

粒子法を用いた吹雪シミュレーションに関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）
研究期間：平 22～平 23
担当チーム：雪氷チーム
研究担当者：松澤勝、金子学、伊東靖彦
武知洋太、渡邊崇史

【要旨】

吹雪対策施設の性能評価に関し、数値シミュレーションを用いる事例が多く見られるようになった。吹雪シミュレーションでは、空間を格子で表現した解析手法が一般に用いられている。近年、流体を粒子の個別の動きで直接的に再現する粒子法という解析手法が開発された。本研究で、粒子法の吹雪への適用性について検討した結果、解決すべき課題が多いことから、現状では従来のオイラー的手法を用いる方が現実的であると考えられた。

キーワード：吹雪、跳躍層、シミュレーション、粒子法、ラグランジュ的手法

1. 研究の背景

積雪寒冷地の冬期道路では、吹雪による視程障害や吹きだまりによって多くの交通障害が発生している。特に平成 23 年度冬期は、北海道及び東北地方の日本海側で吹雪が多く発生し、多重衝突事故や通行止めが多く発生した。こうした吹雪災害の抑止に向けて、吹雪対策施設の整備が行なわれているが、対策施設の計画や設計にあたっては、対策効果の予測が重要となる。従来は、現地観測や風洞実験による評価が一般的であったが、近年、数値シミュレーションによる評価事例が増えつつある。現在行なわれている吹雪シミュレーションでは、空間を格子で表現し吹雪粒子を連続体として近似して計算している（オイラー的手法、図-1）。空間を格子で表現するため、盛土や切土等の道路構造や防雪施設の周辺では、格子を精密に設定することが必要となる。また、吹雪は空気中を雪粒子が移動する現象であり、連続体として表現するよりも、粒子として直接的に表現する方が、より正確な結果を得られる可能性が高いと考えられる。

近年、流体を粒子として表現し、粒子の個別の動きを直接的に再現する粒子法（ラグランジュ的手法、図-2）という解析手法が開発された。粒子法については、着雪や雪崩現象への適用事例はいくつかあるものの、吹雪への適用事例は未だ見られない。そこで、本研究では、吹雪中の雪粒子の運動について、吹雪の中での雪粒子の跳躍運動を再現するプログラムを作成し、粒子法の吹雪への適用の可能性につい

て、基礎的な検討を行なうこととした。

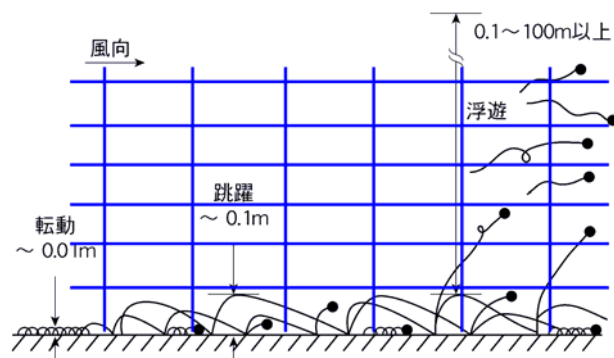


図-1 空間を格子で表現した計算モデル

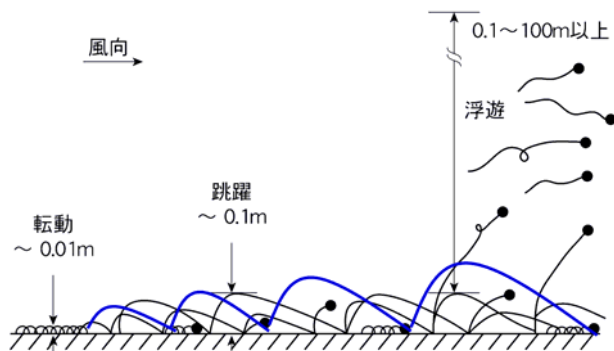


図-2 雪粒子を直接的に表現した計算モデル

2. 研究方法

吹雪中の雪粒子の運動形態には「転動」、「跳躍」、「浮遊」の3つがある。この内、「浮遊」は広い空間を飛雪が流れる状況であり、雪粒子を連続体として表現するオイラー的手法による解析方法でも特に違和感は感じられない。一方「跳躍」は、風により転

