

## 以西底曳網漁船の耐航性に関する研究

西ノ首 英之

Studies of the Seakeeping Qualities of Bull Trawlers  
by Means of Field Measurements\*

Hideyuki NISHINOKUBI

1) The study of seakeeping qualities has remarkably progressed in recent years, accompanied by the great progress in the study of ocean waves. These studies may be considered to form a part of the theoretical background of seamanship.

Concerning fishing boats, it is necessary to clarify the characteristics of their behaviors on ocean waves not only for ship's stability but also for safety during fishing operations at sea. In fact, the motions of fishing boats are affected by their fishing gear during fishing operations, and their motions in response to ocean waves are larger than those of other types of ships, e. g. a general cargo ship, in similar seaway situations.

With this viewpoint in mind, researches on the seakeeping qualities of fishing boats were performed by making field measurements during fishing operations.

2) To be concrete, experiments were carried out aboard commercial fishing boats—bull trawlers—in the East China and Yellow Seas. There are several kinds of bull trawlers there, ranging from 50 GT to 300 GT. These bull trawlers operate throughout the year on these fishing grounds. Using a specially-devised wavemeasuring apparatus, the encountered wave heights and the motions of fishing boats were measured on board a bull trawler during fishing operations. The methods of the statistical analysis of stochastic processes were applied to the data thus obtained.

3) Measurement of wave heights (Chapter 4-1)

In the study of the seakeeping qualities of a ship, it is indispensable to measure the encountered wave heights, and to obtain the relation between the motion of fishing boats and the form of ocean waves simultaneously, during the cruising course.

From this point of view, the author devised a step-type wave measuring apparatus that could be mounted on a midship side of a fishing boat, and that could measure the relative encountered wave heights vertical to the sea surface at a given point of the ship's body. As the observed wave heights in this study include the components of the ship's motions, the true encountered wave heights were obtained by subtracting the ship's motions from the observed wave heights algebraically. There were some difficulties in the method of double integration of the recorded data of heaving acceleration, but the author obtained a practically effective method. The error of measurements of the wave heights by this method was estimated to be less than 10% in the range

---

\* Doctoral thesis submitted to the Faculty of Fisheries of Hokkaido University (December, 1978).

of frequency for the heaving motions of the fishing boat by the experimental way.

4) The wave characteristics of the fishing ground on the East China and Yellow Seas (Chapter 4-2)

From the relationship between the wave periods and its height observed in this study, it became clear that on this fishing ground both the wave height and the wave steepness were larger in winter than in autumn.

The empirical equation was obtained as follows:

$$T_s = 3.29\sqrt{H_{1/3}}$$

where  $T_s$ : Wave periods obtained by the zero-crossing method.

$H_{1/3}$ : Significant wave height.

The wave spectra in both seas were approximately similar to the spectra of the modified Pierson-Moskowitz or the I. S. S. C. wave spectra, giving the following numerical spectrum model of the wave as below:

$$S(\omega) = 0.14 H_{1/3}^2 \omega_1^{-1} (\omega/\omega_1)^{-5} \exp\{-0.57(\omega/\omega_1)^{-4}\}$$

where  $\omega_1 = 2\pi/T_s$ .

5) Short-term maximum distributions of wave heights and the motions of fishing boats (Chapter 5-2)

In general the statistical distribution of data is difficult to determine, but when the process has a narrow frequency spectrum, the data are distributed according to the Rayleigh distribution. The distributions of the observed data were considered to be coincident with the theoretical distribution, and these relations were also affirmed by  $\chi^2$  test. As for these statistics, the ratios between each average of maxima and the theoretical standard deviations that were calculated by the Gaussian distribution, respectively, were shown as estimated coefficients of maxima.

The linear regression equations were obtained between the significant wave heights and the significant values of the motions of fishing boats. Based on these results, it became possible to predict the maximum amplitudes of the ship's response motions in short-term.

6) Long-term maximum distributions of wave heights and the motions of fishing boats (Chapter 5-2)

According to order statistics, the root mean squares of maxima on the record of each cruise were statistically analysed. The distributions of wave heights and heaving motions fitted well the logarithmic-normal and Weibull distribution functions, while the rolling and pitching motions fitted well the Weibull distribution functions.

By considering the above results, the probabilities of occurrences of maxima for both wave heights and motions of fishing boats in operations could be obtained by the joint distribution of Rayleigh and Weibull. These probabilities can be applied to the problem of the limiting value.

7) Frequency response characteristics of fishing boats at sea (Chapter 5-3)

As for all the data obtained by the experiments, the power spectra were calculated by Blackman-Tukey's method, with Akaike's smoothing coefficients. Moreover, for each of the encountered angles between waves and fishing boats, the frequency response functions were calculated by the cross-spectrum analysis method. In this system of ship's motion, input was wave heights and output was motions of fishing boats. The frequency response functions were shown as values of amplitude gain, phase shift, coherency and reliability for motions of fishing boats.

The forced rolling period corresponded to the free rolling period, but as for the pitching and heaving motions, the peaks of power coincided with those in the wave spectra of their frequencies.

As for the pitching and heaving motions, it can be said that fairly good estimations of

frequency response functions were obtained. For example, it can be seen that the coherencies were above 0.7 and the reliabilities were below 0.3 in the frequency range from 0.25 Hz to 0.05 Hz in the heaving motions for beam and quartering seas, and that in case of pitching motions, coherencies were above 0.6 or 0.7 and the reliabilities were below 0.4 in the frequency range from 0.2 Hz to 0.1 Hz. Therefore when the frequency response functions were calculated by the strip theory, the so-called O. S. M., it was found that the amplitude gains in both cases were similar, especially in that of the heaving motions. The effects of fishing gear during fishing operations were not considered in the calculations by the strip theory, and it may be assumed that the difference mentioned above would be affected by them. Based on these results, pitching and heaving motions were considered to be satisfied with linear for the ship's motion system.

#### 8) Estimation of numerical spectrum model of ship's motions (Chapter 6)

The estimation of the motions of the fishing boats during fishing operation is the most important for the investigation of the safety and the fishing plan of the boat. The author tried to establish an empirical equation to estimate ship's motion spectra, based on the ship's response spectra obtained by field measurements. Then the average spectra were deduced for the rolling, pitching and heaving motions for each of the encountered angles between waves and fishing boats. The average spectra obtained by the above-mentioned method were nearly the same over the whole range of sea states experienced and all the heading angles, and these spectra were calculated by the empirical equation of the Gaussian form. The non-dimensional spectra for each motion were obtained by the least squares method, and given as follows:

For rolling motion:

$$S(\omega)/(H_{1/3}^2/\omega_1) = 0.0830 \exp\{-21.3258(\omega/\omega_1 - 0.9855)\}$$

For pitching motion:

$$S(\omega)/(H_{1/3}^2/\omega_1) = 0.0634 \exp\{-11.8376(\omega/\omega_1 - 0.9761)\}$$

For heaving motion:

$$S(\omega)/(H_{1/3}^2/\omega_1) = 0.0647 \exp\{-11.6779(\omega/\omega_1 - 0.9756)\}$$

where  $H_{1/3}$ : The significant value of the motions of the fishing boats which would be deduced by the significant wave height or the r. m. s. values of wave heights.

$\omega_1$ : The average circular frequency of the encountered wave to the ship in the pitching and heaving motions, and the natural frequency in the rolling motion.

### 内 容 目 次

第 1 章	緒論および研究史 .....	64
第 2 章	実船試験における計測機器と解析処理方法 .....	66
第 1 節	計測・記録および処理装置 .....	66
第 2 節	解 析 方 法 .....	67
第 3 章	実 船 実 験 法 .....	69
第 1 節	実習船「鶴水」による実験 .....	69
第 2 節	以西底曳網漁船による実験 .....	74
第 4 章	東海・黄海における波浪 .....	80
第 1 節	波高計測装置 .....	80
第 2 節	東海・黄海の波浪特性 .....	86
第 5 章	以西底曳網漁船による実船実験 .....	90
第 1 節	以西底曳網漁船の特性 .....	91
第 2 節	船体運動振幅極値の統計的特性 .....	94

第 3 節	船体運動の周波数応答特性	103
第 6 章	曳網中の船体運動数値スペクトルの予測	123
第 7 章	総括	126
謝辞		129
文献		129

## 第 1 章 緒論および研究史

船舶の運動性能は大きく分け耐航性と操縦性の二つに代表される。これらの性能に対して、高い精度でこれを定量化し、表現することはいまだ十分ではない。しかし近年これらの性能に対する関心とその向上が強く要望されるようになり、電子計算機の急速な発展普及と相まって運動性能研究も大きく進歩した。船は太古より用いられ長い歴史をもっているが、その流体力学的、運動力学的な研究が一つの体系をなしたのは古いことではない。運動性能に関しては耐航性のすべての問題の根源である海洋波に関する研究が進歩し、近代化されたここ30年来のことである。海洋波中の船の応答の厳密な数式表現は多くの研究者によって進められているが未だ完全ではない。

耐航性とは「船舶が風、波などの外力を受けて航行するとき、有効な平均船速の低下を最少にとどめ、安全かつ快適に航海できる性質」と定義される。耐航性を支配する基本的要素は、その海象で生ずる船体運動である。

船体運動についての研究は、第一として造船工学的研究、すなわち設計上の問題として取り上げる場合、第二として船舶の運航上、その安全と効率を研究する操船の問題として取り上げる場合の二つがあり、今日では耐航性に関する研究は運用術の理論的背景をなしていると考えられる。

本研究は後者の第二の場合であるが、対象としている漁船においても、海洋波中の波による船の安全性の問題は、前者および後者のいずれの立場からも重要な問題である。本研究の供試船である以西底曳網漁船は最大200トン、また他種漁船でも最大3,000～5,000トンであるから、船体の大きさと海洋波の波長、波高などの相対的關係から考えて、海洋波中における船体動揺は一般大型貨物船の場合に比べ、波浪の影響を受ける度合が著しい。

激しい風浪の中の航海を荒天航海法と称するが、荒天という用語は外力である波と船体との相対的關係で決定される。したがって、運動の激しさから見れば漁

船のように小型船においては、広い風浪階級範囲で荒天に遭遇している事になり、大角度傾斜などの頻度も高く、波浪は安全性にとって重要な意味を持っている。さらに、漁船においては、荒天中においても漁撈のための操業を実施するため、操業中は大きな漁具によって漁船の運動が制約されている。そして海洋波による漁船の運動は一般貨物船のような漁船以外の船の運動より大きいものであると考えられる。したがって漁船の場合は一般船舶の通常航行性能に加え、操業実施のための複雑な運動を行い得る性能と安全性をも合わせて保有しなければならない。

漁船の耐航性に関する研究の特殊性は、一般船舶に要求される耐航性に加え前述した「漁船が広義の漁具であり、その漁法上の安全な作業性」とでもいうべき点にあると考える。

水産庁漁船研究室による以西底曳網漁船の転覆事故防止対策に関する研究(1)においては、操船者と設計者との間の責任の分野について言及しているが、事故の発生は操船上の問題にかなり依存している事を指摘している。また、F.A.Oの世界漁船会議においても漁船の事故の多くは大洋における風と波が重要な原因であるとしている。現実的には操船者が漁撈に重きをおき、漁船の安全性あるいは科学性を無視した無理な操船が大きな事故に結びついている場合が多い。漁船に関する操船上のこの分野の研究は少ないが、中でも実船試験は特に少ない。

これらの事を背景にして、海上における漁船の動きに基づいて決定論的な方法も考慮し、統計的解析法を用いて、不規則な海面における漁船の運動の合理的な解釈を得るために、科学的な方法を確立する事が必要であると考えられる。そこで本研究は東海・黄海を主漁場とする以西底曳網漁船を対象として、出港から入港までの船体運動の実態を明らかにし安全な操業を確保する事にある。

以西底曳網漁船の一航海(平均35日～45日)のうちその90%は曳網操業中であるが、船の状態は漁場への往航時、操業中、漁獲物の運搬船への積替の前後および復航帰港時とそれぞれ、種々に変化する。すなわち漁船では状態の変動には広い幅がある。そこで種々の

自然環境下でこの一航海を通じた実船実験を行い、船体運動学的観点から、波浪を入力とし船体運動を出力とする船体動揺応答の問題として、海上における漁船の安全性の研究を意図した。よって終局の目的は操船者の立場から、海上の諸条件下における船の安全性に関する限界の推定、並びに最適運航計画、特に、曳網中の船体運動の数値予測および動揺の大きさとその出現確率などを明らかにする事にある。また船体運動の数値予測は漁船の設計段階においても有用であると考える。

耐航性に関する研究は一般船舶に関するものが多く種々行われている。

耐航性の研究分野の一つに復原安定性の重要な問題がある。船の復原性に関しては、長年の経験から得られた横復原テコの大きさ ( $GZ$ あるいは $GM$ )と乾舷の大きさについて規則が設けられ、船の安全に重要な役割を持っている。

土屋(2)、金山(3)および有路等(4)は漁船の実態調査の重点を $GZ$ におき、乾舷やトリムとの関係に関する調査研究を1956年以来行っている。J. R. Paulling(5,6)は鮪漁船の横復原性のトリムによる影響について、また縦波中の横復原性について1960年と1961年に報告している。その後、IMCO(7,8)では主要漁業国の規則、事故例を分析調査し、 $30\sim 40$ 度の横傾斜で $GZ \geq 0.2m$ 、初期 $GM \geq 0.4m$ などの推奨値を与えている。

日本においても法規上の基準値が一つの目安として最近まで用いられてきたが、土屋(9)はその考え方を一歩進めて、気象海象などの外的条件、船型および上甲板上の構造物なども考慮に入れた安全性示数 ( $C$ 係数)による理論的判断基準の考えを取り入れ検討し、その必要性を1971年に提言している。

これら船の静的復原安定性の研究に対し、船体運動論的観点から、漁船の海洋波中の動揺応答の研究については、川島等(10,11)が1964年以来一連の研究を行っている。川島は漁船の操船者としての立場から、荒天航海法の研究として船体動揺のスペクトル解析を行い波浪に対する応答特性がよく表わされている事を報告している。また川島(12,13)は一連の研究で、船体運動の入力としての波浪の計測と実験システムおよび解析法についても報告し、波高計の試作を行っている。

海洋の波浪、風、潮流などの自然環境下で漁船が安全に操業したり、航行するために必要な漁船としての機能を加えた総合的な立場からの研究としては天下井(14,15)および川島等(16)の研究がある。天下井はトロール船における船体動揺と曳網索の張力との間の統

計的特性として漁具系の応答特性について1971年に報告し、続いて曳網索張力の最大値の数値予測を1972年に行っている。川島は船体運動と漁具系について多変量ARモデルによる解析を行い、曳網索張力は船体動揺のうち上下動と最も関係度が強く、その効果について1976年に報告している。また Vermeer(17)はトロール船の曳網索張力による船体運動の数理解析による評価を1975年に行い報告している。

船体運動の理論解析としてはストリップ法 (Ordinary Strip Method) が早くから大型船舶を対象として用いられてきたが、この理論解析結果の漁船への有用性については高橋等(18)および山越等(19)の研究があり、湖水面における漁船の自航模型船による実験あるいは模型試験水槽における実験により、その有用性を確かめ実験結果と理論計算値とが比較的良好一致することを1974年に続き1975年に報告している。これら湖水面における波浪中の自航模型漁船の動揺に関連して、川島等(20,21)は船体運動計測の方法や実験システムについて、また漁船の転覆機構に関する実験的研究として土屋、山越等(22)と共に1974年以来継続して研究を行っている。

耐航性に関する実船実験は第一に大規模かつ組織的に行われたものとして1952年の「日聖丸」による実験(23)があげられる。この実験は運動性能の研究に多くの糸口を与え世界の実船実験の歴史に残るものである。船舶技術研究所でも多くの実船実験を続けているがその後、総合的実験と銘うって行われたものとしては「シアトル丸」の実験(24)がある。この実験の目的の一つは計測・記録データ処理および解析などの一貫したシステムを開発することであった。種々の新しい記録解析法が試みられ、また機器が試作され、システムとしての今後の問題点の所在を明らかにした。これら商用貨物船に便乗して一航海程度の比較的長期の実態を計測する場合に対して、他方短期の実態を正確に把握することを目的とした実験航海による実船試験もある。Bledsoe et al.(25)の実験、実験船として建造され、理論と実験との一致を実海面の実験で確かめる目的で行われたものとして浅野等(26)の実験がある。

耐航性に関する実船試験の意義は実態の調査にあるが、現況は浅野等の実験および「SR125」(27)のごとく、ごく限られた船の実態調査に留まっている。そして実船試験による耐航性の実態に関する資料はその必要性に比べて少なく、まして漁船については非常に少ない。

漁船に関しては前述した川島、天下井等の漁業練習船による実船試験程度である。商用漁船についての実

船試験はほとんど見られない現状から、実船の漁撈中の船体運動の実態を明らかにするために本研究は行われたものである。

漁船の耐航性に関する研究は非常に少なく、漁船の船体運動の理論的研究も緒についたばかりである。漁船の波浪中での安全性確保と漁船としての総合的性能の向上を図るためにも、漁船の耐航性の研究は今後は非とも推進していかなければならない重要な課題であるとする。

## 第2章 実船試験における計測機器と解析処理方法

海の波は M. S. Longuet-Higgins 等(28)によって論じられているようにその分布はレイリー分布、あるいはガウス分布を示すもので、そのスペクトル分布関数は角周波数  $\omega$  の関数で示され、極めて不規則な現象である。このような、ランダムな入力によって生じられる船体運動は線形系と見なされ、あるいは線形化された系の出力である。したがって船体動揺もまた同様にランダム性をもつ現象である。

本研究においては主として動揺系について考察するが、船体の安全性は根本的には海洋波中の6自由度運動の全体から考察しなければならない。しかし漁船の安全性の限界の推定を、主として横揺れ、縦揺れおよび海水打込みなどの要因となる上下動におき、実験計測はこれらの運動とその入力である波高計測を加え4

項目とした。

### 第1節 計測・記録および処理装置

本研究における計測装置およびデータと情報の流れは Fig. 1 に示す通りであるが、計測装置の概要を以下に記す。

#### (1) 傾斜計 (横揺れ, 縦揺れ)

多くの実船試験に用いられ動揺計として定着した航空計器としてよく用いられている小型のパーティカルジャイロを用いた。地軸に対する横揺れ、縦揺れ角を直接検出し船体の姿勢を検出する東京航空計器KK製 (TRB-8B) である。垂直検出精度  $\pm 0.20$  度以内測定範囲は横揺れ角度  $\pm 65$  度、縦揺れ  $\pm 55$  度である。

#### (2) 加速度計 (上下動)

加速度変換器は非接着型で抵抗線ひずみゲージ式の共和電業製(120A-2J)、 $\pm 2G$ フルスケール加速度計を用いた。周波数特性はDC~50Hz範囲で平坦。なおストレインアンプは同社製動ひずみ測定器(DPM-1N)である。

#### (3) 波高計

航走中の船の波浪に対する応答を明らかにするためには、航走中の船が遭遇する出会い波浪を直接計測しなければならない。そのため、日本においても波高計として特殊いかた曳航式や船舶搭載式の二・三の型が開発されている。船舶型ではタッカー式波浪計(29)が最も有名である。タッカー式波高計は舷側における水位の変化を圧力計により計測し、船の舷側の運動を差引く方式である。

本研究の実船試験は商用漁船へ便乗して行う関係上漁船としての作業上の制約から既製の波高計では実用的でなく波高計測は不可能なため、実船の漁船用としてタッカー方式にならない波高計を製作した。ただし舷側における水位変動はステップ式波高計とし、舷側の運動成分は前述した傾斜計による横揺れと縦揺れ角および上下動の加速度を二回積分した上下変位により差し引く方法で行った。

二回積分器の製作に多大の困難と苦勞をしたが、精度的にも実用となる積分器が完成し、波高計測が可能となった。

この試作波高計の詳細については後述(第4章第1節)する。

#### (4) 記録器

研究初期の実船実験の段階では4チャンネルペン書きレコーダー(渡辺測器製リニアコーダWTR281)を用いて記録した。しかし波高計のある実験では、上下加速度の二回積分のアナログ演算が必要となり、また

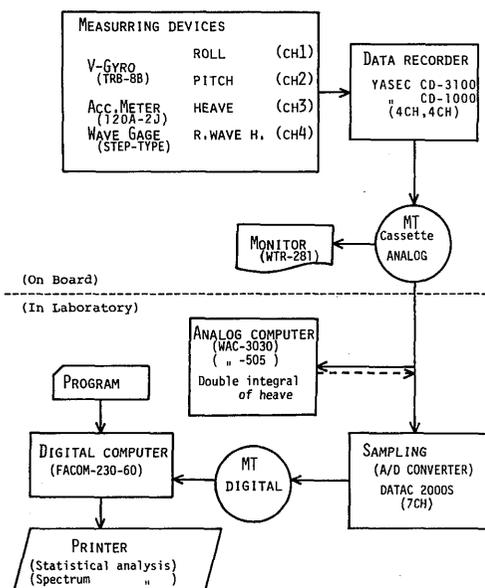


Fig. 1. Block diagram of used system.

一航海を通じた実験で膨大なデータ量のため4チャンネルカセットデータレコーダ(山科精器製CD-3100とCD-1000)を用い、計測データの記録および二回積分演算処理の記録などを行った。

第2節 解析方法

不規則波中の船の動揺応答は種々の形で示される。スペクトル表現はその一つであり、スペクトル解析による輝かしい成果は既に認められている所である。

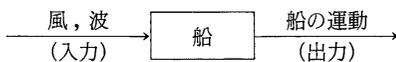
船の応答の性質はストリップ法により理論的に、または模型実験を通して実験的に求めることができる。しかし一方、海洋波は前述したように不規則現象であり統計的性質を有している。すなわち確率過程と呼ばれる一つの統計的な事象である。したがってその中に置かれた船の応答もまた統計的な性質を持つものとなる。海洋波中の船の応答の研究にこの考え方を導入したこの種の研究上古典ともいわれる Denis と Pierson (30) の研究成果が明らかにされ、あらゆる応答のような不規則な現象の処理に確率過程論の成果が取り入れられるようになった。最近では通信工学の発展に伴ない制御理論にも多くその成果が用いられている。日本においてもこれと全く時を同じくしてこのような扱いが山内(31, 32)によって成され、その成果は本種研究の発展に大きく貢献した。近年では確率過程論または時系列解析に関する文献、参考書(33~40)も多くみられる。

(1) 統計的取扱いによる解析

実船試験計測において得られるデータは有限である。実際の記録から  $\{f(x)\}$  なる観測系列が各動揺および波高について時間の関数として得られる。この段階でデータが有界である。現象のもつ有界な帯域幅などによる解析上への影響をみる上でデータの特性の確認が必要である。また各データの振幅極値の統計的特性から不規則現象の短期予測や長期予測を行うため確率分布の検定および分布関数の計算など統計解析を行った。

(2) コレログラム、スペクトルおよび応答関数解析の概要

海洋波中の船の運動について、入出力関係は次のように表わすことができる。



このとき、不規則に変動する確率過程としての海洋波について、定常性、エルゴート性の仮定が成立しているものとする。海洋波中の操業中の漁船の運動応答特性に線形性が成立つならば、海洋波を入力とする漁

船の運動出力応答も定常性、エルゴート性の近似が成立つ。定常確率過程としての波高  $x(t)$ 、船体運動系のインパルス応答関数  $h(\tau)$ 、その周波数応答関数  $H(\omega)$  とすると、応答  $y(t)$  の自己相関関数およびスペクトルをそれぞれ、 $R_{xx}(\tau)$ 、 $R_{yy}(\tau)$ 、 $S_{xx}(\omega)$  および  $S_{yy}(\omega)$  とする。また  $x(t)$  と  $y(t)$  の相互相関関数およびクロススペクトルをそれぞれ  $R_{yx}(\tau)$ 、 $S_{yx}(\omega)$  とすると次の諸関係が成立つ。

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h_{yx}(\tau) \cdot x(t-\tau) d\tau \quad (2 \cdot 2 \cdot 1)$$

$$R_{yy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h_{yx}(\alpha) \cdot h_{yx}(\beta) \cdot R_{xx}(\tau - \alpha + \beta) d\alpha \cdot d\beta \quad (2 \cdot 2 \cdot 2)$$

$$S_{yy}(\omega) = |H_{yx}(\omega)|^2 S_{xx}(\omega) \quad (2 \cdot 2 \cdot 3)$$

$$R_{yx}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} h_{yx}(u) \cdot R_{xx}(\tau - u) du \quad (2 \cdot 2 \cdot 4)$$

$$S_{yx}(\omega) = H_{yx}(\omega) \cdot S_{xx}(\omega) \quad (2 \cdot 2 \cdot 5)$$

したがって、周波数応答特性は入力と出力とのクロススペクトルと入力スペクトルより、 $H_{yx}(\omega) = S_{yx}(\omega) / S_{xx}(\omega)$ 、また位相特性は、 $\theta(\omega) = \text{Arg}\{S_{yx}(\omega)\}$  で表わされ、位相の関係も含んだ完全な周波数応答特性を求めることができる。さらに、クロススペクトルの優れている点は、ノイズの影響が含まれない点にもある。例えば、出力応答  $y(t)$  に  $y(t)$  および入力  $x(t)$  にも相関のないノイズ  $n(t)$  が含まれ、 $y'(t) = y(t) + n(t)$ 、{ここで、 $y(t) = L(x(t))$  とする} が測定されたとすると、

$$\begin{aligned} S_{y'y'}(\omega) &= S_{yy}(\omega) + S_{nn}(\omega) \\ &= |H(\omega)|^2 \cdot S_{xx}(\omega) + S_{nn}(\omega) \end{aligned} \quad (2 \cdot 2 \cdot 6)$$

となるが、 $S_{y'y'}(\omega) = S_{yx}(\omega)$  となってノイズの影響は含まれない。この外、出力  $y(t)$  が入力  $x(t)$  に対して周波数応答関数  $H(\omega)$  をもつ線形な応答としてどの程度説明できているか、または線形変換がどの程度の割合を占めるか、説明できていない部分  $S_{nn}(\omega) / S_{y'y'}(\omega)$  がどれ位含まれているかを示す指標としてコヒーレンシ (Coherency) 関数  $\gamma^2(\omega)$  (回帰分析における重相関係数の2乗に相当する量) がある。すなわち、

$$\begin{aligned} \gamma^2(\omega) &= |H_{yx}(\omega)|^2 \cdot S_{xx}(\omega) / S_{y'y'}(\omega) \\ &= 1 - \{S_{nn}(\omega) / S_{y'y'}(\omega)\} \end{aligned} \quad (2 \cdot 2 \cdot 7)$$

またこの  $\gamma^2(\omega)$  から  $H_{yx}(\omega)$  の相対誤差  $R_e(\omega)$  は、次式によって与えられる。

$$R_e(\omega) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left( \frac{1}{\gamma^2(\omega)} - 1 \right) F\{\delta, 2, 2(n-1)\}} \quad (2 \cdot 2 \cdot 8)$$

$F$  についてはよく知られている赤池(39)の次の近似式

を用いた。

$$F(2, n, 0.95) = 3.00 + \frac{10.00}{n-1.40} \quad (2 \cdot 2 \cdot 9)$$

$$F(1, n, 0.95) = 3.85 + \frac{10.00}{n-1.40} \quad (2 \cdot 2 \cdot 10)$$

(3) コレログラム、スペクトルおよび応答関数の数値計算法

$\Delta t = 1.0$  秒間隔にある基線から読み取った入力および応答出力の時系列をそれぞれ  $x_1, x_2, \dots, x_M, y_1, y_2, \dots, y_M$  とする。これらデータから標本自己相関関数、すなわち  $\tau = \ell \cdot \Delta t$  における  $\hat{R}_{xx}(\tau), \hat{R}_{yy}(\tau)$  の値は、次の様になる。

$$\begin{aligned} \hat{R}_{xx}(\tau) &= \frac{1}{M-\tau} \sum_{i=1}^{M-\tau} \left\{ x_{i+\tau} - \frac{1}{M-\tau} \sum_{i=1}^{M-\tau} x_{i+\tau} \right\} \\ &\quad \left\{ x_i - \frac{1}{M-\tau} \sum_{i=1}^{M-\tau} x_i \right\} \\ &= \frac{1}{M-\tau} \left\{ \sum_{i=1}^{M-\tau} x_{i+\tau} \cdot x_i - \frac{1}{M-\tau} \sum_{i=1}^{M-\tau} x_{i+\tau} \sum_{i=1}^{M-\tau} x_i \right\} \end{aligned} \quad (2 \cdot 2 \cdot 11)$$

ここでデータ数  $M$  が大きく、平均値の変動も少なく移動平均を用いる必要のないときには、

$$\hat{x}_i = x_i - \bar{x} \text{ また、 } \bar{x} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i \text{ として}$$

$$\hat{R}_{xx}(\tau) = \frac{1}{M-\tau} \sum_{i=1}^{M-\tau} \hat{x}_{i+\tau} \cdot \hat{x}_i \quad (2 \cdot 2 \cdot 12)$$

同様に  $\hat{R}_{yy}(\tau)$  も計算される。これにより  $x(t), y(t)$  のコレログラムが描かれる。またこれをノルマライズした自己相関係数は  $\rho(\tau) = \hat{R}(\tau)/\hat{R}(0)$  で示される。

次にスペクトル  $S_{xx}(\omega), S_{yy}(\omega)$  は相関関数のフーリエ変換であると定義されるから次の式で計算される。

$$\begin{aligned} S_{xx}(\omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(t) e^{-j\omega t} dt \text{ または} \\ S_{xx}(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (2 \cdot 2 \cdot 13) \\ \hat{S}_{xx}(\omega) &= \frac{\Delta t}{2\pi} \left\{ \hat{R}_{xx}(0) + 2 \sum_{i=1}^{m-1} \hat{R}_{xx}(\tau) \cos \left( 2\pi \frac{r}{2m} \cdot \tau \right) \right. \\ &\quad \left. + \hat{R}_{xx}(m) \cos r\pi \right\} \quad (2 \cdot 2 \cdot 14) \end{aligned}$$

ここで  $\omega = 2\pi f, f = \frac{1}{2 \cdot \Delta t} \frac{r}{m}$  である。したがってスペクトルはサンプリング時間間隔 ( $\Delta t$ ) から定まる最大解析周波数、すなわちナイキスト周波数 (Nyquist frequency),  $\omega_N = \frac{2\pi}{2 \cdot \Delta t} = \frac{\pi}{\Delta t}$  の間をラグの最大の数と同じ  $m$  個に分割した点 ( $\omega = 0, \frac{1}{m} \omega_N, \frac{2}{m} \omega_N, \dots, \frac{r}{m} \omega_N, \dots, \omega_N$  の  $m+1$  個の点) で求めることになる。すなわち、 $\Delta\omega = \frac{\pi}{m \cdot \Delta t}$  は後で述べるウィンドウ

の演算を容易にし、かつ分解能を合理的なものとするためである。

クロススペクトル  $S_{yx}(\omega)$  は、

$$S_{yx}(\omega) = C_{Oyx}(\omega) + jQ_{Uyx}(\omega) \quad (2 \cdot 2 \cdot 15)$$

$$|S_{yx}(\omega)| = \{ C_{Oyx}^2(\omega) + Q_{Uyx}^2(\omega) \}^{1/2} \quad (2 \cdot 2 \cdot 16)$$

のように二つの実関数  $C_{Oyx}(\omega), Q_{Uyx}(\omega)$  で表わされる。ここで、 $C_{Oyx}(\omega)$  をコーススペクトラム (Co-spectrum),  $Q_{Uyx}(\omega)$  をクォードレイチュアスペクトラム (Quadrature-spectrum) という。

$$C_{Oyx}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \{ R_{yx}(\tau) + R_{yx}(-\tau) \} \cos \omega \tau d\tau \quad (2 \cdot 2 \cdot 17)$$

$$Q_{Uyx}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} -\{ R_{yx}(\tau) + R_{yx}(-\tau) \} \sin \omega \tau d\tau \quad (2 \cdot 2 \cdot 18)$$

式 (2・2・17), (2・2・18) で明らかのように  $R_{yx}(\tau)$  の  $\tau$  の正の部分および負の部分からそれぞれ、 $\frac{1}{2} \{ R_{yx}(\tau) + R_{yx}(-\tau) \}$  および  $-\frac{1}{2} \{ R_{yx}(\tau) - R_{yx}(-\tau) \}$  を計算しておく必要がある。その標本値を  $\hat{R}_{yx}^+(\tau)$  および  $\hat{R}_{yx}^-(\tau)$  とすると、

$$\begin{aligned} \hat{R}_{yx}^+(\tau) &= \frac{1}{2(M-\tau)} \left\{ \sum_{i=1}^{M-\tau} \hat{y}_{i+\tau} \cdot \hat{x}_i \right. \\ &\quad \left. + \sum_{i=1}^{M-\tau} \hat{y}_i \cdot \hat{x}_{i+\tau} \right\} \end{aligned} \quad (2 \cdot 2 \cdot 19)$$

$$\begin{aligned} \hat{R}_{yx}^-(\tau) &= \frac{1}{2(M-\tau)} \left\{ \sum_{i=1}^{M-\tau} \hat{y}_{i+\tau} \cdot \hat{x}_i \right. \\ &\quad \left. - \sum_{i=1}^{M-\tau} \hat{y}_i \cdot \hat{x}_{i+\tau} \right\} \end{aligned} \quad (2 \cdot 2 \cdot 20)$$

となり式 (2・2・19), (2・2・20) のフーリエ変換で式 (2・2・17), (2・2・18) は次の様に計算される。

$$\begin{aligned} \hat{C}_{Oyx}(\omega) &= \frac{\Delta t}{2\pi} \left\{ \hat{R}_{yx}^+(0) + 2 \sum_{i=1}^{m-1} \hat{R}_{yx}^+(\tau) \cos \left( 2\pi \frac{r}{2m} \tau \right) \right. \\ &\quad \left. + \hat{R}_{yx}^-(m) \cos r\pi \right\} \end{aligned} \quad (2 \cdot 2 \cdot 21)$$

$$\hat{Q}_{Uyx}(\omega) = \frac{\Delta t}{2\pi} \left\{ 2 \sum_{i=1}^{m-1} \hat{R}_{yx}^-(\tau) \sin \left( 2\pi \frac{r}{2m} \tau \right) \right\} \quad (2 \cdot 2 \cdot 22)$$

式 (2・2・14), (2・2・21), (2・2・22) で計算されたものはいわゆる、生のスペクトラム (raw spectrum) といわれるもので  $W_0(\omega)$  の影響を受けて切込みの大きい負の値なども出るスペクトルである。そこでこれに Table 1 に示すようなウィンドウにより、平滑化スペクトラム (smoothed spectrum) が計算される。すなわち、

$$S_{xx}(\omega) = \sum_{n=-k}^k a_n \hat{S}_{xx} \left( \frac{r-m}{m} \cdot \frac{2\pi}{2\Delta t} \right) \quad (2 \cdot 2 \cdot 23)$$

$$S_{yy}(\omega) = \sum_{n=-k}^k a_n \hat{S}_{yy}(\omega) \quad (2 \cdot 2 \cdot 24)$$

Table 1. Spectral window coefficient ( $a_n$ ).

window	$a_n$	$a_0$	$a_1=a_{-1}$	$a_2=a_{-2}$	$a_3=a_{-3}$
$W_1$		0.5132	0.2434		
$W_2$		0.6398	0.2401	-0.0600	
$W_3$		0.7029	0.2228	-0.0891	0.0149
Q		0.64	0.24	-0.06	
Hamming		0.54	0.23		
Hanning		0.50	0.25		

$$C_{0yx}(\omega) = \sum_{n=-k}^k a_n \hat{C}_{0yx}(\omega) \quad (2 \cdot 2 \cdot 25)$$

$$Q_{uyx}(\omega) = \sum_{n=-k}^k a_n \hat{Q}_{uyx}(\omega) \quad (2 \cdot 2 \cdot 26)$$

これら種々のスペクトルが求められた事から、周波数振幅応答  $|H_{yx}(\omega)|$ 、周波数位相応答  $\theta(\omega)$  およびコヒーレンシ  $\gamma^2(\omega)$  はそれぞれ次の通りである。

$$|H_{yx}(\omega)| = S_{yx}(\omega)/S_{xx}(\omega) \quad (2 \cdot 2 \cdot 27)$$

$$\theta(\omega) = \tan^{-1}\{Q_{uyx}(\omega)/C_{0yx}(\omega)\} \quad (2 \cdot 2 \cdot 28)$$

$$\gamma^2(\omega) = |H_{yx}(\omega)|^2 \cdot \{S_{yy}(\omega)/S_{xx}(\omega)\}^{-1} \quad (2 \cdot 2 \cdot 29)$$

### 第3章 実船実験法

耐航性の実船試験を行う場合、海洋波の波高や波周期などの情報は不可欠な条件である事は前にも述べた通りである。船上から船と波との出会いベースでの完全な波高計が未だ存在しない事から、入力として高い精度の波浪計測は不可能である。しかし操船者としての立場から見ると、海面状態を目視観測した結果から自船の運動を端的に判断することが出来れば船の安全な運航は非常に容易となる。

そこで、風浪階級と波の進行方向に対する船の相対針路をパラメータとして、船体の波浪中の運動、特に横揺れと縦揺れ特性をどの程度明らかにでき、また傾斜計およびスペクトル解析用電子計算機プログラムのテストのために短期の実船実験を行った。

#### 第1節 実習船「鶴水」による実験(41)

この実験では外界条件がほぼ一定と見られる短時間内に、波向に対して船の針路を45度ずつ変えて8角形を描いて航走するいわゆる8角航走試験を行った。こうすることにより、船はほぼ一定のスペクトルを持つ不規則波中で出会い角度45度間隔の斜め波試験を行ったことになる。したがって一定の気象、海象条件下で船の針路の差に基づく船の応答の変化を求めることが

できる。

#### (1) 実験計測の方法

実習船「鶴水」の実験状態は Table 2 に示す通りで、長崎港外2海里沖の海域において、速力約8.0ノットで行われた。当日の海況は風浪階級3、うねり2、風向は波浪およびうねりの方向とほぼ等しく南西、風速は平均4.5m/秒であった。傾斜計は船体中央重心下80cmの所に設置し、横揺れ・縦揺れはペン書オシログラフに同時記録された。連続記録から  $\Delta t = 0.5$ 秒間隔に、その振幅を読み取って得た各1100個の時系列データに対してスペクトル解析を行った。スペクトル分割数(ラグ数)は60であるが、ラグ数90および120の場合と Table 1 に示した赤池のスペクトルウインドウ  $W_1, W_2, W_3$  の3種についての結果を比較検討した。

#### (2) 結果および考察

スペクトル解析に先だち、得られた時系列データの統計的特性の確認のため確率分布を調べた。その結果を Fig. 2 に示した。船体運動の振幅の統計的性質につ

Table 2. Conditions of R. V. Kakusui through the measurements.

