

# 模型実験によるスノープラウの排雪抵抗力評価方法

中嶋 大智\* 鎌田 慈\*\*

## Method of Evaluating Snow Resistance Working Against Snowplow by Model Experiment

Daichi NAKAJIMA Yasushi KAMATA

In order to investigate the snow resistance working against snowplow, a model experiment has been carried out. A method of evaluating the snow resistance working against full-scale snowplow attached to an actual vehicle by the model experiment based on the similarity rule has been devised. By this method, the resistance against snowplow can be estimated with higher accuracy compared with the conventional calculation method using an area ratio. In this paper, the outline of the model experiment and the devised method is introduced. The experimental results of the resistance against model snowplows of scales 1/10 and 1/6.7 were converted to that of the 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 scale 1/5. Thereby, the scale effect and the validity of this method have been shown.

キーワード：スノープラウ，排雪抵抗，模型実験，相似則，スケール効果

### 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。このスノープラウを新たに開発するにあたっては、形状によって変化するスノープラウへの作用力、排雪性能等を検討する必要がある、これには数多くの実験や数値計算等を行わなければならない。しかしながら、実際の雪で実物大のプラウを用いた試験を数多く実施することは困難であり、かつ雪の運動を表現可能な計算手法も未だ発展途上にある。そこで、実際の現象を再現した模型実験でプラウへの作用力（以下、排雪抵抗力）を測定し、この結果から実スケールの排雪抵抗力を推定することが必要となる。

本研究では、船舶の推進抵抗における相似則を参考に、模型実験から実物大のスノープラウの排雪抵抗力を推定する方法を考案した。そして、この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. スノープラウの推進抵抗における相似則

#### 2.1 船舶の推進抵抗とスノープラウの排雪抵抗

図1に示すように、排雪時にスノープラウが受ける抵抗力は、下部に粘性の高い物体の抵抗を受けながら進む

点で船舶の推進抵抗と類似している。

船舶の推進抵抗では、粘性の影響は船体のごく近くに限定されるのに対し、水面に波を起こす重力の影響は比較的船体から離れた範囲に及ぶ。よって、船の推進に対する全抵抗  $R_T$  は、現象を空間的に2つの部分に分けることで、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<sup>1)</sup>。

スノープラウにおける排雪抵抗力  $R_T$  についても船舶と同様、スノー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  $R_R$  との和と考えて相似則の適用を試みた。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。

