

吹雪量の観測値と複数の推定手法による推定値との比較

— 石狩吹雪実験場における観測結果より —

Comparison of the snow transportation rate by observation and some estimation methods - Using results of observation on the Ishikari Blowing-Snow Test Field -

武知 洋太¹, 大宮 哲¹, 原田 裕介¹, 高橋 丞二¹
Hiroataka Takechi¹, Satoshi Omiya¹, Yusuke Harada¹, Joji Takahashi¹
Corresponding author: hiro-takechi@ceri.co.jp (H. Takechi)

道路における吹雪災害を軽減していくには、暴風雪時に発生する道路上の吹きだまりを事前予測していくことが重要であり、このためには累計の吹雪量を正確に推定していくことが必要となる。吹雪量を推定する方法は、これまで複数の方法が検討されているが決められた方法がないのが現状である。そこで本論では、吹雪量について石狩吹雪実験場での飛雪流量の観測値から算出し求めた値と風速を基に吹雪量を求める既往の経験式から見積もった推定値を比較し、推定手法の課題や改善方法について考察した。

1. 背景

積雪寒冷地の道路では、吹雪による吹きだまりが発生し車両が立ち往生するなどの吹雪災害が発生している¹⁾。このような吹雪災害を軽減していくには、暴風雪時に発生する吹きだまりを事前予測していくことが重要であり、このためには暴風雪イベントにおける累計の吹雪量を正確に推定していくことが必要となる。しかし、吹雪量を推定する方法は、これまで複数の方法が検討されているが決められた方法がないのが現状である。



図1 調査箇所

表1 各観測事例の期間と気象条件

	日付	開始時刻	終了時刻	風速 (m s ⁻¹)			気温 (°C)			累計降雪量 (mm)
				平均	最大	最小	平均	最大	最小	
事例1	2018/1/25	8:00	18:00	7.9	10.7	1.7	-6.0	-4.0	-12.6	2.8
事例2	2019/1/17	9:50	18:00	10.4	14.2	6.4	-9.3	-5.4	-13.4	0.9
事例3	2019/1/18	9:50	18:00	10.2	13.1	7.7	-4.5	-3.1	-6.0	3.0
事例4	2019/2/8	8:30	18:00	9.7	11.2	7.0	-13.6	-13.3	-13.9	1.7

2. 調査方法

2. 1 飛雪流量の観測

著者らは、北海道石狩市にある寒地土木研究所石狩吹雪実験場 (N43°13', E141°24' : 図1) において、吹雪時の卓越風向風上に 200~300m 以上の吹走距離を有する箇所にて飛雪流量の観測を行った。ここで飛雪流量 q (g m⁻² s⁻¹)、とは、単位面積を単位時間に通過する雪粒子の質量である。飛雪流量の計測は地上高 1m, 3m, 7m に飛雪粒子係数装置 (新潟電気製 SPC-95) (以下、SPC とする) を設置し 2017 年度、2018 年度の冬期間に観測した。また、吹雪が発生した表1に示す期間には、雪面から高さ 0.1m に SPC を追加で設置し、高さ 0.1m の飛雪流量を観測した。

飛雪流量の観測時には、高さ 6.2m に設置した風向風速計により風速を観測した。さらに、観測箇所近傍に設置した気温計と二重柵基準降水量

計により気温 (°C) と降雪量 (水量換算値) (mm) を観測した。表1に、観測事例毎の風速、気温、累計降雪量の観測結果を示した。

2. 2 飛雪流量の観測値を用いた吹雪量の算出

SPC で観測した各高さの飛雪流量 q を基に、式 (1) の通り高さ 5m までの吹雪量 Q_5 (g m⁻¹ s⁻¹) を台形近似により求めた。なお、算出期間は表1に示す各事例の期間とし 10 分毎に算出した。

$$Q_5 = ((q_0 + q_{SPC0.1})/2) \cdot 0.1 + ((q_{SPC0.1} + q_{SPC1})/2)(h_{SPC1} - 0.1) + ((q_{SPC1} + q_{SPC3})/2)(h_{SPC3} - h_{SPC1}) + ((q_{SPC3} + q_5)/2)(5 - h_{SPC3}) \cdots (1)$$

