

(昭和 57 年 5 月 日本造船学会春季講演会において講演)

追い波中における船体縦運動と垂直波浪荷重について

正員 竹 沢 誠 二* 正員 平 山 次 清*

正員 西 本 和 生**

On the Prediction of Longitudinal Motions and Vertical Wave Loads
of a Ship in Following Seaby Seiji Takezawa, *Member* Tsugukiyo Hirayama, *Member*
Kazuo Nishimoto, *Member*

Summary

As a sequel to Ref 1, comparison between results of theoretical calculation and tank experiment was mainly carried out at the zone where encounter frequency approaches zero in following waves. Vertical shearing force, which was not dealt with previously, is included in this paper. Meanwhile, problem on following long crested irregular waves are also dealt with. The following are outlines of conclusions.

1) Calculated results by the widely used New Strip Method (NSM) or Ordinary Strip Method (OSM) for transfer function of vertical shearing force in following waves were compared to experimental results. This comparison shows bad agreement, worse than that in the case of vertical bending moment. Hence, these methods are regarded to be impracticable in following waves.

2) Transfer function of vertical shearing force by $N(A)$, recommended in the previous paper to be a new practical method for vertical bending moment, shows a considerable difference from experimental results. Therefore, it can not be regarded as having practical precision of prediction on vertical shearing force.

3) In following waves, results of theoretical calculation of vertical wave loads transfer function at $F_n=0$ express experimental ones the best quantitatively in any ship speed. Hence, this approximate calculation can be recommended as a practical tentative one.

4) It is understood that there is still certain problem in calculation of diffraction forces and Froude Krylov forces in following waves by presently used theoretical methods.

5) By applying transfer function obtained from experiment, characteristics in long crested irregular following waves can be precisely predicted. In other words, despite the singular form of spectra in the encounter phenomena in following waves, the popular method of short term prediction based on the principle of linear superposition is proved with experimental evidence.

6) Encounter mean period, both obtained from estimated encounter spectra and measured directly from encounter time history, appear to be nearly identical. This means that it is possible to predict encounter mean period in long crested waves from encounter spectrum.

1 前 言

本論は前報¹⁾の続編として、追い波中で出会い周波数がゼロに近くなる領域での、縦運動と縦波浪荷重について、理論計算結果と水槽試験結果を比較検討したものである。本研究の契機は ITTC 耐航性委員会での波浪中

船体運動に関する国際協同計算の結果が、追い波中の縦波浪荷重において各研究機関による算出値間に特に著しい差があったことにあった。ITTC 協同計算で対象にしたコンテナ船型について、計算と同一状態で水槽試験を実施し、前報では波浪中縦曲げモーメントに関して、実験が困難なためデータの少なかった追い波中の周波数応答関数の実験値を求め、その特性をよく説明できる推定値が得られる新実用算法として、NSM に Added Mass

* 横浜国立大学 船舶・海洋工学科

** 東京大学大学院 (研究当時横浜国立大学大学院)

にのみ丸尾の三次元修正を用いる算法を提案した。

本論では縦曲げモーメントより以上に、各機関の計算値間に差があった垂直剪断力の応答関数について、水槽試験を追加し同様な比較を追加するとともに、不規則波中の縦波浪荷重についても検討した。また、不規則追い波、およびその中での船体応答の出会いスペクトルは、ある周波数で発散する特異な形のスペクトルになる。本報ではこのようなスペクトルがどの程度実現されているかを実験で検討するとともに、推定出会い応答スペクトルと実測のそれを比較し、不規則追い波中における出会い波および出会い現象の統計的特性についても検討した。

なお、使用した模型とその状態、実験装置、試験水槽は前報と全く同じであるので本論では実験法などについては記述しない。応答関数を求める実験に関しては実験法も全く同様で、規則追い波および前報で開発した過渡追い波中の試験を行った。測定した波浪荷重はミドシップにおける縦曲げモーメントと垂直前断力である。後者は今回追加した計測項目であるが、波浪荷重測定用スチール・バー（前報 Fig. 1 参照）に垂直剪断力測定用のストレインゲージを追加して計測した。

2 追い波中波浪荷重応答関数

今回の実験では、過渡水波および規則波中でミドシップにおける垂直剪断力 F_V を垂直曲げモーメント M_V と同時に計測した。なお、出会い周波数 (f_e) ゼロの影響が顕著に現われるフルード数 $F_n=0.4$ の場合を、基準速力として選んだ $F_n=0.275$ の場合の他に実施した。

また、模型の船首部を固定した状態で同じ装置を使用して、波浪強制外力のみによるミドシップでの $(F_V)_{EX}$ と $(M_V)_{EX}$ を実験で求めた。これらの計測結果は Fig. 1~4 および Fig. 5~8 中に点で示されている。さらにこれらの図中には下記の各種計算法による結果を同時に線で記入し、実験値との比較を行っている。

O(O) : OSM 法, 原型 (original)

N(O) : NSM 法, 原型 (original)

N(A) : NSM 法, Added Mass にのみ三次元修正

N(AD) : NSM 法, Added Mass および Damping Coef. に三次元修正

FK : 流体力を Froude-Krylov 力のみとした場合

N(O)+E(W. EX) : N(O), ただし Wave Exciting Forces に Experiments で得られた値を使用

N(A)+E(W. EX) : N(A), ただし Wave Exciting Forces に Experiments で得られた値を使用

FK 以下は本論で追加された計算である。なお、FK 法は、Radiation と Diffraction に基づく項を全部ゼロと

し、慣性力、復原力と Froude-Krylov 力のみが作用するとした算法である。

2.1 波浪中縦曲げモーメントの応答関数

縦曲げモーメントに関する図は Fig. 1~4 にまとめている。同様な図が前報にも掲載されているが、 $F_n=0.4$ における波浪強制縦曲げモーメント $(M_V)_{EX}$ の図 (Fig. 4) は前報になかったものであり、各図中には今回の実験が追加されている。さらに、N(O)+E(W. EX) と N(A)+E(W. EX) および FK の計算結果が追加されている。

これらの図から、前報で提案した新実用算法 N(A) において Fig. 2, 4 に示されている実験で求めた波浪強制モーメントを使用して、得られた波浪中縦曲げモーメント、N(A)+E(W. EX) は実験値にはほぼ等しいことが読み取れる。すなわち、Fig. 2, 4 に示されている波浪強制モーメント成分の実験値と理論値の差が特に $\bar{\omega}_e=0$ の影響を受ける範囲において問題点として残されていることがわかる。

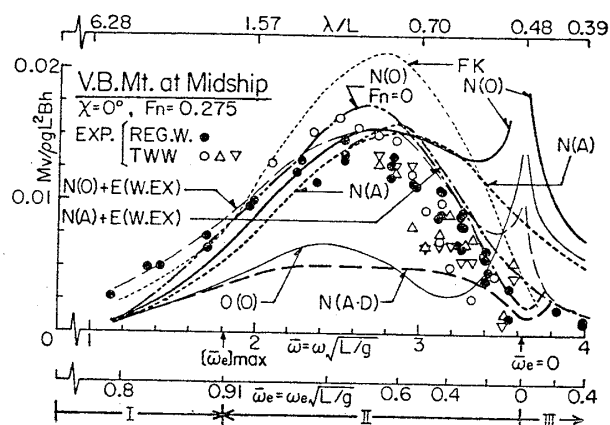


Fig. 1 Transfer function of vertical bending moment in following waves at $F_n=0.275$

