

降雪量観測の高精度化および降雪強度や降雪形態が視程低下に与える影響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
国立研究開発法人 防災科学技術研究所

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。

降雪量観測の高精度化および降雪強度や降雪形態が視程低下に与える影響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 武知 洋太
研究員 大宮 哲

国立研究開発法人防災科学技術研究所
雪氷防災研究センター

総括主任研究員 中井 専人
主任研究員 本吉 弘岐
契約研究員 山下 克也

- ※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

要旨

安全な冬期道路交通を確保するうえで、悪天候時の視程障害の発生を正確に予測することが重要である。精度良く予測するためには正確な降雪強度を把握することが不可欠であるが、実測は容易でない。それは、降雪粒子は雨滴よりも風の影響を受けやすく、雨量計への捕捉率が強風時ほど低下するためである。

本共同研究では、この計測誤差を適切に補正するための関係式を構築することで降雪強度の実測結果を高精度化すること、また、降雪と視程低下の関係を解明することを目的とし、野外観測を実施した。結果、風速と捕捉率の関係について、風速変化の小さな降雪事例を抽出して解析を行ったことで、先行研究に比べバラツキの小さな関係を示すことができた。また、降雪強度が大きいほど視程低下が大きいことを確認した。

キーワード：吹雪、降雪強度、捕捉率、視程障害、DFIR

目 次

1. はじめに	1
2. 降雪観測に関する先行研究	1
3. 観測概要	4
(1) 降雪強度の観測方法	4
(2) 視程の観測方法	7
4. 結果	8
(1) 風速と雨量計の捕捉率の関係	8
(2) 弱風下における降雪時の視程	9
5. おわりに	10
参考文献	10

1. はじめに

安全な冬期道路交通を確保するうえで、地吹雪や降雪による視程障害の発生を正確に予測することが重要である。これまで、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、主に強風下での吹雪時の視程低下に関する研究が精力的に進められてきた^{1),2)}など。一方で、弱風下における降雪起因の視程低下については、シビアな交通障害に直結することが少ないこともあり、あまり進められていない。しかし、悪天候時の視程予測精度の向上を目指すうえで、降雪起因の視程低下メカニズムを解明することは必須である。

降雪時の視程低下メカニズムを調査するにあたり、「降雪強度」は基本となる物理量の一つである。降雪強度は「単位面積に単位時間あたりに積もった雪の重さに等しい水の深さ」として定義づけられており³⁾、その計測には雨量計が用いられることが多い。しかし、雨量計を用いて降雪強度を正確に実測することは容易でない。それは、降雪粒子は雨滴に比べて風による影響を受けやすいため、雨量計に捕捉されにくく、実際の値を過小評価することが多いためである。

本共同研究では、この過小評価分を補正するための関係式を構築することで降雪強度の実測結果を高精度化すること、また、降雪と視程低下の関係を解明することを目的とし、野外観測を実施した。

2. 降雪観測に関する先行研究

これまで、国内外を問わず、降雪に関する情報を正確に把握するための研究が盛んに行われてきた。その代表例として、世界気象機関（以下、WMO）が主導となって1986年から1993年にかけて行われた固体降水量測定法相互比較 (Solid Precipitation Measurement Intercomparison) プロジェクトや2012年からは2015年にかけて行われた固体降水測定法比較計画 (Solid Precipitation InterComparison Experiment, SPICE) プロジェクトが挙げられる。前者のプロジェクトでは観測手法の国際基準、Double Fence Intercomparison Reference (3章で詳述) が確立され、後者のプロジェクトでは各国毎に仕様が異なる雨量計による観測データの取扱い方法を検討するための比較観測が行われた。なお、詳細については各プロジェクトのレポート^{4),5)}を参照されたい。