Principal dimension	
$L_{pp}$	14.80 m
B	3.32 m
D	1.52 m
Gross tonnage	19.95 t
Displacement	44.10 t
Draft	
F	0.95 m
A	1.80 m
M	1.375 m
Metacentric height	
GM	0.416 m
Main engine	110 HP
Ship's speed	8.0 knots

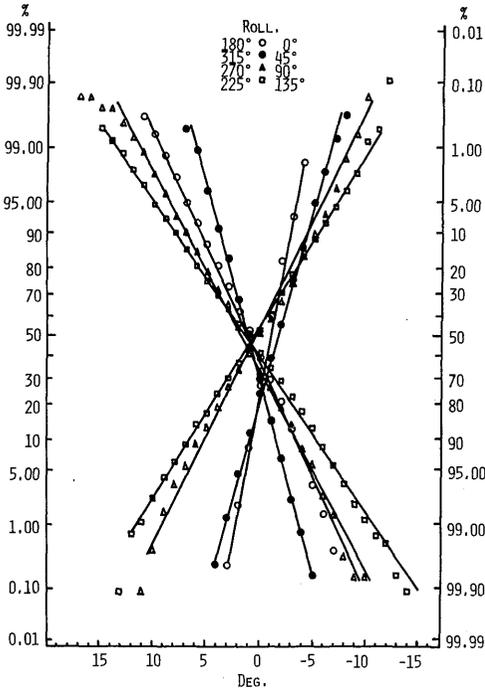


Fig. 2-1. Statistical distribution of rolling amplitude on various courses toward the wind direction.

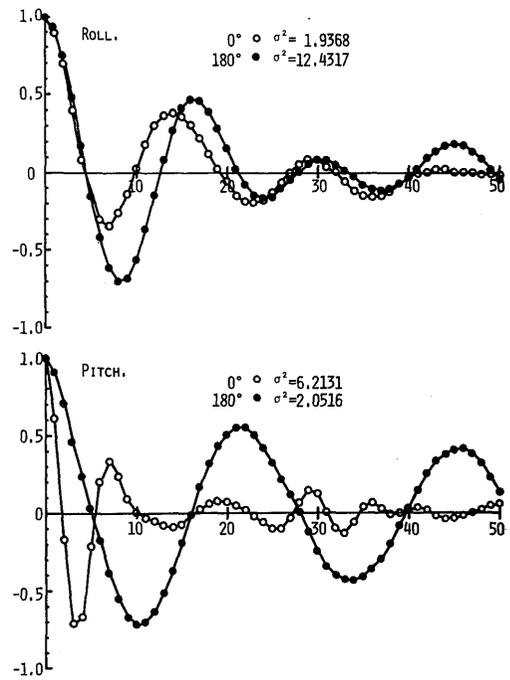


Fig. 3-1. Auto-correlograms of rolling and pitching at head sea and following sea.

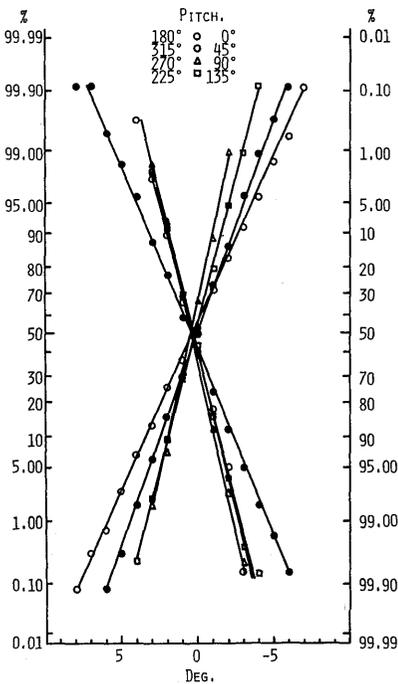


Fig. 2-2. Statistical distribution of pitching amplitude on various courses toward the wind direction.

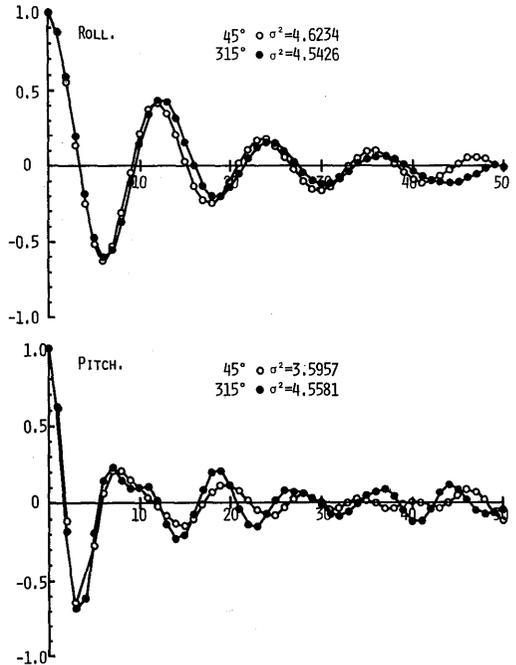


Fig. 3-2. Auto-correlograms of rolling and pitching at bow sea.

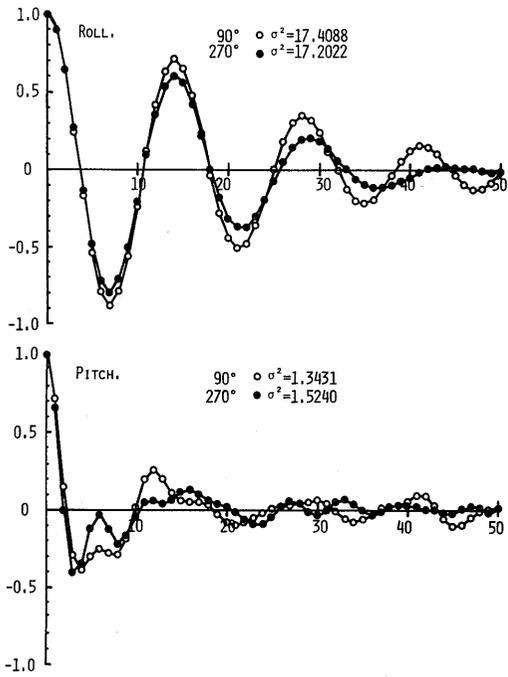


Fig. 3-3. Auto-correlograms of rolling and pitching at beam sea.

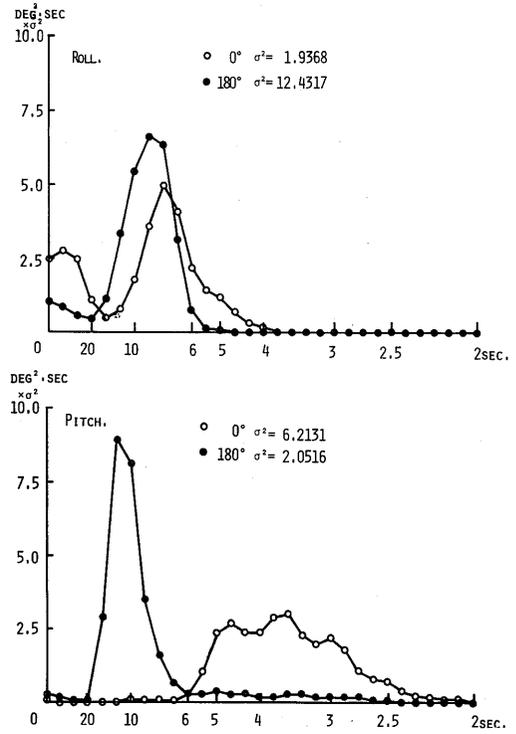


Fig. 4-1. Power spectra of rolling and pitching at head sea and following sea.

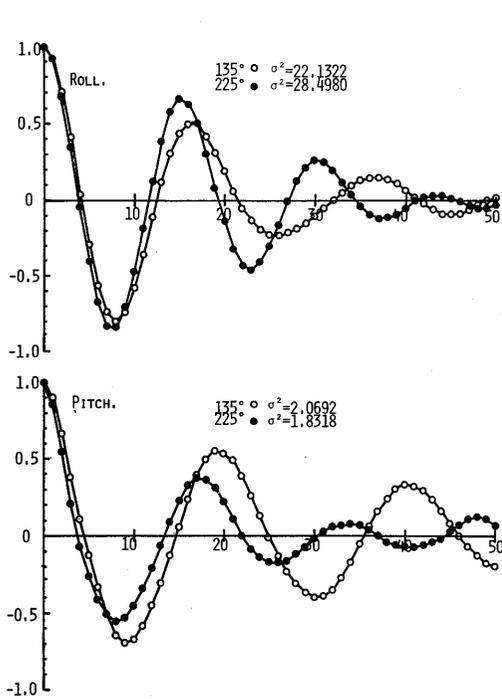


Fig. 3-4. Auto-correlograms of rolling and pitching at quartering sea.

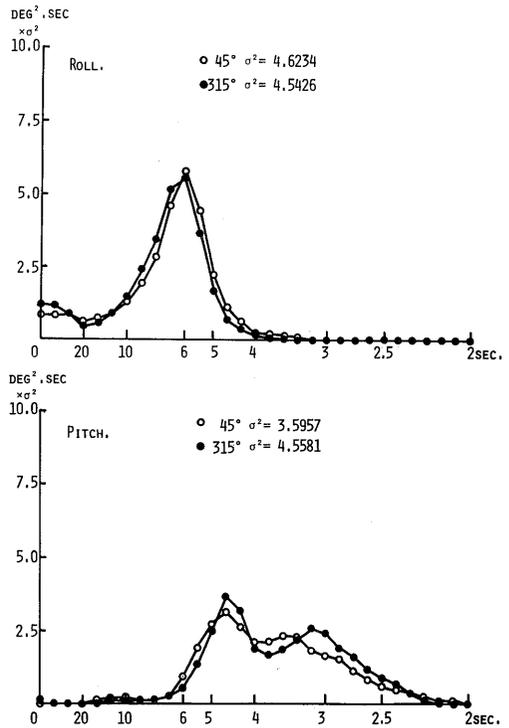


Fig. 4-2. Power spectra of rolling and pitching at bow sea.

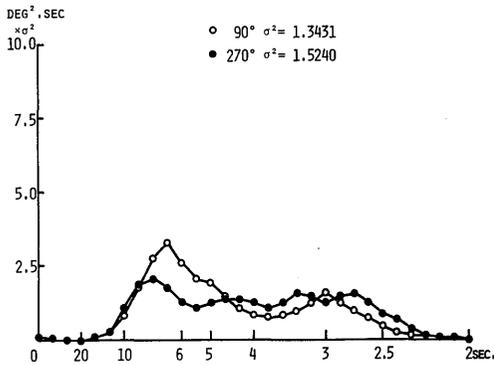
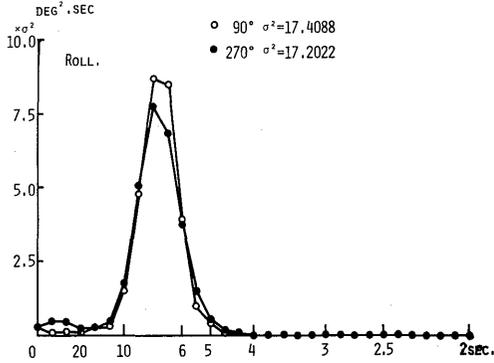


Fig. 4-3. Power spectra of rolling and pitching at beam sea.

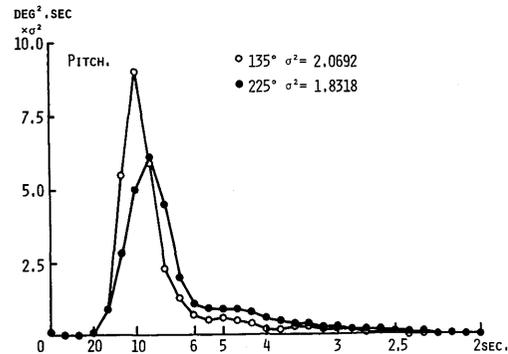
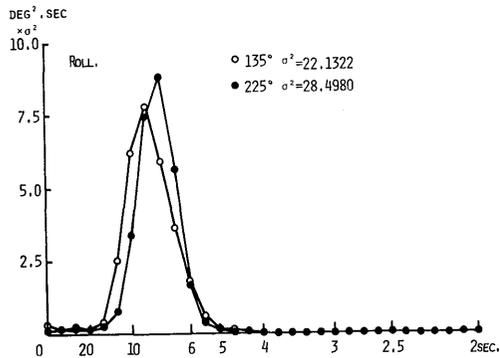


Fig. 4-4. Power spectra of rolling and pitching at quartering sea.

いては、川島ほか(42)および山内(43)によって正規分布をすることが知られており、実験の場合もそれぞれ正規分布を示している。

スペクトル解析によるコレログラムおよびパワースペクトルをそれぞれ Fig. 3 及び Fig. 4 に示した。実習船「鶴水」の海洋波中における動揺特性は同図に示される通り、船首尾線に対して対称な方向から波を受ける場合、すなわち、45度と315度(斜め向い波: Bow sea), 90度と270度(横波: Beam sea)及び135度と225度(斜め追い波: Quartering sea)のそれぞれの動揺の周期、振幅及び減衰状況はほぼ等しい。

これらの相対針路のうち動揺が最も大きな針路は横揺れについては、斜め追い波の場合で次いで横波の場合である。縦揺れについては、相対針路0度、すなわち向い波(Head sea)次いで斜め向い波の順であった。横揺れが大きく転覆事故が起こりやすい危険な針路として、よく「斜め追い波は避けるべきだ」と言われるが、この結果からも斜め追い波状態の危険度がよく分かる。また、斜め追い波は波を船の右舷から受ける場合と左舷から受ける場合とではその動揺の大きさが他の相対針路の場合の左右舷の一致の良さに比べやや悪い。これは斜め追い波での横揺れの不安定性を示しているものと考えられる。動揺の最も小さい針路については、横揺れの場合は、向い波次いで斜め向い波、縦揺れについては、横波次いで斜め追い波及び追い波(Following sea)の場合である。

周期については、横揺れの場合は全ての針路にわたりほぼ7.5秒附近に明らかなピークが見られ、このピークは供試船の横揺れ固有周期と思われる。縦揺れの方は横揺れと異なり、2から3個のピークが現われている。これらのピークはそれぞれ船の縦揺れ、横揺れの固有周期及び波との出会い周期を示すものと思われる。縦揺れ固有周期については横揺れ固有周期のように顕著ではなく、むしろ波との出会い周期が顕著に現われている。

以上スペクトル解析結果から船の波との相対針路の差に基づく動揺応答特性の変化がよく分かり、スペクトル解析法が非常に有効である事も示された。

船体運動の極大値あるいは極小値の確率分布はレイリー分布で近似し得ることが Longuet-Higgins(28) や Jasper(44)の研究によって知られている。その結果、福田(45)によれば船体応答の理論計算、すなわちストリップ法によりその短期のパラメータ分散を求め(3・1・1)式(28)に示すような船体運動の諸特性値が推定できると述べている。

Table 3. The calculated angle, period and number of heavy movements from each power spectrum of rolling and pitching movements.

Rolling											
R. Co.	$\sigma^2$	$\bar{\theta}_a$	$\bar{\theta}_s$	$\bar{\theta}_{max}$	$\theta_e$	$\theta'_e$	T	$\theta_{max}$	q ( $x > x_1$ )	N <sub>c</sub>	N <sub>o</sub>
0°	1.94	1.74	2.78	3.55	4.48	5.39	7.5	5.4	$6.76 \times 10^{-8}$		0
45°	4.62	2.69	4.30	5.48	6.92	8.32	6.0	9.4	$9.86 \times 10^{-4}$	0.2	3
90°	17.41	5.22	8.34	10.64	13.43	16.15	7.5	11.0	0.159	23.4	25
135°	22.13	5.88	9.41	12.00	15.15	18.21	8.6	13.0	0.236	30.2	33
180°	12.43	4.41	7.05	8.99	11.35	13.65	8.6	11.1	0.076	9.8	11
225°	28.50	6.67	10.68	13.61	16.19	20.66	7.5	15.2	0.326	47.8	46
270°	17.20	5.19	8.30	10.58	13.36	16.05	7.5	17.5	0.156	22.8	28
315°	4.52	2.66	4.26	5.43	6.86	8.25	6.0	7.0	$8.71 \times 10^{-4}$	0.2	0
Pitching											
0°	6.21	3.12	4.99	6.36	8.03	9.65	3.8	7.5			
45°	3.60	2.37	3.79	4.83	6.11	7.34	4.6	7.1			
90°	1.34	1.45	2.82	2.96	3.73	4.49	6.7	3.5			
135°	2.07	1.80	2.88	3.67	4.63	5.57	10.0	4.8			
180°	2.05	1.79	2.86	3.65	4.61	5.54	12.0	4.1			
225°	1.83	1.69	2.71	3.45	4.36	5.24	8.6	5.1			
270°	1.52	1.54	2.47	3.15	4.00	4.78	7.5	4.3			
315°	4.56	2.67	4.27	5.44	6.87	8.26	4.6	8.4			

Note ; R. Co. : ship's relative course against the wave direction

$\sigma^2$  : variance of the ship's movement amplitude

$\bar{\theta}_a$  : arithmetic average of amplitude

$\bar{\theta}_s$  : significant value of amplitude

$\bar{\theta}_{max}$  : average of higher amplitude of 10% throughout overall data

$\theta_e$  : expected amplitude at 1% probability

$\theta'_e$  : expected amplitude at 0.1% probability

T : dominant period of ship's movements

$\bar{\theta}_{max}$  : observed maximum amplitude

q ( $x > x_1$ ) : probability of rolling angle x above a given heeling angle,  $x_1 = \tan^{-1}(f/0.5B)$ , where f is free-board of the boat at the measurements and B is the maximum width of ship's hull

N<sub>c</sub> : calculated number of the above heeling from q ( $x > x_1$ )

N<sub>o</sub> : observed number of rolling angles above  $x_1$

$$\left. \begin{array}{l} \text{平均値} = 1.25\sigma \\ (1/3) \text{ 最大平均値(有義値)} = 2.00\sigma \\ (1/10) \text{ } \text{ } = 2.55\sigma \\ (1/100) \text{ } \text{ } = 3.22\sigma \\ (1/1000) \text{ } \text{ } = 3.87\sigma \end{array} \right\} (3 \cdot 1 \cdot 1)$$

$$q(x > x_1) = \exp(-x^2/2\sigma^2) \quad (3 \cdot 1 \cdot 2)$$

$q(x > x_1)$  について、 $x$  を横揺れ角度とし、 $x_1$  を次に述べる仮定に従い近似的に 8 度とし、 $q$  を推定した。すなわち、“鶴水”の船体半幅(0.5B=1.66m)と実験時の乾舷( $f=0.23m$ )から、船が横傾斜した場合、傾斜舷の上甲板舷側が水面と等しくなり、甲板上に海水が浸入し始める角度( $x_1$ )は静水中であれば  $\tan x_1 \approx 2 \cdot f/B$  であり、 $x_1 \approx 8$  度となる。海洋不規則波中では上述の仮定の下で耐航性における海水打込み(Deck wetness)を推定することは十分ではない。すなわち、真の海水打込みの推定のためには、舷側の海面に対する相対運動の応答を計測する必要がある。しかしここでは近似値として(3・1・2)式により推定された確率から本

そこで理論計算による分散と実船試験による分散( $\sigma^2$ )は、よく一致する(24)ことから、ここでは(3・1・1)式にFig. 3で示した実船試験結果の分散を代入し、船体運動の諸期待値を推定した。さらにFig. 2に示されたように船体動揺の時間的変動量の確率分布が正規分布に従うことから(3・1・2)式が成立し、同式から動揺の極大値が一定値を越える確率も推定できる(45)。

Table 4. Principal particulars of No. 97 CHOYO MARU, No. 23 TOKAI MARU and No. 51 TOKAI MARU.

	No. 97 Choyo Maru	No. 23 Tokai Maru	No. 51 Tokai Maru
Length (O. A)	36.730m	38.955m	38.955m
// (Reg)	32.200m	34.000m	34.000m
// (P. P)	31.80 m	33.60 m	33.60 m
Breadth (M <sup>ld</sup> )	7.00 m	7.30 m	7.30 m
Depth ( // )	3.35 m	3.40 m	3.40 m
Draft ( // )	2.90 m	2.95 m	2.95 m
Gross tonnage	197.12 t	193.94 t	193.94 t
Displacement	438.20 t	507.50 t	507.50 t
Capacity Hold	178.58 m <sup>3</sup>	173.00 m <sup>3</sup>	193.00 m <sup>3</sup>
// F. O. T.	104.15 m <sup>3</sup>	151.00 m <sup>3</sup>	162.49 m <sup>3</sup>
// F. W. T.	14.20 m <sup>3</sup>	10.00 m <sup>3</sup>	9.85 m <sup>3</sup>
Main Engine (Diesel)	650 ps	1000 ps	1000 ps
Speed (Service)	10.00 Kt	10.50 Kt	10.50 Kt
// (Trial Max.)	11.00 Kt	12.22 Kt	12.22 Kt
Complement	16 p	16 p	16 p
Block Coefficient C <sub>b</sub>	0.663	0.680	0.680
Prismatic // C <sub>p</sub>	0.705	0.712	0.712
Midship // C <sub>m</sub>	0.940	0.951	0.951
Water plane // C <sub>w</sub>	0.910	0.940	0.940
// C <sub>wB</sub>	0.84(A)m	0.98(A)m	0.98(A)m

実験の計測時間内での $q$ の発生回数( $N_c$ )を(3・1・3)式により計算した。

$$N_c = (N \cdot \Delta t / T) \cdot 2 \cdot q \quad (3 \cdot 1 \cdot 3)$$

ここで、 $N$ はデータ数(1100)、 $\Delta t$ はデータ読み取り間隔(0.5秒)および $T$ はパワースペクトルより求めた横揺れの平均周期である。一方、記録から $q$ の発生回数( $N_0$ )を数え両者を比較した。その結果は、Table 3に他の諸特性値と共に示した通り、 $N_c$ と $N_0$ はよく一致した。

## 第2節 以西底曳網漁船による実験(46)

実習船“鶴水”による実船実験の結果、動揺特性の解析、表現には確率過程としての取扱いによるスペクトル解析が有効であった。そこで商用漁船に便乗し実船による実験の可能性と実験上の問題点を明らかにするため、短期実船実験を行った。また海況の目視観測のみから安全性の限界を予測するための動揺特性をどれだけ明らかに出来るかについて、次の3点について検討した。

- ① 船体運動スペクトルから見た目視観測海況の定量的精度
- ② 操業中と航走中の動揺の比較
- ③ 船内各部、特に乗組員の各寝台での上下加速度

## の比較

### (1) 実験の方法

実験は大洋漁業長崎支社所属以西底曳網漁船第97長洋丸、第23及び第51東海丸に乗船して行った。第97長洋丸の実験は1971年12月30日～1972年1月5日の漁場への往航時及び操業状態について行われた。第51東海丸の実験は1972年5月1日～3日の漁場への往航時および操業中について、引き続き5月3日～5日にわたり第23東海丸の帰港時について行われた。

計測項目は横揺れ、縦揺れおよび上下動として上下加速度の3運動について船橋において計測し連続記録した。供試船は3隻共に同船型でほぼ等しいトン数である。主要目についてはTable 4に示す通りである。またスペクトル解析における一実験当たりのデータ数は880個、読み取り時間間隔 $\Delta t=0.4$ 秒、ラグ数は60である。

### (2) 結果および考察

#### (2)-1 運動スペクトルから見た目視観測波浪の定量的精度について

帰港時航走状態で波との相対針路10度(向い波)、風浪階級3(WMOコード3700)について2回、また操業状態で斜め向い波、風浪階級4について3回および

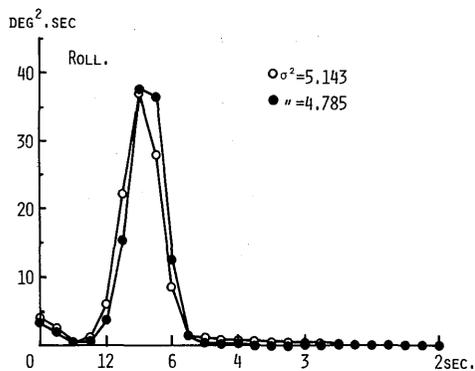


Fig. 5-1. Power spectra of rolling during homeward voyage at head sea, sea state 3, about 7.0 knots.

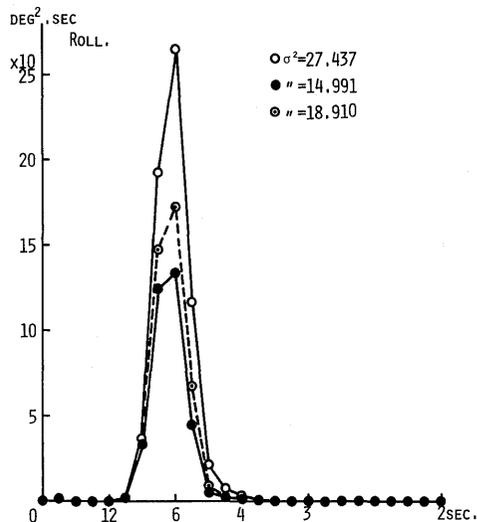


Fig. 6-1. Power spectra of rolling during fishing operation at bow sea, sea state 4, about 3.5 knots.

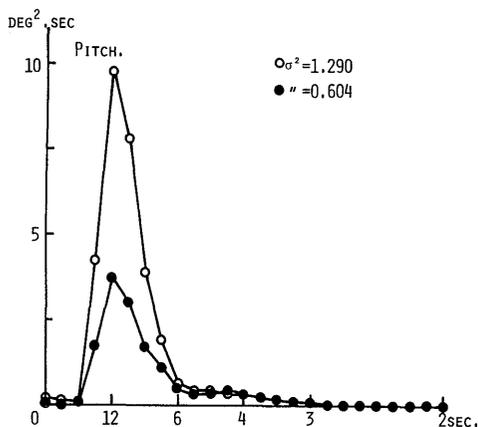


Fig. 5-2. Power spectra of pitching during homeward voyage at head sea, sea state 3, about 7.0 knots.

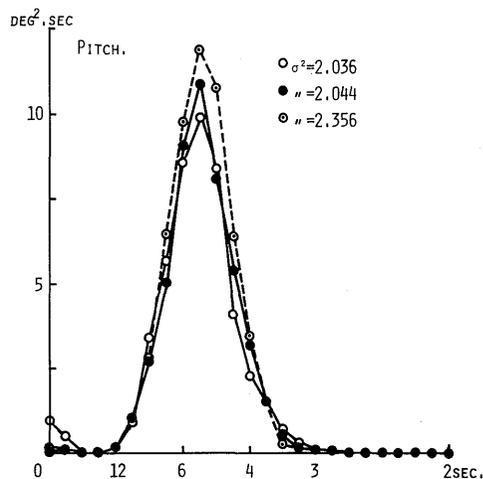


Fig. 6-2. Power spectra of pitching during fishing operation at bow sea, sea state 4, about 3.5 knots.

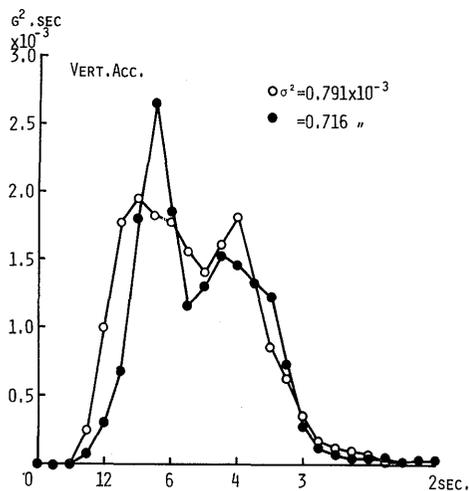


Fig. 5-3. Power spectra of heaving during homeward voyage at head sea, sea state 3, about 7.0 knots.

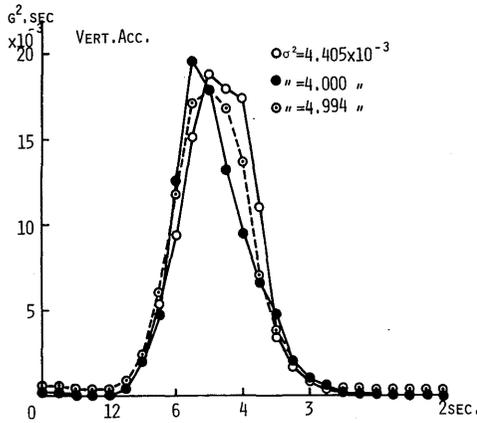


Fig. 6-3. Power spectra of heaving during fishing operation at bow sea, sea state 4, about 3.5 knots.

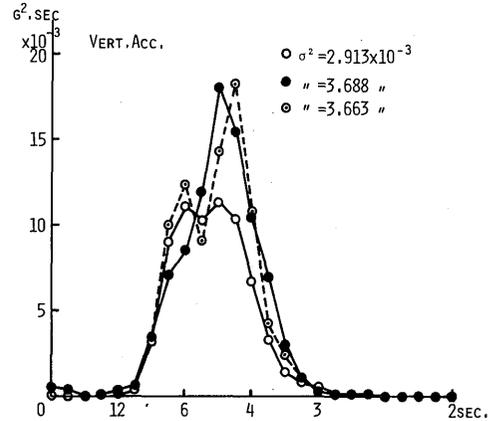


Fig. 7-3. Power spectra of heaving during fishing operation at beam sea, sea state 2, about 3.5 knots.

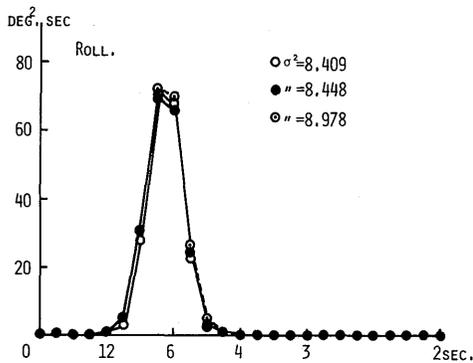


Fig. 7-1. Power spectra of rolling during fishing operation at beam sea, sea state 2, about 3.5 knots.

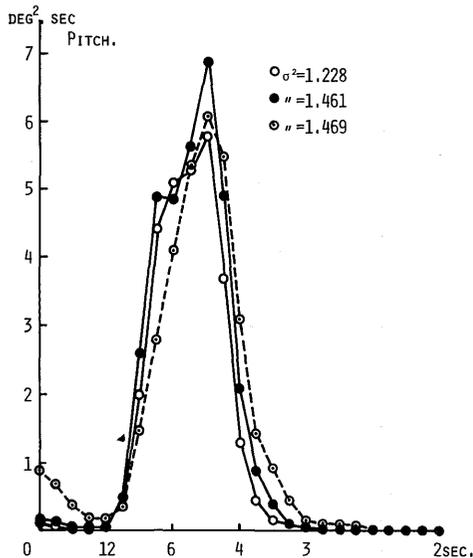


Fig. 7-2. Power spectra of pitching during fishing operation at beam sea, sea state 2, about 3.5 knots.

横波の風浪階級2について3回の各実験機会が得られたので各動揺特性について比較考察する。ただし船のコンディションは実験期間が短いためその間の変化はなかったものとして無視した。

#### a) 向い波状態の場合

スペクトル解析による横揺れ、縦揺れおよび上下動のパワースペクトルを Fig. 5 に示す。同図によれば、2回の実験における横揺れと上下動は振幅および周期ともほぼ等しい。しかし縦揺れについては、周期は等しいが振幅値は分散( $\sigma^2$ )の値からみると0.4度の差が認められる。パワーのピーク値では約2倍以上の差がある。したがってこれらの事から波浪の評価を風浪階級のみで定量化し、船体運動を一義的に定量化予測する事は困難であると考えられる。

8角航走試験の結果(41)、縦揺れは向い波の場合が最も大きく、またコレログラムから見て横揺れより減衰の大きい運動である。また縦揺れ固有周期による動揺より出会い周期による動揺が顕著であった事などから、3運動の中でも縦揺れ特性は一致が一番悪く、予測が困難であろうと考える。さらに風浪階級3の場合波高は0.5m~1.25mまでの範囲を含みその上限と下限の差、または波長などの相違により縦揺れ応答スペクトルにも差が顕著に現われたものと考えられる。上下動加速度特性はパワーにそれぞれ2つのピークが現われている。8秒附近のピークは横揺れ周期に一致しているが、加速度計の設置がこの実験の場合、左舷側である事から横揺れ周期の影響でその周期のところにピークが現われたものとする。横揺れ特性は向い波の場合に動揺は最も小さく、横揺れ固有周期が卓越し減衰の小さい動揺である事から、周期および振幅値共により一致を示したものとする。

b) 斜め向い波状態の場合

斜め向い波では風浪階級4(波高範囲は1.25m~2.50m)の場合について3回の実験機会が得られた。各動揺のスペクトルを Fig. 6 に示す。3回の計測結果において差が大きい運動は横揺れで最大1.4度である。この横揺れの差は、海洋波が不規則な有限波頂線のため斜波中では“みそすり運動”のような揺れ方をし、その周期は船の固有周期が卓越し等しくても、振幅値は一定ではなく風浪階級4の波高範囲1.25m~2.5mの差に起因するものと考えられる。

縦揺れ及び上下動については、ほとんど差は見られない。

c) 横波状態の場合

本実験の3回の計測時間間隔は各約1時間である。すなわち、1回の曳網操業時間約3時間において、曳網開始直後、中期および“寄せ”開始直前の実験結果である。各運動のスペクトルを Fig. 7 に示す。これらの図において運動の周期、振幅などの各実験間の差はほとんどみられない。海況変化がこの約3時間の間、ほとんどなくほぼ定常であったものと仮定すれば一曳網の全時間を通じて、曳網索に対する魚の入網負荷の変化も無視できる程度であり、船体運動の変化はなかったものと考えられる。

横揺れ運動スペクトルにおけるパワーの周波数範囲は狭く、船の固有周期が卓越している事が認められた。縦揺れのスペクトルには貨物船の実船試験(24)の結果において、横揺れの周期が現われる事が知られているが、Fig. 7-2にも横揺れ周期と考えられる6~7秒近くに明らかに小さなピークが認められる。縦揺れの波との出会い周期はパワーの卓越ピークの5秒である。上下動については、向い波の場合と同様にパワーに2個のピークが見られる。ピークの小さい6秒のパワーは横揺れ固有周期が現われたものと考えられ、一方パワーの大きい5秒の周期が波との出会いによる上下動の応答周期であると考えられる。

以上の実験から得られた向い波、斜め向い波および横波の各相対針路別に3運動の動揺特性について考察したが全般的にみて、横揺れ周期は出会い角すなわち相対針路の変化に関係なく、ほぼ一定で固有周期の値を示した。縦揺れ及び上下動の周期は波との出会い角により異なり、波との出会い周期を示すと考えられる。振幅は目視による海況がほぼ等しいと判断された場合でも、横揺れについては斜め向い波で、縦揺れについては向い波で大きな差が見られた。上下動については差は小さいが横波でみられた。斜め追い波と追い波に

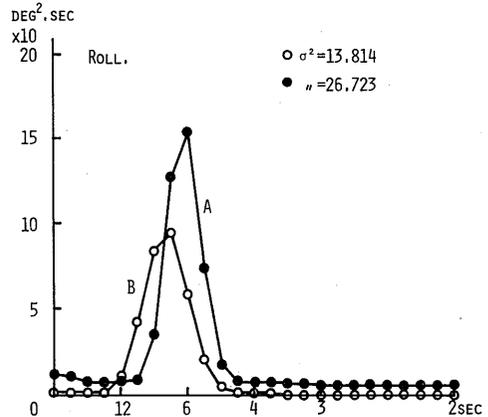


Fig. 8-1. Power spectra of rolling at quartering sea, sea state 4.  
A : during fishing operation  
B : during outward voyage

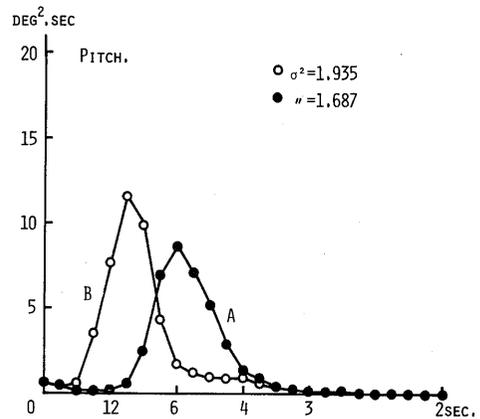


Fig. 8-2. Power spectra of pitching at quartering sea, sea state 4.  
A : during fishing operation  
B : during outward voyage

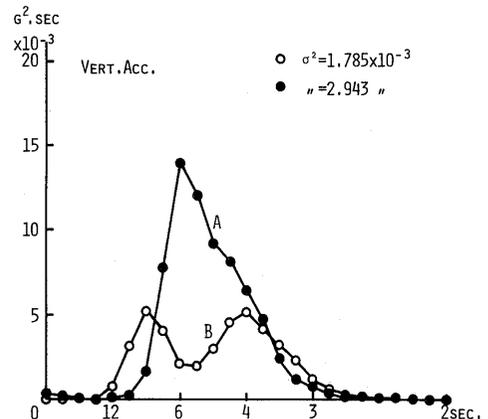


Fig. 8-3. Power spectra of heaving at quartering sea, sea state 4.  
A : during fishing operation  
B : during outward voyage

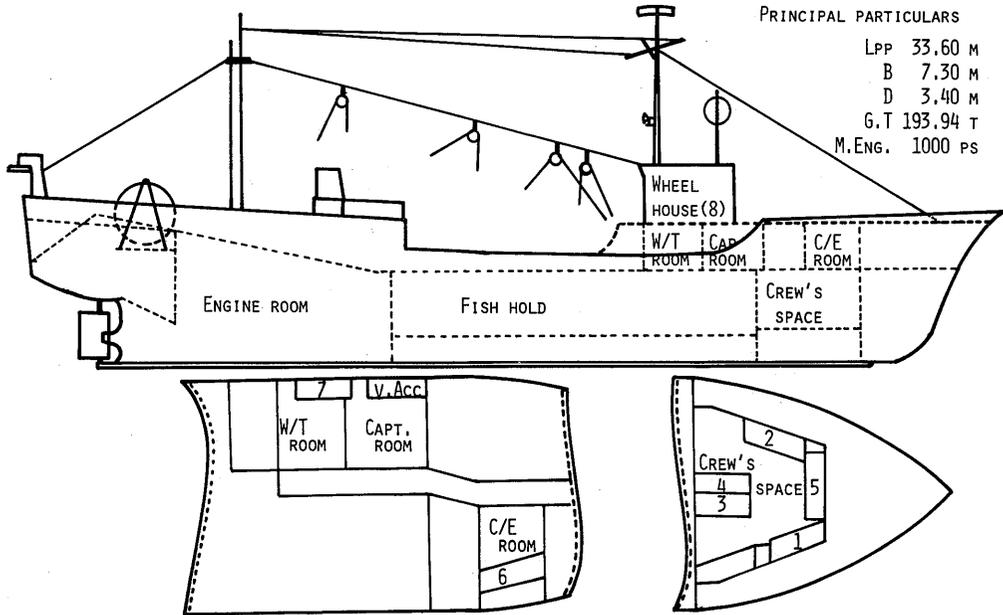


Fig. 9. General arrangement of the No. 51 TOKAI-MARU.

