波浪荷重の統計的性質と疲労強度評価のための 波浪荷重のシミュレーション法 (その2)

正員 富田 康 光* 正員 河 辺 寛**
正員 佐々木 司** 正員 福 岡 哲 二***

Statistical Characteristics of Long Term Distribution of Wave-Induced Loading and the Simulation Method
for Fatigue Strength Analysis of Ship Structural Member (2nd Report)

by Yasumitsu Tomita, *Member* Hiroshi Kawabe, *Member*
Tsukasa Sasaki, *Member* Tetsuji Fukuoka, *Member*

Summary

The purpose of this study is to clarify the time history of wave-induced stress by analyzing data collected from 6 naval ships over a period of 3 years. The time history of wave-induced stress at midship deck plate is compared with encountered wave height condition. By the data, wave-induced stress is linear to wave height in the elastic stress region. The property of the time history of wave-induced stress, therefore, is considered to be the same as that of encountered wave condition. The proposed random fatigue loading model based on the encountered wave conditions can be verified by the data from time history of wave-induced stress. Based on the above result, the random fatigue loading model for ship structural members is discussed.

1. は じ め に

疲労強度は船舶設計において考慮すべき最も重要な要素の1つである。船殻の疲労強度評価においては波浪応力の長期分布と時間履歴を明らかにすることが必要となる。近年、著者らは北太平洋航路を航行する38隻の船舶¹⁾及び日本-インド洋航路を航行する11隻の船舶²⁾が14年間にわたって収集した遭遇波浪のデータについての統計調査を行った。その結果、船体に波浪によって誘起される荷重の長期分布は、遭遇海象の統計値と密接な関係にあり、波浪荷重などの船体応答は波高と線形関係にあることを基礎仮定とし、荷重の長期分布のパラメータと波高分布のパラメータの関係を理論的に明らかにした。また、船舶の遭遇海象の時間履歴は比較的低波高状態と比較的高波高状態の2つの状態に分類でき、この2つの状態はランダムなオーダーで交互に出現することを結論づけた。こうした結果を基に、

波浪応力が波高と線形関係にあると仮定して、船体構造部材におけるランダム疲労荷重モデルを提案した。前報で提案した荷重モデルは遭遇波高の時間履歴に基づいたものであり、荷重と波高が線形関係であれば、直接波と荷重は対応可能である。しかしこのことを実際船体構造部材に生じる応力の航海中の時間履歴について検証した資料は今のところない。本論では海上自衛隊が有する6隻の護衛艦に装備された船体運動状態表示装置 (Ship Motion Analysing Computer System: SMACS) を用いて、北太平洋の日本近海において3年間にわたって計測された波と応力の統計データの解析を行った。SMACSでは波浪と船体中央部甲板に働く波浪応力が同時計測されるので、波浪状態と波浪応力の統計的特性を解析し、著者らが提案したランダム荷重モデルが標準変動振幅荷重試験及び船体構造部材の疲労強度の評価に使用できるかを検証した。

2. SMACSを用いた波浪応力と遭遇波浪の計測

2.1 SMACSの概要

SMACSは、荒天航行に対する操船支援情報の提供及び荒天中の運航マニュアル作成や船舶設計のためのデータベースの充実を目的として開発され、1986年1月より海上保安庁の1000 ton型巡視船に搭載されている³⁾。海上自衛隊

* 大阪大学

** 防衛大学校

*** 三井造船

においても1987年度以降に就役した護衛艦及び補給艦等にSMACSを装備して海上保安庁と同様の目的で運用を行っている。

2.1.1 計測の流れ

SMACSは船首部甲板及び船体中央部ガニネルに取り付けられた歪計、船首部甲板及び船体中央部甲板に取り付けられた加速度計から入力される船体応答データ、艦艇既存の機器から自動入力されるデータ及び乗員が定期的に目視観測によって入力する波浪の到来方向のデータをデータ処理装置で処理し、現在の海象、応答情報を表示器に表すと共に、装置中のディスクドライブに得られたデータを自動記録するものである。記録の間隔は通常航海時が20分間隔、それ以外の状態では5分間隔である。

