

曳航中の振れ回り運動による針路安定性評価法 におよぼすプロペラ流の影響

正員 重廣律男* 正員 刀根隆典**

Influences of Propeller Race on the Evaluation of Course Stability by means of Slewing Motions in a Towed Condition

by Ritsuo Shigehiro, Member Takanori Tone, Member

Summary

The course stability of a ship is a difficult task to be determined from the quantity of the performance in the initial design stage. Most of newly-designed ships' maneuver abilities are examined by the model tests in a towing tank. Although, the drawback of this experimental method is that it will have high running costs to investigate the course stability. In the present state, it is too costly to conduct the experiments of maneuvering motions with a fishing vessel in the towing tank. The authors have proposed the simple evaluation method of the course stability by using a circulating water channel. However, the model of the ship is too small to mount its power motor and propeller. The simple evaluation method neglected the influence of propeller race on the course stability.

In this paper, the simple evaluation method is improved and takes into account the influence of propeller race on slewing motions in a circulating water channel. As the towing point moves forward at a constant speed, the amplitude of slewing motion decreases and its period gets longer. The index of evaluation (a_T) is represented by the point of towing from the center of gravity. Accordingly, the influence of propeller race (Δa_T) is the difference between the index of evaluation on a propeller working and the one of a dummy boss. The results are checked and compared with the course stability of sea trials. By using the present method, new fishing vessels can be designed to achieve the improvement of course stability.

1. 緒 言

新しい計画船の操縦性能で定量的な性能把握が難しいものの一つに針路安定性能が挙げられる。商船等では、試作模型船での操縦性能実験を実施して要求性能達成への設計法が検討される^{1),2)}。一方、漁船の場合、船価等の理由により操縦性能試験水槽を使用した詳細な検討が難しいのが現状である。著者らは前報³⁾で操縦性能試験水槽に比べ運用負担が軽い回流水槽を使用して、曳航中の振れ回り運動評価から針路安定性能の簡便な評価法を提案した。しかし、本法はプロペラ無し模型で実施できる実験法の簡便性と船体のみ針路安定性能が主体を占めることから、プロペラ流の影響を無視したものである。プロペラ流が針路安定性能におよぼす影響は、MMG(操縦運動の数学モデル研究グループ)での検討が重ねられ^{4),5)}、舵とプロペラを配置する船尾(以下、通常

船尾と呼ぶ)であるとおおむね針路安定側に作用する。これの主な理由は、次の二つである。

- (1) プロペラ流により船尾流場が増速されて、船体周りの圧力分布が裸殻状態のそれに比べ後方寄りとなる^{6),7)}。
- (2) プロペラ流により舵流入速度が増速され、舵直圧力が増加する^{8),9),10)}。

本論文では前報の実験方法³⁾を改良して、プロペラ流の影響を含む針路安定性能の簡便な評価法を提案する。手法は複雑な船尾流場変化の詳細には立ち入らず、回流水槽中でプロペラ駆動模型船を曳航して、振れ回り運動の減衰過程の比較を行うものである。また、ポッド式プロペラの電気推進システムを採用する場合(以下、ポッド船尾と呼ぶ)、船尾形状は針路安定性能へ大きく影響し、初期設計段階でも完成度の高い設計が要求される¹¹⁾。本論文の目標は、提案した評価法の有効性確認としてポッド船尾漁船の針路安定性能を初期設計段階で精度良く推定することである。これには、針路安定性能へのプロペラ流の影響を評価することが鍵となる。

曳航中の振れ回り運動は、曳航点を船首側に移動すると減衰し、その運動周期も長くなる¹²⁾。これにプロペラ駆動有無の運動を課してプロペラ流の影響を実験的に得る方法で

* 鹿児島大学 水産学部 漁業工学分野

** 尾道造船(株) 設計部 船殻設計課

ある。つまり、プロペラ駆動時の評価曳航点(a_{Tp})とプロペラを外した状態(以下、ダミーボス状態と呼ぶ)の評価曳航点(a_{T0})の差をプロペラ流の影響(Δa_T)とする方法である。

2. 回流水槽での曳航中の操縦運動モデル

2.1 被曳航船の操縦運動方程式

曳航船・被曳航船系を Fig. 1 に示す回流水槽中での曳航状態に置き換える場合、曳航船が一定速度で常に直進していることに対応する。被曳航船は一定流水中で対水運動を行う。よって、被曳航船の運動方程式の変数は、対水速度項(u, v)と流水項(U)を除く対地速度項(u_G, v_G)とに分けて記述する必要がある。本報では舵等の付加物の影響は、供試模型船が小型であることから付加物付き船体として船体の流体力項に含ませている。また、針路安定性能の定性的な評価に焦点を絞り、操縦運動方程式を線形化する。さらに、プロペラ推力は、ある荷重度での一定値(T_o)として、前進方向のみに作用するとする。プロペラ駆動による定常的な横力や旋回モーメントは、実験時の当て舵、または、ポッドの旋回によるプロペラ推力方向の修正によって除かれる。従って、曳航索の張力(T_s)を外力項として取り扱えば船体の重心に固定された G - xy において、前進速度を u 、横流れ速度を v 、旋回角速度を r として操縦運動方程式は(1)式で表される。

$$\left. \begin{aligned} m' \dot{u}'_G &= X'_o u'^2 + T'_s - m'_x \dot{u}' + T'_o \\ m' (\dot{v}'_G + u'_G r') &= Y'_v v' + (Y'_r - m'_x u') r' - T'_s (\psi' + \theta') - m'_y \dot{v}' \\ I'_G \dot{r}' &= N'_v v' + N'_r r' - a' T'_s (\psi' + \theta') - J'_z \dot{r}' \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ただし、 m' は船体質量の無次元値であり、 I'_G は重心回りの慣性モーメントの無次元値である。 X'_o は直進時の抵抗係数である。 Y'_v, N'_v は横流れによる力とモーメントの微係数である。 Y'_r, N'_r は旋回による力とモーメントの微係数である。 m'_x, m'_y, J'_z は各運動方向の付加質量、付加慣性モーメントの無次元値である。 θ は曳航索の振れ角であり、 ψ は船首振れ角である。また、無次元化を(2)式に示す。

