

スケグによる高速船の針路安定性改善

正員 安川 宏 紀* 正員 平田 法 隆*
正員 小瀬 邦 治*

Improvement of course-keeping ability of a high speed mono-hull by skegs

by Hironori Yasukawa, *Member* Noritaka Hirata, *Member*
Kuniji Kose, *Member*

Summary

This paper describes the improvement of course-keeping ability of a ship by attaching the skegs. The ship was designed as a high speed monohull with 40 knots by water jet propulsion system, however, the remarkable course-keeping instability appeared unfortunately. To improve the course-keeping ability, the skegs with $A_S/(LT) = 1/50$, where A_S is the total skeg area, L the ship length and T the draft were designed. The captive model tests such as the resistance test and circular motion test were carried out to capture the hydrodynamic force characteristics for the ship with and without skegs. Based on the experimental data, maneuvering simulations such as 15/15 zig-zag maneuver and 30deg turning were made to investigate the effectiveness of the skegs. Through the simulations, we found that skegs with $A_S/(LT) = 1/33$ are needed for improving the course-keeping ability of the ship. It was confirmed that the skegs are effective in the wide speed range from slow to high near 40 knots by oblique towing test for various ship speed.

1. 緒 言

先に、高速三胴船の操縦性研究の一環として、その center hull を取り出した単胴船の操縦性の検討を行ったところ、針路安定性が著しく劣ることが判明した¹⁾。この船は元々、Water Jet 推進器を備え、フルード数 $F_n = 0.65$ 相当の船速で航走するように計画された高速単胴船であった。 $F_n = 0.65$ というフルード数域における高速船の特徴は、高速走行時には船首を上げて半滑走状態となるものの依然として排水量型船舶の性質を残していることであり、国内の海上警備に当たる巡視船や欧州等で活躍している高速フェリー等の多くがその範疇に属する。従って、本船のような針路安定性の劣る船の特徴を知ることは、この種の船の船型計画に、有益と考えられる。

針路不安定性を示したこの船を改良すべく、船尾にスケグを装着することを考える。船や曳航バージの針路安定性を改善する方法として、スケグは有効であることが知られている²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾。しかし、この種の高速船型に対してスケグの装着により、どの程度針路安定性が改善できるかを具体的に示した例はないようである。

本論文では、問題となった高速船の概要、針路不安定性を改善するためのスケグの設計ならびにその効果について報告する。今

回計画したスケグの効果を調べるには、自由航走模型試験の実施が有効と考えられるが、高速船を対象としていることから、水槽試験設備の能力ならびに模型の製作上、試験の実施は困難であった。そこで、模型船を用いて Circular Motion Test(CMT) を実施し、操縦流体力特性を把握した後で、シミュレーション計算によってスケグの効果を検証することとした。ただ CMT 試験においても、設計フルード数での実施が困難であったため、操縦流体力に及ぼす船速影響を把握すべく、高速域での斜航試験を追加した。

2. 高速単胴船とスケグの概要

2.1 供試船

水槽試験で使用した模型船ならびに想定している実船の主要目を Table 1 に、また本船の body plan を Fig.1 に示す。なお、body plan は S.S.1 毎に描かれている。Fig.2 に船体模型船の側面図を示す。船長ベースのフルード数 (F_n) で 0.65 を超えるような高速域を対象としているため、ハードチェーン船型とした。また、抵抗性能を向上させるべく、船尾プロファイルの切り上がりを顕著なものとした。方形係数は約 0.42 である。

2.2 スケグの計画

船尾にスケグを装着することを考えるにあたり、スケグの効果を簡単に見積もる方法を述べ、それに従って、スケグの大きさを決定する。

スケグの長さ (スパン長) を l_S 、スケグの高さ (コード長) を h_S 、スケグの面積を A_S 、その装着する位置を x_S とする。ス

* 広島大学大学院工学研究科

原稿受理 平成 18 年 2 月 13 日

Table 1 Principal dimensions of a monohull

| | model | fullscale |
|------------------------------|----------------------|--------------------|
| length (L/L_{wl}) | 2.00m | 100.0m |
| max. breadth (B) | 0.25m | 12.5m |
| draft (T) | 0.07m | 3.5m |
| wetted surface area (S) | 0.452m ² | 1130m ² |
| volume (∇_m) | 0.0130m ³ | 1625m ³ |
| center of buoyancy (x_G) | -0.086m | -4.3m |
| L/B | 8.00 | 8.00 |
| B/T | 3.57 | 3.57 |

