

## k - 乱流モデルを用いた風速分布予測と吹雪粒子の運動シミュレーション

水工学研究室 安藤 宏

指導教官 福島 祐介

### 1. はじめに

吹雪は風の乱れによって雪粒子が浮遊する現象である。気体である空気と固体である雪粒子が混合して流れることから、吹雪は典型的な固気二相流であると言える。固気二相流は、流体と気体の密度差、濃度、粒径などによって流れ構造が著しく異なるので、取り扱いが難しく、基礎方程式も十分確立していない。また、吹雪は雪崩の発生原因の一つと考えられ、その流動特性を知ることは、固気二相流の基本的な流動特性を把握するばかりでなく、雪崩の発生要因の推定ということで、防災的な意味もある。

### 2. 雪の運動形態

吹雪の運動形態には大きく分けて転がり、跳躍、浮遊の3種類がある。

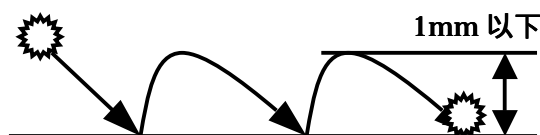


図 - 1 . 転がり (Creep)

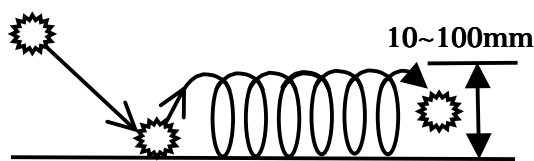


図 - 2 . 跳躍 (Saltation)

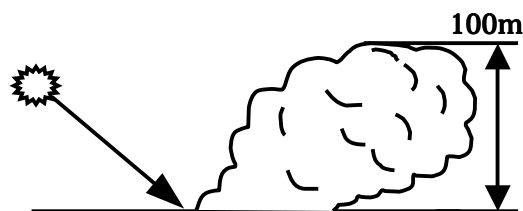


図 - 3 . 浮遊 (Suspension)

### 3. 研究目的

福島ら(2002)によって乱流拡散方程式を用いた吹雪の濃度分布の解析が行われたが、本研究では吹雪粒子の運動を解析し、実際の吹雪を数値シミュレーションしているという点で大きく異なっている。具体的には、吹雪粒子一つひとつに着目し、軌跡、地面での衝突、跳ね返り、浮遊などの運動を考慮したスプラッシュ過程を取り入れ、より現実的な粒子の挙動を再現する。そしてk - 乱流モデルにより変動流れ場を再現し、空間での吹雪の濃度分布を求め、南極みずほ基地において行われた西村(北大低温研, 2001)による飛雪流量の観測データと比較、検討する。

### 4. 運動方程式

(1), (3)式はNalpanisら(1985)によって考案された粒子の運動方程式である。これらと水平方向、鉛直方向の加速度式(2), (4)の合わせて4式をルンゲクッタ法により解いて計算を行った。

$$\text{水平} \quad \frac{du_p}{dt} = -0.75 \frac{\rho_f}{\rho_p} \frac{C_d}{d} V_R V_{R1} \quad (1)$$

$$\frac{dx_p}{dt} = u_p \quad (2)$$

$$\text{鉛直} \quad \frac{dw_p}{dt} = -0.75 \frac{\rho_f}{\rho_p} \frac{C_d}{d} V_R V_{R3} - g \quad (3)$$

$$\frac{dz_p}{dt} = w_p \quad (4)$$

### 5. スプラッシュ過程

吹雪粒子の底面での衝突と反発現象であるスプラッシュ過程を再現するためには、衝突速度と反発速度の関係式(5), (6)式を用いた。

$$\text{水平方向} \quad v_{ex} = e_h v_{ix} \quad (5)$$

$$\text{鉛直方向} \quad v_{ez} = e_v v_{iz} \quad (6)$$

ここで、 $v_e$  は衝突速度、 $v_i$  は反発速度で接尾辞の  $x$  と  $z$  はそれぞれ水平、鉛直成分を表している。 $e_h$ 、 $e_v$  は水平、鉛直反発係数であり、

$$e_h = \begin{cases} 0.48\theta_i^{0.01} & v_i \leq 1.27\text{m/s} \\ 0.48\left(\frac{v_i}{1.27}\right)^{-\log(v_i/1.27)} \theta_i^{0.01} & v_i > 1.27\text{m/s} \end{cases} \quad (7)$$

$$e_v = \begin{cases} 15.68\theta_i^{-0.94} & v_i \leq 1.23\text{m/s} \\ 15.68\left(\frac{v_i}{1.23}\right)^{-\log(v_i/1.23)} \theta_i^{-0.94} & v_i > 1.23\text{m/s} \end{cases} \quad (8)$$

