共同研究報告書
整理番号第528号

# 吹雪の時間的空間的変動特性の解明に関する研究

# 共同研究報告書

令和3年3月

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所
国立大学法人 名古屋大学大学院 環境学研究科

Copyright © (2021) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

共 同 研 究 報 告 書
第 528 号令和 3 年 3 月

# 吹雪の時間的空間的変動特性の解明に関する研究

# 共同研究報告書

国立研究開発法人土木研究所　寒地土木研究所
寒地道路研究グループ　雪氷チーム

| | | |
|---|---|---|
| 上席研究員 | 松澤　勝※1 |
| 総括主任研究員 | 西村　敦史※2 |
| 研究員 | 國分　徹哉※3 |
| 研究員 | 大宮　哲 |

国立大学法人　名古屋大学大学院　環境学研究科

| | |
|---|---|
| 教授 | 西村　浩一※4 |
| 教授 | 藤田　耕史 |

※１：現　国立研究開発法人　土木研究所　寒地土木研究所　寒地道路研究グループ　グループ長
※２：現　国土交通省　北海道開発局　事業振興部　技術管理課　技術管理企画官
※３：現　国土交通省　北海道開発局　室蘭開発建設部　施設整備課　施設防災対策専門官
※４：現　国立大学法人　名古屋大学　名誉教授

要旨

吹雪時の視程を予測する際には、時間的・空間的に平均化された気象値が使用されることが多い。しかし、実際の吹雪現象は大気乱流による作用を強く受け、時間的・空間的変動が激しい。

本共同研究では、時間的・空間的変動が大きい吹雪の詳細について解明するため、吹雪計および超音波風速計をそれぞれ約 15 台ずつ用いて集中的に吹雪観測を実施した。結果、吹雪の変動と乱流構造に関わるデータを取得し、吹雪の複雑な構造をとらえた。

キーワード：吹雪計、吹雪観測、乱流構造

# 目　次

1. はじめに ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・1

(1) 背景と目的 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・1

(2) 飛雪流量について ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・1

2. 飛雪流量の計測 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・2

3. 観測方法および結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・4

(1) 平成 28 年度の観測 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・4

(2) 平成 29 年度の観測 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・7

4. まとめ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・10

謝辞 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・10

参考文献 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・10

## 1. はじめに

### （１） 背景と目的

吹雪時の視程障害は、多重衝突事故や長時間にわたる車輌滞留の引き金となる。気象庁によると、視程は「地表付近の大気の混濁の程度を見通しの距離で表したもので、昼間の視程は、その方向の空を背景とした黒ずんだ目標を肉眼で識別できる最大距離」と定義されている [1)]。国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所（以下、寒地土木研究所）では、気象庁より提供された気象予測データを元に、24 時間先までの吹雪時の視程を計算し、インターネットサイト北の道ナビ「吹雪の視界情報」[2)]において予測情報を公開している。この視程予測には、時間的・空間的に平均化された気象値が用いられている。しかし、実際の吹雪現象は大気乱流による作用を強く受け、時間的・空間的変動が激しいため、実際の視程も時間的・空間的変動が大きい。よって、吹雪時の視程をより正確に予測するためには、吹雪の変動特性を明らかにする必要がある。

本共同研究では、吹雪の観測機器および風速計をそれぞれ 15 台ずつ用いて集中観測を実施することにより、短時間スケールで変動する吹雪の乱流構造に関わるデータを取得し、その時間的・空間的な特性を明らかにすることを目的とする。

