

(昭和 56 年 11 月 日本造船学会秋季講演会において講演)

## ブローチング現象発生機構に関する考察

正員 元 良 誠 三\* 正員 藤 野 正 隆\*  
 正員 小 柳 雅 志 郎\* 正員 石 田 茂 資\*\*  
 正員 島 田 和 彦\*\*\* 正員 牧 岳 彦\*\*\*\*

A Consideration on the Mechanism of Occurrence of the Broaching-to Phenomenon

by Seizo Matora, *Member* Masataka Fujino, *Member*  
 Masashiro Koyanagi, *Member* Shigesuke Ishida, *Member*  
 Kazuhiko Shimada, *Member* Takehiko Maki, *Member*

## Summary

When a ship is travelling in a following sea, of which the wave length is almost twice the ship's length, with an advance speed nearly equal to the wave celerity, the ship is violently turned against the helm of rudder. This phenomenon is called the broaching-to, and feared by the seamen for a long time. There exist some different notions as regards the immediate cause of occurrence of this phenomenon. The widely supported notions are as follows; a) reduction of rudder effectiveness in the following seas, b) instability of course keeping of a ship travelling on the downhill slope of wave, and c) the action of turning moment due to the cross flow component of the orbital motion of water particle.

In this paper, the authors discuss the propriety of the traditional notions stated just above by examining them with the hydrodynamic data obtained from the restrained model tests. As a result of the examination, the authors conclude that any of the above stated causes is not the immediate cause of occurrence of the broaching-to phenomenon.

In order to understand the characteristics of the ship motion travelling in a following sea, a simulation study of surge, sway and yaw motions is executed. As the result, it is found that the violent turn of a ship travelling on the downhill slope of the following wave is excited by the wave turning moment when the ship has an advance speed equal to or slightly lower than the wave celerity, and moreover the encounter angle of the ship to the wave is around 20 and 30 degrees.

Consequently, the authors conceive that the broaching-to phenomenon occurs when the wave exciting yaw moment becomes remarkably high compared with the hydrodynamic moment of course yaw keeping generated by the helm of rudder. This notion is verified by analysis of the broaching-to phenomenon observed at a full-scale experiment in the sea.

## 1 緒 言

中小型船舶が追波中を比較的高速で航行するとき、船速が波速にはほぼ等しく波長が船長の2倍程度である等の条件が合致するとしばしば、ブローチングと呼ばれている急速な回頭運動を起こすことが知られている<sup>1),2)</sup>。回頭運動の急速な発達に伴い船体には大きな横傾斜が発生

するとともに、回頭運動発達時には横波状態となることもあって、場合によっては横転することもあり、古くから船乗り仲間からは恐れられていた現象である。このようなブローチング現象発生原因として従来指摘されていたのは主として次の3点である。

- (1) 舵効きの低下：追波中船体が波の下り斜面に位置する場合、舵は波頂付近に存在することが多く、波の粒子速度により舵への流入速度が減少し、舵効きが低下する。
- (2) 波面上での針路安定性の劣化：船体が波の下り斜面上に位置する際、船は針路不安定となる。このため急速な横すべりおよび回頭運動が発生す

\* 東京大学工学部

\*\* 運輸省船舶技術研究所（研究当時、東京大学工学部船舶工学科研究生）

\*\*\* 防衛庁（研究当時、東京大学工学部船舶工学科学生）

\*\*\*\* 東京大学大学院工学系研究科

る。

(3) 波の粒子運動による回頭モーメントの発生：ブローチング現象が発生しやすいとされている，波長船長比 $\lambda/L=2$ の波面上で船体が波の下り斜面ほぼ中央に位置する場合，船首および船尾はそれぞれ波の谷および波頂付近に位置することになる。そのため，船体が波の進行方向とある角度を有するとき，波の粒子運動のうち船体中心線に対するcross flow成分が船体と波の出会い角をますます増加させる方向の回頭モーメントを発生させる。

これらのうち，(1)については実験的にその事実が明らかにされている<sup>3)</sup>。また(2)についても理論的かつ実験的に，操縦微係数の波面上での変化が研究され<sup>5)</sup>，確に波の下り斜面で針路不安定になることが確かめられている<sup>4)5)</sup>。このように，波の下り斜面で舵効きが低下し，かつ針路不安定になるという事実は確認されているが，これらの事実がブローチング現象発生の直接の原因であるか否かはブローチング現象のメカニズムを具体的に検討してはじめて明らかになるのであろう。一方，(3)については実証的な検討はほとんどなされていないようである。

以上の現状に鑑み，本論文では波浪中で実施された拘束模型船による各種流体力計測試験の結果をもとに，前述の原因説に検討を加えるとともに，流体力計測結果を利用して追波中航走時の船体運動（サージ，スウェイ，ヨー）のシミュレーション計算を実施し，ブローチング現象の力学的メカニズムを考察する。さらに，実船試験で観測・記録されたブローチングの数例を取出し，これを解析することにより，前述のブローチング現象の力学的説明仮説の妥当性を検討する。

## 2 拘束模型試験による従来原因説の検討

### 2.1 供試模型船

実験に使用された模型船は垂線間長7.14mの小型漁船の1/7.14FRP製模型で船型の概要をFig.1に示した。本船型は後述する実船試験にも使用された船型で，Fig.1の平面図中に示されている左右舷側および甲板上のフロートは実船試験に際し，万が一の横転に備え付加されたもので，模型船では装着されていない原型の船型とした。Table 1に実船および模型船の主要目を示した。

### 2.2 試験状態

ブローチングが発生する際には，いわゆる波乗り状態となり船体は波面上を波速とほぼ等しい速度で運動する。拘束模型試験もこれに対応し，波との出会い周波数 $\omega_e$ を $\omega_e=0$ として実施するのが望ましいが，試験水槽

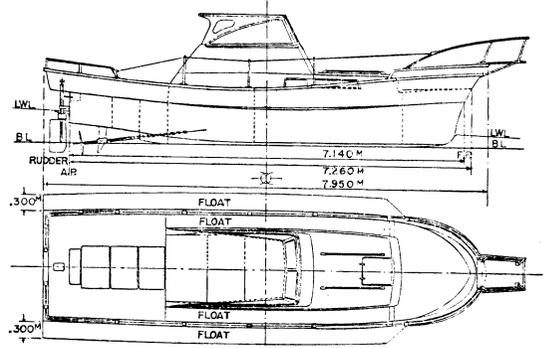


Fig. 1 General arrangement of the full scale ship

Table 1 Principal particulars of model and full scale ship

	FULL SCALE SHIP	MODEL
Length overall	7.95 m	1.113 m
Length registered	7.26 m	1.017 m
Length between perpendiculars (L)	7.14 m	1.000 m
Breadth overall	2.16 m	0.305 m
Breadth	1.87 m	0.262 m
Depth	0.63 m	0.0882 m
Draft fore	0.260 m	0.0364 m
Draft aft	0.507 m	0.0710 m
Displacement	2413 kg	6.629 kg
KG	0.738 m	0.083 m
GM	0.715 m	0.121 m
∞G	0.601 m aft	0.0842 m aft
Radius of gyration (yaw)	—	0.252 m

の曳引車の速度に制限があるため， $\omega_e=0$ という条件を満足させることができない。しかし $\omega_e=0$ に極力近づけるといふ観点から，波長・船長比 $\lambda/L$ を $\lambda/L=1.6$ ，船速・波速比 $U/C$ を $U/C=0.9$ と選定して，大部分の実験を実施した。ただし，一部の試験では実験状態がこれらと異なるものもある。また，波高・波長比 $H_w/\lambda$ は1/30または1/20である。各種流体力計測実験における模型船はヒープ，ピッチは自由で，サージ，スウェイ，ヨーが拘束されている。模型船の取付け状態をFig.2に示した。

### 2.3 流体力計測結果に基づく従来原因説の検討

#### (1) 舵効きの低下

前述の供試模型船において一定舵角 $\delta=\pm 30^\circ$ を操舵した際に船体に作用する重心まわりの回頭モーメントの計測結果をFig.3に模型船のスケールのまま示した。一定舵角 $\delta_0$ を保持し，波との出会い角 $\chi_0$ (Fig.4に示し

