(昭和 43 年 5 月日本造船学会春季講演会において講演)

原子力第一船の波浪中動揺と加速度について

正員 山 内 保 文* 正員 大 井 浩**
 正員 高 石 敬 史* 正員 飯 塚 正 文***
 正員 吉 野 泰 平* 正員 木 原 弘 毅**

On the Ship Motions and Accelerations of a Nuclear Ship in Waves

By Yasufumi Yamanouchi, *Member*, Hiroshi Ōi, *Member*

Yoshifumi Takaishi, *Member*, Masafumi Iizuka, *Member*

Taihei Yoshino, *Member*, Hiroki Kihara, *Member*

Summary

Researches to predict the ship motions and accelerations to be induced on a nuclear ship in waves were carried out by model tests and theoretical computations.

Firstly, the responses of the ship, which advances with various speed in regular waves coming from various directions, were measured and compared with the computed results by so-called strip theory.

Secondly, the model tests in irregular waves having a certain energy spectrum were carried out, and the short term distribution of the probability of the responses were estimated through the cumulative energy density of the spectrum of the responses which were derived both by the test results and the computations.

Finally, the long term distribution of the responses were also estimated by using the derived short term distribution and the probability of occurrence of sea state at the northern North Atlantic Ocean.

1 緒 言

わが国で建造される原子力第一船を対象にして、波浪中の動揺特性と、就航中経験するであろう動揺と加速度の統計的な期待値とを求めるため、模型実験と計算とを行なった。原子力船のうける加速度の推定を目的とした従来の研究と¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾本論の異なる点は、

- (イ) 斜め波や横波中における応答特性を調べたこと、
 - (ロ) 不規則波中において模型実験を行ない、応答の短期分布を測定したこと、
 - (ハ) 長期間の出現期待値を波浪の観測値¹⁵⁾と結びつけて推定したこと、
- 等である。

2 模型実験および計算の方法

2.1 供 試 船

本船は原子動力実験船として計画され、Fig.1 に示すような配置であり、船体中央のやや後方に原子炉室がある。Table-1 に主要寸法を示す。本船の設計基準値のうち動揺と加速度に関するものを Table-2 に示す。この値は、運輸省および NK の設定する基準^{註1)}を満足するようとられたものである。

* 船舶技術研究所

** 日本原子力船開発事業団

*** 三菱重工業(株)長崎造船所

註1) (イ) 運輸省；原子力船特殊規則（検査心得）昭和 42 年 12 月

(ロ) NK；原子力船の船級登録のための漸定指針 昭和 39 年 12 月

Fig. 1 Rough Arrangement

Table-1 Principal Dimensions

	m
Length bet. P.P. (L)	116.000
Breadth mid. (B)	19.000
Draft designed (d)	6.900
Trim	0
Block Coefficient (C_B)	0.663
Displacement Volume (∇)	10083 m ³
C.G. from ∇	aft 1.98% L
$\overline{KG}$	m
	7.57
$\overline{GM}$	m
	0.900
Longl. Radius of Gyration	0.23 L

Tabl-2 Design Standard of Ship Motion and Accelerations

	Vertical Acc. (g)	Transverse Acc. (g)	Longl. Acc. (g)	Pitch	Roll
For Strength	0.82	0.65	0.2	*(1) 10° (2) 15°	(1) 30° (2) 45°
For Safety	1.0	1.0	1.0	20°	60°

* (1) For 100% Out Put of Engine
(2) For 50% Out Put of Engine

2.2 模型実験方法

実船の 1/29 模型船 (長さ 4 m) を船舶技術研究所三鷹第一船舶試験水槽 (角水槽) において、規則波中および不規則波中に自航させ、波に対する出会角や船の速度を種々に変えたなかで、縦揺れ、上下加速度 (船首、重心および船尾)、横揺れ、左右加速度 (重心)、前後加速度を測定した。規則波中における実験方法は、角水槽において従来から行なわれている方法であるから、本節では不規則波中の実験方法について述べる。

まず水槽に一定のスペクトラムを有する不規則波を発生させる。これは水槽の一辺 80 m にわたるフラップ式造波板を、ストローク一定に保ち、周期、すなわち駆動モーターの回転数を、発生させたいスペクトラの形に応じた頻度分布になる様に不規則に時々刻々変化させることで得られる⁸⁾。

実験では波のスペクトラムとして、Pierson-Moskowitz 型をとり、その大きさは I. S. S. C. (国際船体構造会議) 設定の式⁹⁾における観測波高 H_V (本論では有義波高として取扱う) および平均周期 T_V を与えて決めることにした。

後述の計算では $T_V = 4 \sim 18$ 秒の間を 2 秒おきにとっているが模型実験ではそのうちの代表的なものとして現

Fig. 2 Wave Energy Spectrum Generated in the Tank

実に起こり得る大波浪に近い値を考え、 $H_V=9.4\text{m}$ 、 $T_V=8$ 秒のものと、波高の影響を調べるため $T_V=8$ 秒で $H_V=4.7\text{m}$ という、有義波高を $1/2$ にしたものとをとった。(1) 式で表わされるスペクトラムと、実際に水槽において発生した波のスペクトラムを比較すると Fig. 2 のようになる。

$$[r(\omega)]^2 = 0.11 \cdot H_V^2 \cdot \frac{T_V}{2\pi} \cdot \left(\frac{T_V \omega}{2\pi}\right)^{-5} \exp\left\{-0.44\left(\frac{T_V \omega}{2\pi}\right)^{-4}\right\} \quad (1)$$

