

# 追波中の船の大振幅前後揺れと波乗り現象

(その2 シミュレーションによる検討)

正員 菅 信\* 正員 猿田俊彦\*  
安野三樹雄\*

Surging of Large Amplitude and Surf-riding of Ships in Following Seas  
(Part 2 Numerical Simulation)

by Makoto Kan, *Member* Toshihiko Saruta, *Member*  
Mikio Yasuno

## Summary

In the previous papers<sup>5),6)</sup>, the authors examined the surf-riding phenomenon of a ship in the regular following waves by the self-running model tests and reported that the surf-riding phenomenon seemed to occur at the moment when the ship speed including the oscillating component due to the surging motion reached the phase velocity of the wave. They also tried to explain the occurrence of the surf-riding by analysing the equation of surging motion, and showed that once the ship speed reached the phase velocity of the wave, then the ship was caught in a state of the statical equilibrium of the longitudinal force, and therefore after that the ship speed could not change from the wave speed. The above explanation, however, was not very clear, because the equation of surging motion was characterized by the non-linear term of the exciting force and its analytical solution could not be obtained, and it was pointed out by the discussor that the confirmation by the numerical simulation should be done about the critical condition for the occurrence of the surf-riding.

In the present paper, the authors derive the expedient expression of the non-linear equation of surging motion and carry out the calculation of the numerical simulation. As the result the above critical condition for the occurrence of the surf-riding proves to be correct and the unsymmetrical periodic surging motion with a large amplitude, the behavior of the occurrence of the surf-riding, and the stable or unstable behavior of the surf-riding can be simulated. As regards the unsymmetrical surging velocity, some examples of the model tests are presented to show the qualitative agreement with the simulation. It is also clarified that in some small range of the ship speed close to the critical speed for surf-riding, the occurrence of the surf-riding or the periodic surging motion depends on the initial condition about the ship position and the surging velocity of the ship.

Since the critical condition itself proves to be correct, the simple method proposed previously to estimate the critical wave height and critical ship speed need not be corrected as a guideline to avoid the dangerous surf-riding.

## 1. 緒 言

追波中の船の波乗りは、いわゆるブローチング現象と深い係わりがありその発生のための必要条件の一つと考えられている<sup>1)~4)</sup>。筆者らは<sup>5),6)</sup>、この波乗り現象発生のメカニズムを模型実験により調べ、前後揺れによる速度変動を含む船の速度が波の位相速度に等しくなったときに波乗り状

態になるらしいことを示した。また前後揺れ運動方程式の解析的な検討により、過渡状態を過ぎて定常状態になっている船の速度が波の位相速度に等しくなるようなときには前後方向の力の釣合条件が静的に満たされるようになること、そして一旦この状態になるとその後はこの静的な釣合状態から変化できなくなることをもって波乗りの発生を説明できるとした。しかしその説明は、前後揺れ運動方程式が非線形であることから明確さに欠けるところがあり、また波乗りの安定、不安定について何も示していないことな

\* 船舶技術研究所

どからシミュレーション等による確認の必要のあることが、文献<sup>5)</sup>の討論で梅田により指摘されていた。

今回、あらためて前後揺れ運動方程式を作りなおしてシミュレーション計算を行なったところ、大振幅の非対称前後揺れや波乗りの発生の様子、波乗りの安定、不安定の挙動などをシミュレートすることができた。また波乗り発生の限界速度付近のある狭い速度範囲では初期条件により波乗りが発生したりしなかったりする場合のあること等の新しい事実が判った。しかし前回示した波乗り発生の限界条件そのものは基本的には正しいことが確認され、従って安全運航指針として示した波乗り発生の限界波高や限界船速の簡易推定法については特に訂正する必要のないことが明らかになった。

## 2. 前後揺れ強制力の表示式

ここでは追波中の前後揺れや波乗りを考えるのに適した強制力の表示式を導くが、本文の目的は主として波乗りの発生やその安定性をできるだけ単純な形で示すことにあるので、強制力には波の散乱等は無視したフルード・クリロフの仮定を用い、船のトリムや沈下等前後揺れ以外の運動は無視し、更に船型は前後対称を仮定する。

空間固定座標系を  $o-xyz$  とし、 $x$  軸の正方向に進む波の波面  $\zeta$  を次のように表す。

$$\zeta = -\zeta_a \cos(kx - \omega t) \quad (1)$$

ここに  $\zeta_a$  は波の振幅、 $k$  は波数 ( $=2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  は波長)、 $\omega$  は波の円周波数である。 $x$  軸の正方向に速度  $V$  (あるプロペラ回転数に対応する船の平水中速度) で移動する座標系を  $o'-\xi\eta\zeta$  とし、この座標系は  $t=0$  で空間固定座標系  $o-xyz$  と一致しているものとする。船体固定座標系を  $O-XYZ$  とし、動座標系  $o'-\xi\eta\zeta$  から見た  $\xi$  軸方向の船の変位すなわち前後揺れの変位  $o'O$  を、 $t=0$  で  $\xi_0$  (初期変位)、 $t=t$  で  $\xi$  とする。Fig.1 参照。

$x, X, \xi$  の間には

$$x = Vt + \xi + X \quad (2)$$

の関係があるから、船体固定座標で表した波の波面は(2)

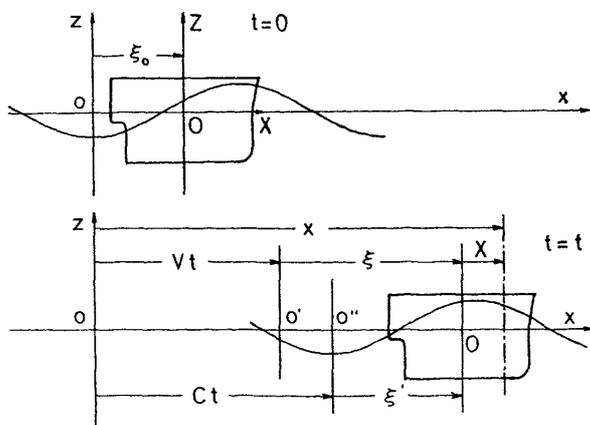


Fig. 1 Coordinate system

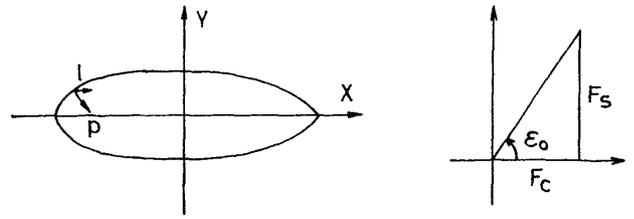


Fig. 2 Inward normal and phase angle of exciting force

式を(1)式に代入して

$$\zeta = -\zeta_a \cos(kX - \omega_0 t + k\xi) \quad (3)$$

となる。ただし波の位相速度を  $C$  として

$$\omega_0 = \omega(1 - V/C) \quad (4)$$

である。 $\omega_0$  は速度  $V$  で  $x$  軸の正方向に移動する座標系と波との出会い円周波数であって、船と波との出会い円周波数ではない。

波面が(3)式で表される時、フルード・クリロフの仮定に基づく船体表面の圧力  $p$  は

$$p = -\rho g \zeta_a \cdot \exp(-kZ) \cdot \cos(kX - \omega_0 t + k\xi) \quad (5)$$