$$\left. \begin{aligned} X', Y' &= \frac{X, Y}{\frac{1}{2} \rho U^2 L_{pp} d}, \quad N' = \frac{N}{\frac{1}{2} \rho U^2 L_{pp}^2 d} \\ m' &= \frac{m}{\frac{1}{2} \rho L_{pp}^2 d}, \quad I'_G = \frac{I_G}{\frac{1}{2} \rho L_{pp}^4 d} \\ u', v' &= \frac{u, v}{U}, \quad r' = r \frac{L_{pp}}{U}, \quad a', \ell' = \frac{a, \ell}{L_{pp}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ただし、 U は曳航速度であり、 ρ は流体の密度である。 L_{pp} は垂線間長さ、 d は平均喫水である。また、 ℓ は索長、 a は重心から曳航点の距離である。

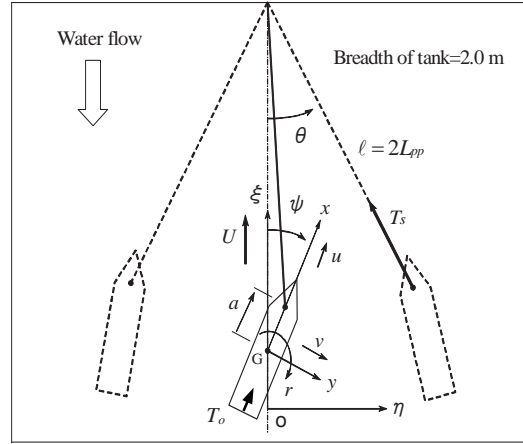


Fig.1 Coordinate systems.

2.2 回流水槽中での振り回り運動の変数変換

曳航中の安定判別が行い易いように運動方程式の変数(u, v, r)を曳航索の振れ角(θ)と船首振れ角(ψ)に変換する。曳航索が一直線上に張っていると、Fig. 1 に示す θ, ψ と u, v, r の関係¹²⁾ から(3)式を得る。

$$\left. \begin{aligned} u &= U \cos \psi + \ell \dot{\theta} \sin(\psi + \theta) \\ v &= -U \sin \psi + \ell \dot{\theta} \cos(\psi + \theta) - ar \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

(3)式から対水速度項(u, v)と流速項(U)を除く対地速度項(u_G, v_G)とに分ける。さらに、無次元化と線形化を行って

$$\left. \begin{aligned} u' &= 1 \\ u'_G &= \ell' \dot{\theta}' (\psi' + \theta') \cong 0 \\ v' &= -\psi' + \ell' \dot{\theta}' - a' r' \\ v'_G &= \ell' \dot{\theta}' - a' r' \\ \dot{u}' &= \dot{u}'_G = 0 \\ \dot{v}' &= -\dot{\psi}' + \ell' \ddot{\theta}' - a' \dot{r}' \\ \dot{v}'_G &= \ell' \ddot{\theta}' - a' \dot{r}' \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

となる。(4)式を(1)式の前進の式に代入して、張力と抵抗、推力の釣り合いの式を得る。

$$T'_s = -(X'_o + T'_o), \quad (X'_o < 0, T'_o > 0) \quad (5)$$

同様に横流れと旋回の式に(4)式を代入すると曳航索の振れ角(θ)と船首振れ角(ψ)との連成運動方程式を得る。

$$\left. \begin{aligned} \ell'(m'+m'_y)\ddot{\theta}' - \ell'Y'_v\dot{\theta}' + T'_s\theta' - a'(m'+m'_y)\dot{\psi}' \\ - (Y'_r - m'_x + m'_y - a'Y'_v)\dot{\psi}' + (T'_s + Y'_v)\psi' = 0 \\ - \ell'N'_v\dot{\theta}' + a'T'_s\theta' + (I'_G + J'_z)\dot{\psi}' \\ + (aN'_v - N'_r)\dot{\psi}' + (N'_v + a'T'_s)\psi' = 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$H_3 = \begin{vmatrix} A_1 & A_3 & 0 \\ A_0 & A_2 & A_4 \\ 0 & A_1 & A_3 \end{vmatrix} = A_3H_2 - A_4A_1^2$$

$$\begin{aligned} &= T'_s\ell'\{(m'+m'_y)N'_r + Y'_\beta(I'_G + J'_z)\}(a'Y'_\beta - N'_\beta)\{(\ell' + a')h_2 \\ &- \ell'\{(m'+m'_y)N'_r + Y'_\beta(I'_G + J'_z)\} \\ &+ h_2\{N'_r + a'(Y'_r - m'_x + m'_y)\}\} \geq 0 \end{aligned} \quad (11)$$

2.3 曳航点の安定条件

被曳航船の曳航点(a')を船首側へ移動すると安定になる曳航点の条件は、Routh-Hurwitz の安定判別から得られる。また、この安定判別が行い易いように、(6)式の流体力微係数の値が正になるように次式の変換を行う。

$$Y'_\beta = -Y'_v \geq 0, \quad N'_\beta = -N'_v \geq 0, \quad N'_r = -N'_r \geq 0 \quad (7)$$

$\theta = \alpha e^{2t}$, $\psi = \beta e^{2t}$ と置いて(6)式に代入して特性方程式

$$A_0\lambda^4 + A_1\lambda^3 + A_2\lambda^2 + A_3\lambda + A_4 = 0 \quad (8)$$

を得る。ただし、

$$\left. \begin{aligned} A_0 &= \ell'(m'+m'_y)(I'_G + J'_z) \\ A_1 &= \ell'\{(m'+m'_y)N'_r + Y'_\beta(I'_G + J'_z)\} \\ A_2 &= T'_s\{(I'_G + J'_z) + a'(\ell' + a')(m'+m'_y)\} \\ &\quad + \ell'\{N'_\beta(Y'_r - (m'+m'_x)) + Y'_\beta N'_r\} \\ A_3 &= T'_s\{N'_r + (\ell' + a')(a'Y'_\beta - N'_\beta) + a'(Y'_r - m'_x + m'_y)\} \\ A_4 &= T'_s(a'Y'_\beta - N'_\beta) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

