(昭和 59 年 11 月 日本造船学会秋季講演会において講演)

# 浅水域における操縦数学モデルの検討

# ――とくに舵利きパラメータに対する浅水影響――

正員 藤 野 正 隆\* 正員 石 黒 剛\*\*

A Study of the Mathematical Model Describing Manoeuvring Motions in Shallow Water ----Shallow water effects on rudder-effectiveness parameters-----

by Masataka Fujino, Member Tsuyoshi Ishiguro, Member

#### Summary

In order to clarify shallow water effects on the various parameters necessary to predict the rudder normal force during manoeuvring motions, which are called rudder-effectiveness parameters in this paper, different kinds of captive model tests were extensively carried out for a particular ship. As a result, it is found that the rudder-effectiveness parameters are remarkably dependent on the water depth, and that intimate knowledge of those parameters at a certain water depth is essential for predicting manoeuvring motions at that depth with accuracy. In particular, both  $\kappa$  value and  $\delta_R$  versus  $\beta$  relationship, which denote the increase of rudder inflow velocity and effective rudder inflow angle respectively, are most important.

Prediction of rudder normal force in transient state during manoeuvring motions is not satisfactorily accurate especially in shallow water, although the steady turning characteristics may be predicted well by means of the mathematical model used in this paper.

Lastly, it is shown that the full-scale manoeuvring motion can be successfully estimated from the results of model tests by taking account of the scale effects on the total resistance and the effective wake fraction.

### 1 緒

言

船舶の巨大化に伴い船の操縦性に及ぼす浅水影響が精 力的に研究されるようになって久しい。たとえば拘束模 型による流体力の測定および自由航走模型試験により, 針路安定性が水深の減少とともに一旦は劣化することは あっても、さらに水深が浅くなると著しく針路安定とな ることなどが示された<sup>1,2)</sup>。しかし、浅水域での実船試 験は実験海域の確保が困難であること、実験中の不測の 事故などに対する懸念などから ESSO OSAKA による 詳細な実験が実施されるまで<sup>3)</sup>、本格的な実験はほとん ど行われていなかった。ESSO OSAKA の実船試験を契 機に国際試験水槽会議では主として実船-模型船間の尺 度影響の調査を目的に国際協力研究が提唱され、我国で も多数の機関がこれに参加している。本研究も船型こそ ESSO OSAKA と異なるが、この研究活動の一環として

# 実施されたものである。

浅水域での流体力微係数が深水域と顕著に異なること は衆知のとおりである。しかし, 舵流体力に対する浅水 影響については必ずしも十分明らかになっているとはい いがたい。揚力面の見地から舵力に対する水深影響を検 討した菅・花岡<sup>4</sup>, Hess<sup>5</sup>の研究, 主船体と舵の相互干 渉に対する浅水影響を取扱った藤野・加納・元良<sup>6</sup>の研 究がある程度である。深水域での舵力の表現法について は MMG (日本造船学会試験水槽委員会操縦数学モデル 検討グループ)が詳細に検討し, その有効性が認められ つつある<sup>7</sup>。

本研究では以上の現状を踏まえ,MMGの考え方に基 づき舵流体力を表現する場合,その表現式に含まれる種 々のパラメータ(以下これを舵利きパラメータと呼ぶ) に対する浅水影響を実験的に明らかにすることを第1の 目的とした。次いで拘束模型試験から求められた舵利き パラメータおよび船体流体力のデータを用いて操縦運動 シミュレーションを実施し,自由航走模型試験結果との 比較から操縦数学モデルの有効性を検討した。さらに船

<sup>\*</sup> 東京大学工学部

<sup>\*\*</sup> 石川島播磨重工業(株)船舶海洋事業本部(研究当時,東京大学大学院工学系研究科)

体の直進抵抗および船体伴流に対する尺度影響を考慮し たシミュレーション結果と実船試験結果を比較し,前述 の尺度影響を考慮すれば浅水域での実船操縦性能も大略 推定できることを明らかにした。

#### 2 操縦数学モデル

本論文で使用した操縦数学モデルは、前述のように MMG による数学モデルにならったもので、以下に示 すとおりである。重心のサージ、スウェイ、ヨーの速 度、および角速度をu,v,r、船体質量およびヨー慣性モ ーメントをm、 $I_{zz}$ とすれば、サージ、スウェイ、ヨー の運動方程式は次式で与えられる。座標系・記号などは JTTC での慣用によった<sup>9</sup>。

$$m(\dot{u} - vr) = X_H + X_R + X_P \tag{1}$$

$$m(\dot{v}+ur) = Y_H + Y_R \tag{2}$$

$$I_{zz} r = N_H + N_R \tag{3}$$

右辺各項の下付き添字 H, R, P は主船体, 舵, プロペラ に基づく流体力を意味する。

(1) 主船体に働く流体力

$$X_{H}, Y_{H}, N_{H} はそれぞれ次のように表わす。
X_{H}=X_{\dot{u}}\dot{u}+X(u)+(X_{vr}-Y_{\dot{v}})vr
+X_{vv}v^{2}+X_{rr}r^{2} (4)
Y_{H}=Y_{\dot{v}}\dot{v}+Y_{\dot{r}}\dot{r}+Y_{v}v+(Y_{r}+X_{\dot{u}}u)r
+Y_{vvv}v^{3}+Y_{vvr}v^{2}r+Y_{vrr}v^{2}+Y_{rrr}r^{3}$$

$$N_{H} = N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_{v}v + N_{r}r + N_{vvv}v^{3}$$