日本国内における雨量計への降雪粒子の補足率に関する研究例として、横山ら⁶⁾や大宮・松澤⁷⁾などがあり、雨量計のタイプごとに捕捉率（実測値／真値）と風速の関係式が示されている。なお、降雪強度の「真値」の算出については、WMOが推奨する方法にならない、Double Fence Intercomparison Reference (3章で詳述) を用いた観測結果に基づく。横山ら⁶⁾が観測に用いた3種類の雨量計の外観を図1に、その内部構造を図2に示す。これらは気象庁アメダスや国土交通省道路気象テレメータ等の地上気象観測点で使用されている事が多い一般的な雨量計（転倒ます式雨量計 (RT-1)、温水式雨量計 (RT-3)、溢水式雨量計 (RT-4)）である。いずれの雨量計とも受水口は直径20cmである。RT-4には助炭（じょたん）と呼ばれる直径50cmの風除けが元々取り付けられてあるが、近年ではRT-1やRT-3にも助炭を付けるケースが増えており、2021年3月現在、RT-3に助炭を取り付けたタイプが北海道内の全アメダスで使用されている。なお、RT-3に助炭を取り付けたタイプはRT-4の外観とほぼ等しい。積雪寒冷地で使用

される雨量計の多くは融雪機能（ヒーター、不凍液など）を有している。受水口内に取込まれた降雪粒子を液体の水に融解したのち、「ししおどし」と類似の機構を有する転倒ますへと集水し、ますの転倒回数から降水量を算出している（降水 0.5mm～1.0mm ごとに1度転倒するものが多い）。

