



Title	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プ張力の応答特性および最大値の予測
Author(s)	天下井, 清; Amagai, Kiyoshi
Citation	北海道大學水産學部研究彙報, 23(2), 102-126
Issue Date	1972-08
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/23474">https://hdl.handle.net/2115/23474</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	23(2)_P102-126.pdf



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プ張力の応答特性および最大値の予測

天下井 清\*\*

Study on the Dynamical Response between a Ship's Motions and Fishing Gear (II)

On the response characteristic between a ship's motions and the warp tension and the prediction of the extreme value of the warp tension in trawl fishing

Kiyoshi AMAGAI\*\*

Abstract

In this paper, the author describes a study of the mechanism of the trawl fishing gear system which was reported in the former paper. The experiments were performed on the stern trawler and the ship's motion and warp tension were measured and recorded simultaneously in several sea conditions during the last 4 years. From these data, the response characteristic between the ship's motions and the warp tension were obtained by the method of the statistical analysis of a random process. Also, the statistical properties of the motion and warp tension were shown for the sea condition and each angle between the ship's heading and the wave direction.

From the results of these analyses, the relation of the motions and warp tension were discussed.

It is determined that the heaving motion of the ship appears again in the variation of the warp tension. The influence of the warp tension to the ship's motions was discussed, too.

Further it will be shown that the probability distributions of the ship's motions and the warp tension in trawl fishing approximates the single parameter "Rayleigh" type for a given state of the sea.

Finally, the extreme values of ship's motions and warp tension will be examined to evaluate the feasibility of the prediction of such extreme values.

緒 言

漁船が一般船舶と区別されて論じられなければならない点は、大規模な漁具を用いて操業することによって生じる操業中の運動についてであろう。不規則に変動する諸要素について、現象の複雑性を克服し、種々の自然環境における漁船の状態を統計的解析により簡明にとらえるため、4年にわたっ

\* 1971年10月、1972年4月日本水産学会大会で一部発表

\*\* 北海道大学水産学部漁船運用学講座

(Laboratory of Fishing Boat Seamanship, Faculty of Fisheries, Hokkaido University)

## 天下井：船体運動と漁具との力学的関係 (II)

て北海道大学練習船おしよ丸 (1180 ton) におけるトロール操業中の船体動揺とワープ張力とを同時に連続記録してきた。この資料に基づき前報<sup>1)</sup>でトロール操業中の船体動揺によって生じるワープ張力の不規則な時間的変動量の確率分布は正規分布であり、ワープ張力と船体動揺の間には相互関係が存在し、ワープ張力の変動に直接影響をおよぼしている運動は Heaving であることをコログラムおよびパワースペクトラムを計算することによって明らかにしたが、本報告では実験的に求めた動揺を入力とし張力を出力とする船と漁具との応答系の中のワープの張力系における応答特性を求め、ワープにかかる張力の変動の主因が Heaving によるものであることを確認し、この張力系のメカニズムを考察した。さらにワープ張力の振幅の極値の分布パターンを検し、ワープ張力の最大値の予測を行なった。

本論に先だち、終始御指導を賜った北海道大学水産学部川島利兵衛教授に深く感謝する。種々の計算処理は北海道大学大型計算機センター利用によった。

### 資料および解析方法

#### 資 料

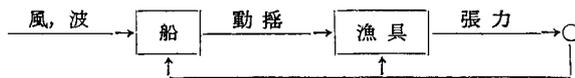
解析に供した資料は種々の海況と諸条件下においてスターン型トロール練習船おしよ丸のトロール操業時、特に曳網中に 6 自由度船体動揺と左舷および右舷側ワープ張力を磁気テープに同時に連続測定記録したもので、実験時の状態、実験海域、日時等は表 1 に示す通りである<sup>2)10)11)</sup>。また実験船おしよ丸の主要寸法は、 $L_{pp}=60.00$  m,  $B=11.00$  m,  $D=5.40$  m,  $GT=1180.64$  ton であり、トロールウインチは最大トルク 524 kg-m, 回転数 81/min の油圧モーターが使用され左右主ドラムには直径 24 mm のワープがそれぞれ 1500 m 巻き込まれており、巻込荷重は 10 ton, 巻込速度は 40m/min である。

#### 供試トロール漁具

実験に使用されたオッターボードは図 1 に示すように、縦型で幅 1.4 m, 高さ 3.0 m, 空中重量 1.2 ton, 水中重量 0.89 ton である。トロール網は図 2 に示す通りである。

#### 応答特性の統計的性質

トロール漁業における曳網中の船体運動とそれによって漁具に生じる不規則運動、ここではワープにかかる張力についてであるが、両者の相互関係について著者は動揺を入力とし、張力を出力とするワープの張力系として解析することを提唱してきた。船体動揺を入力とする漁具系の応答としてのワープ張力を考えると次の関係が成り立つ。



この時、不規則に変動する風波およびそれによって起こされる船体運動、さらにワープ張力も定常不規則過程として取り扱いかい、またエルゴード的であると仮定する。海洋波を入力とする船体 6 自由度の動揺の応答をはじめ、船体の特定点の加速度、甲板上特定点の波面との距離、船体応力等船の応答は極端に大きくならない限り線型な近似が成り立つものとして取り扱かう。このような線型理論に基づく船体動揺応答理論は既に明らかにされている<sup>2)9)</sup>。同様な関係を漁具系に考える。この系における不規則な入力確率過程を  $x_i(t)$  で表わし、その中の線型な振動応答系の応答出力を  $y(t)$ 、 $x_i(t)$  の自己相関関数を  $R_{x_i x_i}(\tau)$ 、 $x_i(t)$  と  $y(t)$  との相互相関関数を  $R_{y x_i}(\tau)$  で表わす。入力としての 6 種の船体動揺と応答としてのワープ張力のそれぞれのクロススペクトラム  $S_{y x_i}(\omega)$   $i=1, 2, \dots, 6$

Table 1. *Experimental condition.*

Date	Ship's time of measurement	Wave scale	Wave direction	Speed of net towing	Depth of sea bottom (m)	Warp length (m)
43.4.7	17-40	4	5	3.5	50.5	130
4.8	07-00	3	5	3.5	54	230
4.10	16-00	3	2	3.0	123	410
4.11	11-00	6	5	3.0	124	370
44.4.10	17-00	2	3	3.8	70	220
"	18-00	"	4	"	"	"
4.11	15-30	"	3	3.9	80	240
"	17-00	"	"	4.0	78	"
"	18-00	1	"	"	"	"
4.12	07-00	0	"	3.9	104	320
"	08-00	1	4	3.8	"	"
"	09-45	"	"	3.0	100	320
45.4.20	14-00	3	3	3.5	117	360
"	15-50	"	"	"	"	"
"	16-50	"	2	"	108	350
"	18-30	"	3	"	"	"
4.21	17-20	1	1	4.4	50	160
4.22	12-04	3	"	3.6	44	"
"	14-40	2	"	3.4	"	180
"	15-55	3	"	"	"	"
"	18-00	"	2	3.9	52	200
4.23	10-05	4	5	4.0	60	240
"	13-25	4	1	3.9	66	260
"	14-15	5	2	"	"	"
"	15-20	"	"	"	"	"
"	16-50	"	5	3.8	"	"
45.7.19	10-15	0	"	3.5	190	600
"	10-50	"	"	"	"	"
"	16-10	1	3	"	250	650
"	16-55	"	4	"	"	"
7.20	13-05	3	4	2.9	250	700
"	16-05	"	"	3.2	240	650
"	17-00	3	"	"	"	"
"	17-40	"	"	"	"	"
7.23	11-00	1	2	3.7	169	550
"	11-40	"	1	3.6	"	"
"	16-00	"	"	3.5	78	240
7.24	12-45	3	5	3.3	246	700
"	13-25	"	"	"	"	"
"	13-35	"	"	"	"	"
"	15-00	"	1	3.7	240	700
"	16-05	"	"	"	"	"
7.25	07-15	4	1	3.5	237	700
"	09-34	3	2	"	244	"
"	12-40	4	1	"	238	"
46.4.10	08-00	3	5	3.6	"	"
4.11	10-30	2	3	3.7	"	"



と入力のスpektrum  $Sx_i x_i(\omega)$  および振幅特性はもとより位相の関係をも含んだ完全な周波数応答特性  $H_i(\omega)$  との関係は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} Syx_i(\omega) &= 1/2\pi \int_{-\infty}^{\infty} Ryx_i(\tau) \exp(-j\omega\tau) d\tau = 1/2\pi \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(u) Rx_i x_i(\tau-u) du \exp(-j\omega\tau) d\tau \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} h(u) \exp(-j\omega u) \left\{ 1/2\pi \int_{-\infty}^{\infty} Rx_i x_i(\tau-u) \exp(-j\omega(\tau-u)) d\tau \right\} \\ &= H_i(\omega) \cdot Sx_i x_i(\omega) \end{aligned}$$

したがって周波数応答特性  $H_i(\omega)$  は

$$H_i(\omega) = Syx_i(\omega) / Sx_i x_i(\omega) \text{ によって求められる。}$$

この手法の優れている点は位相の関係が保たれているだけでなく出力応答  $y(t)$  に何らかの理由で  $y(t)$  と  $x_i(t)$  とも相関のないノイズ  $n(t)$ , すなわち  $x_i(t)$  の  $H(\omega)$  による応答として説明できないもの全部が含まれ、 $y'(t) = y(t) + n(t)$  が測定されたとしても  $Sy'y'(\omega) = Syy(\omega) + Snn(\omega) = |H(\omega)|^2 \cdot Sx_i x_i(\omega) + Snn(\omega)$  となるが  $Sy'x_i(\omega) = Syx_i(\omega)$  となってクロスの場合にはその計算結果にノイズの影響が含まれなくなることである。また  $y(t)$  が  $x_i(t)$  という入力の  $H(\omega)$  という周波数応答特性をもつ線型な応答としてどの程度説明できているか、説明できていない部分  $Snn(\omega) / Sy'y'(\omega)$  がどの位含まれているかを示す一つの指標となる coherency 関数  $\gamma^2(\omega)$  は

$$\gamma^2(\omega) = |H(\omega)|^2 Sx_i x_i(\omega) / Sy'y'(\omega) = 1 - Snn(\omega) / Sy'y'(\omega)$$

