

追波中の漁船の波乗りに関する模型実験

菅 信*・猿田 俊彦*・安野三樹雄*
山越 康行**・鈴木 四郎**

Model Experiments on Surf-Riding of a Fishing Boat in Following Waves

By

Makoto KAN, Toshihiko SARUTA, Mikio YASUNO
Yasuyuki YAMAKOSHI and Shiro SUZUKI

Abstract

Surf-riding phenomenon of a ship in regular following waves is examined. Results of the self-running model tests in the regular following waves show that there exists a definite critical condition in occurrence of the surf-riding phenomenon which is clearly distinguished from the large amplitude surge motion, and that the critical condition can be regarded as the moment when the ship speed including the variable component due to the surge motion reaches the wave speed. Analytical considerations of equation of surging motion in following waves explain the above critical condition by the fact that once the ship speed reaches the wave speed, then the ship speed can not be changed from the wave speed, because the ship is in a state of statical equilibrium with regard to the ship speed.

Since the critical condition is clarified as mentioned above, it becomes possible to estimate the critical wave height and ship speed for the surf-riding as a function of wavelength and wave direction for every type of ships and every loaded conditions, provided that the surge response function in following waves can be estimated exactly.

A simple method for estimation of the critical wave height and ship speed is proposed and some examples of the chart of the critical curves for a stern trawler are also presented. The estimation of critical speed by means of the above method using Froude-Kriloff's hypothesis and neglecting the added mass, the resistance and the increase of the wave speed due to the dispersion by the finite wave amplitude, is in the safer side by about 10% than the experimental results. It is also emphasized that in the shallow water the critical speed is drastically decreased.

* 運動性能部

** 農林水産省 水産工学研究所
原稿受付：昭和62年8月15日

目次

1. 緒言26
 2. 模型船と実験方法27
 2.1 模型船27
 2.2 実験方法28
 3. 実験結果29
 3.1 プロペラ回転数と船速29
 3.2 前後揺れ応答34
 3.3 出会周期40
 3.4 前後揺れ速度と加速度44
 4. 波乗り発生の解析的検討48
 5. 安全運航指針への応用50
 5.1 限界波高50
 5.2 限界船速52
 6. 浅水影響53
 7. 結言53

1. 緒言

追波中の船の波乗り現象は、操縦不能から転覆にいたる危険性をもついわゆるブローチング現象の発生と

きわめて深い関連があるとされており^{1),2)}、その発生のメカニズムを明らかにすることが求められている。規則的追波中の波乗り現象については、P. Du. Cane と G. J. Goodrich の行った実験があり、その結果の一例を Fig. 1 と Fig. 2 に再録してある。これによると、平水中速力 7.03ft/sec (2.14m/sec, $Fn=0.436$) に相当する馬力を保って種々の波長の規則的な追波中 (波高 h 一定, $h=4.5inch=11.43cm$, $h/L=1/21.6$) を自航させた場合、 $\lambda/L=2.4$ 程度までの長波長域で大きな前後揺れを示しており、その値は前後揺れの振幅を x 、波振幅を $\xi_w (=h/2)$ とすると $x/\xi_w > 10$ というような大きな値も見られる程である (Fig. 2)。ところが $\lambda/L=2.4$ の付近で突然、前後揺れの振幅が零に落ちている。また Fig. 1 を見ると、その $\lambda/L=2.4$ より波長の長い方では平水中速力より僅かに速い平均速力を中心にやはりかなり大きな前後揺れによる速力変動があり、 $\lambda/L=2.4$ のところで突然船速が上がり波速に等しくなっている。この突然の変化に対応する波の波速を critical speed と言っているが、この時の船の状態は、波の下り斜面の部分に船尾を波の山にした位置で捕捉された形となり非常に安定した平衡状態にあって、この状態の時、例えば後ろから外力を加

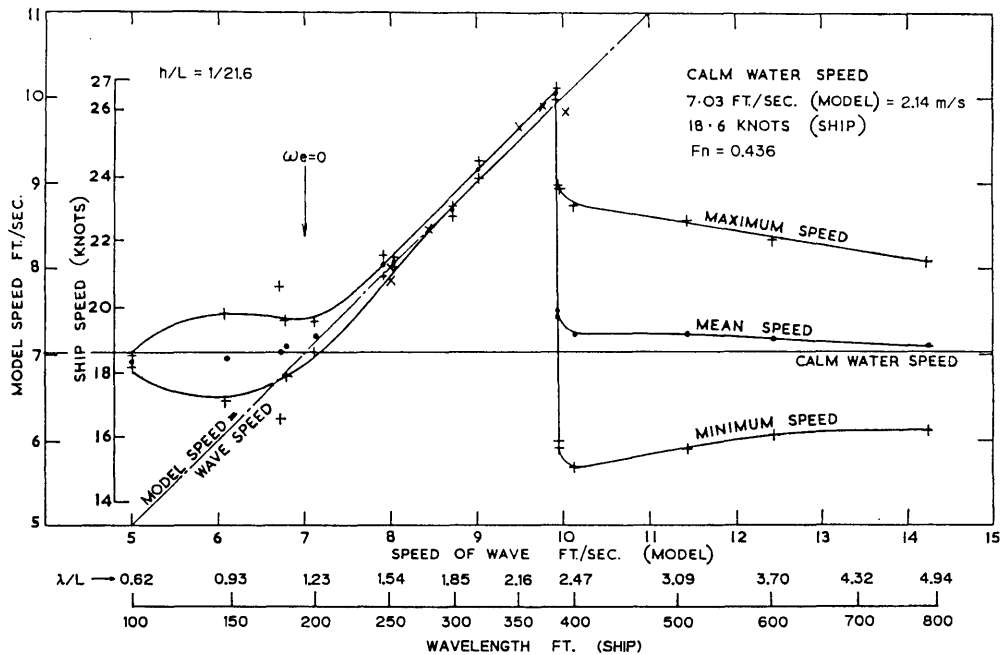


Fig. 1 Variation of Model Speed (from P. Du Cane et al.¹⁾)

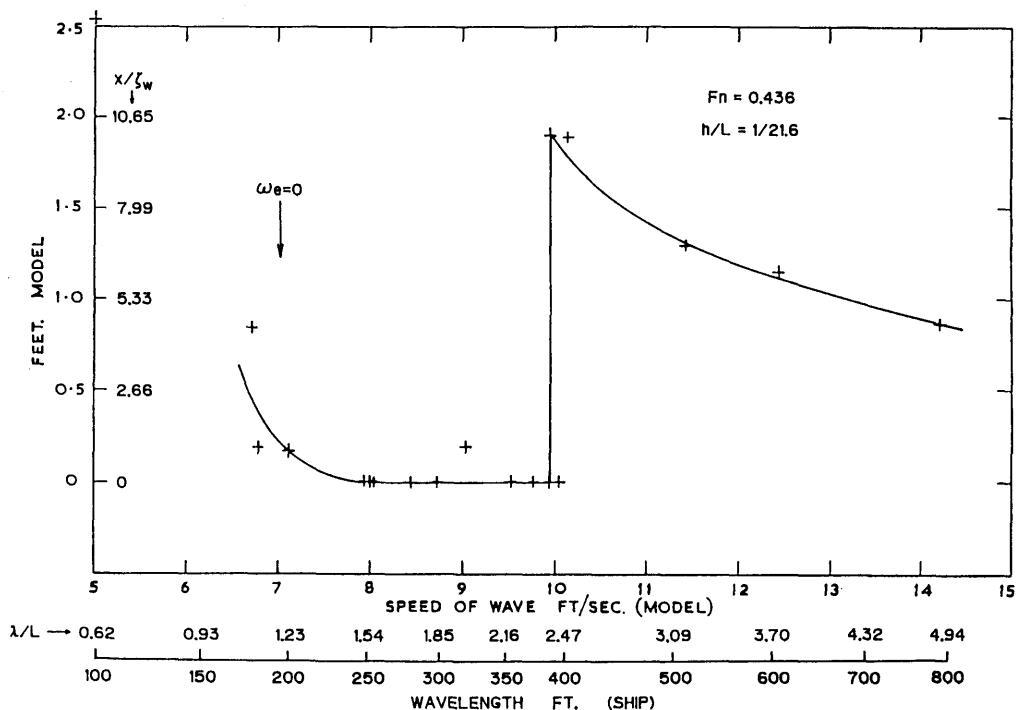


Fig. 2 Amplitude of Surge from Mean Position (from P. Du Cane et al.¹⁾)

えてやると模型船は一つ先の波に移ってそこでまた安定した平衡状態になるし、逆に前から外力を加えれば一つ後ろの波に移って同様に安定してしまうことを観察している。このような現象の生ずる波長範囲がしばらく続いた後、平水中速力で計算して $\omega_e = 0$ になる付近 ($\lambda/L = 1.2$ 付近, ω_e は出会円周波数) から再び船は前後揺れを始めるようになることを述べている。彼らはこの興味深い現象を発見しているが、その後それ以上の追究をしていないように思われる。

著者等は今回、漁船模型を使い P. Du. Cane 等と同様の実験を行った結果、追波中の大振幅前後揺れから波乗りに移行する現象に関して、多くの詳しいデータを得ることができ、その結果、波乗り現象発生メカニズムを明らかにするとともに、危険な波乗りを避けるための安全運航指針の簡易な推定法を提案することができた⁴⁾。追波中の大振幅前後揺れと波乗りに移行する限界を示すデータはこれまでに公表されたものはなく、また追波中の前後揺れの推定精度向上の

ための研究の検証データとしての意義も少なくないと考えられるので、今回得られた実験データは膨大であるが文献⁴⁾に発表した極く一部のデータを含めてすべての実験データを、資料として取まとめておくことにした。

なお、本報告の主要部分は、深水域での波乗りを扱った文献⁴⁾とほとんど同じであるが、更に浅水域での波乗りを含めて一般化したものである。文献⁴⁾を改めて参照する必要がないようにしたため、それと重複する記述が少なからずあることを始めにおことわりしておく。

2. 模型船と実験方法

2.1 模型船

使用した模型船は124トン型北洋沖合底曳網漁船の1/12模型であり、Table 1に主要目を、Fig. 3に正面線図と船首尾形状を、またPhoto 1に外観を示す。

Table 1 Principal Particulars

Items	Ship	1/12 Model	Remarks
Displacement Δ	471.07 t	266.0 kg	full departure
Length L_{pp}	30.58 m	2.548 m	between perpend.
Breadth B	7.38 m	0.615 m	mould
Fore Draft d_f	1.62 m	0.135 m	from base line
Aft Draft d_a	3.62 m	0.302 m	from base line
Mean Draft d_m	2.62 m	0.218 m	from base line
Roll Period T_r	10.17 sec	2.68 sec	2.94 sec as plan
Radius of Gyration		0.297 L_{pp}	
K G	3.36 m	0.280 m	K = base line
G M	0.45 m	0.0375 m	
\odot G	2.71 m	0.226 m	to aft
Propeller Dia.	2.30 m	0.186 m	stock propeller
Pitch ratio	cpp	1.055	
Dir. of Prop. Rev.	left	right ahead	
Rudder Area Ratio	1/27.3	1/27.3	$A_r/L_{pp} \cdot d_m$



Photo 1 View of Model

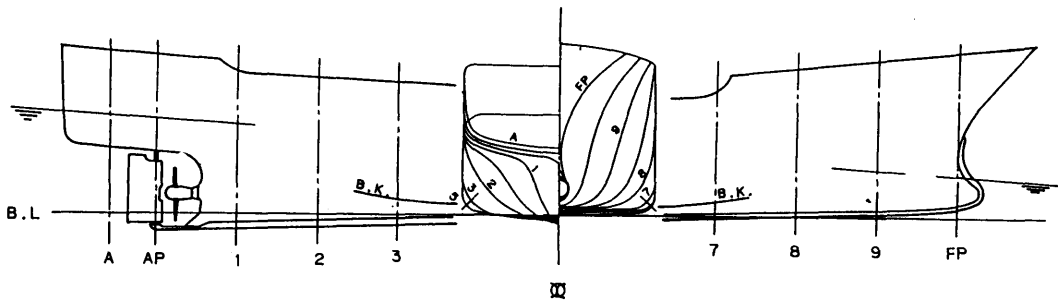


Fig. 3 Body Plan and Shapes of Bow and Stern

2.2 実験方法

模型実験は、船舶技術研究所の第1船舶試験水槽（通称80m角水槽）において、無線操縦の完全自航模型船を用いて行った。ある波長と波高に設定した規則的な追波中を、予め設定したプロペラ回転数で航走させ、模型船に搭載したジャイロアクセルメーターにより前後揺れの加速度を計測し、同時に水中超音波を利用した航跡自画装置による1秒ごとの位置データから、平均船速と前後揺れによる速度変動の振幅を計測した。プロペラ回転数は模型船に搭載した駆動用直流

モーターの速度制御装置により設定値が保たれるようになっている。P. Du. Cane等の実験では、模型船の馬力（恐らくプロペラ回転数）を平水中のある速力に相当する値に設定し、以後それは変えずに波の波長の方を変えて（波高は一定）行っているが、今回の実験は設定した波でプロペラ回転数の方を低速域から高速域まで広範囲に変えて行った。この方が波乗りの限界を明らかにするための実験としては能率が良く適切な方法と考えられる。実験を行った波長、波高、プロペラ

Table 2 Parameter of Experiment

λ/L_{pp}	h/λ	n (rps)*	
0.5	1/40	5~20,	14 runs
0.625	1/20	5~21,	24 runs
	1/10	10~15,	17 runs
0.75	1/20	5~21,	16 runs
1.0	1/40	5~21,	30 runs
	1/20	5~21.5,	29 runs
1.25	1/40	5~21.5,	15 runs
	1/20	5~21,	15 runs
1.50	1/40	5~21.5,	28 runs
	1/20	5~21.5,	25 runs
	1/10	13~21,	9 runs
1.75	1/40	5~21.5,	11 runs
2.0	1/40	5~21,	11 runs
	1/20	5~21.5,	21 runs
2.5	1/40	5~21,	9 runs
3.0	1/40	5~21,	9 runs

* n : number of propeller revolution

回転数の組み合わせを Table 2 に示す。なお、22rps 以上のプロペラ回転数での実験は、自航モーターの速度制御装置の容量の制限から実施できなかった。

波との出会角は、模型船の寸法の制限 ($L_{pp}=2.548$ m, 排水量 266kg) からオートパイロット装置を搭載できなかったため、マニュアル操舵でコース保持が比

較的やりやすい $\chi=0^\circ$ (真の追波) の場合のみに限定した。

前後揺れの加速度を計測したジャイロアクセロメーターは通常のパーティカルジャイロのジンバル上に小型のサーボ式加速度計を載せたもので、本来は縦揺れ、横揺れ、上下揺れ加速度、左右揺れ加速度を計測するように設計されたものであるが、今回はこれを水平面内で 90° 回転させて前後揺れの加速度を計測したものである。

角水槽での真の追波中の実験で使える有効水面は、助走および回避旋回区間を含めて 60m 弱であり質のよいデータを取るには狭すぎる嫌いがあるが、限界一杯まで船を航走させてなるべく長時間のデータを取るよう努めた。このため回避しきれず、消波ビーチに乗り揚げプロペラ、船体、船底超音波発信部等を度々損傷した。

3. 実験結果

3.1 プロペラ回転数と船速

Fig. 4 は、平水中の模型のプロペラ回転数と船速の関係である。角水槽における模型実験では通常摩擦修正をしていないので、今回の実験もすべて模型船の自航点におけるものである。この結果をプロペラ回転数の 7 次式で最小自乗近似した曲線を、Fig. 5 以下に示す追波中のプロペラ回転数と船速の関係の図で使っている。

