

鉄道一般
車 両
施 設
電 気
運転・輸送
防 災
環 境
人間科学
浮上式鉄道

高速車両の台車周りの着雪を予測する

鉄道車両が冬季に降雪地帯を高速走行すると、線路上に積雪した雪を舞い上げ、車両に着雪して成長していきます。そして着雪した雪が落下すると、車両や線路沿いの地上設備に損害を与えることがあります。このような被害を防ぐために、着雪しにくい車両形状の開発が期待されています。しかしながら、着雪現象は、物理的な複雑さから未解明のままであり、現在も研究が進められています。鉄道総研では、実験を元に着雪計算アルゴリズムを開発し、降雪風洞実験の着雪結果を再現できる着雪解析手法を開発しました。その結果、台車モデルの着雪状況を着雪解析により予想することができるようになりました。



室谷 浩平
Kohei Murotani
鉄道力学研究部
計算力学研究室
主任研究員
【専門分野】 並列計算、
計算科学、計算力学



中出 孝次
Koji Nakade
鉄道力学研究部
計算力学研究室
主任研究員(上級)
【専門分野】 流体力学、
計算流体力学



鎌田 慈
Yasushi Kamata
防災技術研究部
気象防災研究室
主任研究員(上級)
【専門分野】 鉄道の気象、
雪氷災害対策



高橋 大介
Daisuke Takahashi
防災技術研究部
気象防災研究室
研究員
【専門分野】 鉄道の気象、
雪氷災害対策

はじめに

鉄道車両が冬季に降雪地帯を走行すると、線路上の雪が舞い上がり、鉄道車両の床下や台車に雪が付着して成長していきます(図1)。この着雪の塊は氷に近い硬さとなり、成長すると数十kgを超えることもあります。走行時の振動や分岐器を通過するときに発生する衝撃で、成長した着雪が落下すると、線路のバラストが飛び散り、鉄道車両や鉄道設備、沿線家屋への被害が発生する可能性があります。また、分岐器のレールの隙間に挟まると、進路の転換を行うことができなくなることもあります。

このような着雪問題を解決するために、着雪に関するさまざまな研究が行われていますが、観測や実験、簡易式を用いたアプローチが多く、着雪メカニズムを解明するに至っていません。そこで、筆者らは着雪しにくい鉄道車両形状の開発を目標に、着雪成長プロセスを再現できる着雪解析手法を開発しています。

降雪風洞を用いた着雪実験

着雪現象を正確に再現するためには、雪の結晶の形状による絡み合いや凍結・

融解の相変化を考慮する必要がありますが、図1のような鉄道車両を対象とした着雪現象を再現する解析を行うには、そのようなミクロな解析では非常に困難です。そこで、ここでは、着雪現象のマクロな性質を得るために、防災科研の降雪風洞(※参照)(図2)を用いました。

降雪風洞にて、図3(b)のような立方体模型を用いて着雪状況を測定しました。図3(a)のように、風洞風路の上部に設置した降雪装置から一定風速の下で自由落下させた雪が、立方体模型に着雪する実験を行いました。風速を一定にすると、立方体模型への着雪形状は、ほぼ一定であることがわかりました。さまざまな風速の元で、立方体模型を風向に対して角度を変えて実験した結果、飛雪が、着雪するかしないかの判定基準に、着雪対象への飛雪の速

※ 降雪風洞

降雪装置で作られた人工雪を用いて、低温室内に設置された風洞内に雪を降らせて実験を行いました。ここでは、防災科学技術研究所雪氷防災研究センターが所有する降雪風洞を利用しました。

