

ラグランジュ型吹雪モデルの開発

齋藤佳彦 (株雪研スノーイーターズ)
 大槻政哉 (")
 植松孝彦 (")
 前山徳久 ((財) 日本気象協会)
 佐藤隆光 (")

1. はじめに

コンピュータを用いた吹雪数値シミュレーションは、吹雪現象の物理過程の究明、吹雪災害の予測及び防災にとって有効な手法である。吹雪現象の数値モデルを構築する場合、流体（風）運動と粒子（雪粒子）の運動の二つの物理過程に分けられるが、現在実用化されている吹雪数値シミュレーションのほとんどは、風及び雪粒子の運動を「場」として捉えるオイラー型モデルである。一方、雪粒子の運動については、個々の雪粒子の運動を表現するラグランジュ型モデルが最適であると考えられるが、計算負荷が高いなどの問題により、実用化に至ったモデルは少ない。

そこで本研究では、オイラー型吹雪モデルと同様に、実用を目的としたラグランジュ型モデルの作成及びオイラー型モデルとの比較検証を行った。

2. モデル概要

2.1 計算の流れ

一般に吹雪現象を理解しようとする場合、流体運動（風）と吹雪粒子（拡散）運動の二つの物理過程に分けて考えることが多い。同様に、物理過程を物理（数値）モデルに置き換える場合も、二つ分けて考えるのが一般的である。だが、物理過程をモデルに置き換える過程で、運動の捉え方により「オイラー型」と「ラグランジュ型」に分けられる。特に吹雪粒子の運動を例に挙げると、前者の場合、吹雪粒子の運動を「粒子濃度の拡散」として捉えるのに対し、後者は吹雪粒子の運動を粒子一つ一つの運動として捉える。現在のところ、実用されている吹雪モデルは、ほとんどが流体運動、吹雪粒子運動とも「オイラー型」としたものである。

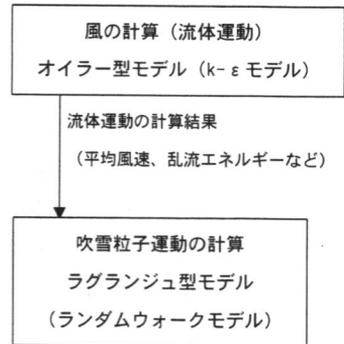


図1 モデルの構成

今回開発した吹雪モデルは、流体運動（風）のモデルにはオイラー型モデル（ $k-\epsilon$ 乱流モデル）、吹雪粒子運動についてはラグランジュ型モデル（ランダムウォークモデル）とした。よってモデル構成は、図1のようになる。

2.2 吹雪粒子運動過程

雪粒子挙動モデルとして、Sato .et (1997)を参考とした Langevin 方程式系のラグランジュ型ランダムウォークモデルを使用した。ここで用いるランダムウォークモデルは、気流計算モデルから出力される気流および拡散係数、乱流エネルギーを用いて、発生源から多数の粒子を放出・追跡し、その粒子密度から雪粒濃度や挙動を求める方法である。

ここでは雪粒の移流には気流計算結果の平均分布を用い、雪粒の変動速度には乱流エネルギーから設定される各成分風速の標準偏差、速度変動のラグランジュ時間スケールおよび随時発生させる正規乱数によって表現される粒子の遷移確率分布の方程式を逐次解くことで、粒子密度すなわち雪粒濃度を計算した。

粒子速度 $u_{p(n)} = \bar{u} + u'_{(n)}$ (1)

$u'_{(n)} = \alpha u'_{(n-1)} + \sqrt{1-\alpha^2} \sigma_u \xi$ (2)

粒子位置 $x_{(n)} = x_{(n-1)} + u_{p(n)} \Delta t$ (3)

ここで、 $u_{p(n)}$: n ステップにおける粒子速度、 \bar{u} : 平均速度 (気流計算結果の平均風速)、 $u'_{(n)}$: n ステップにおける乱流速度成分、 α : 自己相関係数 (粒子速度の持続性を表す)、 σ_u : 変動速度の標準偏差 (気流計算結果の乱流エネルギー)、 ξ : 正規乱数 (N(0,1))、 $x_{(n)}$: n ステップにおける粒子位置座標、 Δt : タイムステップ。

2.3 吹きだまり過程

吹きだまりは乱流エネルギーの小さい場所で発生すると考え、吹きだまり発生の確率 P を仮定し、雪粒子の挙動を追跡する際に、 $P < 1$ 以下になるときに吹きだまると仮定した。吹きだまり発生の確率 P は以下で示される。

$P = \frac{(k_t - k)}{k_t}$ (4)

ここで、 k は地表面付近の計算格子における乱流エネルギー、 k_t は臨界乱流エネルギーとし、下記の摩擦速度 u_* と乱流エネルギーの関係式に臨界摩擦速度 u_{*c} を代入し求めた。ここで、 C_μ はモデル定数である。

