

道路構造の防雪効果を評価する数値シミュレーションモデルの検討

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 雪氷チーム ○小中 隆範
伊東 靖彦
松澤 勝

道路構造による吹きだまり対策効果の定量化に向けては、現地観測が不可欠であるが、観測回数や観測対象が限られることから、数年単位の短い期間で多様な地形条件に対する十分な観測データを得ることは難しい。近年、数値シミュレーションにより吹雪対策の効果評価を行う事例が増加しつつあることから、数値シミュレーションプログラムを作成し、吹きだまり対策の定量的な評価に取り組むこととしたので報告する

キーワード：吹雪、防雪、シミュレーション、道路構造

1. はじめに

近年、厳冬期において、爆弾低気圧や強い冬型の気圧配置に起因する暴風雪により、短時間のうちに道路上に大規模な吹きだまりが発生し、交通障害を引き起こすケースがしばしば発生している。道路構造による吹雪対策として、防雪盛土や防雪切土という工法が用いられる。しかし、既往研究事例が少ないため防雪効果が定量的に明らかとはなっていない。また、一度の暴風雪に対して、どの程度の吹きだまり抑制効果が期待できるか等についても不明な点が多い。道路構造による吹雪対策の設計法を確立するために、道路構造ごとの吹きだまり量と積雪深や気象条件との関係を明らかにし、防雪効果を定量化することが極めて重要である。

道路構造による吹きだまり対策効果の定量化に向けては、現地観測が不可欠であるが、観測回数や観測対象が限られることから、数年単位の短い期間で多様な地形条件に対する十分な観測データを得ることは難しい。現地観測結果を補う手法として、近年、数値シミュレーションにより吹雪対策の効果評価を行う事例が増加しつつあることから、数値シミュレーションプログラムを作成し、吹きだまり対策の定量的な評価に取り組むこととしたので、以下に報告する。

2. 数値シミュレーションに関する調査

はじめに文献調査^{1~16)}を行い、数値シミュレーションプログラム作成に必要な諸条件（気流のモデル、浮遊層のモデル、跳躍層のモデル、格子形状、吹雪対策施設の取扱い等）を取りまとめた（表-1）。それらについて、既往知見により比較検討し整理したものを基本設計とした（表-2）。

数値シミュレーションの内、気流に関しては多様なプログラムが既に開発され提供されている。数値シミュレーションプログラムの開発にあたって、格子形状や吹雪現象解析のためのカスタマイズが可能であり、様々な乱流モデルが扱えることからOpenFOAMを採用することと

表-1 検討項目

大項目	中項目	小項目
構成モデル	気流モデル	1) 気流のアルゴリズム 2) 気流の基礎方程式 3) 乱流モデル
	浮遊層のモデル	1) 基礎方程式 2) 落下速度 3) オイラーモデルとラグランジェモデル
	跳躍層のモデル	1) 跳躍層のモデル化 2) 吹きだまりモデル 3) 吹きだまり密度
計算領域について	格子と計算領域	1) 格子形状 2) 格子サイズと計算領域
	対策施設等	1) 防雪柵 2) 植生（キャノピーモデル）
その他	オペレート	1) 処理の流れ

表-2 構築したシミュレーションの基本設計

大項目	中項目	小項目	条件
構成モデル	気流モデル	アルゴリズム	有限体積法
		基礎方程式	RANSモデル
		乱流モデル	標準k-εモデル RNG k-εモデル 低Re数型k-εモデル
	浮遊層のモデル	基礎方程式	乱流拡散係数による移流拡散方程式
		落下速度	降雪起源と雪面起源の雪粒子の異なる二つを設定
	跳躍層のモデル	オイラーモデルとラグランジェモデル	オイラーモデル
跳躍層のモデル化		ある層厚の跳躍層を仮定	
吹きだまりモデル		最下層の格子の沈着量と侵食量のバランスで表現	
計算領域について	格子と計算領域	吹きだまり密度	自由に変更可能
		格子形状	構造格子 非構造格子
	対策施設等	防雪柵	格子界面上の空隙持つ面的抵抗物
		植生	キャノピーモデル