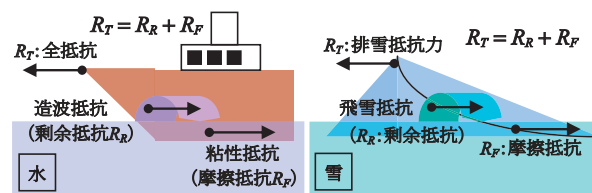


図1 船舶の推進抵抗とスノープラウの排雪抵抗

#### 2.2 模型実験から実車の排雪抵抗力を推定する手順

本研究で考案した相似則を用いて、模型実験結果から実車のスノープラウの排雪抵抗力  $R_T$  を推定する流れを図2に示す。

- ① 模型実験を行い、縮尺  $1/n$  の模型プラウの排雪抵抗力  $R_T'$  を測定する。

\* 鉄道力学研究部（車両力学）

\*\* 防災技術研究部（気象防災）

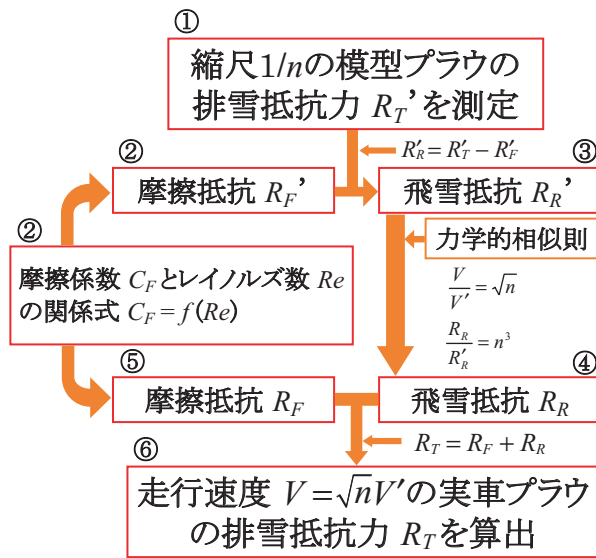


図2 模型実験から実車への換算の流れ

- ② 模型プラウの摩擦抵抗  $R_F'$  は、その接触部分と同じ長さと同面積をもつ平板表面の摩擦抵抗と同じと考える。そこで、本研究では平板プラウを用いて摩擦抵抗  $R_F'$  を測定した。平板の摩擦抵抗係数  $C_F$  と摩擦抵抗  $R_F'$  との関係は、雪密度  $\rho$ 、平板の接触面積  $S'$ 、走行速度  $V'$  を用いて次のように定義される。

$$C_F = \frac{2R_F'}{\rho S' V'^2} \quad (1)$$

平板プラウに対する排雪抵抗力測定実験結果から平板の摩擦抵抗係数  $C_F$  とレイノルズ数  $Re$  の関係式

$$C_F = f(Re) \quad (2)$$

を求め、式(1)を変形し、模型プラウの接触面積  $S'$ 、走行速度  $V'$  としたときの  $R_F'$  を算出する。

- ③ 模型プラウの飛雪抵抗  $R_R'$  は、以下の式のように排雪抵抗力  $R_T'$  と摩擦抵抗  $R_F'$  の差で求められる。

$$R_R' = R_T' - R_F' \quad (3)$$

- ④ 前節で述べたように飛雪抵抗  $R_R$  はフルード数のみの関数であると考えたため、フルード数が等しければ実車プラウの飛雪抵抗  $R_R$  と模型プラウの飛雪抵抗  $R_R'$  の間に力学的相似則が成立する。フルード数  $F_r$

は慣性力  $F_i (= \rho L^2 V^2)$  と重力  $F_g (= \rho g L^3)$  の比の平方根で、次のように定義される。

$$F_r = \sqrt{\frac{F_i}{F_g}} = \sqrt{\frac{\rho L^2 V^2}{\rho g L^3}} = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (4)$$

ここで、 $L$  は実車プラウの長さの代表値である。同様にして縮尺  $1/n$  の模型プラウの長さの代表値  $L'$  を考えるとフルード数  $F_r$  が等しい場合、式(4)より、

$$\frac{V}{V'} = \sqrt{\frac{L}{L'}} = \sqrt{n} \quad (5)$$

となる。よって、速度は  $\sqrt{n}$  倍に換算される。また、力学的相似則が成立しているため、

$$\frac{R_R}{R_R'} = \frac{\rho L^2 V^2}{\rho L'^2 V'^2} = \left(\frac{L}{L'}\right)^2 \left(\frac{V}{V'}\right)^2 \quad (6)$$

となる。式(5)、(6)より実車プラウの飛雪抵抗  $R_R$  と模型プラウの飛雪抵抗  $R_R'$  の間の関係式は以下のようになる。

$$\frac{R_R}{R_R'} = \left(\frac{L}{L'}\right)^3 = n^3 \quad (7)$$

- ⑤ 実車プラウの摩擦抵抗  $R_F$  は、②と同様に式(1)を変形し、式(2)によって算出された  $C_F$ 、実車プラウの接触面積  $S$  と走行速度  $V$  を代入して算出する。すなわち、

