

(昭和 41 年 11 月造船協会秋季講演会において講演)

波浪曲げモーメント予測のための 波スペクトルについて

正員 福田 淳 一*

On the Families of Wave Spectra for Prediction of Wave Bending Moments

By Jun-ichi Fukuda, *Member*

Summary

Available data on statistics of wave height and period have been collected on the world sea areas and routes. The purpose of this paper is to establish tentatively standard family of wave spectra for prediction of wave bending moments in rough seas based on such wave data.

Theoretical wave spectra originally proposed by Neumann, Darbyshire, Roll-Fischer and Pierson-Moskowitz were modified realistically to fit the observed sea states and compared with each other. Further, the comparative investigation was carried out on the standard deviations of wave bending moments of two ships in rough seas, which were obtained from those wave spectra and response operators.

There are not so significant differences between the results obtained from those modified wave spectra. The results derived from modified Darbyshire spectra, however, have a tendency rather different from the others. Modified Pierson-Moskowitz wave spectra proposed by I. S. S. C. would be appropriate for short-term and long-term prediction of wave bending moments in rough seas and acceptable as an interim proposal.

1 緒 言

最近、世界の主要海域における波浪に関する統計資料が蒐集整理されて、これらの波浪の長期分布資料を利用して船体に働く波浪曲げモーメントの長期分布を推定することも可能になりつつある。波浪の長期分布は、その短期分布の資料を長期間にわたって十分数多く集積することによつて得られるのであつて、長期分布の基礎となる短期分布の正確な資料を得るためには、波浪計測機による計測記録より波スペクトル、有義波高、平均波周期等を解析整理して波浪の短期分布を正確に知る必要がある。このような短期分布資料が十分数多く集められてこそ波浪の長期分布に関する資料が完備するのであるが、このような短期分布の完全な記録は最近ようやく相当数集積されてきたとはいえ現在の段階では未だ十分とはいえない。

現在利用し得る波浪の長期分布資料は、その大部分が航海船舶および気象観測船による目測平均波高（有義波高に等しいとされている）と目測平均波周期より成つており、これらの長期にわたる発現頻度の形で整理されている。すなわち、ISSC-1964, Committee on Environmental Conditions の報告¹⁾では、世界の各主要海域について、有義波高を6階級に、平均波周期を6階級に区分し、これらの組合わせ数 36 の区分についてそれぞれの発現頻度を示している。その他、Roll²⁾による北大西洋の波浪資料、山内等³⁾による北太平洋および日本近海の波浪資料では、有義波高および平均波周期の区分をさらに数多くとつている。

このように、目測による資料に基づいて若干信頼性に欠ける感みがあるにしても、ある海域である有義波高とある平均波周期の組合わせで表わされるような海面状態の長期の発現頻度が一応知られているので、そのような海面における船に働く波浪曲げモーメントの短期分布を知ることができれば、海面状態（有義波高と平均

原稿受付 昭和 41 年 7 月 10 日

* 九大工学部

波周期で表わされている)の長期の発現頻度を利用して波浪曲げモーメントの長期分布を推定することができる。そこで、有義波高と平均波周期とで表わされた海面における波浪曲げモーメントの短期分布を知ることが問題となる。

この波浪曲げモーメントの短期分布を求める手段として、実船の応力計測記録を解析してある海面における波浪曲げモーメントの短期分布を知る方法と、海面状態を波スペクトルによつて表示し、模型実験または理論計算によつて得られた波浪曲げモーメントの応答関数を用いて、そのような海面状態における波浪曲げモーメントの短期分布を求める方法とがある。前者の方法によつて波浪曲げモーメントの短期分布資料を数多く集め長期分布の推定を行なうためには、長期間にわたつて少なからぬ経費を投じて実船による計測を行なわなければならない。これに反して、後者の方法によれば、海面状態を適切な方法によつて波スペクトルで表示することができれば、比較的短時間で少ない経費で目的を達することができる。

そこで、短期の海面状態を波スペクトルによつて表示する方法について考えてみよう。波浪曲げモーメントの短期分布および長期分布の推定を行なうに当つて、われわれが現在利用し得る波浪に関する資料は、上に述べたように、有義波高と平均波周期の組合わせで表わされた短期の海面状態の長期にわたる発現頻度の形となつている。従つて、ある有義波高と平均波周期の組合わされた海面状態を、そのような条件を満足する適切な波スペクトルで表示しなければならない。実際の海面状態に対応する波スペクトルは無限に数多く存在し、全く同一の波スペクトルは二度と再現しないといわれる程互いに相異なる。ある海面状態のみについても、これに対応する波スペクトルを有義波高と平均波周期の条件のみによつて簡単に近似することは不可能である。一定の有義波高と平均波周期を持つような海面状態でも、これらに対応する波スペクトルは無限に数多く存在し得る。このように無限に数多く存在し得る波スペクトルのすべてをとりあげることは不可能であるから、一定の有義波高と平均波周期を持つような数多くの波スペクトルの平均的なものを仮定し、このような仮定の波スペクトルによつてある有義波高と平均波周期を持つような海面状態を代表させることが考えられる。このような仮定が許されるならば一少なくとも、このような仮定を行なつても波浪曲げモーメントの長期分布推定結果に重大な誤差を生じないであろうとの仮定が許されるならば一そのような波スペクトルで表わされる海面状態における波浪曲げモーメントの短期分布の推定を行ない、さらに長期分布の推定をも行なうことができる。

現在利用し得る波浪に関する短期および長期の資料は決して完全なものではない。資料は十分長期間にわたつて集積されてはならず、有義波高および平均波周期も目測によるものが多く十分の信頼性があるとは言い難い。たとえば、Cartwright⁴⁾によると、計測資料より解析された有義波高および平均波周期と目測によるそれらの値との間にはかなりの相違がある。しかしながら、より正確な資料が得られていない現在、多少信頼性に欠ける点があるにしても、現在利用し得る波浪の資料に基づいて、上に述べたような考え方によつて波浪曲げモーメントの長期分布推定のための波スペクトルを近似的に表示することは、このようなマクロ的な問題研究の手段として実用的で有力な方法であろう。準拠すべき波浪の資料の不完全さは、問題の取扱い方の本質に抵触するものではなく、今後信頼し得る資料が集積されるに応じてその不備を修正すればよいのである。

3 波スペクトル表示式

現在までに海洋学者によつて提唱されている波スペクトルの理論式として、Neumann⁵⁾、Darbyshire⁶⁾、Roll and Fischer⁷⁾ および Pierson and Moskowitz⁸⁾ のものがある。これらは、本来、波スペクトルを風速の関数として取扱い、理論的根拠に基づくとともに、経験的事実と合致するように、暴風によつて生成される波浪のエネルギースペクトルの式を導いている。そして、Neumann の波スペクトルのように風の吹続時間、吹送距離等を考慮に入れて完全発達波、不完全発達波等を考へているものもあるが、何れの式においても風速によつて波スペクトルの形が定まるよになつてきている。しかし、実際の海面では風速のみによつて海面状態は定まらず、波浪の発達程度、うねり等の過去の履歴の有無、風速、風向の変化等によつて同一風速下でも海面状態は著しく異なる。

そこで、このような暴風によつて生成される理想的な波浪の理論的スペクトルの考え方とは別個に、実際に観測または計測された海面状態を表現する波スペクトルの表示式を考えることにする。ただし、そのような波スペクトルを近似的に表示する式としては、上に述べた本来の理論式の形を流用して、これらの式を海面状態に適合するように修正することにする。従つて、ここで仮定する波スペクトルの曲線形状は本来の理論式によるものと