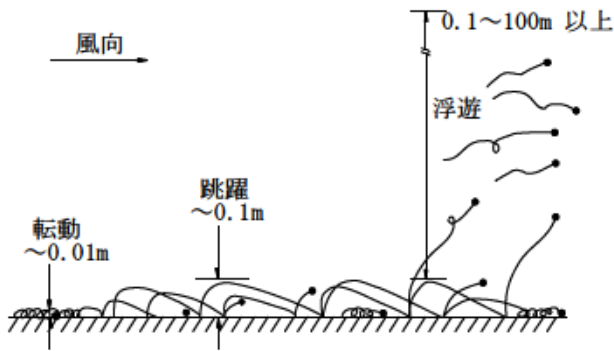


図-1 飛雪の運動形態¹⁷⁾

した。吹雪中の雪粒子の運動には、転動、跳躍、浮遊の3つがあり(図-1)、吹きだまりの計算には、跳躍層と浮遊層の吹雪をそれぞれ再現し、雪面で移動する雪の収支を計算することが必要となる。

このような吹雪特有の部分については、既存のプログラムが公開されていないため、新規に作成することとした。

3. 数値シミュレーションプログラムの開発

シミュレーションシステムは、メインプログラムをOpenFOAMとしたため、迅速かつ安定な動作環境を考慮し、プリ・プロセス、ポスト・プロセスの動作環境をWindows系とし、OpenFOAMのネイティブな環境であるLinuxをメイン・プロセスの動作環境とした。

シミュレーションシステムは、プリ・プロセス、メイン・プロセス、ポスト・プロセスと言う流れで動作する(図-2)。

また、全体構成については図-3のとおりとなり、メイン・プロセスとプリ・プロセス、ポスト・プロセスの動作環境が異なることから、ファイル、コマンドなどの通信を考慮する必要が生じた。

ファイルの通信については、本来はWindowsでファイル共有を行うプロトコルであるSMB/CIFSが、LinuxサーバにSambaというソフトウェアをインストールすることにより通信を行うことが可能となるため利用することとした。本システムではLinuxサーバにSambaをインストールし、Windowsのクライアントと同一のネットワークに接続することでファイル共有を行うこととした(図-4)。