2.1.2 計測記録項目

SMACSの計測記録項目をTable 1に示す。

2.2 応力計測結果

2.2.1 解析対象艦船及び解析データ

本論では護衛艦「あさぎり」型の同型艦6隻のデータを

用いて解析を実施した。Table 2にその主要目を示す。

(1) 行動海域

護衛艦の行動海域は主として太平洋の日本近海、日本海及び東シナ海である。

(2) 計測期間

解析対象とした艦船の計測期間はTable 3に示すとおりである。なお、計測期間中の艦船の年間航海日数は150～200日程度である。

(3) 航行状態の特徴

艦船はその運用目的から、一般商船とは運航形態が大きく異なっている。一般商船は目的地への往復を速く、かつ経済的に航行するために一定の高速力を保って航行する傾向にあるが、護衛艦等の艦船はFig.1に示すように10kt

Table 1 Recording Items and Contents

ITEM	CONTENTS
MEASURING DATE/HOUR	Year, Month, Date, Hour.
SHIP POSITION	Mean position in measuring period.
SHIP DIRECTION	Mean direction in measuring period.
ROLLING/PITCHING ANGLE	Average amplitude of significant value in measuring interval.
SPEED	Mean speed in measuring period.
VERTICAL ACCELERATION	Significant value at bow and midship.
STRESS	Significant value at bow (2 position) and midship deck plate.
WIND DIRECTION WIND SPEED	Mean value in measuring period.
WAVE DIRECTION	Observed by crew.
WAVE HEIGHT WAVE LENGTH	Calculated value by the data of measured ship motion (vertical acceleration and pitching motion)

Table 2 Principal Particular of ASAGIRI Class Destroyer

Length Over All L _{OA} (m)	Breadth B (m)	Depth D (m)	Draft d (m)
137.0	14.6	8.8	4.5

Table 3 Measured Period and Number of Data

SHIP	MEASURING PERIOD	NUMBER OF RECORD
A	88. 3. 19～92. 10. 5	23018
B	88. 9. 7～92. 12. 18	28601
C	88. 1. 24～91. 12. 13	21058
D	89. 7. 24～92. 4. 24	16460
E	90. 1. 22～92. 12. 24	18521
F	90. 9. 27～93. 1. 26	8091

Fig. 1 Statistical Data of Operation Speed (Ship A)

付近の速度の使用頻度が高いものの全体的には使用速度に多少のパラツキがある。また一般商船が針路の変更を最小限にとどめているのに対して、護衛艦等の艦船は針路の変更を頻繁に行っている。これは艦船が演習等を行いながら航行するためであり、その傾向は Fig.2 に示す波浪と船首方位との相対角度がほぼ一樣であることより明らかである。

(4) 解析データ

SMACS による計測データは Table 1 に示したとおりであるが、この中から遭遇海象と船体に生じる応力の関係を調べるという目的で波高、波長と船体中央部の甲板の応力について統計解析を行う。

(i) 波高、波長

波高、波長は船体をセンサーと考え、船体運動の計測値より逆算して求められた。その推定法は概ね次の手順による⁴⁾。

ア. 計測された上下加速度をフーリエ変換し、加速度スペクトル ($S_{\text{motion}}(\omega)$) を求める。

イ. 上下加速度の応答周期及び応答の標準偏差を求める。

$$R_{\text{mea}}^2 = \int S_{\text{motion}}(\omega) \cdot d\omega$$

ウ. 同様の方法によりピッチ角の標準偏差を求める。

エ. ピッチ角及び上下加速度計測値の標準偏差をストリップ法で求めた短波頂不規則波中での単位波高に対する運動の標準偏差 (R/H) で除することによって有義波高 $H_{1/3}$ 及び波長 λ を求める。 $H_{1/3} = R_{\text{mea}} / (R/H)_{\text{cal}}$

波周期

$$T_{01} = 2\pi \int S_{\text{motion}}(\omega) d\omega / \int S_{\text{motion}}(\omega) \omega d\omega$$

