

36 トリムした船体に働く横力の分布について

海洋開発研究領域 海洋資源利用研究グループ *湯川 和浩
環境・エネルギー研究領域 海洋汚染防止研究グループ 星野 邦弘、原 正一、山川 賢次

1. まえがき

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プレスト沖で発生した「エリカ号」の海難事故では、原油流出による海洋環境汚染が国際的な問題にまで発展した。著者らは平成10年度から5年計画で「荒天時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、前述のような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」の開発を目標としている[1][2]。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、図-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、計算で用いる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非常に少ない[3][4]。そこで、本研究では損傷船舶を曳航する場合を想定し、Even Keelと船首トリム3(deg.)のVLCC船型を対象に、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を取り扱う。まず、VLCC船型の10分割模型を用いてトリムした船体に働く流体力と横力の船長方向分布を計測し[5]、偏角や姿勢の違いに伴う流体力の変化につい

て検討した。次に、ある程度取り扱いが簡便であり、CFD[6][7]に比べて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[8]により、トリムした船体に働く流体力と横力の船長方向分布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

計算には図-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： $\nabla \Phi \rightarrow 0 \text{ (at } \infty)$
 - [4] 剥離の条件： $\nabla \Phi \cdot (\vec{n} \times \vec{\tau})$
 - [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。

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

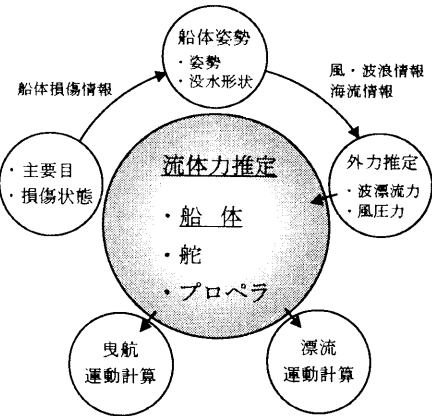


図-1 最適曳航支援システムの流れ

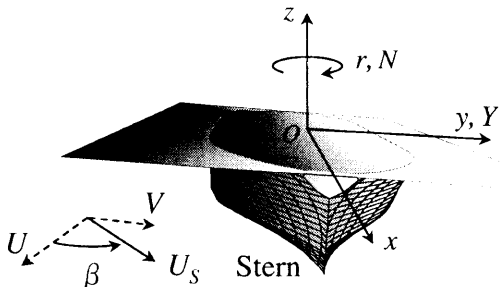


図-2 座標系

また、直進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。

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

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

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

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

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

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。

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

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

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モデル化を行った。すなわち、図-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