関しては実験機会が得られなかったが、波浪に関する波高、波長および出会い周期などについての情報としては目視観測の風浪階級のみでは不十分であり、また精度の面で問題がある。特に運動の振幅値について、運動によっては特有の相対針路において大きな差が認められた。

(2)-2 曳網中と航走中の運動の比較

海況と相対針路がほぼ同一条件（海況4）の場合における航走中（船速約9ノット）と、曳網中（同約3.5ノット）の計測結果から得られたパワースペクトルをFig.8に示す。これらの図から運動振幅の平均値( $\sigma$ )は、横揺れと上下動は曳網中の方が航走中より大きくその差は横揺れで1.5度、上下動で0.012Gであった。縦揺れについては逆にその差はわずかであるが、航走中の方が大であった。また各運動の周期および減衰状態に関して、横揺れと縦揺れは共に曳網中の方が航走中に比べ周期は短く、減衰が大であった。上下動については減衰は横揺れ、縦揺れと同様大きい、周期については航走状態で卓越した周期がFig.5と同様、2個のピーク、すなわち8秒と4秒にそれぞれ認められ曳網状態では6秒のみの単一周期のスペクトルであった。

曳網中の周期が航走中の周期に比べ短いのは、この実験の場合、相対針路が斜め追い波状態で船速が曳網中の約3.5ノットに対し、航走中は約9ノット、その差

約5.5ノットのためであり、曳網中が当然短いと考えられる。また3運動とも曳網中において最も顕著な周期がそれぞれ等しい値を示し、減衰も大きいのは、曳網索の張力すなわち漁具の抵抗による影響と考えられる。天下井(14,15)によればトロール操業中の船体運動は漁具のワープ張力と力学的相関関係があり、なかでも上下動が最も関係が強いことを明らかにしている。また

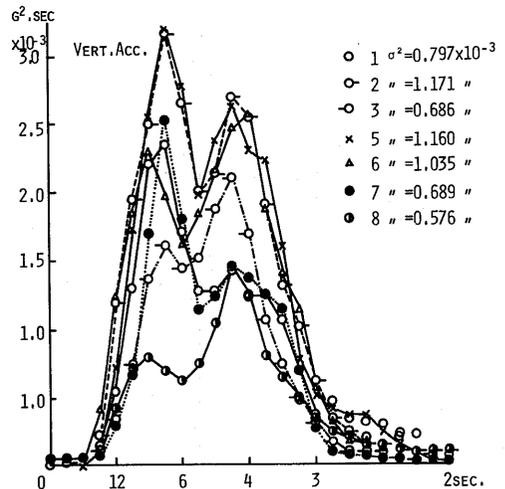


Fig. 10-1. Power spectra of acceleration during homeward voyage at head sea, sea state 3, about 7.0 knots.

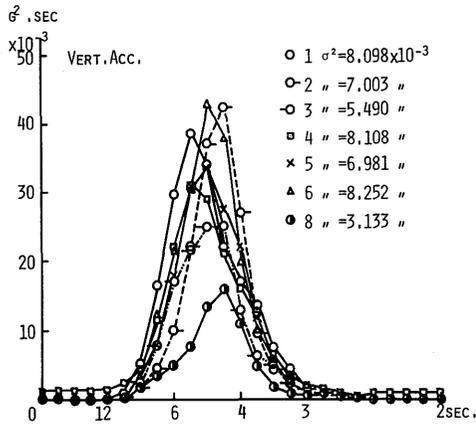


Fig. 10-2. Power spectra of acceleration during fishing operation at bow sea, sea state 4, about 3.5 knots.

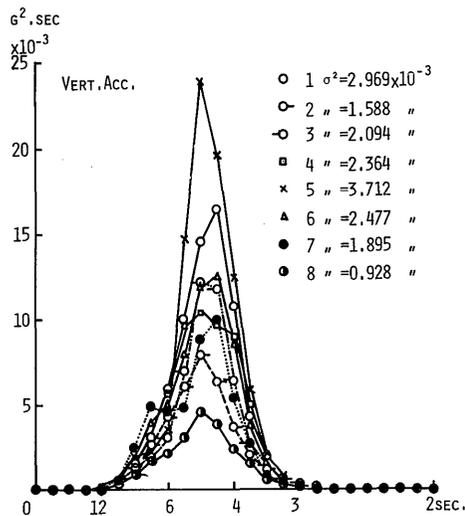


Fig. 10-3. Power spectra of acceleration during fishing operation at following sea, sea state 2, about 3.5 knots.

は船首尾線中央からのびる事は少なく、ガントリーのすべりレール上を移動し片舷に寄っている場合が多い。これが以西底曳網漁船の横揺れを増大させている原因ではないかと考える。斜め追い波状態のみの実験結果であるが、以西底曳網漁船の場合、大角度の横傾斜確率は曳網中の方が航走中より高く、危険性も大きいと考えられる。

(2) 3 船内各部特に乗組員の各寝台での上下加速度の比較

船の乗心地または船酔に最も影響を与えるといわれている上下動加速度について、船内各部の比較を行った。すなわち、乗心地度は上下動加速度の値を指標として Fig. 9 に示すような乗組員の各寝台の位置で計測し比較した。上下動加速度のパワースペクトルを相対針路が向い波、斜め向い波および追い波について Fig. 10 に示した。加速度計は船体に固定したため、横揺れおよび縦揺れ角度の影響が  $\{G \cdot \cos \theta\}$  として含まれているが、乗心地はこれらの影響も含めて考えられるべきとの観点から無視した。また計測点が8点であり、1点の計測時間は約10分であるから全点の計測所要時間は80分である。この間の海況変動についても大きな差は認められず無視して比較した。Fig. 10 に示す通り、同一計測時における周期は各寝台共等しく、スペクトルのピークは航走中で2個、曳網中で1個である。しかし振幅の平均値( $\sigma$ )は各位置で大きな差が認められた。

Fig. 10 に示された各相対針路において、最も上下動加速度が小さく、したがって乗心地度が最も良好と考えられるのは船橋の漁撈長の寝台であった。次いで良好な場所は通信長室および船長室の各寝台であった。比較的船首部に近い機関長室および一般乗組員室などの各寝台では悪く、これらの各寝台間で優劣の順位をつける事は本実験結果の範囲では困難であるが、ほぼ船首に近いほど、すなわち上下動運動の重心より遠いほど、上下動加速度は大きく乗心地度は悪くなる傾向が認められた。乗心地度が最も悪い船員室寝台と最も良い漁撈長寝台との上下動加速度の差は、帰航時航走中の向い波の場合 (Fig. 10-1) で0.010G、曳網中の斜め向い波 (Fig. 10-2) で0.035Gおよび追い波 (Fig. 10-3) で0.031Gであり、それぞれ漁撈長寝台の1.4倍、1.6倍および2.0倍であった。漁撈長寝台はその職務上、船橋にあるが奇しくも乗心地度が最も良い場所であった。

(3) 短期の実船実験結果と今後の問題点

実船試験として実習船による8角航走試験および、

操業中と航走中の運動の大小についても追い波の場合について論じているが、上下動は操業中の方が大きく横揺れおよび縦揺れでは航走中の方が大きい結果を示している。本実験結果と比較した場合、縦揺れと上下動については同傾向であるが、横揺れは逆の傾向となっている。この相違に関しては、トロール網と以西底曳網の漁法上の相違に起因するものと考えられる。すなわち、オットートロールの場合は曳網索が両舷から2本取られるのに対し、以西底曳網では2隻曳のためワープは船尾に1本であり、しかもこの1本のワープ

以西底曳網漁船による短期実験の結果から総括的に次の事が今後の問題点として考えられた。

1) 実船実験における運動の計測法と解析法については満足し得る結果が得られた。

2) 運動特性を明らかにするためにはパラメータとして相対針路と海況について考察する必要がある、8角航走試験は海況については一定条件にほぼ固定でき相対針路のみのパラメータとして運動特性の表現ができる事から非常に有効な試験方法であった。しかし商用漁船の曳網中については、漁撈上の問題から現実的には実施が不可能である。

3) したがって効率のよい8角航走試験が行えないため、実船実験は長期間にわたり行い、多くの計測結果から統計的手法などにより種々の実態を明らかにする必要がある。

4) また風浪階級による海況の定量化のみでは海上における船の運動特性は明らかに出来なかった。したがって波高計が必須であり、次章で述べる波高計測装置を試作した。

#### 第4章 東海・黄海における波浪

船舶の海洋波に対する応答運動を明らかにするためには、波の観測は航海中の船が遭遇する船と波浪波形との相対関係まで含めて計測し、運動との対応を各時刻ごとに行う必要がある。いわゆる出会い波浪の観測による波高と船体運動の同時計測を要し、両者の関係を同時に知る事が重要であると考えられる。

そこで船体上のある点において、海面に対して垂直に相対的な出会いの波高を計測するために、漁船の船体中央の舷側に固定できるステップ型波高計測装置を考案した。したがって、相対的な波高は船の運動成分を含んでいるため、出会い波高の正確な計測を要する線形系の入力としては問題がある。

この研究では、相対波高が計測されたので出会い波高は相対波高から船の運動を代数的に減ずることによって得られる方法とした。

船の運動中で、横揺れと縦揺れ角および上下動加速度が計測されたので、記録された運動に基づいて、上下動は二重積分の方法を用いて加速度を変位に変換することが必要であった。記録データの二重積分法には若干の問題があったが、実用的な方法を開発した。

上記の開発された波高計測装置により、実船実験を通じて得られた東海・黄海の波浪特性は標準波スペクトルとしての Pierson-Moskowitz 型とはやや異なる

波スペクトルであった。しかし、有義波高と平均波周期の二つのパラメータによって表わされる数値波スペクトルモデルが導かれた。

#### 第1節 波高計測装置(47)

船舶に対する環境としての海象、特に波浪情報は耐航性を論ずる場合、必要不可欠である。実船実験で問題となるのは波の計測である。耐航性に関する研究で多くの研究者は波高計測に常に強い関心を払い、種々の波高計を試作開発している。

ステップ型波高計としては Russel (48) が1961年に、同じくステップ型でかつその遠隔測定装置を川島(12, 13)は1963年に試作開発している。海洋波中の船体運動を波浪に対する応答運動として取扱い、その応答関数を求める場合は前文で述べたように、波浪計測も出会い波高を計測する必要がある。

船舶用波高計が開発されたのはごく最近のことであり、未だ精度の高い波高計はない。主なものとしては Tucker(29)、益田(49)、山内(50)および「SR132」(51)で開発されたものなどがある。SR132で開発された波高計を用いた実船実験が SR125の実験(27)である。

本研究においてもステップ型の実船実験用波高計測装置を考案し、実用的に満足し得る精度の結果を得た。

#### (1) 波高計の構造と波高計測およびその処理方法

出会い波高計測システムのブロック図を Fig. 11 に示す。図中(A)の部分は、実船実験における船体運動の3要素(横揺れ、縦揺れおよび上下動加速度)および船体に取付けられたステップ式波高計による相対波高の検出部である。(B)の部分は上下動加速度を上下動変位に変換するための2回積分処理部、すなわちアナログ積分演算部である。(C)は(A)において計測された出会いの相対波高より(B)において演算処理された船体運動を除き、地軸空間における波高変動を得るためのデジタル演算処理部である。

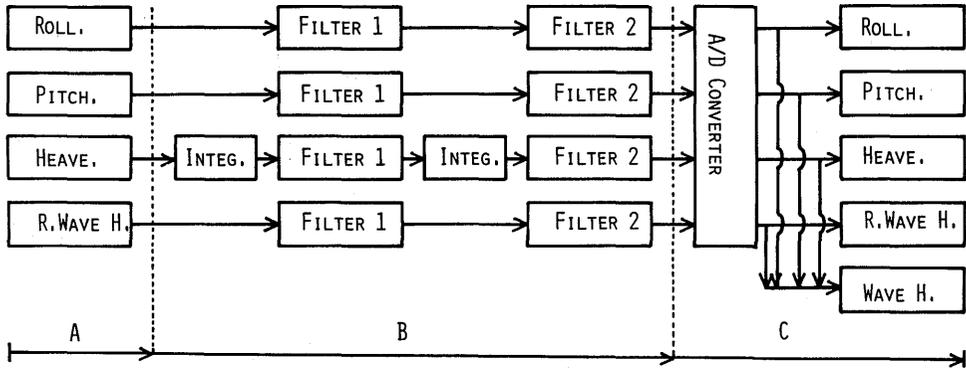
出会い波高と船体運動計測値との関係は次式で与えられる。

求める波高を  $h$ 、計測される相対波高  $h_e$ 、計測される船体運動の横揺れ角  $r$ 、縦揺れ角  $p$ 、および上下動の変位を  $z$ 、とおく。これらはすべて時間の関数であり、ある時刻における関係は；

$$h(t) = h_e(t) \pm B/2 \cdot \tan\{r(t)\} \pm CW \cdot \tan\{p(t)\} \pm z(t) \quad (4 \cdot 1 \cdot 1)$$

で与えられる。ここで  $B$  は波高計取付け部における船の幅であり、 $CW$  は波高計と浮面心との船首尾線上の水平距離である。

本システムでは  $A/D$  変換して、デジタル演算処理



PART A: MEASUREMENT OF SHIP'S MOTIONS AND RELATIVE WAVE HEIGHT,  
 B: ANALOGOUS CALCULATION FOR INTEGRATION OF VERTICAL ACCELERATION,  
 C: DIGITAL CALCULATION TO DELETE SHIP'S MOTIONS FROM RELATIVE WAVE HEIGHT.

Fig. 11. Block diagram of calculation for encountered wave height.

をしているのでサンプリング時間間隔を  $\Delta t$  とすると  
 (4.1.1) 式は次の様になる。

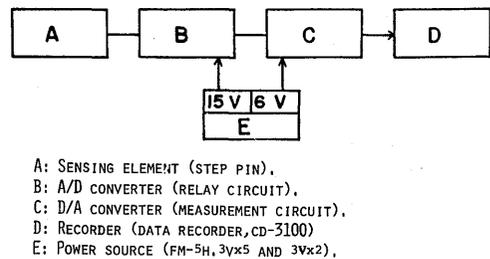
$$h(i\Delta t) = h_e(i\Delta t) \pm B/2 \cdot \tan\{r(i\Delta t)\} \pm CW \cdot \tan\{p(i\Delta t)\} \pm z(i\Delta t) \quad (4.1.2)$$

ここで  $i=1, 2, 3, \dots, N$  として処理されるが、 $z(i\Delta t)$  については (B) に示されるように加速度で検出しているのでアナログ処理による 2 回積分の後に A/D 変換する必要がある。

(1)-1 相対波高の計測

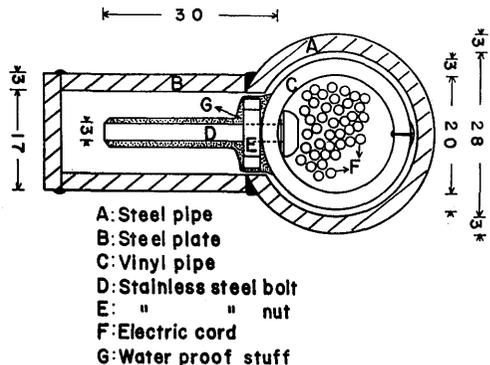
波高計測についてはいろいろな方式が前文で述べたように研究開発されているが、耐航性の実船実験用として商用漁船の船体に取り付ける事を第一の目的としてステップ式波高計を製作した。原理的には各ステップ間に定抵抗をそう入し、各ステップが海水によって短絡されることにより海面の昇降を抵抗の変化に変換する。これを電圧の変化として取り出し、波高の計測記録を行う方式である。この場合、海水によってステップを短絡させる時、絶縁体上に残る海水膜に流れる残留電流のために、測定直線性が失われ記録波形がひずむ。この点を解決する方法として、海面に対応する各ステップ間の短絡をリレー回路を用いて行わせるような波高計 (48) とした。

製作した波高計のブロック図、波高検出ポール部の断面図および船体取付図をそれぞれ Figs. 12, 13 および 14 に示す。使用したリレーは富士通信機製 151 型小型リレー、抵抗は通信用の  $1/4P, 50\Omega$  である。すべての抵抗は、抵抗値を均一にするためデジタルポルト



A: SENSING ELEMENT (STEP PIN),  
 B: A/D CONVERTER (RELAY CIRCUIT),  
 C: D/A CONVERTER (MEASUREMENT CIRCUIT),  
 D: RECORDER (DATA RECORDER, CD-3100)  
 E: POWER SOURCE (FM-5H, 3Vx5 AND 3Vx2),

Fig. 12. Block diagram of wave measurement device.



A: Steel pipe  
 B: Steel plate  
 C: Vinyl pipe  
 D: Stainless steel bolt  
 E: " " nut  
 F: Electric cord  
 G: Water proof stuff

Fig. 13. A cross-sectional view of step-type wave measurement device.

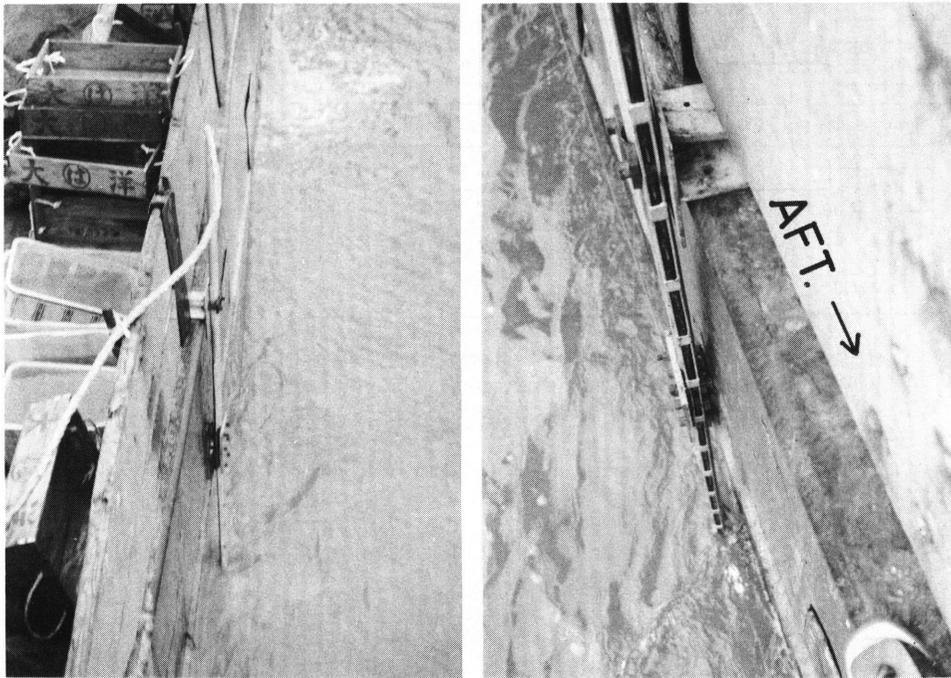


Fig. 14. Sight of outfit of wave measurement device.

メータで測定し、 $49.5 \pm 0.5 \Omega$  以内のものを選び使用した。また舷側における相対波高の変動範囲より波高計の全長は4.20mとし、ステップの間隔を8cmにとり、50ステップとした。

#### (1)-2 上下動加速度の計測データ処理

上下動の計測は非接触型抵抗線ひずみゲージ式加速度計によったが、計測された船の上下動加速度から変位を得るために積分演算処理を行った。しかしその処理方法として、低周波帯域の加速度波を直接積分して速度や変位のデータを得ることは不可能である。すなわち、測定された加速度波形自体に含まれている直流分や波形処理の過程で含まれてしまうドリフト誤差などのため、被積分波形をみるとドリフトの影響が非常に強く現われ、原波形が持っている本来の情報がかくれてしまうか、または発散してしまう恐れがある。これらの誤差を除く適当な処理方法として、デジタル演算(52)やアナログ演算(53)など種々積分法が提案されているが、本装置では次の方法を用いた。

##### a) アナログ電子計算機による積分

積分演算には日立電子製WAC-3030,あるいはALS-505アナログ電子計算機を用いた。この方法については鈴木等(53)による地震波形解析がある。対象とした地震加速度波は船体運動に比べてむしろ高周波

数帯域の現象で、データの長さを最大にとっても、積分演算時間は1~2分程度である。しかし一方船体運動の上下動のような低周波数帯域の加速度波の場合は時系列データとしても必然的に長く必要となり、したがって所要積分演算時間も長くなり8~10分程度になる。その結果アナログ計算機自体のゼロドリフトなど新たな誤差のため満足し得る被積分波形は得られなかった。そこでこのゼロドリフトなどの超低周波分の影響を排除するためにハイパスフィルターを積分器に附加し、アナログ計算機自体のドリフト誤差をカットする方法を用いた。

##### b) フィルターの製作と計測データの前処理

アナログまたはデジタル積分などにおいては、計測時に入ってくる超高低の両周波数成分の雑音の影響が極めて大きい。特に2回積分においてはこの影響が大きく、そのために積分処理の前にこれらの雑音を除いておく必要がある。この方法としてオペアンプによるフィルターを用いた。

本方法では多重帰還高域通過回路の能動フィルター(54,55,56)を製作した。使用したオペアンプはAD-504Lである。以西底曳網漁船の運動特性(46)より、上下動加速度の周波数範囲は0.08Hz~0.5Hzの間であったことから、シャ断周波数を1回積分後のフィル

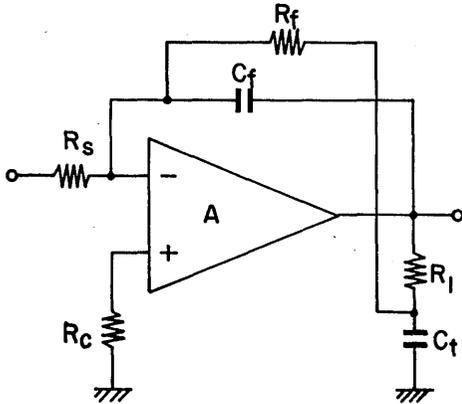


Fig. 15. The circuit of differentiation and integration.

ターでは0.05Hzとし、2回積分後の次段フィルターでは0.03Hzとした。多重帰還高域通過回路の電圧伝達関数は次式で与えられる。

$$G(s) = \frac{-Hs^2}{s^2 + \alpha\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (4 \cdot 1 \cdot 3)$$

ここで  $\omega_0 = 2\pi f_0$  ( $f_0 = 0.03$  および  $0.05$  Hz),  $\alpha = \sqrt{2}$  (最大平坦特性) および  $H = 1$  (0dB) である。定数決定は最大平坦特性, すなわち帯域内の周波数特性の波うちが最も少なくなる条件から決定した。

c) 微分・積分回路による積分

積分演算をアナログ計算機により行うには、演算器が1回積分について6~9個, および係数器が4~6個必要である。そこで、別手法として Fig. 15 に示すようにオペアンプの積分回路中に出力からのフィードバックに周波数特性をもたせ、低周波数域では微分し目的とする必要な高周波数域では積分する、いわゆる微分・積分回路を設計し積分器を試作した(57, 58)。

この回路では積分演算にはオペアンプが1個で済みしかもフィルター効果(微分)もある程度保有しており(a)で述べたアナログ計算機による積分と等しい精度で被積分波形が得られた。ただしフィルター効果を持ち微分される低周波数帯域で、電圧(出力)は微分特性どおりの 6dB/oct で完全に低下せず、ほぼ一定値となる。そこでこの積分処理法においても(b)で述べたハイパスフィルターを附加し、低域をさらにカットする方法を(a)の積分時と同様用いた。したがって、ゼロドリフト誤差などの超低周波数帯域の影響はほとんど除去できた。

(2) 試作波高計の精度と波高計測結果および考察

(2)-1 波高計による相対波高測定

ステップ式波高計の計測回路電源電圧6.46V(平角

5号, 3V×2)のときの校正値をデジタルボルトメータにより測定し、その結果を Table 5 に示す。また実船試験により得られた舷側における相対波高記録の一例を Fig. 16 に示す。

ステップ間にそう入した抵抗の誤差もすべて±1%以内のものをういたため特性も Table 5 に示されるとおり十分な直線性を有し、また Fig. 16 に示すような記録例から見て、ステップの切れも良好であり、波高計として十分な性能と精度を有していると考えられる。

波高計のステップピンのポール部重量は約40Kg, 船体への装着および船内への収納方法については特に十分な配慮をした。すなわち、以西底曳網漁船では漁場で漁獲物の荷役が頻繁に行われ、仲積運搬船の接触時には、荷役作業上波高計を収納する必要がある。また海況5程度までは荷役が行われるため、荒天時においても収納は容易に可能でなければならない。これらに関して、実船試験の結果は良好で、スムーズに約10分で船内に収納出来た。また装着には約20分を要した。

ポール部強度については、船速10ノット、海況7という厳しい条件を台風避航時に経験したが支障なく十分であった。波高計全体は Fig. 12 に示すように波高検出ポール部、リレーボックス部、電源部および記録部と各々ユニット化したために取扱いが容易で記録は船体運動と同時に船橋で行った。

以上の通り波高計自体の性能は十分満足し得るものであるが、波高計を船体舷側(中央部左舷側)に装着しているため、相対波高記録には、船体の航走波の影響および相対針路により、船体の一方では重複波、他方では防波による効果の誤差が含まれていると考えられる。これらの誤差については、船型、船速および海況など要因が多く、未だ正確な定量的検討は行っていない。

日本海難防止協会の航走波研究委員会による「航行船舶の航走波が小型船舶に及ぼす影響の研究」(59)で、航走船の要目から航走波の特性波高を推定する式を示している。そこでこの式により、以西底曳網漁船が10.5ノットで航走する場合の特性波高を推定した。その結果、114GT型で0.49m, 134GT型で0.52mおよび195GT型では0.47mの特性波高を得た。この値は船首尾線側方100mの所での値であるが、約50cm以下という値から相対波高計の誤差は大きなものではないと考えられ、大体の目安として参考にした。また一方、以西底曳網漁船の操業時の曳網速度は最大3~4ノットであるから曳網中の波高測定に関する限り、航走波によ

Table 5. Calibration value of the step-type wave measurement device.

Step No.	Wave height (cm)	Voltage (v)	Step No.	Wave height (cm)	Voltage (v)
0	0	0.00	26	208	3.49
1	8	0.13	27	216	3.62
2	16	0.39	28	224	3.75
3	24	0.51	29	232	3.88
4	32	0.64	30	240	4.01
5	40	0.77	31	248	4.14
6	48	0.90	32	256	4.27
7	56	1.03	33	264	4.40
8	64	1.16	34	272	4.53
9	72	1.29	35	280	4.66
10	80	1.42	36	288	4.79
11	88	1.55	37	296	4.91
12	96	1.68	38	304	5.04
13	104	1.80	39	312	5.17
14	112	1.93	40	320	5.30
15	120	2.06	41	328	5.43
16	128	2.19	42	336	5.56
17	136	2.32	43	344	5.69
18	144	2.45	44	352	5.82
19	152	2.56	45	360	5.95
20	160	2.71	46	368	6.08
21	168	2.84	47	376	6.21
22	176	2.97	48	384	6.34
23	184	3.10	49*	392	6.46
24	192	3.23			
25	200	3.36			

\* No.49 : 6.46 v / 392cm

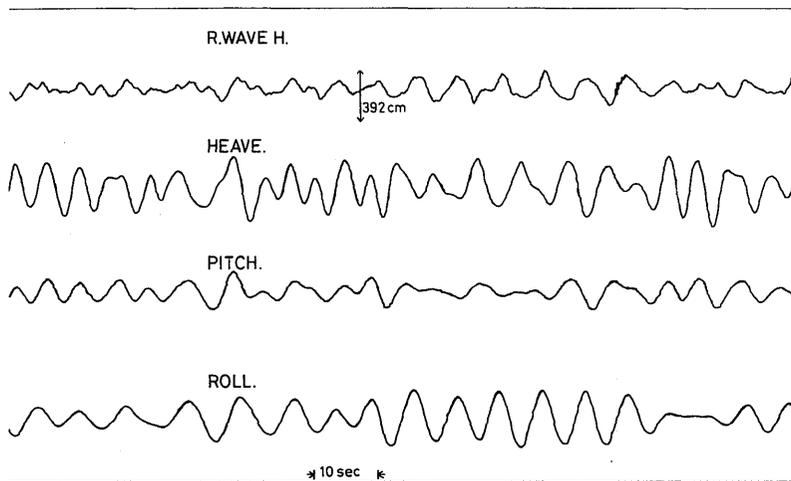


Fig. 16. A recorded sample of ship's motions and relative wave height.

る誤差は少なく無視し得る程度であると考えられる。

一般航走時を含め、その他の要因による波高測定誤差については今後検討し、正確に定量化すべき問題として残されている。

(2)-2 アナログ演算部の周波数特性

a) 静特性の検討

アナログ電子計算機および微分・積分回路による2回積分演算の周波数利得特性と位相特性およびフィルターの周波数利得特性を Fig. 17 に示す。同図によれば、前章における以西底曳網漁船の上下動の周波数帯域0.05Hz~0.5Hz間では利得特性誤差  $\pm 0.5dB$  以内位相誤差は13度以内であることが分かる。微分・積分回路の場合、位相特性精度を高めると利得特性が低周波数域で過大となる傾向がある。したがってこれを補正するためには、フィルターのシャ断周波数で利得が  $-3dB$  である特性を利用し、これらが相殺補正して総合特性として必要周波数帯域、特に低域限界周波数で  $\pm 0.5dB$  以内となるようにフィルターの定数決定に特に配慮が必要である。

実験船の上下動変位を波高と等しいと仮定し、最大8m(海況7)とすれば、波高測定誤差は上記  $0.5dB$  から計算して40cmである。波高40cm程度の波浪につい

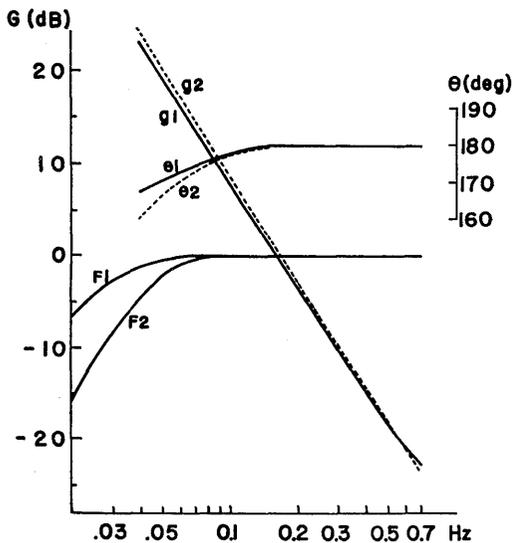


Fig. 17. Bode diagram of the transfer function.  
 $g_1, \theta_1$ : by approximate integral method ( $T_0=40\text{sec}$ ,  $T_s=15\text{sec}$  and  $h=0.1$ )  
 $g_2, \theta_2$ : by differentiation and integration  
 $F_1, F_2$ : active high pass filter ( $f_0=0.03\text{Hz}$  and  $0.05\text{Hz}$ )

ては、実船試験による耐航性の研究では問題視するほどの重要性はないと考え、誤差の許容限界を  $\pm 0.5dB$  位相については15度以内とした。Fig. 17 に示す通り、アナログ演算部の特性はこの許容範囲内であり、実用的に十分満足し得るものと考えられる。

b) 不規則信号による動特性の検討

実船試験により得られた上下動の加速度信号を用いて2回積分を行い、その精度を検討した。この場合、被積分波形の精度を比較、検討すべき真の上下動変位波形が得られないために、比較検討方法として、周波数領域での検討を行った。すなわち、加速度信号とこれから線形変換して得られた変位信号とを定常確率過程の不規則信号として、オートスペクトル解析、さらに加速度信号を入力とし、変位信号をその出力とするクロススペクトル解析を行い、演算積分時間6分間のフィルターを含めたアナログ2回積分回路の応答特性と線形性を検討した。その結果を Fig. 18 に示す。同図からコヒーレンシはスペクトルの有効周波数帯域(0.08Hz~0.3Hz)で0.94以上、相対誤差は0.15以下であることがわかる。位相特性についても同周波数帯域で10度以内である。0.08Hz以下の低周波数帯域において、大きな誤差が現われているのは、フィルターの有効なシャ断効果の成果である。一方0.3Hz以上の高周波数帯域において、入出力信号間の線形変換精度が悪いのは、その周波数帯域の入力信号が非常に小さい事とその結果アナログおよびデジタル演算の誤差が重畳し、利得および位相共に誤差が大きく現われたものとする。しかし、加速度信号の有効なスペクトル分布周波数から考察し、無視して問題はないと考えられる。

以上積分器の動特性について検討した結果、本手法による出会い波高計測システムの中で積分器が最も重要な演算部分であることから、考案された波浪計測装置は実船用および実用的方法として十分な精度を有していると考えられる。

(3) 実船による出会い波高計測結果の分析例

1974年2月8日に行った実船試験で得られた記録データ (Fig. 16) について本手法に従い波高算出演算を行った。その結果のパワースペクトルおよび波高の頻度分布を Figs. 19, 20 に示す。データ数500、読み取り間隔0.5秒、スペクトル計算におけるラグ数は50である。実験時の海況は6、右舷船尾より波浪を受けて曳網中のデータである。Fig. 20 より、波高の時系列データの分布は正規分布であり、出会い波周期は約8.3秒である。データ中での最大波高は5.3m、有義波高は3.8

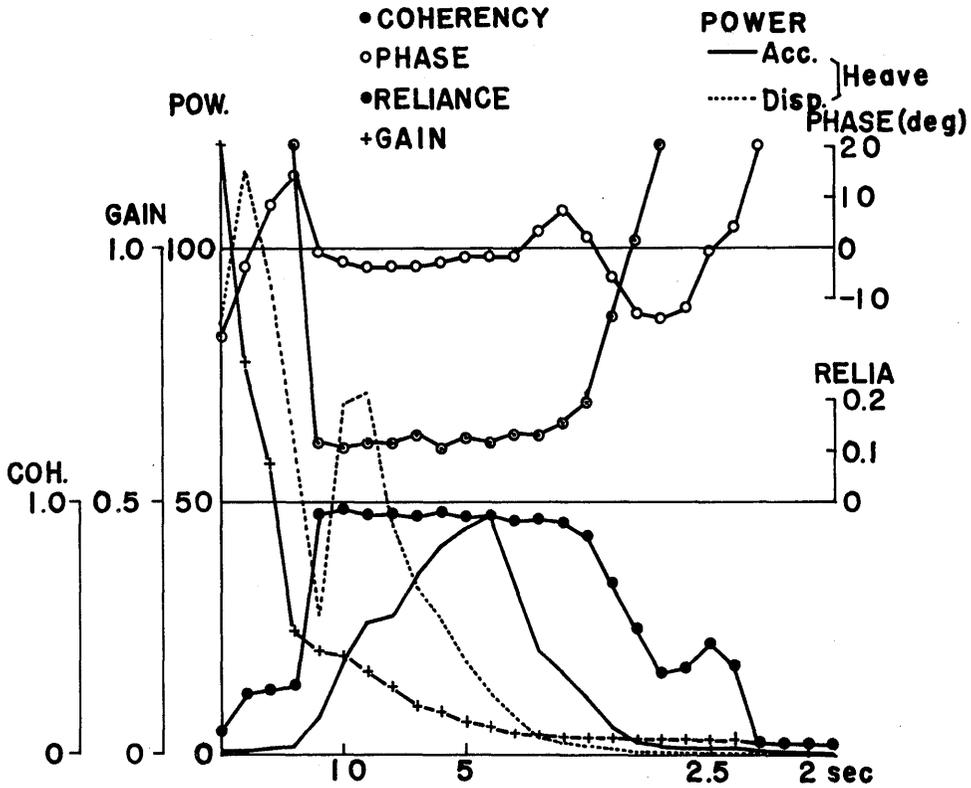


Fig. 18. The response characteristic, coherency and reliance between acceleration and displacement of the heaving by approximate integral method.

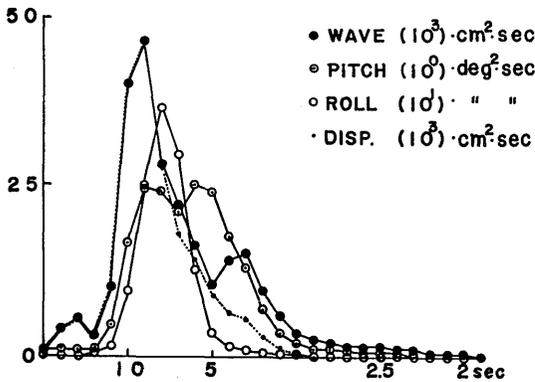


Fig. 19. Power spectra of ship's motions and encountered wave height.

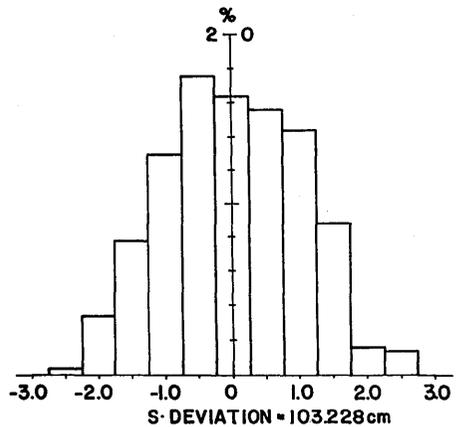


Fig. 20. Distribution of wave height variation.

m, 1/10最大平均波高は4.6mおよび平均波高(r. m. s)は2.6mであった。Fig. 19に示すパワースペクトルに波周期のピークが8.3秒と4.2秒の2個ある。これは4.2秒の周期の波は曳網中で船速3~4ノットの低速ではあるが、船体影響および荒天のための碎波によるものと考えられる。したがって本来の波周期は長周期の

ピーク8.3秒と考える。

### 第2節 東海・黄海の波浪特性

以西底曳網漁船はFig. 21に示す東海・黄海を主漁場としているが、東海・黄海は四季によりそれぞれ波浪特性を異にする事は明らかである(60)。一年間を通じた場合、海況が最も厳しい冬期と最も穏やかな夏期

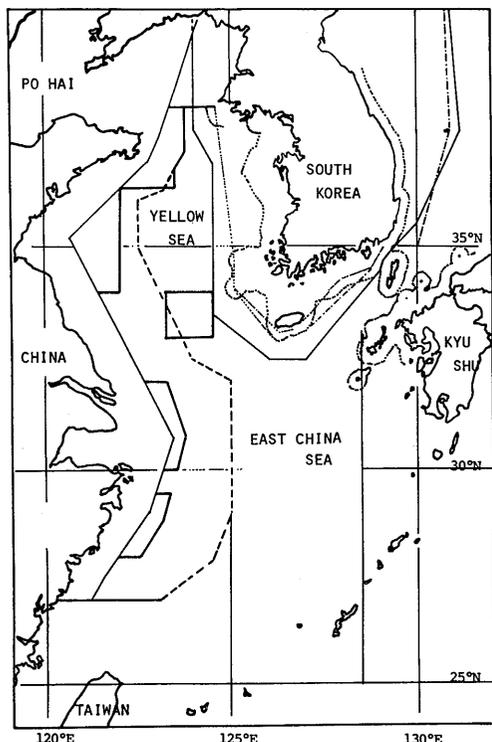


Fig. 21. Fishing area of medium trawler (bull trawler) west of 130°E.