 $+N_{vvr}v^2r+N_{vrr}vr^2+N_{rrr}r^3$  (6)

(4) 式右辺の船体直進抵抗は白勢ら<sup>9</sup>にならい次のように表わす。全抵抗係数を  $C_T = -X(u)/(\rho Su^2/2)$  ( $\rho$ : 流体密度, S: 浸水面積) とするとき,

$$C_T = (1+k)C_F + \sum_{i=2}^{n} a_i F_n^{i}$$
 (7)

ただし、相当平板の摩擦抵抗係数  $C_F$  は Hughes の式

$$C_F = \frac{0.066}{(\log R_e - 2.03)^2} \tag{8}$$

によった。またkは形状影響係数である。

(7) 式中の  $a_i(i=3,4,5,6)$  は実験定数であり、 $F_n, R_e$ はそれぞれフルード数  $F_n = U/\sqrt{Lg}$ 、レイノルズ数  $R_e$ =  $UL/\nu$  (L:船長、 $\nu$ :動粘性係数、g:重力の加速度、 U:船速) である。

(2) 操舵による流体力

 $X_{R}, Y_{R}, N_{R}$ の表式は次のとおりである。

$$X_R = -(1 - t_R) F_N \sin \delta \tag{9}$$

$$Y_R = -(1+a_H)F_N\cos\delta \tag{10}$$

$$N_R = -(x_R + a_H x_H) F_N \cos \delta \tag{11}$$

ここで $a_H$  は操舵による付加横力, $x_H$  はその着力点,  $d_R$  および $x_R$  はそれぞれ舵抵抗減少係数,舵位置を表 わす。舵直圧力  $F_N$  は舵直圧力係数勾配  $f_{\alpha}$ ,有効流入 流速  $U_R$ ,有効流入角  $\alpha_R$ ,舵面積  $A_R$  を用いて次式 で定義する。

$$F_N = \frac{1}{2} \rho A_R U_R^2 f_\alpha \sin \alpha_R \tag{12}$$

$$U_{R} = \sqrt{u_{R}^{2} + v_{R}^{2}} \tag{13}$$

$$v_R = v_{RP} - \gamma_R (v + x_R r)$$
(14)  
$$u_R = u [1 - w_{P0} + \tau \{c_{Pv} v' + c_{Pr} r'$$

$$+ (v_{P'} + c_{P} v_{P'} | v_{P'} |)^{2} ] \frac{u_{R0}}{u_{P0}}$$
(15)

(15) 式中の  $u_{R0}/u_{P0}$  は直進時の舵およびプロペラ流入 速度  $u_R, u_P$  の比で,  $u_{R0}, u_{P0}$  はそれぞれ次式で与えら れる。

$$u_{R0} = \frac{\varepsilon u_{P0}}{1 - s} \sqrt{1 - 2(1 - \eta \kappa)s + \{1 - \eta \kappa (2 - \kappa)\}s^2}$$
(16)

 $u_{P0} = u(1 - w_{P0}) \tag{17}$ 

 $\eta$ はプロペラ直径と舵高さの比,  $w_{P0}$ は直進時プロペラ 位置伴流率である。また, (14) 式中の  $v_{RP}$ は直進時あ て舵に相当する横方向流速,  $\gamma_R$  は整流係数, 無次元値 v', r' は v'=v/U, r'=rL/U であり,  $v_P'$  は  $v_P'=v'+$  $x_P'r'$  ( $x_P'$  はプロペラ位置の無次元値)。前述の式中の  $\kappa, \tau, c_{Pv}, c_{Pr}, c_P$  などは実験定数である。なお, (15) 式 右辺 [] 内の表式は松本による<sup>10)</sup>。また,  $\varepsilon$ , s は

$$\varepsilon = \frac{1 - w_{R0}}{1 - w_{P0}} \tag{18}$$

$$s=1-\frac{u_P}{nP} \quad (P: プロペラピッチ)$$
(19)

である。 舵への有効流入角  $\alpha_R$  は

$$\alpha_R = \delta - \frac{v_{RP}}{u_R} - \gamma_R (\beta' - x_R'r') \frac{U}{u_R} \qquad (20)$$

で与えられる。

推力減少係数をt,スラスト係数を $K_r$ とするとき $X_P$  は次式で与えられる。

$$X_P = (1 - t)\rho n^2 D_P^4 K_T$$
 (21)

ただし、n: プロペラ毎秒回転数、 $D_P$ : プロペラ直径、 $K_T(=T/\rho n^2 D_P^4)$ は前進率  $J(=u_P/nD_P)$ の 関数 である。

