

トリムした船体に働く流体力の推定

正員 湯川 和 浩* 正員 星野 邦 弘**
 正員 原 正 一** 山 川 賢 次**

An Estimation of Hydrodynamic Forces Acting on a Trimmed Ship Hull

by Kazuhiro Yukawa, *Member* Kunihiro Hoshino, *Member*
 Shoichi Hara, *Member* Kenji Yamakawa

Summary

After the marine disaster of "Nakhodka" in 1997 at the Japan Sea, we started in 1998 a five-year research project to develop an "Optimum Towing Support System" (OTSS). OTSS is a simulation system based on the data of external forces on the sea conditions and hydrodynamic forces acting on a hull, rudder and propeller. By OTSS we are able to obtain appropriate guidelines to avoid a secondary accident and to minimize marine pollution. In the simulation, the accurate prediction of hydrodynamic forces acting particularly on a hull would be most important. Using a ten-segmented model ship, we measured the distribution of lengthwise lateral force acting on a trimmed hull in order to investigate characteristics of the hydrodynamic forces. In this paper we report the result of the investigation and propose a theoretical prediction method based on the slender body theory for the hydrodynamic forces acting on a trimmed hull.

1. 緒 言

1997年に日本海で発生した「ナホトカ号」の海難事故や1999年にフランス北西部のブレスト沖で発生した「エリカ号」の海難事故では、積載していた原油の流出により沿岸一帯は多大な海洋汚染に見舞われた。著者らは平成10年度から5年計画で「荒天下における航行不能船舶の漂流防止等に関する研究」を実施しており、損傷船舶の漂流予測法および最適曳航法に関する研究を通し

て、「最適曳航支援システム」の開発を進めている¹⁾²⁾³⁾。このシステムは既存のコンピュータで実行可能なソフトウェアで、Fig.1に示すように損傷船舶の姿勢から推定する流体力と海象条件から推定する外力を用いたシミュレーション計算により、2次災害の防止や海洋汚染を最小限に留めるための指針を与えることができる。ただし、シミュレーション計算で損傷船舶の漂流運動や曳船時の運動を正確に評価するためには、数学モデルを構成する流体力の表現が問題となり、中でも船体に働く流体力を精度良く推定することが非常に重要である。

損傷船舶は一般に姿勢変化を伴っていると考えられるが、トリムやヒールした船体に働く流体力の理論推定法に関する研究例は極めて少ない⁴⁾⁵⁾。そこで、本研究ではトリムした損傷船舶を曳航する場合を想定し、船首曳航時と船尾曳航時の船体に働く流体力の理論推定法につ

* 海上技術安全研究所 海洋開発研究領域

** 海上技術安全研究所 環境・エネルギー研究領域

原稿受理 平成14年7月10日

秋季講演会において講演、平成14年11月14, 15日

いて検討を行う。まず、一般的な VLCC 船型を選び、その 10 分割模型を用いてトリムした船体に働く横力の船長方向分布を計測し⁶⁾⁷⁾、偏角や船体の姿勢の違いが及ぼす影響について調べた。次に、CFD⁸⁾⁹⁾ に比べて取り扱いが簡便であり、しかも短時間で比較的精度良く船体に働く流体力を推定することが可能であると思われる細長体理論に基づく方法¹⁰⁾を用いて、前述した VLCC 船型を対象にトリムした船体に働く横力の船長方向分布と流体力の推定を行ったのでその結果を報告する。

2. 船体に働く流体力の理論推定法

計算には Fig.2 に示すような Midship を原点とする船体固定座標を用いる。また、(1) 船体は細長体である、(2) 偏角と旋回角速度の小さな運動を扱う、(3) 造波の影響は無視できる、という 3 つの仮定のもと、船体まわりの流場を Double Body Model として取り扱う。ここで、剥離渦層以外の領域が完全流体であると仮定すると、船体まわりの流場を表す全速度ポテンシャル Φ は、次の 5 つの条件を同時に満足する必要がある。

- [1] Laplace の条件 : $\nabla^2 \Phi = 0$
- [2] 物体表面の条件 : $\nabla \Phi \cdot \vec{n} = 0$
- [3] 無限遠方の条件 : $\nabla \Phi \rightarrow U_s$ (at ∞)
- [4] 剥離の条件 : $\nabla \Phi \cdot (\vec{n} \times \vec{\tau}) = 0$

