

追波、斜め追波中における二軸二舵 高速痩せ型船の操縦運動とその制御

正員 梅 田 直 哉* 学生員 牧 敦 生*
正員 橋 本 博 公*

Manoeuvring and Control of a High-Speed Slender Vessel with Twin Screws
and Twin Rudders in Following and Quartering Seas

by Naoya Umeda, *Member* Atsuo Maki, *Student Member*
Hirotada Hashimoto, *Member*

Summary

Broaching is a phenomenon whereby a ship cannot keep a constant course in severe following and quartering seas with relatively high speed. Once this dangerous phenomenon happens, even a ship complying with the current Intact Stability Code (IS Code) of the International Maritime Organization (IMO) could capsize. This paper focuses on broaching of slender vessels with twin screw propellers and twin rudders because they are often operated in high speed range which make susceptible to broach. First, existing experimental results at the Haslar basin were explained by a mathematical modelling proposed by the authors and extended here to predict broaching of high-speed slender ships in severe following and quartering seas. Second, we discussed the effect of the fin-stabilizer (anti-rolling fin) with which high speed vessels are often equipped, on broaching. Then, we identified an optimal control gains to reduce danger of capsizing due to broaching. Effects of the fin size and its aspect ratio as well as the area of rudder were also investigated. The above results are expected to be used for designing high-speed slender ships with a fin-stabilizer set for avoiding dangerous broaching at seas

1. 緒 言

厳しい追波、斜め追波中を高速で航行する船舶が舵効きを失い、その針路を保持できなくなる現象はブローチング(操縦不能現象)と呼ばれ、IMO の IS コードをクリティカルに満足する船舶においても転覆が発生しうるため、かねてより危険視されてきた。これまで著者ら¹⁾はこのブローチングを漁船など一軸一舵の小型船舶を対象に研究を実施してきた。しかしながら、二軸二舵方式を採用するような高速 RoPax フェリーや高速艦艇でもブローチングの危険が存在するため同様な研究が望まれる。

実際にこれらの高速艦艇がブローチングを起こした例として、1951 年にポルトガル海軍の駆逐艦 Lima が荒天下の大西洋上を高速で追波航行中、大きな波に運ばれ最大限の保針努力にもかかわらず急回頭し、その間の横揺れ角が 67 度

まで達したことや²⁾、Nicholson³⁾ がハスラーの角水槽で行った実験において、追波中、ラジオコントロールを用いたマニュアル操舵により航行する長さ 5m、二軸二舵方式の模型船が、左 35 度の最大舵角をきっていたにもかかわらず、右に回頭してしまう現象を記録したことがあげられる。

最近ではこれらの二軸二舵高速痩せ型船には多くの場合フィスタビライザーが装備されており、そのブローチング発生時の横揺れへの効果も実用上重要であろう。そこで本稿では、フィンも含めて著者らのこれまでの方法論を拡張した。そして Lloyd^{4),5)} の自由航走模型実験結果により、本研究において用いる二軸二舵船の数学モデルの検証を試みた。その後、フィンの有無による斜め追波中における船体運動への影響を、フィンの面積とアスペクト比の数種類の組み合わせに対して調査し、それぞれの組み合わせに対するフィンの最適な制御方法についての検討をした。さらに同様の解析手法を用いて、舵面積とオートパイロットに関する検討を行った。

2. 対象船について

対象とした船は、Lloyd^{4),5)} が過去ハスラー水槽において自由航走模型実験を行なったフリゲートタイプの二軸二舵

* 大阪大学大学院工学研究科

原稿受理 平成 18 年 8 月 4 日

高速船であり、その正面線図及び主要目を Fig.1、Table1 に示す。また、この船の方形係数 C_b は 0.49 であり、フルード数 0.4~0.5 での航行に適した瘦せ形であるといえる。

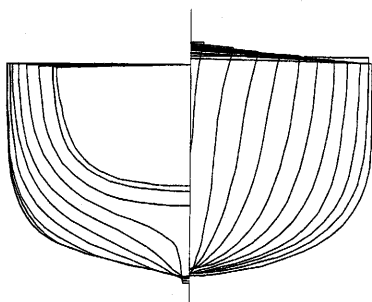


Fig.1 Body plan of the ship

Table.1 Principal particulars of the ship.

LBP	109.7 m
Breadth	12.5 m
Draught	4.2 m
Displacement	2790 t
GM	0.55 m
Natural roll period	12.7 s
Rudder area	7 m ²

3. 数学モデルについて

本研究では、Surge-Sway-Yaw-Roll の4自由度モデルを用いる。この数学モデルが従う座標系を Fig.2 に示す。O- ξ, η, ζ は原点を波の谷にとり波の位相速度で ξ 方向に進む慣性座標系であり、G-x, y, z は原点を船体重心にとった船体固定座標系であるが、 ϕ 方向に回転は行わないものとする。

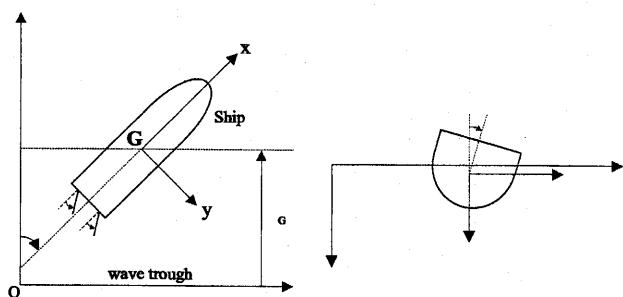


Fig.2 Coordinate system.

