

高速車両の排雪力を予測する



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



齋藤 理沙
Risa Saito
鉄道力学研究部
計算力学研究室
研究員

はじめに

鉄道車両は、積雪した線路上を走行する際に、**スノープラウ**[®]により排雪しながら走行します(図1)。その際、排雪によって車両に働く抵抗力により、車体の動揺や振動が発生する可能性があります。そのため、新幹線では実際の車両を用いた排雪試験などの結果を基に線路上の積雪深に応じた速度規制などによる対応がなされています。

一方で今後、現象解明を深度化し、速度規制などに資するさらなる有益な知見を得ていくためには、さまざまな場面での排雪走行を想定し

た試験を行う必要があります。しかしながら、現実問題として、天候状況やコストの制約から、すべての組み合わせ条件に対応した多くの実車両試験を実施することは困難です。

このため鉄道総研では、実車両による排雪試験をデジタル空間で再現可能な解析手法の開発を進めています。ここではこのうち、粒子法を用いた排雪解析、排雪解析と車両運動解析の連成、実験による排雪解析の検証結果について概説するとともに、今後の研究開発計画について紹介します。

図1 積雪した線路上を走行する鉄道車両



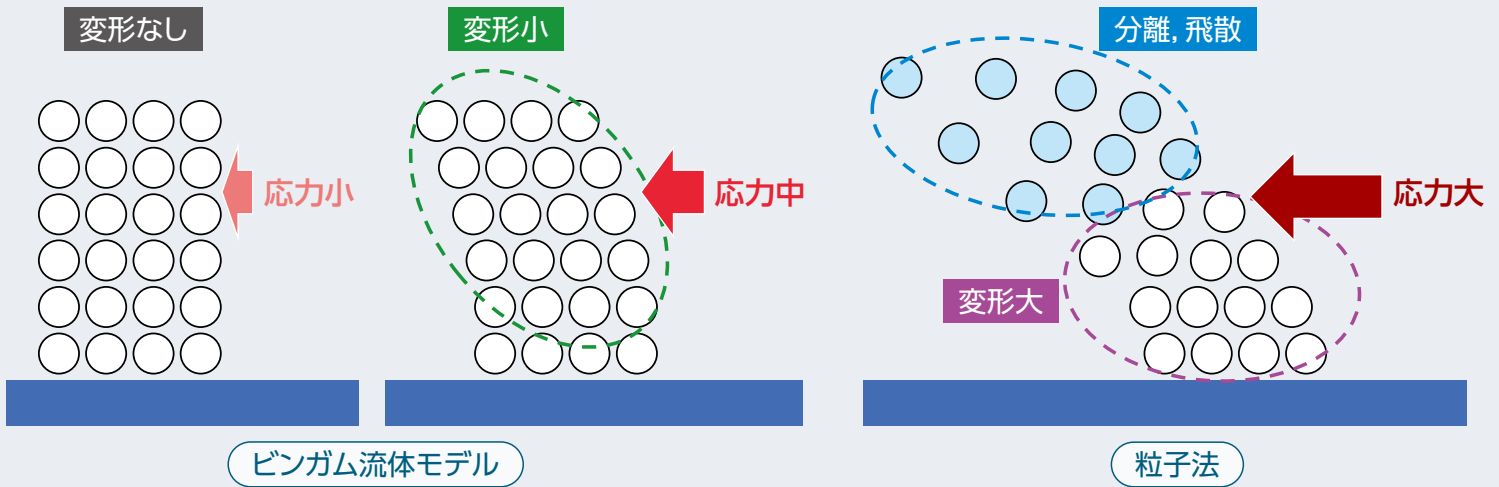


図2 雪の変形モデル

排雪解析¹⁾

排雪解析は、線路上に積雪した雪をスノープラウにより線路外へ排雪する現象を再現するものです。図2のように、かかる力の大きさにより、雪の状態は変化します。かかる力が小さいと雪は変形しませんが、ある一定の力がかかると変形しだします。さらに大きな力がかかると、大きく変形し、形状を維持できなくなると、雪粒子に分離して飛散していきます。排雪解析では、「ある一定の力がかかるとまでは変形しないが、その値を超えると変形する」性質をビンガム流体モデルによりモデル化し、「さらに大きな力がかかると、大きく変形し、雪粒子に分離して飛散していく」性質を粒子法によりモデル化しました。ビンガム流体モデルは、ある一

