

## 散水時の積雪密度及び含水率と 舞い上がり発生速度の推定

飯倉 茂弘\* 鎌田 慈\* 宍戸 真也\* 遠藤 徹\*  
齊藤 実俊\*\* 井門 敦志\*\* 梶山 博司\*\* 藤井 俊茂\*\*\*

### Scale Model Tests To Reproduce Wet Snow Flying Phenomenon During Train Running

Shigehiro IIKURA Yasushi KAMATA Masaya SHISHIDO Toru ENDO  
Sanetoshi SAITO Atsushi IDO Hiroshi KAJIYAMA Toshishige FUJII

Aiming at developing a more effective method of controlling the train speed under snowfall in the Tokaido Shinkansen line, experiments on the snow-flying phenomena using car model and new snow made wet by watering were carried out. As a result, clear relationships among occurrence of snow-flying phenomena, physical properties of snow and the running speed were found. In addition, we were able to show the method of presuming change in the density and water content of the snow under water sprinkling based on the air temperature, the snowfall, and the amount of water sprinkling.

キーワード：雪の舞い上がり，散水，速度規制，バラスト飛散

### 1. はじめに

雪が積もった軌道上を列車が走行すると雪の舞い上がりが発生し、車両床下の機器や台車に付着する。付着した雪（着雪）は走行中に成長し、着雪の自重、沿線気温の上昇や車両の振動などにより軌道上に落下し、バラストを飛散させ、沿線家屋への被害や車体破損をもたらすことがある。この種の雪害は、東海道新幹線が開業して広く知られるようになった<sup>1)~3)</sup>。このため、東海道新幹線では、関ヶ原地区にスプリンクラーを設置し（延長68.5km）、降雪時に散水強度5mm/hで散水を行って雪の舞い上がりの発生を抑制するとともに、軌道上の積雪状態および天候を指標とした速度規制を実施している<sup>4)</sup>。

列車の走行による濡れ雪（本報告では、散水によって含水した雪を「濡れ雪」と呼ぶ）の舞い上がりは、列車の走行速度や床下形状および軌道上の積雪の物理的性状などの影響を受ける。車両の床下形状に凹凸のある車両模型を用いて、濡れ雪の舞い上がりを再現した過去の試験結果から、濡れ雪の舞い上がりの要因は車両通過時に雪面上で圧力が急速に下がり、濡れ雪の表面と下面との間に圧力差が生じ、その結果、濡れ雪表面が下方から押し上げられて発生することが明らかになった<sup>5)</sup>。近年、東海道新幹線を走行する車両は、車体の床下形状が平滑

化されており、このような車両では台車部分が通過する際に生じる圧力変化を除けば、従来の車両に比べ車体床下の圧力変化は小さいと考えられる<sup>6)</sup>。

本研究では、このように床下が平滑化されている車両が走行した際に、濡れ雪の舞い上がり及び散水量や軌道上の積雪の密度および含水率の影響を実験的手法で明らかにすることを目的とする。

### 2. 試験方法および試験装置

#### 2.1 散水試験

塩沢雪害防止実験所の露場で、透水材を上面に貼り付けた複数の合板（770×580mm）に降雪を8～15cm程度自然に堆積させた後、これらをスプリンクラーから約8m離れた位置に置いて散水を行った（以下、これを濡れ雪試料と呼ぶ、図1）。なお、本試験に使用したスプリンクラーは東海道新幹線の関ヶ原地区で用いられているものと同仕様の鉄研Ⅲ型スプリンクラーである。試験中の散水温度は東海道新幹線と同等の4～6℃とした。また、散水強度は4～12mm/hであり、散水時間は1～4hとした。

濡れ雪試料の物理的性状に関しては、密度は雪粒子間の引張破壊強度に影響し、密度が増加すると、この引張破壊強度は大きくなる<sup>7)</sup>。また、散水することによって雪粒子の隙間に水が介在し、水の毛管負圧によって雪粒子間に引力が働くため、含水率が増加するとこの引力が大きくなると考えられる。これらのことから、密度と含