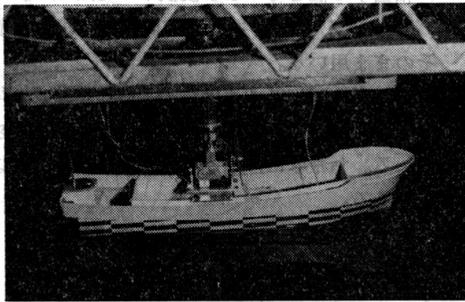
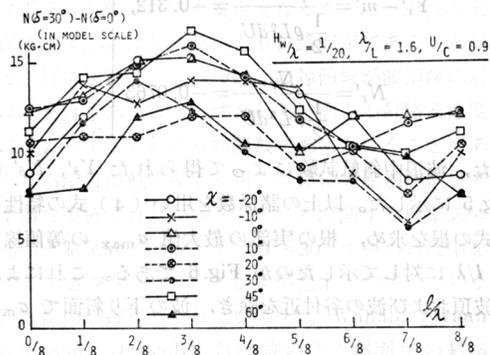
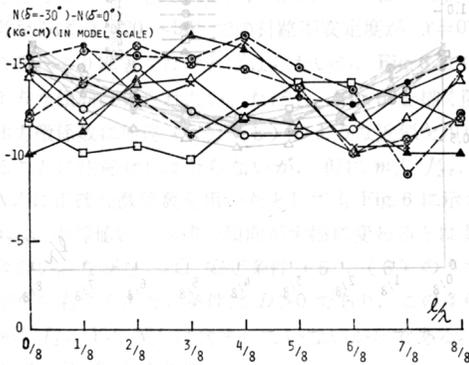


Fig.2 Installation of model to the towing carriage



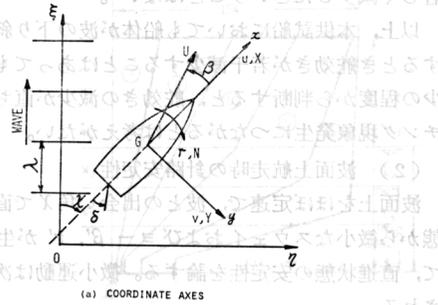
(a) Starboard rudder



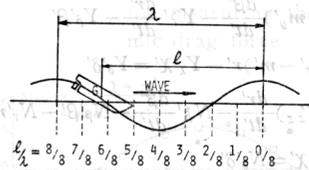
(b) Port rudder

Fig.3 Rudder effectiveness in following seas  
 $(H_w/\lambda=1/20, \lambda/L=1.6, U/C=0.9)$

た座標系参照)で直進する船体には、操舵による流体力のほか、いわゆる波浪強制力も作用するので、舵中央に保ったまま  $\chi$  で同一波浪中を直進する際の回頭モーメントを差引いている。同図の横軸  $l/\lambda$  は船体重心の波面上での位置を表すパラメータで、船首前方の波頂より船体重心までの距離  $l$  の波長  $\lambda$  に対する比である。Fig.3によれば本供試船の場合、波の下り斜面 ( $l/\lambda=4/8\sim 8/8$ ) に船体重心が位置する際、左舵では若干舵モ



(a) COORDINATE AXES



(b) SHIP'S POSITION ON WAVE

Fig.4 Coordinate axes

ーメントが減少する傾向があり、右舵では左舵よりやや顕著に減少するといえるが、舵効きが著しく減少し、そのことがブローチング発生の原因となるというほどではない。

Renilson らの模型実験では<sup>3)</sup>、 $\chi=0^\circ$ における舵力の微係数  $Y'_\delta$ 、 $N'_\delta$  を波面上における船体位置を変数として計測している。その結果によれば、波の下り斜面での  $N'_\delta$  が波の上り斜面での約 1/2.5 程度に減少しており、本供試船の場合に比べ、波の下り斜面での舵の回頭モーメントの減少が著しい。本供試船の場合との著しい相違は船尾における舵の配置——とくに没水深度——の相違によるものと思われる。文献(3)の供試船型は2軸2舵船型で、舵もこのような船型に典型的に見られるアスペクト比の小さい釣下げ舵で、舵の下端も船体 base line よりもかなり上方にある。したがって、船体が波の下り斜面にあり船首トリムの状態となる際には舵の没水深度が著しく減少し、場合によっては舵の一部が空中に露出しやすい船型である。事実、左舷側の舵に空気吸込みが発生している旨の記述がある。一方、本論文で使用した供試船型は Fig.1 から明らかなようにアスペクト比の大きい舵を有し、舵の下端も base line よりさらに下方に位置している。したがって、Fig.3 に示した波高・波長比  $H_w/\lambda=1/20$  程度の波では空気吸込みが起こりにくく、いわんや舵の空中露出はない。このような舵の相違が、本論文と文献(3)における波面上での舵効きの差異となったものと思われる。また、実船試験に際し、舵板の直上に舵直圧力検出用ブロック・ゲージを配して舵の発生する直圧力を計測したが、ブローチング現象が発生している場合も含め、舵効きが波の下り斜面で

著しく減少したということはない<sup>6)</sup>。

以上、本供試船においても船体が波の下り斜面に位置するとき舵効きが若干減少することはあっても、その減少の程度から判断すると、舵効きの減少が直ちにブローチング現象発生につながるとは考えがたい。

(2) 波面上航走時の針路安定性

波面上をほぼ定速で、波との出会い角 $\chi$ で直進する状態から微小なスウェイおよびヨー $\beta'$ ,  $r'$ が生じたとして、直進状態の安定性を論ずる。微小運動は次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} -(m'+m_y')\frac{d\beta'}{dt'} - Y_r'\frac{dr'}{dt'} - Y_\beta'\beta' \\ - (Y_r' - m')r' - Y_\chi'\chi' = Y_\delta'\delta' \\ (I'_{zz} + J'_{zz})\frac{dr'}{dt'} - N_\beta'\frac{d\beta'}{dt'} - N_\beta'\beta' - N_r'r' \\ - N_\chi'\chi' = N_\delta'\delta' \end{aligned} \right\} (1)$$

ここで左辺第5項  $Y_\chi'\chi'$ ,  $N_\chi'\chi'$  は波との出会い角の微小変化  $\chi'$  による波浪外力を表わす。また、ダッシュ(')は無次元量を意味する。ところで、

$$\chi' = r' \quad (2)$$

であること、加速度および角加速度の連成項  $Y_r'r'$ ,  $N_\beta'\beta'$  の寄与は小さいことを考慮すれば(1)式は

$$\left. \begin{aligned} (m'+m_y')\beta' + Y_\beta'\beta' + (Y_r' - m')\chi' + Y_\chi'\chi' \\ = -Y_\delta'\delta' \\ N_\beta'\beta' - (I'_{zz} + J'_{zz})\chi' + N_r'\chi' + N_\chi'\chi' \\ = -N_\delta'\delta' \end{aligned} \right\} (3)$$

となる。したがって  $\chi = \chi_0$  で直進する船の針路安定性は次の特性方程式の根により判別される。

$$As^3 + Bs^2 + Cs + D = 0 \quad (4)$$

ただし

$$\begin{aligned} A &= (m'+m_y')(I'_{zz} + J'_{zz}) \\ B &= -(m'+m_y')N_r' + (I'_{zz} + J'_{zz})Y_\beta' \\ C &= -(m'+m_y')N_\chi' - N_r'Y_\beta' + (Y_r' - m')N_\beta' \\ D &= -Y_\beta'N_\chi' + Y_\chi'N_\beta' \end{aligned}$$

安定であるためには(4)の根の実部がすべて負であることが必要かつ十分であるが、そのためには(4)式の係数には次の関係が必要である。

(a)  $B/A > 0$ ,  $C/A > 0$ ,  $D/A > 0$  (5)

(b)  $BC - AD > 0$  (6)

