

## 軌道上の雪質を考慮した車両台車部の着雪量予測手法

鎌田 慈\* 高橋 大介\* 栗原 靖\*\*  
横倉 晃\*\*\* 飯倉 茂弘\*

Method of Predicting the Snow Accretion Amount on Train Bogies in Consideration of Snow Properties on the Track

Yasushi KAMATA Daisuke TAKAHASHI Yasushi KURIHARA  
Akira YOKOKURA Shigehiro IIKURA

Trains operating in snowy areas have snow accretions on their bogies. When the snow falls off the car, it might damage ground facilities. To prevent such damage, snow removing operations are performed at stations. We developed a method of predicting the snow accretion amount in the following steps. Firstly snow properties on the railway track was estimated from climatic conditions, secondly the amount of flying snow caused by train passing according to the snow properties and the train speed was estimated. Finally we predicted the snow accretion amount from the amount of flying snow.

キーワード：新幹線，台車，着雪，雪の舞い上がり量，着雪量予測

## 1. はじめに

積雪した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付着して成長する（以下、着雪）。これが列車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事象を引き起こしたりすることがある<sup>1)</sup>。これまでに新幹線や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<sup>2) 3)</sup>、台車部分への着氷雪量の低減対策に関する研究が行われてきた<sup>4)</sup>。また、高速で走行する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<sup>5)</sup>、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<sup>6)</sup>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有効な対策が無く、気象状況によっては著しく着雪することが確認されている。そのため、駅や車両基地などで雪落とし作業が実施されている。このような作業を効果的かつ効率的に実施するためには、着雪量を精度良く予測して人員を配置する必要がある。

本研究では、着雪量を精度よく予測するために、気象条件から軌道上の雪質を推定する方法の検討、雪質、走行速度に応じた雪の舞い上がり量との関係解明、雪の舞い上がり量と着雪量との統計解析を実施した。これらを着雪量の予測手法へ組み込むことで、これまでの統計分析

による手法<sup>7)</sup>に比べて、推定誤差は半分以下となった。

## 2. 解析に用いたデータ

対象としたのは、降積雪地域を走行する秋田新幹線「こまち」に運用されている車両（以下、「こまち」車両）であり、秋田から盛岡への走行中に成長した着雪に着目した。本研究で解析に用いたデータを以下に示す。

## 2.1 着雪量データ

着雪量データは、東日本旅客鉄道株式会社から提供されたものであり、2007～2009年度の冬期に盛岡駅の上り線ホーム下に設置された着雪量計測装置<sup>8)</sup>およびWebカメラにより記録した「こまち」車両の台車側面の着雪量とカメラ画像である（図1）。「こまち」車両は6両編成で、上りの場合、先頭が11号車（東京方）、最後尾が16号車（秋田方）となる。本研究では、カメラ画像と着雪量データを両方取得できる15号車前位台車の

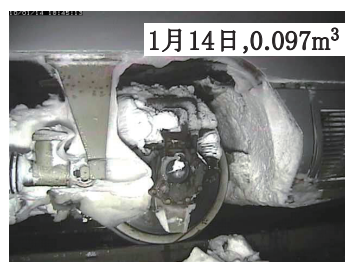


図1 着雪した車両台車部

\* 防災技術研究部 気象防災研究室  
\*\* 前 防災技術研究部 気象防災研究室  
\*\*\* JR 東日本テクニカルセンター（現：東北交通機械株式会社）

特集：防災技術

着雪量を当該列車の代表値として解析に使用した。なお、「こまち」車両は、秋田駅出発前に雪落とし作業が行われており、出発時の着雪量は常に $0\text{m}^3$ である。

2.2 気象データ

解析に使用したアメダス観測点は、秋田、大曲、角館、田沢湖、雫石、盛岡の6地点である。これらの観測点の気温、降水量、日照時間を解析に使用した。気温は毎正時の瞬間値、降水量と日照時間は1時間毎の積算値である。ここで、気温 $1^\circ\text{C}$ 以下の降水を降雪とみなして以後の解析に用いた。

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、以下の順で発生すると考えられる。

- ① 沿線への降雪，線路上の積雪，吹き溜まりの発生
- ② 積雪がある線路上の列車走行
- ③ 列車走行に伴う雪の舞い上がり
- ④ 台車部への着雪

ここで、着雪量は走行中の雪の舞い上がり量と正の相関をもつと考えられ、この雪の舞い上がり量は軌道上の雪質や列車の走行速度に影響を受けると考えられる。そこで、軌道上の雪質を推定するモデルと雪の舞い上がり量を推定するモデルについて検討した。