で与えられる。周波数応答特性、位相特性、coherency 関数については文献<sup>4)</sup> に詳述されている。これらの計算プログラムは付録1に示した。パワースpektrumの平均化係数としては赤池<sup>5)</sup>によるspektrumウインドウ  $W_1$  を用いた。

### 不規則振動の分布

不規則に変動するものの確率分布の基本的な型には正規分布、対数正規分布およびレイレイ分布がある。Longuet-Higgins が波高の分布の解析にレイレイ分布を採用し、以後 Pierson, Neuman, James 等が大洋波の研究に、N. H. Jasper が波とそれによって引き起こされる Pitching, Rolling, Heaving, 船体応力について研究し、これら不規則に変動する極大値あるいは極小値の確率分布がレイレイ分布で近似し得ることを明らかにしている<sup>6)</sup>。著者はワーブ張力の変動について時間間隔1秒で読み取ったデータ系列が正規分布することを明らかにしたが、本報告では曳網中のワーブ張力の振幅の極値(全振幅)の確率分布について

正規分布  $p(x) = 1/\sigma \sqrt{2\pi} \exp(-(x-u)^2/2\sigma^2)$ ,  $-\infty < x < \infty$  および

レイレイ分布  $p(x) = 2x/E \exp(-x^2/E)$ ,  $x \geq 0$ ,  $E = 1/N \sum_{i=1}^N x_i^2$  との検定を行なった。計算プログラムは付録2に示す通りである。

## 結果および考察

### 1. 船体動揺を入力とするワーブの張力応答特性

トロール操業中の船体動揺を入力としワーブ張力を出力とする船体運動に対する張力系を考え、入力である6つの船体動揺それぞれに対するワーブ張力との位相特性をも含んだ周波数応答特性を Head sea の場合について波浪階級別に解析するに当たって出力であるワーブ張力は左舷側張力を使用した。スタートロールにおける左右両舷のワーブにかかる張力の変動は前報においてコロログラムで示した通り同一の変動を示している。ちなみに左舷側のワーブ張力を入力とし右舷側のワーブ張力を出力

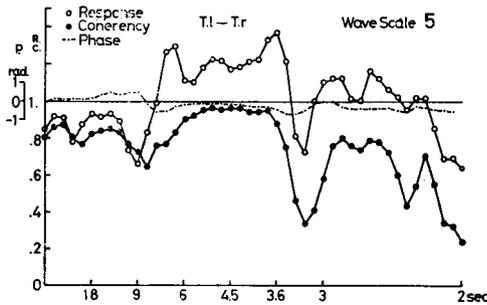


Fig. 3. The response characteristic and coherency between the left side warp tension and the right side warp tension in wave scale 5.

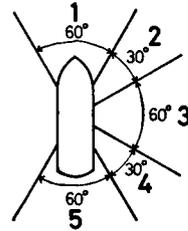


Fig. 4. Each angle between the ship's heading and the wave direction. 1; Head sea 2; Quarter head sea 3; Beam sea 4; Quarter following sea 5; Following sea.

と考へた時の周波数応答特性と coherency を求めたところ図3となった。これからも判断できるように両者の張力は漁具設置時の左右ワープの展開状態で張力の絶対値に大小はあつてもその変動現象そのものには著しい位相差のないことはもちろん、ほとんど一致していることを示している。したがつて応答解析に當つてはどちらか一方の張力変動を用いればよいと言へる。

### 1-1. 波浪階級別応答特性

波の主成分波の方向と船首方向との相対角を図4のように分類し、ここでは Head sea の場合について表2に示す波浪階級別に応答特性について述べる。

Table 2. Wave scale.

Wave scale		Wave height(m)	
0	Calm (grassy)	0	0
1	Calm (rippled)	0	0.1
2	Smooth	0.1	0.5
3	Slight	0.5	1.25
4	Moderate	1.25	2.5
5	Rough	2.5	4

### Heaving とワープ張力の応答

図5に示すように、calm の時は各周波数について卓越した応答は見られず、coherency も低い。このことからワープ張力の変動が Heaving のみに支配されるのではなく、他の動揺およびその他の影響を多分に受けていると解釈される。波浪階級が1, 2, 3となると張力変動のスペクトラムの主要な周波数帯が含まれる 9~3 sec の間で応答および coherency がともに高く、Heaving と張力の相互関係を証明している。階級 4, 5 についても同様で全般的にみると海況が荒れるにつれてワープ張力は Heaving の変動をそのまま再現していると言へる。また、ここで注目すべきことは、6~4.5 sec、階級5においてはさらに 3.6~3.4 sec において coherency が著しく低下していることである。周波数応答特性も同様に低い値を示している。この原因として考えられることはこの応答系において船体運動がワープ張力へ影響をおよぼしているばかりでなく、曳網中の船体運動に関して、ワープ張力の船体運動におよぼす影響が現われていて、それが無視できないものであることを意味しているものと思われる。おしよ丸は 1200 ton の船でありながら、その船級からいって商業船と比較して非常に小規

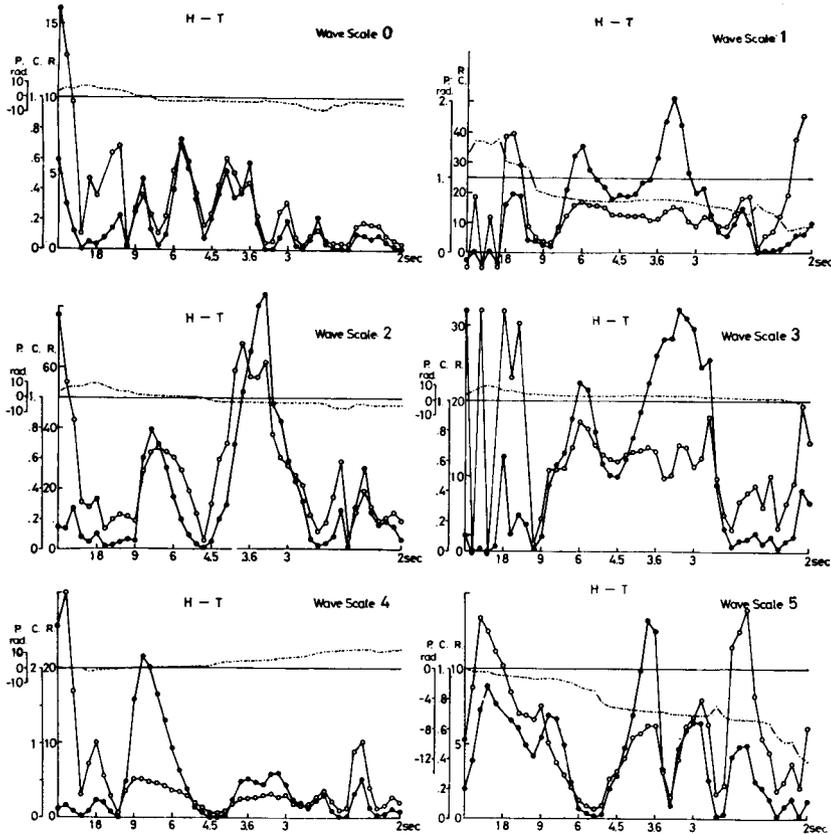


Fig. 5. The response characteristic and coherency between the heaving motion and the warp tension at head sea (wave scale 0~5).

模な漁具を用いていることに注意すれば、商業船においては船体動揺が一層大きな漁具による影響を受けていると思わねばならず、その意味で漁船操業中の船体運動は安全性の面で追求されなければならないであろう。このことについてはさらに検討するつもりである。

#### Pitching とワーブ張力の応答

図6に示すように、波浪階級が大きくなるにつれて応答および coherency は低い値を示している。したがって Pitching がワーブ張力におよぼす影響は小さいとみてよい。海況が静かな時は Pitching のパワースペクトラムの主要周波数が含まれる 9~6 sec の所で応答が比較的高いが一般に coherency が低いのは Heaving と同様ワーブ張力による Pitching への影響が大きい証拠と思われる。

#### Rolling とワーブ張力の応答

トロール操業中の Rolling は著しくその動揺振幅が減少させられるが、図7にみる Rolling とワーブ張力の周波数応答特性は波浪階級が大きくなるにつれて高くなっていることから判断される。つまりワーブ張力の影響を受けているのであるが coherency が低いことから Rolling はワーブ張力には影響をほとんどおよぼしていないことが分る。

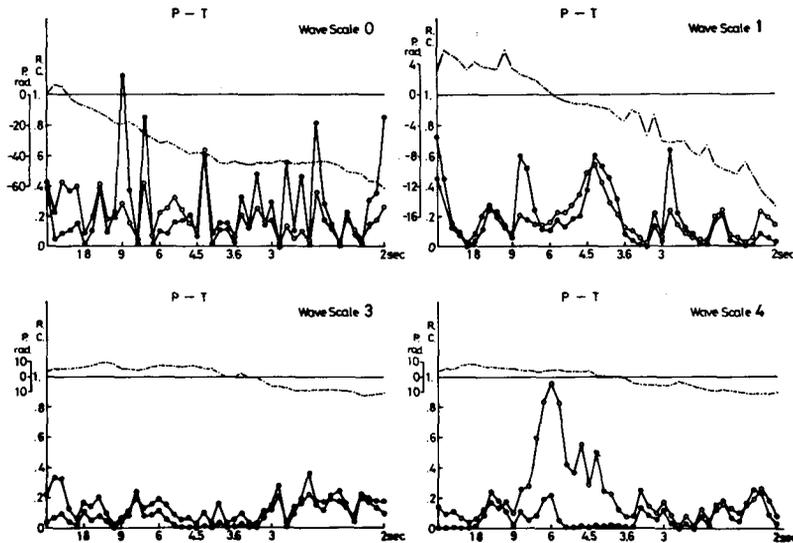


Fig. 6. The response characteristic and coherency between the pitching motion and the warp tension at head sea (wave scale 0, 1, 3, 4).