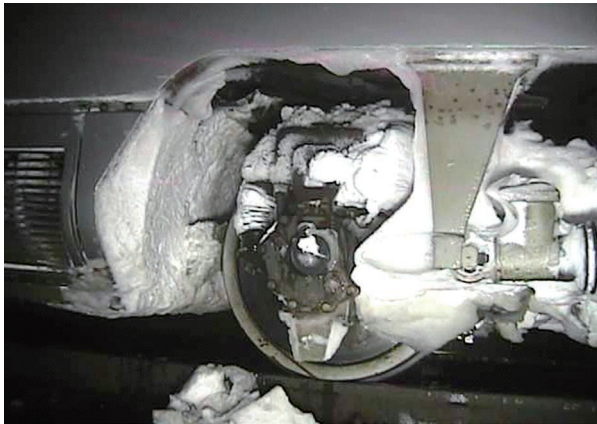


図1 着雪した台車部



図2 防災科研の降雪風洞

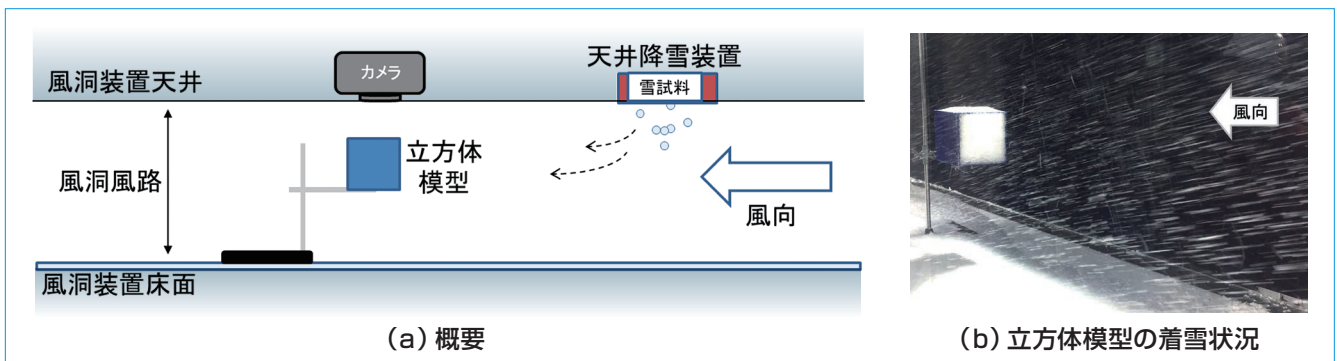


図3 立方体模型の着雪実験

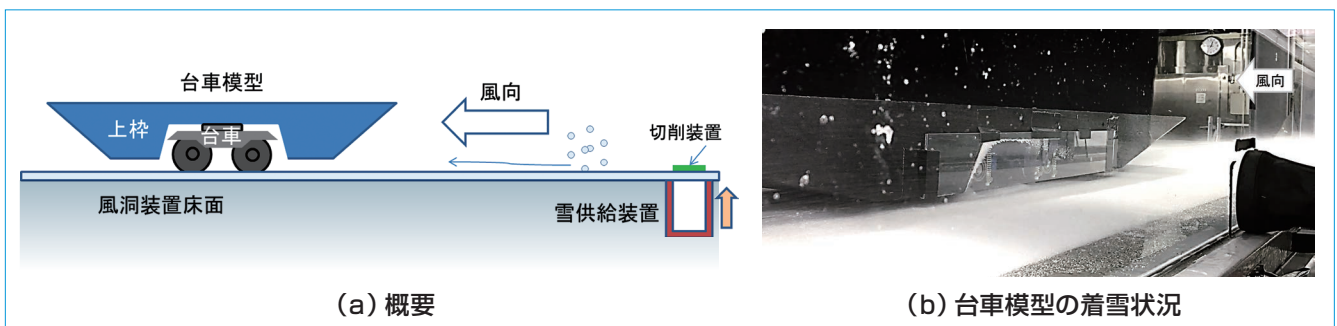


図4 台車模型の着雪実験

度と着雪対象の向きを考慮すればよいことがわかり、着雪解析での飛雪が着雪するかしないかの判定に用いることができました。なお、この値は、雪質(形状、温度、密度など)により変化します。

着雪解析手法の開発では、鉄道車両の台車周りの着雪状況を再現することを目的としています。そこで、台車モデルに、車両を模擬した上枠を取り付けたモデルを台車模型とよび、着雪実験と着雪解析を比較します。雪の供給方法に関しては、走行している状態での着雪現象に近づけるために、図4(a)のよ

うに風洞装置床面に設置した雪供給装置から押し上げられた雪が、切削装置で砕かれ、風洞装置床面上を流されるようにしました。台車模型の形状に関しては、飛雪が台車模型の底部から回り込んで、台車周辺に短時間で着雪させるために、図4(a)のように上枠の上部から下部にかけて傾斜をつけて、飛雪が底部に入りやすい形状にしています。