であり、船体表面の内法線方向余弦を  $(l, m, n)$  とすると  $X$  軸の正方向に働く波強制力  $F$  は

$$F = \int p l dS = F_a \cos(\omega_0 t - k\xi - \epsilon_0) \quad (6)$$

ただし

$$F_a = (F_c^2 + F_s^2)^{1/2} \quad (7)$$

$$\epsilon_0 = \tan^{-1}(F_s/F_c) \quad (8)$$

$$F_c = -\rho g \zeta_a \int \exp(-kZ) \cdot \cos kX \cdot l dS \quad (9)$$

$$F_s = -\rho g \zeta_a \int \exp(-kZ) \cdot \sin kX \cdot l dS \quad (10)$$

である。Fig.2 参照。

いま  $L_{pp}$  を船の垂線間長さとし、 $\lambda > L_{pp}$  程度の波を考えると(10)式から、 $F_s > 0$  だから位相角  $\epsilon_0$  は  $0 \leq \epsilon_0 \leq \pi$  の範囲で取ることになる。また前後対称船では(9)式から  $F_c = 0$  だから  $\epsilon_0 = \pi/2$ 、従って(6)式から

$$F = F_a \sin(\omega_0 t - k\xi) \quad (11)$$

と表せる。

(11)式の表示は追波中の前後揺れがまだ波乗りに移行しない場合には差し支えないが、波乗りが発生するような場合には動座標系  $o'-\xi\eta\zeta$  から見た船の位置  $\xi$  が時間とともに  $(C-V)t$  で速さかかってしまうため不都合な表示となる場合がある。そこで  $\xi$  のかわりに、波速  $C$  で  $x$  軸の正方向に移動する座標系  $o''-\xi'\eta'\zeta'$  を導入すると

$$\xi = \xi' + (C-V)t \quad (12)$$

であるからこの関係を(11)式に代入して

$$F = -F_a \sin k\xi' \quad (13)$$

の表示が得られる。以下(11)式と(13)式の表示を適当に使い分ける場合がある。

なお、船の平均速度  $V_m$  で移動する座標系を導入すると

波乗り前の前後揺れ運動の変位の非対称性を観察するのに便利であるが、繁雑になるので本文では省略する。

### 3. 波乗りの安定性

波乗り状態を考える場合は、前後揺れ強制力の表示式としては(13)式を使う。これを船と波の相対位置との関係で図示すると Fig.3 のようになる。 $-\lambda/2 \leq \xi' \leq 0$  で  $F \geq 0$ ,  $0 \leq \xi' \leq \lambda/2$  で  $F \leq 0$  である。 $\xi'$  は波の谷からの船の変位を表しているから、船体中央部が波の下り斜面にあるときは船は波から推力を受け、上り斜面にあるときは抵抗を受ける。

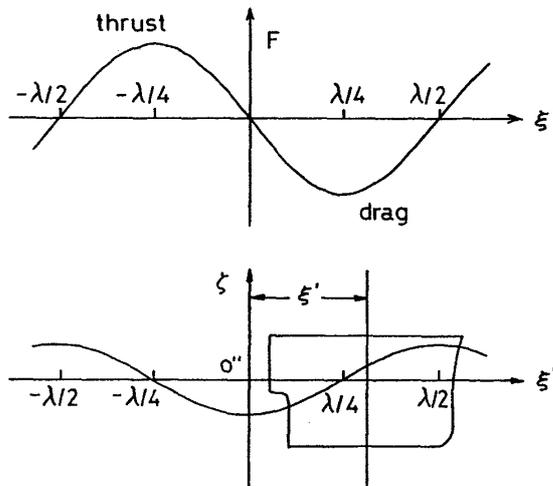


Fig. 3 Exciting force in surf-riding condition

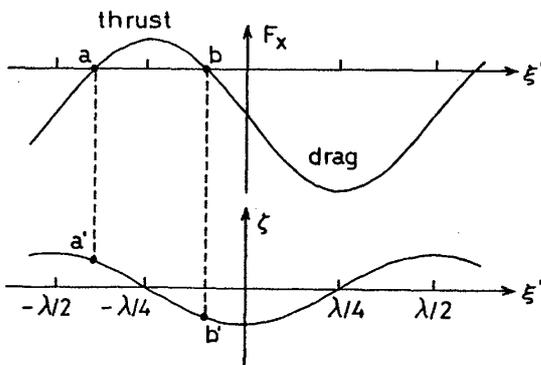


Fig. 4 Surf-riding from lower speed than wave speed

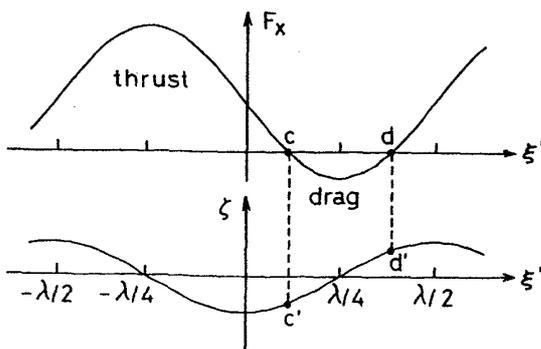


Fig. 5 Surf-riding from higher speed than wave speed

推力減少係数を  $1-\tau$ , プロペラによる推力を  $T \cdot (1-\tau)$ , 抵抗を  $R$ , 波強制力を  $F$  で表すと船に働く力の合計  $F_x$  は  $X$  軸の正方向に働く力を正として

$$F_x = T \cdot (1-\tau) - R + F \quad (14)$$

である。

波速  $C$  より低い平水中船速  $V$  に対応するプロペラ回転数を保った状態で発生する波乗りを考えると、 $F_x$  と  $\xi'$  の関係は Fig.4 のようになり、 $F_x=0$  になる 2 点  $a$  と  $b$ , 即ち波の下り斜面の 2 点  $a'$  と  $b'$  で力の平衡条件を満たすことになる。しかし波の斜面上側の点  $a'$  は不安定な平衡点であり、下側の点  $b'$  が安定な平衡点である。理由は  $a'$  では船の変位を増す方向の力が働くのに対し  $b'$  ではそれを抑制する方向の力が働くからである。

一方、波速より高い平水中船速に対応するプロペラ回転数を保った状態で発生する波乗りを考えると、 $F_x$  と  $\xi'$  の関係は Fig.5 のようになり、 $F_x=0$  になる 2 点  $c$  と  $d$  即ち波の上り斜面の 2 点  $c'$  と  $d'$  で力の平衡条件を満たすことになるが、前と同様の理由により上側の点  $d'$  は不安定な平衡点であり、下側の点  $c'$  が安定な平衡点である。なお、波の上り斜面で波に捕捉されて平水中船速より遅い速度で走り続ける状態に対して波乗りという用語を用いることは適切ではないかもしれないが、本文では船が規則追波の中を波の位相速度と等しい速度で安定して走り続ける状態に対してはすべて波乗りという用語を用いるものとする。

両方をまとめると、安定平衡点の範囲は  $-\lambda/4 \leq \xi' \leq \lambda/4$  となり、波乗りは波の谷を中心にした前後  $\lambda/4$  づつの範囲内に船体中央部を置いた状態で発生することが判る。波速より低速からの波乗りの限界に対応する  $\xi' = -\lambda/4$  は安定平衡点と不安定平衡点が一致したところであって、前進方向への変位に対しては安定であるが、後進方向への変位に対しては不安定である。もう一方の波速より高速からの波乗りの限界に対応する  $\xi' = \lambda/4$  での安定、不安定は上と逆になる。平水中船速が始めから波速に等しい場合は、波による強制力を受けない点での波乗りとなるが、このときは波の谷が安定平衡点であり、波の山は不安定平衡点である。船体中央部を波の山に置いた復原性の悪い状態での波乗りは起こらないことが判る。

以上は前後対称船型の場合であって一般の船型の場合には平衡点等は多少ずれてくるし波長によっても変化する。また短波長の波の場合には、あてはまらない場合が生じるであろう。

### 4. 前後揺れの運動方程式

追波中の船の前後揺れを表す運動方程式を次のように書く。

$$M \cdot dv/dt = T \cdot (1-\tau) - R + F \quad (15)$$

ここに  $M$  は  $X$  軸方向の付加質量を含む船の質量、 $v$  は前後揺れによる変動分を含む時々刻々の船の速度、 $F$  は

(11)式または(13)式で表される波強制力である。

シミュレーション計算の場合に、運動方程式の各項を線形化する必要はない筈であるが、シミュレーション結果の物理的な解釈をより容易にするため、(15)式の右辺の強制力以外の項を次のように線形化する。即ち、

$$T = T_0 + T_1 v, \quad R = R_0 + R_1 v \quad (16)$$

とおく。ここで、 $T_0 = T(v_0) - dT(v_0)/dv \cdot v_0$ ,  $R_0 = R(v_0) - dR(v_0)/dv \cdot v_0$ ,  $T_1 = dT(v_0)/dv$ ,  $R_1 = dR(v_0)/dv$  である。なお、 $dT(v_0)/dv$  はプロペラ回転数を一定に保って速度だけを変えた場合の微分である。 $v_0$  は考えているプロペラ回転数での平水中速度、あるいは波乗りを考えるのであれば波速とかを取ればよいであろう。

