

(昭和 32 年 7 月 20 日造船協会講演会に於て講演)

不規則な波及び風の中における船の 横揺れについて

正員 加藤 弘* 正員 元良 誠三**
 正員 石川克比古*** 正員 笠原 協之***
 正員 若松 義郎**** 正員 村上 俊一*****

On the Rolling of Ships in irregular Seas and irregular Wind

By Hiroshi Kato, *Member*
 Seizo Matora, *Member*
 Katsuhiko Ishikawa, *Member*
 Kyoshi Kasahara, *Member*
 Yoshio Wakamatsu, *Member*
 and Toshikazu Murakami, *Member*

Abstract

Recently, many successful trials for the statistical analysis of irregular ocean waves have been made by oceanographers, such as Pierson, Longuet-Higgins, Neumann and others, while the statistical investigations of the ship motion in irregular seaway have been promoted concurrently under the cooperation of oceanographers and naval architects.

Many brilliant results were produced by this cooperation, for instance the papers by Pierson and St. Denis, Lewis and others.

The authors have been working on the same problem by model experiments at a seashore, where we built a tower to get a stable platform.

From the platform, we measured the waves by a wave recorder, the ship's rolling angle by a pantagraph and the wind pressure by a wind pressure gauge simultaneously, changing the ship's encounter angle and its natural rolling period.

Having applied the statistical analysis to the records obtained, we found that the statistical method given by Longuet-Higgins, Pierson and others gave the outstanding results.

Being encouraged by these results, we have tried to extend the same method to a case where irregular wind pressure as well as irregular wave moment affect a ship.

原稿受付・1月10日

* 東京大学教授

** 東京大学助教授

*** 三菱日本重工

**** 東京大学大学院

***** 防衛庁技研

諸 言

最近不規則な波の統計的な解析が, Pierson [1], Longuet-Higgins [2], Neumann [3] 等の海洋学者によつて目覚ましい発展を見せ, その中での船の運動についても海洋学者と造船学者とが協力して驚くべき進歩を見せており, その中でも Pierson 及び St. Denis [4], Lewis [5] の論文, 或いは "Ships and Waves" [6] の中の諸論文は有名である。

又日本でもこれらと別箇に山内氏 [7] が時系列論的な解析を發展させている。

本論文ではこれらの統計的な解析を実際に測定した値につき適用してその精度, 或いは妥当性を検討する為に海岸に測定台を設けて風で実際に海面に生じた不規則な波の中で模型を動揺せしめ, 波高及び船の動揺を風と共に精密に測定して, 得られた記録に統計的な解析を行った。

又波と共に不規則な風による風圧偶力が共存する場合にも拡張して理論値及び実験値を比較した。

第1章 船体横揺れの線型理論

1.1 波浪中の線型理論

不規則な波の中の船体横揺れの運動方程式は

$$I \frac{d\dot{\theta}}{dt} = F_1(t) - N\dot{\theta} - Mgm\theta \quad (1.1)$$

ここに $F_1(t)$ = 波による不規則な強制偶力

N = 抵抗係数 (線型化せるもの)

m = GM

変形して

$$d\dot{\theta} = (F_1/I)dt - \frac{1}{I}(N\dot{\theta} + M \cdot g \cdot m \cdot \theta)dt = d\dot{\theta}_1 + d\dot{\theta}_2 \quad (1.2)$$

この式の $d\dot{\theta}_1$ は波の強制横揺れ外力による速度の変化を表わし, $d\dot{\theta}_2$ は船が t なる時刻に存在する $\dot{\theta}$ 及び θ による速度の変化, 謂わば船の履歴による速度の変化を表わしている。

今 $t=0$ において, 船に $(F_1/I)dt = d\dot{\theta} = 1$ なる impulsive force を与えたとき, 船のその後の自由動揺を $\Theta(t)$ とする。簡単のために

$$\begin{aligned} F_1/I &= f_1(t) & 0 \leq t \\ &= 0 & 0 > t \end{aligned}$$

とし, 又 $t=0$ で $\theta = \dot{\theta} = 0$ とすれば,

$$\theta(t) = \int_0^t f_1(\tau) \Theta(t-\tau) d\tau = \int_0^\infty f_1(\tau) \Theta(t-\tau) d\tau \quad (1.3)$$

(1.3) 式は強制動揺と自由動揺の両者を含んだものである。これを次々に Fourier 変換すると,

$$\theta(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [f_1(\omega)] [\Theta(\omega)] e^{i\omega t} d\omega \quad (1.4)$$

但し $[f_1(\omega)] = f_1(t)$ の frequency spectrum

$[\Theta(\omega)] = \Theta(t)$ の " "

一方 $\theta(t)$ を直接 Fourier 変換した形で表わすと,

$$\theta(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [\theta(\omega)] e^{i\omega t} d\omega \quad (1.5)$$

従つて $[\theta(\omega)] = [f_1(\omega)] \cdot [\Theta(\omega)]$ (1.6)

観測時間を T とすれば, (1.6) 式は次の様な energy spectrum の形で表わすことが出来る。

$$\frac{2}{\pi T} |[\theta(\omega)]|^2 = \frac{2}{\pi T} |[f_1(\omega)]|^2 \cdot |[\Theta(\omega)]|^2 \quad (1.7)$$

波の強制横揺れ偶力 $F_1(t)$ は, 波傾斜を $\Phi(t)$ とすれば,

$$F_1(t) = \gamma \cdot M \cdot g \cdot m \cdot \Phi(t) \quad (1.8)$$

ここに γ = 有効波傾斜係数

故に
$$[f_1(\omega)] = \frac{\gamma M m}{I} \omega^2 |r(\omega)| \quad (1.9)$$

但し $[r(\omega)]$ は一定点における海面の上下を表わす函数の frequency spectrum*。

(1.9) 式を (1.7) 式に代入することにより

$$\frac{2}{\pi T} |[\theta(\omega)]|^2 = \frac{2}{\pi T} |[r(\omega)]|^2 \cdot \left\{ \frac{\gamma M \cdot m}{I} \omega^2 \cdot |[\Theta(\omega)]| \right\}^2 \quad (1.10)$$

ここに

$$\frac{2}{\pi T} |[\theta(\omega)]|^2 = \text{船体横揺れ角の energy spectrum}$$

$$\frac{2}{\pi T} |[r(\omega)]|^2 = \text{波の " "}$$

又 $\left\{ \frac{\gamma \cdot M \cdot m}{I} \omega^2 |[\Theta(\omega)]| \right\}$ は response amplitude operator と呼ばれ

*
$$r(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} r(t) e^{-i\omega t} dt$$

普通 $[A(\omega)]$ で表わされる。

結局
$$\frac{2}{\pi T} |[\theta(\omega)]|^2 = [A(\omega)]^2 \frac{2}{\pi T} |[r(\omega)]|^2 \quad (1.11)$$

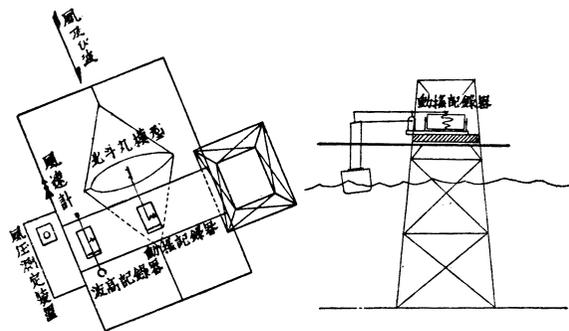
即ち波の energy spectrum に船の横揺れ角の response amplitude operator の 2 乗を掛ければ、その波の中の船の横揺れ角の energy spectrum が求められる。

