

社 団 法 人

# 日本造船研究協会報告

第 49 号

昭 和 40 年 3 月

---

高速船の波浪中の応力頻度ならびに甲板荷重の実験的研究……………第49研究部会

Experiments on the Stress Frequency and Deck Wave Load Acting  
on the High Speed Ships in Rough Seas

……………The 49th Research Committee

---

The Report  
of the  
Shipbuilding Research Association  
of Japan  
Tokyo, Japan  
March, 1965

第 49 研究部会委員名簿

主　　查	秋　田　好　雄		
幹　　事	青　山　俊　久	石　山　一　郎	内　田　勇
	岡　田　正　三	大　野　檀	黒　川　正　典
	郷　田　国　夫	関　一　之	高　橋　幸　伯
	田　中　秀　雄	土　屋　九　一	中　村　昭　和
	藤　田　純　夫	船　橋　敬　三	松　浦　和　雄
	松　岡　史　香	向　山　泰	若　松　一　夫
委　　員	太　田　十　一　郎	国　安　常　雄	熊　井　豊　二
	栗　田　省　吾	三　宮　一　泰	首　藤　保　信
	杉　野　茂	高　城　清	宝　田　直　之　助
	田　代　新　吉	田　添　嘉　二	鶴　田　稔
	寺　沢　一　雄	富　武　満	長　沢　準
	西　岡　正　美	八　田　公　雄	浜　野　和　夫
	藤　田　勇　一	山　本　善　之	柚　木　茂　登
	吉　識　雅　夫	吉　武　嘉　一	

**Membership on the 49th Research Committee**

Chairman	Yoshio AKITA		
Secretaries	Toshihisa AOYAMA Syōzō OKADA Kunio GŌDA Hideo TANAKA Sumio FUJITA Shikō MATSUOKA	Ichirō ISIYAMA Dan ŌNO Kazuyuki SEKI Kyūichi TSUCHIYA Keizō FUNABASHI Yasushi MUKOUYAMA	Isamu UCHIDA Masanori KUROKAWA Yukinori TAKAHASHI Akikazu NAKAMURA Kazuo MATSUURA Kazuo WAKAMATSU
Member	Zyūichirō ŌTA Shōgo KURITA Shigeru SUGINO Shinkichi TASHIRO Kazuo TERASAWA Masayoshi NISHIOKA Yūichi FUJITA Masao YOSHIKI	Tsuneo KUNIYASU Kazuyasu SANOMIYA Kiyoshi TAKASHIRO Yoshiji TAZOE Takemitsu TOMI Kimio HATSUTA Yoshiyuki YAMAMOTO Yoshikazu YOSHITAKE	Toyoji KUMAI Yasunobu SUDŌ Naonosuke TAKARADA Minoru TSURUTA Hitoshi NAGASAWA Kazuo HAMANO Shigeto YUNOKI

# Experiments on the Stress Frequency and Deck Wave Load Acting on the High Speed Ships in Rough Seas

## 1 PREFACE

### 1. 1. Introduction

The structural members of a ship are experienced the irregularly repeated forces which induced by ocean waves. For the optimum design of a ship, the investigations on these loads are most necessary. But little is known about the actual situations of these loads and the wave induced ship stresses experienced in service. In order to estimate the durable years of an existing ship and to establish the reasonable design of ship structures, the load spectrum and the value of the expecting maximum load on ship in certain service term must be well known.

Recently, with the improvement of statistics, oceanography and measuring instruments, the statistical measurement of ship stresses or loads has been developed in many countries. In these tests, the ship stresess in main longitudinal member amidship are mostly measured as the standard. For instance, series tests<sup>2-9)</sup> were carried out by David Taylor Model Basin in United States on many kinds of war ships and oil tankers, and experiments<sup>10-12)</sup> on cargo boats were carried out by Shipbuilding Research Foundation in Sweden.

In Japan, statistical measurements were carried out in 1957 through 1959 on a cargo liner Hodakasan-Maru<sup>15)</sup> and in 1956 through 1960 on a cargo liner Settsu-Maru by the 44th Research Committee of Shipbuilding Research Association of Japan.<sup>(16-17)</sup> In 1960, the 49th Research Committee was organized in this Association, and under the helping of the Ministry of Transportation and the co-operation with the several organizations, statistical measurements of stresses on many liners were planned. On the other hand, with increase in speed of ship, several damages due to "green seas" have been reported in forecastle deck, fore part of upper deck or brigde front of ships. A few experiments on the impact force of green sea have been carried out on model ships, but none on the actual ship except Settsu-Maru mentioned above. Up-to-date the magnitude of the impact force due to green sea has been estimated only by the analysis of the damages or the observation by crews. Then there are no data on green sea useful to the design of ship. Together with the statistical measurement of ship bending stresses, these experiments aimed to measure the impact force due to green sea and to investigate the relation between operating condi-

tions of ship and the occurrence and severity of green sea phenomena.

## 1. 2. Outline of Experiments

The experiments were carried out on seven ships in 1960 and ten ships in 1961. For 4 ships of them, the statistical stress in longitudinal member of ship structure was measured together with the water pressure due to green sea, but as for the other six ships in 1961 only the deck water pressure was measured. The list of these ships is shown in Tab. 0.1. Soyo-Maru is a refrigerating cargo boat for whaling, Yawatasan-Maru is an oil and ore carrier, and Shinanogawa-Maru is an oil tanker and the other nine ships are regular ocean liners from Tokyo to New York with rather high speed having almost the similar types.

The statistical longitudinal stress was measured on upper deck plate in the midship section, and the deck water pressure due to green sea was measured by the special gauges fitted on the upper deck near the No. 1 hatch.

## 2 MEASURING APPARATUS

### 2. 1. Stress Cycle Counter

The stress cycle counter has a simple semi-mechanical system in order to avoid the drifting of zero balancing, to be fit for use in long time and easy to operate. This counter is consisted of three parts such as detector, microhead and counter. The outline is shown in Fig. 2.1.

The detector changes the strain in a span to the rotation of the pointer of a dial gauge, and the pointer slides on the segments which divided the circle into forty and are the electric contacting points. In this case, the span is 500mm and the pitch of the segment corresponds to the stress of 0.5 kg/mm<sup>2</sup>.

The microhead rotates the micro screw by a condenser motor and adjusts the zero point of the dial gauge.

The counter part consists of 17 electromagnetic counters and each of them is connected to the corresponding segment of the detector. In this system the level crossing frequencies are counted in 17 levels (positive 8 negative 8, and zero), and the frequency of each maximum stresses in positive and negative can be obtained by simple calculations.

### 2. 2. Apparatus for Wave Pressure on Deck

#### (1) Electronic Frequency Counter

With the electronic frequency counter the frequency of water pressure on upper deck due to green sea was measured. The water pressure is picked up by a diaphragm and wire strain gauges. The output of the strain meter is connected to a photo-electric galvanometer, and the light reflected from the galvanometer is received by photo-cells, then the number of the level crossing is counted by electro-magnetic counters. (Fig. 2.5).

#### (2) Portable Frequency Counter

The portable frequency counter is a simple counter designed to be easy for use, easy to fit on the deck and needless to use the electric source and lead wires. The counter is shown in Fig. 2.7 and 2.8. Six small bellows which are adjusted to act as electric contacts at six levels of pressure respectively are connected to six electromagnetic counters, and the water pressures are counted at these steps ranged from  $0.1 \text{ kg/cm}^2$  to  $1.6 \text{ kg/cm}^2$ . The battery is self contained in the apparatus.

### (3) Maximum Water Pressure Gauge

By the maximum water pressure gauge, only the value of the maximum water pressure in any concerned term is measured. This gauge is the most simple one aimed to be used and fitted easily and inexpensively, on many ships to obtain the data as much as possible. This gauge consists of an annealed copper diaphragm of 0.1 mm thick which is fixed to a ringformed steel frame as shown in Fig. 2.31, and the experienced maximum water pressure is estimated from the residual deformation of the copper diaphragm. The errors of the estimated pressure are rather large in the range less than  $0.3 \text{ kg/cm}^2$ , but above this pressure it was assured from static and dynamic tests that the error is less than several percents. The dynamic tests were carried out by dropping water mass on the gauge using the apparatus described in the following chapter 3.2. (4).

## 3 METHOD OF TESTING

### 3. 1. Surrounding Conditions

Most of the records on the weather, wave and ship operating conditions were measured each 4 hours by the apparatus originally fitted to the ships or the observation by crews. (Tab. 3.1)

### 3. 2. Stress

The pick up part of the stress cycle counter is attached to the under surface of upper deck in amidship section for measuring the longitudinal bending stress of ship.

The zero point of the meter is adjusted before starting harbour. The counted numbers were read and recorded at noon every day, then the stress frequencies in 24 hours were obtained. Besides this, the stress frequencies in 15 minutes before noon were measured to obtain the short term distribution.

### 3. 3. Water Pressure on Deck

As the ships were scarcely encountered with green sea, the time intervals for recording the statistical deck water pressure or the maximum values and the times for changing the diaphragm of gauge were unequal in each ship. In most ships the pick up was located near the No. 1 hatch side of upper deck.

## 4 ANALYSIS

### 4. 1. Frequency of Stress

#### (1) Short-Term Distribution

It is well known that, in such a short time as the operating condition which is represented by sea condition, weather condition, speed of ship, load condition, angle of encounter and etc. is considered to be constant, the frequency distribution of stresses coincide with the Rayleigh distribution. Rayleigh distribution is decided identically by the value of  $\sqrt{E}$  which is the root mean square of stress variations. The values of E depend on the operating conditions of a ship and particularly on wave heights. This is increased with the increase in wave height.

The maximum and mean values of each short-term distributions were compared with the curves of  $2.142\sqrt{E}$  and  $0.886\sqrt{E}$  as discussed by Longuet-Higgins<sup>18-19)</sup>, and there are good agreement between these values and two curves as shown in Fig. 4.2. It was proved from these results that the short-term distribution of stresses is represented by Rayleigh distribution.

#### (2) Element Histogram and Long-Term Distribution

The measured histograms of long term distribution are shown in Fig. 4.3 for each navigation and ship. In this figure the bending stress x in upper deck at amidship is taken as abscissa, and the "stress frequency density" as ordinate which shows the stress frequency in the range from  $(x-0.5)$  kg/mm<sup>2</sup> to  $(x+0.5)$  kg/mm<sup>2</sup>. These curves are obtained by accumulating the short-term distributions which follow the Rayleigh distribution, then each curve should have a peak near the null stress, rather be flat line near the maximum or minimum stress, and approximately straight lines midway. Thus, in this figure the middle parts are approximated by straight lines. Since the four ships in the figure are same type ships in Tokyo-New York line, it would be safe to estimate the stress frequency of the same type ships in winter North Pacific Ocean line from the average histogram on these four ships, see Fig. 4.4. The histogram for 20 years is also estimated by translating it in parallel as shown in the figure. The sea condition is well known to be most severe in winter in North Pacific Ocean, then the expected maximum stress would be estimated from this histogram. These values are 6 kg/mm<sup>2</sup> in tensile stress and 10 kg/mm<sup>2</sup> in compression.

If we know the short-term distribution and the frequency of encountering in each operating condition, the long-term distribution can be estimated by summarizing the short-term distribution weighed by the frequency of the corresponding operating conditions.

Short-term distribution for each operating condition is called as "element histogram" because it is the element to obtain the long-term distribution, and the encountering

frequency in each operating condition is called the "weighing factor". Many kinds of factors are considered in operating condition but three items-class of wave (A), class of ship speed (B) and heading angle (C)- are taken into account following after the analysis of Jasper<sup>5)</sup>. Each condition is classified in 5, and the operating conditions are represented by (A,B,C,), see Tab. 4.1.

Shorter intervals in measurements of operating condition are needed to establish the more precise analysis, but here only the measured conditions at every noon are roughly assumed as the operating condition of those whole days. The element histograms for 24 hours are assumed from the short-term distribution corresponding to the same operating conditions as those of the concerned noon. Although 24 hours are too long to be considered as the short term, if the long-term distribution constructed by these element histograms and weighing factors can be approximated to the result of actual measurements, it may be said that the data in logbook can be used easily for the classification of the operating conditions.

Frequencies in each operating condition which are called "weighing factors" are shown in Tab. 4.1. This is the total of the measurements in 414 days and the numbers in round brackets are the ones of the days of encountering the concerned condition. These experiments are carried out mostly on ships of similar type, on same course and in same seasons, then the operating conditions are distributed in somewhat narrow ranges of classification.

Few examples of element histograms are shown in Figs. 4.5~4.12, and all of them are approximated straight lines as same as Fig. 4.3. Some discrepancies are found even on same ships in the same condition, and it would be considered that these are resulted from the choosing of operating conditions in which only three parameters are taken into account and the assumption that they last for 24 hours. But in rough approximation, we can think that the element histograms on all the similar ships are represented by a mean histogram as shown in Fig. 4.5. by thick lines.

In Fig. 4.13 we have shown the comparison of the histograms in 414 days, which are built up by calculation using the mean histogram of each operating condition and weighing factor, with the histograms from the actual measurements on all ships. Further rough approximations are made by assuming that the operating conditions have only one variable of wave height (A), and the others are constant, i.e. ship speed (B) is the 4th class (15-20 kt) and heading angle is the first class (head seas), and using the corresponding weighing factors as shown in the undermost line of Tab. 4.1. The results are also shown in Fig. 4.13. It is known on these two results that the both histograms are approximately agreed with the histograms of the actual measurements, and that longterm histograms can be estimated by the operating conditions at every 24 hours and the

corresponding element histograms, and even when assumed that the operating conditions are classified only by the wave heights. That is to say, if we can get the element histograms of a ship for several classes of wave heights, and if we have the informations about the statistical data of the concerned ocean, we can estimate the long term stress distribution without actual long term stress measurements.

### (3) Distribution of Extreme Values

The maximum stresses in each day are shown in Figs. 4.14 and 4.15 as represented by Gumbel<sup>20)</sup> and Yuille<sup>21)</sup>. The results are almost in straight lines except a few stresses in compression. Thus the maximum stress or the return period in any certain terms can be estimated from these curves.

## 4. 2. Water Pressure on Deck

### (1) Frequency of Water pressure

The results of measurement of the pressure of dashed water of green sea at the side of No. 1 hatch on upper deck are shown in Tab. 4.2 and Fig. 4.17. From the results of the experiments in winter of 1960, it was impossible to find a significant conclusion on the frequency distribution of water pressures, by the following reasons that many troubles happened in the testing apparatus, the number of gauges is too small and the time intervals for measuring are not equal on each ship.

Even if the most simple classifications are considered in ship operating and sea conditions, the number of the measurements of deck water pressure was too small to achieve the statistical analysis on the frequency in water pressure due to green sea. The results on four ships carried out in winter of 1961 are shown in Fig. 4.18. Fortunately no troubles happened with the instruments in these tests, and the encountered green seas were all catched without fail. The frequency and magnitude of green sea during the navigation in winter North Pacific Ocean may be roughly estimated from these results.

### (2) Maximum Water Pressure

The frequency of green sea is too small, thus the maximum value of the water pressure is rather utilized for the design of ships. In order to obtain the date as many as possible, simple and cheap measuring apparatus were provided. The measured results are shown in Tab. 4.3. Weather conditions observed by crews are also shown in this table. It seems to be impossible to find precisely the correspondence of weather conditions with the maximum pressure values from these results. But the estimation would be made on that the maximum pressures were induced in the most severe weather conditions in each concerned terms. It should be noted that the maximum peak value of the deck pressure has exceeded 17 m head. However in this case, no damage was observed in this ship. It seems rather unreasonable if our considerations are limited only in statical strength

calculations. Further analysis about the space and time distribution of the pressure and the transient response of the ship structural member must be achieved. For this purpose, the simple maximum pressure gauges in these experiments are not so useful.

The maximum water pressures comparing with the heading angles and wave classes are shown in Fig. 4.19. The accuracy of the gauge is not so good at the heads less than 3 meters, but the conditions of occurrence of the green sea in these ships are estimated by the cross points of the base plane and the envelopes shown by dotted lines in the figure.

### (3) Model Experiment

For the basic investigation of green sea phenomena, laboratory experiments on dropping water mass were carried out following after the experiments conducted by Watanabe andot hers<sup>22)</sup>. The equipments of the test are shown in Fig. 4.20. On the top of a steel tower of 10 m height, a cubic water tank of 1 ton capacity are hanged. Hinged bottom plates of the tank can support the filled water by a compressed air cylinder. When the air is released by a solenoid valve, the bottom is open and the water is falled down in a green mass.

Laying a stiffened square panel of 1.2 m x 1.2 m on the floor, the time and space distributions of the water pressure and the transient impact load on the panel were measured. These are largely effected by the volume of water, height of the tank and the opening speed of the tank bottom as shown in Fig. 4.21 and 4.22.

In Fig. 4.22 the peak of the water pressure is very high and the duration is very short. In this case the peak value of the impact load on the 1.44 m<sup>2</sup> panel exceeded 40 tons. when the bottom is opened more slowly, we can get Fig. 2.17 which is assumed similar to the actual green seas on ocean going ships.

After the experiments on transient pressure and load, we are conducting the research on the relation between the loads and the structural elements having various flexibilities and vibration characters.

## 5 CONCLUSION

This paper presents the results and the analysis on the statistical measurements of ship bending stress and the water pressure on deck due to green sea on several similar type cargo ships during the navigation in winter north pacific ocean.

It may be estimated on the wave induced longitudinal stress on upper deck that, the maximum stress which is experienced on a ship in Tokyo~New York line during her navigation for twenty years is 10 kg/mm<sup>2</sup> in compression and 6 kg/mm<sup>2</sup> in tension.

It is assured that, if the element histograms and the weighing factors of each operating condition are given on a ship, the long term stress distribution can be estimated, and that, even if the variable in the operating condition is limited only to the wave

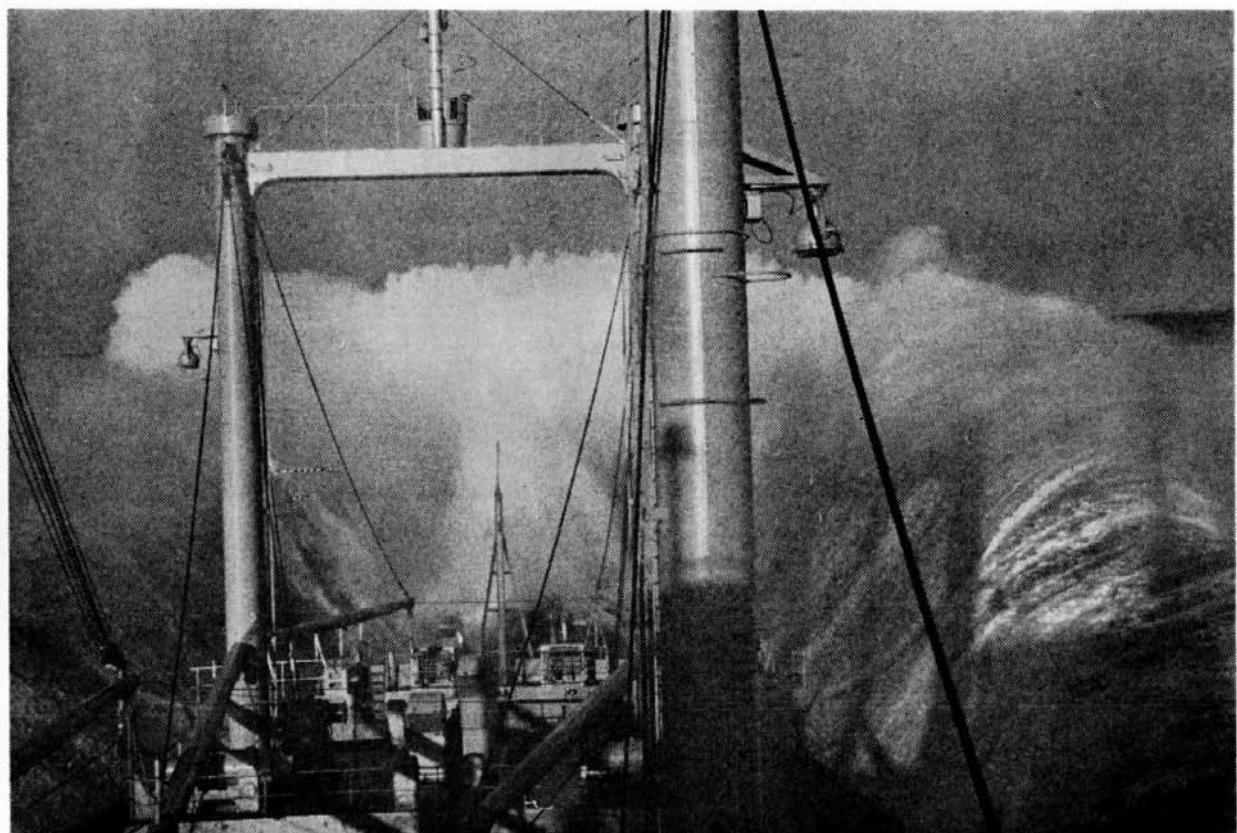
height, it can be estimated approximately.

As for the water pressure on deck due to green sea, shortness of data refrains us to derive any significant conclusion now. But some informations about the conditions of the occurrence of green sea phenomena in tested ships were obtained.

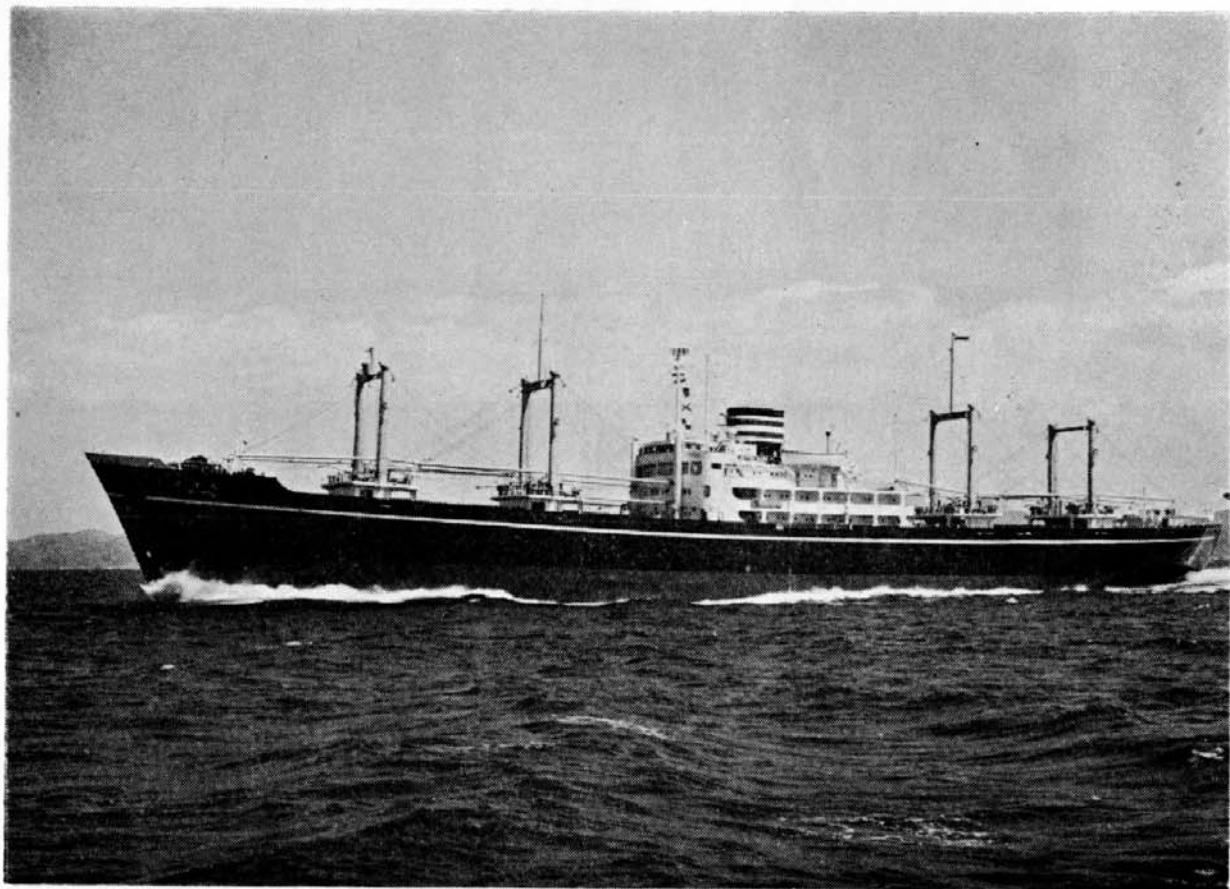
On the stresses or damages induced by the impact pressure due to green sea, the dynamical analysis of the transient phenomenon should be taken into consideration.

This project was helped by the grant-in-aid of the Ministry of Transportation and completed under the co-operation of related ship building companies, shipping companies, universities and research institutes.

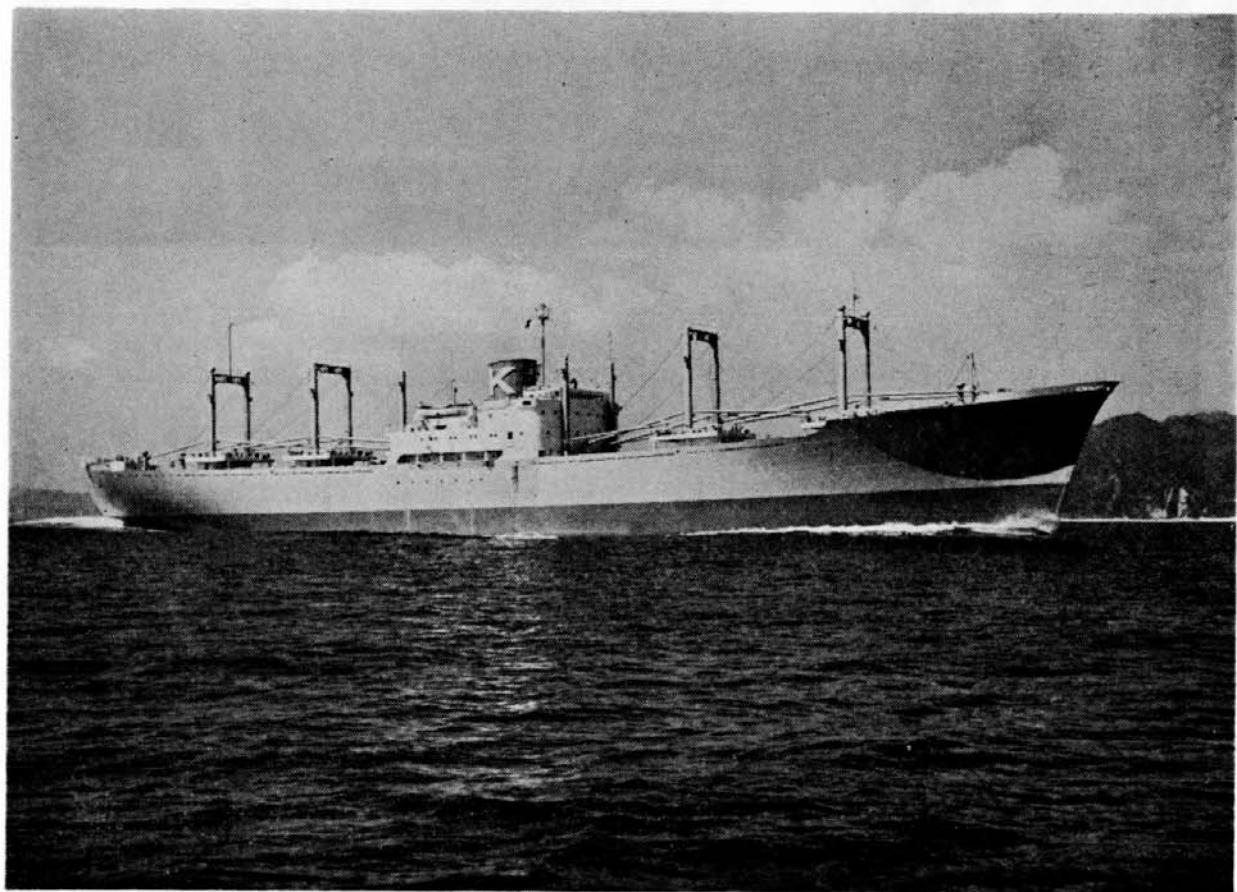
The authors wish to thank the parties concerned for their continued support.



