

## 5 極端気象がもたらす雪氷災害の被害軽減のための技術の開発

研究期間：平成 28 年度～33 年度

プログラムリーダー：寒地道路研究グループ長 三木 雅之

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）

### 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 年度冬期以降 5 冬期続けて 80 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や平成 26 年 2 月の関東甲信での多量降雪など、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

このうち、平成 28 年度は(1)、(2)、(3)について実施している。

### 3. 研究の成果・取組

「2. 目標とする研究開発成果」に示した達成目標に関して、平成 28 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、過年度に取得したデータに基づいて吹雪量に与える気象要因の影響度を解析し、気象条件から吹雪量を推定する式について検討を行うとともに、大雪・暴風雪に関する事例収集、現地観測を実施した。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、2014 年 2 月の関東甲信地方における短時間多量降雪事例を解析し、樹林内で雪崩が発生した箇所は降雪強度が大きく気温が低い気象条件であったことなどを解明した。

### (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。

前中長期目標期間で開発した吹雪視程予測技術のうち、地吹雪発生条件や、気温0度付近での「雨」「雪」判別条件の改良について検討した。また、青森県内で観測サイトを構築し、取得した風速、気温、吹雪時の画像から、既往の地吹雪発生条件に合致しない吹雪発生の実態を把握した。さらに、降雪形態による視程低下メカニズム解明に向けて、降雪時の視程調査に関する既往文献を収集するとともに、降雪時に目視による視程観測を行った。

### (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、防雪林の防雪性能に関する現地観測、風洞実験の実験環境構築と予備実験、飛雪捕捉モデルの検討に向けた既往文献調査を行った。現地観測の結果、風が林内を通過する距離が防雪林の防雪性能を評価する上で重要であることが認められた。風洞実験においては、実験条件の検討と模型製作を行った。

「防雪柵の端部・開口部対策に関する研究」では、移動気象観測車により防雪柵端部開口部の現地観測を行った。観測結果より、斜風の場合に開口部付近では視程が低下しやすい傾向にあり、また開口部より風下側へのエンドエフェクトの影響範囲が大きくなる傾向が確認された。

「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、GNSS 測位精度低下への対策として RFID を用いた位置測位実験を行い、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。また、ミリ波レーダを用いて周囲探知実験を行い、吹雪時を想定したレーダ前面に着雪した状態でも、車両の探知が可能であることを確認した。ただし、人がしゃがんだ状態や腹ばいになった状態、車両に雪が堆積した状態では、検出できない場合があった。

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

**Research Period** : FY2016-2021

**Program Leader** : Director of Cold-Region Road Engineering Research Group  
MIKI Masayuki

**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)

**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 FY 2006 is 152 people, and is over 80 for five years consecutively from FY 2010 to FY 2014. 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, 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 2016 as below.

- Studies on Technologies for Assessing the Intensity of Extremely Severe Snowstorms
- Hazard Assessment for Avalanches Caused by Intense Heavy Snowfall
- 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 apertures of Snow Fences
- Research on a Technology to support the operation of snow removal vehicles during visibility hindrances caused by Severe Snowstorms

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

## 5.1 極端気象がもたらす雪氷災害の実態解明とリスク評価技術の開発

### 5.1.1 極端な暴風雪等の評価技術に関する研究

担当チーム：寒地道路研究グループ（雪氷チーム）

研究担当者：松澤勝、西村敦史、原田裕介、武知洋太、大宮哲

#### 【要旨】

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

平成 28 年度においては、現地観測を実施したほか、過年度に取得したデータに基づいて吹雪量に与える気象要因の影響を解析し、気象条件から吹雪量を推定する式について検討を行うとともに、大雪・暴風雪に関する事例収集を行った。

キーワード：暴風雪、大雪、飛雪流量、吹雪量

#### 1. はじめに

近年、急速に発達した低気圧により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。平成 25 年 3 月に北海道東部で発生した暴風雪では 9 名が亡くなった。また、平成 27 年 1 月に北海道羅臼町で発生した暴風雪では、国道 335 号が通行止めとなり、羅臼町は 3 日間にわたり孤立した。

暴風雪や大雪による被害の軽減は喫緊の課題であり、より適切な対策を講じるためには、その激しさを定量的に評価することが不可欠である。しかしながら、吹雪の激しさを示す既存の指標（例えば、年間累計吹雪量や視程障害発生頻度など）は一冬期を通したものであり、一回の暴風雪や大雪の激しさを適切に評価する指標ではない。本研究は、一回の暴風雪や大雪の激しさをより適切に評価する指標を作成し、暴風雪および大雪に関するハザードマップの開発を目指すものである。

平成 28 年度は以下について実施した。

- (1) 気象観測および飛雪流量観測
- (2) 吹雪量推定式の検討
  - ・重回帰分析による検討
  - ・乱流拡散式に基づく浮遊層吹雪量の検討
  - ・べき乗式による検討
- (3) 大雪・暴風雪に関する事例収集

「飛雪流量」や「吹雪量」は吹雪の激しさを示す指標の 1 つとして用いられる。「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のことを指し<sup>1)</sup>、「吹雪量」は飛雪流量を高さ方向に積分した値を指す<sup>2)</sup>。

一般に吹雪量を連続的かつ自動的に実測することは難しいため、吹雪量の算出は経験式によって推定されることが多い。これまでに多くの経験式が提示されているが<sup>3)~7)</sup>など、一義的なものは示されていない。

吹雪の運動形態には、図 1 に示す「転動」、「跳躍」、「浮遊」の 3 種類がある<sup>8)</sup>。「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。

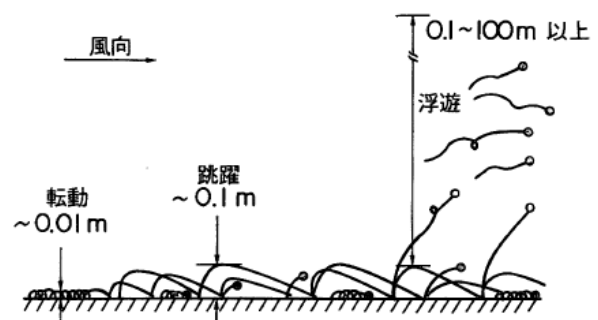


図 1 吹雪の運動形態（転動・跳躍・浮遊）<sup>8)</sup>より抜粋

## 2. 気象観測および飛雪流量観測

### 2.1 観測地点

暴風雪発生時の気象条件には地域特性がある。たとえば、当研究所の石狩吹雪実験場 (N43° 12′, E141° 23′) が位置する道央地域では西高東低の気圧配置時に、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暴風雪が発生するケースが多い<sup>9)</sup>。そこで本研究では、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2、図3に記す。



図2 石狩吹雪実験場  
(国土地理院地図に加筆したもの)



図3 弟子屈吹雪観測サイト  
(国土地理院地図に加筆したもの)

### 2.2 気象観測

石狩吹雪実験場、弟子屈吹雪観測サイト両地点に共通する気象観測項目を表1に、各種気象観測機器を取り付けた吹雪観測タワーの状況を図4に示す。

表1 気象観測項目

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4 吹雪観測タワー (弟子屈吹雪観測サイト)

### 2.3 飛雪流量観測

飛雪流量の観測には、タンス型ネット式吹雪計 (観測高度は雪面~高度 0.1m)、筒型ネット式吹雪計 (観測高度は0.1m~2.0m)、Snow Particle Counter (以下SPC、観測高度は1m~7m) 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、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あたる。図5に筒型ネット式吹雪計およびタンス型ネット式吹雪計を示す。筒型、タンス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。また、図6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を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。詳細についてはSchmidt (1977)<sup>10)</sup>を参照されたい。

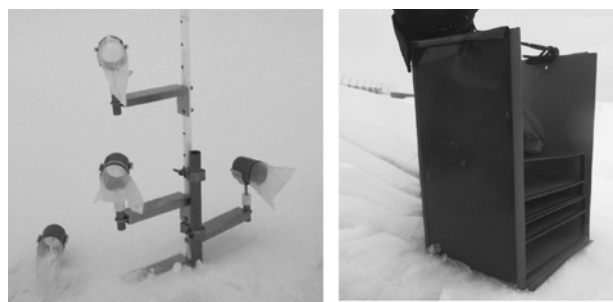


図5 筒型ネット式吹雪計 (左) および  
タンス型ネット式吹雪計 (右)



図6 Snow Particle Counter (SPC) の外観

観測した飛雪流量から吹雪量を求める方法を記した模式図を図7に示す。タンス型ネット式吹雪計、筒型ネット式吹雪計、SPCによって観測された各々の高度で得られた飛雪流量を鉛直方向に合計することにより、吹雪量を算出した。ここでは、図7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。

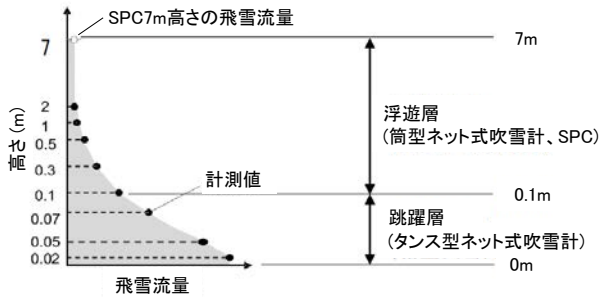


図7 飛雪流量から吹雪量を算出する方法の模式図

### 3. 吹雪量推定式の検討

平成28年度は、平成26～27年度に石狩吹雪実験場および弟子屈吹雪観測サイトで取得した気象データおよび飛雪流量データを解析し、気象条件から吹雪量を推定するための式を検討した。ここで、データ解析の対象とした飛雪流量の観測事例数は2観測箇所合わせて85事例である。

#### 3.1 重回帰分析による全層吹雪量の検討

気象観測データを説明変数、全層（跳躍層および浮遊層の合計）の吹雪量  $Q_{all}$  ( $g/m^2/s$ ) を目的変数とし、重回帰分析を用いた吹雪量推定方法を検討した。ここでは、説明変数の候補を、大宮ほか<sup>11)</sup>に基づき、以下に挙げる気象要素を使用した。

- ① 高度1mにおける風速  $V_{1m}$  (m/s)
- ② 10分間降水量  $P$  (mm)
- ③ 現況気温  $T$  ( $^{\circ}C$ )
- ④ 降水終了からの経過時間  $t$  (h)
- ⑤ 吹雪発生時の直近の降雪による降雪深  $SF$  (cm)
- ⑥ 降雪終了後の風速の4乗の積算  $U_{sum}$  ( $h \cdot m^4/s^4$ )

得られた重回帰式を式(1)に、その結果を表2に記す。また、飛雪流量観測結果から算出した全層の吹雪量  $Q_{all\_obs}$  と、式(1)によって計算した吹雪量  $Q_{all\_cal}$  の比較結果を図8に記す。重回帰分析の結果、重相関Rは0.81であり、今回選択した説明変数と目的変数の相関が高いことが示された。また、決定係数(重決定R2)は0.65であった。以上より、重回帰分析を用いることによって、概ね良好に吹雪量を計算することができると考えられる。

$$Q_{all\_cal} = -17.30 + 3.33V_{1m} + 4.91P - 0.89T + 1.08t + 0.74SF + 1.89U_{sum} \quad \dots (1)$$

表2 重回帰の結果

回帰統計	
重相関 R	0.81
重決定 R2	0.65
補正 R2	0.63
標準誤差	14.49
観測数	85

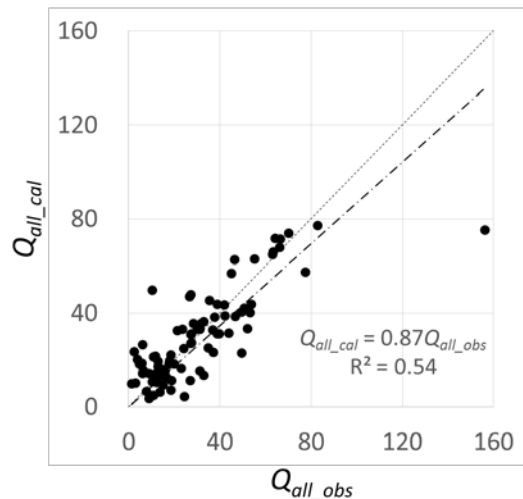


図8 吹雪量計算値と観測値の比較

(破線は1対1の線、一点鎖線は回帰線を示す)

#### 3.2 乱流拡散式に基づく浮遊層の吹雪量 $Q_{sus}$ の推定

一般に、跳躍層における吹雪粒子運動には運動力学モデルが<sup>12)</sup>、浮遊層においては乱流拡散モデルが適用される<sup>13)</sup>。本節では、乱流拡散式に基づく浮遊層における吹雪量  $Q_{sus}$  の算出について検討する。

##### 3.2.1 推定モデル

浮遊層では、雪粒子が風に乗って運ばれると仮定できる。そのため、任意の高さ  $z$  の浮遊層の飛雪流量  $q(z)$  は、単位体積当たりの雪粒子の質量である飛雪空間密度  $N(z)$  と風速  $V(z)$  を用いて

$$q(z) = N(z) \cdot V(z) \quad \dots (2)$$

と表すことができる。浮遊層の吹雪量  $Q_{sus}$  は、飛雪流量を高さ方向に積分した値なので、

$$Q_{sus} = \int q(z) dz \quad \dots (3)$$

となる。式(3)を解くため、式(2)の  $N(z)$  を定める。ここでは、松沢・竹内(2002)<sup>14)</sup>による、降雪を伴う吹雪

時の飛雪空間密度の鉛直分布式(4)を採用する。なお、式(4)中において、第1項は降雪成分の、第2項は地吹雪成分による  $N(z)$ を示すものである。

$$N(z) = \frac{P}{w_f} + \left( N_t - \frac{P}{w_f} \right) \left( \frac{z}{z_1} \right)^{-\frac{w_b}{ku_*}} \quad \dots (4)$$

ここで、

$P$ : 飛雪粒子の鉛直フラックス ( $\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$ )

$z_1$ : 基準高さ (m)

$N_t$ : 基準高さ  $z_1$  での飛雪空間密度 ( $\text{g}/\text{m}^3$ )

$k$ : カルマン定数 (=0.4)

$u_*$ : 摩擦速度 (m/s)

$w_f$ : 降雪粒子の落下速度 (m/s)

$w_b$ : 浮遊粒子の落下速度 (m/s)

である。なお、式(4)は吹雪が十分発達した条件下で成り立つ式であることに留意されたい。

次に式(2)の  $V(z)$ を定める。大気安定度が中立の場合、風速の鉛直分布は式(5)で与えられる。

$$V(z) = \frac{u_*}{k} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \quad \dots (5)$$

ここで、 $z_0$ は表面粗度 (m)である。

式(4)と式(5)を式(2)に代入すると、飛雪流量の鉛直分布式(式(6))が得られる。

$$q(z) = \frac{Pu_*}{kw_f} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) + \frac{u_*}{k} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \cdot \left( N_t - \frac{P}{w_f} \right) \left( \frac{z}{z_1} \right)^{-\frac{w_b}{ku_*}} \quad \dots (6)$$

ここで、

$$a = \frac{u_*}{k} \left( N_t - \frac{P}{w_f} \right) \quad \dots (7a)$$

$$b = -\frac{w_b}{ku_*} \quad \dots (7b)$$

とおくと、

$$q(z) = \frac{Pu_*}{kw_f} \ln \frac{z}{z_0} + a \left( \frac{z}{z_1} \right)^b \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \\ = \frac{Pu_*}{kw_f} (\ln z - \ln z_0) + \frac{a}{z_1^b} \cdot z^b \ln z - \left( \frac{a}{z_1^b} \ln z_0 \right) \cdot z^b \quad \dots (8)$$

これを式(3)に代入すると

$$Q_{sus} = \frac{Pu_*}{kw_f} \int (\ln z - \ln z_0) dz + \frac{a}{z_1^b} \int z^b \ln z dz - \frac{a}{z_1^b} \ln z_0 \int z^b dz \\ = \frac{Pu_* z}{kw_f} \left( \ln \frac{z}{z_0} - 1 \right) + \frac{a}{b+1} \frac{z^{b+1}}{z_1^b} \left( \ln \frac{z}{z_0} - \frac{1}{b+1} \right) + c \quad \dots (9)$$

が得られる。ここで、 $c$ は積分定数である。

式(9)を高さ  $z_1$ から浮遊層の上端の高さ  $z_2$ まで積分すると式(10)が得られる。

$$Q_{sus} = \left[ \frac{Pu_* z}{kw_f} \left( \ln \frac{z}{z_0} - 1 \right) + \frac{a}{b+1} \frac{z^{b+1}}{z_1^b} \left( \ln \frac{z}{z_0} - \frac{1}{b+1} \right) \right]_{z_1}^{z_2} \quad \dots (10)$$

式(7)および式(10)の各変数を適切に定め、式(10)の定積分を解くことで  $Q_{sus}$ を算出する。

### 3.2.2 浮遊層の吹雪量 $Q_{sus}$ の試算方法 (3 ケース)

3.2.1 項にて述べたモデルを用いて  $Q_{sus}$ を算出するにあたり、式(7)および式(10)の各変数を適切に定める必要があるが、適切な変数については確立されていない。そこで本研究では、表3~5に記す3ケースの変数パターンについて試算した。なお、いずれのケースにおいても  $z_1=0.15\text{m}$ 、 $z_2=7.0\text{m}$ 、 $w_f=1.2\text{m/s}$ 、 $z_0=1.5 \times 10^{-4}\text{m}$ 、 $u_*=0.036U_{10}\text{m/s}$ とし、 $w_b$ と  $N_t$ のみを変えて試算を行った。なお、 $U_1$ は高度1mにおける風速、 $U_{10}$ は高度10mにおける風速である。ここで、表3(ケース1)に記す変数は松沢(2007)<sup>15)</sup>および松澤(2016)<sup>16)</sup>に基づく。