このうち、(5)の第1条件は常に満足されるので、残る3条件が満たされねばならない。ここでは(4)式を具体的に解くこととする。そのためには、船体の波面上の位置  $l/\lambda$  および波との出会い角  $\chi$  の関数として流体力微係数の値を知らねばならないが、実験設備等の制限のため一部の係数については次のような近似をせざるを得ない。

(a)  $m_y'$ ,  $J'_{zz}$  は元良チャート<sup>7)</sup>より求めた平水時

に相当する値をそのまま波浪中にも用いる。

(b)  $Y_r'$ ,  $N_r'$  も平水中 CMT 試験より求めた値をそのまま用いる。

これに対し、 $Y_\beta'$  および  $N_\beta'$  は波浪中斜航試験より得られた値、 $Y_\chi'$  および  $N_\chi'$  も波浪強制力計測結果より求めた値を用いる。ちなみに、前述の平水時の諸係数は以下のとおりである。

$$\left. \begin{aligned} m' + m_y' &= \frac{m + m_y}{\frac{1}{2}\rho L^2 d} = 0.491, \\ I'_{zz} + J'_{zz} &= \frac{I_{zz} + J_{zz}}{\frac{1}{2}\rho L^4 d} = 0.0260, \\ Y_r' - m' &= \frac{Y_r - mU}{\frac{1}{2}\rho L^2 dU} = -0.312, \\ N_r' &= \frac{N_r}{\frac{1}{2}\rho L^3 dU} = -0.0763 \end{aligned} \right\} (7)$$

また、波浪中斜航試験によって得られた  $Y_\beta'$ ,  $N_\beta'$  は Fig. 5 に示した。以上の諸係数を用い(4)式の特性方程式の根を求め、根の実部の最大値  $\sigma_{max}$  の等値線を  $\chi$ ,  $l/\lambda$  に対して示したのが Fig. 6 である。これによれば波頂および波の谷付近を除き、波の下り斜面で  $\sigma_{max}$

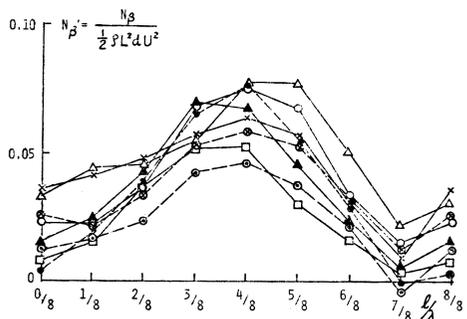
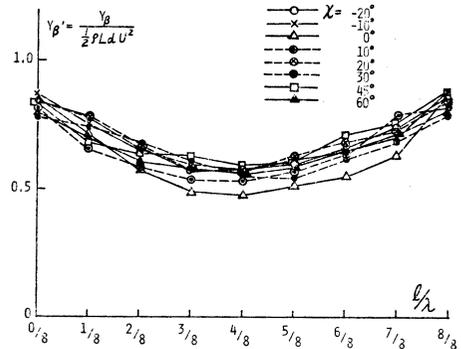


Fig. 5 Results of oblique towing tests in following seas ( $H_w/\lambda=1/20$ ,  $\lambda/L=1.6$ ,  $U/C=0.9$ )

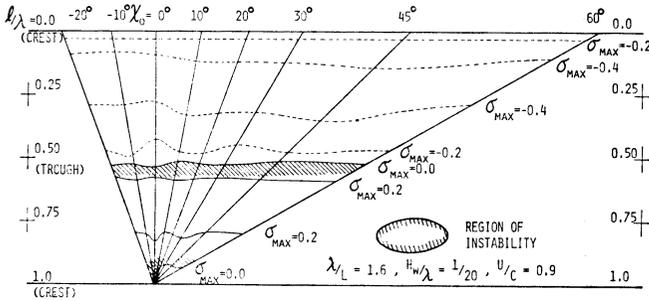


Fig. 6 Contour map of the maximum values of the real part of the solution of equation(4) ( $H_w/\lambda=1/20$ ,  $\lambda/L=1.6$ ,  $U/C=0.9$ )

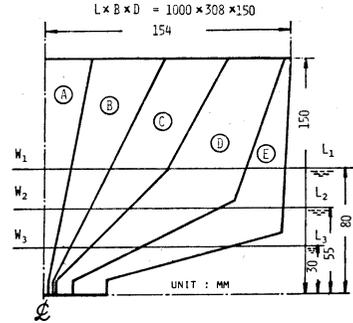


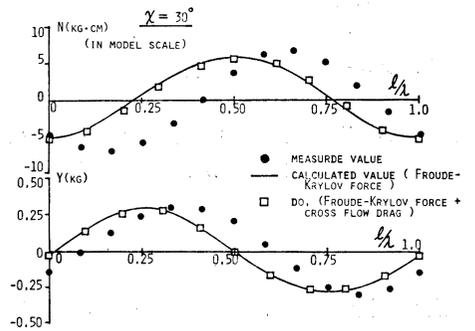
Fig. 7 Two-dimensional bodies used for measuring the hydrodynamic drag force

は正となり船は針路不安定となること、一方波の上り斜面では  $\sigma_{max}$  は常に負になり針路安定であることがわかる。特に注目すべきは  $\sigma_{max}$  の等値線が波頂線に対してほぼ平行であること、すなわち波面上の針路安定度は  $\chi$  にはよらず、 $l/\lambda$  のみの関数であるということである。ところが自由航走模型を用いて運輸省船舶技術研究所角水槽で実施されたブローチングに関する模型試験や後述の実船試験では、 $\chi$  が  $20^\circ \sim 30^\circ$  で斜め追波中を航走するときブローチング現象が発生しやすいという明らかな傾向が確認せられている<sup>8),9)</sup>。Wahab, Swaan<sup>4)</sup> や Renilson, Driscoll<sup>3)</sup> らは波の下り斜面での針路不安定がブローチング現象発生直接的原因であるとの見解をとっていると思われるが、もし、このような見解が妥当ならば  $\chi=20^\circ \sim 30^\circ$  での針路不安定度が  $\chi=0^\circ \sim 10^\circ$  のそれより顕著でなければならぬが、Fig. 6 ではそのような傾向は見られない。ただし、Fig. 6 を描く際、流体力微係数に前述 (a), (b) のような近似を用いていることに注意せねばならないが、仮に  $m_y', J_{zz}', Y_r', N_r'$  に正確な微係数を用いたとしても Fig. 6 に示された  $\sigma_{max}$  の等値線の前述の傾向が大幅に変わるとは期待できない。なぜならば、安定条件 (5), (6) のうちで判定を左右する主たる条件は  $D > 0$  であり、この条件には  $m_y', J_{zz}', Y_r', N_r'$  は含まれていないからである。ところで、 $D > 0$  なる条件は

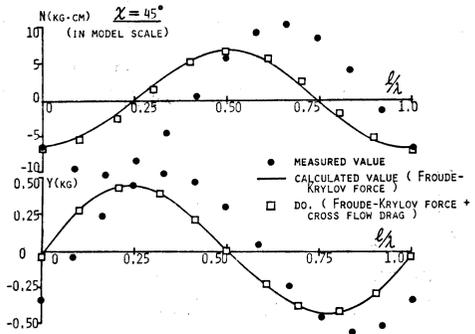
$$D = -Y_{\beta'}' Y_{\chi'}' \left( \frac{N_{\chi'}'}{Y_{\chi'}'} - \frac{N_{\beta'}'}{Y_{\beta'}'} \right) > 0 \quad (8)$$

と書き直すことができる。波の上り斜面では  $Y_{\chi'}' > 0$ ,  $N_{\chi'}' < 0$  となり、波の下り斜面では反対に  $Y_{\chi'}' < 0$ ,  $N_{\chi'}' > 0$  となる傾向のあること(後出の Fig. 9 参照) および Fig. 5 に示された  $Y_{\beta'}', N_{\beta'}'$  の  $\chi, l/\lambda$  に対する変化の様子を考慮すれば、波の上り斜面では針路安定であるが波の下り斜面では針路不安定となることが船型によらず一般的傾向であるといえる。