がり始めた雪粒子が雪面から跳ね上がり、再度雪面に落下した際に跳ね返る。その際、雪面の他の雪粒子を突き飛ばす運動（スプラッシュ過程と呼ぶ）となるため、連続体として表現することは非常に難しい。吹雪中の雪粒子の大半が跳躍層にあることも考え合わせ、本研究では跳躍層の雪粒子の運動について再現することとした。

本研究では、まず基本計算として1個の雪粒子の運動について計算を行なう。次に、スプラッシュ過程を計算に加え、地吹雪が発達する状況のシミュレーションを行ない、粒子法の吹雪への適用性について調べることにした。

2. 1 基本計算の方法

雪粒子の軌道計算は、ニュートン力学の運動方程式（運動の第二法則）に基づいて計算することとした。計算を簡便にするため、雪粒子の形状には球形を仮定し、重力と風による抵抗力が卓越するものとして計算を行なった。粒子の運動方程式を式-1に示す。

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = -\frac{3}{4} \frac{\rho_a}{\rho_p} \frac{C_d}{d} V_R (\vec{u}_p - \vec{u}) - \vec{g} \quad \dots \text{式-1}$$

\vec{u}_p : 粒子の速度, \vec{u} : 風速, $V_R = |\vec{u}_p - \vec{u}|$,
 ρ_a : 空気の密度, ρ_p : 雪粒子の密度, \vec{g} : 重力加速度,
 C_d : 抵抗係数, d : 粒径

計算では、雪粒子に上方への初速と射出角を与えて動き出させ、雪面に落下するまでの動きを計算した。はじめに、鉛直方向に様な風速分布を想定した計算を、次に鉛直方向に対数分布の風速を与えて計算を行なった。それぞれの計算モデルを図-3と図-4に示す。なお、軌道計算の際の誤差補正手法には、オイラー法、修正オイラー法、ルンゲークッタ法があるが、本研究では修正オイラー法を用いた。

2. 2 基本計算の計算結果

様な気流を想定した計算モデルにおいて、3種類の風速（2m/s,6.5m/s,13m/s）を与えた場合の粒子の飛距離（図-5）は、風速に比例した結果が得られた。また、気流の鉛直分布（対数分布）を仮定した場合の粒子の飛距離（図-6）も、風速に比例した計算結果が得られた。本検討により、雪面を飛び出した（初速度を与えた）1個の雪粒子が、風と重力の影響を受けつつ運動する状況を表示することができた。