Fig. 5 (a)~(p) には、その追波中のプロペラ回転数

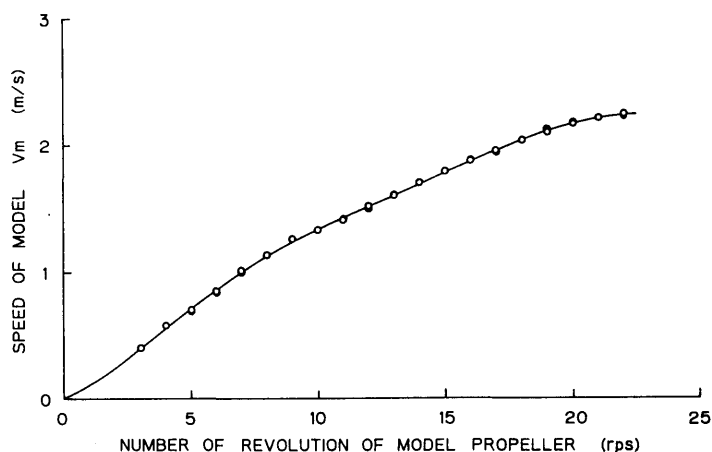


Fig. 4 Speed Test in Still Water

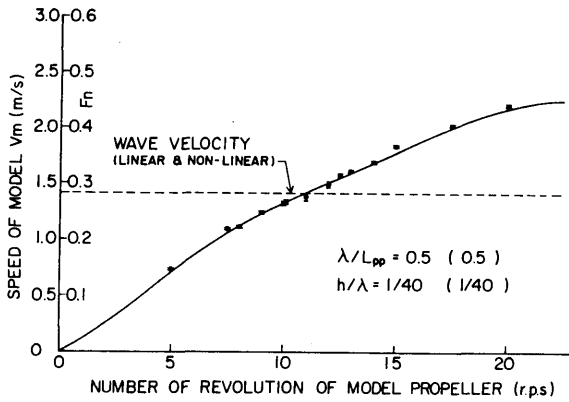


Fig. 5 (a) Variation of Model Speed
($\lambda/L = 0.500, h/\lambda = 1/40$)

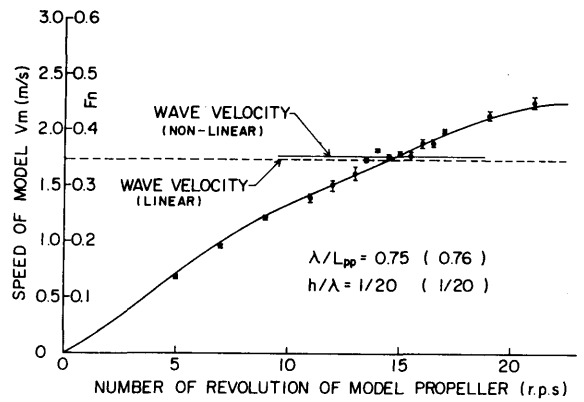


Fig. 5 (d) Variation of Model Speed
($\lambda/L = 0.750, h/\lambda = 1/20$)

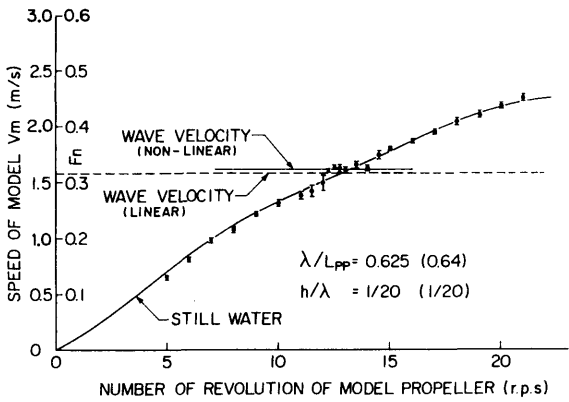


Fig. 5 (b) Variation of Model Speed
($\lambda/L = 0.625, h/\lambda = 1/20$)

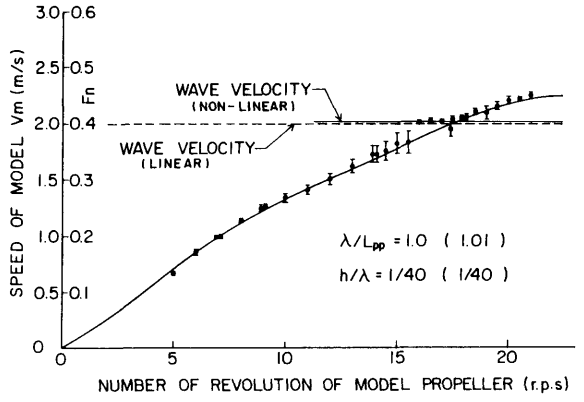


Fig. 5 (e) Variation of Model Speed
($\lambda/L = 1.000, h/\lambda = 1/40$)

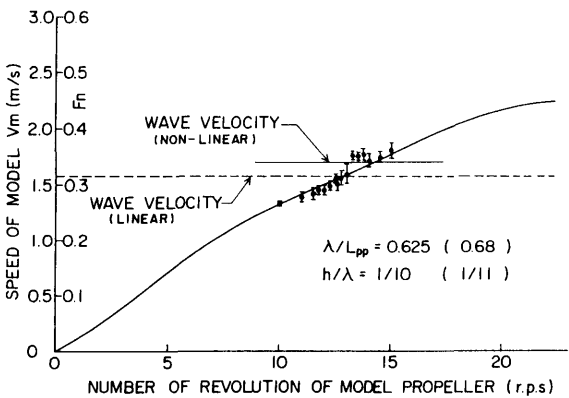


Fig. 5 (c) Variation of Model Speed
($\lambda/L = 0.625, h/\lambda = 1/10$)

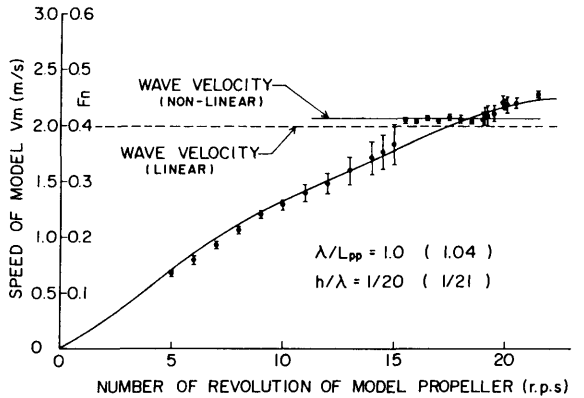


Fig. 5 (f) Variation of Model Speed
($\lambda/L = 1.000, h/\lambda = 1/20$)

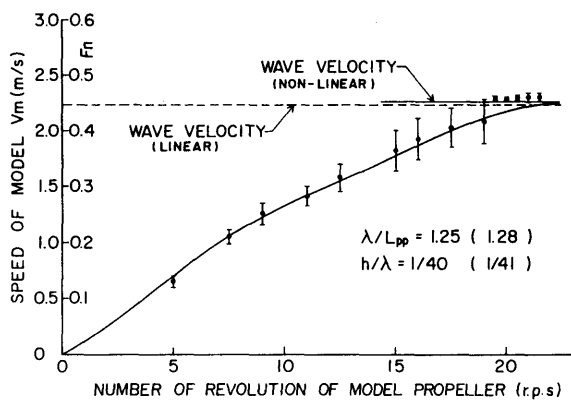


Fig. 5 (g) Variation of Model Speed
($\lambda/L = 1,250, h/\lambda = 1/40$)

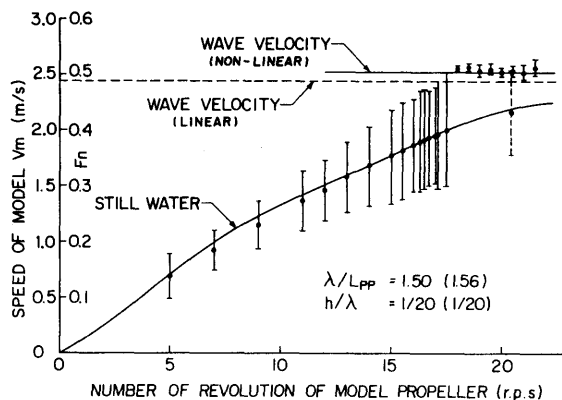


Fig. 5 (j) Variation of Model Speed
($\lambda/L = 1,500, h/\lambda = 1/20$)

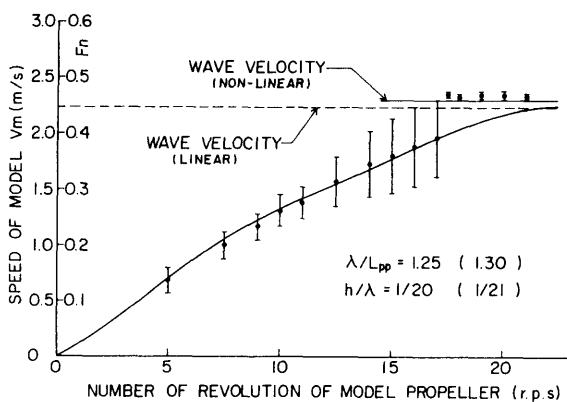


Fig. 5 (h) Variation of Model Speed
($\lambda/L = 1,250, h/\lambda = 1/20$)

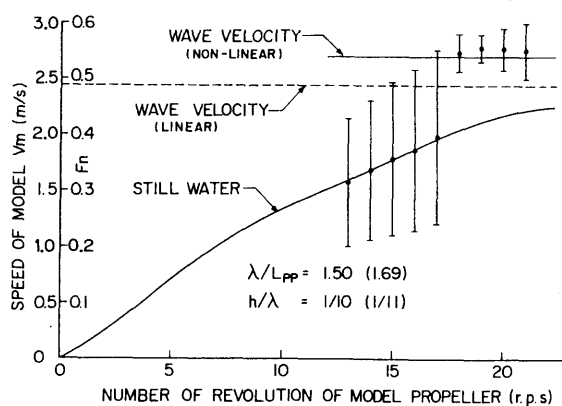


Fig. 5 (k) Variation of Model Speed
($\lambda/L = 1,500, h/\lambda = 1/10$)

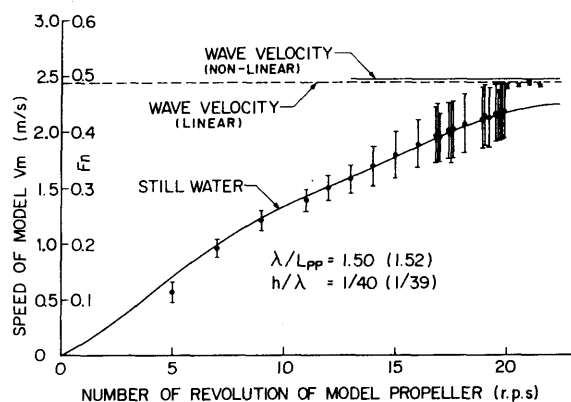


Fig. 5 (i) Variation of Model Speed
($\lambda/L = 1,500, h/\lambda = 1/40$)

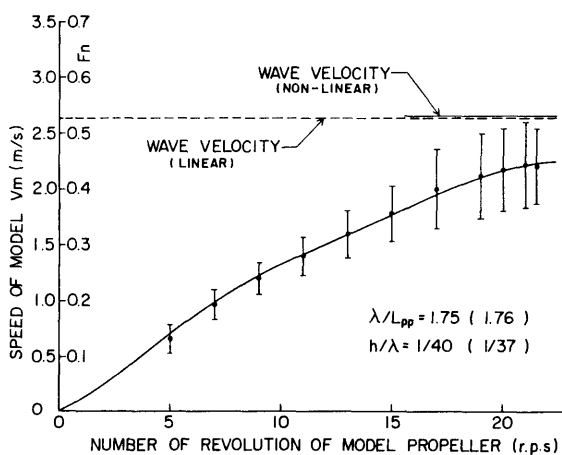


Fig. 5 (l) Variation of Model Speed
($\lambda/L = 1,750, h/\lambda = 1/40$)

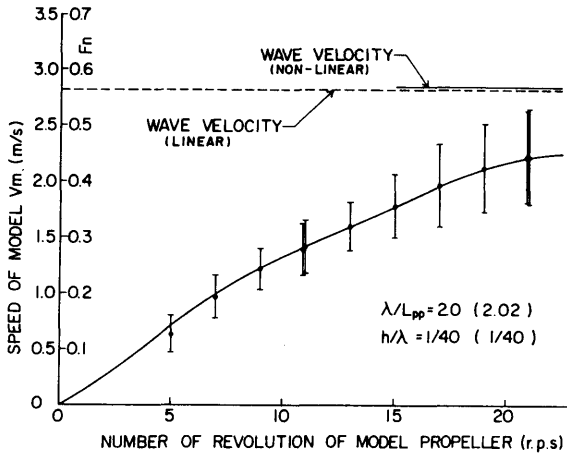


Fig. 5 (m) Variation of Model Speed
($\lambda/L = 2.000, h/\lambda = 1/40$)

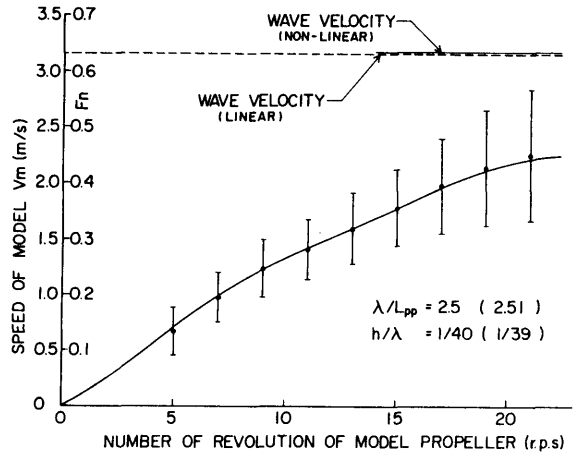


Fig. 5 (o) Variation of Model Speed
($\lambda/L = 2.500, h/\lambda = 1/40$)

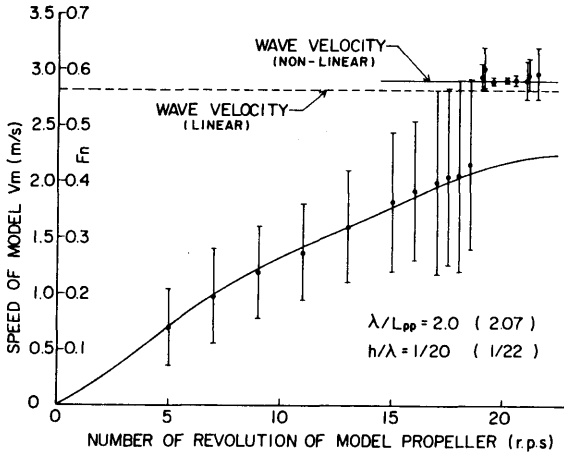


Fig. 5 (n) Variation of Model Speed
($\lambda/L = 2.000, h/\lambda = 1/20$)

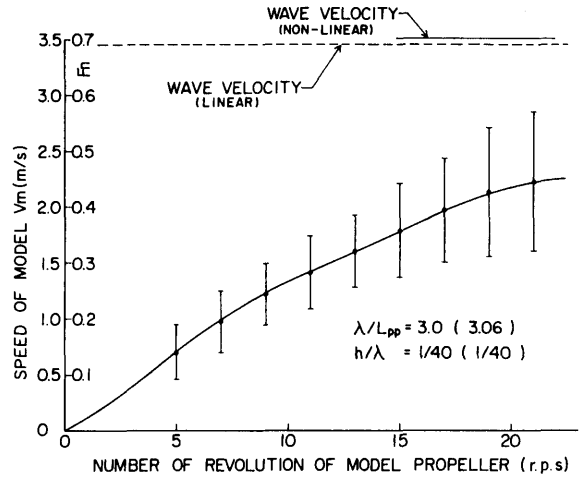


Fig. 5 (p) Variation of Model Speed
($\lambda/L = 3.000, h/\lambda = 1/40$)

と船速の関係についての実験結果を、Table 2 で示したすべての波長、波高の組み合わせの各々について1ケースにつき1図として示してある。ここで示した船速は、上述のように超音波式航跡自画装置の1秒毎の位置データというかなり粗い間隔のデータから求めたものであり、また波高が高く船体運動が激しい場合や、船速が速い場合、水中超音波の伝播状況が悪い等のため欠測データの少なくない場合もあり、測定精度に多少の問題はあるが、予想外に良いデータが取れたと判断している。Fig. 6 に航跡自画装置からの船速解析結果の一例を示しておく。現在更新中の新しい航跡自画装置が完成すれば、1秒に最大5個までの位置デ

ータが取れる予定であり、また欠測データを少なくするため、超音波の受波器を角水槽内の8箇所に増やす等の対策をしており、もっと質の良い計測ができるものと期待している¹²⁾。