また、コマンド通信についてはTelnetを利用することとした。Telnetクライアントを使用し、Windowsのクラ

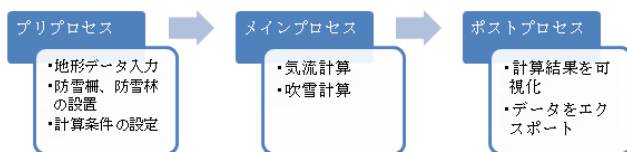


図-2 シミュレーションシステムの動作の流れ

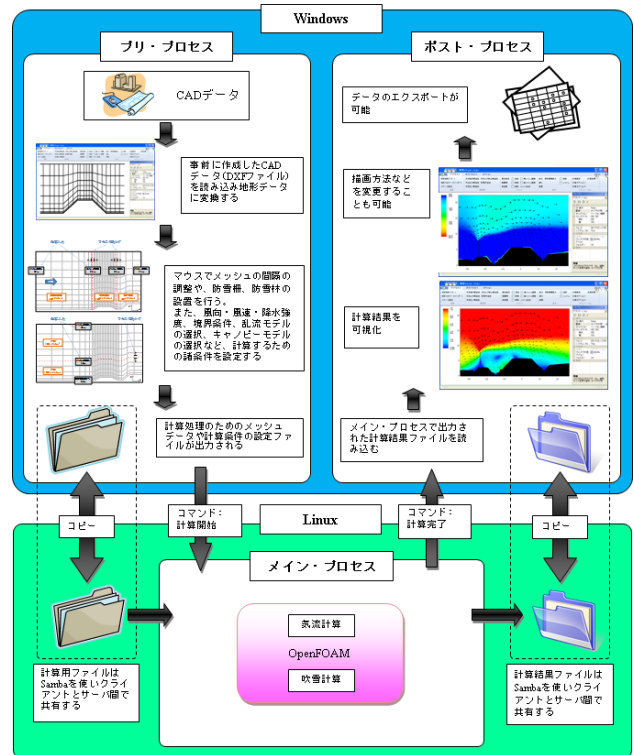


図-3 シミュレーションシステムの構成図

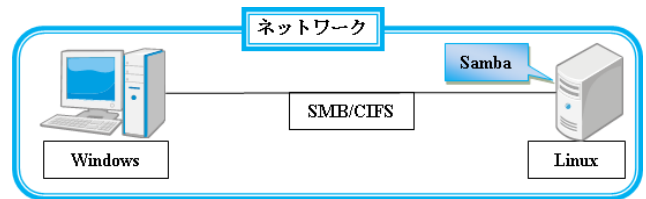


図-4 ファイルの通信

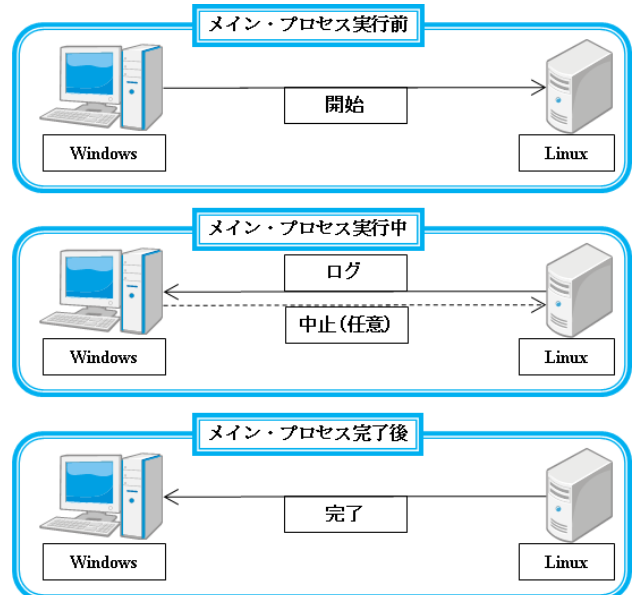


図-5 コマンドの通信

イアントからLinuxサーバに接続する事で、そのサーバ上のプログラムを実行出来、Windowsのクライアントで起動したかの様に使用することが出来るためである。Windowsのクライアントで入力したコマンドは、Linuxサ

サーバのコマンドプロンプトセッションにローカルでログオンした場合と同じようにLinuxサーバに送信され、Linuxサーバ上で実行される。実行したコマンドの出力はWindowsのクライアントに送り返され、Windowsのクライアント上に表示される（図-5）。

4. 数値シミュレーションプログラムの感度試験

数値シミュレーションプログラムの計算パラメータ（臨界摩擦速度、吹雪粒子の落下速度、風速、降水量、風向等）について、各々の計算パラメータの違いによる計算結果の変化を把握するため、感度試験を行い、その結果を基に既往プログラムの計算特性を整理することにした。

感度試験では、計算結果に大きな影響を与えると考えられるパラメータを抽出し、そのパラメータに対し、複数の設定値毎に計算を行い、計算結果を比較することにより、そのパラメータの影響について検討した。

影響を評価するパラメータを基に設定した感度試験の実施項目は表-3に示す。

また、感度試験にあたって、パラメータの比較等を行う際に、標準とするシミュレーションの設定条件、道路（地形）形状を設定した（表-4）（表-5）。

表-3 感度試験実施項目

	感度試験内容
乱流モデル	気流計算で使用できる乱流モデル3種類について、各モデルを用いた場合の計算結果の違いを整理
臨界摩擦速度	既往知見で幅を持っている臨界摩擦速度について、いくつかの値で計算を行い、その違いを整理
吹雪粒子落下速度	降雪起原および雪面起原の吹雪粒子の落下速度について、いくつかの値で計算を行い、その違いを整理
メッシュサイズと領域サイズ	対象物周辺のメッシュのサイズと計算領域全体のサイズについて、いくつかの条件で計算を行い、その違いを整理
樹木モデル	樹木のキャンピーモデルとして使用できる4種類のモデルについて、各モデルを用いた場合の計算結果について、その違いを整理
防雪林形状・葉面積	防雪林について、枝下間隙、葉面積密度による計算結果の違いについて整理
防雪柵	防雪柵の種類、柵高、空隙率、下部間隙による計算結果の違いについて整理