# 3 舵利きパラメータに対する浅水影響

前述の操縦数学モデルに現われる舵利きパラメータに 対する浅水影響を調べるため以下に述べる拘束模型試験 を行った。

## 3.1 供試模型船

実験に使用した模型船の主要目を Table 1 に示す。 後に述べる自由航走模型試験結果と比較するためのシミ ュレーション計算を行うには主船体に働く流体力測定実 182

Table 1	Principal	particulars	of	the	
	shin-mode				

Ship model				
垂線間長(L)	3. 000 m			
型 幅 (B)	0. 4948 m			
型 喫 水 (d)	0. 1209 m			
排 水 量(清水中)	124. 63 kgf			
$\bigotimes B$	0. 22% <i>L</i> aft			
舵面積 $(A_R)$	80. 197 cm²			
舵アスペクト比 (A)	1. 563			
プロペラ直径 $(D_P)$	86. 2 mm			
ピッチ比	0. 876			
展開面積比	0. 8154			
縮 率	1/89. 333			

験も行う必要がある。本研究では

- (1) 深水域での CMT 試験
- (2) 深水および浅水域での PMM 試験
- (3) 深水および浅水域での直進抵抗試験

などを実施した<sup>11)</sup>。CMT 試験では(4)~(6) 式中, 加速度 お よび 角加速度の係数を除く流体力微係数を定 め, PMM 試験では加速度および角加速度に関連した線 形微係数と  $X_{vr}$  に対する浅水影響を調べた。CMT, PMM 試験の結果は直進抵抗試験より求められた形状影 響係数 k および  $a_i$  とともに Table 2 にまとめた。

# 3.2 舵利きパラメータに対する浅水影響

舵利きパラメータのうち主船体と舵の相互干渉を表わす *a<sub>H</sub>*, *x<sub>H</sub>* に対する浅水影響については著者の一人らが

Table 2	Hydrodynamic	coefficients	of	mathematical	model	describing
	manoeuvring motions					

H/d		∞	2.78	1.5	1. 2	
	$Y_v'$	-0. 239	-0.258	-0. 580	-1.637	
	$Y_{r'}$	0.0646	0.0678	0. 0644	0. 1032	
	$Y_{vvv'}$	-0.894	-1.003	-1.854	-4.322	
	$Y_{vvr'}$	-0.255	-0.182	-1.055	-0. 578	
	$Y_{vrr'}$	-0.517	-0. 496	-0.705	-0. 284	
Hydrodynamic Coefficients Related to Surge, Sway and Yaw Motions	Y <sub>rrr</sub> '	-0.0707	-0.0632	-0. 1150	-0. 0797	
	$N_v'$	-0.0722	-0.106	-0.268	-0.519	
	$N_{r'}$	-0.0426	0. 0435	-0.0620	-0.1028	
	$N_{vvv}{}^{\prime}$	-0.0483	-0.0563	-0. 1112	-0. 1916	
	$N_{vvr'}$	-0.407	-0.740	-2.53	-5.48	
	$N_{vrr'}$	-0. 0317	-0.0335	-0. 0390	-0. 0467	
	N <sub>rrr</sub> '	-0. 0282	-0. 0615	-0. 217	-0. 555	
	$X_{vv'}$	-0.0213	-0.0213	-0.0213	-0.0213	
	$X_{vr'}$	-0. 085	-0. 105	-0. 189	-0. 592	
	X <sub>rr</sub> '	-0.0117	-0.0117	-0.0117	-0.0117	
	$m' - X \dot{u}'$	0. 248	0. 254	0. 274	0. 288	
	$m' - Y \dot{v}'$	0. 360	0. 407	0. 630	0. 923	
	$I_{zz'} - N\dot{r}'$	0. 0211	0. 0227	0. 0296	0.0394	
	Y;'	-0. 0328	-0.0408	-0.0632	-0. 290	
	$N_v'$	0. 0093	0.0086	0.0070	0. 0945	
Total Resistance	k	0. 298	0. 425	0. 598	1.090	
	$a_3$	5. 13	2. $40 \times 10$	8.76×10	$3.26 \times 10$	
	$a_4$	$-8.41 \times 10$	$-3.75 \times 10^{2}$	$-1.89 \times 10^{3}$	3. $81 \times 10^{2}$	
	$a_5$	$4.85 \times 10^{2}$	$2.\ 01\!\times\!10^3$	1. $45 \times 10^4$	$-6.40 \times 10^{3}$	
	<i>a</i> <sub>6</sub>	$-9.58 \times 10^{2}$	$-3.63 \times 10^{3}$	$-3.82 \times 10^4$	3. $43 \times 10^4$	

Propeller open characteristics :

 $K_T = 0.405 - 0.436 J - 0.025 J^2 \quad (J = u_P/nD_P)$ 

Remarks: 1) Results of PMM tests at H/d=2.59 are modified for simulation of H/d'=2.78

2) Non-dimensional quantities are defined as follows :

X', Y'=X, Y/0.5  $\rho L dU^2$ , N'=N/0.5  $\rho L^2 dU^2$ , m'=m/0.5  $\rho L^2 d$ ,  $I_{zz'}=I_{zz'}$ 0.5  $\rho L^4 d$ , etc. 浅水域における操縦数学モデルの検討



