

鉄道車両からの落雪現象を模擬した落雪実験とモデルの作成

鎌田 慈* 辻 滉樹* 高橋 大介*

Snow Falling Experiments and Modeling to Simulate Phenomena of Snow Falling from Railway Vehicle

Yasushi KAMATA Hiroki TSUJI Daisuke TAKAHASHI

In order to elucidate the mechanism of snow-falling from railway vehicles in winter, a mathematical model was studied to estimate the time taken for snow to fall in a warm tunnel. In addition, to validate the model which is based on the heat balance to the accreted snow plate, snow-falling experiments were carried out in a low-temperature room, and the onset time of snow-falling was compared between the model and the experiments. The result showed that it was possible to estimate the onset time when snow-falling begins, by setting the appropriate influence range on snowmelt at the interface between the plate and the accreted snow in the model.

キーワード：落雪，着雪，供給熱量，落雪実験，車両落雪モデル，着雪量推定手法

1. はじめに

冬季に積雪寒冷地帯を走行する鉄道車両には、軌道上の雪が舞い上げられて車両台車部等に雪が付着することがある。成長した着雪が様々な原因により、走行中に落下することで、バラストの飛散や地上設備の破損、分岐器不転換などを引き起こすことがあり、冬季における輸送障害の一因となっている¹⁾。対策として、着雪量を減らすために、軌道への散水による軌道内積雪の濡れ雪化²⁾やボディマウント構造をはじめとする車体形状の平滑化³⁾、駅での雪落とし作業⁴⁾などが実施されている。しかしながら、依然として車両着落雪が原因となる障害は発生しており、鉄道総研では、対策を効果的かつ効率的に実施するための研究開発を進めている。その一つが、雪落とし作業を効率的に実施するための車両着雪量を推定する手法の開発である。

車両着雪量については、これまでも研究^{5) 6) 7)}を進めてきたが、車両からの落雪現象は、発生タイミングや車体における発生位置ともに多様であるため、現象そのものの発生を直接捉えることが容易ではなく、発生メカニズムの解明は進んでいない。トンネル等の温暖な環境での落雪や融雪が発生し、着雪量が減少することも考えられるため、着雪量の推定精度を向上するためには、この現象の発生メカニズムの解明が必要である。

筆者らは車両落雪現象の発生メカニズムを解明するために、実験的手法による研究を行っている。本論文では、車両落雪現象について簡易なモデル化を行い、落雪の発生時間を推定するモデルを構築し、落雪実験と比較した結果について報告する。

2. 車両落雪現象のモデル化

A 駅～B 駅を積雪寒冷地帯、B 駅～C 駅を無雪地帯と仮定した場合における、冬季の列車走行時の気温と着雪量の変化を模式的に図 1 に示す。積雪寒冷地帯のトンネルでは、冬季において内部の温度は外気温より高く、坑口からある程度の距離を越えると概ね一定の正の気温を示すことが報告されている⁸⁾。このため、トンネル内では車体が温められることにより、落雪が生じやすくなると考えられる (図 2)。

本論文では、トンネル内での車両落雪現象は、気温の上昇による着雪の付着面での融解が原因で発生すると考える。また、新幹線車両台車部の着雪はフサギ板が多いと報告されており⁹⁾、フサギ板は鉛直なため着雪も落下

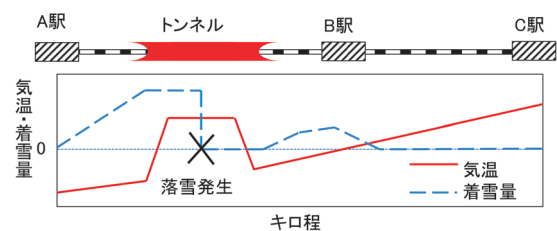


図 1 冬季の列車走行時の着雪量の変化 (模式図)

