

波浪中船体運動に係る流体力の簡易推定式の開発 —その3 : Roll の付加慣性モーメント—

松井 貞興*, 篠本 恭平**, 杉本 圭**

Development of Simplified Formula of Hydrodynamic Force Acting on Ship in Waves - 3rd report: Added Mass Moment of Inertia of Roll -

by

MATSUI Sadaoki, SHINOMOTO Kyohei, and SUGIMOTO Kei

Abstract

We have developed a simplified formula for the added mass moment of inertia in roll motion as a fundamental study to develop a closed formula for ship motion in waves. The proposed formula is expressed by the explicit function of the main dimensions of the ship (length L , breadth B , draft d , block coefficient C_b , waterplane area coefficient C_w , and height of center of gravity KG) and was developed on the basis of physical considerations to achieve both accuracy and a wide range of applications. The proposed formula was evaluated by comparing numerical calculations using the actual hull-forms of 77 ships \times 2 loading conditions, and we determined that it was sufficiently accurate for all merchant ship types.

* 構造安全評価系

** 一般財団法人日本海事協会 船体開発部

原稿受付 令和3年7月13日

審査日 令和3年11月8日

目 次

1. 緒言.....	80
2. Roll の付加慣性モーメントの簡易算式の開発.....	81
2.1 二次元の roll 付加慣性モーメントの傾向.....	81
2.2 原点まわりの付加慣性モーメント.....	83
2.3 重心まわりの付加慣性モーメント.....	84
3. 結言.....	88
謝 辞.....	88
References.....	88

1. 緒言

近年では船舶構造設計のよりいっそうの合理化のため、船級協会において波浪荷重の簡易算式の高度化が推し進められている¹⁾。これを受け、著者らは簡便かつ実用的な精度を有する波浪中応答の簡易算式の開発を目的とし、前報までに運動方程式の構成要素である Froude-Krylov 力²⁾と復原力係数³⁾、heave, pitch に対する radiation 流体力ならびに scattering 流体力⁴⁾の簡易算式をすでに開発している。本論文ではそれに続き、roll の付加慣性モーメント（以降、付加質量と呼ぶ）の船体の主要パラメータを用いた簡易算式を開発する。本研究では算式の精度と汎用性を両立させるために、シリーズ計算値などに対するフィッティングに依る箇所は最小限にし、物理的背景を踏まえたアプローチによって算式を開発することを基本理念としている。

Roll の付加質量(A_{44})の推定自体は、ストリップ法や 3 次元 Green 関数法などのポテンシャル理論に基づく数値解析によって合理的な計算が可能である。一方、船型パラメータを用いた roll の付加質量の簡易推定式を与えた過去の研究例は多くないが、roll の固有周期の推定を目的にした質量慣性モーメント(M_{44})を含めた roll の全慣性モーメント($M_{44} + A_{44}$)の簡易算式はいくつか存在する。例えば、加藤は全慣性モーメントの推定式を実験により与えている^{5,6)}。しかし、同推定式は 1951 年当時の船舶に依存する係数があり現在の船舶に適用することの疑義が指摘されている⁷⁾。また、International Code on Intact Stability (IS コード)⁸⁾では全慣性モーメントに対応する横環動半径の簡易算式が L, B, d のみを用いて示されているが、船体の痩せの情報は反映されておらず、式の物理的意味に乏しいものである。

以上に対し本研究では、船体の基本パラメータ（船長 L 、船幅 B 、平均喫水 d 、方形係数 C_b 、水線面積係数 C_w 、キール上重心高さ \overline{KG} ）を用いた roll の付加質量の簡易算式を、物理的考察に基づき導出する。2 次元の roll 付加質量はルイスフォーム断面の周波数が極限の場合に対して解析解が求められているため、まずはそれを参考に 2 次元付加質量の定性的傾向を把握する。その後でストリップ法のアプローチに基づき、船型パラメータを適切に考慮しつつ原点まわりの 3 次元付加質量に拡張する。導いた簡易算式の検証は、前々報³⁾で示した実際の 77 隻×満載・バラスト状態の計 154 の船型を用いて、3 次元 Green 関数法プログラム⁹⁾による数値計算値と比較することで行う。

なお、roll の全慣性モーメント($M_{44} + A_{44}$)のうち主要なのは質量慣性モーメント(M_{44})であることが知られている。その意味では roll の付加質量に求められる精度はそれほど高くはなく、本論文でも roll の推定に困らない精度以上の精度は求めないこととする。一方で、質量慣性モーメント(M_{44})の推定式については CSR にみられるように船種や積付条件による場合分け¹⁰⁾が必要になると考えられ、本論文とは全く異なるアプローチによる検討を要すると考えられる。