$$R_F = \frac{\rho S V^2}{2} C_F \quad (8)$$

- ⑥ 実車プラウの排雪抵抗力  $R_T$  は、以下の式のように摩擦抵抗  $R_F$  と飛雪抵抗  $R_R$  の和として求める。

$$R_T = R_F + R_R \quad (9)$$

このように、現象を空間的に2つの部分に分けて換算す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。

### 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3に示す。本装置は、鉄道総研の塩沢雪害防止実験所構内に設置されており、トラスビーム式のガイドレール内を走行する台車へ模型プ

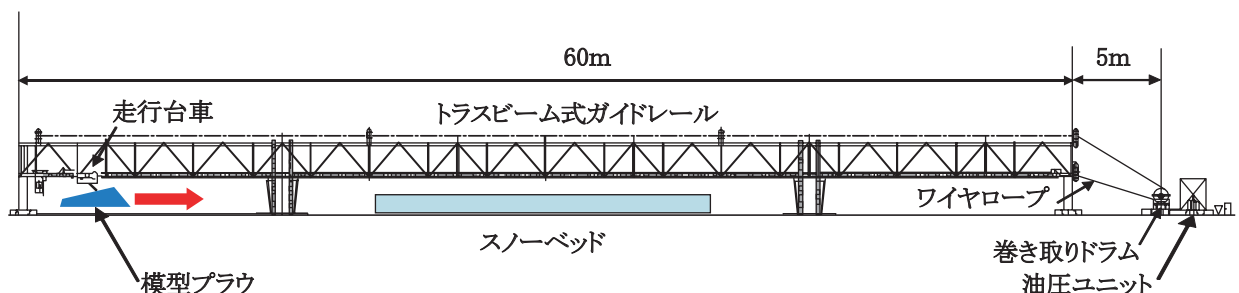


図3 排雪力測定試験装置

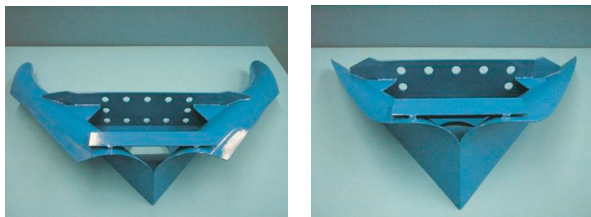
ラウを取り付け、スノーベッドを通過させることで、最高速度40m/sまでの排雪状況を再現することができる。

走行台車はワイヤーロープに牽引されてガイドレール上を走行する。ワイヤー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。走行台車の制動は、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、ワイヤーロープを介して行う。

3.2 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。模型プラウは、既存の新幹線用スノープラウを模倣したもので、タイプA、タイプBの2種類を用いた。縮尺は、1/10、1/6.7、1/5の3種類である。図6にスノープラウ形状の特徴を表す諸元を、表1に試験に使用した模型プラウ諸元の数値を示す。

平板プラウは、雪と接触する部分を平板としたもので、摩擦抵抗  $R_f' = \text{排雪抵抗力 } R_r'$  として平板の摩擦抵抗  $R_f'$  を測定することを目的としている。前後方向長さは、

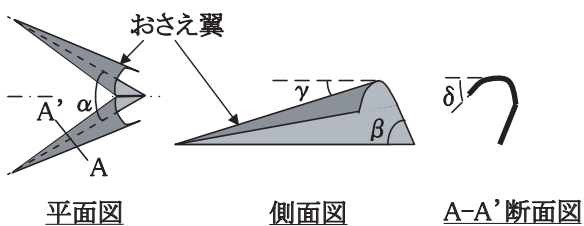


(a) タイプA (b) タイプB

図4 試験に使用した模型プラウ



図5 平板プラウ（側面）



$\alpha$ : ひらき角,  $\beta$ : すくい角,  $\gamma$ : むかえ角,  $\delta$ : おさえ角

図6 スノープラウ形状の特徴を表す諸元

表1 模型プラウ諸元の数値

	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$
タイプA	82°	70°	10°	29-48°
タイプB	73°	55°	10°	-

600mmと300mmの2種類がある。また、先端形状は、走行時の飛雪抵抗が極力小さくなるよう、60°の鋭角となっている。

3.3 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7）。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、雪面からスノープラウ下端までの長さで表される。

