

# 帆走用水中フィンを装着した船体に働く流体力の推定

海上安全研究領域  
元海上安全研究領域

\*二村 正、上野道雄、南 佳成、藤原敏文  
野中晃二

## 1. まえがき

地球温暖化防止に関連し、環境負荷低減に貢献しうる帆装商船の開発の気運が高まり、当研究所においても帆装商船開発に向けた研究が平成 14 年度より開始された。

帆装商船として適していると考えられる船体の性能は、抵抗が小さいこと、帆走時に横流れが小さく、セールにより発生する力の着点と横流れにより船体に発生する流体力の着点と横流れにより船体等である。現在、帆装商船として検討されている船種はばら積船であるが、排水量や喫水を大きく変えずに上記条件を考えると、水中フィンを船体の最適な位置に装着することにより良好な性能が確保できると考えられる。そこで、水中フィンを装着した船体の斜航流体力計測を行いその性能について検討した。また、水中フィン装着による増加流体力を水中フィンの投影面積だけを用いて推定する簡単な方法を開発した。本報告ではこれらの結果について報告する。

## 2. 供試模型船及び試験状態

斜航流体力計測に用いた模型船はSR221-Cのタンカー船型<sup>1)</sup> (L=2.97m) である。現在、帆装商船として検討されているのは船長180mのばら積船であるが、計測に用いた模型船を船長180mに換算すると、表 - 1 に示すように、対象船であるばら積み船とほぼ同程度の主要目である。

図 - 1 に流体力の座標系を示す。計測した斜航流体力は、船体に働く前後力 $F_x$ 、横力 $F_y$ 、船体中心まわりの回頭モーメント $M_z$ 、喫水位置まわりの傾斜モーメント $M_x$ である。試験はすべて満載状態で、舵、プロペラ無しの状態である。試験速度は $U=0.546\text{m/s}$ である。

図 - 2 に水中フィンを装着した模型状態を示す。

表 - 1 供試船と想定ばら積船の主要目

| 項目       | 供試船<br>(SR221-C) | 想定船<br>ばら積船 |
|----------|------------------|-------------|
| 船長 L (m) | 180              | 180         |
| 幅 B (m)  | 32.6             | 32.3        |
| 喫水 d (m) | 10.9             | 10.7        |
| L/B      | 5.52             | 5.57        |
| B/d      | 3.01             | 3.02        |
| Cb       | 0.802            | 0.7 ~ 0.8   |
| Lcb (%)  | -2.53            |             |
| Lcb (m)  | -4.55            |             |

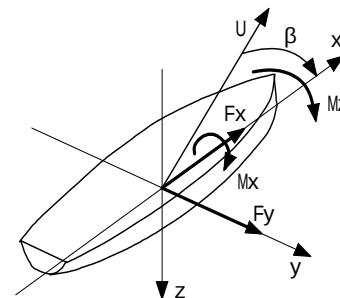


図 - 1 座標系

水中フィンは2種類有り、Case 1 から 4 のように船側両舷から船底下に 2 枚の平板を突き出した状態と、Case 5、6 のように船体中心線の船底下に平板 1 枚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等の詳細は図 - 2 を参照願いたい。

## 3. 斜航流体力計測結果

斜航流体力計測はHeel 状態についても行ったが、本報告では $\text{Heel} = 0^\circ$  状態の計測結果を主に示す。

図 - 3 に、水中フィンを装着していない船体単独状態及び、水中フィンを装着したCase 1 から 6 の斜航流体力と、船体前後方向圧力中心位置 $L_x$ 、上下方向圧力中心位置 $L_h$  を示す。なお、無次元化は以下の方法による。