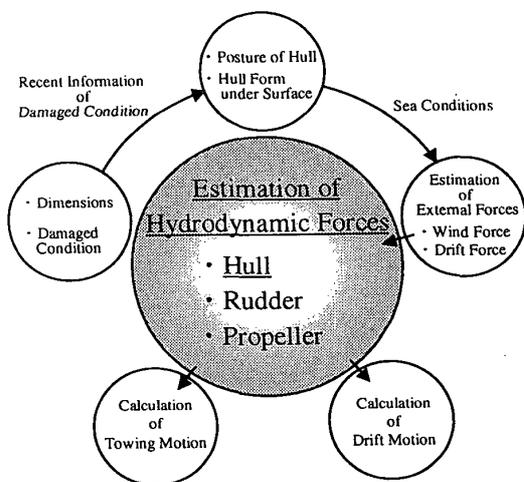


Fig.1 General flow of OTSS

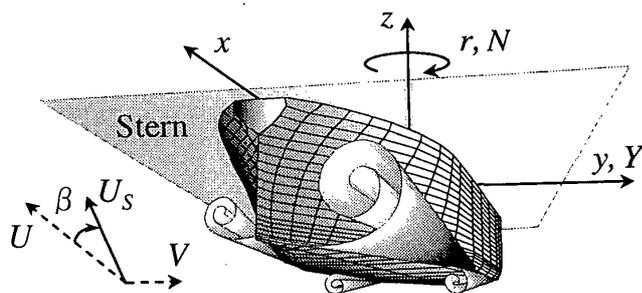


Fig.2 Coordinate system

[5] 剥離渦層の条件 : $\Delta p = \Delta \vec{v}_n = 0, \vec{\omega} = \vec{n} \times \Delta \vec{v}_t$
ただし、 \vec{v} は流速ベクトル、 \vec{n} および $\vec{\tau}$ は法線ベクトルと接線ベクトル、 $\vec{\omega}$ は渦度ベクトル、 p は圧力とし、添字の n, t は法線および接線方向を表す。このとき、細長体の仮定と等角写像を用いると、船体まわりの流場は船体横断面ごとの 2 次元問題に簡略化して取り扱うことが可能になる。そこで、次式に示す 7 次の写像関数で船体のフレームライン形状を近似する。

$$\left. \begin{aligned} W(\zeta; x) &= \sum_{n=1}^5 a_n(x) \zeta^{3-2n} \\ \zeta &= \xi + i\eta = r(\cos \theta + i \sin \theta) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

また、上式で近似した船体の直進運動と横運動による攪乱を表す単位複素速度ポテンシャル f_1, f_2 および離散的な渦糸の分布で表現した剥離渦層の複素ポテンシャル f_3 をそれぞれ足し合わせると、船体まわりの流場を表す全複素速度ポテンシャル f が得られる。

$$f = Uf_1 + Vf_2 + f_3 \quad (2)$$

$$f_1 = C_0 \log \zeta - \frac{C_1}{2\zeta^2} - \frac{C_2}{4\zeta^4} - \frac{C_3}{6\zeta^6} - \frac{C_4}{8\zeta^8} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} C_0 &= a_1 a'_1 - a_2 a'_2 - 3a_3 a'_3 - 5a_4 a'_4 - 7a_5 a'_5 \\ C_1 &= a_1 a'_2 - a_2 (a'_1 + a'_3) - 3a_3 (a'_2 + a'_4) \\ &\quad - 5a_4 (a'_3 + a'_5) - 7a'_4 a_5 \\ C_2 &= a_1 a'_3 - a_2 a'_4 - 3a_3 (a'_1 + a'_5) \\ &\quad - 5a'_2 a_4 - 7a'_3 a_5 \\ C_3 &= a_1 a'_4 - a_2 a'_5 - 5a'_1 a_4 - 7a'_2 a_5 \\ C_4 &= a_1 a'_5 - 7a'_1 a_5 \\ a'_n &= \frac{d}{dx} a_n \quad (n = 1 \sim 5) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$f_2 = a_1 \left(\zeta + \frac{1}{\zeta} \right) \quad (5)$$

$$f_3 = \sum_{k=1}^{n_s} \sum_{j=1}^n \frac{K_{k,j}}{2\pi i} \log \frac{(\zeta - \zeta_{k,j})(\zeta - \zeta_{k,j}^{-1})}{(\zeta - \bar{\zeta}_{k,j})(\zeta - \bar{\zeta}_{k,j}^{-1})} \quad (6)$$

ここで、 $K_{k,j}$ は k 番目の剥離点から流出した j 番目の渦糸の渦強さ、 $\zeta_{k,j}$ は ζ 平面における渦糸の位置、 n_s および n は剥離点と渦糸の数を表す。船体に働く横力 Y と回頭モーメント N は、横運動と剥離渦層の運動量 I_2, I_3 を用いて、次式のように表せる。

$$\left. \begin{aligned} Y &= -UI_3 \Big|_{x=\frac{L}{2}} \\ N &= UI_3 \Big|_{x=\frac{L}{2}} \cdot \frac{L}{2} - U \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} (I_2 + I_3) dx \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} I_2 &= -\rho\pi V \left\{ (a_1 - a_2)^2 + 3a_3^2 + 5a_4^2 + 7a_5^2 \right\} \\ I_3 &= 2\rho \sum_{k=1}^{n_s} \sum_{j=1}^n K_{k,j} \left\{ (a_1 - a_2) \text{Im} [\zeta_{k,j}^{-1}] \right. \\ &\quad - a_3 \text{Im} [\zeta_{k,j}^{-3}] - a_4 \text{Im} [\zeta_{k,j}^{-5}] \\ &\quad \left. - a_5 \text{Im} [\zeta_{k,j}^{-7}] \right\} + \rho \sum_{k=1}^{n_s} \sum_{j=1}^n K_{k,j} \delta_{k,j} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ただし、 ρ は流体の密度、 $\zeta_{k,j}$ は渦糸の渦対間距離を表す。なお、横力 Y 、回頭モーメント N および各船体横断面に働く横力 ΔY の無次元化には次式を用いる。

$$Y' = \frac{Y}{\frac{1}{2}\rho L d U_s^2}, \quad N' = \frac{N}{\frac{1}{2}\rho L^2 d U_s^2}, \quad C_Y = \frac{\Delta Y}{\frac{1}{2}\rho d U_s^2} \quad (9)$$

3. 剥離境界層のモデル化

船体まわりの流場は、流れの可視化実験の報告を参考にしてモデル化を行った。すなわち、Fig.3 に示すように各船体横断面の両舷のビルジ部におけるフレームラインとベースラインの接点を剥離点と仮定する。また、各断面で新たに発生する渦糸の渦強さは、両舷のビルジ部に仮定した剥離点における接線速度を打ち消すように決