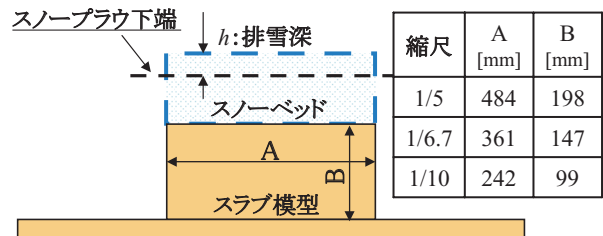


図7 軌道スラブ模型断面

3.4 測定項目および測定方法

排雪走行時にスノープラウが受ける力は、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、走行台車の模型プラウ取り付け部に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のサンプリング周波数で記録した。測定に用いた3分力計を図8に示す。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50cm間隔で設置した鉄棒を通過した際の電圧を記録し、通過時間で除すことで台車走行速度を求めた。

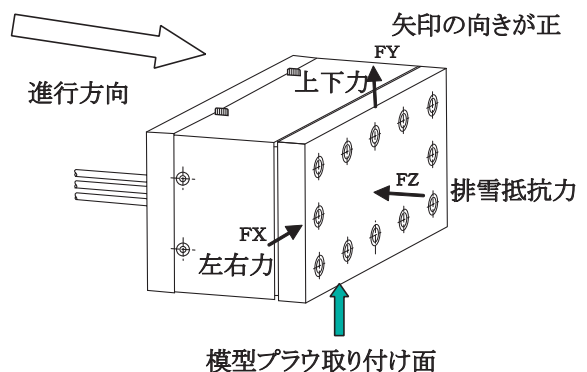


図8 測定に使用した3分力計

特集：防災技術

3.5 試験手順

模型プラウを低速で走行させることで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う。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

3.6.1 平板プラウ

平板プラウでは摩擦抵抗  $R_F'$  = 排雪抵抗力  $R_T'$  であるとして、表2に示す条件で平板プラウに働く摩擦抵抗  $R_F'$  を測定した。

表2 平板プラウの測定条件

排雪深 $h$	80mm
走行速度 $V'$	10, 20, 30, 40m/s

3.6.2 模型プラウ

タイプ A, B の模型プラウに働く排雪抵抗力  $R_T'$  を表3に示す条件で測定した。このとき、排雪深  $h$  は幾何学的相似則を満たすようにした。

表3 模型プラウの測定条件

縮尺	1/10	1/6.7	1/5
排雪深 $h$	20mm	30mm	40mm
走行速度 $V'$	10, 20, 30, 40m/s		

3.7 相似則の検証方法

縮尺 1/10, 1/6.7 の試験結果を縮尺 1/5 へ2.2節の手順で相似則を用いて換算した結果が縮尺 1/5 の試験結果の2次近似曲線上または近傍にプロットされるかどうかで相似則の妥当性を検証した。

4. 試験結果と相似則の検証

4.1 平板プラウの試験結果

平板プラウの試験結果を図9に示す。走行速度が増加すると摩擦抵抗  $R_F'$  は増加した。また、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。この結果より式(1)と以下の式を用いて平板プラウの摩擦係数  $C_F$  とレイノルズ数  $Re$  を算出した。

$$S' = Lh \quad (10)$$

$$Re = \frac{LV'}{(\eta/\rho')} \quad (11)$$

ここで、 $S'$  は平板プラウの接触面積、 $\rho'$  は模型実験における雪密度、 $V'$  は模型プラウの走行速度、 $\eta$  は雪の粘

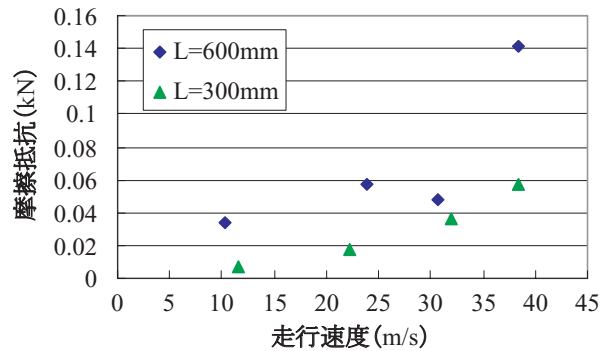


図9 平板プラウ排雪試験結果

性係数である。

篠島は1967年に塩沢の積雪について密度100～300kg/m<sup>3</sup>、雪温 -2～-40℃の範囲で精密な測定を行い、粘性係数  $\eta$ 、密度  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] および雪温  $\theta$  [°C] の間に

