

# 船の波乗り限界速度の簡易推定法について

菅 信\*

A simplified formula to estimate the critical speed of surf-riding of ships

By

Makoto KAN\*

## Abstract

The surf-riding of a ship can trigger off the broaching-to phenomenon, which may lead to capsizing of the ship. In the previous papers the present author clarified that the surf-riding occurred when the ship speed including the oscillatory component due to the surging motion reached the phase speed of the wave, and also proposed the formula to estimate the critical speed for the occurrence of the surf-riding phenomenon. However, because the formula includes the wave exciting force for the surging motion, it can not be utilized easily by people who are not familiar with the calculation of the exciting force.

In the present paper, the author proposes the simplified formulae to estimate the critical speed of surf-riding for both infinite and finite water depth cases. It is shown that in spite of very simple forms the accuracy of those proposed formulae is satisfactory for the wave length longer than the ship length, which is significant for the broaching-to phenomenon. Since those new formulae include only the fineness coefficients of the ship such as a block coefficient, a midship coefficient or a prismatic coefficient, and also the length and draft of the ship, anyone can estimate the critical speed to avoid the dangerous surf-riding.

It is also clarified that if the wave length is very long, the difference between the phase speed of the wave and the critical speed for the surf-riding depends on neither the hull form factors nor the water depth, but depends on only the wave height.

## 1. 緒 言

追波中の船の波乗りはいわゆるブローチングの引金となる危険な現象である。ブローチング現象は船が追波または斜め追波中を比較的速い速度で走っている際に、波の下り斜面で加速され、そこに捕捉されたような形で波とほぼ同じ速度で走らされるとともに、舵効きが悪くなり操縦不能に陥る現象である。操縦不能になるため意図しない急激な回頭運動が起これ、波の作

用と相まって瞬時の転覆に至る場合が少なくない。このようなブローチング現象については模型実験等によりその性質がかなり把握されてはいるが<sup>1),2)</sup>、この現象が発生するメカニズムについては明らかにされていない。これに関する著者の見解は以下のようなものである<sup>1)</sup>。即ち、船が波に捕捉された波乗り状態では、その時のプロペラ回転数で出せる平水中速度より大幅に加速された速度で走っていることになり、プロペラスリップが小さくなるため、プロペラ後流の舵への流入速度が相対的に減った状態になっている。このため船体に作用するその他の流体力に比べ舵力が相対的に

\* 運動性能部

減少した状態、つまり舵効きの悪くなった状態に陥っていることになり、これがブローチング発生の基本的原因ではないかと考えている。実際波乗りによる舵力の低下量が50%以上になる場合のあることが梅田の試算によって確かめられている<sup>8)</sup>。従って波乗りによってどの程度平水中速度から加速されるかが、舵効きの悪化の程度と直接関わっていることになる。波乗り現象そのものは短波長の波でも起こることが著者らによって示されているが<sup>11), 12)</sup>、加速される程度が少ないためそれほど危険なものではない。これに対し波長の長い波では加速される程度が大きくなるため危険性もそれだけ高いことになる。船長の2倍程度の波長の波でブローチングが起こり易いという観測<sup>1), 2)</sup>は上述のような推測を裏付けるものと考えられる。ブローチング発生に関するこのような著者の見解は一般に認められたものではないが、波乗りがブローチング発生の引金であることについては一般的な共通認識になっており、従来から研究の対象になっていたものである<sup>3)~7)</sup>。そして梅田等<sup>8)~10)</sup>や著者等<sup>11)~21)</sup>の一連の研究によって波乗り現象の発生のメカニズム等が明確な形で示された。

また危険なブローチング現象の発生を避けるためには波乗り現象そのものの発生を避ければ良いということになるが、安全運行指針として使える発生条件の推定法についても著者らにより示され<sup>11), 12)</sup>、国際海

事機関等にも報告されている<sup>21)</sup>。しかしその推定法を用いて波乗り発生限界の船の速度を求めるためには、船に働く前後揺れ強制力を求める必要があるため誰でも容易に使えらるというものではなかった。そこで今回著者は波乗り発生限界速度に関する更に実用的な推定式を導くことを試み、前後揺れ強制力の簡易な表示式を用いて実用的でかつ精度も高い推定式を導くことができた。この推定式は船の肥瘦係数が判れば誰でも容易に計算できるもので利用価値は高いものと考えられ、国際海事機関には既に報告してあるが<sup>18), 22)</sup>、その根拠等については未発表であるのでここに報告するものである。

## 2. 波乗り現象の概要

船の波乗り現象がどのようなものであるかを当所の80m角水槽で行った模型実験の結果<sup>11), 12)</sup>を用いて説明する。Fig.1は横軸に模型船のプロペラ回転数Nをとり、縦軸に模型船の速度をプロットした図である。波長/船長比( $\lambda/L$ )=1.5、波高/波長比( $h/\lambda$ )=1/20の規則的な波を真後ろから受ける真追波の状態( $\chi=0$ )で完全自航模型船を走らせたものである。右上がりの斜めの曲線は波のない平水中での速度試験の結果である。角水槽の通常の試験方法で行ったものであり摩擦修正は施していない。上下に短い横線のついた縦の線は、前後揺れによって周期的に変動する模