Fig. 1 Experimental determination of ruddereffectiveness parameters

行った計算<sup>6)</sup>があるが、主船体、舵ともに矩形平板で近 似した理論であるため、その結果を後述のシミュレーシ ョン計算に用いることはできない。本研究の主眼は舵利 きパラメータに対する浅水影響を極力、具体的に明らか にすることであるから、Fig.1 に示す手順で舵利きパラ メータ決定のための実験を行った。実験時の船速はとく に断らない限り実船換算9ノットで、プロペラ回転数は 9ノット相当の実船自航回転数(以下これを SSP と書 く)および SSP×1.5、SSP×2.25 の3種とした。ま た、水深Hと喫水 dの比 H/d は、1.2、1.5、2.59(た だし自由航走試験は 2.78 で実施されている)、5.88(水 深の影響は無視できるので、以下に引用する図表中では しばしば∞と表記している)である。以下に各試験結果 を略述する。

(1) 舵単独試験

(12) 式から明らかなように、MMG モデルでは舵単 独特性をもとにプロペラの作動、船体運動を加味して舵 への流速  $U_R$ ,有効流入角  $\alpha_R$ を推定し舵力を求める。 したがって、舵単独特性はプロペラ単独特性とともに MMG モデルにおける舵流体力推定の基本である。当 初、Table 1 に示す供試模型船用の舵を用いて単独試験 を実施したが、舵レイノルズ数(代表長さとして舵コー ド長を用いる)の不足のため、舵角 10°付近で失速し舵 直圧力係数勾配  $f_\alpha$ も明確に定め得ない結果となった。 そのため寸法比で 2.5 倍の相似舵を用い改めて単独試験 を実施した。その結果を Fig.2 に示す。図中の実線は 藤井の式<sup>12</sup>)

 $f_{\alpha} = \frac{6.13\Lambda}{2.25+\Lambda}$  (Λ:舵アスペクト比) (22)

を表わす。実測値より定めた  $f_{\alpha}$  は 2.82 で (22) 式に よる  $f_{\alpha}$ =2.51 より約 12% 大きい。この相違は, 舵直 圧力増加を意図した翼型形状の端板が本供試舵の下端に 付加されていることによる。

(2) 舵位置伴流計測試験

船体に舵のみを装備し直進操舵試験を行う。計測され た舵直圧力と舵単独特性から舵直圧力一致法により,舵







Fig. 3 Effective wake fraction of rudder in shallow water

への平均流入流速を求め、舵位置での伴流率 $w_R$ を定めた。結果を Fig.3 に示す。水深が喫水の3倍程度までは $w_R$ はほぼ一定であるが、これより浅くなると急速に舵への流入流速が減少する。

(3) プロペラ位置伴流計測試験

船体にプロペラのみを装備し、直進曳航時のプロペラ 推力を計測する。別途求められたプロペラ単独特性をも とに、プロペラ推力一致法によりプロペラ位置での伴流 率  $w_P$  を求めた (Fig. 4)。図中の  $w_{P0}$  の添字 0 は直進 時伴流率を意味する。

(4) 直進操舵試験

プロペラおよび舵を装備し直進中,操舵により船体に 加わる横力 および 回頭モーメント,舵直圧力を計測す る。舵直圧力の計測結果から舵直圧力一致法により(16) 式中の  $\kappa$  を定めるとともに,  $\kappa$  と $\epsilon$ の積として  $k_x$  を求 めた (Fig. 5)。 $k_x$  はプロペラ増速効果を表わし,通常, 深水域では 0.6 程度であるといわれている。本供試船に おいても深水時 0.6~0.7 であり従来の経験値に近い。 184

日本造船学会論文集 第156号





浅水域での $\kappa$ にはプロペラ回転数による差異が認められるが、 $k_x$ に有意な差異があるとはいいがたい。なお、Fig. 5 には $u_R$ を(16)式とは異なる次式







Fig. 6 Shallow water effects on linear derivatives of rudder forces

$$u_{R} = \varepsilon u_{P} \sqrt{\eta \left\{ 1 + \kappa \left( \sqrt{1 + \frac{8 K_{T}}{\pi J^{2}}} - 1 \right) \right\}^{2} + 1 - \eta}$$

$$(23)$$

で表現した場合の  $\kappa$ ,  $k_x$  をも併記した。 Fig. 5 は H/d が 1.0 に近づくにつれ  $k_x$ は増加し,底の存在によりプロペラ後流 の拡散が減少することを示しているが,  $k_x$  は単純に流速の増加を表わすわけ で はなく,揚力面としての舵が発生する流 体力に対する鏡像効果としての浅水影響 をも含むことに注意が必要である。

本試験で計測された操舵による船体横 力および回頭モーメントから、いわゆる 舵利きの線形微係数  $Y_{s}$ ,  $N_{s}$  に対する浅 水影響を求め Fig. 6 に図示した。 図中 には文献 6) に示した計算法による結果