一方、今迄の経験によれば船型によってブローチングが発生しやすいものとそうでないもののがかなり截然と区



(a)  $\chi=30^\circ$



(b)  $\chi=45^\circ$

Fig. 8 Effects of cross flow component of the orbital velocity of water particle on wave exciting forces ( $H_w/\lambda=1/30$ ,  $\lambda/L=1.6$ ,  $U/C=0.6$ )

別できること<sup>6)</sup>、またある特定の船の場合でも波長・波高・波との出会い角・船速などの条件が合致してはじめてブローチングが発生することなどを考え合せると、波の下り斜面で針路不安定であることがブローチング現象発生に直接結びつくとは考えがたい。

(3) 波の粒子運動に基づく回頭モーメント

波の粒子運動のうち船体に対し cross flow となる成分に基づく回頭モーメントを推算するため、本供試船型の代表的横断面に近い 5 種類の断面形状を有する長さ 1

mの2次元模型を作製し (Fig.7 参照), 真横に曳航し抗力を計測した。この結果を用いて前述の cross flow に相当する流体抗力を供試船型の各横断面に対し推定し, 船長方向にはストリップ法的に加算して cross flow による横力および回頭モーメントを求め, これを波浪強制力の計算値と比較した (Fig.8)。Froude-Krylov の仮定の下に計算された横力および回頭モーメント, それらに前述の cross flow による流体抗力を加算した横力および回頭モーメントのいずれも計測結果との一致度は良くない。この点についての詳細な検討は今後に残された問題点であるが, 少なくとも波の粒子運動に基づく回頭モーメントの寄与は小さいことは明らかである。したがって, 従来唱えられてきた波の粒子運動による回頭モーメントがブローチング発生原因であるとはいえない。

以上, ブローチング現象発生直接的原因として従来挙げられてきた3項目につきその妥当性を, 流体力計測結果を用いて検討したが, いずれもブローチング現象発生第一義的原因とはいえないことが明らかとなった。

### 3 斜め追波中航走時の船体運動

前節での検討の結果, 従来のブローチング発生原因説はいずれも首肯しがたいものであるといえる。そこで, 本節では簡単な運動方程式を用い, 斜め追波中のサージ, スウェイ, ヨー運動のシミュレーション計算を実施し, 斜め追波中での船体運動の特徴を捉え, ブローチング現象発生メカニズムを考える手掛りを得ることとした。

#### 3.1 運動方程式

横揺れは考慮せず, 前後揺・左右揺・船首揺のみを考える。すなわち, プロペラ推力と前後方向流体抵抗が釣り合い船は一定速度  $U$  で前進しているとして, そのまわりに起こる微小運動  $u, v, r$  の変化を取扱う。

$$\left. \begin{aligned} m(\dot{u}-rv) &= X + X_E \\ m(\dot{v}+Ur) &= Y + Y_E \\ I_{zz}\dot{r} &= N + N_E \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

右辺第1項  $X, Y, N$  は船体運動 ( $\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}, u, v, r$ ) および操舵  $\delta$  に基づく流体力, 右辺第2項  $X_E, Y_E, N_E$  は波浪強制力で出会い角  $\chi$  および波面上での船体位置  $l/\lambda$  の関数である。右辺第1項については線形項のみで近似することとし, 加速度および角加速度の連成項  $Y_r\dot{r}, N_{\dot{v}}\dot{v}$  を無視すれば (9) 式は,

$$\left. \begin{aligned} (m+m_x)\dot{u} &= X_u u + X_E(\chi, l/\lambda) \\ (m+m_v)\dot{v} &= Y_v v + (Y_r - mU)r + Y_\delta \delta + Y_E(\chi, l/\lambda) \\ (I_{zz} + J_{zz})\dot{r} &= N_v v + N_r r + N_\delta \delta + N_E(\chi, l/\lambda) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

となる。以下に述べるシミュレーション計算における

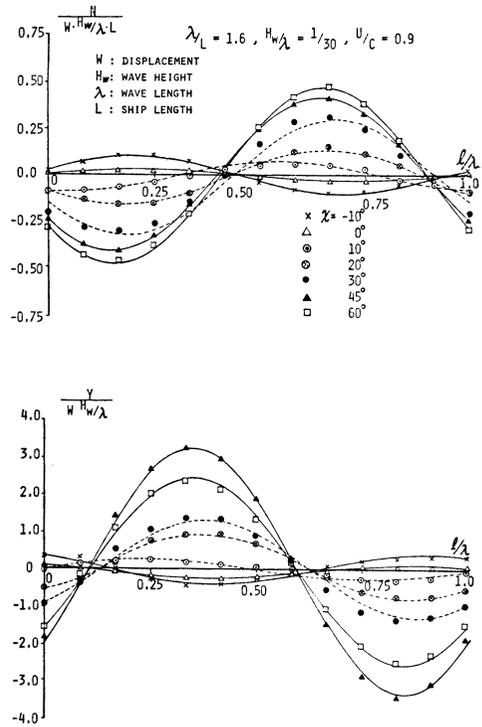


Fig.9 Wave exciting sway force and yaw moment ( $H_w/\lambda=1/30, \lambda/L=1.6, U/C=0.9$ )

(10) 式中の諸係数等は次のとおりとした。付加質量  $m_x, m_y$ , 付加慣性モーメント  $J_{zz}$  および流体力微係数  $Y_r, N_r$  は平水中での値をそのまま波浪中でも使用する。 $Y_v, N_v$  は前述のように波浪中斜航試験の結果 (Fig.5) において  $Y_v' = -Y_{\beta'}$ ,  $N_v' = -N_{\beta'}$  としたものをを用いる。微係数  $X_u$  は平水中抵抗試験の結果から  $\partial X/\partial u$  として定めた。波浪強制力のうち  $Y_E, N_E$  については計測結果を Fig.9 に示したが,  $X_E$  も含め波浪強制力は計測結果を用いることとし, 任意の  $\chi, l/\lambda$  に対する強制力および強制モーメントはスプライン補間によって推定する。

また (10) 式の解法は次のとおりである。

- (a) 初期条件として出会い角  $\chi_0$ , 波面上の船体重心位置 ( $l/\lambda$ ) および初速  $U$  を与える。
- (b)  $\chi_0, (l/\lambda)_0, U$  に相当する (10) 式中流体力微係数および波浪強制力・波浪強制モーメントを定め,  $t=0$  から  $t=\Delta t$  の微小時間  $\Delta t$  内ではそれらの値は一定として船体運動を計算する。
- (c) その結果  $t=\Delta t$  では波との出会い角  $\chi$ , 波面上船体位置  $l/\lambda$ , 船速が定まるので, それらの値に対し改めて流体力微係数および波浪強制力・波浪強制モーメントを定める。これらの値を用いて

