

走行風を利用した新幹線台車周りの着雪対策

高見 創* 新木 悠斗* 室谷 浩平** 石井 秀憲** 鎌田 慈***

Countermeasures against Snow Accretion Around Shinkansen Bogies Using Running Wind

Hajime TAKAMI Yuto ARAKI Kohei MUROTANI Hidenori ISHII Yasushi KAMATA

In this study, we investigated a countermeasure against snow accretion on bogies of high-speed train by utilizing high-speed air flow through inlets on sides of train. The effectiveness of this method was confirmed through model experiments and numerical analysis. The results showed that this method is expected to reduce snow accumulation onto the body panel behind the bogie by about half.

キーワード：着雪，流体力学，走行風，空気取り入れ口，模型実験，数値解析

1. はじめに

積雪地域を走行する新幹線車両への着雪は、付着している間は特に問題とならないが、気温の高い地域やトンネル内を走行中に車両から落雪すると、その高速性ゆえにバラストの跳ね上げや地上・車両への衝突による設備被害を発生させる問題がある。この対策として、一定以上の車両着雪が生じた場合は、途中駅で車両の融雪作業を行い、過大な着雪の成長を防ぐことが行われている。しかし、この雪落とし作業には多くの時間と人手が掛かる運用面の課題に加え、走行中に着雪が短時間で成長する場合は必ずしも十分な対策とならない。

現在、積雪地域の北海道新幹線や北陸新幹線の延伸が進められており、走行中の着雪そのものを抑制する対策が望まれる。既に様々な対策が軌道側・車両側の双方で検討・実施されているが、本研究では車両側対策の新たな試みとして、着雪の成長しやすい台車後方の端部塞ぎ板を対象に、高速車両周りの空気の流れを利用して着雪を抑制する手法を検討した。その効果と空力音への影響を模型実験と数値解析により検証した。

2. 走行風を利用した着雪対策

2.1 着雪表面の雪粒子運動

着雪表面の雪粒子の運動を図1に示す¹⁾。流体に比べて質量の大きい雪粒子が流れの中で浮遊運動しているとき、流線が急峻に曲がる衝突面付近では、慣性効果の大きい粒子は流れに追従できなくなり壁面に衝突する。このとき雪粒子を壁面に着雪させないためには、雪粒子の衝突速度 v 、衝突角度 θ とすると、雪粒子の接線速

度 $v \sin \theta$ による慣性力が雪の付着力 F_a を上回る必要がある。

雪の付着力の大きさは気温や雪質、付着面状態により変化するが、雪粒子の接線速度が十分に高ければ着雪を防ぐことができる。したがって、対象とする着雪面（ここでは台車端部塞ぎ板）を流れ方向に傾斜させて雪粒子の衝突角度を緩やかにし、雪粒子の接線速度を着雪の閾値以上に上げることが一般的な対策となる（雪国で家の屋根に急傾斜をつけて雪の重力が付着力を上回るようにするのと似ている）。一方、機器の構成や保守等の制約から衝突面に傾斜を付けることが難しい場合は、外力により雪粒子の接線速度を強制的に変える必要がある。

2.2 インテークとノズルの適用

雪粒子の接線速度を変える方法として、本研究では送風ファンなどの駆動源は用いずに、走行風を利用した対策を検討した（図2）。この対策は、台車側面から走行風を取り込むインテークと、インテークから取り込んだ風を車輪下流の台車端部塞ぎ板へ吹き出すノズル、およびノズルを覆うカバー（ノズルカバー）から構成される。

本構成により、台車端部塞ぎ板に衝突する雪粒子の衝突角度を変化させ、雪粒子の接線速度を着雪閾値以上とすることで着雪の抑制を図る。

3. 模型実験による着雪対策の検証

着雪対策を検討するため、模型車両の走行が可能な実験装置を新たに開発した。本実験装置を用いることで、列車走行にともない軌道面から積雪が舞い上がり、列車周りの流れによって雪粒子が浮遊運動し、台車内の衝突面に付着するまでの現象を模擬した。また、着雪抑制効果の見込まれた形状については、降雪風洞実験を実施して対策効果を推定した。