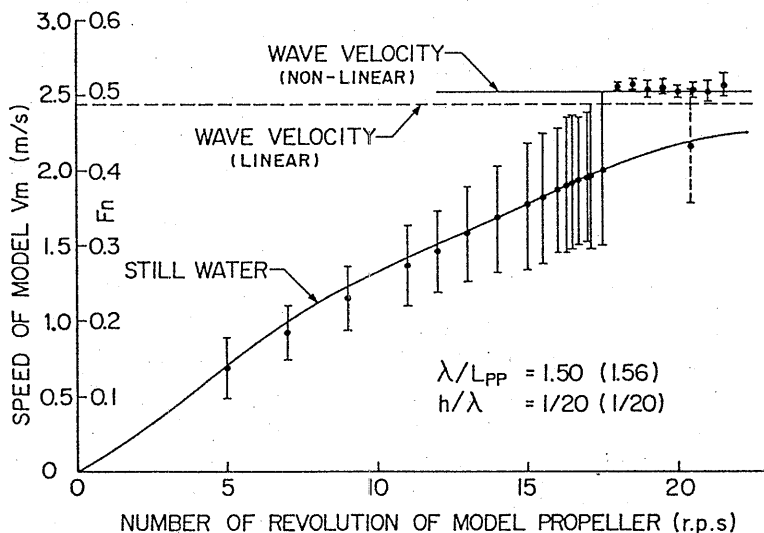


Fig. 1 Variation of ship speed in following wave

型船の速度変動の範囲を示している。黒い点は速度変動の中心を示す。プロペラ回転数 $N$ が小さくなると平均的な速度は平水中を走るときとあまり差がないが、プロペラ回転数を上げてゆくと速度変動の大きさが少しづつ大きくなるとともに、あるところで突然速度変動が消滅してなくなり、船の平均速度が不連続に上昇していることが判る。この突然の平均速度の変化が船の波乗り現象の発生を表すものである。つまりある限界までは船は追波の中で大きな速度変動を伴う前後揺れ運動をしながら波に追い越される形で走っているが、その限界のところからは船が波に捉えられたような形になり波と共に走るようになるため前後揺れ運動が消滅してしまうことを示しているわけである。この不連続な変化を起こした後の模型船の速度が、この図で横に長い実線で示された波の速度（線形理論による波の位相速度に波高分散効果による修正を施してある）と一致していることが上の説明の根拠であるが、連続写真やビデオによる観測によってもそのことは明瞭に観察されている。

このような船の平均速度の変化がどのようにして起こるのかについても、この図の中に重要な示唆が含まれている。即ち、平均速度の突然の変化が起こる前までは変動速度の最大値が波の速度まで達していないが、突然の変動が起こる直前の実験点では最大値がほとんど波の速度に達しており、その直後の実験点で波乗りが発生していることが明白である。つまり変動する船の速度の最大値が波の速度に達するようになると波乗り現象が発生するらしいことをこの図は示唆していることになる。種々の波長と波高の組合せの規則波の中で同様な模型実験を繰り返して実施した結果は、すべて上の推論を裏付ける結果であることが確認されている<sup>12)</sup>。

以上のことをもう少し分かりやすい例で具体的に見てみよう。Fig. 2は80m角水槽における模型船の1秒ごとの航跡図と、対応する模型船の速度の時間変動の様子を示したものである。速度変動の図で実線が実験値を白丸がシミュレーション結果を示している。実線で示された実験値で不連続で不自然な挙動を示してい