定の値の応力になるまでは変形は発生せず、その値を超えた応力がかかると変形が発生する流体モデルのことで。バターや粘土、アスファルト、溶岩流などをモデル化する場合にも用いられます。粒子法は、一般的に用いられる計算対象を格子に分割して計算する手法とは異なり、計算対象を粒子に分割して計算する手法です。激しい流れや、分離・結合を繰り返す現象、衝突をともし現象を扱うことを得意とする計算手法です。排雪解析では、スノープラウと雪の衝突を扱うのに加え、雪が分離・飛散する現象を扱うため、粒子法を用いるのに適しています。

図3は排雪解析の初期状態、図4は排雪解析の結果です。実際の排雪現象では、静止したスノーベッド²⁾に走行するスノープラウが突

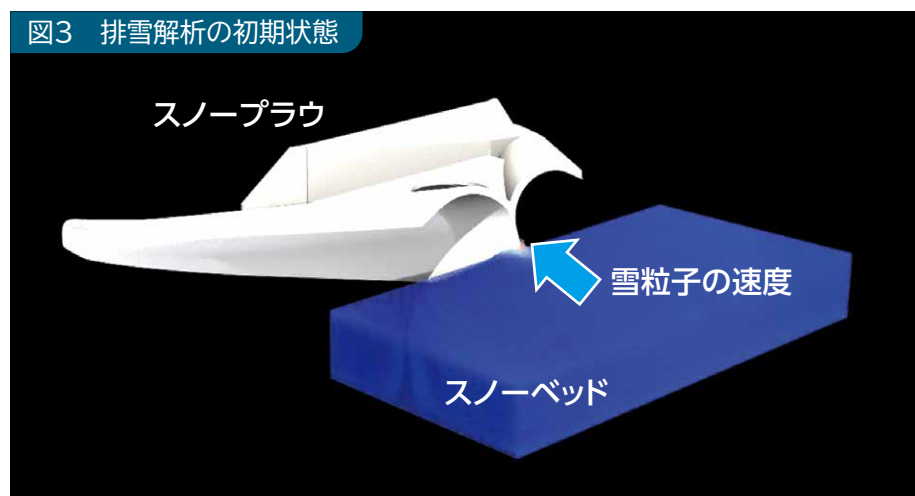
スノープラウ

線路上に積雪した雪を排除する目的で、先頭車両の前面下部に取り付けられた板状の排雪装置です。

スノーベッド

均質な雪の条件で排雪試験を実施するために、均質な雪を人工的に決められた範囲にベッド状に敷き占めた雪の塊のことです。

図3 排雪解析の初期状態



入する現象を扱います。一方で、排雪解析では、解析空間をできるだけ小さい空間に限定したいため、[図3](#)のように、静止したスノープラウに、速度をもったスノーベッドが衝突する等価な問題に置き換えて解析しています。[図4](#)では、30m/sの速度をもった雪粒子が、スノープラウに衝突して飛散する様子を観察することができます。本解析では、スノーベッドを直径1mmの粒子、500万個でモデル化して、スノープラウがスノーベッドを通過する0.18秒間について計算を行いました。鉄道総研のスーパーコンピュータの720コアを用いた場合の計算時間は、4時間でした。

排雪解析と車両運動解析の連成解析²⁾

スノープラウにかかる排雪力は、鉄道車両の運動にさまざまな影響を与えます。ここでは、排雪解析により計算されたスノープラウへの排雪力を車両運動解析に渡し、車両運動解析で計

