

## 外洋フェリーの運動性能に関する研究

(第1報) 斜波中模型実験及び理論計算

小川 陽 弘\*・野 中 晃 二\*  
森 政 彦\*・猿 田 俊 彦\*

### On the Motions of an Ocean Car Ferry

(Part I) Model Tests in Oblique Waves and Theoretical Calculations

By

Akihiro OGAWA, Koji NONAKA,  
Masahiko MORI and Toshihiko SARUTA

#### Summary

Large car ferry boats of a long distance service around Japanese adjacent seas are rapidly increasing in number, and because of their special ship forms, their performances are needed to be investigated for the purpose of keeping their safety operations.

The paper presents a free running model test result in regular oblique waves at the Mitaka No. 1 Ship Model Experiment Basin in comparison with the calculated result by strip methods, and a towed free roll test at the Mitaka No. 2 Ship Model Experiment Basin for obtaining the roll damping coefficients, with a 5 m model of "Shiretoko-maru" (in service between Tokyo and Tomakomai, about 1,000 km).

In the free running test, pitch, roll, yaw, yaw rate, rudder angle and bow accelerations (vertical, transverse and longitudinal) were measured. Theoretical calculations on the above motions and accelerations (except longitudinal one) were carried out by strip methods separately with pitch and heave, and with roll, yaw and sway, to compare with the experiments. The agreement between experiments and calculations were proved to be good on the whole.

In some special wave conditions in the experiments, when the encounter period was nearly half of the natural period of roll, unstable roll occurred. During the unstable roll of large amplitude, irregular bow accelerations were observed. From the analysis of the acceleration, it seemed that a big wave impulsive force was given to the hull in the vicinity of bow.

On pitch and roll amplitudes, the nonlinearity to wave heights were found to be small.

---

\* 運動性能部 原稿受付 昭和49年6月28日

## 目 次

1. 緒言
2. 実験及び計算の概要
  - 2.1 模型船
  - 2.2 実験の種類
  - 2.3 理論計算
3. 角水槽における波浪中自航試験
  - 3.1 実験状態
  - 3.2 計測項目
  - 3.3 解析の方法
  - 3.4 実験結果及び考察
    - 3.4.1 ロール及び不安定ロール
    - 3.4.2 ピッチ
    - 3.4.3 ヨウ
    - 3.4.4 船首上下加速度
    - 3.4.5 船首左右加速度
    - 3.4.6 船首前後加速度
    - 3.4.7 位相
    - 3.4.8 異常加速度
    - 3.4.9 速度低下
4. 長水槽における航走中自由横揺試験
  - 4.1 実験状態
  - 4.2 解析法及び実験結果
    - 4.2.1 線型減衰係数
    - 4.2.2 非線型減衰係数
    - 4.2.3 N係数
  - 4.3 考察
5. 結論
6. 結言
  - 参考文献

## 1. 緒 言

カーフェリーは従来陸上交通の不能な島しょ間の連絡、あるいは湾内の横断などの陸路を短絡するような航路に用いられるのが目的であったので、小型で低速のものがほとんどであった。

近年になって大型・長距離・高速のカーフェリーが台頭、急速にその航路網を拡大しつつあるが、その背景には自動車の急増に伴う陸上輸送力の伸び悩み、経済成長に伴う輸送物資の急増、労働力需要に基づく運転手の不足、レジャーブームによる移動人口の増加、また最近では燃料供給事情の悪化による輸送径路の変更などの要因があり、したがってその航路も陸上の幹線道路のバイパス的な役割を持ったものが多い。その

ため輸送量は飛躍的に増大することが要求され、大型化・高速化が当然の成行きになっているわけである。

これら外洋フェリーの船型上の特徴は、載貨重量に比べて広い甲板面積を必要とすることから生ずるもので、幅一喫水比が通常船型にくらべて極めて大きく、高速であることから、方形係数は小さい。このため船首尾近傍の水線付近の肋骨線の傾斜は非常に大きい。通常2軸で2舵、または1舵のものもあり、バウスタスター及びフィンスタビライザー等の減揺装置を装備している。上部構造は極めて大きい。

このような特殊な船型を持った大型船は在来見られなかったもので、これが積荷及び運航上の時間的制約などのために風波中でも高速の保持を要求されることが多いと想像されるので、その運動性能に関しても種々の問題があることが予想される。波浪中では動揺・加速度等の大きさもさることながら、これらが波高の変化に対して線型的に変化するかどうか、何らかの異常現象を生じないかどうか、減揺装置の効果、また風圧面積と水圧面積の比が極めて大きいため、操縦性能に及ぼす風の影響、バウスタスターの有効な限界等、多くの問題点が考えられる。

波浪中の船体運動等に関してはストリップ法による計算法が普及し、少なくともコンテナ船等のやせ形の船型では実験値とよく合うと言われているが、これが外洋フェリーの特殊な船型にも適合するかどうか非常に興味のある所で、もし実用的に計算の適合性が確かめられれば、その利用価値は非常に大きい。

以上のような背景から、外洋フェリーの船型について模型実験、理論計算、実船試験等を行なって来たが、今回は波浪中の動揺・加速度等に関する模型実験と理論計算との比較について報告する。なお外洋フェリー全般については文献 1)、2) に詳しい。また、一般に外洋フェリーと称しているが、ルール上の航行区域は沿海または近海のものほとんどである。

## 2. 実験及び計算の概要

## 2.1 模型船

模型実験の対象とした船は、実船実験との比較が可能になるべく実在の船であること、大型・高速で将来とも外洋フェリーの一つの代表的な船型であり得ると予想されること、フィンスタビライザーを装備していること等を条件とし、なお実船試験の便宜、模型実験のための図面等諸資料の提供が得られることを前提として選択した。決定した船は日本沿海フェリー

鯛の『しれとこ丸』である。本船は昭和47年4月に東京一苦小牧航路に就航し、その後8月に同型の『えりも丸』が同航路に就航している。

模型船は長さ5mの木製で、波浪中で実験を行なうため、船首尾部及び船橋前部等の冠水する可能性のある部分は実船と相似に製作した。ただし中央部分は計測器等の積載、操作の便のために開口としてある。

模型船の主要目は、実験計画時は本船が未就航だったので実船の基本計画喫水に合わせる予定であった

が、機器の搭載のために排水量がやや不足するので多少増加した。これは本船の満載就航状態にほぼ近くなっている。実験状態の模型船およびこれに対応する実船の主要目等を Table 1 に、正面線図及び船首尾形状図を Fig. 1 に示す。

実船には揚力制御式のフィンスタビライザーが装備されているが、その効果等については実船試験で調査しているので、模型船には装着していない（ビルジキールは付けてある）。またバウスラスターの開口は設

Table 1 Principal dimensions

		Model ship		Actual ship
Length b.p.	L	5.0000m		142.00 m
Breadth (moulded)	B <sub>MLD</sub>	.8028m		22.80 m
Breadth (designed W.L.)	B <sub>WL</sub>	.7746m		22.00 m
Depth (moulded)	D <sub>MLD</sub>			8.00 m
Draft (designed)	d <sub>MLD</sub>	.2007m		5.70 m
Tested condition:				
Draft	d	.2110m		5.99 m
Displacement	Δ	434.3kg	(437.3kg)	10,200 t
Block coefficient	C <sub>b</sub>	.531		
Prismatic coefficient	C <sub>p</sub>	.622		
Water plane coefficient	C <sub>w</sub>	.800		
Midship coefficient	C <sub>M</sub>	.842		
L.C.B (after midship)	lcb	3.831%		
Metacenter above keel	KM	.4151m		
Metacentric height	GM	.052m		
Longi. radius of gyration	K <sub>yy</sub> /L	.247		
Trans. radius of gyration	K <sub>xx</sub> /B <sub>MLD</sub>	— (4.114)		
Natural roll period	T <sub>R</sub>	2.70 sec	(2.61 sec)	
Propeller:				
Diameter		135.56mm		3.850 mm
Pitch ratio		1.0 (Fixed)		1.0 (Variable)
Expanded area ratio		.57		.57
Boss ratio		.319		.319
Rake		0		0
Pitch angle range		—		50°
Number of blades		4		4
Direction of turn		Outward		Outward
Rudder:				
Number		2		2
Area ratio (incl. horn)		1/29		1/29

Remark: Values in ( ) are those of towed condition which are different from those of free running model.

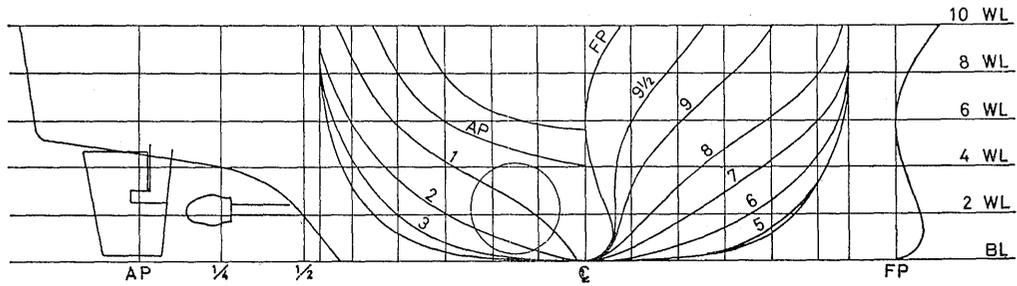


Fig. 1 Body plan and bow and stern profiles of model

けてあるがスラスタに相当するものは何も取付けていない。

2.2 実験の種類

実験は角水槽（三鷹第1船舶試験水槽）における斜波中自航試験と、長水槽（三鷹第2船舶試験水槽）における平水中自由横揺試験の2種に大別される。

波浪中実験は、主として問題点を探り安全性の限界を求める意味で、実船の運航状態に近く、しかも実船では実現するわけにはいかないような状況を設定して行なった。実際の運航状態に近いという意味では、模型船の平水中速力を基準にして同一プロペラ回転数で、平常運航時の平均的波高のうちで比較的高いと思われる値（3.4m）を標準として実験した。実船で実現し難いという意味では、フィンスタビライザーを用いなかったのもその一つであるが、更に大波高（4.3m, 5.1m）時の実験も加えた。不規則波中の実験も行なうべきかとも思われたが、沿海における波のスペクトラムを具体的に設定することが困難だったので、不規則波中の実験は行なわず、規則波中のみとした。