Fig.7 Influence of drift angle on effective wake fraction of propeller

も示す。 $Y_{\delta}$ ,  $N_{\delta}$  には舵自身に働く流体力のほか, 操舵 により船体に誘起された流体力も含むので,  $Y_{\delta}$ ,  $N_{\delta}$  の 徴係数で浅水影響を議論するのは操舵による流体力発生 の細かいメカニズムを無視することに なり 適当でない が,総合的な舵利きの目安にはなる。実験結果および計 算結果とも, H/d が 2.0 近辺までは舵利きに対する浅 水影響が非常に小さいことを示している。 SSP の場合

の実験結果が計算値と傾向が 異なるが、プロペラ回転数が 高いほど舵利き微係数に対す る浅水影響が大であることも 実験値と計算値の対応がよい。Fig.3に示した舵位置で の流速の水深の減少に伴う急 速な低下を考慮すると、Fig. 6の結果は舵利きに対するプ ロペラ増速効果がいかに大き く、舵利きを正確に推定する にはプロペラ増速効果をどの ように正確に算定するかが重 要であるかを示している。

(5) 斜航操舵試験

舵への流入流速および有効 流入角に対する船体運動の影 響を調べるため斜航操舵試験 を実施した。計測された舵直 圧力とプロペラ推力より, 舵 直圧力が0となる舵角  $\delta_R$  と プロペラ推力一致法より斜航 中のプロペラ流入流速 up を 求め, (15)式中の実験定数 7, *c*<sub>P</sub>, *c*<sub>Pv</sub> を求めた。斜航時の プロペラ位置伴流率 wp と直 進時の伴流率 wPo の比 wP/ wPoをFig.7 に示す。本結果 によれば wp/wpo の値に対す るプロペラ回転数の影響は顕 著でないので, プロペラ回転 数の相違は考慮せず各水深ご とに前述の実験 定数を求め た。図中の曲線が(15)式に よるモデル 化の結果を表わ す。水深の減少とともに、プ ロペラ流入流速に対する斜航 運動の影響が強く現われるこ とがわかる。

 $\delta_R$ の斜航角 $\beta$ による変化

を Fig.8 にまとめて示す。 小瀬ら<sup>13)</sup> によっても実験的 に明らかにされたように、  $\delta_R$  は  $\beta$ の正負に対して非対 称となる。 H/d=1.2 の場合を除き、  $\beta=0$  付近のある 範囲で  $\delta_R$  はほぼ一定となるが、 この範囲の外側では  $\delta_R$  は  $\beta$  とともに直線的に変化し、その勾配はプロペラ 回転数の増加に伴い減少する傾向がある。 (20) 式によ れば  $\delta_R$  は次式



Fig. 8 Extinction angle of rudder normal force,  $\delta_R$ , in shallow water

186



Fig. 9 Shallow water effects on increase of lateral force caused by rudder deflection

$$\delta_R = \frac{v_{RP}}{u_R} + \gamma_R \beta \frac{U}{u_R} \tag{24}$$

で表わせるが、前述の $\beta$ に関する非対称性から(24)式 でモデル化せず、図中の実線をそのまま後述のシミュレ ーション計算に使用することとした。すなわち、図中の 実線を $\delta_{R'} = f(\beta')$ とするとき、斜航角 $\beta'$ を次式

$$\beta_{R}' = \beta' - x_{R}'r' \tag{25}$$

で舵位置での横流れ角  $\beta_R'$  に置き換え,有効流入角  $\alpha_R'$ を

$$\alpha_{R}' = \delta' - f(\beta_{R}') \tag{26}$$

とした('は無次元値を表わす)。

舵直圧力と同時に計測された船体横力と回頭モーメントから操舵によって船体に誘起された流体力の大きさ $a_H$ と操舵による流体力の着力点 $x_R + a_H x_H$ を求め, Fig. 9, 10 に示す。 $H/d = \infty$ , 2.59 では $a_H$ の $\beta$ によ



Fig. 10 Point of application of rudder turning force

る明確な差異は明らかでないが、H/d=1.5、1.2では $\beta$ の増大に伴い  $a_H$ が増加する。浅水域での  $a_H$ が  $\beta$  とともに増加することは、矩形平板モデル近似による理論計算によっても、すでに明らかにされている<sup>6</sup>。 $a_H$ の値自身も水深の減少とともに増加し H/d=1.2 では深水域における値に比べ著しく大きい。この傾向も矩形平板近似による計算結果と符合する<sup>6</sup>。 Fig. 9、10 の図中の点線は後述のシミュレーションに使われた近似表式である。

# 4 操縦運動シミュレーションと自由航走模型 試験

数学モデルの有効性を検証するため、前述の数学モデ ルと実験によって求められた流体力諸係数を用い旋回運 動および zigzag 運動のシミュレーションを実施し、供 試模型船による自由航走試験結果と比較した。なお、実 験は東京大学船舶航海性能試験水槽で行った。

