

## 道路構造による吹きだまり対策効果の定量化に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 24～平 27

担当チーム：寒地道路研究グループ（雪氷）

研究担当者：松澤勝、伊東靖彦、小中隆範、  
渡邊崇史

### 【要旨】

積雪寒冷地の冬期道路では、吹雪に伴う吹きだまりにより交通障害が発生する。道路構造による吹雪対策として防雪切土や防雪盛土等が用いられているが、防雪効果については十分に明らかとはなっていない。このため本研究では、道路構造による吹きだまり対策の効果の定量化に向けて、現地観測や数値シミュレーションによる評価を行うこととした。その結果、盛土道路に比べて切土道路で吹きだまりが発達しやすく、切土道路における吹きだまり量は吹雪量に比例して増加することを確認した。数値シミュレーションプログラムでは、盛土道路の吹きだまりについて精度の高い再現性が得られた。また、盛土道路において、気象要因・地形要因が一定の場合、盛土高が3mを越えた時、そこを閾値として雪堤が低くなり吹きだまりが少なくなる傾向が現地観測とシミュレーションの結果により確認され、盛土構造の吹きだまり対策効果を定量的に明らかにした。

キーワード：暴風雪、吹雪、吹きだまり、道路構造、シミュレーション

### 1. 研究の背景

近年、厳冬の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、道路上で大規模な吹きだまりが短時間のうちに発生し、交通障害を引き起こすケースがしばしば発生している。吹雪災害が激甚化・多様化する中で、途絶しない道路ネットワークの確保が求められており、吹きだまりの発達を抑制するために道路構造による吹雪対策として、防雪盛土や防雪切土等の工法が用いられている。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、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。

本研究では、道路構造ごとの吹きだまり対策について適切な設計方法を示すことによって、暴風雪災害の軽減や早期回復に寄与出来ることから、道路構造と吹きだまりとの関係（2. 章）、及び道路構造による吹きだまり対策効果の定量化（3. 章）について検討を行った。

### 2. 道路構造と吹きだまりとの関係

道路構造による吹きだまり対策の効果を検証するにあ



図一 位置図

たつては、道路周辺の地形条件を正しく把握することが重要である。積雪寒冷地域では、積雪や吹きだまりによって、道路周辺の地形条件が冬期間を通じて大きく変化する。このため、当研究所が札幌市近郊に所有する実験観測施設（石狩吹雪実験場）や現道にて、吹きだまりの発達状況について現地観測を行った（図-1（a）（b））。

## 2. 1 道路構造と吹きだまりとの関係に関する野外調査

### 2. 1. 1 道路構造と吹きだまりの発達速度の関係

道路構造（切土、盛土）と吹きだまりの関係（吹きだまり量、位置、速度）を明らかにするための検討を行うにあたり、道路上での吹きだまりの発達状況について調査を行い、計4回の吹雪について吹きだまりの形状変化のデータを取得した。また、冬期の切土道路、盛土道路、平坦路について積雪による道路周辺環境の変化を把握するため、石狩市内の一般国道231号にて、降雪前の11月と積雪期の1～3月の各1回、地形の測量を行った。

平成21～23年度の3冬期に、石狩吹雪実験場内の切土道路と盛土道路（図-2）で観測した吹きだまりデータを用い、吹雪発生時の吹きだまりの発達状況について整理した。吹きだまりデータは道路中心線の風上側50mから風下側10mの範囲で吹きだまり形状を観測し、吹雪発生前と吹雪継続中（最大2回）、吹雪終了後の結果をもとに、6回の吹雪イベントにおいて合計15の吹きだまり発達状況のデータを取得した。なお、吹雪イベントとは、1回の吹雪の発生から終了までを言い、後述する吹雪量 $Q$ （単位幅を単位時間に通過する雪粒子の全質量）と風速 $U$ の経験式を用いて、吹雪発生と終了を判別した。

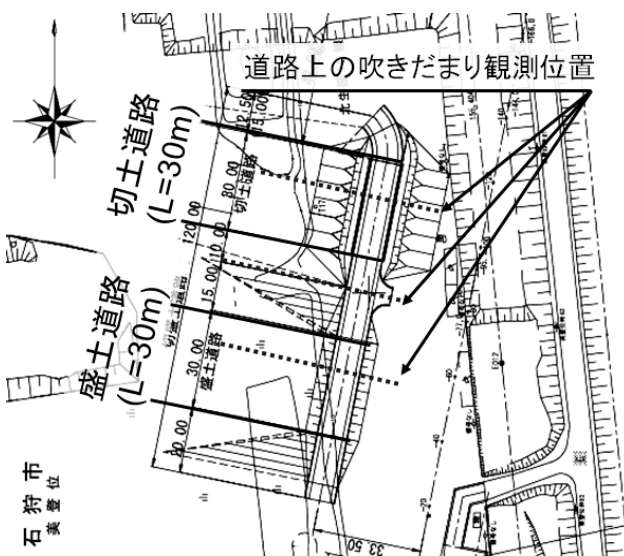


図-2 吹きだまり形状観測箇所配置図

切土・盛土道路における吹雪前後の吹きだまりの形状の変化の一般的な事例を、図-3と図-4にそれぞれ示す。この事例では、切土道路では道路中心線上で深さ18cmの吹きだまりが見られた。一方、盛土道路では吹きだまりは見られなかった。

吹雪発生からの経過時間と、切土・盛土道路の道路中心線上の吹きだまり深さの関係について図-5に示す。切土道路では深さ15cmを超えるような吹きだまりの発生が多く見られた。吹雪ごとに降雪や風速等の条件が異なるため、吹雪発生からの経過時間と吹きだまり深さの関係は一樣ではない。一方、盛土道路では、顕著な吹きだまりを生じた事例は見られなかった。

