中速商船・漁船船型の操縦流体力データベースと 操縦運動の一推定法

正会員 芳村 康男* 増本 友美子**

Hydrodynamic Force Database with Medium High Speed Merchant Ships Including Fishing Vessels
and Investigation into a Manoeuvring Prediction Method

by Yasuo Yoshimura, *Member* Yumiko Masumoto

Summary

Manoeuvring prediction is indispensable for the designing stage of ship. It becomes a serious concern that the manoeuvring performance complies with the IMO standard. For medium speed merchant ships such as container ship and PCC, they have the tendency that the advance and tactical diameter become larger by the course-keeping quality too stable, and have a possibility not to comply with the standard. Particularly, at the ballast condition with large trim by the stern, the above tendency becomes stronger. As for fishing vessels, C_b is around 0.6 that is similar to the above merchant ships because of the high Froude number, and has an initial trim in addition to the conventional baseline trim. It becomes very important to precisely evaluate the manoeuvring hydrodynamic forces against the trim.

Based on the above background, the authors have made the database of manoeuvring hydrodynamic coefficients for medium speed merchant ship and fishing vessels with one propeller and one rudder system. Then, the regression models which properly presume hydrodynamic coefficients are introduced based on this database.

The concluding remarks are summarized below.

1. The linear hydrodynamic derivatives of hull can be well predicted even in the large trimmed condition by correcting Kijima's model that had been predicting a turning circle excessively large.
2. The interactive coefficients which have been modeled as functions of principal dimensions of ship are not so affected by them. Particularly, k_x , x'_H and l'_R can be modeled as almost constant. a_H and γ_R are slightly affected by the parameter $C_b/(LB)$, however the effects are too smaller than conventional models.
3. Using the presented new regression models, turning motion and z-manoevr are simulated and compared with conventional Kijima's model. As the result, the prediction errors can be reduced to 1/2-1/3 of conventional model.

1. 緒 言

船舶の操縦性能の推定に関して、タンカー、バラ積み船など大型肥大船型を対象とした操縦性能の推定方法の研究は数多いが、コンテナ船や PCC、フェリーといった船型を対象とした操縦性能推定法の研究は数少ない。こうした船は、フルード数が高いことから C_b が 0.6 前後とやせており、針路安定性が良好で、Z 試験のオーバーシュートの操縦性基準

にほとんど抵触しないことによると考えられる。しかし、針路安定性が過度に良好な船では逆に旋回性能が低下し、旋回圏が大きくなって操縦性基準を満足しない場合も考えられる。特にバラスト状態は船尾トリムとなり、この場合の針路安定性はさらに良くなる方向となつて、旋回圏がより大きくなることが予想される。

一方、漁船船型は一般商船に比べるとサイズは小型であるものの、船速は十数ノットでフルード数は 0.3~0.4 もあり、 L/B は小さく幅広ながら、中速商船と似たような C_b が採用されている。また、載荷状態の違いによる通常のトリム変化に加えて、漁船特有のイニシャルトリムやフォールスキルを有するという特徴もあり、中速商船と同様、トリムに対する取扱いが重要である。

以上の背景を踏まえ、本報ではまず、中速商船や漁船船型を対象とした操縦流体力のデータベースを整理することから開始する。これらのデータには、データベースの信頼性の

* 北海道大学水産科学研究院

** 日本エア・リキード株式会社

観点から計測条件や解析方法が明記されているものを中心に選ぶ。また、推進器と舵についても1軸1舵を基本とする。続いて、この流体力データベースを基に、船の主要目から操縦流体力を推定する帰帰モデルを検討する。このモデル化はデータベースに大きく依存し、一般的に使用できるという保証はないが、モデル化に当たっては可能な限り流体力学的な特徴を活用する。さらに、この新しいモデルにより操縦運動のシミュレーションを行い、こうした船型で従来から活用されてきた1990年の貴島モデル¹⁾による推定結果と比較し、本推定法の有効性を確認する。

2. 操縦運動数学モデル

操縦運動を表す数学モデルの基本はMMG²⁾に準じ、そのモデルを以下に要約する。操縦運動は船体重心を原点とした座標系で表し、重心における船体前後方向、横方向の速度成分、および回頭角速度をそれぞれ u_G , v_G , r_G とし、付加質量を含めた運動方程式を次式で示す。

$$\left. \begin{aligned} (m+m_x)\dot{u}_G - (m+m_y)v_G r_G &= X \\ (m+m_y)\dot{v}_G + (m+m_x)u_G r_G &= Y \\ (I_{zz}+J_{zz})\dot{r}_G &= N - x_G Y \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

ただし、 m , I_{zz} は船の質量と旋回の慣性モーメントであり、 m_x , m_y , J_{zz} は船体前後方向の付加質量、横方向の付加質量および旋回運動の付加慣性モーメントを表す。定常流体力 X , Y , N の表現に関しては、Fig.2.1の座標系に示すように、統一して船体中央を原点として表記する。また、 x_G は船体重心の x 軸座標であり、船体中央から前方にある場合をプラスと表記する。定常流体力はMMGの考え方に従い、付加慣性力および船体・舵・プロペラの各定常流体力成分に分離して次式で表現する。

$$\left. \begin{aligned} X &= X_H + X_R + X_P \\ Y &= Y_H + Y_R + Y_P \\ N &= N_H + N_R + N_P \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

Fig. 2.1 Co-ordinate systems.

