

長期予測をベースとした波浪荷重の簡易算式の開発

— Heave加速度及びPitch角 —

篠本 恭平*, 松井 貞興**, 杉本 圭*, 芦田 晋作***

1. 緒言

船舶の設計において、乗船者の安全性や乗心地、船体構造設計のための波浪荷重など様々な側面から波浪中の船体運動の合理的な推定が求められている。今日では、3次元パネル法等の耐航性ツールによって精度よく波浪中の船体運動を推定することができ、設計現場や規則開発において実用に供されている¹⁾。一方で、数値解析に依らない船体運動の簡易的な推定手法にも高い需要が存在する。例えば、個船毎に構造強度評価のための波浪荷重を数値解析で推定することは、船体構造設計の工数を考えるとハードルが高いとされる。そのため、船級規則^{2) 3)}では船舶の主要パラメータを用いた簡易算式による波浪荷重の推定手法が採用されている。

これまで多くの場合、船舶の最大荷重は、線形重ね合わせ理論を応用したエネルギースペクトル法を利用することで不規則波中の船体応答の解析、さらに、評価海域の波浪発現頻度表を利用した長期予測が行われることで推定されてきた^{4) 5)}。船級規則^{2) 3)}においても、最大荷重の線形項は超過確率 10^{-8} レベルの長期予測値と同等な値となるよう規定されている。このことから、長期予測は船舶の最大荷重の線形項を推定するために確立された手法であると言えることができる。

本研究の目的は、長期予測を定式化し、汎用的かつ高精度な超過確率 10^{-8} レベルの最大荷重の簡易算式を開発することである。目的を同じくする過去の研究として、河邊らによる研究⁶⁾が挙げられるが、ストリップ法による計算結果を用いた構造解析を行い、波浪による応力の長期分布を求めて最大荷重を予測する手法を提案している。また、河邊らや重見ら⁷⁾の研究では、不規則波中の船体応答の標準偏差の定式化などは行っていない。加えて、同研究はばら積貨物船と油タンカーのみを対象としていたため、その結果を他の船種やサイズの船舶に対しての精度保証は難しいと考える。本研究では、不規則波中の船体応答の標準偏差や不規則波の方向分布を考慮している。また、船舶の主要パラメータを用いた長期予測の定式化を図っている。船種やサイズを限定しない簡易算式を開発するため、一步一步段階を踏んで波浪荷重の支配的な要因とその傾向を検討し、任意の船種及びサイズのモデルを用いた数値解析により精度検証を行った。これにより、汎用的かつ高精度な簡易算式を開発できたと考える。

本稿はHeave加速度とPitch角に焦点を当て、簡易算式を提案している。

簡易算式に含まれる応答振幅（以下、RAO）には、数値解析で得られたRAOを用いたが、Jensenら⁸⁾や松井ら⁹⁾が提案するRAOの簡易算式を用いる

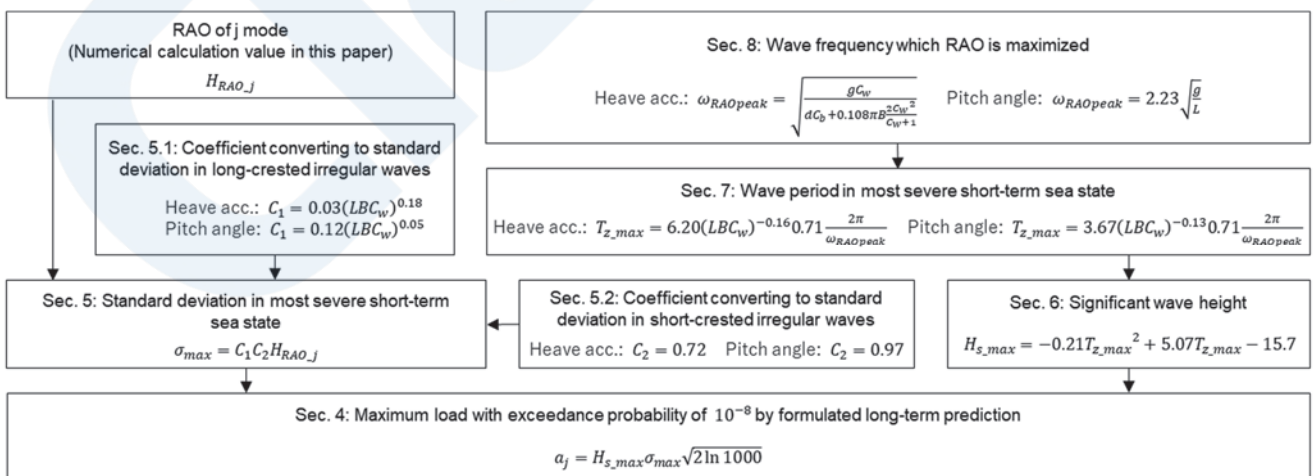


図1 定式化された長期予測のフロー図

* 船体開発部

** 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所

*** 川崎重工業株式会社（研究当時、船体開発部）

ことも可能である。

超過確率 10^{-8} の長期予測値を得るためのフロー図を図1に示す。図1の通り、長期予測は構成要素に分けることができ、それぞれ第4章以降で説明する簡易算式で表すことができる。これらの構成要素を可能な限り理論的なアプローチで発展させて長期予測を定式化した。数学的に定式化することが困難な要素もあったが、数値解析に使用した船舶の多様性と総数を活かして定式化を試みた。

2. 3次元耐航性プログラムによる数値解析

提案した超過確率 10^{-8} レベルの最大荷重の簡易算式の精度を検証するため、日本海事協会が開発した線形の3次元耐航性プログラムによる計算を実施した。当該プログラムは、Papanikolauらが提案した前進速度影響を加味したGreen関数法に基づくプログラムである^{10) 11)}。杉本らは曳航試験を行い、数値解析の結果との比較により当該プログラムの精度を検証している¹⁾。当該検証により、当該プログラムで計算された船体運動や船体曲げモーメントなどの応答と低波高条件での実測値はよく一致することが分かった。しかし、当該プログラムにはいくつかの制限があり、これらの制限によって実験値と計算値の間にわずかな誤差が生じる可能性があることを理解しておく必要がある。計算モデルのパネルサイズが波長に対して相対的に粗いことに起因すると予想される実験値と計算値の誤差がその一例である。