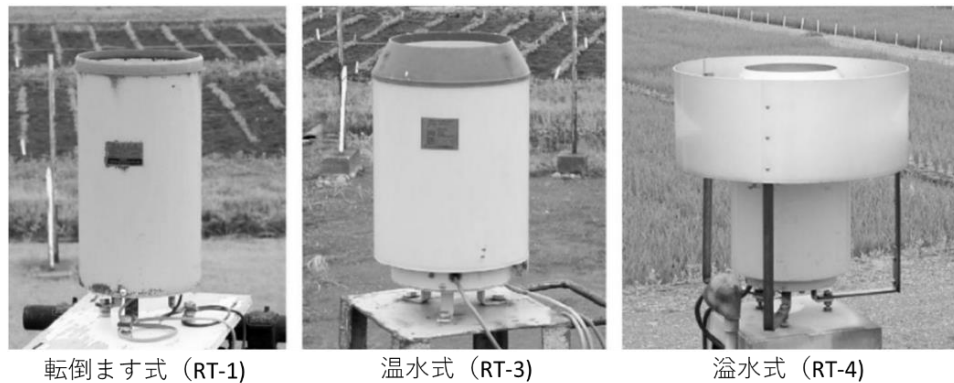


図1 地上気象観測で使用されることが多い3種類の雨量計（横山ら⁶⁾より引用）

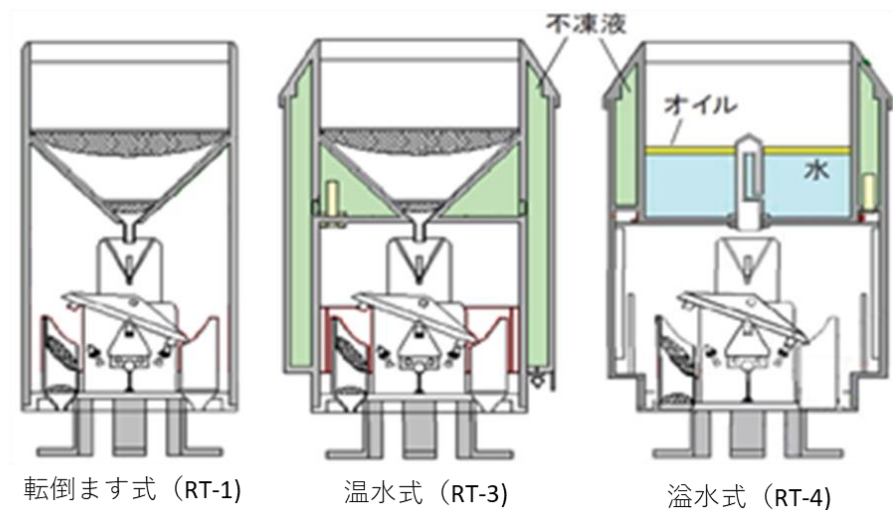


図2 雨量計の内部構造（酒井ら⁸⁾より引用）

横山ら⁶⁾が示した結果の一例を図3に記す。横山らは図1に示した雨量計を用いた観測を新潟県上越市にて行い、1回の降雪イベント毎に求めた降雪強度の累積値から捕捉率（Catch Ratio, CR）を算出し、雨量計の受水口高さにおける風速（Wind Speed）との関係を示した。図中の曲線は吉田⁹⁾の式に回帰させて求めた曲線である。次に、大宮・松澤⁷⁾は、横山ら⁶⁾の結果の多くが風速 5m/s 以下であることに着眼し、それ以上の強風時のデータを補完すべく、強風頻度の高い北海道石狩市（寒地土木研究所が所有する石狩吹雪実験場、N43° 12' , E141° 23'）にて観測を行った。そこでは、RT-1 および助炭を取り付けた RT-3 の2種類が用いられた。その結果を図4に記す。比較のため、図4中には横山ら⁶⁾が示した回帰曲線（図3）も付記してある。この結果より、新潟県と北海道では冬期間の気候特性が異なるものの、風速

の増加に伴う捕捉率の減少傾向は一致すること、5m/s を超える強風下においても捕捉率は減少する傾向があることが示された。雨量計のタイプ毎の比較においては、RT-1 の回帰曲線がほぼ一致すること、また、外形がほぼ等しい RT-4 と助炭付き RT-3 の回帰曲線も概ね一致することが確認された。これは、雨量計の捕捉率が主に風速と雨量計の形状に依存することを示唆するものである。しかし、いずれの先行研究も 1 回の降雪イベント単位の解析であり、各降雪イベントの平均風速を代表風速として扱っているため、1 降雪イベント中における風速変化の影響は考慮されていない。実測値をより適切に補正するためには、降雪時の風速変化がなるべく小さなデータを用いて作った関係式を用いる必要がある。

