

帆装船のシミュレーションについて

海上安全研究領域 *南 佳成、二村 正、藤原 敏文、上野 道雄

1. はじめに

地球温暖化は重要な環境問題の1つとして世界的な問題となっている。また、二酸化炭素の排気量の抑制について、船舶の分野でも検討され始めている。このような社会状況から自然エネルギーを積極的に利用する帆装船が注目されている。現在、海上技術安全研究所でも帆装商船に関する研究開発を行っている。帆装船に用いる高揚力帆の開発や船体形状及び水中フィンの検討をおこなっているが、最終的に船としての総合性能を評価するために帆走性能についてシミュレーションで評価する必要がある。そこで、筆者らはまず一定風速の状態での定常帆走状態を推定できるシミュレーションプログラムの開発を行った¹⁾。本論文では、開発したシミュレーションプログラムの有効性を検証するために、既存のばら積船に海上技術安全研究所で検討した帆を装備した帆装船についてシミュレーション計算を実施した。シミュレーションに用いた帆のデータは、海上技術安全研究所で風洞試験を行って求めた²⁾。さらに、帆走性能の向上を図るために、船底に水中フィンを取り付けた場合についても検討した。水中フィンの配置は、取り付け位置、面積をパラメータとして6種類のケースを想定した。本論文では、帆走性能に及ぼす帆の面積の影響、船底に装備した水中フィンの配置の影響について評価した結果を報告する。

2. 帆装船の運動方程式

帆装船の船体運動は水平運動だけでなく、帆に生じる流体力によりロール運動も生じる。帆装船の運動方程式を構築するのに用いた座標系を図1に示す。帆装船の運動方程式は船体固定座標系で記述し、釣り合い状態を基準に線形化された表現している。

$$\left\{ \begin{array}{l} m \dot{u}_G - m v_G r = X \\ m \dot{v}_G + m u_G r = Y \\ I_{zz} \dot{r} = N \\ I_{xx} \ddot{\phi} = K - GM \cdot g \cdot m \cdot \sin \phi \end{array} \right. \quad (1)$$

m は質量である、 I_{xx} , I_{zz} は船体固定座標系における x 軸及び y 軸周りの慣性モーメントを表す。 X , Y , N , K は船体固定座標系における x 軸方向の外力、 y 軸方向の外力、 z 軸周りのモーメント、 x 軸周りのモーメントを示している。本論文では、帆走船の定常状態を評価するために、運動方程式の外力の項がバランスして0になっている。

$$\left\{ \begin{array}{l} X = 0 \\ Y = 0 \\ N = 0 \\ K - GM \cdot g \cdot m \cdot \sin \phi = 0 \end{array} \right. \quad (2)$$

(2)式にある外力項の各成分は、以下のように表現される。

$$\left\{ \begin{array}{l} X = X_H + X_R + X_P + X_S + X_{US} \\ Y = Y_H + Y_R + Y_S + Y_{US} \\ N = N_H + N_R + N_S + N_{US} \\ K = K_H + K_R + K_S + K_{US} \end{array} \right. \quad (3)$$

添字 H , R , S , P , US は、船体、帆、プロペラ、上部構造物を意味する。

さらに、船体に関する流体力及びモーメントは微小運動を仮定して釣り合い状態から摂動展開され、各変数による多項式近似で表現できる。船体に生じる流体力及びモーメントについて無次元係数を用いて表現すると以下ようになる。

$$\begin{aligned}
X'_H &= X_H / \frac{\rho}{2} L d U^2 = X'_0 + X'_{\beta\beta} \beta^2 + X'_{\beta\phi} \beta \phi + X'_{\phi\phi} \phi^2 + X'_{\beta\beta\beta} \beta^3 \\
Y'_H &= Y_H / \frac{\rho}{2} L d U^2 = Y'_{\beta} \beta + Y'_{\phi} \phi + Y'_{\beta\beta\beta} \beta^3 + Y'_{\beta\beta\phi} \beta^2 \phi + Y'_{\beta\phi\phi} \beta \phi^2 + Y'_{\phi\phi\phi} \phi^3 \\
N'_H &= N_H / \frac{\rho}{2} L^2 d U^2 = N'_{\beta} \beta + N'_{\phi} \phi + N'_{\beta\beta\beta} \beta^3 + N'_{\beta\beta\phi} \beta^2 \phi + N'_{\beta\phi\phi} \beta \phi^2 + N'_{\phi\phi\phi} \phi^3 \\
K'_H &= K_H / \frac{\rho}{2} L d^2 U^2 = K'_{\beta} \beta + K'_{\phi} \phi + K'_{\beta\beta\beta} \beta^3 + K'_{\beta\beta\phi} \beta^2 \phi + K'_{\beta\phi\phi} \beta \phi^2 + K'_{\phi\phi\phi} \phi^3
\end{aligned}
\tag{4}$$

