

PS-20 波浪荷重の簡易算式の開発

構造安全評価系 * 松井 貞興

1. はじめに

船体構造設計では、船体に生じる波浪荷重を正しく推定することが第1のステップである。波浪荷重は、昨今では耐航性プログラムを用いた波浪荷重解析によって合理的に推定することができるが、造船所が個船毎に波浪荷重解析を実施することは依然としてハードルが高いのが実情である。その為船級構造規則¹⁾では、波浪荷重を船舶の主要パラメータを用いた簡易算式で推定している。一方でそれらの算式は、特定の船種、サイズに焦点を当て開発される傾向にあり、任意の船に対して汎用的に適用する事は難しいといった側面がある。

本研究では、任意の船種及びサイズに対して適用できる汎用的且つ高精度な波浪荷重の簡易算式の開発を目標とし、船舶の主要パラメータ(船長 L 、船幅 B 、喫水 d 、方形係数 C_b 、水線面積係数 C_w 等)を用いた波浪中の6自由度運動の簡易算式を開発した。基礎理論を踏まえた数理的アプローチに基づき、基礎方程式系及び各流体力成分は船舶形状や水面下の瘦せ影響等の各因子を明らかにしたうえで定式化を行った、また、同提案式と実船を用いた三次元Green関数法によるシリーズ計算値との比較を行い、その精度を検証した。本報告では紙面の都合上、波浪荷重として特に重要な復原力のある運動モードである heave, pitch, roll についてのみ示す。

2. 波浪中の船体運動の簡易算式

周波数応答を仮定し、複素振幅表示を用いる。運動 X_j と座標系の定義を図-1に示す。船速は最悪海象下の想定速度である5kt(CSR¹⁾に基づく)とし、波向きは向い波(180°)から追い波(0°)まで30°刻み、周波数は構造設計において重要となる範囲の $\lambda/L = 0.5, 0.7, 1.0, 1.5$ とする。また、精度の検証には船種やサイズを限定しない実際の77隻×2積付状態の船舶を用いている。記号は以下の通りである。

- ρ : 海水密度, g : 重力加速度, U : 船速, M : 排水量
- ζ_a : 波振幅, β : 波向き, ω : 波周波数, k : 波数(= ω^2/g)
- ω_e : 出会い波周波数(= $\omega - kU \cos \beta$), $K = \omega_e^2/g$
- ϵ_j : 代表長さ($\epsilon_{1\sim3} = 1, \epsilon_4 = B, \epsilon_{5,6} = L$)
- M_{ij} : 質量マトリクス(重心回り)

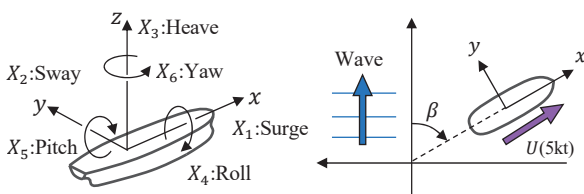


図-1 運動と座標系の定義

2. 1 Froude-Krylov 力の簡易算式

Froude-Krylov 力(以下 F.K. 力) E_j^{FK} は波浪中運動に対して支配的な流体力成分であり、入射波の速度ポテンシャル $\phi_0(= e^{kz - ik(x \cos \beta + y \sin \beta)})$ の船体表面積分によって比較的容易に推定できる。本研究では、長波長域における漸近値が正しい値をとるよう、図-2に示すように運動モードごとに異なる船体形状を仮定して以下の式を導いた²⁾。ただし、 $\bar{E}_j^{FK} = E_j^{FK}/\rho g \zeta_a B L \epsilon_i$ と無次元化されている。

$$\bar{E}_3^{FK} = e^{-i\bar{k}_l \bar{x}_f - kd C_{vp}} \left(\frac{2}{\bar{k}_w} \sin \frac{\bar{k}_w}{2} \right) \left(\frac{2}{\bar{k}_l} \sin \frac{C_w \bar{k}_l}{2} \right) \quad (1)$$