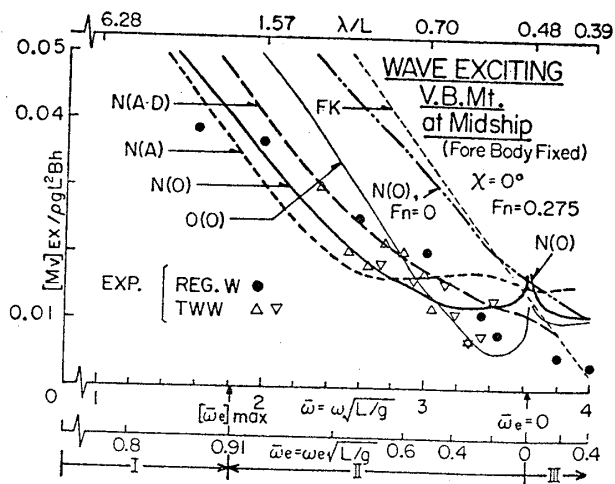


Fig. 2 Wave exciting moment in following waves at $F_n=0.275$

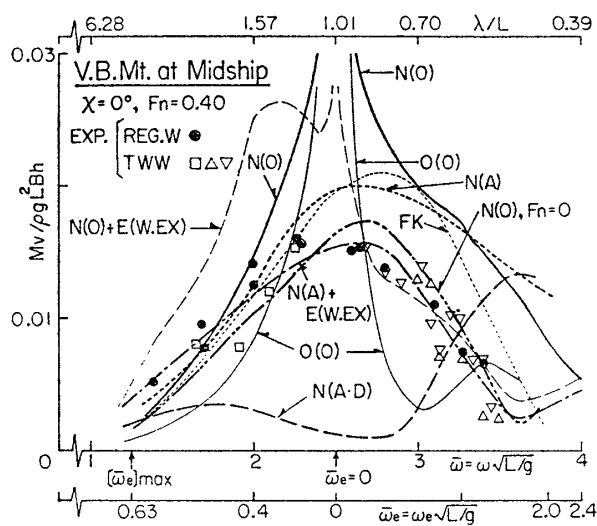


Fig. 3 Transfer function of vertical bending moment in following waves at $F_n=0.4$

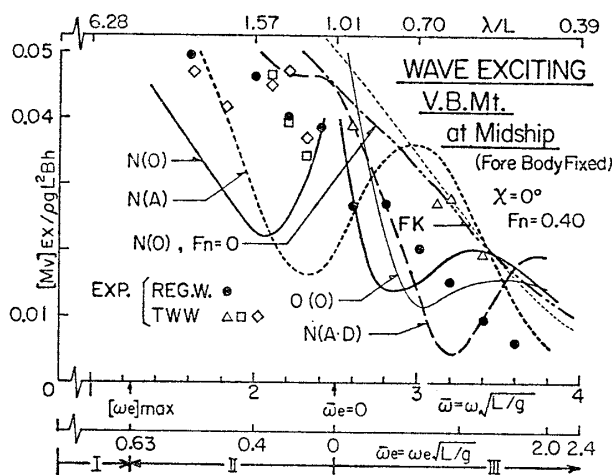


Fig. 4 Wave exciting moment in following waves at $F_n=0.4$

出会い周波数がゼロに近くなると波浪強制力として Froude-Krylov 力が支配的に作用するであろうとの類推から、FK の計算値を追加した。その結果は Fig. 2, 4 の波浪強制モーメントでは実験値と定性的に合っているが定量的に合っていないことから、Fig. 1, 3 の波浪中縦曲げモーメントでも同様な傾向の差を示している。

これらのことから Froude-Krylov 力および出会い周波数ゼロ近辺での Diffraction Force の理論計算の推定精度がまだ不十分であることがわかる。

2.2 波浪中垂直剪断力の応答関数

本論ではミッドシップでの波浪垂直剪断力を扱っているが、実験結果と各種計算値の比較を Fig. 5~8 に示した。なお、Fig. 5 には住友重機平塚水槽の試験結果⁹⁾ (SHI) を記入させていただいた。本論の実験結果とほぼ一致していることがわかる。縦曲げモーメントの場合に比べ、前節で述べた計算値は全般的に実験値に合っ

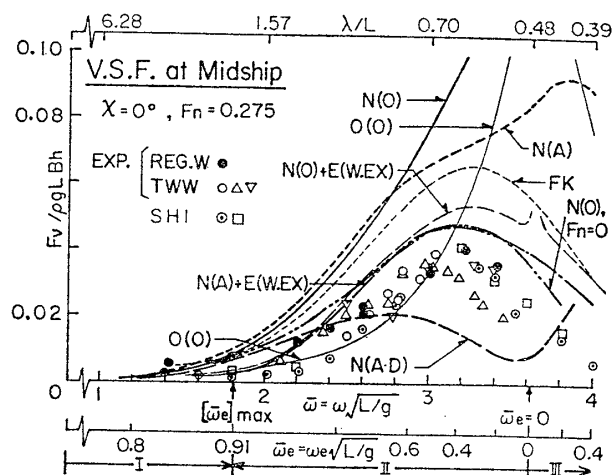


Fig. 5 Transfer function of vertical shearing force in following waves at $F_n=0.275$

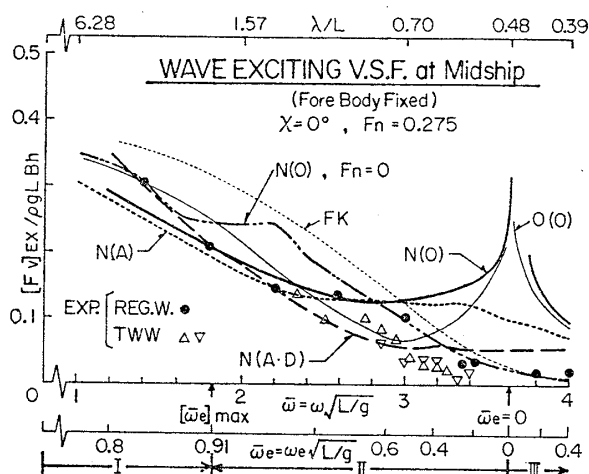


Fig. 6 Wave exciting force in following waves at $F_n=0.275$

いないことが目立つ。縦曲げモーメントではほとんど一致した $N(A)+E(W. EX)$ の計算結果も垂直剪断力では縦曲げモーメントほどの定量的な一致は見られない。また、縦曲げモーメントで実用算法として推薦した $N(A)$ による計算結果は定性的にその傾向はやや似ているが、定量的には差が大であり、垂直剪断力では実用算法とはいいがたい。FK 法が $N(A)$ よりよい傾向と定量性を与えているが、FK 法は追い波時の出会い周波数がゼロに近い範囲でしか適用できないことは明らかであるので、どの範囲で FK 法をとるかを別に決める要があり、このままでは実用算法に組み入れられない。

なお、 $O(O)$ と $N(O)$ は $\omega_0=0$ での発散の影響が縦曲げモーメントの場合より以上に顕著に現われ、全く不適格である。

2.3 追い波中縦波浪荷重応答関数の特性

通常使用されているストリップ法すなわち NSM および OSM に手を加えることを前提として、追い波中波

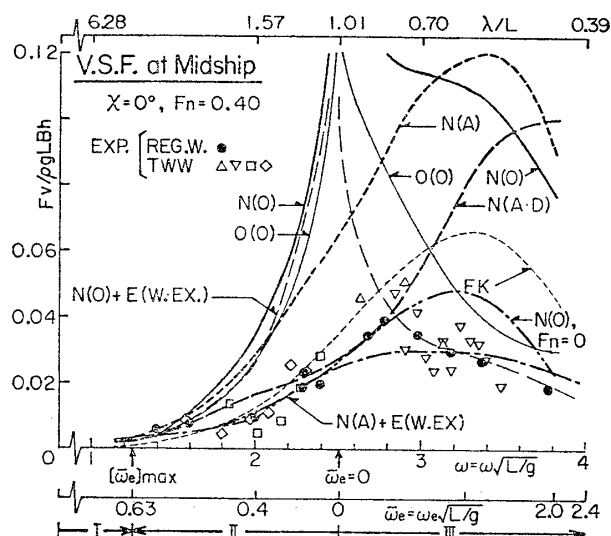


Fig. 7 Transfer function of vertical shearing force in following waves at $F_n=0.4$

