ における雪の跳躍粒子の写真と Bagnold の飛砂における跳躍粒子の写真が見かけ上同一視できるので、多くの研究で用いられている Bagnold の式を雪の場合も適用できるとして採用した。ただし、式(11)の中に現れる定数 c は砂の場合と異なる。そこでその定数 c の決定に関してのみ、具体的に定数が示されている小林らの式を応用した。すなわち、空気の密度 1200 g/m^3 、重力加速度 9.8 m/s^2 としたとき、Bagnold による式(11)は

$$q_s = 122.45 c u_*^3 \quad (15)$$

となる。一方、小林の式(13)における上空 1 m での風速を見積るために、高さ方向の流速分布が対数法則に従うとする。

いま、 y は雪面からの高さ、 y_0 は粗度定数、 k は Karman 定数 (約 0.4)、 u_* : 摩擦速度とすれば対数法則は

$$u = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{y}{y_0} \right) \quad (16)$$

で表される。この式に $y = 1 \text{ m}$ を代入すれば上空 1 m での風速が求まるため、式(13)から

$$q = 0.03 u_*^3 \left(\frac{1}{k} \ln \frac{1}{y_0} \right)^3 \quad (17)$$

となる。

式(15)と式(17)の両式で見積もられた雪の輸送量は等しいはずであるから、両式を等値して

$$c = \frac{0.03}{122.45} \left(\frac{1}{k} \ln \frac{1}{y_0} \right)^3 \quad (18)$$

を得る。本研究では初期の堆雪面は平坦を仮定しているの
で、近藤⁽⁴⁾から $y_0=0.001\text{m}$ ととることにした。その結果 $c = 1.26$ となる。

上式では粗度定数 y_0 を 0.001m としたが、堆雪面は必ずしも平坦でないこと、さらに定数決定の実験に用いたモデル柵⁽⁸⁾の地表面状態における粗度定数 y_0 が確認難しいことなどから、定数 C の値を 1.26 に近い定数とし、改めてモデル柵に適した定数を実験より求めることにした。

(5) 吹雪による堆雪形状の変化

サルテーションによって雪が輸送され、その結果、雪面の形状が変化する。形状の変化は雪の質量の保存から計算できる。

いま、地表面に沿う方向を x とし、 h を地表面に垂直な方向に測った積雪の高さとする。 h の時間変化は区間両端での x 方向の雪の輸送量 q_x の差によりもたらされる。 r_0 を雪の密度とすると Δt 秒間に領域内に蓄積される雪の量と、領域内に堆積する雪の量は等しくなければならないことから

$$r_0 \Delta h_x = - \frac{\partial q_x}{\partial x} \Delta t$$

となる。その他の面についても同様な計算を行うことによつて

$$r_0 \frac{\partial h}{\partial t} = -\nabla \cdot q \quad (19)$$

という式が得られる。

(6) 飛雪による堆雪変化

飛雪による雪粒子の軌跡の計算は雪粒子が計算領域範囲外、または地表、雪面に落下したときに終了する。領域から外れた雪粒子は堆雪に関与しないと仮定し、また落下した地点は、雪粒子の存在する点 $p(x_0, y_0)$ から雪面上の隣り合った格子点を結ぶ直線 $ax + by + c = 0$ に下ろした垂線の長さ h とすると

$$h = \frac{ax_0 + by_0 + c}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (20)$$

$h > 0$ のときは地表より上

$h = 0$ のときは地表に落下

によって判断する。

飛雪とサルテーションによって輸送された雪粒子が、雪面上の1つの格子に堆雪したときの雪の重さを m とする。格子の長さを l 、堆雪密度 r としたときに積雪高さ H は

$$H = \frac{m}{rl} \quad (21)$$

から求めることができる。

(7) 降雪における堆雪の正規分布修正

本研究では単位体積 (cm^3) における雪の重さを雪粒子1個の重さとし、その粒子が風によって輸送されて雪面のどこかに飛来するとしている。

原理的にはこの方法で全ての雪粒子を追跡すればよいが、コンピュータの計算時間や記憶容量を考慮して、ある長さ l (本研究では前後 15cm) 内に存在するすべての雪粒子が、その区間 l 内にある代表的な1つの雪粒子の着地する場所に飛来するとした。