$$\bar{E}_5^{FK} = i e^{-i\bar{k}_l \bar{x}_f - kd C_{vp}} \left(\frac{2}{\bar{k}_w} \sin \frac{\bar{k}_w}{2} \right) \frac{1}{\bar{k}_l} \left\{ \left(\frac{2}{\bar{k}_l} + 2i \bar{x}_f \right) \sin \frac{C_w \bar{k}_l}{2} - C_w \cos \frac{C_w \bar{k}_l}{2} \right\} \quad (2)$$

$$\bar{E}_4^{FK} = i \left\{ \frac{1 - (1 + kd)e^{-kd}}{kB} \right\} \left(\frac{2}{\bar{k}_B} \sin \frac{\bar{k}_w}{2} \right) \left(\frac{2}{\bar{k}_l} \sin \frac{C_b \bar{k}_l}{2} \right) - i e^{-i\bar{k}_l \bar{x}_f - kd C_{vp}} \frac{1}{\bar{k}_w} \left(\frac{2}{\bar{k}_w} \sin \frac{\bar{k}_w}{2} - \cos \frac{\bar{k}_w}{2} \right) \left\{ \frac{2}{\bar{k}_l} \sin \frac{(3C_w - 1)\bar{k}_l}{4} \right\} + \bar{z}_G \bar{E}_2^{FK} \quad (3)$$

ここに、 $C_{vp} = C_b/C_w$, $\bar{k}_l = kL \cos \beta$, $\bar{k}_w = kB \sin \beta$, $\bar{k}_l' = C_b^{-0.15} \bar{k}_l$, $\bar{x}_f = (LCF - LCG)/L$, $\bar{z}_G = (KG - d)/B$ である。これらの推定式は、 $\lambda/L = 0.5$ 以下の短波長でやや精度が低下するものの、船種や波向きに依らず非常に良好な精度を有する。

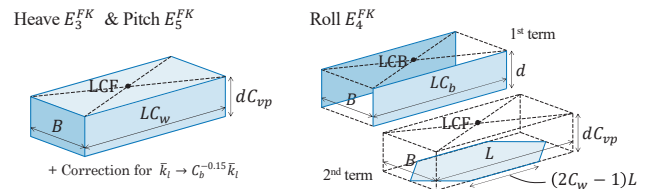


図-2 Froude-Krylov 力の定式化で仮定した船体形状

2. 2 Heave 及び pitch

Heave 及び pitch 運動については、F.K. 力 E_i^{FK} のほか、scattering 流体力 E_i^S 、付加質量 A_{ij} 、減衰係数 B_{ij} 、復原力係数 C_{ij} の全ての成分が無視できない影響を持つため、周波数応答関数の形で定義し、これら全ての流体力成分の簡易算式化を行った。さらに、heave については向い波の $\lambda/L = 1$ 付近で pitch から受ける連成影響が無視できないことが確認されたため、pitch の振幅 $|\bar{X}_5|$ を連成係数 \bar{Z}_{35} を乗じて引用し、以下のような算式とした。

$$\bar{X}_3 = \frac{\bar{E}_3^{FK} + \bar{E}_3^S - \bar{Z}_{35} |\bar{X}_5|}{-\bar{M}_{33} - \bar{A}_{33} + i\bar{B}_{33} + \bar{C}_{33}} \quad (4)$$

$$\bar{X}_5 = \frac{\bar{E}_5^{FK} + \bar{E}_5^S}{-\bar{M}_{55} - \bar{A}_{55} + i\bar{B}_{55} + \bar{C}_{55}} \quad (5)$$

ここに、 $\bar{X}_j = X_j \epsilon_j / \zeta_a$, $\bar{M}_{ij} = KM_{ij} / \rho L B \epsilon_i \epsilon_j$, $\bar{A}_{ij} = KA_{ij} / \rho L B \epsilon_i \epsilon_j$, $\bar{B}_{ij} = KB_{ij} / \rho L B \omega_e \epsilon_i \epsilon_j$, $\bar{C}_{ij} = C_{ij} / \rho g L B \epsilon_i \epsilon_j$, $\bar{E}_i^S =$

