

模型実験によるスノープラウの排雪抵抗力評価方法

○ [機] 中嶋 大智 鎌田 慈 穴戸 真也 大橋 昭典 飯倉 茂弘 遠藤 徹 (鉄道総研)

The Method of Evaluating the Resistance of Snowplow by Model Experiment

○ Daichi Nakajima, Yasushi Kamata, Masaya Shishido,
Akinori Ohashi, Shigehiro Iikura, Toru Endo, (RTRI)

The method of evaluating the resistance of full-scale snowplow of the actual vehicle by the model experiment based on the similarity rule has been devised. By this method, the resistance of snowplow can be estimated with high accuracy compared with the conventional method of calculation using an area ratio. The experimental results of the resistance of snowplows of the models of scales 1/10 and 1/6.7 were converted to that of model of scale 1/5 using this method, and they were plotted on the power approximated curve of the experimental results of the model of scales 1/5. Thereby, the scale effect and the validity of this method were shown.

キーワード：鉄道車両，相似則，模型実験，スノープラウ，排雪抵抗

Key Words：Railway vehicle, similarity rule, model experiment, snowplow, resistance of snowplow

1. はじめに

スノープラウとは、車両限界内の軌道上の積雪を排除するため、先頭車両下部に取り付けられている雪掻き装置である。船舶において、模型実験から実船の推進抵抗を計算する方法を参考に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相似則を用いて評価する方法を考案した。方法の妥当性を調べるため、縮尺の異なる模型プラウによる排雪試験を行い、スケール効果の確認を行った。

2. 船舶とスノープラウの推進抵抗

船舶の推進抵抗は図1に示すように、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る。よって、船の推進に対する全抵抗 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剰余抵抗 R_R との和として考えることができる¹⁾。

一方、スノープラウの排雪抵抗では、図1に示すように、下部に粘性の高い物体の抵抗を受けながら進む点で船舶と

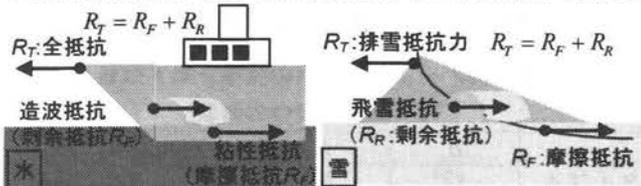


図1 船舶の推進抵抗とスノープラウの排雪抵抗

共通している。そこで、スノープラウにおける排雪抵抗力 R_T を船舶と同様、プラウ表面に対する摩擦抵抗 R_F と飛雪抵抗である剰余抵抗 R_R との和と考えると船舶の推進抵抗における相似則を適用することとした。このとき、摩擦抵抗 R_F はレイノルズ数のみの関数、飛雪抵抗 R_R はフルード数のみの関数であると考えた。

模型プラウの摩擦抵抗 R_F' は、その着雪部分と同じ長さと同面積をもつ平板の摩擦抵抗と同じと考える。平板プラウに対する排雪抵抗力測定実験から、平板の摩擦抵抗係数 C_F とレイノルズ数 Re の関係を別に求め、その結果を用いて R_F' を算出する。実車プラウの摩擦抵抗 R_F も同様にして算出する。平板の摩擦抵抗係数 C_F は、雪の密度 ρ 、平板の着雪面積 S 、走行速度 V を用いて以下のように定義される。

$$C_F = \frac{2R_F}{\rho S V^2} \tag{1}$$

模型プラウの飛雪抵抗 R_R' は、模型プラウの排雪抵抗力 R_T' と模型プラウの摩擦抵抗 R_F' の差として求められる。実車プラウと模型プラウの飛雪抵抗の関係は、模型縮尺 $1/n$ の場合、力学的相似則より以下の式を用いて換算する。