そこで、本共同研究では、風速変化が小さい降雪事例のみに着眼した解析を行い、雨量計の捕捉率と風速の関係について検討した。

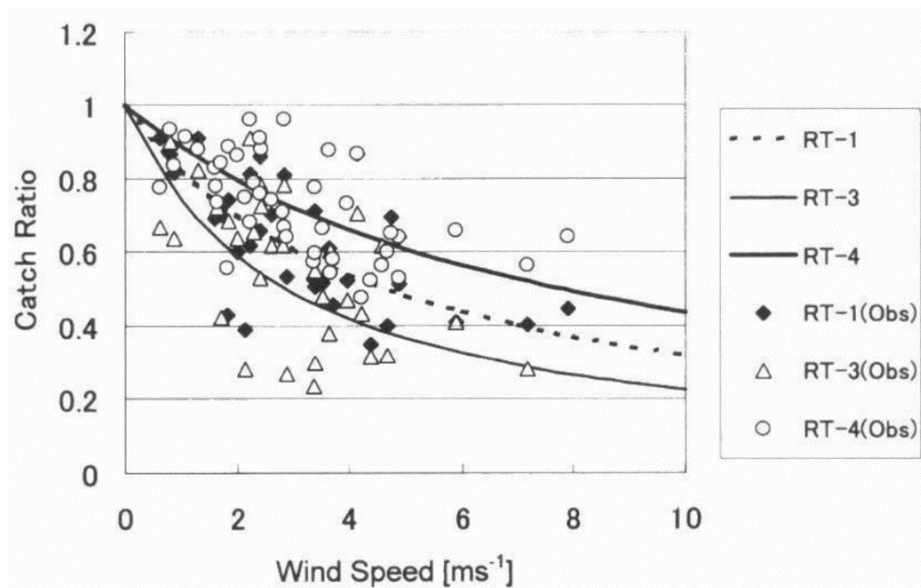


図3 新潟県上越市における雨量計の捕捉率と風速の関係（横山ら⁶⁾より引用）

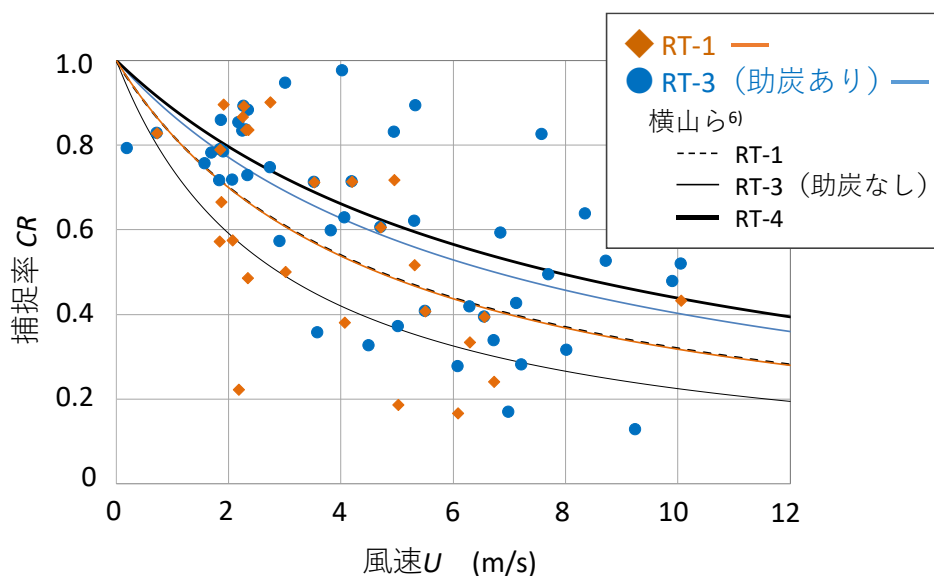


図4 石狩吹雪実験場における雨量計の捕捉率と風速の関係（大宮・松澤⁷⁾の図を改変）

3. 観測概要

石狩吹雪実験場および新潟県長岡市にある国立研究開発法人防災科学技術研究所雪氷防災研究センター（N37° 25' , E138° 53' 、以下、雪氷防災研究センター）構内の観測露場にて、各種気象要素（降雪、風向風速、気温等）および視程の観測を実施した。

（1）降雪強度の観測方法

降雪強度の観測には、図 1 に示した雨量計に加え、WMO が推奨する二重の防風柵（Double Fence Intercomparison Reference, DFIR）⁴⁾で周りを取り囲んだ重量式雨量計（Geonor 社製、GNR-T200B）を使用した。以降、この防風柵を用いた観測システムを DFIR 雨量計と呼ぶことにする。DFIR 雨量計は観測分解能が高く、WMO によると DFIR 雨量計による実測値に対して換算式⁴⁾を適用して求めた値を「真の降雪強度」とみなしてよいとしている。図 5 および図 6 に、石狩吹雪実験場内および雪氷防災研究センター構内に設置されている DFIR 雨量計の外観をそれぞれ記す。また、DFIR 雨量計の平面図を図 7 に示す。DFIR 雨量計は、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 12.0m、4.0m）の中央部に重量式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、柵部分の空隙率は 50%、内側柵の上部と降水量計の受水口が等しい高さになるように設置されてある。

重量式雨量計の外観および内部の様子を図 8 および図 9 に示す。この重量式雨量計は、内部の受水バケツに降水を貯留するタイプであり、バケツ全体の重量増加量から降水量を算出するものである。図 1 に示す雨量計の計測分解能が 0.5~1.0mm である一方、重量式雨量計は 0.1mm 以下の高分解能で精密に計測することができる。本共同研究も、WMO にならい、DFIR 雨量計による実測値に換算式を適用することで真の降雪強度を求め、解析に使用した。

