(昭和 38 年 11 月造船協会秋季講演会において講演)

海洋波中の高速艦艇に働く曲げモーメント

正員 福 田 淳 一* 正員 柴 田 実**

正員 豊 田 久 夫**

Midship Bending Moments Acting on a Destroyer in Irregular Seas

By Jun-ichi Fukuda, *Member* Jitsu Shibata, *Member*
and Hisao Toyota, *Member*

Summary

In the previous paper, the authors presented the results of theoretical evaluation of heave, pitch, shearing forces and bending moments of a destroyer in regular head waves. In this paper, they tried the theoretical evaluation of heave, pitch and midship bending moments of the same destroyer in oblique head waves, and estimated the statistical values of them in irregular head seas by means of St. Denis and Pierson's method. The derived statistical values were compared with those calculated approximately in long-crested irregular head waves.

The statistical heaving amplitudes in irregular head seas are nearly equal to the approximately calculated values in long-crested irregular head waves. However, those of pitch and midship bending moment are rather smaller than the approximately calculated values.

The amplitude of midship bending moment calculated by the conventional method without Smith's effects is nearly equal to the average of 10% highest values in not-fully developed storm seas corresponding to 25m/sec. winds of 40 hours duration, and that calculated with Smith's effects is nearly equal to the average of 10% highest values in fully developed storm seas corresponding to 20 m/sec. winds.

1 緒 言

著者等は、さきに、正面規則波中の高速艦艇の船体運動（上下動揺と縦動揺）および船体に働く剪断力と曲げモーメント等を、ストリップ法を用いた理論計算によって求め、これらの性質を検討したが¹⁾、本論文においては、これらの諸問題の検討をさらに進めて、規則波と斜行する場合の上下動揺、縦動揺および midship に働く曲げモーメントの応答関数を求め、その結果を用いて、不規則海洋波中の船体運動（上下動揺と縦動揺）および midship の曲げモーメントの統計値を推定した。計算例に採用した船型は前論文¹⁾で取扱った駆逐艦船型であって、その主要目を Table 1 に再掲している。

2 規則波と斜行する場合の応答関数

Fig. 1 に示すように、海洋波の一つの成分波である規則波と ψ の角度で斜行する船の上下動揺と縦動揺について考える。この問題は山崎、福田が取扱っているが²⁾、船の横標流、船首揺、横揺、前後動等を見出し、船の

Table 1. Main Particulars of Ship

Length bet. pp. (L)	115.0m
Breadth (B^*)	12.0m
Draft (d_0)	4.0m
Displt. (W)	2,890 t
Block coefft. (C_b)	0.511
L/B^*	9.58
L/d_0	28.8
B^*/d_0	3.0
Rad. of gyration in air	0.242 L
Natural Heaving Period	4.62sec.
Natural Pitching Period	4.42sec.

原稿受付 昭和 38 年 6 月 15 日

*九大工学部

** 三菱長崎造船所艦艇設計課

Fig. 2 (a) Heave in Regular Oblique Waves ($\psi=0^\circ$) Fig. 2 (b) Heave in Regular Oblique Waves ($\psi=30^\circ$) Fig. 2 (c) Heave in Regular Oblique Waves ($\psi=60^\circ$)

Fig. 3 (a) Pitch in Regular Oblique Waves ($\psi = 0^\circ$)

Fig. 3(b) Pitch in Regular Oblique Waves ($\psi = 30^\circ$)

Fig. 3 (c) Pitch in Regular Oblique Waves ($\psi = 60^\circ$)

Fig. 4 (a) Midship B.M. in Regular Oblique Waves ($\psi=0^\circ$) Fig. 4 (b) Midship B.M. in Regular Oblique Waves ($\psi=30^\circ$) Fig. 4 (c) Midship B.M. in Regular Oblique Waves ($\psi=60^\circ$)

$\overline{\mathfrak{M}}_0$ の L/λ^* による変化の傾向は、Fig. 4 に示すように、船速によっては著しく変化しないが斜行角によってかなり相違する。一般に $\overline{\mathfrak{M}}_0$ の値は $L/\lambda^*=1$ より少々大きい場合に最大となり、 $\overline{\mathfrak{M}}_0$ が大きい値となる $L/\lambda^*=0.9 \sim 1.3$ の範囲付近では、高速になると $\overline{\mathfrak{M}}_0$ は少々増加し、また、斜行角が大きくなると $\overline{\mathfrak{M}}_0$ は減少する。