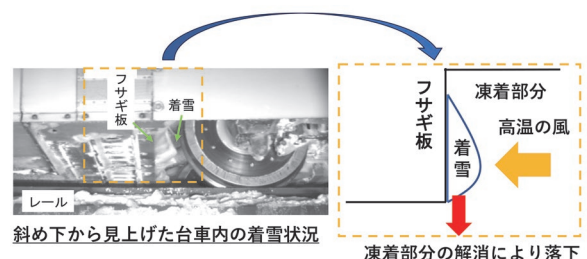


図 2 着雪状況と落雪発生状況の模式図

* 防災技術研究部 気象防災研究室

しやすいと考えられることから、フサギ板への着雪を対象とする。

この他に落雪に関する簡易モデルを検討するにあたって、以下のような仮定を置くこととする。

- (1) 着雪の物性は一定とし、着雪表面からの昇華や融解は無いものとする。
- (2) 一般に着雪は雪粒子と他の物質、また雪粒子同士が様々な力で付着することで発生する¹⁰⁾が、ここでは、着雪の付着は凍着のみによって生じると考える。
- (3) 車両からの落雪現象は、トンネル坑口での車両の突入に伴う圧力の変動や分岐器付近での通過に伴う振動などによって、発生している可能性は十分に考えられる^{11) 12) 13)}が、今回はその影響を考慮しないこととし、走行時にフサギ板へ与えられる熱量によって発生するものとする。

3. 車両落雪モデル

車両落雪モデルは、車両がトンネル等に入庫した際に、落雪するまでの時間を推定するためのモデルである。落雪までの時間とトンネル通過時間を比較することで、トンネル内で落雪するか否かを判定することが可能となる。車両落雪モデルの考え方の模式図を図3に示す。まず、着雪と車両端部フサギ板が凍着している状態へ気温、風速、付着雪面積に依存する熱が与えられる(=供給熱量の増加)。供給熱量が増加することで、着雪の温度が上昇し、フサギ板と着雪の界面が融解(=凍着が解消)して付着力は低下する。一方、着雪表面からの融解や昇華蒸発は発生しないと仮定しているため、重力の値は変化しない。融解が進むと付着力は減少していくため、付着力が重力を下回る時刻(t_{slip})で落下すると考える。

本モデルは、凍着の解消過程を計算する部分と付着力と重力の関係を計算する部分に分けて考える。ここでは前者について、凍着の解消は供給熱量の増加による凍着部分の融解によって生じるということから、融解熱量モデルと呼び、後者については力のバランスで落下することから、落下モデルと呼ぶこととする。

3.1 融解熱量モデル

融解熱量モデルでは、凍着部分の解消過程を計算する。凍着の解消には、凍着部分の温度上昇と融解のために熱量が必要である。融解過程を計算するにあたり、車両端部フサギ板と着雪に与えられる熱量(=供給熱量： Q_s)と凍着部分の解消に用いられる熱量(=解消熱量： Q_m)との関係を考える。ここで、雪(密度に依存するが概ね $10^{-1} \sim 10^0 \text{ W/mK}$)¹⁴⁾と車両端部フサギ板(一般的な材質では 10^1 W/mK)との熱伝導率の違いから、着雪自体の

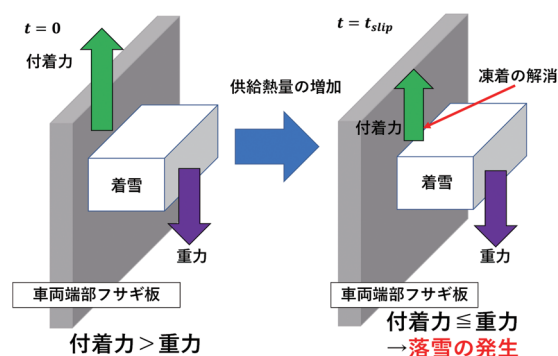


図3 車両落雪モデルの考え方

温度上昇は小さいと考えられるため、供給熱量はすべて凍着部分の解消に用いられると仮定する(式(1))。

$$Q_s = Q_m \quad (1)$$

供給熱量は単位時間当たりの供給熱(q)と時間(t)の積である。上述の熱伝導率の違いから、凍着部分の解消に用いられる供給熱は、車両端部フサギ板の着雪が存在しない領域から走行風によって与えられるとする。伝熱工学では風が介在するときの熱伝達は対流熱伝達と言われる。車両端部フサギ板に供給される単位時間あたりの供給熱は、以下の式で記述することができる。