$$\eta = \eta_0 \exp(0.0253\rho - 0.0958\theta) \quad (12)$$

という関係式を導き出している<sup>2)</sup>。ここで  $\eta_0$  は雪の変形様式によって値の異なる定数で、本検討では圧縮時の値である  $\eta_0 = 3.44$  [MPa·s] を用いた。雪温  $\theta$  は -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、図10に示すように

$$C_F = 0.0005746Re^{-0.2215} \quad (13)$$

と推定された。本研究では、式(13)から求められる  $C_F$  を式(1)に代入し、摩擦抵抗  $R_F'$  を算出した。

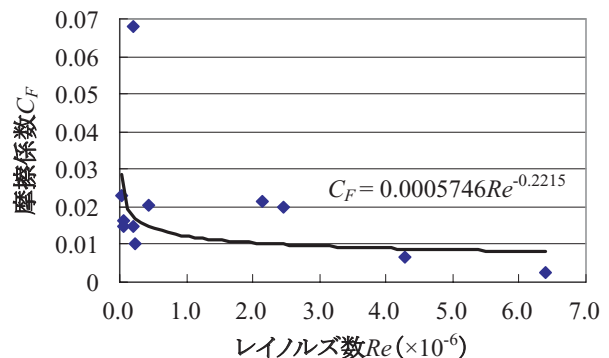


図10 平板の摩擦係数  $C_F$  とレイノルズ数  $Re$  の関係

4.2 模型プラウの試験結果

縮尺 1/10, 1/6.7, 1/5 の模型プラウの試験結果を図11 (タイプ A), 図12 (タイプ B) に示す。タイプ A, B 共にいずれの縮尺においても排雪抵抗力  $R_T'$  は速度の2乗に比例して増加していることがわかる。