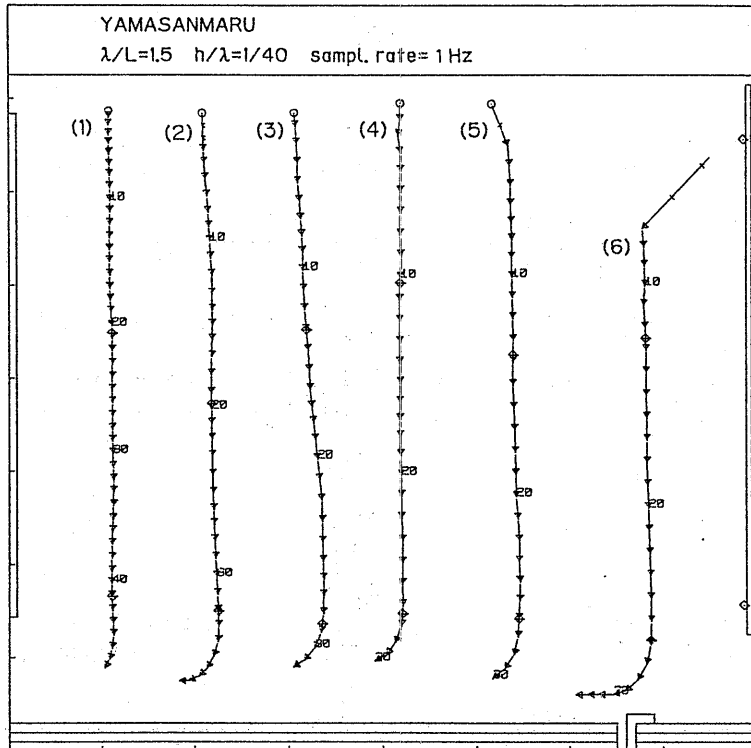


Fig. 2 a Course plotting of a model

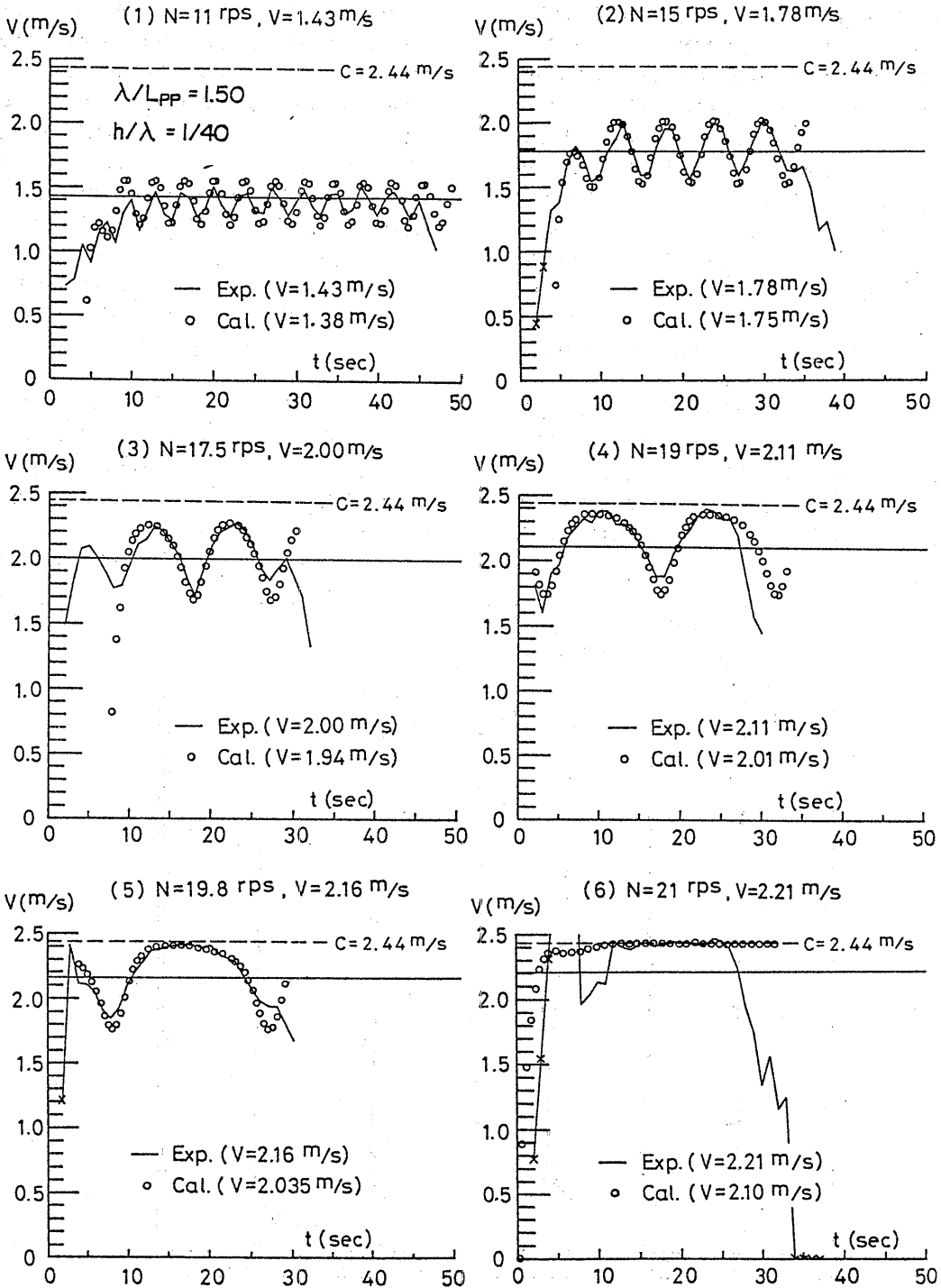


Fig. 2 b Time history of speed variation (experiment and simulation)

る部分は、水中超音波式の模型船航跡自画装置に混入する水中雑音によるものである。プロペラ回転数 $N$ が小さく平均速度が低いときは速度変動は(1)と(2)の例のように正弦的であるが、プロペラ回転数が大きくなるにつれ、平均速度が上がり最大速度が波の速度に近づいてくるとともに速度変動の形が(3)~(5)の例のように正弦波状から非対称な形に変化してくる。この非対称な波形は波の下り斜面で加速されて波と共に走る時間の割合が増え、上り斜面で減速されて走る時間の割合が減ることを意味している。そしてプロペラ回転数がもう少し上がって極限まで行った状態が(6)の波乗り状態であって、船は波の下り斜面で加速された速度のまま波に完全に捕捉された形で走ることになる。言い換えれば、その船が出せる速度よりもかなりの高速で波と共に走らされていることになる。このとき船に働く力は静的に釣り合った状態になっており、プロペラ回転数を大幅に落とさない限り、この静的な平衡状態である波乗りの状態から抜け出すことはできなくなっている。これが船の波乗り現象であり、その発生メカニズムである。

波乗り現象を表現できる非線形な運動方程式を導いて行った数値計算によっても、また理論的な解析によっても波乗りが発生する限界は変動する速度の最大値が波の速度に達する時であるということが確認されているが<sup>15),16)</sup>、実は波乗り現象は現代物理学の最先端のテーマの一つである超伝導ジョセフソン効果や固体プラズマの電荷密度波等とも共通する類似性をもつ自然界における典型的な非線形現象であることが判ってきており思わぬ方向に発展する可能性を秘めた面白い研究テーマでもある<sup>16),17)</sup>。特に初期条件によって異なった振舞いをする非線形な現象であるが、波乗りの発生条件をこれ以上厳密に説明することは、実用的な安全運行指針への応用を目的とする本稿の主旨からは適当でないと思われるのでここでは省略する。詳細は参考文献<sup>15),16)</sup>に報告してある。