3 不規則波中の統計値

海洋波のスペクトルとして Neumann のスペクトル⁴⁾

$$\left. \begin{aligned} [r(\omega, \chi)]^2 &= \frac{C_0}{\omega^6} e^{-2\bar{g}^2/v_w^2 \omega^2} \cos^2 \chi \\ &= [r(\omega)]^2 \cos^2 \chi : -\frac{\pi}{2} < \chi < \frac{\pi}{2} \text{ の場合} \\ &= 0 : \chi \leq -\frac{\pi}{2} \text{ および } \chi \geq \frac{\pi}{2} \text{ の場合} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ただし、 $C_0 = 3.05 \text{ m}^2/\text{sec}^5$, v_w : 風速 (m/sec)

χ : 成分波の進行方向と風向のなす角 (Fig. 1 参照)

を用いると、St. Denis and Pierson の方法⁵⁾を応用して、上下動揺、縦動揺および midship の曲げモーメントのスペクトル $[S_\zeta(\omega, \chi)]^2$, $[S_\phi(\omega, \chi)]^2$, $[S_m(\omega, \chi)]^2$ は、一般に

$$[S(\omega, \chi)]^2 = [r(\omega)]^2 [R(\omega, \psi)]^2 \cos^2 \chi \quad (10)$$

となる。ここで、 $\psi = \chi - \theta$ (θ : 船の針路と風向のなす角) であって、 ψ は進行方向 χ の成分波に対して船が斜行している角度である。

(10) を ω と λ について積分すれば、上下動揺、縦動揺および midship の曲げモーメントの累積エネルギー密度 E_ζ, E_ϕ, E_m が得られる。即ち、一般に

$$E = \int_{\omega_0}^{\infty} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} [r(\omega)]^2 [R(\omega, \psi)]^2 \cos^2 \chi d\omega d\chi \quad (11)$$

となり、 ω_0 は風の吹送距離と吹続時間によって定まる⁶⁾。

上下動揺、縦動揺および midship の曲げモーメント等の短期分布が略々 Rayleigh 分布に従うものと仮定すれば、これらの統計値 $\zeta_{1/n}$, $\phi_{1/n}$, $\mathfrak{M}_{1/n}$ 等 (一般に $A_{1/n}$ の形で表わす) は、Longuet-Higgins の式⁷⁾

$$A_{1/n} = K_{1/n} \sqrt{E} \quad (12)$$

ただし、 $K_{1/3} = 1.42$: 1/3 最大平均値の場合

$K_{1/10} = 1.80$: 1/10 最大平均値の場合

$K_{1/100} = 2.28$: 100 回変動中の最大期待値の場合

$K_{1/1000} = 2.73$: 1000 回変動中の最大期待値の場合

によって求められる。

Fig. 5 Neumann's Spectrum of Waves

縦動揺および midship の曲げモーメントを問題とする場合に最も苛酷と考えられる $\theta = 0^\circ$ の場合、即ち船の針路が風上に向かっている場合についての計算例を以下に示す。

計算条件として風速 10, 15, 20 m/sec の完全発達海面および風速 25 m/sec, 吹送距離無限大, 吹続時間 40 時間の不完全発達海面を想定した。これらの場合の Neumann のスペクトル $[r(\omega)]^2$ を Fig. 5 に示す。

Fig. 6, 7, 8 に (10) の右辺の中の $[r(\omega)]^2 [R(\omega, \psi)]^2$ すなわち

$[r(\omega)]^2 [R_\zeta(\omega, \psi)]^2$: 上下動揺の場合

$[r(\omega)]^2 [R_\phi(\omega, \psi)]^2$: 縦動揺の場合

$[r(\omega)]^2 [R_m(\omega, \psi)]^2$: midship の曲げモーメントの場合

の例を示す。これらの図には、風速 20 m/sec および 25 m/sec の場合について、 $\psi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ および $F_r = 0.3, 0.5$

Fig. 6 (a) Spectrum of Heave ($v_w=20\text{m/sec}$) Fig. 6 (b) Spectrum of Heave ($v_w=25\text{m/sec}$) Fig. 7 (a) Spectrum of Pitch ($v_w=20\text{ m/sec}$) Fig. 7 (b) Spectrum of Pitch ($v_w=25\text{m/sec}$)

の場合を比較して示す。

$[r(\omega)]^2[R(\omega, \psi)]^2$ は、上下動揺、縦動揺、midship の曲げモーメントの何れの場合にも一般に高速となる程大きくなっている。一方、斜行角が大きくなると、縦動揺と midship の曲げモーメントの場合には、 $[r(\omega)]^2[R(\omega, \psi)]^2$ は急激に減少するが、上下動揺の場合には、高速においては減少するけれども低速においては逆に増加する傾向を示している。

Fig. 9 および 10 に、(11)、(12) によって求めた上下動揺と縦動揺および midship の曲げモーメントの 1/10 最大平均値を、風速を横軸にとり船速をパラメータとして示す。

