

特集：鉄道固有の力学的問題に関わる最近の研究

# 降雪地帯を走行する鉄道車両への着雪を再現する 着雪シミュレータの開発

室谷 浩平\* 中出 孝次\* 鎌田 慈\*\*

Development of Simulator to Accurately Reproduce Snow Accretion Phenomenon  
for Railway Vehicles Traveling in Snowy Areas

Kohei MUROTANI Koji NAKADE Yasushi KAMATA

When accreted snow drops off train bogies, it might damage railway ground facilities along tracks, train devices, etc. To establish countermeasures against such snow accretion damage, we have developed a snow accretion analysis method to understand the snow accretion process. The “snow accretion analysis method” developed in this research consists of an “airflow calculation”, a “trajectory calculation” and a “snow accretion calculation”. In this research, we performed two kinds of snowfall wind tunnels to validate the proposed simulator.  
キーワード：着雪解析手法，鉄道車両の着雪，気流計算，軌道計算，着雪計算，双方向連成解析

## 1. はじめに

鉄道分野における着雪被害は、電線やパンタグラフへの着雪による集電障害、車両着雪（図1）が落下することによる地上構造物の破損やバラスト飛散、沿線の倒木・倒竹による輸送障害など多岐にわたる。この中でも車両着雪の落下は、分岐器不転換による遅延や設備の破損などを引き起こすため、重要な問題となっている。このような障害を軽減するために、高速鉄道では、地上側の対策として駅での雪落とし作業など、車両側の対策として床下機器の平滑化による着雪抑制が実施されている。しかしながら、形状が複雑で、メンテナンス上覆うことが困難な車両台車部には着雪が生じ、落雪による被害が発生している。穴戸<sup>1)</sup>は、車両台車部付近にデフレクターを取り付け、台車部に流入する雪の量を減らすことで、着雪抑制を試みたが、実物車両において着雪量の有意な低減効果の確認までは至っていない。このような着雪抑制のデフレクターや車体形状を検討する上で、実物車両を用いた試験を実施するためには多大な労力を要し、着雪が生じる天候条件にも大きく左右されるため、効率的な開発は困難である。

本研究では、着雪量を減らす鉄道車両の形状を検討するために、鉄道車両の着雪現象を再現可能な着雪シミュレータの開発を実施している。鉄道車両床下の着雪現象を再現するためには、雪の舞い上がりと複雑な床下形状の流れを再現する必要があるため、限定した条件や単純な形状を対象とした計算モデルでは、現象を正確に再現



図1 着雪した鉄道車両の台車部

することはできない。また、着雪対象物の形状や空気流の解析についての簡略化をできるだけ行わない方向で進める必要がある。さらに、着雪が成長することによって空気流が変化した場合の着雪部位やその量を見積もる上で、着雪形状を再現することが重要となる。

本研究では、鉄道車両周りの空気の流れ、この中を移動する飛雪粒子の運動、鉄道車両への着雪判定による着雪解析手法を開発<sup>2)3)</sup>した。本報告では、開発した着雪解析手法について述べるとともに、降雪風洞を用いた着雪実験の結果と比較することで、計算の妥当性を検証した結果を記載する。

## 2. 着雪シミュレータ開発のための実験

着雪シミュレータ開発のための基礎データを得ることを目的として、国立研究開発法人防災科学技術研究所雪氷防災研究センター 新庄雪氷環境実験所（以下、防災科研・新庄）において、樹枝状結晶の人工乾き雪を用いて、基本形状としての立方体模型と鉄道車両模型に対する着雪実験を実施した。なお、本章の立方体模型を用いた着雪実験の詳細は、鎌田らの文献<sup>2)</sup>に記載されている。

\* 鉄道力学研究部 計算力学研究室

\*\* 防災技術研究部 気象防災研究室

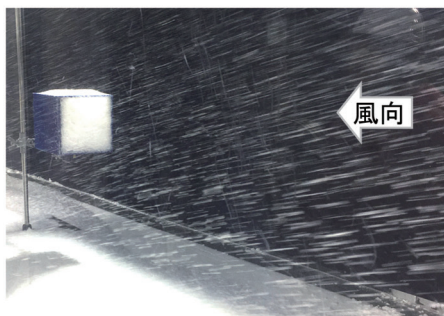
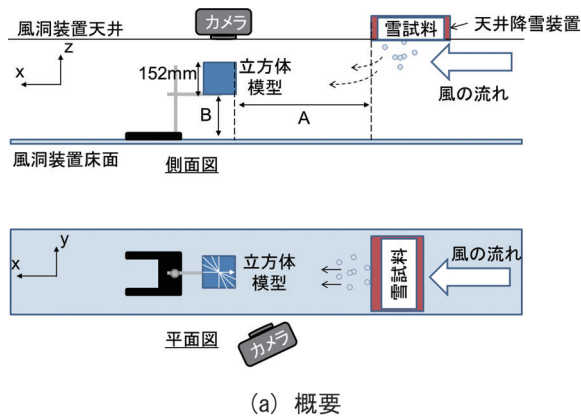
## 2.1 立方体模型の着雪実験方法

基本形状として立方体模型（寸法：152mm×152mm×152mm）を用いた着雪実験を行った。図2に立方体模型の着雪実験の概要と様子を示す。防災科研・新庄の雪氷防災棟の低温実験室内に設置されている風洞は、風洞断面1m×1m、長さ14mの風路をもつ。風洞床面に雪を敷き詰め、風洞断面の中央付近に立方体模型を配置し、気温-2℃で着雪実験を行った（流入風速2.5m/sの着雪実験では、A=1438mm、B=405mm、流入風速5.0m/sの着雪実験では、A=2533mm、B=405mm）。

風洞内への雪の供給は、天井に設置されているふりいと振動モータで構成されている天井降雪装置を用いた。一定の流入風速の下で雪を供給して、立方体模型に対する着雪実験を行い、着雪形状を測定した。

## 2.2 飛雪の抗力係数の測定方法

飛雪粒子は空中で、空気流から抗力を受けて移動するため、飛雪粒子の抗力係数が重要となる。飛雪粒子の形状は複雑であるため、抗力係数を形状から推測することが困難である。そこで、降雪風洞で浮遊する飛雪の抗力係数を求めるために、気温-2℃、流入風速2.5m/sの実験条件で雪を供給し、天井からシートレーザを照射し、風洞側面から飛雪が落下する軌道を撮影した。撮影画像の飛雪の落下角度を用いて、飛雪の抗力係数をパラメータとした重力と抗力の運動方程式を解くことで抗力係数を求めた。