またフィンの作動角 α と舵角 δ の定義を Fig.3 に、フィンの取り付け位置、復原モーメントに対するレバーの長さ、及び取り付け角度に関する記号の定義を Fig.4 に示す。なお、本論文における記号の定義は末尾にまとめた。

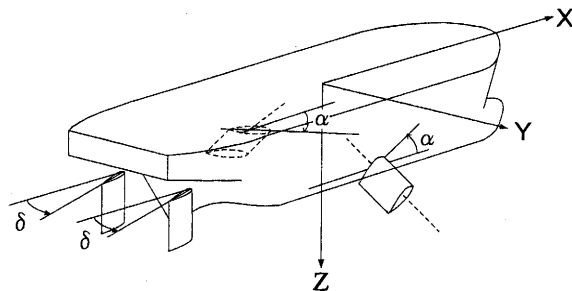


Fig.3 Reference system

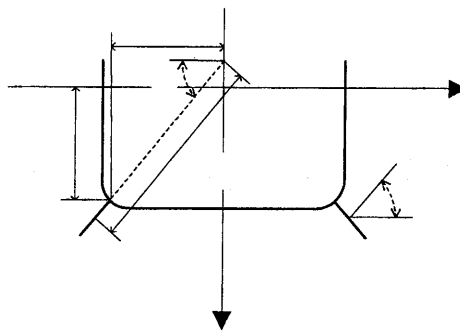


Fig.4 Definition of the symbols relating to fins

数学モデルの基本的構成は一軸一舵船についての著者ら¹⁾のものに基づいており、操縦性数学モデルに線型流体力を考慮している。まず状態ベクトル $\mathbf{x}$ 、制御ベクトル $\mathbf{b}$ を以下のように記述する。状態ベクトル $\mathbf{x}$ は9次元である。

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_9)^T = (\xi_G / \lambda, u, v, \chi, r, \phi, p, \delta, \alpha)^T \quad (1)$$

$$\mathbf{b} = (n, \chi_c)^T \quad (2)$$

その力学系は以下の状態方程式によって表されるとする。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x}; \mathbf{b}) = (f_1(\mathbf{x}; \mathbf{b}), f_2(\mathbf{x}; \mathbf{b}), \dots, f_9(\mathbf{x}; \mathbf{b}))^T \quad (3)$$

$$f_1(\mathbf{x}; \mathbf{b}) = \{u \cos \chi - v \sin \chi - c\} / \lambda \quad (4)$$

$$f_2(\mathbf{x}; \mathbf{b}) = \{T(\xi_G / \lambda, u, \chi; n) - R(u) + X_F(\xi_G / \lambda, u, \chi, \phi, p, \alpha) + X_w(\xi_G / \lambda, \chi)\} / (m + m_x) \quad (5)$$

$$f_3(\mathbf{x}; \mathbf{b}) = \{-(m + m_x)ur + Y_r(u; n)v + Y_r(u; n)r + Y_\phi(u)\phi + Y_\delta(u; n)\delta + Y_w(\xi_G / \lambda, u, \chi; n) + Y_F(\xi_G / \lambda, u, \chi, \phi, p, \alpha)\} / (m + m_y) \quad (6)$$

$$f_4(\mathbf{x}; \mathbf{b}) = r \quad (7)$$

$$f_5(\mathbf{x}; \mathbf{b}) = \{N_v(u; n)v + N_r(u; n)r + N_\phi(u)\phi + N_\delta(u; n)\delta + N_w(\xi_G / \lambda, u, \chi; n) + N_F(\xi_G / \lambda, u, \chi, \phi, p, \alpha) + N_T(\xi_G / \lambda, u, \chi; n)\} / (I_{zz} + J_{zz}) \quad (8)$$

$$f_6(\mathbf{x}; \mathbf{b}) = p \quad (9)$$

$$f_7(\mathbf{x}; \mathbf{b}) = \{m_x z_H u r + K_v(u; n)v + K_r(u; n)r + K_\phi(u)p + K_\delta(u)\phi + K_\delta(\xi_G / \lambda, u, \chi; n)\delta + K_w(\xi_G / \lambda, u, \chi; n) - K_F(\xi_G / \lambda, u, \chi, \phi, p, \alpha) - mgGZ(\phi)\} / (I_{xx} + J_{xx}) \quad (10)$$

$$f_8(\mathbf{x}; \mathbf{b}) = \{-\delta - K_R(\chi - \chi_C) - K_{RT}r\} / T_E \quad (11)$$

$$f_9(\mathbf{x}; \mathbf{b}) = [c_1\phi + c_2p + c_3\{m_x z_H u r + K_v(u; n)v + K_r(u; n)r + K_\phi(u)p + K_\delta(u)\phi + K_\delta(\xi_G / \lambda, u, \chi; n)\delta + K_w(\xi_G / \lambda, u, \chi; n) - K_F(\xi_G / \lambda, u, \chi, \phi, p, \alpha) - mgGZ(\phi)\} / (I_{xx} + J_{xx}) - \alpha] / T_{FE} \quad (12)$$

本研究が対象とする二軸二舵船の舵、プロペラにかかわる数学モデルは李ら⁶⁾のものに基づく。舵角 δ は(11)式に示される微分方程式に従い、両舷で同一角をとるものとする。また、波浪中において船体が波の下り波面に存在するとき、程度の差こそあれ舵力が変動することはかねてより指摘^{7), 8), 9)}されてきた。また本研究と同じ船型の模型を用いた Renilson と Driscoll の実験結果⁴⁾でも、模型船の波との相対位置により舵力が変動しこれがブローチングの一つの要因になりうる可能性を示唆している。従って、本論においても舵流入速度に対する波粒子速度影響を考慮した。

フィンに関する数学モデルは湯室ら^{10), 11)}に従いその制御を表す微分方程式は(12)式に従う。ここで両舷の作動角は絶対値が同じで、正負の符号が逆の値をとるものとし、横揺角に対して比例、微分、二階微分制御を行なうとする。揚力はこの微分方程式を数値的に解くことにより得られたフィンの作動角を用いて計算する。その際、波の粒子速度と船体の横揺角速度によりフィンへの流入角が変化することを考慮する。具体的な揚力の計算式は以下に従い、添え字の P は左舷側、 S は右舷側を表す。

$$L_P = \frac{\rho}{2} u_{FP}^2 A_{FIN} c_\alpha \left[-\alpha + \frac{1}{u} (-l_{FIN} p - w_{WFP} \cos \beta - v_{WFP} \sin \beta) \right] \quad (13)$$

$$L_S = \frac{\rho}{2} u_{FS}^2 A_{FIN} c_\alpha \left[\alpha + \frac{1}{u} (l_{FIN} p - w_{WFS} \cos \beta + v_{WFS} \sin \beta) \right] \quad (14)$$