* 環境工学研究部 車両空力特性研究室
** 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

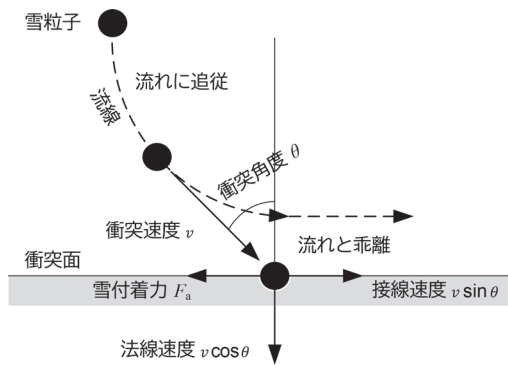


図1 着雪表面の雪粒子運動

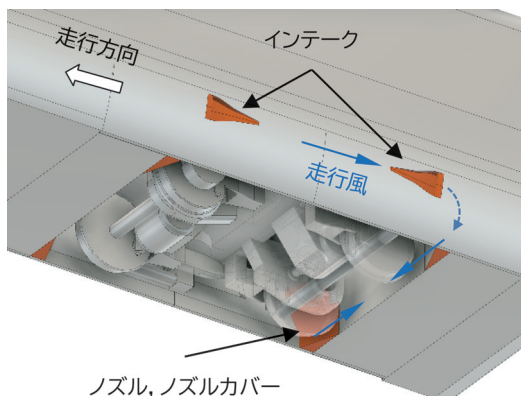


図2 走行風を利用した着雪対策

3.1 模型走行装置による検討

3.1.1 実験装置の概略

模型走行装置は、縮尺約 1/11 の模型軌道を屋外（高架橋上）に直線約 400m 敷設したものである（図3）。模型列車の最大長さは 13.2m（6 両）、最高速度は 27.8m/s（100km/h）である。模型列車の加減速は、先頭車と後尾車に接続したロープを牽引装置で制御することにより行う。

本実験は、列車周りの流れを調べる際に一般的な風洞実験と異なり、実際に列車が軌道上を走行することで車両床下のクエット流れや車輪の回転風が再現できることに加え、軌道側の積雪面に作用する列車風や圧力変動も再現できる特長がある。また、積雪を模擬した粒子（模擬雪）を軌道上へあらかじめ散布することで、列車走行にともなう雪の舞い上がり現象と台車内への浮遊運動を再現することができる。ただし、着雪現象は再現が難しく、模擬雪を使った実験では付着範囲の相対的な比較で評価する。

3.1.2 模型走行実験の相似則

建築物の着雪を対象にした風洞実験では、模擬雪として活性白土（粘土のモンモリロン石を熱処理して得られる微細な粉末）を用いるのが近年は一般的である²⁾。これは、雪粒子の運動と相似性が比較的高いことに加え、

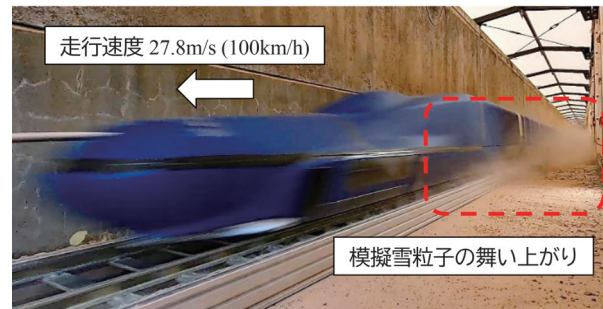
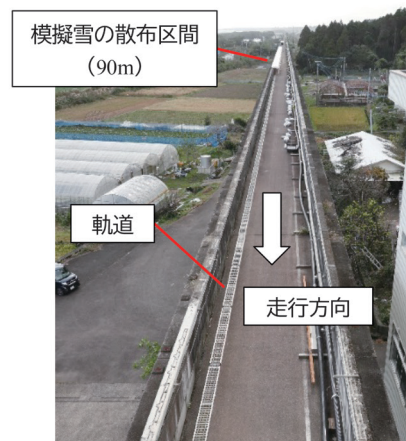