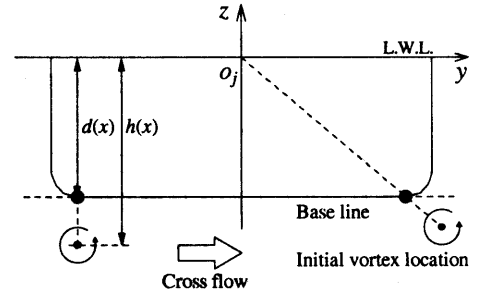


図-3 剥離点および渦糸の初期発生位置

表-1 供試模型船の主要目

	VLCC
L (m)	3.000
B (m)	0.544
d (m)	0.181
C_B	0.803



写真-1 供試模型船の概観

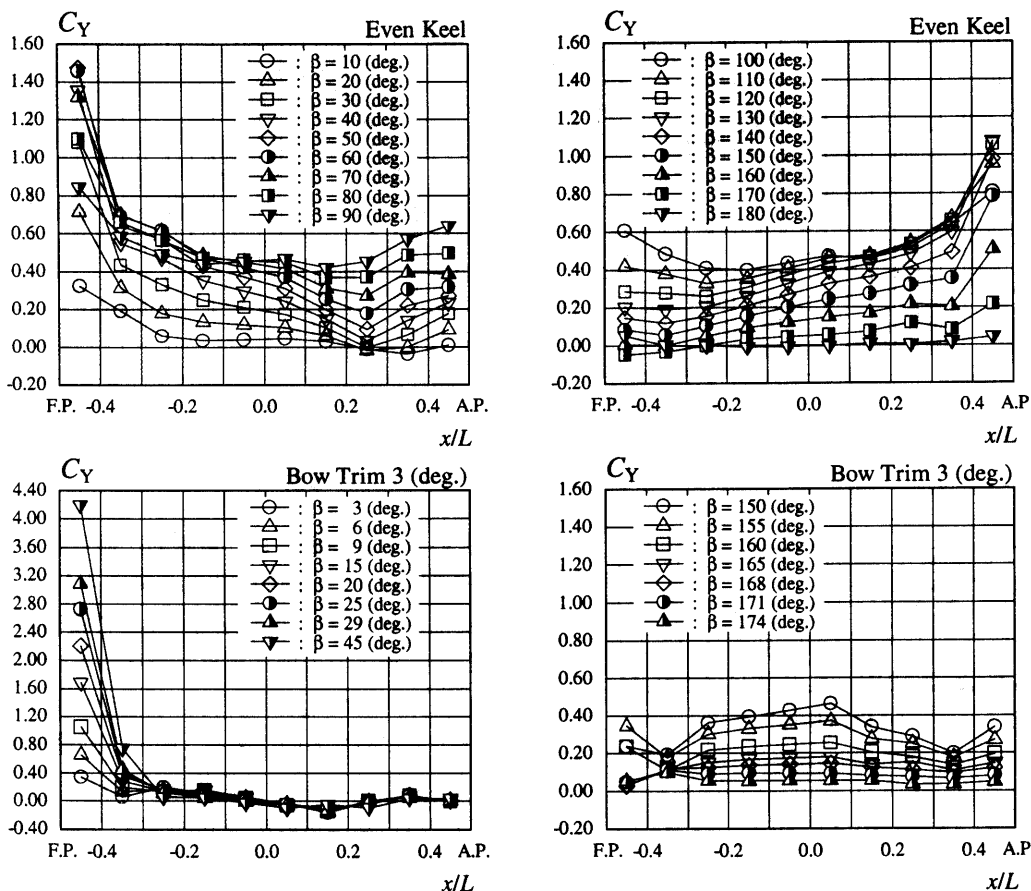


図-4 偏角による横力分布の変化

型 (SR221C 船型 [9]) の 10 分割模型を用いて船体に働く流体力 (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 [5]。供試模型船の主要目と概観を表-1、写真-1 に示す。模型船の姿勢は Even Keel と船首トリム 3(deg.) 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。図-4 に偏角 β の違いによる横力分布の変化、図-5 に横力 Y' と回頭モーメント N' の計測結果を示す。

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 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 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、船首尾を入れ替えば同様な傾向と言える。一方、船首トリム 3(deg.) の場合には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 が大きくなってもほとんど変化しない。また、船尾曳航時には船体中央部に働く横力が大きく、偏角 β が大きくなると逆に横力は小さくなる。

横力 Y' および回頭モーメント N' については、供試模型船を対象とした Even Keel 時の計測結果が過去に報告されているため [9][10]、その結果も合わせて示す。小偏角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' の計測値はそれらと同様な傾向を示しており、拘束模型試験の実験精度を検証する上での目安となる。Even Keel の場合、偏角 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' 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

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。また、(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。また、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。図-6 に Bodyplan を示す。図中の破線は実船

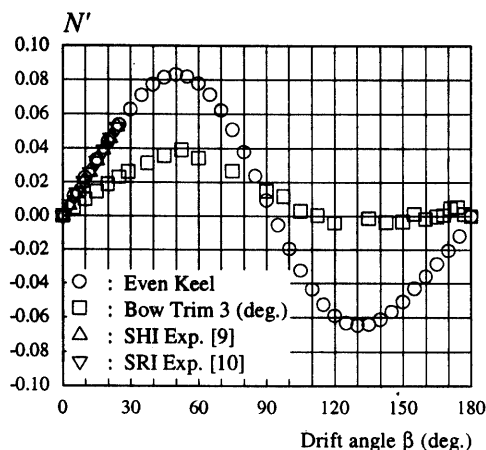
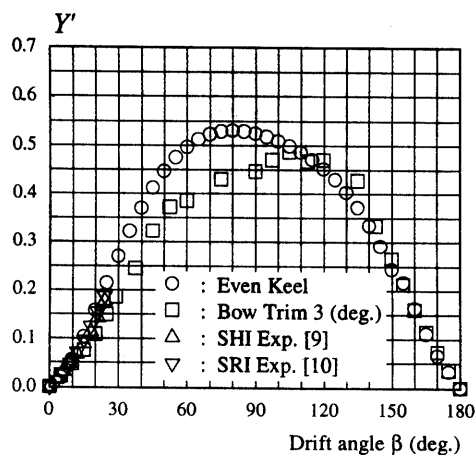