波長

Fig. 2 Statistical Data of Relative Angle between Ship and Wave Direction (Ship A)

$$\lambda = \frac{2\pi g}{\omega^2} = \frac{g T_{01}^2}{2\pi}$$

ここに

$S_{\text{motion}}(\omega)$: 計測した運動のスペクトラム

R_{mea} : 計測した運動の標準偏差

T_{01} : 計測した運動の平均波周期

$H_{1/3}$: 有義波高

$(R/H)_{\text{cal}}$: 理論計算によるピッチ角または上下加速度の短波頂不規則波中での単位波高あたりの標準偏差

ω : 円周波数

このとき用意される $(R/H)_{\text{cal}}$ は、波と船との出合角によって選択される。波と船との出合角は乗員の目視観測によって入力されるため、この観測精度によって波高の精度は左右される。また波高と船体運動の関係は線形を仮定しているので非常に波が高くなり運動が激しい状態では波高の信頼度に問題があると考えられる。一例として、航行中に乗員が目視観測した波高と SMACS により計測された波高の比較を Fig.3 に示す。Fig.3(a) は穏やかな海面状態における場合、Fig.3(b) は 2~4 m のやや波が高い場合である。Fig.3(a) は風浪階級に含まれる波高区分を斜線で囲って示している。このように、波高が低い状態では、もともと船の運動の絶対値が小さく（ピッチ角で有義値 0.5° 前後）、波高の計算精度と目視観測値共に精度は期待できないものと思われる。一方、船体運動が大きくなる Fig.3(b) では波高の計算値が安定し、この程度の波高が最も精度良く計測できたものと思われる。更に大波高時の計測値と対応したものがあれば良いが、現在のところデータがないので不明である。

(ii) 応力

応力は構造部材に取り付けた歪ゲージの計測値を記録している。統計解析を行う応力の計測位置は船体中央部の甲板のややガネル部に近い部分である。

当該部分に働く応力は船体の縦曲げ成分と横曲げ応力成分が重畳した値である。護衛艦型の艦艇の船体中央部に働く波浪曲げモーメントの真能率⁵⁾による護衛艦の長期分布の計算結果では、超過確率 10^{-8} における波と船との相対角度毎の垂直曲げモーメントの極値 M_x と水平曲げモーメントの極値 M_y の比率、ガネル部の縦曲げ応力 σ_x と横曲げ応力 σ_y の応力比及び船体中央部甲板のガネル部に生じる波浪応力 σ_r はそれぞれ Table 4 の値となる。

つまり、本報告で検討する船体中央部に働く波浪応力の計測値の統計値は縦曲げ応力成分が主成分である。

2.2.2 遭遇波浪の波周期の頻度特性

一般商船の遭遇波浪状態についてはこれまで数多くの研究がなされているが、前項 2.2.1 の(1)行動海域(3)航行状態の特徴で述べたように外洋を航行する一般商船と艦船とは、その行動海域や航行状態が大きく異なっている。し

Fig. 3 Relation Between Visual Wave Height and Measured Wave Height by SMACS (Ship A)

たがって、艦船の遭遇する波浪の傾向と外洋航行の一般商船が遭遇する波浪の傾向は一致しないことが予測され、こうした点の検証が必要となる。本論では一般商船と護衛艦の遭遇波浪の比較検討を、それぞれの船舶により記録された波高頻度表により行う。多数の一般商船により観測された波のデータを整理したシップ・アンド・オーシャン財団による北太平洋の波と風のデータ⁶⁾と本解析で用いた護衛艦のデータを比較した。文献6では北太平洋をFig.4のような多数の海域に区分し、それぞれの海域毎に波高頻度表が示されている。護衛艦はこのうち主にE09N, E10Nに相当する海域を航行する。一般商船により観測されたこれ

Table 4 Midship Deck Plate Stress at Gunwale Part

	HEAD	BOW	BEAM	QUARTER	FOLLOW	ALL HEADINGS
M_x/M_y	0.25	0.35	0.55	0.44	0.34	0.45
σ_x/σ_y	0.20	0.28	0.44	0.35	0.27	0.38
$\sigma_z = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$	$1.02\sigma_x$	$1.04\sigma_x$	$1.10\sigma_x$	$1.06\sigma_x$	$1.04\sigma_x$	$1.06\sigma_x$