2.1 主船体の定常流体力

主船体に働く流体力は、加速度項を含めて以下の多項式で表現する。ただし、 $r' (= r/L)$ 、 $\beta = -\sin^{-1}(v/U)$ は船体

中央における無次元角速度と斜航角であり、運動方程式における重心の速度成分と区別して表現する。また、(2.1)式中の $(m_y v_G r_G)$, $(m_x u_G r_G)$ は流体力の計測において定常流体力と分離しない場合もあり、 $u_G=u$, $v_G=v+x_G r$, $r_G=r$ の関係を用い、これらを含めて次式で表す。

$$\left. \begin{aligned} X_H + m_y v_G r_G &= \left(\frac{\rho}{2} L d_{em} U^2 \right) \\ &\times \left\{ X'_0 + X'_{\beta\beta} \beta^2 + (X'_{\beta r} - m'_y) \beta r' + (X'_{rr} + x'_G m'_y) r'^2 + X'_{\beta\beta\beta} \beta^3 \right\} \\ Y_H - m_x u_G r_G &= \left(\frac{\rho}{2} L d_{em} U^2 \right) \\ &\times \left\{ Y'_0 \beta + (Y'_r - m'_x) r' + Y'_{\beta\beta} \beta^3 + Y'_{\beta\beta r} \beta^2 r' + Y'_{\beta r r} \beta r'^2 + Y'_{r r r} r'^3 \right\} \\ N_H &= \left(\frac{\rho}{2} L^2 d_{em} U^2 \right) \\ &\times \left\{ N'_{\beta} \beta + N'_r r' + N'_{\beta\beta} \beta^3 + N'_{\beta\beta r} \beta^2 r' + N'_{\beta r r} \beta r'^2 + N'_{r r r} r'^3 \right\} \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

ただし、 ρ : 水の密度

d_{em} : フォールスキールを含む船体中央喫水

$m'_x, m'_y = m_x, m_y / (\rho/2) L^2 d_{em}$

$x'_G = x_G / L$

Fig.2.2 Trim and false keel of fishing vessel.

2.2 プロペラの定常流体力

プロペラの力は前後方向の推力が主な力であり、直進時の推力減少係数 $(1-t)$ を用いて次式で表現する。

$$\left. \begin{aligned} X_P &= (1-t) \rho K_T D_p^4 n^2 \\ Y_P &= 0 \\ N_P &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

ただし、 D_p : プロペラ直径

n : プロペラ回転数

K_T : 推力係数 (前進定数 $J=(1-w)u/(nD_p)$ の関数)

$1-w$: プロペラの有効伴流係数

なお、プロペラ推力は操舵や旋回・斜航によって変化することが知られているが、操舵による変化は後述する舵力の前後方向の干渉と合わせて表現する。また、旋回・斜航運動が大きくなると一般に w が減少する傾向にあるが、後述する旋回・斜航中の舵流入速度(2.8)式における $(1-w)$ の旋回・斜航運動による変化は小さくなるという実験結果⁶⁾⁹⁾が多いことから、本報では舵力に主眼を置いて、 $(1-w)$ の運動に対する変化は無視する。

2.3 舵の定常流体力

舵による力やモーメント X_R , Y_R , N_R は次式のように、舵角を δ 、無次元舵直圧力を F'_N として次式で表す。

$$\left. \begin{aligned} X_R &= -(1-t_R) \left(\frac{\rho}{2} L d_{em} U^2 \right) F'_N \sin \delta \\ Y_R &= -(1+a_H) \left(\frac{\rho}{2} L d_{em} U^2 \right) F'_N \cos \delta \\ N_R &= -(x'_R + a_H x'_H) \left(\frac{\rho}{2} L^2 d_{em} U^2 \right) F'_N \cos \delta \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

ただし、 t_R , a_H , x'_H は舵と船体との干渉係数を表し、 $(1-t_R)$ の中には、前述の操舵による推力変化分が含まれている。また、無次元舵直圧力 F'_N は次式で表す。

$$F'_N = \frac{A_R}{L d_{em}} f_a U_R'^2 \sin \alpha_R \quad (2.6)$$

ここに、 A_R ：舵面積（可動部）

f_a ：舵単独の直圧力係数の勾配（藤井式）
 $(= 6.13\lambda / (2.25 + \lambda))$

λ ：舵のアスペクト比

また、船速 U で無次元化した舵の有効流速 U'_R と有効流向 α_R は次式で表す。

$$\left. \begin{aligned} U'_R &= \sqrt{u_R'^2 + v_R'^2} \\ \alpha_R &= \delta - \tan^{-1} \left(\frac{-v'_R}{u'_R} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

ただし、 u'_R , v'_R は U'_R の船体前後方向成分と横方向成分であり、次式で表す。

$$\left. \begin{aligned} u'_R &= \varepsilon(1-w) \sqrt{\eta \left\{ 1 + \kappa \left(\sqrt{1 + 8K_T / \pi J^2} - 1 \right) \right\}^2 + (1-\eta)} \\ v'_R &= \gamma_R (v' - r' l'_R) \cong -\gamma_R (\beta + r' l'_R) \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

ここに、 $\eta = D_P / H$, (H ：舵高さ)

$\kappa = k_x / \varepsilon$, (k_x ：プロペラ後流の増速率)

ε ：有効伴流係数比 $(= (1-w_R) / (1-w))$

γ_R ：船体の整流係数

l'_R ：旋回角速度に対する係数

なお、 K_T , J は(2.4)式に示したプロペラの推力係数と前進定数である。また、舵の有効伴流係数 $(1-w_R)$ 、プロペラ後流の増速率 k_x および γ_R , l'_R は、前述の $(1-w)$ と同様、本報では一定と取扱い、操縦運動の関数としない。

3. 流体力微係数・干渉係数のデータベース

1軸1舵の中速商船、漁船の操縦流体力のデータベースを作成するに当たっては、データベースの信頼性の観点から以下の条件で実施された拘束試験データとした。

- 1) 模型船の主要目が明記されたもの
- 2) 拘束位置、拘束運動、モーメント中心が明確なもの
- 3) 計測系の慣性力が適切に控除され、流体力の解析方法が明確なもの