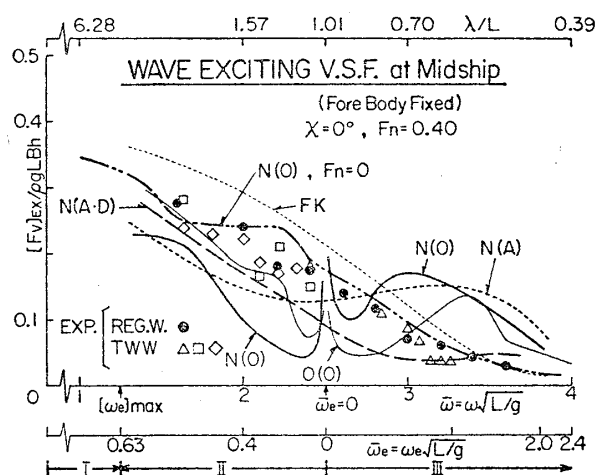


Fig. 8 Wave exciting force in following waves at $F_n=0.4$

浪荷重応答関数推定の改良を考えてきたが、ここでは観点を変えて、水槽試験から得られた実際の現象に立脚して再考してみる。なお船体運動の計算には問題点はほとんどないので、 $N(A)$ 、 $N(O)$ などの結果はそのまま波浪荷重計算に利用できると考える。

Fig. 1 と 3, 5 と 7, で M_v および F_v の実測応答関数どうしを比較してみると、2つの船速の応答関数は定量的にもほぼ一致する。そこで、本論には掲載していないが、 $F_n=0$ の場合の実測値と、船速のある場合の実測値を比較してみると、これらは全部ほぼ一致していることがわかった。

実際の現象では、追い波中の縦波浪荷重は現象として波周波数 ω すなわち波そのものに支配されており、船速影響を含んだ ω_e からの影響が少ないことを意味する。つまり、追い波中で出会い周期が非常に長い場合には、

流体力に船速影響は全くなく、船体停止時 $F_n=0$ の場合と同じ現象になる。ただし現象の周波数は ω_e である。すなわち $F_n=0$ の場合の現象が周波数だけが ω_e となり、時間軸上で引き伸ばされてゆっくりした現象として見られるに過ぎないと考えられる。

この考えによると、波周波数 ω ベースの応答関数として、 $F_n=0$ のそれがどの船速時でも適用されることになる。そこで、 $F_n=0$ の時の $N(O)$ による縦波浪荷重 M_v と F_v の計算値をこれらの図に $N(O)$ 、 $F_n=0$ として記入してみた。なお、 $F_n=0$ では出会い周波数が比較的大であるので $N(O)$ と $N(A)$ に有意な差はない。 $F_n=0$ の計算特性が各種推定計算特性の中で実測値に最も近く、定量的にも実測値にほぼ一致していることがわかる。

Fig. 2, 4 と 6, 8 の $(M_v)_{EX}$ 、 $(F_v)_{EX}$ の図に $F_n=0$ のときの $N(O)$ による算出値を追加記入した。この特性は他の算出特性と傾向が異なり、特にこれまでの推定値で問題のあった $\omega_e=0$ に対応する波周波数 ω をはさんだ領域で実測特性の示す傾向とよく似ている。 $F_n=0$ の計算では前報(5)式の Diffraction 成分の算出にあたり、波周波数 ω に対する M_H 、 N_H の値を使用するのに対し、その他の算法では出会い周波数 ω_e に対する M_H 、 N_H を使用しているところが基本的な差である。これらのことから、追い波中波浪荷重応答関数算出にあたり、Diffraction 成分では波そのものが出会い現象に優先し、船速にかかわらず ω に対する M_H 、 N_H を使用の方が良いことが類推できる。

一方、 $F_n=0$ の応答関数を航走時の波周波数ベースの応答関数として代用することを考えると、現象からの知見として船速影響は無視できるとして船速の入っている項は省略したとしても、前論の(3),(4),(5)式においての周波数を ω としていること、Radiation 成分の計算でも波周波数 ω に対する M_H 、 N_H を用いていることなどの現行のストリップ法に対する算法上の不合理がある。しかし、現実の現象を良く説明しているので新理論算法が開発されるまでの実用算法として推奨できよう。もちろん、出会い角 χ に対して適用限界を別に検討せねばならないが、少なくとも前論 Fig. 12 に示した $\chi=30^\circ$ の場合は $F_n=0$ で代用する方法が最良の推定を与えた。

3 不規則追い波中の特性

3.1 追い波状態で出会い不規則波

$S_{hh}(\omega)$ なるパワースペクトルを持つ長波頂不規則波中を追い波状態で船速 V で航走して得られた出会い波のパワースペクトルを $S_{hh}(\omega_e)$ とする。一般に出会い角を χ とし、追い波を $\chi=0^\circ$ にとると

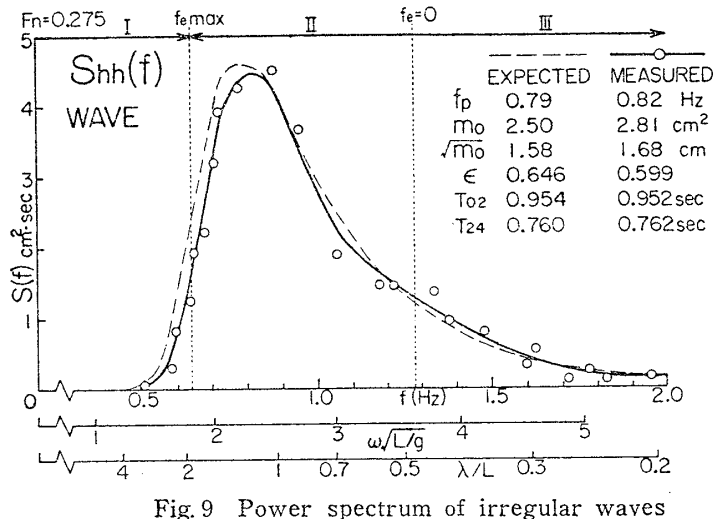


Fig. 9 Power spectrum of irregular waves

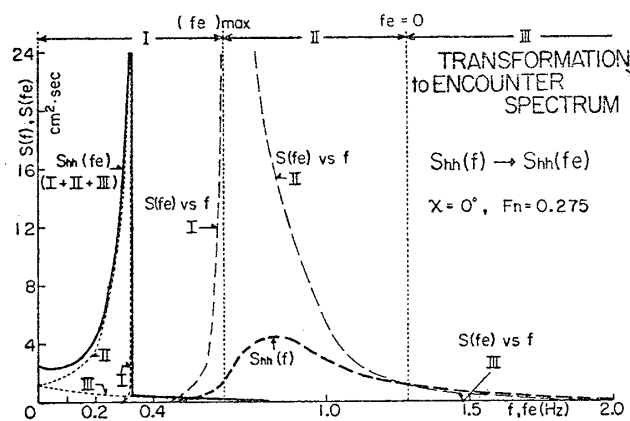


Fig. 10 Transformation to encounter spectrum

$$\omega_e = |\omega - V \cdot (\omega^2/g) \cdot \cos \chi|$$

$$f_e = |f - V \cdot (2\pi f^2/g) \cdot \cos \chi|,$$

$$\omega = 2\pi f, \quad \omega_e = 2\pi f_e,$$

なる関係にあり、周波数 f なる成分規則波の群速度 $g/4\pi f$ と船の波の進行方向成分速度 $V \cos \chi$ との大小関係から、Fig. 9, 10 に示した3つの波周波数領域 I, II, III が存在し、追い波中では一つの f_e は3つの f に対応する場合がある。このような場合に $S_{hh}(f)$ から $S_{hh}(f_e)$ を求めると、Fig. 10 に示した本論の具体例のように $S_{hh}(f_e)$ は $S_{hh}(f)$ とは著しく形の異なったものとなる。

