

3208 新幹線雪害対策に向けた検討

- 向井 智一 (東日本旅客鉄道株式会社) 正 [機] 藤野 謙司 (東日本旅客鉄道株式会社)
菅野 悟 (東日本旅客鉄道株式会社) 正 [機] 堀川 重成 (東日本旅客鉄道株式会社)
和田 耕一 (エクサ・ジャパン株式会社) 正 [機] 阿部 行伸 (株式会社日立製作所)

Investigation of countermeasures for snow disasters of the Shinkansen Vehicle

Tomokazu MUKAI, East Japan Railway Company 2-479, Nisshin-cho, Kita-ku, Saitama-city, Saitama

Kenji FUJINO, East Japan Railway Company

Satoru KANNO, East Japan Railway Company

Shigenari HORIKAWA, East Japan Railway Company

Koichi WADA, Exa Japan Inc.

Yukinobu ABE, Hitachi, Ltd.

In East Japan Railway Company, a variety of countermeasures for snow disasters of the Shinkansen Vehicle, such as snow melting heater, has been developed so far. As a result of various development, it was determined that the snow melting heater was equipped on the series E6 Shinkansen. In this paper, the development process and the outline of this heater were shown. Although the snow melting heater was equipped, all issues for snow disasters could not be resolved by this heater. For the Shinkansen network extension to Hakodate, it has become necessary to consider the influence of snow for underfloor equipment. Also, there is no effective means to consider countermeasures for snow disasters at the time of vehicle design in fact. Then, to solve these issues, a simulation technique was newly developed.

Keywords : Shinkansen vehicle, snow disasters, snow melting heater, simulation

1. はじめに

JR 東日本の新幹線のうち、新在直通車の台車周辺部は、在来線区間走行時に列車走行風による雪の巻き上げなどにより、台車端部フサギ板に多く着雪する。この雪が高速走行中に落下することが原因で、バラスト飛散や車両窓ガラス破損などが発生することがある。

新幹線車両に対し、これまでコーティング剤やヒータなどによる様々な雪害対策の検証を実施してきた。検証の結果、雪害対策として高い効果が得られたヒータについて実用化を目指し改良開発を重ね、新在直通用新幹線電車 (E3 系) や新型新在直通用新幹線電車 (E6 系) 量産先行車における試験を経て、E6 系量産車より実用化することができた。本論文の前半部分で、このヒータの開発経緯と概要を紹介する。

しかし、このヒータにより雪に対する全ての課題が解決できたわけではない。雪害に対する新たな課題も持ち上がり、函館延伸に伴う各種機器への雪の影響の検討が必要となった。特に雪の影響が懸念された主電動機を対象に、床下機器周辺をモデル化し、熱流体シミュレーションと運動シミュレーションを用いて検討を行った。

また、あらためて視点を変えて考えてみると、走行時における着雪のメカニズムについては十分に解明できているとは言いがたい。そこで台車周りを例に取り、格子ボルツマン法による新たな解析手法を用いて雪の挙動解析を行い、着雪シミュレーションとしての有効性を検証した。これらについても本論文の後半で紹介する。

2. 融雪ヒータの開発

2.1 ヒータ開発の経緯

融雪ヒータについては、新幹線高速試験電車 (新在直通車) (E955 形式、FASTECH360Z)、E3 系、E6 系に搭載し、試験を実施しながら改良を重ね、開発を行った。以下にその内容を紹介する。

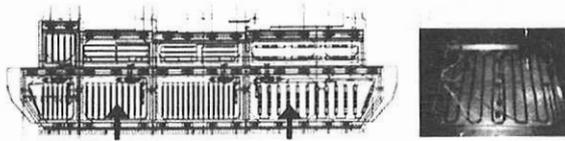
2.2 FASTECH360Z を使用した試験

台車周辺部の雪害対策について、ヒータの融雪効果や実用性を実環境下で比較検証するために、FASTECH360Z を用いて試験を実施した。

事前に行った試験などにより、ヒータによる融雪効果は確認できていたため、実際に車両に搭載することを想定した電源の確保や、ヒータ配線を取付けることによるフサギ板の着脱作業性を考慮した、効率的なヒータの選定や配置の検証などを行った。