数値解析には154の計算モデル（実在する船舶77隻×1隻あたり満載積付状態及びバラスト状態の2つの状態）を用いた。提案した簡易算式は、一般的な商船を対象としているため、喫水線以下の没水部の形状が左右対称である単胴船に計算対象を限定した。図2に示すように、 L や C_b 、 C_w などの値が幅広くなるよう解析対象の船舶を選定している。また、用いた船種はアスファルト運搬船、ばら積貨物船、コンテナ運搬船、セメント運搬船、木材チップ運搬船、一般貨物船、液化ガス運搬船（LNG、LPG）、

ケミカルタンカー、鉱石運搬船、油タンカー、自動車運搬船、冷蔵運搬船、RO-RO船と多岐にわたる。なお、Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers¹²⁾を参考に、大波高中での船速低下を考慮し、前進速度は5 knotとした。

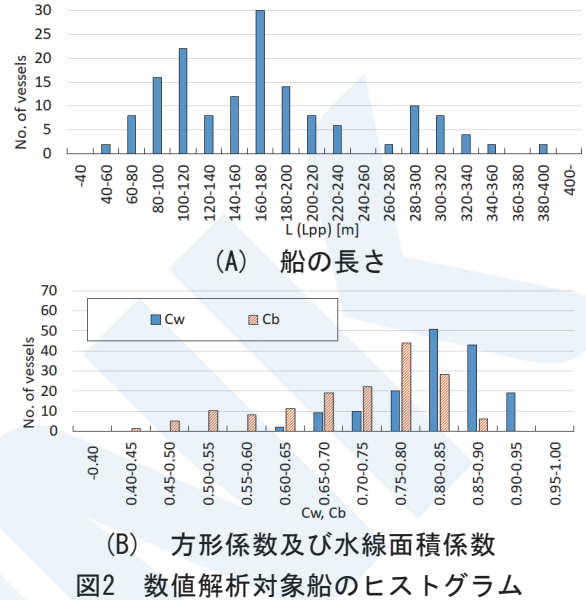


図2 数値解析対象船のヒストグラム

3. 海象条件

海象条件には、IACS Recommendation No. 34¹³⁾の波浪発現頻度表を用いた。図3に当該波浪発現頻度表を示す。

4. 超過確率 10^{-8} レベルの最大荷重の簡易算式

極値 a が閾値 a_j を超える短期不規則海象中の応答の確率分布をRayleigh分布で近似し、当該海象の発現確率を乗じて数値積分することで、長期の a_j を超える確率 $Q[a > a_j]$ が式(1)のように表される。

$$Q[a > a_j] = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left\langle \int_0^{\infty} \exp\left\{-\frac{a_j^2}{2[H_s\sigma(T_s, \chi)]^2}\right\} p(H_s, T_s) dH_s dT_s \right\rangle d\chi \quad (1)$$

Hs/Tz	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5	SUM
0.5	0	0	1.3	133.7	865.6	1186	634.2	186.3	36.9	5.6	0.7	0.1	0	0	0	0	0	0	3050.4
1.5	0	0	0	29.3	986	4976	7738	5569.7	2375.7	703.5	160.7	30.5	5.1	0.8	0.1	0	0	0	22575.4
2.5	0	0	0	2.2	197.5	2158.8	6230	7449.5	4860.4	2066	644.5	160.2	33.7	6.3	1.1	0.2	0	0	23810.4
3.5	0	0	0	0.2	34.9	695.5	3226.5	5675	5099.1	2838	1114.1	337.7	84.3	18.2	3.5	0.6	0.1	0	19127.7
4.5	0	0	0	0	6	196.1	1354.3	3288.5	3857.5	2685.5	1275.2	455.1	130.9	31.9	6.9	1.3	0.2	0	13289.4
5.5	0	0	0	0	1	51	498.4	1602.9	2372.7	2008.3	1126	463.6	150.9	41	9.7	2.1	0.4	0.1	8328.1
6.5	0	0	0	0	0.2	12.6	167	690.3	1257.9	1268.6	825.9	386.8	140.8	42.2	10.9	2.5	0.5	0.1	4806.3
7.5	0	0	0	0	0	3	52.1	270.1	594.4	703.2	524.9	276.7	111.7	36.7	10.2	2.5	0.6	0.1	2586.2
8.5	0	0	0	0	0	0.7	15.4	97.9	255.9	350.6	296.9	174.6	77.6	27.7	8.4	2.2	0.5	0.1	1308.5
9.5	0	0	0	0	0	0.2	4.3	33.2	101.9	159.9	152.2	99.2	48.3	18.7	6.1	1.7	0.4	0.1	626.2
10.5	0	0	0	0	0	0	1.2	10.7	37.9	67.5	71.7	51.5	27.3	11.4	4	1.2	0.3	0.1	284.8
11.5	0	0	0	0	0	0	0.3	3.3	13.3	26.6	31.4	24.7	14.2	6.4	2.4	0.7	0.2	0.1	123.6
12.5	0	0	0	0	0	0	0.1	1	4.4	9.9	12.8	11	6.8	3.3	1.3	0.4	0.1	0	51.1
13.5	0	0	0	0	0	0	0	0.3	1.4	3.5	5	4.6	3.1	1.6	0.7	0.2	0.1	0	20.5
14.5	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.4	1.2	1.8	1.8	1.3	0.7	0.3	0.1	0	0	7.7
15.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.4	0.6	0.7	0.5	0.3	0.1	0.1	0	0	2.8
16.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0	0	0	0.9
SUM:	0	0	1.3	165.4	2091.2	9279.9	19921.8	24878.8	20869.9	12898.4	6244.6	2479	836.7	247.3	65.8	15.8	3.4	0.7	10000