(11)式、(16)式を(15)式に代入すると

$$dv/dt + Av = B + E \sin(\omega_0 t - k\xi) \quad (17)$$

となる。ここに

$$\left. \begin{aligned} A &= \{R_1 - T_1 \cdot (1 - \tau)\} / M > 0 \\ B &= \{T_0 \cdot (1 - \tau) - R_0\} / M > 0 \\ E &= F_a / M > 0 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

である。

曳航水槽での実験のような場合を考え、曳航台車が定速  $V$  (ある決められたプロペラ回転数に対応する平水中船速) に達した後に、クランプを外して模型船を自航させるものとする。

$$v = V + \xi \quad (19)$$

と表せる。但し  $\dot{\xi} = d\xi/dt$  である。

$V$  は(17)式で波を考えない時の定常解から

$$V = B/A \quad (20)$$

であり、(17)式は  $\dot{\xi}$  について

$$d\dot{\xi}/dt + A\dot{\xi} = E \sin(\omega_0 t - k\xi) \quad (21)$$

となる。これがシミュレーションで解くべき方程式である。

或いは  $\xi$  のかわりに  $\xi'$  で表せば

$$d\xi'/dt + A\xi' = -E \sin k\xi' - A \cdot (C - V) \quad (22)$$

とも書ける。どちらの方程式を解いても同じであるが、結果を図示するときには波乗りかそうでないかによって  $\xi$  と  $\xi'$  を使い分けた方が見やすくなる。

なお、角水槽での実験のように、曳航台車がなく模型船のプロペラ自身で加速して自航するような場合には、 $V$  は始めからは定速ではなくて加速過程が含まれてくるから

$$dV/dt + AV = B \quad (23)$$

を(21)式と同時に連立させて解く必要がある。

## 5. シミュレーションの実施例

シミュレーションは(21)式を  $t=0$  での初期条件  $\xi_0 (-\lambda/2 \leq \xi_0 \leq \lambda/2)$  と  $\dot{\xi}_0$  (任意の値) を与えて  $\Delta t = 0.01$  sec のきざみで通常の Runge-Kutta 法により  $\xi$  について解き、 $\xi$  は  $\dot{\xi}$  を積分して求めた。各項の係数は、前回波乗り実験を行なった底曳網漁船の 1/12 模型 ( $L_{pp} = 2.548$  m,  $\Delta = 266$  kg) を対象船として推定した。ただし(21)式を使う

ことは前後対称船の仮定を残したままということになる。

想定した波は  $\lambda/L_{pp} = 1.5$  ( $\lambda = 3.822$  m),  $h/\lambda = 1/20$  で波速  $C$  は波高分散による増加分を無視した値  $(g\lambda/2\pi)^{1/2} = 2.442$  m/s とした。強制力はフルード・クリロフの力だけとし、船の付加質量も無視した。その結果  $E = 0.706$  m/s<sup>2</sup> となった。係数  $A$  については、抵抗・自航試験結果がなかったため、プロペラ (SR 108 コンテナ船の 4.5 m 模型用を流用) の単独試験結果と、平水中速度試験の結果 (プロペラ回転数と船速の関係)、類似船 (漁業練習船) からの推定値  $1 - \tau = 0.73$ ,  $1 - w = 0.70$  等を使って推定したところ  $A = 0.156 V^2$  ( $V$  の単位は m/s) で大略表せることが判った。ここでは波乗り付近の様子を調べるので  $V = C = 2.442$  m/s での値  $A = 0.93$  (1/s) を速度によらず一定として使った。 $A$  は速度によってかなり広範囲に変化するので、これをシミュレーションの際に考慮すべきであるが波乗りの限界船速や波乗りの平衡点を容易に求められることを考えて一定とした。

波乗りが発生している場合は(22)式の方の運動方程式で  $d\xi'/dt = \dot{\xi}' = 0$  と置いて次の関係が成り立っている。

$$V - (E/A) \sin k\xi' = C \quad (24)$$

左辺第2項が波乗りによって平水中速度  $V$  から増加する速度を表している。その最大値は  $\xi' = -\lambda/4$  の時で  $E/A = 0.759$  m/s である。従って、波速より低速側から発生する波乗り限界の平水中速度  $V_{lcr}$  は

$$V_{lcr} = C - E/A \quad (25)$$

となり、今の場合は  $V_{lcr} = 2.442 - 0.759 = 1.683$  m/s である。波速より高速側から発生する波乗り限界の平水中速度  $V_{ucr}$  は  $\xi' = \lambda/4$  の時で

$$V_{ucr} = C + E/A \quad (26)$$

となり、今の場合は  $V_{ucr} = 2.442 + 0.759 = 3.201$  m/s である。

波乗りは  $V_{lcr} \leq V \leq V_{ucr}$  の範囲の平水中速度で発生することになる。しかし波速より高速側からの波乗りについては、低速側からの波乗りからの類推ができることと、実際的な問題としては、高速船が追波中で波に捕捉されて速度が出ないなどの問題は考えられるが、現在のところそれほど重要ではないと思われるので、以下では波速より低速側での前後揺れと低速側からの波乗りについて限界速度  $V_{lcr}$  を境にしていくつかの平水中速度について行なったシミュレーション結果の例を示す。

シミュレーション結果を示した図中の  $\omega_e$  は次式で定義される値で、船と波との実際の出会い円周波数と見なせるものである。

$$\omega_e = \omega \cdot (1 - v/C) = \omega \cdot \{1 - (V + \dot{\xi})/C\} \quad (27)$$

### 5.1 $V < V_{lcr}$

低速側限界速度  $V_{lcr}$  (=1.683 m/s) 未満の平水中船速  $V$  では、初期条件の如何によらず波乗りが発生しないことは明らかである。 $V = 1.4$  m/s の場合の例を Fig.6 に示す。 $\xi/\lambda$

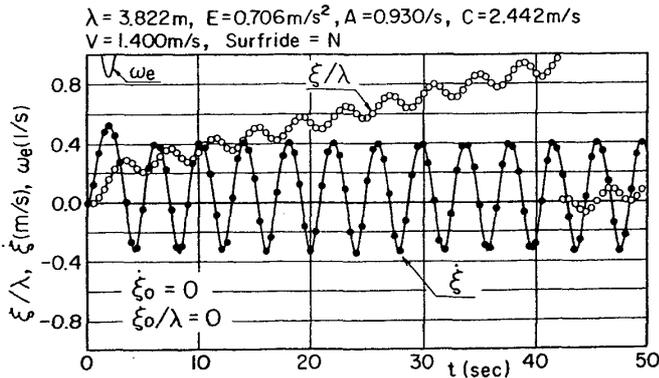


Fig. 6 Periodic surging at lower speed than critical speed

( $V=1.4$  m/s,  $\xi_0=0$ ,  $\xi_0/\lambda=0$ )

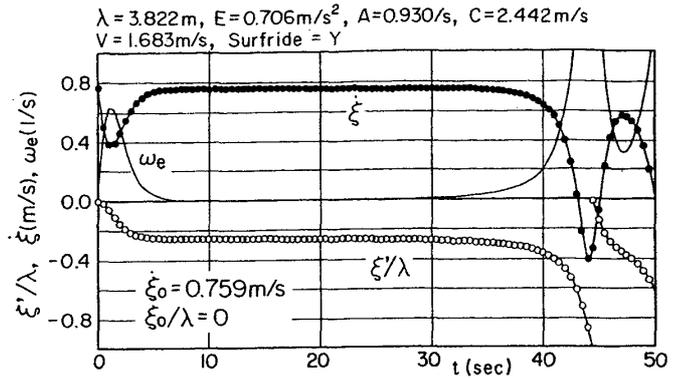


Fig. 9 Periodic surging after nearly surf-riding

( $V=1.683$  m/s,  $\xi_0=0.759$  m/s,  $\xi_0/\lambda=0$ )