これらの条件を満足する操縦流体力データは意外と少ない。特に模型船の排水量は、設計する造船所の機密保持の立場から意識的に空白にされる場合が多く、運動を議論するのにも関わらず質量が不明といった状況にある。

Table 3.1 Principal dimensions of ship models

Ship Model	F1	F2	FUa	FUb	R1	R2	R2	R4a	R4b	SR108	KCS	PCC	TS
Kind of Ship	Japanese Fishing Vessel		European Fishing Vessel		Fishery Training or Research Vessel					Container Ship		PCC	Seiunmaru
L_{pp} (full scale)	31.0	26.85	26.16	26.16	57.5	27.5	33.74	53.0	53.0	175.0	230.0	180.0	105.0
Model Scale	1/15	1/12.2	1/20	1/20	1/29	1/14.6	1/17.7	1/21.4	1/21.4	1/35	1/75.5	1/60	1/24.5
L_{pp} (=L,m)	2.0667	2.2000	1.3080	1.3080	1.9828	1.8816	1.9062	2.4801	2.4801	5.0000	3.0464	3.0000	4.2900
B (m)	0.4933	0.4834	0.5000	0.5000	0.4138	0.4447	0.4407	0.4960	0.4960	0.7257	0.4265	0.5367	0.7313
d (m,molded)	0.1677	0.1789	0.2036	0.2000	0.1517	0.1779	0.1469	0.1830	0.1802	0.2429	0.1430	0.1367	0.2435
keel depth (m)	0.0293	0.0410	0.0250	0.0250	0.0103	0.0205	0.0169	0	0	0	0	0	0
d_{em} (m)	0.1970	0.2199	0.2286	0.2250	0.1621	0.1984	0.1638	0.1830	0.1802	0.2429	0.1430	0.1367	0.2435
∇ (m ³)	0.1227	0.1509	0.0851	0.0803	0.0715	0.1004	0.0785	0.1389	0.1358	0.495	0.1209	0.1206	0.3877
x_G (m)	-0.1807	-0.2250	-0.0698	-0.0319	-0.0372	-0.0259	-0.0375	-0.1379	-0.1455	-0.0905	-0.0450	-0.0422	-0.0918
$B.L.$ trim (m)	0.1580	0.1413	0.0500	0.0000	0	0	0	0.0828	0.0889	0.0285	0	0	0
Init. trim (m)	0.0533	0.0574	0.0375	0.0375	0	0.0547	0.0452	0	0	0	0	0	0
keel trim (m)	0.0187	0	0	0	0	0.0137	0.0113	0	0	0	0	0	0
total trim (m)	0.2300	0.1986	0.0875	0.0375	0	0.0684	0.0565	0.0828	0.0889	0.0285	0	0	0
L/B	4.189	4.551	2.616	2.616	4.792	4.231	4.326	5.000	5.000	6.890	7.143	5.590	5.866
d_{em}/B	0.399	0.455	0.457	0.457	0.392	0.446	0.372	0.369	0.363	0.334	0.335	0.255	0.333
C_b (by d_{em})	0.611	0.645	0.569	0.570	0.538	0.604	0.570	0.617	0.613	0.562	0.651	0.548	0.508
$C_b/(L/B)$	0.1459	0.1418	0.2177	0.2180	0.1122	0.1429	0.1319	0.1234	0.1225	0.0815	0.0911	0.0980	0.0865
total trim/ d_{em}	1.168	0.903	0.383	0.394	0	0.345	0.345	0.452	0.493	0.117	0	0	0
D_P (m)	0.1800	0.1696	0.1022	0.1250	0.1052	0.1300	0.1073	0.1350	0.135	0.1857	0.1046	0.095	0.192
A_R/Ld_{em}	1/23.5	1/19.6	1/27.4	1/27.0	1/37.5	1/28.6	1/37.9	1/37.6	1/36.9	1/45.8	1/54.9	1/39.1	1/46.8
D_P/H ($=\eta$)	0.971	0.955	0.749	0.838	1.000	0.904	0.904	0.913	0.913	0.844	0.798	0.794	0.960