図3 IACS REC. 34¹³⁾の波浪発現頻度表

a : 極値

a_j : j モードの閾値 (独立変数)

H_s : 有義波高

$\sigma(T_z, \chi)$: 短期不規則海象中の有義波高1mあたりの標準偏差

$p(H_s, T_z)$: 短期不規則海象の発現確率密度

T_z : 短期不規則海象のゼロアップクロス平均波周期

χ : 短期不規則海象の波の主方向

この手法は1960年代半ばに提案され、現在我が国でも長期予測のスタンダードな手法として広く用いられている¹⁴⁾。なお、式(1)では船舶が長期間にわたって航海すると、あらゆる方向の波と出会う状況になると考えられるため、波浪との出会角は一様に分布していると考えられる。また、短期不規則海象の平均波周期を約10sと仮定すると、船舶が一生のうちに遭遇する波の数は概ね 10^8 となる。このことから、長期予測を行う際は超過確率 10^{-8} を想定している。

本研究では、河邊ら^{6) 14) 15)}が提唱する最悪短期海象理論 (超過確率 10^{-8} 付近の最大値は、長期分布を構成する短期不規則海象中の船体応答の短期パラメータ (船体応答の標準偏差 $H_s\sigma(T_z, \chi)$) が最大となる短期不規則海象中の船体応答が支配的である) を利用することとした。短期不規則海象中の応答の最大値 (正確にはゼロアップクロス平均波周期中の極大値) は、応答のスペクトルが狭帯域であることより、その確率分布はRayleigh分布で近似できる。また、超過確率 10^{-8} の最大荷重が生じる最悪短期海象は、短期パラメータが最大の短期不規則海象として定義される。よって、式(1)の()内の算式は、式(2)のように近似される。

$$\begin{aligned} & \int_0^\infty \exp\left\{-\frac{a_j^2}{2[H_s\sigma(T_z, \chi)]^2}\right\} p(H_s, T_z) dH_s dT_z \\ &= \sum \exp\left[-\frac{a_j^2}{2(H_{s,i}\sigma_i)^2}\right] p(H_{s,i}, T_{z,i}) \Delta H_s \Delta T_z \quad (2) \\ &\approx \exp\left[-\frac{a_j^2}{2(H_{s,max}\sigma_{max})^2}\right] p(H_{s,max}, T_{z,max}) \Delta H_s \Delta T_z \end{aligned}$$

$H_{s,max}$: 最悪短期海象の有義波高

$T_{z,max}$: 最悪短期海象のゼロアップクロス平均波周期

σ_{max} : 最悪短期海象中の有義波高1mあたりの標準偏差

よって、超過確率 10^{-8} の閾値は近似的に式(3)のように表すことができる。

$a_j|_{Q=10^{-8}}$

$$\approx \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp\left[-\frac{a_j^2}{2(H_{s,max}\sigma_{max})^2}\right] \times p(H_{s,max}, T_{z,max}) \Delta H_s \Delta T_z d\chi \quad (3)$$

ここで、短期不規則海象の継続時間を2時間と仮定すると、船舶が一生のうちに短期不規則海象に遭遇する回数は、概ね 10^5 回となる。このことから、超過確率 10^{-8} の最大荷重が生じると想定した場合、最悪短期海象中の最大荷重の発生確率は 10^{-3} ($=10^{-8}/10^{-5}$)と近似的に求められる。したがって、 10^{-5} の発現確率の短期不規則海象中の1000波最大期待値を求めることで、超過確率 10^{-8} レベルの最大荷重と同等レベルの荷重を求めることができる。超過確率が 10^{-3} に対する最大期待値は式(4)の様に表される。

$$a_j = H_{s,max}\sigma_{max}\sqrt{2 \ln 1000} \quad (4)$$

本稿では式(4)を超過確率 10^{-8} レベルの最大荷重の簡易算式のベースとする。

長期予測の結果より求められたHeave加速度及びPitch角の最悪短期海象中の支配的な波向きを図4に示す。この結果から、それぞれの最悪短期海象の波向きを90deg及び180deg (向波) とした。

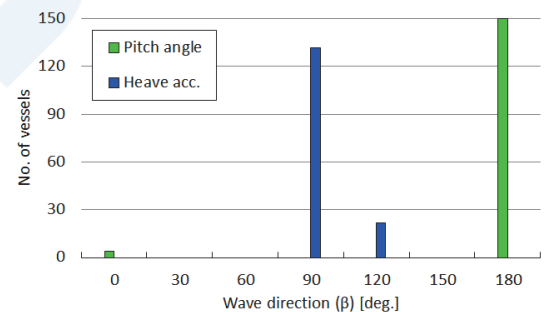


図4 最悪短期海象中の支配的な平均波向き

5. 最悪短期海象中の標準偏差

最悪短期海象中の有義波高1mあたりの標準偏差 σ_{max} は、式(5)のように表される。

$$\sigma_{max} = C_1 C_2 H_{RAO,j} \quad (5)$$

C_1 : RAOを有義波高1mあたりの標準偏差へ変換する変換係数

C_2 : 長波長不規則波から短波頂不規則波へ変換する変換係数

$H_{RAO,j}$: j モードのRAOの最大値

5.1 有義波高1mあたりの標準偏差への変換

有義波高1mあたりの標準偏差 σ を求めるため、RAOを σ に変換させる。一般に、短期予測を行う場合は、船体応答を用いて、線形重ね合わせ理論を応用したエネルギースペクトル法を用いる。そのため、 σ は式(6)で表される。

$$\sigma = \sqrt{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\infty} H_{RAO-j}(\omega, \chi - \beta)^2 S(\omega, T_z) D(\chi - \beta) d\omega d\beta} \quad (6)$$