図-5 横力および回頭モーメントの比較

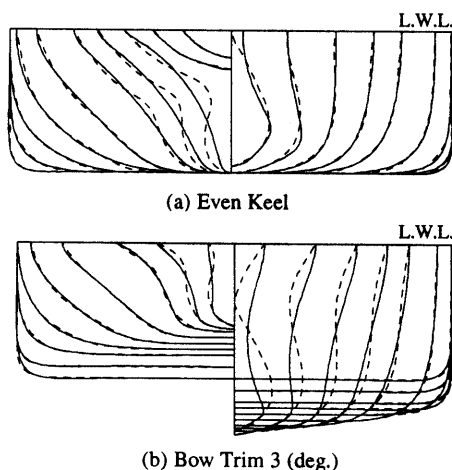


図-6 供試模型船の Bodyplan

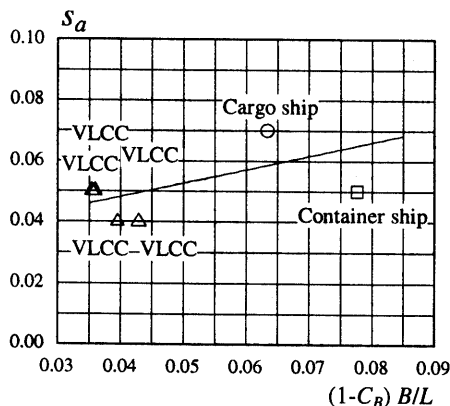


図-7 係数 s_a の推定

型、実線は写像関数による数学船型を表す。フレームラインの絞込みが大きい船首尾端を除けば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モデル化して、船首より船尾方向に向かって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。図-7 は 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実験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まとめたものである。図より計算で用いる s_a の値は 0.047、(11) 式中の係数 γ についても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、船尾曳航時には船首と船尾の座標系を入れ替え、船尾で $s_f = 0.01$ 、船首で $s_a = 0.047$ として計算した。

図-8、図-9 に横力分布の推定結果と実験結果の比較を示す。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精度が悪くなっている。その原因として、自由表面の影響と図-6 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る、今後検討すべき課題の一つである。図-10 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' の推定結果と実験結果の比較を示す。横力 Y' は図-8 と図-9 に示した横力分布の積分値である。傾向を見ると、船首トリムした船体を船首曳航する場合に働く流体力の推定結果は、実験結果に対して多少定量的な差が生じているが、その他の結果については比較的精度良く推定できていると思われる。

本研究で取り扱った流体力の理論推定法には、実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。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、今後さらに数多くのデータを収集し、渦モデ

