

ディストロメータを用いた新雪密度の推定手法

高見 和弥*

A Method to Estimate Newly Fallen Snow Density Based on Disdrometer Data

Kazuya TAKAMI

This study proposes a method to estimate the density of newly fallen snow using disdrometer data. By analyzing the particle size and fall velocity distributions obtained from a disdrometer, the degree of riming is quantified and used to derive snow density. Compared to conventional temperature-based methods, the proposed approach shows a stronger correlation ($R = 0.78$) and significantly lower RMSE (10.5 kg m^{-3}). This technique enables automated, high-frequency estimation of snow density, improving snowfall depth calculations and snow hazard assessments, especially under sub-zero conditions where conventional temperature-based methods are less accurate.

キーワード：降雪，着雪，新雪密度，雪水比，ディストロメータ

1. はじめに

冬季の鉄道の運行の安全性，安定性の確保を目的として，鉄道会社は積雪深などを基に運転規制や除雪の実施判断を行っている。このため，路線上のどこで，どれくらいの，どのような雪が降ったかを精度よく把握することが的確な運転規制を行うためには重要である。一般に利用できる雪の量の情報として，気象庁の観測点の一部では積雪深の観測データが提供されている。しかし，鉄道固有の雪の状況として，鉄道の軌道内に降り積もった雪は列車が通過することで舞い上げられたり，押し固められたりするために鉄道用地外に積もっている雪とは量や性状が異なる。このため，前の列車が通過してから次の列車が通過するまでの間に降った雪を沿線の任意の地点で逐次評価することが必要となる。近年，高精度な気象レーダーの普及によって降水量の面的なデータが一般に利用できるようになってきた。この降水量に新雪密度（降り積もったばかりの積雪の密度）と既知量である液水の密度の比（雪水比）をかけることで，降雪深（新たに降り積もった雪の深さ）に変換することが可能となる。また，例えば車両床下への着雪量に対しては，積雪表層の密度が小さいほど着雪量が大きくなる¹⁾など，新雪密度の値そのものも雪害リスクを評価するために重要なパラメータである。

新雪密度の観測値は，一定の時間に降った雪の体積と重量を測定することで求められる。対象とする時間帯より前に降り積もった雪の圧密による影響を除外するため，一般には雪板を置いてその上に積もった雪を測定する^{2)~6)}。すなわち，人力による観測が必要であり，高頻度での定常観測が難しい。ゆえに観測員が常駐している場所でも多くは日降雪を対象とした観測であり，研究目的であっても1時間程度かそれより短い時間間隔で観測を行っている研究は少ない⁴⁾⁶⁾⁷⁾。雨量計や積雪深計など定常観測が可能な機器を利用し，雪の体積（深さ）は積雪深計の差分値から，重量は雨量計から求めることも可能ではあるが，積雪深計による観測では対象の時間帯より前に降り積もった雪の圧密による積雪深の変化を除外することができない。圧密量を推定して補正する⁷⁾⁸⁾⁹⁾方法も考えられるが，根雪になるような豪雪地帯では既積雪の圧密による沈降を精度よく計算することは難しく，降雪，積雪量が大きいかほど誤差が増加する⁸⁾。降水量，積雪深の観測についても，雪は雨に比べて降水強度が小さいためセンサーの分解能の影響が大きく，例えば

* 防災技術研究部 気象防災研究室

気象庁観測点の積雪深計，雨量計の分解能（積雪深: 1 cm，雨量: 0.5 mm）では事例ごとの差を十分に表現することは難しい。また，固体降水に対しては風速の雨量計の捕捉率に対する影響が大きく，しばしば降水量を過小評価することとなる¹⁰⁾。加えて，積雪深計は雨量計に比べて設置箇所が少なく，特に首都圏など降雪の頻度が少ない地域では限られた観測地点にしか設置されていない。このように新雪密度は定常的な実測が困難なため，何らかの自動観測が可能な機器の観測データから推定を行う手法が必要である。