$H_{RAO-j}(\omega, \beta)$: jモードのRAO

$S(\omega, T_z)$: 有義波高1mあたりのPierson-Moskowitz型の波スペクトル

$D(\beta)$: 方向分布関数

ω : 波周波数

β : 素成波の方向

方向分布関数を除いた式(6)を便宜的にRAOの最大値で除算し、式(7)を変換係数 C_1 と定めることとした。なお、この時の海象は最悪短期海象である。

$$C_1 = \frac{\sqrt{\int_0^{\infty} H_{RAO-j}(\omega, \chi_{max})^2 S(\omega, T_{z,max}) d\omega}}{H_{RAO-j}(\omega_{RAOpeak}, \chi_{max})} \quad (7)$$

$\omega_{RAOpeak}$: RAOが最大となる時の波周波数

χ_{max} : 最悪短期海象中の支配的な波の主方向

簡単に言えば、 C_1 は規則波中のRAOを不規則波の波スペクトル形状を考慮して標準偏差に変換する係数である。 C_1 は船体応答によってその大きさが異なることから、船体応答ごとに求める必要がある。

船体運動を求める際に必要な船体に作用する流体力のうち、Froude-krylov力が主要な成分を占めている。HeaveやPitch等の縦運動における当該流体力は、 n_z に関する積分なので、船型のz方向投影面形状、すなわち水線面形状に大きく寄与する。このことから、Heave加速度及びPitch角の C_1 をこれら水線面積 LBC_w で表すことができると考え、式(8)のように定めた。

$$\begin{aligned} \text{Heave加速度} & C_1 = 0.03(LBC_w)^{0.18} \\ \text{Pitch角} & C_1 = 0.12(LBC_w)^{0.05} \end{aligned} \quad (8)$$

図5は式(8)から得られた C_1 の値と数値解析結果の比較である。いずれの C_1 も概ね推測通り水線面積 LBC_w に相関があったことから、比較的精度の高い

算式を設定できたことが分かる。なお、 C_1 を計算する中で使用した不規則波の波スペクトルは、IACS Rec.34¹³⁾で推奨されている北大西洋の有義波高とゼロアップクロス平均波周期によって定める方式のPierson-Moskowitz型の波スペクトルである式(9)を使用している。ここでのPierson-Moskowitz型の波スペクトルの算式は、便宜的に H_s^2 で除算していることに留意されたい。

$$S(\omega, T_z) = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{2\pi}{T_z}\right)^4 \omega^{-5} \exp\left[-\frac{1}{\pi} \left(\frac{2\pi}{T_z}\right)^4 \omega^{-4}\right] \quad (9)$$

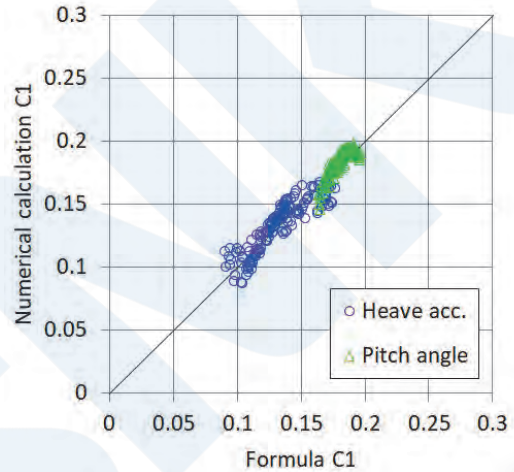


図5 式(8)と数値解析結果の比較

5.2 短波頂不規則波への変換

船体応答スペクトルの積分から分散 σ^2 が求められるが、この時求められる σ^2 は長波頂不規則波における値である。実際の海域の波は長波頂不規則波であることは稀で、多方向からの無数の長波頂不規則波が重なった短波頂不規則波である。すなわち、周波数の異なる素成波の集合及び平面的な広がりを持つ短波頂不規則波は、式(10)で示すような方向分布関数 $D(\beta)$ を用いて近似的に表現される¹⁶⁾。

$$D(\beta) = \frac{(2n)!}{\pi(2n-1)!} [\cos(\chi - \beta)]^{2n} \quad \left(-\frac{\pi}{2} \leq \beta \leq \frac{\pi}{2}\right) \quad (10)$$

福田法¹⁷⁾による船体応答の短期予測では、 $n = 1$ を採用して、式(11)とすることが多い。

$$D(\beta) = \frac{2}{\pi} [\cos(\chi - \beta)]^2 \quad \left(-\frac{\pi}{2} \leq \beta \leq \frac{\pi}{2}\right) \quad (11)$$

短波頂不規則波の標準偏差を σ_{short} 、長波頂不規則波の標準偏差を σ_{long} とすると、 σ_{short} は式(12)で表すことができる。

$$\sigma_{short} = \sqrt{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \sigma_{long}^2 D(\chi - \beta) d\beta} \quad (12)$$

σ_{short} : 短波頂不規則波中の応答の標準偏差
 σ_{long} : 長波長不規則波中の応答の標準偏差

最も厳しい短期不規則海象において、長波頂不規則波を短波頂不規則波に変換する係数 C_2 は、式(13)で定義された。

$$C_2 = \frac{\sigma_{short}(T_{z,max}, \chi_{max})}{\sigma_{long}(T_{z,max}, \chi_{max})} \quad (13)$$

船体運動を考える場合、基本的に船体応答の波向き毎の割合は船舶の大きさにかかわらず概ね同一であると推察される。数値解析の結果から、 C_2 は図6のようにプロットされることを確認し、概ね推測通りであることが分かる。

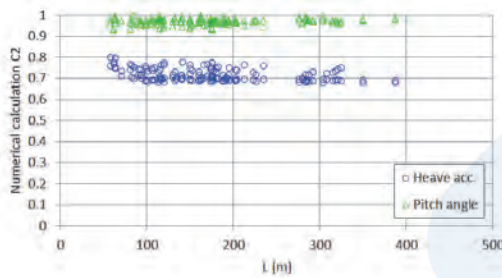


図6 C_2 の数値解析結果

この結果から、 C_2 を式(14)のように表すこととした。

$$\begin{aligned} \text{Heave加速度} & C_2 = 0.72 \\ \text{Pitch角} & C_2 = 0.97 \end{aligned} \quad (14)$$