$$R_R = n^3 R_R' \tag{2}$$

実車プラウの排雪抵抗力 R_T はこれらの和として求める。

このように、現象を空間的に2つの部分に分けることで、模型プラウの実験結果から実車プラウの排雪抵抗力を推定することが可能となる。

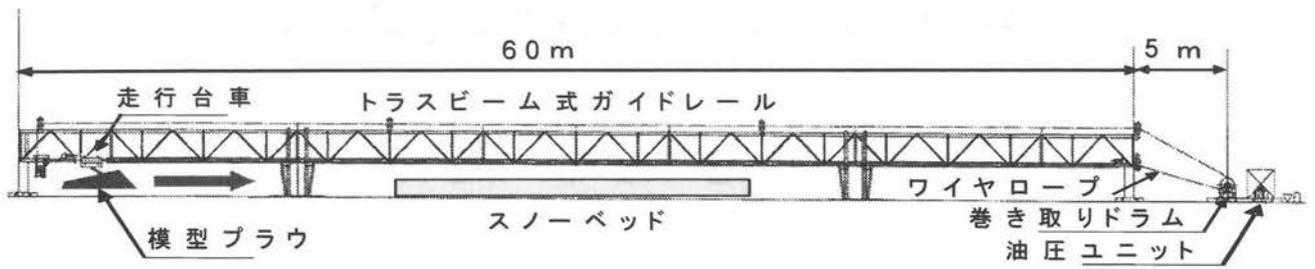


図 2 排雪力測定試験装置

3. 試験方法と相似則の検証方法

3.1 試験装置

排雪力測定試験装置の概要を図 2 に示す。本装置は塩沢雪害防止実験所構内に設置されており、最高速度 40m/s で模型プラウを用いた排雪状況を再現可能である。トラスビーム式のガイドレール内を走行する台車から吊り下げるように模型プラウを取り付け、ガイドレール下に設けるスノーベッドを模型プラウが通過するようにセットし、走行させる。模型プラウは 3 分力計を介して走行台車に取り付けられており、模型プラウにかかる力を測定することができる。また、測定区間のトラスビームには、台車走行速度を求めるために直径 15mm の鉄棒が 50cm 間隔で取り付けられている。

走行台車はワイヤロープに牽引されてガイドレール上を走行する。ワイヤロープは油圧モーターに接続されたドラムにより巻き取られる。試験速度は、油圧モーターを駆動するための油圧および流量を調整することで設定した。走行台車は、油圧モーターへ油を供給する電磁弁を閉じることにより、油圧モーターと直結したドラムを停止し、ワイヤロープを介して制動される。

3.2 スノーベッド

模型プラウの縮尺に合わせた軌道スラブ模型(縮尺 1/10, 1/6.7, 1/5)の上に雪を載せて軌道上の積雪状態を再現したスノーベッドを設置した(図 3 参照)。各縮尺の軌道スラブ模型の寸法を表 1 に示す。ここで排雪深とはスノープラウで排雪される雪の厚さのことであり、試料表面からスノープラウ下端までの距離で表される。

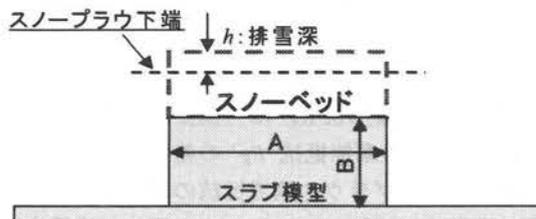


図 3 軌道スラブ模型

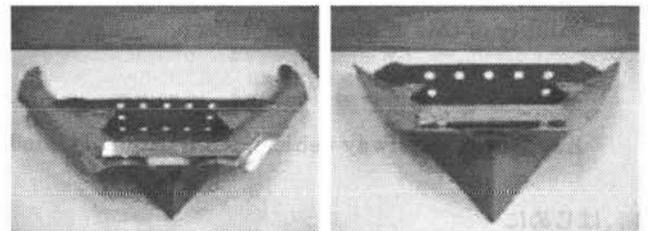
表 1 軌道スラブ模型の寸法

縮尺	A[mm]	B[mm]
1/5	484	198
1/6.7	361	147
1/10	242	99

3.3 模型プラウ

試験に使用した模型プラウを図 4、平板プラウを図 5 に示す。図 6 にスノープラウ形状の特徴を表す数値を示す。試験に使用した模型プラウの形状を表 2 に示す。

平板プラウは、平板に対する排雪抵抗力測定試験に用いるもので、平板の摩擦抵抗を 3 分力計で直接測定することを目的としており、前後方向長さ $L=600\text{mm}$ と $L=300\text{mm}$ の 2 種類がある。また、先端形状は、走行する際の飛雪抵抗が極力小さくなるよう、 60° の鋭角になっている。



(1) タイプ A (2) タイプ B

図 4 試験に使用した模型プラウ

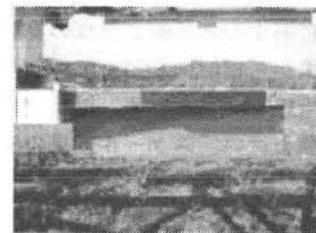
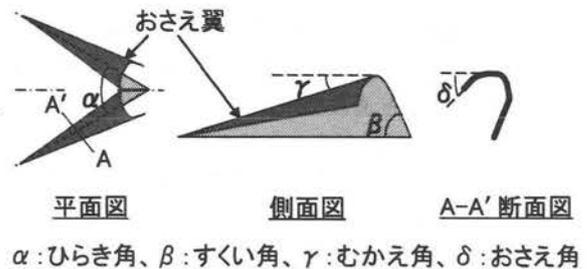