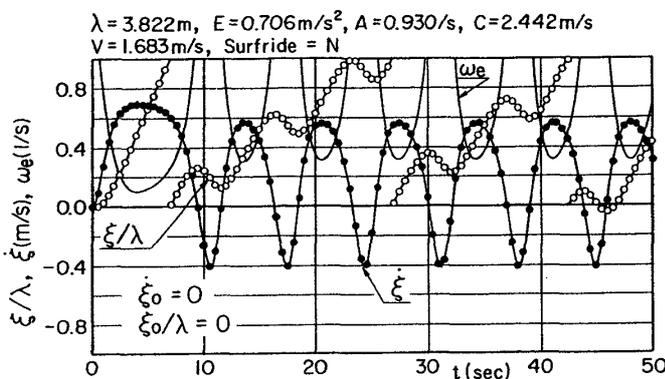
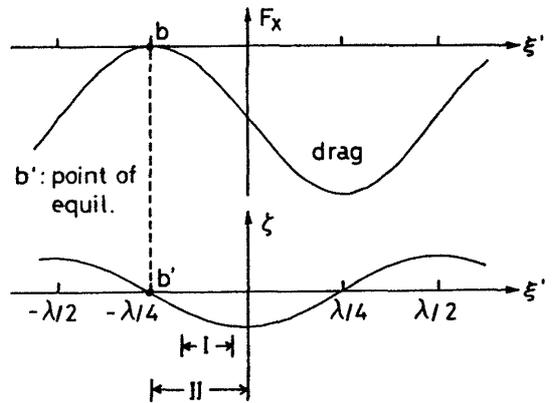


Fig. 7 Periodic surging at critical speed

( $V=1.683$  m/s,  $\xi_0=0$ ,  $\xi_0/\lambda=0$ )



I : range of  $\xi_0/\lambda$  to surf-ride ( $\xi_0=0.5$  m/s)

II : range of  $\xi_0/\lambda$  to surf-ride ( $\xi_0=0.759$  m/s)

Fig. 10 Range of initial condition for surf-riding

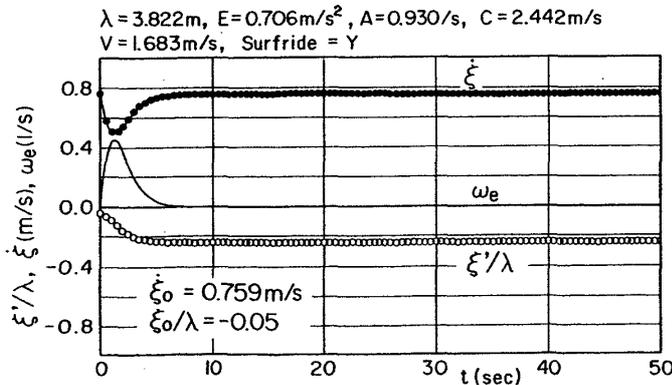


Fig. 8 Surf-riding at critical speed

( $V=1.683$  m/s,  $\xi_0=0.759$  m/s,  $\xi_0/\lambda=-0.05$ )

の曲線にドリフトが出ているが、これは前後揺れの非対称性から追波中の平均船速が同一プロペラ回転数での平水中船速より高くなっていることによる。しかし係数  $A$  を速度によって変化するものとしてシミュレーションした結果では、この付近の速度では前後揺れの非対称性が逆に出ており、どちらの傾向が正しいのかは検討の余地がある。なお Fig.6 等で  $\xi/\lambda$  または  $\xi'/\lambda$  の曲線がドリフトによりスケールアウトした場合は、0 ベースを 1 波長分づつずらして画いてある。

### 5.2 $V = V_{cr}$

平水中船速が低速側限界速度に等しい場合は、初期条件により波乗りが発生したりしなかったりする。

#### 5.2.1 $\xi_0=0$ の場合

これは平水中船速  $V$  で走る曳航台車から模型船のクランプを外すような場合に相当するが、シミュレーション結果によればこの場合にはもうひとつの初期条件  $\xi_0/\lambda$  の如何によらず波乗りにはならない。すなわち船と波との相対位置をどこにもってきてクランプを外しても波乗りにはならない。 $\xi_0/\lambda=0$  (波の谷) の場合の例を Fig.7 に示す。前後揺れ速度の非対称性が特徴的であり、ドリフトも大きく出ている。

#### 5.2.2 $\xi_0=0.759$ m/s の場合

これは波速  $C$  で走る曳航台車から模型船のクランプを外すような場合に相当するが、シミュレーション結果によればこの場合にはもうひとつの初期条件  $\xi_0/\lambda$  が  $-0.25 \leq \xi_0/\lambda < 0$  の範囲では波乗りとなるが、その他の範囲では波乗りとはならない。すなわち船が波の下り斜面のうち波の谷から  $1/4$  波長の範囲にあるときにクランプを外せば波乗りとなるがそれ以外の場所にあるときにクランプを外しても

波乗りとはならない。Fig.8に波乗りになる場合の例( $\xi_0/\lambda = -0.05$ )を、Fig.9にはほとんど波乗りになりかけたが結局ならなかった場合の例( $\xi_0/\lambda = 0$ )を示す。なお、図の上部のコメントでSurfride=Nとあるのは、船の変位を平水中船速  $V$  で移動する座標系について表した  $\xi/\lambda$  で図示したことを示し、Surfride=Yとあるのは波速  $C$  で移動する座標系について表した  $\xi'/\lambda$  で図示したことを示して区別してある。低速側限界船速  $V_{lcr}$  に等しい平水中船速の場合の波乗りの安定釣合点は、先にみたように  $\xi'/\lambda = -0.25$  であり、また平水中船速からの船速増加は  $\xi = 0.759$  m/s であるが、Fig.8の結果は確かにそのようになっている。

5.2.3  $\xi_0 = 0.5$  m/s の場合

$\xi_0$  が 0 と 0.759 m/s の間の場合、波乗りとなる  $\xi_0/\lambda$  の範囲が 0.759 m/s の場合より狭くなり  $-0.17 \leq \xi_0/\lambda \leq -0.04$  程度となる。

Fig.10は以上のことを模式的に示したものである。

以上みたようにこの限界速度では初期条件によっては波乗りにならないことも多いが、波乗りになる場合もあり、この速度未満では波乗りには絶対にならないことを考えれば、この速度を波乗り限界速度と呼んでも差し支えないと思われる。前回<sup>5)</sup>示した波乗り発生の限界条件、すなわち過渡状態を過ぎて定常状態になっている船の速度が前後揺れによる変動分を含めて波速に等しくなることという条件は基本的には正しいものと判断される。従ってこの限界条件

をもとに安全運航指針として導いた波乗り発生の限界波高の簡易推定式  $h/\lambda = 1/(\pi\gamma)$  ( $\gamma$  は前後揺れの振幅応答函数)と限界船速の簡易推定式  $V = C\{1 - (|F|/Mg)^{1/2}\}$  は訂正する必要はないと考えてよいであろう。

5.3  $V_{lcr} < V < V_l$

平水中船速  $V$  が低速側限界速度  $V_{lcr}$  に等しい場合は上で見たように、波乗りの発生が初期条件に左右されるが、同様に初期条件によって波乗りの発生が左右される速度範囲が比較的狭い範囲であるが存在するようである。この速度範囲を  $V_{lcr} < V < V_l$  と表すと  $V_l$  は今の場合 1.755 m/s  $< V_l < 1.760$  m/s の間にいることがシミュレーション結果から判っているが、この限界がどのようにして決められるのかは不明である。ここでは  $V = 1.75$  m/s の場合の例を示す。

5.3.1  $\xi_0 = 0$  の場合

$V = V_{lcr}$  の場合には波乗りは発生しなかったが、今度は  $-0.14 \leq \xi_0/\lambda \leq 0.30$  程度の範囲で波乗りが発生するようになる。 $\xi_0/\lambda = 0.3$  の限界付近の様子を Fig.11( $\xi_0/\lambda = 0.30$ , 波乗り)と Fig.12( $\xi_0/\lambda = 0.31$ , 周期運動)に示す。周期運動の場合の前後揺れ速度の非対称性が一層顕著になっていることが判る。