6. 最悪短期海象における有義波高

IACS Rec. 34における有義波高の算式を検討するにあたり、式(15)のように有義波高に対する波周期

の条件付確率分布（対数正規分布）と有義波高の周辺確率分布（Weibull分布）の結合確率分布を¹⁸⁾を用いる。

$$\begin{aligned} & p(T_z|H_s)p(H_s) \\ &= \frac{1}{T_z \sqrt{2\pi\sigma_T(H_s)}} \exp\left\{-\frac{[\ln T_z - m_T(H_s)]^2}{2\sigma_T^2(H_s)}\right\} \\ & \times \frac{\beta(H_s - \gamma)^{\beta-1}}{\alpha^\beta} \exp\left[-\left(\frac{H_s - \gamma}{\alpha}\right)^\beta\right] \end{aligned} \quad (15)$$

α : 尺度パラメータ
 β : 形状パラメータ
 γ : 閾値

ただし、条件付確率分布における平均 $m_T(H_s)$ 及び分散 $\sigma_T^2(H_s)$ は、式(16)の通りである。

$$\begin{aligned} m_T(H_s) &= E(\ln T_z(H_s)) \\ \sigma_T^2(H_s) &= \text{Var}(\ln T_z(H_s)) \end{aligned} \quad (16)$$

この時、図3に示すIACS Rec. 34¹³⁾の波浪発現頻度表を用い、式(15)における短期不規則海象の発現確率が 10^{-5} であるとして、当該確率における有義波高を多項式近似により式(17)のように定めた。

$$H_{s,max} = -0.21T_{z,max}^2 + 5.07T_{z,max} - 15.7 \quad (17)$$

式(17)は波浪発現頻度表上にプロットした場合、図7のようにプロットされる。図7を見ると分かるように、式(17)は発現頻度の極めて低い海象の有義波高を表していることが分かる。なお、波浪発現頻度表における同時確率が 10^{-5} である短期不規則海象は、概ね円状の分布になる（1つのゼロアップクロス平均波周期で2つの有義波高の短期不規則海象が生じる場合あり）。しかし、船舶設計では一般に高い方の有義波高を用いるため、有義波高の近似式を2次多項式とした。また、同時確率が 10^{-5} である短期不規則海象が円状の分布になることから、有義波高の

Hs/Tz	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5	SUM
0.5	0.0	0.0	1.3	133.7	865.6	1186.0	634.2	186.3	36.9	5.6	0.7	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3050
1.5	0.0	0.0	0.0	29.3	986.0	4976.0	7738.0	5569.7	2375.7	703.5	160.7	30.5	5.1	0.8	0.1	0.0	0.0	0.0	22575
2.5	0.0	0.0	0.0	2.2	197.5	2158.8	6230.0	7449.5	4860.4	2066.0	644.5	160.2	33.7	6.3	1.1	0.2	0.0	0.0	23810
3.5	0.0	0.0	0.0	0.2	34.9	695.5	3226.5	5675.0	5099.1	2838.0	1114.1	337.7	84.3	18.2	3.5	0.6	0.1	0.0	19128
4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	196.1	1354.3	3288.5	3857.5	2685.5	1275.2	455.1	130.9	31.9	6.9	1.3	0.2	0.0	13289
5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	51.0	498.4	1602.9	2372.7	2008.3	1126.0	463.6	150.9	41.0	9.7	2.1	0.4	0.1	8328
6.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	12.6	167.0	690.3	1257.9	1268.6	825.9	386.8	140.8	42.2	10.9	2.5	0.5	0.1	4806
7.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	52.1	270.1	594.4	703.2	524.9	276.7	111.7	36.7	10.2	2.5	0.6	0.1	2586
8.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	15.4	97.9	255.9	350.6	296.9	174.6	77.6	27.7	8.4	2.2	0.5	0.1	1309
9.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	4.3	33.2	101.9	159.9	152.2	99.2	48.3	18.7	6.1	1.7	0.4	0.1	626
10.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	10.7	37.9	67.5	71.7	51.5	27.3	11.4	4.0	1.2	0.3	0.1	285
11.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	3.3	13.3	26.6	31.4	24.7	14.2	6.4	2.4	0.7	0.2	0.1	0.1	124
12.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1.0	4.4	9.9	12.8	11.0	6.8	3.3	1.3	0.4	0.1	0.0	0.0	51
13.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.4	3.5	5.0	4.6	3.1	1.6	0.7	0.2	0.1	0.0	0.0	21
14.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	1.2	1.8	1.3	0.7	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	8
15.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	0.6	0.7	0.5	0.3	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	3
16.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1
SUM:	0	0	1	165	2091	9280	19922	24879	20870	12898	6245	2479	837	247	66	16	3	1	100000

図7 IACS REC. 34¹³⁾の波浪発現頻度表上にプロットした式(17)

単調増加及び単調減少となる範囲は限られる。そのため、式(17)の変数であるゼロアップクロス平均波周期の上限値としては、約17.0sが適当と考える。

7. 最悪短期海象の波周期

一般に、RAOが最大となる時の規則波中の平均波周期は、波周波数 $\omega_{RAOpeak}$ を用いて式(18)のように表せる。

$$T_{RAOpeak} = \frac{2\pi}{\omega_{RAOpeak}} \quad (18)$$

応答スペクトルが狭帯域の性質を有すると仮定すれば、波スペクトルとRAOの最大値が同じ波周波数で重なった時に短期不規則海象中の標準偏差が最大となる。これを「広義の同調^{14) 15)}」という。この仮定により、広義の同調^{14) 15)}時のゼロアップクロス平均波周期 T_{z_BSR} は式(19)で表される。

$$T_{z_BSR} = 0.71T_{RAOpeak} \quad (19)$$

式(19)の0.71は波スペクトルが最大となる波周期からPierson-Moskowitz型の波スペクトルのゼロアップクロス平均波周期に変換する変換する定数である。式(19)と数値解析から得られた最悪短期海象のゼロアップクロス平均波周期との比較を図8に示す。