ただし、揚力係数勾配に関しては、湯室¹⁰⁾に従い NACA12 翼型のアスペクト比 A_{FIN} が ∞ の時の $C_\alpha = 5.79$ に、(15)式で表されるアスペクト比の変換を行ったものを用いた。

$$c_\alpha = \frac{5.79}{1 + \frac{5.79}{\pi \Lambda_{FIN}}} \quad (15)$$

ここで求められた揚力を用いれば、フィンによる Sway、Yaw、Roll、Surge の力及びモーメントはそれぞれ以下のものとなる。また(19)式の Surge 方向力はフィンに生じる誘導抵抗であり、Prandtl の揚力線理論¹²⁾に基づいて計算をした。

$$Y_F = (L_S \sin \beta - L_P \sin \beta) \quad (16)$$

$$N_F = -x_F (L_P \sin \beta - L_S \sin \beta) \quad (17)$$

$$K_F = l_{FIN} (L_P - L_S) \quad (18)$$

$$X_F = -\frac{2}{\pi \Lambda_{FIN} \rho A_{FIN}} \left[\frac{L_P^2}{(u + u_{WFP})^2} + \frac{L_S^2}{(u + u_{WFS})^2} \right] \quad (19)$$

また、舵角の最大値、フィンの作動角の最大値、最大作動速度に関して類似船のデータを用いて制限を設けた。

4. 数値計算結果と考察

4.1 Lloyd の実験との比較

過去に Lloyd^{4), 5)}がハスラーの角水槽を用いて行ったフィンを装備しない状態での二軸二舵高速瘦せ型船型についての自由航走模型実験結果を、本研究で用いる追波、斜め追い波中における船体運動予測モデルを用いて説明しうかどうかを検討した。Lloyd は、波粗度 0.035 かつ目標角 20° の条件のもとで、指令平水中フルード数 Fn と波長船長比 λ/L を変化させて自由航走模型実験を行い、実験結果を以下の判定条件の下で Steered と Broached の二つに分類している。

Steered : 3 波に抜かれるまでに波との出会い角が 40° 以上とならない

Broached : 3波に抜かれるまでに波との出会い角が 40° 以上となる

実験はラジオコントロールによるマニュアル操舵であるが、数値シミュレーションではPD制御を仮定しているため、試行錯誤により概略対応するオートパイロットのパラメータとして比例ゲイン $K_P=0.5$ 、微分時定数 $T_D=0.0$ を推定し、以下その値に固定して計算を行った。その結果を Fig.5 に示す。ここで出会い周波数 ω_e が零の条件も参考のため記した。ただしここで、オートパイロットによる影響は副次的なものであって、主には波力による影響が支配的であったことを付記しておく。

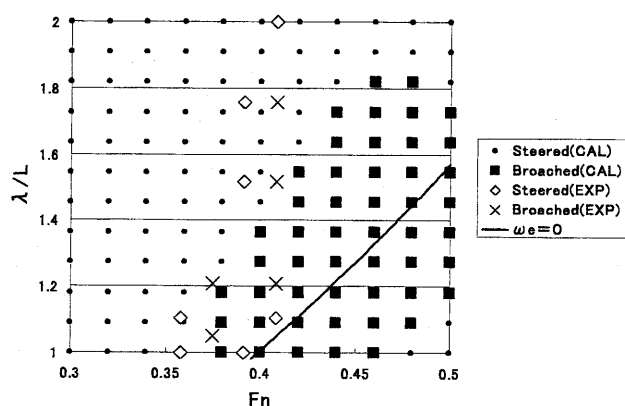


Fig.5 Comparison between model experiment and numerical simulation.

Fig.5を俯瞰すると、 λ/L が1.0から1.5付近までの領域で、実験値と数値シミュレーション結果がよい一致を見せていることが分かる。ただし、 λ/L が1.5を超える領域においては両者の一致度にやや難があるように見受けられるが、総じて本研究に用いる、フィンを装備しない状態での、二軸二舵高速瘦せ型船型についての数学モデルが実現現象を定性的に表しうることが理解できる。

ここで Fig.5 において **Broached** と **Steered** に判定された典型的な例についての時系列データを以下に示す。

まず Fig.6 は波との出会い角 α が 40° を超えたために **Broached** と判定された例である。ブローチング中の横揺角は最大 30° 近くにまで達し、ブローチングが危険な現象であることを物語っている。また、ブローチングを起こすと波の進行方向に対する速度が低下するため一気に波に追い抜かれている様子を位相面軌道から読み取ることができる。

Fig.7 は波との出会い角 α が 40° を超えなかったために **Steered** と判定された例であり、周期的に波に抜かれながら平均針路 20° をほぼ保持している。

さらに $Fn=0.5$ 、 $\lambda/L=1.0$ 付近において **Steered** と判定され

ていることに着目し、同条件における時系列データを Fig.8 に示す。この例における位相面軌道に着目すると、 ξ/λ が約 0.22 の点、すなわち上り波面で安定な波乗り現象を起こしていることが理解できる。これは、波と等速度で走るよりもプロペラ推力が強く、波力が負に作用することで上り波面において波乗り現象が発生したものであると考えられる。この上り波面での波乗り現象中においては、波との出会い角が大きくなる方向にはモーメントが働かないために、Yaw 方向には極めて安定であり、ブローチングに陥る危険はない。

