

PS-2 波浪荷重推定のための新しい数学船型の開発

構造安全評価系 * 松井 貞興

1. はじめに

昨今の船級規則では規則算式の精密化、明確化がいつそう推し進められており、船体構造強度評価のための荷重計算においては、船舶の主要パラメータ（船長 L , 幅 B , 喫水 d , 方形係数 C_b , 水線面積係数 C_w , 中央横断面積係数 C_m 等）の寄与度を明らかにすることが要求されている¹⁾。波浪中応答への船型パラメータの影響を調べる効果的な方法として、感度解析、すなわち系統的に船型パラメータを変化させたときの波浪中応答の変化を調べる方法が考えられるが、それには各種船型パラメータをそれぞれ任意に指定でき、かつ実船相当の波浪中応答が得られるような仮想船型を生成する手段が必要になる。加えて、少数の船型パラメータから生成した数学船型が実船相当の波浪中応答特性を有するのであれば、同数学船型を用いた波浪荷重解析を行うことで、オフセットの定まっていない設計初期段階において合理的に波浪荷重を推定することができると思われる。

そこで本研究では、船型が船舶の主要パラメータの陽関数として表され、かつ実際の船型と同様の波浪中特性を有するような新しいコンセプトの数学船型「松井船型」を開発した²⁾。松井船型はmodified Wigley 船型のパラメータを一般化させ拡張したものである。適用性の確認のため、実在する船型（以降、実船型）と同じ主要パラメータを有する松井船型を作成し、実船型との波浪中応答の比較を行った。

2. 松井船型の定義

松井船型はmodified Wigley 船型をベースに次の点を拡張したものである。

- 指数を実数パラメータに置き換えることで船型のとりうる範囲を増やした
- 縦系の応答にとって重要な水線面二次モーメントを調整できるように、船長方向の伸縮係数を導入した
- 前後部で異なる式を定義し、前後非対称船型とした
- 数式内のパラメータを、船型パラメータによって表した

松井船型は、10 個の船型パラメータ（船長 L , 幅 B , 喫水 d , 方形係数 C_b , 中央横断面積係数 C_m , 水線面積係数 C_w , 水線面二次モーメント係数 C_{w2} , 浮心前後位置 LCB, 浮面心前後位置 LCF, 水線面積二次モーメントに関する前後非対称パラメータ β ）の陽関数として定義される。その定義式は次の通りである。

$$\eta = (1 - \zeta^{Z_1})\{1 - (|\xi|/\alpha_*)^{X_1}\} + \zeta^{Z_1}(1 - \zeta^{Z_2})\{1 - (|\xi|/\alpha_*)^{X_2}\}^{X_3} \quad (1)$$

$$(-\alpha_a \leq \xi \leq \alpha_f, 0 \leq \zeta \leq 1)$$

ここに、

$$X_{1*} = \frac{C_{w*}}{\alpha_* - C_{w*}} \quad (2)$$

$$X_{2*} = \max\left(N, \frac{C_{b*}}{\alpha_* C_m - C_{b*}}\right) \text{ (basic value)} \quad (3)$$

$$X_{3*} = (C_{b*}/C_m \alpha_*)^{N \cdot \text{sgn}(C_{b*} - C_m C_{w*})} \text{ (basic value)} \quad (4)$$

$$Z_{1*} = \frac{C_{b*} - S_* C_m}{C_{w*} - C_{b*} - S_*(1 - C_m)} \quad (5)$$

$$Z_{2*} = \frac{(C_{w*} C_m - C_{b*})/(1 - C_m)}{C_{w*} - C_{b*} - S_*(1 - C_m)} \quad (6)$$

$$S_* = \alpha_* \frac{\Gamma(1 + X_{3*})\Gamma(1 + 1/X_{2*})}{\Gamma(1 + X_{3*} + 1/X_{2*})} \quad (7)$$

$$\alpha_* = 2 \sqrt{\frac{C_{w2*}}{C_{w*}}} \cos\left(\frac{\pi}{3} - \frac{1}{3} \tan^{-1} \sqrt{\frac{C_{w2*}}{C_{w*}^3} - 1}\right) \quad (8)$$