\* 防災技術研究部（気象防災）

\*\* 環境工学研究部（空気力学）

\*\*\* 防災技術研究部

特集：防災技術

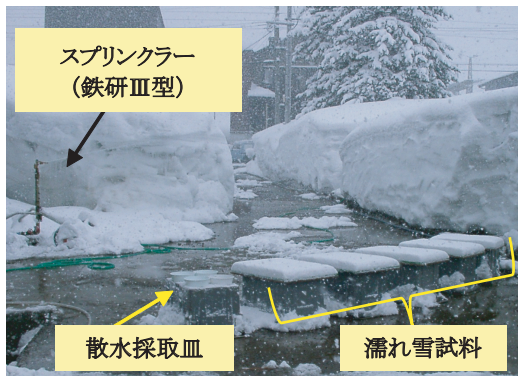


図1 散水試験の状況

水率は雪の力学的な性質に大きな影響を及ぼし、濡れ雪の舞い上がりの発生を推定する指標として用いることができるかと判断した。このため、試験中は濡れ雪試料（雪面下20mmまでの層）の密度と含水率（ここでは濡れ雪試料の質量に対する水の質量の割合を表す重量含水率<sup>8)</sup>を用いた）を10～30分おきに測定した。密度と含水率の測定には、それぞれ円筒形の密度サンブラ（直径108mm）と熱量式の含水率計<sup>9)</sup>を用いた。また、散水量を測定するため、スプリンクラーから濡れ雪試料までの距離と同じ8mの位置に、散水を採取する皿（直径204mm）を置き、随時散水量を測定するとともに、降雪強度、気温、風速の測定を行った。

2.2 濡れ雪の舞い上がり試験

(1) 高速回転円盤装置

高速回転円盤装置（図2）は、直径5mの円盤を最大240rpmで回転させることができ、外周部では最大226km/hの速度が得られる。この円盤下面の外周部に沿って新幹線車両の平滑化された床下を模擬した縮尺1/5の床下模型（ポリスチレン製、幅676mm、高さ250mm）が取り付けられている。この床下模型の一部

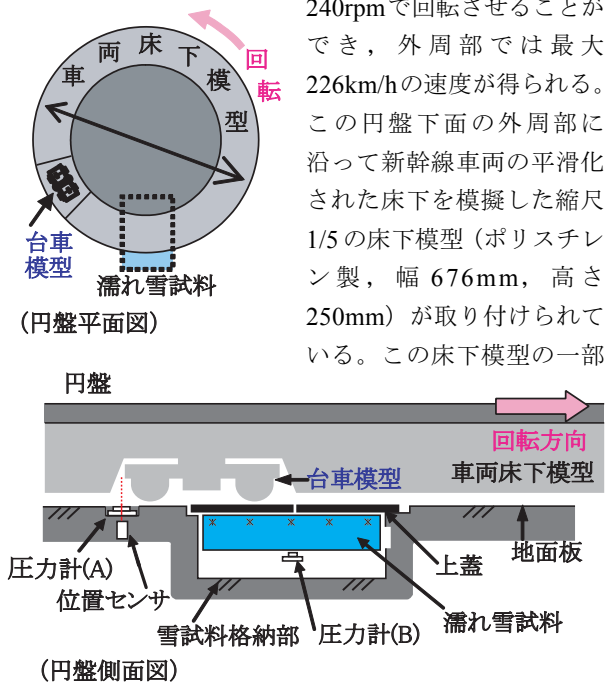


図2 高速回転円盤装置の概要

は台車模型となっており、台車部（台車が取り付けられている凹状の空間）が通過する際の圧力変化を模擬できるようにした。円盤の下には、一部が濡れ雪試料格納部となっている地面板が設備されている。この格納部には、濡れ雪試料（奥行き770mm、幅580mm、厚さ40～170mm）を格納し、軌道上に濡れ雪のある状態を再現することができる。格納部の上蓋は通常閉められているが、回転が所定の速度に達するとバネと電磁弁によって0.15s以内（最大の回転速度において円盤が一回転する時間内）に開けることができる。なお、この回転円盤装置は円形の低温実験室内に据え付けられている。

