

沿線の気象情報を利用した新幹線台車の着雪量推定手法

鎌田 慈* 宍戸 真也* 佐藤 亮太*

Estimation Method for Snow Accretion Amount on Shinkansen Bgies using Weather Information
along the Railway Lines

Yasushi KAMATA Masaya SHISHIDO Ryota SATO

Shinkansen trains operating in snowy areas have snow accretions on their bogies by which ground facilities are occasionally damaged. To prevent such damage, snow removing operations are performed at stations. We developed a method to estimate the snow accretion amount in the following order: estimation of snow properties on the railway track based on weather information, estimation of amount of flying up snow, and prediction of the snow accretion amount based on the amount of flying snow. We confirmed that the amount of the snow accretion upon arrival at the station can be estimated within an error of 3cm.

キーワード：新幹線，台車，着雪，雪の舞い上がり量，着雪量推定

1. はじめに

積雪のある線路上を鉄道車両が走行すると、線路上の雪が舞い上げられて床下機器や台車部分へ雪が付着することで、着雪が成長する。これが走行時に落下すると地上設備を破損したり、分岐器に挟まることで不転換現象を引き起こすことがある¹⁾。この課題に対して、これまでに北海道の在来線において、気象条件と台車着雪量との関係を調べた研究^{2) 3)}、台車部分への着雪量の低減対策に関する研究⁴⁾が行われてきた。また、新幹線の着雪に関しては、東海道新幹線関ヶ原地区の散水濡れ雪化による雪の舞い上がり防止対策⁵⁾、床下機器のボディーマウント化等による車両床下機器への着雪防止対策⁶⁾などが実施されてきた。しかし、形状が複雑な台車部については根本的な対策が無く、気象状況によっては著しく着雪が成長することが確認されている。このような部位からの落雪被害を低減するため、前日の天気予報に基づいて、駅や車両基地などにおいて雪落とし作業が実施されている。雪落とし作業を効率的に実施するためには、着雪量を精度良く予測して作業人員を配置する必要がある。著者らは、これまで、降積雪地域の在来線から新幹線に乗り入れる車両を対象として、走行ルート沿線の気象情報から駅到着時の台車部の着雪量を推定する手法を開発してきた⁷⁾。しかしながら、この着雪量推定手法は、走行速度 130km/h までの車両に対するものであり、また、推定過程に地域的な気象データを用いた統計解析が含まれるために、速度 260km/h で走行する新幹線車両や他地域での着雪量の推定への適用性は不明であった。そこで、本研究では、新規路線の新幹線車両へも適用可能な着雪

量推定手法を作成することを目的として、駅での車両台車部の着雪量測定、高架橋上での気象観測と列車走行時の雪の舞い上がり量測定を実施し、沿線の気象情報から台車部フサギ板の着雪伸長量を推定する手法を作成した。

2. 分析に用いたデータ

対象としたのは、新青森・新函館北斗間（図 1）を走行する北海道新幹線上り列車である。本区間では、着雪量が多くなると予想される日には、新青森駅において上り列車の車両床下の着雪を除去するための雪落とし作業が実施されている。



図1 北海道新幹線走行ルートと沿線気象庁観測点

* 防災技術研究部 気象防災研究室

2.1 車両台車部の着雪量

2.1.1 撮影方法と読み取り方法

新青森駅の上り線ホーム下に高速度カメラを設置（図2）し、冬期に車両が駅に進入する際の車両床下の着雪画像（動画）を撮影した。この動画からフサギ板が画像の中心となる静止画を台車毎に切り出し、読み取った台車部フサギ板の着雪伸長量（図3）を分析に用いた。