このような仮定のもとでは堆雪分布にばらつきを生じる可能性があるため、正規分布を利用してばらつきをおさえた。すなわち、着地点における雪の量と正規分布の全面積に分布する雪の量が等しくなるような正規分布を用いて堆雪の分布を補正した。ただし、正規分布に現れる標準偏差の値は定数決定の実験に用いたモデル柵⁽⁸⁾より決定する。

(8) 2次元の座標変換

長方形格子を用いた計算では防雪柵または複雑な曲線境界が階段形状に近似されるため、境界面の表現が困難で計算が不正確になる恐れがある。一方、境界にそった格子を用いれば境界条件を課すことが容易になるため、精度のよい計算が可能になる。従って本研究では2次元の座標変換 Fig. 1

$$\begin{cases} \mathbf{x} = \mathbf{x}(x, y) \\ \mathbf{h} = \mathbf{h}(x, y) \end{cases} \quad (22)$$

を行い (\mathbf{x}, \mathbf{h}) 平面内の境界に沿った格子上で計算を行った。⁽⁷⁾

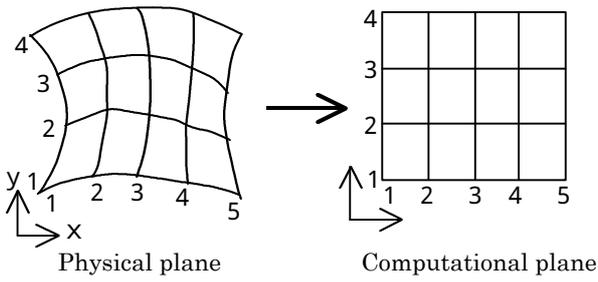


Fig.1 Coordinate transformation

3. 解析モデル

(1) 解析対象物

解析の対象としては、実用化をめざして開発が進んでいる典型的な防雪柵を選んだ。具体的にはFig.3の直立密閉柵、Fig.4の忍び返し密閉柵の2種類の柵について計算を行った。なお、これら2種類の柵は主風向に対して直角に配置した。