Fig. 5 の中から大振幅の前後揺れから波乗りへの移行の様子が良く現れている例として $\lambda/L = 1.5$ の場合を見てみよう。Fig. 5 (i) は $h/\lambda = 1/40$ の場合であるが、上下の両端を短い横線で区切られた縦線は速度変動の範囲を示し、黒丸はその変動の中間点をとって平均船速を表している。プロペラ回転数が高くなるにつれて、前後揺れによる速度変動の振幅が大きくなるが、あるプロペラ回転数 (この場合は 20rps) のとこ

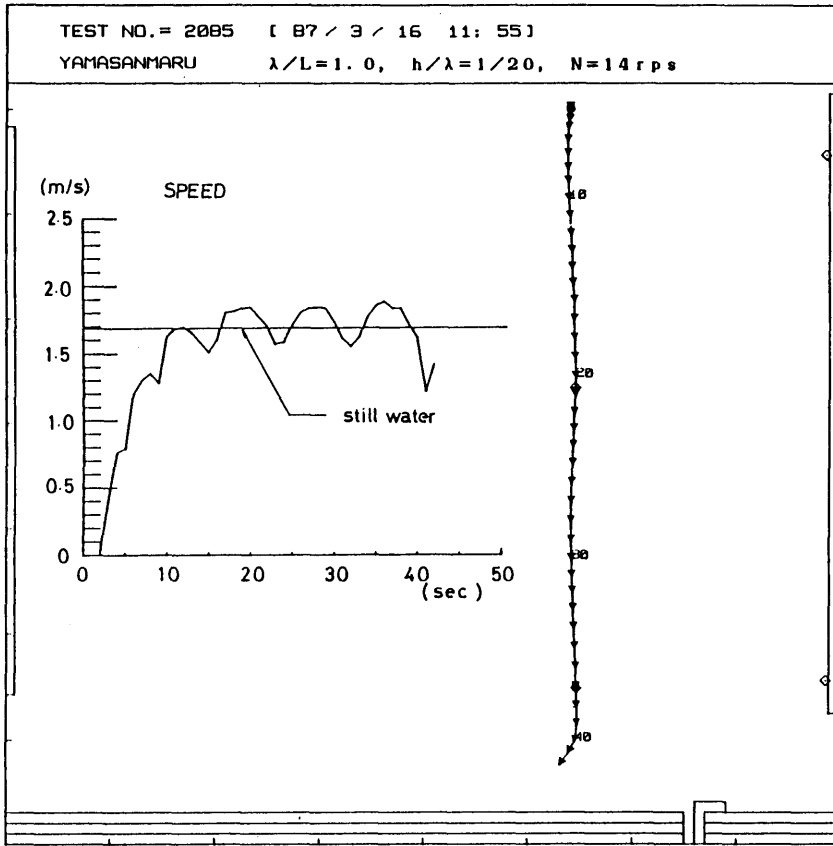


Fig. 6 Example of Speed Analysis from Position Data

ろで急に速度変動がなくなり、同時に平均船速が不連続に変化している。それまでは平均船速はほぼ平水中の値に近いところにあったものが、ここで突然に高くなっているわけであるが、その高くなった速度は図中に点線で示した波速に一致しているのが自然である。僅かな差は出ているが、これは発生した波の周期あるいは船速の計測誤差と考えられる。Fig. 5 (j) は波高が倍になった $h/\lambda=1/20$ の場合であるが、平均船速に突然の変化が起こるプロペラ回転数が 18rps まで下がっている。またこの場合は突然の変化を起こしたあとの平均船速は、点線で示した波速より少し高い速度まで上がっている。Fig. 5 (k) は更に波高を高くした $h/\lambda=1/10$ の場合であるが、突然の変化を起こしたあとの平均船速は、点線で示した波速よりかなり高い速度まで上がっている。しかしビデオと 1 秒毎の連続写真による観察によれば、この突然の変化をす

る前までのプロペラ回転数では大きな前後揺れがみられるが、突然の変化のあとのプロペラ回転数では明らかに波とともに走り、波乗り状態になっていると判断された。従ってこれらの図に現れたような波速より速い速度で波乗りをするということは不合理であるので、この点を考察してみた結果、次のような判断をした。

すなわち、点線で示した波速 C は波周期を T とし

$$\lambda = (g/2\pi) T^2 \quad (3.1)$$

$$C = (g\lambda/2\pi)^{1/2} \quad (3.2)$$

から求めた値であり、無限小振幅の正弦波について成り立つ関係である。

一方有限振幅波である Stokes 波については、波数 $k (=2\pi/\lambda)$ として

$$C^2 = g/k(1+k^2 \zeta_w^2 + 1.25 k^4 \zeta_w^4 + \dots) \quad (3.3)$$

であり⁵⁾、また

$$\lambda = CT \quad (3.4)$$

であるから、(3.3) と (3.4) から C を消去して次式が求められる。

$$(2\pi/T)^2 = gk(1 + k^2\zeta_w^2 + 1.25k^4\zeta_w^4 + \dots) \quad (3.5)$$

計測された波周期 T と波振幅 ζ_w を既知としてこの式から k 、従って波長が求められ、(3.4) により波速 C を求めることができる。

Fig. 5 の図中に非線形として実線で示した波速は、このようにして (3.5) の右辺第3項すなわち k^4 の項まで取って求めた値である。波乗り状態と見なされる船の平均速度は、このようにして求めた波速と比べてもなおある程度の差が認められるが、計測誤差の範囲と判断することもでき、Fig. 5 (i)~(k) に現れていた、同一周期の波に対して波高が高い程波乗り状態の船速が高く出ているように見える奇妙な結果については、上のような説明ができると考えている。

Fig. 5 等で $\lambda/L = 1.5$ などのまるめた値で書いてあるものは、グループ分けしたものが見分けやすいように実験計画での予定値を記してあり、上のような修正をほどこした値はカッコ内に記してある。なお同一周期の波を起こしたつもりでも造波装置の制御精度の問題からか、計測された周期が波高が高い時に僅かであるが長くなっている場合もあり、修正にあたっては計測された周期と波高（フーリエ解析した基本周波数成分）を使用している。

以上のような波速の修正をほどこした後の結果について見て見ると、 $\lambda/L = 1.5$ のいずれの場合も、平均船速の突然の変化が起こる（すなわち波乗り状態になる）のは、前後揺れによる速度変動を含めて船速の最大値が波速に達した時点であるとする仮説⁶⁾を裏付けているように思われる。

同様のことは、 $\lambda/L = 2.0$, $h/\lambda = 1/20$ (Fig. 5 (n)) や $\lambda/L = 1.25$, $h/\lambda = 1/40$, $1/20$ (Fig. 5 (g), (h))、また $\lambda/L = 1.0$, $h/\lambda = 1/40$, $1/20$ (Fig. 5 (e), (f)) のほかに、 $\lambda/L = 0.625$, $h/\lambda = 1/20$, $1/10$ (Fig. 5 (b), (c)) というような短波長の波においても起こっていることが明瞭に示されている。

これらから当然のこととして類推されることは、Fig. 5 で波乗りが起こっていない λ/L (例えば Fig. 5 (p) の $\lambda/L = 3.0$, $h/\lambda = 1/40$ 等) についても波高を高くするか、プロペラ回転数を上げて船速を上げるかす

れば必ず波乗りが起こるのであろうということである。

また平均船速の突然の変化があるため、如何に馬力の余裕があってもある海象下で実現できない船速範囲が存在するということになるが、これは35年以上も前に Grim⁷⁾ が指摘していたことである。

平均船速が波速より低い場合には、前後揺れによる速度変動を含む船速が波速まで達すると波に捕捉されて波乗り状態となり、平均船速が波速までもっていかれるらしいことは以上の実験例に数多く示されているが、逆に平均船速が波速より高い場合には、前後揺れによる速度変動を含む船速の最低値が波速まで下がった時に波に捕捉されて波乗り状態となり、平均船速が波速まで下げられたということを明確に示す結果はあまり得られていない。 $\lambda/L = 0.625$, $h/\lambda = 1/20$ (Fig. 5 (b)) の 14rps, $\lambda/L = 0.75$, $h/\lambda = 1/20$ (Fig. 5 (d)) の 15.5rps, $\lambda/L = 1.0$, $h/\lambda = 1/20$ (Fig. 5 (f)) の 19rps などがその例のようにもみえるが数が少なく断定し難い。従って、波乗り発生の限界を特定する仮説のうち、下限については今回の実験で一応確認できたと考えられるが、上限については確認できていない。但し平均船速が波速より高い場合についての実験は、今回は自航モーターの速度制御装置の容量の制限から、 $\lambda/L \leq 1$ の場合に限られており、もっと長い波長についての実験で確認してみる必要があるのかもしれない。

次に波乗り状態に陥った船の平均船速が波速に等しくなっていることは、前述のように実験でも確認されたと考えているが、この場合の船速は波速に等しい一定値ではなく明白に正弦的な変動をしていると認められる場合が特に波長の長い方の場合に少なくなかった。一例を Fig. 7 に示しておく。これは、恐らく波乗り状態におけるいわゆる2つの平衡点^{7), 8)} (推力, 抵抗, 前後揺れ強制力を加えた前後方向の力が負, すなわち推力方向になる範囲の両端) の間で前後方向の往復運動をしているのではないかと推測しているが、今後更に究明する必要がある。

3.2 前後揺れ応答

前後揺れの振幅応答特性を、波長波高を固定して船速を変えて求めた結果を Fig. 8 (a)~(p) に示す。 $\omega_e = 0$ を同調点とする一種の同調曲線のような形になることと、波乗りになる前後の極めて大振幅の前後揺れが特徴的であり振幅比で10以上の値が数多くみられ

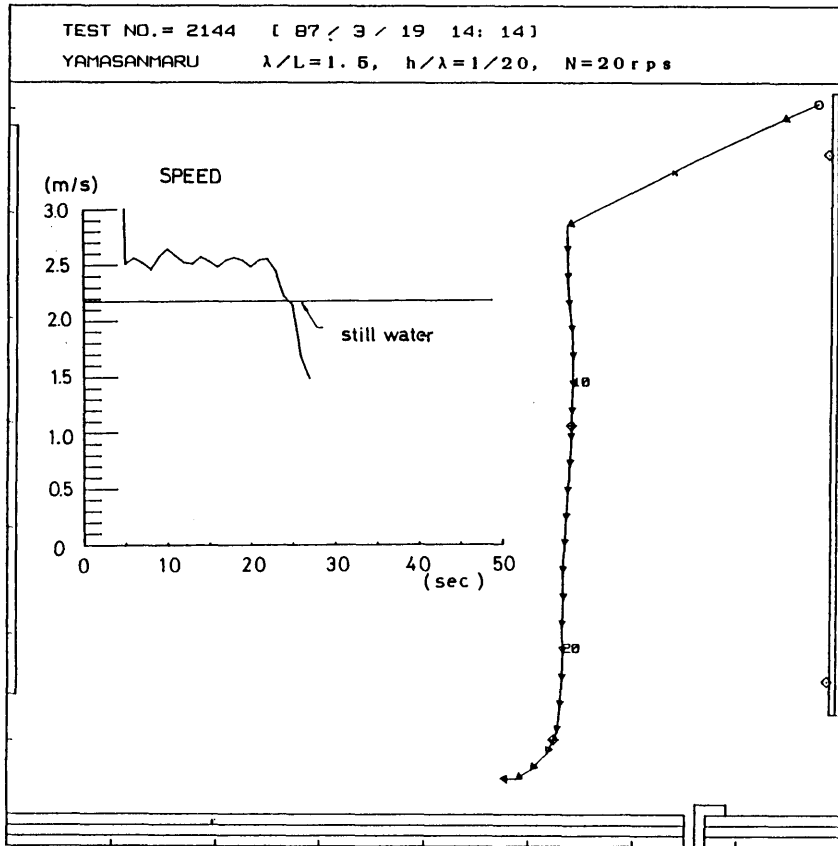


Fig. 7 Surging Motion during Surf-riding Condition

る。 $\lambda/L=0.5, 0.625, 0.75$ というような強制力の小さな短波長の場合でも傾向は同じである。前後揺れ振幅の実験値の大部分については、前後揺れ加速度の記録から解析したものと、1秒毎の航跡から解析したものとで大きな差はないが波乗り直前の大振幅の前後揺れでは、加速度計からの解析は精度があまり良くなり、航跡からの解析結果を示した場合が多い。

Fig. 8 のなかで波乗りが発生している場合の図をみると、 $\omega_e = 0$ の付近、すなわち波乗りのところを実験点が低いところに集中しているが、これは上に述べた波乗りの中で起こっている通常の前後揺れとは異なる性質の短周期前後揺れの部分をプロットしたものである。波との出会周期で変動する本来の前後揺れをプロットしようとするならば、出会周期無限大で、有限の前後揺れ速度があるのであるから、プロットする位

置は無限大とすべきであるが、ここではそれは省略して性質の異なる前後揺れ振幅の方を示してある。

Fig. 9 には通常の周波数応答の形で前後揺れの振幅応答を船速毎に示してある。

Fig. 8, Fig. 9 のいずれも計算値は通常のストリップ法に組み込まれているもので、波強制力はフルードクリロフ力のみとし、抵抗などの減衰力項や附加質量も無視した最も単純な計算法による値である⁹⁾。実験値と計算値の一致度は、特に高速域で極めて悪く改善が必要である¹⁰⁾。計算値がつねに実験値より高くでていることから、附加質量を元良チャートなどから求め、抵抗とプロペラ単独特性、自航要素を考慮すればかなり改善されると考えられるが、今回は試みていない。

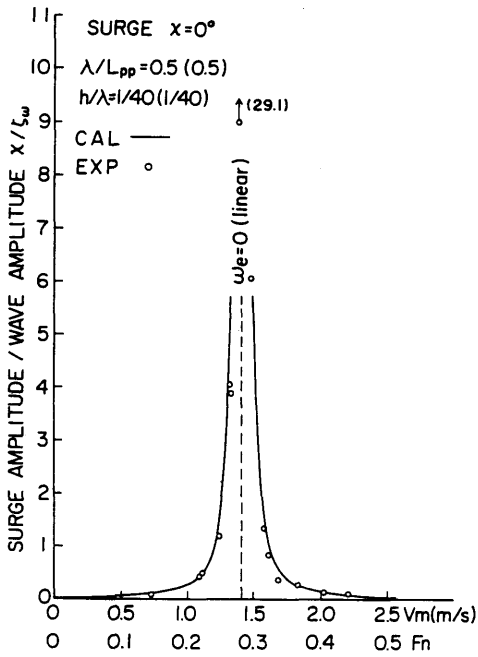


Fig. 8 (a) Surging Amplitude
 ($\lambda/L=0.500, h/\lambda=1/40$)

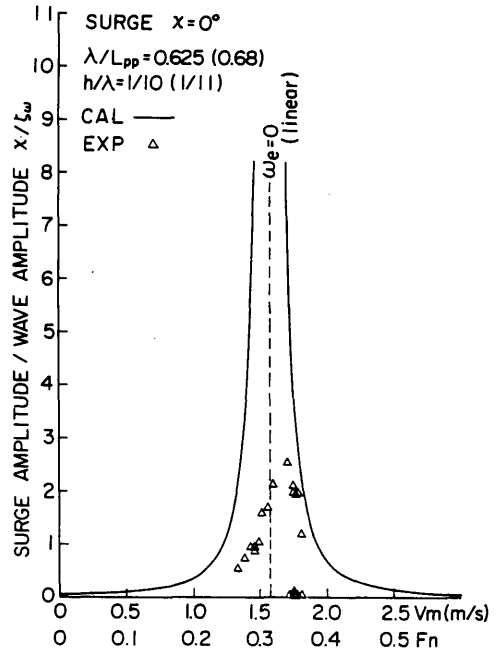


Fig. 8 (c) Surging Amplitude
 ($\lambda/L=0.625, h/\lambda=1/10$)

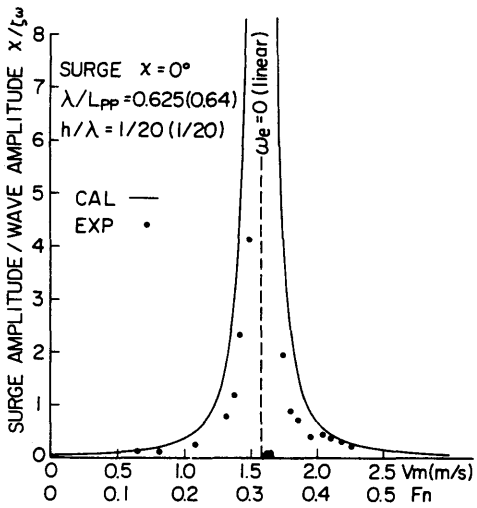


Fig. 8 (b) Surging Amplitude
 ($\lambda/L=0.625, h/\lambda=1/20$)