式の中で U は船速(m/s)、 β は横流れ角 (deg.)、 ϕ はヒール角 (deg.) を表し、 ρ は水の密度である。舵によって生じる流体力、モーメントは、平野の方法³⁾を用いて推定している。上部構造物も風による抵抗成分が生じるので、上部構造物に対する風圧抵抗の推定には著者の一人である藤原の方法⁴⁾を用いて推定している。帆装船に用いた帆のデータは、風洞データから内挿して与えられる²⁾。釣り合い方程式は、(2)式の表現に(4)式を代入することによって求めると、

$$\begin{aligned}
& X'_0 + X'_{\beta\beta} \beta^2 + X'_{\beta\phi} \beta \phi + X'_{\phi\phi} \phi^2 + X'_{\beta\beta\beta} \beta^3 + X'_{\delta\delta} \delta^2 \\
& + X'_S(\psi_w) \cdot (\rho_a / \rho) \times (A_s / L d) (U_a / U)^2 + X'_{US}(\psi_w) = 0 \\
& \{Y'_{\beta} - Y'_{\delta} \gamma_R / (1 - w_R)\} \beta + Y'_{\phi} \phi + Y'_{\beta\beta\beta} \beta^3 + Y'_{\beta\beta\phi} \beta^2 \phi + Y'_{\beta\phi\phi} \beta \phi^2 + Y'_{\phi\phi\phi} \phi^3 + Y'_{\delta} \delta \\
& + Y'_S(\psi_w) \cdot (\rho_a / \rho) \times (A_s / L d) (U_a / U)^2 + Y'_{US}(\psi_w) = 0 \\
& \{N'_{\beta} - N'_{\delta} \gamma_R / (1 - w_R)\} \beta + N'_{\phi} \phi + N'_{\beta\beta\beta} \beta^3 + N'_{\beta\beta\phi} \beta^2 \phi \\
& + N'_{\beta\phi\phi} \beta \phi^2 + N'_{\phi\phi\phi} \phi^3 + N'_{\delta} \delta \\
& + N'_S(\psi_w) \cdot (\rho_a / \rho) \times (A_s / L d) (U_a / U)^2 + N'_{US}(\psi_w) = 0 \\
& \{K'_{\beta} - K'_{\delta} \gamma_R / (1 - w_R)\} \beta + K'_{\phi} \phi + K'_{\beta\beta\beta} \beta^3 + K'_{\beta\beta\phi} \beta^2 \phi + K'_{\beta\phi\phi} \beta \phi^2 + K'_{\phi\phi\phi} \phi^3 + K'_{\delta} \delta \\
& + K'_S(\psi_w) \cdot (\rho_a / \rho) \times (A_s / L d) (U_a / U)^2 - g C_B (B / d) GM \cdot \sin \phi / U^2 \\
& + K'_{US}(\psi_w) = 0
\end{aligned}
\tag{5}$$

U_a は風速(m/s)であり、 w は船首方向に対する相対迎角、 ρ_a は空気の密度を表す。 A_s は帆の面積を示している。

これらの方程式は非線形連立方程式になっている。これらの方程式は直接解くのが困難であるので、非線形連立方程式の解法の一つである多元ニュートン・ラプソン法を用いてによって数値解法を用いて帆走状態での定常釣り合い状態を求めることができる。これより、定常帆走状態における帆装船の船速及び船体姿勢を推定できる。また、帆走性能を評価する上で推進性能に關係する指標として、伝達馬力