2. Roll の付加慣性モーメントの簡易算式の開発

本研究で開発する簡易算式は、重心まわりの3次元の roll 付加質量 A_{44} である。そのために、まずは原点（喫水線高さ）まわりの2次元の付加質量 a_{44}^0 の傾向をしらべ、それを船長方向に積分することで原点まわりの3次元付加質量 A_{44}^0 にし、その後でそれを重心まわりの値に変換することで A_{44} を導く。

2.1 二次元の roll 付加慣性モーメントの傾向

Roll の付加質量の解析解は限定的な条件下で求められており、2次元のルイスフォーム断面に対する周波数無限大および周波数ゼロにおける解析解は Lewis¹¹⁾や Landweber¹²⁾、別所¹³⁾らによって導かれている。本節では、まずこれらの解析解を用いて周波数無限大およびゼロの2次元付加質量の断面形状に対する傾向を調べ、続いて境界要素法を用いて周波数依存性について調べる。

原点（喫水線高さ）まわりの roll の2次元付加質量の周波数無限大における値 a_{44}^∞ および周波数ゼロにおける値 a_{44}^0 は、水平板($d/b = 0$)のときそれぞれ $a_{44}^\infty = \pi \rho b^4/16$, $a_{44}^0 = \rho b^4/\pi$ に、垂直板($b/d = 0$)のとき $a_{44}^\infty = \pi \rho d^4/16$, $a_{44}^0 = \rho d^4/\pi$ となることが知られている。そこで、ルイスフォーム断面の a_{44}^∞ の解析解を $\pi \rho b^4/16$ で正規化して d/b について整理した図を Fig. 2.1 左に、 $\pi \rho d^4/16$ で正規化して b/d について整理した図を Fig. 2.1 右にそれぞれ示す。また、 a_{44}^0 の解析解についても同様に、 $\rho b^4/\pi$ で正規化して d/b について整理した図を Fig. 2.2 左に、 $\rho d^4/\pi$ で正規化して b/d について整理した図を Fig. 2.2 右にそれぞれ示す。両図には実際の船舶の半幅喫水比 $2d/B$ の範囲も示している。その範囲では Fig. 2.1, Fig. 2.2 左図の、 ρb^4 で除した量の方が傾向を捉えるのに適していることが見て取れ、すなわち現実的な船舶ではおおむね $a_{44} \propto B^4$ の傾向にあると推察される。また半円断面の場合 roll 方向にかかる流体力はゼロであるため、Fig. 2.1, Fig. 2.2 において $\sigma = \pi/4 \cong 0.785$ かつ $b = d$ の断面で $a_{44}^\infty = a_{44}^0 = 0$ となる。このことから分かるように、 σ の a_{44} に対する影響は単調減少/増加関数で表せない複雑な傾向を示す。2次元付加質量の算式に対して断面の痩せの複雑な傾向を考慮した場合、3次元付加質量への拡張するときの積分操作が困難になるため、本研究では2次元付加質量の形状影響は簡単に水線幅の4乗に比例するものとし、3次元付加質量に拡張する際に水面下の形状影響を補正係数として扱うことにする。

続いて a_{44} の周波数依存性を調べるため、 $d/b = 0.25, 0.5, 1.0$ の矩形および楕円断面（円断面は0なので省略）に対して原点回りの roll 付加質量 a_{44} を2次元境界要素法によって計算し、 $\rho b^4/\pi$ で正規化して横軸を Kb にとった図を Fig. 2.3 に示す。Fig. 2.3 には船舶の roll を推定するのに意味の有る周波数帯として $\lambda/B = 1 \sim 100$ の範囲も示している。Fig. 2.3 より、周波数無限大およびゼロではそれぞれ定数値に漸近するが、中間の周波数帯では $\lambda/B = 1 \sim 100$ の範囲内でも上に凸の部分と下に凸の部分を持ち、複雑な傾向を示している。したがって、断面形状および周波数域のどちらも広い範囲を扱おうとすると、簡易算式によって精度を保つことは難しいと想定される。ただし、 $d/b = 0.5$ や 0.25 の浅喫水の矩形断面では周波数依存性は大きくなく、また roll の同調周期として現実的な範囲($\lambda/B > 5$)に限定すると値の変化は大きくない。またその範囲では、周波数無限大よりも周波数ゼロの値の方に近いことが分かる。