図2 新青森駅ホーム下のカメラ設置状況

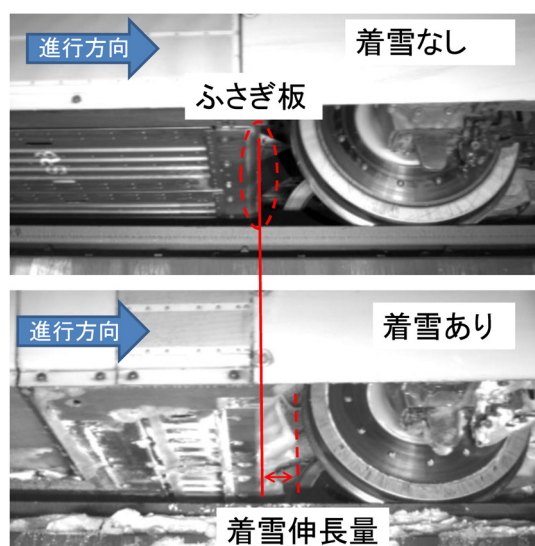


図3 撮影された台車部フサギ板の着雪状況

2.1.2 分析方法

2017年12月7日～2018年2月28日の観測期間内で、鉄道事業者が着雪「中」、「中～小」、「小」、「極小」、「極小～なし」、「なし」と判別した新青森駅到着時の上り列車（列車本数 $N = 1083$ ）について、編成内の進行方向後部の各台車部フサギ板に1号車から順番に番号（図4）

をつけて、判別ごとに観測期間中の各フサギ板番号の着雪伸長量平均値を求めた。また、列車毎に編成内の全フサギ板の着雪伸長量の平均値（編成平均）を求めた。

2.1.3 着雪量の分析

編成内での着雪伸長量の分布を着雪判別「中」と「小」を例に図5に示す。編成の中ではフサギ板番号1～3（1号車～2号車前位台車）の着雪量が多かった。また、5番以降のフサギ板では、奇数番号（各号車の前位台車）の着雪量が大きく、偶数番号（各号車の後位台車）の着雪量が小さくなる傾向を繰り返すことが同図からわかる。編成平均と編成毎のフサギ板番号1～3の着雪伸長量の平均値（No.1～3平均）との相関を図6に示す。No.1～3平均は、編成平均の着雪伸長量と相関関係がみられる。

着雪伸長量が多いフサギ板は、車両前方に多いが、編成平均が100mm程度であってもNo.1～3平均が0mmとなる場合があり、No.1～3平均を分析に用いると過小評価となる可能性がある。そこで、走行時の気象条件によって一編成全体の着雪量の多寡が決まると考えて、着雪量推定手法の開発で使用するフサギ板着雪伸長量には、編成平均を用いることとした。

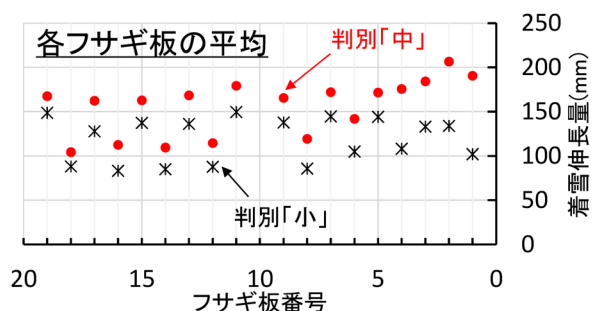


図5 編成内のフサギ板着雪量の分布

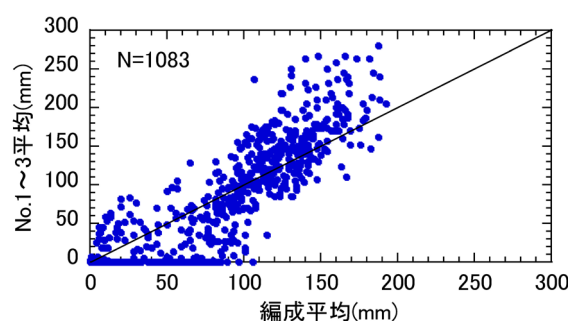


図6 編成平均とフサギ板 No.1～3 の平均着雪伸長量の比較



図4 編成中のフサギ板番号

2.2 気象データ

2017年度冬期（12月～2月）に新青森・津軽蓬田トンネル入口（新青森方坑口）間の高架橋上（青森県青森市内真部 左堰斜路：9k800m 付近）に観測機器を設置して得られた気温、降水量、日射量、積雪深を分析に用いた（図1）。また、着雪量推定手法の検証に用いた気象庁観測点は、青森と蟹田の2地点である。

