2軸1舵船の操縦運動簡易推定法

近藤 匡寿¹・矢野 大行¹・福井 洋²・芳村 康男³

Simple Simulation Model for Manoeuvring Ship Motion of Twin-propeller and Single-rudder Ships

Masatoshi KONDO, Hiroyuki YANO, Yo FUKUI and Yasuo YOSHIMURA

Abstract

Twin-propeller and Single-rudder Ships are frequently used for medium high-speed ships such as container ships and passenger ferry. However, the manoeuvring simulation for these ships is not easy because the interaction forces between propellers and rudder become very much complicated.

In this paper, the authors have investigated a simple analysis and simulation technique for manoeuvring ship motion of twin propeller and rudder ships. For this purpose, captive model tests have been carried out, where the propeller thrusts and rudder normal force as well as ship hull forces are obtained for various parameters including propeller rps and rudder angle. Although the propeller thrusts are slightly different in each other for port and starboard sides and this makes the additional yaw moment, the thrust is assumed to be a single propeller's one by means of combining the both sided thrusts as if the ship is a single propeller and rudder ship. In this analysis, the propeller diameter is assumed to be $\sqrt{2}$ times larger and propeller rps $1/\sqrt{2}$ times, so that the thrust coefficient K_T becomes the average thrust coefficient of twin propellers. This assumption can make very simple and easier since the conventional mathematical model for single propeller and rudder ships can be applied.

In order to validate the above method, free-running model tests have been carried out and compared with the simulated results. As the result, it is found that this simple technique becomes very useful for the simulation of twin-propeller and single-rudder ships.

Keywords : *Manoeuvrability, Twin-propeller single-rudder ships, Interaction coefficients, Mathematical model*

キーワード: 操縦性能, 2軸1舵船, 干渉係数, 数学モデル

1. 緒 言

高速化が要求される船舶では2軸船型が採用されることが多い。2軸2舵船は、低速時の舵効きが良好で、特に港内の操縦性能に優れているが、建造コストや推進性能の面において2軸1舵船の方が優れている。最近では、省エネルギーの観点から、2軸1舵が採用されることも多い。

2軸2舵船の操縦性の研究は、芳村⁽⁴⁾、李⁽⁵⁾など

による詳細な研究があるが、2軸1舵船については意外と少ない。古くは玉井ら⁽¹⁾の研究があるが、実船試験結果や自由航走模型試験結果にとどまっている。これに対して湯室⁽²⁾は、流体力学的な見地から研究を行っているが、残念ながら船体は存在せず、プロペラ・舵にとどまっている。2軸1舵船の操縦運動を、流体力学的背景に基づいて予測するには、船体・プロペラ・舵の干渉係数の取り扱いを明確に

¹ 学生会員 北海道大学大学院水産科学院 (〒041-8611 函館市港町 3-1-1) mskondo@eis.hokudai.ac.jp

² 正会員 ジャパンマリンユナイテッド(株)

³ 正会員 北海道大学水産科学研究院 (〒041-8611 函館市港町 3-1-1) y-yoshi@fish.hokudai.ac.jp

することが不可欠となる。しかし、左右のプロペラが船体中心線上の舵に及ぼす影響は、舵がプロペラ直後に無いことから2軸2舵船より複雑である。

本論ではこうした点を踏まえ、拘束模型試験を実施して、操縦運動推定法の検討を行った。その際、数学モデルは、実績のある1軸1舵船用のMMG数学モデル⁽³⁾を基本にし、それに2軸1舵の特徴を加えることとした。供試船は2軸1舵のフェリーとし、その主要目を表1に、模型船の写真を図1に示す。

表1 供試船の主要目

L_{pp} (垂線間長)	(m)	2.344
B (型幅)	(m)	0.356
d_m (平均喫水)	(m)	0.100
トリム	(m)	0.
∇ (排水容積)	(m^3)	0.0443
x_G (重心前後位置)	(m)	-0.100
D_p (プロペラ直径)	(m)	0.0756×2
P/D_p (ピッチ比)		1.103
回転方向		外回り
軸間距離/ D_p		1.32
λ (舵アスペクト比)		1.470
η ($=D_p$ /舵高さ)		0.879
$A_R/(L_{pp}d_m)$		1/46.7