4.1 操縦運動シミュレーション

シミュレーションには先の2に述べた数学モデルを用い, 舵抵抗減少係数は0.2とした。主船体に働く流体力のうち線形項については PMM 試験により与えられているが, 非線形項については深水時以外は計測結果がない。浅水時の非線形微係数は貴島による ESSO OSAKA 船型の浅水域模型試験結果<sup>14)</sup>から次のように推定した。 貴島が用いている流体力数学モデルは本論文とは異なり, 2次式表現である。そこで, 貴島の与えた流体力微 係数のデータを用い船体横力および回頭モーメントを計算し, この結果にあらためて本論文の3次多項式表現を あてはめ,非線形微係数に対する浅水影響を求め直し, これをそのまま本供試船に適用して浅水域での非線形微 係数を推定した。

一方、 x方向非線形微係数のうち  $X_{vr}$  は本供試模型 による PMM 試験より求めたが、 $X_{vv}, X_{rr}$  は深水時と 同一と仮定した。これらシミュレーションに用いた諸係 数は前掲の Table 2 にまとめた。

プロペラ推力減少係数 t は次のような簡易法により求 めた。模型船を実船換算 9 ノット相当の速度で曳航する とき、曳航装置より船体に加える x 方向力 X, プロペラ 推力Tを計測する。この速度 U での船体抵抗 X(U) は 既知であるから, t を

X+X(U)+(1-t)T=0 (27) より求める。tはプロペラ荷重度により微妙に異なる が、シミュレーションでは簡単のため、Fig. 11の平均 線で代表した。

操縦数学モデルの数値積分にはRunge-Kutta-Gill 法を用い、時間間隔は模型船で $\Delta t = 0.05$  sec,後述の実 船では $\Delta t = 0.5$  sec とした。また、 $\delta_{R}' = f(\beta')$ 特性は





各水深での模型自航回転数が SSP×1.5 に最も近いことから一貫して SSP×1.5 に対する特性で代表した。

#### 4.2 シミュレーション結果と実験結果の比較

浅水実験は水槽内の水位を調整して行った。水槽底面 の水平度の精度は本供試模型の寸法に比べ十分とはいい がたく、試験水域でおよそ 5 mm 程度の凹凸があった。 実施した試験は旋回試験と変形 Z 試験であるが、水面の 広さの制約から変形 Z 試験における 操舵量は通常に 比 べ、舵切返し方位角の大きさの割に著しく大きい。初期 船速はいずれも実船換算 9 ノットの速度である。

## (1) 旋回試験

定常旋回状態に達したのちの無次元角速度 r'と速度 低下率 U/U。を Fig. 12 に示す。H/d=2.78 でのシミ ュレーション (H/d=2.78 での 拘束模型試験は実施し ていない。他の水深でのデータより H/d=2.78 の流体 力諸係数を推定した)による r' が実験値に比し若干過 大であるほかは、シミュレーションと実験の結果の対応 は良好である。 Fig. 13 に示した 定常旋回中の舵直圧力 の実測値とシミュレーション結果の対応はよいが、定常 状態に至る過渡状態での両者の対応は必ずしもよくない (Fig. 14 参照)。*H*/*d*=∞ では操舵直後のピーク値も含 め、全過程での一致度は良いが、H/d=1.2 の場合、操 舵直後の実測のピーク値はシミュレーション結果のよう に鋭い立ち上がりを示さず、その後の時刻歴にも脈動が 見られる。 この傾向は H/d=1.5 でも見られた。 ピー ク値に達した後の脈動は、1回の航走後、長時間、水槽 内の水に残る強い残流がその原因の一つであると考えら れる。一方、浅水域での操舵直後の舵力のピーク値がシ ミュレーション結果より著しく小さいことの理由につい ては,現在のところ推測の域を出ない。Fig.8 に示した



Fig. 12 Turning rate and speed drop during steady turning in shallow water







Fig. 14 Rudder normal force in transient state during turning manoeuvre

H/d=1.2 での  $\delta_R = f(\beta)$  特性によれば原点付近の  $\delta_R$ の変化が、シミュレーションに用いた直線近似では表わ しきれていない。すなわち、実測では直進から極くわず か横流れ角がつくと、 $\delta_R$  は図中の直線近似と異なり不 連続的に大きくなる。しかし、仮にこのことを考慮に入 れても操舵直後のピーク値がシミュレーション結果の約 1/2 にまで減少することは説明できない。この点につい ては今後さらに検討する必要がある。

(2) 変形Z試験

Fig. 15, 16 に  $H/d = \infty$ , 1.2 の場合につき,変形 Z 試 験の実験結果とシミュレーション結果を比較して示す。 方位角,旋回角速度の振幅は実験,シミュレーションで 比較的よく対応しているが,シミュレーションによる各 変数の時刻歴は実測結果より時間的に進んでいる。これ は図から明らかなように、シミュレーションによる舵直



Fig. 15 Comparison of predicted modified zigzag manoeuvre with observed one in deep water





圧力が実測に比し大きく,船の回頭が実測より早く発達 するためである。 $H/d = \infty$ では舵切返し直後の舵直圧 力のピーク値は実験とシミュレーションで良く一致して いるが,ピーク後の舵直圧力の定量的一致度は良くな い。H/d = 1.2では舵切返し直後の舵直圧力のピーク値 の対応も悪い。とくに直進状態からの最初の操舵直後の ピーク値の対応が悪い。