類似した形状で唯一つのピークを持ち、形式的には完全発達波の形をとっている。このような波スペクトルの表示は、Darbyshire type の式を除けば、一般に次のような形で書かれる。

$$[f(\omega)]^2 = P\omega^{-p} \exp\{-Q\omega^{-q}\} \quad (1)$$

ここで $[f(\omega)]^2$: spectral density

P, Q : constant defined by sea states

p, q : positive integer

本来の波スペクトルの理論式では、 P は常数で、 Q は風速の関数となつてゐるが、ここでは P と Q を海面状態を満足するように定める。海面状態を表わすパラメーターとして有義波高と平均周期を用いる。

p および q に適当な正の整数値を与えると本来の波スペクトルの理論式の形が定まる。すなわち、

(a) $p=5, q=4$: Pierson-Moskowitz type

(b) $p=6, q=2$: Neumann type

(c) $p=5, q=2$: Roll-Fischer type

ある短期の海面について観測された平均波高(有義波高に等しいとされている)を H_0 とし平均波周期を T_0 とする。この海面の波スペクトルが(1)で表わされるものとし、 m_n を次のように定義する。

$$m_n = \int_0^\infty [f(\omega)]^2 \omega^n d\omega \quad (2)$$

(2)の積分値は次のようなガンマ関数を含む式で表わされる。

$$m_n = \frac{P}{q} \Gamma\left(\frac{p-1-n}{q}\right) / Q^{(p-1-n)/q} \quad (3)$$

海面の平均水面よりの隆起が Gauss 分布に布うものとすれば、その自乗平均または分散を S^2 とすると

$$m_0 = \int_0^\infty [f(\omega)]^2 d\omega = S^2 (= E/2) \quad (4)$$

波スペクトルが狭帯域であつて、波高分布が近似的に Rayleigh 分布に従うと仮定すれば、有義波高と m_0 の間に次の関係が成立する。

$$H_0 = 4S = 4\sqrt{m_0} (= 2.83\sqrt{E}) \quad (5)$$

波スペクトルが比較的広帯域の場合については Rayleigh 分布の近似が成立しないが、特に広帯域でない限り(5)の近似を行なつても大した誤差はない。

ただし、目測による平均波高が計測された記録より解析された有義波高に等しいと云う仮定については必ずしも確証はなく、目測平均波高は実際の有義波高より若干小さいとも云われている。このことが事実であるならば(5)の仮定によることは波スペクトルを過小評価していることになる。しかしながら、これらの点について十分の資料が得られていない現在、一応(5)の仮定を認めることとしよう。

つぎに、平均波周期についても目測値の不正確さがあるけれどもこれを容認することとすると、Rice⁹⁾によれば平均波周期は次式で与えられる。

$$T_0 = 2\pi \sqrt{m_0/m_2} \quad (6)$$

ただし、波スペクトルが狭帯域の場合には、Longuet-Higgins¹⁰⁾によつて次式が成立するとされている。

$$T_0 = 2\pi(m_0/m_1) \text{ for } \delta^2 \ll 1 \quad (7)$$

$$\delta^2 = (m_0 m_2 - m_1^2) / m_0 m_2 \quad (8)$$

したがつて、近似的には(7)を採用してよいが、波スペクトルが比較的広帯域の場合には(6)による必要がある。しかし、実用的見地より考えると、(7)によれば波スペクトルの高周波数領域における減衰部の影響が小さい点が好都合であり、実用に適しているように思われる。

さて、(1)を変形して

$$\left. \begin{aligned} [f(\omega)]^2 H_0^2 \omega_0^{-1} &= P_1 (\omega/\omega_0)^{-p} \exp\{-Q_1 (\omega/\omega_0)^{-q}\} \\ \omega_0 &= 2\pi/T_0, \quad P_1 = P/H_0^2 \omega_0^{p-1}, \quad Q_1 = Q/\omega_0^q \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

のように無次元化し、(5)と(6)または(5)と(7)の条件を満足するように P_1 および Q_1 を定めると次のようになる。

(5)と(6)による場合:

$$P_1 = (q/16) \left\{ \Gamma\left(\frac{p-1}{q}\right) \right\}^{(p-3)/2} / \left\{ \Gamma\left(\frac{p-3}{q}\right) \right\}^{(p-1)/2} \quad (10)$$

$$Q_1 = \left\{ \Gamma\left(\frac{p-1}{q}\right) / \Gamma\left(\frac{p-3}{q}\right) \right\}^{q/2} \tag{11}$$

$$\omega_0/\omega_v = (q/p)^{1/q} \left\{ \Gamma\left(\frac{p-1}{q}\right) / \Gamma\left(\frac{p-3}{q}\right) \right\}^{1/2} \tag{12}$$

$$[f(\omega_0)]^2 / H_v^2 \omega_v^{-1} = P_1 (\omega_0/\omega_v)^{-p} \exp\{- (p/q)\} \tag{13}$$

ω_0 : peak frequency

(5) と (7) による場合 :

$$P_1 = (q/16) \left\{ \Gamma\left(\frac{p-1}{q}\right) \right\}^{p-2} / \left\{ \Gamma\left(\frac{p-2}{q}\right) \right\}^{p-1} \tag{14}$$

$$Q_1 = \left\{ \Gamma\left(\frac{p-1}{q}\right) / \Gamma\left(\frac{p-2}{q}\right) \right\}^q \tag{15}$$

$$\omega_0/\omega_v = (q/p)^{1/q} \Gamma\left(\frac{p-1}{q}\right) / \Gamma\left(\frac{p-2}{q}\right) \tag{16}$$

$$[f(\omega_0)]^2 / H_v^2 \omega_v^{-1} = P_1 (\omega_0/\omega_v)^{-p} \exp\{- (p/q)\} \tag{17}$$

そこで

(a) Modified Pierson-Moskowitz type

($p=5, q=4$)

(b) Modified Neumann type

($p=6, q=2$)

(c) Modified Roll-Fischer type

($p=5, q=2$)

Table 1 Comparison of various type wave spectra

δ^2	(a) $p=5, q=4$		(b) $p=6, q=2$		(c) $p=5, q=2$	
$T_v/2\pi (= \omega_v^{-1})$	m_0/m_1	$\sqrt{m_0/m_2}$	m_0/m_1	$\sqrt{m_0/m_2}$	m_0/m_1	$\sqrt{m_0/m_2}$
P_1	0.1109	0.0796	0.3904	0.2591	0.2026	0.1250
Q_1	0.4435	0.3183	1.7672	1.5000	1.2732	1.0000
ω_0/ω_v	0.7718	0.7104	0.7675	0.7071	0.7137	0.6325
$[f(\omega_0)]^2 / H_v^2 \omega_v^{-1}$	0.1160	0.1260	0.0951	0.1032	0.0899	0.1014

の各波スペクトル表示式について、(8) の δ^2 および (10)~(13) または (14)~(17) を求めると Table 1 に示すようになる。

(a) および (b) の場合には δ^2 の値は比較的小さく波スペクトルを狭帯域と見なしてよさそうであるが、(c) の場合には δ^2 の値がやや大きく狭帯域の仮定は (a) および (b) の場合よりは無理なようである。狭帯域の仮定をして (7) の条件を採用した場合にエネルギー密度の最大値の生じる周波数は、(6) の条件によつた場合のそれよりもやや高い周波数となる。エネルギー密度の最大値は狭帯域の仮定によつた場合の方がやや小さい。