台車端部には、融雪効果が確認できていた半導体及び遠赤外線を用いた 2 種類のヒータをフサギ板裏部に配置した。電気容量は 600~800W/m²相当分を設置し、ヒータの能力を比較した (図 1)。

また高速化の進む新幹線車両には、台車カバーが必須である。台車端部のほか、台車カバー内側にもヒータを配置して融雪効果を確認した。



半導体ヒータ 遠赤外線ヒータ

Fig.1 Heaters for the bogie end covers

試験の結果、台車端部フサギ板に設置したヒータについて十分な融雪効果を確認した(図2)。ただし、ヒータの種類(半導体および遠赤外線)による優位差は確認できなかった。また、ヒータ関連部品の信頼性、長期間の使用による耐久性も確認できなかった。

台車カバー内側に設置したヒータは、ヒータ設置箇所近傍については融雪効果を確認できた。ただし台車カバーの構造上、ヒータを配置できない箇所は融雪できなかった(図3)。台車カバーの強度を確保してヒータを配置する方法や、配線方法などについて課題が残った。

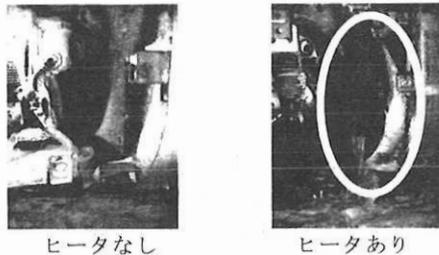


Fig.2 Test results for the heaters on the bogie end covers

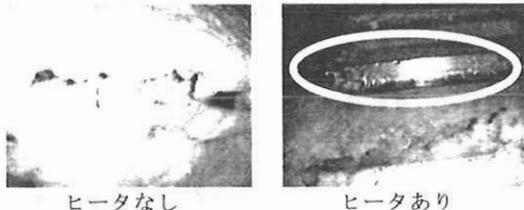


Fig.3 Test results for the heaters on bogie covers

以上のFASTECH360Zを使用した実環境下における雪害対策試験の結果を受け、融雪ヒータ付台車端部フサギ板に関して営業車搭載に向けた開発を進めた。

2.3 ヒータの再選定

FASTECH360Zの試験後、E3系においてヒータの開発を継続した。開発当初のヒータは端部フサギ板に直接貼るタイプのヒータ構造であり、またフサギ板表面温度計測にはサーモスタットを用いたが、フサギ板表面温度の適切な制御が難しいなどの問題点があった。そのため、信頼性およびメンテナンス性を向上させることを目的に、PTCセラミックス素子を使用したヒータを選定した(図4)。PTCヒータは、温度により電気抵抗値が変化する自己電力制御機能を有しているため、温度制御システムが不要となり、付属部品削減による信頼性向上も図れた。

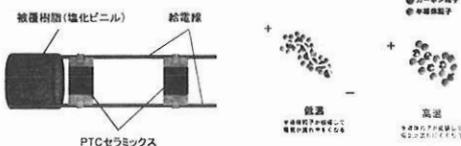


Fig.4 Structure of PTC heater

2.4 定置試験およびE3系による検証

選定したPTCヒータの融雪性能を確認するため、低温試験室内にて実際の端部フサギ板にPTCヒータを設置し、融雪性能評価を実施した(図5)。走行風を模擬した風を当てるなど、実環境を再現した条件下で融雪効果があることを確認した。

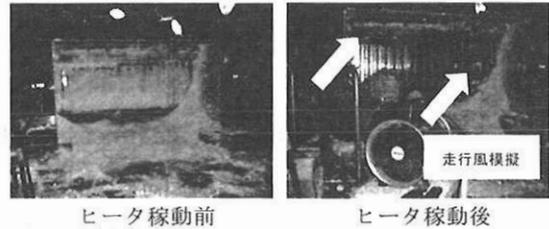


Fig.5 Test results of the PTC heater in the low temperature laboratory

上記試験後、E3系に搭載し、耐久性および融雪性能の評価を実施した。E3系に2シーズンに渡りヒータを搭載した結果、融雪性能および耐久性について問題ないことを確認した。

2.5 E6系量産先行車による検証

E3系で性能を確認したPTCヒータを使用した台車端部フサギ板を、E6系量産先行車に搭載した(図6)。E3系搭載品と比較すると、ケーシングにはめ込むことにより取替え作業を簡略化してメンテナンス性を向上させ、また断熱材との間に空気層を設ける構造とし保温性も向上させた。