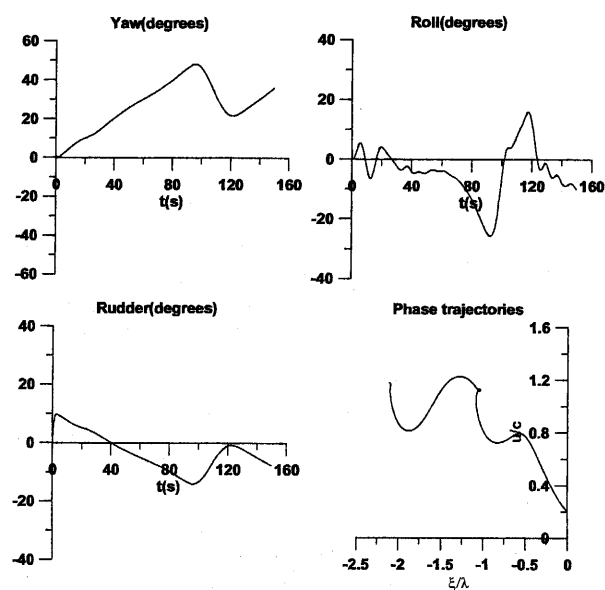


Fig.6. Time series of broaching calculated for Lloyd's condition at $Fn=0.45, \lambda/L=1.25$

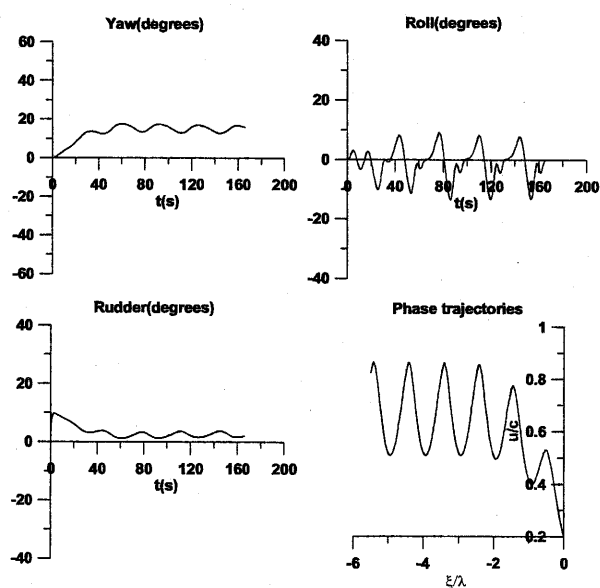


Fig.7. Time series of broaching calculated for Lloyd's condition at $Fn=0.35, \lambda/L=1.6$

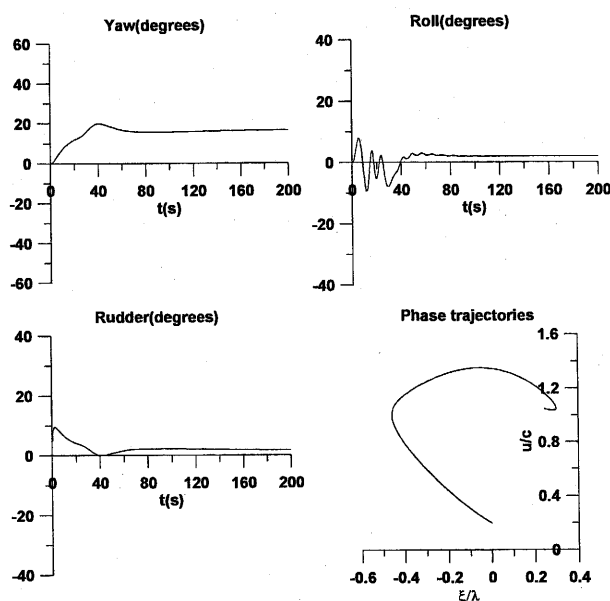


Fig.8. Time series of broaching calculated for Lloyd's condition at $F_n=0.5, \lambda/L=1.0$

4.2 フィンスタビライザーの有効性の検証

4.1 における検討によって、フィンを装備しない、二軸二舵高速痩せ型船型についての数学モデルが実現象をよく表しうると結論が得られた。したがって同モデルを拡張し、フィンの要素を付加した数学モデルを用いて、追波、斜め追波中の船体運動にフィンがいかなる影響を及ぼすのかを検討した。ここでの海象条件は波粗度 $H/\lambda=0.06$ 、波長船長比 $\lambda/L=1.0$ と設定した。

本解析において用いるフィンの面積 A_{FIN} 、アスペクト比 Λ_{FIN} の組み合わせは Table.2 に示すように、State I、State II、State III、State IV として設定した。

Table.2 Investigated dimensions of fin-stabilizers.

	$A_{FIN}(\text{m}^2)$	Λ_{FIN}
State I	0	0
State II	5	0.75
State III	10	0.75
State IV	10	1.5

State I はフィンを装備しない状態である。State II は類似船より推定した状態である。State III は、State II のフィンを 2 組取り付けけた状態に対応している。ただし、2 組のフィンが共存することで生じる相互干渉の考慮については、本論では行っていない。最後に、State IV は取り付け部の長さ、翼端の長さを変えずに面積を 2 倍にした状態である。この状態は既存のフィンの減揺効果を向上させるための改造を施す際

の処置として比較的現実的に即したものであると考えられる。本解析では、指令平水中フルード数 F_n を 0.1~0.5 の区間で、波との指令出会い角 α を $0^\circ \sim 45^\circ$ の区間でそれぞれ分割し、それらの組み合わせ 90 航走に対する数値シミュレーションの中で何ケースの転覆が起こりうるかを、フィンの有効性の評価指標として選ぶこととした。そして、転覆数を最小とするフィンの制御とはどのようなものかを数値計算を用いて探索した。具体的には、フィンの比例ゲイン、微分ゲイン、二階微分ゲインを、実設計に対応する以下の範囲のすべての組み合わせに対し、前述した 90 個の数値計算を行い、その中で転覆数を最も小さくする制御定数の組み合わせを最適な値として選ぶこととした。

$$C_1 : 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16$$

$$C_2 : 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30$$

$$C_3 : 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30$$

ここでの転覆判定条件は、平水中における復原力消失角が $GM=0.55 \text{ m}$ に対して約 50° であることに鑑み、以下のものとした。

$$\text{転覆} : |\phi| > 65 \text{ degrees} \quad (20)$$

以上の事柄をふまえて States II-IV のそれぞれに対して得られた、上記のフィンの二階微分ゲインに対して比例ゲイン、微分ゲインを変化させた時の転覆数の変化を各々 Figs.9-11 に示す。また、これらの 3 次元グラフより得られた最適制御定数を Table.3 に示す。