表3 ケース1で使用した変数

	設定値	備考
$w_b$	$0.031U_1-0.15\text{ m s}^{-1}$	
$N_t$	$0.116 \exp(0.309U_{10})\text{ g m}^{-3}$	降水強度 $\geq 1.0\text{mm h}^{-1}$
$N_t$	$0.021 \exp(0.401U_{10})\text{ g m}^{-3}$	降水強度 $< 1.0\text{mm h}^{-1}$

表4 ケース2で使用した変数

	設定値	備考
$w_b$	$0.56u_*-0.1\text{ m s}^{-1}$	
$N_t$	$60.5u_*^{3.5}\text{ g m}^{-3}$	降水あり
$N_t$	$87.3u_*^{5.4}\text{ g m}^{-3}$	降水なし

表5 ケース3で使用した変数

	設定値	備考
$w_b$	$0.56u_*-0.1\text{ m s}^{-1}$	
$N_t$	$674.35 \exp(-2.46/u_*)\text{ g m}^{-3}$	降水あり
$N_t$	$348.86 \exp(-2.45/u_*)\text{ g m}^{-3}$	降水なし

表4 (ケース2) および表5 (ケース3) に記す変数  $w_b$ ,  $N_t$  は、既得の気象データおよび飛雪流量データ (平成26年度弟子屈観測データ) を解析することによって求めた。この解析は、次の4つのパラメータ ( $z_0$ ,  $u_*$ ,  $w_b$ ,  $N_t$ ) に着眼し、その関係について調べたものであり、前出の式(2)、式(4)、式(5)を用いた。

本解析では、まず4高度で計測した風速値から対数則によって風速の鉛直分布を求め、得られた鉛直分布と式(5)により、最小二乗法によって  $z_0$  と  $u_*$  を算出した。次に、式(2)および式(5)により、再度最小二乗法によって  $w_b$  および  $N_t$  を算出した。得られた  $w_b$  と  $u_*$  の関係を図9に記す。ここで、 $w_b$  と  $u_*$  の近似式を、ケース2およびケース3における  $w_b$  とした。図9中には近似式および決定係数  $R^2$  を付記した。

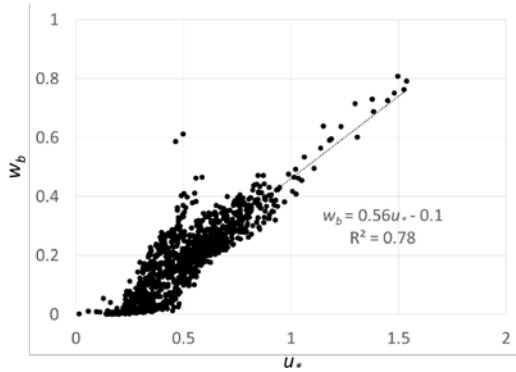


図9  $w_b$  と  $u_*$  の関係

ケース2、3で使用した  $w_b$  の近似式を図中に付記してある

次に、 $N_t$  と  $u_*$  の関係を、「降雪あり」、「降雪なし」に分け、それぞれ図10および図11に記す。この関係から  $N_t$  と  $u_*$  の間に第一近似を考え、その近似式をケース2の変数  $N_t$  とした。図10、図11中に近似式および決定係数  $R^2$  を付記した。なお、降雪の有無については、観測地点の近隣アメダス (弟子屈アメダス) の降水量データから判断した。

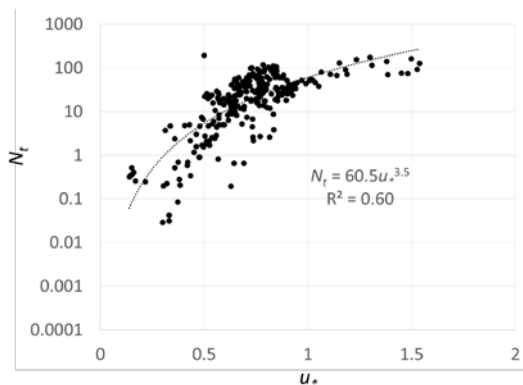


図10 「降雪あり」時の  $N_t$  と  $u_*$  の関係

ケース2「降雪あり」時の  $N_t$  の近似式を付記してある

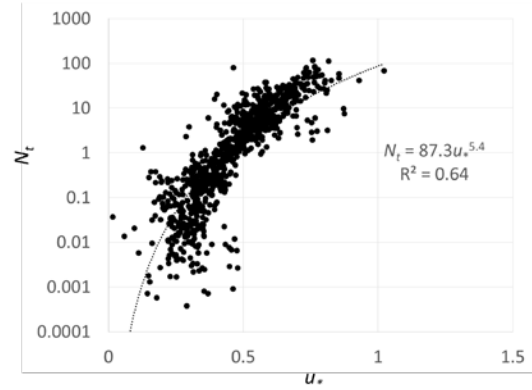


図11 「降雪なし」時の  $N_t$  と  $u_*$  の関係

ケース2「降雪なし」時の  $N_t$  の近似式を付記してある

次に、Budd(1966)<sup>17)</sup> にならい、 $N_t$  と  $1/u_*$  の関係について、近似式を求めた。両者の関係を、「降雪あり」、「降雪なし」に分け、図12および図13に記す。ここで求めた近似式をケース3の変数  $N_t$  とした。図12、図13中には近似式および決定係数  $R^2$  を付記した。

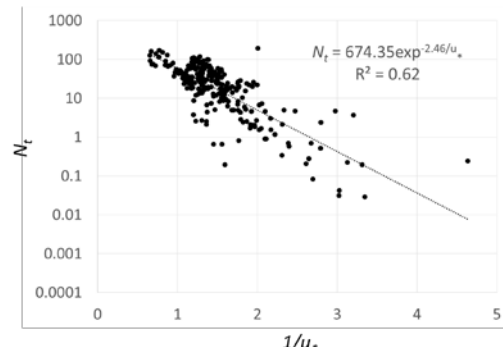


図12 「降雪あり」時の  $N_t$  と  $1/u_*$  の関係

ケース3「降雪あり」時の  $N_t$  の近似式を付記してある

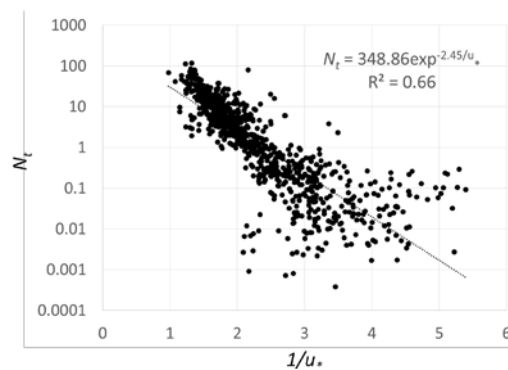


図13 「降雪なし」時の  $N_t$  と  $1/u_*$  の関係

ケース3「降雪なし」時の  $N_t$  の近似式を付記してある

### 3.2.3 浮遊層吹雪量の試算結果 $Q_{sus\_cal}$ と実測値 $Q_{sus\_obs}$ の比較

3.2.2 項で述べた全3ケースの変数を用いて試算した浮遊層における吹雪量  $Q_{sus\_cal}$  と筒型ネット式吹雪量



計（観測高度は0.1mから2m）およびSPC（観測高度は7m）によって計測された飛雪流量から求めた浮遊層における吹雪量  $Q_{sus\_obs}$  との比較を行った。石狩吹雪実験場については図14に、弟子屈吹雪観測サイトについては図15に記す。なお、この計算に用いた式(10)中の降雪粒子のフラックス  $P$  は、石狩吹雪実験場、弟子屈吹雪観測サイトとも、近隣アメダス（石狩アメダス・弟子屈アメダス）の10分間降水量を使用した。

石狩吹雪実験場、弟子屈吹雪観測サイトともに、いずれのケースにおいてもバラツキが大きいことが確認される。ケースごとに着目すると、ケース1による計算値  $Q_{sus\_cal}$  は、観測値  $Q_{sus\_obs}$  が小さい時には過大評価、 $Q_{sus\_obs}$  が大きい時に過小評価する傾向がある。ケース2による  $Q_{sus\_cal}$  は多くの場合において  $Q_{sus\_obs}$  を過大評価する傾向があり、ケース3による  $Q_{sus\_cal}$  は、逆に多くの場合において  $Q_{sus\_obs}$  を過小評価する傾向がある。

バラツキが大きくなった一因として、降水量計による降雪観測の精度が低いことが考えられる。今後、アメダス降水量計のみならず、近隣の道路テレメータの降水量計や積雪深計から求めた降雪粒子のフラックス  $P$  を用いて  $Q_{sus\_cal}$  を試算する予定である。

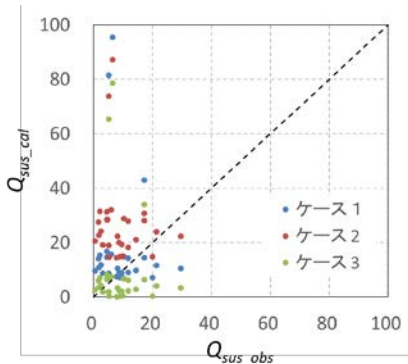


図14 観測値から求めた浮遊層の吹雪量  $Q_{sus\_obs}$  と推定モデルによる計算値  $Q_{sus\_cal}$  の関係 (石狩吹雪実験場)

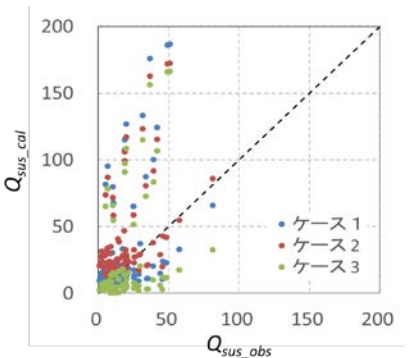


図15 観測値から求めた浮遊層の吹雪量  $Q_{sus\_obs}$  と推定モデルによる計算値  $Q_{sus\_cal}$  の関係 (弟子屈吹雪観測サイト)

### 3.3 べき乗式による吹雪量の推定

本節では、べき乗式を用いた全層の吹雪量  $Q_{all}$  について検討する。ここでは、浮遊層における吹雪量  $Q_{sus}$  と跳躍層における吹雪量  $Q_{sal}$  とに分け、最終的に両者を合計することによって全層の吹雪量  $Q_{all}$  を算出した。

ここで、 $Q_{sal}$  の算出式には、小林ほか(1969)<sup>4)</sup> が提示した跳躍層の吹雪量上限値を示す式(11)を使用することとした。ここで、 $U_1$  は高度1mにおける風速である。

$$Q_{sal} = 0.03 \cdot U_1^3 \quad \dots (11)$$

防災の観点上、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ことを踏まえ、 $Q_{sus}$  についても  $Q_{sal}$  と同様、上限値について検討することとした。

浮遊層における吹雪量  $Q_{sus}$  についても式(11)と同様、高度1mにおける風速  $U_1$  と浮遊層の吹雪量の観測値  $Q_{sus\_obs}$  の関係について求めた。両者の関係を図16に示す。この結果をもとに、 $Q_{sus\_obs}$  の上限値について検討する。まず、風速階級0.5m/s刻み（例えば、5.0~5.5m/s、5.5~6.0m/s）で区切り、その同一階級における最大吹雪量を、その階級の代表値として採用する。これらの値に対してべき乗関数による近似曲線を求め、式(12)を得た。図16中に、式(12)により求めた曲線を併せて記す。

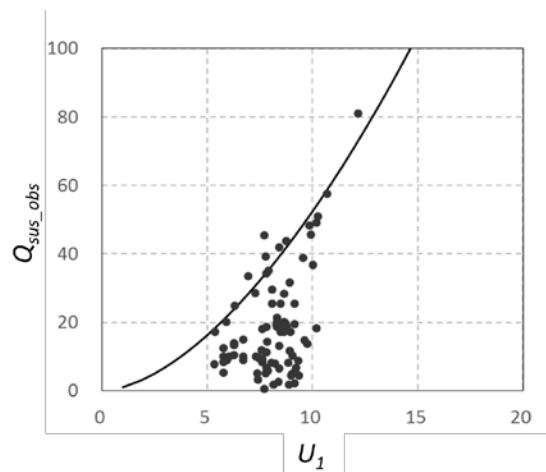


図16 高度1mにおける風速  $U_1$  と観測値から求めた浮遊層の吹雪量  $Q_{sus\_obs}$  の関係 (図中には式(12)による曲線を付記してある)

$$Q_{sus} = 1.07 \cdot U_1^{1.69} \quad \dots (12)$$

観測結果から算出した全層の吹雪量と、計算によって求めた全層の吹雪量の比較を行う。ここでは、式(11)と式(12)の和である式(13)式によって、全層吹雪量の推定式を導いた。

$$Q_{all} = 0.03 \cdot U_1^3 + 1.07 \cdot U_1^{1.69} \dots (13)$$

高度 1m の風速  $U_1$  に対する吹雪量の観測値  $Q_{all\_obs}$  のプロットと、全層吹雪量の上限値を推定する式(13)によって求めた曲線を図 17 に示す。この結果より、本解析によって求めた式(13)は、観測吹雪量の上限値を表現できていることが確認できた。

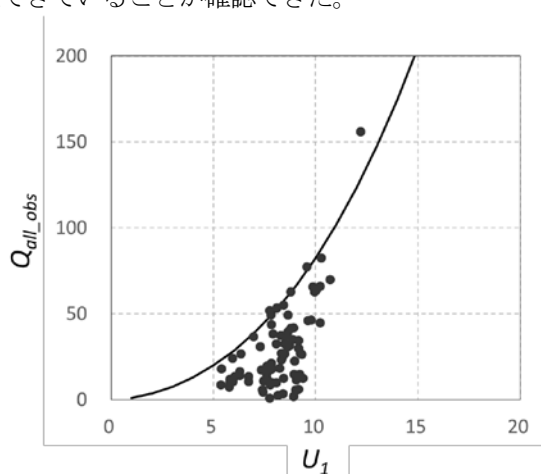


図 17 高度 1m における風速  $U_1$  と観測値から求めた全層吹雪量  $Q_{all\_obs}$  の関係 (図中には式(13)による曲線を付記してある)

次に、松澤ほか(2010)<sup>7)</sup>が示したべき乗式による吹雪量推定式(式(14))との比較を行う。図 18 に、本研究で得た式(13)による曲線のほか、松澤ほか(2010)が示した吹雪量推定式(14)による曲線を示す。なお、松澤ほかは、高度 1.2m における風速のべき乗式を示している。そこで、図 18 は、高度 1m にて観測した風速を対数則によって高度 1.2m の風速値に換算し、全層吹雪量の観測値  $Q_{all\_obs}$  との関係を整理したものを示してある。この結果からも、本研究で示した式(13)が、式(14)による計算値に比べ、観測吹雪量  $Q_{all\_obs}$  の上限値をより精度良く表現できていることが分かる。以上を踏まえ、本報における吹雪量算出には式(13)を用いることとした。

$$Q = 0.005 \cdot U_{1.2}^4 \dots (14)$$

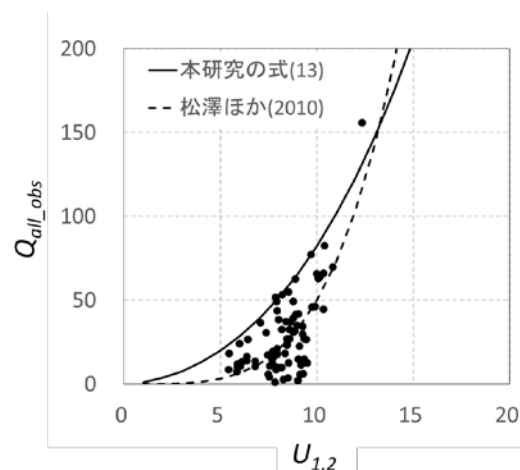


図 18 式(13)と松澤ほか<sup>7)</sup>の式(14)の比較

#### 4. 大雪・暴風雪に関する事例収集

暴風雪や大雪の評価指標を検討するにあたり、暴風雪イベントや大雪イベントが社会生活に与えるインパクトについて検討する必要がある。ここでは、社会生活に与えるインパクトの1つとして、国道通行止めの有無との関連に焦点をあてた。

はじめに気象観測データの収集、整理を行った。加えて、本研究にて検討した吹雪量推定式および気象観測データを用い、過去の暴風雪イベントおよび大雪イベントを抽出するとともに、抽出されたイベントと国道通行止め履歴データをまとめ、データセットを作成した。

##### 4.1 気象データの収集

北海道、東北地方、新潟県(全8道県)の気象庁アメダス計 183 地点および国土交通省北海道開発局の道路気象テレメータ計 176 地点(計 359 地点)における気象データについて、20~35 冬期分を収集した。

##### 4.2 暴風雪および大雪イベントの抽出

4.1 節で収集した気象データに基づき、気象観測地点ごとに暴風雪および大雪イベントを抽出した。各地点の吹雪量は 3 章に示した吹雪量推定式(13)に基づいて算出を行った。

暴風雪イベントおよび大雪イベントの抽出条件は表 6 のとおりとした。いずれも道路除雪作業の支障になる可能性が生じる条件として設定した。聞き取りによる幹線道路の除雪車が受け持ちの作業工区を 1 周するのに必要となる時間から、3 時間の積算吹雪量あるいは降雪の深さを基準に定めた。暴風雪イベントについては、吹きだまりが生じやすい条件と考えられる石狩市内の切土道路における測定結果<sup>18)</sup>をもとに、吹きだまりが道路上に 15cm 程度生じる吹雪量として吹雪

量 200kg/m とした。大雪イベントについては、道路管理者によって異なるものの、新雪除雪の出動基準が 5~15cm 程度であることを参考とした<sup>19)</sup>。

