

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～令和 3 年度

プログラムリーダー：寒地道路研究グループ長 松澤 勝

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、令和元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、過年度研究にて作成した吹雪量推定式を用い、北海道東部で過去に発生した極端な暴風雪 53 事例を対象に、吹雪量をメッシュで計算し、国道の通行規制、気象警報、災害体制等の履歴と、時間吹雪量および累積吹雪量の関係を整理した。

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、雪崩発生時の気象と積雪条件、植生と地形条件を検討し、雪崩発生条件を満たす降雪事例の発生頻度を推定する簡便な解析手法を提案するとともに、発生頻度の地域分布を提示した。さらに、樹林内を流下する乾雪雪崩の運動モデルを考案し、雪崩発生区の傾斜角や発生層厚、樹林の有無による雪崩の衝撃圧と到達距離の算出手法を提案した。

(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、青森県五所川原市など多様な気象環境下での吹雪発生状況や降雪時における視程と気象条件との関係について分析を行い、吹雪視程予測技術の青森県内への適用性について検証し、吹雪視程予測技術の改良案について検討した。また、吹雪視程予測技術を活用し予測した「吹雪の視界情報」の提供を冬期に北海道内を対象に行った。

(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を解明するため、枯れ上がりの程度等の林況の異なる道路防雪林（標準林および狭帯林）における防雪性能に関する現地観測と、観測データの解析を実施した。さらに、枯れ上がりによる防雪性能の低下を補うための補助対策の現地調査と、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、柵端部や開口部における視程急変メカニズムを解明し、視程急変箇所対策の条件に応じた対策技術を検討するため、石狩吹雪実験場における定点気象観測と視程障害移動観測車による観測、シミュレーション解析、風洞実験を行い、これらの結果を整理、分析した。

「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、気象の影響を受けない磁気マーカシステム等を用いた車線走行支援ガイダンスを試作し、視程障害を模擬的に再現した状況で、ガイダンス情報を頼りに除雪車を車線逸脱せずに走行させる実験を実施した。また、周辺探知技術については、ミリ波レーダを用いた前方障害物探知ガイダンスを試作し、除雪車の前方視界を遮断した状況で走行させ、ガイダンス情報に従って障害物の手前で安全に停止させる実験を実施した。

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

Research Period : FY2016-2022

Program Leader : Director of Cold-Region Road Engineering Research Group
MATSUZAWA Masaru

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 2019 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：高橋丞二、原田裕介、武知洋太、大宮哲

【要旨】

本研究は、一回の極端な暴風雪や大雪の厳しさを評価する技術を提案し、これらを用いたハザードマップの提示と、暴風雪時の道路管理における判断支援方を提案することを目的とする。令和元年度は、暴風雪時の厳しさを示す指標や道路管理者の判断支援方を提案するために、北海道東部で発生した暴風雪 53 事例を対象に、本研究で開発した推算手法に気象庁毎時解析格子値等を代入して得られた時間吹雪量と、国道通行規制、気象警報、災害体制等の履歴を統合したデータセットを整備し、それらの関係を整理した。

キーワード：暴風雪、大雪、吹雪量、ハザードマップ、判断支援方策

1. はじめに

近年、急速に発達した低気圧や収束帯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 名もの尊い命が失われた。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。また、平成 30 年 2 月に福井県嶺北地域での大雪により、国道 8 号では最大で約 1,500 台の車両が長期間に渡り滞留し、通行規制解除まで 3 日を要した。

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や大雪の激しさを適切に表す指標が必要である。これまで、吹雪関連では年間累計吹雪量や視程障害発生頻度が、大雪関連では年間累計降雪量や年最大積雪深が厳しさを示す指標としてそれぞれ示されている。しかし、これらは一冬期を通したものであり、地域住民の生活や経済活動に打撃を与える、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。よって、激しい吹雪や降雪に伴う道路通行規制の数値基準は、現時点では確立されておらず、各路線の道路管理者が、気象状況・現地パトロール・管理用カメラ映像などに基づく総合的な判断により通行規制を実施している。

そこで本研究では、暴風雪や大雪災害の軽減に資するため、以下①～⑤の達成目標のもと、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①と②）。次に、各種気象条件および推定吹雪量、過去の通行止め事例、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②と③）。さらに、上記成果を踏まえ、暴風雪や大雪によるリスクを地域ごとに検討し、これらのハザードマップや暴風雪時の道路管理における判断支援方策の作成を目指す（達成目標④と⑤）。

<達成目標>

- ① 吹雪量に与える気象要因の影響度の解明
- ② 暴風雪や大雪の評価指標の提案
- ③ 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
- ④ 暴風雪および大雪に関するハザードマップの開発
- ⑤ 指標に基づく暴風雪時の道路管理における判断支援方策の提案

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に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⁾。

2. 各研究年度における実施内容（概要）

2.1 平成 30 年度までの実施内容

本節では、過年度に実施した研究内容について、年度毎にその概要を述べる。

平成 26 年度は、北海道弟子屈町内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、寒地土木研究所石狩吹雪実験場（以下、石狩吹雪実験場）内に二重柵基準降水量計（DFIR）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（達成目標①、③）。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」³⁾を参照されたい。なお、弟子屈吹雪観測サイトおよび DFIR の概要については本報告書の 3.1 節にも記述してある。

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（達成目標①、③）。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」⁴⁾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、両地点で過去 2 冬期（平成 26～27 年度）に得た観測データを用い、多変量解析等によって吹雪量推定式の作成を試みた。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、地点ごとに暴風雪事例および大雪事例の抽出を行った（達成目標①、②）。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」⁵⁾を参照されたい。

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）の観測データに基づき、吹雪量推定式を作成した。この推定式を用い、近年発生した暴風雪 10 事例程度を対象に、地上気象観測データ（アメダス、道路気象テレメータ）から吹雪量を算出した。また、当該事例における国道通行止め実施履歴との関係について解析した。なお、吹雪量推定式の検討は平成 28 年度にも実施しているが、平成 28 年度に使用した降雪強度データには、そ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 年度の検討では、DFIR 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を用い、改めて吹雪量推定式の作成に臨んだ（達成目標①、②）。詳細については「平成 29 年度プロジェクト研究・重点研究報告書」⁶⁾を参照されたい。なお、観測データの取り扱いおよび吹雪量推定式の導出過程については、本報告書の 3.2 節および 3.3 節にも記述してある。

平成 30 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、近年発生した極端な暴風雪事例を対象に、推定式を用いて算出した吹雪量と国道通行止め実施履歴との関係について事例解析した。なお、平成 29 年度にも類似の解析を実施しているが、そこで使用したデータはアメダスおよび道路気象テレメータで得られた点的データであった。平成 30 年度は気象庁毎時大気解析 GPV および解析雨量を用いて時間吹雪量の 1km メッシュ値を算出し、面的な議論を行った。その結果、吹雪量と通行止め実施の関係は、暴風雪事例ごと、路線（区間）ごとに大きく異なることが示された（達成目標②）。詳細については「平成 30 年度プロジェクト研究・重点研究報告書」⁷⁾を参照されたい。なお、この事例解析結果については本報告書の 4.1～4.4 節にも記述してある。

2.2 令和元年度の実施内容

令和元年度は、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、平成 30 年度に実施した事例解析結果と同様の手法で、北海道東部で発生した直近 8 年間の暴風雪事例（全 53 事例）の時間吹雪量を整理した。加えて、国道の通行止め実施履歴（全 54 路線）や気象警報の発表履歴、北海道開発局の災害時体制等についても整理し、これらをデータセットとして整備した。これらは、今後のハザードマップ等の作成を見据えたものであり、多様な条件下での暴風雪事例や路線ごとの特性等に対して網羅的な解析を行うために用いる。

3. 吹雪量に与える気象要因の影響度の解明

吹雪量を自動的かつ連続的に実測することは困難なため、気象データを用いて経験式によって推定することが多い。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、その大半は風速のみの関数である^{8)～12)}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。ここでは、現地観測結果を基に、各気象要素が吹雪量に及ぼす影響を検討し、一回の暴風雪イベントによる吹雪量を見積もるための推定式を求めた。

3.1 現地観測

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、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 石狩吹雪実験場位置図



図2 弟子屈吹雪観測サイト位置図

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¹³⁾、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¹⁴⁾。

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) を石狩吹雪実験場内に設置し、降雪強度観測を行った。WMO は、DFIR による実測値に対し降雪形態に応じた変換式¹⁵⁾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。図4に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いる。なお、本研究では真の降雪強度に変換した値を解析に使用している。

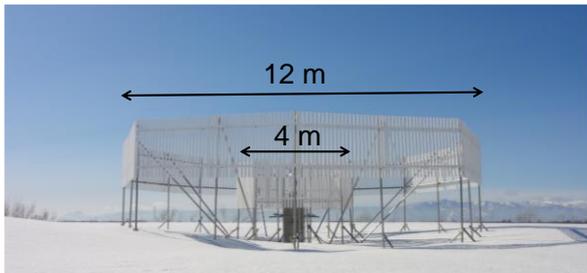


図4 DFIRの外観写真(於:石狩吹雪実験場)

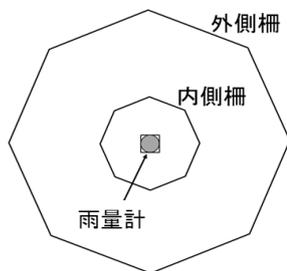


図5 DFIRの平面図

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¹⁶⁾。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気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。

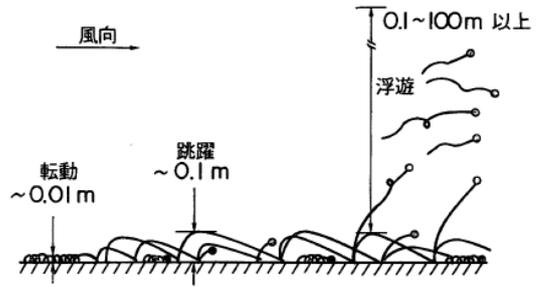


図6 吹雪の運動形態(転動・跳躍・浮遊)¹⁶⁾より抜粋

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。

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Schmidt¹⁷⁾を参照されたい。



図7 タンス型ネット式吹雪計



図8 筒型ネット式吹雪計



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。

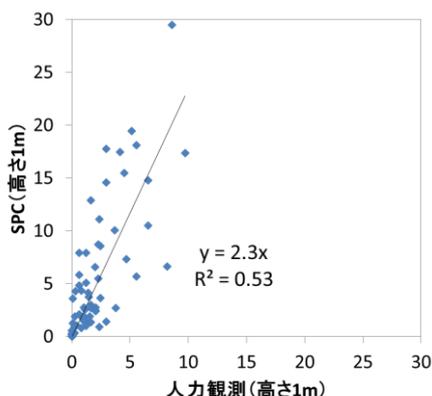


図10 ネット式吹雪量計とSPCによる飛雪流量の比較（高さ1m）

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（タンス型、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 ($\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$) 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Ishizaka¹⁸⁾を参考に、1.2m/sとした。

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。

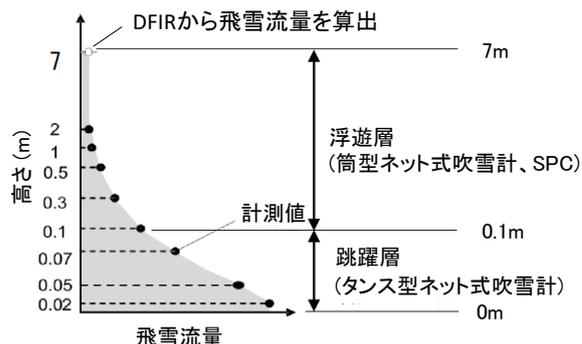


図11 ネット式吹雪計による飛雪流量観測結果から吹雪量を算出する方法の模式図

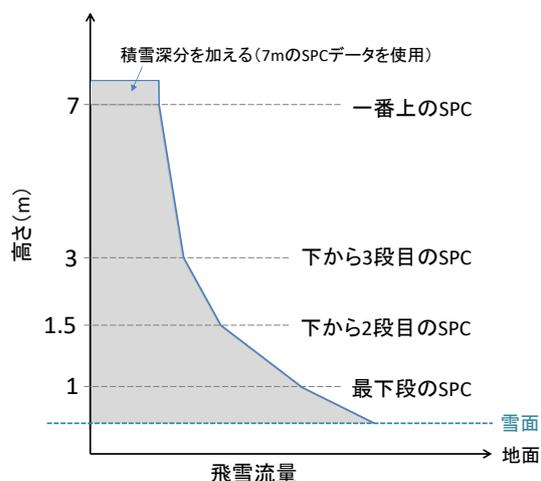


図12 SPCによる飛雪流量観測結果から吹雪量を算出する方法の模式図

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、まずは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。

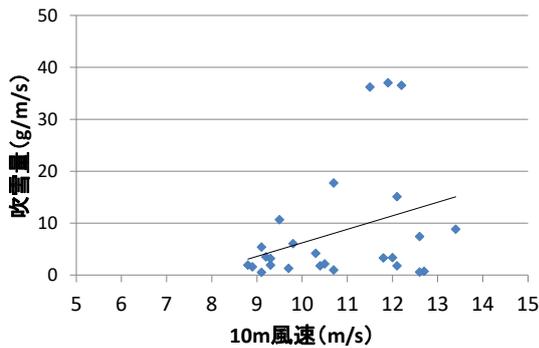


図13 吹雪量と風速の関係（降雪なし）

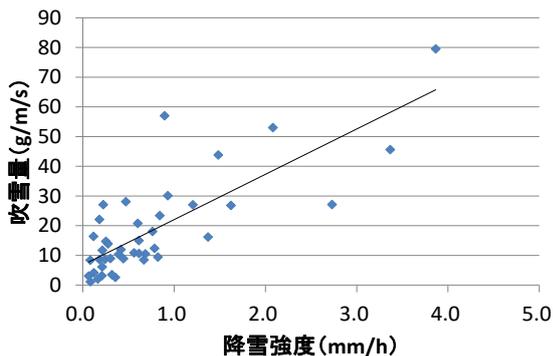


図14 吹雪量と降雪強度の関係

3.3 吹雪量推定式の検討

気象データに基づき、吹雪量推定式を作成する。本節では、ネット式吹雪計（タンズ型、筒型）による実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。

吹雪は、降雪粒子と地吹雪粒子（一度地面に積もった雪粒子が風によって舞い上がった粒子）から成る。

そこで、吹雪量推定式には、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^{8)~12)}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。

$$Q = \underbrace{aPU}_{Q_s} + \underbrace{bU^c}_{Q_b} \quad (1)$$

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。本研究では、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。本研究では、大浦ほか¹⁹⁾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。

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

次に、降雪フラックス P ($g/m^2/s$)を単位変換することによって降雪強度 P' (mm/h)に変換し、また、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。

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

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（タンス型、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。

$$Q = 1.42P'U_7 + bU^c \quad (6)$$

次に、係数 b と c を求めるため、実測吹雪量 Q_b 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（本研究では 10 個以下の場合とした）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て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で囲ってある）。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_7 は高度 7m における風速のことを指す。

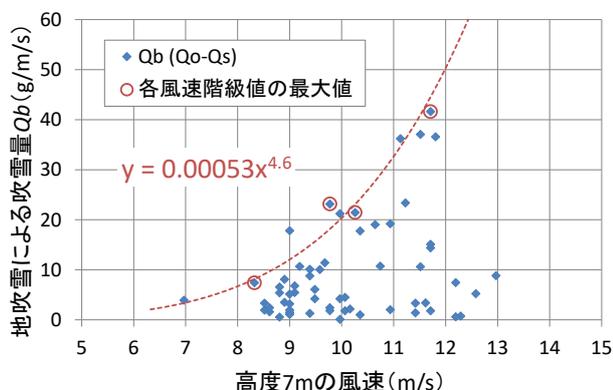


図 15 地吹雪粒子による吹雪量と風速の関係

$$Q = 1.42P'U_7 + 0.00053U_7^{4.6} \quad (7)$$

4. 暴風雪や大雪の評価指標の提案（事例解析）

暴風雪や大雪の評価指標を提案するにあたり、図 16 に示す流れで検討を進めるものとした。本章では、社会的被害の一つである国道通行止めに着眼し、北海道東部を中心に大きな被害をもたらした 2 つの極端な暴風雪事例（①2013 年 3 月 2 日～3 日、②2014 年 2 月 16～19 日）を対象に、気象状況や推定吹雪量、通行止め履歴等との関係について検討する。

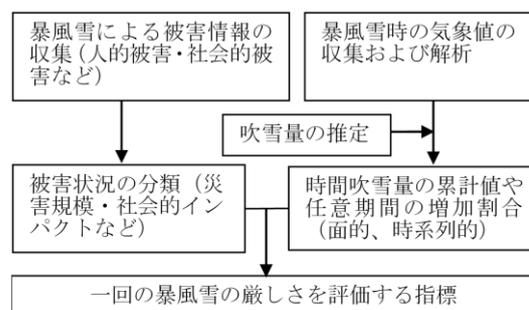


図 16 暴風雪の厳しさを評価する指標の検討の流れ

4.1 解析事例

4.1.1 2013 年 3 月 2～3 日の暴風雪

図 17 に、3 月 2 日 9 時と同日 15 時の地上天気図を記す。2 日 9 時頃に網走沖と苫小牧沖にあった 2 つの低気圧が、12 時頃に網走沖で 1 つになって急激に発達した。低気圧の中心気圧は 9 時から 15 時の 6 時間のうちに 15hPa も低下し、風速が急激に強まった。例えば、9 時の北見アメダスの最大瞬間風速は 1.8m/s であったが、15 時には 13.2m/s、その後 17 時 40 分には 22.7m/s を記録した。日本道路交通情報センター(JARTIC)によると、北海道内の国道通行止めは 22 路線 43 区間におよんだ。また、オホーツク海側や太平洋側東部を中心に合計 300 台以上の車両が立ち往生した。道路交通以外では JR 北海道で 361 本が運休したほか、新千歳空港を発着する 205 便が欠航した。

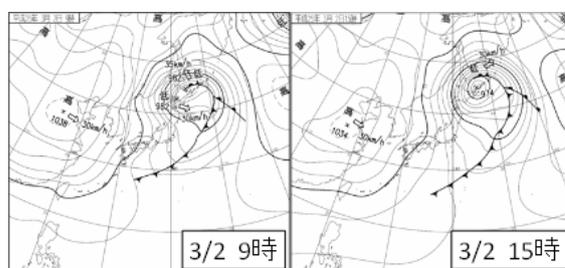


図 17 2013 年 3 月 2 日 9 時と 15 時の地上天気図

4.1.2 2014 年 2 月 16～19 日の暴風雪

図 18 に、2 月 15～18 日の 9 時の地上天気図を記す。2014 年 2 月 14 日から 16 日にかけて関東甲信地方に記録的大雪をもたらした南岸低気圧が発達しながら北東

進し、16日21時には根室の南東海上に達した。その後、低気圧は19日にかけて千島近海に停滞したため、北海道東部は長時間にわたって暴風雪となった。弟子屈アメダスでは、平均風速が16日21時30分から18日12時30分までの39時間にわたって常に15m/s以上であった。JARTICによると、北海道内の国道通行止めは12路線15区間において実施された。

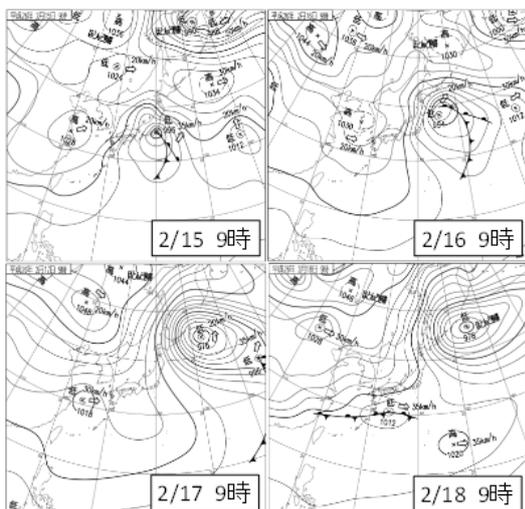


図18 2014年2月15日～18日の9時の地上天気図

4.2 メッシュ吹雪量の算出

吹雪量の算出には、気象庁より配信される降水強度、気温、風速の時別値（解析雨量・毎時大気解析 GPV）を用いて1kmメッシュの時間吹雪量を求めた。なお、解析雨量は1kmメッシュデータである一方、毎時大気解析 GPV は5kmメッシュデータである。そこで、ここでは5kmメッシュを25個の1kmメッシュに分割し、それらはすべて同値であると仮定した。また、各気象要素や気象履歴から吹雪の発生有無を統計的に判定するフロー²⁰に基づき、「吹雪あり」と判定された場合についてのみ吹雪量を計算し、「吹雪なし」と判定された場合の吹雪量はゼロとした。時間吹雪量の計算結果一例（2013年3月2日18時）を図19に記す。

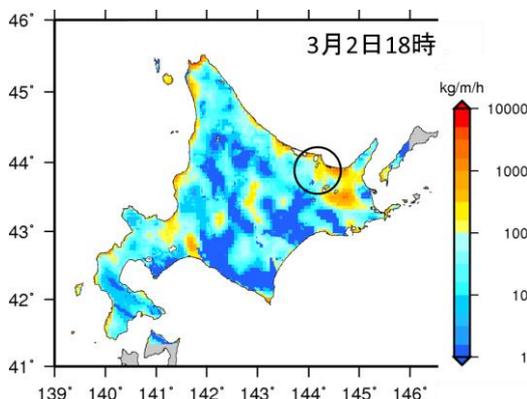


図19 3月2日18時における時間吹雪量

4.3 通行止めの実施有無と時間吹雪量の関係

国道通行止めの実施有無（吹雪に因る通行止めのみ対象）と時間吹雪量の時間変化の関係について整理する。ここでは、美幌町を中心としたエリア（図18の黒丸で囲んだエリア）における国道を対象に、その特徴を述べる。なお、通行止め履歴についてはJARTICにより提供されたデータを使用した。

4.3.1 2013年3月2～3日の暴風雪

2013年3月の暴風雪事例について、2日11時から21時までの1時間ごとの時間変化を図20に示す。図中には、当該エリアにおける国道路線とその番号を付記してある。当該時刻において通行止めが実施されていた路線・区間は赤で、実施されていない路線・区間は黒で示してある。なお、吹雪発生判定フローによって「吹雪なし」と判定された吹雪量ゼロのメッシュについてはグレーで示してある。

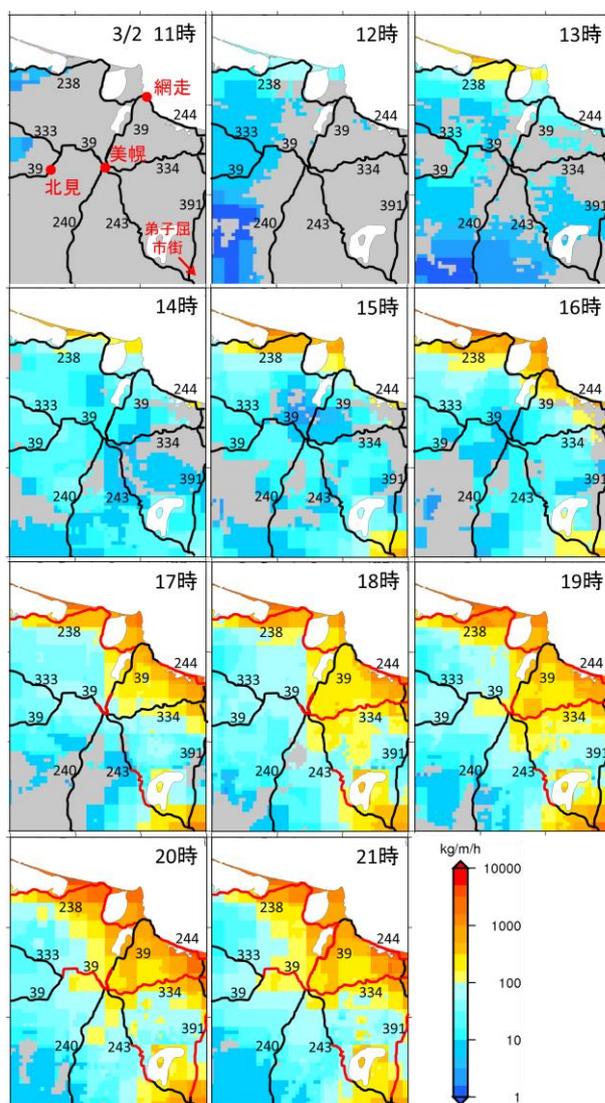


図20 通行止め実施有無と時間吹雪量の関係 (2013年3月2日11時～21時)

この結果より、11時の時点では、広い範囲において吹雪は発生していない。その後、時間経過とともに吹雪発生エリア・吹雪量ともに増加したことが確認される。当該エリアにおいて最初に通行止めが実施されたのは238号と243号であった(16時30分)。次いで、5分後の16時35分に39号が、17時に244号が、18時に334号が、19時30分に39号(区間延伸)と391号が、20時30分に39号(さらに区間延伸)が追加で実施された。なお、3日15時に、243号の通行止め区間の通行止め理由が「吹雪」から「雪崩の恐れ」へと変更になった(当該区間には美幌峠がある)。本結果より、通行止め区間や地域ごとの特徴が読み取れる。例えば16時30分前後において通行止めが実施された238号と39号を比較した場合、海岸沿いに位置する238号は昼過ぎから強めの吹雪が継続したにも関わらず、吹雪の発生開始が遅く、かつ比較的吹雪が弱かった39号とほぼ同じタイミングで通行止めが実施された。一方、20時30分に延伸された39号の区間については、夕方以降、長時間にわたって強い吹雪が発生していたにも関わらず、通行止め実施タイミングは遅かった。また、弟子屈市街は15時頃から長時間にわたって強めの吹雪が継続していたにも関わらず、その中心部が通行止めになることはなかった。

4.3.2 2014年2月16～19日の暴風雪

2014年2月の暴風雪時の国道通行止め実施履歴と時間吹雪量の時間変化について述べる。図21に16日19時から17日9時までの1時間ごとの時間変化を示す。吹雪量の激しさを示すカラーバーは図20と同じものを用いている。ここで、2月16日21時以降の243号一部区間を赤の点線で示してあるが、これは当該時刻に「雪崩の恐れ」との理由で通行止めが実施されたものである。なお、この区間は図20に記した243号の通行止め区間と同じである。

2013年3月の暴風雪事例と同様、238号と39号の通行止め実施タイミングは周辺の路線よりも早かった(17日4時)。次いで5時に334号が、6時30分に39号(区間延伸)と244号が、8時30分には238号(区間延伸)が追加で実施された。

通行止め実施にいたるまでの時間吹雪量の推移傾向は2013年3月の事例と類似しており、海岸沿いに位置する238号は39号に比べて強い吹雪が継続していたにも関わらず、通行止めの実施タイミングは39号と同じであった。また、弟子屈市街においても、長時間にわたって強い吹雪が継続していたにも関わらず、通行止めが実施されることはなかった。これらの結果は、

エリアや路線(区間)ごとに吹雪に対する耐性が異なることを意味するものである。すなわち、通行止め実施判断に関する指標を作成するにあたっては、その区間ごとの特性を考慮に入れた検討を行う必要がある。

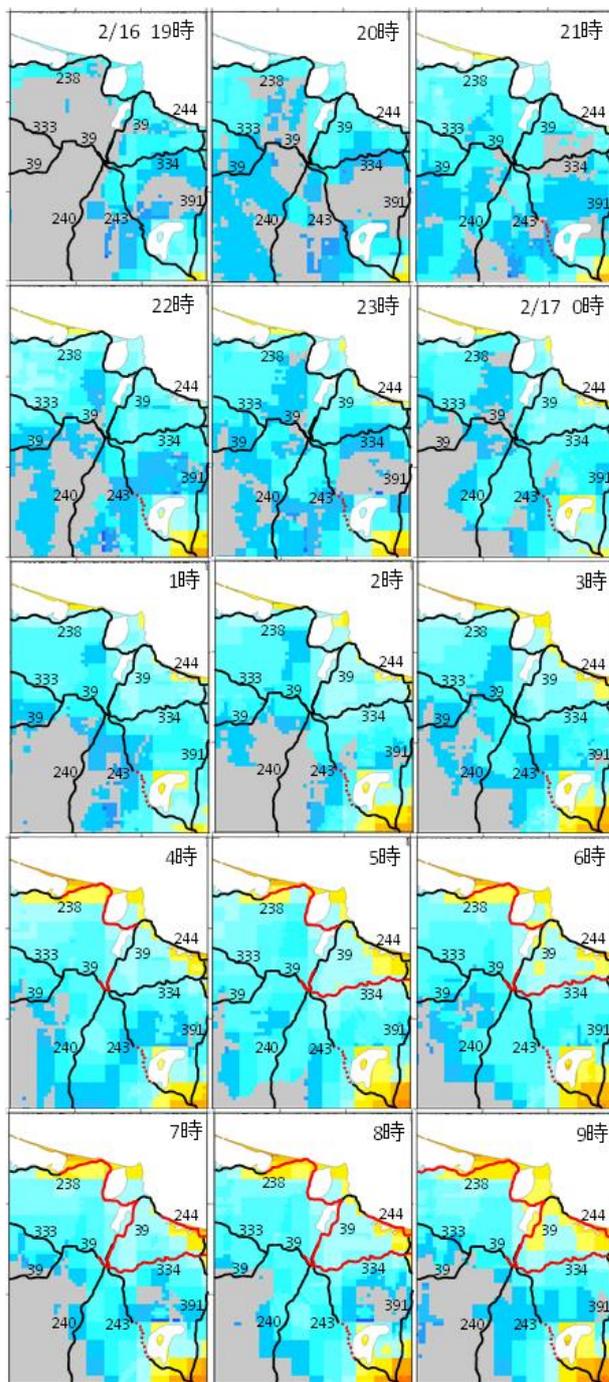


図21 通行止め実施有無と時間吹雪量の関係
(2014年2月16日19時～17日9時)

4.4 通行止め実施と累積吹雪量の関係

通行止め区間ごとに、吹雪発生から通行止め実施にいたるまでの累積吹雪量との関係について整理する。ここでは、通行止めの区間延伸が行われた39号と238号についてはその延伸区間を別区間として扱うことと

し、図 22 に示すようにそれぞれ分割した。

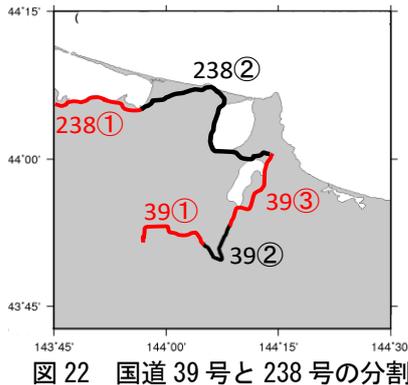


図 22 国道 39 号と 238 号の分割

まず、各通行止め区間の累積吹雪量を代表すると見なすメッシュの選定を行う。本解析では、各通行止め区間において最も吹雪が激しかったと推定されるメッシュを「当該区間を代表する吹雪量を示すメッシュ」として扱うこととし、吹雪発生中における任意の 3 時間累積吹雪量が最大となったメッシュを抽出した。これは、国土交通省が想定する各除雪工区における 1 サイクルの除雪時間（除雪作業開始から終了後に戻ってくるまでの時間）が約 3 時間であることに基づく²¹⁾。

図 23 に、代表メッシュにおいて吹雪の発生が推定されてから通行止め実施にいたるまでの各通行止め区間の累積吹雪量を示す。本結果より、通行止めにいたるまでの累積吹雪量は通行止め区間ごとに大きく異なることが示され、その差は最大で約 43 倍であった（2013 年 3 月の 39 号②と 334 号）。また、総じて 2014 年 2 月の事例の方が 2013 年 3 月よりも通行止め実施までの累積吹雪量は少なかった。

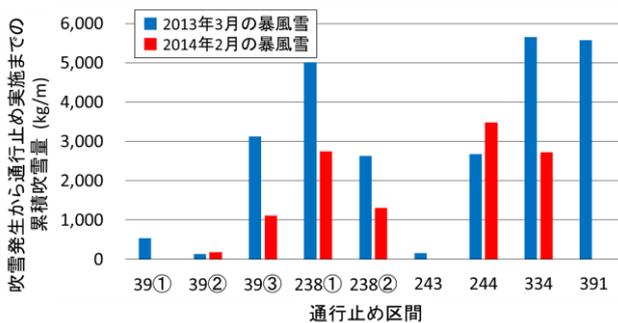


図 23 吹雪開始から通行止め実施までの累積吹雪量

次に、累積吹雪量の増加速度と通行止めとの関係を図 24 に示す。通行止めが実施されたタイミングを横軸 0h とし、実施までの累積吹雪量について示した。2013 年 3 月の事例を実線、2014 年 2 月の事例を破線、同一区間を同色で示した。この結果、累積吹雪量の増加傾向は 2 つの暴風雪事例で大きく異なり、2013 年 3 月の事例では短時間で急激に増加していたのに対し、2014

年 2 月の事例では長時間にかけて徐々に増加したことが確認された。

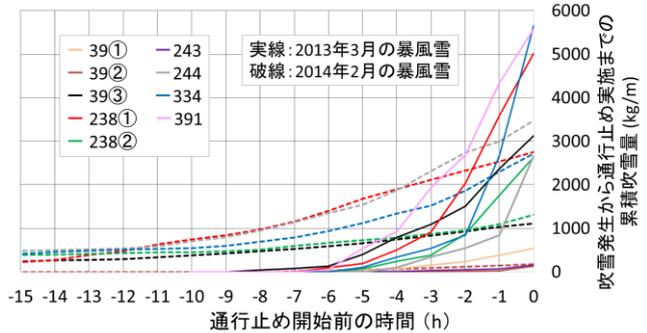


図 24 通行止め開始までの累積吹雪量の変化

5. 暴風雪や大雪の評価指標の提案（網羅的解析）

4 章に示した事例解析結果より、吹雪量と通行止めの関係は、事例や路線（区間）ごとに大きく異なることが示された。すなわち、暴風雪や大雪の評価指標の作成や、この評価指標に基づくハザードマップの作成、道路管理における判断支援方策の提案を行うためには、気象等の各種状況や路線（区間）ごとの特性を考慮に入れた検討を行う必要がある。そこで、暴風雪や大雪の評価指標を作成するため、過去に発生した多様な事象に対して網羅的に解析を行う。令和元年度は、解析に向けて、データセットを整備した。

5.1 データセットの整備

本節では暴風雪時の気象データ、吹雪量、国道通行止め実施履歴、気象警報・注意報の発表履歴、北海道開発局の災害体制履歴等について取りまとめ、データセットを整備する。

5.1.1 解析対象とする暴風雪事例および区間の抽出

直近 8 年間(2011 年～2018 年)に道東地方で発生した暴風雪事例を 53 事例抽出した。事例抽出は、道東地方の複数のアメダスデータと吹雪量推定式(式(7))に基づいて行った。事例の継続期間については、推定式によって吹雪量が記録され始めたタイミングを「吹雪開始」とし、その後 6 時間連続して吹雪量が記録されなくなった場合に一事例の区切りの目安として、最後に吹雪量が記録されたタイミングを「吹雪終了」とした。次に、解析対象とする通行止め区間について整理した。まず、53 事例中 1 事例以上において通行止めが実施されたことがある路線を抽出した（19 路線）。通行止め実施のタイミングやその区間、区間延長は事例によって異なる。そこで、抽出した路線を、通行止め実施区間が全事例で共通となるように適宜区切った。その結果、全 54 区間が選定された。以降、この区間を解析対象区間（以下、「解析区間」とした。

5.1.2 メッシュデータの作成

はじめに、道路基準点案内システム²²⁾によって得られる位置情報を元に、全 54 の解析区間に該当するメッシュデータについて、3 次メッシュコードと緯度経度を整理した。図 25 に、道路基準点案内システムの画面表示の一例を示す。



図 25 道路基準点案内システムの画面表示例

次に、4.2 節と同様の手法により、解析雨量および毎時大気解析 GPV を用い、吹雪量をメッシュで算出した。さらに、解析区間に該当するメッシュ上において 3 時間累積吹雪量が最大値を示したメッシュ（以下、代表メッシュ）を解析区間毎・事例毎に抽出した（54 区間×53 事例＝2862 メッシュ）。以降、代表メッシュにおける各種データ（風速、気温、吹雪量等）を、当該区間の当該事例を代表するデータとして扱うこととする。なお、代表メッシュ抽出に用いた「3 時間の累積吹雪量」の根拠は 4.4 節で既述のとおりであり、国土交通省が想定する各除雪工区の 1 サイクルの除雪時間に基づく。求めたメッシュ吹雪量と抽出した代表メッシュ位置の一例（事例 31：2015 年 2 月 13 日～18 日の事例）を図 26 に示す。ここで、吹雪量については 24 時間累積吹雪量（15 日 0～24 時）を、代表メッシュ位置については星印で示してある。

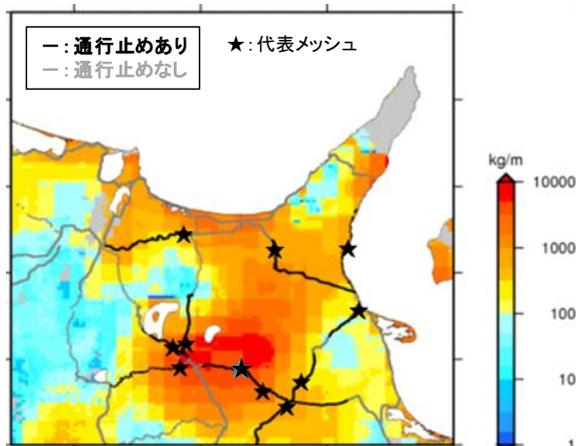


図 26 メッシュ吹雪量と代表メッシュ位置の一例

5.1.3 近傍アメダスの抽出および吹雪量の算出

解析区間毎にそれぞれ最も近いアメダス地点を抽出し、当該事例における気温および風向風速データから吹雪量を算出した。ここで、降雪強度はそれぞれのアメダス地点における解析雨量を用い、吹雪量推定には吹雪発生有無を統計的に判定するフロー²⁰⁾ と式(7)を用いた。

5.1.4 データの時系列整理

解析区間別に、事例番号、気象データ、吹雪量、通行止め期間等を取りまとめ、csv ファイル形式のデータセットを作成した。ここでは、(1)事例の継続期間全体について集計した結果と、(2)事例開始から通行止め開始までについて集計した結果、(3)通行止め開始から通行止め解除までについて集計した結果に分けて整理した。表 2 に、事例の継続期間全体について整理したデータ項目を、表 3 には事例開始から通行止め開始まで、通行止め開始から通行止め解除までについて整理したデータ項目を記す。

表 2 事例の継続時間全体を通したデータ整理項目

項目名	備考	
事例番号		
代表メッシュの 3 次メッシュコード		
事例継続時間(h)		
累積吹雪量(kg/m)		
累積降雪量(cm)		
通行止め開始日時		
通行止め解除日時		
通行止め継続時間(h)		
気象庁発表の 継続時間(h)	大雪注意報	事例期間中の延べ時間
	大雪警報	事例期間中の延べ時間
	風雪注意報	事例期間中の延べ時間
	暴風雪警報	事例期間中の延べ時間
北海道開発局の 体制継続時間(h)	注意体制	事例期間中の延べ時間
	警戒体制	事例期間中の延べ時間
	非常体制	事例期間中の延べ時間
近隣アメダスから 算出した値	選定地点名	
	代表メッシュまでの 距離(km)	
	累積吹雪量(kg/m)	
	累積降雪量(kg/m)	アメダス地点の解析雨量
	吹雪量比率(%)	(メッシュ吹雪量)/(アメダスから求めた吹雪量)
降雪量比率(%)	(解析区間の最大値メッシュの累積)/(アメダス地点の解析雨量累積)	

表3 事例開始から通行止め開始まで、通行止め開始から通行止め解除までのデータ整理項目

項目名	備考
累積時間(h)	
累積吹雪量(h)	
累積降雪量(kg/m)	
最大値および最大増加量	1時間吹雪量(kg/m/h)
	3時間吹雪量(kg/m/3h)
最大値および最大増加量	1時間降雪量(cm/h)
	3時間降雪量(cm/3h)

5.2 時系列図の作成

前節で作成したデータセットに基づき、解析区間および事例別の代表メッシュにおける吹雪量（時間吹雪量、3時間吹雪量、累積吹雪量）、降雪量（時間降雪量、3時間降雪量、累積降雪量）、気温、風況（風向風速）の時系列図を作成した。その一例として、図27に解析区間42、事例25（区間：国道334号斜里町ウトロ西～斜里町光陽町、事例期間：2014年12月16日～12月20日）の時系列図を記す。なお、図中には、通行止めの実施有無、気象庁の注意報および警報期間、北海道開発局の災害に対する体制（注意・警戒・非常）についても付記した。

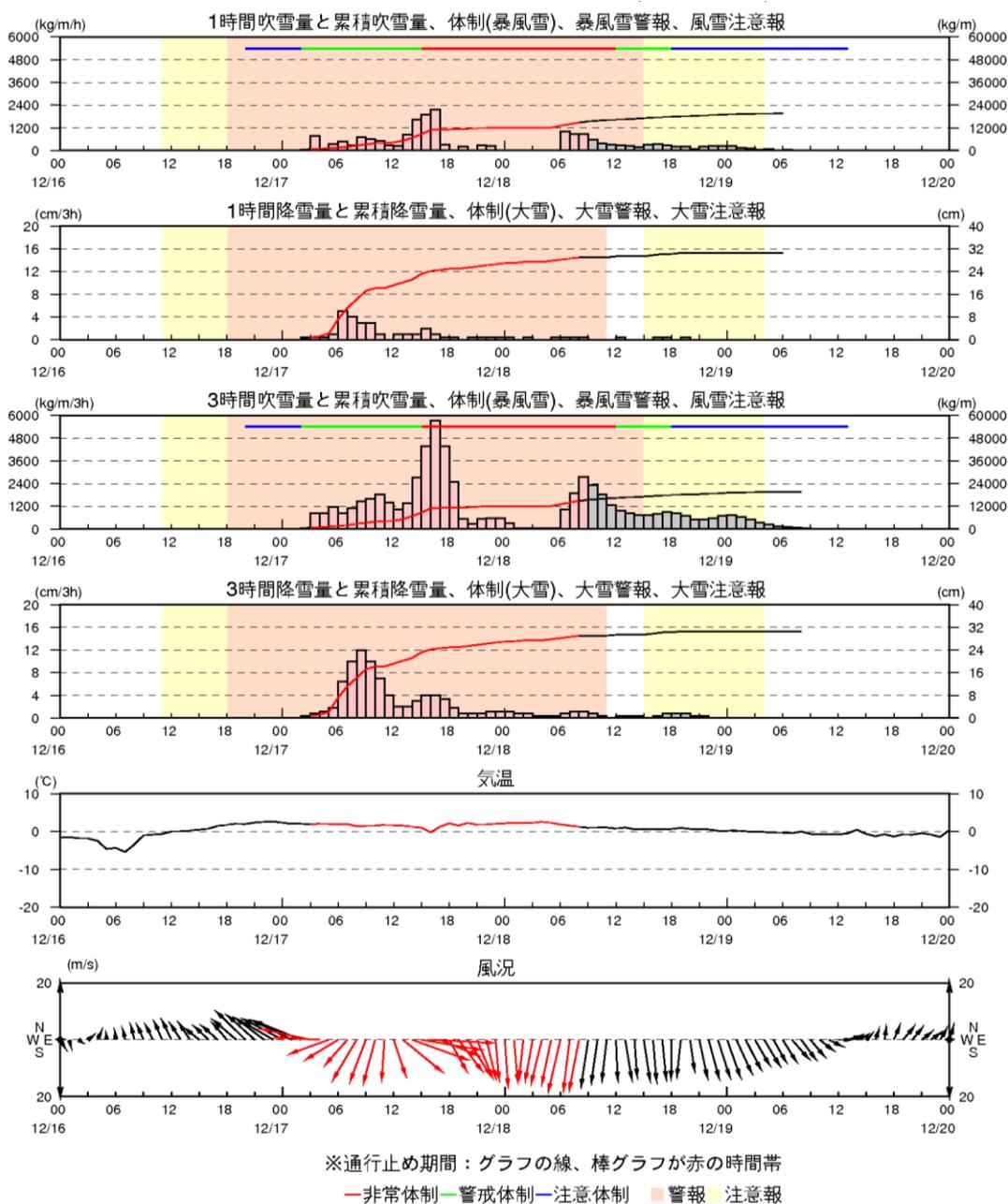


図27 解析区間別および事例別の時系列データの一例

通行止め実施前後における累積吹雪量の時系列変化を解析区間ごとに作図した結果の一例(解析区間42)を図28に記す。ここで、途中で線が切れている事例は、その時点で吹雪事例が終了したことを指す。

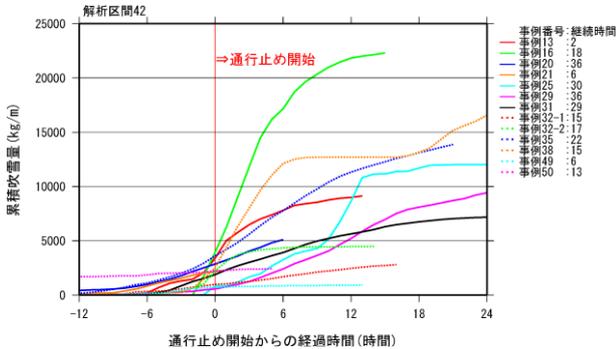


図28 通行止め前後における累積吹雪量の一例

6. まとめ

令和元年度は、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、北海道東部で発生した直近8年間の大雪・暴風雪事例(全53事例)および国道通行止め履歴(全54路線)について取りまとめ、これらのデータセットを整備した。

令和2年度以降は、これまでと同様に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ほか、令和元年度に整備したデータセットを用い、通行止め実施履歴と吹雪量の関係について網羅的な解析を行う。その結果を基に、評価指標を提案のうえ地域や路線(区間)ごとの特性と変化傾向を見出し、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および道路管理における判断支援方策の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) 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> (2020年5月15日閲覧)
- 4) 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> (2020年5月15日閲覧)
- 5) 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> (2020年5月15日閲覧)

- 6) 国立研究開発法人土木研究所：平成29 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，2018.

<https://www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-program/2017/pdf/pro-5.pdf> (2020年5月15日閲覧)

- 7) 国立研究開発法人土木研究所：平成30 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，2019.

<https://www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-program/2018/pdf/pro-5.pdf> (2020年5月11日閲覧)

- 8) 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.

- 9) 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.

- 10) Kobayashi.D : Studies of Snow Transport in Low-Level Drifting Snow. Contributions from the Institute of Low Temperature Science, A24, pp.1-58, 1972.

- 11) Takeuchi.M: Vertical profile and horizontal increase of drift-snow transport, J.Glaciology, 26, pp.481-492, 1980.

- 12) 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.

- 13) 日本雪氷学会：新版雪氷辞典，古今書院，p.52, 2014.

- 14) Sevruk: Summary report. Correction of Precipitation Measurements, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, pp.13-23, 1985.

- 15) Goodison, B.E *et al.* : WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison Final Report, WMO, p.14, 1998.

- 16) 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.

- 17) Schmidt.R A : A system that measures blowing snow, USDA, Forest Service Research Paper, RM-194, 1977.

- 18) 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.

5 極端気象をもたらす雪氷災害の被害軽減のための技術の開発

- 19) 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.
- 20) 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.
- 21) 国土交通省 HP, 第4回冬期道路交通確保対策検討委員会(2018年11月1日開催)配付資料, 資料4: 今冬の大
- 雪対応予定
<http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/toukidou-rokanri/giji04.html> (2020年5月15日閲覧)
- 22) 道路基準点案内システム Web ページ, <http://www.road-refpoint.jp/kijunten/> (2020年5月15日閲覧)

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：秋山一弥（雪崩 C）、高橋丞二、松下拓樹、原田裕介、
高橋 渉、櫻井俊光（雪氷 T）

【要旨】

本研究では、短時間の多量降雪による雪崩の危険度評価手法を提案した。まず、短時間多量降雪時の気温、降雪強度、立木間隔、斜面勾配などを要素とした雪崩発生条件を提示し、低気圧通過に伴う降雪時には雪崩発生に関して降雪結晶の種類や新雪密度に注意する必要があることを示した。また、この雪崩発生条件を満たす降雪事例の発生頻度を推定する簡便な解析手法を提案し、発生頻度の地域分布を提示した。最後に、樹林内を流下する乾雪雪崩の運動モデルを考案し、雪崩発生区の傾斜角や発生層厚、樹林の有無による雪崩の衝撃圧と到達距離の算出手法を提案した。本研究により、頻度解析で得た雪崩発生条件に合致する降雪深を雪崩運動モデルの発生層厚に適用することで、対策施設の設計に必要な雪崩の到達距離と衝撃圧を任意の発生頻度に応じて算出することができるなど、短時間多量降雪による雪崩の危険度評価が可能となった。

キーワード：短時間多量降雪、雪崩発生条件、雪崩発生頻度、雪崩運動モデル、雪崩衝撃圧、雪崩到達距離

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^{1),2)}。例えば、2014年2月14日～15日にかけて、本州の南岸を通過した低気圧に伴う多量降雪により、関東甲信地方を中心とする広い地域で数多くの雪崩が発生した¹⁾。このような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樹林内でも雪崩を誘発したことが特徴である¹⁾⁻⁷⁾。しかし、これらの雪崩発生の気象条件や積雪層の状態、樹林内の植生や地形の条件、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、短時間多量降雪時の雪崩による被害軽減に資する雪崩危険度評価手法を提案することを目的として、雪崩発生時の気象と積雪条件、植生と地形条件、発生頻度および雪崩の衝撃圧と到達範囲の算出手法について検討を行った。

本研究では、短時間多量降雪時の気温と降雪強度を用いた斜面積雪の安定度と硬度の推定結果から、雪崩発生の気象と積雪条件を提示し(第2章)、短時間多量降雪時の現地観測の結果から、低気圧通過に伴う降雪時には雪崩発生に関して降雪結晶の種類や新雪密度に注意する必要があることを示した(第3章)。また、既往の文献レビューと樹林内における雪崩発生箇所の現地調査の結果から、立木間隔、胸高直径、樹種、斜面勾配などを要素とした雪崩発生の植生と地形条件を示した(第4章)。次に、短時間多量降雪時の雪崩発生条件を満たす降雪事例を過

去の気象データから抽出して、その発生頻度を簡便に推定する手法を提案し、発生頻度の地域分布を提示した(第5章)。そして、樹林内を流下する雪崩の運動モデルを考案し、雪崩発生区の傾斜角や発生層厚、樹林の有無による雪崩の衝撃圧と到達距離の算出手法を提案した(第6章)。最後に、これらの研究成果をとりまとめて、短時間多量降雪による雪崩危険度評価手法を提案した(第7章)。以下に、これらの結果の詳細を述べる。

2. 雪崩発生の気象と積雪の条件

短時間多量降雪時の雪崩発生の典型的な事例として、第1章で述べた2014年2月の例¹⁾がある。2014年2月14日から15日にかけて、本州の南岸を通過した低気圧による大雪に伴い、普段は積雪が少ない関東甲信地方を中心とする広い地域で数多くの雪崩が発生した。このときの雪崩の特徴の一つとして、通常は雪崩が発生しにくい樹林内でも雪崩が発生した¹⁾⁻⁷⁾。斜面に樹木が密に存在していれば、樹林は斜面積雪を支えてその移動を抑制し、雪崩発生予防の効果を有する⁸⁾。樹林内で発生する雪崩については、日本^{9), 10)}、スイス^{11), 12)}、イタリア¹³⁾、カナダ¹⁴⁾において調査事例がある。しかし、これらの調査事例のうち、統計的な解析により降雪深が大きいときに樹林内で雪崩が発生する傾向を示した例²⁾はあるものの、気温など他の要素を用いた樹林内における具体的な雪崩発生の気象および積雪の条件は、まだ十分に示されていない。

そこで、2014年2月の短時間多量降雪時における雪崩事例を対象に、地上気温と降雪強度の観測値を用いて斜面積雪の硬度と安定度を推定し、樹林内における雪崩の発生条件を調べた。

2. 1 データと解析方法

2.1.1 雪崩事例

図-1に、2014年2月の大雪において樹林内で発生した雪崩事例(図-1の○)^{1), 4), 5), 7)}の位置を示す。これらは乾雪表層雪崩で、2014年2月14日と15日に発生した。周辺の地形から推定される雪崩発生区での斜面勾配は42~45°、標高は1000~1100 mである¹⁵⁾。ただし、雪崩発生区の樹木密度や樹種などの植生状況は不明である。

樹林内における雪崩発生箇所近傍の気象観測所は、河口湖(KW)、みなかみ(MN)、桧枝岐(HN)である。秩父(CC)とみなかみ(MN)の周辺では、落石防止用ネットを積雪がすり抜けた事例(図-1の□)の報告がある^{7), 16)}。また、樹林以外でも数多くの雪崩(図-1の×)が発生した¹⁾。

2.1.2 気象データ

解析に用いたデータは、図-1の関東甲信地方の気象庁観測所15地点における気温、積雪深の1時間データである。

本研究では、1時間毎の積雪深差が正である場合を降雪ありと判断して、降雪の中断が5時間未満であれば一つの降雪期間が継続しているとみなした。降雪深(cm)は1時間毎の積雪深差の合計値で、平均降雪強度(cm/h)は降雪深

を降雪期間の継続時間で除して求めた。例として、図-2に山梨県河口湖の2014年2月14~15日の積雪深、降雪深、気温、風速の時系列を示す。河口湖では、降雪期間は14日5時から15日9時までの29時間で、この期間の降雪深は112 cm、平均降雪強度は3.9 cm/h、平均気温は-3.4°Cであった。

なお、気象観測所と雪崩発生箇所の間には標高差がある。そのため、樹林内における雪崩発生条件の検討には、標高補正した気温を用いることにする。図-3は、気象観測所15地点の降雪期間の平均気温 T_{av} と標高 H の関係である。各地点における雪崩発生区に相当する標高1100mの気温を推定するにあたり、降雪期間の平均気温と標高との回帰式(図-3の実線)を用いた。

2.1.3 樹林内における雪崩発生条件の検討方法

樹林内の雪崩発生に関わる指標として、雪崩そのものの発生のしやすさと、樹林に対する積雪のすり抜けやすさが重要であると考えられる¹⁵⁾。

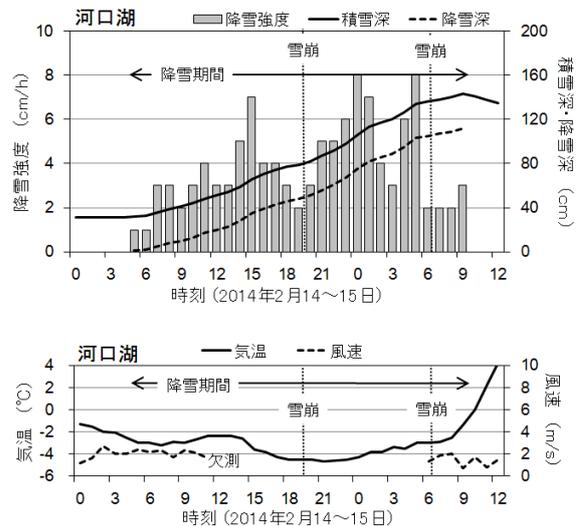


図-2 河口湖における積雪深、降雪強度、降雪深、気温、風速の時系列。

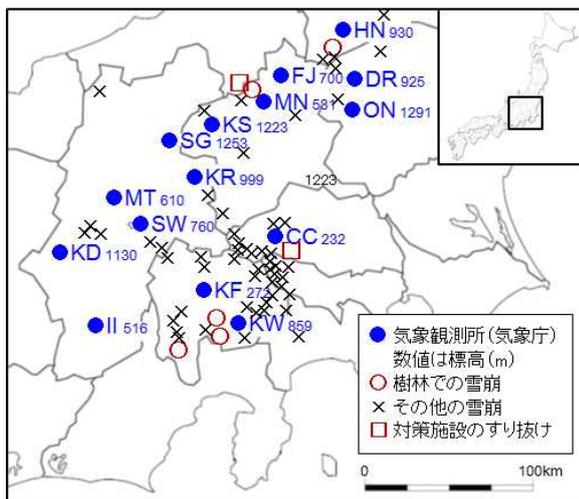


図-1 気象庁の気象観測所(●)と樹林内で発生した雪崩(○)^{1), 4), 5), 7)}、その他の雪崩(×)¹⁾、落石ネット等の対策施設を積雪がすり抜けた箇所(□)^{7), 16)}の位置。HN: 桧枝岐、DR: 土呂部、ON: 奥日光、FJ: 藤原、MN: みなかみ、KS: 草津、SG: 菅平、KR: 軽井沢、MT: 松本、SW: 諏訪、KD: 開田高原、II: 飯田、CC: 秩父、KF: 甲府、KW: 河口湖。

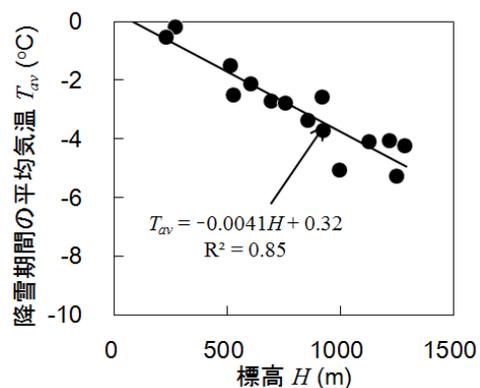


図-3 気象観測所 15 地点の降雪期間の平均気温 T_{av} と標高 H の関係。実線は回帰直線。

雪崩発生のしやすさに関する指標として斜面積雪の安定性が考えられ、ここでは積雪に対して斜面の流下方向へ働く応力と積雪の強度の比で表される安定度 SI ¹⁷⁾を用いる(式(1))。

$$SI = \frac{\Sigma_s}{h\rho g \sin \theta \cos \theta} \quad (1)$$

ここで、 h は積雪深(m)、 ρ は積雪密度(kg/m^3)、 g は重力加速度(m/s^2)、 θ は斜面勾配($^\circ$)、 Σ_s は積雪のせん断強度指数(N/m^2)、 $h\rho g \sin \theta \cos \theta$ はせん断応力(N/m^2)である。ここでは斜面勾配 θ は 45° とした。積雪のせん断強度指数 Σ_s は、式(2)の積雪密度 ρ との関係式¹⁷⁾から推定した。

$$\Sigma_s = 3.10 \times 10^{-4} \rho_i^{3.08} \quad (2)$$

ただし、積雪密度 ρ は圧密によって時間の経過とともに大きくなるので、式(3)より、積雪の圧密過程を考慮した時刻 t (h)の積雪密度 ρ_t (kg/m^3)を求めて¹⁷⁾、せん断強度指数 Σ_s と安定度 SI の推定に用いた。

$$\rho_t = \left\{ \frac{2Ag}{C} \cdot \cos^2 \theta \cdot t^2 + \rho_0^4 \right\}^{1/4} \quad (3)$$

ρ_0 は積もったばかりの初期積雪密度(kg/m^3)、 A は降雪強度($\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}$)である。降雪強度 A は、積雪深差から求めた降雪強度 A_{ob} (m/h)と、 $A = \rho_0 A_{ob}$ の関係となる。ここでは、初期積雪密度 ρ_0 を 50 kg/m^3 とした。 C は圧密の進行に関する係数($\text{N}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot (\text{kg/m}^3)^4)$)で、以下に示す雪温 T_s ($^\circ\text{C}$)との関係式¹⁸⁾を用いて求めた。

$$C = 0.21 \exp(-0.166T_s) \quad (4)$$

新雪では、雪温 T_s は気温 T に等しい($T_s \approx T$)と仮定できる。

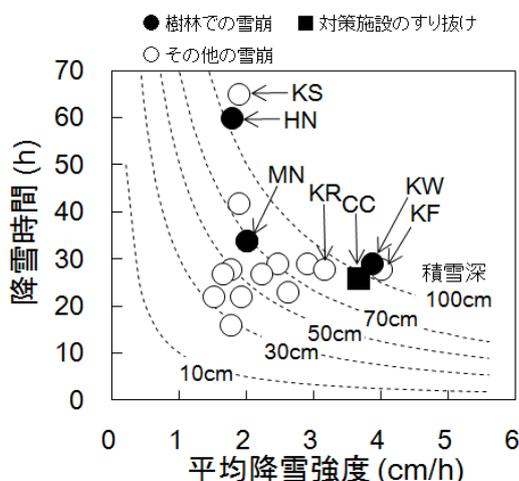


図-4 気象観測所15地点の降雪期間の時間と平均降雪強度の関係。地点の略記号は図-1に同じ。

次に樹林に対する積雪のすり抜けやすさに関する指標として積雪の硬度 H を考える。積雪硬度 H (N/m^2)は、圧縮粘性理論による積雪密度の計算値 ρ を用いて、式(5)に示す密度との関係式¹⁹⁾から求めた。

$$H = 1.31 \times 10^{-5} \rho_i^4 \quad (5)$$

以上より、斜面勾配 θ が一定であれば、斜面積雪の安定度 SI と硬度 H は積雪密度 ρ の関数となり、密度 ρ は気温 T と降雪強度 A_{ob} の観測値から推定することができる。一般に、安定度 SI が小さいほど斜面積雪が不安定で雪崩が発生しやすく、積雪硬度 H が小さいほど積雪粒子間の結合が弱く樹林でも雪崩が発生しやすい。

2.2 結果

2.2.1 降雪状況の特徴

図-4は、図-1に示した気象観測所15地点の降雪時間と平均降雪強度、降雪深の関係である。付近の樹林内で雪崩が発生した観測地点(図-4の●)は、河口湖(KW)、みなかみ(MN)、桧枝岐(HN)である。降雪深が100cm以上となったのは、河口湖(KW)、甲府(KF)、桧枝岐(HN)、草津(KS)である。特に、河口湖(KW)や甲府(KF)は平均降雪強度が大きく、約30時間で降雪深が100cm以上になった。しかし、図-4からは樹林における雪崩の発生条件は明確ではない。

そこで、次の2.2.2項では、降雪期間のうち、特に強い降雪のあった時間帯の気温と降雪強度を用いて、2.1.3項で述べた斜面積雪の安定度と硬度を推定して、樹林内における雪崩発生条件を検討する。

2.2.2 樹林内における雪崩発生条件

図-5は、各気象観測地点の降雪期間のうち平均降雪強度が最も大きくなった12時間の平均気温と平均降雪強度の関係である。この気温は、図-3の方法で推定した標高1100mにおける気温である。また、図-5には2.1.3項で説明した方法で求めた斜面積雪の安定度 SI (実線)と硬度 H (破線)の推定値も示す。

図-5より、周辺の樹林内で雪崩が発生した河口湖(KW)、みなかみ(MN)、桧枝岐(HN)は、降雪時の平均気温が -4°C 以下で、平均降雪強度は3.5cm以上であった。この気温と降雪強度から推定される斜面積雪の安定度 SI は1.5以下で、積雪硬度 H は 400 N/m^2 以下であった。また、落石防止ネットを積雪がすり抜けた事象(図-4の■)が発生した秩父(CC)も、これら樹林内における雪崩事例に近い気象および積雪状況であったと考えられる。よって、降雪時の気温と降雪強度を用いて推定される斜面積雪の安定度と硬度を指標に、樹林内における雪崩発生条件を示

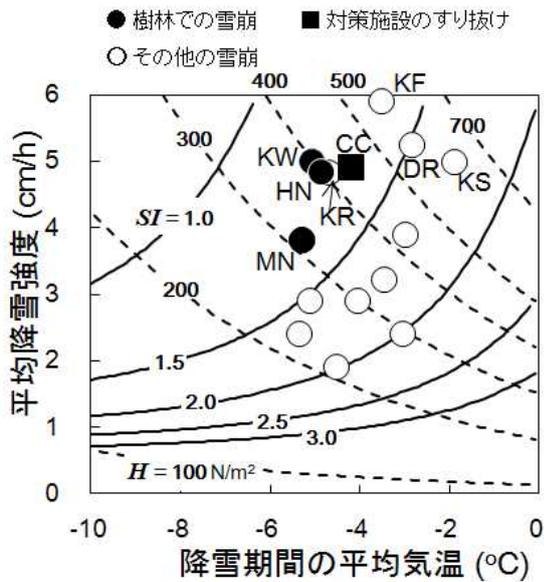


図-5 各気象観測地点における降雪期間のうち降雪強度が最大となった連続する12時間の平均気温と平均降雪強度の関係。斜面積雪の安定度 SI (実線) と硬度 H (破線) は、平均気温と平均降雪強度を用いた計算値。平均気温は図-3の標高との回帰式から求めた標高1100mの値。地点の略記号は図-1に同じ。

すことができると考えられる。つまり、樹林内の雪崩発生条件として、降雪強度が大きい気象条件が12時間継続して斜面積雪が不安定となり(第一条件)、気温が低いために硬度が小さい積雪が形成される(第二条件)ので、樹林内でも雪崩が発生すると考えられる。

また、図-5より、軽井沢(KR)の気象条件は、樹林内で雪崩が発生した箇所の気象条件に近かった。軽井沢の周辺で、実際に樹林内において雪崩が発生したかは不明であるが、この地域でも樹林内で雪崩が発生しやすい状況にあったと考えられる。

2.3 雪崩発生の気象と積雪条件のまとめ

2014年2月の短時間多量降雪時の樹林内における雪崩発生条件について、気象観測データを用いて、降雪時の気温と降雪強度を用いて推定される斜面積雪の安定度と硬度を指標に、樹林内の雪崩発生条件を調べた。その結果、降雪強度が大きい気象条件下で降雪開始から12時間程度で斜面積雪が不安定となり(第一条件)、かつ気温が低いために積雪硬度が小さい積雪が形成される(第二条件)ことにより、樹林内でも雪崩が発生したものと考えられる。

ただし、樹林内における雪崩発生条件には、植生や地形の条件も関係する^{20), 21)}。雪崩発生の植生と地形条件については第4章で検討する。また、2014年2月の大雪に伴う雪

崩発生に、雲粒の付着が少なく安息角の小さい降雪結晶が関与した可能性が指摘されている^{1), 22)}。そこで、次の第3章では、このような降雪結晶と雪崩発生との関係について現地観測を行った。

3. 雪崩発生時の気象および積雪観測

降雪に伴う雪崩発生において、雪崩が発生した箇所の積雪破断面調査から、雲粒付着の少ない降雪結晶が積雪内に脆弱な層(弱層)を形成し、この弱層が長期間維持され、重大な雪崩事故の原因となっていることが指摘されている^{23), 24)}。このような降雪結晶は、低気圧に伴う層状雲から降ることがあり²⁵⁾、2014年2月の大雪に伴う雪崩発生に、雲粒の付着の少ない降雪結晶が関与した可能性が指摘されている^{1), 22)}。

そこで、短時間多量降雪時の雪崩発生における気象および積雪条件の調査の一環として、降雪結晶の種類にも着目した気象と積雪の現地観測を、これまでに新潟県妙高市妙高山麓²⁶⁾と北海道広尾町²⁷⁾で行った。本章では、現地観測箇所の近傍で実際に雪崩が発生した、長野県松本市乗鞍高原における観測結果を報告する。この観測箇所近傍では、過去にも雪崩発生の報告があり、樹林内で発生した雪崩が道路に到達した事例もある^{9), 28)}。

3.1 観測概要

長野県松本市乗鞍高原の平地(北緯36度07分23秒、東経137度37分33秒、標高1458m、以下、観測サイトと呼ぶ)に気象測器を設置し、気温(サーミスタ温度計107、自然通風YG-41303)、風向・風速(風車型YG-5108)、積雪深(レーザー式KDC-S18-L-10)を観測した。降水量は、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度05分18秒、東経137度41分00秒、標高1068m)の観測値を用いる。

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。

3.2 気象概況

図-6(a)と(b)は、観測サイトにおける1月22日から23日の10分間ごとの気温と風向・風速の時間推移、図-6(c)は、積雪深(cm)と時間降雪深(1時間ごとの積雪深差の正值、cm/h)、アメダス奈川の時間降水量(mm/h)の推移である。図-7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²²⁾」と呼ぶ(図-6)。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-6(c))。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-7)。

3.3 積雪断面観測

3.3.1 観測方法

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危険度が高まることから知られている²³⁾。短時間の多量降雪による雪崩発生要因を明らかにするために先行して行った、新潟県妙高山麓²⁴⁾と北海道広尾町²⁵⁾における現地観測では、降雪結晶の種類に加えて、積雪の密度や硬度の時間変化に関する観測を行った。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(図-6(c))。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-8(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-8(b))。

上載積雪荷重(Pa)は、断面積50cm²の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で除して求めた。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

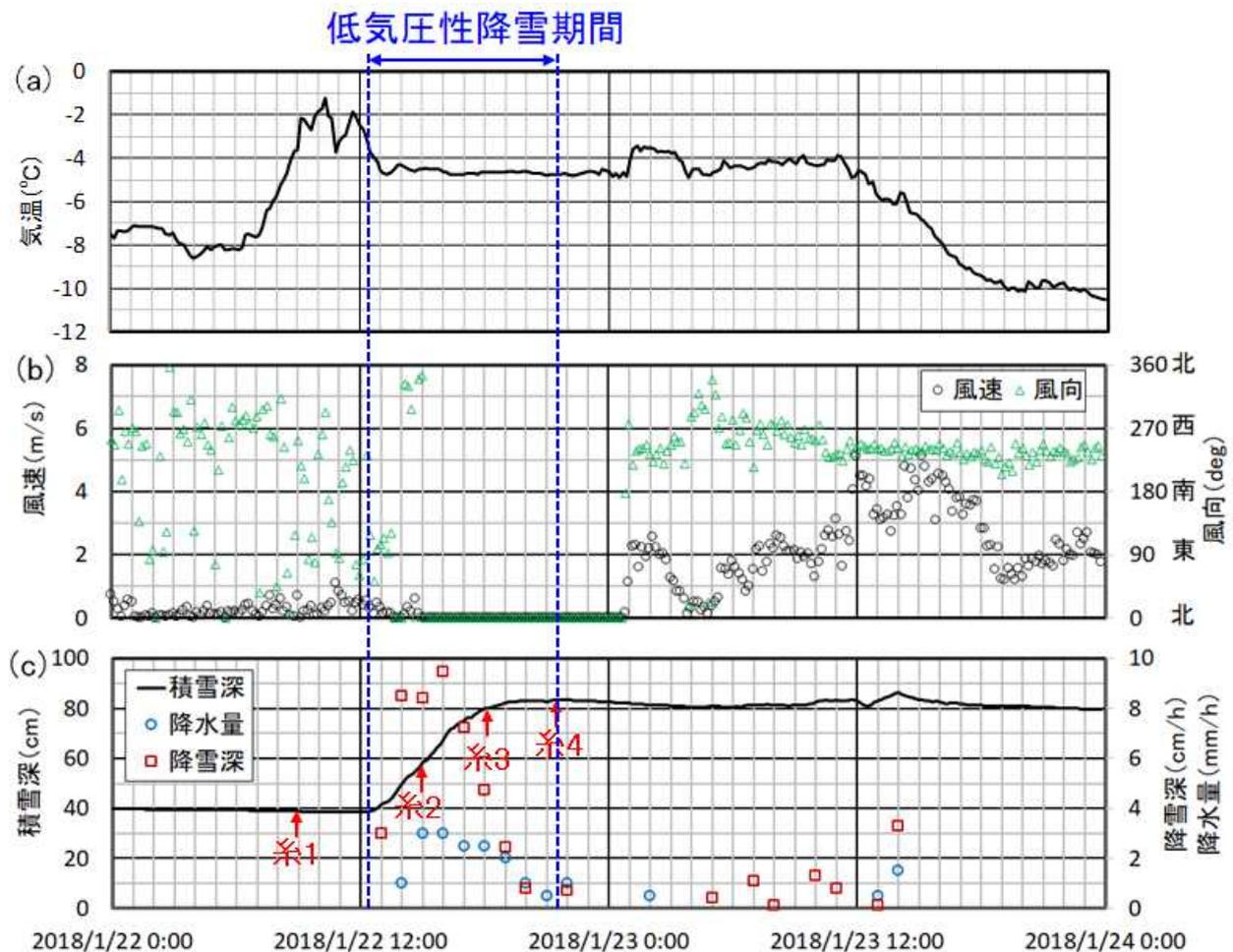


図-6 観測サイトにおける2018年1月22日から23日の(a)気温、(b)風向・風速、(c)積雪深および1時間あたりの降雪深と降水量の推移(降雪深と降水量以外は10分値、降水量は南東へ約6.7km離れたアメダス奈川の測定値で、(c)の赤矢印は積雪断面観測時にマーカースとなる糸1～糸4を設置した時刻)。

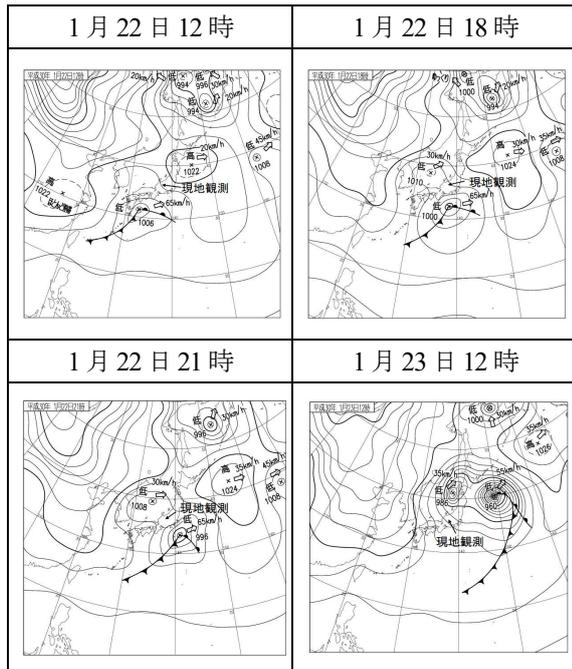


図-7 2018年1月22日12時から1月23日12時までの地上天気図（気象庁作成）

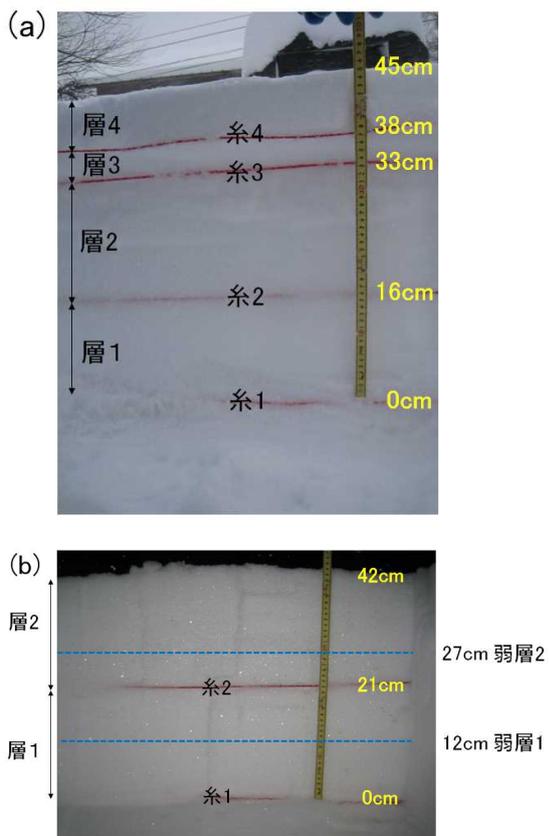


図-8 (a)2018年1月23日12時、(b)2018年1月22日18時の積雪断面。(b)から(a)にかけて、上載積雪荷重による圧密により層1と層2の厚さは小さくなっている。