尚規則波の中の船の同調曲線の magnification factor を $\mu = \theta/\Phi$ とすれば response amplitude operator は次の式の如くなる。

$$[A(\omega)] = \frac{\omega^2}{g} \cdot \mu \quad (1.12)$$

第 2 章 実験装置及び横型

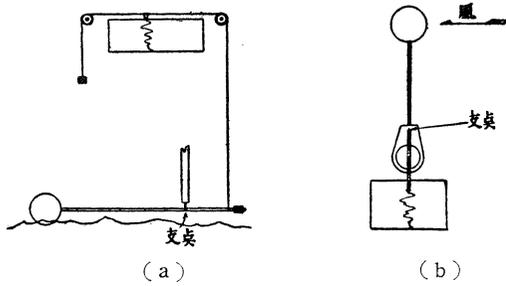
この実験の目的は、実際に風で海面に起きた風波の中での船の動揺を波と共に正確に計測して、第 1 章に述べた方法の精度或は妥当性を調べるにある。従つて、理想的には一定の風速で飽和した波につき、十分に深い所で計測を行うのがよいが、大洋中では拠点がなく、従つて波の記録を正確に取ることが難かしいので、神奈川県葉山一色海岸で、水深 3~4m の所に第 1 図の如き台を作り計測を行つた。



第 1 図

船の動揺角度はパンタグラフにより計測したが、潮の干満を考慮してロッドの長さの調節を行える様にした外、うねりの為に Scale out しない様に工夫してある。

波は浮子の上下を紐及び滑車を経てペンで画かせた。(第 2 図) (a) 又風は後述の様に風圧が必要なので、風速を測らず、第 2 図 (b) の図く振子式の動揺計を利用して風圧を直接測る様にした。振子の自己周期は約 0.5 秒である。



第 2 図

尚この外、風車式の風速計で平均風速を測定し、模型及び目盛板を 16 ミリ映画にて撮影して船の運動及び波の模様を記録した。

模型は航海訓練所の練習船北斗丸の 1/34.25 (長さ 2m) の木製模型を用い、方位及び大体の位置を保持する為に第 1 図の様に菱形に張つた紐で支え、紐の四つの端は夫々バネを介して台に固定した。

尚この船の方位は風及び波に対して任意の方向に変えられる様にし、斜め波における横揺れ及び縦揺れの計測を行う筈であつたが、天候の為そこ迄実験することが出来なかつた。

模型の要目は第 1 表に示す通りである。

第 2 表

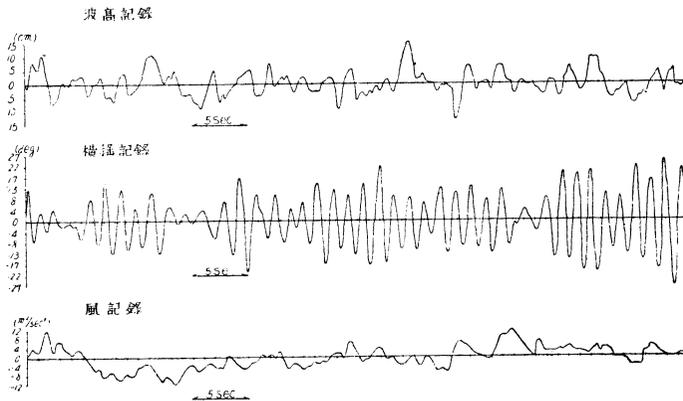
第 1 表			第 2 表	
	実 船	模 型 船	重錘位置 (番号)	模型の周期
排水量	1,656 t	40.211 kg	0	1.15 sec
KG	4.21 m	12.29 cm (基準)	1	1.20 "
GM	0.57 m	1.66 cm (")	2	1.25 "
周 期	11.3 sec	1.93 sec (")	3	1.32 "
前 部	3.31 m	9.66 cm	4	1.42 "
吃 水	4.07	11.88 "	5	1.55 "
後 部	3.69	10.77 "	6	1.70 "
平 均	0.76	2.22 "	7	1.85 "
ト リ ム			8	2.09 "
			9	2.40 "

尚不規則な波の中での船の同調曲線を求める際に、波の方の周期は仲々注文通りに変えられないので、逆に波周期を一定とし、船の周期を変化させて同調曲線を求めることとし、その為に手早く船の KG を変化させて船の固有周期を変化させ得る様にした。その変化の種類は第 2 表の如くである。

第 3 章 実験結果及び理論値との比較

第 3 図には得られた波高、横揺れ角及び風圧 (風速の 2 乗の変動) の記録を示してある。

実験を行つた当時の波は風速 4m 程度の風で起きた風波で、これに多少沖のうねりが混合していた様である。



第 3 図

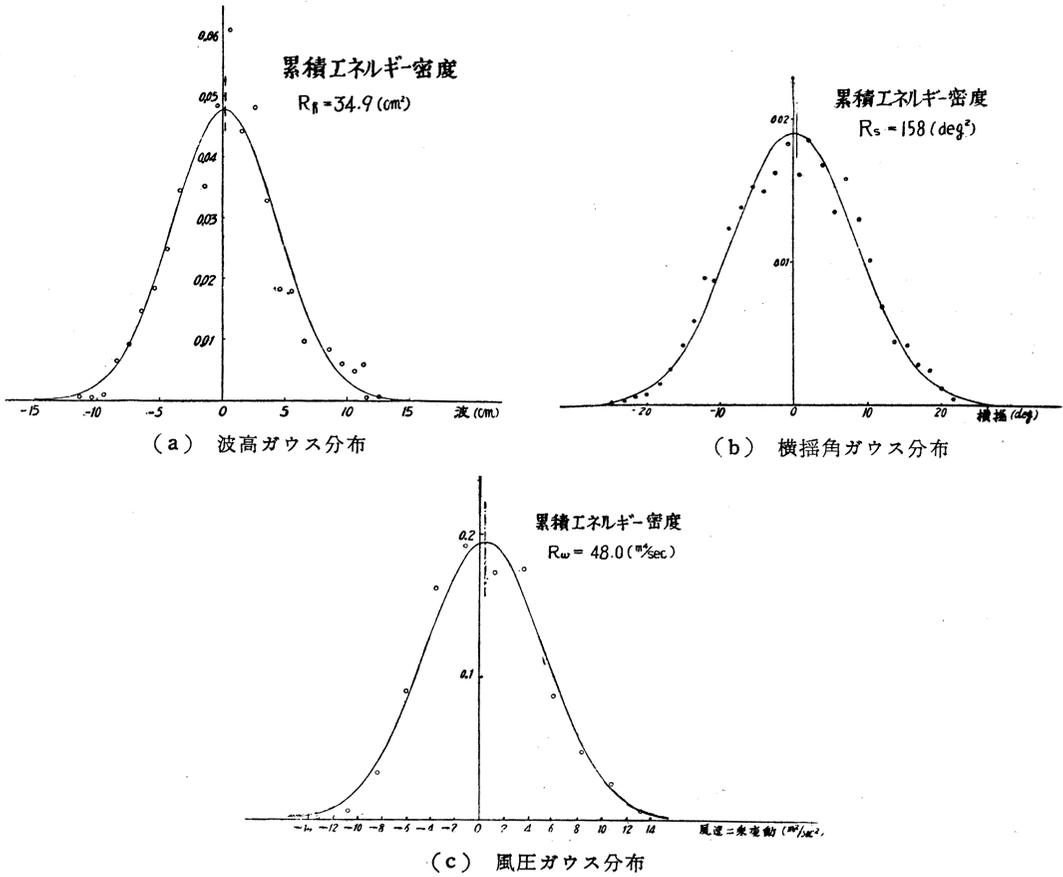
3.1 Gauss 分布

波及びその中の横揺れを統計的に取扱う為の前提として、波高又は横揺れの振幅が Gauss 分布することが必要である。

即ち第 4 図に於て、基線に平行な線を引き、その線が記録を切る時間 (図の太線の部分) の観測時間に対する比を基線からの距離を base として plot した時にそれが Gauss 分布をすることが必要である。