イベント抽出イメージを図 19 に記す。その結果、暴風雪イベントとして 186,811 事例、大雪イベントとして 45,071 事例が抽出された。

表 6 暴風雪および大雪イベントの抽出条件

暴風雪イベント	連続する 3 時間において、時間吹雪量の 3 時間合計の吹雪量が 200kg/m 以上となったイベント
大雪イベント	3 時間降雪の深さが 10cm 以上となったイベント

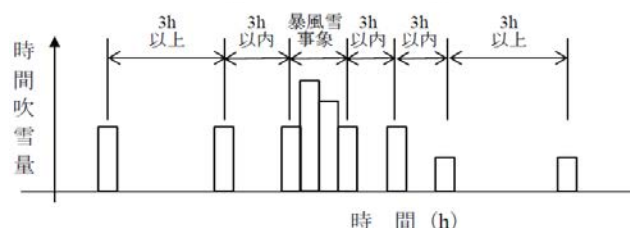


図 19 暴風雪イベントの抽出イメージ

連続する 3 時間の合計吹雪量が 200kg/m 以上となった場合を、暴風雪イベントとして抽出した。この図中では、「暴風雪事象」と記した時間帯が該当する

今後これらのデータを用いて、暴風雪イベント、大雪イベントの評価指標について検討を行っていく予定である。

### 5. まとめ

平成 28 年度は、過年度に取得した飛雪流量データおよび気象データを解析した。本解析結果より、風速から吹雪量の上限值を推定する式について提示した。また、北海道および本州（新潟以北）の地上気象観測データのほか、気象条件から抽出した暴風雪および大雪イベントの整理を行った。

次年度以降は、今年度抽出した大雪イベントおよび暴風雪イベントをデータベース化するほか、過去の通行止め履歴（雪害に起因するもの）と気象データとの関係について検討を進める予定である。

### 参考文献

1) 日本雪氷学会：新版 雪氷辞典，古今書院，p. 166，2014。  
 2) 日本雪氷学会：新版 雪氷辞典，古今書院，p. 190，2014。  
 3) Budd et al. : The Drifting of Non-uniform Snow

Particles. Studies in Antarctic Meteorology, American Geophysical Union, Antarctic Research Series, 9, pp. 59-70, 1966.  
 4) 小林ほか：みぞによる地吹雪量の測定. 低温科学・物理編, 27, pp. 99-106, 1969.  
 5) Kobayashi : Studies of Snow Transport in Low- Level Drifting Snow. Contributions from the Institute of Low Temperature Science, A24, pp. 1-58, 1972.  
 6) Takeuchi : Vertical profile and horizontal increase of drift-snow transport, J. Glaciology, 26, pp. 481-492, 1980.  
 7) 松澤ほか：風速と吹雪量の経験式の適用に関する一考察, 寒地技術論文報告集, 26, pp. 45-48, 2010.  
 8) 竹内：吹雪と吹きだまりの発生機構, 鉄道土木, 26, 12, pp. 41-44, 1984.  
 9) 原田ほか：北海道における大雪・暴風雪時の気圧配置と地域別発生の特徴, 第 26 回ふゆトピア研究発表会, 2014.  
 10) Schmidt : A system that measures blowing snow, USDA, Forest Service Research Paper, RM-194, 1977.  
 11) 大宮ほか：判別分析を用いた地吹雪発生条件に関する検討, 寒地技術論文報告集, 31, pp. 34-39, 2015.  
 12) Bagnold R. A. : The Physics of Blown Sand and Desert Dunes. London, Methuen and Co. Ltd, p. 265, 1941.  
 13) 塩谷：吹雪密度の垂直分布に対する一考察, 雪氷, 15 巻, pp. 6-9, 1953.  
 14) 松沢・竹内：気象条件から視程を推定する手法の研究. 雪氷 64 巻 1 号, pp. 77-85, 2002.  
 15) 松沢：吹雪時の視程推定手法の改良に関する研究. 雪氷 69 巻 1 号, pp. 79-92, 2007.  
 16) 松澤：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 巻 5 号, pp. 255-268, 2016.  
 17) Budd et al. : The Drifting of Non-uniform Snow Particles. Studies in Antarctic Meteorology, American Geophysical Union, Antarctic Research Series, 9, p. 101, 1966.  
 18) 松澤ほか：平成 27 年度重点的研究開発課題報告書「道路構造による吹きだまり対策効果の定量化に関する研究」, 国立研究開発法人土木研究所, 2016  
 19) (社)日本建設機械化協会：2005 除雪・防雪ハンドブック (除雪編), p. 119, 2004.

## 5.1.2 短時間の多量降雪による雪崩危険度評価に関する研究

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

研究担当者：石田孝司、松下拓樹(雪崩 C)、  
松澤勝、西村敦史、原田裕介、高橋渉(雪氷 T)

### 【要旨】

2014年2月14日から16日にかけて関東甲信地方は記録的な大雪となり、各所で雪崩が同時多発的に発生し、一般的には発生しにくい樹林内でも雪崩が発生した。このような短時間多量降雪時の雪崩発生に関わる指標を見いだすことを目的として、関東甲信地方の2014年2月の大雪事例について解析を行った。解析では、気温と降雪強度の観測値から、積雪の圧縮粘性理論に基づいて斜面積雪の硬度と安定度を推定した。その結果、樹林内で雪崩が発生した箇所では、他の箇所に比べて降雪強度が大きく気温が低い状況で降雪が継続したため、硬度が小さく不安定な斜面積雪が形成されたと考えられる。

キーワード：雪崩、樹林、降雪強度、気温、積雪硬度、安定度

### 1. はじめに

2014年2月14日から16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で数多くの雪崩が発生した<sup>1)</sup>。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<sup>1)~6)</sup>。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<sup>7)</sup>。しかし、樹林内で発生する雪崩について、日本<sup>8)9)</sup>、スイス<sup>10)11)</sup>、イタリア<sup>12)</sup>、カナダ<sup>13)</sup>において調査事例がある。この調査事例のうち、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<sup>11)</sup>もあるが、気温などの他の要素を用いた樹林内で雪崩が発生する気象と積雪の具体的な条件は、まだ十分に示されていない。

そこで、2014年2月の大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. データと解析方法

#### 2.1 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○)<sup>1)3)4)6)</sup>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1000~1100mである。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の近傍気象観測所は、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<sup>6)14)</sup>。また、樹林における雪崩以外にも、数多くの雪崩(図1の×)が発生した<sup>1)</sup>。

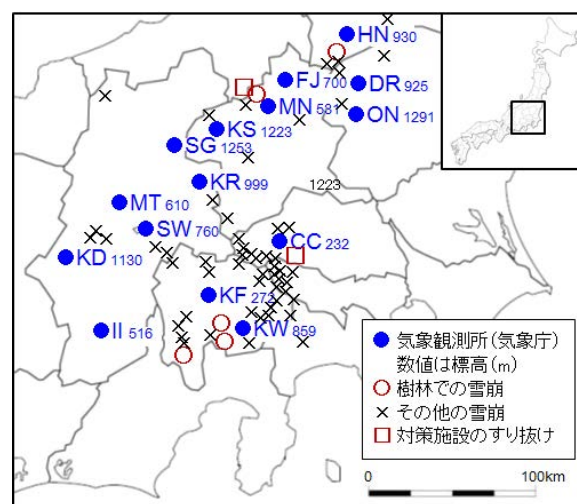


図1 気象庁の気象観測所(●)と樹林内で発生した雪崩(○)<sup>1)3)4)6)</sup>、その他の雪崩(×)<sup>1)</sup>、落石ネット等の対策施設を積雪がすり抜けた箇所(□)<sup>6)14)</sup>の位置。HN：桧枝岐、DR：土呂部、ON：奥日光、FJ：藤原、MN：みなかみ、KS：草津、SG：菅平、KR：軽井沢、MT：松本、SW：諏訪、KD：開田高原、II：飯田、CC：秩父、KF：甲府、KW：河口湖。



2.2 気象データ

解析に用いた気象データは、図1に示す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。

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112cm、平均降雪強度は3.9cm/h、平均気温は-3.4℃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。

2.3 樹林内の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<sup>15)</sup>。

雪崩発生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 $SI$ <sup>16)</sup>を用いる (式(1))。

$$SI = \frac{\Sigma_s}{h\rho g \sin\theta \cos\theta} \tag{1}$$

ここで、 $h$ は積雪深 (m)、 $\rho$ は積雪密度 ( $\text{kg/m}^3$ )、 $g$ は重力加速度 ( $\text{m/s}^2$ )、 $\theta$ は斜面勾配 ( $^\circ$ )、 $\Sigma_s$ は積雪のせん断強度指数 ( $\text{N/m}^2$ )、 $h\rho g \sin\theta \cos\theta$ はせん断応力 ( $\text{N/m}^2$ )である。ここでは、斜面勾配 $\theta$ は $45^\circ$ とした。積雪のせん断強度指数 $\Sigma_s$ は、式(2)の積雪密度 $\rho$ との関係式<sup>16)</sup>から推定した。

$$\Sigma_s = 3.10 \times 10^{-4} \rho_t^{3.08} \tag{2}$$

ただし、積雪密度 $\rho$ 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 $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ )を求めて<sup>16)</sup>、せん断強度指数 $\Sigma_s$ と安定度 $SI$ の推定に用いた。

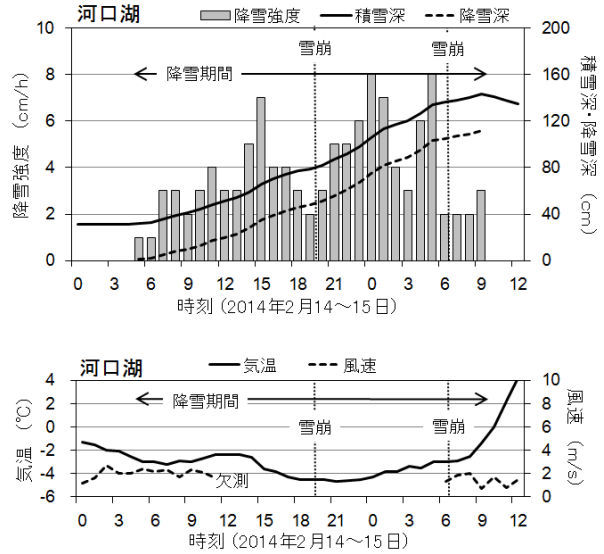


図2 河口湖における積雪深、降雪強度、降雪深、気温、風速の時系列

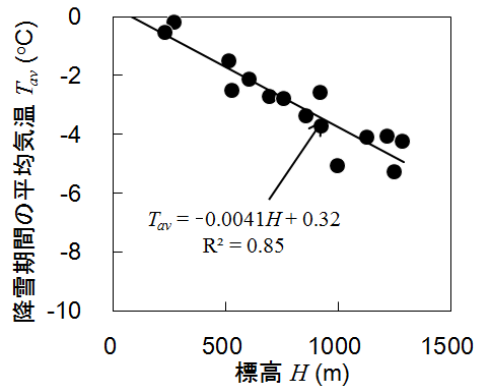


図3 気象観測所15地点の降雪期間の平均気温 $T_{av}$ と標高 $H$ の関係。実線は回帰直線。

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

$\rho_0$ は積もったばかりの初期積雪密度 ( $\text{kg/m}^3$ )、 $A$ 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 $A_{ob}$  ( $\text{m/h}$ )と、 $A = \rho A_{ob}$ の関係となる。ここでは、初期積雪密度 $\rho_0$ を $50 \text{ kg/m}^3$ 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<sup>17)</sup>を用いて求めた。

$$C = 0.21 \exp(-0.166T_s) \tag{4}$$

新雪の場合、雪温 $T_s$ は気温 $T$ に等しい ( $T_s \approx T$ )と仮定することができる。

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  $\rho_t$  を用いて、式(5)に示す密度との関係式<sup>18)</sup>から求めた。

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

以上より、斜面勾配  $\theta$  が一定であれば、斜面積雪の安定度  $SI$  と硬度  $H$  は密度  $\rho$  の関数となり、積雪密度  $\rho$  は気温  $T$  と降雪強度  $A_{\sigma}$  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。

### 3. 結果

#### 3.1 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、次節では、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、2.3節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。

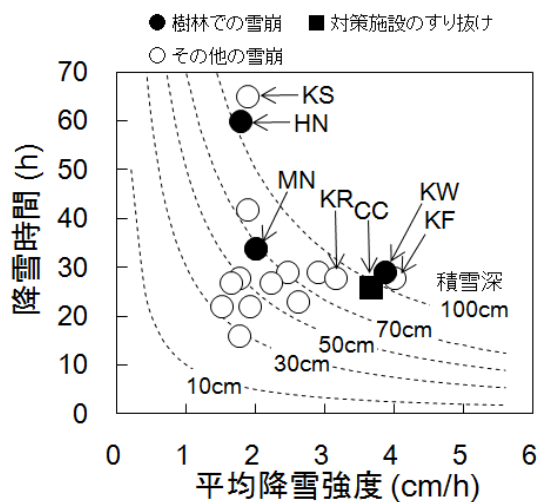


図4 気象観測所15地点の降雪期間の時間と平均降雪強度の関係。地点の略記号は図1に同じ。

#### 3.2 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2.3節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 $-4^{\circ}C$ 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

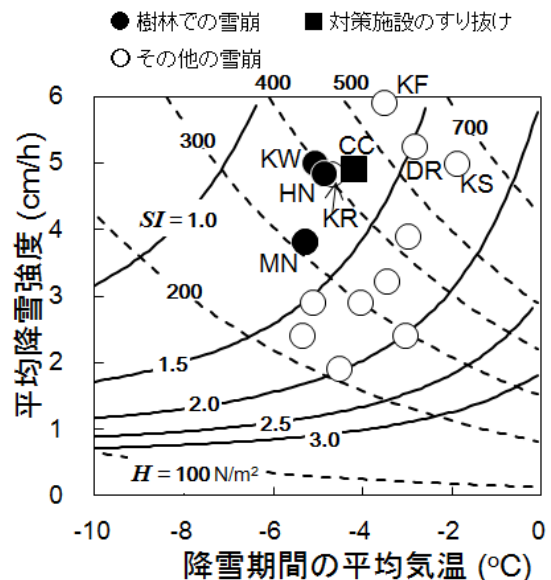


図5 各気象観測地点における降雪期間のうち降雪強度が最大となった連続する12時間の平均気温と平均降雪強度の関係。斜面積雪の安定度  $SI$  (実線) と硬度  $H$  (破線) は、平均気温と平均降雪強度を用いた計算値。平均気温は図3の標高との回帰式から求めた標高1100mの値。地点の略記号は図1に同じ。

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。

#### 4. まとめ

2014 年 2 月の大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、樹林内における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。

今後は、さらなる事例解析や観測を行うとともに、樹林密度等の植生条件についても検討を行っていきたい。また、短時間多量降雪時に発生する雪崩の到達範囲や地形条件<sup>2) 19)</sup>なども調査する予定である。

#### 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) 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 1 号、pp.47-57、2015 年 1 月
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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一群馬県内国道 17 号三国峠一、雪氷研究大会 (2014・八戸) 講演要

旨集、p78、2014 年 9 月

- 7) 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 1 号、pp.14-18、1969 年 1 月
- 8) 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. Lehning：上高地乗鞍スーパー林道で発生した雪崩 (2003 年 1 月 5 日) の調査報告、雪氷、66 巻 1 号、pp.51-57、2004 年 1 月
- 9) 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
- 10) Schneebeli, M., and M. Meyer-Grass: Avalanche starting zones below the timber line structure of forest, Proceedings of the International Snow Science Workshop, Breckenridge, CO, U.S.A., pp.176-181, 1992
- 11) 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
- 12) 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
- 13) 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
- 14) 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、i-ii、2015 年 7 月
- 15) 松下拓樹、池田慎二、秋山一弥：樹林内における雪崩発生条件に関する一考察 —2014 年 2 月関東甲信の大雪時の事例一、雪氷、77 巻 5 号、pp.433-445、2015 年 9 月
- 16) 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 2 号、pp.113-120、1993 年 6 月
- 17) Abe, O.,: Creep experiments and numerical simulations of very light artificial snowpacks, Annals of Glaciology, Vol.32, pp.39-43, 2001
- 18) 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 5 号、pp.441-449、2001 年 9 月
- 19) 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 6 号、pp.439-457、2016 年 11 月

## 5.2 広域に適用できる道路の視程障害予測技術の開発

### 5.2.1 広域的な吹雪視程障害予測技術の開発に関する研究

担当チーム：寒地道路研究グループ（雪氷チーム）  
研究担当者：松澤勝、西村敦史、國分徹哉、原田裕介、  
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きているが、多くの時間と費用が必要となる。そこで本研究では、北海道に加え全国の積雪寒冷地で適用可能な吹雪視程予測技術を開発し、吹雪時に道路管理者や道路利用者の行動判断を支援することで、吹雪災害の被害軽減に資することを目的としている。

平成 28 年度は、降水種別の雨雪と気温及び相対湿度との関係について分析を行い、地吹雪発生状況の調査を実施した。また、降雪時の視程調査に関する既往文献を収集するとともに、降雪時における視程調査を実施した。

キーワード：吹雪、視程障害、予測、情報提供

#### 1. はじめに

我が国の積雪寒冷地の道路では、冬期に吹雪視界不良による交通障害がしばしば発生するなど、厳しい走行環境にある。そこで、防雪施設（防雪柵、防雪林など）などのハード対策の整備が進められており、被害の軽減に効果を上げてきている。しかし、近年急激に発達した低気圧の影響により、北海道に限らずこれまで吹雪の発生頻度が比較的lowかった本州でも、吹雪災害が発生するようになってきた。従来のハード対策の整備には、多くの費用と時間が必要となる他、極端な暴風雪への対応には限界がある。早急かつ効果的な吹雪災害の被害軽減には、従来のハード対策に加えて、吹雪視程の現況及び予測情報を提供するなど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<sup>1)</sup>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」<sup>2)</sup>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<sup>3)4)</sup>を適用している。また、降水の雨雪判別には気温のみ<sup>2)4)</sup>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、既往の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、研究初年度は、降水種別の雨雪と気温及び相対湿度との関係について分析を行うとともに、青森県で地吹雪の発生状況などについて調査を開始した。