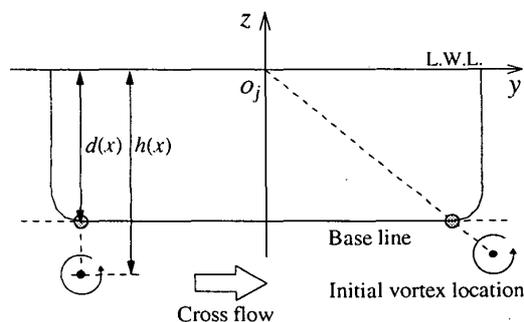


Fig.3 Assumption of initial vortex location

Table 1 Principal particulars of a model ship

| | |
|---------|-------|
| L (m) | 3.000 |
| B (m) | 0.544 |
| d (m) | 0.181 |
| C_B | 0.803 |

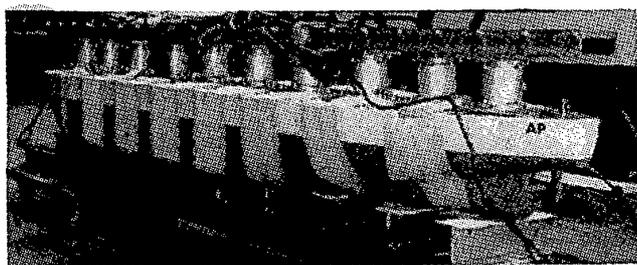


Photo 1 General view of a segmented model ship

定する。その際、渦糸の初期発生位置が問題となるが、Cross Flow に対する Face 側では剥離点の鉛直下方の点、Back 側では原点 o_j と剥離点の延長線上の点に仮定する。剥離点と渦糸の初期発生位置との距離については新たに s という係数を定義して、次式のように表現する。

$$s = \frac{h(x) - d(x)}{d} \quad (10)$$

また、流場の粘性の影響を考慮し、流れの上流部分で流出した渦糸の強さ $K_{k,j}$ は、次式に従って時間の経過と共に減衰するものと仮定する。ただし、 $K_{k,j}(0)$ は渦糸流出時の初期強さ、 ν は流体の動粘性係数、 t は渦糸流出後の経過時間を表す。

$$\frac{K_{k,j}(t)}{K_{k,j}(0)} = 1 - \exp\left(-\frac{\sigma^2}{4\nu t}\right), \quad \sigma = d \cdot \gamma \quad (11)$$

4. 分割模型による横力分布の計測

当研究所の海洋構造物試験水槽において、VLCC 船型の 10 分割模型を用いて船体に働く横力、回頭モーメントおよび横力の船長方向分布を計測した⁶⁾⁷⁾。供試模型船の主要目と概観を Table 1, Photo 1 に示す。ただし、写真では各セグメントの間に薄いゴム膜を貼っているが、実際の計測時には全て取り外した。船体の姿勢は Even Keel と船首トリム 3(deg.) の 2 状態であり、曳航速度は造波の影響を無視できるように 0.206(m/s) ($F_n=0.038$) とした。船体にプロペラと舵は付いていない。また、各セグメントの間隔を 4(mm) とし、運動を全て拘束した状態で計測を行った。ここで、供試模型船は以前 SR221 研究部会において検討された 3 隻の VLCC 船型のうちの 1 隻 (SR221C 船型¹¹⁾) であり、それら 3 隻は主要目は同じであるが、船尾部分において局部的に異なるフレームラインを有している。すなわち、SR221A 船型は V 型、SR221B 船型は U 型、そして供試模型船は両船型のちょうど中間のフレームライン形状となっている。SR221A 船型と B 船型については、過去に東京大学において船体表面の圧力計測から求めた横力分布の結果が報告されているため⁸⁾、Even

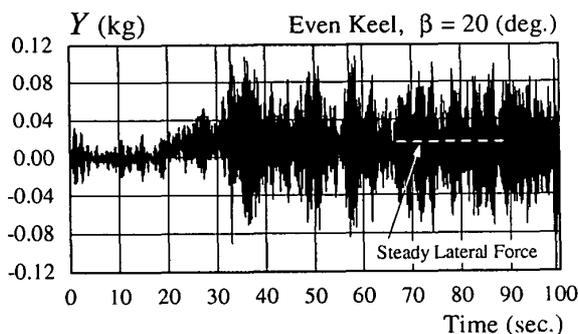


Fig.4 Measured lateral force acting on a segment

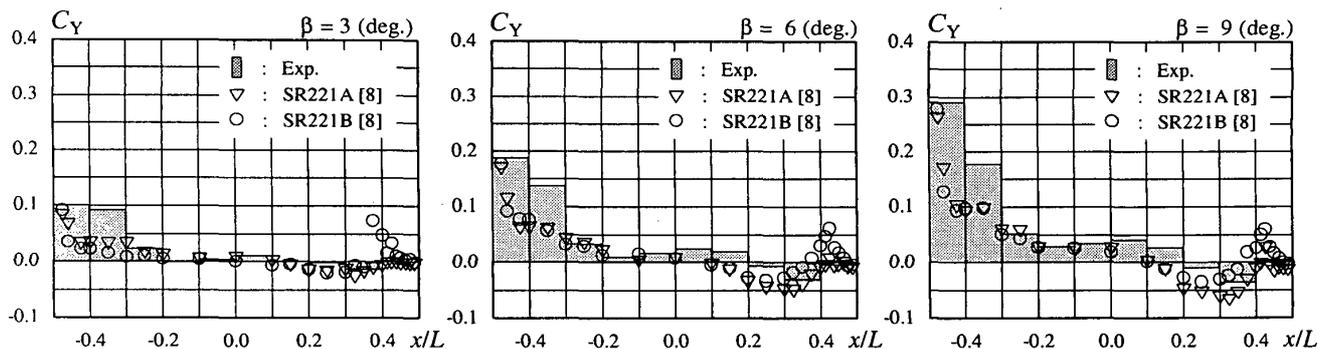


Fig.5 Comparison between measured lateral force distribution acting on SR221A,B and C

