

原子力第一船の波浪中動揺と加速度に関する研究*

山内 保文** 高石 敬史** 吉野 泰平**
森 政彦** 猿田 俊彦**

On the Motions and Accelerations of the Japanese First Nuclear Ship in Waves

By

Yasufumi Yamanouchi, Yoshifumi Takaishi, Taihei Yoshino,
Masahiko Mori and Toshihiko Saruta

Abstract

Model experiments to predict the ship motions and accelerations induced on the Japanese First Nuclear Ship in waves were carried out.

The responses of the model ship in regular and irregular waves generated in the model basin were measured. The test results in regular waves are shown as the amplitude ratio to wave height or wave slope against the ship length-wave length ratio for the various wave directions and ship speed. The responses in irregular waves whose energy spectrum was given as a certain standard type, are shown as the standard deviations of the responses to the significant wave height against the velocity for the various wave directions and the mean wave period. The test results were compared with the computed values by the so-called strip theory.

Finally, the short term distribution of the responses in irregular extreme sea condition was estimated and compared with the values derived from the foregoing researches. Thrust increase in regular and irregular waves was also measured and the speed loss in rough seas was considered.

目 次

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> 緒 論 1. 実験の方法 <ul style="list-style-type: none"> 1.1. 模型船 1.2. 計測項目および計測装置 1.3. 実験状態 <ul style="list-style-type: none"> 1.3.1. 規則波中の実験 1.3.2. 不規則波中の実験 2. 実験結果 <ul style="list-style-type: none"> 2.1. 規則波中の応答 2.2. 不規則波中の応答 2.3. 実験による最大値 2.4. 波浪中の推力増加 | <ul style="list-style-type: none"> 3. 実験結果に対する考察 <ul style="list-style-type: none"> 3.1. 規則波中の応答 <ul style="list-style-type: none"> 3.1.1. 縦運動 3.1.2. 横運動 3.2. 不規則波中の応答 <ul style="list-style-type: none"> 3.2.1. 縦運動 3.2.2. 横運動 3.2.3. 不規則応答のスペクトラム 3.2.4. 実験で測定された最大値の分布 3.3. 不規則波中の推力増加と速度低下 4. 応答の最大値の推定 <ul style="list-style-type: none"> 4.1. 短期分布による推定 |
|---|--|

* 日本原子力船開発事業団と共同研究（昭和42年度）

** 運動性能部

4.2. 長期分布による推定

4.3. 北大西洋と北太平洋の波浪観測値の比較

結 論

付 記

参考文献

付 録

- (1) 水槽における不規則波発生方法
- (2) 斜め波中の Sway の計算法

付 図

- (1) 規則波中の実験値
- (2) 規則波中の振幅応答—実験値と計算値
- (3) 不規則波中の応答の標準偏差
- (4) 実験の最大値
- (5) 規則波中および不規則波中の推力増加
- (6) 風波中における推力増加, 馬力増加と速度低下

緒 論

原子力船に積まれる原子炉が陸上の原子炉と本質的に異なる点は、船体の動揺とそれに基づく加速度を常時経験する点にある。したがって、原子力船の設計に当っては、その船が海洋において受ける動揺や加速度の性質を、その異常値の限界を含めて明らかにする必要がある。

これに関する研究は、わが国で原子力船開発の構想が立てられて以来、種々行なわれてきた^{1)~6)}。従来の研究の方法は大きく2つの方法にわかれる。その1つは普通船舶の航海中に受ける動揺と加速度の変動振幅を長期間にわたり測定し、その統計的性質を明らかにして異常値を推定する方法で、文献1), 2), 4), 5)の研究がこの方法で行なわれたものである。その2つは水槽実験により対象船の規則波中における動揺と加速度の応答関数を求め、これに想定した海洋のエネルギー

スペクトラムをかけ合わせ、その累積エネルギー密度の値から、その海象の中における応答の分布を求めるもので、文献3), 6)の研究がこれに当たるものである。

これらの研究が行なわれた以後今日に至るまでに、波浪中の船体運動に関する分野で、理論的にはストリップ理論に基づく船体縦運動の計算法の進展が、実験的には斜め波中における模型実験と解析方法の開発がそれぞれ行なわれた。

そこで日本原子力船開発事業団と船舶技術研究所は原子力第一船を対象とし、上記の研究方法による異常加速度推定を目的とする共同研究を実施した。

本研究が従来の研究と異なる点は、

- (1) 向波中だけでなく、斜め波中あるいは横波中の応答特性を明らかにすること。
- (2) 縦揺れ、上下動、上下加速度などの縦運動ばかりでなく、横揺れ、横加速度などの横運動特性を明らかにすること。
- (3) 規則的な波の中での実験のほか、一定のエネルギースペクトラムの形状を有する不規則な波を水槽に発生させ、特に大波高の場合の応答の異常値を直接測定すること。
- (4) 実験結果を、ストリップ理論に基づく理論計算値と比較すること。

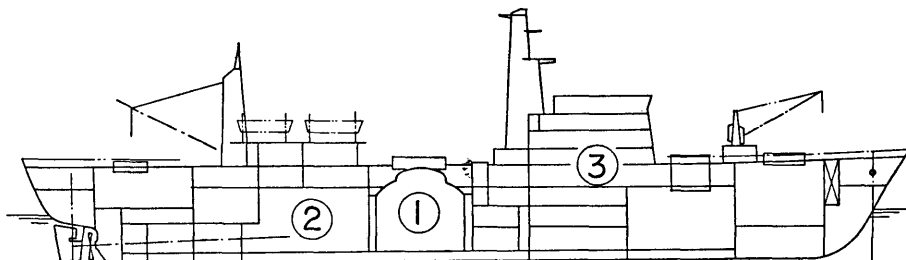
などである。

本論は、本研究のうち、すでに発表された論文²⁾⁴⁾および近く刊行される日本原子力船開発事業団の報告のうちから、模型水槽実験に関する部分をまとめたものである。ストリップ理論の計算に関しては上記論文、あるいは報告を参照されたい。

1. 実験の方法

1.1. 模型船

原子力第一船は Fig. 1 に示すような一般配置図で、



① REACTOR RM ② ENGINE RM ③ ACCOMMODATION SPACE

Fig. 1 Rough Arrangement

M. NO

PARTICULARS.

LENGTH(BETWEEN PERPENDICULARS)	4000 m
LENGTH(ON WATER LINE)	
BREADTH (MOULDED)	0.6552 m
DRAUGHT (MOULDED), DESIGNED FULL LOAD	0.2379 m
RISE OF FLOOR	0.0035 m
STARTING POINT OF RISE OF FLOOR FROM ϕ	0.0238 m
RADIUS OF BILGE CIRCLE	0.0448 m
MEAN THICKNESS OF SHELL PLATING	
WATER LINE BOW AND BUTTOCK LINE APART	0.0172 m
SQUAR STATION APART	0.4000 m
LONGITUDINAL CENTER OF BOUYANCY FROM MIDSHIP	0.0792 m

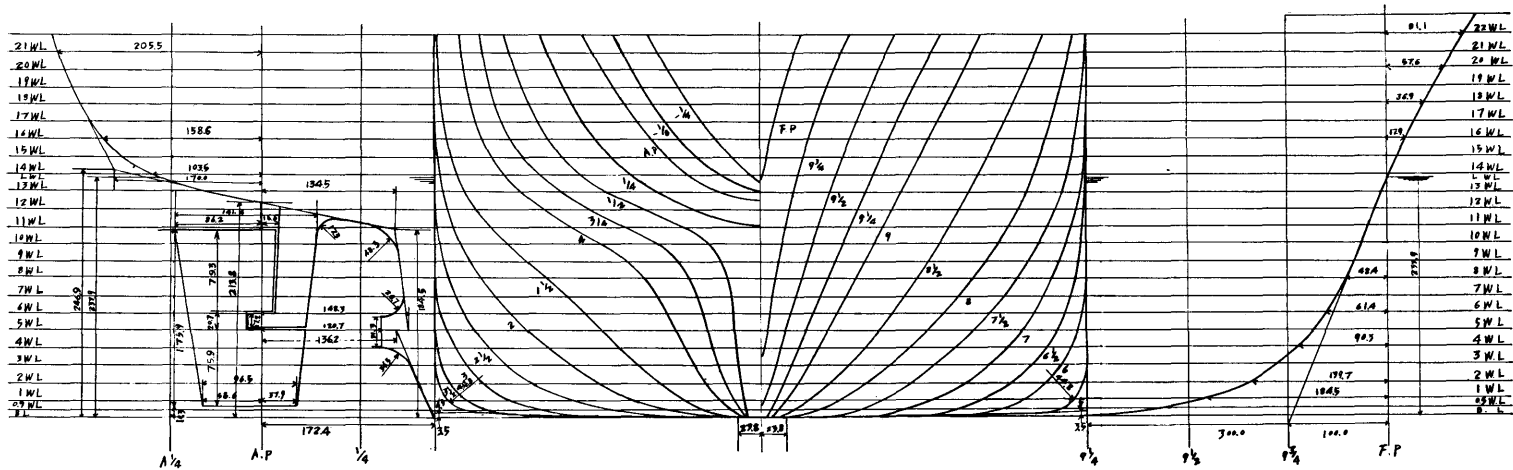


Fig. 2 Lines of the Model

Table 1 Principal Dimensions

Items	Ship	Model
Length over all L_{oa} (m)	130.000	—
Length bet. P.P. L_{pp} (m)	116.000	4.000
Breadth Mld. B_o (m)	19.000	0.655
Depth D_o (m)	13.000	0.466
Draft Designed d_o (m)	6.900	0.238
Trim	0	0
Block Coefft. C_B	0.663	0.663
Midship Coefft. C_M	0.988	0.988
Displacement Vol. (m ³)	10083	0.413
C.G. from Midship (m)	2.950 aft	0.079 aft
C.G. Height \overline{KG} (m)	7.57	0.261
Metacentric Height \overline{GM} (m)	0.900	0.031
Long. Radius of Gyration	0.23 L_{pp}	0.231 L_{pp}
Rudder Area Ratio $A_r/d_o L_{pp}$	1/45.5	1/45.5
Projected Area above LWL		
front view A (m ²)	320	—
profile B (m ²)	1324	—
Propeller Dia. D_p (m)	—	0.145

その主要目は Table 1 に示す値である。模型実験には、1/29 縮尺の模型船(木製)が用いられたが、この模型船はとくに大波高時の実験に供せられるので、上甲板、甲板室などを備えている。船体表面は絹布張りをしたうえで白色ラッカー塗装がほどこされている。模型船の線図を Fig. 2 に、写真を Fig. 3 に、模型船および模型プロペラの要目を Table 1 にそれぞれ示す。実験は計画満載状態について行なわれた。模型プロペラは文献 3) のプロペラ No. 1540 と相似な形状を採用した。

模型船は無線操縦による自航模型であるため、動力装置、操縦装置、動揺等計測装置、記録装置が積込ま

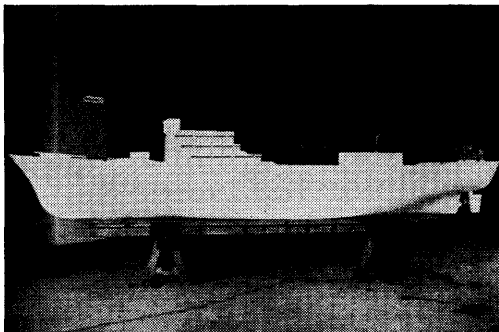


Fig. 3 Model Ship

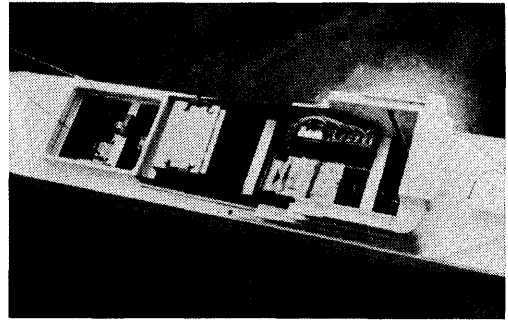


Fig. 4 Equipments of the Model Ship

れている。模型船に計器類を搭載した状態の写真を Fig. 4 に示す。

1.2. 計測項目および計測装置

計測項目と計測器を Table 2 に、計測装置などの配置図を Fig. 5 に示す。

Table 2 Measured Items and Instruments

Rolling Angle	Vertical Free-Gyro
Pitching Angle	do.
Vertical Acceleration at F.P.	Accelerometer (Strain Gage Type)
Vertical Acc. at C.G.	do.
Transverse Acc. at C.G.	do.
Longitudinal Acc. at C.G.	do.
Vertical Acc. at 0.05 L_{pp} forward A.P.	do.
Thrust of Propeller	Propeller Dynamometer (Inductance type)
Number of Revolutions of Propeller	Pulse Generator
Speed	Ultra-sonic Position Indicator
Course of Model	do.
Wave	Wave Probe (Capacitance Type)

ここで、加速度というのは、船体に固定された加速度計によって測定されたものである。したがって、加速度計の取り付けられた場所の線加速度のほか、縦揺れや横揺れなどの傾斜角に基づく重力の加速度の変動成分が含まれている。

プロペラ軸の推力測定に用いられた推力計は、推力にバランスするスプリングと、バランスのずれを検出する差動トランスを組合わせたものである。

記録装置には、電磁オシログラフとマグネティックテープレコーダーを併用したが、規則波中のデータ読み取りには前者の記録を用い、不規則波中のデータの

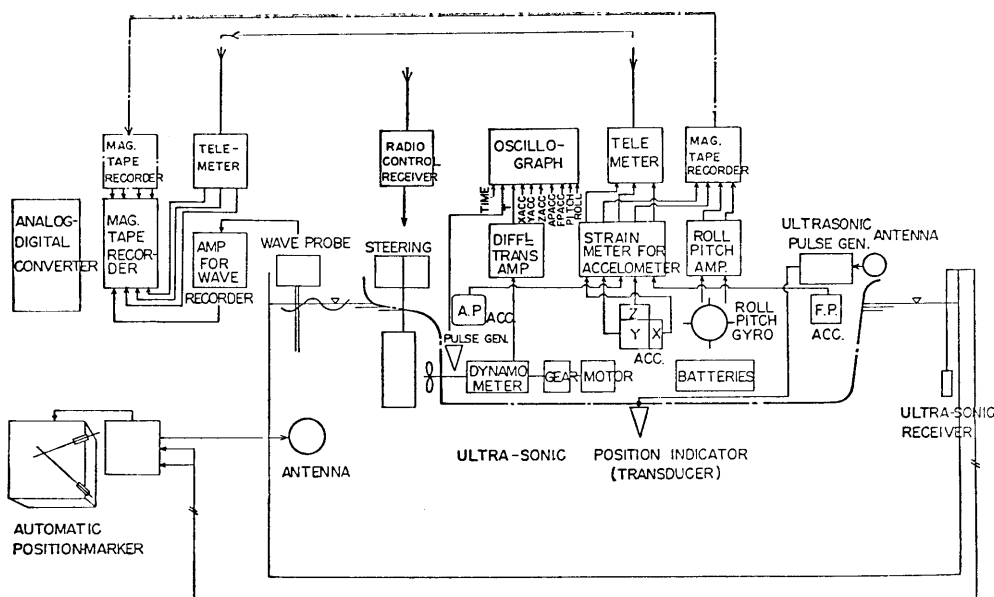


Fig. 5 System of Measurement of the Model Test

解析には、後者と A-D 変換機を組合わせて穿孔テープを製作し、これを計算機により処理することにした⁷⁾。

また、模型船上で測定された量を陸上で記録するためにテレメーターも用いられた。

1.3. 実験状態

1.3.1. 規則波中の実験状態

実験を行なった規則波は、波高がほぼ 0.1m 一定で波長と船長の比 (λ/L) が 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 2.0, 2.62, 3.05, 3.33 の 9 種類の波である。この波の進行方向に対する船の進路角 λ は、向波を 180° として、 180° , 150° , 120° , 90° の 4 種類とした。船速はフルード数 (F_n) 0~0.25 の範囲で 6 ないし 7 点をとった。

1.3.2. 不規則波中の実験状態

角水槽では、不規則波発生制御装置を用い付録-1 に示すような方法で、長波頂の不規則波を発生することができ、適当な周波数範囲でほぼ望む形を有するエネルギースペクトラムが得られる⁸⁾。不規則波中の模型実験を行なう際に、どのようなスペクトラムの不規則波を起こすかが問題である。福田は、波浪曲げモーメント予測のためにスペクトラムの形状が及ぼす影響を論じ⁹⁾、Neumann 形、Pierson-Moskowitz 形および Darbyshire 形のスペクトラムを比較し、国際船体構造会議 (I.S.S.C.) で採用した Pierson-Moskowitz 形

を用いることを提唱している。そして、有義波高は、応答が線型であればいかなる値でもよいが、スペクトラムの形状には平均波周期が大きい影響を持つので、いくつかの周期について波浪曲げモーメントを予測する必要性を指摘している。

Pierson-Moskowitz 形のスペクトラムは、

$$[r(\omega)]^2 = 0.11 \times H_V^2 \left(\frac{T_V \omega}{2\pi} \right)^{-5} \exp \left\{ -0.44 \left(\frac{T_V \omega}{2\pi} \right)^{-4} \right\} \quad (1)$$

で表わされる。ここに H_V は観測波高、 T_V は観測波平均周期、 ω は円周波数である。なお、このスペクトラムは $0 < \omega < \infty$ の範囲で定義され、その範囲で曲線の囲む面積が、分散 σ^2 に等しい。

不規則波中の模型実験を今回行なった主なねらいは原子力第一船が遭遇する可能性のある最も苛酷な海象を人工的に造り出し、その中で船の応答がどのような異常値になるかを直接測定することである。

まず波高としては、樹田の論文¹⁰⁾の表に示された値を参考とし、10分の1最高平均値 $H_{1/10} = 12\text{m}$ をとれば十分であると考え $H_{1/10} : H_{1/3} = 5.1 : 4.0$ の関係から有義波高 $H_V = H_{1/3} = 9.4\text{m}$ の波を起こすことにした。Walden の資料¹¹⁾によっても、 $H_V > 9.25\text{m}$ の波の出現頻度は 0.6% 程度であるので、このような波高には 1年に1回程度遭遇すると考えられる。つぎに、 T_V の値はなるべく多くの値について実験するのが望

ましいが、一方、造波装置で発生できる波の周波数範囲に限界があり、また実験の時間もそう多くとれない関係上、 T_V の影響は、別に行なわれるストリップ理論に基づく理論計算で求めることにし、実験では $T_V=8$ 秒の場合を中心として行ない、横波中の実験では $T_V=10$ 秒の波も追加することとした。なお有義波高が 9.4 m の半分の 4.7 m の実験をまず行ない、ついで 9.4 m で実験した。

(1) 式のスペクトラムを $H_V=9.4\text{m}$, $T_V=8, 9, 10, 11$ 秒に対して示したのが Fig. 6 であり、実験に用い

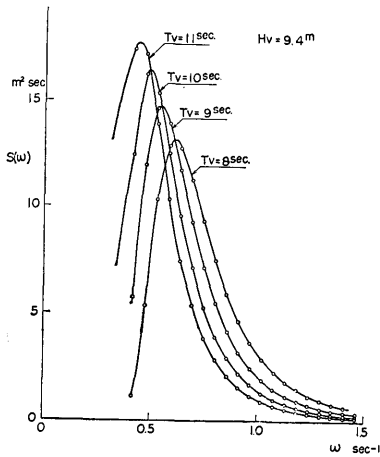
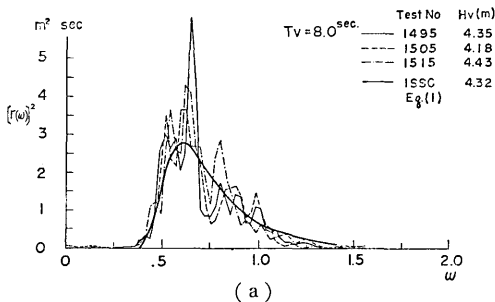
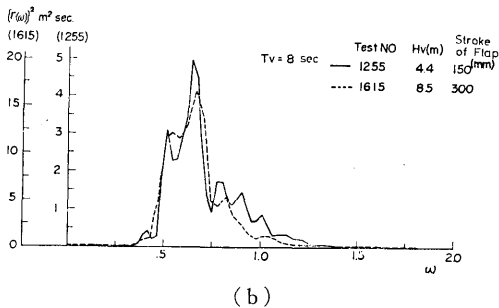


Fig. 6 I.S.S.C. Sea Spectrum



(a)



(b)

Fig. 7 Wave Energy Spectrum Generated in the Basin

た水槽の発生波のスペクトラムを (1) 式と比較して示したのが Fig. 7 である。これらの測定結果によると

- (1) 水槽の波のスペクトラムには、ピークや切れ込みが見られるが、ほぼ(1)式を近似していること。
- (2) 同じプログラムで造波すれば、スペクトラムの縦軸の値は H_V^2 に比例し、 ω に対する形状はほぼ等しいので、波形とストロークの関係は線形であること。
- (3) スペクトラムは再現性を有すること。

などが明らかになった。

波に対する出会角 (α) は、規則波中と同様に 180° , 150° , 120° , 90° の 4 種類とし、一部は 45° の場合も行なった。船速はフルード数 $0 \sim 0.25$ の間で 3 点ないし 4 点をとった。

不規則波中の実験でスペクトラム解析のため信頼できるデータを得るためには、文献 7) に示すように、ある程度以上の長さの記録時間が必要である。例えば解析する最小周期成分、 T_V が 0.5 秒とすると、 $200 \times T_V = 100$ 秒、程度が要求される。しかしながら水槽の大きさが 1 辺 80 m で制限されており、その中での 1 回の航走時間も自ら制限され、高速の場合には 30 秒程度の記録しかとれない。したがって、Fig. 7 に示す

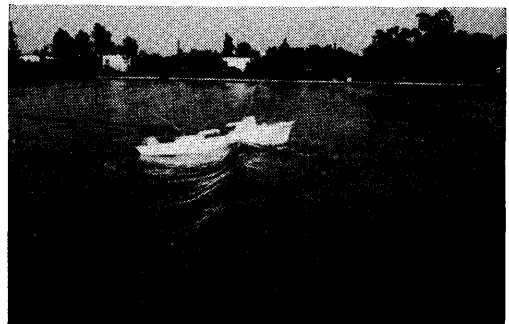


Fig. 8 (a) Model Test in Irregular Head Sea

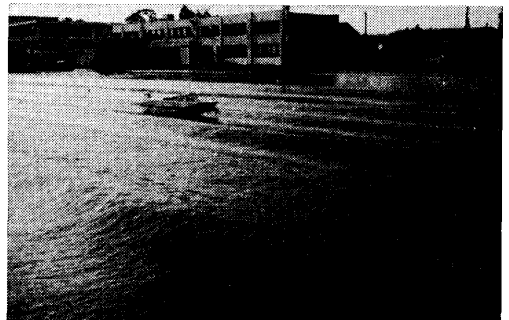


Fig. 8 (b) Model Test in Irregular Beam Sea

スペクトラムを発生させる時間(400秒)の一部分しか実験に用いられないことにもなるので、不規則波中の実験では同一の状態で3回づつ航走することにした。この3回の航走により、造波プログラムはほぼ全部実行され、記録時間の合計も90秒以上となる。

不規則波中で実験中の模型船を Fig. 8 に、波および船の諸応答の記録の例を Fig. 9 に示す。

2. 実験結果

2.1. 規則波中の応答

規則波中の応答は、縦揺れ、横揺れの振幅を最大波傾斜角($\theta_w = k\zeta_a$, $k = 2\pi/\lambda$, ζ_a : 波振幅)で割ったもの、加速度は重力の加速度(g)の単位で表わしたものを実船に換算した波振幅で割ったものを、それぞれ船速ベースに、 λ/L をパラメーターとして示される。(Fig. A 1.1~Fig. A 1.18) この図から、 F_n が 0, 0.1, 0.15, 0.2 および 0.25 の点で、実験点を結ぶ曲線を切り、その交点を λ/L に対して、 χ をパラメーターと

してえがくと Fig. A 2.1~Fig. A 2.25 に示す応答関数を得る。

ここで横軸に $\sqrt{L/\lambda}$ をとっているが、

$$\sqrt{L/\lambda} = \sqrt{\frac{L}{2\pi g}} \omega$$

という関係によって、 ω に対する応答曲線の様子がこの図からうかがわれる。

これらの図には、実験点のほかにストリップ理論に基づく縦運動の計算結果や、次章に述べる横運動の計算結果を比較のため記入してある。なお静止時における平水中自由横揺れ動揺記録を Fig. 10 に示す。これから得られる減衰係数は大角度の場合 $2\varepsilon = 0.222$, 小角度の場合 $2\varepsilon = 0.144$ である。前者に対しては $\nu = 0.99$, 後者に対しては $\nu = 0.051$ となる。(ε, ν については 3.1.2. 参照)

2.2. 不規則波中の応答

不規則波中の応答は、直接あるいはテレメーターを介してマグネティックテープレコーダーに記録され

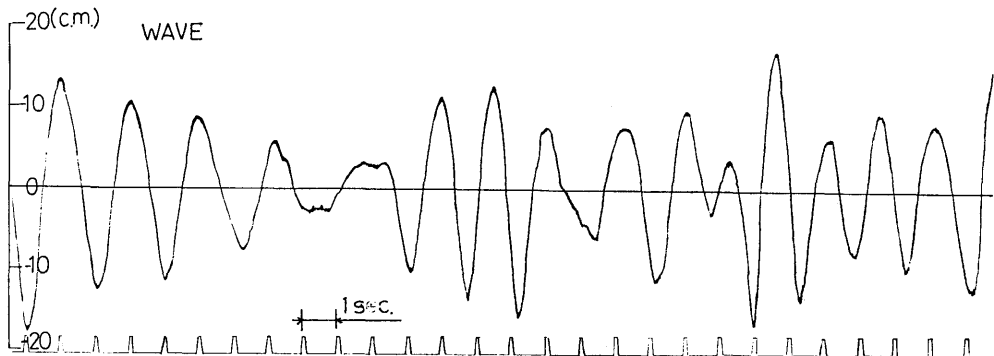


Fig. 9 (a) A Record of Irregular Wave

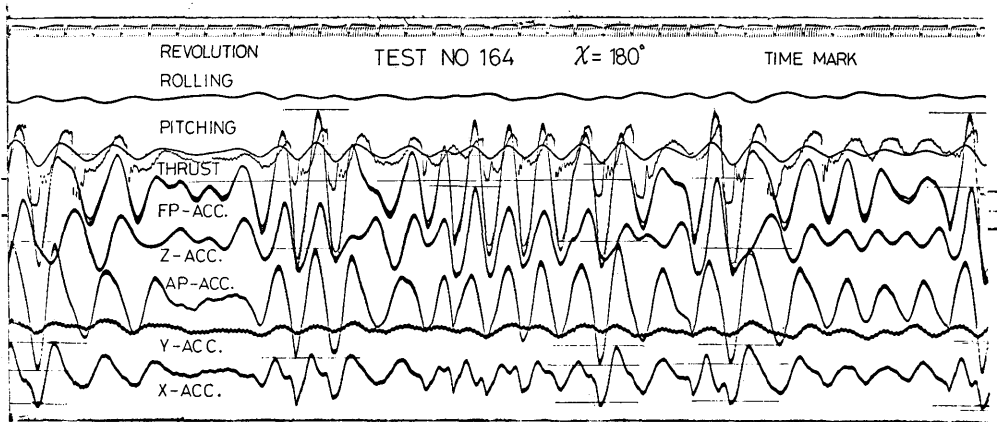


Fig. 9 (b) A Record of the Oscillograph about Ship Motions

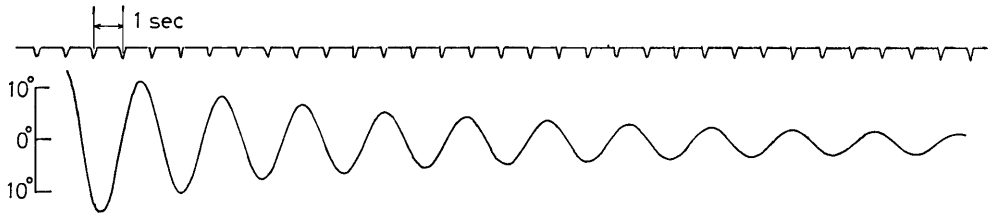


Fig. 10 Free Rolling

る。実験終了後このテープをふたたびはじめからかけ直してデータを再現し、それを一定時間間隔でサンプリングしてデジタル穿孔テープを作る A-D 変換器に入れる。穿孔テープは、文献 7) に示すようなプログラムにしたがってオートコレログラム、スペクトラム解析される。この計算は、伊藤忠電子計算サービス

株式会社に依頼し、日本原子力産業会議、電子計算機室の電子計算機 CDC 3600 を用いて行なわれた。

計算結果は、コレログラム、スペクトラムの図および分散 (σ^2) として示される。

スペクトラムの例を Fig. 11~16 に示す。

応答のスペクトラム $S(\omega)$ 、分散 σ^2 および累積エネルギー密度の間には (2) 式の関係がある。

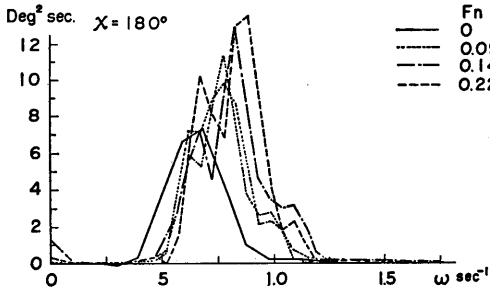


Fig. 11 Spectrum of Pitching

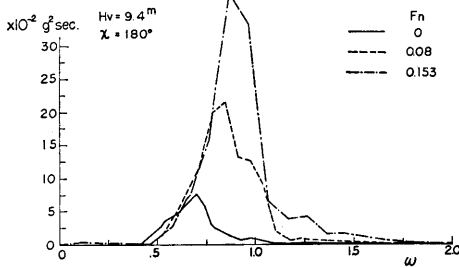


Fig. 12 (a) Spectrum of Vertical Acc. at F.P.