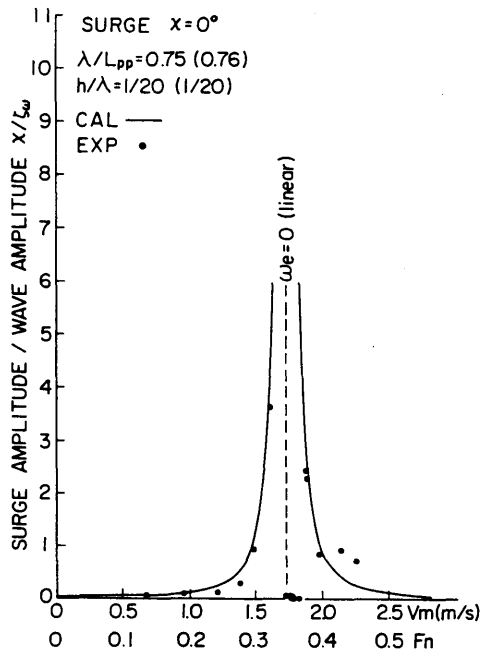


Fig. 8 (d) Surging Amplitude
 ($\lambda/L=0.750, h/\lambda=1/20$)

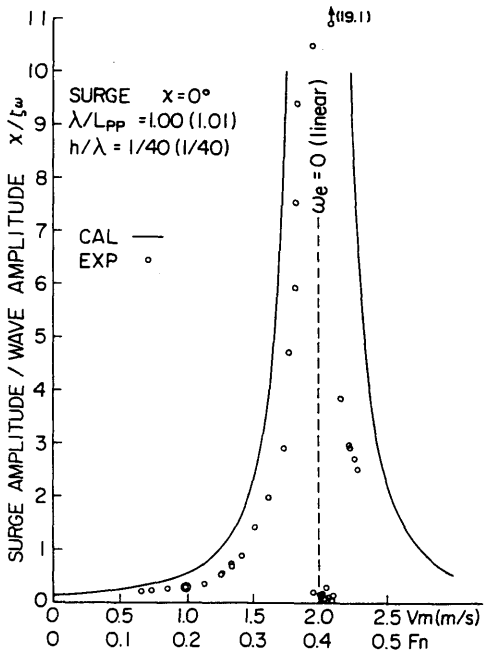


Fig. 8 (e) Surging Amplitude
($\lambda/L = 1.000$, $h/\lambda = 1/40$)

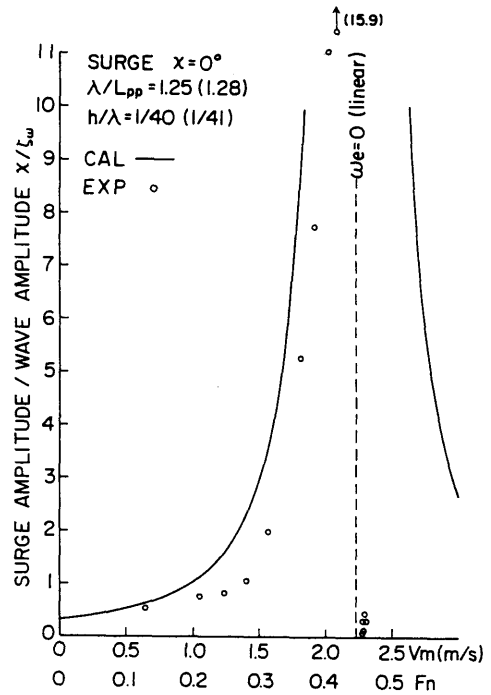


Fig. 8 (g) Surging Amplitude
($\lambda/L = 1.250$, $h/\lambda = 1/40$)

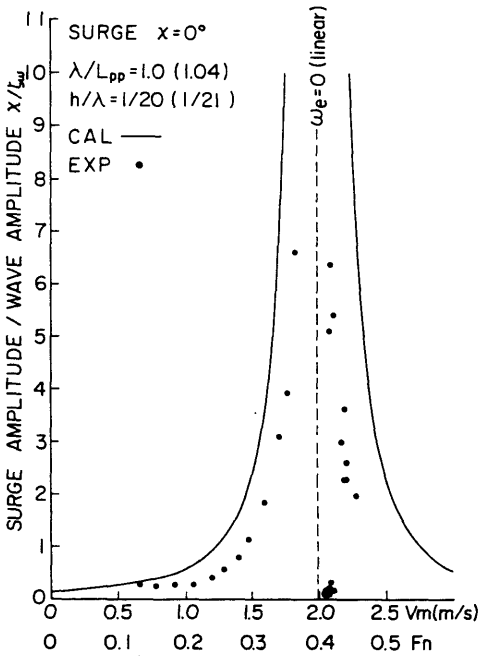


Fig. 8 (f) Surging Amplitude
($\lambda/L = 1.000$, $h/\lambda = 1/20$)

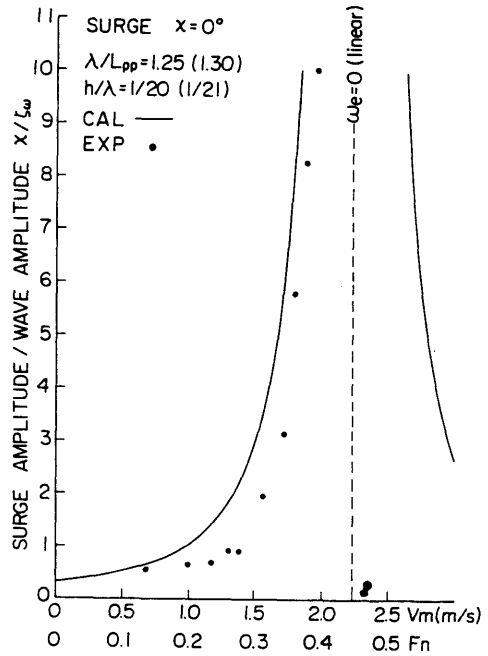


Fig. 8 (h) Surging Amplitude
($\lambda/L = 1.250$, $h/\lambda = 1/20$)

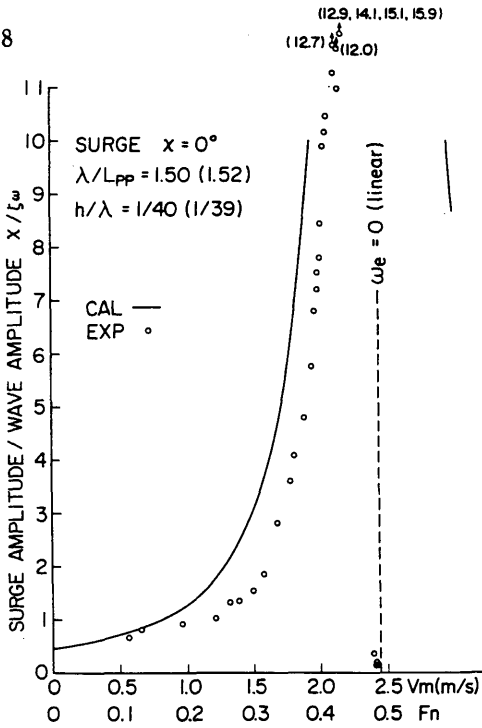


Fig. 8 (i) Surging Amplitude
($\lambda/L = 1.500$, $h/\lambda = 1/40$)

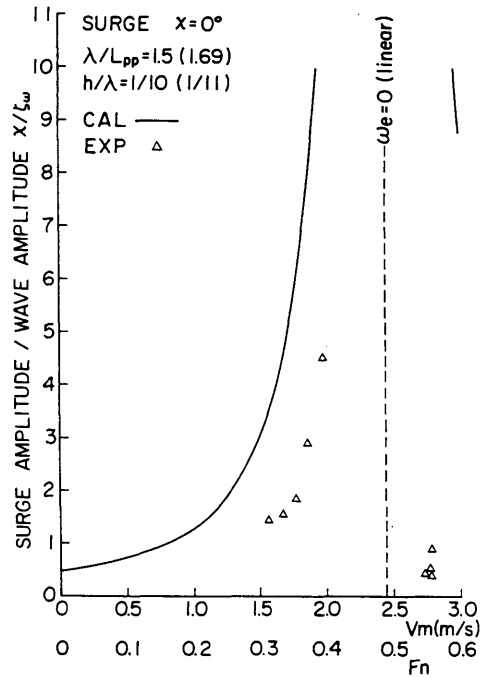


Fig. 8 (k) Surging Amplitude
($\lambda/L = 1.500$, $h/\lambda = 1/10$)

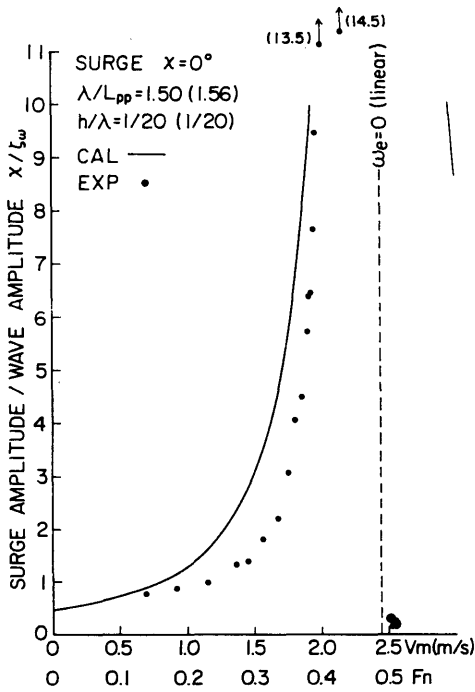


Fig. 8 (j) Surging Amplitude
($\lambda/L = 1.500$, $h/\lambda = 1/20$)

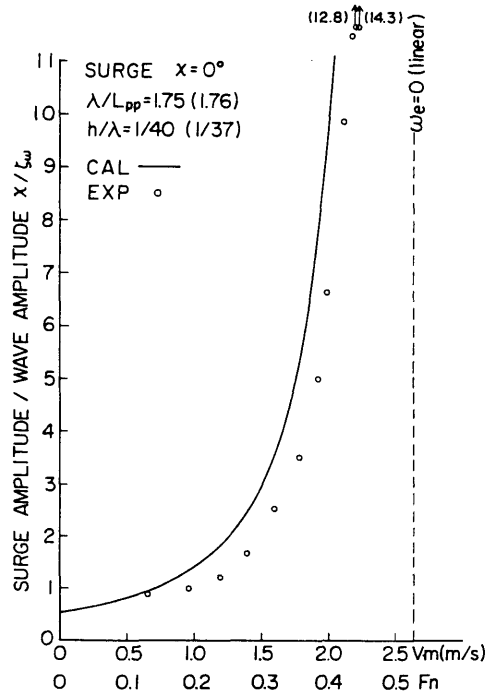


Fig. 8 (l) Surging Amplitude
($\lambda/L = 1.750$, $h/\lambda = 1/40$)

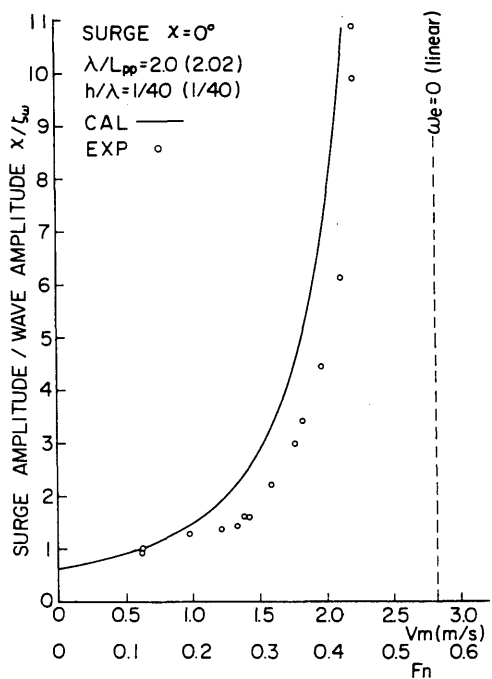


Fig. 8 (m) Surging Amplitude
($\lambda / L = 2.000, h / \lambda = 1/40$)

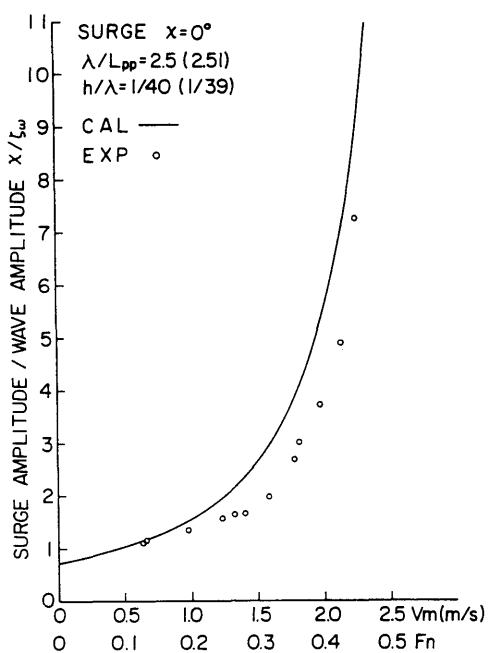


Fig. 8 (o) Surging Amplitude
($\lambda / L = 2.500, h / \lambda = 1/40$)

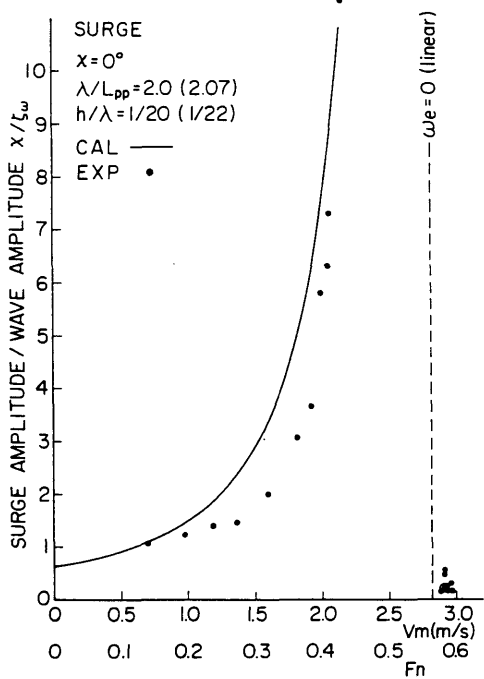


Fig. 8 (n) Surging Amplitude
($\lambda / L = 2.000, h / \lambda = 1/20$)

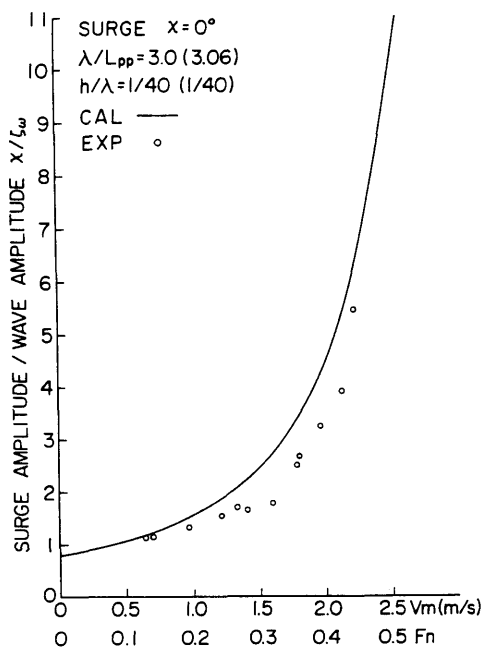


Fig. 8 (p) Surging Amplitude
($\lambda / L = 3.000, h / \lambda = 1/40$)