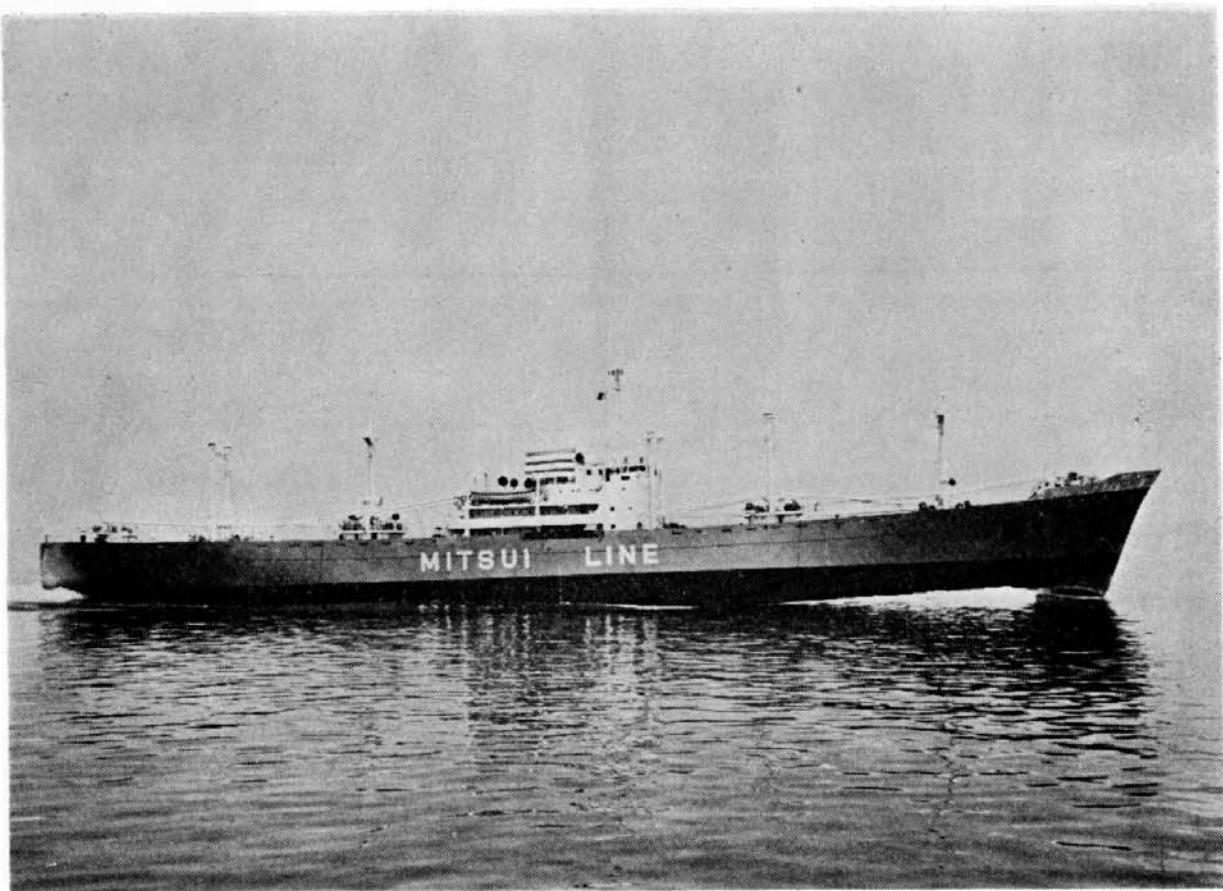
Ph. 1 Green Sea on Settsu Maru



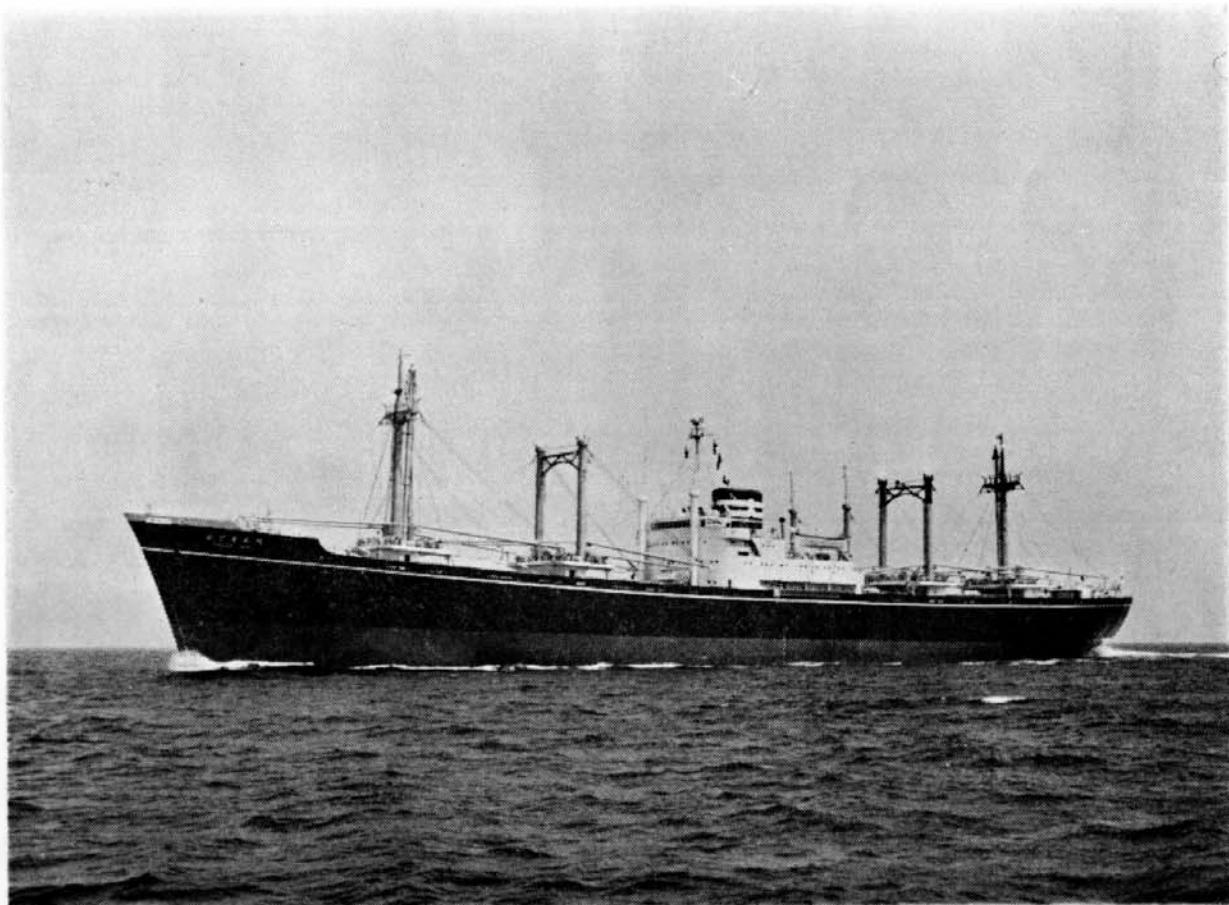
Ph. 2 Settsu Maru



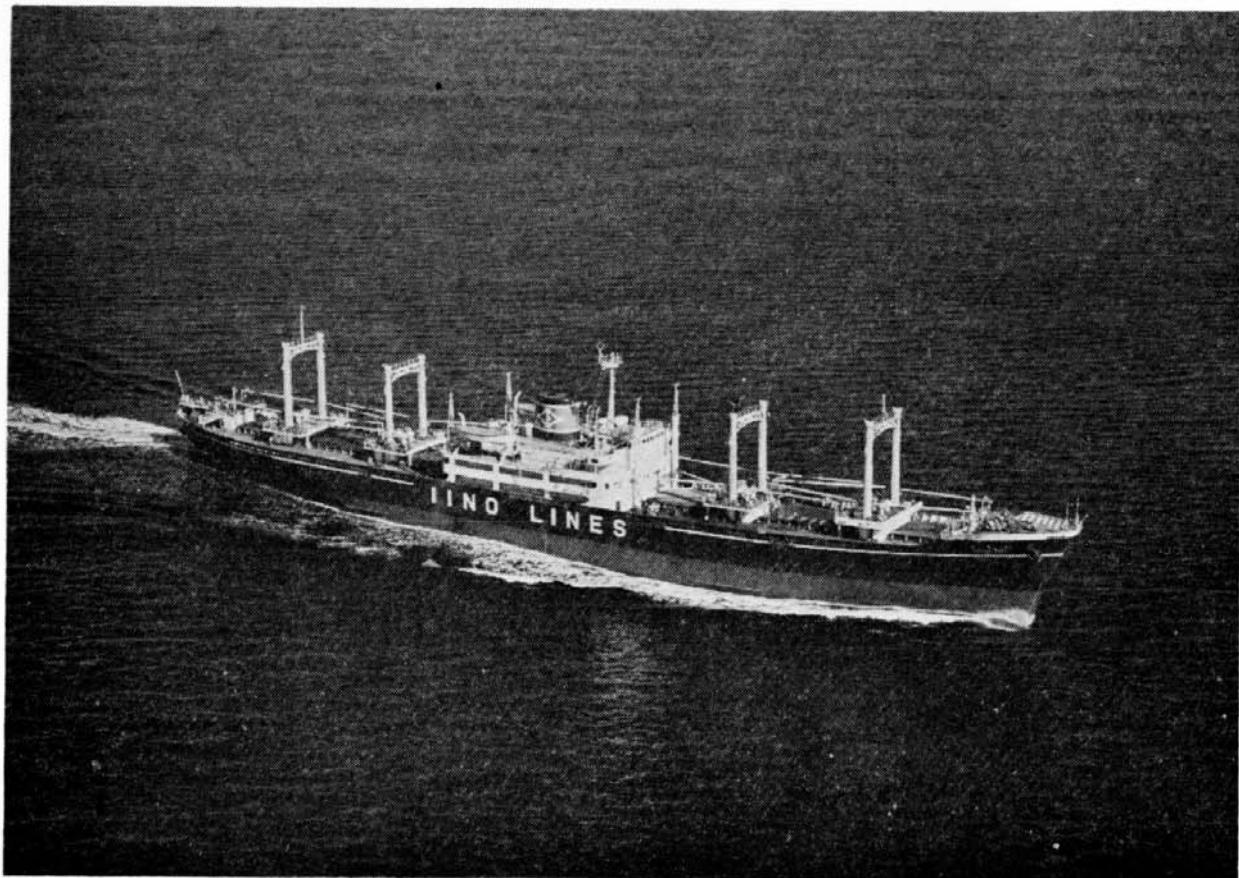
Ph. 3 Montana Maru



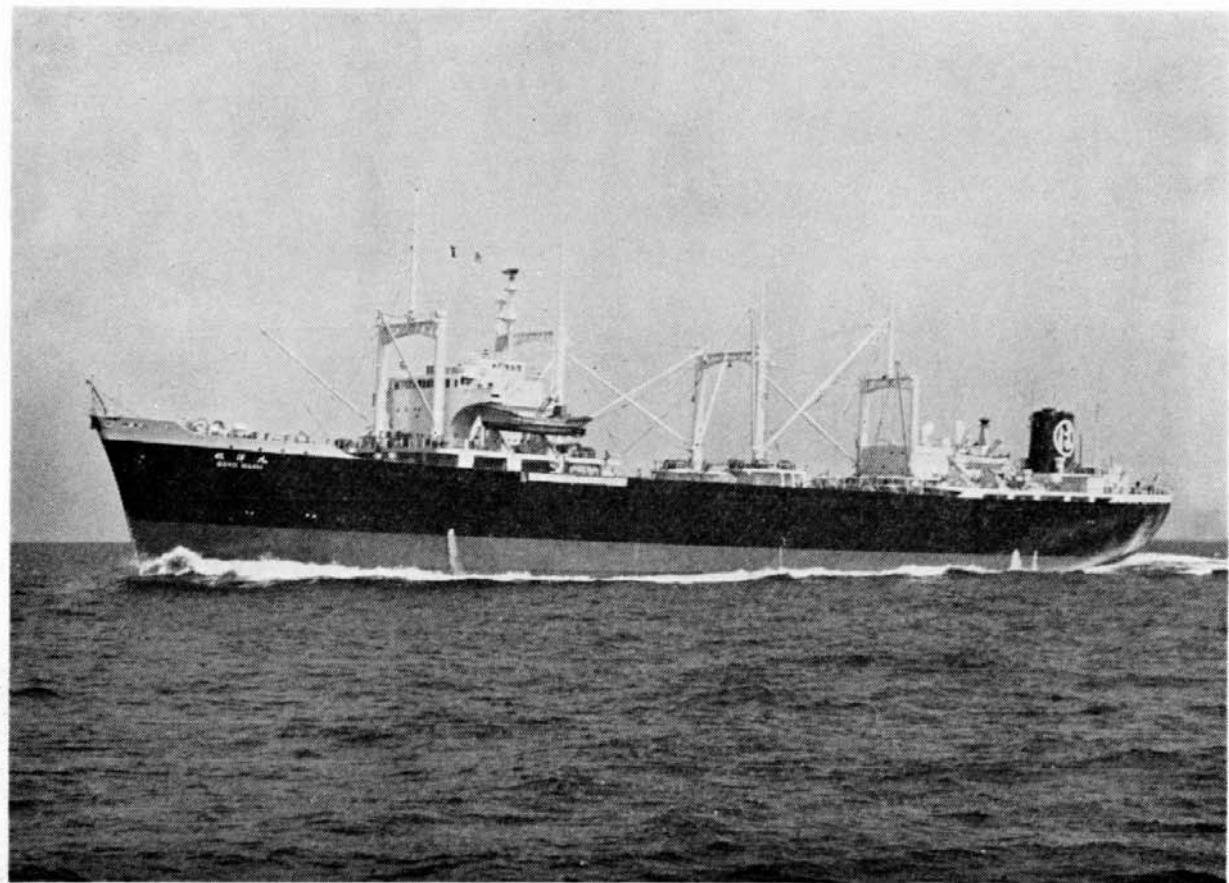
Ph. 4 Hodakasan Maru



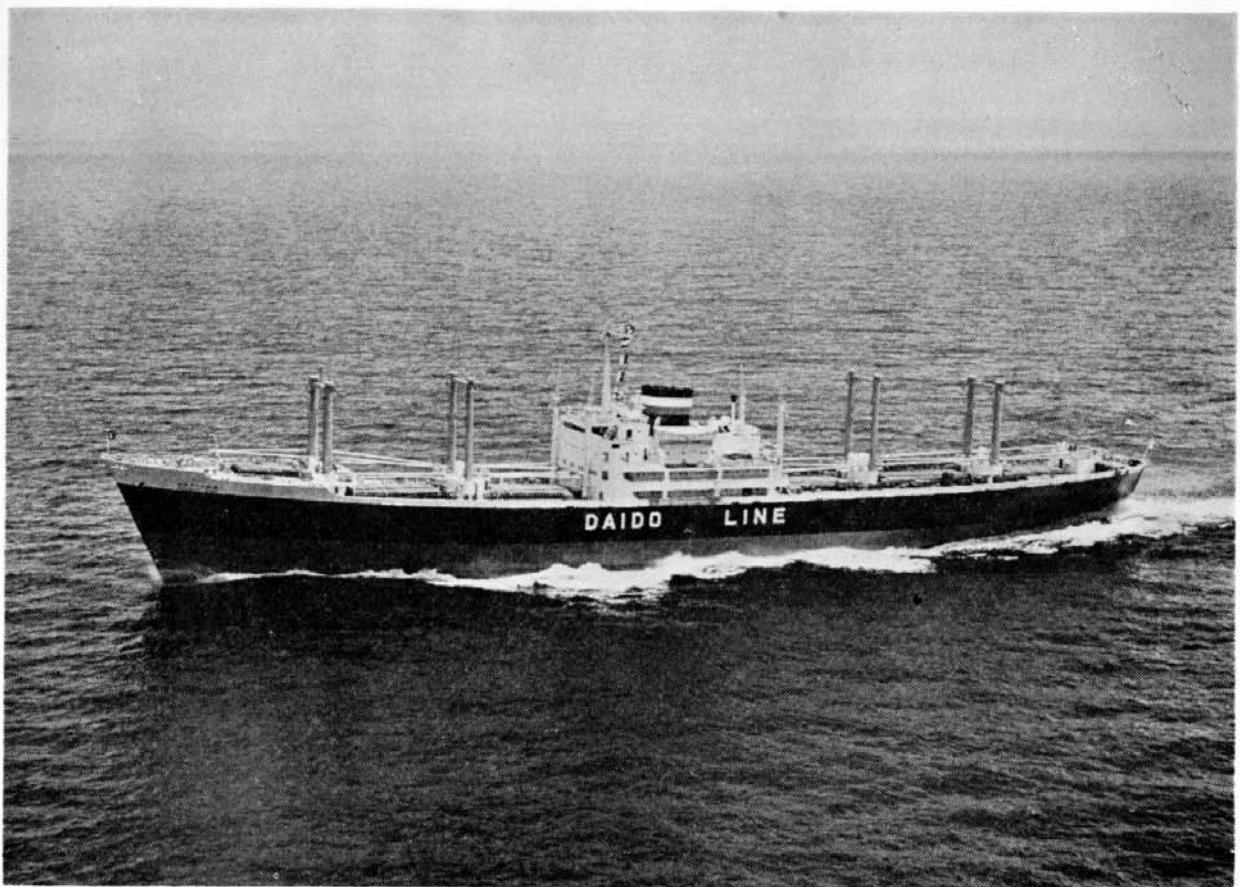
Ph. 5 Hudson Maru



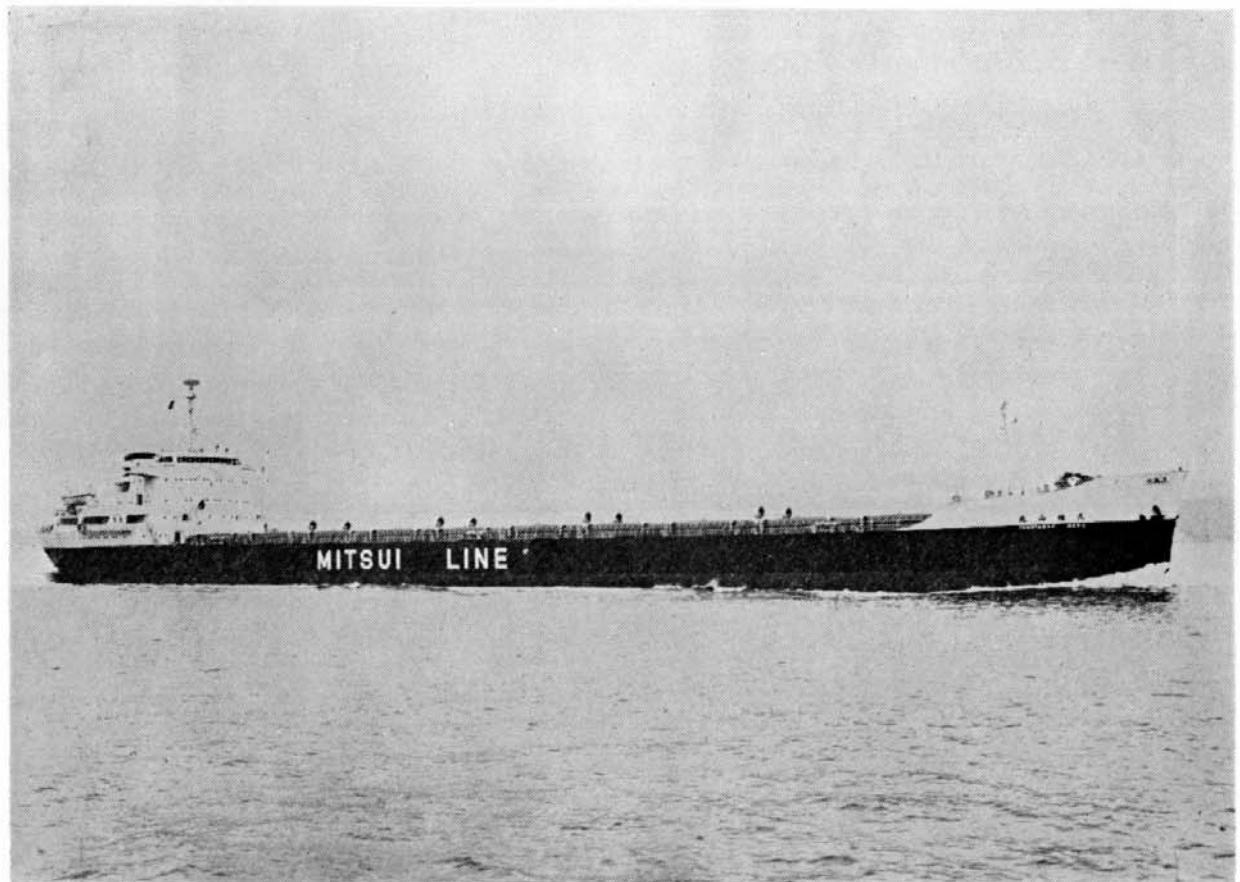
Ph. 6 Ōshima Maru



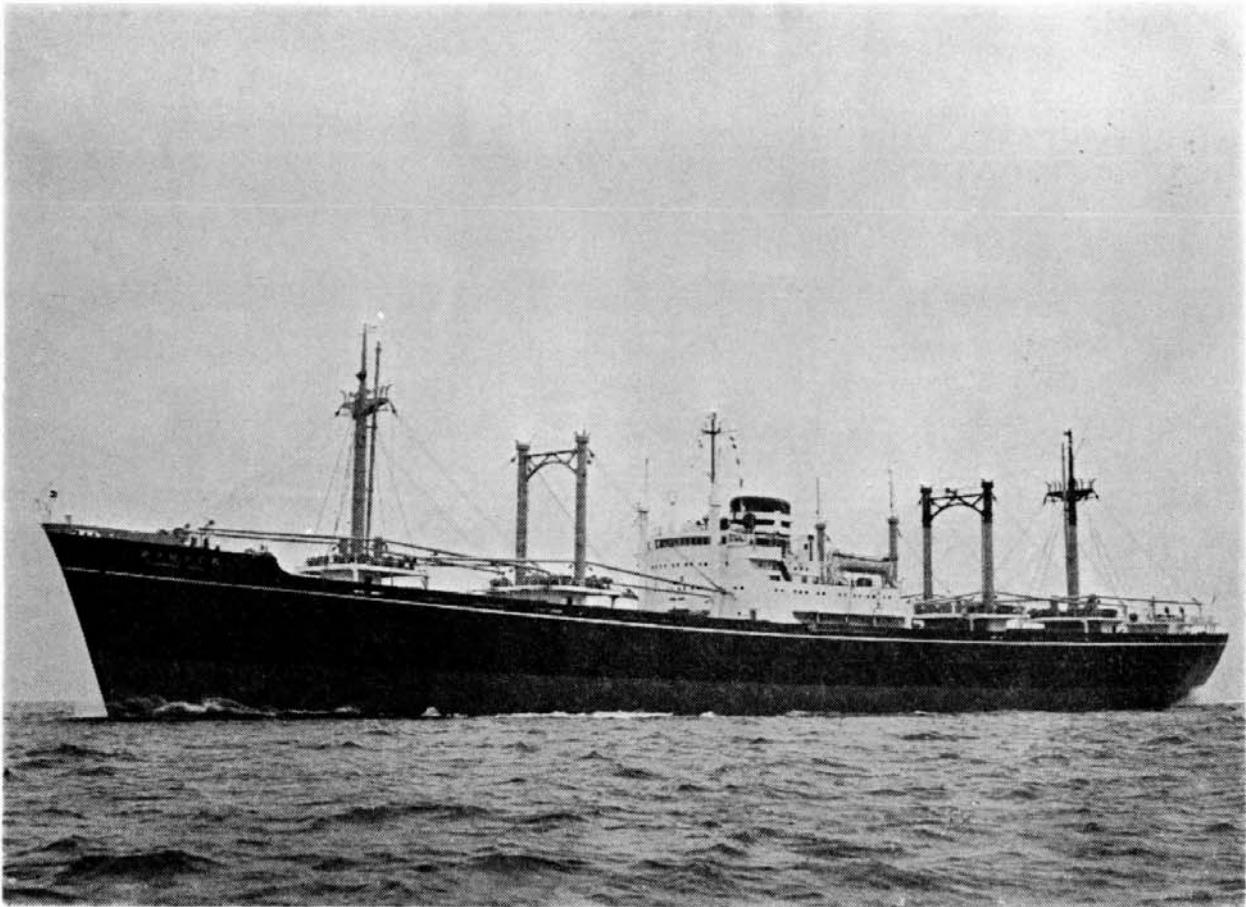
Ph. 7 Sōyō Maru



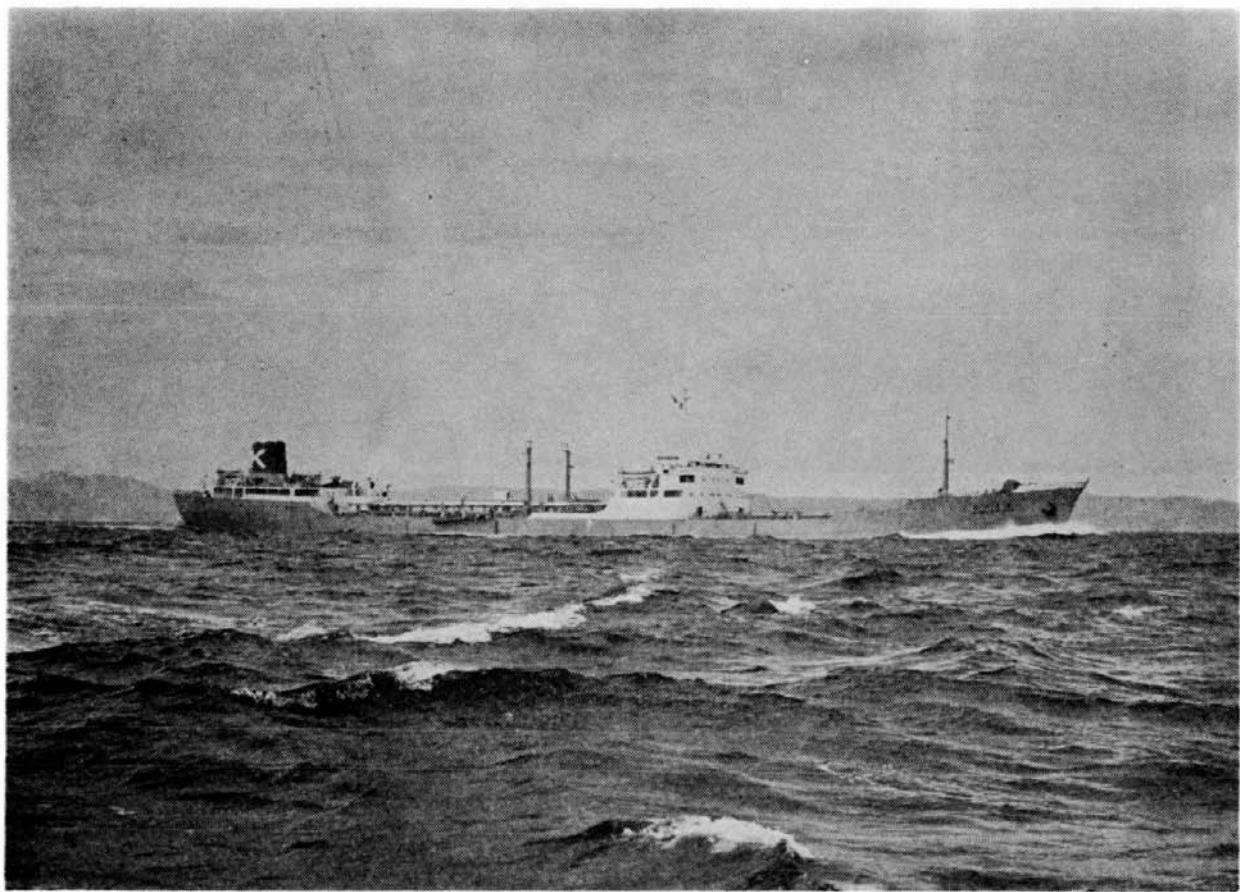
Ph. 8 Brooklyn Maru



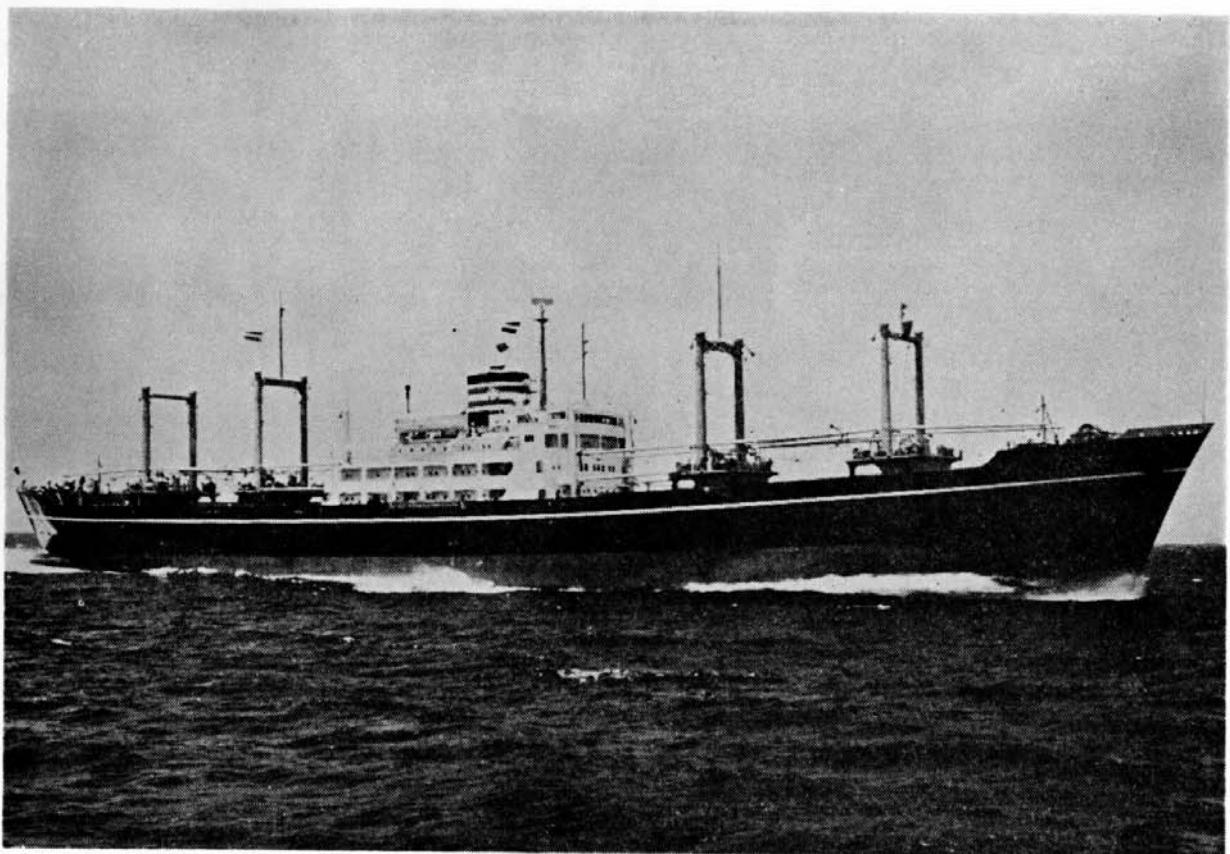
Ph. 9 Yawatasan Maru



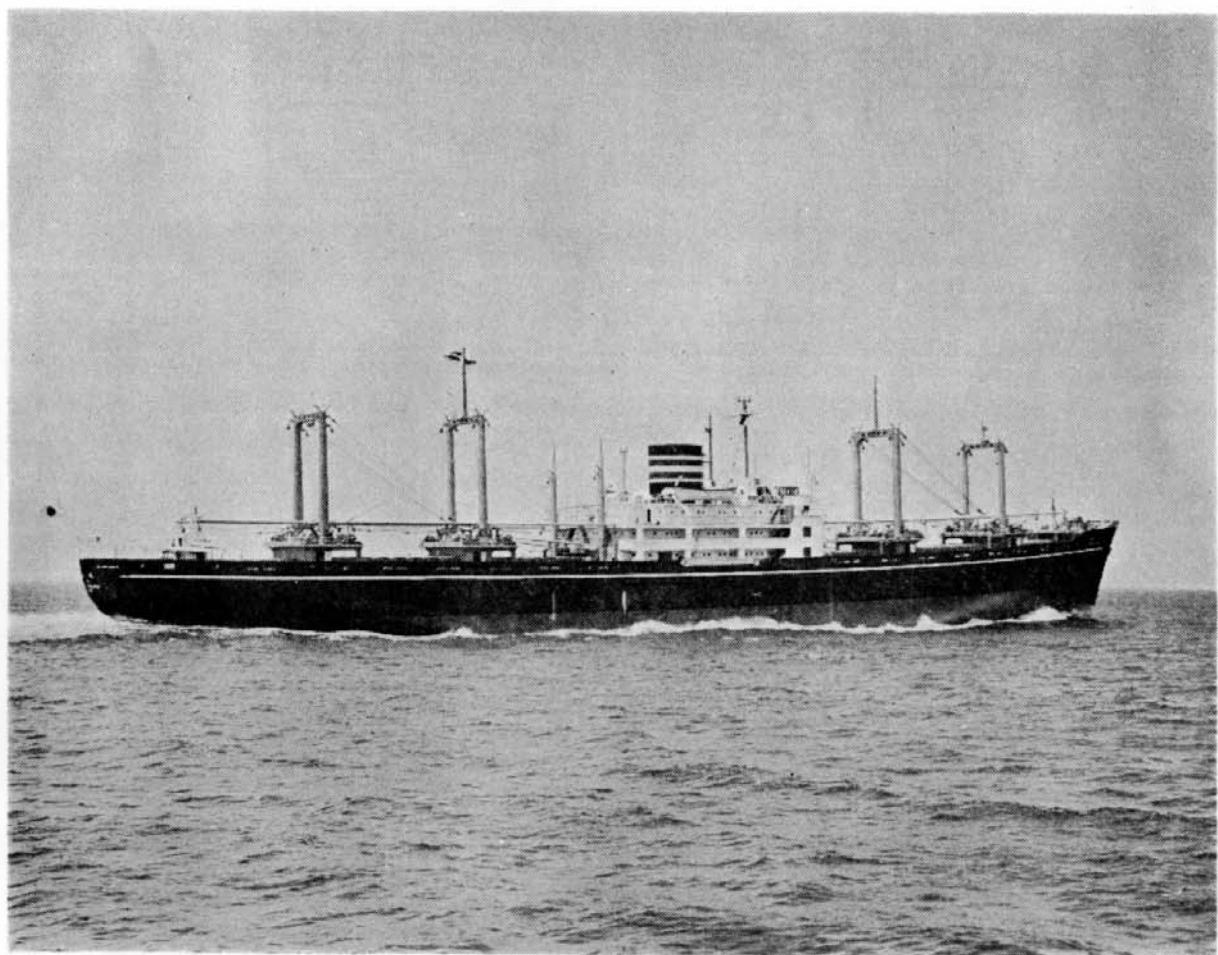
Ph. 10 Norfork Maru



Ph. 11 Shinanogawa Maru



Ph. 12 Saikyo Maru



Ph. 13 Saitama Maru

## 目 次

はしがき.....	1
1. 序 論	
1.1 研究経緯.....	3
1.2 実験概要.....	4
2. 計測装置	
2.1 応力計測.....	8
2.2 水圧計測.....	10
3. 計測方法.....	17
4. 解 析	
4.1 応力頻度.....	19
4.2 甲板水圧.....	32
5. 結 論.....	38
参考文献.....	39
研究部会資料一覧.....	40

## はしがき

波浪中を航走する船舶の船体運動および船体構造部材に生ずる応力の統計的研究は、海洋学の進歩とともに理論・実験ともに著しい発展をとげつつある。

本研究部会では、第44研究部会「実船航走時における船舶の波浪による甲板荷重の実験的研究」に引き続き波浪中の船体縦曲げ応力の長期にわたる統計的解析と、最近の高速化に伴う青波による甲板水圧の調査のために昭和35年から36年に至る2年間、12隻の供試船 (Tab. 0.1) による実船実験を行なった。

Table 0.1 List of the Experimented Ships

Ships Name	Ships Kinds	LPP (m)	D.W. (t)	Speed (kt)	Tested Term	Course	Measured Items *			
							1	2	3	
Settsu Maru	Cargo	145.0	11,182	17.8	Dec. '59-March '60	Round the World via Swez	○	○	-	
" "	"	"	"	"	Dec. '60-Feb. '61	To New York	○	○	-	
Montana	"	150.3	13,361	17.6	" "	"	○	○	-	
" "	"	"	"	"	Dec. '61-Jan. '62	"	○	○	○	
Hodakasan	"	145.1	11,184	17.2	Jan. '61-April '61	Round the World via Swez	○	○	-	
Hudson	"	145.0	12,150	17.4	Feb. '61-April '61	To New York	○	○	-	
" "	"	"	"	"	Nov. '61-Jan. '62	"	○	○	○	
Ōshima	"	145.4	12,033	17.8	Dec. '60-Feb. '61	"	○	○	-	
" "	"	"	"	"	Oct. '61-Dec. '61	"	○	○	○	
Sōyō	"	Refrig.	142.9	11,864	15.3	March '61-April '61	To Antarctic	○	○	-
" "	"	"	"	"	Dec. '61-April '62	"	○	-	○	
Brooklyn	"	Cargo	148.0	12,392	18.5	Dec. '60-Feb. '61	To Vancouver	○	○	-
" "	"	"	"	"	Dec. '61-March '62	"	-	-	○	
Yawatasan	"	Oil, Ore	176.0	27,490	16.6	Nov. '61-Jan. '62	To Vancouver	-	-	○
Norfork	"	Cargo	145.0	12,200	18.2	Dec. '61-Feb. '62	To New York	-	-	○
Shinanogawa	"	Oil	190.0	33,579	16.5	" "	To Kwait	-	-	○
Saikyo	"	Cargo	145.0	11,747	18.3	" "	To New York	○	○	○
Saitama	"	"	145.1	11,559	17.7	Nov. '61-March '62	Round the World via Swez	-	-	○

\* 1 : Stress Frequency, 2 : Freq. of Deck Wave Pressure, 3 : Max. Deck Wave Pressure

供試船12隻中3隻を除いてはいずれもほぼ同型の高速貨物船であり、これらに応力頻度計および水圧頻度計または最高水圧計を取り付け、冬期北太平洋を主とし、大西洋および南氷洋においても、上甲板中央部の応力頻度、前部上甲板の青波による水圧頻度、および青波水圧の任意期間中における最高値の実測を行なった。

得られた応力頻度については、各船の毎日24時間の応力頻度密度をその日の海象および操船条件別

に分類集約し、これを要素ヒストグラムとして図示し、長期の応力頻度分布は要素ヒストグラムの合成によって得られることを示した。本計測結果によれば、試験船と類似船型の高速貨物船に20年に1回の割合で発生する最大応力は、上甲板中央部において約  $10 \text{ kg/mm}^2$  であると推定される。

青波打込みによる甲板水圧の頻度分布は、Rayleigh 分布にはほぼ近いものが得られた。計測資料数が少ないため、最高水圧値と海象および操船条件との間に明確な関係を得るまでには至らなかったが、全実験を通じて記録された最高水圧値は  $17.5 \text{ mH}$  であった。

本研究を終るに当り、研究補助金を交付された運輸省当局、実験船としての使用を快諾され、計測者に絶大な支援協力を与えられた各船舶会社、各船の計測準備工事および計測員の長期にわたる乗船に協力された造船会社および各機関に対し厚く感謝の意を表わす次第である。

# 第1章 序論

## 1. 1 研究経緯

大洋を航走する船舶にどのような外力が働き、それによってどのような応力が生ずるかを明らかにすること、特に船体縦強度部材の応力を知ることは、船体構造の設計に是非必要なことであり、これを実船実験によって明らかにしようとして古くから種々の試みがなされてきた。特に第2次大戦後、計測機器および統計学の発達に伴い、この種の実験が諸外国で系統的に行なわれるようになり、これから長期間の応力頻度を求めて、統計的にその船舶の全生涯中の応力頻度分布や遭遇する最大応力などを推定して、その類似船について最も合理的な船体構造の設計を行なえるよう努力が重ねられている。

最近諸外国のこの種縦強度に関する実船試験研究を概観してみる<sup>1)</sup>。米国においては、第2次大戦中に起った多数の損傷事故にかんがみて、艦艇の実船試験が数多く行なわれている。すなわち、N.H.Jasper などによって Tailor Model Basin が1951年沿岸警備艦で実験を行なったのに引続いて、T2型油送船、航空母艦および駆逐艦などについて行なわれている<sup>2~9)</sup>。計測には主として抵抗線ひずみゲージを應用したものや、機械的な応力頻度計などが用いられ、その他の縦揺れ、横揺れおよび波高の計測なども行なわれている。スウェーデンにおいても、Swedish Shipbuilding Research Foundation の手で1956年貨物船 CANADA 号の実験が行なわれて以来<sup>10~12)</sup>、鉱石運搬船および油送船などについても実船計測が行なわれている。

わが国においても、合理的な設計を行なう基礎資料をうる目的で早くから実船計測が計画実施されているが、主なものをあげてみると、日本造船研究協会第10研究部会の北斗丸による1954年の実験<sup>13)</sup>、第24研究部会の銀河丸による1955年の実験<sup>14)</sup>などがある。統計的計測としては穗高山丸による応力頻度計測<sup>15)</sup>が1957~59年の間に行なわれ、ついで第44研究部会によって摂津丸による世界一周航路での応力頻度計測<sup>16), 17)</sup>が1959~60年の間に行なわれている。これらの研究によって統計的計測用計器の開発が行なわれ、ある程度の統計資料も得られたが、さらに数多くの船についての資料の集積が要望されていた。

また、最近船舶の高速化に伴い、船首樓甲板または No. 1 ハッチ附近の船首部上甲板に、また場合によっては船尾上甲板あるいは船尾樓甲板に青波を受けて凹損を生ずる事故がしばしばみられるようになった。この青波衝撃に対する甲板の強度に関する研究はこれまでなされているが、どのような海象のとき、また船がどのような状態のときにどのくらいの青波が打ち込むかという問題については規則波中の一部の模型実験があるだけで、実船実験は前述の第44研究部会の摂津丸の例以外には諸外国においてもまだ行なっていないようである。この青波の衝撃荷重については、これによって損傷を受けたその凹損状況から、その当時の青波の衝撃荷重を逆算した水頭値や、乗組員の目視による報告が手がかりとなるだけで、今後の設計の基礎資料とするには不十分なものといわざるを得ない。それゆえ、実船実験で青波の打ち込み時の衝撃的外力を計測してその実態を知ることは、船体構造の設計上非常に有意義なことである。