(b) 立方体模型の着雪実験の様子

図2 立方体模型の着雪実験

## 2.3 鉄道車両模型の着雪実験方法

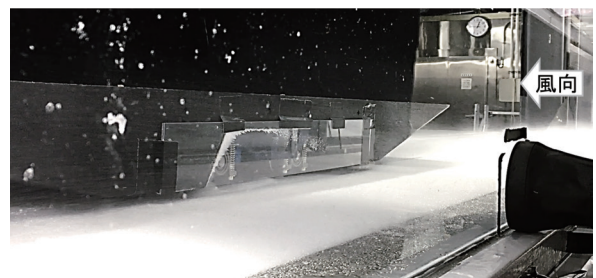
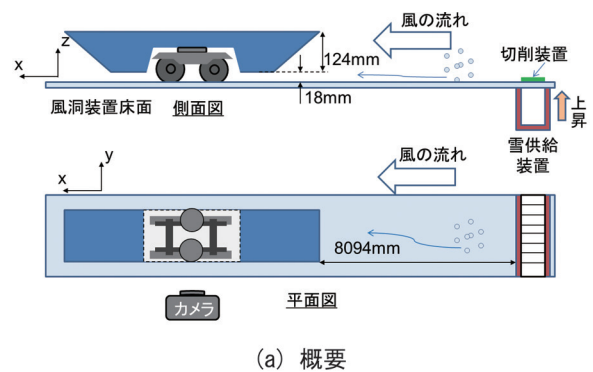
鉄道車両台車部のような複雑な流れ場での着雪計算アルゴリズムの妥当性確認を行うために、静止した鉄道車両模型に対する着雪実験を行った。図3は鉄道車両模型の着雪実験の概要と様子である。図3のように、縮尺1/10の台車モデルに上枠を取り付けたモデルを鉄道車両模型と呼ぶこととする。鉄道車両模型は、上枠の上部から下部にかけて傾斜を付けて、飛雪が底部に入りやすい形にしている。風洞内への雪の供給には、風洞の床面に設置された、雪格納部と切削装置で構成されている雪供給装置を用いた。本実験では、気温は-2℃とし、流入風速10m/sで10分間、風洞内に雪を供給し、着雪後、鉄道台車周辺の着雪分布、着雪伸長量、着雪質量を測定した。なお、着雪伸長量は、着雪が最も多く発生している場所の着雪先端から模型の着雪面までの距離とした。

## 3. 着雪解析手法

### 3.1 双方向連成による着雪解析手法

本研究で開発した着雪解析手法<sup>3)</sup>は、図4のような気流計算と着雪計算を双方向に連成させた手法である。本研究では、気流場の計算を「気流計算」、気流場の速度分布から抗力を計算し、飛雪粒子の軌道を求める計算を「軌道計算」、対象物に着雪するかどうかの判定を「着雪計算」とよび、これら全体を連成させた解析を「着雪解析」と呼ぶことにする。

本研究で開発した着雪解析手法は、図4のような手順



(b) 鉄道車両模型の着雪実験の様子

図3 鉄道車両模型の着雪実験

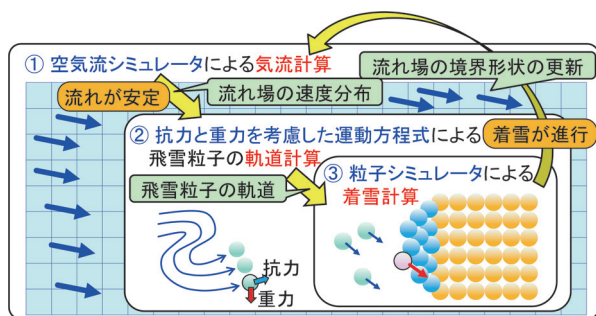


図4 着雪解析手法の概要

で実施する。まず、空気流シミュレータによる気流計算を行う。次に、雪を球形状にモデル化して、空気流の速度分布を用いて、抵抗力と重力を考慮した運動方程式により、飛雪粒子の軌道を計算する。その後、粒子シミュレータにより着雪計算を行う。着雪形状により変化した対象の形状を、空気流シミュレータの境界形状へと反映する。このようにして、本研究の着雪解析手法では、気流計算は飛雪粒子の軌道により着雪計算に影響を与え、着雪計算は境界形状を変化させることにより気流計算に影響を与える双方向連成解析である。なお、本来であれば、飛雪粒子が空中に存在するために発生する気流場への影響を考慮する必要があるが、その影響は降雪風洞実験においてみられなかったため、本手法では考慮していない。

### 3.2 気流計算

気流計算に用いるソフトウェアは、鉄道総研で開発を進めている不等間隔直交格子に対する有限差分法を採用した空気流シミュレータである。基礎式は非圧縮性流体に対するナビエ・ストークス方程式とし、乱流解析はラージ・エディ・シミュレーションにより実施し、サブグリッドスケールモデルは、コヒーレント構造スマゴリンスキーモデルを用いた。基礎式を差分法により離散化し、速度と圧力のカップリングはフラクショナル・ステップ法を用いた。時間進行は、3次精度のアダムス・バッシュフォース法を、空間差分は2次精度の中心差分法を用いた。境界条件は、流入面で流入風を設定し、流出面に対流流出境界条件、上面および側面ですべり速度境界条件、着雪対象の表面と計算領域下面ですべりなし速度境界条件とした。直交格子における物体形状の表現は、計算格子単位で流体と固体を判別するボクセル法とした。

流入風速の鉛直分布  $u(z)$  は、風洞で測定した結果から、流入面で、風洞の流入風速  $U$  m/s、境界層厚さ  $0.3$  m、 $1/7$  べき乗則を用いた

$$u(z) = \begin{cases} U \times \left(\frac{z}{0.3}\right)^{1/7} & (z \leq 0.3) \\ U & (z > 0.3) \end{cases} \quad (1)$$

とした。ただし、 $z$  は風洞床面からの高さである。

### 3.3 軌道計算

本研究では、雪を球形状の粒子として近似し、この粒子を雪粒子とよぶことにする。空中を浮遊する雪粒子を飛雪粒子とよび、軌道計算は飛雪粒子一つ一つに対して実施する。飛雪粒子に働く外力は、重力と気流計算の速度分布から求まる抵抗力とし、飛雪粒子同士の衝突を考慮しないものとした。

軌道計算には、抵抗力と重力を考慮した運動方程式

$$\frac{d\vec{U}_{\text{snow}}}{dt} = \frac{3}{4} C_d \frac{\rho_{\text{air}}}{\rho_{\text{snow}}} \frac{1}{d_{\text{snow}}} \vec{U}_r \|\vec{U}_r\| + \vec{g} \quad (2)$$