第 4 図



第 5 図

第 5 図 (a) は波の記録, (b) は船の横揺角度, (c) は風圧の記録について同じ様な分布を求めたもので, 略々 Gauss 分布をしていることが認められる。

尚この分布の標準偏差の 2 乗の 2 倍は累積エネルギー密度に等しい。

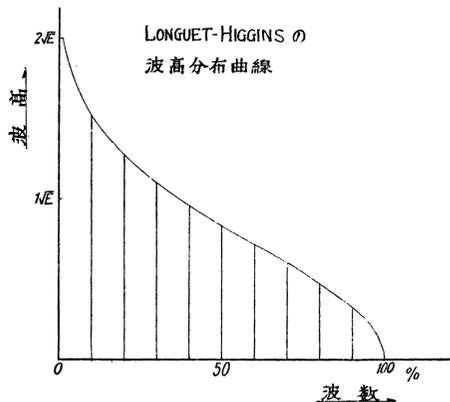
3.2 振幅分布と平均値の関係

Longuet-Higgins [2] によれば, 狭帯域のスペクトル分布をなす波系の振幅を高い方から順に並べると, その分布は累積エネルギー密度 R と密接な関係があり第 3 表の如くなる。

0	$\sim 0.32\sqrt{R}$	の範囲	10%
$0.32\sqrt{R}$	$\sim 0.47\sqrt{R}$	"	"
$0.47\sqrt{R}$	$\sim 0.60\sqrt{R}$	"	"
$0.60\sqrt{R}$	$\sim 0.71\sqrt{R}$	"	"
$0.71\sqrt{R}$	$\sim 0.83\sqrt{R}$	"	"
$0.83\sqrt{R}$	$\sim 0.96\sqrt{R}$	"	"
$0.96\sqrt{R}$	$\sim 1.10\sqrt{R}$	"	"
$1.10\sqrt{R}$	$\sim 1.27\sqrt{R}$	"	"
$1.27\sqrt{R}$	$\sim 1.52\sqrt{R}$	"	"
$1.52\sqrt{R}$	以上	"	"

これを図示すると第 6 図の如くなる。

これに対し計測した波高, 横揺角及び風圧の変動振幅の分布を求めると, 第 7 図 (a), (b), (c) の様になり, かなりの一致が見られる。



第 6 図

尚図中の点線は第5図の累積エネルギー密度を用いて第3表より計算した理論的な分布である。
次に Longuet-Higgins によれば、振幅の平均値及び最大振幅の間には次の様な関係がある。

第 4 表

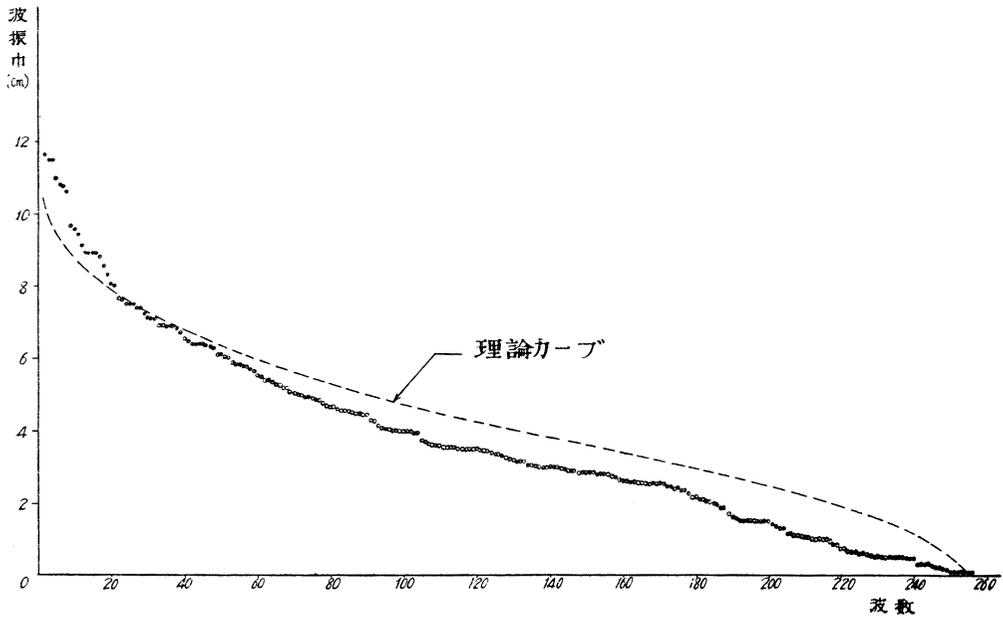
高い方から1/10の波の平均	$\bar{h}_{1/10} = 1.80\sqrt{R}$
高い方から 1/3 の平均 (有義波高)	$\bar{h}_{1/3} = 1.42\sqrt{R}$
算術平均	$\bar{h} = 0.886\sqrt{R}$
最も頻繁に来る波	$= 0.707\sqrt{R}$

又最大振幅については通過した波数(揺れ角)によつて第8図の様になる。

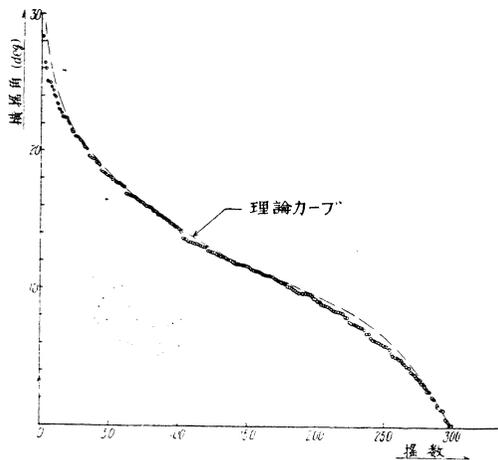
今これを検証する為に、実測された波高及び船の横揺振幅について、平均値を求め、一方その累積エネルギー密度を用いて第4表及び第8図より平均値と最大

値を求めて比較すると第5表の如く極めてよく一致する。

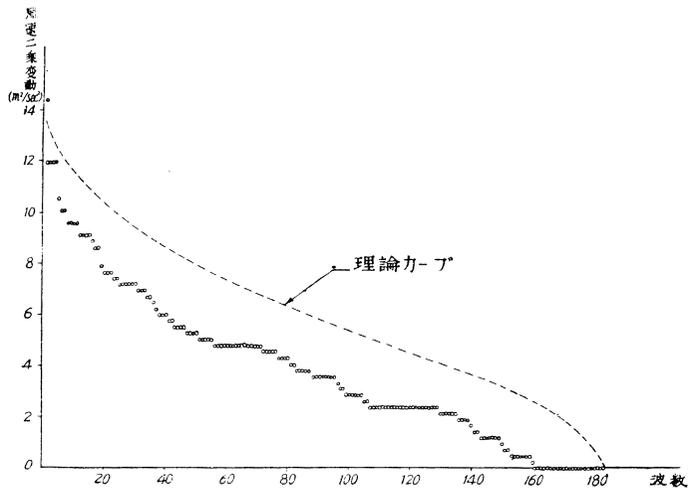
このことから Longuet-Higgins の与えた結果は狭帯域という制限を外しても尚かなりよく実際と合うことが判る。