3.2 雪質変化推定モデル

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<sup>9)</sup>、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<sup>10) 11)</sup>。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の舞い上がり量は多く、降雪後、時間が経過して、焼結や圧密<sup>12)</sup>等によって密度が増加して雪粒子間の結合力が増加した場合に舞い上がり量は少なくなると考えられる。そこで、本研究では積雪表層の雪質を代表するものとして、雪密度に着目した。

3.2.2 雪密度変化の考え方

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(図2)。この過程を構成図で表すと図3のようになる。体積 $V$  ( $\text{m}^3$ )、質量 $m$  ( $\text{kg}$ )の新雪は、雪粒子(氷)の質量 $m_i$ 、間隙中の水の質量 $m_w$ 、間隙中の空気の質量 $m_a$ で構成される。ここでは、体積 $V$  ( $\text{m}^3$ )の底面積を $S$  ( $\text{m}^2$ )として表す。雪粒子(氷)の体積は $V_i$ 、間隙中の水の体積は

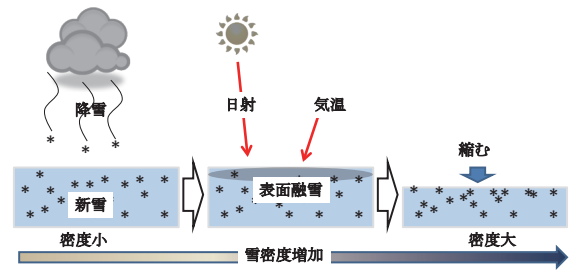


図2 降雪後の表面融雪による雪密度変化の概念

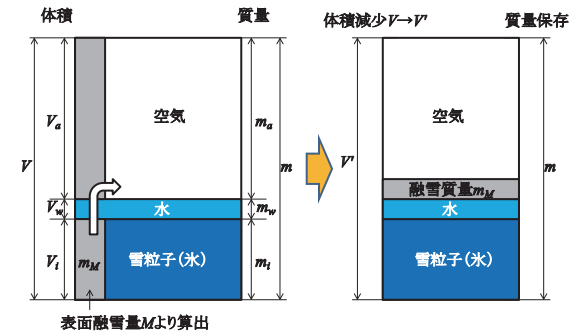


図3 構成図における密度変化の考え方

$V_w$ 、間隙中の空気の体積は $V_a$ である。また、本研究では間隙中の空気の質量 $m_a = 0$ 、乾き雪の場合は $m_w = 0$ と考える。

融雪時には、氷の質量 $m_i$ が融雪質量 $m_M$ に相当する分減少し、それと同じ割合で空気の体積 $V_a$ も減少すると考える。また、融雪水は間隙中の空気に充填され、流出は考えないとした時に、融雪後の体積 $V'$ は式(1)で表される。

$$V' = \frac{m_i - m_M}{m_i} \times V \tag{1}$$

したがって、融雪前の密度を $\rho_s$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、融雪後の密度を $\rho_{s1}$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )とすると、

$$\rho_{s1} = \frac{m}{V'} = \rho_s \left( \frac{\rho_d \times V}{\rho_d \times V - m_M} \right) \tag{2}$$

と表される。ここで、乾き密度<sup>12)</sup> $\rho_d$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )は、積雪中の水分を除いた氷と空気の密度である。また、 $m_M$  ( $\text{kg}$ )は、表面融雪量 $M$  ( $\text{mm}$ )、水の密度 $\rho_w$  ( $=1000\text{kg}/\text{m}^3$ )を用いて式(3)で表される。

$$m_M = M \times 10^{-3} \times S \times \rho_w \tag{3}$$

降雪直後から単位体積の積雪表層の雪に対して、1時間毎の表面融雪量 $M$ を求めて式(2)、(3)に代入し、密度を1時間毎に繰り返し計算する。ここで、新たな降雪があった場合はそれまでの計算をリセットし、新たに密度変化の計算を開始する。