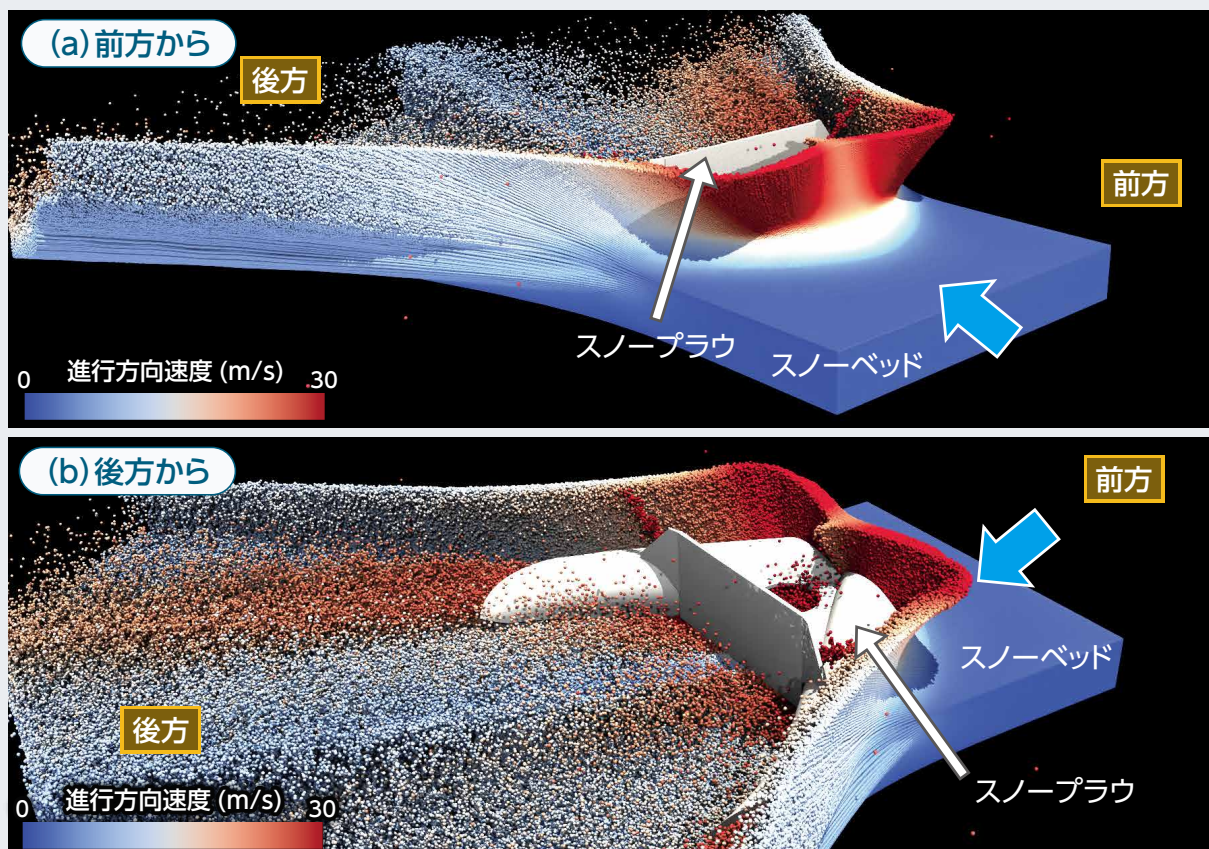
算されたスノープラウの姿勢・移動量を排雪解析に渡し「排雪解析と車両運動解析の連成解析手法」を開発しました([図5](#))。車両運動解析とは、外力による鉄道車両の運動の変化を再現するための解析手法であり、ここでは[マルチボディダイナミクス[®]](#)を用いています。

スノープラウが受ける排雪力により車両模型の姿勢が変化する効果をみるために、車両模型の姿勢を固定する場合(以後この条件を、「固定」とよびます)と、固定しない場合(以後この条件を、「非固定」とよびます)で解析を行いました。[図6](#)は、走行速度30m/s、排雪深15mmでの固定条件と非固定条件のスノープラウにかかる排雪力を比較した結果です。まず、[図6\(a\)](#)