### 3. 波乗り発生条件の推定法

このように波乗りは変動する船の速度の最大値が波の速度に達すると発生するということが明らかになった。変動する速度は厳密には非線形な前後揺れ方程式の解として求められ、その際に興味深い非線形現象が現れるわけであるが、厳密な非線形性は無視してここでは、前後揺れによる速度変動を求めるにあたっては

従来良く使われる線形理論による結果を用いることとする。これは上に述べた船の速度変動の波形が非対称な形になることを無視して対称な波形であることを仮定するのと同じである。また波の速度は線形理論によるものを使うこととし、波高分散効果は無視する。これは安全側の評価になるため、安全運行指針を考える際には妥当な仮定と考えられる。

前後揺れの振幅を $X_a$ 、波との出会い円周波数を $\omega_e$ 、波の位相速度を $C$ 、波乗り発生の限界速度 $V$ (平水中速度)とすると、波を真後ろから受ける真追波の場合( $\chi=0$ )の波乗り発生条件は次式で表せる。

$$C = V + \omega_e \cdot X_a \quad (1)$$

これは平水中速度 $V$ と前後揺れ速度の最大値 $\omega_e \cdot X_a$ との和が波の位相速度 $C$ に等しくなったとき波乗りが発生することを表す式である。

一方船の質量を $M$ 、前後揺れに対する波の強制力の振幅を $F_a$ 、時間を $t$ で表すと前後揺れ $X (= X_a \cdot \cos \omega_e t)$ に対する線形運動方程式は次式のように書ける。

$$M \cdot d^2 X / dt^2 = F_a \cdot \cos(\omega_e t + \epsilon) \quad (2)$$

ここに $\epsilon$ は位相差を表す。これより前後揺れ振幅は

$$X_a = F_a / (M \cdot \omega_e^2) \quad (3)$$

である。波の円周波数を $\omega$ とすると

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

であり、また重力加速度を $g$ とすると無限水深波では

$$C = g / \omega \quad (5)$$

である。(1)式に(3),(4),(5)式を使うと結局

$$V = C \{1 - (F_a / W)^{1/2}\} \quad (6)$$

が無限水深波での波乗り発生限界速度の表示式として得られる。ここに $W (= Mg)$ は船の排水重量である。

また有限水深波では、水深を $H$ 、波数を $k (= 2\pi / \lambda)$ とすると(5)式の代わりに

$$C = (g / \omega) \cdot \tanh kH \quad (7)$$

となるので

$$V = C \{1 - \{F_a / (W \cdot \tanh kH)\}^{1/2}\} \quad (8)$$

が有限水深波での波乗り発生限界速度の表示式として得られる。

斜め追波では出会い角を  $\chi$  で表すと、(1)式に相当する波乗り発生の条件式は

$$C = (V + \omega_e \cdot X_a) \cos \chi \tag{9}$$

となり、また出会い周波数は(4)式の代わりに

$$\omega_e = \omega (1 - V \cos \chi / C) \tag{10}$$

となることから、波乗り発生の限界速度の表示式は、無限水深波では

$$V = C \{1 - (F_a \cdot \cos \chi / W)^{1/2}\} / \cos \chi \tag{11}$$

有限水深波では

$$V = C [1 - \{F_a \cdot \cos \chi / (W \cdot \tanh kH)\}^{1/2}] / \cos \chi \tag{12}$$

となる。

ここで  $F_a$  自身が  $\chi$  の関数であり、長波長域ではほぼ  $\cos \chi$  に比例するものであることと、波の位相速度  $C$  は無限水深波では

$$C = (g \lambda / 2 \pi)^{1/2} \tag{13}$$

有限水深波では

$$C = \{(g \lambda / 2 \pi) \cdot \tanh(2 \pi H / \lambda)\}^{1/2} \tag{14}$$

であることに注意する必要がある。いずれにしても斜め追波では真追波より限界速度が高くなり安全側になるので、安全運行指針としては真追波 ( $\chi = 0$ ) の限界速度を取るのが妥当と思われる。

このような評価が妥当であるかどうかを底曳網漁船の模型実験結果と比較して示したのが Fig. 3 である。

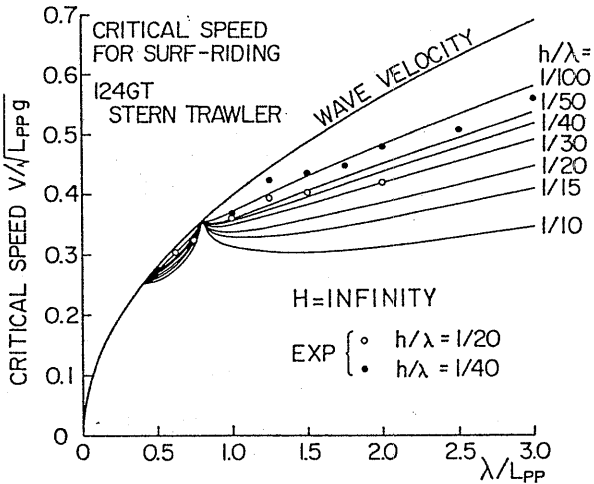


Fig. 3 Critical speed for surf-riding (estimation and experiment)