計算に用いる降雪直後の雪密度は気温の関数として次の経験式<sup>13)</sup>が報告されている。

$$\rho_s = 53.6 \exp(0.488T_a) + 37.0 \quad (4)$$

ここで、 $T_a$  は気温 (°C) である。この経験式を得たデータは -10 ~ 1°C の気温範囲で測定された雪密度である。

以上の計算をする際に本研究で用いた仮定を以下にまとめて示す。

- ・ 単位体積, 単位面積を考え,  $V=1\text{m}^3$ ,  $S=1\text{m}^2$  とする。
- ・ 表面付近の雪温は 0°C とする。
- ・ 融雪の過程では蒸発による水分の損失は無い。また, 下層への浸透も無い。
- ・ 積雪表面の変化であるため, 圧密による密度増加は無視できる。
- ・ 降雪直後の新雪は含水率 0% とする。つまり, 降雪直後の雪密度  $\rho_s$  は乾き密度  $\rho_d$  に等しい。

### 3.2.3 表面融雪量 M の算出方法

表面融雪量は熱収支法<sup>14)</sup>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の多くのパラメータが必要である。そこで, 少ないパラメータで, 短時間間隔で広域に適用可能な Konya 他により提案された融雪モデル<sup>15)</sup>を参考にした。このモデルでは, 全天日射量と気温をパラメータとして融雪熱量を 1 時間毎に計算できる。融雪モデルは式 (5) で表される。

$$Q_M = aK_d + bT_a + c \quad (5)$$

ここで、 $Q_M$  は融雪熱量 (J/m<sup>2</sup>)、 $K_d$  は全天日射量 (W/m<sup>2</sup>)、 $T_a$  は気温 (°C) である。 $a, b, c$  は観測値等との重回帰分析により決定される係数である。

本研究では、 $S = 1\text{m}^2$  を考えるため、式 (3) より融雪質量  $m_M$  と表面融雪量  $M$  (mm) の値は等しくなる。そこで、融雪熱量  $Q_M$  との関係は式 (6) で表される。

$$m_M = M = Q_M / I_F \quad (6)$$

ここで、 $I_F$  は氷の融解潜熱 33.4J/kg である。

全天日射量  $K_d$  は日射計等により計測されるが, 日射量を測定している観測点は少ない。そこで, 多くのアメダス観測点で測定されている日照時間のデータを用いて全天日射量を推定することとした。日照時間データを用いて日単位あるいは時間単位の全天日射量を推定する手法として, 本研究では Yang and Koike のモデル<sup>16)</sup>を使用することにした。このモデルは全天日射量  $K_d$  と地球圏外放射量 (大気上端日射量<sup>17)</sup>  $R_{et}$  (W/m<sup>2</sup>) との比を日照時間と可照時間との比を用いて推定することで, その時刻の全天日射量の値を得るもので, 式 (7) のように表される。

$$\begin{aligned} K_d / R_{et} &= a_1 + a_2(D/D_0) + a_3(D/D_0)^2 \quad \text{if } (0 < D/D_0 \leq 1) \\ &= a_4 \quad \text{if } (D/D_0 = 0) \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 $D_0$  は可照時間 (min)、 $D$  は日照時間 (min) である。

係数  $a_1, a_2, a_3, a_4$  は回帰式から決定される係数である。

全天日射量と日照時間については秋田と盛岡の地方気象台で測定されている 2007 ~ 2009 年度冬期の観測値を用い, 地球圏外放射量と可照時間については緯度から計算した値を用いて, 以下の平均値を得た。

秋田:  $a_1 = 0.265, a_2 = 0.579, a_3 = -0.144, a_4 = 0.259$

盛岡:  $a_1 = 0.277, a_2 = 0.399, a_3 = 0.001, a_4 = 0.175$

本研究では, 奥羽山脈を挟んで日本海側気候と内陸性気候に分けて考え, 秋田の係数を秋田, 大曲, 角館, 田沢湖に適用し, 盛岡の係数を雫石と盛岡に適用した。

### 3.2.4 雪質変化推定モデルの構築

気象条件が積雪表面の密度変化へ与える影響を調べるために塩沢雪害防止実験所 (新潟県南魚沼市) 構内で気象観測 (気温と全天日射量) と積雪表面 2cm の雪密度と質量含水率の変化を測定した。