$$q = h \Delta S \Delta T_b \quad (2)$$

ここで h は熱伝達率、 ΔS は車両端部フサギ板の着雪が存在しない面積、 ΔT_b は車両端部フサギ板の落雪発生前後における温度差である。熱伝達率に関しては、ヌセルト数(Nu)を用いて、以下の式で記述することができる。

$$h = \frac{\kappa_a Nu}{L_b} \quad (3)$$

κ_a は空気の熱伝導率、 L_b は風に直交する物体の代表長さであり、例えば車両端部フサギ板の鉛直方向の長さである。

式(2)と式(3)より、供給熱量は以下の式(4)で記述することができる。

$$Q_s = qt = \frac{\kappa_a Nu}{L_b} \Delta S \Delta T_b t \quad (4)$$

ヌセルト数に関しては、風速により異なる表記の式を用いた¹⁵⁾。風速 0 m/s のとき、

$$Nu = 0.59(Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

それ以外のとき、

$$Nu = 0.664 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

ここで Gr はグラスホフ数と呼ばれる無次元数で、重力加速度を g 、空気の体膨張係数を β 、車両端部フサギ板の初期温度を $T_{b,i}$ 、気温を T_a 、空気の動粘性係数を ν としたときに、以下の式で記述される。

$$Gr = \frac{L_b^3 g \beta (T_{b,i} - T_a)}{\nu^2} \quad (7)$$

また、 Pr はプラントル数であり、空気では 0.71 である。 Re はレイノルズ数で、風速 W を用いて、以下の式で記述される。

$$Re = \frac{L_b W}{\nu} \quad (8)$$

次に、凍着部分の温度上昇と状態変化に用いられる解消熱量について記載する。ここで、着雪は水と空気の混合体で形成されているため、水の密度を ρ_i 、時間 (t) までに凍着部分で融解した氷の体積を V_i 、氷の温度上昇幅を ΔT_i 、水の比熱を C_v 、氷の融解熱を Q_i とすると、凍着部分の水が温度上昇し、水に変化するための解消熱量は以下の式 (9) で記述することができる。

$$Q_m = \rho_i V_i C_v \Delta T_i + Q_i \rho_i V_i = \rho_i V_i (C_v \Delta T_i + Q_i) \quad (9)$$

解消熱量を求めるためには、凍着部分で実際に融解した氷の体積が必要であるが、着雪において融解した氷部分の体積を直接計測することは困難である。そこで、同一の粒径を持つ氷と空気の混合体であった着雪において、時間の経過により徐々に水を含んだ部分が増加する考える。その様子を図 4 に模式的に示す。

Y-Z 平面に関して、着雪において実際に付着している

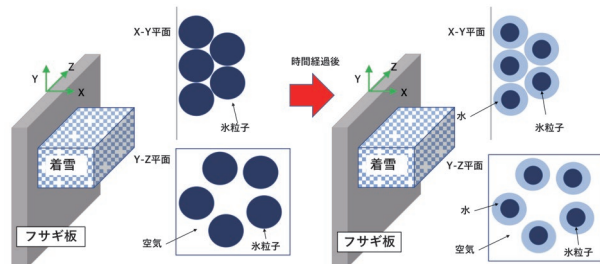


図 4 着雪の融解過程の模式図

氷の面積 (= 実効付着面積: S_e) は融解とともに徐々に減少していくため、実効付着面積を時間の関数として考える。

初期状態では氷と空気の混合体であることから、着雪の密度 (ρ_s) を用いると、着雪の中で氷が占める割合 (= 存在率 a) は以下の式で記述することができる。

$$a = \frac{\rho_s}{\rho_i} \quad (10)$$

実効付着面積は、着雪の密度に比例すると仮定すると、着雪の面積 (S_i) を用いて、初期状態の実効付着面積を以下の式で記述することができる。

$$S_e(0) = S_i a \quad (11)$$

時間が経過するにつれて、融解する氷粒子は増加するため、X 方向の影響範囲を融解高さ (H) としたときに、時間 (t) までに融解した氷の体積 (V_i) は以下の式で記述することができる。