理論計算は船の進行方向と船首方位とが一致した状態で行なわれるが、実際には波による漂流のためにこれらは一致しないのが普通である。したがって実験と計算との比較を行なう場合には、出会角として船首方位をとるか、コース角をとるかは大いに問題のある所である。本実験では自動操舵により船首方位を定める方法を用いたので、コース角は速度、波長等により漂流角の分だけずれている。

長水槽における平水中自由横揺試験は、航走中の横揺抵抗を測定し、ロールの理論計算に適用するためのものである。横揺抵抗は船体自身のものは比較的小さく、ビルジキール等のためにその性質は複雑で、現在の所、他のモードの運動のように理論計算だけで出すのでは非常に精度が落ちるので、ストリップ法の計算でもこの部分だけは実験値を適用するのが普通であり、またそれによって実際と合う計算結果が得られるとされている。

2.3 理論計算

運動の計算はストリップ法により縦運動と横運動と

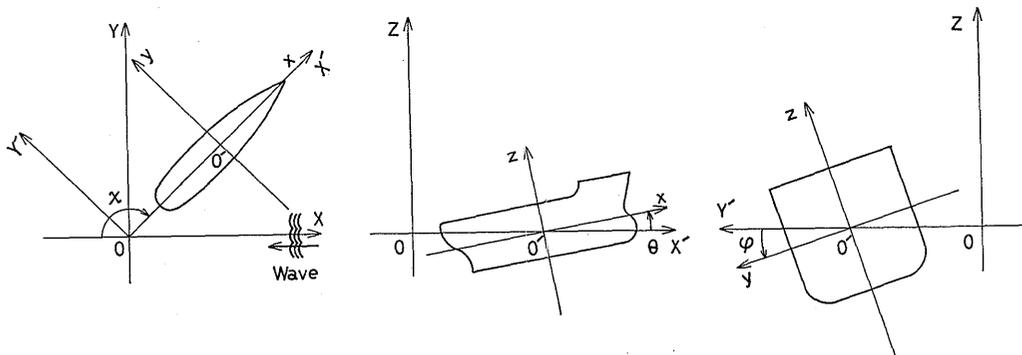


Fig. 2 Co-ordinate systems

に分けて行なった。座標系を Fig. 2 に示す。

斜波中の縦運動の計算は、福田<sup>9)</sup>の方法によりヒーブとピッチのみの連立方程式により行なう。

$$\left. \begin{aligned} (m+a_{zz})\ddot{z}+b_{zz}\dot{z}+c_{zz}z+a_{\theta z}\ddot{\theta}+b_{\theta z}\dot{\theta}+c_{\theta z}\theta \\ =F_{zc}\cos\omega t-F_{zs}\sin\omega t \\ (J_{\theta\theta}+a_{\theta\theta})\ddot{\theta}+b_{\theta\theta}\dot{\theta}+c_{\theta\theta}\theta+a_{z\theta}\dot{z}+b_{z\theta}\dot{z}+c_{z\theta}z \\ =M_{\theta c}\cos\omega t-M_{\theta s}\sin\omega t \end{aligned} \right\} (1)$$

諸係数の計算は O. S. M. (Ordinary Strip Method) によった。

横運動の方程式は田才<sup>4)</sup>の方法によりスウエイ、ヨウ、ロールについて次のように表わす。

$$\left. \begin{aligned} (m+a_{yy})\ddot{y}+b_{yy}\dot{y}+c_{yy}y+a_{\phi y}\ddot{\phi}+b_{\phi y}\dot{\phi} \\ +c_{\phi y}\phi+a_{\phi y}\ddot{\phi}+b_{\phi y}\dot{\phi}+c_{\phi y}\phi \\ =F_{yc}\cos\omega t-F_{ys}\sin\omega t \\ (J_{\phi\phi}+a_{\phi\phi})\ddot{\phi}+b_{\phi\phi}\dot{\phi}+c_{\phi\phi}\phi+a_{\phi y}\ddot{y}+b_{\phi y}\dot{y} \\ +c_{\phi y}y+a_{\phi\phi}\ddot{\phi}+b_{\phi\phi}\dot{\phi}+c_{\phi\phi}\phi \\ =M_{\phi c}\cos\omega t-M_{\phi s}\sin\omega t \\ (J_{\phi\phi}+a_{\phi\phi})\ddot{\phi}+b_{\phi\phi}\dot{\phi}+c_{\phi\phi}\phi+a_{y\phi}\ddot{y} \\ +b_{y\phi}\dot{y}+c_{y\phi}y+a_{\phi\phi}\ddot{\phi}+b_{\phi\phi}\dot{\phi}+c_{\phi\phi}\phi \\ =M_{\phi c}\cos\omega t-M_{\phi s}\sin\omega t \end{aligned} \right\} (2)$$

諸係数の計算は N. S. M. (New Strip Method) によった。ロールダンピングの項は、後記の航走中自由横揺試験から求めた有効減衰係数を用いて計算している。計算プログラムは安藤・小山<sup>9)</sup>及び安藤・高石<sup>9)</sup>が開発したものである。

計算では上記の5モードの運動の他に船首相対水位、船側相対水位、船体中心線上の上下及び左右加速度等が得られるようになっているが、ここでは実験値との比較が目的なので、実験値のあるものについてのみ示した。

### 3. 角水槽における波浪中自航試験

#### 3.1 実験状態

実験は規則斜波中の自航状態のみ行なった。模型船の載貨状態は Table 1 に示した一状態のみである。波長と波高及び出会角の組合せは Table 2 に示すとおりである。 $\lambda/L=2.27$  は横揺の固有周期 2.7秒 (実船14.4秒) に相当するものである。

模型船の速度は、平水中の速度を基準にし、全実験点についてそれぞれ同一プロペラ回転数で行なった。速度は3種で、1.20m/s, 1.54m/s, 1.79m/s である。これに対応する実船の速度はそれぞれ 12.4kt, 16.0kt, 18.5kt, フルード数は 0.171, 0.220, 0.256

である。なお実船の平均航海速度は 18~20kt 程度である。

#### 3.2 計測項目

計測項目はピッチ、ロール、ヨウ、ヨウレート (ヨウ角速度)、舵角、船首加速度 (上下、左右、前後) である。ピッチ、ロールは重心位置に置いたフリージャイロにより、ヨウ、ヨウレートは前記の自動操舵制御に用いている方位ジャイロ及びレートジャイロの信号を利用して計測した。

加速度は F. P. の上甲板上方に設置した加速度計で計測している。左右加速度計の高さは重心上 17.9cm (実船で5.07m相当) であるが、この高さは左右加速度の大きさに影響するので、理論計算もこの位置について行なっている。

各計測値はテレメータ装置によりアナログ信号として陸上に送られ、AD 変換後磁気テープに記録される。サンプリング時間は 1/100 秒とした。

計測器、記録器等は角水槽で常用しているもので、その詳細については別に発表されている。

#### 3.3 解析の方法

計測記録を解析して各運動の周期、振幅及び位相を求めた。まずピッチのゼロクロスから平均周期を求め、これを出会周期  $T_e$  とする。ピッチの振幅が非常に小さくて周期が測定不能か、1周期ごとの周期と平均周期の差の最大値が 0.2 秒を越える場合には、ロールの周期を出会周期とした。

動揺及び加速度の振幅は通常は周期  $T_e$  の成分が支配的であるが、不安定横揺を起している場合はロール及び横加速度の周期の主成分は  $2T_e$  になることを考慮して、この両成分の Fourier 係数を次のように計算した。

即ち、運動  $x(t)$  が円周波数  $\omega (=2\pi/2T_e)$  及び  $2\omega$  の2成分から成るものと仮定し、次のように表わす。

$$x(t) = C_1 \sin(\omega t + \varepsilon_1) + C_2 \sin(2\omega t + \varepsilon_2) \quad (3)$$

これに  $\sin \omega t$ ,  $\cos \omega t$ ,  $\sin 2\omega t$ ,  $\cos 2\omega t$  を乗じて周期  $2T_e$  の整数倍即ち  $2nT_e$  時間積分すれば、

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \int_0^{2nT_e} x(t) \sin \omega t dt = nT_e C_1 \cos \varepsilon_1 \\ A_2 &= \int_0^{2nT_e} x(t) \cos \omega t dt = nT_e C_1 \sin \varepsilon_1 \\ A_3 &= \int_0^{2nT_e} x(t) \sin 2\omega t dt = nT_e C_2 \cos \varepsilon_2 \\ A_4 &= \int_0^{2nT_e} x(t) \cos 2\omega t dt = nT_e C_2 \sin \varepsilon_2 \end{aligned} \right\} (4)$$

したがって、周期  $2T_e$  及び  $T_e$  の成分の振幅  $C_1, C_2$  は、

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{1}{nT_e} \sqrt{A_1^2 + A_2^2} \\ C_2 &= \frac{1}{nT_e} \sqrt{A_3^2 + A_4^2} \end{aligned} \right\} (5)$$

によって求められる。

計算の結果、周期  $2T_e$  の成分は、不安定横揺時のロールと横加速度を除いては無視できる大きさであった。また不安定横揺は、水槽で航走可能な時間内では、次第に増大して行く過程にあったため、上記の解析では振幅は小さく出るので、この場合には最大振幅をとった。

模型船は前述のように方位角及び角速度制御による自動操舵を行っており、両信号のゲイン係数は実験状態に応じて適宜変えたので、ヨウ振幅は明らかにその影響を受けているが、これについての修正等はない。

### 3.4 実験結果及び考察

実験の結果は計算値とともに Fig. 3～Fig. 9 に示した。図中実験点から垂直に引いた実線は、対応する計算値の曲線と結んだものである。点線のものは不安定ロールを起した状態であることを示す。ロール、ピッチ、ヨウの各振幅は最大波傾斜  $\theta_w$  に対する無次元値で、加速度は実船相当の単位波振幅 (m) 当たりの振幅 (g) で表わしている。