図 4 (a) に塩沢雪害防止実験所で観測された降雪後 26 時間経過までの 1 時間毎の気温と全天日射量の変化の一例を示す。この日は午前 9 時に降雪が終了し, 日中は日射が観測されている。降雪後の経過時間 9 ~ 21 時間は夜間であり, 太陽が出ていなかった時間である。また, 26 時間後に降雪があるまで, 降水は観測されていない。図 4 (b) に降雪後の雪密度と含水率の変化を示す。降雪直後の雪密度は約 30kg/m<sup>3</sup> と小さく, 降雪後 5 ~ 7 時間で 110 ~ 130kg/m<sup>3</sup> へ増加し, 降雪 25 時間後には約 150kg/m<sup>3</sup> となった。含水率は, 降雪 5 時間後の全天日射量が多い時に 13.5%, その後日射量が減少し, 気温が低下すると小さくなった。

図 4 (b) 中に雪質変化推定モデルによる密度の変化を示している。融雪熱量  $Q_M$  を求める際の全天日射量  $K_d$  と気温  $T_a$  には実験所での観測値を用いた。測定された

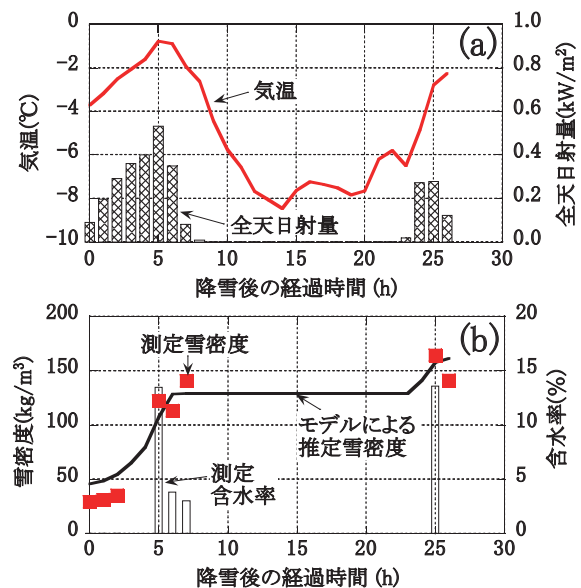


図4 降雪後の経過時間と (a) 気温と全天日射量, (b) 雪密度と含水率の変化

特集：防災技術

雪密度の変化と一致する推定モデルの式(5)の各成分にかかる係数を求めた結果、 $a = 0.85$ ,  $b = 13$ ,  $c = -40$ となった。

3.3 雪の舞い上がり量推定モデル

雪密度や列車の走行速度が雪の舞い上がり量へ及ぼす影響を調べることを目的として、模型を用いた雪の舞い上がり試験を実施した。この試験結果をもとに吹雪発生時の雪粒子の空間密度を計算できる既存の吹雪モデルをベースとした雪の舞い上がり量推定モデルを検討した。

3.3.1 雪の舞い上がり試験

雪の舞い上がり試験は、塩沢雪害防止実験所（新潟県南魚沼市）構内に設置されている排雪力測定試験装置を用いて実施した。この装置は、全長60mのトラスビーム式ガイドレール上をワイヤロープで牽引される台車が走行することで、最高速度40m/sまでの直線運動が可能である。本試験では、車両の床下機器箱を模擬した直方体の箱（長さ200mm、幅400mm、高さ400mm）を走行台車へ取り付け、雪試料上を通過させることで列車風等を発生させ、雪の舞い上がり現象を再現した（図5）。

雪試料は、透気材（人工芝）を上面に貼り付けた合板（484×900×24mm）の上に厚さ150～190mmの自然降雪を載せたものを用いた。走行方向の長さは1.8～2.7mである。雪試料は雪面と床下機器箱模型の下端の距離が150mmとなるように設置した。