¹ 寒地土木研究所

ここで, q_0 , q_5 は雪面近傍 (雪面高さ 0.01m とする) と雪面高さ 5m の飛雪流量, $q_{SPC0.1}$, q_{SPC1} , q_{SPC3} は雪面高さ 0.1m と地上高さ 1m, 3m で SPC により計測した飛雪流量 ($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$) を示す. h_{SPC1} , h_{SPC3} は地上高さ 1m, 3m に設置した SPC の雪面からの高さを示す.

吹雪量の算出では, SPC による飛雪流量の観測値を用いることとしたが, 飛雪流量は雪面からの高さにより大きく変化する²⁾. このため, 式(1)の通り SPC による飛雪流量の観測高さは積雪深を考慮し雪面からの高さとした. また, q_0 は $q_{SPC0.1}$ と q_{SPC3} から外挿し算出した. なお, 雪面高さ 5m 以上の飛雪流量は, 地吹雪に起因した飛雪が少なく高さの違いによる変化が小さいと考えられる. そこで, q_5 には q_{SPC7} を用いた. なお, 本手法で求めた吹雪量を本論では観測値という.

2. 3 既往の経験式による吹雪量推定

(1) 推定手法 1

松澤ら²⁾は本観測と同じ石狩吹雪実験場において吹雪量を観測し, 式(2)の経験式を得ている. なお, この式は降雪終了直後の降雪を伴っていない時の最大吹雪量を風速 1 m s^{-1} 毎に求め導かれた結果である.

$$Q_5 = 0.005 U_{1.2}^4 \quad \cdots(2)$$

ここで, Q_5 は高さ 5m までの吹雪量 ($\text{g m}^{-1} \text{s}^{-1}$), $U_{1.2}$ は高さ 1.2m での風速 (m s^{-1}) を示す.

推定手法 1 では, 式(2)を基に地吹雪発生時における吹雪量を 10 分毎に見積もった (以下, 推定値 1 とする). ただし, 式(1)の適用は以下の地吹雪発生条件を満たす場合とした. 地吹雪発生の判別は竹内ら³⁾の降雪時における地吹雪発生臨界風速を参考とし, 以下の条件により行った.

【地吹雪判定条件】:

$$U_{10} \geq 5 \text{ m s}^{-1} \quad \text{かつ} \quad q_{SPC1} - q_{SPC7} > 0$$

ここで, q_{SPC1} , q_{SPC7} は地上高さ 1m, 7m の SPC により観測された飛雪流量 ($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$), U は高さ 10m での風速 (m s^{-1}) を示す.

ただし, 高さ 1.2, 10m の風速は高さ 6.2m の風速から対数則 (雪面粗度: $1.5 \times 10^{-4} \text{ m}$) より求めた.

(2) 推定手法 2

大宮ら⁴⁾は本観測と同じ石狩吹雪実験場において吹雪量を観測し, 高さ 7m までの降雪を含め

た吹雪量を推定する方法について, 式(3)を提案している. なお, 式(3)の第 1 項は地上から高さ 7m までの降雪成分と風速の積により降雪成分の吹雪量を示したものであり, 第 2 項は地吹雪成分の吹雪量を松澤ら²⁾と同様の方法で観測結果から導いている. 本研究では高さ 5m までの吹雪量を推定するため, 第 1 項は高さ 5m までの降雪成分とするため式(4)の通り改変した.

$$Q_7 = 1.42 P' U_{10} + 0.00053 U_{10}^{4.6} \quad \cdots(3)$$

$$Q_5 = 0.98 P' U_{10} + 0.00053 U_{10}^{4.6} \quad \cdots(4)$$

ここで, Q_5 は高さ 5m までの吹雪量 ($\text{g m}^{-1} \text{s}^{-1}$), P' は降雪強度 (mm h^{-1}), U_{10} は高度 10m での平均風速 (m s^{-1}) を示す.