(2) 試験方法

散水試験によって物性が変化した濡れ雪試料の密度および含水率を測定した後に、濡れ雪試料を高速回転円盤装置へセットし、床下模型を取り付けた円盤を回転させた。一部の試験を除き、格納部の上蓋は閉鎖した状態で円盤を回転させ、所定の回転速度に達した後に開けた。円盤の回転速度は、試験装置の能力から、濡れ雪試料の中心において75～175km/h（外周部では87～202km/h）の範囲とした。濡れ雪試料の舞い上がりの有無は、装置内に設置されているITVカメラの画像から判断した。また、車両が通過する際に発生する圧力変化を捉えるため地面板表面（本試験では濡れ雪試料表面と同等とみなす）と濡れ雪試料下面とに圧力計(A), (B)を設置するとともに、圧力変化が床下模型のどこの部位が通過した際に発生しているかを調べるため、圧力計(A)と円周方向の同位置にレーザ式的位置センサを設置した（図2参照）。なお、一連の試験では、濡れ雪試料の変質を極力防ぐため、室内の温度を-1.0～-0.5℃とした。

実際の車両では床下底面からレール頭頂面までの距離は200mmであり、この距離は1/5の縮尺の模型では40mmとなるが、本試験においては、試験実施の安全上の理由から、床下模型底面から濡れ雪試料の表面までの距離は70～80mmとした。これは、実際の軌道ではバラスト上に数cmの積雪があるときの積雪高さに相当する。

3. 試験結果

3.1 散水時の密度と含水率の変化

散水試験において、散水を開始する前の新雪の厚さは8～15cm、表層20mmまでの密度は39～128kg/m<sup>3</sup>であった。また、各試験の気象状況（試験開始から終了までの平均値）は気温が-5.1～3.0℃、降雪強度は0～4.4mm/h、風速は0～2.4m/sであった。散水試験で得られた濡れ雪試料の密度の変化を図3に、含水率の変化を図4に示す。散水による密度の変化の全体的な傾向は、散水開始からの累積散水量（以下、散水量と呼ぶ）2～3mm程度まで急速な増加がみられたものの、その後は大きな増

加はみられなかった。一連の試験で同一の散水量のときの密度を比較すると、最大で約300kg/m<sup>3</sup>の差が生じていた。また、散水による含水率の変化は、散水開始直後、散水量2～6mmまで増加し、その後徐々に減少する傾向がみられた。一連の試験で同一の散水量のときの含水率を比較すると、最大で約25%の差が生じていた。

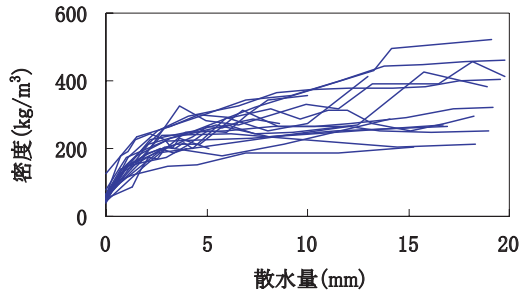


図3 散水量と密度との関係

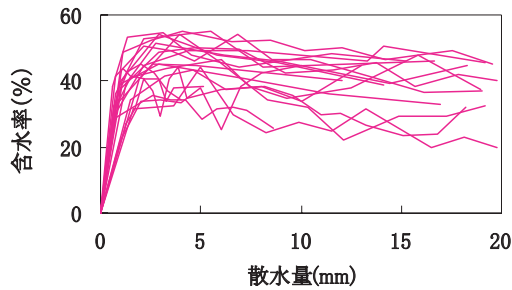


図4 散水量と含水率との関係

### 3.2 濡れ雪の舞い上がり試験

#### (1) 試験時の圧力変化

試験中のITVカメラの画像から、濡れ雪の舞い上がりは床下模型の平滑な部分が通過しているときには発生せず、台車模型通過時に発生することが分かった。また、レーザ式の位置センサと圧力計の測定結果から、台車部が通過する際には圧力変化が生じていることが分かった。台車部が通過する時に試料表面の圧力が急速に低下し、表面の圧力が下面の圧力を下回り、この差が大きいほど、濡れ雪の舞い上がりが発生し易いと考えられる。速度75、100、125、150、175km/hの試験で得られた試