##### 2.1.1 雨雪判別条件に関する分析

北海道及び青森県内にある図-1に示した9箇所の気象台・測候所において観測された1時間毎の気象データを基に、雨雪判別条件について分析を行った。9箇所の内訳は、「札幌」、「旭川」、「網走」、「帯広」、「釧路」、「函館」、「室蘭」、「稚内」、「青森」である。分析対象とした期間は平成 26 年 11 月 1 日～平成 27 年 3 月 31 日、平成 27 年 11 月 1 日～平成 28 年 3 月 31 日の2冬期間とし、降水種別、気温、相対湿度のデータを用い分析を行った。なお、降水種別の観測結果は、「雪」、「雨」、「みぞれ」を対象とした。



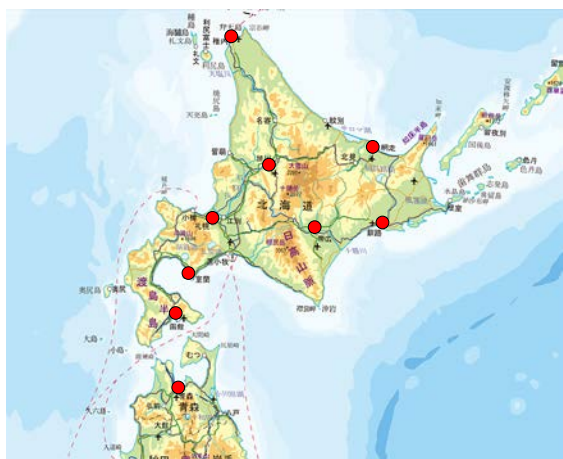


図-1 分析対象箇所  
(国土地理院 国土地理院地図に加筆)

雨雪の分類について気象学上「みぞれ」は雪に分類される。しかし、地吹雪発生や地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、本研究では降水種別の観測結果の「雪」を雪とし、「雨」及び「みぞれ」を雨とし2つに分類することとした。

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

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

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

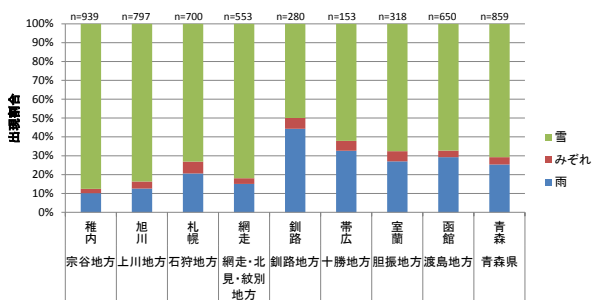


図-2 雪・みぞれ・雨の出現割合

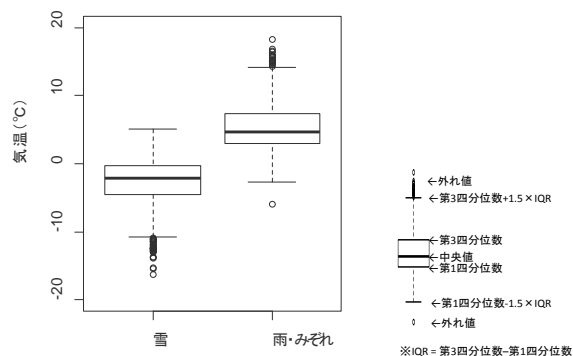


図-3 雨雪と気温との関係

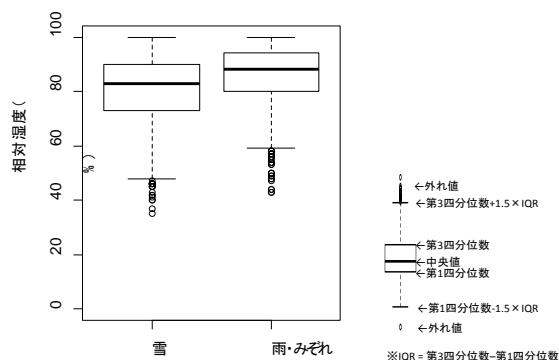


図-4 雨雪と相対湿度との関係

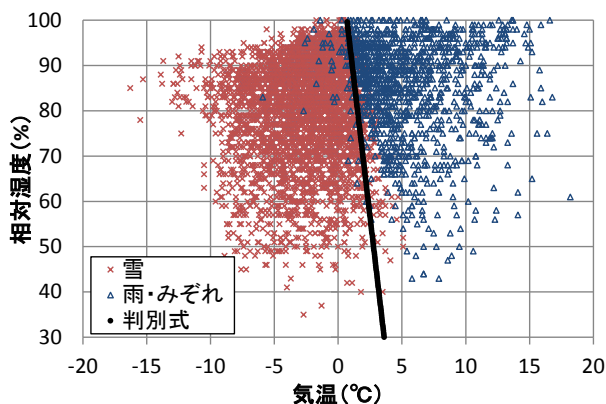


図-5 気温と相対湿度による雨雪判別条件

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

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

次に、図-5は「雪」と「雨」又は「みぞれ」と観測された事例それぞれの気温と相対湿度の関係を散布図で示した結果である。また、これらのデータを用い「雪」と「雨」又は「みぞれ」を区分する判別分析を実施した結

果、以下の式(1)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。

$$N = -0.313 \times T - 0.013 \times \phi + 1.5246 \quad \dots \text{式(1)}$$

T : 気温 (°C)

φ : 相対湿度 (%)

N : 雨雪判別得点

N ≥ 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 地吹雪発生状況に関する調査

本州での地吹雪発生条件を明らかにするため、青森県五所川原市内の風上側が開けた箇所(図-6、図-7)で、地吹雪の発生状況について調査を開始した。調査では、タイムラプスカメラ、風向風速計、温湿度計と地吹雪や降雪を判別しやすくするための黒板を図-7のとおり設置し、平成28年12月1日～平成29年3月14日の期間に観測を行った。なお、観測間隔は10分とした。

さらに平成29年3月4日までに取得した各種データを

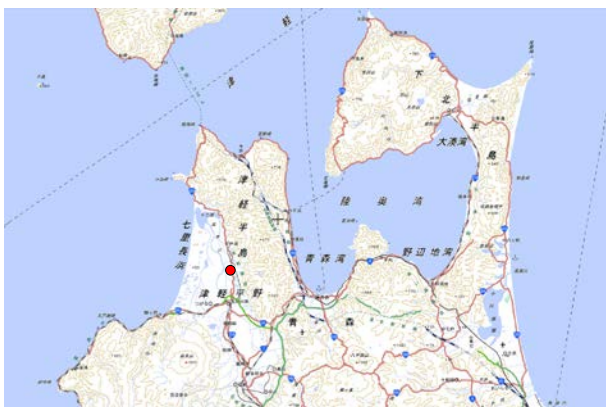


図-6 観測箇所

(国土地理院 国土地理院地図に加筆)

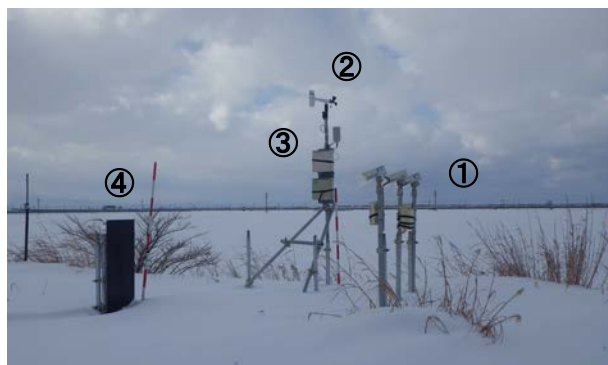


図-7 気象観測機器設置状況

(①タイムラプスカメラ、②風向風速計、③温湿度計、④黒板)

用い、降雪時の地吹雪発生の有無と風向風速や気温との関係について分析を行った。なお、降雪及び地吹雪発生の有無は10分間隔で撮影した静止画像データから読み取りにより整理を行った。

図-8は、降雪時に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, 1986)の結果<sup>5)</sup>を実線で併せて示した。

図-8より、既往研究における地吹雪が発生する気温と風速条件下でも地吹雪が発生しない事例が多く見られた(図-8の丸枠内)。これは、気温や風速の条件が同じでも、北海道よりも温暖な地域では、降雪粒子の雪質や雪面の雪質などが違うことにより地吹雪の発生する条件が大きく異なっているためと考えられる。

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

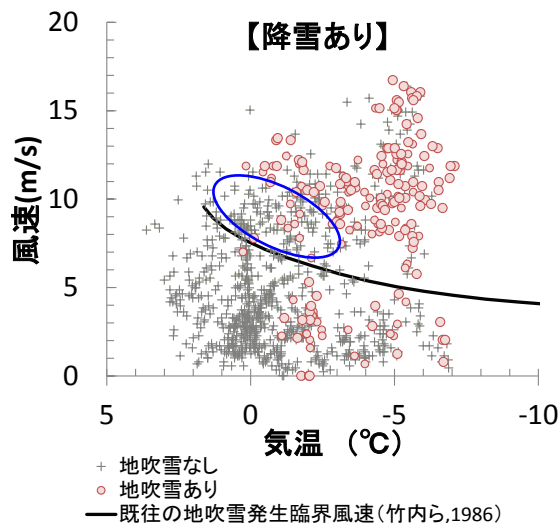


図-8 地吹雪発生有無と気温及び風速の関係

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<sup>6)</sup>において、吹雪時の視程低下は飛雪流量との相関が高いことが知られており、既往の吹雪視程障害予測技術<sup>1) 2) 4)</sup>においても、飛雪流量(g/m<sup>2</sup>/s)と目視観測による視程との実験式を用いて視程を推定している。なお、飛雪流量とは単位時間に単位断面を通過する飛雪粒子の質量である。

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

そこで、降雪形態の違いによる視程低下への影響など降雪時の視程低下メカニズムを明らかとするため、降雪時の視程調査に関する既往文献<sup>7)~13)</sup>を収集するとともに、冬期には降雪時における視程調査を開始した。

2.2.1 降雪時の視程調査概要

平成28年度冬期は、北海道石狩市、青森県青森市、新潟県長岡市の3箇所(図-9)において、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開始した(表-2)。なお、各調査箇所を設定した気象データの観測項目と視程観測時の目標物は表-3、表-4に示すとおりである。また、図-10、図-11、図-12は視程観測のため設定した目標物を降雪時に撮影した観測結果の一例を示したものである。



図-9 調査箇所  
(国土地理院 国土地理院地図に加筆)

表-2 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
	目視	2017年2月1日
青森市 (青森市スポーツ広場)	定点	- ~ -
	目視	2017年1月24日 2017年1月25日
長岡市 (防災科学研究所)	定点	2016年12月1日 ~ 2017年3月31日
	目視	2017年2月7日 2017年2月21日

表-3 視程に関する定点気象観測の項目

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

表-4 視程観測のため設定した目標物

視程区分	石狩市 (石狩吹雪実験場)		青森市 (青森市スポーツ広場)		長岡市 (防災科学研究所)	
	目標物	視程(距離)	目標物	視程(距離)	目標物	視程(距離)
50m未満	視程板1	10m	-	-	視程板1	20m
	視程板2	20m				
	視程板3	40m				
50m以上 100m未満	視程板4	60m	視程板1	50m	視程板2	85m
	視程板5	80m				
100m以上 200m未満	視程板6	100m	視程板2	100m	視程板3	135m
	視程板7	135m				
	視程板8	175m				
200m以上 300m未満	視程板9	255m	視程板3	200m	-	-
300m以上 500m未満	-	-	視程板4	250m	-	-
	-	-	水門	470m	-	-
500m以上 1000m未満	-	-	-	-	-	-
1000m以上	-	-	ビル	1000m	山(手前)	1.5km
	-	-			山(奥)	2.1km





図-10 石狩市での視程観測（撮影画像の例）

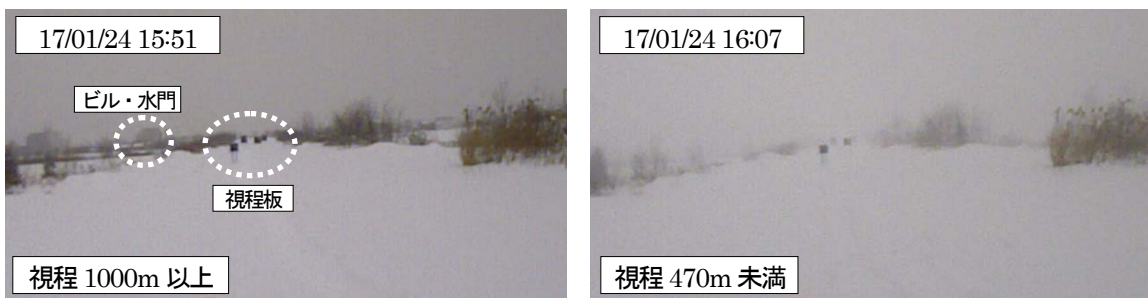


図-11 青森市での視程観測（撮影画像の例）

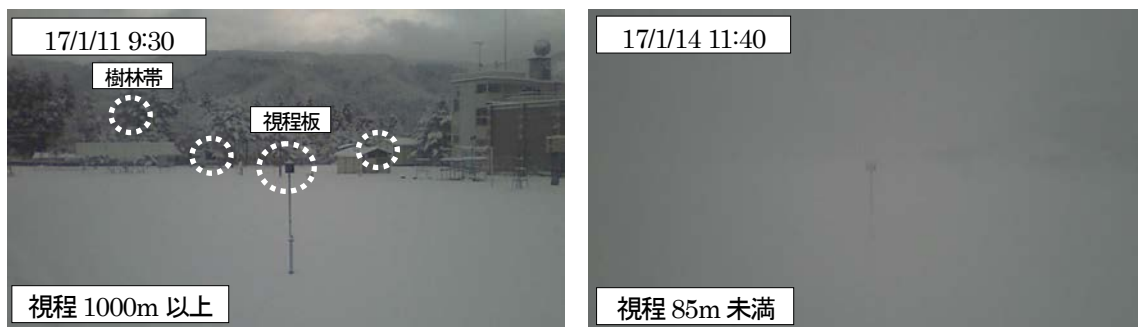


図-12 長岡市での視程観測（撮影画像の例）

今後は、次年度以降も降雪時の視程調査を継続し多様な降雪条件での調査データの収集につとめ、降雪時における視程と降雪量など気象データとの関係について分析を進めて行く予定である。

### 2.3 多様な気象環境下における吹雪視程予測技術開発

吹雪時のドライバーの行動判断を支援するため、前中期に当研究所が開発した「吹雪視程障害予測技術」<sup>2)</sup>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-13）。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-14）。

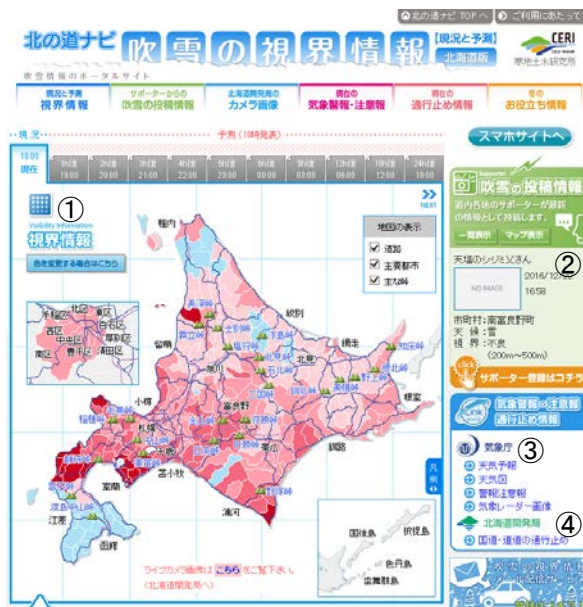


図-13 PC版「吹雪の視界情報」

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

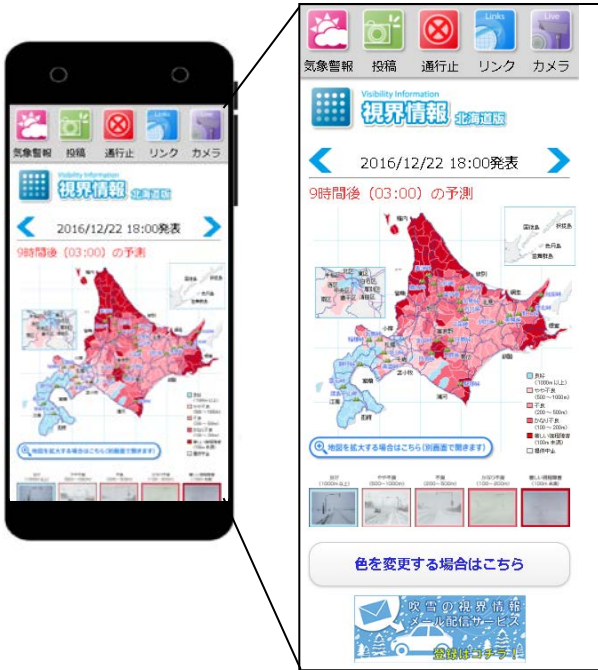


図-14 スマートフォン版「吹雪の視界情報」  
URL : <http://northern-road.jp/navi/touge/sp/fubuki.htm>  
(平成 28 年 12 月 22 日 18 時発表)

本サイトは、北海道を 221 エリアに細分化し提供している。このエリア区分は平成合併前の市町村単位を基本とし、札幌市は区単位ごととしている (図-13、図-14)。

提供情報は現況と予測であり、予測は 1~6 時間先までは 1 時間ごと、それ以降は 9、12、18、24 時間先の情報となっている (図-15)。

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<sup>14)</sup>をもとに、「著しい視程障害(100m 未満)」「かなり不良(100~200m)」「不良(200~500m)」「やや不良(500~1000m)」「良好(1000m 以上)」の 5 ランクに