一般に出会いスペクトル $S(\omega_e)$ あるいは $S(f_e)$ は

$$S(\omega_e) = [1/|1 - (2\omega/g) \cdot V \cos \chi|] \cdot S(\omega)$$

$$S(f_e) = [1/|1 - (4\pi f/g) \cdot V \cos \chi|] \cdot S(f)$$

であるから、右辺の分母が0になるとき $S(f_e) \rightarrow \infty$ となる特異性がある。その特異波周波数は

$$\omega = g/2V \cos \chi, \quad f = g/4\pi V \cos \chi$$

であり、そのときの出会い周波数は

$$\omega_e = g/4V \cos \chi, \quad f_e = g/8\pi V \cos \chi$$

となる。すなわち出会い特異波周波数 f_e は船速の如何を問わず特異波周波数 f の1/2なる簡単な関係にある。

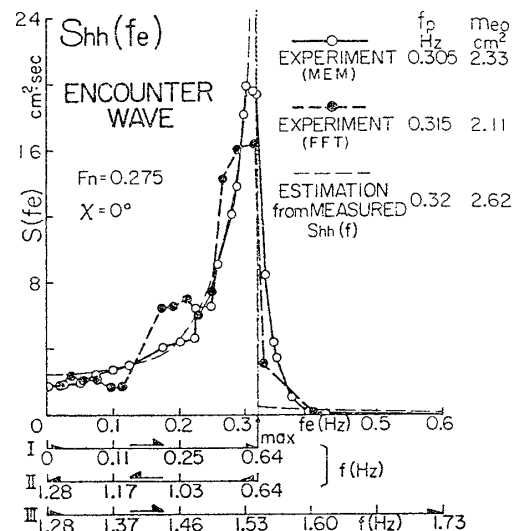


Fig. 11 Encounter power spectrum of irregular waves

以上はよく知られた関係^{7),8)} であるが、このことを実験的に厳密に検証した例は意外に少ないので、本論ではまずこの件の検討結果について述べる。

Fig. 9 に検討対象にした人工不規則波のパワースペクトルを示す。フルード数 $F_n=0.275$ で正面追い波航走時に会い周波数が上記の問題になる領域を十分に含む波スペクトルが選ばれている。希望したスペクトルと実測スペクトルはほぼ一致したことが Fig. 9 からわかる。このスペクトルはアナログデータ・レコーダにストアされている不規則波発生用信号を全部使用した十分に長い1回の造波記録から得られたものである。以後、この実測スペクトルの線を推定計算時のインプットとして使用することにする。

Fig. 10 には Fig. 9 に示した波周波数ベースの実測スペクトル $S_{hh}(f)$ と、そのスペクトルを $F_n=0.275$, $\chi=0^\circ$ の場合の追い波中に変換した出会い波スペクトル $S_{hh}(f_e)$ とを比較して示してある。 $S_{hh}(f_e)$ は著しい低周波領域にしかパワーが存在しない極めて特異な形のスペクトルになることがわかる。もちろん、 $S_{hh}(f)$ と $S_{hh}(f_e)$ の本図上での面積 m_0 と m_{e0} は等しい。 $S_{hh}(f)$ の f 値上での表示は I, II, III の領域に分割されるが、 $S_{hh}(f_e)$ ではこれらの出会い周波数領域が重なり、I + II + III のパワーを持つことになる^{7),8)}。

Fig. 11 にはアナログデータ・レコーダ上にストアされた Fig. 9 の場合と同じ造波信号を使用して得られた実測出会い波スペクトルと、Fig. 10 で得られた推定出会い波スペクトルを比較して示した。実測 $S_{hh}(f_e)$ はもちろん追い波中航走時に測定するので、1回の航走で出会う波の数は極めて少なく10山程度にすぎない。図中のスペクトルはこれらの短い出会い波のタイムヒストリーのそれぞれから得られた相当に形の異なるパワース

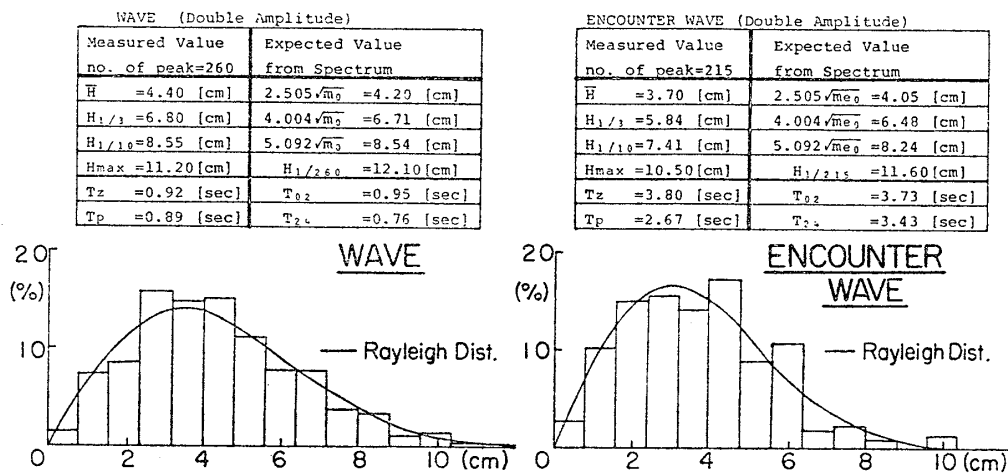


Fig.12 Double amplitude extreme value distribution of waves and encounter waves

ペクトルの平均特性である。本図の場合 16 航走の平均が示されている。なお、実測スペクトルとして高速フーリエ変換アルゴリズム FFT をベースにした直接スペクトル計算法 (FFT 法) による結果と、山内など⁵⁾が推奨している最大エントロピー法^{2),3),4),5)} (Maximum Entropy Method, MEM) による結果が示されている。算法の比較としては、タイムヒストリーが短い場合には MEM 法が良いスペクトルの形状を与え、データ数の多い場合には FFT 法が便利であることが今回の検討の結果からわかった。したがって、本論では出会い現象でタイムヒストリーの短い場合には MEM による結果を採用することにした。

実測スペクトルは推定出会いスペクトルにほぼ等しく、前述の I + II + III の加法スペクトルが実際の出会い波スペクトルをよく説明していることがわかる。推定 $S_{hh}(f_e)$ の発散周波数近くでの形状は、推定スペクトルのように極端には現われないが、その特徴が十分に残された形で実現している。一方、理論上発散点で $S_{hh}(f_e)$ が無限大になることは、 Δf_e を十分に小にすれば実用数値計算上では特に問題にならないことがわかった。

Fig. 12 には実測タイムヒストリーから直接求めた各種統計値と実測スペクトルから求めた推定値の比較および波高のヒストグラムを示しておいた。固定波高記録から Fig. 9 の実測スペクトルと Fig. 12 の左図が得られた。

平均波高 $\bar{H}$ 、有義波高 $H_{1/3}$ 、高い方から 1/10 の平均波高 $H_{1/10}$ 、最高波高 H_{max} などは、スペクトルの $\sqrt{m_0}$ 値に Rayleigh 分布の仮定による係数を乗じて得られる推定値にほぼ一致している。また、ゼロクロスの実測平均周期 T_z はスペクトルから得られた推定平均周期 $T_{0.2}$ にほぼ一致している。これは素直なスペクトル形状をもつ十分に長い一つのタイムヒストリーから得られた結果であるから、当然のことである。一方、出会い波形

から得られた、右図の場合にも、多数の短いタイムヒストリーをつなぎ合わせたタイムヒストリーから算出されているにもかかわらず、上述の固定波高の場合とほぼ同様のことがいえる。また、実測出会いスペクトルは Fig. 11 のように推定されたそれと異なり典型的な狭帯域スペクトルであったので、Rayleigh 分布がよく適合していることがわかる。

3.2 不規則追い波中の応答

一般に不規則波中の応答は波周波数 (ω, f) および出会い周波数 (ω_e, f_e) ベースで取扱可となっているが、通常の不規則波中性能推定計算プログラムでは波周波数ベースのみで実施されている。