Fig. 4 Definition of Area Subdivision of the North Pacific⁶⁾

Fig. 5 Histograms of Wave Period of Each Area subdivision

らの海域における波浪の波周期の発現頻度の確率分布をFig.5に示す。

Fig.5に示すように北太平洋中央部 (M14W) において

Table 5 Frequency of Encountered Wave Condition (Ship A)

H\T	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	TOTAL
.0	10793	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10793
.5	4249	310	65	0	0	0	0	0	0	0	4624
1.0	2988	235	147	87	3	0	0	0	0	0	3470
1.5	2199	320	114	105	56	1	0	0	0	0	2795
2.0	2172	327	110	53	27	45	2	0	0	0	2736
2.5	888	284	95	49	20	21	15	1	0	0	1373
3.0	1190	234	58	51	13	7	12	9	0	0	1584
3.5	137	197	82	48	15	12	8	5	1	0	505
4.0	46	134	48	35	15	14	4	5	3	0	304
4.5	0	61	38	36	20	13	5	6	1	2	182
5.0	0	15	20	20	10	5	7	2	4	3	86
5.5	0	0	7	15	9	3	10	4	1	2	51
6.0	0	0	6	12	2	10	4	4	0	2	40
6.5	0	0	0	3	2	2	1	4	0	5	17
7.0	0	0	0	2	4	2	1	3	0	3	15
7.5	0	0	0	1	2	3	0	0	3	3	12
8.0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3
8.5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	4
9.0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	4
TOTAL	24662	2117	800	527	198	143	69	43	14	25	28598

Fig. 6 Histograms of Wave Period of Destroyer (E 09 N, E 10 N)

は波周期 8~9 秒程度の波浪が多いが、日本近海に近づくにつれて (M 13 N, M 12 N) この周期の波浪の比率は低下し、6 秒以下の短い波周期の波浪の占める比率が高くなる。更に最も日本列島に近い海区 (E 09 N) では 6 秒以下の波周期の波浪が卓越している。これは、日本近海が低気圧の通過経路にあり、その移動速度も速いため、風の吹送時間が太平洋中央部に比べて短く (一般に 30 ノットの風速下では波が完全に発達するために要する時間は約 40 時間である⁷⁾、そのため波浪が完全に発達していない領域で船舶が波浪に遭遇するためであると考えられる。護衛艦の遭遇波浪の波周期の発現頻度を E 09 N, E 10 N に相当する海域について Fig. 6 に示す。図から明らかなように護衛艦も一般商船と同様に 6 秒以下の波周期の発現頻度が特に高い。

更に前述のとおり、艦艇は航海中の針路変更を頻繁に行うために船体が相対的に遭遇する波周期が短くなることも理由の一つとして考えられる。

2.2.3 波浪応力と遭遇波浪との関係

応力の計測位置は船体中央部の右舷ガンネル部であり、その応力は前述のように船体の縦曲げ応力が主成分であ

る。SMACS では応力の有義値と遭遇波高の有義値が同時に計測されるのでその相関について調査した。Fig. 7 に遭遇波高の有義値と計測応力の有義値の散布図を示す。同じ波高でも応力にバラツキがあるが、これは前述のように艦の針路と波向の相対角度がほぼ一様で、航行状態はいわゆるオール・ヘディングに近く、また速力も頻繁に変更するため (Fig. 1, Fig. 2)、それに応じて応答関数が異なり同一波高でも応力値にバラツキが生ずる。Fig. 7 を船と波との相対針路毎に整理した結果が Fig. 8 である。図では相対針路、各波高ランク毎の応力の有義値の平均値と、その標準偏差を示している。このように針路ごとに分類しても同じ波高に対して応力はバラツキがあるが、平均的に見ると波高と応力には線形関係がある。

Fig. 7 Relation Between Wave-Induced Midship Deck Plate Stress and Encountered Wave Height (Ship A)

Fig. 8 Relation Between Wave-Induced Midship Deck Plate Stress and Encountered Wave Height (Ship A)