5.3.2  $\xi_0 = 0.692$  m/s の場合

この場合は波速で走る台車からクランプを外す場合に相

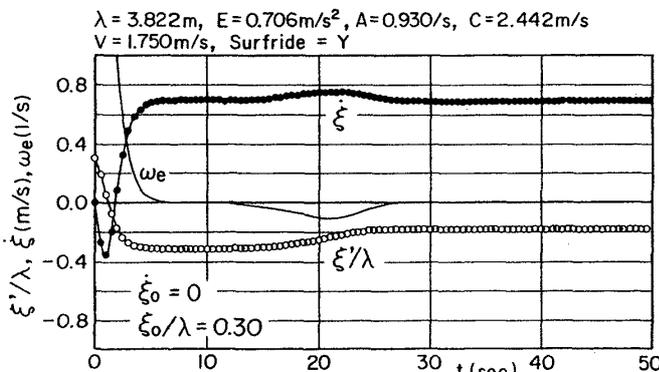


Fig. 11 Surf-riding ( $V = 1.75$  m/s,  $\xi_0 = 0$ ,  $\xi_0/\lambda = 0.30$ )

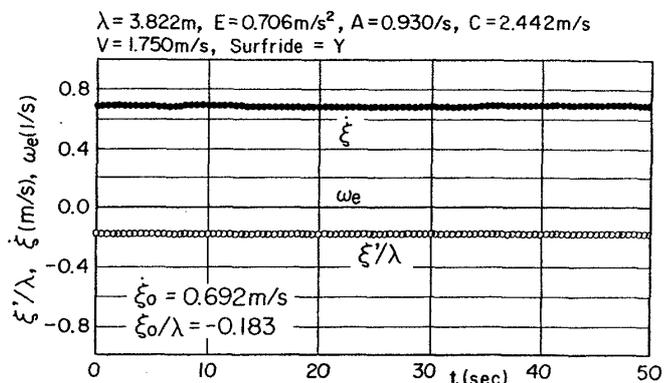


Fig. 13 Surf-riding from stable point of equilibrium ( $V = 1.75$  m/s,  $\xi_0 = 0.692$  m/s,  $\xi_0/\lambda = -0.183$ )

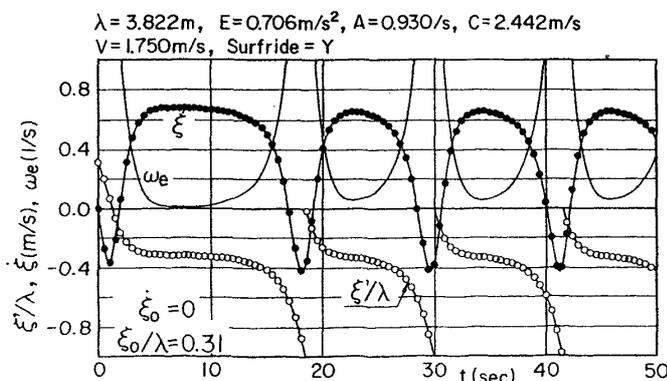


Fig. 12 Periodic surging ( $V = 1.75$  m/s,  $\xi_0 = 0$ ,  $\xi_0/\lambda = 0.31$ )

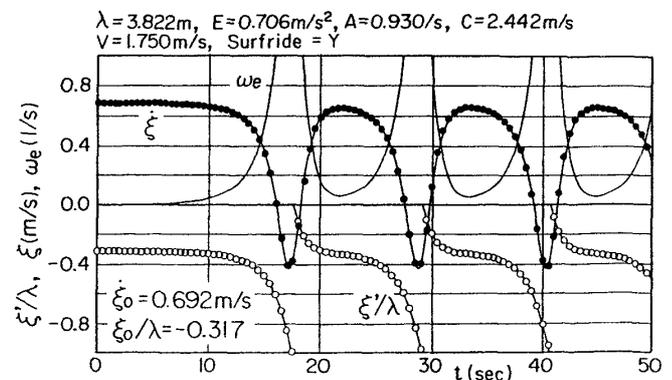


Fig. 14 Periodic surging from unstable point of equilibrium ( $V = 1.75$  m/s,  $\xi_0 = 0.692$  m/s,  $\xi_0/\lambda = -0.317$ )

当するが、波乗り発生の初期条件範囲が  $-0.31 \leq \xi_0/\lambda \leq 0.38$  程度に広がる。波乗りの平衡点は(24)式から  $\xi'/\lambda = -0.183$  (安定平衡点) 及び  $\xi'/\lambda = -0.317$  (不安定平衡点) である。平衡点を初期条件にした場合の例を Fig.13, Fig.14 に示す。安定平衡点の場合はずっと変化がなく (Fig.13), 不安定平衡点の場合には始めの数秒間は波乗り状態であるが、す

ぐに釣合いが破れて長周期大振幅の周期的前後揺れ運動に移ってゆく (Fig.14)。

Fig.15 に波乗り発生範囲等を模式的に示す。

5.4  $V_i < V < C$

$V_i$  がどのようにして決まるのか不明であるが、この限界の速度  $V_i$  より速い平水中速度では初期条件によらず波乗りが発生するようである。

ここでは  $V=1.905$  m/s の場合の例を示す。

5.4.1  $\xi_0=0$  の場合

この場合には  $\xi_0/\lambda$  の如何にかかわらず波乗りとなる。 $-0.50 \leq \xi_0/\lambda \leq -0.28$  程度では後退して後ろの波の安定平衡点で安定し、 $-0.27 \leq \xi_0/\lambda \leq -0.125$  程度では前進して、また  $-0.125 \leq \xi_0/\lambda \leq 0.50$  程度では後退してその波の安定平衡点で安定する。その例を Fig.16 ( $\xi_0/\lambda = -0.28$ , 後退して波乗り) と Fig.17 ( $\xi_0/\lambda = -0.27$ , 前進して波乗り) に示す。

5.4.2  $\xi_0=0.537$  m/s の場合

これは波速で走る台車からクランプを外す場合に相当する。この場合も  $\xi_0/\lambda$  の如何にかかわらず波乗りとなるが、前進して波乗りとなる範囲が少し広がり  $-0.375 < \xi_0/\lambda < -0.125$  程度となる。平衡点は  $\xi'/\lambda = -0.125$  (安定平衡点) および  $\xi'/\lambda = -0.375$  (不安定平衡点) であるが、不安定平衡点を初期条件位置とするとしばらく平衡状態が続いたあと後退し、後の波の安定平衡点で波乗りとなる。Fig.18 にその例を示す。

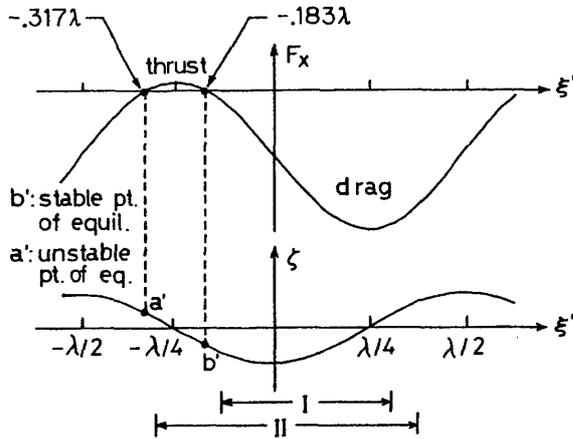
Fig.19 は以上を模式的に示したものである。

5.5  $V=C$

$V_i < V$  の場合と基本的に変らず、初期条件によらずに必ず波乗りとなる。

5.5.1  $\xi_0=0$  の場合

模型船のクランプを外す位置を  $0 < \xi_0/\lambda < 0.5$  の範囲内にとれば後退して谷で安定し、 $-0.5 < \xi_0/\lambda < 0$  の範囲内にとれば前進して谷で安定する。Fig.20 に  $\xi_0/\lambda = 0.495$  の後退して波乗りとなる場合の例を示す。 $\xi_0/\lambda = -0.495$  とすれば Fig.20 と丁度符号が逆になり前進して波乗りとなる場合の結果が得られる。



I : range of  $\xi_0/\lambda$  to surf-ride ( $\xi_0=0$ )  
 II : range of  $\xi_0/\lambda$  to surf-ride ( $\xi_0=0.692$  m/s)

Fig. 15 Range of initial condition for surf-riding ( $V=1.75$  m/s)