$E_i^S/\rho g \zeta_a B L \epsilon_i$ のように無次元化されている。各流体力成分は、F. K. 力の定式化と同様に船体を C_b, C_w 等によって一意に定まる形状で近似した上で次のように定式化している。

$$\bar{A}_{33} = f_{A33} \frac{\pi}{8} K B C_w^{1.5}, \quad \bar{A}_{55} = f_{A55} \frac{\pi}{8} K B \frac{C_w^{3.8}}{12} \quad (6)$$

$$\bar{B}_{33} = f_{b33} K B \left(\frac{2}{K B} \sin \frac{K B}{2} \right)^2 e^{-2K d C_{vp}^2} C_w^{1.5} \quad (7)$$

$$\bar{B}_{55} = f_{B55}^D f_{b33} K B \left(\frac{2}{K B} \sin \frac{K B}{2} \right)^2 e^{-2K d C_{vp}^2} \frac{C_w^{3.8}}{12} \quad (7)$$

$$\bar{C}_{33} = C_w, \quad \bar{C}_{55} = \frac{C_w}{12(3 - 2C_w)} \quad (8)$$

$$\bar{E}_3^S = -\frac{\omega_e}{\omega} k B \left(f_{\Re[ES3]} \frac{\pi}{8} - i f_{\Im[ES3]} \right) e^{-k d C_{vp}} \times \left(\frac{2}{\bar{k}_w} \sin \frac{\bar{k}_w}{2} \right) \left(\frac{2}{\bar{k}_l} \sin \frac{C_w \bar{k}_l}{2} \right) \quad (9)$$

$$\bar{E}_5^S = -\frac{\omega_e}{\omega} k B \left(i f_{\Re[ES5]} \frac{\pi}{8} + f_{\Im[ES5]} \right) e^{-k d C_{vp}} \times \left(\frac{2}{\bar{k}_w} \sin \frac{\bar{k}_w}{2} \right) \frac{1}{\bar{k}_l} \left(\frac{2}{\bar{k}_l} \sin \frac{C_w \bar{k}_l}{2} - C_w \cos \frac{C_w \bar{k}_l}{2} \right) \quad (9)$$

$$\bar{Z}_{35} = 0.7 i C_w \bar{x}_f \quad (10)$$

ここに、 f_{**} は主に周波数に関する補正係数である。提案算式の精度は図-3に示す通り、実用的な精度を有している。Pitchについてはやや相関が弱い、精度のボトルネックとなっているのは scattering 流体力であり、この成分を改良することで全体の精度向上も望まれる。

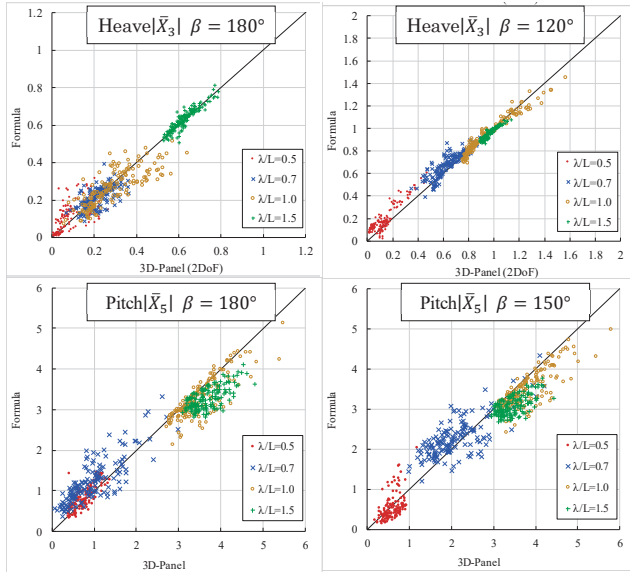


図-3 Heave, pitchの振幅のシリーズ計算値と算式の比較

2. 3 Roll

Rollは、長波長域では scattering 力を無視した次の1自由度方程式系で精度よく推定可能なことが知られている³⁾。

$$\bar{X}_4 = \frac{\bar{E}_4^{FK}}{-(\bar{M}_{44} + \bar{A}_{44}) + i\bar{B}_{44} + \bar{C}_{44}} \quad (11)$$