特性方程式の根の実数部が負であることが安定の条件である。Routh-Hurwitz の安定判別法は、係数 $A_0 \sim A_4$ が全て正であることと、(10)式の係数行列が全て($n=1 \sim 4$)正である。

$$H_n = \begin{vmatrix} A_1 & A_3 & 0 & 0 \\ A_0 & A_2 & A_4 & 0 \\ 0 & A_1 & A_3 & 0 \\ 0 & A_0 & A_2 & A_4 \end{vmatrix} \geq 0 \quad (n=1 \sim 4) \quad (10)$$

ここでは、評価根拠の明確化に主眼を置いて、曳航点の安定条件に関する項のみを示す。曳航点の安定条件は、係数行列の第3項(H_3)から得られる³⁾。

(11)式の最初の{ }の項は、正であるので

$$h_3 = (a'Y'_\beta - N'_\beta)[(\ell' + a')h_2 - \ell'\{(m'+m'_y)N'_r + Y'_\beta(I'_G + J'_z)\}] + h_2\{N'_r + a'(Y'_r - m'_x + m'_y)\} \geq 0 \quad (12)$$

を満足すれば良い。ここで、索長が曳航点に比べて十分に長いとして、($\ell' + a' \cong \ell'$)と簡略化して曳航点(a')について解くと安定となる曳航点の条件が得られる。

$$a' \geq \frac{1}{1 - \varepsilon_o} \left(\frac{N'_\beta}{Y'_\beta} + \frac{\varepsilon_o N'_r}{Y'_r - m'_x + m'_y} \right) \quad (13)$$

ただし、

$$\varepsilon_o = \frac{h_2(Y'_r - m'_x + m'_y)}{\ell'Y'_\beta[(m'+m'_y)N'_r + Y'_\beta(I'_G + J'_z) - h_2]} \quad (14)$$

$$h_2 = \ell'\{N'_\beta(Y'_r - (m'+m'_x)) + Y'_\beta N'_r\} + T'_s\{I'_G + J'_z + I'_k(\ell')\} \geq 0 \quad (15)$$

$$I'_k(\ell') = \frac{m'+m'_y}{(m'+m'_y)N'_r + Y'_\beta(I'_G + J'_z)} [a'(\ell' + a')(m'+m'_y)N'_r + (I'_G + J'_z)\{(\ell' + a')N'_\beta - N'_r - a'(Y'_r - m'_x + m'_y)\}] \quad (16)$$

(13)式の ε_o を微小量としてマクローリン展開を行い、その一次項まで取ると次式を得る。

$$a' > \frac{N'_\beta}{Y'_\beta} + \varepsilon_o \left(\frac{N'_\beta}{Y'_\beta} + \frac{N'_r}{Y'_r - m'_x + m'_y} \right) \quad (17)$$

曳航点の安定条件は、横流れの着力点(N'_β/Y'_β)が主要項である。さらに、これより前方に安定となる曳航点があることも分かる。その量は(14)、(15)式から船体の針路安定指数 $\{N'_\beta(Y'_r - (m'+m'_x)) + Y'_\beta N'_r\}$ と索長および張力(抵抗とプロペラ推力)に依存する。従って、曳航点(a')と索長(ℓ')およびプロペラ推力(T'_o)を設定して、実験的に安定となる曳航点を求めることは、プロペラ流の影響を含む針路安定性能の評価を行うことになる。

3. 供試模型船と曳航実験

供試船は、通常船尾の「南星丸」とポッド船尾の「開発漁船」である。

3.1 南星丸

南星丸は鹿児島大学水産学部漁業練習船であり、総トン数 175 トン、一軸一舵の通常船尾である。舵はシリング舵である。航海速度は 12 ノット($Fn=0.338$)である。船体の主要目を Table 1 とボディープランを Fig. 2 に示す。

供試模型船は縮尺 1/17 であり、垂線間長 L_{pp} が 2.000 m である。試験重量は満載状態の 100.55 kg である。また、操舵等を外部指令で行える自由航走仕様である。プロペラ回転数は光学式センサーで計測される。本実験での舵は、針路安定性能を変える付加物としての役目と直進時の定常旋回力を補正するものである。実験的に針路安定性能を変えることを狙いに三種類の舵を用意した。シリング舵とこれと外形寸法が同じで断面形状が翼型のもの(以下、普通舵と呼ぶ)と普通舵で舵高さが同じで幅が半分のもの(以下、1/2 舵と呼ぶ)である。これらの要目を Table 2 と外観写真を Photo. 1 に示す。プロペラ模型は、本実験において流水加速装置としての役目を果たせれば良いので翼断面形状が平板(翼厚 1.0 mm)の簡易模型である。プロペラ模型の外観写真を Photo. 2 に示す。

Table 1 Principle dimensions of the Nansei-Maru,175GT.

| Items | Ship | Model |
|-------------------|--------------|--------------|
| L_{pp} (m) | 34.000 | 2.000 |
| B (m) | 7.500 | 0.441 |
| d (m) | 2.900 | 0.171 |
| x_G (m) fore(+) | -0.790 | -0.046 |
| C_b | 0.647 | 0.647 |
| Propeller type | 4blades, CPP | 4blades, FPP |
| Diameter (m) | 2.400 | 0.141 |
| P/D (at 0.7R) | 0.860 | 0.860 |
| E.A.R. | 0.590 | 0.590 |
| Boss ratio | 0.283 | 0.283 |

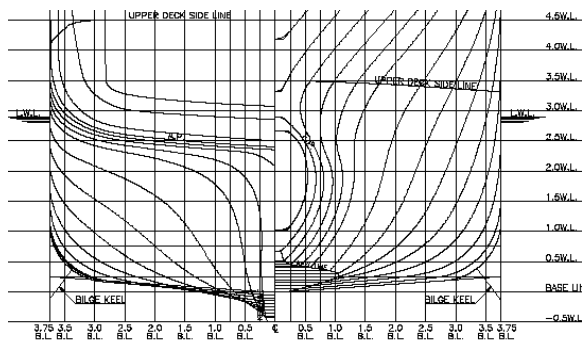


Fig. 2 Body plan of the Nansei-Maru,175GT.