以上の考察から、位置 x における断面の原点（喫水線高さ）まわりの2次元 roll 付加質量 $a_{44}^0(x)$ を水線幅 $B_w(x)$ の水平板の周波数ゼロの付加質量 a_{44}^0 で近似した次式を以降の検討のベースとする。

$$a_{44}^0(x) \cong \frac{\rho}{16\pi} \{B_w(x)\}^4 \quad (2.1)$$

水面下形状に関する補正については次節以降で検討する。

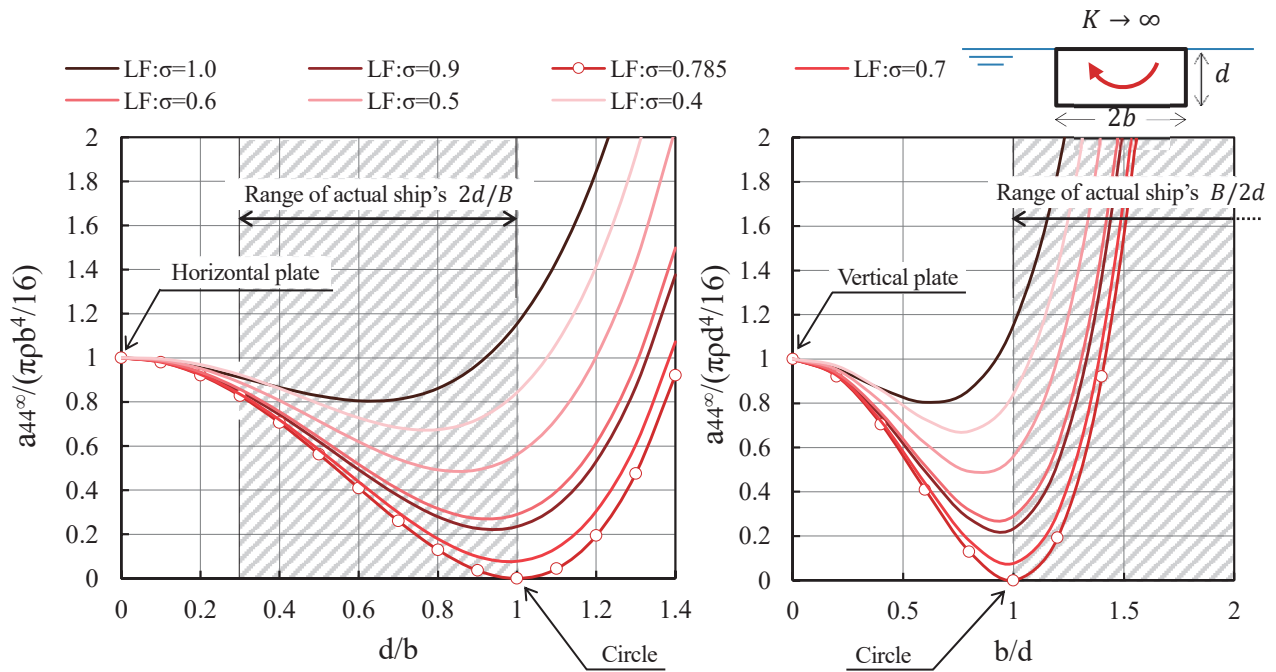


Fig. 2.1 Normalized roll added mass of high frequency of Lewis-Forms. Left: $a_{44}^{\infty}/(\pi\rho b^4/16)$ against d/b , right: $a_{44}^{\infty}/(\pi\rho d^4/16)$ against b/d .