#### Yawing とワーブ張力の応答

図8にみるように、海況が静かな時には4.5~3.6secでcoherencyが高く応答も比較的高いが、海況が荒れるにしたがってcoherencyが低い値を示している。Yawingについてもワーブ張力の影響が現われているとみられるが他の動揺に対する影響に比べて相対的には小さい。

#### Swaying とワーブ張力の応答

図9に示すように、9~6secの周期帯でcoherencyも高く応答もある。しかしYawingと同様に海況が荒れるに従ってSwayingがワーブ張力におよぼす影響は小さい。

#### Surging とワーブ張力の応答

Surgingについて波浪階級別に論じるには資料不足ではあるが、図10に示すようにSurgingの主要周波数帯におけるcoherency、応答ともに比較的大きく、Heavingについてワーブ張力に影響をおよぼしているものと思われる。

### 1-2. 波方向別応答特性

次に波浪階級3のみについて図4の波の主成分波の方向と船首方向との相対角別にそれぞれにおける船体動揺とワーブ張力との応答特性、coherencyについてみればHeavingとワーブ張力については図11、Pitching, Rolling, Yawing, Swaying, Surgingそれぞれとワーブ張力については図12、図13、図14、図15、図16に示す通りである。

#### Heaving とワーブ張力の応答

波方向2,3の資料が不足しているが、いずれの場合も応答、coherencyともに高く、図17に示すようにHeavingの全方向のパワースペクトラから推して欠けた2,3の場合も含めて、ワーブ張力への影響が殊に強いことが分る。

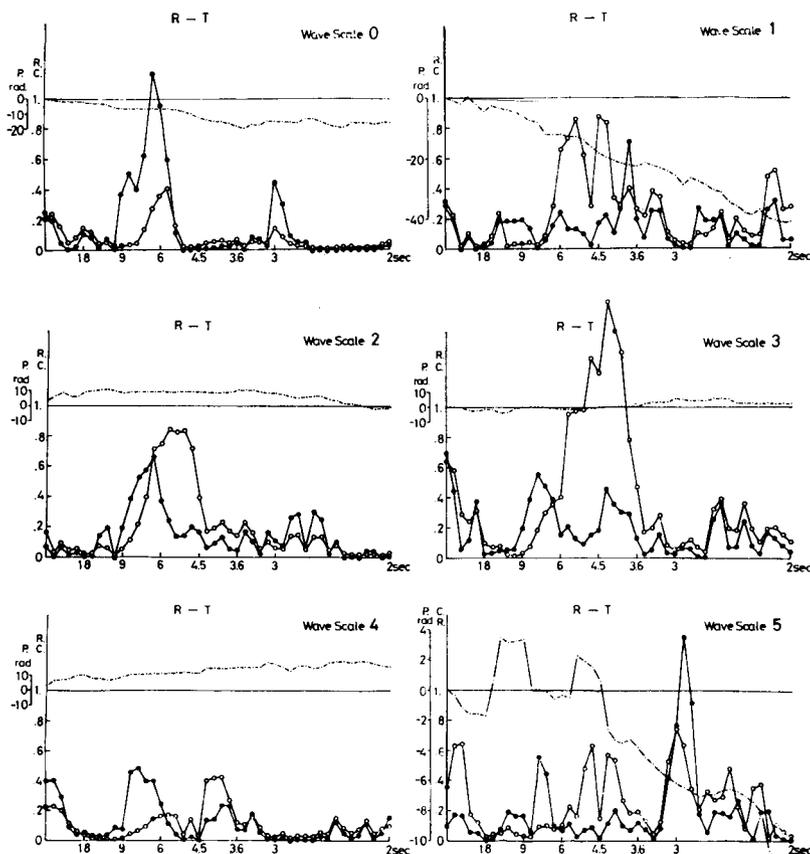


Fig. 7. The response characteristic and coherency between the rolling motion and the warp tension at head sea (wave scale 0~5).

**Pitching とワーブ張力の応答**

波方向 1~3 では応答および coherency は低い。4, 5 の時は 4.5 sec の周波数帯の付近で coherency の高い応答が見られる。このことはトロール曳網中の Pitching は Head sea の時に大きく、順次 Following sea になるにつれて小さくなっていることと考えあわせると、波浪階級別にみた結果と一致している。すなわち Heaving は船首方向に波を受ける時大きく、船尾より受ける時は反対に比較的小さいことから、船体動揺が余り顕著でない時には Pitching の張力に対する影響が現われ、動揺が大きくなる時には、その影響は Heaving のそれに比して小さいためである。

**Rolling とワーブ張力の応答**

Head sea の時は応答はあるが coherency が低い。曳網中の Rolling はその変動が非常に減じられるが波方向 2, 4 の時には比較的 coherency も高く応答もありワーブ張力への影響が認められるがその絶対値は小であり、全体としては問題にならない。

**Yawing とワーブ張力の応答**

Rolling と同様、その絶対値は小さいがどの方向の時にも、coherency, 応答ともに顕われ、ある程

天下井：船体運動と漁具との力学的関係 (II)

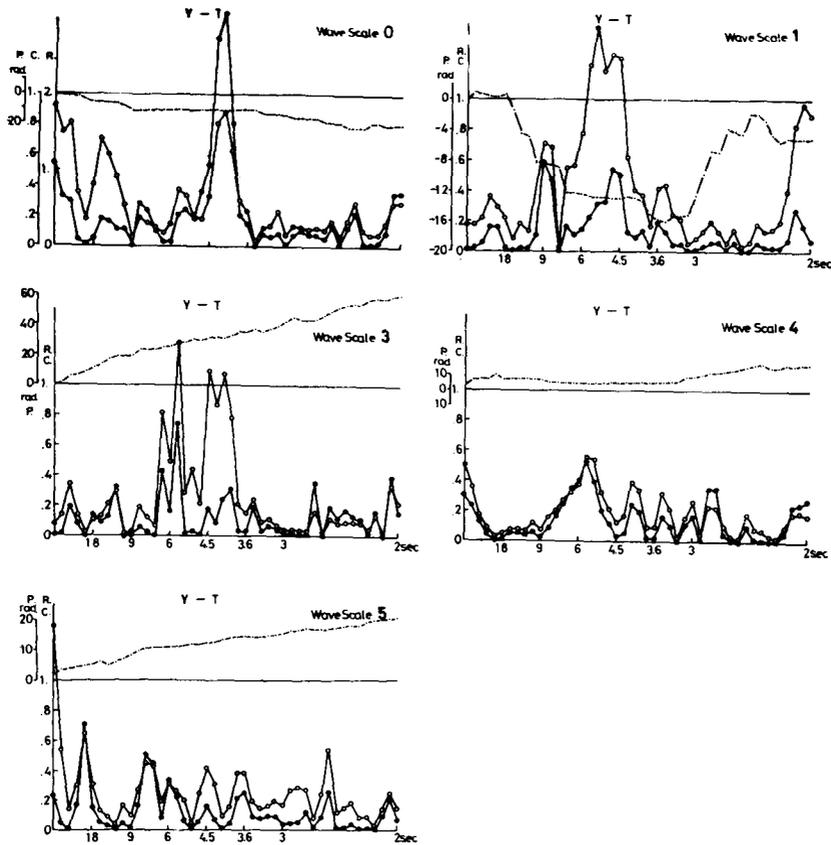


Fig. 8. The response characteristic and coherency between the yawing motion and the warp tension at head sea (wave scale 0, 1, 3, 4, 5).

度のワープ張力への影響が認められる。その中でも4の時に比較的大きい。

**Swaying とワープ張力の応答**

波方向2,3の資料が欠けているのははっきりしないが、4においては coherency も 応答も高い。したがって Swaying と張力の関係は Yawing と同様のことが言える。

**Surging とワープ張力の応答**

Head sea および Following sea の結果だけからは coherency, 応答ともに高くこの動揺の性質からいっても肯ける。

以上各動揺を入力としてワープ張力を出力とする応答系について 個別的ではあるが周波数応答特性, coherency からその応答関係を考察してきた。Rolling を除く各動揺ともそれぞれワープ張力に対して影響をおよぼしていることが認められたがパワースペクトラムにみられるように, Surging, Pitching, Yawing, Swaying のエネルギーは Heaving のそれと比較して非常に小さい点, さらに周波数応答特性にみると, Heaving がワープ張力の変動を支配していると断言してよい。また Heaving とワープ張力との間には遅れ系に似た応答関係が成り立っていると考えられる。

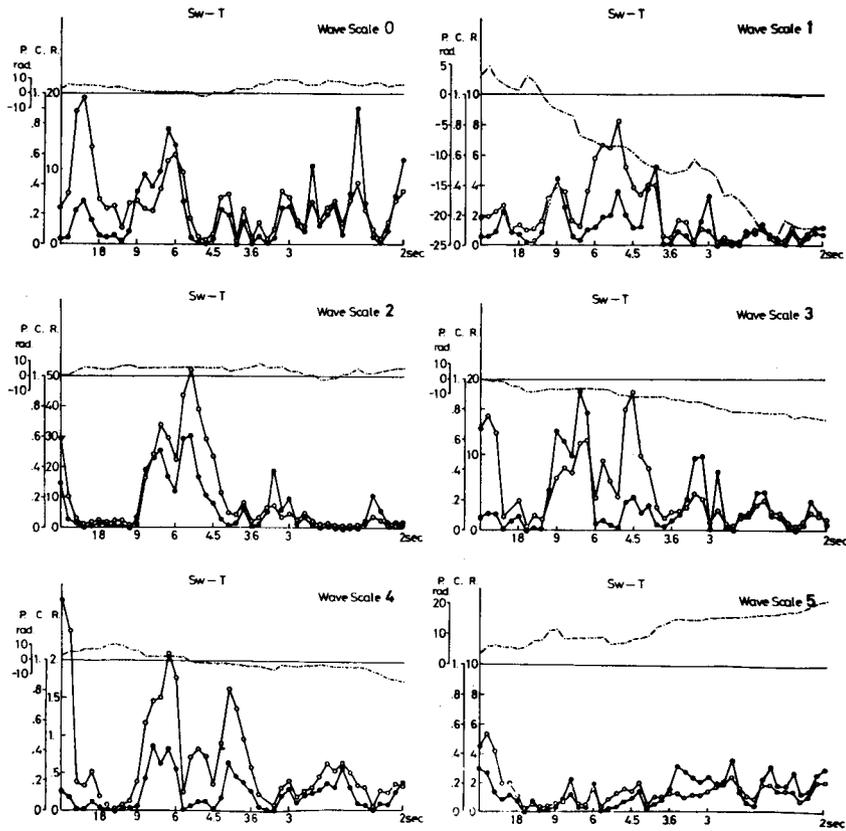


Fig. 9. The response characteristic and coherency between the swaying motion and the warp tension at head sea (wave scale 0~5).