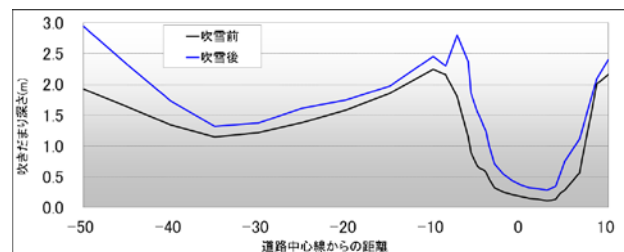


図-3 切土道路における吹きだまり形状の例

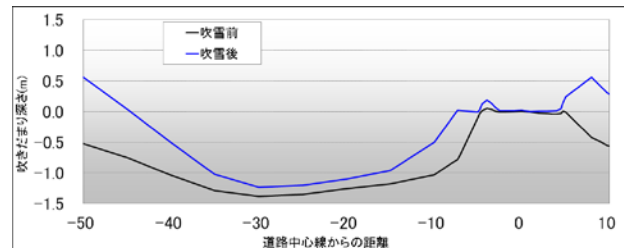


図-4 盛土道路における吹きだまり形状の例

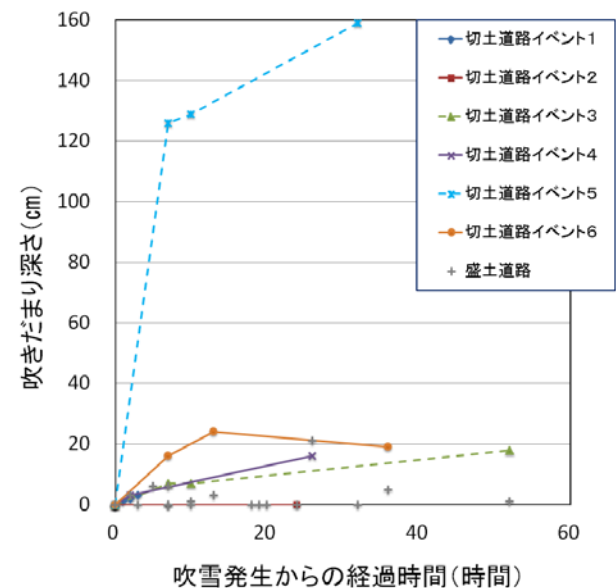


図-5 吹雪発生からの経過時間と切土・盛土道路の道路中心線上の吹きだまり深さ

降雪や風速等の気象条件を考慮して吹きだまりの発達を評価するには、吹雪量を指標として用いることが有効と考えられる。そこで切土道路を対象に、吹雪発生からの累計吹雪量と道路中心線上の吹きだまりの深さとの関係について検討する。

実験場内で観測した高さ1mの風速(10分平均値)を吹雪量 $Q$ と風速 $U$ の経験式(1)<sup>1)</sup>に代入して10分毎の吹雪量を求めた後、吹雪発生からの吹雪量を合計して累計吹雪量を求めた。累計吹雪量の推定例を風速、気温データとともに図-6に示す。

$$Q = 0.005U^4 \dots\dots (1)$$

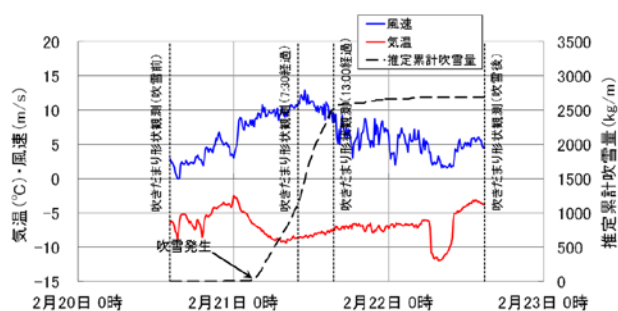


図-6 吹雪イベント時の気象状況と累計吹雪量の推定 (イベント6, 平成24年2月21~22日の例)

表-1 吹雪の発生条件の設定

気 温	吹雪発生臨界風速	
	降雪あり	降雪なし
0 ~ -5℃	6m/s以上	11m/s以上
-5℃以下	5m/s以上	10m/s以上

式(1)は、十分に吹雪が発達した条件で成り立つ。従って、式(1)は少なくとも吹雪の発生条件を満足される場合に適用される。ここでは既往文献<sup>2)</sup>を参考に、吹雪発生条件を表-1に示すように定めた。なお、風速と気温は実験場内で観測した10分平均値を、降雪の有無については石狩アメダスの降雪量の1時間データから判断した。

切土道路の道路中心線上における吹きだまりの深さと推定した累計吹雪量との関係について、図-7に示す。図中、吹きだまり深さの大きい3イベント(イベント4~6)について近似直線を付記した。

イベント毎の推定累計吹雪量と、切土道路の道路中心線上の吹きだまり深さには、比例的な関係が見られた。しかし、推定累計吹雪量に対する吹きだまり深さの増加割合は

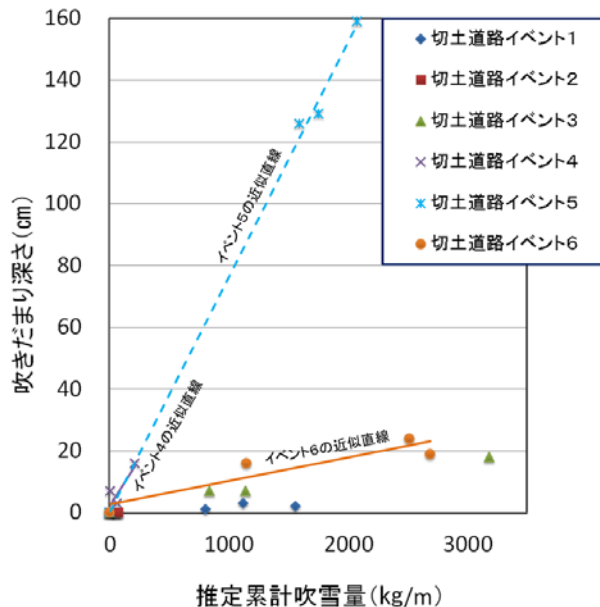


図-7 推定累計吹雪量と切土道路の道路中心線上の吹きだまり深さ

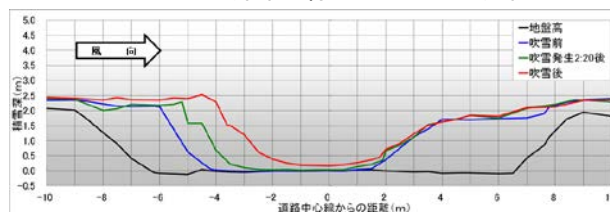


図-8 イベント4の吹きだまり形状変化 (平成24年1月23~24日)