これまで実運用においては，新雪密度は一定の値として与えたり（例：100kg m⁻³），気温などの気象観測値から簡易に推定されていた⁴⁾。しかし，気温で表すことができるのは主に雪の融解の有無による密度の違いで，気温が 0 °C 未満のときに支配的となる雪粒子の種別の違い（雪，霰など）による新雪密度への影響は表現できない。図 1 に鉄道総研の塩沢雪害防止実験所で観測した新雪密度と気温の関係を示す。赤破線は式(1)の経験曲線⁴⁾で， ρ_N は新雪密度[kg m⁻³]， T_a は地上気温[°C]である。

$$\rho_N = 53. \exp(0.488T_a) + 37.0 \tag{1}$$

全ての気温帯の観測値では気温と新雪密度の相関係数は 0.48 であるが，気温 0 °C 未満では相関係数は 0.26 と相関はない。これは気温が表現しているのは主に融解の有無であって雪，霰などの雪粒子の違いではないためである。一方で，図 2 に示すように気温 0 °C 未満でも雪粒子の種別が異なると密度は 2~3 倍異なることがあるため，雪粒子の種別による新雪密度の違いを無視することはできない。そこで，本研究では雪粒子の粒径・落下速度の分布が自動で観測できるディストロメータと呼ばれる機器で得られるデータを利用して，雪粒子の種別を考慮して新雪密度の推定が可能な手法を開発した¹¹⁾。

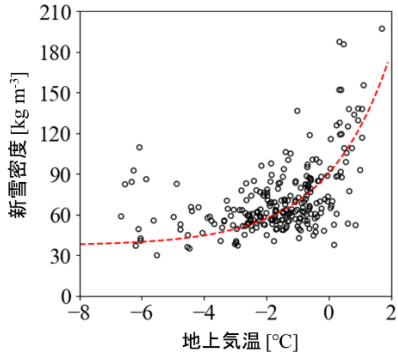


図 1 地上気温と新雪密度の関係

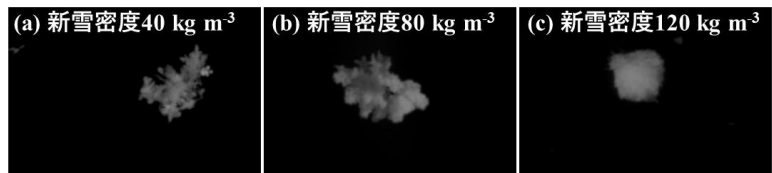


図 2 新雪密度 40, 80, 120 kg m⁻³の時に観測された雪粒子の画像の例

2. 研究の方法

2.1 観測データ

新潟県の内陸部，南魚沼市に位置する鉄道総研塩沢雪害防止実験所（37.04° N，138.85° E）で，新雪密度の直接観測と雪粒子の地上観測（2020-2021 年冬期～2023-2024 年冬期）を実施した。新雪密度の観測には断熱材（発泡ポリスチレン）で作成した 45 cm×45 cm の雪板を使用し，降雪時に屋外に設置した（図 3a）。設置の 1 時間後に雪板の上に積もった雪の深さを金尺で，重量を電子天秤で測定した。雪板には 10 cm ごとに板の上面から側面まで線が引いてあり，板の端部で積雪が丸まることの影響を考慮して，雪板の中央の 20 cm×20 cm を計測の対象とした（図 3b）。

雪粒子の観測には雪粒子の粒径，落下速度や形状などを測定できるディストロメータを利用した。防風ネット内に光学式ディストロメータ Parsivel²（OTT Hydromet GmbH）と，ビデオディストロメータ G-PIMMS