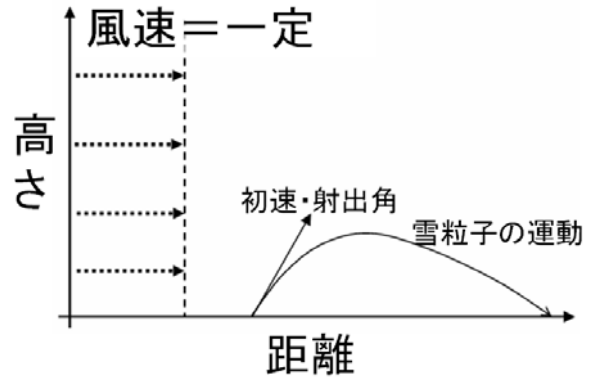


図-3 鉛直に様な気流を想定した計算モデル

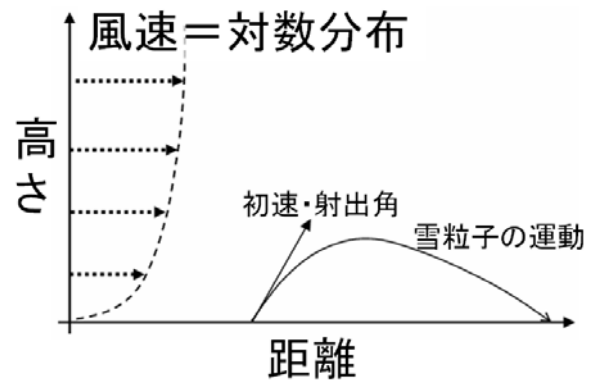


図-4 気流の鉛直分布を仮定した計算モデル

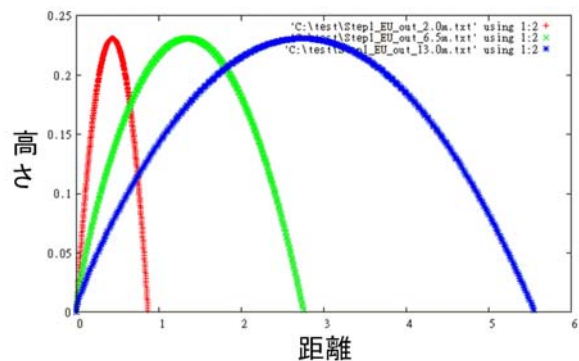


図-5 鉛直に様な気流を想定した計算結果

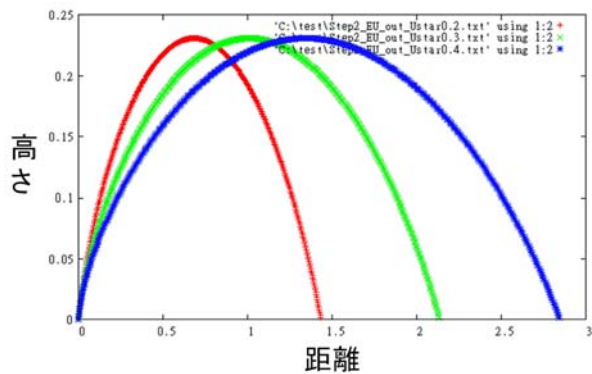


図-6 気流の鉛直分布を仮定した計算結果

2. 3 スプラッシュ過程の計算

これまでの計算で、基本的な雪粒子の運動を計算したが、吹雪のシミュレーションでは、雪面に落下した雪粒子が雪面で反発し、再度跳び上がる現象や、雪面の雪粒子が突き出されて飛び出す現象（スプラッシュ過程、図-7）を表現する必要がある。

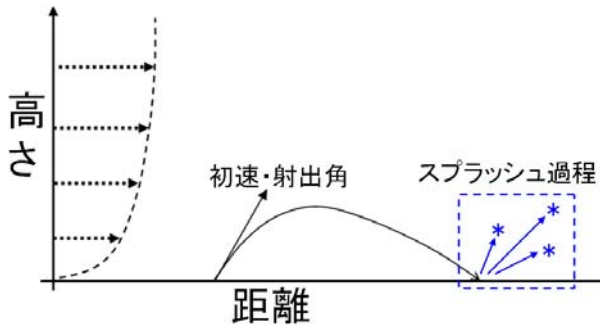


図-7 スプラッシュ過程

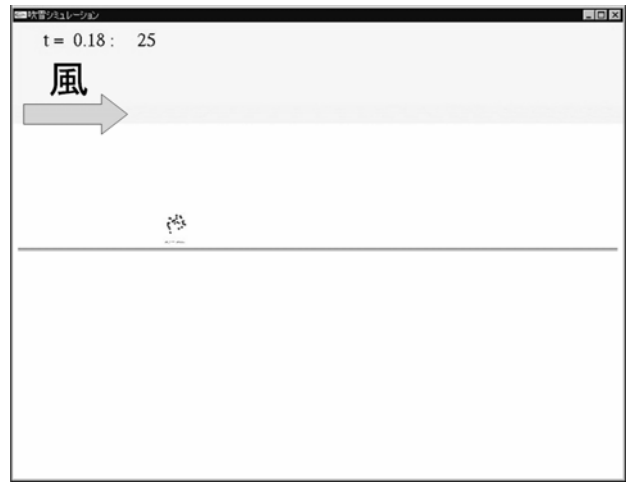
スプラッシュ過程については、K.Nishimura らが低温風洞実験により跳躍層の雪粒子の挙動を観測した事例¹⁾を参考に、雪粒子が雪面に落下した際に射出される雪粒子の個数は二項分布、鉛直方向の反発係数はガンマ分布、水平方向の反発係数は正規分布の乱数で与えることとした。