Table 2 Dimensions of the models of rudders.

| Items | Schilling | Conventional | Half (1/2) |
|----------------|-----------|--------------|------------|
| Area (m^2) | 0.0135 | 0.0135 | 0.00675 |
| Height (m) | 0.132 | 0.132 | 0.132 |
| Breadth (m) | 0.102 | 0.102 | 0.051 |
| Aspect ratio | 1.29 | 1.29 | 2.59 |
| $A_R/L_{pp}d$ | 1/25 | 1/25 | 1/50 |

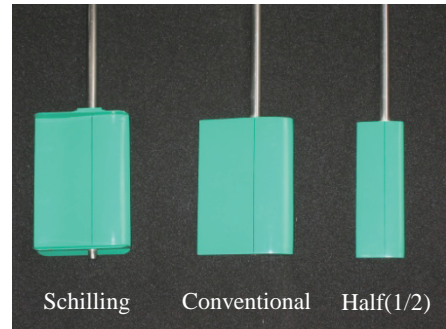


Photo. 1 Models of rudders.



Photo. 2 Model of the propeller.

3.2 開発漁船

供試船の実船は、総トン数 135 トンのまき網漁船で Fig. 3 に示す通常船尾である。供試模型船は、開発船としてポッド式プロペラ電気推進システムの採用を計画して排水量および浮心位置が同一になるように船体中央から後半部を Fig. 4 に示すバトックフロー船型としたものである。船体の主要目を Table 3 に示す。航海速度は、12 ノット($Fn=0.318$)である。

供試模型船は縮尺 1/29.6 であり、垂線間長 L_{pp} が 1.300 m である。試験重量は満載状態の 18.22 kg である。ポッド模型は出力 750kw クラスでトラクター型を想定した。ただし、プロペラ駆動方式は、船体上部に設置されたモーターの回転を傘歯車で伝達する Z ドライブ方式である。ポッド本体は旋回でき、プロペラ推力方向の修正が可能である。プロペラ模型は前述の簡易型であり、0.5 mm の真鍮板で翼を製作¹³⁾したものである。この要目を Table 4 に示す。また、針路安

定性能の向上を狙って、次の三点を設計指針として *photo. 3* に示すフィン在设计した。

- 1) フィン下端とプロペラ下端を一致させる。
- 2) アスペクト比は 1.0 である。
- 3) 模型フィンの面積は実船舵の 1/4 に相当する 400 mm^2 である。

Table 3 Principle dimensions of the round haul netter,135GT.

| Items | Ship | Model |
|-------------------|--------|--------|
| L_{pp} (m) | 38.500 | 1.300 |
| B (m) | 8.100 | 0.274 |
| d (m) | 2.900 | 0.098 |
| x_G (m) fore(+) | -2.350 | -0.079 |
| C_b | 0.522 | 0.522 |

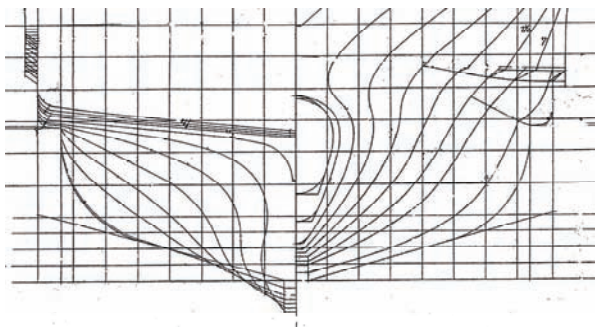


Fig. 3 Body plan of the round haul netter,135GT.

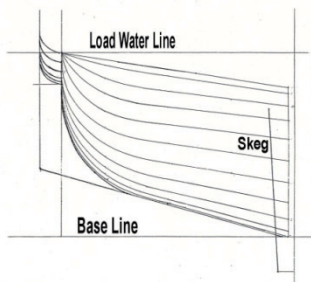


Fig. 4 Body plan of the buttock flow stern.



Photo. 3 Pod propulsion with the fin.

Table 4 Dimensions of the podded drive-propeller.

| Items | Propeller |
|------------------|-----------|
| Number of blades | 4 |
| Diameter (mm) | 76.0 |
| P/D (at 0.7R) | 0.900 |
| E.A.R. | 0.550 |
| Boss ratio | 0.280 |

3.3 回流水槽中での曳航実験仕様

鹿児島大学共同実験施設の回流水槽は、垂直循環型の2プロペラ方式であり、観測部長さ6m、幅2m、水深1mである。最高流速は2.0 m/sである。実験仕様を以下に述べる。曳航索(直径0.6~1.0 mmのワイヤー)を流速が零の状態水面と平行に取り付ける。索長は $2L_{pp}$ である。索長は(15)式から船体の針路安定性能のゲインを意味する。本実験の場合、索長を明記する必要がある。索長に $2L_{pp}$ を用いた主な理由は、船体の針路安定性能の影響を2倍に拡大して評価できることと水槽内で十分な振れ回り運動ができることである。計測手順は一定流速中で模型船の曳航点を *Ordinate* の1/4間隔で移動して振れ回り運動を行わせる。振れ回り運動の観測は、5~6周期分を行えば充分である。