$u_* = C_\mu^{1/4} k^{1/2}$ (5)

2.4 着雪過程

着雪現象も吹きだまりの計算方法と同様に、乱流エネルギーが小さい場所で発生すると仮定し、着雪発生の確率 P を導入し、式 (4)、(5) より求めた。

3. 計算結果検証

3.1 吹雪粒子濃度分布

吹雪粒子の計算結果を Sato .et (1997) に従って整理し、計算結果の妥当性を検証した。図2に作成したモデルと Sato .et(1997)の計算結果を示す。粒子の挙動および鉛直の濃度分布は、実測結果と比較検証した Sato .et(1997)に示された結果を概ね再現しており、本モデルの計算結果の妥当性が確認された。

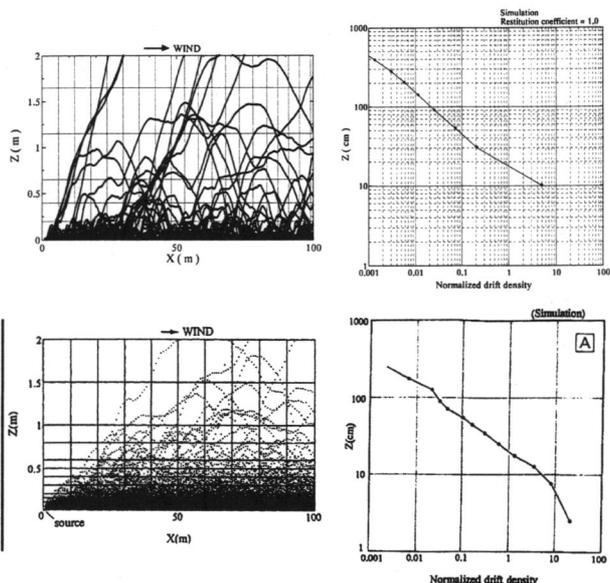


図2 吹雪粒子の挙動 (左) と鉛直吹雪濃度分布 (右) 上段: 計算結果、下段: Sato .et(1997)より (地面との反射係数=1.0)

3.2 吹きだまり分布

図3に本モデルによる計算結果と、

Uematsu et al(1991)より既に検証が行われているオイラー型モデルによる計算結果を示した。両グラフをみると、吹きだまり速度の大きさはほぼ一致しており、分布の形状には若干の違いはあるが、吹きだま

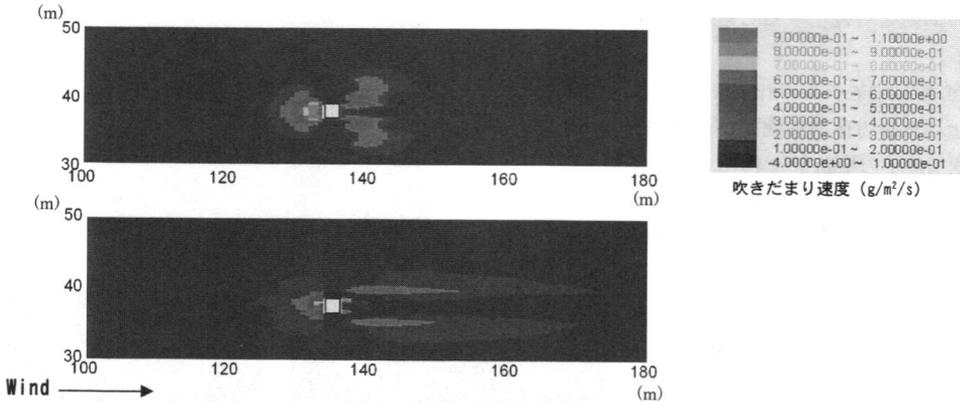


図3 吹きだまり速度の計算結果

上段：オイラー型モデル、下段：ラグランジュ型モデル。立方体形状の構造物を中央部に配置し、風を左側から流入させた場合の計算結果。水平面上部からの視点。

り速度の強い/弱い位置はほぼ一致している。これらから、ラグランジュ型モデルはオイラー型モデルの特徴を概ね再現できていると言える。

3.3 着雪現象

図4に標識を傾斜角 90° 及び 60° に設置した場合の標識への着雪現象のモデルの再現結果を示す。ただし、図中の無次元着雪量とは、放出した粒子の数で着雪したと判定された粒子数を除した値である。

図に示されるように標識を 90° に設置した場合は、乱流の小さい標識中心付近の着雪量が大きく、標識を迂回する気流が支配的で乱流の大きい標識端部では、着雪量が小さくなっている。