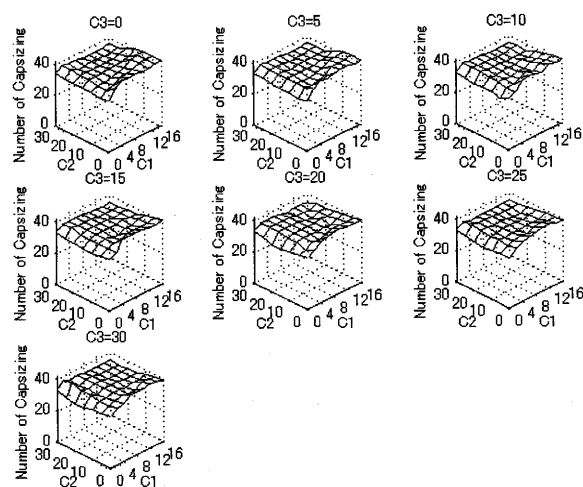


Fig.9. Number of capsizing with various gain of fin controller in state II

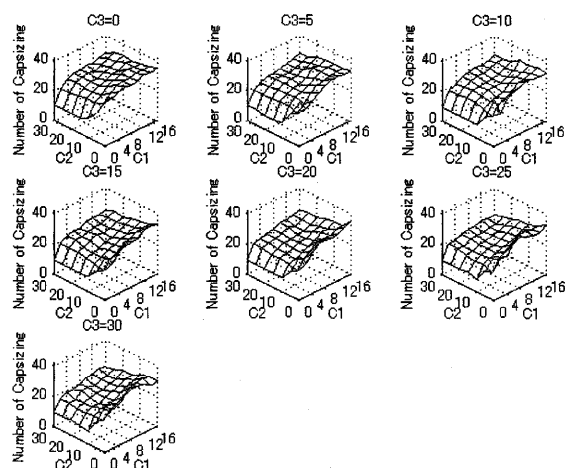


Fig.10.Number of capsizing with various gain of fin controller in stateIII

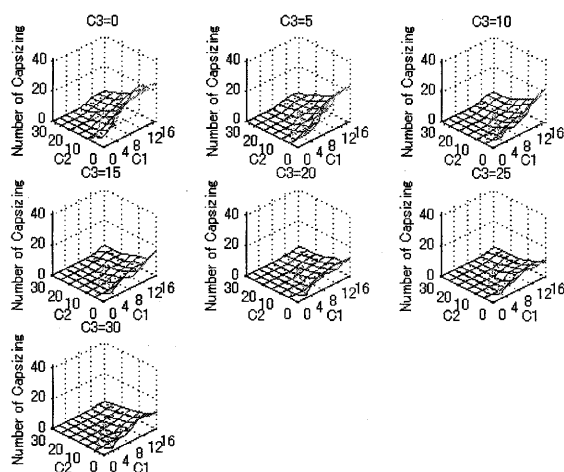


Fig.11.Number of capsizing with various gain of fin controller in stateIV

Table.3. Optimized control parameters of fin-stabilizer .

	C_1	C_2	C_3
State II	0	15	20
State III	0	10	25
State IV	0	20	10

Figs.9–11、Table.3を俯瞰すると、それぞれの状態に対する最適な制御定数の組み合わせにおいて比例ゲインが0となっていることが読み取れる。このことより、横波中における過去の研究^{10), 13)}においても指摘されていることと共通するが、追波、斜め追波中を航行する際にも、比例ゲインより、微分、二階微分ゲインによる減揺効果が高いと結論づけることができた。

ここで、得られたフィンの最適制御定数を用い、制御量としてオートパイロット指令コース、指令平水中フルード数の

組み合わせに対して最終的に得られた各種運動の発生領域での比較検討を、それぞれ States I–IVに対し、Figs.12–15に示す。この際、最終的に落ち着く運動モードの判定については、定常な周期運動、安定波乗り、ブローチングによる転覆、それ以外の要因による転覆、転覆しないブローチング、判定つかずの計6種類に分類を行なった。以下にそれぞれの判定基準についての説明を記す。まず定常な周期運動の判定は定められた数値誤差のもとで次の関係式を満たす τ が存在することとした。

$$\cos(2\pi x_1(t)) = \cos(2\pi x_1(t+\tau)) \quad (21)$$

$$x_i(t) = x_i(t+\tau), i=2, \dots, 9 \quad (22)$$

また安定波乗りは、全ての状態変数がある一定の誤差範囲内でそれぞれ一定値に落ち着くという(23)式の条件をもって判定を行なう。

$$\dot{x}_i = 0, i=1, \dots, 9 \quad (23)$$

そしてブローチングの定義は、先のLloydとは異なり最大舵角を取ってもなお、その逆方向に回頭角速度が発達すること¹⁾とした。すなわち以下の(24)式を満たす場合にブローチングであるとの判定を行なった。

$$\delta = \delta_{MAX}, r < 0, \dot{r} < 0$$

or

$$\delta = -\delta_{MAX}, r > 0, \dot{r} > 0 \quad (24)$$

転覆判定は(20)式に従い、転覆をした際にブローチング状態であったか否かの判定は上記(24)式に従う。さらに判定つかずは、定められた計算時間内において他のどの状態にも分類されなかったものであり、これは非周期的な船体運動を行なっている状況に相当する。

