

II-213

非ブーシネスク $k-\epsilon$ 乱流モデルの吹雪実験への適用

長岡技術科学大学大学院

学生会員 鈴木健史

北海道水工コンサルタンツ

藤田和成

長岡技術科学大学環境・建設系

正会員 福嶋祐介

科学技術庁防災科研新庄雪氷防災研

小杉健二

科学技術庁防災科研新庄雪氷防災研

佐藤 威

1.はじめに

水の流れや風により固体粒子が浮遊状態で輸送される現象は自然界でしばしば観察される。厳冬期山岳地帯で発生する煙型雪崩は、風の乱れによって乾いた雪粒子が浮遊状態で流れる現象である。同様に、平地でも地吹雪と呼ばれる現象があり、乱流状態の空気の流れである風によって、雪粒子が浮遊状態で流れるものである。これらは作業流体が空気であることから、固気二相流と呼ばれている。

固液二相流などで、周囲流体との密度差が小さい場合には密度変化を重力項及び圧力項のみで考慮し、慣性項と粘性項では密度を一定とするブーシネスク近似が用いられることが多い。一方、固気二相流では固体粒子の密度が気体の密度に比べて大きく、ブーシネスク近似は許容されないと考えられる。このような混相流体を非ブーシネスク流体と呼ぶことにする。

科学技術庁防災科学技術研究所新庄雪氷防災研究支所内風洞装置にて吹雪の実験を行い、吹雪諸量の計測を行う。実験により得られた諸量を非ブーシネスク $k-\epsilon$ 乱流モデルに適用し、そのモデルの検証を行う。

2.吹雪の実験

実験は新庄雪氷研究支所、雪氷防災実験棟内にある風洞装置で行った。夏でも自然の雪に近い状態の雪を降らせることのできる施設としては世界で唯一である。実験に用いた風洞装置は幅 100cm、高さ 100cm の正方形断面を擁する全長 14m の風洞装置である。風洞装置底面には厚さ 20mm の雪を敷き詰め、風速 10m/sec、12m/sec の下で実験を行った。敷き詰めた雪の密度は 0.46g/cm³、平均粒径は 0.215mm、0.238mm である。実験に用いた計測器

は SPC(Snow Particle counter)、熱膜風速計を用いた。

図 2 には SPC によって計測した各測点ごとの雪粒子の粒径分布をしめす。底面から 18mm の位置を基準にして、そこから 5mm おきに、118mm の位置まで計測した粒径分布である。上方へ向かうに従って雪粒子が細くなっており、雪粒子の分布のピークが左側へシフトしている。

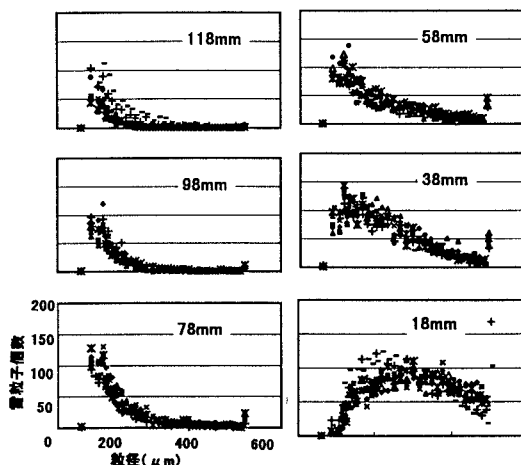


図 2 各測点ごとの粒径分布(風速 10m/sec)

3.非ブーシネスク $k-\epsilon$ 乱流モデル

固流二相流の流れに対してナビエ・ストークス方程式、固体粒子の輸送方程式をもとにレイノルズ方程式、レイノルズ応力の方程式、乱れエネルギー k の方程式を導いた。さらに、均一流体の k 方程式と分子粘性逸散率 ϵ の方程式の関係の類推から非ブーシネスク流体に対する ϵ 方

程式を導いた。このように得られた非ブーシネク $k-\varepsilon$ 乱流モデルの基礎方程式は、固体粒子の拡散方程式、 x 方向のレイノルズ方程式、乱れエネルギー k の方程式、分子粘性逸散率 ε の方程式からなり、次のようである。