$$V_i = (S_e(0) - S_e(t)) H \quad (12)$$

これらを用いて、解消熱量は以下の式で記述することができる。

$$Q_m = \rho_i (S_i a - S_e(t)) (C_v \Delta T_i + Q_i) H \quad (13)$$

3.2 落下モデル

落下モデルでは付着力 (F_a) と重力 (F_g) との関係を考える。融解前は付着力が重力より大きいため、着雪は落下しない。ここで、表面からの着雪の融解はないと仮定しているため、重力は一定となり、着雪の質量 (M) と重力加速度 (g) との積で表せる。一方、付着力は氷の凍着に起因することから、氷の付着強度 (σ_i) と実効付着面積との積で求められる。氷の単位面積当たりの付着強度は一定と仮定すると、融解による凍着部分の実効付着面積の減少に対応して付着力は減少することとなる。したがって、着雪の落下は、付着力と重力が等しくなる時に生じると考える (式 (14))。

$$F_a = F_g \Leftrightarrow \sigma_i S_e(t) = Mg \quad (14)$$

3.3 落雪時間の推定

融解熱量モデルと落下モデルを組み合わせると、車両落雪モデルを考える。まず、時刻 (t_{slip}) において、落雪が発生したとする。このとき、式 (14) より、以下の式が導かれる。

$$S_c(t_{\text{slip}}) = \frac{Mg}{\sigma_i} \quad (15)$$

これは着雪が落下するときの実効付着面積が、着雪の質量に依存することを示す。

式(1)、式(4)、式(13)、式(15)を、時刻(t_{slip})について解くと、式(16)が導かれる。

$$t_{\text{slip}} = \frac{\rho_i L_b \left(S_i a - \frac{Mg}{\sigma_i} \right) (C_v \Delta T_i + Q_i) H}{\kappa_a Nu \Delta S \Delta T_b} \quad (16)$$

本モデルの実現象への適用を考えると、車両端部フサギ板の長さや面積は既知であり、雪や車両端部フサギ板の温度上昇は着雪の温度(≒着雪時の気温)と落下時の温度(=0℃)との差と考えることができる。また、着雪の密度や着雪面積、着雪の質量については、数は少ないながら観測が行われており、ヌセルト数に含まれている車両端部フサギ板に当たる風速についても車両床下の気流解析などから概ね推定することができる。その他、物理定数を鑑みると式(16)で不明なものは融解高さ H だけとなる。したがって、融解高さ H に適切な値を設定することで、落雪が発生する時間を計算できることとなる。なお、本論文では、融解高さ H には任意の一定の値を与えることとする。

4. 落雪実験

車両落雪モデルを構築するにあたり、落雪現象を再現する実験(以下、落雪実験と呼称)を行い、モデルに影響を与えるパラメータについて調べた。なお、本実験は以下の条件を想定して実施した。

- (1) 着雪の面積は一定
- (2) 長大トンネルを対象とした正の気温条件
- (3) 走行風に対応した風速

4.1 実験方法

(1) 雪試料作成方法

車両端部フサギ板を模擬した金属板 SUS304 (300mm×200mm×1.5mm) に一定面積となるような

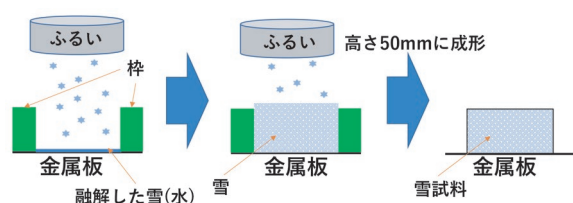


図5 雪試料の作成方法

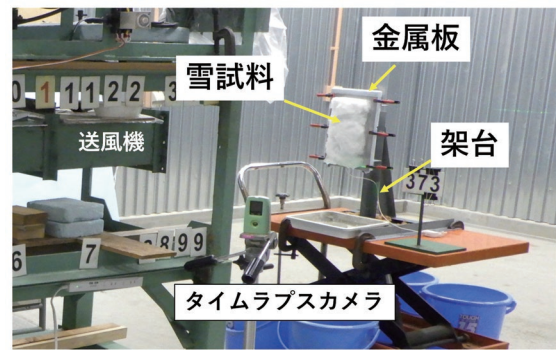


図6 落雪実験の状況

枠(小:10000mm², 中:22100mm², 大:50400mm²)を載せ、その中にふるいを用いて保管していた自然積雪を入れる。その後、高さを50mmに成形して枠を取り外し、-30℃の低温室内で保存して凍着させることで、雪試料を作成した(図5)。