と与えられ、衝突速度  $v_i$  と衝突角度  $\theta_i$  に依る関数である。

## 6. 風速分布

風速分布は南極みずほ基地で観測された高さ 3m での風速から予測された風速分布を用いた。図 - 4 にそれを示す。

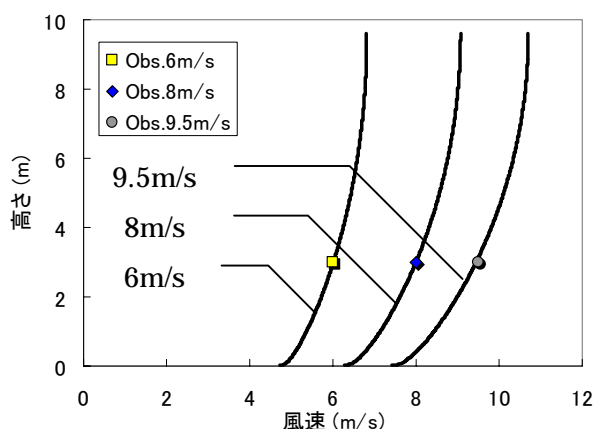


図 - 4 風速分布

## 7. k - 乱流モデル

風速は(9)、(10)式のように平均風速と変動成分に分けられる。

$$u = \bar{u} + u' \quad (9)$$

$$w = \bar{w} + w' \quad (10)$$

ここで  $u'$ 、 $w'$  は

$$k = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2 + w'^2) \quad (11)$$

を満たし、今モデルは 2 次元なので、

$$u' = \sqrt{\frac{2}{3}k} \times x'_i \quad (12)$$

$$w' = \sqrt{\frac{2}{3}k} \times x'_i \quad (13)$$

により与える。ここで  $x'_i$  はランダム関数で、以下の関係を満たすように与える。

$$-1 \leq x'_i \leq 1 \quad (14)$$

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x'^2_i = 1 \quad (15)$$

乱流運動エネルギー  $k$  は図 - 5 の分布を用いて与えた。

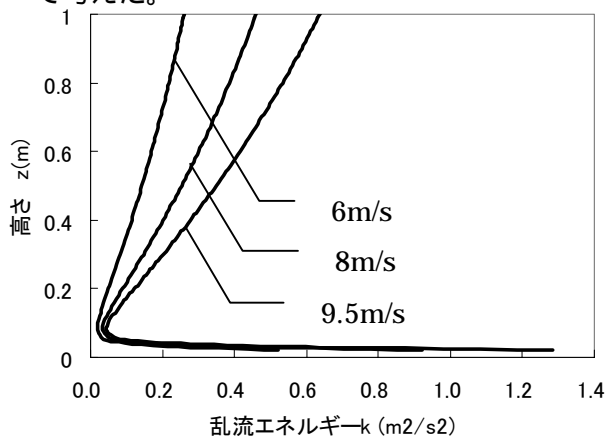


図 - 5 乱流運動エネルギー  $k$  の分布

## 8. 粒径

粒径は根本(2002)の計算で使われた確率分布を用いて与えた。図 - 6 にそれを示す。ここで平均粒径は 0.2mm、粒径の刻みスケールは 0.02mm である。

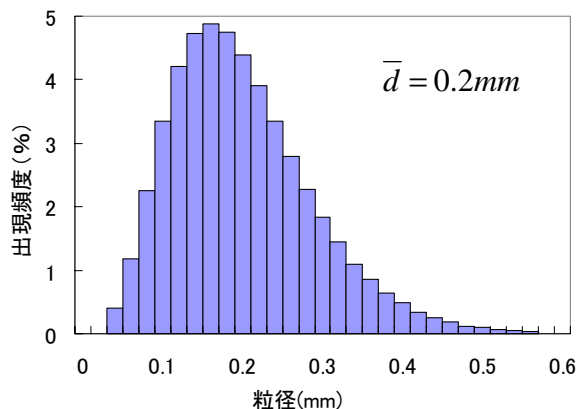


図 - 5 粒径の確率分布

## 9. 比較データ

解析値を比較したのは南極みずほ基地での西村(2001)による観測データである。みずほ基地は昭和基地から 250m 内陸にあり、特徴としては、吹雪が定常状態に達するのに十分広く平坦であり、長時間安定してカタバ風が継続し、風洞実験では得られない限界摩擦速度を大きく上回る風速が発現することなどがある。観測はスノーパーティクルカウンター (SPC) によって飛雪流量を、自動気象観測装置 (AWS) によって風速を測定した。