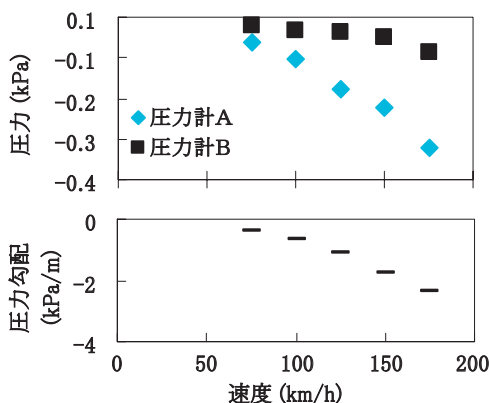


図5 試験速度と圧力および圧力勾配との関係

料表面と下面の負圧のピーク値（圧力計(A)の値をP<sub>A</sub>、圧力計(B)の値をP<sub>B</sub>) および試料内部に生じる圧力勾配((P<sub>A</sub> - P<sub>B</sub>) / 濡れ雪試料の厚さ)を図5に示す。濡れ雪試料の表面および下面の負圧のピーク値は、速度に依存して大きくなる。また、試験速度間隔毎の負圧のピーク値の増加量は、上面に比べ下面では小さいことから、濡れ雪の舞い上がりの要因である濡れ雪試料内部の圧力勾配は、速度に応じて大きくなり、このことから速度が大きいほど濡れ雪の舞い上がりが発生し易くなるものと考えられる。

#### (2) 雪質と濡れ雪の舞い上がりとの関係

濡れ雪の舞い上がり試験実施時の濡れ雪試料の密度と含水率が、舞い上がりの有無にどの程度影響するかを調べた。濡れ雪の舞い上がり試験直前の試料の密度と含水率との関係に、舞い上がりの有無を区別して試験速度毎に図6に示す。その結果、濡れ雪の舞い上がりの有無は、速度と密度および含水率の影響を大きく受けていると考えられ、速度が速くなるほど、また密度や含水率の値が小さいほど、舞い上がりが発生しやす傾向がみられた。図中の舞い上がりの有無のプロットから、試験速度毎に濡れ雪の舞い上がりが発生しにくい領域を区分できた。この舞い上がりが発生しにくい領域の最小の密度と含水率は、試験速度125km/hでは80kg/m<sup>3</sup>、10%であり、150km/hでは95kg/m<sup>3</sup>、12%であり、175km/hでは130kg/m<sup>3</sup>、18%であった。3段階の速度と舞い上がりが発生する最大の密度および含水率の値は、それぞれ相関があることから(図7)、次の関係式が求まる。

$$\rho_c = 1.00v - 48.33 \quad (1)$$

$$W_c = 0.16v - 10.67 \quad (2)$$

ここで、 $\rho_c$ は舞い上がりが発生する最大の密度(kg/m<sup>3</sup>)、 $W_c$ は舞い上がりが発生する最大の含水率(%),  $v$ は試験速度(km/h)である。式から、速度が大きくなるに従って舞い上がりが発生する密度は大きく、また含水率は高くなること分かる。

試験によって得られた(1)、(2)式を用いることにより、列車がある速度 $v_1$ で走行するときに濡れ雪を舞い上がらせないためには、軌道上の雪の密度 $\rho$ が $\rho \geq \rho_c(v_1)$ であり、かつ含水率 $W$ が $W \geq W_c(v_1)$ の条件を満たしていることが必要となる。

### 4. 散水時の密度および含水率の推定

新雪に散水を行った際の密度と含水率の変化は、濡れ雪の舞い上がり大きな影響を及ぼす。このときの密度と含水率について、散水試験の結果を用いて、鉄道沿線でも容易に得られる気象要素などから推定する方法を検討した。これらの推定方法の検討には、2.1節で得られた散水試験の中で散水量が20mm程度まで行われ、かつ連続的に密度と含水率が測定されている試験のデータを用いた。また、