一方、トロール曳網中の船体運動は漁具による影響を多分に受けたものであることは今迄の結果で明らかであるが、とくに Pitching, Yawing については自由浮体の運動にはみられないトップローラーを支点とする漁業の特殊性を如実に示す運動が惹起されている。ワープ張力による船体運動への影響が無視できない程大きいという点、今後船体運動と漁具との応答を考えるにあたって漁船の安全性を確保するためには、漁具系による操業中の船体応答特性を知り、操業中の漁具および船体運動の安全な制御を容易にする必要がある。

## 2. ワープ張力の極値の分布パターン

海面の波の隆起およびその海面における船体動揺の変動が正規分布で表わされることは既に多くの研究者によって明らかにされているが、さらに著者はワープ張力の変動も正規分布であることを報告したり。殊に漁船は種々の気象海象下における操業強行を余儀なくされたりまた操業中に気象海象が悪化した状態に遭遇するわけで、ここで問題にするトロール漁船においては、操業中ワープ張力によって少なからぬ船体動揺への影響を被っていることは既述の通りである。それ故様々な条件下での操業中のワープにかかる張力の極値の分布を知っておく必要がある。

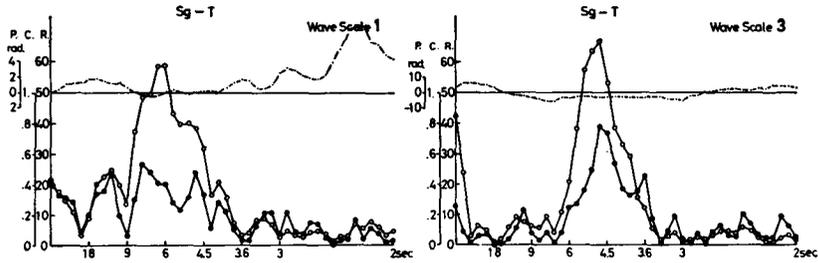


Fig. 10. The response characteristic and coherency between the surging motion and the warp tension at head sea (wave scale 1, 3).

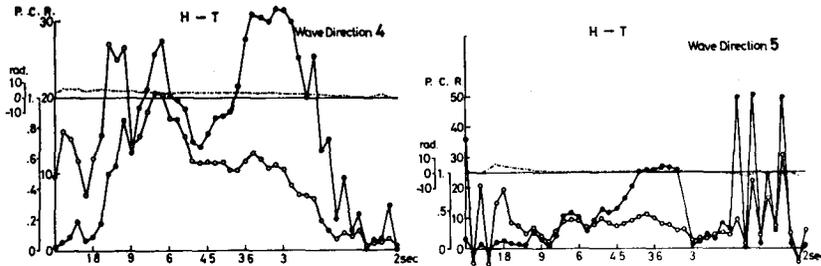


Fig. 11. The response characteristic and coherency between the heaving motion and the warp tension in wave scale 3 (wave direction 4, 5; See Fig. 5 for wave direction 1).

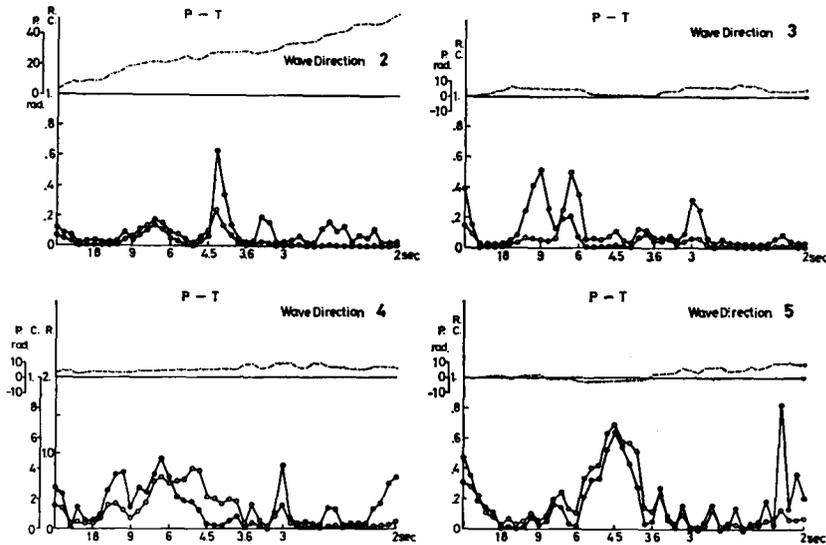


Fig. 12. The response characteristic and coherency between the pitching motion and the warp tension in wave scale 3 (wave direction 2~5; See Fig. 6 for wave direction 1).

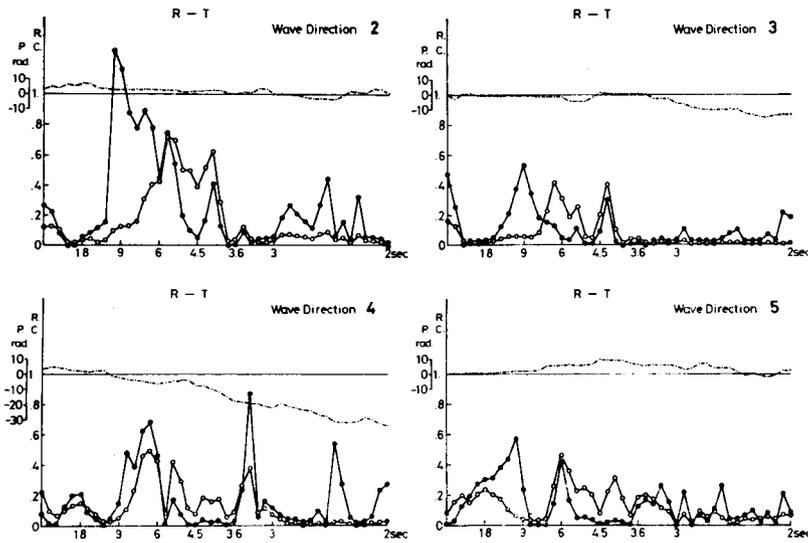


Fig. 13. The response characteristic and coherency between the rolling motion and the warp tension in wave scale 3 (wave direction 2~5; See Fig. 7 for wave direction 1).

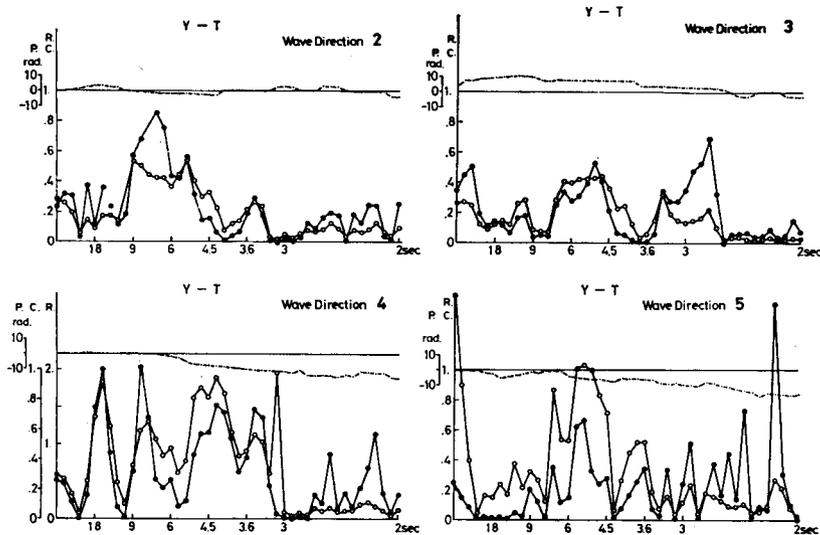


Fig. 14. The response characteristic and coherency between the yawing motion and the warp tension in wave scale 3 (wave direction 2~5; See Fig. 8 for wave direction 1).

分布型の検定

ワープ張力の平均値のまわりで変動する極値の分布は図18に示すように直線上にプロットされレイ分布であることが分る。ワープ張力の極値の分布を Head sea において波浪階級別に図19に、また階級3において波方向別に図20に示した。階級4はより小規模のエビ網を使用しているため張

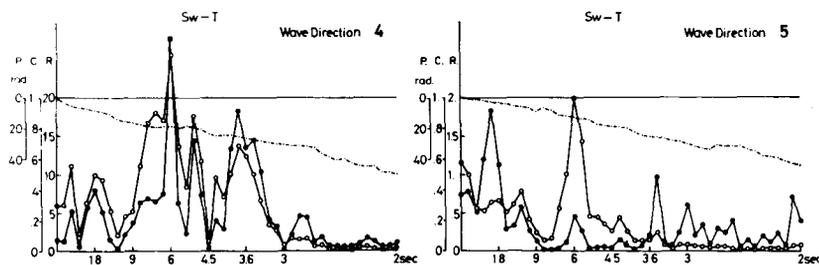


Fig. 15. The response characteristic and coherency between the swaying motion and the warp tension in wave scale 3 (wave direction 4, 5; See Fig. 9 for wave direction 1).

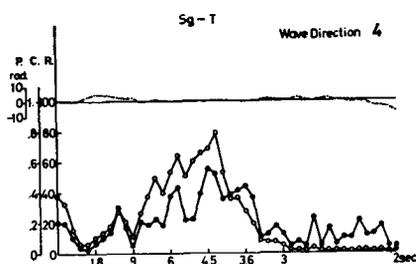


Fig. 16. The response characteristic and coherency between the surging motion and the warp tension in wave scale 3 (wave direction 4, See Fig. 10 for wave direction 1).