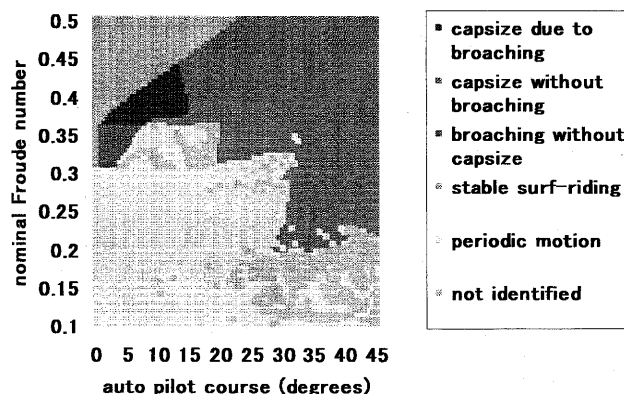


Fig.12 Boundaries of ship motion modes in State I

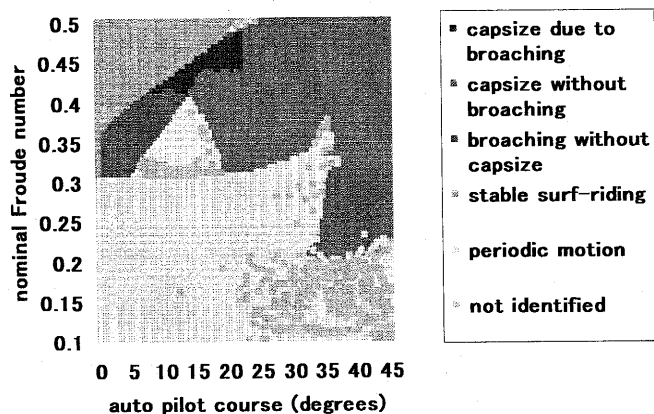


Fig.13 Boundaries of ship motion modes in State II

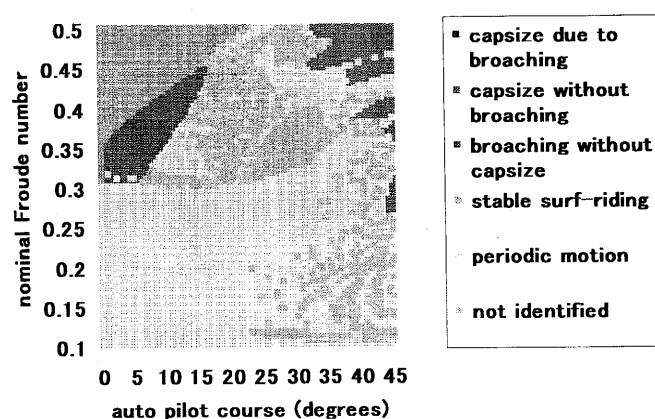


Fig.14 Boundaries of ship motion modes in State III

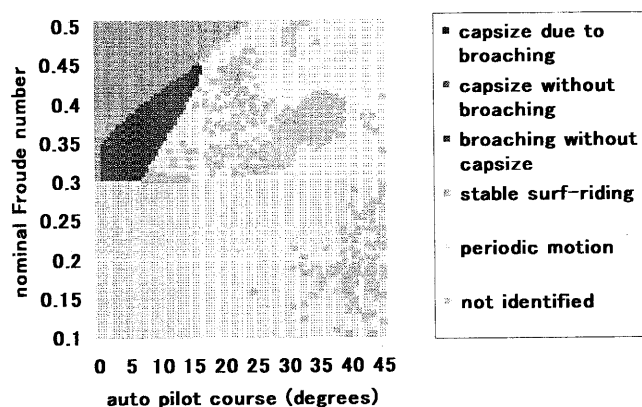


Fig.15 Boundaries of ship motion modes in State IV

これらの4つの結果より、十分な面積を持ったフィンが追波、斜め追波中における転覆をよく防ぎうるということが理解できる。しかしながら、ブローチングに関連する領域があまり変化をしていないことも読み取れ、船の回頭運動自体にフィンは大きな影響を及ぼしえないこともうかがえる。

4.3 舵面積とオートパイロットの最適制御定数の探索

前節ではフィンの最適な制御がいかなるものかについての検討を行なったが、ここでは舵面積の最適値とオートパイ

ロットの最適制御定数を探索する。最適化の順序をこのように選んだ理由は舵特性が推進性能や平水中操縦性能にも関わってくるためであり、まずは既存の舵特性のもとで斜め追波中を航行する際におけるフィンの制御に関する最適化を行い、その後舵特性による転覆数に与える影響を調べることとした。ここでの海象条件、解析手法は、共に4.2で用いたものと同じとした。この解析において用いるフィンの面積 A_{FIN} 、アスペクト比 Λ_{FIN} の組み合わせは、State I、State IIのみとした。これは State III、State IV では4.2において求めた最適制御定数を用いると、この海象条件下では転覆をほとんど防ぐため、どの値が最適であるかを判定しがたいためである。State IIにおけるフィンの制御定数は4.2で最適制御定数の組み合わせとして求めた $C_1=0$ 、 $C_2=15$ 、 $C_3=20$ を用いた。そして舵面積 A_R 、オートパイロットの比例ゲイン K_P 、微分時定数 T_D を、実設計に対応する以下の範囲で変化させた。

$$A_R : 3.5, 5.25, 7.0, 8.75, 10.5, 12.25, 14.0 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$K_P : 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6$$

$$T_D : 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 \text{ (s)}$$

以上の事柄をふまえて State I、State II のそれぞれに対し、上記すべての舵面積に対するオートパイロットの比例ゲイン、微分時定数を変化させた時の転覆数の変化を各々 Fig.16、Fig.17 に示す。またこの図より得られた、State I、State II のそれぞれに対する最適値を Table.4 に示す。Fig.16 と Fig.17 からは、フィンの制御定数に関する比較を行なった場合は異なり、舵面積とオートパイロットに関しての定性的知見を得ることは難しい。舵面積は単に大きいことが望ましいわけではなく、最適値がある。これは舵面積が大になると操舵による横傾斜が問題になるためであると考えられる。また比例制御は強く、微分制御は弱い場合に転覆が少なくなる概略の傾向がうかがえる。

