Design Practice for the Horizontal Fin of a Single Screw-Twin Rudder System

By Toshihiko ARII**, Kazuyoshi HOSOGAYA**, Kenjiro NABESHIMA***

The single-propeller/twin-rudder system composed of a single propeller and two high-lift rudders of fish-tail type (VecTwin system) has been installed on many vessels in Japan. With this system, a ship can be maneuvered at any mode including going astern, hovering, dead slow forwarding and turning by means of various rudder angle combinations, with the propeller revolution kept in the forward direction. To improve propulsive efficiency of the single-propeller/twin-rudder system, a pair of reaction fins is attached between two rudders where the propeller slipstream passes. Performance of the reaction fin system is discussed. The design practice to determine fin size and form is presented.

1. 緒言

フィッシュテール形状の翼断面を特徴とする高揚力特殊舵(シリング舵)は、その高揚力性能により操船性能が優れているため、多くの船舶に装備され、評価を受けてきている。加えるに、一基のプロペラに二枚の高揚力シリング舵を配する構成の“ベクトイン”舵が、ドイツ人 Karl Schilling により考案され¹⁾、イギリス人 Peter Bingham により商業化された²⁾。その技術を導入した日本で 65 隻の実績を生み、主に狭隘な港湾を利用する小型船舶に採用されて、その操船性の優れた機能が十分に利用されてきた³⁾。しかし、操船性能に優れるものの、二枚の舵を装備しているので、一枚舵に比べて推進馬力の増加を許容せざるを得なかった。そこで、ベクトイン舵の推進性能を改良するために、二舵の内側に水平フィンを設けて、プロペラ後流を利用して、フィンの揚力を前進推力に配分して、推進性能を改善することが提案された⁴⁾。一軸一舵の場合も岡本等による開発⁵⁾などで、舵の両側に水平フィンを設けて、プロペラ後流を利用した推進性能改良が採用されてきたが、一軸二舵の場合は、プロペラ直後に舵が無い場合、プロペラ後流はエネルギー回収されずに流れ去ってゆく。このため、二舵間の流場にフィンを置くことにより、後流エネルギーの回収効果が我々の実験により一軸一舵の場合より大きくなることが確認されている⁶⁾。

一軸一舵に設けたフィンの形状を参考にして設けたベクトイン舵でのフィンの効果が水槽試験や実船性能の解析からフィンなしに比べて、3~5%の推進効率の改良が実証されたが、本研究ではその成果を踏まえて、フィンの平面形状・大きさ・取り付け角などのフィン設計の具体的な方法を述べるものである。

2. フィンの特性と検討課題

プロペラの回転によって生じるプロペラ後流は、プロペラの回転方向に旋回しながら後に流れ、左右のフィンに流入する。左右のフィンはプロペラの後方において、ほぼプロペラ軸線上に位置するので、Fig.1 に示すように一方のフィンに対する水流が後方に向かって上向きの角度を持って入射し、他方のフィンに対する水流が後方に向かって下向きの角度を持って入射し、船の前進方向に分力を持つ揚力を発生して船の推進効率が上がる。プロペラの回転方向が、船尾方向より見て前進時に右回りする場合は、左舷側につくフィンは翼先端~後端ラインに対して上方にキャンバーを有するものとし、右舷側のフィンはその逆で、下方にキャンバーを有するものとする。Fig.2 に左舷側フィンの場合のフィン取り付け角度、流入角とフィンによる推力の模式図を示す⁷⁾。フィン取り付け角 α_s 及び流入迎角 β の符号は図中に記載している。フィンの効果が出るためには、Fig.2 において、推力の絶対値が抵抗の絶対値を超える必要がある。

*原稿受付 平成 26 年 2 月 14 日。

**ジャパンハムワージ株式会社(大阪市鶴見区今津北3-4-38)。

***正会員ジャパンハムワージ株式会社(同上)。

の24%とした。Fig. 5に船Bおよび船B'の海上試運転を示すが、フィンの効果は、主機約100%出力時で2.8%であった。

Fig. 5 Power curves of 6,000 DWT tanker B

3.3 まとめ

フィン付きベクツイン船AおよびBとそれらの同型船でフィンのついていない船A'およびB'に対して、満載喫水での海上試運転結果を比較、フィンを設けることにより3~4%の推進効率アップが実証された。ただしフィンの大きさ・形状・取り付け角度については、詳細な決定方法に依って決められたものではなく、水槽試験やCFDによる検討が必要であり、本研究でこれらの検討課題に対して研究を行った。