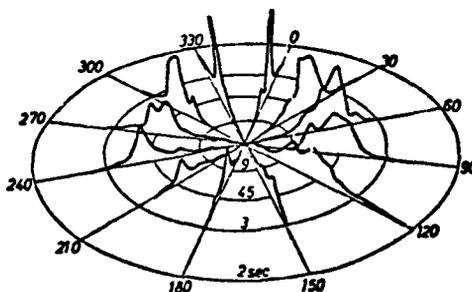


Fig. 17. Three dimensional expression of power spectra of the heaving motion.

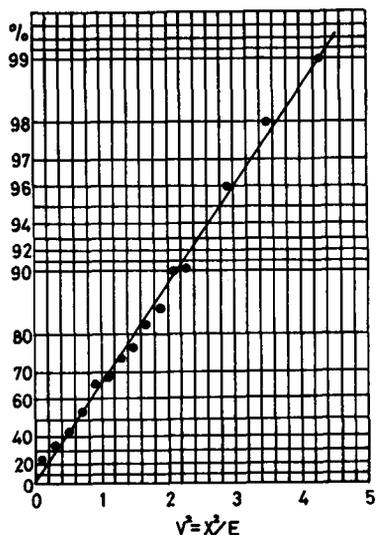


Fig. 18. Cumulative distribution of variation in warp tension.

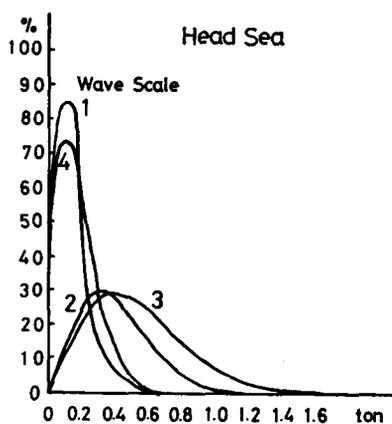


Fig. 19. Distribution of variation in warp tension at head sea for each wave scale.

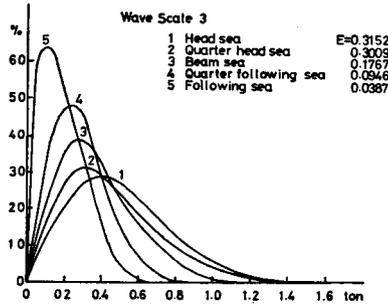


Fig. 20. Distribution of variation in warp tension in wave scale 3 for each wave direction.

Table 3. Chi-square test applied to test goodness of fit of Rayleigh distribution and normal distribution to test results.

Wave scale	Wave direction	Ship speed knots	Total No. variations in sample	Computed value of E(ton)	n	Value of Chi-square Normal	Remarks	Value of Chi-square Rayleigh	Remarks
1	1	4.4	106	0.0206	3	0.111	Very good fit P=0.01	1.235	Good fit P=0.25
2	1	3.4	68	0.2890	5	1.945	Very good fit P=0.15	3.269	Fair fit P=0.40
3	1	3.4	78	0.3152	7	6.426	Fair fit P=0.70	2.375	Very good fit P=0.10
4	1	3.5	220	0.0293	3	5.709	Fair fit P=0.80	0.075	Very good fit P=0.01
3	2	3.5	137	0.3009	8	5.791	Fair fit P=0.50	3.549	Very good fit P=0.15
3	3	3.5	118	0.1767	9	14.240	Fair fit P=0.90	6.263	Good fit P=0.30
3	4	2.9	83	0.0946	4	2.880	Fair fit P=0.60	0.347	Very good fit P=0.02
3	5	3.3	96	0.0387	3	3.248	Fair fit P=0.70	1.624	Fair fit P=0.40

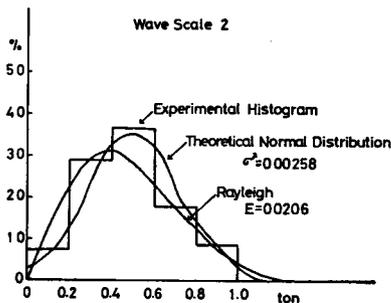


Fig. 21-a. Distribution of variation in warp tension in wave scale 2.

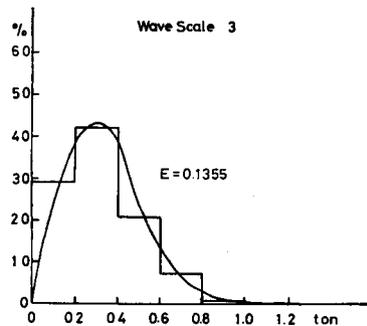


Fig. 21-b. Distribution of variation in warp tension in wave scale 3.

力は小さい。これらのレイレイ分布の適合度の $\chi^2$ 検定は表3に示す通りで、いづれの場合もレイレイ分布と見なしてよい。ただし海況が静かな時、具体的には階級2位までの分布は図21に示すように対象の中心が $\sigma$ だけ移動した正規分布とも見なされる。階級3以上になると正規分布には適合しなくなる。

### 3. ワープ張力の最大値の予測

トロール漁業における漁具、漁船の大規模化に伴ない、主機関およびトロールウインチのパワーアップは近年とみに著しい。これらおよび漁具の安全設計上役立つものとして曳網中のワープにかかる最大張力の予測を試みた。ワープ張力の極値の分布がレイレイ分布することからその予測される最大値 $T_{max}$ はサンプル数を $N$ とすれば Longuet-Higgins<sup>9)</sup>によって

$$T_{max} = E^{1/2} \cdot \theta^{1/2} \quad (1)$$

$$\theta = \log N - \log[1 - 1/2\theta \cdot (1 - \exp(-\theta))] \quad (2) \text{ で与えられる}$$

しかし、(1)、(2)式は実験船上で簡易に応用できない不更がある。曳網中の船体運動およびワープ張力の周期はその海域の波周期と船速によって決まる。いわゆる出会い周期によって決定されるが、張力変動の周期は Heaving の周期と一致し、おおむね 3~9 sec の間に入る。したがって張力変動を考える時、一曳網時間を 30~120 min としてもその間に出現する極値の数、サンプル数は 500~5,000 が考えられる。

したがって一曳網中にワープにかかる張力の予測最大値を簡単に計算し得るために(1)、(2)式を以下のように近似した。 $N=500\sim 5,000$ の範囲では(2)式は

$$\theta^{1/2} = a \cdot N + b \quad (3) \text{ となる。}$$

係数 $a, b$ については表4に示す通りである。

また船上で測定したワープ張力の平均値を $MT$ ton, Heaving の周期を $P$ sec, 予定曳網時間を $t$ sec,

Table 4. Comparison of  $\theta^{1/2}$  according to Longuet-Higgins and approximate from equation (3).

Sample size		a= $0.841 \times 10^{-4}$ b=2.53	a= $0.675 \times 10^{-4}$ b=2.60	a= $0.166 \times 10^{-3}$ b=2.44	a= $0.995 \times 10^{-3}$ b=2.04
N	from Longuet- Higgins				
1	0.707				
2	1.030				
5	1.366				
10	1.583				
20	1.778				
50	2.010				2.089
100	2.172				2.139
200	2.323				2.239
500	2.509	2.575		2.523	2.537
1000	2.642	2.617	2.633	2.606	
2000	2.769	2.701	2.735	2.772	
5000	2.929	2.953	2.937		
10000	3.044				
20000	3.155				
50000	3.296				
100000	3.400				

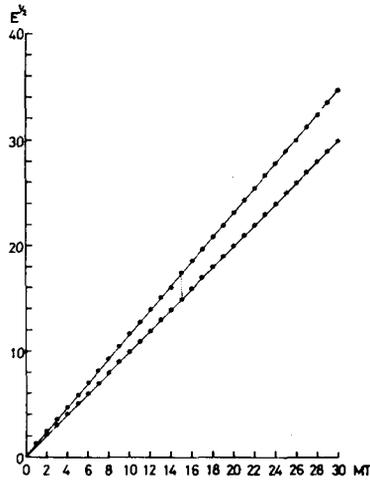


Fig. 22. The relation between root mean square value  $E^{1/2}$  and mean value  $MT$ .

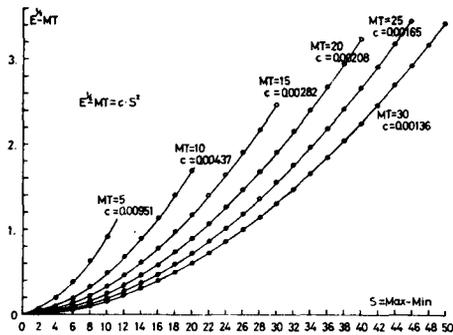


Fig. 23. The relation between  $(E^{1/2} \cdot MT)$  and  $S$ .

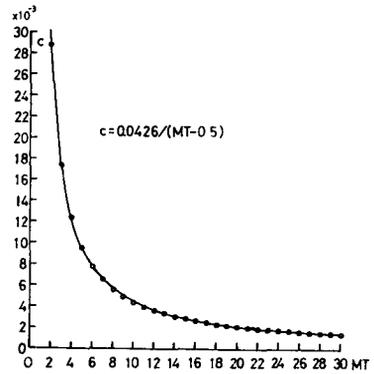


Fig. 24. The relation between coefficient  $c$  and  $MT$ .

$MT$  測定中のワープ張力の変動の最小値と最大値の差を  $S$  ton とすれば

$$N = t/P \tag{4}$$

$E^{1/2}$  と  $MT$  の関係は  $N$  が大きくなれば  $E^{1/2}$  は大きくなり、 $N$  が同数の時は変動の差  $S$  が大きい程  $E^{1/2}$  は大きくなる。これまでの測定値から  $S$  は  $MT$  の 2 倍程度を考えればよいから、その関係を図示すると図 22, 図 23 となる。

これから

$$E^{1/2} = c \cdot S^2 + MT \tag{5} \text{ を得る。}$$

係数  $c$  は  $MT$  の値によって変わり、その関係は図 24 で示され

$$c = 0.04262 / (MT - 0.5) \tag{6} \text{ となる。}$$

したがって求める  $T_{max}$  は (3)~(6) 式から

Table 5. Comparison of predicted and measured values.