推定手法 2 では, 式(4)を基に吹雪量を 10 分毎に見積もった (以下, 推定値 2 とする). なお, 地吹雪発生判別の方法は推定手法 1 と同様とし, 地吹雪発生時にのみ地吹雪成分の吹雪量 (式(4)の第 2 項) を算出した.

(3) 推定手法 3

小林ら⁵⁾は札幌市で風向に直角に掘られた溝に捕捉された雪の量を観測し, 風速との関係から主に地吹雪に起因する吹雪量を推定する経験式を提案している.

$$Q = 0.03 U_1^3 \quad \cdots(5)$$

ここで, Q は吹雪量 ($\text{g m}^{-1} \text{s}^{-1}$), U_1 は高さ 1m での風速 (m s^{-1}) を示す.

推定手法 3 では, 式(5)を基に地吹雪発生時における吹雪量を 10 分毎に見積もった (以下, 推定値 3 とする). なお, 地吹雪発生の判別方法は推定手法 1 と同様とし, 地吹雪発生条件を満たした場合に式(5)により吹雪量を見積もった.

3. 調査結果と考察

吹雪量の観測値と 3 つの経験式 (式(2), (4), (5)) より見積もった推定値から各事例の観測開始から終了まで (表 1) の累計吹雪量をそれぞれ算出し, 両者の関係を示した (図 2). また, 10 分毎に算出した吹雪量の観測値と 3 つの推定値との関係を事例毎に示した (図 3). 図 4 には事例毎の吹雪量の観測値と 3 つ推定値, 気温, 高さ 10m の風速, 降雪強度の時系列変化を示した.