一の体積 100cm^3 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。

3.3.2 観測結果

図-9は、図-8の各層における降雪粒子を撮影(OLYMPUSTG-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

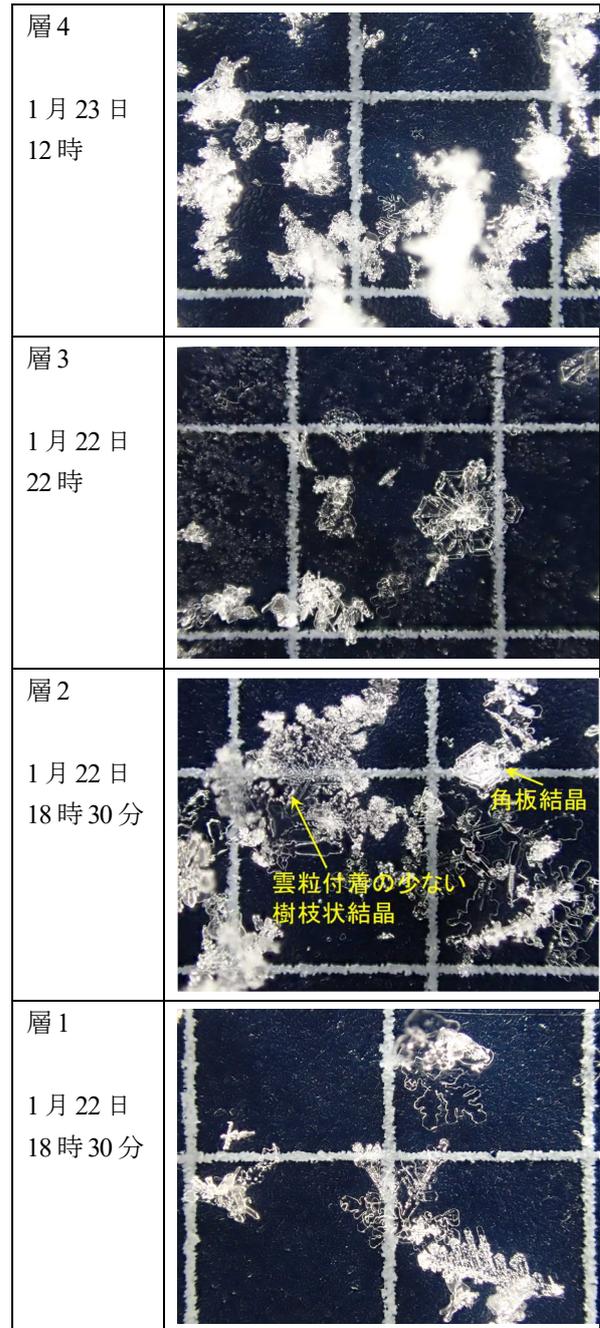


図-9 層1~4の雪粒子の写真(目盛は3mm間隔で、日時は撮影時刻)

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。

図-10(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。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(破線の黒丸)の時間変化は小さく^{26),27)}、50から60kg/m³の範囲であった。

図-10(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。

低気圧性降雪期間では、気温が氷点下で風は静穏であったことから(図-6)、10分間で新雪層は圧密されないと仮定すると、10分間で降った新雪層の密度は、アメダス奈川の降水量と観測サイトの降雪深をもとに推定できる。

次に、低気圧性降雪期間における10分あたりの新雪層の密度(kg/m³)の推定値と、積算降雪深(積雪深差の正值の累計)の時間変化、ならびに1月22日18時の積雪断面をそれぞれ図-11の(a)と(b)に示す。新雪層の密度の変化から、相対的に密度が小さい時刻は1月22日の14時00分と15時50分の前後で、それぞれの密度は25~30 kg/m³と推定された(図-11(a))。乾いた新雪のせん断強度は密度のべき関数で示されることから²⁹⁾、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る可能性がある。1月22

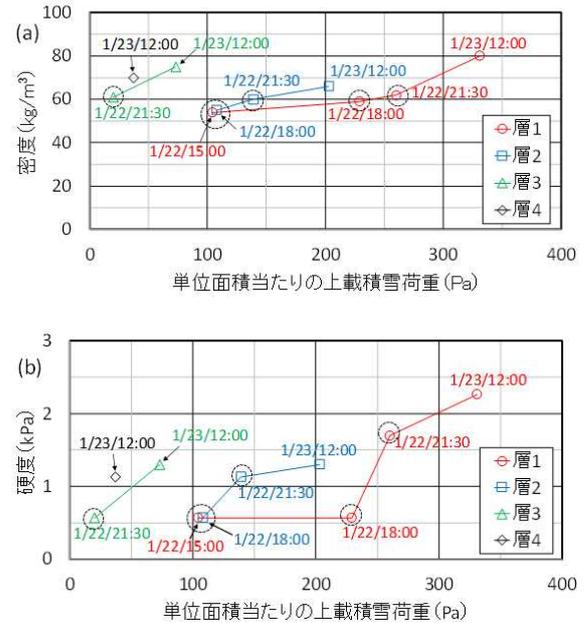


図-10 各積雪層の単位面積当たりの上載積雪荷重と(a)密度、(b)硬度の関係(破線の黒丸は低気圧性降雪期間のデータ)。

日18時の積雪断面で弱層はマーカーとなる糸1から上方へ12cmと27cmの位置にあり、糸2は当日の15時に設置している(図-11(b))。以上から、相対的に新雪層の密度が小さかった1月22日の14時00分と15時50分の前後はせん断強度も小さく、弱層1と2がそれぞれ形成されたと考えられる。なお、1月22日の14~15時の新雪層の最大密度は100 kg/m³程度、16~20時は主として50~100 kg/m³程度と推定されたことから、弱層1の上層と弱層2の上層はいずれの弱層よりも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。

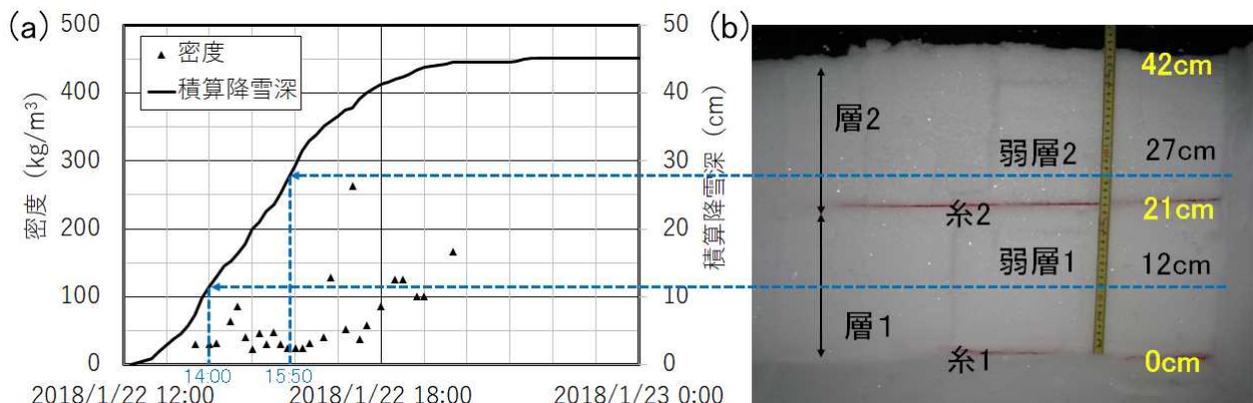


図-11 低気圧性降雪期間の(a)新雪層の密度(推定値)と積算降雪深の推移、ならびに(b)2018年1月22日18時の積雪断面。

3. 4 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度07分55秒、東経137度37分52秒、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

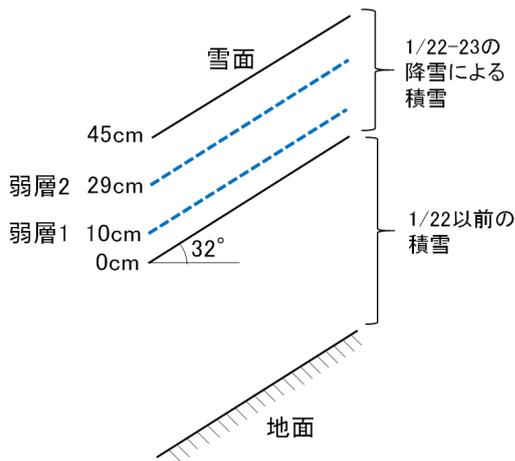


図-12 傾斜面での積雪断面の模式図

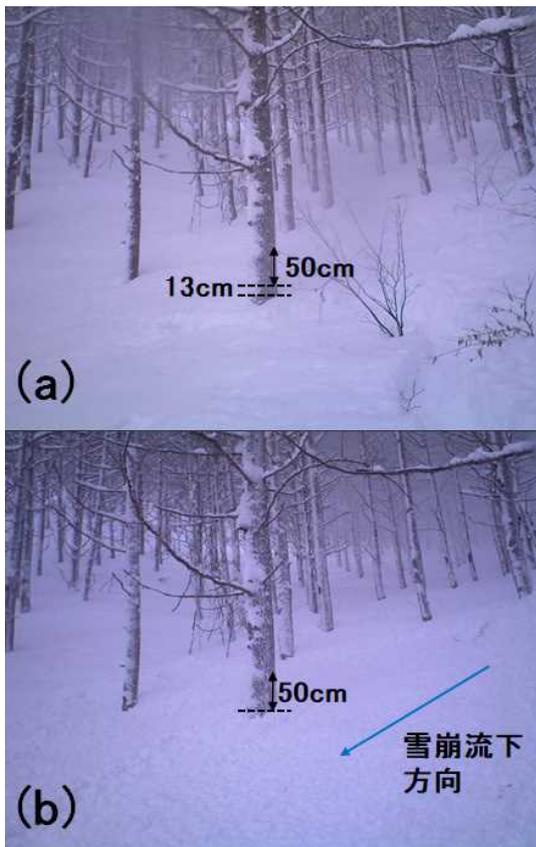


図-13 樹林内の表層雪崩、(a)雪崩発生前(2018年1月23日12時)、(b)雪崩発生後(2018年1月23日13時)

-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-12)。

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-13(a)は雪崩発生前の1月23日12時、図-13(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雪で覆われた。また、図-13(a)では右側に数本の低灌木が頭を出しているが、図-13(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-12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。

3. 5 雪崩発生時の気象および積雪観測のまとめ

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、3.3.2項の断面観測での結果を踏まえると、雲粒付着の少ない降雪結晶が弱層形成に関係しており、それが雪崩発生の要因になったと考えられる。このように形成された弱層は、新潟県妙高山麓²⁶⁾と北海道広尾町²⁷⁾における現地観測でも確認され、弱層の密度と硬度の時間変化の観測結果から、密度と硬度の小さい脆弱な状態が長い時間継続することが明らかになった。つまり、低気圧性降雪期間においては、降雪結晶の種類や新雪密度にも注意する必要があるといえる。ただし、降雪結晶の種類による影響を、第2章で示した雪崩発生の気象と積雪条件に取り入れるためには、これらの降雪結晶を含む積雪密度や硬度の時間変化に関する実測データをさらに蓄積して、式(3)の積雪の圧密の進行に関する係数Cを求める必要がある。

4. 雪崩発生の植生と地形の条件

短時間多量降雪時の雪崩発生において、第2章と第3章で示した雪崩発生の気象と積雪条件に加えて、雪崩発生箇所の植生や地形の条件も重要である。本章では、雪崩発生の植生と地形条件について、既往の文献レビューと、2014年2月の関東甲信地方の短時間多量降雪時の雪崩発

生箇所のうち建物被害が確認された箇所の植生と地形の現地調査を行った。

4. 1 文献調査

4.1.1 立木間隔と立木密度、樹木の胸高直径

樹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、模擬樹林を用いた実験³⁰⁾によると、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³¹⁾が、勾配35°以上の斜面では1000本/ha以上の樹木³²⁾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^{8), 11), 13), 31)~37)}。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³⁷⁾。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³⁶⁾。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な立木間隔

図-14は、雪崩発生防止に必要な平均的な立木間隔^{8), 33), 35)}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のある状態である。図-14の曲線aとbは、全層雪崩の発生防止に必要な立木間隔⁸⁾で、それぞれ胸高直径 W が20cmと

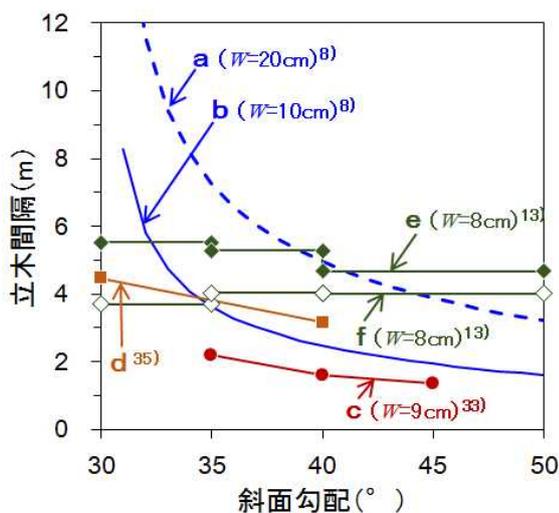


図-14 雪崩発生防止に必要な立木間隔と斜面勾配の関係(a~d)、および雪崩発生地(e)と非発生地(f)の立木間隔と斜面勾配の関係、 W は樹木の胸高直径。

10cmの場合である。石川ら⁸⁾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-14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³³⁾である。図-14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³⁵⁾である。さらに、図-14のeとfは、それぞれイタリアの樹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³³⁾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-14のeとf)の間となる。図-14より、全体の傾向として、斜面勾配が大きい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-15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^{38)~40)}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樹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-14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、自然の樹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、樹林内における雪崩はそのような箇所では発生すると考えられる^{35), 41)}。

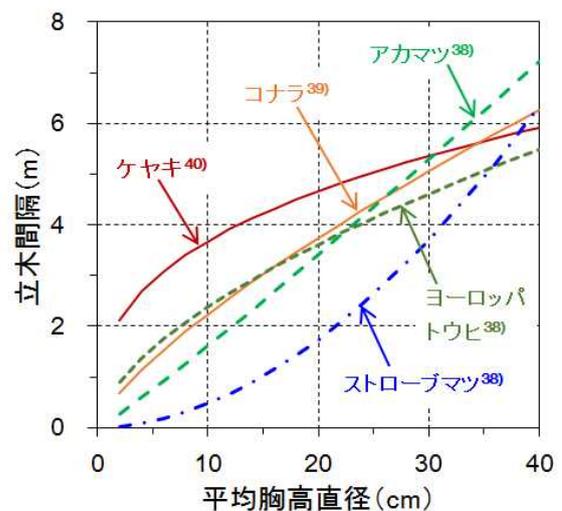


図-15 樹種別の胸高直径と立木間隔の平均的な関係の例、落葉広葉樹(コナラ、ケヤキ)と常緑針葉樹(マツ、トウヒ)

4.1.2 樹種

樹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), 34), 35)}。Schneebeli and Meyer-Grass¹¹⁾によるスイス・アルプスの樹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^{35), 42), 43)}。一方、落葉する広葉樹林は、降雪の遮断率が低いために樹林内の積雪が多く、またアンカー効果も小さい^{35), 43)}。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である⁴⁴⁾。

図-14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-14のb)⁸⁾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-14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樹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-14において前者⁸⁾より後者¹³⁾が示した立木間隔が大きいのは、樹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²⁰⁾。

以上より、樹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。

4.1.3 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^{34), 45), 46)}。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、樹冠密度が樹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れている。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、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。

4.1.4 地形条件

樹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ら³⁵⁾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³²⁾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、樹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-14)。

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⁴⁷⁾はあるが、これらには地域性がみられるため、現時点で標高や斜面方位を樹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。

4.1.5 着目すべき植生と地形の要素

以上、文献レビューの結果、樹林内における雪崩(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。特に、図-14のように、雪崩発生防止に必要な立木間隔と斜面勾配の関係を、胸高直径や樹種、雪崩の種類に応じてあらかじめ整理しておく、雪崩が発生する可能性のある箇所の把握に活用できると考えられる。

4.2 雪崩発生箇所の現地調査

4.2.1 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度29.3分、東経138度36.0分、標高1048m)、東京都奥多摩町(北緯35度49.3分、東経139度5.9分、標高770m)、埼玉県秩父市(北緯36度1.1分、東経138度48.4分、標高1075m)の事例⁴⁸⁾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。

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。

4.2.2 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、図-16に示すように、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-17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、全層雪崩に対しては立木間隔が大きく斜面積雪は不安定であったと考えら



図-16 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°。

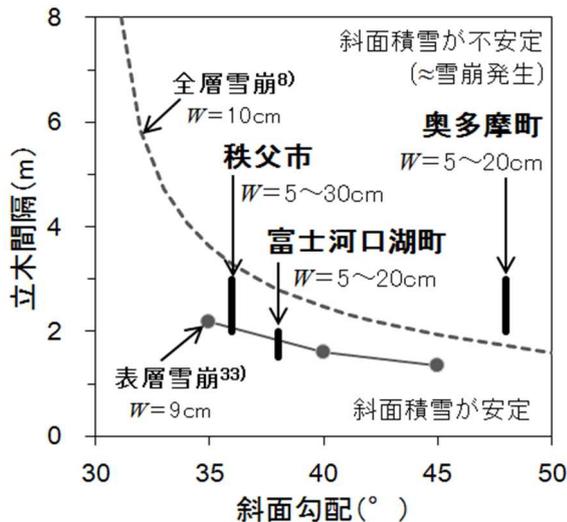


図-17 雪崩発生箇所の立木間隔と斜面勾配、雪崩発生防止に必要な立木間隔と斜面勾配の関係^{8),33)}、 W は胸高直径。

れる。図-17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、いずれも樹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樹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。

4.3 雪崩発生の植生と地形条件のまとめ

雪崩発生の植生と地形条件に関する文献レビューと、2014年2月の短時間多量降雪時における建物被害のあった雪崩箇所の現地調査の結果、樹林内における雪崩(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とを示した。特に、図-14や図-17に示す雪崩発生防止に必要な立木間隔と斜面勾配の関係は、雪崩が発生する可能性のある箇所の把握に活用できると考えられる。なお、短時間多量降雪時の雪崩は、これらの植生と地形の条件と、第2章や第3章で示した気象や積雪条件が重なって発生する²¹⁾。次の第5章では、これまでに示した雪崩発生条件を活用した雪崩発生頻度解析手法を検討する。

5. 短時間多量降雪による雪崩の発生頻度

災害に関わる現象の規模や発生頻度を把握することは、防災や減災の対策を計画するにあたり重要である。雪崩に対しても発生頻度や発生確率を求める方法が提案されているが、雪崩の長期的な発生記録を有する地域は非常に限られ、特に日本国内では雪崩の履歴データから発生頻度を解析することは難しい。そこで、本章では、雪崩の長期的な発生記録が無い地域における雪崩発生頻度解析手法を提案することを目的として、第2章から第4章で示した雪崩発生条件を満たす降雪事例を過去数十年間の気象データから抽出し、その発生頻度を簡便に推定する手法の検討を行い、発生頻度の地域分布を求めた。

5.1 対象とする雪崩発生条件について

気象データを用いた雪崩の発生頻度解析として、ここでは、第2章の図-1に示す2014年2月の関東甲信地方の多量降雪に伴う雪崩事例を対象とする。図-18は、この多量降雪時に樹林内で発生した雪崩とその他の雪崩の

発生条件を、近傍の気象観測データを用いて示したもので、各気象観測所の降雪期間の中で12時間の降雪深が最も大きくなったときの平均気温と降雪深の関係である^{15), 21), 49)}。なお、図-18は、2.2.2項の図-5の縦軸の降雪強度を、12時間の降雪深に直したものである。図中に示す実線は、2.1.3項で示した斜面積雪の安定度 SI の推定値^{15), 49)}で、斜面積雪に作用するせん断方向の応力と積雪強度の比で表され、 SI が小さいほど斜面積雪が不安定で雪崩が発生しやすい状況と考えられる。図-18より、雪崩(●と×)は斜面積雪の安定度 SI が2.0以下となる条件で発生しており、特に樹林内における雪崩(●)はさらに安定度 SI が小さい条件で発生したと推定される。この条件となったのは、群馬県のみなかみ、福島県の桧枝岐、山梨県の河口湖、埼玉県秩父の気象庁アメダスで、降雪時の平均気温が -4°C 以下で、降雪深が12時間で45cm以上(図-18の赤枠内)であった。また、第4章で示した植生条件や斜面勾配なども考慮した樹林内における雪崩発生条件を検討した結果²¹⁾によると、12時間の降雪深の条件は斜面勾配に応じて45~50cmとなる。これに加え、降雪前にある程度の積雪が存在することも樹林内における雪崩発生に必要な条件である⁵⁰⁾。以上、多量降雪に伴う樹林内の雪崩発生条件^{15), 21), 49), 50)}をまとめると、

- ・降雪深 S_{12} : 12時間で45cm以上(斜面勾配 45°)または50cm以上(斜面勾配 30°)
 - ・気温 T_{12} : -4°C 以下(上記12時間の平均気温)
 - ・積雪深 SD : 50cm以上(上記12時間の1時間前)
- となる。ここでは、気象データを用いた雪崩の発生頻度解析の試みとして、上記の短時間多量降雪に伴う樹林内における雪崩発生条件に着目することとする。

5.2 解析に用いたデータ

雪崩発生条件を満たす降雪事例の抽出(5.3節)には、積雪深と気温、降水量の1時間間隔の観測データが必要である。よって、積雪深と気温、降水量の1時間間隔の観測データが得られている北海道から島根県にかけた積雪地域における257箇所の気象庁観測地点と40箇所の北海道開発局道路テレメータ地点(図-19)(合計297箇所)を対象に解析を行った。

降雪事例の抽出を行った期間は、11月から翌年4月までを一冬季として、観測地点により異なるが気象庁観測地点では、積雪深の1時間間隔の観測開始から2018年4月までの16~35冬季(年)、北海道開発局道路テレメータ地点では2004年11月から2019年4月までの13~15冬季(年)である。ただし、12月から2月の期間に240時間以上の連続した欠測がある冬季(年)は解析から除外した。

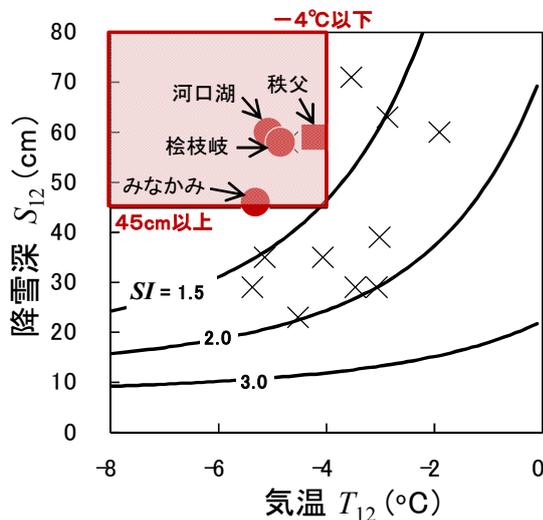


図-18 2014年2月14-15日の大雪に伴う雪崩発生条件。雪崩発生箇所近傍の各気象観測所における降雪期間のうち連続する12時間の降雪深の最大値 S_{12} と平均気温 T_{12} の関係^{15), 21), 49)}(2.2.2項の図-5を基に作成)。斜面積雪の安定度 SI (実線)は、2.1.3項で示した気温と降雪深を用いた計算値^{15), 49)}。●: 樹林内で発生した雪崩、×: その他の雪崩、■: 落石ネットなどの対策施設を積雪がすり抜けた事例。

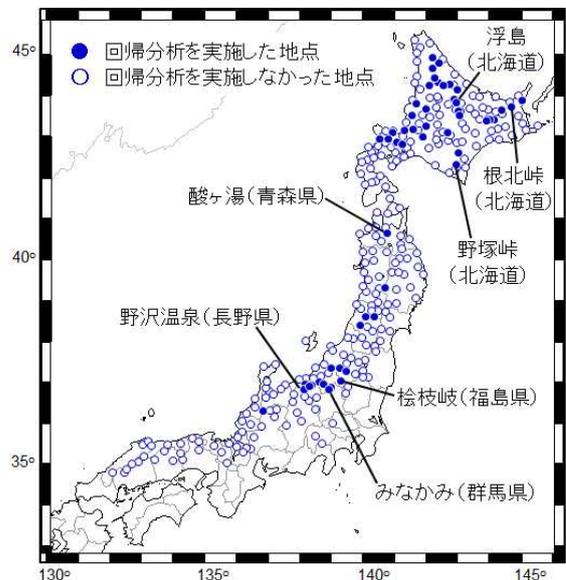


図-19 解析対象地点の分布。積雪地域の気象庁観測地点257箇所と北海道開発局道路テレメータ地点40箇所の分布。●は12時間降雪深 S_{12} の発生頻度の推定式を得るための回帰分析を実施した地点、○は回帰分析を実施しなかった地点。

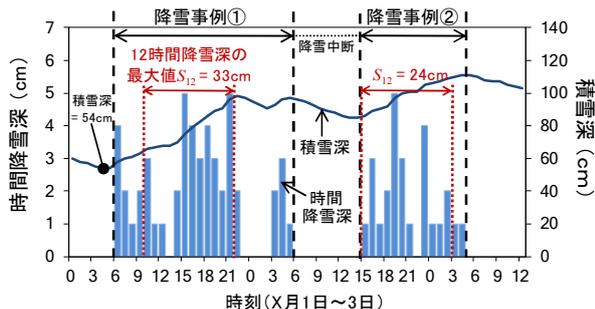


図-20 降雪事例の抽出と 12 時間降雪深 S_{12} の算出例

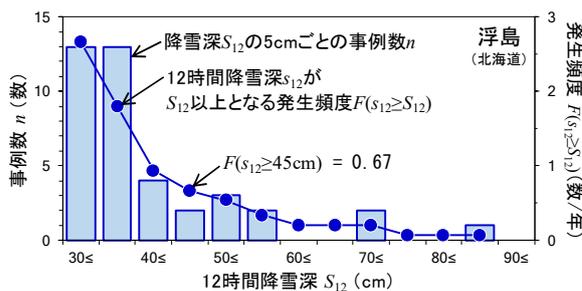


図-21 12 時間降雪深 S_{12} の 5cm ごとの事例数 n と発生頻度 $F(S_{12} \geq S_{12})$ の算出例。

また、気象庁観測地点 8 箇所は、移転等により積雪深の統計切断があるため、統計切断の前後で年数の多い期間を解析の対象とした。

5. 3 降雪事例の抽出方法

降雪事例の抽出例を図-20 に示す。降雪事例の抽出では、降雪開始後の 1 時間間隔の積雪深 (図-20 の線グラフ) の差の正值を、その 1 時間における降雪深 (図-20 の棒グラフ) (以下、時間降雪深とする) と考え、降雪の中断 (時間降雪深 $\leq 0\text{cm}$) が 5 時間未満であれば連続した降雪の事例とした。次に、抽出した降雪事例を対象に、降雪期間の中で連続する 12 時間の時間降雪深の累積値が最大となる期間を調べ (図-20 の赤い矢印の期間)、その 12 時間の降雪深 S_{12} と平均気温 T_{12} を算出した。ここでは、12 時間降雪深 S_{12} が 30cm 以上となる降雪事例を対象とした。図-20 に示す例では、降雪事例①の 10 時から 21 時までの 12 時間の降雪深 S_{12} が解析対象となる。さらに、5. 1 節の雪崩発生条件を満たす事例を抽出するため、12 時間の平均気温 T_{12} が -4°C 以下で、この 12 時間の 1 時間前の積雪深 SD が 50cm 以上である降雪事例を抽出した。

降雪事例の抽出において、積雪深データに欠測がある場合は、連続する欠測期間が 6 時間までであれば、積雪深の増加分を 1 時間間隔の降水量データで按分することで欠測値を補間した。積雪深の欠測期間の降水量が 0mm または欠測の場合は、線形で補間した。また、積雪深の 1 時間の増加が 30cm 以上の場合、この値を異常値と考え、この 1 時間の前後に積雪深の増加がみられない場合は欠測とし、それ以外は上記の方法で補間した。なお、抽出した降雪事例のうち、積雪深の補間データが 50%以上含まれる事例は解析から除外した。その他のデータの取扱いについては、既報^{51), 52)}を参照していただきたい。

5. 4 発生頻度解析の方法

5. 3 節の方法で抽出した各観測地点における降雪事例について、まず 12 時間降雪深 S_{12} の 5cm ごとの事例数 n を求め (図-21 の棒グラフ)、降雪深 S_{12} の大きい階級か

ら事例数 n を累積した値を求めた。この累積値を観測年数で除した値を、ここでは発生頻度 $F(S_{12} \geq S_{12})$ (数/年) とする (図-21 の線グラフ)。この発生頻度 $F(S_{12} \geq S_{12})$ の意味は、任意の 12 時間降雪深 s_{12} が $S_{12}\text{cm}$ 以上となる事例の 1 年あたりの発生数である。図-21 に示す道路テレメータ地点の浮島の例では、任意の 12 時間降雪深 s_{12} が 45cm 以上となる発生頻度 $F(S_{12} \geq 45\text{cm})$ 、つまり 5. 1 節の雪崩発生条件を満たす事例の発生頻度は 0.67 であり、約 3 年に 2 回の発生頻度となる。このように求めた雪崩発生条件を満たす降雪事例の発生頻度として、12 時間降雪深 S_{12} が 45cm 以上となる発生頻度の地域分布を求めた。

次に、12 時間降雪深 S_{12} の発生頻度を推定する式を得るため、12 時間降雪深 S_{12} とその発生頻度 $F(S_{12} \geq S_{12})$ の関係が指数関係に従うと仮定して、降雪深 S_{12} と発生頻度 $F(S_{12} \geq S_{12})$ の対数に対して回帰分析を行った。ただし、事例数が 10 未満または降雪深 S_{12} の 5cm ごとの階級数が 3 以下の地点は、回帰式を得るための十分なデータがないと判断して回帰分析は行わなかった。その結果、残る 57 の観測地点 (図-19 の●) を対象に、12 時間降雪深 S_{12} の発生頻度の推定式を得るための回帰分析を行った。

5. 5 雪崩発生条件を満たす事例の発生頻度分布

図-22 は、抽出した降雪事例の 12 時間降雪深 S_{12} が 45cm 以上となる発生頻度の地域分布である。つまり、5. 1 節の雪崩発生条件を満たす降雪事例の発生頻度である。図-22 より、群馬・長野・新潟・福島の間境付近、青森県酸ヶ湯、北海道の日高山脈や大雪山系、阿寒と知床の周辺、夕張山地の三芦 (図-22 の●) で 0.5 以上 (2 年に 1 回程度の発生) と発生頻度が高い。ただし、発生頻度が 1.0 を上回る (毎年発生する) 地点はなかった。

群馬・長野・新潟・福島の間境付近では、2014 年 2 月の大雪時に樹林内において雪崩が発生し、5. 1 節の雪崩発生条件を満たしていた (第 2 章)^{15), 21)}。図-22 より、この地域は本州の中でも短時間多量降雪に伴う樹林内の

雪崩発生条件を満たす事例の発生頻度が高い地域といえる。一方、同じ2014年の大雪では、山梨県の河口湖周辺でも樹林内において多くの雪崩が発生した^{15), 21)}。しかし、解析を行った河口湖の過去15年間では、2014年2月の事例が唯一5.1節の雪崩発生条件を満たす結果となり、発生頻度は0.07であった。この地域では、2014年2月の大雪に伴う雪崩発生が特異な事象であったといえる。

北海道では、日高山脈や大雪山系周辺、阿寒と知床の周辺、夕張山地の三芦で短時間多量降雪に伴う樹林内の雪崩発生条件を満たす事例の発生頻度が高い結果となった。ただし、実際の樹林内の雪崩発生には、気象や積雪の条件のみならず植生や地形の条件も影響する(第4章)²¹⁾。例えば、大雪山系や阿寒と知床の周辺では常緑針葉樹が多いが、常緑針葉樹は落葉広葉樹に比べて積雪内に埋まった枝葉によるアンカー効果や降雪を枝葉に捕捉して林内の積雪深を減少させることなどにより、雪崩の発生を抑制する効果がある²¹⁾。図-22の結果を用いて短時間多量降雪に伴う樹林内の雪崩発生頻度を推定する場合は、植生や地形の条件も考慮して総合的に検討する必要がある。

一方、樹林内の雪崩と同様の気象条件で発生する事象に、斜面積雪が雪崩予防柵面をすり抜ける現象がある^{15), 53)}。この柵面をすり抜ける現象は、大雪山系周辺や空知の三笠周辺などで発生事例があり⁵³⁾、図-22に示す雪崩発生条件を満たす降雪事例の発生頻度が高い地域と対応している。また、図-22の発生頻度が高い群馬県のみな

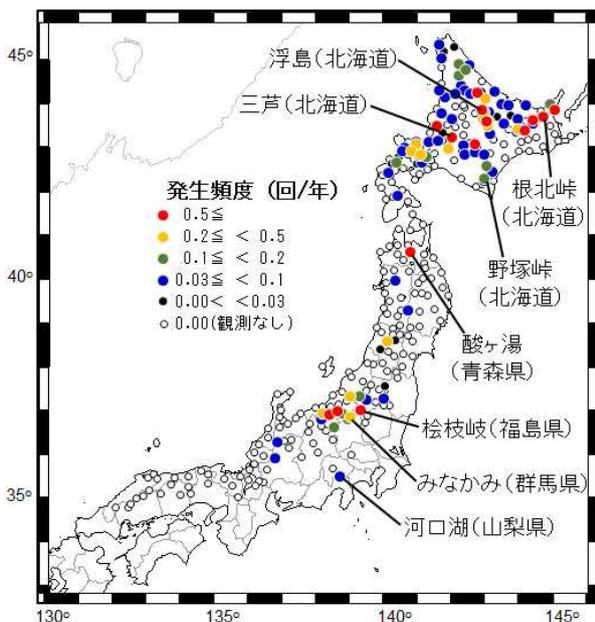


図-22 12時間降雪深 S_{12} が45cm以上となる発生頻度の分布。

かみでは、2014年2月の大雪時に落石防止用のネットを斜面積雪がすり抜けた¹⁵⁾。よって、図-22は柵面やネットを斜面積雪がすり抜ける現象の発生頻度を検討する際の参考資料として活用できると考えられる。

本州の低標高地域や北海道の太平洋側沿岸地域では、雪崩発生条件を満たす降雪事例が見られない地点(図-22の○)が多い。しかし、長野県などの標高1500m以上の地域では、過去に樹林内における雪崩発生⁹⁾がある。この解析で用いた本州における観測地点の最高標高が奥日光の1292mであることから、本州の高標高地域の発生頻度を網羅できなかった可能性がある。また、図-22の発生頻度は、雪崩発生⁹⁾の記録から直接求めたものではなく、気象データから雪崩発生条件を満たす事例を解析して得た雪崩発生⁹⁾の可能性(ポテンシャル)を示すものであり、実際の雪崩発生には、前述の植生や地形の条件²¹⁾も影響することに留意が必要である。このような留意点はあるものの、図-22により、短時間多量降雪に伴う樹林内の雪崩発生頻度の地域分布を示すことができたと考えられる。

5.6 雪崩発生条件を満たす事例の発生頻度の推定式

図-23に、12時間降雪深 S_{12} の発生頻度の推定式を得るための回帰分析結果の例として、北海道の浮島と根北峠、福島県の桧枝岐、群馬県のみなかみにおける12時間降雪深 S_{12} と発生頻度 $F(S_{12} \geq S_{12})$ の関係を示す。縦軸の発生頻度は対数スケールで示し、図中の実線は回帰直線、 r^2 は決定係数(相関係数 r の二乗)である。12時間降雪深の

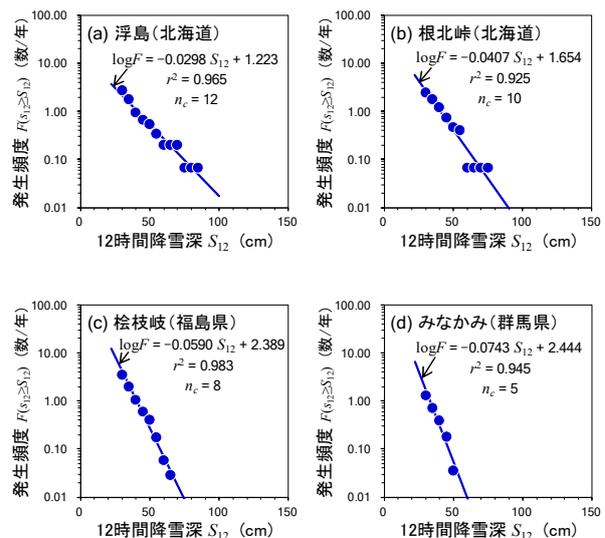


図-23 12時間降雪深 S_{12} と発生頻度 $F(S_{12} \geq S_{12})$ の関係の例。実線は回帰直線、 r^2 は決定係数、 n_c は12時間降雪深 S_{12} の5cm間隔の階級数。

発生頻度を推定する回帰式は、式(6)のように発生頻度の対数 $\log F(s_{12} \geq S_{12})$ の形で表す。

$$\log F(s_{12} \geq S_{12}) = a S_{12} + b \quad (6)$$

ここで、 a と b は係数である。図-23 より、各地点ともに、降雪深 S_{12} と発生頻度の対数 $\log F(s_{12} \geq S_{12})$ の間に、統計的に有意な直線関係 (いずれも有意水準 1%) があり、図中に示す回帰式は観測値との対応が非常によい。ただし、浮島 (図-23a) や根北峠 (図-23b) のように、降雪深 S_{12} の最も大きな事例が突出して、降雪深 S_{12} の第一位と第二位の値の差が大きいと、観測値のプロットが横並びになる場合がある。しかし、5. 1 節の雪崩発生条件の検討に必要なのは、降雪深 S_{12} が 45~50cm 以上となる条件²¹⁾であり、降雪深 S_{12} の 50cm までの範囲であれば観測値と回帰式の関係は良好である。

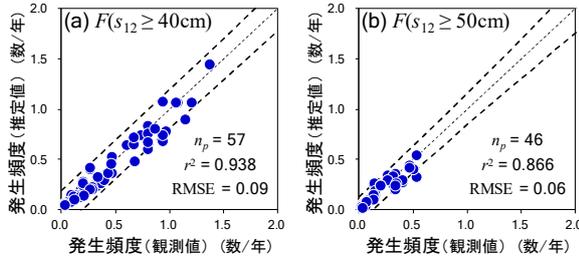


図-24 発生頻度の観測値と回帰式による推定値の比較の例。 n_p は地点数、RMSEは二乗平均平方根誤差、太破線は推定値の95%予測区間。

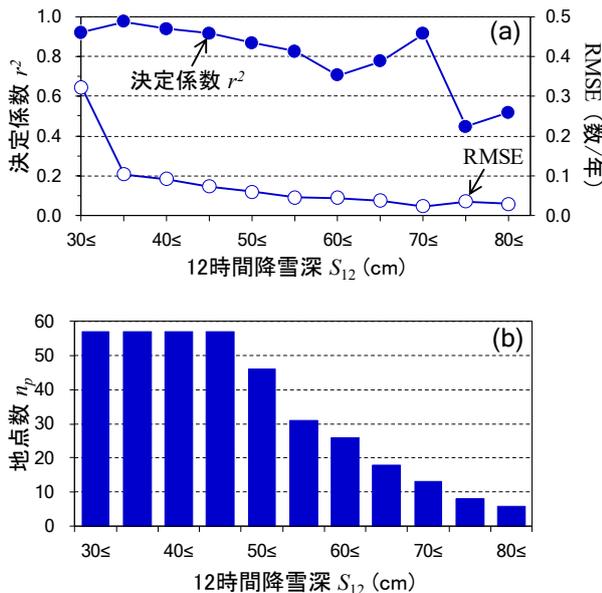


図-25 12時間降雪深 S_{12} の 5cm ごと (a) 決定係数と RMSE、(b) 観測地点数。

図-24 は、57 の観測地点の回帰式から求めた発生頻度の推定値と観測値を比較した結果である。図-24 より、任意の 12 時間降雪深 S_{12} が 40cm 以上となる発生頻度 $F(s_{12} \geq 40cm)$ と 50cm 以上となる発生頻度 $F(s_{12} \geq 50cm)$ のいずれも、観測値と推定値が等値線付近に分布しており、両

表-1 12 時間降雪深 S_{12} の発生頻度の推定式(式(6))の係数 a と b 。種別の A は気象庁観測地点、T は北海道開発局道路テレメータ地点。地点名のカッコ内は国道番号、決定係数 r^2 の “*” は有意水準 1% を示す。

道府県	種別	地点名	観測年数	事例数	階級数	係数 a	係数 b	r^2
北海道	A	中頓別	35	22	5	-0.0617	1.782	0.865
北海道	A	歌登	34	22	5	-0.0657	1.897	0.949 *
北海道	A	音威子府	34	27	12	-0.0282	0.561	0.871 *
北海道	A	美深	34	10	4	-0.0455	0.844	0.988 *
北海道	A	名寄	35	10	9	-0.0268	0.135	0.880 *
北海道	T	天北峠(R239)	15	26	17	-0.0186	0.577	0.884 *
北海道	A	下川	35	18	5	-0.0665	1.804	0.974 *
北海道	A	朱鞠内	35	38	4	-0.0863	2.582	0.988 *
北海道	A	滝上	34	16	7	-0.0457	1.196	0.924 *
北海道	T	浮島峠(R273)	15	34	9	-0.0368	1.392	0.984 *
北海道	T	浮島(R273)	15	46	12	-0.0298	1.223	0.965 *
北海道	T	北見峠(R333)	15	29	9	-0.0333	1.200	0.975 *
北海道	T	羅臼峠(R335)	15	13	13	-0.0197	0.598	0.925 *
北海道	T	根北峠(R244)	15	51	10	-0.0407	1.654	0.925 *
北海道	T	野上峠(R391)	15	15	12	-0.0273	0.874	0.852 *
北海道	T	釧北峠(R240)	15	12	5	-0.0527	1.530	0.932 *
北海道	T	双岳台(R241)	15	22	7	-0.0440	1.589	0.951 *
北海道	A	阿寒湖畔	32	13	4	-0.0808	2.129	0.935
北海道	T	足寄峠(R241)	15	12	4	-0.0727	2.221	0.905
北海道	T	石北峠(R39)	15	21	8	-0.0411	1.367	0.918 *
北海道	T	カシノイ(R39)	15	17	8	-0.0346	1.197	0.960 *
北海道	T	三国(R273)	15	17	15	-0.0159	0.200	0.826 *
北海道	T	三国峠(R273)	15	17	5	-0.0607	1.937	0.982 *
北海道	T	狩勝峠(R38)	15	32	8	-0.0385	1.390	0.991 *
北海道	A	上札内	34	19	6	-0.0326	0.603	0.899 *
北海道	T	野塚峠(R236)	14	28	5	-0.0721	2.447	0.994 *
北海道	A	幌糠	33	12	4	-0.0721	1.786	0.978
北海道	A	深川	35	14	7	-0.0391	0.601	0.896 *
北海道	T	四番川(R451)	15	34	6	-0.0479	1.784	0.968 *
北海道	T	三声(R452)	15	38	5	-0.0524	2.002	0.977 *
北海道	A	夕張	35	29	5	-0.0645	1.927	0.868
北海道	A	新篠津	33	19	4	-0.0863	2.306	0.988 *
北海道	A	石狩	31	10	5	-0.0495	0.786	0.776
北海道	T	毛無峠(R393)	15	51	5	-0.0676	2.560	0.989 *
北海道	A	共和	33	12	4	-0.0787	1.878	0.898
北海道	T	樺立(R393)	13	27	4	-0.0625	2.163	0.993 *
北海道	T	無意根(R230)	15	28	7	-0.0480	1.541	0.943 *
北海道	T	東中山(R230)	15	34	7	-0.0493	1.577	0.902 *
北海道	T	北奥漁(R453)	15	15	5	-0.0376	0.891	0.900
青森	A	酸ヶ湯	35	203	8	-0.0640	2.720	0.994 *
岩手	A	湯田	34	26	5	-0.0594	1.550	0.885
山形	A	尾花沢	34	10	4	-0.0695	1.446	0.886
山形	A	肘折	35	65	7	-0.0452	1.686	0.940 *
山形	A	大井沢	35	29	5	-0.0785	2.228	0.946 *
福島	A	只見	35	29	7	-0.0454	1.260	0.958 *
福島	A	南郷	34	29	5	-0.0781	2.368	0.979 *
福島	A	檢枝岐	35	120	8	-0.0590	2.389	0.983 *
新潟	A	守門	33	17	6	-0.0460	1.268	0.851 *
新潟	A	津南	28	59	10	-0.0418	1.698	0.972 *
新潟	A	湯沢	33	31	6	-0.0630	1.954	0.987 *
新潟	A	関山	34	32	7	-0.0408	1.312	0.943 *
長野	A	野沢温泉	35	76	9	-0.0559	2.188	0.943 *
長野	A	飯山	34	12	4	-0.0498	1.142	0.840
長野	A	信濃町	35	15	4	-0.0550	1.308	0.943
群馬	A	藤原	28	72	9	-0.0465	1.751	0.957 *
群馬	A	みなかみ	28	37	5	-0.0743	2.444	0.945 *
岐阜	A	白川	35	15	6	-0.0385	0.713	0.884 *

者の対応が極めてよい。図-25に、57の観測地点から求めた発生頻度の推定値と観測値の決定係数 r^2 と二乗平均平方根誤差RMSEを降雪深 S_{12} の5cmごとに示す。降雪深 S_{12} が40~55cmの範囲では、決定係数 r^2 は0.8を上回り、二乗平均平方根誤差RMSEは0.1以下と小さい。よって、12時間降雪深 S_{12} が40~55cmの範囲において、各地点の回帰式により高い精度(有意水準1%)で発生頻度の推定を行うことができ、短時間多量降雪に伴う樹林内の雪崩発生条件を満たす事例の発生頻度の推定に、この回帰式を活用できると考えられる。表-1に、回帰分析を行った57地点における任意の12時間降雪深 S_{12} が S_{12} cm以上となる発生頻度 $F(S_{12} \geq S_{12})$ を推定するための式(6)の係数 a と b を示す。

5.7 短時間多量降雪による雪崩の発生頻度のまとめ

本章では、第2章から第4章で示した雪崩発生条件を満たす降雪事例を過去数十年間の気象データから抽出し、その発生頻度を簡便に推定する手法の検討を行い、発生頻度の地域分布を求めた。本手法により、予め降雪深とその発生頻度の関係式を求めておくと、今後予想される降雪深が、対象箇所においてどのくらい頻繁に起こる(平均的に何年に1回相当の)降雪なのか、またはこれまでに経験のない稀な降雪なのかを事前に把握することができる。雪崩の対策では、この頻度解析から求めた雪崩発生条件を満たす降雪深を、雪崩運動モデルの発生層厚に適用することで、対策施設的设计条件となる発生頻度(例えば、30年確率など)で発生すると考えられる雪崩の到達距離と衝撃圧を算出することができる。そこで、次の第6章では、短時間多量降雪時に樹林内を流下する雪崩の到達距離と衝撃圧を算出可能な雪崩運動モデルを検討する。

6. 雪崩の衝撃圧と到達距離の算出方法

本章では、第4章の雪崩発生の植生条件から得られた立木密度と、第5章で得た発生頻度付き降雪深の解析結果を、雪崩の発生層厚に取り込むことが可能な、樹林内を流下する雪崩の運動モデルについて、フェルミー(Voellmy)モデル⁵⁴⁾に基づいて検討し提案した。次に、提案したモデルに採用したパラメータの値の妥当性を、既往の観測から得られた経験則に基づいて検証の上、樹林の有無、斜面高さ、雪崩発生区の傾斜角、雪崩発生層厚を変えて算定した雪崩の速度を基に、雪崩の衝撃圧や到達距離を算出し、既往研究と比較した。

6.1 樹林内を流下する雪崩の運動モデル

6.1.1 フェルミーの雪崩運動モデル

フェルミーは雪崩を流体と考えて開水路の水理学の結

果を適用し、式(7)の運動方程式を提唱した⁵⁴⁾。

$$\rho_s h \frac{du}{dt} = f_d - f_c - f_t \quad (7)$$

ここで、

$$f_d = \rho_s g h \sin \theta \quad (8a)$$

$$f_c = \mu \rho_s g h \cos \theta \quad (8b)$$

$$f_t = \rho_s u^2 / \xi \quad (8c)$$

である。 ρ_s (kg/m^3)は雪崩の密度、 h (m)は雪崩の流動層厚、 u (m/s)雪崩の速度、 t (s)は時間、 θ は雪崩の流下する斜面の傾斜角である。式(8a)の f_d は、 g を重力加速度(=9.8 m/s^2)とすると、斜面に平行に作用するせん断応力である。式(8b)の f_c は雪の荷重に比例したクーロン摩擦抵抗であり、 μ は底面における動摩擦係数である。式(8c)の f_t は速度 u の2乗に比例する抵抗力を表すが、 ξ の具体的な意味は示されていない。以降、ここでは ξ を流動係数と呼ぶことにする。

斜面に沿った長さを s とし、 $d/dt = u d/ds$ に注意すると、式(7)は、

$$\frac{du^2}{ds} = 2g(\sin \theta - \mu \cos \theta - \frac{1}{\xi} u^2) \quad (9)$$

と変形できる⁵⁵⁾。ただし、式(9)の雪崩流動層厚 h 、動摩擦係数 μ 、流動係数 ξ を具体的に設定する必要がある。

6.1.2 樹林内を流下する雪崩の運動モデルの提案

本研究では、フェルミーモデル⁵⁴⁾に基づき、樹林内を流下する雪崩の運動モデルを提案し、雪崩流動層厚 h 、動摩擦係数 μ 、流動係数 ξ の具体的な設定方法を提示する。樹林内を流下する雪崩の運動方程式として、次の式(10)を提案する。

$$\rho_s h \frac{du}{dt} = f_d - f_c - f_t - f_\lambda \quad (10)$$

ここで、 f_d と f_c は式(8a)と式(8b)と同じであるが、 f_t を次の式(11)に置き換える。

$$f_t = \frac{c_f \rho_s u^2}{2} \quad (11)$$

また、新たに式(12)の f_λ の項を加える。

$$f_\lambda = \frac{c_D \rho_s (h d_t) u^2}{2 s_\xi^2} = \frac{c_D \rho_s \lambda h u^2}{2} \quad (12)$$

式(11)は、水流では、開水路の底面に作用する乱流によるせん断抵抗力を表し、 $c_f = 2gn^2 h^{-1/3}$ は乱流摩擦抵抗係数である⁵⁶⁾。ここで n はマニングの粗度係数であり、自然水路では、 n は水路の凹凸や植生によって変化することが知られている⁵⁷⁾。流れの深さ h が増して底面粗度の影響が小さくなると、乱流摩擦抵抗係数 c_f は小さくなり流動性が増すことになる。雪崩を流体とみなしたとき、このよ

表-2 既往研究と本研究における雪崩流動層厚、動摩擦係数、流動係数の設定方法

	既往研究	本研究
雪崩流動層厚	$h_i = h_0$ h_0 : 雪崩発生層厚	$h_i = \frac{u_{i-1}}{u_i} h_{i-1}$
動摩擦係数	$\mu_i = \begin{cases} 0.6 - 0.01u_i & (0 \leq u_i < 10) \\ 5/u_i & (10 \leq u_i < 50) \end{cases}$	$\mu = 0.3$
流動係数	ξ は滑走中一定 (表-3の値を参照)	$\xi_i = \frac{h_i^{1/3}}{n^2 + \frac{c_D \lambda}{2g} h_i^{4/3}}$ n : 粗度係数 $\lambda = d_t/s_t^2$: 立木密度

うな性質は雪崩についても当てはまると仮定する。

式(12)は、水流では、植生の存在によって流れが受ける河床単位面積当たりの抵抗力として知られている⁵⁸⁾。ここでは植生を胸高直径 d_t の円柱の樹木として、流れ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、式(12)は、雪崩が樹木から受ける単位面積当たりの抵抗力とみなせる。 c_D は抗力係数であり、 $\lambda = d_t/s_t^2$ を立木密度とする。ただし、この立木密度は、第4章のものと定義が異なることに注意する。

加えて、式(8c)の流動係数 ξ を、

$$\xi = \frac{h^{1/3}}{n^2 + \frac{c_D \lambda}{2g} h^{4/3}} \quad (13)$$

で定義すると、式(10)は式(9)に帰着する。よって、式(8c)の流動係数 ξ の物理的意味は不明であったが、式(13)の ξ は、雪崩流動層厚 h 、粗度係数 n 、立木密度 λ に依存する形になる。このことは、流動係数 ξ が雪崩流動層厚 h に対して変化することになり、坊城⁵⁹⁾が提唱した流動係数 ξ の考え方を発展させるものである。

以上を、本研究における樹林内を流下する雪崩の運動モデルとする。ただし、雪崩流動層厚 h と動摩擦係数 μ は、別途設定する必要がある。

6.1.3 雪崩流動層厚、動摩擦係数、流動係数の設定方法

ここでは、式(7)のフェルミーの雪崩運動モデル(以下、既往研究とする)と式(10)の本研究で提案する樹林内を流下する雪崩の運動モデル(以下、本研究とする)における雪崩流動層厚 h 、動摩擦係数 μ 、流動係数 ξ の設定方法の違いを示す(表-2)。

(1) 雪崩流動層厚 h

雪崩流動層厚 h は、式(7)や式(10)の運動方程式のみでは決まらない。図-26のように斜面を分割したときに、 (x_i, z_i) での雪崩流動層厚を h_i とする($i=1,2,3,\dots$)。 h_0 を雪崩発生層厚とし、 $i=1$ 番目の雪崩流動層厚 h_1 は、

$$h_1 = h_0 \quad (14)$$

とする。既往研究では、雪崩流動層厚 h_i は、雪崩発生層厚 h_0 のまま流下とともに変わらないもの^{20),55),60),61)}と線形に増加するもの^{20),48)}が用いられている。しかし後者については、流動層厚の増加割合を滑走中の雪の堆積や浸食の物理モデルに基づいて定量化することが難しく現在でも不明な点が多い。よって、表-2には前者のみを示す。

一方、雪崩流下経路の幅は一定、滑走中の雪の堆積や浸食がないと仮定し、本研究における (x_i, z_i) での雪崩流動層厚 h_i を、 (x_i, z_i) を通過する流量 $h_i u_i$ と (x_{i-1}, z_{i-1}) を通

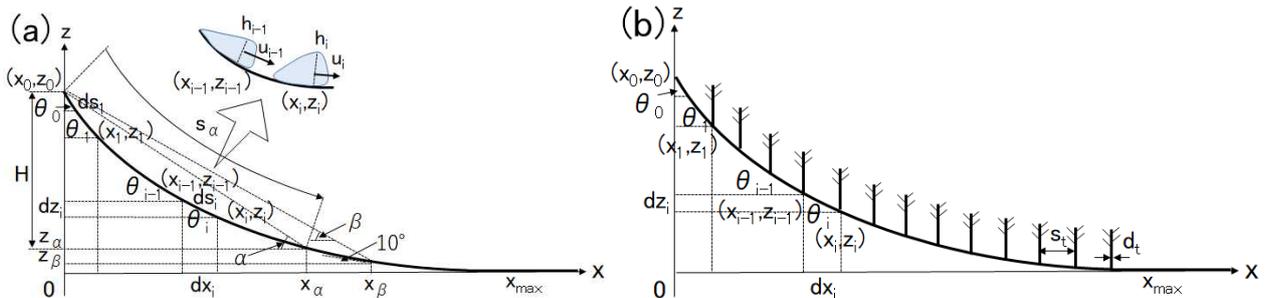


図-26 放物型地形の模式図。(a)樹林が存在しない場合、(b)樹林が存在する場合。

過する流量 $h_{i-1}u_{i-1}$ が等しくなるように求める⁵⁴⁾。すなわち、

$$h_i = \frac{u_{i-1}}{u_i} h_{i-1} \quad (15)$$

となる。本研究での雪崩流動層厚 h_i は、式(14)を初期値として、式(15)に従って変化するものとする。

(2) 動摩擦係数 μ

Schaerer⁶²⁾は、フェルミーの雪崩運動モデルから得られた雪崩の最大速度が、雪崩の映像記録を基に観測された雪崩の瞬間速度に一致するように動摩擦係数 μ の値を推定し、雪崩速度 $u = 10 \sim 50$ m/s の範囲において μ は速度に反比例すること($\mu_i = 5/u_i$)を示した。既往研究では、このSchaererの経験式に加えて、雪崩速度 $u < 10$ m/s の範囲では、速度が0 m/sのとき $\mu_i = 0.6$ 、10 m/sのとき $\mu_i = 0.5$ となる直線内挿式を用いている^{20), 48), 55)} (表-2)。

一方、アモンソン-クーロンの摩擦法則によると、動摩擦係数 μ は、滑り速度に依存しないことが知られている⁶³⁾。実際に、乾雪また湿雪雪崩のせん断応力と垂直応力の比から μ を評価した実験によると、雪崩速度が3.4~9.6 m/sの範囲において、 μ は速度に依存しないことが報告されている⁶⁴⁾。また、Voellmy-Salmモデルでは、雪崩流動層厚 h_0 が1~2 mを超える大規模雪崩に関しては μ を0.16、雪崩流動層厚 h_0 が1~2 mより小さい小規模雪崩に関しては μ を0.25~0.3に設定することを推奨している⁶⁵⁾。本研究ではこの立場に従い、雪崩発生層厚 h_0 が1 m以下の小規模雪崩を対象として、 $\mu = 0.3$ に設定する。

(3) 流動係数 ξ

既往研究では、流動係数 ξ に関する具体的な数値の提示指針はないが、雪崩流動層厚 h_i が雪崩発生層厚 h_0 のまま流下とともに変わらない($h_i = h_0$)とすると、式(13)の流動係数 ξ は定数となる。ただし、 ξ を求めるためには、式(13)のマニングの粗度係数 n を決める必要がある。坊城は、雪崩事例に関する文献を調査して、 n が雪質により変化することを指摘した⁵⁹⁾。ここでは煙を伴わない小規模の乾雪雪崩を対象とするので、坊城⁵⁹⁾の調査結果より $n = 0.03$ を用いる。この値は、手入れのよい直線状の自然水路に対するマニングの粗度係数の標準値に相当する^{56), 57)}。表-3は、式(13)においてマニングの粗度係数 $n = 0.03$ 、立木密度 $\lambda = 0$ のとき、雪崩発生層厚 $h_0 = 0.3$ m、0.5 m、1.0 mに対する流動係数 ξ の値を示す。既往研究の ξ の設定値として、表-3の雪崩発生層厚 h_0 に応じた ξ を用いる。

一方、本研究では、式(13)の流動係数 ξ を用いる。図-27に示すように、 ξ は、式(15)のように雪崩流動層厚 h が変化するときに変数となる。マニングの粗度係数 n は、既

表-3 樹林なしの場合の流動係数(既往研究)

粗度係数 $n = 0.03$ 、立木密度 $\lambda = 0$ の場合

雪崩発生層厚 h_0 (m)	流動係数 ξ (m/s ²)
0.3	744
0.5	882
1.0	1111

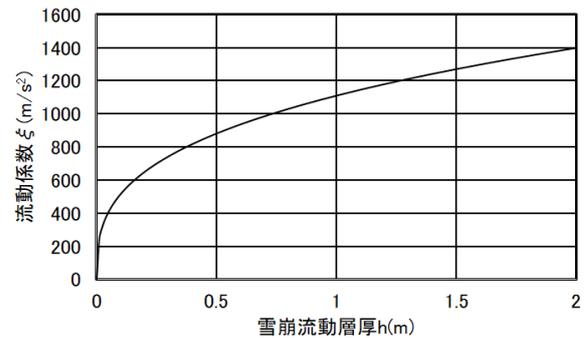


図-27 粗度係数 $n = 0.03$ 、立木密度 $\lambda = 0$ のときの流動係数 ξ と雪崩流動層厚 h の関係

往研究と同様に $n = 0.03$ を用いる。

6.2 算出方法

6.2.1 雪崩流下地形の設定

本研究では、既往文献⁶⁶⁾を基に、雪崩が流下する地形は、図-26に示すように、次の放物型の縦断形状とする。

$$z = \frac{(\tan\theta_0)^2}{4z_0} x^2 - \tan\theta_0 \cdot x + z_0 \quad (16)$$

ここで、 z_0 は水平面からの斜面の高さ(m)、 θ_0 は雪崩発生区の斜面の傾斜角(度)、 x は雪崩発生区からの水平距離(m)で、斜面の高さ z_0 と雪崩発生区の傾斜角 θ_0 を与えると斜面の形状が決まる。斜面の最下点($z = 0$)は $x_{\max} = 2z_0/\tan\theta_0$ であり、 $x > x_{\max}$ のとき地形は平坦とする。図-26のように斜面と平坦部を分割したとき、 (x_i, z_i) を i ($i = 0, 1, 2, 3, \dots$) 番目の座標とする。このとき、 $dx_i = x_i - x_{i-1}$ 、 $dz_i = z_i - z_{i-1}$ とすると、 i 番目の斜面の傾斜角は $\theta_i = \tan^{-1}(|dz_i|/dx_i)$ 、斜面長は $ds_i = \sqrt{(dx_i)^2 + (dz_i)^2}$ となる。 dx_i の値を与えると、 dz_i と ds_i は自動的に決まる。

6.2.2 雪崩の衝撃圧と到達距離の算出方法

i 番目の地点 (x_i, z_i) での雪崩速度を u_i 、雪崩流動層厚を h_i とする。雪崩発生点($i = 0$)でのみ積雪塊は剛体運動し、以降($i \geq 1$)の箇所では積雪塊は細かく碎けて流体運動するものとする⁶⁷⁾⁻⁶⁹⁾。雪崩発生点($i = 0$)で発生した雪

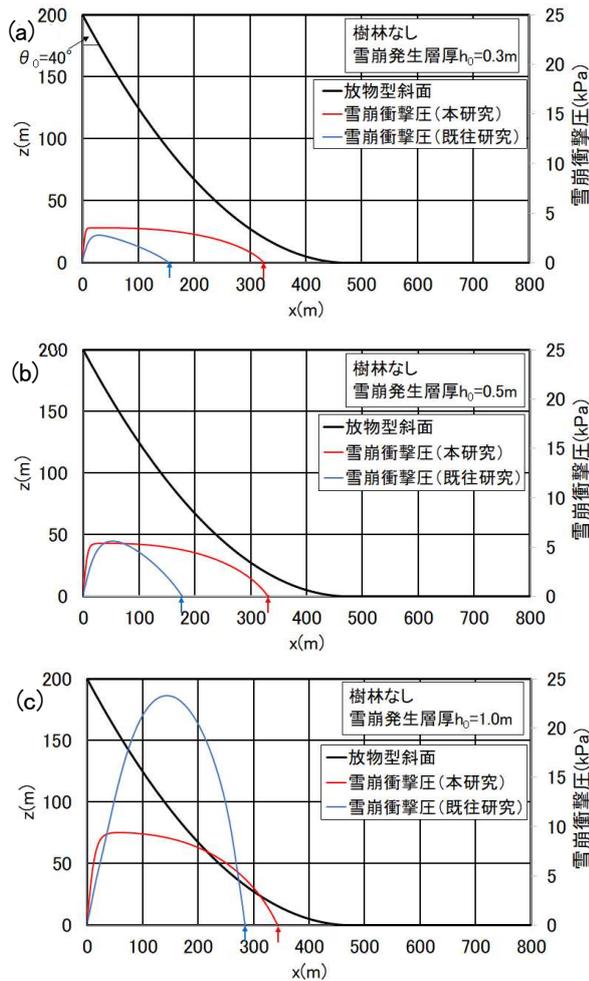


図-28 斜面高さ z_0 が200m、雪崩発生区の傾斜角 θ_0 が40°の放物型斜面(黒)、雪崩の衝撃圧 P (青：既往研究、赤：本研究)、雪崩到達点(青矢印：既往研究、赤矢印：本研究)

崩の次の地点($i=1$)における雪崩速度 u_1 について、式(9)は、 u^2 を含む項を省略すると剛体の運動方程式になり、初速度 $u_0=0$ に対する解は、

$$u_1 = \sqrt{2g(\sin\theta_1 - \mu\cos\theta_1) ds_1} \quad (17)$$

となる。次に、雪崩発生以降の箇所($i \geq 1$)における雪崩速度 u_i について、式(9)を離散化すると、

$$du_i^2 = 2g \left(\sin\theta_i - \mu_{i-1}\cos\theta_i - \frac{1}{\xi_{i-1}h_{i-1}} u_{i-1}^2 \right) ds_i \quad (18)$$

となる。したがって (x_i, z_i) での雪崩速度 u_i の2乗は、 (x_{i-1}, z_{i-1}) での速度 u_{i-1} の2乗に式(18)による速度の変化量 du_i^2 を加算した

$$u_i^2 = u_{i-1}^2 + du_i^2 \quad (19)$$

となり、式(19)より (x_i, z_i) での雪崩速度 u_i が求まる。また、 (x_i, z_i) での雪崩衝撃圧 P_i (Pa)は、式(20)より u_i を用いて算出する⁶⁷⁾。この P_i は、雪崩が建造物の壁面に垂直に

衝突する時の衝撃圧である。

$$P_i = \rho_s (u_i \cos\theta)^2 \quad (20)$$

6.3節と6.4節で示す雪崩衝撃圧 P_i は、ここでは雪崩発生層厚 $h_0=0.3\text{m}, 0.5\text{m}, 1.0\text{m}$ の各条件で算出する。また、雪崩密度 ρ_s は、乾雪雪崩の典型的な密度⁶⁹⁾である $\rho_s=100\text{kg/m}^3$ を用いる。

雪崩の到達距離 x_α は、雪崩速度 u_i が減速し雪崩が停止する直前の x_i の値とする。雪崩の発生源 (x_0, z_0) から到達点 (x_α, z_α) までの実走斜距離を s_α とし、到達点から発生源を見通した角度を α (度)、 $H=z_0-z_\alpha$ を雪崩の発生源から到達点までの落差とする。また、雪崩の経路を下って斜面の傾斜角が10°となる地点を (x_β, z_β) として、 (x_β, z_β) から雪崩の発生源を見上げた仰角を β (度)とする(図-26a)。

6.2.3 地形と植生に関する解析条件

雪崩運動モデルによる衝撃圧と到達距離の計算は、乾雪雪崩の発生条件に関する既往の知見^{48), 69)-71)}を参考に、斜面高さ $z_0=50\text{m}, 100\text{m}, 150\text{m}, 200\text{m}$ 、雪崩発生区の傾斜角 $\theta_0=30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ$ の各条件で行う。

また、図-26(b)は、斜面上に樹林が存在する場合の模式図で、斜面の分割点 (x_i, z_i) 上に樹木を配置する。樹木の胸高直径を d_t 、立木間隔を s_t とし、平坦部には樹木はないとする。斜面上の樹木は円柱として、その抗力係数を $c_D=1$ とする。ここでは樹林内での乾雪表層雪崩の発生条件を検討した結果(第4章)に基づき、斜面上の樹木の胸高直径を $d_t=0.2\text{m}$ 、立木間隔を $s_t=3\text{m}$ とし、斜面の x 軸方向の分割幅を $dx_i=3\text{m}$ とする。このとき立木密度は $\lambda=0.022(\text{m}^{-1})$ となり、 λ は斜面上で変わらないものとする。また、粗度係数は $n=0.03$ とし、斜面上と平坦部で変わらないものとする。

6.3 雪崩運動モデルの検証

図-28は、表-2の既往研究と本研究における設定値を用いた、樹林のないときの雪崩運動モデルによる雪崩の衝撃圧と到達距離の計算結果の例である。図中の実線(黒)は、斜面高さ $z_0=200\text{m}$ 、雪崩発生区の傾斜角 $\theta_0=40^\circ$ のときの放物型の斜面形状を示す。また、実線(青と赤)は、それぞれ既往研究と本研究の設定値(表-2)に基づいて計算した雪崩衝撃圧で、 x 軸上の矢印は雪崩到達点を示す。雪崩発生層厚 h_0 は、図-28(a)では0.3m、図-28(b)では0.5m、図-28(c)では1.0mである。既往研究と本研究において、 h_0 が大きいほど雪崩最大衝撃圧 P_{\max} と雪崩到達距離 x_α は大きくなる。特に、雪崩発生層厚が $h_0=1.0\text{m}$ と大きいときに雪崩衝撃圧と到達距離の既往研究と本研究の違いが顕著となる。

以下では、雪崩運動モデルによる到達距離の計算結果が、実走斜距離 S_α と落差 H の関係および $\alpha - \beta$ の関係に対する経験則と矛盾しないかの検証を行う。

6.3.1 実走斜距離と落差の関係との比較による検証

図-29は、異なる斜面高さ z_0 、雪崩発生区の傾斜角 θ_0 、雪崩発生層厚 h_0 に対して、既往研究と本研究における設定値(表-2)を用いて計算した樹林のない場合における実走斜距離 S_α と落差 H の関係である。図より、既往研究(図-29(a))と本研究(図-29(b))、いずれの場合も実走斜距離 S_α と落差 H の間に、

$$S_\alpha = C_s H + D_s \quad (C_s, D_s \text{ は係数}) \quad (21)$$

の関係がある。ここで、式(21)の係数 C_s と D_s は、 θ_0 と h_0 に依存する。

既往研究の設定値を用いた場合、図-29の(a1)と(a2)に示すように、雪崩発生層厚が $h_0 = 0.3\text{m}$ 、 0.5m と小さい

ときは、 θ_0 が大きい急勾配な斜面ほど S_α は小さく、 h_0 が大きい方が S_α は大きい。同様の傾向は本研究の設定値を用いた計算結果(図-29(b1)と(b2))にもみられる。ただし、雪崩発生区の傾斜角 θ_0 の増加に伴う実走斜距離 S_α の減少は、本研究の計算結果(図-29(b1)と(b2))に比べて小さい。また、雪崩発生層厚 $h_0 = 1.0\text{m}$ (図-29(a3))における実走斜距離 S_α と落差 H の関係は、本研究の計算結果(図-29(b3))とは大きく異なる。本研究では、 θ_0 の大きい急勾配な斜面ほど S_α は小さくなるが、既往研究では、落差 H が約70m以上の場合は、雪崩発生区の傾斜角 θ_0 が大きくなると S_α は小さくなり、落差 H が約70m以下の場合では、 θ_0 が大きくなると S_α は大きくなるという、落差 H により逆の傾向を示す。

また、実走斜距離と落差の比(S_α/H)について、雪崩発生層厚 h_0 (図-29(a1)~(a3))ごとにその平均値を求める

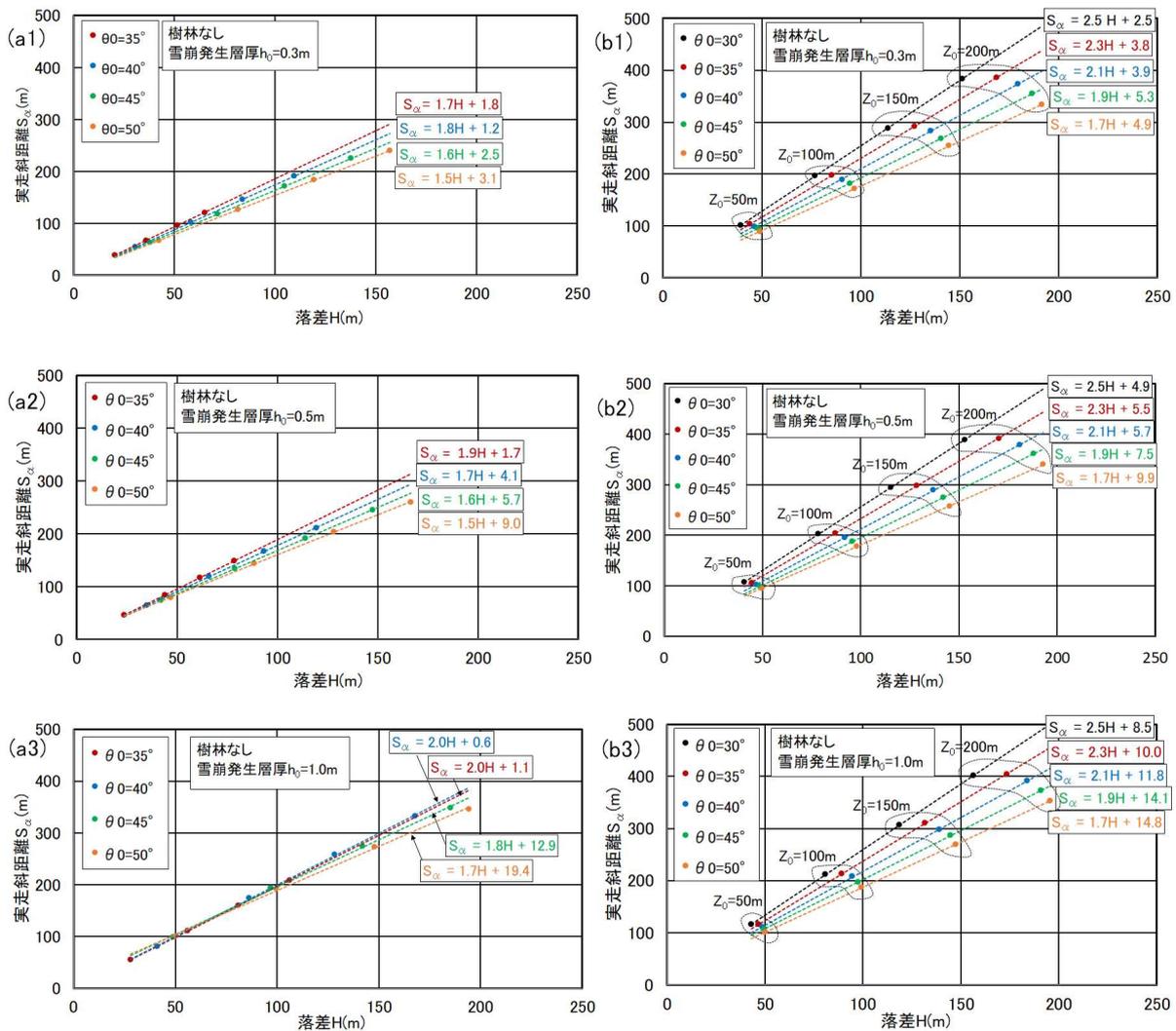


図-29 樹林のない場合、表-2の設定値を用いたときの雪崩の実走斜距離 S_α と落差 H の関係。(a1)~(a3)は既往研究における雪崩発生層厚 $h_0 = 0.3\text{m}$ 、 0.5m 、 1.0m の場合、(b1)~(b3)は本研究における $h_0 = 0.3\text{m}$ 、 0.5m 、 1.0m の場合の計算結果。

