

模型を用いて排雪走行を再現する

鎌田 慈

防災技術研究部
(気象防災研究室 主任研究員)

宍戸 真也

前 防災技術研究部
(気象防災研究室 研究員)

高橋 大介

防災技術研究部
(気象防災研究室 研究員)



かまた やすし



しど まさや



たかはし だいすけ

中嶋 大智

前 鉄道力学研究部
(車両力学研究室 研究員)

中出 孝次

環境工学研究部
(車両空力特性研究室 主任研究員)

西山 幸夫

研究開発推進室
(設計・試作 主査)



なかじま だいち



なかで こうじ



にしま やきお

はじめに

積雪地域を走行する新幹線の中で特に雪が多い区間では散水消雪による雪対策が施されています。しかし、取水が困難な区間では軌道脇に貯雪溝を設けて、車両先頭部に搭載されたスノーブラウにより軌道上の雪を貯雪溝へ排除して走行する自力排雪走行が採用されています(図1)。貯雪溝の深さは該当地域の冬期間の降積雪量により決められます。また、東北・上越新幹線開業前に開発された200系車両用スノーブラウ(以下、200系プラウ)では、軌道上の積雪深によって速度規制は行われるものの、新雪の深さがスノーブラウ下端から15cm(レール上端から30cm)に達するまで排雪走行が可能です。

これから降雪量、積雪量ともに多い多雪地域へ延伸する新幹線ルートにおいても、沿線からの取水が困難な区間などには自力排雪走行が計画されています。しかしながら、保守作業上の安全を考慮して貯雪溝の深さには制限があるため、大雪時には図1に示すように貯雪溝が雪で埋まり、機械除雪を併用したとしても、最終列車通過時には軌道脇に雪の壁(側雪)が形成される状況が想定されている区間があります。ところが、従来型の200系プラウでは雪の壁(側雪)がある条件下での排雪走行は想定されていないので、図1のような雪の堆積状態では側雪が排雪時の抵抗力(以下、排雪抵抗力)などに影響を及ぼし、安全安定

輸送に支障することが懸念されます。

このため、多雪地域の降積雪条件、貯雪溝構造に適した新しいスノーブラウ形状の開発が必要となります。開発目標は、①側雪の有無にかかわらず貯雪溝へ向けて雪を飛散させること、②排雪抵抗力が200系プラウと同等以下であること、としました。今回は、排雪状況を再現するための試験装置の製作、模型試験の排雪抵抗力を実スケールへ換算するための相似則の検討、縮尺模型を用いた試験による形状検討について紹介します。

排雪力測定試験装置の製作

スノーブラウの形状を検討する際には実物を用いて試験をすることが最も信頼できますが、試験が大掛かりとなって労力がかかるため様々な形状を検討するのは困難です。そこで、実物の代用として縮尺模型を用いて形状を検討することになります。

模型を用いた排雪試験を実施するためには、排雪状況を再現可能な試験装置が必要となります。そこで、200系プラウ開発時の縮尺模型試験に使用された装置を参考にして排雪力測定試験装置を製作しました(図2)。この装置は全長60mのトラスビームの下にワイヤロープでけん引される走行台車があり、これに縮尺模型プラウを取り付けて、測定区間に設置されたスノーベッドを通過させることで、最高速度40m/sまでの排雪状況を再現することができます。ワイヤロープは油圧モーターに直結したドラムにより

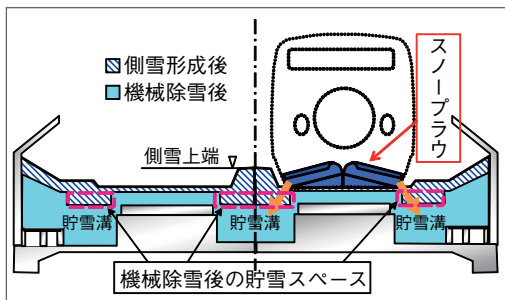


図1 多雪地域の高架橋内堆雪図の例

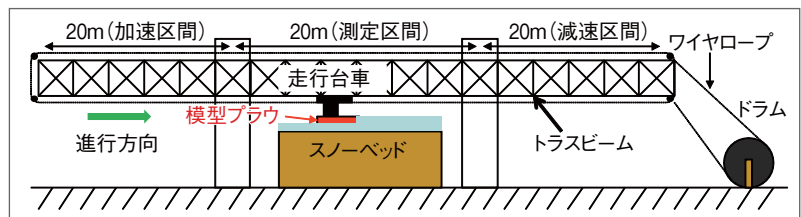


図2 排雪力測定試験装置の概要図

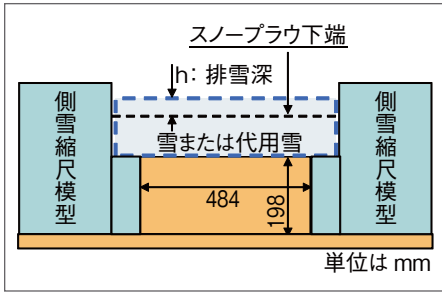


図3 線路構造物模型(縮尺1/5)