2.3 雪の舞い上がり量

着雪量に影響を及ぼす雪の舞い上がり量は、2017年度冬期（12月～2月）に新青森・津軽蓬田トンネル入口間の高架橋上（左堰斜路）の上り線保守用通路に飛雪流量計 SPC（Snow Particle Counter, 新潟電機株式会社：SPC-S7）を設置（図7）して、列車通過時に飛雪フラックス（ $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$ ）を測定した。飛雪流量計 SPC は、スリット式のレーザーを投光し、受光部において通過する粒子の大きさ（粒径）に依存したレーザー光の減衰量と減衰した回数を測定することで、粒径別の個数をカウントする計測機である。飛雪フラックスは、飛雪粒子を球形氷と仮定し、測定された粒径から粒子の体積を求め、これに氷の密度を乗じて積算値を計算して求めている。なお、飛雪フラックスは速度に依存する⁷⁾が、観測機器を設置した左堰斜路における列車の走行速度は260km/hである。分析には、列車通過時に30秒間測定した平均値を用いた。



図7 飛雪流量計 SPC の設置状況

3. 着雪現象の発生過程と着雪量推定方法

3.1 着雪現象の発生過程

着雪は、以下の過程を経て発生すると考えられる。

- I．線路上への降雪・積雪、吹き溜まりの発生
- II．積雪がある線路上の列車走行
- III．列車走行による雪の舞い上がり（飛雪発生）
- IV．台車部への着雪

そこで、本研究では、これらの過程を追って着雪量を推定する手法を検討した。着雪量推定手法は、①沿線の気象情報から軌道上の雪質を推定し、②雪質、走行速度に応じた雪の舞い上がり量を推定し、③雪の舞い上がり量に応じた台車部着雪量を推定する手法である（図8）。次節からは①～③の推定方法について記す。

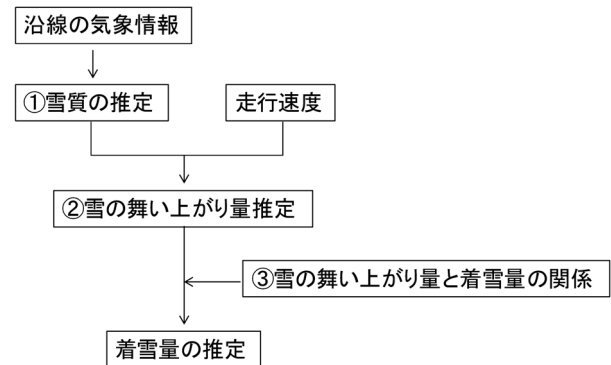


図8 着雪量推定手法のフロー図

3.2 雪質の推定

3.2.1 雪質と舞い上がりメカニズム

列車走行によって引き起こされる舞い上がりのメカニズムとして、①列車走行によって生じる風のせん断力が雪面上の雪粒子を動かすもの⁸⁾、②列車通過時の気圧の急速降下に伴って雪面と積雪内部に発生した圧力差によって積雪内部に空気の移動が生じ、その結果雪粒子が飛散するもの、が考えられる^{9) 10)}。どちらのメカニズムでも、降雪直後の新雪のような雪粒子間の結合力が弱い場合に舞い上がり量が多く、降雪後、時間が経過し、焼結（接触している雪粒子が0℃以下で固結する現象）や圧密¹¹⁾等によって積雪表層の雪密度が増加して雪粒子間の結合力が増加すると舞い上がり量は少なくなると考えられる。そこで、本研究では、雪の舞い上がりに影響する雪質を代表するものとして雪密度に着目した。

3.2.2 積雪表層雪密度推定モデルの概要

降雪後、積雪表層の新雪は日射や気温の影響を受けて表面融雪が発生し、密度が増加すると仮定する。この過程を積雪の構成図を用いて検討し、積雪表層雪密度推定モデルを開発した¹²⁾。このモデルでは、以下を仮定し、日射と気温による融雪量を用いて密度増加を計算する。

- ・ 単位体積 $V=1\text{m}^3$ 、単位面積 $S=1\text{m}^2$ を考える。
- ・ 表面付近の雪温は0℃である。
- ・ 融雪の過程では蒸発による水分の損失は無く、下層への浸透も無い。
- ・ 圧密による密度増加は無視できる。
- ・ 降雪直後は乾き雪である。
- ・ 積雪中の空気の質量は無視できる。