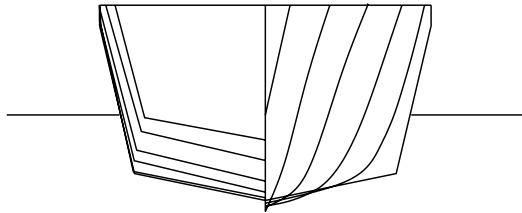


Fig. 1 Body plan of a monohull

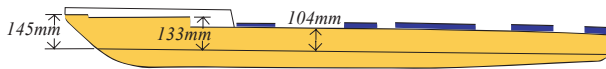


Fig. 2 Side profile of the model

ケグに作用する流体力 F_S は近似的に次のように表すことができる。

$$F_S = \frac{1}{2} \rho A_S U^2 f(\beta - x'_S r') \quad (1)$$

ここで、 ρ は水の密度、 U は船速、 β は船体斜航角、 r' は無次元化された回頭角速度であり、 rL/U と定義される。 x'_S は x_S を船長 L で無次元化した値である。 f はスケグの揚力勾配係数であり、次式⁶⁾で計算する。

$$f = \frac{6.13\lambda}{2.25 + \lambda} \quad (2)$$

λ はスケグのアスペクト比である。

スケグを装着することによる船体に作用する横力と回頭モーメントの変化 $\Delta Y, \Delta N$ はスケグに作用する力 F を用いて次のように表される。

$$\Delta Y = F_S, \quad \Delta N = x_S F_S \quad (3)$$

これらに、(1) 式を代入し、横力は $1/2\rho L T U^2$ で、回頭モーメントは $1/2\rho L^2 T U^2$ で無次元化すると、次式が得られる。

$$\Delta Y' = \Delta Y'_\beta \beta + \Delta Y'_r r' \quad (4)$$

$$\Delta N' = \Delta N'_\beta \beta + \Delta N'_r r' \quad (5)$$

ただし、

$$\Delta Y'_\beta = \frac{A_S}{LT} f, \quad \Delta Y'_r = -\frac{A_S}{LT} f x'_S \quad (6)$$

$$\Delta N'_\beta = \frac{A_S}{LT} f x'_S, \quad \Delta N'_r = -\frac{A_S}{LT} f x'^2_S \quad (7)$$

スケグを装着する前の流体力微係数が既知であれば、上述のスケグを装着したことによる微係数変化の式を用いて、スケグ装着時

の流体力微係数を推定することができる。スケグの効果は、次に示す船の針路安定性指数⁷⁾を用いて判別する。

$$C \equiv \frac{N'_r}{Y'_r - m'_x} - \frac{N'_\beta}{Y'_\beta} > 0 \quad (8)$$

以上の諸式を使って、本船に装着するスケグの効果を見積もってみる。スケグがないときの線形流体力微係数を Table 2 に示す。流体力微係数は、 $F_n = 0.35$ に相当する船速で計測された CMT 結果から得られたものである (Table 4 参照)。本船の針路安定性指数は $C = -0.426$ であり、針路不安定であることが分かる。

Table 2 Linear hydrodynamic derivatives (w/o skegs)

| | |
|---------------|---------|
| Y'_β | 0.1821 |
| $Y'_r - m'_x$ | -0.0334 |
| N'_β | 0.0957 |
| N'_r | -0.0126 |

次のようなスケグを考える。

- ℓ_s は 1.75m (模型値 35mm)、 h_s は 2.0m (模型値 40mm)、 A_S は 3.5m^2 、 $x'_S = -0.485$
- そのとき、 λ は 1.143、 f は 2.065 となる。
- スケグの枚数は 2 枚とすると、スケグ面積比 $A_S/(LT)$ は 1/50 となる。

このスケグを装着したときの微係数変化ならびに船体の線形微係数は Table 3 に示すようになる。スケグの装着によって、 Y'_β は増加、 N'_r は減少し、針路安定性指数 C は -0.426 から -0.227 となり、針路安定性の改善がなされていることが分かる。ただし、 C の値は負のままであり、依然として針路不安定である。通常の船舶では少しの針路不安定性は大きな問題とならないこと、スケグを大きくすると、推進性能の悪化が懸念されることから、このスケグに対して水槽試験を実施することとした。

Table 3 Estimated linear hydrodynamic derivatives and their changes due to the skegs

| | | | |
|-------------------|---------|---------------|---------|
| $\Delta Y'_\beta$ | 0.0413 | Y'_β | 0.2234 |
| $\Delta Y'_r$ | 0.0200 | $Y'_r - m'_x$ | -0.1062 |
| $\Delta N'_\beta$ | -0.0200 | N'_β | 0.0757 |
| $\Delta N'_r$ | -0.0097 | N'_r | -0.0223 |

Fig.3に水槽試験に用いたスケグ図を示す。スケグ後縁は、船尾端 (AE) よりも 20mm ほど前方とした。スケグの翼型は NACA 型の対称翼とし、スケグの取り付け部の最大翼厚は 8mm、スケグ下端部で 5mm とした。

3. 拘束模型試験

本船の船尾にスケグを装着した場合としない場合の 2 つについて、拘束模型試験を実施した。

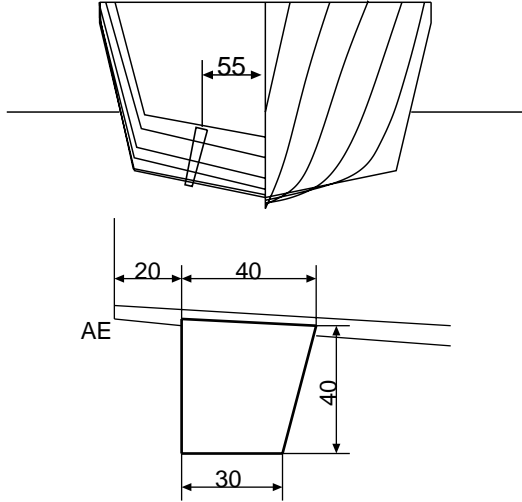


Fig. 3 Skeg arrangement in the model (unit: mm)