を用いる。ただし、 $\vec{U}_{\text{snow}}$  は飛雪粒子の速度、 $\vec{U}_r$  は気流場に対する飛雪粒子の相対速度、 $d_{\text{snow}}$  は飛雪粒子の直径、 $\rho_{\text{air}}$  と  $\rho_{\text{snow}}$  は空気と飛雪の密度、 $C_d$  は飛雪粒子の抵抗力係数、 $\vec{g}$  は重力加速度である。空気の密度は、 $0^\circ\text{C}$  の密度である  $1.3\text{kg/m}^3$  を用いた。飛雪の密度には、降雪風洞で生成される樹枝状結晶が積雪した状態の密度  $100\text{kg/m}^3$  を用いた。飛雪粒子の直径には、雪の結晶の樹枝の長さ  $2\text{mm}$  の半分程度の長さである  $1\text{mm}$  を用いた。2.2節で述べた降雪風洞実験において、流入風速  $2.5\text{m/s}$  での飛雪の落下角度が  $22^\circ$  であったことから、飛雪の落下角度が一致するように、重力と抵抗力の運動方程式 (2) を解いて求めた飛雪の抵抗力係数は  $1.04$  となった。ただし、抵抗力係数は飛雪の形状に依存するため、ある程度ばらつきがあると考え、本研究では、抵抗力係数を平均  $1.04$ 、標準偏差  $0.2$  とした正規乱数の値にし、この値を軌道計算に用いた。なお、標準偏差  $0.2$  は、パラメトリックスタディにより実験の降雪状況に最も近い値と判断したものである。

### 3.4 着雪計算

本研究の着雪計算に用いるソフトウェアは、鉄道総研で開発を進めている粒子シミュレータである。着雪計算では、飛雪粒子の着雪の判定が重要である。これについては、2.1節で述べた鎌田ら<sup>2)</sup>による立方体模型の着雪実験の分析から「飛雪粒子の着雪表面に対する接線方向の速度 (図5) の大きさが、風速に依存しないある一定の値よりも小さい場合には着雪し、大きければ着雪しない」ことが示された。

そこで、本研究では、これらの実験結果を取り入れ、図6の2つの着雪判定により構成される着雪計算アルゴリズムの開発を行った。なお、図6の固体粒子は、解析モデルの形状を構成する粒子である。ここで、鉄道車両などのモデルの形状は固体粒子により構成されている。また、着雪粒子は、飛雪粒子が固体粒子に着雪する

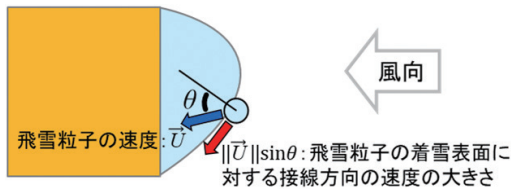
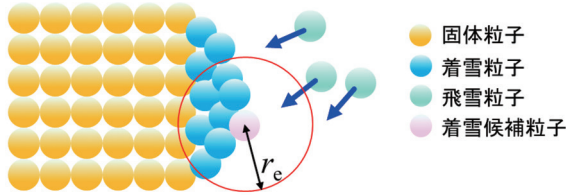
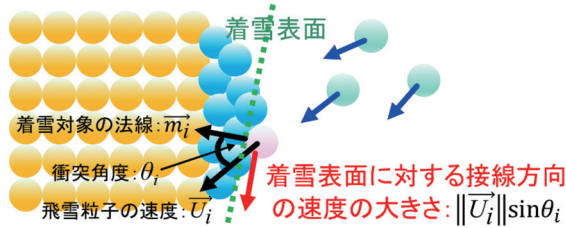


図5 飛雪粒子の着雪表面に対する接線方向の速度の大きさ



(a) 空間充填率による判定 (第1の着雪判定)



(b) 着雪表面に対する接線方向の速度の大きさによる判定 (第2の着雪判定)

図6 2つの着雪判定

ことで、動きが止まった粒子である。

着雪計算アルゴリズムの第1の着雪判定は、図6(a)に示される着雪粒子の空間充填率による着雪判定である。この着雪判定は、飛雪粒子の周りに十分に多くの着雪粒子、あるいは着雪対象物を構成する固体粒子がなければ着雪しないという判定である。まず、粒子*i*の粒子数密度を

$$n_i = \sum_{j \neq i} w(\|\vec{r}_{ij}^*\|) \quad (3)$$

$$w(\|\vec{r}_{ij}^*\|) = \begin{cases} \left(\frac{\|\vec{r}_{ij}^*\|}{r_c} - 1\right)^2 & (0 \leq \|\vec{r}_{ij}^*\| \leq r_c) \\ 0 & (r_c < \|\vec{r}_{ij}^*\|) \end{cases} \quad (4)$$

と定義する。 $w(\cdot)$ は重み関数であり、 $\vec{r}_i$ は粒子*i*の位置であり、 $\vec{r}_{ij}^*$ は粒子*i*と*j*の相対位置 $\vec{r}_{ij}^* = \vec{r}_j - \vec{r}_i$ である。 $r_c$ は重み関数の影響半径であり、粒子の直径 $l_0$ と係数 $c_0$ を用いて、 $r_c = c_0 \times l_0$ と定義され、粒子法でよく用いられる $c_0 = 3.1$ を用いた。着雪判定では、粒子を格子状に配置した場合の基準となる粒子数密度を $n^0$ とし、粒子の空間充填率 $n_i/n^0$ が着雪充填定数 $\alpha$ より大きい

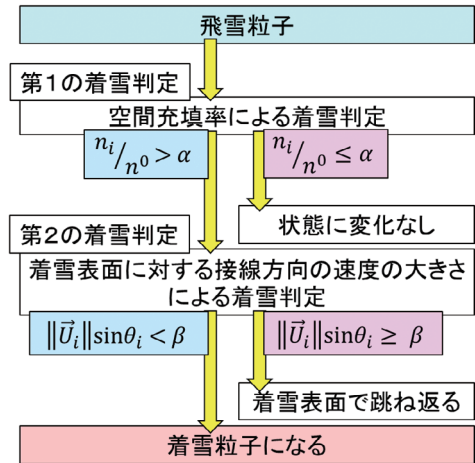


図7 着雪計算アルゴリズム

$$\frac{n_i}{n^0} > \alpha \quad (5)$$

になれば、飛雪粒子は着雪候補粒子となり、第1の着雪判定を満たしたことになる。本研究では、表面に付着しているかどうかの判定だけでよいため $\alpha = 0.65$ とした。

第2の着雪判定は、図6(b)に示される着雪表面に対する接線方向の速度の大きさによる着雪判定である。まず、粒子*i*が着雪判定を行う着雪対象の法線を

$$\vec{m}_i = \sum_{j \neq i} \frac{\vec{r}_{ij}^*}{\|\vec{r}_{ij}^*\|^2} w(\|\vec{r}_{ij}^*\|) \quad (6)$$

と定義する。着雪候補粒子の速度を $\vec{U}_i$ 、着雪対象の法線方向を $\vec{m}_i$ とすると、 $\vec{m}_i$ と $\vec{U}_i$ のなす角は、

$$\theta_i = \arccos\left(\frac{\vec{U}_i \cdot \vec{m}_i}{\|\vec{U}_i\| \|\vec{m}_i\|}\right) \quad (7)$$