- ・ 水と氷の相変化時の体積変化は無視できる。

融雪前の密度を ρ_s 、融雪後の密度を ρ_{s1} とすると、融雪による密度増加は式(1)で表される(図9)。

$$\rho_{s1} = \frac{m}{V'} = \rho_s \left(\frac{m_i}{m_i - m_M} \right) \quad (1)$$

ここで、 m_i は氷の質量(kg)であり、融雪質量 m_M (kg)は表面融雪量 M (mm)から式(2)を用いて換算する。

$$m_M = M \times 10^{-3} \times S \times \rho_w \quad (2)$$

ここで、 ρ_w は水の密度(1000kg/m³)である。したがって、例えば単位面積あたり($S=1\text{m}^2$)の表面融雪量 $M=1\text{mm}$ は、融雪質量 $m_M=1\text{kg}$ となる。

表面融雪量 M は熱収支法により求めることができるが、計算のためには放射収支量等、多くの気象要素が必要である。しかしながら、実務への導入を考慮すると、鉄道分野では少ない気象要素かつ短い時間間隔で広域に適用可能な計算が必要となる。そこで、全天日射量と気温のみから表面融雪量 M を1時間毎に計算可能なKonya et al.により提案された式(3)の融雪モデル¹³⁾を用いることにした。

$$M = aK_d + bT_a + c \quad (3)$$

ここで、 K_d は全天日射量(W/m²)、 T_a は気温(°C)である。なお、係数 a 、 b 、 c は観測値等との重回帰分析により決定される。

積雪表層雪密度推定モデルは降雪後の密度変化を計算する。このため、降雪直後の雪密度の初期値が必要となる。そこで、-10°C~1°Cの気温範囲で、短時間の降雪密度を測定した結果から求められた経験式¹⁴⁾である式(4)を用いて、初期値を与える。

$$\rho_{s0} = 53.6 \exp(0.488T_a) + 37.0 \quad (4)$$

ここで、 ρ_{s0} は降雪直後の雪密度(kg/m³)、 T_a は気温(°C)である。

降雪直後から1時間毎に表面融雪量 M を式(3)より求めて、次の降雪があるまで式(1)により積雪表層の雪密度変化を繰り返し計算する。なお、計算では1時間毎に新たな単位体積の雪密度を想定している。

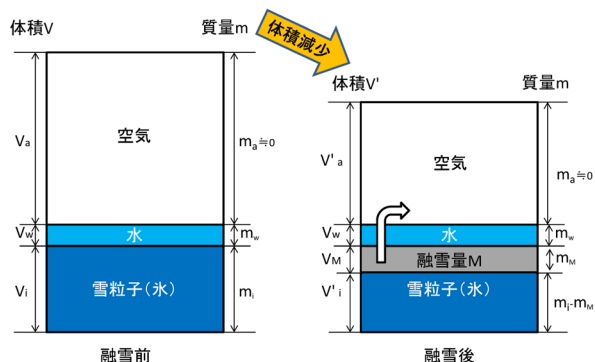


図9 構成図における密度変化の考え方

3.2.3 係数の決定

積雪表層雪密度推定モデルを使用するためには、表面融雪量 M を求める必要がある。そこで、左堰斜路の気象観測値をモデルの入力値として雪密度を推定し、左堰斜路の近傍で測定した積雪表層の雪密度の実測値と比較することで式(3)の係数 a 、 b 、 c を決定した。入力値の全天日射量 K_d は前1時間の10分毎の瞬間値を平均した値、気温 T_a は前1時間の10分毎の瞬間値を平均した値である。

今回、係数を $a=0.018$ 、 $b=1$ 、 $c=-0.5$ と設定することで、推定雪密度と測定雪密度はほぼ一致した(図10)。そこで、これらの係数を積雪表層雪密度推定モデルの計算に用いることとした。

