

# SES の平水中抵抗簡易推定法について

正員 三島茂徳\*

## A Simple Method of Predicting the Resistance of SES in Calm Water

by Shigenori Mishima, *Member*

### Summary

A simple method to predict the resistance of SES (Surface Effect Ship) operated in calm sea is presented in this paper for the use of initial design of SES. Total resistance of SES is broken down into individual components; sidehull frictional drag, seal frictional drag, cushion pressure wave making drag, aerodynamic drag, appendage drag, residual drag and waterjet inlet drag. To estimate each component, results of model tests and theoretical calculation are utilized. Among them it is shown that the estimation of wetted area of sidehulls and seal and trim angle is of critical importance. Predicted resistance of 30 ton type SES experimental craft shows good agreement with that of full scale trials data. Further study will be necessary to refine the method, especially regarding the residual resistance component.

### 1. 緒 言

SES (Surface Effect Ship) は、双胴型船体の前後にフレキシブルシールを持ち、これらで構成されるエアクション室内にリフトファンによって空気を送ることにより、船体重量の大部分を支持することを特徴とする新形式船舶である。SES は、全周スカート型のホバークラフトと同様空気圧によって船体を浮上させて浸水面積を小さくし、高速航走時に著しく増大する摩擦抵抗を低減しようとする船型であり、ホバークラフトの水陸両用性を水上のみに限ることとし、側壁を有することによって航走安定性も保とうとするものであると言える。また、これらは動的浮力を利用するハイドロフォル艇に比べて大型化が容易であるという利点がある。

SES は、シール、エアクション等従来型の船型にない要素があるため構造が複雑であり、解決すべき技術的課題も多いが、実艇を計画する際に必要な抵抗特性の推定法に関してもまだ確立された方法があるとは言えない状況である。一般的には抵抗成分を分離する方法が用いられるが<sup>1)</sup>、分離のしかたや各成分の求め方など難しい問題がある。

本論文では、初期設計の段階で必要になるおおよその抵

抗特性を把握することを目的として、理論計算結果及び水槽試験結果を用いて抵抗成分分離の方法によって抵抗の推定を試みた。さらに、我が国初の SES である防衛庁技術研究本部の 30 トン型 SES 実験艇「めぐろ」を用いた実海域での推進性能試験結果との比較を行い、推定法の妥当性を検討した。

### 2. 各抵抗成分の推定法

#### 2.1 抵抗成分の分離

SES では、リフトファンを作動させ、エアクションによって船体を浮上させるオンクッション状態と、リフトファンを停止して通常の船舶と同様に排水量分の浮力のみで船体重量を支持するオフクッション状態がある。低速時、あるいは何らかの理由でシールを巻き上げた時等オフクッション状態で航走することも考えられないではないが、通常はオンクッション状態での運用が主であるので、ここではオンクッション状態のみについて考える。また、艇の推進装置としてはウォータージェットが用いられている。

SES のオンクッション状態における全抵抗が(1)式で表されるような各抵抗成分の和で表現できると仮定する。

$$D_T = D_{FH} + D_{FS} + D_W + D_A + D_{AP} + D_R + D_I \quad (1)$$

ただし、

\* 防衛庁技術研究本部第1研究所

- $D_T$ : 自航状態における全抵抗  
 $D_{FH}$ : サイドハルの摩擦抵抗  
 $D_{FS}$ : シールの摩擦抵抗  
 $D_W$ : クッション圧力による造波抵抗  
 $D_A$ : 空気抵抗  
 $D_{AP}$ : 付加物の抵抗  
 $D_R$ : 剰余抵抗

$D_I$ : ウォータージェットインレットの付加抵抗  
 である。なお、抵抗とは通常推進器を持たない船体が航走中に受ける抗力を意味し、実際に船体がこの抵抗に逆らって航走するために必要な推力は一般にはこの抵抗とは異なった値となる。これは、推進器の作動によって船尾の流れが変化するため、船体に作用する流体力が変わるためである。また、ウォータージェットの場合はウォータージェットそのものの付加物としての抵抗成分があると考えられる。本計算においては、ウォータージェットの発生する推力  $T$  と船体抵抗  $R$  との差をウォータージェットインレットの付加抵抗  $D_I$  と定義する。すなわち、付加物としてインレットが持つ抵抗と、吸い込み流れによって誘起される抵抗を合わせて付加抵抗とし、(2)式で表されるように、付加抵抗を含めたものを全抵抗  $D_T$  と呼ぶことにする。

$$T = R + D_I = D_T \quad (2)$$

以下、各抵抗成分について述べる。

## 2.2 $D_{FH}$

サイドハルの摩擦抵抗は Schoenherr の摩擦抵抗係数を用いて(3)式で表す。

$$D_{FH} = \frac{1}{2} \rho V^2 A_w C_{FH} \quad (3)$$

ただし、

$\rho$ : 流体の密度

$V$ : 船速

$A_w$ : サイドハルの浸水面積

$C_{FH}$ : Schoenherr の摩擦抵抗係数

である。

レイノルズ数計算のための代表長さは、オンクッション状態での静止時水線長とした。粗度修正に関しては、 $\Delta C_f$  を決定するためのデータがないため今回は 0 とすることにした。