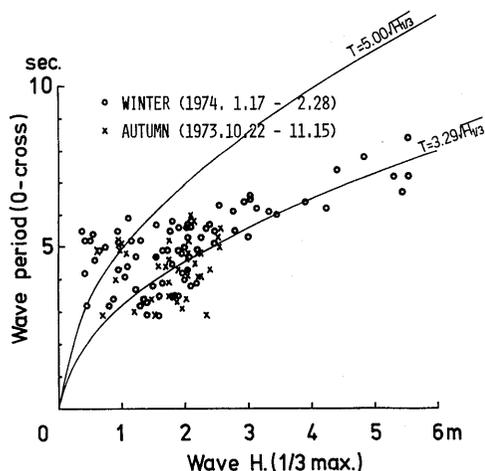


Fig. 22. The relation between the wave period and wave height at the East China and Yellow Seas.

およびその中間的気況の春秋期に大別され、各々変化し異なる。そこで実船実験は夏期、秋期および冬期の計3航海にわたり行い、東海・黄海の波浪についても

一年を通じた特性を明らかにした。

(1) 波高と波周期との関係

東海・黄海の波浪特性として、波高と波周期の関係を Fig. 22 に示す。これらのデータは前節の波浪計測装置により、秋期および冬期航海において曳網中の実験計測によって得られたものである。同図において、横座標は有義波高を示し、縦座標は零交差法によって求められた波周期を示す。

秋と冬における波を比較すると、冬の波高は秋の波高よりも高く、冬の波傾斜は秋のそれよりも急で険しいことが判断される。図中、 $T=5.00\sqrt{H/1.3}$  の線は国際試験水槽会議 (I. T. T. C) で提唱した波スペクトルの有義波高と零交差周期との関係を示したものである。他方の  $T=3.29\sqrt{H/1.3}$  は本実験で得られたデータから有義波高 2 m 以上のものについて、最小自乗法により求めた関係式である。有義波高 2 m 以下のデータを除いたのは波高に対して周期の変動が大きく、長周期の「うねり」などの影響が大きいと考えられたからである。

東海・黄海の波高と周期との関係 ( $T=3.29\sqrt{H/1.3}$ ) から、東海・黄海の波浪は Pierson-Moskowitz 型の波浪と比較した場合、例えば同等の波高に対して周期は短く、したがって波長が短く険しい波といえる。

(2) 東海・黄海の波スペクトルの表示式

Fig. 22 に示された冬のデータを波と船との出会いの相対針路別に分類し、その中から有義波高が約 1 m, 2 m, 3 m, 4 m および 5 m の海況におけるものを選び出し、その実験番号と有義波高を示したのが Table 6 である。荒天時の曳網針路は向い波状態が多いためすべての相対針路にわたり有義波高 5 m までのデータは得られなかった。

Table 6 に示したデータのパワースペクトルを相対針路別に Fig. 23 に示す。同図における横座標の周期は各相対針路共に曳網中の船速約 3.5 ノットでの出会い周期である。なおスペクトル計算における時系列データ数は 382、読み取り時間間隔は 1.0 秒およびラグ数は 30 である。したがってナイキスト周波数は 0.5 Hz (2.0 秒) である。

東海・黄海の波浪特性は Fig. 22 にも示された通り  $T=3.29\sqrt{H/1.3}$  に従い波高が高くなれば周期も長くなったが、これら波スペクトルのピークも有義波高が高くなるに従い長周期帯域に移動している事が示されている。また東海・黄海の波周期範囲は 4 秒～8 秒でかなり限られた特性である事も判断される。

波スペクトルについては、国際船体構造会議 (I.

Table 6. Data list and significant wave height.

Heading angle	H <sub>1/3</sub> Exp. No.	State of sea					
		3	4	4	5	5	6
Head sea	H <sub>1/3</sub>	1.11m	*	1.92m	3.07m	3.93m	5.47m
	Exp. No.	66		9	13	102	94
Bow "	H <sub>1/3</sub>	0.95	*	1.92	2.79	*	*
	Exp. No.	50		42	28		
Beam "	H <sub>1/3</sub>	1.16	*	2.05	2.94	3.48	*
	Exp. No.	16		43	84	79	
Quartering "	H <sub>1/3</sub>	1.11	*	1.94	*	3.37	
	Exp. No.	17		36		30	
Following "	H <sub>1/3</sub>	*	1.32	2.21	*	*	*
	Exp. No.		61	29			

H<sub>1/3</sub> : Significant wave height.  
Exp. No. : Experiment number.

S. S. C)または I. T. T. C)により、それぞれの活動の目的にあわせて、いわゆる「標準波スペクトル」の表現を定めている。

I. S. S. C)において提案された Modified Pierson-Moskowitz 型の理論的波スペクトルの式は波高の有義値と平均波周期の二つのパラメータにより決定され(61)、次式で表わされる。

$$S(\omega) = A\omega^{-5} \exp\{-B\omega^{-4}\} \quad (4 \cdot 2 \cdot 1)$$

ここで定数AおよびBは現実の海面における有義波高(H<sub>s</sub>)と波の平均周期(T<sub>w</sub>=2π/ω<sub>1</sub>)の二つの条件を満たすように決定される。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} H_s &= 4\sqrt{m_0} \\ \omega_1 &= m_1/m_0 \end{aligned} \right\} \quad (4 \cdot 2 \cdot 2)$$

ここで、H<sub>s</sub>は目測平均波高(有義波高に等しいと仮定)、ω<sub>1</sub>は目測平均波周波数である。また、m<sub>n</sub>はスペクトルの原点周りのモーメントで、m<sub>n</sub>=∫<sub>0</sub><sup>∞</sup>ω<sup>n</sup>·S(ω)dωである。

式(4・2・2)の条件によって定数AおよびBを決定し、式(4・2・1)は次のようになる。

$$S(\omega) = 0.11H_s^2\omega_1^{-1}(\omega/\omega_1)^{-5} \exp\{-0.44(\omega/\omega_1)^{-4}\} \quad (4 \cdot 2 \cdot 3)$$

式(4・2・3)を無次元化すると次の通りである。

$$S(\omega)/(H_s^2/\omega_1) = 0.11\omega_0^{-5} \exp\{-0.44\omega_0^{-4}\} \quad (4 \cdot 2 \cdot 4)$$

ただし、ω<sub>0</sub>=ω/ω<sub>1</sub>とする。

以上が I. S. S. C)の波スペクトルの表示式についてであるが、式(4・2・1)と(4・2・4)を比較す

ると、定数は A=0.11, B=0.44 であり、等しい形である。

そこで式(4・2・4)の無次元化波スペクトルの左

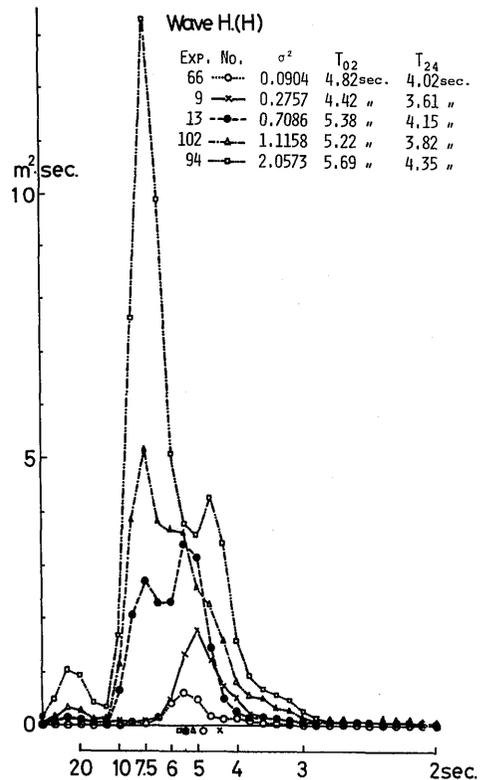


Fig. 23-1. Power spectra of encountered wave height for various sea state at head sea.

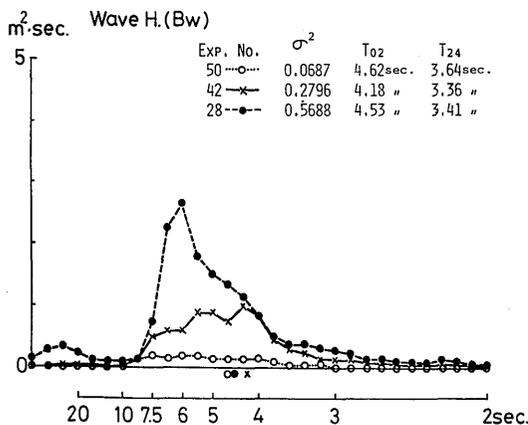


Fig. 23-2. Power spectra of encountered wave height for various sea state at bow sea.

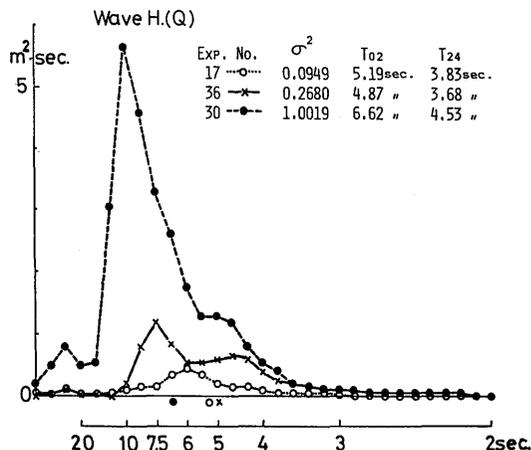


Fig. 23-4. Power spectra of encountered wave height for various sea state at quartering sea.

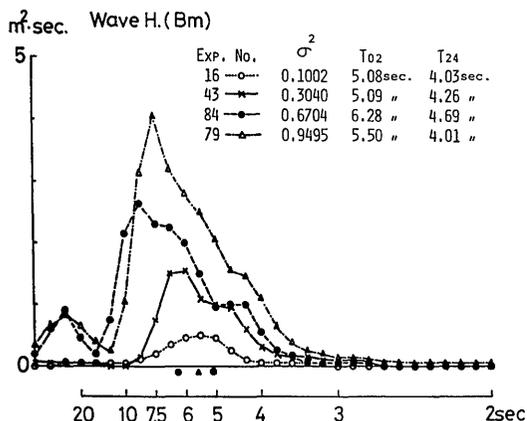


Fig. 23-3. Power spectra of encountered wave height for various sea state at beam sea.

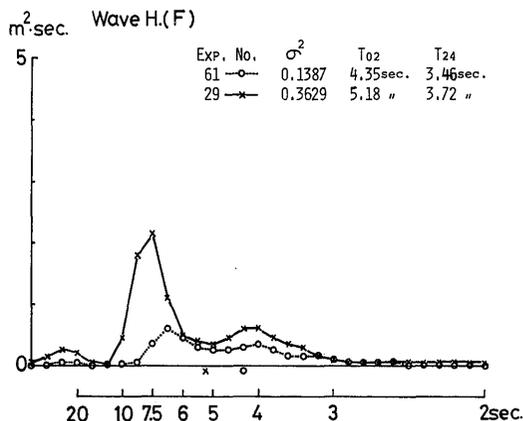


Fig. 23-5. Power spectra of encountered wave height for various sea state at following sea.

辺の通り, Fig. 23 に示された東海・黄海の波スペクトルについても有義波高 ( $H_s$ ) と平均波周波数 ( $\omega_1$ ) により無次元化を行った。ただし Fig. 23 の横座標は船速 3.5 ノットでの出会い周期で示されているため, 船速 0 ノットの周期にスペクトル変換を行った後に無次元化を行う必要がある。

無次元化に先立ち, 式 (4・2・2) の条件である  $H_s$  と  $m_0$  との関係について検討した。その結果を Fig. 24 に示す。同図から,  $H_s$  と  $m_0$  との関係は良好な直線関係を有し, (4・2・2) 式を満足している。ただし式 (4・2・2) における定数は {4.0} であるが, 東海・黄海の波スペクトルでは {5.2} であった。

式 (4・2・2) を満足した事からスペクトルの無次

元化における  $\{H_s^2\}$  の導入は可能であり, その結果 (4・2・1) 式の定数 A および B は実測スペクトルを満足するように最小自乗法により求める事が出来る。

各相対針路別に無次元化スペクトルを  $\omega_0$  軸上で各海況にわたり平均し, その結果を Fig. 25 に示す。同図から, 無次元化スペクトルは各相対針路共ほぼ等しい事が分かる。そこで全相対針路の平均値から, 最小自乗法により東海・黄海の波スペクトルの推定式を求めた。その結果が次の式であり, Fig. 25 の太実線で示されたものである。

$$S(\omega)/(H_s^2/\omega_1) = 0.07\omega_0^{-5} \exp\{-0.57\omega_0^{-4}\} \quad (4 \cdot 2 \cdot 5)$$

Fig. 25 には I. S. S. C 波スペクトルの式 (4・2・4)

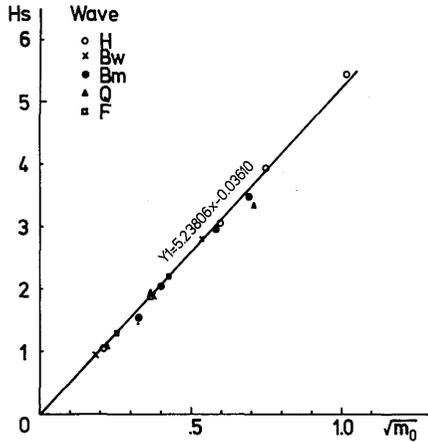


Fig. 24. The relation between the significant wave height ( $H_{1/3}$ ) and standard deviation of wave height ( $\sigma = \sqrt{m_0}$ ).

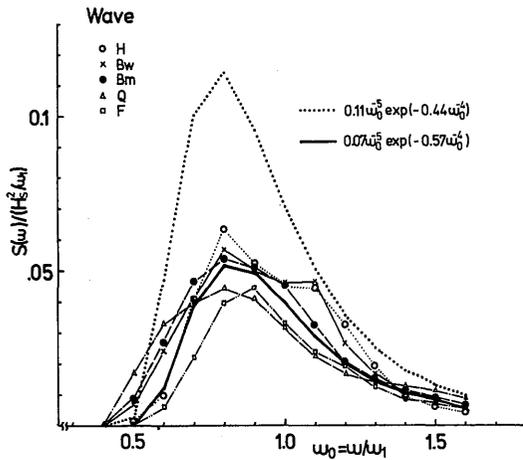


Fig. 25. The nondimensional spectra of wave height.

の値を点線で示したが東海・黄海の波スペクトルは標準波スペクトルとは大分異なる事が分かる。しかし、何らかの方法により有義波高と平均波周期が分かれば東海・黄海の数値波スペクトルモデルが推定可能である。

I. S. S. C.の標準波スペクトルと東海・黄海の波スペクトルを比較すると、前項でも述べた様に、東海・黄海の波は険しく、スペクトルの形から見て短波頂不規則波であると考えられる。両波スペクトルの相違については東海・黄海の地理的要因、気象学的要因によるものと考えられる。すなわち、東海・黄海における風の吹走距離、吹続時間、低気圧の移動速度とこれに

Table 7. Principal particulars of No. 27 TOKAI-MARU.

Principal dimension	
Lpp	33.60 m
B	7.30 m
D	3.40 m
Gross tonnage	193.14 t
Capacity	
Hold	179.72 m <sup>3</sup>
F. O. T	133.84 "
F. W. T	9.88 "
Draft (light condition)	
F	0.73 m
A	3.29 "
M	2.01 "
(displacement)	275.31 t
Main Engine (Diesel)	700ps×670r/m
Block coefficient	0.580
Prismatic "	0.630
Midship "	0.922
Water plane "	0.744

伴う波の伝達距離、角伝搬の効果または逆に三角波の発生など、種々の要因が考えられる。しかし東海・黄海の波浪の気象学的分野からの研究はほとんどなく、これら要因と波スペクトルとの相互関係は未だ明らかでない。

### 第5章 以西底曳網漁船による実船実験

商用漁船に便乗して行う実船実験は効率的な8角航走試験などが行えない事から、長期にわたる計測の集積により多量のデータを統計的に解析せざるを得ない。

波浪情報も目視による観測のみでは船体運動特性を定量的に予測する事は困難であった。そこで前章で述べたように実用的に満足出来る波高計を製作し、定量的情報として波高が得られるようになった。

また、漁船の出港から入港までの一航海を通じてみた場合、船のコンディションは種々変化する。したがってそれらを全て包含したデータを得るため、一航海を通して実船実験を行い、海洋波中の船体応答運動特性および動揺などの大きさとその出現確率から短期および長期の運動予測を行った。そしてこれらの結果は最適運航上の資料と安全な操業を確保する指標となり、また漁船の設計段階においても有効であるとする。

(1) 供 試 船

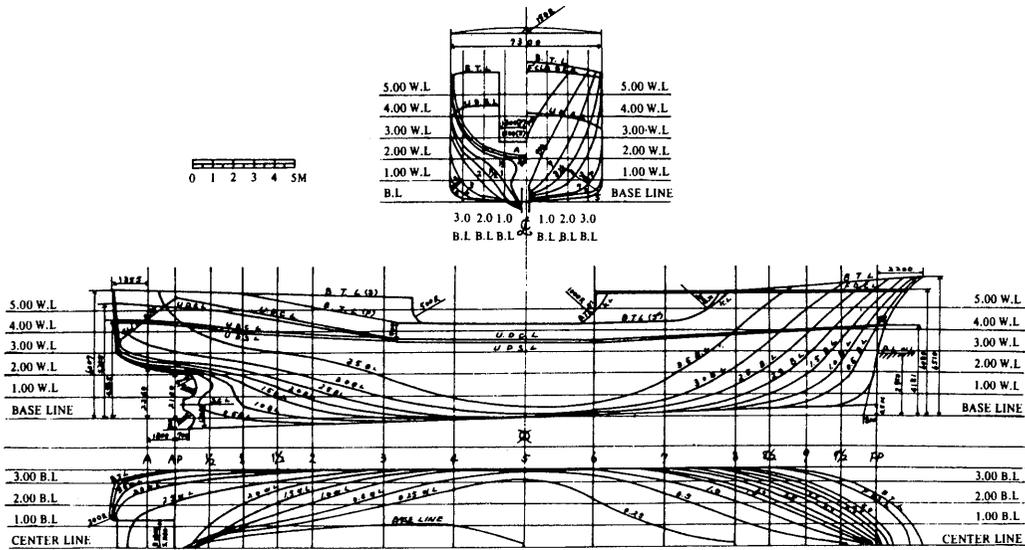


Fig. 26. The lines of the bull trawler(1/200).

供試船第27東海丸は大洋漁業長崎支社所属，二そう曳機船底曳網漁船（以西底曳網漁船）であり，主船第26東海丸の従船である。供試船の主要目は Table 7 に示す通りである。

以西底曳網漁船の特性については後述するが，代表的な船型の船体寸法を Table 8 に示しその船体線図を Fig. 26 に示す。

(2) 実船実験の航海日程

東海・黄海は四季それぞれ波浪特性を異にする事から，一航海を通じた実験計測を一年間にわたり行った。四季を春期（3～5月），夏期（6～8月），秋期（9～11月）および冬期（12～2月）に分け，春期と秋期の海象はほぼ等しいと仮定し実験は夏期，秋期および冬期の各期に1回，合計3航海にわたり商用漁船に便乗し行った。

- a) 夏期航海(1973年7月14日～8月19日；35日)
- b) 秋期航海(1973年10月22日～11月15日；23日)
- c) 冬期航海(1974年1月17日～2月28日；42日)

実験計測回数は夏期航海において91回，秋期航海51回および冬期航海104回の合計246回である。夏期航海では計測回数は多いが，実験初航海のため，波高計の取扱いの不慣れとトラブルがあり波高記録が悪く，また海況も平穏な日が多かった事もあり，統計解析に必要な十分なデータとしては少なかった。秋期航海と冬期航海は満足出来る実験航海で十分な計測データが得られた。測定は一実験15分間データレコーダに連続記録したが，上下動加速度の2回積分における積分器の安定時間および A/D 変換時の余裕データを除き実質 8 分

間である。この記録から読み取り時間間隔 ( $\Delta t$ ) 1.0 秒，データ個数382を時系列データとした。なおスペクトル解析におけるラグ数は30である。

第1節 以西底曳網漁船の特性

以西底曳網漁船は東海・黄海において通年して操業している。これは以西底曳網漁船の特徴の一つである。東海・黄海漁場 (Fig. 21) における漁船漁業規模としては，大中型まき網漁船に次いで第2位であり，漁業生産量についても東海・黄海における総生産量 (1978・3) 144万6000トンのうち，大中型まき網漁業の43万トン (総生産量の29.8%) に次いで16万4000トン (同，11.3%) を占め，重要な漁船漁業である。

現在実働している以西底曳網漁船は499隻 (1977・1・1) あり，船のトン数は80～200GTの範囲である。漁船のトン数ランクで一番多いのは，100～120トン階層で238隻 (全体の47.7%)，次いで180～200トン階層の94隻 (同，18.8%)，その次が120～140トン階層の44隻 (同，8.8%) となっている。これら114GT型，134GT型および194GT型の3階層で全体の70%を占めている。

そこでこの3階層の漁船について，その主要寸法，排水量，喫水，主機関馬力，トリム，GM，乾舷，横揺れ周期および横揺動半径について Table 9 に示す。なおこの表の各種の値は軽荷状態にほとんど等しい動揺試験時の値である。同表から，復原性を端的に示す GM の値は194GT型が最も小さく，次いで114GT型で最も大きいのは134GT型である。横揺れ周期は3階層共にほとんど等しく7秒である。

Table 8. Off-set of the bull trawler.

No. OF ORD.	HALF BREADTH											UPPER DECK S. L.	F'CLE DECK S. L.	BULWARK TOP LINE
	BASE LINE	0.25m W. L.	0.50m W. L.	1.00m W. L.	1.50m W. L.	2.00m W. L.	2.50m W. L.	3.00m W. L.	3.50m W. L.	4.50m W. L.	5.00m W. L.			
A							1.785	2.690	3.073	3.367	3.470	3.335		3.465
A. P.							2.190	2.918	3.251	3.504	3.543	3.460		3.570
1/2	0.297	0.473	0.666	0.682	0.421	1.055	2.562	3.135	3.431	3.620	3.634	3.580		3.640
1	0.567	0.828	0.982	1.115	1.320	2.100	2.894	3.321	3.554	3.650	3.650	3.640		3.650
1 1/2	0.749	1.050	1.249	1.583	2.065	2.690	3.185	3.474	3.620	3.650	3.650	3.650		3.650
2	0.871	1.275	1.590	2.142	2.640	3.085	3.403	3.585	3.648	3.650	3.650	3.650		3.650
3	1.000	1.915	2.477	3.080	3.378	3.545	3.625	3.650	3.650	3.650	3.650	3.650		3.650
4	0.987	2.730	3.203	3.540	3.640	3.650	3.650	3.650	3.650	3.650	3.650	3.650		3.650
5	0.150	3.205	3.524	3.650	3.650	3.650	3.650	3.650	3.650	3.650	3.650	3.650		3.650
6		2.250	3.340	3.615	3.650	3.650	3.650	3.650	3.650	3.650	3.650	3.650		3.650
7		0.840	2.578	3.195	3.438	3.560	3.616	3.643	3.650	3.650	3.650	3.650	3.650	3.650
8			1.350	2.150	2.592	2.892	3.110	3.276	3.405	3.569	3.615	3.435	3.650	3.650
8 1/2			0.750	1.500	1.960	2.310	2.582	2.807	3.000	3.310	3.428	3.090	3.574	3.609
9			0.317	0.860	1.238	1.560	1.851	2.110	2.355	2.808	3.011	2.532	3.326	3.424
9 1/2			0.060	0.295	0.512	0.727	0.956	1.200	1.452	2.007	2.299	1.737	2.850	3.055
F. P.								0.079	0.250	0.787	1.139	0.570	2.020	2.370

No. OF ORD.	HEIGHT (ABOVE BASE LINE)											UPPER DECK S. L.	DECK C. L.	F'CLE S. L.	DECK C. L.	BULWARK TOP LINE
	0.50m B. L.	1.00m B. L.	1.50m B. L.	2.00m B. L.	2.50m B. L.	3.00m B. L.	3.50m B. L.	UPPER DECK S. L.	DECK C. L.	F'CLE S. L.	DECK C. L.					
A	2.280	2.323	2.421	2.578	2.846	3.377		4.312	4.440					5.935		
A. P.	2.145	2.207	2.290	2.427	2.658	3.095	4.471	4.193	4.330					5.893		
1/2	1.735 1.267 0.282	1.987	2.106	2.246	2.465	2.850	3.693	4.045	4.190					5.830		
1	-0.061	0.548	1.673	1.950	2.216	2.600	3.349	3.912	4.060					5.730 5.770		
1 1/2	-0.155	0.198	0.882	1.445	1.845	2.285	3.065	3.793	3.943					5.430 5.710		
2	-0.170	0.071	0.425	0.878	1.360	1.895	2.725	3.690	3.850					5.120 5.650		
3	-0.118	0	0.123	0.281	0.514	0.907	1.834	3.530	3.680					4.520 5.530		
4	-0.058	0	0.061	0.120	0.191	0.360	0.903	3.430	3.580					4.330		
5	0.025	0.061	0.096	0.132	0.168	0.204	0.465	3.400	3.550					4.300		
6	0.125	0.157	0.197	0.232	0.268	0.323	0.690	3.422	3.572					4.990 4.322		
7	0.225	0.257	0.297	0.348	0.470	0.770	1.715	3.500	3.650	5.690	5.840			5.790 4.400		
8	0.325	0.385	0.563	0.871	1.376	2.230	4.000	3.645	3.780	5.759	5.909			5.890		
8 1/2	0.412	0.602	1.000	1.551	2.340	3.495	5.380	3.749	3.860	5.799	5.943			6.000		
9	0.640	1.171	1.901	2.782	3.805	4.972		3.875	3.950	5.850	5.977			6.120		
9 1/2	1.460	2.590	3.588	4.487	5.337	6.157		4.015	4.050	5.916	6.012			6.240		
F. P.	4.025	4.815	5.432	5.975				4.150	4.155	5.997	6.055			6.350		

Table 9. Principal dimension and conditions of the bull trawler.

Fishing boat	M-Mar	D-Mar	27T-Mar	23T-Mar	51T-Mar	97C-Mar
Lrg	29.60	31.00	34.00	34.00	34.00	32.20
Lpp	29.30	30.60	33.60	33.60	33.60	31.80
B	6.30	6.70	7.30	7.30	7.30	7.00
D	2.80	2.85	3.40	3.40	3.40	3.35
GT	114.29	134.72	193.14	193.14	194.02	197.12
M. Eng.	700	780	700	1000	1000	650
Disp.	205.240	223.513	277.490	276.650	279.880	254.960
Draft	1.983	1.890	2.028	2.020	2.045	2.053
GM	0.900	1.209	0.710	0.800	0.890	0.670
Trim	1.915	2.180	2.684	2.745	2.873	2.510
Cb	0.630	0.634	0.582	0.582	0.583	0.565
Fb	1.140	1.231	1.602	1.610	1.578	1.544
Tr	7.38	6.91	7.49	7.44	7.33	7.67
Kr	3.528	3.779	3.140	3.310	3.430	3.050
L/B	4.651	5.567	4.603	4.603	4.603	4.543
L/D	10.464	10.737	9.882	9.882	9.882	9.493
B/D	2.250	2.351	2.147	2.147	2.147	2.090

Table 10. Chang of conditions of the bull trawler.

Condition	Disp.	Draft	GM	Trim	Cb	Fb	Tr
Light	275.310	2.018	0.580	2.560	0.580	1.610	8.29
F.L.P	483.830	3.000	0.940	1.520	0.670	0.652	6.51
F.F.L	451.480	2.860	0.880	1.560	0.650	0.792	6.73
F.L.A.	415.160	2.702	0.690	1.790	0.640	0.967	7.60
E.H.A.	307.320	2.185	0.540	2.840	0.595	1.452	8.59

\*Fishing boat : No. 27T-Mar

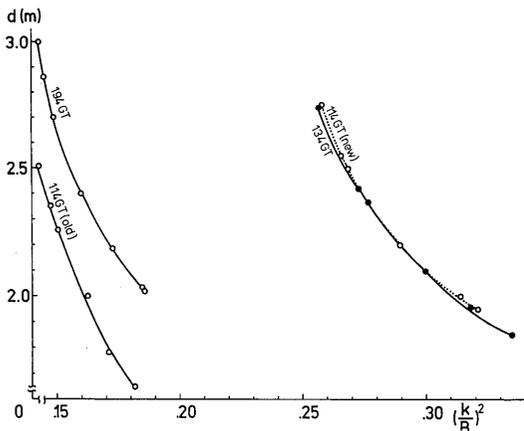


Fig. 27. The relation between the draft and  $(k/B)^2$ .

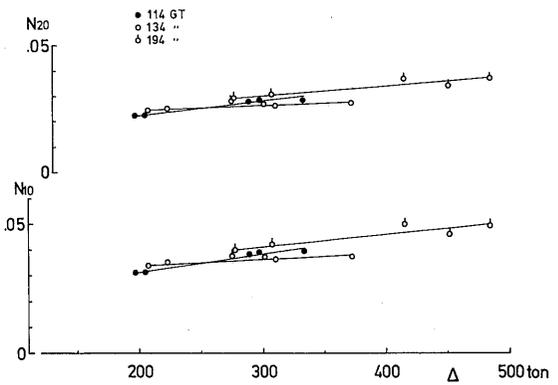


Fig. 28. The relation between the extinction coefficient(N) and displacement( $\Delta$ ).

波高計測装置を積載し、実船実験に主として供した船は194GT型のNo.27T-Maruであるので、この船の一航海を通じた主たる5種の計画状態、すなわち、軽荷、満載出港、漁場発、満載入港および空艙入港状態における排水量、喫水、 $\overline{GM}$ 、トリム、横揺れ周期などの特性値をTable 10に示す。同表より供試船の横揺れ周期は6.5秒から8.6秒の範囲である事が分かる。喫水変化範囲は2.20m~3.00m、トリムについては1.5m~2.8mの範囲である。これら計画状態に対し、実船実験を行った3航海における出港から入港までの実状は喫水では2.58m~3.05m、トリムでは1.93m~2.50mの範囲であった。したがって喫水は計画状態であるが、トリムについては漁場では計画より大きい状態で運航されていた。漁場での喫水およびトリムの実測は供試船の場合、目視によらねばならず波浪と船体動揺とにより極めて困難である。しかし努めて海況が平穏な時に実測した。

次に、114GT型、134GT型および194GT型の3種の出港から入港までの主たる計画状態における特性比較を横揺れ周期と同調強制横揺れ角について行うため、横環動半径と $N$ 係数の計算を行った。

#### (1) 横揺れ周期特性

環動半径計算は復原性規則の環動半径書式により、加藤の式(62)を用いて行った。その結果をFig. 27に示す。同図から114GT型と134GT型はトン数の差が小さい事もありほとんど等しく、194GT型のみが異なる値を示した。しかし横揺れ周期 $\{T_r=2.01 \cdot k/\sqrt{\overline{GM}}\}$ は、求められた環動半径 $(k)$ と $\overline{GM}$ から計算すると3階層間の差は全ての計画状態において0.4秒~1.5秒と小さかった。また平均横揺れ周期の各計画状態間の変動も小さく、周期は7.3秒~8.1秒の範囲であった。これらの事より以西底曳網漁船の横揺れ周期特性は全階層にわたり大差はなくほぼ等しいと考えられる。

#### (2) $N$ 係数特性

$N$ 係数の計算は渡辺・井上(63, 64)の近似式を用いて行い、その結果をFig. 28に示す。同図から3階層の以西底曳網漁船の全計画状態における $N$ 係数の範囲は $N_{10}=0.031\sim 0.050$ および $N_{20}=0.023\sim 0.037$ で排水量の増加と共に $N$ 係数も増大しており、その増大傾向は3階層共に等しい。また3階層共に、同排水量における $N$ 係数はほぼ等しかった。

復原性規則での $N$ 係数は一般に0.02とされているが、以西底曳網漁船の $N$ 係数はそれに比べはるかに大きい特徴を示した。

船舶の不規則波中での最大横揺れ角は次の式で示さ

れる。

$$\theta_{max} = 0.7\theta_{syn} = 0.88\sqrt{\frac{r\theta_w}{N}} = \sqrt{138.5 \frac{r}{N} \frac{H_w}{L_w}} \quad (5 \cdot 1 \cdot 1)$$

ここで、 $\theta_{syn}$ は波周期と船の横揺れ固有周期が等しい場合の同調強制横揺れ角、 $r$ は有効波傾斜係数、 $\theta_w$ は最大波傾斜 $\left(180 \times \frac{H_w}{L_w}\right)$ および $N$ は $N$ 係数である。

そこで有効波傾斜係数 $r$ についても $N$ 係数算出時と等しい各船の各計画状態において、渡辺の式(65)により計算式(5・1・1)から114GT型、134GT型および194GT型の3階層について各計画状態での $\theta_{max}$ を検討した。

この場合、 $\theta_w$ については東海・黄海の波浪特性(第4章第2節)から、以西底曳網漁船の平均的横揺れ周期に等しい8秒の波周期を用いた。すなわち、 $T_w = 3.29\sqrt{H_s}$ より $T_w = 8$ 秒とすれば $H_s = 6$ mとなる。このときの波長は $L_w = 1.56 T_w^2$ から $L = 100$ mである。

式(5・1・1)に求められた $N$ 、 $r$ 、 $H_w$ および $L_w$ を代入すると全計画状態について $\theta_{max}$ は、114GT型で12.3度~18.1度、134GT型で12.8度~18.1度および194GT型で9.6度~17.0度が得られた。

これらの結果から以西底曳網漁船の横揺れ角特性に関して、3階層間の差は小さく同調横揺れ時においても9.6度~18.1度の範囲であり、横揺れ周期特性同様、全ての以西底曳網漁船について大差はなくほぼ等しいと考えられる。

したがって、次節以下において論ずる実験結果は194GT型によるものであるが、運動特性としては全以西底曳網漁船に共通して論じられうるものとする。

### 第2節 船体運動振幅極値の統計的特性(66)

実験海域である東海・黄海は冬季シベリアから吹く季節風のため大きい波浪が出現し、供試漁船にとって一年中で海洋環境が最も厳しい時期である。そこで冬期航海42日間における104回の実験結果を主に用いて、曳網中の船体運動振幅極値について統計解析を行い、船体動揺応答の短期特性および長期特性の結果について論ずる。

#### (1) 船体応答の短期特性

波高や船体運動のような不規則振動現象の連続記録から、一定時間間隔に標本化された時系列データの確率分布はガウス分布をする事はよく知られており、定常確率過程としての取扱いが多くなされている。またこれら不規則現象の極値の短期分布は、Longuet-Higgins(28)やJasper(44)がレイリー分布で表わされ

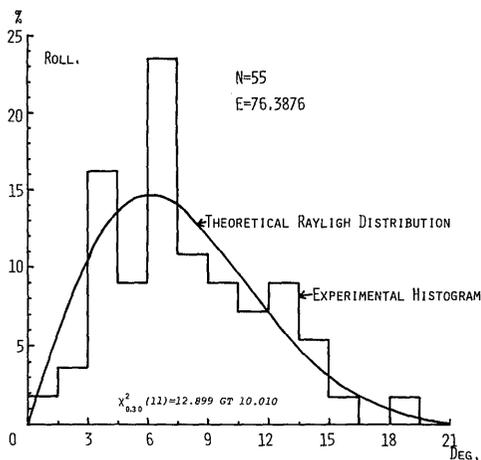


Fig. 29-1. Distribution of variation in rolling angle.

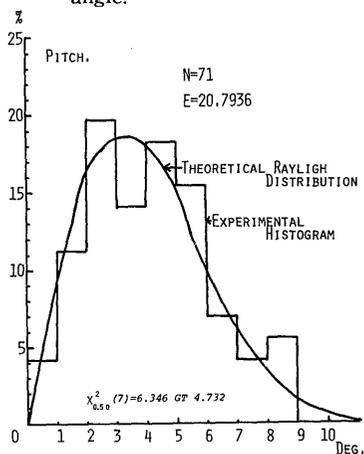


Fig. 29-2. Distribution of variation in pitching angle.

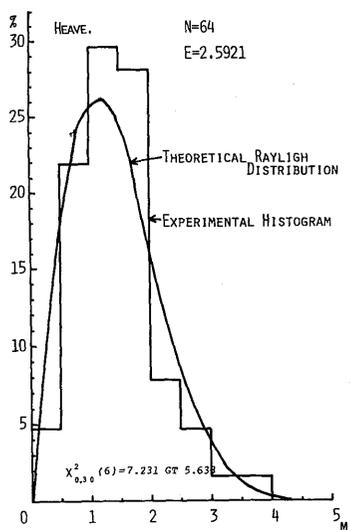


Fig. 29-3. Distribution of variation in heaving amplitude.

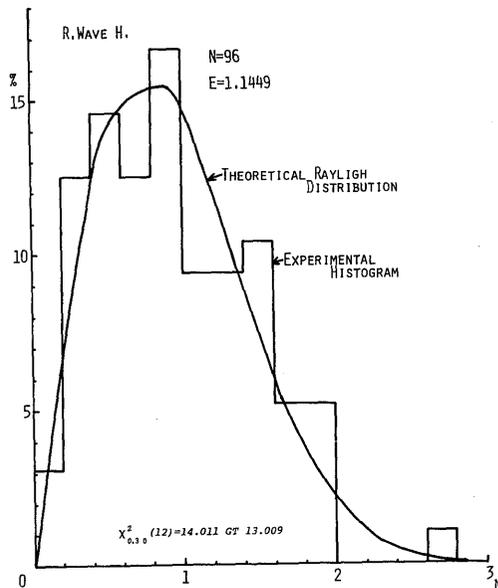


Fig. 29-4. Distribution of variation in relative wave height.

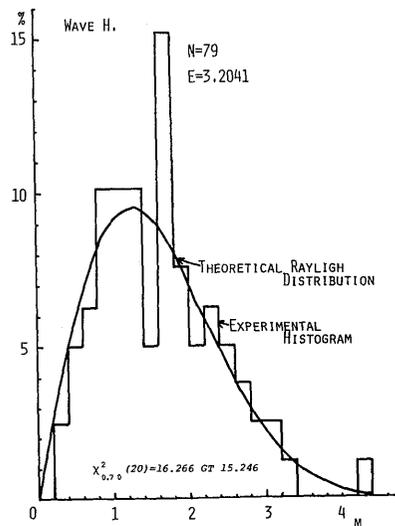


Fig. 29-5. Distribution of variation in encountered wave height.