また、福嶋ら(2002)による拡散方程式を用いた吹雪の濃度分布の解析とも比較を行った。



図 - 6 南極みずほ基地の自動気象観測装置

## 10. 吹雪粒子の軌跡

図 - 7 は乱流がある場合と、無い場合での吹雪粒子の軌跡の変化である。乱流が無い場合は底面への衝突と反発を繰り返すサルテーションを規則的に行いながら輸送されていく様子が分かる。乱流がある場合は転がりや浮遊により輸送されていく。一度浮遊状態になると底面での反発無しに移動する。

図 - 8 は吹雪粒子の粒径による軌跡の変化のグラフである。0.1mm 以下の粒子は浮遊運動により移動しているが、より粒径の小さい 0.06mm の方が高くまで輸送されているのがわかる。0.2mm の粒子はサルテーションにより移動しているが、浮遊と跳躍の境界となる

のが粒径 0.1mm であり、0.1mm より大きい粒子はサルテーションを起こし易い。

図 - 9 は風速による軌跡の変化のグラフである。風速の大きい 9.5m/s の方が、粒子は高くまで上昇しているのが分かる。

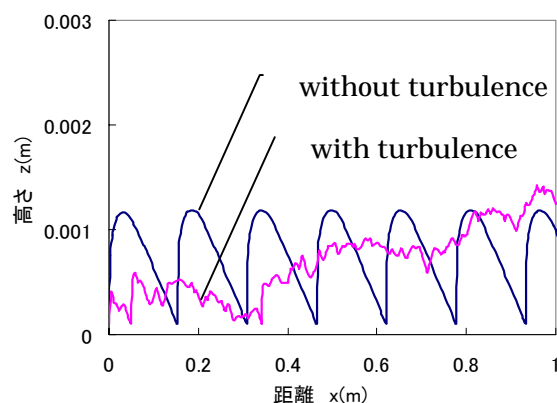


図 - 7 乱流による軌跡の変化

風速 6m/s,  $d=0.1\text{mm}$ ,  $\rho=160\text{kg/m}^3$

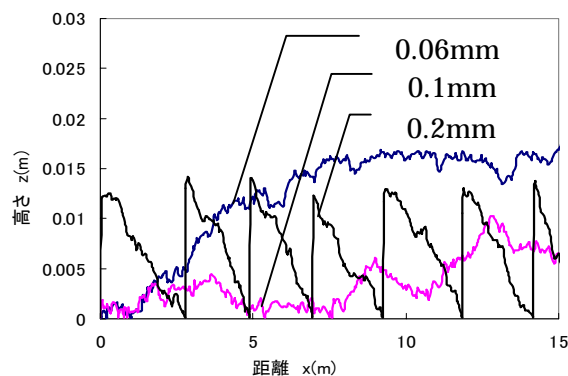


図 - 8 粒径による軌跡の変化

風速 8m/s,  $\rho=290\text{kg/m}^3$

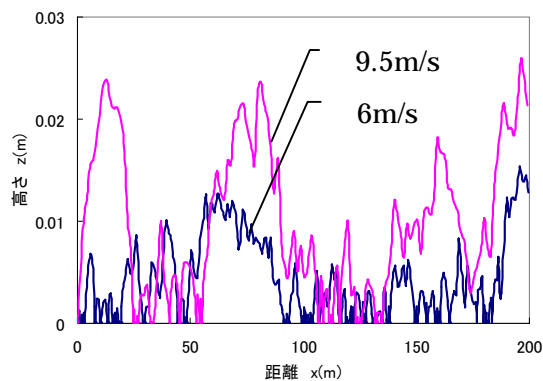


図 - 9 風速による軌跡の変化

粒径 0.1mm,  $\rho=160\text{kg/m}^3$

## 11. 飛雪流量分布

図 - 10、図 - 11 はそれぞれ風速 6m/s と 9.5m/s 時の運動シミュレーションにより求めた飛雪流量分布と現地観測値の比較である。運動シミュレーションの結果としては、地表面からの高さが大きくなるほど飛雪流量は小さくなり、底面付近では非常に大きくなるという飛雪流量の分布傾向をよく表している。風速 6m/s と 9.5m/s 時の計算に用いた雪粒子の密度はそれぞれ  $160\text{kg/m}^3$  と  $460\text{kg/m}^3$  であり、現地観測の結果に合うまで粒子の密度を変えながら計算した。運動シミュレーションと現地観測での分布の傾向はよく合っていると言える。