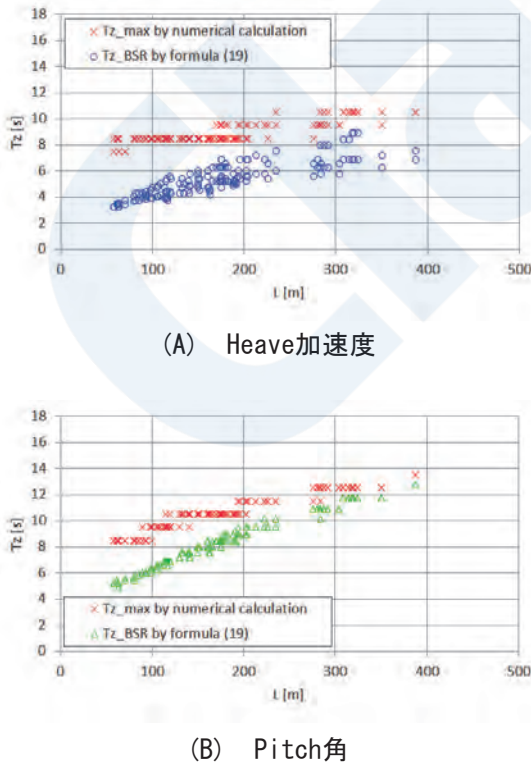


図8 式(19)と数値解析結果の比較

図8から T_{z_max} は T_{z_BSR} よりも長くなる傾向にあることが分かる。これは T_{z_max} では有義波高が考慮されているが、 T_{z_BSR} では考慮されていないことに起因する(T_{z_BSR} は有義波高1mあたりの標準偏差が最大となる短期不規則海象の波周期を定めているのに対し、 T_{z_max} は標準偏差が最大となる短期不規則海象の波周期であるため、有義波高が単調増加する短波長域においては、 T_{z_max} は T_{z_BSR} よりも短波長側に設定されることになる)。 T_{z_BSR} を T_{z_max} に変換するためには、図8に示すような関係から係数を決定する。水線面積 LBC_w と最悪短期海象中のゼロアップクロス平均波周期を用いて式(20)のように表すこととした。

$$\begin{aligned} \text{Heave加速度} \quad T_{z_max} &= 6.20(LBC_w)^{-0.16}T_{z_BSR} \\ \text{Pitch角} \quad T_{z_max} &= 3.67(LBC_w)^{-0.13}T_{z_BSR} \end{aligned} \quad (20)$$

式(20)と最悪短期海象のゼロアップクロス平均波周期の比較を図9に示す。変換したことにより、最悪短期海象のゼロアップクロス平均波周期を高い精度で推定できていることが分かる。

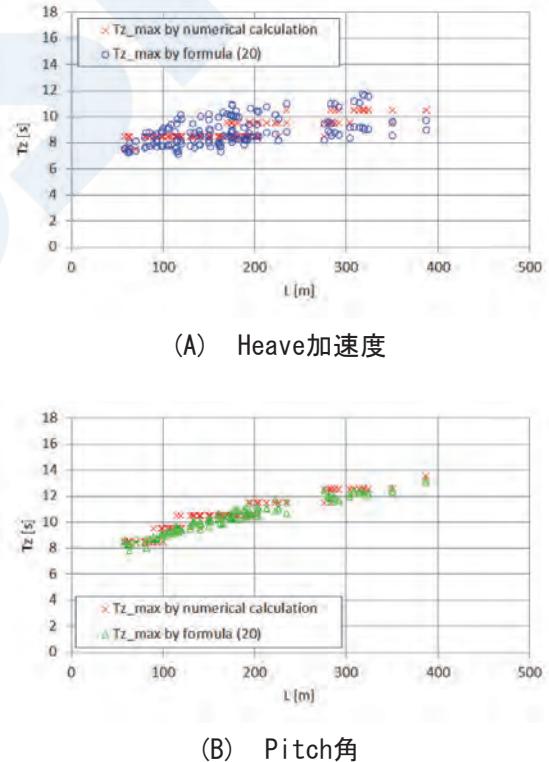


図9 式(20)と数値解析結果の比較

8. 波周波数

式(18)、式(19)及び式(20)から分かるように、 T_{z_max} を得るためには、RAOが最大となる波周波数 $\omega_{RAOpeak}$ が必要となる。Heave加速度のRAOは波ス

ペクトルとRAOのそれぞれの最大値が同じ波周波数で重なる時に最大となる。波向き90degにてHeave加速度のRAOが最大となる時、質量及び付加質量の慣性項と復原力係数の浮力項の和 ($-\omega_e^2(M_{33} + A_{33}) + C_{33}$) は概ね0となる傾向にある。そこで、Heave加速度の $\omega_{RAOpeak}$ は慣性項と浮力項の和が0となる時の波周波数とし、式(21)のように示した。式(21)のHeave加速度の $\omega_{RAOpeak}$ は松井ら⁹⁾による流体力係数の簡易算式に基づいている。式(21)のHeave加速度の $\omega_{RAOpeak}$ と数値解析結果の $\omega_{RAOpeak}$ の比較を図10に示す。

