

5 極端気象がもたらす雪氷災害の被害軽減のための技術の開発

研究期間：平成 28 年度～33 年度

プログラムリーダー：寒地道路研究グループ長 幡本 篤

研究担当グループ：寒地道路研究グループ（雪氷チーム）、土砂管理研究グループ（雪崩・地すべり研究センター）技術開発調整監（寒地機械技術チーム、寒地技術推進室）

1. 研究の必要性

自然災害による死者・行方不明者数は、大きな地震災害を除くと風水害、雪害によるものが最も多く、平成 18 年豪雪では 152 名、平成 22～24 年度、および平成 29 年度は 100 名以上の方が亡くなっている現状である。そのような中で、平成 25 年 3 月の北海道での暴風雪、平成 26 年 2 月の関東甲信や平成 30 年 2 月の福井での多量降雪など、近年、気候変動の影響にもよる異常な吹雪、降雪、雪崩に伴い、多数の車両の立ち往生や長時間に亘る通行止め、集落の孤立などの障害が発生している。しかし、このような極端気象がもたらす、雪氷災害の発生地域や発生形態、災害規模は変化しており、多発化・複雑化がみられることから、雪氷に関する調査研究の総合的な推進は、豪雪地帯対策を円滑かつ効果的に実施するために不可欠である。そこで、豪雪等による国民生活や経済社会活動への影響を緩和するため、雪氷災害対策強化のための研究を行うものである。

2. 目標とする研究開発成果

本研究開発プログラムでは、多発化・複雑化する雪氷災害による交通障害や集落被害の軽減に資するため、大雪や暴風雪など極端気象がもたらす雪氷災害の実態解明とリスク評価技術の開発により一回の暴風雪や豪雪の発生規模や地域性を明らかにしたり、広域の吹雪予測技術の開発による冬期道路管理等の判断の支援を行うとともに、吹雪による視程障害や吹きだまりの緩和のため、吹雪対策施設の性能向上技術の開発や、吹雪視程障害時における除雪車の運行を支援するため除雪車の性能向上技術の開発に取り組むことを研究の範囲とし、以下の達成目標を設定した。

- (1) 極端気象がもたらす雪氷災害の実態解明とリスク評価技術の開発
- (2) 広域に適用できる道路の視程障害予測技術の開発
- (3) 吹雪対策施設及び除雪車の性能向上技術の開発

3. 研究の成果・取組

「2. 目標とする研究開発成果」に示した達成目標に関して、平成 29 年度に実施した研究の成果・取組について要約すると以下のとおりである。

(1) 極端気象がもたらす雪氷災害の実態解明とリスク評価技術の開発

上記の目標を達成するため、研究課題として「極端な暴風雪等の評価技術に関する研究」及び「短時間の多量降雪による雪崩危険度評価に関する研究」を設定した。

「極端な暴風雪等の評価技術に関する研究」では、各気象要素が吹雪量に及ぼす影響について検討した。また、降雪強度と風速データから吹雪量を推定するための関係式を作成し、推定した吹雪量と一般国道の通行止め実施履歴の関係について解析した。

また、「短時間の多量降雪による雪崩危険度評価に関する研究」では、短時間の多量降雪に伴う雪崩発生時の気象および積雪調査、森林での雪崩発生における植生と地形条件の調査を実施し、運動モデルを用いた雪崩の衝撃圧算出手法を提示した。

(2) 広域に適用できる道路の視程障害予測技術の開発

上記の目標を達成するため、研究課題として「広域的な吹雪視程障害予測技術の開発に関する研究」を設定した。

本研究では、降水種別の雨雪と気温及び相対湿度との関係について、平成 28 年度のデータを加えて分析を行い、そこで作成したアルゴリズムをインターネットサイト「吹雪の視界情報」に実装した。また、降雪時の視程調査に関する既往文献を収集するとともに、降雪時における視程調査を実施した。

(3) 吹雪対策施設及び除雪車の性能向上技術の開発

上記の目標を達成するため、研究課題として「防雪林の安定的な防雪性能確保に関する研究」、「防雪柵の端部・開口部対策に関する研究」及び「暴風雪による視程障害時の除雪車運行支援技術に関する研究」を設定した。

「防雪林の安定的な防雪性能確保に関する研究」では、道路防雪林の枯れ上がりによる影響解明を目標として、道路防雪林の構成要素と防雪性能の現地調査として標準林や狭帯林など林況の異なる道路防雪林の防雪性能に関する現地観測、過年度の現地観測データ解析と考察、および風洞実験による防雪性能の解析を実施した。

「防雪柵の端部・開口部対策に関する研究」では、平成 29 年度は視程障害移動観測車による現地観測、石狩吹雪実験場における定点気象観測、縮小模型の製作および風洞実験を行った。

「暴風雪による視程障害時の除雪車運行支援技術に関する研究」では、車線逸脱防止技術に関して、LiDAR を用いた位置測位実験を行い、路肩が堆雪した状況で測位可能であることを確認した。また周辺探知技術において市販車用ミリ波レーダを用いて吹雪時の探知実験を行った。

Development of Technologies for Mitigating Damage from Snow- and Ice-related Disasters Caused by Extreme Climatic Events

Research Period : FY2016-2021

Program Leader : Director of Cold-Region Road Engineering Research Group
HATAMOTO Atsushi

Research Group : Cold-Region Road Engineering Research Group (Snow and Ice Research Team)
Erosion and Sediment Control Research Group
(Snow Avalanche and Landslide Research Center)
Cold-Region Technology Development Coordination(Machinery Technology
Research Team ,Cold-Region Technology Promotion Division)

Abstract : The death toll number suffered from wind, flood or snow and ice disaster is largest compared with death toll caused by other kind of natural disaster except for the large scale earth quake disasters. The death toll number of snow and ice disasters in 2006/07 winter is 152 people, and is over 100 in 2010/2011 - 2012/13 winter and 2017/18 winter. In recent years, extreme snowstorms, snowfalls and snow avalanches, such as the snowstorm that occurred in Hokkaido in March 2013 and the heavy snowfall in the Kanto Koshin area in February 2014 and Fukui prefecture in February 2018, have resulted in many cases of vehicles being stranded in blowing snow, long hours of road closures, and the isolation of communities. The regions conditions and scales of disasters from extreme weather events have been changing. The number of occurrences of these events has been increasing and the conditions of these events have become increasingly complex. To smoothly and effectively implement measures for regions with heavy snowfall, it is indispensable to comprehensively pursue surveys and studies on snow and ice. In order to mitigate the influences to the citizens daily life and the socioeconomic activities, the research teams perform researches in FY 2017 as below.

- A study on a technology for assessing the intensity of extremely severe snowstorms
- Danger rating for snow avalanches caused by heavy snowfall during a short period
- Research on a technology for assessing snowstorm-induced poor visibility in a wide area
- A study on securing stable snowbreak performance for snowbreak woods
- A study on measures for the end and open parts of snow fences
- Research on a technology to support the operation of snow removal vehicles during visibility hindrances caused by severe snowstorms

Key words : climatic change, snow storm, poor visibility, snow avalanche

5.1 極端気象がもたらす雪氷災害の実態解明とリスク評価技術の開発

5.1.1 極端な暴風雪等の評価技術に関する研究

担当チーム：寒地道路研究グループ（雪氷チーム）

研究担当者：松澤勝、伊東靖彦、國分徹哉、武知洋太、大宮哲

【要旨】

近年、急速に発達した低気圧によってもたらされる極端な暴風雪や大雪によって被害が激甚化するケースが散見される。このような雪氷災害による被害を軽減するためには、一回の極端な暴風雪の激しさを適切に表す指標が必要である。しかし、既存の指標は一冬期を通したものであり、一回の事象の激しさを適切に表す指標ではない。本研究は、一回の暴風雪・大雪の激しさを適切に評価する指標を提案し、暴風雪および大雪に関するハザードマップの開発を目指すものである。

平成 29 年度は、各気象要素が吹雪量に及ぼす影響について検討した。また、降雪強度と風速データから吹雪量を推定するための関係式を作成し、推定した吹雪量と一般国道の通行止め実施履歴の関係について解析した。

キーワード：暴風雪、大雪、飛雪流量、吹雪量

1. はじめに

近年、急速に発達した低気圧によってもたらされる暴風雪や局所的な短時間多量降雪によって被害が激甚化するケースが散見される。例えば、平成 25 年 3 月に北海道東部で発生した暴風雪では 9 名が亡くなった。また、平成 27 年 1 月に北海道羅臼町で発生した暴風雪では、国道 335 号が通行止めとなり、羅臼町は 3 日間 にわたり孤立した。

暴風雪や大雪による被害の軽減は喫緊の課題であり、より適切な対策を講じるためには、その激しさを定量的に評価することが不可欠である。吹雪の激しさを示す指標はこれまでも提案されている（例えば、年間累計吹雪量や視程障害発生頻度など）が、これらはあくまで一冬期を通したものであり、一回の暴風雪や大雪の激しさを適切に評価する指標ではない。

本研究では、一回の暴風雪や大雪の激しさを適切に評価する指標を作成し、最終的に暴風雪および大雪に関するハザードマップの開発を目指している。

以下に、本研究テーマの達成目標を記す。

吹雪量に与える気象要因の影響度の解明

暴風雪や大雪の評価指標の提案

暴風雪および大雪の発生頻度と地域性に関する

変化傾向の解明

暴風雪および大雪に関するハザードマップの開発

本文中に記す「飛雪流量」や「吹雪量」は吹雪の激しさを示す指標として使用されることが多い物理量である。飛雪流量は風向に対して直交する単位面積を単

位時間を通して通過する雪粒子の質量($\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$)のことを指し¹⁾、吹雪量は風向に対して直交する単位幅を単位時間に通過する雪粒子の質量($\text{g}/\text{m}/\text{s}$)のこと、すなわち、飛雪流量を高さ方向に積分した値を指す²⁾。

一般に、吹雪量を自動的かつ連続的に実測することは難しいため、吹雪量は気象データを用いて経験式によって推定されることが多い。吹雪量の推定に関しては、これまでも多くの経験式が提示されているが、その大半は風速の関数である^{3)~7)}など。しかし、吹雪の発生条件は風速のみならず、数多くの気象要素が関与するものである。また、吹雪の発生しやすさや発達しやすさは、周辺環境や地域ごとの気象特性にも依存することから、一義的な経験式は示されていない。

そこで本研究では、はじめに各気象要素が吹雪量に与える影響の大小について検討する。その結果を踏まえ、複数の気象要素から吹雪量を推定するための関数を作成する（達成目標 と）。次に、各気象条件や、作成した関数を用いて推定した吹雪量と、過去の通行止め事例や災害発生事例との関係について解析し、暴風雪や大雪の評価指標として適切な物理量について検討する（達成目標 と）。最後に、暴風雪や大雪によるリスクを地域ごとに検討し、ハザードマップの作成を目指す（達成目標 と）。

2. 各研究年度における実施内容（概要）

2.1 平成 28 年度までの実施内容

本節では、過年度までに実施した内容について、その概要を述べる。

平成 26 年度は、北海道弟子屈町に気象観測および吹雪観測を実施するためのサイト（以下、弟子屈吹雪観測サイト）を新たに構築し、気象および吹雪の観測を開始した。また、石狩吹雪実験場内に二重柵基準降水量計（DFIR）（3.1.3 項にて詳述する）を新設し、高精度な降雪強度観測を開始するとともに、吹雪観測を実施した。また、近年の北海道内における大雪・暴風雪の発生頻度や一般国道通行止めの実施履歴を収集・整理し、地域ごとの変化傾向について解析した。詳細については「平成 26 年度プロジェクト研究・重点研究報告書」⁸⁾を参照されたい。

平成 27 年度は、弟子屈吹雪観測サイトおよび石狩吹雪実験場における観測を継続するとともに、弟子屈吹雪観測サイトで得た観測データと各種パラメータ（雪面粗度長や摩擦速度など）の関係について解析した。また、平成 26 年度に引き続き、近年の北海道内における大雪・暴風雪の発生頻度や一般国道通行止めの実施履歴を収集・整理し、地域ごとの変化傾向について解析した。詳細については「平成 27 年度プロジェクト研究・重点研究報告書」⁹⁾を参照されたい。

平成 28 年度は、弟子屈吹雪観測サイトおよび石狩吹雪実験場における観測を継続するとともに、両観測地点で得た 2 冬期分（平成 26～27 年度）の観測データを用い、多変量解析等によって吹雪量を推定するための関数について検討した。また、全道を対象に、最大で直近 35 冬期分の地上気象観測点データ（アメダス、道路気象テレメータ）を収集し、その地点ごとに暴風雪および大雪イベントを抽出した。詳細については「平成 28 年度プロジェクト研究・重点研究報告書」¹⁰⁾を参照されたい。

2.2 平成 29 年度の実施内容

平成 29 年度は、弟子屈吹雪観測サイトおよび石狩吹雪実験場における観測を継続するとともに、石狩吹雪実験場で得た 3 冬期分（平成 26～28 年度）の観測データを用い、吹雪量を推定するための関数について検討した。また、作成した関数を用いて推定した吹雪量と、実際の通行止めとの関係について解析した。本報は、その成果および途中経過について報告するものである。

このうち、吹雪量を推定するための関数については平成 28 年度にも検討しているが、平成 28 年度に使用した降雪強度データの一部に観測精度の低いものが含

まれていた。そのため、平成 29 年度は二重柵基準降水量計によって高精度な降雪観測を実施している石狩吹雪実験場のデータのみ（3 冬期分のデータ；平成 26～28 年度）を用い、再度吹雪量推定式の作成に臨んだ。

3. 吹雪量に与える気象要因の影響度の解明

3.1 現地観測

吹雪量に与える気象要因の影響度を解明し、一回の暴風雪イベントによる吹雪量を正確に把握するため、現地観測を実施した。

3.1.1 観測地点

暴風雪が発生しやすい気圧配置条件には地域特性がある。たとえば、当研究所の石狩吹雪実験場（N43°12'，E141°23'）が位置する道央地域では、西高東低の気圧配置時に発生しやすい。一方、弟子屈吹雪観測サイト（N43°30'，E144°27'）が位置する道東地域では低気圧が通過する時に発生するケースが多い。

本研究では、暴風雪発生時の気象条件が異なることが多い上記 2 地点において、各種気象観測および飛雪流量観測を実施した。石狩吹雪実験場および弟子屈吹雪観測サイトの位置図を図 1 と図 2 に記す。なお、両図とも国土地理院地図に加筆したものである。また、図中には近隣アメダスの位置を付記してある。



図 1 石狩吹雪実験場



図 2 弟子屈吹雪観測サイト

3.1.2 各種気象観測

石狩吹雪実験場、弟子屈吹雪観測サイト両観測点に

共通する気象観測内容を表1に示す。ここで、表中における「視程」は一般的な気象値ではないが、吹雪が激しくなるほど視程は低下し、交通障害を引き起こす一因となることから、気象観測に加え、視程計測も実施した。また、動画映像の記録については、実際の吹雪発生有無を目視確認することを目的に設置した。図3に、弟子屈吹雪観測サイトにおける気象観測タワーの様子を示す。

表1 気象観測項目（石狩・弟子屈に共通）

観測項目	観測間隔	設置台数
気温	10分	1
風向風速	1秒	弟子屈:4(設置高度:1m~7m) 石狩:3(設置高度:1.3m~6.2m)
視程	1秒	1
積雪深	10分	1
日射量	10分	1
動画映像	連続(6時~18時)	1



図3 気象観測タワー(於:弟子屈吹雪観測サイト)

3.1.3 降雪強度の観測

「吹雪」とは、雪粒子が風によって空気中を舞う現象である。したがって、吹雪の激しさを指標化するうえで、降雪を正確に把握することが必須となる。しかし、物理量としての「降雪」を定量的に正しく計測することは容易でない。

例えば、降雪量は「一定時間内に新しく降り積もった雪の深さ」として定義づけられており¹¹⁾、現在気象庁では、積雪深計を用いて計測された時間積雪深差を時間降雪量として定めている。しかし、雪が降っている場合でも、積雪自身の重みによる圧密沈降効果によって積雪深が増加しなかった場合や、雪面上に降り積もった雪が風によって吹き払われた場合には積雪深が増加せず、時間降雪量がゼロと記録されてしまうことが多々ある。特に、本研究の観測サイト(石狩吹雪実験場および弟子屈吹雪観測サイト)は吹雪頻発エリアであり、風が強いケースが多い。

一方、降雪強度は単位時間に降った雪の重さに等しい水の深さのことであり、その計測には雨量計が用い

られる。しかし、降雪粒子は雨滴よりも風による影響を受けやすく、風が強いほど雨量計に捕捉されにくくなる。よって、雨量計による観測は、実際の降雪強度を過小評価するケースが多い。また、風による影響に加え、降水が雨量計自身を濡らすために消費される「濡れ損失」や計測前に蒸発により失われる「蒸発損失」なども、実際の降雪強度を過小評価する要因として挙げられる¹²⁾。

本研究では、世界気象機関(WMO)が推奨する二重柵基準降水量計(Double Fence Intercomparison Reference, 以下 DFIR)を使用し、石狩吹雪実験場において降雪強度観測を行った。図4に石狩吹雪実験場に設置されているDFIRの外観写真を、図5にDFIRの平面図を示す。DFIRはサイズの異なる2つの正八角形の風除け柵(外側柵・内側柵の対角長はそれぞれ12m、4m)からなり、中央部に雨量計が設置されている。外側柵・内側柵はともに長さ1.5mの板からなり、外側柵の上端は内側柵の上端よりも0.5m高い。なお、柵部分の空隙率は50%、内側柵の上部と雨量計の受水口が等しい高さになるように設置されてある。

WMOは、DFIRによる実測値に対し降雪形態に応じた変換式¹³⁾を適用することで、その値を「真の降雪強度」とみなしてよいとしている。本解析では、DFIRによる実測値から算出した降雪強度を使用した。

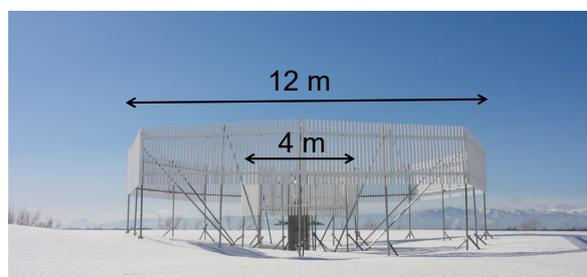


図4 DFIRの外観写真(於:石狩吹雪実験場)

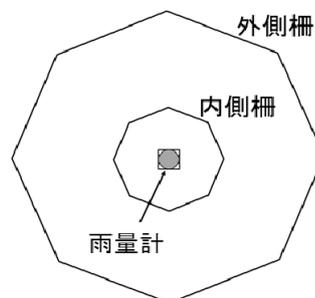


図5 DFIRの平面図

3.1.4 飛雪流量の観測

図6に、吹雪の運動形態を図示する。吹雪の運動形態は「転動」、「跳躍」、「浮遊」の3種類がある¹⁴⁾。転

動」は雪粒子が雪面上を転がる運動である。「跳躍」は雪粒子が雪面上をバウンドしながら風によって運ばれる運動であり、その高さは、概ね0.1m程度とされている。また、「浮遊」は風によって雪粒子が空气中に舞い上げられる運動であり、その高さは100m以上に達することもある。

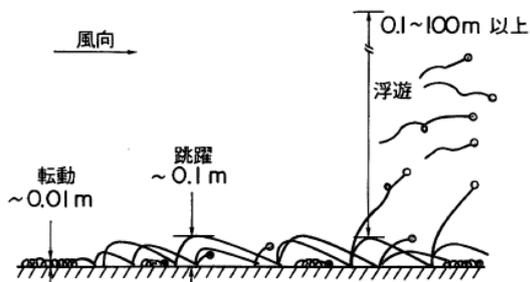


図6 吹雪の運動形態(転動・跳躍・浮遊)¹⁴⁾より抜粋

石狩吹雪実験場および弟子屈吹雪観測サイトにて実施した飛雪流量観測には、タンス型ネット式吹雪計(観測高度は雪面~雪面上0.1m)、筒型ネット式吹雪計(観測高度は雪面上0.1m~2.0m、設置高さは計5点)、Snow Particle Counter(以下SPC、観測高度は1m~7m、設置高さは計4点)を使用した。すなわち、タンス型ネット式吹雪計による計測値は跳躍層の飛雪流量に相当し、筒型ネット式吹雪計およびSPCによる計測値は浮遊層の飛雪流量に相当する。図7にタンス型ネット式吹雪計を、図8に筒型ネット式吹雪計を示す。タンス型、筒型とも、一定時間内にネット内にサンプリングされた吹雪粒子の質量から飛雪流量を求めるものである。



図7 タンス型ネット式吹雪計



図8 筒型ネット式吹雪計

次に、SPCについて述べる。SPCの外観を図9に示す。SPCは非接触により光学的に吹雪粒子を計測する機器であり、平行光を照射しているセンサー内に粒子が通過することで生ずる光の減衰量から、飛雪流量を算出するものである。SPCの計測原理の詳細についてはSchmidt¹⁵⁾を参照されたい。



図9 Snow Particle Counter (SPC) の外観

3.2 各気象要素が吹雪量に及ぼす影響に関する検討

3.2.1 実測飛雪流量に基づく吹雪量の算出

実測した飛雪流量から吹雪量を算出する。ここでは、ネット式吹雪量計(タンス型、筒型)による観測結果から算出した吹雪量と、SPCによる観測結果から算出した吹雪量、その2パターンについて求めた。

はじめに、ネット式吹雪計およびSPCの実測値の整合性について確認する。ここでは、石狩吹雪実験場で実施した3冬期分(平成26~28年度)の飛雪流量観測データ(データ数は69)を使用し、雪面上の高さ1mにおける飛雪流量を比較した。その結果を図10に記す。この結果より、SPCによって計測された飛雪流量は、ネット式吹雪量計によって計測された値を過大評価する傾向があることが分かった(約2.3倍)。以降、本報では、SPCの実測値を2.3で除したものを、SPC観測によって求めた飛雪流量として扱うこととする。

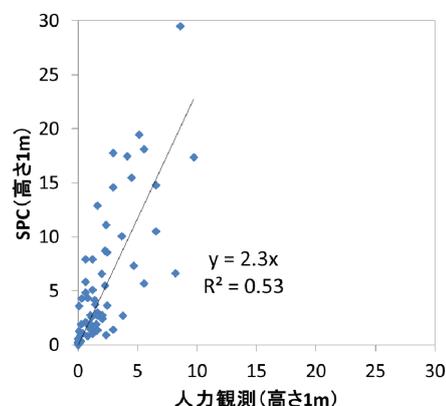


図10 ネット式吹雪量計とSPCによる飛雪流量の比較(高さ1m)

上述したように、吹雪量は飛雪流量を高さ方向に積分することによって求められる。しかし、降雪がある時に飛雪流量を上空まで積分すると、吹雪量は膨大な値になる。そこで、本計算では、いずれも雪面から高度 7m までの範囲を吹雪量の積算範囲とした。これは、道路防雪柵や道路標識の高さの大半が 7m 以下であることから、道路管理の実務においては高度 7m 程度までの吹雪量を加味すれば十分と考えられるためである。

ネット式吹雪計（タンズ型、筒型）によって観測された飛雪流量から吹雪量を算出する方法の概念図を図 11 に示す。図中の網掛け部分に相当する飛雪流量の合計値が、吹雪量に相当する。ここで、ネット式吹雪計による飛雪流量計測は高度 2m までしか実施していないが、高度 7m における飛雪流量は DFIR による観測結果から推定した値を使用した。DFIR 観測から求められる降雪フラックス ($g/m^2/s$) を降雪粒子の落下速度 (m/s) で除することで降雪粒子の空間密度 (g/m^3) が求められ、これに高度 7m における風速を掛けることによって、高度 7m における飛雪流量が得られる。ここで、降雪粒子の落下速度は Ishizaka¹⁶⁾ を参考に、 $1.2m/s$ とした。

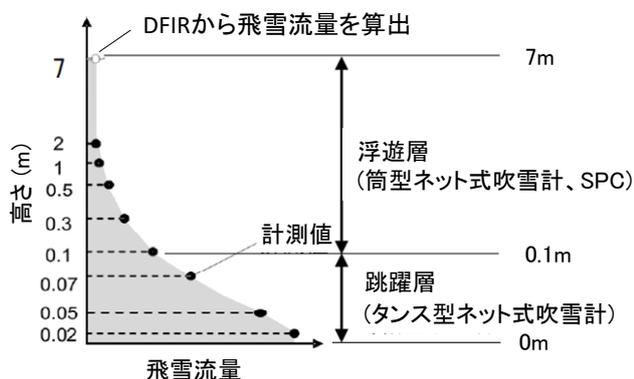


図 11 ネット式吹雪計による飛雪流量観測結果から吹雪量を算出する方法の模式図

次に、SPC の観測結果から吹雪量を算出する方法の概念図を図 12 に記す。図 11 と同様、網掛け部分に相当する飛雪流量の合計値が吹雪量に相当する。SPC による観測時には、積雪深の変動によって雪面から SPC までの高度が変動する。本解析では、石狩吹雪実験場内で計測している積雪深データを用い、雪面からの SPC 高度を随時補正し、雪面からの高さを考慮して吹雪量を算出した。

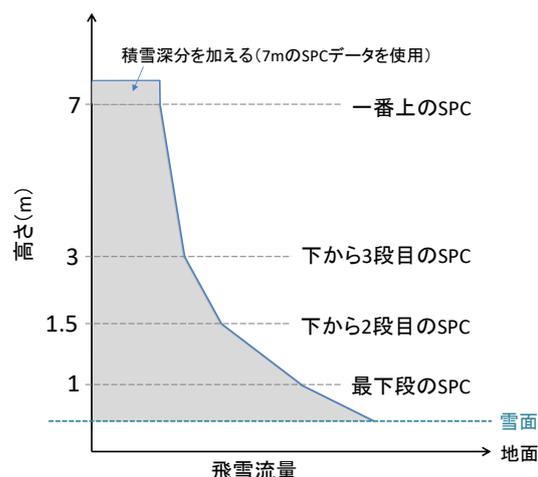


図 12 SPC による飛雪流量観測結果から吹雪量を算出する方法の模式図

3.2.2 各気象要素と吹雪量の比較

複数の気象要素から吹雪量を推定するための関数を作成するにあたり、その前段として、各気象要素が吹雪量に与える影響について検討する必要がある。本研究では、気温、風速、降雪強度など直接観測している気象要素のほか、各要素の累計値や降雪終了からの経過時間など、過去の気象履歴についても検討項目に入れた。

本報では、ネット式吹雪計（タンズ型、筒型）による観測結果から推定した吹雪量と、各気象要素を比較した結果について述べる。ここでは、3.2.1 項で使用したのと同じ、石狩吹雪実験場で実施した 3 冬期分の飛雪流量観測データを使用した。その結果、吹雪量に対して、降雪の有無に関わらず風速と気温が、降雪がある時には降雪強度あるいは降雪量が、降雪が無い時には降雪終了からの経過時間が大きく寄与することが分かった。結果の一例として、無降雪時の吹雪量と高度 10m における風速の関係を図 13 に、吹雪量と降雪強度の関係を図 14 に記す。

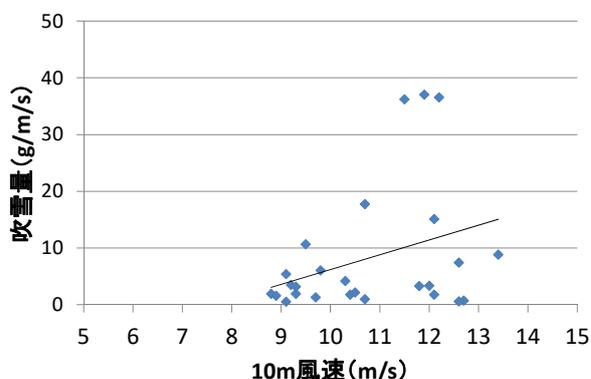


図 13 吹雪量と風速の関係（降雪なし）

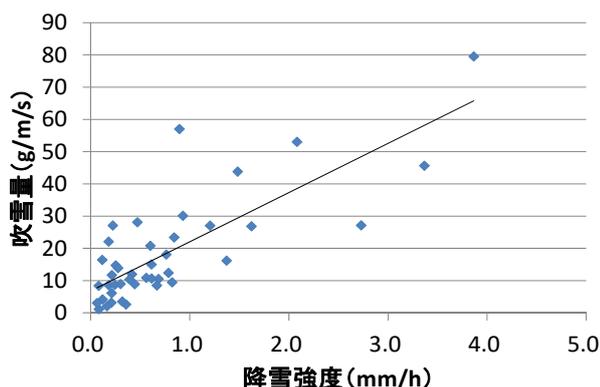


図 14 吹雪量と降雪強度の関係

3.3 吹雪量推定式の検討

次に、気象データから吹雪量を推定するための関数を作成する。本報では、ネット式吹雪計（タンズ型、筒型）による観測結果から算出した最大吹雪量を推定するための関数を求めたプロセス、およびその結果について記す。

吹雪量は、「降雪粒子に起因する吹雪量」と「地吹雪粒子に起因する吹雪量」から成り、その合計である。そこで、降雪項と地吹雪項の両方を含む形の関数を考える。ここで、「降雪粒子に起因する吹雪量」は降雪量と風速に比例する。また、「地吹雪粒子に起因する吹雪量」は、既往の研究成果³⁾⁻⁷⁾などから、風速のべき関数で表されることが分かっている。そこで、吹雪量推定式は以下の形のものを検討することとした。

$$Q = \underbrace{a \cdot P \cdot U}_{Q_s} + \underbrace{b \cdot U^c}_{Q_b} \quad (1)$$

ここで、 Q は吹雪量、 P は降雪に関する変数、 U は風速、 a 、 b 、 c は係数を示す。第一項が降雪項 Q_s 、第二項が地吹雪項 Q_b に相当する。

降雪項については、 U の鉛直分布と P が分かれば雪面から高さ H までの範囲における吹雪量 Q_s を求めることができ、それは次式によって与えられる。

$$Q_s = \frac{P}{W_f} \int_0^H U(h) dh \quad (2)$$

式(2)における P は降雪フラックス ($g/m^2/s$)、 W_f は降雪粒子の落下速度 (m/s)、 $U(h)$ は高度 h における風速 (m/s)を指す。本報では、3.2.1項と同様、 $W_f = 1.2$ を採用した。ここで、風速の鉛直分布が対数則であると仮定し、測定高さ H_0 の風速 U_0 と任意の高さ h から、次式によって $U(h)$ を求めた。

$$U(h) = U_0 \frac{\ln(h/z_0)}{\ln(H_0/z_0)} \quad (3)$$

ここで、 z_0 は雪面の粗度長を指す。本報では、大浦ほか¹⁷⁾に基づき、 $z_0 = 0.00015$ mを採用した。式(2)および式(3)を吹雪量の積算高さ 7 mまで積分すると、式(4)が求められる。ここで、式中の U_7 は高度 7mにおける風速のことを指す。

$$Q_s \approx 6.15 \cdot U_7 \frac{P}{W_f} \quad (4)$$

次に、降雪フラックス P ($g/m^2/s$)を降雪強度 P' (mm/h)に変換し、雪粒子の落下速度 1.2 m/sを用いると、式(4)は式(5)に変換される。

$$Q_s \approx 1.42 \cdot P' \cdot U_7 \quad (5)$$

実際の自然環境の中では、植生や地形の起伏などの影響によって地面粗度長が 0.00015 m よりも大きくなる場合が多々ある。地面粗度長が大きくなると雪面付近の風速が小さくなる。したがって、式(5)で求められる降雪に起因する吹雪量は、ほぼ最大値と仮定してもよいと考えられる。

次に、 Q_s の最大値と Q_b の最大値の和、すなわち吹雪量 Q の最大値を推定するための関数について検討する。ここでは、ネット式吹雪計（タンズ型、筒型）による観測データを使用した結果について述べる。本報で最大吹雪量に着眼した根拠は、防災の観点から、吹雪の激しさを示す指標を作成するうえで安全側を考える必要があるためである。

最大吹雪量の推定式は、式(1)の Q_s に式(5)を用いることで、以下の式(6)となる。

$$Q = 1.42 \cdot P' \cdot U_7 + b \cdot U^c \quad (6)$$

次に、係数 b と c を求めるため、吹雪量 Q から降雪項 Q_s を差し引いた値、すなわち地吹雪粒子に起因する吹雪量 Q_b と風速の関係について検討する。ここでは、最大吹雪量を推定するための関数を作成するため、風速を 1m/s 毎に階級分割し、各階級の最大風速を抽出した。なお、同じ風速階級内に振り分けられたデータ数が少ない場合（データ数が 2 個以下の場合）には、その風速階級における値は解析に使用しないこととした。

地吹雪項 Q_b と風速の関係を図 15 に示す。図中に示す累乗近似曲線は、各風速階級における最大値に対し

べき乗近似曲線を引いたものである（近似曲線の作成に用いた対象データを赤丸示す）。この結果、式(6)中の係数、 b と c が求められ、最大吹雪量の推定式は式(7)の通りとなった。ここで、式中の U_{10} は高度 10m における風速のことを指す。

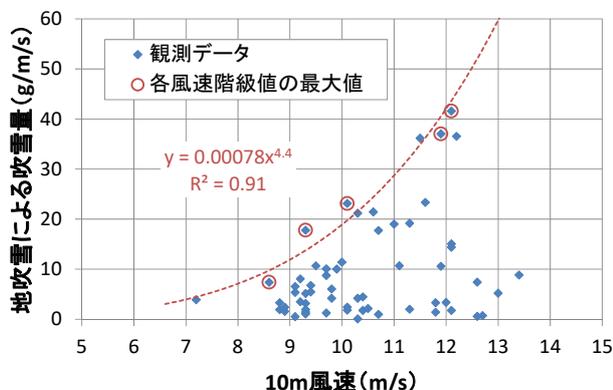
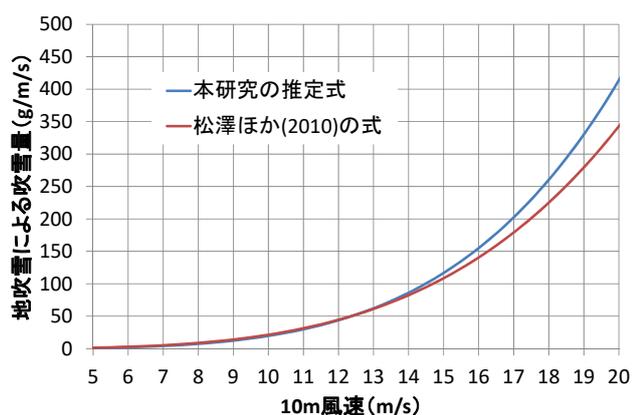


図 15 地吹雪粒子による吹雪量と風速の関係

$$Q = 1.42 \cdot P \cdot U + 0.00078 \cdot U_{10}^{4.4} \quad (7)$$

吹雪量推定式(7)と松澤ほか⁷⁾が提示した吹雪量推定式⁷⁾の比較結果を図 16 に示す。松澤ほかの式は高度 1.2m における風速のべき乗式で示されていることから、図 16 に示す松澤ほか(2010)の式による計算結果は、10m 高度の風速を 1.2m 高度の風速に換算した値を入力している。松澤ほかの式は無降雪時のものであることから、本比較では、式(7)の降雪項をゼロとしてある。図 16 より、本研究で示した推定式の方が、松澤ほか⁷⁾が示した推定式よりも大きな吹雪量を算出することが確認された。



ただし、松澤ほか(2010)の式は、10m高度の風速を1.2m高度の風速に換算した値を入力

図 16 本研究の推定式と松澤ほかの推定式⁷⁾の比較

4. 暴風雪や大雪の評価指標の提案

暴風雪の評価指標を提案するにあたり、過去の交通障害事例や災害事例と気象条件、吹雪量の関係について検討する。平成 29 年度は、3 章で提示した最大吹雪量の推定式(7)を用い、地上気象観測点で得られたデータから最大吹雪量を算出した。次に、一般国道の通行止め実施有無との関係について解析し、その特徴について調べた。なお、ここでは解析対象を北海道内のみとしている。

4.1 最大吹雪量の算出

最大吹雪量の算出には式(7)を用いたが、その適用条件として、武知ら¹⁸⁾による吹雪発生条件フローに基づき、降雪の有無および地吹雪発生の有無を判断した。すなわち、フローによって「降雪あり」と判定された時のみ降雪項を計算し、「降雪なし」と判定された場合には降雪項をゼロとした。地吹雪項についても同様に、「地吹雪あり」と判定された時のみ地吹雪項を計算し、「地吹雪なし」と判定された場合には地吹雪項をゼロとした。

降雪項を計算するにあたり、地上気象観測点に設置されている雨量計データを使用することとなるが、3.1.3 項で述べたように、降雪粒子は風の影響を受けることによって雨量計に捕捉されにくくなり、実際の値を過小評価する。そこで、ここでは大宮・松澤¹⁹⁾が示した補正式を用い、アメダスおよび道路気象テレメータによる実測値を補正して求めた降雪強度を使用した。

4.2 解析対象とした気象地点および通行止め事例

平成 26~28 年度に収集・整理した北海道内における地上気象観測データ（気象庁アメダス 100 地点、国土交通省北海道開発局道路気象テレメータ 176 地点）および一般国道の通行止め履歴データの中から、解析に使用する地点および事例を抽出した。

まず始めに、冬期通行止めの実施回数が多い 11 路線を選んだ。次に、通行止め区間を代表する気象データを示す地上気象観測点について選定した。代表地点の選定方法については、通行止め区間の中央に最も近い地上気象観測点とした。図 17 に、過去 35 年間(1980~2015 年度)における通行止め実施回数の分布図を記す。ここで、本解析対象として選定した地上気象観測点については、図中に赤丸で囲ってある。この図より、通行止めの実施頻度は道東地域および道北地域において高いことが示された。

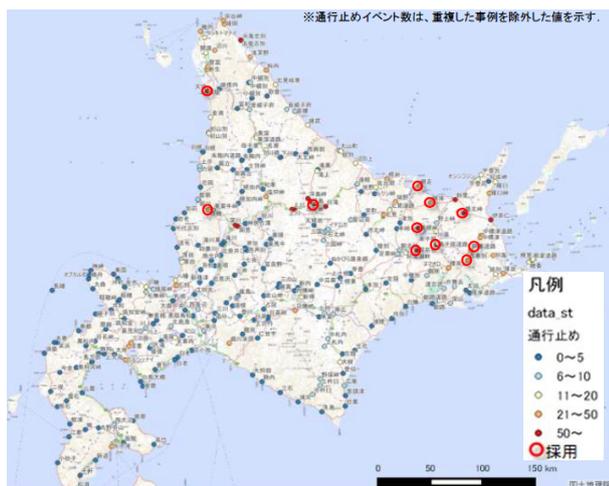


図 17 過去 35 年間（1980～2015 年度）における
通行止め実施数の分布図

解析対象として選定された地点は以下。図中に赤丸で示す。
アメダス：弟子屈、天塩、網走
テレメータ：美幌峠、根北峠、北見峠、双岳台、美馬牛峠、
西春別、阿寒道路、神浦

次に、選定した地上気象観測点それぞれに対し、2014 年度冬期までに実施された通行止め事例のうち、新しいものから 10 事例程度を選んだ。加えて、顕著な雪氷災害を 3 ケース選び、その期間中において実施された通行止め事例を解析対象とした。以下に、「顕著な雪氷災害」として選定した事例について、その概要を記す。

災害事例

日時：2004/1/13 ~ 1/16
人的被害：死者 1 名、負傷者 11 名
通行止め（国道）：20 路線 37 区間
概要：低気圧によって北海道全域において大雪と暴風雪が発生。特に北見地方で記録的な大雪となったケース

災害事例

日時：2013/3/1 ~ 3/3
人的被害：死者 9 名
通行止め（国道）：5 路線 5 区間
概要：北海道全域において大雪と暴風雪が発生。死者が多く出たケース。

災害事例

日時：2014/2/15 ~ 2/19
人的被害：なし
通行止め（国道）：12 路線 15 区間
概要：オホーツク海側や太平洋側東部を中心に、長時間にわたって暴風雪が継続したケース。

4.3 通行止めと気象要素および吹雪量の関係について

本検討では、通行止め開始時の気象要素および吹雪量について整理した。通行止めは、視界不良によって車両の走行が困難になると想定される場合や道路上への堆雪によって車両の通行が困難になると想定される場合、道路除雪の実施が困難になる場合などに実施される。ここで、視界の変動は風速の強弱や吹雪量の大小など、気象状況の現況値に依存していると考えられる。一方、道路上への堆雪量は吹雪によって形成される吹きだまりや降雪量によって増加することから、通行止め実施までの履歴、すなわち累積吹雪量や累積降雪量などに依存していると考えられる。そこで、本解析では「通行止め開始時の現況気象値」と「通行止め開始までの気象履歴」に着眼した。

4.3.1 通行止め開始時の現況気象値

通行止め開始時の現況気象値について述べる。比較結果の一例として、通行止め開始時の現況風速（高度 10m）を地上気象観測地点ごとにまとめた結果を図 18 に示す。また、同様に通行止め開始時の現況気温を地上気象観測地点ごとにまとめた結果を図 19 に示す。図中に記す最大や最小は、4.2 節において解析対象とした通行止め事例に対する最大値および最小値を示す。

図 18 に示す結果から、地上気象観測地点ごとに通行止めが実施される風速が異なる傾向があることがわかった。また、図 19 に示す結果からは、大半の通行止め事例において気温が氷点下であることが示された。これは、プラス気温の時は吹雪や大雪が発生しにくくなり、通行止めの実施に至りづらくなるためと考えられる。