高速艇の場合、フルード数によってトリム、喫水が大きく変化するので、浸水面積の推定が非常に重要である。浸水面積を精度良く推定するため、実験艇の 1/10 縮尺模型を製作し水槽試験を実施した。模型船を Fig. 1 に示す。この模型船は、前後にナイロン製のシールを有し、浮上用ファンをデッキ上に 20 個配置している。高速になると、抵抗試験で得られた模型船の姿勢が後に述べる実艇の航走姿勢と合わなくなる。ウォータージェットを装着した自走用の模型を用いて自航状態の姿勢を計測すると、実艇の姿勢に近くなることが分かった。しかし、ウォータージェットポン

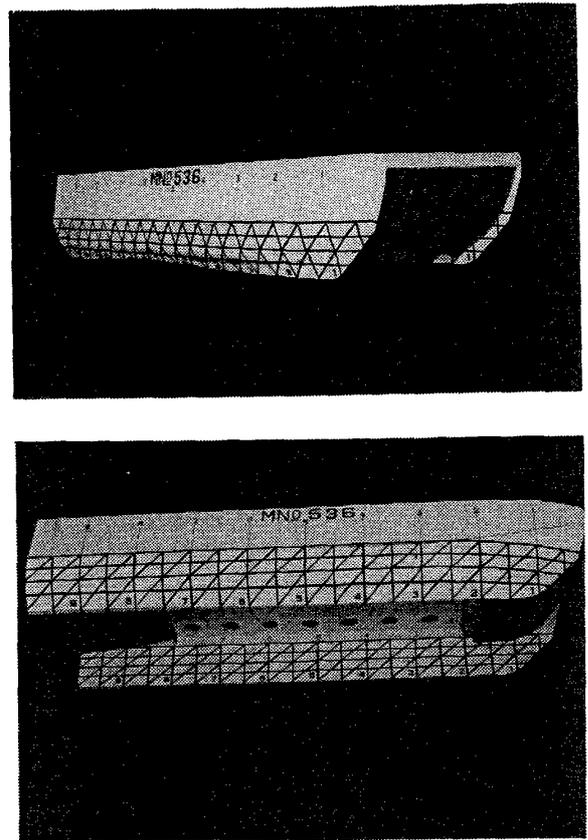


Fig. 1 Model for experiment

プを駆動するモーターの容量の限界から、高速での自航試験が行えなかったため、浸水面積計測試験は実艇のトリムに一致させ、ヒービングを自由に行った。模型船を曳引車で曳航し、定速になった後ある地点で同期信号を受け、正面、側面及び水中に設置したカメラで船体の写真を撮り、サイドハルに描かれた格子からサイドハルの外側、内側の水面を読み取った。試験時には上部構造物及び舵を取り付け、写真を撮ると共に抵抗、姿勢、クッション圧力を計測した。模型重量は 30 kg、クッション圧力は約 30 kg/m<sup>2</sup>とした。撮影した写真の一例を Fig. 2 に示す。

次に、圧力分布が一定速度で水面を航走する場合の波変位を理論計算によって求め、実験と比較することにした。この計算は、Doctors-Sharma の圧力分布について小松が行ったものを使用した<sup>2)</sup>。Doctors-Sharma の分布は、

$$P(x, y) = \frac{1}{4} P_0 [\tanh \alpha(x+a) - \tanh \alpha(x-a)] \cdot [\tanh \beta(y+b) - \tanh \beta(y-b)] \quad (4)$$