(Delivery Horse Power) を用いた。伝達馬力は、プロペラ単独試験から求めたトルク係数を用いて表現する

$$DHP = 2\pi K_Q (J_p) \rho n^3 D_p^5 \tag{6}$$

ここで、前進係数は $J_p = \frac{(1-w)U}{nD_p}$ であり、 w は伴流係数、 n はプロペラ回転数である。

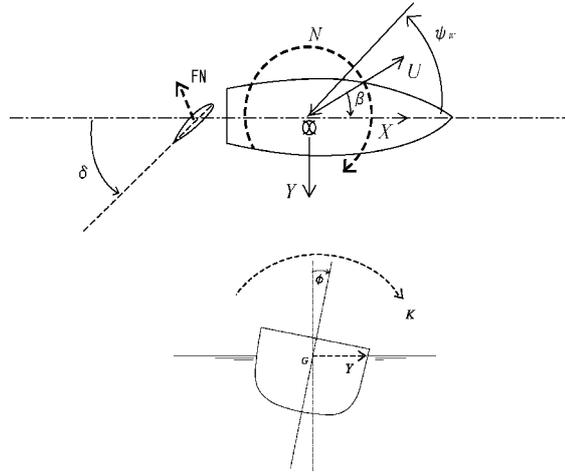


図1 座標系

3. 対象船型及び水中フィンの形状

著者らは、対象船をバラ積み船を想定して主要目は選定しているが、流体力等のデータは SR221-C 船型のデータを用いている。SR221 船型を同サイズの尺度で見ると同程度の主要目であることを確認している。想定したばら積み船の主要目を表1に示す。

表1 想定ばら積み船の主要目

Lpp(m)	180.0
B (m)	32.0
D (m)	16.0
d (m)	10.7
Dp (m)	5.29
Pitch ratio of propeller	0.662
GM (m)	2.0
KG (m)	9.0
A _R /LD	0.015
D.W. (ton)	45,000
Ship speed (knots)	13.5

表の中で D_p はプロペラ直径を表し、SR221C 船型に用いられたプロペラを想定船のサイズに合わせて換算している。次に、帆走性能を向上させるために船底に水中フィンを取り付けることを検討した。水中フィンには2種類あり、Case1 から Case4 のように船側両舷から2枚の平板を設置した状態と Case5、Case6 のように船体中心線の船底に1枚の平板を突き出した状態である。水中フィン面積や取り付け位置は図2に示す。水中フィンの影響を調査するために、各 Case に水槽試験を実施した。著者の一人が、船体単体と水中フィンを取り付けた場合の実験結果を解析して、船体の流体力及びモーメントに対して

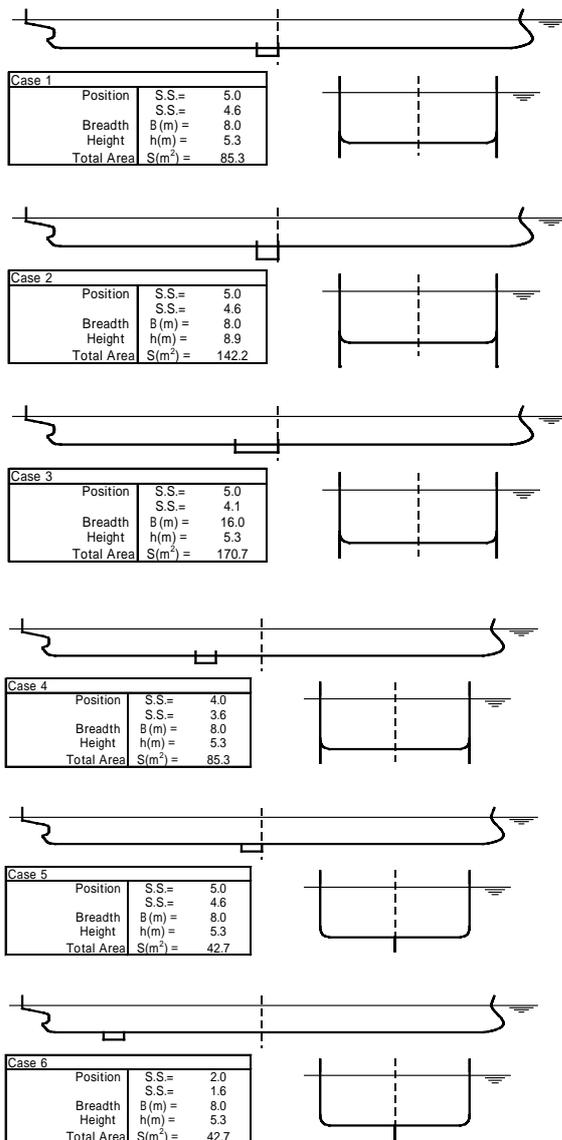


図2 水中フィンの形状及び配置

水中フィンが及ぼす影響をフィンの投影面積だけを用いて推定できる簡便な方法を開発した。これより、水中フィンによる流体力及びモーメントに対する影響は次式で表現できる⁵⁾。