評価指標は、前報³⁾で定義した(18)式である。

$$V'_{Tm} = \frac{\pi B}{TU} \quad (18)$$

ただし、 B は重心位置の両振幅(m)であり、 T は振れ回り周期(s)である。さらに、実験的に $V'_{Tm} = 0.1$ になる曳航点を評価曳航点(a_T)と定義した。 a_T の値は重心位置からの *Ordinate* 表示である。 a_T の値が小さいことは、針路安定となる曳航点が重心位置近くにあることから、船体の針路安定性能が高いことを示す。本評価法では、ダミーボス状態の評価曳航点(a_{T0})とプロペラ駆動時の評価曳航点(a_{TP})との差をプロペラ流の影響($\Delta a_T = a_{T0} - a_{TP}$)とする。 Δa_T の値は、ダミーボス状態からのプロペラ流による針路安定性能の改善量を意味する。また、前報の結果から評価曳航点(a_T)が1.0後方に移動する(小さくなる)ことは、(19)式の着力点比較での針路安定性指数が0.05改善することに相当する。

$$D = \ell'_r - \ell'_\beta = \frac{N'_r}{Y'_r - (m' + m'_x)} - \frac{N'_\beta}{Y'_\beta} \geq 0 \quad (19)$$

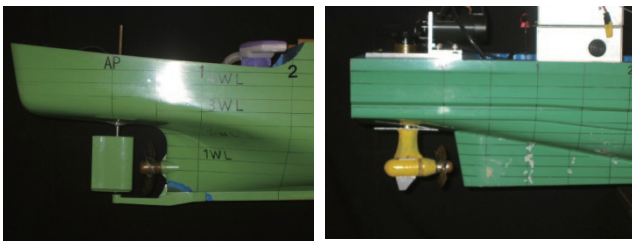
4. 実験的評価法

プロペラ駆動中での振れ回り実験の要点は、プロペラ駆動による定常旋回力の修正とプロペラ回転数の標準化である。

4.1 定常旋回力の修正

定常旋回力の修正は、通常船尾船であると直進時の当て舵に相当する。自由航走仕様の利点は、操舵が容易であり、かつ、定常旋回力の修正が精度良く短時間で行えることである。修正方法は曳航点を最先端にして、曳航状態を観測しながら船体が水槽中央付近で定常に曳航されるように操舵する。操舵量はプロペラ回転数にもよるが、0.5~1.5 度であった。

一方、ポッド船尾船の場合、供試模型船が小型であることとポッド機構の簡素化からポッド本体を船底で固定する方式を採用した。本仕様では、まず、定常旋回力の修正量を予測するための予行計測を行う。次に、水槽外でポッドの取り付け角度を修正して、その後結果確認を行う手順となる。本実験では、定常旋回力の修正に多くの時間を要した経験からこの操作を簡単に行える仕様にするには、実験効率の面で重要である。修正角度は2~6 度であった。供試模型船の船尾写真を Photo. 4 に示す。



The Nansei-Maru. The pod propulsion stern.

Photo. 4 Stern profiles of the models.

4.2 プロペラ回転数の標準化

曳航状態でプロペラ流が針路安定性能におよぼす影響を評価する上で実験流速とプロペラ回転数の標準化が必要である。加えて、プロペラ特性が得られていない簡易模型でも適用できるものが望まれる。本報では仲渡ら¹⁴⁾が提案した(20)式に示す見かけの前進率 J_s で実験流速とプロペラ回転数 n (rps)を標準化する。

$$J_s = \frac{V_s}{nD_p} \quad (20)$$

ただし、 V_s は船速(m/s)であり、 D_p はプロペラ直径(m)である。実験流速は、航海速力に相当する船速である。

本標準化では、まず、基準点として模型船が実験流速でほぼ自航するプロペラ回転数(以下、自航回転数と呼ぶ)を実験的に求める。自航回転数での見かけの前進率を J_{so} (以下、自航点と呼ぶ)とする。

次に、これより低い回転数で適当な張力を得て、振れ回り運動が可能な回転数を評価回転数とする。評価回転数での見かけの前進率 J_{sp} (以下、評価点と呼ぶ)は、自航点を基準に

実験定数 c を用いて

$$J_{sp} = c \cdot J_{so} \quad (21)$$

で表す。ただし、 $c=1.4 \sim 1.6$ である。

本法の評価点は、模型船の自航点より低い荷重度(J_s の大きい点)であるので設計の観点から安全側の評価である。しかし、多くの実績によると模型船の自由航走試験は実船に比べ針路安定になる傾向がある。これは、実船と模型船間の縮率影響の問題であるが、模型船の自航点が摩擦修正分だけ荷重度が高いことから説明できる。よって、低い荷重度設定と縮率影響が相殺し合い、安全側の余裕は小さくなる。操縦性能試験では、縮率影響を舵力効果の変化として捉える方法¹⁴⁾があるが、本法はプロペラ流による船体、舵の流体力変化を簡易的に実験定数 c で考慮したことに対応する。

c 値を決定した具体例を以下に示す。供試模型船はポッド船尾の開発漁船である。実験流速($U=1.13$ m/s, $Fn=0.318$)での自航回転数は 17.3rps である。自航点は $J_{so}=0.863$ である。次に、プロペラ回転数を段階的に変えて振れ回り運動の計測を行う。回転数が自航回転数の 80% ($J_s=1.08$)を超えると張力が小さくなり、定常な振れ回り運動が難しいことや、この回転数が 50% ($J_s=1.73$) 以下であるとプロペラ流の影響が小さくなり、ダミーボス状態の評価値に近づくことが判明した。この間の回転数で実施した振れ回り運動の計測結果を Fig. 5 に示す。 $J_s=1.49$ (10rps), $J_s=1.28$ (11.7rps)と $J_s=1.13$ (13.3rps) では、ほとんど変わらない評価曳航点 $a_{TP}=4.6 \sim 4.8$ が得られた。また、これら回転数に対応する c 値は $c=1.31 \sim 1.73$ である。従って、定常な振れ回り運動が行え、かつ、プロペラ流の影響を最大限に取り込めることを主眼に $c=1.4 \sim 1.6$ を採用した。実験定数 c に幅を持たせているのは、実験時の回転数設定を行い易くする狙いがある。以後は、(21)式の評価点でプロペラ流の評価実験を実施する。

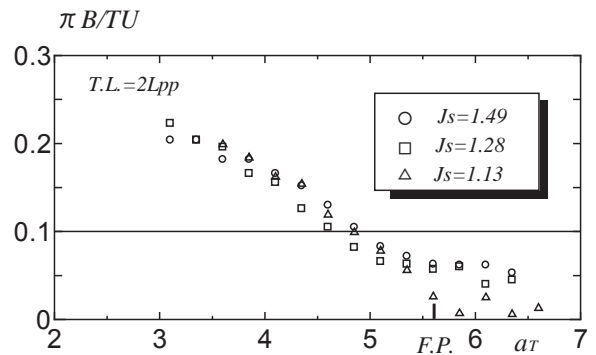


Fig. 5 Example for the slewing motions to change of propeller revolutions in a towed condition.