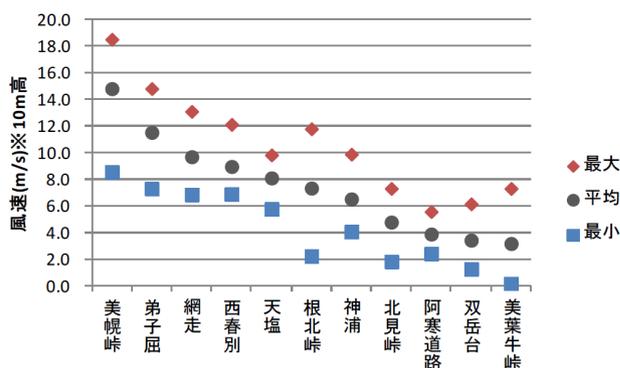


図 18 通行止め開始時の現況風速（高度 10m）

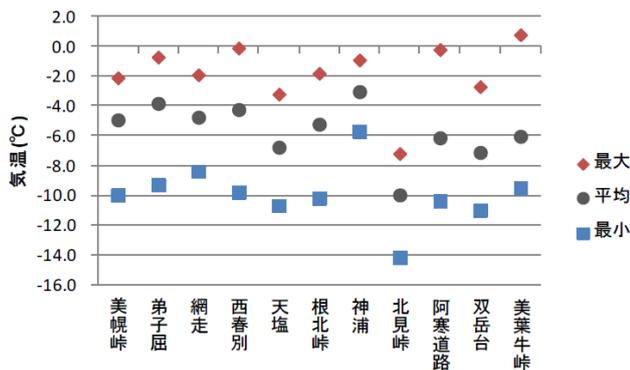


図 19 通行止め開始時の現況気温

4.3.2 通行止め開始までの気象履歴

次に、通行止め開始までの気象履歴について述べる。ここでは、吹雪量の累積値がある閾値を超えた場合に通行止めが実施されると仮定し、通行止め実施と実施に至るまでの累積吹雪量の関係について整理した。その一例として、通行止めが実施された時点から過去に遡って 12 時間分の累積吹雪量の平均値について、地上気象観測地点ごとに整理した結果を図 20 に記す。この結果、通行止めが実施されるまでの累積吹雪量の平均値は地点ごとに異なることが示された。

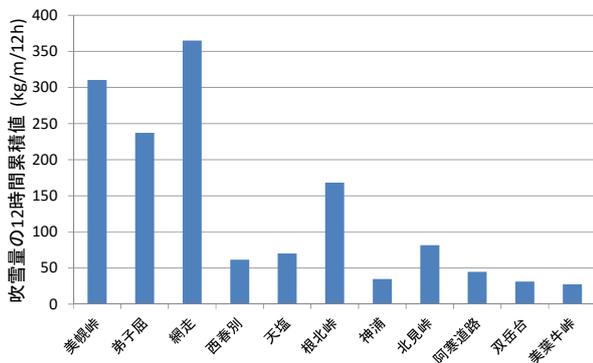


図 20 通行止め開始前 12 時間の累積吹雪量の平均値

次に、地上気象観測地点ごとに、通行止めが開始されるまでの時間と累積吹雪量について解析した。結果の一例として、網走アメダス、弟子屈アメダス、阿寒湖温泉除雪ステーション構内に設置の道路気象テレメータ（以下、阿寒道路）の結果を図 21(a) ~ (c) に示す。ここでは、通行止め実施のタイミングを基準時刻 (0h) とし、その時間変化を過去に遡ってまとめている。なお、図の凡例には、通行止めが実施された日付を示してある。

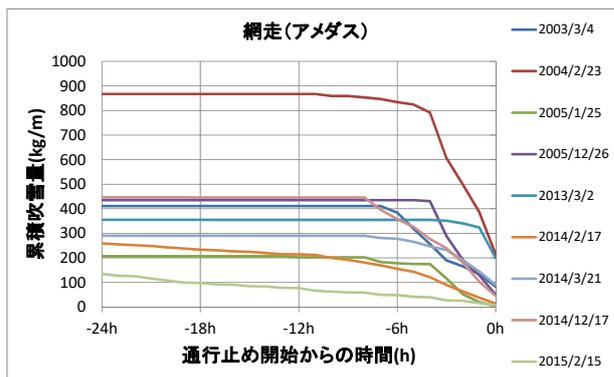


図 21(a) 通行止め開始と累積吹雪量の関係
網走 (アメダス) の例

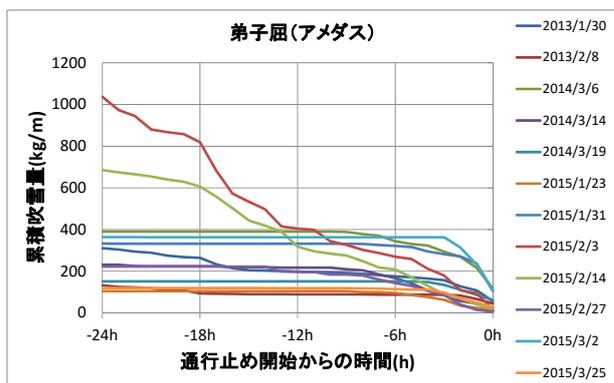


図 21(b) 通行止め開始と累積吹雪量の関係
弟子屈 (アメダス) の例

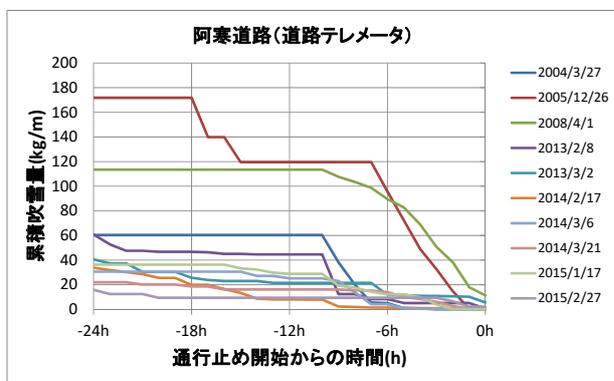


図 21(c) 通行止め開始と累積吹雪量の関係
阿寒道路 (道路テレメータ) の例

上記の結果から、通行止めが実施される時点における累積吹雪量は地点や通行止め事例ごとに様々な値をとることが示され、通行止め実施を決定づける閾値は存在しないことが示された。その一方で、網走や弟子屈においては通行止め開始のおおむね 4 時間前以降、また阿寒道路においては通行止め開始のおおむね 10 時間前以降からの累積吹雪量が通行止め実施に寄与する傾向があることが伺える。なお、図 21(a) ~ (c) に示した以外の地点においても、通行止めが実施される前

数時間以降からの累積吹雪量と通行止め実施の関係については相関があることが確認された。これは、吹雪量が増加しはじめてから通行止め開始までの時間を推測する目安になる可能性がある。

5.まとめ

平成 29 年度は、石狩吹雪実験場で得た 3 冬期分(平成 26～28 年度)の観測データを用い、吹雪量を推定するための関数について検討した。また、作成した関数を用いて推定した吹雪量と、実際の通行止めとの関係について解析した。

平成 30 年度以降は、「通行止め解除と気象データの関係」や、「通行止め継続時間と気象データの関係」について検討を行う。また、平成 29 年度に実施した気象観測地点(11 地点)以外の地点についても同様の解析を行うほか、解析対象とする通行止め事例についても増やし、通行止め実施の地域性および変化傾向について検討する。本研究の最終目標である暴風雪および大雪に関するハザードマップの作成に向け、地域ごとの通行止め実施傾向や変化傾向など、そのデータベース作成に取り掛かりたい。

参考文献

- 1) 日本雪氷学会：新版雪氷辞典,古今書院,p.166, 2014.
- 2) 日本雪氷学会：新版雪氷辞典,古今書院,p.190, 2014.
- 3) Budd.W. F *et al.* : The Drifting of Non-uniform Snow Particles. Studies in Antarctic Meteorology, American Geophysical Union, Antarctic Research Series, 9, pp.59-70, 1966.
- 4) 小林大二ほか：みぞによる地吹雪量の測定 . 低温科学・物理編,27,pp.99-106, 1969.
- 5) Kobayashi.D : Studies of Snow Transport in Low-Level Drifting Snow. Contributions from the Institute of Low Temperature Science,A24, pp.1-58,1972.
- 6) Takeuchi .M: Vertical profile and horizontal increase of drift-snow transport, J.Glaciology, 26,pp.481-492,1980.
- 7) 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,26,pp.45-48, 2010.
- 8) 国立研究開発法人土木研究所：平成 26 年度プロジェク

ト研究・重点研究報告書,極端な暴風雪の評価技術に関する研究,2015.

<https://www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-project/2014/pdf/ju-46.pdf>(2018 年 6 月 14 日閲覧)

- 9) 国立研究開発法人土木研究所：平成 27 年度プロジェクト研究・重点研究報告書,極端な暴風雪の評価技術に関する研究,2016.

<https://www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-project/2015/pdf/ju-69.pdf>(2018 年 6 月 14 日閲覧)

- 10) 国立研究開発法人土木研究所：平成 28 年度 研究開発プログラム報告書, 極端気象がもたらす雪氷災害の被害軽減のための技術の開発,2017.

<https://www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-program/2016/pdf/pro-5.pdf>(2018 年 6 月 14 日閲覧)

- 11) 日本雪氷学会：新版雪氷辞典,古今書院,p.52,2014.
- 12) Sevruk: Summary report. Correction of Precipitation Measurements, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, pp.13-23, 1985.
- 13) Goodison, B.E *et al.*: WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison Final Report, WMO, p.14, 1998.
- 14) 竹内政夫：吹雪と吹きだまりの発生機構,鉄道土木, 26,12,pp.41-44,1984.
- 15) Schmidt.R A : A system that measures blowing snow, USDA, Forest Service Research Paper, RM-194,1977.
- 16) Ishizaka.M *et al.*: A New Method for Identifying the Main Type of Solid Hydrometeors Contributing to Snowfall from Measured Size-Fall Speed Relationship, Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol.91, No.6, pp.747-762,2013.
- 17) 大浦浩文ほか：地ふぶき時における風速の垂直分布特性,低温科学・物理篇,25,pp.73-88,1967.
- 18) 武知洋太ほか：“吹雪の視界情報”における吹雪視程推定手法について,寒地技術論文報告集,32, pp.157-162,2016.
- 19) 大宮哲,松澤勝：強風時における雨量計の降雪粒子捕捉率に関する検討,寒地土木研究所月報,第 769 号,pp.2-8,2017.

5.1.2 短時間の多量降雪による雪崩危険度評価に関する研究

担当チーム:土砂管理研究グループ(雪崩・地すべり研究センター)、
寒地道路研究グループ(雪氷チーム)

研究担当者:石田孝司、原田裕介(雪崩C)

松澤 勝、松下拓樹、高橋 渉、櫻井俊光(雪氷T)

【要旨】

短時間の多量降雪による雪崩発生条件を解明し、危険度評価手法を提案するために、雪崩発生時の気象と積雪状態、地形や植生条件、雪崩衝撃圧の大きさについて調査・解析を行った。低気圧性降雪期間における短時間多量降雪時の雪崩発生では、積雪新雪層の密度や降雪結晶の種類に注意する必要がある。また、2014年2月中旬の関東甲信地方の短時間の多量降雪に伴う乾雪表層雪崩のうち、建物被害が確認された事例の雪崩発生箇所付近の植生と地形は、既往の表層雪崩の発生防止に必要な立木間隔と斜面勾配の関係より立木間隔の広い箇所であることが示唆された。上記事例に地表粗度や立木密度を考慮した雪崩運動モデルを適用した結果、雪崩による建物への衝撃圧は、地表粗度が大きく樹林のある雪崩流下経路では低減されることを示した。

キーワード:短時間多量降雪、積雪、立木間隔、フェルミーモデル、雪崩衝撃圧

1. はじめに

近年、短い時間に急激に積雪深を増す多量降雪によって雪崩が生じる事例が見られる。例えば、2014年2月14日～15日にかけて、低気圧の接近・通過に伴う多量降雪により、関東甲信地方の広域で雪崩が多発した。短時間の多量降雪による雪崩は、従来発生しにくいと言われている森林内でも雪崩を誘発したことが特徴である^{1),2)}。しかし、これらの降雪強度などの気象条件や積雪層の状態、森林帯の立木間隔や、雪崩の衝撃圧などの実態は明らかになっていない。そこで本研究は、降雪強度などの気象条件や積雪層の状態など、短時間多量降雪による雪崩発生条件を解明し、雪崩発生の危険度評価手法を提案することにより、極端気象がもたらす雪氷災害の被害軽減に資することを目的とする。

平成29年度は、短時間の多量降雪に伴う雪崩発生時の気象および積雪調査、森林における雪崩発生の植生と地形条件の調査を実施し、運動モデルを用いた雪崩の衝撃圧算出手法を提示した。

2. 雪崩発生時の気象および積雪観測

土木研究所では、短時間の多量降雪による雪崩発生時の気象条件を明らかにするために、長野県松本市乗鞍高原の平地(北緯36°07'23.12"、東経137°37'33.28"、標高1458m、以下、観測サイトと呼ぶ)に冬期間気象測器を設置し、気象データを収集している。2018年1月22日から23日にかけて、観測サイト近傍の林道奈川安曇線B線(乗鞍高原～白骨温泉)において、雪崩状況を確認し

たところ、7箇所樹林または雪崩予防柵をすり抜けてデブリ(雪崩堆積物)が道路に到達していた。ここでは、上記期間の気象観測、観測サイトの積雪断面観測、ならびに観測サイト近傍の雪崩発生状況を調査した結果を述べる。

2.1 気象概況

図1(a)は、観測サイトにおける1月22日から23日の10分間ごとの気温() (サーミスタ温度計107、自然通風YG-41303)と風向・風速(風車型YG-5108)の時間推移である。図1(b)は、積雪深(cm) (レーザー式KDC-S18-L-10)と時間降雪深(1時間ごとの積雪深差の正值)(cm/h) 観測サイトから南東に約6.5km離れたアメダス奈川(北緯36°05'18"、東経137°41'00"、標高1068m)における時間降水量(mm/h)の推移である。図2は、2018年1月22日12時から1月23日12時にかけての地上天気図である。観測サイトでは、低気圧の接近・通過に伴い、9時間(22日12時30分～21時30分まで)の連続降雪で積雪深が45cm増加した。この9時間を、以下「低気圧性降雪期間²⁾」と呼ぶことにする。特に低気圧が接近した14時から17時にかけて降雪が強まり、時間降雪深は6cm/hを超えた(図1(b))。低気圧性降雪期間において平均気温は-5.5であり、風は静穏であった。低気圧の通過後、23日にかけて気圧配置は冬型へ移行した(図2)。

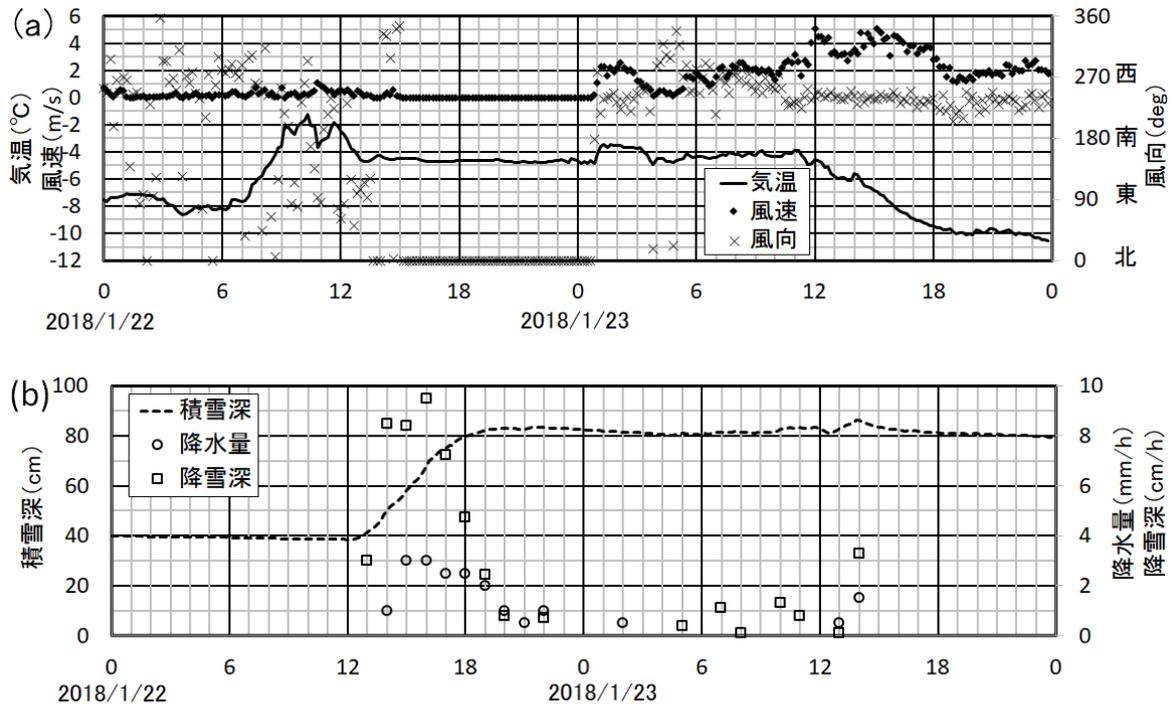


図1 (a)気温、風向・風速、(b)積雪深、時間降雪深、時間降水量（2018年1月22～23日）の時間推移。積雪深と時間降雪深は観測サイト、時間降水量はアメダス奈川。

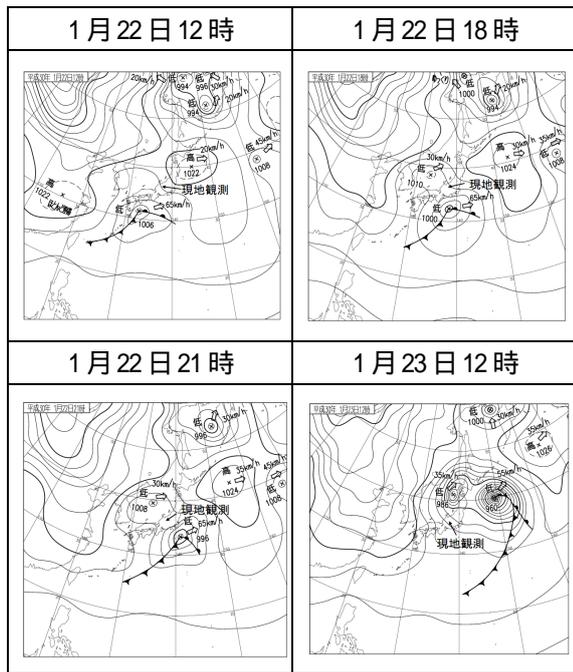


図2 2018年1月22日12時から1月23日12時までの地上天気図（気象庁作成）

2.2 積雪断面観測

2.2.1 観測サイト

同じ雪の量でも、長時間かかって積もるより、短時間に多量の雪が降り積もるときに雪崩発生の危険度が高まること知られている³⁾。短時間の多量降雪による雪崩発生

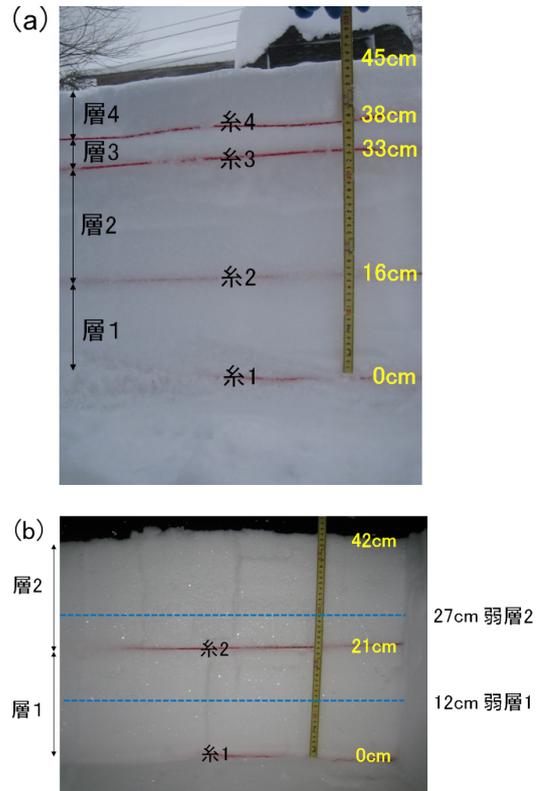


図3 積雪断面 (a) 2018年1月23日12時 (b) 2018年1月22日18時 (b)から(a)にかけて、上載積雪荷重による圧密により層1と層2の厚さは小さくなっている。

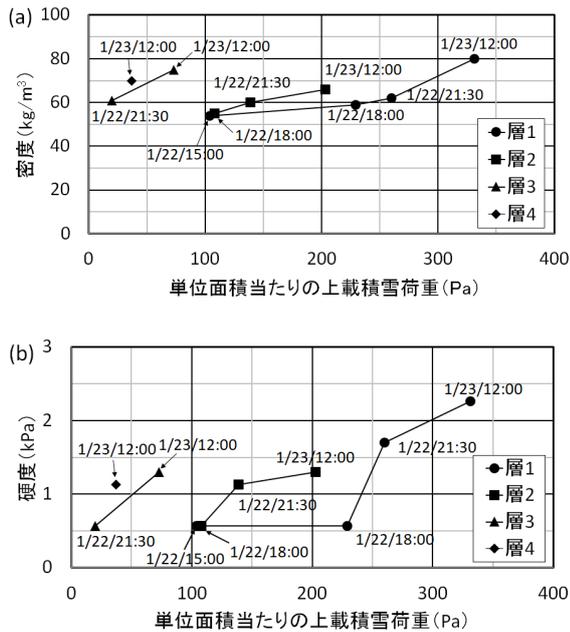


図4 各積雪層の単位面積当たりの上載積雪荷重と (a) 密度、(b) 硬度の時間変化

要因を明らかにするために、先行研究では松下らが新潟県妙高山麓、高橋らが北海道広尾郡広尾町で、積雪の密度や硬度の時間変化に関する現地観測を行っている^{4),5)}。これらの方法に倣い、観測サイトでは以下の手順で積雪断面観測を実施した。

観測開始前の2018年1月22日9時頃に雪面に積雪層のマーカースとして赤い糸1、降雪後、1月22日15時頃に糸2、18時頃に糸3、21時30分頃に糸4を設置した。糸をたよりに積雪断面を露出し、層1、層2、層3、層4の密度と硬度を、1月22日15時から23日12時の間に4回測定した(図3(a))。密度は角型サンプラー(体積100cm³)、硬度は直径15mmの円形アタッチメントを付けたデジタル荷重測定器(ZP-500N)を用いて測定した。

なお、1月22日19時頃に幅30cm、高さ44cmの雪柱を

切り出し、弱層テストのひとつであるショベルコンプレッションテストを実施したところ、糸1から上方に12cm(層1内)と27cm(層2内)付近で破壊が起こった。これらを弱層とみなし、それぞれ弱層1、弱層2とする(図3(b))。

図4(a)は、糸と糸の間にある各積雪層の単位面積当たりの上載積雪荷重(Pa)に対する密度(kg/m³)の時間変化を示す。円筒型サンプラーを用いて各積雪層の質量を測定し、サンプラーの断面積50cm²で除すると単位面積当たりの上載荷重(Pa)となる。密度(kg/m³)は角型サンプラーで各積雪層の中央位置の雪を採取し質量を計測しサンプラーの体積100cm³で除することによって求めた。いずれの測定も3回繰り返し、その平均値を求めた。降雪により上載積雪荷重が大きくなると、各積雪層の密度が増加することがわかる。先行研究と同様、低気圧性降雪期間における密度の時間変化は小さく^{4),5)}、50から80kg/m³の範囲であった。

図4(b)は、各積雪層の単位面積当たりの上載積雪荷重(Pa)に対する硬度(kPa)の時間変化を示す。1月22日15時から23日12時における層1の硬度は、2段階で変化した。1月22日18時までの降雪では、硬度に変化はない。層2の密度が小さいため上載積雪による圧密は進行しないものと考えられる。それ以降の時刻では、上載荷重(層3、層4)が増加すると硬度が0.5~2.5kPaの範囲で増加した。

2.2.2 考察

図5は、10分間における新雪層の密度(kg/m³)と累計降雪深の時間変化である。なお、新雪層の密度は、アメダス奈川の降水量と観測サイトの降雪深により換算されており、10分間で新雪層の圧密はわずかであるものとしている。図5より、新雪層の密度が相対的に小さい時刻は、14時頃と15時50分頃である。そのときの新雪層の密度は、25~30kg/m³と算定された。遠藤は、乾いた新雪のせ

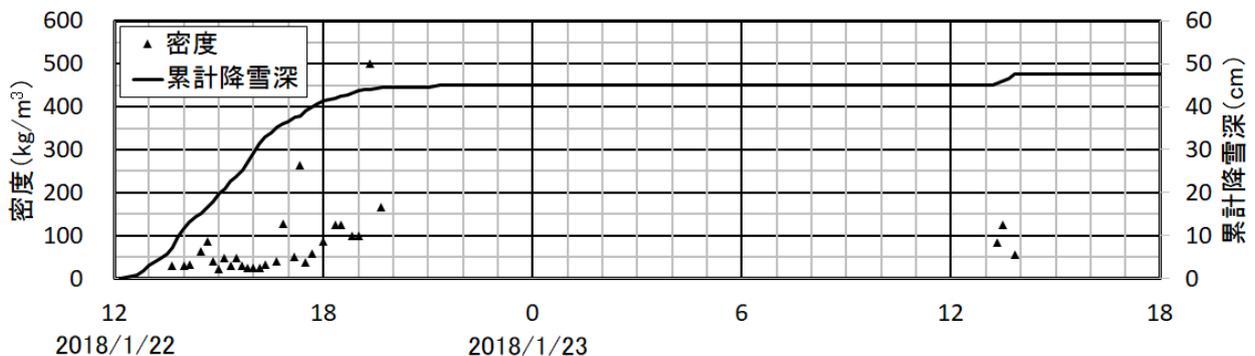


図5 10分間当たりの新雪層の密度(換算値)と累計降雪深の時間変化

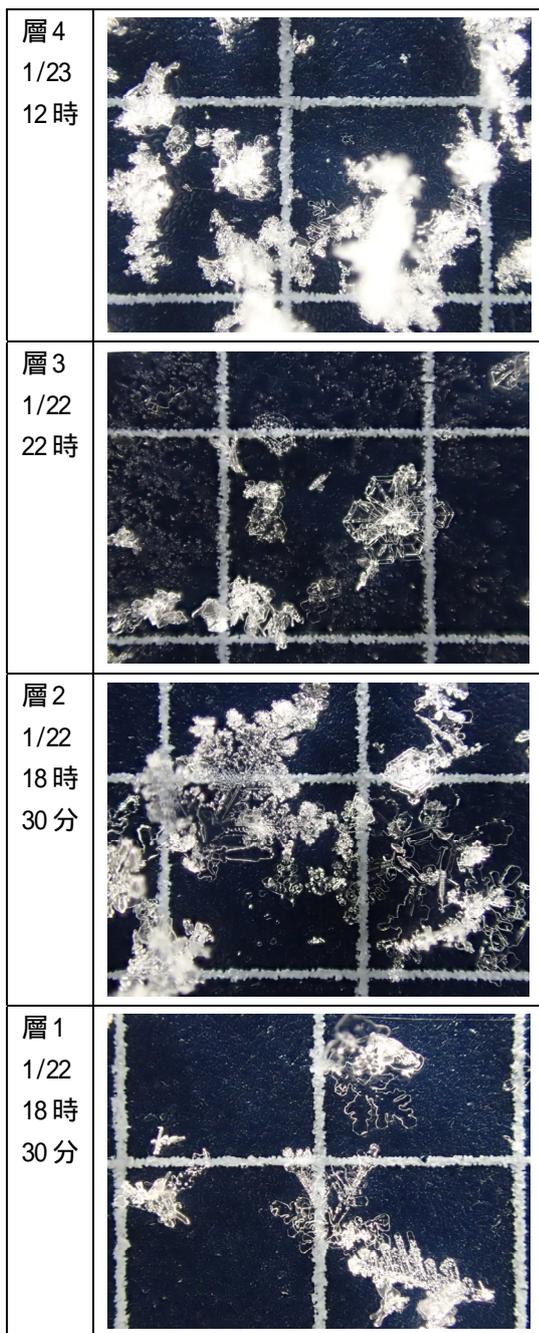


図6 層1~4の降雪粒子の写真、目盛は3mm間隔

せん断強度を、密度のべき関数で示している³⁾。つまり、密度が小さいとせん断強度が小さくなり、積雪層内で弱層になりうる。図3(b)より、上記時刻と弱層1と2の位置が概ね整合がとれていると考えられる。また、14時から15時に最大密度100kg/m³程度、16時以降20時までの密度は50~100kg/m³程度の新雪が堆積していると算定された。よって、弱層1と2の上層または上下層は、相対的に密度が大きい積雪であった可能性が考えられる。

図6は、図3の各層における降雪粒子を撮影（OLYMPUS

TG-4) したものである。1月22日、低気圧の接近中や最接近時の低気圧性降雪期間に形成された層1、層2、層3における降雪粒子は、雲粒(過冷却液滴)付着の少ない樹枝状や角板の結晶が多く見られた。冬型の気圧配置へと変化した1月23日に形成された層4では、雲粒付着の多い降雪粒子が確認された。弱層1、2においても雲粒付着の少ない樹枝状や広幅六花系の結晶が見られた。したがって、弱層を形成した新雪は、密度が小さい雲粒付着の少ない降雪粒子であることが示唆される。

2.3 観測サイト近傍の雪崩発生状況

前述した観測サイト近傍の林道奈川安曇線 B 線における雪崩発生状況を受けて、2018年1月23日10時に、観測サイトから北北東に約1.1km離れた当該路線沿いの斜面斜度32度の樹林地(北緯36°07'55.39"、東経137°37'52.36"、標高1638m)で積雪断面観測を実施した。樹林地の主な樹種はカラマツ(落葉針葉樹)であり、23日10時に外気温は-5.4、積雪深は135cmであった。新雪層厚は45cmであり、1月23日10時の観測サイト(乗鞍高原)における降雪深と同じである。幅30cm、高さ60cmの雪柱を切り出し、ショベルコンプレッションテストを実施したところ、新雪層の最下端から10cmと29cm付近で破壊が起こった。これらの弱層は、観測サイトにおける積雪断面観測から検出された弱層に該当するとみなし、それぞれ弱層1、弱層2とする(図7)。

同観測サイトで実施した積雪断面観測2~3時間後に、調査箇所近傍で樹林内をすり抜ける小規模な表層雪崩が発生した。図8(a)は雪崩発生前の1月23日12時、図8(b)は雪崩発生後の1月23日13時に樹林内を撮影したものである。雪崩は12時から13時の間に発生したものと考えられる。一番手前の樹木にスケールを黒矢印、雪崩流下方向を青矢印でそれぞれ示す。雪崩発生前の黒矢印下端

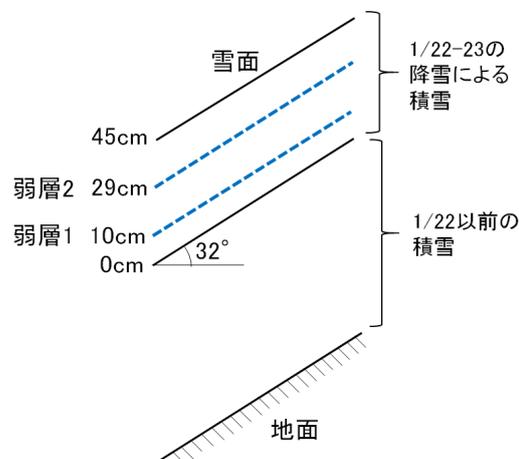


図7 傾斜面での積雪断面の模式図

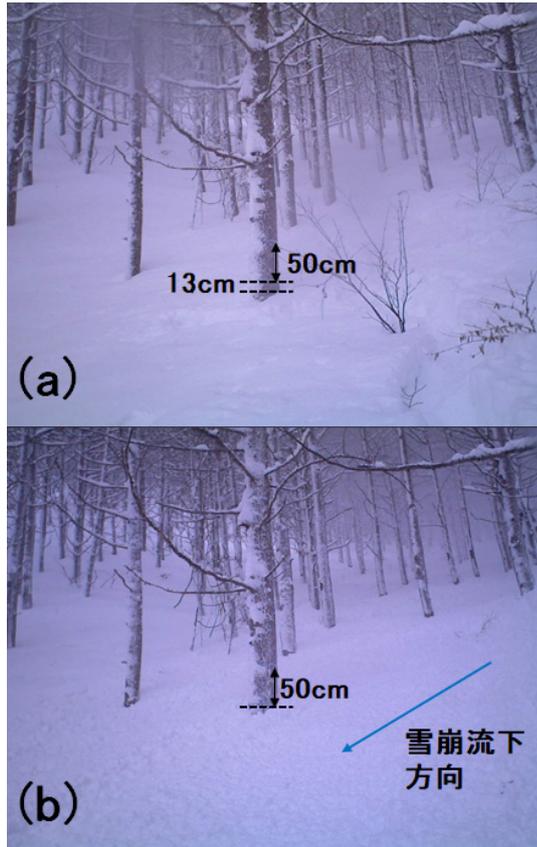


図8 樹林内の表層雪崩、(a)雪崩発生前(2018年1月23日12時)(b)雪崩発生後(2018年1月23日13時)

は黒点線の範囲で露出しているが、雪崩発生後は黒矢印下端付近まで積雪で覆われていた。また、図8(a)では右側に数本の低灌木が頭を出しているが、図8(b)では雪崩により倒伏され雪に埋没している。スケールを示す樹木の画像から、当該箇所における堆積後の雪崩厚さを見積もると13cmと推定された。現地状況から、図7に示す弱層2から上部の積雪が流下したものと考えられる。低気圧性降雪期間における短時間多量降雪時の雪崩発生では、2.2項の断面観測での結果を踏まえると、積雪新雪層の密度や降雪結晶の種類に注意する必要がある。今後、林道奈川安曇線B線で道路に到達した7箇所の雪崩と併せて、発生要因について斜面積雪の安定度と、積雪の圧縮粘性理論³⁾を組み合わせる予定である。

3. 森林における雪崩発生の植生と地形条件

3.1 文献調査

3.1.1 立木間隔と立木密度、樹木の胸高直径

森林による雪崩発生防止機能を考える上で、樹木が存在する密度(本/ha)や樹木の間隔(m)は、基本的かつ重要な植生の要素である。例えば、模擬森林を用いた実験⁶⁾に

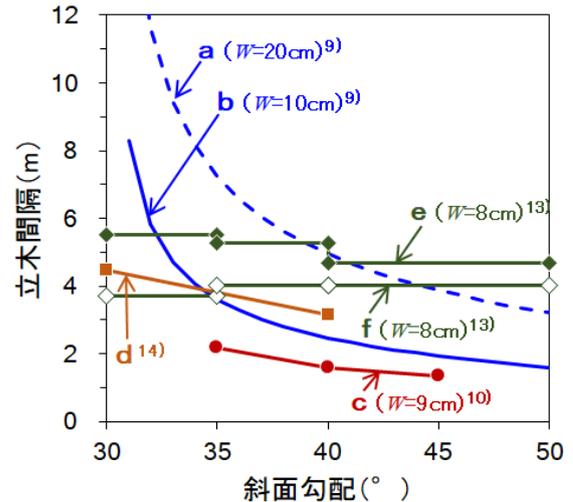


図9 雪崩発生防止に必要な立木間隔と斜面勾配の関係(a~d)、および雪崩発生地(e)と非発生地(f)の立木間隔と斜面勾配の関係、Wは樹木の胸高直径

よると、勾配30°と40°の斜面において積雪の移動を抑制するための立木密度は、1000本/ha(平均立木間隔3.2m)と500本/ha(平均立木間隔4.5m)の間に存在する。また、勾配30°の斜面で、大きなグライド速度を防ぐためには、少なくとも300本/ha(平均立木間隔5.8m)の樹木⁷⁾が、勾配35°以上の斜面では1000本/ha以上の樹木⁸⁾が必要であるとの現地観測結果がある。

ただし、立木密度や立木間隔と雪崩発生との関係は、斜面勾配の他、樹木の胸高直径や樹種、雪崩の種類により異なる^{7)・16)}。例えば、胸高直径が6cm以上の樹木がない場合、斜面積雪は安定しない¹⁶⁾。また、若齢広葉樹林の場合、斜面積雪の移動は積雪内に埋まっている胸高直径6cm以上の立木の合計本数に大きく影響される¹⁵⁾。つまり、ある程度成長した太い樹木(胸高直径が6~10cm以上の樹木)が、雪崩発生防止に必要である。

図9は、雪崩発生防止に必要な平均的な立木間隔^{9),10),14)}と斜面勾配の関係である。図中の各曲線の下側は、樹木が密に存在しており斜面積雪が安定している状態、各曲線の上側は、斜面積雪が不安定で雪崩発生の可能性がある状態である。図9の曲線aとbは、全層雪崩の発生防止に必要な立木間隔⁹⁾で、それぞれ胸高直径Wが20cmと10cmの場合である。石川ら⁹⁾は、樹木の胸高直径に応じた立木密度の算定式を提案しているが、全層雪崩の発生防止において、立木がいくら太くてもある程度以上の立木間隔になれば積雪は崩落するため、胸高直径が20cm以上の場合の計算は行っていない。図9の曲線cは、表層雪崩の発生防止に必要な胸高直径9cmの樹木の立木間隔

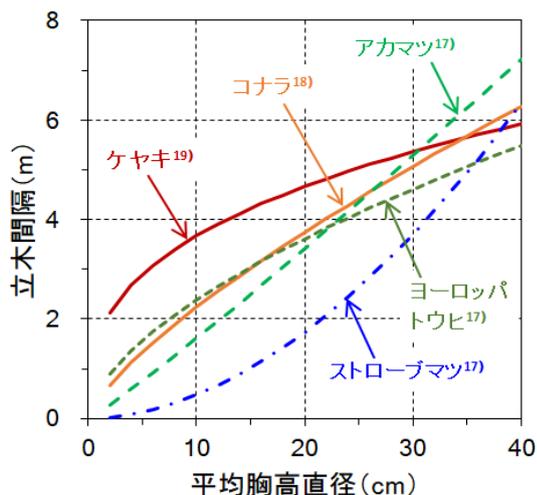


図10 樹種別の胸高直径と立木間隔の平均的な関係の例、落葉広葉樹(コナラ、ケヤキ)と常緑針葉樹(マツ、トウヒ)

¹⁰⁾である。図9のdは、スイスにおける胸高直径8cm以上の樹木の雪崩発生防止に必要な立木間隔¹⁴⁾である。さらに、図9のeとfは、それぞれイタリアの森林内で発生した雪崩55事例の発生箇所と近傍の同標高の非雪崩発生箇所の立木間隔の平均値¹³⁾である。雪崩発生の有無を分ける条件はこの2つの平均値(図9のeとf)の間となる。図9より、全体の傾向として、斜面勾配が大きいくほど雪崩発生防止に必要な立木間隔は小さくなる。また、全層雪崩より表層雪崩の発生防止に必要な立木間隔が小さく、斜面勾配35~45°では、表層雪崩に対して2.0~1.4m以下の立木間隔が必要となる。

図10は、樹種別の平均的な胸高直径と立木間隔の関係を示す例^{17)~19)}である。樹種によってばらつきはあるが、樹木が成長して胸高直径が大きくなると森林としての平均的な立木間隔は大きくなる。特に、樹木が成長して雪崩発生防止機能を有するようになる胸高直径10cm以上になると、樹種によっては、図9で示した表層雪崩の発生防止に必要な立木間隔より大きくなる。よって、広い自然の森林では立木間隔は様々で、立木間隔が雪崩発生防止に必要な間隔より大きい箇所(雪崩発生防止機能を有しない箇所)が当然存在するといえる。つまり、森林内における雪崩はそのような箇所が発生すると考えられる^{14),20)}。

3.1.2 樹種

森林内における雪崩発生には樹種も大きく影響し、常緑針葉樹林に比べて落葉する広葉樹林の雪崩発生防止機能は限定的となり、より小さい立木間隔が必要となる^{11),12),14)}。Schneebeili and Meyer-Grass¹²⁾によるスイス・

アルプスの森林内で発生した雪崩112事例の調査結果では、常緑針葉樹林、落葉針葉樹林、広葉樹林の順に、雪崩発生箇所の立木間隔は小さくなる。常緑針葉樹は、降雪の遮断によって地面の積雪量を低下させるほか、葉の付いた枝が積雪に埋没することで斜面積雪に対するアンカーの役割を果たす^{14),21),22)}。一方、落葉する広葉樹林は、降雪の遮断率が低いために森林内の積雪が多く、またアンカー効果も小さい^{14),22)}。なお、降雪の遮断は、単に葉の有無だけではなく幹からの分枝状態も影響し、常緑針葉樹のスギや落葉針葉樹のカラマツの幹から分枝している1次枝の本数は、広葉樹のミズナラやブナの約2倍であり、これが針葉樹の降雪遮断率が高い要因の一つになっている²³⁾。

図9で示した雪崩発生防止に必要な立木間隔のうち、全層雪崩に対する関係(図9のb)⁹⁾は、東北地方の広葉樹林の現地調査結果に基づくものである。これに対して、雪崩発生地の立木間隔の平均値(図9のe)¹³⁾は、イタリアの常緑針葉樹や落葉針葉樹が支配的な森林における調査結果である。日本とイタリアの気候や積雪の地域性の違いもあると考えられるが、図9において前者⁹⁾より後者¹³⁾が示した立木間隔が大きいのは、森林の雪崩防止機能の樹種の違いによる影響を示していると考えられる。なお、2014年2月の関東甲信地方の大雪時において、山梨県早川周辺の雪崩62例のうち32例が落葉樹林で発生し、常緑樹林での雪崩発生はなかった²⁴⁾。

以上より、森林内における雪崩発生において、落葉する広葉樹林が最も注意を要する樹種といえる。

3.1.3 樹冠密度

雪崩発生に関わる樹木の空間的な密度を表す指標には、樹冠によって地表が覆われている割合を表す樹冠疎密度(以下、樹冠密度)がある^{11),25),26)}。ただし、樹冠密度は樹種による差が大きく、同じ樹冠密度でも樹種によって立木間隔は異なると考えられる。また、降雪を遮断する効果が大きい常緑針葉樹林では、樹冠密度が森林内の雪崩発生に影響すると考えられるが、広葉樹林の場合は、落葉する前に測定した樹冠密度が、雪崩が発生する冬季も同じとは限らない。さらに、針葉樹林内の雪崩発生地と同標高の近傍地の非雪崩発生地の植生を比較したところ、立木間隔には差がみられたが、樹冠密度には明確な差はみられなかったとの報告¹³⁾がある。

以上より、樹冠密度に関しては雪崩発生に関係するかどうか結果が分かっている。よって、雪崩発生に関わる樹木の空間的な密度を表す指標として、樹冠密度より立木密度(間隔)に着目する方がよいと考えられる。特に、落葉す