図1 供試模型船

2. 拘束模型試験

拘束模型試験は、主に舵角試験を北海道大学の曳航水槽、またCMTはJMU運動性能水槽にて実施した。流体力は図2に示すように、原点を船体中央に固定した座標系に従って計測した。検力計は一点ゲージ方式とし、船体中央に取り付けた。なお、一点ゲージ方式の場合、特に N モーメントが大きく、ゲージ歪みも大きくなるため、事前に分力検定を行い、解析の段階で分力補正を行った。模型船はヒープ、ピッチを自由とした。

図2 2軸1舵の操縦流体力の座標系

舵直圧力は操舵機の舵軸に取り付けた検力計で計測した。プロペラ推力の計測には2台の自航動力計を使用し、左右のプロペラを同一回転数に設定した。船速は1.0m/s ($F_n=0.209$)で一定とし、プロペラ回転数を変えることによって荷重度を変更して実験を行った。流体力は次式のように無次元化した。ただし、 $L=L_{pp}$ 、 $d=d_m$ (平均喫水)、 ρ は水の密度、 U は船速、 n はプロペラ回転数を表す。

$$\left. \begin{aligned} X' &= X / \left(\frac{\rho}{2} L d U^2 \right) \\ Y' &= Y / \left(\frac{\rho}{2} L d U^2 \right) \\ N' &= N / \left(\frac{\rho}{2} L^2 d U^2 \right) \\ F'_N &= F_N / \left(\frac{\rho}{2} L d U^2 \right) \\ K_{T(s)} &= T_s / (\rho D_p^4 n^2) \\ K_{T(p)} &= T_p / (\rho D_p^4 n^2) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

3. 舵・プロペラの干渉係数

3.1 解析方法

2軸船において、左右のプロペラ推力 T_s (右舷)と T_p (左舷)については、直進航走中は基本的に同じであるが、操舵あるいは旋回・斜航すると、プロペラの流入速度が左右で異なる結果、左右の推力に差が生じる。軸間距離が長い場合、これが船に回頭モーメントを与えることになる。しかし、多くの場合、軸間距離はプロペラ直径のオーダーなので、ここでは左右の推力差を無視して以下の取扱を行う。

- (1) 左右のプロペラ推力を合わせて1軸のプロペラ推力とする。
- (2) プロペラ直径を $(\sqrt{2})$ 倍とし、プロペラ回転数を $(1/\sqrt{2})$ 倍として解析を行う。

$$\left. \begin{aligned} n^* &= n/\sqrt{2} \\ D_p^* &= \sqrt{2}D_p \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

このような1軸相当回転数 n^* とプロペラ直径 D_p^* を用いて解析すると、プロペラの前進定数 J はもとの2軸の状態と変わらない他、2軸合わせたプロペラ推力係数も次式で表現できる。

$$\begin{aligned} T &= T_S + T_P \\ &= \rho(K_{T(S)} + K_{T(P)})D_p^4 n^2 \\ &= \rho \left(\frac{K_{T(S)} + K_{T(P)}}{2} \right) (\sqrt{2}D_p)^4 \left(\frac{1}{\sqrt{2}}n \right)^2 \\ &= \rho \tilde{K}_T D_p^{*4} n^{*2} \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、 $\tilde{K}_T$ は左右のプロペラ推力係数の平均値となる。

推力減少係数 $(1-t)$ は単純に左右のプロペラ推力の合計から求めることができる。すなわち、

$$(1-t)T = (1-t)(T_S + T_P) = -X_0 \quad (4)$$

プロペラの有効伴流係数 $(1-w)$ は計測した左右のプロペラ推力から個別に求めたが、直進中は左右で大きな違いはなく、後述する舵力に及ぼすプロペラ後流の解析では左右の平均値を用いて解析した。

また、プロペラ有効伴流の運動に対する変化は複雑であり、これをプロペラ軸間距離や運動の関数として表すことも可能であるが、この変化は船尾形状やプロペラ回転方向にも依存し、必ずしも明確でない。また、特定のプロペラ荷重度における運動変化を考慮するだけでは不十分という指摘⁽³⁾もあり、後述する操縦運動シミュレーションでは $(1-w)$ を一定値として取り扱った。