特集：防災技術

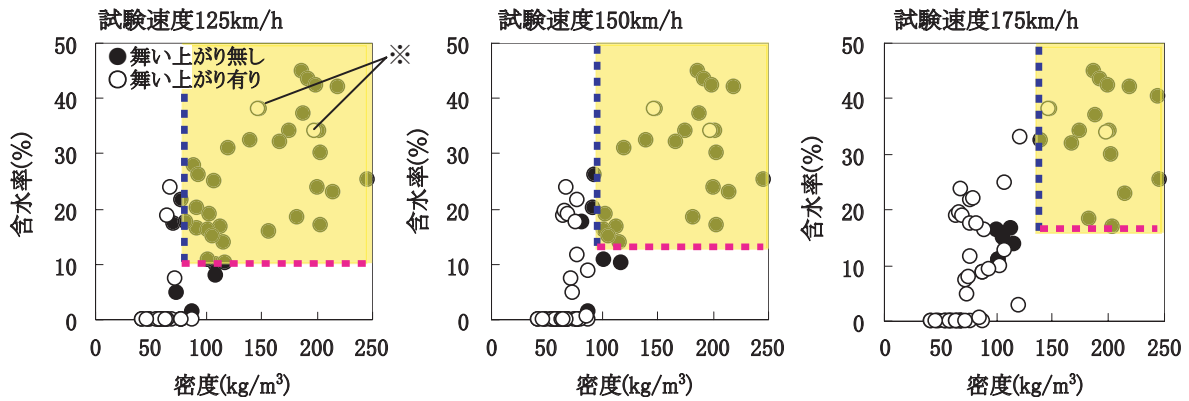


図6 試験に用いた雪の密度および含水率と舞い上がりの有無との関係

(図中の黄色は舞い上がり無しの領域、※舞い上がりが生じたごく薄い表層の密度、含水率はここで示す値よりは小さいと考えられる)

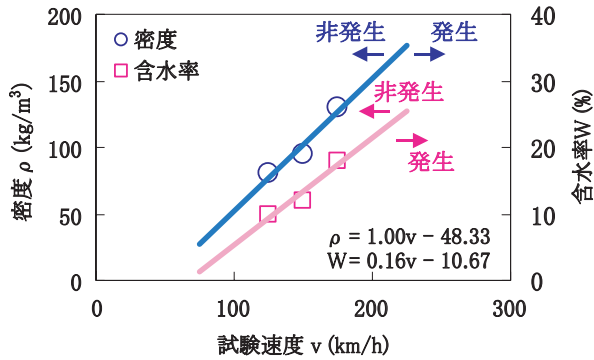


図7 走行速度と舞い上がりの発生する最大の密度および含水率との関係

検討に用いた各試験の気象状況は、気温は-4.0～1.3℃、降雪強度は3.0mm/h以下、風速は2.4m/s以下であった。

4.1 散水時の密度の推定

(1) 密度の推定方法の検討

散水時の密度の違いの原因は、散水時の密度の増加量が関係すると考えられることから、個々の試験について、散水前の初期密度からの増加量  $\rho - \rho_0$  ( $\rho$  : 任意の時間経過後の密度,  $\rho_0$  : 初期密度) と散水量  $P$  (mm) との関係求めた。初期密度が 39, 78, 128 kg/m<sup>3</sup> の3つ

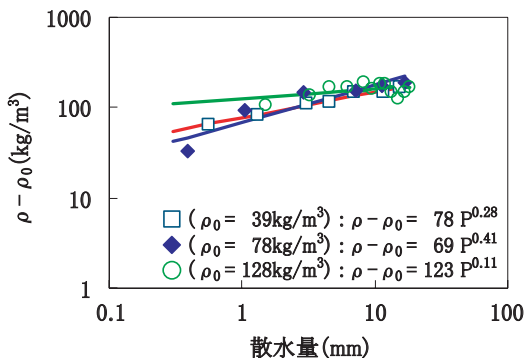


図8 散水量と密度増加量との関係

の試験で得られた散水量と密度の増加量との関係を図8に示す。試験毎に傾きは異なるが、他の試験においても、図8と同様に散水量と密度の増加量との間には良い相関があり、試験毎の密度の増加量は、散水量の関数で近似できることが分かった。これらの結果から、散水量と初期密度からの増加量は次式で表すことができると考える。