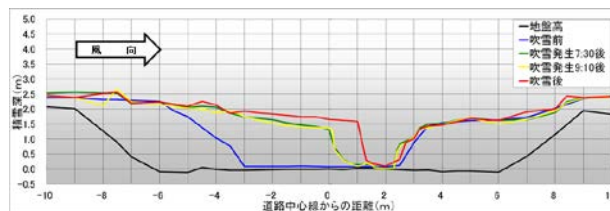


図-9 イベント5の吹きだまり形状変化 (平成24年2月8~9日)

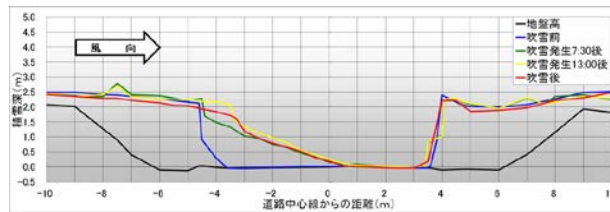


図-10 イベント6の吹きだまり形状変化 (平成24年2月21~22日)

イベント毎に大きく異なり、イベント5の増加割合が最も大きかった。ここで、イベント4~6における切土道路の吹きだまり形状の変化を図-8~10に、当日の気象状況を表-2に示す。イベント4は気温がやや高い事例で、

表-2 イベント4~6の気象状況

イベント	発生日	風速 (m/s)	気温 (°C)	降雪 (cm)
4	H24.1.23 ~ 24	3 ~ 8	-7 ~ -2	28
5	H24.2.8 ~ 9	5 ~ 12	-10 ~ -8	14
6	H24.2.21 ~ 22	3 ~ 12	-9 ~ -3	5

※ 降雪は吹雪発生12時間前から吹雪終了までの累計値

吹きだまりは主に切土風上側斜面上に生じていた。イベント5と6はともに風速が大きく気温が低い事例であるが、イベント6では降雪が少なかった。吹雪の供給源が風上側の新雪であるため、降雪が少なかったイベント6では吹きだまりが道路中心線までに止まったのに対し、降雪が多かったイベント5では吹雪前に風上側の堆雪スペースが雪で埋まっていたため、切土風上側斜面上の吹きだまりが早期に道路中心線を越えて発達したものと考えられる。すなわち吹雪量に対し、風上側に十分な堆雪スペースが無い切土道路では、吹きだまりが短時間で発達する恐れがあるため、注意が必要である。

### 2. 1. 2 道路構造と吹きだまり量の関係

道路構造（切土、盛土）と吹きだまり量の関係を明らかにするため、当研究所が石狩市に所有する実験観測施設（石狩吹雪実験場）で、2012年1~2月と2013年1~3月の2冬季、吹きだまりの観測を行った。吹きだまり形状については、道路中心線から風上側へ50m、風下側へ10mの範囲の道路横断方向で、吹雪前後各1回と吹雪時2回（計4回）を1イベントとして、7イベントの観測を行った。観測は雪面高をオートレベルにより計測し、その計測結果と地盤高の差から積雪深を求めた。

石狩吹雪実験場の盛土道路・切土道路において観測した吹きだまり形状の代表例を図-11に示した。

図-11（上）より盛土道路は雪堤の風下側に吹雪発生時から吹きだまりが形成されていた。吹雪発生後1.5時間では道路中心線上の吹きだまり深さが10cm弱と車両の走行に支障が出る20cm<sup>4</sup>までは発達しなかったが、吹雪後の吹きだまり深さは30cm程度まで発達した。また、図-11（下）より切土道路は風上側に大きく吹きだまりを形成している。これは図-12に示す風の剥離点（S点）において、飛雪量の最も多くなる雪面近くの風が運動量を失い雪が堆積する<sup>5)</sup>ためだと考えられるが、道路中心線上の吹きだまり深さは吹雪後で15cm程度であった。

なお、この期間の風速・気温・推定累計吹雪量は図-13のとおりである。

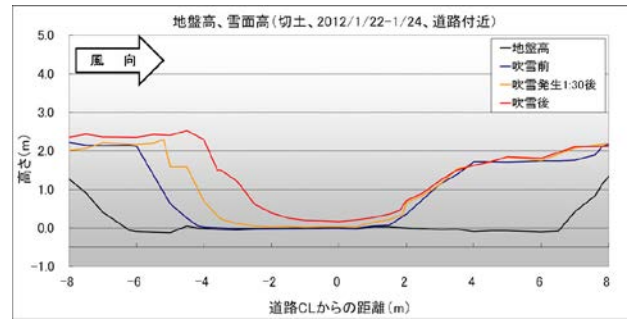


図-11 吹きだまり形状（上：盛土、下：切土）

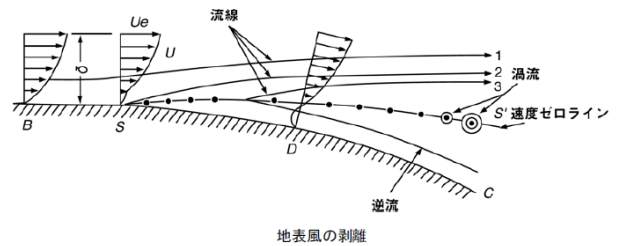


図-12 切土法面での気流状況（模式図）<sup>5)</sup>

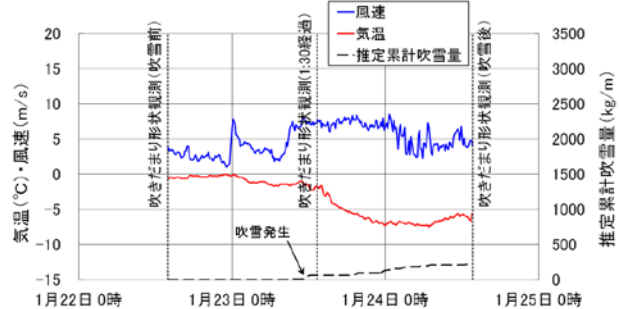


図-13 観測期間の気象状況

観測結果より、道路構造が吹きだまりの形成に影響を与えると考えられるため、道路構造と吹きだまり量及び吹雪量の関係について検討することとした。

吹きだまり量は図-11より、積雪深を道路横断方向に積分して求めた。積分の範囲は道路CLを中心とし、横断方向に7m（上下2車線の車道中心部を想定）と20m（盛土の法尻、切土の法肩）の2測線とした（図-14）。また、吹きだまり量の増分については、1イベントにおける「連続した2回の吹きだまり形状観測時」の「吹きだまり量の変化量」とした。