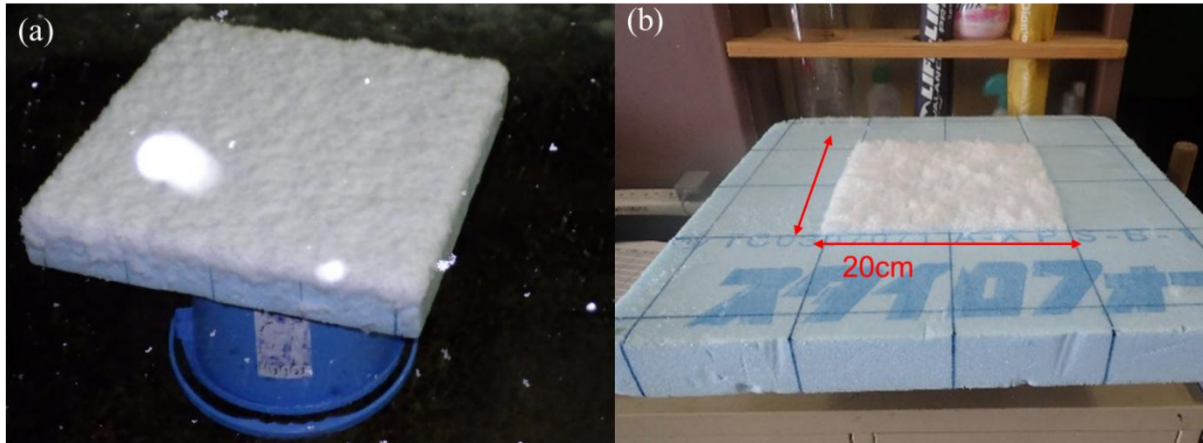


図3 雪板による新雪密度の観測，(a)降雪の採取と(b)中央の20 cm×20 cmの計測
(a)の白く反射している箇所は降雪粒子の映り込みによるもの

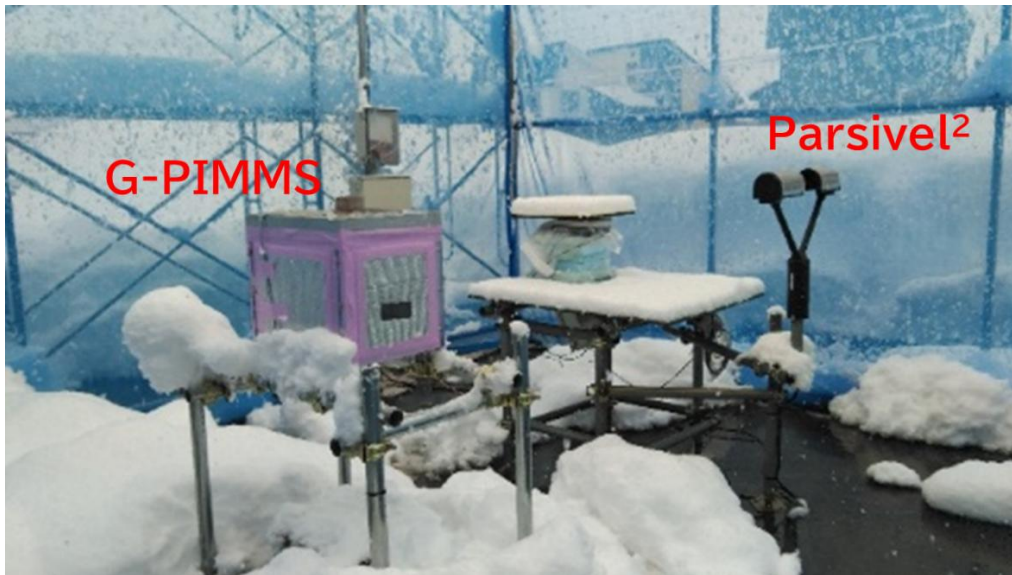


図4 防雪ネット内に設置したG-PIMMSとParsivel². Takami *et al.* (2022)¹¹⁾より引用.
ライセンス：Creative Commons Attribution 4.0 International.

(Ground-based Particle Image and Mass Measurement System)¹²⁾を設置し雪粒子の地上観測を実施した(図4)。Parsivel²は可視光による光学式のディストロメータで、降水粒子がシート状のレーザーを通過し遮断する際の信号の遮断率から粒径と落下速度を計測できる。粒径、落下速度は設定した出力時間単位(本研究では1分間に設定)で32×32の粒径・落下速度のビン(粒径：0～26 mm，落下速度：0～22.4 m s⁻¹)ごとに粒子数が集計される。本研究では各ビンに設定された粒径、落下速度の中央値を、当該のビンの粒径、落下速度として利用した。Parsivel²は個々の粒子について粒径などを求めることができないが、後述するG-PIMMSに比べると観測の安定性に優れることや落下速度が得られる利点がある。

G-PIMMSは降水粒子、特に雪粒子の画像を直接観測するための機器であり、降水粒子が蓋部分に取り付けられた赤外線センサーを横切るとストロボが発光し、CCDカメラで降水粒子を含む幅30 mm×高さ20 mmの画像を取得できる¹²⁾。G-PIMMSは粒子の形状に関するパラメータ(縦横比、円形度等)を画像から直接取得できる点、目視によって粒子の種別を判別できる点に利点があるが、Parsivel²のように落下速度を得ることはできない。また、降雪粒子を取り込む開口部が雪に覆われることで欠測となることがあり、観測の安定性には課題がある。そこで、本研究では定量的な解析にParsivel²の観測データを利用し、G-PIMMS