Fig. 2 では、水槽の波のスペクトラムにピークや切れ込みが若干みられるが、全体の形状はよく (1) 式と合致しているといえる。横波中の実験では $T_V=10$ 秒を想定したスペクトラムも発生させたが、 ω の小さいところで (1) 式に示すものより高いピークを与えている。有義波高 $H_{1/3}$ は、スペクトラムの面積と等しい分散 σ^2 と (2) 式の関係にある。

$$H_{1/3} \div 4\sigma \quad (2)$$

不規則波中の実験では、その解析上ある程度以上の実験時間が必要であり例えば解析する最小周期成分 (T_U) が 0.5 秒とすると最小 $200 T_U=100$ 秒程度が要求される¹⁰⁾。しかし水槽の大きさの制限があるので、高速の場

Fig. 3 Measuring System of the Model Test

合は 30 秒程度の実験時間しかとれない。この時間においては上記の必要とする実験時間がとれず造波プログラムも、その一部しか実行されないのをそれを補うため、すべての実験は同一状態で 3 回航走することにした。そして、このとき第 1 回目から第 3 回目まで順々にプログラム穿孔テープを送り造波プログラムの全体を捲くようにした。

実験記録は模型船上に積まれた計器によりマグネティックテープレコーダーに入れられる。使用計器のシステムを Fig. 3 に示す。データーは A-D 変換されコレログラム・スペクトラム解析される¹⁰⁾。

不規則波中において実験時の模型船の写真を Fig. 4 に示す。

2.3 計算法

2.3.1 縦運動の計算 斜め波中における縦揺れ (θ) と上下揺れ (z) は、連成運動方程式 (3) で表わされ

Fig. 4 Photograph of the Model Test in Irregular Wave

る。

$$\left. \begin{aligned} a\ddot{z} + b\dot{z} + cz + d\ddot{\theta} + e\dot{\theta} + g\theta &= F \\ A\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + C\theta + D\ddot{z} + E\dot{z} + Gz &= M \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中の左辺の係数 $a, \dots, g, A, \dots, G$ は、船体の各横断面を二次元の Lewis 断面で近似し、この二次元の断面が水面で上下動するときに働く流体力を船の各断面に対し求めてこれを長さ方向に積分すれば得られる。これはいわゆるストリップ理論であり、すでに一定の計算方法がおこなわれている。右辺の波の強制項は、座標系を Fig. 5 のようにとり、波面の有効隆起量 (h) を次のように表わし

$$h = \zeta_a e^{-k d_m(x)} e^{-ik^*x} e^{i\omega_e t} \quad (4)$$

ここに、 ζ_a : 波の振幅、 λ : 波長、 $k = 2\pi/\lambda = \frac{\omega_0^2}{g}$, $k^* = k \cos \chi$, $\omega_e = \omega_0 - k^*v$, v : 船速。
これによる船体断面に働く流体力を長さ方向に積分して得られる。

船体の運動と波の強制項を

$$\left. \begin{aligned} z &= z_0 e^{i\omega_e t} e^{i\epsilon_z}, \quad \theta = \theta_0 e^{i\omega_e t} e^{i\epsilon_\theta} \\ F &= F_0 e^{i\omega_e t} e^{i\epsilon_f}, \quad M = M_0 e^{i\omega_e t} e^{i\epsilon_m} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

のように書くと、(3) 式は、下記の連立方程式となる。

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} z_0 e^{i\epsilon_z} \\ \theta_0 e^{i\epsilon_\theta} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} F_0 e^{i\epsilon_f} \\ M_0 e^{i\epsilon_m} \end{vmatrix} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} a_{11} &= -\omega_e^2 a + i\omega_e b + c, & a_{12} &= -\omega_e^2 d + i\omega_e e + g \\ a_{21} &= -\omega_e^2 D + i\omega_e E + G, & a_{22} &= -\omega_e^2 A + i\omega_e B + C \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

(6) 式を解けば、船体運動の振幅 z_0, θ_0 位相 $\epsilon_z, \epsilon_\theta$ が求まる。

さらに、縦揺れと上下揺れの合成による船体の任意位置における垂直方向運動 (z_x) ならびに加速度 ($\ddot{z}_x$) は

$$\left. \begin{aligned} z_x &= z + (x - x_G)\theta = \{z_0 e^{i\epsilon_z} + (x - x_G)\theta_0 e^{i\epsilon_\theta}\} e^{i\omega_e t} \\ \ddot{z}_x &= -\omega_e^2 \{z_0 e^{i\epsilon_z} + (x - x_G)\theta_0 e^{i\epsilon_\theta}\} e^{i\omega_e t} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

で求められる。

これらの Strip 理論による計算は福田の方法¹²⁾に従い、三菱重工業株式会社社長崎造船所所属の IBM-7040 により行なわれた。

2.3.2 横運動 (横揺, 左右加速度) 厳密に言えば、横揺れと Sway および Yaw はお互に連成しており縦運動の場合と同様な取扱い方法もあるが、ここでは取扱いの簡単のため、横揺れと Sway のみをお互に独立として取扱った。先ず横揺れの運動方程式を (9) 式で表わすと

$$\ddot{\varphi} + 2\epsilon\dot{\varphi} + n^2\varphi = m_0 e^{i\omega_e t} e^{i\epsilon_r} \quad (9)$$

振幅および位相は (10) 式のようになる。

$$\varphi_0 = \frac{m_0}{n^2} \cdot \mu, \quad \epsilon_r = \tan^{-1} \frac{\nu A}{A^2 - 1} \quad (10)$$