図 2a)d) より, 事例 1 の観測途中や事例 4 の観測期間の後半において累計吹雪量の推定値が観

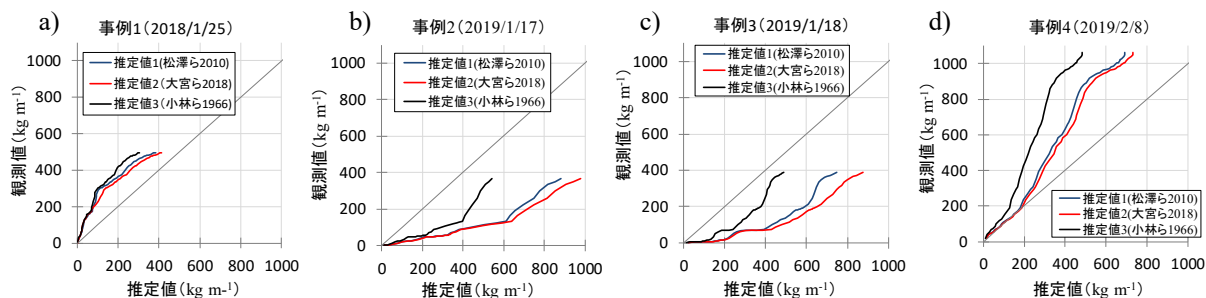


図2 観測値による累計吹雪量と推定値による累計吹雪量との関係

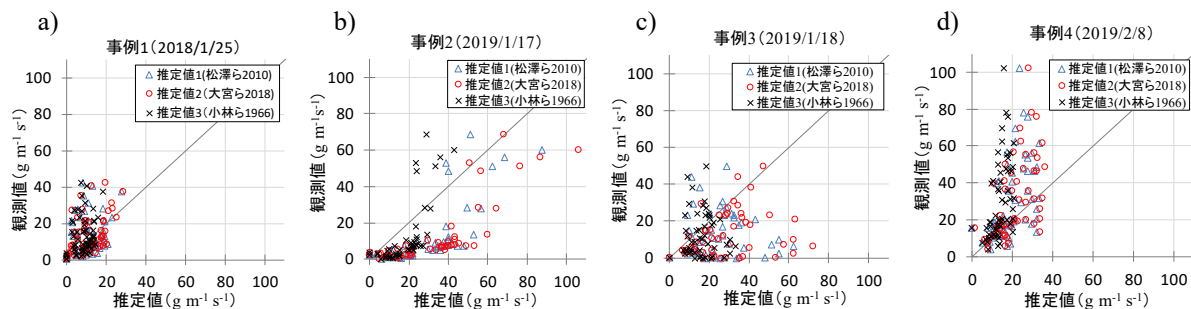


図3 吹雪量の観測値と推定値との関係 (10分値)