となり、この角度を衝突角度 $\theta_i$ とよぶことにする。

着雪表面に対する接線方向の速度の大きさ $\|\vec{U}_i\| \sin \theta_i$ が、着雪の成長がこれ以上進まない状態での着雪表面に対する接線方向の速度の大きさ $\beta$ より小さい

$$\|\vec{U}_i\| \sin \theta_i < \beta \quad (8)$$

になれば、飛雪粒子は、第2の着雪判定を満たしたことになる。本研究では、鎌田ら<sup>2)</sup>の着雪実験より求めた値に近い $\beta = 2.0 \text{ m/s}$ とした。

図7は、飛雪粒子が着雪粒子になるか判定するための着雪計算アルゴリズムである。第1の着雪判定の式(5)と第2の着雪判定の式(8)を満たせば、飛雪粒子は着雪粒子になる。第1の着雪判定を満たし、第2の着雪判

定を満たさない場合は、飛雪粒子が着雪表面付近にあるが、着雪表面に対する接線方向の速度が大きく着雪しない状況である。この場合は、着雪表面において、飛雪粒子が非弾性衝突で跳ね返るものとした。これら以外は、雪粒子の状態を変更しないものとする。なお、飛雪粒子の反発係数は、氷の反発係数 0.8 とした。

### 3.5 着雪計算による気流計算の計算格子の更新方法

着雪解析手法では、着雪計算において着雪がある程度進むと、着雪計算から気流計算に切り替わる。着雪による気流計算の境界形状の変更は、気流計算の計算格子中心における着雪粒子の空間充填率により判定する。本研究では、式 (5) の空間充填率による判定を用いて、各計算格子を固体へと変更するようにした。ただし、 $r_i$  を各計算格子の中心座標、 $\alpha=0.5$ 、 $r_c=2.0 \times (dx_i+dy_i+dz_i)/3.0$ 、 $dx_i$ 、 $dy_i$ 、 $dz_i$  は各格子の軸方向の長さとした。

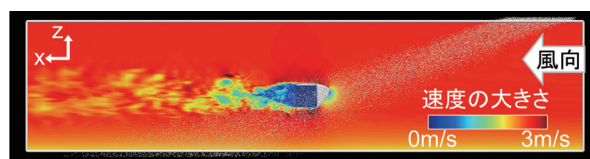
### 3.6 気流計算と着雪計算の切り替え

本研究の着雪解析は双方向連成解析であり、気流計算と着雪計算を切り替えるタイミングを決める必要がある。気流計算の開始時は、着雪形状からの固体境界の形状の変更により、変更された固体境界付近の計算が不安定になり、数値振動が生じる。そこで、この数値振動がある程度取まってから、次のステップの着雪計算を行う必要がある。このことを踏まえて、気流計算の各タイムステップの速度の発散の最大値が、計算が十分に安定した値よりも小さくなると気流計算は終了し、軌道計算と着雪計算に切り替わるという方法を用いた。一方で、着雪計算から気流計算に切り替わるタイミングは、100 タイムステップ毎としている。この着雪解析では、気流計算は、固体境界の形状の変更により生じる数値振動を収束するに行っているだけであるため、着雪解析の時間経過は着雪計算の時間経過と一致するものとする。

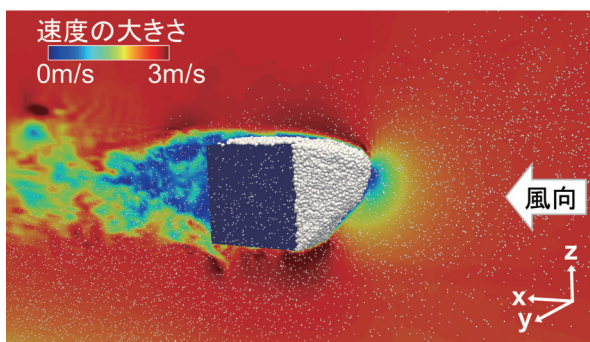
## 4. 立方体モデルの着雪解析の検証

本章では、着雪解析手法の妥当性確認のために、図 8 のような降雪風洞での立方体モデルを用いた着雪実験を再現した着雪解析を実施した。本章で実施した着雪解析に用いた物性値は、空気の密度  $1.3\text{kg/m}^3$ 、飛雪の密度  $100\text{kg/m}^3$  とし、飛雪粒子の直径を平均  $1\text{mm}$ 、標準偏差  $0.2\text{mm}$  の正規乱数により生成される値とし、飛雪の抗力係数を平均 1.04、標準偏差 0.2 の正規乱数で生成される値とした。着雪が多く発生した流入風速  $2.5\text{m/s}$  の場合について、妥当性確認を行い、着雪の少ない流入風速  $5.0\text{m/s}$  の場合については、計算結果を示すにとどめる。

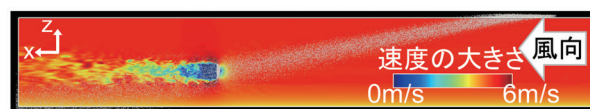
気流計算の格子は、最小格子間隔  $4\text{mm}$ 、 $x$  方向 275 格子、 $y$  方向 125 格子、 $z$  方向 125 格子の格子点数  $4,296,875$



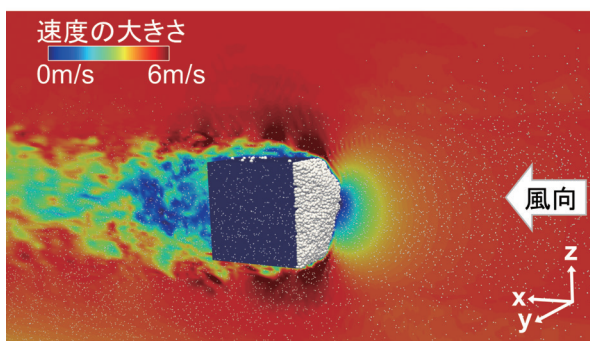
(a) 側面全体 (流入風速 2.5 m/s)



(b) 立方体モデル付近 (流入風速 2.5 m/s)



(c) 側面全体 (流入風速 5.0 m/s)



(d) 立方体モデル付近 (流入風速 5.0 m/s)

図 8 立方体モデルの着雪解析

の不等間隔格子を用いた。軌道計算では、実際の飛雪の物性値である直径  $1\text{mm}$  の飛雪粒子を用いたが、着雪計算は計算コストが大きいため、直径  $1\text{mm}$  の飛雪粒子が  $4^3$  個集まって運動しているという粗視化を行っている。そのため、着雪計算での接触判定は直径  $4\text{mm}$  の粗視化粒子で行っている。以後、本章では、「粗視化粒子」のことを単に「粒子」と呼ぶことにする。

着雪解析における飛雪粒子の生成数は、着雪実験における降雪装置から供給される飛雪の量に比べ、意図的に多くしている。これは、着雪実験では 30 分間かけて着雪を成長させるが、そのような長時間の解析を実施することは計算コストの面で困難であるためである。そこで、解析が破綻しない程度で最大限に飛雪粒子を発生させている。このような理由から、着雪実験と着雪解析では、経過時間は一致しないため、比較する際には何らかの対