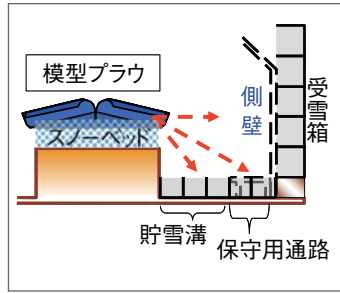


図4 飛雪分布の測定方法

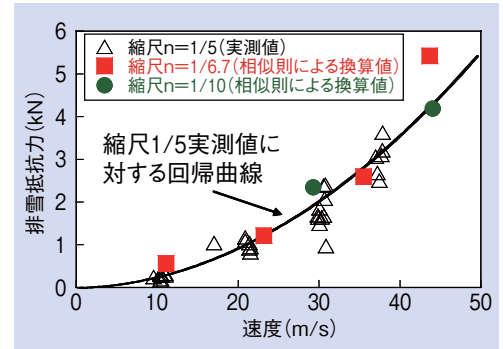


図6 相似則の検証結果

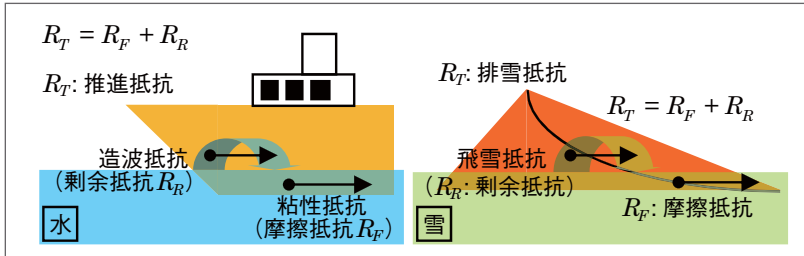


図5 船舶(左)とスノープラウ(右)の推進抵抗

巻き取られます。これと同時に走行台車後方につながったワイヤロープがドラムから送り出され、ドラムにブレーキをかけると走行台車が減速する仕組みになっています。走行速度は、油圧と油の流量を調整して設定します。この装置では60mの距離で加速、測定、減速を行うので、最高速度40m/sを実現するためには、排雪抵抗に対する強度を保ちつつ、走行台車を軽量化することが重要となります。

模型試験の方法

試験に使用したスノーベッドは線路構造物模型の上に雪試料または代用雪(おがくず)を載せたものを用いました(図3)。図中の排雪深とは雪面からスノープラウ下端までの長さです。また、側雪が存在する場合を想定した試験では、側雪の縮尺模型を線路構造物模型の両側面に設置しました。ここで、線路構造物模型と側雪模型は、模型プラウと同じ縮尺としました。

排雪抵抗力は走行台車の模型プラウ取り付け部に設置したロードセルで測定しました。スノープラウから飛散した雪の分布(以下、飛雪分布)は、線路構造物模型の貯雪溝、保守用通路、側壁の位置に受雪箱を設置して、捕捉した雪の質量の割合で評価しました(図4)。

相似則の検討

相似則とは、実物の代用として模型実験を行う場合に、模型に現れる現象と実物の現象をスケールによらず比較することのできる物理量の比(π ナンバと呼ばれる)でつなぐための考え方です。 π ナンバの代表的なものとしてはレイノルズ数があります。

相似則の検討は、実車に搭載するスノープラウ部材の設

計強度の推定や実車による排雪試験での走行速度、排雪深などを設定するために必要となります。

スノープラウの排雪時の運動を考えると、空気と比較して粘性の高い雪をかき分けながら進んでいきます。一方、船舶が海など

を進む運動を考えると、空気よりも粘性の高い水をかき分けながら進んでいます。この点から、どちらも下部に粘性の高い物質をかき分けながら進むという点で似ていると考え、船舶の模型試験から実車の推進抵抗を計算する相似則を参考にして、実車のスノープラウの排雪抵抗力を模型プラウの試験結果から推定する方法を検討しました。