図3 模型走行装置

白色の見た目が雪の再現に適当なためである。しかし、活性白土は吸湿性が高く、湿度の影響を受けやすいことから、本実験のような屋外での使用には不適當である。このため、本実験では活性白土と物性の近いクルミ殻の粉末を使用した。

実車と模型の相似則を表1に示す。この表から、流れの慣性力と粘性力の比を表すレイノルズ数は実車より二桁小さいが、台車部流れが乱流状態にあれば粘性の影響は二次的となり、この相似則は緩和される。雪面上の雪粒子の転動に関わる移動臨界摩擦速度比、雪面から雪粒子の舞い上がりに関わるフルード数、雪面から離れた雪粒子の沈降・浮遊運動に関わる終末沈降速度比、流れに対する雪粒子の追従性を表すストークスパラメータ³⁾は、模擬雪粒子を用いることでいずれも実車と模型ではほぼ等しくなる。ここで、実車と模型のストークスパラメータは共に1を超えることから、台車内の雪粒子と流体の動きは一致せず、複雑な動きが推定される。

次に、着雪現象の再現について述べる。自然の着雪現象は、雪と固体表面との間には雪粒子の機械的な絡み合いや雪粒子の表面自由エネルギー（表面張力）で生じ、雪同士の着雪はこれに加えて氷粒子同士の焼結作用で生じる⁴⁾。これに対し、乾燥した粉末状の模擬雪は、粒子と固体表面および粒子同士の間に働くクーロン力（静電気力）で主に付着する。すなわち、粒子が固体表面や周囲の粒子と接触や衝突を繰り返すことで帯電し、電位差が

表 1 模型走行実験の相似則

	実車(自然雪)	模型(模擬雪)
代表速度: 車両床下流速 U_b	36.1 m/s	14.0 m/s
代表長さ: 台車キャビティ高さ L_b	1.0 m	0.09 m
: 粒子径 L_p	1.1 mm	0.125 mm
粒子の真密度	920 kg/m ³	1400 kg/m ³
粒子の応答時間	0.2 s	0.05 s
レイノルズ数	2.4×10^6	8.5×10^4
移動臨界摩擦速度比	7.6×10^{-3}	9.3×10^{-3}
フルード数	1.6×10^2	1.4×10^2
終末沈降速度比	2.8×10^{-2}	3.4×10^{-2}
ストークスパラメータ	2.0	2.6

列車速度は整備新幹線相当、床下流速 U_b は文献8から列車速度 $\times 0.5$

生じて付着する。この際のクーロン力は雪の付着力に比べて二桁以上小さいため、そのままでは付着範囲が過少に評価される。このため、評価面にパイル生地を貼り付け、粒子の付着力を増加させて実験を行った。このような着雪模擬方法は、自然雪とは付着メカニズムが異なることから、必ずしも実車の着雪状況を再現できないことが欠点となる。一方、気象条件や雪質によって様々な着雪性状を示す実雪と異なり、条件を揃えた比較検証ができることは利点となる。

3.1.3 模型走行による模擬雪舞い上がり

図4に、模型走行による模擬雪の飛散粒子量を示す。ここで飛散粒子量は、軌道横に設置した粒子カウンタで気流に含まれる直径0.05mm以上の粒子数を計測した値である。本図および別途行った高速度撮影動画から、模型車両の走行にともない軌道面から模擬雪が舞い上がり、列車周りの流れによって粒子が浮遊運動して、飛散する状況が確認できる。また、車輪を除く台車部の底面を実験的に塞ぐと、模擬雪の飛散量は大幅に小さくなったことから、車両底面にある台車部の窪みが雪粒子舞い上げの主要因と推測される。