Sample size N	Experiment Max. (ton)	Predicted from Longuet-Higgins (ton)	Approximate predicted from equation (7) (ton)	E	MT	S	a	b
100	9.0	9.02	10.1	4.156	3.614	9.0	$0.995 \times 10^{-3}$	2.04
200	9.0	8.9	10.2	3.838	3.328	9.0	"	"
"	6.4	7.2	7.8	3.123	2.738	6.4	"	"
500	9.0	8.7	11.1	3.475	3.046	9.0	$0.166 \times 10^{-3}$	2.44
"	8.6	7.5	10.3	3.005	2.625	8.6	"	"
800	10.8	9.4	12.9	3.638	3.163	10.8	"	"
1000	12.2	10.4	14.6	3.929	3.433	12.2	$0.84 \times 10^{-4}$	2.533
1500	15.0	11.7	17.8	4.342	3.752	15.0	"	"

(This data were measured on two-boat trawler No. 96 Chōyō Maru.)

$$T_{max} = (a \cdot t / P + b) \{0.04262 / (MT - 0.5) \cdot S^2 + MT\} \quad (7)$$

が導びかれる。(1), (2) 式と (7) 式との比較は表 5 に示した。

小山ら<sup>7)</sup>によれば階級 2 においては揚網時のワープ張力は曳網時の約 1/2 となり、荒天で Head sea における揚網時の張力変動はオッターボードが海底を離れる項より著しく大きくなっているが、その極値の分布もレイレイ分布と見なされるから、揚網時の最大張力の予測にも (7) 式を使用してよいと思われる。ワープ張力の長期分布およびその最大値の予測については別稿に譲る。

### 要 約

トロール操業中の船体動揺を入力としワープ張力を出力とする船体運動に対する漁具の応答系、特にワープ張力系について周波数応答特性、coherency から次のことが明らかとなった。

1. 左右両舷のワープ張力は、その絶対値に大小はあってもその変動現象そのものには著しい位相差はない。
2. ワープ張力の変動は種々の船体動揺が影響をおよぼしているのであるが、特に海況が荒れるにつれて Heaving の変動をそのまま再現しており、両者の間には遅れ系に似た応答関係が成り立っている。
3. Heaving の次に Surging の影響がみられる。
4. トロール曳網中の船体運動は漁具による影響を無視できず、安全な操業を確保するためには漁具系による操業中の船体運動を明らかにしなければならない。

またワープ張力については

5. ワープ張力の極値の分布はレイレイ分布をする。
6. 一曳網中に予測されるワープ張力の最大値は次式で近似される。

$$T_{max} = (a \cdot t / P + b) \{0.04262 / (MT - 0.5) \cdot S^2 + MT\}$$

### 文 献

- 1) 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プ張力の統計的特性. 北大水産彙報 22, 67-72.
- 2) 山内保文 (1961). 船の波浪中動揺応答の新解析法について (その 2). 日本造船協会論文集 110, 19-29.

- 3) 耐航性に関するシンポジウムテキスト (1969). 216 P. 日本造船学会, 東京.
- 4) 磯部孝 編 (1967). 相関函数およびスペクトル. 455 p. 東京大学出版会, 東京.
- 5) 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.
- 6) Longuet-Higgins, M.S. (1952). On the statistical distribution of the height of sea waves. *Journal of Marine Research*. **11**, 245-266.
- 7) 小山武夫・桜井五郎・隅川芳雄 (1968). 船尾トロールの投揚網時におけるワーブ張力の測定結果. 日水誌 **34**, 903-908.
- 8) 山内二郎・森口繁一・一松 信 (1967). 電子計算機のための数値計算法 II. 303 p. 培風館, 東京.
- 9) 北大水産学部 海洋調査漁業試験要報編集委員会編 (1969). 海調漁試要報 **13**, 356-360.
- 10) 同 上 (1970). 誌同 **14**, 368-371.
- 11) 同 上 (1972). 同誌 **15**, 85-89, 295-297.

天下井：船体運動と漁具との力学的関係 (II)

Appendix I. Computation program for response characteristic.

```

1 C MAIN PROGRAM C RSP 1
2 DIMENSION X(600),Y(600),CYX(131),A(4),CYXK(46),SYXK(46),PXX(46), RSP 2
1 PYY(46),PXXA(46),PYXA(46),PYXK(46),C(46),S(46), RSP 3
2 RESPO(46),COHER(46),PHASE(46),CXX(46),CYY(46),SIGMA(46) RSP 4
3 ,SSK(10),NEN(10),MONTH(10),NITI(10),JIKAN(10),MH(10), RSP 5
4 TATE(45),YOKO(45) RSP 6
2 DOUBLE PRECISION NBDC(10) RSP 7
3 INTEGER SS(10),HEAD(10),EP(10) RSP 8
4 CALL DATAON RSP 9
5 IHC=45 RSP 10
6 K2=IHC+1 RSP 11
7 IHC=65 RSP 12
8 READ(5,1) NOX RSP 13
9 1 FORMAT(15) RSP 14
10 READ(5,2) (A(I),I=1,4) RSP 15
11 2 FORMAT(4F10.0) RSP 16
12 DO 10 I=1,NOX RSP 17
13 READ(5,3) NBDC(I) RSP 18
14 3 FORMAT(A8) RSP 19
15 READ(5,4) SS(I),EP(I),HEAD(I),SSK(I),NEN(I),MONTH(I),NITI(I),JIKAN RSP 20
1 (I),MH(I) RSP 21
16 4 FORMAT(3I5,F5.0,5I5) RSP 22
17 M=MH(I) RSP 23
18 READ(5,5) CALIB RSP 24
19 5 FORMAT(F10.0) RSP 25
20 IF(I=1) 20,20,30 RSP 26
21 20 READ(5,6) (Y(J),J=1,M) RSP 27
22 6 FORMAT(16F5.0) RSP 28
23 CALL SUB1(Y,M) RSP 29
24 DO 7 J=1,M RSP 30
25 Y(J)=Y(J)*CALIB RSP 31
26 7 CONTINUE RSP 32
27 CALL SUB2(Y,CYY,M,IHC) RSP 33
28 CALL SUB3(CYY,PYY,IHC) RSP 34
29 CALL SUB4(PYY,A,PYXA,IHC) RSP 35
30 CALL EPSRN(PYXA,TATE,YOKO,EPS,IHC) RSP 36
31 GO TO 40 RSP 37
32 30 READ(5,6) (X(J),J=1,M) RSP 38
33 CALL SUB1(X,M) RSP 39
34 DO 8 J=1,M RSP 40
35 X(J)=X(J)*CALIB RSP 41
36 8 CONTINUE RSP 42
37 CALL SUB2(X,CXX,M,IHC) RSP 43
38 CALL SUB3(CXX,PXX,IHC) RSP 44
39 CALL SUB4(PXX,A,PXXA,IHC) RSP 45
40 CALL EPSRN(PXXA,TATE,YOKO,EPS,IHC) RSP 46
41 CALL SUB5(X,Y,CYX,M,IHC) RSP 47
42 CMAX=N=0. RSP 48
43 DO 9 J=36,96 RSP 49
44 IF(CYX(J)) 9,11,11 RSP 50
45 11 IF(CMAX<CYX(J)) 12,9,9 RSP 51
46 12 CMAX=CYX(J) RSP 52
47 N=J RSP 53
48 9 CONTINUE RSP 54
49 KS=N-(IHC+1) RSP 55
50 K5=2*IHC+1 RSP 56
51 WRITE(6,21) NBDC(1),NBDC(1) RSP 57
52 21 FORMAT(1H1,3/,A8,5H AND ,A8) RSP 58
53 WRITE(6,13) N,KS RSP 59
54 13 FORMAT(1H ,2/,15X,7HMAX.NO.,10X,2HKS/1H0,19X,13,10X,13/) RSP 60
55 WRITE(6,14) (CYX(J),J=1,K5) RSP 61
56 14 FORMAT(1H5,10X,'CROSS CORRELATION'/(1H0,10F12.6)) RSP 62
57 KC=20 RSP 62-A
58 IF(ABS(KS).GE.KC)KS=0 RSP 62-B
59 CALL SUB6(CYX,CYXK,SYXK,PYXK,C,S,A,PXXA,PYXA,RESPO,COHER,PHASE, RSP 63
1 SIGMA,IHC,KS) RSP 64
60 WRITE(6,15) NBDC(1) RSP 65
61 15 FORMAT(1H1,3/,10X,A8) RSP 66
62 WRITE(6,16) RSP 67
63 16 FORMAT(1H ,2/,', SS EP',5X,'DATE',5X,' HEAD SSK M ',5X, RSP 68
1 ' IPSIRON',/) RSP 69
64 WRITE(6,17) SS(1),EP(1),NEN(1),MONTH(1),NITI(1),JIKAN(1),HEAD(1), RSP 70
1 SSK(1),MH(1),EPS RSP 71
65 17 FORMAT(1H ,2I5,3I3,2I5,F5.2,15,F15.7) RSP 72

```

Appendix 1. (continued)

```

66      WRITE(6,18)
67      18 FORMAT(1H ,2/,5X,3HLAG,3X,11HCORRELATION,7X,5HPOWER,7X,8HRESPONSE,
1      1      6X,9HCOHERENCY,7X,5HPHASE)
68      WRITE(6,19) (L,CXX(L),PXXA(L),RESPO(L),COHER(L),PHASE(L),L=1,K2)
69      19 FORMAT(110,5E14,6)
70      GO TO 10
71      40 WRITE(6,15) NBCD(I)
72      WRITE(6,16)
73      WRITE(6,17) SS(I),FP(I),NEN(I),MONTH(I),NITI(I),JIKAN(I),HEAD(I),
1      1      SSK(I),MH(I),EPS
74      WRITE(6,22)
75      22 FORMAT(1H ,2/,5X,3HLAG,3X,11HCORRELATION,7X,5HPOWER)
76      WRITE(6,23) (L,CYY(L),PYXA(L),L=1,K2)
77      23 FORMAT(110,2E14,6)
78      10 CONTINUE
79      STOP
80      END
RSP 73
RSP 74
RSP 75
RSP 76
RSP 77
RSP 78
RSP 79
RSP 80
RSP 81
RSP 82
RSP 83
RSP 84
RSP 85
RSP 86
RSP 87
RSP 88
RSP 89