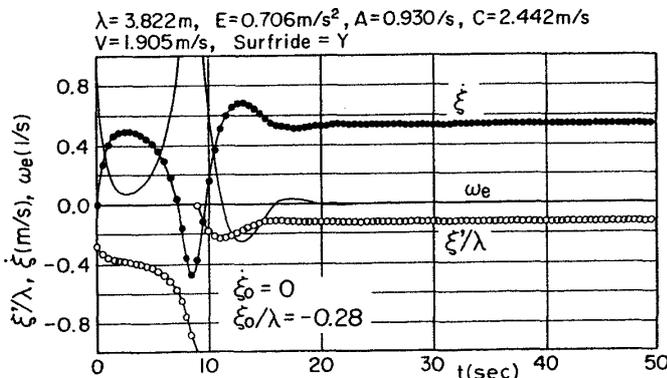


Fig. 16 Surf-riding after going astern ( $V=1.905$  m/s,  $\xi_0=0$ ,  $\xi_0/\lambda=-0.28$ )

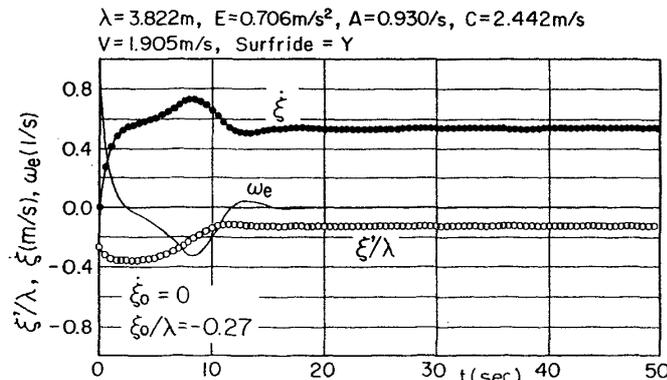


Fig. 17 Surf-riding after going ahead ( $V=1.905$  m/s,  $\xi_0=0$ ,  $\xi_0/\lambda=-0.27$ )

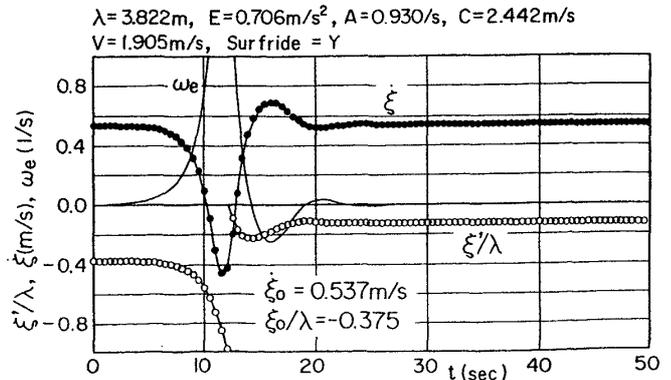
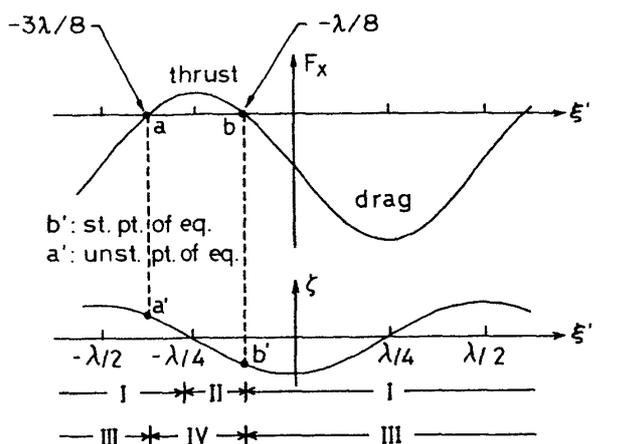


Fig. 18 Surf-riding from unstable point of equilibrium ( $V=1.905$  m/s,  $\xi_0=0.537$  m/s,  $\xi_0/\lambda=-0.375$ )



- I : going astern and surf-riding ( $\dot{\xi}_0=0$ )
- II : going ahead and surf-riding ( $\dot{\xi}_0=0$ )
- III : going astern and surf-riding ( $\dot{\xi}_0=0.537\text{m/s}$ )
- IV : going ahead and surf-riding ( $\dot{\xi}_0=0.537\text{m/s}$ )

Fig. 19 Direction of motion before surf-riding ( $V=1.905\text{ m/s}$ )

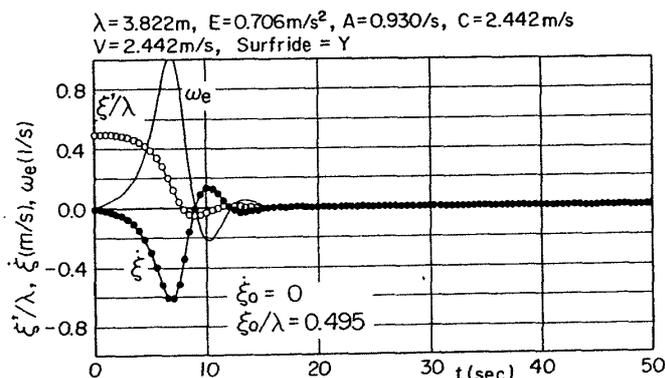


Fig. 20 Surf-riding after going astern ( $V=2.442\text{ m/s}, \dot{\xi}_0=0, \xi_0/\lambda=0.495$ )

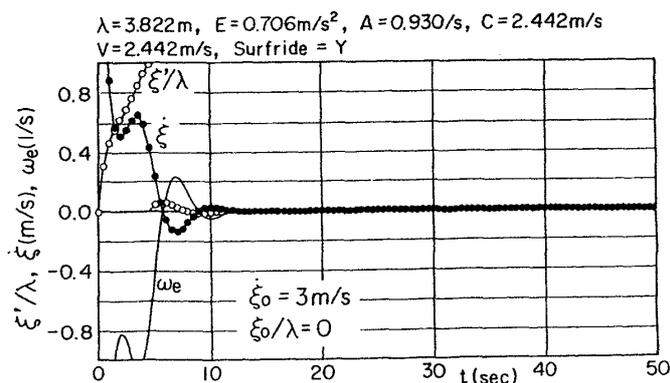
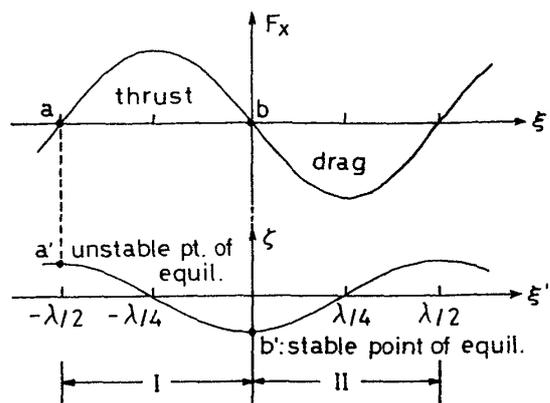


Fig. 21 Surf-riding after large initial plus speed ( $V=2.442\text{ m/s}, \dot{\xi}_0=3.0\text{ m/s}, \xi_0/\lambda=0$ )

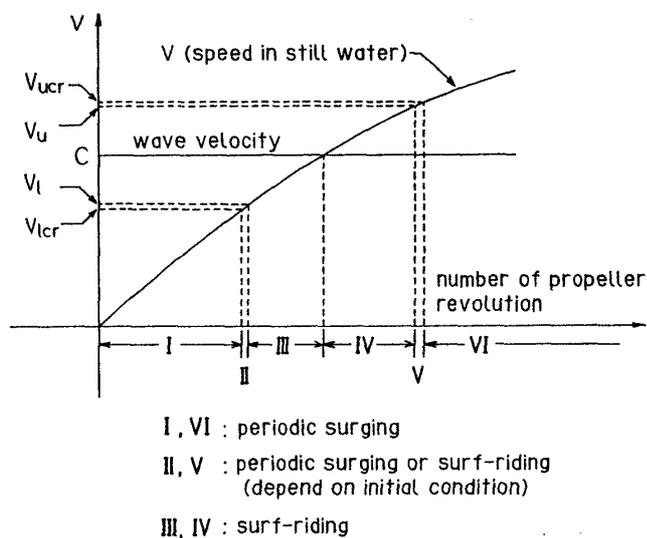
5.5.2  $\dot{\xi}_0 = \pm 3.0\text{ m/s}$  の場合