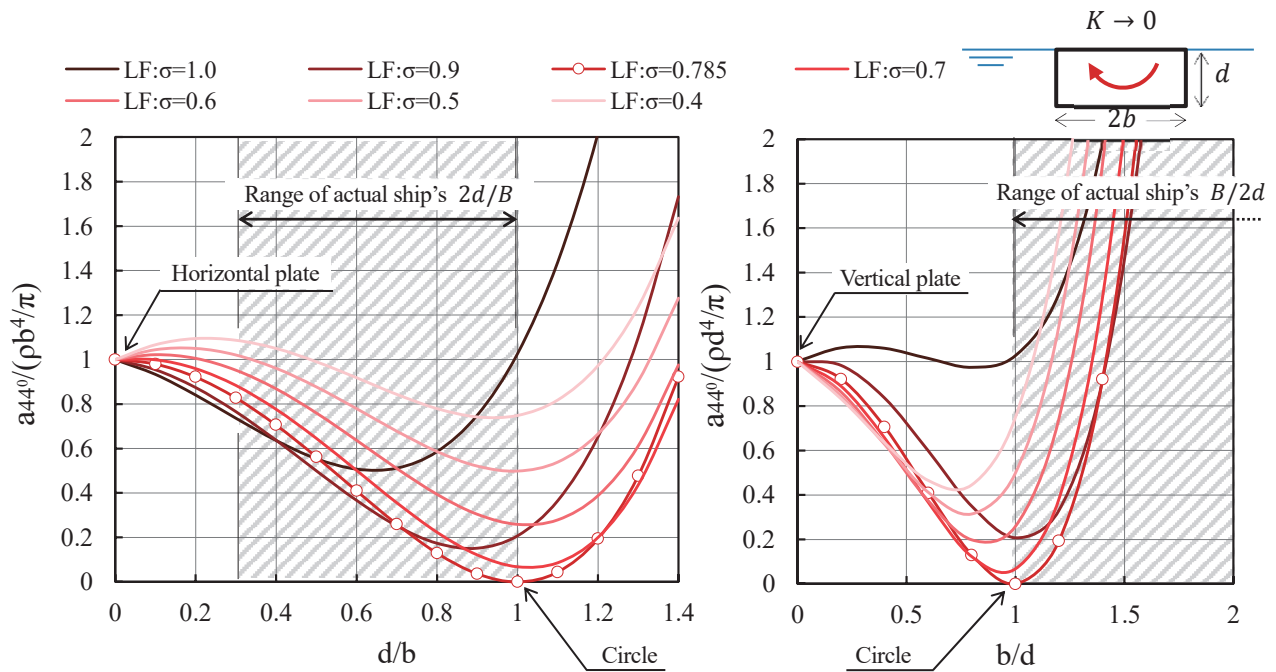


Fig. 2.2 Normalized roll added mass of low frequency of Lewis-Forms. Left: $a_{44}^0/(\rho b^4/\pi)$ against d/b , right: $a_{44}^0/(\rho d^4/\pi)$ against b/d .

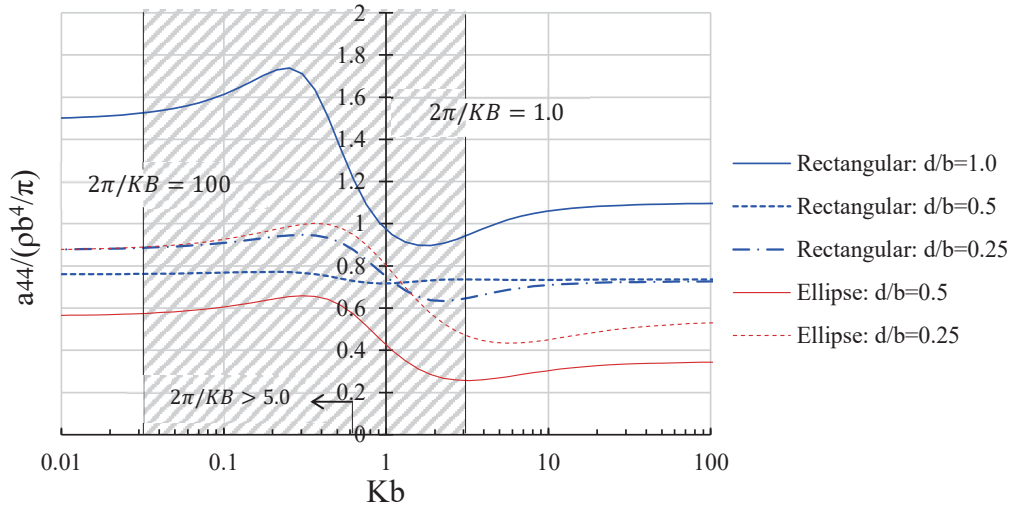


Fig. 2.3 Normalized roll added mass $a_{33}/(\rho b^4/\pi)$ of rectangular and ellipse section against Kb .