試験開始時の雪質を測定後、設定速度で床下機器箱模型を走行させて雪の舞い上がり量を測定した。雪の舞い上がり量としては、雪面上の雪粒子の質量フラックス

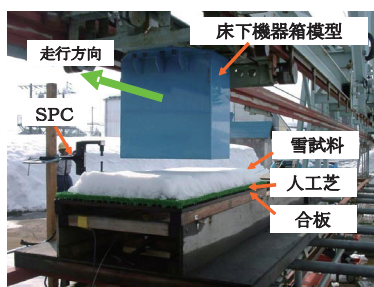


図5 雪の舞い上がり試験状況

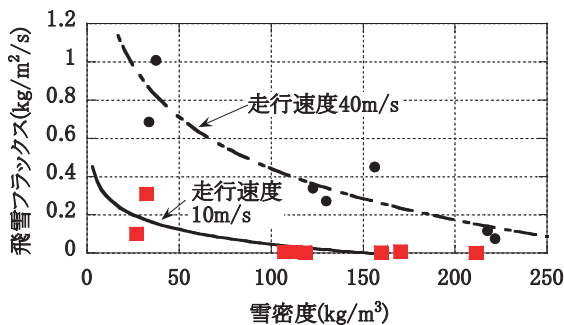


図6 飛雪フラックスと雪密度との関係

（以下、飛雪フラックス）を飛雪粒子計（Snow Particle Counter, 以下 SPC, 新潟電機株式会社：SPC-S7）を用いて測定した。また、雪面上の風速分布測定には熱線風速計（日本カノマックス株式会社：アネモマスター風速計 6141）を用いた。

3.3.2 雪密度と飛雪フラックスの関係

試験で得られた飛雪フラックスと雪密度の関係を試験の走行速度10m/sと40m/sを例に図6に示す。飛雪フラックスは、降雪直後の雪密度が低いうちは大きく、雪密度が高くなると共に指数関数的に減少することがわかる。

3.3.3 雪の舞い上がり量推定モデル

雪の舞い上がりのメカニズムのうち、列車風によって引き起こされる雪の舞い上がりは、風によって雪粒子が跳躍・浮遊運動する地吹雪のメカニズムと共通する点が多い。そこで、列車の走行に伴う雪の舞い上がり現象は列車風によって雪面に働くせん断応力で支配されるものと仮定し、雪面と積雪内部との間に働く圧力差による飛雪は考慮しないこととした。そこで、列車通過に伴って舞い上げられる雪の飛雪フラックス  $F$  について、excess shear stress rule<sup>18) 19)</sup> を仮定し、式(8)で表す。

$$F = \gamma(\tau - \tau_t) \tag{8}$$

ここで、 $\tau$  は列車風による雪面に働くせん断応力 (Pa),  $\tau_t$  は飛雪が発生する臨界せん断応力 (Pa) を表す。この式は臨界せん断応力を超えるせん断応力が大きいほど、飛雪フラックスが大きくなることを意味し、 $\gamma$  は飛雪フラックスの増加の割合を表す係数である。

風によるせん断力と風速との間には  $\tau = \rho_a u_*^2$  の関係がある<sup>20)</sup> ため、式(8)は以下のように変形できる。

$$F = \gamma \rho_a (u_*^2 - u_{*t}^2) \tag{9}$$

ここで、 $u_*$  は雪面位置での風速を表す摩擦速度 (m/s),  $u_{*t}$  は飛雪が発生し始める摩擦速度を表す臨界摩擦速度 (m/s) である。

雪の舞い上がり推定モデルでは、積雪表層の雪密度増加により雪粒子がパッキングされて飛びにくくなり、飛雪フラックスが減少すると考え、式(8)の  $\gamma$  を雪質に依存する減衰曲線として表すこととした。摩擦速度  $u_{*t} = 0.2 \text{ m/s}$ , 空気密度  $\rho_a = 1.3 \text{ kg/m}^3$  として、飛雪フラックス  $F$  と摩擦速度  $u_*$  の関係が得られればパラメータ  $\gamma$  の同定が可能となる。そこで、摩擦速度  $u_*$  として走行速度 20m/s と 30m/s での雪面上 7mm の位置で計測された風速から対数分布則を用いて計算した値、飛雪フラックス  $F$  にはそれぞれの走行速度の試験結果を用いて整理した結果、パラメータ  $\gamma$  と雪密度  $\rho_s$  との関係を表す式(10)が得られた。

$$\gamma = 4.33 \exp(-1.84 \times 10^{-2} \rho_s) \tag{10}$$

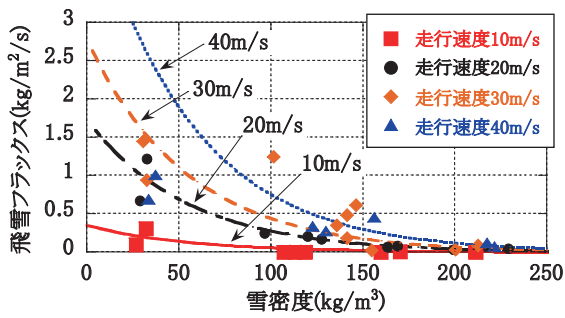


図7 飛雪フラックスと雪密度との関係  
(図中の各曲線は舞い上がり量推定モデル(式(9))による回帰曲線)