る広葉樹林の場合、後述するように樹木による降雪遮断がほとんどないため、冬季における樹冠密度は立木間隔などに比べて雪崩発生に対する影響は小さいと考えられる。

3.1.4 地形条件

森林内の雪崩発生に関わる地形条件として重要なのは、一般的な雪崩発生条件と同様に斜面勾配であり、樹種によって雪崩発生の可能性のある斜面勾配は異なる。例えば、Frehner et al.¹⁴⁾によると、常緑針葉樹林であれば勾配 35° 以下の斜面では雪崩発生の可能性は低いが、落葉針葉樹林ではそれより緩い勾配の 30° の斜面でも発生する。また、相浦⁹⁾の富山県における常緑針葉樹林(スギ)と広葉樹林(ブナ)内の積雪移動量の観測結果によると、勾配 35° 以上の斜面で積雪は不安定になる。なお、森林内の雪崩発生と斜面勾配の関係は、通常、立木間隔や樹種、胸高直径などの植生条件と合わせて調べられている(図 9)。

その他の地形要素として、標高や斜面方位と雪崩発生との関係を調査した例¹³⁾や斜面の断面形状について調べた例²⁷⁾はあるが、これらには地域性がみられるため、現時点では標高や斜面方位を森林内の雪崩発生条件に加えることは難しい。また、地面の凹凸も雪崩の発生に影響するが、積雪が存在すると地面の凹凸の影響は小さくなるため、表層雪崩を考える場合はその重要性は低いと考えられる。

3.1.5 植生と地形条件のまとめ

以上、文献レビューの結果、森林内における雪崩(ここでは、乾雪表層雪崩を対象とする)の発生に関わる植生条件として着目すべき要素は、立木間隔(立木密度)、胸高直径、樹種であり、地形条件として着目すべき要素は斜面勾配である。これらの植生と地形の要素と、2.の気象および積雪条件として着目すべき要素の降雪深(量)、気温、風速、積雪(新雪)の強度や硬度のそれぞれの要素が重なって森林内で雪崩が発生すると考えられる。

3.2 雪崩発生箇所の現地調査

3.2.1 雪崩発生箇所の現地調査の概要

2014年2月14~15日の関東甲信地方の大雪に伴う乾雪表層雪崩の発生箇所のうち、建物被害があった山梨県富士河口湖町(北緯 35° 29.3'、東経 138° 36.0'、標高 1048m)、東京都奥多摩町(北緯 35° 49.3'、東経 139° 5.9'、標高 770m)、埼玉県秩父市(北緯 36° 1.1'、東経 138° 48.4'、標高 1075m)の事例²⁸⁾について、雪崩が発生したと考えられる斜面で、植生と地形状況の現地調査を行った。



図 11 雪崩発生箇所の植生状況の例
秩父市、2014年10月30日、斜面勾配は36°

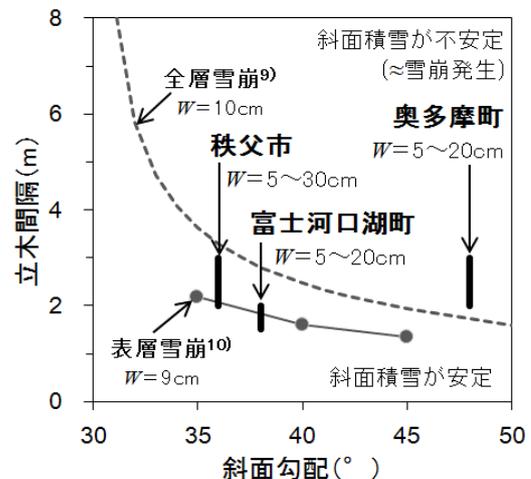


図 12 雪崩発生箇所の立木間隔と斜面勾配、雪崩発生防止に必要な立木間隔と斜面勾配の関係⁹⁾¹⁰⁾、 W は胸高直径

調査は、富士河口湖町は2014年6月17日、奥多摩町は同年6月18日、秩父市は同年10月30日に実施した。

3.2.2 雪崩発生箇所の植生と地形の状況

2014年2月の関東甲信地方の大雪に伴う雪崩が発生した3箇所の現地調査の結果、雪崩が発生したと考えられる箇所の植生は、いずれも樹高が最大15m前後、胸高直径5~30cmの広葉樹林で、立木間隔は1.5~3.0mであった(図11)。

図12では、今回の調査箇所と既往研究による雪崩発生防止に必要な立木間隔と斜面勾配の関係を比較した。秩父市の雪崩発生箇所では、全層雪崩に対しては立木間隔が小さく斜面積雪は安定だが、表層雪崩に対しては立木間隔が大きく斜面積雪は不安定な状態であったと考えられる。奥多摩町の雪崩発生箇所では、全層雪崩に対しても立木間隔が大きく斜面積雪は不安定であったと考えられる。図12の立木間隔と斜面勾配の関係との比較からみた

雪崩発生条件において、これら 2 箇所では、いずれも森林内で表層雪崩が発生する可能性があったと考えられる。一方、富士河口湖町の雪崩発生箇所における斜面勾配と立木間隔の関係は、表層雪崩の発生条件の境界上にある。樹木が密に植生して斜面積雪が安定している箇所があるものの、そのなかで比較的立木間隔が大きい箇所で雪崩が発生したと考えられる。よって、短時間の多量降雪時には森林内でも雪崩が発生する可能性があり、特に 2014 年 2 月の事例では、広葉樹林の中の表層雪崩の発生防止に必要な立木間隔より大きい箇所で、乾雪表層雪崩が発生したと考えられる。

4. 雪崩の衝撃圧算出手法の提示

ここでは、3. の立木間隔や胸高直径に関する調査結果をもとに、雪崩運動モデルに地表粗度や立木密度をパラメータとして与え、雪崩の衝撃圧算出手法を提示した。また、雪崩による建物の被害事例について、上記手法を用いて衝撃圧を試算した。

4.1 対象とする雪崩事例

2014 年 2 月 14 日～15 日の関東甲信地方の大雪により^{1),2)}、明瞭な流下経路を持ち建物に被害を及ぼした雪崩として、南アルプス市 N 地区、甲府市 I 地区、富士河口湖町 Y 地区、奥多摩町 H 地区、秩父市 N 地区を解析対象とする。表 1 は、雪崩発生時刻、地形や植生など

の雪崩流下経路状況と建物の被害状況を示す²⁸⁾。雪崩発生時刻に関しては 2013/2014 年冬季における日本全国の雪崩災害リスト¹⁾や現地での聞き取り調査に基づく。

4.2 雪崩の運動モデルと雪崩衝撃圧

雪崩流下経路の幅は一定と仮定し、1 次元のフェルミーの雪崩運動モデル²⁹⁾を用いて、表 1 の各事例に対して雪崩の流動層厚、速度、衝撃圧を評価する。フェルミーモデルには、流動係数という未定のパラメータが含まれており、通常、計算による雪崩の到達距離や衝撃圧が実際の到達距離や建物の被害状況に整合するように、最適となるパラメータ値の選定が行われる^{24), 28), 30)}。ここでは、雪崩流下経路の地形や植生条件に応じて流動係数の値を設定する。

地理院地図(国土地理院)から 5 地区の地形データを読みとり、概ね標高差 10m 毎の水平距離を地理院地図上で計測し雪崩流下経路を作成する²⁸⁾。図 13 はその縦断面の模式図である。i 番目(i=1,2,3,...)の斜面の水平距離を HL_i とすると、i 番目の斜面の傾斜角は $\theta_i = \tan^{-1}(10/HL_i)$ 、斜面長は $s_i = \sqrt{(HL_i)^2 + 10^2}$ となる。

図 13 の i 番目斜面において、 h_i を雪崩流動層厚、 u_i を雪崩の層厚に関する平均速度、 t を時間とすると、雪崩の運動方程式は

$$\rho_s h_i \frac{du_i}{dt} = \rho_s g h_i (\sin\theta_i - \mu \cos\theta_i)$$

表 1 雪崩流下経路と建物の被害状況²⁸⁾

発生箇所	雪崩発生時刻	雪崩流下経路状況	建物の被害状況
南アルプス市 N 地区	2/15 3時	広葉樹林(高木密)内の沢地で、経路上は植生がほとんど無く、地表は岩等で凹凸が大きい。被災箇所の直上に若干の樹木がある。	木造住宅 1 階窓破損
甲府市 I 地区	不明	崩壊地の沢地形で植生はなく、地表は岩等で凹凸が大きい。樹木はない。	鉄筋コンクリート建造物の窓・ドアのみ破損
富士河口湖町 Y 地区	2/15 6時30分	広葉樹林(高木密)内の沢地で経路上の植生はほとんど無いが、標高 950m 付近で杉林(高木密)が存在する。地表の凹凸は小さい。	簡易な木造バンガロー等 3 棟全壊、1 棟半壊、1 棟一部破損、木造住宅 2 階窓破損
奥多摩町 H 地区	2/15 4時	発生区は広葉樹林(高木密)内の沢地で、走路後半から堆積区にかけては杉林内(高木密)の沢地形で、経路上には植生がない。地表は岩等で凹凸が大きい。被災箇所の直上に若干の樹木がある。	木造住宅 1 階窓破損
秩父市 N 地区	不明	高木密の広葉樹林内の沢地形で、走路にも樹木が多くみられる。地表の凹凸は小さい。	木造倉庫 1 棟全壊

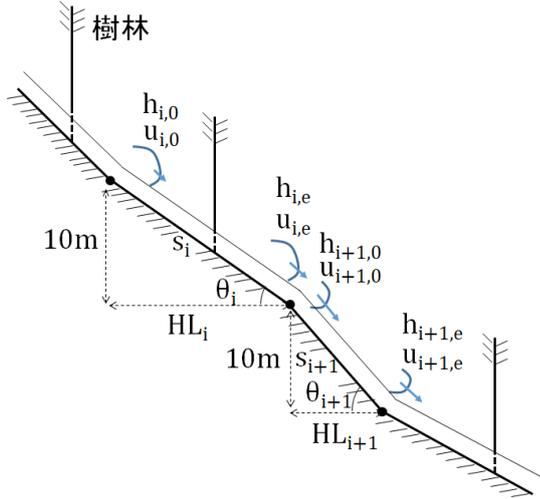


図13 雪崩流下経路縦断面の模式図

$$-\frac{1}{2}c_f\rho_s u_i^2 - \frac{1}{2}c_D\rho_s\lambda_t h_i u_i^2 \quad (1)$$

となる。ここで、 ρ_s は雪崩の密度であり一定と仮定する。また、 g は重力加速度、 μ は雪崩の動摩擦係数、 c_f は乱流摩擦抵抗係数、 c_D は抵抗係数を表し、 λ_t を立木密度と定義する³¹⁾。式(1)の右辺の第1項は斜面に平行に下方へ作用するせん断応力、第2項は垂直応力に比例する雪と雪あるいは雪と地面の間の底面摩擦抵抗(クーロン摩擦抵抗)第3項は乱流摩擦抵抗を表す。胸高直径 d_t の樹木を円柱とし、これが流下方向ならびに横断方向に間隔 s_t 離れて位置するものとする。このときの立木密度は $\lambda_t = d_t/s_t^2$ となる³¹⁾。式(1)の右辺の第4項は、雪崩が樹木の存在により単位面積当たりを受ける抵抗力を表す。なお、抵抗係数 c_D は、樹木の幹が円柱であるとみなし、 $c_D = 2$ を与える²⁸⁾。

式(1)は、 $d/dt = u_i d/ds_i$ に注意すると³²⁾、

$$\frac{du_i^2}{ds_i} = 2g(\sin\theta_i - \mu\cos\theta_i) - \frac{1}{h_i}(c_f + c_D\lambda_t h_i)u_i^2 \quad (2)$$

と変形できる。式(2)の c_f はマンギの粗度係数 n と関係しており、水流の場合、

$$c_f = 2gn^2/h_{i,0}^{1/3} \quad (3)$$

であり、 n は水路の粗度 k_s の関数であることが知られている³³⁾。

$$n = 0.042k_s^{1/6} \quad (4)$$

式(4)を式(3)に代入すると、 c_f は相対粗度 $k_s/h_{i,0}$ に依存し、相対粗度が大きいと乱流摩擦抵抗は増加することを意味する。雪崩についても水流の場合と同様に、 n の値は地表の凹凸、走路の蛇行や植生の状況などに関係すると考えられる³⁴⁾。

i 番目の斜面での雪崩流動層厚の初期値 $h_{i,0}$ 、初速度 $u_{i,0}$

を与え、式(2)を解くと、 i 番目の斜面での雪崩の終端速度 $u_{i,e}$ は

$$u_{i,e} = \sqrt{u_{i,max}^2 - (u_{i,max}^2 - u_{i,0}^2) \exp\left[-\frac{2g}{\xi_i h_{i,0}} s_i\right]} \quad (5)$$

となる。式(5)の ξ_i は

$$\xi_i = \frac{h_{i,0}^{1/3}}{n^2 + c_D\lambda_t h_{i,0}^{4/3}} \quad (6)$$

で定義され、以下流動係数と呼ぶ。 ξ_i は、粗度係数 n 、立木密度 λ_t 、雪崩流動層厚 $h_{i,0}$ に依存する。式(5)の $u_{i,max}$ は式(1)の定常解であり、以下で与えられる。

$$u_{i,max} = \frac{h_{i,0}^{2/3}}{n} \sqrt{\frac{\sin\theta_i - \mu\cos\theta_i}{1 + \frac{c_D\lambda_t}{2gn^2} h_{i,0}^{4/3}}} \quad (7)$$

式(7)は、 n や λ_t が大きいと式(1)右辺の第3項と第4項の雪崩に対する抵抗力が大きくなり雪崩速度が小さくなることを示す。

図13の i 番目斜面の雪崩流動層厚の初期値 $h_{i,0}$ 、初速度 $u_{i,0}$ 、終端での雪崩流動層厚 $h_{i,e}$ 、速度 $u_{i,e}$ とする。 i 番目と $i+1$ 番目の斜面の境界点で斜面長 s_i に比例する雪の取り込みがあり層厚が $\Delta h_{i,e} = \alpha s_i$ (α は取り込み率)だけ増加すると仮定すると、 i 番目の斜面の始端と終端で流量が保存する必要がある

$$h_{i,e}u_{i,e} = h_{i,0}u_{i,0} + \Delta h_{i,e}u_{i,e} \quad (8)$$

を課す。また、境界点では斜面の角度が変化するため、連続の式

$$\frac{h_{i+1,0}}{h_{i,e}} = \frac{u_{i,e}}{u_{i+1,0}} = \left(\frac{\sin\theta_i}{\sin\theta_{i+1}}\right)^{3/10} \quad (9)$$

を課す^{29),35)}。 i 番目斜面での初期値 $h_{i,0}$ 、 $u_{i,0}$ と流動係数 ξ_i を与え、式(5)より $u_{i,e}$ を計算する。 $u_{i,e}$ を式(8)に代入し $h_{i,e}$ を決定する。式(9)に $h_{i,e}$ 、 $u_{i,e}$ を与えると $i+1$ 番目斜面での雪崩流動層厚の初期値 $h_{i+1,0}$ と初速度 $u_{i+1,0}$ が決まり、式(5)より $i+1$ 番目の斜面の終端速度 $u_{i+1,e}$ を計算する。以下 i の番号を増やし同様の計算を繰り返し、雪崩が建物の壁面に衝突する時の斜面の傾斜角を θ_c 、雪崩層厚を h_c 、流動係数を ξ_c 、雪崩速度を u_c とする。壁面に垂直な雪崩速度は $u_c \cos\theta_c$ のため、雪崩衝撃圧 P_c を

$$P_c = \rho_s (u_c \cos\theta_c)^2 \quad (10)$$

より算出する³⁶⁾。

4.3 解析条件

フェルミーモデルを用いて表1の雪崩事例を解析する際に必要な、雪崩発生層厚と初速度、雪崩密度、動摩擦係数、マンギの粗度係数、立木密度、雪の取り込み率の値を以下のように設定する。

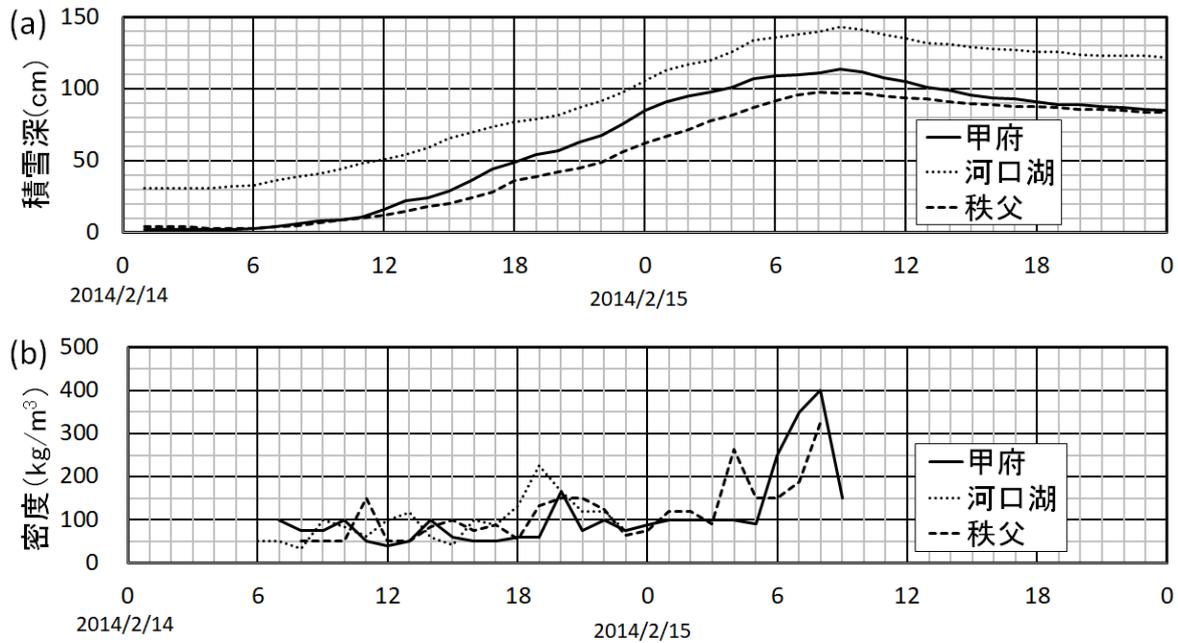


図 14 甲府地方气象台、河口湖、秩父の気象観測所 での、(a)積雪深、(b) 新雪層の密度の時間変化

4. 3. 1 雪崩発生層厚 $h_{1,0}$ と初速度 $u_{1,0}$

図 14(a)は、2014 年 2 月 14 日 1 時から 2 月 15 日 24 時までの甲府地方气象台(標高 273m)、河口湖特別地域気象観測所(標高 860m)、秩父特別地域気象観測所(標高 232m)における積雪深の時間変化を示す。南アルプス市 N 地区での雪崩発生時刻は 2 月 15 日 3 時頃である¹⁾。この地区の近隣の甲府気象観測所では、2 月 8~9 日の南岸低気圧の降雪による 2cm の残雪があった。積雪深は 2 月 14 日 6 時以降に増加し始め、2 月 15 日 3 時頃の積雪深は 98cm である(図 14(a))。したがって、この間の降雪深は 96cm である。富士河口湖町 Y 地区での雪崩発生時刻は現地での聞き取り調査から 2 月 15 日 6 時 30 分頃である。この地区の近隣の河口湖気象観測所では、2 月 8~9 日の南岸低気圧の降雪による 31cm の残雪があった。積雪深は 2 月 15 日 5 時以降に増加し始め、2 月 15 日 6 時 30 分の積雪深は 137cm である(図 14(a))。したがって、この間の降雪深は 106cm である。甲府市 I 地区や秩父市 N 地区での雪崩発生時刻は不明である。また奥多摩町 H 地区の近隣のアメダスにおいて積雪深の測定はなされていない。そのため、他地区との類推からいずれの地区に対しても雪崩発生層厚 $h_{1,0}$ を 1.0m とする。また、雪崩初速度はいずれの事例に対しても $u_{1,0} = 0\text{m/s}$ とする。

4. 3. 2 雪崩密度 ρ_s

いずれの地区も 2 月 14 日の 6 時頃から積雪が増加し始め、2 月 15 日の 9 時頃までの 27 時間(今後降雪時間帯と呼ぶ)の短時間に多量の降雪があった。降雪時間帯において、平均風速は 1~2m/s であり気温は概ね氷点下で推移

していることから風や融解による積雪の密度変化は小さいと考えられる。このとき水の密度 \times 1 時間当たりの降水量(mm) \times 0.1/1 時間当たりの降雪深(cm)の関係から算定した 1 時間当たりの積雪密度の時系列を図 14(b)に示す。降雪時間帯の平均密度はいずれの地区においても 100kg/m^3 程度であるため、この値を式(10)に用いる。

4. 3. 3 動摩擦係数 μ

$u_{i,max} > 0$ であるため、動摩擦係数は $\mu < \tan\theta_i$ を満たす必要がある。Buser らは、新雪表層雪崩の動摩擦係数 μ として 0.16 の小さい値を提案している³⁷⁾。また坊城は、1980 年以前の雪崩事例に関する文献を調査した結果、 μ の値は 0~0.5 の間で出現し、とくに 0.14~0.33 の間に集中し、最頻値は 0.16 であることを報告している³⁴⁾。そのためここでは μ の値として 0.16 を用いる。これは $\tan^{-1}(0.16)$ より底面摩擦角が 9° に相当するため、 $\theta_i > 9^\circ$ である必要がある。

4. 3. 4 マニングの粗度係数 n

マニングの粗度係数 n とマニング係数 M には、 $n = 1/M$ の関係がある³³⁾。坊城は、雪質によって雪崩を、A グループ(雪煙を伴う雪崩)、B グループ(軟らかい雪の面発生雪崩)、C グループ(硬い雪または湿雪の面発生雪崩)に分類し、マニング係数 M との関係を示している³⁴⁾。対象とする雪崩は、いずれの地区において乾雪表層雪崩であったことが報告されている¹⁾。ここでは、B グループのマニング係数 M の平均値 $33\text{m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ から、粗度係数 n を 0.03 とした。この値を、植生がなく凹凸の小さい地表が雪で覆われ、その上を流下する乾雪表層雪崩に対する粗度係数 n の基

表2 粗度係数 n と立木密度 λ_t の値の設定、南アルプス市N地区、甲府市I地区、富士河口湖町Y地区、奥多摩町H地区、秩父市N地区

発生箇所	粗度係数 n	立木密度 λ_t
	植生なし 地表の凹凸大きい $n = 0.03 + 0.042$	一部樹木あり $\lambda_t = 3.3 \times 10^{-2}$
	植生なし 地表の凹凸大きい $n = 0.03 + 0.042$	樹木なし $\lambda_t = 0$
	植生なし 地表の凹凸小さい $n = 0.03$	一部樹木あり $\lambda_t = 7.5 \times 10^{-2}$
	植生なし 地表の凹凸大きい $n = 0.03 + 0.042$	一部樹木あり $\lambda_t = 3.3 \times 10^{-2}$
	植生なし 地表の凹凸小さい $n = 0.03$	樹木あり $\lambda_t = 3.3 \times 10^{-2}$

準値とする。表2は、各地区に対する粗度係数 n の設定値を示す。南アルプス市N地区、甲府市I地区、奥多摩町H地区では、雪崩流下経路に植生はないが岩等による地表の凹凸があるため、その粗度を $k_s = 1\text{m}$ とすると、式(4)より $n = 0.042$ となる。基準値 $n = 0.03$ に地表の凹凸の効果を検討した $n = 0.042$ を加算すると、全体の粗度係数の値は $n = 0.072$ となる(表2)。

4.3.5 立木密度 λ_t

南アルプス市N地区では、被災箇所直上に一部、富士河口湖町Y地区では標高950m付近に一部、奥多摩町H地区では雪崩流下経路後半から堆積区にかけて、秩父市N地区では、雪崩流下経路すべてに胸高直径(20~40cm)の樹木が存在する²⁸⁾。ここでは、樹木の胸高直径 d_t として最小の0.2mを用いる。また、3.の図12から、立木間隔 s_t として、富士河口湖町Y地区では最大の2m、奥多摩町H地区と秩父市N地区では最大の3m、南アルプス市N地区は不明のため3mを用いる。これらの値を用いた立木密度 $\lambda_t = d_t/s_t^2$ を表2に示す。

4.3.6 雪の取り込み率 α

雪の取り込み率に関しては、不明な点が多いため文献^{24), 28), 38)}にしたがう。雪崩の流動層厚は100m流下することに0.25m増加すると仮定すると、式(8)の $\Delta h_{i,e}$ の雪の取り込み率 α の値は 2.5×10^{-3} となる。

表3 雪崩発生層厚 $h_{1,0} = 1.0\text{m}$ に対する、衝突時の斜面の傾斜角、雪崩層厚、流動係数、雪崩速度、雪崩衝撃圧、南アルプス市N地区、甲府市I地区、富士河口湖町Y地区、奥多摩町H地区、秩父市N地区

発生箇所	傾斜角 θ_c (°)	雪崩層厚 h_c (m)	流動係数 ξ_c (m/s ²)	雪崩速度 u_c (m/s)	雪崩衝撃圧 P_c (kPa)
	38.4	1.7	128	9.9	6.0
	12.4	3.0	239	5.9	3.3
	14.8	1.5	1259	15.4	22.2
	48.8	1.9	113	11.7	6.0
	41.0	1.6	213	13.3	10.1

4.4 結果と考察

表3は、雪崩発生層厚 $h_{1,0} = 1.0\text{m}$ のときの衝突時の斜面の傾斜角 θ_c 、雪崩層厚 h_c 、流動係数 ξ_c 、雪崩速度 u_c 、衝撃圧 P_c を示す。また図15は、表1の各雪崩事例に対する雪崩発生点(推定)と被災箇所の標高、その2地点間の地形の縦断面であり²⁸⁾、樹林が存在する位置を模式的に示す。また、発生点から被災箇所までの雪崩層厚と雪崩速度の変化を水平距離に対して示す。雪崩の衝撃圧から想定される破壊効果の目安として、衝撃圧が1kPaで窓を破壊、5kPaでドアを破壊、30kPaで木造の建造物を破壊することが知られている³⁹⁾。

甲府市I地区では、雪崩流下経路に植生や樹木はないが(図15(b))、岩等による凹凸があるため粗度係数 n の値を0.072に設定した。衝突時の流動係数 ξ_c の値は約240m/s²であり、雪崩衝撃圧は約3kPaである(表3)。南アルプス市N地区と奥多摩町H地区での粗度係数の値は、甲府市I地区と同じであるが、被災箇所の直上(図15(a))や雪崩流下経路後半から堆積区にかけて樹木が存在するため(図15(d))、樹林が存在する斜面では立木密度 λ_t の値を 3.3×10^{-2} (表2)、樹林の存在しない斜面では $\lambda_t = 0$ とした。樹林の効果により衝突時の流動係数 ξ_c の値は甲府地区I地区に比べ半分程度になるが、雪崩衝撃圧は倍の6kPaとなった。これは、南アルプス市N地区と奥多摩町H地区の方が甲府地区I地区に比べ衝突直前の斜面の傾斜角が3~4倍大きく、式(7)より雪崩速度の傾斜角に対する効果が現れたためである(表3)。これらの3地区では、建物の窓ガラスやドアが破壊する被害が報告されているが(表1)、計算による衝

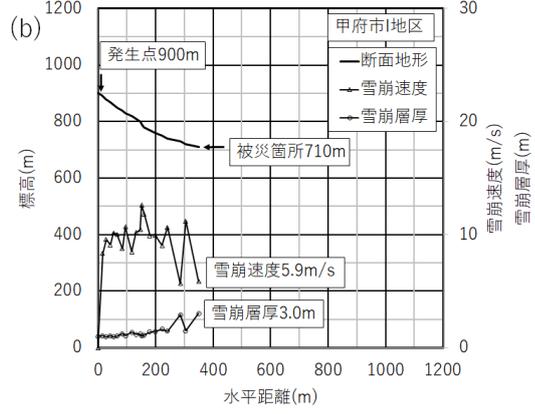
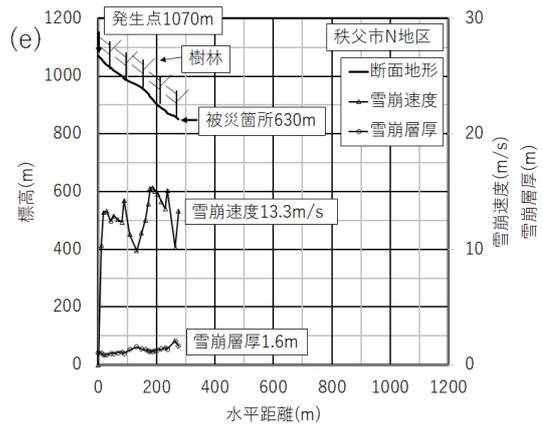
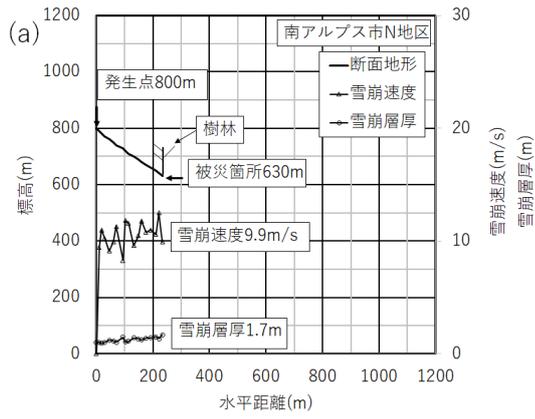
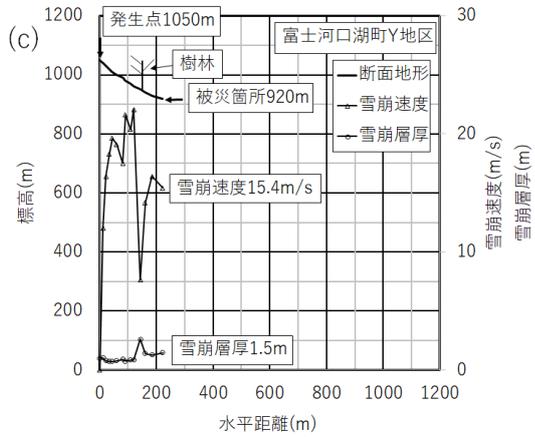
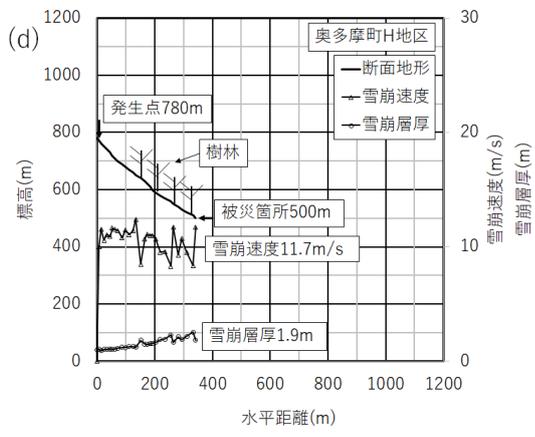


図 15 5 地区の雪崩事例に対する雪崩発生点（推定）と被災箇所の位置、地形縦断面（樹林位置は模式的）および水平距離に対する雪崩層厚と雪崩速度の変化

撃圧は、窓ガラスやドアが破壊する目安としての 1~5 kPa に近い。



富士河口湖町 Y 地区では、雪崩流下経路に植生はなく地表の凹凸が小さいため粗度係数 n の値を 0.03、標高 950m 付近に一部樹林が存在するため、樹林が存在する斜面では立木密度 λ_t の値を 7.5×10^{-2} （表 2）、樹林の存在しない斜面では $\lambda_t = 0$ とした。樹林帯を通過する前の雪崩速度は約 20m/s であり通過直後は約 7m/s に減少する。その後、流下とともに雪崩速度は約 15m/s に増加し（図 15(c)）、衝突時の流動係数 ξ_c の値は 1259m²/s²、雪崩衝撃圧は約 22kPa であり、南アルプス市 N 地区、甲府市 I 地区、奥多摩町 H 地区に比べると大きい（表 3）。富士河口湖町 Y 地区では、簡易な木造バンガローや木造住宅 2 階の窓が破壊される被害が報告されているが（表 1）、計算による衝撃圧は、木造の建造物を破壊する目安としての 30kPa に比べると小さい。



秩父市 N 地区では、雪崩流下経路に植生はなく地表の凹凸が小さいため粗度係数 n の値を 0.03、発生区から堆積区までの樹林帯をすり抜ける雪崩を想定し（図 15(e)）、立木密度 λ_t の値を 3.3×10^{-3} に設定した（表 2）。衝突時の流動係数 ξ_c の値は 213m²/s²、雪崩衝撃圧は約 10kPa である（表 3）。秩父市 N 地区では、木造倉庫が破壊される被害が報告されているが（表 1）、計算による衝撃圧は、木造の建造物を破壊する目安としての 30kPa に比べると小さい。

南アルプス市 N 地区、富士河口湖町 Y 地区、奥多摩町 H 地区、秩父市 N 地区の雪崩流下経路の地表の凹凸の有無は考慮するが仮に樹林がないとして雪崩衝撃

圧を計算すると、表3の は6.0から9.2kPa、 は22.2から27kPa、 は6.0から9.4kPa、 は10.1から55.2kPaへ増加する。このように雪崩流下の一部の経路あるいは全経路に樹林が存在することによって雪崩による衝撃圧は緩和されることがわかる。

斜面の傾斜角が変化する境界点では式(9)の条件を課しているため、雪崩速度が増加すると層厚は減少する。衝突直前の傾斜角の変化が最も大きい 甲府市I地区では、衝突時の雪崩速度が急激に減少しているため(図15(b))、与えた雪崩発生層厚1mに対して衝突時の雪崩層厚は3.0mに増加する(表3)。したがって、雪面の地面からの高さは、地面からの積雪深1mを加算すると4.0mになる。衝突直前の斜面の傾斜角の変化の小さい他の4地区においては、雪崩層厚は2mに達しない(表3)。富士河口湖町Y地区では、雪崩発生時の地面からの積雪深1.4mを加算すると雪面は2.9m程度になる。富士河口湖町Y地区では建物の2階の窓が破損している(表1)。この建物は傾斜地に建造されていて2階の窓の高さは地面から3mであることから²⁸⁾、計算結果は現地調査結果と整合する。しかし、雪崩層厚は雪崩流下経路の斜面の傾斜角だけでなくフェルミーモデルでは考慮していない流下経路の幅によっても変化するため⁴⁰⁾、これらの効果による雪崩層厚変化と雪の取り込みによる雪崩層厚変化との違いには注意する必要があり、今後の課題である。

5. まとめ

本研究では、短時間多量降雪時の雪崩の実態を解明するために、1) 雪崩発生時の気象条件と積雪状態、2) 森林における雪崩発生の植生と地形条件、3) 雪崩による建物への衝撃圧算定手法について報告し、以下の結果が得られた。

- 1) 2018年1月22日～23日に本州南岸に接近した低気圧に伴い乗鞍高原にて短時間多量降雪をもたらした事例を対象に、雪崩発生時の気象条件と積雪状態を調査した。低気圧前面の降雪による9時間の低気圧性降雪期間において、平均気温は-5.5で風は静穏、積雪深増加は45cm、時間降雪深6cm/h以上が3時間継続した。低気圧性降雪期間の降雪粒子には、雲粒付着の少ない樹枝状や角板、広幅六花系の結晶が多く見られ、積雪層の密度変化は50～60kg/m³、硬度変化は0.5～2kPaと小さかった。低気圧通過後は冬型の気圧配置になり、雲粒付着の多い降雪粒子が観測された。平地の積雪層と樹林帯斜面上の積雪層のほぼ同じ位置に弱層を2つ確認し、斜面積雪では雪面に近い方の弱層の破壊による

と思われる雪崩を観測した。これらの弱層は短時間多量降雪時に形成され、気象データから形成時の弱層は上下の積雪層に比べ密度が相対的に小さい位置にあることが示唆された。したがって、低気圧性降雪期間における短時間多量降雪時の雪崩発生では、積雪新雪層の密度や降雪結晶の種類に注意する必要がある。

- 2) 森林内の乾雪雪崩発生の気象および積雪条件として着目すべき要素は、降雪深(量)、気温、風速、積雪(新雪)の強度や硬度である。植生条件としては、立木間隔(立木密度)、胸高直径、樹種、地形条件としては斜面勾配が重要な要素である。また、既往文献に基づく森林内の雪崩発生機構の考察と、2014年2月中旬の関東甲信地方の大雪に伴う雪崩発生箇所の現地調査結果から、雪崩は既往の雪崩発生防止に必要な立木間隔と斜面勾配の関係の境界より立木間隔の広い箇所が発生したことを示した。
 - 3) 2014年2月中旬に関東甲信の5地区で発生した乾雪表層雪崩に対して、フェルミーの雪崩運動モデルを適用し算出した建物の壁面に対する雪崩衝撃圧と実際の被害状況とを比較した。フェルミーモデルに含まれる流動係数という未定のパラメータをマニングの粗度係数と立木密度で定式化し、5地区の雪崩流下経路の地形状況や植生に応じて粗度係数や立木密度の値を設定し衝撃圧を算定した。短時間多量降雪時に発生した雪崩の密度としては気象データから推定した一定の値100kg/m³を用いたが、衝撃圧は雪崩流下経路の地形や植生条件により大きく変化することが明らかになった。地表粗度が大きく樹林のある雪崩流下経路では雪崩衝撃圧は軽減されることを定量的に示した。
- 今後、これまでに得られた雪崩発生評価手法について、既存の気象観測データ等を用いて短時間多量降雪による雪崩の発生頻度を明らかにしていきたい。また、雪崩衝撃圧算出手法で得られた流動係数をもとに到達範囲を考慮のうえ、上記を組み合わせた短時間多量降雪による雪崩の危険度評価手法を検討することを予定している。

参考文献

- 1) 和泉薫ら：2014年2月中旬の大雪による雪崩災害の発生状況と特徴、平成25-26年度科学研究費助成事業(課題番号25900003)研究成果報告書、pp.111-118、2014
- 2) 石坂雅昭ら：2014年2月の南岸低気圧時の新潟県下における降雪粒子の特徴 - 関東甲信地方の雪崩の多発に関連して -、雪氷、77、pp.285-302、2015
- 3) 遠藤八十一：積雪の破壊、基礎雪氷学講座3、雪崩と吹雪、

- 東京、古今書院、pp.42-51、2000
- 4) 松下拓樹ら：南岸低気圧による降雪結晶弱層の密度と硬度の時間変化、寒地技術論文・報告集、32、pp.120-125、2016
 - 5) 高橋渉ら：短時間多量降雪時の雪崩発生に関わる積雪密度の時間変化に関する現地観測、寒地土木研究所月報、770、pp.24-30、2017
 - 6) 堀和彦ら：模擬森林による積雪の移動量および雪荷重の測定、日本雪工学会論文集、33、pp.1-11、2017
 - 7) Höller, P.: Snow gliding on a south-facing slope covered with larch trees, Ann. forest science, 71, pp.81-89, 2014
 - 8) 相浦英春：斜面積雪の安定に必要な立木密度、日本森林学会誌、87、pp.73-79、2005
 - 9) 石川政幸ら：なだれ防止林の立木密度、雪氷、31、pp.14-18、1969
 - 10) 遠藤八十一ら：表層雪崩の発生防止に必要な立木密度、日本雪氷学会秋季大会講演予稿集、126、1989
 - 11) Schneebeili, M., and P. Bebi: Snow and avalanche control, Hydrology, Encyclopedia of Forest Sciences, Elsevier, pp.397-402, 2004
 - 12) Schneebeili, M., and M. Meyer-Grass: Avalanche starting zones below the timber line structure of forest, Proc. Int. Snow Sci. Workshop (ISSW), pp.176-181, 1992
 - 13) Viglietti, D., et al.: Snow avalanche release in forest ecosystems: A case study in the Aosta Valley Region (NW-Italy), Cold Reg. Sci. Technol., 64, pp.167-173, 2010
 - 14) Frehner, M., et al.: Avalanches. Sustainability and success monitoring in protection forests, The Federal Office for the Environment (FOEN), Bern, Appendix 1, pp.2-7, 2007
 - 15) 佐伯正夫ら：若齢広葉樹林の雪崩防止効果、雪氷、41、pp.37-47、1979
 - 16) 杉山利治、佐伯正夫：植生のなだれ防止機能に関する研究、防災科学技術総合研究報告、3、pp.29-41、1965
 - 17) 佐藤大七郎：林分の立木密度と平均直径との関係についての REINEKE'S の式について、日本林学会誌、44、pp.343-349、1962
 - 18) 柳谷新一ら：東北地方におけるシイタケ原木林の本数管理と原木生産量、林業試験場東北支場年報、7、pp.111-122、1966
 - 19) 西山嘉寛：広葉樹林管理技術に関する研究 - 伐採地に植栽された広葉樹の成長 -、岡山県農林水産総合センター森林研究所所報、27、pp.83-90、2011
 - 20) In der Grand, H., 新田隆三訳：ヨーロッパの山岳林に関する雪崩学の成果、雪氷、44、pp.105-110、1982
 - 21) 新田隆三：森林の雪崩防止機能、雪氷、53、pp.217-224、1991
 - 22) Tremper, B.: Staying alive in avalanche terrain, The Mountaineers Books, Seattle, 318pp, 2008
 - 23) 工藤哲也ら：植生要素と雪崩発生度の解明に関する研究、豪雪地帯における雪害対策技術の開発に関する研究、科学技術庁研究開発局、pp.88-98、1988
 - 24) 秋山一弥ら：2014年2月の大雪によって山梨県早川周辺で発生した雪崩の到達距離と地形の関係、雪氷、78、pp.439-457、2016
 - 25) 建設省北陸技術事務所：なだれ防災対策調査報告書、建設省北陸技術事務所、新潟、94pp、1989
 - 26) Bebi, P., et al.: Snow avalanche disturbances in forest ecosystems - State of research and implications for management, Forest Ecology and Management, 257, pp.1883-1892, 2009
 - 27) McClung, D. M.: Characteristics of terrain, snow supply and forest cover for avalanche initiation caused by logging, Ann. Glaciol., 32, pp.223-229, 2001
 - 28) 池田慎二ら：2014年2月の関東甲信大雪時に発生した雪崩の運動の特徴、寒地技術論文・報告集、31、pp.70-73、2015
 - 29) Voellmy, A.: Über die Zerstörungskraft von Lawinen. Schweizerische Bauzeitung, Sonderruck, 73, 1955 (English translation: On the destructive force of avalanches. U.S. Dept. of Agriculture. Forest Service, Alta Avalanche Study Center Translation No.2, 1964)
 - 30) 前野紀一：雪崩運動の理論、基礎雪氷学講座3、雪崩と吹雪、東京、古今書院、pp.94-107、2000
 - 31) 関根正人：移動床流れの水理学、共立出版、p.192、2012
 - 32) 小川紀一郎：表層雪崩の発生と流下に関する考察、新砂防、43巻1号、pp.23-29、1990
 - 33) 池田俊介：詳述水理学、技報堂出版、p.270、2004
 - 34) 坊城智弘：フェルミの雪崩運動モデルにおける抵抗パラメータに関する一考察、雪氷、51、pp.170-177、1989
 - 35) (社)日本建設機械化協会編：新編防雪工学ハンドブック、p.90、2010
 - 36) 清水弘：なだれ、気象研究ノート、日本気象学会、136、pp.63-123、1979
 - 37) Buser, E and H. Frutiger: Observed maximum run-out distance of snow avalanches and the determination of

the friction coefficients μ and ν , Journal of glaciology, 26, 94, pp.121-130, 1980