3.1 抵抗試験の概要と結果

抵抗試験では、船に作用する全抵抗と姿勢変化（船体浮上量とトリム変化量）を計測した。\$F_n\$ を 0.22~0.677 まで変化させ、その時の全抵抗を計測し剰余抵抗係数 (\$C_r\$) を求めた。\$C_r\$ は全抵抗係数 (\$C_t\$) から摩擦抵抗係数 (\$C_f\$) を差し引くことにより求めることができる。ここで、\$C_f\$ の算出には次式で表される ITTC 1957 の式を用いた。

$$C_f = \frac{0.075}{(\log_{10} Re - 2)^2} \quad (9)$$

式中、\$Re\$ は船長 (\$L\$) ベースのレイノルズ数である。

船の姿勢変化は、船の船首部と船尾部をレーザー変位計で計測し、それらから船体ミッドシップ部での浮上量 (\$s\$) とトリム量 (\$\tau\$) を求めた。

Fig.4に水槽試験で得られた \$C_r\$ 曲線、船体浮上量変化 (\$s\$)、トリム量変化 (\$\tau\$：船尾トリムを正)を示す。\$C_r\$ は静水時における浸水面積ベースで無次元化されている。船体浮上量とトリム量は船長に対するパーセント表示となっている。\$C_r\$ は、スケグが付くことにより、どのフルード数においてもほぼ一様に 0.0002 程増加している。船体浮上量については、スケグ装着の影響は小さい。トリム量はスケグ装着の影響をわずかに受け、船首上げのトリムが増加する。

この抵抗試験結果をもとに、実船での有効馬力 (EHP) の計算を行う。馬力計算にあたり、2次元外挿法を用いることとし、粗度修正係数は 0 とした。Fig.5に有効馬力の比較を示す。スケグが付くことにより、本船の設計速度である 40kn において、約 5%の馬力増加となった。

3.2 Circular Motion Test の概要と結果

スケグの有無の 2 状態について、斜航試験と Circular Motion Test (CMT) を実施した。船速は \$F_n = 0.35\$ 相当とした。計測にあたり、船体のトリム変化は自由とし、船体の上下運動（船体沈下や浮上）と横傾斜（ヒール）は固定とした。試験では、船体ミッドシップに設置した 3 分力計で、船体に作用する前後力、横力、回頭モーメントを計測した。計測された主船体に作用する前後力、横力には、模型船の質量ならびに付加質量の影響が混入す

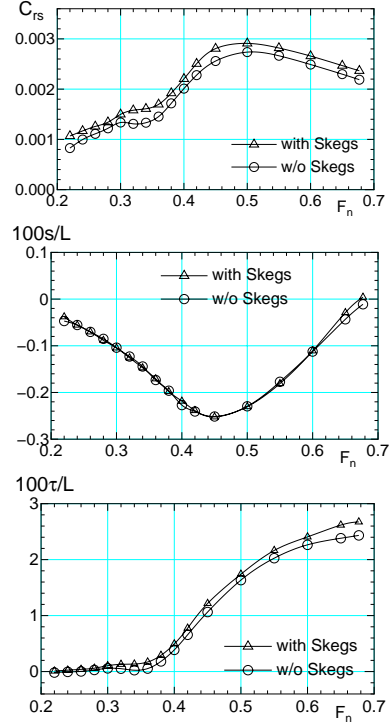


Fig. 4 Resistance test results (top: residual resistance coefficient curves, middle: dipping curves, bottom: trim curves)

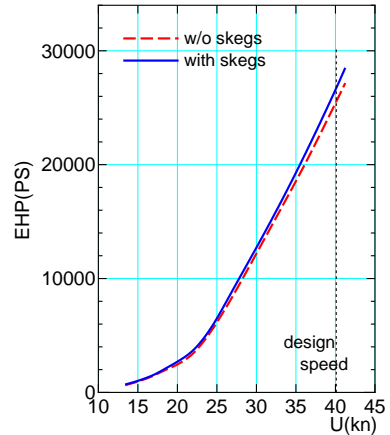


Fig. 5 Comparison of effective horse power

る。それらを \$X_H^{*'}, Y_H^{*'}\$ と表すと次を意味する。

$$\left. \begin{aligned} X_H^{*'} &= X_H' - (m' + m_y')r' \sin \beta_m - R_0' \\ Y_H^{*'} &= Y_H' - (m' + m_x')r' \cos \beta_m \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

ただし、\$m\$ は船の質量、\$m_x, m_y\$ は船の付加質量、\$r\$ は回頭角速度、\$\beta_m\$ はミッドシップでの船体斜航角、\$R_0\$ は直進時の抵抗である。\$X_H, Y_H\$ は主船体に作用する前後力、横力、\$N_H\$ はミッドシップ周りの回頭モーメントである (Appendix 参照)。式中、\$'\$ は無次元値であることを意味する。CMT で計測された主船体に作用する前後力、横力、ミッドシップ周りの回頭モーメント係数 \$X_H^{*'}, Y_H^{*'}, N_H'\$ を Fig.6に示す。