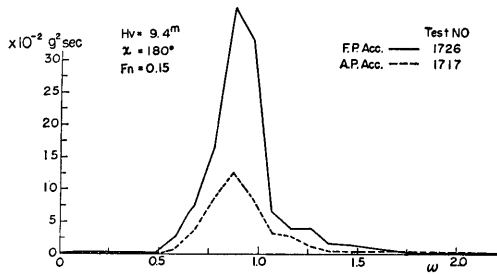


Fig. 12 (b) Comparison of the Spectrum of Vertical Acc. at F.P. and A.P.

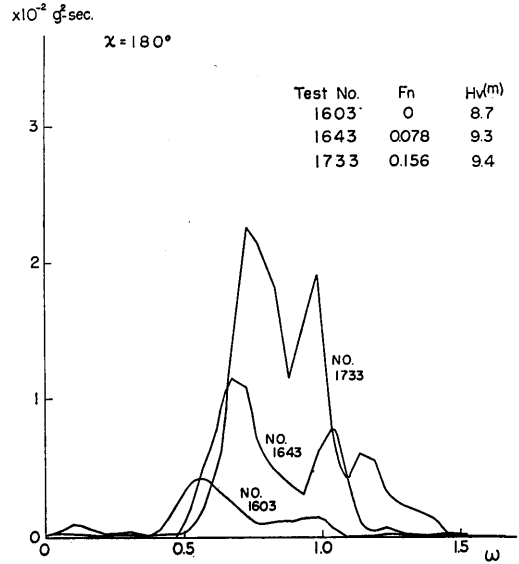


Fig. 13 Spectrum of Vertical Acc. at C.G.

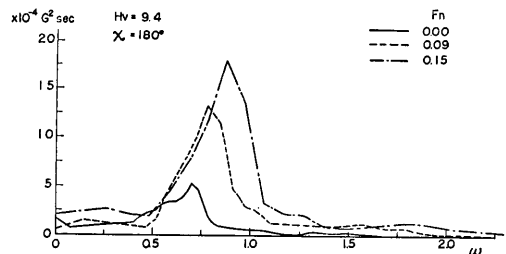


Fig. 14 Spectrum of X-Acc. at C.G.

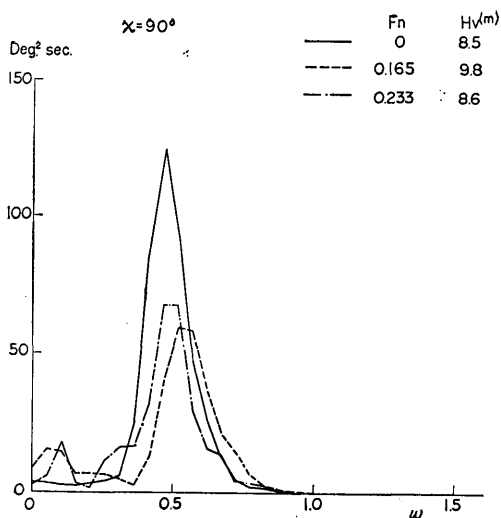


Fig. 15 Spectrum of Rolling

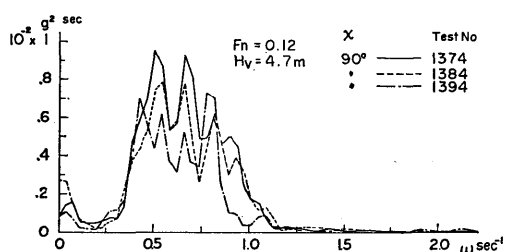


Fig. 16 Spectrum of Transverse Acc. at C.G.

$$2\sigma^2 = E = 2 \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega \quad (2)$$

この E を使い、 \sqrt{E} にいろいろの係数をかけることにより、例えば Rayleigh 分布を仮定した応答の極値の短期分布を推定できる。

\sqrt{E} は、その応答をもたらした波の有義波高に比例するから、

$$R = \sigma / H_v \quad (3)$$

という値を求めておけば、任意の有義波高に対しては (4) 式から \sqrt{E} を得ることができる。

$$\sqrt{E} = \sqrt{2} R \cdot H_v \quad (4)$$

実験で求めた R の値を F_n ベースに、 α ごとに示したのが Fig. A 3.1~Fig. A 3.25 である。同じ図の中には別に行なわれたストリップ理論で計算した応答関数 $A(\omega)$ と、(1) 式の $[r(\omega)]^2$ とから、

$$R = \int_0^{\infty} A^2(\omega) [r(\omega)]^2 / H_v^2 d\omega \quad (5)$$

として求めた値も実線で示される。

2.3. 実験による最大値

不規則応答の記録から、変動値のピークを高い方か

ら全変動数の 1/10 を読みとり、その平均値 ($a_{1/10}$) および最大値 (a_{max}) を求めた。それを Fig. A 4.1~Fig. A 4.14 に示す。

これは、実験した海象の中で船がどの程度の応答を示すか、あるいは \sqrt{E} を用いた短期分布の推定値とどの程度違うかなどをみるためにとられたものである。図中に

$$\left. \begin{aligned} a_{1/100} &= 2.36 \sqrt{E} \\ a_{1/10} &= 1.80 \sqrt{E} \\ a_{1/100} &= 1.31 a_{1/10} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

などのいわゆる Rayleigh 分布の場合における関係を示す線を記入しておいた。

2.4. 波浪中の推力増加

波浪中でプロペラ軸にかかる推力の時間的平均値 (T) から、同じ前進速度における平水中の推力 (T_0) を差引いた値 (ΔT) を波浪中の推力増加量とする。まず、規則波中の模型実験で測定した推力の値をそのまま速度ベースに、波長 (λ/L) をパラメーターとして出会角ごとに示した。その 1 例を Fig. 17 (a) に示す。同じ図中に平水中の推力 T_0 も示したが、 T_0 の値そのものは、屋外水槽の完全自航模型船のため摩擦修正を行っていないので、直進水槽における自航試験による値ほどの精度を持たぬものである。

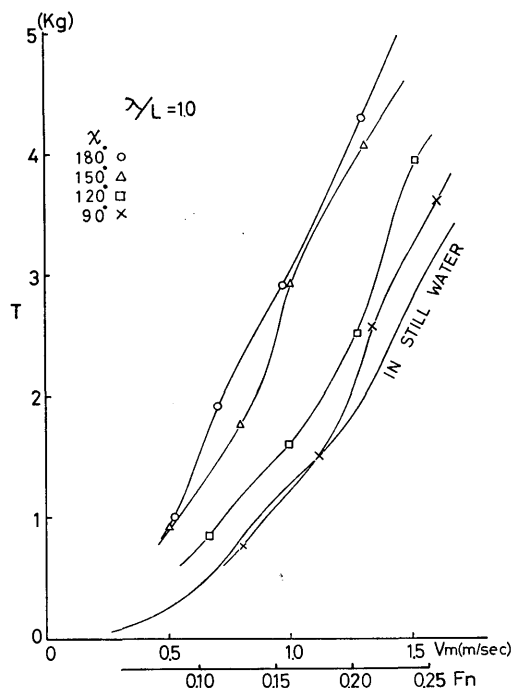


Fig. 17 (a) Propeller Thrust in Regular Waves

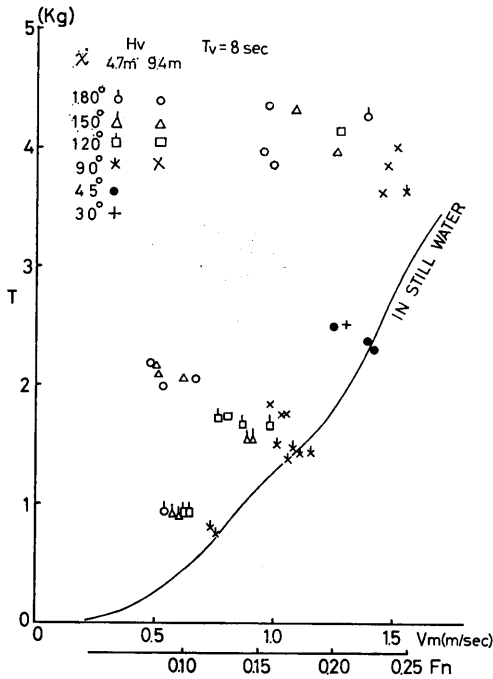


Fig. 17 (b) Propeller Thrust in Irregular Waves

さて、この図から $F_n=0.1, 0.15, 0.20, 0.25$ の速度における規則波中の推力増加量 ΔT_r を読みとり、これを (7) 式のように無次元化した値にする。すなわち波浪中の推力増加は波と、波による船体運動に基づくものであるとし、波高 (H_w) の自乗に比例するとする。

$$\Delta \tau_r = \frac{\Delta T_r}{\rho g H_w^3 B^2 / L} \quad (7)$$

この $\Delta \tau_r$ を $\sqrt{L/\lambda}$ をベースにして各 F_n ごとに示したのが、Fig. A 5.1~Fig. A 5.4 である。

次に Fig. 17 (b) に示す不規則波中の推力増加を、(7) 式の H_w の代わりに有義波高 H_v を用いて無次元化する。その結果を Fig. A 5.6 に示す。Fig. A 5.5~Fig. A 5.8 には 3.3. に述べる方法により、規則波中の推力増加から推定した値を示す。

3. 実験結果に対する考察

3.1. 規則波中の応答

規則波中における船体の応答を、縦運動と横運動とに分けて考察する。縦運動とは、船体中心面に対して対称な運動、すなわち縦揺れ、上下揺れ、上下加速度 (FP, AP および CG における) を指し、横運動とは船体中心面に対して非対称な運動、すなわち横揺れ、

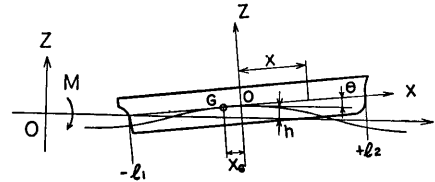
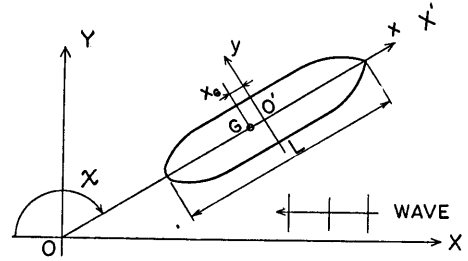


Fig. 18 (a) Co-ordinate System for Longitudinal Motion

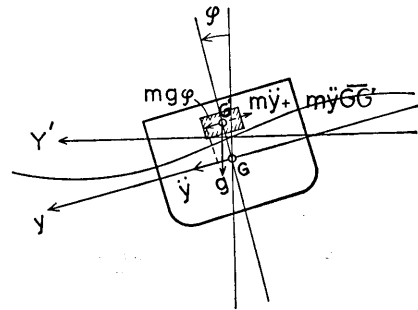


Fig. 18 (b) Accelerations due to Rolling and Swaying

Sway, 横加速度を指すものである。Fig. 18 にそれぞれの座標系を示す。

3.1.1. 縦運動

規則的斜め波中の縦運動は、船体の横断面を二次元と考えたときの流体力を全長にわたり積分し、縦揺れと上下揺れの連成運動方程式を解く、いわゆる線形ストリップ理論によって計算される。原子力第一船について、渡辺の理論に田才の二次元流体力を用いて波浪曲げモーメントを計算する福田の方法¹³⁾による船体運動の計算が別に行なわれたので、計算結果と実験結果を比較しながら規則波中の応答の特性を考察する。

(1) 縦揺れ (Fig. A 2.1~A 2.5)

実験値と計算値を比較するとかなり良く一致しているが、一般に実験点がやや高めである。

$\sqrt{L/\lambda}$ に対する変化の状態は、これは波浪中の船の縦揺れの一般的性質であるが、 $\sqrt{L/\lambda} < 1.0$ の範囲では縦揺れに対する波の有効傾斜角 $\theta_w \cos \chi$ に応じた振幅

であるが、 $\sqrt{L/\lambda} > 1.0$ の範囲では振幅は急激に減少している。ただし、 $\chi = 120^\circ$ の横波に近い斜め波中では $\sqrt{L/\lambda} > 1.0$ で、最も大きい振幅を示す。 $\sqrt{L/\lambda} > 1.5$ の範囲ではほとんど縦揺れはしないと考えてよい。

(2) 船首上下加速度 (Fig. A 2.6~A 2.10)

実験値と計算値の一致の度合いは、縦揺れの場合と同じ程度によく合っているといえる。 $\sqrt{L/\lambda}$ に対する傾向は、応答に著しいピークがあることである。 $\sqrt{L/\lambda} > 1.0$ の範囲では斜め向波中の方が向波中より大きい値を示し、また速度の増加とともに一般に増加する傾向にある。

(3) 重心における上下加速度 (Fig. A 2.11~A 2.15)

実験値と計算値とを比べてみると、 $\sqrt{L/\lambda}$ の大きい場合に実験値がやや高い値であるが、速度が高い場合 $\sqrt{L/\lambda}$ の小さい範囲で実験値が計算値をかなり下まわっている。波との出会角の影響に関しては、低速では横波中の値が大であるが、高速になるにしたがい $\sqrt{L/\lambda} < 1.0$ の範囲で、向波や斜め向波の値が大となる。船首加速度の大きさと比較すると、応答のピークの値で約 1/3 である。

3.1.2. 横運動

規則的斜め波中の横運動、すなわち Roll, Sway, Yaw の3つのモードの運動はお互に連成しているのであるが、ここでは Roll と Sway だけをとり上げ、しかもお互に連成しないと仮定して計算することにした。

まず、横揺れの運動方程式を

$$I_\varphi \ddot{\varphi} + N_\varphi \dot{\varphi} + R_\varphi \varphi = M_\varphi \sin(\omega_e t - \varepsilon_m) \quad (8)$$

あるいは

$$\ddot{\varphi} + 2\varepsilon\dot{\varphi} + n^2\varphi = m_0 \sin(\omega_e t - \varepsilon_m) \quad (9)$$

と表わすと、横揺れの振幅 φ_0 と波に対する位相差 ε_r は (10) 式のようなになる。

$$\varphi_0 = \frac{m_0}{n^2} \mu, \quad \varepsilon_r = \tan^{-1} \frac{\nu A}{A^2 - 1} \quad (10)$$

ここで μ は magnification factor であり、

$$\mu = \frac{\sin \chi}{\sqrt{(1 - A^2)^2 + \nu^2 A^2}} \quad (11)$$

$$\nu = \frac{2\varepsilon}{n}, \quad A = \frac{\omega_e}{n} \quad (12)$$

$$\omega_e = \omega_0 - \nu k \cos \chi, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega_0^2}{g} \quad (13)$$

などの関係を有する。 ν は横揺れの減衰率を表わし、同調時 ($A=1$) の μ の値 (μ_{\max}) から $\mu_{\max} = \frac{1}{\nu}$ という関係によって求められる。(9) 式の右辺にある波の強制力の振幅 m_0 は、有効波傾斜係数を γ 、最大波

傾斜角を θ_w とすると、 $m_0 = \gamma n \theta_w \sin \chi$ と表わされるが、ここでは簡単のため $\gamma=1$ として計算した。また $\varepsilon_m=0$ とした。

ついで、Sway の運動方程式を

$$M\ddot{y} + N_y \dot{y} = F_y \sin(\omega_e t - \varepsilon_f) \quad (14)$$

あるいは

$$\ddot{y} + \nu_y \dot{y} = f_y \sin(\omega_e t - \varepsilon_f)$$

と表わすと、Sway の加速度 \ddot{y} の振幅 \dot{y}_0 および波に対する位相差 $\varepsilon_{\dot{y}}$ は (15) 式のようなになる。

$$\dot{y}_0 = \frac{f_y}{\sqrt{1 + \left(\frac{\nu_y}{\omega_e}\right)^2}}$$

$$\varepsilon_{\dot{y}} = \tan^{-1} \frac{\tan \varepsilon_f - \left(\frac{\nu_y}{\omega_e}\right)}{1 + \frac{\nu_y}{\omega_e} \tan \varepsilon_f} \quad (15)$$

ここで ν_y は減衰力を、 f_y は波の強制力を表わす係数であり、前者は Haskind による近似式²³⁾と実験値とから、後者は波の圧力を船体表面上で積分して得られる Froude-Krylov の力として、付録 2 に示すようにして求められる。

さて、船上に置かれた質量 m に加わる横向きの力を考えると、横揺れの傾斜角 φ による重力の成分、横揺れの角加速度 $\ddot{\varphi}$ によるもの、Sway の加速度によるものの3つの力の和として表わされる。すなわち Fig. 18 (b) に示すように、

$$f = m g \varphi - m \ddot{y} - m \overline{GG'} \ddot{\varphi} \quad (16)$$

である。したがって f/m をもって、合成された横向きの有効加速度とすると、これは模型船上で実験によって測定された加速度に対応する。これを \ddot{Y} とすると

$$\ddot{Y} = g \varphi - \ddot{y} - \overline{GG'} \ddot{\varphi} \quad (17)$$

となるが、実験で求めた \ddot{Y} は $\overline{GG'}=0$ すなわち船の重心に加速度計が置かれた場合の値である。

$$\ddot{y} = \dot{y}_0 \sin(\omega_e t - \varepsilon_{\dot{y}})$$

$$\varphi = \varphi_0 \sin(\omega_e t - \varepsilon_r) \quad (18)$$

とおくと、 $\ddot{Y} = (\dot{y}_0 \cos \varepsilon_{\dot{y}} - \varphi_0 g \cos \varepsilon_r) \sin \omega t$

$$= (\dot{y}_0 \sin \varepsilon_{\dot{y}} - \varphi_0 g \sin \varepsilon_r) \cos \omega t \quad (19)$$

となり、その振幅 \dot{Y}_0 を重力の加速度 g の単位で表わし、それを波振幅 ζ_a で割った値は、

$$\frac{\dot{Y}_0}{g \zeta_a} = \sqrt{\left\{ \left(\frac{\dot{y}_0}{g \zeta_a} \right) \cos \varepsilon_{\dot{y}} - \left(\frac{\varphi_0}{\theta_w} \right) k \cos \varepsilon_r \right\}^2 + \left\{ \left(\frac{\dot{y}_0}{g \zeta_a} \right) \sin \varepsilon_{\dot{y}} - \left(\frac{\varphi_0}{\theta_w} \right) k \sin \varepsilon_r \right\}^2} \quad (20)$$

と表わされる。

このようにして求められた φ_0 および $\dot{Y}_0/(g \zeta_a)$ を、実験値と比較しながら考察する。

(1) 横揺れ (Fig. A 2.16~A 2.20)

計算値は非常に単純化した仮定のもとで得られたものであり、実験値とは同調点付近を除いてあまりよく合わない。ただ、これらの図から、速度の高い場合に斜め追波で応答曲線が $\sqrt{L/\lambda}$ の大きい範囲でピークを持つ様子がよくうかがわれる。

(2) 横方向加速度 (Fig. A 2.21~A 2.25)

横揺れの場合と同様に、計算はかなり簡化された仮定のもとに行なわれたが、横方向加速度の場合、実験値とかなりよく一致しているといえる。応答の特徴としては、横揺れの同調点にピークが1つあり、それより高い $\sqrt{L/\lambda}$ の範囲にもう一つ高原型のゆるやかなピークを有している。また、高速でかつ斜め追波中のときかなり大きい値に達することがわかる。

横方向加速度の応答の特性をよく見るため、横波中における重心の上下方向加速度と比較したのが Fig. 19 である。

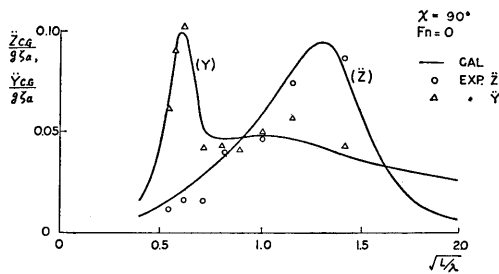


Fig. 19 Comparison of Vertical and Transverse Acceleration at C.G.