2.2 原点まわりの付加慣性モーメント

前節の 2 次元流体力 $a_{44}^0(x)$ を基に、原点 (喫水線高さ) まわりの 3 次元 roll 付加質量 A_{44}^0 の式を導く。まず、水線幅 $B_w(x)$ の分布を、区間 $[-L/2, L/2]$ で積分したときの面積が水線面積 LBC_w (C_w は水線面積係数) に一致するような次の冪関数 $B_w^{Pow}(x)$ で近似する。

$$\frac{B_w^{Pow}(x)}{B} := 1 - \left(\frac{2|x|}{L}\right)^{\frac{C_w}{1-C_w}} \quad \text{for } |x| \leq L/2 \quad (2.2)$$

このとき、原点まわりの 3 次元 roll 付加質量 A_{44}^0 は次のように表せる。

$$\begin{aligned} \frac{A_{44}^0}{\rho B^4 L / 16\pi} &= \int_{-L/2}^{L/2} \frac{a_{44}^0(x)}{\rho B^4 / 16\pi} dx \\ &\cong f_{A_{44}^0} \int_{-L/2}^{L/2} \left\{ \frac{B_w^{Pow}(x)}{B} \right\}^4 \frac{dx}{L} \\ &= f_{A_{44}^0} \frac{(C_w + 1)(2C_w + 1)(3C_w + 1)}{24C_w^4} \\ &\cong f_{A_{44}^0} C_w^{2.25} \end{aligned} \quad (2.3)$$

ここに、 $f_{A_{44}^0}$ は水面下形状の補正係数である。式(2.3)最右辺の近似は C_w の関数の簡略化が目的であるが、これによる精度低下は Fig. 2.4 に示すように殆どない。

式(2.3)によって水線面の痩せの影響は合理的に考慮された。次に、水面下形状の補正係数 $f_{A_{44}^0}$ の傾向を調べるため、3 次元境界要素法によって得た $\lambda/L = 0.7, 3.0$ における 154 隻の実船の A_{44}^0 と式(2.3)の値 $\rho B^4 L C_w^{2.25} / 16\pi$ の比をとり、 d/B で整理した図を Fig. 2.5 に示す。Fig. 2.5 には Fig. 2.2 に示したルイスフォーム断面 ($\sigma = 1$) の周波数ゼロにおける 2 次元付加質量 $a_{44}^0/(\rho b^4/\pi)$ の解析解も示している。Fig. 2.5 より、 $f_{A_{44}^0}$ は d/B が増えるにつれて一度減少してその後増加傾向に転じるという点で 2 次元付加質量の解析解と同様の傾向を示しており、3 次元付加質量の喫水影響は 2 次元と概ね同じであることがわかる。喫水が 0 から深くなるにつれ減少するのは船の底面と側壁から受ける力が相殺する関係にあるためであり、喫水がさらに深くなると増加するのは側壁の寄与が主となって $a_{44} \propto d^4$ の傾向に移るためである。また、 $\lambda/L = 0.7, 3.0$ のプロットの差が大きくないことから $f_{A_{44}^0}$ の周波数依存性は無視できると考えられる。以上のことから、 $f_{A_{44}^0}$ を d/B の関数としてフィッティング等によって定めれば、原点まわりの 3 次元付加質量 A_{44}^0 の簡易算式を得ることができる。

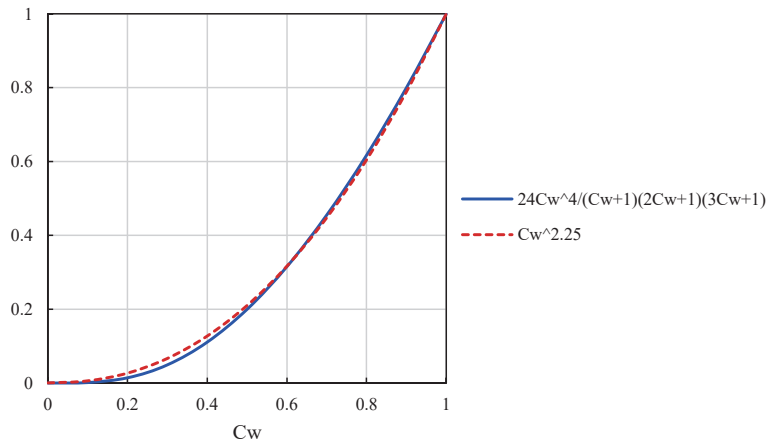


Fig. 2.4 Comparison of $24C_w^4/(C_w + 1)(2C_w + 1)(3C_w + 1)$ and $C_w^{2.25}$.