ことを示した。さらに、Longuet-Higgins はガウス分布の標準偏差 ( $\sigma$ ) から極値の平均値, 1/3最大平均値 (有義値) および1/10最大平均値などの期待値は ( $\sigma$ ) をパラメータとして予測が可能であることも明らかにした。

そこで筆者も実船実験で得られたデータについてガウス分布およびレイリー分布の検討を行い ( $\sigma$ ) と極値

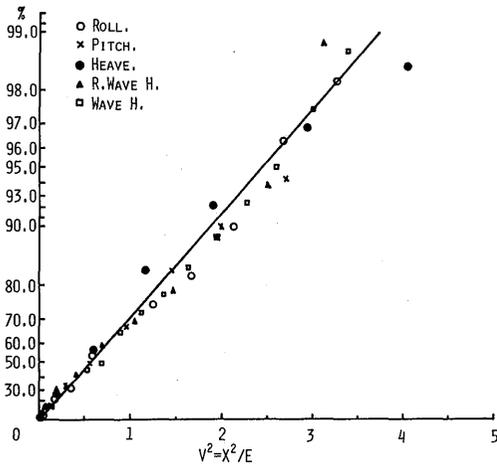


Fig. 30. Cumulative distribution of variation in rolling angle, pitching angle, heaving amplitude, relative wave height and encountered wave height.

の期待値との関係を調べた。極値（全振幅）の分布の一例を Fig. 29 に示し、その累積確率分布を Fig. 30 に示す。これらの図から波高および船体運動の極値の分布がレイリー分布であることが分かる。また分布の適合度の  $\chi^2$  検定の結果も良好であることが確認された。

次に ( $\sigma$ ) をパラメータとして極値の期待値の短期推定係数を求めた。104回の実験の平均値を Table 11 に示す。結果は、Longuet-Higgins (28) の求めた値より約 10% 低い値であるが、全てのデータは同様な傾向を示した。約 10% 低い値については 1.0 秒間隔に読み取られた時系列データからこの中の極大、極小値から極値としたためと考えられる。

漁船は種々の気象海象下で操業強行を余儀なくされたり、また波の進行方向に関係なく曳網針路の変更を余儀なくされる場合などがある。そのようなとき、船体運動を概略かつ端的に推定し得ることが望まれる。そこで、目視観測による波高は、有義値に近似することから、波高と船体運動振幅極値のそれぞれの有義値

を用いて、両者の相関関係を求めた。

波高の有義値に対する船体運動および相対波高の有義値を各相対針路ごとにプロットした結果を Fig. 31 に示す。これらの図から横揺れ、縦揺れ、上下動および波高計の装着舷側部における波面変動 (Relative wave height) が回帰直線で表わされ、波高から船体運動を相対針路別に一次式で推定し得る結果を得た。最小自乗法により求めた直線回帰方程式の各回帰係数と 95% 信頼限界を Table 12 に示した。

船の安全性と操業中の作業能率は横揺れが最も重要な要素であるが、横揺れの最も小さい針路は向い波であり、逆に大きい針路は、斜め追い波と追い波である。縦揺れについては横波が最も小さく、追い波が最も大きい。上下動の場合は相対針路に関係なく船は波高に等しく昇降している。舷側の波面変動は甲板上への海水打込み (Deck wetness) の推定に用いられるが、その最も小さい針路は横揺れと同様向い波の場合である。逆に最も大きい針路、すなわち、海水打込みの確率の高い針路は追い波状態である。

武隈等 (67) は波スペクトルの実験的検証を行う手段として高速コンテナ船自体を波浪計とみなして、その運動記録、特に縦揺れから波スペクトルを評価すること (Reverse Operational Method of Sea Spectrum) を試み、その方法の有用なことを示している。しかし漁船の曳網中の運動からみると縦揺れより上下動を波スペクトル推定に用いるのが振幅応答から考え妥当であると言える。

本実験は商用漁船に便乗して計測を行い、実験のための特別な操船は行っていないので任意の条件での実験は行えなかった。しかしこの事は逆に漁船の実際の運航状態における計測結果であるといえる。したがって結果は現場での船長の経験的判断をよく表わしており、船長は船体運動をかなりの確に予測している事がうかがえる。すなわち、横揺れ運動からみると波高が 4 m 以上 (海況 6) になると曳網針路は横揺れの最も小さい向い波状態が多い。さらに荒天になれば操業を

Table 11. Representative values of  $a(p)/\sigma$  in the each spectrum.

a(p)	Longuet-Higgins	Wave H.	Pitch.	Roll.	Heave.	R. Wave H.
Average (0.500)	1.25	1.18	1.20	1.23	1.21	1.15
$H_{1/3}$ (0.333)	2.00	1.81	1.82	1.89	1.86	1.77
$H_{1/10}$ (0.100)	2.55	2.25	2.30	2.35	2.30	2.22
r. m. s.	1.41	1.30	1.31	1.35	1.34	1.27

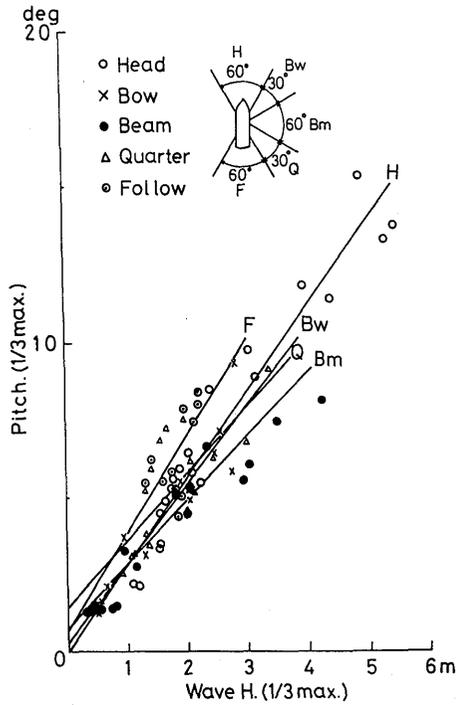


Fig. 31-1. The relation between the wave height ( $H_{1/3}$ ) and pitching angle ( $H_{1/3}$ ) for various relative course angles.

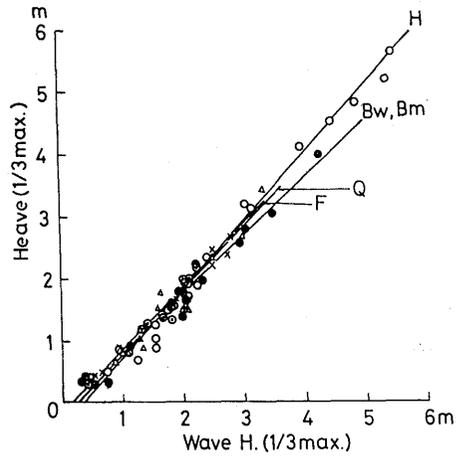


Fig. 31-3. The relation between the wave height ( $H_{1/3}$ ) and heaving amplitude ( $H_{1/3}$ ) for various relative course angles.

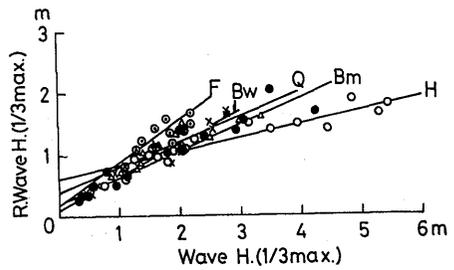


Fig. 31-4. The relation between the wave height ( $H_{1/3}$ ) and relative wave height ( $H_{1/3}$ ) for various relative course angles.

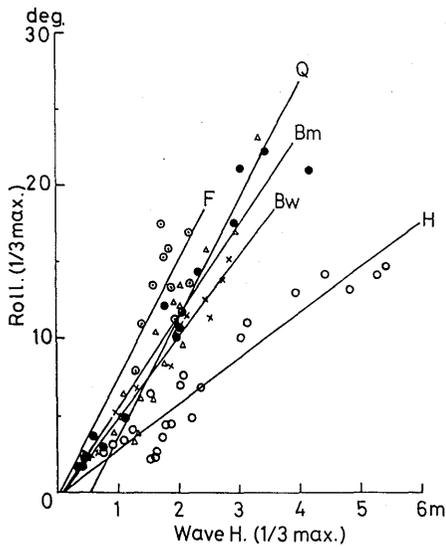


Fig. 31-2. The relation between the wave height ( $H_{1/3}$ ) and rolling angle ( $H_{1/3}$ ) for various relative course angles.

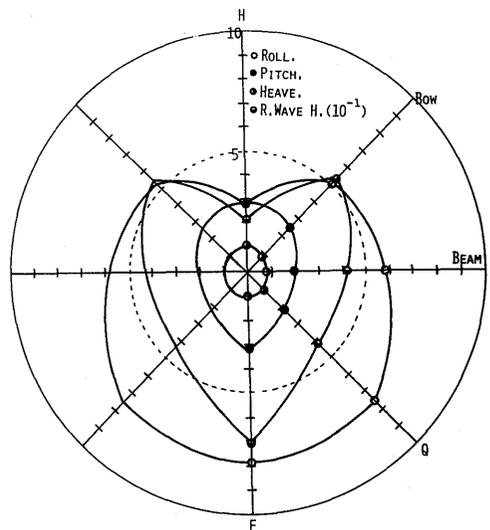


Fig. 32. Calculated regression coefficient of rolling, pitching, heaving and relative wave height for various course angles.

Table 12. Regression line of Y (ship's motion and relative wave height) on X (wave height).

Heading angle	Y	Pitch. (deg)	Roll. (deg)	Heave. (m)	R. Wave H. (m)
		95% limit	95% limit	95% limit	95% limit
Head	sea	2.78 x-0.003	2.93 x-0.168	1.11 x-0.454	0.22x+0.617
		±0.367	±0.555	±0.055	±0.049
Bow	"	2.56 x+0.286	5.22 x-0.521	0.94 x-0.113	0.54 x+0.103
		±0.786	±0.677	±0.113	±0.078
Beam	"	1.87 x+0.722	5.94 x-0.622	0.93 x-0.159	0.43 x+0.390
		±0.375	±1.011	±0.080	±0.096
Quartering	"	2.16 x+1.408	7.62 x-4.188	1.04 x-0.311	0.41 x+0.390
		±1.122	±1.452	±0.178	±0.128
Following	"	3.20 x+0.361	7.57 x-0.260	1.03 x-0.204	0.69 x+0.124
		±1.901	±3.625	±0.266	±0.259

\* Y=a(±95%) x+b ; x: wave height (m).

中止している。実験データについても追い波状態のデータが向い波に比べ少ない。

回帰係数のみを相対針路別に極座標にプロットしたのが Fig. 32 である。この図から船体運動の相対針路による特性がよく分かる。Ochi (68) は海況 7 のときの船体運動の累積エネルギー密度の平方根( $\sqrt{E}$ )の値を相対針路別に示しているが、本実験結果の回帰係数と比較して横揺れおよび縦揺れについては同じ傾向を示しているが、上下動についてはやや異なる結果となっている。上下動の結果が異なる要因としては本供試船が漁船であり、曳網中で船速が Ochi の実験の 10.0 ノットに対して 3~4 ノットと遅い事と漁具ことにワープ張力の影響であろうと考えられる。さらに Ochi は縦揺れ、上下動および船首上下加速度の  $\sqrt{E}$  と波高の  $\sqrt{E}$  との関係は船速 10.0 ノット、向い波の場合について示している。それらの結果は波高 (X 軸) と船体運動 (Y 軸) の関係は座標の原点を通るものとして示したため、二次曲線となっているが、筆者の場合と同様、回帰直線で示される関係を有している。ただしその場合は本実験結果と同様に Y 軸切片を持つことになる。波と船体運動の関係を入出力で考えた場合、原点を通ることが妥当であるが、波高が小さい場合は誤差も大きいためこの誤差を考慮すれば、複雑な二次方程式で示すよりも簡単な一次式の方が短期の船体運動予測には実用的であると考え。

船体運動の標準偏差 ( $\sigma$ ) をパラメータとした運動極値のいくつかの期待値の推定および波高に対する船体応答運動の回帰方程式による推定など操業中の短期予測が定量的に可能となり、これらの結果は、安全操業

を確保する上で有用な運航指標となり得るものと考えられる。

## (2) 波高および船体運動の長期特性

波高および船体運動の長期予測については、Jasper (44) 以来いろいろと行われている。Jasper は短期分布はレイリー分布で表わされ、これらの長期分布は対数正規分布で表わされる事を示した。福田 (69, 70) は海水打込みの長期予測に関して線形ストリップ理論による上下動揺と縦動揺の解を用いて船首と波面との相対運動の応答関数を近似的に計算し、海面状態の長期統計資料から予測する事を示した。また篠田 (71) はある式により測定値を変換した値が対数正規分布になるように、変換した値の尖度 (四次のモーメント) まで計算して分布関数のパラメータを定める式を示し、青函連絡船の長期の動揺予測を行っている。

そこで筆者も毎日一回ほぼ定時に計測された波高および船体運動のデータ (Table 13) から極値の自乗平均の平方根(a)の一航海の分布を調べた。Jasper や篠田の例にならない対数正規分布の適用を試みたところ、波高と上下動の分布はほぼ良い適合を得られたが、横揺れ、縦揺れおよび相対波高については、曳網操業中という状態のためか良い適合は得られなかった。長期の極値統計には Gumbel 分布 (72) や Cauchy 分布などがあるが、簡単な分布関数によって経験的データを表わす場合によく用いられる分布としてワイブル分布 (73) がある。

そこで本実験結果についてもワイブル分布の適用を行ったところ、波高および船体応答がワイブル分布で

Table 13. The root-mean-square amplitude by periodical measurement.

Date	Time	Exp. No.	Wave H. r. m. s	Roll. r. m. s	Pitch. r. m. s	Heave. r. m. s	R. Wave H. r. m. s
1974/ 1/28	11-30	2	1.515m	6.91°	3.49°	1.000m	1.104m
	29 12-30	4	1.513	8.33	3.66	1.209	0.794
	30 12-30	7	1.345	8.83	3.51	1.171	0.746
	31 11-15	10	1.436	6.90	3.12	0.976	1.102
2 / 1	11-30	11	1.604	10.09	5.83	1.558	1.000
	2 11-30	14	1.502	8.31	5.30	1.467	0.991
	3 11-00	16	0.833	3.71	1.97	0.664	0.475
	4 11-15	19	1.509	7.67	3.45	1.104	0.776
	5 *	*	*	*	*	*	*
	6 12-45	22	1.300	12.41	3.58	1.095	1.136
	7 11-15	27	0.935	4.38	2.21	0.762	0.587
	8 11-00	30	2.724	16.57	6.60	2.600	1.122
	9 11-15	32	2.180	15.11	4.38	2.002	1.092
	10 11-15	33	1.032	8.13	4.70	0.965	0.900
	11 12-15	41	1.792	8.74	4.56	1.615	1.073
	12 11-30	44	1.684	10.28	4.92	1.381	0.913
	13 12-00	50	0.686	3.74	2.74	0.613	0.517
	14 11-30	58	1.104	1.54	2.45	0.668	0.796
	15 11-45	63	1.125	5.40	3.10	0.920	0.732
	16 12-00	66	0.798	2.49	1.55	0.600	0.438
	17 11-15	68	0.257	1.33	0.93	0.263	0.188
	18 12-45	76	0.410	2.84	0.91	0.231	0.363
	19 12-00	77	2.006	9.47	4.05	1.756	1.203
	20 12-00	81	2.993	14.41	5.66	2.701	1.170
	21 12-20	85	0.662	1.99	2.35	0.596	0.344
	22 12-00	93	1.611	3.51	3.72	1.346	0.905
	23 12-00	98	3.842	10.10	9.55	3.781	1.202
	24 12-30	102	2.762	9.22	8.32	2.968	1.070

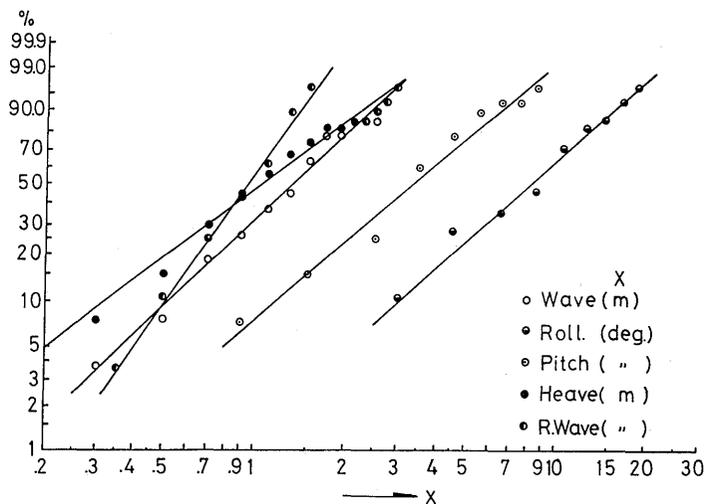


Fig. 33. Cumulative distribution of variation in rolling, pitching, heaving, relative wave height and encountered wave height.

Table 14. Parameters of the Weibull distribution and results of  $\chi^2$ -test.

Parameter	m	$\alpha$	$\gamma$	$\mu$	$\chi^2$ -test
Wave Height	2.1	2.7	0	1.444	$\chi^2_{0.70}$ (17) = 13.541 > 12.560
Pitch.	1.8	12.6	0	3.601	$\chi^2_{0.30}$ (9) = 10.656 > 8.915
Roll.	1.9	79.8	+1.5	8.781	$\chi^2_{0.30}$ (8) = 9.524 > 8.395
Heave.	1.6	1.6	0	1.202	$\chi^2_{0.30}$ (6) = 7.231 > 6.110
R. Wave H.	3.0	1.2	+0.2	0.948	$\chi^2_{0.70}$ (14) = 10.821 > 9.478

$$* \text{ Weibull distribution, } f(x) = \frac{m}{\alpha} (x-\gamma)^{m-1} \exp\left\{-\frac{(x-\gamma)^m}{\alpha}\right\}$$

表わし得ることが示された。(a)値の累積確率分布をワイブル確率紙にプロットした結果を Fig. 33に示す。またこのワイブル確率密度関数のパラメータと分布の適合度の  $\chi^2$  検定の結果を Table 14 に示す。検定の結果は良好であることが認められた。したがってこのように極値の(a)値の長期分布が求められたことにより、波高および船体応答の各大きさに対するその出現確率はレイリー分布とワイブル分布との同時分布を計算することにより求められる。すなわち、

$$P(x_0) = \int_0^{\infty} \frac{m}{\alpha} (a-\gamma)^{m-1} \cdot \exp\left[-\left\{\frac{(a-\gamma)^m}{\alpha} + \frac{x_0^2}{a^2}\right\}\right] da$$

(5・2・1)

ここで  $P(x_0)$  は  $x_0$  またはこれより大きい波高あるいは船体動揺が起こる確率である。また  $m, \alpha$  および  $\gamma$  はワイブル分布のパラメータであり、 $a$  は極値の短期の自乗平均の平方根である。この積分を数値積分により求めたものが厳密値であり、波高、船体運動および相対波高について求めた結果を Table 15 に示した。

篠田(71)は青函連絡船について、また竹沢(74)は北大平洋航路のコンテナ船について、これら長期予測値から船体運動など現象の平均周期と船の1年間の航海秒数から1年間の極大異常値、さらに10年、50年、100年

Table 15-1. Probability of occurrence of wave height by joint distribution of Rayleigh and Weibull.

$x_0$ (m)	$p(x_0)$	N/Year	
		$N_{lower}$	$N_{upper}$
1	0.50942E+00	0.17330E+06	0.34661E+06
2	0.18386E+00	0.62548E+05	0.12510E+06
3	0.59911E-01	0.20382E+05	0.40763E+05
4	0.18514E-01	0.62985E+04	0.12597E+05
5	0.55323E-02	0.18821E+04	0.37642E+04
6	0.16139E-02	0.54907E+03	0.10981E+04
7	0.46203E-03	0.15718E+03	0.31437E+03
8	0.13011E-03	0.44264E+02	0.88527E+02
9	0.36061E-04	0.12268E+02	0.24536E+02
10	0.98247E-05	0.33424E+01	0.66847E+01
11	0.26243E-05	0.89277E+00	0.17855E+01
12	0.68450E-06	0.23287E+00	0.46573E+00
13	0.17349E-06	0.59023E-01	0.11805E+00
14	0.42498E-07	0.14458E-01	0.28916E-01
15	0.10004E-07	0.34035E-02	0.68070E-02
16	0.22510E-08	0.76580E-03	0.15316E-02

Dominant period; 10sec-5sec.

Table 15-2. Probability of occurrence of rolling angle by joint distribution of Rayleigh and Weibull.

$x_0$ (deg)	$p(x_0)$	N/Year	
		$N_{lower}$	$N_{upper}$
10	0.21537 E +00	0.18317 E +06	0.24423 E +06
20	0.36618 E -01	0.31143 E +05	0.41524 E +05
30	0.59451 E -02	0.50563 E +04	0.67417 E +04
40	0.94143 E -03	0.80069 E +03	0.10676 E +04
50	0.14458 E -03	0.12296 E +03	0.16395 E +03
60	0.21115 E -04	0.17958 E +02	0.23944 E +02
70	0.28524 E -05	0.24260 E +01	0.32346 E +01
80	0.34590 E -06	0.29419 E +00	0.39225 E +00
90	0.36634 E -07	0.31157 E -01	0.41543 E -01
100	0.33129 E -08	0.28176 E -02	0.37568 E -02
110	0.25139 E -09	0.21381 E -03	0.28508 E -03
120	0.15832 E -10	0.13465 E -04	0.17953 E -04
130	0.85519 E -12	0.72734 E -06	0.96979 E -06
140	0.76066 E -13	0.64695 E -07	0.86259 E -07

Dominant period; 8sec—6sec.

Table 15-3. Probability of occurrence of pitching angle by joint distribution of Rayleigh and Weibull.

$x_0$ (deg)	$p(x_0)$	N/Year	
		$N_{lower}$	$N_{upper}$
5	0.19771 E +00	0.16815 E +06	0.22420 E +06
10	0.27446 E -01	0.23343 E +05	0.31124 E +05
15	0.36623 E -02	0.31148 E +04	0.41531 E +04
20	0.48462 E -03	0.41217 E +03	0.54956 E +03
25	0.63949 E -04	0.54388 E +02	0.72518 E +02
30	0.83745 E -05	0.71225 E +01	0.94967 E +01
35	0.10738 E -05	0.91325 E +00	0.12177 E +01
40	0.13196 E -06	0.11223 E +00	0.14964 E +00
45	0.15143 E -07	0.12879 E -01	0.17172 E -01
50	0.15802 E -08	0.13440 E -02	0.17920 E -02

Dominant period; 8sec—6sec.

間などの異常値を予測している。

以西底曳網漁船の曳網中の異常値の予測についても同様の方法で計算し、その結果を Table 15 に示した。すなわち、以西底曳網漁船の1曳網時間は約3時間、主船および従船を合計して1日に7網の操業が平均的実態である。したがって一隻当たり1日に3.5網の操業となる。冬期一航海の操業日数を30日として、東海・黄海における風浪の強い冬季は11月～2月の4ヵ月間であり、その間3航海行うとすれば操業日数は90日となる。この間の総曳網回数は315回、よって1隻の船の

1年間の冬季のみの曳網秒数は約 $3.4 \times 10^6$ 秒である。そこで、例えば横揺れについてその平均周期は8～6秒であるから、この間に片舷 $425 \times 10^3 \sim 567 \times 10^3$ 回の揺れとなり、両舷では $8.5 \times 10^5 \sim 11.34 \times 10^5$ 回の横揺れがある。これを海況が厳しい時期のみで代表し、1年間の横揺れ回数とし、この回数を先に求めた確率にかければ、その角度またはそれ以上の横揺れに1年間に遭遇する回数の期待値が求まる。またこの逆数は期待値が1回となる年数である。100年間における出現回数の期待値が1回より十分小さいものは現われないと

Table 15-4. Probability of occurrence of heaving amplitude by joint distribution of Rayleigh and Weibull.

$x_0$ (m)	$p(x_0)$	N/Year	
		$N_{lower}$	$N_{upper}$
1	0.40432E+00	0.13755E+06	0.22925E+06
2	0.13801E+00	0.46950E+05	0.78250E+05
3	0.46696E-01	0.15886E+05	0.26476E+05
4	0.15876E-01	0.54011E+04	0.90018E+04
5	0.54277E-02	0.18465E+04	0.30775E+04
6	0.18599E-02	0.63275E+03	0.10546E+04
7	0.63550E-03	0.21620E+03	0.36033E+03
8	0.21508E-03	0.73171E+02	0.12195E+03
9	0.71565E-04	0.24346E+02	0.40577E+02
10	0.23228E-04	0.79022E+01	0.13170E+02
11	0.72985E-05	0.24829E+01	0.41382E+01
12	0.22043E-05	0.74991E+00	0.12499E+01
13	0.63592E-06	0.21634E+00	0.36057E+00
14	0.17428E-06	0.59289E-01	0.98815E-01
15	0.45162E-07	0.15364E-01	0.25607E-01
16	0.11023E-07	0.37501E-02	0.62502E-02

Dominant period; 10sec-6sec.

Table 15-5. Probability of occurrence of relative wave height by joint distribution of Rayleigh and Weibull.

$x_0$ (m)	$p(x_0)$	N/Year	
		$N_{lower}$	$N_{upper}$
0.4	0.64821E+00	0.29403E+06	0.55130E+06
0.8	0.31444E+00	0.14263E+06	0.26743E+06
1.2	0.13305E+00	0.60353E+05	0.11316E+06
1.6	0.51555E-01	0.23385E+05	0.43848E+05
2.0	0.18725E-01	0.84937E+04	0.15926E+05
2.4	0.64624E-02	0.29313E+04	0.54963E+04
2.8	0.21379E-02	0.96973E+03	0.18182E+04
3.2	0.68209E-03	0.30940E+03	0.58012E+03
3.6	0.21083E-03	0.95633E+02	0.17931E+03
4.0	0.63352E-04	0.28736E+02	0.53881E+02
4.4	0.18557E-04	0.84173E+01	0.15782E+02
4.8	0.53101E-05	0.24087E+01	0.45162E+01
5.2	0.14872E-05	0.67460E+00	0.12649E+01
5.6	0.40830E-06	0.18520E+00	0.34726E+00
6.0	0.11002E-06	0.49907E-01	0.93575E-01
6.4	0.29133E-07	0.13215E-01	0.24778E-01
6.8	0.75879E-08	0.34419E-02	0.64535E-02
7.0	0.38496E-08	0.17462E-02	0.32741E-02

Dominant period; 7.5sec-4sec.

仮定すれば、横揺れでは両舷100度すなわち片舷50度の動揺は生じない事になる。

波高および他の船体運動についてもその平均周期から横揺れと同様の推定を行った結果、縦揺れでは25度上下動では16m、相対波高(舷側の水面変動)では6.8mおよび出会い周期での東海・黄海における波高は15m(風浪階級9)となる。

相対波高から海水打込みの長期予測について、本供試船の漁場における平均乾舷は90cm、ブルワーク高さは90cm、さらにブルワーク上の打込み水防止板高さは60cmである。そこでブルワークトップまでの1.8mより大となる相対波高の確率はTable 15-5から $3.1 \times 10^{-2}$ 、さらに打込み水防止板トップまでの2.4mより大となる相対波高の確率は $6.5 \times 10^{-3}$ である。したがって相対波高の平均周期7.5~4秒から1年間の海水打込み発生回数は、ブルワークトップまでの高さで $14 \times 10^3 \sim 26 \times 10^3$ 、防止板高さまででは $3 \times 10^3 \sim 5.5 \times 10^3$ 回である。これらの予測値は波高計装着部の舷側からの海水打込み回数であるが、実船実験中においてこの外に船尾スリップウエーからの海水打込みも頻度高く観測された。したがって以西底曳網漁船の操業中における海水打込みはかなり激しく頻度が高い事が推察される。

### 第3節 船体運動の周波数応答特性(75,76)

耐航性の研究には幾つかの方法があるが、その一つは、船の6自由度運動方程式を解く理論的方法である。すなわち、現在では線形ストリップ法(O. S. M)により、理論的に計算が可能であり、近年では漁船船型についてもその有用性が報告されている。

また、他の一つは、船の運動を定常確率過程であるとして、時系列解析に基づく海上における船の動きに関する研究である。

海洋波は極めて不規則な現象であり、統計的性質を有している。すなわち定常確率過程と呼ばれる一つの統計的な事象である。一方このような、ランダムな入力によって生じられる船体運動は線形系と見なされ、あるいは線形化された系の出力である。したがって船体運動もまた同様にランダム性を持つ現象であり統計的な性質を持つものとなる。すなわち、船のダイナミックシステムの出力はまた定常確率過程であると考えられる。

そこで、本研究においても確率過程としてのスペクトル解析およびクロススペクトル解析を行い、船体応答運動の微視的あるいは構造的性質を明らかにする観点から周波数応答特性について考察する。

なお、多くの実験計測結果の中からTable 6に示した各実験(有義波高が1m, 2m, 3m, 4m, 及び5m)について、すなわちFig. 23に示された入力の波スペクトルに対応した出力の船体運動の解析結果について論ずる。

各船体動揺の周波数応答特性、すなわち、振幅利得特性、位相特性および入出力間の線形性を示す指標であるコヒーレンシとその相対誤差をFigs. 35, 37, 39および41に示した。

振幅利得特性は同図から各海況(波高)によりかなりの変動が見られる。これは東海・黄海漁場の波浪特性がFig. 23から分るように不規則であり、またFig. 22からある波周期に対してはその有義波高はほぼ一定値を有する事 $\{T=3.29\sqrt{H_{1/3}}\}$ など、試験水槽における模型実験に用いられる規則波のすべての波長に対して一定波高であるのとは異なり、実船実験の場合は入力として全ての周波数にわたり一定波高が得られない事によるものが原因の一つである。また他の一つは船のコンディションの変化に基づく事も原因の一つであると考えられる。すなわち供試船の一航海における状態変化は、喫水で2.58m~3.05m、トリムでは1.93m~2.50mの範囲であった(第5章第1節)。

船の状態変化(喫水、トリム)による船体運動の変化特性については高橋・川島(77)がストリップ法による理論計算結果を報告している。すなわち、トリム変化による場合、上下動応答は向い波状態でトリムが小さい時に高く、縦揺れ応答は逆にトリムが大きい時に高い。また喫水変化による場合、上下動および縦揺れ共に向い波状態で喫水が大きい時に高くなっている。その差はトリムおよび喫水の平均時の10~20%である。

これら入力である波浪特性と船の状態変動などから実船実験による船体運動応答の周波数特性を見る場合周波数軸では入力の波スペクトルと出力の運動スペクトルが卓越した周波数範囲内で、かつコヒーレンシが0.5~0.7以上の範囲に限定してその振幅利得特性を見る必要がある。また逆にコヒーレンシが低い周波数では入出力のスペクトルも小さく、したがって両者の線形応答関係は誤差が大きく考察できない。

実験結果はコヒーレンシの高い周波数帯域にかぎれば各海況共に振幅利得特性もかなり近い一致を示しているといえる。したがって実船試験の場合、船体応答特性は振幅利得の包絡線をもってその周波数応答特性であると考えられる。

#### (1) 横揺れの周波数応答特性 (Fig. 34, Fig. 35)

相対針路別に各海況における横揺れのパワースペク

トルを Figs. 34-1~5 に示す。同図から横揺れ応答の周期は波と船との相対針路に関係なく、ほぼ一定周期の 8.5~6.5 秒、平均 7.5 秒である。周期 7.5 秒は以西底曳網漁船の特性で述べた様に本供試船の固有周期に一致する。

「しあとる丸」の実船試験結果(24)においても、横揺れ運動は減衰が小さく横揺れ固有周期の近くにスペクトルのピークを示した。そして波浪との出会い角、出会い周期のいかんにかかわらず出会い周期による横揺れは大きくはないと報告されている。漁船の操業中の横揺れ特性も等しく同様な結果を示している。

図中で横軸上のそれぞれの記号(○, ×, ●, △, □)はそれぞれ実験番号に対応してそのスペクトルから求めたゼロクロス周期  $\{T_{02} = 2\pi\sqrt{m_0/m_2}\}$  の値を示している。曳網中の船速は波浪、風および潮流など特に潮流の影響が大きく作用し、種々異なると考えられるが平均 3.5 ノット (1.8 m/sec) 程度であると推定している。したがってこの程度の船速であれば波浪との出会い周期は、向い波と追い波状態でのその差は 1~1.5 秒で大きな差はない。

各相対針路別に波浪に対する横揺れ応答の振幅利得特性 (Amplitude gain, deg/m: 単位波高当りの運動振幅を意味する)、位相特性およびコヒーレンシとその相対誤差について考察するが、各相対針路における振幅利得は各針路特有の応答特性である。しかし波高の大小には大した関係はないようである。また周期  $T_{02}$  での振幅利得の平均値は前節の短期予測で論じた回帰係数にほぼ一致している。

#### (1)-1. 向い波の場合 (Fig. 34-1, Fig. 35-1)

パワースペクトルの卓越したピーク周期は、どの海況においても 7.5 秒である。スペクトルの原点まわりのモーメントから求めた運動の平均周期  $T_{02}$  は、6~7.5 秒範囲でありスペクトルのピーク値とよく一致している。

横揺れ運動波形は Fig. 16 に示した通り他の運動波形より規則的である。その結果、パワースペクトルも単一ピークを持つきれいな形であると考えられる。向い波状態における横揺れ振幅利得の卓越周期は 7~10 秒範囲であるが振幅利得の絶対値は小さい。コヒーレンシについては周期 10 秒で 0.54 と線形性がやや高いのみで他の周期では低い。特に横揺れスペクトルのピーク周期 7.5 秒では 0.05 と低く、向い波における横揺れ応答は波に起因する応答運動ではなく、船の固有周期による動揺のみの現象であるといえる。各海況における周期  $T_{02}$  での振幅利得の平均値は 2.4 (deg/m) であ

る。この値は前節で求められた直線回帰方程式の回帰係数 2.9 にほぼ等しい。これらの結果から曳網中の横揺れの予測がクロススペクトル解析結果からも確認され定量的に可能であると考えられる。ただしこの定量的予測は、東海・黄海の波浪周期帯域が比較的狭い特性を有している事に注意すべきであろうと考える。位相特性については、有義波高が 2 m の実験 No. 9 を例に示したが、コヒーレンシの高い周期域では位相差は少ないが固有周期 7.5 秒付近では位相差は大きく約 90 度異っている。

#### (1)-2 斜め向い波の場合 (Fig. 34-2, Fig. 35-2)

斜め向い波でのパワースペクトルのピーク周期は向い波の場合と同様、横揺れ固有周期と思われる 7.0~7.5 秒で平均周期  $T_{02}$  もよく一致し約 7.0 秒である。応答の振幅利得の高い周期もパワースペクトルの卓越周期とほぼ一致している。しかし出会い波浪周期は 5~6 秒でやや短い周期である。コヒーレンシはやはり有義波高が 2 m の場合の実験 No. 42 を例に示したが、向い波の場合に比べると高く 0.7、また振幅利得も高く波浪に対する横揺れ現象が向い波の場合より多く現われた事が考察される。横揺れの平均周期  $T_{02}$  における振幅利得の平均値は 5.1 (deg/m) で回帰係数 5.2 によく一致している。位相特性についてはコヒーレンシの高い周期 7.5 秒では位相差はないが、6~7 秒の横揺れの平均周期範囲では約 30 度の遅れがみられる。斜め向い波状態では「みそすり運動」が通常みられるがこの現象によって位相遅れが生じたものであろう。

横揺れ応答は入力としては波高より波傾斜角を用いて表現される(43)が、この向い波および斜め向い波における位相シフトから考えて妥当な説明が得られるように考える。

#### (1)-3 横波の場合 (Fig. 34-3, Fig. 35-3)

パワースペクトルのピーク周期は、すべての海況において 6.7~8.6 秒であり、船の横揺れ固有周期に一致している。また横波の場合は波周期ともほぼ一致している。振幅利得においてもこの周期範囲で高く各海況共にピーク値は等しく、平均周期  $T_{02}$  での平均値は 5.8 (deg/m) で回帰係数 5.9 と一致している。コヒーレンシも 6~7.5 秒範囲で 0.5 とかなり高く、したがって相対誤差も少なく横揺れ応答の横波に対する線形性が考察できる。位相特性については周期 5.5~7.5 秒範囲で位相差は少なく約 15 度程度の遅れ現象である。

コヒーレンシおよび位相特性からも、横波に対する横揺れ応答の線形性が判断され、また波高より波傾

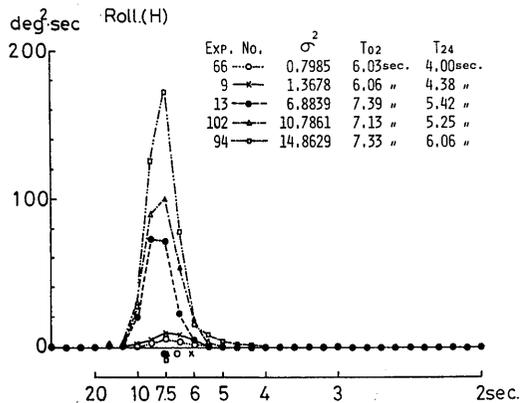


Fig. 34-1. Power spectra of rolling for various sea state at head sea.

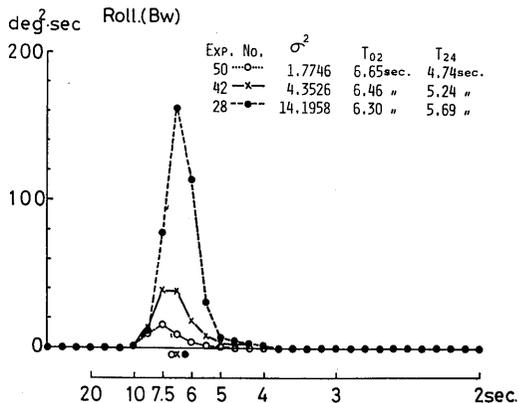


Fig. 34-2. Power spectra of rolling for various sea state at bow sea.

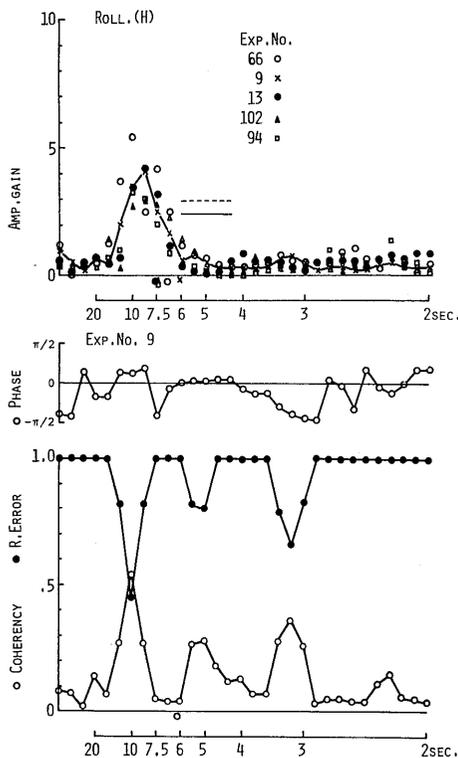


Fig. 35-1. The response characteristic, coherency and reliance between the rolling motion and wave height at head sea.