3.2. 不規則波中の応答

不規則波中の応答を、まず応答の累積エネルギー密度(E)から求められた標準偏差を有義波高で割った値(R)について考察し、ついで応答のスペクトラムについて言及する。

R の実験値は、フルード数ベースに置点されるとともに、前節までに述べた規則波中の応答の計算値 $A(\omega)$ と、(1)式で表わされる波のエネルギー Spektrum $[r(\omega)]^2$ とから(5)式により計算された R の値と比較される。

3.2.1. 縦運動

(1) 縦揺れ (Fig. A 3.1~A 3.4)

実験値と計算値とを比べると、速度に対してゆるやかに変化する傾向は等しいが、実験値がやや高めにでている。 $\chi=180^\circ$ と 150° において最大値が現われている。有義波高が異なっても R の値に変化が認められ

(102)

ない。計算結果では、 $T_V=8$ 秒~10秒のとき最も大きい値となる。

(2) 船首部上下加速度 (Fig. A 3.5~A 3.8)

有義波高が高い場合の実験値が示されているが、計算値とよく一致している。向波になるほど、速度の増加による増加の傾向は著しい。

(3) 重心の上下加速度 (Fig. A 3.9~A 3.12)

実験値を計算値と比べると、一般に実験値が低めである。高速では向波中の値が大となってくるが、低速では横波中の値が大である。波との出会角の影響では向波中では波の平均周期が異なってもあまり変化しないが、斜め波から横波に近づくにつれて、 T_V の影響が著しくなり、 T_V の小さい場合の方が高い値を示す。 $T_V=10$ 秒の場合の実験値も示した。

(4) 船尾部の上下加速度 (Fig. A 3.13~A 3.16)

船首部上下加速度と同様、実験値と計算値とはよく合っている。

船首、重心、船尾の上下加速度をいろいろな場合について比較すると $T_V=8$ 秒に対してTable 3のようになる。この表によると、向波中では、重心の上下加速度は、船首部の上下加速度の約1/4である。船速がゼロの場合には、船首と船尾の上下加速度は等しいが速力が大となるにもなって、船首部の上下加速度の増加が著しくなる。重心の上下加速度は斜め波中の方が向波中より大となっている。

Table 3 Comparison of R for Vertical Acceleration at Bow, C.G. and Stern

χ	180°	180°	180°	150°	120°	90°
Fn	0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2
F.P.	0.015	0.027	0.040	0.040	0.035	0.016
C.G.	0.004	0.007	0.011	0.012	0.015	0.012
A.P.	0.015	0.019	0.028	0.030	0.030	0.019

(5) 重心の前後方向加速度 (Fig. A 3.17)

実験値だけ、 χ にかかわらず一つの図に示す。これによれば速度に対する増加の様子は、重心の上下加速度の傾向と似ており、その大きさは $F_n=0.2$ 、 $\chi=180^\circ$ のとき上下加速度の約1/3である。

3.2.2. 横運動

(1) 横揺れ (Fig. A 3.18~A 3.21)

横波中では、実験値と計算値とは大きさ、傾向ともによく合っている。横波中では $T_V=12$ 秒の場合に最大の横揺れであるが、斜め追波で高速の場合にはさら

に大きい横揺れを起こしている。

(2) 重心の横加速度 (Fig. A 3.22~A 3.25)

横揺れに対して述べたこととほぼ同様のことが重心の横加速度に対してもいえる。速度に対する傾向をみると、横波中では変化が少なく、斜め向波中では速度とともに減少し、斜め追波中では速度とともに増大しているが、 $\chi=30^\circ$ の場合さらに高速になると再び減少している。

横波の場合について、重心の上下加速度の R の値と比べてみると、 $T_r=8$ 秒のとき両者はほぼ同じ大きさを示すが、上下加速度は T_r が小さくなると R の値が大となるが、横加速度は T_r が大きい場合に R の値が大となる。これは Fig. 19 に示す規則波中の応答の性質から考えれば当然のことである。

3.2.3. 不規則応答のスペクトラム

Fig. 11~Fig. 16 に示すスペクトラムから、ピークが存在、高さの割合、その左右のすその拡がりなどを見ることができる。

例えば、縦揺れ、上下加速度、前後加速度などの縦運動では速度が大になるに伴ない、ピークが ω の高い方に移動し、その高さもだんだん高くなる様子がわかる。また、重心の横または上下加速度はスペクトラムの山が横に広い形を示している。

D. E. Cartwright & M. S. Longuet-Higgins¹²⁾ によれば、スペクトラムの形状が不規則応答の短期分布に影響を与える。普通、船体運動などは狭帯域のスペクトラムで、極値の分布が Rayleigh 分布であるとして \sqrt{E} に一定の係数をかけて $a_{1/n}$ を推定しているが、この係数は次に示す ϵ の値で異なってくる。

$$\epsilon = \frac{m_0 m_4 - m_2^2}{m_0 m_4} \quad (21)$$

ここで
$$m_n = \int_0^\infty S(\omega) \omega^n d\omega.$$

いま一つの例として、重心の上下加速度 (Test No. 1143) と、重心の横加速度 (Test No. 1374) のスペクトラム (Fig. 12 および Fig. 16) 図について ϵ を求めるとそれぞれ 0.91 と 0.64 となる。文献 12) の Figure 4 から ϵ のそれぞれの値に対して $a_{1/10}$ を読みとり、 $\epsilon=0$ の場合と比較すると、0.86 および 0.95 を得る。すなわち、これらの応答に対しては Rayleigh 分布による推定は、それぞれ 14% と 5% だけ高すぎる値であることがわかる。しかしながら Rayleigh 分布の推定は安全側であり、また $a_{1/n}$ の n の値が大である場合には差が小さくなるので、本論ではすべて

Rayleigh 分布による推定を行なうことにする。

不規則波中の応答のスペクトラム $S(\omega)$ から次式によって、規則波中の応答関係 $A(\omega)$ を計算することができる。

$$|A(\omega)|^2 = \frac{S(\omega)}{[r(\omega)]^2} \quad (22)$$

船速がゼロの場合について、縦揺れ、ローリングおよび重心の横加速度のスペクトラムから求めた応答関数を、計算値や規則波中の実験値と比較したのが Fig. 20~Fig. 22 である。

これらを見ると、縦揺れでは $\sqrt{L/\lambda} > 0.6$ の範囲で

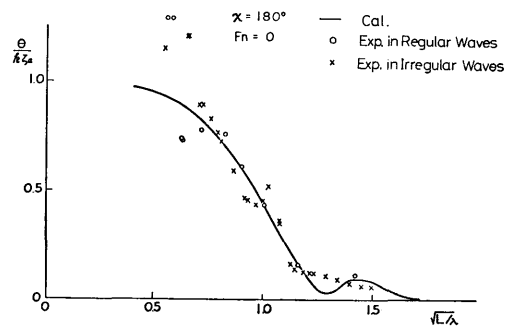


Fig. 20 Amplitude Response of Pitching

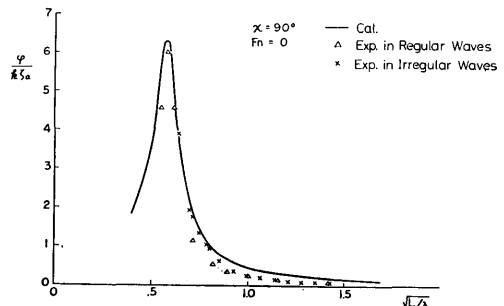


Fig. 21 Amplitude Response of Rolling

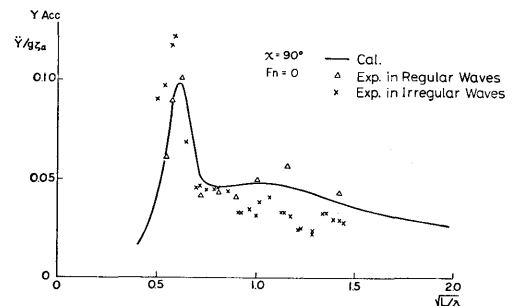


Fig. 22 Amplitude Response of Transverse Acc. at C.G.

よく合っており、横揺れでも同様であるが、実験値がやや低めである。重心の横加速度では、 $\sqrt{L/\lambda}$ の高い範囲でスペクトラムから求めた値が低くでていることなどがわかる。

3.2.4. 実験で測定された最大値の分布

Fig. A 4.1~A 4.14 に示される実験により測定された σ , $a_{1/10}$, a_{max} などの関係を見ることにする。まず σ に対する $a_{1/10}$ および a_{max} の値を Rayleigh 分布から与えられる理論値と比較すると、理論値を上限としてその下方に実験値がままとまっている。次いで $a_{1/10}$ に対する a_{max} の関係は $a_{max} \doteq a_{1/100}$ としたとき、実験点は理論値よりやや低めであるが、非常によくままとって理論値に近いことがわかる。その理由を考えると、前節で述べたように、 ϵ の値によって $a_{1/n}$ を推定するために \sqrt{E} にかける係数が異なるので、 σ に対する $a_{1/10}$ や $a_{1/100}$ の関係が散らばると考えられる。一方 $a_{1/n}$ に対して $a_{1/m}$ の値は ϵ の相違によってもそう大きく変化しないといえる。例えば文献 12) Fig. 4 で $\eta^{(1/5)}/\eta^{(1/10)}$ を調べてみると $\epsilon=0$ で 0.88 $\epsilon=0.8$ で 0.86, $\epsilon=0.9$ で 0.85 というようにそれらの間の差は小さい。本報告では R の値を用い、Rayleigh 分布として最大値を推定するが、 $a_{1/10}$ などの実験値を用いて a_{max} を推定する方法も考えられる。

3.3. 不規則波中の推力増加と速度低下

不規則波中における平均推力増加を無次元化したものを Fig. A 5.6 に示した。

一方、規則波中の推力増加から、不規則波中の推力増加を推定する理論がある^{14),15)}。すなわち、波高 ζ_a の規則波中における推力増加を $\Delta T_r(\omega)$ とすると、 $[r(\omega)]^2$ というスペクトラムの不規則波中での平均推力増加 ΔT_i は次式で表わされるとされている。

$$\Delta T_i = 2 \int_0^\infty \frac{\Delta T_r(\omega)}{\zeta_a^2} [r(\omega)]^2 d\omega \quad (23)$$

あるいは無次元化して、

$$\Delta \tau_i = \frac{\Delta T_i}{\rho g \frac{B^2}{L} H_V^2} = 8 \int_0^\infty \Delta \tau_r(\omega) \frac{[r(\omega)]^2}{H_V^2} d\omega \quad (24)$$

$[r(\omega)]^2$ として (1) 式の ISSC スペクトラムを、 $\Delta \tau_r(\omega)$ として規則波中の実験値 (Fig. A 5.1~A 5.4) を用い、 $\Delta \tau_i$ を計算した。その値を Fig. A 5.5~A 5.8 の中に実線で記入してある。実験値と計算値を比較すると、実験点の散らばりが多いが、一般に計算値の方が F_n の大きいところで高い値を示している。ここでは不規則波中の推力増加と速度低下率の一般的性質について計算値から考察する方法をとる。

まず、不規則波中の推力増加と波との関係を、計算値を示す Fig. A 5.5~A 5.8 によってみると、一般に向波中で最大の増加を示し、斜め波から横波の順で少なくなっている。また平均周期では $T_V=8$ 秒の場合に最大値を示す。速度が増すにつれて推力増加は増しているが高速の範囲で頭打ちの傾向を示す。

ついで、文献 15) に示す方法にしたがって、波および風を考慮に入れた海象中での馬力増加と、速力低下を推定する。この場合波は長波頂であり、その進行方向と風の方角とは一致しているとする。風速 U と、有義波高の間には I.T.T.C. の提唱する¹⁷⁾ Fig 23 の関係があるととした。

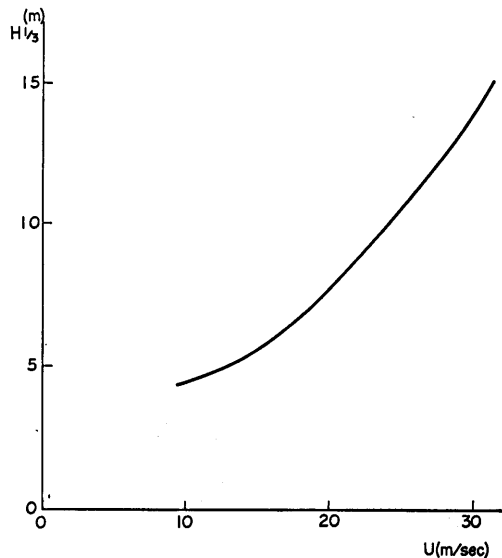


Fig. 23 Relation between Wind Velocity and Significant Wave Height

船速を V_s 、風向と船首方向のなす角を χ とすると、相対風速 U' および相対風向 θ はそれぞれ次式のようにになる。

$$U'^2 = U^2 + V_s^2 - 2UV_s \cos \chi \quad (25)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\sin \chi}{\frac{U}{V_s} - \cos \chi} \quad (26)$$

そしてこれによる風圧抵抗は、(27)式のように表わされる。

$$R_a = \frac{1}{2} \rho_a k_a(\theta) C_0 A U'^2 \quad (27)$$

ここで

- ρ_a : 空気の密度
- $k_a(\theta)$: 風向影響係数
- C_0 : 正面風圧係数
- A : 船体水面上正面投影面積

であり、 C_0 の値として 0.7 をとり、 $k_a(\theta)$ は、船舶工学便覧第 1 分冊 p. 601 の標準曲線第 13.4 図の値をとった。

本船の平水中の推進抵抗試験は、船舶技術研究所船型試験部目白水槽で行なわれているので、そこで得られた平水中の推力 T_0 と、伝達馬力 DHP_0 に対して、風浪中でどのように増加するかを調べる。

風浪中の推力は

$$T = T_0 + \Delta T_i + R_a \quad (28)$$

で表わされるとする。この値を風速をパラメーターとし、 $T_V=8$ 秒のとき波に対する出会角ごとに示したのが Fig. A 6.1~A 6.4 である。

風浪中の伝達馬力は、波浪中の η_p が平水中の η_p と同じであると仮定すれば

$$DHP = DHP_0 \frac{T}{T_0} \quad (29)$$

で求められる。一般に波浪中では η_p が低下するはずであるが、ここでは一応風浪中の DHP 、さらには次に述べる速度低下の目安を得るために上記のような仮定をとり、取り扱いを簡単化した。 DHP の値を Fig. A 6.5~A 6.8 に示す。

つぎに、これらの図をもとにして、 DHP 一定の場合、風速による速度低下を推定すると Fig. A 6.9~A 6.12 のようになる。それによると $T_V=8$ 秒のとき、 $\chi=180^\circ$ で最大の速度低下を示し、斜め向波から横波になるに伴ない速度低下が少なくなる。 $H_V=9.4$ m すなわち $U=23$ m/sec の風浪中で向波の場合、速度低下率は 0.53 となり船速は 16.4 ノットから 8.4 ノットに低下することが推定される。同じ海象のなかで、出会角に対して船速がどうなるかを示したのが Table 4 である。

Table 4 Reduced Speed in Wind (Velocity: 23m/sec) and Waves (Significant Wave Height : 9.4m) Predicted from the Tests in Regular Waves

Encounter Angle	Beam Sea	120°	150°	Head Sea	
	90° ^{kn}	kn	kn	180° ^{kn}	
Mean Wave Period	6 sec	13.1	9.7	7.4	8.1
	8	13.8	10.9	8.9	8.4
	10	14.6	12.1	10.8	10.1
	12	15.1	13.0	12.0	11.2

Speed in calm sea = 16.4 kn.

4. 応答の最大値の推定

4.1. 短期分布による推定

不規則変動量の累積エネルギー密度を E とし、 N ケの変動数のうちに現われる応答の最大値が a_0 をこえる確率を f とすると、Rayleigh 分布を仮定すれば、

$$f = 1 - \exp(-Ne^{-a_0^2/E}) \quad (30)$$

あるいは $a_0 = C(N, f)\sqrt{E}$ と表わせば、 $C(N, f)$ は

$$C = \left[-\ln \left\{ \frac{1}{N} \ln \left(\frac{1}{1-f} \right) \right\} \right]^{1/2} \quad (31)$$

と表わされる⁶⁾。いま文献 6) と比較する意味で、原子力船が、年間に一度起こるような苛酷な海象の中で、7~10 時間程度の間航行し続けるとしてその時受ける応答の最大値を $N=5000$ 、 $f=0.1$ として推定する場合には、文献 6) によれば $C=3.24$ となる。ここで $f=1/10$ をとる意味は、船がこのような海象に 10 回遭遇するうちに 1 回は a_0 をこえる応答を経験するということである。Fig. A 3.1~A 3.25 に示す応答の標準偏差を有義波高で割った値 (R) を用い、有義波高が 9.4 m の場合の海象中における短期分布を推定する。その場合船速は $F_n=0.20$ を上限とした。

Table 5 にいろいろの推定値を示す。同表中には不規則波中の実験により測定された最大値 a'_{max} も示してある。これはほぼ $a_{1/100}$ に対応するものと考えてよい。

これを従来の推定値と比較する。文献 4)、6) などと与えられているいろいろの船型に対する推定最大値を船の長さ L あるいは $1/\sqrt{L}$ に対してとると Table 6 のようになる。また、これらの値の補間により原子力第一船の L に対する値を求め、本研究による短期分布からの推定値とともに Table 6 に記入してある。それによると、F.P. および A.P. で本研究の値がわずかに高めであるが、船体中央部の値は一致しており、従来の推定値と本研究の推定値がよく合うという結論が得られる。

4.2. 長期分布による推定

あらゆる出会角における規則波中の船の応答関係がわかれば、海象のスペクトラムを与え、その中の応答の短期分布を Rayleigh 分布と仮定し、極値を推定することができる。一方、その船が航行する海洋における海象のスペクトラムの出現頻度を考慮に入れて、上記の極値の出現の確率を求めることができる。この方法は、福田が船体中央部の波浪曲げモーメントの推定に対して提案した方法である^{18), 19)}。原子力第一船の波浪中応答の長期分布に対して、これと同じ方法を用いた計算が別に行なわれた。この計算結果が縦揺れ、重心上下加速度、横揺れ、重心横加速度に対して文献 24)

Table 5 Maximum Values Predicted by Short Term Distribution

 $F_n=0.2$

	PITCH	F.P. Acc	Z-Acc	A.P. Acc	ROLL	Y-Acc	X-Acc	HEAVE
R	0.44	0.04	0.015	0.03	0.70	0.015	0.0035	0.25
\sqrt{E}	5.85°	0.53 g	0.20 g	0.40 g	9.3°	0.20 g	0.046 g	3.32 m
$a_{1/10}$	10.5	0.96	0.36	0.72	16.8	0.36	0.084	5.98
$a_{1/100}$	13.8	1.25	0.47	0.95	22	0.47	0.11	7.9
a_{\max}	19.0	1.72	0.65	1.30	30	0.65	0.15	10.8
a'_{\max}	14.3	1.00	0.45	0.61	15	0.49	0.06	—
χ	180°	180°~150°	120°	150°~120°	90°	90°	180°	90°

 a'_{\max} : Maximum value measured by model testTable 6 Comparison of Maximum Values by Various Authors^{4),6)}

Δ	L	$1/\sqrt{L}$	\sqrt{L}	Max. Acc AT		
				F.P.	⊗	A.P.
87.500 ton	245 m	0.064	15.6	0.68 g	0.135 g	0.50 g
17.400	150	0.082	12.2	1.25	0.40	0.90
19.417	150	0.082	12.2	1.36	0.45	1.03
3.460	87	1.072	9.3	1.90	0.95	1.35
*this ship (1)	116	0.093	10.8	1.60	0.65	1.25
" (2)				1.72	0.65	1.30

*(1) Predicted by interpolation

(2) Predicted by this paper

Table 7 Maximum Values Predicted by Long Term Distribution

$\log_{10} Q$ (M)	PITCH	F.P. Acc	Z-Acc	A.P. Acc	ROLL	Y-Acc
-6.5	14°	1.5 g	0.55 g	1.3 g	45°	0.78 g
-8.0	18°	1.9 g	0.70 g	1.6 g	58°	1.0 g

Table 8 Comparison of the Estimated Maximum Values with the Design Standard

		Vertical Acc. at Midship	Transverse Acc. at Midship	Longitudinal Acc. at Midship	Pitching	Rolling
Design Standard	Strength	0.82 g	0.65 g	0.2 g	(out) 100% 10° (put) 50% 15°	30° 45°
	Safety	1.0	1.0	1.0	20°	60°
Estimated Max. Value	(1)	0.65	0.65	0.15	19°	30°
	(2)	0.55	0.78	—	14°	45°
	(3)	0.70	1.0	—	18°	58°

(1) from short term distribution

(2) from long term distribution (within a year)

(3) from long term distribution (within twenty years)

Table 9 Frequency Distribution of Height and Period of the Wave in the Northern North Pacific Ocean 1954~1963

Number of Observation		Wave Height (m)							CALM	TOTAL
		0.0~ 0.75	0.75~ 1.75	1.75~ 2.75	2.75~ 3.75	3.75~ 5.75	5.75~ 7.75	7.75~		
Wave Period (sec)	~5	77815	88194	7283	1164	430	120	46		175052
	5~7	8590	84428	30776	4651	1448	399	99		130391
	7~9	2638	22654	43266	8936	3229	902	215		80940
	9~11	577	3263	15441	8969	3210	1081	442		32983
	11~13	215	730	2391	5005	1885	721	352		11299
	13~15	46	189	352	1388	900	423	218		3516
	15~	26777	4746	2021	714	744	1450	238		36689
	CALM									7682
	TOTAL	116658	204204	100630	30827	11846	5096	1610	7682	478552
percentage										
Wave Period (sec)	~5	16.26	18.43	1.52	0.24	0.01	0.02	0.01		36.58
	5~7	1.79	17.64	6.43	0.97	0.30	0.08	0.02		27.25
	7~9	0.55	4.73	8.85	1.87	0.67	0.19	0.04		16.91
	9~11	0.12	0.68	3.23	1.87	0.67	0.23	0.09		6.89
	11~13	0.04	0.15	0.50	1.04	0.39	0.15	0.07		2.36
	13~15	0.01	0.04	0.07	0.29	0.19	0.09	0.05		0.74
	15~	5.59	1.00	0.44	0.15	0.15	0.30	0.05		7.66
	CALM									1.60
	TOTAL	24.38	42.69	21.07	6.44	2.48	1.06	0.25	1.61	100.00

に示されている。これらの結果から、原子力第一船が1年に1回遭遇する確率 ($\log Q \approx -6.5$ とした) および20年すなわち船のほぼ一生のうちに1回遭遇する確率 ($\log \approx -8$ とした) における応答の値は Table 7 のように与えられている。これと Table 6 による短期分布からの推定最大値と、本船の設計基準値をともに比較して示すと Table 8 のようになる。

この表から次のようなことがわかる。

(1) 強度に関する設計基準値は、縦揺れ以外は、短期分布による推定値をカバーしている。

(2) 縦揺れの短期分布よりの推定値がかなり大であるが、船速を $F_n=0.15$ 程度にすると 17° となる。この場合、逆に出力 50% を保持できる限界である縦揺れ 15° になる確率を逆算してみると、文献(6)の Fig. 14 から、 $C=2.86$ に対して $N=500$ 、 $f=1/10$ を得る。すなわち、このような海象では500回縦揺れるうち、 $1/10$ の確率で振幅が 15° になる。

(3) 長期分布から推定した横揺れ、横加速度の最大値はかなり大であり安全の基準いっばいの値を示している。この理由としては、長期分布の計算では波と船

との出会角が $0 \sim 360^\circ$ の間で一様の確率で現れると仮定しているからと考えられる。ある程度までの波高ではこの仮定は成立するであろうが、有義波高が 10m に達するような大波浪中では、船の進路を波に立てるような操船をする確率が大きくなり、これらの推定値はもっと小さくなると考えてよい。

(4) 長期分布から推定した20年に1回の最大値は、安全に関する設計基準値を満足している。

4.3. 北大西洋と北太平洋の波浪観測値の比較

前節で述べた長期分布の計算には Walden の資料¹¹⁾ を福田が波浪曲げモーメントの長期分布計算のためまとめた表¹⁹⁾を用いた。これは北大西洋における海洋観測船の観測値の頻度分布を示すものである。原子力第一船に関して重要なのはむしろ北太平洋であると考えられるので、両海域の海象を比較する必要がある。北太平洋の波浪の観測値をまとめた資料が著者の一人等によって発表されている^{20), 21)}。この資料は、わが国の一般船舶が、気象業務法にしたがって気象庁に毎日報告している、いわゆる海上気象資料をまとめたものである。これを波高と波周期の頻度分布の表として、文

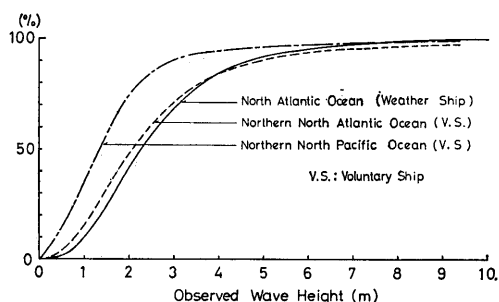


Fig. 24 Cumulative Distribution of Wave Height

献 19) の Table 3 に示される Walden の北大西洋の観測値と比較しやすい形に表わしたのが Table 9 である。両者について、波高の累積頻度をえがくと Fig. 24 のようになる。これによると、北太平洋の海象は北大西洋の海象に比べて波高が全般的に低いように見える。しかし、両者の資料の性質の差も考慮する必要がある。すなわち北大西洋の観測値は、定点観測船 (Weather Ship) の気象観測専門員により観測された値で、定点の分布から見て北大西洋をかなり万遍なく掩っていて、その海象の性質をかなりよく表現しているといえる。これに対し北太平洋の観測値は商船の航路近くに偏っており、またその航路も四季に応じ、また海象気象に応じてなるべく苛酷な海面を避けるようにとらわれていると考えられ、苛酷な海象の観測値が現われにくいともいえる。また観測者も一般の船の乗組員であるから、前者と比べて信頼度、正確度の点でやや劣っているといつてよい。これらのことを考えると Fig. 24 に示す、両海域の波高の頻度分布の差がそのまま実際の差を示すと考えるのも早計であろう。北部北大西洋における一般船舶の観測値をまとめたものがこれも Walden によって発表されている²²⁾。その波高累積頻度を Fig. 24 に点線で記入した。それによると北大西洋の定点観測によるものと大差ないが、北太平洋の観測値とはかなり差があることがわかる。したがって北大西洋の海象の方が苛酷であるとも考えられる。いずれにしても、現存する海象の観測値に関しては、北大西洋の定点観測によるものが最も苛酷であるので、現段階ではこれに基づいて長期分布を計算することは当を得たものといえる。なお、北太平洋の観測値を用いて応答の長期分布を計算することも可能である。

結 論

本研究は、原子力第一船が海上で遭遇するいろいろ

の海象のなかで、動揺とそれに基づく加速度がどのような異常値を経験するかという問題を、模型実験を中心にして論じたものである。すなわち、規則波中の実験においては波に対する出会角、船速を変えたなかで波長に対する応答関数を求め、不規則波中の実験においては波に対する出会角、船速をかえて不規則応答の標準偏差あるいは短期分布を求めた。これらの実験値は別に行なわれたストリップ理論に基づく計算値と比較された。また模型実験により測定した推進器軸の推力増加量をもとに、風浪中の馬力増加あるいは速度低下を推定した。これにより船体の応答と、海象との関係を明らかにし、さらに、応答の異常値を短期分布と長期分布の両面から推定した。北太平洋と北大西洋の海象の相違に対しても言及した。本研究の結果、次の諸点が明らかになった。

- (1) 従来の研究による上下加速度の推定最大値と、本研究の推定値とはよく一致する。
- (2) 本船の安全に関する設計基準値の範囲内に本研究による最大推定値が含まれる。
- (3) 重心の横加速度は重心の上下加速度と同程度の場合によってはそれより大きい値となり得る。
- (4) 実験値と計算値は定性的にはよく一致している。

今後に残された問題点を列挙すると次のようなものがある。

- (1) 斜め追波中で横運動が大となることが推定されたので、この点についてさらに実験を加える必要がある。
- (2) 減揺装置により過大な横運動を減少させることも考えられるが、斜め追波中における効果や、加速度に対する効果を調べる必要がある。
- (3) 本研究で取り扱った加速度は船体の動揺に基づくもののみで、スラミングなどの衝撃的な外力によるものは別に考慮する必要がある。
- (4) 不規則波中の馬力増加、あるいは馬力変動の機構についてさらに研究を進める必要がある。
- (5) わが国に最も関係のある北太平洋の海象の資料が必要であり、信頼度の高いデータを得ることが切望される。

付 記

本研究は、昭和 42 年 5 月から同年 12 月にわたり日本原子力船開発事業団と船舶技術研究所との共同研究として実施されたものである。またこのうちのストリップ理論による縦運動の計算、短期分布および長期分