マルチボディダイナミクス

複数の剛体がお互いに連結して全体として一つの動きをする解析手法です。それぞれの剛体は、加えられた力・トルク・拘束により、並進運動あるいは回転運動を行います。

図4 排雪解析の結果



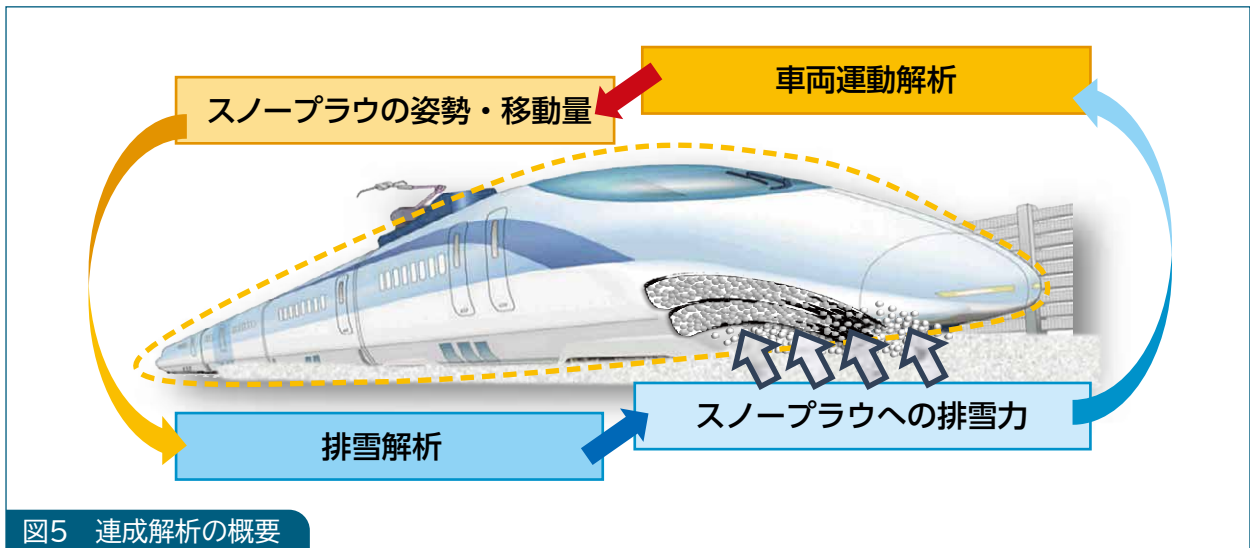


図5 連成解析の概要

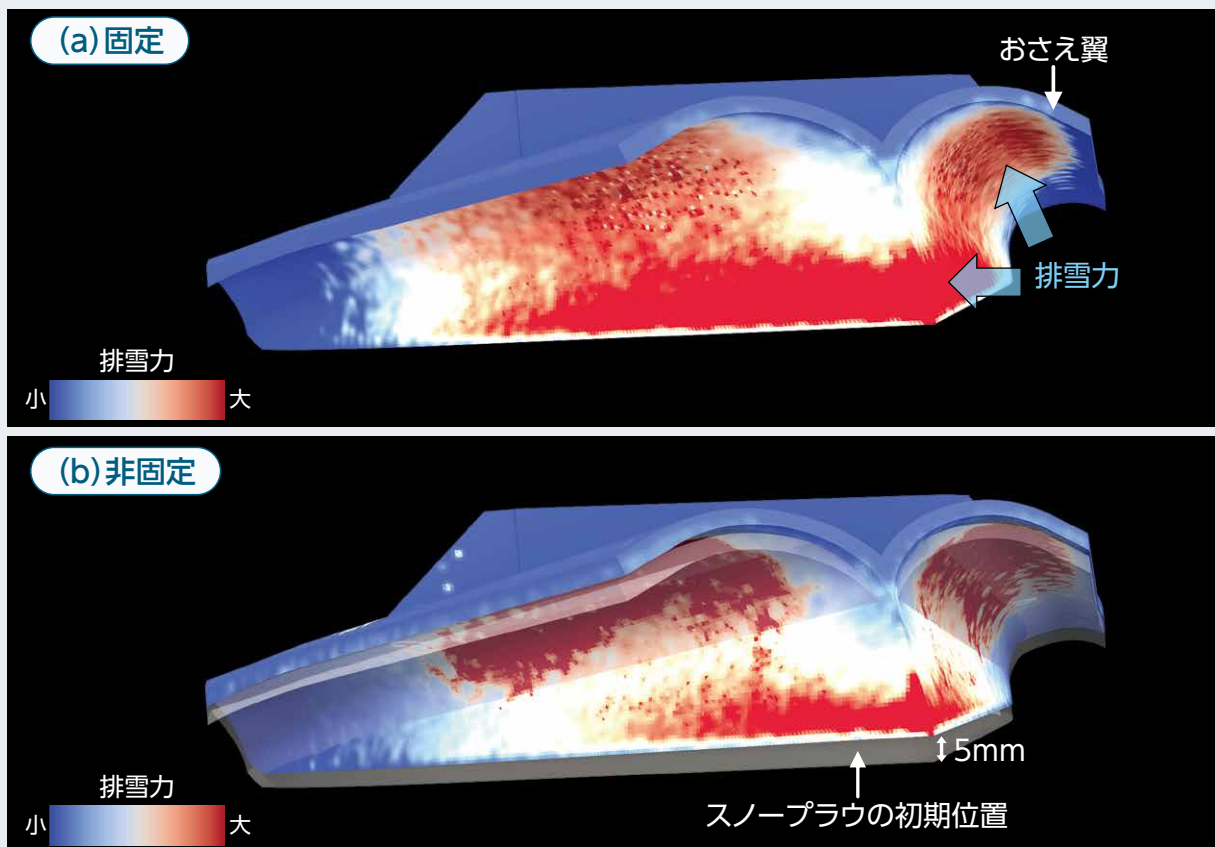
の固定条件のスノープラウに比べて、図6(b)の非固定条件のスノープラウは、排雪力の大きな赤色の領域が少ないことがわかります。次に、スノープラウの初期位置(図6(b)の半透明の位置)から、スノープラウが約5mm上昇していることがわかります。このことから、おさえ翼に排雪力がかかると、スノープラウが上方方向に動くことがわかります。さらに、排雪解析を用