図5は、同じ粒子カウンタで計測した飛散量を列車の通過時間で積算した値である。近似線は、各走行速度のデータから最小二乗法で求めた。この図から、走行速度が1.3倍（ $\approx 21.6/16.2$ ）へ増加すると、模擬雪の飛散量は2～3倍へ増加する傾向が見られる。このことから、雪の飛散量は走行速度への依存性が高く、高速列車ほど台車部への雪の流入量も増加すると推測される。一方、軌道面から上方へ離れると模擬雪粒子の飛散量は急激に低下することから、雪粒子の少ない $h/L_b > 0.5$ の高さにインテークを設置して高速な走行風を取り込むことができれば、有効な着雪対策になると考えられる。

3.1.4 模型走行による着雪対策の検証

既存の台車側カバーにインテークを設け、そこから取り込んだ風を台車内へ吹き出すノズルおよびノズルカバーで構成した対策形状（図2参照）について、模型走行実験

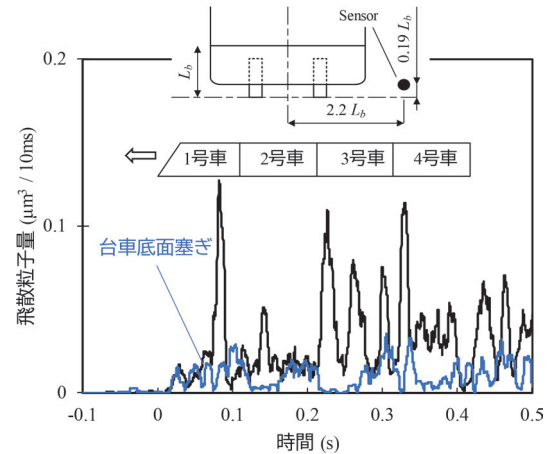


図4 模擬雪の飛散量

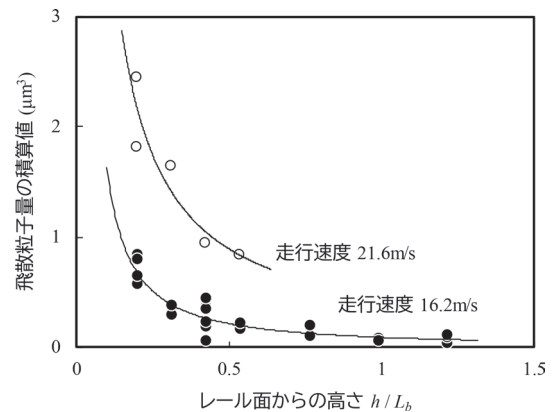


図5 飛散量の鉛直方向分布

から模擬雪の付着状況を調べた。走行速度は27.8m/s（100km/h）である。

図6に、台車下流の端部塞ぎ板における模擬雪の付着状況を示す。撮影画像からパイル生地色を除いたRGB信号の輝度平均値をグレースケールに変換したもので、白色が模擬雪の付着を示す。対策を行わない基本形状の場合、台車内に流入した模擬雪が衝突しやすい端部塞ぎ板の下方付近（図6(a)のA）のほか、流れの淀む横隅付近B、上隅付近Cに付着しやすい傾向が見られる。

これに対し、対策形状の場合、インテークから走行風が取り込まれて台車内の車輪付近まで到達し、接線速度の増加した範囲（図6(b)の赤枠部分）は、模擬雪の付着低減が確認できる。

3.2 降雪風洞実験による着雪対策の検証

模型走行実験から着雪抑制の効果が見られた対策形状について、防災科学技術研究所・雪氷防災研究センターの降雪風洞装置⁵⁾を用いて着雪実験を行った。実験状況を図7に示す。