布の計算は、日本原子力船開発事業団が三菱重工業株式会社社長崎造船所造船設計部開発室に依頼して行なったものである。本論を閉じるに当たって、この研究を推進するために尽力された日本原子力船開発事業団造船部長大井浩氏、同造船課長佐藤祥氏、同元造船課長田島義弘氏（現日立造船株式会社）、同田中守氏、同吉田章一氏（現石川島播磨重工業株式会社）、同木原弘毅氏（現三菱重工業株式会社）に感謝いたします。とくに、木原弘毅氏には、全期間を通じ研究の連絡、とりまとめなどの煩雑な仕事を一手に引受けていただいたことを深く感謝いたします。また、理論計算を行なって模型実験の結果の解析に重要な資料を提供していただいた三菱重工業株式会社社長崎造船所の飯塚正史技師に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 日本原子力船研究協会：原子力船における外力の原子炉におよぼす影響に関する試験研究（I），原船協 14-I，1960年
- 2) 同上，原船協 23-I，1961年
- 3) 日本原子力船研究協会：海洋観測船兼補給船の平水中および波浪中の模型試験，原船協 41，1963年
- 4) 川島栄一，坂尾稔，洲崎薫：実船による動揺加速度の計測値とその解析について，造船協会論文集 第111号，昭和37年
- 5) 坂尾稔：船における不規則変動量の長期統計について，造船協会論文集，第111号，昭和37年
- 6) 川島栄一，坂尾稔，田崎亮：船体運動により船用原子炉に働く外力についての一考察，造船協会論文集，第105号，昭和34年
- 7) 山内保文，高石敬史，菅井和夫，安藤定雄：船の波浪中動揺応答の解析法について（その4），造船協会論文集，第119号，昭和41年
- 8) 山内保文：三鷹第一船舶試験水槽に付属する新しい施設（不規則波発生制御装置・動揺水槽）とその目的について，第9回船研研究発表会，昭和42年11月
- 9) 福田淳一：波浪曲げモーメント予測のための波スペクトルについて，造船協会論文集，第120号，昭和41年
- 10) 榊田吉郎：統計的見地よりの船体の近似的曲げモーメント，造船協会論文集，第111号，昭和37年
- 11) H. Walden：Die Eigenschaften der Meereswellen im Nordatlantischen Ozean, Deutscher Wetterdienst, Seewetteramt, Nr. 41, 1964
- 12) D.E. Cartwright and M.S. Longuet-Higgins：The statistical distribution of the maxima of a random function, Proceedings of the Royal Society, A, Vol. 237, 1956
- 13) 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，西部造船会会報，32号，1966
- 14) 丸尾孟：波浪中の船体抵抗増加に関する研究（第2報），造船協会論文集，第108号，昭和35年
- 15) R. Tasaki, H. Kitagawa：On Self-propulsion Tests in Waves with Super Tanker Models, Report of Transportation Technical Research Institute, No. 44, 1961
- 16) O.J. Sibul：Increase of Ship Resistance in Waves, 1967
- 17) ELEVENTH INTERNATIONAL TOWING TANK CONFERENCE：Technical Decisions and Recommendations of the Seakeeping Committee 5-3 (6) Proceedings, 1966
- 18) 福田淳一：波浪荷重の長期分布推定法，造船協会誌，448号，昭和41年
- 19) 福田淳一：長期の波浪曲げモーメント異常値の傾向について，造船協会論文集，第123号，昭和43年
- 20) Y. Yamanouchi, S. Unoki, T. Kanda：On the Winds and Waves on the Northern North Pacific Ocean and South Adjacent Seas of Japan as the Environmental Conditions for the Ship, Papers of Ship Research Institute, No. 5, 1965
- 21) 日本造船研究協会第80研究部会：海象気象に関する統計調査，造船研究，Vol. 8, No. 1, 1966
- 22) H. Walden：Höhe und Periode des Seeganges im nördlichen Nordatlantischen Ozean, Sonderdruck aus der Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Band 17, Heft 5, 1964
- 23) G. Vossers：Fundamentals of the Behaviour of Ships in Waves, I.S.P. Vol. 7, No. 65 (1960) p. 28
- 24) 山内保文，大井浩，高石敬史，木原弘毅，吉野泰平，飯塚正文：原子力第一船の波浪中動揺と加速度について，日本造船学会論文集，第123号，昭和43年

付 録 水槽における不規則波発生方法

角水槽には一辺 80 m にわたって一列にならぶフラップ式造波装置がある。この造波板（フラップ）は、Fig. 25 に示すように水中の下辺をヒンジで支えられ、空中にある上端を、与えられたストロークで往復運動させるようになっている。正弦運動をする造波板の角振幅を $\bar{\theta}$ で表わすと、これによって造られる規則波の波高 H_w は (A 1) 式で示される。

$$\frac{\bar{\theta}\lambda}{H_w} = -\frac{\pi}{2k} \left(H_1 e^{kH_1} + \left(\frac{1}{k} + H_1 \right) (1 - e^{kH_1}) \right)^{-1} \quad (\text{A. 1})$$

ここで $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ， λ ：波長。

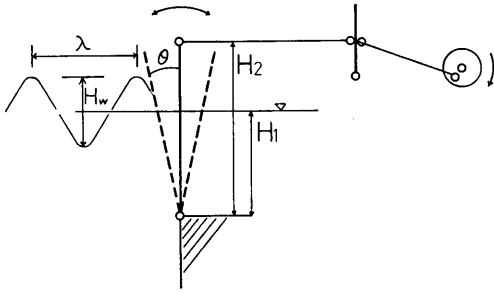


Fig. 25 Wave Maker

規則波の波長 λ は、造波装置を駆動する直流モーターの回転数 N と (A. 2) 式で示す関係がある。

$$\lambda = \frac{60g\tau}{2\pi N} = 93.6 \frac{\tau}{N} \text{ (m)} \quad (\text{A. 2})$$

ここで τ は減速歯車の減速比である。

本造波装置では、ストロークを一定の値に保ったまま運転するので、不規則波を発生するためには、駆動モーターの回転数を刻々に変化させる必要がある。

いま Fig. 26 (a) に示すようなエネルギースペクトラムの形をもつ不規則波を発生させる場合を説明す

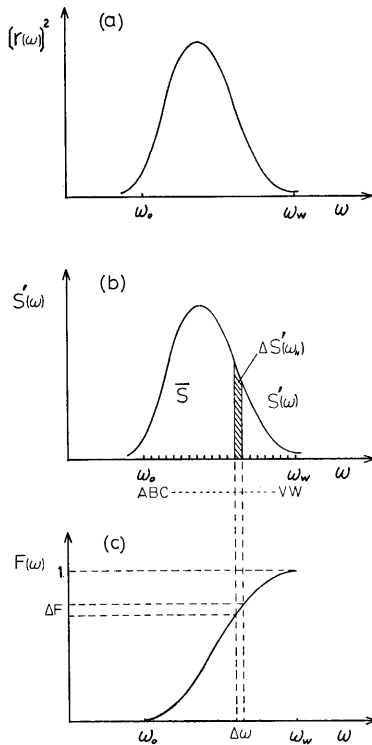


Fig. 26 Procedure of Irregular Wave Making

る。まず第一の条件として、スペクトラムの大部分が $\omega = 2.3 \sim 8$ の範囲に入る必要がある。これはそれぞれモーターの最低と最大の回転数に対応するものである。このスペクトラムを $[r(\omega)]^2$ とすると、(A. 1) 式によって、造波板の動き θ のスペクトラム $S'(\omega)$ は

$$S'(\omega) = [r(\omega)]^2 / A(\omega) \quad (\text{A. 4})$$

で与えられる。ここで (A. 1) 式から、

$$A(\omega) = [-2H_1 \{ (1 - e^{kH_1}) / kH_1 - 1 \}]^2 \quad (\text{A. 5})$$

である。

次に $S'(\omega)$ を Fig. 26 (b) に示すように $\omega_b \sim \omega_w$ の間で 20 等分し、各々の $\Delta\omega$ のバンドの代表周波数に、ABCDEFGHIJKLMNPQRSTUVWXYZ という記号をつける。

$S'(\omega)$ を面積 1 となる確率密度関数とし、この確率分布関数を決める。すなわち、 $\Delta\omega$ のあるバンド、例えば N のバンドにおける $S'(\omega)$ の面積分 $\Delta\bar{S}'$ は

$$\frac{\Delta\bar{S}'}{S} = \Delta F \quad (\text{A. 6})$$

$$\text{または} \quad \int_{\omega_0}^N S'(\omega) d\omega = F(\omega_N) \quad (\text{A. 7})$$

である。 $F(\omega)$ の形は Fig. 26 (c) に示すようになる。

そこで乱数表により 2 桁の数字を選び、その数字を $F(\omega)$ とする $\Delta\omega$ のバンドの記号をとる。この手順をつぎつぎとくりかえし、A~W の記号がスペクトラム \bar{S}' の頻度分布を持つ、一連の Random な記号列を得る。これを穿孔テープにして、造波装置の不規則波発生制御テープ読み取り機に入れると、その記号に対応する駆動モーターの回転数が指令され、モーターに供給する電機子電圧が加速減速に応じて正負に自動制御される。テープの記号の読み込み速度として、1 ステップ 2 秒、1 秒および造波板の 1 ストロークごとの 3 種類が選択可能である。

造波板のストロークは、造波板の動きのスペクトラム $S'(\omega)$ から

$$ST = 1.77 H_2 \sqrt{\bar{S}'} \quad (\text{A. 8})$$

で与えられる。

不規則波発生制御装置の概念図を Fig. 27 に、電源の系統図を Fig. 28 に示す。これは、角水槽に従来より設備されていた造波装置に、新しい電源制御装置をつけ加えたものであって、慣性の大きい機械系を不規則な回転数制御指令に速やかに追従させるため、Fig. 28 に見るように一対の SCR 静止レオナード方式の直流電源からなっており、駆動用直流モーターに、加速の時はプラスの電圧を、減速の時はマイナスの電圧を加えるような、電源の切換方式をとっている。

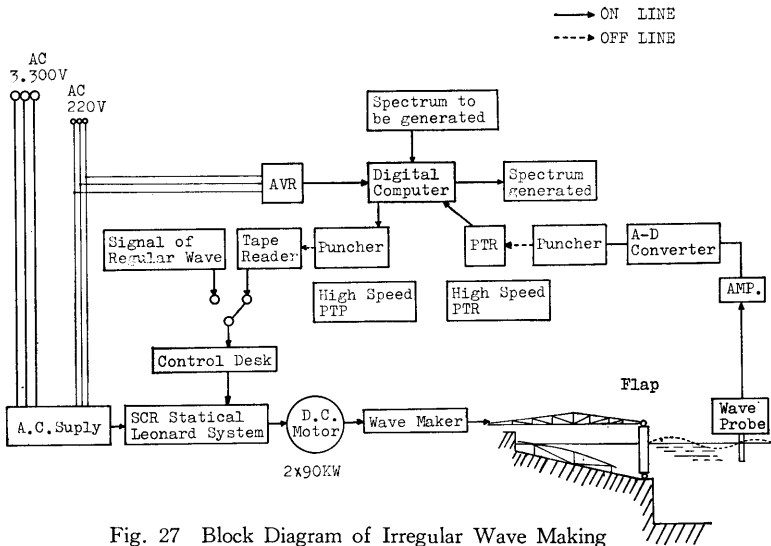


Fig. 27 Block Diagram of Irregular Wave Making

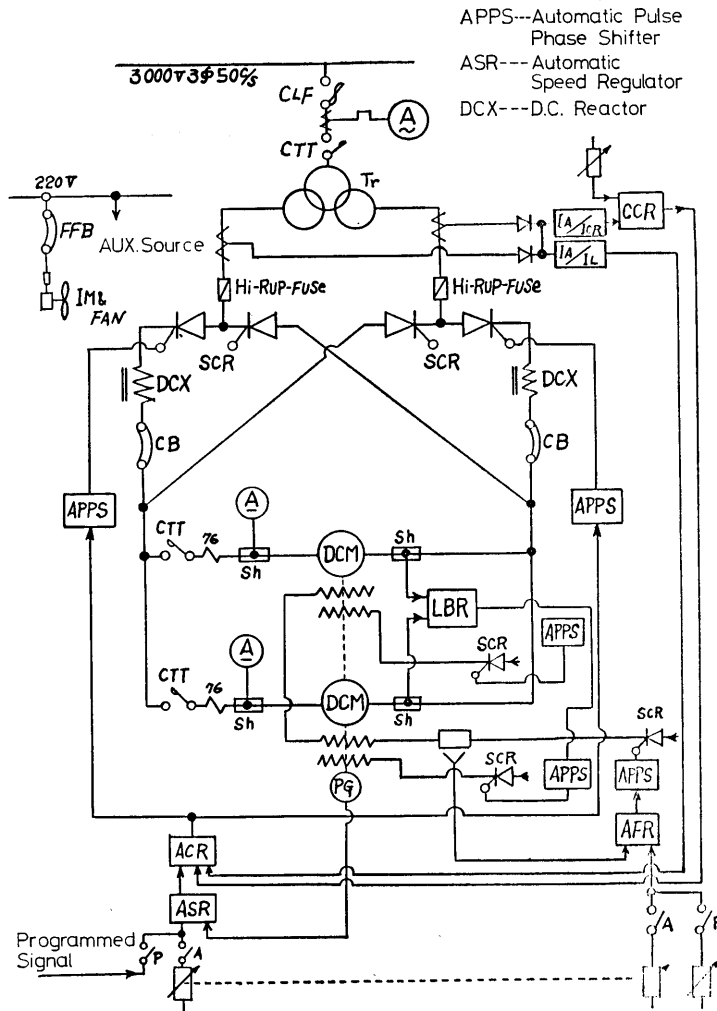


Fig. 28 Power Regulating System of Irregular Wave Making

なお本装置は、原子力船の振動、動揺対策に関する不規則波中の異常加速度の研究のため、昭和40年度、41年度の2ヶ年にわたる原子力関係試験研究費で整備されたものであり、本装置の製作は、日立製作所（日製産業機受注）がおこなったことを付記する。

斜め波中の Sway の計算法

(1) 波の強制力

平衡位置に固定された船体に関する座標を (x, y, z) とし、 x 軸を船の前後方向に、重心を通り鉛直下方に z 軸をとる。船の進向方向と波の進行方向とのなす角を χ とすると、進行波の速度ポテンシャルは (A. 9) 式のように書かれる。

$$\Phi = \left(\frac{g\zeta_a}{\omega} \right) e^{kz} \sin \{k(-y \sin \chi + x \cos \chi) - \omega t\} \quad (\text{A. 9})$$

船体による流体の攪乱を無視して、船体表面 (x_0, y_0, z_0) における波の圧力は (A. 10) 式のようになる。

$$p = p_0 - \rho g z + \rho g \zeta_a e^{kz_0} \cos \{k(-y_0 \sin \chi + x_0 \cos \chi) - \omega t\} \quad (\text{A. 10})$$

このうちの変動圧力の y 軸方向の成分、すなわち (x_0, y_0, z_0) における船体表面の方向余弦を (l, m, n) とすると、 $p m$ を船体表面について積分したものが、いわゆる Froude-Krylov の Sway force である。これを F_y と書く

$$F_y = \int_S p m dS \quad (\text{A. 11})$$

となり、これは船体の容積 V についての体積積分に変換され (A. 12) 式となる。

$$F_y = \int_V \frac{\partial p}{\partial y} dV \quad (\text{A. 12})$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \rho g \zeta_a k \sin \chi e^{kz} \sin \{k(-y \sin \chi + x \cos \chi) - \omega t\} \quad (\text{A. 13})$$

であるから、船の幅を波長に対して小さいとし (A. 13) 式で $k y$ の項を省略し、また x, y, z をそれぞれ

$$\xi = \frac{x}{L}, \quad \eta = \frac{y}{B}, \quad \zeta = \frac{z}{d}$$

という無次元変数に変換すると、 F_y は次式のようになる。

$$\begin{aligned} F_y &= \rho g \zeta_a k \sin \chi \int_{-L/2}^{L/2} \int_0^{y_0} \int_{-y_0}^{y_0} e^{kz_0} \sin(kx_0 \cos \chi \\ &\quad - \omega t) dy dz dx \\ &= \frac{1}{2} \rho g \zeta_a k \sin \chi \cdot L B d \int_{-1}^1 \int_0^1 \int_0^1 e^{k\zeta d} \sin(\gamma \xi \cos \chi \\ &\quad - \omega t) d\eta d\zeta d\xi \end{aligned}$$

(112)

$$= \frac{1}{2} \rho g \zeta_a k \sin \chi \cdot L B d \int_{-1}^1 \int_0^1 \int_0^1 \eta_0 e^{k\zeta d} \sin(\gamma \xi \cos \chi - \omega t) d\zeta d\xi \quad (\text{A. 14})$$

ここで $\gamma = \pi L / \lambda$ である。

これを $\cos \omega t$ と $\sin \omega t$ の項に分ける。

$$\begin{aligned} F_y &= \frac{1}{2} \rho g \zeta_a k \sin \chi \cdot L B d \int_{-1}^1 \int_0^1 \eta_0(\xi, \eta) e^{k\zeta d} \\ &\quad \times \{ \sin(\gamma \xi \cos \chi) \cos \omega t \\ &\quad - \cos(\gamma \xi \cos \chi) \sin \omega t \} d\zeta d\xi \quad (\text{A. 15}) \end{aligned}$$

いま、 F_y の振幅を F_{y0} とし、無次元化した係数 C_{F_y} を (A. 16) 式のように定義する。

$$C_{F_y} = \frac{F_{y0}}{\frac{1}{2} \rho g \zeta_a k \sin \chi \cdot L B d} \quad (\text{A. 16})$$

そうすると、 C_{F_y} と波の強制力の位相差 ε_{F_y} は

$$\begin{aligned} C_{F_y} &= \sqrt{C_{F_{ys}}^2 + C_{F_{yo}}^2} \\ \varepsilon_{F_y} &= \tan^{-1} \left(\frac{C_{F_{ys}}}{C_{F_{yo}}} \right) \quad (\text{A. 17}) \end{aligned}$$

と書かれる。ここに、

$$\begin{aligned} C_{F_{yo}} &= \int_{-1}^1 \int_0^1 \eta_0(\xi, \eta) \sin(\gamma \xi \cos \chi) d\zeta d\xi \\ C_{F_{ys}} &= \int_{-1}^1 \int_0^1 \eta_0(\xi, \eta) \cos(\gamma \xi \cos \chi) d\zeta d\xi \quad (\text{A. 18}) \end{aligned}$$

である。

(2) 減衰力

船体の Sway に対する減衰力は、G. Vossers²³⁾ にしたがって非常に簡単化し次式で表わす。

$$N_y = N_{y0} L \frac{2\beta_0^2}{1 + \beta_0} \quad (\text{A. 19})$$

ここで N_{y0} は、断面係数が β_0 である船体中央横断面を二次元物体としたときの Sway 減衰力である。 N_{y0} と発散波の振幅比 \bar{A}_y との間には

$$N_{y0} = \frac{\rho g^2 \bar{A}_y^2}{\omega^2} \quad (\text{A. 20})$$

という関係があり、 ω の小さい範囲では

$$\bar{A}_y = d y \cdot \xi_B^2 \quad (\text{A. 21})$$

と表わされる。ここで $\xi_B = \frac{B\omega^2}{2g}$ 、 $d y$ は船型による係数である。上記の関係をまとめると船体の減衰力は次式のようになる。

$$\begin{aligned} N_y &= \frac{\rho g^2 \bar{A}_y^2 L}{\omega^2} \frac{2\beta_0^2}{1 + \beta_0} \\ &= \frac{1}{2} \rho \frac{2\beta_0^2}{1 + \beta_0} \frac{V}{C_b} H_0 \omega \cdot d y^2 \quad (\text{A. 22}) \end{aligned}$$

ここに $H_0 = \frac{B}{2d}$ である。 $d y$ の値が H と β の関数として文献 23) に示されているが、本論では付加質量係数 k_y とともに別の方法でこれらの値を定めた。 k_y

は、船体の Sway に対する見かけ質量を $\rho V(1+k_y)$ と表わすときの係数 k_y である。そうすると、本文中の式 (15) の f_y と v_y/ω は、

$$f_y = \frac{F_y}{M_y} = \frac{g \zeta a k \sin \chi C_{Fy}}{2C_b(1+k_y)} \quad (\text{A. 23})$$

$$\frac{v_y}{\omega} = \frac{N_y}{\omega M_y} = \frac{H_0 \frac{2\beta_0}{1+\beta_0} d_y^2}{2C_b(1+k_y)} \quad (\text{A. 24})$$

となる。

d_y と k_y の係数は、これらの値のいくつかの組み合わせについて \ddot{Y} を計算し、その結果が $\chi=90^\circ$, $F_n=0$ における \ddot{Y} の実験値とよく一致するものとした。その値は $k_y=0.4$, $d_y=2.0$ である。