得られた結果は、Appendix の (18) 式で表される表示に従い、操縦流体力微係数を求めた。Table 4に得られたスケグの有無に

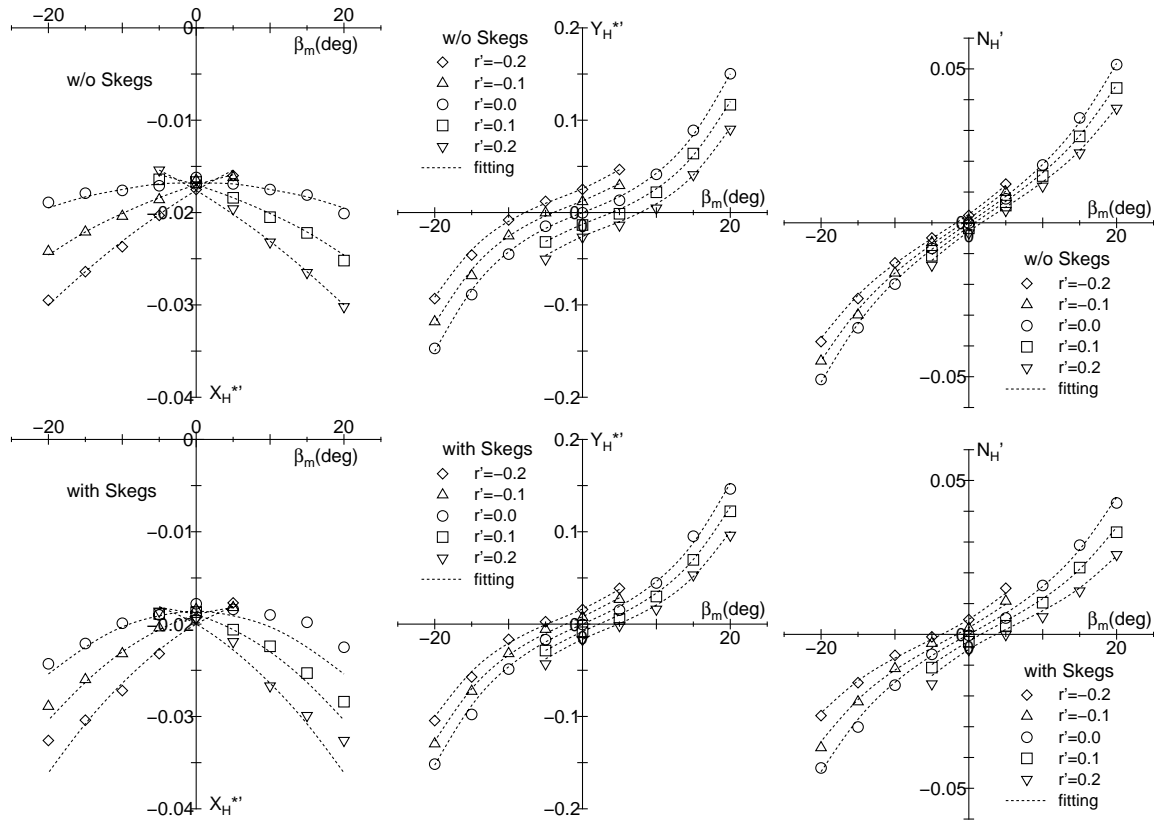


Fig. 6 Circular motion test results with and without skegs ($F_n = 0.35$)

対する操縦流体力微係数の比較を示す。同時に、針路安定性指数 C を記載している。また、Fig.6には、微係数表示の精度を確認すべく fitting の結果が点線で記載されている。fitting の精度は十分と言える。

スケグの装着により、 Y'_β と $Y'_r - m'_x$ は増加、 N'_β と N'_r は減少し、予想の通り、針路安定性指数 C は増加した。定量的に見ると、 $Y'_r - m'_x$ の増加量が予想よりも特に大きかったため、 C は -0.227 に対し -0.107 となった。これは望ましいものであった。前節で述べたスケグによる針路安定性変化の見積もり方法は、近似的なものであるため、水槽試験結果に対する定量的な差違はまぬがれないが、おおよその推定は可能であることが分かる。

4. 操縦運動シミュレーション計算

計測された抵抗試験ならびに CMT 試験結果をもとに、操縦運動のシミュレーション計算を行った。

4.1 計算の概要

基礎となる運動方程式や流体力の表示法は Appendix に記載した。Water Jet 推力の特性は、一基あたり Fig.7に示すようなものとした。直進航行時の Water Jet 推進器の推力は 1 基あたり約 23ton であり、それを 2 基装備しているものとした。そのとき、スケグを装着しないときの船速は約 27kn、スケグを装着したとき約 26kn となる。操舵は、Water Jet 推進器のバケット角を変更することによって行うものとした。

計算は、スケグを装着しない場合、スケグを 2 枚装着した場合に加え、スケグを 3 枚装着した場合の 3 通りシミュレーション計算を行った。3 枚スケグの場合は $A_s/(LT) = 1/33.3$ となる。3 枚のスケグの場合、2 枚スケグを装着した場合の CMT 結果