と、雪崩発生層厚 $h_0 = 0.3\text{m}$ では1.7、 $h_0 = 0.5\text{m}$ では1.8、 $h_0 = 1.0\text{m}$ では2.0となり、雪崩発生層厚 h_0 の大ききつまり雪崩の規模に対する依存性がみられる。一方、本研究の設定値を用いた計算結果(図-29(b1)~(b3))では、実走斜距離と落差の比(S_α/H)の雪崩発生層厚 h_0 ごとの平均値は、 $h_0 = 0.3\text{m}$ では2.1、 $h_0 = 0.5\text{m}$ では2.2、 $h_0 = 1.0\text{m}$ では2.2となり、雪崩の実走斜距離 S_α が落差の約2倍であるとする経験則と整合する⁷²⁾。

6.3.2 $\alpha - \beta$ の関係との比較による検証

図-30は、異なる斜面高さ z_0 、雪崩発生区の傾斜角 θ_0 、雪崩発生層厚 h_0 に対して、既往研究と本研究における設定値を用いて計算した樹林のない場合における $\alpha - \beta$ の関係である。図-30(a1)~(a3)は既往研究の計算結果であり、図-30(b1)~(b3)は本研究における計算結果である。

る。雪崩発生層厚 h_0 は、図-30の(a1)と(b1)では0.3m、(a2)と(b2)では0.5m、(a3)と(b3)では1.0mである。ここで、 α と β には、

$$\alpha = A\beta + B \quad (A, B \text{ は係数}) \quad (22)$$

の関係があることが経験的に知られ、この関係式を用いて雪崩の到達距離を推定する統計モデルは $\alpha - \beta$ モデルと呼ばれている^{20), 65), 69), 73)}。

図-30(a1)~(a3)は、既往研究における設定値に基づく計算結果から評価した $\alpha - \beta$ の関係である。図より式(22)の線形の関係が成り立つが、雪崩発生層厚が $h_0 = 1.0\text{m}$ のとき(図-30(a3))は、 β に対する α の変化は非常に小さく経験則と整合しない。一方、図-30(b1)~(b3)は、本研究の設定値に基づく計算結果から評価した $\alpha - \beta$ の関係であり、いずれの h_0 に対しても、図より線形

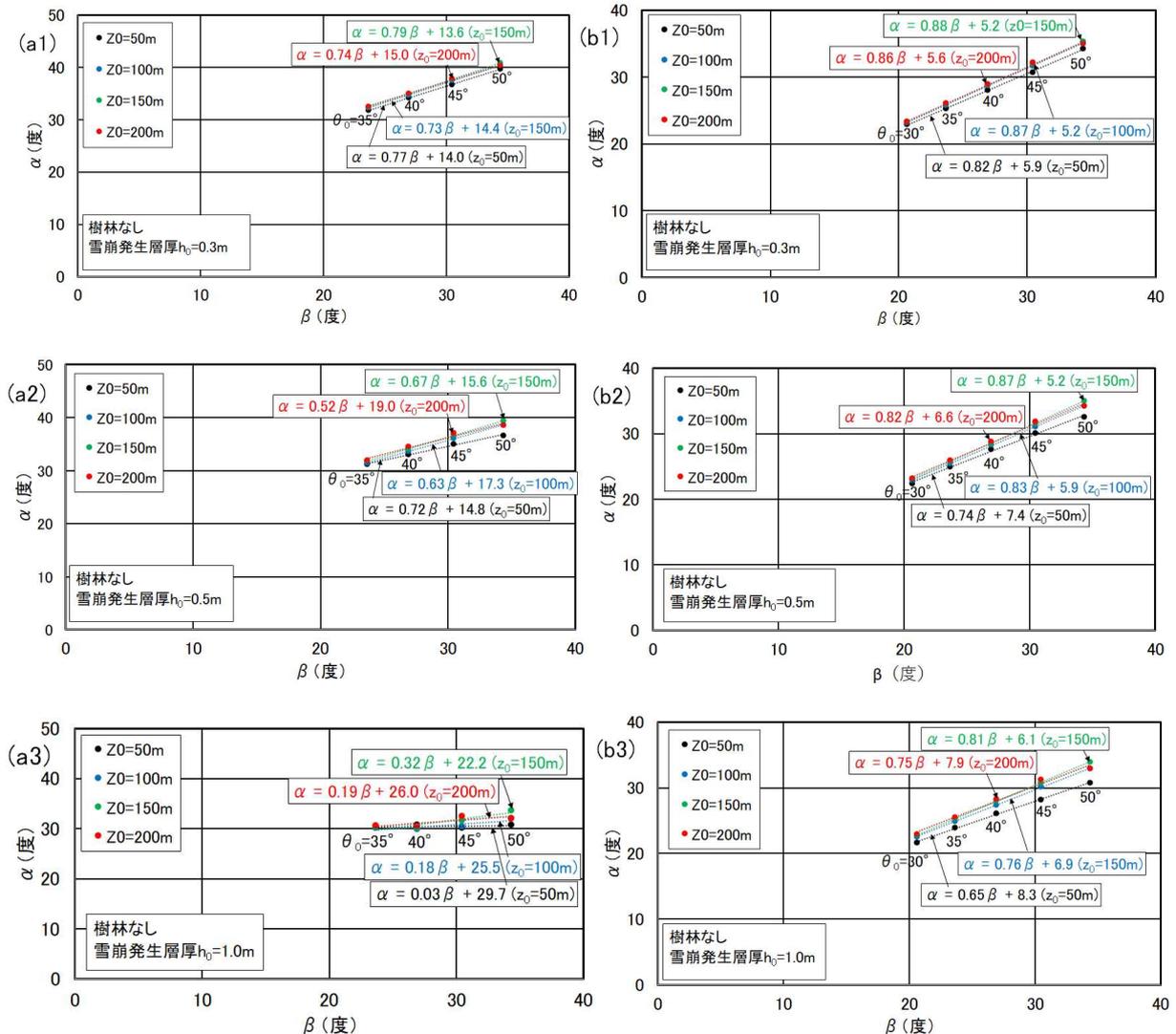


図-30 樹林のない場合、表-2の設定値を用いたときの $\alpha - \beta$ の関係。(a1)~(a3)は既往研究における雪崩発生層厚 $h_0 = 0.3\text{m}$ 、 0.5m 、 1.0m の場合、(b1)~(b3)は本研究における $h_0 = 0.3\text{m}$ 、 0.5m 、 1.0m の場合の計算結果。

の関係が成立していることから、式(22)の $\alpha - \beta$ の関係の経験則を満たしている。

よって、以下で行う、短時間多量降雪に伴う樹林内で発生する雪崩の衝撃圧と到達距離の計算では、実走斜距離 S_α と落差 H の関係や $\alpha - \beta$ の関係に対する経験則と矛盾しない本研究の設定値を用いた方法で計算を行う。

6. 4 樹林内を流下する雪崩の衝撃圧と到達距離の結果

6.4.1 雪崩の最大衝撃圧の計算結果

図-31は、雪崩の衝撃圧の最大値 P_{max} と斜面高さ z_0 の関係を、異なる雪崩発生区の傾斜角 θ_0 と雪崩発生層厚 h_0 および樹林の有無に対して、式(10)の雪崩運動モデルおよび表-2の本研究における設定値を用いて計算した結果である。図-31より、雪崩の最大衝撃圧は、樹林の有無に関係なく、斜面高さ z_0 にはほとんど依存しないが、雪崩発生区の傾斜角 θ_0 が大きくなると、雪崩の最大衝撃圧 P_{max} は大きくなる。これは、 θ_0 の大きい斜面ほど、式(9)

表-4 雪崩の衝撃圧と被害の目安^{(7),(69)}

衝撃圧(kPa)	破壊力の目安
1	窓ガラスが割れる
5	ドアが壊される
30	木造建物が破壊される
100	大きな木が飛ばされる
1000	鉄筋コンクリート構造物が破壊される

の駆動力を表す $\sin\theta$ の項が大きくなり、雪崩の速度の増加率が大きくなるためである。

また、図-31(a1)~(a3)より、樹林が存在しない場合(立木密度 $\lambda = 0$)、雪崩発生層厚 h_0 が0.3m、0.5m、1.0mと増加したとき、雪崩の最大衝撃圧 P_{max} は大きくなる。今回計算を行った範囲では、雪崩発生層厚 $h_0 = 0.3m$ ではすべての発生区の傾斜角 θ_0 に対して P_{max} は5 kPaよりも小さ

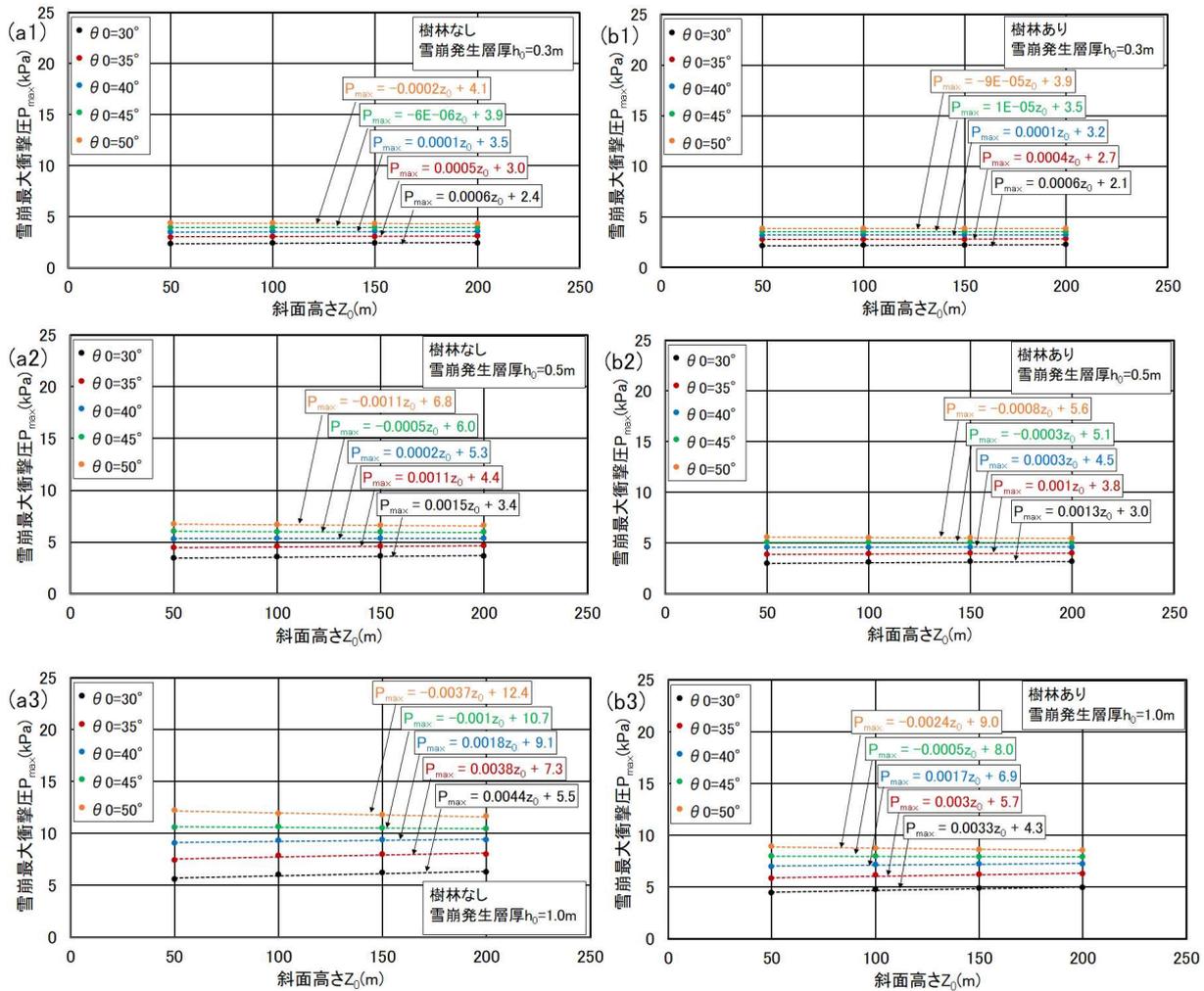


図-31 表-2の本研究における設定値を用いたときの雪崩の最大衝撃圧 P_{max} と斜面高さ z_0 の関係。(a1)~(a3)は樹林がないときの雪崩発生層厚 $h_0 = 0.3m, 0.5m, 1.0m$ の場合、(b1)~(b3)は樹林があるときの $h_0 = 0.3m, 0.5m, 1.0m$ の場合の計算結果。

く窓ガラスやドアが破壊される程度であるが(表-4 参照)、雪崩発生層厚が $h_0 = 1.0\text{m}$ で発生区の傾斜角 θ_0 が 45° 以上になると P_{\max} は 10 kPa を超える。

一方、図-31 (b1)～(b3)より、樹林が存在する場合(立木密度 $\lambda = 0.022$)、樹林のない場合に比べて雪崩の最大衝撃圧 P_{\max} は小さい。これは、樹林があると、式(9)と式(13)から u^2 の係数が $1/\xi h = n^2/h^{4/3} + c_D \lambda / (2g)$ となり、樹林のないとき($\lambda = 0$)に比べて第2項の分だけ抵抗力が増加するために雪崩の速度の増加率が小さくなるためである。また、雪崩発生層厚 $h_0 = 0.3, 0.5, 1.0\text{m}$ のとき、 u^2 の係数の第1項の大きさはそれぞれ、 4.5×10^{-3} 、 2.3×10^{-3} 、 0.9×10^{-3} となり、第2項の大きさ 1.1×10^{-3} と比較すると、発生層厚 h_0 が小さく立木密度が $\lambda = 0.022$ の疎密度の場合は、第1項が相対的に大きくなって第2項の寄与は小さくなる。したがって、 h_0 が 0.3m や

0.5m のときの雪崩の衝撃圧は、樹林のない場合($\lambda = 0$)と大差はなく、雪崩は樹林内を勢いが衰えることなく流下するものと考えられる。

6.4.2 雪崩の到達距離の計算結果

図-32は、雪崩到達距離 x_α と斜面高さ z_0 の関係を、異なる雪崩発生区の傾斜角 θ_0 と雪崩発生層厚 h_0 、および樹林の有無に対して、式(10)の雪崩運動モデルおよび表-2の本研究における設定値を用いて計算した結果である。図-32より、樹林の有無に関係なく、雪崩到達距離 x_α は斜面高さ z_0 が大きいほど長くなる。また、雪崩発生区の傾斜角 θ_0 の大きい斜面ほど、雪崩到達距離 x_α は短くなる。これは、雪崩発生区の傾斜角 θ_0 が大きいほど、雪崩発生区からの水平距離 x に関する2回微分から得られる曲率 $(\tan\theta_0)^2/2z_0$ が大きくなり、斜面の傾斜角 θ が 0° に漸近する地点が近くなることによる。 θ が 0° に近づくとき、 θ_0

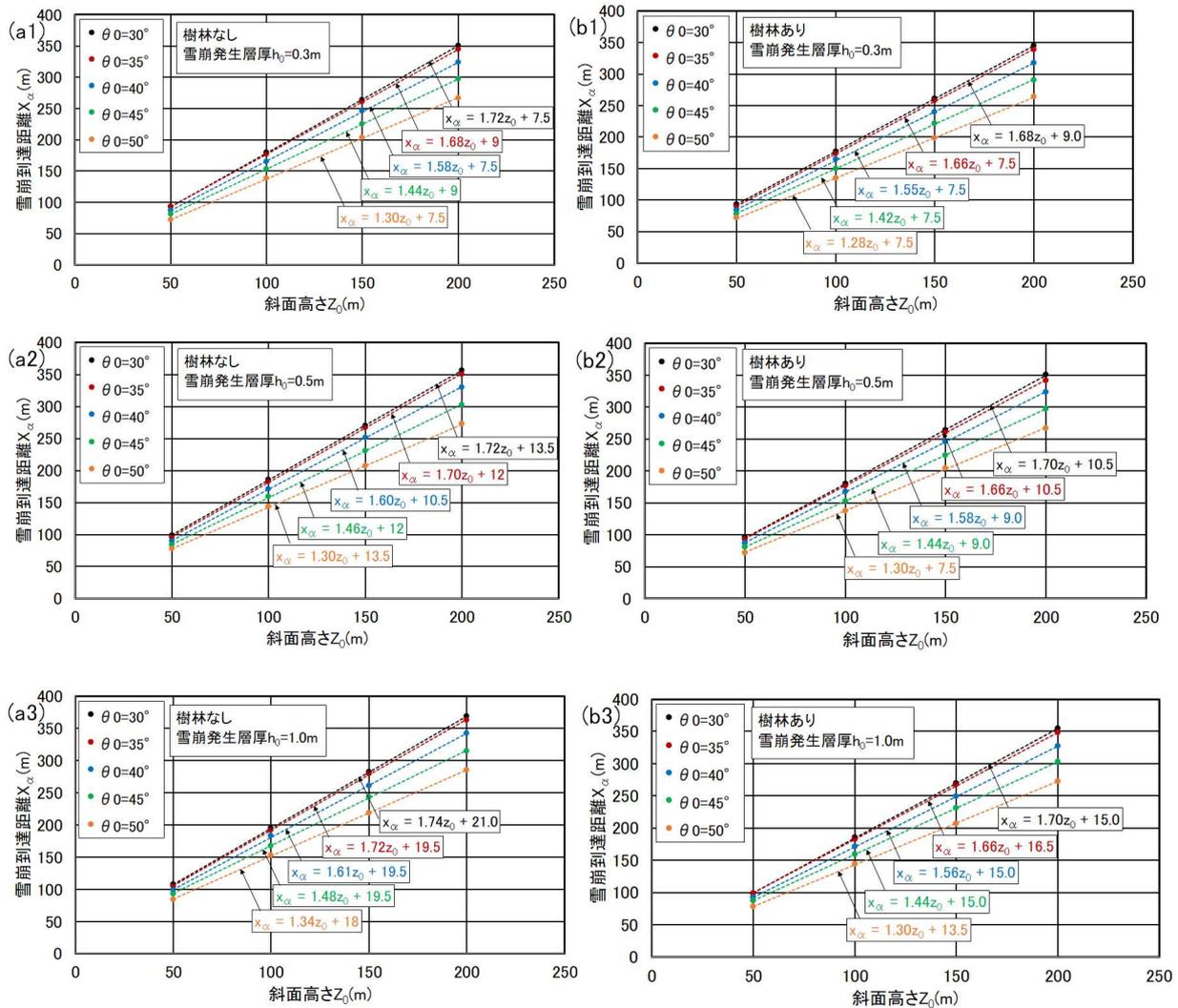


図-32 表-2 の本研究における設定値を用いたときの雪崩到達距離 x_α と斜面高さ z_0 の関係。(a1)～(a3)は樹林がないときの雪崩発生層厚 $h_0 = 0.3\text{m}, 0.5\text{m}, 1.0\text{m}$ の場合、(b1)～(b3)は樹林があるときの $h_0 = 0.3\text{m}, 0.5\text{m}, 1.0\text{m}$ の場合の計算結果。

が大きいほど、式(9)の駆動力を表す $\sin\theta$ の項は急激に減少し、一方クーロン摩擦抵抗の項 $\mu\cos\theta$ は急激に増加するため、雪崩の速度の増加率が小さくなり雪崩到達距離 x_α は短くなる。

図-32より、雪崩発生層厚 h_0 と雪崩到達距離 x_α の関係をみると、樹林の有無に関係なく、雪崩発生層厚 h_0 が大きくなるにしたがって雪崩到達距離 x_α は長くなる。これは、雪崩の規模が大きくなるほど到達距離が増大する傾向があることが経験的に知られていることと矛盾しない⁷⁴⁾。樹林の有無による雪崩到達距離 x_α の違いに着目すると、樹林がある場合($\lambda = 0.022$)、式(9)と式(13)から u^2 の係数は $1/\xi h = n^2/h^{4/3} + c_D\lambda/(2g)$ となり、樹林のないとき($\lambda = 0$)に比べて第2項の分だけ抵抗力が増加するため、雪崩到達距離 x_α が短くなる。

6.5 雪崩の衝撃圧と到達距離の算出方法のまとめ

本章では、短時間多量降雪時に樹林内で発生して流下する雪崩の到達距離と衝撃圧を算出する手法を検討した。その結果、フェルミーの雪崩の運動方程式⁵⁴⁾に立木から受ける抵抗力を加えることにより、樹林の影響を考慮した雪崩の到達距離と衝撃圧を算出することが可能になった。この算出方法の妥当性を検証したところ、雪崩の実走斜距離と落差の関係などの経験則と整合することが示された。よって、本研究で提案する樹林の影響を考慮した雪崩運動モデル⁷⁵⁾により、樹林の有無、斜面高さ、雪崩発生区の傾斜角、雪崩発生層厚などの各種条件を任意に設定して、雪崩の到達距離と衝撃圧を算出することが可能になった。

本研究で提案する雪崩運動モデルの活用により、短時間多量降雪による雪崩発生時の気象と積雪の条件(第2~3章)および植生や地形の条件(第4章)に応じた雪崩の到達距離と衝撃圧を算出することができる。また、頻度解析から求めた雪崩発生条件に合致する降雪深(第5章)を雪崩運動モデルの発生層厚に適用することで、雪崩対策施設的设计条件となる頻度(例えば、30年確率など)で発生すると考えられる雪崩の到達距離と衝撃圧を算出することが可能である。

7. 短時間の多量降雪による雪崩危険度評価手法

短時間多量降雪時の雪崩による被害軽減に資する雪崩危険度評価手法を提案することを目的として、雪崩発生時の気象と積雪条件、植生と地形条件、発生頻度および雪崩の衝撃圧と到達範囲について検討を行った。以下では、本研究における検討結果をまとめ、短時間多量降雪による雪崩の危険度評価手法を提案する。

7.1 雪崩危険度評価の各要素の検討結果のまとめ

第2章では、2014年2月の短時間多量時の樹林内における雪崩発生条件について、降雪時の気温と降雪強度を用いて積雪の圧縮粘性理論に基づいて推定される斜面積雪の安定度と硬度を指標に、樹林内における雪崩発生時の気象と積雪条件を調べた。その結果、降雪強度が大きい気象条件下で降雪から12時間程度で斜面積雪が不安定となり(第一条件)、かつ気温が低いために積雪硬度が小さい積雪が形成される(第二条件)ことにより、樹林内でも雪崩が発生したと考えられる。具体的な気象および積雪条件として、12時間という短時間に45cm以上の降雪があり、この降雪時の平均気温が -4°C 以下のときに、普段は発生しにくい樹林内でも雪崩が発生する傾向にある。

第3章では、短時間多量降雪時の雪崩の実態と積雪状態に関する現地観測を行った。2018年1月の乗鞍高原における現地観測などの結果から、低気圧性の降雪には、雲粒付着の少ない樹枝状や角板、広幅六花など降雪結晶が多く見られ、これらの結晶により積雪内に密度と硬度が小さい弱層が形成されやすく、雪崩発生に関して降雪結晶の種類や新雪密度に注意する必要があることを示した。

第4章では、雪崩発生時の植生と地形条件について、既往の文献レビューと、2014年2月の関東甲信地方の短時間多量降雪時の雪崩発生箇所のうち建物被害が確認された箇所の植生と地形の現地調査を行った。その結果、樹林内における乾雪雪崩発生時の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、地形条件としては斜面勾配が重要であることを示した。

第5章では、第2章から第4章で提示した雪崩発生条件を満たす降雪事例を過去の気象データから抽出して、その発生頻度を簡便に推定する手法を検討した。検討の結果、降雪事例の降雪深と発生頻度の間には指数関係が成立し、両者の回帰式から降雪深がある値を超過する発生頻度を簡便に推定できることが明らかになった。また、この発生頻度解析手法が、国内の積雪地域全体に適用可能であることを示し、短時間多量降雪による雪崩発生頻度の地域分布や地域的な特徴を明らかにした。

第6章では、樹林内を流下する雪崩の運動モデルを提案した。ただし、雪崩流動層厚、動摩擦係数、流動係数などの設定方法が既往研究と異なることから、雪崩到達距離に関する経験則との比較検討から、本研究で提案する雪崩運動モデルの妥当性について検証を行った。その結果、本研究で提案する雪崩運動モデルが、雪崩の実走斜距離と落差の関係などの経験則と整合することを示した。また、この雪崩運動モデルの活用により、立木密度ととも

に雪崩に対する抵抗が増して雪崩の最大衝撃圧と到達距離が小さくなるなど、樹林の影響を考慮した雪崩の衝撃圧と到達距離を計算することが可能になった。

7.2 短時間の多量降雪による雪崩危険度評価手法

7.1 節の検討結果に基づき、以下では短時間多量降雪による雪崩危険度評価手法を提案し、その活用と留意点について述べる。

7.2.1 短時間多量降雪による雪崩発生評価手法

第2章から第4章では、短時間多量降雪による雪崩の発生条件を、気象、積雪、降雪結晶の特徴、植生、地形の観点から検討を行い、普段は発生しにくい樹林内での雪崩発生条件を提示した。既往の雪崩危険斜面の判定手法である、斜面勾配や植生、積雪深に基づく評価得点による危険度判定^{76),77)}では、高木が密に存在する斜面では雪崩発生危険度が小さいという判定になる。しかし、2014年の関東甲信地方を中心とした大雪では、各地で樹林内において雪崩が発生した(第2章)。本研究では、普段は発生しにくく、既往の雪崩危険度判定手法では評価できない樹林内における雪崩発生に対して、その発生条件と着目すべき要素を提示することで、短時間多量降雪による雪崩発生評価手法を提案した。特に、樹林が密な状態であっても、短時間(12時間)の降雪深が45cm以上となり、かつこの降雪時の平均気温が-4℃以下と低い場合には、樹林内でも雪崩が発生する傾向にあることを示した。

本研究で提案した雪崩発生評価手法の活用として、気象予報や現地の観測データから、本研究で提示した雪崩発生条件に合致する短時間多量降雪が予想あるいは確認される場合には、道路の通行止め等の規制や規制区間における雪崩発生状況の現地確認の際あるいは雪崩に対する警戒避難の判断のための参考資料として活用できると考えられる。特に、本研究で提示した雪崩発生条件に合致する短時間多量降雪時には、従来発生しにくいと考えられてきた樹林内においても雪崩が発生する可能性があることを念頭に置くことが大切である。

7.2.2 短時間多量降雪による雪崩発生危険度図

第5章では、短時間多量降雪時の雪崩発生条件(第2章～第4章)を満たす降雪事例の発生頻度解析手法の提案を行い、この手法が全国の積雪地域に対して適用できることを示した。また、全国57箇所における発生頻度の推定式を示し、短時間多量降雪に伴う樹林内の雪崩発生頻度の地域分布(雪崩発生危険度図)を提示した。国内では、同一箇所における雪崩の長期間にわたる発生記録は皆無であり、雪崩発生に関して直接的な頻度解析を行うことは難しい。しかし、本研究で提案した気象データを利用し

て雪崩の発生頻度を推定する手法は簡便で有用であると考えられる。

本研究で提案した手法により、短時間多量降雪による雪崩や降雪深⁷⁸⁾の発生頻度の推定式を予め求めておくと、気象予報などで今後予想される降雪深が、対象箇所においてどのくらいの頻度で起こる降雪なのか、あるいは樹林内における雪崩発生の可能性の有無などを事前に把握することができ、大雪や雪崩などに対する予防的対策や事前準備の参考資料として用いることができると考えられる。ただし、この手法により雪崩の発生頻度解析を行う場合は、解析結果が雪崩発生の可能性(ポテンシャル)を示すものであり、実際の雪崩の発生には植生や地形の状況も影響²¹⁾することに留意が必要である。本研究の発生頻度解析結果を活用する際は、雪崩発生評価手法(7.2.1項)も参考にしていきたい。

7.2.3 短時間多量降雪による雪崩危険度評価手法

第6章では、樹林内を流下する雪崩の運動モデルを考案し、樹林の有無、斜面高さ、雪崩発生区の傾斜角、雪崩発生層厚などの各種条件に応じた雪崩の到達距離と衝撃圧の算出ができることを示した。また、第5章の頻度解析から求めた雪崩発生条件に合致する降雪深を雪崩運動モデルの発生層厚に適用することで、30年や50年、100年など異なる発生頻度(または再現期間)に相当する雪崩の到達範囲と衝撃力を推定することができると考えられる。本研究では、この手法を短時間多量降雪による雪崩危険度評価手法として提案する。

本研究で提案する雪崩危険度評価手法により、雪崩対策施設的设计条件となる頻度(30年確率や50年確率など)^{76),77),79)}で発生すると考えられる雪崩の到達距離と衝撃圧を算出することが可能である。さらに、ヨーロッパや北米において実施されている雪崩対策の計画のためのゾーニングやハザードマップの作成⁷⁹⁾に、本手法を活用するという方法も考えられる。ただし、本研究で対象としたのは、短時間多量降雪時において発生する乾雪表層雪崩であることに留意が必要である。第5章で提示した発生頻度は、新たに積もった積雪がすべて崩落することを仮定しており、この新積雪層の内部で崩落が起こって雪崩が発生する場合は、雪崩の規模(発生量)を過大評価することになる。一方、降雪前のすでに存在する積雪の内部に弱層があつて、この弱層に新たな降雪による応力が増して、そこから雪崩発生に至る場合は過小評価となる。このような不確定な要素による影響を考慮する一つの方法として、雪崩の到達範囲や衝撃力の再現期間値を算出するにあたり、地形や植生の要素と関連付けながら、それぞ

れの再現期間値に対する統計的な信頼区間を推定して評価する手法⁸⁰⁾などがある。あるいは本研究で提案した樹林の影響を考慮した雪崩運動モデルの活用において、現地状況に応じて複数の発生層厚（例えば、降雪深 45～50cm）や立木密度の条件で計算を行い、雪崩の到達距離と衝撃圧の幅を持った算出結果の示し方も考えられる。

7.2.4 まとめ

短時間多量降雪時には、従来発生しにくいと言われていた樹林内でも雪崩が発生することが特徴である。しかし、これまでの雪崩危険度評価手法では、短時間多量降雪により樹林内で発生する雪崩を評価することができなかった。また、雪崩の規模と発生頻度を把握することは、雪崩対策を計画する上で重要であるが、雪崩の長期的な発生記録を有する地域は非常に限られ、特に日本国内では雪崩の履歴データから発生頻度を解析することは困難であった。さらに、樹林の影響を考慮した雪崩の到達距離や衝撃圧を算出する手法が存在しなかった。

本研究により、短時間多量降雪による樹林内での雪崩発生条件（雪崩発生評価手法）が明らかになり、またこの発生条件を満たす降雪事例の発生頻度の地域分布（雪崩発生危険度図）を提示した。さらに、樹林の影響を考慮した雪崩運動モデルを提案した。以上より、短時間多量降雪時の雪崩の規模（発生層厚＝降雪深）と発生頻度を想定した雪崩の衝撃圧と到達距離の推定が、対象とする地域ごとに行うこと（雪崩危険度評価）が可能と考えられる。

参考文献

- 1) 和泉 薫、河島克久、伊豫部勉、松元高峰：2014 年 2 月中旬の大雪による雪崩災害の発生状況と特徴、科学研究費助成事業（課題番号 2590003）研究成果報告書、pp.111-118、2014 年 8 月
- 2) 原田裕介、高橋渉、松下拓樹、石田孝司：短時間多量降雪に起因する雪崩発生の特徴—北海道十勝南部での調査事例—、寒地技術論文・報告集、Vol.33、pp.187-192、2017 年 11 月
- 3) 秋山一弥、関口辰夫、池田慎二：2014 年 2 月の大雪によって山梨県の早川周辺で発生した雪崩の特徴、雪氷、77 巻、pp.47-57、2015 年 1 月
- 4) 中村一樹、上石 勲、阿部 修：2014 年 2 月の低気圧の降雪による雪崩の特徴、日本雪工学会誌、Vol.30 No.2、pp.106-113、2014 年 4 月
- 5) 上石 勲、中村一樹、安達 聖、山下克也：2014 年 2 月の南岸低気圧の降雪による雪崩被害と関連する大雪災害、科学研究費助成事業（課題番号 2590003）研究成果報告書、pp.119-125、2014 年 8 月

- 6) 阿部 修、中村一樹、佐藤研吾、小杉健二：国道 48 号関山峠の雪崩災害、科学研究費助成事業（課題番号 2590003）研究成果報告書、pp.135-138、2014 年 8 月
- 7) 町田 誠、杉本 敦、松井富栄、町田 敬：2014 年 2 月 14 日からの南岸低気圧通過時に発生した雪崩災害事例—群馬県内国道 17 号三国峠—、雪氷研究大会（2014・八戸）講演要旨集、p.78、2014 年 9 月
- 8) 石川政幸、佐藤正平、川口利次：なだれ防止林の立木密度、雪氷、31 巻、pp.14-18、1969 年 1 月
- 9) 山口 悟、西村浩一、納口恭明、佐藤篤司、和泉 薫、村上茂樹、山野井克己、竹内由香里、M. Lehnig：上高地乗鞍スーパードルミで発生した雪崩（2003 年 1 月 5 日）の調査報告、雪氷、66 巻、pp.51-57、2004 年 1 月
- 10) 秋山一弥、花岡正明、武士俊也、池田慎二：樹林地と無林地における斜面積雪と雪崩の発生、日本雪工学会誌、Vol.28 No.1、pp.22-26、2012 年 1 月
- 11) Schneebeli, M., and M. Meyer-Grass: Avalanche starting zones below the timber line structure of forest, Proceedings of International Snow Science Workshop (ISSW), pp.176-181, 1992
- 12) Teich, M., C. Marty, C. Gollut, A. Grêt-Regamey and P. Bebi: Snow and weather conditions associated with avalanche releases in forests: Rare situations with decreasing trends during the last 41 years, Cold Regions Science and Technology, Vol.83-84, pp.77-88, 2012
- 13) Viglietti, D., S. Letey, R. Motta, M. Maggioni and M. Freppaz: Snow avalanche release in forest ecosystems: A case study in the Aosta Valley Region (NW-Italy), Cold Regions Science and Technology, Vol.64, pp.167-173, 2010
- 14) McClung, D. M.: Characteristics of terrain, snow supply and forest cover for avalanche initiation caused by logging, Annals of Glaciology, Vol.32, pp.223-229, 2001
- 15) 松下拓樹：関東甲信大雪時の樹林における雪崩発生条件について、気象研究ノート、第 241 号、pp.426-435、2019 年 12 月
- 16) 和泉 薫、松元高峰、上石 勲、佐々木邦明、高橋 徹、森山英樹：2014 年 2 月の大雪による関東甲信地方の雪氷災害、雪氷、77 巻 4 号、iii、2015 年 7 月
- 17) 遠藤八十一：降雪強度による乾雪表層雪崩の発生予測、雪氷、55 巻、pp.113-120、1993 年 6 月
- 18) Abe, O.: Creep experiments and numerical simulations of very light artificial snowpacks, Annals of Glaciology, Vol.32, pp.39-43, 2001

- 19) 竹内由香里、納口恭明、河島克久、和泉 薫：デジタル式荷重測定器を利用した積雪の硬度測定、雪氷、63 巻、pp.441-449、2001 年 9 月
- 20) 秋山一弥、池田慎二、木村諤、松下拓樹：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 巻、pp.439-457、2016 年 11 月
- 21) 松下拓樹、高橋渉、松澤勝、高橋丞二：広葉樹林における乾雪表層雪崩の発生条件について、日本雪工学会論文集、Vol.34 No.4、pp.55-67、2018 年 10 月
- 22) 石坂雅昭、藤野丈志、本吉弘岐、中井専人、中村一樹、椎名徹、村本健一郎：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 巻、pp.285-302、2015 年 7 月
- 23) 池田慎二：無名沢雪崩事故の原因となった降雪結晶弱層による積雪不安定性の形成過程と持続性、雪氷、77 巻、pp.17-35、2015 年 1 月
- 24) Bair, E. H., R. Simenhois, K. Birkeland, and J. Dozier: A field study on failure of storm snow slab avalanches, *Cold Regions Science and Technology*, Vol.79-80, pp.20-28, 2012
- 25) 中村一樹、佐藤友徳、秋田谷英次：降雪系弱層形成時の気象の特徴、北海道の雪氷、No.32、pp.14-17、2014 年 1 月
- 26) 松下拓樹、石川茂、石田孝司：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、Vol.32、pp.120-125、2016 年 11 月
- 27) 高橋渉、原田裕介、松下拓樹、松澤勝：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、No.770、pp.24-30、2017 年 7 月
- 28) 原田裕介、石田孝司：樹林帯をすり抜けて多発する雪崩発生時の気象の特徴 —上高地乗鞍スノーパーク林道の事例—、雪氷研究大会(2017・十日町)講演要旨集、p.221、2017 年 9 月
- 29) 遠藤八十一：積雪の破壊、基礎雪氷学講座Ⅲ 雪崩と吹雪、古今書院、pp.42-51、2000 年 2 月
- 30) 堀和彦、井良沢道也、阿部修、松嶋秀士：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、Vol.33 No.1、pp.1-11、2017 年 1 月
- 31) Höller, P.: Snow gliding on a south-facing slope covered with larch trees, *Annals of Forest Science*, Vol.71, pp.81-89, 2014
- 32) 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 巻 1 号、pp.73-79、2005 年 2 月
- 33) 遠藤八十一、大関義男、庭野昭二：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、p.126、1989 年 10 月
- 34) Schneebeli, M., and P. Bebi: Snow and avalanche control, *Hydrology, Encyclopedia of Forest Sciences*, Elsevier, pp.397-402, 2004
- 35) Frehner, M., B. Wasser, and R. Schwitter: Avalanches, Sustainability and success monitoring in protection forests, The Federal Office for the Environment (FOEN), Appendix 1, pp.2-7, 2007
- 36) 佐伯正夫、渡辺成雄、大関義男：若齢広葉樹林の雪崩防止効果、雪氷、41 巻、pp.37-47、1979 年 3 月
- 37) 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 号、pp.29-41、1965 年 3 月
- 38) 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 巻 12 号、pp.343-349、1962 年 12 月
- 39) 柳谷新一、都築和夫、小西明：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 号、pp.111-122、1966 年
- 40) 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 号、pp.83-90、2011 年 12 月
- 41) 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 巻、pp.105-110、1982 年 6 月
- 42) 新田隆三：森林の雪崩防止機能、雪氷、53 巻、pp.217-224、1991 年 9 月
- 43) Tremper, B.: Staying alive in avalanche terrain, *Mountaineers Books*, 318p., 2008
- 44) 工藤哲也、石川政幸、大関義男、庭野昭二、渡辺成雄、松岡広雄、山野井克己：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 年 3 月
- 45) 建設省北陸地方建設局北陸技術事務所：昭和 63 年度 なだれ防災対策調査報告書、94p.、1989 年 3 月
- 46) Bebi, P., D. Kulakowski, and C. Rixen: Snow avalanche disturbances in forest ecosystems - State of research and implications for management, *Forest Ecology and Management*, Vol.257, pp.1883-1892, 2009
- 47) McClung, D. M.: Characteristics of terrain, snow supply and forest cover for avalanche initiation caused by logging, *Annals of Glaciology*, Vol.32, pp.223-229, 2001
- 48) 池田慎二、秋山一弥、松下拓樹：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、気象研究ノート、第 241 号、pp.436-442、2019 年 12 月
- 49) Matsushita, H., and K. Ishida: Characteristics of snow avalanche release in forests during a heavy snowfall event,

- Proceedings of International Snow Science Workshop (ISSW), pp.556-560, 2016
- 50) 松下拓樹、高橋渉、松澤勝：短時間多量降雪時の雪崩発生リスクを簡便に把握する手法、寒地土木研究所月報、No.780、pp.19-24、2018年5月
- 51) 松下拓樹、高橋 渉、高橋丞二：雪崩発生条件を満たす降雪事例の頻度解析、寒地土木研究所月報、No.792、pp.2-10、2019年5月
- 52) 松下拓樹、高橋 渉、高橋丞二：気象データを用いた短時間多量降雪時の雪崩発生頻度の推定、寒地土木研究所月報、No.807、pp.2-10、2020年7月
- 53) 松下拓樹、松澤 勝、伊東靖彦、加治屋安彦：斜面積雪が雪崩予防柵面をすり抜ける現象の発生条件、寒地土木研究所月報、No.665、pp.10-17、2008年10月
- 54) Voellmy, A.: Über die Zerstörungskraft von Lawinen, Schweizerische Bauzeitung, Vol.73, pp.159-165, 1955 (On the destructive force of avalanches, translated by R. E. Tate, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Alta Avalanche Study Center Translation, No.2, 64pp, 1964)
- 55) 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年5月
- 56) 池田俊介：詳述水理学、技報堂出版、pp.266-270、1999年1月
- 57) 岡本芳美：開水路の水理学解説、鹿島出版会、pp.129-133、1991年9月
- 58) 関根正人：移動床流れの水理学、共立出版、p.192、2005年2月
- 59) 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巻、pp.170-177、1989年9月
- 60) 新山純一、松田宏、飯倉茂弘、河島克久、藤井俊茂：東北新幹線盛岡・八戸間のなだれ危険度評価とその工学的意義、日本雪工学会誌、Vol.19 No.2、pp.91-101、2003年4月
- 61) 日本建設機械化協会 編：新編防雪工学ハンドブック（改訂版）、527p.、1988年3月
- 62) Schaerer, P. A.: Friction coefficients and speed of flowing avalanches, IAHS-AIHS Publications, No.114, pp.425-432, 1975
- 63) 松川宏：摩擦の物理、岩波書店、p.4、2012年6月
- 64) Platzer, K., P. Bartelt, and C. Jaedicke: Basal shear and normal stresses of dry and wet snow avalanches after a slope deviation, Cold Regions Science and Technology, Vol.49, pp.11-25, 2007
- 65) Gauer, P., K. Kronholm, K. Kristensen, and S. Bakkehøi: Can we learn more from the data underlying the statistical α - β model with respect to the dynamical behavior of avalanches ?, Cold Regions Science and Technology, Vol.62, pp.42-54, 2010
- 66) Gauer, P.: Considerations on scaling behavior in avalanche flow along cycloidal and parabolic tracks, Cold Regions Science and Technology, Vol.151, pp.34-46, 2018
- 67) 清水弘：なだれ、気象研究ノート、第136号、pp.63-123、1979年3月
- 68) Hopfinger, E. J.: Snow avalanche motion and related phenomena, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol.15, pp.47-76, 1983
- 69) McClung, D., and P. Schaerer: The avalanche Handbook (3rd edition), Mountaineers Books, 342p., 2006.
- 70) 秋山一弥、関口辰夫：空中写真判読による雪崩の特徴と発生規模・発生数の関係、雪氷、75巻、pp.3-17、2013年1月
- 71) 秋山一弥、関口辰夫：Google Earthの広域写真判読で得られた雪崩の特徴と発生規模・発生数の関係、日本雪工学会論文集、Vol.34 No.1、pp.1-12、2018年1月
- 72) 松田宏、藤元隆彦、武士俊也、綱木亮介：雪崩到達距離に関する考察、雪氷、56巻3号、pp.265-269、1994年9月
- 73) Lied, K., and S. Bakkehøi: Empirical calculations of snow-avalanche runout distance based on topographic parameters, Journal of Glaciology, Vol.26, pp.165-177, 1980.
- 74) 和泉薫：大規模雪崩の流動性、新潟大学積雪地域災害研究センター研究年報、第7号、pp.187-194、1985年
- 75) 上之和人、松下拓樹、原田裕介、秋山一弥：樹林内を流下する雪崩運動モデルの提案、寒地技術論文・報告集、Vol.35、pp.58-63、2019年11月
- 76) 砂防学会（監修）：雪崩対策、山海堂、328p.、1993年2月
- 77) 日本建設機械化協会、雪センター（編）：2005除雪・防雪ハンドブック（除雪編）、417p.、2004年12月
- 78) 松下拓樹、高橋 渉、高橋丞二：降雪の発生頻度に関する簡易評価手法（2）、寒地技術論文・報告集、Vol.35、pp.73-78、2019年11月
- 79) Rudolf Miklau, F., S. Sauer Moser, and A. I. Mears (eds.): The Technical Avalanche Protection Handbook, Wilhelm Ernst & Sohn, 408p., 2015
- 80) Barbolini, M., and C. J. Keylock: A new method for avalanche hazard mapping using a combination of statistical and deterministic models, Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol.2, pp.239-245, 2002

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：高橋丞二、松下拓樹、原田裕介、大久保幸治、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。

令和元年度は多様な気象環境下での吹雪発生状況や降雪時における視程と気象条件との関係について分析を行った。吹雪視程予測技術の青森県内への適用性について検証し、吹雪視程予測技術の改良案について検討した。また、北海道内を対象とし予測した「吹雪の視界情報」をメールや SNS で発信し提供した。

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⁾を適用している。また、降水の雨雪判別には気温のみ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、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い、吹雪時の視程を推定する際の行う雨雪判別条件について改良を行った。また、現状の地吹雪発生条件の青森県での適用性や改善の必要性などを把握するため地吹雪の発生状況などの気象調査を行った。

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」、

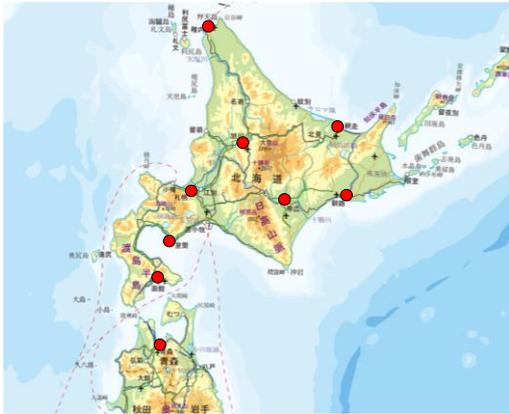


図 1 分析対象箇所
(国土地理院 国土地理院地図に加筆)

「雨」、「みぞれ」を対象とした。

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

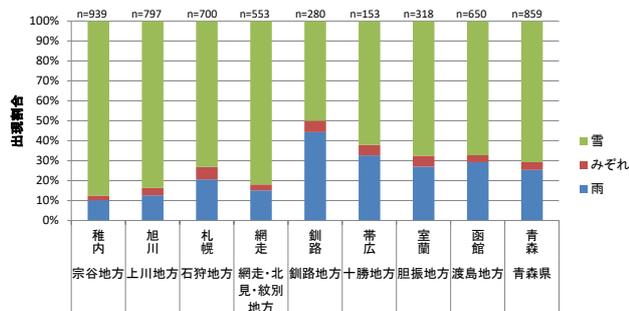


図 2 雪・みぞれ・雨の出現割合

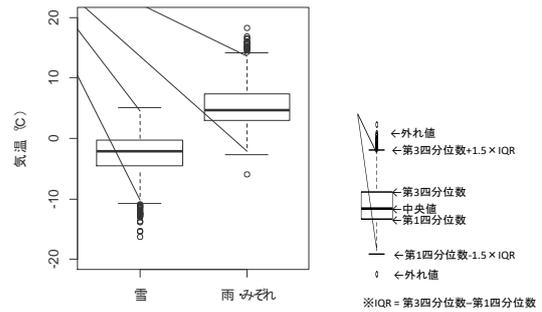


図 3 雨雪と気温との関係

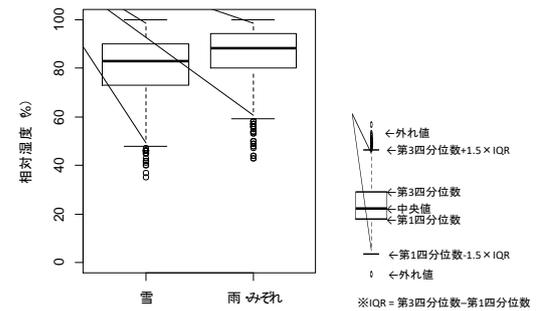


図 4 雨雪と相対湿度との関係

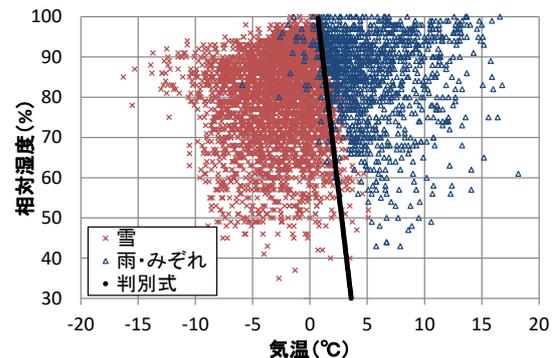


図 5 気温と相対湿度による雨雪判別条件

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。

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。この結果は表 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)

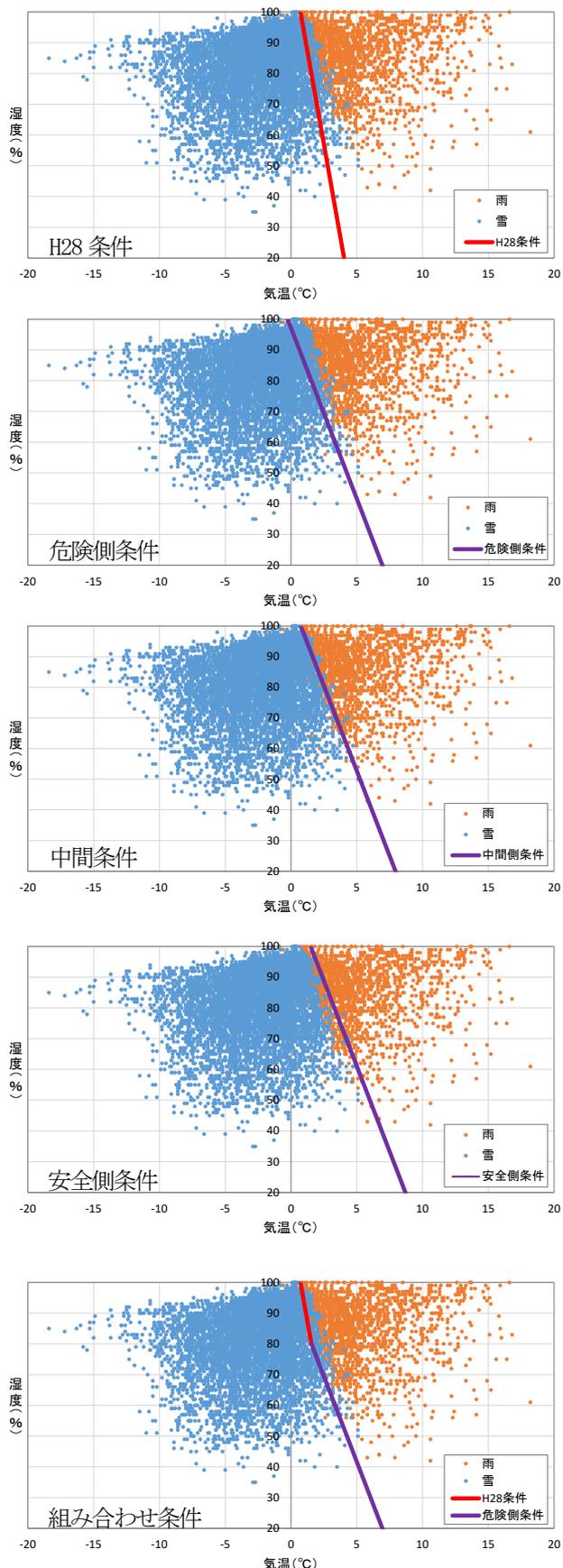


図 6 気温と相対湿度による雨雪判別条件(条件別)

- 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」と気温と相対湿度の関係を示す散佈図とした上で、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5つの判別条件による判別精度について検証を行った。判別精度は、表2のとおり「適中率」、「空振り率」、「見逃し率」を求め確認した。

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

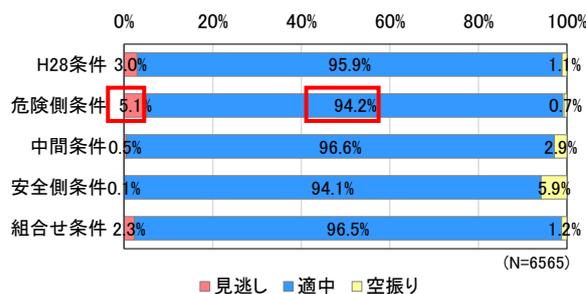


図7 判別条件毎の適中率

表2 判別条件による雨雪の適中率

		観測	
		雪	雨・みぞれ
判別式	雪	n_{11}	n_{12}
	雨・みぞれ	n_{21}	n_{22}

全データ数 = n

- 適中率 = $(n_{21} + n_{22}) / n$
- 空振り率 = $(n_{12}) / n$
- 見逃し = $(n_{21}) / n$

低くなるのがわかった。

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)。

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

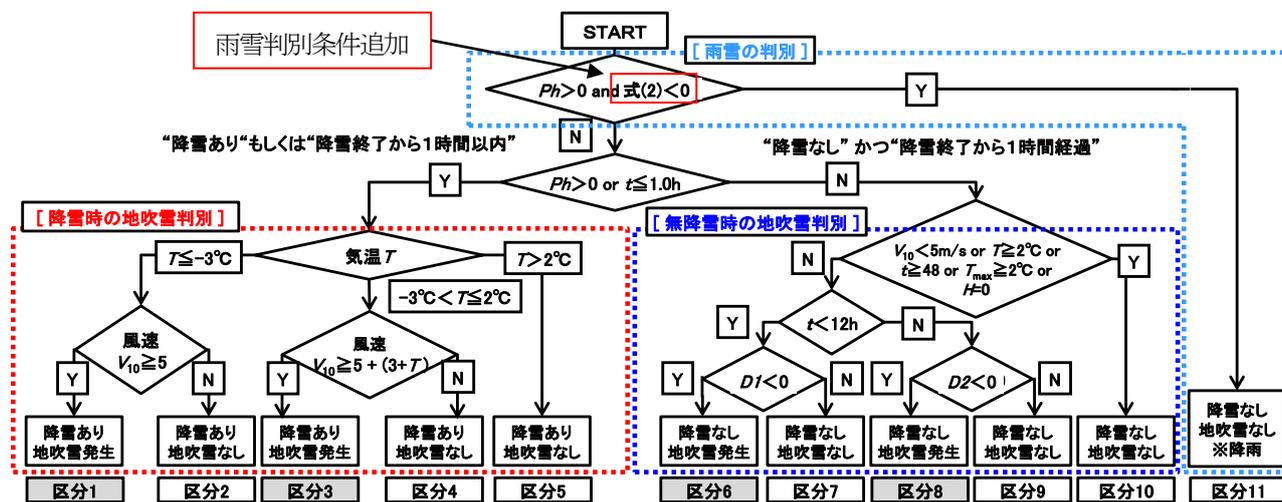
ただし、 T : 気温 (°C)

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」



【凡例】

- Ph : 降水強度 (mm/h)
- t : 降雪(水)終了からの現在までの経過時間(h)
- T : 気温 (°C)
- V_{10} : 高さ10mの風速(m/s)

$$D1 = -0.59 \times V_{10} + 0.2 \times T - 0.08 \times SF + 4.77$$

$$D2 = -1.18 \times V_{10} + 0.16 \times T + 0.09 \times t + 0.03 \times V_{sum} + 4.93$$

- T_{max} : 降水強度 (mm/h)
- H : 積雪深 (cm)
- SF : 降雪終了までの降雪量 (cm)
- V_{sum} : 降雪終了後の毎時風速の4乗積算 $\times 10^3$

図8 雨雪判別条件を改良した地吹雪判別条件 (新アルゴリズム)

2.1.3 雨雪判別条件の改良後の情報提供精度

平成 30 年 3 月 1 日からは、2.1.2 項に示した新アルゴリズム (図 8) を用いて「吹雪の視界情報 (視程の予測情報)」の公開を行った。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、

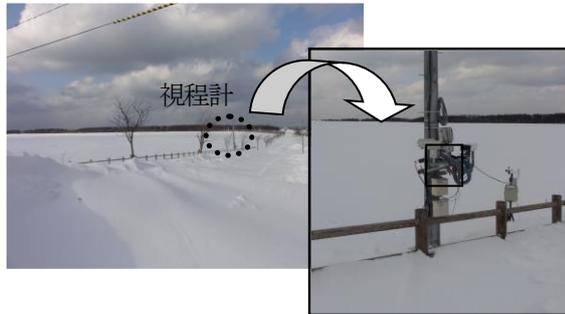


図 9 初山別村での気象観測状況

表 3 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 = $(n_{11} + n_{22} + n_{33} + n_{44} + n_{55}) / n$

日時	日	03月01日																							
時	分	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
推計値	新アルゴリズム	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
推計値	旧アルゴリズム	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
視程計	観測結果	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
日時	日	03月02日																							
推計値	新アルゴリズム	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
推計値	旧アルゴリズム	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
視程計	観測結果	5	5	5	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	2	2	3	2	3	3	3	5	5	5	5
日時	日	03月03日																							
推計値	新アルゴリズム	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
推計値	旧アルゴリズム	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
視程計	観測結果	4	4	5	5	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
日時	日	03月04日																							
推計値	新アルゴリズム	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
推計値	旧アルゴリズム	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
視程計	観測結果	5	3	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

凡例

- 5 視程 1,000m 以上
- 4 視程 500~1,000m 未満
- 3 視程 200~500m 未満
- 2 視程 100~200m 未満
- 1 視程 100m 未満

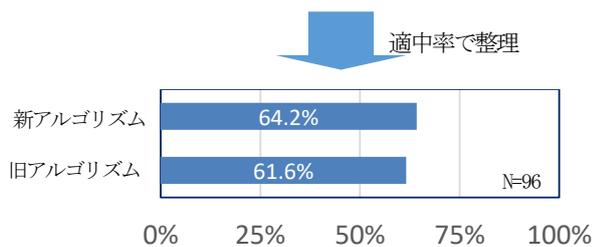


図 10 吹雪視程演算の適中率

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 9) 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 3 に示した方法で求めた。

図 10 に、平成 30 年 3 月 1 日から 3 月 4 日の暴風雪視程の演算値、及び現地の視程の毎時の値を、吹雪の視界情報で提供している 5 ランクで整理した結果を示す。図 10 より、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。

2.1.4 多様な気象条件下における地吹雪発生条件の調査

北海道外での地吹雪発生条件を明らかにするため、青森県青森市及び五所川原市内の風上側が開けた箇所 (図 11) で、地吹雪や視程障害の発生状況について調査を行った。

調査では、表 4 に示した観測項目について平成 28 年 12 月 1 日~平成 29 年 3 月 14 日、平成 29 年 11 月 22 日~平成 30 年 3 月 31 日、平成 30 年 12 月 1 日~平成 31 年 3 月 31 日、令和 1 年 12 月 1 日~令和 2 年 2 月 12 日の期間に観測を行った (図 12)。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ったため、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吹雪の発生頻度が高かった五所川原市を対象に分析を行った。降雪及び地吹雪発生の有無、視程 (設定した目標物に視認有無より判断) について動画データを用い 10 分毎に平均的な



図 11 観測箇所

(国土地理院 国土地理院地図に加筆)

表 4 地吹雪発生状況に関する定点気象観測項目

観測項目	観測機器	青森県	
		青森市	五所川原市
吹雪状況	タイムラプスカメラ BCC100	○※1	○
視程	視程計 MiniBSV	○※2	○※1
	風向風速計	○※2	○
気温	温湿度計 HMP35D	—	○
湿度		—	○
積雪深	積雪深計	—	○※1
日射量	日射量計 MS-402	—	○※1

※1はH29年度より観測開始
 ※2はH30年度より観測開始
 「—」はアメダス等の既存データが利用可能のため未観測

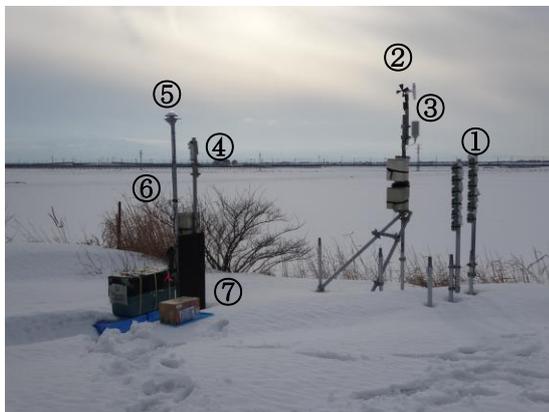


図 12 気象観測機器設置状況（五所川原市）

①タイムラプスカメラ、②風向風速計(地上高2.5m)、
 ③温湿度計、④積雪深計、⑤日射量計、⑥視程計(地上
 高1.2m)、⑦黒板)

状況を判断した。ただし、地吹雪の判別結果に間違っ
 た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取得した平
 成29年11月22日以降の観測データを分析対象とした。

図13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)
 の結果を参考に設定している地吹雪発生条件⁷⁾を併せて
 破線で示した。

図13より、既往の地吹雪発生条件において地吹雪が
 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も多く見られた。また、気温0℃
 より高い場合には地吹雪の発生している事例はあまり見

れず、気温1℃以上ではほとんど地吹雪の発生事例が
 みられない(図13の黒い色の破線囲み部)。これは、青
 森においては、北海道よりも気温が温暖であるため冬期
 に気温0℃以上となる機会が多く、北海道内よりも降雪
 粒子や雪面の雪質などが吹雪の発生しにくい条件となる
 頻度が高いため既往研究による地吹雪発生条件下でも地
 吹雪が発生しない事例が多く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
 てしまう事例が多く発生することが懸念される。

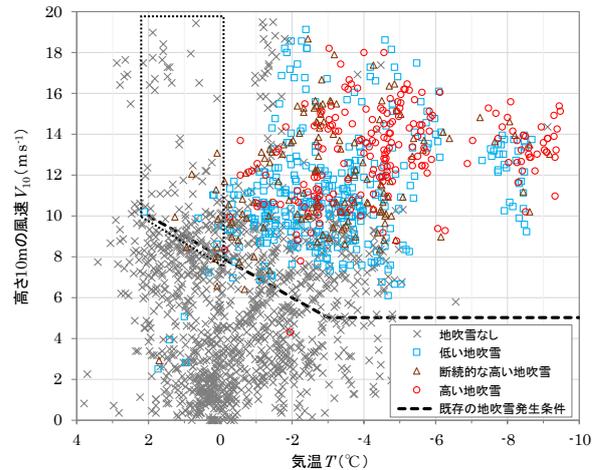


図 13 地吹雪発生有無と気温及び風速の関係
 (五所川原市：H29年11月22日～R2年2月12日)

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⁹⁾において、吹雪時の視程 Vis と飛雪流量 q
 の間には強い相関関係がある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¹²⁾⁴⁾においても、飛雪
 流量($g/m^2/s$)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 q とは単位時間に
 単位断面積を通過する飛雪粒子の質量 ($g/m^2/s$) である。

$$Vis = 10^{-0.8861 \log(q) + 2.648} \dots (3)$$

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とするため、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、平成 29 年度及び平成 30 年度冬期に北海道石狩市、新潟県長岡市の 2 箇所 (図 14) において、降雪時の視程の調査を行った。調査種別と調査期間は、表 5 に示すとおりである。

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水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 6、表 7 に示すとおりである。表 6 に示した雨量計 (DFIR) は、世



図 14 視程調査箇所
(国土地理院 国土地理院地図に加筆)

表 5 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 2018年11月21日 ~ 2019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 2019年1月25日 2019年3月13日 2019年3月16日 2019年3月23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 2018年12月1日 ~ 2019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 2019年1月7日 2019年1月16日 2019年1月18日 2019年2月8日 2019年2月12日 2019年2月13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 6 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	長岡市
		石狩吹雪実験場	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	○	○
気温	気温計	○	○
積雪深	積雪深計	○	○

※「-」は未観測、「△」はH28年度を除き観測

表 7 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)		長岡市 (防災科学研究所)	
	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3※	50m
	視程板5	80m	視程板4※	60m
	-	-	視程板5	85m
100m以上 200m未満	視程板6	100m	建物※	100m
	視程板7	135m	建物※	110m
	視程板8	175m	視程板6	135m
	-	-	樹林帯	150m
	-	-	樹林帯※	200m
200m以上 300m未満	視程板9	250m	-	-
300m以上 500m未満	樹林帯※	350m	-	-
500m以上 1000m未満	-	-	-	-
1000m以上	-	-	-	-

※2017年11月以降に追加

界気象機関 (WMO) が基準器として定めている二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 5 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 15、図 16 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

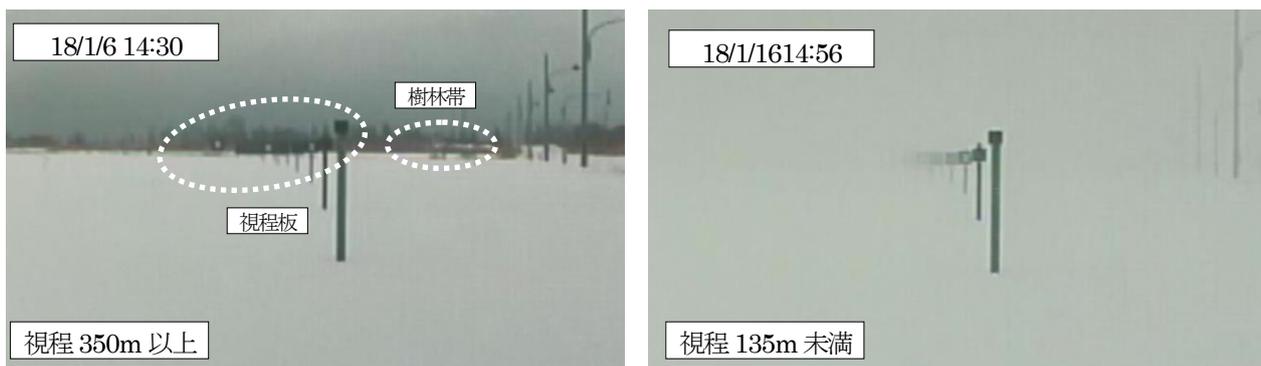


図 15 石狩市での視程観測（撮影画像の例）

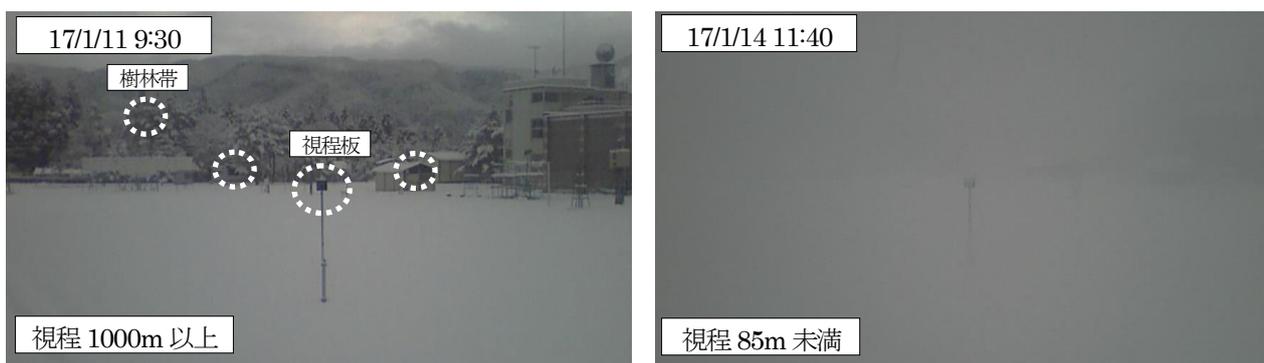


図 16 長岡市での視程観測（目標物と撮影画像の例）

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 17 は降雪強度と視程との関係を示した結果である。降雪による視程障害への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 17 より、降雪強度の増加に伴い視程が低下する傾向がみられ、降雪強度が 10mm/h を超過すると視程は 100m 以下に低下する事例が見られた。ただし、視程が

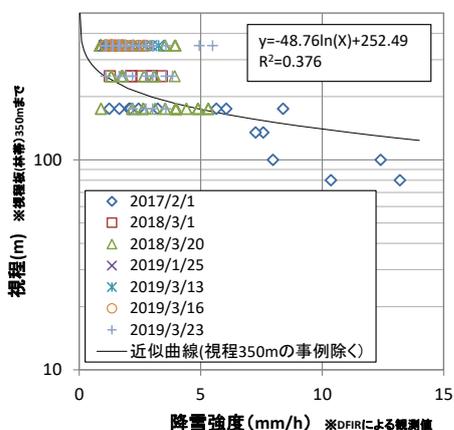


図 17 降雪強度と視程の関係（風速 5m/s 未満）

175m まで低下した際にも降雪強度には 1~8mm/h でバラツキが見られ、降雪強度以外の条件が視程に影響していることが考えられる。

2.2.2 降雪時の視程と飛雪流量との関係

前述の通り、吹雪時における視程 V_{is} と飛雪流量 q との関係には式(3)が提案⁸⁾されており、吹雪時や降雪時の視程を推定する際に活用している。しかし、この関係式は主に吹雪時に得られた実験式であり風の弱い降雪時に適用可能かは未確認である。そこで、風の弱い降雪時の視程と飛雪流量との関係について分析を行った。

分析は、動画映像を撮影していた石狩吹雪実験場における観測結果から強い降雪強度が観測された事例（表 8）を対象に行った。

視程 V_{is} は、抽出事例の動画映像より 1 分毎に前半 30 秒間の映像から主たる（平均的な）状況を読み取りにより判定した。飛雪流量 q は、飛雪空間密度 N と飛雪粒子の移動速度 V の積として式 (4) の通り表すことができる。なお、飛雪空間密度 N とは単位空間に存在する飛雪粒子の質量である (g/cm^3)。ここで降雪時における飛雪空間密度 N は、降雪フラックスと降雪粒子の落下速度から式 (5) として表せる。飛雪粒子の移動速度 V は、風速に一致すると仮定すると水平風速と降雪粒子の落下速度

表 8 強い降雪が観測された分析対象の事例

日付	時刻		
	開始	終了	合計時間
2016年12月29日	9:00	10:00	1:00
2017年1月13日	12:00	15:00	3:00
2017年1月22日	13:40	14:40	1:00
2017年1月24日	15:50	16:40	0:50
2017年2月1日	14:44	15:10	0:26
2017年3月10日	9:00	10:00	1:00
	11:00	12:00	1:00
2017年11月19日	6:30	11:00	4:30
2017年12月5日	9:25	10:00	0:35
2017年12月9日	7:00	9:00	2:00
2017年12月16日	8:35	9:00	0:25
2018年1月4日	14:50	16:00	1:10
	9:00	10:00	1:00
2018年1月6日	10:30	12:00	1:30
	14:00	15:44	1:44
2018年2月11日	7:00	8:00	1:00
2018年2月17日	9:00	10:00	1:00
2018年2月26日	6:00	8:00	2:00
2018年2月28日	10:00	11:00	1:00
	6:20	6:40	0:20
2018年3月20日	7:20	8:20	1:00
	7:00	8:00	1:00
集計時間	-	-	28:30:00

から式 (6) の通り表せる。

$$q = N \times V \quad \dots (4)$$

$$N = P/w_f \quad \dots (5)$$

$$V = \sqrt{(V_{10})^2 + w_f^2} \quad \dots (6)$$

ここで、 P : 降雪フラックス($g\ m^{-2}\ s^{-1}$)、 w_f : 降雪粒子の落下速度(m/s) ($=1.2\ m/s$ とする)、 V_{10} : 高さ 10m の風速(m/s)である。

そこで、高さ 10m の風速 V_{10} と降水強度 Ph (mm/min) の観測値から換算した降雪フラックス P を基に、式(4)、(5)、(6)から飛雪流量 q を算出した。

図 18 は、 V_{10} が 5m/s 未満の降雪時における視程と飛雪流量との関係を示したグラフである。なお、視程板より評価された視程毎の飛雪流量については中央値、最大値、最小値、75%タイル値、25%タイル値を示した。また、既往研究で得られている式(3)の関係式を合わせて赤色の実線で示した。

図 18 より、視程板より評価した視程と飛雪流量の中央値との関係は概ね式(3)と一致しており、強風下でない降雪に起因した視程低下についても式(3)の関係が適用可能であることが確認できた。ただし、同じ視程であっても飛雪流量にはバラツキが見られた。これは、降雪強度が同じであっても降雪粒子の大きさや落下速度といった降雪形態の違いが影響していることが考えられる。そこで、降雪形態に影響を及ぼしていると考えられる気温