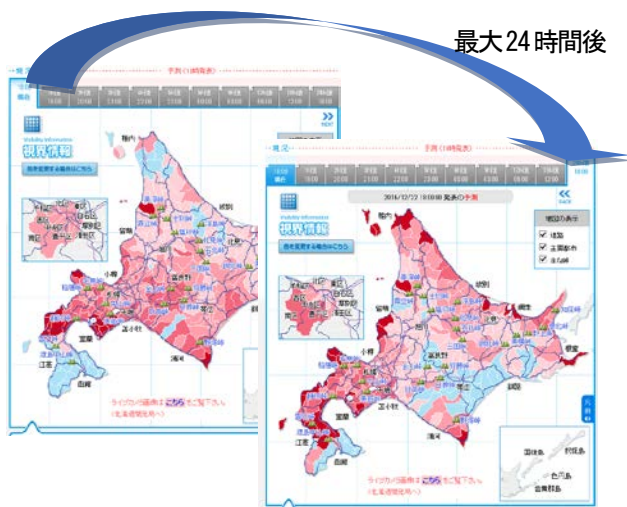


図-15 吹雪の視界情報のエリアと予測時間  
(平成 28 年 12 月 22 日 18 時発表)

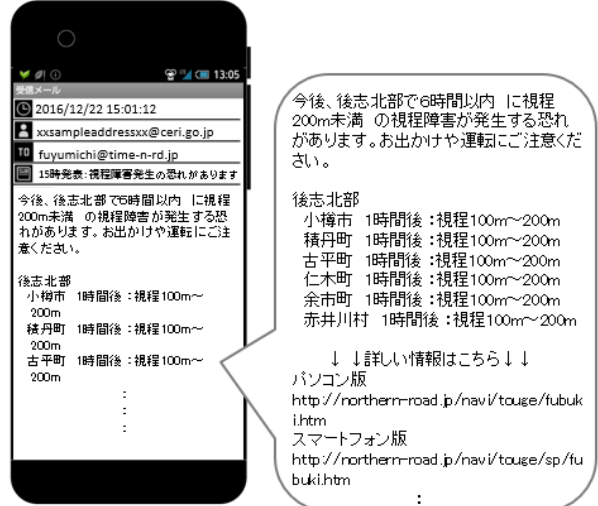


図-16 吹雪の視界情報メール配信サービス  
(平成 28 年 12 月 22 日 18 時発表)

区分し、エリアごとに色分け表示している (図-13、図-14、図-15)。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<sup>15)</sup>を登録すると、条件に合致した際に視界不良の予測結果を自動で通知するプッシュ型のサービスである (図-16)。

提供開始後、提供した内容について確認作業を行ったところ、降雪/降雨判定で現象と異なると思われる事象が発生していることが確認できた。そのときの視界情報の演算結果を図-17 に示す。北海道南部の旧大野町で視界が 100~200m となっている。気温は 2.1℃、降水量は 3~5mm/h を視界演算の入力値とした結果、降雪と判定され視程演算を行っていた。しかし、近隣の CCTV カメラで確認すると現地は雨であり、雨雪判別のエラーと考えられる。これについては、「2.1.1 雨雪判別条件に関する分析」の成果をアルゴリズムに組み込むことで予測精度の

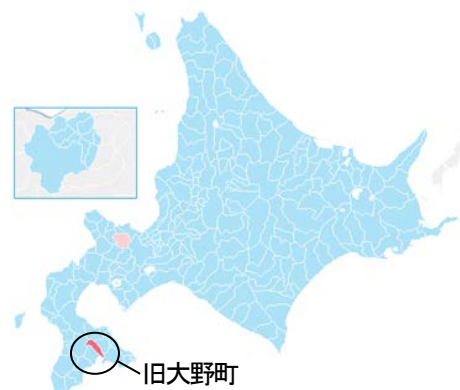


図-17 平成 29 年 3 月 29 日 9 時発表予定の演算結果

向上が期待できるため、今後取り組む予定である。

図-18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の積雪があった平成28年12月22日及び23日には、10,000件を超えるアクセス数となっている。

天候悪化時のアクセス数の増加から、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。

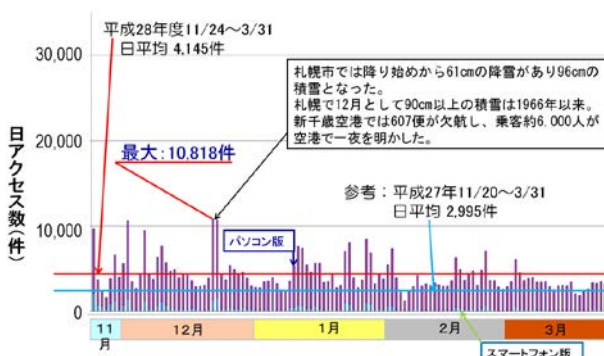


図-18 平成28年度「吹雪の視界情報」アクセス数

### 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関し、降水種別の雨雪と気温及び相対湿度との関係について分析を行うとともに、青森県で地吹雪発生状況の調査を開始した。さらに、降雪形態の違いによる視程低下への影響など降雪時の視程低下メカニズムを明らかにするため、降雪時の視程調査に関する既往文献を収集するとともに、降雪時における視程調査を開始した。

また、吹雪時のドライバーの交通行動の判断支援に向けて、吹雪時の視界予測情報をインターネットで公開した。その結果、天候悪化時にアクセス数が増加しており、交通行動判断に活用していることが伺えた。一方、雨雪判別の条件などについては改良が必要であることがわかった。

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

### 参考文献

1) 松澤勝：浮遊粒子の落下速度を考慮した吹雪時の視程推定手法改良、寒地技術論文・報告集、Vol.23、pp.400-405、2007

2) 土木研究所寒地土木研究所：平成 26 年度 重点プロジェクト研究（重点プロジェクト研究・戦略研究）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、2014

3) 大宮哲ら：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) 武知洋太ら：“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) 竹内政夫ら：降雪時の高い地吹雪の発生限界風速、昭和 61 年年度日本雪氷学会全国大会予稿集、p.256、1986

6) 武知洋太ら：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

7) 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

8) Mellor,M. : Light scattering and particle aggregation in snowstorms., J.Glaciol., 6, No44, pp.237-248., 1966

9) O'Brien,H,W. : Visibility and light attenuation in falling Snow, J. Appl. Met., 9, pp.671-683., 1970

10) 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

11) 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

12) 藤吉康志ら：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

13) 川端一史ら：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

14) 加治屋安彦ら：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

15) 國分徹哉ら：インターネットによる吹雪の視程情報提供、第 36 回交通工学研究発表会論文集、pp.579-584、2016



## 5.3 吹雪対策施設及び除雪車の性能向上技術の開発

### 5.3.1 防雪林の安定的な防雪性能確保に関する研究

担当チーム：寒地道路研究グループ（雪氷チーム）、  
技術開発調整監付

（寒地機械技術チーム、寒地技術推進室）

研究担当者：松澤勝、西村敦史、伊東靖彦、櫻井俊光（雪氷）  
住田則行、幸田勝（機械）

高玉波夫、佐藤圭洋、渡辺淳、鈴木哲（推進室）

#### 【要旨】

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

平成28年度では、下枝の枯れ上がりによる防雪性能等への影響解明を目標に、道路防雪林の防雪性能に関する現地観測、風洞実験の実験環境構築と予備実験を実施した。

キーワード：防雪、吹雪、道路、防雪林、間引き、植栽密度管理、枝下高

#### 1. はじめに

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

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

本研究は、防雪林の安定的な防雪性能を確保することを目指し、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防雪林への補助防雪対策の提案、枯れ上がりの見られる防雪林の管理手法の提案を行うものである。

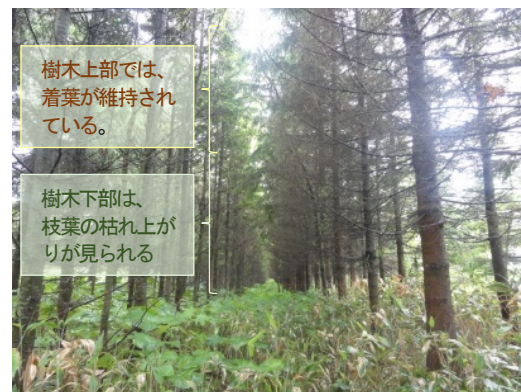


図1 防雪林内の下枝の枯れ上がり状況  
(天塩町雄信内)

平成28年度は下枝の枯れ上がりによる防雪性能等への影響解明を目標に下記(1)～(2)を行った。

- (1) 防雪林の防雪性能に関する現地観測
- (2) 風洞実験の実験環境構築と予備実験

本稿では、林帯幅が10m以上の標準林を調査したため、防雪林の標準林を単に防雪林と記す。

#### 2. 防雪林の防雪性能に関する現地観測

防雪林に求められている防雪性能は吹きだまりと視程

障害の緩和である<sup>1)</sup>。吹きだまりは吹雪による飛雪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<sup>4)</sup>で表される (式(1))。

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

飛雪流量は、風速 ( $V$ ) と単位体積当たりの雪粒子の質量 (飛雪空間密度:  $Nv$ ) の積<sup>4)</sup>で表される (式(2))。

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

そのため、視程障害と吹きだまりの緩和を評価するためには、防雪林が風を弱める効果と飛雪を減じさせる効果を明らかにする必要がある。言い換えれば、防雪林の風上と風下における風速と飛雪流量を観測することで防雪性能を評価できると考えられる。

本研究では、一般国道 40 号線沿いの天塩町雄信内防雪林で 1) 気象等の連続観測、2) 吹雪発生時における飛雪流量の観測を実施した。雄信内防雪林は、昭和 56 年に造成され、防雪林の延長は約 5km、観測した道路南西側における防雪林の林帯幅はおよそ 30m である。樹高 1m 以下の樹木を除いた観測地 (KP181.76 付近) における林帯内の樹高は平均 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 1)。

## 2. 1. 気象等の連続観測

### 2. 1. 1. 観測概要

防雪林の防雪性能を評価するため、一冬期間を通じた気象等の連続観測を実施した。連続観測は無人観測で、計測器で測定された値を自動的に記録した。観測期間は、平成 28 年 12 月 22 日から平成 29 年 3 月 18 日である。観測項目を

表 1 に、観測地点を図 2 に示す。表 1 の設置状況について、平成 27 年度から継続した観測等を既設、本年度から開始した観測等を新設とした。

平成 27 年度の観測では、風上の地点 No.1 で計測した風速や視程を基準 (分母) とし、地点 No.2, 21, 22, 3 で計測した風速や視程の値を分子として、それぞれ風速比、視程比として表現した。しかし、データ解析では基準としていた No.1 の位置より南側にある樹木 (図 2) が基準点の値に影響を与えていたことが判明した<sup>5)</sup>。そのため、平成 28 年度の観測ではより周りの影響が少ない場所を選び、

地点 No.0 を基準とした (以下、地点 No.0 を基準点とする)。

風向・風速の観測には風車型風向風速計 (ノースワン、KDC-S04)、視程の観測には視程計 (明星電気、TZE-4)、温湿度の観測には温湿度計 (ヴァイサラ、HMP155) を利用した。風向・風速は 1 秒ごと (No.21、No.22 の風向・風速は 10 秒ごと) に得られたデータを 10 分平均とした。視程は 1 秒ごとに得られたデータの 10 分中央値を用いた。さらに吹雪の状況を視覚的に把握するため、カメラ (ノースワン、KADEC21-EYE) による静止画を 1 日 3 回記録した。

表 1 気象等の連続観測項目

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



図 2 雄信内防雪林における観測地点の略図

### 2. 1. 2. 気象等の連続観測結果と考察

連続観測の一例として、平成 29 年 3 月 3 日から 3 月 6 日までの観測結果を示す。後述するように、3 月 4 日は現地観測を実施している。

各観測地点 (風上から No.2, No.21, No.22, No.3) における風速比、風上 (基準点) と風下 (No.3) の視程の変化を図 3 に示す (ここでは No.4 を除いている)。次に観測



した基準点の風向・風速の変化と各観測地点の風速比および視程の変化を時系列で述べる。

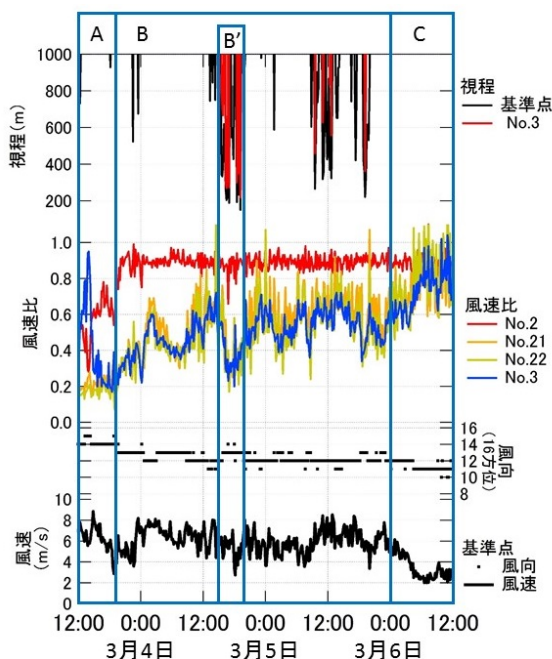


図3 3月4日～6日に吹雪が発生した時の連続気象等観測の結果

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

B: 3月3日18時～3月6日0時頃、基準点の風向が西になると、林縁・風上 (No.2) における風速が安定する。風向が防雪林に直交する時にみられる風速比の安定化は、先行研究と一致する<sup>9)</sup>。3月4日0時以降、基準点の風速は5m/s以上だった。一般的に新雪の場合、風速が5m/s以上で吹雪が発生する<sup>4)</sup>。しかし、3月4日0～12時頃まで吹雪が発生していない。これは近傍の天塩アメダスによると、3月2日から3月3日未明まで気温がプラスだったため、雪面の雪が融解再凍結して堅くなったことに加え、その後の新たな降雪もほとんどなかった (3日11時に2cmの降雪があるのみ) ため、吹雪が発生しなかったものと考えられる。

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

C: 3月6日0時以降、基準点の風速が低下すると同時に、林内 (No.21, 22) および道路側風下の林縁 (No.3) で風速比が高くなった。

以上から、風上の風向が変化すると、防雪林内と道路側の風下における風速比に変化がみられる。このように、防雪林の防雪性能を評価する上で、道路に対する風向、すなわち風が林内を通過する距離も重要な要素であることが明らかになった。なお、平成27年度に実施した研究<sup>6)</sup>でも同様の結果が得られている。

## 2. 2. 吹雪発生時における飛雪流量の観測

### 2. 2. 1. 観測概要

吹雪発生時における飛雪流量の観測の実施日は、平成29年1月11日～12日および3月4日である。ここでは3月4日13時～18時に観測した結果を示す。現地調査状況を図4に示す。図3に示した通り風向は北西から西であった。吹雪の吹走距離 (林風上の平坦地の距離) は300m程であることが衛星写真から確認できる。

飛雪流量の鉛直分布を計測するために、筒型ネット式吹雪計および箱型吹雪計を用いた。筒型ネット式吹雪計5台 (高さ2m、1m、0.5m、0.3m、0.1m) とダンス型ネット式吹雪計1台を1セットとし、2セットで観測を実施した (図4)。1セットは基準点付近に設置し、1セットは林内と道路側林縁まで移動しながら各観測地点 (No.2, No.21, No.22, No.3) に設置し、この2セットを用いて2点同時に飛雪流量の観測を行った。1回の観測時間は10分 (基本) から20分間であり、飛雪流量が十分に得られなかった場合に観測時間を延長した。筒型ネット式吹雪計の捕捉率は0.85、高さ毎に異なるダンス型ネット式吹雪計の捕捉率は、0.75 (高さ0.1m)、0.7 (高さ0.07m)、0.65 (高さ0.05m)、0.6 (高さ0.02m) とした<sup>7)</sup>。

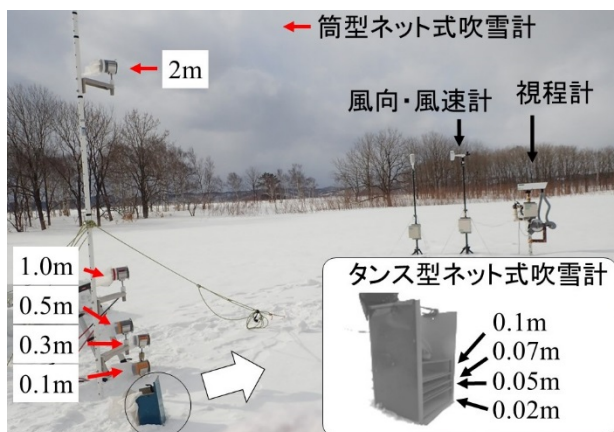


図4 基準点の飛雪流量観測状況 (3月4日9時撮影) (数字は雪面上の観測高さで、ネット部中央の高さを指す)

### 2. 2. 2. 飛雪流量の観測結果と考察

12時までは風速5m/s以上であったが吹雪の発生はな

かった。前日までの晴天で雪面が堅いことで吹雪が発生しなかったと考えられる。12 時以降に降雪がみられ、降雪を伴う吹雪が発生した。

基準点と各観測地点 (No.21, 22, 3) で飛雪流量を計測した。2m までの飛雪流量から吹雪量 (飛雪流量を高さ方向に積分した値) を計算した。基準点と各観測地点の吹雪量で比をとり、吹雪量比として算出した (図 5)。なお、風上林縁は距離 0m、風下林縁は 35m、道路は距離 40.5 ~ 50.5m に位置する。

風上と風下における吹雪量比から、下枝の枯れ上がりが見られる雄信内防雪林においても、吹雪防止効果が認められた。ただし、今回の実施期間では降雪を伴う吹雪であること、卓越風向の西風 1 風向だけの観測であることを踏まえると、今後は異なる気象条件で飛雪流量を観測することが必要と考えている。