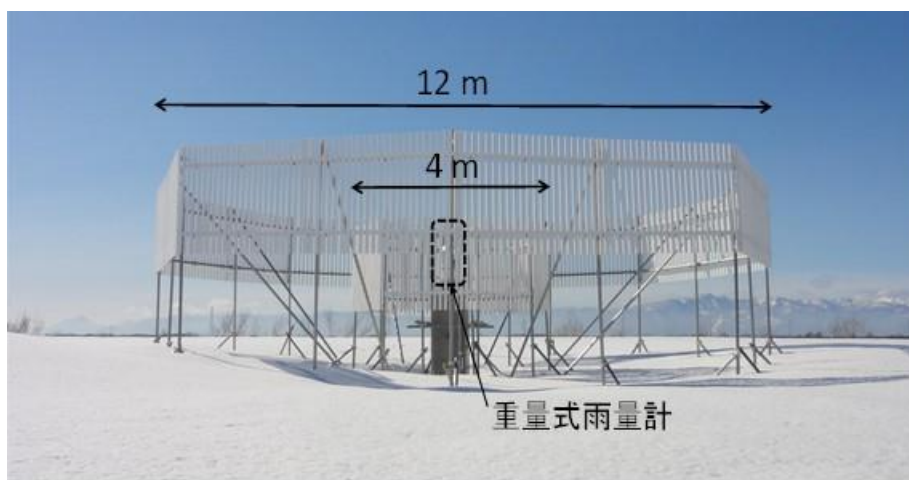


図5 石狩吹雪実験場内に設置された DFIR 雨量計



図6 雪氷防災研究センター構内に設置された DFIR 雨量計

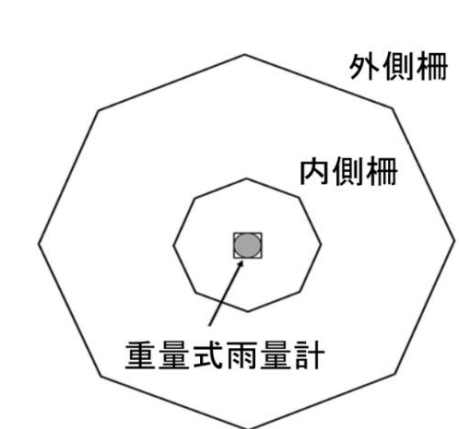


図7 DFIR 雨量計の平面図



図8 重量式雨量計の外観



図9 重量式雨量計の内部

(2) 視程の観測方法

視程観測は、視程計（明星電気社製、TZE-4-HD および TZE-2T）のほか、現地観測や動画データを用いた目視により行った。石狩吹雪実験場では、視程観測用の既設の黒色視程板 9 枚（10m～250m）に加え、遠方の樹林帯を目視対象物とした。一方、雪氷防災研究センターの観測露場には既設の視程板がないため、仮設で設置した黒色視程板のほか、既存の構造物や樹林帯を目視対象物とした。なお、1 回の目視観測は 30 秒間とし、視認できた最大距離を記録した。視程計の設置状況を図 10 に、両観測地点における視程観測の様子（動画データのキャプチャ画像）を図 11 と図 12 にそれぞれ示す。