一方、MMGモデルによる1軸1舵の舵有効流速のモデルは次式で表される⁽³⁾。ただし、 ε は u_{R0}/u_P ($= (1-w_R)/(1-w)$)であり、プロペラの有効伴流係数に対する舵位置の有効伴流係数の大きさとなっている。また、 κ は k_x/ε であり、舵位置におけるプロペラ増速率を表す。

$$u'_R = \varepsilon(1-w) \times \sqrt{\eta \left\{ 1 + \kappa \left(\sqrt{1 + 8K_T/(\pi J^2)} - 1 \right) \right\}^2 + (1-\eta)} \quad (5)$$

舵直圧力一致法によって、上記の舵有効流速を解析するに際しても、(5)式中の K_T 、 J 、 $(1-w)$ の特性は前述の1軸として解析した結果を使用する。た

だし、 η はもとのプロペラ直径から求めており、表1の要目に掲げた値を使用する。

また、船体の整流係数、および船体と舵との干渉係数については、MMGモデルではそれぞれ次式で表される⁽³⁾が、2軸1舵船も舵は1つであることから、1軸1舵船と同じ解析方法が適用できる。

$$\beta_R = \gamma_R(\beta - r'l'_R) \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} X'_R &= -(1-t_R)F'_N \sin \delta \\ Y'_R &= -(1+a_H)F'_N \cos \delta \\ N'_R &= -(x_R + a_H x_H)F'_N \cos \delta \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

3.2 解析結果

2軸1舵の供試模型船の干渉係数を表2の左側に示す。同表の右側にはITTCベンチマークデータの供試船となっている1軸1舵KCSコンテナ船の各種の干渉係数⁽⁶⁾を参考までに比較する。

表2 干渉係数の比較

	2軸1舵 フェリー	1軸1舵 KCS コンテナ船
$1-t$	0.797	0.811
$1-w$	0.856	0.664
$1-t_R$	0.853	0.558
a_H	0.402	0.232
x_H	-0.646	-0.712
γ_R	0.393	0.412
ε	0.737	0.906
κ	0.168	0.707
k_x	0.124	0.641

表2より、2軸1舵では $(1-w)$ が大きく、 ε と κ が通常の1軸1舵と比べて小さくなっているのが特徴的である。本供試模型船は両軸をシャフトブラケットで支持されているため、プロペラ有効伴流が小さく、 $(1-w)$ が大きくなっている。

また、 ε は2軸1舵船では舵位置の伴流がプロペラ位置よりも大きくなって $(1-w_R)$ が小さくなるため、この値が小さい。 κ は2軸1舵の場合は舵位置では左右のプロペラ噴流が舵に当たりにくくなることから、この値が低下すると考えられる。

この点について、本論の冒頭にも紹介したように、湯室⁽²⁾は2軸のプロペラ軸間距離 $(2y_p)$ を種々に変え、これらのプロペラ後流中の舵角試験を詳細に行っている。ただし、船体は無い。文献(2)に掲載されたプロペラ推力と舵直圧力の計測結果の図を読み取り、

図3 2軸1舵のプロペラ後舵角試験結果の再解析
(文献(2)に掲載された図表からの再解析結果)

これを(3)式、(5)式で再解析し、2軸1舵状態のプロペラ増速率 k_x (この実験では κ と同じ) を求めた結果を図3に示す。横軸がプロペラ直径で無次元化したプロペラ軸間距離で、プロペラの増速率 k_x を縦軸で表している。また、同図には1軸1舵船の平均的なプロペラ増速率($k_x=0.6$)を軸間距離=0の位置に×印で示す。この結果から、軸間距離がプロペラ直径程度では、1軸1舵船の約1/2程度に低下し、本供試船のように軸間距離がプロペラ直径の1.3倍では1/3程度、更に軸間距離が長くなってプロペラ直径の2倍以上になると、2軸プロペラの後流影響がほとんど無くなることを示している。