風洞スケールの制約から、模型車両は3.1節で用いた先頭車1両の床下部分のみを使用し、着雪量の評価は後

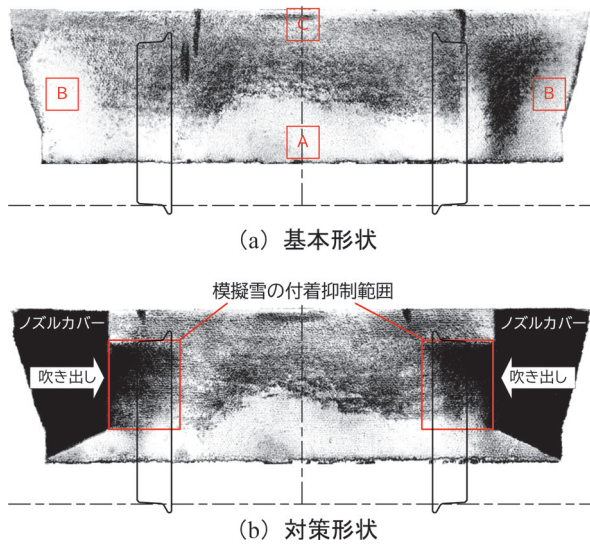


図6 模型走行実験の模擬雪付着状況

位台車でを行った。台車端部塞ぎ板の表面には着雪を促進するためのフェルト布を貼り付けた。主流速度は20m/s、気流温度は -2°C 、上流側からの雪の供給は10分間行った。雪は人工降雪装置で作った樹枝状の乾雪を使用し、風洞床面から主流内へ供給した。

図8に、台車端部塞ぎ板の着雪状況を示す。着雪範囲は前節の模型走行実験と同様の傾向を示し、対策を行わない基本形状の場合は下方[A]、横隅[B]、上隅[C]に着雪しやすい傾向が見られる。これに対して対策形状の場合、ノズルの吹き出し口から中央付近までの広い範囲で着雪の抑制効果が確認できる。

各条件について2回の実験を行い、それぞれの着雪量を計測して平均した結果を図9に示す。この図から、対策形状により台車端部塞ぎ板の着雪量は約半分に抑制される効果が推定される。