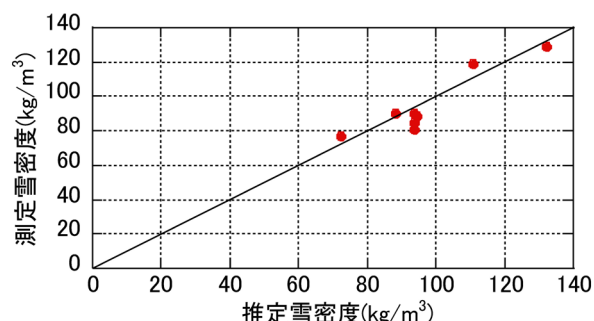


図10 雪密度の推定値と測定値との比較

3.3 雪の舞い上がり量の推定

積雪表層雪密度推定モデルに高架橋上で測定した気温、降水量、日射量を入力して、軌道内の雪密度を推定し、列車通過時の雪の舞い上がり量(飛雪フラックス)との関係を調べた。図11に推定雪密度と飛雪フラックスとの関係を示す。ばらつきはあるが、最も相関係数が大きくなる回帰曲線を求めてその変化に着目すると、推定雪密度が50kg/m³程度では飛雪フラックスは大きな値を示しているが、推定雪密度の増加とともに飛雪フラックスが減少し、150kg/m³を超えるとほぼ0kg/m²/sになることがわかる。これは、3.2節に述べたような積雪表層の雪密度の増加に伴って、雪粒子の結合力が増加することで雪が舞い上がりにくくなったためと考えられる。この傾向は、過去の研究においても、最高速度144km/hまでの模型走行実験により確認されている⁷⁾。本研究で実施した高架橋上における観測により、新幹線の走行速度260km/hでも同様の傾向があることが確認できた。図に示した推定雪密度と飛雪フラックスとの関係式(相関係数 $R=0.71$)は以下の式(5)となる。

$$F = 0.07 - 5.08 \times 10^{-4} \rho_s - 5.61 \times 10^{-6} \rho_s^2 - 5.75 \times 10^{-8} \rho_s^3 + 9.27 \times 10^{-10} \rho_s^4 - 4.36 \times 10^{-12} \rho_s^5 + 6.67 \times 10^{-15} \rho_s^6 \quad (5)$$

ここで、 F は飛雪フラックス(kg/m²/s)、 ρ_s は推定雪密度(kg/m³)である。

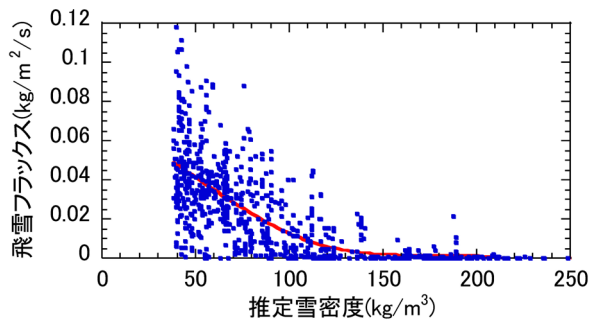


図 11 推定雪密度値と飛雪フラックスとの関係

雪の舞い上がり量の速度依存性については、実験的手法によって同程度の雪密度でも速度が大きい方が大きくなる傾向が得られている⁷⁾。列車は駅の近くで減速するため、速度低下時の飛雪フラックスは小さくなると考えられるが、本研究では安全側の評価として、式(5)を用いることとした。速度依存性を反映するためには、今後、走行速度を変えた現車試験を実施して、雪の舞い上がり量を調べる必要がある。

3.4 雪の舞い上がり量と着雪量との関係

対象列車は、青函トンネル走行中に着雪がなくなり、その後、トンネル区間が続くため着雪が生じず、津軽蓬田トンネル入口において、着雪はほぼ無い状況であると鉄道事業者より情報提供を受けている。そこで、着雪は、津軽蓬田トンネル入口から新青森駅までの約18.7kmの明かり区間を走行中に着雪伸長量0mmから成長するものと仮定した。そこで、新青森駅到着時における着雪伸長量の編成平均を津軽蓬田T入口～新青森駅の明かり区間の走行時間410秒で除して着雪伸長速度を求めた。左堰斜路で測定された飛雪フラックスと着雪伸長速度との関係を図12に示す。