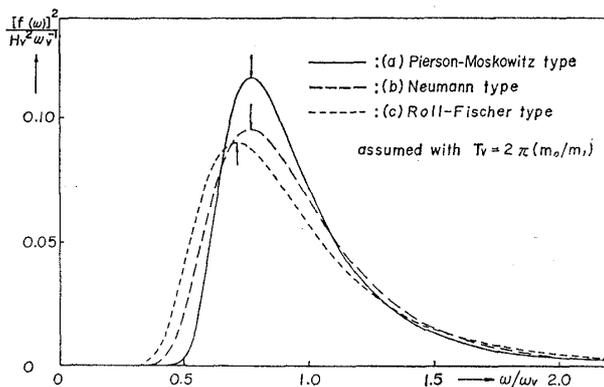


Fig. 1 Various type wave spectra in dimensionless form

狭帯域の仮定の下に求められた各波スペクトルの無次元化された形を Fig. 1 に比較して示す。スペクトルのピークは (a) が最も鋭く高く、以下 (b), (c) の順となつている。しかしながら、3種の波スペクトルの間にはそれ程著しい相違はない。

以上に述べた一般に (1) の形で表わされる波スペクトル表示式と異つた形の波スペクトル表示式として Darbyshire type の式がある。本来の Darbyshire の波スペクトルを修正して目測による平均波高 (有義波高) と平均波周期より波スペクトルを仮定する方法が British Towing Tank Panel (BTTP) で採用されている^{11), 12)}。すなわち

(d) Modified Darbyshire type

$$[f(\omega)]^2 = 0.214 H_v^2 \exp\{- (\omega - \omega_0) / \sqrt{0.065(\omega - \omega_0 + 0.26)}\} \tag{18}$$

for $-0.26 < (\omega - \omega_0) < 1.65$

$[f(\omega)]^2 = 0$ elsewhere

$$\omega_0 = (3.15/T_v) + (8.98/T_v^2) : \text{peak frequency} \tag{19}$$

この場合には、(a)~(c)の場合と異なつて、エネルギー密度の最大値の生じる周波数 ω_0 が $\omega_v (=2\pi/T_v)$ の2次式で表わされたことになつている。また、エネルギー密度の最大値は ω_v と無関係であつて

$$[f(\omega_0)]^2/H_v^2 = 0.214(\text{sec}) \quad (20)$$

のように一定である。

(a), (b) および (c) の波スペクトルについて、 ω_0 , $[f(\omega_0)]^2/H_v^2$ を狭帯域の仮定の下に (16), (17) によつて求めた結果、および (d) の波スペクトルの ω_0 , $[f(\omega_0)]^2/H_v^2$ を求めた結果を、Fig. 2 に比較して示している。また、Fig. 3 に (a) および (d) の波スペクトルの例を比較して示している。

Fig. 1~3 よりわかるように、(a), (b) および (c) の波スペクトルの間にはほぼ類似した傾向があり相互の間に著しい相違はないが、(d) の波スペクトルはこれらとやや異なつた傾向を示している。

このように、目測による平均波高(有義波高)と平均波周期に基づいて波スペクトルを仮定しようとする場合に、(a), (b), (c) および (d) の表示式のどれを採用するかによつて、また、(a), (b), (c) の表示式では平均波周期に対して (6) または (7) のどれの条件をとるかによつて、波スペクトルが若干相違する。ところで、われわれがある海面状態を波スペクトルで表わそうとする目的は、そのような海面状態における応答の短期分布を求め、これに基づいて長期分布を推定することにある。したがつて、仮定した波スペクトルに若干の相違があつたとしても、そのような波スペクトルを用いてある海面状態における応答の短期分布を求めた結果に重大な相違を生じなければ大した支障はない。また、短期分布を求めた結果に若干の相違があつても、これによつて長期分布を推定した結果に大きい相違を生じなければ実用上差支えない。次節に、これらの波スペクトルを用いて波浪曲げモーメントの短期分布を求めた結果を比較して示し、各波スペクトルによつて求められた結果がどの程度相違するかを検討してみよう。

3 短期分布計算結果の比較

ある海面における船の応答の短期分布を表わすパラメーターとして、応答を確率過程としての時間的変動量と考えた場合に、その分散 (R^2) または標準偏差 (R) が用いられる。前節に述べた各波スペクトルによつて海面状態を表わした場合、すなわち

- (a) Modified Pierson-Moskowitz Spectra (ISSC Spectra)
- (b) Modified Neumann Spectra
- (c) Modified Roll-Fischer Spectra
- (d) Modified Darbyshire Spectra (BTTP Spectra)

を用いて、150 米の貨物船と 300 米の巨大型油送船の船体中央部に働らく波浪曲げモーメントの標準偏差 (R) を求めた結果を以下に示す。ただし、(a), (b) および (c) の波スペクトルは狭帯域の仮定により (7) の条

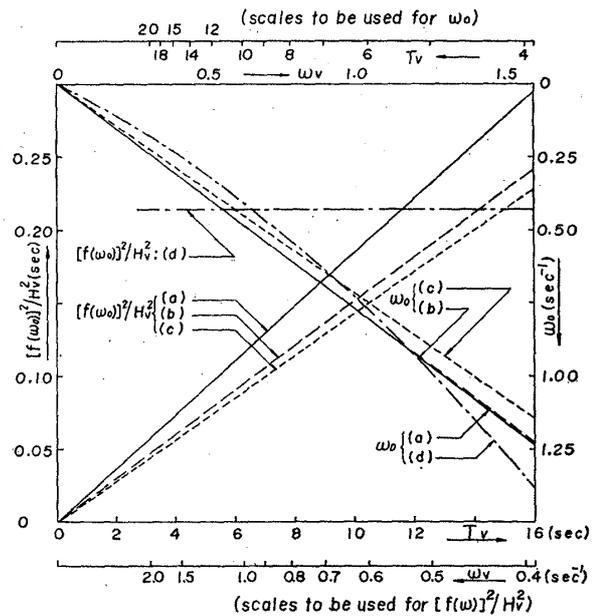


Fig. 2 Peak frequency and peak value of various type wave spectra

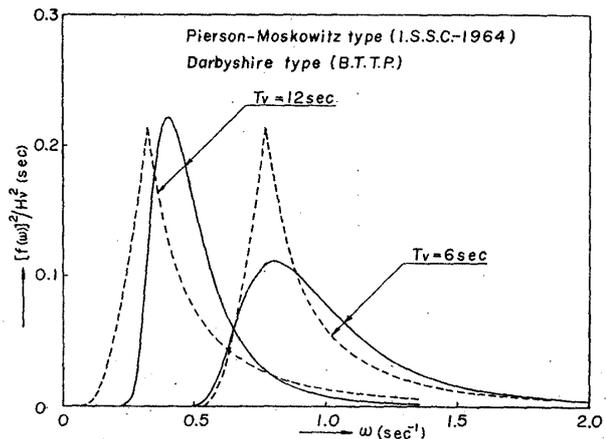


Fig. 3 Comparison of ISSC and BTTP wave spectra

件を用いたものを採用している。これらの波スペクトル表示式は次の通りである。

$$(a) [f(\omega)]^2/H_v^2 = 0.11 \omega_v^{-1} (\omega/\omega_v)^{-5} \exp\{-0.44(\omega/\omega_v)^{-4}\} \quad (21)$$

$$(b) [f(\omega)]^2/H_v^2 = 0.39 \omega_v^{-1} (\omega/\omega_v)^{-6} \exp\{-1.77(\omega/\omega_v)^{-2}\} \quad (22)$$

$$(c) [f(\omega)]^2/H_v^2 = 0.20 \omega_v^{-1} (\omega/\omega_v)^{-5} \exp\{-1.27(\omega/\omega_v)^{-2}\} \quad (23)$$

$$(d) [f(\omega)]^2/H_v^2 = 0.214 \exp\left\{-\frac{(\omega - \omega_0)}{\sqrt{0.065(\omega - \omega_0 + 0.26)}}\right\} \quad (24)$$

$$\left. \begin{aligned} &\text{for } -0.26 < (\omega - \omega_0) < 1.65 \\ &= 0 \text{ elsewhere} \\ &\omega_0 = (3.15/T_v) + (8.98/T_v^2) \\ &= 0.501 \omega_v + 0.227 \omega_v^2 \end{aligned} \right\}$$