図4(b)は、台車模型の着雪実験の様子です。風洞内の底面に雪を敷き占め、風速10m/sで風洞内に雪を飛ばし、台車模型に着雪する実験を行いました。

着雪解析手法

ここで開発した着雪解析手法¹⁾(参照)は、図5のような手順で実施されます。まず、空気流シミュレーターによる気流計算を行います。次に、雪を球形にモデル化して、空気流の速度分布を用いて、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します。その後、粒子シミュレ

着雪解析手法

気流計算、軌道計算、着雪計算を組み合わせた解析全体を指します。

ターにより着雪計算アルゴリズム (☞参照) を用いて着雪計算を行います。

着雪が進み、着雪形状に変化がみられると、その形状を空気流シミュレーターの境界形状へと反映し、ふたたび気流計算を行います。このように本解析手法では、気流計算による飛雪粒子の軌道が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ています。お互いの計算の影響を与えあいながら計算を行っていく解析のことを双方向連成解析といいます。

気流計算では、空気の流れを不等間隔の直交格子による差分法 (☞参照) により計算しています。構造物が配置され、流れが乱れることが予想される場所に、細かい格子を配置しています。

軌道計算では、抗力(空気抵抗)と重力を考慮した運動方程式により、飛雪が飛ぶ方向を計算しています。飛雪粒子の粒径や密度、抗力係数には、降雪風洞実験で測定した値を用いています。

着雪計算では、着雪現象にまだ理論的な原理が確立されておらず、未解明な部分が多いため、立方体形状への着雪形状から考察する実験的な方法により、着雪するかどうかを判定する着雪計算アルゴリズムの開発を行いました。

立方体モデルへの着雪解析

着雪解析手法の妥当性確認を行うために、降雪風洞実験を模擬した解析を

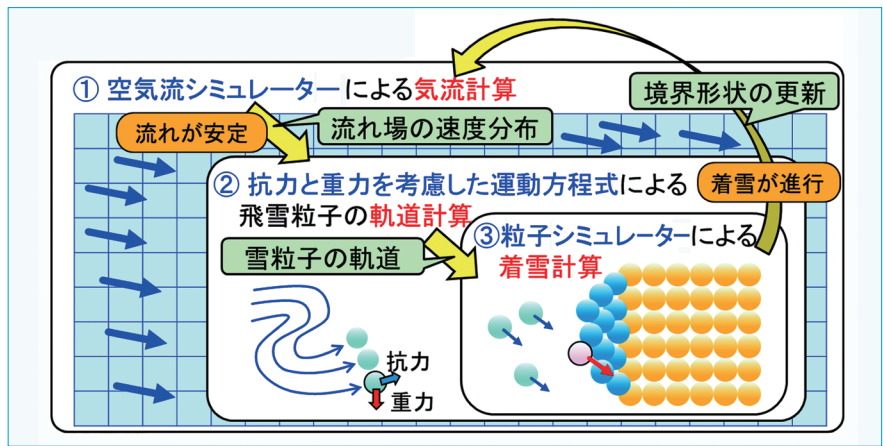


図5 着雪解析手法の概要

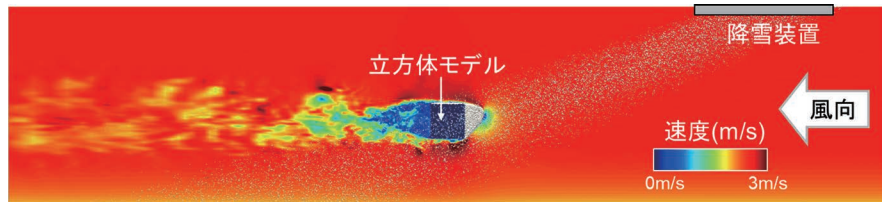


図6 立方体モデルの着雪解析(側面全体)