$$F_x' = F_x / (0.5 \rho L d U^2)$$

$$F_y' = F_y / (0.5 \rho L d U^2)$$

$$M_z' = M_z / (0.5 \rho L^2 d U^2)$$

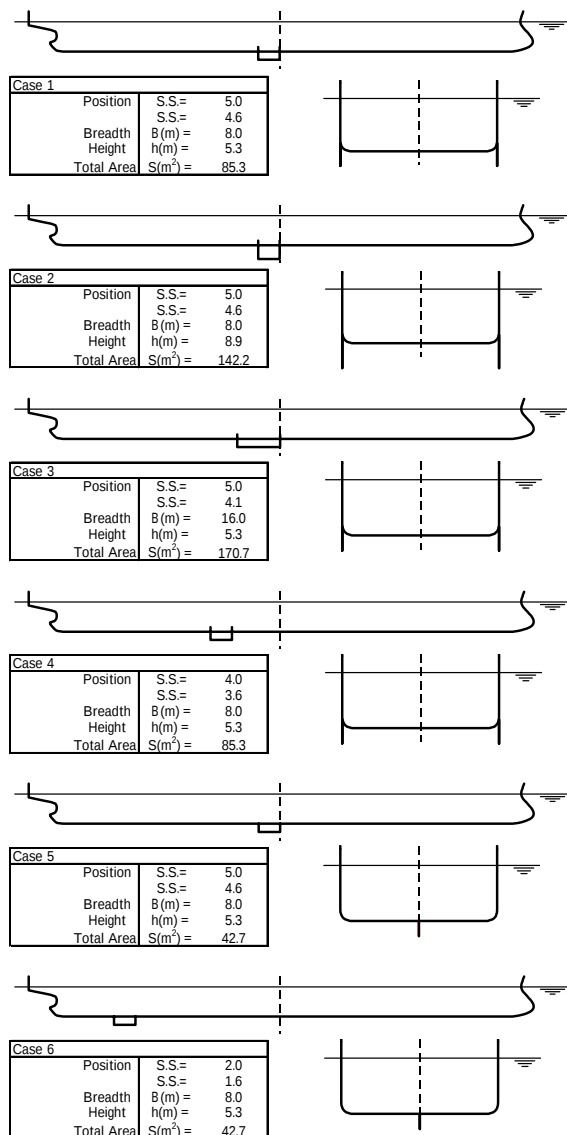


図 - 2 水中フィン装着状態

$$Mx' = Mx / (0.5 \rho L^2 d U^2)$$

$$Lx' = Mz' / Fy'$$

$$Lh' = Mx' / Fy' \times L/d$$

図 - 3 の計測結果から、水中フィン装着により、横力  $Fy'$  が大きく増加していることが解る。ここで、水中フィン面積を  $S$  (Cace 1 ~ 4 は 2 枚分) とし、船長  $\times$  喫水  $= Ld$  との面積比を  $S' = S / Ld$  とする。例えば、Cace 1 では水中フィン面積比は  $S' = 4.37\%$  と非常に小さいが、斜航角  $\beta = -10^\circ$  での横力は、船体単独に比べ 71% も増加しており、小さな水中フィンにより大きな横力の増加が得られることがわかる。この横力の増加によって、帆走時に横流れを小

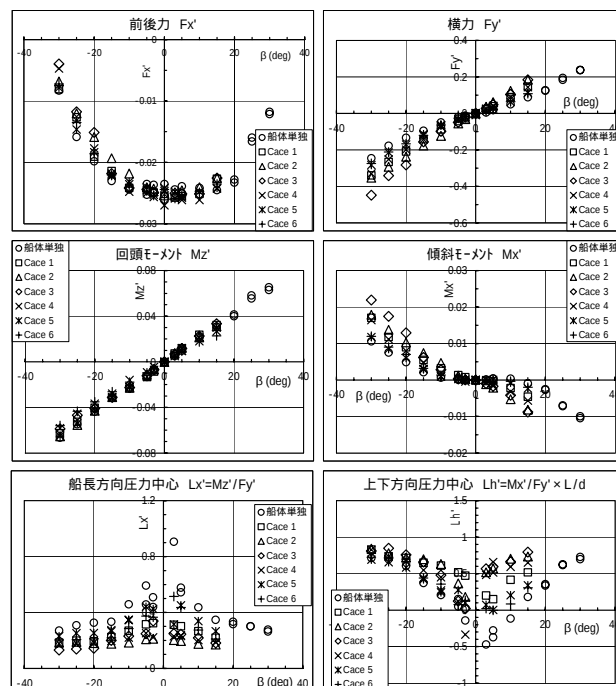


図 - 3 斜航流体力計測結果

さくできるため、水中フィン装着は帆装船にとって有効な手段であるといえる。また、図 - 3 の船体前後方向の圧力中心位置  $Lx'$  も水中フィンの装着の影響が大きく現れている。船体単独では、 $\beta$  が小さくなると  $Lx'$  が船体前方に移動する傾向であるが、水中フィン装着により全体的に船体中心に近づくとともに、 $\beta$  の小さいところでの前方への移動量も小さくなっている。この水中フィン装着による  $Lx'$  の変化の傾向も帆装船にとって好ましい傾向であると言える。なぜならば、船体上に数台のセイルを設置したとすると、風により船体に働く横方向の力の中心位置は、どんなに前方だとしても S.S. 7 ~ 8 付近であると推測され、船体単独のように  $Lx'$  が船首付近や、それよりも前方では、大きな当舵量が必要となるためである。