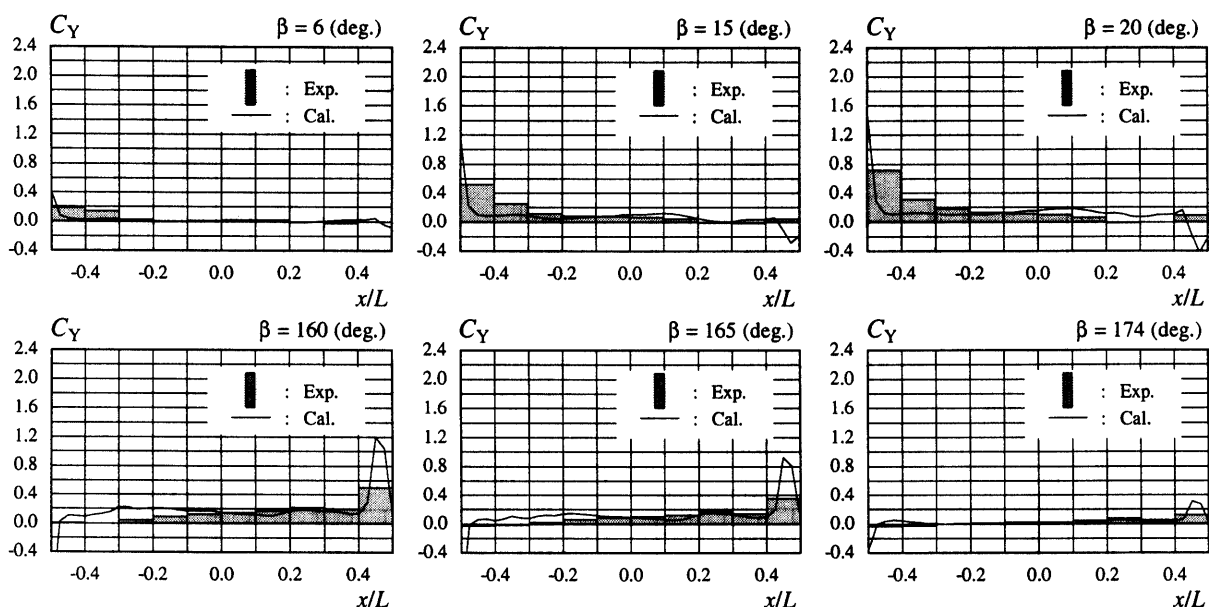


図-8 横力分布の推定結果 (Even Keel)

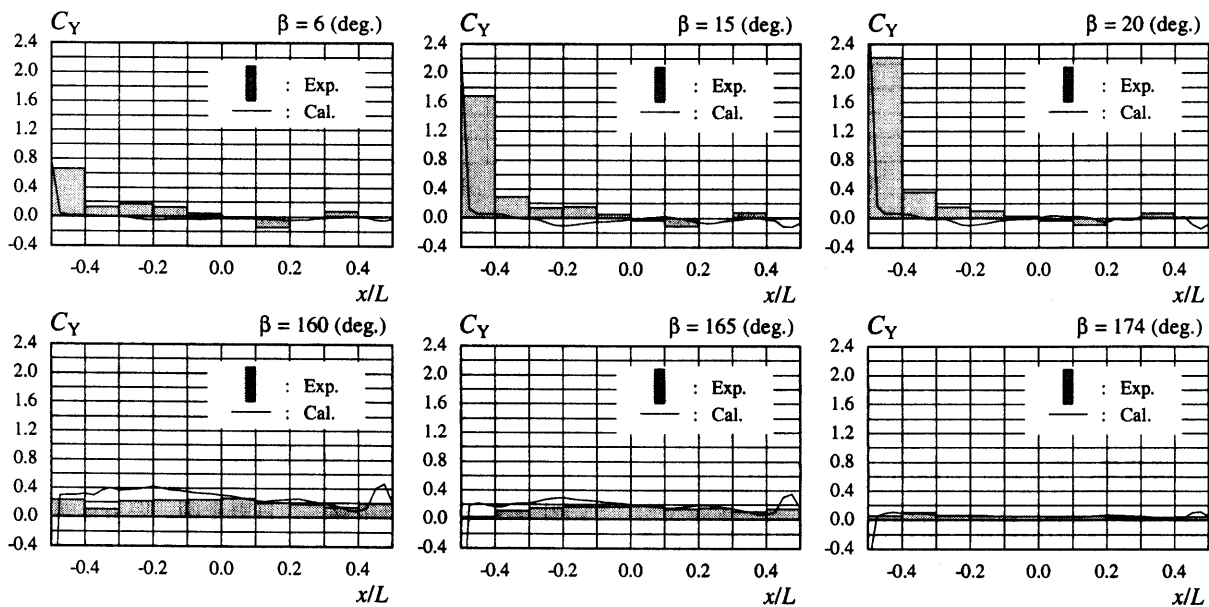


図-9 横力分布の推定結果 (Bow Trim 3 deg.)