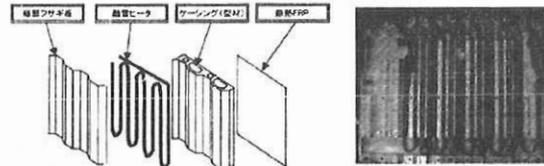


Fig.6 Structure of the bogie end covers with PTC heater

E6系量産先行車を使用し、走行試験による融雪性能評価試験を実施した(図7)。融雪性能が高いことが確認でき、耐久性および信頼性も確認できたため、E6系量産車に採用することとなった。

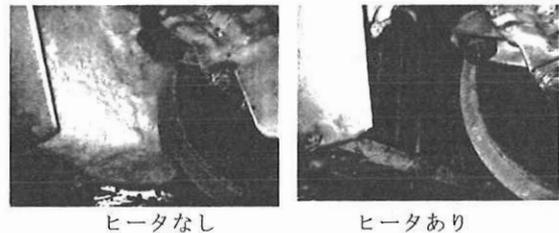


Fig.7 Test results of the series E6 prototype vehicle

3. 雪害対策における新たなアプローチ

融雪ヒータがE6系量産車へ採用されることで台車端部フサギ板部の雪害対策が進んだが、雪害に対する課題はこれですべてが解決できたわけではない。走行環境が変化することによって起こる雪害や、台車端部以外の箇所への着雪の対策については、今後も検討を進めていく必要がある。環境変化が起きる要因のひとつとしてあげられるのは、新幹線ネットワークの拡大である。新幹線

の函館延伸においては、これまでと異なる環境を走行することによる床下機器への影響の有無を検討する必要がある。

また、車両が完成した後、走行試験により雪害対策を検証する方法では、実対策実施の遅れや作業の手戻りが発生する恐れがある。そのため、雪害対策を検討し、車両の設計段階から検証が行える新たな手法の開発も望まれている。

そこでこれらの課題に対し、シミュレーション技術を応用した手法の開発に取り組むこととした。

3.1 床下機器周りの雪影響

(1) 目的

新幹線ネットワークの拡大による函館延伸で、これまでと異なる低温降雪環境下を新幹線車両が走行することになる。そこで、床下機器への雪の影響を確認する目的で、熱流体解析で実績のある Voxel-LES 解析を用いて熱流体シミュレーションによる流れ場の解析を実施した。

(2) 概要

解析モデルは、JR 東日本が運行する高速新幹線車両の床下機器周りをモデル化し、MMBM (主電動機送風機)、空調装置、連続換気装置、CI (主変換装置) で構成される範囲とした。また、MM (主電動機) への雪の影響を確認するため、MMBM から MM ダクト (主電動機風道)、MM までを別モデルで作成して熱流体シミュレーションも実施した (図 8)。

熱流体シミュレーションで得られた結果をもとに雪模擬粒子パラメータを設定して、運動シミュレーションを実施することで、雪の影響を確認した。

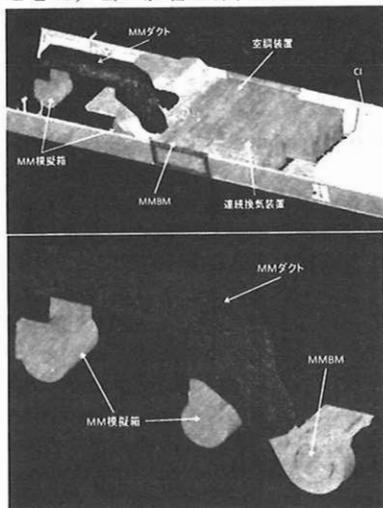


Fig.8 Thermal fluid analysis model around the underfloor equipment

(3) シミュレーション条件

床下機器周りの流れ場、温度場に対して影響を与える可能性のある外気温、空調装置や連続換気装置の換気流量などをパラメータとしてシミュレーションを実施した。シミュレーション条件は、走行速度や周囲温度などを考慮し、より雪粒子が床下機器スペースに入りやすいものとした。さらに、現車測定などのデータを参考に MM ダクト内のシミュレーションを実施した。