具体例として、追い波中の波浪縦曲げモーメントに例を取り説明する。長波頂不規則波中の波浪縦曲げモーメントの応答パワースペクトル (S_{MM}) は次式で与えられる。

$$S_{MM}(f) = |H_{Mh}(f)|^2 \cdot S_{hh}(f)$$

$$S_{MM}(f_e) = |H_{Mh}(f_e)|^2 \cdot S_{hh}(f_e)$$

Fig. 13 は f ベースのその計算結果 $S_{MM}(f)$ である。Fig. 1 に示した波周波数ベースの追い波中縦曲げモーメントの周波数応答関数 $|H_{Mh}(f)|$ と、Fig. 10 に示した波スペクトル $S_{hh}(f)$ を用いて、上式により $S_{MM}(f)$ が算出されている。なお、数種の $H_{Mh}(f)$ を使用したので、一つの $S_{hh}(f)$ に対して数種の $S_{MM}(f)$ が算出されている。通常、応答スペクトル $S(f)$ から n 次のモーメント m_n を算出し、さらに次のような推定統計値を求めている。

$$m_n = \int_{f_L}^{f_H} f^n \cdot S(f) \cdot df$$

応答振幅の平均値など $= \sqrt{m_0} \times (\text{レーレー分布の定数})$
 応答の平均周期

$$\begin{aligned} \text{ゼロクロス} & T_{0.2} = \sqrt{m_0/m_2} \\ \text{ピーク・トゥ・ピーク} & T_{2.4} = \sqrt{m_2/m_4} \end{aligned}$$

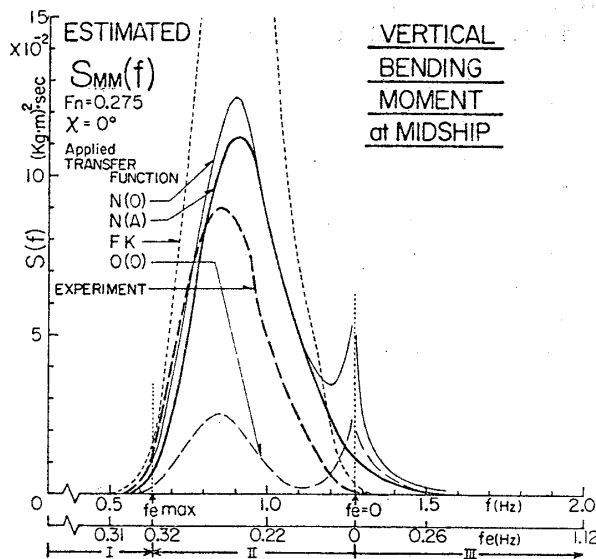


Fig. 13 Estimated power spectrum of vertical bending moment

ただし、平均周期 T_{02} などは航走状態では出会いベースの応答スペクトルから求めないと意味がない。一方、 m_0 のみが関係する推定値すなわち平均振幅などでは、 $S_{MM}(f)$ と $S_{MM}(f_e)$ の m_0 の値は等しいので、 $S_{MM}(f)$ の m_0 からの推定値が使用できる。このように応答の振幅に関する推定統計値のみを対象とする場合には $S_{MM}(f)$ の算出のみで十分である。通常、推定計算範囲はここに止まっている場合が多い。15 回 ITTC の協同比較計算でも、平均波周期を変化させた長波頂 ITTC 波スペクトルに対し、出会い角を変化させて各種応答スペクトルの $\sqrt{m_0}$ を求めるに止まっている。

$|H_{Mh}(f)|$ が $f_e=0$ で発散する場合には、Fig. 13 の $S_{MM}(f)$ でも $f_e=0$ に対応する f の位置で発散する。

本論で対象にしている追い波中の場合、出会い周波数ベースの応答スペクトルは、前述の波の場合と全く同様に 3 種の波周波数範囲 I, II, III での応答スペクトルの和として、出会い応答スペクトル $S_{MM}(f_e)$ が求まる。その算出結果を Fig. 14 として示したが、 $S_{hh}(f_e)$ に類似のスペクトル形となる。なお、本図には実測出会いタイムヒストリーから求められた実測出会いスペクトル $S_{MM}(f_e)$ が示されている。この実測 $S_{MM}(f_e)$ から $S_{MM}(f)$ を逆算する事は領域 I, II, III の分を判別することができないので不可能である。また実測 $S_{MM}(f_e)$ と実測 $S_{hh}(f_e)$ から $H_{Mh}(f_e)$ を形式的に算出可能であるが、これから周波数応答関数 $H_{Mh}(f)$ を求めることはできない。

これらの $S_{MM}(f_e)$ からは $\sqrt{m_0}$ による振幅に関する推定統計値ばかりでなく、 T_{02} などの平均周期の推定も可能である。Fig. 14 から、実験によって求めた縦曲げモーメントの応答関数を用いた場合が、もっとも実測

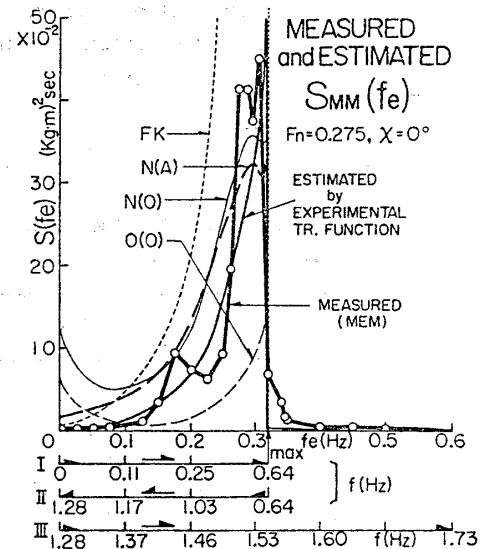


Fig. 14 Measured and estimated encounter power spectrum of vertical bending moment

VERTICAL BENDING Mt. at Midship (Double Amplitude)

Measured Value	Expected Value
no. of peak=230	calculated from Spectrum
$\bar{H} = 0.497$ [Kg-m]	$2.505\sqrt{m_0} = 0.458$ [Kg-m]
$H_{1/3} = 0.803$ [Kg-m]	$4.004\sqrt{m_0} = 0.733$ [Kg-m]
$H_{1/10} = 1.048$ [Kg-m]	$5.092\sqrt{m_0} = 0.932$ [Kg-m]
$H_{max} = 1.434$ [Kg-m]	$H_{1/230} = 1.313$ [Kg-m]
$T_p = 3.71$ [sec]	$T_{02} = 3.70$ [sec]
$T_p = 3.30$ [sec]	$T_{24} = 3.40$ [sec]

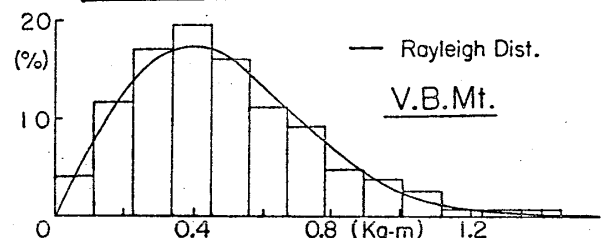


Fig. 15 Double amplitude extreme value distribution of vertical bending moment

スペクトルの形に近く、次に前報で提案した NSM で Added Mass にのみ三次元修正を施した応答関数 $[N(A)]$ がよいスペクトルを推定していることがわかる。

Fig. 15 には出会い波形の場合と同様に、実測縦曲げモーメントのタイムヒストリーから直接求められた全振幅の統計量と平均周期が、実測スペクトルから推定されたそれらの値と比較して示してある。一般に、追い波中の現象は極めて狭い周波数域の現象であるので、Rayleigh 分布が良く適合し、また平均周期 T_{02} はもちろん、 T_{24} さえも良く実測値と一致している。故に、スペクトルから求まる振幅に対する基準値 $\sqrt{m_0}$ および平均周期に対する基準値 T_{02} , T_{24} で、以後各種応答関数による推定精度の定量的判定を行うことにしよう。