ここで μ は magnification factor であり

$$\mu = \frac{\sin \chi}{\sqrt{(1 - A^2)^2 + \nu^2 A^2}} \quad (11)$$

$$2\epsilon = \nu\omega_s$$

となる。また、 $A = \frac{\omega_e}{\omega_s}$ であり、 ω_e は (4) 式に示すものと等しい波との出会周波数であり、 ω_s は船の固有横揺周波数で模型船の平水中における自由横揺試験から求められる。また ν は減衰率で、 $A=1$ における magnification Factor の値 $\mu_{\max}$ と $\nu = 1/\mu_{\max}$ という関係にある。 $\mu_{\max}$ の値として、規則的横波中の実験値をとることにする。

ついで Sway の運動方程式を (12) 式のように表わすと

$$\ddot{y} + \nu_y \dot{y} = f_y e^{i\omega_e t} e^{i\epsilon_y} \quad (12)$$

加速度 $\ddot{y}$ の振幅 $\ddot{y}_0$ および位相差 ϵ_y は (13) 式のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \ddot{y} &= \ddot{y}_0 e^{i\omega_e t} e^{i\epsilon_y} \\ \ddot{y}_0 &= \frac{f_y}{\sqrt{1 + \left(\frac{\nu_y}{\omega_e}\right)^2}} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$e_{\ddot{y}} = \tan^{-1} \frac{\tan e_{fy} - \frac{\nu_y}{\omega_e}}{1 + (\tan e_{fy}) \frac{\nu_y}{\omega_e}} \quad \left. \vphantom{\frac{\tan e_{fy} - \frac{\nu_y}{\omega_e}}{1 + (\tan e_{fy}) \frac{\nu_y}{\omega_e}}} \right\}$$

f_y および ν_y は附録に述べる方法で求められる。

横揺と Sway が求まると船上に固定された質量 m に働く力から、等価的な左右加速度が求められる。すなわち Fig-6 に示すように、横揺れによる傾斜角 φ にもなる重力の加速度の成分 $y\varphi$ と Sway の加速度 $\ddot{y}$ によつて、 m には (14) 式で表わされるような力が働く。ここで m は重心にあるとして $\ddot{\varphi}$ による力を省略した。

$$f = mg\varphi - m\ddot{y} \quad (14)$$

そこで $g\varphi - \ddot{y} = \ddot{Y}$ において、船体に固定された質量に働く等価的な横方向の加速度を示す。そうすると (10) 式および (13) 式から $\ddot{Y}$ は (15) 式ようになる。

$$\ddot{Y} = (\ddot{y}_0 \cos e_{\ddot{y}} - \varphi_0 g \cos e_r) \sin \omega t - (\ddot{y}_0 \sin e_{\ddot{y}} - \varphi_0 g \sin e_r) \cos \omega t \quad (15)$$

あるいは $\ddot{Y}$ の振幅 $\ddot{Y}_0$ は $g\zeta_a$ で除した値として

$$\frac{\ddot{Y}_0}{g\zeta_a} = \sqrt{\left\{ \left(\frac{\ddot{y}_0}{g\zeta_a} \right) \cos e_{\ddot{y}} - \left(\frac{\varphi_0}{k\zeta_a} \right) k \cos e_r \right\}^2 + \left\{ \left(\frac{\ddot{y}_0}{g\zeta_a} \right) \sin e_{\ddot{y}} - \left(\frac{\varphi_0}{k\zeta_a} \right) k \sin e_r \right\}^2} \quad (16)$$

と表わされる。

2.3.3 短期分布の計算 波の統計的な諸量、すなわち有義波高、平均周期等が一定値で表わされるような海象における船体の応答の分布を短期分布と呼ぶ。諸応答の統計的期待値は標準偏差から求められる。

いま、船速、波に対す船首方向を一定値とすると、短波頂不規則波中の船の応答の標準偏差 σ は、(17) で表わされる。

$$\sigma^2 = \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\infty} [r(\omega, \psi)]^2 [A(\omega, \chi - \psi)]^2 d\omega d\psi \quad (17)$$

ここで、 $[r(\omega, \psi)]^2$: 波のエネルギースペクトラム

$$= \frac{2}{\pi} [r(\omega)]^2 \cos^2 \psi : -\frac{\pi}{2} \leq \psi < \frac{\pi}{2}$$

$$= 0$$

その他の角度

$[A(\omega, \chi - \psi)]$: 船の応答関数

ψ : 平均波方向と成分波方向とのなす角

χ : 平均波方向と船首方向とのなす角

$A(\omega, \chi)$ は、前節までの計算で求められる。波のエネルギースペクトラムとしては、実験との比較のため、¹ S. S. C. スペクトラム ((1) 式) を、また従来の研究との比較にも役立てるため Neumann スペクトラム ((18) 式) をとり、両者について (17) 式の計算を行なうことにする。

$$[r(\omega)]^2 = 0.390 \cdot H_V^2 \cdot \frac{T_V}{2\pi} \cdot \left(\frac{T_V}{2\pi} \omega \right)^{-6} \exp \left\{ -1.767 \left(\frac{T_V}{2\pi} \omega \right)^{-2} \right\} \quad (18)$$

これらの式から応答の標準偏差 σ は波高 H_V に比例することがわかるから、

$$R \equiv \frac{\sigma}{H_{1/3}}$$

において、 R を計算することにする。計算では平均周期 T_V を 4 秒～18 秒の間を 2 秒おきにとつた。

3 規則波中の応答

規則波中における応答の振幅を、加速度については重力の加速度 (g) の単位で表わし、それを波振幅 (ζ_a) で割つたものを、横揺れおよび縦揺れについては最大波傾斜角で割つたものをそれぞれ応答関数とし、船速 (フルード数 $F_n = 0, 0.10, 0.15, 0.20$ および 0.25) ごとに波に対する会角 (χ) をパラメーターとし、 $\sqrt{L/\lambda}$ をベースにして表わした。ただし実験値においては先ず会角ごとにフルード数ベースに点を取り、上記のフル