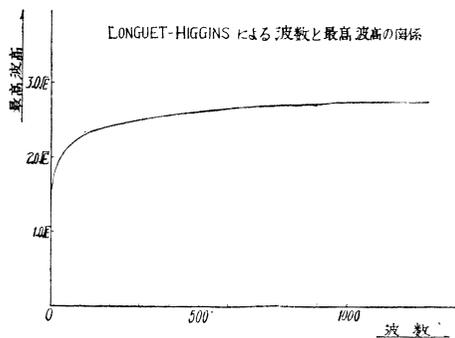
第 7 図 (a) 波 振 幅 分 布



第 7 図 (b) 横 揺 角 分 布



第 7 図 (c) 風圧分布



第 8 図

第 5 表

実験番号	No 2		No 6	
	実測値	累積エネルギーより算出せるもの	実測値	累積エネルギーより算出せるもの
波 \bar{h}_1/s	139mm	139mm	136mm	150mm
$\bar{h}^3/10$	193 "	177 "	180 "	192 "
\bar{h}	74 "	87 "	81 "	94 "
高 $h_{max}(300波中)$	310 "	243 "	275 "	265 "
横 θ_1/s	17.8°	17.7°	18.9°	18.7°
$\theta_1/10$	22.1°	22.5°	23.2°	23.8°
揺 θ	11.3°	11.1°	12.0°	11.7°
$\theta_{max}(300揺れ中)$	26.9°	31.3°	28.4°	33.3°

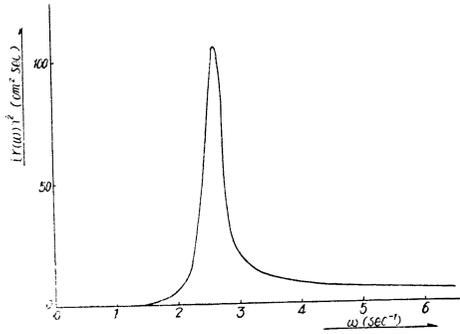
3.3 波のエネルギースペクトル

波のエネルギースペクトルを求めるには自己相関関数を Fourier 変換する方法と、記録を直接 Fourier 解析機にかけて求める方法とがあるが、今回は数例について両方を試みた結果、労力の少ない解析機によることにした。

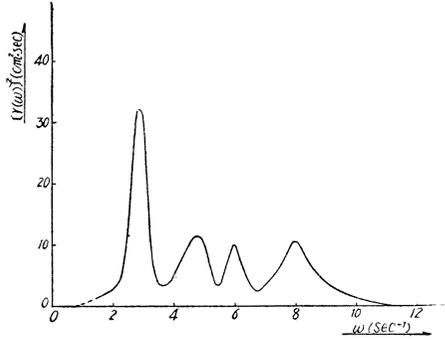
用いた Fourier 解析機は東大地震研究所高橋研究室のものである。

この様にして求めた波のエネルギースペクトルの数例を第 9 図～第 13 図に示してある。

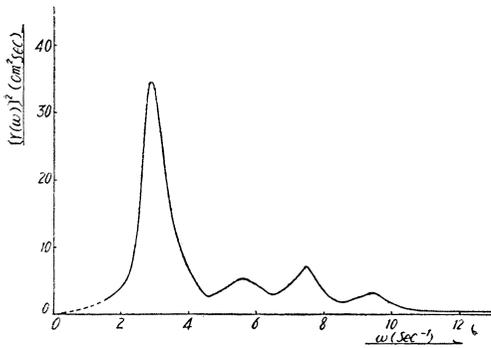
発生期の風波とうねりが混つているので形は複雑である。



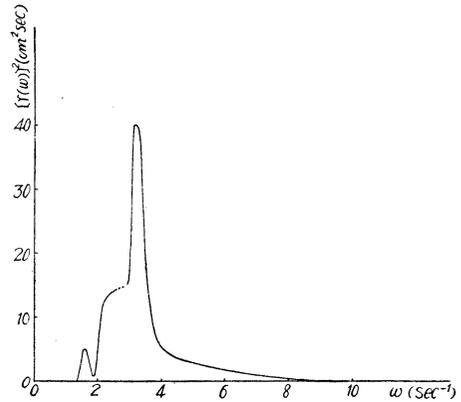
第 9 図



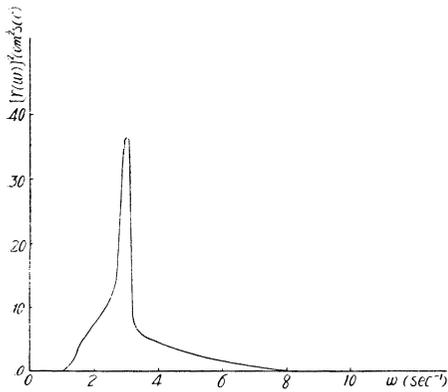
第 10 図



第 11 図



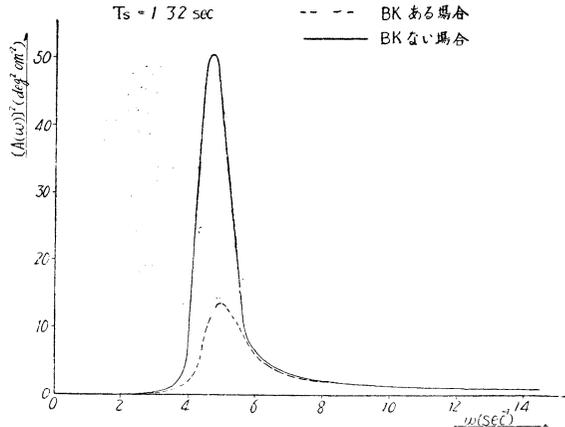
第 12 図



第 13 図

船の Response Amp Operator

$T_s = 1.32 \text{ sec}$



第 14 図

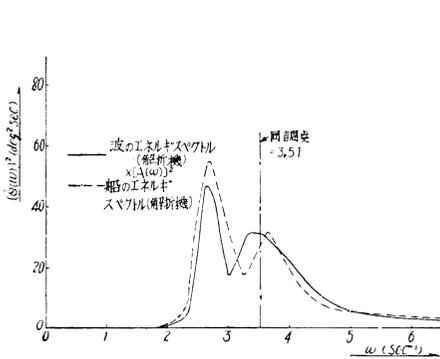
3.4 波に対する response amplitude operator

海岸の実験に用いた模型をその盛東京大学動揺水槽で種々の周期の規則波中で揺らせて同調曲線を求め、それより response amplitude operator $[A(\omega)]$ を次の式により求めた。