以上の状勢のもとで、昭和35年本研究協会内に第49研究部会が設置され、35、36年度の運輸省科学技術試験研究補助金の交付を受け、関係官庁、大学、船会社、造船所等の協力をえて、35年4月から37年始めてわたり大がかりで系統的な「高速船の波浪中の応力頻度ならびに甲板荷重の実験的研究」が行なわれた。なお甲板荷重の計測は37年も引きつづき行なわれた。

## 1. 2 実験概要

### 1.2.1 実験船

昭和35年度には7隻の船が実験船として当てられ、それぞれ船会社および造船所の計測員が乗船して、応力頻度および青波水圧の計測が行なわれた。

36年度にはさらに多数の青波水圧の資料をうるために実験船は10隻にふやされ、このうち4隻の船については、35年度と同様に計測員が乗船して応力頻度および青波水圧の計測が行なわれたが、他の6隻には水圧計のみを取りつけ専任計測員は乗船せず、すべて乗組員によって計測された。

以上35年度と36年度でのべ17隻（このうち同一の船で両年度にわたって使用したものもあるので実際は12隻）（図解 Ph. 2～13 参照）について実験が行なわれた。これらの船の航路、要目、計測事項および期間等は Tab. 1.1 に示すとおりである。この12隻の実験船のうち、壮洋丸（冷凍船）、八幡山丸（鉱石兼油送船）および信濃川丸（油送船）を除く他の9隻はすべて貨物船であり、その主要寸法も大体同じである。また航路も大部分の船はニューヨーク航路である。一例としてモンタナ丸の36年度実験時の航路を Fig. 1.1 に示す。

### 1.2.2 計測概要

#### a) 応力頻度の計測

船体縦曲げ応力の標準値として船体中央部付近上甲板の応力頻度を測定した。すなわち、中央部の上甲板裏側（大部分の船は CO<sub>2</sub> room 内）にピックアップを取りつけ、同箇所付近または測定室に応力頻度指示器が取りつけられた。この計測は Tab. 1.1 に示すように、35年度では7隻、36年度では4隻ののべ11隻の船について行なわれた。

なお、一部の船では応力頻度計のピックアップ近傍に抵抗線型ひずみゲージが取りつけられ、オシログラフによる縦応力の連続記録がとられた。

#### b) 青波水圧の計測

甲板上に打ち込む青波の衝撃水圧を計測するため、水圧頻度計または最高水圧計が取りつけられた。これらの取りつけ位置は船によって若干相違するが、これまでの青波による損傷事故例や乗組員の意見等も参考として、No. 1 ハッチサイド付近に重点的に配置された。ただ、モンタナ丸、壮洋丸および信濃川丸では船首樓甲板にも取りつけられた。なお、Tab. 1.2 に実験船に搭載された水圧計の一覧表を示した。

簡易水圧頻度計は、35年度の実験では一部漏水等の不備な点があったが、36年度には改良され作動も良好で引き続き37年度も使用した。

最高水圧計は36年度から取りつけられ、各荒天ごとの青波の最大水圧が計測された。また、一部の船では数個の衝撃波水圧計を取りつけ、青波打ち込み時の水圧がオシログラフで連続的に記録された。Fig. 1.2 にこれら計器の配置の一例としてハドソン丸のものを示した。

Tab. 1.1 Ships used for Experiments

Ship Name	Seittu Maru	Montana Maru	Hodakasan Maru	Hudson Maru	Ōshima Maru	Sōyō Maru	Brooklyn Maru	Yawatasan Maru	Norfork Maru	Shinano-gawa Maru	Saikyo Maru	Saitama Maru
Owner	Nippon Yusen Kaisha	Kawasaki Kisen Kaisha	Mitsui Steam Ship Co. Ltd.	Ōsaka Shōsen Kaisha	Iino Lines Ltd.	Taiyo Fishery Ltd.		Mitsui Steam Ship Co. Ltd.	Ōsaka Shōsen Kaisha	Kawasaki Kisen Kaisha	Nihon Yusen Kaisha	
Route	Japan~New York	Japan~New York	Round the World	Japan~New York	Japan~Antarctic	Japan~New York	Japan~New York	Japan~Vancouver	Japan~New York	Japan~Kwait	Japan~New York	
Members who boarded ship	T. Hirota K. Kuwano M. Harada	T. Sugiyama Y. Sugimura N. Nemoto	H. Aya K. Kano S. Mishima A. Takeuchi	O. Tada G. Wataya S. Mihara								
1960 Items Measured	Date	1960.12.3 ~1961.2.5	1960.12.3 ~1961.2.2	1961.1.2 ~1961.4.19	1961.2.8 ~1961.4.9	1960.12.2 ~1961.2.17	1961.3.2 ~1961.4.10	1960.12.4 ~1961.2.12				
1961 Winter	Members who boarded Ship	Y. Sakai		H. Marutani S. Sioda	T. Naoi							
1961 Items Measured	Date	1961.12.3 ~1962.1.31		Stress Freq. & Deck Wave Press.	Stress Freq. & Deck Wave Press.		Deck wave Pressure		Stress Freq. & Deck Wave Press.	Deck wave Pressure	Stress Freq. & Deck Wave Press.	Deck Wave Press.
1962 Winter				1961.11.10 ~1962.1.12	1961.10.18 ~1961.12.27	1961.12.31 ~1962.4	1961.11.5 ~1962.1.10	1961.12.2 ~1962.2.29	1961.12.24 ~1962.2.16	1961.12.3 ~1962.2.16	1961.11.19 ~1962.3.6	
Measurement was conducted by crews												
Ship Type	Cargo Ship				Cold Storage Ship	OreCarrier	Cargo Ship and/or Oil Tanker	Cargo Ship Oil Tanker	Cargo Ship			
L <sub>PP</sub> (m)	145.00	150.30	145.08	145.00	145.38	142.90	148.00	145.00	190.00	145.00	145.00	145.08
Bmld (m)	19.54	20.50	19.60	19.40	19.50	20.70	20.50	19.40	26.30	19.50	19.50	19.50
Dmld (m)	12.30	12.90	12.50	12.50	12.32	13.30	12.50	13.20	14.00	12.30	12.30	12.30
d (m)	8.825	9.404	8.52	9.18	9.19	8.80	9.27	9.77	9.18	10.70	9.00	9.02
C <sub>b</sub>	0.669	0.652	0.672	0.672	0.670	0.749	0.637	0.795	0.672	0.7837	0.673	0.669
D.W.	(t)	11.182	13.361	11.184	12.151	12.033	11.864	12.392	12.200	33.600	11.750	11.560
G.T.	(t)	9.556	10.104	9.634	9.254	11.193	9.550	17.107	9.295	20.540	9.958	9.385
N.T.	(t)	5.477	5.827	5.868	5.501	5.450	6.361	5.508	5.531	11.741	5.457	5.288
Principal Max. Dimensions	(kt)	20.7	20.9	20.5	20.8	20.5	17.8	21.69	17.4	21.01	17.5	20.69
Service Speed (kt)		17.8	17.6	18.4	17.4	17.8	15.3	18.5	16.6	18.2	16.5	17.7
Main Engine	Mitsubishi Nagasaki 9UEC 12,000BHP	Kawasaki MAN K9Z 78/140C 11,500BHP	Mitsui B&W 974VTF 160 12,000BHP	Kōbe 9RD-76 12,000BHP	Iino Sulzer 9RD-76 12,000BHP	Uruga Sulzer 7R-SAT-76 9,100BHP	Mitsubishi Nagasaki 9UEC 13,000BHP	Mitsubishi B&W DE684VT2 13,000BHP	Mitsubishi Kōbe 6RD-90 12,600BHP	Kawasaki K12Z 78/140C 15,000BHP	Mitsubishi Nagasaki 9UEC 13,000BHP	Mitsubishi Kōbe 12,000BHP