は図 2 に示したように、画像から粒子の種別を調べるために利用した。観測データは新雪密度の評価時間に合わせて 1 時間ごとに整理した。

2.2 ライミング成長の度合い

融解を伴わない場合（積雪中に液水が存在しない場合）、氷の密度は決まっているため、積雪の密度は単位体積内の空隙の多さに依存する。このため、小さな粒子や過冷却水滴を捕捉して雪粒子内部の空隙が埋まるライミング成長が進むほど（図 2 の(a)の粒子から(b), (c)の粒子に変化するほど）新雪密度は大きくなる。このライミング成長の度合いに着目し、Parsivel²の観測で得られる粒径・落下速度分布から、平均的なライミング成長の度合いを求める方法を提案した¹¹⁾。粒径 D [mm]と雪粒子の密度 ρ_s [g cm⁻³]の関係について、式(2)のように同じ粒径に対してはライミングの度合い f_{rim} に依存する仮定¹³⁾¹⁴⁾を採用した。

$$\rho_s(D) = \alpha_1 f_{rim}(D) D^{\beta_1} \quad (2)$$

ライミング成長の度合い $f_{rim} = 1$ が最も軽いライミング無し雪片、 $f_{rim} = 5$ が最も重い霰に対応する。また、 f_{rim} について式(3)に示すように粒径の関数として、雪粒子の落下速度 V [m s⁻¹]とライミング無し雪片の経験的な落下速度 V_0 [m s⁻¹]の比の 2 乗で表す仮定¹⁵⁾を採用した。

$$f_{rim}(D) = \left(\frac{V(D)}{V_0(D)} \right)^2 \quad (3)$$

雪粒子が終端速度に達している（抗力と重力が釣り合っている）とすると、落下速度の 2 乗は式(4)のように同じ粒径に対しては、雪粒子の密度 ρ_s と抵抗係数 C_d の比を表す。すなわち、ライミング成長が進んだ重くて丸い（抗力係数が小さい）雪粒子ほど式(3)の $f_{rim}(D)$ の値は大きくなる。

$$V^2 = \frac{4g}{3\rho_a C_d} \rho_s D \quad (4)$$

ρ_a は大気密度[kg m⁻³]、 g は重力加速度である。ライミング無し雪片の経験的な落下速度 V_0 について、式(5)の経験式¹⁶⁾を用いた。

$$V_0(D) = 0.8D^{0.16} \quad (5)$$

式(3)の f_{rim} は粒径の関数であるため、新雪密度と比較するためには事例ごとの代表値を求める必要がある。本研究では降水量に対する寄与で重みづけ平均することを考え、平均的なライミング成長の度合いとして、式(6)に示す F_{rim} を求め、 F_{rim} と新雪密度の関係性を調べた。

$$F_{rim} = \frac{\sum_i f_{rim}(D_i) M_0(D_i) N(D_i) \Delta D_i}{\sum_i M_0(D_i) N(D_i) \Delta D_i} \quad (6)$$

ここで、 D_i および ΔD_i は Parsivel²の i 番目のビンに対する粒径の値と幅[mm]、 $N(D_i)$ は i 番目のビンの粒子個数、 M_0 はライミング無し雪片の重量[mg]で式(7)の経験式¹⁶⁾を用いた。

$$M_0 = 0.073D^{1.4} \quad (7)$$

図 5 に F_{rim} に対応する雪粒子の例を示す。前述のように F_{rim} が 1 付近ではライミングが無い空隙が大きな雪片が、 F_{rim} が 5 付近では霰が対応している。 F_{rim} が 1 未満の値が現れるのは、既往研究におけるライミング無し雪片の観測¹⁶⁾よりも大きくて軽い粒子が観測されたためである。