4. フィン設計の指針

ベクツイン舵のフィンの設計要素として、フィンの大きさ、フィンの平面形状、フィンの取り付け位置・角度がある。これらについて、設計手法のまとめを行った。

4.1 フィン設計のパラメーター

フィンの平面形状はFig. 6(b)に示すように、そのパラメーターである翼端部の翼弦長 C_{FT} 、翼根部の翼弦長 C_{FR} 、スパン長さ幅 S_F 、後退角 α_{SW} で決まる。 S_F は制限が無ければ一般的に大きいほうが誘導効力を減らすのでよいといわれているが、4.2節に記載するように他の制限があるので、それにより決定される。二枚の舵板間の寸法は、Fig. 6(c)に示すように、それぞれの舵板を105度回転し、プロペラの流れをせき止めるモード（クラムシェルモード）にする際に、干渉が無いようにするため、 $a_R + (0.02 \sim 0.05) = a$ で決まる。

フィンの実面積（片舷分） A_f は次式で表され、フィンの抵抗解析時などに使用する。

$$A_f = S_F \times (C_{FR} + C_{FT}) / 2 \times k \quad (1)$$

係数 k は0.65~0.75で舵厚、フィンの大きさによる。

Fig. 6 Parameter of fin scale

4.2 フィンのスパン長さ

フィンのスパン長さはプロペラ直径の比で表される。標準的な平面形状のフィンにおいて、フィンスパン長さ/プロペラ直径を変えてフィンの推力を計算により求めた。Fig. 7に S_F/D_P を0.227~0.303に変えた場合の公称面積（ $=S_F \times (C_{FT} + C_{FR}) / 2$ ）と有効面積（公称面積から舵板内部部分の面積を除いたもの）の図及び要目を示す。フィンの揚力係数、抗力係数はNACA4415のものを使用、(2)式で推力 T を計算した。フィンへの流入速度 v を求める際のプロペラによる加速は、(3)式⁸⁾によった。

$$T = L \sin \alpha - D \cos \alpha \quad (2)$$

ここで L : 揚力, D : 抗力, α : 流入角
加速比 = $1 + 1.2a$

$$a = 1/2 \left((1 + 8/\pi \cdot K_T / J^2)^{0.5} - 1 \right) \quad (3)$$

ここで K_T = プロペラの推力係数

J = プロペラの前進係数

Fig. 7 Series of fin span size

Fig.8 Lift coefficient of NACA4415
(based on the data of reference 7))

標準としての S_F/D_p を 0.242 とし、この場合のフィンへの流れの実流入角は、Fig.8 に示す NACA 特性を基に失速が生じる少し手前の 13° およびそれより小さい 10° の 2 つの場合を検討した. S_F/D_p と実流入角 α との関係は以下のように決めた. Fig.9 に、舵前縁での水平方向の流入角変化の一般的な例を挙げているが、フィン揚力の平均値を表すと考えられる位置をフィン翼根からの距離で表し、この距離をスパン長さ S_F で無次元化した線 (揚力評価基準線と称する) を取る. S_F が大きくなると、この揚力評価基準線は、プロペラ軸心側に移動し、流れの角度も大きくなるので、Fig.9 の流入角分布の傾向から、Fig.10 の変化をする と推定した.

Fig.9 Typical span-wise variation of inflow angle

Fig.10 Angle of attack as a function of S_F/D_p

Fig.11 Effect of fin span

Fig.11 に S_F/D_p をベースに thrust/ D_p^2/v^2 を示すが、流入角 13° および 10° 共に S_F/D_p は大きいほど thrust/ D_p^2/v^2 は大きい. 一方、スパン長さは、左右フィンが舵回頭時に互いに干渉しないことが必要である. Fig.12 にプロペラ直径と S_F の実績を示すが、 S_F の決定の初期値として参考になる.

Fig.12 Data S_F/D_p to propeller diameter

4.3 フィン前縁の後退角

フィン前縁に後退角があると揚力は減少するが、その程度について検討した. Fig.13 に示す形状のフィン 3 種につき、回流水槽における実験値と参考文献⁹⁾ からのデータを基にしたフィン推力の計算値の比較を実施した. フィン 1,2,3 の後退角はそれぞれ 0° 度, 23.5° 度, 47° 度である. Fig.14 に推力の回流水槽での実験

値及び計算値の比較を、後退角 30 度の場合を 1.0 として比較した。実験値と参考文献を基に計算した値は後退角 20 度以上では同一傾向を示しており、Fig.13 のカーブを参考に後退角影響をみることができる。後退角 20 度以下では両者の一致はよくないが、将来の要検討課題としたい。

Fig.13 Fin form of different sweep angle

Fig.14 Thrust of fin as a function of sweep angle

4.4 フィン翼端・翼根の長さ

フィン翼端の長さ C_{FT} 、翼根の長さ C_{FR} の相対的な関係が、フィン性能に影響を与える。Fig.15 に示す 3 種類のフィン形状につき、CFD で推力を推定した。

Fig.15 Series of C_{FT}/C_{FR}

Fig.16 に結果を示すが、 C_{FT}/C_{FR} の値は、0.26 付近が最適であることがわかる。フィンは大きいほど効果があるので、 C_{FR} を最大値にとって、 C_{FT} は $C_{FT}/C_{FR} \div 0.26$ の関係で決めればよいと考える。