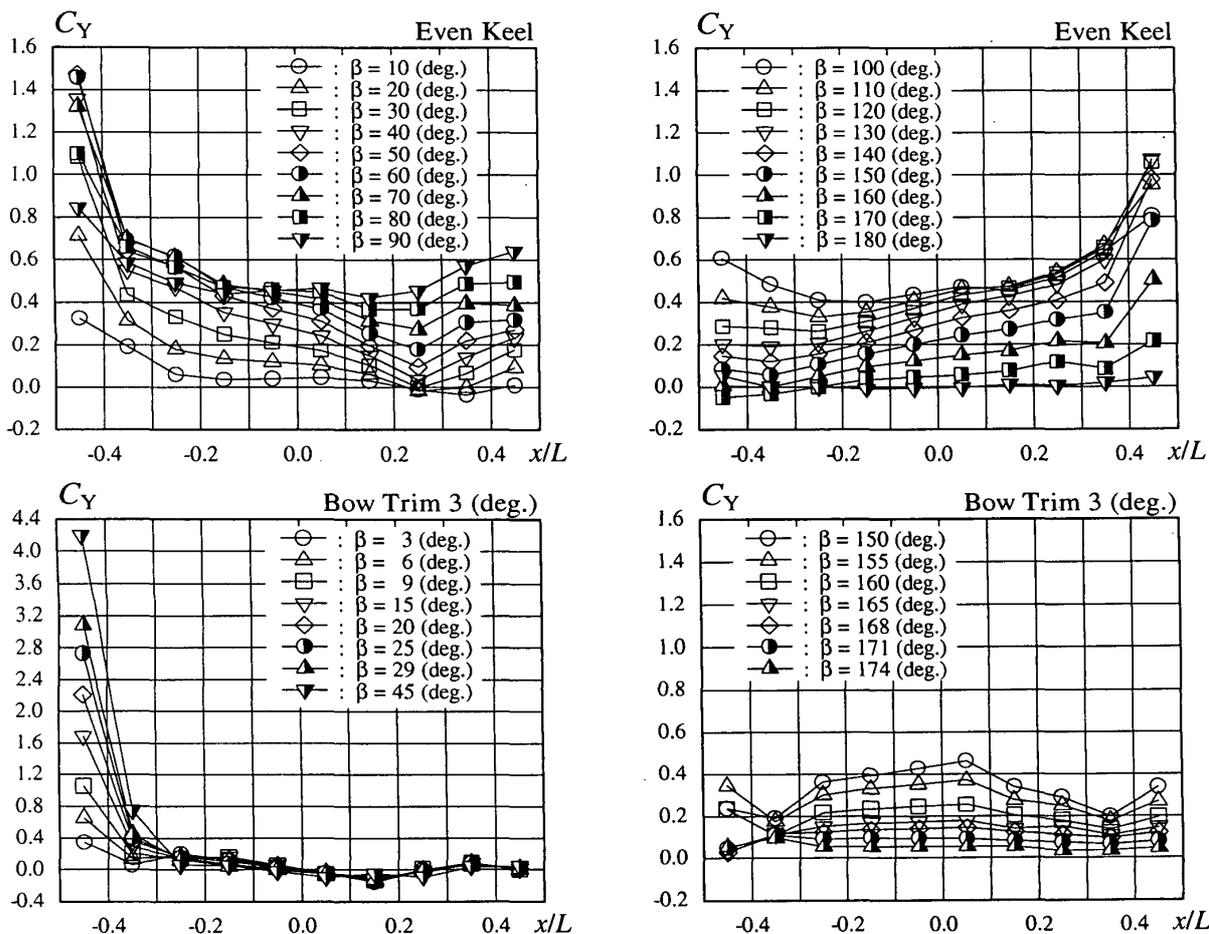


Fig.6 Measured lengthwise lateral force distribution acting on a segmented model ship

Keel で偏角 β が 3, 6, 9(deg.) の 3 状態について本計測結果との比較を行った。ただし、一般に船体まわりには多くの剥離渦が存在し、特に船尾部分では船底から船側へ流れが上昇するときに大きな巻き込みが形成され、運動の状態によってその形状や形成位置が異なる。Fig.4 に Even Keel で偏角 β が 20(deg.) の場合に船尾セグメントに働く横力の計測結果を示すが、計測値は大きく変動して船尾付近の複雑な流場を表している。従って、解析では図中の破線のように船体運動が比較的安定したと思われる範囲において計測値を平均化し、その値をセグメントに働く定常的な横力とした。他のセグメントに

についても同様な方法で解析を行い、SR221A 船型および B 船型の横力分布と比較した結果を Fig.5 に示す。図より、本計測結果は船体表面の圧力計測から求めた横力分布に比べて船首部分で若干大きめに計測されているが、偏角 β の変化に対する横力の船長方向分布は同様な傾向を示していると思われる。

Fig.6 に偏角 β の違いに伴う横力分布の変化を示す。図より傾向を見ると、Even Keel の場合には偏角 β が大きくなるに従い船体中央部から船首部にかけて働く横力が発達し、偏角 β が 40(deg.) では船首部に働く横力は船尾部の 6 倍程度まで大きくなる。また、偏角 β が