この他、傾斜モーメント  $Mx'$  及び船体上下方向の圧力中心位置  $Lh'$  に水中フィン装着の影響が顕著に表れている。

#### 4. 水中フィンによる横力増加量

水中フィン装着による横力増加量について検討する。まず、水中フィン単位面積当りの横力増加量を次のように定義する。

$$(F_y' - F_{y0}') / S' = (F_y - F_{y0}) / (0.5 \rho S U^2)$$

ここで、

$F_{y0}'$  : 船体単独の横力無次元値

$F_y'$  : フィン付き船体の横力無次元値である。

この単位面積当たりの横力増加量  $(F_y' - F_{y0}') / S'$  を図 - 4 に示す。横力増加量は Cases 1 から 6 のいずれの状態においても、斜航角  $\beta$  が  $\pm 20^\circ$  以内であれば、フィン面積にほぼ比例し、斜航角  $\beta$  と線形傾向にある。

図 - 4 に参考に高揚力特性を持つ 3 次元翼の揚力を破線で示す。図のように翼の高揚力曲線よりも、平板である水中フィンを取り付けた船体の横力増加量の方が大きい。これは、船体により水中フィンへの流入角が増加していることや、船体により水中フィンへの流入速度が大きくなっていること等が考えられるが、いずれにしても、翼揚力だけで流体力を推定することは困難である。

このため、横力増加量は水中フィンの面積に比例し、斜航角  $\beta$  と線形関係であるとして取り扱うこととした。計測した Case 1 ~ 6 の  $\beta = \pm 20^\circ$  間のデータで 1 次近似を求め (1) 式に示す。また、図 - 4 に実線でその近似式を示す。

$$(F_y' - F_{y0}') / S' = 0.0754 \beta \quad (1)$$

### 5 . 回頭、傾斜モーメント増加量の推定

前述の横力増加量の近似式を用い、水中フィン取り付け位置に横力増加量が働くこととして、回頭モーメント増加量  $(M_z' - M_{z0}') / S'$ 、傾斜モーメント増加量  $(M_x' - M_{x0}') / S'$  を推定する。回頭モーメントは船体中心まわりのモーメント、傾斜モーメントは喫水線まわりのモーメントであるため、それぞれの単位面積あたりの流体力増加量は (2)、(3) 式となる。