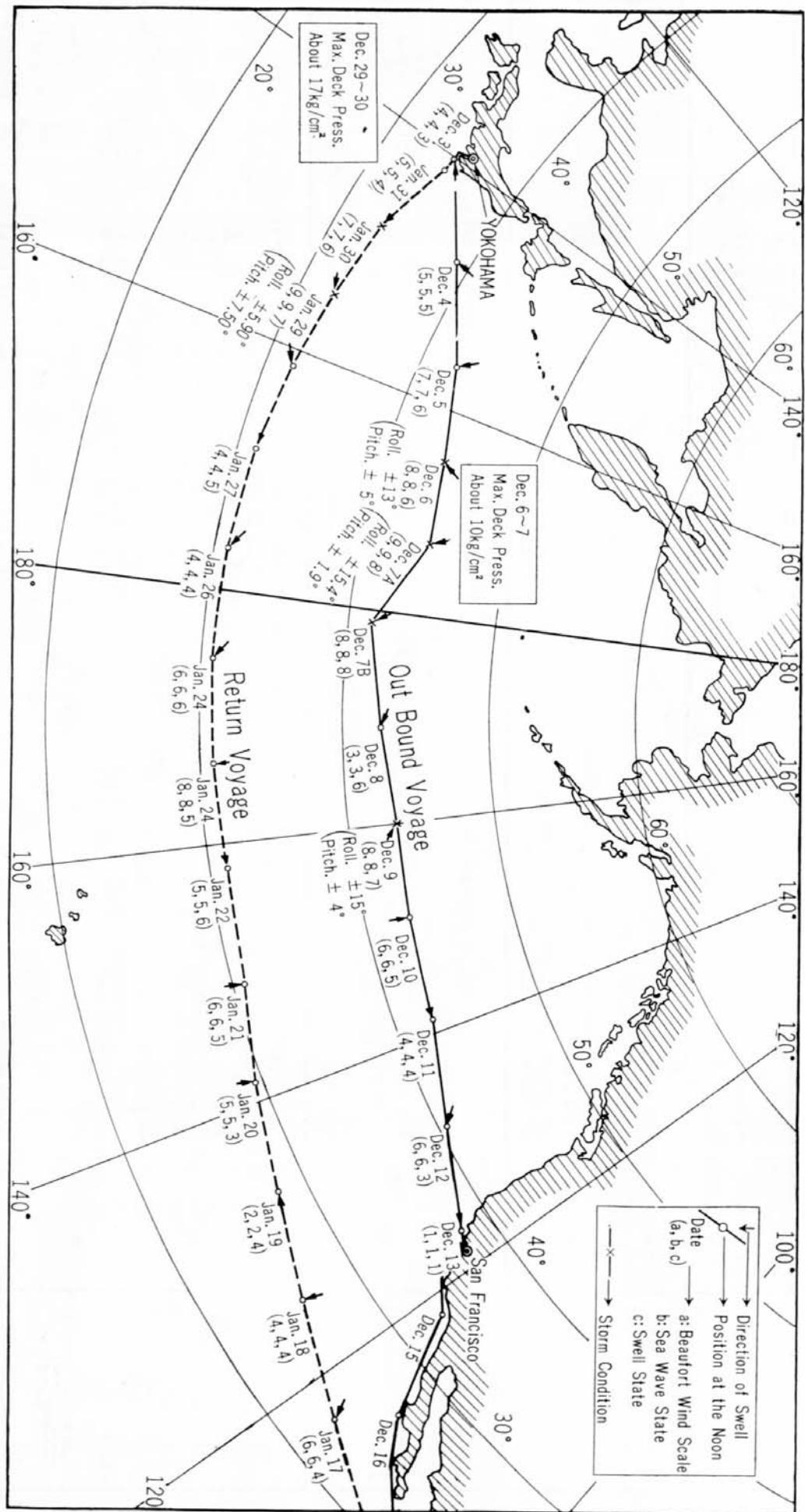


Fig. 1.1 Route of Montana Maru in 1961-1962

Tab. 1.2 Number of Equipped Measuring Apparatus

	Ship's Name		Stress Frequency Counter	Water Press. Freq. Counter	Portable Water Press. Freq. Counter	Maximum Water Press. Gauge
1960 ~ 1961 Winter	Settu	Maru	1	1	1	
	Montana	Maru	1		2	
	Hodakasan	Maru	1		1	
	Hudson	Maru	1		1	
	Ōshima	Maru	1		1	
	Sōyō	Maru	1		2	
	Brooklyn	Maru	1		1	
1961 ~ 1962 Winter	Montana	Maru	1		2	1
	Hudson	Maru	1		1	1
	Ōshima	Maru	1		1	1
	Sōyō	Maru				1
	Brooklyn	Maru				1
	Yawatasan	Maru				2
	Norfork	Maru				1
	Shinanogawa	Maru				1
	Saikyo	Maru				1
	Saitama	Maru				1

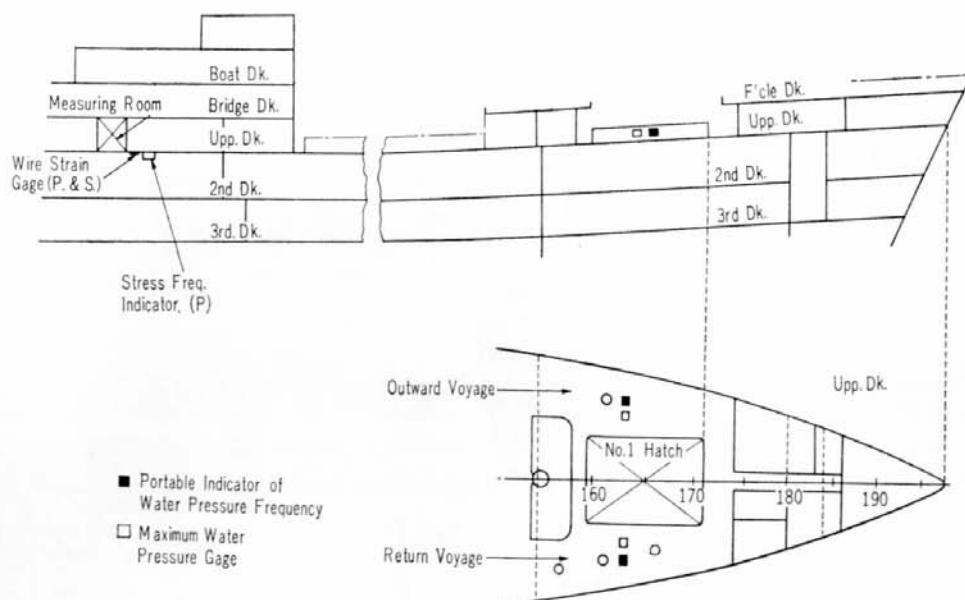


Fig. 1.2 Arrangement of Measuring Apparatus on Hudson Maru

## c) 気象、海象、本船の状態等の計測および記録

縦応力や青波の打ち込みは、気象、海象および操船状態と非常に密接な関係があるので、これらはログブックの型式にならって計測記録された。

## 第2章 計測装置

### 2.1 応力計測

#### 2.1.1 動的計測

応力の動的計測は計測箇所に抵抗線ひずみゲージを貼布し、市販の6素子動的ひずみ計測器および電磁オシログラフで記録を行なった。この方法は広く実用に供されているので特別な説明は省略する。

#### 2.1.2 応力頻度計

船体応力頻度計の具備すべき条件としては次の事項が考えられる。

- a) 長期間の連続使用が可能であること。
- b) 計器の零点移動ができるだけ少ないこと。
- c) 操作が容易でほとんど調整の必要なないこと。
- d) 頻度記録が自動的に行なえること。
- e) 遠隔操作が可能であること。

試作した頻度計は、以上の見地から半機械的な方式を採用したもので、その外観を Fig. 2.1 に示すが、次の3主要部分からなりたっている。

- 1) 発信部
  - 2) マイクロヘッド部
  - 3) 計数部
- (i) 発信部

発信部においては標点間のひずみがダイヤルゲージの指針の回転に伝えられ、指針がセグメント上を摺動する。指針の1回転は 0.5 mm の変位に相当し、セグメントは円周上を40等分されているから1セグメントは0.0125mmの変位に相当する。

そこで標点距離:  $L$ , 伸び:  $\Delta L$ , ヤング率:  $E$  とすれば応力  $\sigma$  は

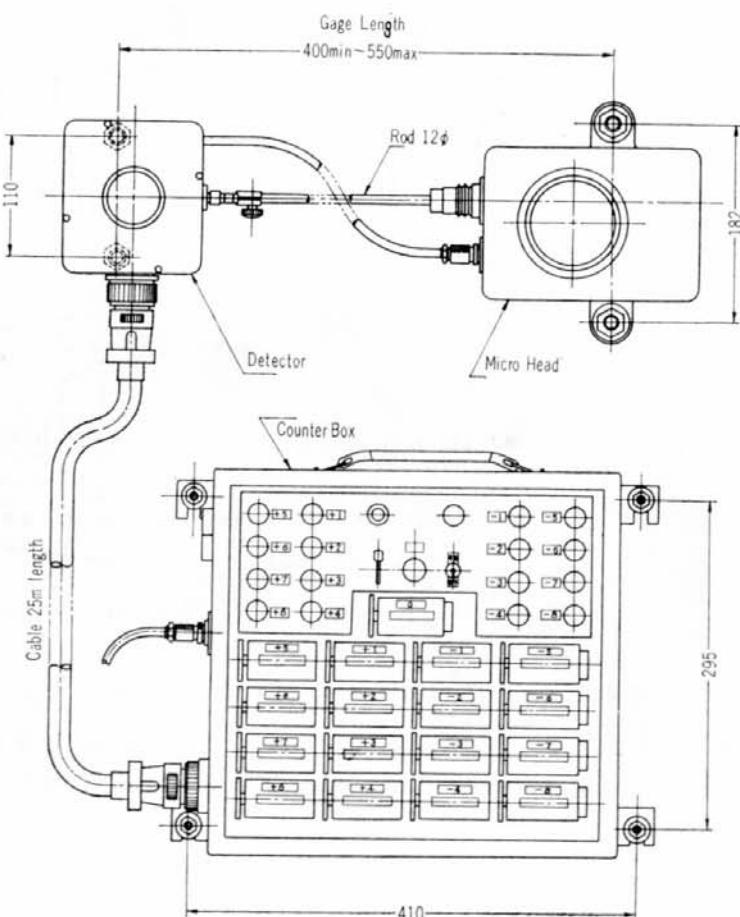


Fig. 2.1 Stress Frequency Counter

$$\sigma = \frac{4L \cdot E}{L}$$

で求められる。たとえば、1セグメントが応力  $0.5 \text{ kg/mm}^2$  に相当し、ヤング係数が  $2 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$  であるとして所要の標点距離  $L$  を求めるとき

$$L = \frac{4L \cdot E}{\sigma} = \frac{125 \times 10^{-4} \times 2 \times 10^4}{0.5} = 500 \text{ mm}$$

となる。このように本頻度計のひずみ感度は標点距離を変えることによって調整することができる。

発信部と計数部は導線で接続され、指針があるセグメントに触ると電流が流れリースイッチによってその対応する段階の度数計が動作する。40箇のセグメントと17箇のリレーとの接続は、測定応力値を勘案して任意に選択することが可能である。これは頻度分布を精度よく測定するには、低い応力段階を比較的細かく測定することが必要で、リレーの配分を必ずしも等間隔にすることが有利でないことによる。

#### (ii) マイクロヘッド部

マイクロヘッド部はマイクロメータを内蔵し、コンデンサーモータによりマイクロスクリューを回転し指針の零微調整を行なう。

またモータにより指針を順次摺動し、回路の点検を遠隔操作で行なうこともできる。発振部とマイクロヘッド部を  $\text{CO}_2$  room 天井（上甲板）に取り付けた状態を Fig. 2.2 に示す。

#### (iii) 計数部

計数部は、各セグメントを指針が通過した回数を、それぞれ対応する電磁式度数計で指示するものである。度数計の感動電流は比較的大きく約  $80 \text{ mA}$  であるから、セグメントには直接この電流を流さず、感動電流  $5 \text{ mA}$  程度のマイクロリレーを挿入して接点を保護し、かつ、コイルに蓄電器を並列に接続して 0.5 秒程度の自己保持を行ない誤動作を防いでいる。

度数計は零 1 個、正負各 8 個、計 17 個設け、40 箇のセグメント中どれをこれらに対応させるかは任意に選定できるようになっている。 $\text{CO}_2$  room 側壁に取り付けた計数部を Fig. 2.3 に示す。

#### (iv) 頻度計数方式

この型の頻度計は、零からの引張応力および圧縮圧力があらかじめ定めた各帯域を通過する回数を Fig. 2.4 のように計数するもので、帯域通過数から応力頻度を求めるには次の計算を必要とする。

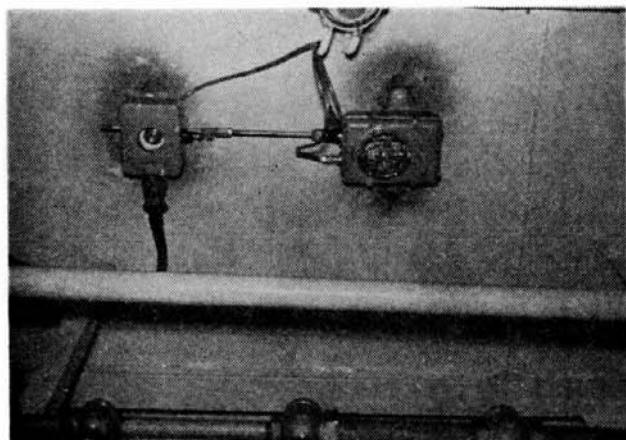


Fig. 2.2 Detector and Micro Head

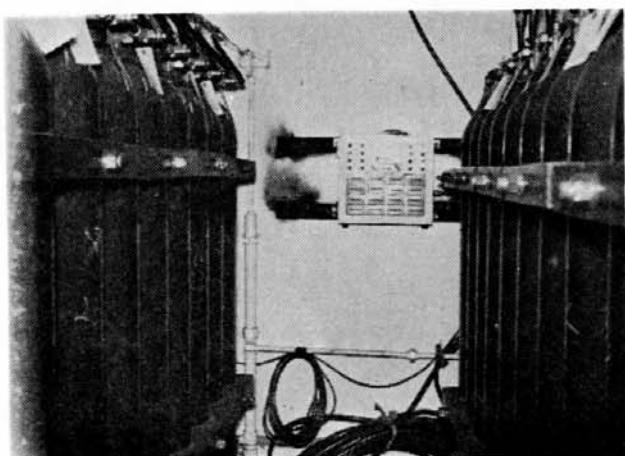


Fig. 2.3 Counter Box

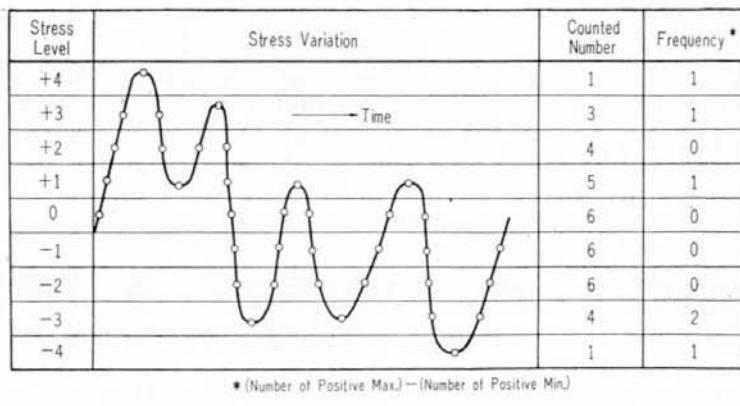


Fig. 2.4 Counting Method of Stress Frequency Counter

各度数計が示す帯域通過数をそれぞれ  $N_0, \dots, N_x, \dots, N_i$  とする。ただし  $N_0$  は 0 帯域、  $N_i$  は最大応力値の帯域通過数とする。同様に応力頻度数を  $M_0, \dots, M_x, \dots, M_i$  とする。

いま応力が正の極小値や負の極大値をもたない普通に多く見られる場合には、各帯域における応力の極大値の数は、最大帯域では

$$N_i = M_i$$

$N_i$  より低い応力帯域では応力頻度数は

$$M_x = N_x - 2N_{x+1} + 2N_{x+2} - 2N_{x+3} \dots + (-1)^{(i-x)} \cdot 2N_i$$

で求められる。

応力に正の極小値や負の極大値が表われる場合は実際にまれであるが、この場合はいわゆる Longuet Higgins<sup>18)</sup> などのいう広帯域スペクトルの場合で、このときには、上記の  $M_x$  はある帯域中の応力の正の極大値と正の極小値の頻度の差を与えることになり、正負の両方から上記の計算を行なっていくと中央（零帯域）付近で合わなくなってくる。しかし、零帯域付近以外では、本計測による応力頻度は諸外国で行なわれている引張一圧縮の全振幅をとる場合の頻度と同じ傾向を示すことが明らかである<sup>15)</sup>。

## 2. 2 水圧計測

### 2.2.1 精密水圧頻度計

本器は航行中船舶の青波および、白波水圧の最高値を計測する目的で作られたものであり、最高水圧頻度数を自動的に電磁カウンタに記録を行なうものである。

Fig. 2.5 は水圧頻度計のブロックダイアグラムで、ピックアップ部分だけ甲板上に取りつけられ、ほかはすべて計測室内に置かれている。ピックアップには受圧膜に抵抗線ひずみゲージを貼付した水圧計を用い、Amp. は増幅器であり、Disc. は位相検波器であり、

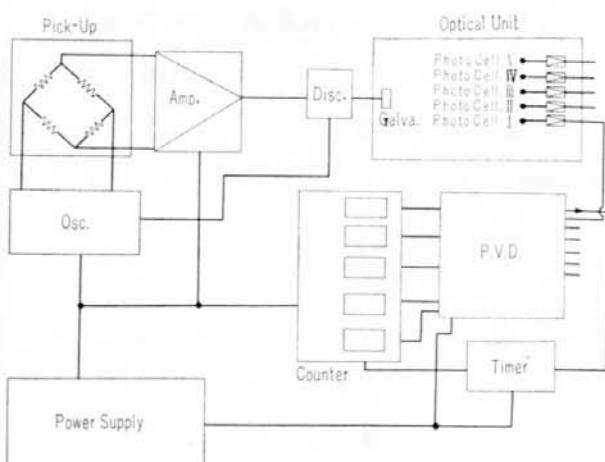


Fig. 2.5 Electronic Frequency Counter of Water Pressure

この出力がガルバノメータを振らす。Osc. はプリッジソース用の CR 型発振器である。上甲板上に取り付けた精密水圧頻度計ピックアップを Fig. 2.6 に示す。図は頻度計測用と連続記録用の二つのピックアップを並べたところで、上方のカバーされた部分はジャンクションボックスで導線はここから船内に引込まれている。

本装置のオプチカルユニットは、電磁オシログラフと同様の光学系を用いたスライサーであり、光エネルギーを電気エネルギーに変換する。スライス位置は光電池 Ph. C. を機械的に移動することにより調節可能で、他のいかなるスライサーよりも安定である。外気温度の影響を避けるため、本器のケース内面に断熱アスペストをはり、電熱器およびサーモスタットによって、常に  $45^{\circ}\text{C}$  の温度を保つようにしている。

PVD は尖頭値検出器であり、各スライサーからの出力を受け、この幅の最高値のみを記憶し、タイマの指示によりこの最高レベルのカウンタを動作させる。本回路はサイラトロンおよびミゼットリレーで構成されている。

### 2.2.2 簡易水圧頻度計

簡易水圧頻度計は波浪中を航走する船舶の甲板に打ち込む青波の衝撃圧力の頻度を計測する目的で製作されたものである。その特徴は取扱いが容易でだれでも計測できること、船体への取付けも簡単で着脱や位置変更などが容易であること、甲板上に計測用電線などを敷設する必要のないことなどである。

ピックアップ（受圧部）にはベローズを用い、あらかじめセットした所定値の水圧を受けると、ベローズのたわみによってリレー回路が閉じ、電磁式度数計が作動する。

本器の主要目は次のとおりである。

- a) 測定圧力 : 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 kg/cm<sup>2</sup> (1, 2, 4, 8, 12, 16 mH) の 6 段階
- b) 衝撃感度 : 最小  $2.5\text{ms}$  ( $1/\text{400 sec}$ )。ただし、リレースイッチおよび度数計の機械的部分の復旧に時間を要するので、波状に繰返されるパルスに対する分解能は最小  $20\text{ c/s}$  程度である。
- c) 測定圧力方向 : 垂直分力 (計器は水平位置に設置する)
- d) 電源 : 乾電池, 45V 自藏

昭和35年度に使用した簡易水圧頻度計の外観を Fig. 2.7 に示すが、本器のうち計器本体内へ浸水事故を生じたものがあり、また自重が重く1人では持ち運べない等の欠点があったため、昭和36年度計測に当っては、完璧な水密の保持と重量の軽減とに主眼をおいて外殻および本体内の配置を根本的に改め、Fig. 2.8 のようなものとした。旧型の本体は厚さ10mmの軟鋼板製であったが、新型の方は重量軽減のため外殻の厚さ約5mmの軽合金鋳物とした。いずれも上面に6個のピックアップと前面

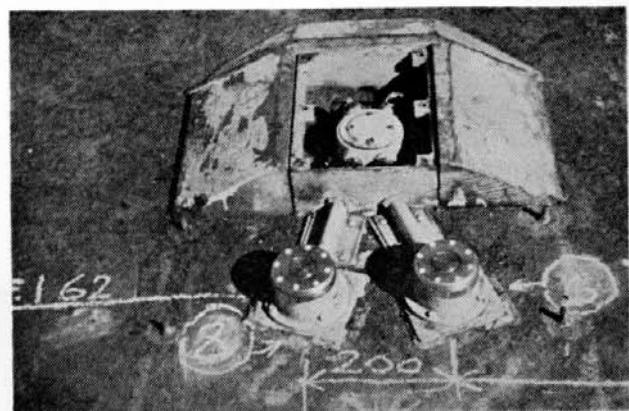


Fig. 2.6 Sensing Head of Electronic Pressure Counter

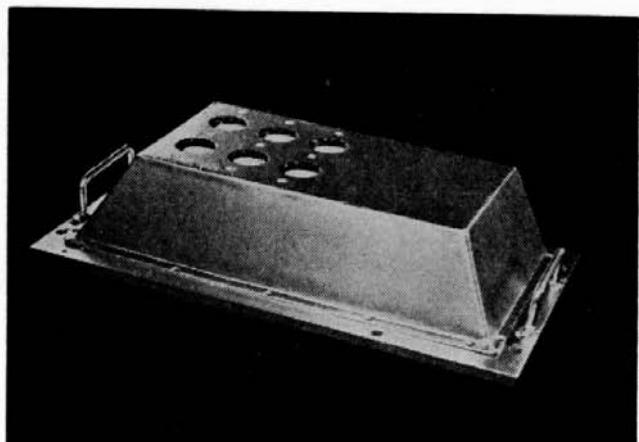


Fig. 2.7 Portable frequency Counter of Water Pressure (Old Type)

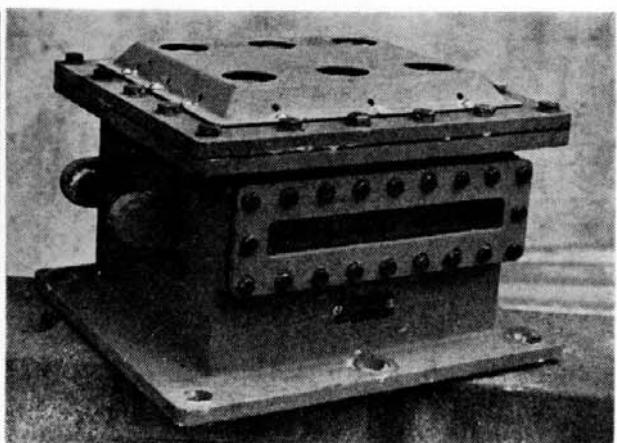


Fig. 2.8 Portable frequency Counter of Water Pressure (New Type)

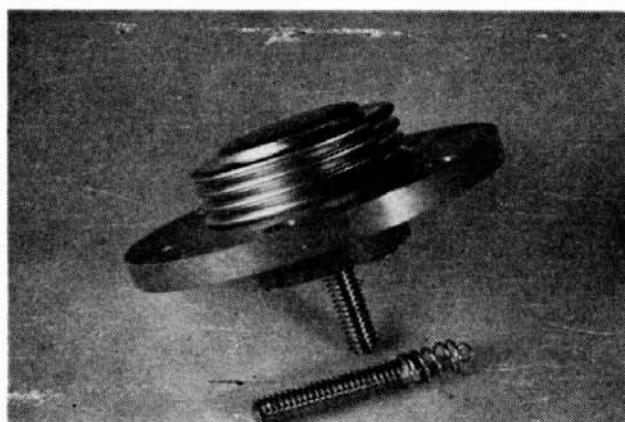


Fig. 2.9 Sensing Element of portable Frequency Counter of Water Pressure

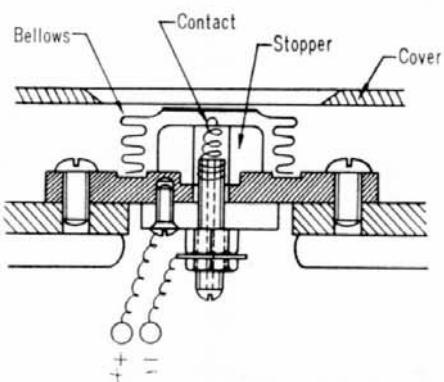


Fig. 2.10 Section of Sensing Element

に度数計のぞき窓を有している。

ピックアップの外観を Fig. 2.9 に、断面を Fig. 2.10 に示す。これはベローズ頂板と接点との接触によって回路を閉じるスイッチの役目をする。ベローズは燐青銅製で、接点は燐青銅コイルバネに金メッキを施したもの用いた。

本器に使用した計数回路を Fig. 2.11 に示す。ベローズを使用したピックアップによって開閉され繼電器 (R) のコイルを流れる回路と、繼電器接点によって開閉され度数計 (C) のコイルを流れる回路とを、共通の電源 (E) に接続したものである。これによって、ピックアップの電流値を小さくしてベローズおよび接点の消耗を防ぎ、度数計に十分な電流を通すことができる。

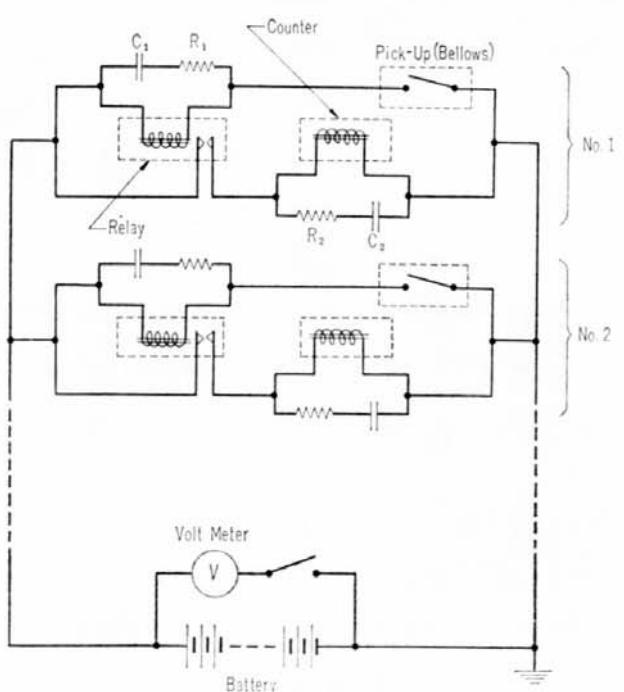


Fig. 2.11 Circuit of Portable Frequency Counter of Water Pressure

繼電器および度数計の各コイルに並列に入れた蓄電器と抵抗 ( $C_1, R_1$  および  $C_2, R_2$ ) は、いずれも接点の火花を消去し、瞬間的現象に対して十分な動作時間をかけぐためのものである。度数計は通常  $100 \text{ ms}$  ( $1/10 \text{ sec}$ ) 近くの動作時間を必要とするが、この回路によれば、ピックアップの接触時間  $2.5 \text{ ms}$  ( $1/400 \text{ sec}$ ) 程度の衝撃波を確実に計数することができる。