ード数における値を図上で内挿して求める手順が必要である (Fig. 7~Fig. 10)。 $\sqrt{L/\lambda}$ は円周波数 ω と $\sqrt{L/\lambda} = \sqrt{\frac{L}{2\pi g}} \omega$ という関係にある。一例として $F_n = 0.20$ におけるいくつかの応答関数を Fig. 11~Fig. 14 に示す。

これらの図等から次のような点がわかる。

Fig. 5 Co-ordinate System

Fig. 6 Acceleration due to Rolling and Swaying

Fig. 7 Pitching Amplitude measured in Regular Waves

Fig. 8 Vertical Acceleration at C.G. in Regular Waves

Fig. 8 Vertical Acceleration at C.G. measured in Regular Waves

Fig. 9 Rolling Amplitude measured in Regular Waves

Fig. 10 Transverse Acceleration at c.G. measured in Regular Waves

Fig. 11 Amplitude Response of pitching to wave slope

Fig. 12 Amplitude Response of Vertical Acceleration at C.G. to Wave Height

Fig. 13 Amplitude Response of Rolling to Wave Slope

(イ) 縦揺れ (Fig. 11) : 実験値と計算値と比べると、時々かけはなれた実験値があり、また全般的に実験値が高めにでているが、傾向はよく合っている。 $\sqrt{L/\lambda} > 1.0$ の範囲では $\chi = 180^\circ$ より $\chi = 120^\circ$ あるいは 150° の場合に大きい縦揺れとなる。

(ロ) 船首上下加速度 : 応答関数に高いピークがあり、そこでは実験値が高めに出ているが、全体として縦揺れの場合と同程度に計算値と合っている。 $\chi = 150^\circ$ の場合の値は $\chi = 180^\circ$ より一般に高めであり、 $\sqrt{L/\lambda} > 1.0$ の範囲では $\chi = 120^\circ$ も $\chi = 180^\circ$ より大となる。横波中をのぞいて速度の増加につれて船首上下加速度は増加している。

(ハ) 重心における上下加速度 (Fig. 12) : 実験値と計算値を比較すると、 $\sqrt{L/\lambda}$ の大きいところで実験値が高めであるが、高速で $\sqrt{L/\lambda}$ の小さい範囲では実験値がかなり低めである。低速においては $\chi = 90^\circ$ の値が大であるが高速になるに伴い $\sqrt{L/\lambda} > 1.0$ の範囲で $\chi = 150^\circ$, 180° の値が大となってくる。斜め追波中の値は一般に他の場合より小さい。

(ニ) 船尾部上下加速度 : A. P. および A. P. より $0.05L$ 前方における点の上下加速度に対しては計算値のみがある。それによれば船首上下加速度と似た傾向を有するが、とくに $\chi = 120^\circ$ の値が大きいことが目立っている。

(ホ) 上下揺 : 計算値だけであるが、横波中の値が $\sqrt{L/\lambda}$ の大きな範囲において著しく大きいことが注目される。

(ヘ) 横揺れ (Fig. 13) : 計算値は前述のように非常に簡単化した仮定によつて求められたものであるから

実験値との一致はあまり良くない。ただ計算値によつて、斜め波中のローリングの応答の様子がよくわかる。速度の高い場合、斜め追波中で特に高い値となることがわかる。

(ト) 重心における左右加速度 (Fig. 14) : 実験値は、計算値と傾向は良く一致している。高速で斜め追波中を航行する場合に ω の広い範囲にわたり高い値を示すこと、横揺れの同調周期でピークを持つこと等がわかる。なお横波中における重心の上下加速度の応答関数と比較したのが Fig. 15 である。

Fig. 14 Amplitude Response of Transverse Acceleration at C.G. to Wave Height

Fig. 15 Comparison of Vertical & Transverse Acceleration at C.G.

4 不規則波中の応答

実験による不規則波中の応答は、オートコレログラム、スペクトラムを介して解析される。得られた応答のスペクトラムの例を Fig. 16~Fig. 19 に示した。これらの図によると例えば縦揺れなどの縦運動では、船速の増加と共に ω の高い方にピークが移り、その高さも増加する様子がわかる。また重心の横加速度は ω の広い幅にわたつて高い値を持つことがわかる。

つぎにスペクトラムの形状から離れて、その面積で与えられる分散の平方根である標準偏差をその時の有義波高

Fig. 16 Spectrum of Pitching

Fig. 17 Spectrum of Vertical Acceleration at C.G.

Fig. 18 Spectrum of Rolling

Fig. 19 Spectrum of Transverse Acceleration at C.G.