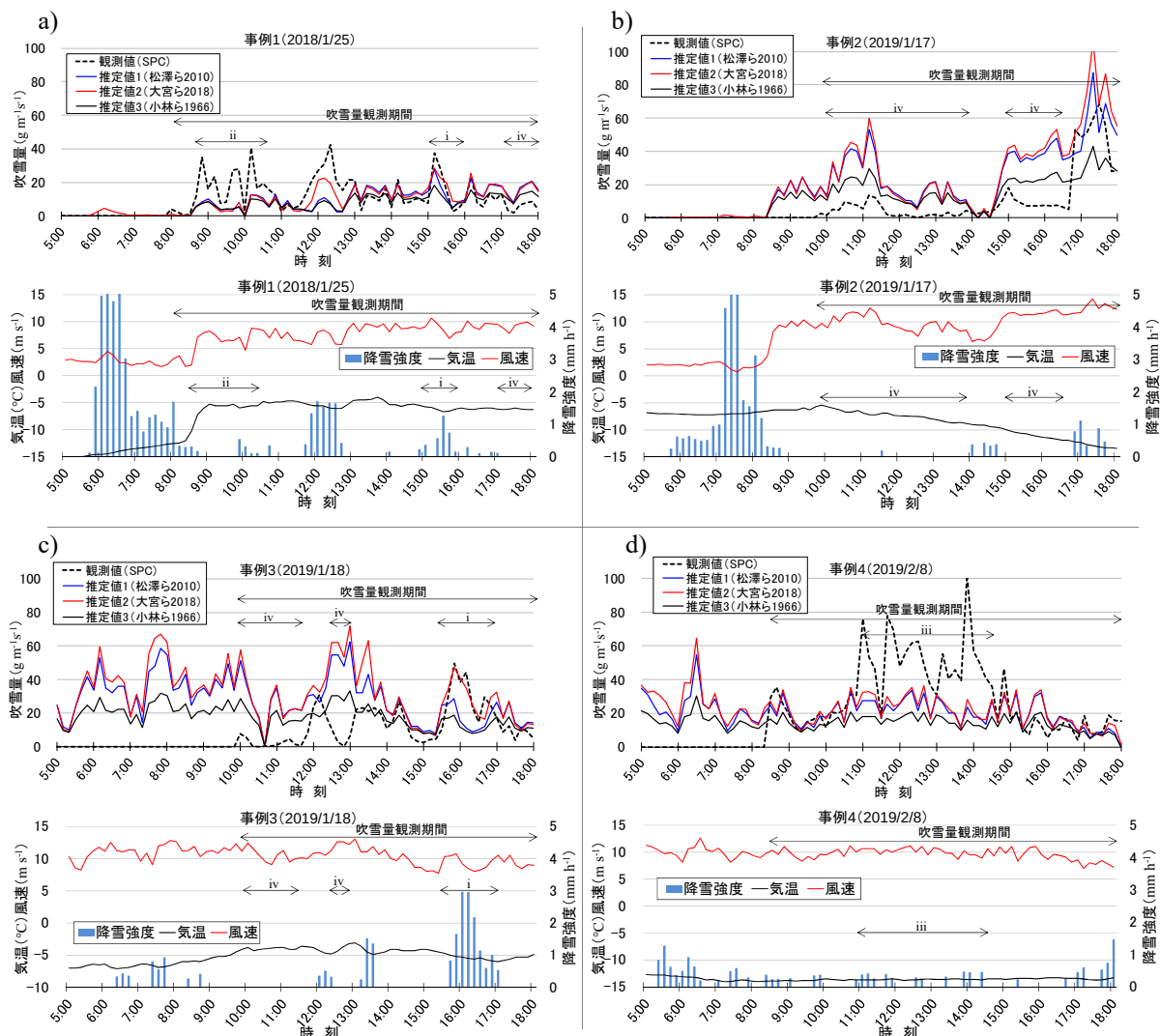


図4 吹雪量 (観測値と推定値) 及び各種気象要素の時系列 (10分値)

測値を大きく下回った。図 3a)c)d)より、事例 1, 3, 4 において吹雪量の 3 つの推定値はいずれも観測値に概ね一致するデータが多く見られたが、観測値を下回るデータも多く見られた。

図 4 より、事例 1 の 15~16 時頃 (図 4 a) (i)) 及び事例 3 の 15 時半~17 時頃 (図 4 c) (i)) の吹雪量に着目すると、推定値 2 は概ね実測値に一致しているが、推定値 1 や推定値 3 については実測値より過小であった。この期間は、降雪強度が比較的強い時間帯であった。式(2)及び式(5)では降雪成分の吹雪量を直接考慮していないことから、このことが推定値 1 や推定値 3 が実測値に比べて過小であった要因と考えられる。

また、事例 1 の 8 時半~10 時半頃 (図 4 a) (ii)) には吹雪量の 3 つの推定値がいずれも観測値を下回っている。この時間帯は、風速が 10 m s^{-1} 未満で降雪もあまり観測されていない条件下であったが、直前に気温-13~-15℃の低温下で降雪が多く観測されている。このため、地吹雪を発生させる新積雪が十分存在し地吹雪が発達しやすかったことが考えられる。さらに、事例 4 の 11~14 時半頃 (図 4 d) (iii)) の時間帯においても、吹雪量の 3 つの推定値はいずれも実測値を下回っている。この時間帯の気象条件を確認すると、気温-13℃の低温下において風速が概ね 10 m s^{-1} を超過し降雪も断続的に発生していた。なお、式(2)、(5)は気温-1~-8℃での観測結果、式(4)は積雪表面温度が-4~-7℃における観測結果に基づいて経験式が設定されている。このため、概ね気温-10℃未満の低温下での降雪時や降雪終了直後においては、既往の経験式 (式(2), (4), (5)) は吹雪量を過小評価してしまう恐れがあると考えられる。

図 2b)c)より、事例 2 及び 3 において観測開始から終了までの累計吹雪量の 3 つ推定値はいずれの推定結果についても観測値を大きく上回った。また図 3b)より、事例 2 では吹雪量の推定値のほとんどが実測値の 2 倍以上と大きかった。なお、事例 2 では観測期間中の累計降雪量 (水量換算値) が 0.9mm と少なく (表 1)、このことが大きな要因であったと考えられる。

また図 4 より、事例 1 の 17~18 時 (図 4 a) (iv))、事例 2 の 10~14 時、15~16 時半 (図 4 b) (iv))、事例 3 の 10~11 時半、12 時半~13 時の時間帯 (図 4 c) (iv)) の吹雪量に着目すると、3 つの推定値はほとんどが実測値を上回っており、特に推定値 1 と推定値 2 は実測値との乖離が大きかった。