図7 実験(立方体モデル)の着雪形状

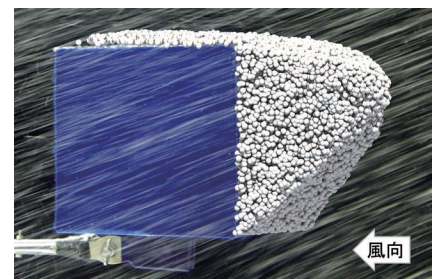


図8 解析(立方体モデル)の着雪形状

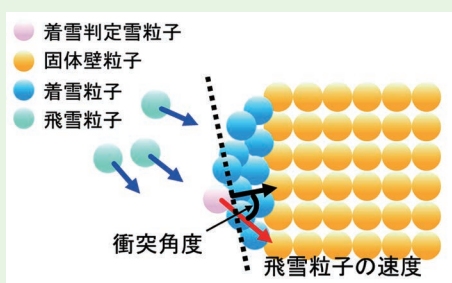
行いました。図6は、風速2.5m/sで、立方体モデルの着雪解析を側面全体から見た結果です。気流計算の格子に、最小格子間隔4mm、格子点数4,296,875の不等間隔格子を用いました。飛雪粒子の生成は、実験の天井降雪装置の降雪分布を模擬して、図6の右上の部分に、直径4mmの飛雪粒子を発生させ、

自由落下させました。その結果、飛雪粒子は、空気流に流されながら落下していき、立方体モデルに衝突すると、着雪が進んでいきます。

図7は、立方体モデルの着雪実験の着雪形状、図8は、立方体モデルの着雪解析の着雪形状です。図7と図8の結果を比較すると、おおむね着雪形状を再現できていることが確認できます。

☞着雪計算アルゴリズム

降雪風洞実験結果から得られた、飛雪の速度と衝突角度が小さいときに、着雪が発生するという関係を、数式を用いた計算方法にしたものです。右図では、着雪計算アルゴリズムで用いる、飛雪の速度と衝突角度について示しています。



☞差分法

微分方程式を解くために、微分を差分近似で置き換える数値解析手法。

台車モデルの着雪解析

鉄道車両の台車周りの着雪状況を再現できることを確認するために、台車模型を用いた降雪風洞実験を模擬した解析を行いました。気流計算の格子に、最小格子間隔2mm、格子点数23,512,500の不等間隔格子を用いました。飛雪粒子の生成に関しては、実

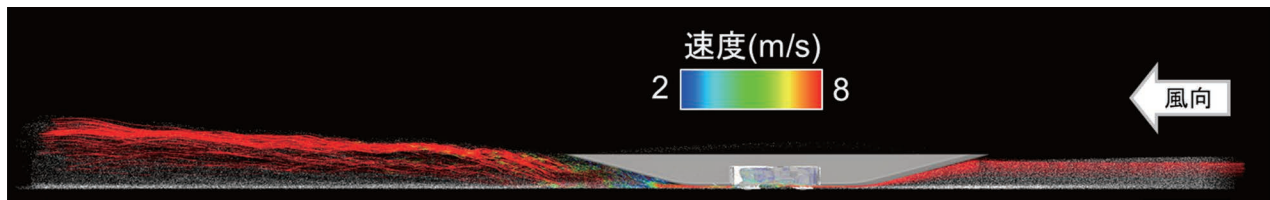


図9 台車モデルの着雪解析(側面全体)