波速で走っている曳航台車から静かにクランプを外すかわりに手で押すとか、あるいは曳航台車の速度を一時的に上げるなどして大きな初速を与えると、ひとつ先または後



- I : going ahead and surf-riding ( $\dot{\xi}_0=0$ )
- II : going astern and surf-riding ( $\dot{\xi}_0=0$ )

Fig. 22 Direction of motion before surf-riding ( $V=2.442\text{ m/s}$ )



- I, VI : periodic surging
- II, V : periodic surging or surf-riding (depend on initial condition)
- III, IV : surf-riding

Fig. 23 Speed range of surf-riding

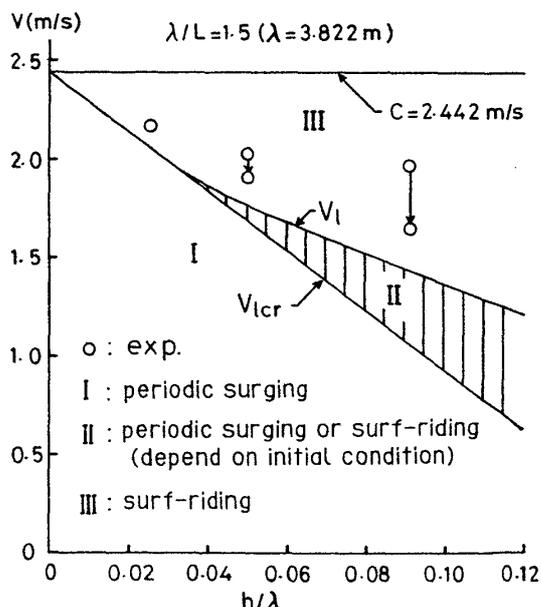


Fig. 24 Critical speed and wave height ( $\lambda/L=1.5$ )

の波まで移動してから安定した波乗りとなる。これは P. Du Cane 等<sup>7)</sup>の実験で観察されていることと一致する。Fig.21 に  $\xi_0=3.0$  m/s で前の波へ移動する場合の例を示す。 $\xi_0=-3.0$  m/s とすれば Fig.21 と符号が逆になって後ろの波へ移動する場合の結果が得られる。

Fig.22 は、 $V=C$  の場合の様子を模式的に示したものである。

以上いろいろな平水中速度について周期的な前後揺れま

たは波乗りの生ずる様子を調べてきたが、これらを模式的にまとめると Fig.23 のようになる。すなわちある波長、波高を定めた場合、波乗りの発生しない速度範囲 I と VI, 必ず波乗りが発生する速度範囲 III と IV, および波乗りの発生が初期条件によって左右される速度範囲 II と V とに分けられることになる。ただし  $V_{lcr} \leq V \leq V_l$  または  $V_u \leq V \leq V_{ucr}$  すなわち波乗りの発生が初期条件によって左右される速度範囲 II または V は、波高によって変化することがシ

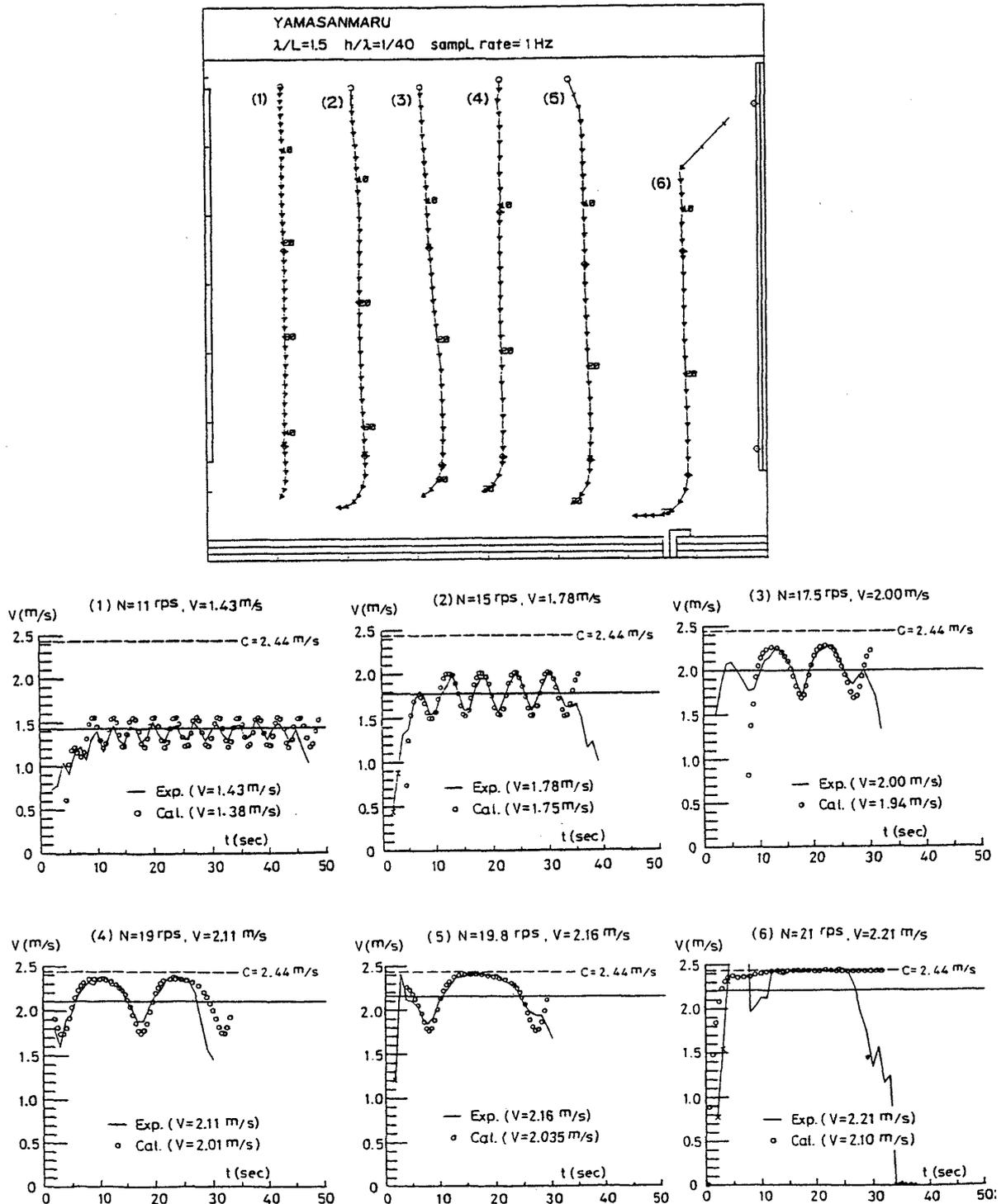


Fig. 25 Model tests on speed variation ( $\lambda/L=1.5, h/\lambda=1/40$ )

シミュレーションの結果から判っている。それを示したのが Fig.24 である。  $V > C$  の範囲については  $V = C$  に対して対称になるので省略してある。この図から  $\lambda/L_{pp} = 1.5$  の場合、  $h/\lambda < 1/30$  程度の低波高では初期条件により波乗りの発生が左右される速度範囲は存在せず、  $h/\lambda = 1/30$  程度からこの速度範囲が現れ始め、波高が高くなるにつれてその範囲が広がっていくことが判る。

## 6. 模型実験との対応

Fig.24 には角水槽での模型実験<sup>5)</sup>で得られた波乗りの限界速度を○印で示してある。ただし実験では波高が高くなると波速が高くなるため限界速度も上がるので、Fig.24 では波速を一定とした計算と比較するために波速が高くなった分を差引いて矢印で示した位置まで実験値を下げたものも示した。これによると角水槽での実験のような場合には限界速度は  $V_{icr}$  ではなく  $V_i$  に近くなって現れているようにみえる。

今回のシミュレーションによると前後揺れの速度変動は、平水中船速が波乗り限界に近づくにつれて非対称性が強くなるということが認められたが、前回は行った模型実験の結果によってもそのことが確認できる。Fig.25 は模型実験結果の例であり、限界速度に近づくにつれて非対称性が強く