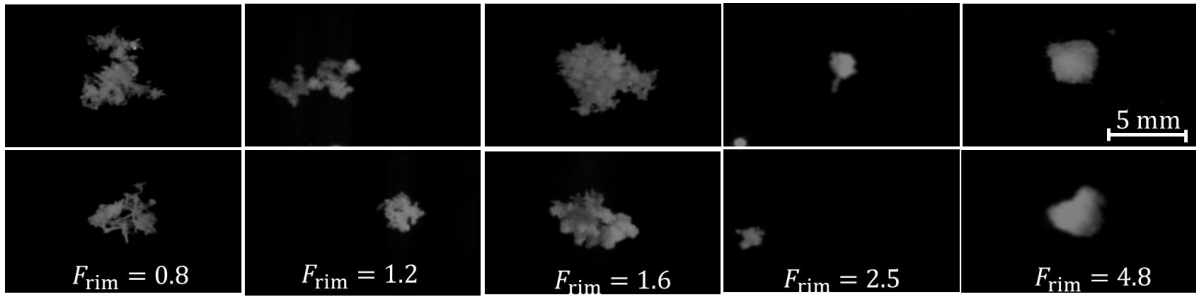


図5 平均的なライミング成長の度合い F_{rim} に対応する雪粒子
対象の1時間のうちから典型的な粒子で写りのよいものを2つずつ例示した

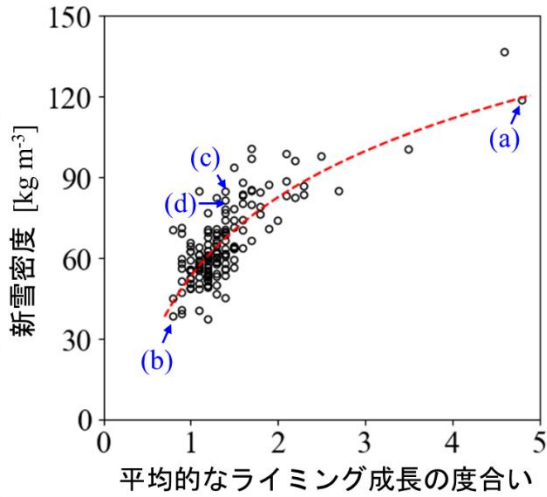


図6 平均的なライミング成長の度合い F_{rim} と新雪密度 ρ_N の関係(2022-2023年, 2021-2022年冬期), (a)~(d)は図7に例示する事例, 赤破線は式(8)の経験曲線.Takami *et al.* (2022)¹¹より引用. ライセンス: Creative Commons Attribution 4.0 International.

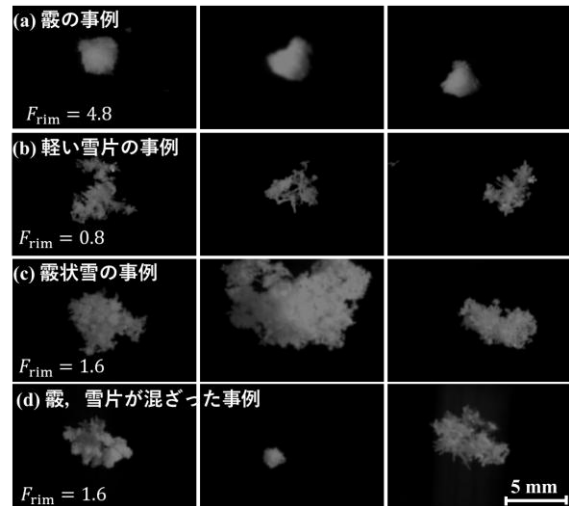


図7 図6に矢印で示した4事例で観測した雪粒子の画像例. Takami *et al.* (2022)¹¹より引用. ライセンス: Creative Commons Attribution 4.0 International.

3. 結果

3.1 ライミング成長の度合いと新雪密度の関係性

塩沢における光学式ディストロメータ Parsivel²による粒径, 落下速度の観測データから求めた F_{rim} と, 雪板を用いた新雪密度の直接観測のデータの関係を調べた. 解析に用いたデータは2020-2021, 2021-2022年冬期に観測したデータのうち, 気温が0℃未満で降雪深が10mm以上の157事例である. 降雪深が10mm未満の事例を除外したのは, 測定誤差の影響が大きくなるためである. 図6に平均的なライミング成長の度合い F_{rim} と新雪密度 ρ_N の関係を示した. 相関係数は0.78で, 図1で示した気温に対する相関係数0.26より高かった. 図5に示した分布に対して対数式で回帰分析を行い, 経験式(8)を得た¹¹⁾.

$$\rho_N = 42.3 \ln(F_{rim}) + 53.2 \quad (8)$$

また, 支配的な雪粒子の種類が異なる4事例について図7に雪粒子の画像例を示した. 図6, 7に示すように, 本研究で開発した式(8)による推定手法は霰や雪片といった種別の分類が明確な粒子が支配的な事例だけでなく, 図7(c)の霰と雪片の間のような雪粒子(霰状雪と呼ばれる)や, 図7(d)の霰と雪片が混在する事例についてもシームレスに扱うことが可能である.