### （２）飛雪流量について

吹雪の強さを示す飛雪流量 $q$ は、飛雪空間密度 $N$ と風速 $v$ の積で示される（式 1）。飛雪流量 $q$ は風に直交する単位断面積を単位時間に移動する雪粒子の質量（単位：kg m$^{-2}$ s$^{-1}$）であり、飛雪空間密度 $N$ は単位体積空間に存在する雪粒子の質量（単位：kg m$^{-3}$）である。風速と飛雪流量は飛雪空間密度を介して比例関係にある。飛雪空間密度は、飛雪粒子の粒径 $D$（単位：mm）、密度 $\rho$（単位：kg m$^{-3}$）の関係から導出され、式 2 のように表現できる。なお、飛雪粒子の移動速度と風速は完全に一致するものではなく、粒子速度の方が風速よりも相対的に小さいことが知られている（Nishimura *et al.*, 2014 [3)]）。よって、吹雪の時間的・空間的変動の特性を正しく捉えるためには、風速と飛雪流量を各々の高い精度且つ複数の測器を利用し、観測することが必要となる。

$$q = Nv \qquad \text{式 1}$$

$$q \propto \frac{4}{3}\rho\left(\frac{D}{2}\right)^3 \qquad \text{式 2}$$

## 2. 飛雪流量の計測

飛雪流量の計測には、新潟電機社製のスノーパーティクルカウンター（以降、SPC）を利用した。これは、光学的な手法で飛雪粒子を計測するものである。測定原理を図 1 に示す。

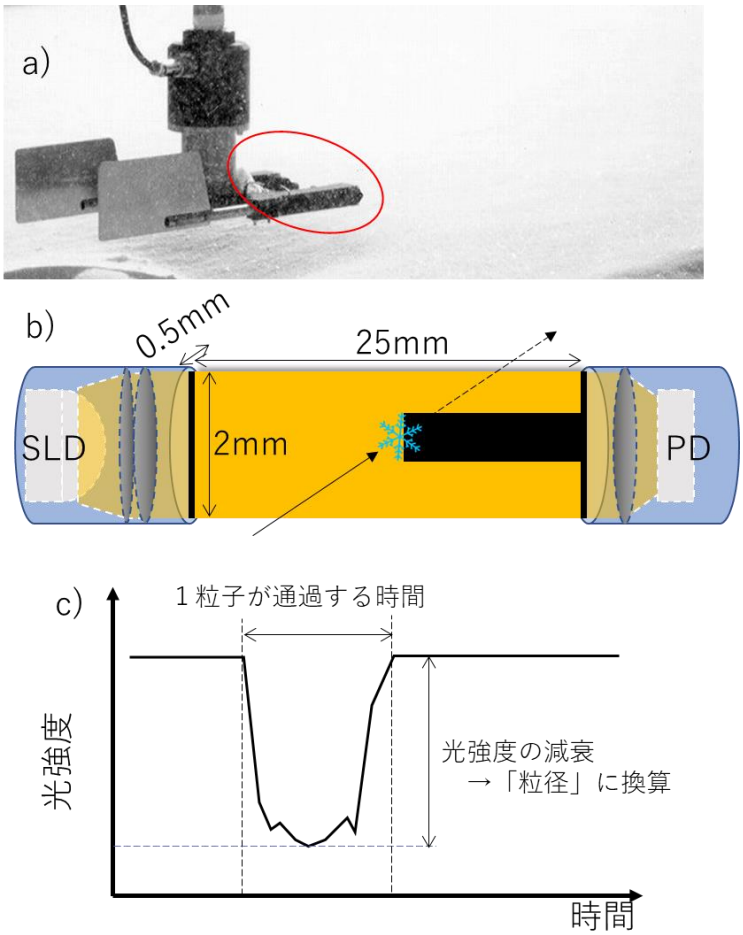


図 1　SPC の測定原理

a）SPC の外観とセンサー部（新潟電機株式会社 HP より）、b)SPC のセンサー部（SLD：スーパールミネッセントダイオード、PD：フォトダイオード）、c）1 粒の雪粒子が通過したときにおける光強度の時間変化の一例。図 b)において、光は SLD から PD へ直進し、飛雪粒子があればその部分の光が遮断される（黒くハッチされた領域）ため、光強度の時間変化を図示すれば図 c)のように減衰したスペクトルとして表示される。