Table 4 Hydrodynamic derivatives and the course-keeping ability index

| | w/o skegs | with skegs |
|------------------------|-----------|------------|
| $X'_{\beta\beta}$ | -0.0388 | -0.0557 |
| X'_{rr} | -0.0216 | -0.0352 |
| $X'_{\beta r} - m'_y$ | -0.0453 | -0.0407 |
| Y'_β | 0.1821 | 0.2069 |
| $Y'_r - m'_x$ | -0.0334 | 0.0121 |
| $Y'_{\beta\beta\beta}$ | 2.0372 | 1.8907 |
| $Y'_{\beta\beta r}$ | -1.4955 | -1.4451 |
| $Y'_{\beta r r}$ | 0.2678 | -0.0472 |
| $Y'_{r r r}$ | -0.0833 | -0.0250 |
| N'_β | 0.0957 | 0.0764 |
| N'_r | -0.0126 | -0.0212 |
| $N'_{\beta\beta\beta}$ | 0.4325 | 0.4217 |
| $N'_{\beta\beta r}$ | -0.4717 | -0.6676 |
| $N'_{\beta r r}$ | 0.0039 | 0.1502 |
| $N'_{r r r}$ | -0.0417 | -0.0833 |
| C | -0.426 | -0.107 |

をもとに、 $Y'_\beta = 0.2193$ 、 $Y'_r - m'_x = 0.0349$ 、 $N'_\beta = 0.0668$ 、 $N'_r = -0.0255$ とし、さらにその他の流体力係数は 2 枚スケグの場合と同じであると仮定して計算を行った。スケグを 3 枚装着した場合には、 C は正となり針路安定となる。付加質量係数については、元良チャートを用いて推定し、スケグの有無に関わらず同一とした。

4.2 計算結果

Fig.8に 15deg-15deg zig-zag 運動の比較を示す。スケグ無しの場合には、針路不安定性が強すぎ、zig-zag 運動は発散した

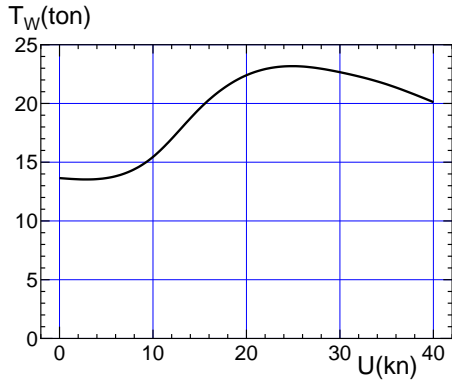


Fig. 7 The water jet thrust curve assumed

ため、結果を載せていない。スケグが2枚の場合は、運動が発散することはなくなり、スケグの効果が認められるが、第一行き過ぎが47degもあり、スケグの効果は未だ不十分である。スケグの計画段階において、スケグ2枚では針路不安定性は完全に除去できないことを認識していたものの、少しの針路不安定性が大きな行き過ぎ角を招くことは想定外であった。通常の船舶のように、舵による針路安定効果が望めないWater Jet推進船では、針路安定性をきちんと確保しておく必要があるものと考えられる。スケグを3枚とし、針路安定性を確保した場合には、第一行き過ぎ角が約10degとなり、常識的な値となる。本船の場合には、前述のスケグが3枚ほど必要であると考えられる。

Fig.9にバケット角30degの旋回航跡の比較を示す。スケグが付き、さらにスケグの枚数が多いほど、旋回半径は大きくなる。15/15 zig-zag では問題のない3枚スケグの場合には、旋回縦距や旋回径は4Lを超えることになる。

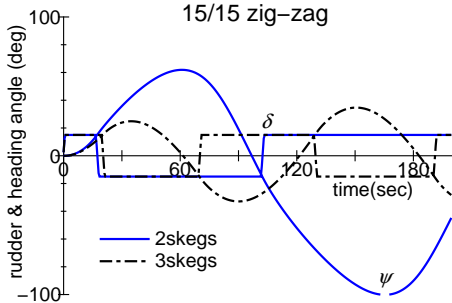


Fig. 8 Comparison of heading and rudder angles in 15/15 zig-zag maneuver

5. 高速域における針路安定性改善効果

シミュレーション計算によって、スケグの効果が明らかとなった。しかしながら、その基礎となる船体の操縦流体力微係数は $F_n = 0.35$ という設計フルード数 ($F_n = 0.65$) よりも低いところで計測されたものであった。スケグの効果が、設計フルード数付近でも十分なものであるのか、斜航試験を実施し検証することとした。

なお、流体力微係数に及ぼす船速影響に関する研究として、池田等、田嶋等による滑走艇模型を用いた水槽試験結果があり、横流れ速度や回頭角速度に関する船体横力の微係数は船速の2乗または1乗に比例することが示されている⁸⁾⁹⁾。しかし、本研究で

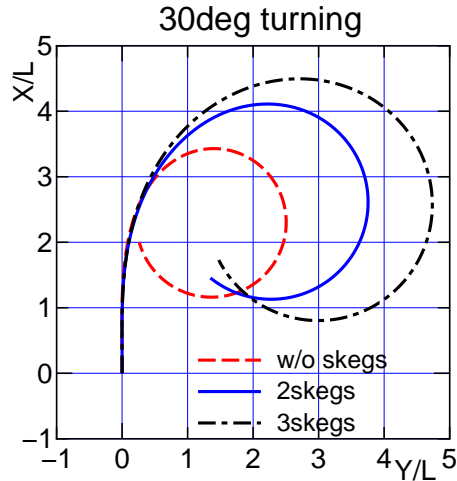


Fig. 9 Comparison of turning trajectories ($\delta = 30\text{deg}$)