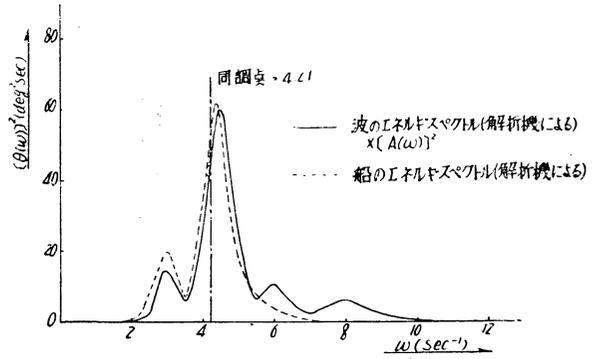
$$[A(\omega)] = \frac{\gamma \omega^2}{g} \frac{\sqrt{1 + \left\{ \frac{2(a+b \frac{\omega}{\lambda_s} \theta_{a0})}{\pi} \cdot \frac{\omega}{\lambda_s} \right\}^2}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\lambda_s^2}\right)^2 + \left\{ \frac{2(a+b \frac{\omega}{\lambda_s} \theta_{a0})}{\pi} \cdot \frac{\omega}{\lambda_s} \right\}^2}}, \quad \lambda_s = \frac{2\pi}{T_s} \quad (31)$$

模型はビルジキールの有る場合と、無い場合の両方で実験を行つて第 14 図 (1 例) の如き $[A(\omega)]^2$ を得た。

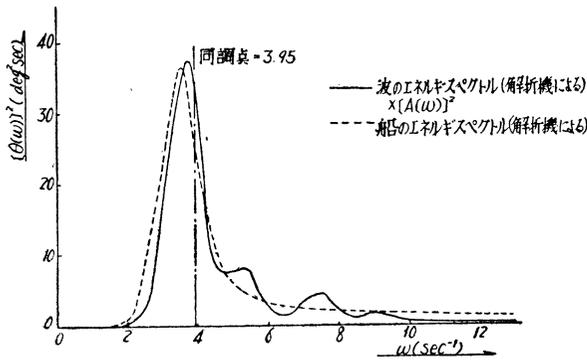
3.5 実測された船の横揺のスペクトルと計算値の比較



第 15 図



第 16 図



第 17 図

第 1 章に述べた如く、 $[r(\omega)]^2$ というエネルギー・スペクトルを有する波の中の船の運動はこれに response amplitude operator の 2 乗 $[A(\omega)]^2$ を掛けて求められる (第 1-10 式)

そこで 3-3 の第 9 図～第 13 図に示す波のスペクトルに、各場合に対応する operator を掛けて船の横揺れのスペクトルを求めると第 15 図～第 19 図実線の如くなる。図中第 15 図～第 17 図はビルジキールのある場合、第 18 図及び第 19 図はビルジキールの

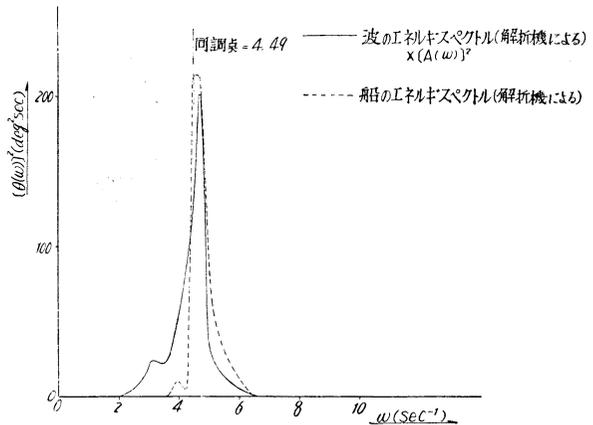
無い場合である。

一方各実験番号に対して、実測された船の横揺れの記録を直接 Fourier 解析機にかけて横揺振幅のエネルギー・スペクトルを求めると第 15 図～第 19 図の点線の如くなり両者は極めてよく一致している。

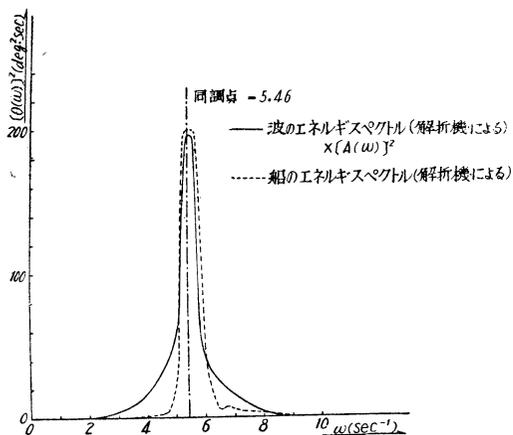
船の横揺のスペクトルが判ればその面積—果積エネルギー密度—より第 4 表及び第 8 図によつて、平均の振幅、及び最大の振幅を推定することが出来る。

第 6 表は、第 15 図～第 19 図の実測されたスペクトル (点線) 及び計算により求められたスペクトル (実線) の両方から果積エネルギー密度を求めて平均角度、及び最大角度を求めたもので、両者はかなりよく一致している。

このことから、船の遭遇する荒天の波のスペクトルが判れば、それよりその中での船の運動が規則波中の特性を用いて相当の精度を以て予想され得ることが判る。海洋に生じる波のスペクトルは Neumann [3] により詳しく研究されて、大体一つの型になることが明かにされたが、我国としては台風の周辺或いは中心附近の波のスペクトル等身近に迫る問題を一日も早く解決する必要がある。



第 18 図



第 19 図

第 4 章 不規則な波の中の同調曲線

規則的な波の中では、船の周波数応答曲線（同調曲線）は、同調率附近で sharp な山を生じるが、不規則な波の中ではこの同調曲線はどうかを実験及び計算により求めた。

即ち風速及び波のあまり変化しない期間を選び、船の固有週期を重錘を上下することによって手早く変化させて横揺角度を記録した。

通常は船の周期を一定にし、これに周期の異つた波を当てることによって同調率を変えて同調曲線を求めるが、今は逆に一定周期の波に、周期の異なる船を遭遇せしめて同調率を変化させたわけである。

船の周期の変化は第 2 表に示す如く 1.15 秒から 2.4 秒迄 10 段階であり、理想から云うと、この中間 1.5 秒位の周期の波の中で横揺れさせた記録が望ましいのであるが今回は天候の具合で平均周期約 0.9 秒の波についてしか実験が出来ず、従つて同調よりも船の周期が短い方の記録が得られなかつた。

4.1 実験値

第 20 図は実験の結果で、sharp な山は水槽の規則波の中での同調曲線を示し、図中の plot が不規則な波の中の実測値より求めた平均横揺角度である。

又図中 $\bar{\theta}_1, \bar{\theta}^{1/3}, \bar{\theta}^{1/10}, \bar{\theta}_{1,000}$ 等は実験値を基として第 4 表の關係を用いて計算した諸平均値及び 1,000 揺中の最大値で、この種類の不規則波では 1000 回揺れでも尚規則波中の同調角度には達しないことを示している。

一般的な傾向としては不規則中では規則波中に較べて同調の山は著しく下り、同調以外の所では逆に規則波中よりも大きくゆれることが判る。

4.2 計算値

次に実験値と対比する為に次の様な計算を行つた。

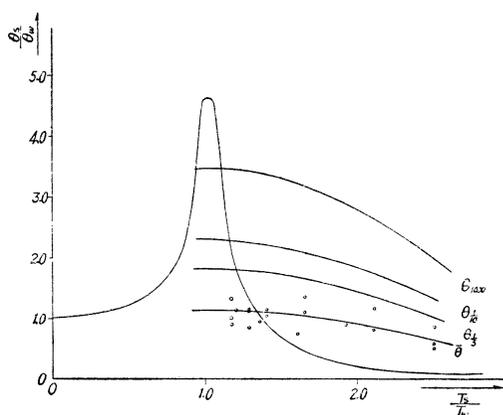
即ち先ず周期 0.95 から 2.4 秒迄の 11 状態の模型

に種々の周期の規則波を当てて実験を行い、各々の状態に対する 11 個の同調曲線を求めて (1.12) 式によつてこれより各状態の response amplitude operator を求めて第 21 図を得た。