表-4 標準とするシミュレーション設定条件

	設定値
風速	10m/s (高さ10m)
降水量	1mm/h
雪面粗度長	10^{-4} m
雪密度 (吹きだまり計算)	150 kg/m ³
流入側地表粗度長	0.05m
吹雪粒子落下速度	0.5m/s (降雪起原、雪面起原とも)
乱流モデル	標準k-ε
モデル範囲	左400m、右200m、上空高さ100m
メッシュサイズ	横メッシュ 0.25~10m 縦メッシュ 0.15~5m

表-5 標準とする道路（地形）形状

道路形状（地形別状）	諸元
平坦	-
盛土	高さ3m、1:1.5勾配、車道幅員6m
切土	高さ3m、1:1.5勾配、車道幅員6m
吹きだめ柵	地形：平坦、柵高3.0m、下部間隙0.5m、空隙率40%

以上の条件により感度試験を行い、判明した結果が表-6である。

表-6 感度試験結果のまとめ

		結果概要
乱流モデル		道路構造や防雪施設などの一般的な吹雪解析では、標準k-ε、またはRNGk-εを用いることが望ましい。
臨界摩擦速度		雪粒子や雪面の状況に応じて大きく変化するため、吹きだまりの再現計算や試行計算によって、事例ごと最適値を検討することが望ましい。
吹雪粒子落下速度	降雪起原	雪粒子や雪面の状況に応じて大きく変化するため、吹きだまりの再現計算や試行計算によって、事例ごと最適値を検討することが望ましい。
	雪面起原	雪粒子や雪面の状況に応じて大きく変化するため、吹きだまりの再現計算や試行計算によって、事例ごと最適値を検討することが望ましい。
メッシュサイズと領域サイズ	メッシュサイズ	小さい程精度が高くなるが、計算負荷も大きくなるため、地形や防雪施設のサイズ等を加味し、設定する必要がある。
	領域サイズ	十分に発達した吹雪を解析する場合、風上200m以上取ることが必要である。
樹木モデル		吹雪計算での乱流エネルギーの利用方法の影響により、防雪林無いため吹雪が発達する傾向がみられた。今後、アルゴリズムなどを検討することが必要である。
防雪林形状・葉面積	枝下間隙	視程、吹きだまりについては、枝下間隙の違いによって差は見られるが、どちらのパターンも風下側で視程が低下、吹きだまりが生じる結果となっている。今後検討が必要な部分である。
	葉面積密度	風速については、葉面積密度が大きくなるに従い、風下側の風速が小さくなる傾向となっており、一般的知見と合致していると考えられる。一方で、視程、吹きだまりについては、風下側で葉面積密度が大きくなるほど、吹きだまりが大きくなり、視程が低下する傾向となっており、一般的知見とは相違が見られた。
防雪柵	種類	どの柵についても、一般的な知見で言われている吹きだまり形状となっていたが、吹き止の柵について風下の逆流が大きく、その影響により吹きだまりが発生し、視程が低下する傾向がみられた。
	柵高	吹きだめ柵：柵高が高くなるほど、風下の風速が小さくなり、視程は大きく、吹きだまりは柵直下の吹きだまりの面積が広がる傾向あり、既往知見とは逆傾向にある。
		吹き止柵：風下の視程は柵高による違いは小さいが、吹きだまりは柵高が大きくなるほど、吹きだまりが多くなる傾向にある。
	空隙率	吹き止柵：柵高が大きくなるほど吹きだまりの範囲が大きくなる傾向にあるが、防雪柵直下の視程が小さくなる傾向にある。ただし、柵高が大きいほど、風下側に行くほど視程が一気に小さくなる柵は小さい。
下部間隙	既往知見と柵高傾向が一致している。	
	吹きだめ柵、吹き止柵とも下部間隙が大きくなるほど、吹きだまりの範囲が大きくなる傾向はあるが、視程については下部間隙が大きくなるほど、小さくなる傾向がみられる。吹きだまりに関しては、概ね一般的知見と同様であると考えられる。	