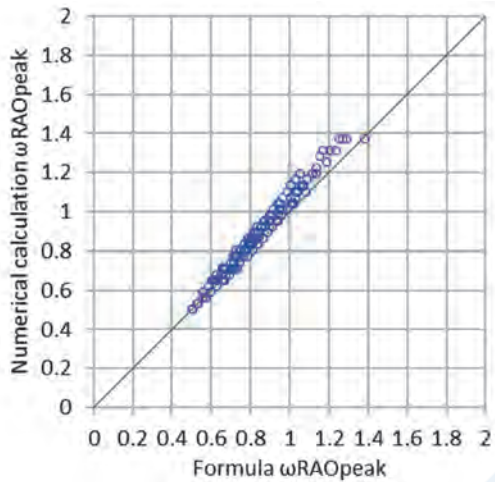


図10 式(21)と数値解析結果のHeave加速度の $\omega_{RAOpeak}$ の比較

式(21)の精度が概ね高いことが分かる。一方、波向き180degにてPitch角のRAOが最大となる時は波スペクトルとRAOのそれぞれの最大値が同じ波周波数で重なる時とはならない。同調周期付近でRAOが最大とはならないため、Heave加速度と同様の手法を取ることはできない。そこで、Pitch角の $\omega_{RAOpeak}$ は船の長さに関係ないという定性的な考察に基づき、数値解析の $\omega_{RAOpeak}$ を船の長さで無次元化すると、 $\omega_{RAOpeak}$ の無次元値は図11のように表される。

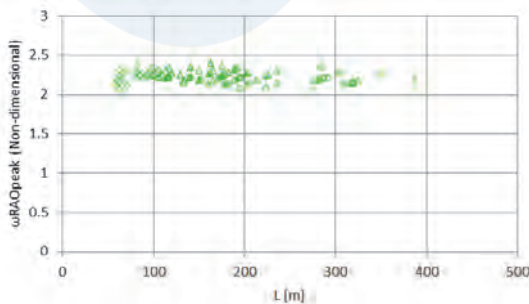


図11 無次元のPitch角の波周波数の数値解析結果

図11の結果から、Pitch角のRAOの $\omega_{RAOpeak}$ は船の長さに関係なく概ね一定であることが分かる。このことから、 $\omega_{RAOpeak}$ の無次元値を2.23とし、 $\omega_{RAOpeak}$ の有次元値を式(21)のように定めた。式(21)のPitch角の $\omega_{RAOpeak}$ と数値解析結果の $\omega_{RAOpeak}$ の比較を図12に示す。

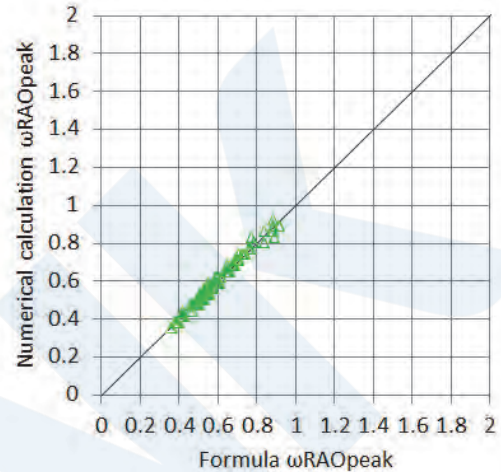


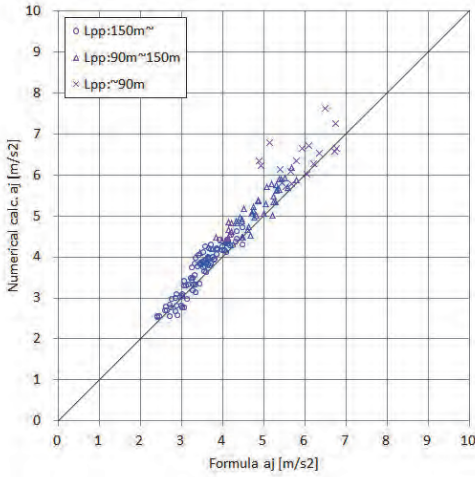
図12 式(21)と数値解析結果のPitch角の $\omega_{RAOpeak}$ の比較

図12の結果から、概ね推測通りであり、式(21)の精度が高いことが分かる。

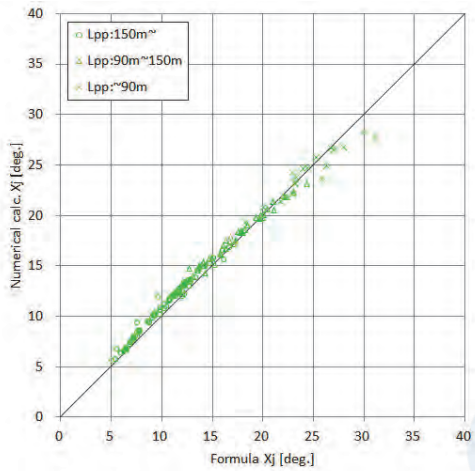
$$\begin{aligned} \text{Heave加速度} & \quad \omega_{RAOpeak} = \sqrt{\frac{gC_w}{dC_b + 0.108\pi B \frac{2C_w^2}{C_w + 1}}} \quad (21) \\ \text{Pitch角} & \quad \omega_{RAOpeak} = 2.23 \sqrt{\frac{g}{L}} \end{aligned}$$

9. 簡易算式と計算結果の比較

Heave加速度及びPitch角を式(4)にて計算した値と数値解析における超過確率 10^{-8} レベルの長期予測値の比較を図13に示す。



(A) Heave加速度



(B) Pitch角

図13 式(4)と数値解析における超過確率 10^{-8} レベルの長期予測値の比較

図13から分かるように、式(4)の精度は高いことが分かる。

10. 結論

線形理論に基づいて、Heave加速度とPitch角の長期予測の高精度な簡易算式を開発した。開発した構成要素ごとの簡易算式を図1に示している。構成要素の定式化について簡単にまとめると次の通りである。

- 船体応答の最悪短期海象中の標準偏差がRAOの最大値と相関があると仮定し、RAOの最大値を長期予測の定式化に使用する。本稿では、長期予測の定式化の精度を確認するために数値解析で得られたRAOの値を用いており、RAO自体の定式化は行っていない。