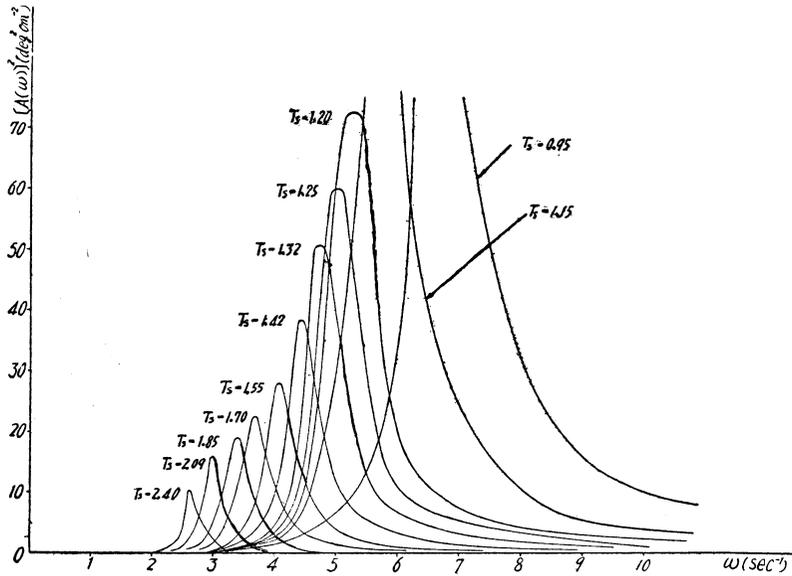
この response amp. operator と実験時の波のスペクトルとを掛け合せると各状態の場合の横揺のエネルギー

第 6 表

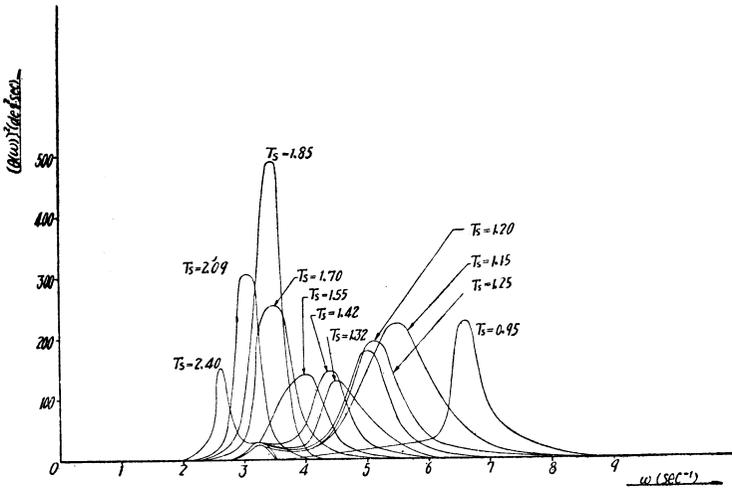
	実測値	計算値 (波のスペクトル × R.A.O.)	
第 17 図	$\theta_{\frac{1}{3}}$	12.4°	13.5°
	$\theta_{\frac{1}{10}}$	—	17.1°
	$\bar{\theta}$	7.9°	8.4°
第 16 図	$\theta_{\frac{1}{3}}$	10.9°	11.3°
	$\theta_{\frac{1}{10}}$	—	14.4°
	$\bar{\theta}$	7.3°	7.1°
第 15 図	$\theta_{\frac{1}{3}}$	12.7°	11.6°
	$\theta_{\frac{1}{10}}$	—	14.7°
	$\bar{\theta}$	7.5°	7.3°
第 18 図	$\theta_{\frac{1}{3}}$	17.8°	18.3°
	$\theta_{\frac{1}{10}}$	22.1°	23.2°
	$\bar{\theta}$	11.3°	11.4°
第 17 図	$\theta_{\frac{1}{3}}$	18.9°	20.6°
	$\theta_{\frac{1}{10}}$	23.2°	26.0°
	$\bar{\theta}$	12.0°	12.8°



第 20 図 規則波、不規則波中の船の同調曲線 (観測)



第 21 図 Response Amplitude Operator 群



第 22 図 一定の波に対し船の T_s を変えて得た横揺エネルギースペクトル

スペクトルが得られる (第 22 図)。

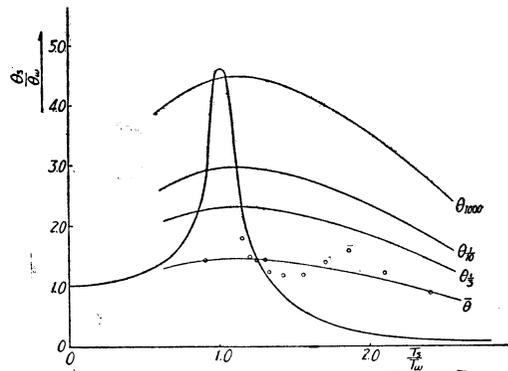
このスペクトルの面積 R は累積エネルギー密度を表わすから \sqrt{R} を求めて第 4 表の関係より平均横揺角度を、第 8 図より最大角度を求めることが出来る。

その結果が第 23 図であつて、傾向としては第 20 図の実測結果と極めてよく一致しており、数値的には多少大き目に出ている。

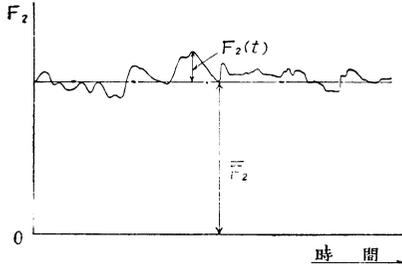
第 5 章 不規則な風の共存する場合の横揺れ

5.1 二つの不規則外力が共存する場合の横揺れ理論

第 1 章には不規則な波のみが影響する場合を考え



第 23 図 規則波、不規則波中の船の同調曲線 (計算)



第 24 図

たが今度はこれに不規則な風が加わった場合を考えて見る。風による傾斜偶力は風速の2乗に比例するから、今は風速の2乗の変動のみを考える。

今風圧モーメントが風の息の為に第 24 図の様に変化すると考えると、平均偶力を \bar{F}_2 、変動を $F_2(t)$ として \bar{F}_2 は単に船を一定角度傾斜させ、 $F_2(t)$ が船を動揺せしめる。

船の横揺の運動方程式は、

$$I \frac{d\theta}{dt} = \{F_1(t) + F_2(t) + \bar{F}_2\} - N\theta - M \cdot g \cdot m \cdot \theta \quad (5.1)$$

$$\theta' \equiv \theta - \bar{F}_2 / Mg \cdot m \quad (5.2)$$

として定傾斜 $\bar{F}_2 / M \cdot g \cdot m$ より測つた角度を θ' とすると

$$I \frac{d\theta'}{dt} = F_1(t) + F_2(t) - N \cdot \theta' - M \cdot g \cdot m \cdot \theta' \quad (5.3)$$