Fig. 8 はフルード数 0.25 におけるクロスカーブであるが、本図中の実験値は Fig. 3～7 に示した実験点から内挿または外挿によって推定したものである。

Fig. 9 は、実験では波に対する位相が得られないため、ピッチに対する各運動の位相を示したもので、各実験値は  $F_n=0.25$  に対して Fig. 8 と同様に推定したものである。

#### 3.4.1 ロール及び不安定ロール (Fig. 3, Fig. 8)

Fig. 3 の  $\chi=150^\circ$  において、 $\lambda/L=0.75, 1.00$  の 2 点で異常に大きなロール角が現われている。同様の現象は同図中に示した  $\chi=180^\circ$  の場合にも起っている。普通のロールは、規則波中ではピッチと同じ周期 (出会周期) で、波を受けると比較的短時間で定常な動揺状態に入るのに対して、この場合には振幅の時間的増加が非常に緩慢で、角水槽での実験可能な時間内ではほとんど定常な運動状態に達しない。このときのロールの周期は出会周期の 2 倍で、ロールの固有周期

に近い。

これは一般に不安定横揺と言われており、船体運動、波等により GM が変化し、条件によって安定な横揺が存在し得なくなって発散していくもので、一般にはヒービングによる GM の変化が最も影響が大きいと言われている。本船の場合は喫水の変化によるメタセンタの変化は非常に小さいので、主として波面の形とピッチングによる影響かと想像されるが断定はできない。

不安定横揺の振幅は、出会周期の僅かな変化で大きく変るため、船速、波高、波長等の種々の条件に対して定量化することは困難である。正面向い波中で不安定ロールを起している場合の例を Fig. 10 に示す。

不安定横揺を起している場合を除けば、出会周期がロールの固有周期に近くなる横波 ( $\chi=90^\circ$ ) 及び斜め追波 ( $\chi=60^\circ, 30^\circ$ ) でロール振幅は大きく、ごく常識的な傾向を示している。計算値と実験値を比較すると、 $\chi>90^\circ$  ではほぼ一致した結果を与える。斜め追波では、 $\chi=60^\circ$  の波長の長い範囲と、 $\chi=30^\circ$  のほぼ全範囲で、計算と実験とが余り良く合わない。これは自動操舵によるローリングモーメントの影響も入っているので、比較の難しいところである。

Fig. 3 の  $\chi=90^\circ$  の図には波高を変えた場合の応答も示した。この図から分るように、波高に対するロール応答の非線型性はほとんどない。

#### 3.4.2 ピッチ (Fig. 4, Fig. 8)

計算値、実験値ともに速度による変化が極めて少なく、また Fig. 4 の  $\chi=180^\circ$  の図に見られるように、波高の変化による応答振幅の変化も非常に少ない。実験と計算とは全般に良く合うが、向波～斜め向波の比較的長波長の範囲では、やや実験値の方が高い。当然のことながら、横波ではほとんどピッチングはしない。その他の出会角では、 $\chi=120^\circ$  の場合を除き波長

Table 2 Wave conditions

$\chi \backslash \lambda/L$	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	2.00	2.27
0° 30° 60°	○	○	○	○	○	○	
90°	○	○△	○△	○△	○△	○	○△
120° 150°	○	○	○	○	○	○	
180°	○	○△	○△	○△	○△	○	○△

○ Hw = 12 cm ( 3.4 m )

△ Hw = 15 cm ( 4.3 m ) 18 cm ( 5.1 m )