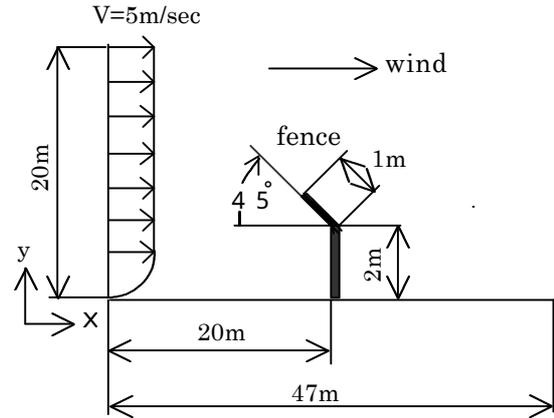


Fig.4 Bend snow fence

(2) 定数の決定

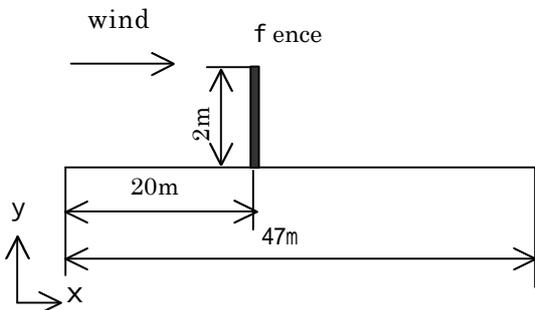


Fig.2 Model snow fence for test calculations

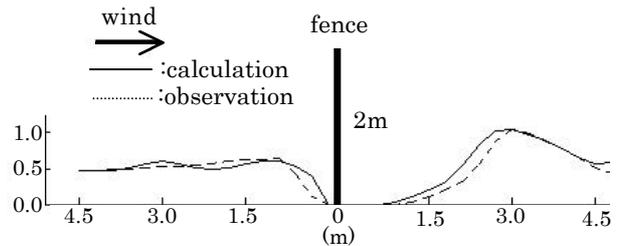


Fig.5 Snowdrift near the snow fence of fig.2

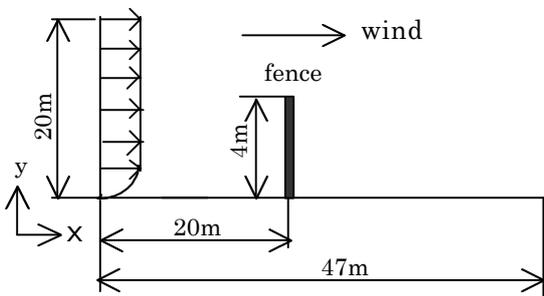


Fig.3 Flat snow fence

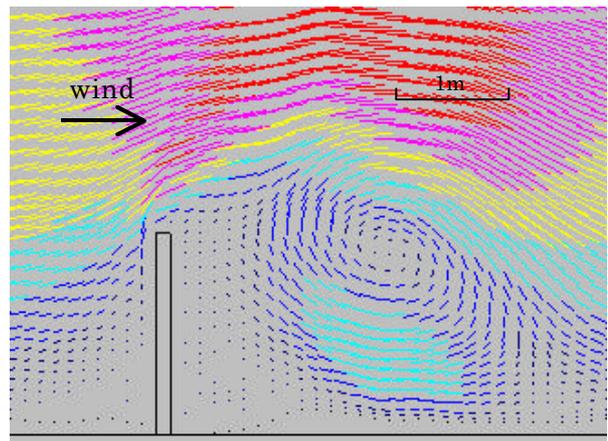


Fig.6 Velocity field near the snow fence of fig.2

定数決定モデルを用いた本研究のような数値シミュレーションでは定式化するときに現われるパラメータをいかにして決定するかが重要な問題になる。これらのパラメータには降雪時の終端速度 v_p , 堆雪分布をきめる正規分布の標準偏差 σ , 風速の大きさ U そして地吹雪などによって輸送されるサルテーションの定数 c がある。このような定数を決めるには過去の研究で示されている実測データと本研究での解析結果を比較検討することが望ましい。しかし、柵の立地条件や風の向き、雪の状態そして防雪柵の大きさなどの違いにより、過去の研究結果で得られた堆雪状態に微妙な差異がみられる。

本解析ではこれらの点を考慮して、よく引用される Price⁽⁸⁾ のデータ (Fig.2 の柵) を選び、計算結果がデータに近づくように定数を決めた。その結果、本研究ではそれぞれの定数の値を $v_p = 0.26\text{m/s}$, $\sigma = 10\text{m}$, $U = 0.8\text{m}$, $c = 3.0$ と定めた。(Price 論文では堆雪形状を数日に分けて測定している。本解析では降雪時間を降り始めから 2 時間までしか計算していないため、最初からのデータである STAGE1, STAGE2 の平均の堆雪をとった。) Fig.5, Fig.6 がその場合の計算結果である。

Fig.5 は柵近傍の堆雪状態を示した図である。ただし雪の降雪量、雪の状態などの気象条件が特定できないため、たて軸は最大の堆雪高さを 1 に規格化したものをとっている。また、Fig.6 はそのときの柵近傍の風速パターンを示したものである。

雪の形、大きさ、種類により落下速度は異なるが、本解析で得た終端速度 v_p の結果は妥当な範囲内にあると思われる⁽⁹⁾。従って、本解析ではこれらの値を使用する。

(3) 境界条件と初期条件

本解析では雪面が十分に広く、かつ降雪量、風速の大きさ、風速の向き、サルテーションの発生状況が雪面の場所によらずどこでも同一であると仮定する。その上で平面上に防雪柵を設置し、防雪柵を含む計算領域を考えた。なお、計算領域内における最上層部の風速は一定とする。

境界における Y 軸方向の流速変化は対数法則の式 (16) に従うと仮定する。その他の境界条件としては

雪面上：粘着条件 ($u = v = 0$)

防雪柵上：粘着条件 ($u = v = 0$)

遠方境界：x 軸方向に一様流、y 軸方向の流速は零

を課した。

一方、雪粒子の大きさ、雪の種類、雪の性質などに関しては適当な数学モデルが見あたらない。そこで、本解析ではそれぞれの雪粒子を同一とみなして、雪の質量、落下速度そして雪の密度等に関しては Table 1 に示した値を用いた。なお、降雪量は Table 1 に示すように降水量で表現した。降水量と雪の空間濃度との関係は次式で示すことができる。

$$\text{降水量} = \text{「雪の空間濃度」} \times \text{「雪粒子が一樣に落下する速度」}$$

差分計算、流体に関する諸条件は Table 1 に示し、柵に対する最上層部の高さ y_0 と速度 u_0 の条件は Table 2 の値を用いた。Fig.3, Fig.4 における柵の高さや風速等の値は野外実験におけるデータ⁽¹⁰⁾を参考にしている。