```

```

C      AVENUE AND THE DIFFERENCE BETWEEN X(I) AND AVE
1      SUBROUTINE SUB1(X,M)
2      DIMENSION X(600)
3      AVE=0.
4      DO 10 I=1,M
5      AVE=AVE+X(I)
6      10 CONTINUE
7      AVE=AVE/FLOAT(M)
8      DO 20 I=1,M
9      X(I)=X(I)-AVE
10     20 CONTINUE
11     RETURN
12     END
RSP 90
RSP 91
RSP 92
RSP 93
RSP 94
RSP 95
RSP 96
RSP 97
RSP 98
RSP 99
RSP100
RSP101
RSP102

```

```

C      AUTO-CORRELATION
1      SUBROUTINE SUB2(X,CXX,M,IH)
2      DIMENSION X(600),CXX(46)
3      B=1./FLOAT(M)
4      K2=IH+1
5      CXX(K2)=0.
6      DO 10 I=1,M
7      CXX(K2)=CXX(K2)+X(I)*X(I)
8      10 CONTINUE
9      CXX(K2)=CXX(K2)*B
10     DO 30 L=1,IH
11     CXX(L)=0.
12     30 CONTINUE
13     DO 40 L=1,IH
14     N=M-L
15     DO 20 I=1,N
16     K=L+I
17     CXX(L)=CXX(L)+X(K)*X(I)
18     20 CONTINUE
19     CXX(L)=CXX(L)*B
20     40 CONTINUE
21     RETURN
22     END
RSP103
RSP104
RSP105
RSP106
RSP107
RSP108
RSP109
RSP110
RSP111
RSP112
RSP113
RSP114
RSP115
RSP116
RSP117
RSP118
RSP119
RSP120
RSP121
RSP122
RSP123
RSP124
RSP125

```

```

C      PART OF POWER SPECTRUM
1      SUBROUTINE SUB3(CXX,PXX,IH)
2      DIMENSION CXX(46),PXX(46)
3      K2=IH+1
4      IH1=IH-1
5      PXX(K2)=0.
6      DO 10 L=1,IH1
7      PXX(K2)=PXX(K2)+CXX(L)
8      10 CONTINUE
9      PXX(K2)=CXX(K2)+2.*PXX(K2)+CXX(IH)
10     DO 30 I=1,IH
11     PXX(I)=0.
12     30 CONTINUE
RSP126
RSP127
RSP128
RSP129
RSP130
RSP131
RSP132
RSP133
RSP134
RSP135
RSP136
RSP137
RSP138

```

天下井：船体運動と漁具との力学的関係 (II)

Appendix 1. (continued)

```

13      DO 40 I=1, IH                      RSP139
14      DO 20 L=1, IH1                    RSP140
15      P=3.1415926/FLOAT(IH)*FLOAT(L)   RSP141
16      PXX(I)=PXX(I)+CXX(L)*COS(P)      RSP142
17      20 CONTINUE                       RSP143
18      PXX(I)=CXX(K2)+?.*PXX(I)+(-1.)*I*CXX(IH) RSP144
19      40 CONTINUE                       RSP145
20      RETURN                            RSP146
21      END                                RSP147

C      POWER SPECTRUM                    RSP148
1      SUBROUTINE SUB4(PXX,A,PXXA,IH)    RSP149
2      DIMENSION PXX(46),A(4),PXXA(46)  RSP150
3      K2=IH+1                           RSP151
4      DO 100 J=1,K2                      RSP152
5      PXXA(J)=0.                         RSP153
6      100 CONTINUE                       RSP154
7      IH1=IH-1                           RSP155
8      IH2=IH-2                           RSP156
9      IH3=IH-3                           RSP157
10     IH4=IH-4                           RSP158
11     IH5=IH-5                           RSP159
12     PXXA(K2)=A(1)*PXX(K2)+2.*(A(2)*PXX(1)+A(3)*PXX(2)+A(4)*PXX(3)) RSP160
13     PXXA(1)=A(1)*PXX(1)+A(2)*(PXX(K2)+PXX(2))+A(3)*(PXX(1)+PXX(3))+ RSP161
14     1 A(4)*(PXX(2)+PXX(4))              RSP162
15     PXXA(2)=A(1)*PXX(2)+A(2)*(PXX(1)+PXX(3))+A(3)*(PXX(K2)+PXX(4))+ RSP163
16     1 A(4)*(PXX(1)+PXX(5))              RSP164
17     PXXA(3)=A(1)*PXX(3)+A(2)*(PXX(2)+PXX(4))+A(3)*(PXX(1)+PXX(5))+ RSP165
18     1 A(4)*(PXX(K2)+PXX(6))              RSP166
19     PXXA(IH2)=A(1)*PXX(IH2)+A(2)*(PXX(IH1)+PXX(IH3))+A(3)*(PXX(IH1)+ RSP167
20     1 PXX(IH4))+A(4)*(PXX(IH1)+PXX(IH5)) RSP168
21     PXXA(IH1)=A(1)*PXX(IH1)+A(2)*(PXX(IH1)+PXX(IH2))+A(3)*(PXX(IH1)+ RSP169
22     1 PXX(IH3))+A(4)*(PXX(IH2)+PXX(IH4)) RSP170
23     PXXA(IH)=A(1)*PXX(IH)+2.*(A(2)*PXX(IH1)+A(3)*PXX(IH2)+A(4)*PXX(IH3) RSP171
24     1 ) RSP172
25     DO 30 J=4,IH3                      RSP173
26     PXXA(J)=A(1)*PXX(J)+A(2)*(PXX(J-1)+PXX(J+1))+A(3)*(PXX(J-2)+ RSP174
27     1 PXX(J+2))+A(4)*(PXX(J-3)+PXX(J+3)) RSP175
28     30 CONTINUE                       RSP176
29     RETURN                            RSP177
30     END                                RSP178

C      CROSS CORRELATION                 RSP179
1      SUBROUTINE SUB5(X,Y,CYX,M,IH)     RSP180
2      DIMENSION X(600),Y(600),CYX(131) RSP181
3      K7=2*IH+1                         RSP182
4      B=1./FLOAT(M)                     RSP183
5      DO 10 I=1,K7                       RSP184
6      CYX(I)=0.                          RSP185
7      10 CONTINUE                       RSP186
8      DO 20 I=1,K7                       RSP187
9      J=I-(IH+1)                         RSP188
10     IF(J) 11,12,12                    RSP189
11     DO 30 N=1,L1                       RSP190
12     K1=J+N                             RSP191
13     CYX(I)=CYX(I)+Y(K1)*X(N)          RSP192
14     30 CONTINUE                       RSP193
15     CYX(I)=CYX(I)*B                    RSP194
16     GO TO 20                          RSP195
17     11 L1=M-ABS(J)                     RSP196
18     DO 40 N=1,L1                       RSP197
19     K1=N+ABS(J)                       RSP198
20     CYX(I)=CYX(I)+Y(N)*X(K1)         RSP199
21     40 CONTINUE                       RSP200
22     CYX(I)=CYX(I)*B                    RSP201
23     20 CONTINUE                       RSP202
24     RETURN                            RSP203
25     END                                RSP204
26

```

Appendix 1. (continued)

```

C      RESPONSE COHERENCY PHASE
1      SUBROUTINE SUB6(CYX,CYXX,SYXX,PYXX,C,S,A,PXXA,PYYA,RESPO,COHER, RSP206
2      1          PHASE,SIGMA,IH,IHC,KS) RSP207
3      DIMENSION CYX(131),CYXX(46),SYXX(46),PYXX(46),C(46),S(46),A(4), RSP208
4      1          PXXA(46),PYYA(46),RESPO(46),COHER(46),PHASE(46),SIGMA( RSP209
5      2          46) RSP210
6      K2=IH+1 RSP211
7      K3=IHC+1+KS RSP212
8      DO 10 I=1,K2 RSP213
9      CYXX(I)=0. RSP214
10     SYXX(I)=0. RSP215
11     SIGMA(I)=0. RSP216
12     10 CONTINUE RSP217
13     DO 20 I=1,IH RSP218
14     JP=K3+I RSP219
15     JM=K3-1 RSP220
16     CYXX(I)=(CYX(JP)+CYX(JM))*0.5 RSP221
17     SYXX(I)=(CYX(JP)-CYX(JM))*0.5 RSP222
18     20 CONTINUE RSP223
19     CYXX(K2)=CYX(K3) RSP224
20     CALL SUB3(CYXX,PYXX,IH) RSP225
21     DO 30 I=1,K2 RSP226
22     CYXX(I)=PYXX(I) RSP227
23     PYXX(I)=0. RSP228
24     30 CONTINUE RSP229
25     IH1=IH-1 RSP230
26     SYXX(K2)=0. RSP231
27     DO 40 I=1,IH1 RSP232
28     DO 50 J=1,IH1 RSP233
29     P=3.1415926/FLOAT(IH)*FLOAT(I)*FLUAT(J) RSP234
30     PYXX(I)=PYXX(I)+SYXX(J)*SIN(P) RSP235
31     50 CONTINUE RSP236
32     PYXX(I)=-2.*PYXX(I) RSP237
33     40 CONTINUE RSP238
34     DO 60 I=1,IH RSP239
35     SYXX(I)=PYXX(I) RSP240
36     PYXX(I)=0. RSP241
37     60 CONTINUE RSP242
38     DO 70 J=1,K2 RSP243
39     C(J)=0. RSP244
40     S(J)=0. RSP245
41     RESPO(J)=0. RSP246
42     COHER(J)=0. RSP247
43     70 CONTINUE RSP248
44     CALL SUB4(CYXX,A,C,IH) RSP249
45     CALL SUB4(SYXX,A,S,IH) RSP250
46     DO 90 J=1,IH RSP251
47     P=3.1415926/FLOAT(IH)*FLOAT(J)*FLOAT(KS) RSP252
48     C(J)=COS(P)+C(J)*SIN(P)*S(J) RSP253
49     S(J)=COS(P)*S(J)-SIN(P)*C(J) RSP254
50     90 CONTINUE RSP255
51     DO 210 J=1,IH RSP256
52     IF(C(J)) 301,333,303 RSP257
53     301 SGNC=-1. RSP258
54     GO TO 333 RSP259
55     303 SGNC=1. RSP260
56     333 IF(S(J)) 401,402,403 RSP261
57     401 SGNS=-1. RSP262
58     GO TO 304 RSP263
59     402 SGNS=0. RSP264
60     GO TO 304 RSP265
61     403 SGNS=1. RSP266
62     304 IF(C(J)) 306,305,306 RSP267
63     305 PYXX(J)=3.1415926/2.*SGNS RSP268
64     GO TO 210 RSP269
65     306 PYXX(J)=ATAN(S(J)/C(J))+3.1415926/2.*(1.-SGNC)*SGNS RSP270
66     210 CONTINUE RSP271
67     IF(C(K2)) 101,102,102 RSP272
68     101 PYXX(K2)=3.1415926 RSP273
69     GO TO 103 RSP274
70     102 PYXX(K2)=0. RSP275
71     103 DO 300 L=1,IH RSP276
72     DO 350 J=1,L RSP277
73     K4=J-1 RSP278