実線は(6)式による無限水深波の波乗り発生限界速度を無次元化して示したものであり、丸印の実験点は80m 角水槽で行った実験結果をFig. 1のような図にして限界速度を求めてプロットしたものである。  $h/\lambda = 1/20$  と  $1/40$  のいずれについても実験点はおよそ計算値の10%程度高めに出ており、計算値がその程度安全側の評価になっていることが判る。つまりここで示した表示式が安全運行指針として妥当性を持つものであることを表している。

なお前後揺れ強制力は、波の粒子運動は考慮するが船が波を乱さないとするフルードクリロフの仮定を用い、また船体形状を断面のルイスフォーム近似で表した上で、圧力の法線成分を船体表面全体に渡って積分する方法で求めており、フルードクリロフの仮定の範囲内では、船型近似の点を除いて、もっとも厳密な結果である。

#### 4. 波乗り発生条件の簡易推定法

このように上で求めた表示式は簡単な形をしてはいるが、前後揺れ強制力を求める必要があることから、このままの形では一般の使用には必ずしも適当ではない。そこで次にこの表示式を簡易化することを考える。

簡易化のポイントは強制力の計算を如何にして簡易化するかに尽きる。

まず船の形を簡易化して箱船で置き換える。このとき箱船の排水容積  $\nabla$  と中央横断面積  $A_{\infty}$ 、及び幅  $B$  は元の船と同じ値に保つが、長さ  $L_s$  と喫水  $d_s$  を元の船の値  $L, d$  より次の関係式でそれぞれ短くする (Fig. 4 参照)。

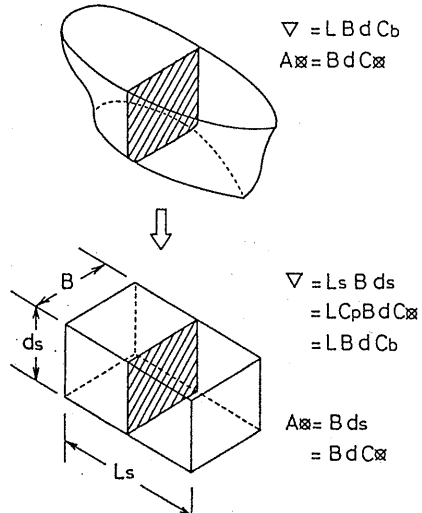


Fig. 4 Simplification of hull form

$$d_s = d \cdot C_{\infty} \quad (15)$$

$$L_s = L \cdot C_b / C_{\infty} = L \cdot C_p \quad (16)$$

ただし  $C_{\infty} (= A_{\infty} / Bd)$  は中央横断面積係数,  $C_b (= \nabla / LBd)$  は方形係数,  $C_p (= \nabla / A_{\infty} L = C_b / C_{\infty})$  は柱形係数をそれぞれ表す。

この箱船に作用する前後揺れに対するフルードクリロフの強制力は, 前後端面の矩形面に作用する波の圧力を積分するだけで容易に求められ, 結果のみ示すと次のようになる。

有限水深波で

$$F_a = 2 \rho gh \cdot \sin(kL_s \cos \chi / 2) \cdot \sin(kB \sin \chi / 2) \cdot \{\sinh kH - \sinh k(H - d_s)\} / (k^2 \sin \chi \cdot \cosh kH) \quad (17)$$

無限水深波で

$$F_a = 2 \rho gh \cdot \sin(kL_s \cos \chi / 2) \cdot \sin(kB \sin \chi / 2) \cdot \{1 - \exp(-kd_s)\} / (k^2 \sin \chi) \quad (18)$$

$\chi \rightarrow 0$  のときはそれぞれ

有限水深波で

$$F_a = \rho ghB \cdot \sin(kL_s / 2) \cdot \{\sinh kH - \sinh k(H - d_s)\} / (k \cdot \cosh kH) \quad (19)$$

無限水深波で

$$F_a = \rho ghB \cdot \sin(kL_s / 2) \cdot \{1 - \exp(-kd_s)\} / k \quad (20)$$

となる。これらの表示式を使えば, (6), (8), (11) および (12) 式からそれぞれの場合の波乗り発生限界速度が求められる。もっとも使用頻度の高いと思われる  $\chi = 0$  の無限水深波の場合について記すと

$$V = C [1 - \{h \lambda \sin(\pi LC_p / \lambda) \cdot \{1 - \exp(-2\pi d C_{\infty} / \lambda)\} / (2\pi L d C_b)\}^{1/2}] \quad (21)$$

となる。この表示式は更に  $\lambda \rightarrow$  大の仮定を使うと

$$V = C [1 - \{h \sin(\pi LC_p / \lambda) / LC_p\}^{1/2}] \quad (22)$$

となる。これは波乗り限界速度の船型要素への依存性が船の長さ  $L$  と柱形係数  $C_p$  のみによって表されることを示すものであり, 船型影響は少ないとした著者らの以前の計算結果<sup>13)</sup> を式形で裏付けるものである。参考文献<sup>18), 22)</sup> ではこのような根拠を示さずに (22) 式の結果のみを紹介したものである。

この表示式はまた更に  $\lambda \rightarrow \infty$  の極限を考えると

$$V = C - (gh/2)^{1/2} \quad (23)$$

となり, 船型の影響は全くなり, 波高に依存するだけになることを示している。

有限水深波では (21) 式に相当する式は

$$V = C [1 - \{h \lambda \sin(\pi LC_p / \lambda) \cdot \{\sinh(2\pi H / \lambda) - \sinh\{2\pi(H - d C_{\infty}) / \lambda\}\} / \{2\pi L d C_b \cdot \sinh(2\pi H / \lambda)\}\}^{1/2}] \quad (24)$$