応付けをして比較をすることになる。

図8(a)と図8(c)では、右上部から発生させた飛雪粒子が自由落下し、空気流に流され立方体モデルへ着雪していく様子を見ることができる。図8(b)と図8(d)では、着雪先端部分の流れ場の速度が小さくなっていることが確認できる。この解析では、計算時間間隔を気流計算0.0004s、着雪計算0.00016sとし、着雪計算を6万ステップ実施した。総粒子数が約8万粒子の解析となった。

図9は流入風速2.5m/sの場合の立方体模型の着雪実験と着雪解析の結果である。着雪解析の黄色破線は着雪実験の着雪形状である。これらと比較した結果、概ね着雪形状を再現していることが確認できる。

図10は流入風速5.0m/sの場合の立方体模型の着雪実験と着雪解析の結果である。流入風速5.0m/sの着雪実験では、飛雪の衝突により、着雪面端部(図10(a)の赤色破線内)の着雪部分に削剥が発生した。現状の着雪解析では削剥解析は実施されないため、着雪解析の着雪面端部(図10(b)の赤色破線内)の着雪形状が、着雪実験とは異なる。一方で、削剥の影響が少ない着雪面中央(図10(b)の緑色破線内)の立方体表面に対する着雪表面の角度は再現していることが確認できる。

図11は、実験と解析での着雪先端の推移を比較した結果である。図11(a)は、着雪先端と着雪伸長量の関係を示している。着雪対象物から最も離れた着雪箇所を着雪先端とする。図11(b)は、実験と解析での着雪先端の推移を示している。着雪実験と着雪解析の着雪伸長量と先端の高さの関係は、概ね一致していることから、上方から飛雪が来ることによって、着雪が進むにつれて着雪先端が高くなりながら着雪伸長量が増加するという着雪実験の様子を、着雪解析においても再現していることが確認できる。ここで、着雪解析の方が、先端の位置がやや高いのは、着雪実験では立方体模型が前下方に傾いた影響であると考えられる。

図11(b)は、着雪実験の経過時間と着雪解析のステップ数を対応付けるために用いることができる。そこで、図11(b)を用いて、着雪実験の経過時間と着雪解析のステップ数を対応付けた。具体的には、図11(b)にある10分後、15分後、20分後、30分後の実験値からできるだけ近い着雪伸長量の解析結果を見つけ、その解析のステップ数を、それぞれの実験値と対応付けた。図9と図10の中にある「着雪解析〇ステップ後」というのは、この手法を用いて実験の経過時間と対応付けた解析のステップ数である。

図12(a)は着雪実験の射影面積における着雪解析の相対誤差の求め方であり、図12(b)は相対誤差の推移である。着雪実験では、図12(a)の「実験」が撮影された結果である。着雪解析の結果を、立方体模型が一致

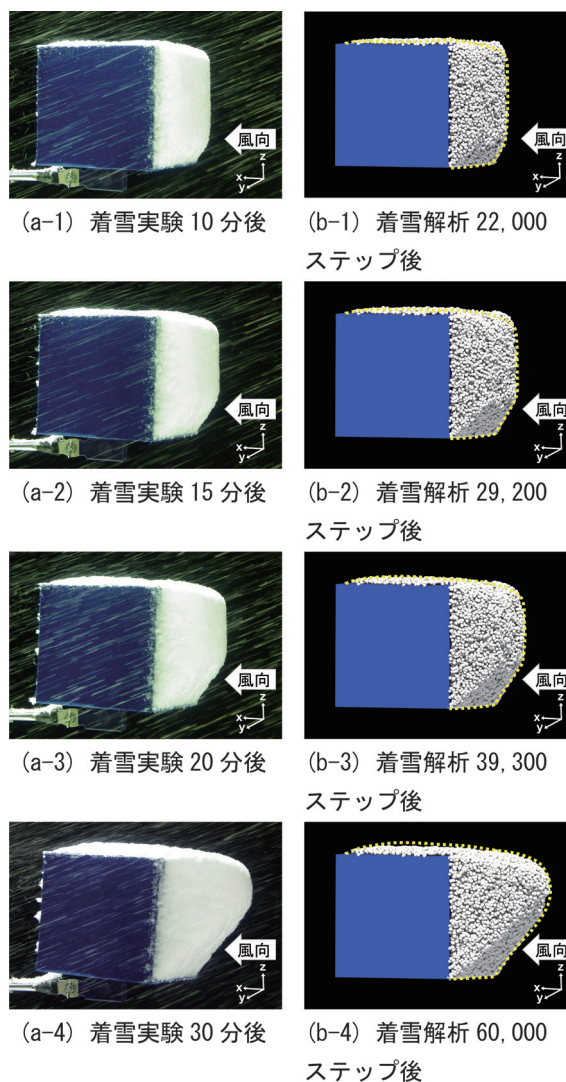


図9 立方体模型の着雪実験と立方体モデルの着雪解析 (流入風速2.5m/s, 側面やや斜め前方から見た場合)

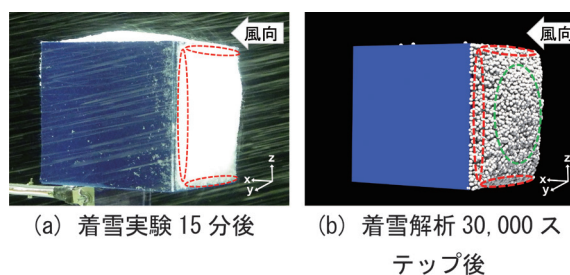


図10 立方体模型の着雪実験と立方体モデルの着雪解析 (流入風速5.0m/s, 側面やや斜め前方から見た場合)

する射影面に射影した結果が図12(a)の「解析」である。それぞれの着雪した部分の射影面積を求め、着雪実験を基準に相対誤差を求めた結果が図12(b)である。図12(b)では、横軸は着雪実験の経過時間であり、着雪解析

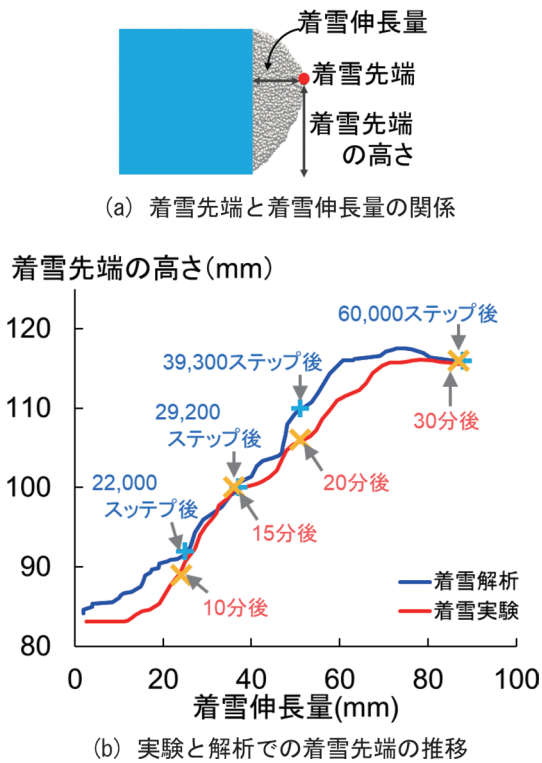


図 11 実験と解析での着雪部分の先端の推移の比較 (流入風速 2.5m/s)