図 - 12、図 - 13 は今回の運動シミュレーションにより求めた飛雪流量と乱流拡散方程式によるものとの比較である。ここで雪粒子の密度は 6m/s 時が  $160\text{kg/m}^3$  で、9.5m/s 時が  $460\text{kg/m}^3$  である。どちらの場合も運動シミュレーションと乱流拡散方程式は同じような分布形を表している。

## 12. 雪粒子密度の考察

新庄雪氷防災研究所での風洞実験の結果から、福嶋ら(2002)によって逆算された雪粒子の密度は  $143.9 \sim 259.9\text{kg/m}^3$  である。観測条件の違いや、実験で用いた雪粒子は人工のものであることなどを考慮すると、今回計算で用いた  $160 \sim 460\text{kg/m}^3$  の値は十分妥当な値であると考えられる。

## 13. 結論

吹雪粒子の運動解析を行い、これと現地スケールの吹雪を比較し、モデルの妥当性を検証することが出来た。

乱流拡散方程式を用いて求めた飛雪流量分布と比較し、異なる手法で求めた解析値がほぼ一致することがわかった。

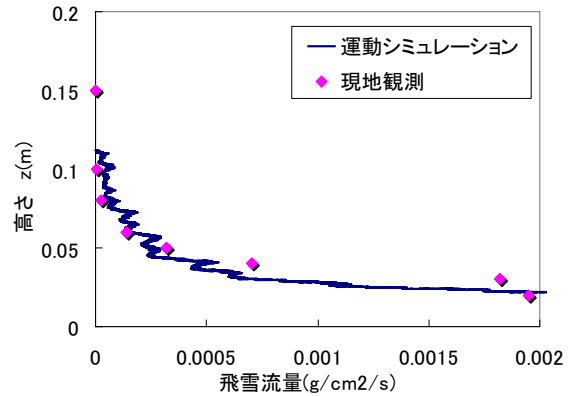


図 - 10 風速 6m/s 時の飛雪流量分布

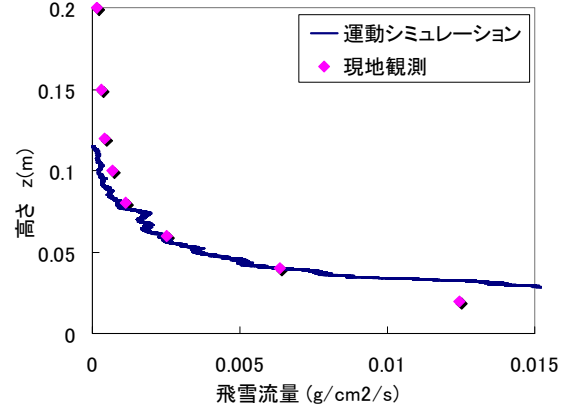


図 - 11 風速 9.5m/s 時の飛雪流量分布

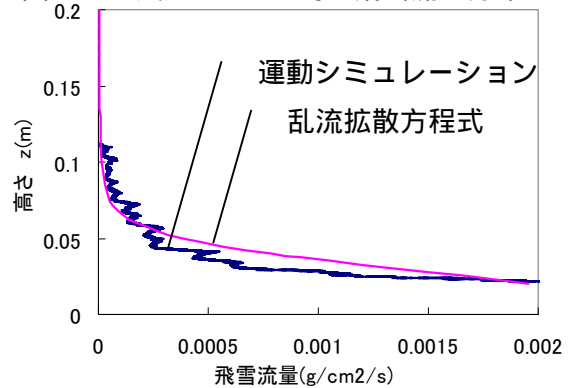


図 - 12 拡散方程式の解との比較(風速 6m/s)

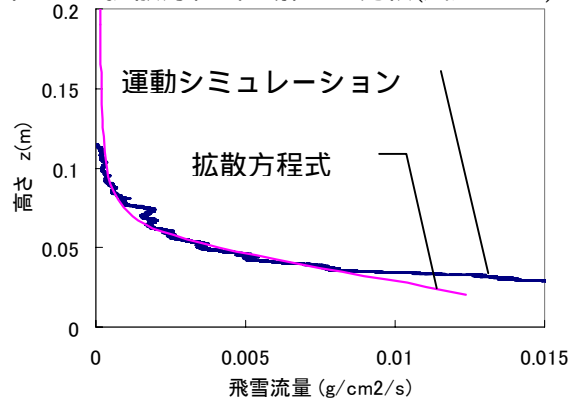


図 - 13 拡散方程式との比較(風速 9.5m/s)