$$(M_z' - M_{z0}') / S' = 0.0754 \beta \times Ls' \quad (2)$$

$$(M_x' - M_{x0}') / S' = 0.0754 \beta \times (-d') \quad (3)$$

ここで、

$Ls' = Ls / L$  : S.S.5 からのフィン取付距離

$d' = d / L$  : 喫水無次元値である。

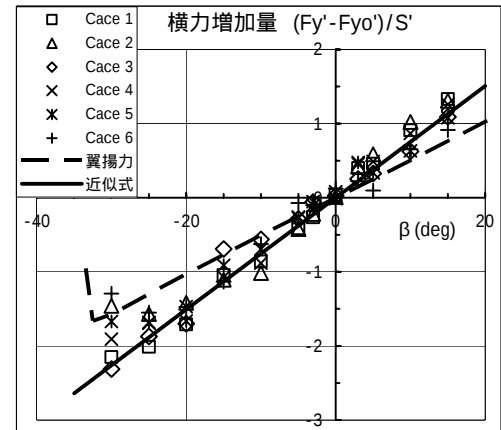


図 - 4 水中フィン装着による  
横力増加量とその近似式

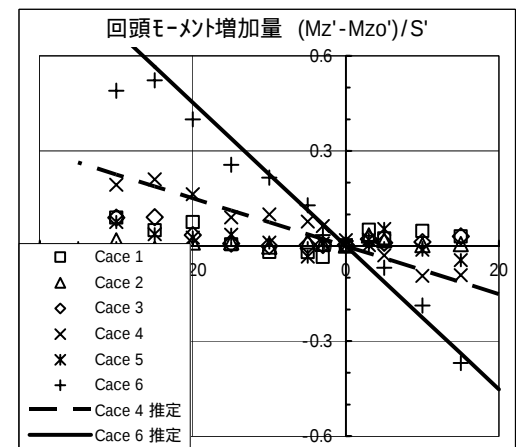


図 - 5 横力増加量近似式を用いた  
回頭モーメント増加量の推定

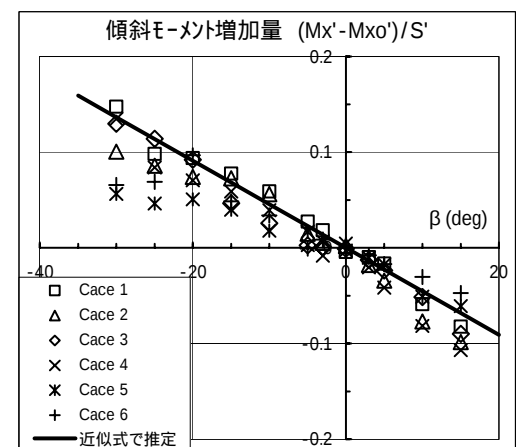


図 - 6 横力増加量近似式を用いた  
傾斜モーメント増加量の推定

(2)、(3)式による推定値と、計測結果を図 - 5 (回頭モーメント増加量) と図 - 6 (傾斜モーメント増加量) に示す。

図 - 5 の回頭モーメント増加量では、Cace 1、2、3、5 は水中フィンが S.S.5 位置に取り付けられたため、その推定値は  $\beta$  にかかわらず 0 である。計測結果も、ばらつきが大きいもののほぼ 0 となっている。Cace 4 の推定値は破線で、Cace 6 の推定値は実線で示してあるが、回頭モーメント推定値と計測値はほぼ一致している。

図 - 6 の傾斜モーメント増加量では、喫水が取り付け距離であるため、推定値はいずれの状態も太い実線となる。船体中心に平板を 1 枚取り付けた Cace 5、6 の誤差は大きいものの、全体的には  $\beta = \pm 20^\circ$  間での計測値を推定値は表していると言える。

以上のように、回頭モーメント、傾斜モーメント増加量は、横力増加量近似式を用いた推定方法でおおよそ推定できるといえる。

## 6．水中フィンによる前後力増加量

図 - 7 に、水中フィン装着による前後力増加量  $(F_x' - F_{x0}')/S'$  を示す。

前後力増加量は、前後力そのものが小さいため、その差である増加量はばらつきが大きい。特に、Cace 5、6 は  $\beta$  の正負で差が大きい。このため、比較的傾向が一致している Cace 1 ~ 4 のデータを用い、前後力増加量は左右対称であると仮定し、 $|\beta|$  に比例する近似とした。なお、抵抗値を過小評価しないよう、 $\beta = 0^\circ$  での値は、近似計算では -0.026 であった値を、近似式では -0.04 とし、- 側に移動させた。近似式を(4)式に示す。また、図 - 7 に太い実線でその近似式を示す。

$$(F_x' - F_{x0}')/S' = 0.0037 |\beta| - 0.04 \quad (4)$$

図 - 7 の Cace 1 ~ 4 のデータでは、近似式より一部下にプロットされている点があるものの、 $\beta = \pm 20^\circ$  間は近似式に近い値、あるいは近似式よりも上にプロットされている点が多い。Cace 5、6 のデータでは、 $\beta$  が + 側と - 側で近似式の下と上にばらついているが、全体的には低めの近似式

となっている。

前後力増加量  $(F_x' - F_{x0}')/S'$  は、負が抵抗増加で、正が抵抗減である。(4)式の近似式を用いて前後力増加量を推定した場合、全体的には大きめの抵抗値であると計算されるため、設計上は安全サイドで推定されることとなる。