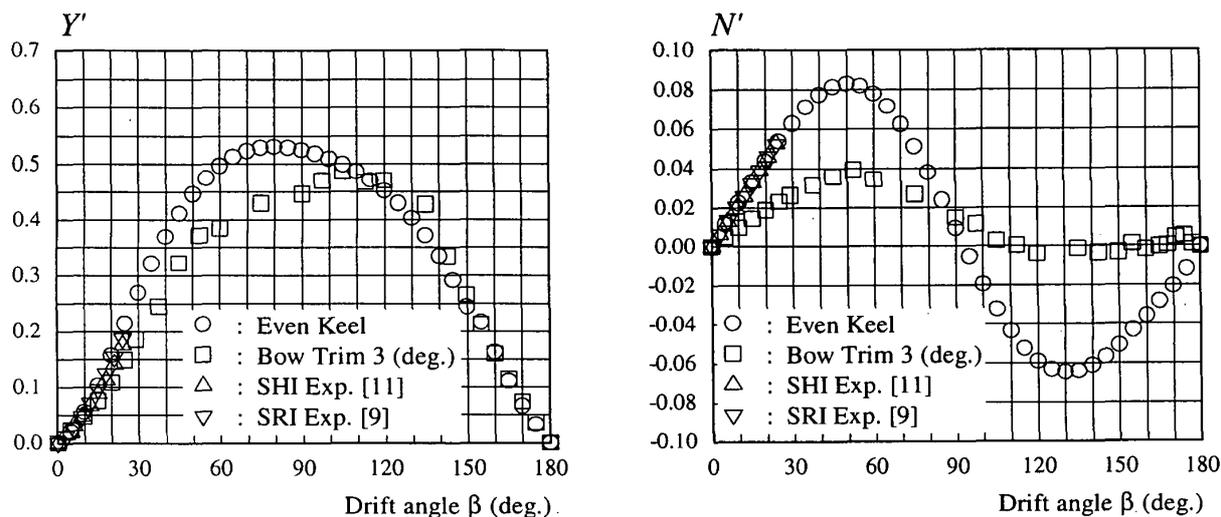


Fig.7 Measured lateral force and yaw moment acting on a segmented model ship

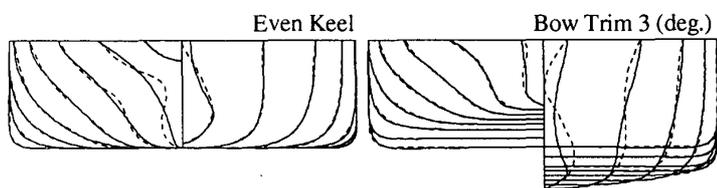


Fig.8 Bodyplans of a segmented model ship

90(deg.) 付近では船首尾に働く横力はほぼ等しくなり、船体中央部では小さくなる。船尾曳航時も、船首尾を入れ替えれば同様な傾向と言える。

一方、船首トリム 3(deg.) の場合には Even Keel の場合に比べて全く傾向が異なる。偏角 β の増大に対して船首部に働く横力の発達が非常に大きく、船体中央部から船尾部にかけて働く横力は、偏角 β が大きくなってもその値はほとんど変化しない。また、船尾曳航時には偏角 β の変化に対して船体中央部に働く横力の変化が大きく、船首部および船尾部における変化は小さい。

横力 Y' および回頭モーメント N' の計測結果については、供試模型船と同型船を対象とした Even Keel 時の計測結果が過去に報告されているため⁹⁾¹¹⁾、その結果も合わせて Fig.7 に示す。図中の△印と▽印はそれぞれ住友重機械工業 (株) と当研究所において計測された横力 Y' および回頭モーメント N' の結果であり、○印と□印は本研究で計測した供試模型船に働く横力の分布を船長方向に積分して求めた結果である。小偏角 β の範囲での比較になるが、本研究で得られた横力 Y' と回頭モーメント N' の計測結果はそれらと同様な傾向を示しており、計測精度は偏角 β が 30(deg.) 以下の範囲において十分なものである。図より Even Keel の場合、偏角 β が 80(deg.) 付近で横力 Y' は最大となるが、船首トリム 3(deg.) の場合、110(deg.) 付近で最大となる。また、回頭モーメント N' については、船首トリム 3(deg.) の

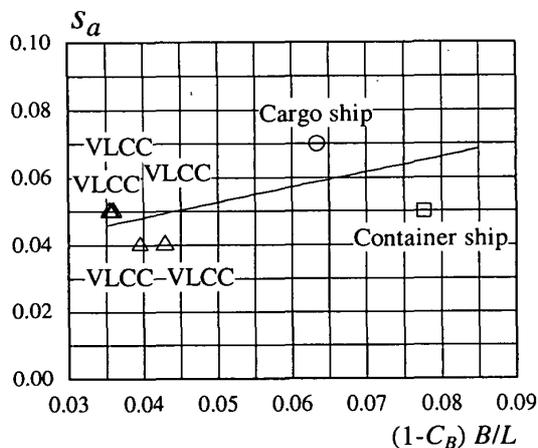


Fig.9 Estimation of parameter s_a

場合、Even Keel に比べて半分程度の値で、特に船尾曳航時に働く回頭モーメント N' の値が非常に小さいことがわかる。

5. 推定結果と計測結果の比較

前述した VLCC 船型の 10 分割模型を計算対象船型とし、Even Keel と船首トリム 3(deg.) の 2 状態について、船首曳航時と船尾曳航時の船体に働く横力の船長方向分布と流体力の推定計算を行った。数値計算では船体を長さ方向に 40 等分割し、各船体横断面から離散的な渦糸を自由に流出させた。ここで、(1) 式の写像関数には 5 つの係数が含まれるが、係数 $a_1(x) \sim a_3(x)$ は船体横断面ごとに吃水 $d(x)$ 、船幅 $B(x)$ 、横断面積 $S(x)$ から決まる係数である。そして、係数 $a_4(x)$ と $a_5(x)$ についてはできるだけ実船型に近い数学船型が得られるように、試行錯誤により適切な値をとることにした。Fig.8 に Bodyplan を示す。図中の破線は実船型、実線は写像関数によって得られた数学船型のフレームラインを表す。計算対象とした分割模型船は船首尾にバルブを有するた