(1) Experimentally Measured Values

Fig. A 1.1~Fig. A 1.18

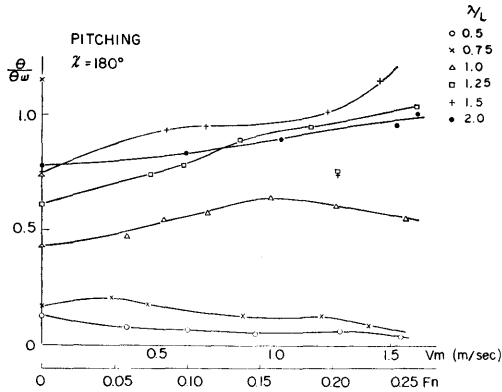


Fig. A 1.1

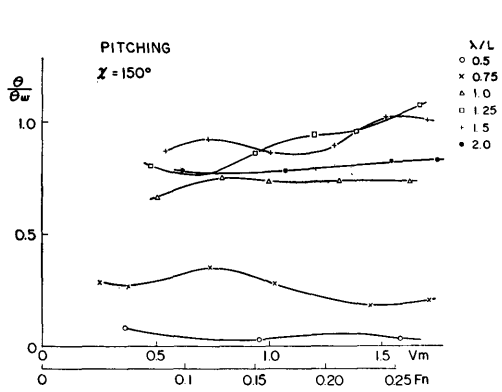


Fig. A 1.2

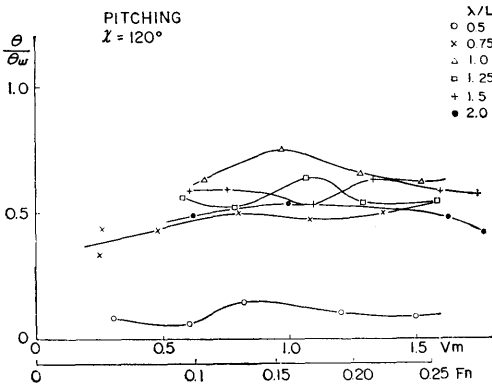


Fig. A 1.3

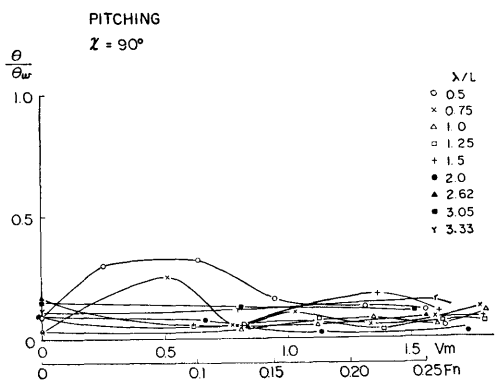


Fig. A 1.4

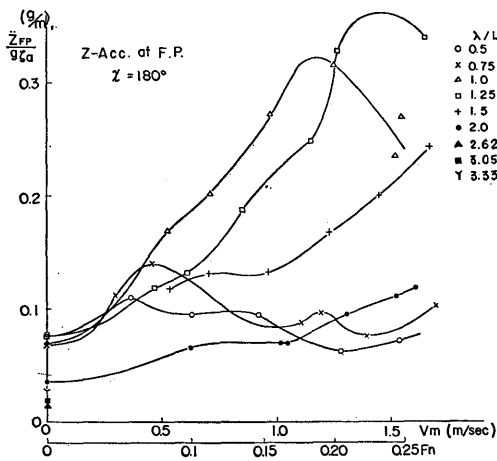


Fig. A 1.5

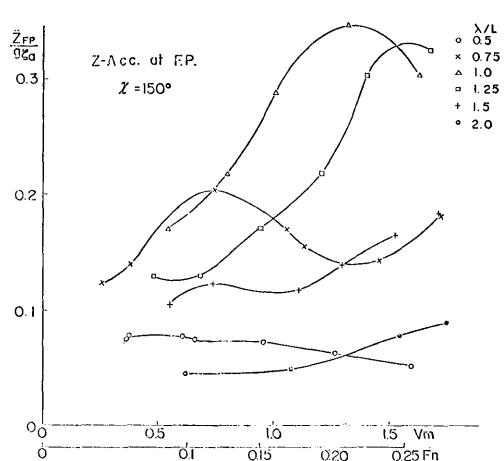


Fig. A 1.6

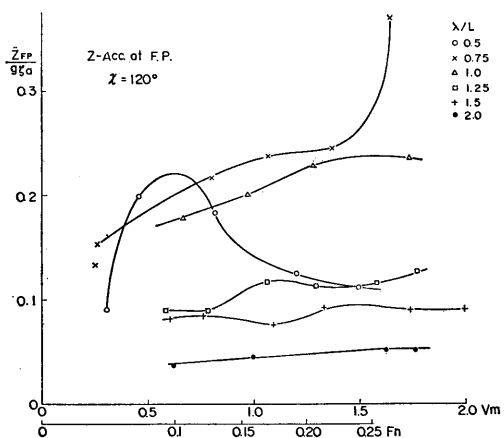


Fig. A 1.7

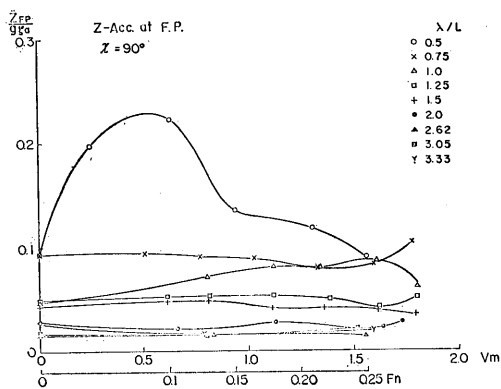


Fig. A 1.8

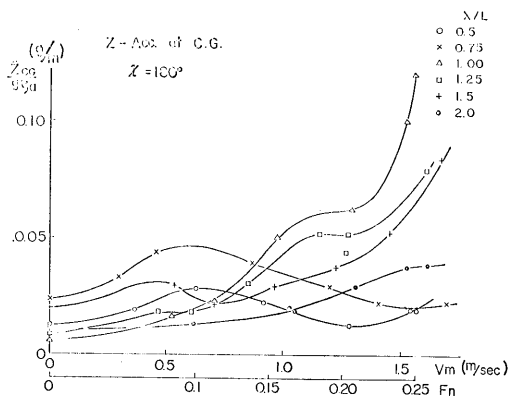


Fig. A 1.9

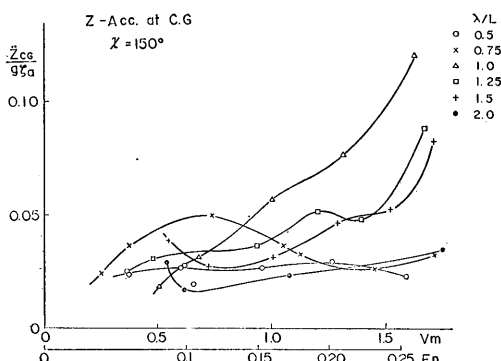


Fig. A 1.10

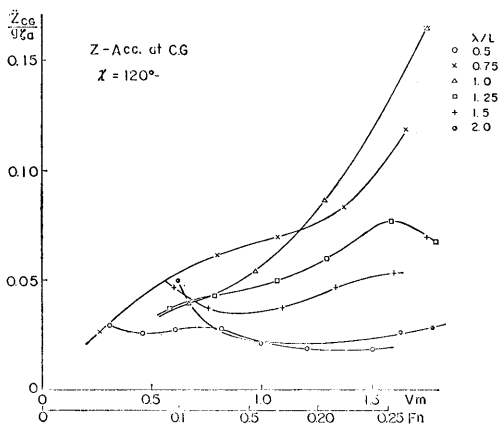


Fig. A 1.11

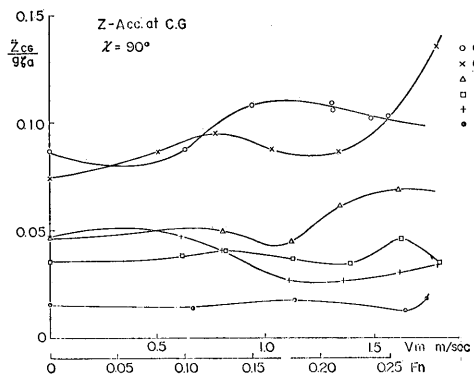


Fig. A 1.12

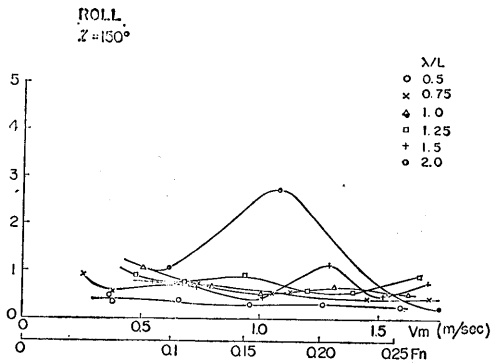


Fig. A 1.13

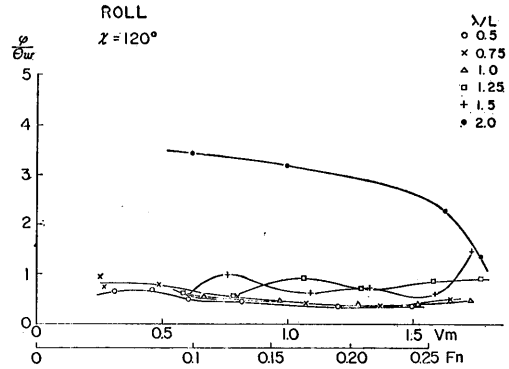


Fig. A 1.14

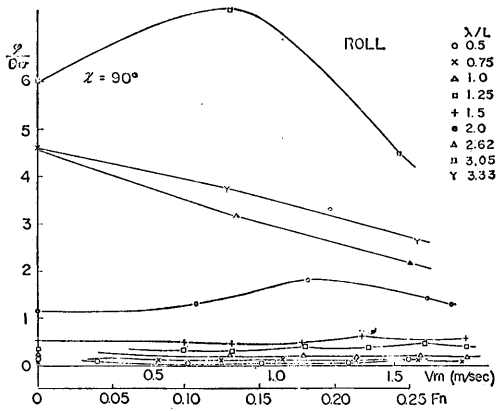


Fig. A 1.15

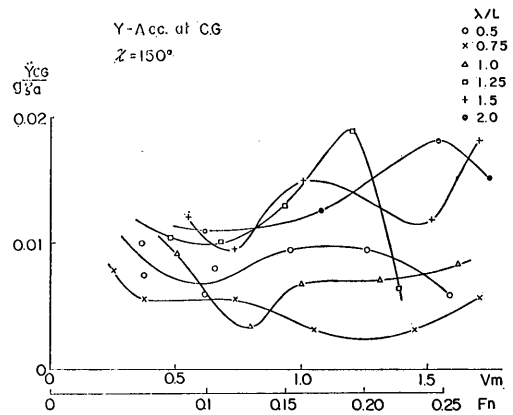


Fig. A 1.16

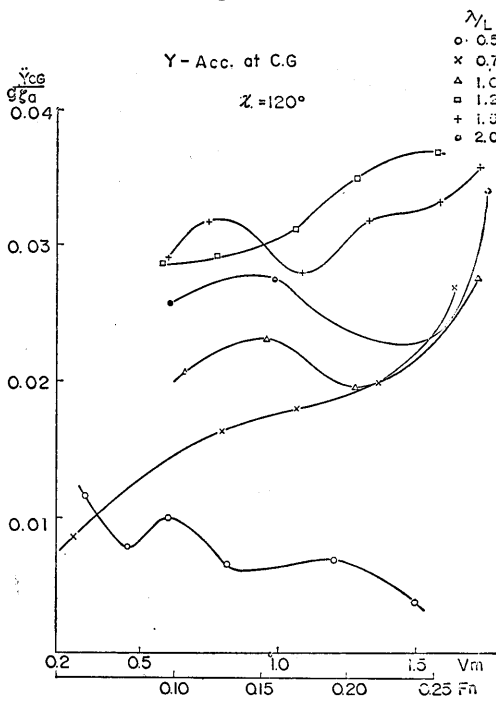


Fig. A 1.17

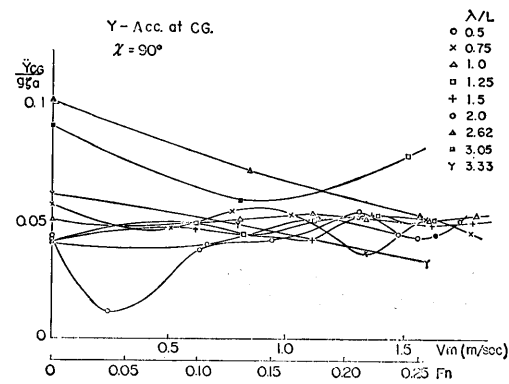


Fig. A 1.18

(2) Response Amplitude in Regular Waves—experimental and theoretical—

Fig. A 2.1~Fig. A 2.25

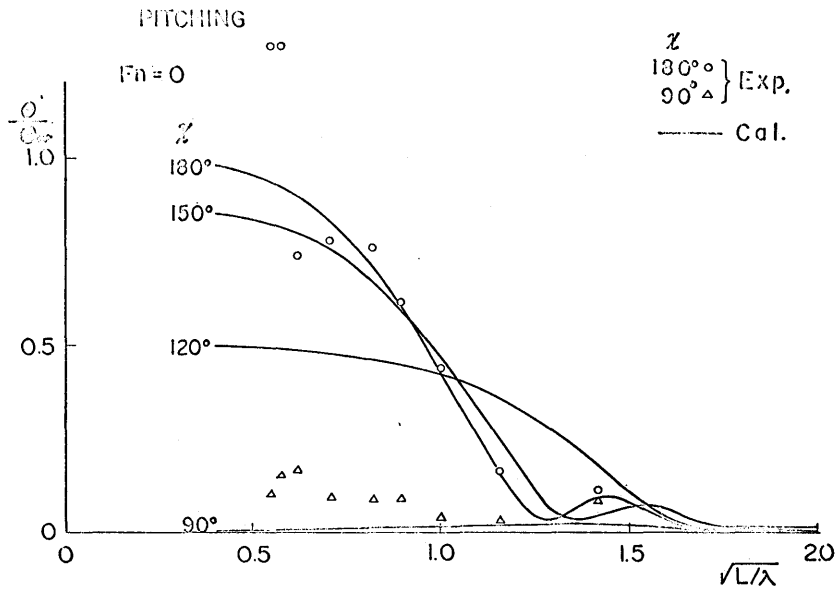


Fig. A 2.1

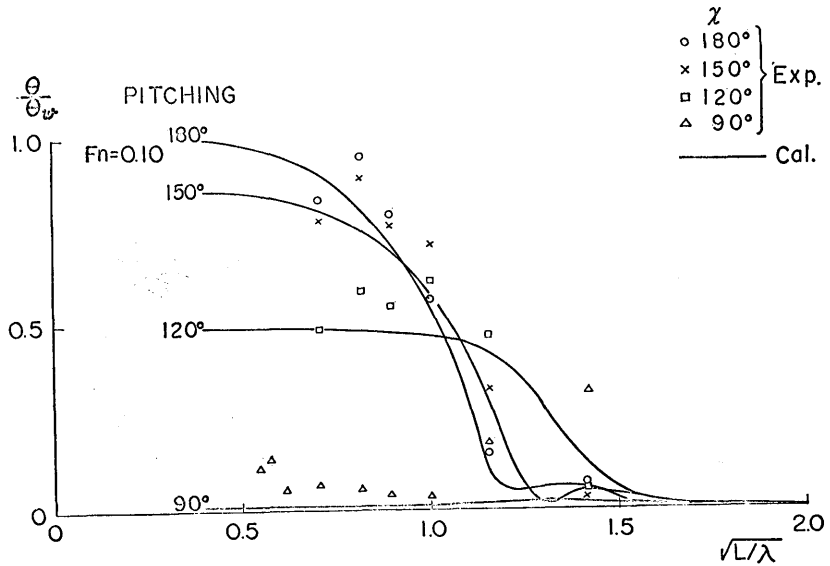


Fig. A 2.2

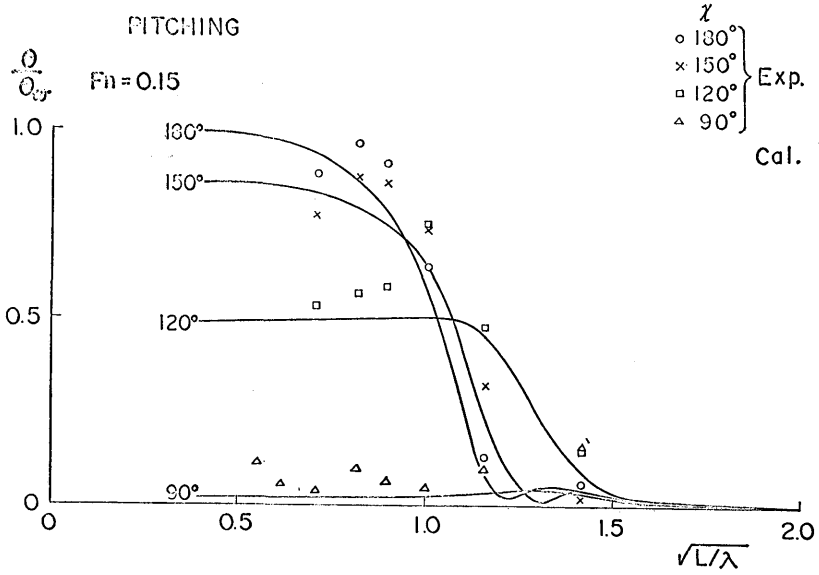


Fig. A 2.3

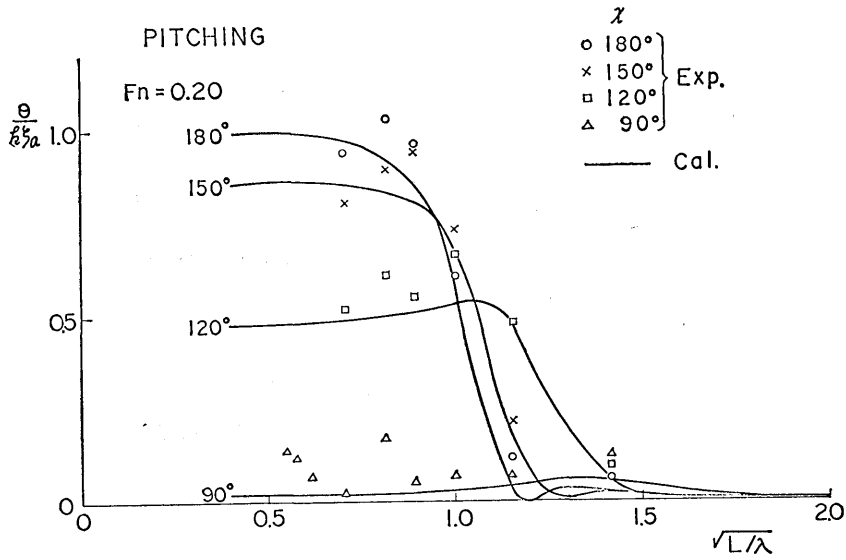


Fig. A 2.4

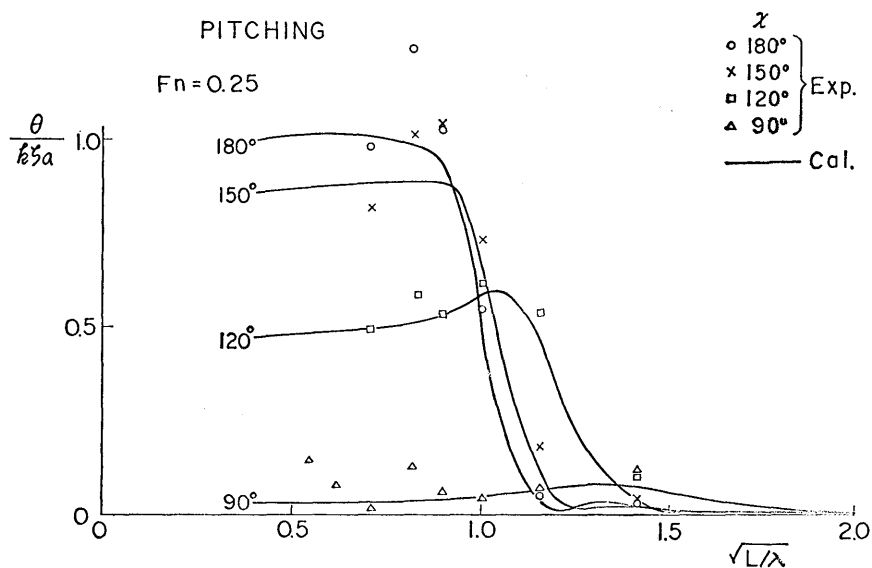


Fig. A 2.5

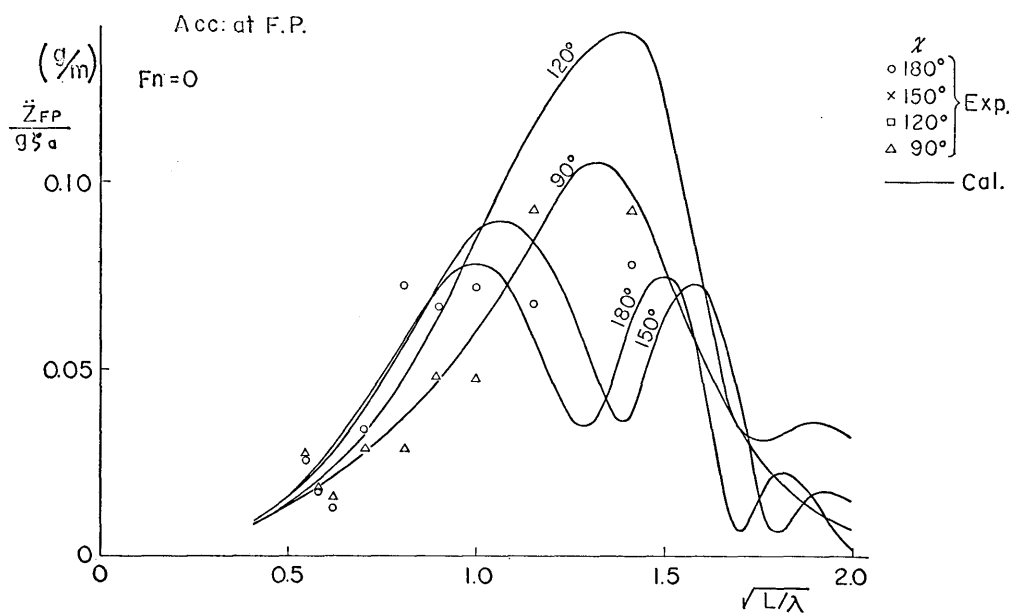


Fig. A 2.6

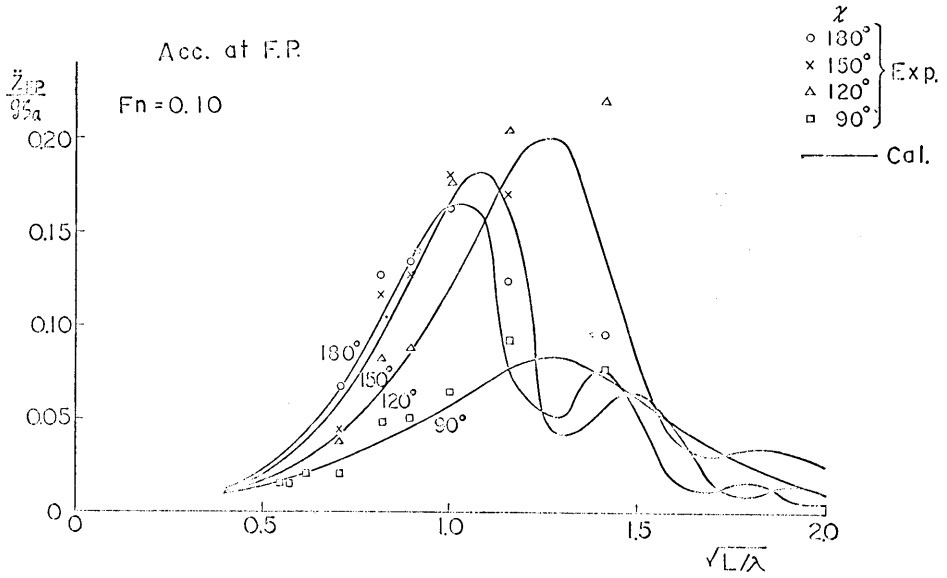


Fig. A 2.7

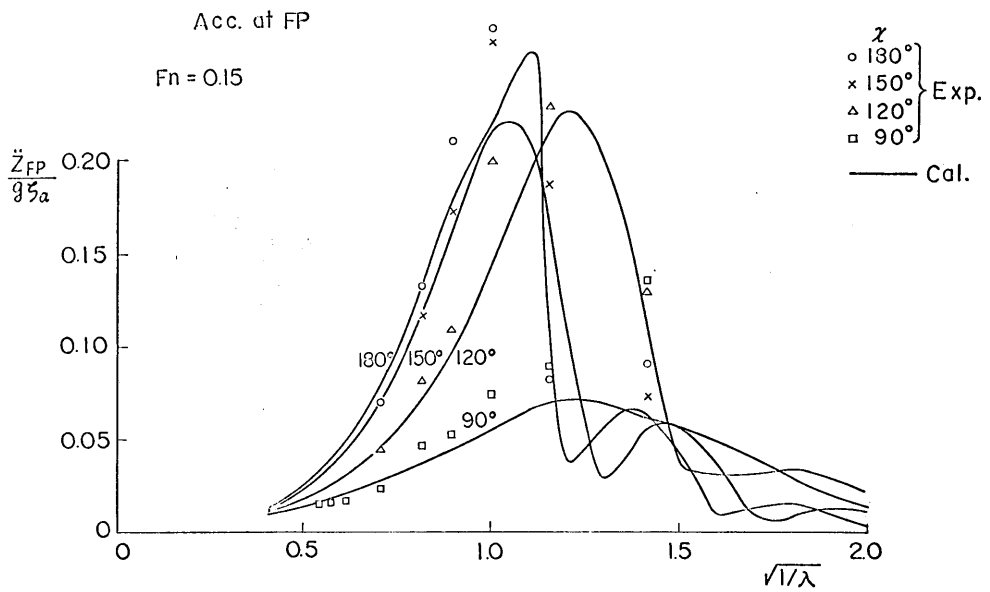


Fig. A 2.8

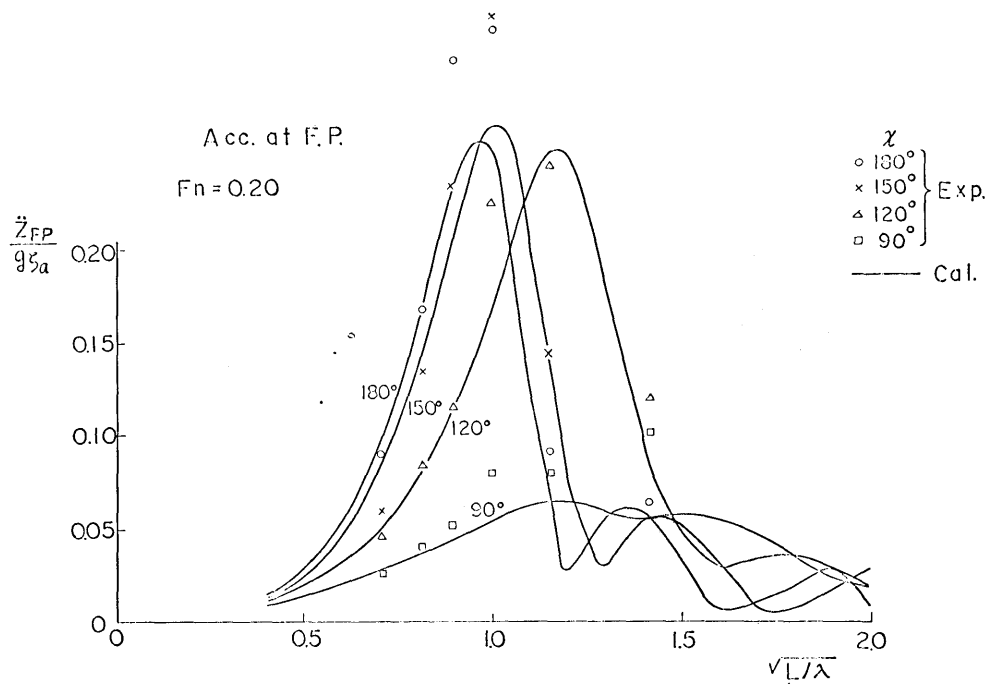


Fig. A 2.9