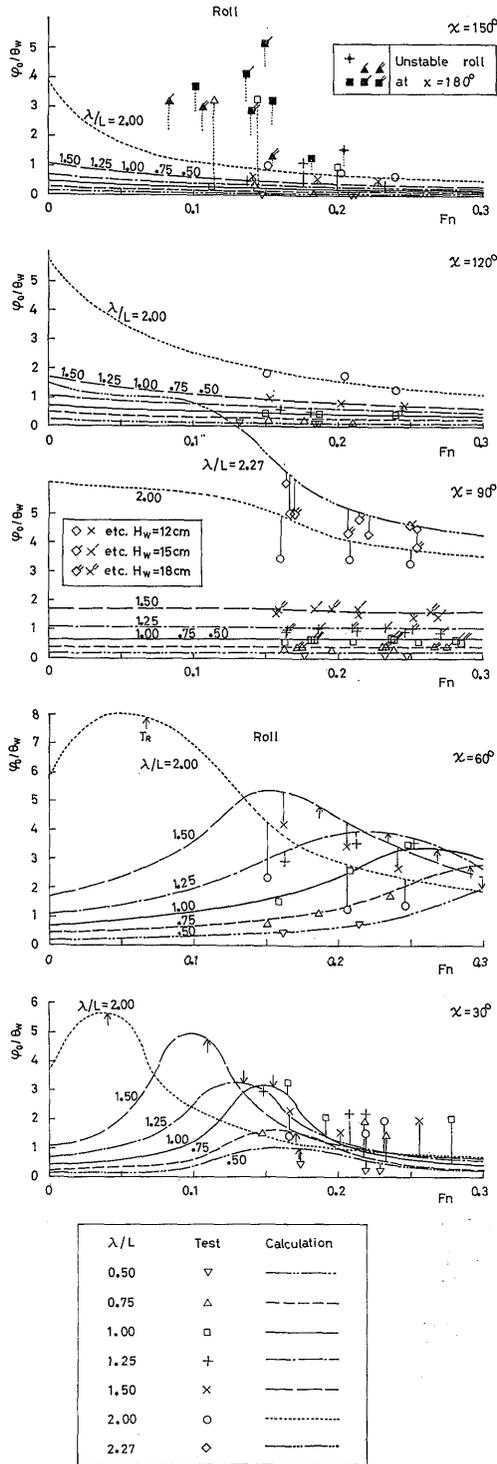


Fig. 3 Roll amplitudes

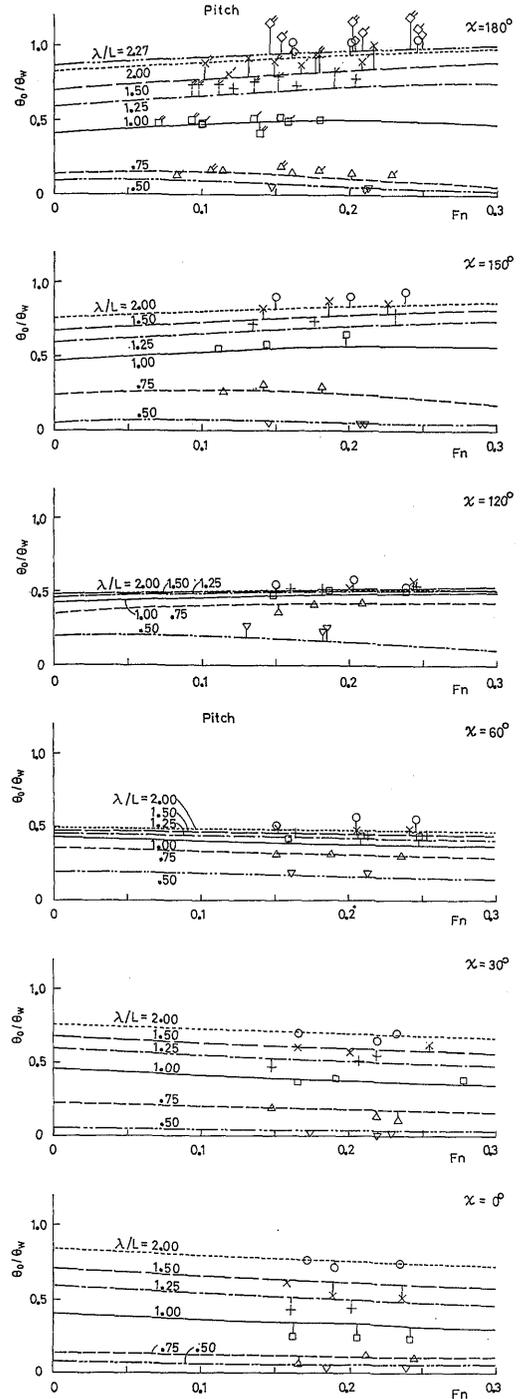


Fig. 4 Pitch amplitudes

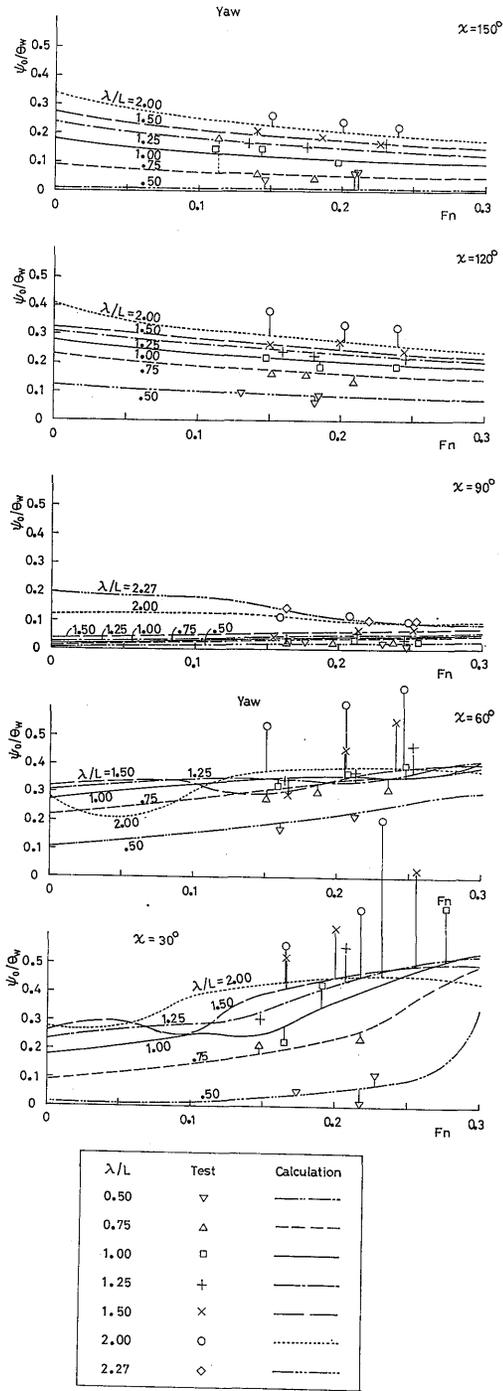


Fig. 5 Yaw amplitudes

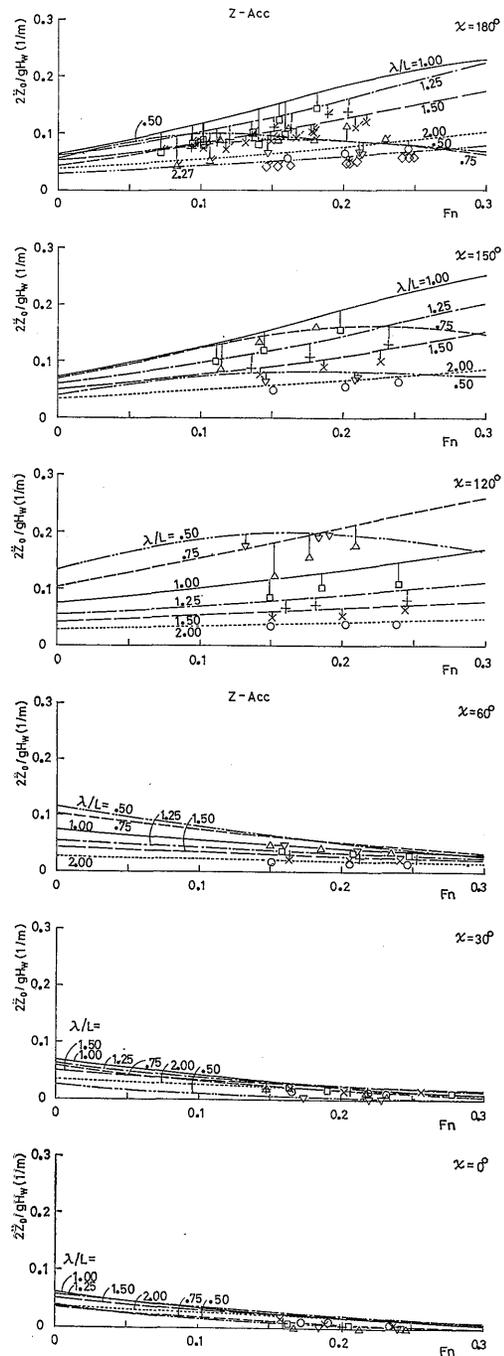


Fig. 6 Vertical acceleration at F. P.

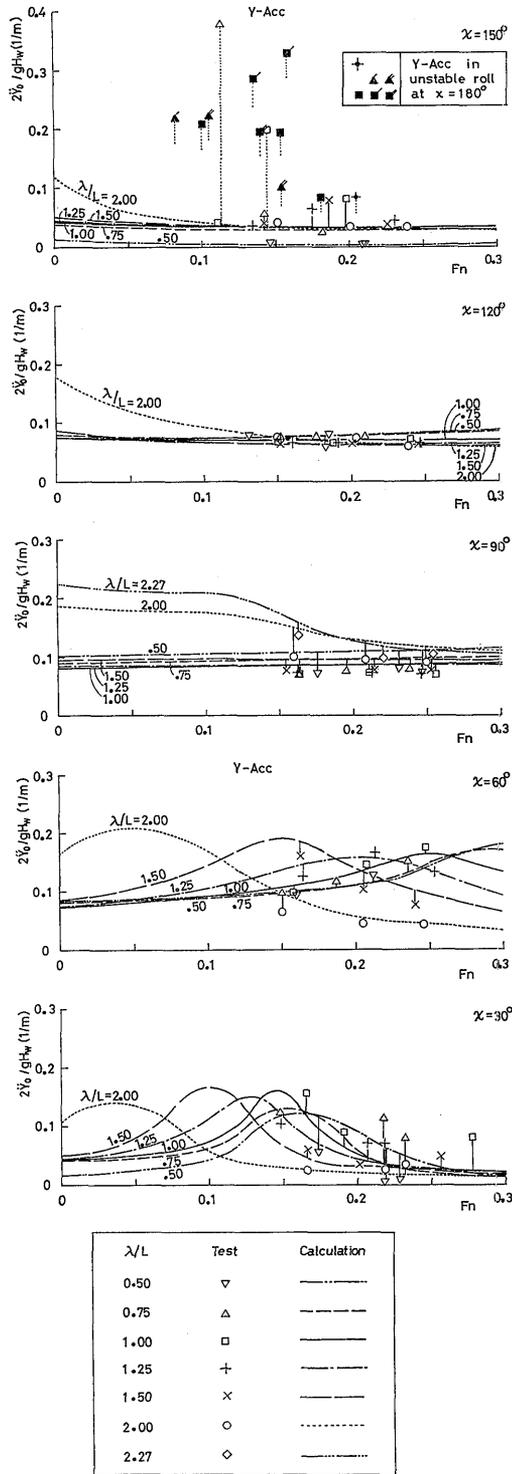


Fig. 7 Transverse acceleration at F. P.

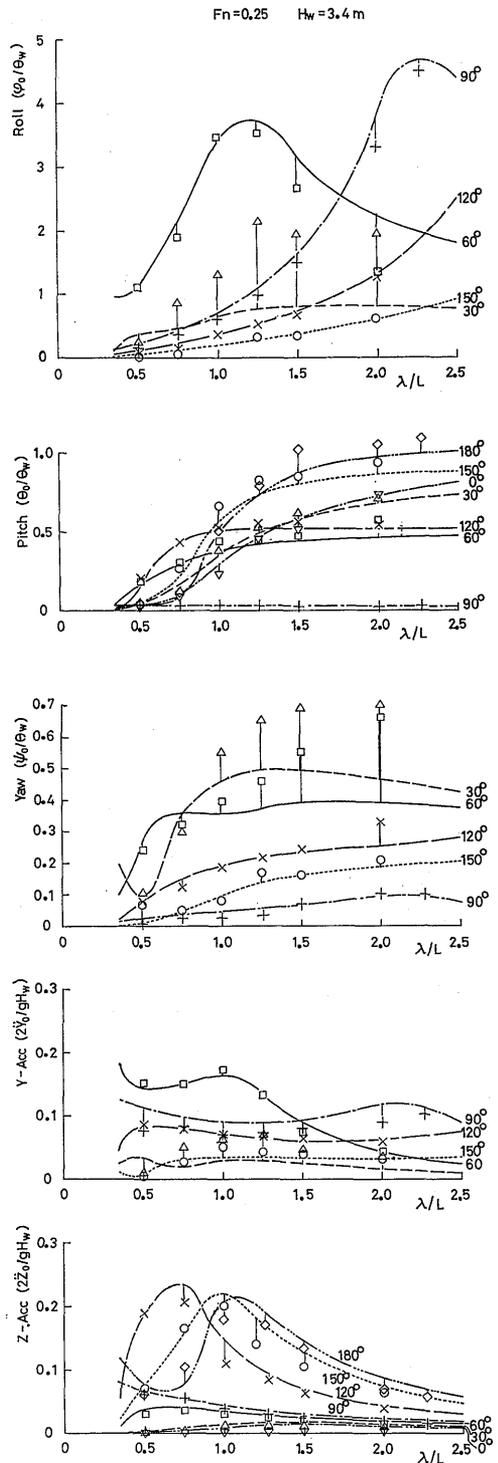


Fig. 8 Motions and accelerations

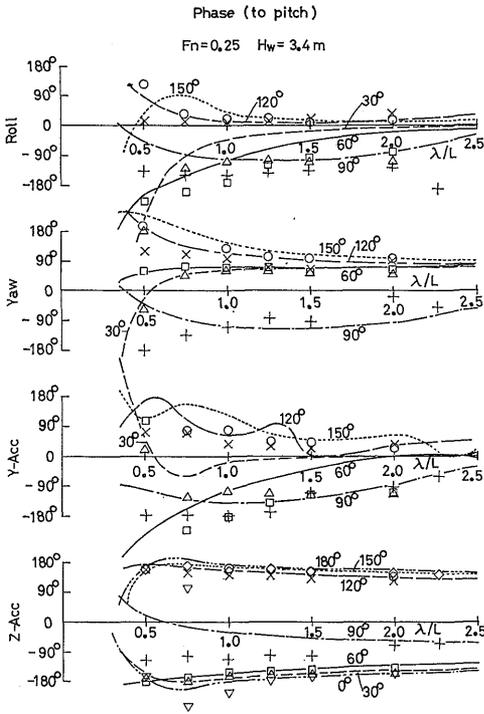


Fig. 9 Phase angle to pitch

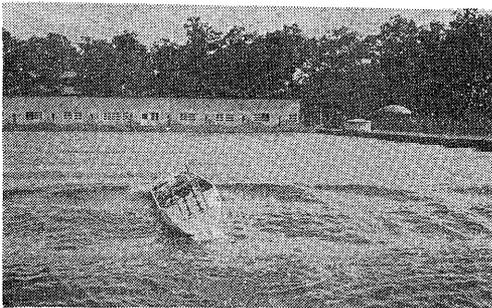


Fig. 10 Unstable roll in head wave (note splash at port bow and propeller race)

が長くなるに従って、振幅は単調増加の傾向にあり、コンテナ船等に見られるような  $\lambda/L=1.25$  前後でのピークが現れない。これは  $B/d$  が大きく、ピッチングの固有周期が小さいことと、2軸船でダンピングが大きいことによるものであろう。コンテナ船船型でも2軸のものは1軸に比較して、これに近いような傾向を示している<sup>9)</sup>。

3.4.3 ヨウ (Fig. 5, Fig. 8)