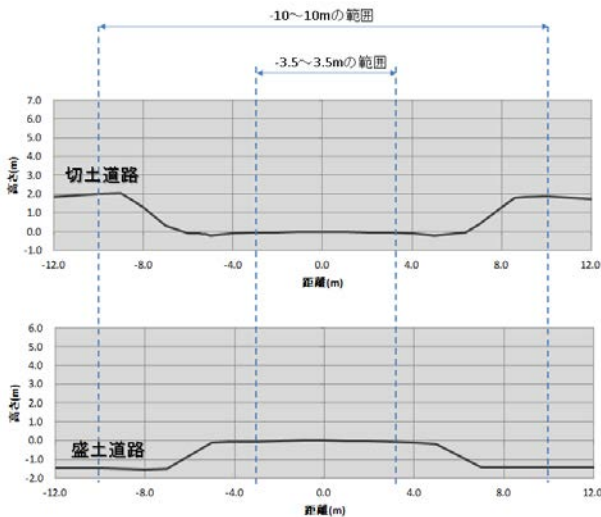


図-1 4 道路構造と測定箇所

吹雪量は吹雪発生時の飛雪流量(スノーパーティクルカウンタで計測)より、次式を用いて算出した。

$$Q = 1.91 Mf 1 + 1.7354 \dots \dots (2)$$

ここで

Q : 吹雪量 (g/m<sup>2</sup>/s)

Mf 1 : 1 m高の飛雪流量 (g/m<sup>2</sup>/s)

ここで、算出した吹雪量を雪の密度(新雪を仮定し100kg/m<sup>3</sup>とする)で除し体積に換算した。

計測点以外の積雪深は、風上側・風下側の近傍地点(各1点)の積雪深を用い、距離による線形内挿によって推定した。

図-1 5は吹雪量と吹きだまり量の増分の関係を示している。盛土道路の吹きだまり量の増分は吹雪量の5%程度、切土道路の吹きだまり量の増分は吹雪量の50%程度となっている。盛土についてはR<sup>2</sup>が小さいので明確なことは言えないが、切土では風上から飛んできた吹雪の約半分が切土内に捕捉されていることを示す。定性的には、盛土道路の車線上は凸地形であり路面上の風が強いため吹きだまりが生じにくく、切土道路は凹地形であり風が弱いいため吹きだまりが生じやすいと言われているが、定量的な捕捉率は今まで示されたことがなかった。

図-1 6は道路構造と吹きだまり量の関係を図-1 4に示した道路構造全体(測線20m)と車道のみ(測線7m)に分けて示したものである。上下2車線の車道中心部(道路横断-3.5~3.5m)においては切土道路の吹きだまり量は盛土道路の3倍程度ある。盛土道路では路面上の雪

が 吹

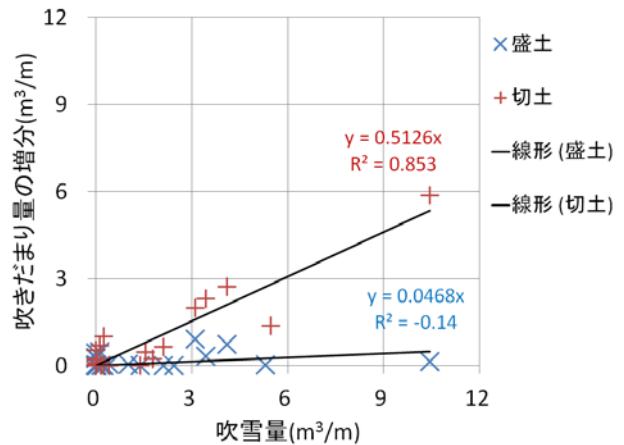


図-1 5 吹雪量と吹きだまり量の増分の関係

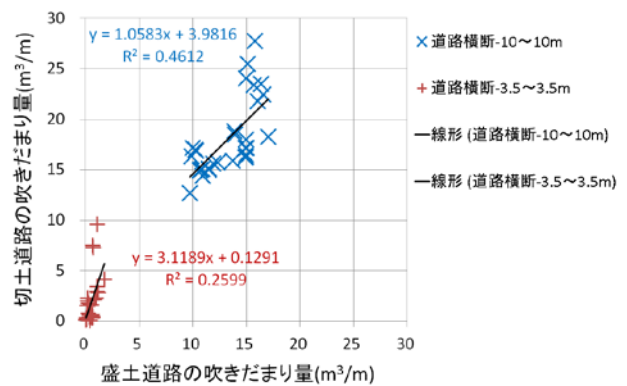


図-1 6 道路構造と吹きだまり量の関係

き払われるが、切土道路では路面上の雪が移動することがないため、大きな差が生じているものと考えられる。しかし、盛土道路の法尻部の間と切土道路の法肩部の間(図-1 4の道路横断-10~10m)では吹きだまり量に大きな差はなかった。これは盛土道路・切土道路共に、法面部が吹きだまりを許容するポケットとして機能したためと考えられる。

### 3. 道路構造による吹きだまり対策効果の定量化

道路構造による吹きだまり対策効果を検証するにあたり、現道(図-1)にて、吹きだまりの発達状況について現地観測を行い、その観測結果を元に数値シミュレーションプログラムを開発した。そして現地観測結果とシミュレーションによる検討結果をもとに、吹きだまり対策効果の定量化について検討した。

#### 3. 1 数値シミュレーションプログラムの開発

##### 3. 1. 1 数値シミュレーションに関する調査

はじめに文献調査<sup>6~21)</sup>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-3)。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-4)。

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を採用することとした。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