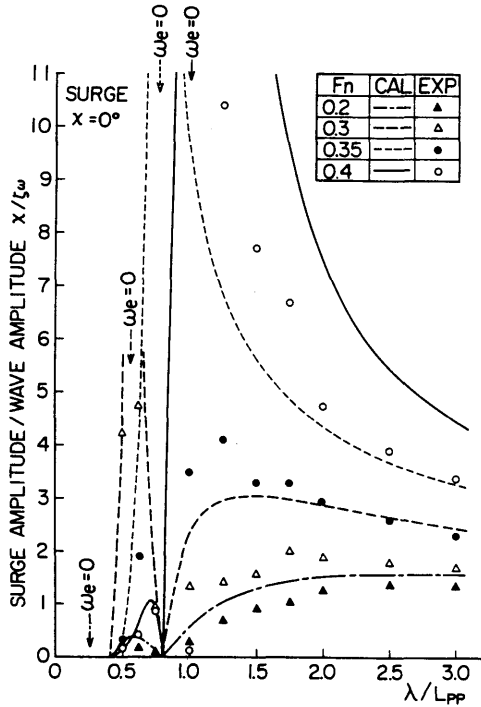


Fig. 9 Surging Response Function

3.3 出会周期

追波中の前後揺れ振幅は、上に述べたもっとも単純な計算法では $1/\omega_e^2$ に比例するし、抵抗を考慮した計算法では $1/\omega_e$ に比例する。いずれにもして追波中の前後揺れ振幅が極めて大きくなる理由は、出会周期 T_e が長くなることであるので、出会周期の実験値を Fig. 10 (a)~(p) に示す。波傾斜が緩く ($h/\lambda = 1/20, 1/40$)、また $\omega_e = 0$ (波乗り) から外れていけば計算値と良く合っているが、波傾斜が急になる ($h/\lambda = 1/10$) と全体に高速側へずれてくる (Fig. 10 (c), (k))。これは、これらの図では前述の振幅分散による波速の増加を無視しているためである。また $\omega_e = 0$ に近づくとき計算値から外れてくる傾向が、 $\lambda/L \geq 1.5$ で顕著にみられるが、これは前後揺れ速度が平均値のまわりの正弦的な変動から、非対称な変動になり波速に近い高速側が1周期の間により長い時間を占めることにより (Fig. 6 参照)、平均船速が平水中の値より上がっていることによるものと考えられる。

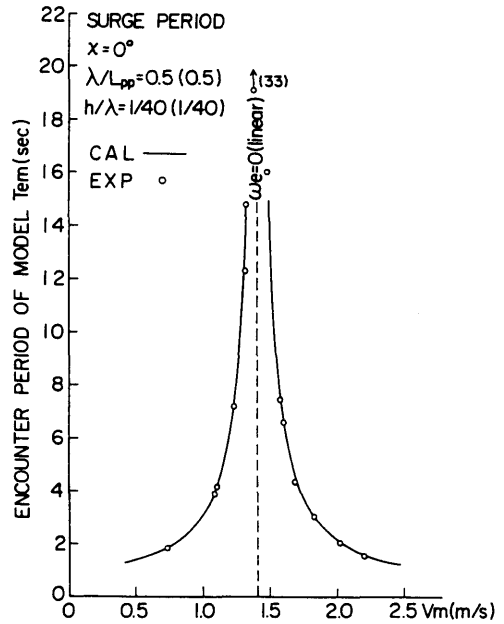


Fig. 10 (a) Surging Period ($\lambda/L = 0.500, h/\lambda = 1/40$)

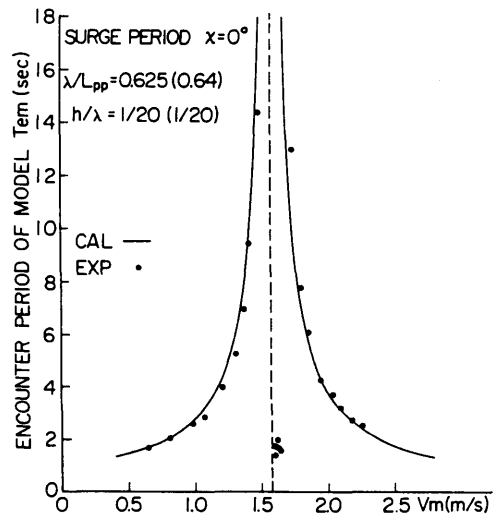


Fig. 10 (b) Surging Period ($\lambda/L = 0.625, h/\lambda = 1/20$)

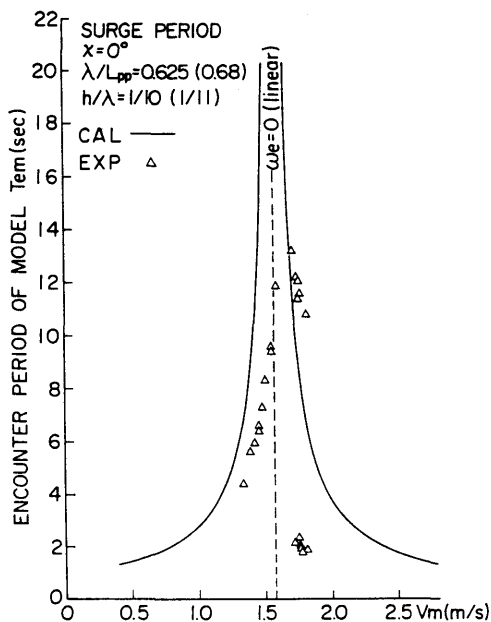


Fig. 10 (c) Surging Period
 ($\lambda/L=0.625, h/\lambda=1/10$)

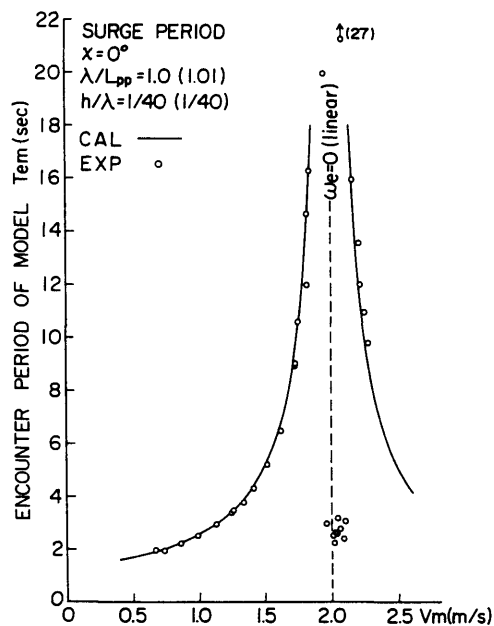


Fig. 10 (e) Surging Period
 ($\lambda/L=1.000, h/\lambda=1/40$)

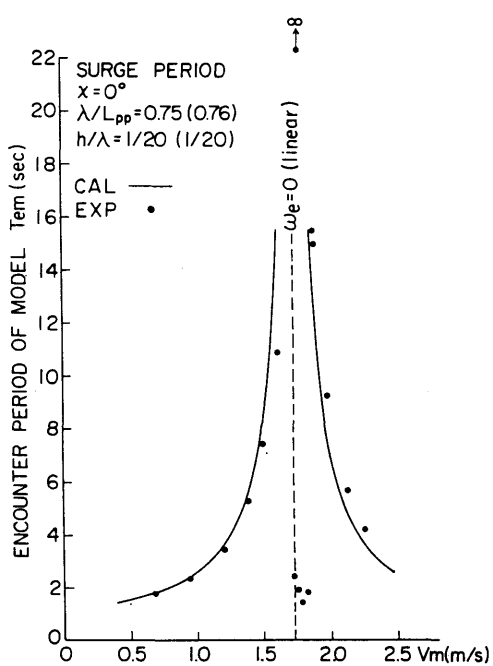


Fig. 10 (d) Surging Period
 ($\lambda/L=0.750, h/\lambda=1/20$)

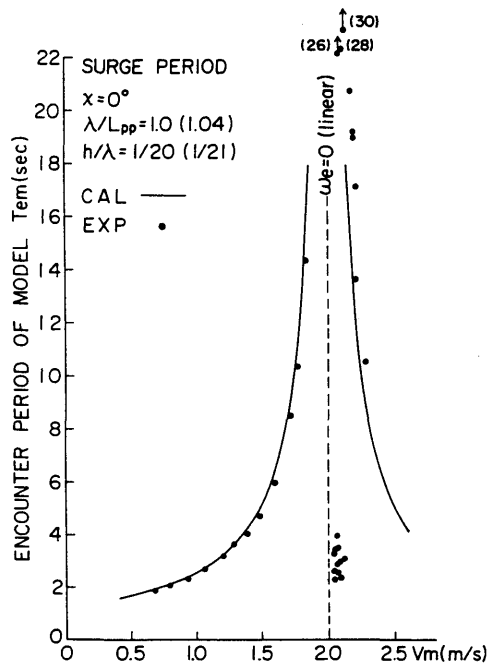


Fig. 10 (f) Surging Period
 ($\lambda/L=1.000, h/\lambda=1/20$)

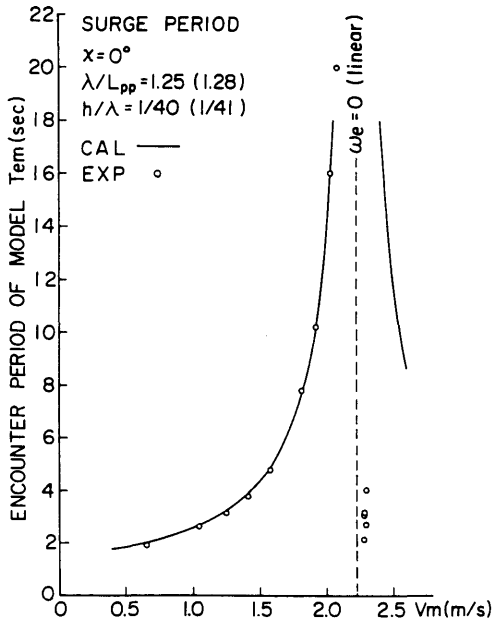


Fig. 10 (g) Surging Period
 ($\lambda/L = 1.250$, $h/\lambda = 1/40$)

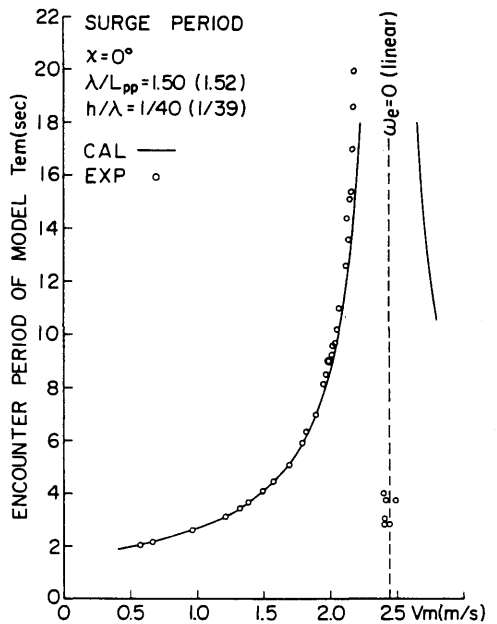


Fig. 10 (i) Surging Period
 ($\lambda/L = 1.500$, $h/\lambda = 1/40$)

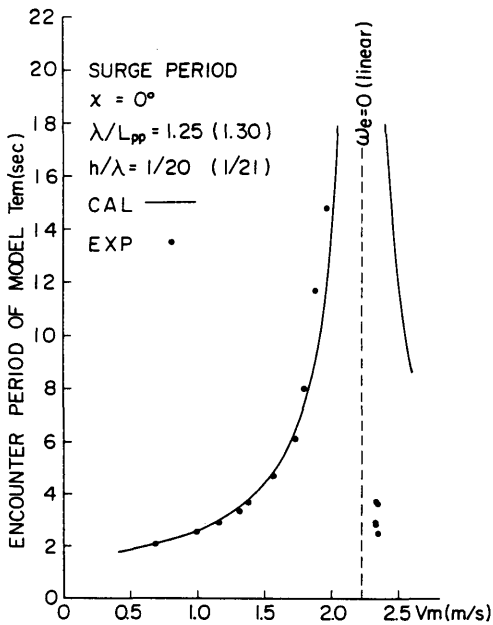


Fig. 10 (h) Surging Period
 ($\lambda/L = 1.250$, $h/\lambda = 1/20$)

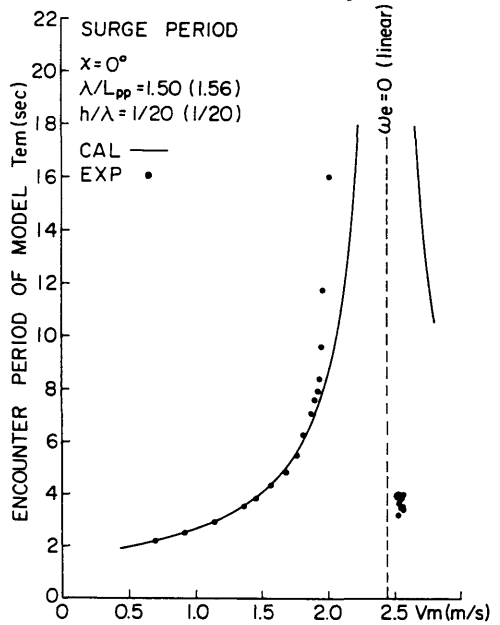


Fig. 10 (j) Surging Period
 ($\lambda/L = 1.500$, $h/\lambda = 1/20$)

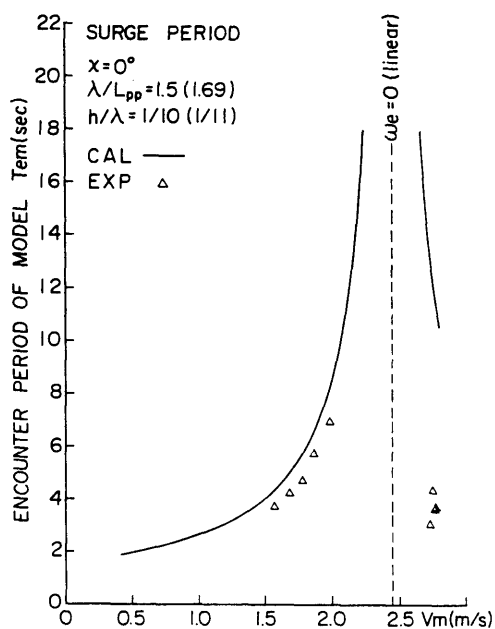


Fig. 10 (k) Surging Period
 ($\lambda/L=1.500$, $h/\lambda=1/10$)

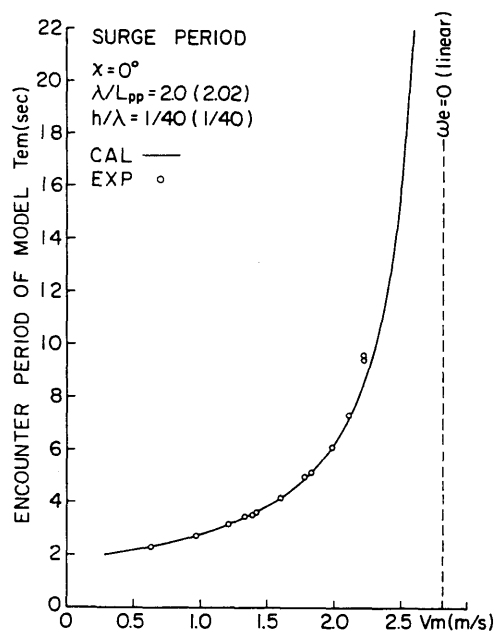


Fig. 10 (m) Surging Period
 ($\lambda/L=2.000$, $h/\lambda=1/40$)

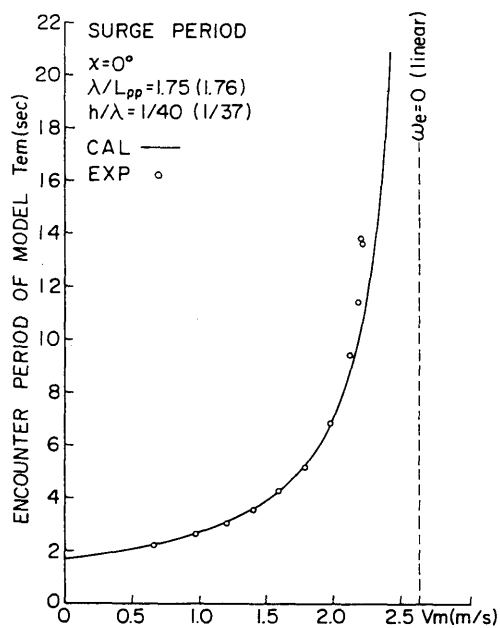


Fig. 10 (l) Surging Period
 ($\lambda/L=1.750$, $h/\lambda=1/40$)