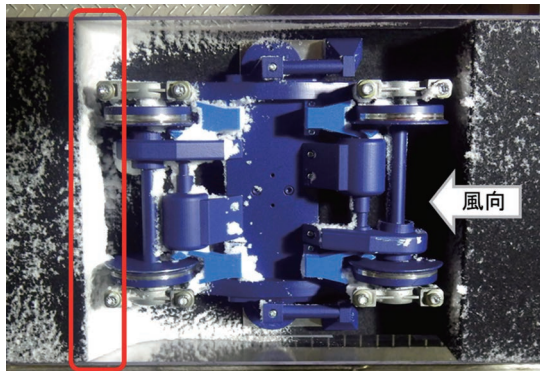


図10 実験(台車模型)の着雪状況

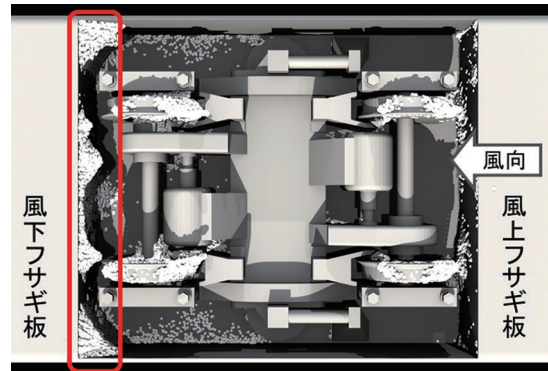


図11 解析(台車モデル)の着雪状況

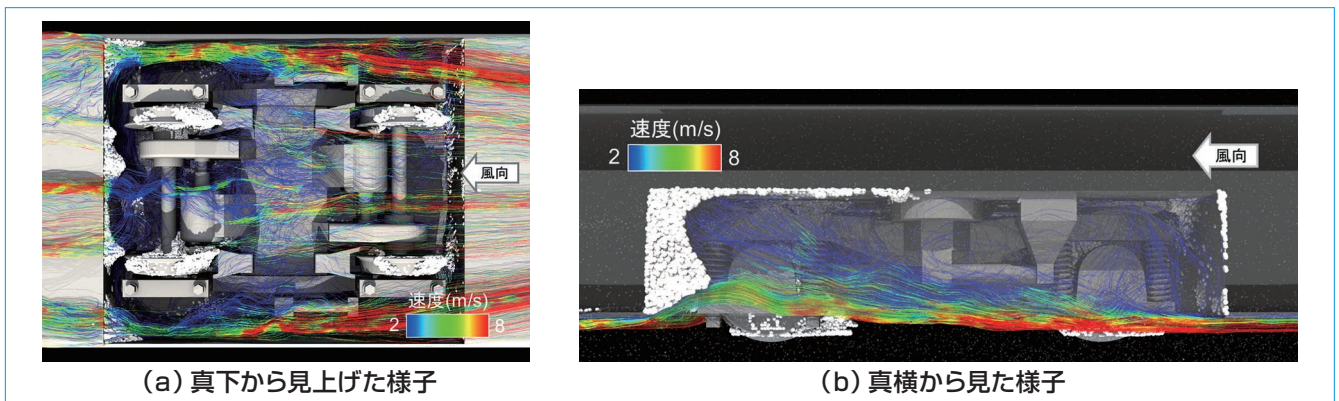


図12 解析の着雪状況と空気流の流れ

験の降雪装置の降雪分布を模擬して、台車モデルの全面的風速10m/sの流入入口一面に、直径2mmの飛雪粒子を発生させました。

図9は、降雪風洞実験を模擬した台車モデルの着雪解析全体を側面から見た結果です。前方から雪が飛んでき、台車モデルの後方に舞い上がりながら抜けていく様子がみられます。

図10は着雪実験、図11は着雪解析の結果です。解析と実験の結果と比較すると、赤枠内のフサギ板への着雪状況だけでなく、台車付近全体の着雪状況が実験を解析で再現できていることが確認できます。

着雪が発生する場所、発生しない場所を考察するために、図12のように、

着雪解析の着雪状況と空気流の流れを繋いだ流線を表示しました。図12(a)のように台車モデルを真下から見ると、風上フサギ板の付近から入ってきた流線が、風下フサギ板に着雪している付近で流れが遅くなり渦巻き、着雪していない場所から流出していることがわかります。また、図12(b)のように台車モデルを真横から見ると、風上フサギ板付近から入ってきた流線が、風下フサギ板にあたり、上昇し、台車内で低速な流れが渦巻いていることがわかります。このことから、着雪が発生している場所は、台車モデル内で空気流の速度が遅くよどんでいる場所であり、着雪が発生していない場所は、空気流の速度が速く、台車モデル内から流出

している場所であることがわかります。

おわりに

筆者らは、着雪成長プロセスを再現できる着雪解析手法を開発し、着雪しにくい鉄道車両形状の開発を目指しています。

今後は、走行を模擬した鉄道車両モデルを開発し、実物の鉄道車両を模擬した解析が実施できるようにすることを目指しています。RRR

文献

- 1) 室谷浩平, 中出孝次, 鎌田慈, 高橋大介, 根本征樹:降雪風洞と連携した着雪シミュレータの開発, 第24回計算工学講演会, 2019