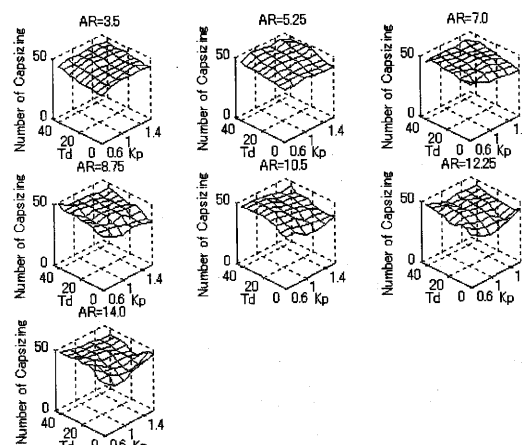


Fig.16. Number of capsizing with various autopilot gains and differential time constants and rudder areas in state I

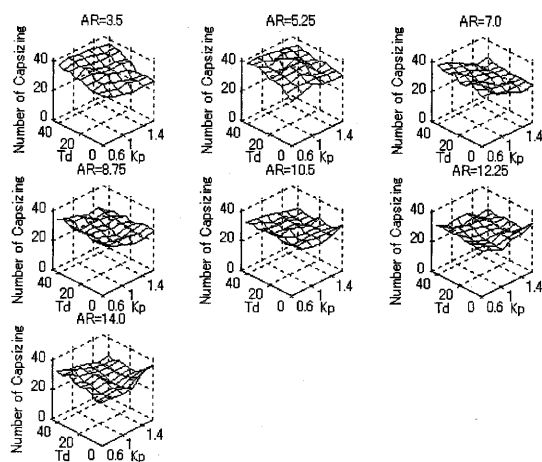


Fig.17. Number of capsizing with various autopilot gains and differential time constants and rudder areas in state II

Table.4. Optimized rudder area and autopilot parameters.

	A_R	K_P	T_D
State I	7	1.6	0
State II	8.75	1.4	15

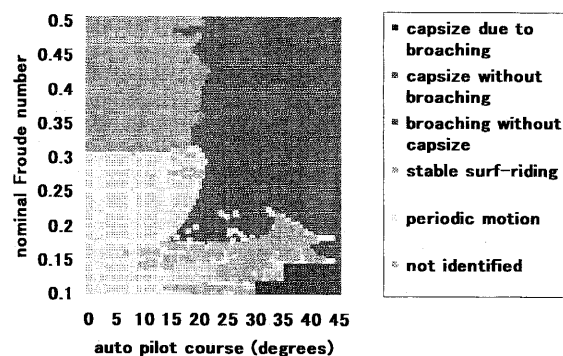


Fig.18 Boundaries of ship motion modes in State I with optimized auto pilot.

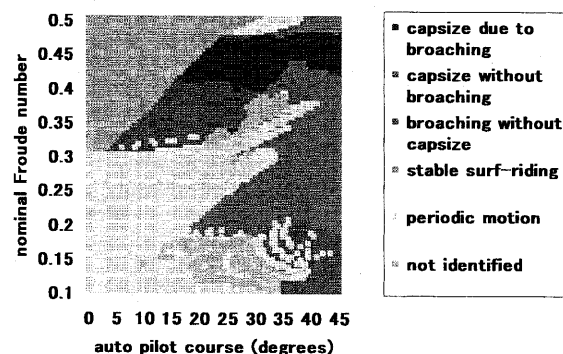


Fig.19 Boundaries of ship motion modes in State II with optimized auto pilot.

次に、得られた舵面積とオートパイロットの、転覆を最もよく防ぐ上での最適値を用い、制御量としてオートパイロ

ット指令コース、指令平水中フルード数の組み合わせに対して最終的に得られた各運動の発生領域での比較検討を、それぞれ State I、State II に対し、Fig.18、Fig.19 に示す。

Fig.18、Fig.19 と Fig.12、Fig.13 の比較より、フィンとは異なり、舵面積とオートパイロットの制御定数が船の回頭運動に大きな影響を及ぼすことが理解できる。すなわち、これらの値を最適化することで、ブローチングの発生領域自体を小さくすることも可能である。ここでは特に、舵面積や比例ゲインを単に大きくすることが転覆を防ぐことにつながらないことに留意する必要がある。

5. 結言

本研究において用いる二軸二舵船の数学モデルが、Lloyd の行なった実験結果を定性的に表しうることを示し、このモデルの有効性を確認した。そして同モデルを拡張した、フィンを装備した数学モデルを用いてフィンの効果の検討を行い、フィンが追波、斜め追波中でも減揺効果をよく発揮し、ブローチングによる転覆を防ぎうることを確認した。また、フィンの面積、アスペクト比と制御定数をうまく組み合わせることにより、ブローチングによる転覆をよく防ぎうることを示した。さらに同様の検討を舵面積とオートパイロットに関しても行い、フィンに関する検討と同様、ブローチングによる転覆の危険性を最大限減少せしめうる最適値を見出せることも示した。今後はフィンスタビライザーを作動させた二軸二舵高速瘦せ型船に対する追波、斜め追波中における自由航走模型実験を行い、今回の数値計算結果と比較することが望まれる。

謝 辞

本研究を実施するにあたって、QinetiQ Sea の deputy technical director である M.R.Renilson 博士、東京大学名誉教授の藤野正隆先生、(財)日本造船技術センターの鷺尾祐秀博士、防衛庁技術研究本部の成行英司防衛庁技官より有益なるご助言を賜った。また本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金（基盤 B：18360415）ここに記して感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) Umeda, N., Hashimoto, H. : Qualitative Aspects of Nonlinear Ships Motions in Following and Quartering Seas with High Forward Velocity, Journal Marine Science and Technology, Vol.6, 2002.
- 2) Saunders, H.E. : Hydrodynamics in Ship Design, Soc Nav