対象としている船型とは大きく異なり、またスケグの効果については言及されていないなど、研究目的が異なることを指摘しておきたい。

5.1 斜航試験の概要と結果

斜航試験では、 F_n を0.3から0.65まで0.05毎に、船体斜航角(β)を-3degから12degまで変化させた。計測にあたり、船体のトリム変化は自由とし、船体の上下運動(船体沈下や浮上)は固定とした。一般に、斜航試験結果に及ぼす高速船の上下運動変化の影響は無視できないことが知られている⁸⁾。そこで、抵抗試験で計測した船体浮上量に相当する噴水状態となるよう曳航船速毎に調整した。ヒールについては固定とした。試験は、スケグの有無について試験を実施し、スケグ有りの場合には前述のスケグを2枚船尾に装着するものとした。

試験では、船体ミドシップに設置した3分力計で、船体に作用する前後力(X_H)、横力(Y_H)、回頭モーメント(N_H)を計測した。さらに、 β に関する次のような微係数表示を採用し、最小自乗法にて、 $X'_{\beta\beta}$ 、 Y'_β 、 $Y'_{\beta\beta\beta}$ 、 N'_β 、 $N'_{\beta\beta\beta}$ を求めた。

$$X'_H = -R'_0 + X'_{\beta\beta}\beta^2 \tag{11}$$

$$Y'_H = Y'_\beta\beta + Y'_{\beta\beta\beta}\beta^3 \tag{12}$$

$$N'_H = N'_\beta\beta + N'_{\beta\beta\beta}\beta^3 \tag{13}$$

Fig.10に、計測結果より得られたフルード数に対する操縦流体力微係数の変化を示す。 Y'_β はフルード数の増加とともに2次関数的に増加する。 N'_β はフルード数に対しわずかに増加する。 $X'_{\beta\beta}$ はフルード数の増加とともにその絶対値が線形的に増加する。 $Y'_{\beta\beta\beta}$ はフルード数に関わらずほぼ一定である。 $N'_{\beta\beta\beta}$ はフルード数の増加とともに2次関数的に減少する。これらの傾向は、スケグの有無には関わらない。 Y'_β はスケグの装着により値が増加、 N'_β は値が減少する。その変化量は、フルード数に対して、 Y'_β は増加傾向にあるが、 N'_β はスケグの有無によってやや傾向が異なる。なお、ここで得られた $F_n = 0.35$ における微係数は、前述のCMTから得られたものとは少し異なるが、これは微係数を求めるベースの式が異なるためである。

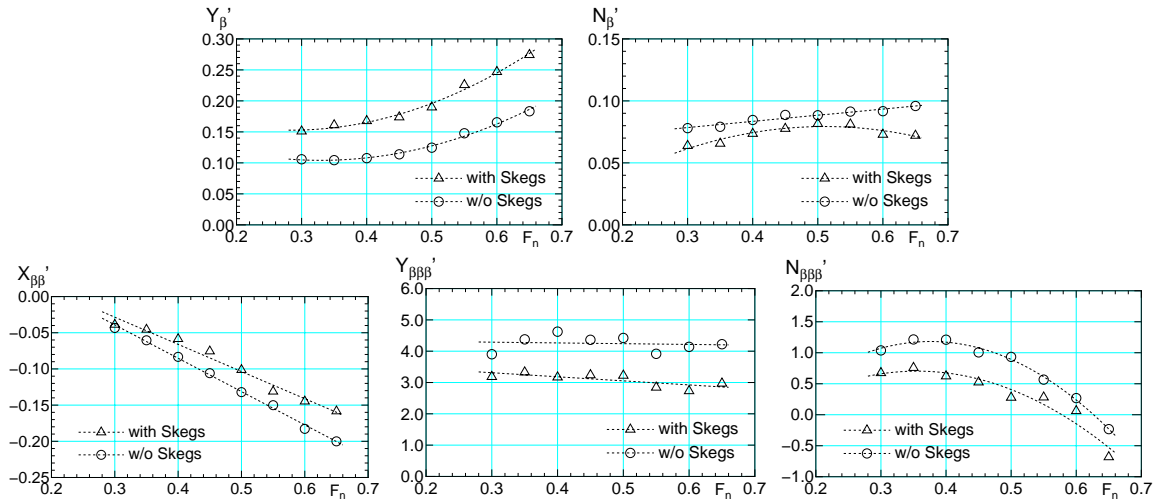


Fig. 10 Speed effect on the hydrodynamic derivatives with respect to drift angle

5.2 針路安定性に及ぼす船速影響に関する考察

得られた線形流体力微係数を用いて、スケグによる針路安定性の改善効果ならびに針路安定性に及ぼす船速影響について考察する。ここで、旋回運動モードに関する着力点と斜航運動モードに関する着力点をそれぞれ次のように表す。

$$C_{\text{turn}} = \frac{N'_r}{Y'_r - m'_x - m'_t}, \quad C_{\text{drift}} = \frac{N'_\beta}{Y'_\beta} \quad (14)$$