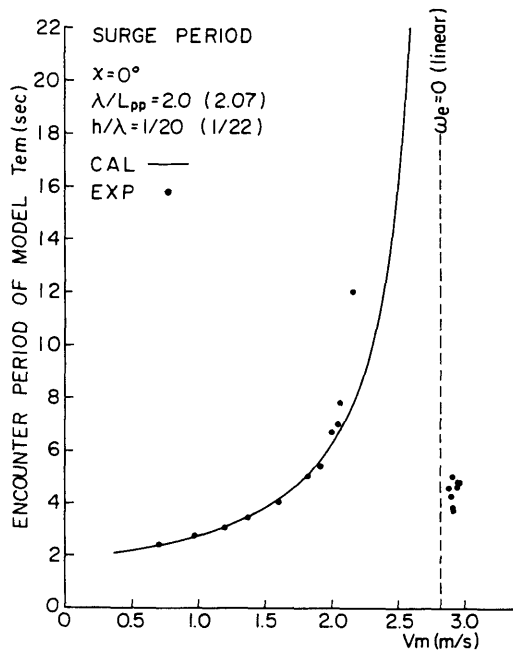


Fig. 10 (n) Surging Period
 ($\lambda/L=2.000$, $h/\lambda=1/20$)

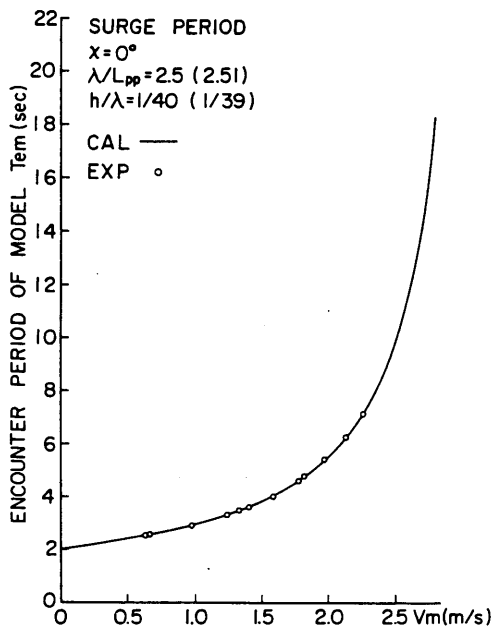


Fig. 10 (o) Surging Period
 ($\lambda/L=2.500, h/\lambda=1/40$)

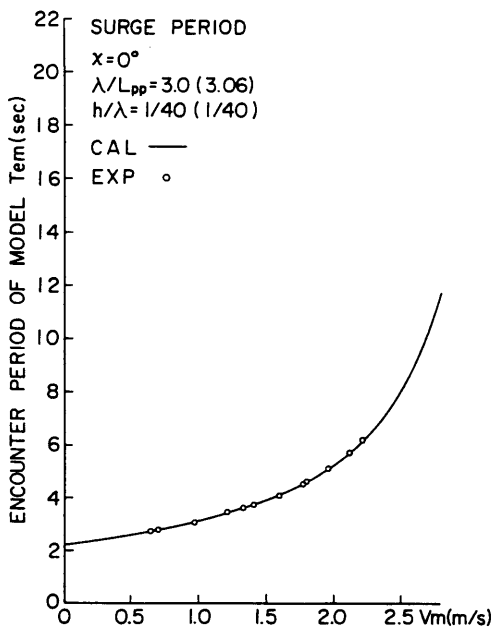


Fig. 10 (p) Surging Period
 ($\lambda/L=3.000, h/\lambda=1/40$)

有効水面 60m の水槽で 2m/sec 前後の模型船速の実験を行い、20sec 近い周期の現象を観測しているわけであるから、極めて難しい実験であり模型船を度々損傷したということが納得されると思われるが、その割にはかなり精度の良いデータが得られたと判断している。

$\omega_e=0$ 付近で低いところに集中している実験点は、通常言うところの波との出会周期ではなく、先に述べた波乗り中の前後揺れの周期であって、Fig. 8 の前後揺れ振幅の図における $\omega_e=0$ 付近での実験点と対応するものである。

3.4 前後揺れ速度と加速度

Fig. 11 (a)~(p)には前後揺れの速度と加速度を示してある。実線は前述の単純計算法による結果であり、実験値とは極く低速時、または極く短波長の場合 ($\lambda/L=0.5$, Fig. 11 (a))を除いて一致度は極めて悪い。これらの実験値は計算法の改良を研究する際の検証データとして有用であることと、追波中の前後揺れの性質を把握するのに、前後揺れの変位だけでなく、速度と加速度の挙動をも同時に見ることが必要と考え、すべてのデータを資料として掲げたものである。

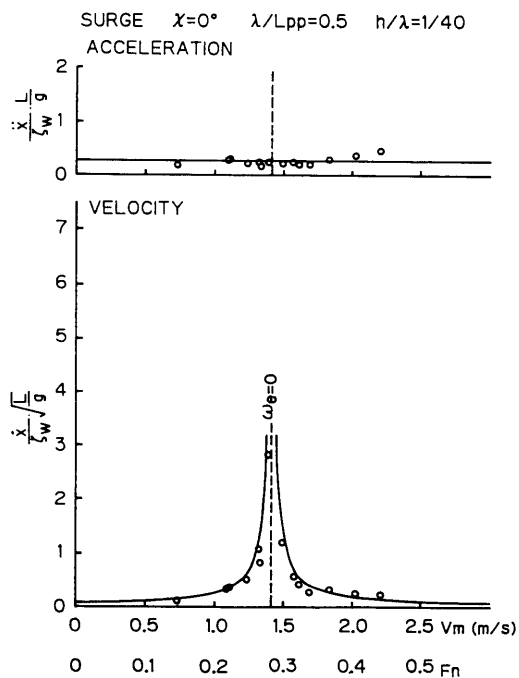


Fig. 11 (a) Surging Velocity and Acceleration
 ($\lambda/L=0.500, h/\lambda=1/40$)

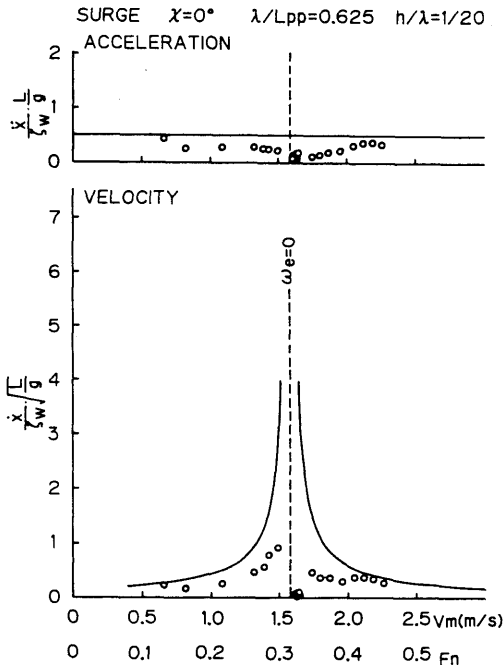


Fig. 11 (b) Surging Velocity and Acceleration ($\lambda/L=0.625$, $h/\lambda=1/20$)

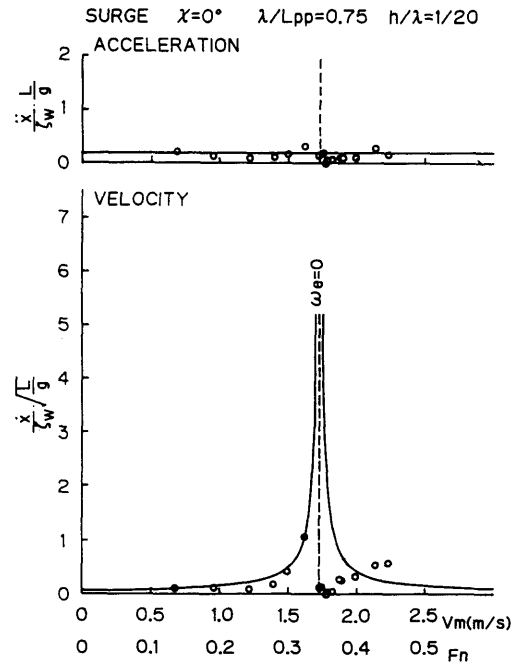


Fig. 11 (d) Surging Velocity and Acceleration ($\lambda/L=0.750$, $h/\lambda=1/20$)

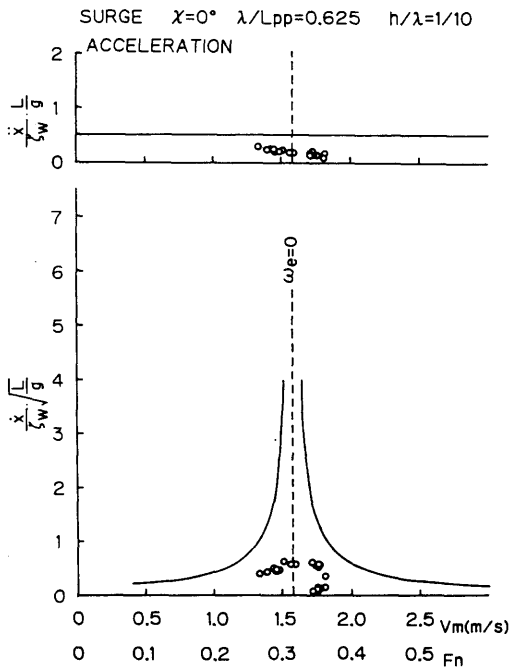


Fig. 11 (c) Surging Velocity and Acceleration ($\lambda/L=0.625$, $h/\lambda=1/10$)

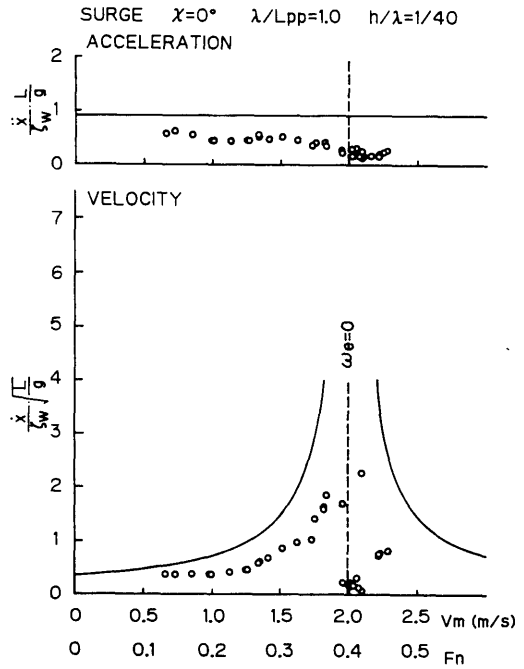


Fig. 11 (e) Surging Velocity and Acceleration ($\lambda/L=1.000$, $h/\lambda=1/40$)

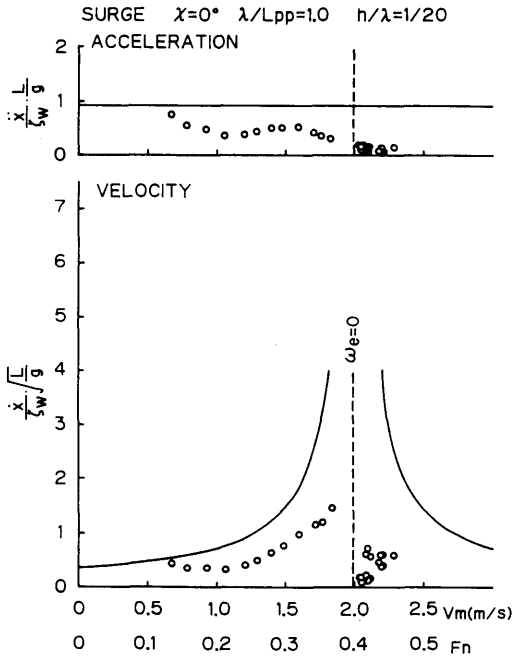


Fig. 11 (f) Surging Velocity and Acceleration ($\lambda/L=1.000, h/\lambda=1/20$)

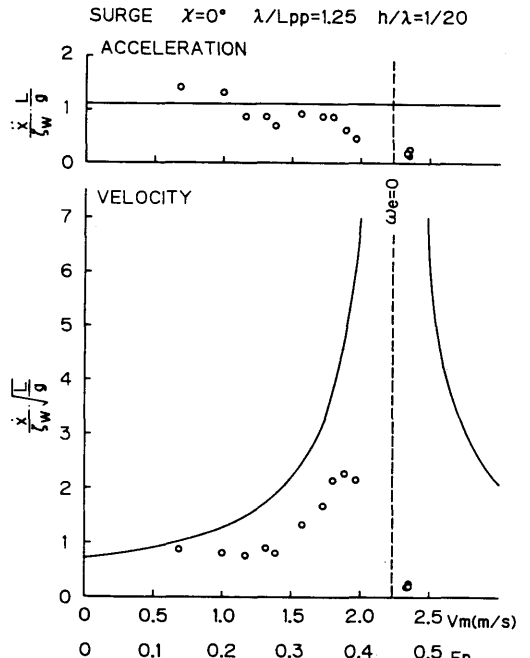


Fig. 11 (h) Surging Velocity and Acceleration ($\lambda/L=1.250, h/\lambda=1/20$)

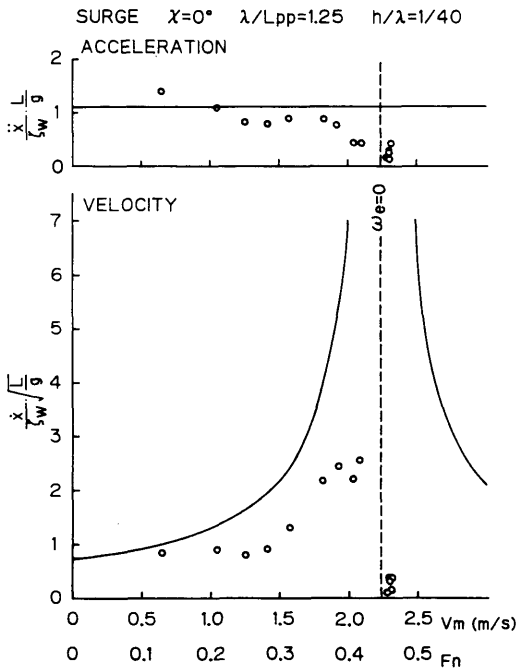


Fig. 11 (g) Surging Velocity and Acceleration ($\lambda/L=1.250, h/\lambda=1/40$)

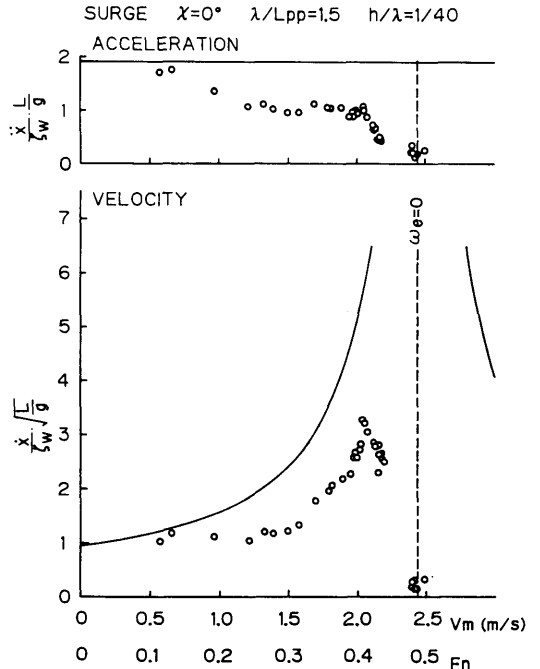


Fig. 11 (i) Surging Velocity and Acceleration ($\lambda/L=1.500, h/\lambda=1/40$)