表-3 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-4 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 $k-\epsilon$ モデル RNG $k-\epsilon$ モデル 低Re数型 $k-\epsilon$ 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
		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	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	
	吹きだまり密度	自由に変更可能	
計算領域について	格子と計算領域	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

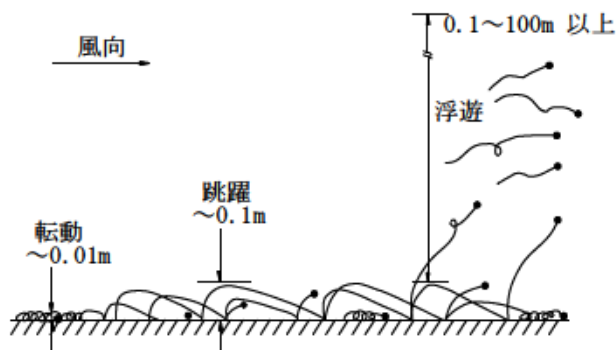


図-17 飛雪の運動形態<sup>2,2)</sup>

り(図-17)、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. 1. 2 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、迅速かつ安定した動作環境を考慮し、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・プロセスという流れで動作する(図-18)。

また、全体構成については図-19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。

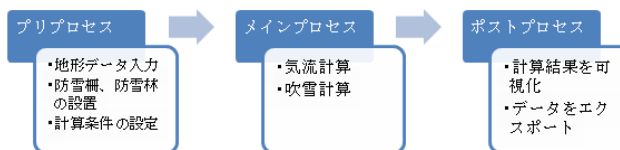


図-18 シミュレーションシステムの動作の流れ

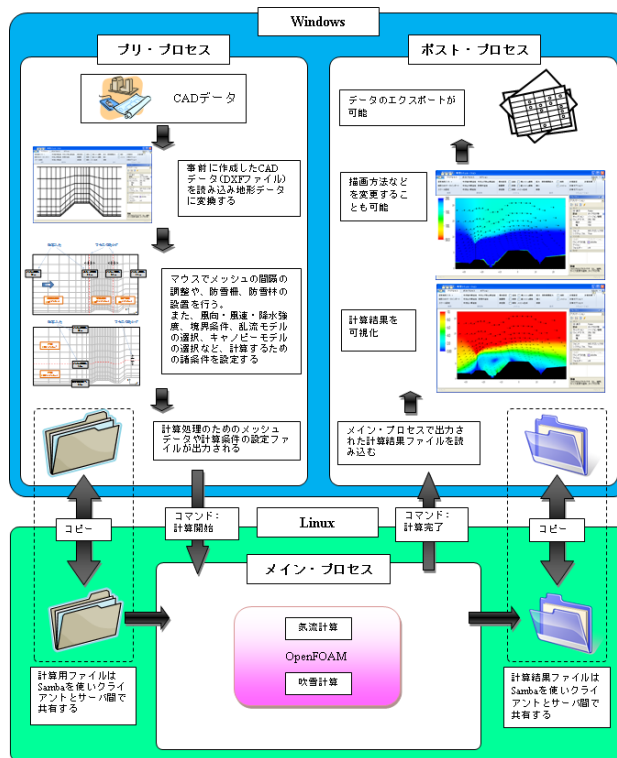


図-19 シミュレーションシステムの構成図

3. 1. 3 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-5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（表-6）、道路（地形）形状（表-7）を設定した。

以上の条件により感度試験を行い、判明した結果を表-8にまとめた。

表-5 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	樹木のキャノ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-6 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 <sup>-4</sup> m
雪密度 (吹きだまり計算)	150 kg/m <sup>3</sup>
流入側地表面粗度長	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-7 標準とする道路（地形）形状

道路形状（地形形状）	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%

表-8 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以上取る必要がある。
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、防雪林無いから吹雪が発生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、一般的な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、一般的な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、吹き止めの柵について柵風下の逆流が大きくなり、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	吹きだめの柵：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払われている箇所が広がる傾向あり。既往知見とは逆傾向にある。
		吹き止めの柵：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。
		吹き払い柵：柵高が大きくなるほど吹き払い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、柵高が大きいかほど、風下側に行くほど視程が一気に小さくなる幅は小さい。
	空隙率	既往知見と概ね傾向が一致している。
下部間隙	吹きだめの柵、吹き払い柵とも下部間隙が大きくなるほど、吹き払い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、概ね一般的な知見と同様であると考えられる。	

3. 1. 4 野外調査データを用いた精度検証

野外調査結果を用いて、道路構造と吹きだまりの関係につ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こととし、道路構造の違いによる吹きだまり（量、位置、速度）や吹雪量の違いについて、各項目が明確になるように検討を行った。検討した結果、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%前後であることや、切土道路では風上側が吹きだまりやすいことが明らかとなった。

次に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-20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。断続的な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に示す吹雪の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。

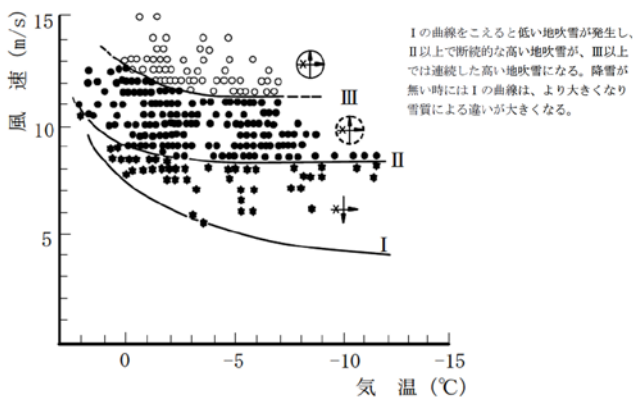


図-20 吹雪発生臨界風速<sup>2)</sup>

表-9 吹雪の発生条件<sup>2)</sup>

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

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。

$$U_{7m} = U_z \frac{\ln(7/z_0)}{\ln(z/z_0)}$$

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。

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。

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に示すパターンで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-21に示す。

表-10 事例ケース一覧

番号	ケース	イベント		時間 (h)	気象条件					
		開始	終了		平均風速 (m/s) 全期間	吹雪時	風向	降雪量 (cm)	雪密度 (kg/m <sup>3</sup> )	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