このパラメータを式(9)に適用し、雪密度毎、走行速度毎に飛雪フラックスを求め、回帰曲線を求めた結果、図7のように試験結果と概ね整合することがわかった。

### 3.3.4 飛雪フラックスと着雪量の関係

当該列車が走行したときの飛雪フラックスを推定するために、秋田・盛岡間の6地点(秋田、大曲、角館、田沢湖、雫石、盛岡)を通過したときのアメダス観測点の気象データから各観測点の飛雪フラックスを求めた。なお、走行速度は運転曲線から観測点前後の平均的な速度を読み取った値を用いた。

6地点の観測点毎に求められた飛雪フラックスは、列車通過時の舞い上がり量を推定したものであり、時間的、空間的な影響範囲が考慮されていない。そこで、各地点で推定された飛雪フラックスが盛岡駅で測定された着雪量にどの程度相関があるかを調べるために各地点の飛雪フラックスを説明変数として、変数増減法による重回帰分析を行った。その結果、標準化した偏回帰係数は、秋田は0.44、大曲は0.13、角館は0.16、田沢湖は0.09、雫石は0.05となった。なお、盛岡における飛雪フラック

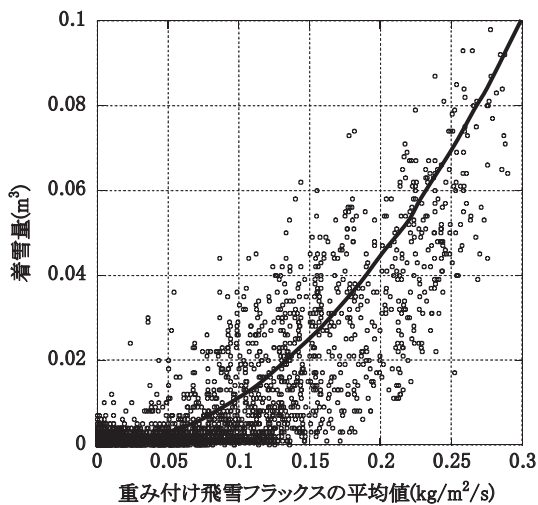


図8 重み付け飛雪フラックスの平均値と着雪量との関係

スは、着雪量の予測精度を向上するために寄与しなかったと判定されたため除外した。本研究では、各観測点の飛雪フラックスに観測点毎に求めた係数を重み付けとして乗じた値(以下、重み付け飛雪フラックス)を平均した値(重み付け飛雪フラックスの平均値)が、通過列車へ影響する飛雪フラックスを示していると考えられる。

重み付け飛雪フラックスの平均値 $\bar{F}$ と着雪量 $V$ との関係は図8のようになる。回帰式から、雪質を考慮した着雪量予測式を以下のように導いた。

$$V = 1.11\bar{F}^2 \tag{11}$$

## 4. 着雪量予測手法の検証

沿線の気象情報から着雪量を予測するまでの手順を以下に示す。

- ①沿線の気象情報として、毎正時の気温、降水量、日照時間をインプットデータとして入手する。
- ②雪質推定モデルにより、地点毎の雪密度を計算する。
- ③雪密度、および走行速度に応じた飛雪フラックスを計算する。
- ④地点毎に重みづけを行った飛雪フラックスの平均値を求める。
- ⑤重み付け飛雪フラックスの平均値と着雪量の関係(式(11))から着雪量を推定する。

上記手順のうち、①から④までは列車の有無にかかわらず気象データの更新時に順次計算結果を加え、列車通過時刻において⑤の計算を行うことになる。上述の手順で求めた軌道上の雪の変質過程を考慮した着雪量予測値と測定された着雪量との関係を図9に示す。