計算例に採用した貨物船と油送船の主要目は Table 2 に示している。

Table 2 Main particulars of the ships

	Cargo Ship	Oil Tanker
Length between perpendiculars (L)	150.000m	300.000m
Length / Breadth (L/B)	7.000	6.000
Length / Drouth (L/d)	17.500	17.500
Breadth / Drouth (B/d)	2.500	2.917
Block coefficient (Cb)	0.700	0.830
Water plane area coefficient (Cw)	0.787	0.891
Midship sectional area coefficient (Cm)	0.986	0.993
Centre of buoyancy from midship (forward)	0.005L	0.034L
Longitudinal gyradius	0.250L	0.245L
Weight of displacement (W)	19,766ton	218,727ton
After body weight	0.4883W	0.4825W
Fore body weight	0.5117W	0.5175W
After body moment about midship	0.1025WL	- 0.0876WL
Fore body moment about midship	0.1075WL	0.1212WL
After body 2nd. moment about midship	0.0305WL ²	0.0223WL ²
Fore body 2nd. Moment about midship	0.0320WL ²	0.0389WL ²
Still water bending moment (hog)	0.0108WL	- 0.0030WL

これらの船(満載状態)について、規則波中にて船体中央部に働く波浪曲げモーメントの応答関数を求めた結果を Fig. 4 に示す。図には、フルード数 0.15 の場合の応答関数を $\sqrt{\text{船長}/\text{波長}}$ の関数として表わしている。これらは、規則波に対する斜行角 0° (正面迎波) より 180° (追波) の間を 15° 間隔の斜行角について理論計算によつて求めたものであるが¹⁸⁾、図には 30° 間隔の斜行角についての結果のみを示した。

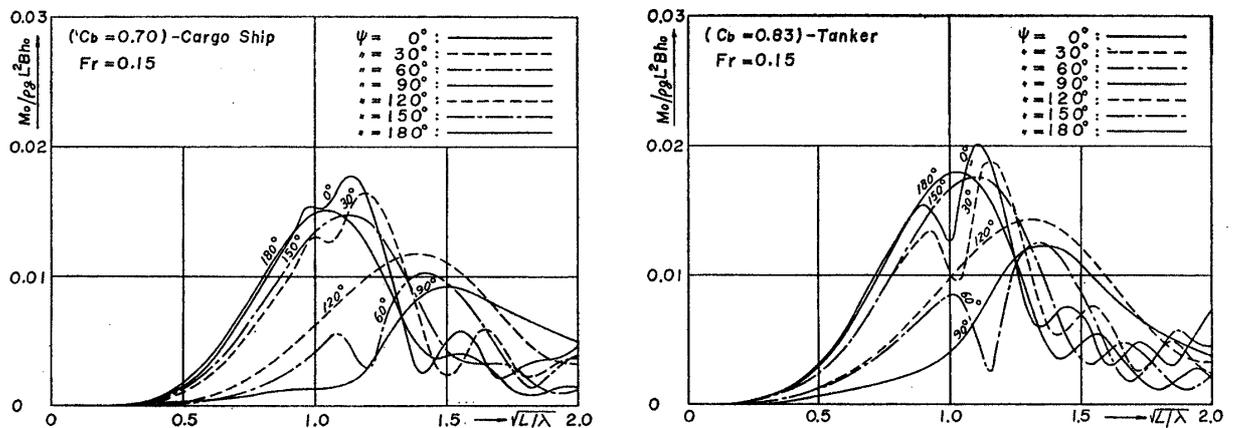


Fig. 4 Response operators of vertical bending moment at midship

図中に用いた記号は次の通りである。

M_0 : amplitude of vertical bending moment at midship

ρ : density of sea water,

g : acceleration of gravity

- L : length between perpendiculars, B : breadth of ship
- h_0 : amplitude of wave elevation, λ : wave length
- ψ : heading angle to waves ($\psi=0^\circ$: head waves)
- F_r : Froude number, C_b : block coefficient

これらの応答関数を用いて、長波頂不規則波および短波頂不規則波中における波浪曲げモーメントの標準偏差 R を求めた結果を Fig. 6 以下に示している。波浪曲げモーメントの標準偏差は、(21)~(24) の波スペクトルを用いて線型重ね合わせの方法により波浪曲げモーメントの分散 R^2 を求めることによつて得られる。すなわち、

(i) 長波頂不規則波中の場合

$$R_\theta^2 = \int_0^\infty [M_0(\omega)/h_0]^2 \psi_{=\theta} [f(\omega)]^2 d\omega$$

(ii) 短波頂不規則波中の場合

$$R_\theta^2 = (2/\pi) \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^\infty [M_0(\omega)/h_0]^2 \psi_{=\theta-\chi} [f(\omega)]^2 \cos^2 \chi d\omega d\chi$$

ここで

R^2 : variance of wave bending moment

θ : heading angle to mean wave direction ($\theta=0^\circ$: head waves)

χ : angle between a component wave direction and the mean wave direction

短波頂不規則波の場合には、素成波の方向性エネルギーの分布が波の平均進行方向より $\pm 90^\circ$ の範囲に $\cos^2 \chi$ の分布をなすものと仮定している。

長波頂不規則波中で正面迎波の場合の波浪曲げモーメントのエネルギー・スペクトル計算の例を Fig. 5 に示す。図では、(a) Modified Pierson-Moskowitz wave spectra (ISSC spectra) および (d) Modified Darbyshire wave spectra (BTTP spectra) による結果を比較して示している。

Fig. 6 に、(a)~(d) の4種類の波スペクトルを用いて長波頂不規則波中における波浪曲げモーメントの標準偏差 R を求めた結果を示す。波に対する船の針路 ($\theta=0^\circ$: 正面迎波) をパラメータとし、標準偏差の無次元値