そのとき、針路安定性指数 C は $C = C_{\text{turn}} - C_{\text{drift}}$ と表される。斜航試験から得られるのは C_{drift} に関するものだけであり、 C_{turn} については言及できない。 C_{drift} は小さいほど針路安定であることを意味する。

Fig.11はフルード数ベースに斜航試験結果をもとに計算した C_{drift} を図示したものである。スケグを装着することにより、 C_{drift} は一様に小さくなっており、針路安定側に変化していることが分かる。フルード数の変化に対しては、スケグの有無に関わらず $F_n = 0.45$ 近くまでは C_{drift} が少しずつ増加するものの、その後小さくなり針路安定側に变化する。 $F_n = 0.35$ と $F_n = 0.65$ だけを比較すると、明らかに針路安定側へ変化していることが分かる。この変化は船の姿勢変化と関係があるように思われるが、詳細は不明である。このことから、 $F_n = 0.35$ において針路安定であれば、設計フルード数 $F_n = 0.65$ での針路安定性は問題ないと考えられる。

厳密な議論を行うためには、 C_{turn} を含める必要があるが、 C_{turn} のフルード数に対する変化は、 C_{drift} の変化と大きく異なるとは考え難く、スケグの効果は、 $F_n = 0.35$ において針路安定であるのならば、設計フルード数 $F_n = 0.65$ 付近でも問題ないものと考えられる。

6. 結 言

本論文では、針路安定性に問題が生じた高速船の概要、この針路不安定性を改善するための船尾スケグの設計ならびにその効果について報告した。得られた知見をまとめると次の通りである。

- (1) 船尾にスケグを装着することにより、ほぼ所期の通りに、針路安定性が改善されることが確認された。本船に3枚のスケグ(スケグ面積比 1/33.3)を装着することにより、問

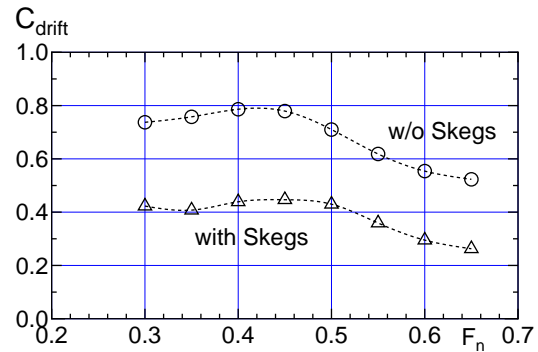


Fig. 11 Speed effect on C_{drift}

題なく操船できる見通しが得られた。この種の高速船は、完全に針路安定となるようにスケグを計画すべきであると考えられる。しかしながら、推進性能が悪化することに留意する必要がある。本船に2枚のスケグを装着する場合には、有効馬力が約5%増加する。

- (2) 船速を変更した斜航試験から、 $F_n = 0.35$ において針路安定であれば、設計フルード数 $F_n = 0.65$ での針路安定性は問題ないことが概ね確認された。なお厳密な議論をするためには、旋回に関する操縦流体力微係数ならびにその着力点に及ぼす船速影響について調査する必要がある。

本船が針路不安定である理由は、船尾プロファイルの切り上がりが見出し、前方向にイニシャルトリムが付いており、さらには Water Jet 推進船であるため舵や付加物がなく、船尾横抵抗が小さいためと考えられる。この種の船型計画にあたっては、針路不安定とならないように留意する必要がある。

今後の課題として、高速船の操縦運動シミュレーション計算法の高度化とその検証があげられる。引き続き検討したい。

謝 辞

本研究における水槽試験は、平成17年度広島大学卒業研究の一環として山田竜太郎君により実施されたものである。ここに記して感謝の意とする。

参考文献

- 1) 安川宏紀, 平田法隆, 小瀬邦治: 高速三胴船の性能に及ぼすアウトリガー配置の影響 (第 3 報: 操縦性), 日本船舶海洋工学会論文集 第 2 号 (2005), pp.197-203.
- 2) 村田良雄, 多田納久義: 小型鋼船の進路不安定とその対策, 関西造船協会誌 第 113 号 (1964), pp.9-14.
- 3) 川野浩一: ある進路不安定船におけるスケグ及び舵数の効果について, 造船学会論文集 第 126 号 (1969), pp.167-172.
- 4) 井上正祐, 貴島勝郎, 村上正義, 坂田公男, 林 承治: 被曳船バージ船型の針路安定性に関する一考察, 西部造船会々報 第 50 号 (1975), pp.65-74.
- 5) 竹川正夫, 永松秀一, 元良誠三: 曳航 Barge の保針性能について, 日本造船学会論文集 第 137 号 (1975), pp.186-195.
- 6) 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), pp.31-42.
- 7) 藤井 斉, 野本謙作: I. 操縦性試験法, 第 2 回操縦性シンポジウム, 日本造船学会 (1970), pp.1-39.
- 8) 池田良穂, 奥村英晃, 新名二郎, 片山 徹: 斜航する滑走艇の艇体に働く流体力の計測, 関西造船協会誌 第 231 号 (1999), pp.57-64.
- 9) 田嶋慎一郎, 池田良穂, 片山 徹, 奥村英晃: PMM 試験による滑走艇の操縦流体力の計測, 関西造船協会誌 第 232 号 (1999), pp.71-76.