と表現される。ここで、

$P_0$ : 最大圧力

$a$ : クッション室長さ/2

$b$ : クッション室幅/2

$\alpha$ : 圧力分布のパラメータ

$\beta$ : 同上

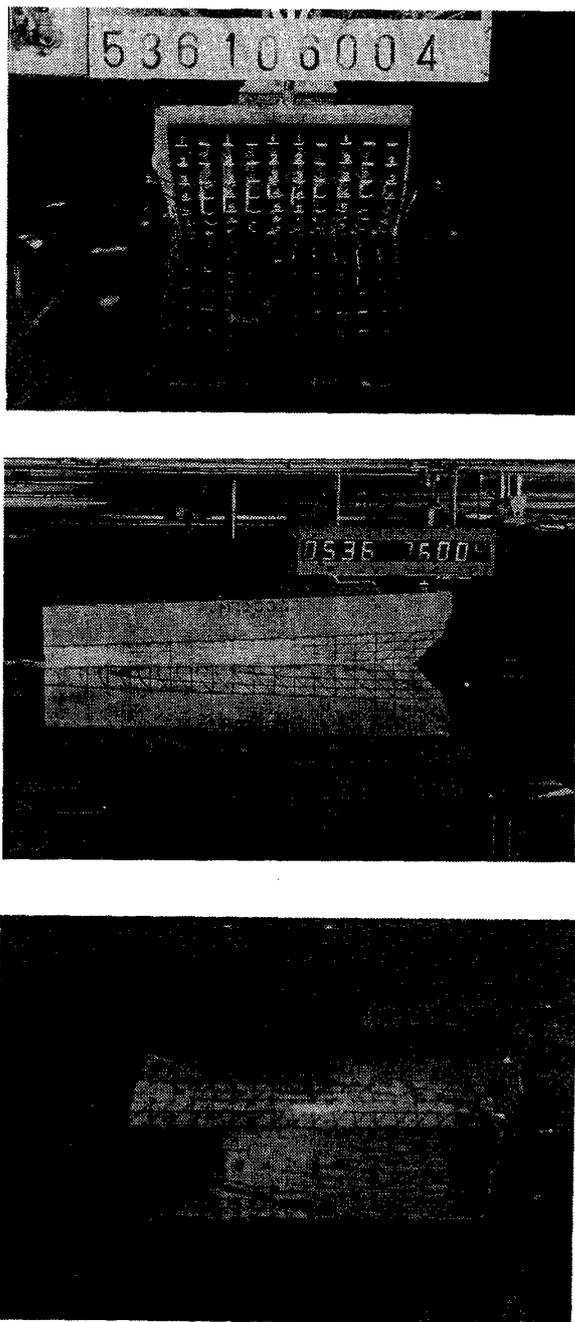


Fig. 2 Forward, side and bottom view of the model towed at  $F_n=1.03$

であり、SESの場合、サイドハルを有することから、幅方向の圧力分布は一様、即ち  $\beta=\infty$  とし、長さ方向については、造波抵抗が実験値とよく合うと言われている  $aa=5.0$  を採用した<sup>3)</sup>。計算方法は文献(2)に詳しいので省略する。サイドハル外側の波形について、実験結果と計算結果を比較したものを Fig. 3 に示す。図中のそれぞれの水平線は船底を表す。この図をもとにサイドハルの外側の浸水面積を計算し、計算値と実験値の比較を行ったものが Fig. 4 である。これは、オンクッション状態静止時の浸水面積で無次元化してある。Fig. 3 及び Fig. 4 から、計算によって浸水

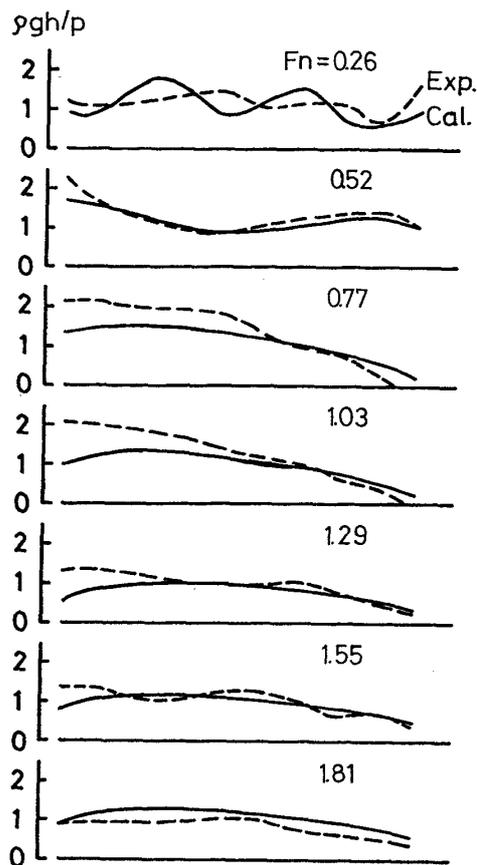


Fig. 3 Comparison between calculated and measured wave patterns along the outside hull

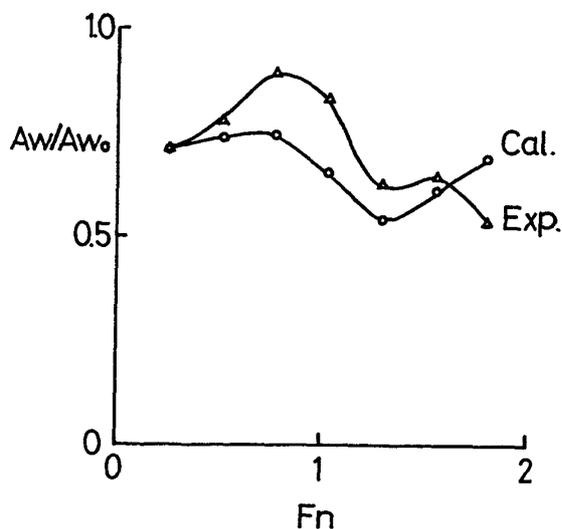


Fig. 4 Comparison between calculated and measured wetted area of the outside hull

面積のおおよその推定であれば可能であると考えられる。波形の違う部分は、計算ではクッション圧力を  $30 \text{ kg/m}^2$  としているのに対し、実験では必ずしも設定圧力になっていないこと、サイドハルの作る波の影響、写真からの読み取りの誤差等に起因するものと思われる。そこで、後に剰余