向波～横波の範囲では速度による振幅の変化が少なく、実験・計算した範囲では波長が長いほど振幅は大きい。また実験と計算の一致度は良い。

斜め追波の長波長の場合には、実験値の方が計算値に比較して相当大きくなっているが、これは主として操舵による影響である。即ち理論計算ではこれを考慮していないが、実験では自動操舵によって針路を保っているため、そのためにヨウイングが生じて振幅が変るものである。船体の操舵に対する応答は遅いので、出会周期の短い向波～横波では、この影響はほとんどないと考えて良い。

3.4.4 船首上下加速度 (Fig. 6, Fig. 8)

実験値と計算値とは大体合うが、全般に実験値の方がやや低目に出ており、速度による変化は比較的少ない。横波～追波の範囲では振幅は小さい。Fig. 6 の  $\chi=180^\circ$  の図から分るように、波高の変化による影響は少なく、波長の短い範囲で、波高の高い場合に多少低目に出ている程度である。

なお、試みにピッチングだけによる上下加速度  $\alpha_p$  を、

$$\frac{\alpha_p}{g} = \theta_0 \frac{\omega_e^2}{g} l_p \tag{6}$$

$l_p$ : C. G. から加速度計までの水平距離

によって計算してみると、 $\chi=90^\circ$  の場合以外は定量的にも良く一致した結果が得られ、このような近似がある程度実用できることが確かめられた。

3.4.5 船首左右加速度 (Fig. 7, Fig. 8)

左右加速度の傾向はロールに非常に良く似ている。即ち、向波～斜め向波の範囲では比較的小さく、速度による変化も少ない。そして  $\chi=150^\circ, 180^\circ$  の図からも明らかなように、不安定ロールを起している場合には非常に大きな値を示し、横揺同調時の値よりも大きくなっている。 $\chi=30^\circ$  以外の場合に計算値と実験値とがほぼ一致している点もロールの場合と同様である。

このように左右加速度は（勿論、重心上ある高さを持って場所という前提の下にであるが）、ロールによく似た傾向を持っているので、試みにロールによる成分が、

$$\frac{\alpha_R}{g} = \phi_0 \left(1 + \frac{\omega_e^2}{g} l_R\right) \tag{7}$$

$l_R$ : 水面から加速度計までの垂直距離

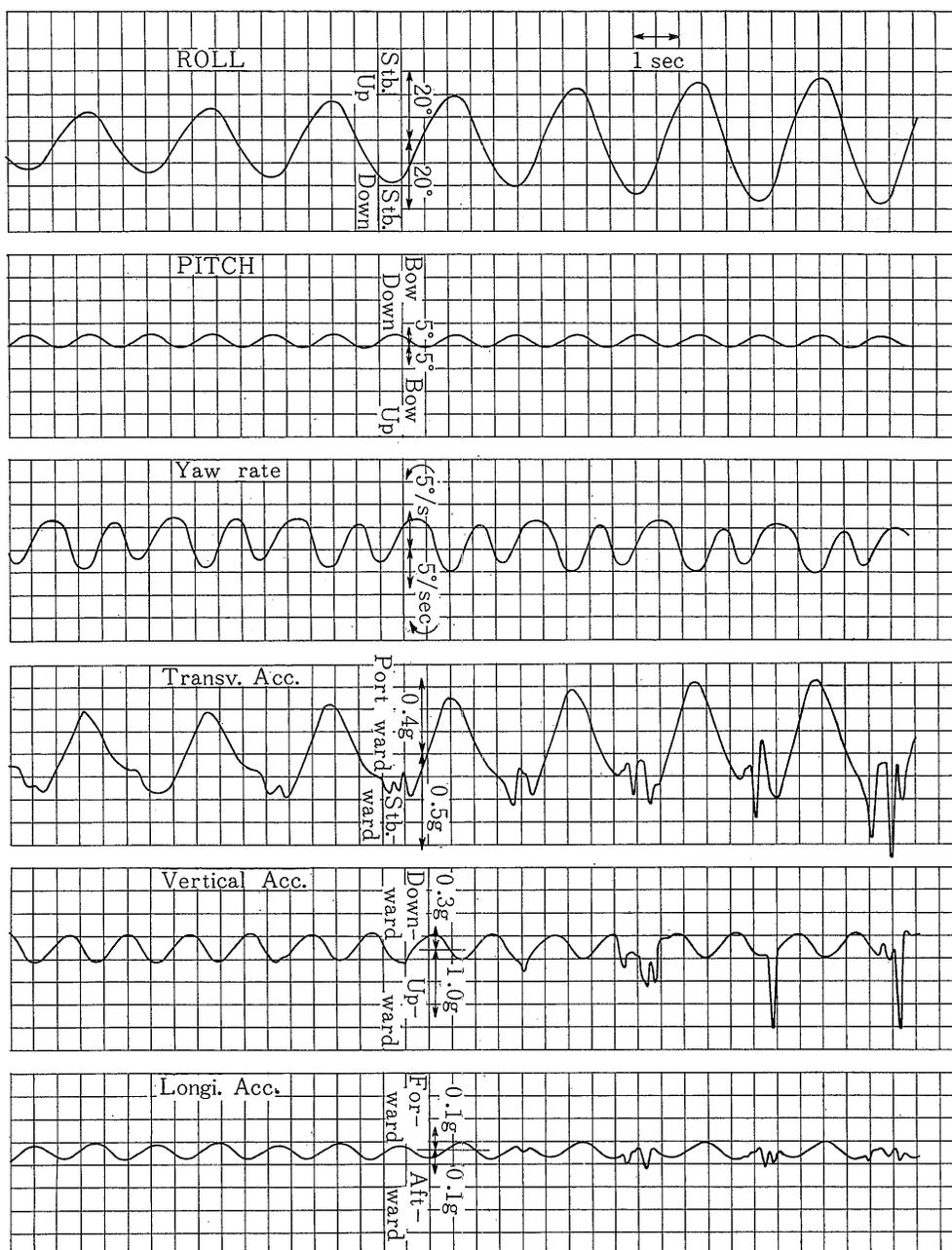


Fig. 11 A record of irregular acceleration in unstable rolling

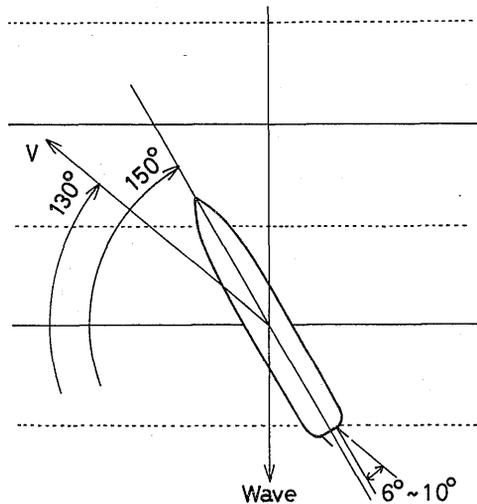
によって表わされると仮定して計算して比較してみると、斜め追波でロールが大きい場合と、不安定ロールの場合には、ほとんどロールによって左右加速度が生じていることがわかる。

3.4.6 船首前後加速度

前後加速度は、計算値がなく実験値のみなので、図は省いたが、傾向としては上下加速度の分布に非常に似ており、大きさは約1/10のオーダーである。ピッチ、ヒーブによる前後加速度成分は非常に少ないから、上下加速度がピッチとよく似た傾向を示していることと考え合わせると、ピッチングとサージングも似たような傾向を持っていることがわかる。

3.4.7 位相 (Fig. 9)

以上の各運動のピッチングに対する位相を示したものが Fig. 9 である。上下加速度はピッチと同時に計算しているが、ロール、ヨウ、横加速度はピッチとは別の式で計算しているので、多少の相違が出ることは予想される。実験と計算との比較の結果を見ても、上下加速度の位相は横波の場合を除いて良く合っている



$\lambda / L = .75$  ,  $\chi = 150^\circ$  ,  $H_w = 12 \text{ cm}$

$V_0 = 1.20 \text{ m/s}$  ,  $V = .63 \text{ m/s}$  ,  $T_e \approx 1.32 \text{ sec}$

Fig. 12 Relative orientation of model to wave

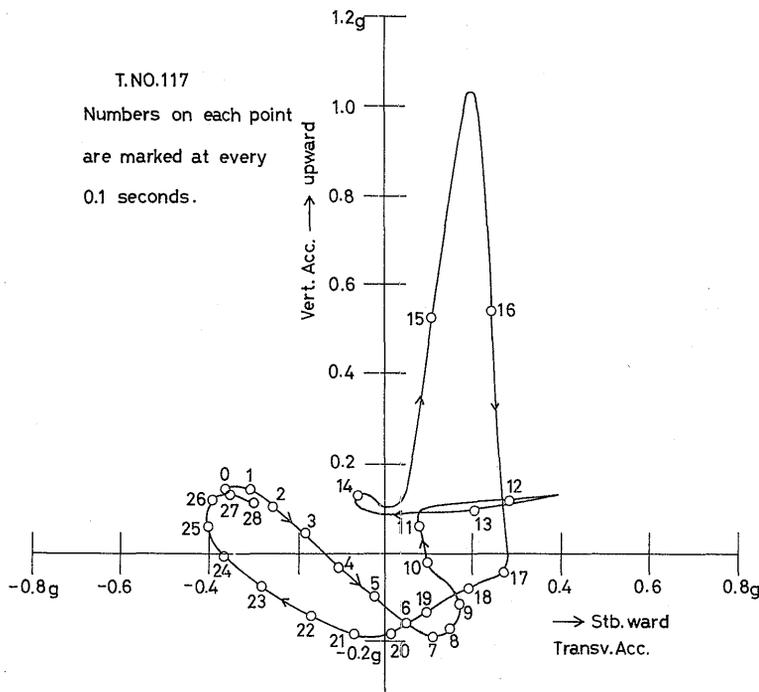


Fig. 13 An example of irregular acceleration at F. P. in unstable rolling

が、他の運動では多少のパラツキが見られる。

### 3.4.8 異常加速度

不安定横揺を起している幾つかの場合に、船首加速度計に衝撃的な異常に大きな値が記録された。Fig. 11は波高12cm (3.4m),  $\lambda/L=0.75$ ,  $\chi=150^\circ$ ,  $V_0=1.20\text{m/s}$  のときの記録例で、ロールと横加速度のみが会周期の2倍の周期で、振幅を徐々に増大させて行き、遂には衝撃的な加速度を全方向に生じている模様明らかに示されている。このときの波との出会状態は Fig. 12 に示すが、波との相対位置関係は不明である。船体運動としては船首及び右舷が下った状態で発生している。ただしこのような状態のときに常に衝撃加速度が生じるわけではなく、不安定ロールが片振幅  $20^\circ$  を越すような場合でも生じていないものもある。Fig. 13 は Fig. 11 で衝撃加速度を生じているところの上下・左右加速度の時間的变化を示したもので、船は波との出会による定常的な周期運動の他に、非常に大きな力で船首を上下左右に振られている様子がわかる。