5. 野外調査データを用いた精度検証

5.1. 野外調査結果の整理

野外調査結果を用いて、シミュレーション計算結果の精度検証と再現計算を行うため、先ず野外調査データを整理し、調査時の気象状況（風速、風向、降水量など）を、整理結果及び近傍の気象観測施設データを基に取りまとめた。

また、野外調査データより道路構造の違いによる吹きだまりや視程状況の違いについて、各項目が明確になるように検討を行った（表-7）。

表-7の項目について、検討した結果を表にまとめたのが表-8である。

表-7 整理項目

項目名	検討項目
道路構造と吹きだまりの関係	①道路構造と吹きだまり（量、位置、速度）との関係

表-8 検討結果のまとめ

項目名	検討項目
道路構造と吹きだまりの関係	・吹雪量に対する吹きだまり量の割合は、切土で50%、盛土で5%程度であった。 ・切土道路では、風上側が吹きだまりやすい。

5.2. 数値シミュレーションプログラムの精度検証

精度検証の前に本シミュレーションプログラムにおける吹雪の発生条件について記す。

吹雪の発生は図-6に示す気温と風速との関係で表されるのが一般的である。図中に示す3本のラインは、下側から低い地吹雪、断続的な高い地吹雪、連続的な高い地吹雪の臨界条件である。低い地吹雪は気温が低いほど臨界風速が小さく、4m/s前後の風速で発生する。断続的あるいは連続的な高い地吹雪は、気温の影響は小さく、風速が非常に強い場合に発生する。吹雪発生の有無の判別には、この気温と風速との関係を考慮して表-9に示す吹雪発生条件を適用するものとする。なお、吹雪時は計測値のみで、降雪の有無を判別することが難しく、常に“降雪あり”の条件を課した。

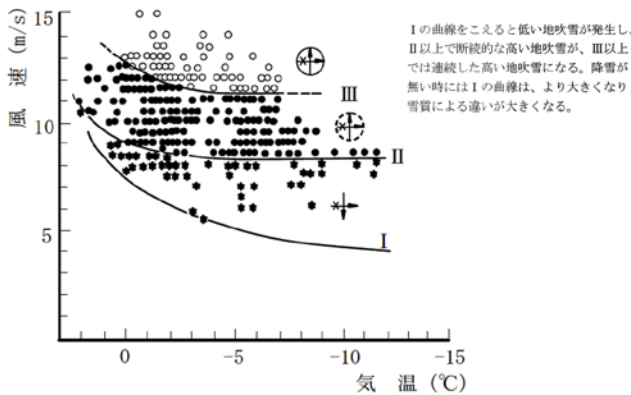


図-6 吹雪発生臨界風速¹⁸⁾

また、ここでの風速は、7m高さでの風速となっているため、検討する対象の風速計の高さに留意して、風速の鉛直分布の対数分布式を用いて、次式で7m高さの風速に変換した。

$$U_{7m} = U_z \frac{\ln(7/z_p)}{\ln(z/z_p)}$$

ただし、z：風速計の高さ (m)、 U_z ：高さzの風速、 z_0 ：雪面の粗度長 ($1.4 \times 10^{-4}m$) である。

表-9 吹雪の発生条件¹⁸⁾

気温	降雪有り	降雪無し
0~-5°C	6 m/s以上	11 m/s以上
-5°C以下	5 m/s以上	10 m/s以上

続いて、シミュレーションの精度や妥当性について検討するために、整理した野外調査データを用いて、シミュレーションによる再現解析を行い、解析結果と野外調査結果の比較を行った。再現対象の事例は、比較的強い吹雪が発生した表-10に示す期間である。

表-10 事例ケース一覧

番号	ケース	イベント			気象条件					
		開始	終了	時間 (h)	平均風速 (m/s)	風向	降雪量 (cm)	雪密度 (kg/m ³)	降水強度 (mm/h)	
1	道路、切土(実験場)	2012/2/7 14:40	2012/2/8 13:50	23	7.5	8.5	西北西	8	100	0.35
2	道路、盛土(実験場)	2012/2/7 14:40	2012/2/8 13:50	23	7.5	8.5	西北西	8	210	0.35