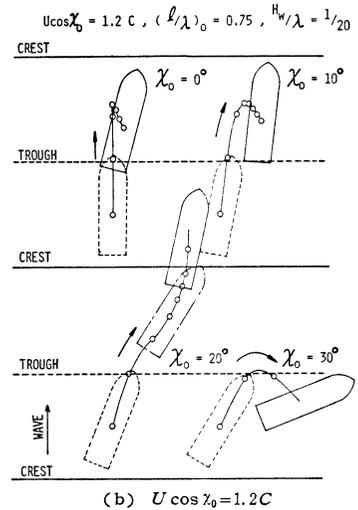
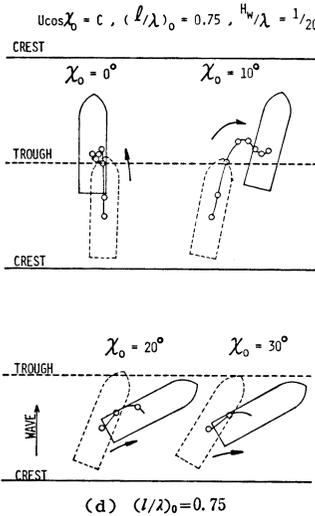
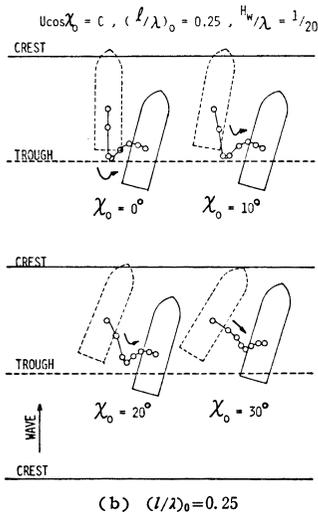
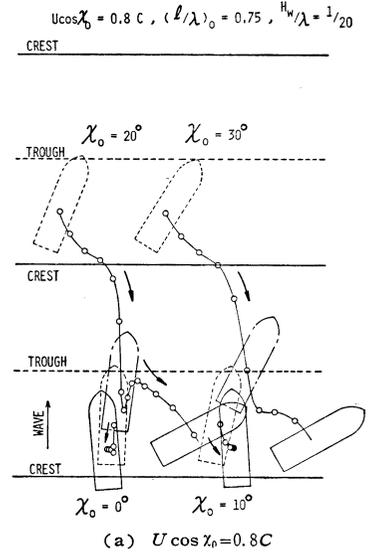
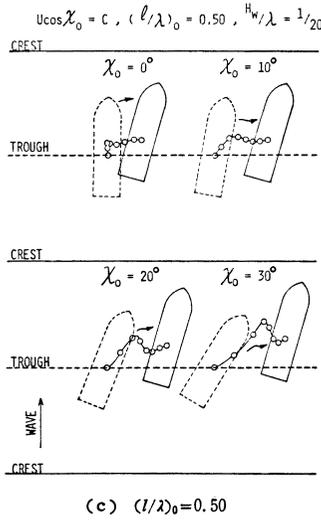
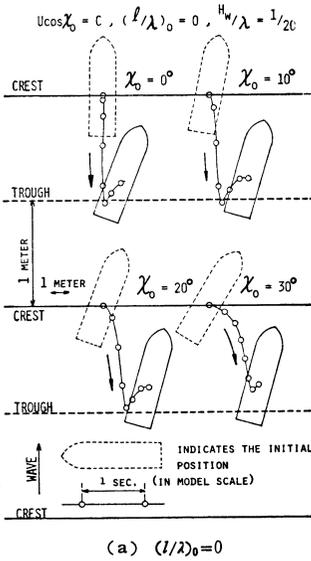


Fig. 10 Ship's trajectories in following seas ( $U \cos \chi_0 = C, H_w/\lambda = 1/20$ )

Fig. 11 Effects of initial advance speed on ship's trajectories in following seas ( $H_w/\lambda = 1/20, (\ell/\lambda)_0 = 0.75$ )

$t = \Delta t$  から  $t = 2\Delta t$  までの  $\Delta t$  間の船体運動を計算する。

(d)  $t = 2\Delta t$  での流体力微係数および波浪強制力等を計算し (c) の手順を繰り返す。

実際の計算では  $\Delta t = 0.05$  秒 (模型換算) とし、波との出会い角  $\chi$  が波浪外力測定範囲  $-20^\circ \leq \chi \leq 60^\circ$  を越えたところで計算を停止した。なお、以下に示すシミュレーションでは操舵は行っていない。

### 3.2 シミュレーション計算の結果とその考察

ブローチングが起りやすいとされている、 $\lambda/L = 2.0$  の場合のみにつき次の初期条件の下で計算を実施した。

$$\chi_0 = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$$

$(l/\lambda)_0 = 0, 0.25, 0.50, 0.75$

$U \cos \chi_0 = kC, k = 0.8 \sim 1.2$  ( $C =$ 波速)

シミュレーション計算に使用する流体力微係数については 3.1 で言及したとおりであるが、 $Y'_\beta, N'_\beta$  を計測した波浪中斜航試験時の  $\lambda/L, H_w/\lambda, U/C$  などの航走条件は今述べたシミュレーション条件とは異なる。Fig. 5 に示した  $Y'_\beta, N'_\beta$  を、実験時と異なる航走状態に適用することは厳密には正しくないが、ここでは計測結果をそのまま用いる。ただし、波浪強制力については、Froude-Krylov の仮定にしたがえば波傾斜に比例するとしてよ

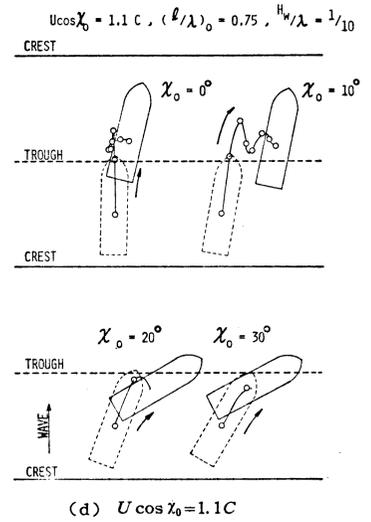
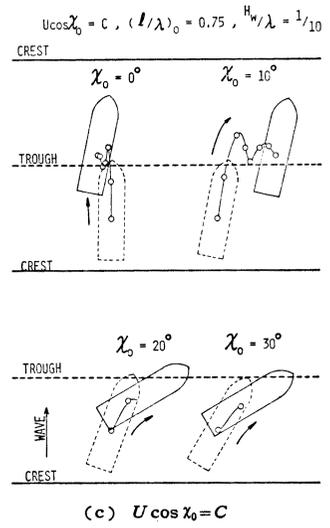
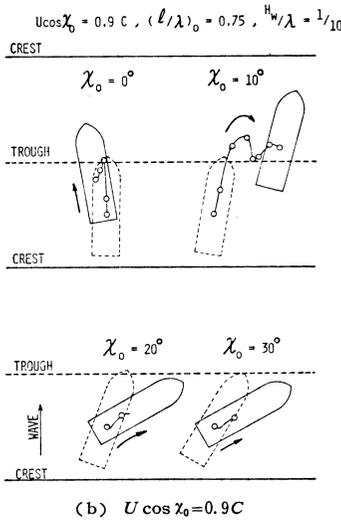
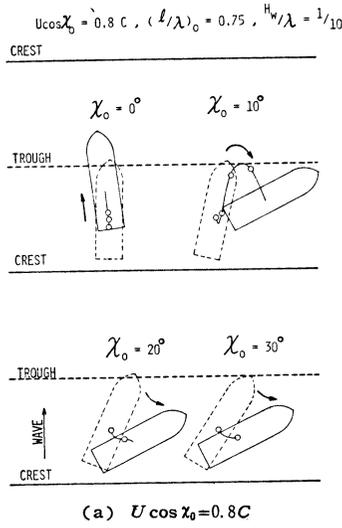
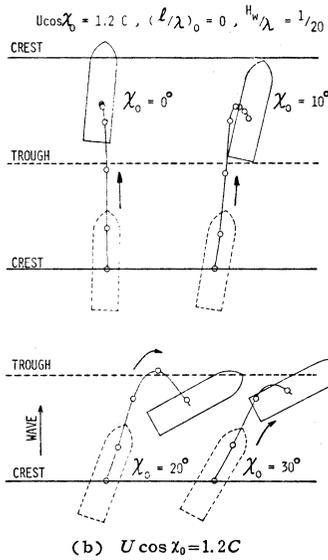
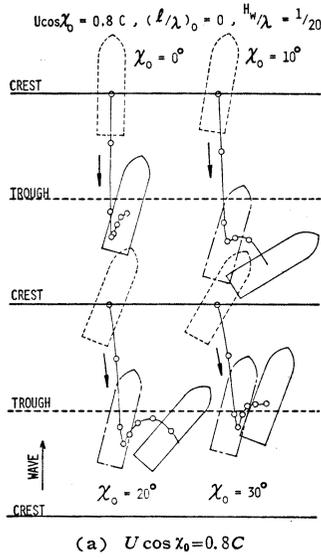


Fig. 12 Effects of initial advance speed on ship's trajectories in following seas ( $H_w/\lambda=1/20, (l/\lambda)_0=0.0$ )

Fig. 13 Effects of initial advance speed on ship's trajectories in following seas ( $H_w/\lambda=1/10, (l/\lambda)_0=0.75$ )