以上,旋回試験と変形 Z 試験についてシミュレーショ ン結果と模型試験結果を比較したが,いずれの場合も浅 水域での舵直圧力の一致度が不十分である。今後,浅水 域航行中の舵近傍の流場を詳しく調査し,舵直圧力のモ デル化をさらに検討する必要があろう。

4.3 舵利きパラメータの操縦運動に及ぼす影響

前節までの検討の結果,操舵に対する 過渡応答のう ち舵直圧力の シミュレーションには改良が必要である が、定常旋回特性についてはシミュレーションと実験の 結果は良好に一致することが示された。しかし、たとえ 浅水域での定常旋回特性をシミュレーション するにし ても, 種々の水深に対して舵利きパラメータを実験的に 求めておくことは煩雑な感を否めない。主船体に働く流 体力についてはなんらかの方法で浅水影響を考慮すると しても、舵利きパラメータについては深水時の値が利用 できれば実用上便利である。舵利きパラメータのうち  $\kappa, a_H, x_H, w_P$  および  $\delta_R = f(\beta_R)$  の特性をそれぞれ深水 時の値で代用し、浅水域の定常旋回特性を予測した結果 を Fig. 17, 18, 19 に示す。 Fig. 17 には κ, δR を変え た結果のみが示されているが、他のパラメータ  $a_H, x_H$ , wp を変えた結果は変えない場合とさして異ならないこ とから記載を省略した。Fig. 18 についても同様である。 当然の結果とはいえ、水深が浅くなればなるほど、その 水深における舵利きパラメータを使用しない定常旋回特 性の予測結果は実験結果と合わない。本供試船では、と



Fig. 17 Steady turning characteristics predicted by substituting rudder-effectiveness parameters in deep water for those in shallow water (H/d = 2.78)



Fig. 18 Steady turning characteristics predicted by substituting rudder-effectiveness parameters in deep water for those in shallow water (H/d =1.5)



Fig. 19 Steady turning characteristics predicted by substituting rudder-effectiveness parameters in deep water for those in shallow water (H/d =1.2)

くに  $\kappa$  の値と  $\delta_R$  特性が予測結果に与える影響が大きい。

# 5 実船性能の推定

拘束模型試験結果に基づく操縦数学モデル構築の最終 目標はシミュレーション計算による実船性能の推定にあ る。本節では本供試船型の実船試験結果(深水域での旋 回およびZ試験, H/d=1.8の浅水域でのZ試験)を前 述の操縦数学モデルに実船-模型間の尺度影響を考慮し たシミュレーション結果と比較し, モデルの有効性を検 討する。

模型船の結果から実船性能を推定するために考慮した 尺度影響は次のとおりである。

(1) 実船の直進時船体抵抗を三次元外挿法で推定する。

(2) 直進中の実船のプロペラおよび舵位置の伴流率
 *w<sub>R0</sub>*, *w<sub>P0</sub>* を矢崎らの方法<sup>15</sup>)により推定する。

(3) 線形流体力徴係数として実船の自航回転数に相当するものを用いる。

したがって、プロペラ単独性能に対するレイノルズ数の 相違の影響、実船に対する摩擦抵抗の粗度修正などは考 慮していない。

以上の方法により深水域での定常旋回性能をシミュレ ーション計算で求めた結果を実測値と比較し Fig. 20 に 示した。本図には前述の(1),(2),(3)のいずれか を考慮せずに予測した結果も示す。いずれも実船試験結 果との一致度が悪く,前述の尺度影響を考慮すれば模型 船の特性から実船性能がほぼ満足できる精度で推定可能 であることを確認した。

Fig. 21 には 5°-5°Z 試験, Fig. 22 には 20°-20°Z 試 験の時刻歴を示す。 20°-20°Z 試験では シミュレーショ ンによる前進速度低下が実測よりも顕著であることを除 けば, シミュレーションと実測による運動の対応は良好 である。これに対し 5°-5°Z のシミュレーション結果で は右舵と左舵の利きに著しい相違があり, 左舵の利きが 悪い。Fig. 8 に示した  $\delta_R = f(\beta)$  特性の非対称性のた め小舵角では左舵の利きが右舵に比較し明らかに劣るこ とになる。これより, 前述の 5°-5°Z のシミュレーショ ン結果に左右舵の利きの相違が生じたものと思われる。



Fig. 20 Steady turning characteristics of full-scale ship in deep water (approach speed ≑20.9 kts)









Fig. 22 20°-20° zigzag manoeuvre of full-scale ship in deep water (approach speed ≑ 15 kts)



Fig. 23 20°-20° zigzag manoeuvre of full-scale ship in shallow water  $(H/d=1.8, \text{ approach speed} \pm 15 \text{ kts})$ 

一方, 5°-5°Z の実船試験結果には左舵, 右舵の利き に顕著な差異は見られない。模型船に見られた $\delta_R = f(\beta)$ の非対称性が高井の流場観測<sup>16)</sup>で観察された舵前 方の船体からの縦渦と, プロペラ回転流との干渉に基因 すると考えるならば $\delta_R = f(\beta)$ 特性になんらかの尺度 影響が予想される。5°-5°Z 試験の実船試験結果とシミ ュレーション結果の相違をこの観点から検討する必要が あろう。