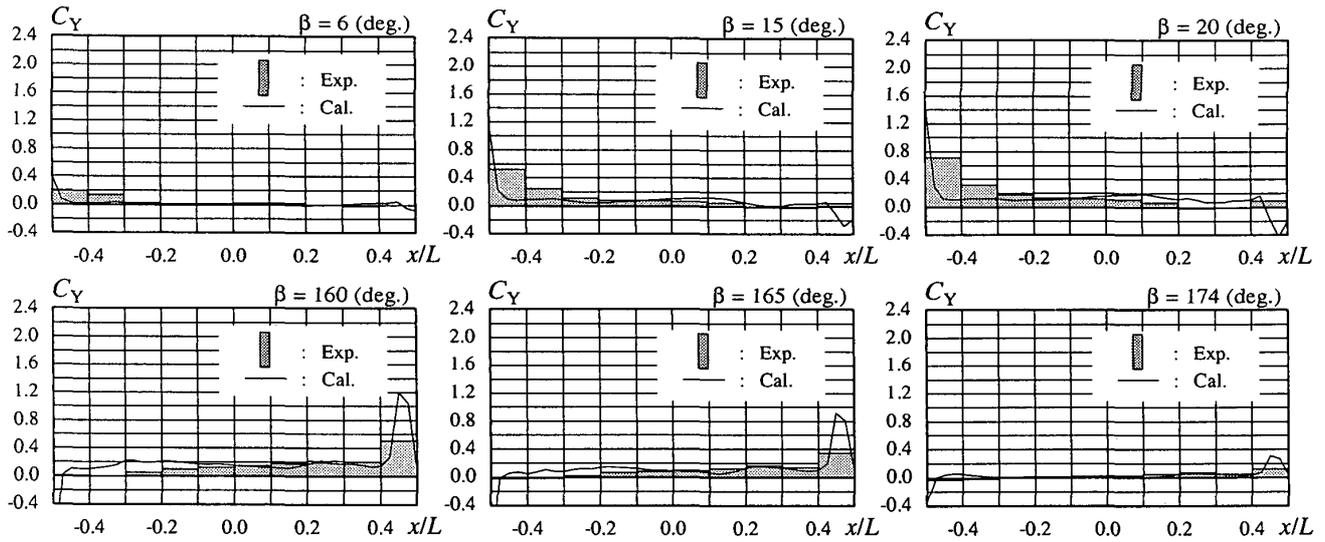


Fig.10 Estimated lateral force distribution acting on a segmented mode ship (Even Keel)

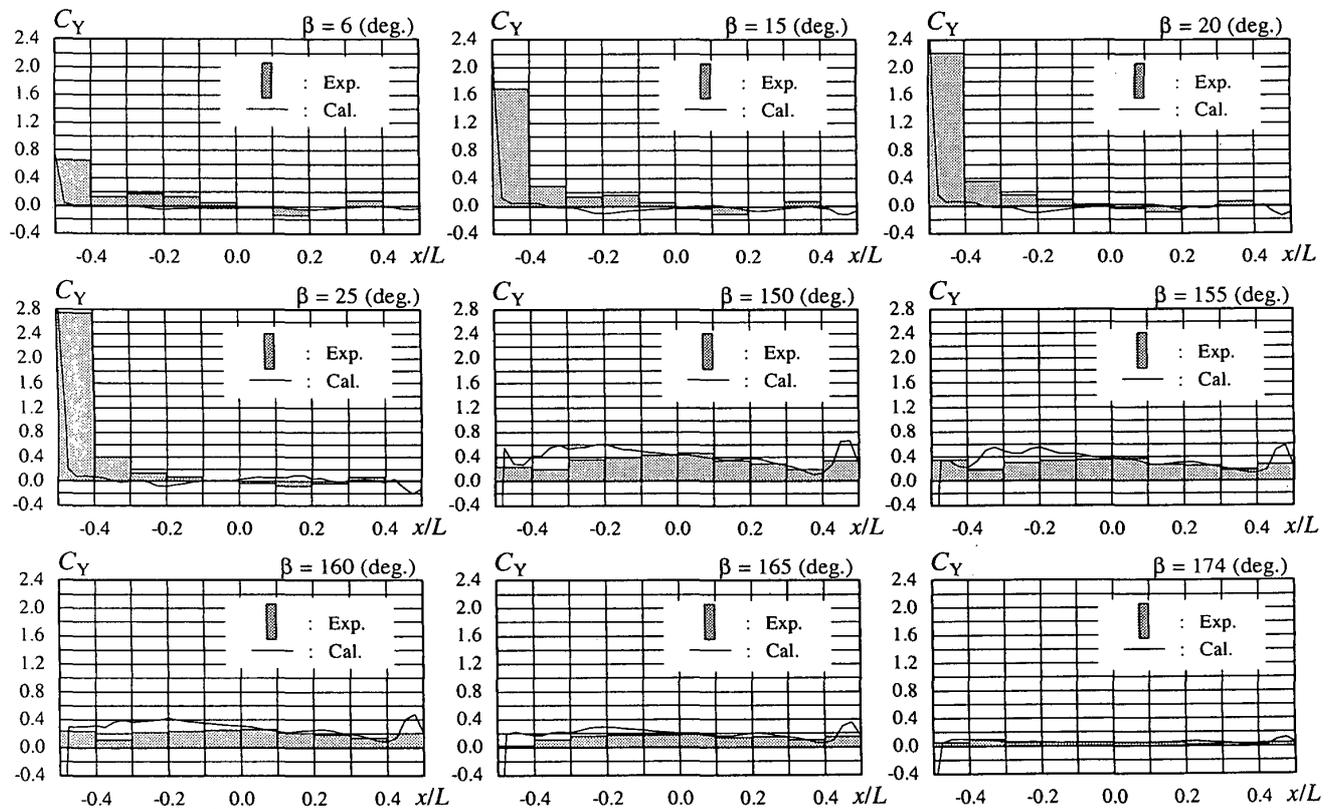


Fig.11 Estimated lateral force distribution acting on a segmented model ship (Bow Trim 3 deg.)