図 5 平板プラウ



α: ひらき角、β: すくい角、γ: むかえ角、δ: おさえ角

図 6 スノープラウ形状の特徴を表す数値

表 2 模型プラウの形状

	α	β	γ	δ
タイプ A	82°	70°	10°	29-48°
タイプ B	73°	55°	10°	-

3.4 測定項目および測定方法

排雪走行時にスノーブレードが受ける力は、大別すると、左右、上下、前後方向の3成分である。これらの力を測定するため、走行台車の模型ブレード取り付け部に3分力計を設置して進行方向に対する左右力、上下力、前後力(排雪抵抗力)を測定し、走行台車に搭載されたロガーに20kHzのサンプリング速度で記録した。また、走行台車に取り付けられている近接センサがトラスビームに設置した鉄棒を通過した際の電圧をロガーへ同時に記録し、鉄棒間隔(50cm)を通過時間で除すことで台車走行速度を計算した。

3.5 試験手順

模型ブレードを低速で走行させることでスノーベッド上の試料の表面をならし、ジャッキによりスノーベッドを昇降させて排雪深の調整を行い、走行台車をスタート位置まで戻し、測定機器の記録をスタートさせる。スノーベッドの初期状態として試料の密度を測定し、試験速度(10~40m/s)を設定した後に排雪走行試験を開始した。

3.6 試験条件

(1) 平板ブレード

平板ブレードでは摩擦抵抗 R_F = 排雪抵抗力 R_T であることより、表3に示す条件で平板ブレードに働く摩擦抵抗 R_F を測定した。

(2) 模型ブレード

表4, 5に示す条件でタイプA, タイプBの模型ブレードに働く排雪抵抗力 R_T' を測定した。このとき、排雪深 h , 前後方向長さ b が幾何学的相似則を満たすようにした。

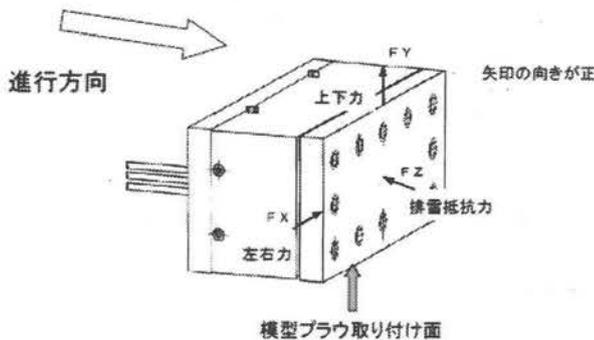


図7 測定に使用した3分力計

表3 平板ブレードの測定条件

前後方向長さ L	300, 600mm
排雪深 h	80mm
走行速度 V'	10, 20, 30, 40m/s

表4 模型ブレード(タイプA)の測定条件

縮尺	1/10	1/6.7	1/5
排雪深 h	20mm	30mm	40mm
前後方向長さ b	200mm	299mm	400mm
走行速度 V'	10, 20, 30, 40m/s		

表5 模型ブレード(タイプB)の測定条件

縮尺	1/10	1/6.7	1/5
排雪深 h	20mm	30mm	40mm
前後方向長さ b	168mm	252mm	336mm
走行速度 V'	10, 20, 30, 40m/s		

4. 試験結果と相似則の検証

4.1 平板の摩擦係数とレイノルズ数の関係式の推定

図8に平板ブレードの試験結果を示す。前後方向長さ L が大きいと摩擦抵抗 R_F も大きくなっていることから平板部に働く摩擦抵抗が測定されていることがわかる。この結果より式(1)と以下の式を用いて平板ブレードの摩擦係数 C_F とレイノルズ数 Re を算出した。

$$S' = Lh \tag{3}$$

$$Re = \frac{LV'}{(\eta/\rho')} \tag{4}$$

ここで、 S' は平板ブレードの着雪面積、 ρ' は模型実験における雪密度、 V' は模型ブレードの走行速度、 η は雪の粘性係数である。篠島は1967年に塩沢の雪について密度100~300kg/m³、温度-2~40℃の範囲で精密な測定を行い、粘性係数 η 、密度 ρ [kg/m³] および温度 θ [℃] の間に