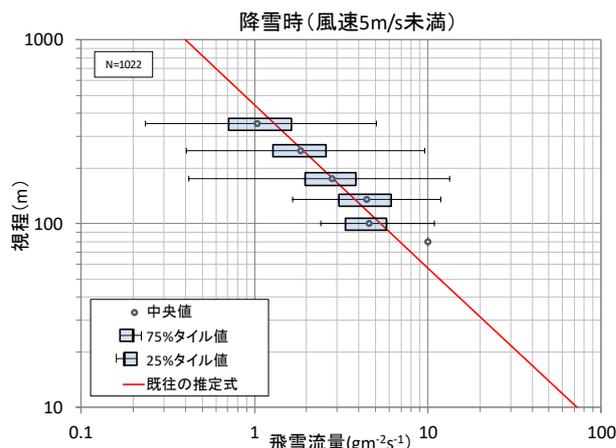


図 18 飛雪流量と視程の関係 (風速 5m/s 未満)

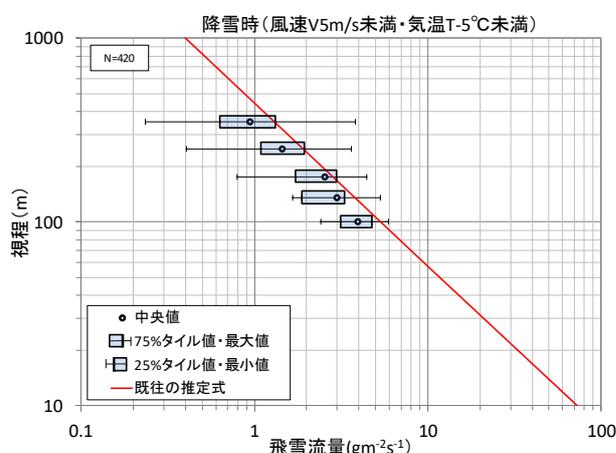


図 19 飛雪流量と視程の関係 (風速 5m/s 未満)

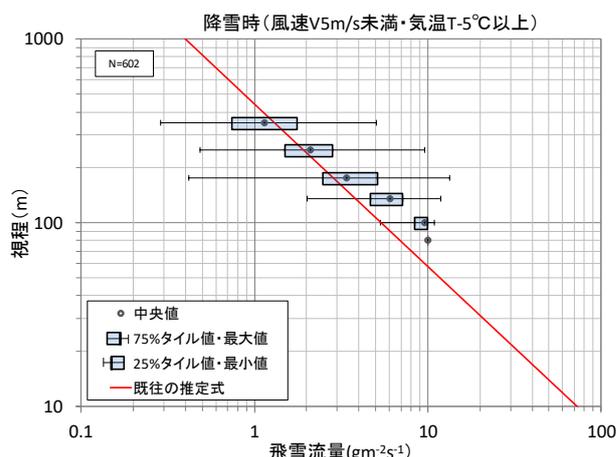


図 20 飛雪流量と視程の関係 (風速 5m/s 未満)

の違いに着目し分析を行った。

図 19、図 20 は、 V_{10} が 5m/s 未満の気温 T が $-5\ ^\circ C$ 未満と $-5\ ^\circ C$ より高い場合とに区分し、それぞれの降雪時の視程と飛雪流量の関係を整理した結果である。図 19

より、気温 -5°C 未満の場合には視程と25%タイル値から75%タイル値までの飛雪流量との関係に着目すると、既往の関係式よりも飛雪流量に対応する視程が小さい傾向が見られた。一方、図20より気温 -5°C より高い場合には視程が概ね200m未満の場合には既往の関係式よりも視程が大きい傾向が見られた。

このように、降雪時の飛雪流量と視程との関係にはバラツキが見られ、同じ飛雪流量であっても気温が低いほど視程が小さくなる傾向を確認した。

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 気象条件を用いた吹雪視程予測手法

これまでに開発した気象条件を用いた吹雪時における視程予測技術⁹⁾について説明する。吹雪時の視程予測技術では図21に示す流れで視程の推定を行っている。

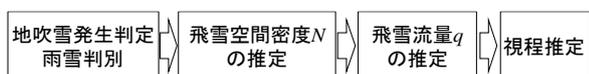


図21 吹雪時の視程推定手法のフロー

ここで前述の通り、吹雪時の視程 V_{is} と飛雪流量 q の間には強い相関関係があり、式(3)が得られている。なお、浮遊層の飛雪流量は飛雪空間密度 N と風速 V の積($q=N \cdot V$)で表せる。そこで、本予測手法では松澤⁹⁾による式(1)を用いて任意の高さ z における $N(z)$ を求め、風速 V を乗じることで q を算出している。なお、式(1)の第1項は降雪による飛雪空間密度、第2項は地吹雪による飛雪空間密度に該当する項である。次に武知⁸⁾による式(4)を用いて視程 V_{is} に換算している。

$$N(z) = \frac{P}{w_f} + \left(N_t - \frac{P}{w_f} \right) \left(\frac{z}{z_t} \right)^{-\frac{w_b}{ku_*}} \quad \dots (7)$$

ここで、 P : 降雪フラックス($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、 N_t : 基準高さ z_t の飛雪空間密度(g m^{-3})、 w_f : 降雪粒子の落下速度(m s^{-1})、 w_b : 浮遊雪粒子の落下速度(m s^{-1})、 k : カルマン定数($=0.4$)、 u_* : 摩擦速度(m s^{-1})である。なお本推定手法では、既往研究⁹⁾を参考とし式(3)の変数には以下の値を与えている。

$w_f = 1.2 (\text{m s}^{-1})$ 、 $w_b = 0.21 (\text{m s}^{-1})$ 、 $z_t = 0.15 (\text{m})$ 、 $u_* = 0.036 V_{10} (\text{m s}^{-1})$

$Ph \geq 0.4 \text{ mm h}^{-1}$ の場合

$$N_t = 0.116 \exp(0.309 V_{10}) (\text{g m}^{-3}) \quad \dots (8)$$

$Ph < 0.4 \text{ mm h}^{-1}$ の場合

$$N_t = 0.021 \exp(0.401 V_{10}) (\text{g m}^{-3}) \quad \dots (9)$$

ここで、 V_{10} : 高さ10mの風速(m s^{-1})、 Ph : 降雪強度(mm h^{-1})である。なお、 Ph は降雪を降水に換算した値とする。またドライバーの目線高さを考慮し、任意高さ z は1.2mを基本としている。ただし、雪面から目線までの高さは積雪量により変化するため、 z は積雪深を考慮した変数としている。

前述の式(5)により $N(z)$ を推定する手法は、雪面に飛び出しやすい飛雪粒子が十分に存在し、吹雪が十分発達した平衡状態を想定したものである。このため、地吹雪が発生する状況であるかの判別や、雨ではなく雪が降っているかの判別を行った上で視程を推定することが重要となる。そこで、本推定手法では地吹雪発生と雨雪の判別を図8に示した判別条件で行うこととしている。

2.3.2 吹雪視程予測手法の多様な地域への適用性検証

上述の吹雪視程予測手法の推定精度を視程の推定値と真値とを比較することによって検証し、青森県内への適用性や予測手法の課題について分析した。なお、視程の真値は現地での実測結果を基に判断した。

(1) 検証方法

検証箇所は、北海道内4箇所(石狩市、初山別村、猿払村、弟子屈町)及び青森県内2箇所(青森市、五所川原市)とした(図22)。検証期間は北海道内が平成28年度、平成29年度、平成30年度の3冬期(12月~3月)、青森県内が平成29年度、平成30年度の2冬期(12月~3月)とした。検証箇所では視程推定に必要となる気象データ(視程、気温、相対湿度、風速、積雪深)を観測した。さらに、視程の真値を把握するため、検証箇所では視程の観測又は動画映像の撮影を行った。なお、観測箇所は風上に200m以上の吹走距離を有し地吹雪が



図22 検証箇所

表 9 視程推定に用いた気象データ

気象要素	実測・推定の区分	統計方法
視程	Vis	実測値 ①北海道内 前1時間の中央値(視程計) (計測インターバル1秒) ②青森県内 判読結果の中央値(動画映像) (10分毎に視認距離を判読)
気温	T	実測値 前10分値
相対湿度	φ	実測値 前10分値 (猿払村はMSMデータ利用)
風速	V ₁₀	実測値 前1時間の平均値 (高さは対数則により10mへ補正)
積雪深	H	実測値 前10分値
降雪フラックス	P	推定値 毎時の解析雨量データの単位を換算し利用
降雪強度	Ph	推定値 毎時の解析雨量データ利用
降雪終了後の最大気温	T _{max}	実測値 降雪終了時からの気温Tの最大値*
風速4乗の積算値	U _{sum}	実測値 降雪終了時からの 毎時風速V ₁₀ の4乗値の積算値*
降雪深の積算値	SF	推定値 降雪終了時からの降雪深の積算値* ただし、降雪深は解析雨量データより換算

*降雪終了は解析雨量データにより判定

表 10 視程 5 ランクでの精度検証方法

		推定した吹雪時の視程					計	
		1	2	3	4	5		
		100m未満	100m以上 200m未満	200m以上 500m未満	500m以上 1000m未満	1000m以上		
現地での実測による視程	1	100m未満	n11	n12	n13	n14	n15	
	2	100m以上 200m未満	n21	n22	n23	n24	n25	
	3	200m以上 500m未満	n31	n32	n33	n34	n35	
	4	500m以上 1000m未満	n41	n42	n43	n44	n45	
	5	1000m以上	n51	n52	n53	n54	n55	
	計						SUM(n)	

- 2ランク以上見逃し 2ランク以上見逃し率=(n13+n14+n15+n24+n25+n35)/n
- 1ランク見逃し 1ランク見逃し率=(n12+n23+n34+n45)/n
- 完全適中 完全適中率=(n11+n22+n33+n44+n55)/n
- 1ランク空振り 1ランク空振り率=(n21+n32+n43+n54)/n
- 2ランク以上空振り 2ランク以上空振り率=(n31+n41+n42+n51+n52+n53)/n
- 広義の適中 広義の適中率=1ランク見逃し率+完全適中率+1ランク空振り率

発生しやすい地点とした。

検証する視程の推定は、検証箇所における気象データの実測値(ただし、一部のデータは検証箇所近傍のアメダス、道路テレメータの観測データを活用)より必要な入力データの特別値(表 9)を求め、視程の特別値を推定した。ただし、降雪強度に関連する入力データは解析雨量データを活用し求めた(表 9)。なお、視程の推定高さ z は視程計の設置高さ z と積雪深を考慮し、視程計の

雪面からの高さに設定した。

視程の真値は、後方散乱型視程計の実測値から求めた1時間毎の中央値とした。ただし、青森県内2箇所では、別途撮影した動画映像内の背景(目標物)が視認できる距離から視程を10分毎に判定し、視程の真値を1時間毎の中央値から判断した。

視程予測手法の推定精度は、視程の推定値と実測値を「吹雪の視界情報(2.3.3項参照)」で用いている「視程100m未満」、「視程100m以上200m未満」、「視程200m以上500m未満」、「視程500m以上1000m未満」、「視程1000m以上」の5つに区分し、この5ランクでの適中率を分析することにより検証した。なお適中率の分析では、表10の分割表により「完全適中」、「2ランク以上見逃し」、「1ランク見逃し」、「2ランク以上空振り」、「1ランク空振り」及び「広義の適中」を定義し、それぞれの割合について整理した。

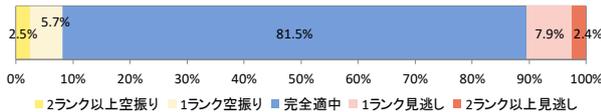
(2) 適中率

図 23 は、北海道内4箇所と青森県内2箇所での推定視程の適中率を整理した結果である。図 23 より、適中率は北海道内が81.5%、青森県内が77.3%であり、青森県内での適中率は北海道内より4.2%低いものの北海道内と同程度であった。ただし、2ランク以上の空振りが青森県内は6.8%であり北海道内の2.5%に比べ若干高い傾向が見られる。

次に、大きな見逃し・空振りの改善に向け、2ランク以上の見逃しや空振りに着目し、それらが地吹雪判別条件(図 8)のどの判定区分で発生頻度が高いかを分析した。図 24 は各検証箇所における2ランク以上の見逃し、2ランク以上の空振り、広義の適中(1ランクの見逃し及び空振りを含めた割合)を地吹雪判定区分毎に整理した結果である。

図 24 より、2ランク以上の空振りとなる割合は降雪時の現況気温 T が $-3 < T \leq 2^{\circ}\text{C}$ の条件下で地吹雪が発生する

視程5ランクの推定精度(適中率)
【北海道内(石狩・初山別・猿払・弟子屈)】



視程5ランクの推定精度(適中率)
【青森県内(青森市・五所川原市)】



観測ランク	演算ランク					合計
	1 100m未満	2 100~200m	3 200~500m	4 500~1000m	5 1000m以上	
1 100m未満	12	15	33	15	33	108
2 100~200m	27	35	103	98	100	363
3 200~500m	86	96	351	402	493	1428
4 500~1000m	63	69	313	585	2055	3085
5 1000m以上	93	77	426	1398	25474	27468
合計	281	292	1226	2498	28155	32452

観測ランク	演算ランク					合計
	1 100m未満	2 100~200m	3 200~500m	4 500~1000m	5 1000m以上	
1 100m未満	0	0	1	0	0	1
2 100~200m	33	14	9	3	3	62
3 200~500m	17	7	32	56	32	144
4 500~1000m	17	25	67	78	64	251
5 1000m以上	34	21	161	362	2978	3556
合計	101	67	270	499	3077	4014

図 23 視程 5 ランクでの適中率

地吹雪判定区分	2ランク以上空振り						広義の適中(※1ランクずつまで適中)						2ランク以上見逃し					
	五所川原市	青森市	石狩市	弟子屈町	初山別村	猿払村	五所川原市	青森市	石狩市	弟子屈町	初山別村	猿払村	五所川原市	青森市	石狩市	弟子屈町	初山別村	猿払村
1	2.5%	0.0%	1.0%	0.3%	0.8%	0.7%	4.2%	5.3%	13.9%	2.6%	7.5%	1.8%	0.0%	0.3%	0.9%	0.0%	0.4%	0.1%
2	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.5%	2.5%	8.2%	2.1%	4.0%	2.0%	0.1%	0.5%	1.9%	0.1%	1.4%	0.3%
3	7.6%	0.3%	1.5%	0.5%	0.7%	1.2%	7.3%	2.6%	4.8%	1.6%	1.7%	0.8%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
4	0.8%	0.6%	0.2%	0.0%	0.2%	0.2%	11.6%	18.1%	9.9%	3.0%	6.8%	2.9%	0.2%	0.6%	0.5%	0.0%	0.4%	0.1%
5	0.8%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	3.6%	4.8%	0.8%	0.1%	0.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
6	0.8%	0.0%	0.1%	0.5%	0.3%	1.1%	3.0%	1.3%	3.0%	5.6%	5.6%	5.1%	0.0%	0.0%	0.2%	0.0%	0.2%	0.3%
7	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.6%	2.6%	2.6%	1.7%	5.3%	2.5%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
8	0.0%	0.0%	0.0%	0.3%	0.0%	0.5%	0.9%	0.6%	0.5%	4.3%	2.7%	4.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%
9	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.5%	0.5%	0.1%	4.9%	1.4%	4.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%
10	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	44.8%	51.1%	48.2%	70.8%	57.9%	71.1%	0.0%	0.0%	0.5%	0.6%	0.5%	0.5%
11	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	3.1%	3.0%	1.2%	0.9%	1.7%	0.6%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%
合計	12.5%	1.1%	2.8%	1.6%	2.0%	3.7%	87.1%	97.4%	93.2%	97.6%	95.1%	94.8%	0.4%	1.5%	4.0%	0.8%	2.9%	1.5%

図 24 地吹雪判定区分別の2ランク以上の空振り・見逃しの発生頻度(検証箇所別)

と判定された区分3で高い傾向が見られた。特に五所川原市ではその割合が7.6%と高い。一方、2ランク以上の見逃しは降雪時に地吹雪が発生しないと判定された区分2(降雪時の気温 $T \leq -3^{\circ}\text{C}$ かつ風速 $V_{10} < 5\text{m/s}$)で割合が比較的高い傾向が見られた。ただし、その割合は最も高い箇所でも1.9%であった。

このような結果を踏まえると、現状の吹雪視程予測手法は、気温 0°C 付近で強風となる条件下において実際の視程よりかなり低い値を推定してしまう頻度が高いことが懸念される。

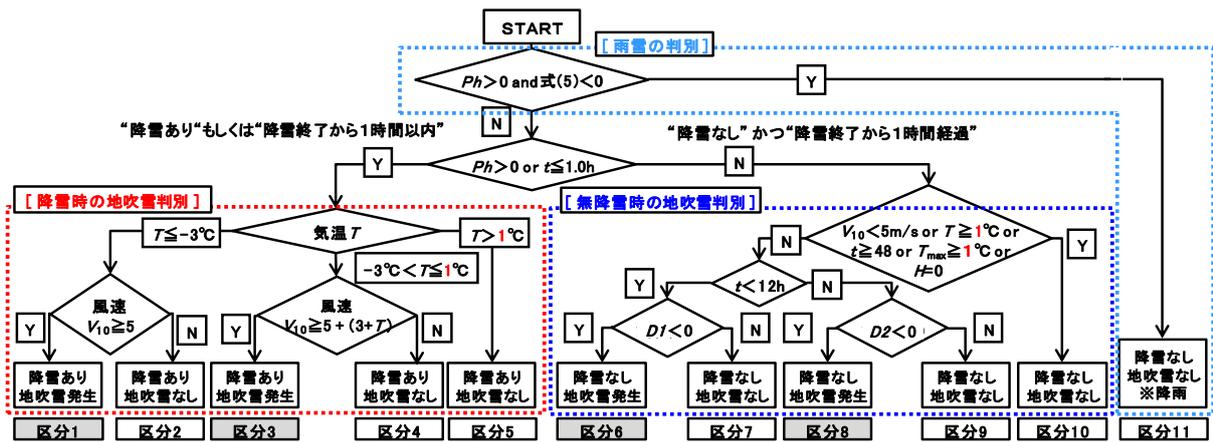
2.3.3 吹雪視程予測手法の改良案の検討

(1) 地吹雪発生条件の改良

前述の通り地吹雪判別条件の区分3で推定視程の2ランク以上の空振りが五所川原で多かった原因には、地吹雪判別条件で地吹雪判定を行った段階において空振りが

発生していたことが要因として考えられる。一方、2.1.4項で分析した五所川原市での降雪時の地吹雪発生状況の分析結果では、図13より気温が 0°C より高い範囲では風速に関係なく地吹雪の発生事例がほとんど見られされていない。

これらの事を踏まえると、現状の地吹雪判別条件で地吹雪が発生すると判断している気温の上限値 2°C をより低温に変更することが必要と考えられる。ただし、図13より気温 0°C 付近においては地吹雪が発生する事例も散見されている。このことから、気温の上限値を 0°C まで低くしてしまうと地吹雪の発生を見逃してしまう恐れもある。そこで、地吹雪判定に用いる気温の上限値は 1°C に変更するが適切と考え、地吹雪判別条件の改良案を図24に示した通り検討した。



【凡例】

Ph: 降水強度 (mm/h)
 t: 降雪(水)終了からの現在までの経過時間(h)
 T: 気温(°C)
 V₁₀: 高さ10mの風速(m/s)

$$D1 = -0.59 \times V_{10} + 0.2 \times T - 0.08 \times SF + 4.77$$

$$D2 = -1.18 \times V_{10} + 0.16 \times T + 0.09 \times t + 0.03 \times V_{\text{sum}} + 4.93$$

T_{max}: 降水強度 (mm/h)
 H: 積雪深 (cm)
 SF: 降雪終了までの降雪量 (cm)
 V_{sum}: 降雪終了後の毎時風速の4乗積算×10³

図 25 地吹雪判別条件(気温条件の改良案) ※改良箇所: 赤字

(2) 基準高さの飛雪空間密度の推定式の改良

2.3.1 項で示した吹雪視程推定手法で用いている基準高さ $Z_t (=0.15m)$ の飛雪空間密度 $M_t (=N_{0.15})$ は、吹雪時に実測された飛雪流量データを基に松澤¹⁾が提案した経験式(式(8)、(9))により推定している。ただし、この飛雪流量データは気温 $-6.0\sim-2.5^{\circ}C$ の比較的低温下で調査された3つの観測事例で取得されたものである。

このため、気温条件によっては既往の経験式では $N_{0.15}$ を適切に推定ができていない可能性あると考えられる。

そこで、吹雪時に実施した吹雪量観測の結果から基準高さ(0.15m)の飛雪空間密度 $N_{0.15}$ を求め式(8)、(9)の妥当性について検証した。

著者らは、観測箇所の風上側に200m以上の吹走距離を有する地吹雪の発達しやすい箇所(北海道石狩市(石狩吹雪実験場)及び弟子屈町)でネット式吹雪計(箱型及び円筒型)を用いて高さ2mまでの吹雪量 Q の観測を吹雪時に実施した(表11)。なお、吹雪量 Q とは単位幅を単位時間に通過する飛雪粒子の質量である。

本分析では、吹雪量観測で計測した高さ0.1mと0.3mでの飛雪流量を用いた。なお、計測値の捕捉率(箱型0.75、円筒型0.94)により補正した。また、観測時には併せて降雪の有無を記録し、気温 T と高度1.0m又は1.3mでの風速 V_{10} を計測した。

表 11 吹雪量観測の実施概要

観測年月日	開始時刻	終了時刻	観測回数	観測箇所	観測年月日	開始時刻	終了時刻	観測回数	観測箇所
2015/1/8	10:27	12:16	5	石狩市	2015/01/31	12:45	15:56	10	弟子屈町
2015/03/02	13:19	17:03	5	石狩市	2015/02/27	15:08	17:18	9	弟子屈町
2016/01/21	10:52	15:15	6	石狩市	2015/02/28	08:59	09:43	2	弟子屈町
2016/01/28	10:05	15:03	11	石狩市	2016/01/19	09:37	14:26	16	弟子屈町
2016/02/10	10:21	13:46	8	石狩市	2016/01/21	10:10	10:53	4	弟子屈町
2017/01/11	14:00	16:07	6	石狩市	2016/02/21	07:26	10:16	13	弟子屈町
2017/01/28	11:10	15:10	12	石狩市				小計	54
2017/02/17	21:50	00:00	6	石狩市				合計	168
2017/02/18	00:10	00:40	2	石狩市					
2017/02/01	16:20	17:20	4	石狩市					
2017/02/02	07:47	10:51	9	石狩市					
2017/12/26	10:50	14:20	6	石狩市					
2018/01/25	08:50	15:29	16	石狩市					
2018/03/02	10:50	16:04	18	石狩市					

※観測時間/回は5分又は10分間
小計 114

浮遊層の飛雪流量 q は飛雪空間密度 N と風速 V の積($q=N \cdot V$)で表せる。このため、基準高さ(0.15m)の飛雪流量 $q_{0.15}$ と風速 $V_{0.15}$ から基準高さ(0.15m)の飛雪空間密度 $N_{0.15}$ を求めた。なお、 $q_{0.15}$ は高さ0.1mと0.3mで計測された飛雪流量から内挿し求めた。また、 $V_{0.15}$ は高さ10mの風速 V_{10} から対数則により求めた。なお、雪面粗度は $1.5 \times 10^{-4}m$ とした。

図26は、降雪を伴った場合における基準高さ(0.15m)の飛雪空間密度 $N_{0.15}$ と高さ10mの風速 V_{10} との関係を気温 T が $-3^{\circ}C$ 以下と $-3^{\circ}C$ より高い場合に分け整理した結

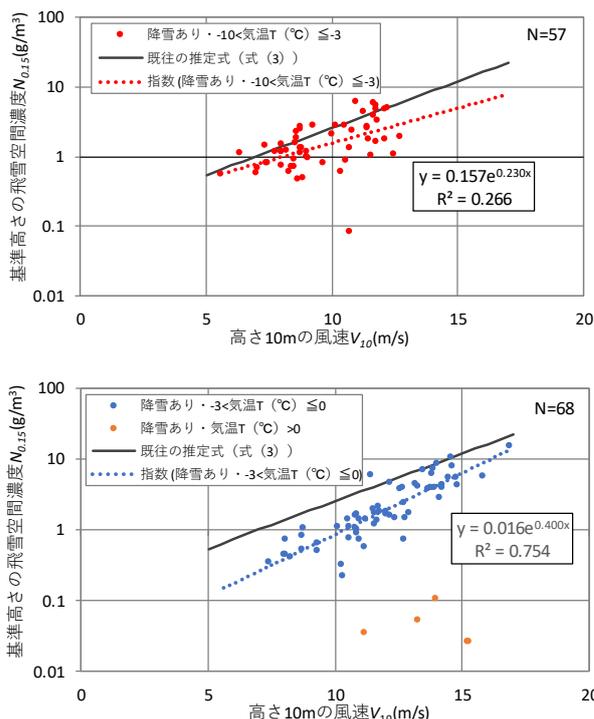


図 26 基準高さの飛雪空間密度と高さ10mの風速(降雪あり)

果である。また、図には併せて既往の経験式(式(8))を示した。

図26より、気温 $-3^{\circ}C$ 以下では $N_{0.15}$ の観測結果が既往の式(8)と概ね一致する傾向が見られた(式(10))。一方、気温 T が $-3^{\circ}C$ より高い場合には $N_{0.15}$ の観測結果が既往の経験式よりも小さい傾向が見られ、 V_{10} が小さい場合に顕著であり、式(11)の関係式が得られた。

$$N_{0.15} = 0.157 \exp(0.230 V_{10}) \quad \dots(10)$$

$$N_{0.15} = 0.016 \exp(0.400 V_{10}) \quad \dots(11)$$

次に、図27には降雪が見られなかった場合における基準高さの飛雪空間密度 $N_{0.15}$ と風速 V_{10} の関係を整理した。また、図には併せて既往の経験式(式(9))を示した。なお、無降雪時の観測事例は少なく観測時の風速 V_{10} が気温 T によって偏りがあったため、 T による場合分けを行わず近似式を求めた。その結果、 V_{10} が大きいほど既往の式(9)よりも $N_{0.15}$ は低い傾向が見られ、式(12)の関係が得られた。

$$N_{0.15} = 0.053 \exp(0.242 V_{10}) \quad \dots(12)$$

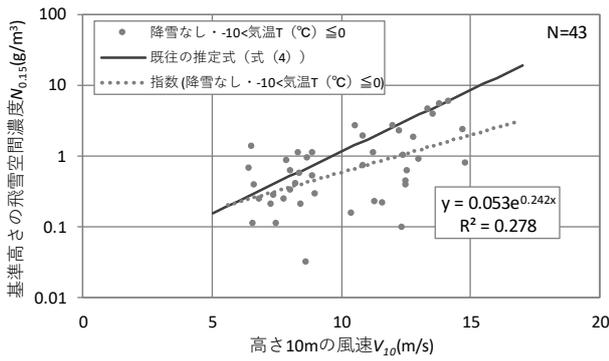


図 27 基準高さの飛雪空間密度と高さ 10m の風速 (降雪なし)

これらの結果から、基準高 (0.15m) の飛雪空間密度 $M_{0.15}$ の推定には、降雪時の気温 T が -3°C 未満では式 (8)、気温 T が -3°C より高い場合には式 (11) を用い、降雪を伴わない場合には式 (12) を用いることが適切と考えられる。

2.3.4 吹雪視程予測手法の改良案の改良効果検証

(1) 改良効果の検証方法

2.3.1 項で詳述した視程予測手法について、以下の点を改良し、推定精度の改善効果について検証した。なお、検証方法は 2.3.2 項と同様の方法により北海道内と青森県内での適中率などを整理することにより行った。

【地吹雪判別条件の改良】

地吹雪判別条件の気温条件を 2.3.3 項(1)で検討した結果を基に、図 25 に示した通り変更することとした。

【基準高さの飛雪空間密度 M の推定式の改良】

2.3.3 項(2)で検討した結果を基に、2. で説明した視程推定手法の式(7)に用いる基準高 (0.15m) の飛雪空間密度 $M_{0.15}$ の推定式を、以下の通り変更することとした。

降雪あり ($Ph \geq 0.4 \text{ mm h}^{-1}$)

$T < -3^{\circ}\text{C}$ の場合式 (8) を適用

$-3^{\circ}\text{C} < T < 1^{\circ}\text{C}$ の場合式 (10) を適用

降雪なし ($Ph < 0.4 \text{ mm h}^{-1}$)

.....式 (11) を適用

なお、 Ph は降雪強度 (mm h^{-1})、 T は現況気温 ($^{\circ}\text{C}$) である。

(2) 改良効果の検証結果

図 28 は、北海道内 4 箇所と青森県内 2 箇所での改良した視程推定手法での推定視程の適中率を整理した結果である。図 23 及び図 28 より、適中率は北海道内で 81.5% から 82.2%、青森県内が 77.3% から 78.0% に向上し、青森県内では 2 ランク以上の見逃しが 6.8% から 5.0

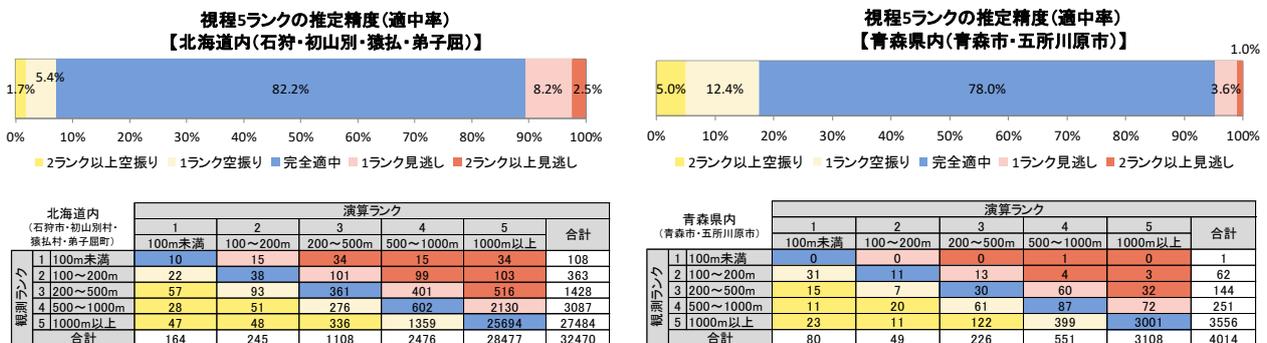


図 28 視程 5 ランクでの適中率

地点毎の全数に対する割合	地吹雪判定区分	2ランク以上空振り						広義の適中(※1ランクずれまで適中)						2ランク以上見逃し											
		五所川原市		青森市		石狩市		弟子屈町		初山別村		猿払村		五所川原市		青森市		石狩市		弟子屈町		初山別村		猿払村	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	1	2.4%	0.0%	1.0%	0.2%	0.7%	0.6%	4.4%	5.3%	13.8%	2.6%	7.5%	1.9%	0.0%	0.3%	1.0%	0.0%	0.5%	0.1%	0.0%	0.0%	0.5%	0.1%		
2	2	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.5%	2.5%	8.2%	2.1%	4.0%	2.0%	0.1%	0.5%	1.9%	0.1%	1.4%	0.0%	0.0%	0.0%	1.4%	0.3%		
3	3	4.3%	0.2%	1.1%	0.3%	0.4%	1.0%	9.7%	2.6%	5.2%	1.7%	2.0%	0.9%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%		
4	4	0.5%	0.4%	0.1%	0.0%	0.2%	0.2%	8.0%	14.8%	8.5%	2.8%	6.1%	2.7%	0.2%	0.6%	0.5%	0.0%	0.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.4%	0.1%		
5	5	1.5%	0.2%	0.1%	0.0%	0.1%	0.0%	7.6%	8.3%	2.2%	0.4%	1.2%	0.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%		
6	6	0.3%	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.5%	2.6%	1.0%	2.9%	6.0%	5.7%	0.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.3%	0.4%		
7	7	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.7%	2.2%	2.1%	1.5%	5.2%	2.4%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%		
8	8	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.2%	0.5%	0.4%	0.3%	4.3%	2.2%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%		
9	9	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.3%	0.1%	4.8%	1.1%	3.6%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%		
10	10	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	47.4%	52.2%	49.1%	71.4%	58.8%	71.8%	0.0%	0.0%	0.5%	0.6%	0.5%	0.5%	0.6%	0.5%	0.5%	0.5%		
11	11	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	8.1%	8.0%	1.2%	0.9%	1.6%	0.6%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%		
合計		9.0%	0.9%	2.3%	0.7%	1.5%	2.5%	90.6%	97.6%	93.8%	98.5%	95.4%	95.9%	0.4%	1.5%	4.1%	0.8%	3.1%	1.6%						

図 29 地吹雪判定区分別の 2 ランク以上の空振り・見逃しの発生頻度 (検証箇所別)

%に減少した。

さらに、改良後の推定視程の各検証箇所における2ランク以上の見逃し、2ランク以上の空振り、広義の適中の割合を地吹雪判定区分(図25)毎に整理した結果を図29に示した。図29より、2ランク以上の空振り割合が高かった区分3でその割合がほとんどの検証箇所でも改良前 비해低減していることがわかる。特に五所川原市では、空振りの割合が7.6%から4.3%に低減しており、他の検証箇所よりも大きな改善が見られた。また、改良により見逃しが増加することも懸念されたが、見逃しの割合が増加するような変化はほとんど見られなかった。

2.3.5 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30)。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31)。

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¹⁰⁾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)」

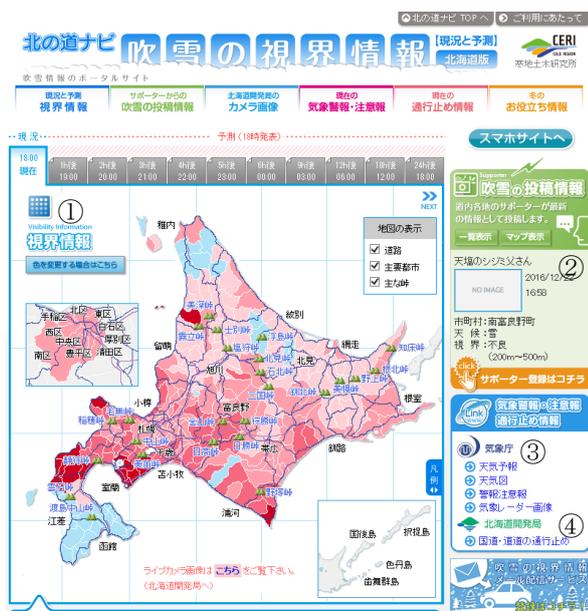


図30 PC版「吹雪の視界情報」
URL : <http://northern-road.jp/navi/touge/fubuki.htm>
(平成28年12月22日18時発表)

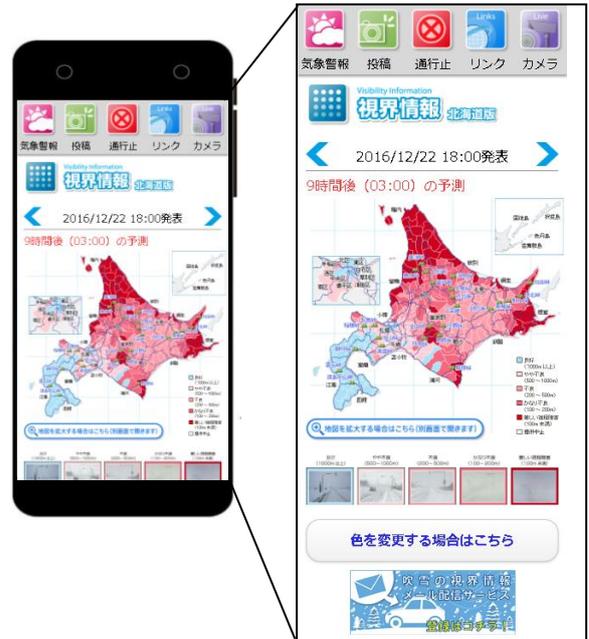


図31 スマートフォン版「吹雪の視界情報」
URL : <http://northern-road.jp/navi/touge/sp/fubuki.htm>
(平成28年12月22日18時発表)

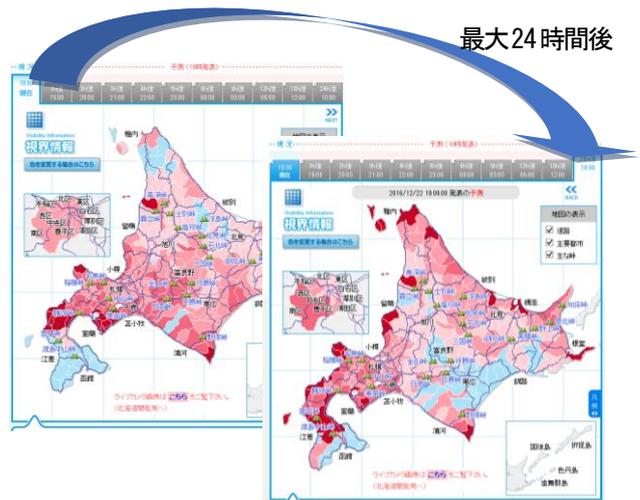


図32 吹雪の視界情報のエリアと予測時間
(平成28年12月22日18時発表)

「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30、図31、図32)。

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を登録¹⁶⁾¹⁷⁾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33)。

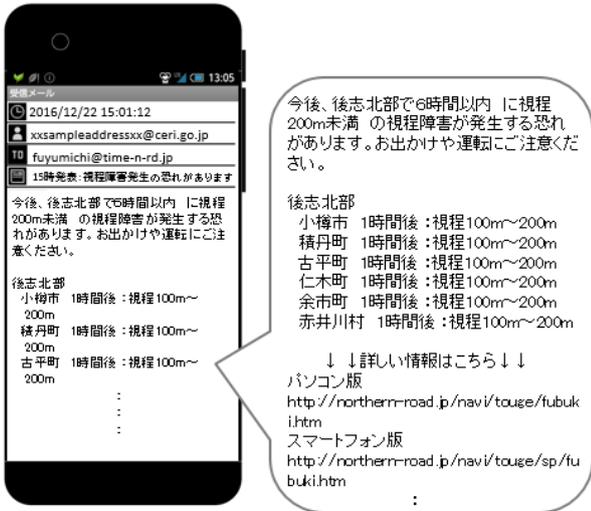


図 33 吹雪の視界情報メール配信サービス
(平成 28 年 12 月 22 日 15 時発表)

図 34 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 の積雪となった平成 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。

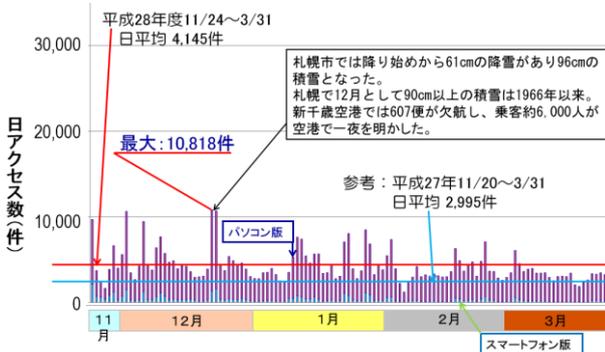


図 34 平成 28 年度「吹雪の視界情報」アクセス数

2.3.6 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。なお、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。

図 35 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。気象庁が「人命にかかわるような暴風雪や大雪になる

おそれ」と記者発表した平成 30 年 3 月 1 日及び 2 日には、2 日間で 5 万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の増加から、利用者が「吹雪の視界情報」を天候悪化時の行動判断に活用していることが伺われる。

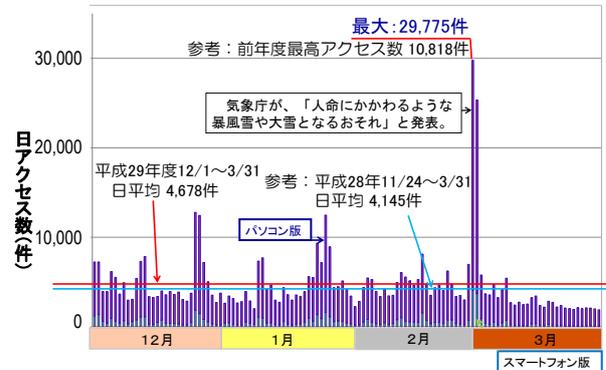


図 35 平成 29 年度「吹雪の視界情報」アクセス数

2.3.7 平成 30 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 30 年度も平成 30 年 11 月 22 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。

図 36 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。オホーツク海側、上川北部で総降雪量 50cm 以上の大雪となった平成 31 年 1 月 23 日から 24 日には、2 日間で 3 万 2 千件を超えるアクセス数となっている。平成 29 年度と同様に、天候悪化時にアクセス数が増加することから、利用者が「吹雪の視界情報」を天候悪化時の行動判断に活用していることが伺われる。

また、平成 30 年度には、インターネットサイト「吹雪の視界情報」の利用者に対して、サイト活用状況など

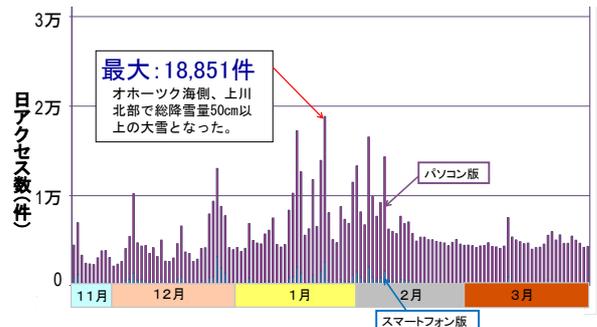


図 36 平成 30 年度「吹雪の視界情報」アクセス数

のアンケート調査を実施した。視界不良（視程 200m 未満）の予測時の行動変化について質問した回答結果を図 37 に示す。アンケートの回答者は、875 人であった。

図 37 よりインターネット「吹雪の視界情報」の利用者の 73%は、視界不良（視程 200m 未満）の予測時において行動を変更すると回答しており、視界予測情報が行動変更に活用されていることが伺われる。

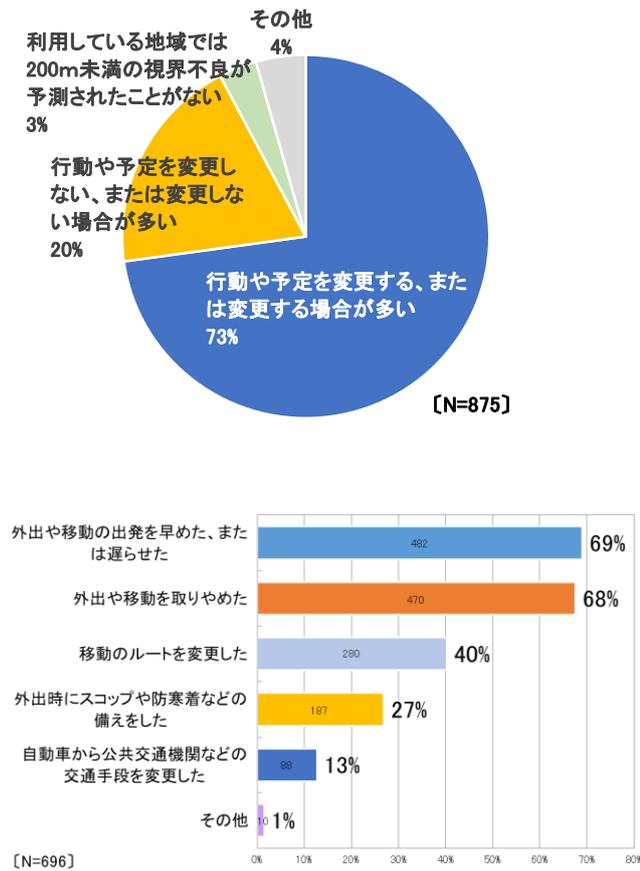


図 37 「吹雪の視界情報」アンケート回答結果 視界不良予測時の行動変更について

2.3.8 令和元年度冬期の提供

吹雪時のドライバーの行動判断を支援するため、令和元年度も令和元年 11 月 21 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。

図 38 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。

図 38 より太平洋側東部、オホーツク海側で総降雪量 40cm 以上の大雪となった令和 2 年 1 月 30 日から 31 日には、2 日間で 2 万 1 千件を超えるアクセス数となっている。平成 30 年度と同様に、天候悪化時にアクセス数が増加することから、利用者が「吹雪の視界情報」を天

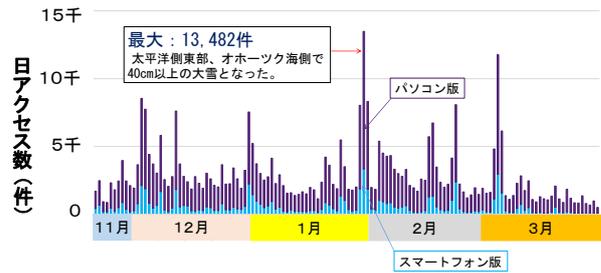


図 38 令和元年度「吹雪の視界情報」アクセス数

候悪化時の行動判断に活用されていることが伺われる。

インターネットサイト「吹雪の視界情報」について、前中期の平成 24 年度からの日平均アクセス数の推移を年度毎に図 39 に示す。

図 39 より日平均アクセス数は、平成 30 年度の約 6 千件より低く、約 3 千件であった。日平均アクセス数が減少した原因として、吹雪視界不良（視程 200m 未満）が予測された日が平成 30 年度では 109 日であったが、令和元年度は 85 日と少なかったことが一因として考えられる。なお、パソコン版の日平均アクセス数は、平成 30 年度の約半数となったが、スマートフォン版は平成 30 年度より約 1 割増加した。

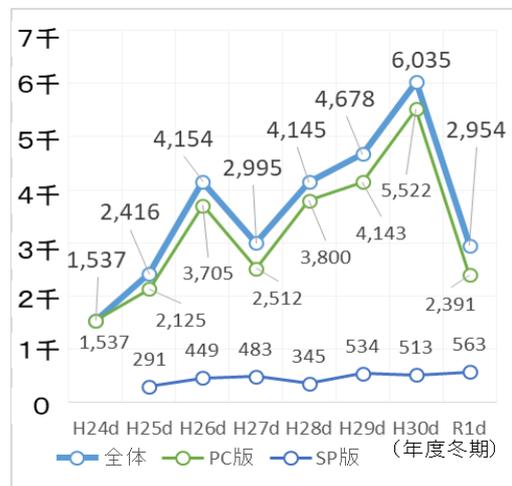


図 39 年度別「吹雪の視界情報」日平均アクセス数

また、令和元年度には、ツイッターによる情報提供を開始し、暴風雪が見込まれた日を対象に令和元年度冬期は計 7 回のツイートを行った (図 40)。

「吹雪の視界情報」ツイッターのアクセス数を図 41 に示す。日本海側で 50cm 以上の大雪となった令和元年



北の道ナビ吹雪視界情報 @fubuki_navi

吹雪による視程100m未満の著しい視界不良が、現況(4日9時)および今後の予測でも日本海側および太平洋側西部で予測されています。
詳しくはこちら→
(スマホ版) [northern-road.jp/navi/touge/sp/...](https://northern-road.jp/navi/touge/sp/)
(PC版) northern-road.jp/navi/touge/fub...
#吹雪視界



図 40 「吹雪の視界情報」ツイッター URL : https://twitter.com/fubuki_navi (令和元年 12 月 3 日 11 時 5 分ツイート)



図 41 令和元年度ツイッターアクセス数

12 月 3 日には 2 万 3 千件を超えるアクセスとなっている。

また、ツイッターの効果を検証するため、6 時間以内に吹雪視界不良（視程 200m 未満）が予測された地域の人口が同等であった令和 2 年 1 月 30 日と令和 2 年 2 月 23 日のインターネットサイト「吹雪の視界情報」の人口 1,000 人当たりの日アクセス数を比較した。その結果を図 42 に示す。

図 42 より、ツイートした令和 2 年 1 月 30 日は人口 1,000 人当たり 2.7 件でありツイートしていない令和 2

年 2 月 23 日の 1.6 件に対して約 1.7 倍であった。このことから、ツイートすることによりインターネットサイト「吹雪の視界情報」の利用者増加に効果があったことが伺われる。

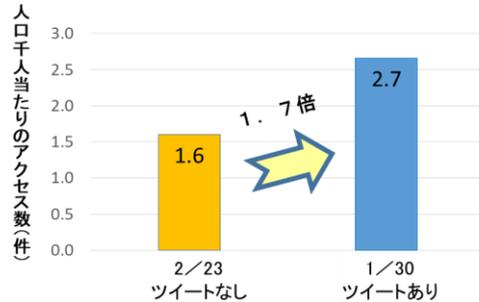


図 42 ツイートの有無による「吹雪の視界情報」人口千人当たりのアクセス数

2.3.9 視界予測情報提供の効果検証

(1) 検証方法

道路利用者に対して、インターネットサイト「吹雪の視界情報」で情報提供することによる冬型事故の削減数を試算することで効果検証を行った。

事故削減数は、冬型事故件数、自動車を利用したトリップ数及び行動変更により事故回避できたトリップ数を求めて算出した。

(2) 冬型事故件数の算出

平成 29 年度の交通事故統計データ¹⁸⁾では、冬型事故の内、視界不良が原因の人身事故は 42 件発生していた。物損事故は、交通事故リスク要因の分析¹⁹⁾から人身事故の 27.31 倍であったことから 1,147 件とし、計 1,189 件の視界不良が原因の事故が発生していたと仮定した。また、視界不良以外が原因の人身事故は 935 件発生しており、物損事故はその 27.31 倍の 25,535 件とし、計 26,470 件の視界不良以外が原因の事故が発生していたと仮定した。なお、視界不良が原因の事故の 1,189 件は以降の(4)で示した“視界不良が予測された日 (109 日)”に発生していると仮定した。また、視界不良が予測された日 (109 日)に視界不良以外が原因の事故は“視界不良が予測された日”と“冬期 (11~3 月) 日数 (151 日)”の比率から求め 19,107 件とした。

(3) 自動車を利用したトリップ数の算出

視界不良が予測された地域の自動車によるトリップ数 A は、視界不良が予測された地域の人口に道央都市圏パーソントリップ調査²⁰⁾の結果から算出した自動車によるトリップ率 1.33 (トリップ/人) を乗じた 229,138,059

トリップとした。なお、視界不良が予測された地域の人口は、吹雪視界不良（視程 200m 未満）が予測された日と地域から算出した。

(4) 行動変更により事故回避できたトリップ数の算出

平成 30 年度冬期において、吹雪視界不良（視程 200m 未満）が予測された日数は 109 日であり、その地域に居住する延べ人口は 172,284,255 人（市町村合併前の平成 22 年国勢調査²⁰から算出）であった。この 109 日間の平均日アクセス数は 6,203 件/日であったが、これは吹雪視界不良が予測された地域以外を含んだアクセス数であるため、北海道全体の 109 日間の延べ人口 600,199,671 人との比率から吹雪視界不良地域からのアクセス数は 1,781 件/日とした。

平成 30 年度に実施した利用者アンケートでは、視界不良の予測時において 73%が行動を変更すると回答しており（図 37）、その内の 68%（全体の 50%）が「外出や移動をとりやめる」と回答している（図 37）。試算では、アクセス数 1,781 件/日の内 50%は外出や移動をとりやめることにより、全ての原因の冬型事故を回避できたと仮定した。また、アクセス数 1,781 件/日の内 73%は出発時間を変更するなどの行動変更により視界不良が原因の事故を回避できたと仮定した。1 アクセス当たりのトリップ数は、道央都市圏パーソントリップ調査²⁰の冬期 1 日当たりのトリップ数 2.1 とした。行動変更により事故回避できたトリップ数 N は次式により求めた。

N (冬型事故回避トリップ) =

$$1,781 \times 109 \times 0.5 \times 2.1 = 203,835$$

N (視界不良事故回避トリップ) =

$$1,781 \times 109 \times 0.73 \times 2.1 = 297,600$$

(5) 事故削減数の推定

(2)、(3)、(4)で求めた値を次式に代入することにより、事故削減数 X を求めた。

$$N / (A+N) = X / (B+X)$$

N : 事故回避できたトリップ数

A : 自動車を利用したトリップ数

B : 冬型事故件数

X : 事故削減数

冬型事故の削減数は次式のとおりとなった。

$$203,835 / (229,138,059 + 203,835) =$$

$$X / (1,189 + 19,107 + X)$$

$$X = 18.1$$

また、吹雪視界不良が原因の事故削減数は次式のとおりとなった。

$$297,600 / (229,138,059 + 297,600) =$$

$$X / (1,189 + X)$$

$$X = 1.5$$

試算結果から、インターネットサイト「吹雪の視界情報」で情報提供を行うことにより、冬型事故を 18.1 件（視界不良が原因の事故は 1.5 件）削減しており、道路利用者の安全に貢献していることが伺われる。

3. まとめ

本研究では、広域的な吹雪視程障害予測技術の開発に向け、「多様な気象環境下における吹雪発生条件」や「降雪形態と視程の関係」や「気象条件を用いた吹雪視程予測手法」の北海道外への適用性などについて以下の通り調査を行った。

- 1) 降水種別の雨雪と気温及び相対湿度との関係について 3 カ年分の分析を行い、「気象条件を用いた吹雪視程予測手法」における地吹雪判定手法の雨雪判別条件について改良を行った。
- 2) 平成 30 年 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吹雪視程予測手法による情報提供を開始し、暴風雪時における予測情報について、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し予測精度を検証した。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% 上昇していることを確認した。
- 3) 青森県で地吹雪発生状況について調査を実施し、その結果を基に地吹雪発生条件について分析を行った。その結果、降雪時に地吹雪発生するとしている既往の条件下（気温と風速）においても地吹雪が発生してない事例が多く見られた。特に、気温 0℃より高い場合には風速に関係なく地吹雪の発生している事例はあまり見られず、気温 1℃以上ではほとんど地吹雪の発生事例がみられなかった。
- 4) 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とするため、降雪時の視程調査に関する既往文献を収集した。
- 5) 降雪時における視程調査を実施し、降雪時における飛雪流量と視程との関係について分析を行った。その結

果、降雪時における飛雪流量と視程の関係は、バラツキが見られるものの吹雪時に得られた関係式とも傾向が概ね一致することを明らかとした。ただし、同様の飛雪流量であっても気温が低い場合に視程が短くなる傾向が見られた。

- 6) 「気象条件を用いた吹雪視程予測手法」の推定精度について北海道内4箇所と青森県内2箇所において検証した。その結果、青森県内においても北海道内と概ね同程度の適中率であることを確認した。また、気温が概ね0°C以上における降雪時に推定視程の空振りが多く、風速5m/s未満の降雪時に推定視程の見逃しが多くみられるなどの課題を把握した。
- 7) 把握した課題を基に、「気象条件を用いた吹雪視程予測手法」の吹雪発生の判定条件や飛雪空間密度の推定式のパラメーターについての改良案を検討し提案した。
- 8) 吹雪時のドライバーの交通行動の判断支援に向けて、「吹雪の視界情報」をインターネットで公開し、道路利用者への情報提供を行った。その結果、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、ツイッターにより情報提供を行うことで「吹雪の視界情報」のアクセス数の増加に効果があることが伺えた。さらに、情報提供を行うことにより、冬型事故が削減できていることから道路利用者の安全に貢献していることが伺えた。

今後、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一、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一、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) 齊藤博英: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
- 18) 北海道警察本部交通企画課:冬型交通事故の実態(平成30年版)、平成30年11月
- 19) 齊田光、平澤匡介、高橋尚人:北海道における冬期の交通事故傾向および交通事故リスク要因の分析、第60回北海道開発技術研究発表会論文、2016
- 20) 北海道建設部都市計画課、札幌市市民まちづくり局総合交通計画部交通計画課:道央都市圏パーソントリップ調査 人の動きからみる道央都市圏のいま、2008
- 21) 総務省統計局:平成22年国勢調査、都道府県・市区町村別主要統計表、2017

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
（寒地機械技術チーム、寒地技術推進室）

研究担当者：高橋丞二、伊東靖彦、金子 学、原田裕介、
高橋 渉、櫻井俊光(雪氷)、植野英睦、斉藤 勉
(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の約4割を吹雪が占めるため、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照不足等で下枝が枯れ上がることにより、防雪性能の低下が懸念される。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。

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割は吹雪に起因し、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施設による吹雪対策が不可欠である。道路防雪林（以下、防雪林という）は、道路の風上側または両側に樹木を林立した防雪施設で、樹木が風を抑え飛雪を捕捉することにより、吹雪による視程障害や吹きだまりを緩和する役割がある。吹雪対策として最も高い効果が期待される¹⁾。

北海道の道路事業では延長80km以上の防雪林が造成済みで、現在も引き続き造成されている。一方で、防雪林の造成を開始してから30年以上が経過したことで、課題が浮きぼりとなっている。前中期計画では、過湿や土壌堅固等が樹木の初期成長期における成長遅延要因であることを明らかにし、樹木の成長に応じた防雪林の効果的な育成管理の手法を示した²⁾。一方、樹木が十分に成長した防雪林の管理上の課題が散見された。課題の1つに、下枝の枯れ上がりに伴う防雪性能の低下がある³⁾。

外観上十分に成長した防雪林でも、その内部では日照不足により、地表面に近いところで下枝の枯れ上がりが散見される（図1）³⁾。吹雪は地表面に近いほど雪粒子の量が多い現象である⁴⁾。そのため、間引き等による下枝の枯れ上がりの対策は、吹雪による吹きだまりや視程障害の緩和に重要であると考えられる。本研究では、防雪林の安定的な防雪性能確保のため、次に

挙げる項目を実施する。

- 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



図1 防雪林内の下枝の枯れ上がり状況

地表面付近における下枝の枯れ上がりによる機能低下については、防風林や海岸防災林等には見逃されやすい防雪林特有の課題である。そのため、吹雪による視程障害や吹きだまりを緩和する防雪林の防雪性能に関する実測事例は、ほとんどない。ここでは、①に示す下枝の枯れ上がりによる防雪性能等への影響を解明するために、現地調査と模擬実験により、以下1)～5)について令和元年度までに実施した結果を2章に整理した。模擬実験は、任意の林況設定が可能な風洞実験装置を用いた。

- 1) 葉面積、立木密度等で表現される防雪林の構成要素を現地調査により把握
- 2) 防雪林の防雪性能評価のため、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
- 3) 防雪林の構成要素と防雪性能の定量的関係を整理
- 4) ICT 活用による防雪林の防雪性能の評価可能性の検討
- 5) 下枝の枯れ上がりに関する風洞実験

下枝の枯れ上がりがみられる防雪林では、風下や林内に防雪ネット柵や低木が設置されることがある。しかし、補助柵（防雪ネット柵や低木等）の効果や下枝の枯れ上がり高さによる設置基準については明らかになっていない。ここでは、前頁の② 防雪性能が低下した防雪林への補助対策の提案について、効果的な補助対策を検討するため、以下1)と2)について令和元年度までに実施した結果を3章に整理した。

- 1) 補助対策に関する資料調査
- 2) 補助対策の現地試験と評価検討

現地の状況把握、効果的な補助対策を踏まえて、令和2年度以降、前頁の③ 枯れ上がりの見られる防雪林の管理手法を提案について取り組む予定である。

本研究の成果となる、防雪性能を安定的に確保するための防雪林の管理手法は、効果的な道路吹雪対策施設の整備に必要不可欠である。今後、上記手法を北海道開発局など道路管理者が推進する防雪事業や、「道路吹雪対策マニュアル」に反映させることで、吹雪災害が頻発する積雪寒冷地における安全・安心な生活環境や社会・経済活動の維持に貢献することができるものと考えられる。また、植生を利用した吹雪対策（Living Snow Fences）を推進している北米や欧州に本研究の成果が活用されることで、国際的に貢献することも期待される。

2. 下枝の枯れ上がりによる防雪性能等への影響解明

下枝の枯れ上がりによる防雪機能等への影響を明らかにするために、防雪林の構成要素である基本林の樹齢と樹高、下枝の枯れ上がりの進行を把握した。この樹木調査を踏まえて、防雪林内の風雪の吹き抜けや補助対策の効果等に関する現地観測を実施した。

調査対象の防雪林には標準林と狭帯林が含まれる。それぞれの防雪林の基本設計¹⁾を図2に示す。標準林とは林帯幅が10m以上、狭帯林とは林帯幅が10m以下の防雪林である。標準林は林帯幅が比較的に広い

道路に流れ込む吹雪による吹きだまりの緩和効果と、吹雪による視程障害の緩和効果が期待され、狭帯林は林帯幅が比較的に狭いため、吹きだまりの緩和効果は薄い¹⁾が、視程障害を緩和する効果が期待される¹⁾。また、狭帯林は林帯幅が狭いので、広い道路用地を必要としない等のメリットがある。

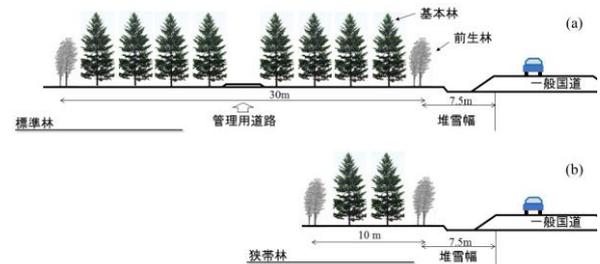


図2 防雪林の基本設計 a)林帯幅30mの標準林、b)林帯幅10mの狭帯林

2. 1 防雪林内における下枝の枯れ上がりの把握

2. 1. 1 調査方法

下枝の枯れ上がりの進行に関する既往研究は少ない。ここでは、表1に示す20年以上前に造成した防雪林を対象に現況を把握し、過去の調査と対比することで樹木の成長過程や枯れ上がりの進行を示した。

平成6年に24の防雪林について調査された報告書^{5,6)}と現況を比較することで、樹木の成長過程や枯れ上がりの進行を調査した。過去2つの報告書には、各防雪林の代表的な樹種について、推定樹高、林齢、樹高、胸高直径、枝張、枝下高、当年伸長量（最大3年分）、枯損率が記載されている。このうち、次の4項目に該当する防雪林、① 現況存在しない防雪林、② 日照や環境条件が特異と考えられる狭帯林、③ 現在の一般的な防雪林と樹種が異なる防雪林、④ 工事等で測定困難な防雪林を除外した。その結果、21防雪林39箇所50地点で再計測を行った。調査箇所は北海道東部および北部に多い（図3）。これは元々防雪林の分布に偏在があるためである¹⁾。

再測定では表1に示す防雪林において、樹種ごとに標準木を2~4本選定のうえ、各樹木の樹高、枝下高（4方向および中心）、枝張（4方向）、隣接木との距離を測定した。枝下高は枯枝と生枝をそれぞれ測定した（図4）。枝張はそれぞれの方向の最長のものを測定した。測定は雪氷チームおよび道北・道東支所が分担し、平成26年11月5日~平成27年7月3日の間で行った。

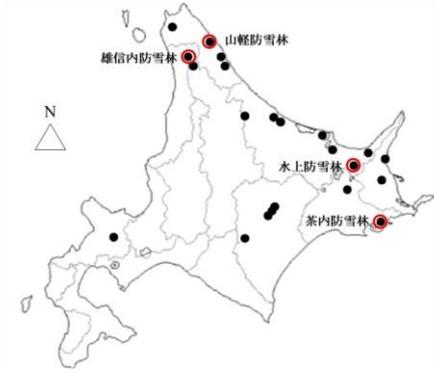


図 3 構成要素と下枝の枯れ上がりを調査した防雪林

表 1 調査対象の防雪林の一覧

	国道番号	防雪林の地名
1	276	京極町北岡
2	40	中川町国府
3	39	大空町湖南
4	238	網走市東浜
5	238	紋別市共和
6	238	紋別市小向
7	239	西興部村奥興部
8	334	斜里町朱円
9	391	小清水町水上
10	40	天塩町雄信内
11	40	稚内市サラキトマナイ
12	238	枝幸町岡島
13	238	枝幸町ヤマウス
14	238	浜頓別町山軽
15	44	浜中町茶内
16	243	弟子屈町仁多
17	272	中標津町俵橋
18	334	羅臼町幌萌
19	241	上士幌町居辺
20	241	上士幌町北居辺
21	241	士幌町東雲



図 4 測定項目の詳細と測定状況（上部写真）

2. 1. 2 樹木調査の結果

測定した樹種は全体の4分の3がアカエゾマツであり、ヨーロッパトウヒ、トドマツをあわせると、現在道路防雪林で用いられる基本林構成種^りが96%を占めた(図5)。樹齢は約30~40年程であり、樹高は10m前後(平均9.7m、最小約4m、最大約16m)である。

なお、樹木調査の詳細については過年度の報告書^りを参照されたい。

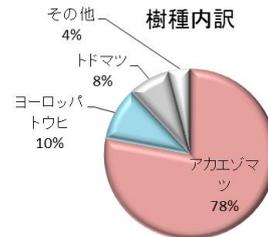


図 5 調査した樹種の内訳

1) 樹齢と樹高との関係

アカエゾマツの樹齢と樹高の関係を、一例として図6に示す。図中の赤線は回帰直線であるため調査対象年数にのみ限定される直線であるが、成長速度は1年間でおおよそ0.29mである。なお、「道路吹雪対策マニュアル」^りには樹齢と樹高の散布図を掲載しているが、10~15年生以下の若年木が中心である。本調査記録は40年を超える樹木も含まれており、順調に育てば40年間で約10mの樹高になることが期待される。ただし、図中の回帰直線は調査した樹木のみ適用される。

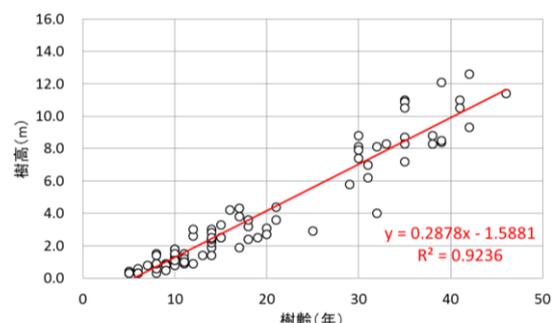


図 6 アカエゾマツの樹齢と樹高. 赤線は回帰直線

2) 下枝の枯れ上がりの進行

平成6年の調査結果と合わせて枯れ上がりの進行状況を把握した。アカエゾマツの樹高と生枝下高(下枝の枯れ上がり高さと同じ)の関係を図7に示す。

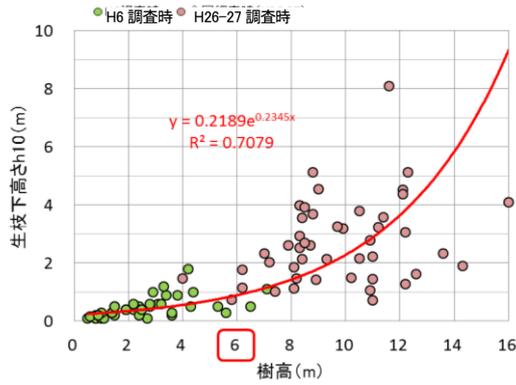


図 7 生枝下高と樹高の関係。赤線は回帰曲線

回帰曲線から、樹高が高いほど下枝の枯れ上がりが進行しやすいことを示している。特に、樹高 6m 前後から下枝の枯れ上がりが増加する傾向にある。ただし、回帰曲線の累乗関数は調査した樹高のみに適用される。

2. 2 防雪林の風雪の吹き抜けに関する気象観測

本中長期計画において下枝の枯れ上がりに着目して調査を行った防雪林は、標準林 3 箇所と狭帯林 1 箇所である。平成 27 年度からは天塩町雄信内（一般国道 40 号、標準林）、平成 29 年度には小清水町水上（一般国道 391 号、狭帯林）、令和元年度からは浜頓別町山軽（一般国道 238 号、標準林）と浜中町茶内（一般国道 44 号、標準林）について、それぞれ気象等の観測を実施した。なお、補助対策工が設置されている箇所においても気象等を観測している。補助対策工が設置されていない気象観測は 2 章、補助対策工が設置されている気象観測は 3 章で扱う。

2. 2. 1 観測箇所概要

1) 雄信内防雪林（標準林）

一般国道 40 号沿いの雄信内防雪林の延長は約 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、風上には 300m 以上の吹走距離（吹雪が発達する距離）がある（図 8）。

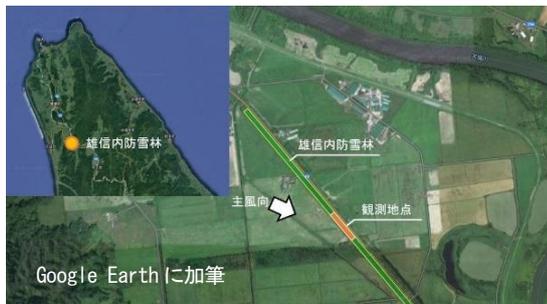


図 8 雄信内防雪林の観測箇所

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 9）。



図 9 雄信内防雪林

2) 山軽防雪林（標準林・一部補助対策工あり）

一般国道 238 号沿いの山軽防雪林の延長は約 2.8km、観測した道路南西側、道路北東側の両側における防雪林の林帯幅はおよそ 30m である。道路南西側には丘陵があるが障害物はなく吹走距離は 200m 以上で、道路北東側には低木や雑草が点在しているが吹走距離は 100m 以上で、およそ 1.5km 先にオホーツク海がある海岸沿いの防雪林である（図 10）。



図 10 山軽防雪林における観測箇所

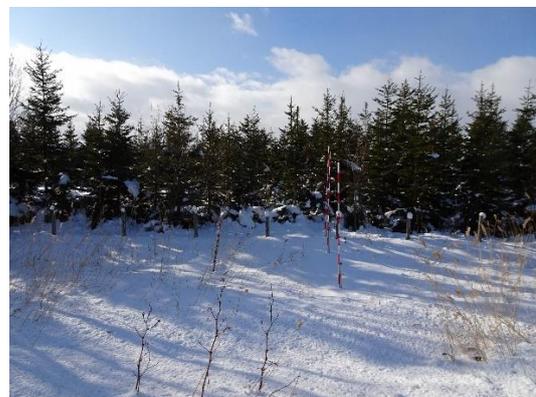


図 11 山軽防雪林（南西側）



図 12 山軽防雪林（北東側）

観測地（KP238 付近）の南西側における防雪林内の樹高は平均 5m 程度、北東側は平均 10m 程度である。南西側の防雪林（図 11）には下枝の枯れ上がりはみられないが、北東側の防雪林には 1m 程度の枝打ちが見られる（図 12）。

3) 茶内防雪林（標準林・補助対策工法あり）

一般国道 44 号沿いの茶内防雪林の延長は約 0.8km、観測した道路北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（KP66.5 付近）における林内の樹高は平均 12m 程度であり、林帯内部には 2m 以上の枯れ上がりが見られる。また、根室道路事務所により枯れ上がり対策として防雪ネット柵が風上林縁の牧草地側（図 14）と林内中央付近に設置されている。



図 13 茶内防雪林の観測箇所



図 14 茶内防雪林（風上林縁の防雪ネット柵）



図 15 茶内防雪林（林内の防雪ネット柵）

4) 水上防雪林（狭帯林）

水上防雪林の延長は約 1km、風上林縁からの吹走距離は 300m 以上あり、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（図 16）。



図 16 水上防雪林の観測箇所

観測地（KP110.0 付近）における樹高は平均 10.2m であり、地表面から高さ約 2m ほどまで枝打ちされており枝葉のない状態である（図 17）。



図 17 水上防雪林の外観

2. 2. 2 観測および結果整理方法

1) 観測方法

気象等観測項目は、防雪林の箇所毎に異なるが、風向・風速、気温、視程、飛雪流量、吹きだまり量等である。各項目と単位、計測範囲および解析時に利用した範囲を表 2 に示す。観測機器について、風向・風速の観測には風車型風向風速計（R.M. Young Co.）、温湿度の観測には温度計（Vaisala Co.）、視程の観測には視

程計（明星電気社製）、飛雪流量の観測には吹雪計（新潟電気社製）を主に利用した。

表 2 単位と解析に利用した値

項目	単位	計測範囲	データ処理範囲
風向	16 方位	-	10 分最頻値
風速	m/s	0.1 以上	10 分平均値
気温	°C	-	10 分平均値
視程	m	1000 以下	10 分中央値
飛雪流量	g/m ² /s	0.1 以上	1 分平均値
吹きだまり量	m ³ /m	-	累計値

2) 結果整理方法

ここでは観測結果について、風上基準点の値を分母、風下の観測地点（主に道路側）の値を分子とし、風速比として整理する（式(1)）。なお、2.3 節では、風速の他、視程、飛雪流量の結果を用いて、それぞれ風速比、視程比、飛雪流量比として表現する。

$$\text{風速比} = \frac{\text{風下（道路側）の風速 (m/s)}}{\text{風上（基準点）の風速 (m/s)}} \quad (1)$$

防雪林を通過し減風された風の場合は、風速比は 1.0 より小さい値となる。

基準点の高さを風下の風速計の高さと合わせるため、風上の高さごとの風速を算出する必要がある。雪面における風速の鉛直分布は対数則の式(2)¹¹⁾で算出される。

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right) \quad (2)$$

ここで、 $u(z)$ 、 u_* 、 κ 、 z 、 d 、 z_0 はそれぞれ、基準点の高さにおける風速(m/s)、摩擦速度(m/s)、カルマン定数(=0.4)、風速を計測した高さ(m)、積雪深(m)、雪面における地表面粗度(m)である。地表面粗度 z_0 については既往研究¹⁰⁾の値 (1.5×10⁻⁴m) を用いる。積雪深 d を北海道開発局が管理する近隣の道路テレメータ等の値を入力し、観測した高さにおける風速から摩擦速度 u_* を計算する。観測した地点における摩擦風速 u_* が算出できれば、基準点におけるそれぞれの高さの風速 u が算出される。このように、基準点 1 点に 1 台の風速計があれば各高さの基準風速を算出することができる。

2. 2. 3 観測結果

1) 雄信内防雪林（標準林）

平成 29 年度に、雄信内防雪林における風雪の吹き抜けについて観測するため、風上林縁から道路側風下にかけて風向・風速の連続観測を実施した。風上林縁から 50m 程度離れた風上に基準点 (No.0) を、風上林縁に No.2、林内 No.21、No.22、道路側風下林縁に No.3、No.4 を設けて風向風速計を設置し観測した (図 18)。



図 18 雄信内防雪林における観測地点

図 19 に、風上の基準点 No.0 と林縁 No.2 地点における風速の比較結果 (高さ:3m) 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 (高さ:1, 3, 7m)、No.21 (高さ:1, 3m)、No.22 (高さ:1, 3m)、No.3 (高さ:1, 3, 7m)、No.4 (高さ:3m) について風向別 (225.0~292.5°) に解析した。林内および林風下林縁では、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 (図 20)。