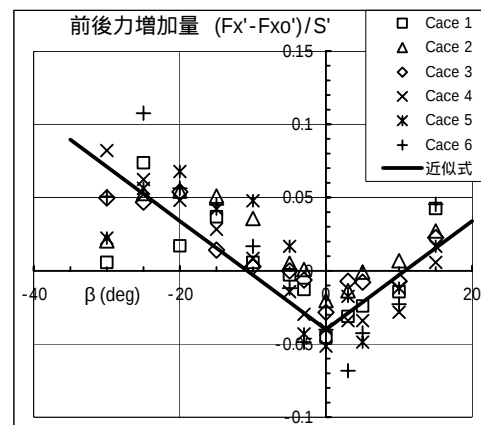


図 - 7 水中フィン装着による  
前後力増加量とその近似式

## 7．水中フィン装着時の流体力推定の検証

水中フィンを装着した船体に働く斜航流体力は、船体単独の斜航流体力が求まれば(1) ~ (4)式により推定できることを示したが、以下では、この推定値がどの程度合っているか検証する。

### 7.1 船体単独斜航流体力の近似式

水中フィンを装着した船体に働く斜航流体力は、船体単独の流体力が既知である必要がある。まず船体単独の前後力  $F_x'$ 、横力  $F_y'$ 、回頭モーメント  $M_z'$ 、傾斜モーメント  $M_x'$  を  $\beta$  の関数であるとし、最大で 6 次の多項式で近似した。図 - 8 に船体単独の流体力計測値とその近似式を示す。なお、図に示す船長方向圧力中心  $L_x'$  及び上下方向圧力中心  $L_h'$  の実線は、近似式の横力と近似式の回頭及び傾斜モーメントから求めた値であり、流体力だけでなく圧力中心も良い近似となるよう流体力の近似式が求められていることが解る。

### 7.2 流体力推定値と計測値の比較

前述の、船体単独の流体力近似式に、(1)式から(4)式に示した水中フィンによる増加流体力を加えた水中フィン付き船体の斜航流体力推定値を求め、計測値と比較して推定精度の検証を行う。