これらの統計値は風速の増加と共に大きくなるが、風速 20 m/sec 以上では上下動揺の統計値は急激に飽和して一定値に近付く。これに反して、縦動揺の場合にはこのような飽和の傾向は小さく、midship の曲げモーメントの場合には飽和の傾向はさらに小さい。Fig. 6~8 における風速 20 m/sec および 25 m/sec の場合の $[r(\omega)]^2[R(\omega, \psi)]^2$ を検討すれば、これらのことが納得される。縦動揺と midship の曲げモーメントの場合には、風速 20 m/sec 以上で完全発達波を想定して計算しても、不完全発達波を想定した場合と比較して、統計値の著しい増加はないが、上下動揺の場合には両者の差はかなり大きくなると思われる。ただし、船長がもっと長い場合には

 Fig. 8 (a) Spectrum of Midship B.M. ($v_w = 20$ m/sec)

 Fig. 8 (b) Spectrum of Midship B.M. ($v_w = 25$ m/sec)

 Fig. 9 Heave and Pitch in Irregular Seas ($\theta = 0^\circ$)

 Fig. 10 Midship BM in Irregular Seas ($\theta = 0^\circ$)

これらの傾向も若干変って来て、縦動揺と曲げモーメントの統計値は、風速 20 m/sec 以上で上に述べた上下動揺の場合の傾向と似た傾向となることが推測される。

上下動揺の統計値は、Fig. 9 に示すように高速となる程大きくなる。縦動揺の場合にも同様の傾向が認められるが、上下動揺の場合程ではない。一方、midship の曲げモーメントの統計値は、Fig. 10 に示すように 20 節前後の船速で最小となり、これより高速になると船速と共に大きくなる。しかしながら船速による曲げモーメントの変化はそれ程大きくはない。スミス効果を見放した標準計算およびこれを考慮した計算による midship の曲げモーメントの値は、それぞれ風速 25 m/sec および 20 m/sec の場合の 1/10 最大平均値にほぼ等しくなっている。

つぎに、近似的な計算法として、規則波と斜行する場合の応答関数が正面規則波中すなわち $\psi = 0^\circ$ の場合と等しいとして計算した累積エネルギー密度を E' とすると

$$\begin{aligned} E' &= \int_{\omega_0}^{\infty} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} [r(\omega)]^2 [R(\omega, \psi)]^2_{\psi=0^\circ} \cos^2 \chi d\omega d\chi \\ &= \frac{\pi}{2} \int_{\omega_0}^{\infty} [r(\omega)]^2 [R(\omega, \psi)]^2_{\psi=0^\circ} d\omega \end{aligned} \quad (13)$$

となる。この E' は、換言すれば、波の累積エネルギー密度が Neumann のスペクトルで与えられる累積エネルギー密度

$$\frac{\pi}{2} \int_{\omega_0}^{\infty} [r(\omega)]^2 d\omega$$

に等しく、風下方向にのみ進行する成分波より成るような不規則海面を仮定して求められた上下動揺、縦動揺、曲げモーメント等の累積エネルギー密度に相当する。

そこで、応答関数 R を ω および ψ の関数として厳密に計算して求めた $\sqrt{E}$ と、(13) によって近似的に求めた $\sqrt{E'}$ との比を K' とし、

$$K' = \sqrt{E} / \sqrt{E'} \quad (14)$$

を、風速を横軸として表わすと Fig. 11 のようになる。 $K' \approx 1$ が成立すれば、(13) による近似計算は十分実用に適する。図に示すように、上下動揺の場合には一般に $K'_z > 1$, midship の曲げモーメントの場合には $K'_m < 1$, 縦動揺の場合には風速 13 m/sec 以上で、 $K'_\phi < 1$ となっている。これらのことは、Fig. 6, 7, 8 に示す $[r(\omega)]^2 [R(\omega, \psi)]^2$ の斜行角による変化の傾向を検討すれば納得される。風速大なる暴風海面の場合が重要であるが、Fig. 11 に示すように、近似計算は、上下動揺の場合には少々過小値を与え、縦動揺および midship の曲げモーメントの場合にはそれぞれ 5~10% および 10~15% の過大値を与えるけれども安全側にあり、いずれも近似値としてほぼ差し支えない。ただし、船長が大きく変化すれば相似船型であっても、これらの K' の値は変化するであろうから注意を要する。

Fig. 11 K'_z , K'_ϕ and K'_m

4 結 言

さきに発表した正面規則波中の高速艦艇の上下動揺、縦動揺および midship の曲げモーメントの計算法を、さらに規則波と斜行する場合に適用して、これらの応答関数を求め、St. Denis and Pierson の理論を応用して、Neumann のスペクトルで表わされる不規則海洋波中における上下動揺、縦動揺および midship の曲げモーメントの統計値を求めた。また、これらの結果と、正面規則波中の応答関数を用いて近似的に計算した結果とを比較して、近似計算の精度を検討した。以上の結果次のようなことがわかった。