本研究で利用した SPC（SPC-S7 および SPC-95）のサンプリング領域は 2mm(H)×25mm(D)×0.5mm(W)である（図 1(b)）。この領域を通過した飛雪粒子によって図中の光強度（出力電圧）の減衰ピーク値から予め求めておいた経験式（Sato et al., 1993 [4]）を利用して粒径とする。測定可能な粒径は約 0.02～0.5mm である。飛雪粒子は、この粒径範囲においてほぼ等間隔に分割（SPC-S7 は 1～32 ステップ、SPC-95 は 1～64 ステップ）されたステップに振り分けられる。なお、1 つの減衰ピークを 1 粒子とみなし、単位時間（通常は 1 分間）に得られた粒子数（減衰ピーク数）および振り分けられたステップの代表粒径から式 3 を利用して飛雪流量に換算される（式 3 は SPC-S7 の場合。SPC-95 の場合は式中の 32 が 64 になる）。

$$q = \sum_{i=1}^{32} q_i = \sum_{i=1}^{32} \frac{4\pi}{3} \rho \left(\frac{D_{e,i}}{2}\right)^3 \qquad \text{式 3}$$

ここで、$De,i$ は第 i 番目のステップの平均粒径、$qi$ は第 i 番目のステップの飛雪粒子の飛雪流量である。ここで、0.5mm より大きな粒子は全て第 32 ステップ（もしくは第 64 ステップ）に分類されるため、0.5mm 以上の大きさの飛雪粒子については過小評価される場合がある。また、全ての雪粒子を球として仮定しているため、過大評価されている場合もある。先行研究では、雪面が硬く削剥が生じないような特殊な場合を除き、SPC による測定結果は概ね正確であることが示されている（佐藤ら、2005[5]）。通常の観測ではサンプリング間隔を 1Hz として計測するが、本研究では吹雪の時間的変動を観測することを目的としているため、100 kHz の高周波でサンプリングを行った。

本研究では、風の乱流と飛雪流量の関係を明らかにするため、超音波風速計を利用した。超音波風速計は、向かい合うトランスデューサー（超音波送受信器）の間を高い周波数の超音波パルスが伝搬する時間を計測するものである。空気に乱れが無い状態では全ての超音波パルスの伝搬時間が等しくなるが、風により空気に乱れが生じると伝搬時間に遅延が生じる。この遅延時間を風速に換算する。また、3 対のトランスデューサーで風向に換算する。本研究では高時間分解能で計測するため 10Hz 程度で計測を実施した。

## 3. 観測方法および結果

### （１） 平成 28 年度の観測

平成 28 年度の観測は、寒地土木研究所の石狩吹雪実験場内にて実施した。本研究では吹雪の時間的・空間的な変動を捉えることを目的としているため、風上の障害物などの影響が懸念される。現に、防雪林などでは樹木の影響により飛雪流量が大幅に変化することが知られている（櫻井ら、2020[6]）。そのため、吹雪風上に位置する木々を伐木したうえで観測を実施した（図 2）。

図 2　石狩吹雪実験場（北ゾーン）の観測箇所風上で実施した伐木作業

SPC および超音波風速計をそれぞれ 15 台ずつ使用して観測を行った。機器の設置状況および周辺環境を図 3 に、観測局舎内におけるデータ処理機等の配置を図 4 に示す。