$$\left\{ \begin{aligned} X'_{fin}(\beta) &= X_{fin} / 0.5 \rho L d U^2 = (-0.04 + 0.212 |\beta|) \frac{A_f}{Ld} \\ Y'_{fin}(\beta) &= Y_{fin} / 0.5 \rho L d U^2 = 4.32 \beta \cdot \frac{A_f}{Ld} \\ N'_{fin}(\beta) &= N_{fin} / 0.5 \rho L^2 d U^2 = Y'_{fin}(\beta) \cdot x'_{g_f} \\ K'_{fin}(\beta) &= K_{fin} / 0.5 \rho L d^2 U^2 = Y'_{fin}(\beta) \cdot z'_{g_f} \end{aligned} \right. \quad (7)$$

ただし、 A_f はフィン面積を表している。フィンの前後方向の力の定数項は水中フィンの直進時の抵抗係数を意味しており、模型試験結果を実船スケールに換算した値を用いている。これより、この式を運動方程式(5)の中で船体の流体力を表現している項へ加えるだけである。

次に、想定したばら積み船に設置する帆の形状は4個の矩形帆で構成される。帆の設置は、タンク配置等からマスト設置場所が決められる。想定したばら積み船の帆の配置は以下ようになる。

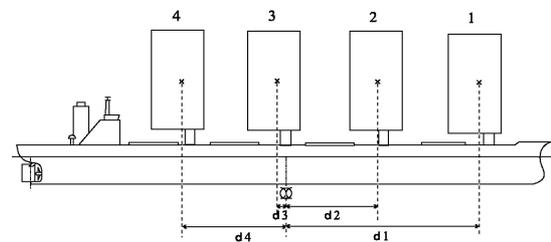


図3 帆装船の帆の配置

図3にある各帆の船体中心位置(ミッドシップ)からの距離について、 d_1 、 d_2 、 d_3 及び d_4 はそれぞれ52.1m、23.3m、-5.5m、34.3mとしている。

$$\left\{ \begin{aligned} X'_S &= 4 \times (C_L \sin(\psi_W - \beta) - C_D \cos(\psi_W - \beta)) \\ Y'_S &= 4 \times (C_L \cos(\psi_W - \beta) + C_D \sin(\psi_W - \beta)) \\ N'_S &= (C_L \cos(\psi_W - \beta) + C_D \sin(\psi_W - \beta)) \times (d_1 + d_2 + d_3 + d_4) \\ K'_S &= 4 \times (C_L \cos(\psi_W - \beta) + C_D \sin(\psi_W - \beta)) \times H_{ac} \end{aligned} \right. \quad (8)$$

帆によって生じる流体力は帆単体の実験から得られた流体力特性をもとに相対風速、相対迎角から求めている。 $X's$ 、 $Y's$ 、 $N's$ 、 $K's$ は、帆により生じる外力及びモーメントを示している。 C_L 、 C_D は帆単体の揚力係数、抗力係数であり、 H_{ac} は帆の空力中心からの重心高さを示す。