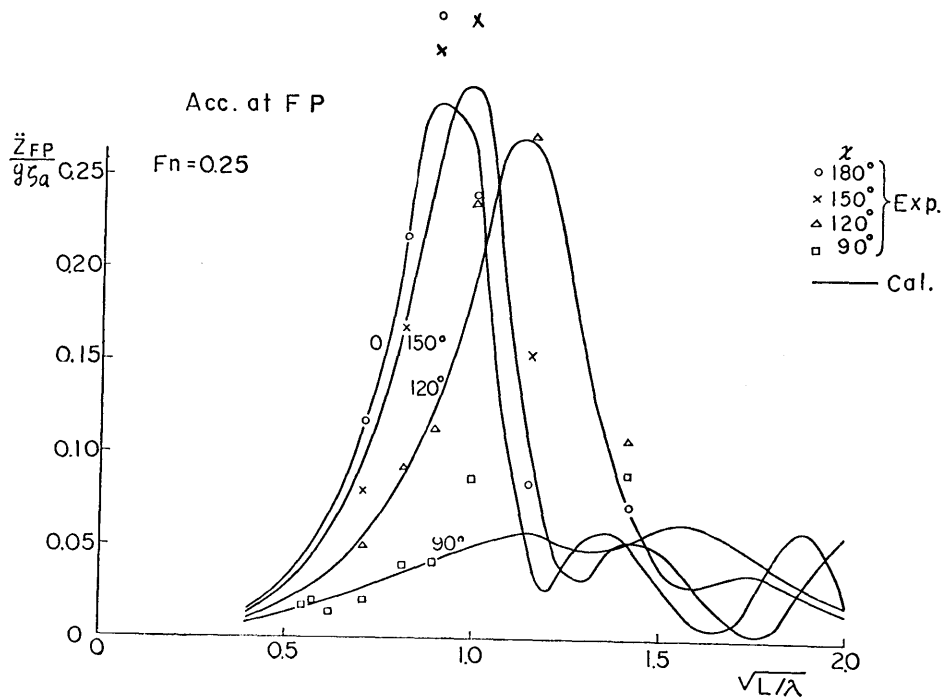


Fig. A 2.10

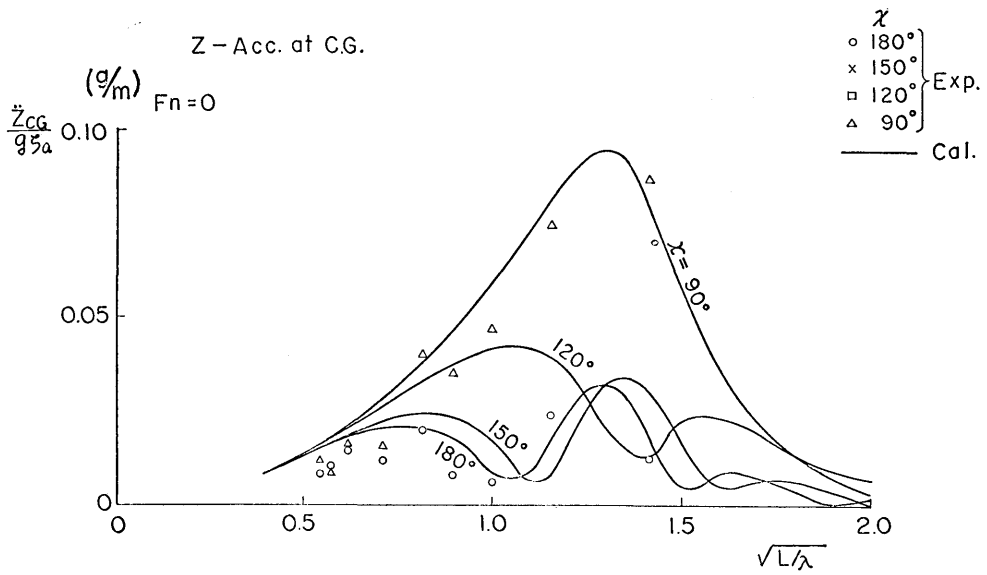


Fig. A 2.11

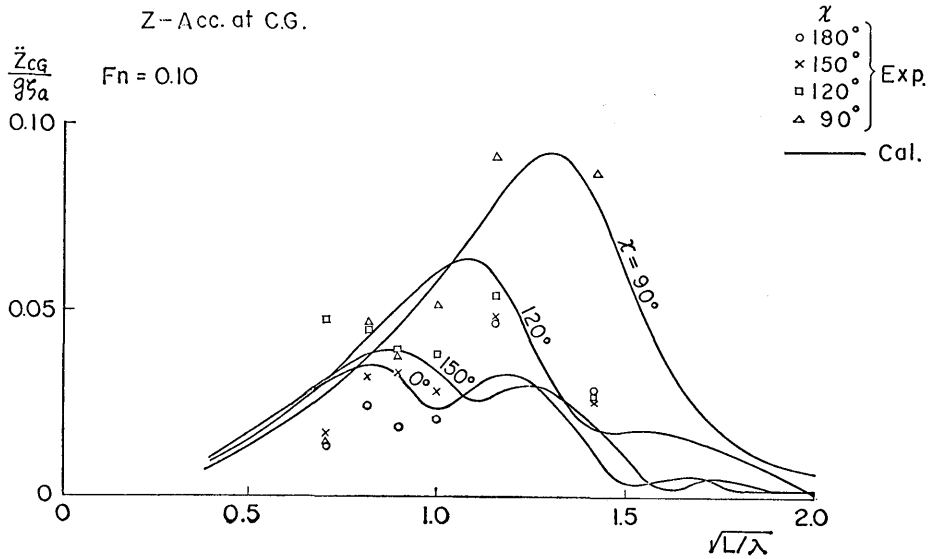


Fig. A 2.12

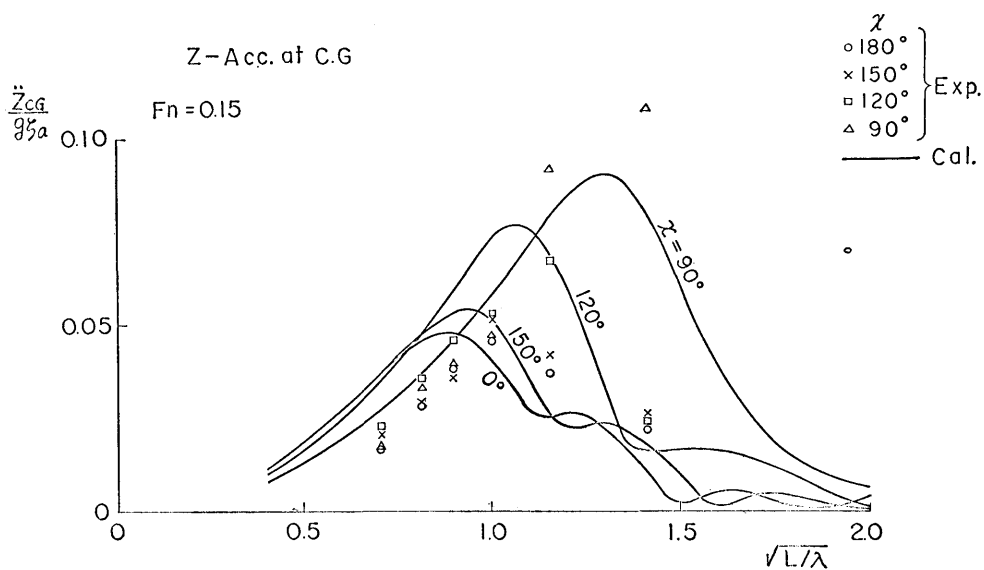


Fig. A 2.13

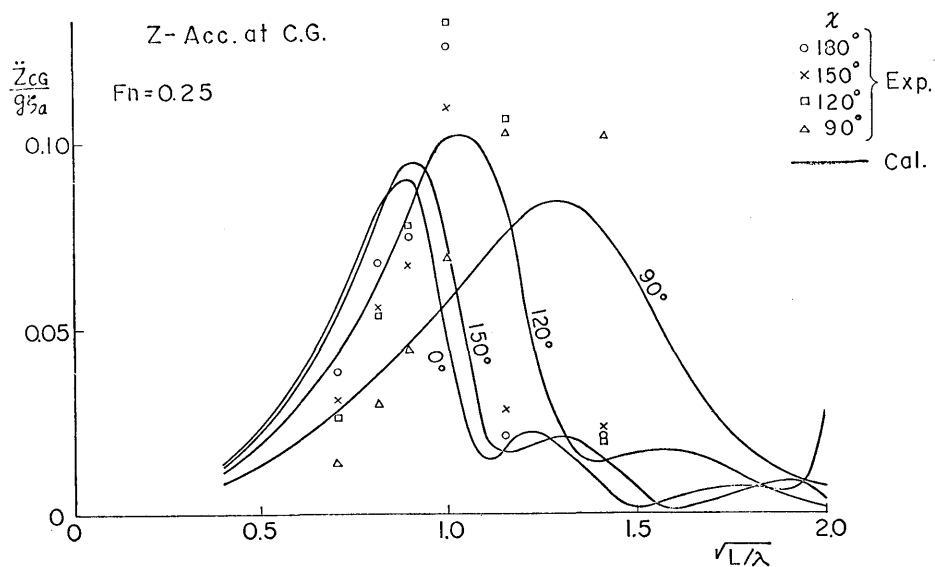


Fig. A 2.14

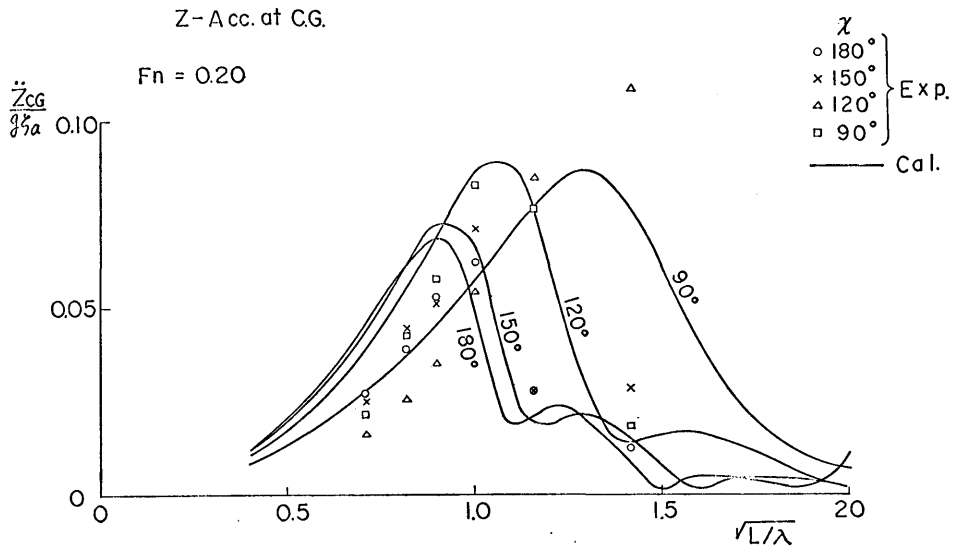


Fig. A 2.15

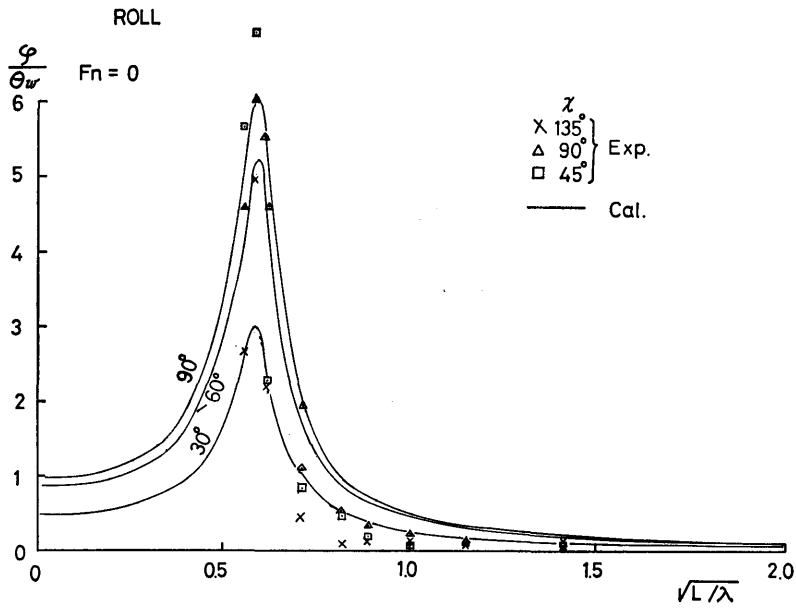


Fig. A 2.16

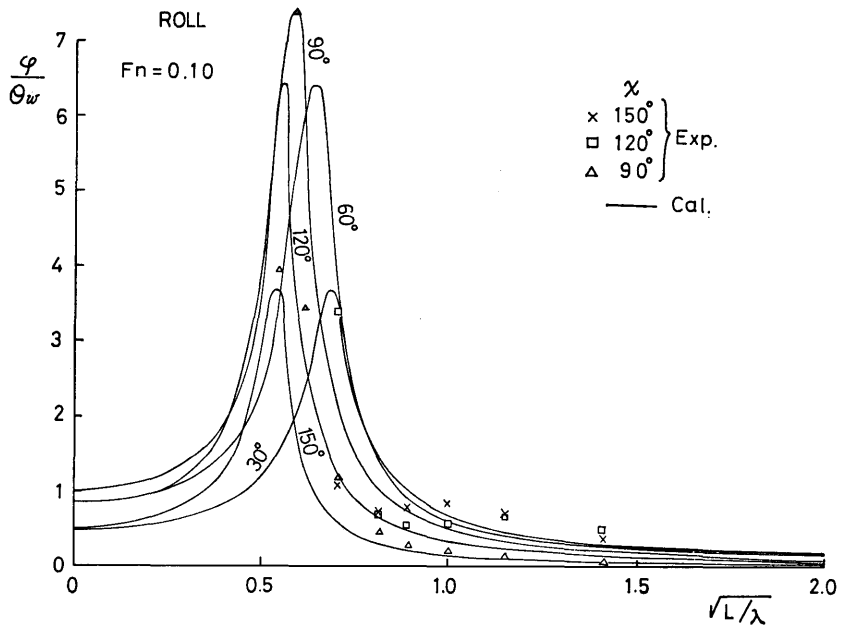


Fig. A 2.17

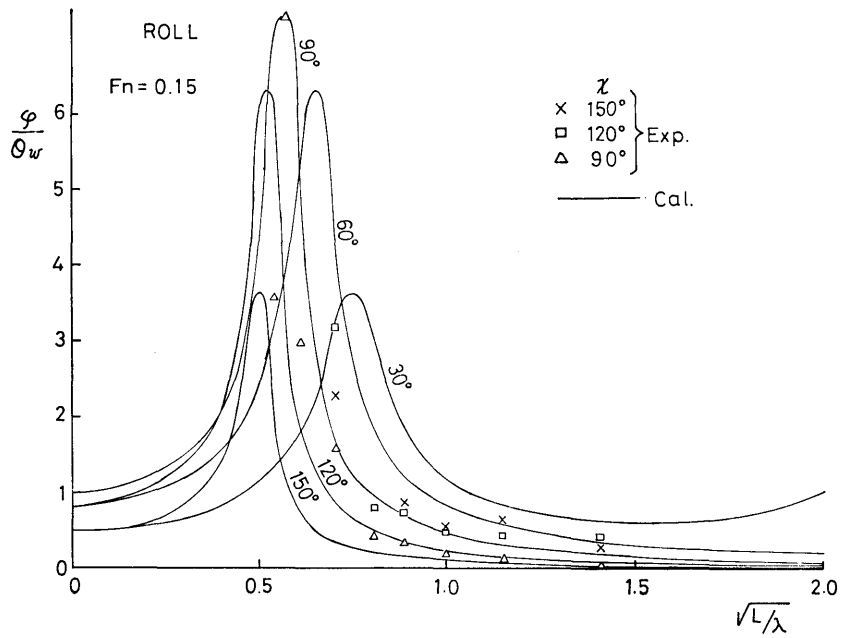


Fig. A 2.18

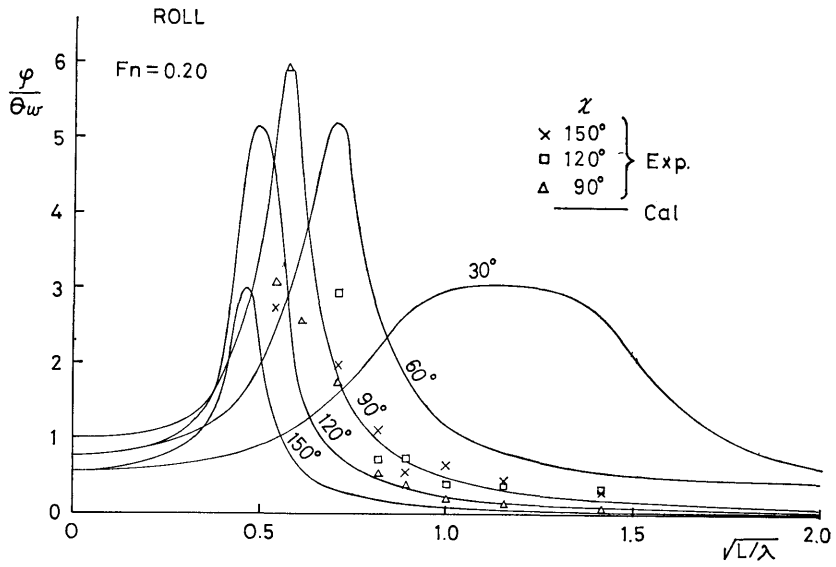


Fig. A 2.19

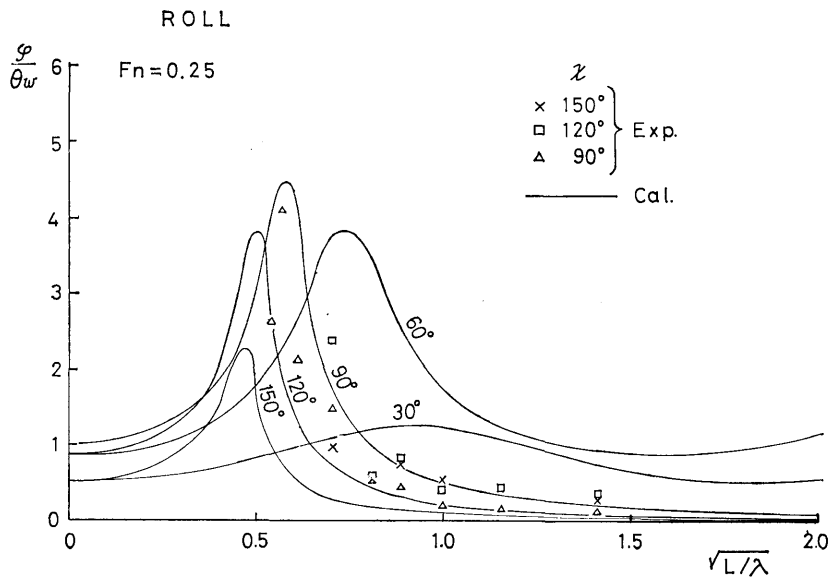


Fig. A 2.20

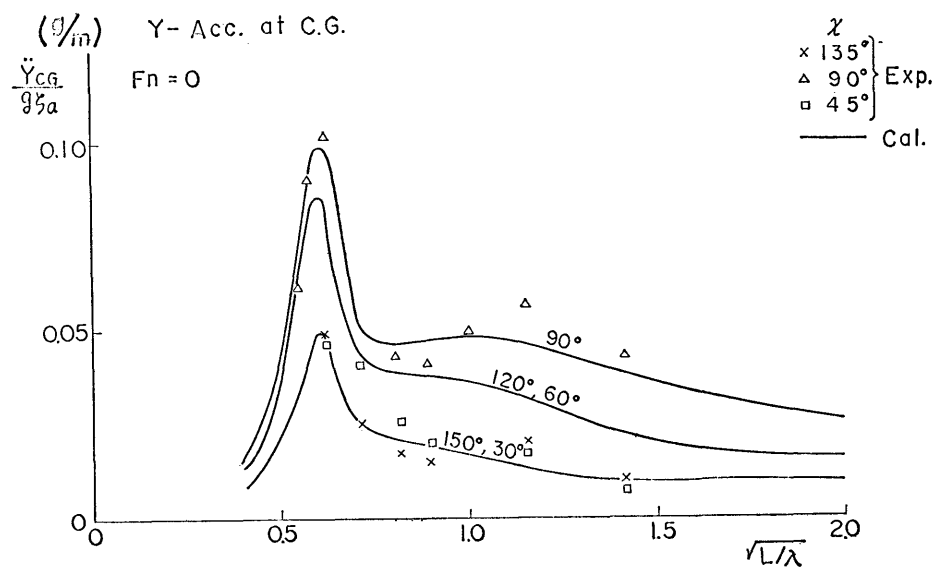


Fig. A 2.21

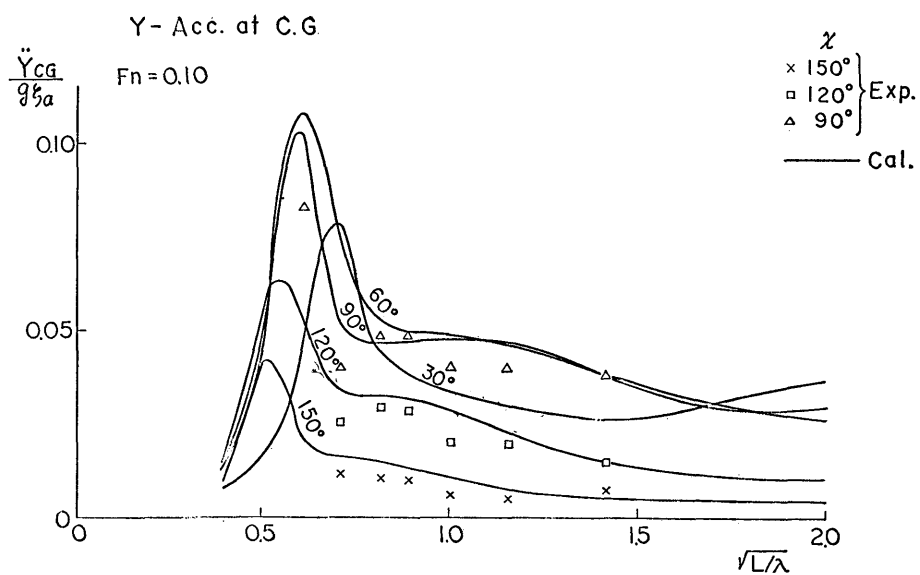


Fig. A 2.22

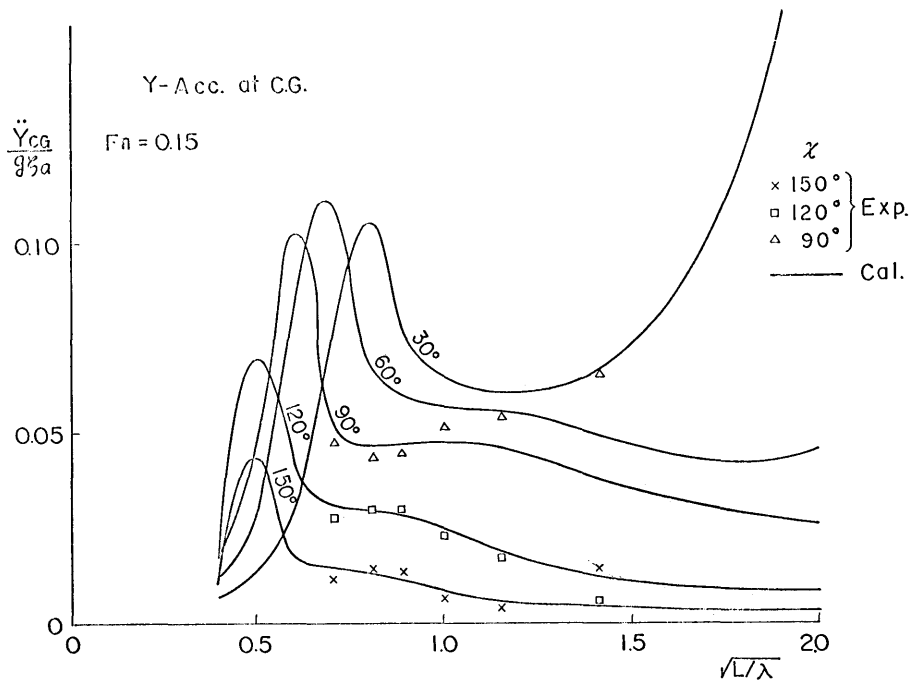


Fig. A 2.23

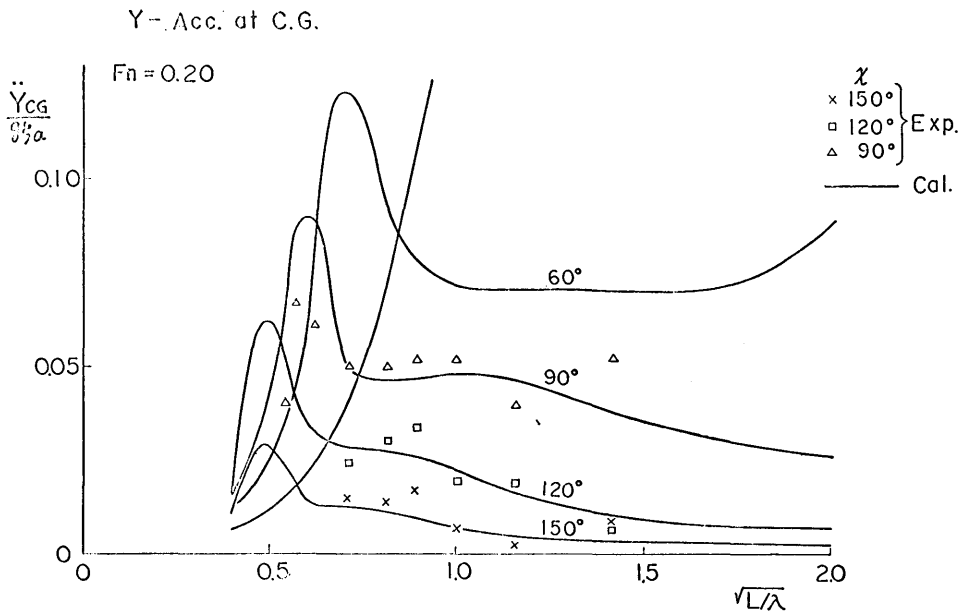


Fig. A 2.24

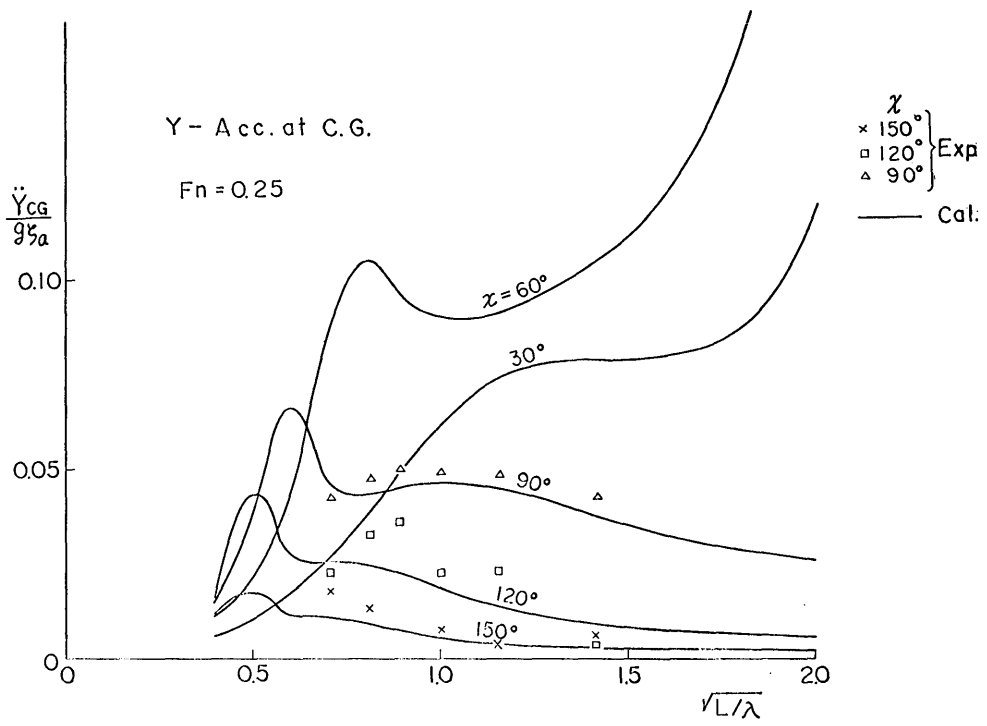


Fig. A 2.25

(3) Standard Deviation of the Responses in Irregular Waves

Fig. A 3.1~Fig. A 3.25

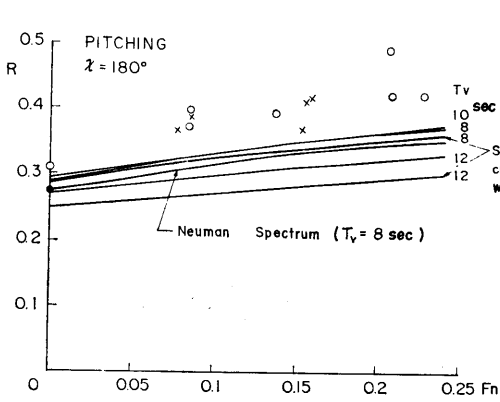


Fig. A 3.1

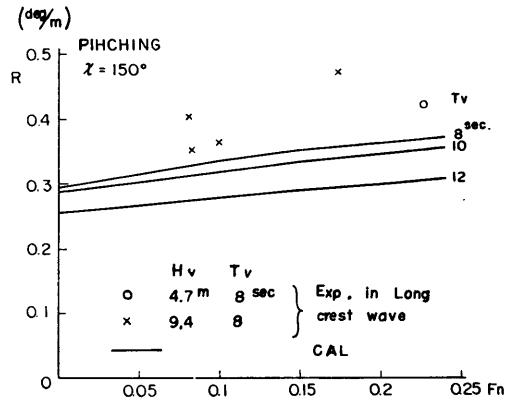


Fig. A 3.2

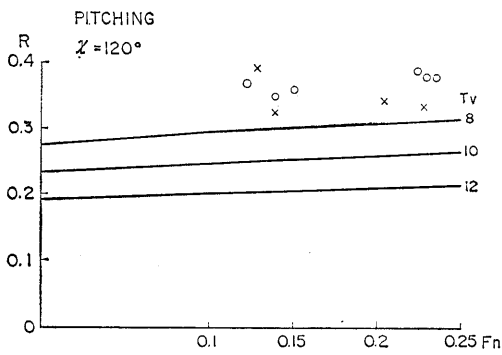


Fig. A 3.3

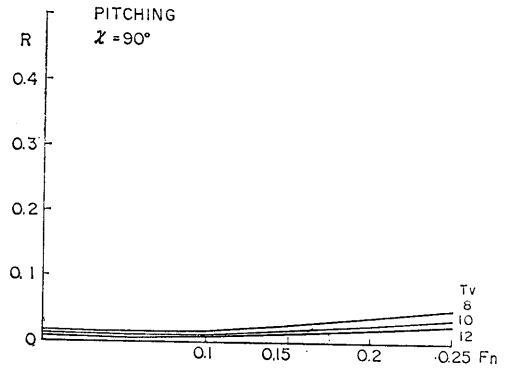


Fig. A 3.4

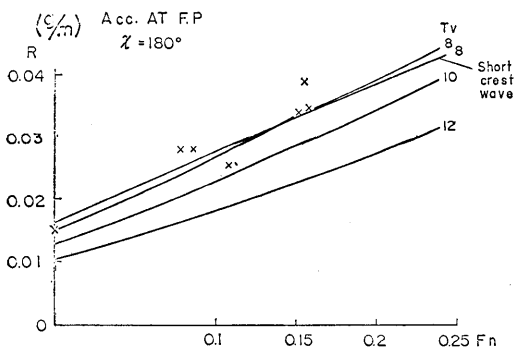


Fig. A 3.5

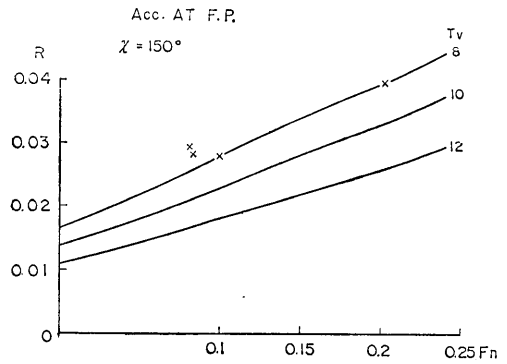


Fig. A 3.6

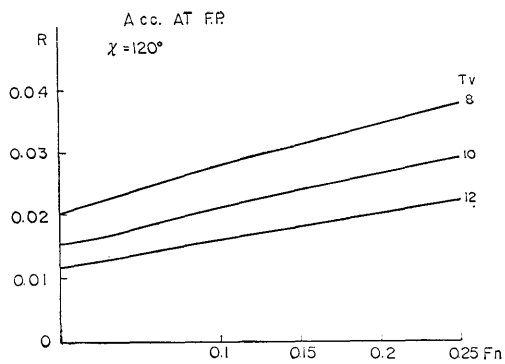


Fig. A 3.7

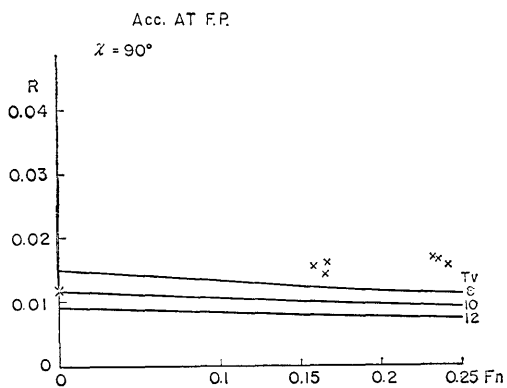


Fig. A 3.8

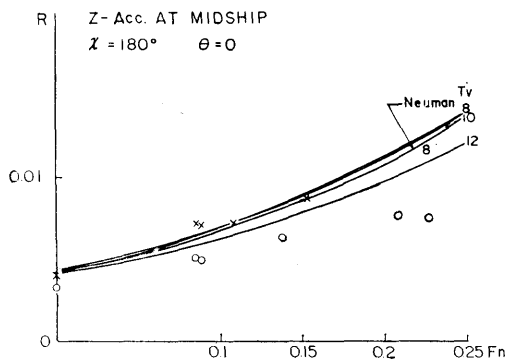


Fig. A 3.9

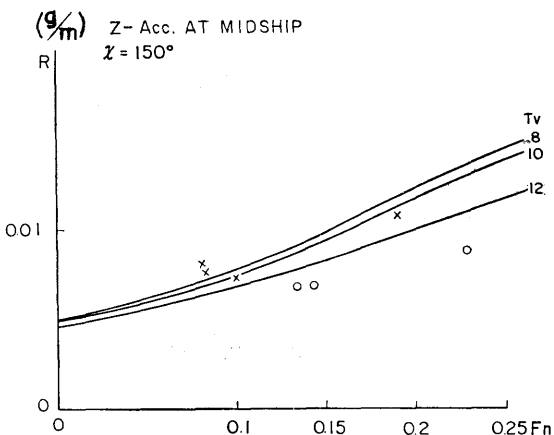


Fig. A 3.10

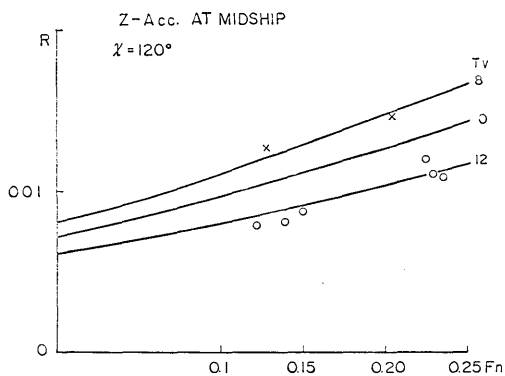


Fig. A 3.11

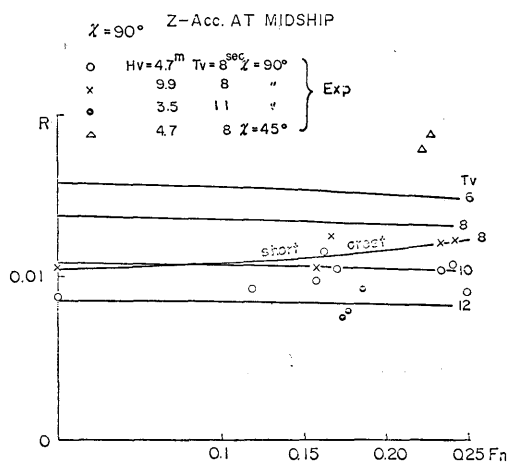


Fig. A 3.12