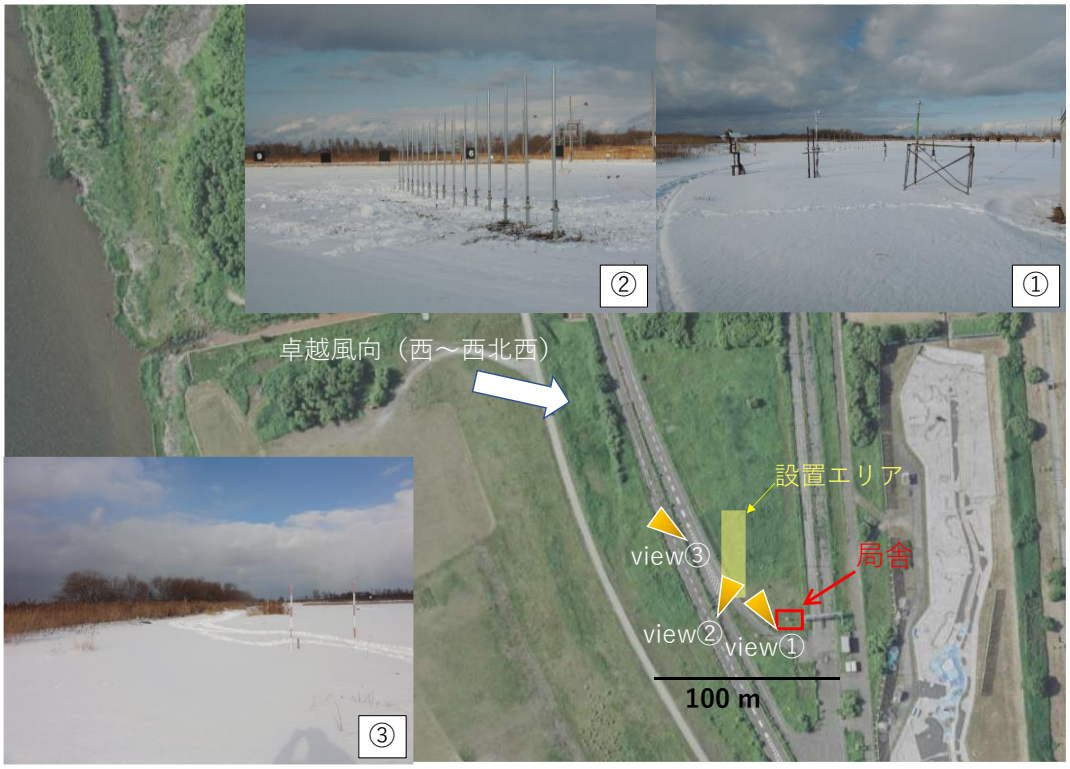


図 3　機器の設置状況および周辺環境（国土地理院の空中写真を使用）

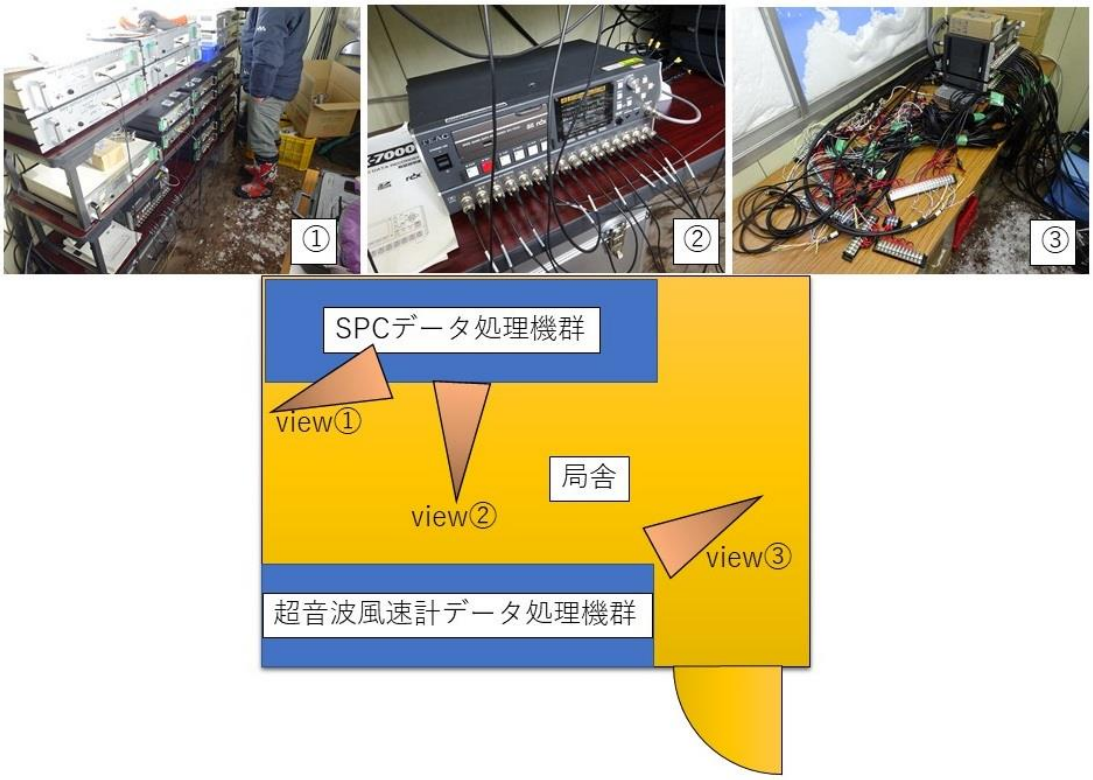


図 4　観測局舎内におけるデータ処理機等の配置

吹雪発生時の様子を図 5 に示す。また、結果の一例として、12m離れた 2 地点における飛雪流量の時間変化の様子を図 6 に示す。図 6 より、12m離れた箇所であっても両者の変動は概ね一致しており、相互相関においても目立ったズレは見られないことが確認された。ただし、瞬間的な飛雪流量の変化を捉えられていることなど、微細な乱流構造との関係も示唆された。一方で、吹雪の発達には風上の吹走距離が 300m程度あると良い [7]と考えられることから、吹雪の微細な構造や乱流構造の詳細については、風上の地形の畝や樹木などが影響しているものと考えられる。現在、時間的・空間的のより小さいスケールでの変動特性や周波数解析に加え、瞬間的な気流場に関する解析を進めているところである。