いれば、図6のようなスノープラウにかかる排雪力の分布を求めることができるので、スノープラウ製作の際の部材強度の検討ができるようになります。

実験による排雪解析の検証

鉄道総研の塩沢雪害防止実験所構内に設置された、排雪力測定試験装置(図7)を用いて排雪

図6 スノープラウにかかる排雪力



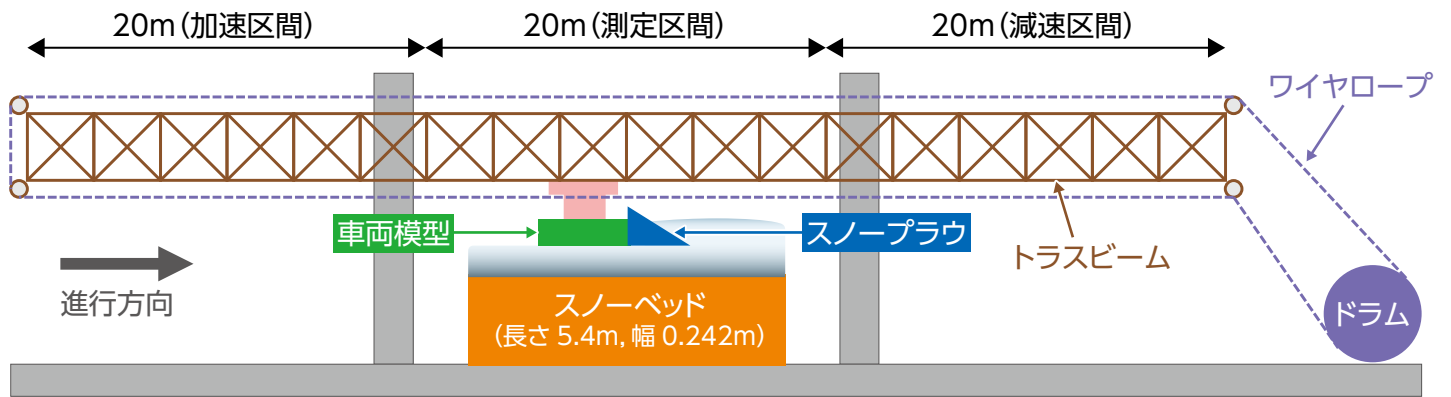


図7 排雪力測定試験装置

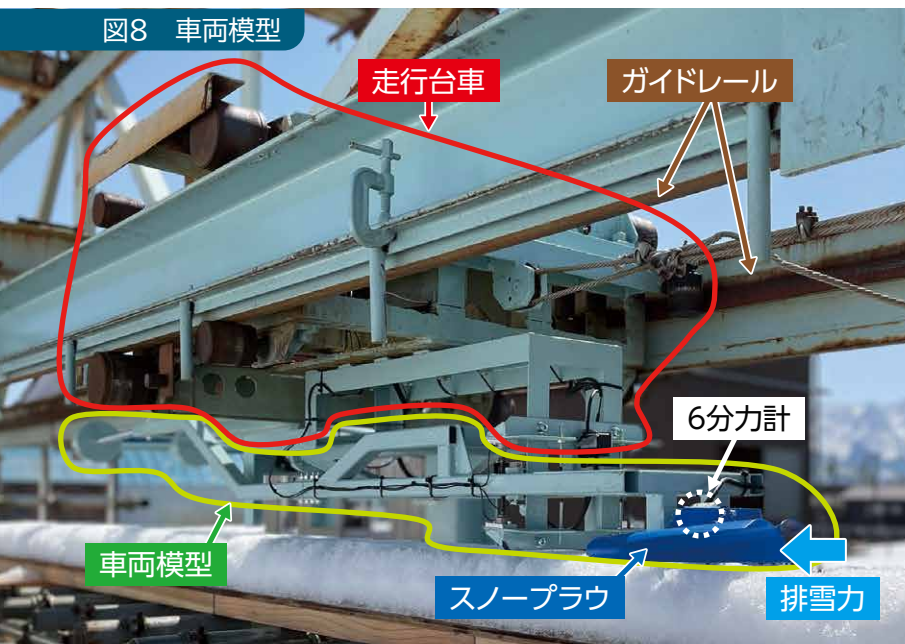


図8 車両模型



図9 スノーベッドを通過する車両模型

実験を行いました。この排雪力測定試験装置には、全長60mのトラスビーム式のガイドレールに沿って移動する走行台車があり、そこに車両模型を設置し、走行台車をワイヤロープにより牽引することで走行状態を模擬することができます。