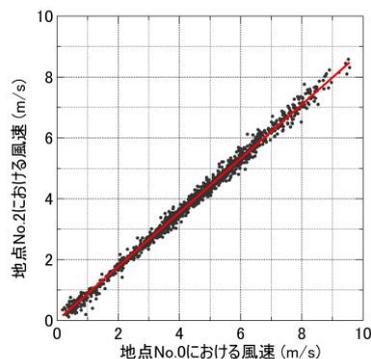


図 19 林風上の基準点 No.0 と林縁 No.2 地点における風速の比較 (高さ:3m)

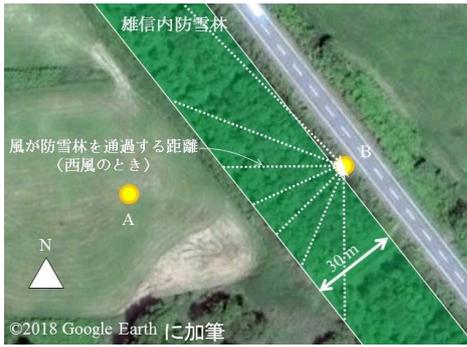


図 20 風が防雪林を通過するときの距離 (イメージ)

風が林内を通過する距離と風速比との関係を図 21 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。図 21 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。

図 21 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、次の高さ毎に特徴が見られる。

- ・ 7m: 風向によらず風下 (No.3) の風速比が 0.6~0.2 の範囲で低下している。
- ・ 3m: 直交風 (225~247.5°) では、風下 (No.3, No.4) 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。
- ・ 1m: 直交風 (225~247.5°) では、風下 (No.3, No.4) 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。

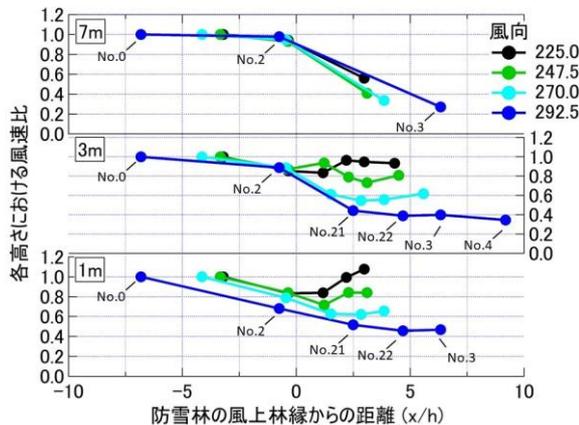


図 21 防雪林の風上林縁からの距離と風速比
風向 225.0°: 防雪林に対して直交風。
図中の地点 No.0~No.4: 風向 292.5°のとき。

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、明らかに下枝の枯れ上がりによる風雪の吹き抜けが生じていることを示す。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、下枝の枯れ上がりによる風雪の吹き抜けの影響は認められない。

2) 水上防雪林 (狭帯林)

平成 29 年度に、水上防雪林における風雪の吹き抜けについても調査を実施した。風上 D 点を基準点とし、風下 A 点に風向風速計を設置し (図 22)、風速比を算出した。



図 22 水上防雪林における観測地点

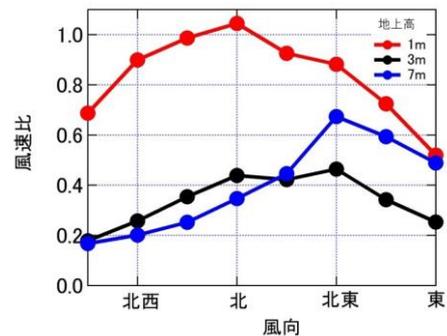


図 23 風向別の地点 A における風速比

図 23 に、風下で計測した狭帯林における風速比を示す。高さは 1m、3m、7m である。雄信内防雪林の標準林と同様に、各高さで風速比が異なる。直交風の北から斜風の西北西の風では、高さが高いほど風速比が低く、3m と 7m で十分な減風効果がみられる傾向にある。一方、北東の風では高さ 7m の方が 3m よりも風速比が高い。これは、現地の写真 (図 24) から林冠の疎密によるものと考えられる。また、高さ 1m では全方位 (西北西~東) において風速比が 0.5 以上

と高い値を示し、直交風の北風のときは 1.0 を超える風速比であった。これは、枝打ちによるものと考えられ、風雪の吹き抜けによる影響である。



図 24 一般国道 391 号から撮影した水上防雪林。赤枠の部分に疎の林冠がみられる

吹雪が発生した平成 31 年 1 月 24 日に、水上防雪林を車両で走行し動画を撮影し、防雪林の開口部を通過したときに視認性の悪化が確認された(図 25)。一方、観測地 A 点を通過したとき、枝打ちされた防雪林の低い位置から飛雪粒子が飛散している状況が確認された。風雪の吹き抜けによる影響であったが、この時はドライバーの視認性においては防雪林が視程障害を緩和し、且つ視線誘導効果を発揮し、走行に支障のない状況であった(図 26)。



図 25 吹雪発生時における水上防雪林の開口部



図 26 吹雪発生時における水上防雪林の観測地点

水上防雪林では、地表面付近における枝打ち、あるいは枯れ上がりにより飛雪粒子の飛散による視程悪化の懸念はあるが、ドライバーの目線高さで飛雪を抑えていけば、狭帯林の主目的である視程障害の緩和効果が

が発揮されるものと考えられる。なお、風下 A 点で観測した高さ 3m は、盛土構造である一般国道 391 号上ではドライバーの目線高さに相当する。

2. 3 防雪林の構成要素と防雪性能の定量的関係

ここでは、雄信内防雪林(標準林)のデータを用いて、防雪林の空隙率で構成要素を表現し、気象等観測結果から防雪性能と空隙率の関係について示した。

2. 3. 1 防雪林の空隙率

防雪林を通過する風の空力特性を説明しうる防雪林の構成要素には、樹高、林帯幅、延長、樹種に加えて空隙率、葉面積指数 LAI または植物面積指数 PAI¹²⁾ が該当する。ここで、LAI は単位地表面積あたりの葉の投影面積の総和、PAI は単位地表面積あたりの葉の他、枯れた葉、枝、幹の投影面積比として定義され、双方とも 3 次元構造を捉えた無次元の指数である¹²⁾。

防雪林の構成要素と防雪性能を正確に把握するためには、植生の空隙率や LAI 等のパラメータを調査することが必要となる。しかし、LAI 等のパラメータを明らかにするためには現地踏査が必要とされ、長大な防雪林の調査で用いるには財源制約のある中では負担が大きく、計測から解析まで時間を要する。道路の付属施設とした防雪林の道路管理手法という技術的な側面において、PAI 等を網羅的に正確に把握することよりも、道路側から如何に防雪林の構成要素を迅速に捉えるかが鍵となる。

空隙率は防雪林の投影面積で表現される 2 次元構造ではあるが、道路側から迅速に計測を可能にするのである。そこで、防雪林の空隙率を比較的簡易に算出可能な写真撮影による手法¹³⁾を採用し、本研究は簡易的に防雪林の構成要素と防雪性能の定量的関係を明らかにするため、防雪林風上と風下で風向・風速と飛雪流量を計測し、風速や飛雪流量と空隙率の関係を整理し、防雪性能の定量的関係を示す。なお、ここでいう空隙率とは光学的な空隙率(Optical porosity)である。

解析手順は次の通りである。以下の手順 a) ~ d) は、図 27 の a) ~ d) の画像と一致させている。画像は積雪が融解した直後の平成 30 年 5 月 8 日に撮影し、撮影環境は晴天、無風であった。

- a) 道路側 B 点(図 18)から魚眼レンズで防雪林全体を撮影した。このとき、中心線は防雪林と直交する方位(230°)とした。すなわち、魚眼レンズで撮影される範囲は方位 230°±90°である。撮影した高さは 1, 3, 5, 7, 9m である。
- b) 撮影された魚眼画像における上下の極点を結ぶ線を方位ごとに描き、方位ごとに等分した。

- b') 水平部 (白枠) をトリミングして撮影した各高さとする。地表面や防雪林以外の樹木が映り込まないようにした。
- c) トリミングされた画像を風向毎に切り取った。
- d) 切り取った画像を 8bit から 1bit まで bit 数を減らし、白黒の閾値を 50% (白と黒の二値化) で表現した。

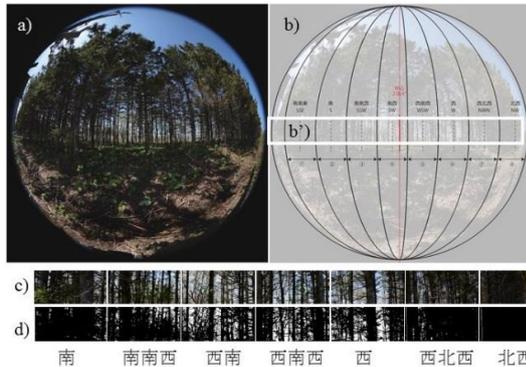


図 27 防雪林における空隙率の算出手順の一例 (高さ 1m の場合)

同様の方法で、風速と同じ高さ 3m、5m、7m、9m で撮影して解析した。画像を図 28 に示す。なお、撮影した方位 $230^\circ \pm 90^\circ$ の画像から、北西方位の画像解析については防雪林の縁までとし、南南東の方位には取り付け道路があるため、解析結果では除外した。高さ 1m と 3m においては風上側に見える樹林帯のピクセルを除外した。このように、風向毎に切り取り二値化された画像について、次式の関係から防雪林の空隙率を算出した。

$$\text{空隙率} = \frac{\text{背景の面積 (二値化された白の領域)}}{\text{切り取った画像の面積}} \quad (3)$$

下枝の枯れ上がりについて定量的に評価するため、南～北西の方位における防雪林の空隙率を解析した結果を図 29 に示す。図 29 より、高さが高いほど防雪林の空隙率が低く、南風あるいは北西になるほど空隙率が低くなる傾向にある。高さが高いほど防雪林の空隙率が低くなることは、すなわち高さが低い部分に空隙があることを意味している。よってこの結果は下枝の枯れ上がりによる空隙率への影響である。また、南あるいは北西の方位では防雪林の距離が長くなり、樹木等が重なり合うため、空隙率が徐々に低くなるものと考えられる。

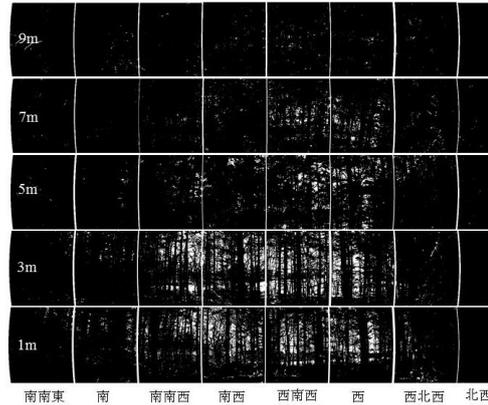


図 28 地点 B の各高さ (1, 3, 5, 7, 9m) で取得した防雪林の二値化画像

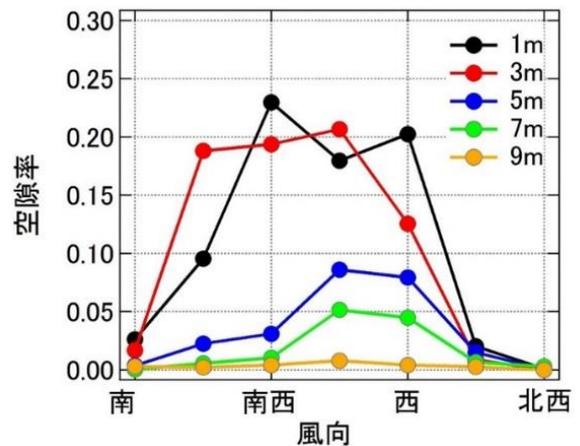


図 29 地点 B で撮影された画像から解析した防雪林の空隙率

2. 3. 2 防雪林を通過する風と飛雪流量の特徴

防雪林の標準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(4)) で表される⁸⁾。

$$\log Vis = -0.773 \log(Mf) + 2.845 \quad (4)$$

飛雪流量 (Mf) 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(5))⁸⁾ で表される (ただし、雪面近傍を除く)。

$$Mf = Nt \cdot V \quad (5)$$

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ります。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。

1) 風の特徴

図 30に、雄信内防雪林(図 18)における地点Aと地点B(高さ3m)における風速の相関図を示す。なお、基準点Aの風向が西のときのデータである。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0.68である。

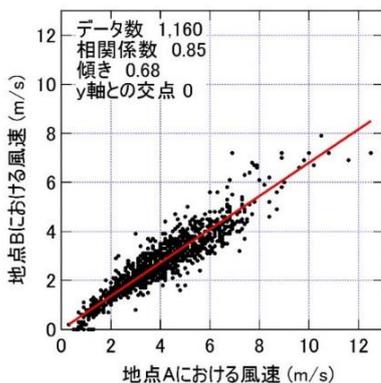


図 30 地点 A と地点 B (高さ 3m) における風速

同様の方法で、風向別に高さ 1~9m の風速比を求めた。図 31 に風向別に解析した風速比を示す。地点 B における高さ 3~9m のデータは、平成 30 年 2 月 3 日~5 月 8 日に得たものである。高さ 1m のデータは、平成 28 年 12 月 22 日~平成 29 年 3 月 18 日に得たものである。南西の風のとときに風速比が最も高く、南風・北西の風になるほど風速比が低下する。また、高さが高くなるにつれて風速比が低下する傾向にある。南西の方位が 225°であり、防雪林と直交する方位が 230°であるため、南西の風のとときに防雪林とはほぼ直交する風である(以下、直交風とする)。他方、南風や西の風のとときは防雪林に対して斜風である。すなわち高さ 9m を除くと、高さに関係なく防雪林に対して直交風から斜風になるほど風速比が低下する。

2) 飛雪流量の特徴

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 32)。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。観測地点は図 18 に示す基準点 No.0(高さ 2.5m; 地点 A)と、道路側の風下林縁の観測点 No.3(高さ 3m; 地点 B)である。

風速比と同じように飛雪流量比を計算した。地点A

の風向が西のときの飛雪流量比の算出方法を、一例として図 33に示す。風上地点Aと風下地点Bで計測された飛雪流量の散布図における回帰直線から、飛雪流量比は0.66である。相関係数は0.3と正の相関関係にあるものの、風速比のそれより低い。また、図 33から、傾き1.0を超える点(9データ)が存在している。すなわち、風上の地点Aよりも風下の地点Bの飛雪流量が多い。以降、この9データについてはSHAと記す。

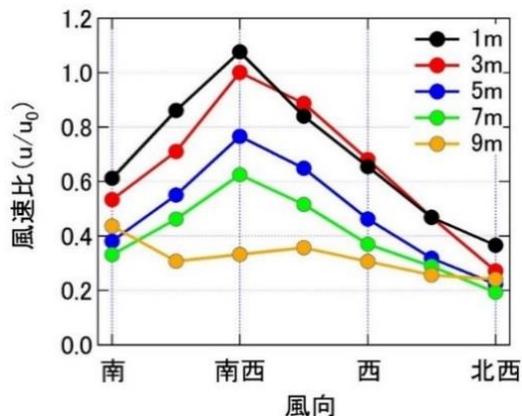


図 31 風向別の地点 B における風速比



図 32 基準点 (No.0) に設置した飛雪粒子計

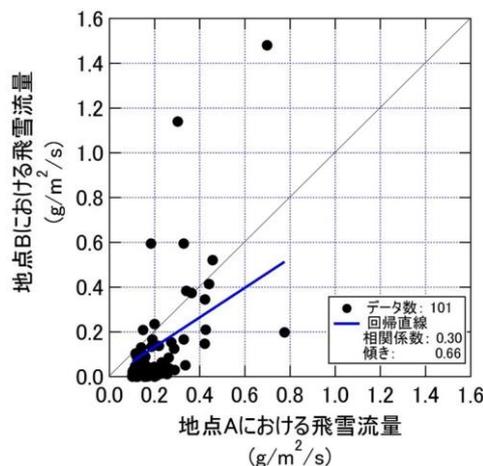


図 33 地点 A と地点 B における飛雪流量の比較
黒色実線は傾き 1.0 の直線を示す

防雪林を通過する風向では、吹雪による飛雪粒子は、

防雪林の樹木や枝葉が抵抗体となり風速が低下し、落下して吹きだまりになる。あるいはこれらの抵抗体に着雪する。そのため、防雪林を通過した後の風下では、風上よりも飛雪流量が減少するはずである。また、降雪を伴う吹雪においても、樹冠による降雪遮断があるものと考えれば、風上よりも林風下の飛雪流量が減少するはずである。したがって、図 33に示した傾き1.0を超えるSHAは、特異なものと考えられる。この原因として樹木の枝葉に積もった雪が落下して、飛雪を発生させることが挙げられる。実際に、降雪を伴う吹雪時に地点B付近で撮影した写真から、樹木に付着した冠雪からの飛雪（落雪）が認められた（図 34）。そこで、図 33の傾き1.0を超える9データ（SHA）を除き、図 35を得た。

風速比と同様に、風向別の飛雪流量比を算出した結果を図 36に示す。SHAを除く飛雪流量比がすべての風向でSHAを含む飛雪流量を下回り、風向によらず飛雪流量比がおよそ0.2~0.4の範囲に収まることがわかる。

既往研究⁸⁾⁹⁾によって、飛雪流量と視程の関係が明らかにされており、飛雪流量 (M_f) と視程 V_{is} には式(4)の関係がある。そこで、図 36 で得られた飛雪流量比から、式(4)を用いて視程比へ換算すると図 37 が得られる。SHAを除くと、視程比で2.2~3.5倍の視程障害緩和効果がある。このように、飛雪流量を防雪林風上と風下で計測することにより、防雪林の視程障害緩和効果を推定することが可能である。高さ3mにおける風速比と飛雪流量比を図 38 に示す。なお、風速比は図 31、飛雪流量は図 36のそれぞれ再掲である。風速比は防雪林に対して斜風より直交風の方が高い一方、SHAを除く飛雪流量比は風向による顕著な違いはみられない。



図 34 降雪を伴う吹雪時に撮影した、(a)樹木に付着した冠雪、(b)冠雪からの飛雪（落雪）

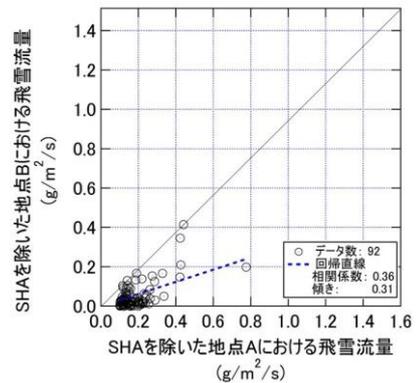


図 35 傾き 1.0 を超える点 (SHA) を除いた地点 A と地点 B における飛雪流量の比較。黒色実線は傾き 1.0 の直線を示す

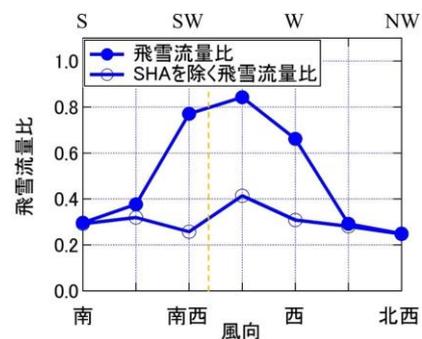


図 36 防雪林を通過する風向別の飛雪流量比。点線は防雪林に直交する風向 (230°) を示す

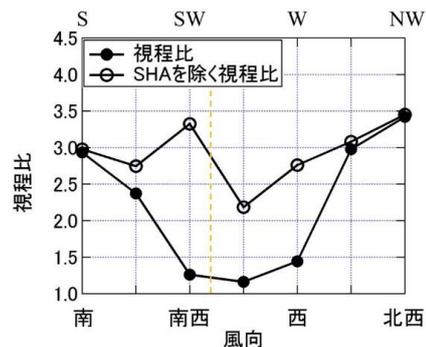


図 37 飛雪流量比から換算した風向別の視程比。点線は防雪林に直交する風向 (230°) を示す

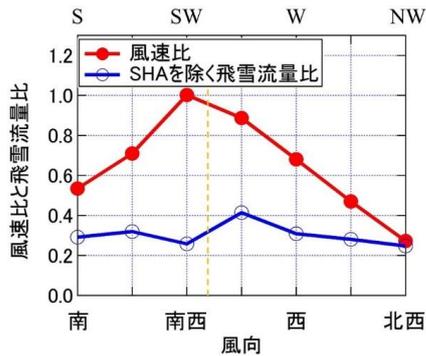


図 38 高さ 3m における風向別の地点 B における風速比と飛雪流量比
点線は防雪林に直交する風向 (230°) を示す

2. 3. 3 防雪林を通過する距離と防雪効果

図 20 に示したように、風向が変わると風が防雪林を通過する距離が変わる。雄信内防雪林の林帯幅が 30m 一律であり、防雪林に直交する風向は 230°なので、風向別に防雪林を風が通過する距離を計算できる (図 39)。



図 39 風が防雪林を通過するときの距離

風向別の風速比 (図 31) と風向別の飛雪流量比 (図 36) の横軸を、風が防雪林を通過する距離に置き換えて図 40 を得た。風が防雪林を通過する最も短い距離は南西の風 (SW, 225°) で 35m、最も長い距離は北西の風 (NW, 315°) で 380m である。ただし、風下林縁から地点 B までの距離を考慮していない。図 40 から、防雪林を通過する風の距離が長くなるほど (斜風であるほど)、風速比と飛雪流量比が低く防風・防雪効果が高いと考えられる。より詳しくみると、風速比は防雪林を通過する風の距離が長くなるほど徐々に低下する。

一方、SHAを除く飛雪流量比は最短距離の35m (南西の風) で0.4以下であり、既に風速比のそれより低い値を示している。つまり、直交風では下枝の枯れ上がりが影響して防風効果がほぼ見られないのに対して、

防雪効果に関しては、下枝の枯れ上がりは影響しない結果であった。ただし、下枝の枯れ上がりとは関係ないが、SHAの発生原因を樹木の冠雪からの飛雪とするならば、直交風のときに道路側風下まで強い風が吹き込む結果、樹木の冠雪からの飛雪が道路に流れ込む可能性はあり得ると思慮される。

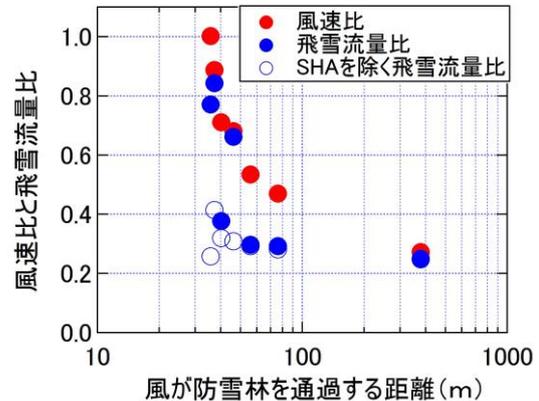


図 40 風速比・飛雪流量比と風が防雪林を通過する距離の関係

2. 3. 4 空隙率と防風・防雪効果

図 31 と図 36 から、斜風になるほど風速比と飛雪流量比が低くなる傾向と、空隙率も低くなる傾向が一致しているように考えられるため、図 41 に風速比、飛雪流量比を空隙率の関数として示す。高さ 1~7m における風速比を黒丸で示す。ただし、高さ 9m には相関が認められないため、高さ 9m の風速比を白丸で示し、回帰分析には含めていない。また飛雪流量比は高さ 3m のみの値である。

図 41 から、空隙率が高いほど風速比が高くなる傾向にあることがわかり、回帰分析から式(6)を得た。

$$u_B = 1.01 u_A A^{0.18} \quad (6)$$

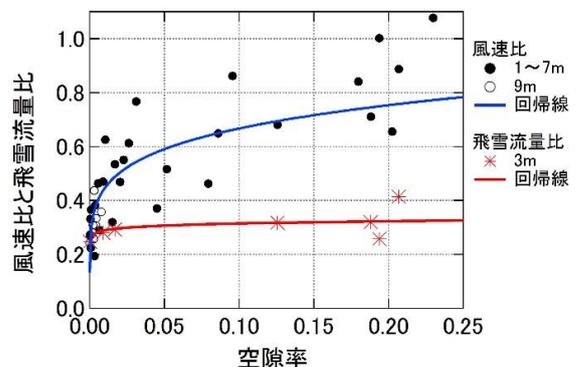


図 41 空隙率と風速比・飛雪流量比の関係

ここで u_A 、 u_B 、 A は、それぞれ風上と風下の風速(m/s)と空隙率である。また、空隙率と飛雪流量比についても累乗関数を用いて回帰分析を行い、式(7)を得た。

$$q_B = 0.34q_A A^{0.04} \quad (7)$$

ここで q_A と q_B は、それぞれ風上および風下における飛雪流量(g/m²/s)である。

次に、風速比と飛雪流量比から得られた結果について物理的な意味を考える。吹雪とは、「雪粒子が風によって空中を舞う現象」として定義される¹⁴⁾。すなわち、抵抗となる防雪林などがなければ雪粒子は風に追従する¹⁵⁾。風が防雪林を通過できるものと考えれば、飛雪粒子も風に追従するので飛雪も通過するものと思われる。しかし、本研究で得られた結果では、風速比より飛雪流量比が低い結果となった(図 38、図 41)。樹木が障害物となり飛雪粒子は着雪や吹きだまりを形成するなどして、防雪林が飛雪を捕捉したと考えれば、飛雪流量比が風速比のそれより小さくなることは想像できる。実際に、風速比を示した式(6)では、空隙率が1に近づく時、風速比も1に近づく。一方、飛雪流量比を示した式(7)では、空隙率が1に近づく時に飛雪流量比は風速比のように1には近づかない。少しでも障害物が存在すると吹雪による飛雪が樹木や枝葉に着雪することから、急激に飛雪流量比が減少する可能性があるが、今後の課題としたい。

以上のように、空隙率と風速比および飛雪流量比から導出した関係式は、防雪林の空隙率だけで防風・防雪効果を推定することが可能であると考えられる。

2. 3. 5 構成要素と防雪性能のまとめ

一般国道 40 号線沿いに造成されている雄信内防雪林において、道路側から撮影された写真により、防雪林の空隙率を解析し、防雪林風上と風下で風向・風速と飛雪流量を観測した。国道から撮影した防雪林の写真から方位別の空隙率を解析したところ、地表面に近く直交風になるほど空隙率が高い結果を得た。風速と飛雪流量の解析では、風上を基準とし、風下で観測した風速と飛雪流量を比で表現した。その結果、防雪林に対して直交する風ほど、また地表面に近いほど風速比が高く、地表面から高いところや斜風になるほど風速比が低くなる傾向にあった。飛雪流量においては風向による顕著な違いはみられず飛雪流量比は、ほぼ 0.2-0.4 の間に収まった。また、風向から風が通過する距離の関数として風速比と飛雪流量比を解析したとこ

ろ、風速比は防雪林を通過する風の距離が長くなるほど徐々に低下したのに対し、飛雪流量比は最短距離の 35m (南西の風) であっても低い値を示した。すなわち、防雪林風下の林縁高さ 3m での計測において、防雪効果に下枝の枯れ上がりの影響は小さいものと考えられる。また、空隙率が高いほど風速比と飛雪流量比が高いことから、空隙率と風速比、および空隙率と飛雪流量比を直接比較することにより、防雪林の防雪効果を評価するための関係式を導出した。ただし、飛雪流量の関係式については、風速ほど明確な結果が得られていないため、継続したデータの取得が必要である。なお、詳細については文献^{16),17),18),19),20),21),22),23)}を参照されたい。

2. 4 ICT 活用による防雪林の防雪性能の評価可能性の検討

前節では、雄信内防雪林を対象に空隙率と防雪効果との関係について整理し、空隙率が防雪林の防雪性能を評価する指標になりうることを示した。本節では、防雪林の延長方向における空隙率を連続的に評価するため、雄信内防雪林において車載カメラで動画を撮影し、画像を切り取り、魚眼レンズから空隙率を算出した手法(図 27)と同様に下枝の枯れ上がりおよび樹木の有無による空隙率を計算した。また、算出された空隙率を用いて、防雪林の移動気象観測車による風速観測の結果を評価した。移動気象観測は平成 30 年度に、空隙率の計測は令和元年度にそれぞれ実施した。

車載カメラで撮影した動画から正確な撮影地点 (KP) を算出するために車速を一定 (50km/h) にし、KP 標識と道路構造物 (橋梁) を基準とし(図 42)、画像は 60fps で取得し、KP は小数点第 3 位まで換算した。1 秒間隔で切り出した画像を 2 値化して空隙率を算出した。使用したカメラは、ウェアラブルカメラ (HERO8, GoPro Inc.) で、車両の天板に据え付けて撮影した。図 43 に、切り出し画像の一例と KP の位置関係を示す。防雪林の粗密は枯れ上がりだけでなく、取り付け道路や交差点などにより様相が異なる。

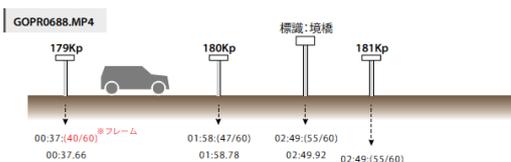


図 42 静止画の位置 (KP) と撮影時間の関係

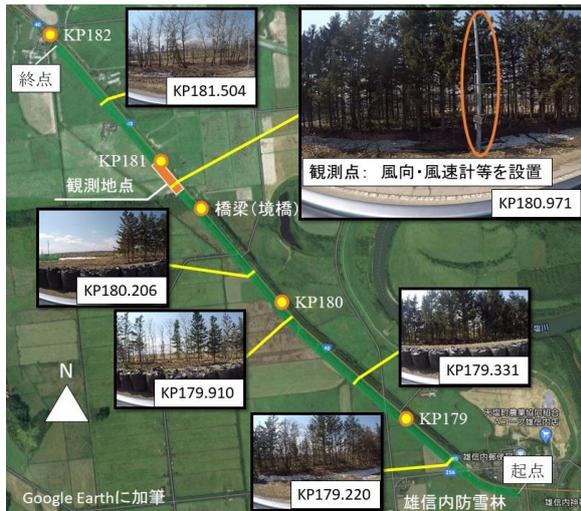


図 43 雄信内防雪林の画像取得位置

図 44 に動画から空隙率に換算した結果の一例を示す。まずは 1 秒間隔で動画から画像を切り取った。ウェアラブルカメラには広角レンズが取り付けられており、画像の端部では若干の湾曲が見られるため、トリミングした。また、車両の目線高さに合わせるため画像上端・下端をトリミングした。これ以外にも、背面の山岳部や道路標識等、防雪林以外の物体が映り込んでいる場合はトリミングして除いた。最終的に得られた画像を 2 値化し、空隙率に換算した。

視程障害移動観測車(図 45)は、超音波式風向風速計(PGWS-100-3)、GPS センサー(M12P/10S)等を搭載している。超音波式風向風速計では 10Hz の時間間隔で風速を計測し、観測地点 (KP) については GPS センサーで取得した情報を基に算出した。

吹雪が発生した平成 31 年 1 月 17 日に、雄信内防雪林の延長約 4.1km を往復 11 回走行して風速を観測した。観測地点における基準点の風向風速計(図 18)から、卓越風向は西および北西の風、平均風速は 8.5m/s であった。

図 46 に、移動気象観測で得られた風速と空隙率の換算結果を示す。一般国道 40 号沿いの風速観測結果は概ね基準点の平均風速よりも低い。ただし、風速 8.5m/s 以上の箇所もあり、たとえば KP181.319 付近など空隙率が高い箇所では、極端に風速が高い場合もみられる。

図 41 に掲載した魚眼レンズで撮影した風速比と空隙率の関係と比較するため、平均風速 8.5m/s を基準(分母)として図 46 に掲載した風速を風速比で表現し、図 47 に示す雄信内防雪林延長における風速比と空隙率の関係から、回帰分析により式(8)を得た。

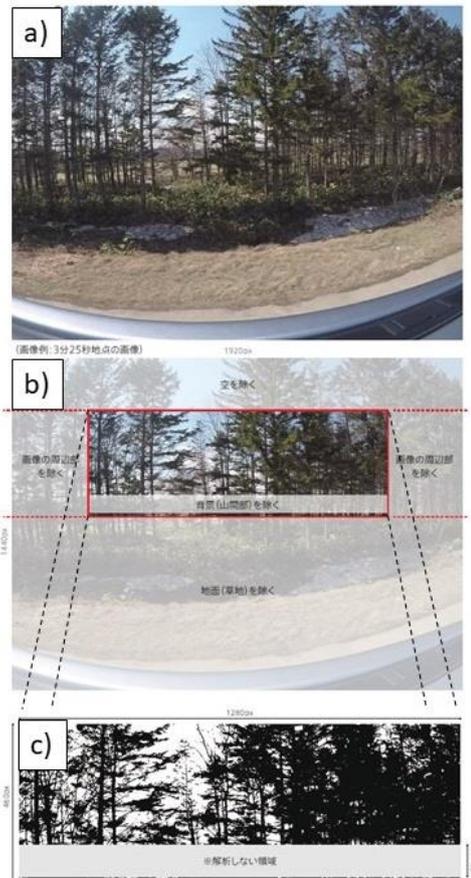


図 44 動画から切り取った画像の空隙率換算方法
a) 動画から切り取った画像、b) 画像のトリミング、c) トリミングされた画像の 2 値化画像



図 45 移動気象観測車

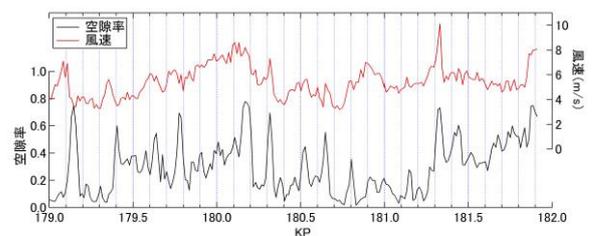


図 46 雄信内防雪林延長(KP)における空隙率と風速

$$u = 0.8u_0A^{0.15} \quad (8)$$

次に、上記式(8)と、図 41 の結果を回帰分析した式(6)を比較した (図 47)。移動気象観測と防雪林延長の動画で得られた回帰線 (式(8)) の方が低い値となった。移動気象観測と防雪林延長の動画で得られた結果は過小評価していることになるが、これは空隙率算出のために撮影した動画の画角 (防雪林と直角方向) と風向 (防雪林に対して斜風) にズレが生じていることに起因していると考えられる。

令和元年度に実施した結果、過小評価ではあったが移動気象観測と防雪林延長の動画で得られた画像から空隙率に換算することで、防雪林延長における防風効果を評価可能であることを示した。防風効果に言及する場合、たとえば図 47 の回帰線によれば防雪林の空隙率が 0.1 の場合、風速比は 0.5 となる。風上の風速が 10m/s であれば吹雪により視程不良であると考えられるが、空隙率 0.1 の場合は風速比 0.5 程度であることから道路上の風速は 5m/s となる。吹雪の臨界風速 (5~6m/s)²⁴⁾を鑑みれば、道路上の視程は比較的良好であったと推察される。

以上のように、防雪林の空隙率を計測しただけで道路上の吹雪の状態を推定可能となるため、防雪林延長の動画で得られた画像解析は新しい評価方法になり得るものと思慮される。ただし、現段階では防雪林の林帯幅や平均樹高を考慮していない点は添えておきたい。

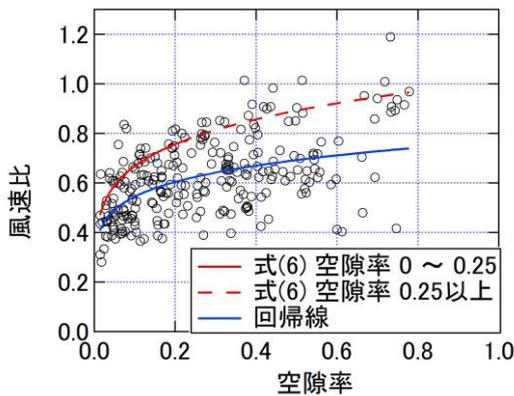


図 47 雄信内防雪林延長の風速と空隙率の関係
青線 (回帰線) : $u = 0.8u_0A^{0.15}$

2. 5 下枝の枯れ上がりに関する風洞実験

本節では、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、令和元年度までに実施した風洞実験結果を整理した。平成 30 年度まではモルトフィルター材、令和元年度は PLA 樹脂を用いた模型を製作し、枯れ上がり有りおよび無しの実験を実施した。

2. 5. 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 48) を使用する。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 49)。

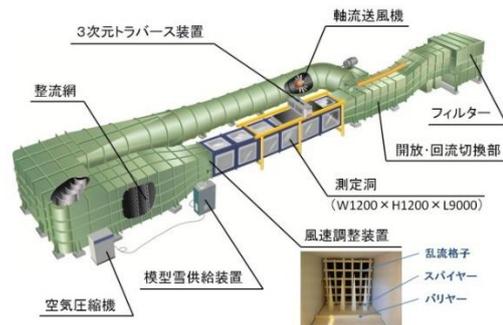


図 48 風洞実験装置



図 49 風洞実験装置のターンテーブルと防雪林模型

2. 5. 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²⁴⁾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
- (2) 風洞断面の大きさによる制限
- (3) 測定項目からの制限

(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²⁴⁾。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²⁶⁾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²⁴⁾。

(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^{26)・29)}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 φ1188.5mm×高さ 50mm であり、差替部は幅 300mm×長さ 1150mm である（図 49）。

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 50）とし、同パターンを繰り返し配置した。本実験では図 50 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。

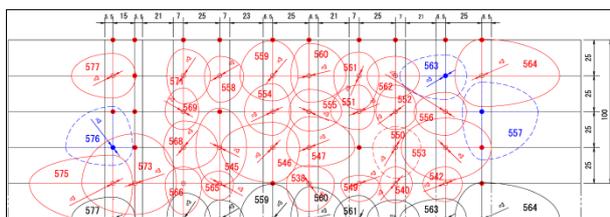


図 50 一般国道 40 号線沿い雄信内防雪林の調査結果から製作した植栽配置構成図

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 49、図 51）。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^{26)・28)}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

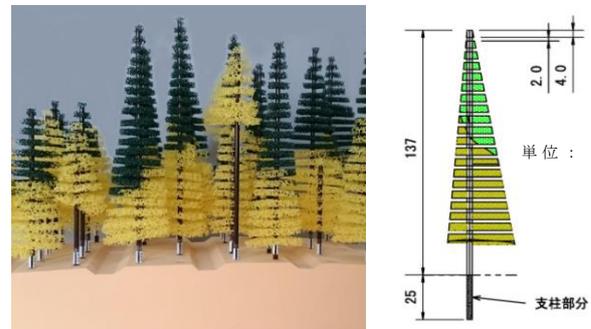


図 51 樹木模型

上がった部分に MF-8（セル数 8 ± 2 個/25mm²）を、上部にある緑色の生きた枝葉に MF-13（セル数 13 ± 3 個/25mm²）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（φ3mm）を使用した。

2. 5. 3 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。

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 0.15³⁰⁾）に近似するよう、気流を調整した²⁶⁾。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=50mm）³¹⁾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、2.2 節の雄信内防雪林の気象等観測結果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 49）。

2) 計測方法

風速計測には日本カノマックス(株)製の熱線流速計 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、2.2 節で記した、雄信内防雪林において固定観測を行った 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 52 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）。

各地点のデータは、No2 は 3 点、No3~No5 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 52）に設定した。

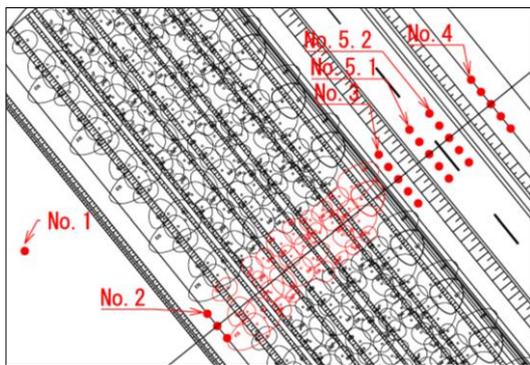


図 52 風速計測点位置図

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 章 3 節で述べた観測期間（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。

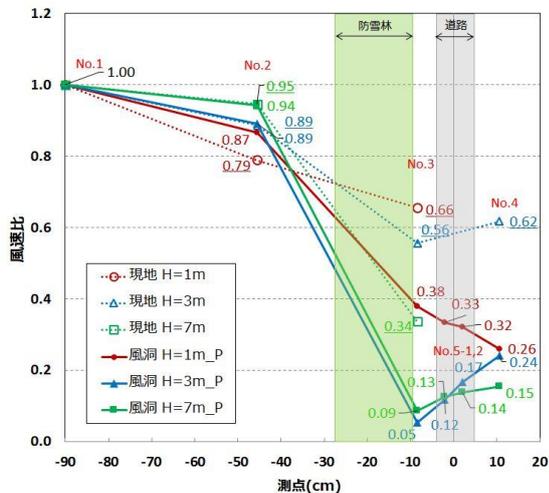


図 53 計測点横断方向の風速比（風洞・現地）

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 53 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。

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。

2. 5. 4 防雪林模型の下枝の枯れ上がりによる影響解析

2. 5. 3 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。

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 54)。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 55)。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。

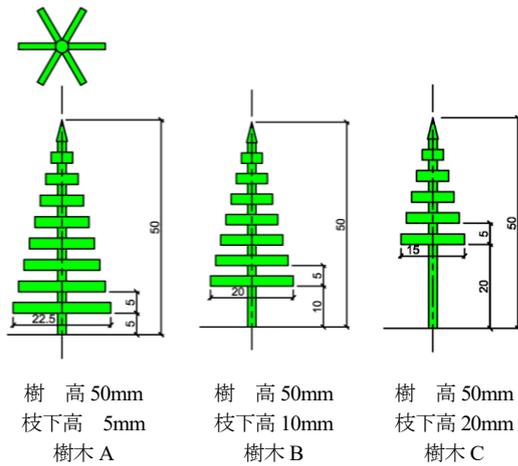


図 54 樹木模型

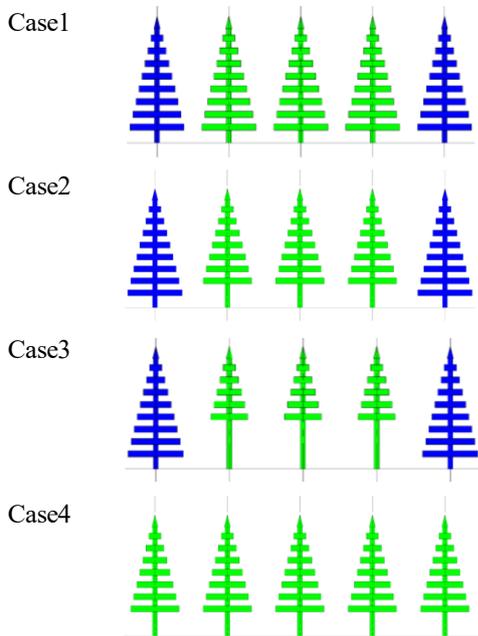


図 55 植栽配置側面図

- 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

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³²⁾。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、流速と表現する。

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) 実験装置

実験には寒地土木研究所の風洞実験装置 (図 48) を使用した (2. 5. 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 56)。



図 56 樹木模型を配置した様子

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 31) 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目線高さ ($H=1.5\text{m}$) 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 57 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。

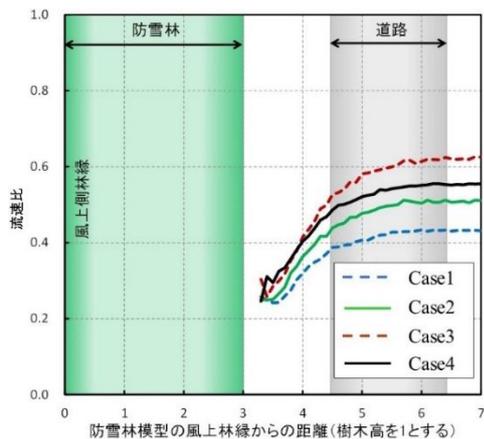


図 57 防雪林模型から風下の水平方向における流速比 (ドライバーの目線高さに相当する $h=15\text{mm}$ の流速比)

図 58 に、林縁・林内全ての枝下高を 10mm としたときの流速比 (図 57 の Case4) と、林内だけ枝下高 10mm としたときの流速比 (図 57 の Case2) の比を示した。(Case2) は (Case4) 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、下枝が枯れ上がった結果と考えられる。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。

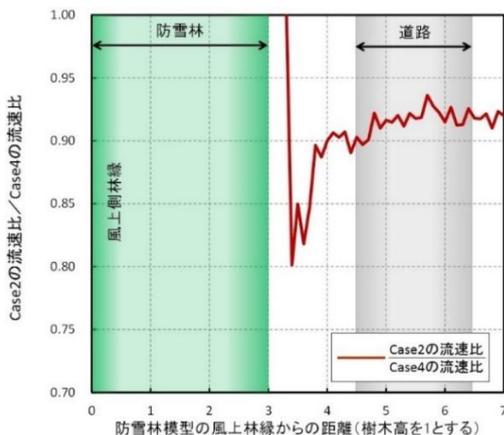


図 58 枝下高 10mm とした防雪林模型における林内／林縁・林内の流速比 (林縁・林内とも枝下高を 10mm とした模型による流速比を基準としたもの。 $h=15\text{mm}$)

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、2. 5. 2 で製作した防雪林模型の枯れ上がり部分において、特に林縁部の修整を慎重に行うこととした。

2. 5. 5 防雪林模型の修整

「2. 5. 3 現地観測の再現実験」結果より、模型実験の風速比が低い傾向にある。防雪林模型における現地観測で得られた風況の再現性を高めるため、模型の修整を行った。

1) 模型修整手順

修整は、減風効果に大きく影響がない項目から着手し、間引きから枝葉 (モルトフィルター) の剪定の順で実施した。都度風洞実験にて風況を観測、その結果を踏まえ、次の修整を考察した。以降、修整、実験、考察を繰り返し現地観測に近づけた。

2) 実験装置、実験条件、計測方法

実験には寒地土木研究所の風洞実験装置 (図 48) を使用した (2. 5. 1 を参照)。実験条件、計測方法は 2. 5. 3 と同様とした。実験のパターンと防雪林模型の樹木本数を表 3 に示す。パターン P は修整前の模型林である (平成 29 年度実施、実験結果は図 53)。パターン 1~4 は間引きのみで修整した模型林である (平成 30 年度実施)。

表 3 各パターンと防雪林模型の樹木本数

	防雪林模型の樹木本数 (本)										(H: 高さ mm)
	列1	列2	列3	列4	列5	列6	列7	列8	列9	列10	
	H=80	H=117	H=94 H=102 H=96 H=65	H=85 H=86 H=99	H=143 H=137 H=154	H=137 H=142 H=158 H=136	H=132 H=82 H=141	H=131 H=129 H=116 H=49	H=149 H=143 H=64	H=147	
パターンP (P)	11	11	44	33	33	44	33	44	33	11	297
パターン1 (P1)	-	-	44	33	33	44	33	44	33	11	275
パターン2 (P2)	-	-	44	33	-	-	33	44	33	-	187
パターン3 (P3)	-	-	44	33	-	-	33	44	11 H=64	-	165
パターン4 (P4)	-	-	22 H=94 H=102	11 H=99	-	-	33	44	11 H=64	-	121



図 59 防雪林模型の樹木配置 (パターン P)

防雪林模型の横断方向の配置を図 59 に示す。防雪林模型の樹木は横断方向に 10 列で、樹木の高さは 49mm~158mm、樹木の本数は全部で 297 本である。樹木の配置は列 1 が風上側、列 10 は風下の道路側である。

3) 実験結果と考察

模型の修整については、各項目毎風洞実験にて風況を確認しながら、以下の手順にて実施した。



図 60 パターン 1

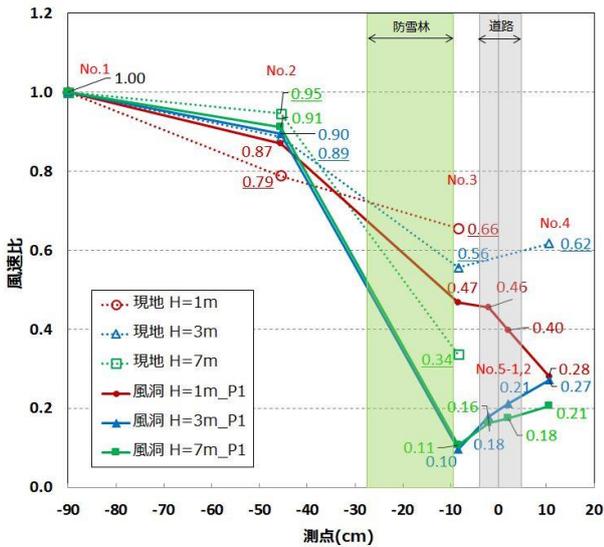


図 61 計測点横断方向の風速比
(パターン 1・現地)

(パターン 1) 落葉樹の間引き

冬期間葉を落とし減風効果がないことから、まず風上側落葉樹(列 1, 2)について間引いた。間引き後の樹木の本数は 275 本である。

(結果)

修整前に比べ現地観測にやや近づいたが、全体的に乖離している(図 61)。

(パターン 2) 林内部の間引き

パターン 1 の結果より全体的に減風効果の低減が必

要なため、風下側落葉樹と、「2. 5. 4」を踏まえ林縁部を残し林内部中心列(列 5, 6)を間引いた。間引き後の樹木の本数は 187 本である。

(結果)

大きく本数を間引いたため、パターン 1 より H=1m, H=3m, H=7m とともに風況が現地観測に近づいたが乖離はまだ大きい(図 63)。



図 62 パターン 2

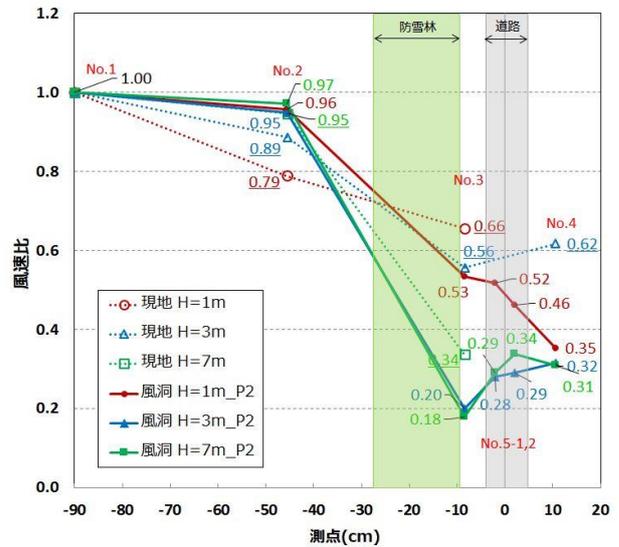


図 63 計測点横断方向の風速比
(パターン 2・現地)

(パターン 3) 風下側林縁部の間引き

林内部を間引いても乖離が大きいため、林縁部の間引きを行った。風上側に比べ、影響の少ない風下側から実施した。全体的に現地観測と乖離が大きいため、水平方向に枝葉が大きく張り出し、各高さで減風効果が大きい高い樹高のものから間引いた。(列 9, H=149mm, H=143mm)。間引き後の樹木の本数は 165 本である。

(結果)

H=7m は現地観測値に近づいた。H=1m, H=3m については乖離が確認された(図 65)。

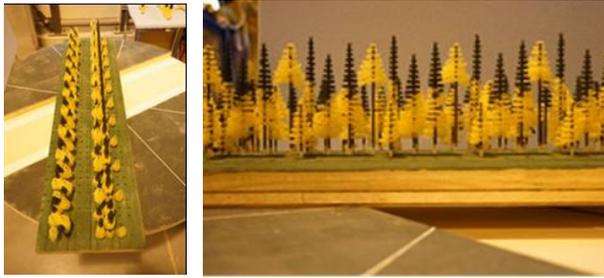


図 64 パターン 3

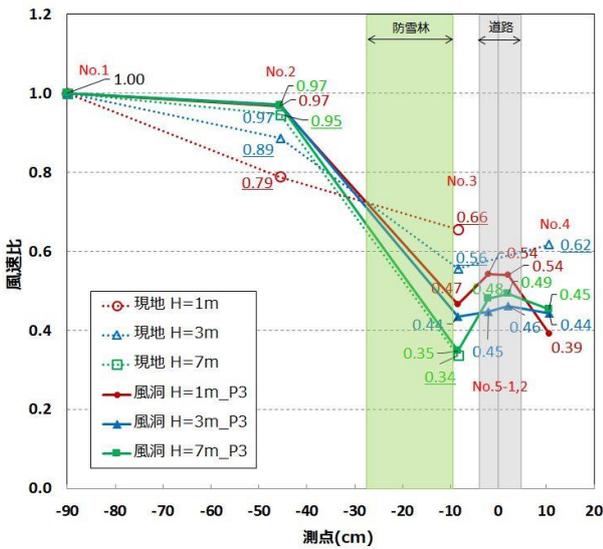


図 65 計測点横断方向の風速比
(パターン 3・現地)

(パターン 4) 風上側林縁部の間引き

風下側林縁部においてこれ以上の間引きは、防雪林模型の林帯幅が狭くなり、現地との差異が大きくなる。それにより、現地防雪林の防雪性能における林帯幅の要因が確保できなくなるため、風上側の林縁部を間引いた。全体的に枝葉を減らせるよう、列 3 は 4 種類ある樹高のなかで 2 番目と 4 番目に高い樹高のものを間引き (列 3, H=96mm, H=65mm)、列 4 は 3 種類の中で 2 番目と 3 番目に高い樹高のものを間引いた (列 4, H=85mm, H=86mm)。パターン 4 を図 66 に示す。間引き後の樹木の本数は 121 本である。

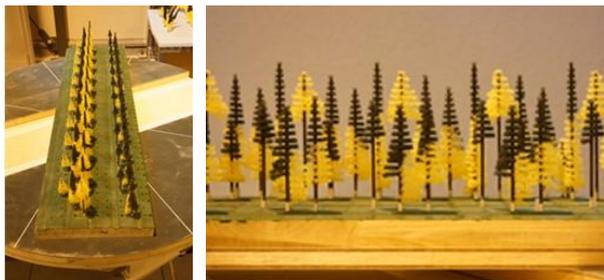


図 66 パターン 4

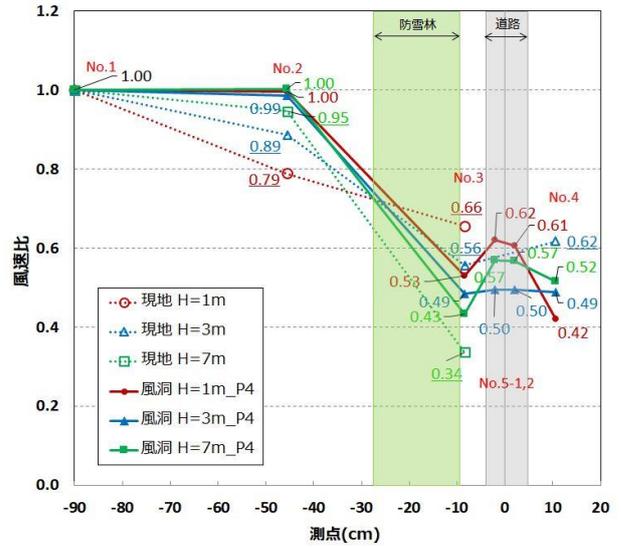


図 67 計測点横断方向の風速比
(パターン 4・現地)

(結果)

H=1m, H=3m は近づいたが、H=7m においては、風速比が増し乖離が大きくなった (図 67)。

(各パターン of 現地風速比の乖離)

現地観測と各パターン 1~4 の風速比との乖離を表 4 に示す。乖離は風洞実験値と現地観測値の風速比の差を、現地観測値を基準とした割合で算出した。

$$\text{乖離} = \frac{\text{風洞実験風速比} - \text{現時観測風速比}}{\text{現地観測風速比}} \quad (8)$$

各パターン 1~4 の平均値は、全体の乖離度合いを比較するため高さ H=1m, H=3m, H=7m の乖離値の絶対値の平均とした。風速比は図 52 の地点 No3 の値とした。

各パターン of 乖離の平均値は、模型を修整していないパターン P が 69% で、模型を修整したパターン 1 が 60%、パターン 2 が 43%、パターン 3 が 18% と修整する程小さくなった。パターン 4 は模型林を間引きし過ぎて高さ H=7m の乖離が +29% まで上がり、そのため乖離の平均値が 20% と、パターン 3 より大きくなった。

表 4 現地観測とパターン1~4の風速比との乖離

	高さ			乖離の 平均値
	H=1m	H=3m	H=7m	
現地観測	0.66	0.56	0.34	
パターンP (P)	0.38 -42%	0.05 -90%	0.09 -74%	69%
パターン1 (P1)	0.47 -28%	0.10 -82%	0.11 -68%	60%
パターン2 (P2)	0.53 -18%	0.20 -64%	0.18 -47%	43%
パターン3 (P3)	0.47 -29%	0.44 -22%	0.35 +3.6%	18%
パターン4 (P4)	0.53 -19%	0.49 -13%	0.43 +29%	20%

※ 上段:風速比、下段:乖離

(パターン3 剪定) 枝葉の剪定

パターン4は乖離が大きくなったので、以降、パターン3をもとに、枝葉(モルトフィルター)の剪定のみで修整を行うこととした。

剪定は、H=1m, H=3m, H=7mの風洞実験結果をもとに、減風効果の高い階層のモルトフィルターを剥離させ調整した。剪定のための修整のため、風洞実験を進めるための目安として各階層の空隙率を算出した。空隙率は模型を風向方向から撮影し、樹木・枝葉の部分の2次元的な占有率にて算出した。計8回剪定と実験を繰り返し、現地観測値に近づけた。表5に各パターンS1~S8の枝葉(モルトフィルター)の剪定箇所を示す。

(結果)

現地観測と各パターンS1~S8の風速比との乖離を表6に示す。最終的にパターンS8で乖離の平均値は4.8%まで現地観測に近づけることができた。パターンS8の測点と風速比の関係を図68に示す。

表 5 各パターンS1~S8の枝葉の剪定箇所

	防雪林模型P3の枝葉(モルトフィルター)の剪定箇所
パターンS1 (P3S1)	P3樹木の列7 Z=24/H=82, 列8 Z=28/H=116, 列8 Z=15/H=49, 列8 Z=27/H=49, 列9 Z=24/H=64
パターンS2 (P3S2)	S1樹木の列7 Z=29/H=141
パターンS3 (P3S3)	S2樹木の列4 Z=22/H=86, 列4 Z=28/H=86
パターンS4 (P3S4)	S3樹木の列3 Z=30/H=94, 列3 Z=38/H=102
パターンS5 (P3S5)	S4樹木の列3 Z=12/H=94, 列3 Z=18/H=94
パターンS6 (P3S6)	S5樹木の列8 Z=35/H=129, 列9 Z=36/H=64
パターンS7 (P3S7)	S5樹木の列8 Z=9/H=49
パターンS8 (P3S8)	S5樹木の列3 Z=26/H=102

Z:剪定位置(mm) H:模型林の高さ(mm)

表 6 現地観測とパターンS1~S8の風速比との乖離

	高さ			乖離の 平均値
	H=1m	H=3m	H=7m	
現地観測	0.66	0.56	0.34	
パターンS1 (P3S1)	0.57 -14%	0.44 -21%	0.32 -5.5%	13%
パターンS2 (P3S2)	0.57 -14%	0.44 -22%	0.31 -7.7%	14%
パターンS3 (P3S3)	0.58 -11%	0.46 -17%	0.33 -1.2%	10%
パターンS4 (P3S4)	0.59 -11%	0.46 -18%	0.33 -1.1%	10%
パターンS5 (P3S5)	0.62 -5.9%	0.51 -8.8%	0.35 +4.9%	6.5%
パターンS6 (P3S6)	0.60 -8.8%	0.51 -8.8%	0.35 +5.5%	7.7%
パターンS7 (P3S7)	0.64 -2.3%	0.51 -9.0%	0.35 +5.2%	5.5%
パターンS8 (P3S8)	0.65 -0.1%	0.51 -8.4%	0.36 +5.8%	4.8%

※ 上段:風速比、下段:乖離

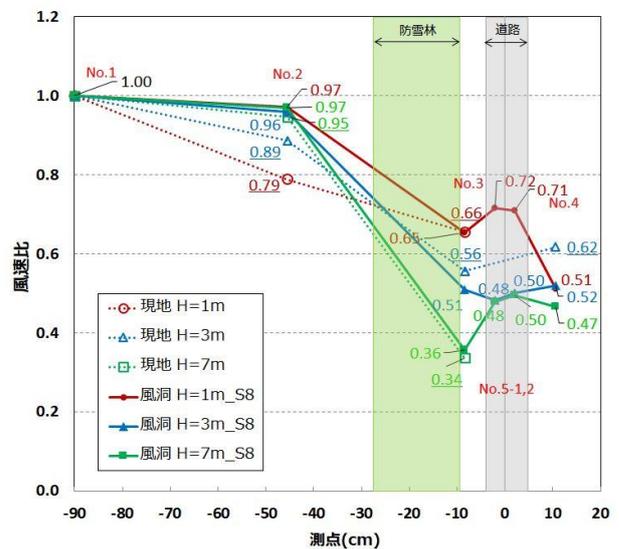


図 68 計測点横断方向の風速比 (パターンS8・現地)

2. 5. 6 防雪林模型の再検討

前項までの「2. 5. 3 現地観測の再現実験」結果と、「2. 5. 3 防雪林模型の修正」のモルトフィルターを用いた模型実験では風速の減速が著しく、現地と風速比を合わせるために6割の樹木模型の間引をしたため、防雪林の形体を維持できず、現地と大きく異なる形体となった。このため、令和元年度は、現地観測結果から枯れ上がり分布の解析を行い、模型の材質と形状を再度検討し模型を製作して、枯れ上がりの有無による防雪性能を把握するため実験を行った。

1) 枯れ上がり分布の解析

現地観測では方位4方向(50°、140°、230°、320°)の下枝の枯れ上がりを計測している。枯れ上り分布の特徴について、枯れ上がりがある樹木と枯れ上がりが無い樹木の種類、枯れ上がりの方位と高さ分布の解析

(1) 枯れ上がりが有る樹木は全て針葉樹で、落葉広葉樹は枯れ上がりが無い。

(2) 生枝下高(地上から生枝までの高さ)は、道路側の樹木ほど高くなる傾向がある。この原因として自動車の排気ガスの影響が考えられる。

(3) 列10の樹木番号564は方角140°と230°、樹木番号557は方角230°と320°の2方位の枯れ上がりが大きい。この原因として図71と図72の通り、南西に高い樹木があり日差しを遮り、日射不足となるためと考えられる。列9の樹木番号542は枝葉全て枯れ上がっている。これは道路側に近く、樹高も低いため殆ど日差しが当たらないためと考えられる。

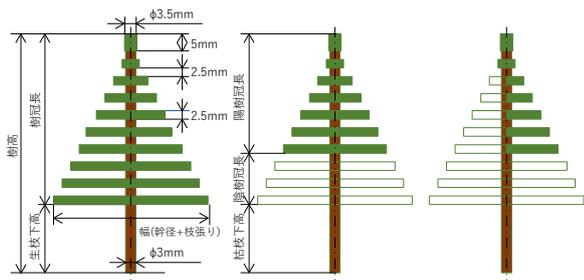
2) 枯れ上がり有り無しを再現した模型の製作

枯れ上がり分布の解析結果より、「枯れ上がり」と「枯れ上がり無し」の防雪林模型を製作した。

ア) 樹木模型の材質と寸法

表7の枯れ上がり分布の解析を元に、a)「枯れ上がり無し模型」、b)下枝に枯れ上がりがある「枯れ上がり模型(下枝)」、c)下枝の枯れ上がりと、防雪林の奥側2方位に枯れ上がりがある「枯れ上がり模型(下枝・奥側)」の3種類の樹木模型を製作した。

図69に模型寸法、図70に樹木模型と枝葉パーツを示す。模型寸法は1/100とした。様々な枯枝・生枝が簡易に再現できるように、枝葉と幹をパーツにて製作し脱着できる構造とした。枝葉パーツの高さは2.5mm、枝葉パーツの長さは0.5mm単位、枝葉パーツ間の空間は2.5mm、樹高、生枝下高、枯枝下高、



a) 枯れ上り無し模型 b) 枯れ上り模型(下枝) c) 枯れ上り模型(下枝・奥側)

図69 枯れ上がり無し模型と枯れ上がり模型

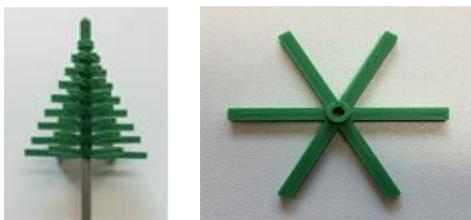


図70 樹木模型と枝葉パーツ

陽樹冠長、陰樹冠長は5mm単位で作製した。枝葉パーツの材質はPLA樹脂を用いた。幹パーツは直径3mmのステンレス棒を使用している。枝葉パーツの層数は表7のa)欄に記載する。

イ) 枯れ上がりの有る樹木模型

枯れ上がり模型の列1から列9の樹木模型は枯れ上がり模型(下枝)とし、現地観測した4方位の生枝下高の平均値まで下層の枝葉パーツを取り除いた。枯れ上がり模型(下枝)の枝葉パーツの層数を表7のb)欄に記載する。列10の樹木模型は枯れ上がり模型(下枝・奥側)とし、現地樹木の下枝と奥側半分は枯れ上がりがあるため、枯れ上がりが2方位ある箇所は枝葉パーツの枝6本のうち3本を切り取り、枯れ上がりが3方位から4方位ある箇所は枝葉パーツを取り除いた。枯れ上がり模型(下枝・奥側)の枝葉パーツの層数を表7のc)欄に記載する。

ウ) 模型の樹木配置

枯れ上がり無し模型1ブロックの配置を図71に、枯れ上がり模型の配置を図72に示す。樹木の配置は「2.5.3 防雪模型の検討と製作」を基本とした。樹木番号575, 546, 555, 556は隣の模型と干渉して設置できなかった。樹木番号576も隣の模型と干渉するため同じ列内で移設した。模型の樹木本数は1ブロック27本、全体で11ブロック297本である。

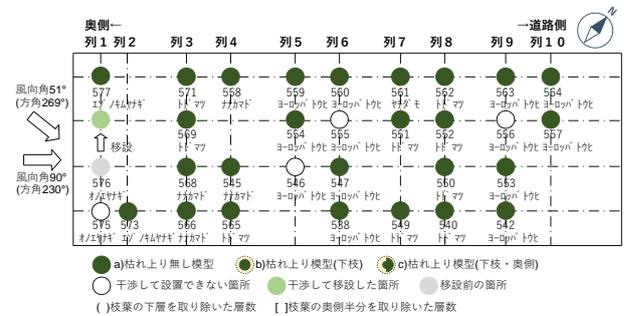


図71 枯れ上がり無し模型の配置

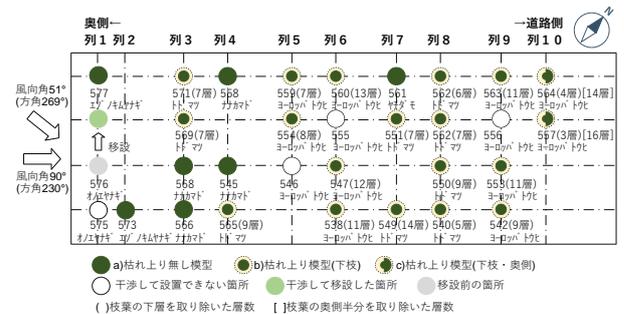


図72 枯れ上がり模型の配置

3) 実験条件

「2. 5. 3 現地観測の再現実験」の計測方法（計測点）を基本に、風向角は前年度までと同じ斜風 51° と、道路に直角な直交風 90° の 2 通り、模型は枯れ上がり無し模型（図 73）と枯れ上がり模型（図 74）の 2 通り、風速の計測高さは H=10mm, H=30mm, H=70mm の 3 点で実験を行った。



図 73 枯れ上がり無し模型の側面と実験状況



図 74 枯れ上り模型の側面と実験状況

4) 実験結果と考察

ア) 枯れ上がり模型の風況

枯れ上がり模型の計測点横断方向の風速比を図 75 に示す。風況（風速比の変化）は計測高さ H=10mm、

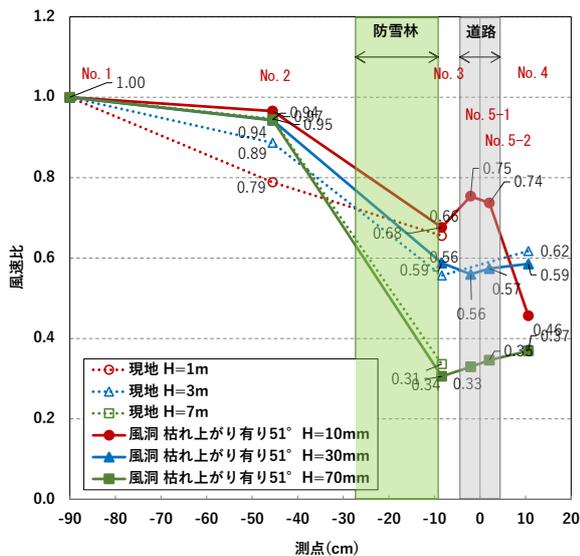


図 75 計測点横断方向の風速比（枯れ上がり模型 風向角 51°）

H=30mm、H=70mm とも風洞実験と現地観測がほぼ一致している。現地観測と風洞実験の風速比の乖離（No3 地点）は、表 8 に示す 6%程度であった。風洞実験と現地観測の風速比が近く、枯れ上がり模型において現地の風況に近づける事が出来た。

表 8 現地観測と枯れ上がり模型の風速比の乖離

	高さ			乖離の平均値
	H=1m	H=3m	H=7m	
現地観測	0.66	0.56	0.34	
枯れ上がり模型	0.68 +3%	0.59 +6%	0.31 -9%	6%

※ 上段:風速比、下段:乖離

イ) 枯れ上がりによる防雪性能の低下

図 76 に高さ H=10mm の風向角と枯れ上がり有無の比較を示す。また、枯れ上がり有りとなしとの風速比の差を図 79 に示す。風向角 51° の時枯れ上がりが無しは 0.55 で、枯れ上がりが有り 0.68 と 0.13 上昇している。枯れ上がり無しの状態でも枝葉が少ないので、風速比の上昇が小さいと考えられる。風向角 90° は、枯れ上がり無し 0.36 から枯れ上がり有り 0.69 と 0.33 上昇している。高さ H=10mm は斜風の防雪性能低下は小さいが、直交風の防雪性能の低下が大きい。風向角 90° の時、高さ H=30mm の風速が早いので、その風が高さ H=10mm に入り込んでいるためと考えられる。

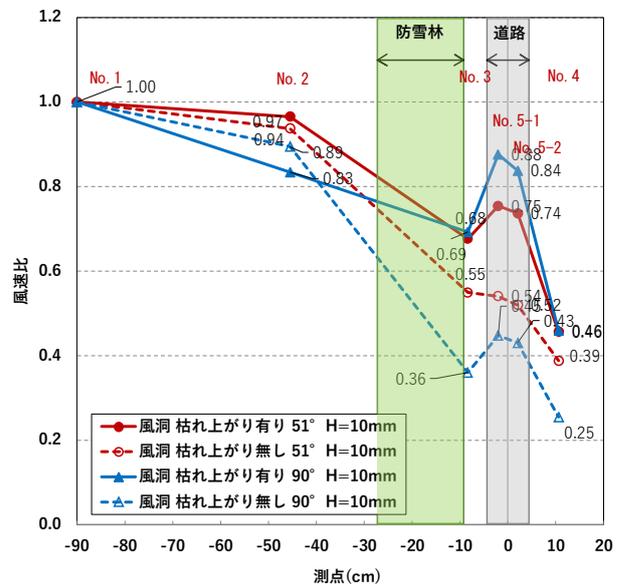


図 76 風向角と枯れ上がり有無の防雪性能（高さ H=10mm）

図 77 に高さ H=30mm の風向角と枯れ上がり有無の比較を示す。風向角 51° の風速比は枯れ上がりが無し

0.13 で、枯れ上がりが有ると 0.59 と 0.46 上昇している。防雪性能低下が大きく、枯れ上がりで枝葉が無くなる箇所が多いためと考えられる。高さ H=30mm 風向角 90° は、枯れ上がり無し 0.12 から枯れ上がり有り 0.70 と 0.58 に上昇している。高さ H=30mm は防雪性能低下が大きい、特に直交風の防雪性能低下が大きい。林帯を上がって降下する風と、林帯の中（枯れ上がり箇所）を通過する風の比率が変わるためと考えられる。

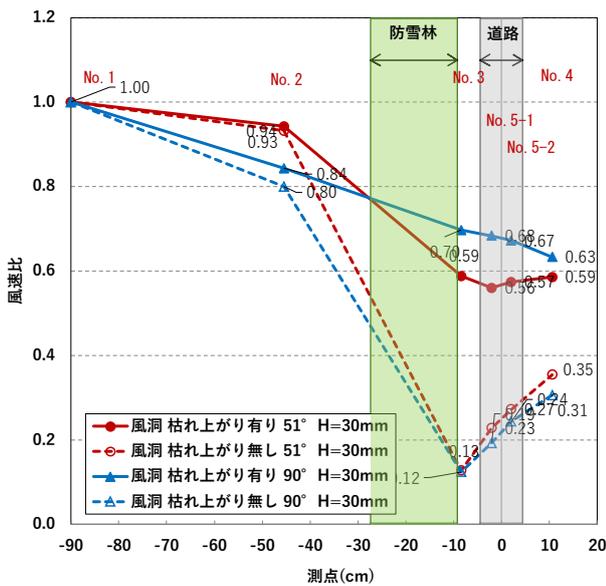


図 77 風向角と枯れ上がり有無の防雪性能 (高さ H=30mm)