3. 波浪応力の長期分布

3.1 船体中央部甲板に働く波浪応力計測値の長期分布

船体中央部甲板に働く波浪応力は20分間隔でその有義値が計測されているが、その間の応力の頻度分布は記録されていない。そこで、20分間の応力の頻度分布を推定し、波浪応力の長期分布を次に示す手順で予測した。

(1) 20～30分間の短時間における不規則波浪状態における波浪応力のスペクトラムは狭帯域の特性を示すと仮定する。よって波浪応力のピーク値 σ の頻度分布はレーレー分布で近似できる。

(2) 応力の標準偏差 R と応力有義値 $\sigma_{1/3}$ には一般に次式の関係がある。

$$\sigma_{1/3} \approx 2R \quad (1)$$

1回の計測期間における波浪応力のピーク値 σ の確率分布は応答の標準偏差 R をパラメータとしたレーレー分布に従う。よって、応力の値が σ を超える確率を $Q(\sigma)$ とすると次式で表される。

$$Q(\sigma) = \exp\left(-\frac{\sigma^2}{2R^2}\right) \quad (2)$$

(3) 1回の計測期間(20分間)における平均波周期を T 秒とすると、この間の全ピーク値の回数 N は

$$N = \frac{20 \times 60}{T} \quad (3)$$

である。

(4) 応力のピーク値の分布がパラメータ R のレーレー分布に従うとすると、応力が $\sigma \sim \sigma + d\sigma$ の間の発生頻度 $n(\sigma)$ は、

$$n(\sigma) = N \frac{\sigma}{R^2} \exp\left(-\frac{\sigma^2}{2R^2}\right) d\sigma \quad (4)$$

となる。

(5) 以上(1)～(4)の操作を全観測期間にわたり合計すると、応力の長期分布が得られる。こうして求めた長期分布の結果をFig.9に示す。図において●印が上記の方法により求めた応力の実測値である。図より護衛艦の船体中央部の甲板に生じる応力の長期分布の値は弾性域内にあることもわかる。

3.2 波浪応力の長期分布の理論的予測

遭遇波浪の統計値と不規則海象中での船体応答理論から、著者らは先の報告において¹⁾波浪応力の長期分布を推定する方法を示した。そこでは計算の手順がやや複雑であったのでより簡単な方法を次に示す。

(1) 10^{-N} の確率で発生する波浪応答の極値 X_m を真能の近似式²⁾により推定する。

$$X_m = 1.073 \{-\log_{10} \{p(R_{\sigma \max}) \times p_{m0}\}\}^{-1/2} \times \overline{R_{\sigma \max}} H_{\max} N \quad (5)$$

ここで

$\overline{R_{\sigma \max}}$: 短期分布において、応力標準偏差 $R\sigma$ を次式によって単位波高あたりの応力標準偏差 $\overline{R\sigma}$ とし

Fig. 9 Long-Term Distribution of Wave-Induced Midship Deck Plate Stress (Ship A)

た値の最大値。なお、このときの波周期を $T_{\max}$ とする。

$$\overline{R_{\sigma}} = \frac{R_{\sigma}}{H}$$

$p(R_{\sigma \max})$: 海象データにおける $T_{\max}$ のランクの波周期の中での最大波高 $H_{\max}$ の発現頻度。

p_{m0} : $R_{\sigma \max}$ となる相対波高を受ける確率

波周期に対する応力標準偏差を求めるために、「あさぎり」型護衛艦の船体中央部の縦曲げ応力をストリップ法により計算した結果をFig.10に示す。図から明らかなように最も激しい応答は艦首波時に生ずる。SMACSで計測される応力は縦曲げ成分が主成分となるので本計算は縦曲げ成分について行った。なお、Fig.10より $\overline{R_{\sigma \max}}$ は $T=7$ 秒の向い波状態において生起し、その時の値は $\overline{R_{\sigma \max}} = 0.3707$ である。また、6隻の艦艇の遭遇波浪のデータより求めた正面向い波状態で航行する確率をTable 6に示す。

(2) 波浪応力の長期分布がワイブル分布に従うとすると、応力 σ の超過確率 $Q(\sigma)$ は次式で表される。

$$Q(\sigma) = \exp\left\{-\left(\frac{\sigma}{\alpha_x}\right)^{\beta_x}\right\} \quad (6)$$