(2) 落雪実験方法

雪試料を一定の気温(5℃, 10℃, 15℃)に設定した低温実験室内の風洞装置出口の架台上に設置し、送風機を用いて、一定風速(0~20m/sの範囲で2.5m/s刻みで設定)の風を当てた(図6)。雪試料の背面には断熱材を貼り、車両端部フサギ板と同様に着雪が存在する面(=表面)からのみ、風が当たるようにした。ここで、日本国内における列車の走行速度は最大320km/hであるが、車両下端と地表面との中間付近の風速比は0.5程度であり¹⁶⁾、対象となる車両端部フサギ板付近の風速は車両とともに移動するためにこれよりも低いと考えられることから、実験での風速は走行速度よりも小さな値とした。

雪試料の状況をタイムラプスカメラ(Brinno, TLC200)で撮影し、送風開始から滑り始めるまでの時間(以後、滑り時間と呼ぶ)を動画から読み取った。

4.2 実験結果

図7に気温と付着雪面積を変化させた場合の風速と滑り時間との関係を示す。いずれの気温、付着雪面積でも風速が大きくなるほど、滑り時間は短くなる傾向が見られた。同じ風速では、気温が高くなるほど、また、付着雪面積が小さくなるほど、滑り時間は短くなる傾向が見られた。

5. 実験結果とモデルの計算結果の比較

本章では、モデルによる落雪時間(計算時間)と落雪実験の結果(滑り時間)を比較し、モデル計算の妥当性について考察する。式(16)の中で用いられるパラメータについて、落雪実験時の対応を表1に示す。

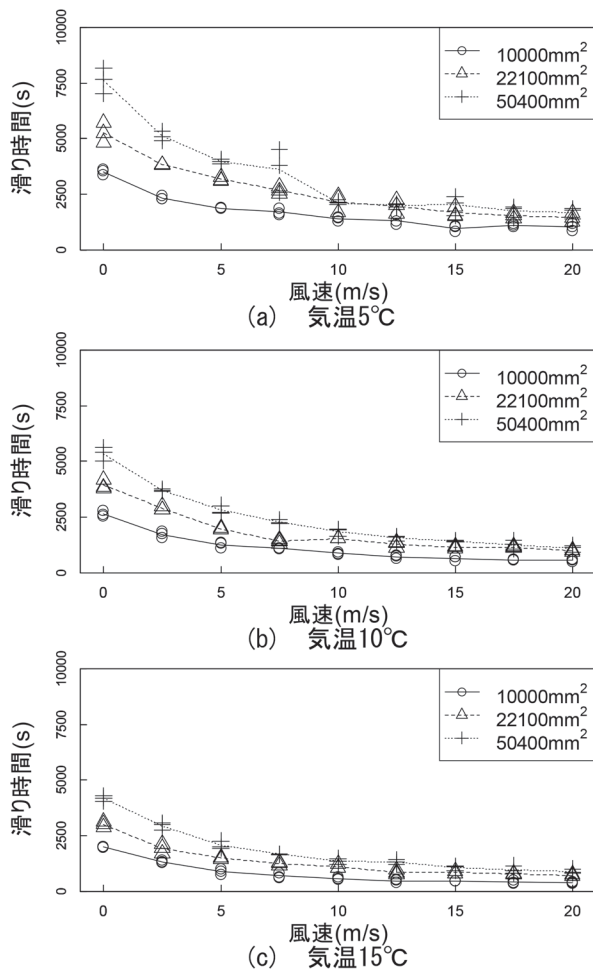


図7 風速と滑り時間との関係

図8に付着雪面積「中」における、気温を変化させた場合の滑り時間と計算時間との比較を示す。なお、実験で落雪後の界面部分の着雪を観察すると10mm程度が含水していたため、ここでは融解高さを10mmとした。気温10℃と15℃の滑り時間の短い実験（風速2.5～20m/s）では、図中の1:1の直線上にプロットされ、計算結果は実験結果とある程度一致する結果が得られたと考えることができる。一方で、気温5℃の実験では、滑り時間の小さな実験（特に風速2.5～10m/s）で過小評価しているが、滑り時間と計算結果の相関は良いことがわかる。また、いずれの気温でも滑り時間の大きな実験（風速0m/s）ではモデルが実験を過大評価しており、乖離が大きかった。