となる。また水深  $H$  があまり大きくないという条件下で  $\lambda \rightarrow$  大のときの (22) 式に相当する式は

$$V = C [1 - \{h \lambda \sin(\pi LC_p / \lambda) / 2\pi H LC_p\}^{1/2}] \quad (25)$$

となる。この (25) 式は (24) 式が任意の有限水深波に対して有効であるのに対し, 水深が浅い場合の浅水波に対してのみ有効なものであることに注意する必要がある。(25) 式はまた無限水深波の (22) 式とは異なった表示になっているが,  $\lambda \rightarrow \infty$  の極限では

$$V = C - (gh/2)^{1/2} \quad (26)$$

となり, 無限水深波の場合の (23) 式と同じ表現になってしまう。無限水深波と有限水深波では波の位相速度  $C$  が (13), (14) 式のように異なっているため波乗り限界速度の絶対値は当然の事ながら異なっているが, 波の速度と限界速度との差は波長がある程度長ければ無限水深波でも有限水深波でも, 船型要素にも水深にも無関係に同じになることを表している。

このことはまた Grim<sup>3)</sup> や著者ら<sup>12)</sup> が指摘した「浅水で波乗りが発生し易い」という事実の因って来る理由が, 浅水波では波の位相速度が遅くなるためであることを明確に示すことにもなっている。

なお (19) 式で  $\lambda \rightarrow$  大とすると (20) 式と同じ式になるので, 前後揺れの強制力そのものについても, 波長が長ければ無限水深波でも有限水深波でも同じになり水深の影響は現れないことが判る。

さて次に上で導いた波乗り限界速度の簡易推定式がどの程度の近似になっているかを調べてみよう。

Fig. 5 は長さ 12m の小型船 (長さ 115m のコンテナ船型を縮めたもの) を対象に無限水深波で調べたものである。実線は前述のようにフルードクリロフの仮定のもとでは厳密な値を示すものであり, 例えば波高  $h = 1$  m の追波中を走る場合,  $h = 1$  m の実線で示した平水中速度に相当するプロペラ回転数以上の出力で走ると波の速度まで加速されてそのまま走り続けることを表

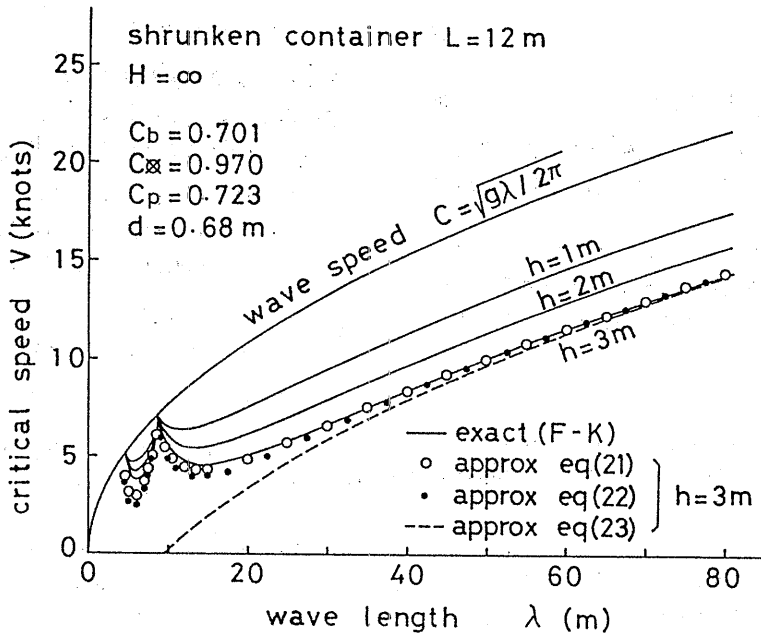


Fig. 5 Approximation of critical speed  
 (shrunken container,  $H=\infty$ )

している。即ち危険な波乗りを避ける安全運行のためには該当する限界速度以下の平水中出力で走らなくてはならないことを示すものである。簡易推定式の精度を評価するに当たっては波高は無関係になるので、ここでは波高 $h=3\text{ m}$ の場合について調べた。○印は(21)式による推定値で波長が船長程度よりも長ければかなり良い近似になっていることが判る。●印はそれよりやや近似が悪いと考えられる(22)式による推定値であるが、ブローチングにとって危険な船長の2倍程度以上の波長域では(21)式と大差のない良い近似になっている。また点線は(23)式によるものであり、波長が充分長ければ船型要素の無関係な(23)式でも比較的良好な結果を与えることが判る。

同じ船を水深 $H=2\text{ m}$ の浅水波で調べたものが Fig. 6である。やはり波長が船長程度以上あれば(24)式がかなり良い結果を与えている。また(24)式よりは近似度が悪いと考えられる(25)式の方が良い結果を与えているが、これは水深の浅い浅水波でたまたまそうなっただけで、(25)式は任意の有限水深の場合に成り立つものではないので、水深がそれほど浅くない有限水深の場合には一般に(24)式の方が近似度は良い筈のものである。波長が充分長ければ船型要素も水深も無関係になる(26)式でも良い近似になることが判る。