- 38) 建設省河川局砂防部監修・社団法人雪センター編:集団雪崩対策工事技術指針(案) p.31、1996
- 39) McClung, D.M. and Schaerer, P.A: The avalanche Handbook (3rd edition). Seattle, WA, The Mountaineers, p.342, 2006
- 40) 田中頼博ら:連続体モデルとVoellmyモデルによる雪崩解析結果の比較、寒地技術論文・報告集、28、pp.58-61、2012

5.2 広域に適用できる道路の視程障害予測技術の開発

5.2.1 広域的な吹雪視程障害予測技術の開発に関する研究

担当チーム：寒地道路研究グループ（雪氷チーム）

研究担当者：松澤勝、西村敦史、松下拓樹、國分徹哉、
武知洋太、大宮哲

【要旨】

近年、急激に発達した低気圧の影響により、北海道に限らず本州などの吹雪の発生頻度が低かった地域でも、吹雪による交通障害が発生するようになってきている。これまで、防雪林等のハード対策によって吹雪災害の軽減に効果を上げているが、多くの時間と費用が必要となる。そこで本研究では、北海道に加え全国の積雪寒冷地で適用可能な吹雪視程予測技術を開発し、吹雪時に道路管理者や道路利用者の行動判断を支援することで、吹雪災害の被害軽減に資することを目的としている。

平成 29 年度は、降水種別の雨雪と気温及び相対湿度との関係について、平成 28 年度のデータを加えて分析を行い、そこで作成したアルゴリズムをインターネットサイト「吹雪の視界情報」に実装した。また、降雪時の視程調査に関する既往文献を収集するとともに、降雪時における視程調査を実施した。

キーワード：吹雪、視程障害、予測、情報提供

1. はじめに

我が国の積雪寒冷地の道路では、冬期に吹雪視界不良による交通障害がしばしば発生するなど、厳しい走行環境にある。そこで、防雪施設（防雪柵、防雪林など）などのハード対策の整備が進められており、被害の軽減に効果を上げてきている。しかし、近年急激に発達した低気圧の影響により、北海道に限らずこれまで吹雪の発生頻度が比較的lowかった本州でも、吹雪災害が発生するようになってきた。従来のハード対策の整備には、多くの費用と時間が必要となる他、極端な暴風雪への対応には限界がある。早急かつ効果的な吹雪災害の被害軽減には、従来のハード対策に加えて、吹雪視程の現況及び予測情報を提供するなどのソフト対策を行うことが必要である。

そこで本研究では、北海道に加え全国の積雪寒冷地で適用可能な吹雪視程予測技術を開発し、この技術を用いた吹雪視程情報提供システムにより、吹雪時の道路利用者や道路管理者の判断を支援することで、多様化・複雑化する雪氷災害の被害軽減に資することを目的とする。

2. 研究概要と成果

2.1 多様な気象環境下における吹雪発生条件の解明

吹雪時における視程予測技術¹⁾では、降雪の有無や雨雪の判別、地吹雪発生の有無などの前提条件を正確に予測することが重要である。前中長期目標期間（以下、前

中期）に当研究所が開発した「吹雪視程障害予測技術」

²⁾では、北海道の道央や道北の日本海側やオホーツク海側で調査した地吹雪の発生状況を基に設定した地吹雪発生条件³⁾⁴⁾を適用している。また、降水の雨雪判別には気温のみ²⁾⁴⁾を用いている。

このため、東北地方など、より広域な積雪寒冷地に、既往研究による地吹雪発生条件などの予測技術をそのまま適用していくことは不十分と考えられる。

そこで、平成 28 年度より、降水種別の雨雪と気温及び相対湿度との関係について分析を行うとともに、青森県で地吹雪の発生状況などについて調査を開始した。

2.1.1 雨雪判別条件に関する分析

平成 28 年度は、北海道及び青森県内にある図 1 に示した 9 箇所の気象台・測候所において観測された 1 時間毎の気象データを基に、雨雪判別条件について分析を行った。9 箇所の内訳は、「札幌」、「旭川」、「網走」、「帯広」、「釧路」、「函館」、「室蘭」、「稚内」、「青森」である。

分析対象とした期間は平成 26 年 11 月 1 日～平成 27 年 3 月 31 日、平成 27 年 11 月 1 日～平成 28 年 3 月 31 日の 2 冬期間とし、降水種別、気温、相対湿度のデータを用い分析を行った。なお、降水種別の観測結果は、「雪」、「雨」、「みぞれ」を対象とした。

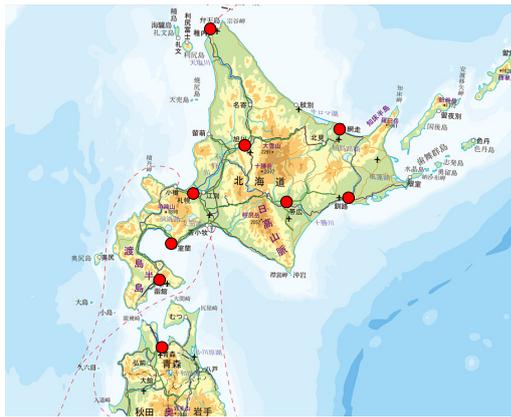


図 1 分析対象箇所
(国土地理院 国土地理院地図に加筆)

雨雪の分類について気象学上「みぞれ」は雪に分類される。しかし、吹雪発生の判別や吹雪による視程障害の予測に活用することを考慮すると、「みぞれ」は雪に分類しないほうが良いと考えられる。そこで、本研究では雨雪判別の際に、降水種別の観測結果の「雪」を雪とし、「雨」及び「みぞれ」を雨とし2つに分類することとした。

図 2 は、各観測箇所の「雪」、「みぞれ」、「雨」と観測された事例の割合である。このグラフより、太平洋側に近い「釧路」、「帯広」、「室蘭」や緯度が低く南に位置する「函館」や「青森」で「雨」又は「みぞれ」の出現割合が概ね 3 割以上と高くなる傾向が確認された。

図 3 は、「雪」と「雨」又は「みぞれ」と観測された事例それぞれについての気温の中央値と第 1 四分位数と第 3 四分位数を示した箱ひげ図である。また、図 4 は、同様に相対湿度との関係について箱ひげ図で示したものである。

図 3 より、気温については「雪」と「雨」又は「みぞれ」と観測された事例では「雪」の事例の方が気温は低い傾向がみられた。なお、「雪」と観測された事例の中央値が -2.1°C で、事例の半数は $-4.5 \sim -0.3^{\circ}\text{C}$ に集中していた。

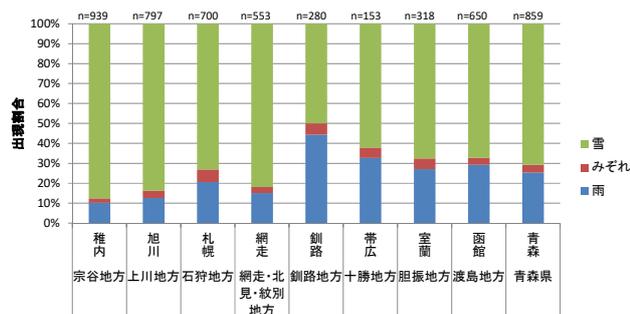


図 2 雪・みぞれ・雨の出現割合

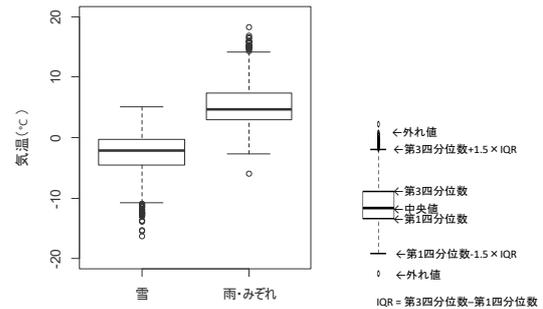


図 3 雨雪と気温との関係

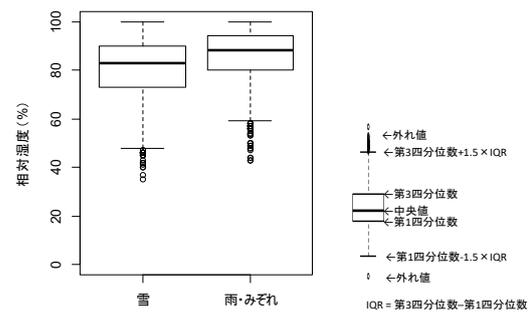


図 4 雨雪と相対湿度との関係

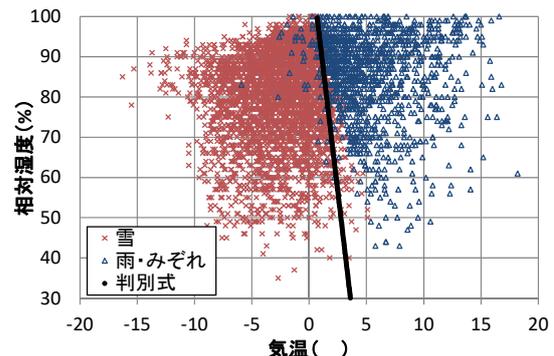


図 5 気温と相対湿度による雨雪判別条件

一方、図 4 より「雪」と「雨」又は「みぞれ」と観測された事例で相対湿度を比較すると、「雪」と観測された事例の方が低い傾向がみられたが、気温ほど明確な差は確認出来なかった。

この結果から、雨雪の発生に及ぼしている影響は、相対湿度に比べると気温の方が大きいと考えられる。

次に、図 5 は「雪」と「雨」又は「みぞれ」と観測された事例それぞれの気温と相対湿度の関係を散布図で示した結果である。また、これらのデータを用い「雪」と「雨」又は「みぞれ」を区分する判別分析を実施した結果、以下の式(1) (以下、「H28 条件」という)を得た。そこで、グラフには併せてこの判別式を実線で記した。

$$N = -0.313 \times T - 0.013 \times \varphi + 1.5246 \quad \dots (1)$$

ただし、 T : 気温 (°C)
 φ : 相対湿度 (%)
 N : 雨雪判別得点
 $N \geq 0$ の場合は「雪」
 $N < 0$ の場合は「雨」又は「みぞれ」

次に、この判別式の判別精度の検証を行った。この結果に表 1 に示すとおりである。表 1 より、雨雪の判別式は適中率が 95%と高い精度が得られた。

表 1 判別式による「雪」と「雨」の判別結果

		観測	
		雪	雨・みぞれ
判別式	雪	71% (3749事例)	1% (56事例)
	雨・みぞれ	4% (200事例)	24% (1244事例)

- : 雨雪判別の適中
- : 「雪」の空振り
- : 「雪」の見逃し

2.1.2 雨雪判別条件に関する検討

平成 29 年度は、図 1 の北海道にある 8 箇所の気象台・測候所において、平成 28 年度に分析に利用した降水種別、気温、相対湿度のデータに、平成 28 年 11 月 1 日～平成 29 年 3 月 31 日までのデータを加え 3 冬期分とし、最適な雨雪判別条件の検討を行った。また、降水種別の観測結果は、平成 28 年度同様に「雪」、「雨」、「みぞれ」を対象として、降水種別の観測結果の「雪」を雪とし、「雨」及び「みぞれ」を雨とし 2 つに分類して解析を実施した。

雨雪の判別条件については、以下の 5 つの条件で検討を行った。

- H28 条件
- 気象庁の平成 21 年度数値予報研修テキスト⁶⁾に記載されている「雪」と「雪か雨」境界(以下、「危険側条件」という)
- 気象庁の平成 21 年度数値予報研修テキスト⁶⁾に記載されている「雪か雨」と「雨か雪」の境界(以下、「中間条件」という)
- 気象庁の平成 21 年度数値予報研修テキスト⁶⁾に記載されている「雨か雪」と「雨」の境界(以下、「安全側条件」という)
- H28 条件と危険側条件を組み合わせた条件(以下、「組み合わせ条件」という)

図 6 に、降水種(「雪」と「雪か雨」または「みぞれ」)

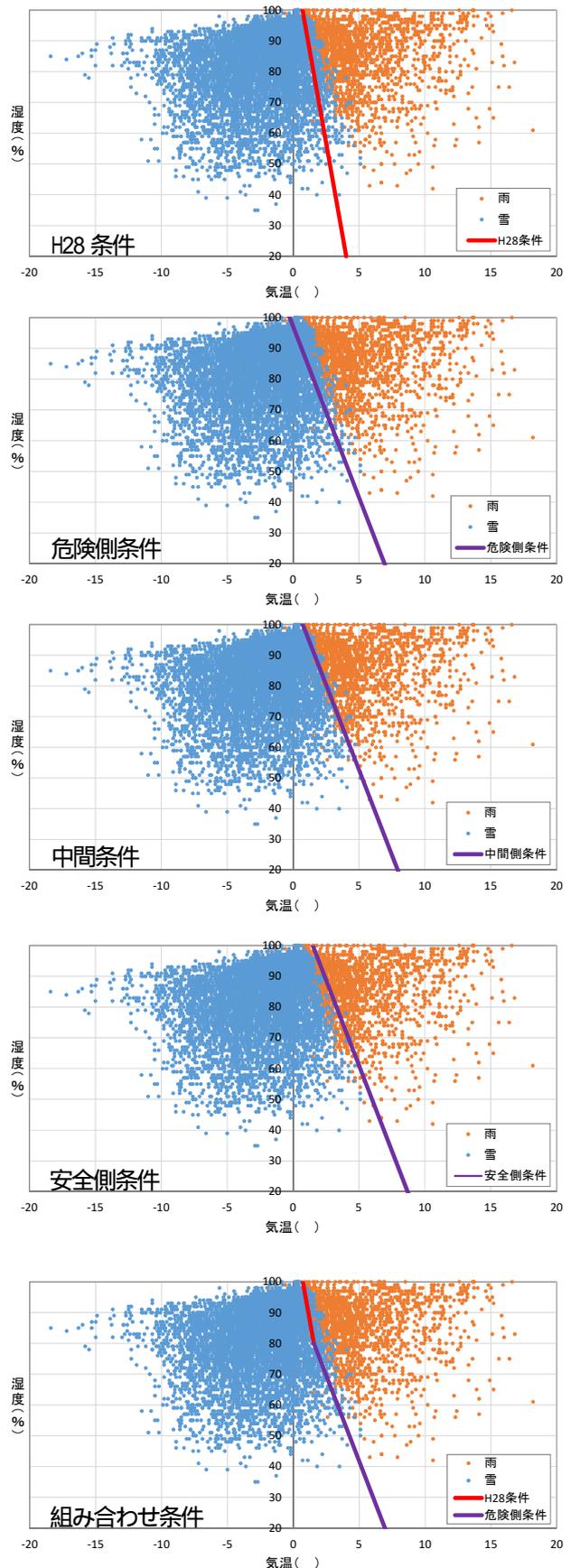


図 6 気温と相対湿度による雨雪判別条件(条件別)

と気温と相対湿度の関係を散布図とした上で、5つの雨雪判別条件による境界をそれぞれで示す。

次に、これら判別式の判別精度の検証を行った。適中精度は表2のとおり整理し、「見逃し率」、「適中率」、「空振り率」を求めた。

表 2 判別式による適中率

		観 測	
		雪	雨・みぞれ
判別結果	雪	n_{11}	n_{12}
	雨・みぞれ	n_{21}	n_{22}

全データ数 = n

空振り率 = $(n_{21}) / n$

適中率 = $(n_{11} + n_{22}) / n$

見逃し率 = $(n_{12}) / n$

検証結果を図7に示す。図によると、中間条件が最も適中率が高く、96.6%であり、さらに見逃し率が0.5%と低くなることがわかった。

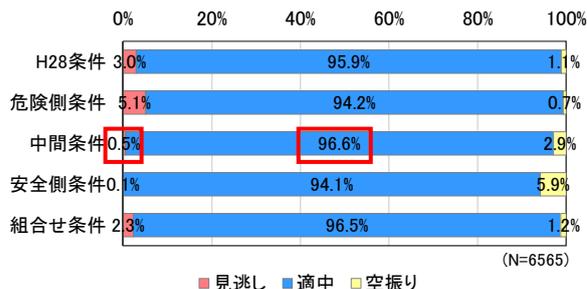


図 7 判別条件毎の適中率

そこで、前中期で作成した「吹雪の視界情報」アルゴリズム²⁾(以下、旧アルゴリズムという)に中間条件の判別式(2)を雨雪判別条件として組み込むこととした(以下、新アルゴリズムという)(図8)。

$$N = \varphi + (100 - \varphi) \times (T - 9.75) \times -1 \dots (2)$$

ただし、 T : 気温 (°C)

φ : 相対湿度 (%)

N : 雨雪判別得点

$N \geq 0$ の場合は「雪」

$N < 0$ の場合は「雨」又は「みぞれ」

- P : 降水量(mm)
- φ : 相対湿度(%)
- T : 気温(°C)
- U : 風速(m/s)
- t : 降雪終了からの経過時間(h)
- T_{max} : 降雪終了後の最高気温
- H : 積雪深(cm)
- SF : 降雪終了までの降雪量(cm)
- t : 降雪(水)終了から現在までの経過時(h)
- U_{sum} : 降雪終了後の毎時風速の4乗積算/1000

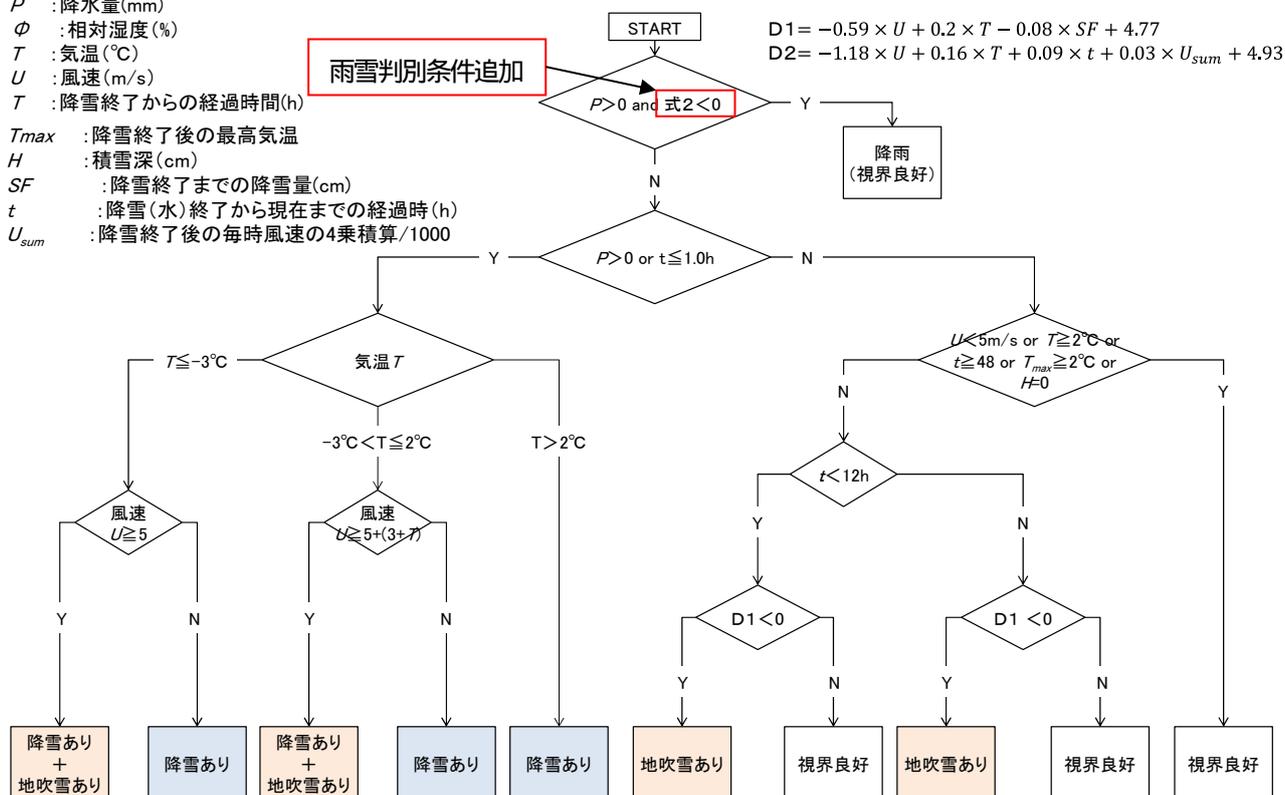


図 8 平成 29 年度「吹雪の視界情報」アルゴリズム

2.1.3 地吹雪発生状況に関する調査

北海道外での地吹雪発生条件を検証するため、青森県五所川原市内の風上側が開けた箇所(図 9、図 10)で、地吹雪の発生状況について調査を開始した。

調査では、タイムラプスカメラ(BCC100)、風向風速計(KDC-S04)、温湿度計(HMP35D)、積雪深計(KADEC21-SNOW-C)、日射量計(MS-402)、視程計(MiniBSV)と地吹雪や降雪を判別しやすくするための黒板を図 10のとおり設置し、平成 28 年 12 月 1 日～平成 29 年 3 月 14 日、平成 29 年 11 月 22～平成 30 年 3 月 31 日の期間に観測を行った。ただし、積雪深、日射量及び視程は平成 29 年 12 月より観測を行った。

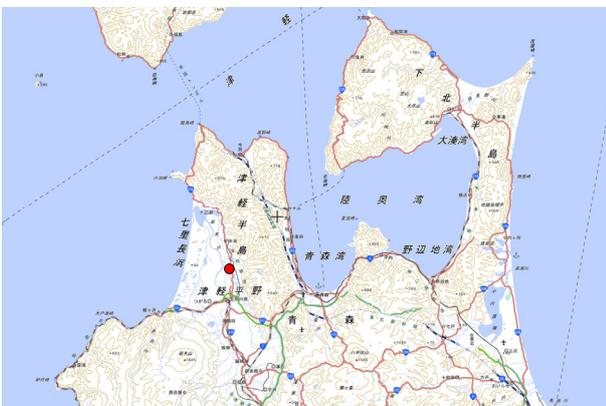


図 9 観測箇所
(国土地理院 国土地理院地図に加筆)



図 10 気象観測機器設置状況
(タイムラプスカメラ、風向風速計(地上高 2.5m)、温湿度計、積雪深計、日射量計、視程計(地上高 1.2m)、黒板)

風向風速、温湿度、積雪深、日射量の観測間隔は 10 分とし、視程の観測間隔は 1 分とした。また、タイムラプスカメラの撮影は当初 10 分毎日中のみ記録した。しかし、地吹雪の判別が 10 分毎の画像では非常に難しかつ

たため、平成 29 年 11 月 22 日からは 1 秒毎に撮影したコマ送り動画として記録した。

次に、これらのデータを用いて降雪時の地吹雪発生の有無と風向風速や気温との関係について分析を行った。降雪及び地吹雪発生の有無は、画像データを用い 10 分毎に平均的な状況を判断した。ただし、地吹雪の判別結果に間違っただ判定結果のデータが含まれるのをできるだけ排除するため、1 秒毎に撮影したコマ送り動画データを対象とした。なお、本分析は平成 30 年 1 月 28 日までのデータを対象に行った。

図 11 は、降雪時に低い地吹雪及び高い地吹雪が発生した場合と、しなかった場合の気温及び風速の関係を示した結果である。また、グラフには北海道石狩市における降雪時の地吹雪の発生条件に関する既往研究(竹内ら)の結果を实線併せて示した。また、視程 200m 未満であった地吹雪の発生事例を併記した。なお、視程は 10 分間の中央値により判定した。

図 11 より、既往研究において地吹雪が発生するとされる気温と風速条件下においても、地吹雪が発生していない事例が多く見られた(図 11 の丸枠内)。これは、青森において、冬期に気温が 0°C 付近になる機会が北海道よりも多く気温が温暖であり、北海道内とは降雪粒子の雪面の雪質などが異なるため、既往研究による地吹雪発生条件下でも地吹雪の発生しない事例が見られたと考えられる。

このため、青森県内で既往研究による低い地吹雪の発生条件を用いて地吹雪の発生を判断した場合、空振りし

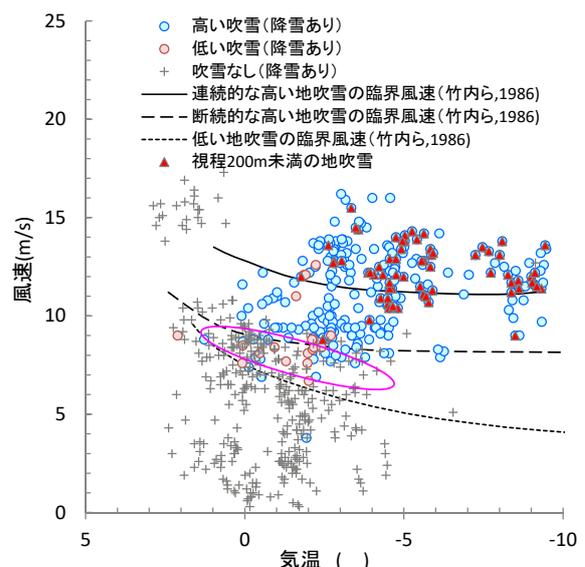


図 11 地吹雪発生有無と気温及び風速の関係
(平成 29 年 11 月 22 日～平成 30 年 1 月 28 日)

てしまう事例が多く発生することが懸念される。

一方、視程 200m 未満の地吹雪発生事例は断続的な高い地吹雪の発生事例以上の条件でのみ発生していた。

今後は、さらに地吹雪発生状況に関する気象データを取得し、分析を進めて行く予定である。

2.2 降雪形態による視程低下のメカニズム解明

既往研究⁸⁾において、吹雪時の視程低下は飛雪流量との相関が高いことが知られており、既往研究による吹雪視程障害予測技術^{1) 2)4)}においても、飛雪流量(g/m²/s)と目視観測による視程との実験式を用いて視程を推定している。なお、飛雪流量とは単位時間に単位断面を通過する飛雪粒子の質量である。

しかし、地吹雪に起因した飛雪粒子と降雪に起因した飛雪粒子では密度や大きさに差異がある。このため、飛雪流量が同じであっても飛雪粒子が地吹雪粒子によるものかあるいは降雪粒子によるものかによって視程が異なる可能性がある。

そこで、降雪形態の違いによる視程低下への影響など降雪時の視程低下メカニズムを明らかにするため、降雪時の視程調査に関する既往文献^{9)~15)}を収集するとともに、冬期には降雪時に視程調査を以下のとおり実施した。

2.2.1 降雪時の視程調査

平成 28 年度及び平成 29 年度冬期に北海道石狩市、青森県青森市、新潟県長岡市の 3 箇所(図 12)において、降雪時の視程の調査を行った。観測種別と調査期間は表 3 に示すとおりである。

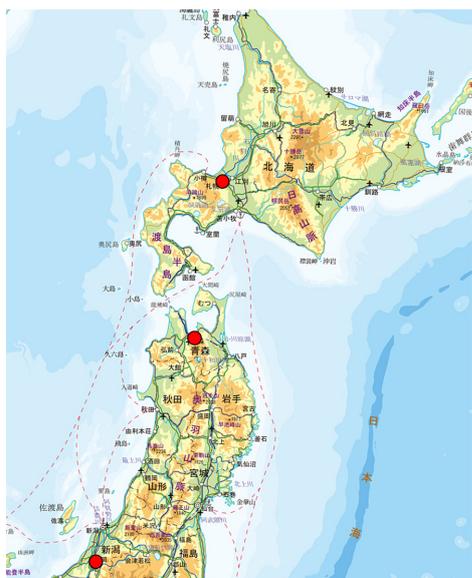


図 12 視程調査箇所
(国土地理院 国土地理院地図に加筆)

表 3 視程観測と視程調査実施日

観測箇所	観測種別	調査期間
石狩市 (石狩吹雪実験場)	定点	2016年12月15日 ~ 2017年3月31日 2017年11月13日 ~ 2018年3月31日
	目視	2017年2月1日 2018年3月1日 2018年3月20日
青森市 (青森市スポーツ広場)	定点	- ~ -
	目視	2017年1月24日 2017年1月25日
長岡市 (防災科学研究所)	定点	2016年12月1日 ~ 2017年3月31日 2017年12月1日 ~ 2018年3月31日
	目視	2017年2月7日 2017年2月21日 2018年1月24日 2018年1月25日 2018年1月26日 2018年1月29日 2018年1月30日

※下線は目視により視程200m未満の視程障害が観測された事例

表 4 視程に関する定点気象観測の項目

観測項目	観測機器	石狩市	青森市	長岡市
		石狩吹雪実験場	青森市スポーツ広場	防災科学技術研究所
視程(画像)	動画カメラ	○	-	-
	タイムラプスカメラ	-	○	○
降水量	雨量計(DFIR)	○	-	○
	雨量計(転倒ます型)	○	-	○
降雪粒子の粒径分布	レーザー式降水粒径速度分布測定装置	△	○	○
飛雪流量	飛雪粒子計数装置	○	○	-
風向風速	風向風速計	○	○	○
積雪深	積雪深計	○	-	○

※「-」は未観測、「△」はH29年度のみ観測

表 5 視程観測のため設定した目標物

視程区分	石狩市 (石狩吹雪実験場)		青森市 (青森市スポーツ広場)		長岡市 (防災科学研究所)	
	目標物	視程(距離)	目標物	視程(距離)	目標物	視程(距離)
50m未満	視程板1	10m	-	-	視程板1 [※]	10m
	視程板2	20m	-	-	視程板2	20m
	視程板3	40m	-	-	-	-
50m以上 100m未満	視程板4	60m	視程板1	50m	視程板3 [※]	50m
	視程板5	80m			視程板4 [※]	60m
100m以上 200m未満	視程板6	100m	視程板2	100m	視程板5	85m
	視程板7	135m			建物 [※]	100m
	視程板8	175m			建物 [※]	110m
	-	-			視程板6	135m
200m以上 300m未満	視程板9	250m	視程板3	200m	樹林帯	150m
	-	-			樹林帯 [※]	200m
300m以上 500m未満	樹林帯 [※]	350m	視程板4	250m	-	-
	-	-	水門	470m	-	-
500m以上 1000m未満	-	-	-	-	-	-
1000m以上	-	-	ビル	1000m	-	-

※2017年11月より追加した目標物を示す

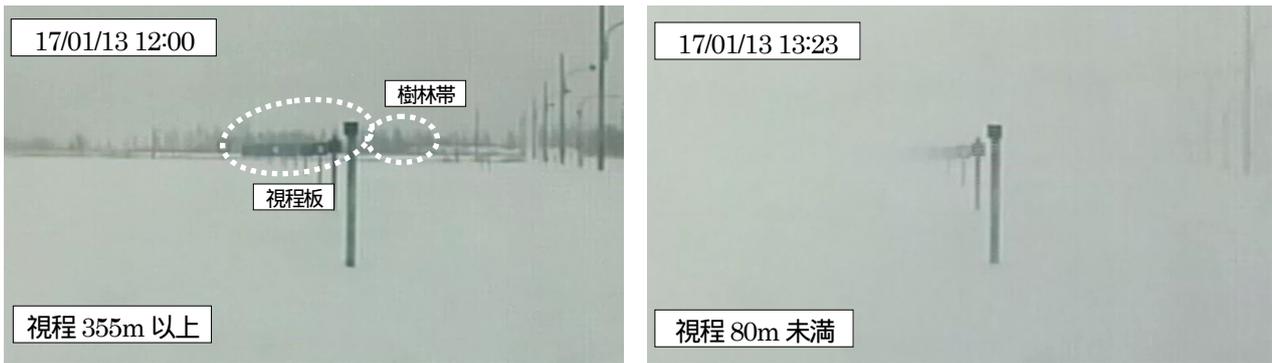


図 13 石狩市での視程観測（撮影画像の例）

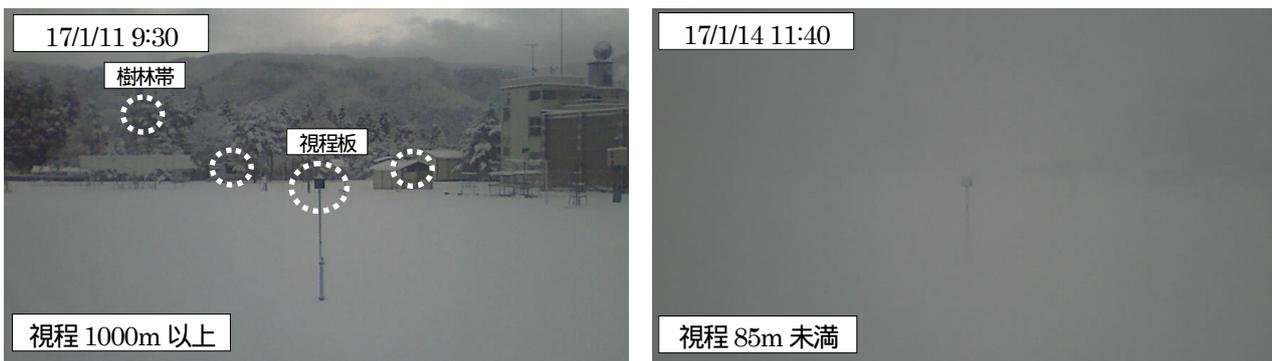


図 14 長岡市での視程観測（目標物と撮影画像の例）

視程観測のための目標物を設定し、降雪時に目視やカメラでの画像撮影による視程観測と降雪量など気象状況の観測を行った。各調査箇所における気象データの観測項目と視程観測時に設定した目標物は表 4、表 5 に示すとおりである。表 4 に示した雨量計（DFIR）は、世界気象機関（WMO）が基準器として定めている 2 重柵基準降水量計を用いて計測した降水量を示す。また、目視観測は 1 回当たり 30 秒間で実施した。その結果、表 3 の下線で示した視程の目視観測日には視程 200m 未満となった視程障害が観測された。図 13、図 14 は降雪による視程障害発生時に撮影された目標物の画像の一例である。

さらに、石狩吹雪実験場で目視観測した結果を対象とし、視程と降雪強度の関係について分析を行った。なお、視程は視認できた最大距離より評価した。また、視程観測時の降雪強度は DFIR により観測された 1 分毎の降水量より降雪強度を求めた。

図 15 は降雪強度と視程との関係を示した結果である。視程障害への降雪のみによる影響を把握するため、地吹雪が発生していないと考えられる風速 5m/s 未満の弱風時での調査結果のみを示した。

図 15 より、降雪強度の増加に伴い視程が低下する傾

向があり、降雪強度が 5 mm/h 以上の降雪が発生した場合に視程が 200m を下回ることが示された。ただし、降雪強度が 5 mm/h 未満の場合にも視程が 200m 未満となる観測事例が見られ、同程度の降雪強度であっても観測された視程にはばらつきが見られた。

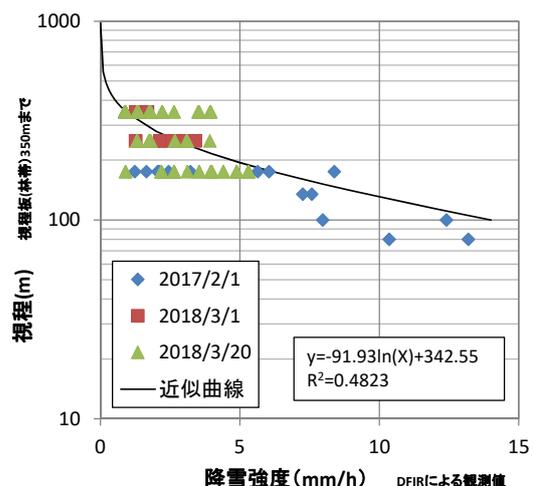


図 15 降雪強度と視程の関係（風速 5m/s 未満）

今後は、降雪時の視程調査を継続し多様な降雪条件での調査データの収集につとめ、降雪時における視程と降

雪量など気象データとの関係について分析を進めて行く予定である。

2.3 多様な気象環境下における吹雪視程予測技術開発

2.3.1 平成 28 年度冬期の提供

吹雪時のドライバーの行動判断を支援するため、前中

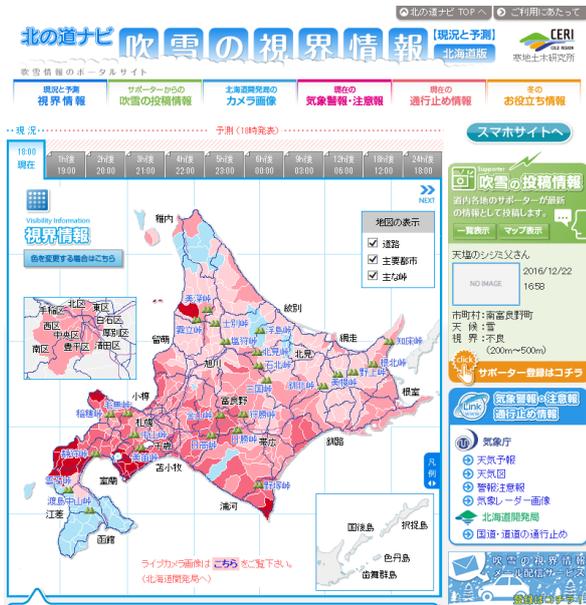


図 16 PC 版「吹雪の視界情報」

URL : <http://northern-road.jp/navi/touge/fubuki.htm>
(平成 28 年 12 月 22 日 18 時発表)

期計画に当研究所が開発した「吹雪視程障害予測技術」²⁾を利用して、北海道内の吹雪視程障害の情報提供を平成 28 年 11 月 24 日より、インターネットサイト「吹雪の視界情報」で行った。このインターネットサイトは、①吹雪の視界情報、②吹雪の投稿情報、③気象警報・注意報、④道路通行止め情報等を集約したインターネットサイトである(図 16)。あわせて、移動中の利用者の利便性を向上させるため、スマートフォン版「吹雪の視界情報サイト」も公開した(図 17)。

吹雪の視界状況は、吹雪時のドライバーの運転挙動に関する研究成果¹⁴⁾をもとに、「著しい視程障害(100m 未満)」「かなり不良(100~200m)」「不良(200~500m)」「やや不良(500~1000m)」「良好(1000m 以上)」の 5 ランクに区分し、エリアごとに色分け表示している(図 16、図 17、図 18)。

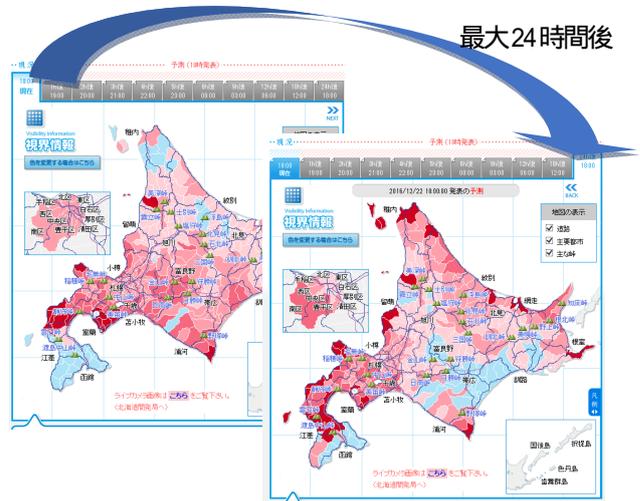


図 18 吹雪の視界情報のエリアと予測時間
(平成 28 年 12 月 22 日 18 時発表)



図 17 スマートフォン版「吹雪の視界情報」

URL : <http://northern-road.jp/navi/touge/sp/fubuki.htm>
(平成 28 年 12 月 22 日 18 時発表)



今後、後志北部で6時間以内に視程 200m未満 の視程障害が発生する恐れがあります。お出かけや運転にご注意ください。

後志北部
小樽市 1時間後: 視程100m~200m
積丹町 1時間後: 視程100m~200m
古平町 1時間後: 視程100m~200m
仁木町 1時間後: 視程100m~200m
余市町 1時間後: 視程100m~200m
赤井川村 1時間後: 視程100m~200m

↓ 詳しい情報はこちら ↓
パソコン版
<http://northern-road.jp/navi/touge/fubuki.htm>
スマートフォン版
<http://northern-road.jp/navi/touge/sp/fubuki.htm>

図 19 吹雪の視界情報メール配信サービス
(平成 28 年 12 月 22 日 15 時発表)

さらに、視界不良について、事前に注意喚起を促すための「メール配信サービス」も平成28年11月24日より開始した。利用者が事前にメールアドレスと配信条件¹⁵⁾を登録すると、条件に合致した際に視界不良の予測結果を自動で通知するプッシュ型のサービスである(図19)。

提供開始後、提供した内容について確認作業を行ったところ、降雪/降雨判定で現象と異なると思われる事象が発生していることが確認できた。そのときの視界情報の演算結果を図20に示す。北海道南部の旧大野町で視界が100~200mとなっている。気温は2.1℃、降水量は3~5mm/hを視界演算の入力値とした結果、降雪と判定され視程演算を行っていた。しかし、近隣のCCTVカメラで確認すると現地は雨であり、雨雪判別のエラーと考えられる。



図20 平成29年3月29日9時発表予定の演算結果

図21にインターネットサイト「吹雪の視界情報」のPC版及びスマートフォン版の日平均アクセス数を示す。平成28年度の日平均アクセス数は4,145件で昨年度と比べる約1.4倍に増加した。また、札幌市内に96cmの