Table 1 parameters

	air	snow	condition of calculation
time increment: t			0.001
criterion of convergence:			0.00001
time interval of snowfall			2 (hr)
velocity profile at left boundary			log-low
Reynolds number :Re*	100		
precipitation (mm/hr)		18.7	
velocity of the snow particle without wind v(m/s)		0.26	
snow density at the ground: r(kg / m ³)		100	
viscosity: (m ² / s)	0.28		
standard deviation: (m)			0.8
snow density in air r(kg / m ³)		0.02	
roughness parameter zo(cm)			0.1
Constants:c in eq.(15)		3	
t(s) in eq.(5)			0.00 3

*:代表的長さ L=4m(柵の高さ),代表的速さ V= 7 m/s を使用. Re = V · L / = 7 * 4 / 0.28 = 100

Table 2 top high Y_0 and velocity U_0

	0
	5

4. 計算結果と考察

はじめに本研究に用いた計算法が妥当であるかどうかを確かめるために、雪面が十分に広く障害物がない場合の計算をおこなった。すなわち、3章の解析モデルにおいて記した境界条件と初期条件をもとにして、降水量 = 18.7mm/hr, 高さ $Y_0=10m$, Y_0 における速度 $U_0=10m/s$, 雪粒子の落下速度 = 0.26m/sec, 降雪時間 = 2hr, 雪の堆積密度 = $100kg/m^3$ の場合について、堆雪高を数値シミュレーションで計算して予測値と比較した。

なお予測値は

$$\text{予測値} = 18.7 \times 2 / 100m = 37.4cm$$

である。数値シミュレーションについては、次の2種類の流速パターンを考えて計算を行った。

計算領域内で風がない場合の堆雪高の計算。

計算領域内で水平方向の風速が対数法則にしたがい、鉛直方向の風速が0と仮定した堆雪高の計算。

その結果、それぞれの堆雪誤差は次のとおりになった。

の堆雪誤差 = 0 %

の堆雪誤差 < 3 %

ただし、堆雪誤差は

$$\text{堆雪誤差} = \left| \frac{\text{数値シミュレーション} - \text{予測値}}{\text{予測値}} \right| \times 100$$

と定義した。

の誤差に関しては格子幅の不揃いと正規分布の関係から生じたものと考えられる。実際、格子間隔を一定の長さにするると誤差は0に近付いた。この結果から本研究で用いた計算法は信頼できると判断した。

次にこれまでに述べた2種類の柵に対してシミュレーションを行った。計算領域は直立密閉柵、忍び返り密閉柵に対し

流速の最大値を100とする					
黒	青	シアン	黄	マゼンダ	赤
0-15	16-32	33-49	50-66	67-85	86-100



Fig.7 Velocity field near the snow fence of fig.3



Fig.8 Velocity field near the snow fence of fig.4

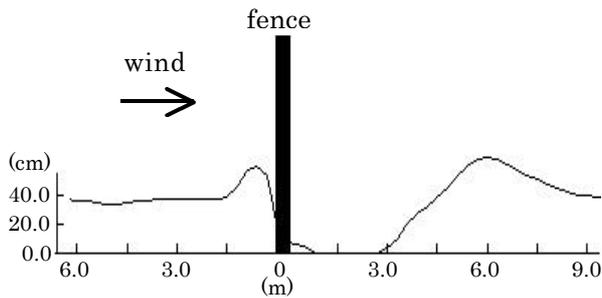


Fig.9 Snowdrift near the snow fence of fig.3

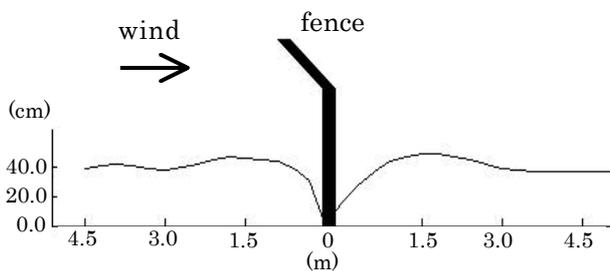


Fig.10 Snowdrift near the snow fence of fig.4

Fig. 7, Fig. 8の密閉柵において、柵の風上では柵に近づくにつれて風の向きが上向きになり、柵を通過した後方で最大速度に達し、柵の風下では大きな渦が発生している様子がわかる。これらの現象は実測結果と一致している⁽¹⁰⁾。また、柵風下の真下にも小さな渦が存在している様子がわかる。さらに、柵の風下には渦による逆風域が存在し、地表付近では風の速い場所が存在することも示している。