ルに改良を加える必要があると思われる。しかし、計算対象とした船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、船首トリムした船体を船尾曳航する場合に働く流体力や Even Keel の船体を船首曳航および船尾曳航する場合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と考えられる。

6. まとめ

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

船首曳航する場合に働く流体力に関しては、推定結果と実験結果の間に多少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流体力を実用的な精度で推定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。

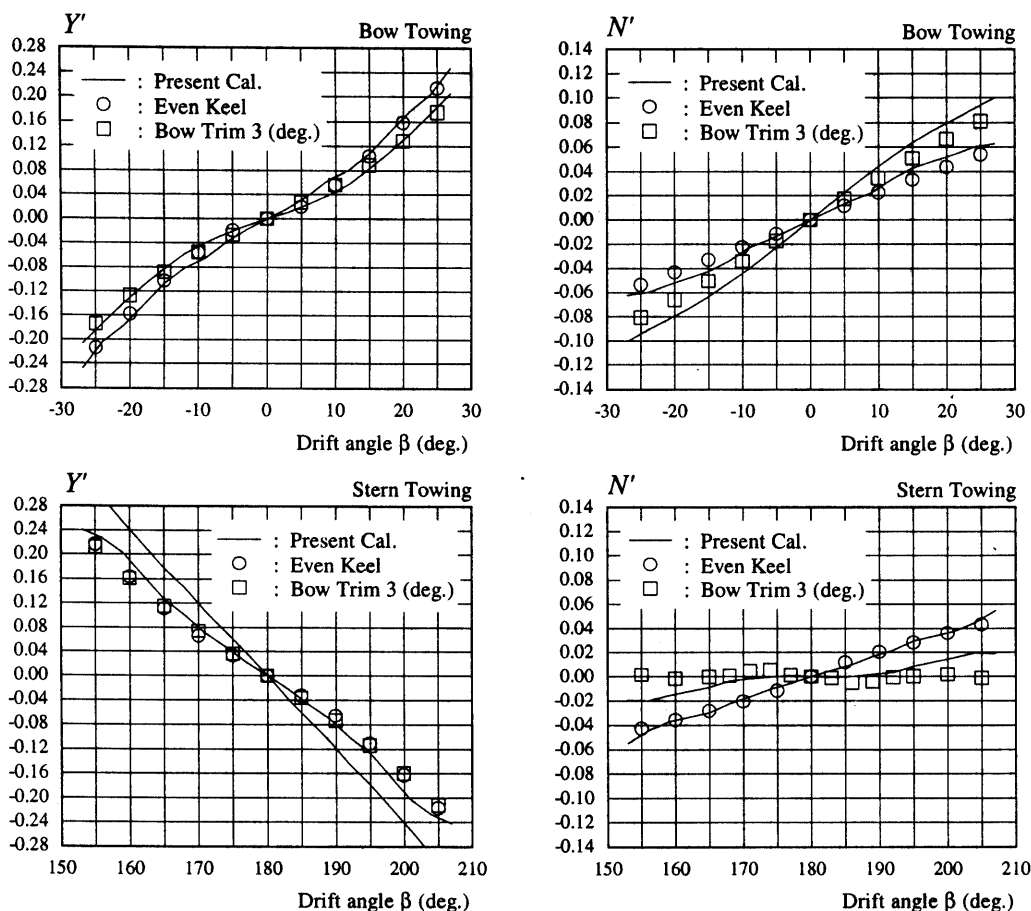


図-10 横力および回頭モーメントの推定結果

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] 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.
- [4] 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.
- [5] 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).

- [6] 大森拓也、藤野正隆、巽 圭司、川村隆文、宮田秀明：肥大船の操縦運動中の流場に関する研究 (第三報 定常旋回中の流場)、日本造船学会論文集、第 179 号 (1996)、pp.125-138.
- [7] 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.
- [8] 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).
- [9] (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).
- [10] 二村 正、上野道雄、宮崎英樹、佐伯延博、野中晃二：旋回運動する船体の船尾流場の計測、船舶技術研究所 研究発表会講演集、第 72 回 (1998)、pp.185-190.