図 10 視程計による計測（雪氷防災研究センター構内）



図 11 石狩吹雪実験場における視程観測の様子

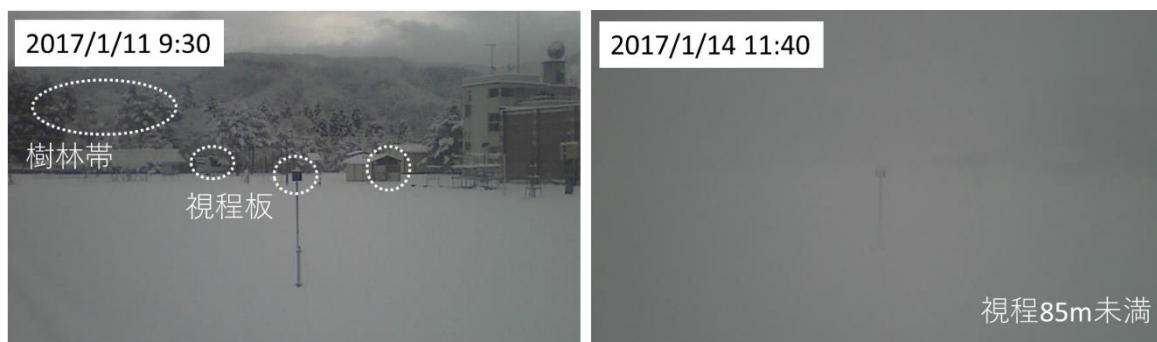


図 12 雪氷防災研究センター構内における視程観測の様子

4. 結果

(1) 風速と雨量計の補足率の関係

2章で述べたように、先行研究における解析は降雪イベント単位であり、イベント継続中における風速変化は考慮に入れられていなかった。横山ら⁶⁾が解析した降雪イベントの平均継続時間は14時間49分、大宮・松澤⁷⁾のそれは6時間22分である。横山ら⁶⁾が解析した降雪イベントは具体的な日時が明記されていないため、イベント中の風速変化量については不明であるが、大宮・松澤⁷⁾が解析した降雪イベントにおける風速変化量の平均は4.7 m/s (最大11.7 m/s、最小1.1 m/s)であった。従って、図4中のプロットには、それぞれ横軸方向に平均4.7 m/s程度のバラツキを有している。

本共同研究では、風速変化が小さな降雪事例のみを扱う。DFIR雨量計のほか、図1に示した雨量計、風向風速計、気温計のデータ(いずれも10分平均値)を解析に使用した。この中から下記の条件に合致する連続データを抽出し、それぞれの降雪強度の累積値から捕捉率 CR を求めた。ここでは、抽出された連続データの平均風速を代表風速 U とした。なお、以下は全て「かつ条件」である。

抽出条件

- ①風速変化が1時間以上にわたって1.0 m/s以内に収まっていること
- ②気温が常に0°C未満であること
- ③DFIR雨量計に基づいて算出された降雪強度の真値の累積値が4mm以上であること

一例として、石狩吹雪実験場で観測した助炭付きRT-3による観測結果を図13に示す。全観測データのうち、上記の抽出条件に合致したものは16例あった。横軸エラーバーは風速変化幅を示す。図中には、先行研究にならって吉田の式⁹⁾に回帰させて求めた回帰曲線(赤の実線。以下、関係式①)のほか、第一近似として指数関数による近似曲線(赤の破線。以下、関係式②)も示してある。また、比較のため、横山ら⁶⁾のRT-4と大宮・松澤⁷⁾の助炭付きRT-3の回帰曲線も付記してある。表1に、 CR と U の関係式、関係式から求めた CR の実測値に対する二乗平均平方根誤差(RMSE)、 U ごとの CR を記す。この解析で得られた助炭付き温水式雨量計の捕捉率は、先行研究で示されている雨量計の捕捉率よりも低い傾向があった。関係式①、②ともに、先行研究の関係式から求められたRMSEよりも小さいことが確認された。関係式①においては、いずれの風速においても捕捉損失分が既往のものより10%前後大きい。一方、関係式②においては、弱風時には既往の関係式との違いは小さいが、風速の増加とともに乖離が大きくなる。例えば、横山ら⁶⁾の関係式と比べ、風速10m/sにおいては捕捉率が16%異なる。

この結果より、先行研究で示されている関係式を用いた場合には、降雪時の雨量計の捕捉損失分を十分に補正しきれない可能性があることが示された。本研究によって求めた関係式を実務において使用する際には、安全側を考慮に入れ、風速8m/sまでは関係式①を、風速8m/sを超える場合には関係式②を使用することが望ましいと考える。ただし、関係式中の風速 U は、雨量計の受水口の高さにおける風速であることに留意されたい。今後も引き続き解析を進める予定である。