図 5　吹雪発生時の様子

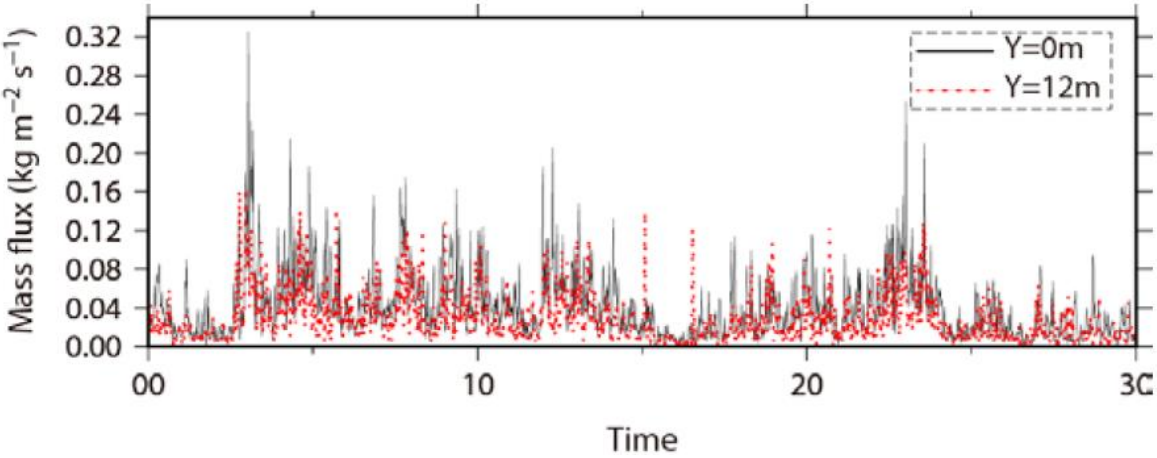


図 6　吹雪発生時における飛雪流量の時間変化（横軸単位：分）

### （２） 平成 29 年度の観測

平成 29 年度は、平成 28 年度の結果を踏まえて、風上の障害物の少ない箇所を選定した。観測サイトは当別町の遊々公園（北海道石狩市当別町当別太）とした（図 7）。観測サイトの風上（卓越風向：西～西北西）にはおおよそ 300mの吹走距離が確保されており、吹雪の観測には十分な距離がある。なお、当該箇所は当別町所有の行政財産であることから、使用許可を得たうえで観測を実施した。観測は、準備も含め平成 30 年 1 月～2 月に実施した。図 8 に、ドローンを用いて空撮した観測サイトの写真を示す。観測局舎から機器の設置エリアまでは 80～90m 程度の距離が離れている。配線方法は平成 28 年度と同様の方法とした。図 9 に、SPC および超音波風速計の設置状況を示す。観測機器は、卓越風向に直交するように等間隔で設置した。