2. 4 吹雪シミュレーションの実行

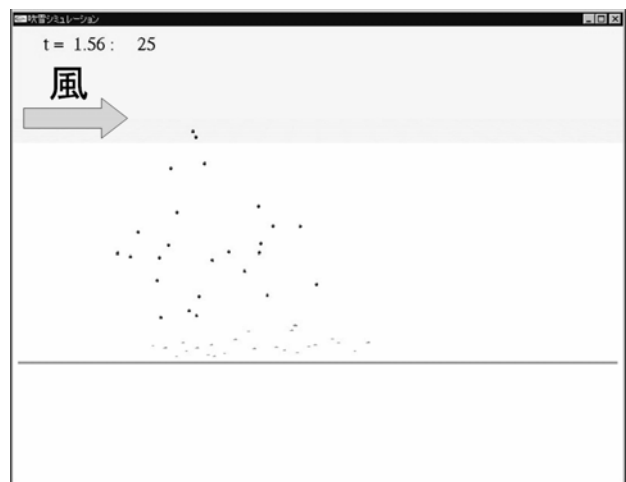
スプラッシュ過程を組み込んだ吹雪シミュレーションプログラムをC言語で作成し、以下の条件で計算を行なった。計算結果を図-8に示す。

- 1) 初期に25個の雪粒子を発生させる
- 2) 雪粒子の初速と射出角は乱数で与える
- 3) スプラッシュ過程で発生する雪粒子は5個以内の乱数で与える
- 4) スプラッシュ過程を3回経た雪粒子は消失

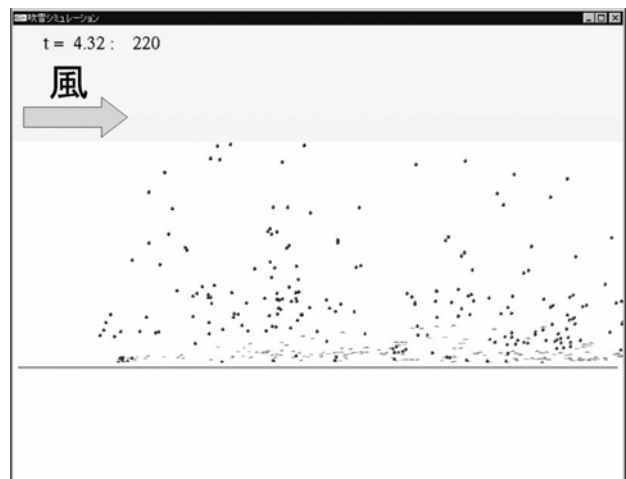
実行直後に発生した 25 個の雪粒子（図-8の①）は、乱数により与えられた初速と射出角で運動を開始した後、風と重力の影響により落下し（図-8の②）、落下した雪粒子はスプラッシュ過程を経て増加しつつ運動する（図-8の③）。スプラッシュ過程の繰り返しにより、雪粒子は増加・消失を繰り返し、次第に地吹雪の様相を呈するシミュレーション結果が得られた。（図-9の①～③）。なお、図-9の③では約 19000 個の雪粒子を発生させたが、雪粒子数の増加に伴い計算負荷が増大し、ここまでの計算に数分を要した。