図8のような縮尺1/10のスノープラウを搭載した車両模型を、長さ5.4m、幅0.242mのスノーベッドを通過させることで、排雪実験を実施しました(図9)。設置したスノーベッドには、平均雪密度 184kg/m^3 のしまり雪^{DEF}を用いました。今回は、車両姿勢を固定・非固定、走行速度を20、30m/s、排雪深を5、10、15mmとし、それぞれの条件について2～5回の実験を行いました。

図10は「衝突時の排雪力」と「排雪力の時間平均」を、固定条件と非固定条件に分けて実験と解析を比較した結果です。排雪解析のみを用い

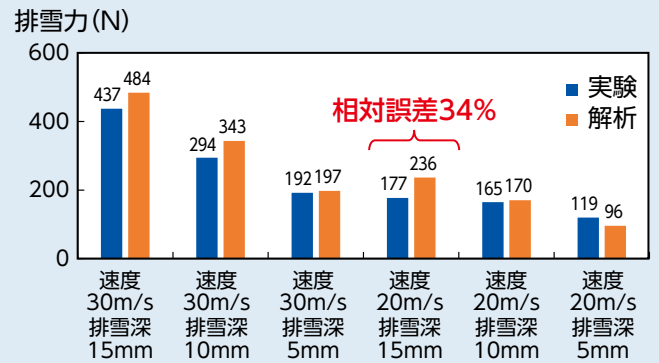
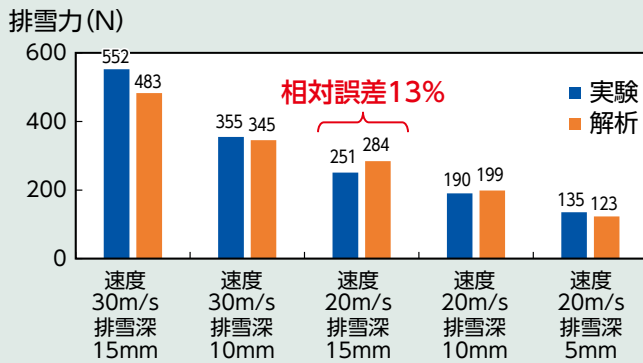
DEF しまり雪