(5.3) 式は (1.1) 式の $F_1(t)$ を $F_1(t) + F_2(t)$ に置き換えたものに等しいから、 $F_2(t) / I = f_2$ とすれば全く前と同様に

$$[\theta'(\omega)] = \{[f_1(\omega)] + [f_2(\omega)]\} [\Theta(\omega)] \quad (5.4)$$

となる。従つて

$$|[\theta'(\omega)]|^2 = |[f_1(\omega)] + [f_2(\omega)]|^2 \cdot |[\Theta(\omega)]|^2 \quad (5.5)$$

が得られる。

$[f_1(\omega)]$ 及び $[f_2(\omega)]$ は夫々複素数で互いに位相差をもつて居り、この位相差によつて $|[f_1(\omega)] + [f_2(\omega)]|^2$ の値が異つて来る。

今 $f_2(t)$ が $f_1(t)$ よりも τ だけ進んでいると仮定しよう。このとき $f_1(t) + f_2(t)$ の energy spectrum は

$$\int_{-\infty}^{\infty} \{f_1(t) + f_2(t)\} e^{-i\omega t} dt = [f_1(\omega)] + e^{i\omega\tau} [f_2(\omega)] \quad (5.6)$$

となる。即ち $[f_1(\omega)]$ と $[f_2(\omega)]$ は相互に $\omega\tau$ なる位相差をもつ。

もし $f_1(t)$ と $f_2(t)$ の重畳の仕方が全く random であれば、 $[f_1(\omega)]$ と $[f_2(\omega)]$ の重なり方も全く random であつて、 $|[f_1(\omega)] + [f_2(\omega)]|^2$ は位相差 $\omega\tau$ が $0 \sim 2\pi$ の範囲についての平均値となる。即ち

$$\begin{aligned} |[f_1(\omega)] + [f_2(\omega)]|^2 &= \frac{\int_0^\pi |[f_1(\omega)] + [f_2(\omega)]|^2 d\theta}{\int_0^\pi d\theta} \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \{ |[f_1(\omega)]|^2 + |[f_2(\omega)]|^2 + 2|[f_1(\omega)][f_2(\omega)]| \cos\theta \} d\theta \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \{ |[f_1(\omega)]|^2 + |[f_2(\omega)]|^2 \} d\theta = |[f_1(\omega)]|^2 + |[f_2(\omega)]|^2 \end{aligned} \quad (5.7)$$

となり波及び風の影響は単独に加え合わせることが出来る。

結局

$$\frac{2}{\pi T} |[\theta'(\omega)]|^2 = \frac{2}{\pi T} \{ |[f_1(\omega)]|^2 + |[f_2(\omega)]|^2 \} \cdot |[\Theta(\omega)]|^2 \quad (5.8)$$

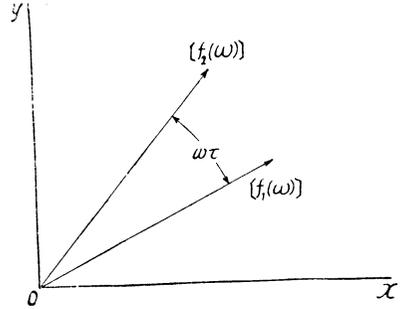
が成立する。

5.2 波と風との間に cross correlation の無い場合の計算例

今簡単な為波と風の間には cross correlation が無いとすると、船の横揺は単純に波によるものと風によるものとの和となり、波について行つたと同じ計算を風について行えばよい。

そこで今 1 例として葉山で計測した風の記録から

平均風圧 = 約 4 m/sec の定常風の風圧 平均風圧変動 = 平均風圧の約 0.25 倍



の第3図に示す例につき船の揺れを計算してみた。

先ず風圧のスペクトル分布は風速2乗の変動をとると第25図の如くなる。

これに対し船の response amplitude operator を求めると

$$I\ddot{\theta}' + K\theta' + W \cdot GM \cdot \theta' = F_2(t)$$

$$\theta' + 2\alpha\theta' + \lambda^2\theta' = \frac{F_2(t)}{I}$$

$$[\theta'(\omega)]^2 = [F_2(\omega)]^2 \left\{ \frac{\mu'}{I} \left(\frac{T_s}{2\pi} \right)^2 \right\}^2$$

$$[F_2(\omega)] = 0.78 \times 10^{-4} A h [\Delta V^2(\omega)]$$

$$\therefore [\theta'(\omega)]^2 = \left\{ \frac{0.78 \times 10^{-4} A \cdot h}{I} \left(\frac{T_s}{2\pi} \right)^2 \mu' \right\}^2 \cdot [\Delta V^2(\omega)]^2$$

$$= \left\{ \frac{0.78 \times 10^{-4} A \cdot h}{W \cdot GM} \mu' \right\}^2 \cdot [\Delta V^2(\omega)]^2$$

$$= [A_2(\omega)]^2 \cdot [\Delta V^2(\omega)]^2$$

θ' : 風による横揺角度 (rad·)

A : 風圧側面積 (m²)

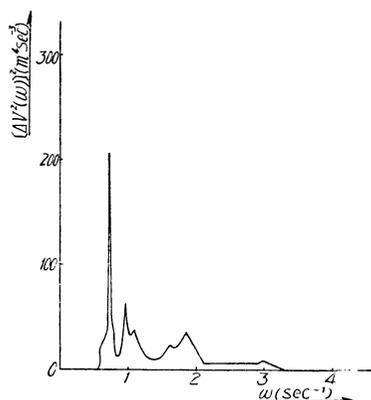
F_2 : 風圧変動モーメント

h : 風圧モーメントレバー (m)

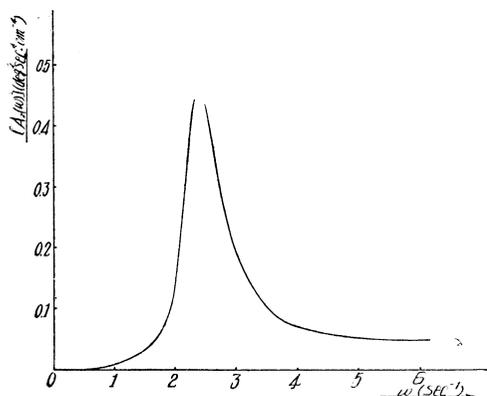
ΔV^2 : 風速2乗の変動 (m²/sec²)

μ' : mag-factor

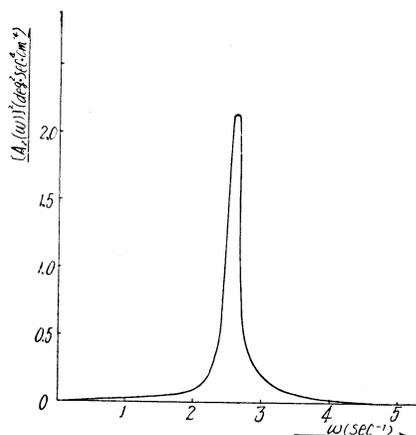
今船の固有周期約 2.5 秒の二状態につき response amp. operator を求めると第26図の如くなる。従つ



第25図 風圧変動のスペクトル



第26図(a) 風に対する Response Amplitude Operator



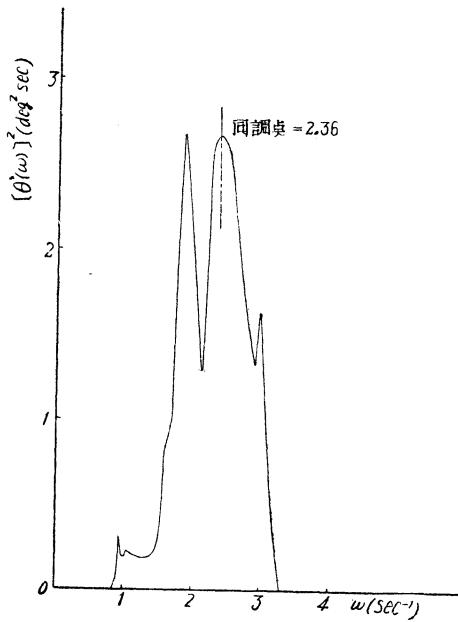
第26図(b) 風に対する Response Amplitude Operator