この期間の気象条件を確認すると、降雪がほとんど観測されていない時間帯であることがわかる。

吹雪量の推定値はいずれも各風速における吹雪量の上限值 (飽和吹雪量) から設定された経験式より見積もっている。一方、これらの期間は降雪を伴っていなかったことにより吹雪が十分発達していなかったことが考えられる。このため、式(2)、(4)、(5)の経験式により降雪を伴っていない場合の吹雪量を推定する場合には、実際よりも吹雪量を過大評価してしまう恐れがある。降雪を伴わない場合には、風上に存在する吹雪の供給源になり得る積雪量等から吹雪の持続性を別途評価していくことが、吹雪量を推定する上では必要と考えられる。

4. まとめ

本論では、飛雪流量 q の観測結果を基に高さ 5m までの吹雪量 Q_5 を算出し、既往の経験式 (式(2), (4), (5)) による推定値と比較した。その結果、概ね気温-13℃未満の低温下における降雪時や降雪終了直後には、既往の経験式では吹雪量を過小評価してしまう恐れがあることを明らかにした。一方、降雪を伴わない場合にはいずれの経験式を用いた場合においても吹雪量を実際より過大に見積もってしまう場合があり、風上に存在する吹雪の供給源になり得る積雪量等から吹雪の持続性を併せて評価していくことが、吹雪量を推定する上では必要と考えられる。

【参考文献】

- 1) 吾田洋一, 松澤勝, 伊東靖彦, 横山博之, 山田毅, 2010: えりも町での吹きだまり調査報告, 雪氷研究大会(2010・仙台)講演要旨集, 62
- 2) 松澤勝, 金子学, 伊東靖彦, 上田真代, 武知洋太, 2010: 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, 45-48.
- 3) 竹内政夫, 石本敬志, 野原他喜男, 福沢義文, 1986: 降雪時の高い地吹雪の発生限界風速, 昭和 61 年度日本雪氷学会全国大会予稿集
- 4) 大宮哲, 武知洋太, 高橋丞二, 松澤勝, 2018: 降雪時における吹雪量推定式の提案—降雪強度と風速による吹雪量の算定—, 雪氷研究大会(2018・札幌)講演要旨集, 273
- 5) 小林大二, 1969: みぞによる地吹雪量の測定, 低温科学 物理編, 27, 99-106

V_1 : 高さ 1 m の風速(m s^{-1})

P_h : 時間降水量(mm h^{-1})

である. なお w_b は風速の鉛直分布式を用いて,

$$w_b = 0.031 \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{1}{z_0}\right) - 0.15 \quad \dots (3')$$

とする.

以上の式と値を用いることで, 高さ 10 m の風速 V_{10} と時間降水量 P_h から任意の高さの飛雪流量 $q(z)$ を算出することができる.

2. 2 飛雪流量と視程の関係式

吹雪時の視程と飛雪流量は関係が深く, 竹内・福沢²⁾や, 松沢・竹内³⁾が, 視程と飛雪流量との実験式を示している. 武知ら⁴⁾は, 一般市民を被験者とした実験を行い, 既往研究のデータに加えて分析し, 実験式(式(4))を得た. 本研究では式(4)を用いて, 任意の高さの飛雪流量 $q(z)$ から視程 $Vis(z)$ を求める. なお, 本研究では, 道路構造令に示される小型車のドライバーの目線高さである高さ $z = 1.2 \text{ m}$ での視程を求める.

$$Vis(z) = 10^{-0.886 \log(q(z)) + 2.648} \quad \dots (4)$$

2. 3 飛雪流量を用いた吹雪量の推定方法

吹雪量は飛雪流量を鉛直方向に積分した値であり, 降雪がある場合, 積分の上端を定めないと値が無限になる不都合が生じる. このため, 本研究では, 演算対象の上限の高さを 7 m とする.