4. 数値シミュレーションによる検証

模型実験から着雪抑制の効果が見られた対策形状について、気流計算と着雪計算を連成した数値シミュレーションを実施し、対策効果の検証を行った。

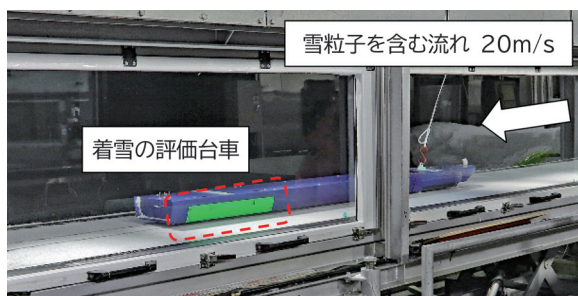


図7 降雪風洞実験

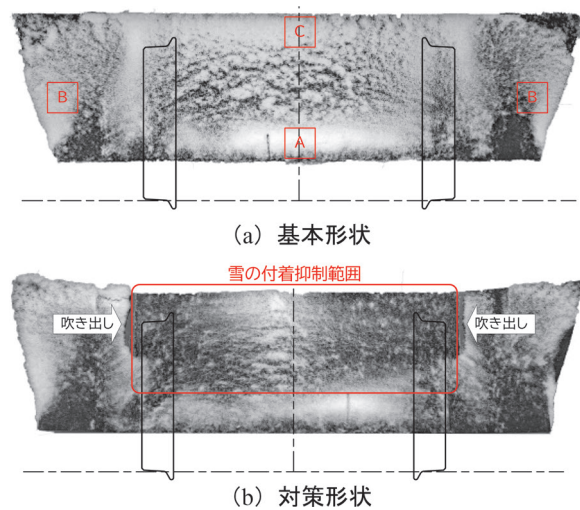


図8 降雪風洞の着雪状況

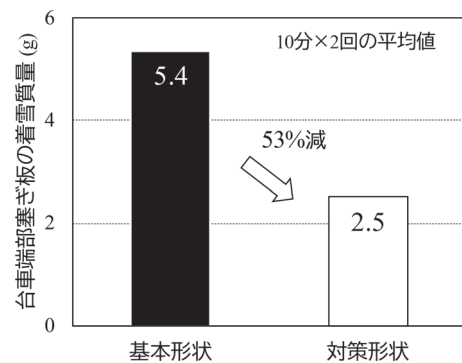


図9 着雪質量の比較

4.1 気流計算

気流計算には鉄道総研で開発した「空気流シミュレーター⁶⁾」を使用し、模型車両周りの非定常非圧縮流解析をLES (Large Eddy Simulation) により行った。車両モデルは先頭車1両の車体と2台車で構成し、後位台車を評価部位として対策形状を設置した。計算格子は x 方向(レール方向)606格子、 y 方向(マクラギ方向)740格子、 z 方向(鉛直方向)214格子の合計約1億の不等間隔直交格子を使用した。境界条件は、流入境界と軌道面を走行速度 $U=20\text{m/s}$ に固定し、流出境界に対流流出条件を適用した。走行を模擬するため、車輪境界は走行速度に応じた接線速度を付与した。

図10に、台車内の平均流速分布(ベクトル絶対値)を示す。図10(b)の対策形状では、インテークから取り込まれた走行風が台車内へ吹き出し、車輪下流付近の流れを加速させることが示される。また、 xz 断面の図から、基本形状の場合は台車中央の底面から後方車輪の上方に向かって流れが台車内へ入り込むのに対し、対策形状ではノズルからの吹き出しがこの流れを阻害する方向へ作用する様子も見られる。

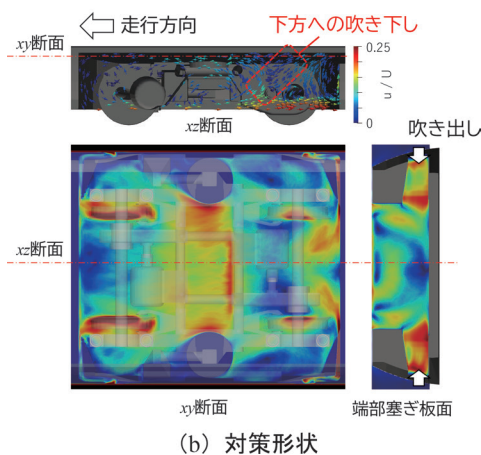
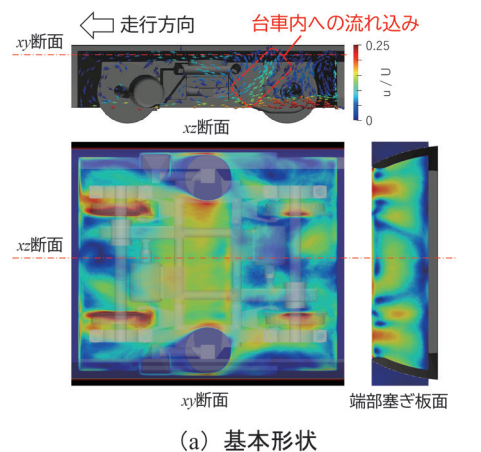


図 10 対策形状の気流計算

4.2 着雪計算

着雪計算には鉄道総研で開発した着雪シミュレータ⁷⁾を使用した。流れの初期値として、前節の気流計算における 1.0×10^6 ステップ時の計算結果を与えた。雪粒子は直径 0.5mm の球形として、列車前方のレール面付近の yz 断面から一様に流入させた。時間刻みは $\Delta t U / L_0 = 2.2 \times 10^{-3}$ として、 1.0×10^6 ステップまで計算を行った。着雪判定は台車端部塞ぎ板と台車上面の下流部分のみとし、それ以外の部分は着雪しない条件とした。