$$\rho - \rho_0 = \alpha P^\beta \quad (3)$$

上記(3)式で、係数  $\alpha$  は  $P=1$  のときの密度増加量を意味する。また、係数  $\beta$  は図8の回帰直線の傾きを表すものであり、密度の増加速度を意味する。これらの  $\alpha, \beta$  は試験によって異なり、本試験においては、 $\alpha$  は 65～141、 $\beta$  は 0.10～0.57 の範囲であった。

(2) 推定式の作成

上記(3)式において、係数  $\alpha$  と  $\beta$  が決まれば、密度  $\rho$  と散水量  $P$  との関係を導くことができる。 $\alpha$  と  $\beta$  は散水時の気象条件や初期密度  $\rho_0$  に依存して変化するものと考えられる。この  $\alpha$  と  $\beta$  とをそれぞれ目的変数とし、試験時の降雪強度  $I$  (mm/h)、平均気温  $T$  (℃)、平均風速  $U$  (m/s)、および初期密度  $\rho_0$  を説明変数として重回帰分析を行った。その結果、 $\alpha$  については、降雪強度  $I$  と気温  $T$  が、また、 $\beta$  に関しては降雪強度  $I$ 、気温  $T$  および初期密度  $\rho_0$  が、それぞれ有意であり、重回帰式は次のとおりであった。

$$\alpha = -15.4I - 19.7T + 98.9 \quad (4)$$

$$\beta = 0.15I + 0.08T - 0.001\rho_0 + 0.34 \quad (5)$$

上記(4)と(5)式の重相関係数は0.62と0.82である。係数  $\alpha$  は  $P=1$  のときの密度増加量であるため、散水初期の段階で大きく影響する。(4)式の符号から、降雪強度が小さく、もしくは気温が低いときに大きな値をとることが分かる。これは、降雪強度が小さい場合や降雪時の気温が低い場合には、初期密度が小さくなり、散水初期の密度の増加量が大きな値になるものと考えられる。 $\beta$  は密度の増加速度を決定する係数であり、(5)式の回帰式の符号から、 $\beta$  は降雪強度や気温が大きいに、また、初

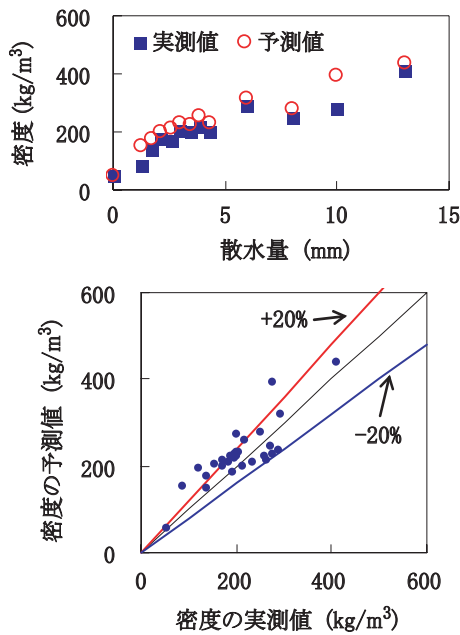


図9 実測値と予測値の比較

期密度が小さいときには大きい値となることが分かる。

(3) 密度の予測値の検証

散水試験データより作成された(3)~(5)式を用いて求められた密度の予測値の検証を行うため、試験で得られた実測値と、それぞれの気象条件をもとに推定した予測値とを比較した(図9)。検証に用いたデータは、試験時間が短いため、ほとんどが密度300kg/m<sup>3</sup>以下の比較となったが、この範囲で得られた予測データ数の8割以上が実測値に対して±20%の範囲内であった。このことから、(3)~(5)式を用いた密度の推定値は、概ね実測値を再現していると考えられる。