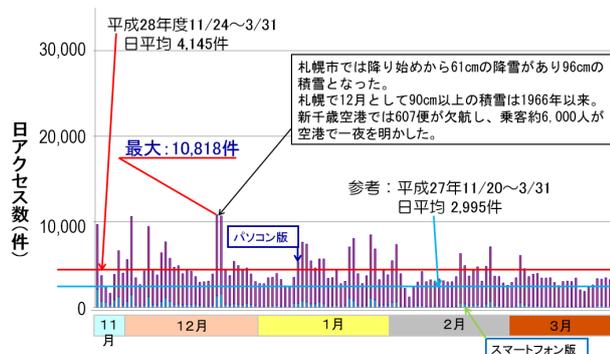


図21 平成28年度「吹雪の視界情報」アクセス数

積雪があった平成28年12月22日及び23日には、10,000件を超えるアクセス数となっている。天候悪化時のアクセス数となっている。天候悪化時のアクセス数の増加から、利用者が「吹雪の視界情報」を行動判断に活用していることが伺われる。

2.3.2 平成29年度冬期の提供

吹雪時のドライバーの行動判断を支援するため、平成29年度も平成29年12月1日より、インターネットサイト「吹雪の視界情報」で情報提供を行った。平成30年3月1日からは、2.1.2に示した新アルゴリズム(図8)で公開を行った。

新アルゴリズムで公開直後の、3月1日から3月4日に急速に発達した低気圧が北海道付近を通過し暴風雪が発生した。この低気圧の通過時に、北海道北部日本海側の初山別村を走る一般国道232号に設置している視程計(図22)を用いて、新アルゴリズムと、旧アルゴリズムの視界情報の予測精度について検証を行った。精度検証は、吹雪の視界情報で実施に提供している5ランクでの適中率を整理し行った。なお、適中率は表6に示した方法で求めた。

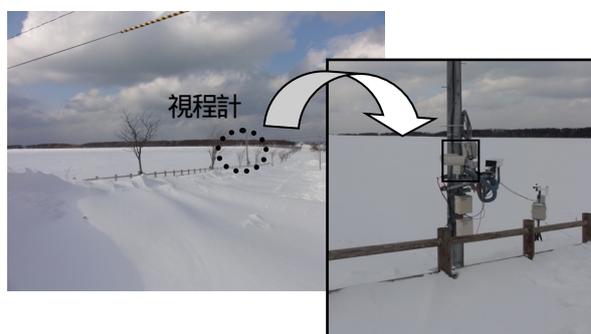


図22 初山別村での気象観測状況

表6 吹雪視程の適中率

現地観測の視程	アルゴリズムによる吹雪時の視程推定				
	100未満	100~200m	200~500m	500~1000m	1000m以上
100未満	n_{11}	n_{12}	n_{13}	n_{14}	n_{15}
100~200m	n_{21}	n_{22}	n_{23}	n_{24}	n_{25}
200~500m	n_{31}	n_{32}	n_{33}	n_{34}	n_{35}
500~1000m	n_{41}	n_{42}	n_{43}	n_{44}	n_{45}
1000m以上	n_{51}	n_{52}	n_{53}	n_{54}	n_{55}

全データ数 = n

適中率 = $(n_{11} + n_{22} + n_{33} + n_{44} + n_{55}) / n$

ね 5 mm/h の降雪が発生した場合に視程が 200m を下回った。ただし、降雪強度が 5 mm/h 未満の場合にも視程が 200m 未満となる観測事例が見られるなど、同程度の降雪強度であっても視程の観測結果にはばらつきが見られた。

また、吹雪時のドライバーの交通行動の判断支援に向けて、吹雪時の視界予測情報をインターネットで公開した。3月1日からは降水種別の雨雪と気温及び相対湿度との関係を加味したアルゴリズムで運用を開始した。その後の暴風雪時において、現地の視程と、旧アルゴリズム、新アルゴリズム、それぞれで演算した視程について比較検討を行った。その結果、適中率が新アルゴリズムの方が旧アルゴリズムより、2.6%上昇した。

また、アクセス数においては、天候悪化時にアクセスが増加しており、交通行動判断に活用していることが伺えた。また、年々日平均アクセス数は増加傾向にあり、このサイトの認知度が上昇している。

今後は、広域に適用可能な吹雪視程予測技術の開発に向けた調査を継続するとともに、インターネットサイト「吹雪の視界情報」のPRに努め、吹雪災害の減災に寄与していきたい。

参考文献

- 1) 松澤勝：浮遊粒子の落下速度を考慮した吹雪時の視程推定手法改良、寒地技術論文・報告集、Vol.23、pp.400-405、2007
- 2) 土木研究所寒地土木研究所：平成 27 年度プロジェクト・重点研究報告書 - 4.2 暴風雪による吹雪視程障害予測技術の開発に関する研究 -、土木研究所、2015
- 3) 大宮哲、武知洋太、國分徹哉、原田裕介、松澤勝：複数の気象要素に基づく地吹雪発生条件、寒地土木研究所月報、第 750 号、pp.14-22、2015
- 4) 武知洋太、松澤勝、國分徹哉、大宮哲、原田裕介：“吹雪の視界情報”における吹雪視程推定手法について、寒地技術論文・報告集、Vol.32、pp.157-156、2016
- 5) 土木研究所寒地土木研究所：平成 28 年度 研究開発プログラム報告書 - 5.極端気象がもたらす雪氷災害の被害軽減のための研究開発 -、土木研究所、2016
- 6) 気象庁：最大降雪量ガイダンス、平成 21 年度数値予報研修テキスト、pp.27-37、2009
- 7) 竹内政夫、石本敬志、野原他喜男、福沢義文：降雪時の高い地吹雪の発生限界風速、昭和 61 年度日本雪氷学会全国大会予稿集、p.256、1986
- 8) 武知洋太、松澤勝、中村浩：吹雪時に人間が感じる視程と視程計や吹雪計による計測値との関係、北海道の雪氷、28、pp.17-20、2009
- 9) 鈴木弥幸：視程と降雨(雪)強度との関係、気象庁研究時報、第 15 号、No7、pp.483-487、1963
- 10) Mellor,M. : Light scattering and particle aggregation in snowstorms., J.Glaciol., 6, No44, pp.237-248., 1966
- 11) O'Brien,H,W. : Visibility and light attenuation in falling Snow, J. Appl. Met., 9, pp.671-683., 1970
- 12) 斉藤博英：降雪の強さと視程、国立防災科学技術センター研究報告、5、pp.33-40、1971
- 13) 岩井邦中：長野市における降雪中の視程について、天気、Vol.22、pp.27-29、1975
- 14) 藤吉康志、若浜五郎、遠藤辰雄、入川真理、小西啓之、竹内政夫：札幌における一冬間の降雪強度と視程の同時観測、低温科学物理篇、第 42 巻、pp.147-156、1984
- 15) 川端一史、赤田尚史、長谷川英尚、築地由貴、近藤邦夫、稲葉次郎：降雪時における視程・降雪強度及び雪片の大きさに関する同時観測、寒地技術論文・報告集、Vol.20、pp.684-688、2004
- 16) 加治屋安彦、松澤勝、鈴木武彦、丹治和博、永田泰浩：降雪・吹雪による視程障害条件下のドライバーの運転挙動に関する一考察、寒地技術論文・報告集、Vol.20、pp.325-331、2004
- 17) 國分徹哉、武知洋太、大宮哲、原田裕介、松澤勝：インターネットによる吹雪の視程情報提供、第 36 回交通工学研究発表会論文集、pp.579-584、2016

5.3 吹雪対策施設及び除雪車の性能向上技術の開発

5.3.1 防雪林の安定的な防雪性能確保に関する研究

担当チーム：寒地道路研究グループ（雪氷チーム）
 技術開発調整監付
 （寒地機械技術チーム、寒地技術推進室）
 研究担当者：松澤 勝、西村敦史、伊東靖彦、高橋 渉、
 櫻井俊光(雪氷)、植野英睦、幸田 勝（機械）
 高玉波夫、渡辺 淳（推進室）

【要旨】

積雪寒冷地の北海道では、吹雪による冬期交通障害が多発しており、国道における通行止め原因の4割を吹雪が占める。そのため道路の吹雪対策が重要な課題である。道路防雪林は吹雪対策として高い効果が期待できるが、間引き遅れによる日射不足で下枝が枯れ上がり、防雪性能の低下が懸念されている。そこで本研究は、下枝の枯れ上がりによる防雪性能等への影響解明、防雪性能が低下した道路防雪林への補助防雪対策の提案、枯れ上がりの見られる道路防雪林の管理手法を提案することで、安定的な防雪性能を確保することを目指すものである。

平成 29 年度では、道路防雪林の枯れ上がりによる影響解明を目標として、道路防雪林の構成要素と防雪性能の現地調査、すなわち、標準林や狭帯林など林況の異なる道路防雪林の防雪性能に関する現地観測、過年度の現地観測データ解析と考察、および風洞実験による防雪性能の把握に関する研究を実施した。

キーワード：防雪、吹雪、道路、防雪林、間引き、植栽密度管理、枝下高

1. はじめに

北海道における国道の通行止めの約4割は吹雪に起因するものであり、安全な生活環境や社会・経済活動を維持するためには道路の吹雪対策が不可欠である。道路施設による吹雪対策では、道路防雪林（以下、防雪林という）が防雪柵と同様に多く利用される。防雪林は、道路の風上側または両側に樹木を造成し、風を抑え飛雪を捕捉することにより、吹雪による吹きだまりや視程障害を緩和する防雪施設である。

道路事業として、防雪林は最初の造成から30年以上が経過し¹⁾、樹木の成長に伴う育成や管理上の課題が顕在化している²⁾。その課題のうちの1つに、下枝の枯れ上がりに伴う防雪効果の低下がある。外観上十分に成長した防雪林でも内部では日射不足により、地表に近い下枝が枯れ上がる状況がみられる（図1）。地表に近いほど雪粒子の量が多い吹雪の現象³⁾を踏まえると、下枝の維持管理は吹雪防止に重要であると考えられる。

本研究は、防雪林の安定的な防雪性能を確保することを目指し、以下の項目に着目して研究を遂行する。

- 1)下枝の枯れ上がりによる防雪性能等への影響解明
- 2)防雪性能が低下した防雪林への補助防雪対策の提案

3)枯れ上がりの見られる防雪林の管理手法の提案

具体的には、下枝の枯れ上がりによる防雪性能等への影響解明において、まずは現地調査により防雪林の構成要素を把握する。次に、防雪林の防雪性能を評価するために、下枝の枯れ上がりによる風雪の吹き抜けに関する気象観測を実施し、防雪林の構成要素と防雪性能の定量的関係を整理する。さらに、現地調査の結果から風洞を利用した模擬実験により、下枝の枯れ上がりによる防雪性能に関して定量的に評価する。そして、これらを踏まえて、防雪林の補助防雪対策や管理手法を提案する。



図1 防雪林内の下枝の枯れ上がり状況

平成 28 年度、29 年度では以下について実施した。

- 1) 防雪林の構成要素と防雪性能の現地調査および下枝の枯れ上がりによる防雪性能への影響分析
- 2) 風洞実験による防雪性能の把握

2. 防雪林の構成要素と防雪性能の現地調査および下枝の枯れ上がりによる防雪性能への影響分析

防雪林に求められている防雪性能は吹きだまりと視程障害の緩和である¹⁾。吹きだまりは風速の低下等により飛雪粒子の移動が停止して堆積することで発生する。視程(Vis)は風向に直角な単位断面積を単位時間に移動する雪粒子の質量(飛雪流量: Mf)の関数(式(1))⁴⁾で表される。

$$\log Vis = -0.773 \log(Mf) + 2.845 \quad (1)$$

飛雪流量は、風速(V)と単位体積当たりの雪粒子の質量(飛雪空間密度: Nt)の積(式(2))⁴⁾で表される(ただし、雪面近傍を除く)。

$$Mf = Nt \cdot V \quad (2)$$

吹きだまりと視程障害の緩和効果を評価するためには、防雪林が風と飛雪を減じさせる効果を明らかにする必要がある。言い換えれば、防雪林の風上と風下における風速と飛雪流量を観測することで防雪性能を評価できる。

2.1. 現地調査の概要

平成 28 年度では、防雪林の防雪機能を決定する構成要素(林帯幅、樹木疎密度、枯れ上がりの高さ、樹高等)に関して、前中長期計画(平成 27 年度)に実施した防雪林(標準林と狭帯林を含む)の現地調査結果を解析したところ、北海道に点在する 22 防雪林 39 箇所 50 地点(図 2)におけるほぼ全ての防雪林で下

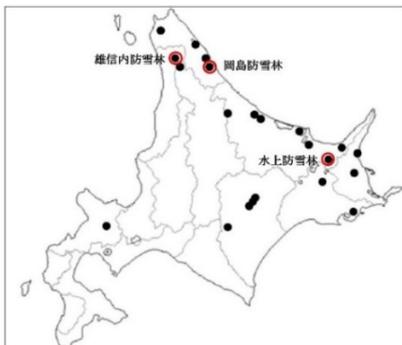


図 2 下枝の枯れ上がり調査対象の防雪林分布(赤枠: 現地観測を実施した防雪林)

枝が枯れていることを明らかにした⁶⁾⁷⁾。ただし、一般国道 238 号線沿いの枝幸町岡島防雪林(標準林)は下枝の枯れ上がりが見られない防雪林であるため(図 3)、現地調査を実施した⁸⁾。調査箇所では、防雪林の立木密度が密であるが、調査箇所の北部には疎の林帯がみられた(図 4)。防雪効果を検証したところ、防雪林に対して斜めから吹く風(以下、斜風とする)特に風向 202.5°では、十分に飛雪を抑えている可能性を示した。一方、立木密度が疎の林帯を通過する風向 315.0°では防雪効果が低下したことも明らかになった(図 5)。



図 3 岡島防雪林(0.5m 程度の高さで枝打ちされている)



図 4 岡島防雪林の調査対象箇所

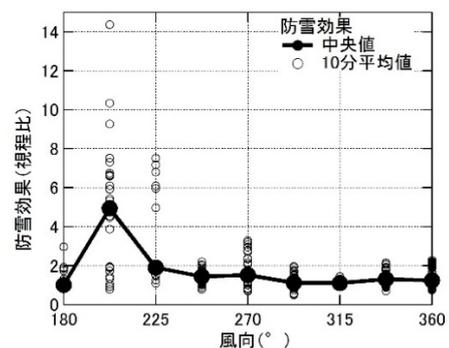


図 5 岡島防雪林の防雪効果

縦軸は視程計で計測された視程比(D点/A点)であり、高いほど防雪効果が高いことを示す。風向 202.5°の風と同様に、風向 315.0°の風でも視程比が高くなると期待されたが、疎の林帯の影響で視程比が低い値を示す⁸⁾。

本研究では、下枝の枯れ上がりが認められた防雪林

(標準林と狭帯林)に着目して現地調査を実施した。なお、標準林は林帯幅 10m 以上、狭帯林は林帯幅 10m 未満の防雪林である¹⁾。

2.1.1. 現地観測を実施した標準林

一般国道 40 号線沿いの天塩町雄信内防雪林(図 2)は、昭和 56 年から造成され、防雪林の延長は約 5km、観測した道路南西側における防雪林の林帯幅はおよそ 30m である。樹高 1m 以下の樹木を除いた観測地(KP181.76 付近)における林内の樹高は平均 12m であり、林帯内部には平均して高さ 2.4m の枯れ上がりが見られている(図 6)。



図 6 雄信内防雪林における下枝の枯れ上がり状況

2.1.2. 現地観測を実施した狭帯林

一般国道 391 号線沿いの小清水町水上防雪林(図 2)の延長はおよそ 1km、観測した道路北側における防雪林の林帯幅はおよそ 10m である。観測地(KP110.0 付近)における樹高は調査中であるがおよそ 7m 程度であり、高さ 1m ほどの下枝の枯れ上がりが見られている(図 7)。



図 7 水上防雪林における下枝の枯れ上がり状況

2.2. 標準林・狭帯林における風速等の連続観測

2.2.1. 平成 28 年度の観測(標準林)

雄信内防雪林(標準林)の防雪性能を評価するため、一冬期間を通じた気象等の連続観測を実施した。連続観測は無人工観測で、計測器で測定された値を自動的に

記録した。観測期間は、平成 28 年 12 月 22 日から平成 29 年 3 月 18 日である。観測地点を図 8 に、観測項目を表 1 に示す。表 1 の設置状況について、前中長期計画(平成 27 年度)から継続した観測等を「既設」、平成 28 年度から開始した観測等を「新設」とした。



図 8 雄信内防雪林における観測地点の略図

表 1 平成 28 年度における気象等の連続観測項目

設置状況	観測項目	観測機器	台数	観測地点	地盤からの高さ
既設	風向・風速	風車型風向風速計	12	No.1	3m
				No.2	1, 3, 7m
				No.21	1, 3m
No.22				1, 3m	
No.3				1, 3, 7m	
既設	視程	視程計	2	No.1	3m
				No.4	3m
既設	道路上の吹きだまり等の視覚的な情報	カメラ	1	矢羽根	3m
				新設	風向・風速
新設	視程	視程計	1		

衛星画像ならびに現地観測より、観測場所の風上には 300m 以上の吹走距離(吹雪が発達する距離)がある。防雪林から 40m 程度離れた地点 No.0 は雪面で発達した吹雪を観測する基準点とした。地点 No.2 と No.3 は風上・風下林縁、No.21、No.22 は林内における風速を観測するための観測地点である。風上林縁から道路側にかけて多点で風速を観測することで、詳細な防雪林の減風効果を評価することが可能となる。

風向・風速の観測には風車型風向風速計(ノースワン、KDC-S04)、視程の観測には視程計(明星電気、TZE-4)、温湿度の観測には温度計(ヴァイサラ、HMP155)、吹雪の状況を視覚的に把握するため、固定式視線誘導柱(矢羽根)に設置したカメラ(ノースワン、KADEC21-EYE)で静止画を 1 日 3 回記録した。視程計は、吹雪による視程障害の強度を計測するものであり、温度計は地吹雪発生の有無を判断するための

ものである。

解析においては、風向・風速は1秒ごと（No.21、No.22の風向・風速は10秒ごと）に得られたデータの10分平均値を用いた。視程は1秒ごとに得られたデータの10分中央値を用いた。なお、地点No.0を風上の基準とした（以下、地点No.0を基準点とする）。

2.2.2. 平成29年度の観測（標準林）

平成28年度と同様に一冬期間を通じた気象等の連続観測を実施した。観測期間は、平成30年2月3日から平成30年3月31日である。観測項目を表2に、観測地点を図8に示す。平成28年度の風速観測では、風上の地点No.1、No.2、No.21、No.22の風向・風速を計測したが、平成29年度では防雪林における下枝の枯れ上がり进行评估するため、上記観測点を撤去してNo.3に集約した。すなわち、道路側の風下林縁の鉛直方向における風速を明らかにすることで、下枝の枯れ上がりの影響を评估することを目的とした。飛雪粒子計以外、利用した測器とデータの処理方法は平成28年度と同じである。

表2 平成29年度における気象等の連続観測項目

観測機器名	設置箇所	設置高さ
風車型風向風速計 (DKC-S04)	No.0	3m
	No.3	1, 3, 5, 7, 9m
視程計 (TZE-4)	No.0	2m
	No.3	3m
温湿度計 (KDC-A01)	No.0	3m
飛雪粒子計 (SPC-95)	No.0	3m
	No.3	

2.2.3. 平成29年度の観測（狭帯林）

狭帯林の防雪性能を評価するため、小清水町水上において冬期における風向風速の連続観測を実施した。観測期間は平成30年2月24日から平成30年3月31日である。観測項目を表3に観測地点を図9に示す。また、風上は畑地で吹走距離が500m程あることが衛星画像から読み取られる。

風向・風速の観測には風車型風向風速計（ノースワン、KDC-S04）を利用した。解析における風向・風速は10秒ごとに得られたデータの10分平均値を用いた。なお、得られたデータについては今後解析する予定である。

表3 気象の連続観測項目

観測機器名	設置箇所	設置高さ
風車型風向風速計 (DKC-S04)	A	1, 3, 7m
	D	3m



図9 水上防雪林における観測地点

2.3. 気象等の連続観測結果と考察

2.3.1. 平成28年度に実施した気象観測結果

連続観測の一例として、雄信内防雪林における平成29年3月3日から3月6日までの観測結果を示す。2.4.1. で示すように、3月4日には飛雪流量の現地観測を実施している。

各観測地点（風上からNo.2、No.21、No.22、No.3）における風速比、風上（基準点）と風下（No.3）の視程の変化を図10に示す（ここではNo.4を除いている）。次に観測した基準点の風向・風速の変化と各観測地点の風速比および視程の変化を時系列で述べる。

A：3月3日12時～18時頃、基準点の風向は北から北西の風である。このとき、林縁・風上（No.2）の風速比にばらつきがあることがわかる。

B：3月3日18時～3月6日0時頃、基準点の風向が西になると、林縁・風上（No.2）における風速が安定する。風向が防雪林に直交する時にみられる風速比の安定化は、先行研究と一致する⁵⁾。3月4日0時以降、基準点の風速は5m/s以上だった。一般的に新雪の場合、風速が5m/s以上で吹雪が発生する⁴⁾。しかし、3月4日0～12時頃まで吹雪が発生していない。これは近傍の天塩アメダスによると、3月2日から3月3日未明まで気温がプラスだったため、雪面の雪が融解再凍結して堅くなったことに加え、その後の新たな降雪もほとんどなかった（3日11時に2cmの降雪があるのみ）ため、吹雪が発生しなかったものと考えられる。

B'：3月4日15時頃に降雪が確認された。15時～21時では、基準点の風速が5m/s以上で視程の低下がみられ、吹雪が発生した。林内（No.21, 22）および道路側風下の林縁（No.3）で風速比が0.3程度まで低下した。

C：3月6日0時以降、基準点の風速が低下すると同

時に、林内(No.21, 22)および道路側風下の林縁(No.3)で風速比が高くなった。

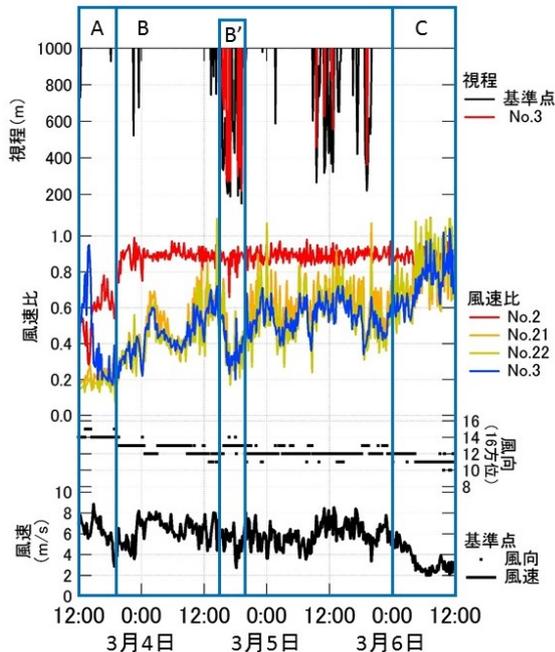


図 10 3月4日～6日に吹雪が発生した時の連続気象等観測の結果

2.3.2. 風向別に解析した風速の結果と考察

ここでは、2.3.1. で得られたデータを用いて、風向別に風速を解析した結果⁹⁾⁻¹⁰⁾を示す。風速の解析では、風上の基準点(図8の地点 No.0)で得られた値を分母、各観測点(図8の地点 No.2~No.4)で得られた値を分子とし、風速比として表現した。

図 11a に、地点 No.2 (高さ:3m)における風速と基準点(No.0)の風速の比較結果の一例を示す。図に示したデータは基準点 No.0 の風向が 270°(西)の時のもので、データ数は 1,254 データ(10 分平均値)である。図中の直線は、原点を通る回帰直線であり、傾きから風速比は 0.89 (相関係数: 0.99) である。

同様の算出方法で、地点 No.2~No.4 について風向別(135.0~315.0°)に解析したデータ数および相関係数を図 11b に示す。なお、風向 135.0~315.0°は、防雪林に直交する風向(225.0°)から±90°の範囲である。次に、図 11a の方法で風向ごとに計算した風速比の結果を図 12 に示す。

風速比のデータ解析から、風向 135.0~315.0°における相関係数(図 11b)が防雪林に直交する風向(225.0°)を基準に凸型であることがわかる。これは、防雪林に対して平行風になるほどデータにばらつきがあることを示す。

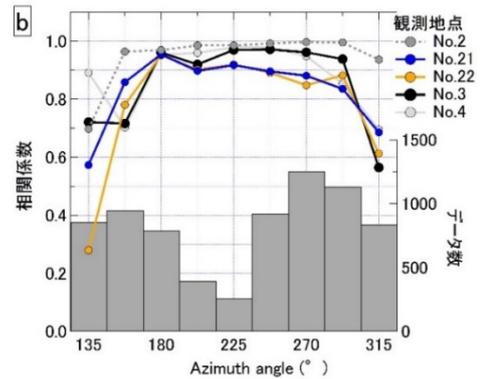
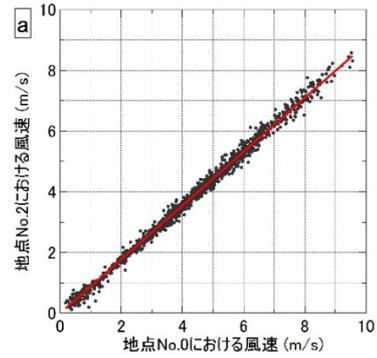


図 11 風向 135.0~315.0°における風速比の解析結果
風速比解析の一例: 林風上の基準点 No.0 と林縁 No.2 地点における風速の比較 .b) 風速比の算出過程で得られる相関係数(線グラフ)とデータ数(棒グラフ)

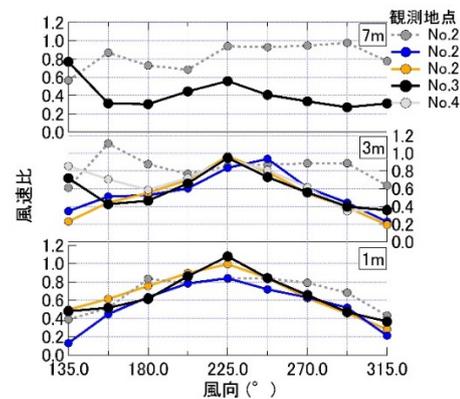


図 12 各高さ(7、3、1m)における風速比の解析結果。

特に図 12 に示す風速比の結果から、たとえば、高さ 3m、風向 157.5°の風では風速比が極端に高いなど、防雪林に直交する風向 225.0°を基準とした線対称ではない。風向 225.0°~135.0°の風では、風上に林(図8の No.1 付近)があることにより、風上の基準点のデータに影響していることが考えられる。よって、以下の解析では、防雪林と平行の風と南向きの風を除き、225.0°~292.5°の値を用いて解析する。なお、風向 225.0°~

247.5°を直交風、風向 270.0~292.5°を斜風とみなす。

林内および林風下林縁の観測地点 No.21、No.22、No.3 では、風向によって風が防雪林を通過する距離が変わる。防雪林に直交するほど、風が通過する距離が短く、平行風に近づくほど、風が林内を通過する距離が長くなる。そこで、観測地点 No.21、No.22、No.3 で、風が林内を通過する距離と風速比との関係を図 13 に示す。ここで、防雪林の風上林縁を 0m としているので、基準点（風速比：1.0）における距離（横軸）はマイナスとなり、風向によってその距離も変わる。なお、図 13 の横軸は、防雪林の風上林縁からの距離 x を平均樹高 h (12m) で除した値（高倍距離）である。この値は防雪柵における吹きだまり量や吹きだまりの長さなどの研究で多用される¹¹⁾。

図 13 に示す防雪林の風上林縁からの距離と風速比との関係から、次に示すように、防雪林に対する直交風と斜風で違いが見られる。

- ・高さ 7m：風向によらず風下の風速比が 0.6~0.2 の範囲で低下している。
- ・高さ 3m：直交風（225~247.5°）では、風下の風速比が 1.0~0.8 程度と、風上とほぼ同等である。斜風では、風下の風速比が 0.6~0.4 程度まで低下している。
- ・高さ 1m：直交風（225~247.5°）では、風下の風速比が 1.1~0.8 程度と、風上とほぼ同等である。斜風（270~292.5°）では、風下の風速比が 0.6~0.4 程度まで低下している。

直交風では、下枝の枯れ上がりがみられる高さ 1m と 3m で、風速比が風上とほぼ同等で減風効果がないことから、下枝の枯れ上がりの影響があることがわかった。一方、斜風では、高さ 1m~7m のすべての高さで減風効果があることから、明らかな下枝の枯れ上がりの影響は認められない。

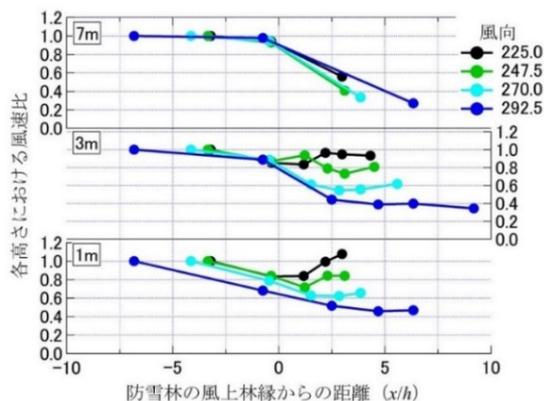


図 13 風速比と防雪林の風上林縁からの距離の関係
横軸は風が通過した距離 x を平均樹高 h で除した値。
風向 225.0°は防雪林に対して直交風にあたる。

2.4. 吹雪発生時における飛雪流量の観測

2.4.1. ネット式吹雪計による観測概要

ネット式吹雪計による飛雪流量観測の実施日は、平成 29 年 3 月 4 日である。雄信内防雪林における現地調査状況を図 14 に示す。飛雪流量の鉛直分布を計測するため、筒型ネット式吹雪計および箱型吹雪計を用いた。

筒型ネット式吹雪計 5 台（高さ 2m、1m、0.5m、0.3m、0.1m）とタンス型ネット式吹雪計 1 台を 1 セットとし、2 セットで観測を実施した。1 セットは基準点付近に設置し、1 セットは林内と道路側林縁まで移動しながら各観測地点（No.2、No.21、No.22、No.3）に順に設置し、この 2 セットを用いて 2 点同時に飛雪流量を合計 5 回観測した。観測回を run 1 ~ run 5 とした。1 回の観測時間は 10 分であり、飛雪流量が十分に得られなかった場合に観測時間を延長した。筒型ネット式吹雪計の捕捉率は 0.85、高さ毎に異なるタンス型ネット式吹雪計の捕捉率¹²⁾は、各 0.75（高さ 0.1m）、0.7（高さ 0.07m）、0.65（高さ 0.05m）、0.6（高さ 0.02m）とした。

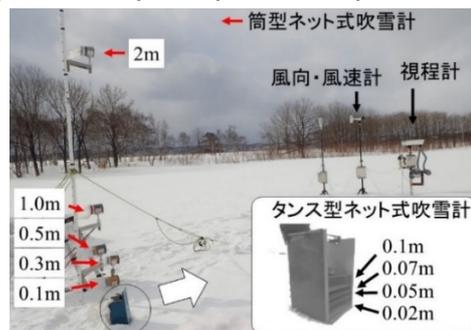


図 14 基準点の飛雪流量観測状況(平成 29 年 3 月 4 日 9 時撮影)。数字は雪面上の観測高さで、ネット部中央の高さを指す。

2.4.2. 飛雪粒子計による自動連続観測の概要

飛雪流量を連続観測するため、飛雪粒子計（新潟電気、SPC-95）による観測を実施した（図 15）。



図 15 基準点 (No.0) に設置した飛雪粒子計

観測期間は、平成 30 年 3 月 8 日から平成 30 年 3 月 31 日である。観測地点は表 2 と図 8 に示す基準点 No.0 (高さ 2.5m) と、道路側の風下林縁の観測点 No.3 (高さ 3m) である。なお、得られたデータについては今後解析する予定である。

2.4.3. 飛雪流量の観測結果と考察

雄信内防雪林で実施した飛雪流量の観測結果⁹⁾を示す。平成 29 年 3 月 4 日 12 時までは風速 5m/s 以上であったが吹雪の発生はなかった。前日までの晴天で雪面が堅いことで吹雪が発生しなかったと考えられる。12 時以降に降雪がみられ、降雪を伴う吹雪が発生した。風向は防雪林に対して斜風 (292.5°) である。

飛雪流量比と吹雪量比の計測結果を図 16 に示す。防雪林に対して斜風 (292.5°) では、吹雪量比が風上林縁からの距離が道路に近づくにつれて低下し、風上の林縁からの距離が 5h 程度となる道路の風上側の法尻で、吹雪量比が 0.2 程度まで低下した。防雪林の平均樹高 h は 12m のため、5h の実際の距離は 60m である。林帯幅が 30m の防雪林において斜風という条件では、防雪機能に与える下枝の枯れ上がりの影響が認められない結果が得られた。

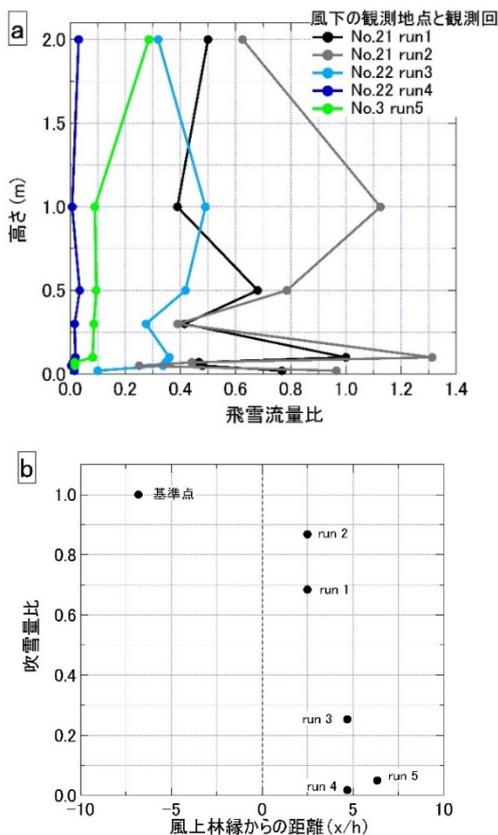


図 16 2017 年 3 月 4 日に発生した吹雪の観測結果
a) 基準点を分母とした飛雪流量比 b) 基準点を分母とした吹雪量比

2.5. 現地観測のまとめ

風速比と吹雪量比の解析結果から、斜風では林風上林縁からの距離が 60m 程で、下枝の枯れ上がりが見られる防雪林でも吹雪の減勢効果が十分に発揮されていることが認められた。ただし、今回の実施期間では降雪を伴う吹雪であること、卓越風向の 1 風向だけの観測だけであることを踏まえると、今後も防雪林に対して斜風だけでなく直交風についても引き続き観測する必要があると考えている。

3. 風洞実験による防雪性能の把握

防雪林の防雪機能を把握するためには、実フィールドで計測することが望ましい。しかし、実フィールドにおける防雪林の林帯幅、枯れ上がりの高さなど、異なる林況における防雪機能の把握、および補助対策工法や管理手法の検討には限度がある。そこで本研究は、任意の林況設定が可能な風洞実験装置を用いて、防雪林の防雪機能を評価することを目的とする。

まずは、防雪林の 1 区画について吹雪時における風況などを再現できるように実験環境を構築し、相関を確認した後、下枝の枯れ上がりによる防雪林の防雪機能の把握、対策工法の検討等を進める予定としている。

平成 28 年度では、前中長期計画中の平成 27 年度に実施した、一般国道 40 号線沿いの天塩町雄信内防雪林 (標準林) における林帯幅、樹木配置、生枝、枯れ枝の空間分布などの林況調査結果に基づき、現況の防雪林を再現した模型を製作し、風洞実験を行った。

平成 29 年度では、防雪林の模型修整手法を検討するため、前中長期計画で製作した防雪林の模型で実験した結果を再解析した。

3.1. 風洞実験の実験環境構築

3.1.1. 実験装置

実験には寒地土木研究所所有の風洞実験装置 (図 17) を使用した。

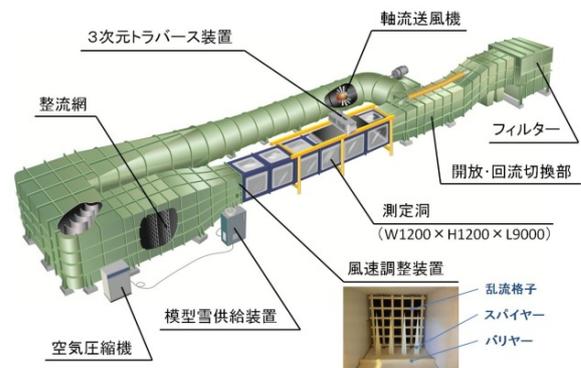


図 17 風洞実験装置



図 18 風洞実験装置のターンテーブルと防雪林模型

装置の主要寸法は、全長約 29m、測定洞の全長約 9m、測定洞の断面 1.2m×1.2m である。測定洞には、風向角を可変できるターンテーブルを備えたベース模型を設置している（図 18）。

3.1.2. 防雪林模型の検討と製作

可能な限り現地状況を再現するため、現地調査に基づいて防雪林模型を製作した。模型は、樹木を配置する地形模型と、地形模型上に配置する樹木模型で構成されている。地形模型の形状は、現地測量による代表断面で製作した。模型の縮尺設定については文献¹³⁾を参考にすると、以下の(1)～(3)を考慮する必要がある。

(1) 自然風に関する相似則

風洞実験では、接地境界層内に収まるよう模型を配置する必要がある¹³⁾。用いた風洞実験装置の接地境界層は下面から高さ 0.4m である¹⁴⁾ため、その範囲内で実験を行う必要がある。

(2) 風洞断面の大きさによる制限

一般的に大きな模型を風洞に配置すると、上方や左右の拘束壁の影響によって自然風の再現に影響が出る。閉塞率（模型断面積の風洞断面積に対する割合）5%以下が1つの指標とされるが、確定的な回答が見当たらないとされている¹³⁾。

(3) 測定項目からの制限

大縮尺となるほど高さ方向の測定誤差が大きくなるほか、小さすぎる模型であれば物理的に取扱が困難となる。

本研究では、これらを総合的に考案して縮尺を 100分の1とした。ここでは(2)で言及した閉塞率を無視している。このように道路周辺における防雪施設（防雪柵、防雪林）を対象とした風洞実験において縮尺を 100分の1としたものは多数¹⁴⁾⁻¹⁷⁾ある。

地形模型は円形状のターン部模型と差替部模型で

構成されている。差替部模型を入れ替えることで異なるパターンの林帯を実験できる。地形模型のサイズに関して、円形状のターン部は 1188.5mm×高さ 50mm であり、差替部は幅 300mm×長さ 1150mm である（図 18）。

植栽の配置について、樹木寸法等を計測した現地調査範囲（約 25m×約 10m）を 1 パターン（図 19）とし、同パターンを繰り返し配置した。本実験では図 19 の青書きで示した樹木は隣接する樹木と大きく接触し、配置が困難であったことから除き、同図朱書きで示した配置で構成した。

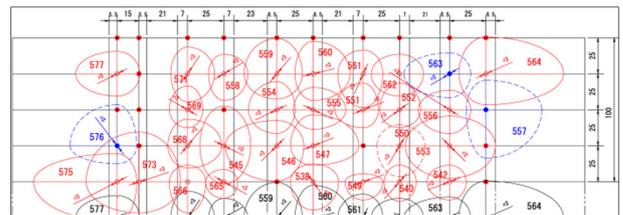


図 19 一般国道 40 号線沿い雄信内防雪林の調査結果から製作した植栽配置構成図

樹木模型は、自然発生した小木や倒木を除いた 31 形状とした（図 18、図 20）。各形状は現地調査に基づいて樹高、枝張、枝下高を再現した。材質は造形しやすく、実験中の修整が容易で、風洞実験での実績¹⁴⁾⁻¹⁶⁾のあるモルトフィルター材（イノアック（株）製）を用いた。フィルター材の厚さ、風速を同一条件下とした場合、単位面積当たりのセル数が増加すると圧力損失も高くなり、フィルター材の通気性が低い。そこで、2 種類のフィルター材を用いて枝葉を造形した。常緑針葉樹では下枝の枯れ上がりが見られるが、この枯れ上がった部分に MF-8（セル数 8 ± 2 個/ 25mm^2 ）を、上部にある緑色の生きた枝葉に MF-13（セル数 13^{+3}_{-2} 個/ 25mm^2 ）を使用した。落葉広葉樹は枯れ枝部分と同規格とした。なお樹木の幹は、樹木を問わず真鍮の棒（3mm）を使用した。

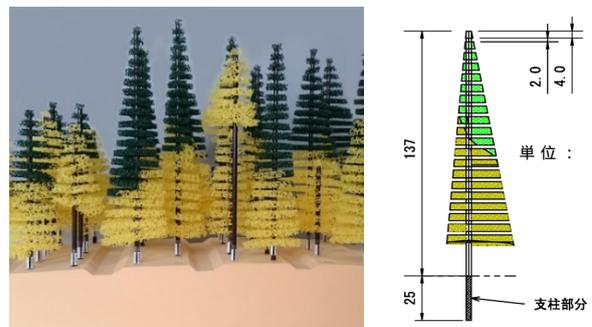


図 20 樹木模型

3.2. 現地観測の再現実験

現地観測で得られた風況が模型上で再現されているか確認するため、模型上の防雪林風下および、より風下の道路付近において風速計測を行い、これらと現地観測によって得られた風況との比較を行った。

3.2.1. 実験条件の設定

測定洞内の鉛直風速分布は、上空ほど風速が増す自然の風を模擬するため、べき法則（べき指数は田園地帯を想定した 0.15¹⁸⁾）に近似するよう、気流を調整した¹⁴⁾。

実験風速は、模型雪に活性白土を用いた風洞実験で吹きだまりの再現性が高いとされる風速 4.5 m/s 前後（地面からの高さ H=50mm¹⁹⁾を参考に、風速 7 m/s（但し H=400mm での風速）とした。

防雪林模型は、2. の現地観測において卓越風向であった西からの風を再現するよう、測定洞内のターンテーブル上に模型を配置した（図 18）。

3.2.2. 計測方法

風速計測には熱線流速計（日本カノマックス(株)製 IHW-100）を用いた。計測は、I型プローブを使用し1計測の計測間隔を 10ms として1箇所当たり 3072 個計測し、計測データを平均した。