抵抗を求めるときの摩擦抵抗算定の際には実験結果を用いて浸水面積を求め、実験艇の浸水面積推定には計算結果を用いることとした。なお、観測結果から、内側の波形は外側の波形よりおよそクッション圧力のヘッド分だけ下がっていると考えて良さそうであった。

2.3  $D_{FS}$

シールの抵抗は分離して計測することが困難であり、どのように取り扱うかによって推定値が異なってくることも考えられる。本方法では、シールの抵抗は摩擦抵抗分のみを見積もり、その他の抵抗成分はサイドハルの形状抵抗と合わせて剰余抵抗とした。また、船尾シールからは航走中常に空気もれが生じており、水面との接触はほぼないものと考えられるので、ここではシールの摩擦抵抗  $D_{FS}$  として船首シールのみを考慮し、これを(5)式で表す。

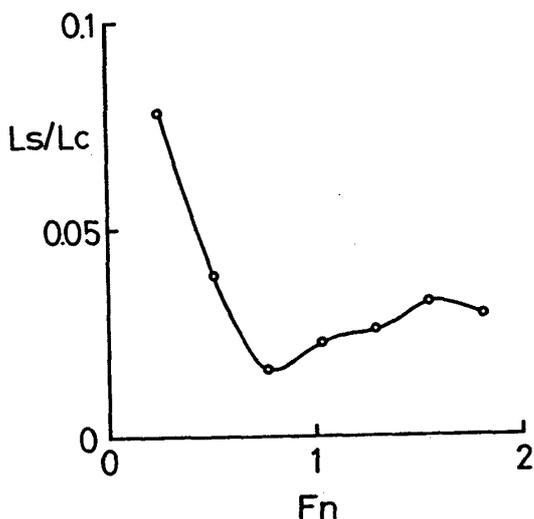


Fig. 5 Measured wetted length of the bow seal

$$D_{FS} = \frac{1}{2} \rho V^2 A_s C_{FS} \tag{5}$$

ここで、

$A_s$ : 船首シールの接水面積 =  $L_s \cdot B_s$

$L_s$ : 船首シールの接水長さ

$B_s$ : 船首シールの幅

$C_{FS}$ : Schoenherr の摩擦抵抗係数

であり、レイノルズ数は  $L_s$  を基準長さとして計算する。 $L_s$  を、Fig. 2 の正面写真から読み取ったものが Fig. 5 である。 $L_s$  はクッション室長さ  $L_c$  で無次元化した。

2.4  $D_w$

クッション圧力による造波抵抗の計算には Doctors の造波抵抗係数  $R_c$  を用いた<sup>3)</sup>。想定した圧力分布は 2.1 で述べた Doctors-Sharma の分布である。この係数はクッション室の長さ幅比  $L_c/B_c$  と、クッション室長さを用いたフルード数の関数である。実験艇の場合、 $L_c/B_c=2.79$  であり、このときのフルード数と  $R_c$  の関係を Fig. 6 に示す。 $R_c$  を用いると  $D_w$  は、