4.2 散水時の含水率の推定

(1) 含水率の推定方法の検討

散水時の含水率は変化が大きく、気象要素のみからは、有意な推定式を得ることができなかった。そこで、濡れ雪試料内部の水の存在様式に着目し、含水率を(6)式を用いて、積雪内部の空隙の体積に対する水の体積の割合を表す飽和度<sup>7)</sup>に変換した。飽和度は散水量に対して含水率よりも変動が小さくなり、実験式が作成し易いため、飽和度と散水量との関係を分析することで、間接的に含水率を推定する方法を検討した。

$$W = \frac{100\rho_w S(\rho_i - \rho)}{\rho(100\rho_i - \rho_w S)} \quad (6)$$

ここで、 $W$ は含水率(%),  $\rho_w$ は水の密度(kg/m<sup>3</sup>),  $\rho_i$ は氷の密度(kg/m<sup>3</sup>),  $\rho$ は雪の密度(kg/m<sup>3</sup>),  $S$ は飽和度(%)である。この式を用いて、実験で得られた含水率 $W$ から飽和度を求めた。なお、水の密度 $\rho_w$ は1000kg/

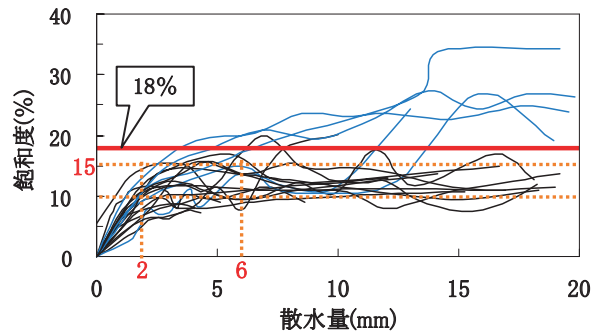


図10 散水量と飽和度との関係

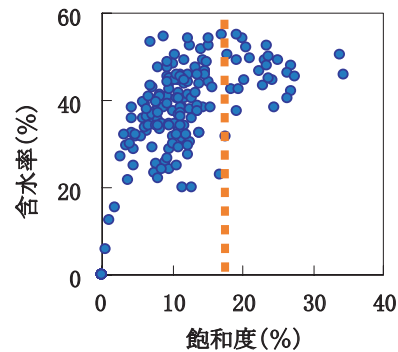


図11 飽和度と含水率との関係の関係

m<sup>3</sup>, 氷の密度 $\rho_i$ は917 kg/m<sup>3</sup>とし、雪の密度 $\rho$ は実測値を与えた。図10に散水量に対する飽和度 $S$ の変化を示す。飽和度 $S$ は、散水量が2~6mmになる散水初期に急速に大きくなり、その後18%以下で比較的に小さい変化で推移するものと、18%を超え大きく変化するものがある。飽和度は、約18%を超えると空隙が孤立した気泡となり透水性が大きくなる<sup>7)</sup>。このような事例では飽和度の変化が18%以下の場合と比べて大きく、実験式の作成が困難である。ここでは、飽和度が18%に達した事例の解析は今後の課題として残し、これ以下の事例について解析を進める。なお、飽和度が18%以上の領域では含水率が比較的高く、濡れ雪の舞い上がりが発生する条件からは安全側に位置づけられる(図11)。

図10から、飽和度 $S$ (%)が18%以下の事例については、散水量6mmまでは散水量に応じて増加し、その後は一定であると仮定し、散水量 $P$ (mm)を用いて以下に表現することとした。

$$S = \begin{cases} 2P(0 \leq P < 6) \\ 12(P \geq 6) \end{cases} \quad (7)$$

積雪に散水を行った際の含水率 $W$ は、(3)~(5)式で求まる雪の密度 $\rho$ 、(7)式より求まる飽和度( $S$ )を、式(6)へ代入することによって推定することができる。

(2) 含水率の予測値の検証

飽和度が18%に達していない試験において、含水率の

特集：防災技術

実測値と(6),(7)式を用いて推定した予測値とを比較した。含水率が急速に増加する散水初期の段階では実測値に比べ予測値が大きく下回るが、含水率が最大となった後の減少過程においては、得られた予測データ数の8割以上が実測値に対して、±20%の範囲内であった(図12)。