波乗り限界速度に対する船型の影響が少ないとした著者らの先の報告<sup>13)</sup>を考慮すれば上の検定結果は一般化しても差し支えないものと考えられるが、念のために更に別の船型として長さ $L=30.58\text{ m}$ の底曳網漁船について調べてみる。Fig. 7は無限水深波についての結果である。簡易推定式の精度の評価は波高 $h=6\text{ m}$ の場合について行った。波長が船長程度以上であれば(21)式が良い近似になっていることや、波長が船長の2倍程度以上では(22)式もかなり良い結果を与えること、更に波長が充分長ければ船型要素と無関係な(23)式でも比較的良好な近似になること等、Fig. 5のところで述べたことがそのまま当てはまる。Fig. 8はこの船を水深 $H=20\text{ m}$ の有限水深波で調べたものである。任意の有限水深の場合に有効な(24)式が船長程度以上の波長域で良い近似になっているが、(25)式による結果はFig. 6の場合とは違いかなり近似は悪くなっている。これは水深が浅いとは言いがたいことから当然の結果であり、水深を浅くすれば(25)式による推定値が Fig. 6の場合と同様に良い近似になることは確認してある。波長が充分に長ければ船型要素も水深も無関係な(26)式が良い近似を与えることは Fig. 6の場合と同様である。

以上の精度評価から最も推奨できる推定式は無限水深の場合なら(21)式、有限水深の場合なら(24)式であるが、



多少精度が落ちててもより簡単な式の方が良いという場合は無限水深の場合なら(22)式も推奨できる。有限水深の場合の(25)式は、波長に対し水深の極く浅い浅水波の

場合に限っては使っても良いが、一般には推奨できない。(23)式と(25)式は極く波長の長い特殊な場合を除いて推奨できない。

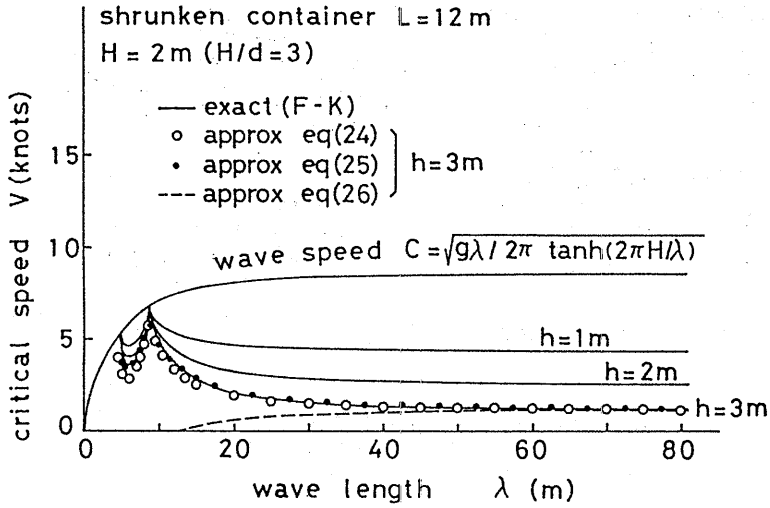


Fig. 6 Approximation of critical speed (shrunken container,  $H=2\text{ m}$ )

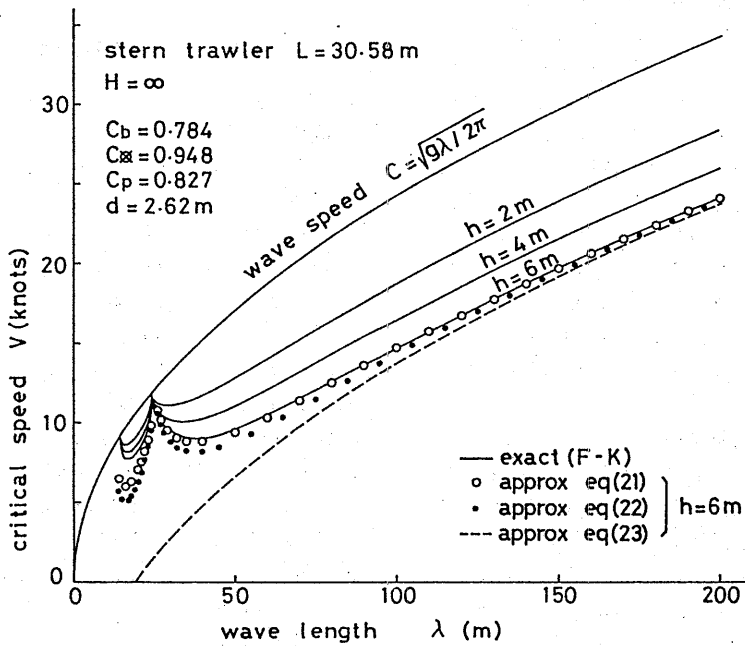


Fig. 7 Approximation of critical speed (stern trawler,  $H=\infty$ )