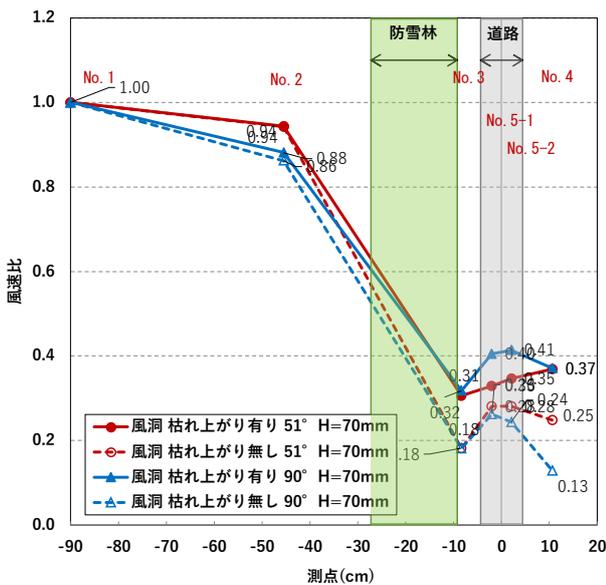


図 78 風向角と枯れ上がり有無の防雪性能 (高さ H=70mm)

図 78 に H=70mm の風向角と枯れ上がり有無の比較を示す。風向角 51° の風速比は枯れ上がりが無し 0.18 で、枯れ上がりが有り 0.31 と 0.13 と上昇している。高さ H=70mm 風向角 90° は、枯れ上がり無し 0.18 から枯れ上がり有り 0.32 と 0.14 上昇している。高さ H=70mm は枯れ上がり箇所が少ないため、風向角 51°、風向角 90° とともに風速比の増加が少ないと考えられる。

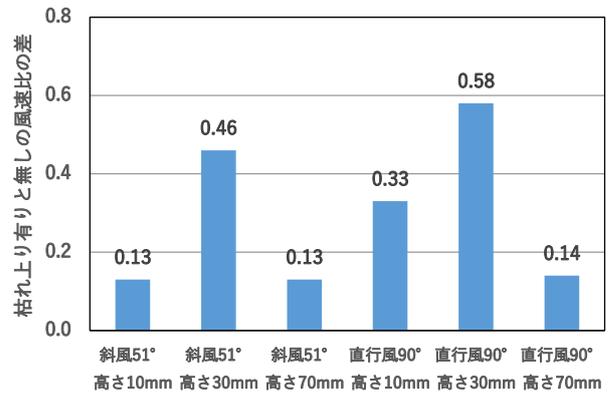


図 79 枯れ上がり有無の風速比の差

2. 6 防雪林の構成要素と防雪性能における今後の展望

現在、防雪林（標準林）の整備においては、最大吹きだまり量に応じて林帯幅（11~32m）が決定される。仮に、空隙率に基づく防雪林の性能評価が可能になれば、空隙率に基づく防雪林の整備によるコスト縮減に貢献できる可能性があると考えられる。以下に、3 点例示する。

- ① 防雪林内部で下枝の枯れ上がりが見られたとしても、林縁で枝葉が繁茂し空隙率が十分に低ければ（すなわち、十分な防雪性能が確保されていれば）更なる対策を講じる必要がない。
- ② 現在の防雪林では初期生長期に生育不良を伴いやすいマツ科が利用されているが、初期の生育不良を回避するためにマツ科以外の樹種を利用し、性能を確保可能な空隙率となる配置を検討する。
- ③ 性能を確保可能な空隙率から最小の林帯幅（狭林幅）を導出することで、効率的な防雪林整備につなげる。

今後、空隙率と防雪性能の関係解明に向け、現地観測や風洞実験によるデータの解析を引き続き進める予定である。

3. 防雪性能が低下した防雪林への補助対策の提案

3. 1 補助対策に関する資料調査

防雪性能が低下した防雪林の補助対策工法として、①低木等の植生、②ネット柵などが挙げられる。低木等の場合は、日照時間が重要となるため林縁に植栽する必要がある。ネット柵の場合は、配置箇所に限りはない。ただし、防雪林が植物である以上、人工的な柵を防雪林内外に配置することへの違和感は否めない。まずは、双方のメリットとデメリットを把握することを目的に資料調査等を実施した。

3. 1. 1 多様な植生を活用した補助対策

防雪林の基本林は、アカエゾマツをはじめとするヨーロッパトウヒやトドマツなどマツ科の樹種で構成される(図 2、図 5)り。また、防雪林の林縁には、基本林の初期成長を保護するため前生林が配置され、初期生長の早いヤナギ属などが主に採用される(図 2)り。施工現場では、基本林のマツ科よりも主に初期段階でヤナギ属の樹高が高くなり、被圧に伴い基本林の成長を妨げるケースがみられる。そこで、本項では基本林の被圧の影響が極力発生しない低木の他、ヤナギ属の単一林、農作物による補助対策について調査した。なお、調査対象は我が国の防雪林ではなく、先駆的に防雪林を活用している米国の文献が主体である。米国では植生を活用した吹雪対策を Living Snow Fence (LSF)³³⁾としており、我が国の防雪林も LSF に含まれる。ここでは、米国で LSF に利用される植物の種類と吹雪捕捉量について整理し、日本での LSF の適用性について考察した。

1) 米国で LSF に利用される植物の種類と吹雪捕捉量

米国で利用されている LSF の樹種は様々である。我が国でも利用されている 1)常緑針葉樹だけでなく、2)ヤナギ、3)トウモロコシも LSF として研究されている³⁴⁾。

ア) 常緑針葉樹

針葉樹の多くは常緑樹であるが、カラマツやヌマスギなどの落葉樹もある。LSF には主に針葉樹のうち、分類学的にはマツ科が用いられ、米国ではマツ科トウヒ属(*Picea*)が主である。たとえば、オウシュウトウヒ(*Picea abies*)、コロラドモミ(*Abies concolor*)などがある³⁴⁾。

イ) ヤナギ属

前章で述べたようにヤナギは、バイオマス、野生動物の生息環境、二酸化炭素の固定だけでなく LSF に利用することで複数の利点が期待されている。そのため、ヤナギに関する先行研究の件数も群を抜いて多い

(Heavey & Volk (2014)³⁴⁾など)。

ウ) トウモロコシ

トウモロコシ (*Zea mays*) は、バイオ燃料として着目されている植物である³⁶⁾。米国農務省によると、トウモロコシの生産量は食用を含めて年間 4 億トンにもなり、世界の輸出量の 40 %を占めている³⁷⁾。ここで、LSF としてのトウモロコシに関する過去の研究事例を示す。

1984 年頃、ミネソタ州を含む 2 つの州では、収穫し終えたトウモロコシの茎と葉に着目し吹雪対策効果を検証した。トウモロコシの茎の高さは約 2 m で、空隙率は 50%の金属製の防雪柵と同等と考える良い。方法は、トウモロコシ 6~8 列を 2 組、その間隔は 50~60 m で、冬季間刈り取らずに残して防雪効果を検証し、春に刈り取るものである。

吹雪捕捉量は 1 m あたり 7.6 トンで、およそ 2.7 m の防雪柵と同等である。また、セットバック (LSF から道路までの距離) は 30 m では近すぎるため、最低 46 m は必要としている³³⁾。

エ) LSF の吹雪捕捉量

LSF における樹種別の吹雪捕捉量について、樹高、空隙率、吹走距離、セットバックの条件を考慮した調査結果を以下に示す。

Heavey & Volk (2014)³⁴⁾はニューヨーク州に造成されている LSF の吹雪捕捉量について、造成してから年数、樹高、空隙率、吹走距離、セットバックの条件を調査し(表 9)、トウヒ、ヤナギ、トウモロコシの吹雪捕捉量を調べた(表 10)。その結果、トウヒとヤナギに関して、造成から 3 年以内の LSF では吹雪捕捉量を、樹木を通り抜けた積雪量で除した値 (Q_c/Q) が 1 以上であることが示された。これは造成後すぐに防雪効果があることを示している。造成後 4 年から 11 年のトウヒとヤナギの LSF では Q_c/Q が非常に大きいため、十分な吹雪捕捉量が得られている。特にヤナギの吹雪捕捉量が著しいことがわかる。なお、トウモロコシについては Tabler (1994)³³⁾が指摘したセットバックよりも短く Q_c/Q が 1 よりも小さい。設置条件を最適化すれば、トウモロコシも LSF として活用できると思われる。

以上のように、我が国でも利用されているマツ科だけでなく、LSF に利用されているヤナギ、トウモロコシ等も吹雪対策効果が確認されている。

表 9 調査対象の樹高、空隙率、吹走距離、セットバックと造成してからの年数

	樹高(m)	空隙率(%)	吹走距離(m)	セットバック(m)	年数
トウヒ属	2.9	27	855	52	3年以内
	4.0	42	400	37	4年~11年
ヤナギ属	1.9	86	339	27	3年以内
	5.0	47	383	27	4年~9年
トウモロコシ	1.3	0	340	71	1年

※Heavy & Volk (2014)³⁴⁾のデータより作成

表 10 調査対象の吹雪捕捉量

	Qc(tons/m)	Q(tons/m)	Qc/Q	L(m)	D35(m)	D35/L	年数
トウヒ属	40	15	2.7	12	41	3.4	3年以内
	180	9	19.2	11	32	3.0	4年~11年
ヤナギ属	10	10	1.0	28	31	1.1	3年以内
	246	9	41.0	11	31	3.1	4年~9年
トウモロコシ	5	7	0.7	18	29	1.6	1年

Qc: 樹木に堆積した吹雪捕捉量、Q: 樹木を通り抜けた積雪量、Qc/Q: 吹雪捕捉量/樹木を通り抜けた積雪量の比、L: ドリフト（風下側のふきだまり）の長さ、D35: 標準的なセットバック、D35/L: セットバックとドリフトの比。 ※Heavy & Volk (2014)³⁴⁾のデータより作成。

2) 日本での LSF の適用性に関する考察

北海道における国道防雪林は、1976 年から道北・道東を中心に造成が開始され、現在では 210 箇所にもなるが、総延長はおよそ 80 km³⁾と米国に比べればまだ短い。防雪林の一部にはヤナギも植栽されているが、これは防雪効果を意図したものではなく、防雪効果を期待する基本林としては、アカエゾマツ、ヨーロッパトウヒ、トドマツなどが植栽されている(図 2)。しかし、これらマツ科は、防雪効果が発揮されるまで成長に時間を要する。さらに、土層の確保や排水などにより、生育不良とならないよう生育基盤の整備も必要となる。最近の研究結果から、防雪林では密に樹木が植栽されているため、日照不足により下枝の枯れ上がりがみられることが指摘されている³⁾。吹雪の現象は地表面に近いほど飛雪流量が多く、下枝の維持が必要であるが、下枝を維持するための間引きの作業の維持管理費用が負担となっている。そこで、マツ科だけでなく低木等を組合せて LSF を一つのシステムとして造成することも有意義と考えられる。積雪寒冷地における在来種の生残率と成長速度を調査した結果³⁸⁾によると、低木のエゾヤマハギやアキグミ等は生残率も成長速度も高いとある。生残率が高いこと、成長速度も早いこと、在来種であることを考慮すれば、エゾヤマハギやアキグミ等は LSF として適した低木であると考えられる。ま

た、外来種のマツ科であるが、北海道の道路での導入実績があり、耐寒性、耐風性、耐雪性を有するモンタナマツも、低木の候補として考えられる。また、造成においては米国を参考に、道路を管理・運営する一機関だけでなく、市区町村の自治体、地権者も含めた組織的な取り組みが、北海道における経済的便益も視野に入れた LSF の造成を促進させるきっかけになると考えられる。今後、防雪林の造成・管理運営方法について、我が国でも米国での取り組みについて適用の可能性を検討することも有意義と考えられる。適用性の検討にあたっては、環境面で配慮が必要な場合を考慮した。外来種の選定の是非や、その植物が十分な市場性、供給可能性の有無など、社会資本整備に適するものであることの条件を満たすことが今後求められる。

3) 多様な植生を活用した補助対策のまとめ

本節では、米国における LSF に関する歴史から紐解き、最近の研究動向についてレビューを行った。樹種に着目してみれば、我が国でも利用されている常緑針葉樹だけでなく、寒冷地でも成長速度が著しいヤナギやトウモロコシなどが利用されている。また、米国では吹雪対策としての LSF だけでなく、費用対効果、バイオマスや野生動物の生育環境、二酸化炭素の固定、土壌の侵食抑制としても LSF は注目されている。加えて、一機関が LSF の造成・管理運営を実施しているわけではなく、市区町村の自治体や地権者も含めて LSF の造成を促進させるという視点がある。このように、枯れ上がりの補助対策工法としてだけでなく、多様な植生を活用した吹雪対策には様々な付加価値が期待できるものと考えられる。詳細については文献^{39),40),41)}を参照されたい。

3. 1. 2 防風ネット工による補助対策

1) 資料調査

防風柵・防風ネットの構造と防風効果の関係において、抗力係数 kr は防風効果に最も影響を及ぼす重要な指標である⁴²⁾。ただし、抗力係数 kr を直接的に推定することは容易ではなく、光学的空隙率（空隙率）が防風効果を評価する構造因子として用いられている⁴²⁾。防風ネットに関するメーカーの資料より、ネットの材質はポリエチレン、ナイロンが用いられており、樹脂でコーティングされている場合もある。防風・防雪・防砂を目的としたネットの空隙率は、約 30~50%であった。また、資料調査をもとに、これらネットと単管(STK500、φ48.6×t2.4)、クランプを組み合わせた仮設のネット柵工について、構造計算の上の一般図を試作した(図 80)。生枝下高と樹高の関係(図 7)をもとに、

柵高さは1.8mと2.7mとした。ただし、現地の地盤条件については、別途考慮する必要がある。今後、防雪林の補助対策として、現地試験等に基づいたネットの適切な材質と空隙率、立木を支柱と見立てネットを設置する応急的な対策案を検討することを考えている。

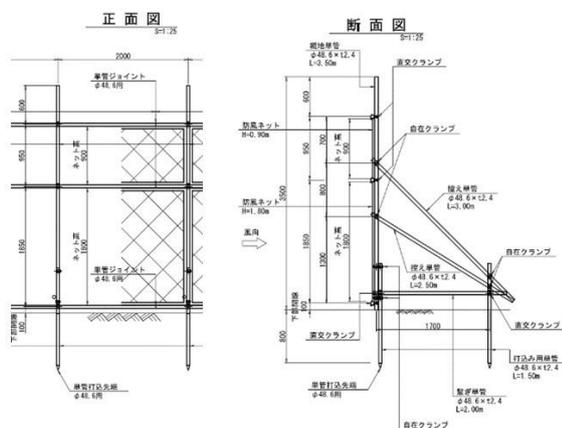


図 80 ネット柵工の一般図の例 (高さ 2.7m の場合)

2) ヒアリング調査

北海道東部の一般国道 44 号浜中町に位置する茶内防雪林では、補助対策として防風ネット工が施工されている。そこで、道路管理者と維持管理業者に、補助対策に関するヒアリング調査を実施した。



図 81 茶内防雪林で施工されているネット柵工

茶内防雪林は、平成元年度にアカエゾマツが植栽された。しかし、樹木の枯れ上がりに伴い、吹雪天候時に、雪粒子が樹木を通過して道路に到達するようになった。そのため、平成 24～28 年度にかけて、防雪林の風上側林縁または林内（道路用地の狭い区間）に防風ネット工（高さ 3.2m）が設置された（図 81）。当該箇所の防風ネット工は、高さ 1.0m のネットパネルを 3 段とした構造で、最下段のパネルは遮蔽率が 100%と

なっている。この構造は、現地での試行錯誤を経た結果である。現在の構成で、吹雪時の道路上における視程障害緩和や吹きだまり抑制等の防雪効果は発揮されている。

3. 2 補助対策の現地試験と評価検討

下枝の枯れ上がりがみられる防雪林では、風雪の吹き抜けが生じていることが明らかになった（2 章 2 節）。補助対策工法による風雪の吹き抜けの低減が考慮されるが、補助対策工法の有無で防雪林が捕捉する飛雪量について示す必要がある。そこで、下枝の枯れ上がりがみられる防雪林にて吹雪イベント前後の積雪深を観測することで、吹きだまり量による防雪性能を評価し、防雪林が捕捉した吹きだまり量と最大風速との関係を整理する。

平成 30 年度では基準となるデータを得るため、補助対策工が設置されていない雄信内防雪林における吹きだまりの観測を実施した。また、令和元年度より防風ネット柵の効果把握するため、防風ネット柵や防雪柵（金属製）が風上林縁に設置されている防雪林（山軽防雪林、茶内防雪林）で吹きだまりの観測および風向・風速計の観測を実施した。防風ネット柵や防雪柵の効果については令和 2 年度にデータ解析を実施する予定である。

3. 2. 1 吹きだまりの観測

平成 30 年度に実施した雄信内防雪林における吹きだまりの観測では、3m スノーポールを防雪林横断面に 17 本設置し（図 82）、横断面の積雪深をスノーポールで読み取った。読み取りにはタイムラプスカメラ（BCC100, Brinno Inc.）を配置し、24 時間に 1 回の頻度で積雪深を解析した。また、吹雪の発生有無を推定するため、風向風速計を風上基準点に設置した。観測期間は平成 30 年 12 月 9 日から平成 31 年 3 月 16 日である。また、平成 31 年 3 月 5 日におよそ 0.5m おきに積雪深と、融雪後の平成 31 年 4 月 16 日に防雪林横断方向の地盤高を測角儀で測量した（図 83）。

一例として、吹雪が発生した平成 31 年 2 月 4 日から 2 月 5 日における気象データを図 84 に示す。タイムラプスカメラで取得した画像は平成 31 年 2 月 4 日 9 時と翌 5 日 9 時である（図中矢印）。タイムラプスカメラ画像を取得した翌 5 日までの気象データを青色ハッチで示した。気象データから、吹雪発生前の気温は

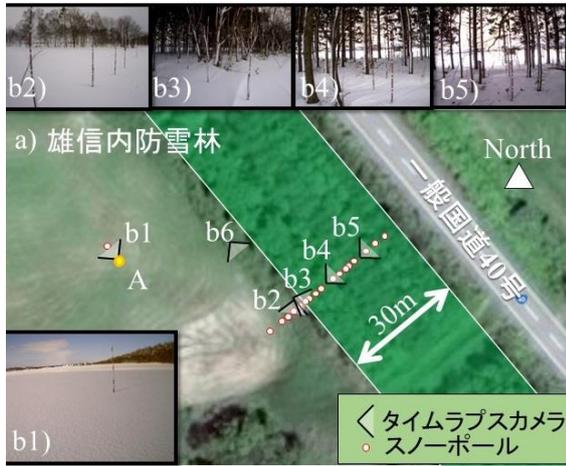


図 82 吹きだまり観測の概要図

a)スノーポールとタイムラプスカメラの配置、b)タイムラプスカメラ画像

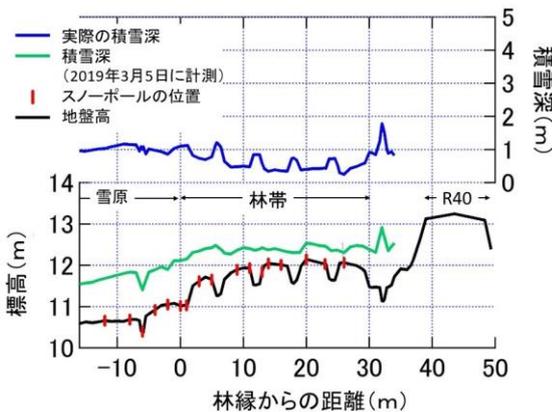


図 83 雄信内防雪林の積雪深 (平成 31 年 3 月 5 日) と林縁からの距離

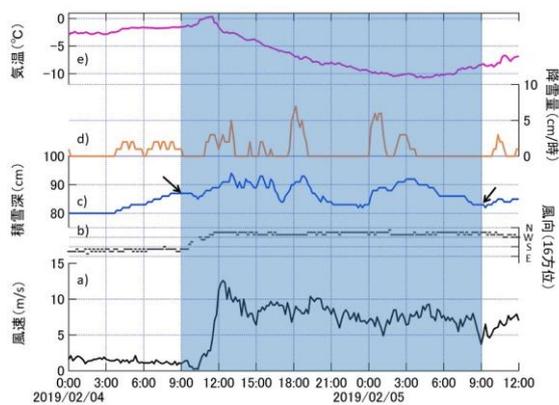


図 84 吹雪発生時の気象データ

a,b) 基準点の風速・風向 (10 分平均値)、c,d,e)雄信内テレメータ (10 分平均値) の積雪深、降雪量、気温。図中の矢印はタイムラプスカメラで取得した画像の時刻 (平成 31 年 2 月 4 日 9 時、翌日 9 時)。

-5°C以上、風速は 5m/s 以下であり、吹雪の発生条件に満たないが、雄信内テレメータから 3cm/h 程度の降雪が確認され、積雪深もそれに伴い増加している。また、4 日 12 時頃から 10m/s を超える風速が観測され、気温-10°C以下まで低下し、降雪に伴い積雪深も変化している。

タイムラプスカメラで撮影されたスノーポールの画像から、平成 31 年 2 月 4 日 9 時から翌 5 日の積雪深の変化を解析し、その結果を図 85 に示す。防雪林の林縁から林内にかけて徐々に積雪深が低下している。風上側でより多くの飛雪を捕捉したと考えられる。さらに、2 月 5 日の積雪深と 2 月 4 日の積雪深との差から 24 時間で捕捉した積雪量が算出される (図 85 赤斜線の領域)。吹雪が発生した 1 イベント (24 時間) で防雪林が捕捉した積雪量は、防雪林の延長 1m あたり 1.5m³ である。たとえば、雪密度を 100kg/m³ とすれば、24 時間で防雪林延長 1m あたり約 150kg の飛雪を捕捉し、仮に防雪林延長 10m とすれば 1.5 トンの飛雪を捕捉した計算となる。ただし、ここでは降雪による積雪量は考慮されていない。そこで、図 86 に示すように、防雪林が捕捉した飛雪捕捉量 (吹きだまり量) を算出するため、風上の雪原に堆積した積雪量の差を算出した。観測期間中の平成 30 年 12 月 9 日から平成 31 年 3 月 16 日において 12 回のイベントを解析し、イベント毎における飛雪捕捉量と最大風速の関係を図 87 に示した。その結果、最大風速が 6m/s 以上のとき、防雪林周辺に吹きだまりが形成され、最大風速が高ければ高いほど防雪林が捕捉した飛雪捕捉量は大きくなることわかる。風速 5~6m/s は吹雪の臨界風速²⁴⁾であることを考えれば整合性があり、それ以下の風速については吹雪によらない量であることも示唆される。言い換えれば、最大風速が 6

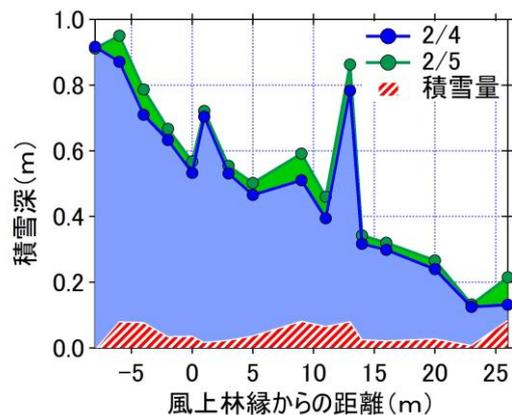


図 85 雄信内防雪林が 1 イベントで捕捉した飛雪量

m/s 以下では防雪林周辺に吹きだまりは形成されず（吹きだまり量としてはマイナスである）、風が弱い時は防雪林の樹冠（枝葉や幹）が飛雪あるいは降雪を捕捉するので、防雪林周辺には吹きだまりは形成しないと考えられる。この場合、飛雪の捕捉ではなく一般的には降雪遮断⁴³⁾などと言われる。

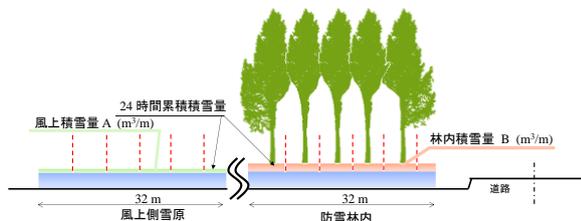


図 86 防雪林だけで捕捉した飛雪量（吹きだまり量）
捕捉した飛雪量＝林内積雪量 A－風上積雪量 B（単位：
m³/m）

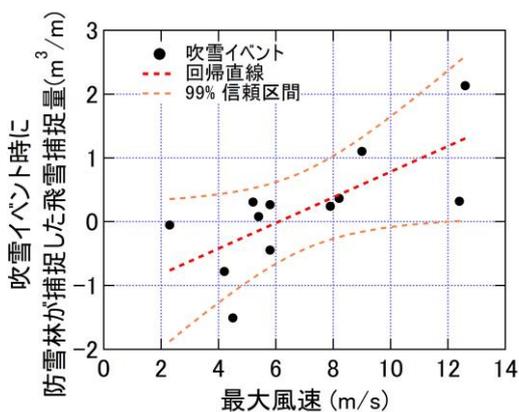


図 87 防雪林が捕捉した飛雪捕捉量と最大風速

以上のように、防雪林周辺における積雪深の経時変化を観測することで、防雪林が捕捉した飛雪捕捉量を定量的に評価することが可能であることを示した。本項の詳細は、文献⁴⁴⁾を参照されたい。

令和元年度に観測した雄信内防雪林（金属製補助柵）、茶内防雪林（防風ネット柵）および山軽防雪林（吹き止め柵）で観測したそれぞれの補助対策工法による防雪林の飛雪捕捉量については、今後解析する予定である。

4. 今後に向けて

令和2年度では、これまでに得た防雪林の構成要素と現地調査結果を用いた防雪性能の評価、風洞実験による下枝の枯れ上がり高の差異による防雪林の防雪機能や補助対策の効果の把握、下枝の枯れ上がりの見ら

れる防雪林の管理方法の提案に向けた検討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釧路開発建設部、同・根室道路事務所、国土交通省北海道開発局網走開発建設部、同・網走道路事務所、北海道開発局稚内開発建設部、同・浜頓別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) 独立行政法人土木研究所寒地土木研究所：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26年度研究報告書、2015
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 北海道開発局開発土木研究所・(財)北海道森林保全協会：防雪林育成・管理業務報告書、1996
- 6) 北海道開発局開発土木研究所・(財)北海道森林保全協会：防雪林育成・管理手法検討業務報告書、1995
- 7) 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所：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
- 8) 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
- 9) 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、No.28、17-20、2009
- 10) 大浦浩文、小林大二、小林俊一：地ふぶき時における風速の鉛直分布特性、低温科学（物理篇）、25、pp.73-88、1967
- 11) 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
- 12) 牧雅康、高橋厚裕、岡野哲郎、小熊宏之：可搬型3次元レーザースキャナデータと放射伝達モデルを用いた林床光環境の推定手法の開発、日本リモートセンシング学会誌、32(2)、pp.77-87、2012
- 13) P.F. Grant & W.G. Nickling: Direct field measurement

- of wind drag on vegetation for application to windbreak design and modelling, *Land Degradation & Development*, 9, pp.57-66, 1998
- 14) (公社)日本雪氷学会編:新版雪氷辞典、古今書院、p.307, 2014
 - 15) K. Nishimura, C. Yokoyama, Y. Ito, M. Nemoto, F. Naaim-Bouvet, H. Bellot, and K. Fujita: Snow particle speeds in drifting snow, *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 119, pp. 9901-9913, 2014
 - 16) 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
 - 17) 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 Annual meeting of the Transportation Research Board*, Washington D.C., pp.1-11, 2017
 - 18) 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
 - 19) 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
 - 20) 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
 - 21) Sakurai *et al.*: The wind speed and mass flux of snow on both sides of a LSF to investigate the wind and blowing-snow mitigation effects of a LSF, *98th Annual meeting of the Transportation Research Board*, Washington D.C., pp.1-10, 2019
 - 22) 櫻井俊光、伊東靖彦、高橋渉、武知洋太、松澤勝、高橋丞二:下枝の枯れ上がりが見られる道路防雪林の防風・防雪効果について、寒地土木研究所月報、793、pp11-20、2019
 - 23) 櫻井俊光、伊東靖彦、武知洋太、高橋渉、松澤勝、高橋丞二:空隙率を指標とした防雪林の防風・防雪効果把握の可能性、雪工学会論文集、技術論文、36(1)、pp.14-22、2020
 - 24) 竹内政夫:大気中の雪粒子と視程、地学雑誌、100(2)、pp.264-272、1991
 - 25) 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、p.616、1997
 - 26) 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
 - 27) 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
 - 28) 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
 - 29) 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ー風洞実験による防雪機能調査ー、第 28 回ゆきみらい研究発表会論文集、804B、40、pp.1-4、2016
 - 30) 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
 - 31) 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
 - 32) 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、p.240、2014
 - 33) Tabler, R.D.: *Design guidelines for the control of blowing and drifting snow*, Strategic highway research program, Report SHRP-H-381, 1994
 - 34) Heavey, J.P., and T.A. Volk: Living snow fences show potential for large storage capacity and reduced drift length shortly after planting, *Agroforestry Systems*, 88(5), pp.803-814, 2014
 - 35) Shaw, D.L., Living snow fences: Protection that just keeps growing, *Colorado Interagency Living Snow Fence Program*, Colorado State University, Fort Collins, CO., 1991
 - 36) Lynd, L.R. et al.: How biotech can transform biofuels, *Nature Biotechnology*, 26(2), pp.169-172, 2008
 - 37) United States Department of Agriculture, Economic Research Service, Online URL: <http://www.ers.usda.gov/topics/crops/corn.aspx>, (2018 年 12 月確認)
 - 38) 長坂晶子ら:北海道産木本 17 種を用いた道路法面の植栽試験-樹種特性からみた植栽の確実性-、北海道林業試験場研究報告 第 45 号、pp.9-20、2008
 - 39) 櫻井俊光、伊東靖彦、松澤勝:米国における植物を利用した吹雪対策について、寒地技術論文・報告集、32、pp.91-96、2016
 - 40) 櫻井俊光、松澤勝、伊東靖彦:道路防雪林の付加価値と

将来展望—米国の Living Snow Fence に関する調査研究
から—、日本道路会議、論文番号 1092、pp.1-2、2017

- 41) 櫻井俊光、伊東靖彦、松澤勝：多様な植生を活用した吹雪対策とその付加価値、北海道開発技術研究論文集、61、2018
- 42) 鳥田宏行：防雪林の評価についての最近の研究、日本雪工学会誌、25、pp.3-20、2009
- 43) 中井裕一郎、坂本知己、寺嶋智巳、北村兼三：ドドマツ林における降雪の遮断蒸発量（II）—熱収支モデルによる推定と水収支的観測との比較—、日林誌、78(1)、pp.15-19、1996
- 44) Sakurai *et al.*: A Case Study of Snowdrift Trapping Efficiency of a Living Snow Fence - Determined From a Transverse Measurement of Snow Depth Profiles, *99th Annual meeting of the Transportation Research Board*, Washington D.C., pp.1-11, 2020

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：高橋丞二、金子学、高橋渉、櫻井俊光(雪氷)
植野英睦、斉藤勉(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。

令和元年度は、石狩吹雪実験場における定点気象観測と視程障害移動観測車による観測、シミュレーション解析、風洞実験を行い、これらの結果を整理・分析した。

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おり、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割を占めている¹⁾。吹雪対策として防雪柵の整備が進められているが、防雪柵整備区間であっても防雪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いる。このため、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削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る。そこで本研究は、視程急変箇所対策の効率的・効果的な整備を通じて雪氷災害の被害軽減を目指すものである。2章では、防雪柵端部や開口部における道路気象と車両の走行に影響を与える視程急変の特徴を捉え、視程急変メカニズムを解明し、3章では、視程急変箇所の緩和対策およびその効果を解明し、気象や道路の沿道環境に応じた最適な対策工の選定方法を提案することを目的とする。

ここで防雪柵とは、吹雪対策のために鋼板等の材料で作られた防雪板で柵前後の風速や風の流れを制御して、道路の吹きだまり防止や視程障害の緩和を図ることを目的とした吹雪対策施設²⁾と定義され、防雪柵の型式には、

吹きだめ柵、吹き止め柵、吹き払い柵および吹き上げ防止柵がある³⁾。本研究では主に吹き止め柵について取り扱うものとし、以降では防雪柵は吹き止め柵のことをいう。また、気象や道路の沿道環境に応じた対策工には副防雪柵など⁴⁾が提案されているが、副防雪柵の効果については明らかとされていない。そのため本研究では、気象や道路の沿道環境に応じた対策工として主に副防雪柵を取り扱うものとする。

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の解明には、吹雪時における防雪柵の有無による違いだけでなく、防雪柵端部や開口部における風の収束に伴う局所的な強風とそれに伴う視程障害（以下、エンドエフェクト⁵⁾という）が発生した時の防雪柵周辺の地形や気象条件等を整理し、把握することが重要である。また、防雪柵端部や開口部で多重事故等が発生するため、視程急変時におけるドライバーによる運転挙動から、適切な対策工を検討する必要性もあり、多角的な視点から防雪柵端部や開口部における視程急変メカニズムに迫る必要がある。他方、現道では気象条件が常に変化することや、沿道環境が多様であることにより、観測データの収集には

多くの労力と時間が必要となる。こうした場合、比較的容易に条件変更が可能な数値解析や風洞実験で検討することが有効と考えられる。そのため、数値解析や風洞実験と現地観測との整合性が十分であることを確認する必要がある。そこで、令和元年度では、石狩吹雪実験場における防雪柵の視程障害移動観測および定点気象観測に加え、同一の防雪柵の設置条件で数値シミュレーションを開始し、整合性を確保した上で対策工の比較検討を行うこととした。

以上から本章は、①現道の防雪柵設置区間における移動気象観測、②防雪柵開口部の道路気象と運転挙動、③石狩吹雪実験場における防雪柵開口部の定点気象観測、④数値シミュレーションによる現地観測結果の検討、⑤模型防雪柵を用いた風洞実験による開口部の影響解析で構成される。

2. 1 現道の防雪柵設置区間における移動気象観測

2. 1. 1 視程障害移動観測車による観測方法

一般国道 231 号及び 337 号、393 号 (図 1) において、視程障害移動観測車 (図 2) を用い、平成 29 年 1~2 月、平成 29 年 12 月~30 年 3 月、平成 31 年 1~2 月の 3 冬の吹雪発生時に移動気象観測を行った (但し、一般国道 393 号の観測は平成 29 年 12 月~30 年 3 月)。区間内には、吹き止め式防雪柵の開口部が合計で 43 箇所存在する。



図 1 移動気象観測車による移動気象観測位置

視程障害移動観測車は、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を搭載している。この視程障害移動観測車を用い、道路上の防雪柵設置区間の端部や開口部における視程急変に着目し、道路気象状況と運転挙動等に関する移動観測を行った (表 1)。なお、データの収録間隔は 0.1 秒とし、観測はドライバーと調査員の 2 名により行った。

視程障害移動観測車による観測の場合、道路上の気象条件について連続的に捉えることが可能となる。一方、定点気象観測では、防雪施設や沿道環境の影響を受けない基準点のデータを取得でき、また、観測点が限られるものの長期間連続したデータ収集が可能である。このため、令和元年度は、2.3 で記す定点気象観測実施箇所において移動気象観測を実施し、限られた観測点を補足するデータの収集を行うこととした。



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、走行速度、アクセル踏量、ブレーキ踏力、ハンドル操舵角
記録間隔	0.1 秒
観測方法	視程障害移動観測車 1 台用い、吹雪時に観測を実施
観測箇所	5 区間 (図-1 参照) ※同一区間を繰り返し観測

2. 1. 2 視程障害移動観測車による観測結果

一般国道 231 号における吹雪時の調査結果の代表的な観測結果を図 3 に示す。また、移動観測時の道路状況を進行方向順に図 4 に示す。

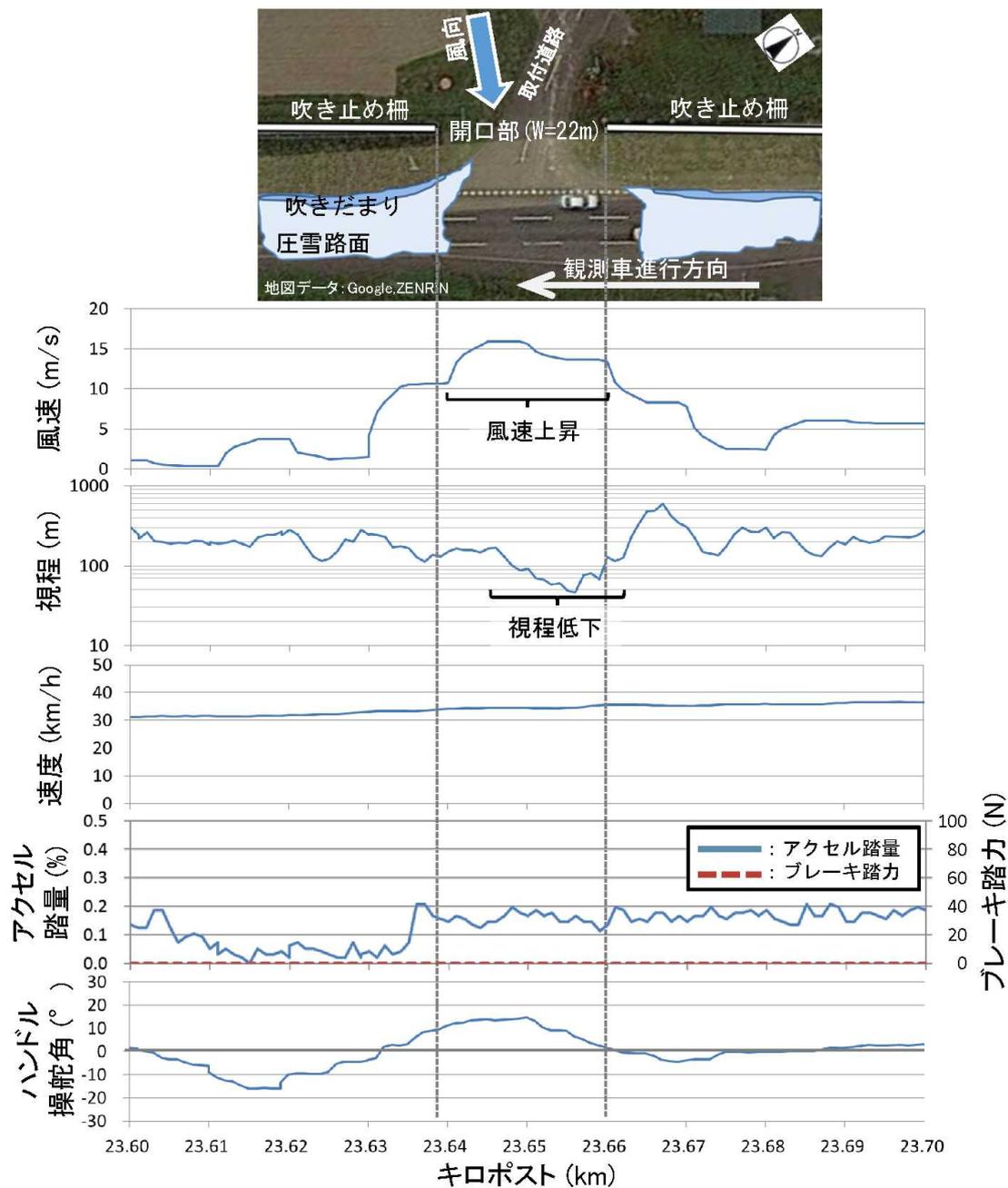


図 3 観測事例1 (観測日平成29年1月28日10時45分) (上: 平面図、下: 観測結果)

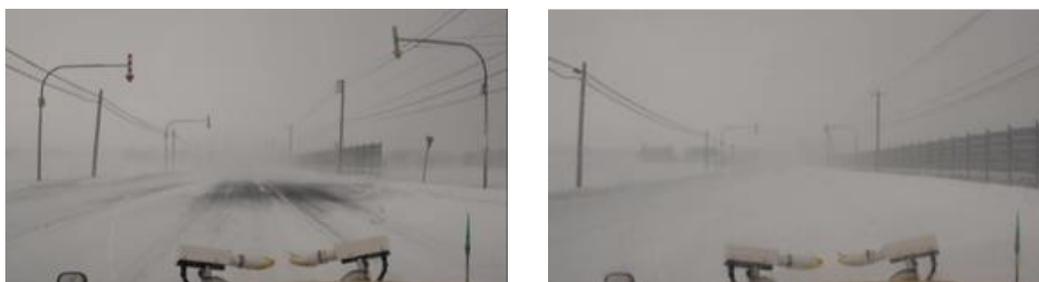


図 4 観測時の道路状況 (観測事例1) (左: 観測車開口部進入前、右: 防雪柵区間)

当該区間は丘陵地にある上下2車線の道路で風上側には300m以上のなだらかな傾斜地(草地で冬期は雪原となる)があり、地吹雪の発達しやすい箇所である。吹き止め柵の開口部は22mである。観測日時は平成29年1月28日10時45分、天候は降雪を伴う吹雪である。観測車は、道路終点側(図3の右側)から起点側(左側)に向かって走行した。

観測車が開口部に差し掛かる手前では、風速は3~6m/s、視程は200m程度と吹き止め柵が有効に機能しており、車速、アクセル踏量、操舵角とも安定していた。開口部に差し掛かると、風速の急速な増大(最大16m/s)と、それに伴う視程の低下(最低40m程度)が見られた。アクセル踏量の大きな変化やブレーキ操作は見られなかったが、急な横風に対し風上側にハンドルを切り、その後風下側、再度中立位置に操舵を行っていた。開口部通過後は、開口部手前側とほぼ同様の風速、視程、運転挙動に戻っていた。

この事例では、視程の低下はあったものの、ブレーキ操作には至らなかった。しかし、急な横風に対し数回のハンドル切り返し操作を要し、また、車速は緩やかに低下する傾向を示していた。

2.2 防雪柵端部の道路気象と運転挙動

2.2.1 開口幅が風速や視程に与える影響

防雪柵の開口部への対策工を立案するにあたり、まず開口部周辺における道路気象の変化を正しく把握することが必要となる。

開口幅が風速や視程に与える影響に着目し、観測データの整理を行うこととし、平均風速3m/s以上、最低視程200m以下のデータを抽出した。対象区間は、開口部の前後の吹き止め柵におけるそれぞれの中点から中点までを採用した(図5)。

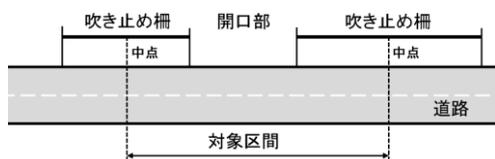


図5 データ解析対象区間

ここで、評価指標として、「視程比」及び「風速比」を以下のように定義した。

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

視程値は、値の変動の幅が大きく単純に平均値を用いることができないため、中央値を採用した。なお、

以下の箱ひげ図には、最小値、25%タイル値、中央値、75%タイル値、最大値を表示した。

開口幅と風速比の関係について図6に示す。開口幅の増加とともに、風速比が増加する傾向が見られた。ただし、開口幅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、変化の程度は小さかった。

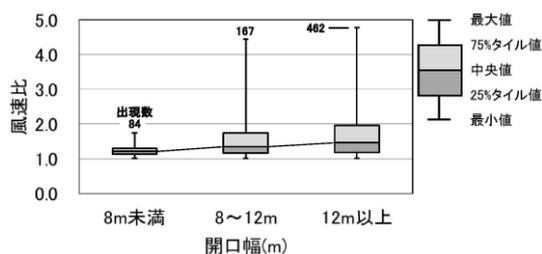


図6 開口幅と風速比

次に、開口幅と視程比の関係について、図7に示す。開口幅の増加とともに視程比が低下する傾向が見られた。変化傾向は比較的明瞭であり、開口幅8m未満では視程比(中央値)が0.4以上、8m以上では視程比(中央値)が0.3以下となっていた。

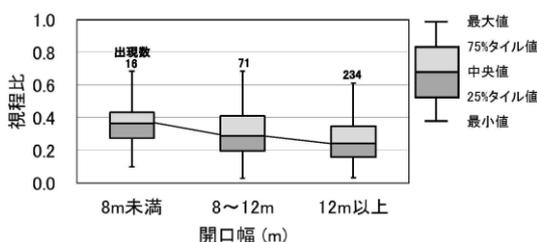


図7 開口幅と視程比

開口幅の違いが道路気象に与える影響について、より詳細に調査するため、風速や視程の変動が50%以上あった場合を「開口部の著しい影響があった」と考え、風速については開口部での最大風速が平均風速の1.5倍以上、視程については最低視程が平均視程の0.5倍以下の場合を「開口部の影響有り」と定義し、風速や視程と開口幅との関係について、図8と図9にそれぞれ整理した。

その結果、風速については開口幅8m以下の場合に、開口部の影響の出現頻度が小さく、開口幅が8mを超える場合には開口幅の違いによる大きな変化は見られなかった(図8)。また、視程については、開口幅が比較的狭い(12m以下)場合に開口部の影響の出現頻度が小さく、開口幅の増加に伴い出現頻度が増加する傾向にあることが判った(図9)。

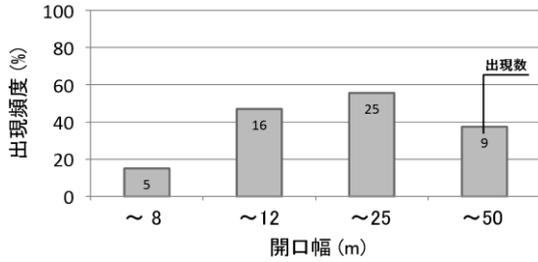


図 8 開口幅毎の風速への影響の出現頻度

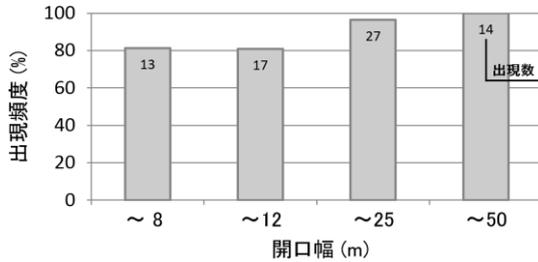


図 9 開口幅毎の視程への影響の出現頻度

2. 2. 2 風速や視程が運転挙動に与える影響

前項では、開口部における道路気象の変化について取りまとめた。対策施設の立案に向けては、道路気象の変化がドライバーの運転挙動に与える影響について評価することが重要となる。

風速や視程の違いがドライバーの運転挙動に与える影響に着目し、観測データの整理を行った。前項では強風、視程障害に着目してデータ抽出を行ったが、ここでは無風、視程良好時も含む全データを採用した。対象区間は前項同様の範囲とした(図 5)。

ここで、気象条件には風速と視程を、運転挙動には走行速度、アクセル踏量、ハンドル操舵角を用い、これらの関係について調査した。風速と視程については、対象区間の観測データの平均値を用いた。

平均風速、平均視程に対する走行速度、アクセル踏量の関係について、図 10～図 13 に示す。箱ひげ図の要素は、運転挙動の最小・最大値、25%及び 75%タイル値、中央値とした。

平均風速と走行速度(中央値)との関係については、風速が低い場合(5m/s未滿)、走行速度は50km/h程度となっていたが、風速5m/s以上では35km/h程度に低下していた(図 10)。

次に、平均視程と走行速度(中央値)との関係では、視程良好時(500m以上)には45km/h程度と高かった走行速度が視程の低下とともに低下し、視程100m未滿では20km/hに低下していた(図 11)。

風速とアクセル踏量との関係については、明確な傾向

は見られなかった(図 12)。しかし、視程とアクセル踏量について見ると、視程100m未滿の場合にアクセル踏量が最大～中央～最小値を含め、顕著に低下していた(図 13)。

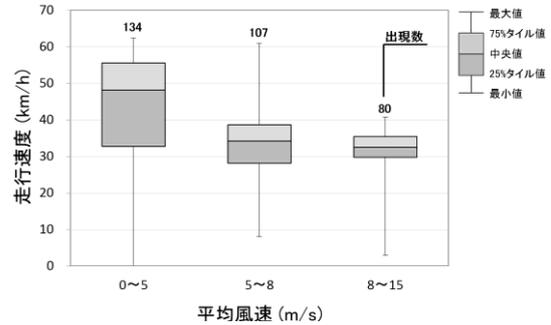


図 10 平均風速と走行速度

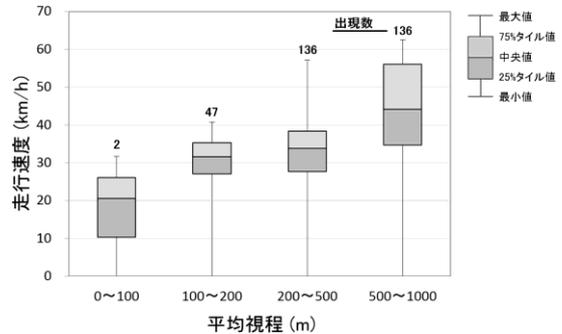


図 11 平均視程と走行速度

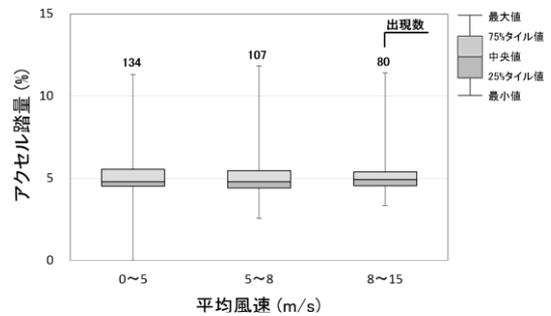


図 12 平均風速とアクセル踏量

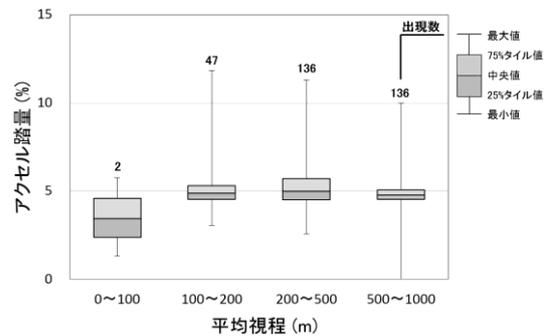


図 13 平均視程とアクセル踏量

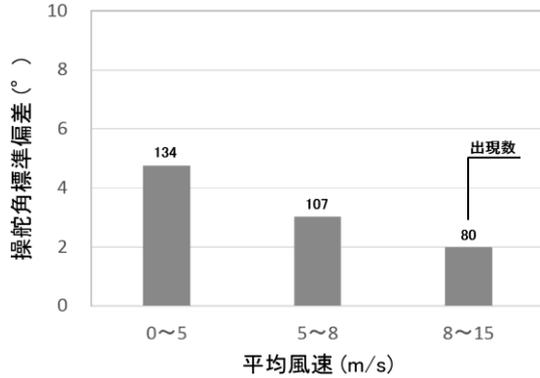


図 14 平均風速とハンドル操舵角標準偏差

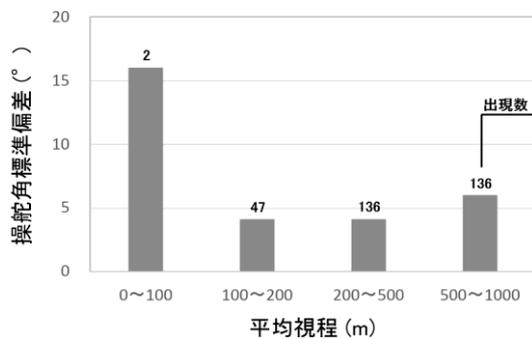


図 15 平均視程とハンドル操舵角標準偏差

一般的に、風速 5m/s 以上では低い地吹雪が、風速 8m/s 以上では高い地吹雪が発生するとされており、風速が高い条件における走行速度の低下は、吹雪に伴う視程障害によるものと考えられる。また、「視程 100m 未満では、道路線形や視的目標物の確認が難しい」と言われ、アクセル踏量の減少は視程障害発生によるものと考えられる。

平均風速、平均視程に対するハンドル操舵角の関係について、図 14 と図 15 に示す。ここで、ハンドル操舵角の場合、直進位置が概ね平均値・中央値と一致するため、グラフには標準偏差のみを示した。

風速とハンドル操舵角との関係については、風速が低い (5m/s 未満) 場合に標準偏差が大きく、風速の増大に伴って、やや低下する傾向となっていた (図 14)。視程とハンドル操舵角の関係では、平均視程が低くなるほどハンドル操舵角の標準偏差が小さくなる傾向にあり、視程 100m 未満の場合に標準偏差が大きい傾向を示した (図 15)。ただし、視程 100m 未満についてはデータ数が少ないので参考値とする。

2.3 石狩吹雪実験場における防雪柵開口部の定点気象観測

2.3.1 定点気象観測の概要

吹き止め柵の開口部が、風向・風速や視程等の道路気象に及ぼす影響について把握するため、石狩吹雪実験場 (図 16) において、現地観測を行った。



図 16 石狩吹雪実験場位置図

ここでは、平成30年の1~3月に観測したデータについて解析した。吹き止め柵 (設置延長93m) は、冬期の主風向に直交するよう設置し、幅9mの開口部を設けた。吹き止め柵から20m離れた風上側に基準となる観測点 (基準点) を設け、吹き止め柵開口部の中心と、柵風下側の路側位置 (以下、風下路側と呼ぶ) において、通過車両への風の影響を想定した高さ1.8mで風速を観測した (図 17)。風向・風速の観測にはR.M. Young社製 (KDC-S04) を用いた。

吹き止め柵は、南北に対し約10°時計回りの方向に設置されており、直角方向は「西」と「西北西」との間にある。風向の解析には、柵と直角方向から時計回りに「西北西」、「北西」、「北北西」、反時計回りに「西」、「西南西」、「南西」 (16方位中6方位、柵と直角方向を中心に112.5°) の範囲で、風速5m/s以上 (10分平均値) のデータを抽出した。



図 17 観測機器設置状況

2. 3. 2 定点気象観測の解析と結果

観測点の風速を基準点風速で除した値を風速比と定義し、風向別に箱ひげ図として表現した。図中の要素は風速比の最小・最大値、25%及び75%タイル値、中央値とした。ここで、風速比が1のとき、風上基準点の風速と同じ風速であることを示す。解析には、開口部の平均的な風場を表現する10分平均値を用いることとし、瞬間風速や乱流については考慮していない。

風下路側における観測結果を図 18に示す。南西(SW)を除き、風速比は防雪柵直角方向を中心に凸型となった。さらに、防雪柵直角方向から概ね45°の範囲で風速比の平均値が1を上回り、道路上に風が強く吹き込む現象が確認された。また、後述する開口部中心と比べ、風速比のばらつきが大きかった。この理由として、開口部風下側では風が大きく乱れていることが考えられる。風向が防雪柵直角方向から45°以上斜めに流入する斜風時では、風速比の低下が見られたが、開口部からの強風が距離とともに弱まることや、防雪柵直角方向から35°を超える場合、観測点が防雪柵の影に入ることが影響したのではないかと考えられる。

開口部中心における観測結果を図 19に示す。風下路側と同様に、全風向で風速比は防雪柵直角方向をほぼ中心に凸型となった。さらに、広い範囲で風速比が1を超えていた。しかし、風速比の強弱は風下路側ほど顕著ではなく、風下路側と比べ、ばらつきが小さかった。防雪柵の有無の影響のみであれば、基準点と同様の風速（風速比=1）となると考えられるが、直角方向に近い「西南西」、「西」、「西北西」について、風速比の中央値が1を上回っており、風速比の増大はエンドエフェクトの影響と考えられる。

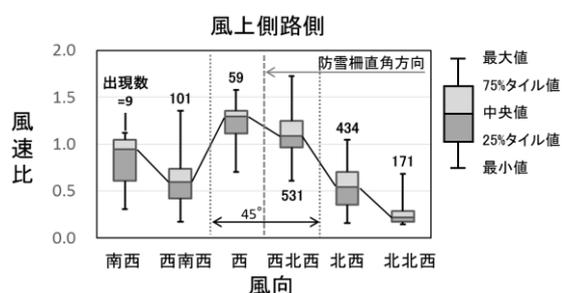


図 18 風下路側における風向別の風速比

以上の結果から、開口部から道路側に流れる強風域の分布状況が風向によって変化していることが推測されるが、開口部における風速の面的な分布、視程障害あるいは吹きだまりの分布を把握するためには、より細かな調査や分析が必要になると考えられる。

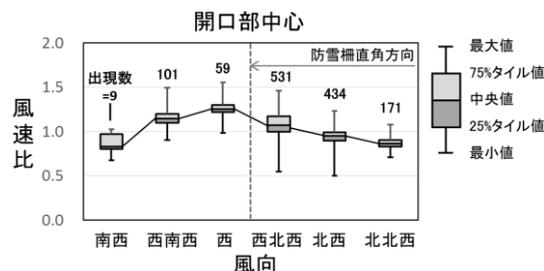


図 19 開口部中心における風向別の風速比

2. 4 数値シミュレーションによる現地観測結果の検討

現地観測の結果、開口部における局所的な強風の発生が確認された。しかし、現地観測の場合、風速計等の観測機器を多数設置することには限界がある。このため、本章では有限要素法（数値シミュレーション）の利用により、観測点以外の風速分布についても可視化し、吹き止め柵まわりの風場を表現することとした。また、本研究では副防雪柵を含む多様な柵の配置について検討し、効果的な開口部対策工法を提案することを目標としている。対策検討に先立ち、数値シミュレーションのパラメータを適切に設定し、現地観測の結果を再現することとした。

2. 4. 1 数値シミュレーション概要

防雪柵の形状作成に利用したCADはSOLIDWORKSであり、数値シミュレーターはSOLIDWORKS flow simulationである。SOLIDWORKSはCADから数値シミュレーションまでを単体のパッケージソフトで処理できるため、形状の変更や再解析が容易である。図 20に解析に利用したCAD形状を示す。

防雪柵は、現地観測と同じ形状の吹き止め柵を2枚作成した。長さそれぞれ北側51m、南側42mとし、柵高5m、開口部9mとした。また、現地観測と同じように、通過車両への風の影響を想定した高さ1.8mにおける平面を作成し、風速分布を可視化できるように設定した。なお、実際の吹き止め柵は、防雪板の下部は無孔、上部は有孔であるが、有孔を表現した場合、計算に膨大な時間を要することが解ったため、本シミュレーションでは忍び返しを含めてすべて無孔と見なした。

シミュレーションモデルでは、吹き止め柵の風上側と風下側それぞれに100mの空間を設け、モデル上端に存在する壁面の影響を受けないよう、上方には100mの空間を設けるように空間を構成した。

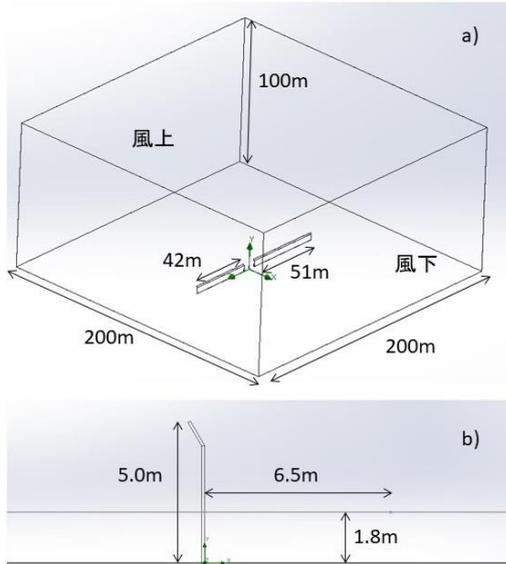


図 20 実験場の吹き止め柵を再現した CAD 画像。a)CAD 画像の鳥瞰図、b)防雪柵の CAD 画像の側面図。

本シミュレーションでは、空気は密度変化しない非圧縮粘性流体とし、質量保存の法則で示される連続の運動方程式（ナビエ・ストークス方程式）を用いている。初期条件では、風上側の壁面から風速10m/sで流入するよう設定した。気象条件は、気温0°C（273.15K）、気圧1atm（約101,325 Pa）、雪面の粗度は、吹雪時の表面粗度と同じ値（ $1.5 \times 10^{-4} \text{m}$ ）⁴⁾とした。なお、全メッシュ数は約60万であり、1回の計算には1時間程度を要した。

風が防雪柵に流入する角度（流入角）について、防雪柵と直交する角度を0°とし、±11.25, ±22.5, ±33.75, ±45°の9パターンについて計算を実施した。

2. 4. 2 数値シミュレーション結果

図 21 に数値シミュレーション結果の一例（防雪柵と直交する角度0°）を示す。高さ1.8mの平面の風速分布が描写され、防雪柵の開口部周りの風速分布を読み取ることができる。図中の白点線は吹き止め柵開口部の中心線であり、中心線の風速は図 22 のようになる。図から、防雪柵風上では風速が10m/sであったが、防雪柵の開口部から6m風上で約8m/sまで減少し、開口部を過ぎると12m/s程度まで風速が増加する。さらに風下では約4m/sまで徐々に減少している。現地観測結果との比較を行うため、以降では風上基準点（防雪柵より20m風上）、防雪柵開口部0mと吹き止め柵風下路側6.5mの風速のみを抽出し、風上基準点を分母として風速比を表現することとした。防雪柵開口部から-20m、0m、6.5mの各3点に対し、計算モデルの格点の位置が完全には一致しないため、3点に相当するデータは内挿により算出した。なお、現地観測で設

置されている防雪柵の中心線は、真西から時計回りに10.8°北西にあるので、数値シミュレーションの流入角0°を現地の風向に合わせて（中心線の風向： $270^\circ + 10.8^\circ = 280.8^\circ$ ）表現した。

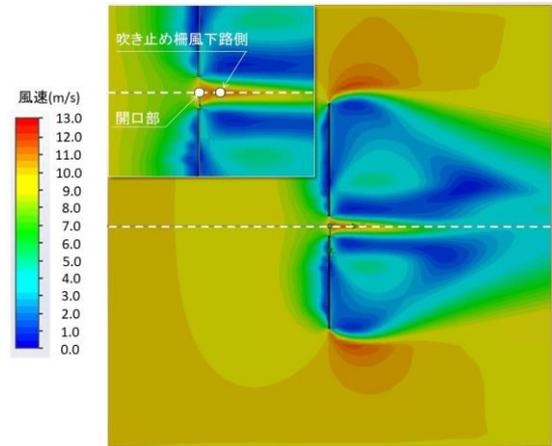


図 21 吹き止め柵まわりを再現した風速分布

高さ1.8mの平面の風速をコンターで示した。○は開口部0mと、吹き止め柵風下路側6.5mの地点である。白点線は中心線を示す（左から右に風が流れている）

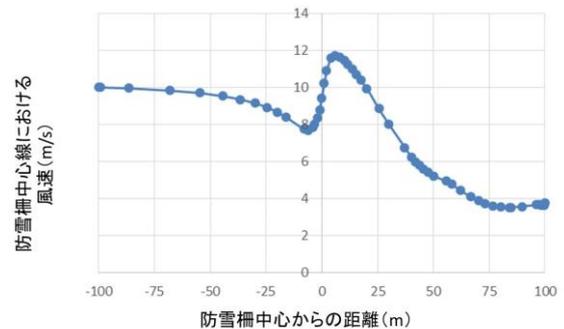


図 22 防雪柵中心線における風速の変化。

図 23 に、風下路側における数値シミュレーション結果を示す。開口部（風向280.8°）を中心に風速比が凸型を示し、現地観測（図 18）と同様の傾向となっていた。数値シミュレーションでの風速比は、6点で現地観測結果（中央値）と比べ低い値を示し、3点で高い値を示した。また、南西（図中SW）の風の場合、現地観測では風速比が1.0に近い。数値シミュレーションにおいては西南西（図中WSW）が図中最小値を示し、それより南では風速比が1.0に近い。北風の場合、現地観測では北北西（図中NNW）で図中最小値を示した。数値シミュレーションでは北西（図中NW）が最小値で、それより北で風速比が1.0に近い。北風と南風の違いは、現地の周囲にある構造物、植生や地形等の違いの影響によるものと考えられる。

図 24に、開口部中心における数値シミュレーション結果を示す。開口部（風向280.8°）を中心に風速比は凸型であるが、風下路側よりも開口部中心の方が風速比は全体的に高い値を示す。この傾向は、現地観測結果からも得られている。吹き止め柵に対して直交する風向（280.8°）では風速比が他の風向に比べてやや低い値を示した。

本数値シミュレーションは完全な定常状態であり、乱流の時間変化や瞬間的な風速・風向を取り扱うものではない。比較した現地観測結果も風速の10分平均値の中央値である。それを踏まえれば、現地観測と数値シミュレーションとで若干の違いはあるものの、数値シミュレーション結果は、吹き止め柵周辺の風況について再現できたものと考えられる。

以上、現地観測と同様の条件を設定し、数値シミュレーションを行い、風向毎の風速比を求めた結果、現地観測結果を概ね再現する計算結果を得ることができた。今後の効果的な開口部対策工法の提案に向けて、数値シミュレーションが効果的な検討手法となると考えられる。



図 23 風下路側における風速比の実測値と計算値



図 24 開口部中心における風速比の実測値と計算値

2. 5 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、

様々な設定条件下での計測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、副防雪柵の模型を追加製作し、風洞実験にて、防雪柵の開口幅の違いと副防雪柵の有無による影響解析を行った。

平成 30 年度は、副防雪柵の緩和効果を求めるため、副防雪柵のパターンを追加して実験と解析を行った。

令和元年度は、風向角の違いによる緩和効果を詳細に把握するため風向角を増やし実験を行った。

2. 5. 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 25）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設置している（図 26）。

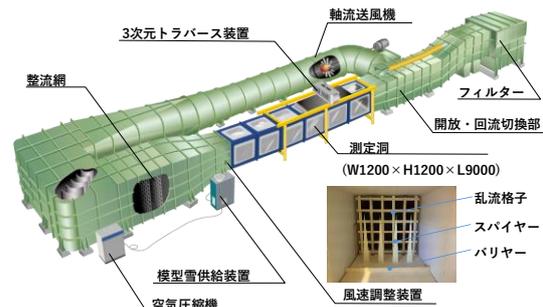


図 25 風洞実験装置



図 26 実験装置のターンテーブルと製作した防雪柵模型

2. 5. 2 縮尺模型の検討と製作

模型の縮尺設定については文献⁵⁾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模型を配置する必要がある⁹⁾。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⁹⁾ため、この範囲に模型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⁹⁾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、これらを総合的に勘案して縮尺を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^{6)~9)}ある。

防雪柵模型は、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

防雪柵模型は、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（図27）。また、防雪柵模型の一部は、3Dプリンタを用いてABS樹脂で製作した。

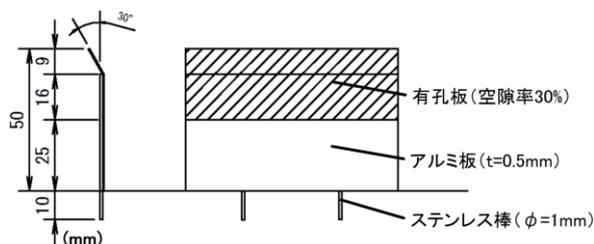


図27 防雪柵模型（吹き止め式防雪柵）

2.5.3 風洞実験条件の設定

測定洞内の垂直風速分布は、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0.15とした¹⁰⁾）に、近似⁶⁾するよう気流を調整し

た。

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=50mm）¹¹⁾を参考に、風速7 m/s（但し H=400mmでの風速）とした。

2.5.4 実験パターン

本実験では2.4.2で製作した防雪柵模型のうち、開口幅100mmと200mm（図28）を用いた。風向条件は防雪柵に対して直交の場合のほか、斜風の場合の影響も把握するため、これらの模型をそれぞれ風向に対して45°、90°、135°に設置（図28、図29）し計測を行った。

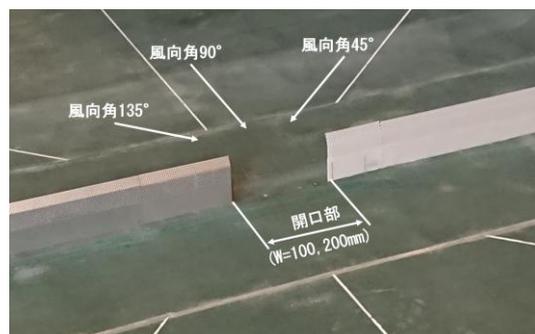


図28 防雪柵開口部

2.5.5 計測方法

風速計測には日本カノマックス（株）製の熱線流速計 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29）。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29）。

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。

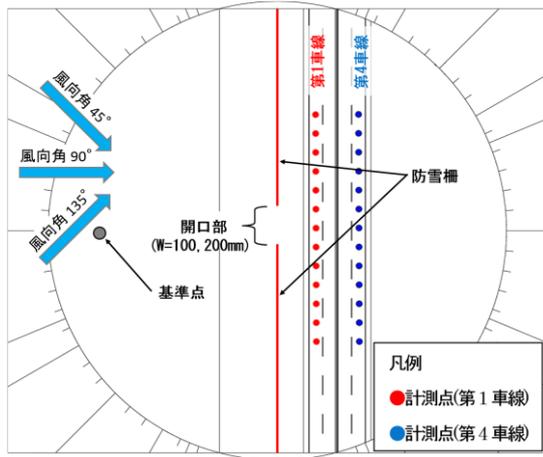


図 29 風速計測箇所図

2. 5. 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 30～図 33 に示す。風向角は、風向と道路延長方向のなす角と定義する。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。風向角 45° の結果は 135° と左右対称となったため割愛する。

防雪柵の開口幅 100mm、道路に対して風が直交（風向角 90° ）した場合の風速比を図 30 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い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° ）した場合の風速比について図 31 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。

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 32 に、200mm の場合の風速比を図 33 に示す。

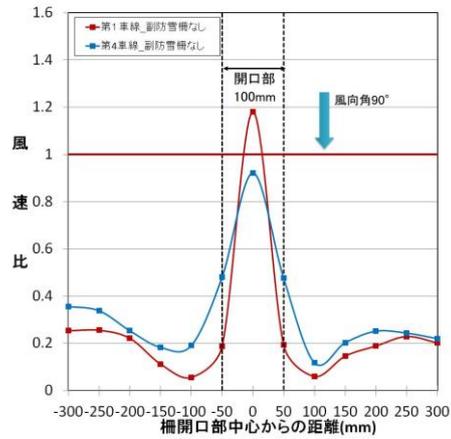


図 30 道路上の縦断方向における風速比（風向角 90° 、開口幅 100mm）

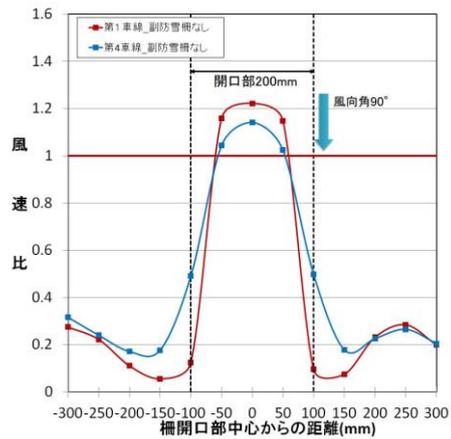


図 31 道路上の縦断方向における風速比

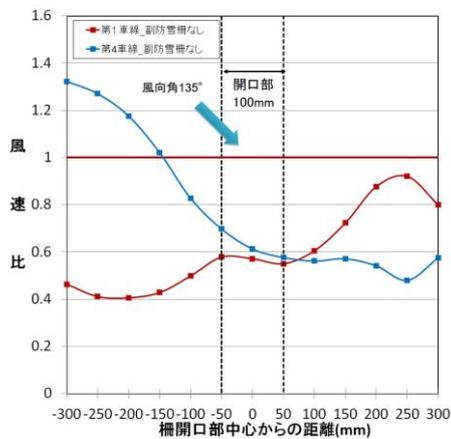


図 32 道路上の縦断方向における風速比（風向角 135° 、開口幅 100mm）

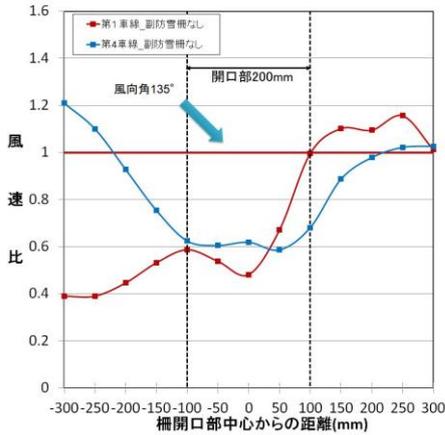


図 33 道路上の縦断方向における風速比 (風向角 135°、開口幅 200mm)

開口幅 100mm の場合 (図 33)、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、風速比のピークの値は 0.9 程度と、直交風の場合 (図 30、図 31) 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 200mm の場合 (図 33)、第 1 車線では、風速比のピーク値が開口幅 100mm 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 100mm の場合 (図 32) 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。

3. 視程急変箇所の緩和対策効果の解明

3.1 既往の対策技術

道路の交差点や取付道路等では、開口部を設けるため、視程が急激に変化する箇所が発生することはすでに述べた。このような視程急変箇所における緩和対策には、副防雪柵、端部処理施設として擬木板あるいは取付道路における開口部対策として門扉式防雪柵など利用される事例はある^り。また米国¹²⁾では、立体交差により開口部で吹きだまりを発生させない方法、防雪林を L 字型あるいは直角三角状に配置する方法や道路線形を直線からカーブ線形に道路構造を変更することで、視程急変を回

避する方法などがある。さらに、卓越風向が道路に平行した場合には、道路に対し角度をもって配置した複数の柵で構成されるヘリンボン柵が紹介されている¹²⁾。なお、ヘリンボンとは模様的一种でニシンの骨という意味があり、杉綾模様とも言われる。しかし、発生する視程障害の実状に即した対策手法の選定が必要とされるものの国内だけでなく海外においても調査例は少なく、対策方法は確立されていない。

3.2 移動気象観測

前章で述べた移動気象観測区間 (図 1) には、副防雪柵による開口部対策 (図 34) が行われている 17 箇所が含まれる。開口部対策としての副防雪柵の有効性について検討するため、開口部の有無が風速や視程等の道路気象に及ぼす影響について検討する。ここでは、2.2 に示した条件に加え、開口部の条件を揃えるため、開口幅 10m 以上 20m 未満の箇所のデータを抽出した。また、データのばらつきを抑えるため 10m 移動平均 (観測地点前後各 5m のデータの平均) データを用いた。

副防雪柵の有無と風速比との関係について図 35 に、副防雪柵の有無と視程比との関係について図 36 に示す。風速比について見ると、最大値、中央値とも副防雪柵がある場合に小さく、風速比は風速が安定的に低下する傾向を示した。次に、視程比について見ると、最大値から最小値まで副防雪柵がある場合に大きく、また、中央値が高いことから、視程の低下が安定して抑えられている傾向がみられた。