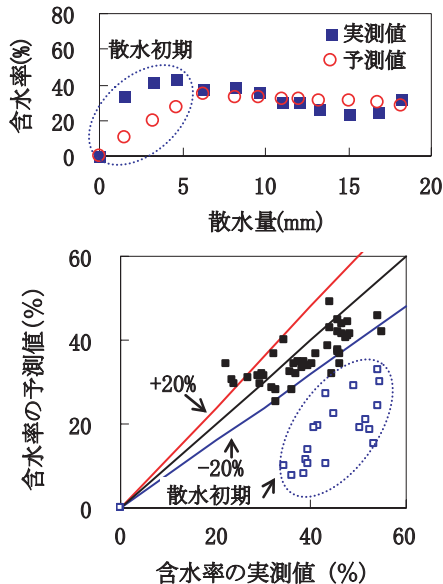


図12 実測値と予測値の比較

5. まとめ

本課題では、天候や積雪状況に加え、軌道内の雪質を指標とする効率的な運転規制の実施方法の検討に資することを目的とし、積雪の密度および含水率が車両走行時の濡れ雪の舞い上がりの発生にどのように影響するかを調べた。一連の試験によって得られた知見を以下に示す。

- (1) 新雪に散水を行った場合、新雪の密度は累積散水量が2~3mmに達するまでに急速に増加し、その後、増加量は小さくなること、また含水率は2~6mmに達するまで急速に増加し、その後は徐々に減少する傾向を示すことが分かった。
- (2) 濡れ雪試料を用いた舞い上がり試験から、濡れ雪の舞い上がりの要因である濡れ雪内部の圧力勾配は台車部が通過する際に大きく、また速度に依存して大きくなることが分かった。
- (3) 雪質と濡れ雪の舞い上がりの発生との関係では、雪の密度および含水率と舞い上がりの発生速度との関係式を求め、密度と含水率が明らかになれば、舞い上がりが発生する車両の走行速度を概ね推定できる

ことを示した。

- (4) 散水試験の結果から、沿線の気象条件などから散水時の積雪の密度や含水率を推定する方法を検討した結果、沿線で比較的容易に入手できる気温と降水強度(降雪強度)から、散水時の積雪密度は比較的精度よく推定できることが分かった。しかし、含水率に関しては、変化の傾向や含水率の減少過程においては概ね予測し得るものの、飽和度が18%に達する場合や散水初期の段階において精度良く求めることが困難であり、今後の課題となった。

謝辞

最後に、本研究の実施にあたり東海旅客鉄道株式会社総合技術本部技術開発部雪害対策グループの関係各位に貴重な意見などご協力を頂いた。また、濡れ雪の物理的性質の推定方法に関して、新潟大学災害復興科学センターの河島克久准教授にご指導頂いた。以上の関係各位に深甚なる謝意を表す次第である。

文献

- 1) 斎藤雅男：東海道新幹線の雪氷害とその対策(1) 雪氷害の特徴とその対策，日本雪氷学会誌「雪氷」，Vol.33，No.3，pp.61-78，1971
- 2) 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
- 3) 藤井俊茂，今井俊昭，遠藤 徹：東海道新幹線車両床下着雪調査，鉄道技術研究速報，No.A-86-200，pp.1-35，1986
- 4) 増子喜久平：63'東海道新幹線の雪害対策．車両と電気，Vol.40，No.1，pp.30-31，1989
- 5) 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
- 6) 飯倉茂弘，遠藤 徹，藤井俊茂，井門敦志，河島克久：鉄道車両通過時に濡れ雪の舞い上がり及ぼす台車周辺形状の評価，寒地技術論文・報告集，Vol.20，pp.227-234，2004
- 7) 前野紀一，黒田登志雄：雪氷の構造と物性，古今書院，1986
- 8) 日本建設機械化協会：防雪工学ハンドブック，森北出版，1977
- 9) Kawashima.K., Endo.T., Takeuchi.Y. : A portable calorimeter for measuring liquid-water content of wet snow. Annals Glaciology. Vol.26, pp.103-106, 1998