- (1) 上下動揺、縦動揺および midship の曲げモーメントの応答関数は、これらを (7) の $\bar{\zeta}_0$, $\bar{\phi}_0$, $\bar{M}_0$ のような無次元値で表わすと、 L/λ^* による変化の傾向が船速と斜行角によって相違する。
- (2) $\bar{\zeta}_0$ は、一般に $L/\lambda^* < 1$ の範囲で大きくなり、この範囲では高速となる程大きくなり、斜行角が大きくなると少々増加する傾向を示す。
- (3) $\bar{\phi}_0$ も、一般に $L/\lambda^* < 1$ の範囲で大きくなるが、高速となってもあまり増大せず、斜行角が大きくなれば少々減少する。
- (4) $\bar{M}_0$ は、一般に $L/\lambda^* = 1$ より少々大きい場合に最大となり、 $\bar{M}_0$ が大きい $L/\lambda^* = 0.9 \sim 1.3$ 付近の範囲では、高速となる程大となり、斜行角が大きくなれば減少する。
- (5) 不規則海洋波中の上下動揺の統計値は、風速と共に増大するが、風速 20 m/sec 以上の暴風海面の場合には急激に飽和してほとんど増大しなくなる。また、高速の場合には上下動揺は大きくなる。
- (6) 不規則海洋波中の縦動揺の統計値は、風速と共に増大し、風速 20 m/sec 以上の暴風海面の場合にも上下動揺の場合のように飽和しない。また、高速になっても縦動揺の増加は小さい。
- (7) 不規則海洋波中の midship の曲げモーメントの統計値は、風速と共に増大し、風速 20 m/sec 以上の暴風海面の場合にも飽和しない。また、船速 20 節以上の場合には高速になると少々増加するが船速による変化は小さい。
- (8) スミス効果を見捨てた標準計算 およびこれを考慮した標準計算による midship の曲げモーメントの値は、それぞれ、風速 25 m/sec, 吹続時間 40 時間の不完全発達暴風海面および風速 20 m/sec の完全発達暴風海面

面における曲げモーメントの 1/10 最大平均値にほぼ等しい。

(9) 正面規則波中の応答関数を用いた近似計算は、風速 13 m/sec 程度以上の暴風海面を考えた場合、上下動揺に対しては少々過小値を与え、縦動揺および midship の曲げモーメントに対しては、それぞれ 5~10% および 10~15% の過大値を与えるけれども安全側にあり、近似値としてはほぼ差し支えないと思われる。

以上は計算例に採用した駆逐艦船型について得られた結論であって、類似船型であっても船長が相当に異なる船については、不規則海洋波中の統計値推定にはなお検討の余地がある。しかし、本論文で求めた応答関数を用いれば、船長の異なる類似船型についての統計値を推定することは容易である。

本論文で取扱った不規則海洋波中の上下動揺、縦動揺および midship の曲げモーメント等の統計値は、いずれも問題を線型的に考えて、静水中静止時の値を基準としその値よりの変動量の平均振幅を論じている。従って、種々の非線型の要素、静水中静止時の値からの変動中心の値のずれ等については別個に考慮する必要があり、これらの諸問題の研究の発展が望まれる。

終に臨み、本研究に寄せられた三菱長崎造船所造船設計部長岡部利正博士、艦艇設計課長島田博之技師のご好意、ご援助に感謝する。また、有益なご討論を頂いた九大名誉教授渡辺恵弘博士におん礼申上げる。なお、計算に協力された三菱造船研究部計装研究課の諸氏、九大造船学教室泰一郎助手に対し謝意を表する。

文 献

- 1) 福田, 柴田, 豊田, 星隈: “規則波中の高速艦艇に働く曲げモーメント” 造船協会論文集第 112 号 (1962) p. 101
- 2) 山崎隆介, 福田淳一: “波と斜行する船の動揺について” 西部造船会々報第 23 号 (1962) p. 241
- 3) 福田淳一: “規則波中の船の縦曲げモーメント(続)” 造船協会論文集第 111 号 (1962) p. 204
- 4) G. Neumann: “On Ocean Wave Spectra and a New Method of Forecasting Wind-generated Sea” Technical Memorandum No. 43, Beach Erosion Board
- 5) M. St. Denis and W. J. Pierson, Jr.: “On the Motions of Ships in Confused Seas” Trans. SNAME Vol. 61 (1953) p. 280
- 6) W. J. Pierson, Jr., G. Neumann and R. W. James: “Practical Methods for Observing and Forecasting Ocean Waves by Means of Wave Spectra and Statistics” U. S. Navy Hydrographic Office (1955)
- 7) M. S. Longuet-Higgins: “On the Statistical Distribution of the Height of Sea Waves” Journal of Marine Research Vol. 11 No. 3 (1952) p. 245