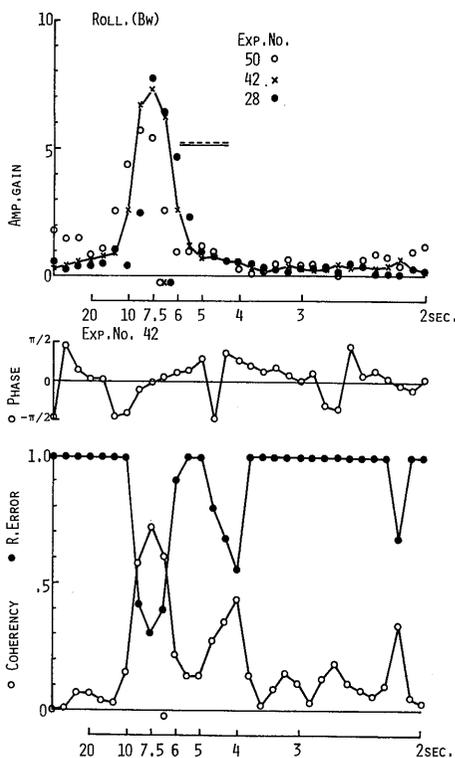


Fig. 35-2. The response characteristic, coherency and reliance between the rolling motion and wave height at bow sea.

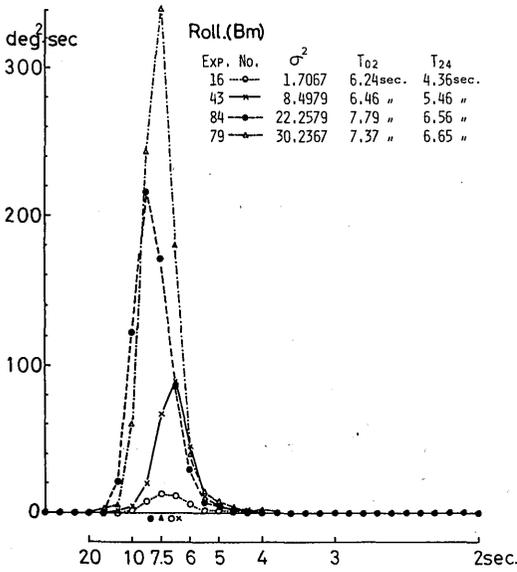


Fig. 34-3. Power spectra of rolling for various sea state at beam sea.

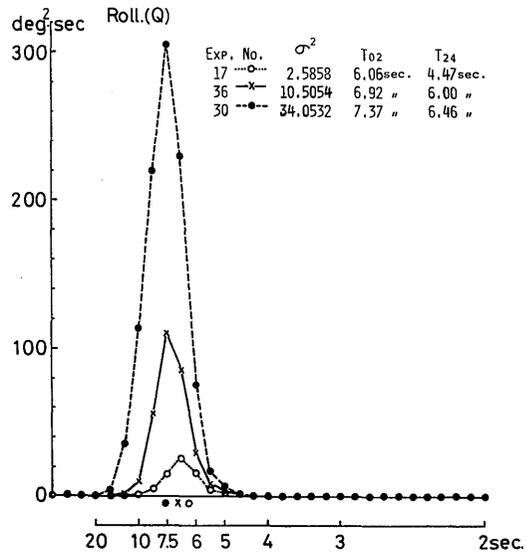


Fig. 34-4. Power spectra of rolling for various sea state at quartering sea.

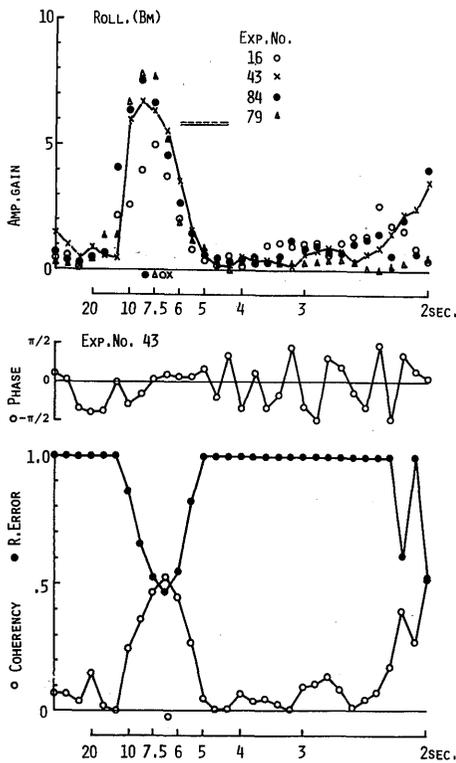


Fig. 35-3. The response characteristic, coherency and reliance between the rolling motion and wave height at beam sea.

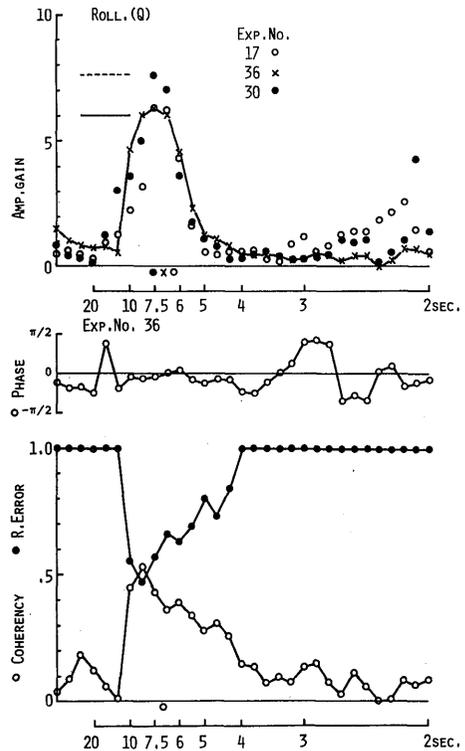


Fig. 35-4. The response characteristic, coherency and reliance between the rolling motion and wave height at quartering sea.

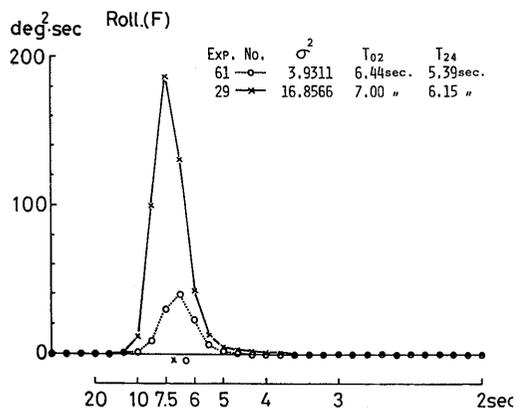


Fig. 34-5. Power spectra of rolling for various sea state at following sea.

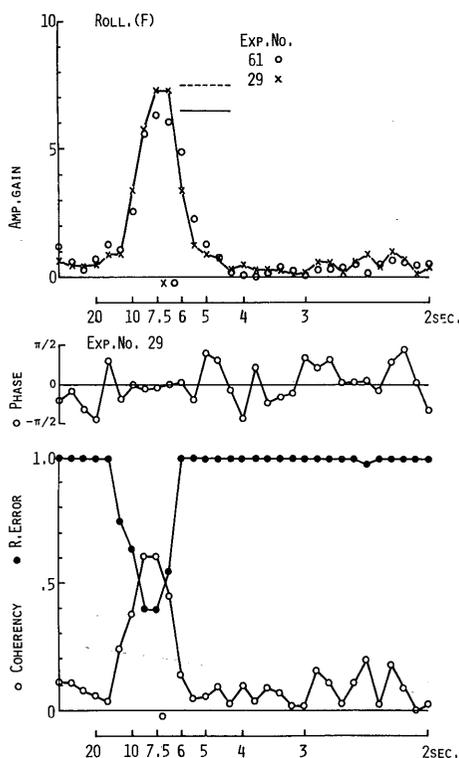


Fig. 35-5. The response characteristic, coherency and reliance between the rolling motion and wave height at following sea.

斜角に対する出力表現がより妥当であると考えられる。

(1)-4 斜め追い波の場合 (Fig. 34-4, Fig. 35-4)

パワースペクトルのピーク周期は全ての海況で横揺れの固有周期に等しい6.5~7.5秒である。したがって振幅利得の高いピーク周期も同様に6.5~7.5秒である。平均周期  $T_{02}$  での振幅利得の平均値は6.0 (deg/m), 回帰係数は7.6であったから, 周波数応答特性からみれば回帰式の予測では過大評価をしている事になる。コヒーレンシは同周期範囲で0.4~0.5で横波状態と比べてやや線形性が悪い。位相特性のシフト量はパワーの卓越周期範囲で-5度とわずかに進む傾向にあるがこの程度は誤差内であろうと考える。

漁船の模型試験(21)および外洋フェリーの耐航性模型試験(78)などで斜め追い波状態は非常に危険で, 異常に大きい横揺れあるいは不安定横揺れ現象が生じる結果を報告している。また理論計算値も斜め追い波については実験結果と一致しないと報告されているが, 本供試船の場合はコヒーレンシの値(0.5)からみて入力である波浪に対する横揺れ応答の説明が不十分であるとは考えられない。これについては底曳網漁具のワープ張力の影響が十分考えられる。すなわち, オッタートロールについて天下井(15)は横揺れとワープ張力との関係について報告し, コヒーレンシは高く影響が認められるが絶対値は低いと述べている。しかし供試船の二そう曳についてはオッタートロールとは操業形態が異なり, 横揺れはオッタートロールでは操業時に航走中より小さいのに対し, 二そう曳では逆に操業時に大きい結果から漁具影響が絶対値も含め高く大きいものと考えられる。

(1)-5 追い波の場合 (Fig. 34-5, Fig. 35-5)

追い波での実験は有義波高2.5m以上については得られずデータとしては少ない。パワースペクトルの卓越周期は6.5~7.5秒でやはり横揺れ固有周期に等しいピークが認められた。振幅利得特性は上記周波数範囲にわたり2実験共よく一致している。出会い平均周期  $T_{02}$  における2実験の平均値は6.5 (deg/m), 回帰係数は7.5でほぼ等しく, 他の相対針路と比べ追い波の場合が最も高い。コヒーレンシも0.6と高く応答特性を十分説明出来ていると考えられ, 横揺れに対する追い波の影響も横波および斜め追い波と同じ程度であると推察される。位相特性についても斜め追い波の場合と同様わずか5度進む傾向を有しているがこれも誤差内であると考えられる。

小川ほか(78)の報告では, 縦揺れ周期は波浪周期と同一である事を示し, 縦揺れ周期即波浪周期とみなし

縦揺れに対する横揺れの位相特性を示した。その結果と本実験の場合とは同一傾向にある。すなわち、向い波状態では遅れ、追い波状態では進む特性である。したがって漁船の曳網中における横揺れの波浪に対する位相特性も一般船の航走中の位相特性と等しい事が推察された。

(2) 縦揺れの周波数応答特性 (Fig. 36, Fig. 37)

縦揺れのパワースペクトルを相対針路別に Figs. 36-1~5 に示し、周波数応答特性については Figs. 37-1~5 に示した。

すべての相対針路における出会い波浪周期範囲は Fig. 23 の波スペクトルから 6~9 秒で大差がなく、縦揺れのパワースペクトルのピーク周期も全ての相対針路にわたり大差はなく 6~9 秒である。したがって縦揺れ周期は波との出会い周期によく一致している。

縦揺れは横揺れに比べると減衰の大きい動揺であるから、縦揺れ固有周期による動揺は波による強制動揺に比べ小さい。特に曳網作業中の縦揺れは航走中より小さく、ワーブ張力の影響で抑制されるためと考えられる。パワースペクトルの形も卓越周期も波浪のそれとよく似ている。したがって動揺波形も横揺れ波形より不規則である。相対針路別の振幅利得特性は絶対値は小さいが追い波の場合が最も大きく、次いで向い波および斜め追い波である。最も小さいのは横波状態の場合でこの相対針路における縦揺れ応答はほとんど無いに等しいといえる。

なお Fig. 37 の振幅利得特性にはストリップ法による理論の利得特性値も点線で示した。実験値と理論値の比較については後述する。

(2)-1 向い波の場合 (Fig. 36-1, Fig. 37-1)

縦揺れのパワースペクトルのピーク周期は 5.5~7.5 秒と海況が高くなるにつれて長周期側に移動している。また波浪のパワースペクトルも 5~7.5 秒と同一傾向であり、縦揺れ応答の絶対値は小さいがピーク周期はよく一致している。波高に対する縦揺れ応答の振幅利得は名海況共にパワースペクトルの卓越周期範囲で有義波高 1 m の海況を除きよく一致しているといえる。しかし長周期域でやや利得が小さい。これは波高が高くなるにつれ波浪の卓越周期は長くなる特性に対し、後述する上下動応答は長周期域で高く、縦揺れ応答はこの上下動とワーブ張力の影響により抑制され小さくなるためであろうと推察される。

スペクトルの平均周期  $T_{02}$  での振幅利得の平均値は 2.9 (deg/m) で回帰係数の 2.6 と等しい。コヒーレンシの値は 0.87 と高く、向い波中の縦揺れ応答の線形

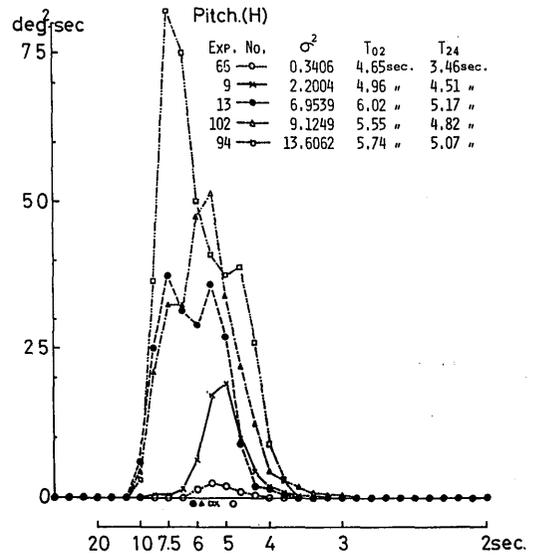


Fig. 36-1. Power spectra of pitching for various sea state at head sea.

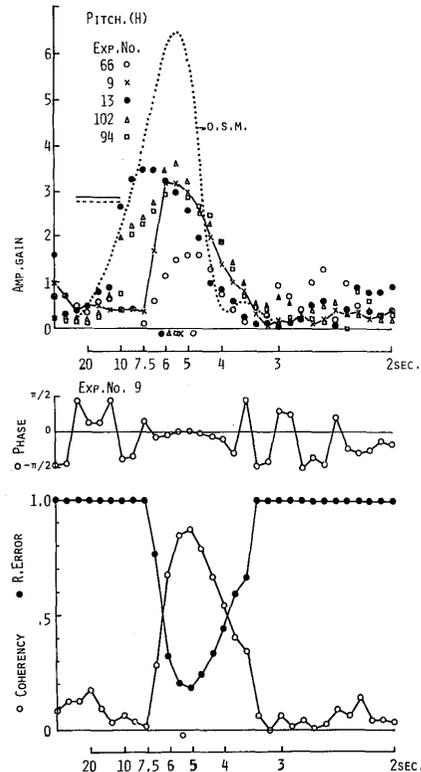


Fig. 37-1. The response characteristic, coherency and reliance between the pitching motion and wave height for various sea state at head sea.

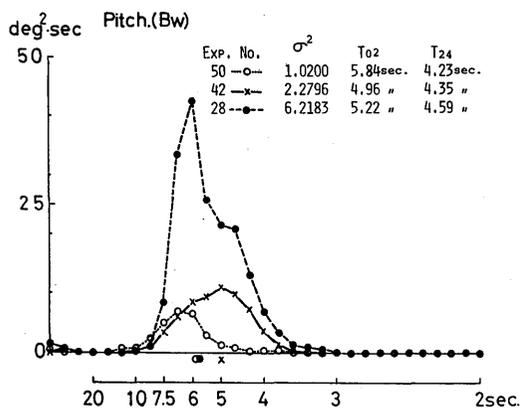


Fig. 36-2. Power spectra of pitching for various sea state at bow sea.

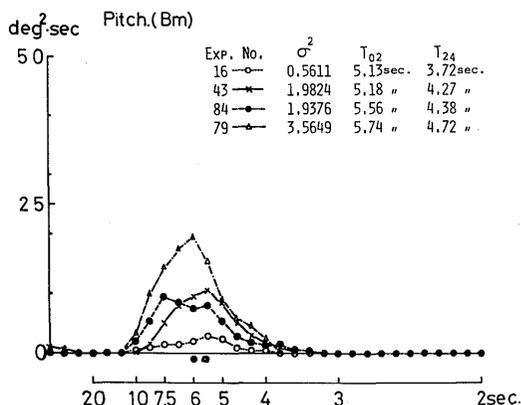


Fig. 36-3. Power spectra of pitching for various sea state at beam sea.

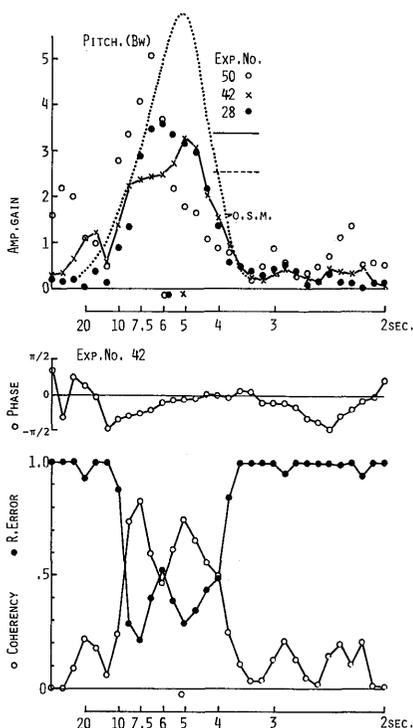


Fig. 37-2. The response characteristic, coherency and reliance between the pitching motion and wave height for various sea state at bow sea.

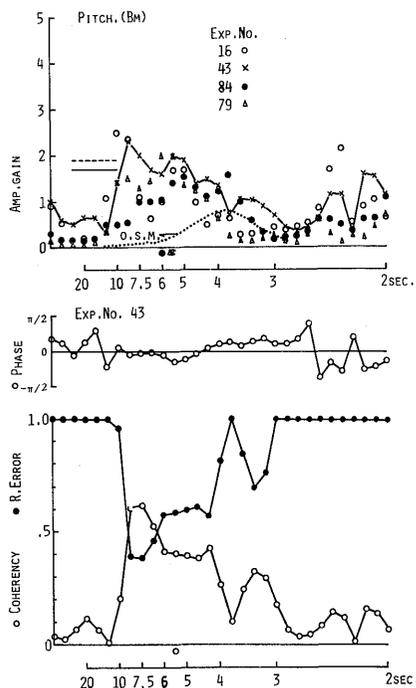


Fig. 37-3. The response characteristic, coherency and reliance between the pitching motion and wave height for various sea state at beam sea.

性は非常に高い。位相特性はコヒーレンシの高い周期4〜7秒範囲でシフト量はほとんどなく、0〜5度進む傾向であるが誤差内であろうと考える。

(2)−2 斜め向い波の場合 (Fig. 36-2, Fig. 37-2) パワースペクトルのピーク周期は各海況共に5〜6秒とほぼ等しいが、スペクトルの形は海況により大分

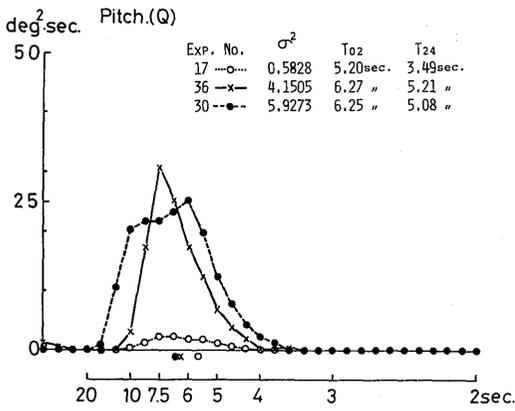


Fig. 36-4. Power spectra of pitching for various sea state at quartering sea.

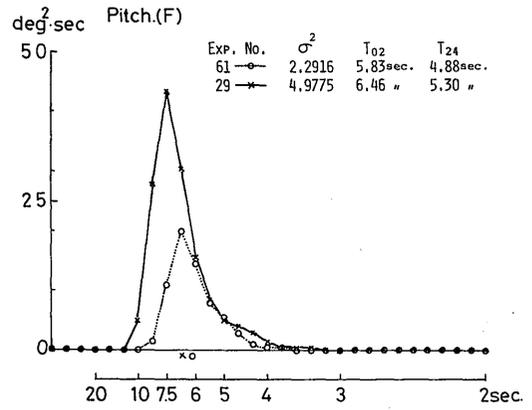


Fig. 36-5. Power spectra of pitching for various sea state at following sea.

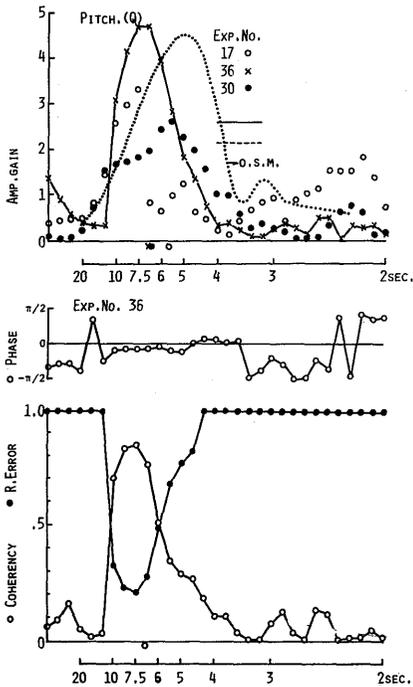


Fig. 37-4. The response characteristic, coherency and reliance between the pitching motion and wave height for various sea state at quartering sea.

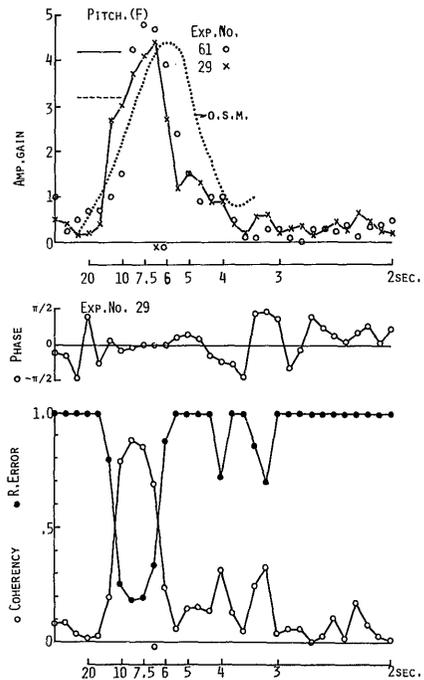


Fig. 37-5. The response characteristic, coherency and reliance between the pitching motion and wave height for various sea state at following sea.

異っており、波スペクトルに似て3実験3様である。したがって出会い平均周期  $T_{02}$  における応答の振幅利得は偏差が大きい。平均値で3.4(deg/m)、一方回帰係数は2.6で差は0.8とやや大きい。波浪のスペクトルと縦揺れ応答の特性から見てこの3実験の相対針路は斜め向い波でも、向い波より近い針路(実験 No. 50)と横波状態により近い針路(実験 No. 42)とが混在していると考えられる。

コヒーレンシについては、有義波高2 mの実験(No. 42)を例として示したが、縦揺れ周期には横揺れ固有周期が現われる事が知られており、コヒーレンシが0.83と高い長周期7.5秒がそれを表わし、5秒附近のコヒーレンシ0.75が縦揺れの応答周期であろうと考える。

位相特性については、6~10秒帯域で進んでいる。したがって横揺れと縦揺れとの合成運動である斜め向い波特有の「みそすり運動」の位相は、波浪に対して横揺れ成分は遅れ、縦揺れ成分は進む特性を有していると推察される。

#### (2)-3 横波の場合 (Fig. 36-3, Fig. 37-3)

パワースペクトルのピーク周期は斜め向い波とほぼ同様、各海況共に6秒であり運動量の絶対値は小さい。応答の振幅利得特性も絶対値は小さくしかも広周期帯域にわたっている。出会い平均周期  $T_{02}$  での振幅利得の平均値は1.7(deg/m)で回帰係数の1.9と等しく一致している。しかし各海況により振幅利得特性の変化が大きく一致が悪い。またコヒーレンシからもすべての相対針路の中で横波状態が最も線形性は悪く、横揺れ固有周期と考えられる7.5秒に0.62の値のピークがあるのみで他の広い周期範囲では応答の線形性は低い。したがって横揺れの向い波同様、縦揺れに対する横波は大きな意味を有しないと考えられる。

位相特性については、周期4~7.5秒範囲で0~20度進む傾向にあるがコヒーレンシの高い7.5秒付近では位相差はほとんどない。

#### (2)-4 斜め追い波の場合 (Fig. 36-4, Fig. 37-4)

パワースペクトルのピーク周期は6~7.5秒で前方から波を受ける場合に比べやや長周期帯域にある。応答の振幅利得特性は1 m, 2 mおよび3.4 mの各海況間の一致が悪い。すなわち、有義波高が高いとき(実験 No. 30)振幅利得は長周期域で他より小さく、逆に有義波高が低いとき(実験 No. 17)は短周期域で小さい。前者については向い波状態の場合でも考察したように長周期域では上下動応答の卓越とワープ張力の影響で運動の縦揺れ成分の減少が現われたものと考えられる。平

均周期  $T_{02}$  での振幅利得の平均値は偏差が大きい2.6(deg/m)であり、回帰係数2.2と大差はない。コヒーレンシは周期7.5秒で0.85と高く線形性は良好である。位相特性はコヒーレンシの高い6~10秒周期域で約10~15度進んでいる。

#### (2)-5 追い波の場合 (Fig. 36-5, Fig. 37-5)

パワースペクトルのピーク周期は6.5~7.5秒で斜め追い波の場合とほぼ等しい。応答の振幅利得は他の相対針路に比べ最も高く、また2実験の結果もよく一致している。平均周期  $T_{02}$  における振幅利得の平均値は4.2(deg/m)、回帰係数は3.3であったから、その差は0.9(deg/m)である。したがって回帰式による運動予測では過少評価となると考える。

コヒーレンシも追い波の場合が0.9で最も高く、この周期7~10秒帯域の応答の線形性は高く、また精度も十分であると考えられる。実験データが少なく、有義波高が2.2 mまでの実験しかなく3 m以上で縦揺れ応答が他の相対針路でみられた長周期帯域での減少傾向を確認できなかった。

実験航海を通して、追い波状態では揚網時、ワープ張力には船体の後進抵抗の分だけ多く負荷がかかり、ワープ切断の危険があるため、荒天での追い波操業は少ない。したがって実験機会が少なくデータも少なかった。

位相特性はコヒーレンシの高い周期6.5~10秒帯域でシフト量が少なく3~5度進む傾向にあるが誤差内であろうと考える。

#### (3) 上下動の周波数応答特性 (Fig. 38, Fig. 39)

海洋波による船体運動の中で上下動はスラミングあるいはプロペラレーシング、漁船にとってはさらに漁具のワープ切断あるいは漁獲性能にも影響を及ぼす運動である。実験船上では上下動の計測は上下動加速度で得られたが、研究室で2回積分を行ったので振幅は{m}単位である。したがって周波数応答特性の振幅利得は単位波高当たりの上下動変位、すなわち、{m/m}として示されている。

横揺れおよび縦揺れの結果と同様、相対針路別に上下動のパワースペクトルを Figs. 38-1~5 に、波に対する応答の振幅利得、コヒーレンシおよび位相の周波数特性を Fig. 39-1~5 に示した。これらの図から上下動応答の周期は、出会い波周期にすべての針路で一致している。また周期5秒以上の長周期波浪に対して上下動の振幅利得は0.8~1.1(m/m)とほとんど波高に等しくあるいは波高以上の上下変位で追従上下動している。

波高スペクトルのパワーは周期4～5秒以下で0～2 (m<sup>2</sup>・sec)と小さく、上下動応答の振幅利得も0.8以下に激減している事から、上下動の応答予測には波周期が4～5秒以上、波高は約1 m以上について考慮すれば十分といえる。

舷側における波面変動(相対波高)と上下動の関係について、それぞれの振幅利得特性が周期軸上で反比例の関係にある。すなわち、本供試船の場合、周期4～5秒を境にして長周期域で上下動応答の振幅利得は高く、一方相対波高の振幅利得は低い。短周期域では逆に上下動応答は低く相対波高の振幅利得は高い。この事は上下動と相対波高の運動関係から考え当然である。すなわち、ある喫水で水上にある船がある波高に対する上下動応答が大であれば舷側の相対波高は小さく、逆に上下動が小であれば相対波高は当然大きくなる。

位相特性についてはすべての相対針路において±10度以内のシフト量である。しかし加速度から変位への2回積分過程で積分器の位相特性(47)が10～20秒の周期帯域で10度以内の誤差があった。したがって位相シフト量は少なく波に追従応答していると推察される。

(3)-1 向い波の場合 (Fig. 38-1, Fig. 39-1)

パワースペクトルのピーク周期は5～7.5秒で、波高が高くなるに従いピークは長周期帯域に移動している。この傾向は波浪特性と等しく、それぞれの海況で上下動と波高のスペクトルのピークは一致している。

振幅利得はパワースペクトルの卓越周期範囲4～12秒で0.8～1.1と高く、波高に等しく追従し上下動している。20秒以上の周期については上下動のパワーもほとんどなく上下動加速度を変位に変換する2回積分過程にハイパスフィルターをそう入し、フィルターのシャ断周波数が0.05Hz(20秒)であるから考察しない。各海況における応答の振幅利得特性のうち、有義波高が1 m(実験 No. 66)の場合は、他の海況が高い場合に比べ振幅利得は低い。したがってコヒーレンシも他に比べ低く、曳網中の本供試船(194GT)に上下動を生じさせる波高はほぼ1 m以上であると考えられる。平均周期 T<sub>02</sub>における振幅利得の平均値は0.98(m/m)、前節における応答予測の回帰係数は1.11であったから両値はほぼ等しい値である。

コヒーレンシについても4.5～20秒の周期範囲で0.8～0.9と高く、波高に対する上下動変位の線形性は非常に高く、また相対誤差も少なく十分な精度で示されていると考えられる。

位相特性については4.5秒以上の周期範囲で0～3

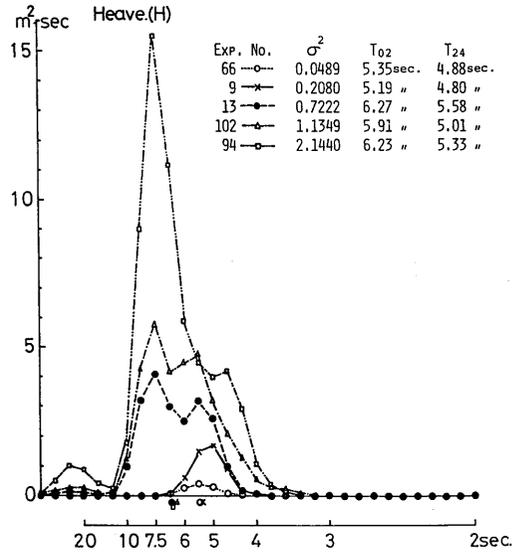


Fig. 38-1. Power spectra of heaving for various sea state at head sea.

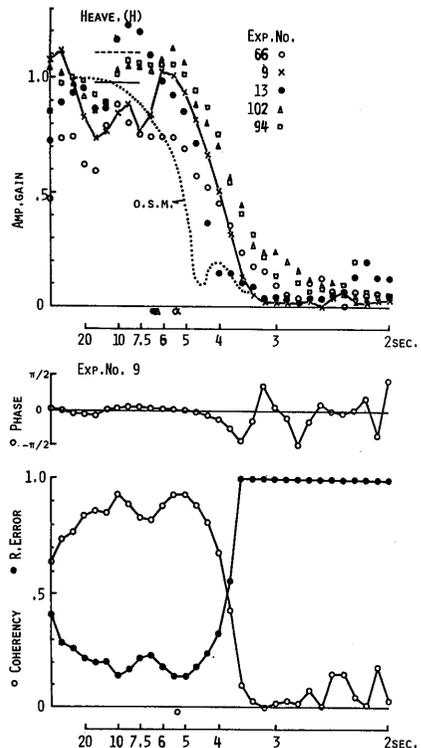


Fig. 39-1. The response characteristic, coherency and reliance between the heaving motion and wave height for various sea state at head sea.

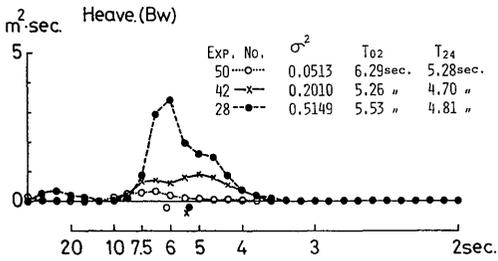


Fig. 38-2. Power spectra of heaving for various sea state at bow sea.

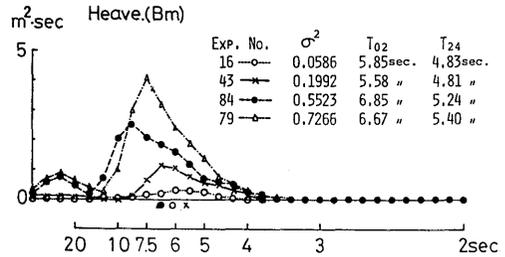


Fig. 38-3. Power spectra of heaving for various sea state at beam sea.

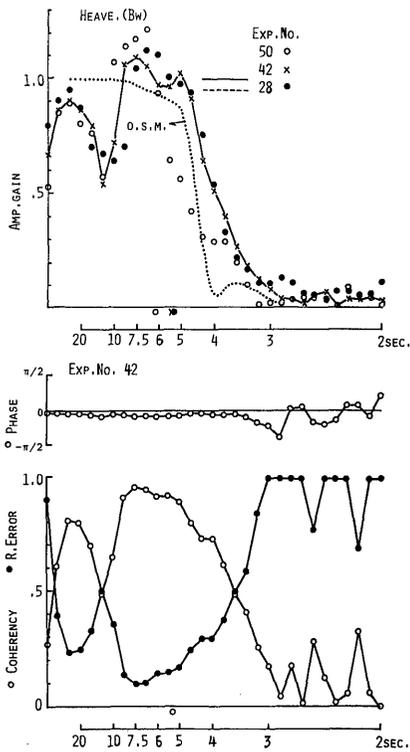


Fig. 39-2. The response characteristic, coherency and reliance between the heaving motion and wave height for various sea state at bow sea.

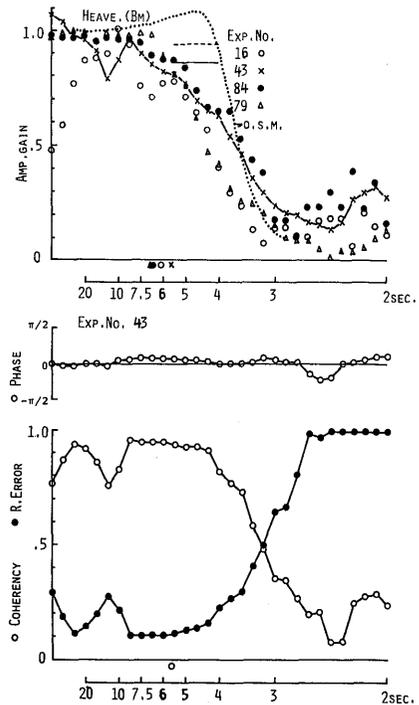


Fig. 39-3. The response characteristic, coherency and reliance between the heaving motion and wave height for various sea state at beam sea.

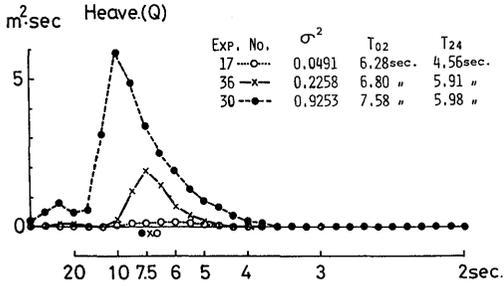


Fig. 38-4. Power spectra of heaving for various sea state at quartering sea.

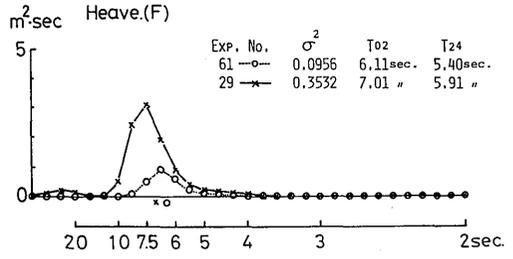


Fig. 38-5. Power spectra of heaving for various sea state at following sea.

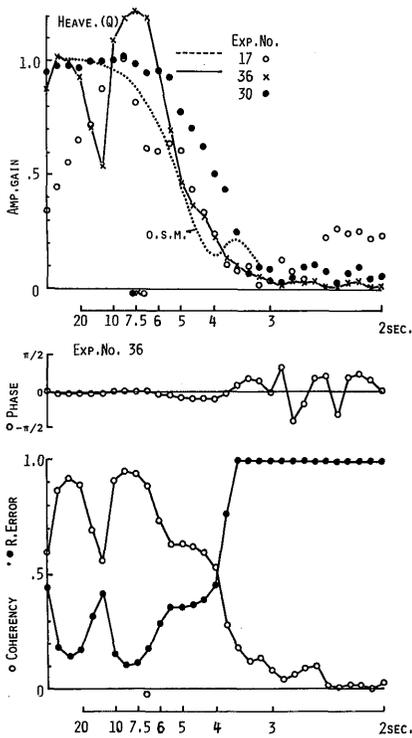


Fig. 39-4. The response characteristic, coherency and reliance between the heaving motion and wave height for various sea state at quartering sea.

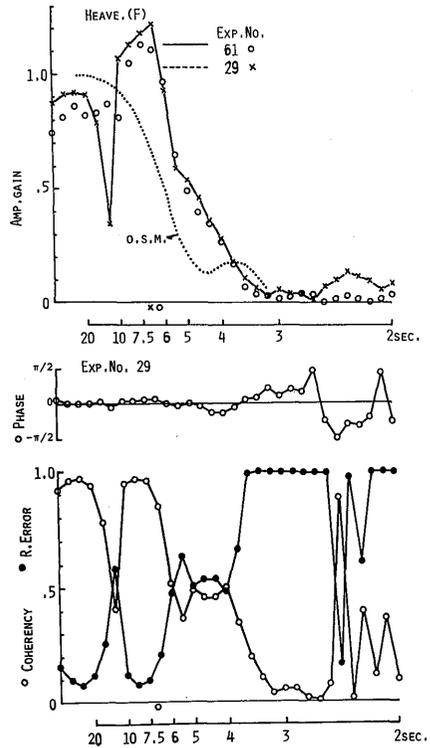


Fig. 39-5. The response characteristic, coherency and reliance between the heaving motion and wave height for various sea state at following sea.