図9に気温10℃における、付着雪面積を変化させた場合の落雪実験の結果とモデルによる計算結果との比較を示す。なお、軸はともに対数である。融解高さは図8と同様に10mmとした。付着雪面積「中」の実験では、風速0m/sを除けば、滑り時間と計算時間はある程度一致している。一方で、付着雪面積「小」については過小評価しており、付着雪面積「大」については、いずれの

表1 モデルの計算に用いる落雪実験のパラメータ

パラメータ (単位)	説明	試験に使用した値
L_b (mm)	金属板の長さ	300
S_i (mm ²)	付着面積	10000 (小) 22100 (中) 50400 (大)
ΔS (mm ²)	金属板の面積と付着面積の差	10000 (小) 22100 (中) 50400 (大)
$a = \frac{\rho_s}{\rho_i}$ (無次元)	氷の存在率（着雪密度と氷の密度との比）	実験条件から計算
M (kg)	着雪質量	実験値
ΔT_i (°C)	低温室の温度と落下時の着雪の温度との差	30
Nu (無次元)	ヌセルト数	実験条件から計算
ν (m ² /s)	空気の動粘性係数	実験条件から計算
T_a (°C)	実験時の気温	5, 10, 15
W (m/s)	実験時の風速	0, 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20
$T_{b,i}$ (°C)	低温室の温度	-30

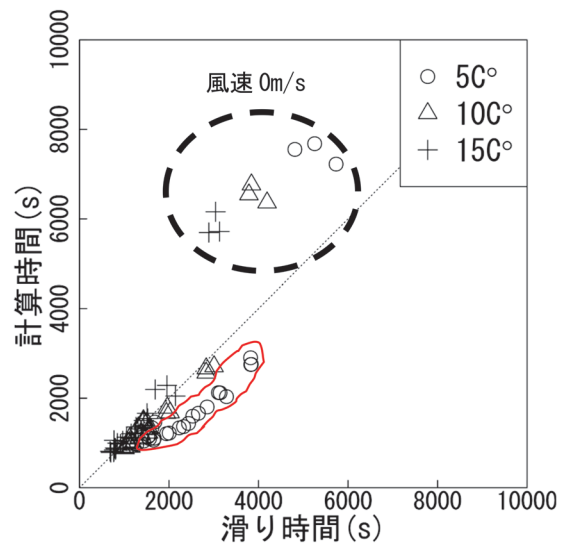


図8 付着雪面積「中」における、各気温での滑り時間と計算時間の関係（点線は1:1の関係を示す。各温度のマーカーは左に行くほど風速が大きい）

風速においても過大評価している。しかしながら、計算時間と滑り時間との相関は良いことがわかる。

風速0m/sの実験でモデルと計算のずれが比較的大きくなる傾向があるが、これは風速に対するヌセルト数の式が異なることに起因する可能性が考えられる。また、付着雪面積に関して生じる計算のずれの原因として、モ