図 7　観測サイト（遊々公園）の局舎と機器設置エリア（国土地理院の空中写真を使用）

図 8　平成 29 年度における観測サイト（当別町遊々公園内）

図 9　観測サイトに設置した SPC および超音波風速計

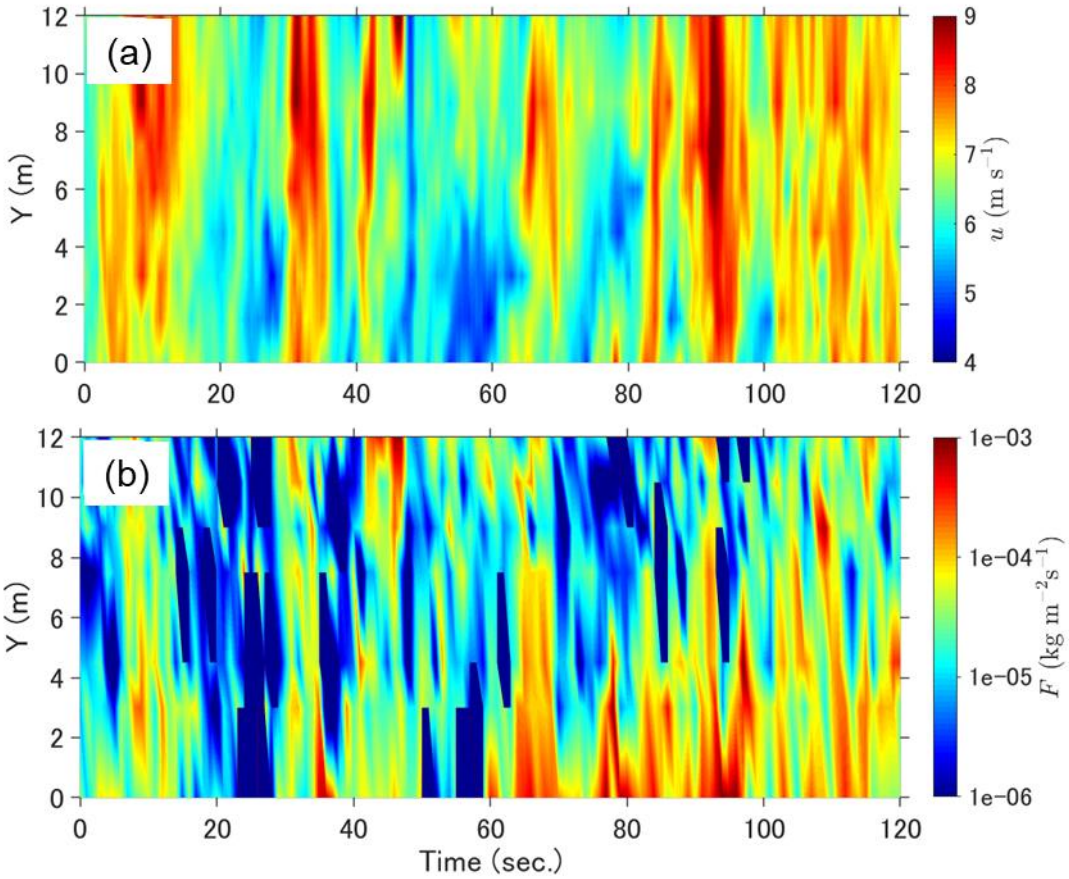


図 10　観測された吹雪の時空間構造（時間-水平断面）の一例

a)風速、b)飛雪流量

観測の結果、各観測点での時系列データのほか、図 10 に示すような時空間構造が得られた。横軸は経過時間（sec)、縦軸は機器の設置位置を示す。本共同研究の結果より、水平断面における吹雪の変化は、決して時空間的に平均化された情報として得られるものではなく、複雑な時間的・空間的構造が形成されていることが確認された。この時空間的構造が、ドライバーから見える吹雪の時々刻々と変化する視程に関係しているものと想像される。

## 4. まとめ

本共同研究では、時間的・空間的変動が激しい吹雪現象の詳細を解明するため、スノーパーティクルカウンターおよび超音波風速計をそれぞれ 15 台ずつ用いて集中観測を実施し、吹雪の変動と乱流構造に関わるデータを取得した。観測の結果、吹雪の複雑な構造をとらえることが出来た。本観測によって得られたデータは膨大である。今後も継続的に解析を実施する予定であり、より詳細な吹雪現象の把握に臨みたい。

## 謝辞

本共同研究を遂行するにあたり、多くの方々から多大なご協力をいただきました。(国研) 防災科学技術研究所の根本征樹博士・伊藤陽一博士、北海道大学の下山宏博士・中坪俊一氏・森章一氏・藤田和之氏、東京工業大学の大風翼博士、新潟大学の新屋啓史博士、北海道教育大学の尾関俊浩博士、富山大学の杉浦幸之助博士、新潟電機株式会社の石丸民之永氏・羽賀秀樹氏、寒地土木研究所雪氷チームの伊東靖彦氏・原田裕介博士・武知洋太氏・櫻井俊光博士、寒地土木研究所寒地技術推進室の藤高亮氏・佐藤嘉昭氏には、観測機器の貸与やメンテナンス、機器設置および撤去時においてご協力をいただきました（いずれも所属は当時のもの)。また、当別町からは観測場所を提供していただきました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