```

Appendix 1. (continued)

```

71      IF(K4) 501,502,501                                RSP280
72      502 K4=K2                                          RSP281
73      501 PK1=PYXK(J)-PYXK(K4)                          RSP282
74      PK2=ABS(PK1)-3.1415926                            RSP283
75      PK3=ABS(PK2)                                       RSP284
76      IF(PK1) 601,602,603                                RSP285
77      601 SGN1=-1.                                        RSP286
78      GO TO 666                                          RSP287
79      602 SGN1=0.                                        RSP288
80      GO TO 666                                          RSP289
81      603 SGN1=1.                                        RSP290
82      666 IF(PK2) 701,702,703                            RSP291
83      701 SGN2=-1.                                       RSP292
84      GO TO 777                                         RSP293
85      702 SGN2=0.                                       RSP294
86      GO TO 777                                         RSP295
87      703 SGN2=1.                                       RSP296
88      777 IF(PK3) 888,802,803                            RSP297
89      802 SGN3=0.                                       RSP298
90      GO TO 888                                          RSP299
91      803 SGN3=1.                                       RSP300
92      888 SIGMA(L)=SIGMA(L)+SGN1*0.5*(SGN2+1.)*SGN3   RSP301
93      550 CONTINUE                                       RSP302
94      PHASE(L)=PYXK(L)-2.*3.1415926*SIGMA(L)-3.1415926/FLOAT(IH)*FLOAT(L
1      )+FLOAT(KS)+PYXK(K2)                                RSP303
95      500 CONTINUE                                       RSP304
96      PHASE(K2)=PYXK(K2)                                RSP305
97      DO 120 J=1,K2                                     RSP306
98      C(J)=C(J)**2+S(J)**2                               RSP307
99      COMER(J)=C(J)/(PXKA(J)*PYXA(J))                  RSP308
100     RESPO(J)=SQRT(C(J))/PXKA(J)                       RSP309
101     CONTINUE                                           RSP310
102     RETURN                                             RSP311
103     END                                               RSP312
                                                    RSP313

C
1     IPSIRON                                           RSP317
2     SUBROUTINE EPSRN(PXXA,TATE,YOKO,EPS,IH)             RSP318
3     DIMENSION PXXA(46),TATE(45),YOKO(45)              RSP319
4     K1=IH-1                                            RSP320
5     K2=IH+1                                            RSP321
6     P1=3.1415926/FLOAT(IH)                             RSP322
7     YOKO(1)=0.                                         RSP323
8     TATE(1)=PXXA(K2)                                   RSP324
9     DO 1 I=2,IH                                        RSP325
10    I1=I-1                                             RSP326
11    YOKO(I)=FLOAT(I1)*P1                               RSP327
12    TATE(I)=PXXA(I1)                                   RSP328
13    1 CONTINUE                                         RSP329
14    E01=E02=E21=E22=E41=E42=0.                       RSP330
15    DO 2 I=2,K1+2                                      RSP331
16    E01=E01+TATE(I)                                   RSP332
17    Y2=YOKO(I)**2                                     RSP333
18    E21=E21+Y2*TATE(I)                               RSP334
19    E41=E41+Y2*Y2*TATE(I)                            RSP335
20    2 CONTINUE                                         RSP336
21    DO 3 I=3,K1+2                                      RSP337
22    E02=E02+TATE(I)                                   RSP338
23    Y2=YOKO(I)**2                                     RSP339
24    E22=E22+Y2*TATE(I)                               RSP340
25    E42=E42+Y2*Y2*TATE(I)                            RSP341
26    3 CONTINUE                                         RSP342
27    EM0=(TATE(1)+4.*E01+2.*E02+TATE(IH))*P1/3.       RSP343
28    EM2=(TATE(1)*YOKO(1)**2+4.*E21+2.*E22+TATE(IH)*YOKO(IH)**2)*P1/3. RSP344
29    EM4=(TATE(1)*YOKO(1)**4+4.*E41+2.*E42+TATE(IH)*YOKO(IH)**4)*P1/3. RSP345
30    EM04=EM0*EM4                                       RSP346
31    EPS2=(EM04-EM2**2)/EM04                             RSP347
32    EPS=SQRT(EPS2)                                       RSP348
33    RETURN                                             RSP349
34    END                                               RSP350

```

Appendix 2. Computation program for Rayleigh distribution and normal distribution.

```

C      DISTRIBUTION
1  SUBROUTINE  DIST(X,AVE,MH,I,CE,MMAX,MMIN,SIGMA,GKAI,RKAI,EVG,EVR,PDP171
      1      ADIV,MDIV,RDG,SV,B,JH) PDP172
2  DIMENSION  X(600),AVE(30),CE(30),SIGMA(30),GKAI(30),RKAI(30), PDP173
      1      ADIV(30,41),MDIV(30,40),RDG(30,40),JH(30) PDP174
3  INTEGER    EVG(30,40),EVR(30,40) PDP175
4  REAL       MMAX(30),MMIN(30) PDP176
5  GKAI(11)=RKAI(11)=CE(11)=SIGMA(11)=0. PDP177
6  DO 1 I=1,MH PDP178
7  CE(11)=CE(11)+X(1)*X(1) PDP179
8  SIGMA(11)=SIGMA(11)+(X(1)-AVE(11))**2 PDP180
9  1 CONTINUE PDP181
10 CE(11)=CE(11)/FLOAT(MH) PDP182
11 SIGMA(11)=SIGMA(11)/FLOAT(MH-1) PDP183
12 CALL  MAXMIN(X,MMAX,MMIN,MH,I) PDP184
13 CALL  HISTO(X,AVE,MMAX,MMIN,ADIV,MDIV,RDG,MH,SV,B,JH,I) PDP185
C      ***KAI SQUARE TEST OF RAYLEY DISTRIBUTION PDP186
14 DO 3 I=1,JH(I) PDP187
15 EV=(EXP(-ADIV(11,I)**2/CE(11))-EXP(-ADIV(11,I+1)**2/CE(11)))*FLOA PDP188
      1(MH) PDP189
16 EVR(11,I)=EV PDP190
17 IF(EV) 5,6,5 PDP191
18 6 SA=0. PDP192
19 GO TO 7 PDP193
20 5 SA=(MDIV(11,I)-EV)**2/EG PDP194
21 7 RKAI(11)=RKAI(11)+SA PDP195
22 3 CONTINUE PDP196
C      ***KAI SQUARE TEST OF NORMAL DISTRIBUTION PDP197
23 SIG=SQRT(SIGMA(11)) PDP198
24 P=3.1415926 PDP199
25 DO 4 I=1,JH(11) PDP200
26 T1=(ADIV(11,I)-AVE(11))/SIG PDP201
27 T2=(ADIV(11,I+1)-AVE(11))/SIG PDP202
28 P1=(1.-SQRT(1.-EXP(-2./P*(T1**2)*(1.+T1**4*0.008692)))/2. PDP203
29 P2=(1.-SQRT(1.-EXP(-2./P*(T2**2)*(1.+T2**4*0.008692)))/2. PDP204
30 IF(11) 11,12,12 PDP205
31 P1=P1-P1 PDP206
32 11 IF(T2) 13,13,14 PDP207
33 14 P2=P2-P2 PDP208
34 13 EG=(P2-P1)*FLGAT(MH) PDP209
35 FVG(11,I)=EG PDP210
36 IF(EG) 8,9,8 PDP211
37 9 SA1=0. PDP212
38 GO TO 10 PDP213
39 8 SA1=(MDIV(11,I)-FV)**2/EG PDP214
40 10 GKAI(11)=GKAI(11)+SA1 PDP215
41 4 CONTINUE PDP216
42 RETURN PDP217
43 END PDP218
C      HISTOGRAM PDP142
1  SUBROUTINE  HISTO(X,AVE,MMAX,MMIN,ADIV,MDIV,RDG,MH,SV,B,JH,I) PDP143
2  DIMENSION  X(600),ADIV(30,41),MDIV(30,40),AVE(30),RDG(30,40), PDP144
      1      JH(30) PDP145
3  REAL       MMAX(30),MMIN(30) PDP146
4  DO 2 I=1,40 PDP147
5  ADIV(11,I)=MDIV(11,I)+RDG(11,I)*0. PDP148
6  2 CONTINUE PDP149
7  ADIV(11,1)=SV PDP150
8  JH(11)=0. PDP151
9  DO 9 J=1,40 PDP152
10 ADIV(11,J+1)=ADIV(11,J)+B PDP153
11 DO 11 I=1,MH PDP154
12 IF(ADIV(11,J+1)-X(1)) 11,11,12 PDP155
13 12 IF(ADIV(11,J)-X(1)) 10,10,11 PDP156
14 10 MDIV(11,J)=MDIV(11,J)+1 PDP157
15 11 CONTINUE PDP158
16 JH(11)=JH(11)+1 PDP159
17 IF(ADIV(11,J+1)-MMAX(11)) 9,9,13 PDP160
18 9 CONTINUE PDP161
19 13 RDG(11,1)=MDIV(11,1) PDP162
20 DO 14 I=1,JH(11)-1 PDP163
21 RDG(11,I+1)=RDG(11,I)+MDIV(11,I+1) PDP164
22 CONTINUE PDP165
23 DO 20 I=1,JH(11) PDP166
24 RDG(11,I)=RDG(11,I)/FLOAT(MH) PDP167
25 20 CONTINUE PDP168
26 RETURN PDP169
27 END PDP170

```