めフレームラインの絞込みが大きく、近似の精度が若干落ちてはいるが、その他の部分は比較的精度良く近似できているものと思われる。また、渦糸の初期発生位置を表す係数 s については、剥離境界層が発達する様子を簡単にモデル化して、船首より船尾方向に向かって係数 s の値を線形的に大きくしていく。その際、F.P. 断面における係数を s_f 、A.P. 断面における係数を s_a とおくと、 s_f は剥離境界層が発達する出発点であるため 0.01 という小さい値とし、最終的に得られる流体力の推定結果に対

して支配的であると考えられる s_a の値のみを変化させた。ここで、計算対象船型に対する係数 s_a の推定法が問題となるが、Even Keel の模型船 7 隻を対象として、流体力の推定結果ができるだけ計測結果に合うように選んだ s_a の値を主要目を組み合わせたパラメータで整理した Fig.9 を用いると推定が可能である。図より計算対象船型に対する係数 s_a の値は 0.047 となる。(11) 式中の係数 γ についても同様に、模型試験結果をベースにした検討から 0.05 という値を用いた。また、船尾曳航時

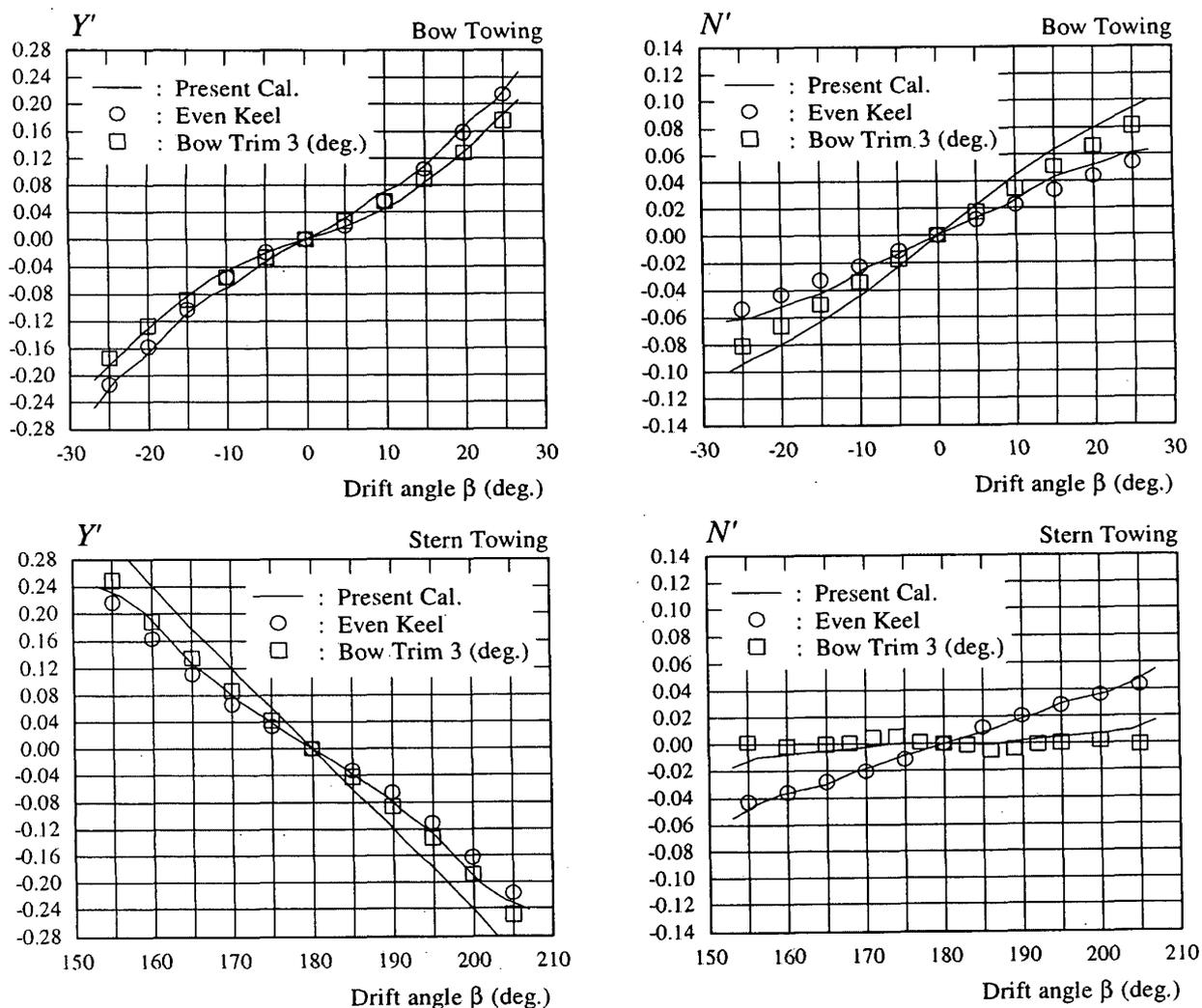


Fig.12 Hydrodynamic forces acting on a segmented model ship

には船首と船尾の座標系を入れ替え、船尾で $s_a = 0.01$ 、船首で $s_f = 0.047$ として計算した。

Fig.10 および Fig.11 に 10 分割模型に働く横力分布の推定結果と計測結果の比較を示す。図中の実線が推定結果である。船体中央部付近では比較的精度良く推定できているが、船首尾端においては若干推定結果と計測結果に定量的な差が生じている。その主な原因として、自由表面の影響と Fig.8 に示す Bodyplan の近似精度が挙げられる。特に船首尾バルブ近傍における絞込みの大きいフレームライン形状の近似については、(1) 式の写像関数の限界であると思われ、今後検討すべき課題の一つである。