で割った値について考察する。この値を R と書くと、応答の累積エネルギー密度 E は (19) 式で与えられる。

$$\sqrt{E} = \sqrt{2} R \cdot H_{1/3} \quad (19)$$

この値 $\sqrt{E}$ は、不動則変動量の短期分布を推定するのに用いられる量であり不規則変動の振幅の示す関数をスペクトラムの形状から推定することにより (20) 式の関係で振幅の統計量を推定できる。

$$a = c \sqrt{E} \quad (20)$$

この関係については後述する。

さて、それぞれの応答について R を求めたものの例を Fig. 20～Fig. 24 に示した。図中の点は実験点を、実線および破線は、実験に対応して long crest wave における計算値を、また Fig. 23～24 の点線は short crest wave における計算値を示す。実験値は Long Crest Wave に対応するものである。

これらの図から次のような点がわかる。

(イ) 縦揺れ (Fig. 20) : 計算値と実験値とを比べると、速度に対するゆるやかな変化の傾向は一致しているが、実験値の方がやや高め (10～15%) の値を示している。この傾向はどの出角でも見られる。 $\chi = 180^\circ$ および 150° において最大値を示す。計算結果によれば T_V が 8 sec で最も高い値を与える。有義波高による差は認め難い。

(ロ) 船首部上下加速度：有義波高が 9.4 m の場合の実験値のみであるが、計算値とよく一致している。速度が大になるにつれて増加する傾向は $\chi = 180^\circ, 150^\circ$ で大きく、 $\chi = 120^\circ$ で小さくなり $\chi = 90^\circ$ ではなくなる。

(ハ) 重心の上下加速度：横波中と向波中およ

Fig. 20 Standard Deviation of Pitching

Fig. 21 Standard Deviation of Vertical Acceleration at C.G.

Fig. 22 Standard Deviation of Vertical Acceleration at Bow (F.P) and Stern (0.05L, fore A.P)

び斜め向波中の値を比較すると Fig. 21 のようになり、低速中では横波中の値が大であり、向波より斜め向波中の値が大である。高速になるにつれて、斜め向波あるいは向い波中の値が大となる。計算値と実験値とを比較すると、一般に実験値が低目である。 $\chi = 90^\circ$ の場合 $T_V = 10$ 秒の実験値も記入されている。 T_V の小さい方が大

なる値をとり $T_V=6\text{ sec}$ で最大となる。

(二) 船尾部 (A. P. より $0.05L$ 前方) 上下加速度：船首部上下加速度の場合と同様計算値とよく合っている。また H_V による差もない。 $\chi=180^\circ$ のときの例を、Fig. 22 に船首部上下加速度と共に示す。

船首部、重心および船尾部の上下加速度を比較すると Table-3 のようになる。

Table-3 Comparison of R for Vertical Acceleration at Bow, C. G. and Stern

χ	180°	180°	180°	150°	120°	90°
F _n	0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2
F. P	0.015	0.027	0.040	0.040	0.035	0.016
C. G	0.004	0.007	0.011	0.012	0.015	0.012
A. P	0.015	0.019	0.028	0.030	0.030	0.019

(ホ) 横揺れ (Fig. 23)：横波の場合実験値と計算値は大きさと傾向ともほぼ合っている。 $T_V=12$ 秒の場合に最大値をとることが計算値からわかるが出会角についてみると斜め追波中を中速以上の速度で航行する場合著しく大きい値となることもわかる。また $T_V=8\text{ sec}$ の場合、短波頂の波の場合が長波頂の波の場合より、速度の高いところで高い値を示しているのは興味深いことがらである。

(ヘ) 重心の左右加速度 (Fig. 24)：横揺れの場合に述べたとほぼ同様のことがこの場合についてもいえる。速度に対する変化の状態は、横波ではあまり変化せず、斜め向い波では速度が増すにつれてゆるやかに減少している。斜め追波の場合は速度と共に増大しているが $\chi=30^\circ$ では途中から再び低下する傾向を示す。

二 横波中の上下加速度の値と比較してみると $T_V=8.5$ 秒の場合にほぼ等しい値となるが、上下加速度では T_V が小さくなると R が大きい値となるが、左右加速度では T_V が大きくなると R が

Fig. 23 Standard Deviation of Rolling

また $T_V=8\text{ sec}$ の場合、短波頂の波の場合が長波頂の波

Fig. 24 Standard Deviation of Transverse Acceleration at C. G.

Fig. 25 Long Term Distribution of Pitching

Fig. 26 Long Term Distribution of Vertical Acceleration at C. G.

Fig. 27 Long Term Distribution of Rolling

Fig. 28 Long Term Distribution of Transverse Acceleration at C. G.

大となり $T_V=12\text{ sec}$ で最大になる。

(ト) 重心の前後加速度：実験値のみであるが λ の値にかかわらず速度にともなう増加の割合はゆるやかである。オーダーは、 $F_n=0.2$ で $R=0.0035$ であり、これは同じ F_n の向い波における重心の上下加速度の値の約 1/3 程度である。

5 応答の最大値の推定

応答の最大値の推定に 2 つの方法を試みる。一つは前節で述べた短期分布による推定であり、もう一つは海洋における波の発生頻度を考慮に入れて長期分布を推定する方法である。

5.1 短期分布による推定

いま不規則変動量の振幅の分布が Rayleigh 分布に従うときは N コの波に出会う間の最大値が a を越える確率を f とすれば、 f は N と a_0 と E とから (21) 式で与えられ

$$f = 1 - \exp(-N e^{-\frac{a_0^2}{E}}) \quad (21)$$

これより $a_0 = C(N, f) \sqrt{E}$ と表わすと、 C なる係数は N, f の関数として (22) 式のようなになる¹⁴⁾。

$$C = \left[-\ln \left\{ \frac{1}{N} \ln \left(\frac{1}{1-f} \right) \right\} \right]^{1/2} \quad (22)$$

C の値は文献[6]において行なわれたと同様に $N=5,000$ 回、 $f=0.1$ とすると、 $C=3.24$ となる。この値をある海象における最大値と考えるとそれぞれの応答に対して標準偏差の最大値から推定した値は Table-4 のようになる。この場合、船速は、Service speed 16 ノット ($F_n=0.25$) より減少して 13 ノット ($F_n=0.20$) となると仮定している。同じ表のなかに、実験で測定した最大値も記入してある。