長期分布のパラメータ α_x, β_x は次に示す手順で求められる⁴⁾。

(i) 短期分布の形状パラメータ β_R を次式で求める。

$$\beta_R = A \beta_{H_{T_{\max}}} \quad (7)$$

ここで $\beta_{H_{T_{\max}}}$ は $T_{\max}$ の波周期における波高の頻度分布のワイブル形状パラメータである。(7)式の係数 A は次式によって求められる(ただし $p(T_m) \leq 0.1$)。

$$A = -22.652 p(T_m)^2 + 4.2850 p(T_m) + 0.48732 \quad (8)$$

(ii) パラメータ β_x, α_x を次式によって計算する。

$$\beta_x = 0.014215 + 0.90903\beta_R - 0.15697\beta_R^2 \quad (9)$$

$$\alpha_x = \frac{X_m}{\{N \log(10)\}^{1/\beta_x}} \quad (10)$$

Fig.9において、上記の方法で計算された応力の予測値を実線で表し、3.1で示した波浪応力の実測値から得られた長期分布との比較を示す。図から判断できるように遭遇波浪から予測した長期分布と応力実測値による長期分布はよく一致している。他の艦艇について同様の計算を行った結果も計測データと遭遇波高より推定した長期分布とよく一致した。すなわち、長期分布の理論的予測は、船体応答が波高と線形関係にあるということを基礎仮定としており、これに基づいた理論計算値と計測データがほぼ一致したことにより、船体中央部甲板の応力は遭遇波高の記録から予測できる。この結果は、船体に生じる波浪応力が弾性応答のとき、その統計値の時間的変化は遭遇波浪の時間履歴と1対1に対応し、著者らの提案するランダム荷重疲労試験のためのモデルの検証となる。

Fig. 10 Short-Term Parameter of Wave-Induced Midship Deck Plate Stress

Table 6 Probability of p_{mo}

SHIP	P_{mo}
A	0.1524
B	0.1791
C	0.1738
D	0.1438
E	0.1667
F	0.1436

4. 遭遇波浪状態と波浪応力の時間履歴

著者ら¹⁾は北太平洋航路を航行する38隻の商船及び日本-インド洋航路を航行する11隻の商船における14年間の海象データを基に解析を行った。その結果、実際の航海中における波浪状態の時間履歴について次のように述べている。

(1) 比較的低波高状態 (当該海域の平均波高の2倍以下) では、遭遇波高は時間によらずランダムに発生する。

(2) 高波高状態 (当該海域の平均波高の2倍以上) では、遭遇波高は徐々に増加し、ある1点で最高波高に達した後、徐々に減衰する。つまり波高は時間と共に変化している。よって遭遇波高状態はFig.11に示すようにモデル化できる。このときの高波高状態を「嵐状態」と呼ぶ。

(3) (1)と(2)の状態はランダムなオーダーで交互に出現する。

また各海域におけるそれぞれの高波高状態について最大波高 $H(m)$ 、持続期間 $T(day)$ の統計的関係を調査した結果、各オーダーでの嵐状態における持続期間はバラツキがあるものの、その平均持続時間は最大波高の大きさによらずほぼ一定であり、北太平洋航路では3.5日、日本-インド洋航路では4.5日である。こうした実海象における遭遇波浪状態の時間履歴を基に著者らは船舶疲労設計におけるランダム荷重疲労試験に用いるための標準ランダム荷重モデルを提案した。

これらの結果は前述のとおり北太平洋航路及び日本-インド洋航路における遭遇波浪に基づくものであり、実際に船体構造部材に加わる荷重 (応力) の時間履歴も、遭遇波高の時間履歴と同様のモデル化ができるか否かという点についてはまだ検討されていなかった。そこで本論ではSMACSによって計測された日本近海を航行する艦艇の遭遇海象と甲板の応力についてもFig.11の「嵐モデル」と同様の傾向を示すか否かを検証した。Fig.12に護衛艦が遭遇した波高の1年間の時間履歴を各月毎に示す。個々の図における横軸は経過日数、縦軸は波高である。艦艇は航海