Table 3.2 Hydrodynamic force derivatives and interactive coefficients

ship model	F1	F2	FUa	FUb	R1	R2	R2	R4a	R4b	SR108	KCS	PCC	TS
Hull derivatives													
$X'_{\beta\beta}$	0.0112	-0.1392	0.0770	0.1116	-0.1101	-0.0065	-0.1010	-0.0082	-0.0677	-0.0500	-0.0549	-0.0504	-0.0457
$X'_{\beta r}-m'_y$	-0.1317	-0.2084	-0.3765	-0.3136	-0.0984	-0.2362	-0.1552	-0.1446	-0.1489	-0.1031	-0.1084	-0.1232	-0.1139
$X'_{rr}+x'_G m'_y$	-0.0482	-0.0225	-0.0171	0.0216	-0.0081	-0.0122	-0.0062	0.0125	0.0104	-0.0003	-0.0120	0.0171	0.0186
$X'_{\beta\beta\beta}$	0.2144	0.1121	-0.3450	-0.6715	0.6347	-0.1575	0.4858	0.3190	1.2564	-0.0219	-0.0417	0.5917	0.5227
Y'_β	0.8812	0.7699	0.6928	0.6163	0.4666	0.5482	0.4814	0.4079	0.4285	0.3040	0.2252	0.2629	0.3805
$Y'_r-m'_x$	0.2558	0.1753	0.1040	0.0873	0.0585	0.0980	0.0866	0.0889	0.0783	0.0862	0.0398	0.0261	0.0080
$Y'_{\beta\beta\beta}$	0.5316	1.8851	0.7598	1.1722	1.5618	1.3732	1.1277	1.2750	1.2769	1.3354	1.7179	1.5504	2.3050
$Y'_{\beta\beta r}$	1.1707	0.4800	-0.0594	-0.0838	-0.5124	0.1729	0.0580	-0.3438	-0.2556	-0.6556	-0.4832	-0.6533	-1.6470
$Y'_{\beta rr}$	0.6076	0.6719	0.4814	0.4678	0.8509	0.2878	0.5180	0.5000	0.4192	0.7012	0.8341	0.7384	1.0900
Y'_{rrr}	0.0367	0.0231	-0.0198	-0.0550	-0.0370	-0.0380	-0.0017	-0.0600	-0.0296	-0.0286	-0.0050	-0.0566	-0.0881
N'_β	-0.0015	0.0833	0.1560	0.1839	0.1591	0.1140	0.1070	0.1017	0.0995	0.0726	0.1111	0.0977	0.1497
N'_r	-0.0843	-0.1007	-0.0618	-0.0602	-0.0604	-0.0575	-0.0601	-0.0760	-0.0832	-0.0456	-0.0465	-0.0505	-0.0795
$N'_{\beta\beta\beta}$	0.3021	0.2898	0.2281	0.2139	0.4681	0.2826	0.3380	0.2240	0.1433	0.1714	0.1751	0.1731	0.3350
$N'_{\beta\beta r}$	-0.4755	-0.7811	-0.4272	-0.4582	-0.8230	-0.4585	-0.5209	-0.4271	-0.3162	-0.5236	-0.6167	-0.6273	-0.7705
$N'_{\beta rr}$	-0.0622	0.0574	0.0024	0.0197	0.1447	0.0567	0.0007	0.0339	0.0200	0.0686	0.0512	0.0954	0.2121
N'_{rrr}	-0.0172	-0.0269	-0.0063	-0.0124	-0.0404	0.0051	-0.0164	-0.0248	-0.0062	-0.0302	-0.0387	-0.0353	-0.0502
Interactions													
$1-t_R$	0.856	1.055	0.820		0.548	0.883	0.883	0.709	0.777	0.710	0.742	0.753	0.659
$1+a_H$	1.000	1.067	1.437		1.294	1.000	1.000	1.276	1.226	1.237	1.361	1.419	1.236
x'_H	-	-	-0.364		-0.383	-	-	-0.380	-0.377	-0.480	-0.436	-0.467	-0.462
ε	0.967	1.164	1.179		1.272	0.885	0.885	1.206	1.210	0.921	0.956	1.214	1.033
κ	0.664	0.452	0.385		0.456	0.565	0.565	0.509	0.512	0.631	0.633	0.457	0.676
k_x	0.642	0.526	0.454		0.580	0.500	0.500	0.614	0.620	0.581	0.605	0.555	0.699
l_R	-0.996	-1.023	-0.774		-1.359	-0.976	-0.976	-0.670	-0.723	-1.100	-0.755	-0.946	-0.947
γ_R (+turning)	0.414	0.409	0.687		0.342	0.513	0.513	0.499	0.498		0.492	0.514	0.394
γ_R (-turning)	0.410	0.251	0.544		0.323	0.513	0.513	0.453	0.415		0.338	0.268	0.312
γ_R (mean)	0.412	0.330	0.615		0.333	0.513	0.513	0.476	0.457		0.415	0.391	0.353

データベースとして選択した 11 隻 13 状態の模型船の要目を Table 3.1 に示す。F1, F2 は実船の総トン数が 80~160 トンの日本のかけまわし式トロール漁船³⁾で、船尾トリムが大きい。FUa, FUb は北欧のトロール漁船で載荷状態を変えたものであり、 L/B が 2.6 という超幅広船型である。これらは本報で新たに追加実験した。R1~R2 は著者の大学の漁業調査練習船⁴⁾もしくは計画船で、船型は漁船というより中速商船に近い。R4a, R4b も漁業調査練習船^{5), 6)}である。SR108 は旧型のコンテナ船で、多くの実験結果があるが、ここでは松本ら⁷⁾の実験結果を引用した。ただし、主船体流体力モデルについては、パラメータが斜航角 β でなく v' で解析されていることから(2.3)式で再解析を行った。KCS は MOERI の設計したパナマックス型コンテナ船で、ITTC25 期で操縦性推定のバリデーションの対象となった船型であり、海上技術安全研究所で実施された実験結果⁸⁾を引用した。PCC は著者がかつて実施した実験結果⁹⁾である。また TS は航海訓練所の練習船「青雲丸」で矢吹らの実験結果¹⁰⁾を引用した。なお Table 3.1 において、baseline trim とは計画喫水からのトリム（商船における通常のトリム）であり、initial trim は Fig.2.2 に示したように漁船などで計画状態におけるキールラインの AP と FP における喫水の差を表している。また、keel trim は false keel 自体が船体前後方向にテーパしている場合であり、AP と FP のキール深さの差を表す。したがって、全体のトリムは上記の三つを加えたものとなる。また、 d_{em} は船体中

央の型喫水 d に船体中央における false keel の深さを加えたもので、実質的な船体中央喫水である。Table 3.1 の C_b や舵面積比はいずれもこの d_{em} で無次元化している。

これら 13 状態の流体力はいずれも定常拘束運動を与える斜航試験・CMT で実施され、流体力は全て船体中央における拘束運動と旋回モーメントで解析されている。各模型船の船体流体力微係数、干渉係数を Table 3.2 に示す。これらの解析方法については、直進試験から複数のプロペラ荷重度に対して自航要素を求めた後、直進状態の舵角試験によって(2.8)式の舵有効流速のパラメータを求める他、舵直圧力と船体に作用する流体力との関係から(2.6)式の干渉係数を解析する。ただし、干渉係数は模型船の自航点における値を採用する。また船体の整流係数 γ_R は舵直圧力が零となる付近の斜航試験・CMT から文献 2)の方法で解析する。続いて主船体の流体力については、舵・プロペラ付き斜航試験・CMT の解析の場合、同時に計測された舵直圧力及びプロペラ推力に上記の干渉係数を用いて、以下の方法で舵・プロペラの力を控除し、実質的に主船体のみの流体力としている。なお、流体力の無次元化は(2.3)式と同じである。

$$\left. \begin{aligned} X'_H &= X' - (1-t)T' \\ Y'_H &= Y' + (1+a_H)F'_N \\ N'_H &= N' + (x'_R + a_H x'_H)F'_N \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