4. シミュレーション結果

4.1 帆走性能に対する帆の面積の影響

帆装船を設計する上で、適切な帆の面積を検討しなければならない。帆の面積が拡大すると、帆装船のプロペラ直径を推進効率を向上する。しかし、帆の面積を拡大する欠点としては重心が上昇し、帆走装置自体の重量が増加して強度的な問題が生じることである。重心の上昇は、帆の中心の高さと重心位置の距離と帆の重さを考慮することによって推定できる。帆走装置の重さは面積に比例しており、比例定数は 0.15t/m^2 であると経験的に仮定されている。この重心位置の上昇を考慮して帆装船の航走状態及び帆走性能を検証するために、帆の面積をパラメータにして帆走性能の変化についてシミュレーションを行った。風の条件は、ビュフォート風力階級7相当の 15m/s とし、風向は 0 度から 180 度の範囲で 10 度おきに変更した。帆の面積は、 1600m^2 (単一帆の面積: 400m^2) から 3200m^2 (単一帆の面積: 800m^2) まで変更した。帆走性能を評価するために、まず帆走状態に関する船速 U 、横流れ角 β 、ヒール角 φ 及び舵角 δ の変化を図4に示す。船速は帆の面積変化に比例して速くなっていることが分かる。帆走による最大船速は、検討した範囲では初期速度の約 50% 増加している。横流れ角は、帆の面積が多くなると横流れ角の大きさが大きくなっていることが分かる。ヒール角は検討した範囲で最大 6 度まで変化しており、運航作業上大きなヒール角も問題である。舵角は、面積変化に比例して大きくなっており、帆の面積が 2800m^2 のときには最大舵角が 15 度を超過していることが分かった。帆装船の操縦性を考えるとあまり舵の当て舵量が大きくないことが望ましく帆の面積を決定する上で当て舵量が制約条件の一つになる。次に、推進性能の評価指標でもある DHP について帆の面積に対するシミュレーション結果を図5に示す。原船型と帆のみ設置した船型と相対比較している。ただし、DHP は風向の影響を受けるので、実海域ではあらゆる方向から風が吹いてくるために風向に対して平均した DHP' を求めて評価した。

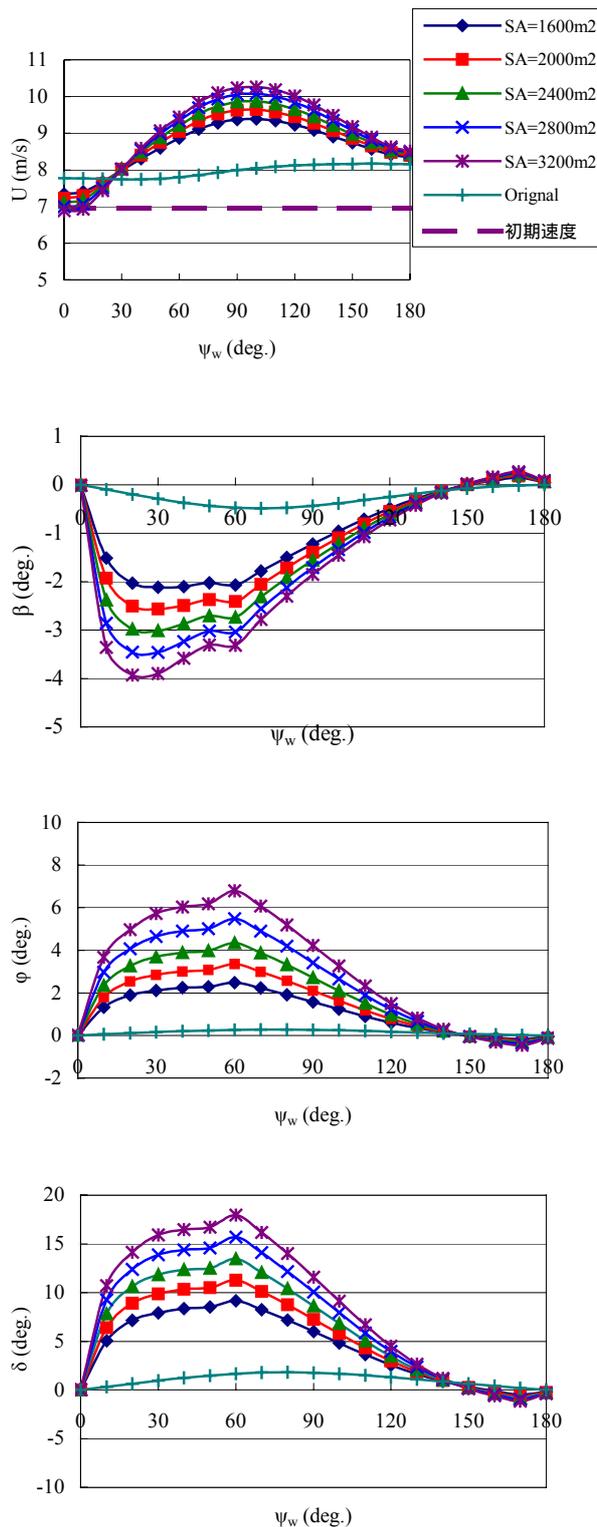


図4 帆の面積に対する航走姿勢の変化

$$DHP' = \int DHP(\psi_w) d\psi_w / \Delta\psi_w \quad (9)$$

ここで、 $\Delta\psi_w$ は検討した風向範囲を表している。シミュレーション結果から帆の面積が大きくなると、 DHP' は減少している。 DHP' は、検討した範囲ではビュフォート風力階級7相当でも最大約5%向上であることが分かった。