4.3 針路安定性能の基準

本評価法は、針路安定性能が判明している船の針路安定性

能を基準にして、これとの相対比較で評価精度を保証する必要がある。本報での針路安定性能の基準として、南星丸実船のスパイラル特性を Fig. 6 に示す。南星丸は操縦性能には問題無く、針路安定性能が非常に良い船である。また、小型船 ($L/V < 10$) では信川ら¹⁵⁾が指摘しているように針路不安定ループ幅が少しでもあると操船者は、不安に感じる。

小型船の初期設計段階での評価指針として、「非常に良い」から「不安定」までの評価を次の四段階に分ける。

- s) 「非常に良い」
- a) 「良い」
- b) 「中立安定」
- c) 「不安定」

ただし、「中立安定」は、わずかな正の変化で安定になり、逆に、負の変化で不安定にも成り得ることを意味する。

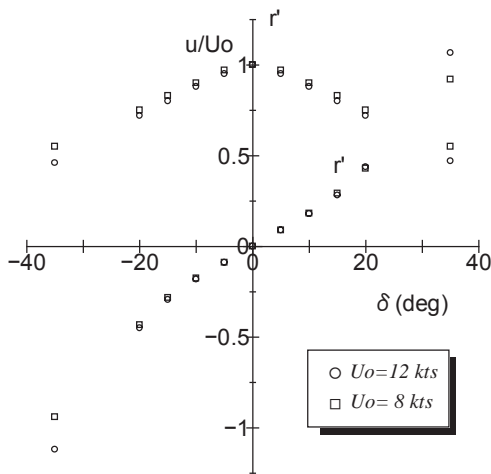


Fig. 6 Spiral maneuvers of the Nansei-Maru by the sea trial.

まず、振れ回り運動の基本となるダミーボス状態での評価について述べる。通常船尾で舵を変更した場合の振れ回り運動の計測結果を Fig. 7 に示す。シリング舵の評価曳航点は $a_{T0}=4.2$ である。普通舵の評価曳航点は $a_{T0}=4.3$ である。1/2 舵の評価曳航点は $a_{T0}=5.2$ である。シリング舵は普通舵に比べて、わずかであるが船体の針路安定性能が向上している。

1/2 舵は(22)式に示す舵面積(A_R)と直圧力係数勾配(f_a)の積による舵性能比較では、普通舵の約 73% の能力である。

$$f_a \cdot A_R = \frac{6.13\Lambda}{2.25 + \Lambda} A_R \quad (22)$$

ただし、 Λ はアスペクト比である。針路安定性能の劣化を狙った 1/2 舵では、定性的な特性が捉えられている。定量的には、普通舵に比べ評価曳航点が 0.9 大きくなることから(19)式の針路安定指数で約 0.05 劣化することに対応する。

次に、プロペラ駆動状態で舵を変更した場合のプロペラ流の影響について述べる。航海速度 12 ノット相当での自航点

は $J_{sp}=0.851$ である。評価点は(21)式から定常な振れ回り運動が行える $J_{sp}=1.25$ ($c=1.47$)を採用した。シリング舵と普通舵と 1/2 舵のそれぞれの結果を Fig. 8, Fig. 9 と Fig. 10 に示す。プロペラ流の影響は、シリング舵が $\Delta a_T=0.9$ であり、普通舵が $\Delta a_T=1.0$ であり、1/2 舵が $\Delta a_T=0.9$ である。舵を変更した通常船尾船では、プロペラ流の影響がほぼ同じである。

以上、基準性能との相対比較からプロペラ駆動時の評価曳航点と四段階評価とが対応付けられる。まず、シリング舵付き模型船($a_{TP}=3.2$)の評価は、実船と対応して s) 評価の「非常に良い」とした。次に、普通舵付き模型船($a_{TP}=3.3$)はシリング舵付きとほぼ等しい結果であるので s) 評価の「非常に良い」である。一方、1/2 舵付き模型船は普通舵付きに比べ針路安定指数で約 0.05 劣化する。前報の結果から通常船尾模型船の針路安定指数は、0.10 程度である。1/2 舵付き模型船は、針路安定指数の劣化から普通舵付き模型船に比べて、かなり劣るが針路不安定には至らないと判断される。従って、1/2 舵付き模型船($a_{TP}=4.3$)の評価は b) 評価の「中立安定」とした。

漁船は低速時の操船要求から舵要目が決まり、舵面積比 (A_R/Ld) が 1/25~1/40 の大きなものとなる¹⁶⁾。結果として、航海速度での針路安定性能が良い傾向にある。しかし、開発漁船はポッド船尾であるので舵が装備されない。本評価法の実用例として開発漁船の指針安定性能を評価する。

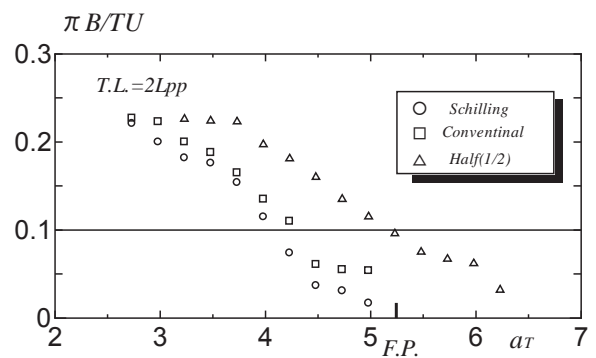


Fig. 7 Results of slewing motions to change of the rudder type on the conventional stern with a dummy boss.