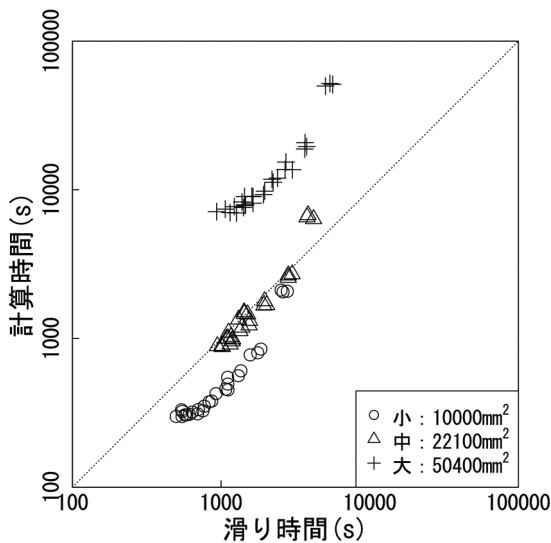


図9 気温 10°Cにおける、各付着面積での滑り時間と計算時間の関係（点線は 1 : 1 の関係を示す。各面積のマーカーは左に行くほど風速が大きい）

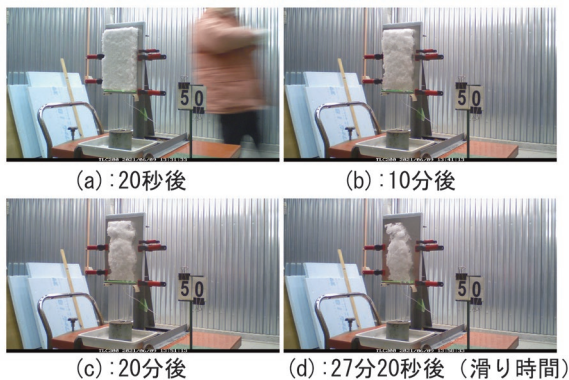


図10 付着雪面積「大」における雪試料の融解の様子

モデルでは、雪試料自体の融雪は無いものと仮定しているが、実際は実験時に雪試料自体が融解していることが挙げられる（図10）。融雪が発生すると、付着雪面積が減少して供給熱が増加する一方、雪試料の質量が減少する。供給熱が増加すれば滑り時間は短くなるが、雪試料の質量が減少すれば付着力が小さくても着雪は保持されるために滑り時間は長くなる。今回の実験結果では、付着面積が小さい場合は前者、付着面積が大きな場合は後者の影響が大きいと考えられた。このような着雪表面からの融雪過程については、今後、モデルに組み込む必要があると考えている。

以上より、融解高さを一定としたときの計算では、気温が低い時や付着雪面積が異なる場合に、計算時間と滑り時間との間にずれが見られるものの、両者の相関はよいことがわかった。ここで、車両落雪モデルを実際に走行する車両に適用する場合、走行時に車両端部フサギ板にあたる風速が 0m/s となることは考えにくいこと、計

算結果と滑り時間の相関は良いことから融解高さ H を気温の関数として設定するなどの工夫をすることで、トンネルに進入してから落雪が発生するまでの時間を計算することは可能と考えられる。

6. まとめと今後の課題

車両落雪現象の発生時間を推定することができる車両落雪モデルを構築した。このモデルでは、多くの仮定を用いているが、実験結果に対して、ある程度の精度で落雪に至る時間を推定できることを確認した。今後、本モデルを実際の車両走行時に適用することで、長大トンネルにおいて、トンネル内に侵入してからどれくらいの時間で落雪が発生するかの判定が可能となると考えられる。列車の走行速度は概ね決まっているため、落雪の発生時間が分かることで、落雪の発生場所を特定して、落雪の多発箇所を抽出できれば、対策の優先順位について検討可能となると考えられる。これらは作成した車両落雪モデルの利用の一例であるが、効率的な車両着雪現象対策の一助となることを目指していきたい。

今後は、モデルの精度向上のために、着雪の融解過程に関して考慮すること、融解高さについて、適切な値を調査することが必要である。

本論文は、第37回寒地技術シンポジウムで発表された論文¹⁷⁾をもとに再構成している。

文献

- 1) 斎藤雅男：東海道新幹線の雪氷害とその対策（1）雪氷害の特質とその対策，雪氷，33(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) 石原知明，中栄周三：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
- 4) 天谷徳宏：「東海道新幹線の雪害対策」列車遅延を最小にするための取り組み，JR 東海技報，8，pp.10-11，2009
- 5) 鎌田慈，室谷浩平，中出孝次，高橋大介，佐藤研吾，根本征樹：鉄道車両に用いる着雪シミュレータの開発（その1）—実験による着雪発達条件の検討—，雪氷，83(1)，pp.79-95，2021
- 6) 室谷浩平，中出孝次，鎌田慈：鉄道車両に用いる着雪シミュレータの開発（その2）—実験から導き出した着雪発達条件を用いた着雪解析手法の検討—，雪氷，83(5)，pp.465-487，2021
- 7) 鎌田慈，穴戸真也，飯倉茂弘：鉄道車両台車部の着雪量推定手法，第36回寒地技術シンポジウム 論文・報告集，2020
- 8) 常本瑞樹，清水政利，齋藤寛之，梶山博司：温度変化やトロリ線摩耗が集電性能に与える影響，鉄道総研報告，