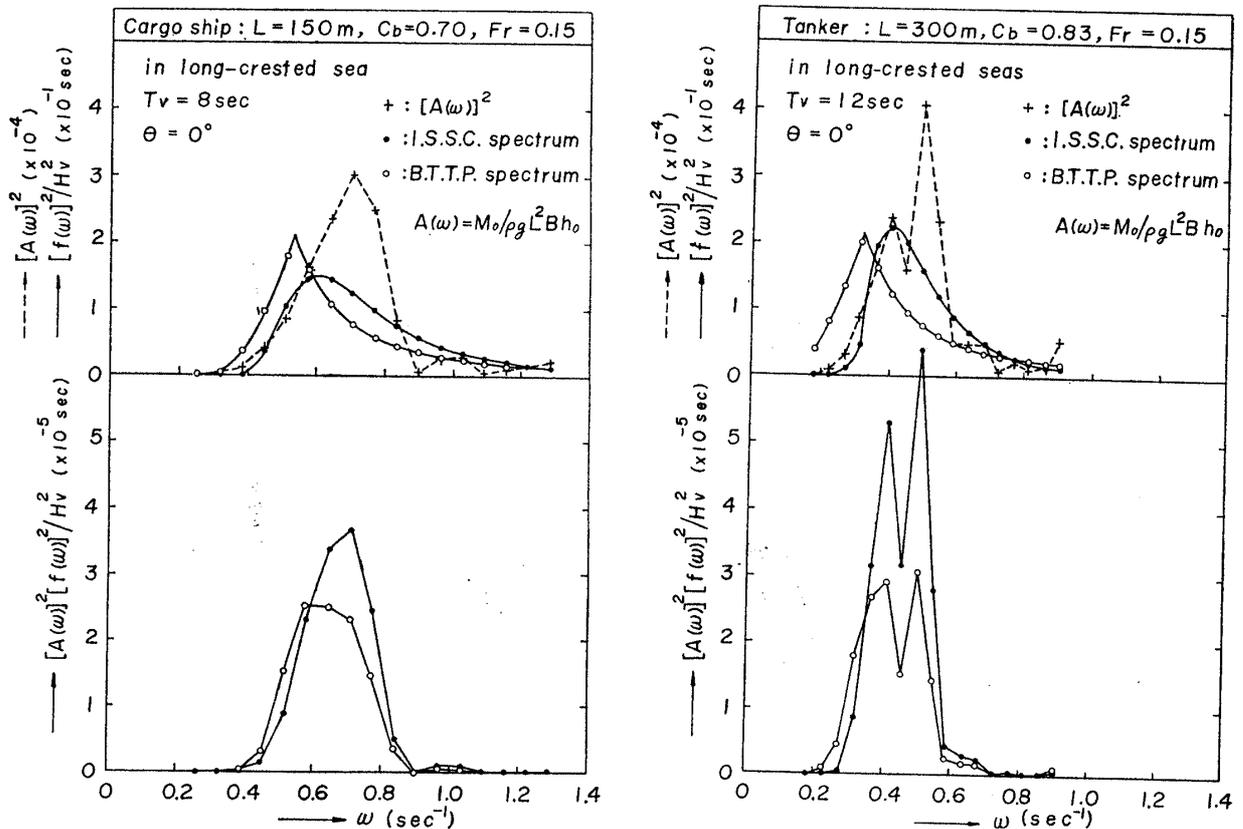


Fig. 5 Energy spectra of vertical bending moment at midship

Table 3 Comparison of results in various type wave spectra (long crested irregular seas)

		150 m Cargo Ship					300 m Oil Tanker				
		R_b/R_a					R_b/R_a				
θ (deg.)		T_v (sec.)					T_v (sec.)				
		4	6	8	10	12	6	8	10	12	14
0		1.356	0.993	0.928	0.960	0.997	1.200	1.040	0.959	0.954	0.967
30		1.386	0.966	0.934	0.973	1.007	1.278	0.954	0.954	0.959	0.975
60		1.129	0.940	0.976	0.992	1.043	1.104	0.954	0.963	0.978	0.995
90		1.016	0.948	1.025	1.064	1.070	1.059	0.934	0.960	1.005	1.038
120		1.126	0.942	0.965	1.008	1.036	1.104	0.953	0.953	0.979	1.006
150		1.516	0.980	0.932	0.966	1.001	1.420	1.024	0.948	0.951	0.974
180		1.586	0.997	0.929	0.953	0.987	1.454	1.076	0.957	0.946	0.963
		R_c/R_a					R_c/R_a				
		T_v (sec.)					T_v (sec.)				
θ (deg.)		4	6	8	10	12	6	8	10	12	14
		0	1.750	1.027	0.885	0.901	0.944	1.465	1.109	0.950	0.913
30		1.748	0.976	0.883	0.913	0.961	1.540	1.041	0.933	0.914	0.921
60		1.256	0.893	0.915	0.952	1.036	1.218	0.943	0.921	0.926	0.945
90		1.067	0.885	0.969	1.049	1.106	1.142	0.899	0.897	0.944	0.994
120		1.264	0.904	0.905	0.961	1.018	1.228	0.942	0.905	0.922	0.933
150		1.970	1.001	0.886	0.907	0.950	1.790	1.085	0.928	0.902	0.915
180		2.156	1.047	0.892	0.895	0.932	1.895	1.175	0.954	0.905	0.907
		R_d/R_a					R_d/R_a				
		T_v (sec.)					T_v (sec.)				
θ (deg.)		4	6	8	10	12	6	8	10	12	14
		0	0.597	1.172	0.896	0.777	0.805	0.994	1.274	0.971	0.805
30		0.449	1.185	0.865	0.782	0.836	1.034	1.215	0.926	0.794	0.756
60		0.348	1.007	0.816	0.838	1.012	1.023	1.010	0.863	0.792	0.798
90		0.441	0.954	0.835	0.972	1.189	1.108	0.968	0.772	0.787	0.874
120		0.287	1.070	0.820	0.838	0.967	1.092	1.041	0.827	0.773	0.803
150		0.219	1.166	0.885	0.781	0.817	1.002	1.255	0.931	0.774	0.742
180		0.279	1.132	0.931	0.780	0.787	1.015	1.334	0.994	0.794	0.735

Ra : Estimated in modified Pierson-Moskowitz wave spectra
 Rb : Estimated in modified Neumann wave spectra
 Rc : Estimated in modified Roll-Fischer wave spectra
 Rd : Estimated in modified Darbyshire wave spectra

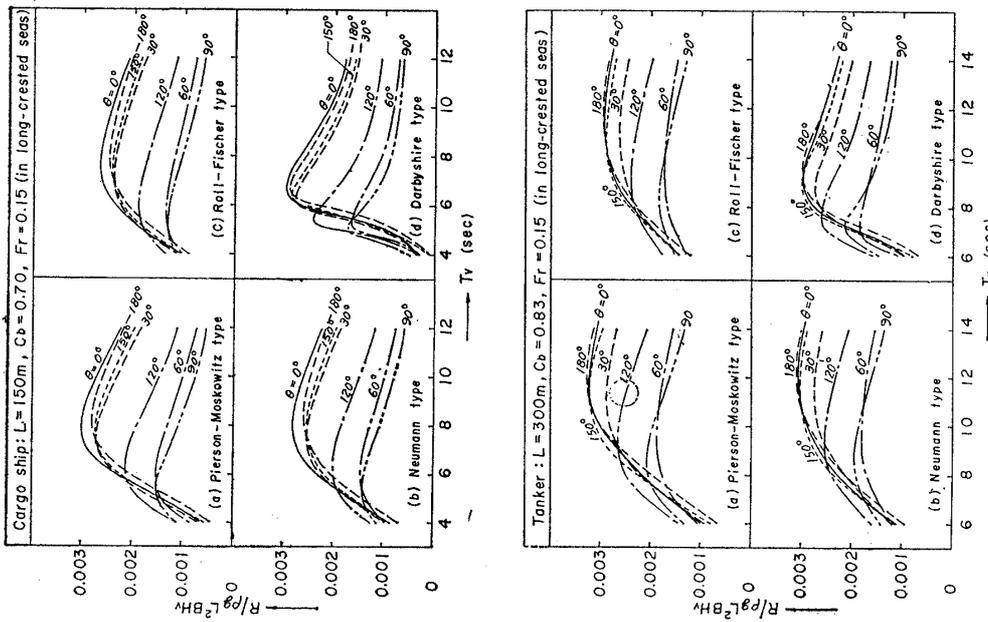


Fig. 6 Standard deviations of vertical bending moment in long crested irregular seas as functions of visual wave period