いので<sup>10)</sup>、波長および波高の相違は波傾斜の差異として考慮に入れた。計算結果のうち代表的なもののみを Fig. 10~Fig. 13 に示した。これらの図はいずれも波面上での船体重心の軌跡を示し、静止観測者から見た絶対軌跡を示したものではない。図中、点線で輪郭を描いた船が初期位置を示し、重心軌跡の○印は模型換算で1秒毎の位置を示す。なお、波進行方向の長さのスケールに対し、それと直角な波頂線方向の長さのスケールは1/6.25 に縮められている。すなわち、波頂線に平行な運動は

1/6.25 に圧縮されている。

(1) 波面上での初期位置の影響

初期船速の波進行方向成分  $U \cos \chi_0$  が波速  $C$  に等しい場合につき、船体の波面上初期位置が以後の船体運動にいかなる相違を生ずるかを Fig. 10 に示した。これを見ると次の事が明らかである。

- (a) 初期に波の山、波の上り斜面、波の谷に位置していた船体は波面より受ける負の  $x$  方向力のため波に対し遅れだすが、その際波の上り斜面で受ける負の波浪回頭モーメント——すなわち船体中心線を波頂線に対し直角とする方向のモーメン

ト——により、船体の波との出会い角 $\chi$ は初期角 $\chi_0$ よりも減少することとなり、船体は波の上り斜面に止まり続ける傾向を持つ。

これに対し

(b) 初期に波の下り斜面に位置する船体は初期出会い角 $\chi_0$ が $0^\circ\sim 10^\circ$ では波面推力を受けて船首前方の上り斜面に達し、前述の(a)の傾向を持つことになる。一方、 $\chi_0$ が $20^\circ\sim 30^\circ$ では波浪による回頭モーメントの作用で波との出会い角が増加する方向に急速に回頭運動を起こし、そのため後続の波頂線にじきに追越されると予想されるが、実際には $\chi_0=0^\circ\sim 10^\circ$ の場合と同様波面推力を受けて前方に加速されると同時に、波浪横力により波の下り斜面を下降する方向の横流れ速度も急速に発達することにより、波の下り斜面に止まり続け急速な回頭運動を起こすこととなる。

このように、波の下り斜面にあり、かつ $\chi_0=20^\circ\sim 30^\circ$ ではいわゆるブローチング現象に見られる特徴的な急速な回頭運動と横流れ運動が発生することがわかる。ちなみに $H_w/\lambda=1/20$ のFig. 10の場合、 $(l/\lambda)_0=0.75$ 、 $\chi_0=30^\circ$ では横運動開始後1.8秒(模型換算)で $\chi=56^\circ$ に達し、その時の旋回角速度および横流れ速度はそれぞれ $r=41$  deg/sec、 $v=-24$  cm/secである。

## (2) 初期船速の影響

前述のように波面上船体初期位置が $(l/\lambda)_0=0.75$ で波の下り斜面にある場合、急速な回頭運動が発達することがわかった。そこで $(l/\lambda)_0=0.75$ の場合のみにつき、初期船速 $U \cos \chi_0$ を $0.8C\sim 1.2C$ に変化させたときの船体運動をFig. 11に示した。同図(a)は $U \cos \chi_0=0.8C$ で初期船速の波進行方向成分が波速より若干低い場合であるが、 $\chi_0=0^\circ, 10^\circ$ では先のFig. 10(d)に示した $U \cos \chi_0=C$ の場合と異なり、波の下り斜面上に止まり波に乗った状態、いわゆる波乗り状態になることがわかる。また $\chi_0$ が $20^\circ, 30^\circ$ では一旦は後続の波頂に追越されるが、その後、後続の波の下り斜面に捉えられ急速な回頭運動を引起している。

一方、 $U \cos \chi_0=1.2C$ の場合、 $\chi_0=0^\circ\sim 20^\circ$ で船は波の下り斜面を下り降り、波の上り斜面に止まるか( $\chi_0=0^\circ, 10^\circ$ の場合)、前方の波頂を追越し波の下り斜面に入る( $\chi_0=20^\circ$ の場合)が、 $\chi_0=30^\circ$ では一旦は波の谷まで下降するものの横運動の発達により、波の下り斜面に止まり回頭運動を発達させる。Fig. 10(d)に示した $U \cos \chi_0=C$ の場合も含めると、次の傾向のあることが明らかである。初期に波の下り斜面に位置し、かつ初期出会い角 $\chi_0$ が $30^\circ$ 程度の場合、 $U \cos \chi_0$ が $0.8C\sim 1.2C$ の範囲では初期船速によらず波の下り斜面に止まり続ける傾向があり、その際波浪回頭モーメントの作用により

急速な回頭運動が起りやすい。

波の下り斜面に止まる傾向のある場合は、下り斜面で大きな回頭運動が引起せられるということはFig. 12(a)の $\chi_0=10^\circ, 20^\circ$ 場合でも明らかである。また $\chi_0=20^\circ, 30^\circ$ の出会い角では急速な回頭運動が発生するということはFig. 12に示された $U \cos \chi_0=1.2C$ 、 $(l/\lambda)_0=0$ の場合でも明らかである。

ここまでのシミュレーション計算例はいずれも $H_w/\lambda=1/20$ であるが、 $H_w/\lambda=1/10$ として波浪外力を増加させた場合につき、船速が船体運動に及ぼす影響を調べた(Fig. 13)。ただし、波面上初期位置は $(l/\lambda)_0=0.75$ とした。Fig. 13(a)~(d)いずれの場合も初期出会い角 $\chi_0$ が $20^\circ\sim 30^\circ$ のとき、船は波の下り斜面に止まり続け、急速な回頭運動を発達させる。Fig. 13に示したうちで最も急速に横運動を発達させた例は $U \cos \chi_0=0.8C$ 、 $\chi_0=30^\circ$ の場合で(航跡図からも明らかである)、横運動開始1.15秒後に $\chi=57^\circ$ 、 $v=-52$  cm/sec、 $r=56$  deg/secに達しているとともに前後方向速度も $t=0$ における $u=163.3$  cm/secが $u=220$  cm/secに加速されている。さらに $U \cos \chi_0=0.8C$ では $\chi_0=10^\circ$ の場合も横運動の発達が著しい。しかし、一般的には $\chi_0=0^\circ, 10^\circ$ では初期船速が波速に近づき、かつそれを越えるにしたがい、波の下り斜面にある船体は斜面を下降し前方の上り斜面に止まる傾向を有する。 $H_w/\lambda=1/10$ で初期に波の下り斜面にある場合の船体運動に対する船速影響をまとめると

- (a) 初期船速の波進行方向成分 $U \cos \chi_0$ が波速よりも若干低い場合に波の下り斜面に止まる、いわゆる波乗り状態となりやすい、
  - (b) 波乗り状態になりやすい初期船速で、波との出会い角 $\chi_0$ が $20^\circ\sim 30^\circ$ 程度のとき波乗り状態のまま急速に回頭する
- といえる。また、Fig. 13をFig. 10(d)およびFig. 11と比較すると
- (c) 波乗り状態の発生および波乗り状態での急速な回頭運動の発達に対し、波の艫度——すなわち波浪外力の大きさ——は決定的な影響を及ぼすことが明らかである。

以上のシミュレーション結果より次の事が明らかとなった。

『船速の波進行方向成分 $U \cos \chi_0$ が波速 $C$ にはほぼ等しいか若干低く、波との出会い角 $\chi_0$ が $20^\circ\sim 30^\circ$ 程度であるとき、波長が船長の2倍程度で波の艫度も大きい等の条件が合致すると、いわゆる波乗り状態となり波浪回頭モーメントの作用の下で急速な回頭運動を発達させる』