Table 1 には縦曲げモーメントに関する実測出会いスペクトルから求めた諸量と、Fig. 14 の各種推定出

Table 1 Comparison of characteristic values between measured encounter power spectrum and transformed ones of vertical bending moment

measured value (m)	VERTICAL BENDING MOMENTS at MIDSHIP in an Irregular Wave					
	Transfer Fn. applied	experimental	OSM	NSM	NSM(A)	FK
0.183	$\sqrt{m_{e0}}$ [Kg-m]	0.184	0.093	0.203	0.190	0.260
1.00	$(\sqrt{m_{e0}})t/(\sqrt{m_{e0}})m$	1.01	0.51	1.11	1.04	1.42
3.70	T_{02} [sec]	3.57	4.02	4.16	3.97	4.05
1.00	$(T_{02})t/(T_{02})m$	0.96	1.09	1.12	1.07	1.10
3.40	T_{24} [sec]	3.41	3.38	3.58	3.59	3.48
1.00	$(T_{24})t/(T_{24})m$	1.00	0.99	1.06	1.06	1.02

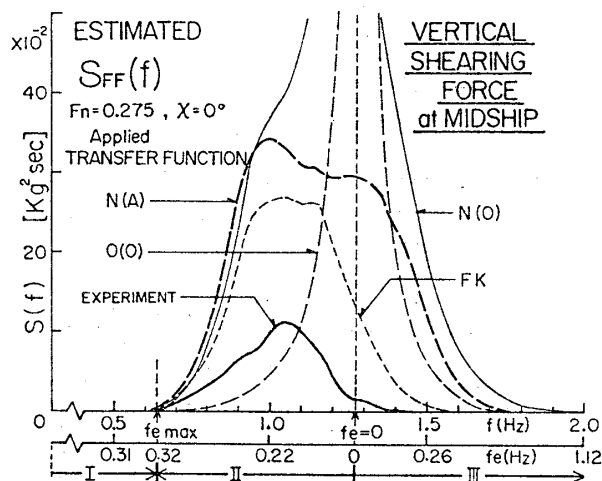


Fig. 16 Estimated power spectrum of vertical shearing force

会いスペクトルから求めた諸量を比較して示した。

$\sqrt{m_{e0}}$ では実験による応答関数を使用した推定値は、領域 I, II, III の加算があるにもかかわらず実測スペクトルからの値にほぼ等しい値が得られている。また NSM (A) の応答関数を使用した場合もほぼ実測に一致しており、実用性が確められたといえよう。

全体的に、縦曲げモーメントでは、Fig. 14 から想像されるほどには $\sqrt{m_{e0}}$ に差がない。また Fig. 13 の $f_e = 0$ における発散現象は $\sqrt{m_0}$ の値に著しい影響を与えていない。平均周期 T_{02} 、および T_{24} ではスペクトルの形状には相当な差があるのであるが、すべて極めて狭帯域であるので各推定値間に差が少なく、すべての値がほぼ実測値に等しい値になっている。

波浪剪断力に関して、縦曲げモーメントと同様に、Fig. 16~18, Table 2 に結果を示した。Fig. 16 の応答スペクトルの推定に用いた周波数応答関数は Fig. 5 に示したものである。Fig. 16, 17 および Table 2 から明らかなように、N(A) 法を含め各種計算法による波浪剪断力の $\sqrt{m_0}$ および T_{02} , T_{24} の推定精度は縦曲げモーメントに比べ著しく悪い。Fig. 16 に明確に示されているように、波浪剪断力では三次元修正を施していない NSM, OSM における $f_e = 0$ 位置での発散は広範囲にわたって

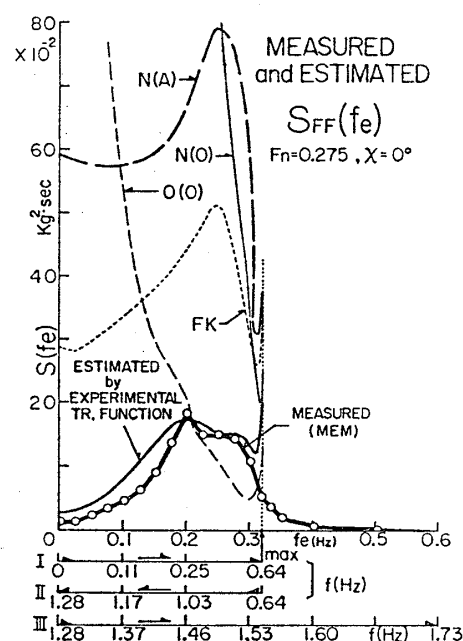


Fig. 17 Measured and estimated encounter power spectrum of vertical shearing force

VERTICAL SHEARING FORCE at Midship (Double Amplitude)

Measured Value	Expected Value
no. of peak=180	calculated from Spectrum
$\bar{H} = 0.445$ [Kg]	$2.505\sqrt{m_{e0}} = 0.478$ [Kg]
$H_{1/3} = 0.678$ [Kg]	$4.004\sqrt{m_{e0}} = 0.765$ [Kg]
$H_{1/10} = 0.899$ [Kg]	$5.092\sqrt{m_{e0}} = 0.973$ [Kg]
$H_{max} = 1.200$ [Kg]	$H_{1/100} = 1.344$ [Kg]
$T_z = 4.33$ [sec]	$T_{02} = 3.96$ [sec]
$T_p = 3.94$ [sec]	$T_{24} = 2.87$ [sec]

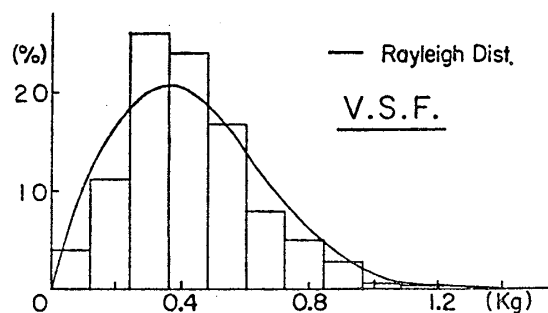


Fig. 18 Double amplitude extreme value distribution of vertical shearing force

Table 2 Comparison of characteristic values between measured encounter power spectrum and transformed ones of vertical shearing force

VERTICAL SHEARING FORCE at MIDSHP in an Irregular Wave

measured value (m)	Transformed Value (t)					
	Transfer Fn. applied	experimental	OSM	NSM	NSM(A)	F.K.
0.191	$\sqrt{m e_0}$ [Kg]	0.213	0.038	0.585	0.421	0.325
1.00	$(\sqrt{m e_0}) t / (\sqrt{m e_0}) m$	1.12	0.20	3.06	2.20	1.71
3.96	T_{02} [sec]	4.68	9.85	7.38	5.31	5.10
1.00	$(T_{02}) t / (T_{02}) m$	1.18	2.49	1.86	1.34	1.29
2.87	T_{24} [sec]	3.97	4.80	4.34	4.01	3.96
1.00	$(T_{24}) t / (T_{24}) m$	1.38	1.67	1.51	1.40	1.38