$$D_w = 2R_c \cdot P_c W / (\rho g \cdot L_c) \tag{6}$$

と表される。ここで、

$P_c$ : クッション圧力

$W$ : 船体重量

$g$ : 重力加速度

である。

2.5  $D_A$

空気抵抗は、次式で表される。

$$D_A = \frac{1}{2} \rho_{air} V_w^2 A_F C_{Da} \tag{7}$$

ただし、

$C_{Da}$ : 空気抵抗係数

$\rho_{air}$ : 空気の密度

$A_F$ : 正面風圧面積

$V_w$ : 対流風速

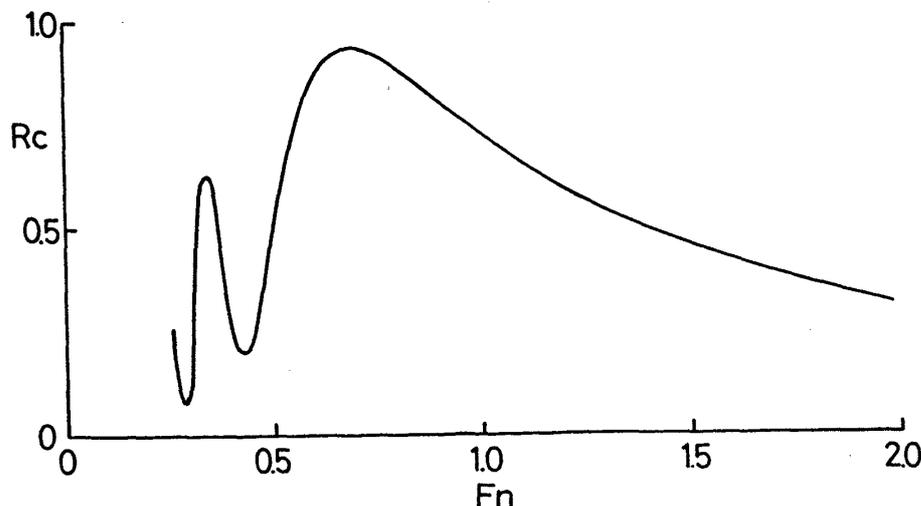


Fig. 6 Doctors' wave resistance coefficient

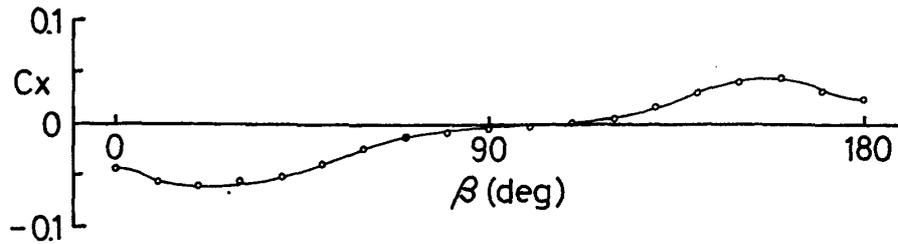


Fig. 7 Aerodynamic drag coefficient obtained by wind tunnel test ( $Re=1.33 \times 10^6$ )

であり、 $C_{Da}$ の値は、1/25縮尺の模型船を製作し、風洞試験を行った結果から求めた。模型船は木製であり、シール部分も、形状を模した剛体となっている。風洞試験結果をFig. 7に示す。試験では模型船と地面の間隔を1mmとして、回転機構の上のせ、風向と船体中心線とのなす角 $\beta$ を $0^\circ$ から $180^\circ$ まで変化させて6分力を計測したが、ここでは船長方向の力の無次元値 $C_x$ のみを示してある。無次元化は模型船の全長 $L_m$ を用いて $0.5\rho V_w^2 L_m^2$ で行ってある。これから、 $\beta=0^\circ$ の時の値を $C_{Da}$ に換算すると0.44となる。

## 2.6 $D_{AP}$

舵の付加物抵抗は付加物抵抗係数 $C_{AP}$ を用いて

$$D_{AP} = \frac{1}{2} \rho V^2 A_{WAP} C_{AP} \quad (8)$$

と表す。ここで、

$A_{WAP}$ : 付加物の浸水面積

$C_{AP}$ : 付加物抵抗係数

である。 $C_{AP}$ は縦舵の1/4.35縮尺模型を用いた、キャビテーション水槽における舵抵抗計測試験結果から求めた。 $C_{AP}$ はキャビテーション数による影響は小さかったが、40kt相当のキャビテーション数(約0.5)での値0.022を用いることとした。なお、この試験は三井造船昭島研究所のキャビテーション水槽にて実施した。

## 2.7 $D_R$

剰余抵抗は、全抵抗からこれまで述べたサイドハルの摩擦抵抗 $D_{FH}$ 、シールの摩擦抵抗 $D_{FS}$ 、クッション圧力による造波抵抗 $D_W$ 、空気抵抗 $D_A$ 、舵抵抗 $D_{AP}$ を差し引いたものとして定義する。これには、サイドハルの剰余抵抗、シールの剰余抵抗が含まれる。すなわち、

$$D_R = R - (D_{FH} + D_{FS} + D_W + D_A + D_{AP}) \quad (9)$$

とする。 $R$ は推進器を持たない状態での抵抗である。こうして求めた剰余抵抗を排水容積の2/3乗ベースで無次元化して剰余抵抗係数 $C_R$ を得る。すなわち、

$$D_R = \frac{1}{2} \rho V^2 \nabla^{2/3} C_R \quad (10)$$

試験結果から求めた剰余抵抗係数をFig. 8に示す。

## 2.8 $D_I$

ウォータージェットインレットの付加抵抗については、

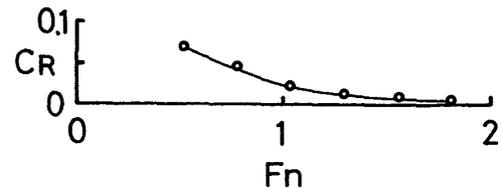


Fig. 8 Residual drag coefficient

文献(4)、(5)に示された水槽試験結果を引用することとした。これによれば、フラッシュ型のインレットでは付加抵抗としてしばしば負の値がみられるなど、平均的には0とみなせるということであり、セミポッド型の場合はインレットが船体から突き出しているため付加物としての抵抗成分が主となり、次式で表される。

$$D_I = \frac{1}{2} \rho V^2 A_I C_{DI} \quad (11)$$

ここで、

$C_{DI}$ : 付加抵抗係数

$A_I$ : ウォータージェットインレットの正面面積

である。ここではインレットの形式がスクープ型であり船体からの突き出しがあることから(11)式を用い、 $C_{DI}$ の値は0.3とした。

## 2.9 実験艇の抵抗予測

前節までに述べた方法を用いて実験艇の全抵抗を推定することを試みた。一例として重量31.1ton、クッション圧力310kg/m<sup>2</sup>の状態について、各抵抗成分を積み上げた結果をFig. 9に示す。この図から分かるように、低速では造波抵抗と剰余抵抗が支配的であり、高速になるにしたがって摩擦抵抗及び舵抵抗が著しく増大することが分かる。特に、舵の抵抗が予想以上に大きく、このような高速艇ではできるだけ付加物を小さくすることが抵抗特性上はきわめて重要であり、ウォータージェットの流向を変えることによる操舵方法の採用も検討する必要があると思われる。また、剰余抵抗成分は通常の排水量型のものの定義とは異なるものであり、今回これ以上の分離はできなかったが、主としてサイドハルの剰余抵抗成分とシールの圧力抵抗成分であると考えられる。また、計測誤差などがあつたとすればこの項にはいることになる。シールに関しては実物と相