て第25図の $[\Delta V^2(\omega)]^2$ をこれに掛けると般の横揺れのエネルギー・スペクトルが第27図の如く得られる。これより累積エネルギー密度を求めて第4表、第8図を用いると風圧変動による横揺れ角 θ' は右表となる。尚定傾斜角は $\theta_1 = F_2/W \cdot GM = 2.8 \text{ deg}$ であり、風による傾斜は風下側に $\theta = |\theta_1 + \theta'|$ である。

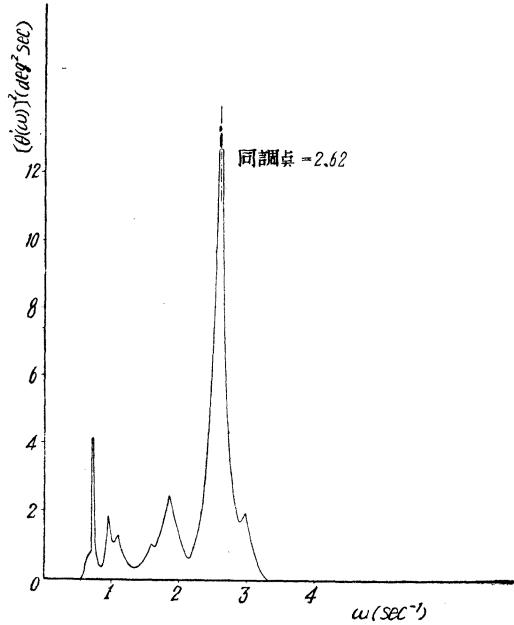
又これと従来の突風による傾斜の考え方 (dynamical stability による) とを比較して見ると、第28図

に於て θ_0 なる動揺角度で揺れていて風上に一杯傾いた時突風が吹いて ΔF_2 だけ風圧モーメントが増し、同図の斜線の面積 A と B が等しくなる角度 θ 迄船が余分に傾くと考える訳である。 \bar{F}_2 は上の計算の時と等しい

	(a) B.K. 装着	(b) B.K. なし
$\bar{\theta}'$	1.6 deg	2.1 deg
$\bar{\theta}'_{1/3}$	2.5	3.4
$\bar{\theta}'_{1/10}$	3.2	4.3
$\bar{\theta}'_{\max 20 \text{ 揺れ}}$	3.3	4.5
50	3.7	5.1
100	4.0	5.5
500	4.6	6.3
1000	4.8	6.6



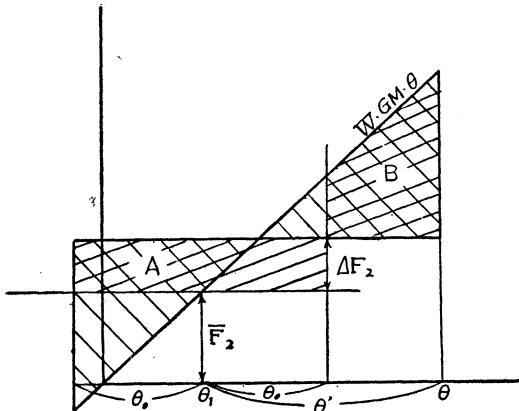
第 27 図(a) 不規則風による横揺スペクトル



第 27 図(b) 不規則風による横揺エネルギー
スペクトル

第 7 表

状 態	T_s	突風による傾斜増加 (従来の方法)	風圧変動による傾斜増加				
			平 均	最 大			
				50 挿れ	100	500	1000
a) B.K. 装着	2.66	1.4 deg	1.6 deg	3.7 deg	4.0 deg	4.6 deg	4.8 deg
b) B.K. なし	2.40	1.4	2.1	5.1	5.5	6.3	6.6



第 28 図

と見て風による傾斜増加を比べて見ると第7表に示すようになる。

これによると今回とつた方法の値に比べて従来の突風計算による傾斜増加は多少小さ目に出ている。

尤もこの計算に用いた風の変動のスペクトルは平均風速 4 m/sec 位の風に伴うものであり、船の状態も一例丈であるから、これから一般的な結論を下すのは早計であり、分後種々の気圧型式及び風速に於ける風の変動のスペクトルを求める事が必要であろう。

結 言

(1) 海上で風によつて生じた風波及びその中の船

の動揺角度は Gauss の統計分布によく一致する。

(2) 風圧の変動(風速の2乗の変動)も Gauss の統計分布に割合によく一致する。

(3) 風波の波高分布、及びその中の船の動揺の振幅分布及び平均値、最大値等は Longuet-Higgins の与えた狭帯域スペクトルの混成波の振幅分布及び平均値、最大値と極めてよく合う。

(4) 風圧変動の分布も Longuet-Higgins の分布に割合によく合うが波程でない。これは風のスペクトル分布

がかなり広帯域な為であると考えられる。

(5) 波高のスペクトルに船の Response amplitude operator を掛けて得られた船の横揺のスペクトルは極めて実測値とよく合致し、従つて振幅の平均値、最大値等もよく合致する。

このことから、規則波中の船の動揺の特性がわかっている時は、或スペクトル分布の海洋波の中でどの様な揺れ方をするか、かなりの精度で推定出来、従つて将来は種々の気圧配置による暴風の中の波のスペクトルを求めることが問題になるであろう。

(6) 風の息による船の傾斜も波と同様に取扱うことが出来、もし風と波の相互の位相が random であれば波及び風の影響は単純に各々の和で表わされる。

(7) 風圧変動による横揺れは、風のスペクトルの分布によつて非常に変化するが、将来種々の気圧型式における風の変動のスペクトルが求められれば、風及び波の影響下における船の限界傾斜角度が確率論的に求められる可能性がある。

終りに臨み、本研究は文部省総合研究“海難による研究”及び造船研究協会第 17 部会の研究の一環として行つたものであることを附記し、種々便宜と助言を賜つた東大地震研究所高橋教授、会田助手、並に助力を惜しまなかつた。三菱造船、橋本鑑一氏及び東大工学部船舶安定性能研究室の諸氏に対し厚く感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) W.J. Pierson, Jr. & W. Marks.: “The Power Spectrum Analysis of Ocean Wave Records” Trans. AGU. 1952.
- (2) M.S. Longuet-Higgins: “On the Statistical Distribution of the Height of Sea Waves” Journal of Marine Research. 1952.
- (3) W.J. Pierson, Jr., G. Neumann, & R.W. James, Department of Meteorology.: “Practical Methods for Observing and Forecasting Ocean Waves by Means of Wave Spectra and Statistics”, 1953.
- (4) M.St. Denis & W.J. Pierson: “On the Motions of Ships in Confused Seas”, SNAME. 1953.
- (5) E.V. Lewis: “Ship Speeds in Irregular Seas”, SNAME. 1955.
- (6) “Ships and Waves”, Council on Wave Research and SNAME. 1954.
- (7) 山内保文: “船の動揺の時系列論的解析について” 造船協会論文集 1956.