・固体粒子の拡散方程式

$$\frac{v_t}{\sigma_t} \frac{dc}{dz} = -w_s \cos \theta (c - F_s) \quad (1)$$

・ x 方向のレイノルズ方程式

$$\frac{d}{dz} \left(\rho v_t \frac{du}{dz} \right) + \rho_a R \frac{v_t}{\sigma_t} \frac{dc}{dz} \frac{du}{dz} + \rho_a g I = 0 \quad (2)$$

・乱れエネルギー k の方程式

$$\frac{d}{dz} \left(\rho \frac{v_t}{\sigma_k} \frac{dk}{dz} \right) + P + G - \rho \varepsilon = 0 \quad (3)$$

・分子粘性逸散率 ε の方程式

$$\frac{d}{dz} \left(\rho \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dz} \right) + c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \{ P + (1 - c_{3\varepsilon}) G \} - c_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} = 0 \quad (4)$$

ここで、 v_t は渦動粘性係数、 P は乱れエネルギーの生成項、 G は負の生成項であり次のようである。

$$v_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

$$P = \rho v_t \left(\frac{du}{dz} \right)^2 - k \rho_a R \frac{d}{dz} \left(\frac{v_t}{\sigma_t} \frac{dc}{dz} \right) \quad (6)$$

$$G = g \cos \theta \rho_a R \frac{v_t}{\sigma_t} \frac{dc}{dz} \quad (7)$$

ここで、 u は流下方向の流速、 c は固体粒子の濃度、 g は重力加速度、 z は上向き of 座標、 w_s は固体粒子の沈降速度、 F_s は鉛直方向のフラックス、 θ は斜面の傾斜角、 σ_t は渦動拡散係数と渦動粘性係数との比、

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon, c_\mu, c_{1\varepsilon}, c_{2\varepsilon}, c_{3\varepsilon}$ は $k-\varepsilon$ 乱流モデルの数値定数である。

4. 実験結果と数値解析結果の比較

計算で用いた吹雪の諸量については表 1 に示す通りである。

表-1 計算に用いた条件

雪面の粗度	6.33mm
雪粒子の粒径	0.215mm, 0.238mm
雪の密度	0.46g/cm ³

雪面上の粗度は雪質などの条件により大きな幅が

あるが、一般的に 0.01~10mm 程度といわれている。吹雪が発生した場合にはしてないときに比べ粗度が增大することが知られているが、ここでは吹雪を発生させた場合も同一値を使用した。

図 3, 図 4 には、実験結果と計算結果を示す。吹雪の実験によって得られた風速データは雪面から次第に流速が大きくなり、上方で一定の値に近づく分布を示す。流速分布を対数表示にするとその分布はほぼ直線を示し乱流の対数則に近い分布形状を示すことがわかる。吹雪量分布は底面から次第に小さくなり、風速 10m/sec, 12m/sec のいずれの場合も底面から 100mm ぐらいでほぼゼロの値をとる。風速 12m/sec の場合には上方付近で分布の乱れが見られるが、これは雪面の雪、給雪装置の雪が不連続に供給されたことによる影響と考えられる。

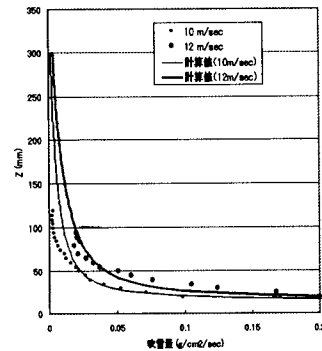


図 3 吹雪量分布

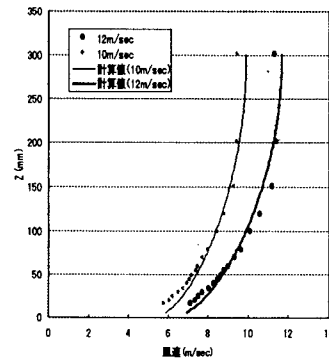


図 4 風速分布

福嶋祐介, 1998, 非ブーシネク $k-\varepsilon$ 乱流モデルによる吹雪の流動解析, 長岡技術科学大学研究報告, 第 20 号, 29-42.