同図には表2に示した本供試模型船のプロペラ増速率を●印で表すが、湯室の実験結果よりやや小さいものの、これに近い結果が得られており、湯室の実験結果と整合性がある。

4. 操縦運動シミュレーション

前述の干渉係数の取り扱いに従って、2軸1舵の本供試模型船の操縦運動シミュレーションを行い、これらを自由航走模型試験結果と比較する。

4.1 シミュレーションの数学モデル

シミュレーションを行う数学モデルは、1軸1舵船の標準的なMMG型数学モデルを使用し、プロペラ直径を2軸の $\sqrt{2}$ 倍とし、プロペラ回転数を $1/\sqrt{2}$ 倍として計算する。プロペラの推力の K_T-J 特性は2軸船のプロペラと同じである。

運動方程式は(8)式に示すとおりで、式中の u_G 、

v_G 、 r_G は船体重心における速度成分を、右辺は船体中央における定常流体力成分を表す。流体力はMMGの考え方に従って、船体、舵、プロペラの各力の成分に分離する。

$$\left. \begin{aligned} (m+m_x)\dot{u}_G - (m+m_y)v_G r_G &= \frac{\rho}{2} L d U^2 (X'_H + X'_P + X'_R) \\ (m+m_y)\dot{v}_G + (m+m_x)u_G r_G &= \frac{\rho}{2} L d U^2 (Y'_H + Y'_R) \\ (I_{zz} + J_{zz})\dot{r}_G &= \frac{\rho}{2} L^2 d U^2 \{N'_H + N'_R - x'_G(Y'_H + Y'_R)\} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

主船体流体力 X_H 、 Y_H 、 N_H は(9)式に示す船体中央における β と r 'の多項式で表す。CMTなどの拘束模型試験で計測された本供試模型船の船体流体力微係数を表3に掲げる。

$$\left. \begin{aligned} X'_H &= X'_0 + X'_{\beta\beta}\beta^2 + (X'_{\beta r} - m'_y)r' + X'_{rr}r'^2 + X'_{\beta\beta\beta}\beta^3 \\ Y'_H &= Y'_\beta + (Y'_r - m'_x)r' + Y'_{\beta\beta}\beta^2 \\ &\quad + Y'_{\beta\beta r}\beta^2 r' + Y'_{\beta rr}\beta r'^2 + Y'_{rrr}r'^3 \\ N'_H &= N'_\beta + N'_r r' + N'_{\beta\beta}\beta^2 \\ &\quad + N'_{\beta\beta r}\beta^2 r' + N'_{\beta rr}\beta r'^2 + N'_{rrr}r'^3 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

表3 船体流体力微係数

X'_0	-0.0212
$X'_{\beta\beta}$	-0.0348
$X'_{\beta r} - m'_y$	-0.0957
X'_{rr}	-0.0070
$X'_{\beta\beta\beta}$	-0.0018
Y'_β	0.2501
$Y'_r - m'_x$	0.0346
$Y'_{\beta\beta}$	2.6087
$Y'_{\beta\beta r}$	-1.7091
$Y'_{\beta rr}$	1.1682
Y'_{rrr}	-0.0461
N'_β	0.0966
N'_r	-0.0513
$N'_{\beta\beta}$	0.4218
$N'_{\beta\beta r}$	-0.8629
$N'_{\beta rr}$	0.1459
N'_{rrr}	-0.0439

プロペラの力は(2)式に示した1軸相当プロペラ直径 D_P^* とプロペラ回転数 n^* を用いて次式で表す。

$$X'_P = 2(1-t)K_T D_P^{*4} n^{*2} / (L d U^2) \quad (10)$$

ただし、 $K_T = a_0 + a_1 J + a_2 J^2$, $J = \frac{(1-w)u}{n^* D_p^*}$

また、船体と舵との干渉は既に示した(6)、(7)式を用いる。

4.2 自由航走模型試験

本供試模型船の自由航走模型試験を実施し、旋回航跡やスパイラル特性、Z 試験の時系列を求めた。実験は北海道大学水産学部水泳プールと JMU 運動性能水槽の双方で実施した。船速は実船の航海速力 ($F_n=0.268$)、および半速程度の $F_n=0.188$ とし、GM は実船で 1.87m とした。