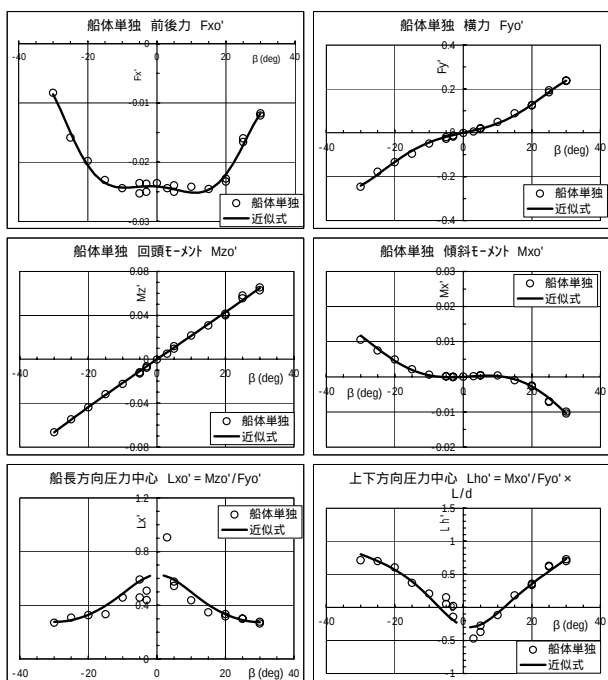


図 - 8 船体単独の流体力とその近似式

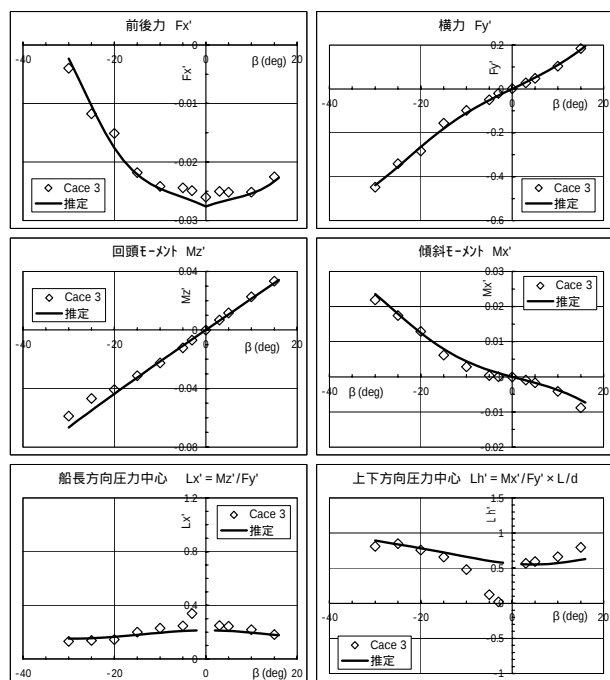


図 - 10 Case 3 の流体力と推定値

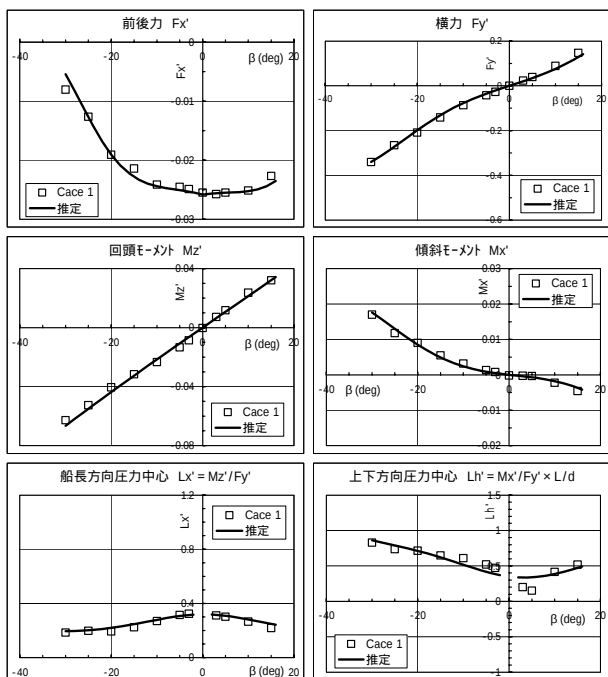


図 - 9 Case 1 の流体力と推定値

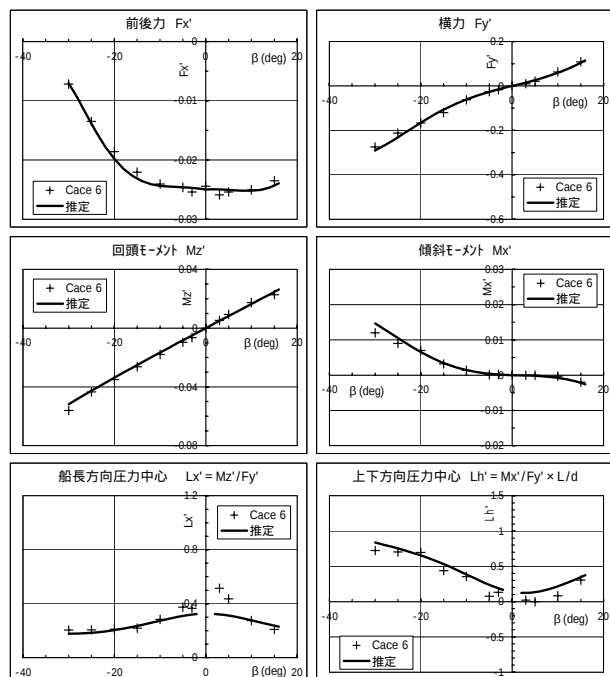


図 - 11 Case 6 の流体力と推定値

例として、図 - 9、10、11 に、Case 1、Case 3、Case 6 の流体力推定値と計測値を示す。なお、図の船長方向圧力中心  $Lx'$  及び上下方向圧力中心  $Lh'$  は、推定横力と推定回頭モーメント及び推定傾斜モーメントから計算した値である。

図 - 9 ~ 11 で特に推定値との差が顕著なのは、 $\beta = 0^\circ$  付近の船長方向圧力中心  $Lx'$  と上下方向圧力中心  $Lh'$  であるが、 $\beta = 0^\circ$  付近は横力及びモーメント自体の流体力が小さいため、ある程度の誤差は致し方ない。また、図 - 10 の前後力  $Fx'$  の

差が顕著であるが、図 - 8 での前後力のばらつきと大きな差はなく、計測誤差範囲の差であるといえる。

以上のように、多少の誤差はあるものの、水中フィンを着装した船体に働く流体力は、船体単独の流体力が既知であれば、(1)～(4)式を加算することにより推定できると言える。