計測は、2. で記した、固定観測を行った4地点（防雪林の風上側の基準点（No.0 に相当）から風下側の道路法尻の地点 No.4 まで）のほか、道路上の風速分布の把握を目的として、道路上の2地点（2車線道路の各車線上）を追加し、計6地点で行った。計測点の位置を図 21 に示す。計測は、現地観測における各固定観測地点+道路上と、この地点を道路縦断方向に 25mm 毎ずらした5測線で行った（後述の No.1 を除く）。

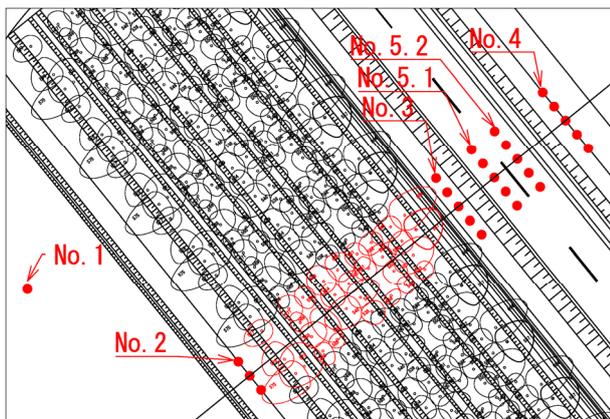


図 21 風速計測点位置図

各地点のデータは 5 点を平均したものを使用した。計測高さは共通で地面から高さ 150mm までは 5mm 間

隔、それ以降計測上限である 400mm まで 10mm 間隔で計測した。なお、2. で述べた基準点（No.0）に相当する風洞の基準点は、風洞壁面や模型による影響が受けにくい風洞中央の風上側計測上限の計測点 No.1（図 21）に設定した。

3.2.3. 現地観測データの処理

現地観測の風速比の算出には、2. で述べた観測期間（平成 28 年 12 月 22 日～平成 29 年 3 月 18 日）における風向・風速の観測結果から、西の風向を抽出して平均化したものを用いた。なお、基準点で観測された風向・風速は、高さ 3m である。基準点の高さ 1m と 7m の風速を対数則で計算し、これを基準（分母）として道路側風下 No.3 の風速（分子）を風速比として表現した。

3.2.4. 実験結果と考察

計測点横断方向の風速比（現地・風洞）を図 22 に示す。

図中の横軸は、道路横断方向の計測点を示し、道路の中央を 0 として風上側をマイナス、風下側をプラスとして風洞実験での縮尺で示した。縦軸は、現地観測と風洞実験それぞれの風速比である。

風洞実験における風速比は、防雪林直前風上の地点 No.2 で僅かに低下し、防雪林を通り抜けた直後の地点 No.3 で大きく低下した。さらに、そこから風下の道路風下法尻に至る（No.3～No.5.2）間、風速比は回復の傾向を示した。この傾向は現地観測と一致が見られた。

道路防雪林の風上近傍の地点 No.2 の風速比は、高さ 1m で風洞実験の値が現地観測に比べて僅かに高いものの、上方に位置する高さ 3m および 7m では、ほぼ一致した。

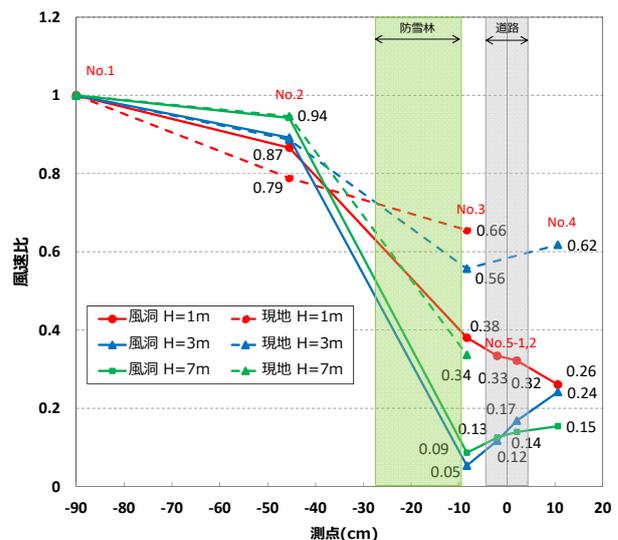


図 22 計測点横断方向の風速比（風洞・現地）
測定点別に着目すると地点 No.2 の防雪林風上側林

縁では防雪林による風速低下や斜風による林縁に沿った風の流れの影響が考えられる状況であったが、現地観測と風洞実験において相関が高い結果が得られていた。一方、道路防雪林の風下側直下の地点 No.3 の風速比は、風洞実験では現地観測に比べ、高さによらず低い値となった。また、現地観測と比較した風速比は、高さ 1m で約 1/2、3m で約 1/11、7m では約 1/2.6 と低く、特に高さ 3m での乖離が大きい。道路風下側法尻近傍の地点 No.4 の風速比は、現地観測が 3m のみであるが、風洞実験では現地観測に比べて低い値を示した。

3.3. 防雪林模型の下枝の枯れ上がりによる影響解析

0 で示したとおり、下枝の枯れ上がりが見られる高さにおいて、道路付近の風速が大きくなることについては、現地観測結果を再現したが、風洞実験の結果は防雪林による減風効果が高く、現地観測結果と比べると乖離がみられた。そこで、防雪林の模型修整手法を検討するため、前中長期研究計画期間内に実施した別の防雪林模型の風洞実験結果を再解析した。

3.3.1. 樹木模型

利用した樹木は、下枝高だけを変えた 3 種である(図 23)。平均樹高は 5m を想定した模型で、模型の高さは 50mm である。樹木配置は、下枝の枯れ上りを表現するため、道路吹雪対策マニュアル(防雪林編)に従い標準林タイプで、樹木列数 5 列、千鳥間引きの林況を表現した。下枝の枯れ上がりによる影響解析のため、林縁と林内における枝下の高さを変えた模型を利用した(図 24)。なお、枝下高 5mm の樹木は下枝の枯れ上がりの無いものとする。

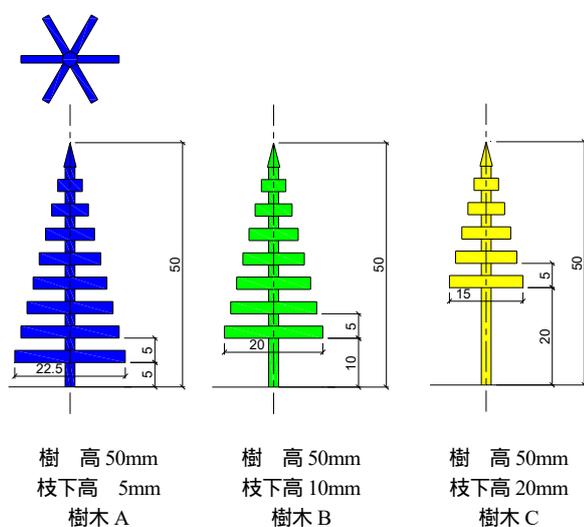


図 23 樹木模型

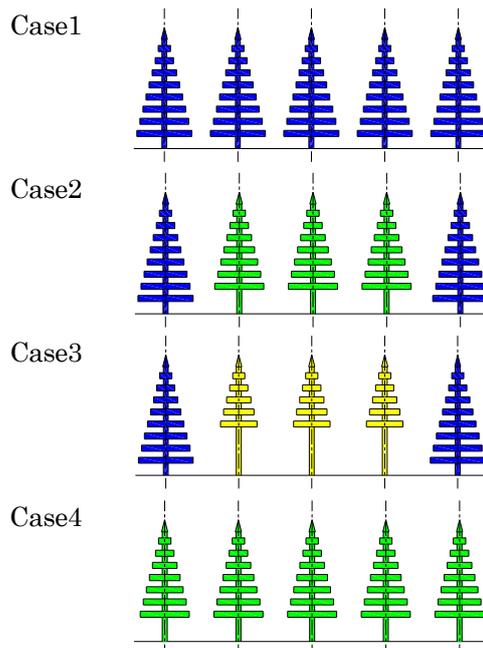


図 24 植栽配置側面図

- Case1 : 林縁・林内に樹木 A、
- Case2 : 林縁に樹木 A、林内に樹木 B、
- Case3 : 林縁に樹木 A、林内に樹木 C、
- Case4 : 林縁・林内に樹木 B

3.3.2. 計測手法

計測には、PIV (粒子画像流速測定法:Particle Image Velocimetry)を用いた。計測原理は、流れ場に投入した微小なトレーサー粒子(追跡子)にレーザーをシート状に照射して流れの断面を可視化し、ハイスピードカメラによる連続撮影された画像から、トレーサー粒子の移動量を解析して流速を計測する方法である。よって、側面からみた面的な流れ場を把握することが可能である。トレーサー粒子は、模型雪として使用している活性白土である。PIV で解析可能な供給量は 230g/min である¹⁶⁾。なお、模型雪の動きは空気の流れと完全には一致せず、計測結果は風速ではなく、模型雪の移動速度であるため、流速とする。

風上(分母)と風下(分子)における流速の比から流速比を求め、防雪機能を評価する指標として利用した。画像の撮影は毎秒 2,000 枚で 5 秒間行い、画像 2 枚 1 組から得られる流速分布を 5,000 組分平均したものを計測結果とした。計測面は鉛直面および水平面である。

3.3.3. 実験装置

実験には寒地土木研究所の風洞実験装置(図 17)を使用した(3.1.1.を参照)。測定洞には、風向角を可変できるターンテーブルを備えたベース模型を設置した(図 25)。

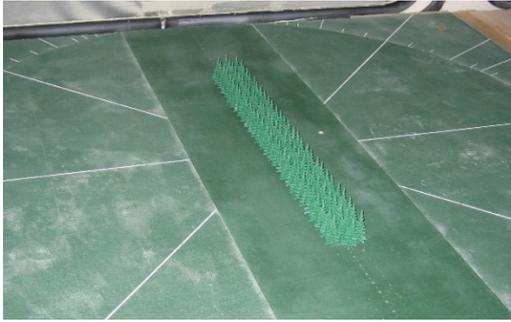


図 25 樹木模型を配置した様子

3.3.4. 実験結果と考察

防雪林の模型は、標準的な防雪林の縮尺を 100 分の 1 スケールとしている。防雪林模型の高さは 50mm であり、5m 相当の防雪林を想定している。この実験で得られる結果は事例解析として成り立つが、たとえば現地調査を実施している雄信内防雪林など、他の防雪林に適用するためには、一般解として表現した方が合理的である。そこで本稿では、防雪林の現地観測結果（図 16）と同様に、防雪林の風上林縁からの距離を樹高で除した高倍距離で表現する。なお、水平方向に計測された流速比は、乗用車ドライバーからの視線高さ（ $H=1.5\text{m}$ ）に相当する模型高さを $h=15\text{mm}$ として、データを整理した。

図 26 に、模型の高さ $h=15\text{mm}$ における風下の流速比を示す。林縁の枝下を維持し、林内の枝下高を 5mm、10mm、20mm（Case1～Case3）と変化させると、防雪林模型から風下の水平方向における流速比は上昇する。下枝高 20mm の防雪林（Case3）では枝下高 5mm（Case1）に比べて平均 1.3 倍流速比が高い結果であった。林縁における下枝を維持させ、林内の枝下高だけを変化させた結果であるため、防雪林内の下枝の枯れ上がりによる影響と考えられる。

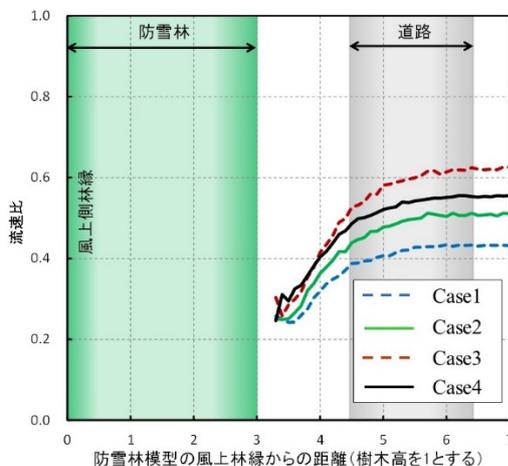


図 26 防雪林模型から風下の水平方向における流速比。(ドライバーの視線高さに相当する $h=15\text{mm}$ の風速比)

図 27 に、林縁・林内全ての枝下高を 10mm としたときの流速比（図 26 の Case4）と、林内だけ枝下高 10mm としたときの流速比（図 26 の Case2）の比を示した。流速比が林縁のみ枝下高を 5mm として維持したものと比べ、道路を想定した位置では最大 0.9（全体では最大 0.8）まで低下したことが読み取られる。林縁・林内全ての枝下高の高さを変えた場合（Case4）は、下枝の枯れ上がりの影響と考えられる。一方、林内だけ下枝高を変えた場合（Case2）は、言い換えれば、林縁の下枝を維持した結果と考えられる。

実際の防雪林において、道路側風下の風速に与える影響だけに着目すれば、「下枝の枯れ上がり」による防雪効果の低下と「林縁における下枝の維持」による防雪効果の持続の両者が相殺するように、林縁に対策を講じれば、防雪林内の下枝の枯れ上がりによる減風効果の低下による影響を抑えることができ、防雪林の防雪性能を維持できるものと期待される。

本結果を踏まえて次年度では、3.1.2. で製作した防雪林模型の枯れ上がり部分においては、特に林縁部を慎重に修整したい。

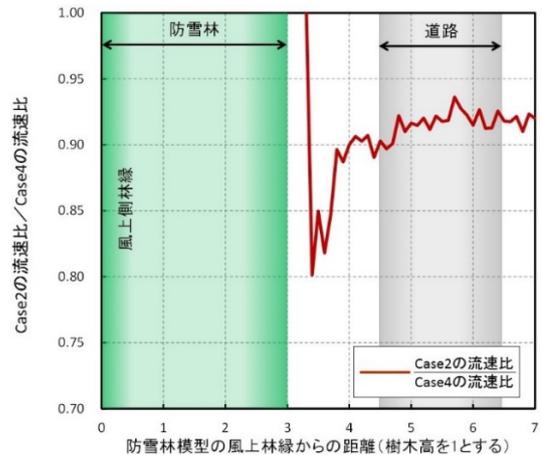


図 27 枝下高 10mm とした防雪林模型における林内 / 林縁・林内の流速比(林縁・林内とも枝下高を 10mm とした模型による流速比を基準としたもの。 $h=15\text{mm}$)

4. 今後に向けて

平成 30 年度では、引き続き防雪林の構成要素と防雪性能の現地調査による課題抽出、および風洞実験の実施に取り組みつつ、防雪性能が低下した防雪林への補助対策の提案に取り組む予定である。

謝辞

現地調査に際し、国土交通省北海道開発局留萌開発建設部、同・羽幌道路事務所、国土交通省北海道開発

局網走開発建設部および同・網走道路事務所より資料提供や観測機材の設置に協力いただいた。ここに記して感謝の意に代えたい。

参考文献

- 1) 独立行政法人土木研究所寒地土木研究所：道路吹雪対策マニュアル - 防雪林編 - (平成 23 年版)、2011
- 2) 伊東靖彦：防雪林の課題について - 雪氷研究大会 (2009・札幌) の企画セッションにおける討議を基に - . 日本雪工学会誌、26、pp.9-15、2010
- 3) 竹内政夫、石本敬志、野原他喜男：吹雪量と飛雪量垂直分布、雪氷、37(3)、pp.114-121、1975
- 4) 松沢勝、加治屋安彦、竹内政夫：風速と降雪強度から吹雪時の視程を推定する手法について、北海道開発土木研究所月報、593、pp.20-27、2002
- 5) 櫻井俊光、伊東靖彦、渡邊崇史、松澤勝：防雪林における風速の変化に関する研究、寒地技術論文・報告集、32、pp.102-104、2016
- 6) 松澤勝、伊東靖彦、渡邊崇史、住田則行、山崎貴志、幸田勝、高玉波夫、佐藤圭洋、渡辺淳、鈴木哲：防雪林の機能向上に関する研究、平成 27 年度成果報告書、2017
- 7) Sakurai, T., Y. Ito, T. Watanabe, M. Matsuzawa: Preliminary investigations on the effects of branch withering and the thinning of trees for living snow fences in Northern Hokkaido, Japan, 96th International Conference on the Transportation Research Board, Annual meeting, 17-01849, pp.1-11, 2017
- 8) Sakurai T, Y. Ito, T. Watanabe, M. Matsuzawa, Study of wind speed changes with differences in wind direction through the living snow fence, in The 32nd International Symposium on Okhotsk Sea & Polar Oceans, A-7, pp.1-4, 2017
- 9) 櫻井俊光、伊東靖彦、武知洋太、松澤勝：斜風時における道路防雪林の枯れ上がりの影響に関する研究、寒地技術論文・報告集、33、pp.125-130、2017
- 10) Sakurai, T., Y. Ito, M. Matsuzawa, Effect of branch withering in living snow fences on blowing-snow mitigation in Northern Hokkaido, Japan, in The 1st International Workshop on Wind-Related Disasters and Mitigation, 44, pp.1-10, 2018
- 11) Tabler, R.D., Controlling blowing and drifting snow with snow fences and road design, NCHRP 20-7(147), Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., 2003
- 12) 松澤勝：降雪を伴う吹雪時の吹雪量の推定手法に関する研究、雪氷、78(5)、pp.255-268、2016
- 13) 社団法人日本鋼構造物協会 (編)：構造物の耐風工学、東京電機大学出版局、ISBN:4501615702、pp.616、1997
- 14) 松澤勝、上田真代、渡邊崇史、住田則行、山崎貴志、石川真大：ライフサイクルに応じた防雪林の効果的な育成・管理手法に関する研究、平成 23 年度成果報告書、2013
- 15) 山田毅、伊東靖彦、加治屋安彦、小杉健二、根本征樹：風洞実験による防雪林の樹木形態と防雪効果の関係について、北海道の雪氷、25、pp.85-88、2006
- 16) 山田毅、伊東靖彦、加治屋安彦、松澤勝、小杉健二、根本征樹、望月重人：風洞実験による防雪林の樹木形態と防雪効果の関係について、北海道の雪氷、26、pp.21-24、2007
- 17) 山崎貴志、住田則行、幸田勝：新型路側設置型防雪柵の開発について - 風洞実験による防雪機能調査 -、第 28 回ゆきみらい研究発表会論文集、804B、40、pp.1-4、2016
- 18) 風洞実験法ガイドライン研究委員会 (編)：実務者のための建築物風洞実験ガイドブック、財団法人日本建築センター、ISBN:978-4-88910-148-5、2008
- 19) 老川進、苔米地司、石原孟：建物近傍の雪吹きだまりの風洞総時速に関する考察、日本雪工学会誌、23、pp.13-32、2007
- 20) 山崎貴志、住田則行、中村隆一：吹雪風洞実験における防雪林縮尺模型と PIV について、雪氷研究大会(2014、八戸) 講演要旨集、pp.240、2014

5.3 吹雪対策施設及び除雪車の性能向上技術の開発

5.3.2 防雪柵の端部・開口部対策に関する研究

担当チーム：寒地道路研究グループ（雪氷チーム）

技術開発調整監（寒地機械技術チーム）

研究担当者：松澤勝、伊東靖彦、小中隆範、櫻井俊光(雪氷)
植野英睦、幸田勝(機械)

【要旨】

吹雪による通行止めの対策として、防雪柵など吹雪対策の整備が進められているが、柵端部や開口部において、視程障害により多重事故等が発生している。しかし、防雪柵端部や開口部における吹雪時の視程急変メカニズムや、車両の走行に影響を与える視程急変の特徴は解明されていない。また、視程急変箇所対策として様々な方法が試みられているが、各々の対策効果は定量的に明らかとなっていない。そこで本研究では、視程急変メカニズムの解明及び視程急変箇所対策技術の効果の定量化を行い、視程急変箇所対策の条件に応じた対策技術の提案を行うことを目的とするものである。

平成 29 年度は視程障害移動観測車による現地観測、石狩吹雪実験場における定点気象観測と、風洞実験を行った。

キーワード：吹雪、視程急変、吹雪対策、防雪柵開口部、エンドエフェクト、移動気象観測

1. はじめに

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、多重衝突事故や車両の立ち往生などの交通障害が多く発生している。吹雪による通行止めは北海道内の国道における通行止め要因の4割を占めており、その対策として防雪柵など吹雪対策の整備が進められている。しかし、防雪柵整備区間であっても柵端部や開口部において、突発的な視程障害により多重事故等が発生しており、視程急変対策に関する行政ニーズは高い。公共事業費のコスト縮減が求められている中、吹雪対策施設についても、整備の優先づけや効率的な道路管理が重要となっている。そこで視程急変箇所対策の効果的な整備を通じて雪氷災害の被害軽減に寄与するため、本研究では視程急変メカニズムを解明し、車両の走行に影響を与える視程急変の特徴を明らかにすることを旨とするものである。

平成 29 年度においては、(1) 視程障害移動観測車による移動気象観測、(2) 石狩吹雪実験場における定点気象観測、(3) 風洞実験を行った。

2. 防雪柵端部・開口部における視程急変メカニズムの解明

防雪柵端部や開口部における視程急変メカニズムを



図 - 1 位置図

解明するにあたっては、風の収束に伴う飛雪によって局所的な視程障害（以下、エンドエフェクトという）が発生した時の条件（防雪柵周辺の地形条件、気象条件等）を整理し、把握することが重要である。そこで現道の防雪柵設置区間において移動気象観測を、石狩吹雪実験場において定点気象観測を行った。

2.1 視程障害移動観測車による移動気象観測

一般国道 231 号、一般国道 337 号及び一般国道 393 号(図 - 1)において、視程障害移動観測車(図 - 2)を用いて、平成 29 年 1 月~2 月と平成 29 年 12 月~平成 30 年 3 月の 2 冬季の吹雪発生時に、移動気象観測を行った(ただし、一般国道 393 号は平成 29 年 12 月~平成 30 年 3 月に観測)。区間内には防雪柵の開口部が、合わせて 43 箇所存在する。

視程障害移動観測車には、ビデオカメラ、前方散乱型視程計(TZF-31A)、超音波式風向風速計(PGWS-100-3)、温度計(R003-1YRP631)、GPS センサー(M12P/10S)、ブレーキ踏力計、アクセル踏量計及びハンドル操舵角計が搭載されている。この視程障害移動観測車を用いて道路上の防雪柵設置部、防雪柵端部、防雪柵開口部の視程急変画像取得と、それに対応した気象状況等の観測を行った(表 - 1)。データ取得間隔は 0.1 秒である。移動気象観測は観測ドライバーと調査員の 2 名により行った。



図 - 2 視程障害移動観測車

表 - 1 移動気象観測の内容

観測要素	走行中の道路映像、気温、風向風速、視程
記録間隔	0.1秒
観測方法	視程障害移動観測車(観測車)1台を利用して観測を行った ※観測車は、ビデオカメラ、気温計、風向風速計、視程計、GPS センサーを搭載
観測箇所	5区間(図-1参照) ※同一区間を様々な気象条件で繰り返し観測
観測回数	各箇所において2回(1日/回)合計6回
観測時間	計120時間以上(各区間1時間以上) ※吹雪が発生している日に、繰り返し観測を行った ※視程障害(エンドエフェクト)の発生が確認できるデータを4時間以上含めた

データ解析を行うに当たり、データの解析対象区間を以下のとおり定義した。開口部については、防雪柵開口部の前後にある防雪柵、それぞれの中点から中点までを解析対象区間とした(図 - 3 上)。端部については、防雪柵の中点から端部までと端部から 50m までを解析対象区間とした(図 - 3 下)。

視程は最低視程 200m 以下のデータを、風速は平均風速 2m 以上のデータをそれぞれ解析対象データとして抽出した。また、解析では 10m 移動平均(観測点の前後 5m の範囲における平均値)データを使用した。

評価する指標として、視程比及び風速比を以下で定義する。

視程比 = 対象区間の最低視程 / 対象区間の視程中央値

風速比 = 対象区間の最大風速 / 対象区間の平均風速

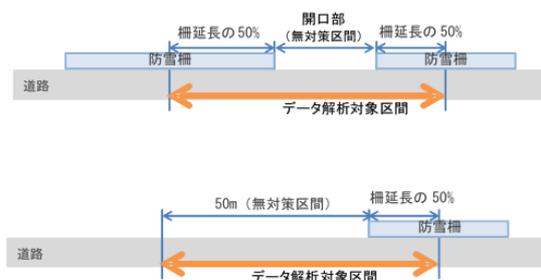


図 - 3 データ解析対象区間
(上: 開口部 下: 端部)

2.2 視程障害移動観測車による観測結果

代表的な観測事例による解析と全データによる解析の 2 つの方法で結果を述べる。

2.2.1 代表的観測事例による解析

ここではエンドエフェクトの影響が見られた開口部の 2 観測事例について記述する。観測事例 1 は開口部が広い事例、観測事例 2 は狭い事例である。図 - 4、図 - 6 は観測した防雪柵開口部の詳細図及び視程、風向風速、移動平均視程の観測結果である。詳細図には道路上の吹きだまり及び圧雪範囲も示している。赤線は開口部左右にある防雪柵設置区間(開口部除く)の平均視程である。開口部以外の平均視程と全体の移動平均視程を比較した時に、移動平均視程が下回っている箇所がエンドエフェクトの影響範囲といえる。図 - 5、図 - 7 には移動観測時の道路状況を進行方向順に示した。

観測事例1 (一般国道231号 観測区間)

観測事例1 (観測日 2017年1月28日 10時45分) (図-4)の観測区間は、丘陵地にある上下2車線道路で風上側に300m以上の平坦地があり、吹走距離が長い箇所である。観測時は降雪があった。

防雪柵開口部(22m)の道路終点側では風速13m/s前後の西風が吹き込み、防雪柵に対して斜風となっているため(青矢印)開口部より道路終点側まで路面上の雪が道路全幅で吹き払われており、舗装面が露出

している(図-5)。防雪柵開口部の道路起点側では風速15m/s前後の北西風が吹き込み、防雪柵に対してほぼ直角であるため(青矢印)道路上の雪は開口部とほぼ同じ位置で吹き払われている。移動平均視程が開口部を含まない平均視程を下回っている区間は開口部の道路起点側で8m程度(図-4下の緑丸部分)となっており、そこまでエンドエフェクトの影響が見られる。視程は開口部から離れた区間に比べ悪くなっており、風速も大きくなっている。

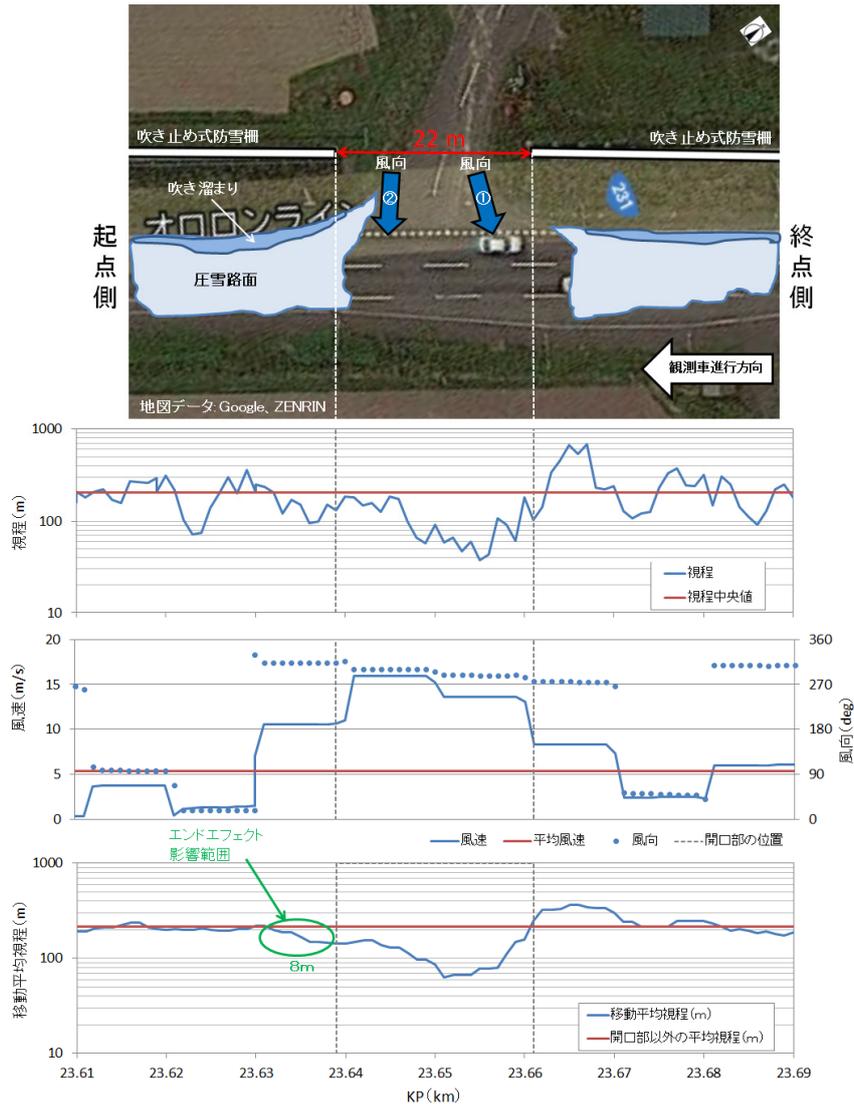


図-4 観測事例1 (観測日 2017年1月28日 10時45分)(上: 平面図、下: 気象観測結果)

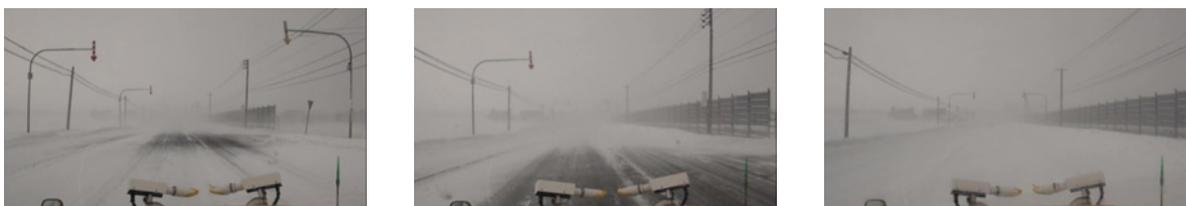


図-5 観測時の道路状況 (観測事例1) (左: 開口部手前、中: 開口部、右: 開口部通過後)

観測事例2 (一般国道231号 観測区間)

観測事例2 (観測日 2017年1月28日9時55分)
 (図-6)の観測区間は、海岸沿いの上下2車線道路で、風上側に100m程度の平坦地があり、比較的吹走距離が短い箇所である。観測時は降雪があった。

防雪柵開口部(9m)では風速6m/s前後の西風が吹き込み、防雪柵に対して斜風となっている(図

-6の青矢印)、開口部より風下側に位置する道路上の雪が吹き払われており、舗装面が露出している(図-7)。移動平均視程が開口部を含まない平均視程を下回っている区間は開口部の前後で最大で8m程度(図-6下の緑丸部分)となっており、そこまでエンドエフェクトの影響が見られる。同区間では開口部から離れた区間と比べ視程の悪化が見られる。

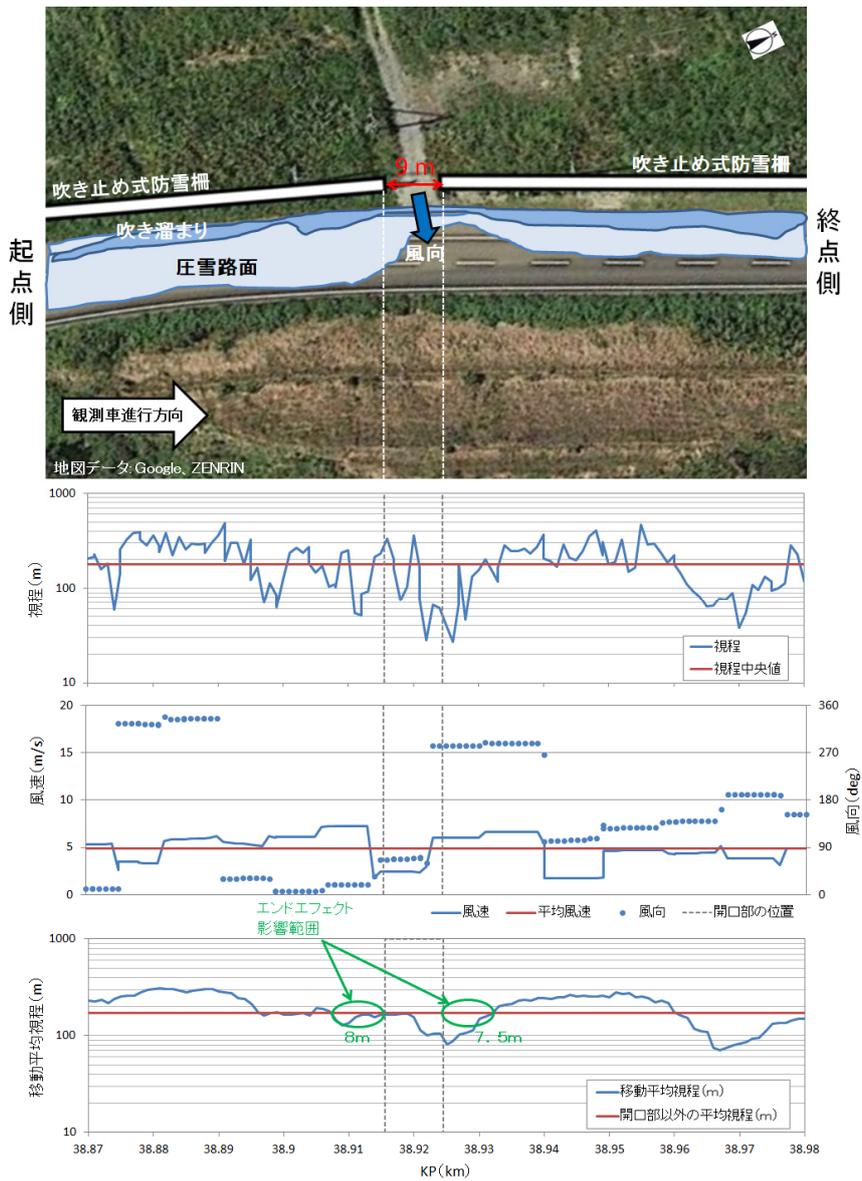


図-6 観測事例2 (観測日 2017年1月28日9時55分)(上:平面図、下:気象観測結果)

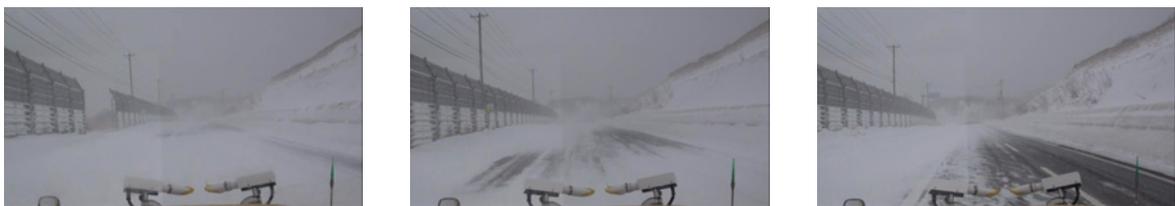


図-7 観測時の道路状況 (観測事例2) (左:開口部手前、中:開口部、右:開口部通過後)

2.2.2 全データを使用した解析

ここでは全データを使用した解析について記述する。

開口部延長と視程比の関係を図 - 8 に示す。箱ひげ図の区分は、最小値、25%タイル値、中央値、75%タイル値、最大値である（以下、図 - 13まで同様）。

図より、開口部延長が増加するに従って視程比が低下していることがわかる。特に開口部の延長が 8m未満では視程比中央値が0.7、8m以上では視程比中央値が0.6以下と大きく変化している。

次に開口部延長と風速比の関係を図 - 9 に示す。開口部延長が増加するに従って、風速比が増加する傾向が見られる。ただし、開口部の延長が 8m未満では風速比中央値が1.2、8m以上では風速比中央値が1.3とその変化は緩やかであった。

次に風向角（なお、風向角は、風向と道路延長方向のなす角と定義する。）と開口部の視程比の関係を図 - 10 に示す。直交風に比べて、風向角が 30°以上の時に視程比が小さくなる傾向があった。

風向角と開口部の風速比の関係を図 - 11 に示す。直交風に比べて、風向角が 30°以上の時に風速比が大きくなる傾向があった。

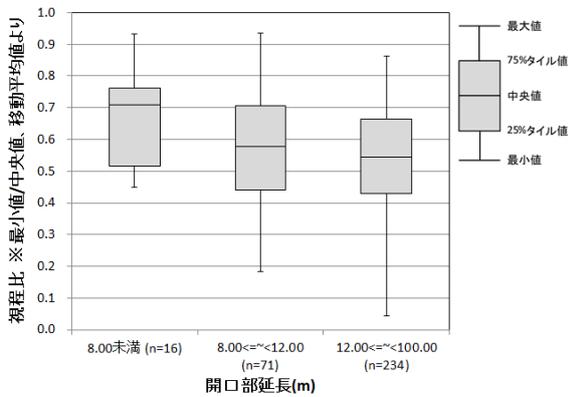


図 - 8 開口部延長と視程比

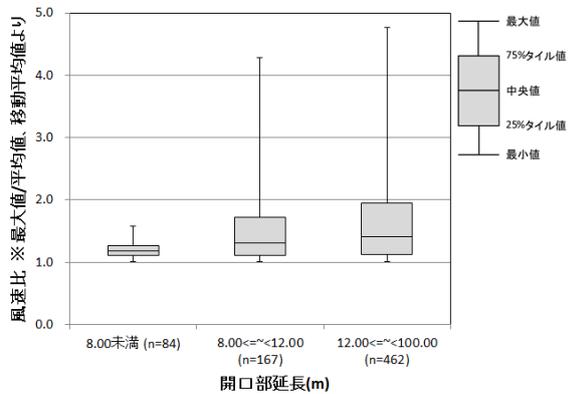


図 - 9 開口部延長と風速比

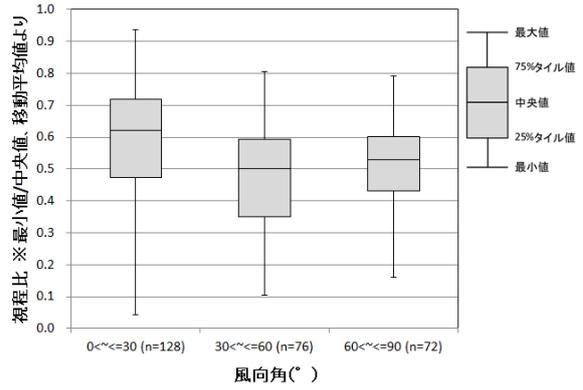


図 - 10 風向角と視程比（開口部）

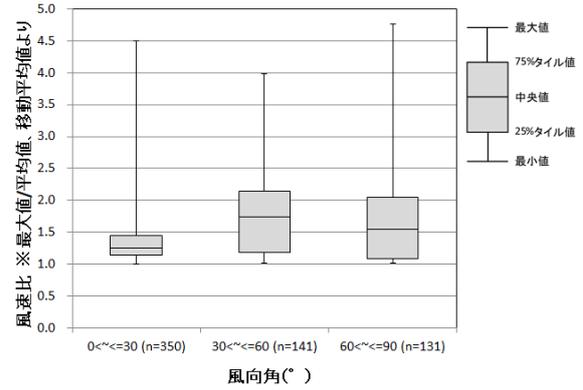


図 - 11 風向角と風速比（開口部）

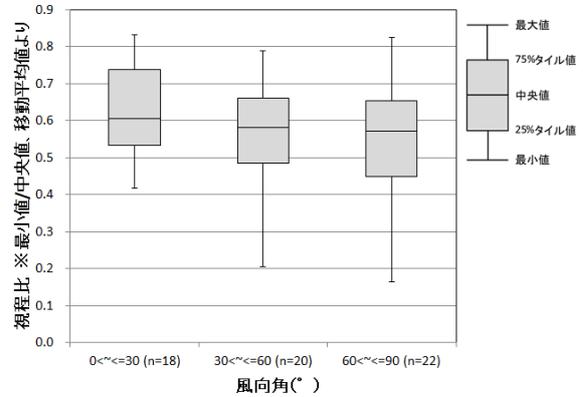


図 - 12 風向角と視程比（端部）

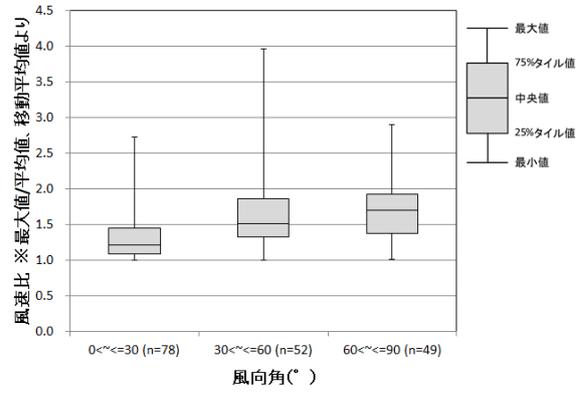


図 - 13 風向角と風速比（端部）

風向角と端部の視程比の関係を図 - 12 に示す。風向角が大きくなるに従い、視程比が小さくなる傾向があった。

風向角と風速比の関係（端部）を図 - 13 に示す。風向角が大きくなるに従い、風速比が大きくなる傾向があった。

2.3 定点気象観測

防雪柵開口部における、気象条件（風向風速、視程）と防雪柵開口部からの距離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、平成 30 年 1～3 月に定点気象観測を行った。観測を行うに当たり、吹き止め式防雪柵 102m（開口部 9m 含む）を冬期主風向となる西北西に対し直交する向きに設置した（図 - 14）。観測機器の設置位置については、基準点を防雪柵風上側 20m に、観測点を防雪柵開口部、風上側路肩付近（6.5m）、風下側路肩付近（27.5m）とした（図 - 15）。