なお、一部の模型船の x'_H が(-)と表示しているのは、 a_H が

Fig. 3.1 Linear hydrodynamic derivatives of hull

Fig. 3.2 Non-linear hydrodynamic derivatives of hull

ほとんど零となる場合で、 x'_H が解析できないことによる。
また、SR108 模型船の船体整流係数は定義が明確でないため空欄とした。

3.1 主船体の流体力微係数

1) 線形微係数

線形微係数は、1990年の貴島らのモデル¹⁾をベースに表示することとし、Fig. 3.1には線形微係数を、(3.2)式に示す貴島の等喫水における推定値で除して、 (trim/d_{em}) に対して示す。また、図中の○印は中速商船のデータ、●印は漁船のデータであることを示す。

$$\left. \begin{aligned} Y'_{\beta 0} &= 0.5\pi k + 1.4 C_b / (L/B) \\ (Y'_r - m'_x)_0 &= 0.5 C_b / (L/B) \\ N'_{\beta 0} &= k \\ N'_{r0} &= -0.54k + k^2 \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

ここに、 L ：垂線間長、 B ：型幅、 $k=2d_{em}/L$ である。

対象とした船型は C_b が 0.6 前後であるためか、等喫水状態の線形微係数は上記の貴島式で比較的良好に合っている。トリム付きのデータは主に漁船船型であるが、(3.2)式とトリムに対する修正という形で表現することができる。こうした表現を行うと、 N'_{β} のトリム変化については、貴島の修正式¹⁾にはほぼ一致した特性となっているが、その他の微係数についてはかなり異なる。ただし、これらの船型については等喫水状態のデータが無い場合、同一船型でトリムに対する線形微係数の変化がこうした特性になるかについては明確でなく、データベースの更なる蓄積が必要であろう。なお、Fig.3.1に示す各図の曲線は、後述する(4.1)式のトリムに対する線形微係数の変化モデルを表し、 Y' についてはトリムの二次式、 N' についてはトリムの一次式で表現している。

2) 非線形微係数

非線形微係数を Fig. 3.2 に示す。図中の○印は中速商船のデータ、●印は漁船のデータであることを示す。各図の横軸には L/B や C_b といった船体主要目の比率をとっているが、これらは回帰分析によって最も相関係数の高いものをパラメータとして採用した。このパラメータに対して各非線形微係数を直線近似し、その結果を各図の直線で示すが、その特性は物理的根拠に乏しく相関も劣ることは否めない。前述の線形微係数は、トリムによるアスペクト比の変化や流体力の作用中心の移動などによって、ある程度理論的に導ける要素があるが、非線形微係数は、こうした統計的な整理しかできないのが現状である。ただし、 $(X'_{\beta r} - m'_x)$ は基本的に船の付加質量に関係する微係数であることから、船体の無次元質量に相当する $C_b/(L/B)$ との相関がかなり強いことを示している。なお、各図に示す直線は、後述する(4.3)～(4.5)式の近似特性を示している。

3.2 船体・プロペラ・舵の干渉係数

1) 舵力の船体との干渉係数

$(1-t_R)$, $(1+a_H)$, x'_H の干渉係数を Fig. 3.3 の上段に示す。等喫水の場合の $(1-t_R)$ は 0.7 程度であるが、船尾トリムが大きい漁船などでは相対的に舵面積が大きくなり、船体の干渉が小さくなるためか、 $(1-t_R)$ は増加する傾向がある。

$(1+a_H)$ は従来 C_b に依存する傾向²⁾があり、貴島モデル¹⁾でも C_b をパラメータにモデル化されているが、本報では $C_b/(L/B)$ に対して表示する。なお、この値は○印で示すコンテナ船や PCC といった商船ではやや大きくなっているが、これらの舵はほとんどホーン付きのマリーナ舵であり、模型試験において大きなホーンは船体に固着され、この部分に働く力が船体の力として計測されるため、見かけ上、操舵による干渉が増える結果になっていると考えられる。これに対して●印で示す漁船はシューピース付きの舵であり、ホーン面積は小さいため $(1+a_H)$ が同図の破線に示すようにやや小さくなる傾向にある。

舵直圧力の a_H 倍の干渉力の作用点となる x'_H は力学的にも船尾付近にあり、垂線間長 L で無次元化した x'_H はどの船も概ね -0.4～-0.5 付近に位置していることが Fig. 3.3 上段右図から確認できる。これに対して貴島モデルの推定値は C_b に対して -1.8 から 0 近くまで変化する結果となり、これらの計測データとは全く異なる特性になっている。

2) 舵有効流速の係数 ε , k_x

(2.8)式中の舵有効流速の係数 ε と k_x を Fig. 3.3 の中段に示す。プロペラ後流の増速率を表す k_x は、

$$k_x = \varepsilon \kappa \quad (3.3)$$

となるが、この値は従来から無限後方を 1.0 とするとプロペラ背後の舵位置では 0.6 程度と取り扱われており、この図からも概ねその値に近い結果となっている。

プロペラと舵位置における有効伴流係数の比 ε はプロペラ有効伴流係数 $(1-w)$ に依存する傾向がある。Fig. 3.3 中段右図には、今回の供試船だけでなく、著者が過去に計測した多くの模型実験から得られた ε を $(1-w)$ に対してプロットしているが、プロペラの有効伴流係数 $(1-w)$ が小さい船では ε が大きくなる傾向にある。これは、プロペラの有効伴流が強い程、舵位置における流速の回復が早まるからであろうと考えられる。漁船船型も同様な傾向にあるが、プロペラ直径や舵面積が船体に比べて大きい場合、やや異なったグルーブを形成している。