まず、切土道路の再現シミュレーション例を以下に示す。

基準点での気象測定データ (10分データ) 及びアメダスデータ (10分データ) を整理した結果に基づき、事例ケースの吹きだまり再現シミュレーションを行うために必要な気象条件を決定した (表-11)。

シミュレーション精度を検証するため、表-12に示すパターンのシミュレーションを行った。シミュレーション結果 (吹きだまり形状) を図-7に示す。

最も再現性の高かったパターンは、風速10m/s (初期設定より高い)、臨界摩擦速度0.15m/s (既定値より低い)、表-12の第4パターン (逐次計算) である。

表-11 事例ケースの気象条件 (切土)

(解析期間2012/2/7 11:00~2012/2/9 11:10、23h)

要素	値	使用データ	備考
平均風速	7.5 m/s	基準点 (雪面からの高さ1.5 m)	
吹雪時平均風速	8.5 m/s	風速：基準点、 気温：石狩アメダス	吹雪有無は表9の条件 (降雪あり) で判定
積雪深の差	8 cm	基準点	期間開始と終了の積雪深の差
降水量 (積算値)	8 mm	積雪深の差から推定	新雪の密度100 kg/m ³ として算出
降水強度	0.35 mm/h		

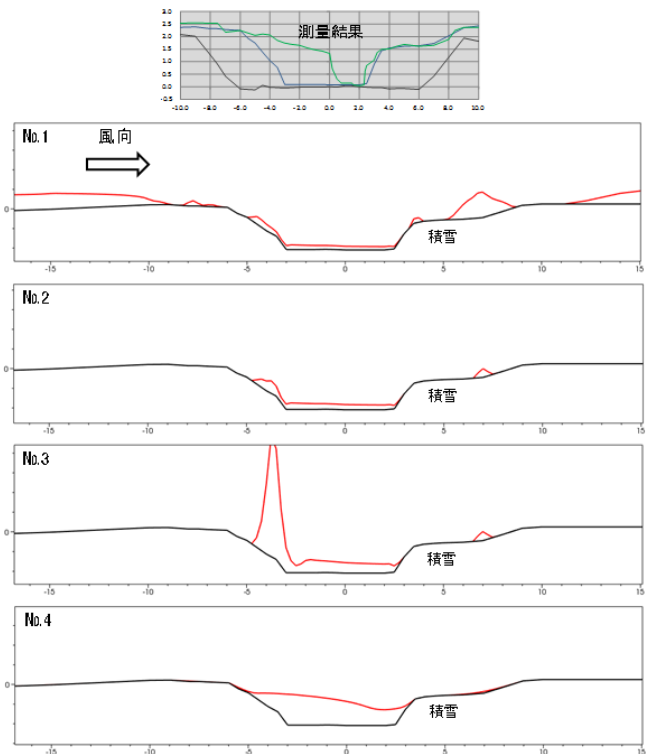


図-7 精度検証シミュレーション結果 (道路、切土)

表-12 精度検証用のシミュレーションパターン
(切土)

No.	計算条件				再現性について
	風速	雪面起源 雪粒子落下速度	臨界摩擦速度	計算方法	
1	7.6 m/s	0.5 m/s	0.2 m/s	通常	実測より全体的に吹きだまり量が小さい 観測に見られなかった吹きだまり発生
2	10.0 m/s	0.5 m/s	0.2 m/s	通常	吹きだまりが斜面に付くようになったが、量は少ない
3	10.0 m/s	0.5 m/s	0.15 m/s	通常	吹きだまり量が大きくなったが、吹きだまり成長速度が非常に大きい箇所があるため、形が再現されていない
4	10.0 m/s	0.5 m/s	0.15 m/s	逐次	概ね再現ができた