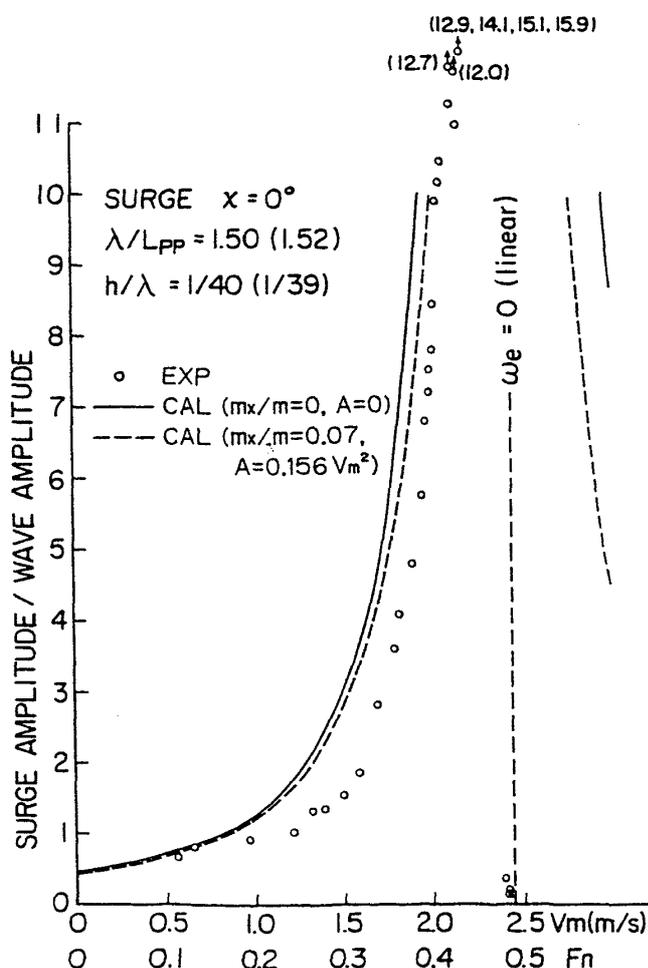


Fig. 26 Estimation of surge amplitude ( $\lambda/L=1.5$ )

なり、ついに波乗りになる様子がよく示されている。シミュレーションとの対応も比較的良いとみなせる。なお、Fig. 25 に示したシミュレーションはすべて  $\xi_0 = \xi_0/\lambda = V_0 = 0$  ( $V_0$  は  $V$  の初期値) とし (21) 式と (23) 式を連立させて解いたものである。係数は  $E = 0.353 \text{ m/s}^2$  とした他は第 5 章と同じ値を使っている。また平水中速度が実験と合っていないのは、前後揺れ速度の周期と波形が実験結果に似ているものを選んだことによる。時間軸も適当にずらしてある。

また前回<sup>5)</sup>、通常のスリップ法による運動計算プログラムに組み込まれている方法では、前後揺れの応答特性の推定が極めて悪いことを示した。そして減衰力項や付加質量項を考慮することにより改善される可能性を述べたが、今回その点についても検討した。通常線形運動方程式の減衰力項の係数に前述の  $A = 0.156 V^2$  を使用し、また元良チャートによる付加質量係数  $m_x/m = 0.07$  を使用したものであるが、結果は Fig.26 に一例を示したようにあまり改善されないことが判った。やはり強制力を厳密に計算することが必要と考えられる。

## 7. 波乗り中の短周期前後揺れについて

波乗りの安定平衡位置を  $\xi'_s$  としそこからの変位を  $\eta$  とすると

$$\xi' = \xi'_s + \eta \quad (28)$$

であるからこれを (22) 式に代入して

$$d^2\eta/dt^2 + A d\eta/dt = -E \sin k(\xi'_s + \eta) - A \cdot (C - V) \quad (29)$$

となる。安定平衡点では

$$E \sin k\xi'_s = -A \cdot (C - V) \quad (30)$$

$$E \cos k\xi'_s = \{E^2 - A^2(C - V)^2\}^{1/2} \quad (31)$$

であるからこれらを (29) 式に代入し、さらに  $k\eta \ll 1$  の仮定をすると

$$d^2\eta/dt^2 + A d\eta/dt + \{E^2 - A^2(C - V)^2\}^{1/2} k\eta = 0 \quad (32)$$

が得られる。(32) 式の解は  $t=0$  での  $\eta$  と  $d\eta/dt$  の初期条件をそれぞれ  $\eta_0, \dot{\eta}_0$  として

$$\eta = e^{-At/2} \{ \eta_0 \cos \omega_s t + (\dot{\eta}_0 + A\eta_0/2) / \omega_s \sin \omega_s t \} \quad (33)$$

と書ける。ただし

$$\omega_s^2 = \{E^2 - A^2(C - V)^2\}^{1/2} k - A^2/4 \quad (34)$$

である。

これは  $\omega_s$  が虚数 (今の場合  $1.683 \text{ m/s} < V < 1.696 \text{ m/s}$  に相当する) なら単調に減衰する運動となるが、 $\omega_s$  が実数 (今の場合  $V > 1.696 \text{ m/s}$  に相当する) の場合には、円周波数  $\omega_s$  の減衰振動で、安定平衡点まわりの運動である。前回の実験で観察された波乗り中の短周期前後揺れは、このようなもので  $A$  の値が小さいと長く続くのではないかと考えられる。今回のシミュレーションでもこのような傾向は多少現れている例がある。前回<sup>5)</sup>この運動を安定平衡点と不安定平衡点の間での往復運動ではないかと推測したのは

誤りである。

## 8. 結 言

追波中の前後揺れ運動方程式を本質的な非線形項（強制力項）は残すが、他の項はなるべく簡単な形にしたうえで、特定の波長、波高の波に対し平水中船速の種々の値についてシミュレーションを実施した。

その結果、波乗り発生の限界条件は、過渡状態を過ぎて定常状態になっている船の速度が、前後揺れによる変動分を含めて、波の位相速度に等しくなるときであるとする考え方が基本的には正しいことが確認された。しかし、そのような考え方に基づいて求めた限界速度  $V_{icr}$  ではどのような場合にも波乗りになるのではなく初期条件によって波乗りになる場合とならない場合のあることが判った。またこの限界速度  $V_{icr}$  からそれよりやや高速の  $V_i$  までの比較的狭い速度範囲であるが、やはり波乗りの発生の有無が初期条件によって左右される範囲のあること、そしてこの速度範囲は波高波長比  $h/\lambda$  によっても変化し  $h/\lambda$  が低いときには現れず、 $h/\lambda$  が高くなると範囲が広がることを判った。しかし  $V_i$  がどのようにして決まるのか、また波乗りの発生になぜ初期条件が関係する場所があるのかの物理的な説明については未解決である。

追波中では限界速度に近づくにつれ、前後揺れに大きな非対称性が現れてくるので、前後揺れを正しく解くには、波強制力を厳密に計算することの他に運動方程式の非線形

性を正しく考慮することが必要である。また前後揺れ以外の運動を扱う場合にも、波との出会いが前後揺れによって決まることを考えると、基本的にはこの非線形性が考慮されるべき場合が少なくないであろう。

## 参 考 文 献

- 1) 元良誠三, 藤野正隆, 小柳雅志郎, 石田茂資, 島田和彦, 牧 岳彦: プローチング現象発生機構に関する考察, 造船学会論文集, 第 150 号 (1981, 12).
- 2) 不破 健, 吉野泰平, 山本徳太郎, 菅井和夫: 小型船のプローチングに関する実験的研究, 造船学会論文集, 第 150 号 (1981, 12).
- 3) M. R. Renilson: An Investigation into the Factors Affecting the Likelihood of Broaching-to in Following Seas, 2nd International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, Tokyo (1982, 10).
- 4) 梅田直哉: 船の波乗り現象について, 造船学会論文集, 第 152 号 (1983, 1).
- 5) 菅信, 猿田俊彦, 安野三樹雄, 山越康行, 鈴木四郎: 追波中の船の大振幅前後揺れと波乗り現象, 造船学会論文集, 第 162 号 (1987, 12).
- 6) 菅信, 猿田俊彦, 安野三樹雄, 山越康行, 鈴木四郎: 追波中の漁船の波乗りに関する模型実験, 船研報告, 第 25 巻, 第 3 号 (1988, 5).
- 7) P. Du Cane and G. J. Goodrich: The Following Sea, Broaching and Surging, RINA, vol. 104, No. 2 (1962, 4).