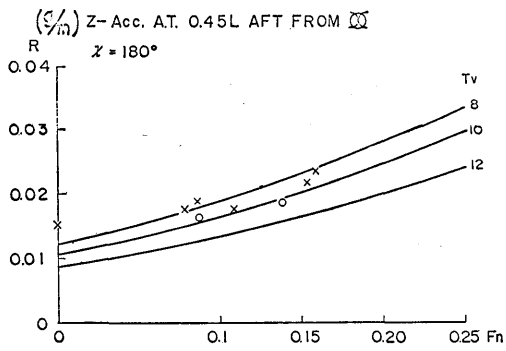


Fig. A 3.13

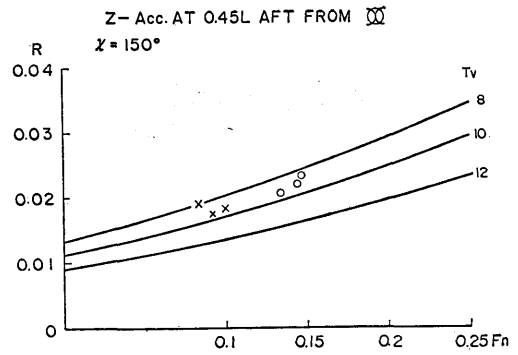


Fig. A 3.14

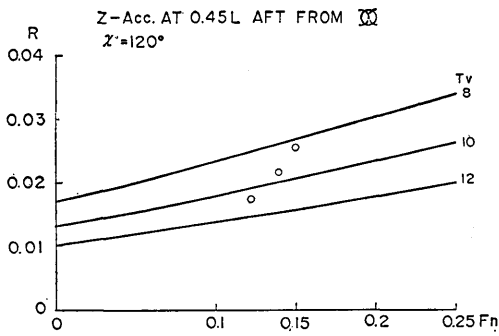


Fig. A 3.15

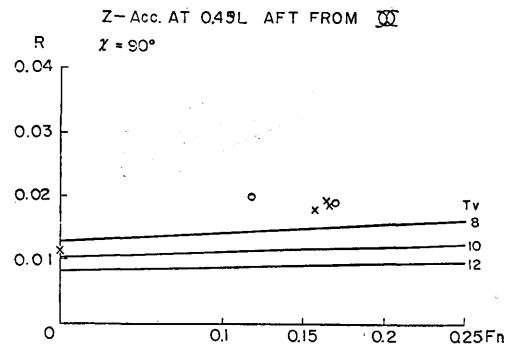


Fig. A 3.16

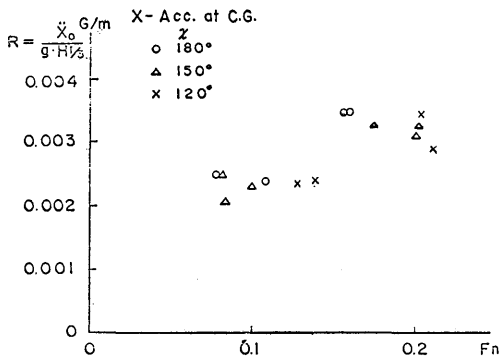


Fig. A 3.17

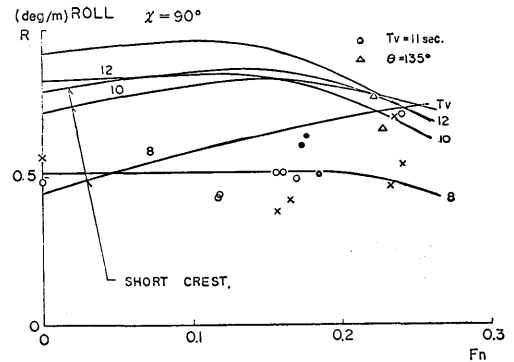


Fig. A 3.18

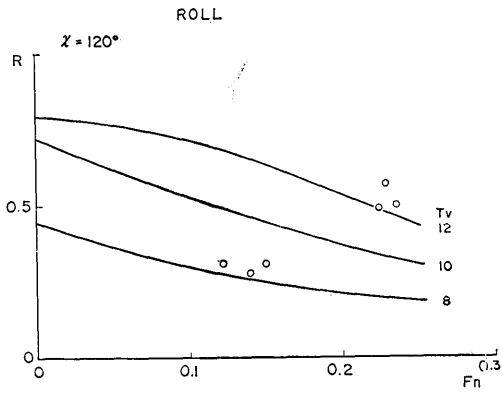


Fig. A 3.19

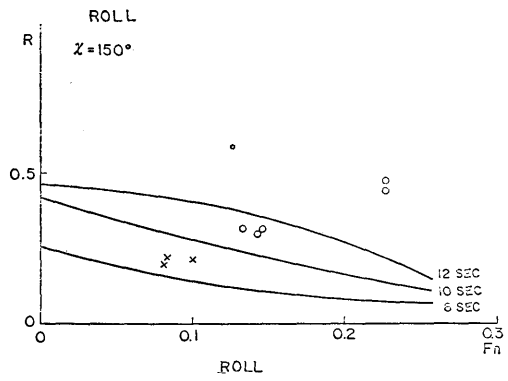


Fig. A 3.20

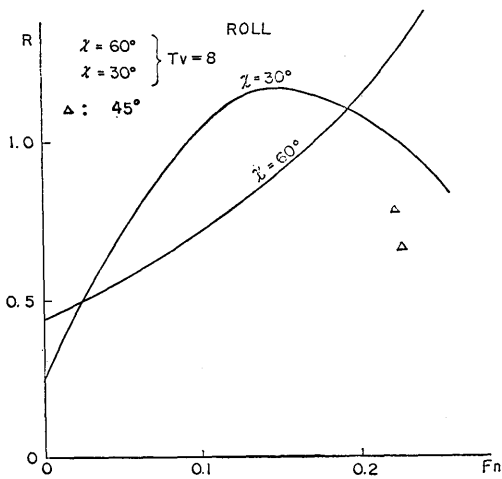


Fig. A 3.21

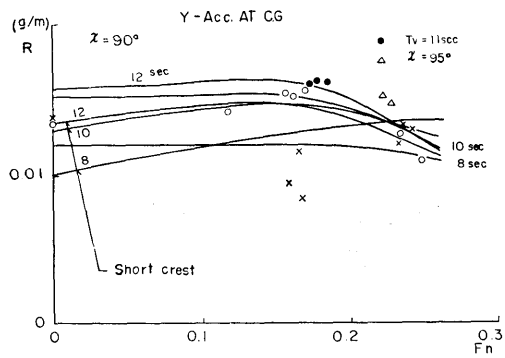


Fig. A 3.22

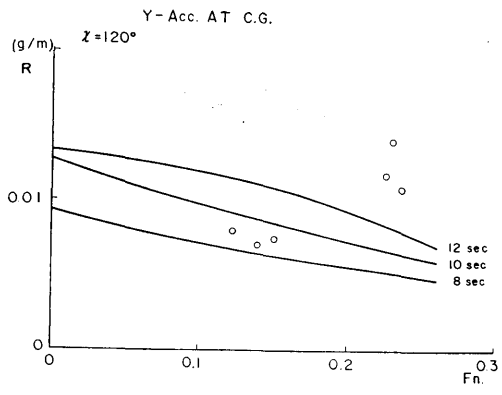


Fig. A 3.23

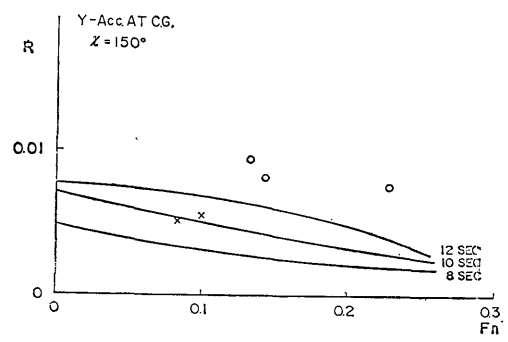


Fig. A 3.24

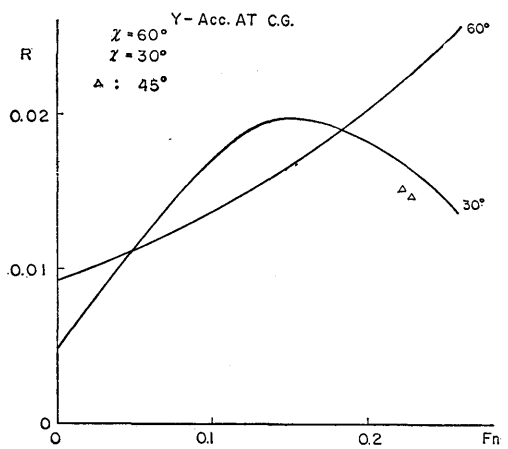


Fig. A 3.25

(4) Maximum Values Measured by the Experiment

Fig. A 4.1~Fig. A 3.14

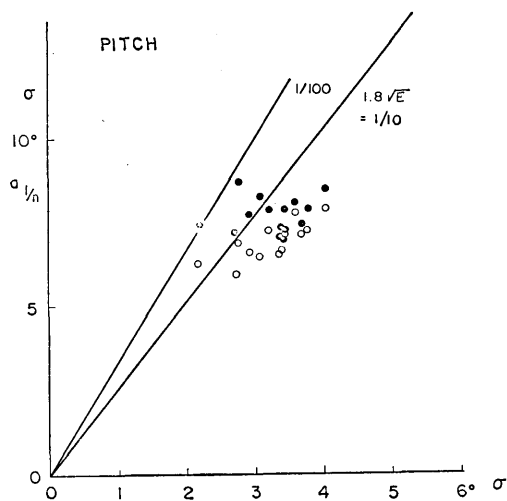


Fig. A 4.1

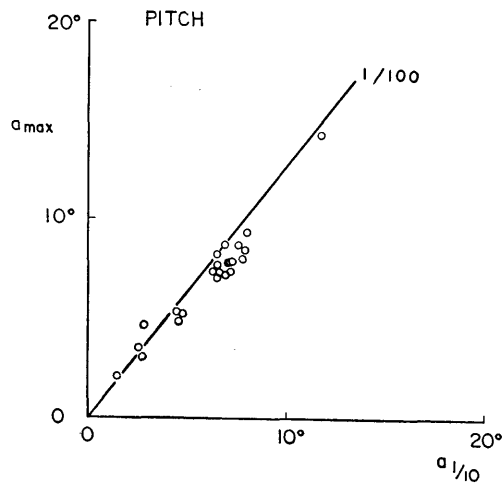


Fig. A 4.2

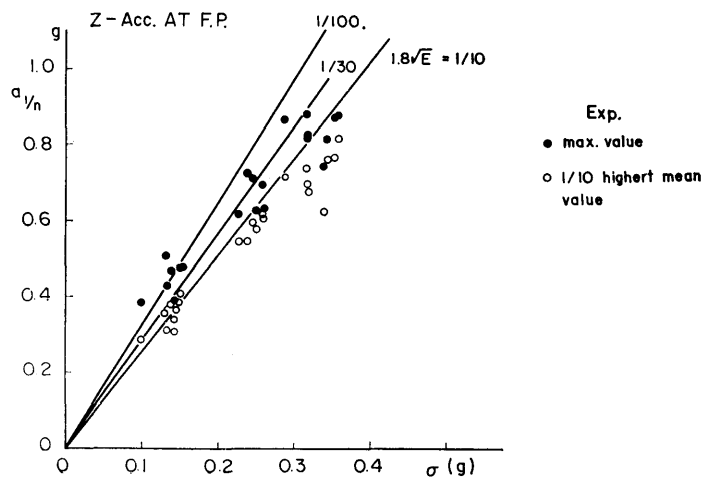


Fig. A 4.3

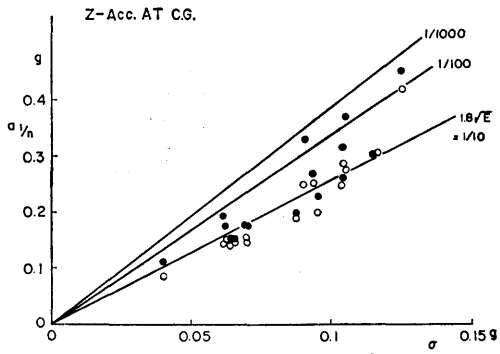


Fig. A 4.4

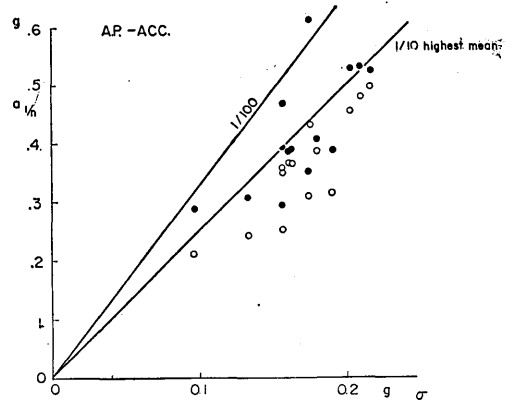


Fig. A 4.5

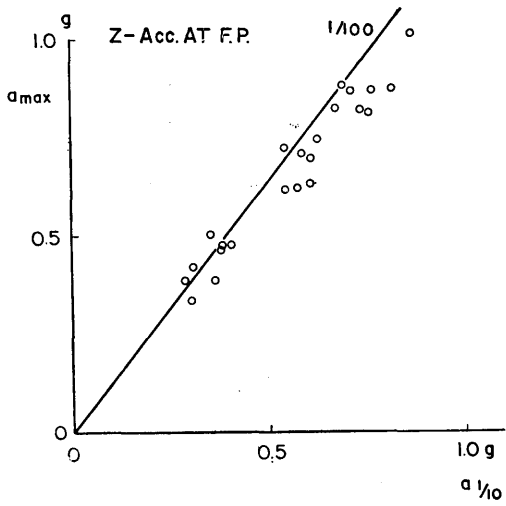


Fig. A 4.6

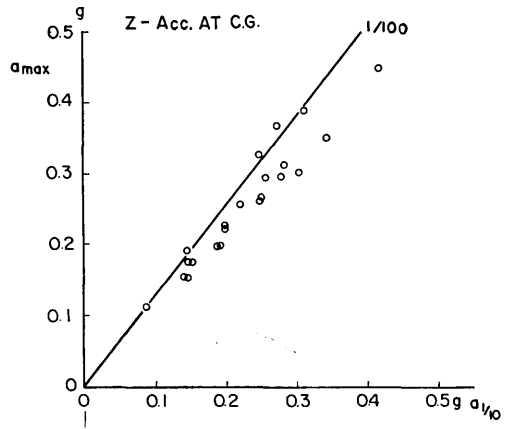


Fig. A 4.7

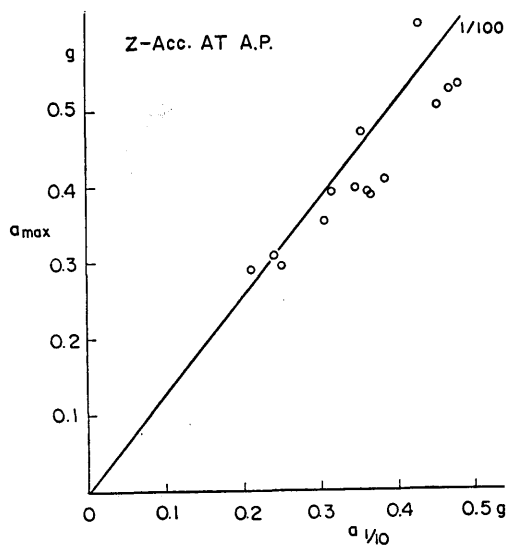


Fig. A 4.8

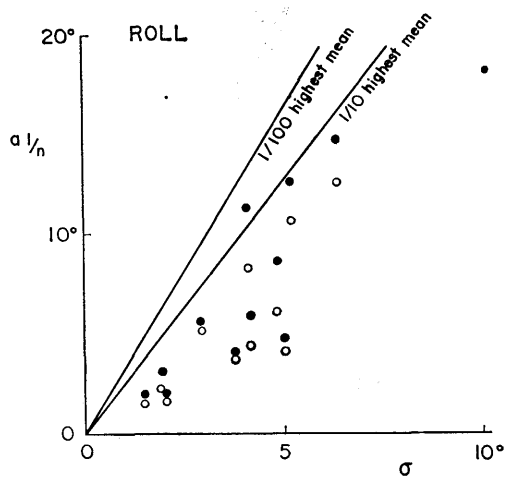


Fig. A 4.9

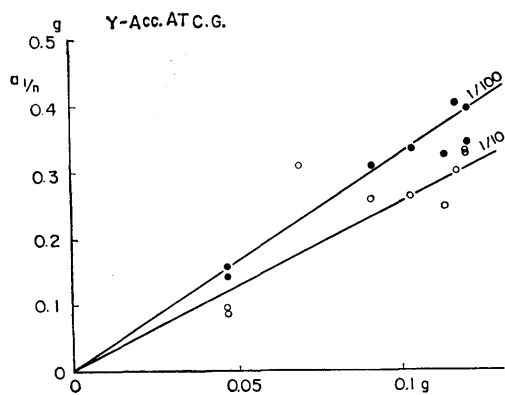


Fig. A 4.10

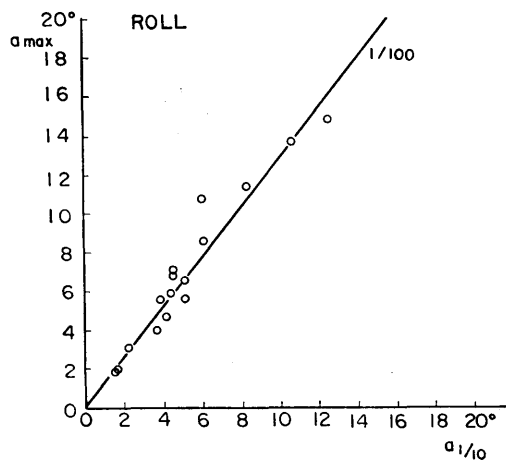


Fig. A 4.11

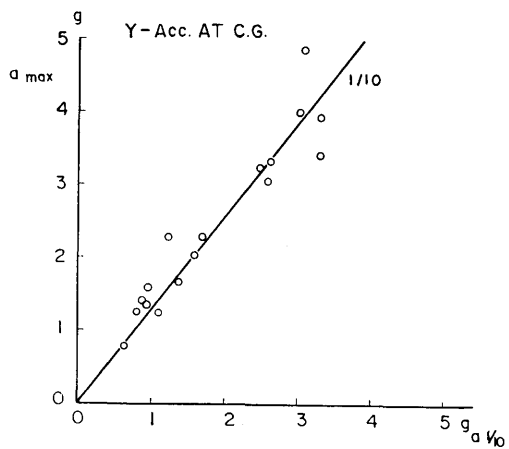


Fig. A 4.12

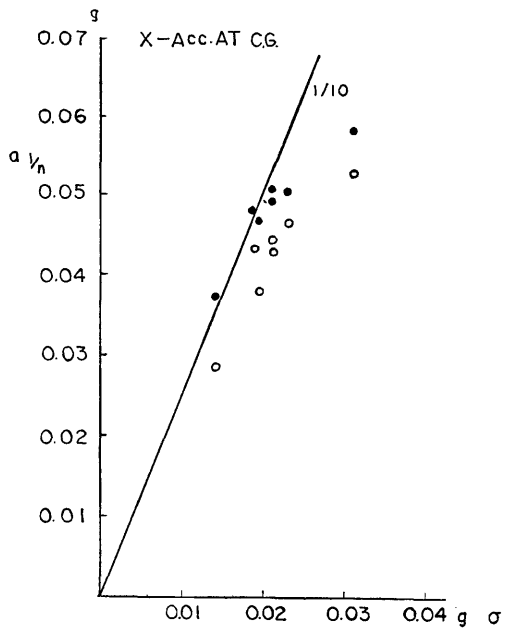


Fig. A 4.13

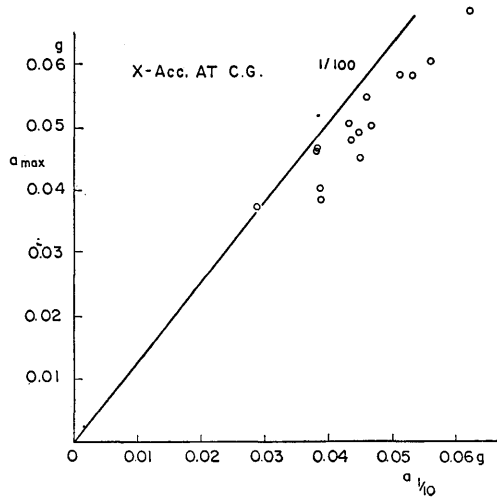


Fig. A'4.14

(5) Thrust Increase in Regular and Irregular Waves Measured and Predicted from the Model Experiment