Fig. 23 には H/d=1.8 での  $20^{\circ}-20^{\circ}Z$  試験の時刻歴 を示す。2 山目以降の一致度が若干悪く、シミュレーシ ョンによる時刻歴の進行が実測結果よりも遅れ気味であ るが、大略の特性は捉えているといってよい。

以上,拘束模型試験により得られた流体力データを基礎に,本節冒頭に述べた尺度影響を考慮すればシミュレーション計算によって,小舵角での zigzag 運動を除き 実船の操縦運動が大略推定可能であることがわかる。

## 6 結 論

以上の検討の結果、得られた結論を以下にまとめる。

(1) 舵利きを表わす各種パラメータに対する浅水影響は顕著であり、数学モデルを用い操縦運動のシミュレ ーションを行うには、これら各パラメータの水深に伴う 変化を考慮する必要がある。本供試船の場合、プロペラ による増速効果を表わす $\kappa$ および舵への有効流入角を定 める  $\delta_R = f(\beta)$ 特性が浅水域での定常旋回特性に与え る影響が大きい。

(2) 浅水域での定常旋回特性についても本論文で用 いた操縦数学モデルで,かなり良い推定ができるが,水 深が浅い場合の非定常運動中の予測,とくに舵直圧力の 予測精度には改良の余地がある。

(3) 実船の定常旋回特性および大舵角での Z 操舵に 伴う操縦運動については、本論文で使用した通常の尺度 影響修正法を考慮すれば大略推定できる。しかし、小舵 角での Z 試験ではシミュレーション結果と実測結果との 対応が悪い。舵直圧力のモデル化そのものに検討の余地 があるが,船尾の舵周囲の流場に実船と模型船間の相違 があり,これが舵直圧力の推定精度を悪くしている可能 性がある。この点についても今後の検討が必要である。

本研究をすすめるにあたり、東京大学 伊田力、小柳 雅志郎助手、和田哮、石井裕司、川村武男技官に実験実 施に際し多大の助力をいただいた。また、昭和 57 年度 卒業研究として北浦新一、森輝海の両氏が本研究の一部 を分担された。冒頭にも述べたように本研究は、ESSO OSAKA に係る国際協力研究に対する国内組織(日本造 船学会試験水槽委員会ワーキング・グループ JAMP)の 研究活動の一環として実施された。研究途上で藤井斉 JAMP 主査ほかの委員の方々から貴重な助言・指摘を いただいた。以上の多数の諸氏に心から深甚の謝意を表 するものである。

#### 参考文献

- 小関信篤,山内保文,松岡史香,山崎芳嗣:旋回 性に及ぼす浅水影響に関する模型試験,造船協会 論文集,第117号(1965).
- Crane, Jr., C. L.: Maneuvering Trials of 278000-DWT Tanker in Shallow and Deep Water, Trans. SNAME, Vol. 87 (1979).
- 4) 菅 信,花岡達郎:旋回性におよぼす浅水影響の 計算,造船協会論文集,第119号(1964).
- Hess, F.: Rudder Effectiveness and Course Keeping Stability in Shallow Water — a Theoretical Model—, Int. Shipbldg. Prog., Vol.24, No. 276 (1977).
- 藤野正隆,加納敏幸,元良誠三:舵と船体の相互 干渉に関する基礎的研究(第2報),日本造船学 会論文集,第147号(1980).
- 7) 小瀬邦治,湯室彰規,芳村康男:操縦運動の数学 モデルの具体化一船体・プロペラ・舵の相互干渉 とその表現一,第3回操縦性シンポジウム(1981).
- 8) 日本造船学会:第三回操縦性シンポジウム・テキ スト,記号表(1981),309~315.
- 白勢 康,広野靖二:船型試験における形状影響 係数の決定法,石川島播磨技報,第22巻,第2 号(1982).
- 10) 松本憲洋:操縦流体力の数学モデルと操縦性能の 推定,大阪大学博士論文(1984).
- 11) 石黒 剛:浅水域における操縦数学モデルに関す る研究,東京大学修士論文(1984).
- 藤井 斉,津田達雄:自航模型船による舵特性の 研究(2),造船協会論文集,第110号(1961).
- 13) 小瀬邦治,佐伯敏朗:操縦運動の新しい数学モデルについて,日本造船学会論文集,第146号(1979).
- 14) 貴島勝郎:浅水域における船体(ESSO OSAKA)

に作用する流体力の計測,日本造船学会試験水槽 委員会ワーキング・グループ (JAMP) 資料, No. JAMP 6-1(1983).

15) 矢崎敦生, 倉持英之助, 門井弘行: 舶用プロペラ 設計資料(第1集), 運輸技術研究所資料 No.43 (1962).

 高井忠夫: ESSO OSAKA 水槽試験中間報告, 日本造船学会試験水槽委員会ワーキング・グループ (JAMP) 資料, No. JAMP 5-6 (1983).