測定方法は本器を甲板上所定の測定位置に固定し、任意の期間の前後における各度数計の数字を読み取れば、それぞれの動作回数が求められる。ある値の水圧を受けると、その値以下にセットした度数計は全部動作するから、各段階の水圧頻度を求めるには、その度数計の動作数から、次段（1段高い水圧）の度数計の動作回数を差引く必要がある。

ただし、Fig. 2.12 において水圧～時間の関係が A のようであれば問題はないが、B のような場合に bc 間が  $1/20 \text{ sec}$  以上離れていると、第 2 段は 1 回計数するだけであるのに第 3 段は 2 回計数し、上記の計算法では合わないことが生ずる。しかし、簡便化を目的とした本器ではこの程度の不合理は、看過することにした。

ペローズは絞り加工によって製作されたものであるため、同じ寸法のものでも特性に不同があるので、1 個ずつ全数について検定較正を行なった。検定結果の一例を Tab. 2.1 に示す。検定は静水圧（外圧）で行なったが、再検定の必要を生じたときのために重錐による検定も加えておいた。最も低い  $1 \text{ mH}$  用のペローズでも、 $30 \text{ mH}$  の衝撃水圧を受けても感度に変化のないことは実験で確かめておいた。

Tab. 2.1 Example of the Constants of Pick-up Bellows

Pick-up No.	Bellows No.	Measuring Pressure $P_0$ (mH)	Spring Constant		Effective Area $A_0$ ( $\text{cm}^2$ )	Setting	
			$k_P$ (mH/mm)	$k_w$ (kg/mm)		Weight $W_0$ (kg)	Deflection $\delta_0$ (mm)
II-1	A-3	1	0.63	0.36	5.7	0.57	1.60
II-2	B-3	2	1.24	0.68	5.5	1.10	1.62
II-3	C-3	4	2.1	1.33	6.3	2.50	1.88
II-4	D-3	8	4.9	2.90	5.9	4.75	1.64
II-5	E-7	12	5.3	3.20	6.0	7.25	2.26
II-6	F-3	16	9.0	5.25	5.9	9.37	1.77

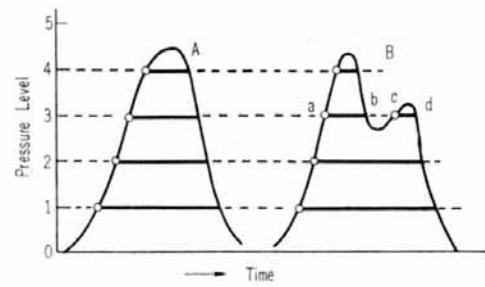


Fig. 2.12 Operation of Portable Frequency Counter of Water Pressure

本器内は完全気密となっているので、温度変化によって内圧の変化が考えられる。甲板暴露部における温度変化  $-20^\circ\text{C} \sim +80^\circ\text{C}$  を考えれば、 $0.3 \text{ kg/cm}^2$  ( $3 \text{ mH}$ ) 程度の内圧変動となって、誤差があまりにも大きい。しかし実際に甲板が波を受けるような状態では、海水の温度変化は、 $5^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$  程度と考えてもよいと思われ、 $0.5 \text{ mH}$  程度の測定誤差は無視することにした。

ペローズの耐圧特性はばらつきが多いであろうが、類似品について計測した結果では、 $1 \text{ mH}$  用のペローズで約  $4.5 \text{ kg/cm}^2$ 、 $16 \text{ mH}$  用で  $17 \text{ kg/cm}^2$  の耐圧強度を有している。また、過大の圧力に

対してはストッパーが働いて変形を制限し、いずれも  $10^8$  回程度の繰返しに耐えられるような使用条件に抑えている。

電源は BL-230 型乾電池 (45V) 3 個を並列に使用しており、各接点回路はそれぞれ 40 mA, 6 点が同時に通電するとして  $10^4$  回程度の計数ができるようになっている。

### 2.2.3 最高水圧計

最高水圧計は、ある一定期間中に甲板に打込んだ青波による衝撃圧力のうちの最高値を計測するために製作した計器である。受圧膜を取換えることによってその期間は任意に選ぶことができる。受圧膜には厚さ 0.1mm の焼鈍銅板を使用してある。この受圧膜に水圧が作用すると膜は永久変形を起し、この変形量をダイヤルゲージで計って、最高水圧を求めるものである。

Fig. 2.13 に外観、Fig. 2.14 に各部品および Fig. 2.15 に組立後の断面図を示す。受圧膜は枠ではさまれ、周辺固定の円板となっており、この枠がボルトで基板に取付けられている。枠はこのほかに予備が数組あり受圧膜を枠ごと取換えられるようになっている。そのほかにも予備膜が数枚用意されている。

塑性変形を与えるものであるから、そのものについて検定することはできないが、等しい寸法の同材について試験した結果を Fig. 2.16 に示す。これは、水圧を除去したのち残留する永久変形（中心点のたわみ  $\delta_0$ ）との変形を生ぜしめた水圧との関係を示すもので、大体  $0.4 \text{ kg/cm}^2$  ( $4\text{mH}$ ) 以上の水圧に対しては、 $p - \delta_0$  はほぼ直線的な関係があり、10枚の試験膜の平均的な線を引いたものが、図中の実線である。これから  $\delta_0$  を計測すればこれに対応する  $p$  を知ることができる。

実船計測に当っては、膜のたわみはダイヤルゲージで計測する。わくに半円形の定規をのせてダイヤルゲージをこれに沿って滑動させると、針先が受圧膜の直径上を動くようになっている。この定規（基準線）から膜の中心点までの距離と、定規から直径の両端の点までの距離の平均値との差が求めるたわみとなるわけである。実際にはちょうど直径の端

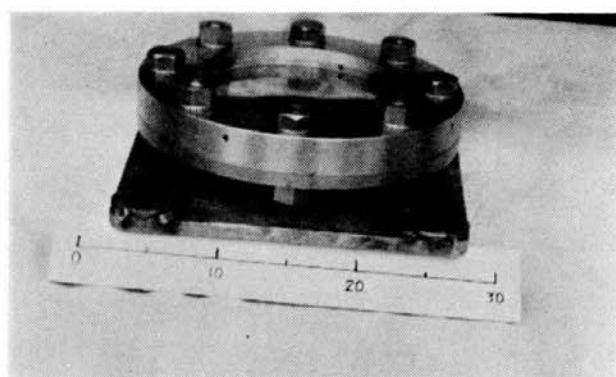


Fig. 2.13 Maximum Water Pressure Gage



Fig. 2.14 Parts of Maximum Water Pressure Gage

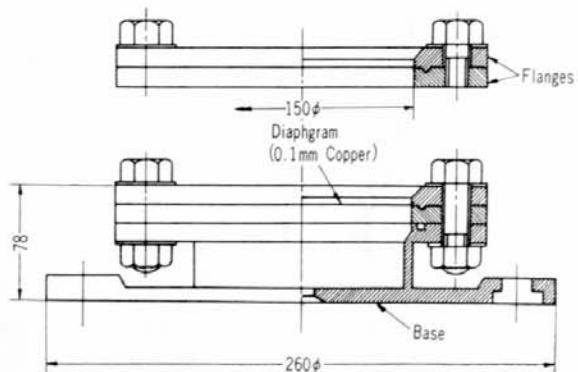


Fig. 2.15 Section of Maximum Water Pressure Gage

の点を測ることは不可能で、ダイヤルゲージの針の半径だけ内側の点を測ることになるので、それを差引く必要があり、実船用の検定曲線としては、この修正を行なったものを用意した。

計測時期は任意であるが、できるだけ多くのデータをうるために、青波を受けるたびに、受圧膜を取り替えて計測することが望ましい。

受圧膜の衝撃に対する特性の検討を若干行なったが、その固有振動数はその上にかぶさっている水の量によって大いに左右されるもので、計測は非常に困難であるために行なわなかった。水塊の落下による衝撃水圧に対する応答についての基準実験の一例を Fig.

2.17 に示す。これは落水試験塔(4.2 参照)によって、高さ 6 m から 1 ton の水塊を落下させ、図の右肩に示したような  $1.2\text{m} \times 1.2\text{m}$  の受圧盤上の計測点 1 および 2 に水圧計を配置し、中心点 3 にこの最高水圧計を置いて受圧膜中心のひずみ(伸び)を抵抗線ひずみゲージで計測したものである。最高水圧計受圧膜の、ひずみ～時間曲線は水圧計 1 および 2 の圧力～時間曲線とほとんど一致しており、最初のピーク圧力がでる  $1/100\text{ sec}$  のところの衝撃圧力に完全に追従していることがわかる。

また、この受圧膜の残留たわみを計測した結果も静的検定曲

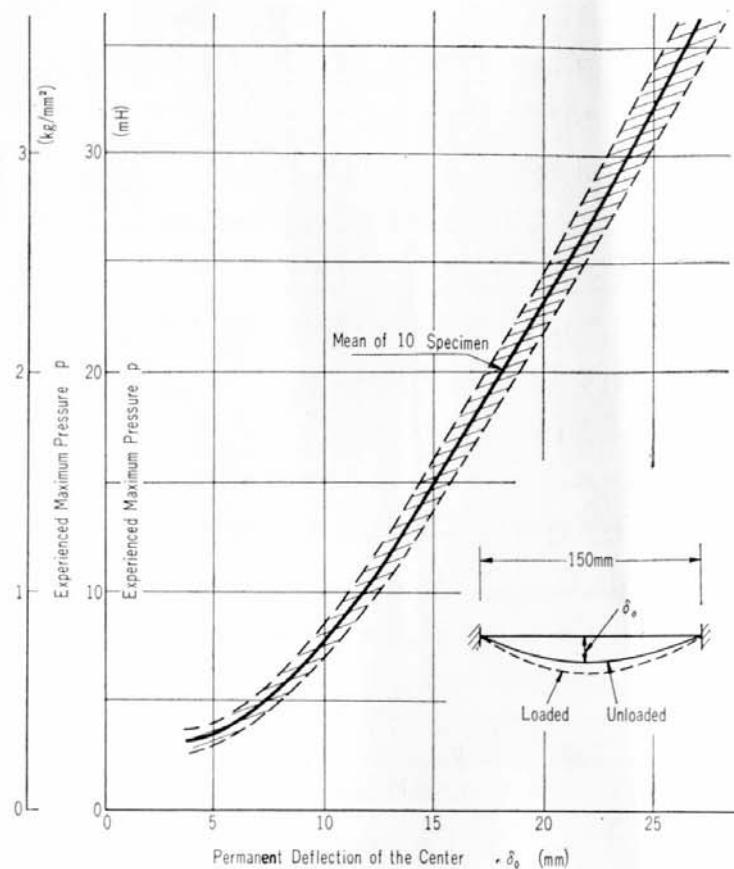


Fig. 2.16 Pressure ~ Permanent Deflection Relation of Diaphragm

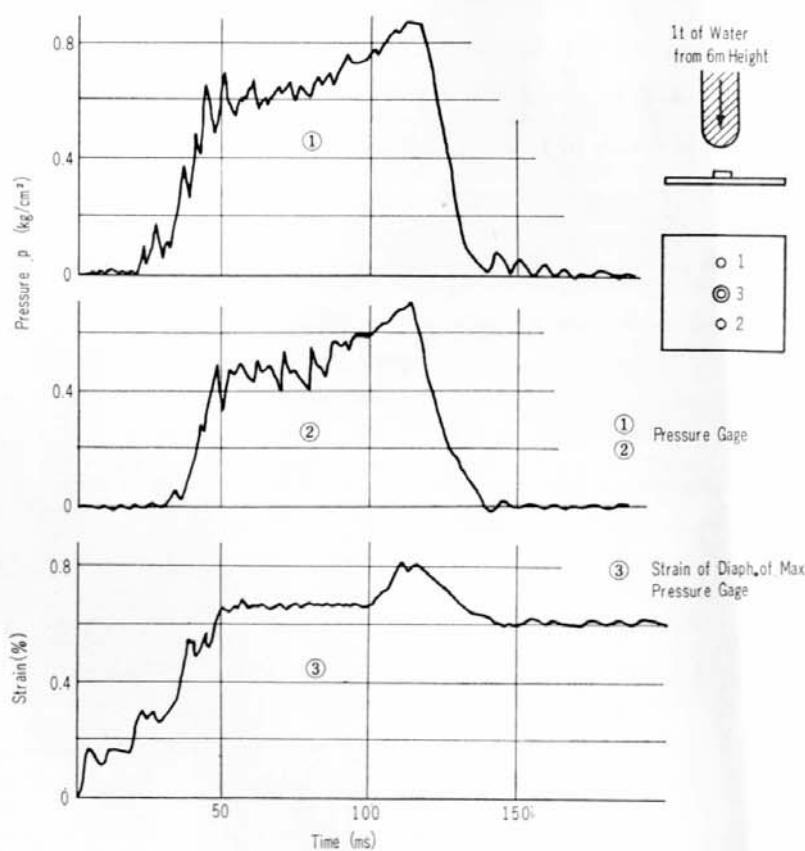


Fig. 2.17 Dynamic Behaviour of Diaphragm

線と完全に一致していた。またこの試験で、衝撃水圧をかける場合、最高水圧計内部が完全気密となつてはいるが、内部の空気の振動のために、受圧膜の変形が乱されることがわかったので、底部に空気抜きの小孔をあけることにした。

実船での使用経験によると Fig. 2.18 における図中 (b) のような負のたわみ（凸変形）が認められることがときどきあった。これは一度 (a) のように凹変形した膜に、なんらかの作用で小さい負圧が働いて (b) の形に反転したものと考えられるので、若干の実験を試みた。

Fig. 2.19 は水圧による正規のたわみ量  $\delta_0$  と反転後のたわみ量  $\delta'$  とを比較したもので、Fig. 2.20 はこの反転を生ずるに要する負圧（内圧）の大きさを示したものである。 $\delta_0 = 10\text{mm}$  ( $p = 10\text{mH}$ ) 程度以上になると平滑な形で反転せず、しわを生ずるが、これ以下では大体完全な形で反転を生ずること、しかも  $0.5\text{mH}$  程度以下の極めて小さい負圧で反転することが認められた。

負圧の生ずる原因については詳しく検討する必要があるが、本器の上面を水が流れること、上述の底にあけた孔から圧力が加わりうること、等々の理由によるものではないかと考えられる。いずれにしてもわれわれの目的とする計測では

(反転たわみ  $\delta'$ ) ≈ (正規たわみ  $\delta_0$ )  
と考えて差支えないようである。

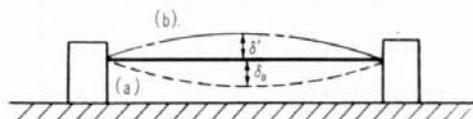


Fig. 2.18 Convex Deflection of Diaphgram

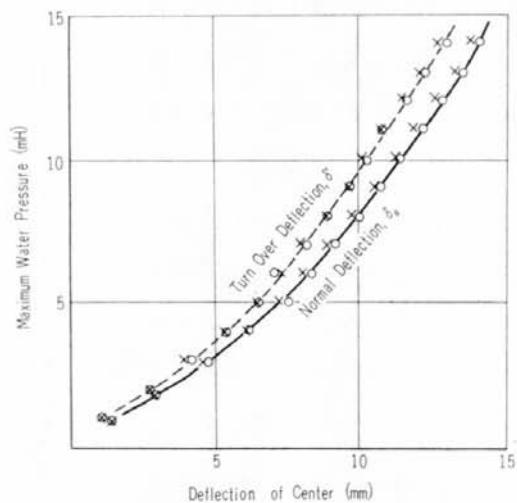


Fig. 2.19 Turn-over Deflection

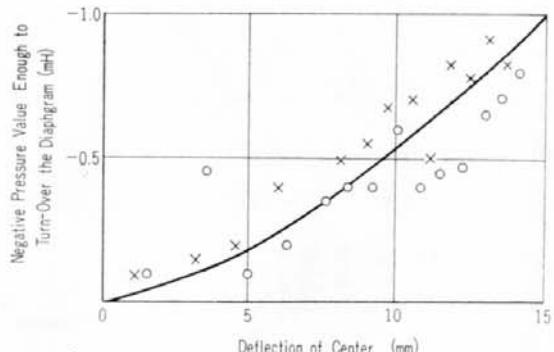


Fig. 2.20 Turn-over Pressure

## 第3章 計測方法

### 3.1 気象、海象など

海象、気象および本船の状態の計測は大体ログブックの形式にならって、一部を除き4時間ごとに記録された。すなわち、気象の計測は本船に設備された気圧計、風向風速計、温度計等により計測記録を行なったが、海象については本船乗組員の目視観測により、記録はそれぞれ指定の天気略号、ビューフォート風力階級、風浪階級およびうねり階級を用いた。また、風向風浪方向、うねりの方向と船の進行方向との関係は解析を便にするため Fig. 3.1 に示す分類によって記録した。その一例としてハドソン丸のものを Tab. 3.1 に示す。

Tab. 3.1 An Example of Record Sheet of Surrounding Conditions

Date		Jan. 2, 1961						Jan. 3			
Time		0	4	8	12	16	20	0	4	8	12
Weather		C	C	B C	Q	R	Q	Q	Q P	B C	B C
Atomospheric Pressure	(mb)	1020	1023.5	1024	1023.5	1017	1011	1007.5	1004	1008	1010.5
Temp.	Air (°C)	17	19	16	18	20	21	20	19	16	15
	Sea Water (°C)	17	18	18	18.5	19	20	20	18	17	17
Ship's Condition	Pourse Long. (deg)	34-10 146-20	34-10 147-10	34-10 149-07	33-57 149-56	33-52 151-25	33-49 152-56	33-45 154-31	33-43 155-50	33-39 156-55	33-42 157-15
	Course (deg)	267	267	267	267	266	662	266	266	267	267
	Speed (deg)	16.8	16.8	17.2	16.25	16.2		16.3	15.0	13.5	14.9
	Speed Relative to Water (kt)	16.75	17.25	17.25	18	18.5	18.5	18.5	16.0	13.75	14.75
	R. P. M.	106.3	106.6	108.3	109.6	109.8	109.3	108.0	104.4	99.8	99.5
	Absolute Direction	WSW	W	WSW	SE	SSE	SW	SSW	SW	SW	W
Wind	Relative Direction	H	H	H	P-QH	P-B	P-QH	P-QH	H	H	H
	Relative Speed (m/s)	14	12	9	10	18	20	18	28	23	16
	Beaufort Scale	6	4	3	4	7	7	7	8	8	7
	Heading Angle	H	H	H	P-QF	P-QF	P-QH	P-QH	H	H	H
Wave	Length (m)	15	10	10	10	15	20	20	30	30	30
	Height (m)	5	2	15	15	5	5	5	8	7	6
	Sea State	6	4	3	4	7	7	7	9	8	7
	Heading Angle	H	H	H	H	H	H	P-QH	P-QH	H	H
Swell	Length (m)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	Height (m)	10	10	8	8	10	10	10	11	12	10
	Period of Encounter (sec)	11	11	10	11	10	10	10	8	8	8
	Swell State	6	6	6	6	6	6	6	7	7	7
	Amplitude (deg)			8	2	8	8			7	4
Rolling	Period (sec)			9	6	15	8			6	7
	Amplitude (deg)			10	5	5	5	6		8	5
Pitching	Period (sec)			7	7	7	8			7	7

### 3. 2 応 力

応力頻度の計測は、発信部およびマイクロヘッド部を中央部上甲板下面に（大部分はCO<sub>2</sub> room）に取付け、計数部を測定室に置いて、各度数計の読みを定時に記録する方法によった。すなわち、出港時に零点の調整をしておいて、航海中は毎日正午に記録を行ない、正午から正午までの約24時間（実際には時差の修正をするため正確に24時間とならない場合が多い）の長期分布を計測記録した。

また35年度の実験では、この24時間ごとの長期の頻度分布計測のほかに、毎日正午前15分間の計測を行ない短期分布の頻度計測も行なった。

### 3. 3 水 圧

甲板上に打込む青波水圧の計測は35年度には簡易水圧頻度計、36年度には簡易水圧頻度計のほか最高水圧計を加えて行なわれた、計測は本船の荒天遭遇ごとに、頻度計の場合は各水圧段階の計数値を読みとることによりその発生頻度を、また最高水圧では受圧膜の永久ひずみを測定し検定曲線から加えられた最高水圧を算出した。

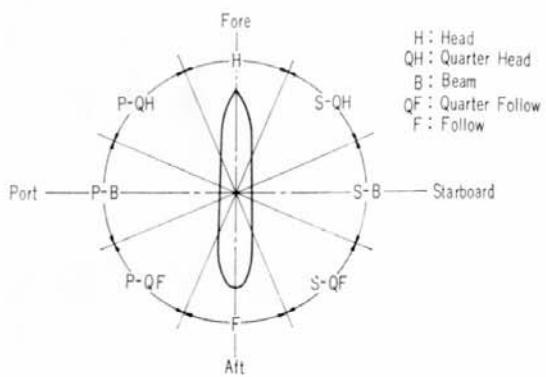


Fig. 3.1 Relative Wave Direction

## 第4章 解析

### 4.1 応力頻度

#### 4.1.1 短期分布

船がおかれている環境状態 (operating condition と呼ぶ) すなわち、海象、船速、波との出合角度、重量分布等が一定の場合、応力、船体運動等の変動量 (peak to peak あるいはその半分) が Rayleigh 分布に従うことは周知のとおりである。operating condition が一定とみなされる程度に短い時間における分布が短期分布であるが、これが Rayleigh 分布に従うというのである。Rayleigh 分布は次式で表わされる。

$$p(x) = \frac{2x}{E} e^{-\frac{x^2}{E}}$$

ここに  $p(x)$  は確率密度函数、 $x$  は確率変数でたとえば応力の変動量 :  $E$  はこの Rayleigh 分布を定める定数で、 $x$  の二乗平均である。 $E$  は船が与えられれば operating condition の函数である。

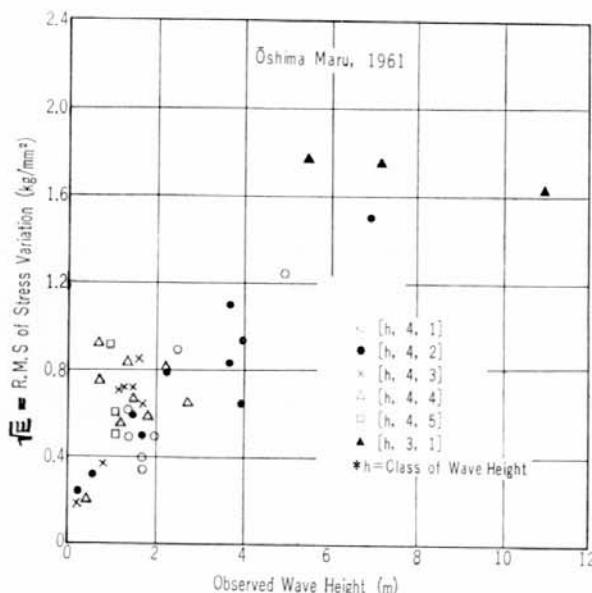


Fig. 4.1 Relation Between Observed Wave Height and RMS Stress ( $\sqrt{E}$ )

Fig. 4.1 は  $E$  に影響をおよぼす因子として波高（目測によるもので、有義波高に相当すると考えられる。）をとり

あげ、それと  $E$  との関係を示したものである。ここに示した結果は昭和 36 年度大島丸の応力のオッショロ記録によるものである。図中 [h, 4, 1] 等の記号は外界条件を示す識別番号で、詳しくは次節 (Tab. 4.1) を参照されたい。計測はおおむね 5 分または 10 分間正午に行なわれた。当然のことであるが、応力変動の二乗平均  $E$  は波高が高くなるにしたがい直線的に増大している。また出合角の影響があるようには見えないが、これは波高以外の他の因子を考慮に入れていないためと思われる。

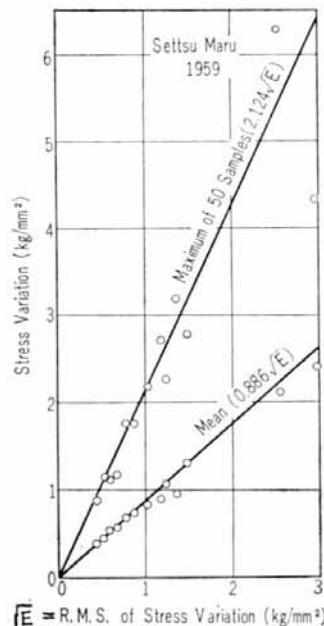


Fig. 4.2 Comparison of Measured and Theoretical Extreme Stress

Longuet-Higgins は、ある  $E$  をもつ Rayleigh 分布に従う母集団から  $N$  個のサンプルを取った場合、その  $N$  個中の最大値の期待値や平均値その他を与えていいる<sup>19)</sup>。すなわち、平均値は  $0.886\sqrt{E}$ 、 $N$  を 50 とした場合の最大値は  $2.124\sqrt{E}$  である。Fig. 4.2 はこの算式による値と実測値との比較を示すものである。ここに示した結果は昭和34年度摺津丸の応力のオッショロ記録によるもので、計測時間はいずれも約 5 分間である。Fig. 4.2 をみると計測値と計算値とがかなり良好な一致を示している。このことは、応力の短期頻度分布がかなりよく Rayleigh 分布に適合することを示している。

#### 4.1.2 要素ヒストグラムと長期分布

われわれが求めたいのは船の全耐用年数を通じての応力の長期分布である。船の実働状態における応力頻度がわかれば、設計段階において構造部材の疲労寿命を推定することも、所要の耐用期間中安全に機能を果すための部材寸法を決定することも可能である。また、異常値の大きさやその出現の確率を求めて合理的設計の資料とすることも可能であり、さらに最近各方面で計画されているプログラム荷重による高応力疲労試験の基礎資料もうることができる。