表-11 事例ケースの気象条件 (切土)  
(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	7.5 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 <sup>3</sup> として算出
降水強度	0.35 mm/h		全期間の平均

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、量はまだまだ少ない
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

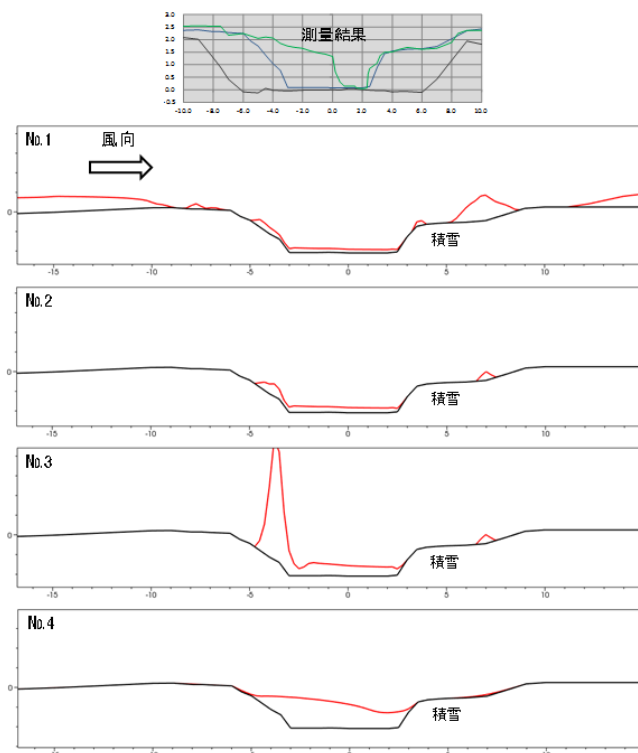


図-21 精度検証シミュレーション結果 (道路、切土)

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。

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1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-21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 <sup>3</sup> として算出
降水強度	0.35mm/h		

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

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く、風下側の凹部で小

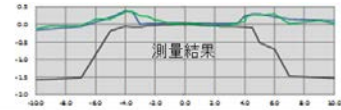


図-22 精度検証シミュレーション結果（道路、盛土）

き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。

### 3. 1. 5 感度試験による再現性の精度向上

切土・盛土区間の吹きだまり形状が野外観測結果と類似した形状に近づく様、再現性の精度を向上させることを目的として、再度計算パラメータ（臨界摩擦速度、雪粒子の落下速度、風速、降水量、風向等）について感度試験を行った（表-15）。

感度試験を行った結果、表-16のパラメータが最適であると考えられる。

表-15 感度試験内容

パラメータ	試験内容
乱流モデル	気流計算で使用する乱流モデルの種類（標準k-ε、RNGk-ε、低Re型k-ε）について、各モデルを使用した場合の計算結果の違いを整理し、再現性の精度向上を図る。
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、数値を変更し計算を行い、その違いを整理し、再現性の精度向上を図る。
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、条件を変えて計算を行い、その違いを整理し、再現性の精度向上を図る。

表-16 感度試験結果

パラメータ	試験結果
領域サイズ	縦メッシュ間隔：0.2m以下 横メッシュ間隔：最下層0.15cm、最上層10m以下 領域サイズ（風上側）：200m以上 （十分長い平坦地を想定した場合）
乱流モデル	標準k-εモデル、またはRNGk-εモデル （RNGk-εモデルで吹きだまりが大い）
臨界摩擦速度	盛土：0.3m/s程度 ※対象物が吹き払われる部分が多いと想定される場合 切土：0.15m/s ※凹状で吹きだまる部分が多いと想定される場合、 盛土の雪堤がある場合も含む
雪面起源雪粒子落下速度	0.5m/s程度

### 3. 1. 6 野外調査データを用いた精度再検証

シミュレーションの再現性を評価するために、表-15の気象条件により、再度精度検証シミュレーションを行った。結果は盛土道路の吹きだまりを概ね再現する事が出来た(図-23)。

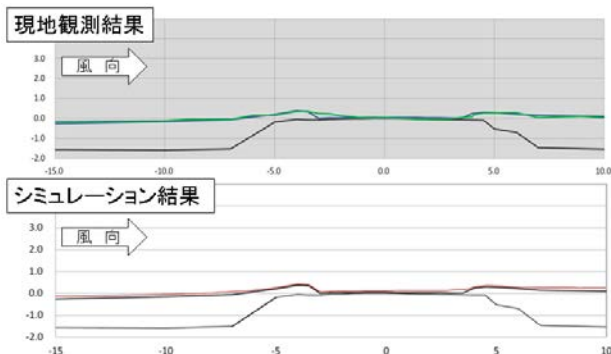


図-23 精度検証シミュレーション結果(道路、盛土)

## 3. 2 吹きだまり対策効果の検証

### 3. 2. 1 現地観測による吹きだまり対策効果の検証

道路構造による吹きだまり対策効果の定量化について検討を行うにあたり、名寄市から美深町にかけての一般国道40号及び石狩市内の一般国道231号において、平成26年の降雪前から平成28年の積雪期(2冬季)にかけて、吹きだまり形状の観測を行った。

形成された雪堤は、道路上に吹きだまりが発生する原因となる。雪堤高さ(盛土高)の関係は竹内ら<sup>3)</sup>の調査のみに基づいており、それを補間すべく調査を行った。図-24は、その一例である。

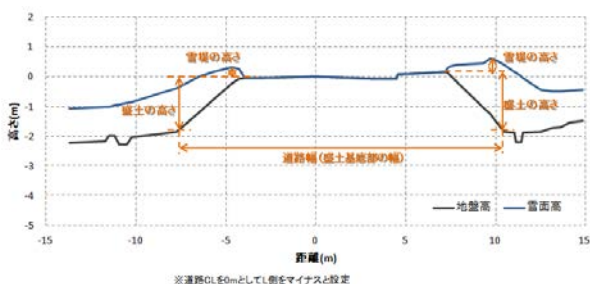


図-24 盛土の高さと雪堤の高さの計測

調査結果から得られた盛土の高さと雪堤の高さの関係を図-25に示す。あわせて竹内ら<sup>3)</sup>による計測結果もプロットした。H27はH26の倍以上の降雪があったことから雪堤高にばらつきが出ているが、概ね竹内ら<sup>3)</sup>のあらわした線形式と関係性は認められた。また、盛土高3mを超えてから雪堤高に大きな変化は見られない。