Fig. 11 Simplified Random Loading Model for Fatigue Strength Analysis of Ship structural Model

Fig.12 Time History of Encountered Wave Height and Wave-Induced Midship Deck Plate Stress (Ship A)

期間が不規則なので連続的な計測が出来ているとは言い難く、かつ入港、船体各種搭載機器の検査等があり、かなりの長期間データが記録されていない場合があるが Fig.12 から明らかなように波高は時間経過と共に増加し、ある一点で最大波高に達した後、徐々に減衰している。すなわちこの傾向は著者らの提案した「嵐モデル」と同じものである。よって本論においても高波高状態を全計測期間中の平均波高の2倍以上の波高と仮定し、さらにこの高波高状態が持続している期間を「嵐」と仮定した。こうした嵐状態の典型的な例を Fig.13 に示す。Fig.13 には波高と同時に応力もプロットした。

図の横軸は嵐の持続時間、縦軸は波高及び応力である。

図において実線は波高、●印は応力を示す。計測された各嵐について、その最大波高と持続期間の関連を調査した。Fig.14 にその結果を示す。同じ嵐のレベル（最大波高）であってもその中を航海する時間にそれぞれバラツキがあるが、平均持続時間でみると、Fig.14 より嵐の持続期間は嵐の規模によらず平均的に3日程度であることがわかる。また Fig.13 より「嵐状態」における波浪応力の増減は遭遇

Fig.13 Typical Storm Condition (Ship A)

波高の増減に強く依存しており、先に示した散布図、波高と応力の線形性を仮定した長期分布の計算例の結果からも、波高と応力は比例関係にあるといえる。よって遭遇波高についてと同様、波浪応力についても、計測期間中の平均応力の2倍以上の状態を「高応力状態」とし、応力の観点から「嵐状態」を高応力状態が持続する期間と定義する。そこで「嵐状態」における最大応力と持続期間の関連を調査した。その結果を Fig.15 に示す。各レベルの最大応力における持続期間にはバラツキがあるが、持続期間の平均値は波高と同様、最大応力値によらず3日程度である。

Fig. 14 Mean Storm Duration in Each Wave Height

Fig. 15 Mean Storm Duration in Each Wave-Induced Midship Deck Plate Stress

Fig. 16 Relation between Stress of Ship structural Members and Encountered Wave Height

こうした結果から、特殊な運用形態をとる艦艇についても、航海中における遭遇波浪状態及び波浪応力の状態は Fig. 11 に示す通り「比較的低波高または低応力状態」と「嵐状態または高応力状態」の2種類に分類することができる。

船体構造部材に生じる応力と、遭遇波高との関係を模式的に示すと Fig. 16 のようになる。このように遭遇波高から構造に生じる応力の間には船体運動、構造応答が介在し、それぞれの応答の性質により線形、非線形の関係になる。本研究で調査した護衛艦の遭遇波高と応力については、波高、応力共にその値は線形関係が成立する範囲内での応答であると考えられる。したがって遭遇波浪と応力による嵐モデルとの統計的諸量はほぼ1対1に対応し、Fig. 11 に示すモデルとなる。遭遇波高が非常に高い場合は船体はスラミングのような非線形運動となり、その結果構造にも弾性範囲を超える応力が生じる。このような時では波高と応力の関係は非線形となり、直接波高の嵐モデルが応力のモデルに対応できるかどうか検討の余地があるが、船体構造に生じる航海中の応力は時間と共に徐々に増加し、ある最大値を過ぎると減少する Fig. 11 のようなモデルが適用できると考えられる。

5. 船体構造部材の疲労強度解析における標準ランダム荷重モデル

これまでの解析結果に基づき、前回の報告で提案したランダム荷重モデルはランダム荷重疲労試験及び船体構造部材の疲労強度評価の双方に用いることができることを確認した。そのモデルは次に示すとおりである。