これがいわゆるブローチングと呼ばれている現象であると思われる。すなわち、ブローチングにおける特徴的

な急激な回頭運動は波浪強制力によって引きされるといえる。

なお、ここまでで紹介した船体運動計算には操舵の効果は加味されていない。以下、操舵の効果について若干の検討を加える。

Fig. 9 より  $\chi_0=30^\circ$ ,  $H_w/\lambda=1/10$  での波浪回頭モーメントを推定すると波の下り斜面で約  $15 \text{ kg}\cdot\text{cm}$  (模型換算) であるのに対し,  $30^\circ$  左舵の発生する回頭モーメントを Fig. 3 より単純に推定すると約  $12 \text{ kg}\cdot\text{cm}$  となる。波浪回頭モーメントを完全には打消すことはできないにしても, 適切な操舵することにより下り斜面での急速な回頭運動を喰止められると期待できる。本論文で使用した供試船型と同一船型の大型自航模型による波浪中自航試験が運輸省船舶技術研究所で実施されているが<sup>8),9)</sup>, 自航試験では当初の舵面積を有する場合ブローチングが発生しにくく, 舵面積を約 60% に減じるなどの変更をしたところ, ブローチングが発生しやすくなったとの報告がある<sup>11)</sup>。また, 後述の実船においても同様の舵面積の縮小のほか, 船首船底へのフィンの装着, トリム変化を調整するフラップの船尾への付加などの変更をしたところブローチングがしばしば観測されるようになった<sup>6)</sup>。実船試験では同一の波浪条件等を再現できないので, ブローチング現象が起こりやすくなったことが上述の船型変更によるものであるとの確証はないが, 両者の間に強い関連のあることは想像に難くない。

結局, 「波の下り斜面での波浪回頭モーメントを操舵によって打消すことができるならば, 船体の回頭運動を抑止できるが, 波の粗度が大きくなり波浪回頭モーメントが増大する反面, 波の粒子運動の影響や空気吸込みや空中露出などによって舵の保針モーメントが減少し, 波浪回頭モーメントが舵の保針モーメントより著しく卓越すると急速な回頭運動が生ずることとなる」といえよう。

#### 4 実船試験によるブローチング現象の確認と解析

前節までの検討で, 追波中高速航走時に波浪回頭モーメントの作用により操舵では押えきれない急速な回頭運動の発達しうることが明らかとなった。この運動がいわゆるブローチング現象といわれるものであると思われる。本節では, Fig. 1 に示した実船を使用し浜名湖今切沖にて実施された実船試験において観測された典型的なブローチング発生時の船体運動の記録を解析し, 前述の「ブローチング現象の力学的説明」の検証を試みる。この海域は西北西ないし北西の風の吹き出しによる風波が本供試船にとってブローチング現象を起こしやすい波長および波高となる場所である。後述する観測例の場合も, 西北西ないし北西の風速約  $10 \text{ m/sec}$  の風が吹き,

目視観測によれば波高  $1.0\sim 1.5 \text{ m}$  波長  $10\sim 15 \text{ m}$  程度の風波が発生していた<sup>6)</sup>。このような海域において約  $8.5$  ノットの速度で, 波をほぼ真後または斜め後  $30^\circ$  程度から受けながら航走中, 数回のブローチングを観測した。

##### 4.1 解析方法

ブローチングが発生した際の船体運動の記録より, ブローチング発生時船体に作用していたと思われる波浪外力を推算する。一方, 前述の拘束模型試験で得られた波浪強制力計測結果から実船試験時の海象下で船体に加わっていたと思われる波浪外力の推定値を求め, これを先の船体運動記録からの推算値と比較する。船体運動記録より船体に作用していた波浪横力および回頭モーメントは近似的に次式で推定できると仮定する。

$$\left. \begin{aligned} Y_E &= (m + m_y)\dot{v} - Y_0v - (Y_r - mU)r - Y_\delta\delta \\ N_E &= (J_{zz} + J_{zz}')\dot{r} - N_0v - N_r r - N_\delta\delta \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

(a) 旋回角速度  $r$  は船内搭載のレイト・ジャイロで計測され, 旋回角加速度  $\dot{r}$  は  $r$  の計測値の数値微分より求める。

(b) 船首尾 2 個所に設置された加速度計による横方向加速度の計測値から船体重心位置での加速度  $\dot{v}$  を求め, これの時間積分から横流れ速度  $v$  を定めた。ただし, 加速度計による  $\dot{v}$  には船体の横傾斜による重力加速度の船体横方向成分および船体運動による遠心加速度成分が混入しているため, 前者については船内搭載のパーティカル・ジャイロによる横傾斜角の記録より, 後者については前述の旋回角速度の記録を用いて修正した。 $\dot{v}$  の時間積分

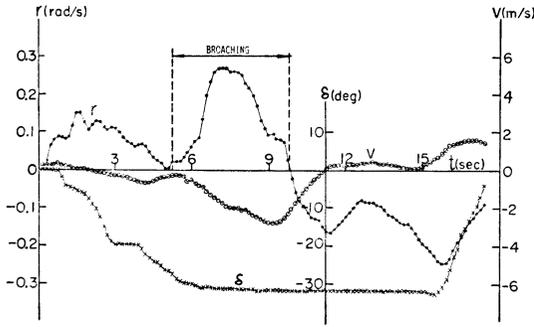
$$v(t) = v(0) + \int_0^t \dot{v}(t) dt \quad (12)$$

において, 時間原点  $t=0$  および初期値  $v(0)$  の決定は次のとおりとした。ブローチング発生前の運動記録より, 舵中央で船がほぼ直進していた時刻を選び出し, この時刻を  $t=0$  とし, その時の舵力 (前述のように舵板直上の舵柱に装備したブロック・ゲージにより計測) から船体横流れ速度を推定, これを  $v(0)$  とした。実船試験時の風速から推定した風による横漂流速度は十分小さいものであったので, これについては考慮に入れない。

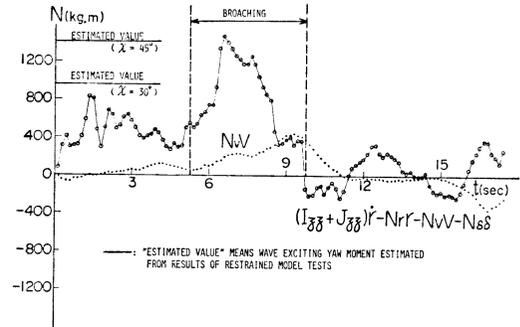
(c) 流体力係数  $m_y, Y_0, Y_r, J_{zz}, N_0, N_r$  等は前述の拘束模型試験等で得られた結果に船速の相違を考慮して推定した値を用いる。

(d) 舵力  $Y_\delta\delta$  および舵力モーメント  $N_\delta\delta$  は直接計測された舵板に作用する横力およびこれに重心・舵柱間の水平距離を乗じたもので代表した。

船体運動の時刻歴および上述のように推定した (11)

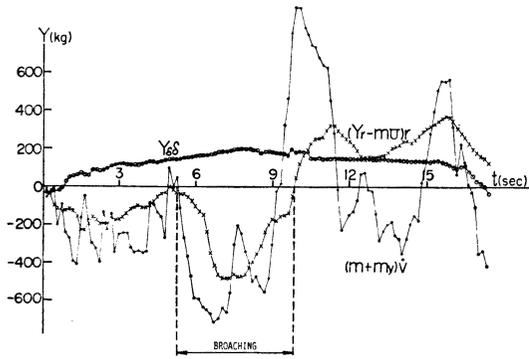


(a) Time histories of ship motions



(e) Time histories of hydrodynamic moments

Fig. 14 Time histories of ship motions and hydrodynamic forces during a “broaching-to” phenomenon (example no. 1)