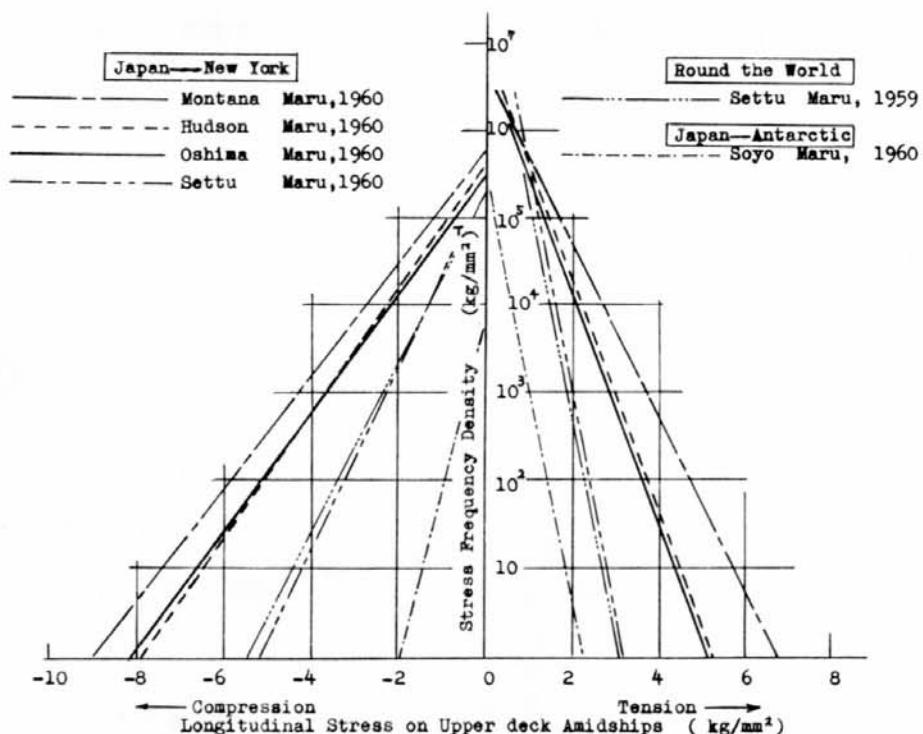


Fig. 4.3 Measured Long Term Histogram

応力頻度の長期分布は、種々の短期分布の累積したものと考えることができる。Fig. 4.3 は今回の試験における各船の 1 航海の応力頻度の長期分布の計測結果を一括したものである。横軸は船体中央部上甲板の縦曲げ応力、縦軸は応力の頻度密度すなわち単位応力帯域当たりの変動回数を示す。横軸の値を  $x$  とするとき、 $x-0.5 \text{ kg/mm}^2$  から  $x+0.5 \text{ kg/mm}^2$  までの  $1 \text{ kg/mm}^2$  の帯域内の応力値の出現回数を示すものである。これは、正しくは周知の Rayleigh 分布の形をした分布曲線の累積であるから、応力零の近くで鋭いピークを生ずる曲線となるものであるが、応力最大値および最小値附

近以外の部分ではほとんど直線に近いので、図のように直線で近似することにした。この表示法は、材料の疲労強度の S-N 線図と対応して、繰返し変動応力に対する累積疲労被害を検討するのに好都合である。

積荷状態や海象条件が変れば、この分布も当然変わってくるので、ある 1 隻の船について多年にわたる計測結果を集積しなければ、その船の全耐用期間中の応力頻度を正しく推定することはできないが、Fig. 4.3 に示す 1 航海だけの結果からでも各類似船の冬期北太平洋（摺津丸の世界一周航路、壯洋丸の南氷洋航路は別として）における 1 航海の応力頻度の概略と推定することは可能である。またここに示した北太平洋航路の 4 隻はほぼ同型と考えて、全部を平均したヒストグラムを求め、Fig. 4.4 に示すように同型船の冬期北太平洋航路における応力頻度と考えても大過ないものと思われる。年度による海象条件のばらつきを、1~2年間の計測だけでカバーしようとするにはいくらか無理があるが、同様にして 20 年間の応力ヒストグラムも図に示すように推定することができる。北太平洋海面においては冬期がもっとも severe な条件となることは周知のとおりであるから、このヒストグラムから 20 年間の最大応力を推定することも可能である。これによると、甲板の引張応力で  $6 \text{ kg/mm}^2$ 、圧縮応力で  $10 \text{ kg/mm}^2$  程度となるようである。

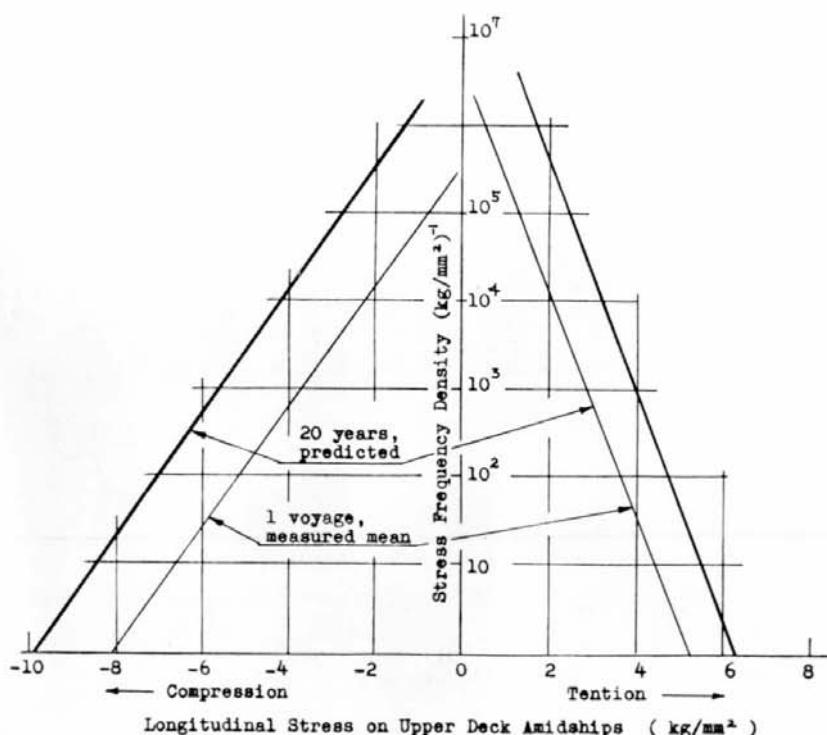


Fig. 4.4 Long Term Histogram

さて、長期分布を求めるには、前記のように短期分布を合成すればよいわけである。ここで、すべての短期分布を実測しなくとも、各外界および操船条件下における短期分布の基本形と、長期間中にその船が遭遇する種々の“外界および操船条件”の出現頻度がわかっておれば、短期分布をそれに相当する条件の出現頻度により重みをつけて加え合わせることにより長期分布を求めることができるはずである。長期分布を組立てる要素であるという意味で、各条件下における短期分布のヒストグラムを“要素ヒストグラム”と呼び、各条件の出現頻度の割合を各条件による“重み係数”と称することにする。

短期分布に影響を与える外界および操船条件には、多数の要因が含まれているが、ここでは簡単のために(A)波高、(B)船速、(C)出合角度の3変数だけをとることにした。各変数をそれぞれ Tab. 4.1 に示すように5段階に分け、識別番号〔A, B, C〕で表示することにした。Aは波高階級、Bは船速階級、Cは出合角度を示す数字で、合計125の外界および操船条件に分類したわけである。

Tab. 4.1 Classification of the Operating Conditions and Weighing Factors

〔A〕 Wave Height					〔B〕 Ship Speed		〔C〕 Heading Angle	
Class 1	2	3	4	5	Class	Range (kt)	Class	Range
Range (m) 0—1.5	1.5—2.5	2.5—3.5	3.5—5.5	5.5—	1	—5	1 2 3 4 5	H. Q. H. B. Q. F. F.
					2	5—10	1 2 3 4 5	H. Q. H. B. Q. F. F.
(2) 0.0048		(1) 0.0024	(4) 0.0097 (4) 0.0097	(9) 0.0217 (7) 0.0169	3	10—15	1 2 3 4 5	H. Q. H. B. Q. F. F.
(27) 0.0652 (37) 0.0894 (32) 0.0773 (36) 0.0869 (15) 0.0362	(25) 0.0604 (24) 0.0580 (11) 0.0266 (17) 0.0411 (7) 0.0169	(19) 0.0459 (26) 0.0628 (6) 0.0145 (10) 0.0242 (5) 0.0121	(14) 0.0338 (19) 0.0459 (7) 0.0169 (12) 0.0290 (5) 0.0121	(7) 0.0169 (11) 0.0266 (5) 0.0121 (3) 0.0072 (2) 0.0048	4	15—20	1 2 3 4 5	H. Q. H. B. Q. F. F.
					5	20—	1 2 3 4 5	H. Q. H. B. Q. F. F.
(149) 0.360	(84) 0.203	(67) 0.162	(65) 0.157	(49) 0.118				
(414) 1.000								

\* H.=Head Sea, Q. H.=Quarter Head Sea, B.=Beam Sea,  
Q. F.=Quarter Following Sea, F.=Following Sea.

外界および操船条件を計測する時間間隔を小さくすればするほど、精密な長期分布が得られるが、ここでは最も簡単な近似として、毎日の正午における条件を計測して、その1日24時間はその条件が持続されたものと考え、要素ヒストグラムとしてはその1日間の分布（厳密には短期分布とはいえないが）をとることにした。これは、このような近似で組立てた長期分布が実測の長期分布と大差なければ、短期分布形さえ求めておけば、毎日の外界および操船条件は特にそのための計測を行なわなくても、ログブックから容易に求められ、比較的簡単に長期分布を推定できるからである。

Tab. 4.1 に今回の全実験船の記録から求めた、各外界および操船条件の出現頻度の割合、すなわち重み係数を示した。（）内の数字は正午に該当する条件となっていた日数を示し、延べ414日の計測結果を集めたものである。船型、航路および季節に大幅の変化がないので、比較的狭い範囲に集

中している。

Fig. 4.5~4.12 は全実験船の毎日の 24時間の応力頻度計測結果から求めた要素ヒストグラムを系統的に示したものである。これらも同様にほぼ直線で近似することができる。ここで、1日間の応力変動の標準回数を求め、各ヒストグラムのもつ全回数がこの標準回数に一致するよう修正を加えてある。図に見るとおり同一の船で同一の条件下においても日によって相当のばらつきが認められる。これは前述のとおり、外界および操船条件として 3 变数だけをとって他の要因を無視していること、要素ヒストグラムとして 1 日 24 時間の頻度分布をとっているのに対して、外界および操船条件としては正午の条件で代表させていることなどによるものと考えられる。

しかし、概略的には各船の各条件における平均的な要素ヒストグラムの直線を引いて、各条件に対する船の応答の比較を行なっても大過ないようと思われる。今回の試験では外界および操船条件の変化範囲が比較的狭いので、十分な比較はできないが、波高が高くなると高応力の頻度が高くなること、出合角度の影響は比較的小さいことなどが明らかに認められる。

さらに仮定を一步進めて、全船を通じての平均のヒストグラムを求めて、同型船の要素ヒストグラムと考えることも、この程度のばらつきならば差支えないようと思われる。一例として、船速 15~20 kt, 向い波の場合 (Fig. 4.5) にこの平均の要素ヒストグラムを図中に太線で入れてみた。

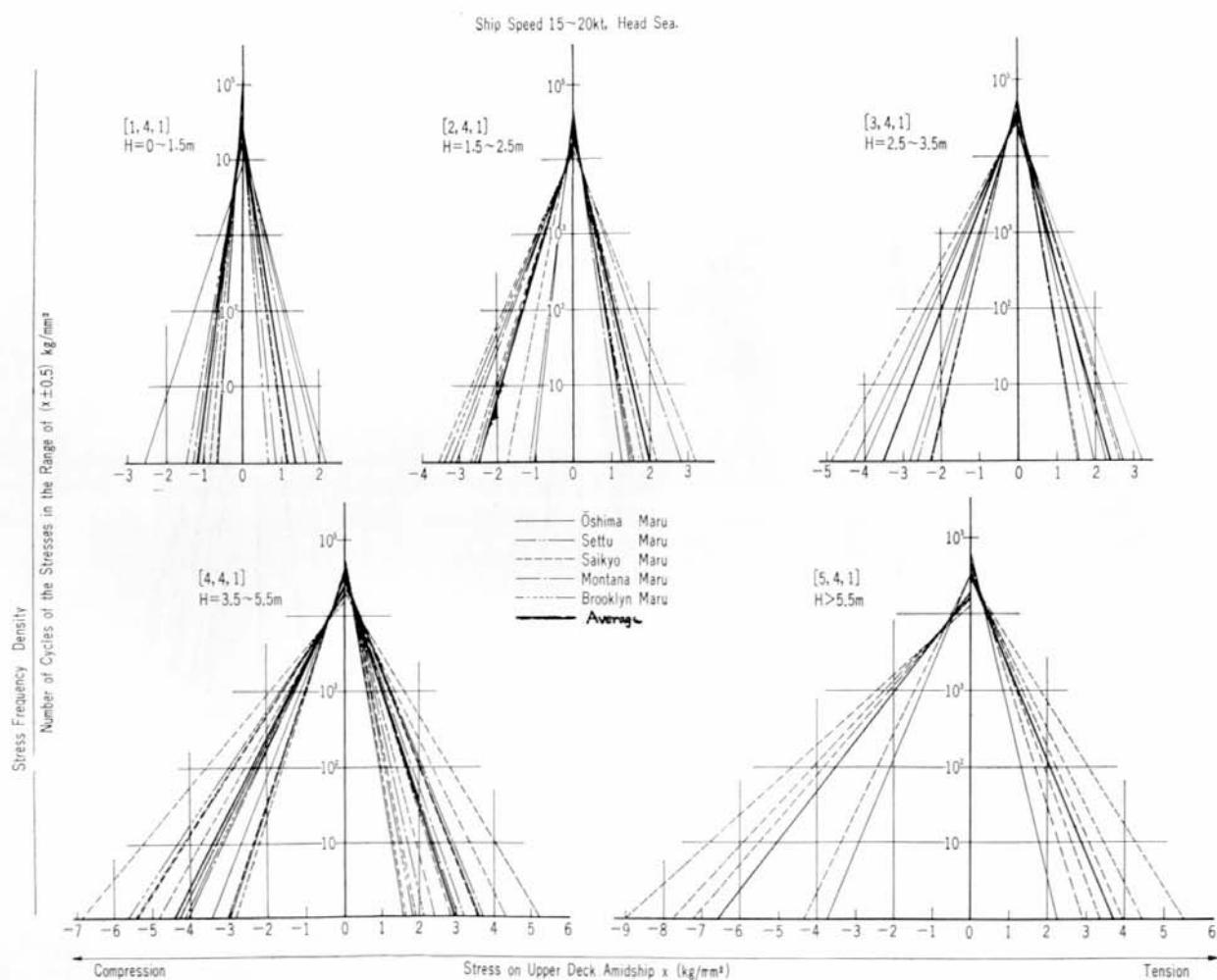


Fig. 4.5 Element Histogram 1 [A, 4, 1]

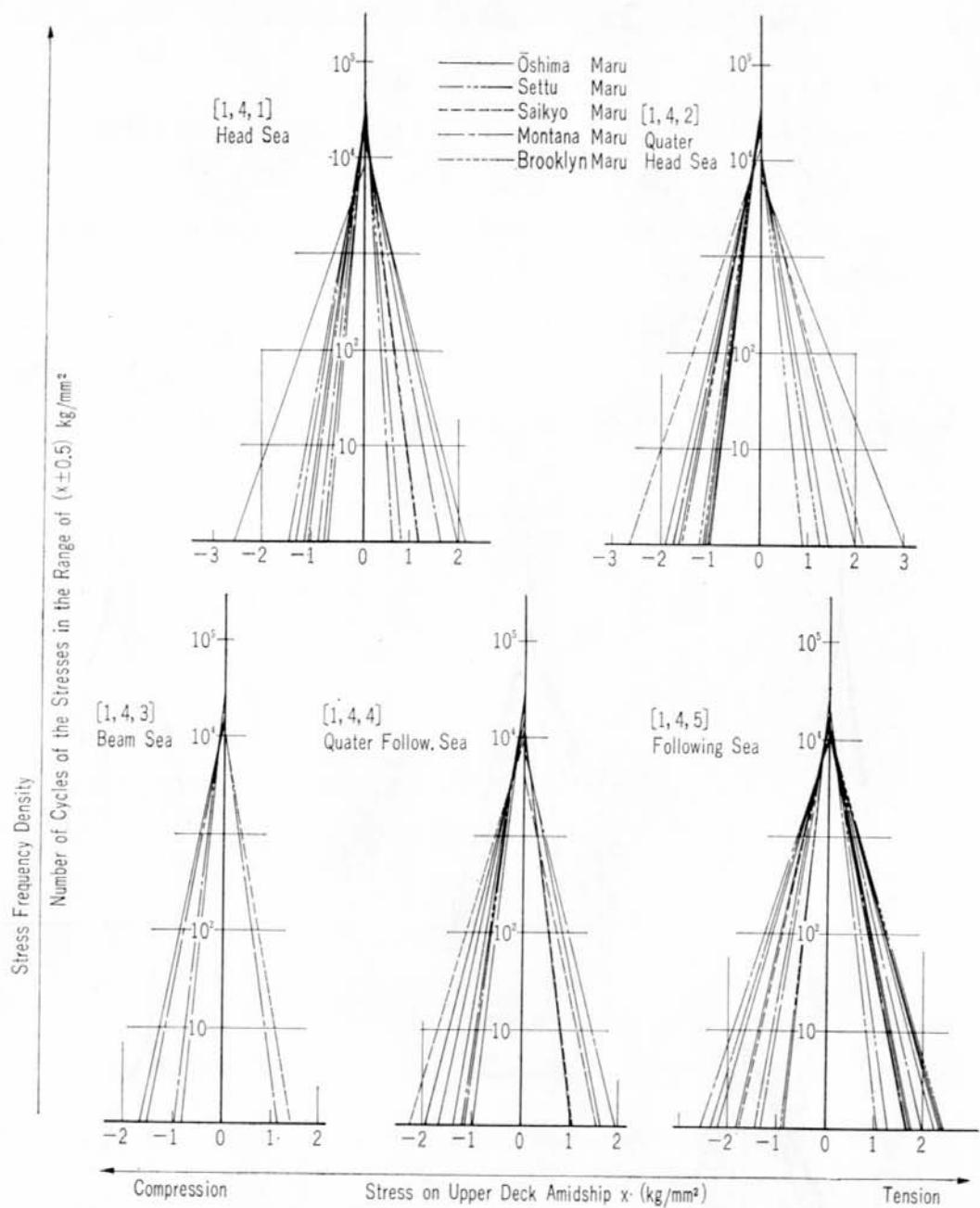


Fig. 4.6 Element Histogram 2 [1, 4, C]

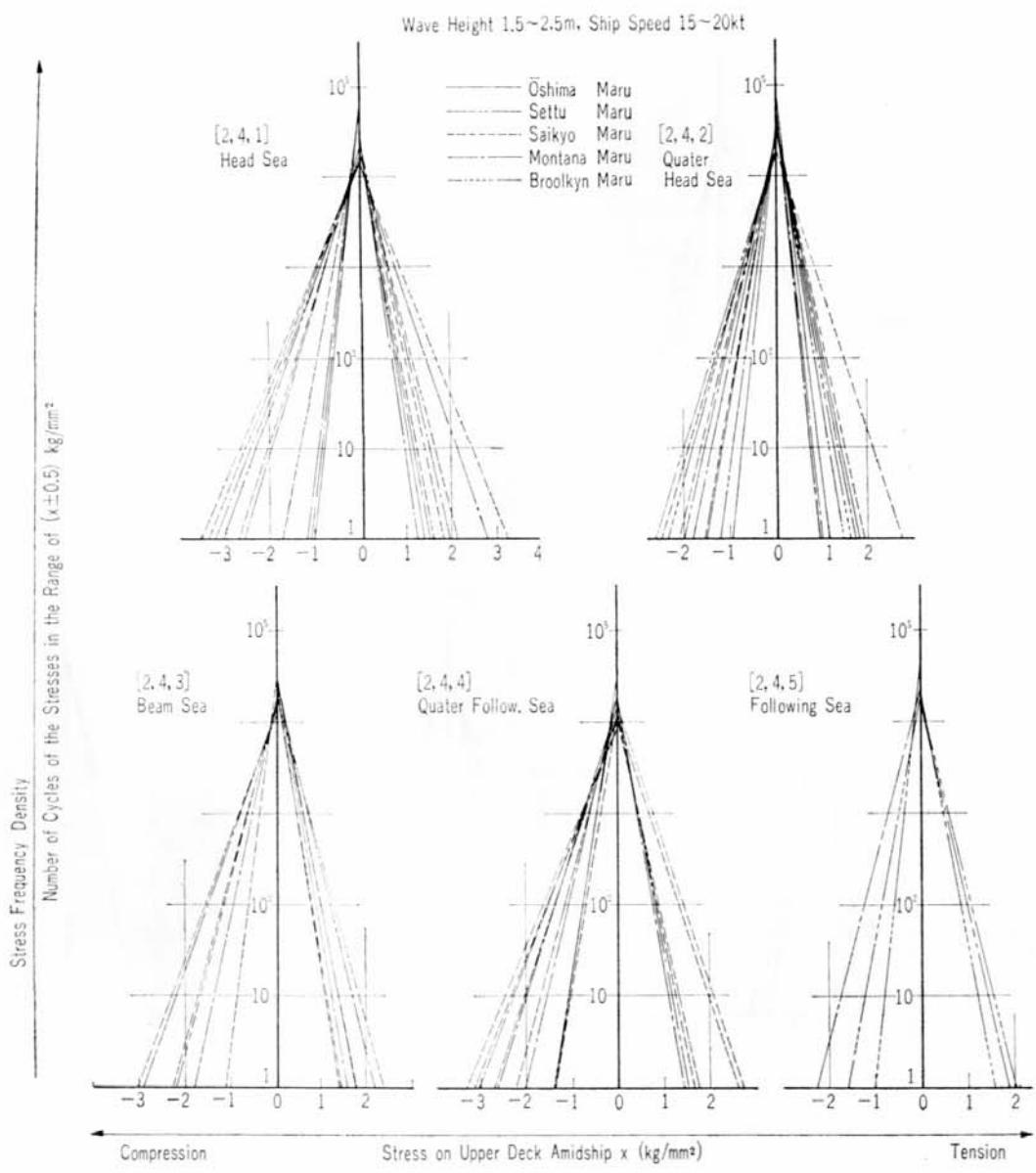


Fig. 4.7 Element Histogram 3 [2, 4, C]

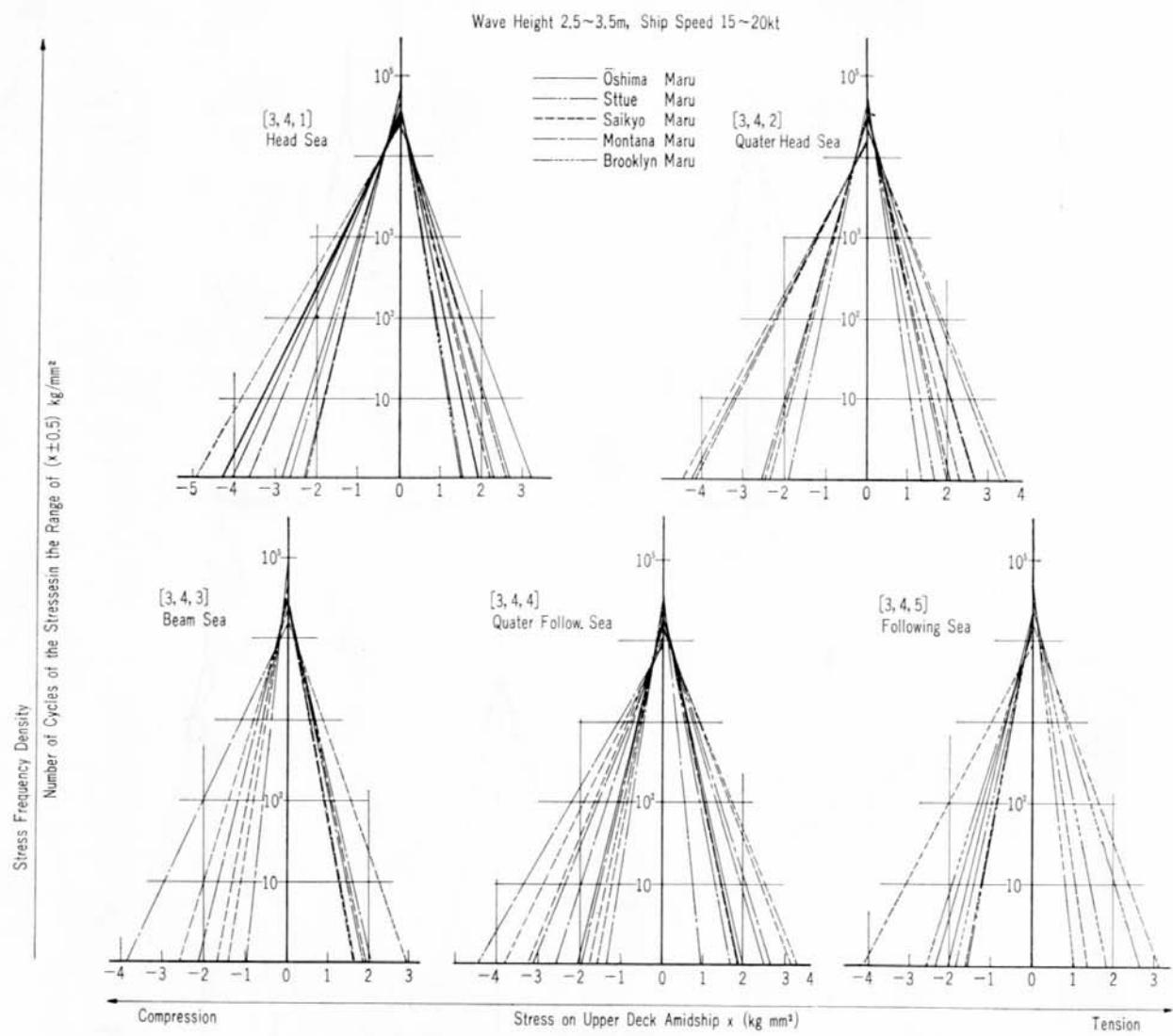


Fig. 4.8 Element Histogram 4 [3, 4, C]