Fig.16 Effect of C_{FT}/C_{FR}

4.5 フィンアスペクト比の影響

舵におけるアスペクト比の直圧力への影響は岡田¹⁰や藤井¹¹の実験式があるが、ここでは、岡田の式を採用して、フィンの推力へのアスペクト比影響とする。Fig.17 に示すように、フィンの有効面積に対するアスペクト比を λ として、岡田の式 $2.41 \{1.3 - 1/(2\lambda)\}$ において、 $\lambda = 1$ の時にこの値が 1.0 になるように、次式をアスペクト比影響式とする。

$$k(\lambda) = 1.25 \{1.3 - 1/(2\lambda)\} \quad (4)$$

Fig.17 Aspect ratio of fin

4.6 フィンの最適取り付け角

フィン取り付け角の最適値を設定する方法として水槽試験による方法がある。水槽試験による方法の一例を以下に示す。まず左舷側のフィンの取り付け角度を 4 度とし、右舷側のフィンの取り付け角度を -8 度、-4 度、0 度、4 度として各々計画速度で自航試験を行う。自航試験の速力は二舵の場合の計画速力である。フィン効果は、模型船の全推進効率 η の値で良否を判断するものとする。Fig.18 において左舷側のフィンの取り付け角度を 4 度に固定したとき、右舷側のフィンの取り付け角度は 0 度が最適となる。次に右舷側のフィンの取り付け角度を 0 度にして左舷側のフィンの取り付け角度を 0 度、4 度、8 度、14 度に変えて自航試験を行い、左舷側のフィンの取り付け角度は 8 度が最適となる。フィン取り付け角度を左舷 8 度、右舷 0

度として、以降の抵抗試験・自航試験を実施することになる。可能性のあると考えられるフィン角度の左右舷組み合わせの全てに対して上述のような試験を行う

Fig.18 Example of determining optimum angle of fin

方法も有り得よう。また CFD による方法もある。また最適取り付け角を水槽試験に依らずにデータベースによる提案を文献 ⑨に記述してあるが、これらについては将来の検討課題としたい。

4.7 まとめ

フィンの平面形状は、そのパラメーターである翼端部の翼弦長 c_{FT} 、翼根部の翼弦長 c_{FR} 、スパン長さ幅 S_F 、後退角 α_{SF} で決まるが、クラムシェルモードで左右のフィンの干渉がない範囲で、 S_F および C_{FR} を最大値にとり、 C_{FT} は $C_{FT}/C_{FR} \cong 0.26$ の関係で決めればよい。後退角は小さいほどフィンの効果が大きい。フィンのアスペクト比による推力への影響は(4)式で修正すればよい。

5. 結言

本研究の成果をまとめると次のようになる。

- (1) ベクツイン船の同型船でフィン付き船とフィン無し船の 2 組 4 隻の試運転結果を解析し、フィンの効果が 3%~4%あることを確認した。
- (2) フィンの平面形状の決め方の設計標準を確立した。各パラメーターは無次元表示とし、一般的に適用できるものとした。
- (3) フィンのスパン長さの最適値がある。後退角は二つのフィンが相互干渉しない範囲で、小さいほどフィンの効果が大きいことがわかった。

今後、NACA4415 以外のフィン翼型の性能、フィン取り付け角の本論文以外の手法、後退角 20 度以下の実験値と計算値の相異の解明などに取り組んでゆきたい。

参考文献

- 1) Karl Shilling 及び Harst Rathert, ドイツ特許, NO.2303299, (1973)
- 2) VP Bingham, "Schilling Rudder Developments", British Ship Research Association, (1977)
- 3) 鍋島ほか 1 名, 日マリ学誌, 34-6(平 11-6), 378-386
- 4) ピーター ビンガム 及び 富田幸雄, 公開実用新案, 実願平 6-6195, (平 6-1-25)
- 5) 岡本ほか 3 名, "船舶用省エネルギー装置 NKK-SURF の開発", NKK 技報, No. 132(平 2)
- 6) 有井ほか 2 名, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 16 号 (平 24-12), 11-16
- 7) Ira H. Abbott ほか 1 名, "Theory of wing sections", Dover publications, (1959), 13-15
- 8) 葛西ほか 1 名, "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 No.578, (1977), 24
- 9) A.Uranga ほか 2 名, "Preliminary investigation into the effects of cross-flow on low Reynolds number transition", 20th AIAA computational fluid dynamics conference, (2011), 16
- 10) 岡田正次郎, "船の背後に置かれた舵の性能に関する実験結果について(その 5)", 造船協会論文集, 第 105 号, (昭 34), 65
- 11) 藤井ほか 1 名, "自航模型による舵特性の研究(2)", 造船協会論文集, 第 110 号, (昭 36), 35