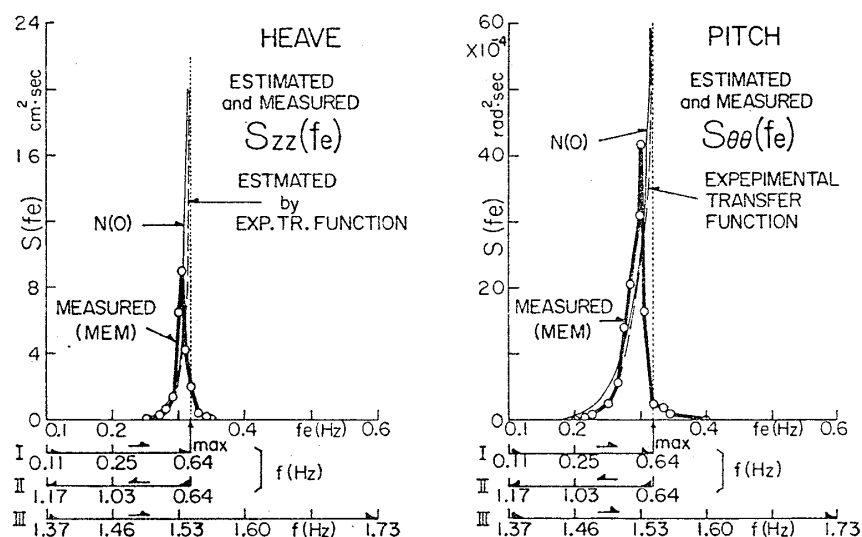


Fig. 19 Measured and estimated encounter power spectrum of longitudinal motions

HEAVE (Double Amplitude)		PITCH (Double Amplitude)	
Measured Value	Expected Value	Measured Value	Expected Value
no. of peak=220	from Spectrum	no. of peak=215	from Spectrum
H = 1.24 [cm]	$2.505\sqrt{m e_0} = 1.03$ [cm]	H = 1.86 [deg]	$2.505\sqrt{m e_0} = 1.64$ [deg]
$H_{1/3} = 1.84$ [cm]	$4.004\sqrt{m e_0} = 1.65$ [cm]	$H_{1/3} = 2.83$ [deg]	$4.004\sqrt{m e_0} = 2.62$ [deg]
$H_{1/10} = 2.17$ [cm]	$5.092\sqrt{m e_0} = 2.10$ [cm]	$H_{1/10} = 3.67$ [deg]	$5.092\sqrt{m e_0} = 3.33$ [deg]
Hmax = 2.67 [cm]	$H_{1/220} = 2.95$ [cm]	Hmax = 5.00 [deg]	$H_{1/215} = 4.66$ [deg]
Tz = 3.39 [sec]	$T_{02} = 3.36$ [sec]	Tz = 3.63 [sec]	$T_{02} = 3.39$ [sec]
Tp = 3.04 [sec]	$T_{24} = 3.04$ [sec]	Tp = 3.34 [sec]	$T_{24} = 3.29$ [sec]

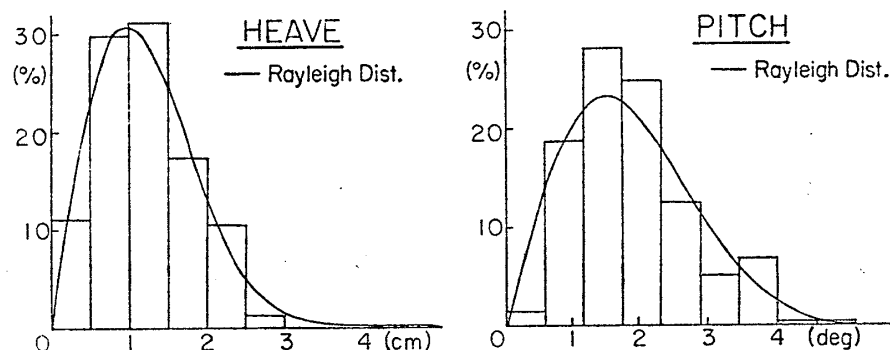


Fig. 20 Double amplitude extreme value distribution of longitudinal motions

いるので m_0 の値に著しい影響を与え、これらの算法が高速時の追い波中では実用性がないことを示している。

縦曲げモーメントの場合と異なり、 T_{02} 、 T_{24} も全般的に実測と推定が合っていないのは、実測スペクトルでは

$f_e=0$ およびその近くにほとんどパワーがないのに、推定スペクトルでは相当なパワーがある場合が多いことに基因している。一方、出会い現象の記録を一航走で長時間とることは水槽では不可能なことであるから、 $f_e=0$

Table 3 Comparison of characteristic values between measured encounter power spectrum and transformed ones of longitudinal motions

	measured value (m)	transformed value (t)		
		Transfer Fn. applied	experimental	NSM
H E A V E	0.412	$\sqrt{m e_0}$ [cm]	0.449	0.455
	1.00	$(\sqrt{m e_0}) t / (\sqrt{m e_0}) m$	1.09	1.10
	3.36	$T_{0.2}$ [sec]	3.21	3.20
	1.00	$(T_{0.2}) t / (T_{0.2}) m$	0.96	0.95
	3.04	$T_{2.4}$ [sec]	3.13	3.18
	1.00	$(T_{2.4}) t / (T_{2.4}) m$	1.03	1.05
P I T C H	0.653	$\sqrt{m e_0}$ [deg]	0.662	0.694
	1.00	$(\sqrt{m e_0}) t / (\sqrt{m e_0}) m$	1.01	1.06
	3.39	$T_{0.2}$ [sec]	3.27	3.34
	1.00	$(T_{0.2}) t / (T_{0.2}) m$	0.96	0.99
	3.29	$T_{2.4}$ [sec]	3.26	3.29
	1.00	$(T_{2.4}) t / (T_{2.4}) m$	0.99	1.00

近くの超低周波域での周波数解析法について再検討の要がある。

Fig. 19, 20, Table 3 には船体運動ヒープおよびピッチに関する結果を示した。不規則波中船体運動に関する結論としては Table 3 からわかるように、三次元修正を施さない NSM 法でもよい推定を与えることが再確認された。また、Fig. 19 に示されている推定出合いスペクトルの発散現象は、出合い波の場合と同様に m_0 の推定などに著しい影響を与えていない。

4 長波頂不規則波中 垂直波浪荷重の推定

前節の検討結果から、使用する応答関数が正しければ、追い波状態を含め長波頂不規則波中の船体運動および波浪荷重は、広く用いられているいわゆる短期予測法で異常な非線形現象の場合を除き、その振幅に関しては適正な推定が行えることが明らかになった。

そこで ITTC の波スペクトルの式で有義波高 H を 4m で一定とし平均波周期 T_1 を変化させた場合の縦曲げモーメントおよび垂直剪断力の標準偏差の短期予測値を Fig. 21 として示した。ただし、次の3種の方法によって求めた応答関数を用い、その結果を比較検討している。

- 実験 (本論の実験結果)
- N(O) 法 (Original の NSM)
- N(A) 法 (NSM に Added Mass にのみ三次元修正を適用)

なお、これらの応答関数は追い波に関しては Fig. 1, 5 に示したものであるが、向い波については紙数の関係で省かれている。なお、有義波高を 4m で一定としたのは、ITTC 協同計算と同一状態にし、他機関の算出値との比較を容易にするためである。ただし、この計算状態は現実的でなくよい状態とはいえない。

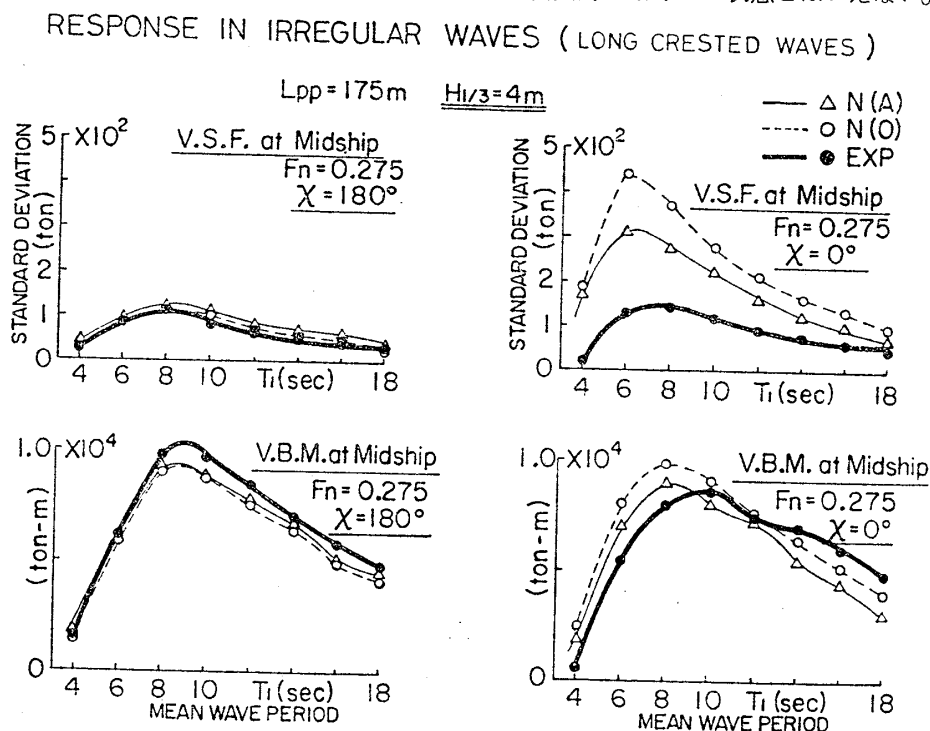


Fig. 21 Short-term prediction of standard deviation of vertical wave loads in head and following sea