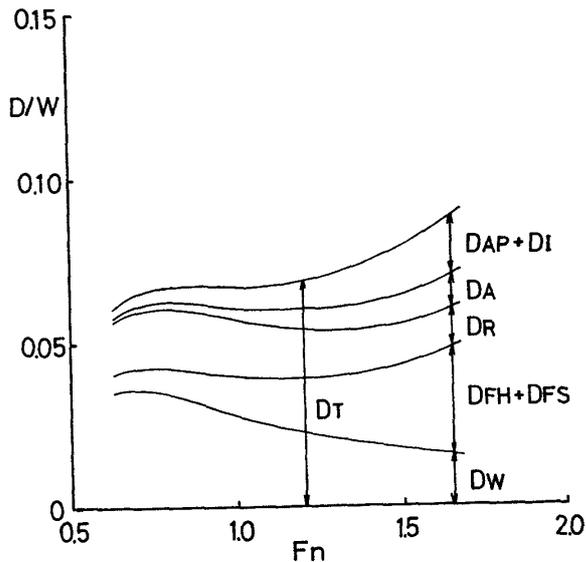


Fig. 9 Drag component breakdown for "MEGURO"  
(S. C. = HR2,  $W=31.1$  ton,  $P_c=310$  kg/m<sup>2</sup>)

似た形状の模型によって試験を行ったものの剛性などのファクターも考えられ、厳密に相似であるとは言えない部分もある。また、異なるタイプのシールを装着した実艦試験も後に実施しており、これらの解析を進めてシールの抵抗成分への寄与を明らかにしていく必要があると考えている。

### 3. 実艇試験

#### 3.1 実験艇について

海上試験を行った 30 トン型実験艇“めぐろ”は、推進器としてガスタービン機関駆動のウォータージェット 2 基を装備している。また、舵は大型 (面積 0.5 m<sup>2</sup>) と小型 (面積 0.2 m<sup>2</sup>) の 2 種類があり、試験目的によってどちらかを装備する。また、着脱可能な船体運動制御用横舵 (面積 0.3 m<sup>2</sup>) を持っている。“めぐろ”の主要寸法を Table 1 に、航走中の様子を Fig. 10 に示す。

#### 3.2 ボラードプル試験

実艦試験の場合、航走中の船体抵抗を直接計測することは不可能である。そこで、計測可能なウォータージェットポンプの流量から推力を求めるために必要な、ウォータージェットノズルの有効断面積を得るため、ボラードプル試験を実施した。

ウォータージェット推力は、海水の密度を  $\rho$ 、船速を  $V$ 、ポンプ流量を  $Q$ 、ジェット流速を  $V_j$ 、トリム角を  $\theta$ 、ノズル有効断面積を  $A_{je}$  とすると、

$$T = \rho Q (V_j \cos \theta - V) \\ = \rho Q \left( \frac{Q}{A_{je}} \cos \theta - V \right) \quad (12)$$

と表される。航走中において、流量  $Q$  は計測可能であるので、 $A_{je}$  が得られれば、推力  $T$  を求めることができる。ボ

Table 1 Principal particulars of "MEGURO"

Length	;L	18.50 m
Breadth	;B	7.50 m
Deck Height	;D	3.40 m
Draft(OFF CUSHION)	;d <sub>off</sub>	1.35 m
Draft(ON CUSHION)	;d <sub>on</sub>	0.35 m
Weight	;W	31.4 ton
Cushion Length	;L <sub>c</sub>	15.35 m
Cushion Breadth	;B <sub>c</sub>	5.50 m
Cushion Height	;H <sub>c</sub>	2.00 m
Cushion Area	;A <sub>c</sub>	84.4 m <sup>2</sup>
Cushion Pressure	;P <sub>c</sub>	330 kg/m <sup>2</sup>

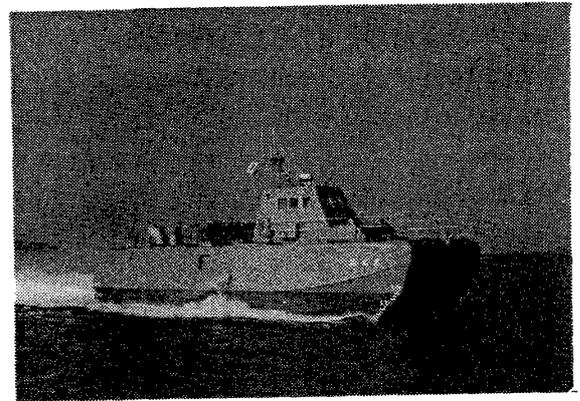


Fig. 10 30 ton type SES experimental craft "MEGURO"