これらから、副防雪柵は開口部における強風や急激な視程障害の発生を効果的に抑制できるものと考えられる。ただし、本検討結果は、風向や風速域の影響、開口幅の影響を十分に定量化したものではないため、今後も調査・検討を継続して進める予定である。



図 34 調査区間に設けられている副防雪柵

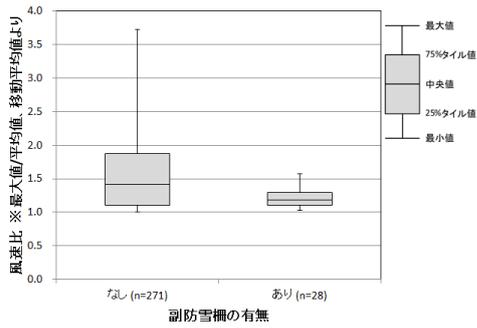


図 35 副防雪柵の有無と風速比の関係



図 38 副防雪柵設置例

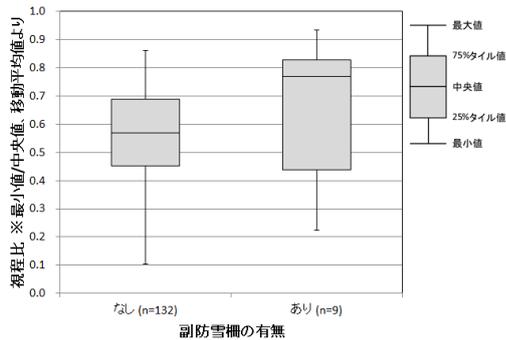


図 36 副防雪柵の有無と視程比の関係

3. 3 風洞実験による副防雪柵の開口部への影響解析

3. 2. 1 副防雪柵の有無による開口部への影響解析

副防雪柵の有無による開口部への影響を解析するため、風洞実験を行った。

(1) 実験条件

実験条件は前章 2. 5 と同様である。実験を行った副防雪柵の設置例を図 37、図 38 に示す。副防雪柵の長さ は 30mm とした。風向角ごとの計測点縦断方向の風速比 を、2. 5 で計測した副防雪柵がない場合と重ねたものを 図 39～図 44 に示す。

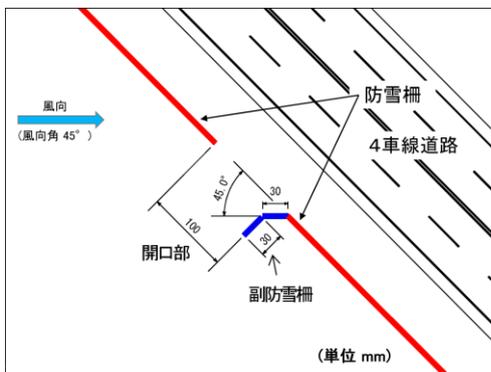


図 37 副防雪柵配置例

(風向角 45°、開口幅 100mm、副防雪柵 30mm)

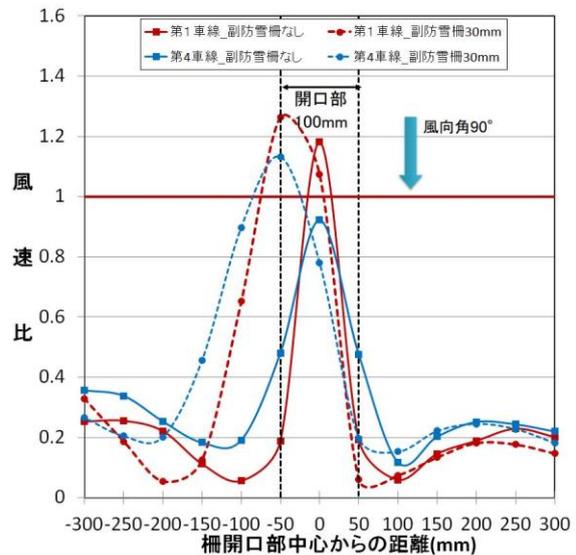


図 39 道路上の縦断方向における風速比 (風向角 90°、開口幅 100mm)

(2) 実験結果と考察

防雪柵の開口幅 100mm、道路に対して風が直交 (風向角 90°) したときの副防雪柵の有無による風速分布の違いについて図 39 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、副防雪柵側に誘導されたと考えられる。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。

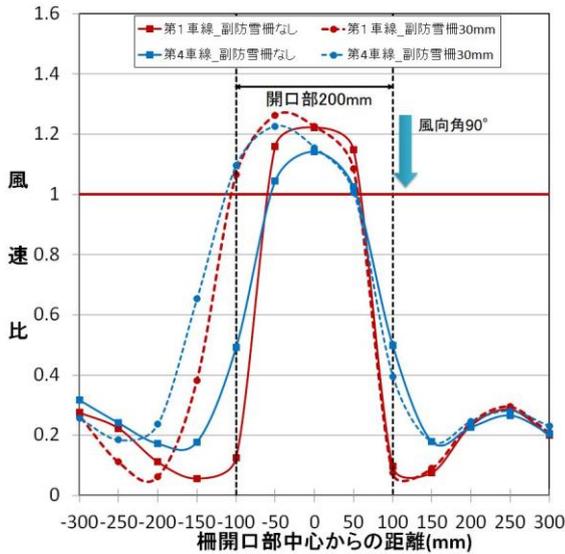


図 40 道路上の縦断方向における風速比
(風向角 90°、開口幅 200mm)

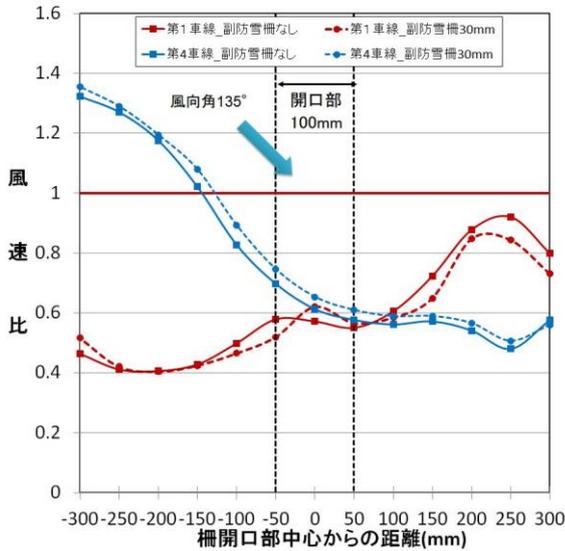


図 41 道路上の縦断方向における風速比
(風向角 135°、開口幅 100mm)

その理由として、付近の風が副防雪柵により整流され、副防雪柵側に誘導されたと考えられる。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 200mm とした場合の副防雪柵の風速比を図 40 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 100mm 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 100mm の場合と比べて風速比のピーク値が大きくなった。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。

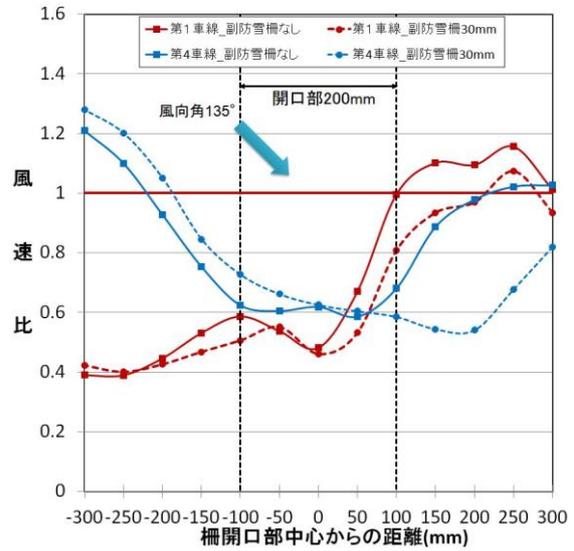


図 42 道路上の縦断方向における風速比
(風向角 135°、開口幅 200mm)

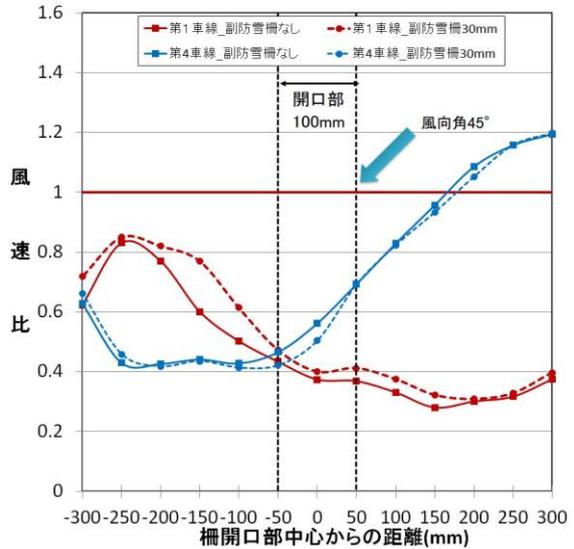


図 43 道路上の縦断方向における風速比
(風向角 45°、開口幅 100mm)

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 41 (開口幅 100mm) と、図 42 (開口幅 200mm) に示す。

開口幅 100mm の場合 (図 41)、第1車線では、副防雪柵がある場合には、風速比のピーク値がより小さくなっていった。防雪柵中心から 100~300mm 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 42)、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った。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 60~300mm 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 100mm 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 43 (開口幅 100mm) と、図 44 (開口幅 200mm) に示す。

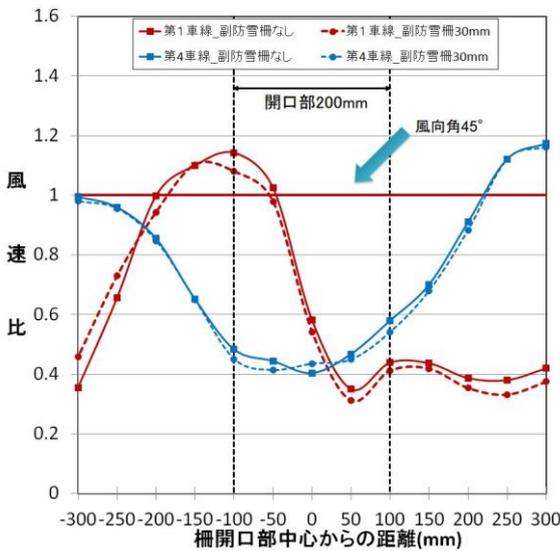


図 44 道路上の縦断方向における風速比 (風向角 45°、開口幅 200mm)

開口幅 100mm の場合 (図 43)、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 200mm の場合 (図 44)、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 100mm 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。

3. 2. 2 副防雪柵の種類による開口部への影響解析

(1) 実験条件

平成 29 年度は、2. 4 及び 3. 2 で記述した「副防雪柵なし」「副防雪柵 30mm」の実験を行った。平成 30 年度

は、副防雪柵の長さなどの違いによる風速の影響を解析するため、「副防雪柵なし」、「副防雪柵 30mm」、「副防雪柵 60mm」、「副防雪柵 90mm」、「副防雪柵 30mm 張出 10mm」、「副防雪柵 60mm 張出 10mm」の 6 パターンの実験を行った。表 2 に実験条件と副防雪柵のパターンを、図 45 に副防雪柵の設置状況を示す。副防雪柵の設置は角柵を付けて設置した。

表 2 実験条件と副防雪柵のパターン

実験条件	風向角 (°)	開口幅 (mm)	計測車線	副防雪柵のパターン
1	90	100	第1	副防雪柵なし(角柵なし)
2	90	100	第4	
3	90	200	第1	
4	90	200	第4	
5	135	100	第1	
6	135	100	第4	
7	135	200	第1	
8	135	200	第4	
9	45	100	第1	
10	45	100	第4	
11	45	200	第1	
12	45	200	第4	

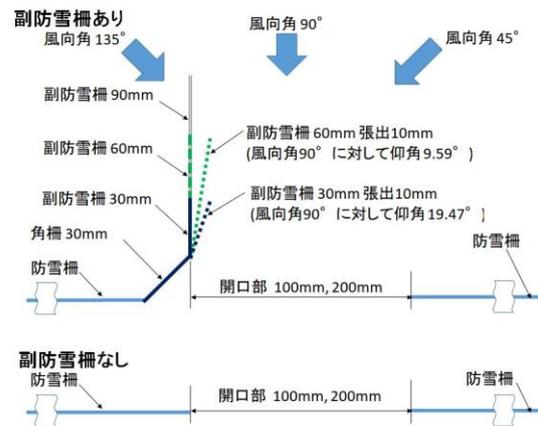


図 45 副防雪柵の設置状況

(2) 実験結果と考察

① 風向角 90°

図 46 に「実験条件 1(開口幅 100mm 第 1 車線)」、図 47 に「実験条件 2(開口幅 100mm 第 4 車線)」、図 48 に「実験条件 3(開口幅 200mm 第 1 車線)」、図 49 に「実験条件 4(開口幅 200mm 第 4 車線)」の風速比の分布を示す。

・ピーク値について

表 3 に風向角 90° の風速比のピーク値を示す。条件 1~4 で副防雪柵が長い方が風速を増す傾向が確認できた。副防雪柵が長い方が、より開口部垂直方向に風が整流され、開口部付近の風速がより増すためと考えられる。また、

副柵 30mm では張出があることによる風速比の軽減が確認できた。張り出すことにより開口部への風の流入を防いでいたと考えられる。しかし、副柵 60mm では張出有りの風速比がやや大きくなっている。張出により開口部への風の流入は防いでいるが、副柵 30mm に比べ柵長が長いため、風が整流されて風速が増し、張出による効果が相殺されたと考えられる。

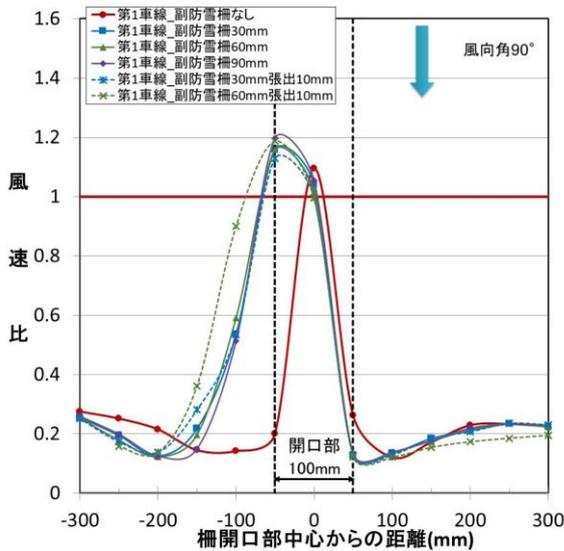


図 46 道路上の縦断方向における風速比 (実験条件 1、風向角 90°、開口幅 100mm、第 1 車線)

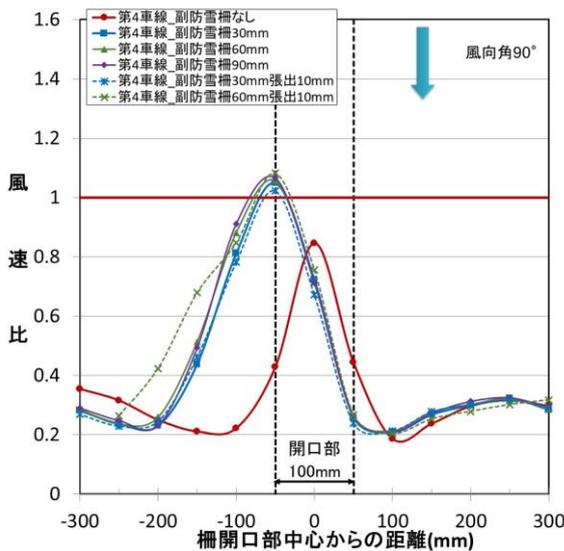


図 47 道路上の縦断方向における風速比 (実験条件 2、風向角 90°、開口幅 100mm、第 4 車線)

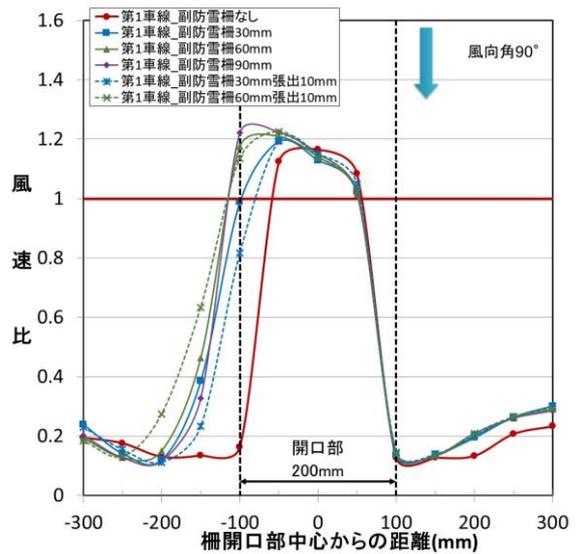


図 48 道路上の縦断方向における風速比 (実験条件 3、風向角 90°、開口幅 200mm、第 1 車線)

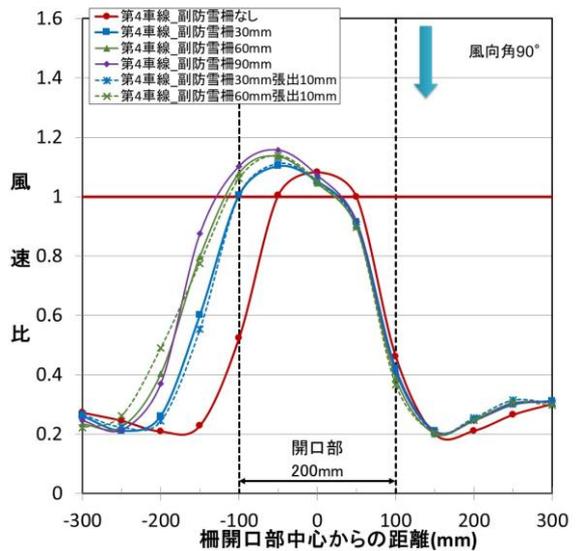


図 49 道路上の縦断方向における風速比 (実験条件 4、風向角 90°、開口幅 200mm、第 4 車線)

表 3 風速比のピーク値 (風向角 90°)

実験条件	風向角 (°)	開口幅 (mm)	計測車線	副防雪柵なし	副防雪柵 30mm	副防雪柵 60mm	副防雪柵 90mm	副防雪柵 30mm 張出 10mm	副防雪柵 60mm 張出 10mm
1	90	100	第1	1.09 (1)	1.16 (3)	1.16 (3)	1.20 (6)	1.13 (2)	1.19 (5)
2	90	100	第4	0.85 (1)	1.05 (3)	1.06 (4)	1.07 (5)	1.02 (2)	1.08 (6)
3	90	200	第1	1.16 (1)	1.19 (2)	1.21 (4)	1.22 (5)	1.19 (2)	1.23 (6)
4	90	200	第4	1.08 (1)	1.10 (2)	1.14 (4)	1.16 (6)	1.11 (3)	1.14 (4)

()内の数値は風速比が低い方からの順位

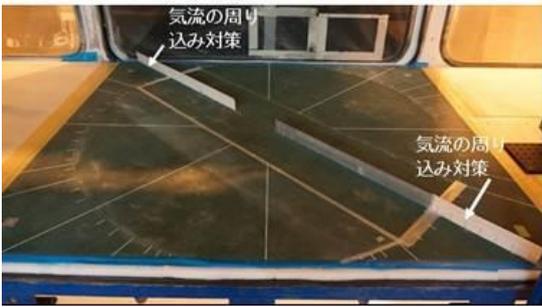


図 50 気流の周り込み対策をした防雪柵模型

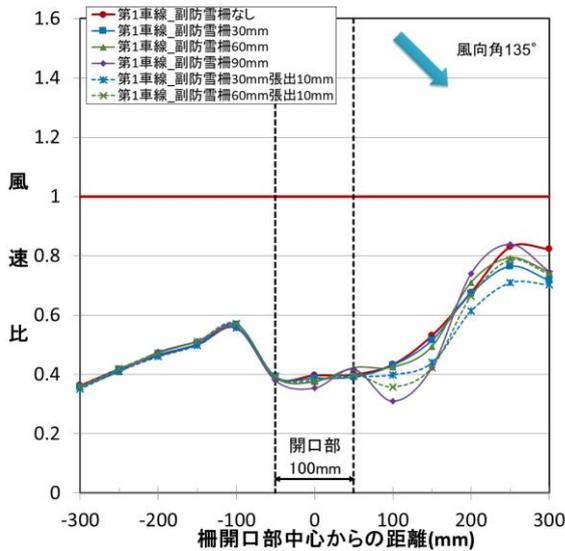


図 51 道路上の縦断方向における風速比 (実験条件5、風向角 135°、開口幅 100mm、第1車線)

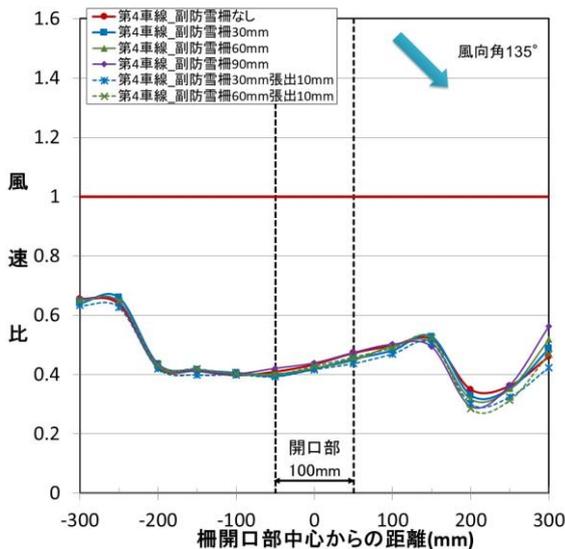


図 52 道路上の縦断方向における風速比 (実験条件6、風向角 135°、開口幅 100mm、第4車線)

・ピーク位置について

副防雪柵を設置しない場合のピーク位置は開口部中心

で、副防雪柵を設置した場合は開口部中心から-50mm (副防雪柵を設置している側) である。ばらつきはあるが特に傾向は見られなかった。

・風速比の上昇について

副防雪柵を設置した場合は、設置しない場合よりも風速比が上昇する範囲が広い。特に副柵 60mm 張出 10mm では上昇範囲が広い。仰角 (9.59°) があることで、副防雪柵設置側 (マイナス方向) へ風を誘導していたと考えられる。しかし、副柵 30mm 張出 10mm は、同じ柵長の副柵 30mm と上昇範囲に差が無い。柵長が短いため、副防雪柵の設置側 (マイナス方向) へ風が整流しきれず誘導が少なくなったと考えられる。

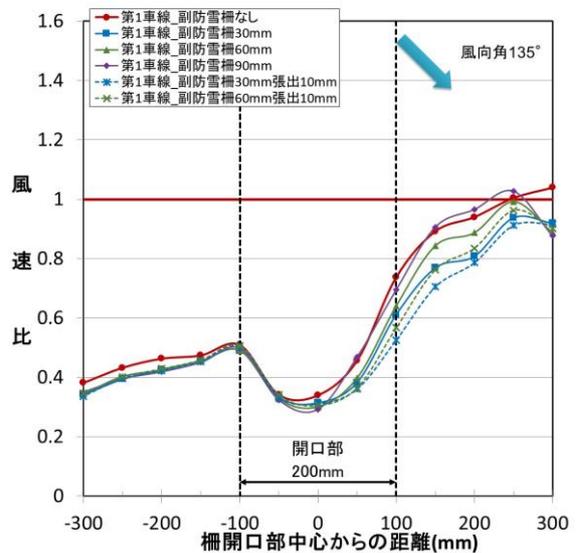


図 53 道路上の縦断方向における風速比 (実験条件7、風向角 135°、開口幅 200mm、第1車線)

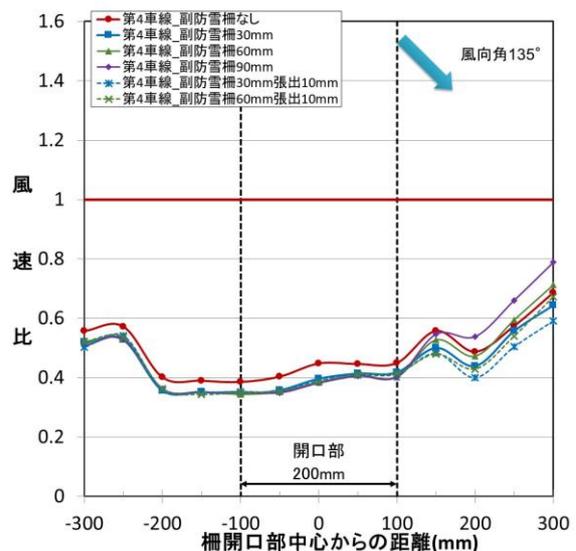


図 54 道路上の縦断方向における風速比 (実験条件8、風向角 135°、開口幅 200mm、第4車線)

表 4 風速比のピーク値 (風向角 135°)

実験条件	風向角 (°)	開口幅 (mm)	計測車線	副防雪柵なし	副防雪柵 30mm	副防雪柵 60mm	副防雪柵 90mm	副防雪柵 30mm 張出 10mm	副防雪柵 60mm 張出 10mm
5	135	100	第1	0.83 (5)	0.76 (2)	0.79 (3)	0.84 (6)	0.71 (1)	0.79 (3)
6	135	100	第4	0.65 (2)	0.66 (5)	0.65 (2)	0.66 (5)	0.63 (1)	0.65 (2)
7	135	200	第1	1.04 (6)	0.94 (2)	0.99 (4)	1.03 (5)	0.92 (1)	0.96 (3)
8	135	200	第4	0.69 (4)	0.64 (2)	0.71 (5)	0.79 (6)	0.59 (1)	0.67 (3)

()内の数値は風速比が低い方からの順位

② 風向角 135°

2. 5. 6 で前述した結果 (図 32、図 33) では測定洞幅員の左右に空隙が生じ気流が回り込んだと見られるため、防雪柵の端部に板を設置し、風が回り込まないように対策を講じて実験を行った (図 50)。

図 51 に「実験条件 5(開口幅 100mm 第 1 車線)、図 52 に「実験条件 6(開口幅 100mm 第 4 車線)」、図 53 に「実験条件 7(開口幅 200mm 第 1 車線)」、図 54 に「実験条件 8(開口幅 200mm 第 4 車線)」の風速比の分布を示す。

・ピーク値について

表 4 に風向角 135°の風速比のピーク値を示す。副防雪柵の設置側 (マイナス方向) からの風向のため、柵の種類によらず、特に副防雪柵を設置していない側

(プラス方向) で車線を問わず風速比は軽減できた。柵長が短い方が軽減が大きい傾向が掴めた。柵長が長いと風向の垂直方向の幅が制限されるが、柵長が長いために風が整流し軽減が小さくなったと考えられる。

実験条件 5~8 で、柵長が同じでも張出がある方で軽減が確認できた。特に実験条件 7、8 では軽減が大きい。張出がある場合、柵長が短い方が効果が大きかった。風向と副防雪柵の仰角が大きな方が、開口部に流入する風量をより減らすことができ、流入する風も柵が短い方が長いものに比べ整流されにくいと考えられる。

・ピーク位置について

第 1 車線では開口幅が 100mm から 200mm になっても風速比のピーク位置は開口部中心から 250mm (副防雪柵を設置していない側) と概ね変わらない (副防雪柵なしを除く)。副防雪柵の違いとピーク位置はばらつきがあまりなく大きな傾向が見られなかった。

・風速比の上昇について

副防雪柵の設置側からの風向のため、副防雪柵の種類によらず、特に副防雪柵を設置していない側 (プラス方向) で車線を問わず風速比は軽減できた。

開口部 200mm の場合、柵長が 90mm と長いと、柵がない場合よりも、第 4 車線では開口部中心から 150mm 以降 (副防雪柵を設置していない側) で風速比が高い。こ

れは副防雪柵により直接の風の流入は防いでいるが、副防雪柵端部より回り込んだ風によるものと考えられる。柵長が長い程、風速比が高くなっている。回り込んだ風がより整流されると考えられる。そのため、第 1 車線の開口部中心から 150~250mm で風速比が一番高く、風下の第 4 車線で風速が増す範囲が広がったと考えられる。副防雪柵の違いによる軽減の範囲は変わらないが、柵長が短い方が軽減は大きかった。張出の有無では張り出た方が、張出がある場合は柵長が短い方が、それぞれ軽減が大きかった。風向に対して柵の仰角が大きな方が開口部への風の流入を防ぎ、また、柵が短い方が長いものに比べ整流されにくいと考えられる。

③風向角 45°

風向角 45°は風向角 135°と同様に、実験では柵の端部に板を設置し、風が回り込まないように対策を講じて実験を行った。図 55 に「実験条件 9(開口幅 100mm 第 1 車線)」、図 56 に「実験条件 10(開口幅 100mm 第 4 車線)」、図 57 に「実験条件 11(開口幅 200mm 第 1 車線)」、図 58 に「実験条件 12(開口幅 200mm 第 4 車線)」の風速比の分布を示す。

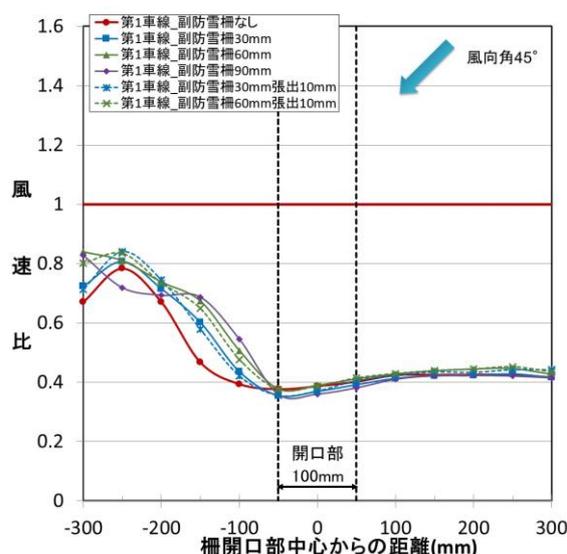


図 55 道路上の縦断方向における風速比 (実験条件 9、風向角 45°、開口幅 100mm、第 1 車線)

・ピーク値について

表 5 に風向角 45°の風速比のピーク値を示す。開口幅 100mm の第 1 車線では副防雪柵の柵長が長くなると風速比が上昇している。柵長が長くなることで風にあたる面積が増えて、開口部への流入量が増えたためと考えられる。第 4 車線では、顕著な差を確認できなかった。

・ピーク位置について

副防雪柵を設置していない側 (プラス方向) からの風

向のため、副防雪柵の設置側（マイナス方向）で風速が増している。実験条件9では、柵長が長い方が風速が増している。柵長が長いとより多くの風を開口部に取り入れたためと考えられる。

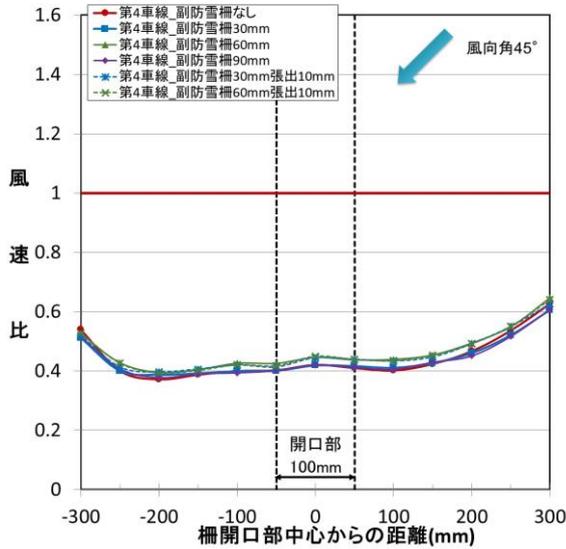


図 56 道路上の縦断方向における風速比
(実験条件 10、風向角 45°、開口幅 100mm、第 4 車線)

風速が上昇した。副防雪柵が開口部への風をより多く流入させていたと考えられる。第 4 車線では、顕著な差を確認できなかった。これは風が拡散されたためと考えられる。

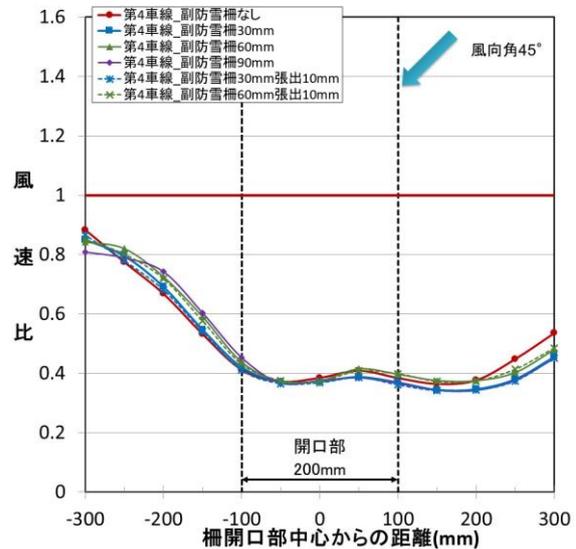


図 58 道路上の縦断方向における風速比
(実験条件 12、風向角 45°、開口幅 200mm、第 4 車線)

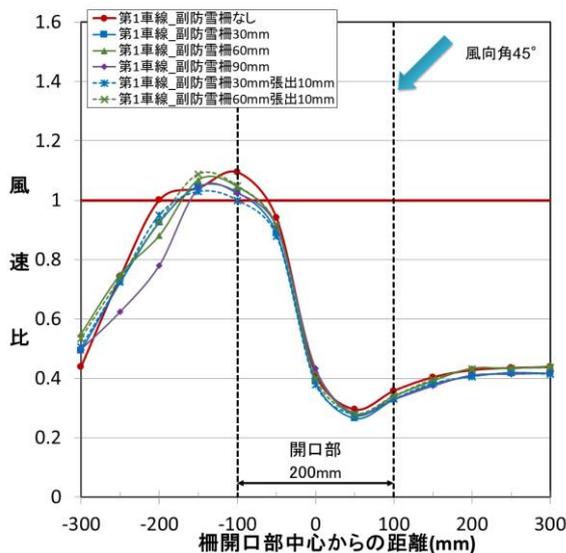


図 57 道路上の縦断方向における風速比
(実験条件 11、風向角 45°、開口幅 200mm、第 1 車線)

張出の有無では張出の方が風速の上昇を抑えていた。張り出すことで、風向に対しより副防雪柵の仰角が小さくなり、開口部への流入を防ぐことができると考えられる。

・風速比の上昇について

開口部 100mm では副防雪柵が長い方が、第 1 車線の開口部中心から -50 ~ -300mm (副防雪柵の設置側) で

表 5 風速比のピーク値 (風向角 45°)

実験条件	風向角 (°)	開口幅 (mm)	計測車線	副防雪柵なし	副防雪柵 30mm	副防雪柵 60mm	副防雪柵 90mm	副防雪柵 30mm 張出 10mm	副防雪柵 60mm 張出 10mm
9	45	100	第1	0.78 (1)	0.81 (2)	0.84 (5)	0.83 (3)	0.84 (5)	0.83 (3)
10	45	100	第4	0.63 (3)	0.61 (1)	0.65 (6)	0.61 (1)	0.63 (3)	0.64 (5)
11	45	200	第1	1.09 (5)	1.05 (3)	1.07 (4)	1.04 (2)	1.03 (1)	1.09 (5)
12	45	200	第4	0.88 (6)	0.85 (3)	0.84 (2)	0.81 (1)	0.87 (5)	0.85 (3)

()内の数値は風速比が低い方からの順位

3. 2. 3 風向角による開口部への影響解析

(1) 実験条件

令和元年度は、風向角の違いによる影響を詳細に把握するため風向角 112.5° と風向角 67.5° の実験を行った。副防雪柵は平成 30 年度と同様、「副防雪柵なし」、「副防雪柵 30mm」、「副防雪柵 60mm」、「副防雪柵 90mm」、「副防雪柵 30mm 張出 10mm」、「副防雪柵 60mm 張出 10mm」の 6 パターンとした。表 6 に実験条件と副防雪柵のパターンを示す。

(2) 実験結果と考察

前述 3.2.2 の副防雪柵の種類による開口部への影響解析では開口部 100mm と 200mm について記載したが、今実験では同種の傾向を示したため、開口部 100mm を主に記述する。

①開口幅 100mm 風向角 112.5°

・ピーク値について

図 59 に風向角 112.5° 開口幅 100mm 第 1 車線のピーク値を示す。風向角 90° の場合は副防雪柵なしが一番低かったが、風向角が 112.5° になると副防雪柵 30mm 張出 10mm が一番低くなった。副防雪柵が風を引き寄せる効果が弱くなったためと考えられる。

図 60 に風向角 112.5° 開口幅 100mm 第 4 車線のピーク値を示す。第 1 車線から第 4 車線にかけて副防雪柵なしは風速比の低下が大きいが、副防雪柵ありは風が整流されているため、副防雪柵なしに比べ風速比の下がり小さい。

表 6 実験条件と副防雪柵のパターン

実験条件	風向角 (°)	開口幅 (mm)	計測車線	副防雪柵のパターン
1 3	112.5	100	第1	副柵なし(角柵なし)
1 4	112.5	100	第4	副柵30mm(+角柵30mm)
1 5	112.5	200	第1	副柵60mm(+角柵30mm)
1 6	112.5	200	第4	副柵90mm(+角柵30mm)
1 7	67.5	100	第1	副柵30mm張出10mm(+角柵30mm)
1 8	67.5	100	第4	副柵60mm張出10mm(+角柵30mm)
1 9	67.5	200	第1	副柵60mm張出10mm(+角柵30mm)
2 0	67.5	200	第4	副柵60mm張出10mm(+角柵30mm)

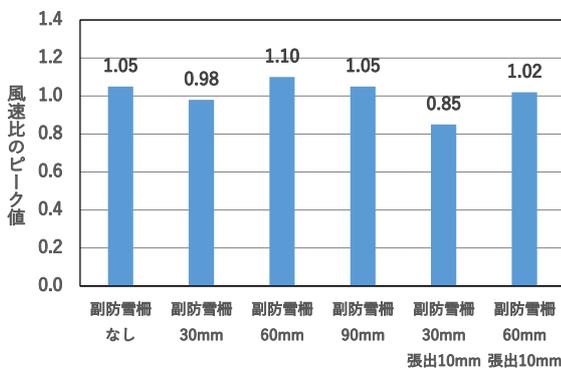


図 59 風向角 112.5° のピーク値 (開口幅 100mm、第 1 車線)

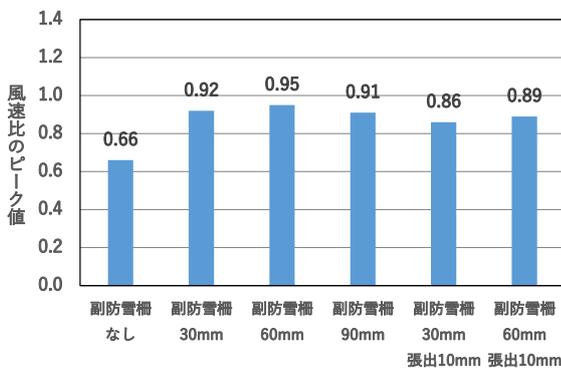


図 60 風向角 112.5° のピーク値 (開口幅 100mm、第 4 車線)

・風速比の上昇範囲

図 61 に風向角 112.5° 開口幅 100mm 第 1 車線の風速比を示す。風向角 112.5° も風向角 90° と同様に、風が副防雪柵に誘導されて、風速比の上昇している範囲が少し広がっている。風速比は副防雪柵 30mm 張出 10mm が一番低い。これは風向角 90° と同様の傾向で、風向に対して柵の仰角が大きく開口部への風の流入を防ぎ、副防雪柵 60mm や副防雪柵 90mm 比へ整流されにくいと考えられる。

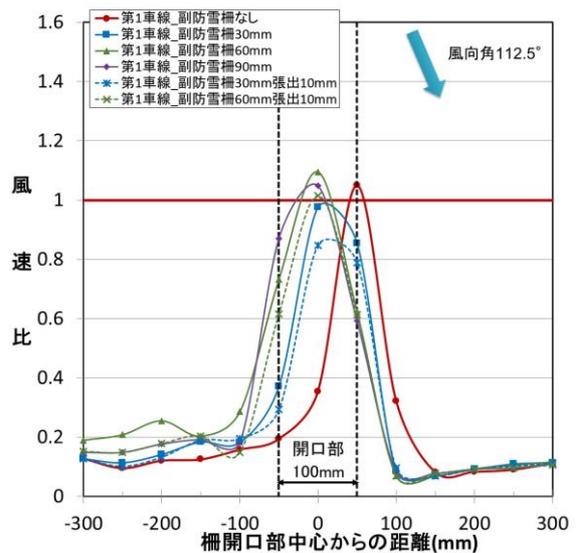


図 61 道路上の縦断方向における風速比 (実験条件 13、風向角 112.5°、開口幅 100mm、第 1 車線)

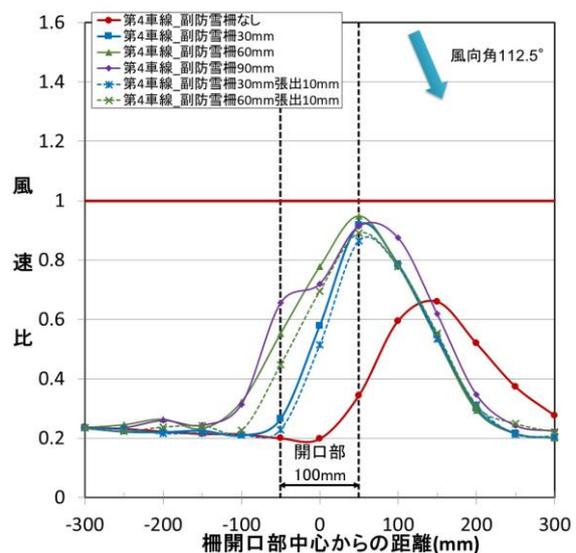


図 62 道路上の縦断方向における風速比 (実験条件 14、風向角 112.5°、開口幅 100mm、第 4 車線)

図 62 に 風向角 112.5° 開口幅 100mm 第 4 車線の風速比を示す。第 1 車線から第 4 車線にかけて、副防雪柵なし

しはピーク値が下がりながら上昇範囲が広がっているが、副防雪柵ありはピーク値があまり下がることなく上昇範囲が広がっている。風向角 90° と同様の傾向が確認でき、風が副防雪柵に誘導されているのが原因を思われる。

第1車線と第4車線のピーク位置の変化から、開口部通過後の風向は、副防雪柵ありが副防雪柵なしより、道路に直交に近づくと考えられる。第1車線と第4車線の上昇範囲の変化から、開口部を通過した後の風の拡散は、副防雪柵ありの方が副防雪柵なしより拡散していると考えられる。

②開口幅 100mm 風向角 67.5°

・ピーク値について

図 63 に風向角 67.5°開口幅 100m 第1車線のピーク値を示す。副防雪柵の設置有無による風速比の変化はあまりない。

図 64 風向角 67.5°開口幅 100m 第4車線のピーク値を示す。第1車線から第4車線にかけて副防雪柵なしは風速比の低下が大きい、副防雪柵ありは風が整流されているため風速比の下がり方が小さい。風向角 112.5°と数値は近いが、風向角の違いにより風の整流の影響は小さいと考えられる。

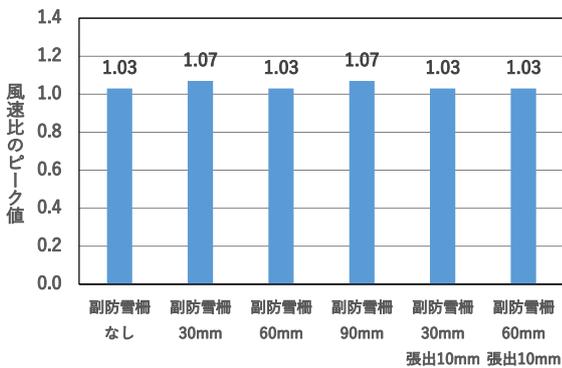


図 63 風向角 67.5°のピーク値 (開口幅 100mm、第1車線)

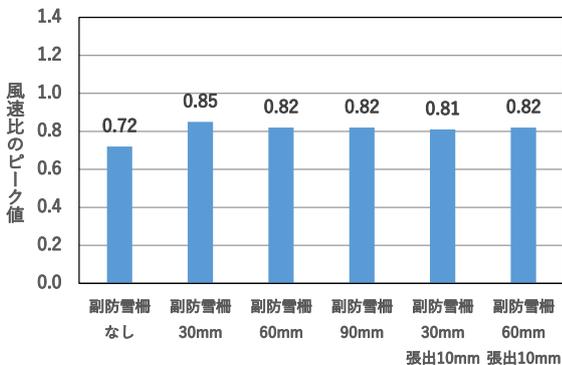


図 64 風向角 67.5°のピーク値 (開口幅 100mm、第4車線)

・風速比の上昇範囲

図 65 に風向角 67.5°開口幅 100mm 第1車線の風速比を示す。ピーク値は副防雪柵なしと副防雪柵ありであまり変わらないが、副防雪柵ありは風が誘導されているため、上昇範囲が副防雪柵の設置側(マイナス側)に広がっている。

図 66 に風向角 67.5°開口幅 100mm 第4車線の風速比を示す。第1車線と第4車線のピーク位置の変化から、開口部通過後の風向は、副防雪柵ありが副防雪柵なしより、風向角 112.5°と同様に道路に直交に近づくと考えられる。第1車線と第4車線の上昇範囲の変化から、副防雪柵ありと副防雪柵なしで、開口部を通過した後の風の広がり方が違い、副防雪柵なしは副防雪

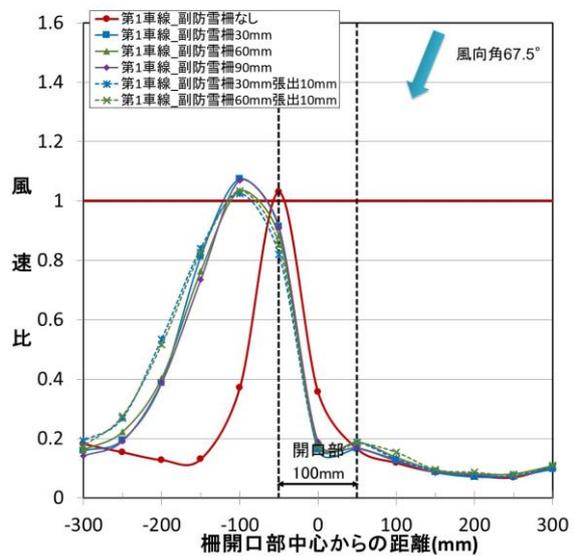


図 65 道路上の縦断方向における風速比 (実験条件 17、風向角 67.5°、開口幅 100mm、第1車線)

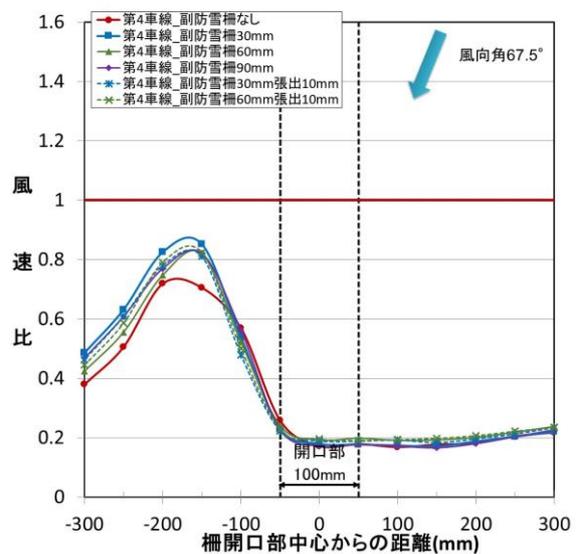


図 66 道路上の縦断方向における風速比 (実験条件 18、風向角 67.5°、開口幅 100mm、第4車線)

柵ありより拡散しているため、副防雪柵なしの上昇範囲は第1車線では副防雪柵ありより狭いが、第4車線で副防雪柵ありと同じ広がりになったと考えられる。

③開口幅 100mm の風向角と副防雪柵の緩和効果

図 67 に開口幅 100mm 第1車線の風向角と風速比のピーク値を示す。風向角が 135°から 90°付近までは、副防雪柵 30mm 張出 10mm の風速比が一番低い。

風向角が 90°付近から 45°は副防雪柵なしの風速比が一番低いが、副防雪柵 30mm 張出 10mm との差は僅かである。副防雪柵を設置することで、道路に直交する風向角以外では、第1車線は風速が緩和される。

図 68 に開口幅 100mm 第4車線の風向角と風速比のピーク値を示す。第4車線は、風向角 135°で副防雪柵なしと副防雪柵ありの差が小さいが、全域で副防雪柵なし

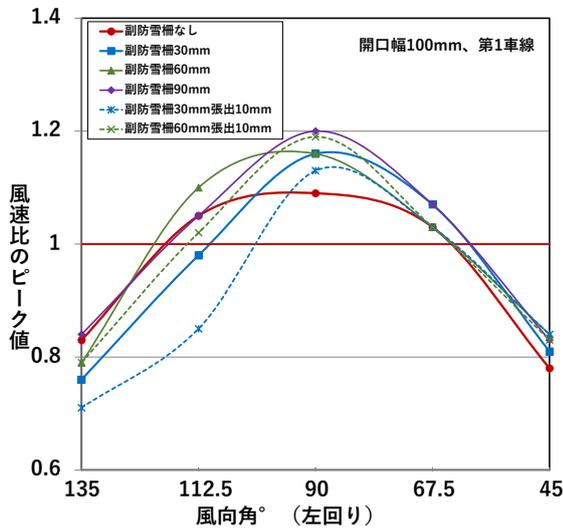


図 67 風向角と風速比のピーク値 (開口幅 100mm、第1車線)

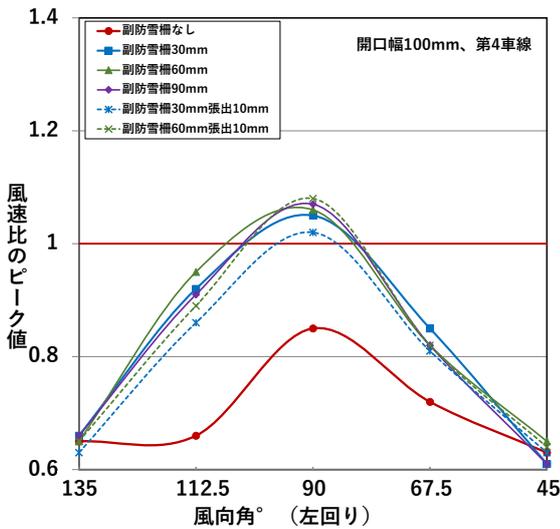


図 68 風向角と風速比のピーク値 (開口幅 100mm、第4車線)

より副防雪柵ありの方が風速比が高くなり、風向角が 45°付近で副防雪柵なしと副防雪柵ありの差が小さくなっている。

④開口幅 200mm の実験結果

前述の通り、開口幅 200mm の実験結果は開口幅 100mm と同様の傾向であるため、開口幅 100mm と比べ特徴的な点について記述する。

図 69 に風向角 112.5°開口幅 200mm 第1車線の風速比、図 70 に風向角 112.5°開口幅 200mm 第4車線の風速比を示す。

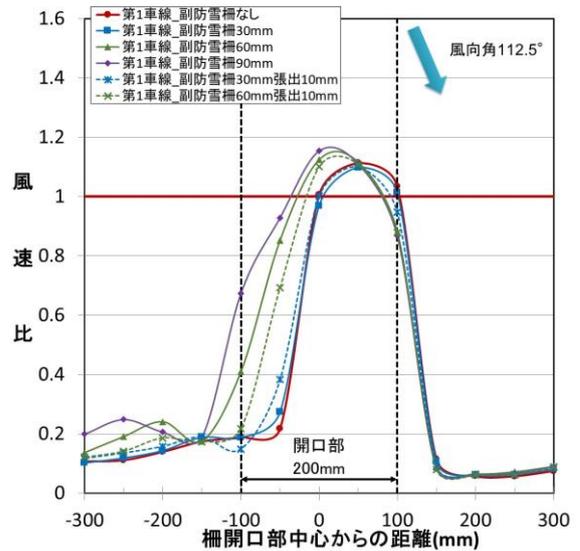


図 69 道路上の縦断方向における風速比 (実験条件 15、風向角 112.5°、開口幅 200mm、第1車線)

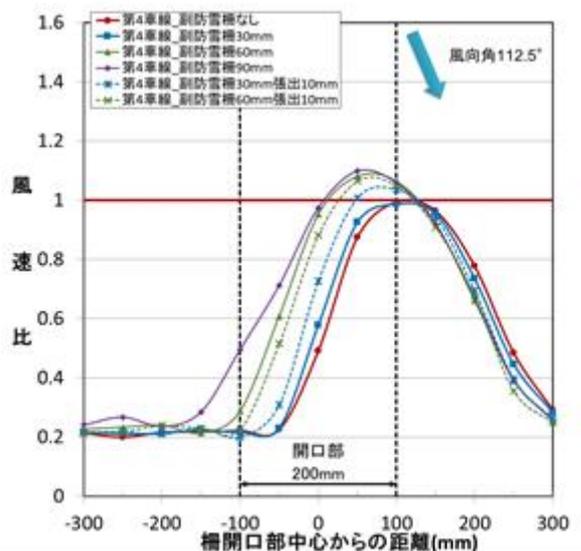


図 70 道路上の縦断方向における風速比 (実験条件 20、風向角 67.5°、開口幅 200mm、第4車線)

開口幅 100mm で風の流入を防いでいたと考えられる副防雪柵 30mm 張出 10mm は、張出なしと変わらない結果となった。開口幅が広いと直接流入する風量が多くなるため、仰角による流入を防ぐ影響度合いが小さくなるためと考えられる。

図 71 に風向角 67.5° 開口幅 200mm 第 1 車線の風速比、図 72 に風向角 67.5° 開口幅 200mm 第 4 車線の風速比を示す。開口幅 100mm に比べ風速比の上昇範囲が若干広くなっているが同様の傾向を示していた。

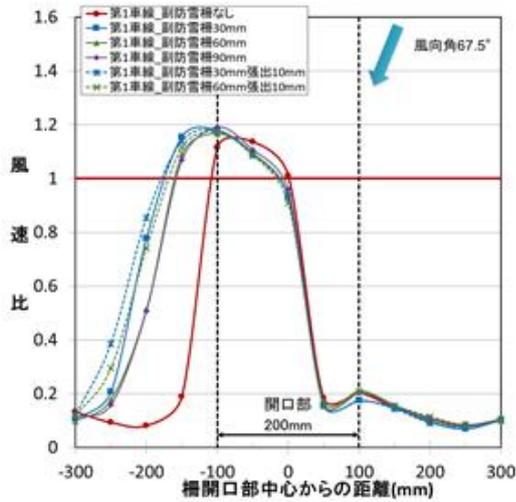


図 71 道路上の縦断方向における風速比 (実験条件 19、風向角 67.5°、開口幅 200mm、第 1 車線)

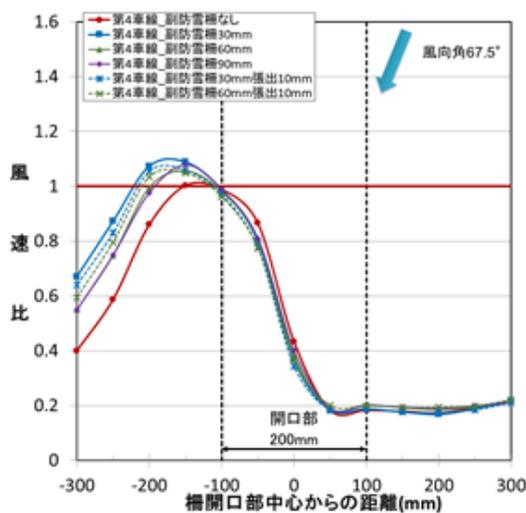


図 72 道路上の縦断方向における風速比 (実験条件 20、風向角 67.5°、開口幅 200mm、第 4 車線)

雪柵 30mm 張出 10mm と副防雪柵なしを比較すると、風向角 135°では副防雪柵を設置した方が風速比が低く、風向角 112.5°ではほぼ同じになり、風向角 90°から 67.5°では副防雪柵なしが低い。現地の風向角が 135°から 112.5°の範囲は、副防雪柵による明確な緩和効果が確認できた。

図 74 に開口幅 200mm 第 4 車線の風向角と風速比のピーク値を示す。現地の主風向角が 135°から 112.5°の範囲は、副防雪柵を設置による僅かな緩和効果が確認できた。風向角が 90°から 67.5°は副防雪柵ありの風速比が高くなる。開口幅 100mm に比べ、風速比の上昇度合いは低いことが確認された。

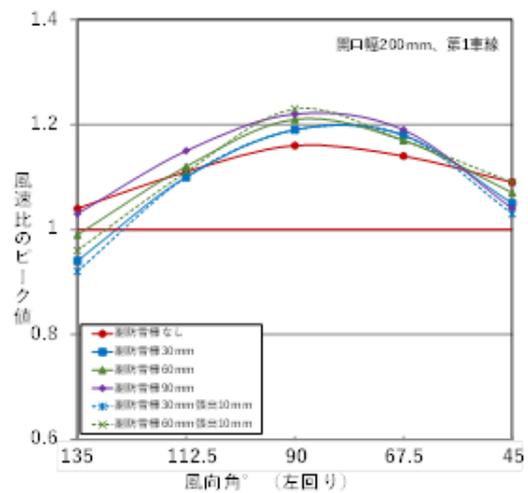


図 73 風向角と風速比のピーク値 (開口幅 200mm、第 1 車線)

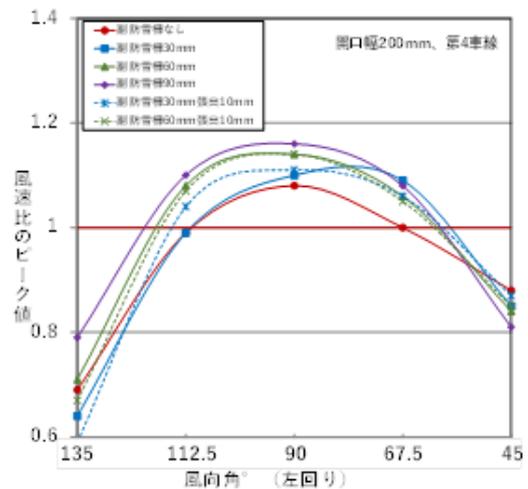


図 74 風向角と風速比のピーク値 (開口幅 200mm、第 4 車線)

⑤開口幅 200mm の風向角と副防雪柵の緩和効果

図 73 に開口幅 200mm 第 1 車線の風向角と風速比のピーク値を示す。副防雪柵ありで風速比が一番低い副防

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の状況やメカニズム、車両の走行に影響を及ぼす要因については、未だ定量的に明らかになっていない。本研究では、視程急変メカニズムの解明に向けて、道路上や石狩吹雪実験場内の防雪柵設置区間において視程障害移動観測車による移動気象観測と、石狩吹雪実験場における定点気象観測を行った。また、定点気象観測と同一の条件で数値シミュレーションを行い、風速分布の再現性整合性について検討した。さらに、開口部を含む防雪柵模型を用いた風洞実験を行った。

移動気象観測では、防雪柵の開口幅の増加とともに風速が上昇し、視程が低下する傾向が見られ、開口幅 12m 以上では視程比（中央値）が 0.3 以下に低下することがわかった。また、風速の増加や視程の低下がドライバーの運転挙動に影響を及ぼし、特に視程が 100m 以下に低下した場合に影響が顕著となることが判った。

次に、定点気象観測では、防雪柵直角方向を中心に道路上に強い風の吹き込みを生じること、また、開口部においてエンドエフェクトが発生していることを確認した。数値シミュレーションは、この傾向を良好に再現しており、多様な対策検討における効果的な検討手法となることを確認した。

風洞実験では、副防雪柵が短い場合や張り出しを持たせた場合に道路上の風速上昇を軽減できることなど、副防雪柵の有無や風向の変化による道路上への影響について把握できた。

今後は効果的な副防雪柵の長さや仰角や設置位置などについて、検討を進めることとしたい。

次年度は、これまでの検討結果に基づき、端部・開口部対策について、シミュレーションによる検討を行い、効果的な対策手法についての風洞実験や石狩吹雪実験場への対策施設の設置と検証試験を行う予定である。

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（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) 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
- 4) 大浦浩文、小林大二、小林俊一：地ふぶき時における風速

- の鉛直分布特性、低温科学（物理篇）、25、pp.73-88、1967
- 5) 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、p.616、1997
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 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
- 11) 老川進、苦米地司、石原孟：建物近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
- 12) R. D. Tabler: Controlling blowing and drifting snow with snow fences and road design –Final report–, Prepared for National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Transportation Research Board of the National Academies, 2003

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：片野浩司、牧野正敏、山口洋士、新保貴広、久慈直之

【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。令和元年度は、車線逸脱防止技術では磁気マーカシステム等を用いた車線走行支援ガイダンスを試作し、視程障害を模擬的に再現した状況で、ガイダンス情報を頼りに除雪車を走行させ、車線逸脱せずに除雪作業が可能であることを確認した。また、周囲探知技術ではミリ波レーダを用いた前方障害物探知ガイダンスを試作し、除雪車の前方視界を遮断した状況で走行させ、ガイダンス情報に従って障害物の10m以上手前で安全に停止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、磁気マーカシステム

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RTK-GNSS（以下、「VRS-GNSS」という）、RFID^{*2}、LiDAR^{*3}、磁気マーカシステム^{*4}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。

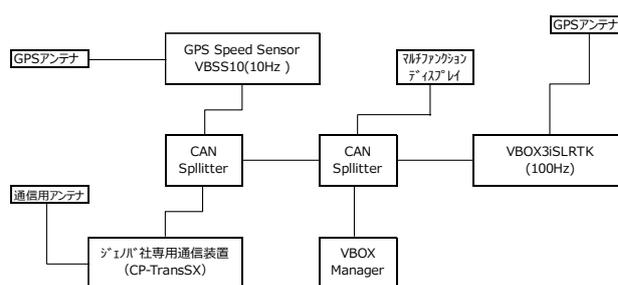


図-1 機器構成

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。

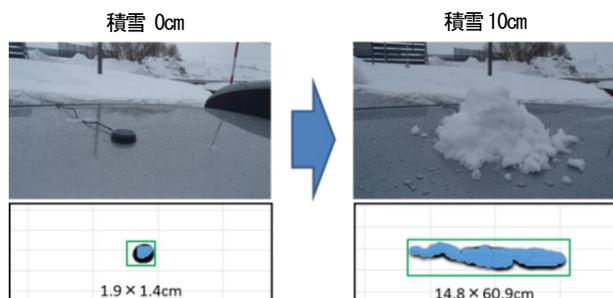


図-2 アンテナ部の積雪による測位の変化

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)

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	メーカー	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 D0TR-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 A s 常温合材を入れて締め固めた。



写真-2 読取装置 (UHF 帯リーダ)

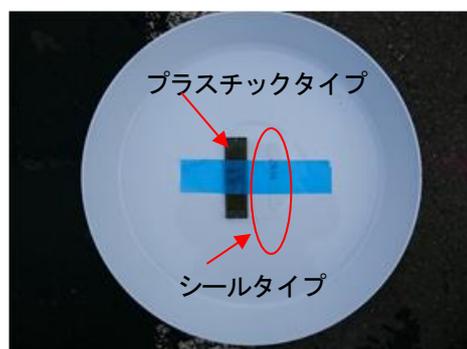


写真-3 トレーの内側底面への RFID タグ貼付状況

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 s 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



写真-4 実験状況

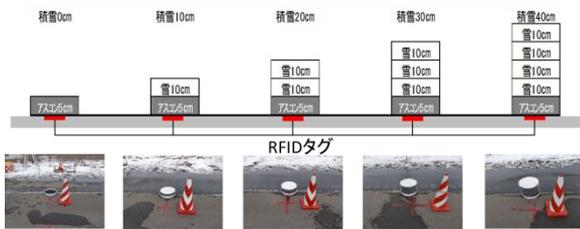


図-3 積雪状況再現概略図

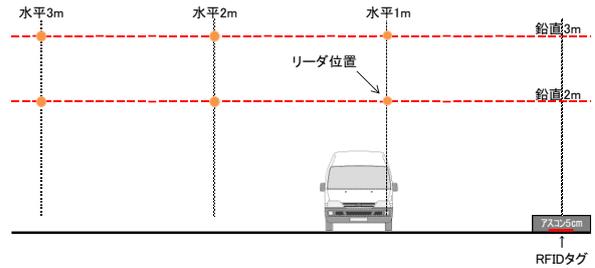


図-4 実験概略図

2. 2. 2 実験結果

実験結果を表-2に示す。

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	x	-67	-68	-73	-66	x	-70	-64	-67	-69	x	x	x	x
			・10km/h	-71	x	-63	-67	-63	-69	x	-63	-65	-62	x	x	x	x	x
			・20km/h	x	x	-70	-68	-68	-68	x	-64	-69	x	x	x	x	x	x
	・30km/h	x	x	-66	-74	-65	-64	x	-70	-64	x	x	x	x	x	x		
	3.0	1W	水平距離(m)	1.0					2.0					3.0				
			リーダ角度(°)	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	x	x	x	-63	-73	x	x	-75	-66	-80	x	x	x	x	x
			・10km/h	x	x	-70	-58	x	x	x	-63	-60	-69	停止時が未検出のため省略				
・20km/h			x	x	-64	-66	x	x	x	-64	-74	-70	停止時が未検出のため省略					
・30km/h	x	x	-68	-71	-74	x	x	-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	x	-78	x
			・10km/h	-75	-72	-78	-68	-69	-73	-70	-72	-73	x	x	-76	x	x	x
			・20km/h	-81	-75	-69	-80	-71	-76	x	x	-72	x	x	x	x	x	x
	・30km/h	-76	-73	-73	-70	-64	-72	-75	x	-67	x	-80	x	x	x	x		
	3.0	1W	水平距離(m)	1.0					2.0					3.0				
			リーダ角度(°)	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	x	-73	-70	-68	-73	-76	-75	-73	x	x	x	x	x	x
			・10km/h	-70	x	-70	-70	-73	-73	-77	x	x	x	停止時が未検出のため省略				
・20km/h			-75	x	-75	-70	-79	x	x	-72	-75	x	停止時が未検出のため省略					
・30km/h	-81	-75	-73	-70	-73	x	x	x	x	x	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
x 検出なかった箇所

2.3 RFIDによる自転車位置測位実験

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を用いた自転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①（図-5）と道路上を想定した実験②（図-6）を行った。

交差点を想定した実験①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。



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②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）。

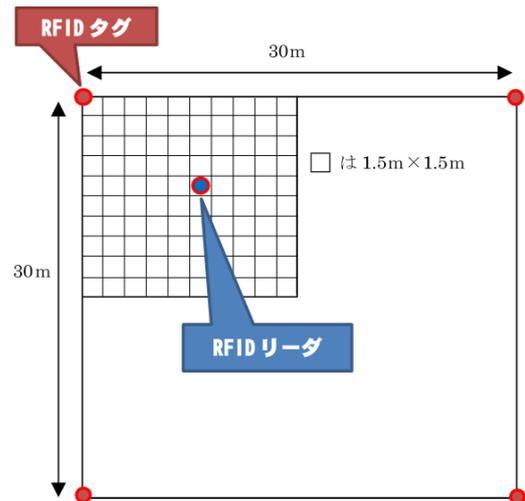


図-5 実験①計測エリア図

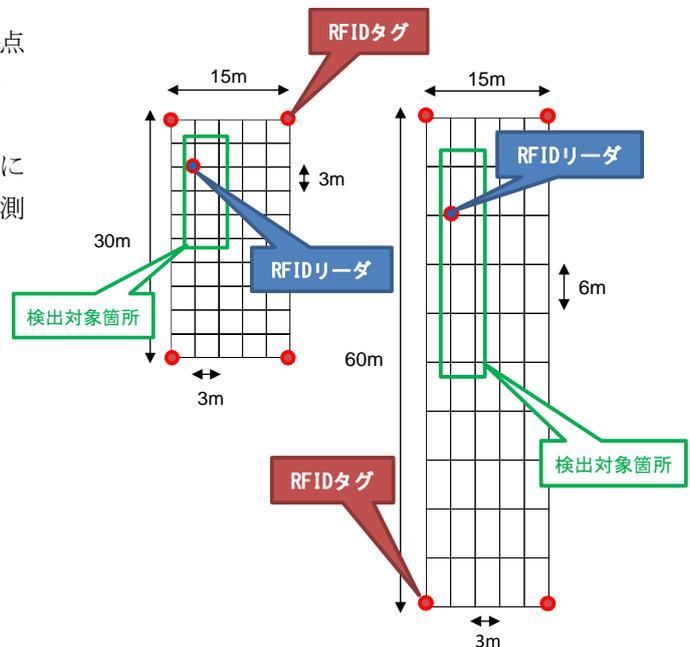


図-6 実験②計測エリア図

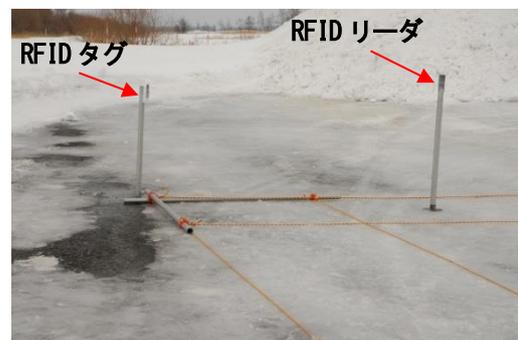


写真-6 実験①計測状況

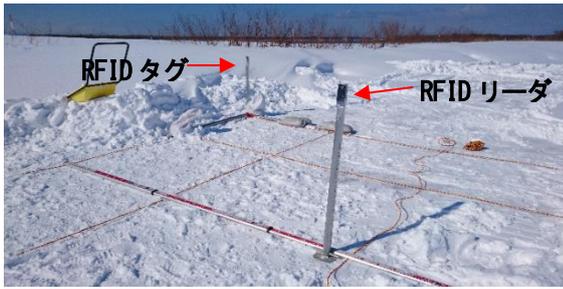


写真-7 実験②計測状況

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、設置間隔が縦断方向 30m を超える範囲でさらなる確認が必要といえる。

実験①及び②の結果から、RFID は、車線逸脱防止に使用するうえで、自転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①の計測結果を図-7 に示す。

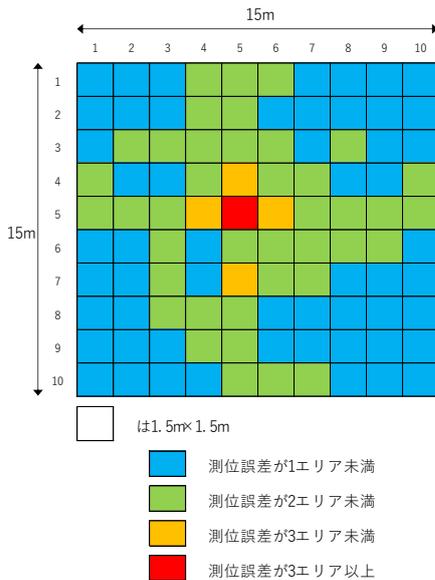


図-7 実験①計測結果

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②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

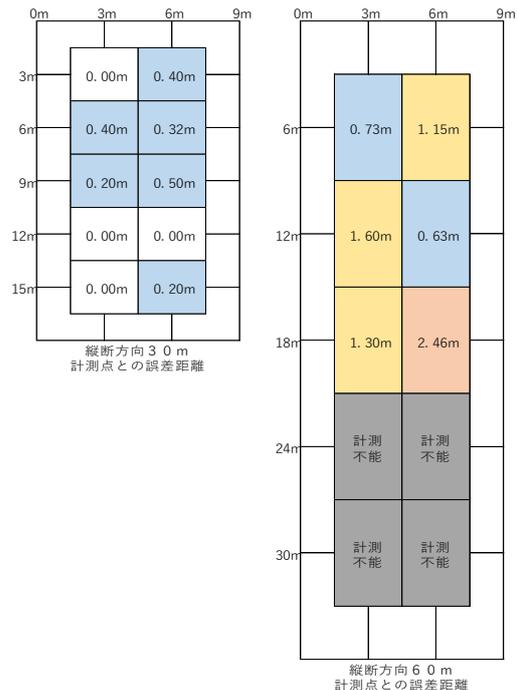


図-8 実験②計測結果

2. 4 LiDAR による自転車位置測位実験

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 の自転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 の自転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

自転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 の自転車位置測位手法は、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。冬期に行う自転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)。

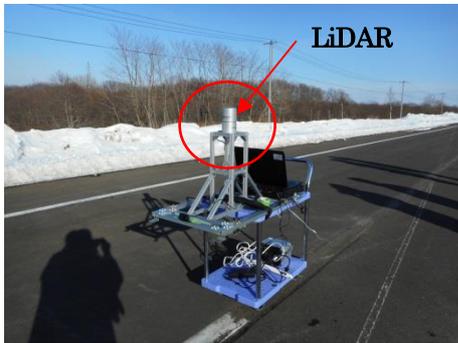


写真-8 LiDARによる自車位置測位状況

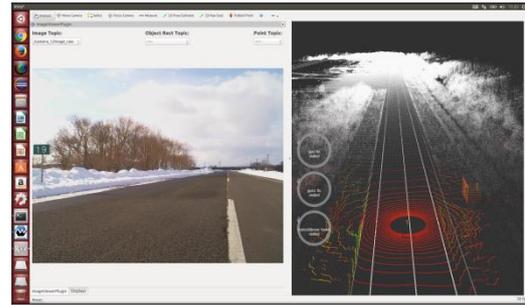


図-10 自車位置測位状況

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②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。

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①の自車位置測位結果を図-9に、Autowareによる自車位置測位状況を図-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。