ここで、Rollの減衰係数 B_{44} については正確な推定が困難であるので、暫定的に Bertin の N 係数を用いた値として定義する。また Rollの復原力 C_{44} については船舶のパラメータを用いた古い推定式が存在するが、現存する船舶に適合するよ

うに再定義した⁴⁾。結局、各流体力成分の簡易算式として以下を得た。

$$\bar{A}_{44} = K B f_{A44} C_w^{2.25} \quad (12)$$

$$\bar{B}_{44} = \sqrt{\frac{360}{\pi^2} f_{X4} \frac{\zeta_a}{B} |\bar{E}_4^{FK}| \bar{C}_{44} N} \quad (13)$$

$$\bar{C}_{44} = \frac{C_w^{1.7}}{12} + 0.49 \frac{d^2 C_b}{B^2 C_{vp}^{0.4}} - \frac{d C_b K G}{B} \quad (14)$$

ここに、 f_{X4} はピーク値の補正係数である。 $N = 0.02$ として波浪中計算したものと算式との比較を図-4に示す。算式は良好な推定精度を有することが分かる。

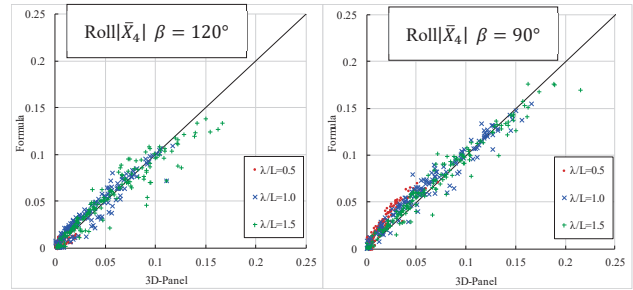


図-4 Rollの振幅のシリーズ計算値と算式の比較(N=0.02)

3. まとめ

本研究では、船体構造設計に用いるための、船種ならびに波条件に依らず適用することのできる波浪中船体運動の簡易算式を開発した。運動モード毎に支配的な流体力成分のみを考慮し、かつ各流体力成分は船体形状を船体パラメータによって一意に定まる形状に近似した上で算式化を行うことで、船体パラメータの影響を適切に考慮している。開発された算式は船長 L 、船幅 B 、喫水 d 、方形係数 C_b 、水線面積係数 C_w 、重心高さ KG 、浮面心位置 $x_f (= LCF - LCG)$ の陽関数で表されており、容易に計算可能である。実際の77隻×2積付状態の船舶を用いて精度を検証し、最悪海象下の想定船速5ktにおいて実用的な精度を有していることが確認された。

謝辞

本研究は、一般財団法人日本海事協会との共同研究により実施しました。関係各位に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 日本海事協会: 鋼船規則 CSR-B&T 編 ばら積貨物船及び油タンカーのための共通構造規則(2019)
- 2) 松井貞興, 篠本恭平, 杉本圭, 芦田晋作: 単胴船に算用する6自由度のFroude-Krylov力の簡易算式の開発, 日本船舶海洋工学会論文集第31号(2020)(査読中)
- 3) 田才福造: 船の横揺れの運動方程式について, 九州大学応用力学研究所所報(1965), 第25号
- 4) 松井貞興, 篠本恭平, 杉本圭, 芦田晋作: 波浪中船体応答の簡易算式の開発-第3報: Roll運動-, 日本船舶海洋工学会講演論文集第30号(2020), pp. 557-563