向い波 ($\chi=180^\circ$) 中では, Fig. 21 のように 3 種の推定値はほぼ一致し, N(O) 法が十分な精度を持つ実用算法であることが再確認されている。なお, $\chi=180^\circ$ の結果は ITTC 協同計算での各機関の算出値の間の差は小さく, 本論の N(O) の結果もほとんどそれに一致している。

これに対し, Fig. 21 の追い波中では周波数応答関数における差と同様に, 不規則波中での各機関間の結果の差は著しかった⁹⁾。本論の実験応答関数から求めた結果は, 垂直剪断力ではそれらの中の低い部に属し, 縦曲げモーメントでは上位に属していた。なお, 本論の N(O) の結果は両者とも高い値を与えているグループに属していた。縦曲げモーメントにおける N(O) と N(A) の差は, 応答関数の発散点での有無に基いているが, 不規則波中の特性ではこのように意外に影響が小さい。実験の応答関数を用いて求めた推定値は波周期 T_1 の大なるところで N(O), N(A) より大になっているが, これは Fig. 1 の応答関数での差から推測される傾向である。 $F_n=0.275$ ではこのように意外に三者は近接しているが, 例えば $F_n=0.4$ になると Fig. 3 の応答関数から推察されるように, N(O) は著しく大なる値を与え一般論としては実用算法とはいえないことは明らかである。追い波中の垂直剪断力では実験からの推定線と計算による推定線の差が極めて大である。すなわち垂直剪断力では N(O) はもちろん N(A) も実用算法とはいえないことがわかる。ただし, $F_n=0$ の応答関数を $F_n=0.275$ のそれとして代用する方法は実用精度を持つことは Fig. 5 の N(O), $F_n=0$ の特性から読み取れる。

なお, 実験特性を向い波と追い波で比較すると同程度であり, 追い波中が意外に大であることに気がつく。

このような一般的特性を加味して考えると, N(O) 法などによる追い波中波浪剪断力の過大な推定は現用算法の重大欠陥であることがわかった。したがって, 追い波中の縦波浪荷重に関して, 不合理性を含んでいるが $F_n=0$ での応答関数で代用する算法を, 新理論算法が確立されるまでの暫定的方法として提案する。

船体運動, ピッチ, ヒープに関しては図が省略されているが, $\chi=180^\circ$ および 0° において Fig. 21 の左図の場合のように三者は一致した。

5 結 言

追い波中を比較的に高速で航行する場合の縦波浪荷重の応答関数, および長波頂不規則追い波中の波浪荷重の特性について主に検討してきたが, 本論で得られた結果を以下に列記する。

1) 追い波中縦曲げモーメントの周波数応答関数の実用的推定法として, NSM に丸尾の三次元修正を断面附

加質量のみに適用する方法を前報で提案したが, その方法において波浪強制モーメントによる成分に実験値を使用すると, ほぼ実験によって得られた波浪中縦曲げモーメントの応答関数と等しい推定曲線が得られることが本報の研究でわかった。すなわち, 前論で提案した N(A) 法にまだ波浪強制モーメントによる成分の推定に問題が残されている。

2) 追い波中垂直剪断力の応答関数の純理論的推定は前報で提案した N(A) 法も含めて, 縦曲げモーメントに比べ著しく推定精度が悪かった。また, 実験から得られた波浪強制力成分を使用した N(A) 法による算出結果はほぼ実験から得られた波浪垂直剪断力の応答関数に一致した。しかし, N(A) 法のみによる純理論的計算結果の値は悪く, 追い波中の波浪剪断力に関しては実用的理論計算法に至っていないことがわかった。

3) 実験で求めた追い波中の縦波浪荷重の応答関数に船速の影響はほとんどなく, 船体停止時のそれにはほぼ一致した。この事実から, 船体停止時の理論応答関数を船速のある場合での波周波数ベースの応答関数として代用できることがわかった。この方法は実用算法として十分な精度をもつので, 新理論が確立されるまでの暫定的な実用算法として新しく提案した。

4) 長波頂不規則波中を追い波状態で航行すると, その出会い波のスペクトルは理論上 $\omega_e = g/4V \cos \chi$ あるいは $\bar{\omega}_e = 1/4 F_n \cos \chi$ の位置で発散し, 3 種の波周波数領域の和のスペクトルとして特異な形状のスペクトルとなる。実測出会い波から, この特徴を強く残した出会いスペクトルが得られ, 固定点での波スペクトルから求められた換算出会いスペクトルともほぼ一致した。また, 実測出会い平均周期も換算スペクトルからの予測値とほぼ等しかった。

5) 長波頂不規則追い波中での波浪荷重を含めた船体応答は, 出会い波における 3 種の波周波数領域での各々の出会い船体応答スペクトルの和として推定される。その推定時に用いた波周波数ベースの船体応答関数が正しければ, 得られた出会い周波数ベースの応答スペクトルは実験から求められたそれと船体運動, 波浪荷重ともほぼ一致した。したがって, 推定出会いスペクトルから求められた振幅の平均値, 有義値などはもちろん, 出会い平均周期なども実測値とほぼ一致した。すなわち, 線形重ね合せの原理に基づく上記の追い波中出会い現象の応答スペクトルの推定法は, 実際の現象をよく説明していることが確かめられた。なお, $\omega_e = g/4V \cos \chi$ 位置での出会いスペクトルの発散は離散的数値計算を行っている実用算法では著しい影響を与えないことがわかった。

6) 本論の実験結果からの推定値は長波頂不規則波中の縦曲げモーメントおよび垂直剪断力では, 向い波中

と追い波中で大略等しかった。一方、現行の通常算法 NSM などでは追い波中垂直剪断力の過大な推定値を与える傾向にあるので、本論で提案の方法などに算法を改める必要がある。

本論の作成にあたり、小林顕太郎氏作成の波浪中船体運動計算プログラム、および宮島進氏作成の MEM 法のスペクトラム計算プログラムを使用した。また本論の実験、解析、および図面の作成にあたり、石黒剛、タン・ジョン・リクの両君、および宮川清助手、高山武彦技官に負うことが多い。ここに改めて謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) S. Takezawa, T. Hirayama, K. Nishimoto : A Study on Longitudinal Motions and Bending Moment of a Container Ship in Following Sea, 日本造船学会論文集, 第150号, 昭和 56. 12.
- 2) 宮島 進 : 人工造波とその解析法に関する新しい試み, 横浜国大・船舶・海洋工学科, 昭和55年度卒業論文, 昭和 56. 3.
- 3) 赤池弘次, 中川東一郎 : ダイナミックシステムの統計的解析と制御, サイエンス社, 昭和 47.
- 4) 日野幹雄 : スペクトル解析, 朝倉書店.
- 5) Y. Yamanouchi, K. Ohtsu, H. Oda : Spectrum Estimate Through Auto-Regressive Model Fitting With An Information Criterion Based On The Maximum Entropy Principle, Written Contribution to the Report of Seakeeping Committee of 16th ITTC, Sept. 1980.
- 6) 高石敬史 : Draft of the Report of Seakeeping Committee of 16th ITTC, 1981. 2.
- 7) 高石敬史, 黒井昌明 : 波浪中船体運動の実用計算法, 第2回耐航性に関するシンポジウム, 昭和 52. 12.
- 8) W. G. Price, R. E. D. Bishop : Probabilistic Theory of Ship Dynamics, Chapman and Hall, London, 1974.
- 9) 小林顕太郎, 小保方準 : コンテナ船型の斜波中船体運動 および 波浪荷重試験, 住友重機械技報, Vol. 29, 1981.