- 船舶の縦運動を考えると水線面形状の寄与が大きいという定性的な考察から水線面積 LBC_w を用いて各応答のRAOの最大値を標準偏差に変換する係数を定式化した。(第5.1節)
- 長波頂不規則波を短波頂不規則波に変換する係数は応答ごとに一定値とした。(第5.2節)
- 最悪短期海象中の有義波高1mあたりの標準偏差は、RAOの最大値、第5.1節の係数及び第5.2節の係数を乗じて求めた。(第5章)
- RAOが最大となるHeave加速度の波周波数は、慣性項と浮力項の和が0となる等式から定式化した。Pitch角の波周波数はPitch角の $\omega_{RAOpeak}$ が船の長さ依存しないという定性的な考察に基づき、無次元の $\omega_{RAOpeak}$ から定式化した。(第8章)
- Heave加速度とPitch角のそれぞれについて、広義の同調^{14) 15)}時のゼロアップクロス平均波周期に水線面積 LBC_w を用いた補正をかけることで、最悪短期海象のゼロアップクロス平均波周期を定式化した。(第7章)
- 10^{-5} の発現確率の有義波高は有義波高とゼロアップクロス平均波周期の結合確率分布を用いて定式化した。(第6章)
- 超過確率 10^{-8} の最大荷重は、最悪短期海象理論⁶⁾を用いて定式化した。(第4章)

上述のように、本稿で示した簡易算式は数値解析によって得られたRAOの値に基づいている。今後は筆者らが耐航性理論に基づいて開発したRAOの簡易算式を使用し、精度検証等を行う予定である。また、横運動や船体曲げモーメントについても、本稿と同様のアプローチで簡易算式を開発する予定である。

謝辞

本研究の遂行及び論文執筆にあたり、適切なアドバイスを戴いた海上技術安全研究所の深沢塔一博士、日本海事協会の河邊寛博士、また、本研究のデータ分析等にご協力いただいた、日本郵船の赤松達哉氏、商船三井の大宮知起氏、脇田薫平氏、葛谷知史氏、今治造船の松脇淳也氏に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) K. Sugimoto, Y. Fukumoto, J. Matsuwaki, T. Akamatsu, S. Ashida, K. Onishi, H. Houtani, M. Oka, H. Kawabe, K. Ishibashi, Non

- Linear Effect on Wave-induced Loads for Hull Structural Design, Proceeding of 39th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE 2020), OMAE ASME 2020
- 2) International Association of Classification Societies, Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers, 2019
 - 3) ClassNK, Rules for the Survey and Construction of Steel Ships Part C, 2019
 - 4) A. Shinkai, Estimating the Design Values of Vertical Bending Moment Induced on the Ship Hull in Waves, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 138, pp. 295-304, 1975 (in Japanese)
 - 5) J. Fukuda, R. Nagamoto, O. Tsukamoto, A. Shinkai, Estimating the Design Values of Horizontal Wave Shearing Force Induced on the Ship Hull in Waves, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 139, pp. 166-173, 1976 (in Japanese)
 - 6) H. Kawabe, M. Morikawa, K. Shibazaki, Simple Estimation Method for Long-term Distribution of Wave Induced Load based on the Severest Wave Condition Approach, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 189, pp. 193-200, 2001 (in Japanese)
 - 7) T. Shigemi, T. Zhu, Studies on the Practical Estimation Method of the Design Loads for Primary Structural Members of Tankers - 1st Report, Design Sea States -, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 191, pp. 195-207, 2002 (in Japanese)
 - 8) J. J. Jensen, A. E. Mansour, A. S. Olsen: Estimation of ship motions using closed-form expressions, Ocean Engineering, Vol. 31, pp. 61-85, 2004
 - 9) S. Matsui, K. Shinomoto, K. Sugimoto, S. Ashida, Development of Closed Formula of Ship Response in Wave – 2nd report: Hydrodynamic Forces Related to Vertical Motion-, Conference proceedings, the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol 28, 2019 (in Japanese)
 - 10) M. Oka, T. Ando, C. Ma, T. Yoshida, N. Izumi, N. Matsubara, A. Usami, Y. Kidoura, H. Kawabe, Numerical Calculation Procedure of Global Ship Motion of LNG Carrier Considering LNG Liquid Dynamic Effect in Wave Condition, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol. 26, pp. 103-118, 2017 (in Japanese)
 - 11) A. D. Papanikolaou, T. E. Schellin, A Three Dimensional Panel Method for Motions and Loads of Ships with Forward speed, Ship technology research, Vol.39, pp. 145-156, 1992
 - 12) International Association of Classification Societies, Technical Background Documents for CSR, 2018
 - 13) International Association of Classification Societies, Recommendation No. 34 Standard Wave Data, 2001
 - 14) H. Kawabe, S. Hibi, H. Tanaka, K. Shibazaki, H. Sasajima, Contribution of Supposed Wave Condition on Long-term Distribution of Wave Induced Load (1st Report Relation between The Maximum Wave Induced Load and Supposed Wave Condition), Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 186, pp. 319-339, 1999 (in Japanese)
 - 15) H. Kawabe, Contribution of Supposed Wave Condition on The Long-term Distribution of A Wave Induced Load, Journal of Marine Science and Technology, Vol. 6, pp. 135-147, 2002
 - 16) S. Takezawa, K. Kobayashi, On the Motion Responses of Offshore Floating Structures in Directional Spectra Waves -The 1st-order responses-, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 165, pp. 141-152, 1989 (in Japanese)
 - 17) J. Fukuda, Statistic Prediction of Ship Response, Society of Naval Architects of Japan, First Symposium on Ship Manoeuvrability, pp. 99-119, 1969 (in Japanese)
 - 18) A. Shinkai, S. Wan, The Statistical Characteristics of Wave Data and Long-Term Predictions of the Ship Response, Transactions of the West-Japan Society of Naval Architects, Vol. 89, pp. 223-231, 1995 (in Japanese)