今後、データ整理及び解析を行う予定である。



図 - 14 吹き止め式防雪柵

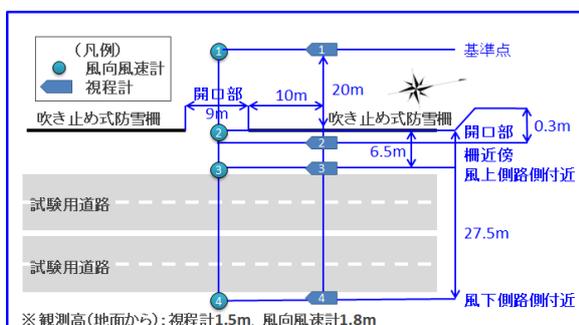


図 - 15 観測機器設置図

2.4 模型防雪柵を用いた風洞実験による開口部の影響解析

防雪柵端部や開口部における視程急変箇所の状況を把握するためには、実フィールドで計測することが望ましいが、計測条件の設定が困難である。そこで本研究では、様々な条件下での計測の設定が可能な風洞実験装置を用いて、防雪柵端部や開口部における視程急変の状況を把握、対策工法の検討を行う。

平成 28 年度は、現道の設置状況に基づき、風洞実験用の縮尺模型を製作した。

平成 29 年度は、模型を追加製作するとともに、風洞実験を行い、防雪柵の開口部周辺における風況の観測を行った。

2.4.1 実験装置

実験には寒地土木研究所所有の風洞実験装置（図 - 16）を使用した。

装置の主要寸法は、全長約 29m、測定洞の全長約 9m、測定洞の断面 1.2m × 1.2m である。測定洞には、風向角を可変できるターンテーブルを備えたベース模型を設置している（図 - 17）。

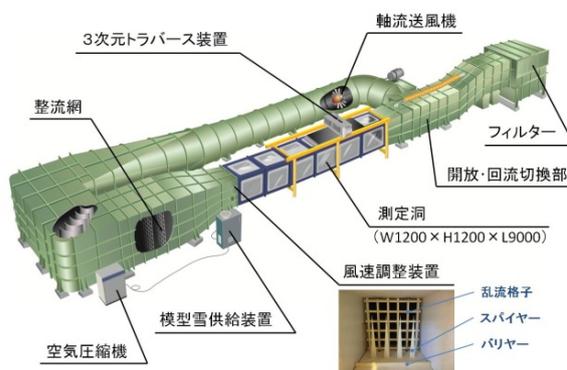


図 - 16 風洞実験装置



図 - 17 実験装置のターンテーブルと製作した防雪柵模型

2.4.2 縮尺モデルの検討と製作

モデルの縮尺設定については文献³⁾を参考にすると、以下の(1)~(3)を考慮する必要がある。

(1) 自然風に関する相似則

接地境界層内に収まるようモデルを配置する必要がある³⁾。用いた風洞実験装置の接地境界層は下面から高さ 0.4m⁴⁾であるため、この範囲にモデルを配置する必要がある。

(2) 風洞断面の大きさによる制限

一般的に大きなモデルを風洞に配置すると、上方や左右の拘束壁の影響によって自然風の再現に影響が出る。閉塞率(モデル断面積の風洞断面積に対する割合)5%以下が1つの指標とされるが、確定的な回答が見当たらない³⁾とされている。

(3) 測定項目からの制限

風速計測においては、大縮尺となるほど高さ方向の測定誤差が大きくなるほか、小さすぎるモデルであれば、物理的に取扱が困難となる。

本研究では、これらを総合的に考案して縮尺を 100分の1とした。このように道路周辺における防雪施設(防雪柵、防雪林)を対象とした風洞実験において縮尺を 100分の1としたものは多数^{4) - 7)}ある。

防雪柵モデルは、2.1で防雪柵の柵端部や開口部の対策が行われている一般国道337号(KP=74.25付近)の柵形式、対策を参考に以下の諸元とした。

- ・防雪柵の形式: 吹き止め式防雪柵(H=5.0m)
- ・有孔板(防雪板)の空隙率: 30%
- ・開口幅のパターン: 5m、7m、10m、20m

防雪柵モデルは、防雪板にはアルミ板を、支柱にはステンレス棒を用い製作した。ただし、開口部付近の防雪板は、3Dプリンタを用いてABS樹脂で製作した(図-18)。

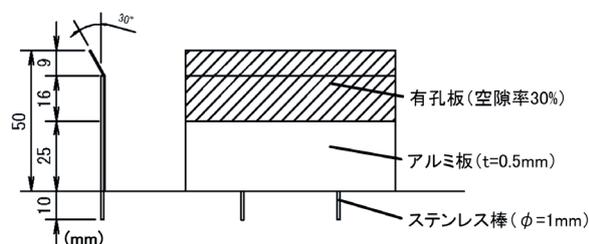


図 - 18 防雪柵モデル(吹き止め式防雪柵)

2.4.3 風洞実験条件の設定

測定洞内の鉛直風速分布は、上空ほど風速が増す自然の風を模擬するため、ベキ法則(ベキ指数は田園地

帯を想定した0.151⁸⁾)に近似するよう、気流を調整した⁴⁾。

実験風速は、モデル雪に活性白土を用いた風洞実験で吹きだまりの再現性が高いとされる風速 4.5 m/s 前後(地面からの高さ H=50mm)⁹⁾を参考に、風速 7 m/s (但し H=400mm での風速)とした。

2.4.4 実験パターン

本実験では2.4.2で製作した防雪柵モデルのうち、開口幅 100mm と 200mm (図-19)を用いた。風向条件は防雪柵に対して直交の場合のほか、斜風の場合に開口部がもたらす影響を把握するため、これらのモデルをそれぞれ風向に対して 45°、90°、135° に設置(図-19、図-20)し計測を行った。

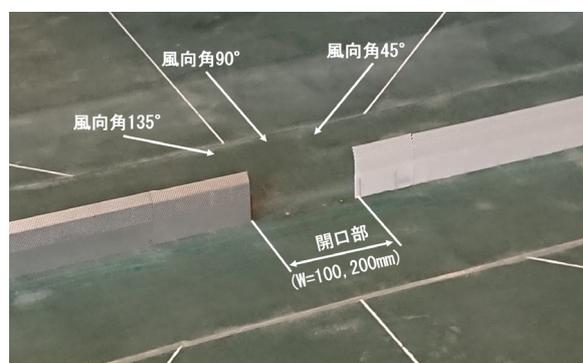


図 - 19 防雪柵開口部

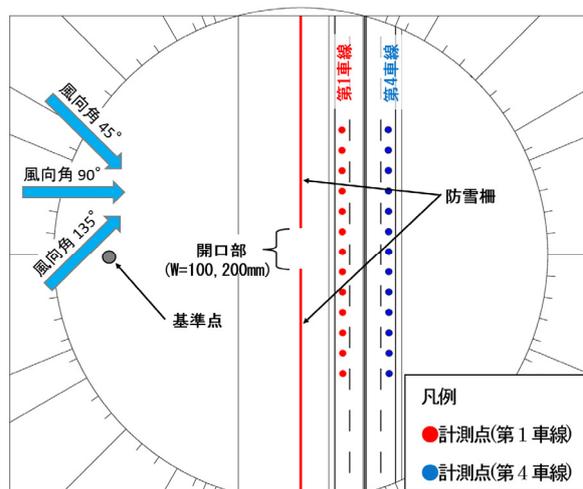


図 - 20 風速計測箇所図

2.4.5 計測方法

風速計測には熱線流速計 IHW-100 (日本カノマックス)を用いた。計測は、I型プローブを使用し、1計測の計測間隔を 10ms として 1 箇所当たり 3,072 個計測し、そのデータを平均した。

計測箇所は、4車線道路における防雪柵開口部がもたらす影響を把握するため、道路上の2列(4車線の最も風上側車線を第1車線として、第1車線上中央と風下側の第4車線上中央)とした。計測では、防雪柵開口部の中央を基準とし、道路縦断方向に、前後300mmを50mm毎に1列あたり13計測点で行った(図-20)。

計測高さは、地面から高さ100mmまでは5mm間隔、それ以降150mmまで10mm間隔で計測した。

なお、風速の基準点は、風洞壁面や模型による影響を受けにくい風洞中央の風上側計測上限の計測点に設定した(図-20)。

以下、この基準点の風速に対し、同じ高さで計測した風速の比を風速比として定義する。

2.4.6 実験結果と考察

風洞実験により取得した風速データの中から、乗用車の目線高さ(高さ1.5m)に相当する高さ $h=15\text{mm}$ のデータを抽出し、風向角(90°、135°)ごとに図-21~図-24に示す。なお、風向角は、風向と道路延長方向のなす角と定義する。風向角45°については、模型が左右対称であることから、風向角135°と同等と考えられるため、ここでは掲載を割愛することとした。ここで図中の横軸は道路縦断方向の測点を示し、防雪柵開口部の中央を0、風下側から見て左側をマイナス、右側をプラスとした。

防雪柵の開口幅100mm、道路に対して風が直交(風向角90°)したときの風速比を図-21に示す。防雪柵直近の第1車線について見ると、開口部端部では吹き止め柵により風が弱められ(風速比0.2程度)、開口部で風速が上昇し、開口部中央で基準点風速を20%程度上回る結果となった。最も風下側の第4車線については、風速比の変化の傾向は第1車線とおおむね同様であったが、風速比のピーク値が第1車線よりも小さくなる傾向にあった。

開口部周辺で集中した風が、防雪柵から離れるに従って拡散しているものと考えられる。

防雪柵の開口幅200mm、道路に対して風が直交(風向角90°)したときの風速比について図-22に示す。第1車線では、風速比のピーク値は、開口幅100mmの場合と同様であるものの、そのピークの範囲はより広い。第4車線については、開口幅100mmの場合と比べて風速比のピーク値が大きく、基準点風速より大きい。

開口部周辺で集中した風が、柵から離れるに従って拡散するものの、開口部の幅が広い場合には、風下に大きく影響するものと考えられる。

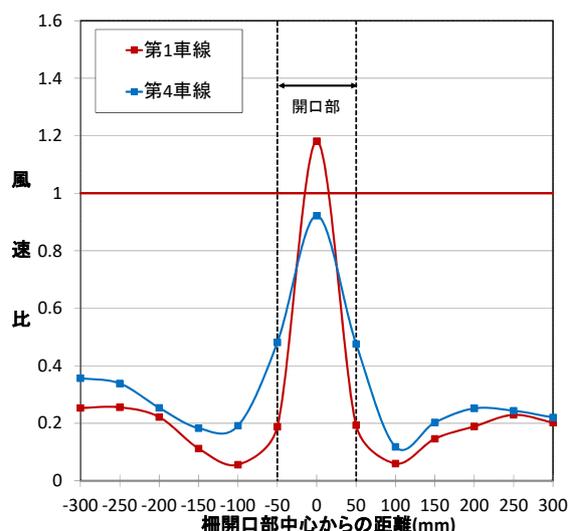


図-21 道路上の縦断方向における風速比 (開口幅100mm、風向角90°)

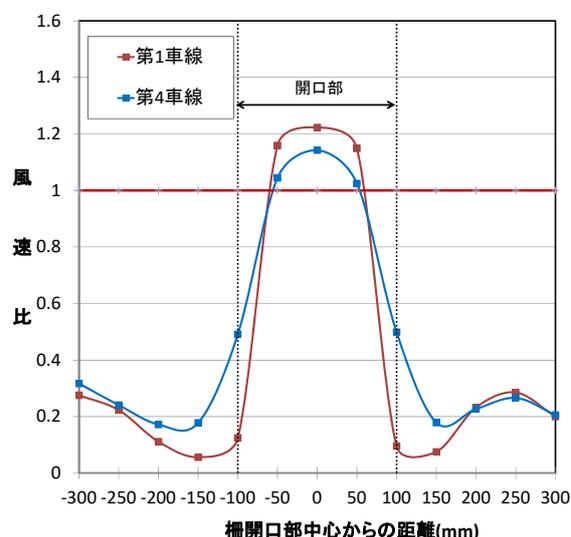


図-22 道路上の縦断方向における風速比 (開口幅200mm、風向角90°)

このように直交風の場合、開口部中心付近で風が強められること、開口幅が広い場合にはより風下に強風が到達する傾向が見られた。

次にこれまでと同様の条件で、風向角135°の場合の開口幅100mmの場合を図-23に、200mmの場合の風速比を図-24に示す。

開口幅100mmの場合(図-23)第1車線では、風速比のピークの位置が風下側(開口部中心からの距離がプラスの方向)に移動するものの、風速比のピーク値は0.9程度と、直交風の場合(図-21、22)と比べて小さかった。第4車線については、風上側(開口部中心からの距離がマイナスの方向)の風速比が大きくなっていった。風洞模型は風の風向角90°の場合に測定

洞の幅員とおおむね一致させているが、模型を 45° 回転させたことにより、測定洞幅員の左右に各々空隙が生じ、気流が回り込んだことが原因と見られる。今後風を回り込まないよう、模型延長の変更や、端板の設置等の対策を講じていきたい。

開口幅 200 mm の場合 (図 - 24) 第 1 車線では、風速比のピーク値が開口幅 100 mm 場合と比べてより大きく、影響範囲も広がっていた。また、直交風の場合よりも風速比のピークの値がやや小さかった。第 4 車線では防雪柵設置部の方が風速比が高い結果となったが、開口幅 100 mm の場合 (図 - 23) と同様に柵端部から気流が回り込んだことが原因と見られる。

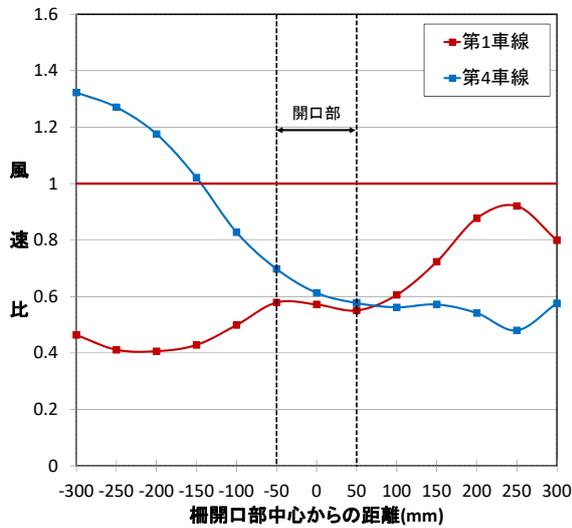


図 - 23 道路上の縦断方向における風速比 (開口幅 100mm、風向角 135°)

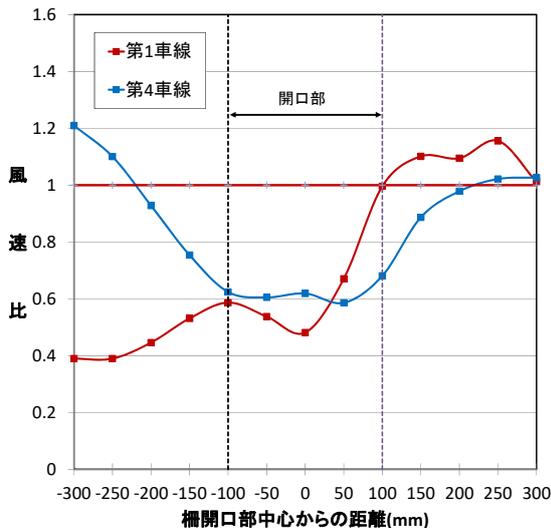


図 - 24 道路上の縦断方向における風速比 (開口幅 200mm、風向角 135°)

3. 視程急変箇所の緩和対策効果の解明

3.1 移動気象観測

2.1 で述べた移動気象観測区間 (図 - 1) には、端部 (開口部) 対策 (図 - 25) が行われている 17 箇所が含まれている。

2.2 で示した条件に加え、開口部延長 10m 以上 20m 未満のデータを解析データとして抽出し、端部 (開口部) 対策箇所の解析を行った。



図 - 25 調査区間に設けられている副防雪柵

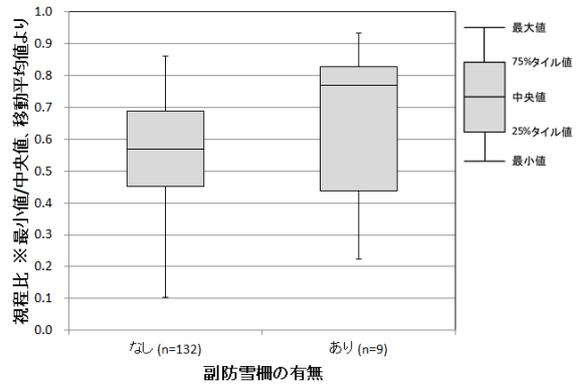


図 - 26 副防雪柵と視程比の関係

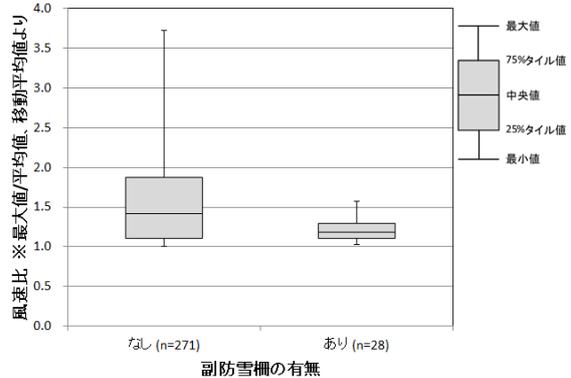


図 - 27 副防雪柵と風速比の関係

副防雪柵と視程比の関係を図 - 26 に示す。副防雪柵が設置している場合に視程比が大きい傾向があった。
副防雪柵と風速比の関係を図 - 27 に示す。副防雪柵が設置している場合に風速比が小さい傾向があった。

3.2 風洞実験

実験条件は 2.4 と同様である。実験を行った副防雪柵の設置例を図 - 28、29 に示す。

ここでは風向角ごとの計測点縦断方向の風速比と開口幅の関係を図 - 30 ~ 図 - 35 に示す。

防雪柵の開口幅 100 mm、道路に対して風が直交（風向角 90°）したときの副防雪柵の有無による風速分布の違いについて図 - 30 に示す。防雪柵直近の車線（第 1 車線）について見ると、副防雪柵がある場合には、風速比のピークを示す位置が副防雪柵側に移行し、風速比の値が上昇した。また強風の影響範囲も拡大する傾向となっていた。副防雪柵は一般に、風の水平方向の流入を抑制すると考えられるが、本実験では開口部付近の風が副防雪柵により整流され、副防雪柵側に誘

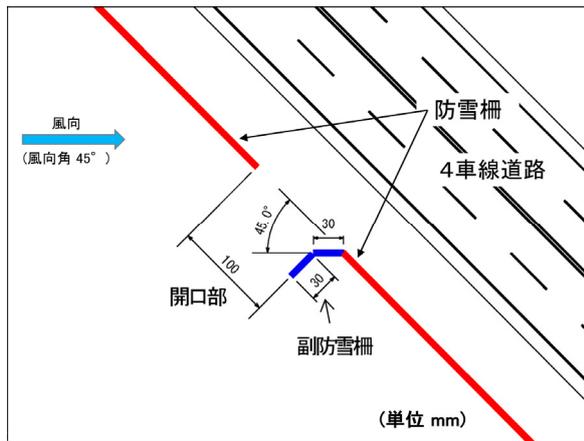


図 - 28 副防雪柵配置例
(開口幅 100mm、副防雪柵 30mm、風向角 45°)



図 - 29 副防雪柵設置例

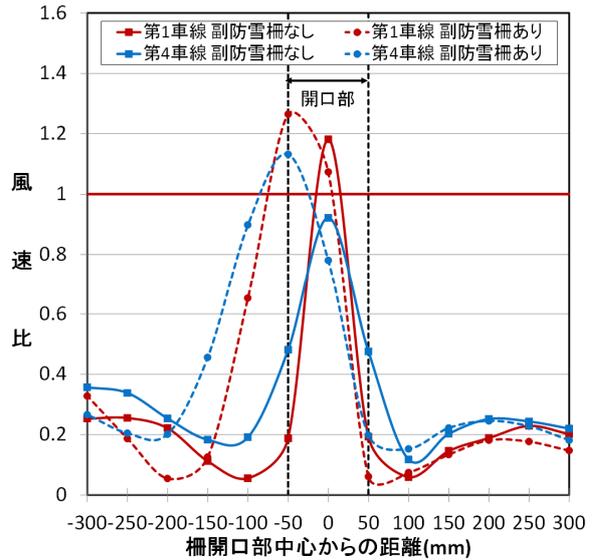


図 - 30 道路上の縦断方向における風速比
(開口幅 100mm、風向角 90°)

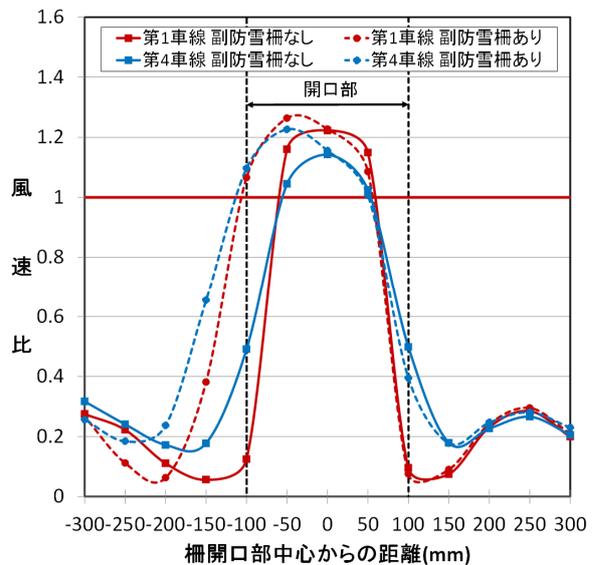


図 - 31 道路上の縦断方向における風速比
(開口幅 200mm、風向角 90°)

導されたのではないかと見られる。詳細については今後、検討することとしたい。最も風下側の第 4 車線については、強風となる範囲の傾向は第 1 車線とおおむね同様であったが、風速比のピーク値が大きくなる傾向にあった。

上記と同様の条件で、防雪柵の開口幅を 200 mm とした場合の副防雪柵の風速比を図 - 31 に示す。

第 1 車線では、風速比のピーク値と副防雪柵の有無による影響は、開口幅 100 mm の場合と同様であるものの、強風の影響範囲はより広がっていた。第 4 車線については、開口幅 100 mm の場合と比べて風速比の

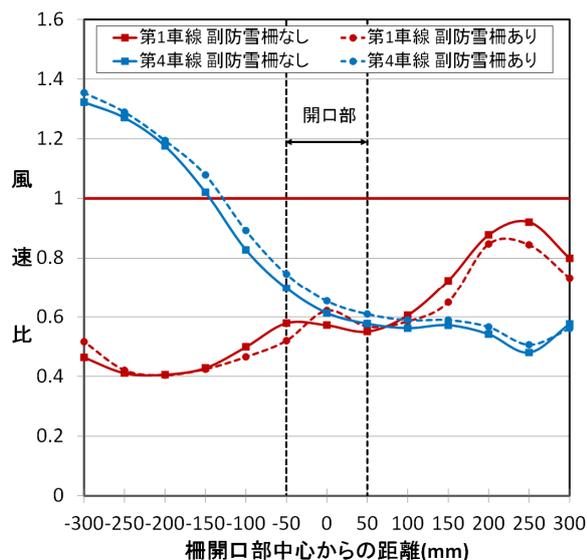


図 - 3 2 道路上の縦断方向における風速比
(開口幅 100mm、風向角 135°)

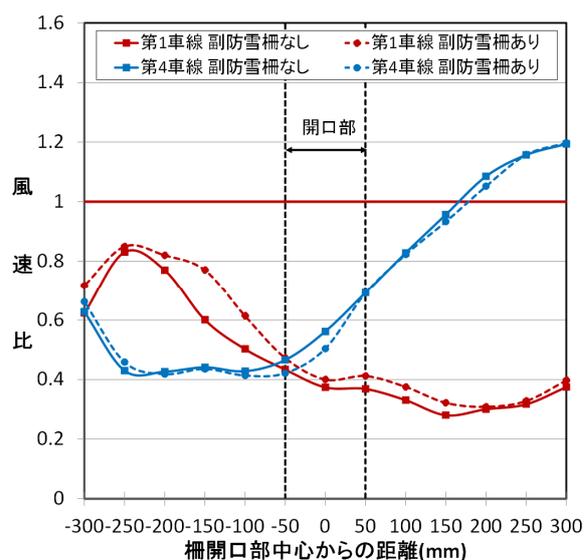


図 - 3 4 道路上の縦断方向における風速比
(開口幅 100mm、風向角 45°)

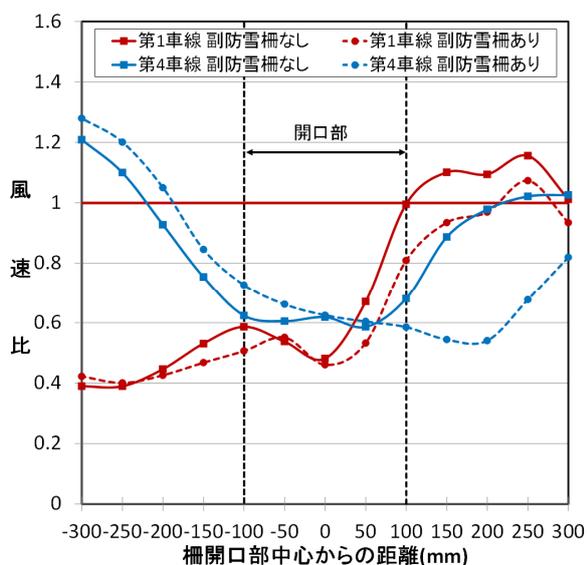


図 - 3 3 道路上の縦断方向における風速比
(開口幅 200mm、風向角 135°)

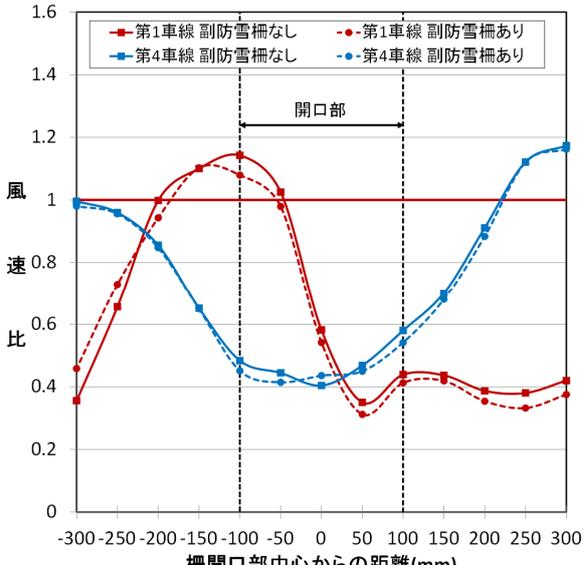


図 - 3 5 道路上の縦断方向における風速比
(開口幅 200mm、風向角 45°)

ピークの値が大きくなった。開口部周辺で集中した風が、距離とともに拡散するものの、開口部の幅が広い場合には、強風がより風下側に広く影響するものと考えられる。直交風の場合、副防雪柵の影響により風速比のピークの位置が副防雪柵側に移動しピークの値も上昇することが判った。

これまでと同様の実験条件で、風向角 135° の場合の風速比を図 - 32 (開口幅 100 mm) と、図 - 33 (開口幅 200 mm) に示す。

開口幅 100 mm の場合 (図 - 32) 第 1 車線では、副防雪柵がある場合には、風速比のピークの値がより小さ

くなっていた。防雪柵中心から 100 mm ~ 300 mm の範囲において、風速比が 0.6 以上となり、「副防雪柵あり」の方が「副防雪柵なし」よりも風速比が小さい。

開口幅 200 mm の場合 (図 - 33) 第 1 車線では、副防雪柵がある場合には、風速比のピークの値がより小さくなっていた。副防雪柵側から風が流入した場合、直交風の場合よりも風速比のピークの値がやや小さく、副防雪柵がある場合に、風速比が全般に低下する傾向となっていた。防雪柵中心から 60 mm ~ 300 mm の範囲において、風速比が 0.6 以上となり、「副防雪柵あり」の方が「副防雪柵なし」よりも風速比が小さい。また、

その低減効果は開口幅 100 mm よりも大きかった。

次にこれまでと同様の条件で、風向角 45° の場合の風速比を図 - 34 (開口幅 100 mm) と、図 - 35 (開口幅 200 mm) に示す。

開口幅 100 mm の場合 (図 - 34) 第 1 車線では、副防雪柵がある場合には、ピーク付近の風速比の値が、副防雪柵がない場合に比べてより大きくなる傾向にあった。これは、副防雪柵により、風が開口部に誘導され、集中したことが原因と考えられる。

開口幅 200 mm の場合 (図 - 35) 第 1 車線では、「副防雪柵なし」の場合に風速比のピークの値がより大きく、強風の範囲も広がっていた。また、開口幅 100 mm の場合と比べ、副防雪柵の影響による風速比の上昇は顕著ではなかった。副防雪柵の影響と比べ、開口幅が大きく影響しているものと見られる。

4. まとめ

防雪柵端部や開口部における吹雪時の視程急変メカニズムや、車両の走行に影響を与える視程急変の特徴は解明されていないことから、本研究では、視程急変メカニズムの解明に向けて、まずは実態を把握するべく、視程障害移動観測車による現地観測及び石狩吹雪実験場において定点気象観測を行った。更に開口部を含む防雪柵模型を用いた風洞実験を行った。

移動気象観測の結果からは、防雪柵開口部において、開口部の大きさが 8m を超えた場合に視程が小さく、風速が大きくなる傾向が示された。また、開口部では風向が直交に近い場合に、視程が低下する範囲がより広がり、風速が大きくなる範囲もより広がる傾向であった。また、風洞実験でも開口部が大きい場合に風速が大きく、影響範囲も拡大する傾向が確認された。

副防雪柵と視程比及び風速比との関係については、移動気象観測の結果から副防雪柵を設置している場合に視程比が大きく、風速比が小さくなる傾向であった。

また、風洞実験の結果からは、風向角 135° の場合、副防雪柵の設置により開口部の風速を低減できることが示唆されたが、直交風の場合、風速が増加するケースも見られた。

今年度は観測区間での吹雪事例が少なく十分なデータが得られなかったため、次年度も移動観測データの蓄積を行いつつ、定点での気象観測も行い、様々な気象条件下でのデータの収集を行っていく予定である。

また、風洞実験では、防雪柵に直交する副防雪柵を用いたが、風向や測定位置により副防雪柵が風を強める場合があった。効果的となる副防雪柵の仕様につい

て、今後検討を進めることとしたい。

参考文献

- 1) (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
- 2) 福澤義文、加治屋安彦、畠山祐司：防雪柵端部付近における視程障害と対策、日本道路会議論文集 24 号、pp.358-359、2001
- 3) 社団法人日本鋼構造物協会 (編)：構造物の耐風工学、東京電機大学出版局、ISBN:4501615702、p616、1997
- 4) 松澤勝、上田真代、渡邊崇史、住田則行、山崎貴志、石川真大：ライフサイクルに応じた防雪林の効果的な育成・管理手法に関する研究、平成 23 年度成果報告書、2013
- 5) 山田毅、伊東靖彦、加治屋安彦、小杉健二、根本征樹：風洞実験による防雪林の樹木形態と防雪効果の関係について、北海道の雪氷、25、pp.85-88、2006
- 6) 山田毅、伊東靖彦、加治屋安彦、松澤勝、小杉健二、根本征樹、望月重人：風洞実験による防雪林の樹木形態と防雪効果の関係について、北海道の雪氷、26、pp.21-24、2007
- 7) 山崎貴志、住田則行、幸田勝：新型路側設置型防雪柵の開発について - 風洞実験による防雪機能調査 -、第 28 回ゆきみらい研究発表会論文集、804B、40、pp.1-4、2016
- 8) 風洞実験法ガイドライン研究委員会 (編)：実務者のための建築物風洞実験ガイドブック、財団法人日本建築センター、ISBN:978-4-88910-148-5、2008
- 9) 老川進、苔米地司、石原孟：建物丘傍の雪吹きだまりの風洞相似則に関する考察、日本雪工学会誌、23、pp.13-32、2007

5.3.3 暴風雪による視程障害時の除雪車運行支援技術に関する研究

担当チーム：技術開発調整監（寒地機械技術チーム）

研究担当者：巖 博、牧野正敏、高本敏志、新保貴広、佐藤信吾

【要旨】

近年、積雪寒冷地では気候変動の影響にもよる異常な暴風雪に伴い、車両の立ち往生や長時間にわたる通行止め・集落の孤立など、障害の発生が増えてきている。本研究では、暴風雪による視程障害時でも安全に除雪作業が行える運行支援技術として、車線逸脱防止技術と周囲探知技術に関する実験を行った。平成29年度は、車線逸脱防止技術ではLiDARを用いた位置測位実験を行い、路肩に雪が堆積している状況でも測位可能であることを確認した。また、周囲探知技術では市販車用ミリ波レーダ（76GHz帯）を用いて実際の吹雪時に探知実験を行い、視程距離が50m程度の吹雪時でも、70m先の車両の探知が可能であることを確認した。

キーワード：除雪車、除雪作業、周囲探知、自車位置推定、ミリ波レーダ、LiDAR

1. はじめに

近年、積雪寒冷地では気候変動の影響にもよる異常な暴風雪に伴い、車両の立ち往生や長時間にわたる通行止め・集落の孤立など、障害の発生が増えてきている。平成25年3月1日～3日の暴風雪では、北海道内において、雪に埋まった車の中での一酸化炭素中毒や車外での低体温症などにより、9人が犠牲になる事故が発生している。このため、暴風雪による視程障害時においても安全に除雪作業を行い、道路交通の早期解放や緊急車両の先導を可能とする除雪車の開発については、現場ニーズが非常に高い。

また、「国土交通省防災業務計画 第7編 雪害対策編（H27.7改正）」¹⁾において除雪機械の冬期の安全な走行を支援する技術等の開発、「北海道総合開発計画（H28.3.29）」²⁾において積雪寒冷地特有の災害等に対応する高機能除雪車の開発等が求められている。

本研究では、暴風雪による視程障害時でも安全に除雪作業が行える運行支援技術として、自車位置を推定し車線内を走行するための車線逸脱防止技術と、除雪車周囲の人・車両・道路工作物などを探知し衝突事故を防ぐための周囲探知技術の開発に取り組むものである。

2. 車線逸脱防止技術の検討

車線逸脱防止には、車両の位置を正確に把握する測位技術が必要である。

本研究では高精度の測位技術開発のため、VRS方式¹⁾のネットワーク型RTK-GNSS（以下、「VRS-GNSS」という）RFID²⁾、LiDAR³⁾を対象に実験を行った。

2.1 VRS-GNSSにおける積雪による測位への影響

単独測位のGNSSより測位精度が高く、移動体でも使用可能なVRS-GNSSを使用し、積雪による影響を検証した。

2.1.1 実験方法

GNSSアンテナを乗用車の屋根に設置し、雪を被せることで模擬的に積雪状況を再現した。

積雪は0cm・5cm・10cmの3パターンとし、乗用車が停止した状態で測位した。

なお、VRS-GNSSは100HzのRTK測位を行うことが可能なVBOX3i（VBOX社製）と、ジェノバ社GNSS補正情報で構成されている。

機器構成を図-1に示す。

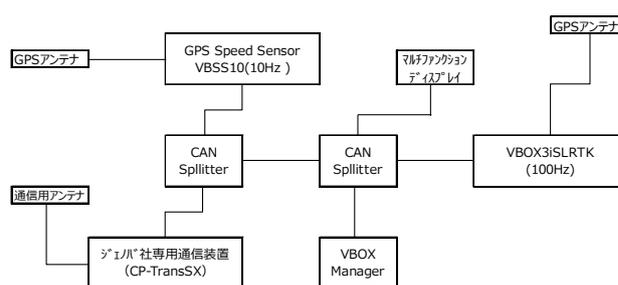


図-1 機器構成

2.1.2 実験結果

積雪による測位の変化を図-2に示す。

実験の結果、積雪が0cmの場合、測位の変位は1.9cm×1.4cmの範囲内であったのに対し、積雪を10cmにした場合の変位は、14.8cm×60.9cmとなり、積雪により測位精度が落ちることを確認した。

このことから、GNSS アンテナ部の積雪対策を検討する必要があることがわかった。

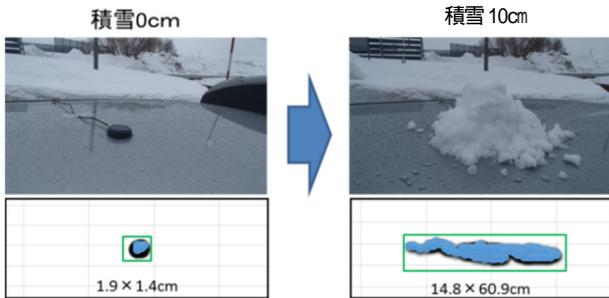


図-2 アンテナ部の積雪による測位の変化

2.2 RFIDの電波検出実験

トンネル出口や橋梁高架下など、GNSSの測位精度が低下する箇所における、補助的な測位方法を検討した。比較的安価で調達可能、小型・薄型で取り扱いが容易、舗装への埋め込みも可能なことからRFIDを選定し、積雪状況を再現して電波検出実験を行った。

2.2.1 実験方法

RFID タグの種類には読取装置（以下、「リーダ」という）から発信される電波で作動するパッシブタグと、電池を内蔵し電波を発信するアクティブタグがある。

実験にはパッシブタグを採用し、水分が付着した状況や金属面では使用できないシールタイプ（写真-1 上段）と、防水性があり金属面に設置しても使用可能なプラスチックタイプ（写真-1 下段）を使用した。

表-1 に RFID タグの諸元を示す。

表-1 使用した RFID タグ（パッシブタグ）

タグ種類	メーカ	名称	検知距離	作動温度	費用	特徴
シールタイプ	SMART RAC	Short dipole	長距離 8.5m	-40 ~ 85	65千円/ ロット (1,000個)	水・金属 非対応
プラスチックタイプ	LOGI FLEX	MT-SH	長距離 9.0m	-20 ~ 100	84千円/ ロット (100個)	水・金属 対応

リーダは、送信出力を 250mW から 1W まで可変設定できる DOTR-920J（東北システムズ・サポート社製）の UHF 帯リーダを使用した（写真-2）。電波特性は円偏波方式である。

RFID タグを舗装内に埋設することを想定し、直径 41.5cm 深さ 10 cm のプラスチック製トレーの内側底面に RFID タグを貼り付け（写真-3）厚さが 5cm になるよう

As 常温合材を入れて締め固めた。

また、同型の別トレーに厚さ 10cm になるよう雪を入れ、トレーを積み重ねることで、積雪量の変化を再現した実験を行った。

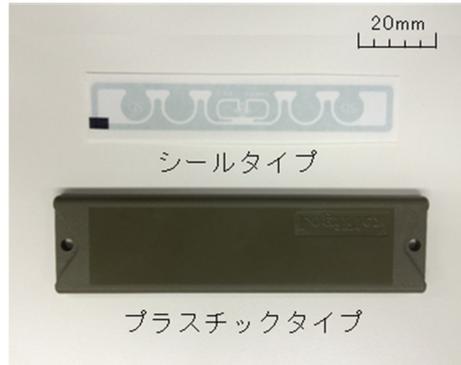


写真-1 RFID タグ（パッシブタグ）



写真-2 読取装置（UHF 帯リーダ）

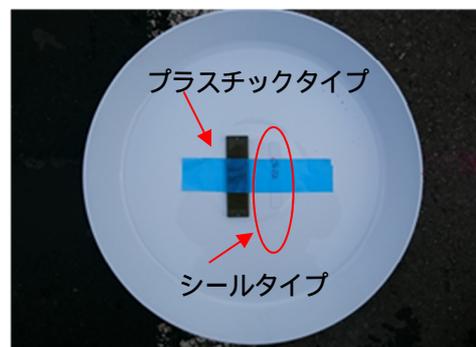


写真-3 トレーの内側底面への RFID タグ貼付状況

実験は、寒地土木研究所苫小牧寒地試験道路で実施した。

走行車線の外側線上に RFID タグ入りトレーを設置し、リーダを搭載した実験車両を走行させ、積雪状況・鉛直距離・水平距離・走行速度の違いによる電波の検出状況を確認した（写真-4）。

なお、リーダは、RFID タグに向けてスタッフに取り付

け、実験車両に搭載した。

実験項目は以下のとおりである。

- ・積雪状況：A ≤ 5cm + 積雪 (0cm, 10cm, 20cm, 30cm, 40cm) の5パターン (図-3)
- ・鉛直距離：2m, 3mの2パターン (図-4)
- ・水平距離：1m, 2m, 3mの3パターン (図-4)
- ・走行速度：10 km/h, 20 km/h, 30 km/hの3パターン

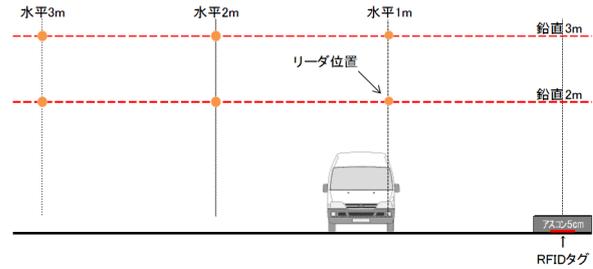


図-4 実験概略図



写真-4 実験状況

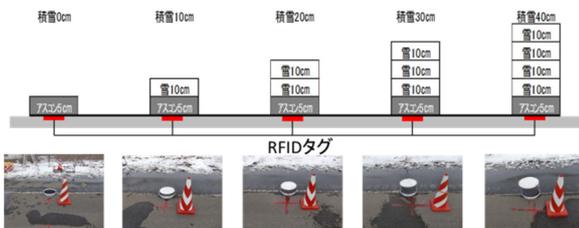


図-3 積雪状況再現概略図

2.2.2 実験結果

表-2 に実験結果を示す。

実験の結果、反射波(マルチパス)の影響により、電波の検出が不安定な状況はあったが、リーダーの送信出力が1W、走行速度30 km/hまでの条件で、プラスチックタイプは鉛直距離3m×水平距離2m以内で検出可能であった。また、シールタイプは鉛直距離2m×水平距離2m、または鉛直距離3m×水平距離1m以内で検出可能であった。なお、積雪の違いによる検出への影響は見られなかった。