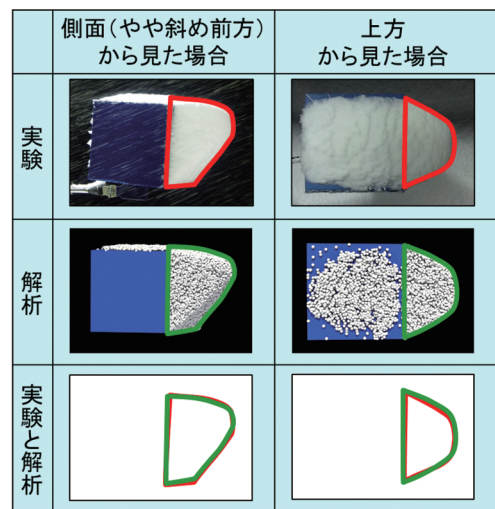
は図 11(b) を用いて対応付けた。側面 (やや斜め前方) と上方からの撮影の分析では、ともに着雪解析は着雪実験を射影面積の 6% 程度の相対誤差で再現していることが確認できる。

### 5. 鉄道車両モデルの着雪解析

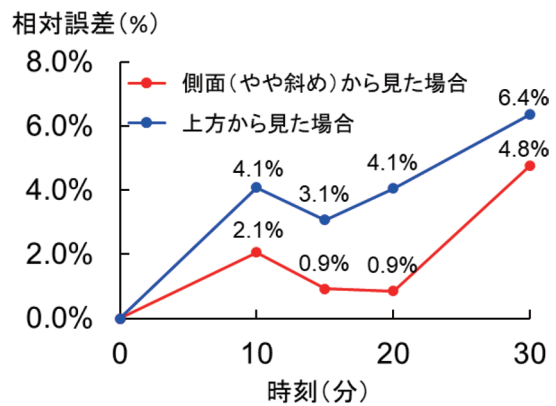
本章では、鉄道車両台車部のような複雑な流れ場での着雪計算アルゴリズムの妥当性確認を行うために、鉄道車両モデルの着雪実験を再現する着雪解析を実施した。フサギ板の形状が変更された場合であっても、実験における着雪分布と着雪量を、解析により再現できるかを調べるために、垂直なフサギ板モデル (図 13(a) と図 13(c)) と傾斜のあるフサギ板モデル (図 13(b) と図 13(d)) を用いた。

着雪解析に用いた物性値は、流入風速 10.0m/s、空気の密度 1.3kg/m<sup>3</sup>、飛雪の密度 100kg/m<sup>3</sup> とし、飛雪粒子の直径を平均 1mm、標準偏差 0.4mm の正規乱数により生成される値とし、飛雪の抗力係数を平均 1.04、標準偏差 0.2 の正規乱数で生成される値とした。飛雪粒子が雪面に衝突し分裂することなどを考慮して、飛雪粒子の直径の標準偏差を立方体モデルより大きく設定した。

気流計算の格子は、最小格子間隔 2mm、x 方向 855 格子、y 方向 220 格子、z 方向 125 格子の格子点数 23,512,500 の不等間隔格子を用いた。着雪計算では、直径 2mm の粗視化粒子による着雪計算を行った。



(a) 相対誤差の求め方



(b) 相対誤差の推移

図 12 流入風速 2.5m/s の着雪実験の射影面積における着雪解析の相対誤差

飛雪粒子の生成に関しては、実験の風洞床面の雪供給装置の位置に、飛雪粒子を 10mm 間隔に格子状に 408 個 (風路方向 1 個、風路幅方向 34 個、高さ方向 12 個) 発生させ、飛雪粒子の位置に乱れを与えるために、20mm 間隔内に収まるように、一様乱数で乱れを与えた。なお、飛雪粒子は、風洞内に流されていくため、0.001s 間隔で再生成した。こちらの場合も、着雪解析における飛雪の生成数は、着雪実験における降雪装置から供給される飛雪の量に比べ、意図的に多くしている。

計算時間間隔を気流計算 0.0002s、着雪計算 0.00004s とし、着雪計算を 300 万ステップ実施した。総粒子数が約 550 万粒子の解析となった。

図 14 に鉄道車両モデルの着雪解析全体像を示す。台車付近に付着している大きな白球は着雪粒子、空中を浮遊している小さな白点は飛雪粒子、線は流線、色は速度の大きさである。流線のシードは、大きく着雪している部位である風下側フサギ板の両端部と中央部に配置した。流線から車両後部の雪の舞い上がりは、空気流の乱

れから発生していることが確認できる（図14）。

図15(a-1)と図15(a-2)は着雪実験10分後の結果であり、図15(b-1)と図15(b-2)は着雪解析300万ステップ後の結果である。図15(b-1)と図15(b-2)の白球は着雪粒子である。フサギ板を変化させた時の着雪分布の変化を調べるために、着雪が多く発生する赤線破線内の着雪分布に注目すると、実験と解析で類似していることが確認できる。

図16～図18は、降雪風洞実験を模擬した車両モデルの着雪解析300万ステップ後の着雪解析の結果に流れを加えた結果である。台車付近に付着している白球は着

雪粒子、線は流線、色は速度の大きさである。流線のシートは、大きく着雪している部位である風下側フサギ板の両端部と中央部に配置した。図16では、車輪が止まっているため、車輪前方に着雪が発生している。台車底部の機器の間を縫う様に流線が発生している様子が確認できる。垂直なフサギ板モデルを真下からみると、風上側フサギ板付近から入ってきた流れが、風下側フサギ板付近で淀み、着雪が多いことが分かる（図17(a)）。傾斜のあるフサギ板モデルを真下からみると、風上側フサギ板付近から入ってきた流れの多くは、淀むことなく風下側フサギ板付近から流出していることが分かる（図17(b)）。垂直なフサギ板モデルを真横からみると、風上側フサギ板付近から入った流れが、風下側フサギ板にあたり、上昇して台車付近で淀んでいることが分かる（図18(a)）。一方、傾斜のあるフサギ板モデルを真横からみると、風上側フサギ板付近から入った流れが、風下側フサギ板にあたり、下降して流出していることが分かる（図18(b)）。図16～図18の結果をまとめると、垂直なフサギ板モデルでは台車付近で淀んだ低速な流れになっており着雪しやすいが、傾斜のあるフサギ板モデルでは風下側フサギ板付近で高速な流れになっており着雪しにくいことが分かる。