Fig. 9, Fig. 10は直立密閉柵と忍び返し密閉柵の堆雪形状であり、降雪運動における雪粒子を追跡する数値シミュレーションを実行した結果である。定性的傾向は雪面の景観と一致している。

本研究では、2種類の防雪柵について数値シミュレーションを行ったが、柵の高さ、柵の型また気象条件等が異なれば同じ型の柵でも結果が異なる場合がある。従って、野外実験等と簡単に比較検討できないが、標準的な柵である直立密閉柵、忍び返し密閉柵などの定性的傾向は実際に観測される風景と一致を示した。

5. まとめ

本研究では種々の形状をした防雪柵まわりの流れ場と堆雪

形成過程を数値シミュレーションにより解析した。そして防雪柵の形状が流れ場や堆雪形状に及ぼす影響を調べた。

計算は 風速場の計算 降雪運動の計算 雪の輸送計算 雪面形状の計算からなる。

一般に位置の関数となる拡散係数は、正確な値を得ることが難しいため、本研究では降雪時の雪粒子の運動を追跡することにより着地点を計算し、堆雪量を求めた。また、差分法による近似計算を行ったが複雑な形状を精度よく表現するために一般座標を用いて境界に沿った格子を生成し、その格子を用いて計算を行った。

計算例として2次元における防雪柵を解析し、基本例として典型的な防雪柵である直立密閉柵、一般座標の特徴を生かした応用例として忍び返し密閉柵の2種類の防雪柵を選び、流れ場および堆雪形状を計算してシミュレーションの有効性を調べた。

その結果、定性的な傾向は実際に観察される雪面の景観と一致しており、吹雪あるいは地吹雪における堆雪形成過程における“降雪運動の解析”は有効であることが確認された。

吹き溜まり量などの定量的な値を得ることは次の課題であるが、道路または鉄道等の施設を計画する際に、本計算方法による計算結果は柵の形状または影響範囲の広さを把握する場合に基本的資料として役立つものと考えられる。

本研究では、それぞれの防雪柵は主風向に対して直角に配置して計算を行ったが、時間と共に常に向きが変化する実際の風に対しても計算可能である。

本研究では簡単のために層流計算を行ったが、今後の課題として計算結果の定量的な信頼性を増すために、種々の乱流モデルの検討を行うこと、実験などによる基礎データを集積すること、降雪量を決定する面積を小さくしてより精度の高い計算をすることなどがあげられる。

参考文献

- (1) Bagnold, R.A., 1941: The physics of blown sand and desert dunes. Methuen and Co. Ltd., 265pp.
- (2) 河村龍馬, 1948: 風による砂の運動. 科学, 18, 24-30.
- (3) 小林大二, 1971: 地吹雪の発生と発達, 低温科学, 物理篇, 28, 141-145.
- (4) 近藤純正, 1987: 地吹雪臨界風速のパラメータ化, 日本雪氷学会誌 (49巻2号)
- (5) Uematsu, T., Nakata, T., Takeuchi, K., Arisawa, Y. and Kaneda, Y., 1991: Three-dimensional numerical simulation of snowdrift. Cold Regions Science and Technology, 20, 65-73.
- (6) Liston, G.E., Brown, R.E. and Dent, J.D., 1993: A two-dimensional computational model of turbulent atmospheric surface flows with drifting snow, Annals of Glaciology, 18, 281-286.
- (7) 山下四郎, 河村哲也, 2000: 一般座標を用いた種々の防雪柵まわりの流れと堆雪形成過程の数値シミュレーション, 日本雪氷学会誌 (62巻5号)
- (8) Price, W.I.J.: The effect of the characteristics of snow fences on the quantity and slope of the deposited snow, International Union Geodesy and Geophysics, Pub.No.54(1961)
- (9) 鈴木道也, 謝国章, 海老原英明, 秋場寿広, 1981: 降雪粒子の大きさと落下速度の新観測法, 日本雪氷学会誌 (43巻1号)
- (10) 鉄道技術研究所速報, 1985, NO.A-85-142: 防雪柵の機能と効果及びその適正設置. 日本国有鉄道 鉄道技術研究所, 44-51
- (11) Kobayashi, D., 1972: Studies of snow transport in low-level drifting snow. Contr., Inst. Low Temp. Sci., Ser. A., 24, 58pp.