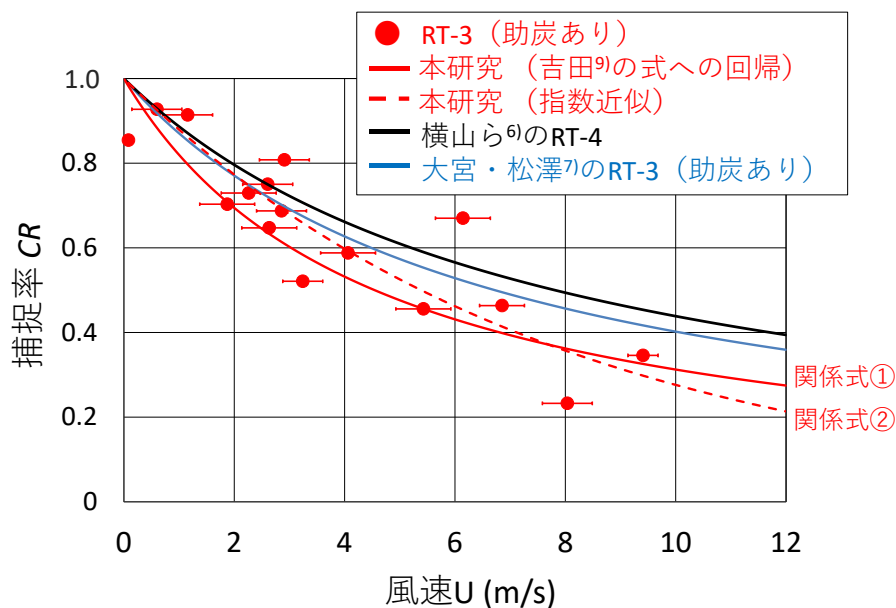


図 13 石狩吹雪実験場における雨量計の捕捉率と風速の関係
(風速変化の小さい降雪事例についての解析結果)

表 1 雨量計ごとの関係式・RMSE・風速ごとの捕捉率

雨量計の種類	助炭	捕捉率CRと風速U(m/s)の関係式	RMSE	CR			
				U = 2	U = 5	U = 8	U = 10
RT-4 (横山ら ⁶⁾)	有 (標準装備)	$CR = \frac{1}{1+0.128U}$	0.107	0.80	0.61	0.49	0.44
RT-3 (大宮・松澤 ⁷⁾)	有	$CR = \frac{1}{1+0.149U}$	0.167	0.77	0.57	0.46	0.40
RT-3 (本共同研究)	有	関係式① $CR = \frac{1}{1+0.221U}$	0.106	0.69	0.47	0.36	0.31
	有	関係式② $CR = \exp(-0.129U)$	0.091	0.77	0.52	0.36	0.28

(2) 弱風下における降雪時の視程

ここでは、石狩吹雪実験場における目視観測結果について述べる。ここで、視程は視認できた最大距離を用いて評価した。視程観測時の降雪強度は DFIR 雨量計により観測された 1 分毎の降水量より求めた。吹雪の発生臨界風速とされる風速 5m/s¹⁰⁾に満たないの弱風下での降雪強度と視程の関係を図 14 に示す。この結果より、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 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。今後も引き続き解析を進める予定である。