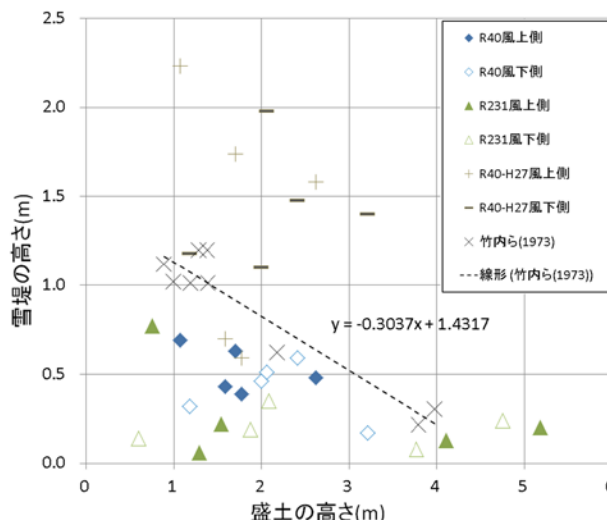


図-25 盛土の高さと雪堤の高さとの関係

### 3. 2. 2 数値シミュレーションによる吹きだまり対策効果の検証

数値シミュレーションにより、盛土道路と吹きだまりの関係について解析を行った。

盛土・雪堤等の共通条件については表-17のとおりとした。雪堤高については、路側高さ4m以上で路外逸脱の可能性が高い場合は車両用防護柵を設置することがあるので、盛土高5mでは防護柵高の0.75mとした。数値計算は代表的な気象条件(風速10m/s、降水量1mm/h、継続時間12h)と吹雪災害時の気象条件(表-18)の2通りで行った。

表-17 共通条件

盛土高	雪堤高	積雪深	法面勾配
1.0m	1.00m	1.0m	1:1.5
3.0m	0.45m		
5.0m	0.75m		

表-18 吹雪事例の気象条件(湧別アメダスより)

日時	時	降水量(mm)	気温(°C)	風向・風速(m/s)	
				風速	風向
2013/03/02 13:00	13	0.0	-4.6	11.8	西北西
2013/03/02 14:00	14	0.0	-5.5	11.4	西
2013/03/02 15:00	15	1.0	-5.7	13.8	西北西
2013/03/02 16:00	16	2.5	-5.4	16.4	北西
2013/03/02 17:00	17	1.5	-5.5	15.3	北西
2013/03/02 18:00	18	2.0	-5.5	16.0	北西
2013/03/02 19:00	19	1.5	-5.4	17.0	北西
2013/03/02 20:00	20	2.0	-5.1	19.8	北西
2013/03/02 21:00	21	1.5	-4.8	16.8	北西
2013/03/02 22:00	22	0.5	-4.7	15.8	北西
2013/03/02 23:00	23	1.0	-4.9	13.8	北西
2013/03/03 00:00	24	0.5	-5.1	13.6	北西
2013/03/03 01:00	1	0.0	-5.0	14.6	北西
2013/03/03 02:00	2	0.0	-4.9	13.2	北西
2013/03/03 03:00	3	0.0	-5.4	10.5	北西

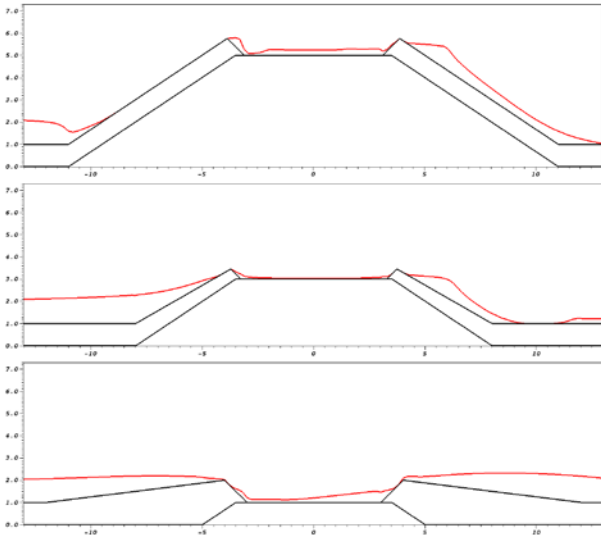


図-26 盛土高さと吹きだまり形状  
(風速 10m/s、降水量 1 mm/h、継続時間 12h での  
計算結果)

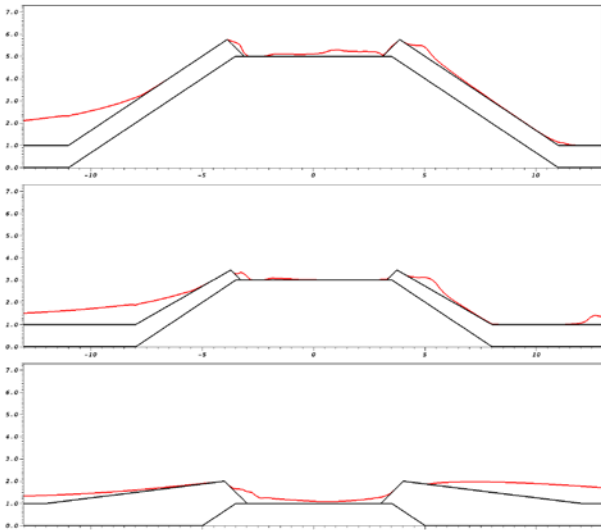


図-27 盛土高さと吹きだまり形状  
(表-18に示す条件での計算結果)