この力の概略の大きさを推定するために、縦運動のピークの部分だけについて次のように簡略化して計算してみた。Fig. 14 に示すように、力  $F$  が、重心の前

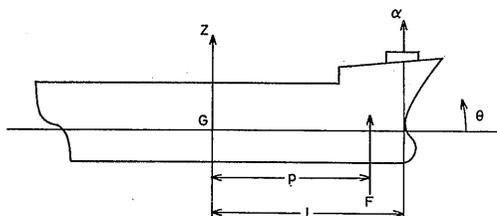


Fig. 14 Simplified model of bow acceleration due to impulsive force

方  $p$  の位置に働いたために、 $l$  の位置にある加速度計に衝撃加速度  $\alpha$  が生じたとする。船の重量を  $W$ , 付加質量係数を  $m_z$ , 付加慣動半径を  $K'$  とすれば、

$$\left. \begin{aligned} \frac{W}{g}(1+m_z)\ddot{z} &= F \\ \frac{W}{g}(K_{yy}^2 + K'^2)\ddot{\theta} &= pF \\ \alpha &= \ddot{z} + l\ddot{\theta} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

であるから、

$$F = \frac{W}{\frac{1}{1+m_z} + \frac{l \cdot p}{K_{yy}^2 + K'^2}} \cdot \frac{\alpha}{g} \quad (9)$$

仮に、力が S. S.  $8\frac{1}{2}$  付近に働いたとして、

$$\left. \begin{aligned} m_z &= 1, \quad K' = K_{yy} \\ p/L &= 0.35 \\ \alpha/g &= 1.0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

とすれば  $F=212\text{kg}$  となる。もちろん加速度計の取付不良によるブレ等ではないことは確かであり、実船へ直接換算するわけにはいかないにしても、このような状態のときに相当に大きな衝撃力が加わることは明らかである。

なお向波 ( $\chi=180^\circ$ ) で不安定ロール中に発生した衝撃加速度の例では、横加速度にのみ現われている。

### 3.4.9 速度低下

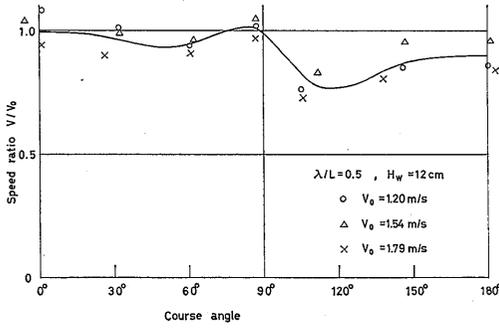
Fig. 15(a)~(f)は波高12cm ( $H_w/L=1/42$ )の場合の、波方向に対する速度低下を示したものである。前述のように、模型船は直流モータで電池の電圧を一定として駆動しているので、電池の放電の程度により必ずしも  $V_0$  が常に一定とはならないので、図は概略の傾向を示すに止まる。また回転数の低下も実船の場合にくらべて少ないので、実船では更に速度低下は大きいものと考えられる。

Fig. 16(a)~(e)は向波中の速度低下に対する波高の影響を示したものである。実験点からは、全体として高速の場合の方が速度低下率が少ないように見え、基準速度 ( $V_0$ ) による差が現れているようであるが、これは前記のモータの特性との関係もあるので、はっきりしたことは不明である。図中の曲線はこれらの実験点から大体の速度低下の傾向を示したものである。Fig. 16(f)はこれらの曲線を同時に示したもので、 $\lambda/L=1.50$ 以下の広い波長範囲で速度低下が大きくなっていくこと、この速度低下が波高に対して比較的直線的で、波高の低い所でも速度低下が割合大きくなると思われることが特徴である。このため、この種の船型では普通船型にくらべて Sea margin が悪くなる可能性が予想される。

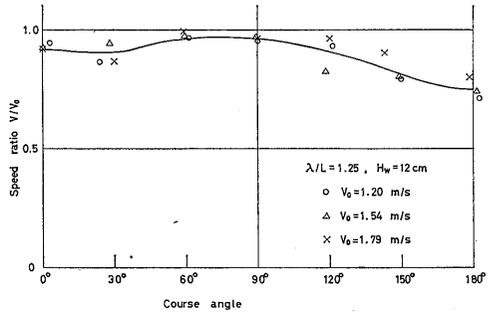
## 4. 長水槽における航走中自由横揺試験

### 4.1 実験状態

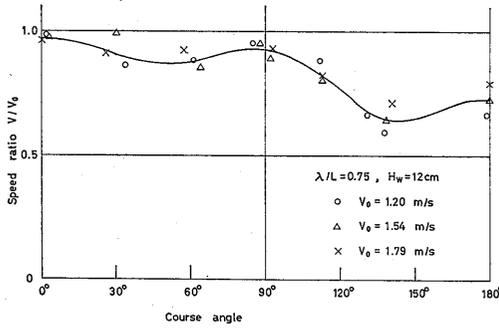
長水槽 (400m水槽) での模型船の実験状態は、できるだけ角水槽での状態に合わせるようにしたが、計測器の配置の都合等により、わずかな差が生じた。これらは Table 1 に示してあるが、特に本試験では横慣性モーメントも測定してある。また台車により曳航する関係で、重心点で模型船を固定し、ピッチ、ロー



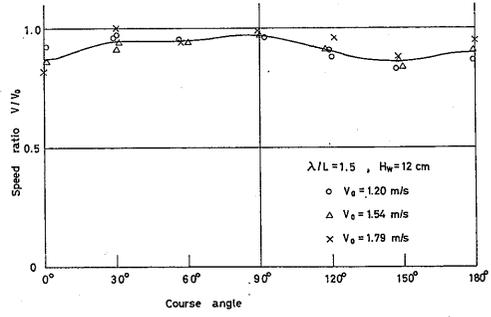
(a)



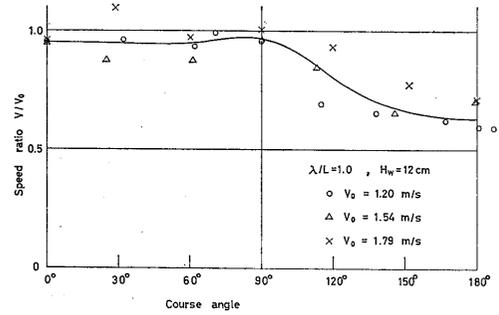
(d)



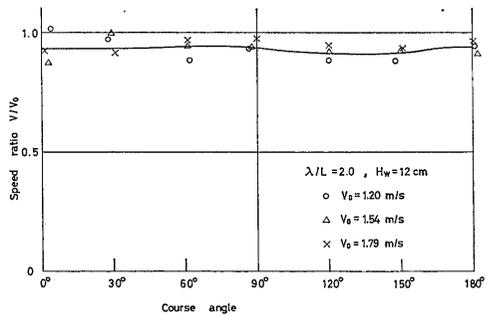
(b)



(e)



(c)



(f)

Fig. 15 Speed reduction in waves

ルのみ自由で他の運動は拘束している。横揺固有周期 2.61秒はこの状態で停止中自由横揺させた場合の値である。なお舵は付けてあるが、プロペラは外してある。台車にセットした状態の模型船を Fig.17 の写真に示す。

船の速度  $V$  は 0 と 0.4 m/s から 0.1 m/s おきに 2.5 m/s までとし、更に周波数  $\omega$  の動揺によって生ずる

波と前進速度によって生ずる波との干渉を表わす波形係数  $\Omega = \omega V/g$  が 1/4 に近くなる速度として、 $V = 0.975, 1.012, 1.050$  m/s を追加した。

自由横揺をさせるために与える初期ロール角は  $12^\circ \sim 13^\circ$  とした。ロール角は模型船に搭載したフリージャイロ式動揺計の出力を台車上のレクタグラフに記録した。