$R/\rho g L^2 B H_0$ を目測平均波周期 T_v の関数として表わしている。また、(a) Modified Pierson-Moskowitz spectra (ISSC spectra) を用いて得られた値を基準として、他の3種類の波スペクトルより得られた値との比較を Table 3 に示す。

Fig. 6 および Table 3 よりわかるように、150 米の貨物船および 300 米の油送船の何れの場合にも、4種類の波スペクトルを用いて得られた結果には多少の相違はあつても、一般に重大な相違は認められない。標準偏差の値は正面迎波および追波状態で大きく、これらの状態より横波状態に変針するにしたがつて減少するが、標準偏差の値が大きい場合には4種類の波スペクトルによる相違は小さく、標準偏差の値が小さい場合にその相違が比較的大きい。したがつて、長期分布の推定結果に対しては4種類の波スペクトルによる相違はそれ程重大な影響を生じないであろうと思われる。

しかしながら、Fig. 6 に示された結果をよく検討すると、(a), (b) および (c) の波スペクトルより得られた結果は相互に比較的類似した傾向を示しているのに対して、(d) の波スペクトルより得られた結果のみはこれらとやや異なつた傾向を示している。すなわち、正面迎波または追波状態およびこれらに近い状態で標準偏差の値の大きい場合に、 $R/\rho g L^2 B H_0$ の値が最大となる平均波周期の値は、(a), (b), (c) の何れの波スペクトルによつた場合でも大差ないが、(d) の波スペクトルによつた場合にはやや小さい値となり、且つ最大値付近の曲線形状が鋭どくとがつた傾向を示している。その原因は、波スペクトルのピーク周波数およびピークの値が (a), (b), (c) の3種類の波スペクトルではほぼ似通つた値となつているのに対して、(d) の波スペクトルの場合にはこれらと異なつた傾向を持つているためである。

以上述べたように、(a), (b), (c) の3種類の波スペクトルを用いて得られた結果は相互に比較的類似した傾向を持つており、(d) の波スペクトルより得られた結果だけが、これらとやや異なつた傾向を示しているのので、以下では (a) Modified Pierson-Moskowitz spectra (ISSC spectra) および (d) Modified Darbyshire spectra (BTTP spectra) を用いて得られた結果の比較を行なう。

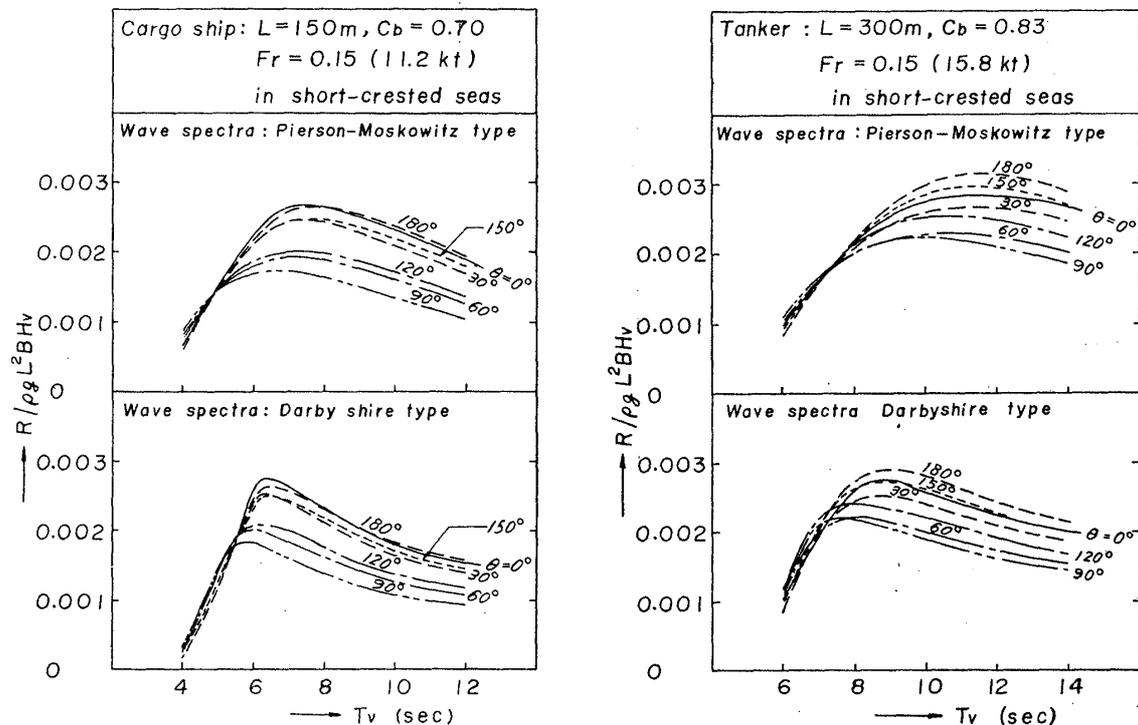


Fig. 7 Standard deviations of vertical bending moment in short crested irregular seas as functions of visual wave period

Fig. 7 に、短波頂不規則波中の計算結果を示す。Fig. 6 における場合と同様に、波に対する船の針路をパラメーターとし、 $R/\rho g L^2 B H_0$ を目測平均波周期の関数として表わしている。