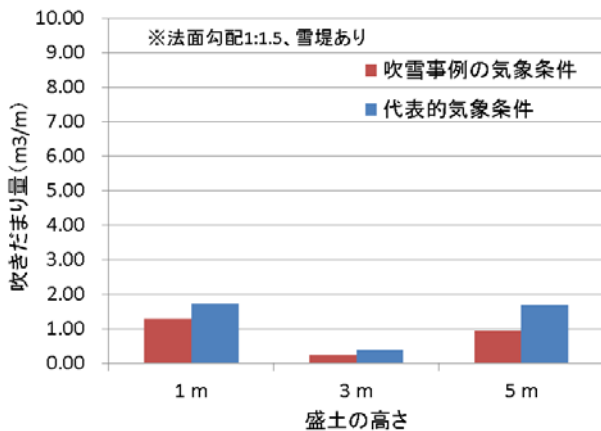


図-28 盛土の高さと吹きだまり量との関係

演算した結果、道路上の吹きだまり深さについては、気象条件に関係なく盛土高が3mの場合に最も小さかった(図-26、図-27)。

盛土高と吹きだまり量との関係についても、盛土高3mの場合に吹きだまり量が最も少なくなった(図-28)。これは盛土高3mの時の雪堤高が最も小さく、吹きだまり誘因となる、雪堤風下の風の乱れの影響が小さかったためと思われる。

#### 4. まとめ

積雪寒冷地の冬期道路では、暴風雪により道路上に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等が用いられているが、その防雪効果については十分に明らかとなっていない。本研究では、道路構造による吹きだまり対策の効果の定量化に向けて、現地観測や数値シミュレーションによる評価を行った。

道路構造と吹きだまりとの関係について、道路上の吹きだまりは、盛土道路と比べて切土道路で発生しやすいこと、切土道路の道路中心線上の吹きだまりの深さが概ね累計吹雪量に比例すること、盛土道路の雪堤の高さが概ね積雪の深さに比例すること等、道路構造ごとの吹きだまりの特徴を整理する事が出来た。

また、道路構造による吹きだまり対策効果について、数値シミュレーションによる盛土道路での吹きだまりの解析を行った結果、精度の高い再現性を得られた。盛土道路において、気象要因・地形要因が一定の場合、盛土高が3m程度の時に雪堤が低く道路上の吹きだまりが少なくなることが現地観測とシミュレーションの結果により確認出来、吹きだまり対策効果が定量的に明らかとなった。

#### 参考文献

- 1) 松澤勝ほか：風速と吹雪量の経験式の適用に関する一考察、寒地技術論文・報告集、Vol. 26、pp. 45-48、2010
- 2) 日本雪氷学会北海道支部：雪氷調査法、p19、1991
- 3) 竹内政夫、野原他喜男、福沢義文：吹雪による視程障害について、土木試験所月報No245、pp. 9-15、1973
- 4) 渡邊崇史、金子学、松澤勝：車両が発進困難となる吹きだまり深さに関する実験と吹きだまり発達速度に関する観測、寒地土木研究所月報No712、2012
- 5) 石本敬志、竹内政夫、野原他喜男、福沢義文：切土区間の道路における防雪対策について、北海道開発局土木試験所月報

No.335、1981

- 6) Kobayashi Daiji : Studies of snow transport in low-level drifting snow, Contrib. Inst. Low temp. Sci, 1972.
- 7) Iversen et al. : Eolian erosion of the Martian surface, Part1; Erosion rate similitude, Icarus, 1975.
- 8) R. A. Schmidt : Properties of Blowing Snow, Reviews of Geophysics and Space Physics, 1982.
- 9) Pomeroy, J. W. et al. : Saltation of snow, Water Resour. Res, 1990.
- 10) T. Uematsu et al. : Three-dimensional numerical simulation of snowdrift, Cold Regions Science and Technology, 1991.
- 11) Takahiko Uematsu : Numerical study on snow transport and drift formation, Annals of Glaciology, 1993.
- 12) G. E. Liston et al. : A two-dimensional computational model of turbulent atmospheric surface flows with drifting snow, Annals of Glaciology, 1993.
- 13) Sato, T. et al. : Application of a random walk model to blowing snow, Snow Engineering: Recent Advance, 1997.
- 14) Mohamed Naaim et al. : Numerical simulation of drifting snow : erosion and deposition models, Annals of Glaciology, 1998.
- 15) 福嶋祐介、藤田和成、鈴木健史、小杉健二、佐藤威 : 非ブーシネス  $k-\epsilon$  乱流モデルによる吹雪の流動解析、雪氷、1999
- 16) Peter Gauer : Numerical modeling of blowing and drifting snow in Alpine terrain, Journal of Glaciology , 2001.
- 17) 富永禎秀、持田灯、村上周三、佐脇哲史 : 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、2002
- 18) 佐藤隆光 : 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、2002
- 19) 佐藤威、望月重人 : 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、2004
- 20) 富永禎秀、持田灯、吉野博、志田貴之、大風翼 : 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、2005
- 21) Patrick Grover et al. : Snow Transport and Mitigation Modeling System for Managing Snow Drifting Along Highway, Transportation Research Circular, 2012
- 22) (独) 土木研究所寒地土木研究所 : 道路吹雪対策マニュアル (平成23年改訂版) 、2011

## STUDY ON QUANTIFICATION OF EFFECTIVENESS OF HIGHWAY STRUCTURES TO MITIGATE SNOWDRIFTS

Budget : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2012-2015

Research Team : Cold-Region Road Engineering

Research Group

(Snow and Ice Research Team)

Author : MATSUZAWA Masaru

ITO Yasuhiko

KONAKA Takanori

WATANABE Takashi

Abstract : Snowdrifts caused by snowstorms bring traffic hindrance at winter roads in snowy cold regions. Drift-control cuts and fills are used on roads to mitigate such hindrances. However, their effectiveness has not been fully confirmed. Towards quantifying the effects of highway structures on mitigating snowdrift, this study assesses those effects through onsite investigations and numerical simulations. The investigation verified that snowdrifts tend to develop more on cut road sections than on fill road sections and that snowdrift development is proportional to snow transport. The numerical simulation showed high-accuracy reproducibility for snowdrifts on fill road sections. The onsite observations and simulations for fill road sections revealed that, for a given set of weather and topographic factors, the snowbank height and snowdrift amount tend to increase with increase in fill height until the fill height of 3 m, after which they tend to decrease with increase in fill height. The effectiveness of snowdrift mitigation by fill road sections was quantitatively clarified.

Key words : snowstorm, blowing snow, snowdrift, road structure, simulation