Fig.12 に船首曳航時と船尾曳航時の船体に働く横力 Y' および回頭モーメント N' の推定結果と計測結果の比較を示す。図中の○印と□印はそれぞれ Even Keel と船首トリム 3(deg.) の場合の計測結果であり、それに対応する実線が推定結果を表す。ただし、横力 Y' および回頭モーメント N' の計測結果は、各セグメントに働く横力と同時に船体の Midship において計測した 10 分

割模型全体に働く流体力である。図より傾向を見ると、Even Keel の場合には、船首曳航時および船尾曳航時の船体に働く流体力を偏角 β が大きい範囲まで定性的にも定量的にも実用的な精度で推定できているものと思われる。一方、船首トリム 3(deg.) の場合には、船尾曳航時の船体に働く流体力については、定性的には傾向を捉えていると考えられるが、偏角 β の大きい範囲において推定結果は計測結果に対して定量的に若干差が生じている。しかし、船首曳航時の船体に働く流体力については、Even Keel の場合と同様に比較的精度良く推定できているものと思われる。

本研究で取り扱った流体力の理論推定法には、模型試験によって同定するパラメータがいくつか含まれている。しかし、トリムした船体に働く流体力や船体まわりの流場に関する詳細なデータは極めて少ないため、Even Keel 時のパラメータを適用して推定計算を行った。本研究で計算対象とした分割模型は現在運航している一般的な VLCC 船型であるため、他の VLCC 船型に対しても同様に本計算法を適用することで、Even Keel や船

首トリムした船体を船首曳航および船尾曳航する場合に船体に働く流体力を比較的精度良く推定することが可能であると考えられる。また、トリムした船体に働く流体力の推定精度をさらに向上させるためには、今後、流体力や船体まわりの流場に関する数多くのデータを収集し、渦モデルに改良を加える必要があると思われる。

6. 結 言

本研究では、VLCC 船型の 10 分割模型を用いた拘束模型試験結果をベースにして、Even Keel および船首トリムした船体に働く流体力と横力分布の理論推定法について検討した。その結果、船首トリムした船体を船尾曳航する場合に働く流体力に関しては、推定結果と計測結果の間に若干定量的な差が生じたものの、それ以外の状態については、本計算法を適用することで船首曳航時と船尾曳航時の船体に働く流体力を実用的な精度で推定することが可能であることがわかった。今後、他の船型や旋回運動のような大きな運動に適用していくためには、計算で用いるパラメータと船型要素および船体の運動状態の相互関係を十分に把握することが重要であると考えられる。また、トリムした船体に働く流体力の推定精度を向上させるためには、特に船体まわりの流場に関するデータを収集し、剥離線や渦糸の強さ、横力分布などの場で個別に渦モデルの検証を行っていく必要があると思われる。

謝 辞

本研究で実施した VLCC 船型の 10 分割模型を用いた横力分布の計測試験では、九州大学大学院工学研究院 貴島勝郎教授と大阪大学大学院工学研究科 内藤 林教授の研究室よりお借りした計測機器を使わせて頂きました。ここに、感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 原 正一：荒天下における航行不能船舶の漂流防止等に関する研究概要，船舶技術研究所 研究発表会講演集，第 74 回 (2000)，pp.307-308.
- 2) 原 正一，山川賢次，星野邦弘，湯川和浩：最適曳航支援システムの開発 (その 1. 損傷船舶の最終姿勢)，海上技術安全研究所 研究発表会講演集，第 1 回 (2001)，pp.33-36.
- 3) 原 正一，星野邦弘，山川賢次，湯川和浩：最適曳航支援システムの開発 (その 2)，海上技術安全研究所 研究発表会講演集，第 2 回 (2002)，pp.339-342.
- 4) 井上正祐，貴島勝郎，森山文雄：トリム時の船体操縦微係数の推定，西部造船会々報，第 55 回 (1977)，pp.127-139.
- 5) 野中晃二：ヒール時の主船体に働く操縦流体力の推定，西部造船会々報，第 96 号 (1998)，pp.59-67.
- 6) 星野邦弘：漂流運動の研究，第 5 回曳航技術研究委員会資料 (2001).
- 7) 湯川和浩，星野邦弘，原 正一，山川賢次：トリムした船体に働く横力の分布について，海上技術安全研究所 研究発表会講演集，第 2 回 (2002)，pp.171-176.
- 8) Fujino, M., Ohmori, T., Usami, S., Eguchi, S., Kanai, M. and Miyata, H.: Longitudinal Distribution of Hydrodynamic Lateral Force Acting on a Ship in Manoeuvring Motion, Mini Symposium on Ship Manoeuvrability, The West-Japan Society of Naval Architects(1995), pp.11-36.
- 9) 宮崎英樹，野中晃二，日野孝則，児玉良明：CFD による操縦流体力の推定について，船舶技術研究所 研究発表会講演集，第 72 回 (1998)，pp.191-196.
- 10) 湯川和浩：操縦運動時の船体に作用する流体力の推定に関する研究，九州大学学位論文 (1998).
- 11) (社) 日本造船研究協会：操縦運動時の船体周囲流場に関する研究，第 221 研究部会 (第 2 年度) 報告書 (1995).