図 11 に雪粒子の付着状況を示す。基本形状と対策形状の比較から、台車端部塞ぎ板の吹き出し口付近と台車上面で着雪の抑制効果が見られ、それらの着雪抑制範囲は図 10 の気流計算から、吹き出しによって流れが加速した範囲、および台車中央から上方に向かう流れ込みを阻害した範囲にそれぞれ対応すると考えられる。

図 12 に、着雪判定領域における着雪体積の推移を示す。この図から、対策を行わない基本形状と比較して、対策形状は着雪体積が 44% 低減する効果が推定される。

5. 大型風洞実験による空力騒音の検証

対策形状のインテークは台車カバーの表面に設置する

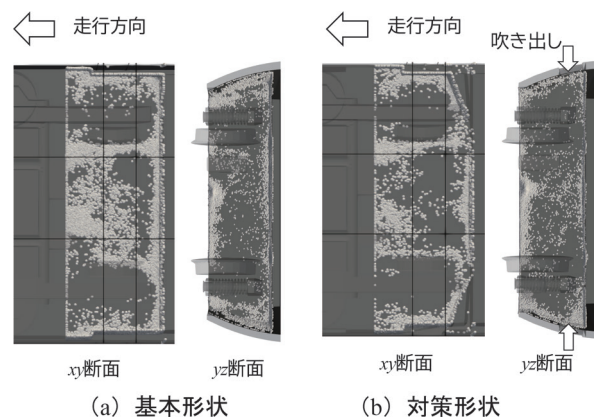


図 11 対策形状の着雪計算

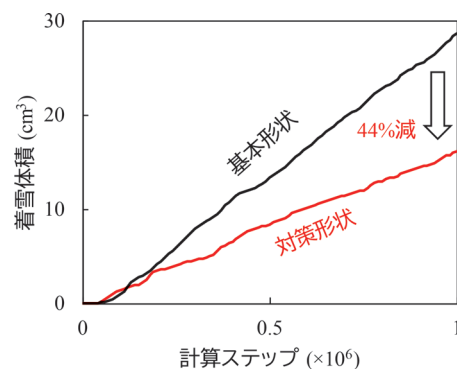


図 12 着雪体積の推移

ことから、車外騒音への影響が懸念される。このため、風洞実験により空力音への影響を検討した。

5.1 実験方法

鉄道総研・大型低騒音風洞を用いて、模型車両の空力音測定を行った⁸⁾。供試体は縮尺 1/7 の模型車両 1.5 両を使用し、先頭車の後位台車を評価部位とした。評価部位の台車は、台車機器の形状を再現した騒音測定用の精密台車を使用した。双方向への走行を想定して、対策形状は台車の上流・下流の両側に設置した（図 2 の状態）。空力音測定は、無指向性マイクロホンと直径 1m のビームフォーミング式マイクロホンアレイで行った。ノズル吹き出し口の流速測定は、小型の熱線式風速計を模型車両内に組み込んで行った。

5.2 実験結果

台車の側方 3.5m（実車換算 25m）で計測した騒音レベルについて、基本形状に対する増加幅を図 13 に示す。主流速度は 260km/h、騒音レベルは模型縮尺による実車換算後周波数に A 特性補正を掛けた値である。ノズル吹き出し口の流速を測定した条件は、基本形状に対する流速比（対策形状の流速／基本形状の流速）を第 2 軸に併

記した。

ここで、インテーク形状は一般的な NACA 形状を基にしているが、種別 A は開口部上面を簡略化した形状、種別 B は前節までの実験および数値解析で使用した形状、種別 C と種別 D は種別 B の外形を小さくした形状である。また、種別 E はインテークの無いハーフカバー形状である。

この図から、形状を簡略化したインテーク A は基本形状から 2.2dB の増加を示した。これに対してインテーク B は、基本形状から 0.9dB の増加に抑えられており、その増加幅はハーフカバー E よりも小さい。外形を小さくしたインテーク C と D は騒音の増加幅は縮小しているが、それにとまって得られる流速比も小さくなり、着雪抑制の有効性が低くなる。