3) 舵有効流向の係数 γ_R , l'_R

舵有効流向の係数 γ_R , l'_R は Fig. 3.3 の下段の図に示す。船体整流係数 γ_R は旋回性能や針路安定性に大きな影響を与えることから、その推定には細心の注意が必要である。この γ_R は Table 3.2 に示したように、左右の旋回運動でその値が異

Fig. 3.3 Interactive hydrodynamic coefficients among hull, rudder and propeller

なる。これは1軸1舵の船ではプロペラ後流が左右非対称になることに起因している。こうした背景から、左右の特性を別々に整理することが望ましいが、ここでは左右の平均値を $C_b/(L/B)$ に対してプロットする。平均的な γ_R は $C_b/(L/B)$ に対して増加する傾向を示している。 γ_R は小さい値ほど整流効果が大いことを示すが、 C_b が小さく (L/B) の大きい船ではこの効果が大いことを裏付けている。なお、貴島モデルではプロペラの整流効果を含めた藤井の整流係数 γ を用いているが、 γ_R との関係は次式で記述でき²⁾、これを $C_b/(L/B)$ に対して推定式を与えている。

$$\gamma = \gamma_R (U/u_R) \quad (3.4)$$

同図には $u_R/U=1.0$ としてこの推定特性を破線で示すが、供試船のデータと全く異なり、 $C_b/(L/B)$ の増加に対して減少する推定となっている。このように計測データと異なる背景は貴島モデルにおける整流係数が模型試験結果によるものではなく、実船の操縦性能を総合的に合わせるための修正係数という位置付けになっており、タンカーなどの肥大船への適用で針路安定性が低下して旋回性能が強くなる局面をこの係数でカバーしようとした結果、 $C_b/(L/B)$ の大きい船の整流係数を小さくして舵の針路安定性効果を弱めざるを得なかったものと推測される。

l_R の係数は物理的には舵位置($=-0.5L$)に対応するが、Fig.3.3 下段の右図に示すように、船の垂線間長で無次元化した l'_R は概ね-0.9程度で、実際の舵位置の2倍近い値となっている。この点は貴島モデルでも-1.0を採用しており、今回のデータとほぼ同様な結果になっている。

4. 操縦運動の一推定法と推定結果

以上の流体力のデータベースをもとに、操縦運動を推定する一手法を以下に示す。前節に示した流体力微係数や干渉係数の一部は理論的な背景に裏付けされたものもあるが、多くは統計的な相関を示しているに過ぎない。この意味から流体力のモデル化はデータベースに大きく依存し、一般的に使用できるという保証は得がたい。しかし、データベースの母集団を増やす一方、より物理的根拠に基づいたモデル化を行うことによって、汎用的な数学モデルに発展させることが可能であろう。本節では、中速商船、漁船を対象として、操縦流体力をモデル化し、操縦運動を計算する一手法について検討した結果を示す。

Fig.4.1 Predicted linear hydrodynamic derivatives and force levers

4.1 流体力微係数の数式化

1) 主船体流体力の線形微係数

線形微係数は、(3.2)式に示した等喫水における貴島モデルの $Y'_{\beta 0}$, $(Y'_r - m'_x)_0$, $N'_{\beta 0}$, N'_{r0} をベースとして次式で表現する。

$$\left. \begin{aligned} Y'_\beta &= Y'_{\beta 0} (1 + 0.54\tau'^2) \\ Y'_r - m'_x &= (Y'_r - m'_x)_0 (1 + 1.82\tau'^2) \\ N'_\beta &= N'_{\beta 0} (1 - 0.85\tau') \\ N'_r &= N'_{r0} (1 + 0.33\tau') \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

ただし、 $\tau' = \text{trim}/d_{em}$ である。上式のトリムに対する線形微係数の変化特性はデータベースに対して最小自乗法を適用して Fig.3.1 の実線に示す。線形微係数の推定によって微小運動時の旋回および斜航に対する流体力の作用点がそれぞれ求まる。

$$\left. \begin{aligned} l'_\beta &= \frac{N'_{\beta 0}}{Y'_{\beta 0}} \\ l'_r &= \frac{(-N'_{r0})}{m'_x + m'_x - Y'_{r0}} \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

(4.1)式で推定した線形微係数、および(4.2)式の作用点の無次元位置の推定結果を、計測結果と比較して Fig.4.1 に示す。図中の実線が推定と実測の相関を表す直線である。同図にはまた貴島モデルによる推定結果を×印で比較し、実測との相関を破線で示すが、線形微係数の推定精度が改善されている。

2) 主船体流体力の非線形微係数

非線形微係数は、前節にも述べたように、物理的な根拠が明確でないため、これらを数式化することは困難であるが、Fig. 3.2 の各図の実線で示した特性を用いる。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} X'_{\beta\beta} &= 1.15 C_b / (L/B) - 0.18 \\ X'_{\beta r} - m'_y &= -1.91 C_b / (L/B) + 0.08 \\ X'_{rr} + x'_G m'_y &= -0.085 C_b / (L/B) + 0.008 \\ X'_{\beta\beta\beta} &= -6.68 C_b / (L/B) + 1.10 \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

$$\left. \begin{aligned} Y'_{\beta\beta\beta} &= 0.185 L/B + 0.48 \\ Y'_{\beta\beta r} &= 0.97 \tau' / C_b - 0.75 \\ Y'_{\beta rr} &= 0.26 (1 - C_b) L/B + 0.11 \\ Y'_{rrr} &= 0.069 \tau' - 0.051 \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

$$\left. \begin{aligned} N'_{\beta\beta\beta} &= -0.69 C_b + 0.66 \\ N'_{\beta\beta r} &= 1.55 C_b / (L/B) - 0.76 \\ N'_{\beta rr} &= -0.075 (1 - C_b) L/B - 0.098 \\ N'_{rrr} &= 0.25 C_b / (L/B) - 0.056 \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