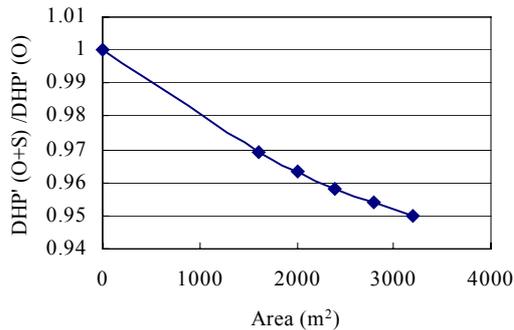


図5 帆の面積に対するDHPの変化

4.2 帆走性能に及ぼす水中フィンの影響

帆の面積をパラメータにして帆走性能の変化についてシミュレーションを行った。風の条件は、一定風速で15 m/sとし、風向は0度から180度の範囲で10度おきに変更した。帆の面積は、上記シミュレーションの結果から操縦性、運航作業性を考慮して舵角が15度以下、ヒール角を5度以下の制約条件を仮定し、2400m² (単一帆の面積:600m²)とした。帆走性能を評価するために、帆走状態に関する船速 U 、横流れ角、ヒール角及び舵角を図6に示す。図の中には、原船型に帆のみを設置した状態も加えて比較している。船速は原船型に帆のみを設置した場合が最も大きくなっている。これは、水中フィンが付加物抵抗になっており、水中フィンによる姿勢変化の抑制による推進効率が向上した利得より大きくなっていることが考えられる。横流れ角は、帆の面積が多くなると横流れ角の大きさが大きくなっていることが分かる。図より、横流れ角の変化が一番小さいのはCase3であることが分かる。これは、Case3が他のCaseの中でフィン面積が最も大きく、横流れに対する抵抗成分が大きいことに起因している。一方、ヒール角は検討した範囲で各

Case は大きな変化は見られなかった。想定したフィン面積が船体固有の復原力に対して相対的に小さい

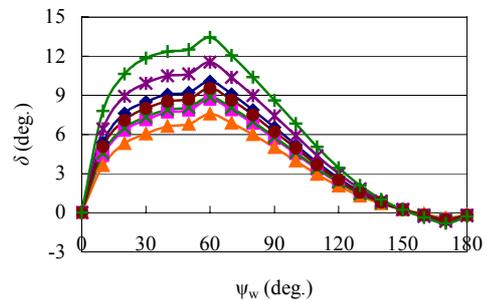
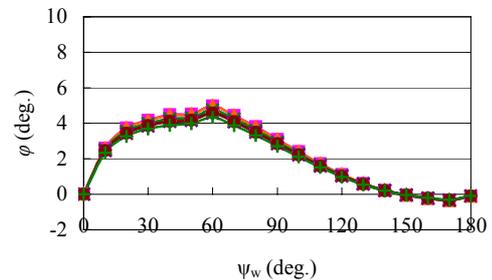
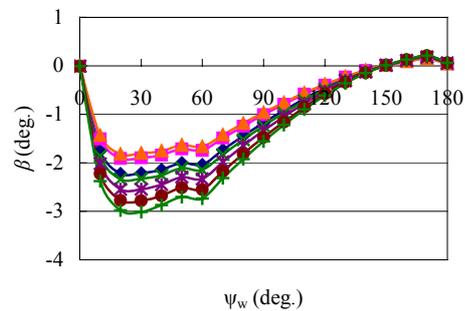
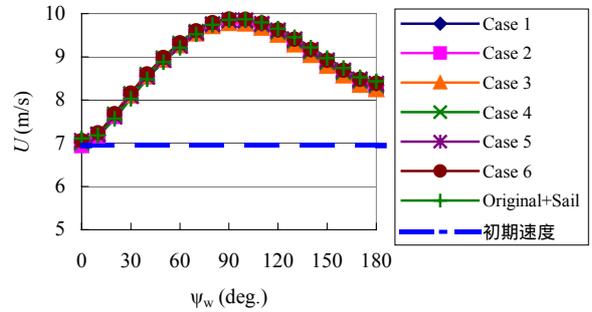