度進む応答傾向であるが、積分処理過程の誤差を考慮すれば位相差は無視され得る値であると考えられる。

### (3)-2 斜め向い波の場合 (Fig. 38-2, Fig. 39-2)

パワースペクトルのピーク周期は5.5~6.0秒であり向い波状態の場合と同様、波浪周期によく一致している。応答の振幅利得については、上下動応答スペクトルの卓越周期範囲5~8秒で0.8~1.1と高く、上下動は波高に完全に一致して追従している事が分る。有義波高1mの海況(実験 No. 42)での上下動応答は周期5秒以下ではパワーもほとんどなく、振幅利得も他の波高が高い海況に比べ同周期範囲で低い。したがって斜め向い波においても上下動を生じさせる波高の下限は約1mであり、またその周期も4~5秒以上の波であると考えられる。スペクトルの平均周期  $T_{02}$  における振幅利得の平均値は0.99 (m/m)、回帰係数は0.94であったからほぼ等しい値である。

コヒーレンシはスペクトルの有効な周期範囲4~9秒で0.80~0.95と高く、入出力関係の線形性は良く、また十分な精度を示している。

位相特性は3.5秒以上の周期域で5~7度進んだ傾向であるが前述した理由により誤差内で無視し得る範囲である事から応答追従の位相差はないものと考えられる。

### (3)-3 横波の場合 (Fig. 38-3, Fig. 39-3)

パワースペクトルのピーク周期は6~7.5秒で波浪周期に等しい。応答の振幅利得についてもスペクトルの卓越周期範囲6~10秒で0.8~1.0と高く、横波状態においても波高に等しく上下動している。ただし有義波高1m(実験 No. 16)に対する応答の振幅利得は他の海況に比べやはり低い。平均周期  $T_{02}$  での振幅利得の平均値は0.86 (m/m) で回帰係数0.93に一致している。

コヒーレンシは4秒以上の周期に対して0.82~0.96と高く、上下動変位の波浪に対する線形性の良さが示されている。また位相特性は他の相対針路に比べ最も広い周期帯域(3秒以上)にわたりわずかに遅れ傾向であるがそのシフト量は少なく誤差範囲内として無視出来る程度で追従応答していると考えられる。

### (3)-4 斜め追い波の場合 (Fig. 38-4, Fig. 39-4)

パワースペクトルのピーク周期は7.5秒あるいは有義波高3.37m(実験 No. 30)の海況で10秒であり波スペクトルとよく一致している。応答の振幅利得は6~10秒周期帯域で0.95~1.20と高く、波高に等しいか波高以上に上下動している。ただし他の相対針路の場合と同様、有義波高1.11m(実験 No. 17)の海況での

振幅利得は他の海況に比べやや低い。平均周期  $T_{02}$  での振幅利得の平均値は0.96 (m/m) で回帰係数の1.03に等しい。コヒーレンシは振幅利得の高い周期6~10秒範囲では0.74~0.95と高くこの周期帯域での線形性は良好である。しかし約6秒以下の周期では線形性は悪い。すなわち前方から波を受ける場合に比べ後方から波を受ける場合は線形性が悪くなる周期は出会周期であるから1~2秒長周期域である。

位相特性は広い周期帯域にわたり0~±3度のシフト量であり、他の相対針路における位相特性と同様である。

### (3)-5 追い波の場合 (Fig. 38-5, Fig. 39-5)

パワースペクトルのピーク周期は波浪の周期に等しく6.5~7.5秒である。波浪周期との一致は他のすべての相対針路の場合と同様である。応答の振幅利得は周期6~10秒帯域で0.95~1.20 (m/m) と高く、横波状態を除いた他の針路同様1.0をオーバーしている。平均周期  $T_{02}$  での振幅利得平均値は1.13 (m/m) で回帰係数1.03より10%高いがほぼ等しい値を示していると考えられる。コヒーレンシは、やはり応答の振幅利得の高い6.5~10秒帯域で0.85~0.97と線形性は良い。斜め追い波の場合でものべたように線形性が悪くなる周期は前方から波を受ける場合より長周期域である。

位相特性はコヒーレンシの高い周期域で±5度以内のシフト量で小さく無視出来る範囲である。

### (4) 相対波高の周波数応答特性 (Fig. 40, Fig. 41)

海洋波による舷側の波面変動すなわち相対波高は、換言すれば任意の点(相対波高の計測点すなわち船体中央の左舷側)における乾舷の変動振幅を意味する。したがって相対波高は、甲板上への海水打込み(Deck wetness) および甲板上での漁撈作業能率の低下あるいは乗組員への危険性に大きく影響する。

実船実験による相対波高のパワースペクトルを相対針路別に Figs. 40-1~5 に、海洋波による相対波高の振幅利得、コヒーレンシおよび位相の周波数特性を Figs. 41-1~5 に示した。

相対波高応答の周波数振幅利得特性は各周期の波に対する舷側の波面変動特性であるから単位波高当たりの舷側の波面変動 {m/m} を意味する。Fig. 40 のパワースペクトルから舷側における波面変動は海洋波による船体運動および海洋波はもちろんであるがその船体との干渉波に大きく分け起因している事が分る。すなわち、相対波高のパワースペクトルにピークが2個あり、一つは船体運動周期(長周期の6~7.5秒)に、他の一つは不規則な短周期の表面砕波あるいは波浪が

船体に当たり干渉碎波したと考えられる周期（短周期の3～4秒）である。したがって応答の振幅利得およびコヒーレンシイにもこれらの特性が現われている。

供試船の漁場での平均的乾舷は約90cm（喫水が2.50m）である。そこで相対波高の振幅利得から、相対波高が90cmより大となり海水打込みが生じる波高は、最も起りやすい追い波で約1.8m（海況4）以上、最も起りにくい向い波では約2.6m（海況5）以上であると推定された。しかしさらに大量の海水打込みが生じるのは乾舷にブルワーク高さとブルワーク上の打込み水防止板高さの和（90+90+60=240cm）より高い波高の時である。これらについても各相対針路別に推定した。

#### (4)－1 向い波の場合 (Fig. 40-1, Fig. 41-1)

パワースペクトルのピーク周期は7.5秒と5～3.5秒に2つある。周期7.5秒のピークは横揺れおよび縦揺れの卓越周期に一致している。したがって船体運動に起因するものと考えられる。他方5～3.5秒のピークは有義波高の1～2mの海況（実験No. 66, 9）については長周期域に応答のピークはなく短周期域のみのピークである事から海洋波そのもののパワーであると考えられるが、有義波高が3m以上の海況（実験No. 13, 102, 94）については表面碎波および波面の船側での干渉碎波によるパワーであろうと推察される。応答の振幅利得は3.5秒以下の周期帯域では0.8～0.9と高い。したがって当然ながらコヒーレンシイも0.90～0.95と高く線形性は良い。この現象は全ての相対針路について同じ傾向が得られており、相対波高のパワースペクトルから見てパワーは小さく10～50 $\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$ であるから主として船体との干渉波によるものと考えられる。さらに周期3.5～5秒帯域の相対波高は小さく、振幅利得の変化は急激で過渡的現象を示している事から、荒天での碎波あるいは船体による海洋波の攪乱波の不規則性を物語っているといえる。平均周期 $T_{02}$ は、パワースペクトルの2つのピーク周期の中間にあり4～5秒を示しており、どちらの現象の周期も示していない。したがって周期 $T_{02}$ での振幅利得の平均値も偏差が大きく、向い波では特に大きい約0.35(m/m)である。回帰係数は0.22であり両値の差も大きい。 $T_{02}$ における平均利得0.35から乾舷90cmを越し海水打込みが発生する波高は2.6m（海況5）、一方回帰係数からの予測では $\{y=0.22x+0.617\}$ から1.3mの波高（海況4）となり両者の予測波高には2倍の差がある。実船試験時における海水打込みの状態から見て海況5以上が妥当であると考えられる。

位相特性については船体運動の影響と考えられた長

周期域では30～90度進んでいる。短周期域3.5秒以下では位相差はみられない。しかし有義波高2m（実験No. 9）の場合の例であるからこのパワースペクトルの卓越している周期4秒では位相は約20度の遅れを示している。

#### (4)－2 斜め向い波の場合 (Fig. 40-2, Fig. 41-2)

パワースペクトルのピーク周期は向い波の場合と同様にやはり二つあり、長周期域では7秒、短周期域では4秒である。応答の振幅利得特性から、斜め向い波の場合は相対波高変動に対する船体運動の影響が向い波状態より大きく現われている。すなわちコヒーレンシイ特性からみて長周期7秒付近では0.7と高く線形性が良く、振幅利得も0.55と高い。平均周期 $T_{02}$ は4秒で短周期のピークに近い。 $T_{02}$ での振幅利得の平均値は0.51(m/m)、回帰係数は0.54であり切片も小さくほぼ一致している。これら振幅利得から海水打込みが生じる波高は約1.5～1.8m以上となる。位相特性は周期5秒以上の長周期域では約60度の遅れであるが、5秒以下の短周期域ではシフト量はない。

#### (4)－3 横波の場合 (Fig. 40-3, Fig. 41-3)

パワースペクトルの形が横波では短周期域の山が小さくなり、横揺れ周期に等しい長周期6～7.5秒に卓越したピークがある。したがって横波の場合の相対波高は特に横揺れの影響が顕著であると考えられる。ただし有義波高が3.5m（実験No. 79）と高くなるにつれ短周期域の4秒に小さいピークが現われこのパワーは荒天となった海洋波の碎波現象あるいは船体と波とが干渉して生じたものであると推察される。相対波高の振幅利得特性において、周期7秒では0.45(m/m)で、しかも各海況共に等しくまたコヒーレンシイも0.5～0.6とかなり高く線形性が良い。平均周期 $T_{02}$ での振幅利得の平均値は0.38(m/m)で回帰係数0.43とほぼ等しい。しかし回帰式は $\{y=0.43x+0.233\}$ で $y$ 切片が大きいので、海水打込み発生する波高は両者では大きく異なる。すなわち振幅利得によれば2.4m、回帰式によれば1.55mと予測される。

位相特性は向い波および斜め向い波とは異なり長周期域で逆に進む傾向であり、7～7.5秒で約40度の位相差が認められる。横揺れ応答の横波状態における位相特性は5.5～7.5秒周期域で15度の遅れであったから両位相差から考え、横揺れ応答より先に海水打込み現象が発生する事になる。

#### (4)－4 斜め追い波の場合 (Fig. 40-4, Fig. 41-4)

パワースペクトルに顕著なピークが二つあり、舷側での碎波あるいは干渉波が向い波状態および斜め向い

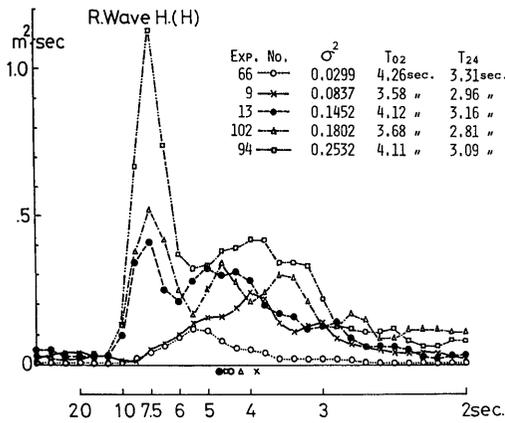


Fig. 40-1. Power spectra of relative wave height for various sea state at head sea.

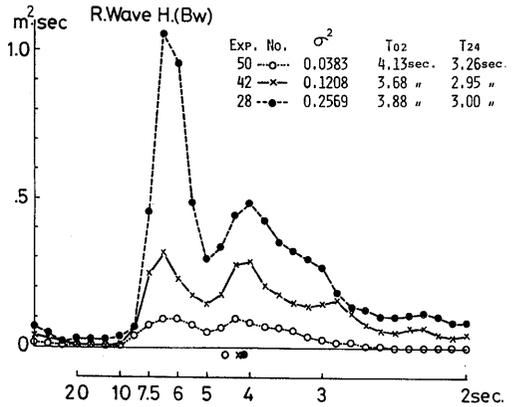


Fig. 40-2. Power spectra of relative wave height for various sea state at bow sea.

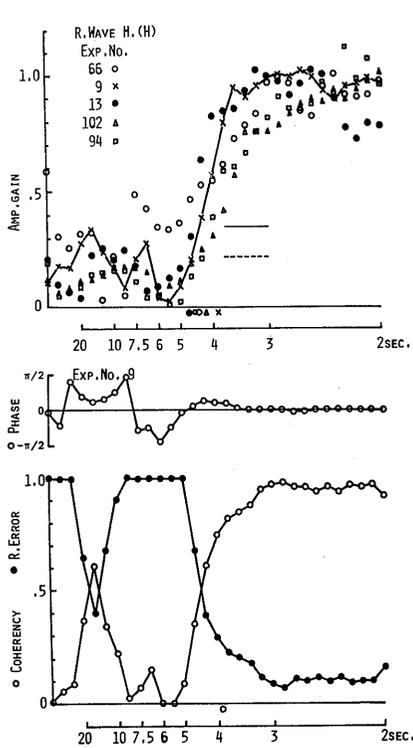


Fig. 41-1. The response characteristic, coherency and reliance between the relative wave height and wave height for various sea state at head sea.

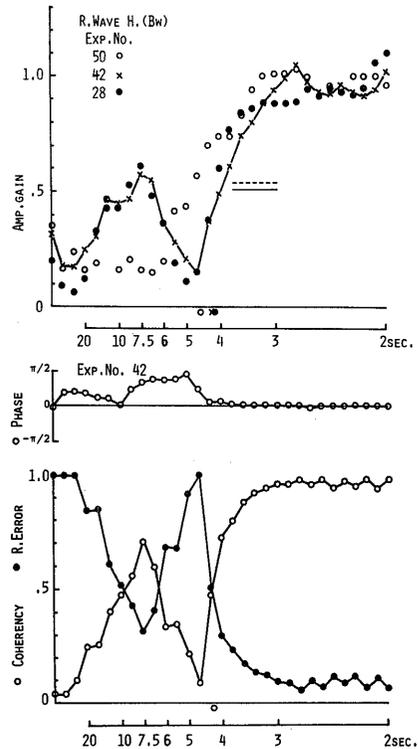


Fig. 41-2. The response characteristic, coherency and reliance between the relative wave height and wave height for various sea state at bow sea.

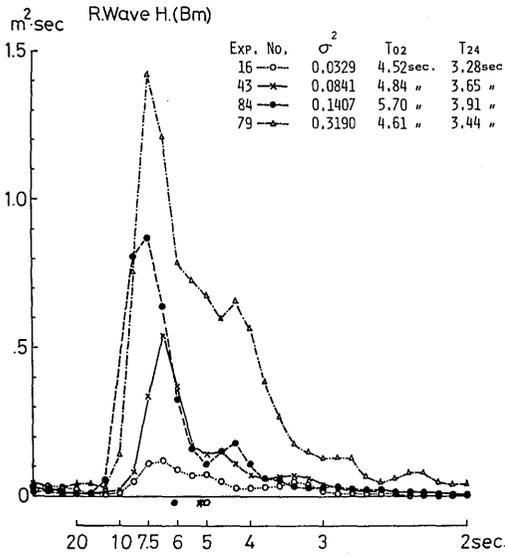


Fig. 40-3. Power spectra of relative wave height for various sea state at beam sea.

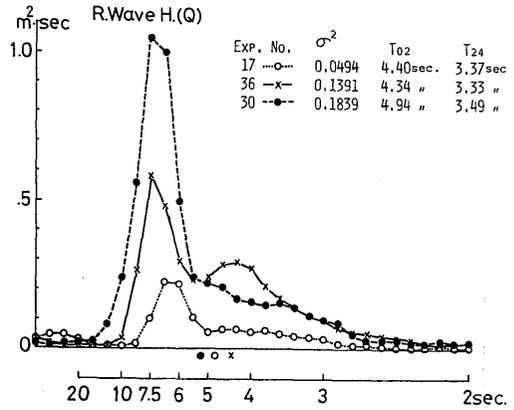


Fig. 40-4. Power spectra of relative wave height for various sea state at quartering sea.

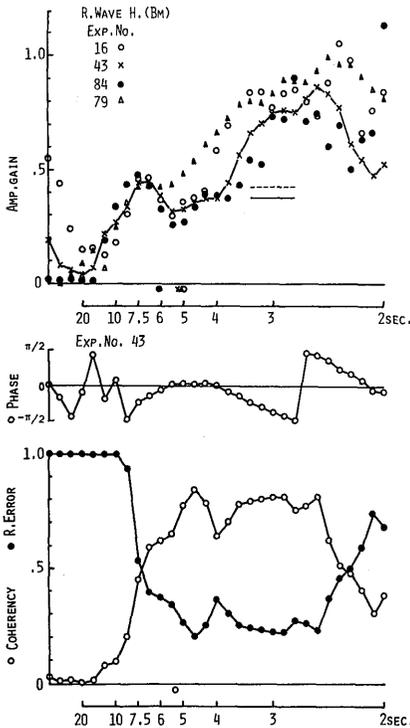


Fig. 41-3. The response characteristic, coherency and reliance between the relative wave height and wave height for various sea state at beam sea.

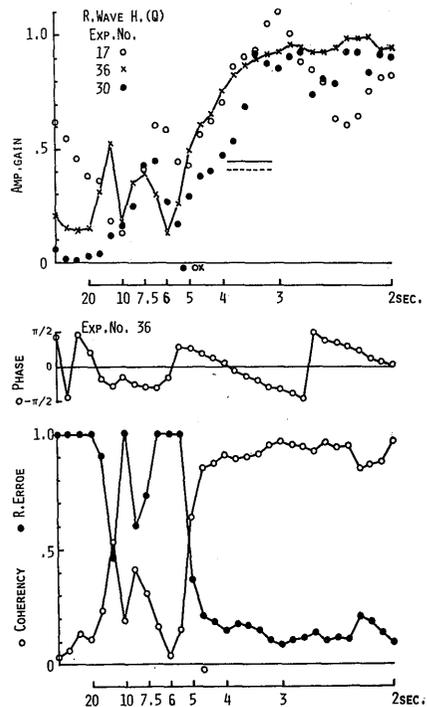


Fig. 41-4. The response characteristic, coherency and reliance between the relative wave height and wave height for various sea state at quartering sea.

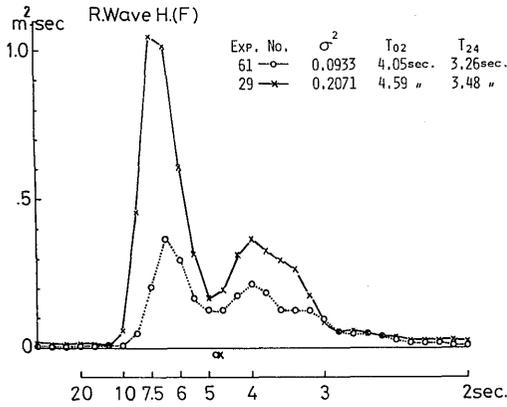


Fig. 40-5. Power spectra of relative wave height for various sea state at following sea.

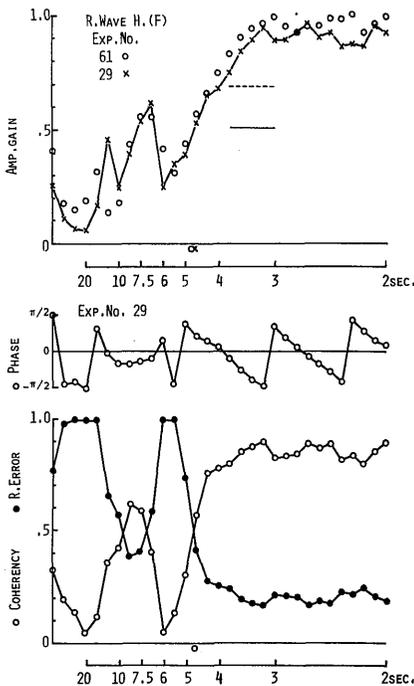


Fig. 41-5. The response characteristic, coherency and reliance between the relative wave height and wave height for various sea state at following sea.

波の場合同様に生じている事が認められる。二つのピークの周期は他の相対針路の場合と大差はなく、7~7.5秒と4~4.5秒である。振幅利得特性は周期7秒で横波の場合よりわずかに低い0.40(m/m)、平均周期  $T_{02}$  での平均値は0.45(m/m)、一方回帰式は  $\{y=0.41x$

+0.39\} であり回帰係数はほぼ等しいが切片が大きい。海水打込み発生時の波高は、振幅利得特性によれば2.0 m、回帰式によれば1.25mと予測され、両者は大きく異なるが横波状態に比べ共に低い波高である。

位相特性については、横波の場合と同様、進む傾向にある。周期7.5秒で約45度のシフトが認められる。したがって横波状態で述べたように、横揺れ運動より前に海水打込みは発生する。荒天航海法で斜め追い波は危険針路であるといわれるが、海水打込みが横揺れより前に発生する事は甲板上の打込み水の排水が悪ければ、または打込み水が多量であれば打込み水の重量および自由表面の影響で船の重心は上昇し、さらに遅れて応答する横揺れとが相まって転覆事故につながる誘因となる事が十分考えられる。

(4)-5 追い波の場合 (Fig. 40-5, Fig. 41-5)

パワースペクトルおよび周波数応答特性は斜め追い波の場合の特性と同様であり、船体運動の影響を顕著に示している。長周期 7~7.5秒での振幅利得は0.60(m/m)と高く、コヒーレンシも同じく0.60であり線形性も良好である。位相についても7~10秒の長周期域で約30度の進みが認められる。したがって横波および斜め追い波の場合と同様、追い波状態においても荒天になれば横揺れ運動より前に海水打込み現象が発生する。平均周期  $T_{02}$  での振幅利得の平均値は0.51(m/m)、回帰式は  $\{y=0.69x+0.12\}$  であった。したがって回帰式による海水打込み発生時の波高予測では過大評価であると考えられるが、上述した転覆事故の誘因を考慮すれば過大評価の方がより安全であると考ええる。

(5) 縦揺れ及び上下動の実験値と理論値の比較

(Fig. 37, Fig. 39)

ストリップ法(Ordinary Strip Method)によって、船速が曳網中とほぼ等しい3.5ノット ( $F_n=0.1$ ) の場合の周波数応答関数を供試漁船について計算しその結果を Figs. 42, 43 に示した。

図に示された応答関数を実船実験の結果と比較するため、横軸は各相対針路別に出会い周期に変換し、また縦軸についても縦揺れの場合はラジアン単位を実験に等しい度に変換した。それらの結果はそれぞれ Figs. 37-1~5 と Figs. 39-1~5 に示した通りである。

これらの図から実験値と理論値を比較した場合、縦揺れは、向い波および斜め向い波で理論値の方が実験値よりかなり大きい。しかし応答の大きい周期に関しては、振幅利得特性から見て両相対針路とも一致しよく似ている。横波の場合は、横波に対する縦揺れ応答

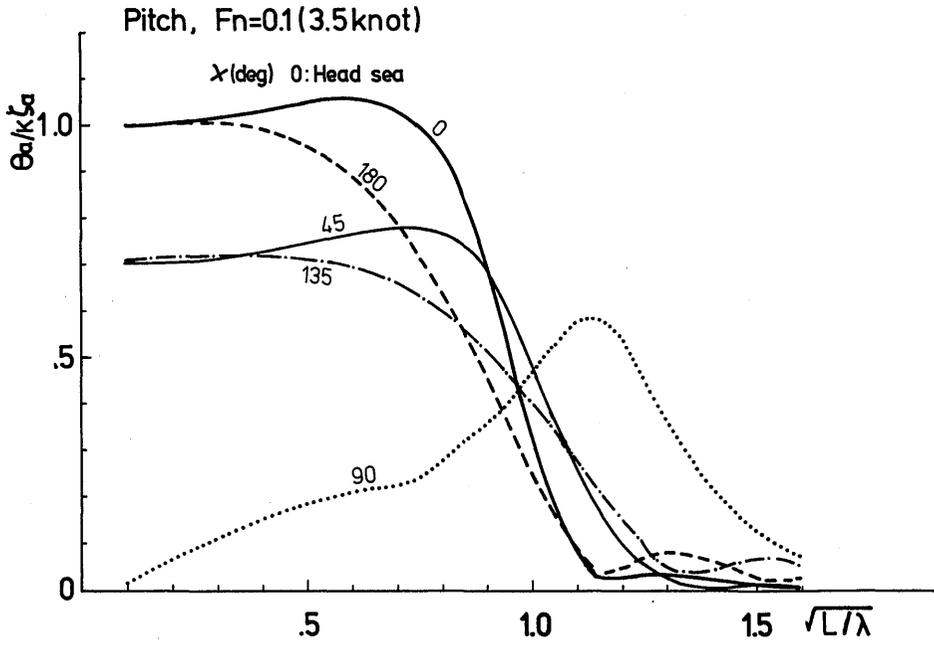


Fig. 42. The pitching amplitudes by ordinary strip method (O. S. M.).

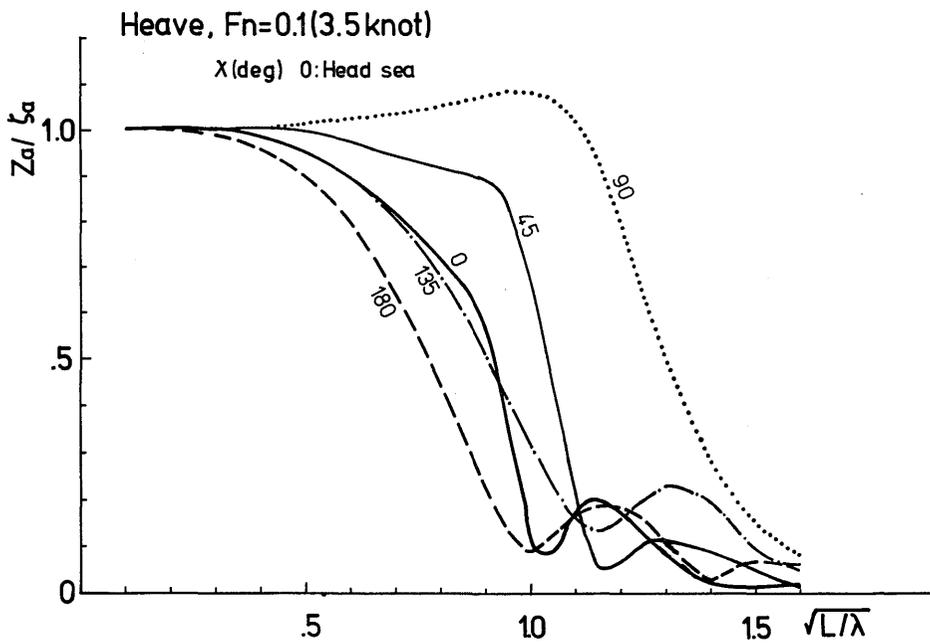


Fig. 43. The heaving amplitudes by ordinary strip method (O. S. M.).

は小さく線形性についても悪い事から、理論と実験との一致は悪い。斜め追い波および追い波では振幅利得はほぼ等しいがその応答周期には相違がある。すなわち理論値は実験値に比べ長周期域で小さく、短周期域で大きい傾向を示し、振幅利得のピーク周期が短周期域にある。

上下動に関しては、すべての相対針路にわたり振幅利得特性はよく似ている。したがって海上における船の運動系では線形性を満足していると推定される。しかし周期軸における細部については大分異なる。横波を除いた向い波、斜め向い波、斜め追い波および追い波では理論値の方が実験値より小さく、特に短周期域でその差が顕著である。横波の場合のみ理論値の方が実験値より大きい。

理論値と実験値の大小比較において、縦揺れと上下動では逆の関係にあり、特に向い波、斜め向い波および横波状態において顕著である。

理論値と実験値の相違の要因については、第一に船速は3.5ノットで等しいが、実験の方は曳網操業状態である。したがって実験値には漁具の影響、すなわちワープ張力の効果が起因しているものとする。そこで理論値が航走状態であり、実験値が曳網状態として比較すると第3章第2節で考察した結果と定性的には等しく、傾向としては妥当な結果を示していると考えられる。

第二としては船の状態変化である。トリムおよび喫水変化による船体運動特性の変化について、高橋(77)によれば、理論値は向い波および斜め向い波状態でその変化が顕著である事を示し、また変化傾向は縦揺れと上下動では逆の特性となっている。

実船実験の場合、喫水は2.58m~3.05mの範囲であり、トリムは1.93m~2.50m(船尾)の範囲である。一方理論計算時の状態は供試船の満載出港状態であり、喫水が3.00mで変化範囲の上限、トリムは1.52mで実験時の範囲外の小さい値である。これらの事から、高橋の報告とは船種および船型も異なるため一元的定量的な比較考察はできないが定性的には全く同傾向である。

理論と実験とを周波数応答関数の振幅利得特性で比較したが、一例として向い波の場合についてパワースペクトルで比較した結果を Fig. 44 および Fig. 45 に示した。すなわち、実船実験で得られた縦揺れおよび上下動スペクトルに対し、一方これらと同時に得られた波スペクトルを用いて理論の応答振幅利得から理論の縦揺れと上下動スペクトルを求め比較した。

Fig. 44 に示す縦揺れの場合、理論と実験の両スペク

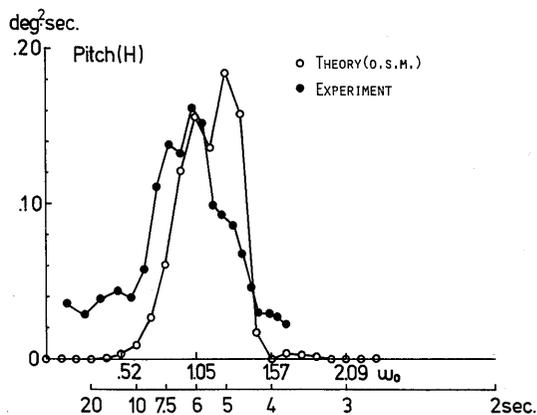


Fig. 44. The comparison of power spectra of pitching by theory ( O. S. M. ) and experiment.

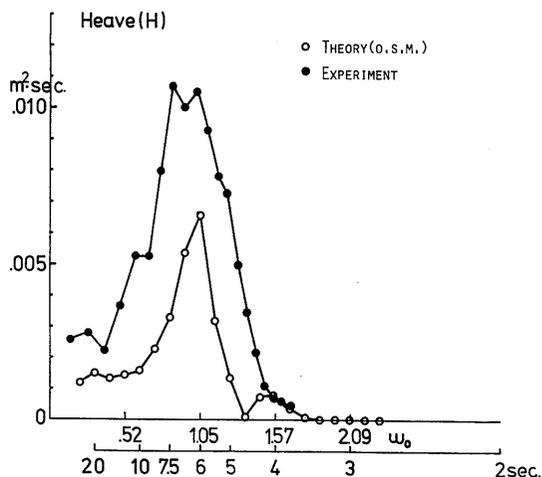


Fig. 45. The comparison of power spectra of heaving by theory ( O. S. M. ) and experiment.

トルのピーク周期7秒付近では良く一致している。しかし7秒より長周期帯域では実験値が、短周期帯域では逆に理論値の方が大きくなっている。

上下動の場合、Fig. 45 から実験値の方がスペクトルのバンド幅も広く、すべての周期範囲で理論値より大きい。上下動の両値の差は上下動の測定位置と上下動における漁船の重心の位置の差も原因の一つとして考えられる。周期についてはスペクトルのピークは両値ともよく一致している。

理論値と実験値の比較を縦揺れと上下動について、振幅利得特性とスペクトルの両方から検討したが、定性的に傾向としては両値共に同じ結果が得られた。し

かし、理論値と実験値の差の定量的検討に関しては漁具の影響を含めた運動系および漁具系両面からの検討が必要であり今後の問題点の一つとして残されている。

第6章 曳網中の船体運動数値スペク

トルの予測(79)

前章までに実船試験の結果から、船体運動の短期および長期予測について、また海洋波に対する船体運動の応答関数について考察し論じた。しかし実船試験結果からクロススペクトル解析により得られた応答関数にも種々の要因と入力である波浪の波長および波高も実海面ではかなり限られている事などにより変動がみられ、安全限界を推定するにはまだ実用的面で問題がある。したがって運航操船者の立場から、例えば目視観測の波高から船体応答のエネルギー表現であるスペクトルを直接予測する事が出来れば安全性の検討、あるいは荒天時の操業遂行可否の決定などが可能となりより効果的である。

また船体応答のスペクトル予測にはストリップ法による理論計算などの方法があるが、第5章第3節で考察したように、漁船の場合、操業中の船体運動については漁具による種々の力学的影響により相違がみられ精度の面でまだ問題がある。そこで実船試験データのスペクトル解析結果から、船体運動スペクトルを予測する実験式を導く事を試みた。すなわち以西底曳網漁船の曳網中の運動スペクトルモデルの推定である。

実船試験の結果において、船体応答の横揺れ、縦揺れおよび上下動のスペクトルは海況(波高)、波との出会い周期および波向と船との相対針路あるいは船の状態などによって種々異なっていた。したがってこれらの要素をすべてパラメータにし、スペクトルの予測式を導く事は現実的に不可能である。また、パラメーターが多ければ実用的ではない。そこでこれらの要素が可能な限り少ない数値スペクトル予測の実験式を検討した。すなわち、第4章第2節において東海・黄海の波スペクトルの推定式を導いたが運動スペクトルの数式表示についても同様の手法により推定計算するモデル実験式を検討した。

(1) 船体運動スペクトルの無次元化

第4章第2節における式(4・2・4)の無次元化波スペクトルの左辺の通り、船体運動スペクトルについても運動振幅の有義値( $H_s$ )と平均周波数( $\omega_1$ )とにより無次元化を行った。その場合、まず式(4・2・2)に示される条件、すなわち $H_s$ と $m_0$ の関係について検討した。横揺れ、縦揺れおよび上下動についての結果はFig. 46に示す通りである。これらの図から、 $H_s = k\sqrt{m_0}$ の $k$ の値は、横揺れの場合、 $k=5.6$ 、縦揺れおよび上下動の場合、 $k=5.4$ であり、各船体運動は良好な直線関係を有し式(4・2・2)を満足している。したがってスペクトルの無次元化における $H_s^2$ の導入は、波スペクトル同様船体運動スペクトルに関しても可能である。その結果、式(4・2・1)における定数 $A$ および $B$ は最小自乗法により決定出来る。なおデータの中で上

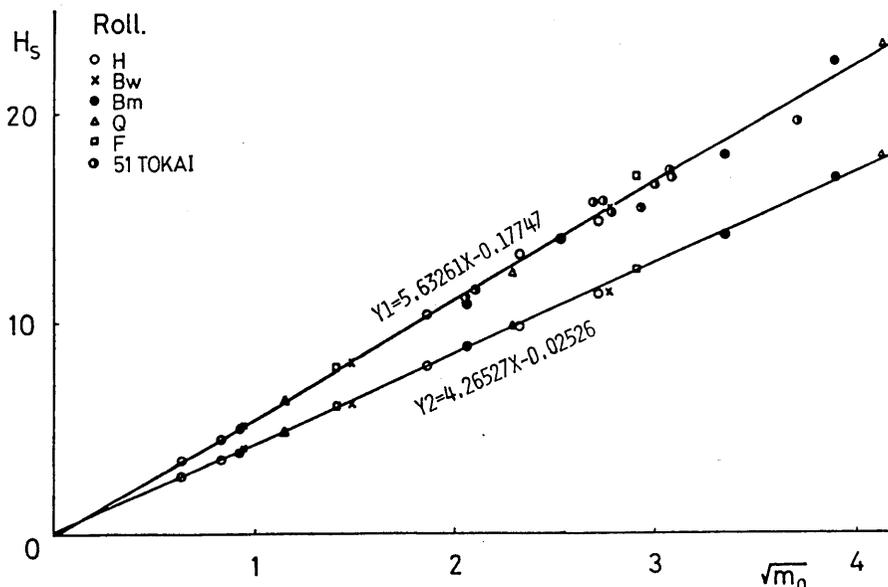


Fig. 46-1. The relation between the  $\sqrt{m_0}$  and  $H_{1/3}$  of rolling.

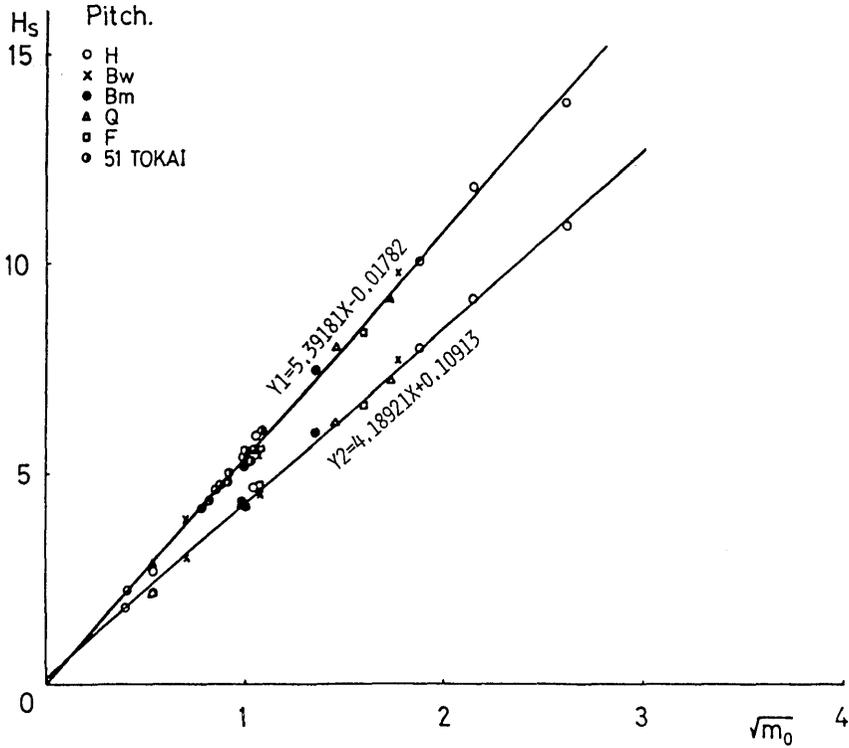


Fig. 46-2. The relation between the  $\sqrt{m_0}$  and  $H_{1/3}$  of pitching.