船舶の推進抵抗に対する粘性の影響は船体のごく近くに限定されるのに対し、水面に波を起こさせるための重力の影響は比較的船体から離れた範囲に限定されます(図5)。よって、船の推進に対する推進抵抗 R_T は船体表面に対する摩擦抵抗 R_F と造波抵抗がその大部分を占める残余抵抗 R_R との和として考えることができます¹⁾。そこで、船舶と同様にスノープラウにおける排雪抵抗 R_T はプラウ表面に働く摩擦抵抗 R_F と飛雪抵抗である残余抵抗 R_R との和と考えます。相似則では、模型試験の排雪抵抗 R_T を上記の2つの抵抗に分け、それぞれを実スケールへ換算し、この和を求めることで実スケールの排雪抵抗力を推定することになります。

この相似則を検証するために縮尺1/10(排雪深20mm)、1/6.7(排雪深30mm)、1/5(排雪深40mm)の200系模型プラウを用いた排雪試験を試験速度10、20、30、40m/sの条件で行いました。相似則の検証方法としては、縮尺1/10、1/6.7の排雪抵抗力を縮尺1/5スケールへ換算し、縮尺1/5の試験結果と比較しました。この結果、縮尺1/10と縮尺1/6.7の模型プラウによる排雪抵抗力を相似則により縮尺1/5へ換算した値は、縮尺1/5の試験結果に対して引いた累乗近似曲線上または近傍にプロットされました(図6)。

以上から、今回、検討した相似則を用いることで、縮尺

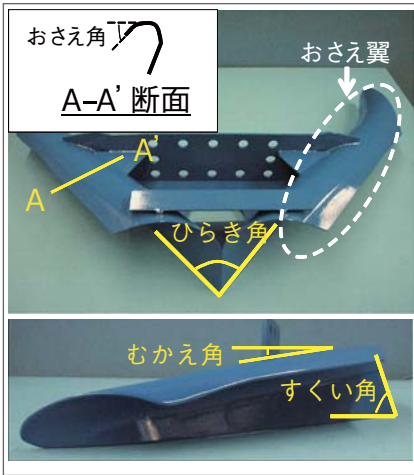


図7 スノープラウの形状を表すパラメータ

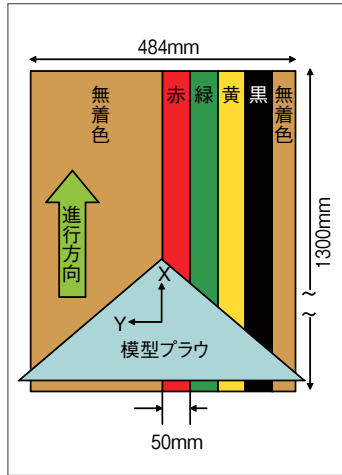


図9 スノーベッド配色

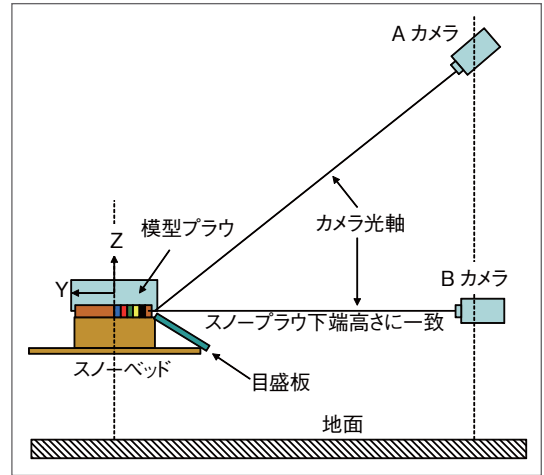


図10 高速度カメラ設置位置

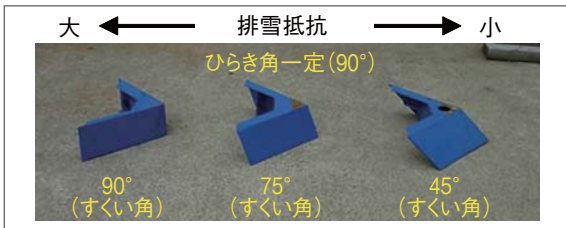


図8 直線型プラウ(縮尺1/10)の例

模型プラウによる試験の結果から実スケールの排雪力を精度良く推定することが可能となると考えられます。また、この相似則では模型の縮尺に応じた速度換算を行うため、模型の試験速度が低くても実スケールにおける高速度の排雪抵抗力を推定することができます。