図6 水中フィン配置に対する航走姿勢の変化

ことが考えられる。当て舵量は、Case 3 が一番小さかった。これもフィン面積が大きいために生じる流体力が大きく、船体重心位置から距離が近くてもヨウモーメントに大きな影響を与えている。次に、推進性能の評価指標である DHP' についてシミュレーション結果を図7に示す。この図の中に DHP' は、風向の影響を受けるので風向に対して平均した値で評価しており、帆のみ設置した船型と相対比較している。シミュレーション結果より、 DHP' の値が一番小さかったのは Case 6 であった。Case 6 は、一つのセンターボードを船尾後方へ取り付けており、フィン面積も他の Case の中で一番小さい。これは、フィン面積が小さいことから水中フィンの付加物抵抗が小さくなり、船尾後方へ取り付けたことフィンから発生するモーメントを大きくすることができたからであると考えられる。シミュレーション結果から、Case 6 以外では今回検討したフィン配置ではフィンによる DHP の減少は図れなかったが、セールによって生じる流体力の着点と横流れによる船体に生じる流体力の着点が合えば当て舵量も減少することが考えられ、今後詳細に検討していけば DHP' をさらに減少させる配置についても可能性はある。また、水中フィンは、操縦性に影響する当て舵量の減少には有効であることも分かった。今後、実用船を設計する上で操縦性も重要であり、定常航走状態での当て舵量の減少についての知見を得ることができた。

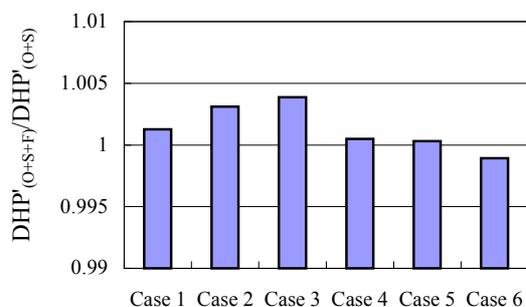


図7 水中フィン配置に対する DHP' の変化

5. 結論

本論文では、帆装船の帆走性能を推定するためにシミュレーションプログラムを開発し、帆の面積や水中フィンの影響についてシミュレーション計算を行った。これらのシミュレーションから以下の結論

を得た。

- (1) 帆の面積を大きくすると、当て舵量も大きくなることが分かった。当て舵は操船性や推進性能に影響を及ぼすために、帆の面積を決定する上で当て舵量も制約条件になることが分かった。
- (1) 帆の面積を大きくすると、ビューフォート風力階級7相当の海域において波向きで平均化した DHP' は約5%減少することができる。
- (2) 6種類的水中フィンのシミュレーション結果から、 DHP' について Case 6 が一番小さくなっており、水中フィンを装備しない場合と比べてわずかではあるが減少していることが確認できた。Case 6 はフィン面積が一番小さいために水中フィンの付加物抵抗が小さく、船尾部分に装備されているのでフィンによるヨウモーメントが大きくなったことが原因であると考えられる。

本シミュレーションプログラムは帆装船の基本性能の検討に利用できることが分かった。今後、 DHP' が減少する水中フィン配置だけでなく、帆の配置についても検討していくことが必要である。また、実海域を航行するので海域に合わせた最適な航路選定について研究していく予定である。

6. 参考文献

- 1) Minami, Y, Nimura, T, Fujiwara, T, Ueno, M, "Investigation into Underwater Fin Arrangement Effect on Steady Sailing Characteristics of a Sail Assisted Ship", The Proceedings of the 13th International Offshore and Polar Engineering Conference, May 2003
- 2) Fujiwara, T, Ueno, M, and Nimura, T, (2003), "On aerodynamics characteristics of a hybrid-sail with square soft sail", The Proceedings of the 13th International Offshore and Polar Engineering Conference, May 2003
- 3) 平野雅祥、高井忠夫、松本憲洋：第3回操縦性シンポジウム、日本造船学会、1981、pp.27-pp.80
- 4) 藤原敏文、二村正、上野道雄：船体に働く風圧力の推定、日本造船学会論文集第183号、1998、pp.77-pp.90
- 5) 二村正、上野道雄、南佳成、藤原敏文、野中晃二：帆走水中フィンを装着した船体に働く流体力の推定、第3回海上技術安全研究所研究発表会講演集、2003年6月