Table-4 Maximum Values Predicted by Short Term Distribution

$F_n=0.2$								
	PITCH	FP-ACC	Z-ACC	AP-ACC	ROLL	Y-ACC	X-ACC	HEAVE
R	0.44	0.04	0.015	0.03	0.70	0.015	0.0035	0.25
$\sqrt{E}=$	5.85°	0.53 g	0.20 g	0.40 g	9.3°	0.20 g	0.046 g	3.32m
$a_{1/10}$	10.5	0.96	0.36	0.72	16.8°	0.36	0.084	5.98
$a_{1/100}$	13.8	1.25	0.47	0.95	22°	0.47	0.11	7.9
$a_{\max}$	19.0	1.72	0.65	1.30	30°	0.65	0.15	10.8
$a'_{\max}$	14.3	1.00	0.45	0.61	15°	0.49	0.06	—
α	180°	180°~150°	120°	150°~120°	90°	90°	180°	90°

$a'_{\max}$: Maximum Value measured by model test

5.2 長期分布による推定

一年に一度あるいは船の一生に一度という長期間における諸応答の分布を長期分布と呼ぶ¹³⁾。

分散 R^2_{ij} , 平均周期 T_j , 有義波高 H_l の海象 S_{lj} の発現確率を P_{lj} , その海象下で波の平均方向に対し船首方向が χ_k の角度をとる確率を f_{ijk} とする。海象 S_{lk} の海面で針路 χ_k となつたときの応答の分散を R^2_{ijk} とし、極値が Rayleigh 分布するものとすれば、極値がある値 M を超える確率は

$$q_{ijk}(M) = e^{-M^2/2R^2_{ijk}} \quad (23)$$

である。

極値が長期間の間に M を超す確率は

$$Q(M) = \sum_{ijk} P_{lj} \times f_{ijk} \times q_{ijk} \quad (24)$$

となり船首方向があらゆる方向に一樣分布すると仮定すれば

$$Q(M) = \frac{1}{c} \sum_{ijk} P_{lj} \times q_{ijk} = \frac{1}{c} \sum_{ijk} P_{lj} e^{-M^2/2R^2_{ijk}} \quad (25)$$

c : 針路の区分数 ($2\pi/c$ の区間ではその中央方向の応答で代表する)

である。

標準偏差は短期分布計算で求めた R から

$$R_{ijk} = (R)_{jk} \times H_{lj}$$

で求められる。

P_{lj} としては, Walden の北大西洋における約 10 年間の観測結果を波周期 2 sec ごと波高 1 m ごとに区分した頻度分布表¹⁵⁾を用いることにした。

この方法による推定値を Fig. 25~Fig. 28 に示す。本図で例えば一年に一度遭遇する確率は $\log Q(M) \doteq -6.5$ 附近を, 20 年に一度ならば $\log Q(M) \doteq -8$ を取れば充分である^{註2)}。そうするとこれらの図からよみとつた値は Table-5 のようになる。

Tabel-5 Maximum Values Predicted by Long Term Distribution

$\log_{10}Q(M)$	PITCH	FP-ACC	Z-ACC	AP-ACC	ROLL	Y-ACC
-6.5	14°	1.5 g	0.55 g	1.3 g	45°	0.78 g
-8.0	18°	1.9 g	0.70 g	1.6 g	58°	1.0 g

長期分布と関連して北大西洋の波浪と北太平洋における値とを比較する必要がある。北太平洋についてもかなり詳細に調査されたものがあるが¹⁶⁾¹⁷⁾, これは一般船舶の観測に基づくものであり, 北大西洋についての資料が定点観測船による観測の詳細な解析結果であるのと比べて精度の点でも異なり, 分類の仕方もやや異っている。必要ならばこれらを関連させる方法もあると考えられる。

註2) この値は縦運動に対するものであつて, 横運動に対してはもう少し小さい $\log_{10}Q(M)$ の値で推定すればよいという考えもある。それは, 後者の動揺の方が固有周期も長く, 全振れ数も前者より小さいと考えられるからである。例えば振れ数が半分になると, $\log_{10}Q(M)$ の値としてはそれぞれ -6.2 及び -7.7 をとればよい。

5.3 従来の推定値との比較

従来の研究⁴⁾⁶⁾に与えられている種々の船型に対する上下加速度の最大推定値（1年に1回）を船の長さに対してとると Table-6 のようになる。これらの推定値の補間によつて本船の値を推定したものと本論による推定値（短期分布によるもの）も同表のなかに示される。これによると、重心における値はよく一致しており、F.P および A.P. の値も本論の値がわずかに大であるが、ほぼ一致することがわかる。

Table-6 Comparison of the Maximum Values by various Authors⁴⁾⁶⁾

λ	L	$1/\sqrt{L}$	$\sqrt{L}$	Max. ACC AT		
				F.P	重	AP
87,500	245m	0.064	15.6	0.68	0.135	0.50
17,400	150	0.082	12.2	1.25	0.40	0.90
19,417	150	0.082	12.2	1.36	0.45	1.03
3,460	87	1.072	9.3	1.90	0.95	1.35
*this ship (1)	116	0.093	10.8	1.60	0.65	1.25
" (2)	"	"	"	1.72	0.65	1.30