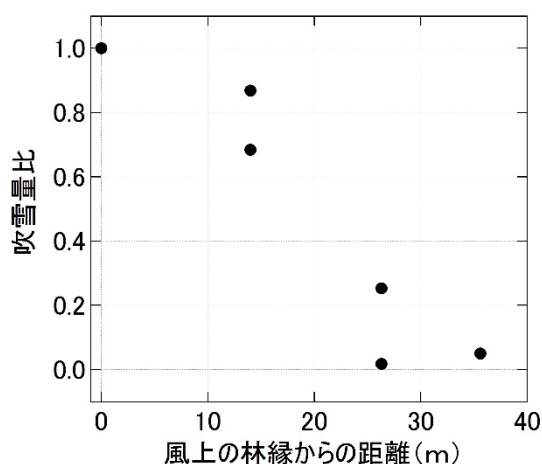


図 5 風上林縁から林内における吹雪量比

### 3. 風洞実験の実験環境構築と予備実験

防雪林の防雪機能を把握するためには、実フィールドで計測することが望ましいが、一定の条件下での防雪機能の把握、対策工法や管理手法の検討を行うことに限度がある。そこで本研究では現地観測に加えて、計測条件の設定が可能な風洞実験装置を用いて、下枝の枯れ上がりのある道路防雪林の防雪機能の把握、対策工法や管理手法の検討を行うことにした。

本研究では、防雪林の 1 区画について吹雪時における風況などを再現できるように実験環境を構築し、相関を確認した後、下枝の枯れ上がりのある道路防雪林の防雪機能の把握、対策工法の検討等を進めていく予定である。平成 28 年度は現地と高い相関を有する風洞実験環境を構築するため、現地調査に基づいた風洞実験用の防雪林モデルの製

作、風洞実験条件の検討と予備実験を行った。

#### 3. 1. 実験の対象とした林帯

風洞実験の対象地は、2. の対象と同じ一般国道 40 号天塩町雄信内の防雪林 1 測線 (KP181.76 付近) である (図 2)。対象地における冬季の卓越風向は西で、卓越風向は防雪林に対して 45 度程度の入射角である。

#### 3. 2. 実験装置

実験には寒地土木研究所の風洞実験装置 (図 6) を使用した。

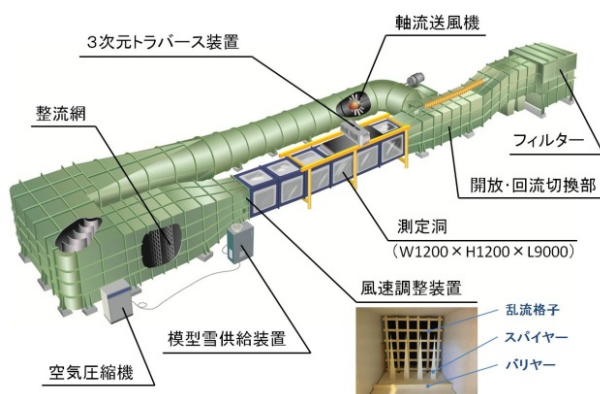


図 6 風洞実験装置

この装置の主要寸法は、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 7 参照)

#### 3. 2. 1. 防雪林モデルの検討と製作

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モデルを製作した。

防雪林モデルは、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した。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「構造物の耐風設計」<sup>8)</sup>を参考にすると、以下の (1) ~ (4) 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
- (4) 模型の対象範囲による制限

(1) について、自然風の相似は風洞実験装置の接地境界層内で満たされるため、接地境界層内に十分入るよう模型を配置する必要がある<sup>8)</sup>。なお、用いた風洞実験装置の接地境界層は下面から高さ 400 mm<sup>9)</sup>である。

(2)については一般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とされる。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る<sup>8)</sup>。

(3)につ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。

(4)については測定したい対象を測定洞内の模型で配置する必要がある。

本研究では、これらを総合的に勘案して縮尺を100分の1として、(2)は無視した。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1/100としたものは多数<sup>9)10)11)12)</sup>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した。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。地形模型のサイズは、円形状のターン部φ1188.5mm×高さ50mmであり、差替部は幅300mm×長さ1150mmである(図7)。

植栽配置は、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8)として同じパターンを模型上に繰り返し配置した。本実験では図8中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7 製作した防雪林模型

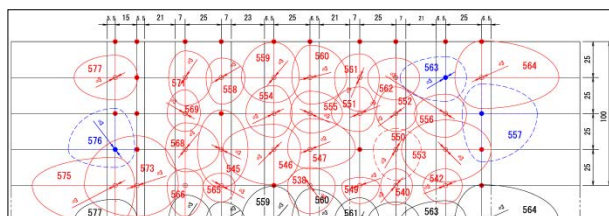


図8 植栽配置構成図

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7、図9)。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<sup>9)10)11)</sup>のあるモルトフィルター材(イノアック(株)製、MF-8、MF-13)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<sup>13)</sup>。そこで、2種類のフィルター材を用いて枝葉を造形した。常緑針葉樹では下枝の枯れ上がりが見られるが、この枯れ上がった部分にMF-8(セル数 $8 \pm 2$ 個/25mm<sup>2</sup>)を、上部にある緑色の生きた枝葉にMF-13(セル数 $13^{+3}$ 個/25mm<sup>2</sup>)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。

モルトフィルターを用いた風洞実験による既往研究<sup>11)</sup>において、林風下の風速比が現地観測に比べ低い結果であった。そこで、本実験では樹木模型の造形において図9に示すとおり枝葉部分についてモルトフィルターの厚み4mm毎に2mmの空隙を設けて、通気を確保する積層構造とした。

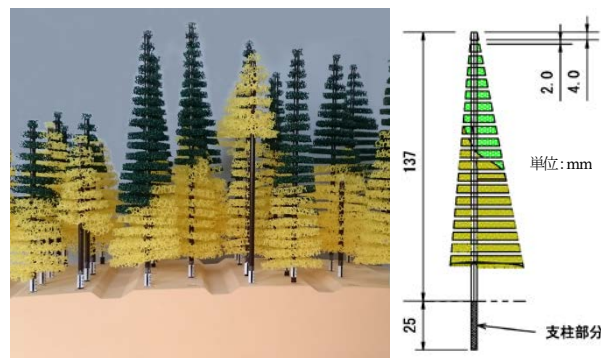


図9 樹木模型

### 3. 3. 実験方法

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

#### 3. 3. 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0.15<sup>14)</sup>)に近似するよう、気流を調整した<sup>9)</sup>。

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4.5m/s前後(地面からの高さH=50mm)<sup>15)</sup>を参考に、風速7m/s(但しH=400



mmでの風速)とした。

防雪林模型は、2. の現地観測において卓越風向であった西からの風を再現するよう、測定洞内のターンテーブル上に模型を配置した(図7)。

### 3.3.2 計測方法

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

計測は、2. で記した、固定観測を行った4地点(防雪林の風上側の基準点(No.0に相当)から風下側の道路法尻の地点No.4まで)のほか、道路上の風速分布の把握を目的として、道路上の2地点(2車線道路の各車線上)を追加し、計6地点で行った。計測点の位置を図10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10)に設定した。

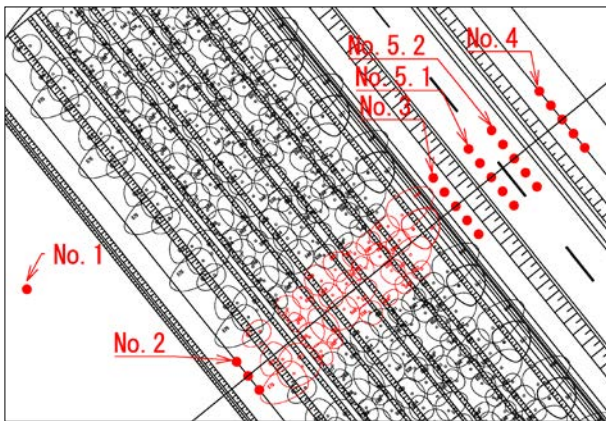


図10 風速計測点位置図

### 3.3.3 現地観測データの処理

現地観測の風速比の算出には、2. で述べた観測期間(平成28年12月22日~平成29年3月18日)における風向・風速の観測結果から、西の風向を抽出して平均化したものを用いた。なお、基準点で観測された風向・風速は、高さ3mである。基準点の高さ1mと7mの風速を対数則

で計算し、これを基準(分母)として道路側風下No.3の風速(分子)を風速比として表現した。

### 3.4 実験結果

計測点横断方向の風速比(現地・風洞)を図11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と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。

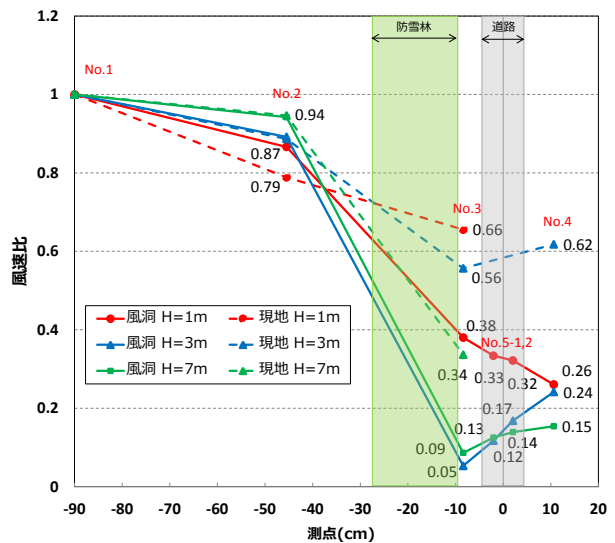


図11 計測点横断方向の風速比(風洞・現地)

一方、道路防雪林の風下側直下の地点No.3の風速比は、風洞実験では現地観測に比べ高さによらず低い値となった。また、現地観測と比較した風速比は、高さ1mで約1/2、3mで約1/11、7mでは約1/2.6と低く、特に高さ3mでの乖離が大きい。

道路風下側法尻近傍の地点No.4の風速比は、現地観測が

3mのみであるが、風洞実験では現地観測に比べて低い値を示した。

### 3. 5. まとめと今後の課題

平成28年度は、現地と高い相関性を有する風洞実験環境を構築するため、現地調査に基づいて防雪林を再現した風洞実験模型の製作、実験条件の検討と予備実験を行った。

その結果、現地観測に比べて風洞実験の風速比は、全体の傾向に概ね再現できたものの、特に防雪林風下での風速比の値が小さく、乖離が見られた。

これは、風洞実験の林帯を構成する樹木模型の枝葉部分の密度が高かったためと考えている。地点No.3以降の防雪林風下側における風速比の相関を高めるために模型の修整を含めた調整が必要と考えられるので、今後取り組んでいきたい。

### 4. 今後に向けて

平成29年度は引き続き防雪林の構成要素と防雪性能の現地調査による課題抽出、および風洞実験の実施に取り組む予定である。

### 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および羽幌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(平成23年版), 2011.
- 2) 伊東靖彦：防雪林の課題について—雪氷研究大会(2009・札幌)の企画セッションにおける討議を基に—, 日本雪工学会誌, 26, pp.9-15, 2010.
- 3) 竹内政夫, 石本敬志, 野原他喜男：吹雪量と飛雪量垂直分布, 雪氷, 37 卷3号, pp.114-121, 1975年.
- 4) 松沢勝, 加治屋安彦, 竹内政夫：風速と降雪強度から吹雪時の視程を推定する手法について, 北海道開発土木研究所月報, 593, pp.20-27, 2002.
- 5) 櫻井俊光, 伊東靖彦, 渡邊崇史, 松澤勝：防雪林における風速の変化に関する研究, 寒地技術論文・報告集, 32, pp.102-104, 2016.
- 6) 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 32<sup>nd</sup> International Symposium on Okhotsk Sea & Polar Oceans*, 2017.

- 7) 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.
- 8) (社)日本鋼構造物協会(編), 構造物の防風工学, p.616, 1997.
- 9) 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24年度成果報告書, 2013.
- 10) 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, No.25, pp.85-88, 2006.
- 11) 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, No.26, 21-24, 2007.
- 12) 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, p.40, 2016.
- 13) イノアックコーポレーション: モルトフィルター技術資料.
- 14) 財団法人日本建築センター：実務者のための建築物風洞実験ガイドブック, 2008.
- 15) 老川進, 苫米地司, 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, Vol.23, pp.13-32, 2007.

### 5.3.2 防雪柵の端部・開口部対策に関する研究

担当チーム：寒地道路研究グループ（雪氷チーム）、  
技術開発調整監（寒地機械技術チーム）

研究担当者：松澤勝、伊東靖彦、小中隆範、櫻井俊光(雪氷)  
住田則行、幸田勝(機械)

#### 【要旨】

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

平成 28 年度は視程障害移動観測車による現地観測と風洞実験に用いる縮小模型の製作を行った。現地観測の結果、斜風の場合に開口部付近では視程が低下しやすい傾向にあり、また開口部より風下側へのエンドエフェクトの影響範囲が大きくなる傾向が見られた。

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

#### 1. はじめに

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

平成 28 年度においては、(1) 視程障害移動観測車による移動気象観測、(2) 風洞実験に用いる縮小模型の製作を行った。

#### 2. 防雪柵端部・開口部における視程急変メカニズムの解明

防雪柵端部や開口部における視程急変メカニズムを解明するにあたっては、風の収束に伴う飛雪によって局所



図-1 位置図

的な視程障害（以下、エンドエフェクトという）が発生した時の条件（防雪柵周辺の地形条件、気象条件等）を整理し、把握することが重要である。そこで現道の防雪柵設置区間において、移動気象観測を行った。

##### 2.1 視程障害移動観測車による移動気象観測

一般国道 231 号および一般国道 337 号の吹き止め式防雪柵が設置されている区間（図-1）において、視程障



## 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

害移動観測車（図－2）を用いて平成29年1月～2月の吹雪発生時に移動気象観測を行った。区間内には防雪柵の開口部が、合わせて17区間存在する。

視程障害移動観測車には、ビデオカメラ、前方散乱型視程計(TZF-31A)、超音波式風向風速計(PGWS-100-3)、温度計(R003-1YRP631)、GPS センサー(M12P/10S)、ブレーキ踏力計、アクセル踏量計およびハンドル操舵角計が搭載されている。この視程障害移動観測車を用いて道路上の防雪柵設置部、防雪柵端部、防雪柵開口部の視程急変画像取得と、それに対応した気象状況等の観測を行った（表－1）。データ取得間隔は0.1秒である。また、ハンドル操舵角は直進時におけるハンドルの舵角 0° に対する左右の舵角を示す。移動気象観測は観測ドライバーと調査員の2名により行い、その属性は表－2に示すとおりである。

表－1に示した観測条件に基づき、防雪柵設置区間の前後も含め観測した。そのうち、運転挙動に影響を及ぼすとされる最低瞬間視程が200m未満のデータを抽出したものが表－3である<sup>1)</sup>。



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、ブレーキ踏力、ハンドル操舵角
記録間隔	0.1秒
観測方法	ビデオカメラ、気温計、風向風速計、視程計、GPSセンサーを搭載した視程障害移動観測車1台を用い観測する。
観測箇所	図－1 ※同一区間を様々な気象条件で繰り返し観測するものとする。
観測回数	平成29年1月上旬～平成29年3月上旬で地吹雪による視程障害の発生が予想される3イベント。 ※データの比較が行えるように各箇所2回以上観測するものとし、合計21箇所以上観測するものとする。また、観測データには視程200m未満のデータを含むこととする。

表－2 観測ドライバーと調査員の属性

氏名	性別	年齢	冬期間の運転頻度	視力	備考
観測ドライバー(A)	男	34	2日に1回程度	1.2	裸眼
観測ドライバー(B)	男	46	2日に1回程度	1.0	裸眼
調査員(A)	男	44	週1回程度	1.0	裸眼
調査員(B)	男	43	2日に1回程度	1.0	矯正

表－3 移動気象観測の観測日と観測区間  
(最低瞬間視程が200m未満の事例)

区間	路線番号	上り/下り	KP	観測日時		最低瞬間視程(m)
①	R231 石狩市	下り	22.50 ~ 24.00	2017/1/12	12.33 ~ 12.34	98
		下り	22.00 ~ 24.00	2017/1/28	9.35 ~ 9.39	73
		上り	24.00 ~ 22.00	2017/1/28	10.45 ~ 10.49	60
		下り	22.00 ~ 24.00	2017/1/28	10.59 ~ 11.04	47
		上り	24.00 ~ 22.74	2017/1/28	12.03 ~ 12.06	37
②	R231 石狩市	上り	28.00 ~ 26.00	2017/1/28	10.38 ~ 10.42	56
		下り	26.00 ~ 28.00	2017/1/28	11.08 ~ 11.12	33
		上り	28.00 ~ 26.00	2017/1/28	11.56 ~ 12.00	66
③	R231 石狩市	下り	31.70 ~ 32.50	2017/1/28	9.54 ~ 9.56	165
		上り	32.30 ~ 31.70	2017/1/28	10.28 ~ 10.29	81
		下り	29.76 ~ 32.53	2017/1/28	11.16 ~ 11.22	26
		上り	32.50 ~ 30.84	2017/1/28	11.45 ~ 11.50	111
④	R231 石狩市	上り	35.30 ~ 33.70	2017/1/12	12.53 ~ 12.55	181
		下り	33.70 ~ 35.40	2017/1/28	9.57 ~ 10.00	34
		上り	35.00 ~ 33.00	2017/1/28	10.22 ~ 10.26	26
		下り	33.70 ~ 35.40	2017/1/28	11.25 ~ 11.28	57
		上り	35.00 ~ 33.00	2017/1/28	11.40 ~ 11.44	36
		下り	33.70 ~ 35.40	2017/1/28	15.31 ~ 15.33	194
		上り	35.00 ~ 33.00	2017/1/28	15.51 ~ 15.54	167
⑤	R231 石狩市	下り	37.00 ~ 38.00	2017/1/28	10.03 ~ 10.06	26
		上り	38.00 ~ 37.00	2017/1/28	10.16 ~ 10.18	40
		下り	37.00 ~ 38.00	2017/1/28	11.31 ~ 11.33	126
		下り	37.00 ~ 38.00	2017/1/28	15.36 ~ 15.38	196
⑥	R337 石狩市	下り	84.65 ~ 86.00	2017/2/1	23.10 ~ 23.14	41
		上り	86.00 ~ 84.00	2017/2/1	23.15 ~ 23.20	37
		下り	84.00 ~ 86.00	2017/2/1	23.23 ~ 23.29	41
		上り	86.00 ~ 84.00	2017/2/1	23.30 ~ 23.36	26
		下り	84.00 ~ 86.00	2017/2/1	23.38 ~ 23.42	26
		上り	86.00 ~ 84.00	2017/2/1	23.43 ~ 23.48	26
⑦	R337 当別町	上り	76.87 ~ 70.63	2017/2/1	20.27 ~ 20.39	88
		上り	77.56 ~ 70.00	2017/2/1	21.50 ~ 22.03	80
		下り	70.00 ~ 77.10	2017/2/1	22.18 ~ 22.31	43
		上り	77.00 ~ 71.14	2017/2/1	22.34 ~ 22.44	33
		下り	71.00 ~ 77.00	2017/2/1	22.46 ~ 22.57	28