$$\begin{cases} C_{ba} \cong C_b \{1 - \text{LCB}(C_b - 2)^2/2\} \\ C_{bf} \cong C_b \{1 + \text{LCB}(C_b - 2)^2/2\} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} C_{wa} \cong C_w \{1 - \text{LCF}(C_w - 2)^2/2\} \\ C_{wf} \cong C_w \{1 + \text{LCF}(C_w - 2)^2/2\} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} C_{w2a} = (1 - \beta)C_{w2} + \{(1 + \beta)C_{wa}^3 - (1 - \beta)C_{wf}^3\}/2 \\ C_{w2f} = (1 + \beta)C_{w2} - \{(1 + \beta)C_{wa}^3 - (1 - \beta)C_{wf}^3\}/2 \end{cases} \quad (11)$$

ここに、 C_{w2} は水線面二次モーメントを、水線面が $L * B$ の矩形のとき 1 になるよう正規化したもの、 β は $(-1,1)$ の範囲を動く前後非対称性を表すパラメータである。各パラメータの下付き文字にある“*”は、midship より aft 側では“a”に、fore 側では“f”にそれぞれ置き換えて計算すればよい。

3. 実船との波浪中応答の比較

実の 10 個の船型パラメータ（ $L, B, d, C_b, C_m, C_w, C_{w2}, \text{LCB}, \text{LCF}, \beta$ ）を用いて生成した提案船型が、実船の波浪中応答と同様の波浪中応答を示すかを検証する。図-1 に、実際のコンテナ船型とそれと同じ船型パラメータを有する松井船型を示す。図-2 には、両船型の向波中 5knot の heave, pitch および VBM(縦曲げモーメント)の応答関数を比較する。提案船型では、通常の場合にくわえ式(8)の $\alpha_* = 1$ とした、水線面二次モーメントを実船に合わせない場合の船型も比較している。図-2 より、提案船型の波浪中応答は実船型と非常によく一致することが確認できる。また $\alpha_* = 1$ としたケースでは実船の応答と離れることから、水線面積 C_w だけでなく、水線面二次モーメント係数 C_{w2} が波浪中応答にとって重要なパラメータであり、松井船型では C_{w2} を調整可能とすることで実船型の応答との一致度を高めていることが分かる。図-3 には、

VBM のピーク値に着目し、検証隻数を船種を限定しない 11 隻に増やした結果について示している。図-2 と同様の結論が、船型を限定せず成立することが分かる。なお、向い波中以外の全波向きでの適用性も確認している。

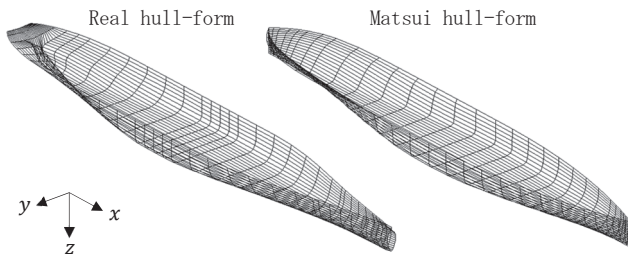


図-1 実際のコンテナ船の水面下形状(上)と、それと同じ船型パラメータを有する提案船型(下)