図19は、フサギ板に着雪した解析と実験での着雪伸長量を比較した結果である。着雪実験は10分後の測定結果であり、着雪伸長量は、垂直なフサギ板モデルでは17mmであり、傾斜のあるフサギ板モデルでは5mmであった。着雪解析では、300万ステップの着雪伸長量は、垂直なフサギ板モデルでは18.13mmであり、傾斜のあるフサギ板モデルでは5.25mmであった。着雪解析300万ステップ後の結果が、着雪実験10分後の結果に近い状態になっているとみることができる。フサギ板の違いからくる着雪抑制効果を着雪実験と着雪解析で比較すると、着雪実験では着雪伸長量70%減少、着雪解析では着雪伸長量71%減少であり、よく一致している。これは、着雪実験で行ったフサギ板の形状変更による着雪伸長量の変化を、着雪解析においても再現できていることを示している。

図20は、フサギ板に着雪した解析の着雪体積と実験の着雪質量を比較した結果である。なお、着雪体積は、着雪粒子数から計算している。着雪体積に一定の密度を

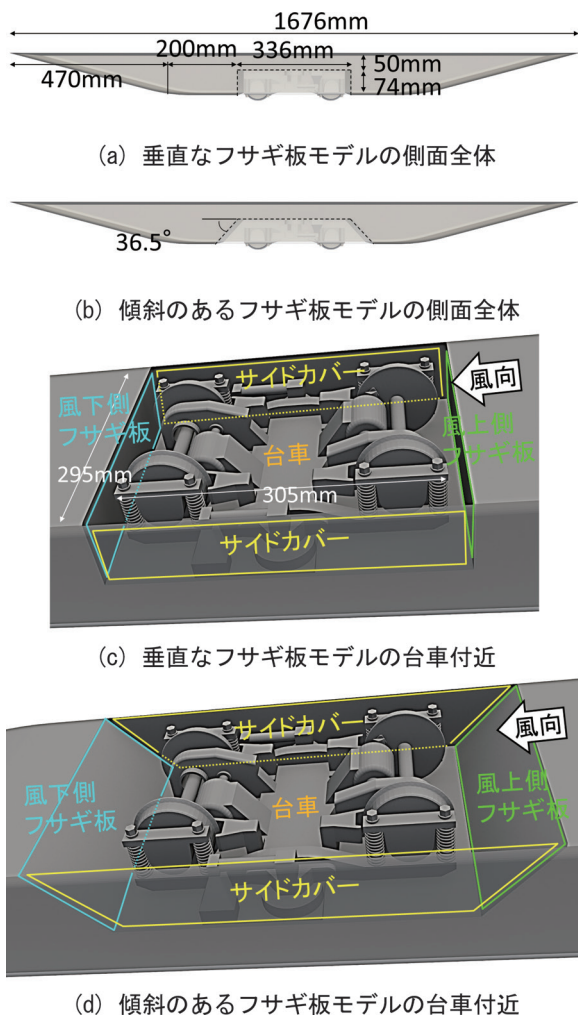
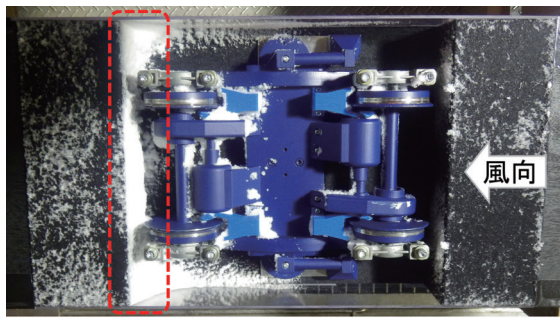


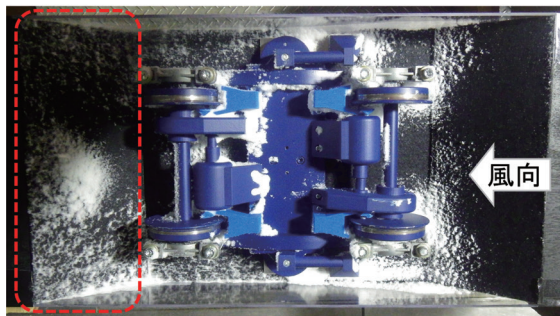
図13 鉄道車両モデル



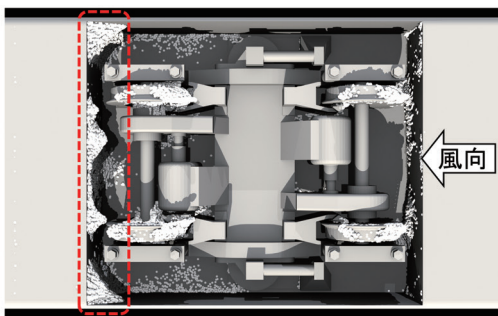
図14 鉄道車両モデルの着雪解析（側面全体）



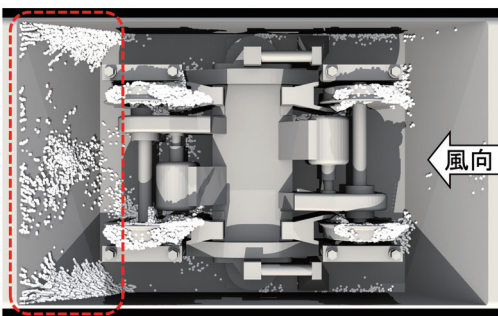
(a-1) 垂直なフサギ板モデルの着雪実験



(a-2) 傾斜のあるフサギ板モデルの着雪実験



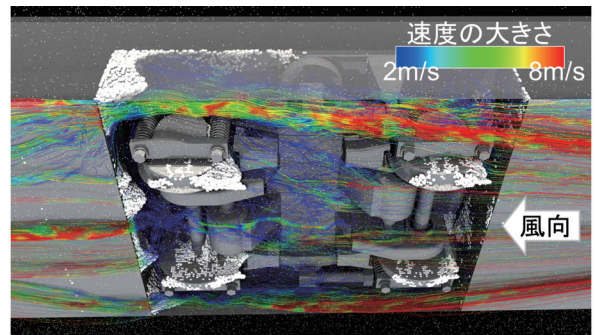
(b-1) 垂直なフサギ板モデルの着雪解析



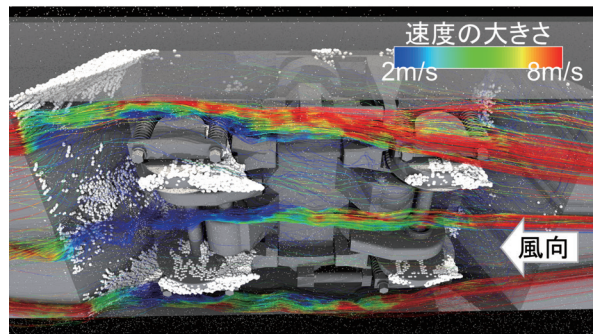
(b-2) 傾斜のあるフサギ板モデルの着雪解析

図 15 鉄道車両模型の着雪実験と鉄道車両モデルの着雪解析（真下から見た場合）

乗ることによって着雪質量が求められるため、両者の値は比較可能である。着雪実験は10分後の測定結果であり、着雪質量は、垂直なフサギ板モデルでは22.4gであり、傾斜のあるフサギ板モデルでは11.1gであった。着雪解析では、300万ステップの着雪体積は、垂直なフサギ板模型