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	

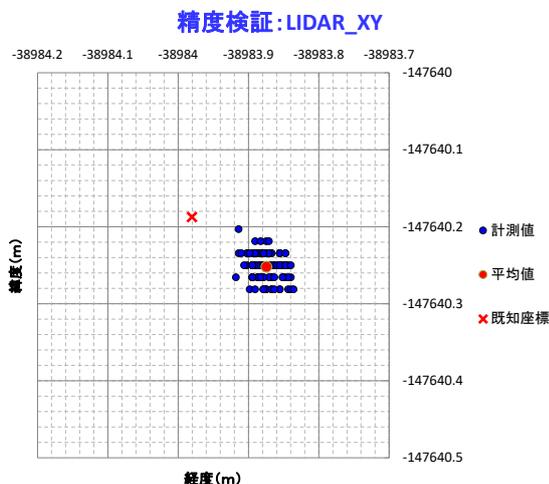


図-9 計測箇所① 自車位置測位結果

2.5 磁気マーカシステムによる自車位置測位実験

磁気マーカシステムは、道路に埋設した磁気マーカを車両底部に設置した磁気センサーで検知することで、自車位置を測位する技術であり、気象や環境の影響を受けにくい特徴がある。

同技術は、国土交通省が実施する「道の駅等を拠点とした自動運転サービス」における実証実験のうち、路車連携型の自動運転バスに利用されている⁴⁾。

そこで、平成30年度は磁気マーカシステムを除雪車に搭載して、除雪作業が自車位置推定の測位精度に与える影響を把握し、車線逸脱防止技術に適用可能な検証した。

2.5.1 実験方法

自車位置測位実験には、(株)愛知製鋼製のMIセンサーを用いた磁気マーカシステムを使用した。また、磁気マーカシステムの位置情報とIMU^{※6)}による自律航法を組み合わせた自車位置推定システムを新たに開発し、使用した。

自車位置推定システムは、IMUによる自律航法を主としているが、IMUは観測時間の経過とともに測位誤差が累積される。そこで磁気マーカシステムの位置情報により測位誤差を補正する仕組みとなっている。

実験は、寒地土木研究所苫小牧寒地試験道路の直線部及び曲線部で行い、磁気マーカの設置間隔、走行速度、

除雪作業の有無による測位精度を検証した。
実験場所平面図を図-11 に示す。

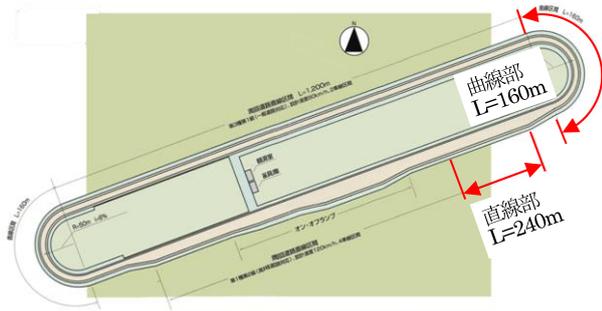


図-11 実験場所平面図

2. 5. 2 小型車両による予備実験

除雪車を使用した実験を行う前に、自車位置推定システムの精度検証のため、乾燥路面においてカート型小型車両を用いた予備実験を行った。

磁気センサは、小型車両の前方下部に高さを調整できるように設置した。

磁気マーカは、直径 100mm 厚さ 2mm の表面設置型マーカを走行車線の中央部に保護シートにより貼り付けた。

実験項目は以下のとおりである。

- ・マーカ設置間隔：直線部
10m, 20m, 30m, 40m, 60m, 80m
- ：曲線部
2m, 3m, 4m, 6m, 10m, 15m, 20m, 30m

- ・センサ取付高さ：20cm, 25cm
 - ・走行速度：5 km/h, 10 km/h, 20 km/h
- 実験状況を写真-9 に示す。

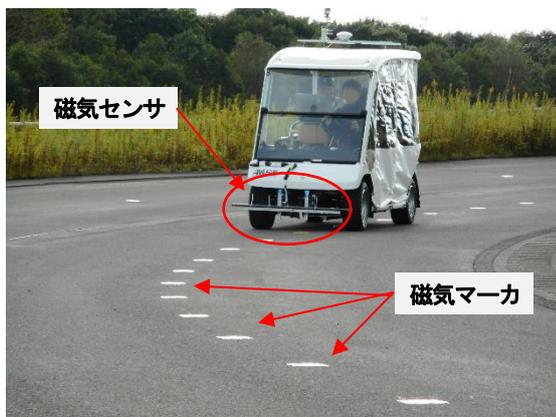


写真-9 予備実験状況 (曲線部)

自車位置推定システムの測位精度の検証は、自動追尾型トータルステーション (以下、「TS」という) による小型車両の走行軌跡の測位結果を基準とし、自車位置推

定システムの測位結果と比較した (写真-10)。

なお、測位結果は平面直角座標を用いた。

また、TS の計測間隔は、300ms 毎とし、TS と自車位置推定システムの時刻同期は行っていない。

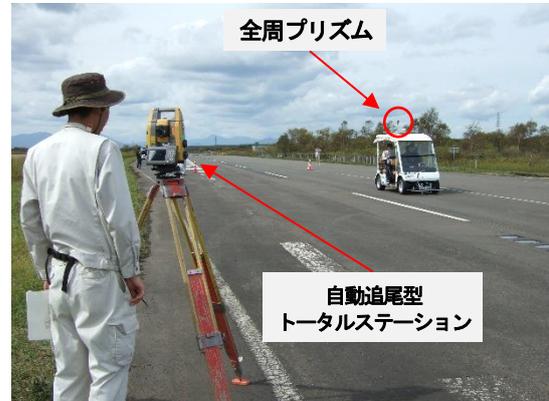


写真-10 TSによる計測状況(直線部)

2. 5. 3 小型車両による予備実験結果

道路幅員が 3.5m の一般的な道路の中心を、車体幅が 2.5m の除雪車が走行した場合、車体側端部から車線端部まで 0.5m の余裕幅ができることから、車線逸脱防止を目的とした自車位置推定システムの目標精度を最大で ±50cm とした。

直線部の実験結果を表-4 に、曲線部の実験結果を表-5 に示す。

表-4 予備実験結果 (直線部)

マーカ設置間隔	走行速度	平均測位誤差 (m)	左方向最大誤差 (m)	右方向最大誤差 (m)	評価
10m	5km/h	0.04	-0.27	0.32	○
	10km/h	0.00	-0.30	0.37	○
	20km/h	0.06	-0.20	0.31	○
20m	5km/h	-0.02	-0.30	0.27	○
	10km/h	0.09	-0.16	0.35	○
	20km/h	0.08	-0.15	0.32	○
30m	5km/h	0.07	-0.23	0.41	○
	10km/h	0.03	-0.24	0.31	○
	20km/h	0.15	-0.14	0.40	○
40m	5km/h	0.23	-0.10	0.63	×
	10km/h	0.22	-0.17	0.71	×
	20km/h	0.22	-0.09	0.58	×
60m	5km/h	0.03	-0.25	0.30	○
	10km/h	0.06	-0.23	0.33	○
	20km/h	0.04	-0.26	0.30	○
80m	5km/h	0.09	-0.13	0.36	○
	10km/h	0.04	-0.20	0.31	○
	20km/h	0.16	-0.06	0.42	○

実験結果は、TS の測位位置を 0 とした場合に、自車位置推定システムが水平方向の右側に測位した誤差をプラス表示、左側に測位した誤差をマイナス表示とし、そ

の最大誤差及び平均誤差を示している。

なお、実験条件のうち、センサ取付高さの違いによる測位誤差に差が見られなかったため、平均処理した結果を表にまとめた。

直線部の実験結果は、マーカ設置間隔 40m の条件を除いた全ての条件で目標精度を達成できた。

マーカ設置間隔が広がるにつれ、測位誤差が増加する傾向が見られた。

また、走行速度の違いが測位精度に与える影響は、顕著には見られなかった。

表-5 予備実験結果（曲線部）

マーカ設置間隔	走行速度	平均測位誤差 (m)	左方向最大誤差 (m)	右方向最大誤差 (m)	評価
2m	5km/h	-0.07	-0.25	0.18	○
	10km/h	-0.05	-0.20	0.13	○
	20km/h	0.01	-0.16	0.21	○
3m	5km/h	0.03	-0.16	0.28	○
	10km/h	-0.12	-0.34	0.16	○
	20km/h	-0.13	-0.33	0.06	○
4m	5km/h	-0.07	-0.27	0.32	○
	10km/h	-0.06	-0.34	0.20	○
	20km/h	0.02	-0.29	0.20	○
6m	5km/h	0.01	-0.19	0.28	○
	10km/h	-0.12	-0.31	0.20	○
	20km/h	-0.13	-0.33	0.18	○
10m	5km/h	-0.06	-0.30	0.25	○
	20km/h	0.10	-0.08	0.33	○
15m	5km/h	-0.07	-0.27	0.13	○
	20km/h	-0.17	-0.34	0.02	○
20m	5km/h	-0.04	-0.45	0.27	○
	20km/h	0.34	0.05	0.73	×
30m	5km/h	-0.05	-0.30	0.21	○
	20km/h	-0.15	-0.42	0.16	○

曲線部では、マーカ設置間隔 20m、走行速度 20 km/h の条件を除いた全ての条件において、目標精度を達成することができた。

直線部同様、走行速度の違いが測位精度に与える影響は顕著には見られなかった。

マーカ設置間隔 2～6m は、測位誤差に顕著な差は見られなかったが、マーカ設置間隔 10m～30m は、設置間隔が広がるにつれて測位誤差が大きくなる傾向が見られた。

2. 5. 4 除雪車による自車位置測位実験

予備実験により自車位置推定システムの測位精度が確認できたことから、除雪車による自車位置測位実験を行った。

実験には除雪トラックを使用した。磁気センサは、除雪トラックの前方底部にブラケットを取り付け、地上高 25cm の位置に設置した（写真-11）。



写真-11 除雪トラック全景

磁気マーカは、直径 30mm、高さ 20mm の埋設型マーカを、車線中央部に深さ 3cm で削孔した穴に埋設し、表層 1cm を充填剤にて充填した（写真-12）。



写真-12 磁気マーカ埋設状況

除雪作業を行いながら実験を実施するため、苫小牧試験道路の直線部と曲線部に圧雪路面を形成した。

直線部の平均圧雪厚さは 6.0cm、雪硬度は 207kg/cm²、曲線部の平均圧雪厚さは、4.7cm、雪硬度は 156kg/cm² であり、路面状態は圧雪及び氷板であった（写真-13）。



写真-13 走行車線積雪状況

実験項目は以下のとおりである。

- ・マーカ設置間隔：直線部 20m, 40m, 80m
：曲線部 6m, 15m
- ・走行速度：15 km/h, 30 km/h
- ・除雪作業の有無：除雪有り, 除雪無し（回送）
実験状況を写真-14、15 に示す。



写真-14 自車位置測位実験（直線部）



写真-15 自車位置測位実験（曲線部）

測位精度の検証は、予備実験と同様にTSによる走行軌跡の測位結果と比較した。

2.5.5 除雪車による自車位置測位実験結果

直線部の実験結果を表-6に、曲線部の実験結果を表-7に示す。

直線部の実験では、マーカ設置間隔20mの条件及び設置間隔40mにおける除雪作業時の走行速度15km/hの条件において目標精度を達成できた。

磁気マーカの設置間隔が広がるにつれ、測位誤差が増加する傾向は、予備実験よりも顕著になる傾向が見られた。

また、走行速度の上昇により測位誤差が増加する傾向が見られたが、除雪作業の有無により測位誤差に顕著な差が見られなかったことから、除雪作業による振動を受けても測位精度に影響を及ぼさないことがわかった。

表-6 自車位置推定実験結果（直線部）

設置間隔	除雪有無	走行速度	平均測位誤差(m)	最大誤差範囲(m)		評価	
				左方向最大誤差(m)	右方向最大誤差(m)		
20m	回送	15km/h	-0.02	0.63		○	
		30km/h	-0.23	-0.34	0.29		
	除雪	15km/h	-	0.50		○	
		30km/h	0.05	-0.48	0.01		
40m	回送	15km/h	-0.26	0.84		×	
		30km/h	-0.35	-0.44	0.40		
	除雪	15km/h	-0.02	0.97		○	
		30km/h	-0.12	-0.74	0.23		
	80m	回送	15km/h	-0.62	0.85		×
			30km/h	-0.76	-0.77	0.08	
除雪		15km/h	-0.44	0.88		×	
		30km/h	-	-0.40	0.48		

※「-」は、マーカ未検出による棄却データ

曲線部では、全ての条件において目標精度を達成することができなかった。

磁気マーカの設置間隔の広がり及び走行速度の上昇、除雪作業を伴うことにより測位誤差が増加する傾向が見られた。

表-7 自車位置推定実験結果（曲線部）

設置間隔	除雪有無	走行速度	平均測位誤差(m)	最大誤差範囲(m)		評価
				左方向最大誤差(m)	右方向最大誤差(m)	
6m	回送	15km/h	0.56	1.26		×
		30km/h	-	-0.02	1.24	
	除雪	15km/h	0.63	1.42		×
		30km/h	0.61	-0.24	1.18	
15m	回送	15km/h	-0.92	2.17		×
		30km/h	-	-1.84	0.34	
	除雪	15km/h	-1.10	2.34		×
		30km/h	-1.47	-2.12	0.22	
	回送	15km/h	-	2.91		×
		30km/h	-	-3.09	-0.17	

※「-」は、マーカ未検出による棄却データ

本実験では、予備実験に使用した小型車両用に設定した自車位置推定システムを除雪車に搭載し使用した。そのため、走行速度の上昇や圧雪が厚い場合に、磁気マーカの未検出や測位精度の低下を招いたものと考えられる。

曲線部の設置間隔については、今後検討が必要であるが、直線部の設置間隔20mでは、除雪作業による振動を受けても目標精度を達成することができたことから、自車位置推定システムは、車線逸脱防止に使用するうえで、適用可能な測位精度を有していることを確認した。

2.6 磁気マーカを用いた車線走行支援ガイダンスの検証実験

磁気マーカシステムと IMU による自律航法を組み合わせた自車位置推定システムを用いた車線走行支援ガイダンスを試作し、自車位置精度を検証するとともに、ガイダンス情報に従い車線を逸脱せずに走行可能な検証実験を行った。

2.6.1 ガイダンス試作機の作製

ガイダンス試作機は、ロボット用オープンソースソフトウェア「ROS」^{※7}の可視化ツールである「RViz」をベースに新たに開発したものである。RViz は、ROS で通信されるデータであれば種類を問わず表示することができ、外部からのセンサ情報やロボットの形状モデル、地図、計画軌道などを三次元表示することができる。

苫小牧試験道路全周の高精度三次元地図データベースを作成し、ベクターマップにより車線境界を判りやすく表示し、走行時のガイダンス用に走行車線の中心に走行目安線を表示した。また、現在位置や道路周辺状況を把握しやすいように、点群情報を基に道路や道路周辺の起伏・背景をカラー表示した。

画面に表示される除雪車モデルは、実際の除雪トラックの諸元を基に 3D モデル化しており、地図と除雪車の尺度を合わせることで、オペレータに違和感の無い表示とした。また、ガイダンス画面はオペレータの運転操作のしやすさを考慮し、運転席からの視点（以下、「コックピットビュー」という）、後方からの鳥瞰的な視点（以下、「バードビュー」という）、カーナビゲーションのような二次元的な視点（以下、「2D ビュー」という）の3種類を設定した。図-12、13、14にガイダンス画面例を写真-16に除雪トラック 3D モデルイメージを示す。

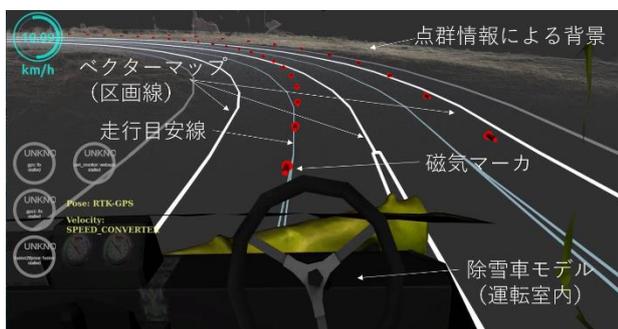


図-12 ガイダンス画面例（コックピットビュー）

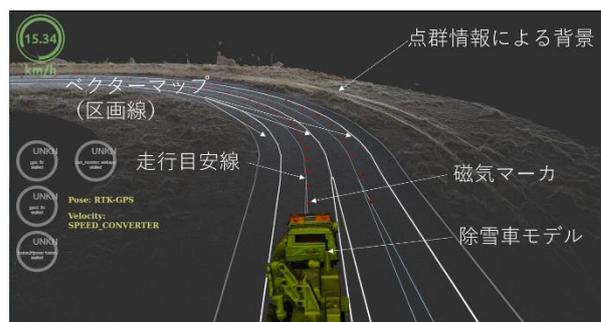


図-13 ガイダンス画面例（バードビュー）



図-14 ガイダンス画面例（2D ビュー）



写真-16 除雪トラック 3D モデル（イメージ）

2.6.2 実験方法

ガイダンス試作機は、磁気マーカシステムと IMU による自律航法の組み合わせによる自車位置推定システム（以下、「磁気マーカ方式」という）のほかに、RTK-GPS による位置測位（以下、「RTK 方式」という）も可能である。平成 30 年度の実験結果より RTK-GPS の測位結果は、TS による走行軌跡の測位結果と同程度の精度があったことから、RTK 方式と磁気マーカ方式の測位結果を比較することで測位精度を検証することとした。

また、視程障害時におけるガイダンスによる運転操作性を検証するため、フロントガラス全面の視界を遮断し、視程障害時を模擬的に再現した状況において、ガイダンス情報を頼りに車線を逸脱せずに走行する実験を行った。

2. 6. 3 RTK 方式によるガイダンス性能検証実験

実験は、寒地土木研究所苫小牧寒地試験道路で行った。ガイダンス性能の検証は試験道路を半周するため自車位置測位を RTK 方式で行った。ガイダンスシステムはリアルタイムに自車位置を高精度地図に表示するとともに、走行軌跡が記録可能である。高精度地図には、走行位置をガイダンスするための走行目安線が表示されているため、オペレータは走行目安線に除雪車モデルの中心を合わせて運転することで、車線を逸脱せずに走行することができる。そこで走行目安線の設定座標を基準とし、目視による通常走行の軌跡と視界を遮断した各ガイダンス情報のみによる走行軌跡の測位座標との差を比較することで、ガイダンス性能を評価することとした。また、オペレータにガイダンス使用時における運転操作性に関するアンケート調査とヒアリングを行った。なお、除雪トラックの視界遮断はフロントガラス全面及び側面の窓に白色半透明のビニールシートを設置した。

試験道路の路面状態は、半周 1,800m のうち、直線部 1 L=800m には圧雪路面 L=240m を、曲線部には L=160m 全て圧雪路面を形成した。圧雪路面の条件は、直線部 1 の平均圧雪厚さは 9.5cm、雪硬度は 63kg/cm²、曲線部の平均圧雪厚さは、4.8cm、雪硬度は 50kg/cm² である。圧雪路面では除雪作業を行いながら走行し、圧雪路面以外の区間は乾燥路面のため回送姿勢にて走行するものとした。

実験項目は以下のとおりである。

- ・ガイダンス種類：コックピット、バード、2D、通常走行（ガイダンス無し）
- ・走行条件：除雪作業有り、回送のみ

実験場所平面図を図-15 に、実験状況を写真-17、18 に、実験時の運転室内の状況を写真-19 に示す。

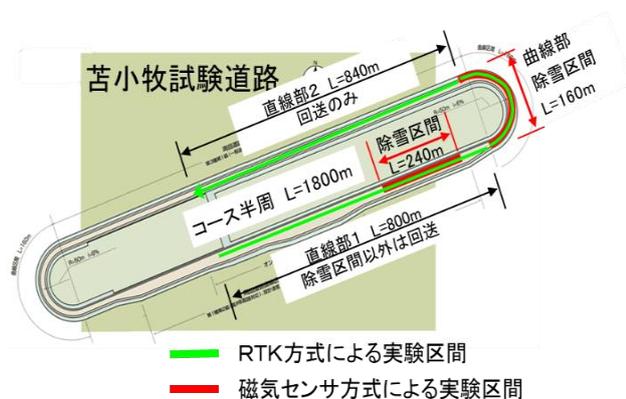


図-15 実験場所平面図



写真-17 実験状況全景



写真-18 実験状況（除雪機械外観）



写真-19 運転室内状況

2. 6. 4 RTK 方式によるガイダンス性能検証実験結果

実験結果を表-8 に示す。

実験はガイダンス種類毎に 2 回行い、実験結果は道路条件及び走行条件毎に分割し平均処理を行った。目標精度は平成 30 年度と同様に ±50cm とした。

コックピットビューでは、直線路の除雪時においては目標精度を達成できたが、直線路の回送時と曲線路の除雪時では、左右方向の最大離隔距離が 50cm を超える箇所があった。しかし最大離隔距離範囲では 1m 以内に収まっていることから概ね目標精度を満たしていると評価した。バードビューでは、直線路の回送時と除雪時においては目標精度を達成できた。曲線路の除雪時では最大離隔距離範囲が 1m を超えているため目標を達成できていない。2D ビューはコックピットビューと同様の結果と



写真-20 直線部実験状況



写真-21 曲線部実験状況

2. 6. 6 磁気マーカ方式による測位精度検証実験結果

直線部の実験結果を表-9 に、曲線部の実験結果を表-10 に示す。目標精度は、平成 30 年度と同様に±50cm とした。直線部の実験では、マーカ設置間隔 10m における視界遮断無しの場合と除雪時の条件において目標精度を達成できた。視界遮断有りの場合と除雪時では、右方向の最大誤差が目標の 50cm を超える箇所があった。しかし最大誤差範囲では 1m 以内に収まっていることと、平均誤差に大きな差が見られないことから、視界遮断無と同等の評価と判断した。一方、マーカ設置間隔 20m、40m を条件とする平成 30 年度の実験で目標精度を達成できていたが、本実験では目標精度を達成することができなかった。

曲線部では、マーカ設置間隔 3m の場合において目標精度を達成できた。マーカ設置間隔 3m の場合と設置間隔 5m の場合では、右方向の最大誤差が目標の 50cm を超える箇所があったが、最大誤差範囲では 1m 以内に収まっていることと、平均誤差に大きな差が見られないことから、設置間隔 3m の場合と同等の評価と判断した。

表-9 自車位置推定実験結果 (直線部)

設置間隔	除雪有無	視界遮断	平均測位誤差(m)	最大誤差範囲(m)		評価
				左方向最大誤差(m)	右方向最大誤差(m)	
10m	回送	無し	0.08	0.77		○
		有り	0.14	-0.33	0.44	△
	除雪	無し	0.07	0.51		○
		有り	0.07	-0.12	0.39	△
20m	回送	無し	0.71	2.40		×
		有り	0.52	0.04	2.45	×
	除雪	無し	0.39	0.86		×
		有り	0.47	-0.56	1.69	×
40m	回送	無し	0.58	1.42		×
		有り	0.75	0.00	1.42	×
	除雪	無し	0.53	1.24		×
		有り	0.53	0.15	1.38	×
5m	回送	無し	0.04	0.65		○
		有り	0.08	-0.23	0.42	△
	除雪	無し	0.08	0.83		△
		有り	0.08	-0.24	0.60	△
5m	回送	無し	0.28	0.69		△
		有り	0.28	-0.04	0.66	△
	除雪	無し	0.04	2.08		×
		有り	0.04	-1.38	0.70	×

表-10 自車位置推定実験結果 (曲線部)

設置間隔	除雪有無	平均測位誤差(m)	最大誤差範囲(m)		評価
			左方向最大誤差(m)	右方向最大誤差(m)	
3m	回送	無し	0.65		○
		有り	-0.23	0.42	△
	除雪	無し	0.83		△
		有り	-0.24	0.60	△
5m	回送	無し	0.69		△
		有り	-0.04	0.66	△
	除雪	無し	2.08		×
		有り	-1.38	0.70	×

本実験では、平成 30 年度の実験よりも高い測位精度が得られるよう、磁気マーカの設置間隔を狭め、IMU や磁気センサの調整を行ったが、直線部の実験では 20m、40m において目標精度を達成できず、マーカの設置間隔を狭めた 10m でのみ目標精度を達成できた。今回の実験では圧雪路面上に磁気マーカの位置を示すマーキングは行っておらず、ガイダンスの画面に表示される磁気マーカの位置を目安に実験を行った。そのため直接目視で路面を確認しながら運転するよりも、細かなハンドル操作を伴う運転となり、自律航法の測位精度に影響を与えたものと思われる。また、視界を遮断した場合は運転挙動がより不安定になるため、その傾向がより強くなったものと考えられる。

曲線部の実験では、マーカ設置間隔を狭めたことにより平成 30 年度の実験結果より測位精度が向上した。しかし曲線部は道路線形に合わせてハンドル操作を行いながら、マーカの位置合わせを行うため、確実にマーカ上

をセンサが通過するためには、ガイダンスによる運転操作の習熟が必要である。

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ため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-11に実験に使用したミリ波レーダの諸元を示す。

表-11 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

3.2 ミリ波レーダ定置実験 (その1)

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-22)、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-23)。また、計測場所は直線方向に100m程度確保した(写真-24)。

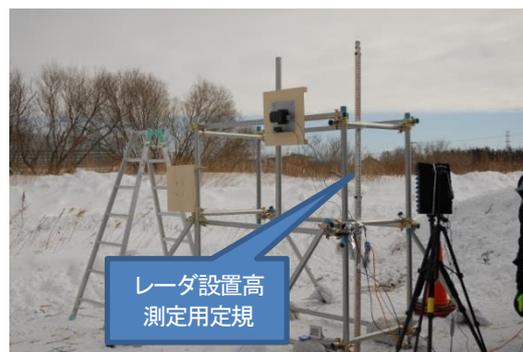


写真-22 ミリ波レーダ設置状況



写真-23 ミリ波レーダとレーダ検証用カメラ



写真-24 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。

実験①：対象物が車両の場合の検出実験

実験②：対象物が人の場合の検出実験

実験③：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④：吹雪時を想定した、車両に雪が堆積した場合の検出実験

3. 2. 1 実験①：車両の検出

実験①の概略図を図-17に、実験結果を表-12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。

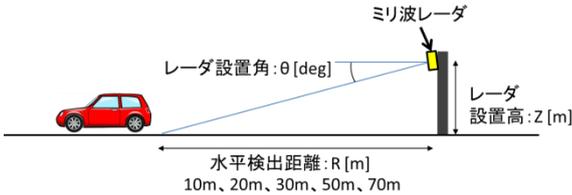


図-17 実験①概略図

表-12 実験①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②：人の検出

実験②の概略図を図-18に、実験結果を表-13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。

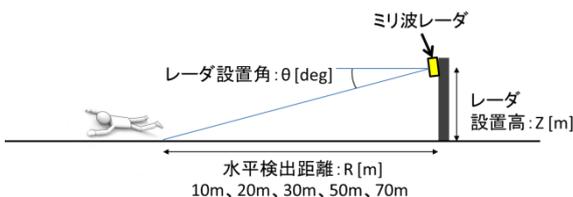


図-18 実験②概略図

表-13 実験②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			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③：レーダ前面の着雪の影響

実験③の概略図を図-19に、実験結果を表-14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-25）。

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0～10 cm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。

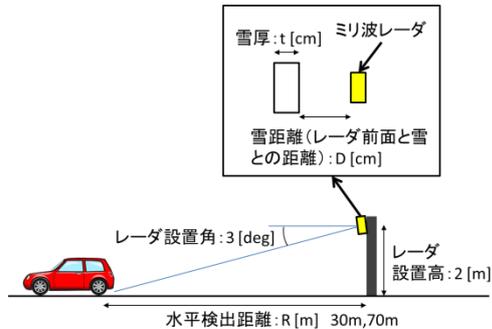


図-19 実験③概略図

表-14 実験③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

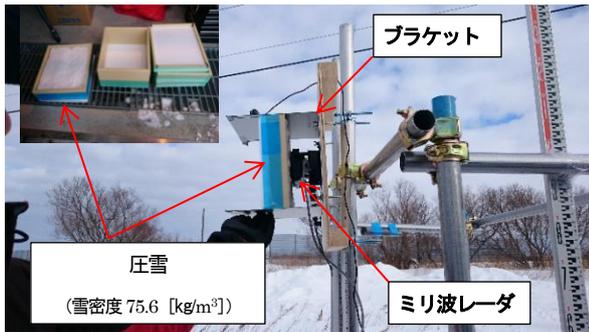


写真-25 着雪再現状況



写真-26 車両積雪再現状況

3. 2. 4 実験④：車両周りの積雪の影響

実験④の概略図を図-20に、実験結果を表-15に示す。実験④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-26)。

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。

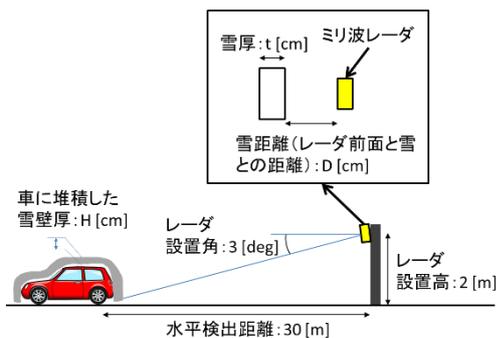


図-20 実験④概略図

表-15 実験④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

3. 3 ミリ波レーダ定置実験(その2)

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⑤: 晴天時の車両の検出実験

実験⑥: 降雪時の車両の検出実験

実験⑦: 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-27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-28)と実験車両を45日間存置し、監視用カメラ(写真-29)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①を、70mの距離に実験車両②を配置した(写真-30)。

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ポールの目視観測結果を採用した。



写真-27 計測場所全景

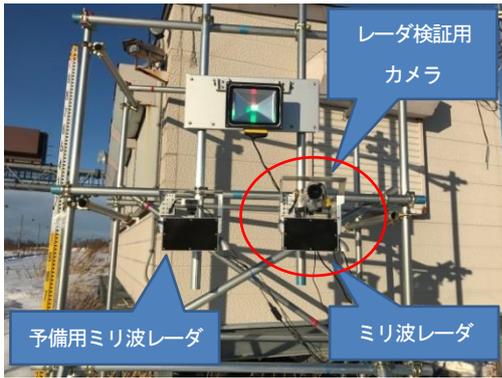


写真-28 ミリ波レーダ設置状況



写真-29 監視カメラ設置状況



写真-30 実験車両配置状況

3.3.1 実験⑤：車両の検出(晴天時)

実験⑤の概略図を図-21 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。

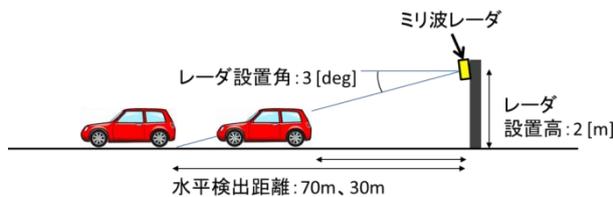


図-21 実験⑤概略図

実験⑤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-31 に、実験結果を図-22、図-23 に示す。

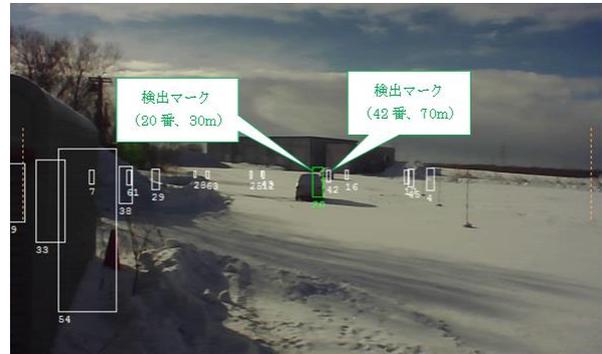


写真-31 実験⑤晴天時車両検出状況

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、車両検出に必要なとされる反射断面積の目安は-10dBsm である。

実験車両①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②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①の平均検出距離は 29.5m、変動量は±0.1m であった。実験車両②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①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②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①及び②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。

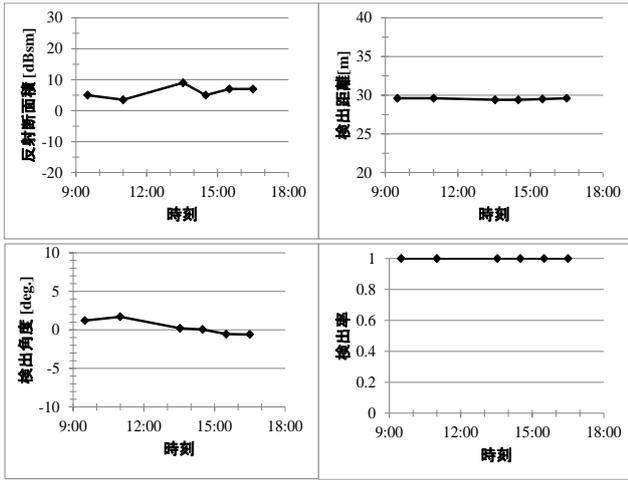


図-22 実験⑤検出結果(30m、実験車両①)

に、検出結果を図-25、26に、実験結果比較表を表-16に示す。



写真-32 実験⑥車両検出状況

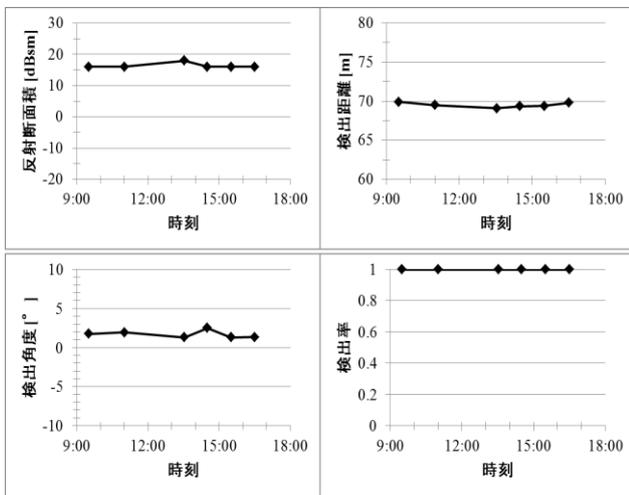


図-23 実験⑤検出結果(70m、実験車両②)

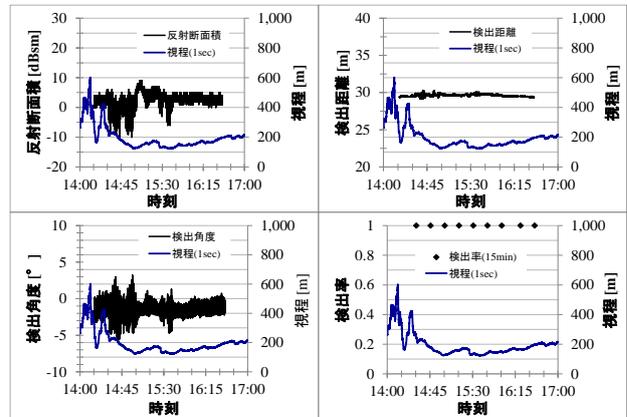


図-25 実験⑥検出結果(30m、実験車両①)

3. 3. 2 実験⑥：車両の検出(降雪時)

実験⑥の概略図を図-24に示す。

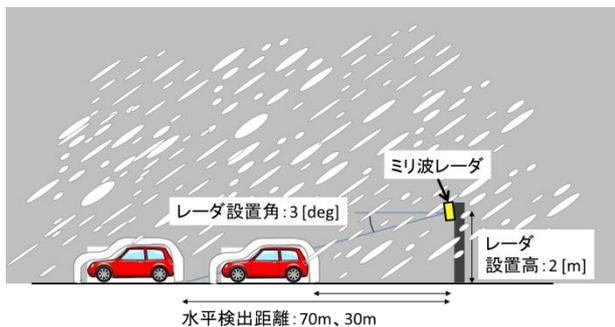


図-24 実験⑥概略図

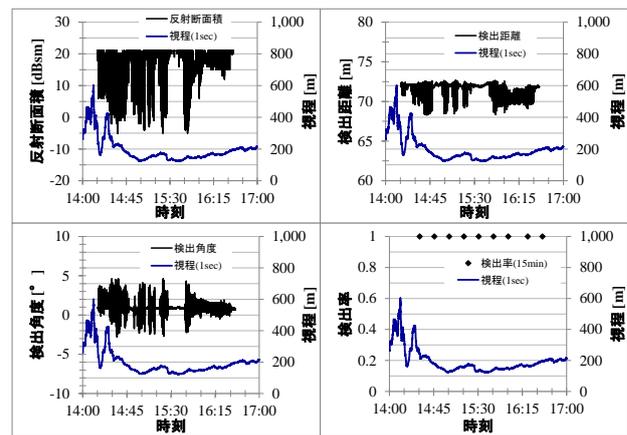


図-26 実験⑥検出結果(70m、実験車両②)

実験⑥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-32

表-16 実験結果比較表

検出対象	項目	単位	実験⑤:晴天時			実験⑥:降雪時		
			平均値	最小値	最大値	平均値	最小値	最大値
				変動量			変動量	
30m 実験 車両 ①	反射 断面積	dBsm	6.1	3.5 -2.6	9 ~2.9	2.7	-10 -12.7	9 ~6.3
	検出距離	m	29.5	29.4 -0.1	29.6 ~0.1	29.6	29.2 -0.4	30.3 ~0.5
	検出角度	度	0.3	-0.6 -0.9	1.7 ~1.4	-1.5	-5.6 -4.1	3.2 ~4.7
	検出率	%	100	100 0	100	100	100 0	100
70m 実験 車両 ②	反射 断面積	dBsm	16.3	16 -0.3	18 ~1.7	18.1	-5 -23.1	21 ~2.9
	検出距離	m	69.5	69.1 -0.4	69.9 ~0.4	71.6	68.3 -3.3	72.6 ~1
	検出角度	度	1.7	1.3 -0.4	2.5 ~0.8	0.9	-2.8 -3.7	4.6 ~3.7
	検出率	%	100	100 0	100	100	100 0	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-26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⑤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①、②ともに検出に必要な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⑦: 降雪による積雪時の車両検出

実験⑦の概略図を図-27に示す。

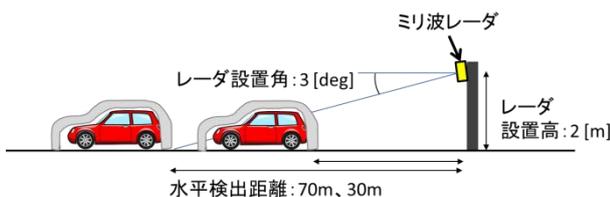


図-27 実験⑦概略図

実験⑦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-33に、実験車両の積雪状況を写真-34、35に、実験結果比較表を表-17に示す。

実験車両①のルーフ上の積雪は15cm、実験車両②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。

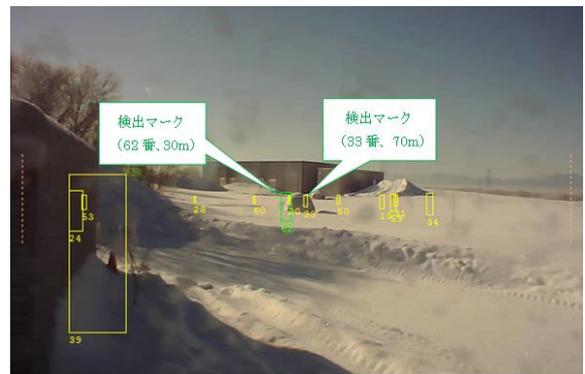


写真-33 実験⑦車両検出状況



写真-34 実験車①積雪状況



写真-35 実験車両②積雪状況

表-17 実験結果比較表

検出対象	項目	単位	実験⑤:晴天時			実験⑦:積雪時		
			平均値	最小値	最大値	平均値	最小値	最大値
				変動量			変動量	
30m 実験 車両 ①	反射 断面積	dBsm	6.1	3.5	9	2.2	-6	8.5
	検出距離	m	29.5	29.4	29.6	29.7	29.3	30.1
	検出角度	度	0.3	-0.6	1.7	-0.5	-2.5	1.8
	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	15.9	8.5	21
	検出距離	m	69.5	69.1	69.9	71.3	70	72.3
	検出角度	度	1.7	1.3	2.5	0.9	0.2	2
	検出率	%	100	100	100	100	100	100

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、検出に必要な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。

3.4 ミリ波レーダ除雪車搭載実験

平成30年度は、除雪車に市販車用ミリ波レーダを搭載し、除雪作業がミリ波レーダの検出性能に与える影響を検証する実験を行った。

実験⑧：除雪車走行時における車両の検出実験

実験⑨：除雪車停止時における人の検出実験

実験場所全景を写真-36に、実験場所平面図を図-28に示す。

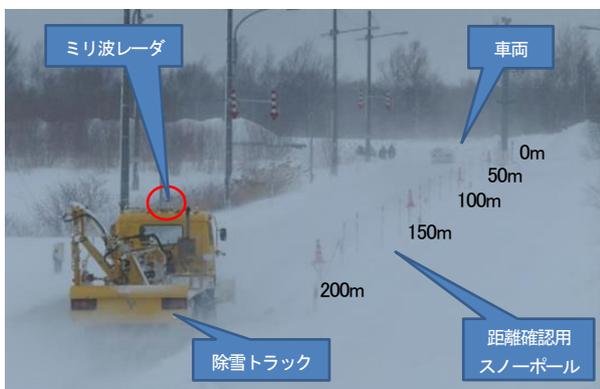


写真-36 実験場所全景

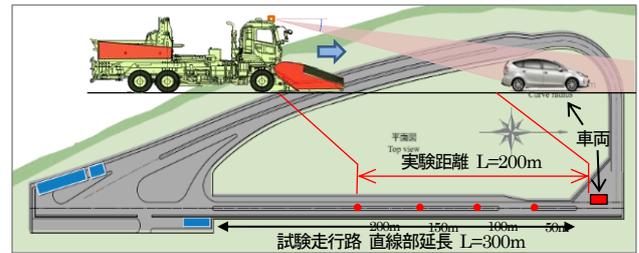


図-28 実験場所平面図(石狩吹雪実験場)

実験は寒地土木研究所石狩吹雪実験場の試験走行路で行った。除雪作業を行いながら実験を実施するため、試験走行路の直線部に圧雪路面を形成した。

平均圧雪厚さは5.3cm、雪硬度は134kg/cm²、路面状態は圧雪であった。

直線部の終点側に車両(写真-37)を配置し、車両から200m手前の位置を除雪車の出発地点とした。

視程距離は、試験走行路の中央分離帯に設置されている透過型視程計の計測値と、中央分離帯に10m間隔で設置した視程確認用スノーポールの目視観測結果を採用した。

実験には除雪トラックを使用した(写真-38)。

ミリ波レーダを、除雪トラックのルーフ部中央の地上高3.31mの位置に、角度調節が可能なブラケット及びハウジングを用いて設置した(写真-39)。



写真-37 車両設置状況



写真-38 除雪トラック全景



写真-39 ミリ波レーダ設置状況

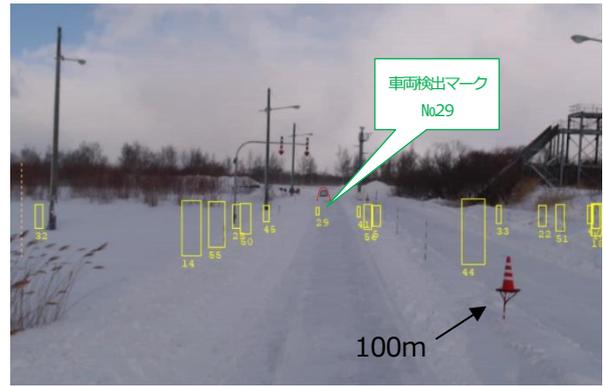


写真-40 実験⑧車両検出状況(降雪無し)

3. 4. 1 実験⑧：除雪車走行時の車両検出

実験⑧の概略図を図-29 に示す。

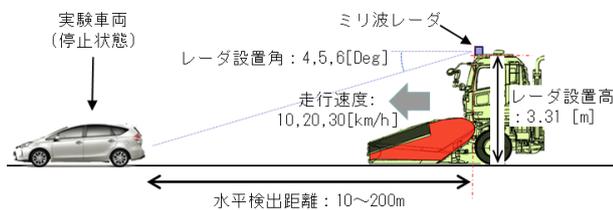


図-29 実験⑧概略図

実験条件は、ミリ波レーダの設置角度を4, 5, 6度、走行速度を10, 20, 30km/h、除雪作業をプラウ単独作業、プラウ・グレーダ併用作業とした。また、比較のため除雪作業を伴わない回送も条件に加えた。

気象条件は、実験中に吹雪を伴うような降雪が発生した場合は降雪有り、軽微な降雪や曇天の場合は降雪無しとした。

除雪車走行時の車両検出は、除雪車を車両に向けて走行させ、ミリ波レーダが車両を検出し始めた距離と、車両直前まで接近し検出不能となる距離を計測することで、検出範囲を把握することとした。

検出結果の一例として、レーダ設置角度5度、走行速度30km/h、プラウ単独作業時における、降雪無しの車両検出状況及び検出結果を写真-40、図-30 に、降雪有りの車両検出状況及び検出結果を写真-41、図-31 に示す。

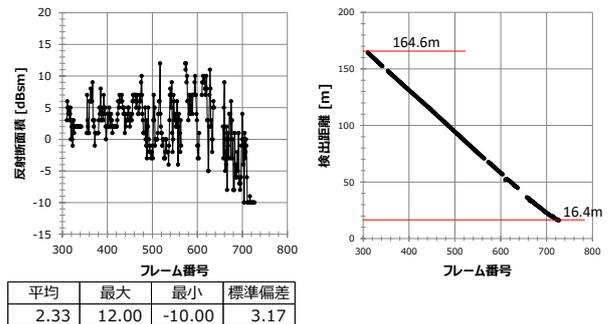


図-30 実験⑧車両検出結果 (降雪無し)

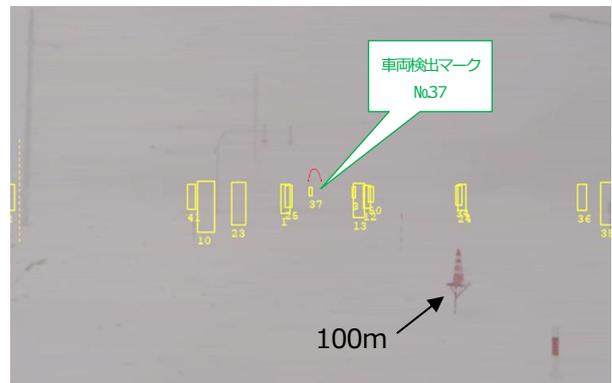


写真-41 実験⑧車両検出状況(降雪有り)

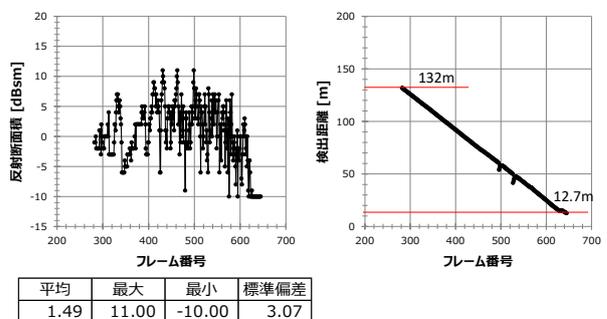


図-31 実験⑧車両検出結果 (降雪有り)

車両検出結果は、反射断面積と検出距離を示したものである。グラフ横軸のフレーム番号は、計測間隔50ms毎の検出結果の順番を示している。

降雪無しの車両検出距離は、164.6m手前から検出を始め、一部未検知があったものの16.4mまで検出できた。平均反射断面積は2.33dBsmであった。

降雪有りの実験時における透過型視程計の平均視程距離は57.3mであり、スノーポールを目視確認による視程距離は50m以下であった。車両検出距離は、132m手前から検出し12.7mまで検出できた。平均反射断面積は1.49dBsmであった。

上記の実験環境では、降雪の影響により車両の最大検出距離が約20%程度低下することがわかった。

しかし、最大検出距離が低下するものの、100m以上手前から車両を検出できるため、除雪車が前方障害物を探知するために必要な距離として想定していた70mよりも更に手前から車両を探知可能であることを確認した。

図-32は、各実験条件の組み合わせによる車両検出範囲の比較を示したものである。

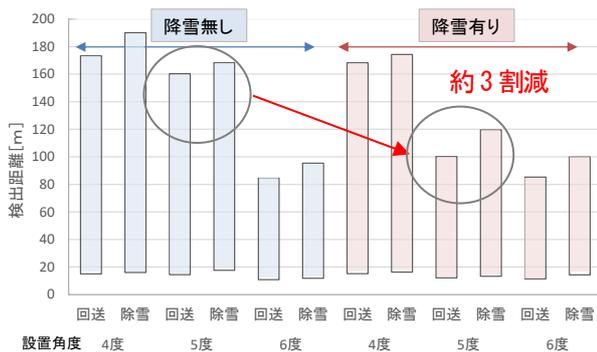


図-32 車両検出範囲の比較結果

なお、実験条件のうち、走行速度の違い及び除雪作業の種類による検出範囲に差が見られなかったため、平均処理したものをグラフ化した。

最大検出距離は、設置角度4度の時が最も長く、5度の場合は1割程度、6度の場合は5割程度低下した。

最小検出距離は、全ての条件において10m以上20m未満の範囲であった。

降雪による影響は、今回の気象条件では、設置角度5度の場合が顕著であり、降雪無しと比べて最大検出距離が3割程度低下した。

除雪作業の有無では、回送時に比べ除雪作業時の最大検出距離が増加する傾向を示した。これは路面整正装置の押付力により車体前方が若干持ち上がるため、レーダ

の俯角が上がり検出距離が増加したものと考えられる。

また、除雪作業に伴う振動の影響により、車両が未検出になることはなかったが、圧雪路面の凸凹により車体が上下に振動した場合、レーダ照射範囲から車両が外れることにより、部分的な未検出が生じる場合があった。

3.4.5 実験⑨：除雪車停止時における人の検出

実験⑨の概略図を図-33に示す。

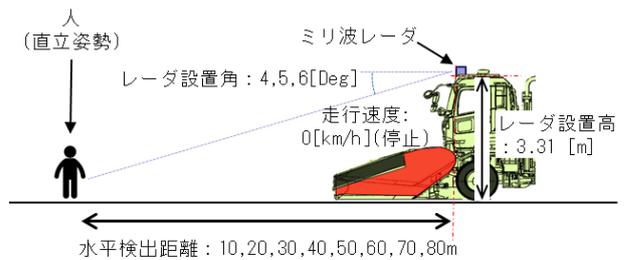


図-33 実験⑨概略図

除雪車停止時における人の検出実験は、試験走行路の直線部に人を直立姿勢で配置し、人から10m離れた位置を基点に80mまで10m毎に除雪車を停止させ、1箇所当たり約15s間計測を行った。

実験条件は、レーダの設置角度を4, 5, 6度、除雪車の状態を路面に除雪装置を接地させた除雪姿勢と回送姿勢とした。

気象条件は、降雪有りと降雪無しとした。

検出結果の一例として、レーダ設置角度5度、水平検出距離70m、除雪姿勢時における降雪無しの人検出状況及び検出結果を写真-42、図-34に、降雪有りの人検出状況及び検出結果を写真-43、図-35に示す。

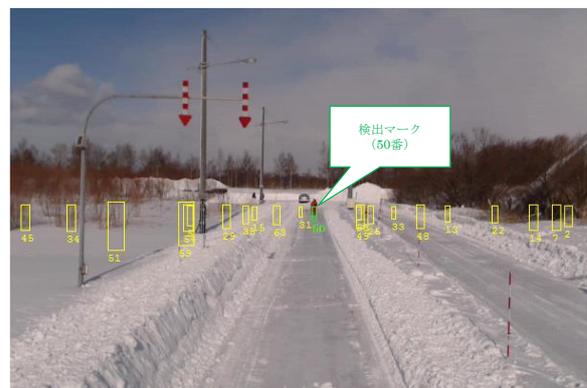


写真-42 実験⑨人検出状況(降雪無し)

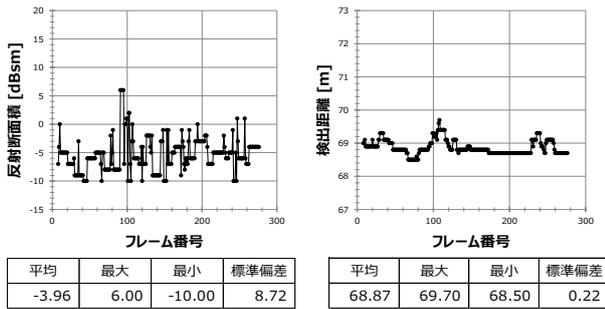


図-34 実験⑨人検出結果（降雪無し）

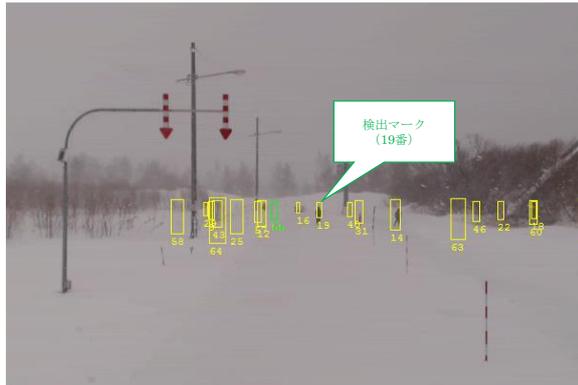


写真-43 実験⑨人検出状況（降雪有り）

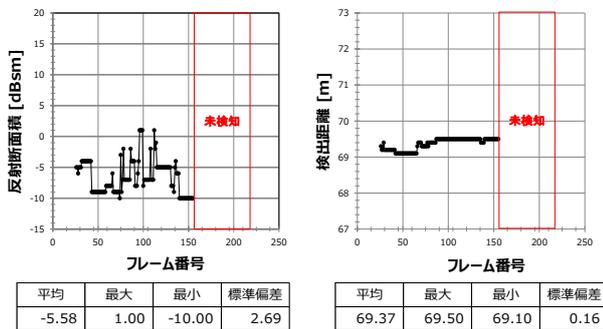


図-35 実験⑨人検出結果（降雪有り）

降雪無しの実験時における平均反射断面積は、
-3.96dBsm、平均検出距離は68.87mであった。
人の検出は車両等と比べ、レーダの反射断面積が小さいため、ばらつきが大きくなる等、検出が不安定になる傾向が見られた。
降雪有りの実験時における平均反射断面積は、
-5.58dBsm、平均検出距離は69.37mであった。
降雪の影響により一部未検知があり、平均反射断面積は低下する傾向を示した。
実験⑨の検出結果一覧を図-36に示す。
表中の判定結果は、計測時間内における人を検出した時間率が90%以上の場合を○、50%以上90%未満を△、50%未満を×とした。

最大検出距離は、レーダの設置角度が4度及び5度の場合70mであり、6度では50mであった。

停止状態の実験では、除雪車の姿勢による検出距離の違いは見られなかった。

降雪の有無による影響は、検出結果の一例で述べたとおり、反射断面積が低下する傾向は見られたものの、検出不能となるような強い降雪が発生しなかったため、影響を確認することはできなかった。

降雪	設置角度	除雪車状態	水平検出距離[m]							
			10	20	30	40	50	60	70	80
なし	4度	回送姿勢	×	○	×	△	○	×	○	×
		除雪姿勢	×	△	○	○	○	△	×	×
	5度	回送姿勢	×	○	○	△	△	○	×	×
		除雪姿勢	×	△	△	○	○	○	○	×
	6度	回送姿勢	×	△	×	○	○	×	×	×
		除雪姿勢	×	○	○	△	×	×	×	×
あり	4度	回送姿勢	×	△	○	○	○	△	○	×
		除雪姿勢	×	△	△	△	○	△	○	×
	5度	回送姿勢	×	○	○	△	○	△	×	×
		除雪姿勢	×	○	○	○	○	○	△	×
	6度	回送姿勢	×	○	○	×	○	×	×	×
		除雪姿勢	×	○	△	○	○	×	×	×

【凡例】

計測時間内に対象を計測した時間率			
○	90%以上	△	50~90%
×	50%未満		

図-36 実験⑨ 検出結果一覧

3.5 ミリ波レーダガイダンスシステムの検証実験

令和元年度は、ミリ波レーダによるガイダンスシステムを試作し、未検出や誤検出をすることなく障害物情報をオペレータに提供可能か、また視程障害を再現した視界を遮断した状況において、ガイダンス情報により安全に停車可能かを検証する実験を行った。

実験⑩：ガイダンス試作機性能検証実験

実験⑪：ガイダンスによる除雪車停止実験

3.5.1 ガイダンス試作機の作製

ガイダンス試作機の作製にあたり、ミリ波レーダによる障害物の検知判定処理方法について検討した。ミリ波レーダによる障害物検知では、ミリ波による検知、受信結果の1次処理、受信処理結果のフィルタリングによる2次処理の3つの工程が必要である。ミリ波による検知及び受信結果の1次処理については、市販ミリ波レーダの検出結果を活用し、除雪車用に新たに構築した障害物判定処理ソフトウェアにより2次処理を行うこととした。障害物判定処理ソフトウェアの処理イメージを図-37に示す。

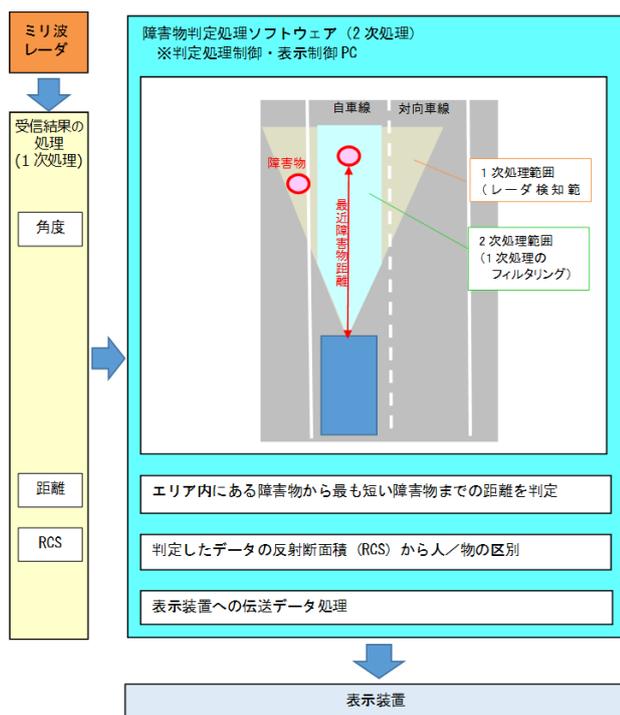


図-37 障害物判定処理のイメージ

ガイダンス試作機は、ミリ波レーダの検出結果を表示できるツールであり、除雪車オペレータの支援を目的として、視程障害時におけるミリ波レーダの有効性を検証するために開発した。なお、ガイダンス試作機は、自車の位置情報や道路の構造情報(車線幅、車線数、曲率等)を持たないため、直線道路を前提としたガイダンスを行うものである。

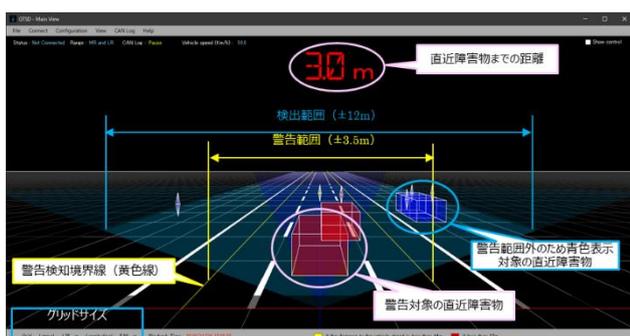


図-38 ガイダンス試作機の表示イメージ

図-38 にガイダンス試作機の表示イメージを示す。ガイダンス試作機の表示画面は、3Dグラフィックスで描画した道路に、ミリ波レーダが検出した障害物情報をオペレータの視線(視野)で重畳表示したものである。描画する道路の車線数や幅は所定の範囲内で変更可能とした。H30年度の実験結果より車両の反射断面積は強い領域に、

人の反射断面積は弱い領域に分布していることが確認できたため、強領域(車両相当)を長方形、弱領域(人相当)を双四角錐表示することで視覚的に区別できるようにした。

オペレータに障害物の接近を警告するため、自車(レーダ)と障害物の距離が近づくにつれ障害物の表示色を段階的に変化させることとした。通常時は青色、注意時は黄色、警告時は赤色に変化する。なお、警告を発する設定距離は任意に変更することができる。また画面中央上部には、レーダから最も近い障害物までの距離が常に表示される。

道路水平方向の検出範囲及び警告範囲も任意設定することができる。図-38の例では、検出範囲を自車の±12mに設定しており、この範囲内の障害物を全て表示させる。警告範囲は自車の±3.5mに設定しており、この範囲内の障害物は警告対象として自車に接近すると表示色が変更される。図-38の例では、警告範囲内の直近障害物は赤色で表示されているが、右側の障害物は警告範囲外のため青色で表示されている。

3.5.2 実験⑩: ガイダンス試作機性能検証実験

実験は寒地土木研究所苫小牧試験道路で行った。

ミリ波レーダ及びガイダンス試作機を搭載した除雪トラックを回送姿勢で走行させ、自車線上と隣接車線に設置した障害物を検知可能か検証した。実験条件は、レーダ設置角度を4度、走行速度を15km/hと30km/hとし、車両を対象とした実験では除雪車の出発地点から100m先の路側帯に車両1、150m先の対向車線に車両2、200m先の自車線に車両3を配置した。人を対象とした実験では、人形を用いて100m先の路側帯に人形1、200m先の自車線に人形2を配置した。

実験状況を写真-44に、実験概略図を図-39及び図-40に示す。



写真-44 実験状況

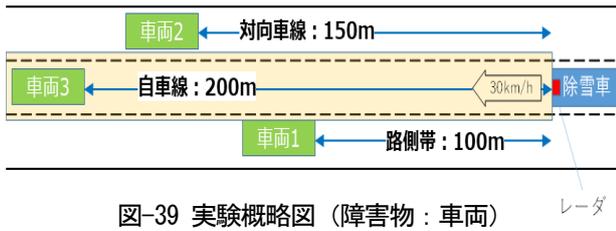
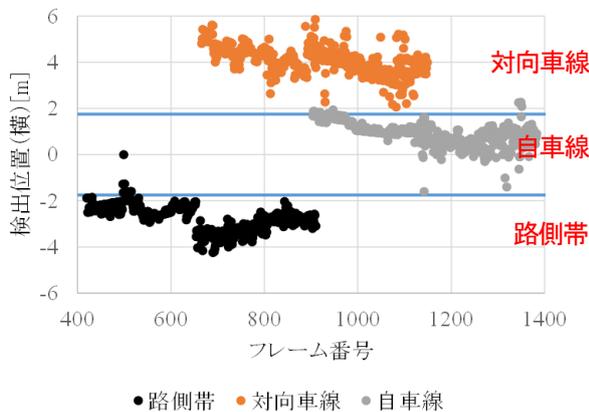


図-39 実験概略図 (障害物：車両)



図-40 実験概略図 (障害物：人形)

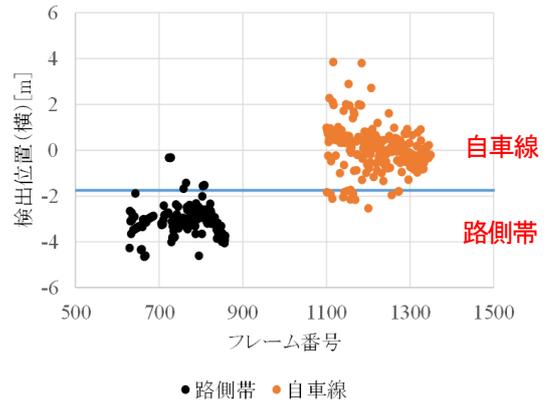
検出結果の一例として、走行速度 15km/h における車両の検出位置を図-41 に、人形の検出位置を図-42 に示す。検出位置は除雪車（レーダ）を原位置 0 とし、正の値が右側、負の値が左側に対する長さで表されている。車線幅は 3.5m であるため、±1.75m の範囲が自車線、-1.75m 未満が路側帯、+1.75m より大きければ対向車線と判断する。ここで、誤検出率は設置した障害物が設置車線外に検出された割合を、正検出率は障害物が設置車線内で検出された割合を示す。図の青色の直線が車線の境界線を示しており、この境界線を越えて検出された場合、誤検出となる。



	平均	最大	最小	標準偏差
路側帯	-2.75	0.00	-4.24	0.55
対向車線	4.09	5.85	2.06	0.60
自車線	0.91	2.27	-1.60	0.50

	検出率	未検出率	誤検出率	正検出率
路側帯	100.0%	0.0%	2.0%	98.0%
対向車線	100.0%	0.0%	0.0%	100.0%
自車線	100.0%	0.0%	2.3%	97.7%

図-41 検出位置結果 (障害物：車両)



	平均	最大	最小	標準偏差
路側帯	-3.03	-0.32	-4.64	0.71
自車線	0.09	3.85	-2.53	0.95

	検出率	未検出率	誤検出率	正検出率
路側帯	92.2%	7.8%	5.7%	86.5%
自車線	100.0%	0.0%	11.6%	88.4%

図-42 検出位置結果 (障害物：人形)

車両では、自車線の検出率は 100% であった。また、誤検出率は平均 2.3% であった。走行による振動や姿勢変動を考慮すると、誤検出の原因となる角度推定誤差は変動を避けられないため、実験結果は想定範囲内といえる。

人形でも、自車線の検出率は 100% であった。また、誤検出率は平均 8.9% であった。車両と比較して、反射断面積が小さいため、反射信号の信号対雑音比が低く、角度推定誤差の変動がより大きくなる。したがって、誤検出率も高くなる傾向がみられる。

3. 5. 3 実験⑪：ガイダンスによる除雪車停止実験

ミリ波レーダ及びガイダンス試作機を搭載した除雪トラックのフロントガラス全面に白色半透明のビニールシートを貼り付けオペレータの視界を遮断し、吹雪による視程障害を模擬的に再現した状況において、除雪トラックを走行させたときにガイダンス試作機で検出した前方の障害物情報のみを用いて安全に停止可能か実験を行ない、ガイダンス試作機の有効性や課題に関するオペレータへのヒアリングを実施した。

実験条件は、レーダ設置角度を 4 度、走行速度を 20km/h とし、障害物にはコーナーリフレクタを使用することとした。障害物を検出できなかった場合や、検出が遅れた場合に除雪トラックが障害物の位置まで走行しても路面に設置したコーナーリフレクタの上を除雪トラックが通過することで接触しないようにした。除雪車の出発地点から 100m 先の路側帯に障害物 1、200m 先の自車線に障害物 2 を配置した。

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

実験状況を写真-45に、実験中の運転室内状況を写真-46に、コーナーリフレクタを写真-47に、実験概略図を図-43に示す。



写真-45 実験状況



写真-46 走行中の運転室内状況



写真-47 コーナーリフレクタ

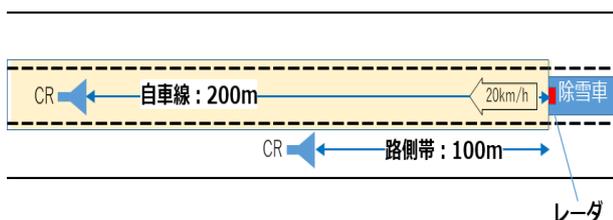


図-43 実験概略図

ガイダンスシステムへの警報は、障害物の接近に伴い障害物の表示色を通常時は青色、注意時は黄色、警告時は赤色に変化させるものであり、設定距離は任意に変更可能である。そこで警報を出す設定距離を注意 40m・警告 20m、同 50m・25m、同 60m・30m に設定し、それぞれの停止距離を確認した。なお、実験は被験者2名で行い、被験者はガイダンスシステムに従って自車線を走行し、赤色の警告表示を認識したところで停止操作をすることとした。図 44~46 に実験時のガイダンス画面例を、表-18 に実験結果一覧を示す。

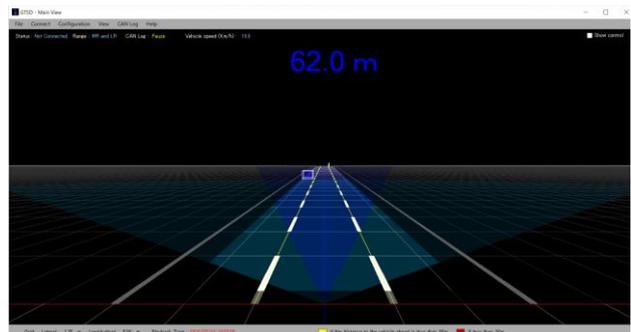


図-44 ガイダンス画面例 (注意 60m 警告 30m 時_通常)

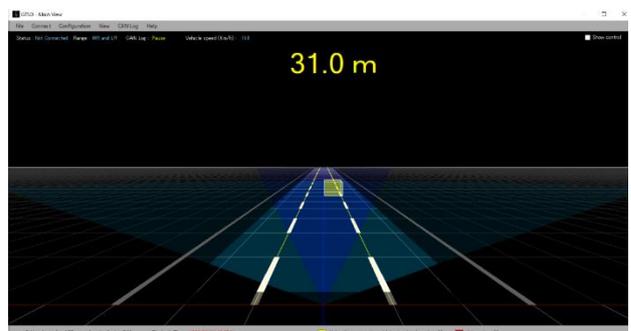


図-45 ガイダンス画面例 (注意 60m 警告 30m 時_注意)



図-46 ガイダンス画面例 (注意 60m 警告 30m 時_警告)

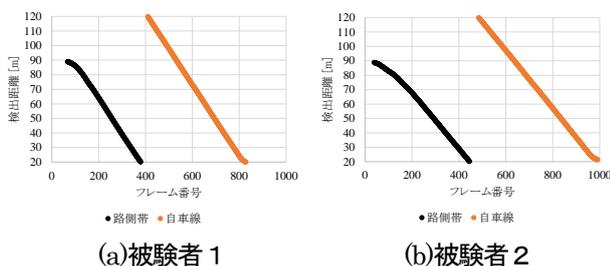
表-18 実験結果一覧

No	警報距離(m)		検出範囲(m)		停止時の障害物までの距離(m)			
	注意 黄色	警告 赤色	検出幅	警告幅	被験者1		被験者2	
					路側帯	自車線	路側帯	自車線
1	40m	20m	3.5m	3.5m	-	5.8m	-	8.6m
2			8.0m	3.5m	-	7.8m	-	6.0m
3	50m	25m	3.5m	3.5m	-	10m	-	11.8m
4			8.0m	3.5m	-	12.9m	13.5m	14.1m
5	60m	30m	3.5m	3.5m	-	15.5m	-	17.5m
6			8.0m	3.5m	-	17.7m	19.2m	17.5m

ここで停止時の障害物までの距離はプラウの先端からの距離を示している。レーダの設置位置とプラウの先端までの水平距離は3.85mであった。

実験の結果、全ての条件において被験者2名ともにガイダンス情報に従い、自車線障害物の手前で安全に停止することができた。警告距離20mでの平均停止距離が7.05m、25mでは12.2m、30mでは17.05mだったことからより安全な停止距離を確保するには警告距離を30mにすることが望ましいと考えられる。

路側帯の障害物は、誤検出により自車線に誤表示した場合、その情報を見たオペレータが停止操作をするか検証するため設置したものである。図-47に検出結果の一例として実験No.6におけるフレーム毎の検出結果を示す。路側帯の障害物は誤検出率が0%であり、路側帯の障害物が誤って自車線に表示されることはなかった。しかしながら被験者2の実験No.4及び6で路側帯の障害物で停止したのは、ガイダンス画面の表示色の変化による判断ではなく、表示距離のみを見て誤操作した結果であった。



	検出率	未検出率	誤検出率	正検出率		検出率	未検出率	誤検出率	正検出率
路側帯	100.0%	0.0%	0.0%	100.0%	路側帯	100.0%	0.0%	0.0%	100.0%
自車線	100.0%	0.0%	10.0%	90.0%	自車線	100.0%	0.0%	8.1%	91.9%

図-47 障害物検出結果

被験者に対するガイダンスシステムの評価に関するヒアリングでは、前方が見えない状況ではガイダンスシステム自体の有効性は高く、前方に何か障害物があるという情報は安心感に直結するため、できるだけ遠方から障

害物を把握することが重要だということがわかった。また、オペレータとしてはより安全側で警報を受ける方が良く、今回の条件だと注意60m 警告30mでのタイミングが望ましいことがわかった。一方で、画面表示（視覚情報）のみでオペレータに情報を伝達する方法には限界があり、音による警報と組み合わせることが有効であることが確認できた。

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) 磁気マーカシステム等を用いた自車位置推定システムを除雪車に搭載し、自車位置測位実験を行った。除雪作業による振動を受けても、測位誤差±50cm以内で測位可能であり、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。
- 5) 自車位置推定システムの車線走行支援ガイダンスを試作し、除雪車の前方視界を遮断した状態でガイダンス情報に従って走行し、車線走行支援ガイダンスは、目標測位誤差(±50cm以内)で自車位置を表示し、車線逸脱することなく除雪作業が可能であることを確認した。
- 6) 周囲探知技術については、市販車用ミリ波レーダ(76GHz帯)を除雪車に搭載し、視程約50m以下の吹雪時に、除雪作業による振動を受けても、100m以上手前から

車両を探知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。

7) ミリ波レーダを用いた前方障害物探知ガイダンスを試作し、これを搭載した除雪車の前方視界を遮断した状態で走行して、ガイダンス情報に従って除雪車を停止させる実験を行った。ガイダンス情報に障害物の未探知・誤探知はなく、オペレータはガイダンス情報に従いながら、障害物の10m以上手前で安全に停止可能であることを確認した。

今後、車線逸脱防止技術については、主たる自車位置測位である衛星測位（みちびき等）に関する一般道での検証試験を行う予定であり、周囲探知技術については、ガイダンスシステムの改良及び警告方法の検討とともに、一般道を対象とした除雪現場での効果検証及び課題の抽出を行う予定である。

※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:磁気マーカシステム:MIセンサを用いた自動運転用磁気マーカシステム

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

※6:IMU（inertial measurement unit：慣性計測装置）

※7:ROS（Robot Operating System：ロボット用ソフトウェアプラットフォーム）

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>（2020年6月15日確認）
- 2) 北海道総合開発計画（H28.3.29）：
<http://www.mlit.go.jp/common/001128021.pdf>（2020年6月15日確認）
- 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/>（2020年6月15日確認）
- 4) 道の駅を拠点とした自動運転サービス「中間とりまとめ」（平成31年1月23日）