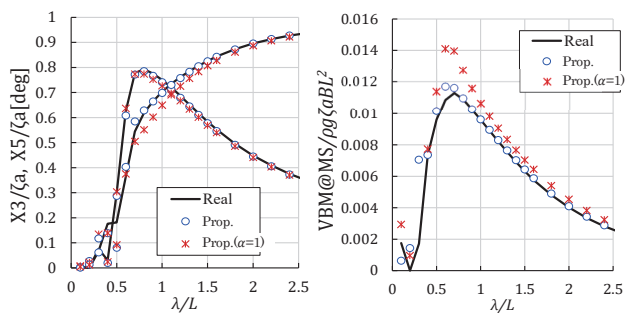


図-2 実際のコンテナ船型と提案船型(通常と、 $\alpha = 1$ とした場合)の向波中の heave, pitch(左)と VBM(右)の応答関数の比較

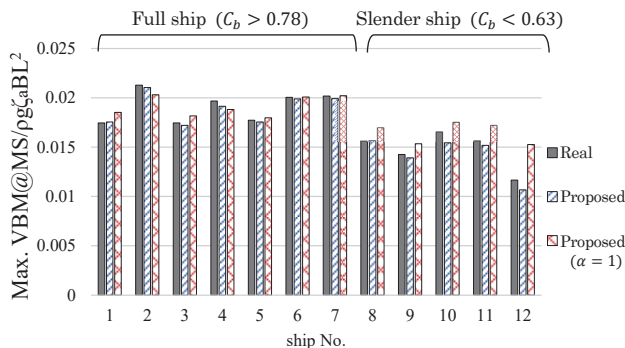


図-3 11 隻の船型に対する実船型と提案船型(通常と、 $\alpha = 1$ とした場合)の向波中の VBM の応答関数のピーク値の比較

4. 感度解析

コンテナ船及びばら積み船の船型パラメータを用いて松井船型を生成し、それを中心に、各船型パラメータを微小に変化させ波浪中応答の感度を調べた。図-4 に、コンテナ船、ばら積み船の向波中の無次元 VBM の応答関数のピーク値の Sensitivity factor を示す。Sensitivity factor とは、船型パラメータに対する応答の感度(微分係数)を各船型パラメータのヒストグラムから得た標準偏差によって正規化したもので、異なるパラメータ間の影響を比較するのに適した指標である。図-4 より、VBM には水線面積 C_w の影響が最も大きく、その次に水線面二次モーメント係数 $C'_{w2}(=C_{w2}/(C_w/(3-$

$2C_w)))$ の影響が強いことが分かる。特に痩せ型船型では、VBM を正確に予測するには C_{w2} の情報が C_w とは別に必要であることが明らかになった。

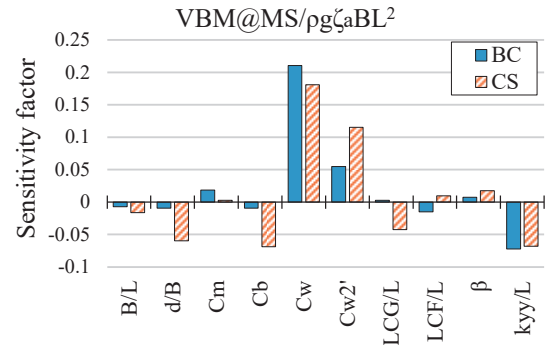


図-4 提案船型によって計算された VBM の sensitivity factor

5. まとめ

本研究では、波浪中応答の推定に役立つ、10 個の船型パラメータ(船長 L 、幅 B 、喫水 d 、方形係数 C_b 、中央横断面積係数 C_m 、水線面積係数 C_w 、水線面積二次モーメント係数 C_{w2} 、浮心前後位置 LCB、浮面心前後位置 LCF、水線面二次モーメントに関する前後非対称パラメータ β)の陽関数で表される数学船型“松井船型”を開発した。本船型の特徴および得られた結果を以下に示す。

- I) 提案船型は半幅が陽関数で定義されているので、エクセル等によってオフセットテーブルを容易に生成可能
- II) 波浪中応答特性が実際の船型と同等なので、少数の船型パラメータから提案船型を生成し、波浪中応答解析を行うことで、オフセットデータの定まっていない設計初期段階における合理的な荷重推定等が可能
- III) 独立に変化させられ、またパラメータの制限もなく痩せ型船型から肥大船型まで幅広く表現できるため、感度解析に有効
- IV) 縦系の応答、特に縦曲げモーメントには水線面積係数 C_w だけでなく水線面二次モーメント係数 C_{w2} の影響も大きいことが明らかになった。提案船型では、 C_{w2} は C_w とは独立に調整可能としている

参考文献

- 1) 日本海事協会：先進的な構造強度評価法及び規則開発に向けた NK の取り組みについて、2018ClassNK 春季技術セミナー (2018)
- 2) 松井貞興：船型パラメータを系統立てて変化させる数学船型の開発、日本船舶海洋工学会論文集第30号(2020), pp. 71-78
- 3) 松井貞興：船型パラメータを系統立てて変化させる数学船型の開発—第2報 水線面二次モーメントおよび前後非対称性に関する形状パラメータの導入—、日本船舶海洋工学会論文集第32号(2021), pp. 21-33