*(1) Predicted by Interpolation

(2) Predicted by this Paper

6 結 言

本論は、原子力第一船を対象にして、この船が海上で遭遇する海象を仮定し、その中で動揺と加速度がどのような値をとり得る可能性があるかという問題を模型実験と理論計算によつて推論したものである。先ず波浪中における応答は向い波中のみならず斜め波や横波に対しても求められ、規則波中の応答関数と不規則波中の応答のスペクトラムが得られた。応答関数と、短期分布について実験値と計算値の比較がなされ、海象と応答との関係に対する船速の影響、波との出会角、海象のスペクトラムの形状などの影響を明らかにした。そしてこれに基づいて長期分布を推定した。その結果

- (イ) 計算値と実験値は比較的良好なこと、
 - (ロ) 従来の研究による上下加速度の推定値と本論の推定値がよく一致すること、
 - (ハ) 重心の左右加速度は、重心の上下加速度と同程度か、場合によつてはそれ以上の値になり得ること、
 - (ニ) 本船の設計基準値 (Table-2) と比較してみると、安全に対する基準値以下の推定値であること、
- 等のことが明らかになった。

本研究は、日本原子力船開発事業団と船舶技術研究所との共同研究であり、三菱重工業(株)長崎造船所開発室は、日本原子力船開発事業団の依頼によりストリップ理論による応答計算、短期分布および長期分布計算を担当した。

ここに、この研究を推進された方々、および実験と計算を補助された関係各位の御協力に感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 日本原子力船研究協会：原子力船における外力の原子炉に及ぼす影響に関する試験研究(I)，原船協 14—I (1960)
- 2) 同上，原船協 21—I (1961)
- 3) 日本原子力船研究協会：海洋観測船兼補給船の平水中および波浪中の模型試験，原船協—41 (1961)
- 4) 川島，坂尾，洲崎：実船による動揺加速度の計測値とその解析について，造船協会論文集第 111 号 (1962) p. 116
- 5) 坂尾稔：船における不規則変動量の長期統計について，造船協会論文集第 111 号 (1962) p. 153
- 6) 川島，坂尾，田崎：船体運動により船用原子炉に働く外力についての一考察，造船協会論文集第 105 号 (1959) p. 93
- 7) Y. Yamanouchi, S. Ando : Experiments on a Series 60 ($C_b=0.70$) Ship Model in oblique regular waves, Papers of Ship Research Institute No.18 (1966)
- 8) 山内保文：三鷹第一船舶試験水槽に附属する新しい施設（不規則波発生制御装置・動揺水槽）と，その目的について，第 9 回船舶研究発表会概要 (1967) p. 1
- 9) Proceedings of International Ship Structures Congress, 1964 Report of Committee 1 on Environ-

mental Condition

- 10) 山内, 高石, 菅井, 安藤: 船の波浪中動揺応答の解析法について (その 4), 造船協会論文集第 119 号 (1966) p. 50
- 11) 福田淳一: 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, 造船協会論文集第 120 号 (1966) p. 99
- 12) 福田淳一: 電子計算機による規則波中の波浪曲げモーメント応答関数の計算, 西部造船会会報 32 号 (1966)
- 13) 福田淳一: 波浪荷重の長期分布推定法, 造船協会誌第 448 号 (1966) p. 29
- 14) D. D. E. Cartwright and M. S. Longuet-Higgins; The statistical distribution of the maxima of a random function, Proceedings of the Royal Society, A, Vol. 237 (1956) p. 212
- 15) H. Walden; Höhe und Periode des Seeganges im nördlichen Nordatlantischen Ozean, Sonderdruck aus der Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Band 17, Heft 5 (1964)
- 16) 日本造船研究協会第 80 研究部会: 海象・気象に関する統計調査, 造船研究, Vol. 8, No. 1 (1966)
- 17) Y. Yamanouchi, S. Unoki, T. Kanda; On the Winds and Waves on the North Pacific Ocean and South Adjacent Seas of Japan as the Environmental Conditions for the Ship, Papers of Ship Research Institute, No. 5 (1965)
- 18) G. Vossers; Fundamentals of the Behaviours of Ships in Waves, I. S. P. Vol. 7, No. 65 (1960) p. 28

附録 斜め波中の船の Sway の計算

本文のなかの (12) 式, (13) 式に示される係数の計算式について述べる。

(1) 波の強制力 (F_y)

平衡位置で固定された船体に関する座標を (x, y, z) とすると, 波の速度ポテンシャルは (A・1) 式の様に表わせる。

$$\Phi = \left(\frac{g\zeta_a}{\omega} \right) e^{kz} \sin \{k(-y \sin \chi + x \cos \chi) - \omega t\} \quad (\text{A} \cdot 1)$$

船体による流体の攪乱を無視して, 船体表面 (x_0, y_0, z_0) における波の圧力は (A・2) 式のように書かれる。

$$p = p_0 - \rho g z_0 + \rho g \zeta_a e^{kz_0} \cos \{k(-y_0 \sin \chi + x_0 \cos \chi) - \omega t\} \quad (\text{A} \cdot 2)$$

この圧力の y 軸方向の成分, すなわち (x_0, y_0, z_0) の方向余弦を (l, m, n) とすると, pm を船体表面について積分したものが, いわゆる Froude-Krylov の Sway force となる。すなわち

$$F_y = \int_S pm dS \quad (\text{A} \cdot 3)$$

この式は船体容積 V についての体積積分に変換され

$$F_y = \int_V \frac{\partial p}{\partial y} dV \quad (\text{A} \cdot 3')$$

となる。

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \rho g \zeta_a k \sin \chi e^{kz} \sin \{k(-y \sin \chi + x \cos \chi) - \omega t\} \quad (\text{A} \cdot 4)$$