3.2 気温による推定手法との比較

得られた経験式(8)による手法¹¹⁾と式(1)による従来の気温による推定手法⁴⁾を比較するため、2022-2023年、2023-2024年冬期に塩沢で気温0℃未満時に新雪密度を観測した67事例を対象に、観測した新雪密度と各手法による推定新雪密度を図8に示した。二乗平均誤差RMSEはそれぞれ10.5 kg m⁻³、24.9 kg m⁻³で、本研究で開発した式(8)による手法¹¹⁾は式(1)の気温による従来の手法⁴⁾よりも高い精度で新雪密度を推定できることが分かった。

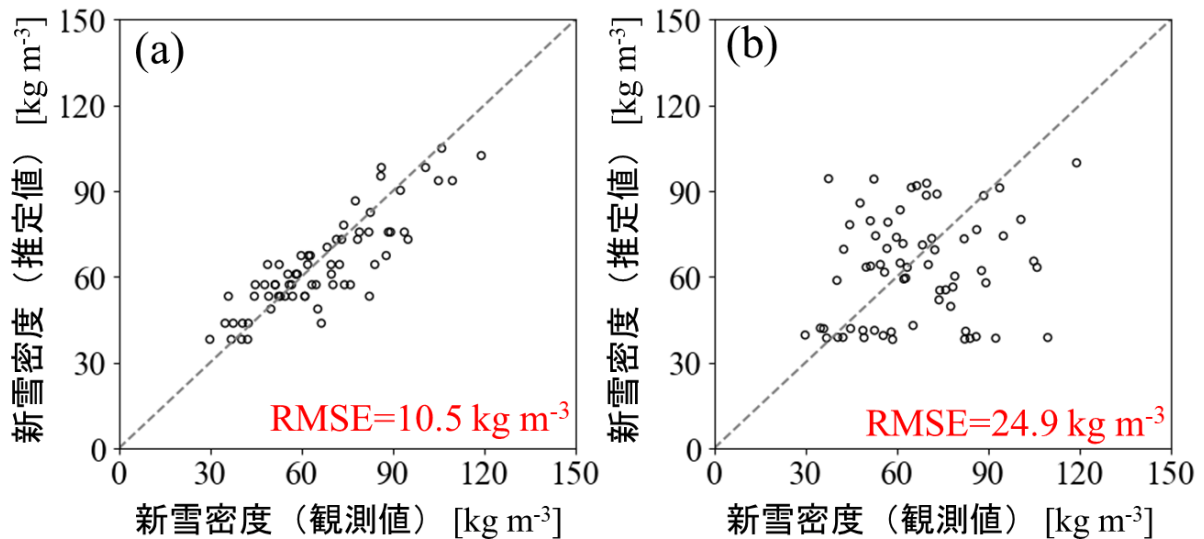


図8 新雪密度の観測値（塩沢、2022-2023年、2023-2024年冬期）と(a)本研究で得られたディストロメータの観測値による経験式(8)、(b)従来の気温による式(1)⁴⁾による推定値

4. まとめ

本研究では降水量から降雪深を求めるために必要となる新雪密度について推定する手法を開発した。従来は手動による観測か、気温による簡易で、特に気温0℃未満の乾いた雪の新雪密度に対して精度が悪い推定方法が利用されていた。そこで本研究では自動で雪粒子の粒径、落下速度の自動観測が必要な光学式ディストロメータの観測データを用いて新雪密度を推定することとした。

融解を伴わない場合（積雪中に液水が存在しない場合）、氷の密度は決まっているため、積雪の密度は単位体積内の空隙の多さに依存する。このため、小さな粒子や過冷却水滴を捕捉して雪粒子内部の空隙が埋まるライミング成長が進むほど新雪密度は大きくなる。このライミング成長の度合いに着目し、光学式ディストロメータの観測で得られる粒径・落下速度分布から平均的なライミング成長の度合いを求める方法を提案した。2020-2021年および2021-2022年冬期に塩沢雪害防止実験所で観測した157事例を対象に、平均的なライミング成長の度合いと新雪密度の関係を調べたところ、相関係数は0.78と、気温と新雪密度との関係に対する相関係数0.26に比べて高い相関が得られることが分かった。そこで、回帰分析を行った平均的なライミング成長の度合いと新雪密度との経験式を得た¹¹⁾。得られた経験式と気温による従来の経験式⁴⁾を用いて、2022-2023年、2023-2024年冬期に塩沢雪害防止実験所で観測したデータを対象に推定精度を確認したところ、本研究の経験式および従来の気温による式によるRMSEはそれぞれ10.5、24.9 kg m⁻³であり、本研究の手法を用いることで大きく推定精度が改善することが分かった。本研究の成果を基に、路線上の任意の地点での雪の重さ、量を推定、予測する手法の開発に取り組む予定である。