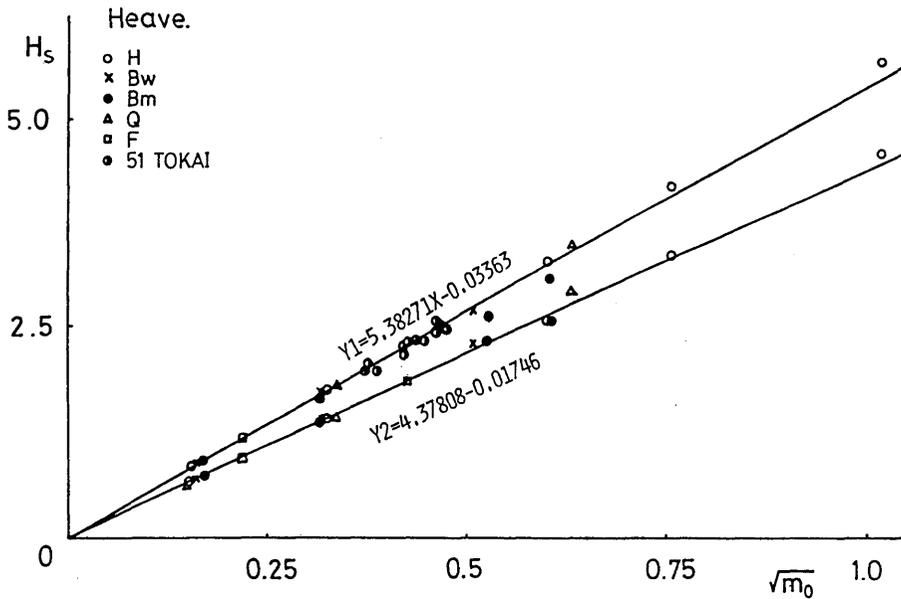


Fig. 46-3. The relation between the  $\sqrt{m_0}$  and  $H_{1/3}$  of heaving.

下動については、第27東海丸では上下動変位で得られているのに対し、第51東海丸では上下動加速度で得られている。しかし式(4・2・2)の関係については Fig. 46-3 で示された通り両者の相違は見られない。したがって単位は問題でない事が分る。またこれらの図中直線  $Y_1$  は振幅極値の有義値、 $Y_2$  は時系列データ ( $\Delta t = 1.0$ 秒) の有義値と  $\sqrt{m_0}$  との関係それぞれを示している。 $Y_1$  および  $Y_2$  共に良好な直線関係を有している事からスペクトルの無次元化に際し  $H_0$  としてはどちらを用いてもよいと考えられる。しかし本研究では第5章第2節における船体運動の短期予測では極値の有義値を用いていることおよび波高の目視観測結果は極値の有義値に一致することなどからここでも  $Y_1$  の関係を用いる事にした。

式(4・2・2)の条件が満足されたので、実測スペクトルを  $\{H_0^2/\omega_1\}$  で除し無次元化されたスペクトルを横軸についても無次元  $\omega_0$  上にプロットした結果を Fig. 47 に示す。Fig. 47 は Table 6 に示した冬期航海データであるが、各相対針路別にスペクトルの無次元化後  $\omega_0$  軸上で平均化したものである。これらの図から無次元化された各船体運動のスペクトルは、波高すなわち海況、波との出会い周期および相対針路などに関係なくほぼ等しい事が分る。そして I. S. S. C. の波スペクトルおよび東海・黄海の波スペクトルが平均周期に対して左右非対称のスペクトル型であったのに比べ、無次元化船体運動スペクトルはほぼ左右対称型である。したがって式(4・2・4)の右辺はガウス近似により次の様に表される。

$$S(\omega)/(H_0^2/\omega_1) = A \cdot \exp\{-B(\omega_0 - \mu)^2\} \quad (6 \cdot 1)$$

ここで、 $A = m_0' / (\sqrt{2\pi} \cdot \sigma)$ 、 $B = (2\sigma^2)^{-1}$  であり、また  $m_0' = \int_0^\infty \{S(\omega)/(H_0^2/\omega_1)\} d\omega_0$ 、なお  $\omega_0 = \omega/\omega_1$  である。Fig. 47 における実線が実測スペクトルの全相対針路の平均値を示し、一方点線で示されたのが式(6・1)で表される実験式による計算値である。縦揺れ(Fig. 47-2)と上下動(Fig. 47-3)の追い波状態の場合は他の相対針路に比べ大きく特に異なった値を示しているが、これは追い波状態のデータが少ない事に起因するものとして無視して処理した。なお誤差については後述する。

次に式(6・1)のガウス近似による実験式が他の同船型以西底曳網漁船に関しても精度よく適用出来るかどうか、また同一船においても東海・黄海の季節による波特性変化から季節が異なった場合の運動スペクトルに対する適合度について検討した。その結果を Fig. 48 に示した。同図において、第51東海丸のデータは第3

章で論じた春期に得た曳網中のものである。それに第27東海丸の秋期航海データを加えそれぞれ無次元化したものである。第27東海丸の冬期航海データが17実験秋期航海データは12実験および第51東海丸のデータが12実験の合計41実験データの平均値である。これらの図から平均値はすべてよく一致しており、無次元化する事により東海・黄海の数値波スペクトルの予測と同様、194G T型以西底曳網漁船の曳網中の船体運動スペクトルは実験式により予測が可能である結果が得られた。

ガウス近似による実験式から推定した各船体運動の数値スペクトルモデルと実測スペクトルとの差は、実測スペクトルの有効周波数帯域で5~20%以内であった。推定スペクトルの許容誤差範囲については次の様に考察される。すなわち、スペクトル解析において、スペクトルの平滑化を行うウィンドウは Table 1 に示された6種類が提案され使用されている。赤池の平滑化係数が表中の  $W_1$ 、 $W_2$  および  $W_3$  であるが、赤池によればこれらウィンドウにより平滑化したスペクトルの有意の差の限界は10%程度とされている。またスペクトルの無次元化に際して、 $\omega_1 = m_1/m_0$  あるいは  $\omega_1 = \sqrt{m_2/m_0}$  において  $m_n$  のスペクトルの積分範囲は現実のスペクトルの有意な周波数範囲について計算すべきであるがその範囲が明りようでない場合が多い。その結果  $\omega_1$  にもある程度の誤差が含まれている。したがってこれら種々の誤差を勘案して、スペクトルの推定誤差は先に示した5~20%以内を許容誤差とした。

またスペクトルの解析結果で重要な意味を持つ船体運動の標準偏差  $\{\sqrt{m_0} = \rho(0)\}$  について、実験式から求められた  $m_0$  値と実測スペクトルの  $m_0$  値を比較した結果は、その差5%以内であった。したがって実験式によるスペクトルの予測は精度的にも満足できるものであると考えられる。さらに前章で得られた周波数応答関数は波浪特性および船の各種状態変化などにより、各周波数軸上で平均値まわりに5~25%の差で変動していた。したがって実験式による推定値の方が5%誤差が小さい事になる。よって実験式は実用的見地から、運動の数値スペクトル予測式として有効であると考え、式(6・1)の右辺の定数  $A$ 、 $B$  および  $\mu$  を決定し、実験式は各運動について次の通り示された。

横揺れ；  $S(\omega)/(H_0^2/\omega_1)$

$$= 0.081 \exp\{-21.3(\omega_0 - 0.98)^2\} \quad (6 \cdot 2)$$

縦揺れ；  $S(\omega)/(H_0^2/\omega_1)$

$$= 0.063 \exp\{-11.8(\omega_0 - 0.98)^2\} \quad (6 \cdot 3)$$

上下動；  $S(\omega)/(H_0^2/\omega_1)$

$$= 0.065 \exp\{-11.7(\omega_0 - 0.98)^2\} \quad (6 \cdot 4)$$

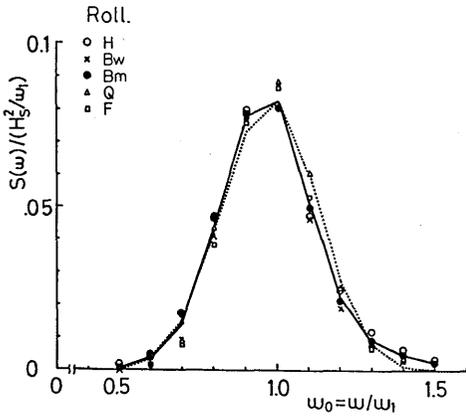


Fig. 47-1. The proposed dimensionless spectra of rolling for various relative course angles.

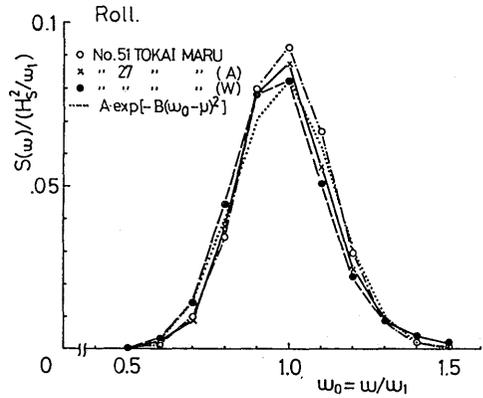


Fig. 48-1. The proposed dimensionless spectra of rolling for various bull trawlers.

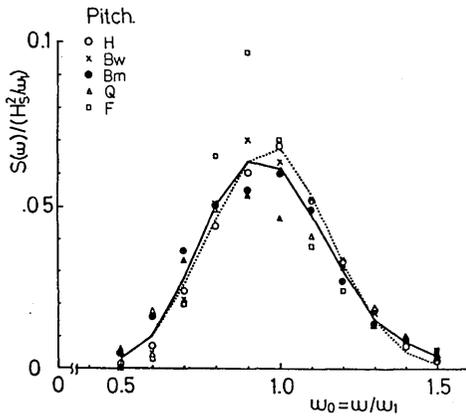


Fig. 47-2. The proposed dimensionless spectra of pitching for various relative course angles.

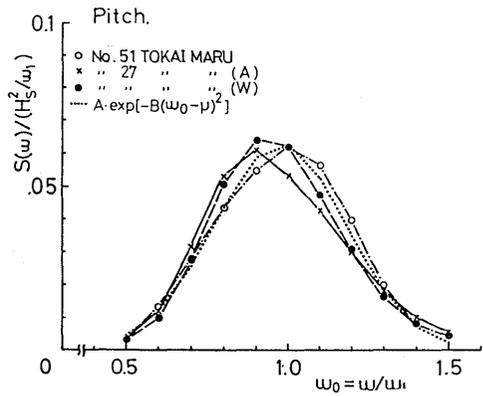


Fig. 48-2. The proposed dimensionless spectra of pitching for various bull trawlers.

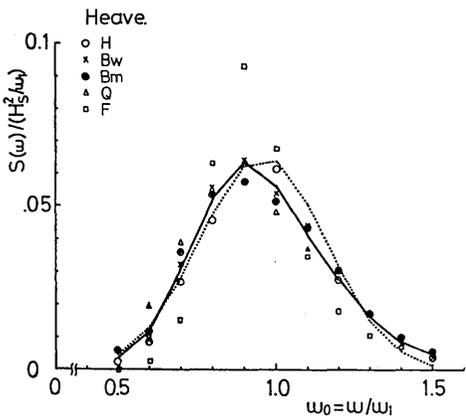


Fig. 47-3. The proposed dimensionless spectra of heaving for various relative course angles.

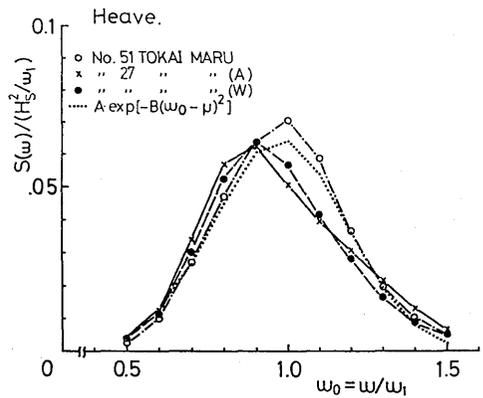


Fig. 48-3. The proposed dimensionless spectra of heaving for various bull trawlers.

上式中の  $H_s$  と  $\omega_1$  について、操船者は次の様にして決定すればよい。各船体運動の有義値 ( $H_s$ ) は第5章第2節でのべた様に各相対針路別に、有義波高(目測平均波高)から Table 12 に示された回帰式を用いて推定出来る。また、平均周期 ( $T=2\pi/\omega_1$ ) は、縦揺れおよび上下動については波との出会い周期から、横揺れについては船の横揺れ固有周期すなわち  $GM$  から推定出来る。

なお第5章第1節において以西底曳網漁船の特性について考察したが、110GT から 200GT までの同種漁船の  $N$  係数は等しく、横揺れ運動の大きさは、最も大きい同調横揺れ時で9.6度から18.1度の範囲であり、船の各種状態においてはほぼ等しかった。したがって式(6・2)においては周期のみが問題である。よってこの実験式はすべての以西底曳網漁船に適用可能であると考える。

## 第7章 総括

耐航性に関する研究は今日では運用術の理論的背景をなしていると考えられる。そこで本研究の目的は、以西底曳網漁船を対象として、実船実験の方法によりまた計測データ解析には定常確率過程による統計的方法を用いて、海上における漁撈中、特に曳網中の漁船の動きを明らかにすることであった。そして操船者の立場から、海上の諸条件下における船の安全性の限界の推定ならびに船体運動の数値予測であった。

結果の詳細については個々の章、節に示されたが、そのうち主要なものをここに改めてかかげると次のとおりである。

### (1) 実船実験法

1) 実習船「鶴水」(19.95トン)による海洋波中の船体動揺特性を明らかにするため8角航走試験を行いスペクトル解析を行った。その結果、船の針路に対して波浪の進行方向が船首尾線に対称な場合、すなわち相対針路が45度対315度(斜め向い波)、90度対270度(横波)および135度対225度(斜め追い波)の横揺れと縦揺れは動揺の周期、振幅および減衰状態などほぼ等しい特性を示した。

相対針路のうち最も動揺の激しいのは、横揺れでは135度と225度の斜め追い波であり、縦揺れでは0度の向い波の状態であった。8角航走試験はほぼ一定のスペクトルを持つ不規則波中における船の針路の差に基づく船体運動の変化を短時間内に求めることが出来る効率のよい試験である。

なお、船体運動のスペクトル解析に先立ち、時系列データの統計的特性の確認のため、確率分布を調べた。横揺れおよび縦揺れは共に正規分布を示した。

2) 以西底曳網漁船の短期の実船実験を通じ、商用漁船による実船実験の方法および曳網中の船体運動の実態など多くの知見が得られた。

以西底曳網漁船による実船実験では、効率のよい8角航走試験を行う事は、漁法上および商用上不可能である。したがって長期にわたる実船実験を行い、多くの計測データから運動特性を明らかにしていかなければならない。

また、船体運動の根源は波浪であり、目視観測による波浪階級情報のみでは船体運動の海洋波に対する応答特性を明らかにする事は困難である。すなわち、目視観測で波浪階級が等しいと考えられた場合の2~3回の実験結果から、船体運動は、2~3回共に周期は等しいが振幅値は特有の相対針路で大きく異なった。たとえば、横揺れは斜め向い波状態、縦揺れは向い波状態で相違がみられた。上下動は、周期および振幅共にほぼ等しく差は少なかった。これらの事から実船用波浪計測装置は、海洋波中の船の運動特性を明らかにするために不可欠である。

3) 1網の曳網時間は約3時間である。この1網の曳網中海況変化が目視であるが認められなかった場合の曳網開始初期、中期および曳網終了直前の3回の運動を比較した。その結果は、各運動共差はほとんど認められなかった。したがって、漁具のワープ張力が船体運動に影響を与えている事は報告され明らかであるが魚の入網効果によるワープ張力の変化程度では船体運動の変化はないと考えられる。

曳網中と航走中との運動を比較した場合、斜め追い波状態では、横揺れと上下動は曳網中の方が大きく、縦揺れはわずかながら航走中の方が大きかった。

4) 以西底曳網漁船の乗心地度を乗組員の各寝台で計測された上下動加速度を指標として比較した。上下動加速度が最も小さく、したがって乗心地度が良好であったのは船橋の漁撈長の寝台であった。次いで通信長および船長の寝台であった。一般乗組員の寝台間では明らかな優劣はつけ難いが、船首に近い程、すなわち、上下動における重心の位置から遠い程悪い傾向が認められた。

5) 海洋波中の船体運動を商用漁船による実船試験の方法により定量的に予測するため、実船用船体装着型の波高計測装置を考案した。

舷側における相対波高をまず測定し、得られた出会

いの相対波高から、これに含まれている船体運動成分を除き出会う波高を得る方式である。船体運動の要素中上下動は加速度で得られているため、これを変位に変換する2回積分法が最も困難で苦労した。2回積分法にはアナログ演算法を用いその積分器を製作した。積分回路の振幅利得特性は $0.03Hz$ 以上の周波数範囲で $\pm 0.5dB$ 以内の誤差であり、位相誤差は同周波数範囲で $-15$ 度以内である。

この積分器に能動ハイパスフィルターを附加し、相対波高測定から出会う波高算出までの総合精度についても検討した。その結果、誤差は加速度の2回積分回路の精度如何であるが、以西底曳網漁船の上下動の主要周波数範囲で利得誤差10%以内、位相誤差 $-10$ 度以内であった。実船試験用出会う波高計としては実用的観点から有効であり、満足出来る精度であると考えられる。

6) 考案された波高計測装置による東海・黄海の波浪計測データから統計的解析により同海域の波浪特性が明らかになった。また東海・黄海漁場の数値波スペクトルモデルが推定された。

東海・黄海の波スペクトルは有義波高と平均波周期から次の様に推定される。

$$S(\omega) = 0.07 H_s^2 \cdot \omega_1^{-1} (\omega/\omega_1)^{-5} \exp[-0.57(\omega/\omega_1)^4]$$

ここで $H_s$ が有義波高であり、 $\omega_1$ が平均波周期である。また東海・黄海の波周期は有義波高が約2m以上については $\{T = 3.29\sqrt{H_s}\}$ により推定出来る。したがって有義波高がなんらかの方法により分かれば波スペクトルは計算で予測が可能となった。

#### (2) 以西底曳網漁船による実船実験

1) 曳網中における漁船の船体運動および東海・黄海の波高の極大値はレイリー分布関数に従って分布していた。また漁船の出港から入港までの一航海にわたる長期実験の結果、船の運動および波高の極大値の平均平方値はワイブル分布関数に従って分布していた。従って極大値の長期および短期分布が求められたことから、東海・黄海の波高および船体運動の各大きさとその出現確率あるいは異常値は、レイリー分布とワイブル分布の同時分布を計算することにより求められる。すなわち、

$$P(x_0) = \int_0^\infty \frac{m}{\alpha} (a-\gamma)^{m-1} \cdot \exp\left[-\left\{\frac{(a-\gamma)^m}{\alpha} + \frac{x_0^2}{\alpha^2}\right\}\right] da$$

上式を数値積分し、波高および船体運動の極大値の長

期間における出現回数の期待値が求められた。例えば100年間に1回より小さい出現確率の極値は、横揺れでは片舷50度、縦揺れでは25度、上下動では16m、舷側の水面変動(相対波高)では6.8mおよび東海・黄海の波高は15mと推定された。

2) 波高と船体運動との有義値の相関関係が分り、一次回帰式が導かれた。したがってこれらの結果を用いると、曳網中における漁船の運動の極大値の数値予測が可能である。すなわち、曳網中の船体運動の大きさは有義波高から相対針路別に推定する事ができる。

3) 海洋波に対する漁船の運動の相対針路別特性がスペクトル解析により、また周波数応答関数がクロススペクトル解析によって推定された。したがって、漁船の運動スペクトルは船の運動と波浪との関係によって計算することができる。すなわち、漁場における海洋波のスペクトルが推定されれば漁船の運動スペクトルが求められる。

横揺れ運動周期は、波浪との相対針路および出会う波周期に関係なくほぼ船の横揺れ固有周期に等しかった。波浪を入力とした曳網中の漁船の横揺れ応答の線形性は向い波では悪いが他の針路では良好である。

横揺れの振幅利得(deg/m)は相対針路により異なり、最も高いのは斜め追い波および追い波で次いで横波であった。スペクトルの平均周期における振幅利得の平均値は前項2)の回帰式の回帰係数とほぼ一致した。したがって応答の平均値は定量的に予測が可能となった。また横揺れ応答の波浪に対する位相特性は、前方および横からの波浪に対しては遅れ、後方からの波浪に対してはわずかに進む傾向が認められた。

4) 縦揺れの応答周期は波浪との出会う周期に全ての相対針路でよく一致していた。したがってその周期におけるコヒーレンシも高く線形性が良好である事が認められた。また縦揺れ運動スペクトルには横揺れ周期が現われ、特に顕著な針路は斜め向い波の場合である。縦揺れの振幅利得の絶対値は小さく、特に横波では平均1.7(deg/m)であり有意性は無視される程度である。振幅利得の最も大きい針路は平均4.2(deg/m)の追い波、次いで2.9(deg/m)の向い波であった。またスペクトルの平均周期における振幅利得の平均値は、横揺れの場合と同様回帰係数と一致していた。縦揺れ応答の位相特性については、スペクトルの卓越周期帯域では位相差は少なくわずかに進む傾向が認められた。

5) 上下動応答と舷側の水面変動(相対波高)の振幅利得は周波数軸上で反比例の関係にある。すなわち、

周期4～5秒を境にして長周期域では上下動の応答が高く、相対波高は低い。他方短周期域では逆に上下動の応答が低く相対波高が高い、上下動の応答の周期は出会い波周期に全ての相対針路で一致し、応答の位相差もなく、振幅利得は長周期域で0.8～1.0(m/m)と高くほとんど波高に等しく追従して上下動している。

曳網中の以西底曳網漁船に対して上下動運動を生じさせる波浪は、有義波高が1m以上で、周期が4～5秒以上であった。

6) 相対波高の振幅利得値より、相対波高が乾舷より大となり、甲板上に海水打込みが生じる波高を定量的に推定した。すなわち、最も生じやすい針路は追い波でその波高は約1.8m(海況4)以上である。最も生じ難い針路は向い波で、波高は約2.6m(海況5)以上である。相対波高の位相特性は横波、斜め追い波および追い波で30～40度の進み特性であった。したがってこの結果は、ある大波高の一つの波に対する船体運動を考えた場合、海水打込み現象は横揺れ応答より先に発生する事を意味する。よって追い波状態で多発している転覆事故の誘因となっている事が十分考えられる。

7) 縦揺れおよび上下動について、実験値とストリップ法による理論値を比較した。

縦揺れについては、向い波および斜め向い波で理論値の方が実験値よりかなり大きかった。しかし周期軸における振幅利得特性は両針路とも一致傾向を有しよく似ていた。横波状態では応答特性は低く、線形性も悪いため一致は特に悪かった。斜め追い波および追い波では振幅利得はほぼ等しかった。しかし理論値では実験値より若干短周期で応答している。

上下動については、すべての相対針路において振幅利得特性はよく似ていた。したがって海上における船の運動系では線形性を満足していると推定された。ただし横波状態を除き他の針路では理論値の方が実験値より小さく、特に短周期域でその差が顕著であった。

実験値と理論値の差については漁具の力学的影響が最も大きいと考えられる。

8) 漁船の運航操船者としては漁場において、現場の海況から操業中の船体運動を定量的に予測する事が望まれる。すなわち、定量的予測により、安全性の確認あるいは荒天での操業遂行の可否決定が科学性を伴って可能となる。そこで実船試験により得られた多量のデータから運動スペクトルを推定する実験式を導いた。その結果、漁船の運動の数値スペクトルモデルが得られた。

実験式は船体運動の極値の有義値( $H_s$ )とその平均

周期( $T_1=2\pi/\omega_1$ )の二つのパラメータにより決定され、横揺れ、縦揺れおよび上下動について次の通りである。

横揺れ： $S(\omega)/(H_s^2/\omega_1)$

$$=0.083 \cdot \exp\{-21.3(\omega/\omega_1-0.98)^2\}$$

縦揺れ： $S(\omega)/(H_s^2/\omega_1)$

$$=0.063 \cdot \exp\{-11.8(\omega/\omega_1-0.98)^2\}$$

上下動： $S(\omega)/(H_s^2/\omega_1)$

$$=0.065 \cdot \exp\{-11.7(\omega/\omega_1-0.98)^2\}$$

パラメータ  $H_s$  は目測平均波高より各運動とも相対針路別に前項2)の帰帰式から求められる。また、 $\omega_1$  は縦揺れおよび上下動については波との出会い周期から横揺れについては船の固有周期から推定できる。この結果は操船時のみならず漁船の設計段階においても有用であると考えられる。

### (3) 漁船の耐航性に関する今後の問題点

1) 漁船の耐航性に関する研究は一般大型船についての模型実験、実船実験および理論研究など多いのに比べて少ない。また漁船に対するストリップ理論の有用性についての研究も定着しつつある。本論文においては以西底曳網漁船の曳網中の耐航性に関して、多くの計測データから統計的解析あるいは海洋波を入力とし船体運動を出力とする線形応答解析を行い、漁船の運動の実態について種々明らかに出来たと考えている。特に波浪計測装置の考察、その結果、海洋波中の船体運動の数値予測および東海・黄海の波スペクトルの予測が可能となった。しかし今後はさらに多くの他種漁船についての実船実験が必要である。

2) 漁船の最大の目的は漁撈である。その観点から主として曳網中の耐航性について実船試験を行ってきたが、漁船としての機能も含めた耐航性、すなわち、漁具との関係とりわけワープ張力の船体運動への影響などについて積極的に検討し、またストリップ法による理論値との差についても定量的にまた運動論的に検討し明らかにする必要がある。

この問題については今後さらに研究し検討したいと考えている。

3) 船体運動の根源は波浪であるから精度の高い波浪情報が必要である。実船実験用波浪計としては現在適当なよいものがない。そこで船体装着式の出会い波高計測装置を試作したが、漁船の操業の安全のためにも波高計を用いる事は非常に有用である。今後さらに商用漁船用として精度の向上または新しい波高計の開発が望まれる。

## 謝 辞

本研究に当たり、当初より懇切な指導を頂いた北海道大学水産学部川島利兵衛教授に厚く御礼を申し上げる。なお本研究中工学的領域については北大水産学部石田正己教授の校閲を、また物理学的領域については北大水産学部佐藤修教授の校閲をいただいた。併せて深謝する。

また、多大のデータ処理と解析に際し、北大水産学部電子計算機室利用に便宜を与えられ御指導を賜った川島利兵衛教授、天下井清教官および九州大学中央計数施設利用については同大学農学部野村男次教授、さらに船体運動の縦揺れと上下動の理論計算を心よく御引受けいただいた水産庁海洋漁業部漁船研究室山越康行氏に対し深謝の意を表す。

また実船実験に際し種々御援助御協力を賜った大洋漁業長崎支社橋本芳房氏、花城勝也氏、第26東海丸の漁撈長故小松末吉氏および第27東海丸松屋寿恵生船長ほか乗組員各位に深く感謝する。

なお、北海道大学水産学部における実験では漁船運用学講座の稲葉恭人助教授および松島寛治技官の御助力を賜った。併せて謝意を表す。

## 文 献

- (1) 土屋孟(1967). 以西底曳網漁船の転覆事故防止対策について. 漁船研技報, 47, 1-13.
- (2) 土屋孟(1956). 漁船の復原性能についての一考察(その1). 中型漁船について. 漁船研技報, 9, 1-62.
- (3) 金山美彦(1961). トリムの影響を考慮した場合の横復原艇の大きさの変化について. 漁船研技報, 15, 1-24.
- (4) 有路実(1968). 福島県原釜地区15トン型小型板曳漁船「第5幸丸」の海上実験及び現状報告(船体の部). 漁船研技報, 49, 1-23.
- (5) Paulling, J. R.(1960). Transverse stability of tuna clippers. *Fishing boats of the world, Vol. 2, edited by Jon-Olof Traung, Published by Fishing News Limited, London, England*, 489-495.
- (6) Paulling, J. R. (1961). The transverse stability of a ship in a longitudinal seaway. *J. Ship research*, 5 (1), 37-49.
- (7) Nadeinski, V. P. and Jens, J. E. L. (1968). The stability of fishing vessels. *Quart Trans. Roy. Inst. Naval Architect*, 110 (1), 1-27.
- (8) Hormann, H. (1970). Stabilität kleiner fisheriefahrzeuge. *Schiffund Hafen*, 22 (5), 467-468.
- (9) 土屋孟(1971). 漁船の復原性能の理論的解析法について. 漁船研技報, 57, 1-29.
- (10) 川島利兵衛(1964). 海洋波中の漁船の横揺れ応答函数の統計的推定について. 日本航海学会誌, 31, 99-106.
- (11) Kawashima, R. (1964). On the response function for the rolling motion of a fishing boat on ocean waves. *Ann. Inst. State. Math. Supple.* III, 33-40.
- (12) Kawashima, R. (1963). On the measurement of ocean waves. A telemetering system for the measurement of ocean waves by means of the use of a bomboo stick wave pole. *Bul. Fac. Fish. Hokkaido Uni.*, 14 (1), 7-21.
- (13) 川島利兵衛(1966). 海岸附近の波高及び波向の遠隔測定装置について. 沿岸海洋研究ノート, 5 (1), 1-9.
- (14) 天下井清(1971). 船体運動と漁具との力学的関係について(I). トロール船における船体動揺とワーブ張力の統計的特性. 北大水産彙報, 22(1), 67-72.
- (15) 天下井清(1972). 船体運動と漁具との力学的関係について(II). トロール船における船体動揺とワーブ張力の応答特性および最大値の予測. 北大水産彙報, 23(2), 102-126.
- (16) 川島利兵衛・天下井清(1976). 多変量ARモデルによる船体運動と漁具との関係について. 日本航海学会論文集, 54, 93-98.
- (17) Vermeer, Jr. H. (1975). Note on the safety of beam trawlers. *Inst. Shipbuilding Progress*, 254, 331-339.
- (18) 高橋生・川島利兵衛(1974). 漁船の耐航について-IV. 96トン型鋼製鮭鱒流網漁船の縦方向運動の応答関数について. 日本航海学会論文集, 51, 119-124.
- (19) 山越康行・有路実・鈴木四郎(1975). 漁船の波浪中の耐航性について(第一報). 漁船の規則波中船体縦運動解析におけるストリップ法の有効性について. 漁船研技報, 63, 1-46.
- (20) 川島利兵衛・天下井清・稲葉恭人・松島寛治・高橋生(1974). 漁船の耐航性について-II. 耐航性の実験システムについて. 北大水産彙報, 25(2), 138-146.

- (21) 川島利兵衛・天下井清・稲葉恭人・松島寛治・高橋生・土屋孟・山越康行(1974). 漁船の転覆機構に関する実験的研究-I. 31屯型木製底曳網漁船における転覆現象の観察. 北大水産彙報, 25(2), 128-137.
- (22) 山越康行(1974). 波浪中船体運動に関する湖水面における模型試験について. 漁船, 193, 47-53.
- (23) 菅四郎(1957). 日聖丸実験報告. 造船協会論文集, 92.
- (24) 第63研究部会(1968). 船舶の耐航性に関する実船試験. 日本造船研究協会報告, 65, 1-110.
- (25) Bledsoe, M. D., Bussemaker, O. and Cummins, W. E. (1960). Seakeeping trials on three dutch destroyers. *Trans. SNAME.*, 68, 39-137.
- (26) 浅野誠一・西牧興・黒井昌明・高木又男・竹沢誠二・井上武彦・中村一郎・清水喜和(1975). 1000m<sup>3</sup> LNG実験船による波浪中航走実験(第一報). 波浪に関する計測と解析. 日本造船学会論文集, 138, 222-232.
- (27) 第125研究部会(1972). 超高速コンテナ船の耐航性に関する研究. 日本造船研究協会報告研究資料, 157, 59-147.
- (28) Longuet-Higgins, M. S. (1952). On the statistical distribution of the heights of sea waves. *J. Marine Research*, 11, 245-266.
- (29) Tucker, M. J. (1956). A shipborn wave recorder. *Trans. INA.*, 98.
- (30) Denis, M. St. and Pierson, W. J. (1953). On the motions of ships in confused sea. *Trans. SNAME.*, 61, 280-357.
- (31) 山内保文(1956). 船の動揺の時系列論的解析について. 造船協会論文集, 99, 47-64.
- (32) 山内保文(1961). 船の波浪中動揺応答の解析法について(その1). 造船協会論文集, 109, 169-183.
- (33) Blackman, R. B. and Tukey, J. W. (1958). The measurement of power spectra from the point of view of communications engineering. *Dover pub. Inc.*, New York.
- (34) 榎木義一・砂原善文(1967). 統計学的手法による自動制御理論. オーム社, 東京.
- (35) Papoulis, A. (1970). Probability random variables and stochastic processes. (工学のための応用確率論). (邦訳). 基礎編, 確率過程編, 東海大学出版会, 東京.
- (36) Bendat, J. S. and Piersol, A. J. (1968). Measurement and analysis of random data. *John Wiley and sons. Inc.*, New York.
- (37) 藤井光昭(1974). 時系列解析. コロナ社, 東京.
- (38) Price, W. G. and Bishop, R. E. D. (1974). Probabilistic theory of ship dynamics. *John Wiley and Sons. Inc.*, New York.
- (39) 磯部孝編(1968). 相関関数およびスペクトル. 東京大学出版会, 東京.
- (40) 赤池弘次・中川東一郎(1974). ダイナミックシステムの統計的解析と制御. サイエンス社, 東京.
- (41) 西ノ首英之(1972). 実船試験による小型漁船の耐航性について(予報). 実習船“鶴水”の海洋波中の動揺特性. 本誌, 33, 85-92.
- (42) 川島利兵衛・天下井清・増田紀義(1968). 漁船の耐航性について(その1). 波浪中の船体運動の立体表示. 北大水産彙報, 18(4), 345-356.
- (43) 山内保文(1969). 耐航性に関するシンポジウムテキスト. 日本造船学会, 53-97.
- (44) Jasper, N. H. (1956). Statistical distribution patterns of ocean waves and of wave-induced ship stress and motions, with engineering applications. *Trans. SNAME.*, 64, 375-417.
- (45) 福田淳一(1969). 耐航性に関するシンポジウムテキスト. 日本造船学会, 99-119.
- (46) 西ノ首英之(1973). 実船試験による小型漁船の耐航性について-I. 以西底曳網漁船の動揺特性. 本誌, 35, 91-102.
- (47) 西ノ首英之・川島利兵衛(1975). 実船試験による漁船の耐航性について-II. 出会い波高計測の一手法. 本誌, 40, 39-47.
- (48) Russell, T. L. (1961). A step-type recording wave gage. *Ocean wave spectra*, 251-257.
- (49) 益田善雄(1968). 波高計について. 日本造船学会誌, 470, 359-365.
- (50) 山内保文(1969). レーダー波高計. 船舶研講, 13.
- (51) 第132研究部会(1972). 実船搭載用波高計に関する研究. 日本造船研究協会報告, 研究資料, 164, 1-42.
- (52) 吉田裕・岡山和生(1974). 地震加速度記録の積分における濾波計算のアルゴリズム. 土木学会論文集, 221, 25-38.
- (53) Suzuki, K. and Sato, H. (1970). On a method to obtain displacement wave form from the record of earthquake acceleration. *J. Inst. Indust. Scie.*, 22(1), 60-63.
- (54) 演算増巾器ハンドブック. 134-197. エレクトロ

- ニクスダイジェスト, 東京.
- (55) Huelsman, L. P.(1966). Handbook of operational amplifier active RC networks. *Burr-Brown Research Corporation, Arizona.*
- (56) Graeme, J. G.(1973). Signal conditioners. *Applications of operational amplifiers*, 102-108. *McGraw-Hill Book Co., New York.*
- (57) 岡村勉夫(1974).  $\bar{O}P$  アンプ回路の設計. CQ 出版社, 東京.
- (58) 平沢隆(1975). 低ドリフトオペアンプとその使い方. 電子科学, 25(1), 35-41. 産報, 東京.
- (59) 日本海難防止協会(1976). 航行船舶の航走波が小型船舶に及ぼす影響の研究. 海難防止の調査研究事業報告書.
- (60) Hogben, N. and Lumb, F.(1967). Ocean wave statistics. *Her Majesty's Stationary Office*, 144-147.
- (61) Pierson, W. J. and Moskowitz, L.(1964). A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodskii. *J. Geophys. Res.*, 69(24), 5181-5190.
- (62) 加藤弘(1951). 船の横揺れ周期の近似計算について. 造船協会論文集, 89, 59-64.
- (63) 渡辺恵弘・井上正祐(1957). 船の横揺抵抗所謂 N の計算方法について. 西部造船会会報, 14, 39-48.
- (64) 渡辺恵弘・井上正祐・村橋達也(1964). N 係数計算法の肥大船への修正. 西部造船会会報, 27, 69-81.
- (65) 元良誠三(1967). 船体運動力学. 共立出版, 東京.
- (66) 西ノ首英之・川島利兵衛(1976). 実船試験による漁船の耐航性について-III. 船体運動振幅極値の統計的特性. 日本航海学会論文集, 55, 1-6.
- (67) Takekuma, K. and Takahashi, T.(1972). On the evaluation of sea spectra based on the measured ship motions. *Trans. West-Japan Soc. of Nav. Arch.*, 45, 51-57.
- (68) Ochi, M. K.(1964). Extreme behavior of a ship in rough seas slamming and shipping of green water. *Trans. SNAME.*, 72, 143-202.
- (69) 福田淳一(1968). 波浪中の船のDeck wetnessに関する長期予測. 日本造船学会論文集, 124, 141-158.
- (70) 福田淳一・秦一郎(1969). 北太平洋及び北大西洋における Deck wetness に関する長期予測. 西部造船会会報, 39, 139-154.
- (71) 篠田仁吉(1961). 船舶の横揺れの長期における統計分布. 造船協会論文集, 110, 233-240.
- (72) Gumbel, E. J.(1963). Statistics of extremes. (極値統計学). (邦訳). 広川書店, 東京.
- (73) 真壁肇(1974). ワイブル確率紙の使い方. 日本規格協会, 東京.
- (74) 竹沢誠二・福田豊(1958). 波浪中船体運動の極値長期分布について. 日本造船学会論文集, 143, 170-178.
- (75) 西ノ首英之・川島利兵衛(1976). 実船試験による漁船の耐航性について-IV. Roll. および Pitch. の周波数応答特性. 日本航海学会論文集, 56, 77-89.
- (76) 西ノ首英之・川島利兵衛(1976). 実船試験による漁船の耐航性について-V. Heave. および相対波高の周波数応答特性. 日本航海学会論文集, 56, 91-100.
- (77) 高橋生・川島利兵衛(1977). 漁船の船型・状態に関する船体運動学的考察-I. 96トン型鋼製鮭鱒流網漁船の縦方向運動の場合. 日本航海学会論文集, 58, 61-83.
- (78) 小川陽弘・野中晃二・森政彦・猿田俊彦(1974). 外洋フェリーの運動性能に関する研究(第一報). 斜波中模型実験及び理論計算. 船舶技術研究所報告, 11(6), 343-361.
- (79) 西ノ首英之・川島利兵衛(1977). 実船試験による漁船の耐航性について-VI. 船体運動スペクトルの予測. 日本航海学会論文集, 57, 101-105.