ラードプル状態では  $V=0$  であるから (12) 式は、

$$T = \rho \frac{Q^2}{A_{je}} \cos \theta \quad (13)$$

と書き直すことができる。したがって、ボラードプル状態で推力  $T$ 、流量  $Q$ 、トリム角  $\theta$  を計測すれば、(13) 式によってノズル有効断面積  $A_{je}$  を得ることができる。

試験は三菱重工業下関造船所の岸壁において行った。岸壁のボラードと船尾を長さ約 50 m のロープでつないだ状態でウォータージェットポンプを作動させ、所要の計測を行った。推力  $T$  は船体とロープの間に設置したロードセルによって計測した。流量  $Q$  は、ポンプの入口出口間の差圧とポンプ軸回転数を計測し、ポンプの特性曲線から求めた。オフクッション状態及びオンクッション状態について主機の回転数を約 5,000 rpm から 15,000 rpm まで変化させて計測を行った。以上の方法によって行った試験結果を Fig. 11 に示す。(13) 式から、ノズル有効断面積は最小二乗法を用いて計算した結果 0.008948 m<sup>2</sup> となった。

#### 3.3 推進試験

平水中推進試験は、下関市周辺の瀬戸内海において実施した。主機回転数を 10,000 rpm から 18,000 rpm まで変えてそれぞれの回転数について約 2 分間、船速、航走トリム、ウォータージェットポンプ流量、クッション圧力等の計測を行った。船速の計測には電磁ログを使用した。計測値は

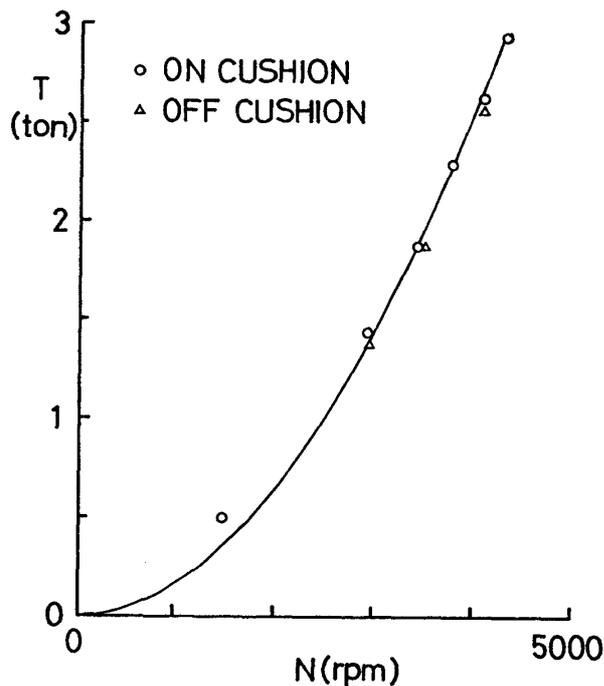


Fig. 11 Thrust vs. waterjet pump shaft rpm ( $V=0$ )

データレコーダを使用して磁気テープに記録し、スペクトルアナライザを用いた時間平均値解析は第1研究所にて行った。計測された諸量から(12)式によって推力を計算し、(1)式による推定計算結果とともにプロットしたものがFig. 12からFig. 14である。図中のS. C.は艇の状態(Ship Configuration)のことであり、 $H$ は艇体、 $R1$ は舵(大)、 $R2$ は舵(小)、 $R3$ は横舵をそれぞれ表す。これらの図から、今回用いた抵抗推定手法は、初期設計の段階等で抵抗特性

を検討する手段としては実用上適用可能であることが分かる。今後はさらに多くの実艦のデータを蓄積し、模型実験との相関を検討していくことが重要であると考えられる。

#### 4. 結 言

本論文は、SESの初期設計段階等において抵抗特性を比較的簡易に推定する方法について、計算結果と実験艇での実海域試験結果との比較から以下の結論を得た。

(1) 実艇の航走姿勢を推定するためには、模型船を自航させて姿勢を計測することが有効であると思われる。ただ

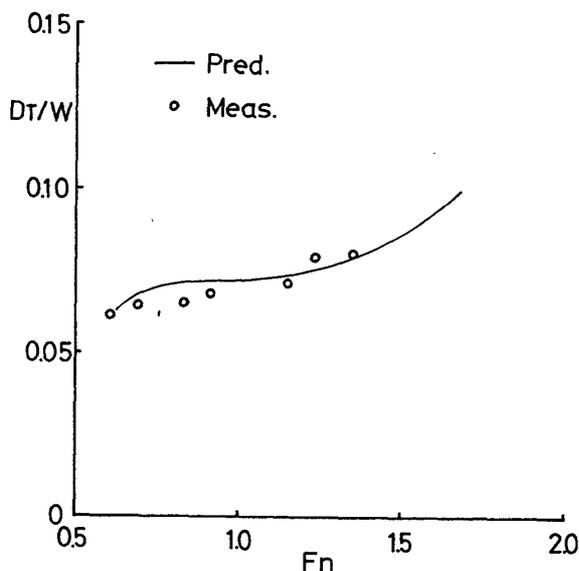


Fig. 13 Comparison between predicted and measured total drag (S. C. = HR2,  $W=31.4$  ton,  $P_c=290$  kg/m<sup>2</sup>)