4.3 相似則の検証結果

相似則を用いて縮尺 1/10, 1/6.7 の排雪抵抗力  $R_T'$  の

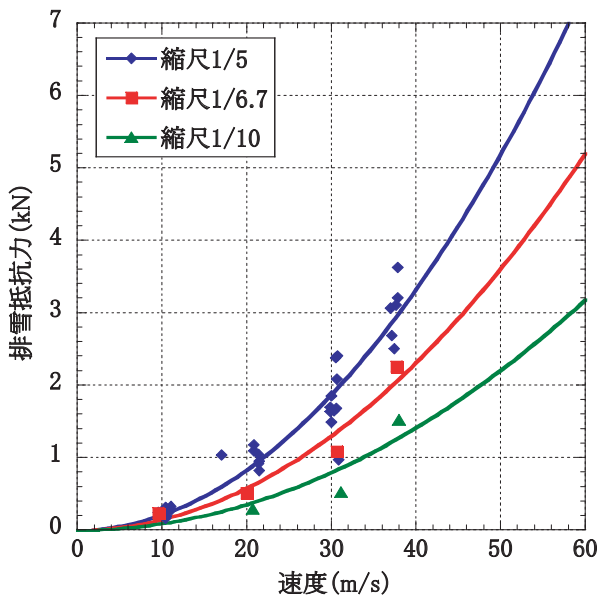


図11 模型プラウ(タイプA)の排雪抵抗力和速度の関係

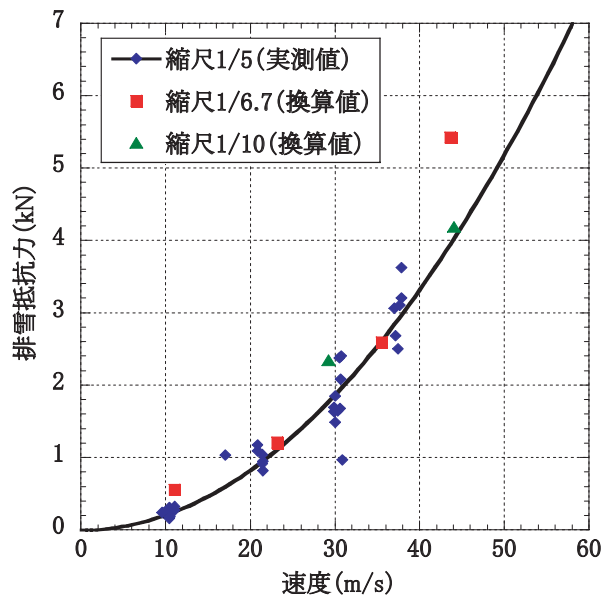


図13 排雪抵抗力の縮尺1/5への換算結果(タイプA)

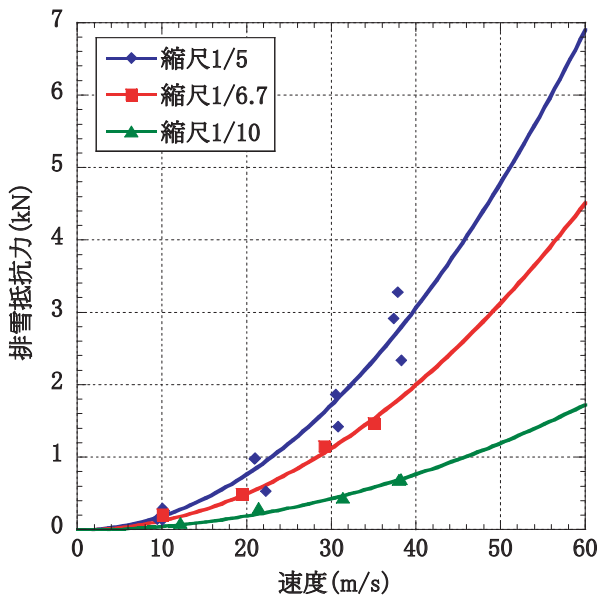


図12 模型プラウ(タイプB)の排雪抵抗力和速度の関係

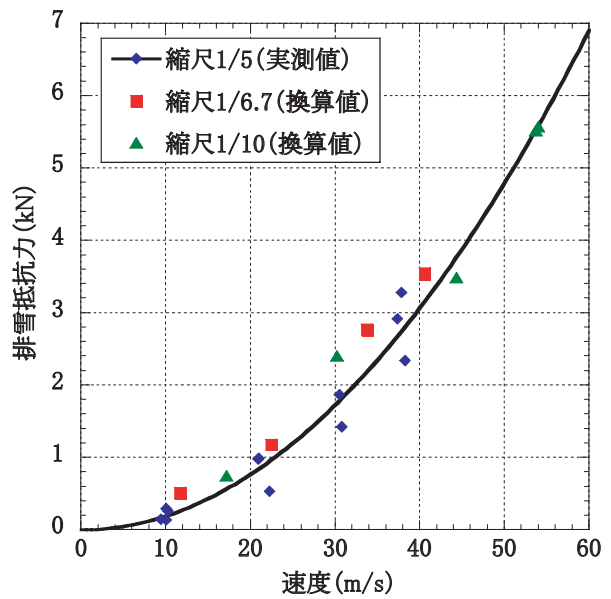


図14 排雪抵抗力の縮尺1/5への換算結果(タイプB)

測定結果を縮尺1/5へ換算した結果と縮尺1/5の排雪抵抗 force  $R_T'$  の測定結果をプロットしたものを図13(タイプA)、図14(タイプB)に示す。いずれのプラウにおいても換算値は縮尺1/5の試験結果の2次近似曲線上または近傍にプロットされており、本研究で考案した相似則の妥当性が確認された。

#### 4.4 排雪抵抗力のスケール換算方法の比較

高橋(1987)は、東北・上越新幹線営業車用スノープラウ開発時に模型試験で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て速度との関係を調べている。そして、実スケールの排雪力を推定する際には、実スケールの排雪断面積を乗ずることで換算していた。この