降り積もった新雪が数日たつことで、雪の枝状の結晶が丸くなって雪粒状となり、やや固くなった雪のことです。新雪よりも雪密度が大きくなります。

固定(車両運動なし / 排雪解析のみ)

非固定(車両運動あり / 連成解析)

衝突時の排雪力



排雪力の時間平均

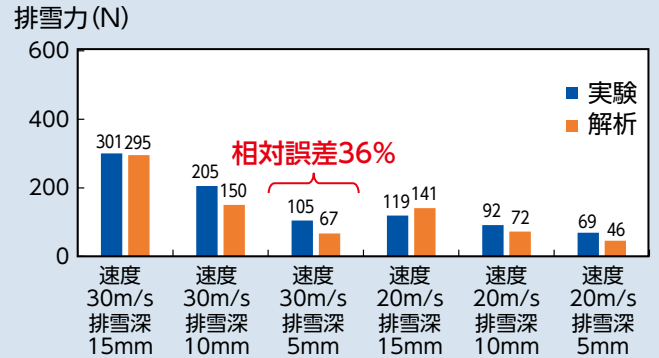
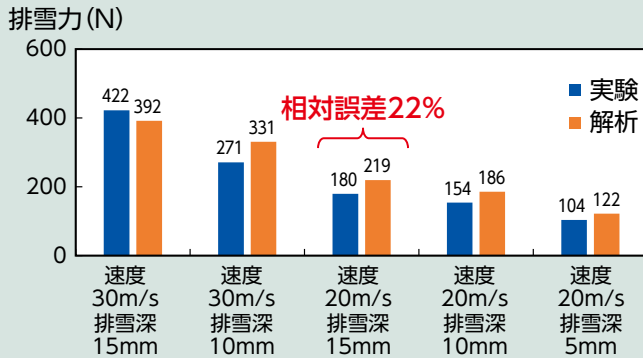


図10 実験と解析の比較

た固定条件において、スノーベッドに衝突時の排雪力を相対誤差13%以内、排雪力の時間平均が相対誤差22%以内で、排雪実験を再現することができました。連成解析を用いた非固定条件においては、スノーベッドに衝突時の排雪力を相対誤差34%以内、排雪力の時間平均が相対誤差36%以内で、こちらも排雪実験を再現することができました。

図10から実験と解析の両方で、排雪力は、非固定条件の方が固定条件よりも小さくなっていることがわかりました。非固定条件の場合に排雪力が低下するのは、図6から、おさえ翼に排雪力がかかることで、①スノープラウが初期位置から上昇し雪粒子とスノープラウの接する面積が減ることと、②スノープラウが初期位置から傾くことで水平面との角度が小さくなるのが原因であると考えられます。このように固定条件に比べて非固定条件は、排雪力が低下するという実験で生じた現象を、解析においても

再現することができました。

おわりに

排雪走行時に発生する問題を検証・解決するために、「排雪解析と車両運動解析の連成解析手法」を開発しました。適用問題はまだ、縮尺1/10模型による検証実験に留まっていますが、今後は、排雪走行時における実車両の輪重・横圧の波形やスノープラウの応力状態と比較することで、実物大スケール問題の再現性を検証していきます。最終的には本解析手法を、排雪走行試験の事前検討、積雪時の走行安全性の評価、スノープラウ製作の際の部材強度の検討などに活用していきたいと考えています。RRR

文献

- 1) 室谷浩平, 石井秀憲, 鎌田慈, 辻槻樹, 坂本裕一郎: 排雪模型実験によるスノープラウの排雪シミュレーションの開発, 雪氷研究大会, 札幌, pp.A3-11, 2022
- 2) 室谷浩平, 齋藤理沙, 坂本裕一郎, 石井秀憲, 鎌田慈, 辻槻樹: 排雪模型実験による排雪走行時の車両運動解析手法の開発, 雪氷研究大会, 郡山, pp.C3-11, 2023