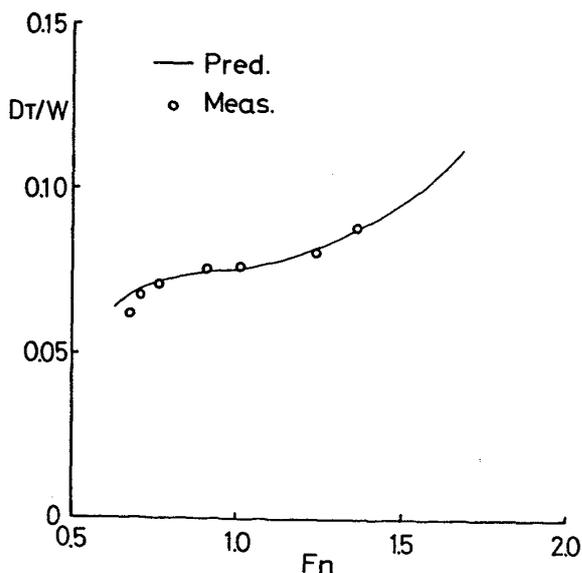


Fig. 12 Comparison between predicted and measured total drag (S. C. = HR1,  $W=31.5$  ton,  $P_c=305$  kg/m<sup>2</sup>)

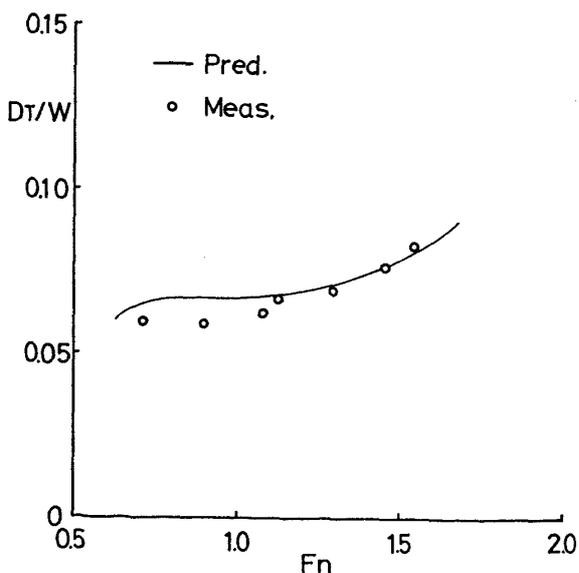


Fig. 14 Comparison between predicted and measured total drag (S. C. = HR 2,  $W=31.1$  ton,  $P_c=310$  kg/m<sup>2</sup>)

し、今回はあまり高速での自航試験が実施できなかったため、今後追加試験を行う必要がある。

(2) 水中カメラで航走中の模型船の写真を撮ることで、浸水面積の推定ができるが、圧力分布が作る波形を計算することによって、より簡単に比較的良好な推定が可能であることがわかった。

(3) 抵抗分離の方法による水平中の抵抗推定計算法によって、実用上適用可能な程度で、SESの抵抗が予測できることが確認された。

今回の研究結果を踏まえて、さらに推定の精度を上げるためには、各抵抗成分の分離の精密化と共に、実艇との相関係数等の検討が必要であると考えている。

### 謝 辞

本研究を行うにあたり、防衛庁技術研究本部第1研究所長村上俊一博士から多くの指導をいただいた。また、模型製作、水槽試験に関しては、第1研究所第4部模型製作室

及び水槽試験室の関係各位の協力を得た。ここに感謝の意を表します。

### 参 考 文 献

- (1) R. A. Wilson, S. M. Wells and C. E. Heber: Powering Prediction for Surface Effect Ships Based on Model Results, J. Hydronautics, Vol. 13, No. 4, October 1979, pp. 113-119
- (2) 小松正彦: SES チャンバ内波形について(第2報), 防衛庁技術研究本部技報 5264(一般), 1987.10
- (3) L. J. Doctors and S. D. Sharma: The Wave Resistance of an Air-Cushion Vehicle in Steady and Accelerated Motion, Journal of Ship Research, Vol. 19, No. 4, December 1972, pp. 248-260
- (4) 柏谷達男: ウォータージェット水取入口付加抵抗の水槽模型試験結果について, 防衛庁技術研究本部技報 5138(一般), 1986.8
- (5) 柏谷達男: セミポット型ウォータージェット水取入口付加抵抗の水槽試験結果(第1報), 防衛庁技術研究本部技報 5270(一般), 1987.11