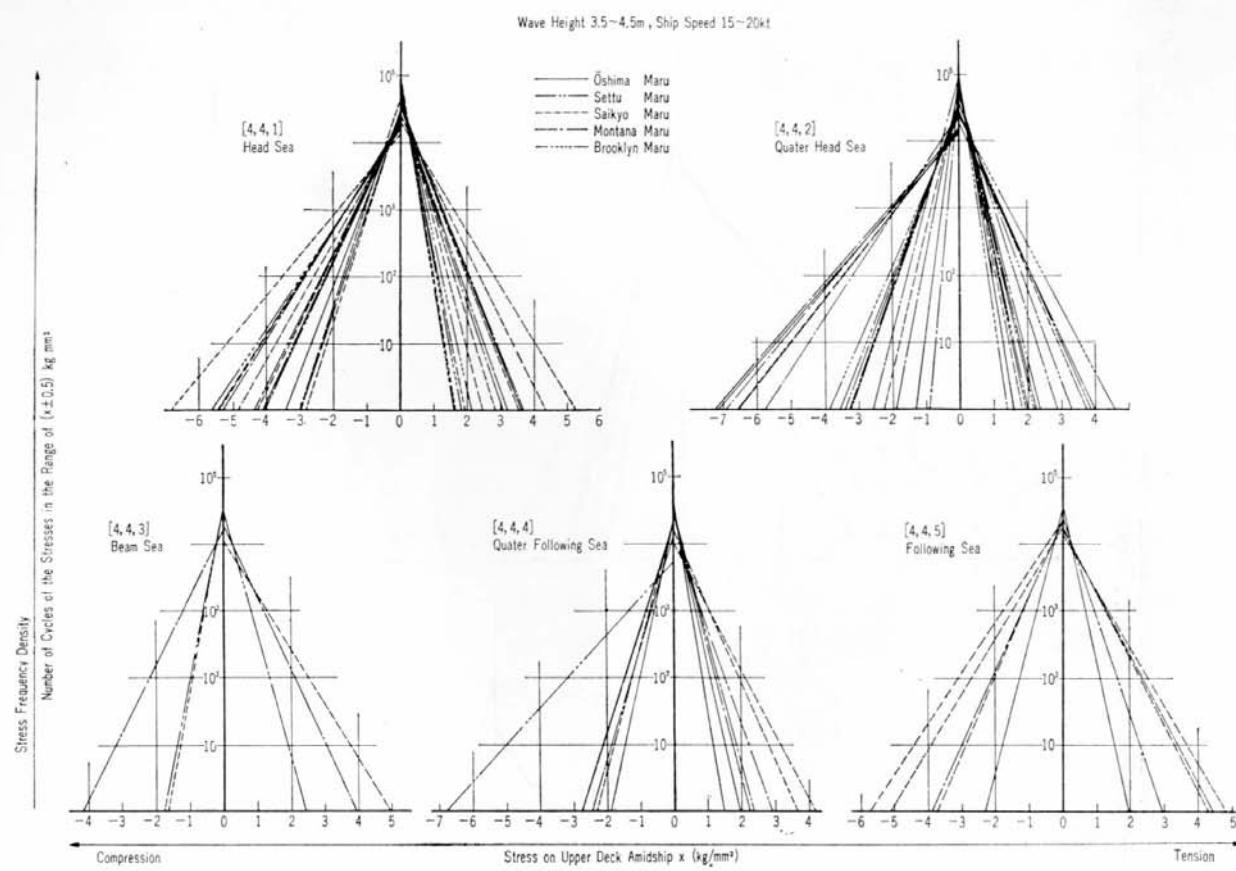


Fig. 4.9 Element Histogram 5 [4, 4, C]

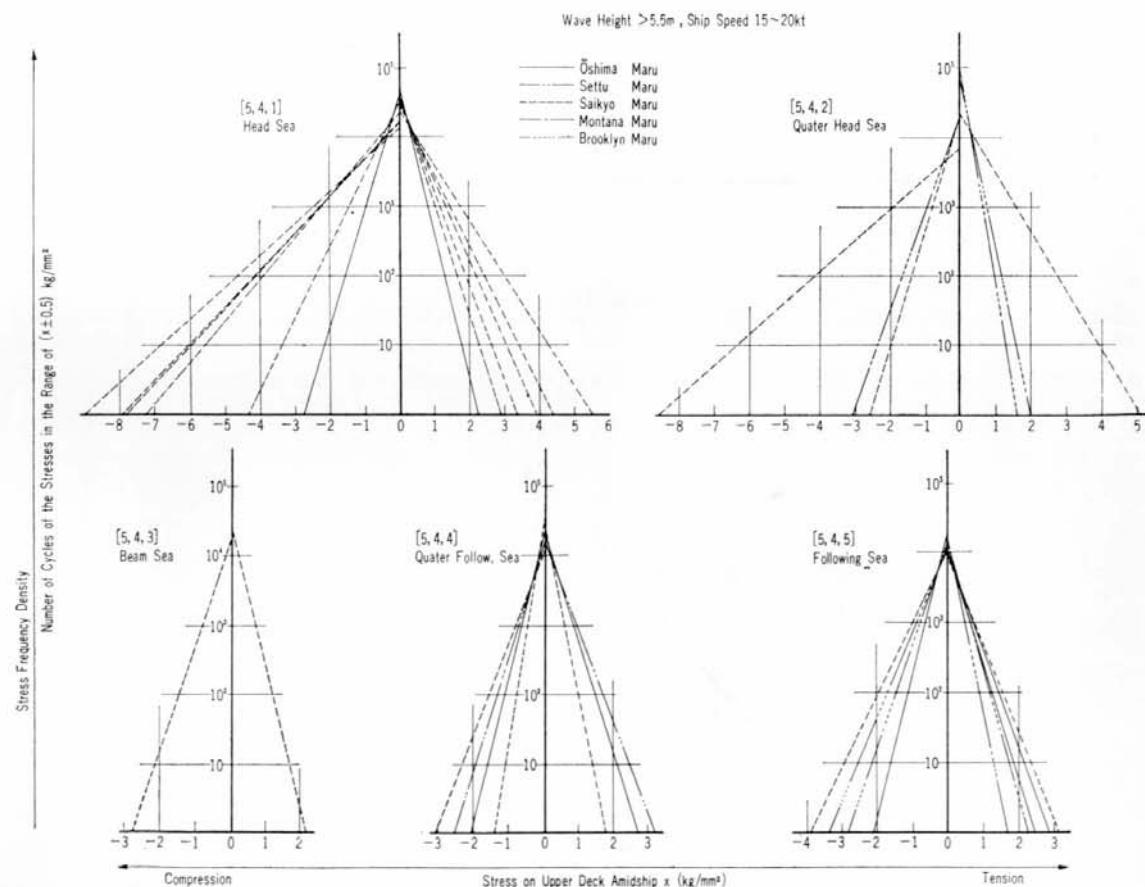


Fig. 4.10 Element Histogram 6 [5, 4, C]

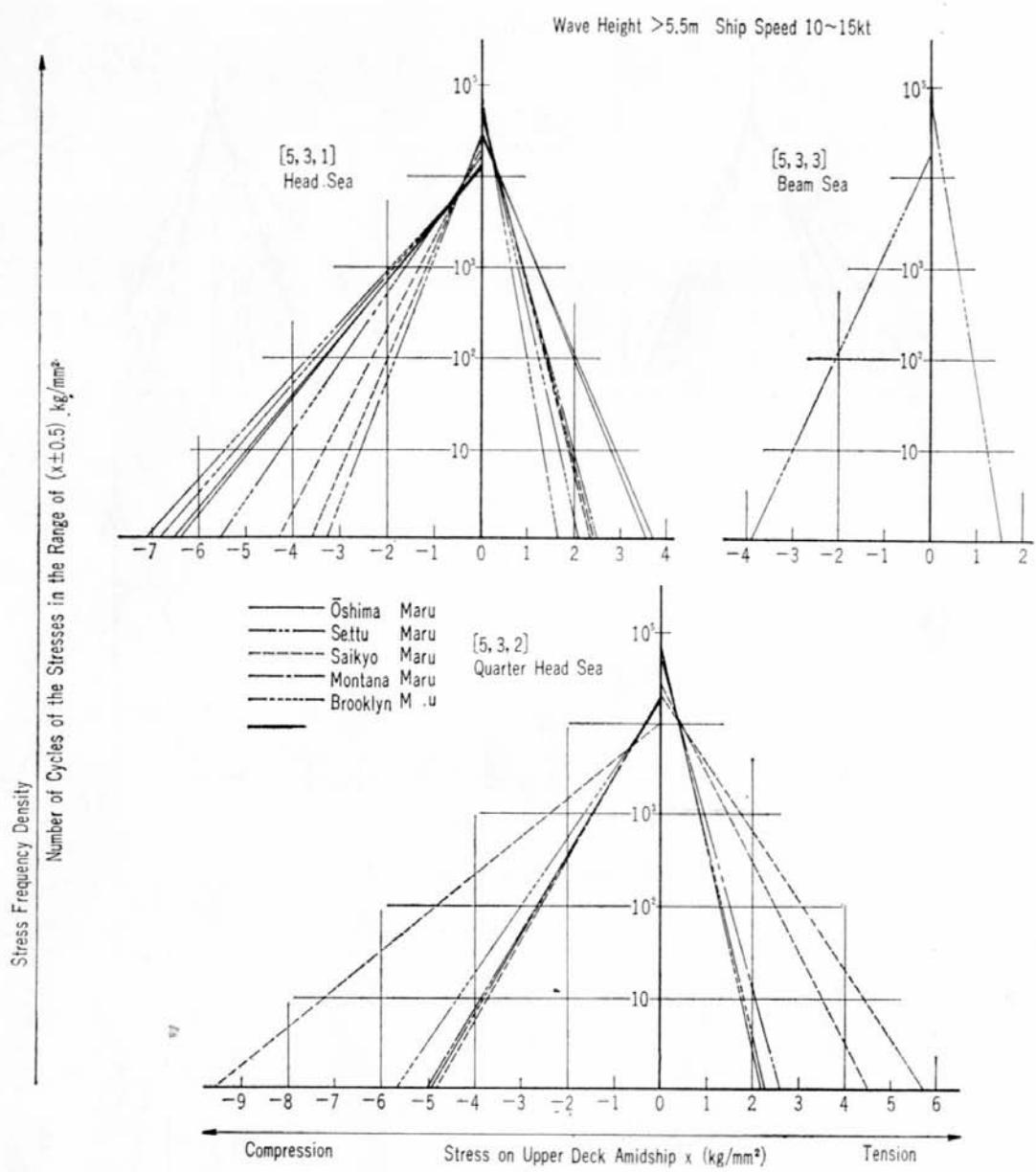


Fig. 4.11 Element Histogram 7 [5, 3, C]

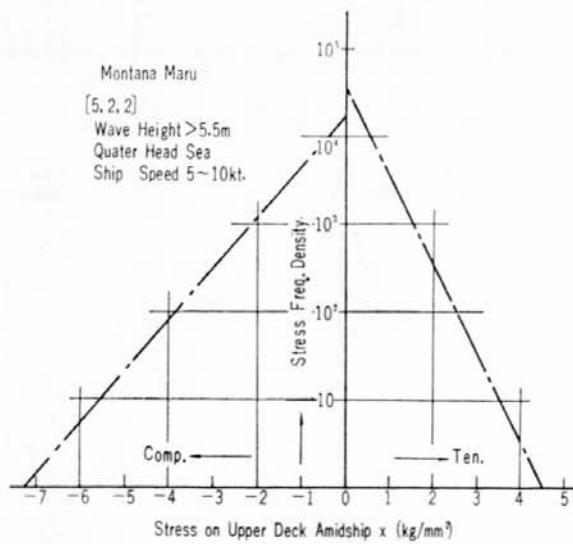


Fig. 4.12 Element Histogram 8

このように、外界および操船条件 [A, B, C] のそれぞれについて平均の要素ヒストグラムを求め、Tab. 4.1 に示した 414 日間の全船の総計のヒストグラムを表中の重み係数を用いて合成してみると、Fig. 4.13 の破線のようになる。ここで長期分布  $p(x)$  は

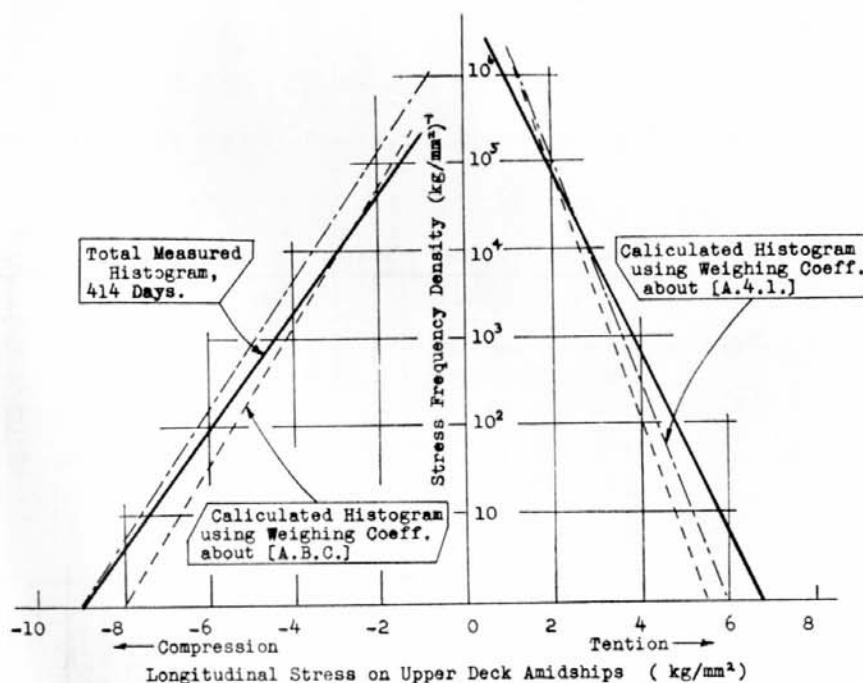


Fig. 4.13 Comparison of Estimated Histogram to the Measured One

$$p(x) = \sum n_i p_i(x) = \sum n_i 10^{a_i x + b_i}$$

によって求めた。ここに  $n_i$  は各条件に属する日数、 $p_i(x)$  は要素ヒストグラム、 $a_i$  は要素ヒストグラムの直線の勾配、 $b_i$  は切片である。図に見るとおり、要素ヒストグラムと重み係数とから計算した頻度分布は、高応力域の頻度が実測のものよりやや低く、低応力の頻度がやや高くなっている。計算によるヒストグラムからある期間中の最大応力を推定するには若干の無理があるかも知れないが、大体の応力頻度分布の模様を知ること、また累積疲労被害の検討を行なうことのためには、この程度の近似で十分有用ではないかと思われる。

また、今回の試験では、外界および操船条件のうち、船速はほとんど大部分が 15~20kt の範囲に集中しており、また向い角の影響も比較的小さいようなので、条件の変数としては波高  $A$  のみをとって同様の計算を試みてみた。簡単のために、船速は 15~20kt、向い角は向波の場合として、[A, 4, 1] の各条件 (Fig. 4.5) の要素ヒストグラムを用い、Tab. 4.1 の最下段に示す波高  $A$  のみの分類による重み係数によってヒストグラムを合成したものを Fig. 4.13 に鎖線で示した。この場合も実測値に対してかなりよい近似を示している。

以上のことから、毎日のある定時刻における外界および操船条件をもってその 1 日間を代表させ、長期間におけるその遭遇頻度（重み係数）を求め、各条件下における 1 日間の応力頻度の要素ヒストグラムを用いれば、長期間の応力頻度分布を大体推定できることがわかった。さらに簡単には、条件として外界条件の波高だけをとって分類した重み係数を用いても相当よい近似が得られることも確かられた。すなわち、本研究におけるような実船試験資料をさらに集積して各種船型における、各条件

下の要素ヒストグラムさえ求めておけば、あとは必ずしも実船計測を行なわなくても、ログブックによる波浪の資料または海洋統計学関係の資料などから波高に関する重み係数を求ることは可能である。長期応力頻度分布の概略を推定することができる。

#### 4.1.3 異常値の分布

E.J.Gumbel はある母集団からある大きさのサンプルを抜取った場合、そのサンプル中の最大値  $x$  の分布は、母集団の分布函数が対数型である場合は、次の累積分布函数  $p(x)$  にしたがうことを示した<sup>20)</sup>。

$$p(x) = \exp(-e^{-y})$$

$$y = \alpha(x - u)$$

ここに  $\alpha$  および  $u$  は定数である。Yuille<sup>21)</sup> は実船試験結果による毎日の最大応力の分布が上式に適合することを確めている。

Fig. 4.14 および 4.15 に摺津丸、大島丸、モンタナ丸およびハドソン丸の 4 隻について、毎日の最大応力値を確率紙にプロットしたものを示す。上式の分布に従う場合は直線に乗るはずであるが、引張応力（ホギング）の場合にはかなりよい適合を示している。図中参考のために Yuille の結果を破線で示した。Yuille はホグ～サグの応力全振幅を用いているのでその半分をもって比較した。

Fig. 4.16 は毎日の最大応力と波高との関係を示したものである。

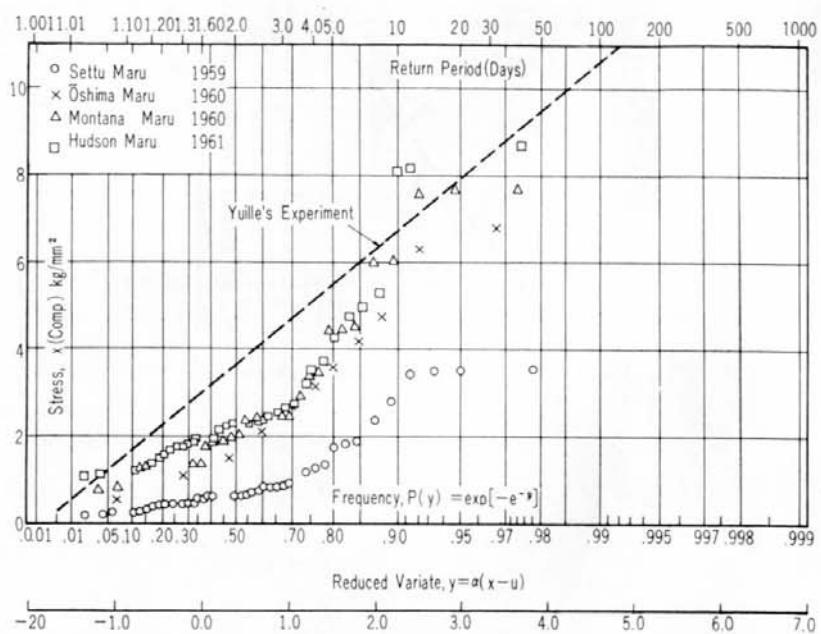


Fig. 4.14 Distribution of Maximum Tension Stress in a Day

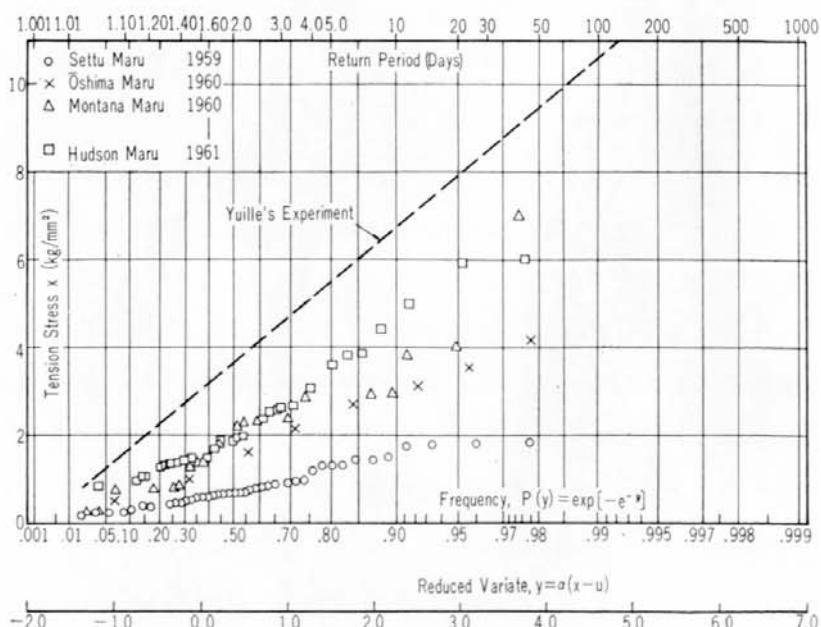


Fig. 4.15 Distribution of Maximum Compression Stress in a Day

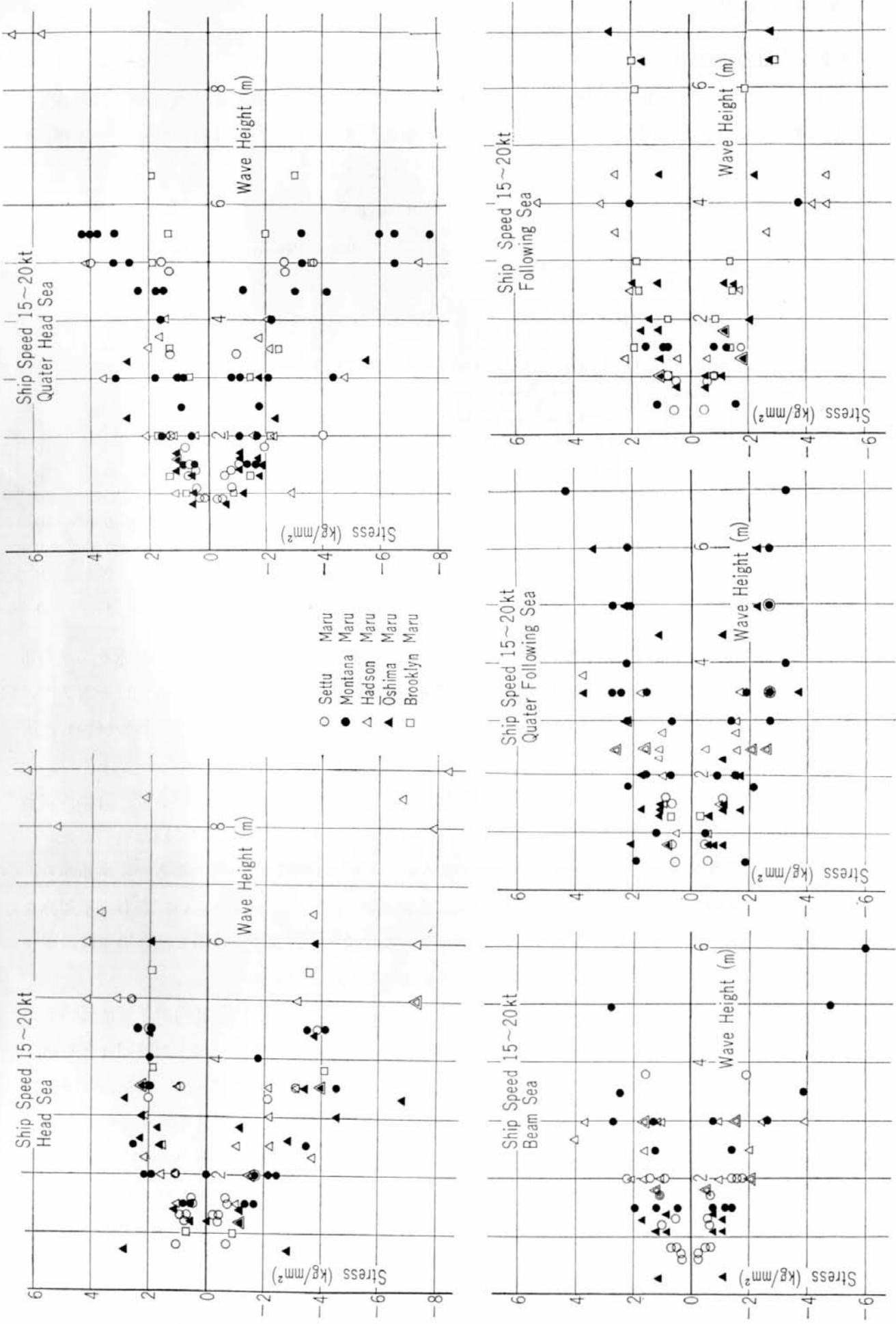


Fig. 4.16 Relation between Wave Height and Maximum Stress in a Day

## 4. 2 甲板水圧

### 4.2.1 水圧頻度分布

青波衝撃による船首部上甲板 No. 1 ハッチサイドにおける水圧頻度を、2.2 で述べた簡易水圧頻度計で計測した結果を Tab. 4.2 に示す。参考のために、さきに摂津丸で計測した結果<sup>16)</sup>も併記した。この場合は水圧値の段階区分が若干異なっていたので、計算による修正を施してある。

Tab. 4.2 Frequency of Deck wave Load

Ships	Period	Wave Pressure on Deck (mH)					
		1—2	2—4	4—8	8—12	12—16	16—
Settsu Maru	4. 12. 1959 — 11. 3. 1960	53	15	4	0	0	0
" "	13. 2. 1961 — 15. 2. 1961	43	2	1	0	0	0
Hodakasan Maru	19. 2. 1961 — 27. 2. 1961	1	1	0	0	0	0
Montana Maru	3. 12. 1960 — 11. 12. 1960	0	0	0	0	0	0
" "	19. 1. 1961 — 2. 2. 1961	186	189	8	29	3	0
" "	1. 1. 1962 — 11. 1. 1962	13	7	3	0	0	0
" "	28. 1. 1962 — 31. 1. 1962	16	13	12	0	0	0
Hudson Maru	1. 1. 1962 — 11. 1. 1962	13	7	3	0	0	0
Ōshima Maru	6. 12. 1961 — 23. 12. 1961	2	0	1	0	0	0
Saikyo Maru	7. 12. 1961 — 26. 12. 1961	7	3	4	0	0	0
" "	8. 2. 1962 — 16. 2. 1962	10	2	0	0	0	0
Total		344	239	36	29	3	0

昭和35年冬から36年春にかけての計測では、旧型の簡易水圧頻度計を用いたため、浸水その他の事故で使用不能になったものが多く、Tab. 4.2 には正常に動作した計器の記録のみを掲げたもので、これ以外の期間にも青波を受けた船もあり、またここに掲げなかつた船ではげしい青波を経験したものもある。

昭和36年冬から37年春にかけての計測では、計器はいずれも終始健全に動作しており、計器を搭載した船で経験した青波はすべて表中に含まれており、表記以外の青波衝撃は受けていない。ただし、この計測は船首上甲板上的一点で行なったものであり、青波現象は概して局所的なものであるから、必ずしもすべての計器がそのときの青波水圧の最大値を記録しているとは限らない。左右玄不対称な水圧を受ける場合も、どちらか一方だけしか記録しないわけである。現に同じ船で他の場所に設置した最高水圧計で、頻度計では記録しなかつた大水圧を記録している例もある。

大体において無人計測を原則としているため、計数値の読み取りを行なう時間間隔が非常に長いものが多い。したがって、Tab. 4.2 に示した期間中でも、実際に青波が集中して起った時間はきわめて限定された短時間であろうと考えられるが、その時間を正確につかむことはできない。航海記録を見れば、その期間中の最も荒れた海況とその時刻を知ることはできるが、青波現象が起るか起らないかの限界の海象条件を正確に求めることも困難である。ただ、同表中の大島丸の例のように、頻度のきわめて少ない期間がわかっていると、その期間中の最も荒れた状態を限界の海面条件と推定することは可能であろう。

海象を応力頻度解析の場合と同様に、波高、船速および出合い角の3変数で表わすとしても、青波現象の生ずる限界条件がわかり、船が長期間の就航中にその条件に遭遇する頻度が求められなけれ

ば、水圧頻度計の測定結果に適確な統計的解析を加えることは難しい。したがって、現在程度の資料だけでは、頻度分布のヒストグラムを求めてあまり意味はないが、Tab. 4.2 の頻度の総計を図示すると Fig. 4.17 のようになる。

このうち、計器が完全に動作した昭和36年冬期のみの4隻の合計をとると Fig. 4.18 のようになり、概略的には類似船の冬期北太平洋の1航海中の青波頻度を推定することができる。ただし、この4隻の遭遇した青波の全数が、前年度のモンタナ丸1隻が昭和36年1月19日から2月2日までに遭遇した数よりも少なく、きわめて不同的な現象であることに注意する必要がある。