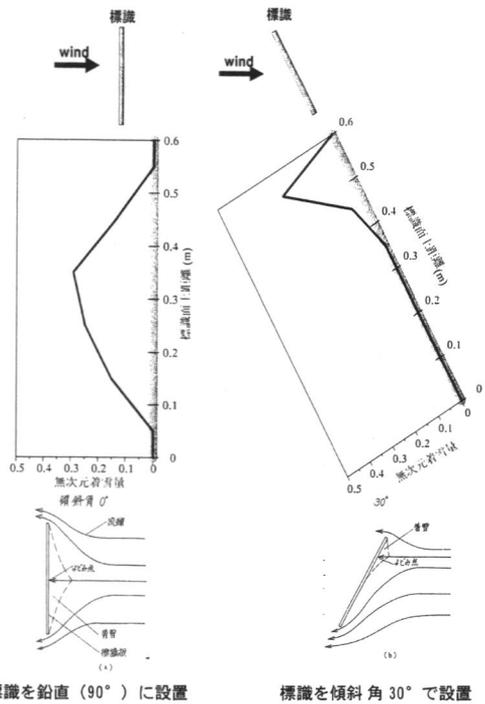
同様に標識を 60° に設置した場合も、平均風速が小さくなる標識上端部で着雪量が多くなっている。ただし、 90° に設置した場合と比較すると、気流を遮蔽する影響が小さく、標識付近への平均風速が小さいため、全体として着雪量は小さくなる傾向が見られた。

また、 90° 及び 60° ともに、観測データに基づいた竹内(1978)の模式図とよく一致しており、着雪現象に対する本モデルの妥当性が確認された。

4. 計算結果の可視化

吹雪数値シミュレーションより吹雪現象の可視化を行う場合、オイラー型モデルでは、風及び吹雪粒子の運動を「場」として捉えて計算を行うため、計算結果は、風速、雪粒子濃度などの分布として出力される。

一方、今回開発したラグランジュ型吹雪モデルでは、風の計算は従来のオイラー型のモデルで行って



標識を鉛直 (90°) に設置

標識を傾斜角 30° で設置

図4 標識への着雪現象の再現結果
上段：設置模式図、中段：計算結果、
下段：着雪の模式図（竹内(1978)より

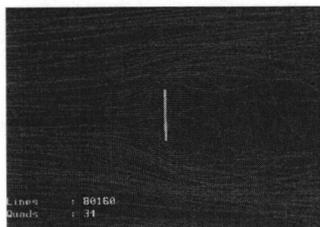
いるため、分布として出力されるが、吹雪粒子の運動については、粒子各々の軌道が出力される。そのため、ラグランジュ型モデルによる計算結果より、従来のオイラー型モデルでは表現できなかった吹雪粒子の挙動を可視化することが可能である。

図 5 に本モデルの計算結果より可視化した立方体構造物及び標識周りの吹雪粒子の挙動を示す。この図から、雪粒子濃度分布表示と異なり、吹雪粒子の挙動が直感的に捉えることが可能である。

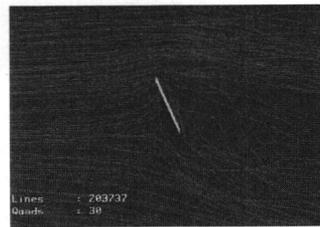
また、バーチャルリアリティ技術とラグランジュ型モデルを組み合わせることにより、吹雪時の視程など人間の感覚に依存する要素の評価の一手段として有効であると考えられる。



立方体構造物周りの吹雪粒子の軌道



標識の傾斜角 90°



標識の傾斜角 60°

標識周りの吹雪粒子の軌道

図 5 吹雪現象の可視化

5. まとめ

実用を目的としたラグランジュ型

吹雪モデルの開発を行った。その結果、

上段：構造物周りの吹雪粒子の軌道、下段：標識周りの雪粒子の挙動

現在実用として一般的なオイラー型吹雪モデルの計算結果と良い一致を見られ、開発したラグランジュ型吹雪モデルの妥当性が確認された。また、従来のオイラー型吹雪モデルでは表現することが出来なかった着雪現象が表現可能となり、実際の着雪現象の傾向をよく表していた。

今回開発したラグランジュ型吹雪モデルは、オイラー型モデルでは表現できない吹雪粒子一つ一つの挙動を表現することができ、吹雪現象を直感的に捉えることが可能である。このことを利用し、バーチャルリアリティ技術などと組み合わせることにより、人間の感覚に依存する視程などの要素の評価手段としても有効であると考えられる。

参考文献

1. Sato, T., Uematsu, T. and Kaneda, Y. (1997) Application of random walk model to blowing snow. *Snow Engineering: Recent Advances*.
2. 竹内政夫 (1978): 道路標識への着雪とその防止, *雪氷* 40 巻 3 号, P15-25.
3. Uematsu, T., Y. Kaneda, K. Takeuchi, T. Nakata and M. Yukumi (1989): Numerical simulation of snowdrift development., *Annals of Glaciology*, **13**, 265-268.
4. Uematsu, T., T. Nakata, K. Takeuchi, Y. Arisawa and Y. Kaneda (1991): Three dimensional numerical simulation of snowdrift. *Cold Regions Sci. Tech.*, **20**, 65-73.