雪模擬粒子パラメータは直径と密度の違いによる 9 ケ

ースを検討した。気象条件のパラメータ設定は、函館付近の気象データなどを参考にした。

(4) シミュレーション結果

① 熱流体シミュレーション

熱流体シミュレーションでは、周囲温度が床下機器周りの流れ場に与える影響は小さいが、走行風の影響が大きく、床下機器周辺の温度が拡散することがわかった。また、MMBM や MM ダクトの風速を測定して流量を比較することで、熱流体シミュレーションの妥当性も検証した。(図 9)

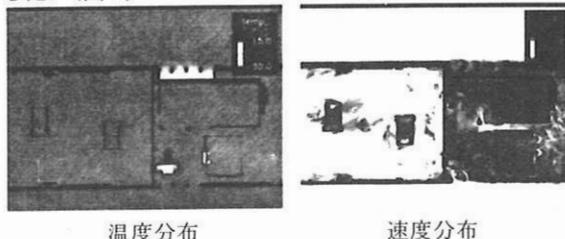


Fig.9 Simulation results around the underfloor equipment

② 雪模擬粒子の運動シミュレーション

熱流体シミュレーションで得られた床下機器周りの流れ場に、雪模擬粒子を配置して運動シミュレーションを実施した (図 10)。この結果から、側ルーバーから吸込んで、MMBM や MM に到達する雪模擬粒子の割合を評価した。評価結果の一例をあげると、走行時 (速度 260km/h) より、停車時 (0km/h) に MMBM へ到達する割合が増加した。MM へは MMBM を通過して雪模擬粒子が到達するが、MMBM の定格運転中は MM から雪模擬粒子が排出され、内部に停滞することはない結果が得られた。

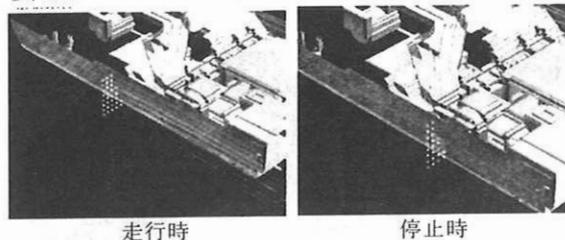


Fig.10 Simulation results of snow particles movement

3.2 台車周りの着雪シミュレーション

(1) 目的

従来の非定常の数値流体解析手法で精度が高い結果を導くためには、メッシュ作成やパラメータ設定などのノウハウが必要であり習得に時間がかかる。そこで比較的容易に扱え、精度がよい解析ができる新しい数値流体力学の手法として、近年急速な進歩を遂げている格子ボルツマン法 (Lattice Boltzmann Method ; LBM) によるアプローチを検討した。この手法は、使い勝手の良さから多くの主要な自動車メーカーで設計開発の分野に応用されている。しかしながら、鉄道分野での適用例は自動車分野と比較すると非常に少ない。また雪の挙動に関するシミュレーション技術は、鉄道分野においても各種検討されているものの、車両の走行条件、地形や積雪状況により流れ場が大きく変わるなどの理由により難易度が高く、一部の機器を除き一般的な設計検討に利用できる程の実用的な手法は見出せていない。

そのため本開発では、この自動車業界において実績のある格子ボルツマン法を使用することで、雪の挙動解析、さらには着雪の解析として、鉄道車両の開発に活用できる可能性があるか、将来の見通しを得ることを目的として検証することとした。

(2) 概要

使用するソフトは、格子ボルツマン法を採用している「PowerFLOW」とし、一例として新在直通車の台車周りの着雪現象を再現した。最初に、鉄道車両周りの3次元非定常流体解析を実施し、後処理として台車周りの車体表面に付着する着雪領域を計算した。なお雪粒子の挙動解析には、自動車業界で実績のある泥はねによる車体表面の汚れの解析に用いられる粒子堆積、追跡機能を利用した。

(3) シミュレーション条件

解析対象は、1種類の台車形状を含む先頭車両とした。形状は過去に着雪評価試験を実施し、測定記録が多く残っている新在直通車タイプとした。また解析領域は、車両モデルと比較して十分な大きさを有するデジタル風洞内とした。解析度は、流れに大きく影響を及ぼさない車体から離れた領域は格子サイズを大きく、流れに大きく影響を及ぼす領域、例えば車両先頭部下部などの格子サイズは特に小さく設定した。これらの条件の下、主流速度は時速90km/hとして非定常流体解析を実施した。