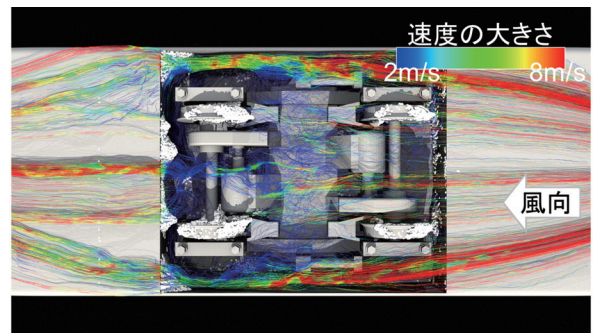


(a) 垂直なフサギ板モデル

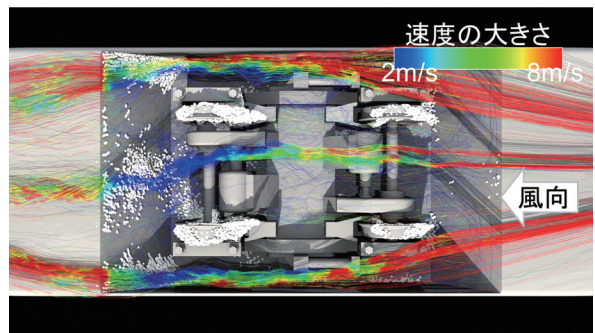


(b) 傾斜のあるフサギ板モデル

図 16 鉄道車両モデルの着雪解析（仰視図）



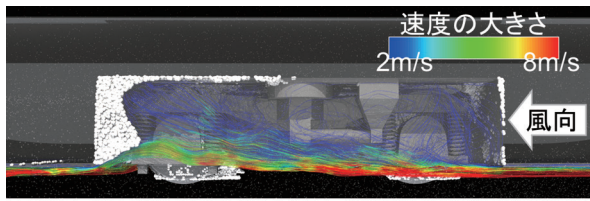
(a) 垂直なフサギ板モデル



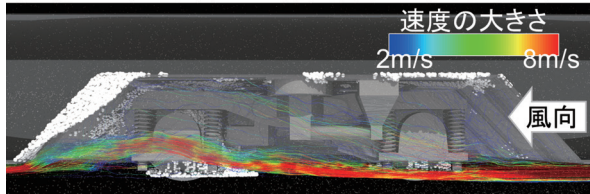
(b) 傾斜のあるフサギ板モデル

図 17 鉄道車両モデルの着雪解析（真下から見た図）

では117.4cm<sup>3</sup>であり、傾斜のあるフサギ板模型では65.0cm<sup>3</sup>であった。着雪解析300万ステップ後の結果が、着雪実験10分後の結果に近い状態になっているとみな



(a) 垂直なフサギ板モデル



(b) 傾斜のあるフサギ板モデル

図 18 鉄道車両モデルの着雪解析（真横から見た図）

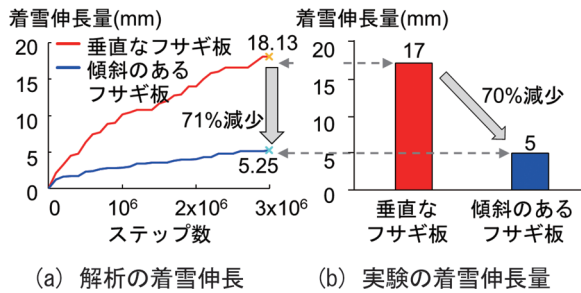


図 19 フサギ板に着雪した解析と実験の着雪伸長量

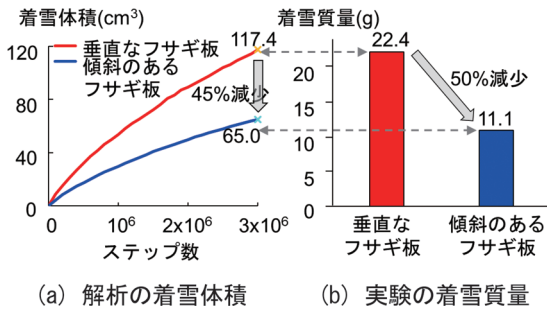


図 20 フサギ板に着雪した解析と実験の着雪量

すと、着雪実験の着雪抑制効果は着雪量 50% 減少、着雪解析の着雪抑制効果は着雪量 45% 減少であり、よく一致している。これは、着雪実験で行ったフサギ板の形状変更による着雪量の変化を、着雪解析においても再現できていることを示している。図 19 では、最も着雪している箇所の着雪量の変化を、図 20 では、全体的な着

雪量の変化を示している。以上のことから、鉄道車両モデルの着雪解析は、着雪実験をよく再現していると確認できた。

## 6. まとめ

本研究では、着雪しにくい鉄道車両形状の開発を目指して、着雪の成長を再現できる着雪解析手法を開発している。開発を進めている着雪解析手法は、気流計算と軌道計算と着雪計算を組み合わせたものであり、着雪形状と着雪の体積の時間変化を計算することが可能となった。

降雪風洞を用いた 2 種類の着雪実験結果と比較することで、着雪解析手法の妥当性確認を行った。まず、立方体模型への着雪実験について、着雪解析は着雪実験の着雪の射影面積を 6% 程度の相対誤差で再現していることが確認できた。次に、複雑な流れ場となる鉄道車両モデルについて、フサギ板の違いからくる着雪抑制効果を着雪実験と比較した。その結果は、着雪実験で行ったフサギ板の形状変更による着雪伸長量の変化を、着雪解析においても再現できていることを示した。さらに、着雪実験において、垂直なフサギ板モデルよりも傾斜のあるフサギ板モデルの方が着雪伸長量と着雪量が減少する原因を、着雪解析により考察することができるようになった。

なお、本研究の結果の一部は、理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」と名古屋大学のスーパーコンピュータ「FX100」を利用して得られたものである（課題番号：hp170067, hp180014）。

## 文献

- 1) 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
- 2) 鎌田慈, 室谷浩平, 中出孝次, 高橋大介, 佐藤研吾, 根本征: 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 巻, 1 号, pp.79-96, 2021 (DOI: 10.5331/seppyo.83.1\_79)
- 3) 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 巻, 5 号, pp.465-487, 2021 (DOI: 10.5331/seppyo.83.5\_465)