1) 気象庁 HP、気象観測の手引き、
https://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/kansoku_guide/tebiki.pdf (2021 年 3 月 12 日閲覧)
2) 北の道ナビ「吹雪の視界情報」
http://northern-road.jp/navi/touge/fubuki.htm (2021 年 3 月 12 日閲覧)
3) Nishimura, K. et al.: Snow particle speeds in drifting snow, Journal of Geophysical Research (Atmospheres), 119, doi:10.1002/2014JD021686, 2014.
4) Sato, T. et al.: Field test of a new snow-particle counter (SPC) system, Annals of Glaciology, 18, 149-154, 1993.
5) 佐藤威、望月重人、小杉健二、根本征樹：スノー・パーティクル・カウンター (SPC) による飛雪流量測定に及ぼす飛雪粒子の形状の影響, 雪氷, 67(6), 493-503, 2005.
6) 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、日本雪工学会論文集、36(1), 14-22, 2020.
7) Takeuchi, M：Vertical Profile and Horizontal Increase of Drift-Snow Transport,

Journal of Glaciology, 26(94), 481-492, 1980.

共同研究報告書
COOPERATIVE RESEARCH REPORT of P.W.R.I.
No.528 March 2021

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所
寒地土木研究所　寒地技術推進室
〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1 番 34 号 電話 011-590-4046