(b) Time histories of hydrodynamic forces

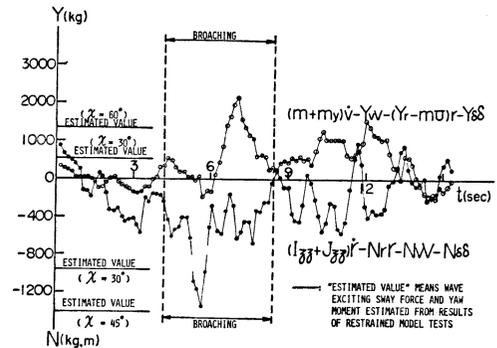
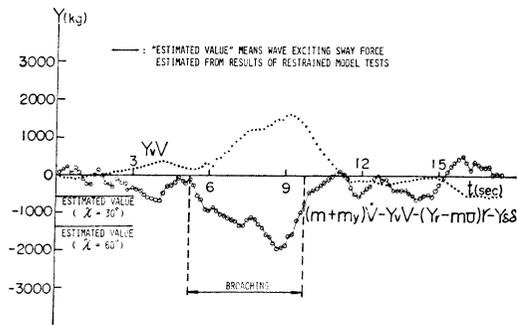
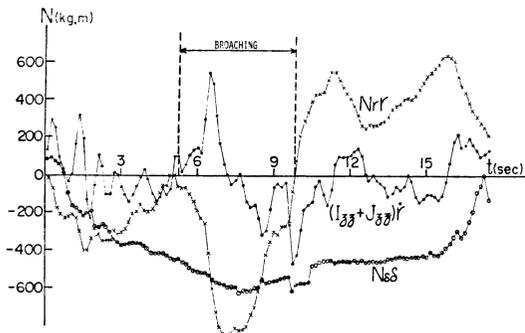


Fig. 15 Hydrodynamic sway force and yaw moment during a “broaching-to” phenomenon (example no. 2)



(c) Time histories of hydrodynamic forces



(d) Time histories of hydrodynamic moments

式右辺の各項を Fig. 14 に示した。この例では波をほぼ真後から受けながら航行中にブローチングが発生し右回頭した。Fig. 15 には、左舷後方 30° より波を受けつつ航行中続けて 4 回ブローチングを起こしたうちで最も顕著なブローチングの例を示すが、(11) 式の右辺によって近似される波浪横力および波浪回頭モーメント  $Y_E$ ,  $N_E$  のみを示す。

#### 4.2 波浪外力の推定値の比較

Fig. 14 の場合、船は左舵をほぼ一杯にとっているにもかかわらず急速に右回頭してブローチングを起こしている。Fig. 14 に示された船体に作用する外力の成分を比較すると、横力では  $Y_v \delta$  の項が主要項であるのに対し、回頭モーメントでは旋回角速度に対する抵抗モーメント  $N_r r$  と舵力モーメント  $N_\delta \delta$  が主要項であることがわかる。Fig. 14 と Fig. 15 の縦軸に記入された推定値は前述のように拘束模型試験結果を基に、実船試験時の海象下で船体に作用したと推定された波浪横力と回頭モーメントである。Fig. 14, 15 いずれの場合も、船体運動記録の解析から推定された横力  $(m + m_y) \dot{v} - Y_v \delta - (Y_r -$

$mU)r - Y_{\delta}\delta$ と回頭モーメント  $(I_{zz} + J_{zz})\dot{r} - N_v v - N_r r - N_{\delta}\delta$ は拘束模型試験結果からの推定値とかなり良い対応を示している。しかし、細かく見ると横力の対応度は回頭モーメントの対応度ほど良くない。これは横力の主要項が  $Y_v v$  であるのに対し、船体の横流れ速度の(12)式による推定精度に不満足な点が残ることによるものと思われる。一方、 $N_v v$ なる項は船体に作用する回頭モーメントの主要項ではないので、 $v$ の推定精度は回頭モーメントの推定にさほど影響しないため回頭モーメントの推定値の一致度は良い。

いずれにしても、実船試験時に観測された急速な回頭運動中——すなわちブローチング現象発生時——に船体に作用して横力および回頭モーメントは、船体が受けていたと推測される波浪横力および波浪回頭モーメントと良く対応することは、前節において船体運動のシミュレーション計算結果から導いた「ブローチング現象の力学的説明」を裏付けるものであると思われる。

## 5 結 言

斜め追波中での船体運動シミュレーション計算を実施することにより、波速に近い速度で波面上を航走する際の船体運動（サージ、スウェイ、ヨー）の特徴を明らかにした。その結果、波の下り斜面において波との出会い角が  $20^\circ$  ないし  $30^\circ$  程度であるとき、船体は波の下り斜面に止まり続けるとともに急速な回頭運動を起こし、短時間のうちに船体を横波状態に陥らせることを明らかにした。このような現象は船体が波浪より受ける回頭モーメントおよび横力により生ずるもので、操舵によって波浪回頭モーメントを相殺できる場合は前述の急速な回頭運動を抑止できるが、舵力モーメントを大幅に越える波浪モーメントを受けるときは操舵にもかかわらず、船体は急速に回頭することになる。この現象がいわゆるブローチングと呼ばれているものであると思われる。従来、ブローチング現象の発生原因として挙げられていた諸原因の妥当性については、いずれも第一義的発生原因とはいいがたいとしたが、前述の発生メカニズムから考えると、波面上での舵効きの減少はブローチング現象発生の直接原因といえないまでも、舵力が波浪回頭モーメントを打消することができるか否かはブローチング発生を左右する重要な因子の一つであるといえよう。ブローチング現象が波浪外力により生ずるものであることから、波長船長比・波との出会い角・船速と波速の関係などがブローチング現象発生の決定要因であることのほかに、波の粗度が絶対的に大きいこともブローチング発生の重要な要因である。

本論文で検討しなかったが、ブローチング現象をさらに十分理解するうえで重要な事項として

- (a) 船型とブローチング現象発生頻度との関連
- (b) トリム、重心高さ等の船体条件とブローチング現象発生の流体力学的関連性
- (c) ブローチング中の横傾斜の発達および横傾斜と回頭運動の関連

などを検討する必要がある。これらについても引続き研究調査を続けてゆく計画である。成果が得られ次第報告しご批判をあおぐ所存である。

本研究は日本小型船舶検査機構における研究委員会の活動の一環として実施されたもので、本論文で述べたブローチング現象発生機構に関しても同委員会の委員諸氏に種々ご検討ご批判をいただきながら構想をまとめていったものである。また実船試験も菅井和夫部長ほかの船舶技術研究所、前田久明教授ほかの東京大学生産技術研究所、水産工学研究所 山越康行氏、堀内浩太郎氏ほかのヤマハ発動機(株)等の多くの委員の協同作業として実施されたものである。本論文に引用することを快く承諾された日本小型船舶検査機構および前述の委員諸氏に厚くお礼申し上げる。また拘束模型供験および船体運動シミュレーション計算等は昭和53年度からの3カ年間の卒業研究の一環として実施された。この間関係された竹田俊志、金井康雄、古川忠文の3氏に深甚なる謝意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) DuCane, P. and Goodrich, G. J.: The Following Sea, Broaching and Surfing, Trans. R. I. N. A., Vol. 104, No. 2 (1962).
- 2) Conolley, J. E.: Stability and Control in Waves: A Survey of the Problem, Jour. Mechanical Engineering Science, Vol. 14, No. 7, Supplementary Issue (1972).
- 3) Renilson, M. R. and Driscoll, A.: Broaching—An Investigation into the Loss of Directional Control in Severe Following Seas, read at the Spring Meeting of R. I. N. A., (1981).
- 4) Wahab, R. and Swaan, W. A.: Course Keeping and Broaching of Ships in Following Sea, Jour. Ship Research, Vol. 7, No. 4 (1964).
- 5) 浜本剛実: 追波を受ける船の針路安定性とその流体力学係数(第1報, 第2報), 日本造船学会論文集, 第130, 133号(1971, 1973).
- 6) 日本小型船舶検査機構: 小型船舶のブローチングに関する調査研究報告書(1981).
- 7) 元良誠三: 船体運動に対する附加質量および附加慣性モーメントについて, 日本造船学会論文集, 第105~107号(1959, 1960).
- 8) 日本小型船舶検査機構: 小型船舶のブローチングに関する調査研究報告書(1979).
- 9) 不破 健, 他: 小型船のブローチングに関する実験的研究, 昭和56年度日本造船学会秋季講演会にて講演予定(1981).
- 10) Grim, O.: Das Schiff in von achtern auflaufender See, Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, Vol. 45 (1951).
- 11) 日本小型船舶検査機構: 小型船舶のブローチングに関する調査研究報告書(1980).