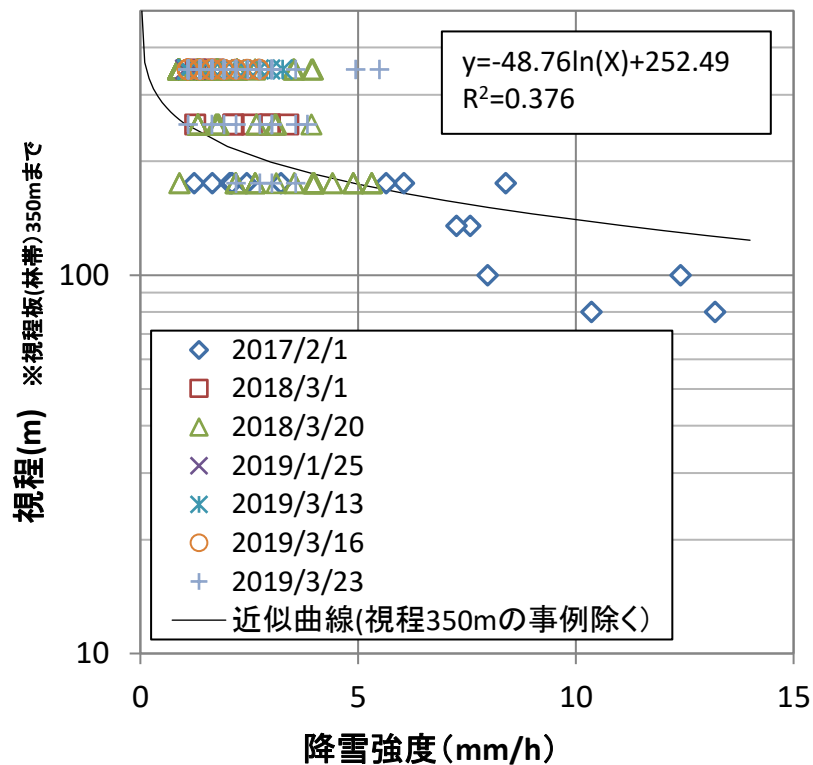


図 14 石狩吹雪実験場における降雪強度と視程の関係

5. おわりに

降雪時の雨量計の捕捉率と風速の関係式を高精度化することは、雨量計による実測値からより妥当な降雪強度を算出するうえで必須である。また、悪天候時の視程予測精度の向上を目指し、降雪起因の視程低下メカニズムを解明することは必須である。これらは冬期道路管理や雪氷災害対策に寄与するものであることから、今後も観測データの収集に努めるとともに、詳細な解析を進める予定である。

参考文献

- 1) 松沢勝, 竹内政夫: 気象条件から視程を推定する手法の研究, 雪氷, 64(1), 77-85, 2002.
- 2) 松澤勝: 吹雪時の視程推定手法の改良に関する研究, 雪氷, 69(1), 79-92, 2007.
- 3) 日本雪氷学会: 新版雪氷事典, 東京, 古今書院, 50p, 2014.
- 4) B. E. Goodison, P.Y.T Louie and D. Yang: WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison Final Report, WMO/TD-No.872, Instruments and Observing Methods Report No.67, 318p., 1998.
- 5) R. Nitu, Y.-A. Roulet, M. Wolff, M. Earle, A. Reverdin, C. Smith, J. Kochendorfer, S. Morin, R. Rasmussen, K. Wong, J. Alastrué, L. Arnold, B. Baker, S. Buisán, J.L. Collado, M. Colli, B. Collins, A. Gaydos, H.-R. Hannula, J. Hoover, P. Joe, A. Kontu, T. Laine, L. Lanza, E. Lanzinger, GW Lee, Y. Lejeune, L. Leppänen, E. Mekis, J.-M. Panel, A. Poikonen, S. Ryu, F. Sabatini, J. Theriault, D. Yang, C.

Genthon, F. van den Heuvel, N. Hirasawa, H. Konishi, H. Motoyoshi, S. Nakai, K. Nishimura, A. Senese and K. Yamashita: WMO Solid Precipitation Intercomparison Experiment (SPICE) (2012 - 2015), Instruments and Observing Methods Report No.131, 1445p., 2018.

- 6) 横山宏太郎, 大野宏之, 小南靖弘, 井上聡, 川方俊和: 冬期における降水量計の捕捉特性, 雪氷, 65(3), pp. 303-316, 2003.
- 7) 大宮哲, 松澤勝: 強風時における雨量計の降雪粒子捕捉率に関する検討, 寒地土木研究所月報, No. 769, pp. 2-8, 2017.
- 8) 酒井武, 上甲実, 熊本真理子: 非固形降水に対する転倒ます型雨量計の風よけの影響調査, 測候時報, 78. 4, pp. 179-183, 2011.
- 9) 吉田作松: 積算雪量計の研究 (第二報) 主として型別の降雪捕集率決定ならびに積算雪量計実用化のための吟味, 気象庁研究時報, 11(6), pp. 507-524, 1959.
- 10) 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臨界風速, 昭和 61 年度日本雪氷学会秋期大会講演予稿集, p. 252, 1986.

共同研究報告書
COOPERATIVE RESEARCH REPORT of P.W.R.I.
No.537 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