であるから, 船の幅を波長に対して小さいとし (A・4) 式のなかの ky の項を省略し, また (x, y, z) を

$$\xi = \frac{x}{L}, \quad \eta = \frac{y}{B}, \quad \zeta = \frac{z}{d}$$

という変数 (無次元) に変換すると, Sway force (F_y) は次式のようなになる。

$$\begin{aligned} F_y &= \rho g \zeta_a k \sin \chi \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_0^{-d} \int_{-y_0}^{y_0} e^{kz_0} \sin(kx_0 \cos \chi - \omega t) dy dz dx \\ &= \frac{1}{2} \rho g \zeta_a k \sin \chi \cdot LBd \int_{-1}^1 \int_0^{-1} \int_0^{\eta_B} e^{k\zeta d} \sin(r\xi \cos \chi - \omega t) d\eta d\zeta d\xi \\ &= \frac{1}{2} \rho g \zeta_a k \sin \chi \cdot LBd \int_{-1}^1 \int_0^{-1} \eta_0 e^{k\zeta d} \sin(r\xi \cos \chi - \omega t) d\zeta d\xi \end{aligned} \quad (\text{A} \cdot 5)$$

ここで $r = \pi L / \lambda$ である。上式を $\cos \omega t$ と $\sin \omega t$ の項に分ける。

$$F_y = \frac{1}{2} \rho g \zeta_a k \sin \chi \cdot LBd \int_{-1}^1 \int_0^{-1} \eta_0(\xi, \zeta) e^{k\zeta d} \{\sin(r\xi \cos \chi) \cos \omega t - \cos(r\xi \cos \chi) \sin \omega t\} d\zeta d\xi \quad (\text{A} \cdot 6)$$

いま, Sway force の振幅 F_{y0} を下式のように無次元化する。

$$C_{Fy} = \frac{F_{y0}}{\frac{1}{2} \rho g \zeta_a k \sin \chi \cdot L B d} \quad (\text{A} \cdot 7)$$

そうすると, C_{Fy} という係数と, 強制力の位相差 ε_{fy} は,

$$\begin{aligned} C_{Fy} &= \sqrt{C_{Fys}^2 + C_{Fyc}^2} \\ \varepsilon_{fy} &= \tan^{-1} \left(-\frac{C_{Fys}}{C_{Fyc}} \right) \end{aligned} \quad (\text{A} \cdot 8)$$

と書かれる。

ここに

$$\begin{aligned} C_{Fyc} &= \int_{-1}^1 \int_0^{-1} \eta_0(\xi, \zeta) \sin(\gamma \xi \cos \chi) d\zeta d\xi \\ C_{Fys} &= \int_{-1}^1 \int_0^{-1} \eta_0(\xi, \zeta) \cos(\gamma \xi \cos \chi) d\zeta d\xi \end{aligned} \quad (\text{A} \cdot 9)$$

である。したがって (A・9) 式を船体表面について計算すればよい。

(2) 減衰力 (N_y)

船体の減衰力は, 非常に簡単化して下式で表わす¹⁸⁾。

$$N_y = N_{y0} L \frac{2\beta_0^2}{1+\beta_0} \quad (\text{A} \cdot 10)$$

ここで, N_{y0} は断面係数が β_0 である船体中央横断面を二次元物体としたときの減衰力である。 N_{y0} と, 発散波の振幅比 $\bar{A}_y$ との間には

$$N_{y0} = \frac{\rho g^2}{\omega^3} \bar{A}_y^2 \quad (\text{A} \cdot 11)$$

という関係があり, ω の小さい範囲では $\bar{A}_y$ は

$$\bar{A}_y = d_y \cdot \xi_B^2 \quad (\text{A} \cdot 12)$$

と表わされる。ここに $\xi_B = \frac{B\omega^2}{2g}$, d_y は係数である。上記の関係をまとめると, 船体の減衰力は下式のようになる。

$$\begin{aligned} N_y &= \frac{\rho g^2}{\omega^3} \bar{A}_y^2 L \frac{2\beta_0^2}{1+\beta_0} \\ &= \frac{1}{2} \rho \frac{2\beta_0^2}{1+\beta_0} \cdot \frac{\nabla}{C_b} H_0 \omega \cdot d_y^2 \end{aligned} \quad (\text{A} \cdot 13)$$

ここに $H_0 = \frac{B}{2d}$ である。 d_y の値は文献 18) に H と β との関数として図示されている。但し本論では, d_y と附加質量係数 k_y とを決めるのに別の方法をとった。 k_y は, 船体の見かけ質量 M_y を, $\rho \nabla (1+k_y)$ と表わすときの係数である。 F_y, N_y および M_y を用いると下式を得る。

$$f_y = \frac{F_y}{M_y} = \frac{g \zeta_a k \sin \chi C_{Fy}}{2 C_b (1+k_y)} \quad (\text{A} \cdot 14)$$

$$\frac{\nu_y}{\omega} = \frac{N_y}{\omega M_y} = \frac{H_0}{2 C_b (1+k_y)} \frac{2\beta_0^2}{1+\beta_0} d_y^2 \quad (\text{A} \cdot 15)$$

これによつて本文中の Sway の運動 (13) 式が決まり, 横揺れとの合成である, 船体に固定された質量に働く加速度 $\ddot{Y}$ が (16) 式で計算される。本論においては, 上式の d_y, k_y の値の組合わせをいくつかとり, (16) 式を計算し, その結果が Fig. 15 に示す実験値 ($\chi=90^\circ$, $F_n=0$ における) をかなり良く近似できる一つの組合わせを本船の値とした。

その値は $k_y=0.4$, $d_y=2.0$ である。