Fig. 8 には、長波頂不規則波および短波頂不規則波中の $R/\rho g L^2 B H_0$ を、平均波周期をパラメーターとして波

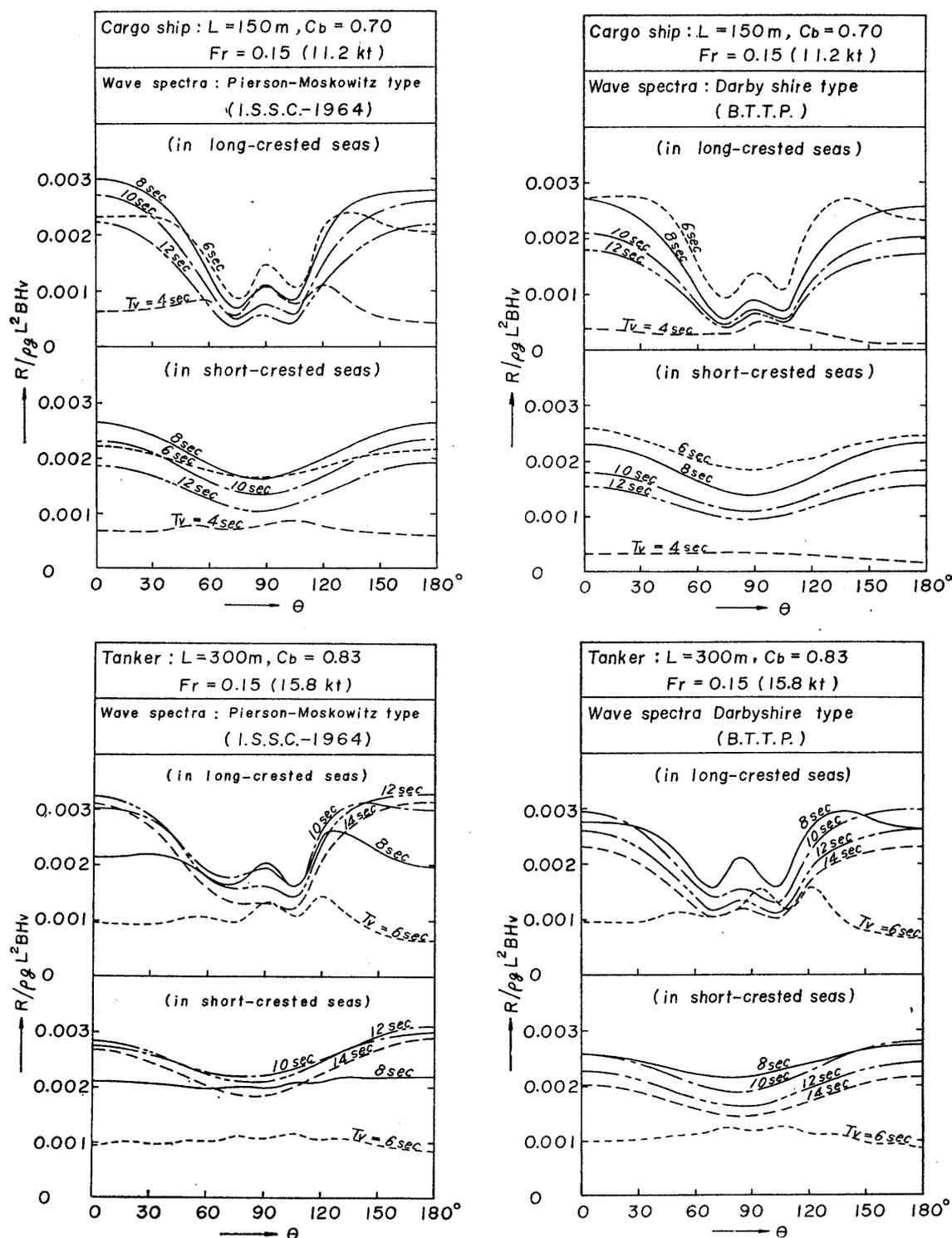


Fig. 8 Standard deviations of vertical bending moment as functions of heading angle to waves

に対する船の針路の関数として表わしている。

以上の Fig. 6~8 に示された結果より次のようなことがわかる。

- (1) 長波頂不規則波中においても、短波頂不規則波中においても、正面迎波または追波状態で波浪曲げモーメントの標準偏差の無次元値 $R/\rho g L^2 B H_v$ は大きく、横波状態では小さい。
- (2) $R/\rho g L^2 B H_v$ の値が大きい迎波または追波状態では、短波頂不規則波中の値の方が長波頂不規則波中の値よりやや小さく、その値が小さい横波状態では短波頂不規則波中の値の方がやや大きい。したがって、 $R/\rho g L^2 B H_v$ の値の波に対する針路による変化は短波頂不規則波中の場合の方がゆるやかである。

- (3) Modified Pierson-Moskowitz spectra (ISSC spectra) によつた場合には、長波頂不規則波中および短波頂不規則波中の何れの場合にも、150 米の貨物船で 8 秒程度、300 米の油送船で 12 秒程度の平均波周期の海面にて正面迎波または追波状態の場合に $R/\rho g L^2 B H_v$ の値が最大となる。Modified Darbyshire spectra (BTTP spectra) によつた場合にも同様の傾向を示すが、 $R/\rho g L^2 B H_v$ の値が最大となるような平均波周期の値は前者の場合より小さく、150 米の貨物船で 6.5 秒程度、300 米の油送船で 9 秒程度である。そして、 $R/\rho g L^2 B H_v$ の値が最大となる平均波周期の近傍で、その平均波周期による変化が前者の場合よりも大きい。これらの点を除けば、双方の波スペクトルによる $R/\rho g L^2 B H_v$ の値の相違はそれ程大きくはない。

さて、上の (3) で述べたように、Modified Pierson-Moskowitz spectra (ISSC spectra) を用いた場合と、Modified Darbyshire spectra (BTTP spectra) を用いた場合とで、 $R/\rho g L^2 B H_v$ の値が最大となる平均波周期の値が異なるのは、双方の波スペクトルのピーク周波数が異なるためである (Fig. 3 参照)。そこで、(21) の Modified Pierson-Moskowitz spectra (ISSC spectra) を、(24) の Modified Darbyshire spectra (BTTP spectra) の式の中の条件 $\omega_0 = (3.15/T_v) + (8.98/T_v^2)$ を用いて修正し、ピーク周波数が (24) による波スペクトルの場合と一致するようにすると、次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} [f(\omega)]^2/H_v^2 &= 0.11 \bar{\omega}^{-1} (\omega/\bar{\omega})^{-5} \exp\{-0.44(\omega/\bar{\omega})^{-4}\} \\ \bar{\omega} &= (4.08/T_v) + (11.64/T_v^2) \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

このように修正した波スペクトルを用いて $R/\rho g L^2 B H_v$ を求めた結果を、(24) の Modified Darbyshire spectra (BTTP spectra) を用いて得られた結果と比較して Fig. 9 に示す。両者の相違は、(21) および (24) の波スペクトルによつた場合の相違よりもはるかに小さい (Fig. 6 参照)。このことから、(21) の Modified Pierson-Moskowitz spectra (ISSC spectra) による結果と、(24) の Modified Darbyshire spectra (BTTP spectra) による結果との相違は、主として波スペクトルのピーク周波数の相違によるもので、波スペクトルの形状にはあまり関係しないことがわかる。ただし、Pierson-Moskowitz type の波スペクトルを用いた場合には、Modified Darbyshire Type の波スペクトルを用いた場合よりも、 $R/\rho g L^2 B H_v$ の値が大きい傾向があり、長さの長い船の場合にこの傾向が強い。

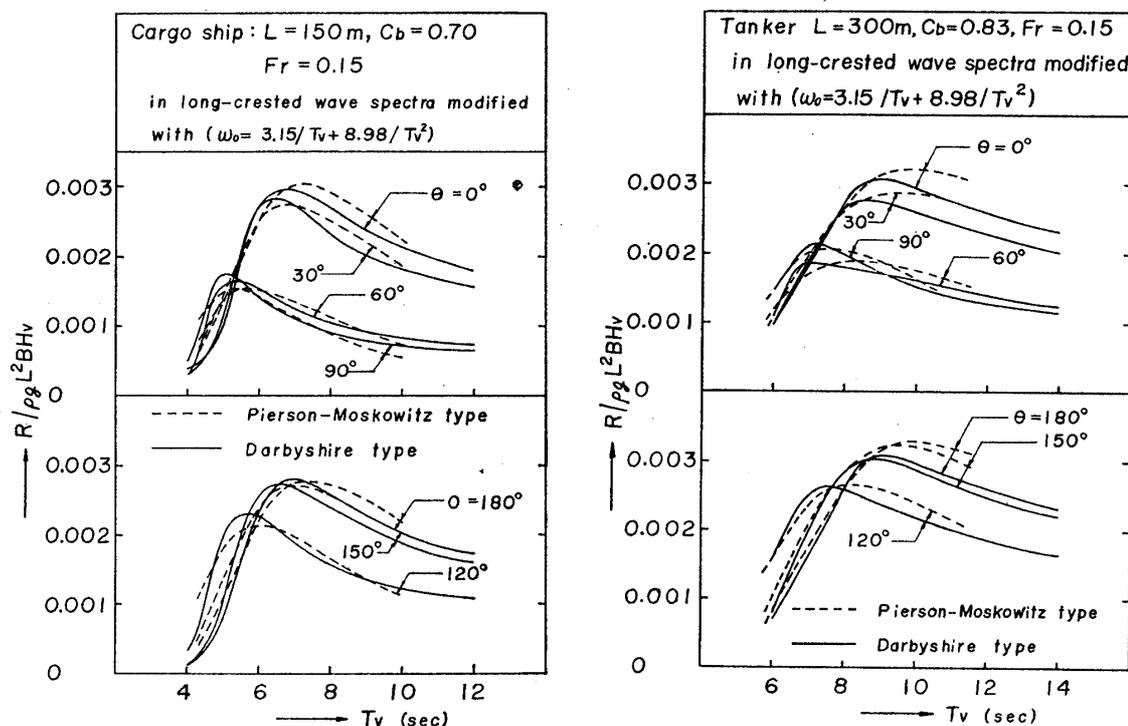


Fig. 9 Comparison of results in modified Darbyshire wave spectra (BTTP spectra) and further modified Pierson-Moskowitz wave spectra