3) 舵・船体・プロペラの干渉係数

干渉係数についても Fig. 3.3 の各図の実線で示した特性を数式化して次式に示す。ただし、物理的な特徴が比較的明確で x'_H , l'_R , k_x はほとんど船型に対して変化がないので、これらは一定と扱う。また、舵面積比やホーンサイズの違いなどから、漁船の a_H と ε については別途数式を与える。

$$\left. \begin{aligned} 1-t_R &= 0.32\tau' + 0.61 \\ a_H &= \begin{cases} 3.6C_b/(L/B), & \text{for merchant ship} \\ 1.2C_b/(L/B), & \text{for fishing vessel} \end{cases} \\ x'_H &= -0.4 \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

$$\left. \begin{aligned} l'_R &= -0.9 \\ \gamma_R &= 2.06C_b/(L/B) + 0.14 \\ \varepsilon &= \begin{cases} 2.26 - 1.82(1-w), & \text{for merchant ship} \\ 1.81 - 0.93(1-w), & \text{for fishing vessel} \end{cases} \\ k_x &= \varepsilon\kappa = 0.55 \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

4.2 操縦運動の推定結果と推定精度

前述のモデルを用いて旋回試験をシミュレーションした結果の一例(PCC、KCS コンテナ船)を Fig. 4.2 に示す。図中には、本数式モデルによる推定結果を実線で示す他、拘束模型実験データによる推定(original data)を破線、貴島モデルによる推定を点線で比較する。自由航走模型試験結果は PCC については文献 9)、KCS コンテナ船は 11) からそれぞれ引用して示す。貴島モデルによる中速商船の旋回圏は従来から大きくなるのが指摘されている¹²⁾が、この比較でも自由航走試験の約 1.3~1.4 倍の旋回圏と大きくなっている。これに対し、本提案のモデルによる推定結果は、拘束模型試験データを用いた推定と合わせて、実測と良く合っており、ここに示した数式モデルの有効性が確認できる。

Fig. 4.3 はデータベース中の供試船に対して、右 35°舵角旋回試験の縦距と旋回圏、および 10°Z 試験の第一オーバーシュートをそれぞれ計算した結果であり、拘束模型実験データによる計算結果 (original data) に対して表示する。図中の○印は中速商船、●印は漁船の推定をそれぞれ示し、これらの

Table 4.1 RMS of error of manoeuvring predictions

	Kijima model 90	Presented model
Merchant Ships		
Advance (L)	0.39	0.11
Transfer (L)	0.41	0.09
Tactical dia.(L)	0.81	0.19
1 st overshoot (deg)	1.00	0.81
Fishing Vessels		
Advance (L)	0.68	0.20
Transfer (L)	0.57	0.14
Tactical dia.(L)	1.06	0.26
1 st overshoot (deg)	3.68	1.41

相関関係を合わせて実線で示す。一方、貴島モデルによる計算結果は同図の×印で示す。ただしこの計算に際しては、貴島モデルの線形微係数のトリム変化が Fig.3.1 に示した特性より過大で誤差が拡大するため、通常の baseline trim のみで計算し、漁船特有の initial trim と keel trim は含めないこととした。また、北欧型の幅広漁船 FUa, FUb の計算においては、 $C_b/(L/B)$ が大きいので ε および γ がマイナスになってシミュレーションが実施できないことから、貴島モデルによる計算対象船から除外した。

本数式モデルによる旋回運動の推定は、同図に示すように、実測データによる計算結果と比較的良好な一致を示していることがわかる。10°Z 試験の第一オーバーシュートの推定については、やや過大となる傾向にあるが、誤差のパラツキは少ない。これらの推定誤差の RMS (root mean square) を Table 4.1 に中速商船と漁船舶型に分けて要約する。

本推定法による誤差は貴島モデルに比べてかなり小さく、漁船を含む中速商船の操縦推定に有効であることを示している。ただし、適用できる主要目の範囲はこれを導いたデー

Fig.4.2 Comparison of predicted turning circle

Fig.4.3 Predicted advance, tactical diameter and 1st overshoot of 10°Z-manoevr

データベースに依存するから、主要目は以下の範囲であり、タンカーなどの肥大船は対象外になる。

$$2.6 < L/B < 7.1, \quad 0.25 < d_{em}/B < 0.46,$$

$$0.51 < C_b < 0.65, \quad 0 < \tau' = trim/d_{em} < 1.17$$

船舶の計画段階で操縦性能を推定するに際し拘束模型試験を行うと、多くの労力と時間が必要である。1990年に公表された貴島モデルは、船の主要目が与えられると数学モデルの全ての係数が求められ、操縦運動がたちまち計算できるという点で極めて画期的な研究成果であった。その後、船型も時代と共に変遷し、IMOで操縦性基準が決議されると、針路安定性に乏しいタンカー、バルカーといった肥大船の操縦運動推定への要請が高まり、貴島モデルもこれらの肥大船にウエイトを置いて改訂が重ねられてきた¹³⁻¹⁶⁾。その一例として、船尾フレームライン形状を表すパラメータに C_{pa} 、 C_{wa} などが採用されている。しかし、この方法は確かに肥大船では有効であるが、コンテナ船などの中速船や漁船の多くの船型では C_{wa} がもともと大きく、 $\sigma_a = (1 - C_{wa}) / (1 - C_{pa})$ が零に近い場合もあり、V型船尾フレームライン形状という取扱いとなつて、操縦推定精度を逆に悪くする結果にもなっている。本報に提示した一推定法は必ずしもベストとは言えないが、こうした船型の操縦性能の推定精度の向上に役立つことが期待される。