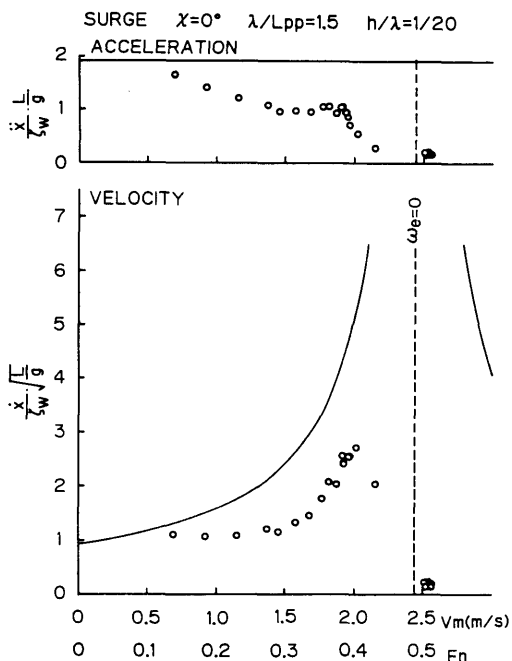


Fig. 11 (j) Surging Velocity and Acceleration ($\lambda/L=1.500$, $h/\lambda=1/20$)

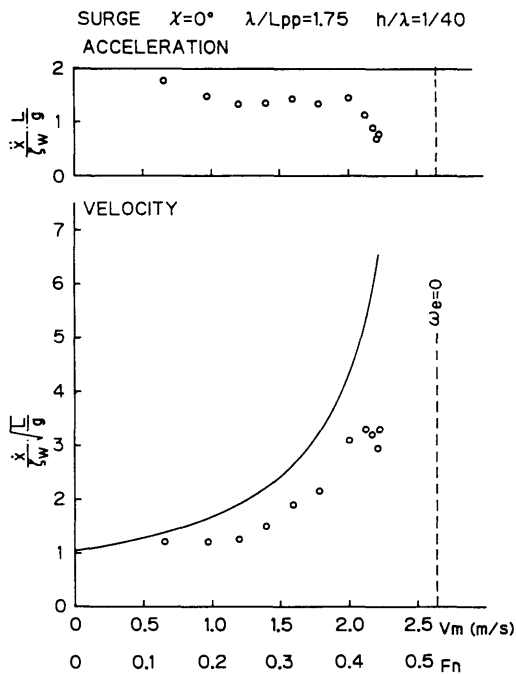


Fig. 11 (l) Surging Velocity and Acceleration ($\lambda/L=1.750$, $h/\lambda=1/40$)

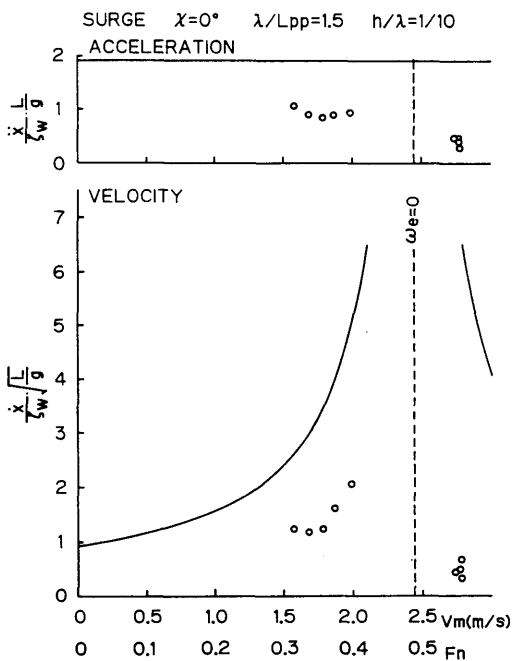


Fig. 11 (k) Surging Velocity and Acceleration ($\lambda/L=1.500$, $h/\lambda=1/10$)

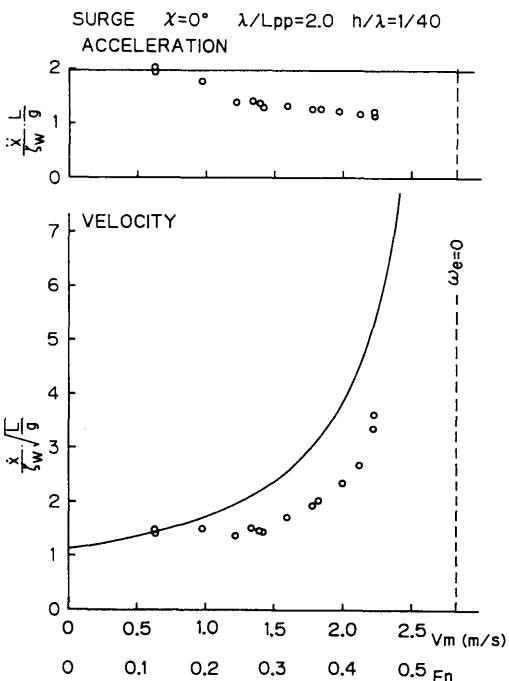


Fig. 11 (m) Surging Velocity and Acceleration ($\lambda/L=2.000$, $h/\lambda=1/40$)

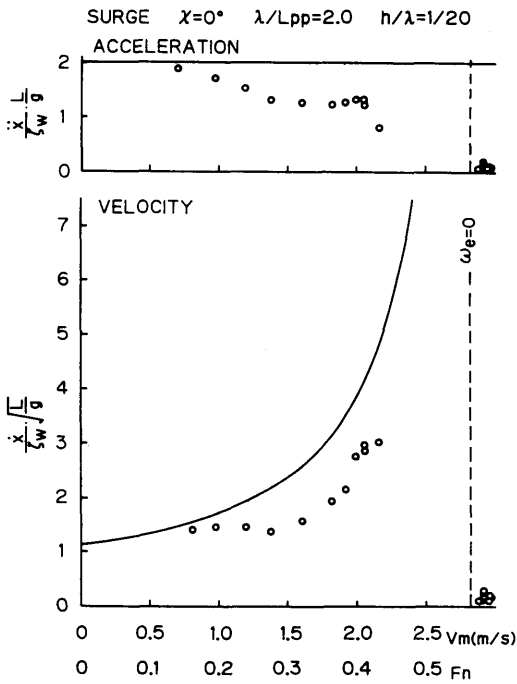


Fig. 11 (n) Surging Velocity and Acceleration ($\lambda/L=2.000, h/\lambda=1/20$)

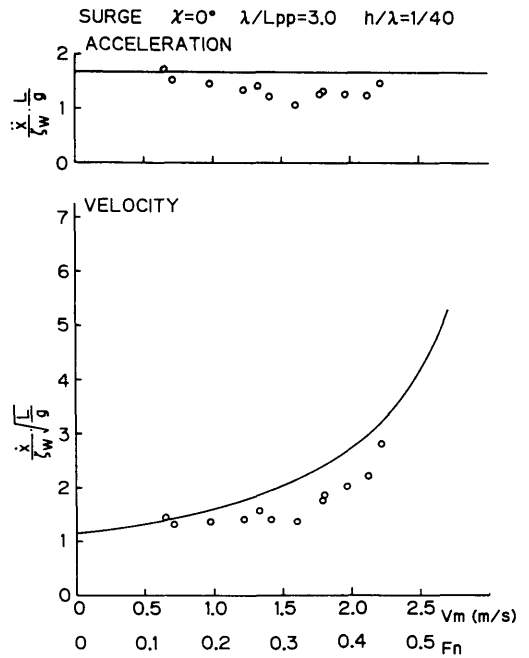


Fig. 11 (p) Surging Velocity and Acceleration ($\lambda/L=3.000, h/\lambda=1/40$)

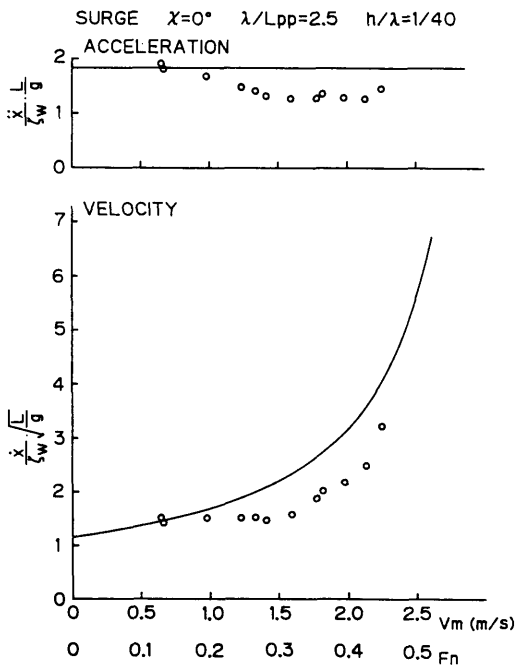


Fig. 11 (o) Surging Velocity and Acceleration ($\lambda/L=2.500, h/\lambda=1/40$)

4. 波乗り発生の解析的検討

以上の実験結果から、波乗りは前後揺れによる速度変動を含めた船の速度が瞬間的にせよ波速に達した時から発生するらしいことが推察されるが、ここではそのことを解析的に明らかにすることを試みる。

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

$$M \frac{dV}{dt} = T \cdot (1 - \tau) - R + F \quad (4.1)$$

ここに、 M は付加質量を含む船の質量、 V は船の速度、 t は時間、 T はプロペラ推力、 $1 - \tau$ は推力減少係数、 R は抵抗、 F は波による前後揺れ強制力である。

プロペラ推力 T が次式で十分に表現されることは良く知られている。

$$T = \rho n^2 D^4 (aJ^2 + bJ + c), J = V(1-w)/nD \quad (4.2)$$

ここに、 ρ は水の密度、 n はプロペラ回転数、 D はプロペラ直径、 w は伴流率である。

また、抵抗 R は

$$R = a_1 V + a_2 V^2 + a_3 V^3 + a_4 V^4 + \dots \quad (4.3)$$

などと表わすことができ、更に前後揺れ強制力 F を

$$F = F_a \cos(\omega_e t + \epsilon) \quad (4.4)$$

と表わす。ここに、 ω_e は出会円周波数で、 ω を波の円周波数とすると真の追波では

$$\omega_e = \omega(1 - V/C) \quad (4.5)$$

である。位相差 ϵ の基準は特に定義していない。

(4.1) に (4.2), (4.3), (4.4) を代入すれば、 V に関する 1 階の常微分方程式になるが非線形のため解析解を得るのが困難である。非線形のままでも取り扱いは可能であり、同じ結論を導くことができる筈であるが、これからの議論は、波乗りの発生を解析的に明らかにしようとするものであって、今ここで言っている V^2 等の非線形性は本質的な要因ではないと考えられることと、解析解を使った方が説明がしやすいことから、次のような線形化をする。すなわち

$$T = T_0 + T_1 V \quad (4.6)$$

$$R = R_0 + R_1 V \quad (4.7)$$

とおく。ここで、 $T_0 = T(V_0) - dT(V_0)/dV \cdot V_0$, $R_0 = R(V_0) - dR(V_0)/dV \cdot V_0$, $T_1 = dT(V_0)/dV$, $R_1 = dR(V_0)/dV$ 等と考えればよく、また V_0 は考えている V の近傍、例えば今の場合なら $V_0 = C$ とすればよいであろう。

(4.4), (4.6), (4.7) を (4.1) に代入すると、 V に関する次の 1 階線形常微分方程式になる

$$\frac{dV}{dt} + AV = B + E \cos(\omega_e t + \epsilon) \quad (4.8)$$

ここに

$$A = [R_1 - T_1 \cdot (1 - \tau)]/M > 0 \quad (4.9)$$

$$B = [T_0 \cdot (1 - \tau) - R_0]/M > 0 \quad (4.10)$$

$$E = F_a/M > 0 \quad (4.11)$$

である。

船の運動を表わす微分方程式において、時間に依存する項がなくなるという条件のもとでも、その方程式が成り立つならば、そのとき船は静的な釣合状態にあると考えてよいであろう。この条件は、(4.8) の場合

$$\omega_e = 0 \quad (4.12)$$

$$AV = B + E \cos \epsilon \quad (4.13)$$

のときに実現される。

$\omega_e = 0$ というのは、(4.5) から明らかなように $V = C$, すなわち船速と波速が等しいときであるから、(4.13) から

$$C = (B + E \cos \epsilon)/A \quad (4.14)$$

が成り立てば、静的な釣合状態が実現されることになる。(4.14) の右辺第 1 項は波乗りがないとした場合の平均船速であり、第 2 項は前後揺れによる船速の変動成分の $\omega_e = 0$ のときの値である。換言すれば静的な釣合状態が実現されるためには、加速中等の過渡状態を除いて、 $\omega_e = 0$ になることがある、すなわち瞬間的な船速 (= 平均船速と船速の変動成分を加えたもの) が波速に達することがあるという条件が必要である。

このような静的な釣合状態が可能であれば、この静的な釣合状態を初期条件として、船の運動を表わす元の微分方程式を解こうとしても、船は釣合状態から変化することができない筈であるから、その解は初期条件がいつまでも保持されることになる筈である。

これを物理的に言い直せば、規則的な追波の中で船が (プロペラ回転の変動に) 応答する速度成分について) 過渡状態を過ぎて定常状態になっている場合に、船速が波速に達するような条件下では、一旦波速に達した後は、ずっとその速度で波とともに走り続けるということになる。

このことを (4.8) の解析解で確かめようとするとき次のようになる。すなわち (4.8) の一般解は

$$V = C_1 \cdot \exp(-At) + B/A + E/(A^2 + \omega_e^2)^{1/2} \cdot \cos(\omega_e t + \epsilon - \delta) \quad (4.15)$$

ただし

$$\delta = \tan^{-1}(\omega_e/A) \quad (4.16)$$

となる。

(4.15) の右辺第 1 項は過渡状態を表わす項で初期条件を与えることにより、係数 C_1 を決めることができる。第 2 項は定常状態に達した後の波浪中の平均船速であって、波浪中の抵抗増加や自航要素の変化を無視すれば、平水中を同一のプロペラ回転数で定常航走するときの速度と考えてよく、追波中ではそのように考えても大きな誤りではないことは、Fig. 5 に示された通りである。第 3 項が波浪中での前後揺れによる船速変動を表わしている。

ここで初期条件を $t=0$ で $V=0$ とすれば

$$C_1 = -B/A - E/(A^2 + \omega^2)^{1/2} \cdot \cos(\epsilon - \delta_0) \quad (4.17)$$

ただし

$$\delta_0 = \tan^{-1}(\omega/A) \quad (4.18)$$

従って

$$V = \{-B/A - E/(A^2 + \omega^2)^{1/2} \cdot \cos(\epsilon - \delta_0)\} \cdot \exp(-At) + B/A + E/(A^2 + \omega_e^2)^{1/2} \cdot \cos(\omega_e t + \epsilon - \delta) \quad (4.19)$$

となる。これは、波浪中で模型船を固定しておいて、ある瞬間に所要の回転数でプロペラの回転を開始し、同時に模型船の固定を解いた後の運動、すなわち実際に角水槽で実験をするときの状況を表わしている。

次に初期条件を $t=0$ で $V=(B+E \cos \epsilon)/A$ (=波速 C) とすれば

$$C_1 = 0 \quad (4.20)$$

$$V = B/A + E/(A^2 + \omega_e^2)^{1/2} \cdot \cos(\omega_e t + \epsilon - \delta) \quad (4.21)$$

となる。これは、船速が波速に達した瞬間を初期状態と考えた場合の、その後の運動を表わしているがこれは一見、上で意図した

$$V = (B + E \cos \epsilon)/A \quad (4.22)$$

という時間に依存しない一定値にはなっていない。

しかし、(4.5) を考慮することによって (4.21) が (4.22) のような一定値でなくてはならないことが導き出せる。すなわち (4.5) から

$$V = (1 - \omega_e/\omega)C \quad (4.23)$$

であるが、波速 C は今の場合は (4.14) のような関係があることが前提であるから、

$$V = (1 - \omega_e/\omega) \cdot (B + E \cos \epsilon)/A \quad (4.24)$$

である。(4.21) と (4.24) を等置すると結局

$$E \cos \epsilon / A - \omega_e / \omega (B/A + E \cos \epsilon / A) = E / (A^2 + \omega_e^2)^{1/2} \cdot \cos(\omega_e t + \epsilon - \delta) \quad (4.25)$$

の関係がすべての t に対して恒等的に成立しなくてはならないが、そのためには恒等的に

$$\omega_e = 0 \quad (4.26)$$

(300)