$$\eta = \eta_0 \exp(0.0253\rho - 0.0958\theta) \tag{5}$$

という関係式を導き出している²⁾。ここで η_0 は雪の変形の様式によって値の異なる定数で、本検討では圧縮の時の値である $\eta_0 = 3.44$ [MPa·s] を用い、温度 $\theta = -2$ ℃ で一定とした。縦軸に平板の摩擦係数 C_F 、横軸にレイノルズ数 Re をプロットし、累乗近似曲線を求めて C_F と Re の関係式を推定した結果、

$$C_F = 0.0005746Re^{-0.2215} \tag{6}$$

と推定された(図9参照)。

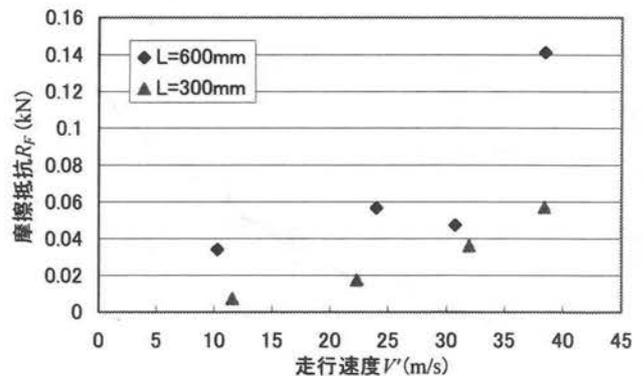


図8 平板ブレード試験結果

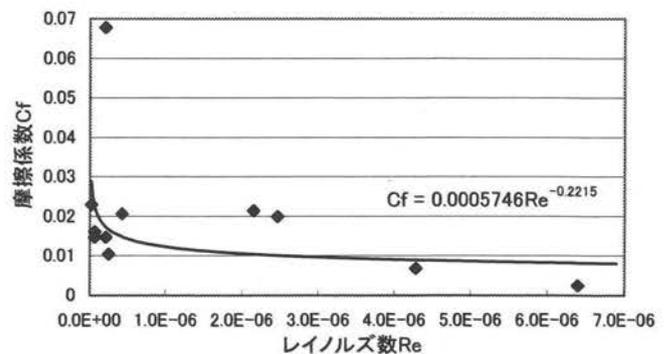


図9 平板の摩擦係数 C_F とレイノルズ数 Re の関係

4.2 相似則を用いた排雪抵抗力評価方法の検討

模型プラウの試験結果を図 10, 11 に示す。タイプ A, B 共に縮尺 1/10 と縮尺 1/6.7 は排雪抵抗力の測定結果を相似則を用いて縮尺 1/5 へ換算したものである。これらが縮尺 1/5 の試験結果の累乗近似曲線上または近傍にプロットされており、スケール効果と相似則の妥当性が確認された。

高橋によれば、東北・上越新幹線営業車用スノープラウ開発時の試験結果は全て測定された排雪力を排雪断面積で除して応力値を計算し、これと速度の関係を調べている²⁾。これは、実スケールの排雪力を見積もる際に実スケールの排雪断面積を乗ずることで換算が容易になるためと考えられる。高橋の方法では、縮尺の違う模型を用いた場合でも速度換算は行われていない。この面積比から実スケールの排雪抵抗力を換算する方法と相似則を用いた排雪抵抗力の換算方法とを比較検討した。その結果を図 12, 13 に示す。

相似則を用いて換算した結果は、多くの場合、面積比を用いて換算した結果と同程度であり、低速域では、両者の違いが見られなかった。しかし、速度 30m/s 以上の高速域において縮尺 1/10, 1/6.7 のタイプ A の模型プラウの試験結果を換算したものは、相似則を用いた結果の方が縮尺 1/5 の試験結果と近かった。面積比を用いた換算では模型縮尺が違っていても約 40m/s の試験速度が上限となってしまう。一方、相似則を用いた場合、低速域で面積比を用いた換算結果と同程度であること、模型縮尺に応じた速度換算を行うため、高速域まで精度よく排雪抵抗力を推定できることから面積比を用いた換算よりも有利であるといえる。