謝 辞

本研究で利用した観測データは鉄道総研，山口大学，日本気象協会の共同研究で取得したものである。

文 献

- 1) 鎌田慈，高橋大介，栗原靖，横倉晃，飯倉茂弘：軌道上の雪質を考慮した車両台車部の着雪量予測手法，鉄道総研報告，Vol.29，No.1，pp.11-16，2015
- 2) Judson, A., Doesken, N., "Density of freshly fallen snow in the Central Rocky Mountains, Bulletin of the American Meteorological Society," Vol.81, pp.1577-1587, 2000.
- 3) 梶川正弘，後藤博，猿渡琢，金谷晃誠，橋本正秀，菊地勝弘：新積雪密度と降雪粒子の諸特性の関係，雪氷，Vol.67，pp.213-219，2005
- 4) 野口守，小林，河島克久，飯倉茂弘，伊豫部勉，藤井俊茂：東北新幹線八戸・新青森間における雪害対策の研究（6）降雪直後の雪密度の気温依存性，雪氷研究大会講演要旨集（2010・仙台），p.174，2010
- 5) Wayand, N.E., Massmann, A., Butler, C., Keenan, E., Stimberis, J., Lundquist, J.D., "A meteorological and snow observational data set from Snoqualmie Pass (921 m)," Washington Cascades, USA, Water Resources Research, Vol.51, pp.10092-10103, 2015.
- 6) Ishizaka, M., Motoyoshi, H., Yamaguchi, S., Nakai, S., Shiina, T., Muramoto, K.I., "Relationships between snowfall density and solid hydrometeors, based on measured size and fall speed, for snowpack modeling applications, " The Cryosphere, Vol.10, pp.2831-2845, 2016.
- 7) Helfricht, K., Hartl, L., Koch, R., Marty, C., Olefs, M., "Obtaining sub-daily new snow density from automated measurements in high mountain regions, Hydrology and Earth System Sciences, " Vol.22, pp.2655-2668, 2018.
- 8) 遠藤八十一，小南裕志，山野井克己，庭野昭二：粘性圧縮モデルによる時間降雪深と新雪密度，雪氷，Vol.64，pp.3-13，2002
- 9) Lehning, M., Bartelt, P., Brown, B., Fierz, C." A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning: Part III: Meteorological forcing, thin layer formation and evaluation, " Cold Regions Science and Technology, Vol.35, pp.169-184, 2002.
- 10) 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，Vol.65，pp.303-316，2003
- 11) Takami, K., Kamamoto, R., Suzuki, K., Yamaguchi, K., Nakakita, E., "Relationship between newly fallen snow density and degree of riming estimated by particles' fall speed in Niigata Prefecture, Japan, " Hydrological Research Letters, Vol.16, No.4, pp.87-92, 2022.
- 12) Suzuki, K., Nakagawa, K., Kaneko, Y., Oki, R., Nakamura, K., "Microphysical features of solid/melting particles by ground-based direct observations for the GPM/DPR algorithm development, " Proceedings of the 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), pp.3941-3944, 2016.
- 13) Brandes, E.A., Ikeda, K., Zhang, G., Schonhuber, M., Rasmussen, R.M., "A statistical and physical description of hydrometeor distributions in Colorado snowstorms using a video disdrometer, " Journal of Applied Meteorology and Climatology, Vol.46, pp.634-650, 2007.
- 14) Zawadzki, I., Jung, E., Lee, G., "Snow studies. Part I: A study of natural variability of snow terminal velocity, " Journal of the Atmospheric Sciences, Vol.67, pp.1591-1604, 2010.
- 15) Bukovčić, P., Ryzhkov, A., Zrnčić, D., Zhang, G., "Polarimetric radar relations for quantification of snow based on disdrometer data, " Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol.57, pp.103-120, 2018.
- 16) Locatelli, J.D., Hobbs, P.V., "Fall speeds and masses of solid precipitation particles, " Journal of Geophysical Research, Vol.79, pp.2185-2197, 1974.