- Archit Mar Eng,(1965).
- 3) Nicholson, K. : Some Parametric Model Experiment to Investigate Broaching-to, Proc Int Symp Dynamics of Marine Vehicle and Structure,(1974).
 - 4) Renilson, M.R., Driscoll, A. : Broaching — An Investigation into the Loss of Directional Control in Severe Following Seas, Trans. RINA, (1982).
 - 5) Renilson, M.R. : An Investigation into the Factors Affecting the Likelihood of Broaching-to in Following Seas, Proceeding of the Second International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles,Tokyo, 1982.
 - 6) 李承健、藤野正隆、深沢塔一：二軸二舵船の操縦数学モデルについて、日本造船学会論文集第 163 号、1988.
 - 7) 不破健、吉野泰平、山本徳太郎、菅井和夫：小型船のブローチングに関する実験的研究、日本造船学会論文集第 150 号、1981.
 - 8) 元良誠三、藤野正隆、小柳雅志朗、石田茂資、島田和彦、牧岳彦：ブローチング現象発生機構に関する考察、日本造船学会論文集第 150 号、1981.
 - 9) Umeda, N., Hashimoto, H., Matsuda, A. : Broaching Prediction in the Light of an Enhanced Mathematical Model, with Higher-Order Terms Taken into Account, Journal of Marine Science and Technology, Vol.7, 2003.
 - 10) 湯室彰規：Anti-Rolling Fin に関する研究(その 1)、石川島播磨技報、第 10 巻第 1 号、1970.
 - 11) 湯室彰規、水谷郁夫：Anti-Rolling Fin に関する研究(その 2)、石川島播磨技報、第 10 巻第 2 号、1970.
 - 12) 今井功：流体力学(前編)、裳華房、1973
 - 13) 高石敬史、平野雅祥、猿田俊彦、高品純志、中嶋利夫：フィンスタビライザー及び舵の横揺れ軽減効果について、関西造船協会誌第 171 号、1978.
- 記号について**
- | | | | |
|--------------|---------------|--------------------|-----------------------------|
| A_{FIN} | フィンの面積 | I_{zz} | z 軸周りの慣性モーメント |
| c | 波速 | J_{xx} | x 軸周りの付加慣性モーメント |
| C_1 | フィン制御の比例ゲイン | J_{zz} | z 軸周りの付加慣性モーメント |
| C_2 | フィン制御の微分ゲイン | K_F | フィンに起因する roll モーメント |
| C_3 | フィン制御の二階微分ゲイン | $K_{\dot{p}}$ | p に関する roll 方向流体力微係数 |
| C_{α} | フィンの揚力勾配係数 | K_r | r に関する roll 方向流体力微係数 |
| g | 重力加速度 | K_v | v に関する roll 方向流体力微係数 |
| GZ | 復原艇 | K_P | オートパイロットの比例ゲイン |
| H | 波高 | K_w | roll 方向波浪強制モーメント |
| I_{xx} | x 軸周りの慣性モーメント | $K_{\dot{\phi}}$ | ϕ に関する roll 方向流体力微係数 |
| | | $K_{\dot{\delta}}$ | δ に関する roll 方向流体力微係数 |
| | | L | 船長 |
| | | l_{FIN} | 船体重心からフィンの取り付け位置までの長さ |
| | | L_P, L_S | フィンで発生する揚力 |
| | | m | 船体重量 |
| | | m_x | x 方向の付加質量 |
| | | m_y | y 方向の付加質量 |
| | | n | プロペラ回転数 |
| | | N_F | フィンに起因する yaw モーメント |
| | | N_v | v に関する yaw 方向流体力微係数 |
| | | N_r | r に関する yaw 方向流体力微係数 |
| | | N_w | yaw 方向波浪強制モーメント |
| | | $N_{\dot{\phi}}$ | ϕ に関する yaw 方向流体力微係数 |
| | | $N_{\dot{\delta}}$ | δ に関する yaw 方向流体力微係数 |
| | | N_T | 両舷の推力差による yaw モーメント |
| | | p | 横揺角速度 |
| | | r | 旋回角速度 |
| | | R | 船体抵抗 |
| | | T | プロペラ推力 |
| | | T_D | オートパイロットの微分時定数 |
| | | T_E | 操舵機の時定数 |
| | | T_{FE} | フィン制御の時定数 |
| | | u | 船体速度の x 方向成分 |
| | | u_F | 波粒子速度影響を考慮したフィン流入速度 |
| | | u_{WF} | フィンに誘起される波粒子速度の x 方向成分 |
| | | v | 船体速度の y 方向成分 |
| | | v_{WF} | フィンに誘起される波粒子速度の y 方向成分 |
| | | w_{WF} | フィンに誘起される波粒子速度の z 方向成分 |
| | | x_F | フィンの長手方向の取り付け位置 |
| | | X_F | フィンに起因する surge 方向力 |
| | | X_w | surge 方向波浪強制力 |
| | | Y_F | フィンに起因する sway 方向力 |
| | | Y_r | r に関する sway 方向流体力微係数 |
| | | Y_v | v に関する sway 方向流体力微係数 |
| | | Y_{δ} | δ に関する sway 方向流体力微係数 |

Y_{ϕ}	ϕ に関する sway 方向流体力微係数
Y_w	sway 方向波浪強制力
Z_H	sway 方向力の着力点高さ
α	フィンの作動角
β	フィンの取り付け角
Λ_{FIN}	フィンのアスペクト比
δ	舵角
λ	波の波長
ξ_G	船体重心の波の谷からの水平距離
π	円周率
ρ	水の密度
ϕ	横揺角
χ	波方向からの方位角
χ_C	オートパイロットの指令コース