予測値と測定された着雪量との間には比例関係が見られ、相関係数は0.86、残差の二乗平均誤差は0.008m<sup>3</sup>

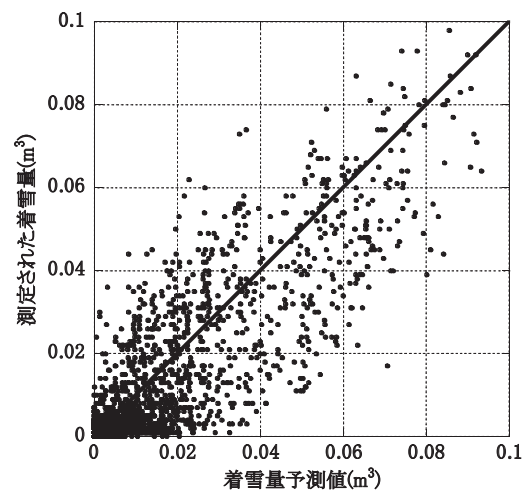


図9 着雪量予測値と測定された着雪量との関係

特集：防災技術

であった。図中の直線は予測値と測定値が一致した場合である。一方、過去に報告されている統計的な着雪量予測手法<sup>7)</sup>では、上記手順において①沿線の気象情報から直接⑤着雪量の予測を行うことになり、予測の二乗平均誤差は $0.017\text{m}^3$ である。二乗平均誤差が小さい方が予測精度は高いため、本研究のように軌道上の雪の変質過程を考慮することにより、着雪量の予測精度は向上すると考えられる。

5. おわりに

本研究では、雪落とし作業等の着雪対策を効果的・効率的に実施するために、沿線の気象情報から積雪地域を走行する列車の台車部に成長する着雪量を精度よく予測する手法について検討した。

この手法は、①沿線の気温、降水量、日照時間を入力値として雪質推定モデルにより地点毎の雪密度を求め、②雪密度と走行速度に応じた雪の舞い上がり量を求め、③地点毎に重みづけを行った雪の舞い上がり量の平均値と測定された着雪量との関係から、着雪量を推定する手法である。過去に著者らが検討した統計的な着雪量予測手法に比べて推定誤差は約半分となり、雪の変質過程を新たに考慮することで精度が向上することがわかった。

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

貴重なご意見および台車着氷雪量等のデータのご提供を頂いた東日本旅客鉄道株式会社研究開発センター テクニカルセンター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, pp.61-78, 1971  
 2) 飯倉茂弘, 河島克久, 遠藤徹, 藤井俊茂：落水雪によるプラスト飛散が起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) 宍戸真也, 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,

pp.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, pp.79-88, 1971  
 6) 日本鉄道施設協会：東北新幹線車両落雪に関する地上対策工の調査研究報告書, p17, 1983  
 7) 鎌田慈, 栗原靖, 宍戸真也, 高橋大介, 飯倉茂弘, 安田馨観, 市原良和, 横倉晃, 横山信行：新幹線台車着雪量の推定方法の検討, 雪氷研究大会 (2010・仙台) 講演要旨集, 171, 2010  
 8) 河島克久, 飯倉茂弘, 遠藤徹, 藤井俊茂：光切断法を用いた鉄道車両の着雪量測定装置の開発, 寒地技術論文・報告集, Vol.19, pp.226-231, 2003  
 9) 荘田幹夫：飛雪防止の基礎的研究, 雪氷, Vol.33, No.3, pp.79-88, 1971  
 10) 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, pp.1-15, 1959  
 11) 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, pp.7-12, 1994  
 12) 日本雪氷学会編：雪氷辞典, 古今書院, 1991  
 13) 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) 講演要旨集 P3-35, p174, 2010  
 14) 小野延雄, 石川信敬, 新井正, 若土正暁, 青田昌秋：基礎雪氷学講座VI 雪氷水文現象, 古今書院, 1994  
 15) Konya, K., Matsumoto, T. and Naruse, R.: Surface heat balance and spatially distributed ablation modeling at Koryto Glacier, Kamchatka Peninsula, Russia, Geografiska Annaler, 86A, pp.337-348, 2004.  
 16) Yang, K. and Koike, T.: A general model to estimate hourly and daily solar radiation for hydrological studies, *Water Resource Research*, 41, W10403, doi: 10.1029/2005WR003976, 2005.  
 17) 近藤純正：水環境の気象学 - 地表面の水収支・熱収支 -, 朝倉書店, p57, 1994  
 18) Anderson, R. S. and P. K. Haff: Simulation of Eolian Saltation, *Science*, 241, pp.820-823, 1988.  
 19) Anderson, R. S. and P. K. Haff: Wind Modification and Bed Response during Saltation of Sand in Air, *Acta Mechanica Suppl. 1*, pp.21-51, 1991.  
 20) 前野紀一, 遠藤八十一, 秋田谷英次, 小林俊一, 竹内政夫：基礎雪氷学講座III 雪崩と吹雪, 古今書院, 2000