### 2.2 視程障害移動観測車による観測結果

ここでは前出の表－3から抽出した、エンドエフェクトの影響が見られた開口部の2観測事例について記述する。観測事例1は開口部が広い事例、観測事例2は狭い事例である。図－3、図－5は観測した防雪柵開口部の詳細図および視程、風向風速、移動平均視程の観測結果である。詳細図には道路上の吹きだまりおよび積雪範囲も示している。

視程については、移動平均視程を「10m移動平均（観測点の前後5mの範囲における平均値）」として算出した。赤線は開口部左右にある防雪柵設置区間（開口部除く）

の平均視程である。開口部以外の平均視程と全体の移動平均視程を比較した時に、移動平均視程が下回っている箇所がエンドエフェクトの影響範囲といえる。図-4、図-6には移動観測時の道路状況を進行方向順に示した。

2.2.1 観測事例1 (一般国道231号 観測区間①)

観測事例1 (観測日 2017年1月28日 10時45分) (図-3)の観測区間は、丘陵地にある上下2車線道路で風

上側に300m以上の平坦地があり、吹走距離が長い箇所である。観測時は降雪があった。

防雪柵開口部(22m)の道路終点側では風速13m/s前後の西風が吹き込み、防雪柵に対して斜風となっているため(青矢印①)、開口部より風下側まで路面上の雪が道路全幅で吹き払われており、舗装面が露出している(図-4)。

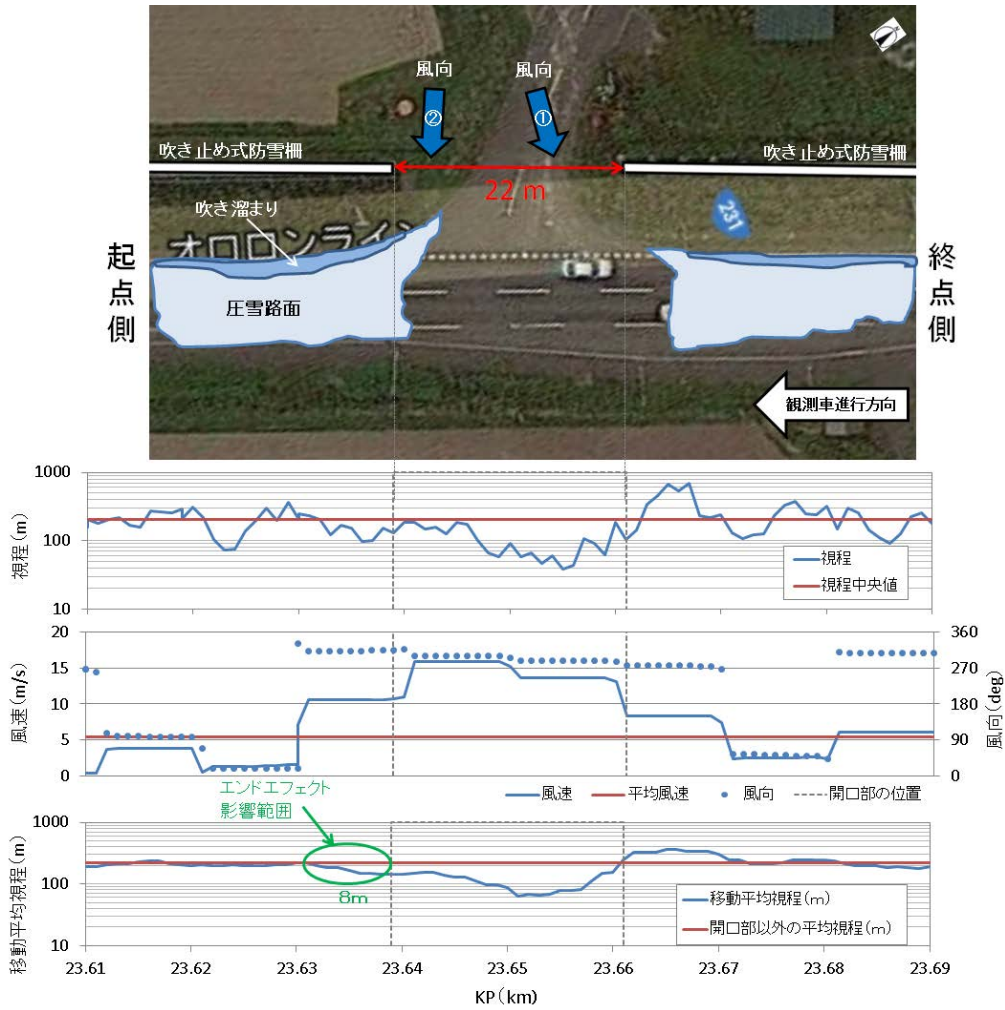


図-3 観測事例1 (観測日 2017年1月28日 10時45分)  
(上: 平面図、下: 気象観測結果)

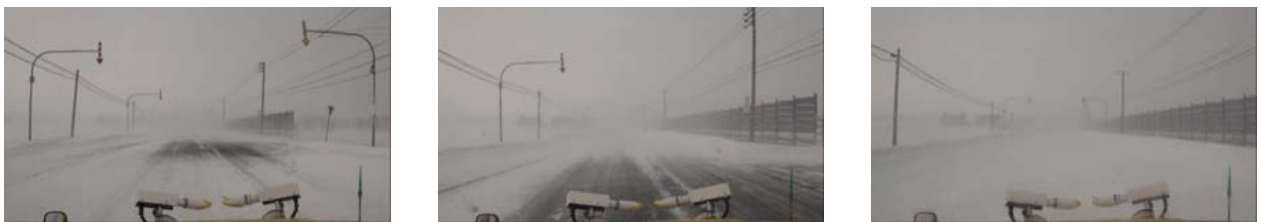


図-4 観測時の道路状況 (観測事例1)  
(左: 開口部手前、中: 開口部、右: 開口部通過後)



## 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

防雪柵開口部の道路起点側では風速 15m/s 前後の北西風が吹き込み、防雪柵に対してほぼ直角であるため(青矢印②)、道路上の雪は開口部とほぼ同じ位置で吹き払われている。移動平均視程が開口部を含まない平均視程を

下回っている区間は開口部の前後で最大で 8m 程度 (図-3 下の緑丸部分) となっており、そこまでエンドエフェクトの影響が見られる。視程は開口部から離れた区間に比べ悪くなっており、風速も大きくなっている。

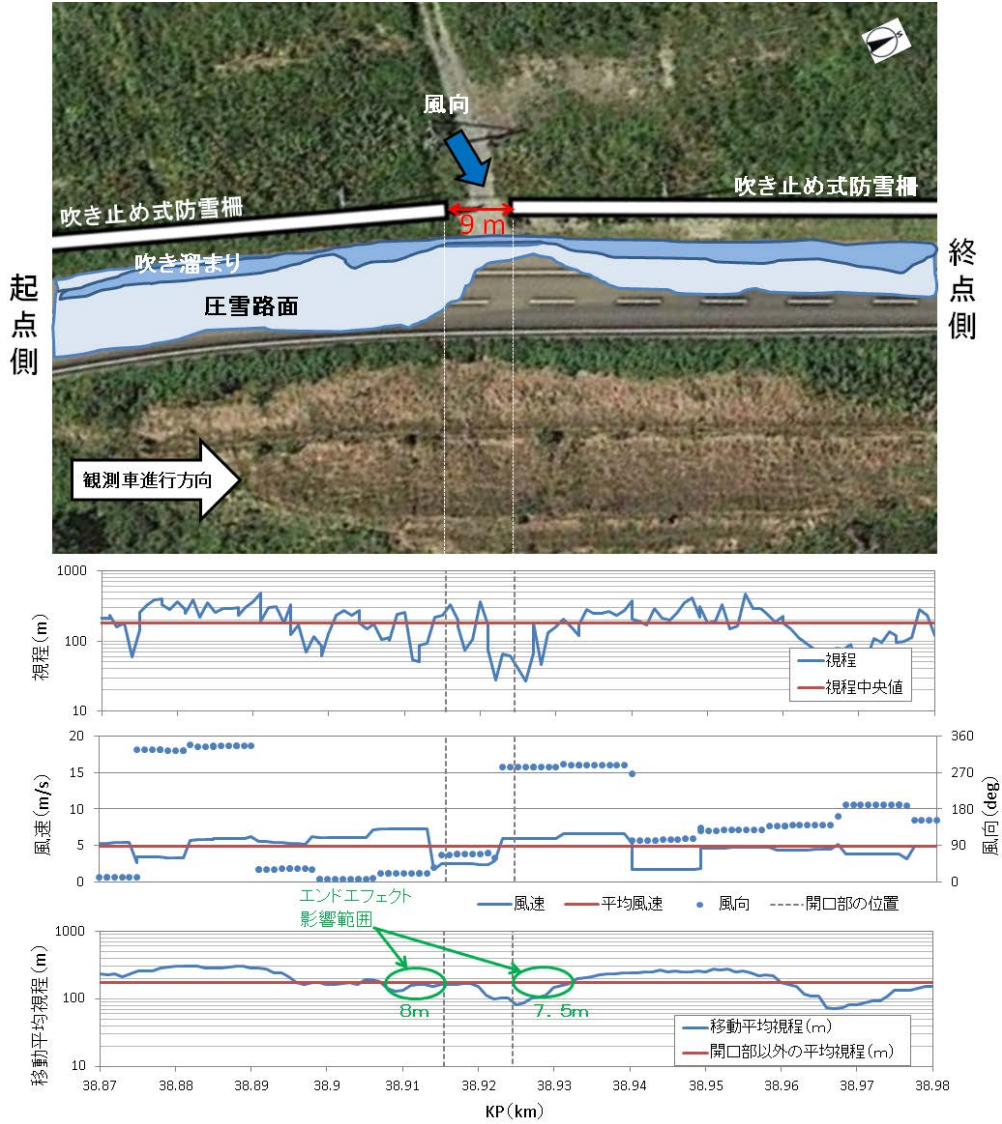


図-5 観測事例2 (観測日 2017年1月28日9時55分)  
(上: 平面図、下: 気象観測結果)



図-6 観測時の道路状況 (観測事例2)  
(左: 開口部手前、中: 開口部、右: 開口部通過後)

### 2.2.2 観測事例2 (一般国道231号 観測区間⑤)

観測事例2 (観測日 2017年1月28日9時55分)  
 (図-5)の観測区間は、海岸沿いの上下2車線道路で、風上側に100m程度の平坦地があり、比較的吹走距離が短い箇所である。観測時は降雪があった。

防雪柵開口部(9m)では風速6m/s前後の西風が吹き込み、防雪柵に対して斜風となっている(図-5の青矢印)。開口部より風下側に位置する道路上の雪が吹き払われており、舗装面が露出している(図-6)。移動平均視程が開口部を含まない平均視程を下回っている区間は開口部の前後で最大で8m程度(図-5下の緑丸部分)となっており、そこまでエンドエフェクトの影響が見られる。同区間では開口部から離れた区間と比べ視程の悪化が見られる。

## 3. 視程急変箇所の緩和対策効果の解明

### 3.1 移動気象観測

2.1で述べた移動気象観測区間(図-1)には、端部(開口部)対策(図-7)が行われている14箇所が含まれている。

2.1で示した移動気象観測では、同時にこれらの対策箇所のデータも取得した。



図-7 開口部対策として調査区間に設けられている副防雪柵

### 3.2 風洞実験に用いる縮小模型の製作

防雪柵端部や開口部における視程急変箇所の状況を把握するためには、実フィールドで計測することが望ましいが、吹雪時に移動し計測することは困難であり、危険をとまなう。そこで、一定の条件下での視程急変箇所の状況を把握するとともに、対策工法の検討を行うため、計測条件の設定が可能な風洞実験装置を用いて、防雪柵端部や開口部における視

程急変の状況の把握、対策工法の検討を行うこととした。

平成28年度は、現道において防雪柵の開口部の対策が実施された箇所の設置状況に基づき、風洞実験用の縮小模型の製作を行った。

縮小模型は、防雪柵模型を設置する水平な地形模型と地形模型上に設置する防雪柵模型で構成した。

模型の縮尺は、道路周辺における防雪対策施設(防雪柵・防雪林)を含めた風洞実験で実績<sup>4~8)</sup>のある縮尺1/100とした。

防雪柵模型は、2.1で防雪柵の開口部の対策が行われている一般国道337号の柵形式、対策を参考に再現した。

- ・防雪柵の形式:吹止柵(H=5.0m)<sup>3)</sup>
- ・開口幅のパターン: 5m、7m
- ・副防雪柵のパターン(L=3m、6m、9m)



図-8 製作した開口部対策防雪柵模型  
 (吹止柵 H=5m)

## 4. まとめ

防雪柵端部や開口部における吹雪時の視程急変メカニズムや、車両の走行に影響を与える視程急変の特徴は解明されていないことから、本研究では、視程急変メカニズムの解明に向けて、まずは実態を把握するべく、視程障害移動観測車による現地観測を行った。

防雪柵開口部において、直交風と比べて斜風の場合には、防雪柵開口部より風下側の道路上の雪が吹き払われる傾向にあった。同様に斜風の場合に防雪柵開口部より風下側の視程が悪化しやすい傾向であった。既往研究<sup>2)</sup>にも見られるが、開口部におけるエンドエフェクトは20m以下であった。また、開口部の幅が小さい場合の方が吹きだまりが広く発生する傾向が見られた。

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

また風洞実験については、平成 28 年度は現道における防雪柵の開口部の対策の設置状況に基づき、風洞実験用の防雪柵模型の製作を行った。

次年度以降、これを用いた防雪柵の防雪柵端部や開口部における視程急変の状況の把握、対策工法の検討を行う予定である。

### 参考文献

- 1) (独) 土木研究所寒地土木研究所：道路吹雪対策マニュアル（平成 23 年改訂版）、2011
- 2) 福澤義文・加治屋安彦・畠山祐司：防雪柵端部付近における視程障害と対策、日本道路会議論文集 24 号、pp.358-359、2001
- 3) 国土交通省北海道開発局：北海道開発局道路設計要領第 6 集 標準設計図集、2016
- 4) 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、No.25、pp.85-88、2006
- 5) 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、No.26、pp.21-24、2007
- 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 24 年度成果報告書、2013
- 7) 国立研究開発法人土木研究所：防雪林の機能向上に関する研究、平成 27 年成果報告書、2015
- 8) 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、p.40、2016

### 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：大槻敏行、牧野正敏、高本敏志、三浦豪、村上和也

#### 【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。車線逸脱防止技術では、GNSSの測位精度が低下する箇所の対策としてRFIDを用いた位置測位実験を行い、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。また、周囲探知技術では、市販車用ミリ波レーダを用いて探知実験を行い、吹雪時を想定したレーダ前面に雪が付着した状態でも、車両の探知が可能であることを確認した。ただし、人がしゃがんだ状態や腹ばいの状態、車両に雪が堆積した状態では、検出できない場合があった。

キーワード：除雪車、除雪作業、周囲探知、位置情報、RTK-GNSS、ミリ波レーダ、RFID

#### 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)」<sup>1)</sup>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)」<sup>2)</sup>において積雪寒冷地特有の災害等に対応する高機能除雪車の開発等が求められている。

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

#### 2. 車線逸脱防止技術の検討

##### 2.1 VRS-GNSSにおける積雪による影響の検証

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方式のネットワーク型RTK-GNSS（以下、VRS-GNSS）を使用し、積雪による影響を検証した。

##### 2.1.1 実験方法

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

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

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

機器構成を図-1に示す。

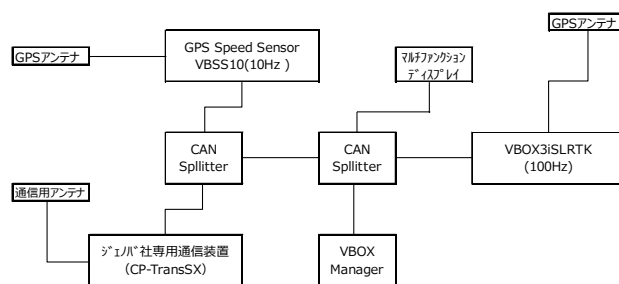


図-1 機器構成

##### 2.1.2 実験結果

積雪による測位の変化を図-2に示す。

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

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



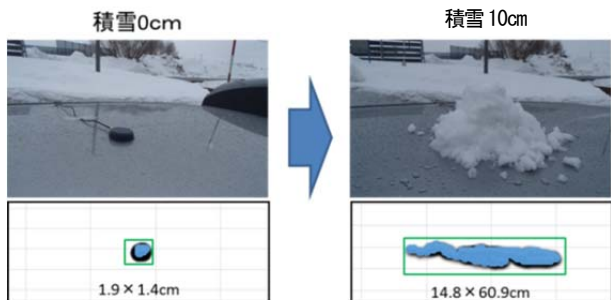


図-2 アンテナ部の積雪による測位の変化

## 2. 2 RFIDの電波検出実験

トンネル出口や橋梁高架下など、GNSSの測位精度が低下する箇所における、補助的な測位方法を検討した。比較的安価で調達可能、小型・薄型で取り扱いが容易、舗装への埋め込みも可能なことからRFID<sup>※1</sup>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）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DOTR-920J（東北システムズ・サポート社製）のUHF帯リーダを使用した（写真-2）。電波特性は円偏波方式である。