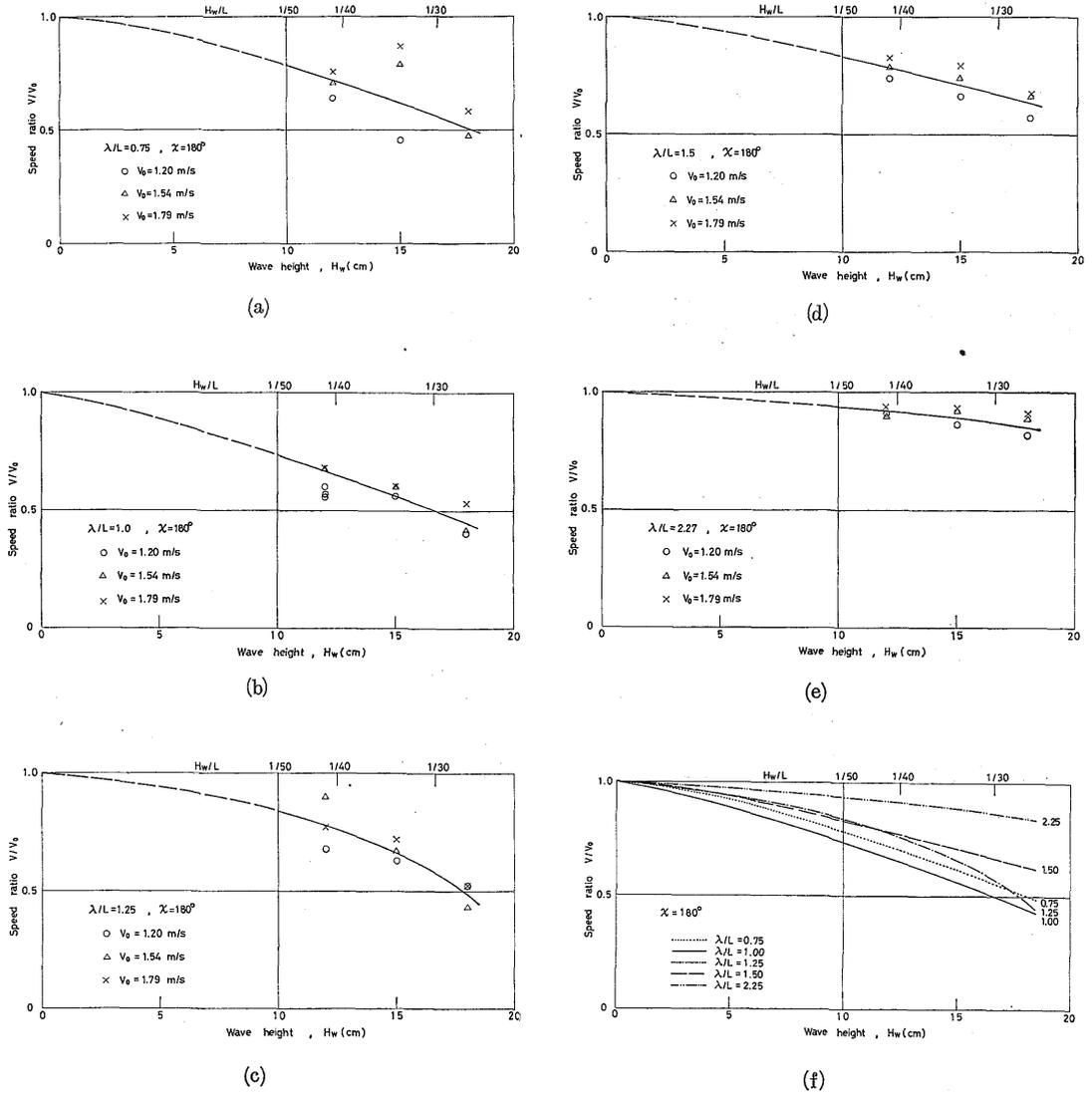


Fig. 16 Effect of wave height on speed reduction

4.2 解析法及び実験結果

4.2.1 線型減衰係数

線型の自由横揺運動方程式を

$$\ddot{\phi} + 2\alpha\dot{\phi} + \omega_0\phi = 0 \tag{11}$$

と表わした場合の減衰係数を  $\omega_0$  で無次元化して,

$$\kappa = 2\alpha/\omega_0 \tag{12}$$

として求めた値とロール周期とを Fig. 18 に示す。同図中には参考のために、同時に同じ方法で計測したコンテナ船の減衰係数と、フェリーの角水槽での実験状態における停船時の値、及び実船のインパルス応答試

験から推定した値 (別に発表予定) をも示した。コンテナ船の減衰係数は高石・吉野の示したものの<sup>9)</sup> のデータを線型解析した値である。

4.2.2 非線型減衰係数

自由横揺の記録をフルードの表現による減減曲線,

$$\left. \begin{aligned} \Delta\phi &= a\phi_m + b\phi_m^2 \quad (\text{deg}) \\ \Delta\phi &= |\phi_n| - |\phi_{n+1}|, \\ \phi_m &= (|\phi_n| + |\phi_{n+1}|)/2 \end{aligned} \right\} \tag{13}$$

にあてはめれば、いわゆる a, b 係数が求められる。

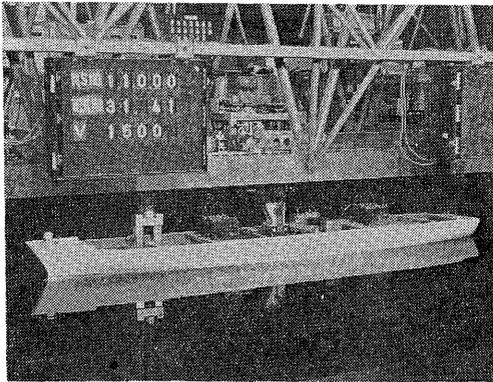


Fig. 17 Model set for free roll test in towed condition

一方、渡辺一田才<sup>4)</sup>による有効減衰係数の同調時の値を  $\phi_m$  に対して適用すれば、

$$2\alpha_e = \frac{2\omega_0}{\pi} (a + b\phi_m) \quad (\phi_m : \text{rad}) \quad (14)$$

これを (12) 式と同様に無次元化すれば、

$$\left. \begin{aligned} \kappa_e &= \frac{2\alpha_e}{\omega_0} = \kappa_\alpha + \kappa_\beta \phi_m \\ \kappa_\alpha &= \frac{2a}{\pi}, \quad \kappa_\beta = \frac{2b}{\pi} \end{aligned} \right\} (15)$$

となって線型化した有効減衰係数及びその線型項、非線型項を振幅  $\phi_m$  の関数として求めることができる。

(2) 式の運動の計算では  $2\alpha_e = b\phi\dot{\phi} / (J\phi\ddot{\phi} + a\phi\dot{\phi})$  として、このようにして求めた値を用いている。なお a, b 係数は実験点から最小二乗法により定めている。

Fig. 19 に  $\kappa_e$  及び  $\kappa_\alpha, \kappa_\beta$  の速度に対する変化を、Fig. 20 に  $\kappa_e$  の  $\phi_m$  に対する変化を示す。

#### 4.2.3 N係数

N係数は

$$\Delta\phi = N\phi_m^2 \quad (\text{deg}) \quad (16)$$

で表されるから、(13)式で求めた a, b 係数を利用すれば、

$$N = \frac{a}{\phi_m} + b \quad (17)$$

によって求められる。これによって計算した N 係数の  $\phi_m = 10^\circ$  及び  $20^\circ$  の時の値  $N_{10}, N_{20}$  を Fig. 21 に示す。

a, b 係数は最大振幅  $12^\circ \sim 13^\circ$  の実験値から定めたものであるから、 $N_{20}$  については外挿による推定値である。

#### 4.3 考察

Fig. 18 によると、カーフェリーの横揺抵抗係数  $\kappa$  は停船時 0.05~0.06、航行中 0.2 の程度で、 $\Omega = 1/4$  に相当する速度近くで急増すること、コンテナ船にくらべて相当大きいこと等がわかる。角水槽における停船