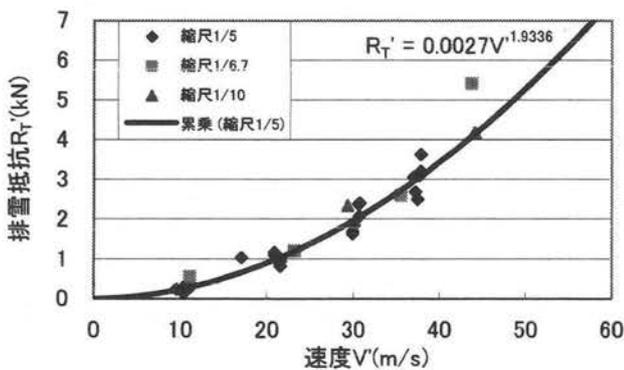


図 10 排雪抵抗力の縮尺 1/5 への換算結果 (タイプ A)

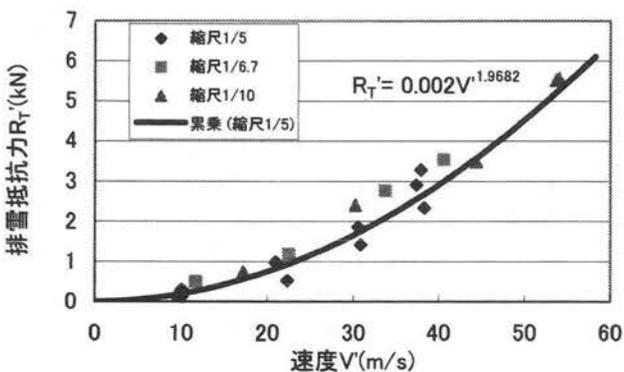


図 11 排雪抵抗力の縮尺 1/5 への換算結果 (タイプ B)

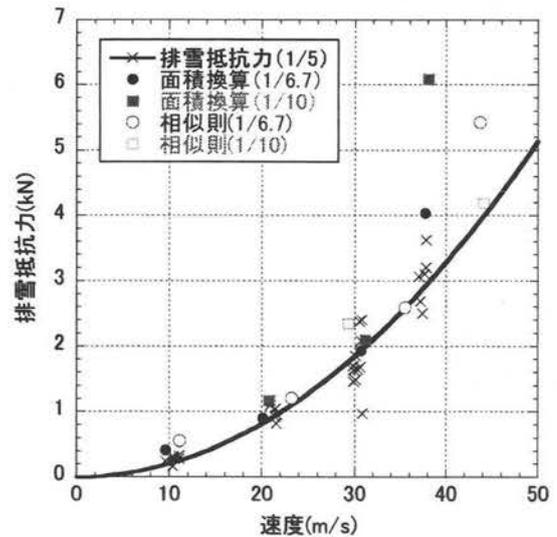


図 12 面積比および相似則の換算結果の比較 (タイプ A)

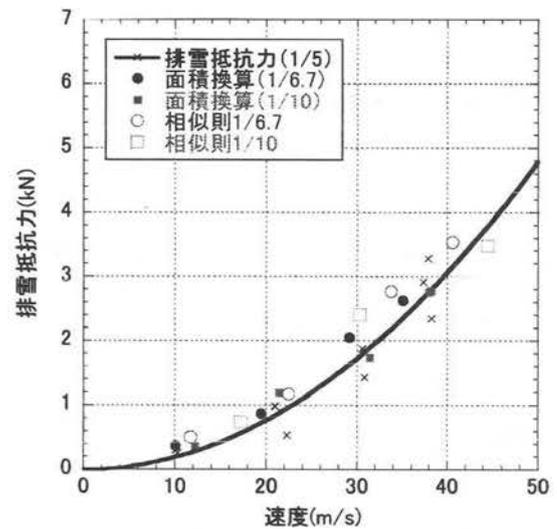


図 13 面積比および相似則の換算結果の比較 (タイプ B)

5. まとめ

相似則にもとづいて、模型実験結果から実車スノープラウの排雪抵抗力を評価する方法について検討し、従来から行われている面積比から換算する手法に比べて、排雪抵抗力を高い精度で計算する手法を考案した。縮尺 1/10, 1/6.7 の模型プラウの排雪抵抗力測定結果を縮尺 1/5 へ本手法を用いて換算した結果、縮尺 1/5 の模型プラウ排雪試験結果の累乗近似曲線上または近傍にプロットされ、これにより、スケール効果と提案手法の妥当性が確認された。

参考文献

- 1) 江守一郎: 模型実験の理論と応用, pp.114-117, 技報堂出版, 1985.
- 2) 前野紀一, 黒田登志雄: 基礎雪氷学講座 I 「雪氷の構造と物性」, pp.168, 1986.
- 3) 高橋脩: 東北・上越新幹線営業車用スノープラウの開発, 鉄道技術研究所速報, No. 87-154, pp.27, 1987.