外洋を航行する船舶の遭遇波浪の状態は「嵐状態」と「低波高状態」の2種類に分類することができる。そして嵐状態では遭遇波高は時間経過に従属的なプロセスをとる。つまり波高は時間経過と共に徐々に増加しある一点で最大波高に達した後、徐々に減衰する。一方低波高状態における遭遇波高は時間によらずランダムなプロセスをとる。そしてこの2つの状態は Fig. 11 に示すようにランダムなオーダーで交互に出現する。さらに Fig. 11 の嵐モデルは護衛艦6隻で計測された船体中央部甲板の波浪応力の時間履歴についても適用することができる。

6. 結 言

著者らは北太平洋と日本-インド洋航路を航海する多数の一船商船の遭遇海象の統計解析を行い、波浪によって船体構造に誘起される荷重の長期分布の特性を調べた。

また、航海中に遭遇する波高の時間履歴を調査し、船体構造の疲労強度評価のための荷重モデルを提案した。

これらの結果は、遭遇波浪の統計調査に基づくものであり、波高と船体構造に生じる応力は線形関係を仮定しており、実際に応力の長期計測による検証が必要であった。

本論では船舶が航海中に遭遇する波高と船体構造に生じる波浪応力の統計的性質と時間履歴を明らかにするために日本近海を航行する6隻の護衛艦において3年間にわたって計測された遭遇波浪と波浪応力のデータを解析した。その結果得られた知見は次のとおりである。

(1) 艦艇の船体中央部甲板のガンネル部の応力と遭遇波高の関係調べた。艦艇は航海中に速力の変更、進路の変更などを頻繁に行うため、遭遇波高と応力の関係は同一の波高でも応力値にバラツキがある。しかし、これらを統計的に整理すると波高と応力の相関は強く、応力の長期分布は遭遇波高の統計量から理論的に予測できる。このことは、遭遇波高と波浪応力は航行状態によりバラツキがあるものの1対1に対応し、遭遇波高の時間変化と応力の時間変化は対応していることを示している。

(2) 護衛艦が受ける波浪状態は太平洋を航行する商船と同様、「嵐状態」と「比較的低波高状態」の2つに分類でき、これらはランダムなオーダーで交互に出現する。

(3) 波浪応力は遭遇波浪と共に増減している。波浪応力の時間履歴は、遭遇波浪の時間履歴と同じ傾向を示す。

よって Fig. 11 に示す「嵐モデル」は応力のモデルとしても有効である。

(4) この嵐モデルを用いた標準変動振幅荷重モデルは変動振幅荷重疲労試験や船体構造部材の疲労設計に応用することができる。

謝 辞

本研究に際し、記録データの収集にご協力いただいた海上自衛隊海上幕僚監部技術部技術第1課及び横須賀造船所資料管理科の関係各位に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 富田康光, 河辺寛, 福岡哲二, 田所誠次郎: 波浪荷重の統計的性質と疲労強度評価のための波浪荷重のシミュレーション法(その1), 日本造船学会論文集, 第170号(1991), pp. 631-644
 - 2) Tomita, Y, Kawabe, H, Fukuoka, T: Stastical Characteristics of Wave-induced Loading and the Simulation Method of Wave Loading Pattern for Fatigue Design., Proceedings of the 3rd ISOPE, 1993, IV, pp. 216~pp. 221
 - 3) 染矢隆一, 相田守文, 仁藤雅夫, 国武吉邦: 波浪中における操船判断に関する実証的研究(その2), 日本造船学会論文集第163号(1988), pp. 141~149
 - 4) 船体運動状態表示装置取扱説明書, 防衛庁
 - 5) 真能創, 河辺寛, 堀田昌, 尾崎哲秀: 艦船の縦強度について(第1報 波浪荷重), 日本造船学会論文集第161号(1988), pp. 237~244
 - 6) 船舶設計用標準海象データベースの構築と利用技術の調査研究報告, 北太平洋の波と嵐(1974~1988), (財)シップ・アンド・オーシャン財団
 - 7) 井上篤次郎: 波の発生・成長・そして減衰, 海事と情報, (1971.10)
 - 8) 真能創, 上野洋純: 波浪に対する各種船体応答の長期分布の近似推定法とその応用, 日本造船学会論文集, 第132号, (1972), pp. 235~247
-