台車の上流と下流に設置したインテークのうち、どちらが空力音の発生源になっているかを調べるため、インテーク B の音源分布解析を図 14 に示す。主流速度は 330km/h、実車換算後の 1/3 オクターブバンド中心周波数は 400Hz である。この図から、下流側インテークの開口部が音源と推定され、吸入方向時の開口形状が低騒音化には重要であることが示される。

以上の結果から、対策形状を実車へ適用する際は種別 B のインテーク形状が適していると考えられるが、他の台車騒音や防音壁の効果等を含む沿線騒音への影響については、現車試験により検証する必要がある。

6. まとめ

本研究では、着雪の成長しやすい台車後方の端部塞ぎ板を対象に、高速車両周りの空気の流れを利用して着雪を抑制する手法を検討した。その効果を模型実験と数値解析で検証した結果、台車端部塞ぎ板の着雪を約半減する効果が見込まれた。

ただし、気象条件や雪質によって様々な着雪性状を示す実車環境において十分な効果を得られるかは不明な点が多く、今後、現車試験での検証を行う予定である。

文 献

- 1) 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），雪氷，Vol.83，No.1，pp.79-95，2021

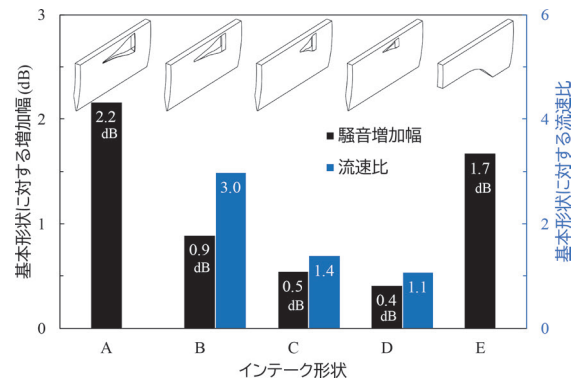


図 13 インテークの空力音と流速比

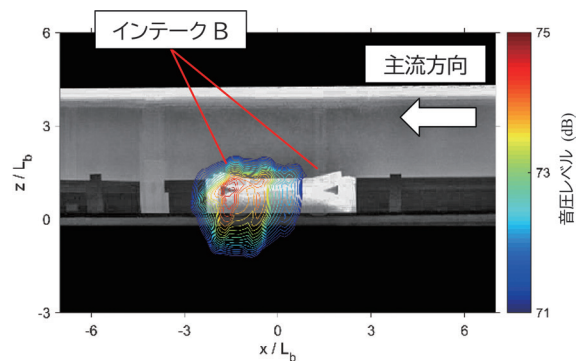


図 14 インテーク付き台車カバーの音源分布

- 2) 三橋博巳：建築物の雪の吹きだまりと吹雪風洞実験，雪氷，Vol.65，No.3，pp.287-295，2003
- 3) 老川進，苦米地司，石原孟：建物近傍の雪吹きだまりの風洞相似則に関する考察，日本雪工学会誌，Vol.23，No.2，pp.133-152，2007
- 4) 前野紀一：氷の付着と摩擦，雪氷，Vol.68，No.5，pp.449-455，2006
- 5) 堤拓哉：風洞装置を用いた雪氷の実大実験について，日本風工学会誌，Vol.43，No.2，pp.155-158，2018
- 6) 中出孝次：鉄道車両床下流れの LES，第 30 回数値流体力学シンポジウム，2016
- 7) 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），雪氷，Vol.83，No.5，pp.465-487，2021
- 8) 山崎展博，長倉清，北川敏樹，宇田東樹，若林雄介：風洞試験を用いた新幹線車両下部から発生する空力音の評価手法，鉄道総研報告，Vol.29，No.5，pp.17-22，2015