吹きだまりの形状及び吹きだまり量は概ね再現されたが、切土の風下側 (x=2m) に見られる凹形の形状は実測と異なっている。実測に見られた急勾配の雪斜面が形成された原因は、着雪などの吹きだまり以外の現象が起きている可能性があると考えられる。そのような場合は、吹雪シミュレーションでは雪面形状を再現しにくい可能性がある。

続いて盛土道路の再現シミュレーション例を以下に示す。

基準点での気象測定データ (10分データ) 及びアメダスデータ (10分データ) を整理した結果に基づき、事例ケースの吹きだまり再現シミュレーションを行うために必要な気象条件を決定した (表-13)。

シミュレーション精度を検証するため、表-14に示すパターンのシミュレーションを行った。シミュレーション結果 (吹きだまり形状) を図-8に示す。

表-13 事例ケースの気象条件 (盛土)
(解析期間2012/2/7 14:40~2012/2/8 13:50、23h)

要素	値	使用データ	備考
平均風速	7.5m/s	基準点 (雪面からの高さ1.5 m)	
吹雪時平均風速	8.5m/s	風速：基準点、 気温：石狩アメダス	吹雪有無は表9の条件 (降雪あり) で判定
積雪深の差	8cm	基準点	期間開始と終了の積雪深の差
降水量 (積算値)	8mm	積雪深の差から推定	新雪の密度100kg/m ³ として算出
降水強度	0.35mm/h		全期間の平均

表-14 精度検証用のシミュレーションパターン
(盛土)

No.	計算条件				再現性について
	風速	雪面起源 雪粒子落下速度	臨界摩擦速度	計算方法	
1	8.5m/s	0.5m/s	0.2m/s	通常	実測より全体的に吹きだまり量が大きい
2	8.5m/s	0.4m/s	0.2m/s	通常	吹きだまりがほぼ発生しない (実測も同様) 風上側の凹部の吹きだまりが再現できなかった

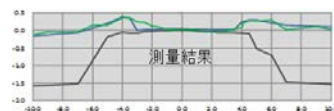


図-8 精度検証シミュレーション結果 (道路、盛土)

再現性の高かったパターンは、雪面起源雪粒子落下速度0.4m/s (既定値より低い) の表-14の第2パターンである。

計算結果によると、吹きだまりが発生する箇所がほとんどなく、実測と同様な状況が見られる。ただし、風上側の凹部の吹きだまりが再現されていない、風下側の凹部で小さな吹きだまりが再現され、実測と逆転している。感度試験においても、このように吹きだまり方を逆転させるメカニズムが見られなかったため、メッシュの切り方が原因であると思われる。

シミュレーションの精度検証、最適パラメータの検討、問題点の抽出等を目的として、切土道路と盛土道路の事例について、その再現計算を行った結果判明した事は以下のとおりである。

- 盛土道路では、雪面起源雪粒子落下速度を既定値 (0.5m/s) から0.35~0.4m/sまで下げると、吹きだまりの再現性が改良された。
- 急勾配の場合、吹きだまりの異常値または通常には見られない形状の吹きだまりが発生する場合があった。
- 吹きだまり速度の大きい箇所では、非常に大きい吹きだまりが発生する場合があり、雪面を変更しながら逐次計算を行うと、より自然な吹きだまり形状になった。
- 切土道路では、既定の臨界摩擦速度 (0.2m/s)、風速 (7.6m/s)、通常計算で計算すると、吹きだまりの過小評価になる場合がある。臨界摩擦速度を0.15m/sまで下げ、風速を10m/sと高くし、逐次計算を行うと吹きだまり量の再現性が改良された。

6. まとめ

道路構造による吹きだまり対策効果の定量化に向けて現地観測が不可欠であるが、数年単位の短い期間で多様な地形条件に対する十分な観測データを得ることは難しいことから、数値シミュレーションプログラムを作成した。

数値シミュレーションプログラムを作成するにあたり、既往文献を基に、吹雪に関する定数やパラメータ（雪粒子落下速度や吹雪の移動限界摩擦速度など）について整理し、既存のモデルを基にシミュレーションシステムの構築を行った。