いずれの場合も、水圧0~1mHの間は計測資料は得られていない。このように非常に小さい青波衝撃、または白いしぶきとなって甲板上に落ちる白波現象とでもいべきものは、高い水圧を記録する青波現象よりもはるかに頻度の高いことは事実である。

#### 4.2.2 最高水圧

外界条件のはげしさと青波による甲板水圧との関係は、前者がある値に達するまでは後者は零である限界条件に達したのちはじめて発生するという不連続的な現象である。また前述のとおり、青波現象はきわめて不同的な現象で、計器を装備した少数の船の短期間の計測結果から有意義の結論を求めるることは困難である。

いずれにしても、頻度計測結果から疲労強度を検討するというような頻度には達しないと思われる所以、設計者にとって関心の的となるのは、静的計算によって船体構造に損傷を与える可能性のあるような異常に高い甲板水圧値である。こういう異常値になると一層遭遇する機会が少なくなってくる。そこで、できるだけ多くの資料を得るために、なるべく簡単安価な計器ができるだけ多くの船に

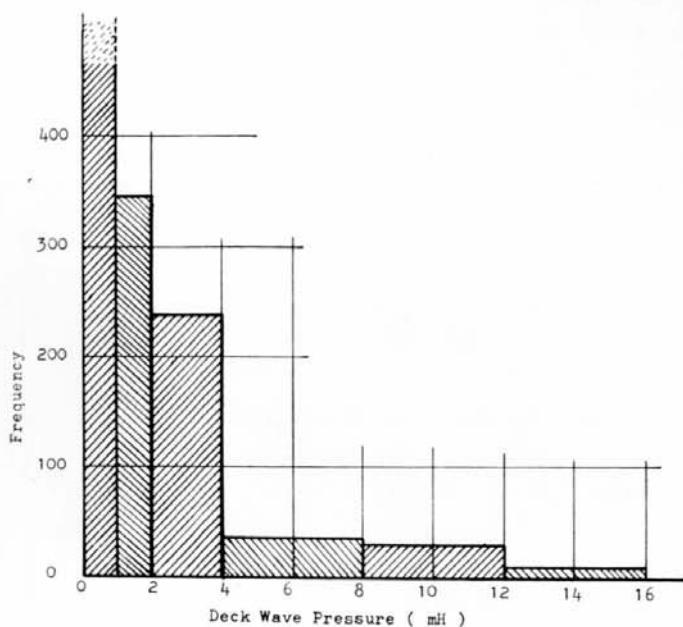


Fig. 4.17 Measured Total Frequency of Deck Wave Load

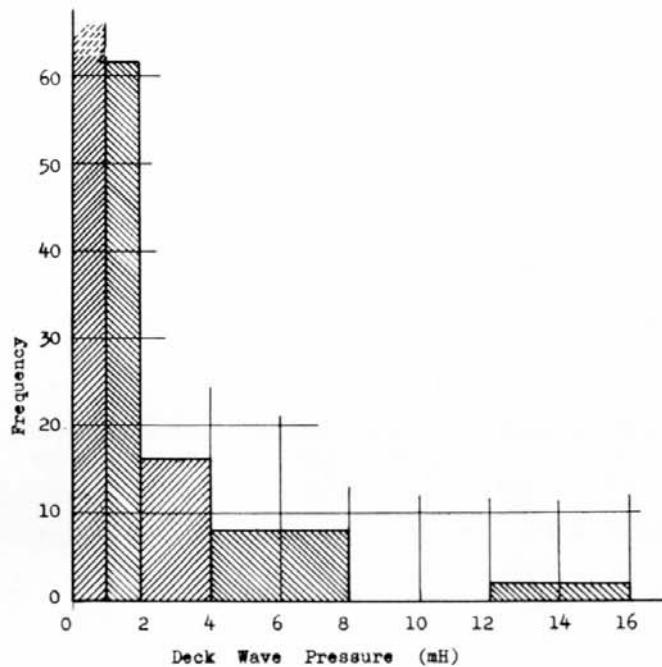


Fig. 4.18 Frequency of Deck Wave Load (4 Navigation of North Pacific Ocean, Winter 1961)

配置しようとして、今回の最高水圧計が計画されたわけである。

試験船10隻のうち、八幡山丸および信濃川丸には各2台、他の船には各1台、合計12台の最高水圧計をとりつけた。

Tab. 4.3 Maximum Water Pressure on Deck

Ships Name	Wave Class.	Swell Class.	Relative Speed (kt)	Head. Angle	Maximum Value	
					from Max. Gauge	from Counter
Hudson Maru	7	7	15	H.	3.5	2-- 4
	" "	6	16	Q.H.	4.2	4-- 8
	" "	7	15	"	3.8	2-- 4
Montana	"	9	8	B.	9.6	4-- 8
	" "	9	8	H.	17.5	8-- 16
Yawatasan	"		6	14	Q.H.	4
	"		7	9	H.	5
	" "		6	14.5	Q.H.	5
	" "		6	14	"	4.5
Norfork	"	9	6	14	H.	4.2
Saikyo	"				3.6	4-- 8
	" "				3.8	2-- 4
	" "				3.2	"
	" "				4	"
Shinanogawa	"		6	H.	9.6 3.6	
	" "		5	"	3.8 4.4	
Ōshima	"		7	"	3.0	4-- 8
	" "		7	Q.H.	2.5	1-- 2
Sōyō	"		5	6	H.	3.1

※ H: Head Sea, Q.H.: Quarter Head Sea, B: Beam Sea

計測結果を一括して Tab. 4.3 に示す。海象、船速および向い角などの外界条件は、主として船の乗組員に計測を依頼するか、航海記録から求めるかのいずれかによった。測定時間間隔は各船によりまちまちで、比較的大きい青波を経験するたびに計測したものもあり、また出港から入港までの長期間を単位としたものもある。いずれの場合も、どの日時どの条件のときに最高水圧を受けたかは判然としないが、その期間中の最もきびしい海面条件がこれに対応するものと考えることにした。

また一二の船では、最高水圧計の受圧膜に凸変形の認められたものもあったが、これは 2.2 で述べたとおり、一度凹変形したものが、なんらかの理由によるきわめて小さい負圧によって反転変形したもので、プラスとマイナスのたわみ量はほぼ等しいものとして圧力を推定した。

連続観測を行なうのではなく、相当の時間間隔をおいて測定しているため、10隻の船でわずかに Tab. 4.3 に掲げただけの記録しか得られなかった。うち2隻はまったく青波に遭遇しなかったものである。この程度の資料では、最高水圧の頻度分布などはもちろん論ずることはできない。また、波浪、船速、出会い角などの外界および操船条件との関連も定量的な議論をするには不十分である。青

波現象の場合は、上記の条件のほかに、船首船型および吃水も重要な要因となることは明らかである。これらの検討は後日に譲るとして、ここでは、出会い角度および波浪階級だけを取上げて、青波最高水圧値との関係をプロットしてみると Fig. 4.19 のようになる。

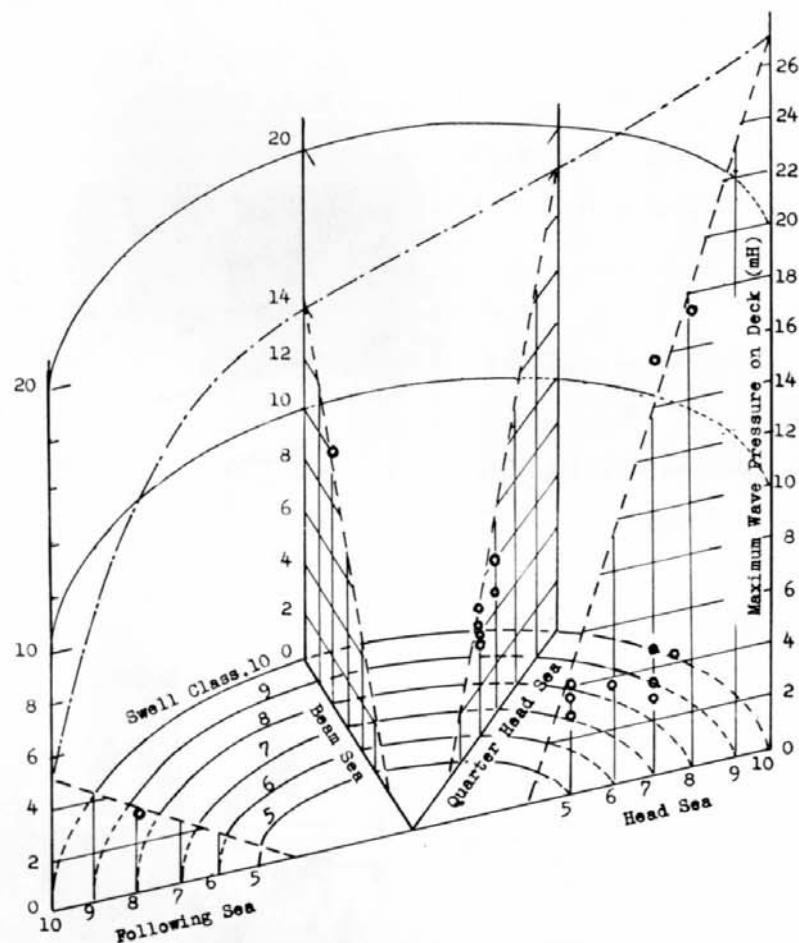


Fig. 4.19 Relation Between the Values of Maximum Water Pressure on Deck and Heading Angle and Sea States

最高水圧計受圧膜のたわみをダイヤルゲージで計測する関係上、現在の 0.1 mm という膜厚をさらに減することは困難で、水圧の低い部分 (3 mH 以下) の測定精度は相当悪い。したがって、前項の頻度計と同様に、青波発生の限界条件を求めることが難しい。しかし、Fig. 4.19 の最高水圧値が零となる点、すなわち斜めの各破線が底面と交わる点は一応この限界条件を示すものと考えてもよいと思われる。

Fig. 4.19 によるとおり、青波水圧最大値は今回の試験では 3~4 mH のものが最も多いが、特に大きいのは 17.5 mH という記録がある。これまで各方面で公表されている青波衝撃による船体構造の損傷例から類推すると約 10 mH 程度が一応危険水圧と考えられるようであるが、今回の試験では青波による損傷は一つも生じていない。きわめて高い水圧を受けているにもかかわらずなんらの損傷も生じていないのは、青波衝撃水圧がきわめて局所的、瞬間的なものである場合が多いためと考えられる。青波水圧の空間的、時間的分布状況とこれを受ける構造物の寸法、固有振動数などの関係については、今後さらに検討を要する問題であると思う。

### 4.2.3 落水試験

前項の終りに述べたとおり、青波衝撃とこれに対する船体構造の応答を検討するためには、青波による水圧の値だけでなく、その空間的、時間的分布およびこれに対する各種構造要素の応答を解明する必要がある。これは実船試験ではなかなか困難であるので、実験室的な落水試験装置を試作してその基礎実験を試みた。

この種の実験は渡辺そのほか<sup>22)23)</sup>による小規模のものがすでに実行されているが、今回のものはやはりこれを大型にしたものである。Fig. 4.20 にこの装置の外観を示す。高さ約 10 m の鉄塔に容量 1 t のタンクを吊し、タンクの底をヒンジ式に開閉できるようにしておいて、圧縮空気シリンダで支えておき、空気を開放して底を開いて水塊を落下させる装置である。タンク底の高さは約 8 m が最大で自由に任意の高さに調節できるようになっている。タンク底面は  $1\text{m} \times 1\text{m}$  の正方形である。

地上に  $1.2\text{m} \times 1.2\text{m}$  の補強板を置いて受圧盤としこれに抵抗線ひずみゲージを利用してダイヤフラム式の水圧計を配置して水圧分布を計測した一例を Fig. 4.21 および Fig. 4.22 に示す。さきに 2.2.3 の項で示した Fig. 2.17 も同様にこの水塊落下試験の一例である。図に見るとおり、平面的には水圧一定と考えられる部分はきわめて狭い範囲に限られており、水圧値、衝撃ピークの鋭さなどは、水量、落下高さおよびタンク底の開き速度に大きく左右されることがわかった。Fig. 4.22 に示したものは最も衝撃ピークの鋭い例で、この場合  $1.2\text{m}$  平方の受圧盤に加わる衝撃荷重は 40 t 以上を記録している。Fig. 2.17 に示したものは圧縮空気の開放速度を加減してタンク底をゆっくり開いた場合の例で、水圧の立上り速度はあまり変わらないが、最大値は大幅に低下しており、しかも最大値附近の圧力がしばらく持続するというまったく異なる現象を示し

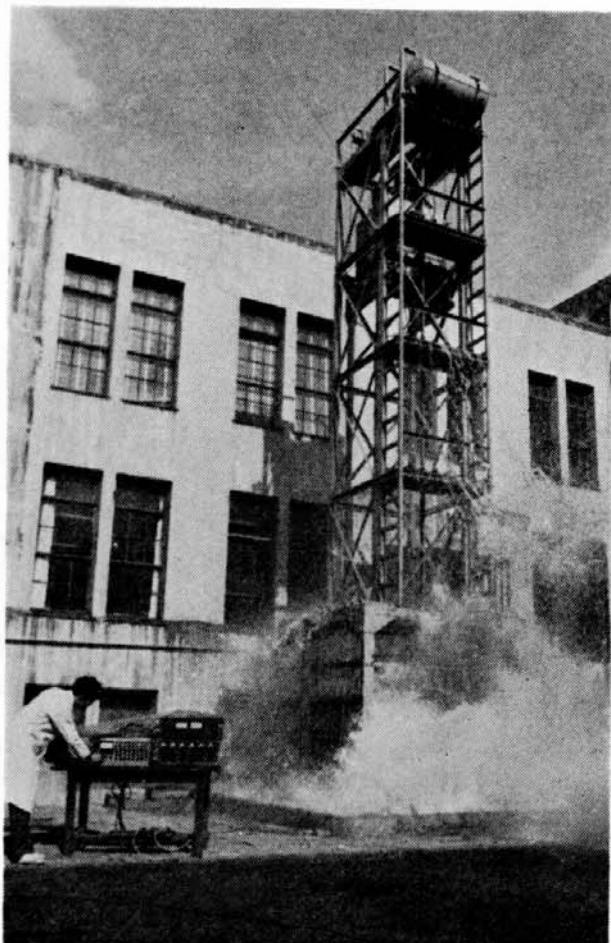


Fig. 4.20 Water Falling Tower

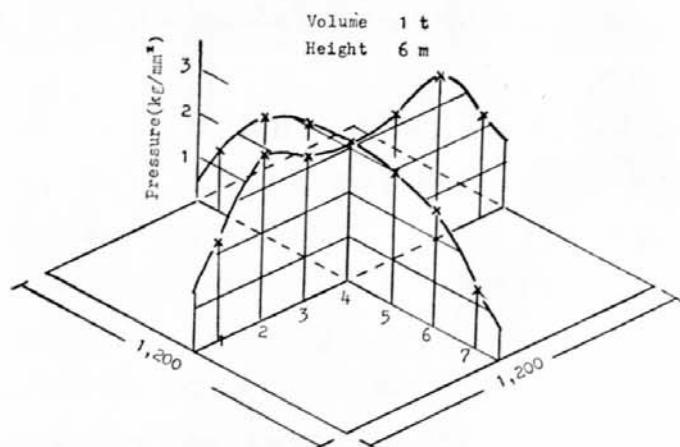


Fig. 4.21 Distribution of Water Pressure (1)

ている。実船における青波衝撃はむしろこの方に近いのではないかと考えられている。

本装置によって、水量、落下高さ、開放速度などを系統的に変化して、落水衝撃水圧および荷重の過渡的状態を検討したのち、これに対する構造要素の応答についても実験的研究を進めているが、これらの結果の詳細については別の機会に報告することにする。

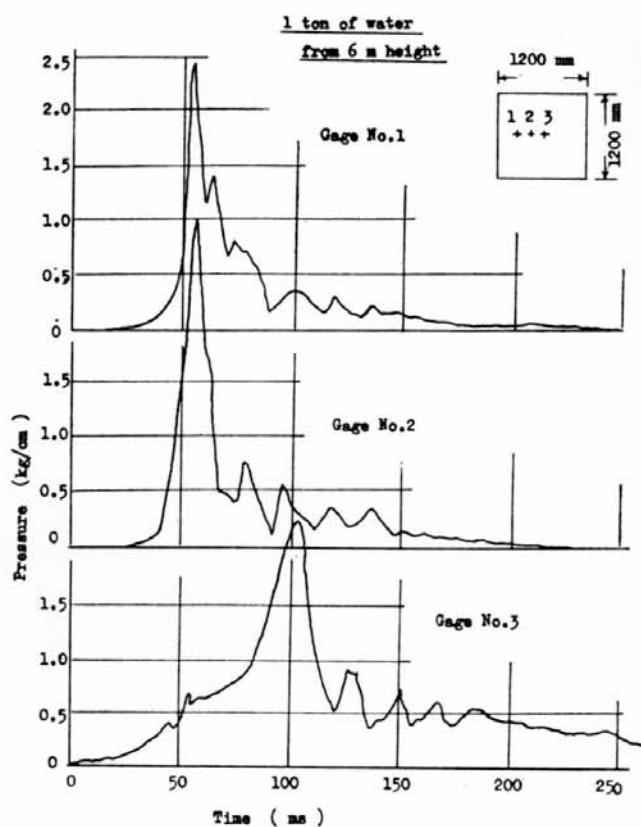


Fig. 4.22 Distribution of Water Pressure (2)

## 第5章 結論

昭和35年および昭和36年の冬期に、わが国の商船における航行中の甲板縦応力の頻度計測と、船首部甲板上における波浪の打込み（青波）による甲板水圧の計測を行なった。

実験船12隻中、9隻はD.W. 12,000t前後の比較的高速な貨物船で、その寸法構造なども大体類似している。その他、油送船、鉱石兼油送船、冷凍運搬船各1隻についても計測を行なった。航路はニューヨーク航路のものが8隻、西廻り世界一周、カナダ、キュエートおよび南氷洋が各1隻であった。

甲板縦応力については、機械的応力頻度計を用いて、各種条件下における応力頻度の短期分布および全行程を通じての長期分布などの計測を行なった。そのほかに新しい試みとして、頻度分布をヒストグラムの形で表わし、これを直線で近似し、毎日24時間の要素ヒストグラムを求めた。外界および操船条件としては波高、船速および出会い角の3変数をとり、毎日正午の条件を求めて近似的にその1日間の条件を代表できるものと考え、各条件下の要素ヒストグラムをそれぞれ集計して、各条件に対する平均的な要素ヒストグラムを求めた。この平均的な要素ヒストグラムと各条件の重み係数（出現頻度）から計算によって組立てた全体のヒストグラムが、実測によるものとかなりよく一致していることが認められた。さらに簡単には、外界条件として波高のみの1変数だけをとって同様の計算を行なっても、相当よい近似が得られるようである。すなわち、要素ヒストグラムさえ求めておけば、長期間の実船計測を行なわなくても、就航海面の波浪に関する統計資料があれば、長期の応力頻度分布の概略を推定できることが認められた。

また、2年間にわたる計測から推定して、今回試験した船と類似の船（貨物船D.W. 12,000t前後）がニューヨーク航路に就航する場合、20年間に遭遇する最大応力は、中央部上甲板上で圧縮応力約10kg/mm<sup>2</sup>、引張応力約6kg/mm<sup>2</sup>程度と考えられる。

波浪の打込みによる船首部甲板上での衝撃水圧は、全測定船の2年間の記録中17.5mHが最大であった。しかしこの場合でも船体構造にはなんらの損傷も生じていない。水圧の空間的時間的分布および構造要素の過渡的応答などの詳細な検討は今後の研究課題として残されている。

波浪の打込み水圧については、簡易水圧頻度計による頻度計測、最高水圧計による最大値のみの計測などを行なった。この水圧値は船速、波高、出会い角などの条件によって大きく影響されることが認められたが、この他にも船首船型、吃水等の重要因子があるので、まだ得られた資料も少ないため、現段階において統計的な結論を下すことはできない。今後の資料の集積が期待される。

## 参 考 文 献

- 1) Report of the Committee on Response to Wave Load on Ships, 1st.  
International Ship Structure Congress, Glasgow, 1961.
- 2) N. H. Jasper; David Taylor Model Basin Rep. 781 (1953).
- 3) N. H. Jasper; D. T. M. B. Rep. 960 (1955).
- 4) N. H. Jasper & J. T. Birmingham; D. T. M. B. Rep. 976 (1956).
- 5) N. H. Jasper; Trans S. N. A. M. E., Vol. 64 (1956).
- 6) N. H. Jasper & R. L. Brooks; D. T. M. B. Rep. 977 (1957).
- 7) N. H. Jasper & J. T. Birmingham; D. T. M. B. Rep. 1216 (1957).
- 8) N. H. Jasper, R. L. Brooks & J. T. Birmingham; D. T. M. B. Rep. 1251 (1960).
- 9) J. T. Birmingham, R. L. Brooks & N. H. Jasper; D. T. M. B. Rep. 1198 (1960).
- 10) R. Bennet; Rep. of Swedish Shipbg. Res. Foundation, No. 13 (1958).
- 11) R. Bennet; Ditto, No. 15 (1959).
- 12) R. Bennet; European Shipbg., Vol. 8, No. 5, 6 (1959).
- 13) 日本造船研究協会第10研究部会報告, 1955.  
(Report of the 10th Res. Commit. of the Shipbuilding Research Assoc. of Japan, 1955.)
- 14) 日本造船研究協会第24研究部会報告, 1957  
(Report of the 24th Res. Commit. of the Shipbuilding Research Assoc. of Japan 1957.)
- 15) 秋田, 石山, 造船協会論文集, 105号, 1959。  
(Y. Akita & I. Ishiyama; Journal of the Society of Naval Architects of Japan, No. 105, 1959.)
- 16) 日本造船研究協会第44研究部会報告, 1961  
(Report of the 44th Res. Commit. of the Shipbuilding Research Assoc. of Japan. 1961.)
- 17) 第44研究部会; 造船研究, 3卷3号, 1961  
(The 44th Res. Commit.; Shipbuilding Research, Vol. 3, No. 3, 1961,)
- 18) D. E. Cartwright & M. S. Longuet-Higgins; National Inst. Oceano., 1956.
- 19) M. S. Longuet-Higgins; J. of Ship Research, Vol. 6, No. 3, 1952.
- 20) E. J. Gumbel; National Bureau of Standards, Applied Mathematics Series 33.
- 21) M. Yuille; Trans. Royal Inst. Naval Architects, Vol. 105, 1963.
- 22) 渡辺, 熊井, 大野; 西部造船会会報, 16号, 1958  
(Y. Watanabe, T. Kumai & Y. Ōno; Journal of the Society of Naval Architects of West Japan, No. 16, 1958.)
- 23) 渡辺, 熊井他; 西部造船会会報, 20号, 1959  
(Y. Watanabe, T. Kumai & others; Ditto, No. 20, 1959.)

# 日本造船研究協会第49究研部会提出資料

## 1. 計器に関するもの

簡易水圧頻度計の構造および使用法	(S R 49 - S 2 - 1)
簡易水圧頻度計について	(S R 49 - 1 - 5)
簡易水圧頻度計図面	(S R 49 - S 4 - 2a b. c. d)
簡易水圧頻度計取扱説明書	(S R 49 - S 5 - 4)
簡易水圧頻度計の電池の寿命について	(S R 49 - S 2 - 2)
最高水圧計使用説明書	(S R 49 - S 5 - 5)
最高水圧計図面	(S R 49 - S 4 - 1)
圧力計予備実験	(S R 49 - 4-5)
最高水圧計図面ならびに特性曲線	(S R 49 - S 3 - 1)
衝撃水圧測定用架台による水圧の Calibration Curve 等	(S R 49 - S 7 - 7.8)
最高水圧計と水塊落下試験	(S R 49 - 5 - 3)
応力頻度計説明書	(S R 49 - S 2 - 3)

## 2. 計測に関するもの

第44研究部会摂津丸実船試験概要	(S R 49 - 1 - 4)
計測要領	(S R 49 - S 2 - 4)
摂津丸計測資料	(S R 49 - 3 - 1)
モンタナ丸 "	(S R 49 - 3 - 2)
大島丸 "	(S R 49 - 3 - 3) (S R 49 - 4 - 1)
ブルックリン丸 "	(S R 49 - 3 - 4)
壮洋丸 "	(S R 49 - 4 - 2)
ハドソン丸 "	(S R 49 - 4 - 3)
穂高山丸 "	(S R 49 - 4 - 4)
西京丸 "	(S R 49 - 5 - 4)
モンタナ丸 "	(S R 49 - 5 - 5)
信濃川丸 "	(S R 49 - 5 - 6)
ハドソン丸 "	(S R 49 - 5 - 7) (S R 49 - S 7 - 5)
ノーホーク丸 "	(S R 49 - 5 - 8)
八幡山丸 "	(S R 49 - 5 - 9) (S R 49 - S 8 - 3)
壮洋丸 "	(S R 49 - S 8 - 4)
第49研究部会実船実験要領	(S R 49 - S 5 - 2)

## 3. 解析に関するもの

応力頻度解析方案	(S R 49 - S 6 - 1)
----------	--------------------

穂高山丸応力頻度解析結果		(S R 49 - S 7 -1)
モンタナ丸	"	(S R 49 - S 7 -2)
牡洋丸	"	(S R 49 - S 7 -9)
摺津丸、ブルツクリン丸	"	(S R 49 - S 7 -10)
ハドソン丸	"	(S R 49 - S 7 -3)
大島丸	"	(S R 49 - S 7 -4)
ハドソン丸	"	(S R 49 - S 8 -1)
モンタナ丸	"	(S R 49 - S 8 -5) (S R 49 - S 9 -4)
大島丸	"	(S R 49 - S 8 -13) (S R 49 - S 9 -3)
昭和35年度応力頻度解析結果中間報告 (1)		(S R 49 - 5 -1)
"	(2)	(S R 49 - S 8 -7)
応力頻度解析中間報告		(S R 49 - S 9 -1)
水圧頻度解析結果		(S R 49 - 5 -2)
昭和35年度大島丸異常応力の推定		(S R 49 - S 9 -2)
甲板の最高水圧		(S R 49 - S 8 -6)

#### 4. そ の 他

オッショロ記録と応力頻度計記録による応力頻度の比較		(S R 49 - S 8 -2)
巡視船の航走中の船体応力の度数分布について (「むろと」の計測結果)	(S R 49 - S 8 -8)	
同	上	(「こじま」の計測結果) (S R 49 - S 8 -9)

昭和40年3月10日 印刷  
昭和40年3月15日 発行

**日本造船研究協会報告 第49号**

発行人 菅 四 郎

発行所 社団法人日本造船研究協会

東京都港区芝平町35  
船舶振興ビル8階  
電話(502) 2371~80  
内線(421~429)

印刷所 船舶印刷株式会社

東京都台東区東上野1-28-3  
電話(831) 4181~4