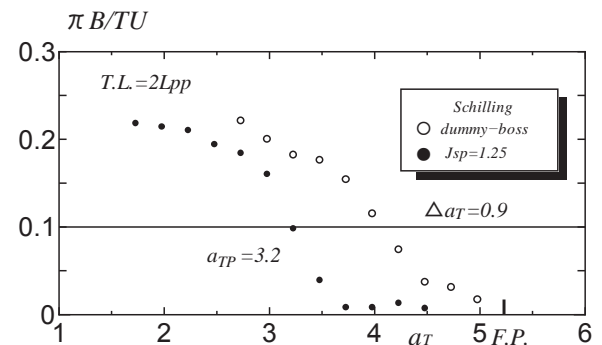


Fig. 8 Influence of propeller race, the schilling rudder.

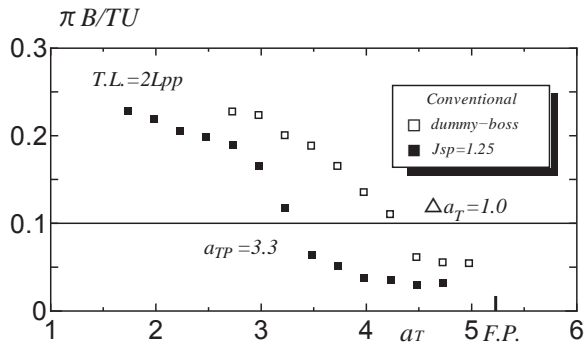


Fig. 9 Influence of propeller race, the conventional rudder.

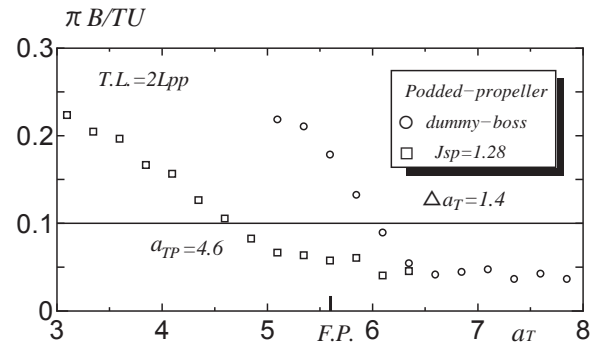


Fig. 11 Influence of propeller race, the pod propulsion system.

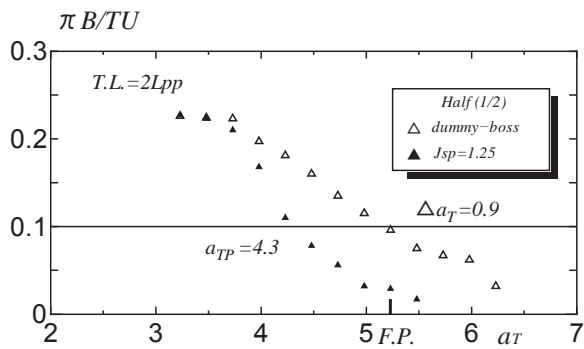


Fig. 10 Influence of propeller race, the half rudder.

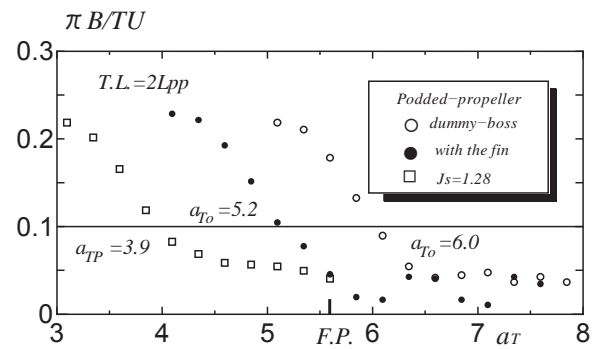


Fig. 12 Comparison slewing motion on the condition of a dummy boss between the pod propulsion and the one with the fin.

4.4 開発漁船の針路安定性能

開発漁船の評価点は、前述の $J_{sp}=1.28$ ($c=1.48$)である。開発漁船のプロペラ駆動中での振れ回り運動の計測結果を Fig. 11 に示す。ポッド船尾の場合、通常船尾に比べプロペラ流の影響が大きく、この改善量は $\Delta a_T=1.4$ である。しかし、プロペラ駆動時の評価曳航点は $a_{TP}=4.6$ である。これは前述の 1/2 舵(「中立安定」)に比べ 0.3 劣る評価値である。従って、ポッド船尾船の評価は、「中立安定」から負の変化であるので a) 評価の「不安定」である。

本報で設計されたフィンの改善効果は大きく、ダミーボス状態の評価値で 0.8 改善された(Fig. 12 を参照)。フィン付き状態でプロペラ駆動時の評価曳航点(図中の口印)は、 $a_{TP}=3.9$ である。プロペラ流の影響は、フィン無し状態のそれとほぼ等しい $\Delta a_T=1.3$ である。評価曳航点 a_{TP} が 1/2 舵と普通舵の中間であることと「中立安定」から正の変化であることからフィン付きポッド船尾船の評価は、a) 評価の「良い」である。これら結果の一覧表を Table 5 に示す。

針路安定性能は s) 評価の「非常に良い」が必ずしも必要ではない。むしろ、a) 評価の「良い」が望ましいことが多い。針路安定性能を良くするには、船尾部に抵抗を付加することになる。省エネの観点からこの付加抵抗は、最小限で良い。しかし、小型船の場合、操船者は少しでも針路不安ループ幅

Table 5 Results of the evaluation of the course stability.

| Control surfaces | a_{To} | Δa_T | a_{TP} | Evaluation |
|------------------|----------|--------------|----------|------------|
| Schilling rudder | 4.1 | 0.9 | 3.2 | very good |
| Conv. rudder | 4.3 | 1.0 | 3.3 | very good |
| Half rudder | 5.2 | 0.9 | 4.3 | marginable |
| Podded-propeller | 6.0 | 1.4 | 4.6 | unstable |
| Pod with the fin | 5.2 | 1.3 | 3.9 | good |