A 操縦運動シミュレーション計算法

高速船に対する操縦運動シミュレーション計算法として, 確立された物は存在しない。ここでは, 通常排水量型船舶で用いられている操縦運動シミュレーション計算法を用いることとする¹⁾。

船尾に 2 基の Water Jet 推進器を備えた船を考える。Water Jet ノズルのパケット角 δ を動かすことにより, Water Jet による推力 T_W の向きを変えて操船しているものとする。また, 操船に伴うヒールの影響は無視できるものとする。

Fig.12に本論文で使用する座標系を示す。まず空間に固定された座標系 $O - X_0 Y_0 Z_0$ を考える。 $X_0 - Y_0$ 平面を静水面に一致させ, Z_0 軸を鉛直下方にとる。 X_0 軸に対し方位 ψ を定義する。船の重心位置 G に原点を一致させ, 船の前方に x 軸方向を, 船体横方向に y 軸をとり, 空間に対し鉛直下向きに z 軸をとる。図中, u, v, r は船の前進方向速度成分, 横方向速度成分, 回頭角速度を表す。 β は船体斜航角, U は船速であり $U = \sqrt{u^2 + v^2}$ と定義される。

次に, シミュレーション計算の基礎となる運動方程式ならびに流体力の数学モデルについて述べる。船体固定系で定義される船の操縦運動方程式は次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} (m + m_x)\dot{u} - (m + m_y)vr &= X \\ (m + m_x)ur + (m + m_y)\dot{v} &= Y \\ (I_{zz} + J_{zz})\dot{r} &= N \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中, m, I_{zz} は船の質量と慣性モーメント, m_x, m_y, J_{zz} は付加質量ならびに付加慣性モーメントである。この (15) 式を数値的に解くことにより, 操縦運動を求めることができる。

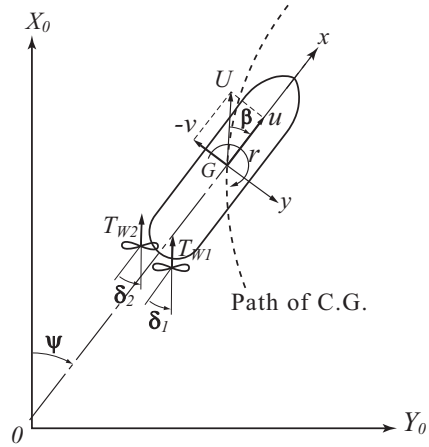


Fig. 12 Coordinate systems

運動方程式の外力成分 X, Y, N の表示にあたり, 船体ミッドシップ位置における流体力成分を用い, 次のように表す。

$$\left. \begin{aligned} X &= X_H + \sum_{i=1}^2 T_{Wi} \cos \delta_i \\ Y &= Y_H - \sum_{i=1}^2 T_{Wi} \sin \delta_i \\ N &= N_H - \sum_{i=1}^2 T_{Wi} (x_{Ti} \sin \delta_i - y_{Ti} \cos \delta_i) - x_G Y \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

ここで, X_H は船体自身に作用する前後方向の流体力, Y_H, N_H は船体自身に作用する横力と回頭モーメント, T_{Wi} は i 番目の Water Jet の推力, (x_{Ti}, y_{Ti}) はミッドシップを原点にとったときの i 番目の Water Jet の位置を表す。 x_G も同様にミッドシップを原点にとったときの重心の前後位置座標である。

X_H, Y_H, N_H は次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} X_H &= \frac{1}{2} \rho L T U^2 X'_H(\beta_m, r') \\ Y_H &= \frac{1}{2} \rho L T U^2 Y'_H(\beta_m, r') \\ N_H &= \frac{1}{2} \rho L^2 T U^2 N'_H(\beta_m, r') \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中, ρ は水の密度, L は船長, T は噴水である。 X'_H, Y'_H, N'_H が流体力係数に相当し, 船の斜航角 β_m と無次元回頭角速度 $r' (= rL/U)$ の関数になる。なお, β_m はミッドシップ位置における斜航角であり, 次式で定義される。

$$\beta_m = \tan^{-1} \left(\frac{-v + x_G r}{u} \right)$$

X'_H, Y'_H, N'_H は, 次のような微係数表示で表す。

$$\left. \begin{aligned} X'_H &= X'_{\beta\beta} \beta_m^2 + X'_{\beta r} \beta_m r' + X'_{rr} r'^2 - R'_0 \\ Y'_H &= Y'_{\beta} \beta_m + Y'_r r' + Y'_{\beta\beta\beta} \beta_m^3 \\ &\quad + Y'_{\beta\beta r} \beta_m^2 r' + Y'_{\beta r r} \beta_m r'^2 + Y'_{r r r} r'^3 \\ N'_H &= N'_{\beta} \beta_m + N'_r r' + N'_{\beta\beta\beta} \beta_m^3 \\ &\quad + N'_{\beta\beta r} \beta_m^2 r' + N'_{\beta r r} \beta_m r'^2 + N'_{r r r} r'^3 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$X'_{\beta\beta}, Y'_{\beta}, Y'_r, N'_{\beta}, N'_r$ 等は操縦流体力微係数と呼ばれる。 R'_0 は直進時の抵抗係数である