実験は無線送信機による手動操船で直進させた後、定常船速に達した時点で自動操舵に切替えて実施した。舵角、回転数の他、船体運動の回頭角、回頭角速度については 1 軸ファイバーオプティックジャイロ (FOG)、横傾斜角などは 6 軸慣性ジャイロによって計測し、航跡や船速は測量で用いられる自動追尾トータルステーションを用いて陸上から計測した。船内データと陸上データの同期は、実験開始時にトータルステーションの反射プリズムを移動させ、双方のデータに記録される移動記録から同期をとった。なお、左右のプロペラは、両舷軸をギアで分割して左右同じ回転数にした。

4.3 シミュレーションと自走模型試験の比較

舵角右 35°旋回航跡のシミュレーション結果を図 4 の曲線で示す。自由航走模型試験の航跡は図中の

図 4 舵角 35°旋回航跡の比較

図 5 スパイラル特性の比較

図 6 20°Z 試験の時系列の比較

○□印であり、船速が増加するとアドバンスがやや大きくなっている。シミュレーションの航跡はいずれの船速でも概ね実験結果と一致している。

図5には船速毎についてスパイラル特性の比較を示す。自由航走模型試験結果は上記と同様に○□印である。これらの比較から、シミュレーション結果は自由航走模型試験結果と大略一致している。

図6には各船速について20°/20°Z試験における実舵角と回頭角の時系列を示す。これらの比較から、第1 オーバーシュート角の自由航走模型試験結果とシミュレーション結果がほぼ一致していることがわかる。

以上の結果より、(2)式に示した1軸相当回転数とプロペラ直径を用いることによって、1軸1舵の操縦運動数学モデルで2軸1舵船の操縦運動を推定できることが確認できた。

5. 結 言

2軸1舵船の船体・プロペラ・舵の干渉係数について、拘束模型試験結果を解析し、また操縦運動をシミュレーションするに際して、1軸相当プロペラ回転数とプロペラ直径を用いることによって、2軸1舵船の操縦運動を容易にシミュレーションできることを示した。

本研究の主な結論を以下に要約する。

- 1) 2軸船のプロペラ直径を $(\sqrt{2})$ 倍とし、プロペラ回転数を $(1/\sqrt{2})$ 倍として1軸1舵船と同様な方法で解析を行い、また操縦シミュレーションに際しても同じ取扱いをする方法は、2軸1舵船の簡単で実用的な操縦運動モデルとして大変有効である。
- 2) プロペラと舵の干渉係数について、2軸1舵船では ε と k_x が通常の1軸1舵と比べて小さくなるのが特徴的である。 ε はプロペラの有効伴流係数に対する舵位置の有効伴流係数の大きさであり、2軸1舵船では舵位置の伴流がプロペ

ラ位置よりも一般に大きいために、この値が小さくなる。

- 3) プロペラ増速率 k_x の減少は、左右のプロペラ噴流が舵に当たりにくいことがこの要因である。この値は、本供試模型船では通常の1軸1舵船の1/4程度になったが、湯室の実験結果⁽²⁾を再解析することによって、この値が妥当である他、プロペラ軸間距離に大きく依存することが改めて確認できた。

謝 辞

本研究の一部はJSPS科研費 24360353の助成を受けたことを付記し関係各位に感謝申し上げます。

参考文献

- (1) 玉井浩正・鬼木博文：2軸高速コンテナ船の操縦操船試験解析，関西造船協会誌，154号，pp. 41-50，1974.
- (2) 湯室彰規：2軸1舵船の舵特性に関する実験結果について，関西造船協会誌，194号，pp. 53-64，1984.
- (3) 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，pp. 27-80，1981.
- (4) 芳村康男・桜井 仁：浅水域の操縦運動数学モデルの検討(第3報)(2軸2舵船の操縦性能について)，関西造船協会誌，211号，pp. 115-126，1987.
- (5) 李 承建・藤野正隆・深沢塔一：2軸2舵船の操縦数学モデルについて，日本造船学会論文集，163号，pp. 109-118，1988.
- (6) 芳村康男・福井 洋・横田大武・矢野大行：横傾斜を含む4自由度操縦運動数学モデルの検討，日本船舶海洋工学会講演会論文集，16号，pp. 17-20，2013.