以上のことから、RFIDが補助的な測位方法に適用可能と判断した。

表-2 実験結果

タグ種類	鉛直距離 (m)	送信出力	条件	検出状況: 数値は受信電界強度 (dBs)														
				1.0					2.0					3.0				
プラスチックタイプ	2.0	1W	水平距離 (m)	1.0					2.0					3.0				
			リーダー角度 (°)	63					45					34				
			積雪状況	0cm	10cm	20cm	30cm	40cm	0cm	10cm	20cm	30cm	40cm	0cm	10cm	20cm	30cm	40cm
			・車両停止時	-69	×	-67	-68	-73	-66	×	-70	-64	-67	-69	×	×	×	×
			・10km/h	-71	×	-63	-67	-63	-69	×	-63	-65	-62	×	×	×	×	×
			・20km/h	×	×	-70	-68	-68	-68	×	-64	-69	×	×	×	×	×	×
	・30km/h	×	×	-66	-74	-65	-64	×	-70	-64	×	×	×	×	×	×		
	3.0	1W	水平距離 (m)	1.0					2.0					3.0				
			リーダー角度 (°)	72					56					45				
			積雪状況	0cm	10cm	20cm	30cm	40cm	0cm	10cm	20cm	30cm	40cm	0cm	10cm	20cm	30cm	40cm
			・車両停止時	×	×	×	-63	-73	×	×	-75	-66	-80	×	×	×	×	×
			・10km/h	×	×	-70	-58	×	×	×	-63	-60	-69	停止時が未検出のため省略				
・20km/h			×	×	-64	-66	×	×	×	-64	-74	-70	停止時が未検出のため省略					
・30km/h	×	×	-68	-71	-74	×	×	-66	-67	-77	停止時が未検出のため省略							
シールタイプ	2.0	1W	水平距離 (m)	1.0					2.0					3.0				
			リーダー角度 (°)	63					45					34				
			積雪状況	0cm	10cm	20cm	30cm	40cm	0cm	10cm	20cm	30cm	40cm	0cm	10cm	20cm	30cm	40cm
			・車両停止時	-68	-73	-76	-70	-70	-71	-76	-75	-70	-76	-76	-78	×	-78	×
			・10km/h	-75	-72	-78	-68	-69	-73	-70	-72	-73	×	×	-76	×	×	×
			・20km/h	-81	-75	-69	-80	-71	-76	×	×	-72	×	×	×	×	×	×
	・30km/h	-76	-73	-73	-70	-64	-72	-75	×	-67	×	-80	×	×	×	×		
	3.0	1W	水平距離 (m)	1.0					2.0					3.0				
			リーダー角度 (°)	72					56					45				
			積雪状況	0cm	10cm	20cm	30cm	40cm	0cm	10cm	20cm	30cm	40cm	0cm	10cm	20cm	30cm	40cm
			・車両停止時	-73	×	-73	-70	-68	-73	-76	-75	-73	×	×	×	×	×	×
			・10km/h	-70	×	-70	-70	-73	-73	-77	×	×	×	停止時が未検出のため省略				
・20km/h			-75	×	-75	-70	-79	×	×	-72	-75	×	停止時が未検出のため省略					
・30km/h	-81	-75	-73	-70	-73	×	×	×	×	×	停止時が未検出のため省略							

凡例
 検出した箇所
 検出したケース内で最も高い電界強度の箇所
× 検出なかった箇所

2.3 RFIDによる自車位置測位実験

2.2.2の実験結果より電波の検出が可能であったため、RFIDを用いた自車位置測位について、TDOA方式⁴による計測システムを製作し、測位精度の検証を行った。

TDOA方式は、複数あるタグからリーダーが電波を受信した際の到達時間差を用いて、位置を推定する方式である。

2.3.1 実験方法

TDOA方式による測位には、リーダー・タグ双方において正確な時刻が必要であり、アクティブタグは電池を内蔵しているため、時刻の送出が可能である。

なお、今回の実験ではアクティブタグの調達ができなかったため、計測用とは別のリーダーを用意し、パッシブタグ（プラスチックタイプ）と結合することで、時刻の送出を可能としたものを模擬的なアクティブタグとして使用した（写真-5）

実験は寒地土木研究所石狩吹雪実験場で行い、交差点を想定した実験（図-5）と道路上を想定した実験（図-6）を行った。

交差点を想定した実験は、30m×30m四方の四隅にRFIDタグを設置し、1.5m間隔に分割したマス目毎の測位精度を検証した（写真-6）

なお、計測は15m×15m内の100マスで行った。

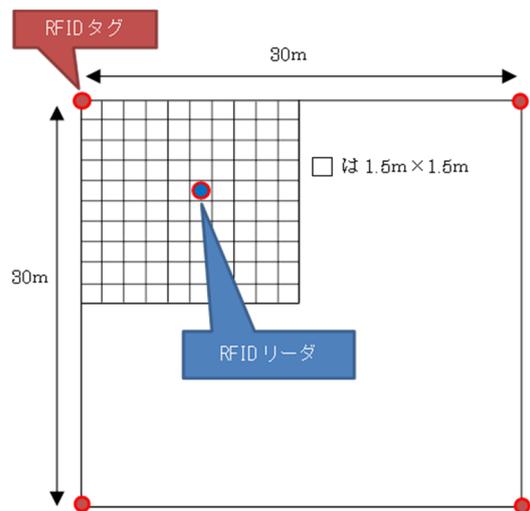


図-5 実験 計測エリア図

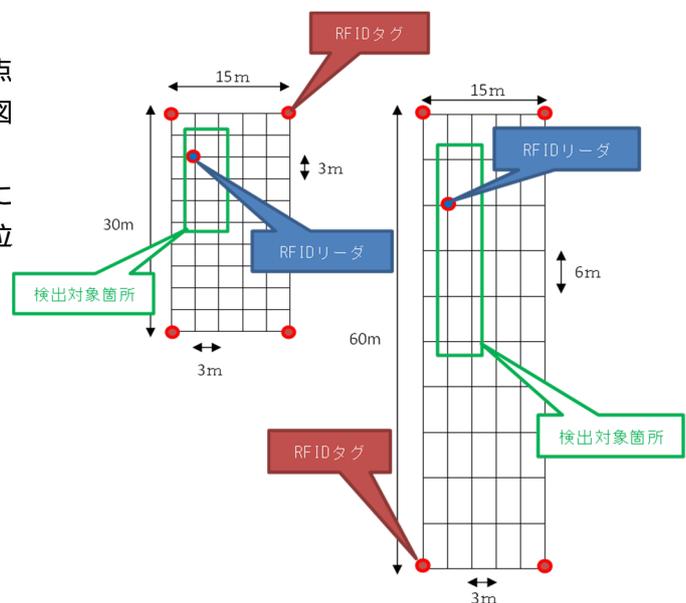


図-6 実験 計測エリア図



写真-5 RFID タグ（アクティブタグの模擬型）

道路上を想定した実験は、横断方向を15m、縦断方向を30mと60mの2パターンについて位置測位の精度を検証した。

横断方向はともに3m間隔とし、縦断方向は30mの場合は3m間隔、60mの場合は6m間隔とした。

なお、計測は図-6の緑枠内の縦横交点を対象箇所とし、それぞれ10箇所で行った（写真-7）。

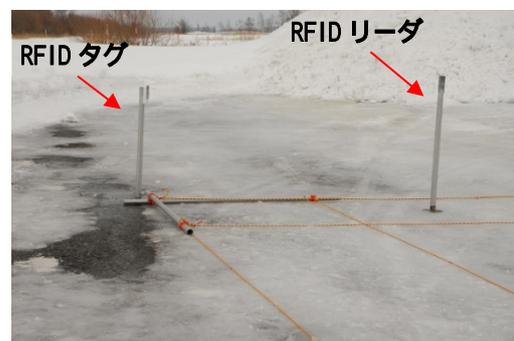


写真-6 実験 計測状況

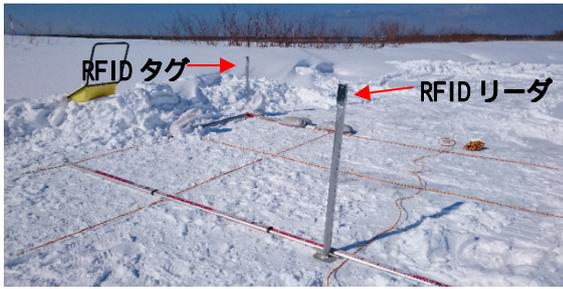


写真-7 実験 計測状況

差は大きくなり、縦断方向に 24m 以上離れると計測不能となった。

測位精度を保ちつつ経済的に RFID タグを設置するには、縦断方向 30m を超える範囲でさらなる確認が必要といえる。

実験 及び の結果から、RFID は、車線逸脱防止に使用するうえで、自車位置測位に適用可能な測位精度を有していることを確認した。

2.3.2 実験結果

実験 の計測結果を図-7 に示す。

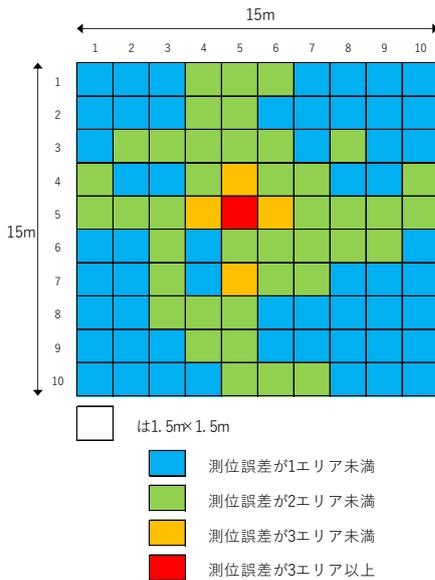


図-7 実験 計測結果

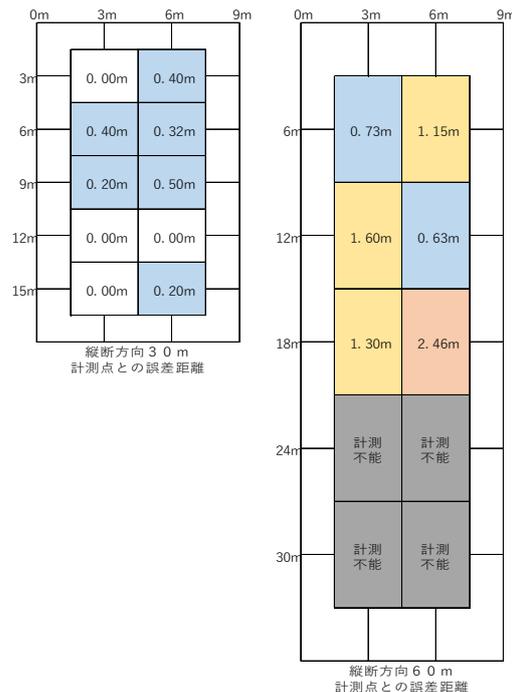


図-8 実験 計測結果

計測回数は、測位誤差が 1 エリア未満となった場合は 2 回とし、測位誤差が 1 エリア以上となった場合は追加計測を 1 回行い、各々の平均値を測位誤差とした。

測位誤差が 1 エリア未満に収まったのは全体の 55%、2 エリア未満と合わせると全体の 95%となった。

一方で、測位誤差が 3 エリア以上の箇所があったが、リーダーと RFID タグの位置関係によって複数の電波を捕捉できない場合があり、測位精度が低下したものと考えられる。

次に実験 の計測結果を図-8 に示す。

計測回数は 2 回とし、計測誤差が生じた箇所は追加計測を 1 回行い、各々の平均値を計測値とした。

縦断方向 30m の場合、誤差なしが全体の 40%、誤差 1m 未満では 100%となった。

一方、縦断方向 60m の場合では誤差 1m 未満が全体の 20%であった。計測点が RFID タグから離れる程、計測誤

2.4 LiDAR による自車位置測位実験

LiDAR は、レーザ光により物体の位置、距離、形状を探知・計測する技術であり、自動車の先進運転支援システムや自動運転車への活用について研究が進められているが、降雪や積雪が LiDAR の自車位置測位に与える影響は明らかになっていない。

そこで、LiDAR の自車位置測位実験を行い、車線逸脱防止技術に適用可能か検証した。

2.4.1 実験方法

自車位置測位実験には、ベロダイン社製 LiDAR と自動運転向けオープンソースソフトウェア「Autoware」³⁾を用いた。

Autoware の自車位置測位手法は、高精度 3 次元地図データと LiDAR のスキャンデータを重ね合わせるスキャンマッチングによるものである。

実験は寒地土木研究所苫小牧寒地試験道路で行った。

冬期に行う自車位置測位実験と周辺環境を合わせる必要があるため、試験道路の高精度3次元地図は、樹木の落葉後の秋期に作成した。

試験道路の直線部に座標値が既知の計測点を5箇所設定し、手押し台車に搭載したLiDARを計測点の直上に設置して、静止状態で1分間計測を行った(写真-8)。



写真-8 LiDARによる自車位置測位状況

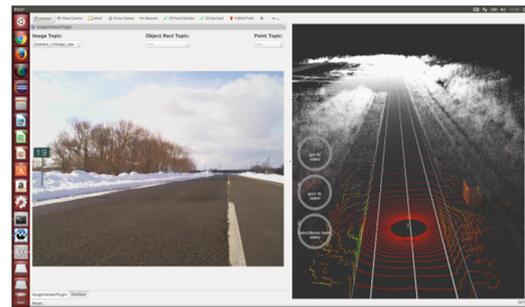


図-10 自車位置推定状況

2.4.2 実験結果

自車位置測位結果を表-3に、その中の代表例として、計測箇所での自車位置測位結果を図-9に、Autawareによる自車位置推定状況を図-10に示す。

なお、自車位置測位結果は平面直角座標を用いている。

実験時の天候は晴れ、走行路面に積雪は無く乾燥状態で、路肩部には路面を除雪した雪が堆積している状態であった。

計測の結果、計測箇所でのX方向の誤差が33cmと大きな値を示したが、全箇所の平均誤差は、X方向に約15cm、Y方向に約7cmであった。

今回の実験では、降雪時や走行路面に積雪のある状況での測位精度の検証はできなかったものの、路肩に雪が堆積している状況において、LiDARは、車線逸脱防止に使用するうえで、自車位置測位に適用可能な測位精度を有していることを確認した。

表-3 自車位置測位結果

計測箇所	条件		①自車位置測位座標 平均値(m)		②既知座標 (m)		測位誤差(②-①) (m)		
	天候	路面 状況	x	y	x	y	x	y	
①	晴れ	走行部 :乾燥 路肩部 :積雪有	-38983.875	-147640.252	-38983.980	-147640.188	0.105	0.064	
②			-39010.701	-147632.218	-39010.367	-147632.313	0.334	0.095	
③			-39079.702	-147612.012	-39079.777	-147612.016	0.075	0.004	
④			-39291.065	-147550.334	-39290.930	-147550.422	0.135	0.088	
⑤			-39367.941	-147528.474	-39367.852	-147528.359	0.089	0.115	
							平均値:	0.148	0.073

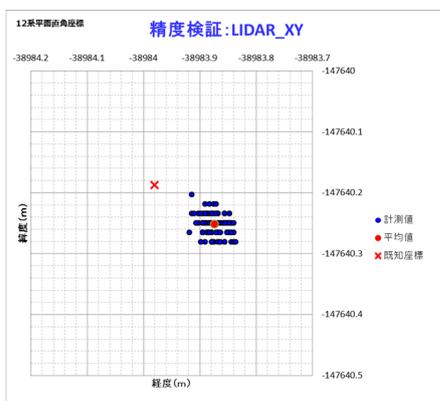


図-9 計測箇所 自車位置測位結果

3. 周囲探知技術の検討

3.1 ミリ波レーダ周囲探知実験

ミリ波レーダは、ミリ波帯(30GHz~300GHz)の電波を用いて障害物を検出するものである。

電波を利用しているのでカメラやレーザなどに比べ、気象の影響を受けにくい特徴があり、自動車の予防安全技術に使用されるなど実用化が進められているが、吹雪時の対応については明らかにされていない。

本実験は、市販車用ミリ波レーダが、視程障害時における周囲探知技術として適用可能か検証した。

現在、ミリ波レーダに使用できる周波数帯は、24GHz帯と76GHz帯である。24GHz帯は近・中距離用、76GHz帯は長距離用として用いられることが多い。

実験では、除雪車が前方障害物を探知するために必要な検出距離を70m以上と想定し、長距離用の76GHz帯ミリ波レーダを使用した。

表-4に実験に使用したミリ波レーダの諸元を示す。

表-4 ミリ波レーダ諸元表

項目	性能
最小検出距離	1m以上
最大検出距離	175m以下 (10dB target以下) 100m以下 (0dB target以下)
距離方向検出精度	+/- 0.5m 以上
同一角度、同一速度に2つのターゲットが存在する場合の距離方向分離性能	2.5 m以上
水平視野角	20 deg以下
同一距離、同一速度に2つのターゲットが存在する場合の水平方向角度分離性能	3.5 deg以上
垂直視野角	4.2 ~ 4.75 deg

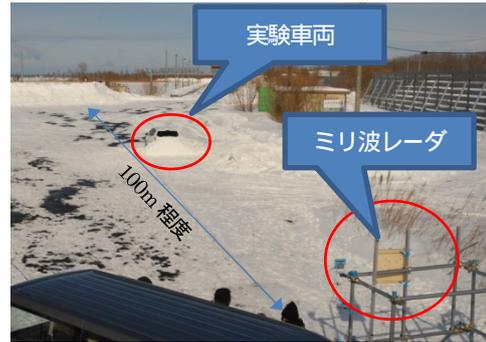


写真-11 計測場所全景

レーダの設置高さや設置角度、対象物との水平検出距離を基本のパラメータとし、以下の実験を行った。

3.2 平成28年度の実験

実験は寒地土木研究所石狩吹雪実験場で行った。

ミリ波レーダは高さや角度が調整できるように設置し(写真-9)、ミリ波レーダと検出結果を画像処理するためのレーダ検証用カメラを取り付けた(写真-10)。また、計測場所は直線方向に100m程度確保した(写真-11)。

実験 : 対象物が車両の場合の検出実験

実験 : 対象物が人の場合の検出実験

実験 : 吹雪時を想定した、レーダ前面に着雪した場合の検出実験

実験 : 吹雪時を想定した、車両に雪が堆積した場合の検出実験



写真-9 ミリ波レーダ設置状況

3.2.1 実験 : 車両の検出

実験の概略図を図-11に、実験結果を表-5に示す。

車両を検出対象とした実験では、レーダの設置高が3m、設置角が4度、水平検出距離10mの条件で、未検出があったが、この1例を除き、設置高・設置角・水平検出距離の全条件において、車両を検出することができた。

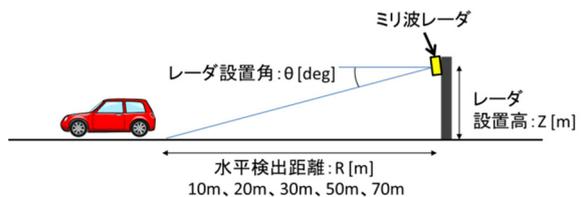


図-11 実験 概略図

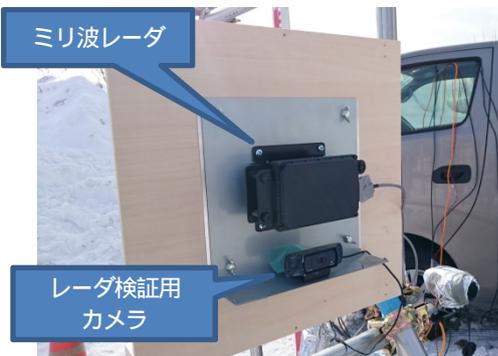


写真-10 ミリ波レーダとレーダ検証用カメラ

表-5 実験 計測結果

設置高 Z [m]	設置角 theta [deg]	水平検出距離 R [m]						
		10	20	30	40	50	60	70
1.0	0	○	○	○	○	○	○	○
1.0	1	○	○	○	○	○	○	○
1.5	2	○	○	○	○	○	○	○
1.5	3	○	○	○	○	○	○	○
2.0	2	△	○	○	○	○	○	○
2.0	3	○	○	○	○	○	○	○
2.5	3	□	○	○	○	○	○	○
2.5	4	○	○	○	○	○	○	□
3.0	4	×	○	○	○	○	○	○

○ : 検出
 △ : 一部未検出 (検出データに一部欠測あり)
 □ : 未検出
 × : 1回目は検出、2回目は未検出

3.2.2 実験 : 人の検出

実験の概略図を図-12に、実験結果を表-6に示す。

人を検出対象とした実験では、立ち・しゃがみ・腹ばいの状態に分けて確認した。

人が立っている状態では、10m~70m先まで検出することができたが、姿勢が揺れた場合などでは、検出データの欠測により、一部未検出となる場合があった。

また、しゃがんだ状態では、立っている状態より反射面積が小さくなるため、さらに未検出となる場合が多く発生した。

腹ばいの状態では、全条件で検出することができなかった。

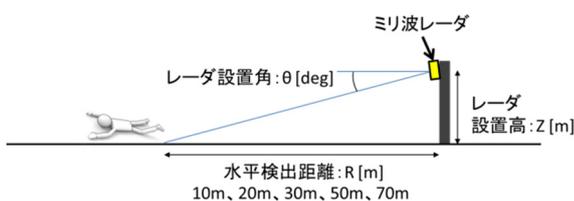


図-12 実験 概略図

表-6 実験 計測結果

設置高 Z[m]	設置角 θ [deg]	水平検出距離 R[m]											
		10			20			30			50		70
		立ち	しゃがみ	腹ばい	立ち	しゃがみ	腹ばい	立ち	しゃがみ	腹ばい	立ち	立ち	
1.0	0	○	△	×	△	△	×	△	△	×	△	○	
2.0	3	○	×	×	△	△	-	△	△	-	△	△	

○ : 検出
 △ : 一部未検出 (検出データに一部欠測あり)
 × : 未検出
 - : 未実施

3.2.3 実験 : レーダ前面の着雪の影響

実験の概略図を図-13に、実験結果を表-7に示す。

レーダ前面に着雪した状態は、発砲スチロール製の枠に雪を詰めたものをブラケットでレーダ前面に設置することで、模擬的に再現した(写真-12)。

実験条件は、レーダ設置高を2m、設置角を3度に固定した。

パラメータは、雪厚(t)を3cm,5cm、水平検出距離(R)を30m,70m、雪距離(D)を0~10cmの組合せと、雪厚(t)を1cm,2cm,10cm、水平検出距離(R)を30m、雪距離(D)を0cm,2cm,5cm,7cm,10cmの組合せに設定した。

雪厚3cm、水平検出距離30m、雪距離6cmの条件で未検出があったが、この1例を除き、雪厚・水平検出距離・雪距離の全条件において、車両を検出することができた。

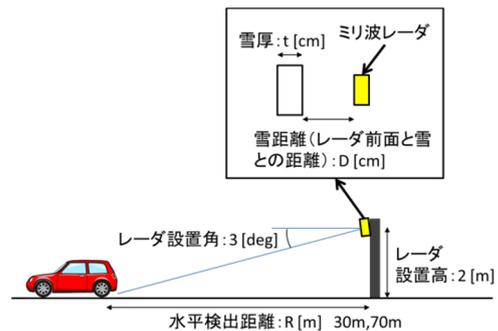


図-13 実験 概略図

表-7 実験 計測結果

雪厚 t:[cm]	水平検出 距離 R:[m]	雪距離 D: [cm]										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	30	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2	30	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3	30	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○
3	70	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
5	30	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
5	70	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
10	30	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

○ : 検出
 × : 未検出



写真-12 着雪再現状況

3.2.4 実験 : 車両周りの積雪の影響

実験の概略図を図-14に、実験結果を表-8に示す。

実験は車両に雪が堆積している状態での実験であるが、雪は自然降雪によるものではなく、所定の雪壁厚となるよう除雪機とスコップで雪を被せて再現した(写真-13)。

実験条件は、レーダ設置高を2m、設置角を3度、水平検出距離を30mに固定した。

パラメータは、雪壁厚(H)を10cm,20cm,30cmのみとした場合と、雪壁厚(H)を10cm、雪厚(t)を3cm,5cm、雪距離(D)を0cm,5cmの組合せに設定した。

実験の結果、雪壁厚10cm,20cm,30cmのみの場合と、雪

壁厚 10cm、雪厚 3cm、雪距離 0cm、5cm の条件では検出することができたが、雪壁厚 10cm、雪厚 5cm、雪距離 0cm 及び 5cm の条件では検出することができなかった。

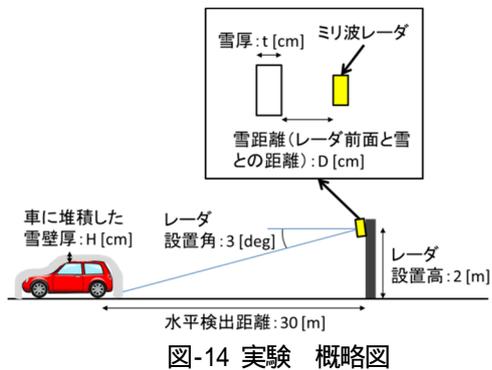


表-8 実験 計測結果

雪壁厚 H:[cm]	雪厚 t:[cm]	雪距離 D: [cm]	
		0	5
10	0	○	
20	0	○	
30	0	○	
10	3	○	○
10	5	×	×

○ : 検出
× : 未検出



写真-13 車両積雪再現状況

3.3 平成29年度の実験

平成29年度は、降雪及び車両に堆積した雪がミリ波レーダの検出性能に与える影響を比較検証するため、寒地土木研究所石狩吹雪実験場で以下の実験を行った。

- 実験 : 晴天時の車両の検出実験
- 実験 : 降雪時の車両の検出実験
- 実験 : 降雪により車両に雪が堆積した状態の検出実験

計測場所全景を写真-14 に示す。

吹雪状況での実験を効率的かつ確実にを行うため、実験場にミリ波レーダ (写真-15) と実験車両を45日間存置

し、監視用カメラ (写真-16) により吹雪の発生状況を確認し、遠隔制御により計測を行った。

実験車両は、レーダから30mの距離に実験車両を、70mの距離に実験車両を配置した (写真-17)。

視程距離は、ミリ波レーダから約50m離れた箇所に設置されている後方散乱型視程計の計測値と、実験車両の側方に10m間隔で設置した視程確認用スノーボールの目視観測結果を採用した。



写真-14 計測場所全景

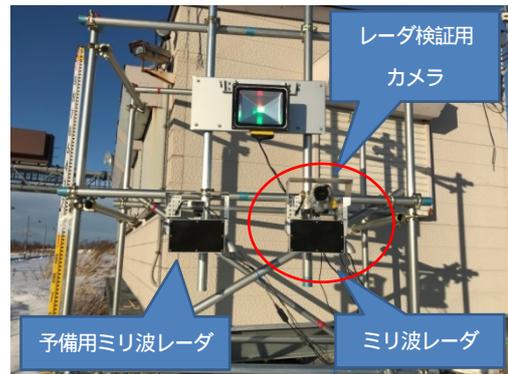


写真-15 ミリ波レーダ設置状況



写真-16 監視カメラ設置状況



写真-17 実験車両配置状況

3.3.1 実験：車両の検出(晴天時)

実験の概略図を図-15に示す。

実験条件は、レーダ設置高を2m、設置角を3度に固定した。

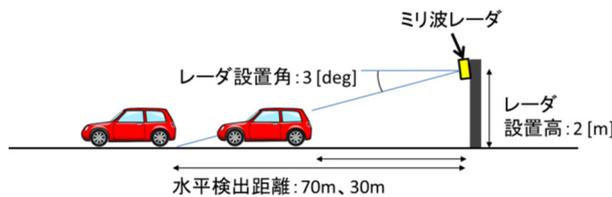


図-15 実験概略図

実験は、計測日の9:30、11:00、13:30、14:30、15:30、16:30に1回当たり1分間の計測を行った。

実験状況を写真-18に、実験結果を図-16、図-17に示す。

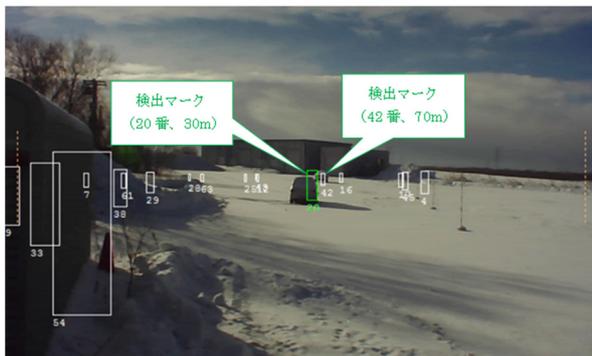


写真-18 実験晴天時車両検出状況

実験結果は、反射断面積、検出距離、検出角度、検出率について、計測時刻毎に計測データの平均値を示したものである。

反射断面積とは、レーダから電波の照射を受けた対象物の電波反射強度の係数で、車両検出に必要とされる反射断面積の目安は-10dBsmである。

実験車両の平均反射断面積は6.1dBsmであり、変動量は-2.6~+2.9dBsmであった。実験車両では16.3dBsm、変動量は-0.3~+1.7dBsmであった。

検出距離はレーダから対象物までの距離であり、実験車両の平均検出距離は29.5m、変動量は±0.1mであった。実験車両では69.5m、変動量は±0.4mであった。

検出角度は対象物をレーダの正面で検出した場合は0度となり、右側に検出した場合が+、左側に検出した場合が-で表される。実験車両の平均検出角度は0.3度であり、変動量は-0.9~+1.4度であった。実験車両では1.7度、変動量は-0.4~+0.8度であった。

検出率は実験車両及びともに全計測時刻において100%であった。

晴天時の計測値を基準とし、降雪時及び車両に雪が堆積した状態の計測値と比較した。

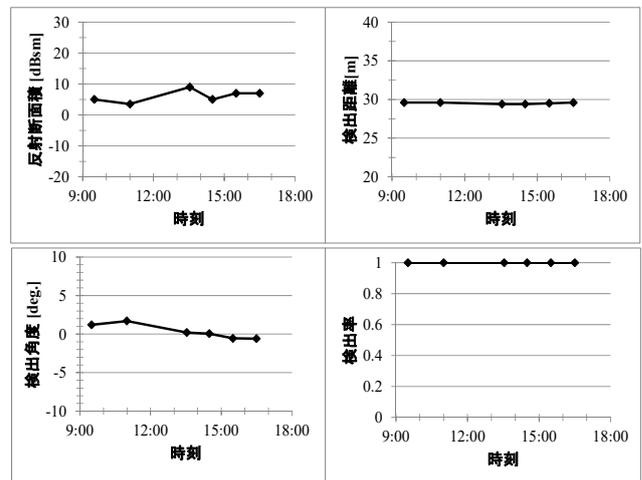


図-16 実験検出結果(30m、実験車両)

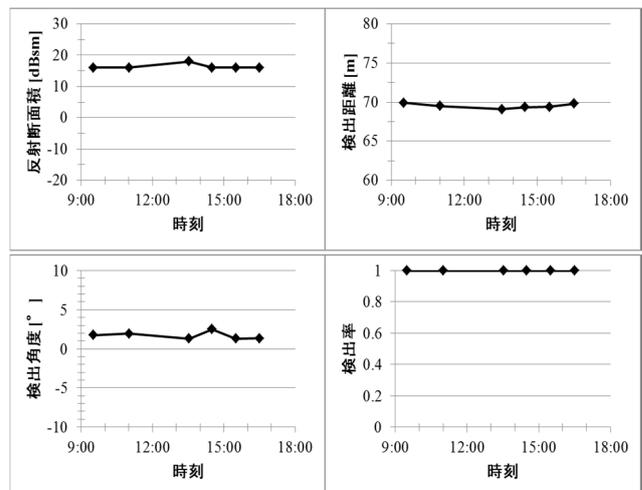


図-17 実験検出結果(70m、実験車両)

3.3.2 実験：車両の検出(降雪時)

実験の概略図を図-18に示す。

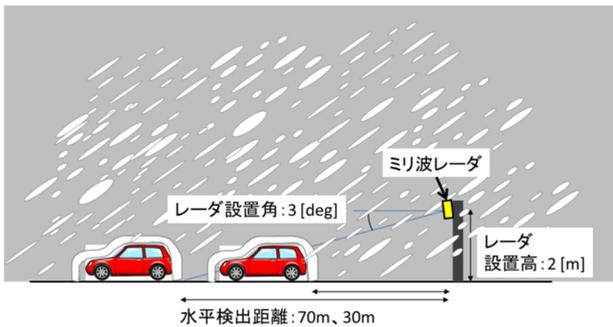


図-18 実験 概略図

実験は、降雪に伴う視程距離の違いによる検出性能を比較するため、降雪が発生した時間帯で連続的に計測した。

最も視程距離が低下した計測日の検出状況を写真-19に、検出結果を図-19、20に、実験結果比較表を表-9に示す。

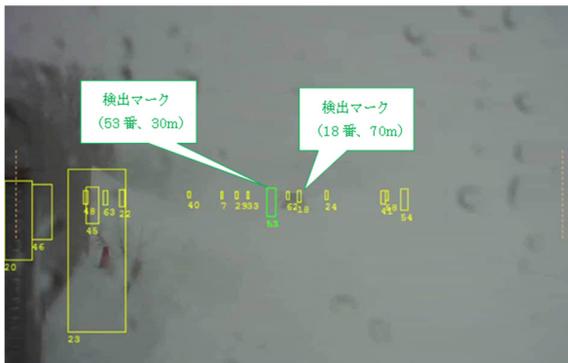


写真-19 実験 車両検出状況

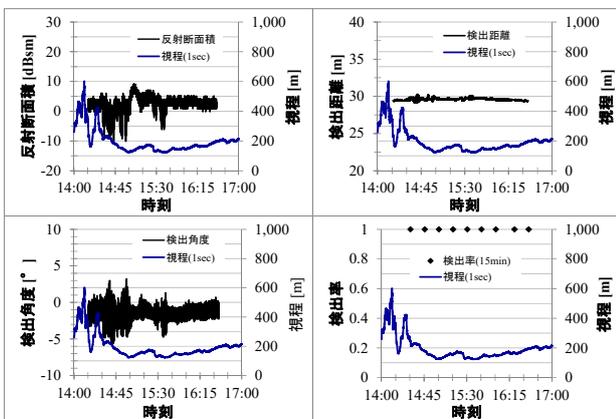


図-19 実験 検出結果(30m、実験車両)

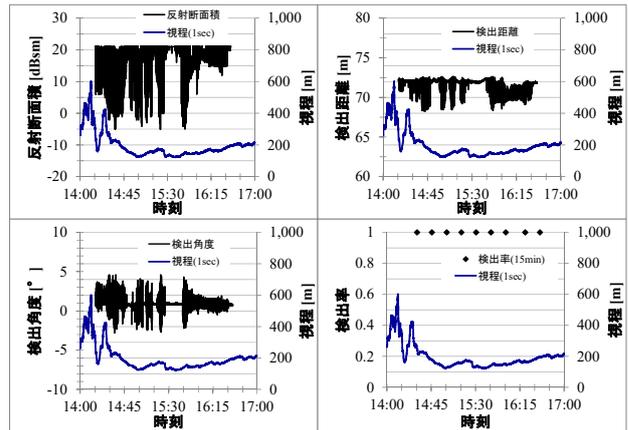


図-20 実験 検出結果(70m、実験車両)

表-9 実験結果比較表

検出対象	項目	単位	実験：晴天時			実験：降雪時		
			平均値	最小値	最大値	平均値	最小値	最大値
30m 実験車両①	反射断面積	dBsm	6.1	3.5	9	2.7	-10	9
	検出距離	m	29.5	29.4	29.6	29.6	29.2	30.3
	検出角度	度	0.3	-0.6	1.7	-1.5	-5.6	3.2
	検出率	%	100	100	100	100	100	100
70m 実験車両②	反射断面積	dBsm	16.3	16	18	18.1	-5	21
	検出距離	m	69.5	69.1	69.9	71.6	68.3	72.6
	検出角度	度	1.7	1.3	2.5	0.9	-2.8	4.6
	検出率	%	100	100	100	100	100	100

実験の結果、後方散乱型視程計の平均視程距離は173mで、最低値は写真-19と同日の15時36分の123mであった。また、同時刻の視程確認用スノーポールの目視確認による視程距離は約50mであった。

実験の計測結果と比較すると、視程距離の低下に伴い各計測項目の変動量は大きくなり、特にマイナス方向の変動量が大きくなる傾向が見られたことから、降雪の影響によりレーダの受信レベルが低下することで、計測誤差が大きくなるものと考えられる。

しかし、対象物の検出率に関しては、実験車両、ともに検出に必要とされるレーダの反射断面積-10dBsmを上回っており、全ての計測時刻にわたって検出率は100%であった。

このことから、76GHz帯のミリ波レーダは、目視による視程距離が50m程度の吹雪時でも70m先の車両の探知が可能であることを確認できた。

3.3.3 実験 : 降雪による積雪時の車両検出

実験の概略図を図-21 に示す。

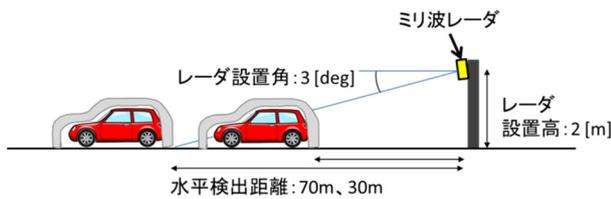


図-21 実験 概略図

実験は、車両上に雪が堆積し、かつ晴天時において、1日6回(9:30、11:00、13:30、14:30、15:30、16:30)1回当たり1分間の計測を行った。

降雪により生じた車両上の積雪深は、ルーフ上に設置した雪尺を周辺監視カメラにより目視計測した。

車両上の積雪深が最も大きかった計測日の検出状況を写真-20に、実験車両の積雪状況を写真-21に、実験結果比較表を表-10に示す。

実験車両のルーフ上の積雪は15cm、実験車両の積雪は20cm、車両周辺の積雪は40cm程度であり、テールランプ付近の車両背面は露出している状態であった。

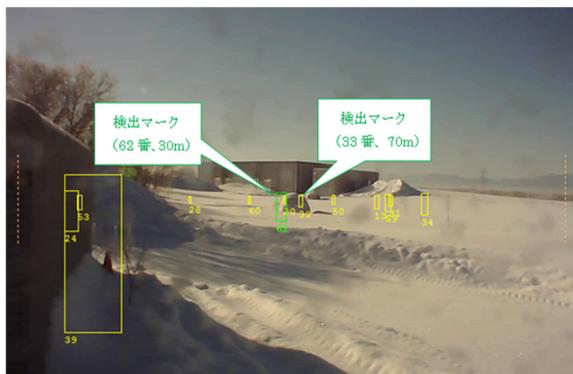


写真-20 実験 車両検出状況



写真-21 実験車両積雪状況

表-10 実験結果比較表

検出対象	項目	単位	実験 : 晴天時			実験 : 積雪時		
			平均値	最小値	最大値	平均値	最小値	最大値
30m 実験車両①	反射断面積	dBsm	6.1	3.5	9	2.2	-6	8.5
				-2.6 ~ 2.9			-8.2 ~ 6.4	
	検出距離	m	29.5	29.4	29.6	29.7	29.3	30.1
				-0.1 ~ 0.1			-0.4 ~ 0.4	
70m 実験車両②	検出角度	度	0.3	-0.6	1.7	-0.5	-2.5	1.8
				-0.9 ~ 1.4			-2 ~ 2.3	
	検出率	%	100	100	100	100	100	100
				0			0	
30m 実験車両①	反射断面積	dBsm	16.3	16	18	15.9	8.5	21
				-0.3 ~ 1.7			-7.4 ~ 5.1	
	検出距離	m	69.5	69.1	69.9	71.3	70	72.3
				-0.4 ~ 0.4			-1.3 ~ 1	
70m 実験車両②	検出角度	度	1.7	1.3	2.5	0.9	0.2	2
				-0.4 ~ 0.8			-0.7 ~ 1	
	検出率	%	100	100	100	100	100	100
				0			0	

実験車両に雪が堆積することにより、雪が堆積していない状態より平均反射断面積は低下するものの、検出に必要とされる反射断面積-10dBsmを上回っているため、全ての計測時刻において検出率は100%であった。

4.まとめ

本研究では、暴風雪による視程障害時でも安全に除雪作業が行える運行支援技術として、自車位置を推定し車線内を走行するための車線逸脱防止技術と、除雪車周囲の人・車両・道路工作物などとの衝突事故を防ぐための周囲探知技術の開発に取り組んだ。

これまでの研究成果を以下に要約する。

- 1) 車線逸脱防止技術については、VRS-GNSSにおける積雪による影響を検証し、アンテナへの積雪が0cmの場合、測位の変位は約2cm以内に収まるが、積雪が10cmの場合は約60cmまで変位が広がり、測位精度が低下することを確認した。このことからGNSSアンテナ部の積雪対策を検討する必要があることがわかった。
- 2) トンネル出口などGNSS測位精度が低下する箇所における補助的な測位方法として、RFIDを用いた自車位置測位実験を行った。道路上を想定した横断方向15m、縦断方向30mの計測エリアでは、測位誤差が1m未満となり、車線逸脱防止に使用するうえで、自車位置測位に適用可能な精度を有していることを確認した。
- 3) 雪の影響が明らかになっていないLiDARを用いた自車位置測位実験を行った。路肩に雪が堆積している状況において、測位誤差は約15cmであり、車線逸脱防止に使用するうえで、自車位置測位に適用可能な精度を有していることを確認した。

4) 周囲探知技術については、市販車用ミリ波レーダ(76GHz帯)を用いて実際の吹雪時に探知実験を行い、目視による視程距離が50m程度の吹雪時でも、70m先の車両の探知が可能であることを確認した。

また、晴天時に人を対象とした検出実験で、人がしゃがんだ状態や腹ばいの状態では、検出できない場合があった。

今後、車線逸脱防止技術については、RFID及びLiDARを含む各種測位技術の降雪時や積雪時の測位精度の検証、周囲探知技術については、ミリ波レーダの除雪車への搭載方法の検討及び走行時における探知性能の検証を行う予定である。

1:VRS方式(Virtual Reference Station:仮想基準点方式)

2:RFID(Radio Frequency Identifier:ICタグを利用した近距離無線通信技術)

3:LiDAR(Light Detection and Ranging:光による検知及び測距技術)

4:TDOA方式(Time Difference Of Arrival:到達時間差方式)

参考文献

1)国土交通省防災業務計画 第7編雪害対策編(H27.7改):

<http://www.mlit.go.jp/common/001036313.pdf>

2)北海道総合開発計画(H28.3.29):

<http://www.mlit.go.jp/common/001128021.pdf>

3)自動運転ソフトウェアのオープンソースの公開(H27.8.25):

<https://www.pdsl.jp/fot/autoware/>