Fig. A 5.1~Fig. A 5.8

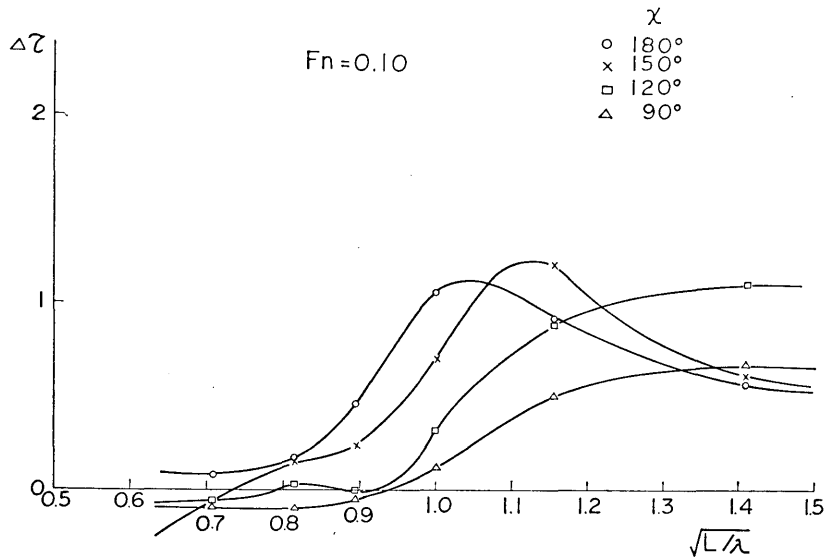


Fig. A 5.1

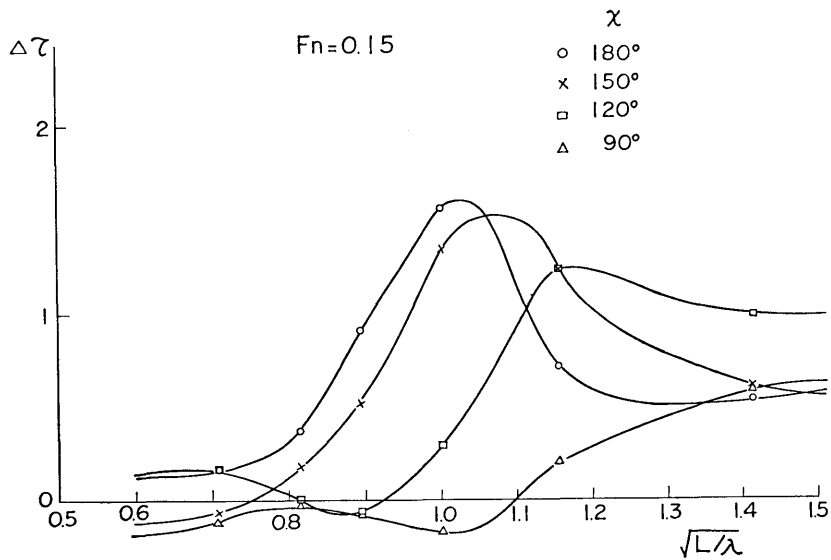


Fig. A 5.2

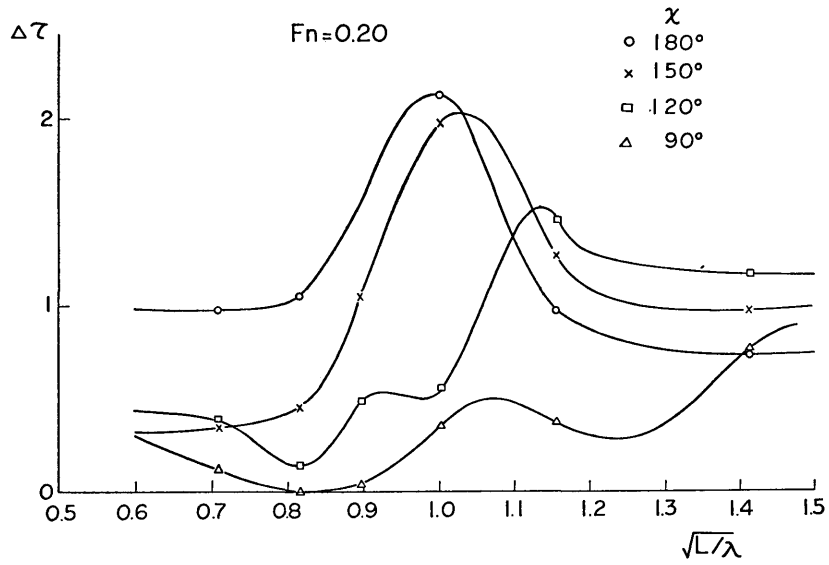


Fig. A 5.3

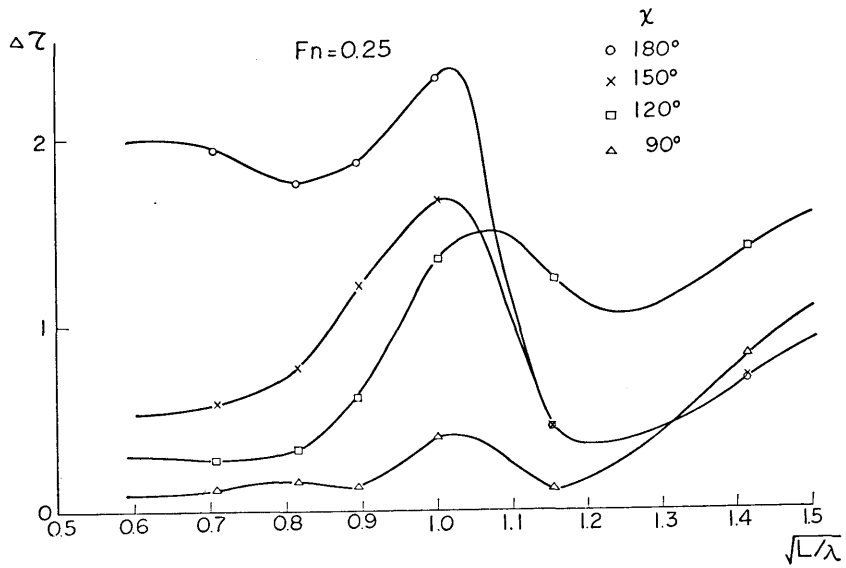


Fig. A 5.4

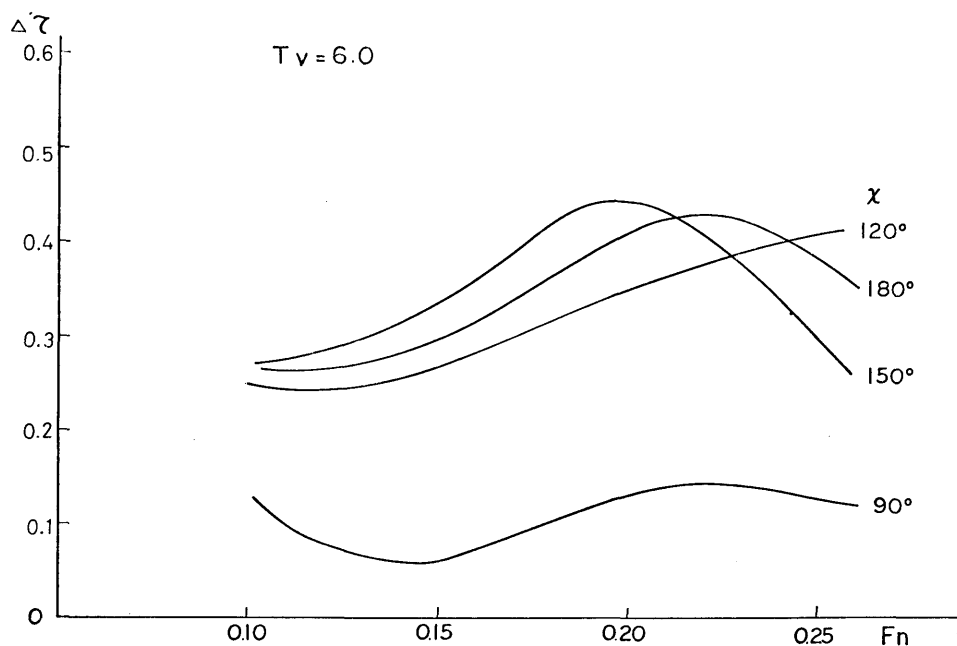


Fig. A 5.5

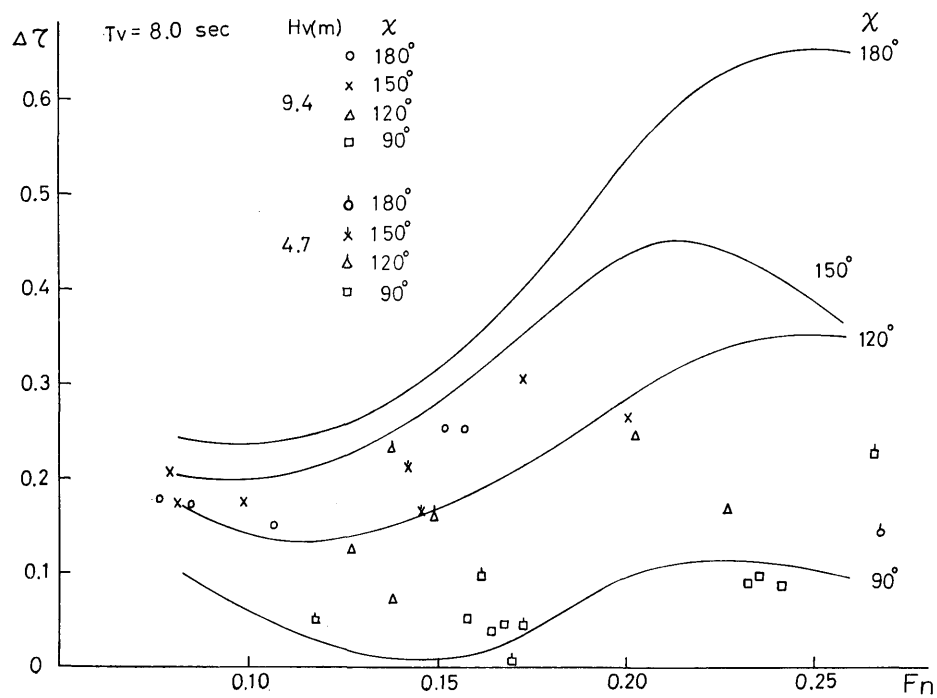


Fig. A 5.6

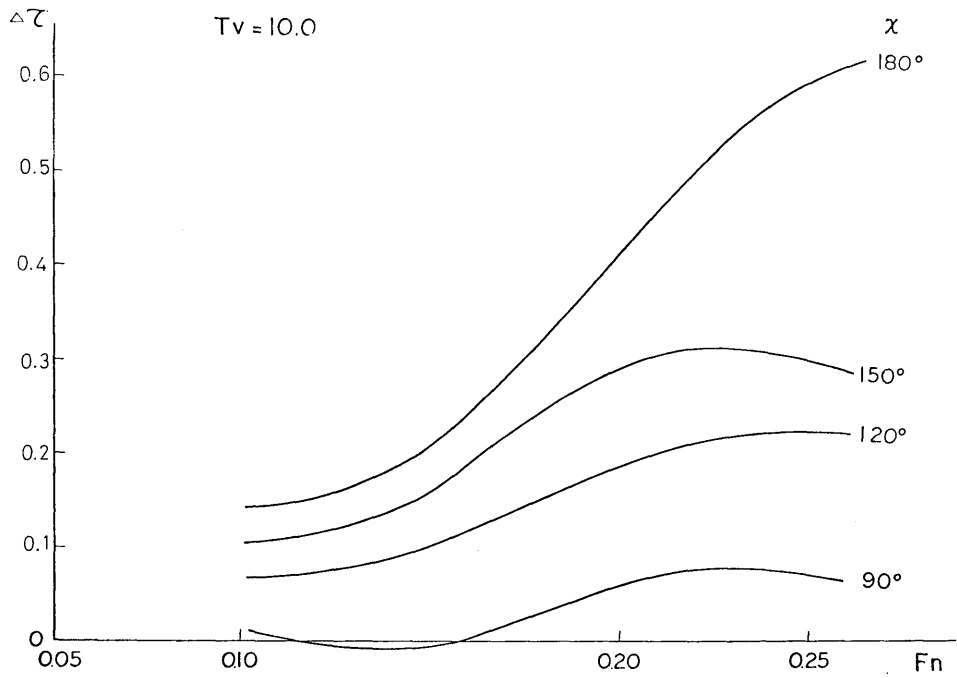


Fig. A 5.7

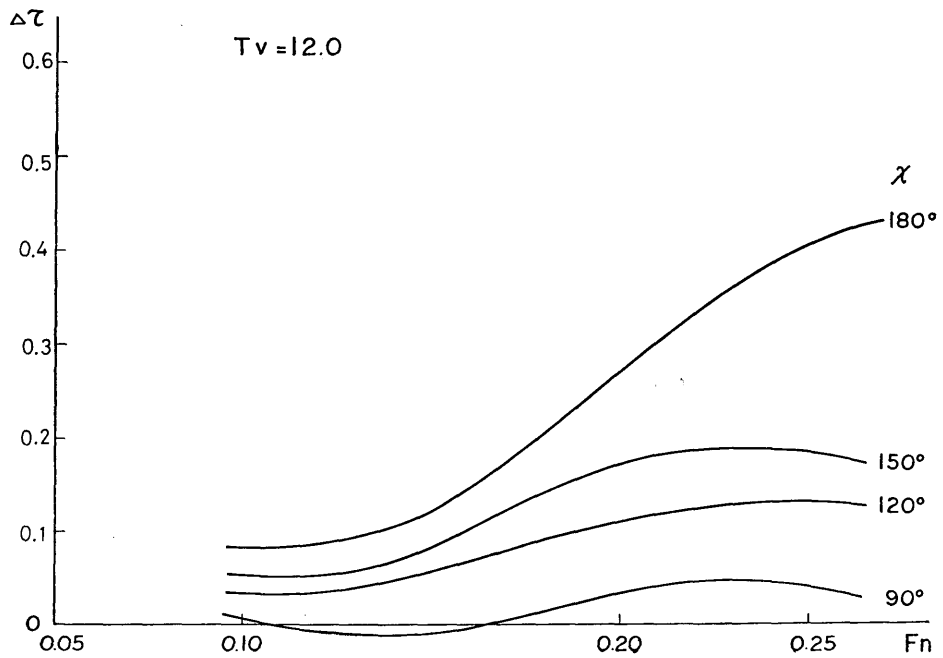


Fig. A 5.8

(6) Thrust, DHP and Speed of the Ship in Wind and Waves

Fig. A 6.1~Fig. A 6.12

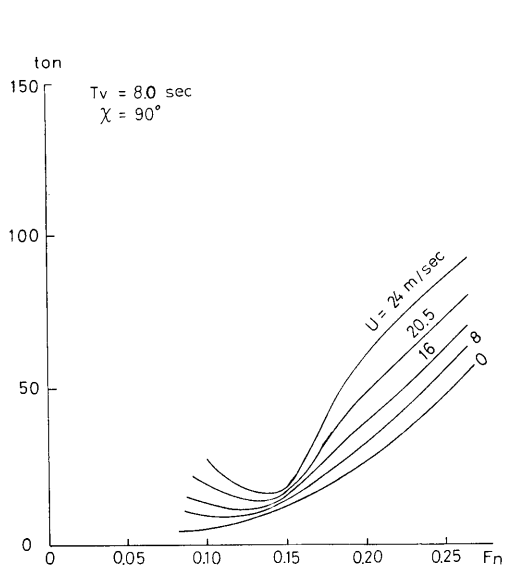


Fig. A 6.1

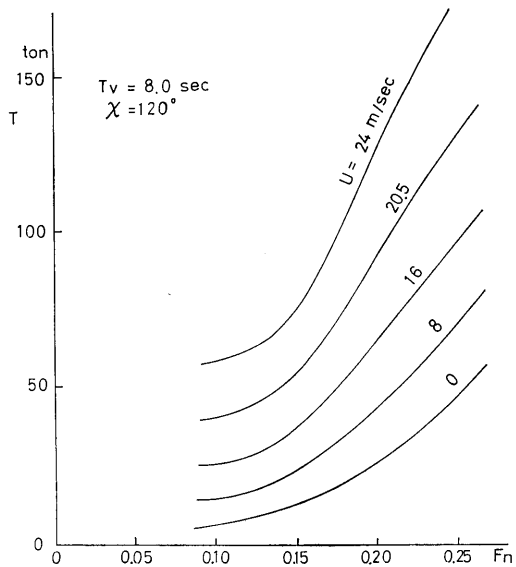


Fig. A 6.2

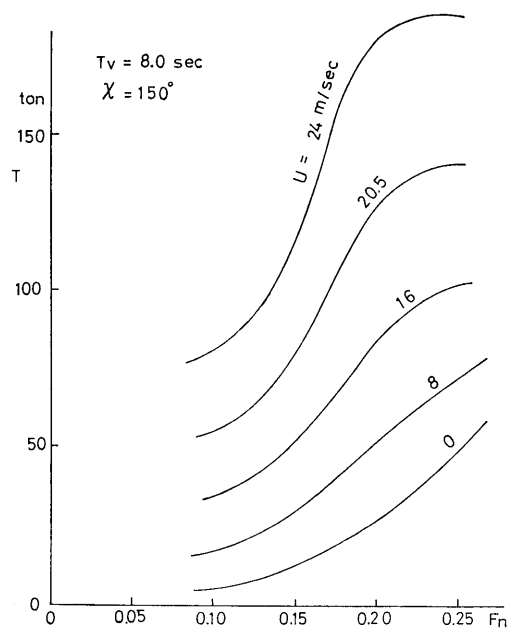


Fig. A 6.3

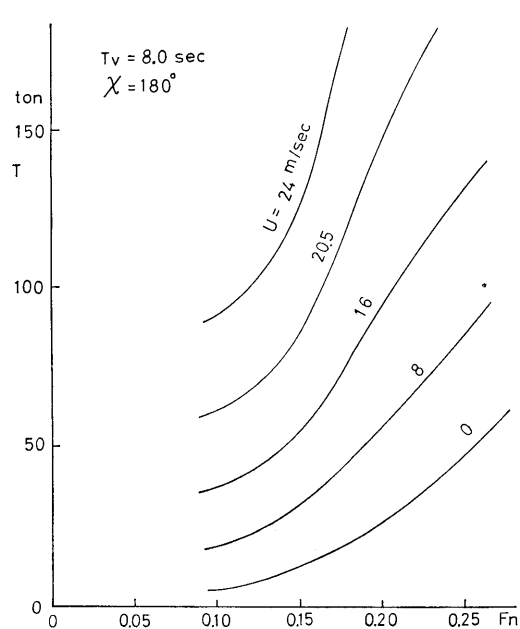


Fig. A 6.4

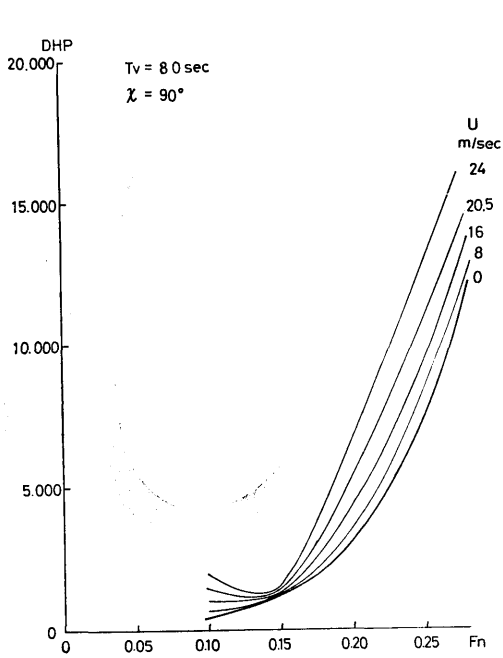


Fig. A 6.5

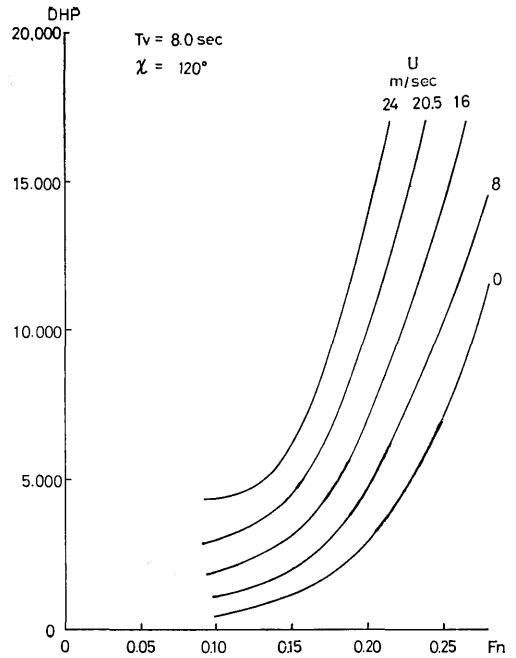


Fig. A 6.6

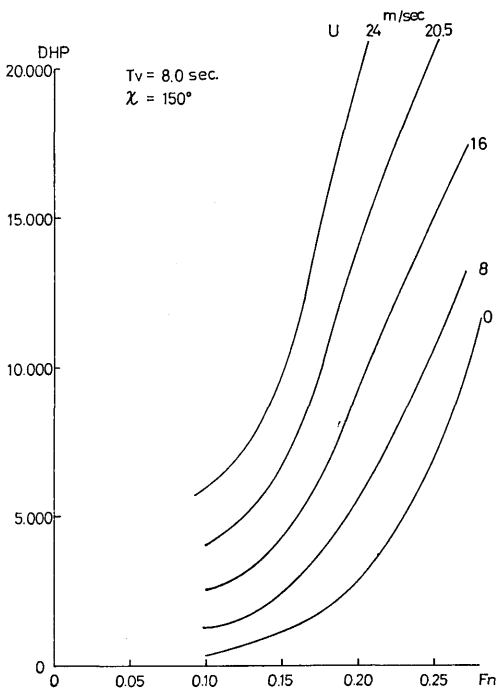


Fig. A 6.7

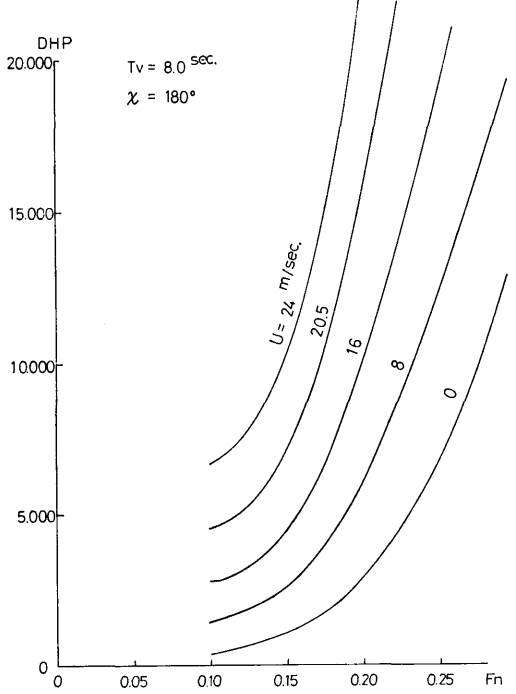


Fig. A 6.8

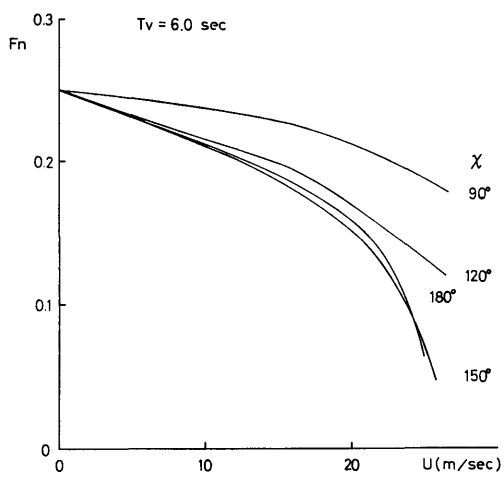


Fig. A 6.9

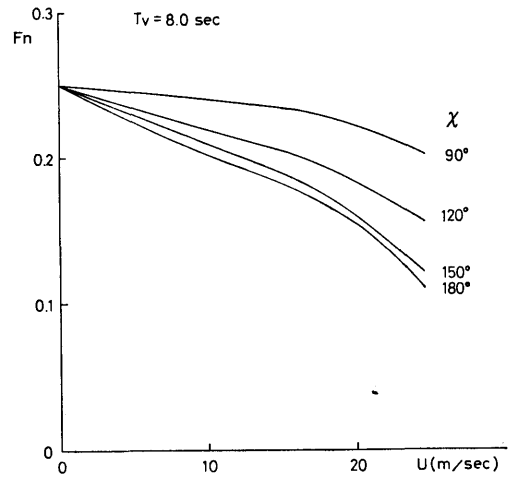


Fig. A 6.10

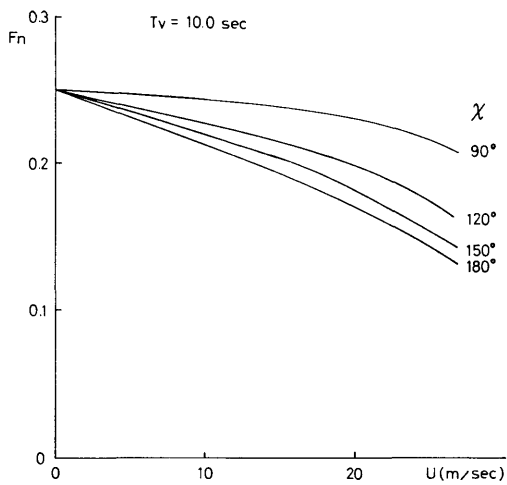


Fig. A 6.11

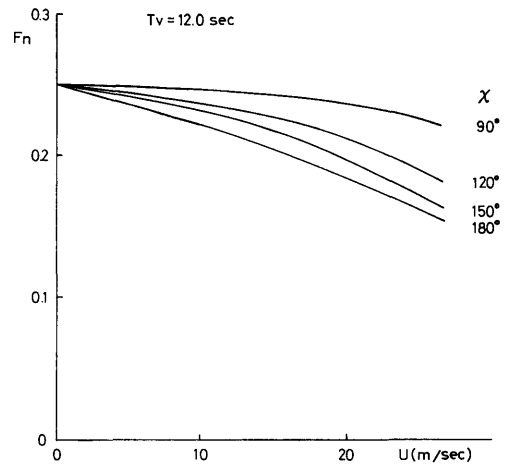


Fig. A 6.12