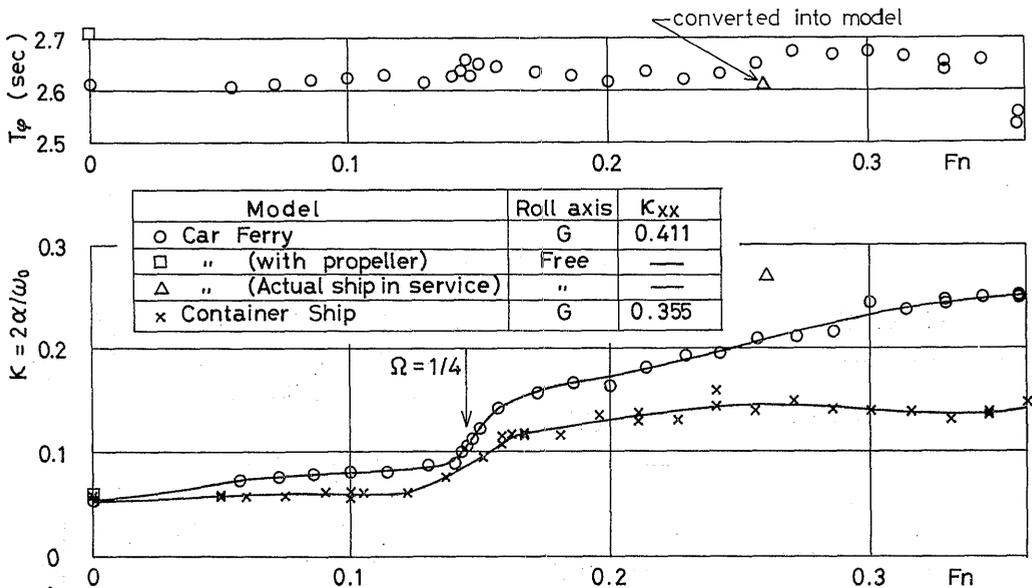


Fig. 18 Linear damping coefficients and natural roll period

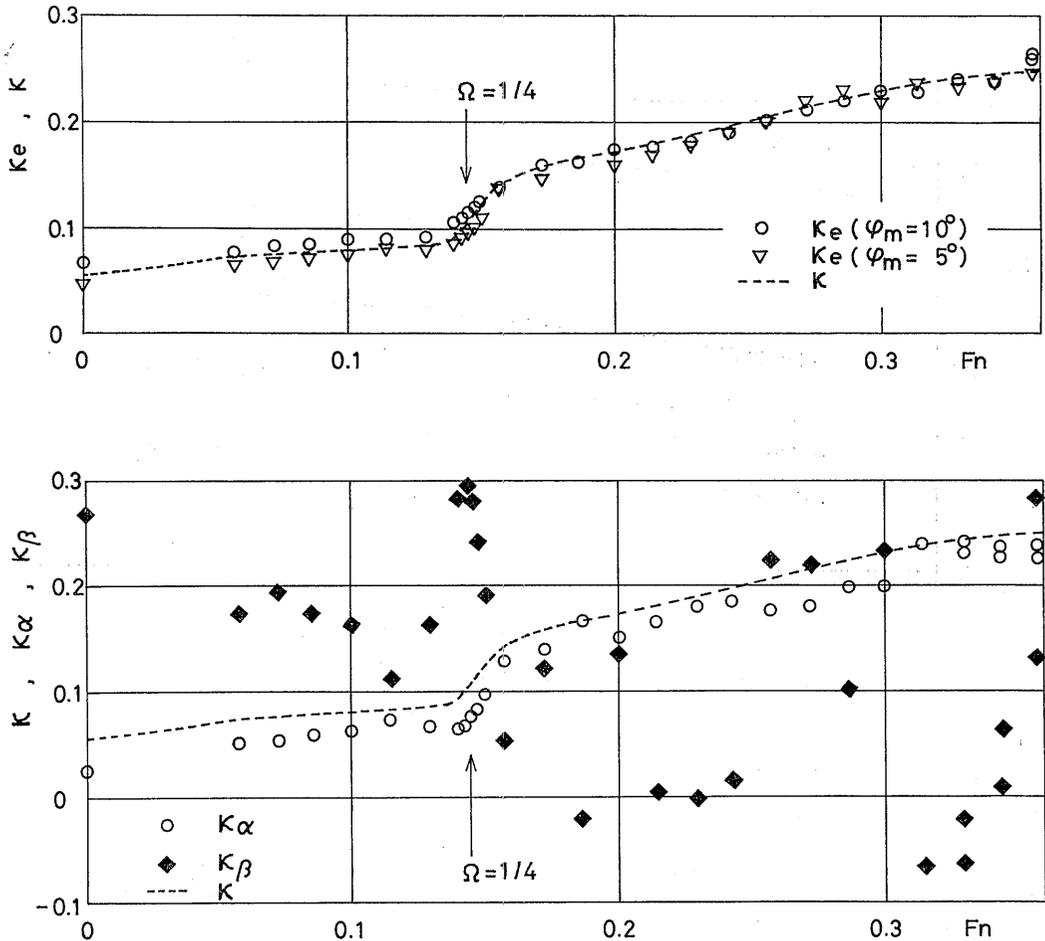


Fig. 19 Effective damping coefficient and its linear and nonlinear components in comparison with linear damping coefficient

時の値及び実船の航行中の値との条件の違いは、プロペラを装備していないこと、重心点で拘束していることが主であるが、両者の影響は原理的には相殺する方向と考えられる。実船の値がやや高目に出ている理由は明らかでないが、模型船の曳航状態ではヒープを拘束しているために、高速域で起るはずの沈下が止められていること、実船ではやや初期トリムがついていること等にも原因があると考えられる。

有効減衰係数として非線型性を考慮した場合も、線形減衰係数と大差ない結果になることは Fig. 19 で明らかであるが、その非線型項には  $\Omega=1/4$  の所でピークが現れていて、この近辺での流体現象の複雑さを示している。

$N$  係数は停止時約 0.01 で、法規上標準とされている値 0.02 よりはかなり小さいが、プロペラ付きの状態及び航海中の実船では、本実験よりも高目の減衰係数が得られているから、実際にはもう少し大きくなることも考えられる。

## 5. 結 論

外洋フェリー船型の波浪中における動揺・加速度等に関する模型実験及び理論計算を行ない、比較検討の結果次の結論を得た。

(1) 波長が船長に等しいかやや短い場合の向波または斜め向波で、出会周期が横揺固有周期の  $1/2$  に近いときに、不安定ロールを起す可能性がある。

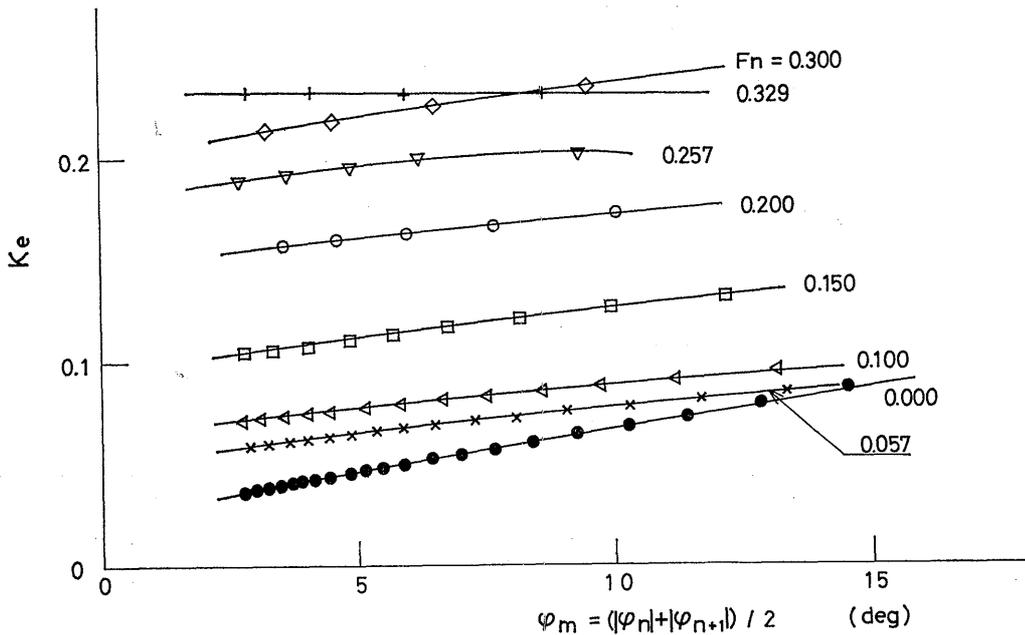


Fig. 20 Effective damping coefficient curves to mean roll angle

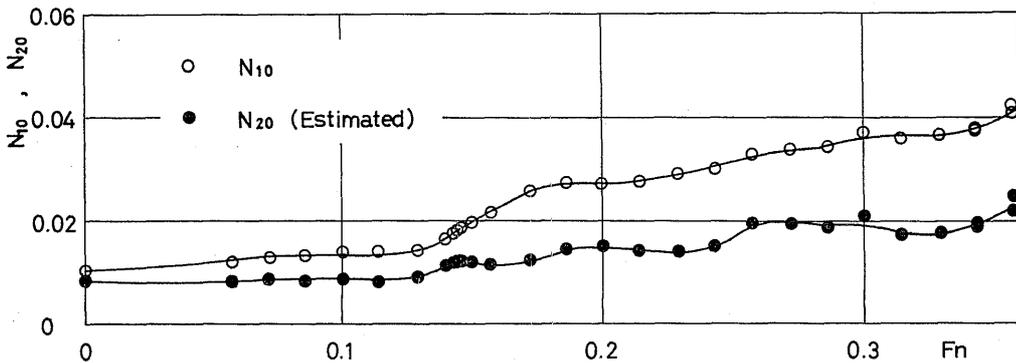


Fig. 21 N-coefficients to speed

(2) 不安定ロールの場合を除けば、出会周期が固有周期に近くなる横波及び斜め追波でロール振幅は最も大きくなる。

(3) ロールの計算値と実験値の比較では、横波～向波の範囲ではほぼ一致した結果を与えるが、斜め追波では合わない所もある。

(4) ロール振幅応答の波高に対する非線型性は非常に少ない。

(5) ピッチは速度による変化が極めて少なく、波

高に対する応答の変化も少ない。

(6) ピッチの計算と実験とは全般に良く合うが、向波～斜め向波の比較的長波長の範囲、即ち運動が大きい所では、やや実験値の方が高い。

(7) ヨウ振幅の実験値には自動操舵の影響が入っているため、出会周期が長くなる斜め追波の長波長の範囲で、計算値よりも実験値の方が大きい。

(8) 船首上下加速度はピッチとの関連が非常に大きい。実験値と計算値との比較では、全般に実験値の

方がやや低目である。

(9) 船首左右加速度の傾向はロールに非常に良く似ている。特に不安定ロールを起している場合の横加速度は、ほとんどロールによって生じている。

(10) 船首前後加速度は傾向としては上下加速度によく似ており、大きさは約1/10である。

(11) 不安定ロールを起している時に、船首付近に非常に大きな衝撃力が働くことがあり、横型船ではそれによる船首上下加速度が1g以上にも達した。

(12) 模型船の速度低下は波高に対して比較的直線的で、全体として高速の方が速度低下率が少ない。

(13) 横揺抵抗係数は速度とともに増加し、航海速度付近では停止時の約3倍になる。

(14)  $N$ 係数は停止時0.01程度であるが、航海速度では  $N_{10}$  が0.034位、 $N_{20}$  が約0.020である。実船ではこれよりも大きくなることが予想される。

## 6. 結 言

本研究は船舶技術研究所研究計画にしたがい、<sup>5</sup>外洋フェリーの運動性能に関する研究<sup>6</sup>の一部として、また日本造船研究協会との共同研究として行なったものである。同協会第6基準研究部会を通じて実船等に関する諸資料の提供を快諾して下さった、日本沿海フェリー(株)、(株)金指造船所はじめ関係各位に深く感謝する次第である。

なお長水槽での実験には推進性能部の協力を得、また理論計算及び実験の解析には船研共用計算機FACOM270-20を使用した。

## 参 考 文 献

- 1) 関西造船協会誌 第142号 “カーフェリー特集号” (1971)
- 2) 宝田直之助: “長距離大型フェリーボート基本設計ノートより”(その1~5), 日本造船学会誌 第502, 504, 505, 510号, 1971, 511号, (1972)
- 3) 福田淳一: “電子計算機による規則波中の波浪曲げモーメント応答関数の計算” 西部造船会々報, 第32号, (1966)
- 4) 田才福造: “Short Crested Wave 中における Sway, Yaw および Roll の運動について” 西部造船会々報 第42号, (1971)
- 5) 安藤定雄, 小山鴻一: “ストリップ法による規則波中の船の縦運動計算プログラム”, 船舶技術研究所報告 第7巻第4号 (プログラム特集 第1集), (1970)
- 6) 安藤定雄, 高石敬史: “ストリップ法による規則波中の船の横運動計算プログラム”, 船舶技術研究所報告 第8巻第6号 (プログラム特集 第2集), (1971)
- 7) 高石敬史, 菅井和夫, 小川陽弘: “角水槽における最近の波浪中模型実験法(その1), (その2)” 日本造船学会誌 第525, 526号, (1973)
- 8) 高石敬史, 吉野泰平, 猿田俊彦: “高速コンテナ船の斜め波中における動揺特性”, 関西造船協会誌 第144号, (1972)
- 9) 高石敬史, 吉野泰平: “斜め波中におけるコンテナ船の船体中央曲げおよび振りモーメントについて”, 関西造船協会誌 第152号, (1974)