ばらつきはあるものの、飛雪フラックスが増加すると着雪伸長速度も増加する傾向があることがわかる。ばらつきの原因としては、以下の可能性が挙げられる。

①フサギ板に成長した着雪量は沿線の飛雪フラックスを反映していると考えられるが、沿線の気象状況によっては、高架橋上の観測点での飛雪フラックスが他地点での飛雪フラックスと程度が異なる場合があること。

②明かり区間の走行時間は短いですが、駅で測定された着雪量には、落雪による着雪伸長量の減少の影響が考えられること。

飛雪フラックスと着雪伸長速度との関係は式(6)の回帰式の形で表される。

$$V_L = a \times F^b \quad (6)$$

ここで、 V_L は着雪伸長速度(mm/s)、 F は飛雪フラックス(kg/m²/s)である。

飛雪フラックスは沿線の1地点で測定された値であることから、測定されたデータが必ずしも代表値とは限らないという問題点がある。そこで、飛雪フラックスと着雪伸長速度との関係式の係数 a と b は、新青森駅到着時における着雪伸長量測定結果の最大値を着雪量推定手法による推定値が下回らないように設定することとした。

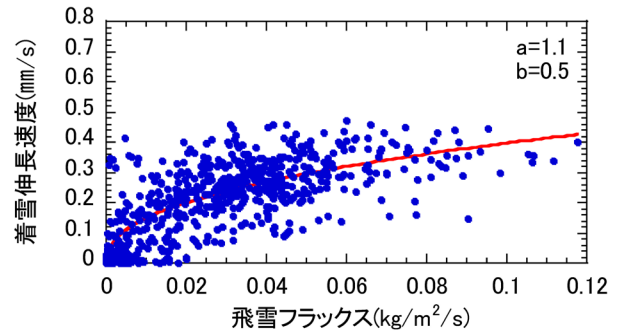


図 12 飛雪フラックスと着雪伸長速度との関係

4. 着雪量推定手法の検証

4.1 計算方法

地点ⅠからⅡへ走行する車両を想定し、沿線の気象情報からある地点の着雪量を計算する方法を図13に示す。

①沿線の気象観測点と得られる気象情報に応じて、受け持ち区間を設定する。

②各区間の気象情報から着雪量推定手法を用いて、各区間の着雪量を計算する。

③各区間の着雪量を積算して、地点Ⅱでの推定着雪量を求める。

本計算では、着雪は走行途中に融解または落雪しないこと、着雪は単調増加することを仮定している。このような計算方法により、任意の区間での着雪量の推定が可能となる。

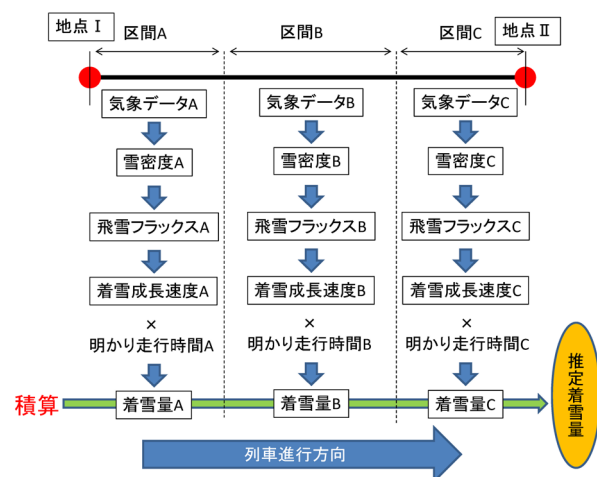


図 13 着雪量推定手法の計算方法概念図

4.2 検証結果

上り線を走行する車両が津軽蓬田 T 入口を着雪なしの状態を通過し、新青森駅に到着するまでの明かり区間で着雪が成長すると仮定する。新青森・津軽蓬田トンネル入口間の気象庁観測点は青森と蟹田の 2 地点で、それぞれの受け持ちの明かり走行時間はどちらも 205 秒である。なお、計算に用いた気象情報は、1 時間毎の気温、降水量、日照時間である。