松澤⁵⁾は, 解析的に式(1)を高さ z で積分して, 浮遊層の吹雪量を求める式を示した. そして, 跳躍層の吹雪量を Kobayashi⁷⁾の実験式より算出し, 両者の和を取ることで全層の吹雪量を求める方法を示した. しかし, 本研究では, 簡易さを優先し以下の式(5)より吹雪量 $Q (\text{g m}^{-1} \text{s}^{-1})$ を求める.

$$Q = \{q(0.1) + q(0.2) \dots + q(6.9) + q(7.0)\} \cdot 0.1 \quad \dots (5)$$

図 1 は, 式(5)で求められる吹雪量 Q の模式図である. 高さ 0.5~6.7 m は省略しているが, 網掛けの部分の部分が吹雪量になる. ところで, 実際の飛雪流量の鉛直分布は連続であり図の実線のようになる. 従って, この手法の場合, 実際の吹雪量を過小評価することになる. これについては, 後で議論するが, 本研究は, 実務者が目安として吹雪量から吹雪の強さを把握する方法を提示することが目的なので, 厳密さを欠くが, 本章では, この手法を用いる.

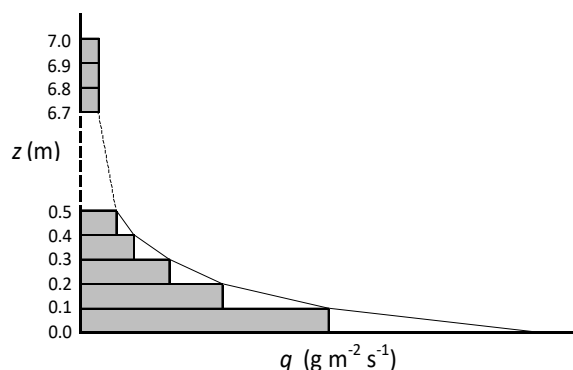


図 1 吹雪量 Q 算出の模式図. 図の網掛け部分の総和が吹雪量に相当する.

3. 計算結果

吹雪量の計算においては, 以下の値を式(1)~(3)に与えて飛雪流量を求め, 式(4)から視程を, 式(5)から吹雪量をそれぞれ算出した.

$V_{10} = 7.5, 10.0, 12.5, 15.0, 17.5, 20.0 (\text{m s}^{-1})$

$P_h = 0.0, 1.0, 3.0, 5.0 (\text{mm h}^{-1})$

図 2 は, 計算結果である. 時間降水量 P_h によらず, 視程と吹雪量との間には, 一定の関係があり, 両対数のグラフで直線になることがわかる.

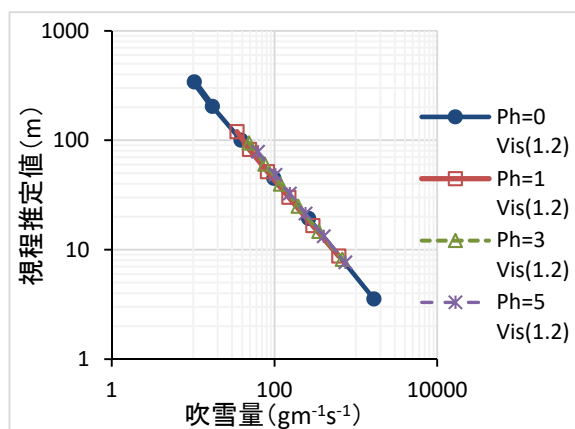


図 2 吹雪量と高さ 1.2 m の視程の推定値との関係. P_h は時間降水量(mm h^{-1}).

4. 跳躍層を考慮した吹雪量推定手法の改良検討

ところで, 2.3 節で断ったように, 上記の手法では, 吹雪量を過小評価する. 特に, 雪面近くの跳躍層での吹雪量の推定誤差が無視できない可能性がある. そこで, 雪面付近の吹雪量の推定に関して改良を検討する.

松澤ら⁸⁾は, 任意の高さの飛雪流量と雪面からその高さまでの吹雪量との関係を解析した. 雪面から高さ 0.1 m まではタンス型ネット式吹雪計を, 高さ 0.3, 0.5, 1.0 m では筒型吹雪計を用いて飛