ため、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。面積比から実スケールの排雪抵抗 force を換算するこの従来の方法と今回の相似則を用いた排雪抵抗 force の換算方法とを比較検討した結果を図15、16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、両者の違いは見られなかった。しかし、速度30m/s以上の高速域においてタイプAの模型プラウの縮尺1/10、1/6.7の試験結果を換算したものは、本研究で考案した相似則を用いた結果の方が従来の面積換算を行ったものよりも縮尺1/5の試験結果と近かった。一方、面積比を用いた換算では模型縮尺が違って速度換算は行われな

特集：防災技術

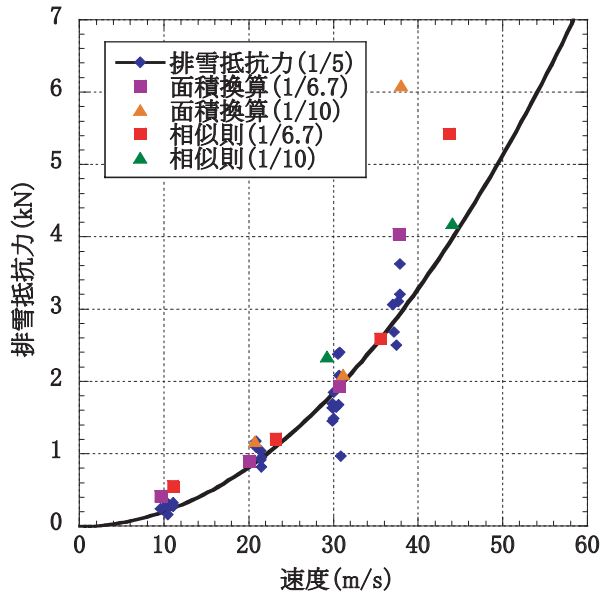


図15 面積比および相似則の換算結果の比較(タイプA)

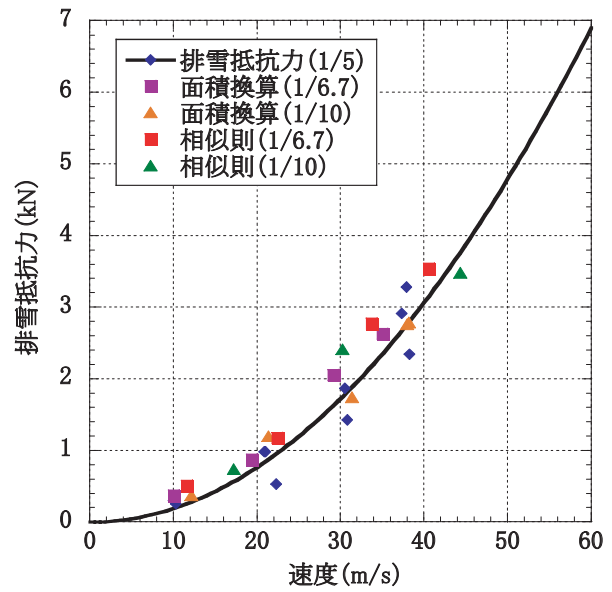


図16 面積比および相似則の換算結果の比較(タイプB)

め、約40m/sの試験速度が上限となってしまいますが、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。

5. まとめ

船舶の推進抵抗における相似則を参考に、模型実験結果から実車スノープラウの排雪抵抗を評価する方法について検討した。縮尺1/10、1/6.7の模型プラウの排雪抵抗を本手法を用いて縮尺1/5の排雪抵抗に換算した結果は、縮尺1/5の模型プラウ排雪試験結果に近く、スケール効果と考案した相似則の妥当性が確認された。また、従来から行われている面積比から実物大プラウの排

雪抵抗を推定する手法に比べて、本研究で考案した相似則を用いた換手法により、高速域まで高い精度で推定することが可能となった。

今後は、新たに開発するプロトタイプスノープラウに対して、模型実験から実物大のスノープラウの排雪抵抗を推定し、その結果を走行シミュレーションやプラウ強度の検討に用いることを予定している。

文献

- 1) 江守一郎:模型実験の理論と応用, 技報堂出版, pp.114-117, 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」, 古今書院, p.168, 1986