RFIDタグを舗装内に埋設することを想定し、直径41.5cm深さ10cmのプラスチック製トレーの内側底面にRFIDタグを貼り付け（写真-3）、厚さが5cmになるようAs常温合材を入れて締め固めた。

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

験を行った。



写真-1 RFIDタグ（パッシブタグ）



写真-2 読取装置（UHF帯リーダ）

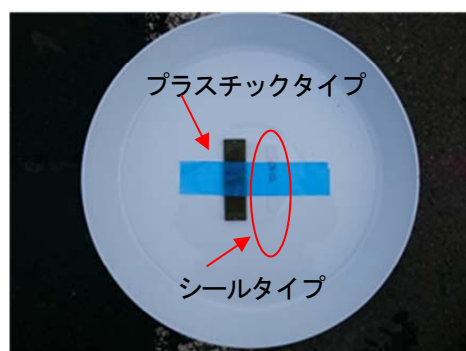


写真-3 トレーの内側底面へのRFIDタグ貼付状況

実験は、寒地土木研究所苫小牧寒地試験道路で実施した。

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

なお、リーダは、RFIDタグに向けてスタッフに取り付け、実験車両に搭載した。

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

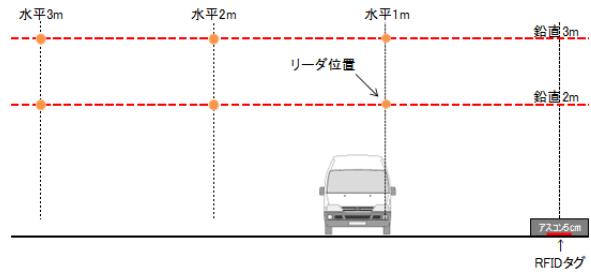


図-4 実験概略図



写真-4 実験状況

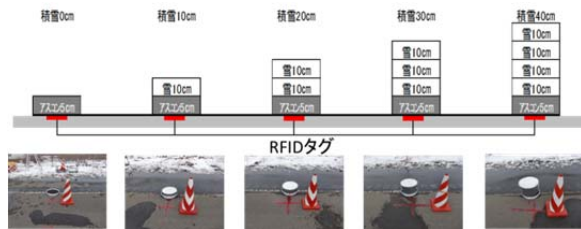


図-3 積雪状況再現概略図

2. 2. 2 実験結果

表-2 に実験結果を示す。

実験の結果、反射波 (マルチパス) の影響により、電波の検出が不安定な状況はあったが、リーダの送信出力が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	×	-67	-68	-73	-66	×	-70	-64	-67	-69	×	×	×	×
			・10km/h	-71	×	-63	-67	-63	-69	×	-63	-65	-62	×	×	×	×	×
			・20km/h	×	×	-70	-68	-68	-68	×	-64	-69	-64	×	×	×	×	×
	・30km/h	×	×	-66	-74	-65	-64	×	-70	-64	×	×	×	×	×			
	3.0	1W	水平距離 (m)	1.0					2.0					3.0				
			リーダ角度 (°)	72					56					45				
			積雪状況	0cm	10cm	20cm	30cm	40cm	0cm	10cm	20cm	30cm	40cm	0cm	10cm	20cm	30cm	40cm
			・車両停止時	×	×	×	-63	-73	×	×	-75	-66	-80	×	×	×	×	×
			・10km/h	×	×	-70	-58	×	×	×	-63	-60	-69	停止時が未検出のため省略				
・20km/h			×	×	-64	-66	×	×	×	-64	-74	-70	停止時が未検出のため省略					
・30km/h	×	×	-68	-71	-74	×	×	-66	-67	-77	停止時が未検出のため省略							
シールタイプ	2.0	1W	水平距離 (m)	1.0					2.0					3.0				
			リーダ角度 (°)	63					45					34				
			積雪状況	0cm	10cm	20cm	30cm	40cm	0cm	10cm	20cm	30cm	40cm	0cm	10cm	20cm	30cm	40cm
			・車両停止時	-68	-73	-76	-70	-70	-71	-76	-75	-70	-76	-76	-78	×	-78	×
			・10km/h	-75	-72	-78	-68	-69	-73	-70	-72	-73	×	×	-76	×	×	×
			・20km/h	-81	-75	-69	-80	-71	-76	×	×	-72	×	×	×	×	×	×
	・30km/h	-76	-73	-73	-70	-64	-72	-75	×	-67	×	-80	×	×	×	×		
	3.0	1W	水平距離 (m)	1.0					2.0					3.0				
			リーダ角度 (°)	72					56					45				
			積雪状況	0cm	10cm	20cm	30cm	40cm	0cm	10cm	20cm	30cm	40cm	0cm	10cm	20cm	30cm	40cm
			・車両停止時	-73	×	-73	-70	-68	-73	-76	-75	-73	×	×	×	×	×	
			・10km/h	-70	×	-70	-70	-73	-73	-77	×	×	×	停止時が未検出のため省略				
・20km/h			-75	×	-75	-70	-79	×	×	-72	-75	×	停止時が未検出のため省略					
・30km/h	-81	-75	-73	-70	-73	×	×	×	×	×	停止時が未検出のため省略							

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

## 2.3 RFIDによる自車位置測位実験

2.2.2 実験結果より電波の検出が可能であったため、RFIDを用いた自車位置測位について、TDOA方式<sup>※2</sup>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Ⅰ（図-5）と道路上を想定した実験Ⅱ（図-6）を行った。

交差点を想定した実験Ⅰ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Ⅱ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）。

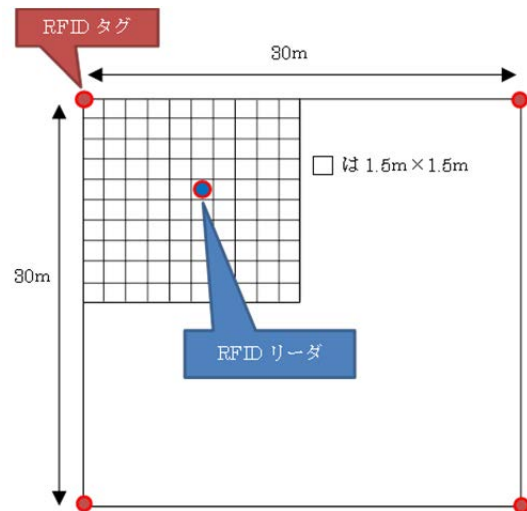


図-5 実験Ⅰ計測エリア図

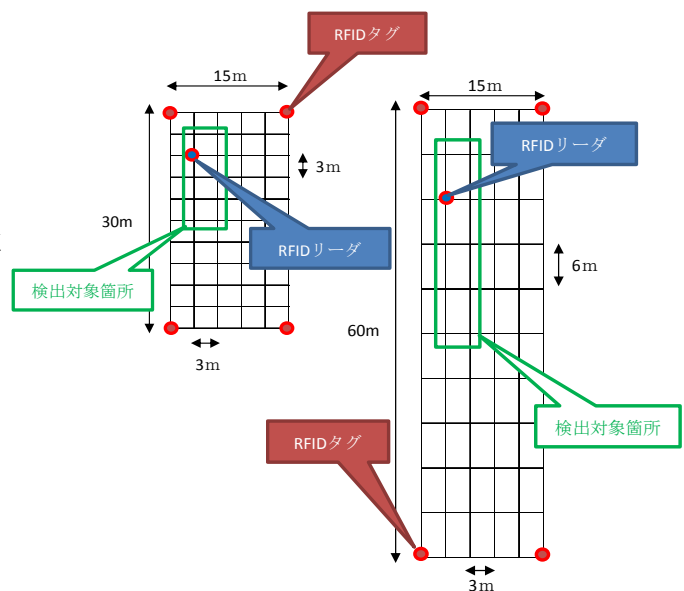


図-6 実験Ⅱ計測エリア図

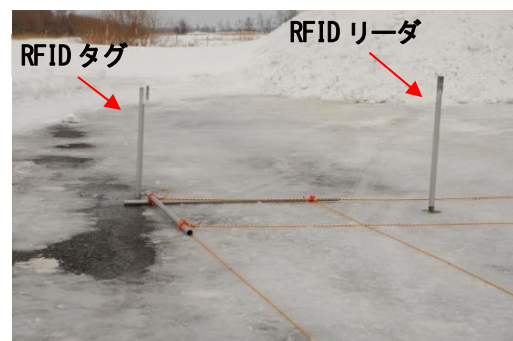


写真-6 実験Ⅰ計測状況

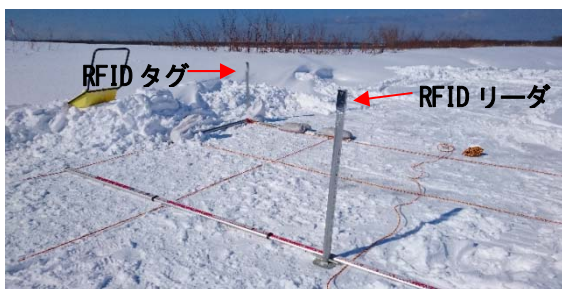


写真-7 実験II計測状況

差は大きくなり、縦断方向に24m以上離れると計測不能となった。

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

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

## 2.3.2 実験結果

実験Iの計測結果を図-7に示す。

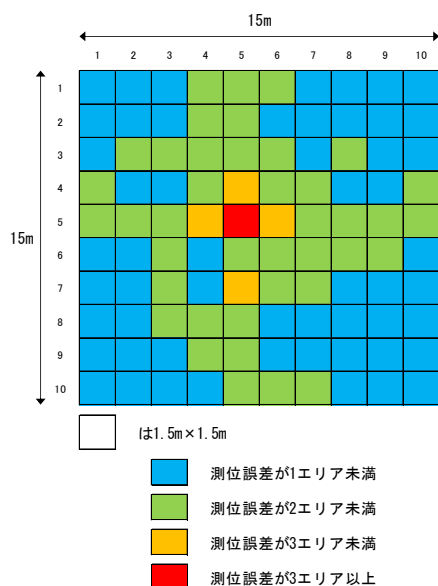


図-7 実験I計測結果

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II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

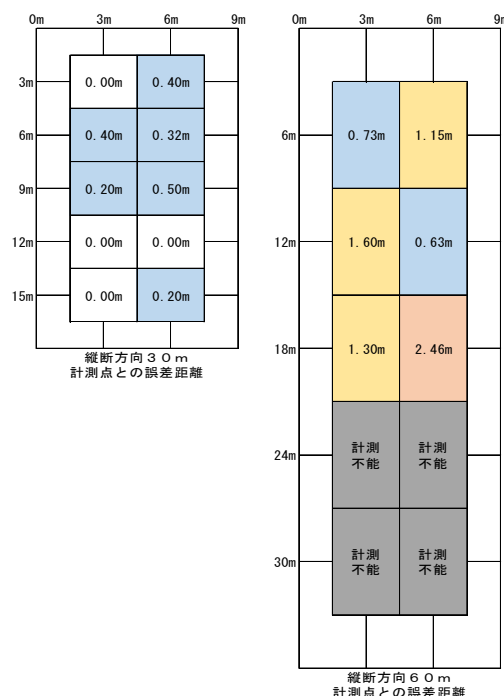


図-8 実験II計測結果

## 3. 周囲探知技術の検討

### 3.1 ミリ波レーダ周囲探知実験

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

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

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

#### 3.1.1 実験方法

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。

今回の実験では、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-3 に実験に使用したミリ波レーダの諸元を示す。

表-3 ミリ波レーダ諸元表

項目	性能
最小検出距離	< 1m
最大検出距離	> 175m (> 10dB target) > 100m (> 0dB target)
距離方向検出精度	< +/- 0.5m
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
水平視野角	> 20 deg
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
垂直視野角	4.2 - 4.75 deg

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と角度が調整できるように設置し(写真-8)、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-9)。また、計測場所は直線方向に100m程度確保した(写真-10)。



写真-10 計測場所全景

実験は、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。

- ①対象物が車両の場合の検出実験
- ②対象物が人の場合の検出実験
- 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
- 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. 1. 2 実験結果

実験①の概略図を図-9に、実験結果を表-4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。

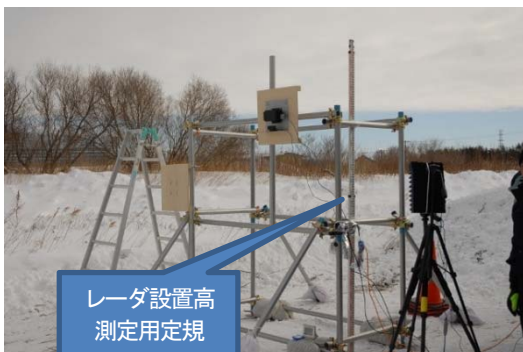


写真-8 ミリ波レーダ設置状況

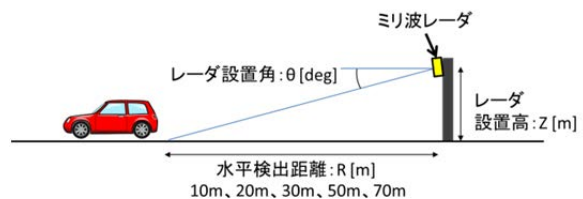


図-9 実験①概略図



写真-9 ミリ波レーダとレーダ検証用カメラ

表-4 実験①計測結果

設置高 Z[m]	設置角 θ [deg]	水平検出距離 R[m]						
		10	20	30	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

実験②の概略図を図-10に、実験結果を表-5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。

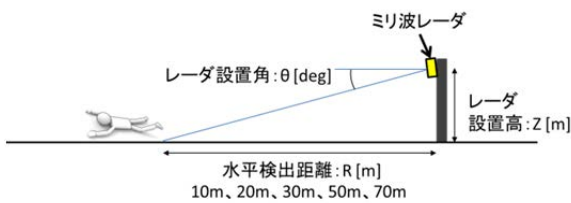


図-10 実験②概略図

表-5 実験②計測結果

設置高 Z[m]	設置角 θ [deg]	水平検出距離 R[m]										
		10			20			30			50	70
		立ち	しゃがみ	腹ばい	立ち	しゃがみ	腹ばい	立ち	しゃがみ	腹ばい	立ち	
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

実験③の概略図を図-11に、実験結果を表-6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、模倣的に再現した (写真-11)。

実験条件は、レーダ設置高を2m、設置角を3度に固定した。

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

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。

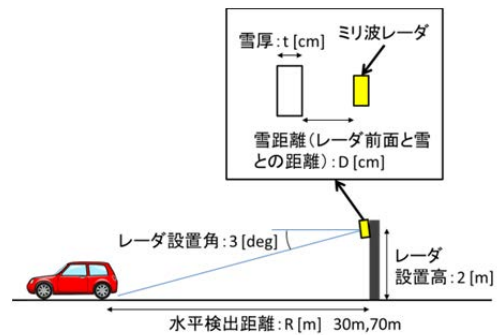


図-11 実験③概略図

表-6 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

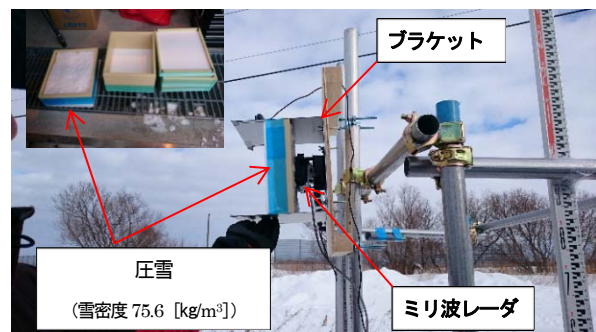


写真-11 着雪再現状況

実験④の概略図を図-12に、実験結果を表-7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ものである (写真-12)。

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の組み合わせに設定した。

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。

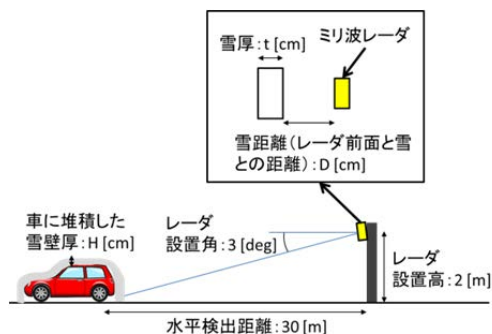


図-12 実験④概略図

表-7 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



写真-12 車両積雪再現状況

#### 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 60cm 程度まで変位が広がり、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) 周囲探知技術については、市販車用ミリ波レーダ (76GHz 帯) を用いて探知実験を行った。吹雪時を想定したレーダ前面に雪が付着した状態でも、車両を検出することができた。ただし、人がしゃがんだ状態や腹ばいの状態、車両に雪が堆積した状態では、検出できない場合があった。

今後、車線逸脱防止技術については RFID を含む各種測位技術の検討、周囲探知技術についてはミリ波レーダと補助的な探知技術の検討を行う予定である。

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

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

#### 参考文献

- 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>
- 北海道総合開発計画 (H28.3.29) : <http://www.mlit.go.jp/common/001128021.pdf>