- Vol.29, No.12, pp.29-34, 2015
- 9) 鎌田慈, 室谷浩平, 飯倉茂弘, 中川勲: 新幹線車両床下着雪状況の分析, 第38回寒地技術シンポジウム 論文・報告集, 2022
 - 10) 松下拓樹: 道路案内標識の着雪. 落雪対策について, 寒地土木研究所月報, 658, pp.45-48, 2008
 - 11) 社団法人日本鉄道技術協会: 昭和55~57年度新幹線の雪害対策に関する研究報告書, 1981~1983
 - 12) 宮部実, 兵頭信彦, 吉田伸司, 平間淳司, 永瀬和彦: 豪雪地帯を高速走行する列車床下機器への着雪に関する研究—第3報 着雪及び落雪の実態, 第15回鉄道技術. 政策連合シンポジウム (J-RAIL2008), pp.89-92, 2008
 - 13) 斉藤実俊, 斎藤寛之, 梶山博司: トンネル内の圧力変動を予測して設備や車両の設計に役立てる, RRR, 75(1), 2018
 - 14) 福迫尚一郎, 田子真, 山田雅彦: 氷, 雪, および海水の熱物性, 熱物性, 2(2), pp.89-100, 1988
 - 15) 日本機械学会: JSME テキストシリーズ 伝熱工学, pp.233, 2005
 - 16) 井門敦志, 岩崎誠: 現車試験による車両底面と地面の間の流れ場の解明, 鉄道総研報告, Vol.30, No.7, pp.35-40, 2015
 - 17) 辻滉樹, 鎌田慈, 高橋大介: 鉄道車両における落雪現象の簡易なモデル化, 第31回寒地技術シンポジウム 論文・報告集, Vol.37, 2021

■ 2024年1月号の訂正

論文の表中に誤りがありました。以下のように訂正させて頂き、お詫び申し上げます。

【訂正箇所】

p.13 右段表1中の一部表記（金属板の面積と付着面積の差の数値）

【誤】 10000（小）、22100（中）、50400（大）

【正】 50000（小）、37900（中）、9600（大）

パラメータ (単位)	説明	試験に使用した値
L_b (mm)	金属板の長さ	300
S_i (mm ²)	付着面積 訂正箇所	10000（小） 22100（中） 50400（大）
ΔS (mm ²)	金属板の面積と付着面積の差	10000（小） 22100（中） 50400（大）
$a = \frac{\rho_s}{\rho_i}$ (無次元)	氷の存在率（着雪密度と氷の密度との比）	実験条件から計算
M (kg)	着雪質量	実験値
ΔT_i (°C)	低温室の温度と落下時の着雪の温度との差	30
Nu (無次元)	ヌセルト数	実験条件から計算
ν (m ² /s)	空気の動粘性係数	実験条件から計算
T_a (°C)	実験時の気温	5, 10, 15
W (m/s)	実験時の風速	0, 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20
$T_{b,i}$ (°C)	低温室の温度	-30

パラメータ (単位)	説明	試験に使用した値
L_b (mm)	金属板の長さ	300
S_i (mm ²)	付着面積	10000（小） 22100（中） 50400（大）
ΔS (mm ²)	金属板の面積と付着面積の差	50000（小） 37900（中） 9600（大）
$a = \frac{\rho_s}{\rho_i}$ (無次元)	氷の存在率（着雪密度と氷の密度との比）	実験条件から計算
M (kg)	着雪質量	実験値
ΔT_i (°C)	低温室の温度と落下時の着雪の温度との差	30
Nu (無次元)	ヌセルト数	実験条件から計算
ν (m ² /s)	空気の動粘性係数	実験条件から計算
T_a (°C)	実験時の気温	5, 10, 15
W (m/s)	実験時の風速	0, 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20
$T_{b,i}$ (°C)	低温室の温度	-30