## 8. 水中フィンを着装した Heel 状態の船体に働く流体力の推定

前述までの内容は船体傾斜無しの状態であるが、最後に、水中フィンを着装した Heel 状態の船体に働く流体力の推定について述べる。

Heel 状態の流体力推定は、前述の Heel 角 = 0° 状態と同じく、Heel 状態の船体単独の流体力が既知であることを前提とする。この船体単独の流体力近似式に、(1)～(4)式に示した水中フィンによる増加流体力を加算した値が、水中フィンを着装した Heel 状態の流体力推定値となる。

図 - 12 に Case 1、図 - 13 に Case 5 の、Heel 角 = 9°（右舷沈）状態での推定値と計測値を示す。Heel 角 = 0° 状態に比べ、 $L_h'$  で多少誤差が大きくなっている物も見られるが、Heel 状態においても (1)～(4)式を船体単独の流体力に加算することにより推定できると言える。

## 9. まとめ

水中フィンを着装した船体の斜航流体力計測を行った結果、以下の結論を得た。

- 1) 水中フィンは小さな面積で大きな横力を発生でき、また、前後方向圧力中心位置を後方に移動させるため、水中フィン装着は帆装船にとって有効な手段であるといえる。
- 2) 水中フィンを着装した船体の斜航流体力は、船体単独の流体力が既知であれば、(1)～(4)式を加算することにより推定できる。また、Heel 状態の流体力も、Heel 状態の船体単独の流体力が既知であれば、同じ方法により推定できる。

本推定法の開発により、設計段階での検討や、シーマージンの検討などが容易に行えるようになった。

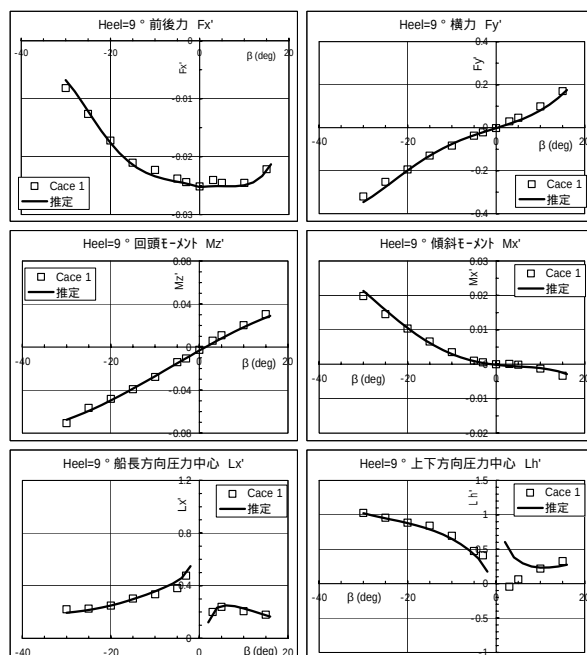


図 - 12 Case 1 の流体力と推定値 (Heel = 9°)

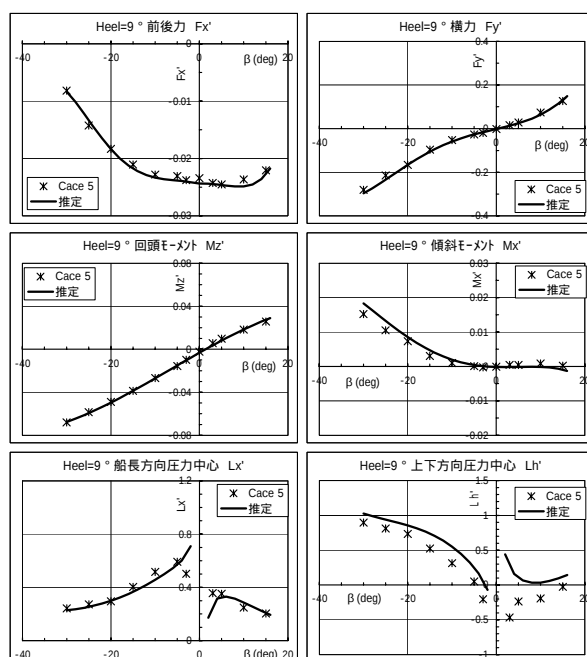


図 - 13 Case 6 の流体力と推定値 (Heel = 9°)

## 参考文献

- 1) 野中他：「操縦運動時の船体まわりの流場に関する研究」、船舶技術研究所報告、第34巻、第5号、(1997)
- 2) 村山他：「海上輸送における風力エネルギー利用の研究（その1）」、船舶技術研究所報告、第23巻、第6号、(1986)