青森と蟹田の気象情報から新青森駅到着時の着雪伸長量の推定値を求めた。ここで、飛雪フラックスと着雪成長速度との関係式 (6) の係数には、 $a = 7.5$ 、 $b = 0.9$ を用いた。新青森駅到着時の着雪伸長量の測定値と推定値との比較を図 14 に示す。推定値が測定値を上回る場合は多いが、両者には正の相関がみられる。今回推定対象とした列車 (N=1083) について、測定値と推定値との差の最大値は 171mm、二乗平均平方根誤差 (RMSE) は 28.5mm であった。したがって、本推定手法による推定の誤差は約 3cm であることを確認した。

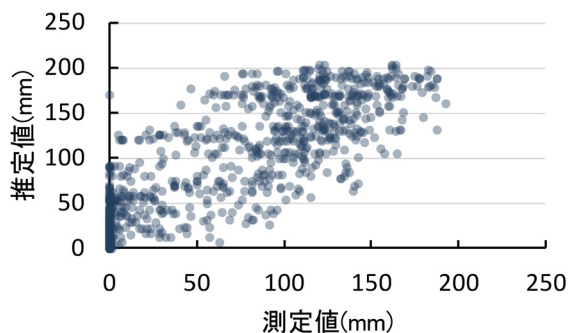


図 14 着雪量伸長量の推定値と測定値との比較

5. おわりに

本研究では、雪落とし作業等の着雪対策を効率的に実施することを目的とする着雪量推定手法の開発のために、駅での着雪量測定ならびに高架橋上での雪の舞い上がり量測定と気象観測を実施した。

津軽蓬田トンネル入り口を着雪なしの状態を通過後、新青森駅到着時の新幹線車両の台車部フサギ板の着雪伸長量を推定し、測定値と比較した結果、約 3cm の誤差で推定可能なことを確認した。

最後に、本研究で得られた成果が、効果的な着雪対策を講じる上での一助になることを願い結びとする。

謝 辞

データを取得する際に多大なる協力をいただいた北海道旅客鉄道株式会社ならびに東日本旅客鉄道株式会社の関係各位に深甚なる謝意を表す。

文 献

- 1) 斎藤雅男：東海道新幹線の雪氷害とその対策 (1) 雪氷害の特質とその対策，雪氷，33-3，61-78，1971
- 2) 飯倉茂弘，河島克久，遠藤徹，藤井俊茂：落氷雪によるバラスト飛散が起こりやすい日の気象条件，RRR，22-25，2003
- 3) 篠島健二：新幹線車両床下の着落雪の予測（東海道新幹線関ヶ原地区），鉄道技術研究所報告，No.1248，1983
- 4) 穴戸真也，中出孝次，井門敦志，飯倉茂弘，鎌田慈，遠藤徹，根本征樹，小杉健二，佐藤威：鉄道車両台車部の着氷雪低減デフレクターの開発，鉄道総研報告，Vol.23，No.3，29-34，2009
- 5) 荘田幹夫：東海道新幹線の雪氷害とその対策 (2) 飛雪防止の基礎的研究，雪氷，33-3，79-88，1971
- 6) 石原知明，中柴周三：東北・上越新幹線車両の着雪防止対策とその効果，鉄道技術研究所速報，No.A-83-145，1983
- 7) 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.1，11-16，2015
- 8) 荘田幹夫：飛雪防止の基礎的研究，雪氷，Vol.33，No.3，79-88，1971
- 9) 吉田順五：気圧の局所降下による積雪の飛散 I - 基礎的考察 -，低温科学物理編，Vol.34，1-15，1959
- 10) 河島克久，遠藤徹，藤井俊茂：新幹線の雪の舞い上がり防止に関する基礎的研究，鉄道総研報告，Vol.8，No.7，7-12，1994
- 11) 日本雪氷学会編：雪氷辞典，古今書院，1991
- 12) 鎌田慈，高橋大介，飯倉茂弘：積雪表層の簡易密度推定手法，第 31 回寒地技術シンポジウム 論文・報告集，Vol.31，2015
- 13) Konya, K., Matsumoto, T. and Naruse, R.: Surface heat balance and spatially distributed ablation modeling at Koryto Glacier, Kamchatka Peninsula, Russia, *Geografiska Annaler*, 86A, 337-348, 2004.
- 14) 野口守，小林等，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) 一降雪直後の雪密度の気温依存性一，雪氷研究大会 (2010・仙台) 公演要旨集，p.174，2010