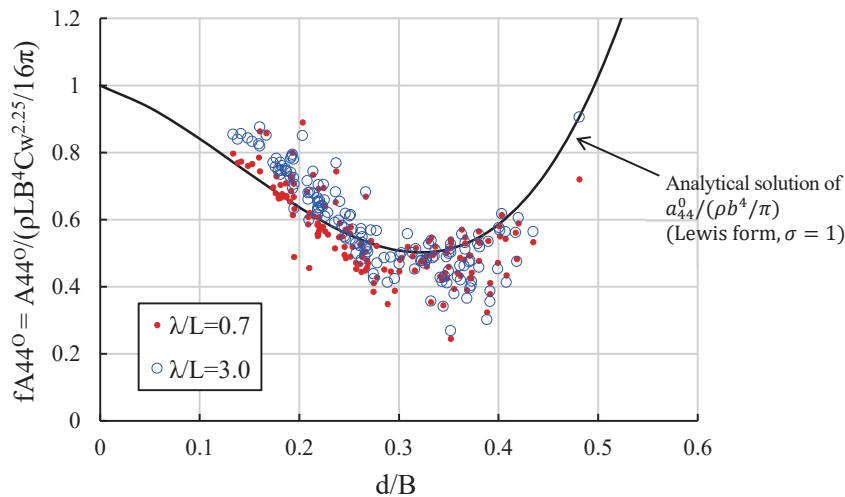


Fig. 2.5 Tendency of the ratio of roll added mass A_{33}^0 obtained by calculation and formula $\rho B^4 L C_w^{2.25} / 16\pi$ against d/B for actual 154 ships.

2.3 重心まわりの付加慣性モーメント

求めたい量は重心周りの付加質量 A_{44} である。 A_{44} は A_{44}^0 から \overline{OG} （喫水線上重心高さ）と sway の付加質量 A_{22} ならびに roll-sway 連成付加質量 A_{24} を用いて

$$A_{44} = A_{44}^0 - 2\overline{OG}A_{24} + \overline{OG}^2 A_{22} \quad (2.4)$$

と変換することで得ることができるが、この式をそのまま適用すると A_{44} の算式は複雑化する。そこで、本研究ではこの変換操作を簡略的に扱うことにする。簡略化の考え方は、Fig. 2.6 に示すように

- （◆） $B \times d$ の矩形の重心まわりの roll によって動かされる流体量は $B \times \overline{KG}$ （ \overline{KG} はキール上重心高さ）の矩形の原点まわりの roll によって動かされる流体量によって近似できる

と見なすことで、 A_{44}^0 の算式で $d/B \rightarrow \overline{KG}/B$ と置き換えたものを A_{44} の算式とするというものである。この簡略化は側壁の積分領域の差や自由表面からの距離の影響を無視しているため誤差が生じるが、支配パラメータの把握という目的においては一定の実用性を有する。Fig. 2.7 に、3次元境界要素法によって得た $\lambda/L = 3$ における154隻の実船の $A_{44}/(\rho B^4 L C_w^{2.25} / 16\pi)$ の、 \overline{KG}/B および d/B に対する傾向を示す。Fig. 2.7 ではプロットの色が $A_{44}/$

$(\rho B^4 LC_w^{2.25}/16\pi)$ の値に対応しており、その色が概ね上下方向に (\overline{KG}/B) の値に応じて) 変化していることから重心まわりの付加質量は d/B ではなく \overline{KG}/B によって整理されるという事実が読み取れ、上記(◆)の近似の正当性が確認できる。

以上の考察によって、前節の原点まわりの A_{44}^0 の式において d/B を \overline{KG}/B としたものを A_{44} と考えることにする。式(2.3)において、補正係数 $f_{A_{44}^0}$ が d/B の関数で表せることを考えると、 A_{44} は

$$\begin{aligned} \frac{A_{44}}{\rho B^4 LC_w^{2.25}/16\pi} &\cong f_{A_{44}}(d/B) \\ \leftrightarrow \frac{A_{44}}{\rho B^4 LC_w^{2.25}/16\pi} &\cong f_{A_{44}}(\overline{KG}/B) \end{aligned} \tag{2.5}$$

と表現できると考えられる。ここで、上記の近似(◆)による誤差があると考えられるため、 $f_{A_{44}}$ と $f_{A_{44}^0}$ は別の関数として定義している。Fig. 2.8 に、 $\lambda/L = 0.7, 3.0$ における $A_{44}/(\rho B^4 LC_w^{2.25}/16\pi)$ を横軸に \overline{KG}/B をとり、近似曲線を併記した図を示す。Fig. 2.8 の $\lambda/L = 0.7, 3.0$ のプロットの差は大きくないことから、実用的な周波数帯では A_{44} の周波数依存性は無視して差し支えないことが分かる。また、Fig. 2.8 の \overline{KG}/B に対する傾向は Fig. 2.5 における d/B に対する傾向に近く、Fig. 2.6 の考えのもと $d/B \rightarrow \overline{KG}/B$ と置き換えることが妥当であることが理解できる。Fig. 2.8 の近似曲線より、式(2.5)の右辺を次式のように決定した。

$$f_{A_{44}}(\overline{KG}/B) \cong 1 - 10.6 \left(\frac{\overline{KG}}{B}\right)^2 + 17 \left(\frac{\overline{KG}}{B}\right)^3 \tag{2.6}$$