スノープラウの形状検討

スノープラウの形状を表すパラメータの定義を図7に示します。ひらき角は平面図上でプラウ先端の角度、すくい角は側面図上で先端の角度、むかえ角はおさえ翼が地面となす角度です。おさえ角はおさえ翼自体のひらき角に直角する断面においておさえ翼先端が地面となす角度となります。ここで、スノープラウのおさえ翼とは、軌道上からすくい上げられた雪を貯雪溝に向けて飛散させる役割を持つものです。

(1) 排雪抵抗の小さな形状を探る

ひらき角とすくい角の検討のために縮尺1/10の直線型プラウを用いて試験をしました。直線型プラウはひらき角一定(90°)ですくい角を45°、75°、90°としたもの(図8)、すくい角一定(90°)でひらき角を60°、90°、120°としたものの計5種類です。

試験の結果、ひらき角、すくい角ともに角度が小さいほど排雪抵抗力は小さくなることがわかりました。

(2) 排雪経路の解析

飛雪を貯雪溝へ向けるにはおさえ角が重要な役割を果た

します。おさえ角を決定するためには、スノープラウの形状によって、スノーベッド上のどの位置の雪がおさえ翼のどの位置からどの方向へ飛び出すか(排雪経路)について解析する必要があります。そこで、スノーベッドの全層を内部まで着色可能なこと、事前に自然雪による飛雪分布と大差ないことが確認できたことから、着色した代用雪(おがくず)を用いて排雪試験を行い、その飛雪状況を高速度カメラで撮影することで排雪経路を解析しました。

撮影に使用したスノーベッドは中央から赤、緑、黄、黒、無着色の順に幅50mm間隔で進行方向に約1.3mの長さで並べました(図9)。高速度カメラはスノーベッド斜め上から撮影するAカメラ、側面から撮影するBカメラの2台を使用し、解析用の基準点を貼り付けた目盛板をスノーベッド脇に設置して、2000コマ/秒で高速度撮影を行いました(図10)。解析では、スノーベッド上の各色の飛雪状況を観察するとともに、飛雪方向についてはAカメラで進行方向(X)と左右方向(Y)を計測し、Bカメラでは進行方向(X)と上下方向(Z)を計測して、一定時間毎に各色の飛雪先端の座標を求めました。

高速度カメラにより観察されたひらき角60°とひらき角90°のプロトタイプ模型の排雪状況の模式図を図11に示します。ひらき角60°の模型では、おさえ翼の前半分が使用されておらず、スノーベッド中央の赤と緑の一部がおさえ翼の中央付近からプラウ進行方向に対して斜め後方へ向けて飛雪しました。一方、ひらき角90°の模型では、おさえ翼全体から、赤、緑、黄がプラウ進行方向に対してほぼ真横へ飛雪しました。側面からの観察から、どちらの模型プラウでもおさえ翼前面からの飛雪は貯雪溝のある下向きに制御されるのに対し、おさえ翼後端の切り欠き部分からの飛雪は高く舞い上がりました。

以上から、ひらき角が小さいと排雪抵抗力は小さいが、おさえ翼により貯雪溝へ向けて制御できる飛雪の量が少な

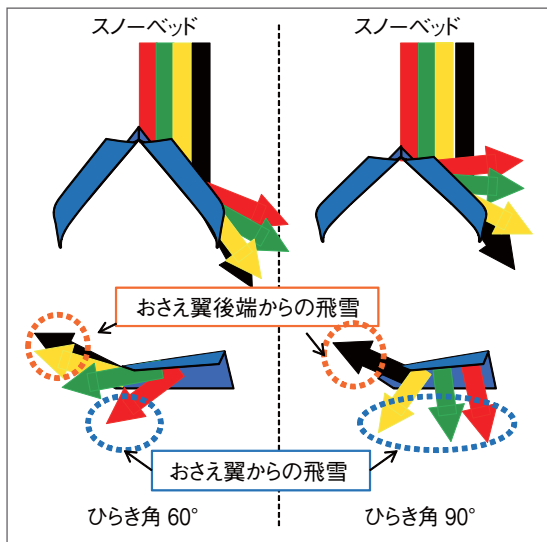


図11 プロトタイプ模型の飛雪状況の模式図

くなること、逆にひらき角が大きいと排雪抵抗力は大きくなるが、おさえ翼により貯雪溝へ向けて制御できる飛雪の量は多くなることがわかりました。このような観察とともに、おさえ翼から飛び出した飛雪先端の座標を用いて、ひらき角、むかえ角、おさえ角、おさえ翼からの飛び出し位置、飛雪の角度との関係を幾何学モデルで定式化しました。これにより、プラウの形状と飛雪を向けたい角度からおさえ角を決定できるようになりました。