5. 結 言

本報では中速商船や漁船舶型を対象として、操縦流体力のデータを収集してデータベース化し、大きな船尾トリムを含むこうした船型の操縦流体力の特徴を明らかにした。続いて、これらのデータベースを基に、船の主要目から操縦流体力を推定する数式モデルの検討を行い、この数式モデルを用いて操縦運動の推定を行い、既存の研究成果と比較検討しその推

定精度を確認した。主な結論を以下に要約する。

1. 主船体流体力の線形微係数は、船尾トリムの少ない中速商船では従来の貴島モデルで比較的良く推定できるが、トリムの大きい漁船舶型に対しては針路安定側へ過大に推定し、結果として旋回圏を過大に推定する結果となる。
2. 船体・プロペラ・舵の種々の干渉係数の多くは物理的根拠にもとづいて検討すると、従来から示されるほどの船型影響は現れず、 k_x 、 x'_H 、 l'_R などは一定と見なしても差し支えない。 γ_R は $C_b/(L/B)$ に対してやや変化する傾向はあるが、従来ほどの変化は見られない。
3. これらデータベースにもとづいて操縦流体力係数の数式モデルを導入し、これを用いて操縦運動を推定した結果、旋回運動、Z試験のオーバーシュートが従来の方法より誤差が1/2~1/3程度に推定できる。

以上のごとく、データベースをできるだけ忠実に数式化することによって、操縦性能を精度よく推定することが可能になり、本報に示した一推定法は中速商船、漁船舶型の操縦性能の推定に有効と思われる。

最後に、本研究の一部は日本船舶海洋工学会平成21年春季講演会において発表¹⁷⁾したことを付記する。また、本報で新たに追加した模型船FUa, FUbの操縦流体力計測に際しては、(株)IHI技術開発本部船舶海洋技術開発部の角水槽を使用させて頂いた。実験にご協力を賜った大森拓也部長をはじめ同研究所の方々に感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Kijima, K., Katsuno, T., Nakiri, Y., Furukawa, Y.: On the manoeuvring performance of a ship with the parameter of loading condition, 日本造船学会論文集, **168**, 1990, pp. 141-148.

- 2) 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, 日本造船学会第 3 回操縦性シンポジウム, 1981, pp.27-80
 - 3) Yoshimura, Y., Ma, N. : Manoeuvring Prediction of Fishing Vessels, proc. of MARSIM'03, 2003, pp.RC-29-1-RC-29-10
 - 4) 芳村康男, 馬 寧, 鈴木四郎, 梶原善之: バルジによる改造漁船船型の操縦性能, 日本造船学会論文集, **192**, 2002, pp.37-46.
 - 5) Yoshimura, Y., Satoh, K., Takeda, S. : Coasting Manoeuvrability of single CPP Equipped Ship and the Application of a New CPP Controller, MARSIM 93, 1993, pp.651-660.
 - 6) 武田誠一, 佐藤 要, 春日 功, 倉本有子, 重松健司, 芳村康男: 神鷹丸III世の操縦性能, 東京水産大学紀要, **79**, 1992, pp.53-70.
 - 7) 松本憲洋, 末光啓二: 拘束模型試験による操縦性の予測, 関西造船協会誌, **176**, 1980, pp.11-22.
 - 8) Yoshimura, Y., Ueno, M., Tsukada, Y. : Analysis of Steady Hydrodynamic Force Components and Prediction of Manoeuvring Ship Motion with KVLCC1, KVLCC2 and KCS, Workshop Proceedings of SIMMAN2008, **1**, 2008, pp.E80-E86.
 - 9) 芳村康男: 浅水域の操縦運動数学モデルの検討(MMGモデルの浅水域への適用について), 関西造船協会誌, **200**, 1986, pp.41-51.
 - 10) 矢吹英雄, 芳村康男: CPP 1 軸 1 舵船の停止操船における操舵制御について, 日本航海学会論文集, **116**, 2007, pp.152-160.
 - 11) Yoshimura, Y., Ueno, M., Shouji, K. : Results of a Free-running Model Test with KCS model, Written Discussion to Manoeuvring Committee, 25th ITTC, 2008.
 - 12) Ishiguro, T., Tanaka, S., Yoshimura, Y. : A Study on the Accuracy of Recent Prediction Technique of Ship's Manoeuvrability at the Early Design Stage, Marine Simulation and Ship Manoeuvrability, 1996, pp.547-561.
 - 13) 貴島勝郎, 名切恭昭: 船尾形状を考慮した操縦流体力の近似的表現, 西部造船会会報, **98**, 1999, pp.67-77.
 - 14) 貴島勝郎, 名切恭昭: 船舶操縦性推定の実用定計算法に関する研究, 西部造船会会報, **105**, 2002, pp.21-31.
 - 15) 青木伊知郎, 貴島勝郎, 古川芳孝, 名切恭昭: 実船の操縦性能推定に関する研究, 日本船舶海洋工学会論文集, **3**, 2006, pp.157-165.
 - 16) 山口善寛, 古川芳孝, 武藤博之, 貴島勝郎: 肥大船型を対象とした操縦流体力微係数の推定に関する研究, 日本船舶海洋工学会論文集, **10**, 2009, pp.105-113.
 - 17) 芳村康男, 増本友美子, 漁船船型の操縦性能推定法, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, **8**, 2009, pp.391-394.
-