式(2.6)右辺の近似式は $\overline{KG}/B = 0$ のとき水平板の値に一致すると考え $\overline{KG}/B = 0$ のとき1かつ傾きが0となるよう関数形を選び、2次および3次の項の係数は154隻の数値計算結果との平均二乗誤差が最小となるように決定している。

なお Fig. 2.8 中に示す通り、 d/B とは違って \overline{KG}/B には現実的にとりうる上限があり、およそ $\overline{KG}/B < 0.5$ であることを特筆しておく。というのも、重心はメタセンタよりも低い位置になければならないため \overline{KG}/B には

$$\frac{\overline{KG}}{B} < \frac{\overline{KM}}{B} \cong \frac{1}{12} \frac{B}{d} + \frac{1}{2} \frac{d}{B} \tag{2.7}$$

という制限があるためである³⁾。ただし、右辺の近似では箱型船型($C_b = 1$)を仮定した。式(2.7)より \overline{KG}/B が0.5以上の値をとりうるのは $d/B < 0.2$ の浅喫水の船舶であって、そのような軽い船舶において \overline{KG}/B が0.5を超えることは現実的に存在し得ない。

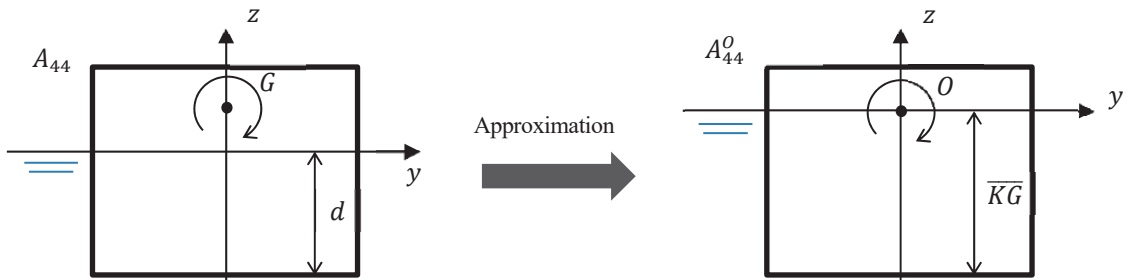


Fig. 2.6 Schema of A_{44} of rectangular $B \times d$ approximated by A_{44}^0 of rectangular $B \times \overline{KG}$.

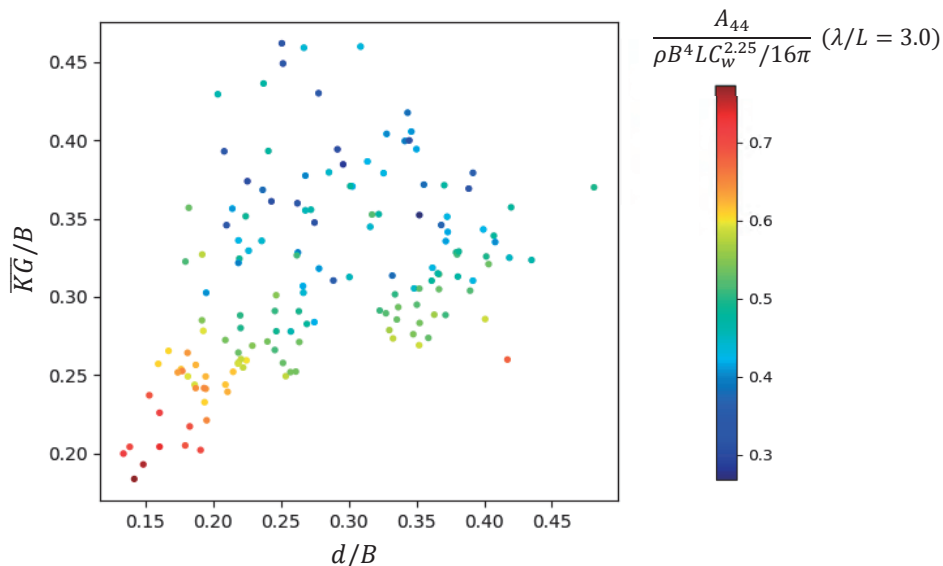


Fig. 2.7 Tendency of $A_{44}/(\rho B^4 L C_w^{2.25}/16\pi)$ in the case of $\lambda/L = 3$ against \overline{KG}/B and d/B for actual 154 ships.