作成した数値シミュレーションプログラムのパラメータについて、実際の解析を行う際に妥当と考えられるモデル若しくは数値等についての整理を行うために感度試験を行った。

シミュレーションプログラムの精度検証、最適パラメータの検討、問題点の抽出を目的として、野外観測データを整理して取りまとめた事例をいくつか抽出し、盛土区間と切土区間を対象に再現計算を行った。

その結果、盛土区間では雪面起源雪粒子の落下速度を0.4m/sとした場合に再現性が高かった。また、切土区間では風速10m/s、臨界摩擦速度0.15m/s、逐次計算とした場合に吹きだまりの形状及び吹きだまり量は概ね再現されたが、切土の風下側に見られる凹形の形状は形成されなかった。

今後の課題として、現状では道路構造ごとにパラメータの調整を行い再現性の向上を図っているが、それだけでは再現性の向上を図れない事例もあるため、新たなアルゴリズムの検討及び改修が必要になってくる。また、今回使用した野外観測データの大部分は、当研究所の石狩吹雪実験場で計測されたものであるため、計測環境が現道と必ずしも一致しないと思われることから、継続的な現地観測データの取得を行った上でシミュレーションプログラムの検証を行い、再現性の向上を図ることが必要である。

参考文献

- 1) Kobayashi Daiji, 1972 : Studies of snow transport in low-level drifting snow, Contrib. Inst. Low temp. Sci.
- 2) Iversen et al., 1975 : Eolian erosion of the Martian surface, Part1; Erosion rate similitude, Icarus
- 3) R.A. Schmidt, 1982 : Properties of Blowing Snow, Reviews of Geophysics and Space Physics
- 4) Pomeroy, J.W. et al., 1990 : Saltation of snow, Water Resour. Res.
- 5) T. Uematsu et al., 1991 : Three-dimensional numerical simulation of snowdrift, Cold Regions Science and Technology
- 6) Takahiko Uematsu, 1993 : Numerical study on snow transport and drift formation, Annals of Glaciology
- 7) G.E. Liston et al., 1993 : A two-dimensional computational model of turbulent atmospheric surface flows with drifting snow, Annals of Glaciology
- 8) Sato, T. et al., 1997 : Application of a random walk model to blowing snow, Snow Engineering: Recent Advances
- 9) Mohamed Naaim et al., 1998 : Numerical simulation of drifting snow : erosion and deposition models, Annals of Glaciology
- 10) 福嶋祐介, 藤田和成, 鈴木健史, 小杉健二, 佐藤威, 1999 : 非ブーシネスク $k-\epsilon$ 乱流モデルによる吹雪の流動解析, 雪氷
- 11) Peter Gauer, 2001 : Numerical modeling of blowing and drifting snow in Alpine terrain, Journal of Glaciology
- 12) 富永禎秀, 持田灯, 村上周三, 佐脇哲史, 2002 : 高層建築物周辺気流のCFD解析における各種改良 $k-\epsilon$ モデルの比較, 日本建築学会計画系論文集
- 13) 佐藤隆光, 2002 : 防雪林の構造が気象改良効果に及ぼす影響に関する研究～防雪林の構造が減風効果に及ぼす影響に関する数値実験～, 北海道大学大学院農学研究科邦文紀要
- 14) 佐藤威, 望月重人, 2004 : 吹きだまりの積雪密度の分布と風速依存性, 社) 日本雪氷学会全国大会講演予稿集
- 15) 富永禎秀, 持田灯, 吉野博, 志田貴之, 大風翼, 2005 : CFDによる建物周辺の吹きだまりの数値予測に関する研究～地表面の雪の飛散・堆積のモデル化に関する検討～, 第19回数値流体力学シンポジウム論文集
- 16) Patrick Grover et al., 2012 : Snow Transport and Mitigation Modeling System for Managing Snow Drifting Along Highway, Transportation Research Circular
- 17) (独) 土木研究所寒地土木研究所, 2011 : 道路吹雪対策マニュアル (平成23年改訂版)
- 18) 日本雪氷学会北海道支部編, 1991 : 雪氷調査法,

Takanori Konaka, Yasuhiko Ito, Masaru Matsuzawa