非定常流体解析の結果から、後処理として雪粒子の挙動を解析した。雪粒子の特性値は、粒子の差異による挙動の違いが明確に把握できるかを確認するため、乾雪および湿雪を模擬した2パターンを採用した。また鉄道車両への着雪は、降雪だけでなく走行風による巻き上げが大きく影響すると言われている。そのため、雪粒子を放出するための条件として、降雪と巻き上げを推定した領域から雪の粒子を放出することとした(図11)。

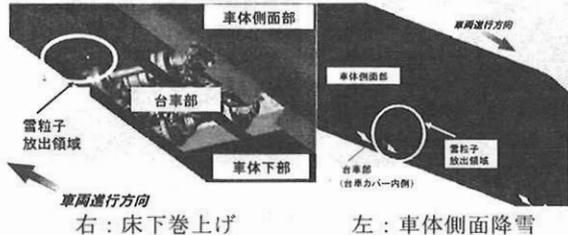


Fig.11 Emission area of snow particle

(4) シミュレーション結果

粒子挙動解析を実施している様子の一例を示す(図12)。放出領域から、温度や初速度などは固定し、位置および角度はランダム(角度は10度以内)に放出した雪粒子が、台車や車体各部に付着していく様子がわかる。



Fig.12 Simulation results of the 3D stream line

解析の結果、同じ非定常流れ環境下でも、乾雪と湿雪

とを模擬した粒子の特性に差異をつけることで雪の挙動は大きく異なり、付着する領域も異なることが確認できた。また、巻き上げを模擬した場合と、降雪を模擬した場合の放出領域の違いによる付着状態の違いを把握できた(図13および図14)。

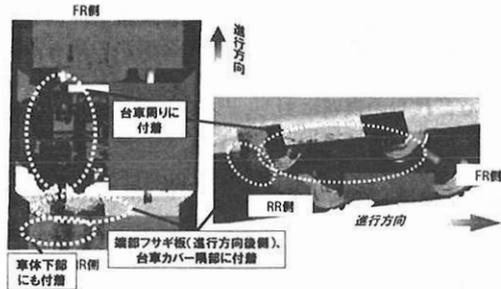


Fig.13 Simulation results of snow particle adhesion by raised snow (wet snow)

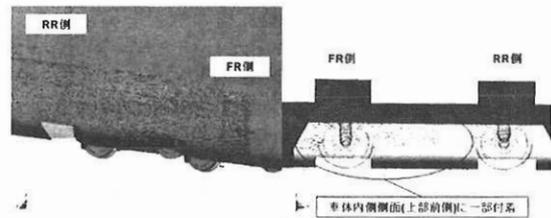


Fig.14 Simulation results of snow particle adhesion by snowfall (wet snow)

(5) シミュレーション結果と実車での測定記録の比較
着雪シミュレーションを設計時に検証ツールとして活用できる可能性を検討するため、今回の解析結果を実際の測定記録の一例と比較した。その結果、実際とシミュレーション結果については、パターン数は少ないものの大きく逸脱してはいないことを確認した。

3.3 今後の開発の方向性

床下機器の雪影響については、シミュレーションの状態を忠実に再現するのは困難であるが、シミュレーションの妥当性検証方法について今後検討を進めていく。
格子ボルツマン法による解析手法については、鉄道車両の着雪シミュレーションとして車両開発に活用できる可能性があるという見通しを得た。ただし、検討したパターン数は少なく課題の抽出も十分とは言えないのが現状である。今後は車両条件、周囲環境などの現象の再現を目指すとともに、将来的には精度の高いシミュレーションを行うことにより、安全性の向上やコストダウンにつながる効率的な対策の設計ツールとしたい。

4. まとめ

新幹線雪害対策の取り組みとして、E6系量産車に搭載されることとなった台車端部カバー融雪ヒータの開発経緯と、今後の雪害対策に向けて有効性を検討しているシミュレーションについて紹介した。
シミュレーションについては活用できる可能性があることを確認できたことから、今後も解析精度を向上させる開発を継続して実施していく。

参考文献

1)堀川重成, 我妻徹, 藤野謙司; 新幹線着落雪対策の開発, 第18回鉄道技術・政策連合シンポジウム p135-138