があると不安に感じるので多少の安定設計が必要となる。初期設計段階で針路安定性能と船型との関係を把握して、実船の船図作成時に付加抵抗の最小化を図ることが肝要である。

5. 結 言

初期設計段階で針路安定性能を確認する方法として、回流水槽での曳航中の振れ回り運動の減衰過程からプロペラ流の影響を含む針路安定性評価法を提案した。評価指標は、再記すると $V'_{Tm} = \frac{\pi B}{TU}$ である。さらに、実験的に $V'_{Tm}=0.1$ なる曳航点を評価曳航点(a_T)と定義した。 a_T の値は重心位置

からの *Ordinate* 表示である。プロペラ流の影響 (Δa_T) は、ダミーボス状態の評価曳航点 (a_{T0}) とプロペラ駆動時の評価曳航点 (a_{TP}) との差から得られる。また、実験手法として、曳航状態での実験流速とプロペラ回転数の標準化法を提案した。プロペラ特性が得られてない簡易模型でも適用できるように自航点 J_{so} を基準にして、評価点 J_{sp} を $J_{sp} = c \cdot J_{so}$ と定めた。ただし、 $c=1.4\sim 1.6$ である。

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 提案した標準化法の評価点 J_{sp} でプロペラを駆動させて定常な振れ回り運動が行える。プロペラ流の影響を含む針路安定性能は、プロペラ駆動中の振れ回り運動の減衰過程から評価することができる。
- 2) 通常船尾船の針路安定性能を変えることを狙って、リング舵、普通舵、1/2 舵を供試模型舵とした。プロペラ駆動時のこれら舵付模型船の評価曳航点は、リング舵 $a_{TP}=3.2$ 、普通舵 $a_{TP}=3.3$ 、1/2 舵 $a_{TP}=4.3$ であった。また、プロペラ流の改善は、ほとんど同じで $\Delta a_T=0.9\sim 1.0$ であった。
- 3) ポッド船尾船の評価曳航点は $a_{TP}=4.6$ であった。ポッド船尾船の評価は、1/2 舵よりも評価曳航点の値で 0.3 劣り、c) 評価の「不安定」である。また、プロペラ流の改善は通常船尾に比べ大きく $\Delta a_T=1.4$ であった。
- 4) ポッド下端部に取り付けたフィンの改善効果は大きく、評価曳航点の改善量は、0.8 であった。フィン付きポッド船尾船の評価曳航点は $a_{TP}=3.9$ であった。また、プロペラ流の改善は、フィン無し状態とほぼ等しく $\Delta a_T=1.3$ であった。評価曳航点が 1/2 舵と普通舵の間であることと「中立安定」から正の変化であることからフィン付きポッド船尾船の評価は、a) 評価の「良い」である。
- 5) 曳航中の定常旋回力の修正を簡単に行える仕様設計は、実験効率の面から重要である。

謝 辞

開発船の供試船として総トン数 135 トン巻まき網漁船をご提供下さった長崎造船株式会社設計部 部長堀田好洋様にお礼申し上げます。また、ポッド模型の製作に携わった鹿児島大学水産学部環境情報科学講座の佐野雄一郎君に心より感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 山崎啓市, 小林英一, 飯田隆, 箆一之: 実船の操縦性能の推定, 日本造船学会誌, 第 869 号 (2002), pp.36-40.

- 2) 佐々木紀幸: ポッド推進システム船の操縦性, 日本造船学会誌, 第 869 号 (2002), pp.44-47.
- 3) 重廣律男, 橋詰泰久, 刀根隆典: 曳航中の振れ回り運動からの針路安定性評価法, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 6 号 (2007), pp.225-233.
- 4) 葛西宏直, 湯室彰規: MMG 報告-III, 舵に作用する力と船体・プロペラとの干渉, 日本造船学会誌, 第 578 号 (1977), pp.358-372.
- 5) 小川陽弘, 長谷川和彦, 芳村康男: MMG 報告-IV, 操縦運動数学モデルの実験的検証と改良, 日本造船学会誌, 第 616 号 (1980), pp.565-576.
- 6) 湯室彰規: 操縦微係数に及ぼすプロペラ, 舵の影響について, 日本造船学会論文集, 第 141 号 (1977), pp.28-38.
- 7) 柏谷達男, 北口周一, 安川英一: 肥大船の進路安定性と流体力に関する実験的研究, 関西造船協会誌, 第 167 号 (1977), pp.29-38.
- 8) 森正彦: プロペラ後流中に置かれた舵の直圧力計算について, 関西造船協会誌, 第 153 号 (1974), pp.81-89.
- 9) 多田納久義, 小田杜茂一, 松本憲洋, 松井志郎, 竹原正樹: 舵の性能に関する実験的研究, 関西造船協会誌, 第 159 号 (1975), pp.19-27.
- 10) 小瀬邦治, 佐伯敏郎: 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), pp.229-236.
- 11) Ayaz, Z., Turan, O. and Vassalos, D.: Maneuvering Aspects of Pod-Driven Ships, Proceedings of 1st International conference on Technical advance in school of Marine Science and Technology (2004), pp.135-152.
- 12) 重廣律男: 曳航・被曳航船系の操縦運動モデル, 関西造船協会誌, 第 230 号 (1998), pp.153-164.
- 13) 中島稔: マリンプロペラ, 第 6 章 プロペラの幾何と構造, ナカシマプロペラ株式会社 (1971), pp.87-120.
- 14) 仲渡道夫, 小瀬邦治, 佐伯敏郎: 船の加減速運動に関する実験的研究, 日本造船学会論文集, 第 144 号 (1978), pp.50-56.
- 15) Nobukawa, T., Kato, T., Motomura, K. and Yoshimura, Y.: Studies on Maneuverability Standards from the viewpoint of Marine Pilots, MARSIM and ICSM (1990), pp.59-66.
- 16) 芳村康男: 舵の原理と設計, 関西造船協会 らん, 第 55 号(2002), pp.3-11.