でなくてはならないことが判る。すなわち、(4.21) において常に (4.26) でなくてはならないから、波速に達した後は常に (4.22) の関係が保持されることになる。

上の説明はあまり明確とは言えないが、その理由は (4.8) の一般解 (4.15) は ω_e を定数とみなしてよい範囲であれば正しい解であるが、 ω_e は (4.5) から明らかのように V に依存しているわけで、今の場合は ω_e が V に依存していることをきちんとした形で考慮しなければ、波乗りの発生を解析的に明白な形で明らかにすることはできそうもないということであろう。

そこで (4.5) を (4.8) に代入すると

$$\frac{dV}{dt} + AV = B + E \cos\{\omega(1 - V/C)t + \epsilon\} \quad (4.27)$$

となる。これを解析的に解くことができれば上で意図したことが、明確な形で証明できると思われるが、解析解を見出すことは困難である。しかしこれを数値的に解くことを考えた場合には、(4.27) を $t=0$ で $V=C=(B+E \cos \epsilon)/A$ の初期条件で解き始めれば、いつまでたっても初期値から変化していかないことだけは明らかであるから、波乗り現象の発生を一応は説明できたとしてよいであろう。確認のために (4.27) を数値的に解いた例を Fig. 12 に示す。

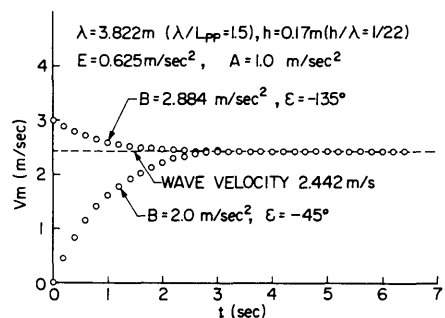


Fig. 12 Simulation of eq. (4.27)

5. 安全運航指針への応用

5.1 限界波高

以上のように波乗り発生の限界条件が明確になったことから、これを避けるための安全運航指針の作成が可能となる。

前後揺れの振幅応答を $\xi (=x/\zeta_w)$ とすると、波乗り発生の限界条件は V_m を平均船速 (近似的に平水中

船速と等しいと考える) とすると

$$C = V_m + \omega_e \cdot x = V_m + \omega_e \cdot \xi \cdot \zeta_w \quad (5.1)$$

と書ける。(4.5) の V は今の場合 V_m と同じものと考えてよいから、(4.5) と (5.1) から波乗り発生の限界波高 $h (=2\zeta_w)$ が次のように求められる。

$$h = 2C / (\omega \cdot \xi) \quad (5.2)$$

これを無次元表示すると、線形波の場合には深水波でも浅水波でも $C = \omega \cdot \lambda / (2\pi)$ の関係を使って

$$h/\lambda = 1 / (\pi \cdot \xi) \quad (5.3)$$

という簡単な表示になる。

以上は $V < C$ からの波乗りである。一方 $V > C$ からの波乗り、すなわち平水中の速度より遅い速度で波とともに走らされる方の波乗りは、前述のように模型実験では明確には確認されていないし、また後述のように危険性は少ないと考えられるが、限界条件としては(5.1) のかわりに

$$C = V_m - \omega_e \cdot x = V_m - \omega_e \cdot \xi \cdot \zeta_w \quad (5.4)$$

となる。この場合 ω_e は (4.5) ではなく

$$\omega_e = \omega (V/C - 1) \quad (5.5)$$

であるが、限界波高の表示式は (5.2)、(5.3) とまったく同じになる。

斜め追波では、出会角を χ としして左右揺れの影響を無視すると (5.3) に相当する式は

$$h/\lambda = 1 / (\pi \cdot \xi \cdot \cos \chi) \quad (5.6)$$

となる。 ξ は大凡 $\cos \chi$ に比例すると考えてよいから、斜め追波の限界波高は $\chi = 0^\circ$ の時の値の $1/\cos^2 \chi$ と考えてよいであろう。

このようにして、波長と出会角、船速を与えて前後揺れの応答特性を求めれば、(5.6) から限界波高が求められる。今回の模型実験に使用した漁船について、先に示した前後揺れ応答の計算値を使って求めた例を Fig. 13 に示す。実線が加速されて波乗りになる場合の限界波高曲線で、点線は減速されて波乗りになる場合の限界波高曲線であり、この曲線より上の範囲では波乗りが発生することになる。このようなチャートが各船型毎に、また必要であれば載荷状態毎に備えられていれば、海象に応じた危険船速を知ることでもできる。

ただし、追波中の前後揺れ応答特性を通常のスト

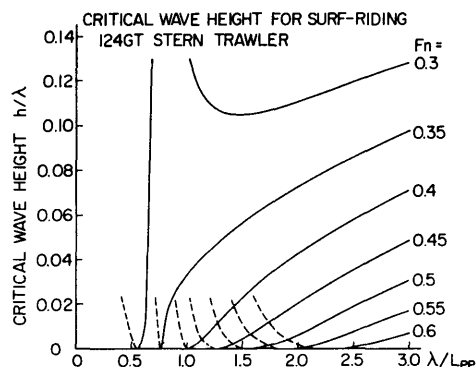


Fig. 13 Critical Wave Height for Surf-riding ($\chi=0^\circ$)

リップ法で計算したものは精度が悪いことが先に実験との比較で明らかになったので、限界条件を精度よく求めるためには推定法の改善が必要である。しかし、ここで使った最も簡単な計算法、すなわち附加質量や前後揺れ抵抗を無視し、波の強制力はフルード・クリロフ力のみを使う計算法の方が安全側の結果を与えており、安全基準として使うには望ましいとも考えられる。また波高が高いほど波速が速いという問題も、これを考慮して限界条件を出そうとすると、(5.2) を逐次近似等で解く必要があるが、無視した方が安全側の結果を与えるので、やはり安全基準として使う場合には無視して差し支えないであろう。

これまでに述べたところから明らかなように、波乗り現象そのものは極めて広範囲の波長域で起こりうることになるが、波強制力の小さな短波長域での波乗りまで危険なのか、また長波長域の波乗りでも、常用の平水中船速と波乗り状態になったときの船速 (= 波速) との差が小さくても危険なのかという問題もあり、真の安全基準はブローチング現象^{11,2)}を考慮したものであるべきことは言うまでもなく、本文での議論は単に波乗りを避けるという目的だけに限定して考えるべきである。

ただブローチングを非常に単純に考えると、操縦運動方程式において、船体に作用する流体力は船速の2乗に比例するが、舵への流入速度は船速に比例する部分とプロペラ後流による加速流とから成り、プロペラ後流からの寄与が大きいとすれば、プロペラ回転数が変わらないにもかかわらず、波乗りによって船速だけが大幅に増加していれば、舵に作用する力は相対的に小さくなることは明らかである。因に Fig. 5 (k) の λ/L

$=1.5$, $h/\lambda=1/10$ の場合, プロペラ回転数 17.5 rps 付近の平水中と波乗り後の見掛けのスリップ比は 0.42 から 0.20 へと減少しており, 舵の効果はかなり減少していることが推測できる。従って波乗りで危険なのは, 平水中船速との差が大きい場合, しかも加速される場合であって, 減速されるような波乗りでは危険性は少ないとも考えられる。従って Fig. 13 から求めた限界船速に対する波速の比が一定の値 (例えば 1.2 など) 以上のときに危険であると判断することになると考えられるが, この比の設定には舵面積などの舵特性を始め操縦流体力特性を当然考慮しなくてはならないであろう。

5.2 限界船速

上述のように平水中船速からどの程度加速されるかを危険性判定の基準と考え, Fig. 13 のような表示ではなく, 次のような表わしの方が適切とも考えられる。

(4.1) で抵抗と推力が釣り合っているとして前後揺れを解くと

$$\xi = |F| / (M \cdot \omega_e^2 \cdot \zeta_w) \quad (5.7)$$

であり¹¹⁾, これが通常のスリップ法による船体運動計算プログラムに組み込まれているものであるが, これと (5.2) および (4.5) とから低速からの波乗り限界船速の式として

$$V = C \{1 - \{|F| / (M \cdot g)\}^{1/2}\} \quad (5.8)$$

が得られる。ただし浅水では, 水深を H として上式で $M \cdot g$ を $M \cdot g \cdot \tanh(kH)$ で置き換えればよい。高速からの波乗り限界船速の式は, 限界波高が両方とも同一の式で表わせたのと違って次のようになる。

$$V = C \{1 + \{|F| / (M \cdot g)\}^{1/2}\} \quad (5.9)$$

(5.8) を無次元化した次の表示

$$V / (L \cdot g)^{1/2} = C / (L \cdot g)^{1/2} \cdot \{1 - \{|F| L / (M \cdot g \cdot \zeta_w) \cdot \zeta_w / \lambda \cdot \lambda / L\}^{1/2}\} \quad (5.10)$$

による限界船速の例を Fig. 14 に示す。高速側の限界船速 (5.9) は波速の曲線に対して対称になるのと, 上で述べたように危険性は少ないと考えられるので省略してある。同図には更に, 今回の実験結果から外挿を含めて得られた限界船速の値を $h/\lambda=1/20$, $1/40$

(302)

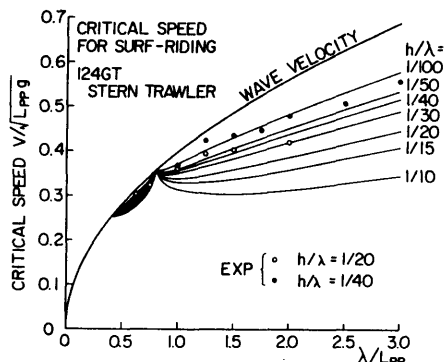


Fig. 14 Critical Speed for Surf-riding ($\chi=0^\circ$)

について示してある。計算値が安全側に出ているのは当然であるが, その量は 10% 前後であり安全運航指針としてはこの方が良いとも考えられる。(5.10) 式の右辺の $|F| L / (M \cdot g \cdot \zeta_w)$ は前後揺れに対する波浪強制力のようなもので, 限界船速曲線との対応を見の上で参考になるので Fig. 15 に示しておく。今回の強制力の計算はフルード・クリロフ力だけであるが, 仮にこれを厳密に計算したとしても前後揺れ応答に (5.7) を使う限り精度の向上は期待できない。これは限界波高を求める表示式 (5.2) 等では, 前後揺れ応答の推定精度が直ちに限界波高の推定精度に結び付くと異なる点で, 限界船速の推定精度を上げる場合は (5.7) は使わず, 抵抗を取り入れた形で解くべきことは言うまでもない。

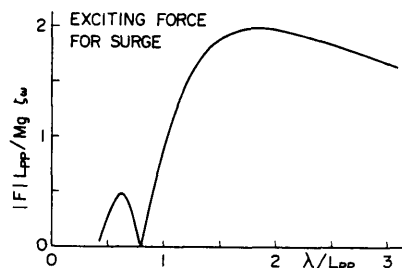


Fig. 15 Wave Exciting Force for Surge (Froude-Kriloff)

斜め追波では, (5.8) に相当する式は

$$V \cos \chi = C \{1 - \{|F| \cos \chi / (M \cdot g)\}^{1/2}\} \quad (5.11)$$

となり, Fig. 14 に相当するチャートを出会角ごとに

作ることができるが $|F|$ は $\cos \chi$ に比例すると考えてよいので、 $\chi = 0^\circ$ の場合の限界船速曲線で、波速と限界船速の差が $\cos \chi$ だけ小さくなった値、すなわち限界船速が上がって安全側になった値に船速の波方向成分が達しなければ安全ということになる。

波乗り限界条件の表示方法としては、Fig. 13 より Fig. 14 のような表わし方の方が、船速の増加量をすぐに判定できて、危険性を直感的に把握するのに便利であろう。

6. 浅水影響

浅水では、波乗り発生の危険性が増大し、平水中前進速度が零に相当するプロペラ回転数の場合でも発生する可能性があることが Grim⁷⁾ によって指摘されていたが、ここでは計算でこのことを検討してみた。Fig. 16 はその結果の一例であり、浅水では限界船速が低くなり波長の長いところでは Grim の指摘したようなことが起こりうることを推定できる。

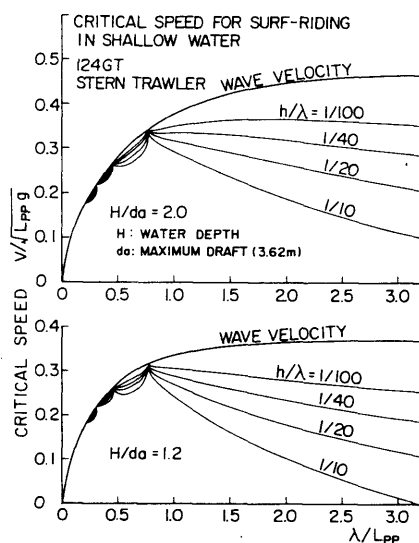


Fig. 16 Shallow Water Effect on Critical Speed

7. 結 言

本報告の結論は次のようにまとめられる。

(1) 規則的追波中における船の波乗りは、長周期大振幅の前後揺れとは明確に区別される現象であり、そ

の発生は前後揺れによる速度変動を含む船の時々刻々の速度が波の位相速度に等しくなった時であることを、自航模型試験結果および解析的な考察から明らかにした。

(2) 従って波乗り発生の限界条件は、平水中船速あるいは対応するプロペラ回転数と波浪条件（波長、波高、出会角）および載荷状態との関連で船型毎に容易に特定することができる。

(3) このためには前後揺れ応答特性の推定精度を良くする必要があるが、前後揺れの抵抗を考慮しない計算では精度が悪いことが明らかになった。

(4) 波乗り状態に陥った船は、平均的には波の位相速度で走らされるが、同時に短周期の前後揺れをしており、波との相対位置が不動になるわけではないことが模型試験から明らかになった。

(5) 波乗りは、波速より低い平水中船速から波速まで加速されて発生する場合と、逆に波速より高い平水中船速から波速まで減速されて発生する場合がありますが、模型実験で明瞭に確認されたのは前者が大部分であり、後者は明瞭には確認されなかった。

(6) 長周期大振幅の前後揺れと波乗りとは現象としては明確に区別されるが、両者の境界付近では微妙な条件で互いに移行することもあり、波乗り状態にならないければ安全という訳ではなく、非常に長周期の前後揺れの状態は波乗りと同じような危険性を持つものと考えべきである。

(7) このようなことを考慮すると、安全運航指針として波乗り限界条件を各船型ごとに特定する場合は、前後揺れ応答の推定計算法としては付加質量や前後揺れ抵抗を無視し、波の強制力はフルード・クリロフ力のみを使う単純な方法が、また波速としては線形波の値を使う方法が安全側の結果を与えており、望ましいと考えられる。この考え方に基づいて限界波高と限界船速を簡易に求める方法を示した。

(8) 波乗りがすべて危険であるとは断定できないので、安全運航指針としては波乗りによって平水中船速からどの程度加速されるかを、一つの基準として取り入れるべきと考えられる。

(9) 浅水域では波乗り発生の限界船速は低くなり、極めて長波長の場合には船速零でも波乗り状態になり得るという Grim の指摘を確認した。

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，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；小型船のブ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) P. Du Cane and G. J. Goodrich；The Following Sea, Broaching and Surging, RINA, vol. 104, No. 2, 1962. 4
- 4) 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（予定）
- 5) 今井功・橋本英典訳；ラム流体力学2，東京図書，1981，p.190
- 6) 菅信；ブローチング発生要因に関する考察—P. Du Cane and G. J. Goodrich の実験結果の解釈と関連して—，運動性能部内研究会資料，1986. 7
- 7) O. Grim；Das Schiff in von achtern anlau-fender See, JSTG, vol. 45, 1951
（英訳あり；DTMB Translation 313, 1965. 2）
- 8) 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
- 9) 高石敬史・黒井昌明；波浪中船体運動の実用計算法，第2回耐航性に関するシンポジウム，造船学会，1978. 12
- 10) 中村彰一・内藤林・井上昭；コンテナ船の波浪中推進性能に関する研究（第5報），関西造船協会誌，第162号，1976. 9
- 11) 元良誠三；Gravity Dynamometer による波浪中抵抗試験及び Surging について，造船協会論文集，第94号，1954. 2
- 12) 石田茂資・菅信・猿田俊彦・安野三樹雄；角水槽の多点式航跡自画装置について，第50回船研研究発表会講演概要集，1987. 12（予定）