① 実行直後

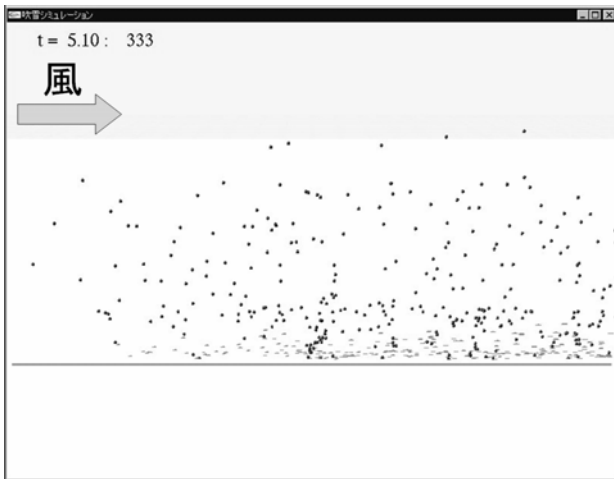


② 初期の雪粒子の運動



③ スプラッシュ過程初期

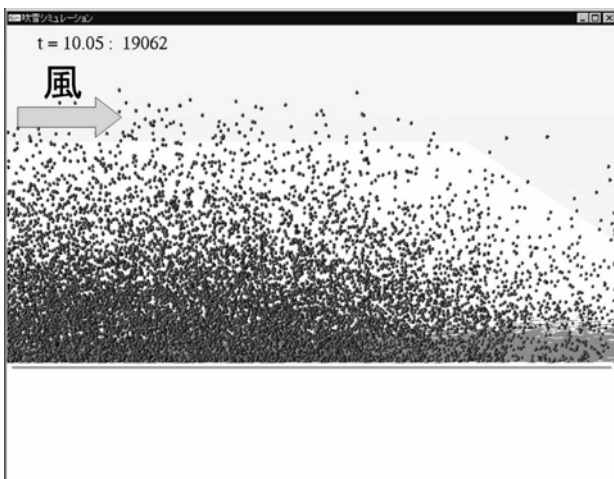
図-8 シミュレーション結果（1）



① 地吹雪の状況 (1)



② 地吹雪の状況 (2)



③ 地吹雪の状況 (3)

図-9 シミュレーション結果 (2)

3. 粒子法の吹雪への適用性について

今回のシミュレーションの結果から見て、今後、粒子法の吹雪への適用の可能性があるものと考えられる。しかし、本シミュレーションで仮定となつて

いた項目を明らかにし、本シミュレーションに含まれない吹雪現象のモデルを作成することが、実用化に向けての課題となる。今後の課題と考えられる主な項目について、以下に示す。

- 1) 転動から浮遊に至る挙動の表現
- 2) 雪の昇華蒸発のモデル化
- 3) 実際の吹雪との整合性の確保
- 4) 盛土や切土等の道路構造や防雪施設周辺での雪粒子の運動の定式化
- 5) 雪粒子の粒径分布(本研究で考慮していない)
- 6) 多くの雪粒子を動かすための処理能力

このように、粒子法の吹雪への適用に際しては、まだ多くの課題が残されており、現状では従来のオイラー的手法を用いることが現実的であると考えられる。

4. まとめと謝辞

粒子法の吹雪への適用性について、平面上における跳躍層の雪粒子の運動を表現したプログラムを作成して検討を行なった。その結果、今後、粒子法の吹雪への適用の可能性があると考えられるが、実用化に向けて解決すべき課題が多く、現状では従来のオイラー的手法を用いることが現実的であると考えられた。最後に、本研究の実施にあたり、防災科学技術研究所の根本征樹氏と、札幌医療福祉デジタル専門学校(現札幌医療福祉専門学校)の山岡誠氏から多くの助言と協力をいただいた。両氏に心から感謝する次第である。

参考文献

- 1) K.Nishimura et.al: "Measurements and numerical simulations of snow-particle saltation", Annals of Glaciology, vol. 26, pp184-190, 1998

A STUDY ON BLOWING SNOW SIMULATION USING THE PARTICLE METHOD

Budget : Grants for operating expenses
General account

Research Period : FY2010-2011

Research Team :

Snow and Ice Research Team

Authors :

MATSUZAWA Masaru, KANEKO Manabu,
ITO Yasuhiko, TAKECHI Hirotaka,
WATANABE Takashi

Abstract :

Numerical simulation is increasingly used today to evaluate the performance of blowing snow control facilities, and analytical approaches involving the use of grids to represent space are commonly adopted to simulate blowing snow conditions. One such approach is the recently developed particle method, which can be used to directly represent fluids based on individual particle movements. In this study, the technique's applicability to the simulation of blowing snow was investigated. As the results revealed a variety of problems to be addressed, it was considered more realistic to use the conventional Euler approach under current circumstances.

Key words :

blowing snow, saltation layer, simulation, particle method, Lagrangian approach