(3) 数値計算による検討

模型試験を行うプラウ形状を絞り込むために数値計算を併用しました。液体の物性によって雪を表せるものと仮定して、プラウへ液体が流れるモデルにより、むかえ角を検討しました。この結果、排雪抵抗力はむかえ角が減少するのに従って減少するが、飛雪の角度はほとんど変化しないことがわかりました。

新しいプラウの形状と性能

新しいプラウ(図12)では、側雪の有無にかかわらず貯雪溝へ向けて排雪するために、側雪上端高さからの排雪が可能な形状かつ排雪抵抗力が小さな形状を目指しました。このため、200系プラウ形状に比べて排雪抵抗力を抑えるために先端が尖っており、側面に雪を高い位置へすくい上げるためのすくい面を有します。すくい面では、おさえ翼を有効利用するためにひらき角を90°にしました(表1)。むかえ角は、200系プラウでは後端へ行くにしたがって角度10°で下がっていますが、新しいプラウでは側雪上端高さを維持するために0°にしました。これらに加えて、おさえ翼後端から高く舞い上がる飛雪対策として、これを貯雪溝へ向けるためのフィンをつけました。

開発した新しい形状の縮尺1/5の模型プラウによる排雪試験を行って200系プラウと比較した結果、200系模型プラ

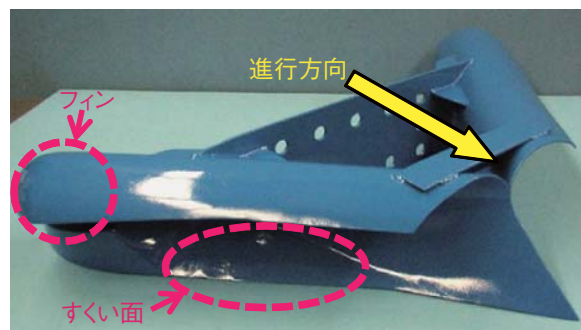


図12 新しいスノープラウ形状

表1 プラウ諸元の比較

	200系	新しい形状
ひらき角	82°	60°, 90° (すくい面)
すくい角	70°	45°, 20° (すくい面)
むかえ角	10°	0°
おさえ角	29-48°	51-58°
備考		すくい面とおさえ翼後端にフィンを有する

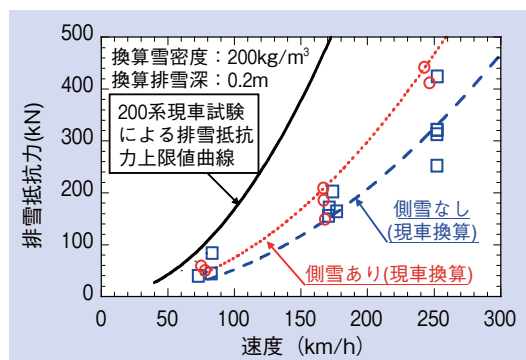


図13 排雪抵抗力の速度依存性

ウよりも多雪地域の線路構造物において適切な位置への飛雪が可能であることを確かめました。さらに、模型試験により得られた排雪抵抗力を相似則により実スケールへ換算すると、200系量産型電車による排雪試験により得られた排雪抵抗力の上限値²⁾を超えない見通しが得られました(図13)。

おわりに

本稿では、スノープラウの形状開発における試験装置の製作、相似則の検討、形状要素の決定方法について紹介しました。実際の排雪走行を縮尺模型を用いた試験によって再現する試みを行ってきましたが、最終的には現車試験により排雪性能を含めた総合性能を確認することが必要と考えられます。そして、その中で今回開発した基本的な形状要素やその考え方が適用されることが期待されます。RRR

文献

- 1) 江守一郎, 斎藤孝三, 関本孝三: 模型実験の理論と応用 第三版, 技報堂出版, 2000
- 2) 高橋脩: 東北・上越新幹線営業電管用スノープラウの開発, 鉄道技術研究所速報, No.A-87-154, 1987