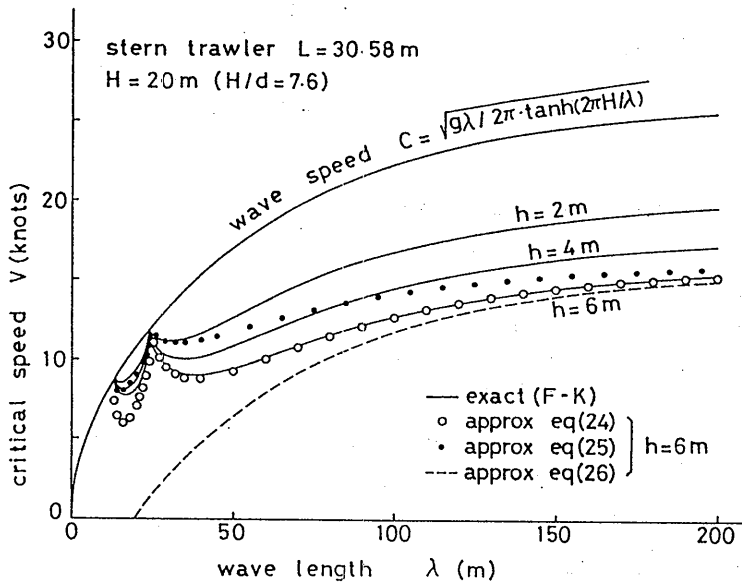


Fig. 8 Approximation of critical speed  
(stern trawler,  $H=20\text{m}$ )

## 5. 結 言

波乗り発生限界速度の簡易な推定式を導き、その精度を調べた結果この簡易推定式が充分実用になることが判った。即ち、無限水深の場合には(21)式の簡易推定式が、有限水深の場合には(24)式の簡易推定式がそれぞれ良い推定値を与える。また無限水深では波長が船長の2倍程度より長ければ一層簡易な(22)式の推定式でも良い結果を与える。波長に対して水深の浅い場合には(25)式が良い推定値を与えるが、水深が深くなるにつれ(25)式の近似度は悪くなる。波長が充分長い場合には(23)式、または(26)式で表されるように波の速度と限界速度の差は船型要素や水深に無関係に波高のみに依存する形になる。これらの推定式は船の長さや肥瘦係数が判れば誰でも容易に計算できるものであり実用的な価値は高いものと考えている。

しかし大きな速度変動を伴う大振幅の前後揺れは波乗りと同様の危険性を持つものであるから、波乗りが起こらなければ安全と単純に考えることはできない。従ってここで示した推定式は波乗りに対して安全側の値を与えるものではあるがこれをもって安全運行指針としてそのまま適用することにも危険がある。10%~20%程度の安全率を見込むなど今後の検討がなお必要と考えている。

また本稿は排水量型船舶を対象としたもので、滑走型や新形式の高速船型に適用できるかどうかは確認されておらず、今後の課題として残されている。

## 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: 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, 150号, 1981, p.211-222.
- 2) 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, 150号, 1981, p.223-231.
- 3) Grim, O.: Das Schiff in von achtern anlaufender See, JSTG, Vol. 45, 1951, p.264-287.
- 4) Grim, O.: Das Schiff in von achtern Kommendem Seegang, Schiffstechnik, Vol. 30, 1983, p.84-94.
- 5) Du Cane, P and Goodrich, G.J.: The following seas, broaching and surging, RINA, Vol. 104, No. 2, 1962, p.109-140.
- 6) Boese, P.: Steuern eines Schiffes im schweren achterlichen Seegang, JSTG, Vol. 63, 1969, pp. 337-355.
- 7) 梅田直哉: 船の波乗り現象について, 日本造船学

- 会論文集, 152号, 1983, p.192-201.
- 8) 梅田直哉, 神山保: 規則波中の船の波乗り現象, 関西造船協会誌, 213号, 1990, p.63-74.
  - 9) 梅田直哉: 不規則波中の船の波乗り現象, 関西造船協会誌, 213号, 1990, p.75-80.
  - 10) Umeda, N: Probabilistic study on surf-riding of a ship in irregular following seas, 4th International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles (STAB'90), Naples, Vol.1, p.336-343.
  - 11) 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, 日本造船学会論文集, 162号, 1987, p.161-171.
  - 12) 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, 船舶技術研究所報告, 25巻, 3号, 1988, p.25-54.
  - 13) 菅 信, 猿田俊彦, 安野三樹雄, 山越康行, 鈴木四郎: 漁船の波乗り現象について, 第7回水産工学研究推進全国会議報告書, 1988, p.129-132.
  - 14) 菅 信: 漁船の波乗り現象に関する研究課題, 第8回水産工学研究推進全国会議報告書, 1989, p.125-128.
  - 15) 菅 信, 猿田俊彦, 安野三樹雄: 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), 日本造船学会論文集, 165号, 1989, p.111-121.
  - 16) 菅 信: 追波中の船の大振幅前後揺れと波乗り現象 (その3, 位相面解析による検討), 日本造船学会論文集, 166号, 1989, p.267-276.
  - 17) 菅 信: 船の波乗り現象と超伝導ジョセフソン効果の類似性について, 第54回船舶技術研究所研究発表会講演集, 1989, p.126-131.
  - 18) 菅 信: 小型船の波乗りの発生条件について, JCI通信, 日本小型船舶検査機構, No.203, 1991.10, p.31-41.
  - 19) Kan, M.: A guideline to avoid the dangerous surf-riding, 4th International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles (STAB'90), Naples, Vol.1, p.90-97.
  - 20) Kan, M.: Surging of large amplitude and surf-riding of ships in following seas, Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol.28, 1992, p.1-14.
  - 21) Kan, M.: A guideline to avoid the surf-riding, IMO, SLF35/INF.3, ANNEX 1, 1991.
  - 22) Japan: Danger of capsizing of ships navigating in following and quatering seas, IMO, SLF36/INF.4, 1992.