4 結 言

波浪曲げモーメントの短期分布および長期分布推定のために必要な、ある短期の海面状態を平均的な波スペクトルによつて表現する方法を、比較検討した。すなわち、数人の海洋学者によつて提唱された理論的波スペクトルの表示式を適当に修正して、ある短期の海面の目測による平均波高（有義波高）と平均波周期の条件を満足させることによつて、そのような短期の海面状態を表わす波スペクトルを仮定した。本来の理論的波スペクトル表示式としては、(a) Pierson-Moskowitz, (b) Neumann, (c) Roll-Fischer, (d) Darbyshire による4種類の式をとりあげ、これらの波スペクトルの式を修正して目測による平均波高（有義波高）と平均波周期の条件を満足するような波スペクトルの式を仮定した。

これらの波スペクトルを用いて、150 米の貨物船と 300 米の油送船について、短期の海面における波浪曲げモーメントの標準偏差 R の無次元値 $R/\rho g L^2 B H_0$ を求め、その結果を比較検討した。4種類の波スペクトルによつて得られた結果の間には重大な相違はないが、(a), (b) および (c) の型の波スペクトルより得られた結果はほぼ類似した傾向を示しているのに対して、(d) の型の波スペクトルより得られた結果のみはやや異なつた傾向を示している。すなわち、(d) Modified Darbyshire spectra (BTTP spectra) を用いて得られた $R/\rho g L^2 B H_0$ を、他の波スペクトル例えば (a) Modified Pierson-Moskowitz spectra (ISSC spectra) によつて得られた $R/\rho g L^2 B H_0$ と比較すると、前者は比較的小さい平均波周期の海面において大きい値となる傾向を示している。その原因は、Modified Darbyshire spectra (BTTP spectra) のピーク周波数が他の波スペクトルのそれよりも低いことによるもので、波スペクトルの形状の相違はあまり影響がない。Modified Pierson-Moskowitz spectra (ISSC spectra) をさらに修正して、そのピーク周波数を Modified Darbyshire spectra (BTTP spectra) のそれと一致させると、双方の波スペクトルによつて得られた $R/\rho g L^2 B H_0$ の相違は更に小さくなる。

したがつて、波浪曲げモーメントの短期分布および長期分布推定のための波スペクトルを仮定するに当つては波スペクトルの形状はあまり重要ではなく、波スペクトルのピーク周波数をどのように仮定するかと云うことが最も重要である。しかしながら、ある短期の海面の目測による平均波周期と波スペクトルのピーク周波数との関係については、現在のところ十分信頼し得る資料が乏しく、たとえば、Modified Darbyshire spectra (BTTP spectra) における波スペクトルのピーク周波数と平均波周期との関係を表わす式をそのまま認めることは尚早に過ぎるように思われる。そして、Modified Pierson-Moskowitz spectra (ISSC spectra) によつて得られた $R/\rho g L^2 B H_0$ の値は、他の波スペクトルより得られたものよりもやや大きく安全側にあること等を考慮すると、現在の段階においては、波浪曲げモーメント予測のための波スペクトルとして Modified Pierson-Moskowitz spectra (ISSC spectra) を採用するのが妥当であろうと思われる。将来、目測平均波周期と波スペクトルのピーク周波数の関係が明らかになれば、それにしたがつて、目測平均波周期 T_0 と $R/\rho g L^2 B H_0$ の関係を示す図（例えば Fig. 6, 7 等）の横軸 T_0 を修正すればよく、また、将来目測平均波高 H_0 （有義波高に等しいとされている）と波スペクトルの面積との関係に修正を加えるべき事実が明らかにされれば、縦軸 $R/\rho g L^2 B H_0$ を修正すればよい。このような、目測平均波周期と波スペクトルのピーク周波数との関係および目測平均波高と波スペクトルの面積との関係を明らかにすることが、目下の急務であつて、それまでは一応 Modified Pierson-Moskowitz spectra (ISSC spectra) を採用することとしても何等差支えないと思われる。

終りに臨み、本研究の数値計算を担当した九州大学造船学教室秦一郎、堤繁美両氏に謝意を表す。また、本研究は、文部省科学研究費によつて行なわれたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) W. H. Warnsinck: "Report of Committee 1 on Environmental Conditions" Proceedings of ISSC 1964, Delft.
- 2) H. U. Roll: "Height, Length and Steepness of Seawaves in North Atlantic and Dimensions of Seawaves as Functions of Wind Force" (English Translation) SNAME (1958)
- 3) Y. Yamanouchi, S. Unoki, T. Kanda: "On the Winds and Waves on the Northern North Pacific Ocean and South Adjacent Seas of Japan as the Environmental Conditions for the Ship" Papers of Ship Research Institute (Tokyo) No. 5 (1965)
- 4) D. E. Cartwright: "A Comparison of Instrumental and Visually Estimated Wave Heights and Periods Recorded on Ocean Weather Ships" Appendix of Ship Rep. 49, NPL Ship Division (1964)

- 5) G. Neumann : "On Ocean Wave Spectra and a New Method of Forecasting Wind Generated Sea" Technical Memorandum No. 43, Beach Erosion Board (1953)
 - 6) J. Darbyshire : "A Further Investigation of Wind Generated Waves" Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Band 12, Heft 1 (1959)
 - 7) H. U. Roll, G. Fischer : "Eine Kritische Bemerkung zum Neumann-Spectrum des Seegangs" Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Band 9, Heft 1 (1956)
 - 8) W. J. Pierson Jr., L. Moskowitz : "A Proposed Spectral Form for Fully Developed Wind Seas Based on the Similarity Theory of S. A. Kitaigorodski" New York University G. S. Report 63-12 (1963)
 - 9) S. O. Rice : "Mathematical Analysis of Random Noise" The Bell System Technical Journal, Vol. 23 (1944), Vol. 24 (1945)
 - 10) M. S. Longuet-Higgins : "On the Intervals between Successive Zeros of a Random Function" Proceedings of Royal Society of London, Series A, Vol. 246, No. 1244 (1958)
 - 11) G. J. Goodrich : "Discussion to the Report of Committee 1 on Environmental Conditions" Proceedings of ISSC 1964, Delft.
 - 12) J. R. Scott : "A Sea Spectrum for Model Tests and Long-Term Ship Prediction" JSR, Vol. 9, No. 3 (1965)
 - 13) J. Fukuda : "Computer Program Results for Response Operators of Wave Bending Moments in Regular Oblique Waves" Journal of the Society of Naval Architects of West Japan No. 32 (1966)
-