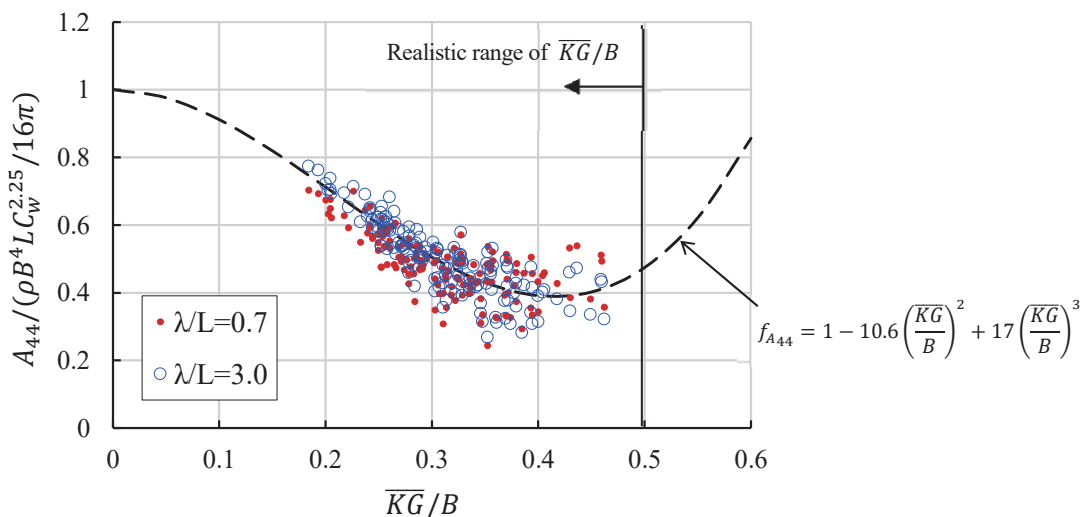


Fig. 2.8 Tendency of $A_{44}/(\rho B^4 L C_w^{2.25}/16\pi)$ against \overline{KG}/B for actual 154 ships.

以上によって、次の重心まわりの roll 付加質量 A_{44} の簡易算式を得た。

$$\frac{A_{44}}{\rho B^4 L} \cong \frac{C_w^{2.25}}{16\pi} \left\{ 1 - 10.6 \left(\frac{\overline{KG}}{B} \right)^2 + 17 \left(\frac{\overline{KG}}{B} \right)^3 \right\} \quad (\text{Proposed}) \quad (2.8)$$

右辺の $C_w^{2.25}/16\pi$ は周波数ゼロの極限かつ喫水がゼロかつ水線幅を式(2.2)の冪関数で近似した場合の値で、中括弧内の式は喫水の影響ならびに原点まわりから重心まわりの値への変換操作を同時に考慮するための補正である。

無次元値 $A_{44}/\rho B^4 L (= \bar{A}_{44}/KB)$ について、提案算式(2.8)と実際の 154 隻の船舶の 3D-Green 関数法プログラムによる計算値とを比較したものを Fig. 2.9 に示す。Fig. 2.9 より、提案算式は数値計算値と相関がみられ、一定の精度を有していることがわかる。推定誤差の二乗平均平方根は $\lambda/L = 0.7, 3.0$ でそれぞれ 0.00073, 0.00071 であった。

続いて、roll の同調周波数に対する提案算式の有効性を検証する。慣性力、復原力、付加質量の和 $\{C_{44} - \omega_e^2(A_{44} + M_{44})\}$ が最小になるような λ/B を同調波長とみなし、154 隻について提案算式の A_{44} を用いた場合と、数値計算値の A_{44} を用いた場合の同調波長を比較したものを Fig. 2.10 に示す。ただし提案算式における M_{44}, C_{44} の値

は数値計算値と同じ値を用いている. Fig. 2.10 は非常に良い相関となっており, roll の推定を行うには式(2.8)の精度で十分であることが確認できる. Fig. 2.10 が Fig. 2.9 に比べ強い相関を示しているのは, 緒言にて述べた通り roll の慣性モーメント $M_{44} + A_{44}$ のうち M_{44} の占める割合が大きいことが主な原因である. 154 隻について $A_{44}/(M_{44} + A_{44})$ のとりうる範囲を調べたところ, およそ 0.1~0.35 にあることが確認された (ただし A_{44} は $\lambda/L = 3.0$ における値で, 慣性モーメントには CSR の算式¹⁰⁾を用いた).

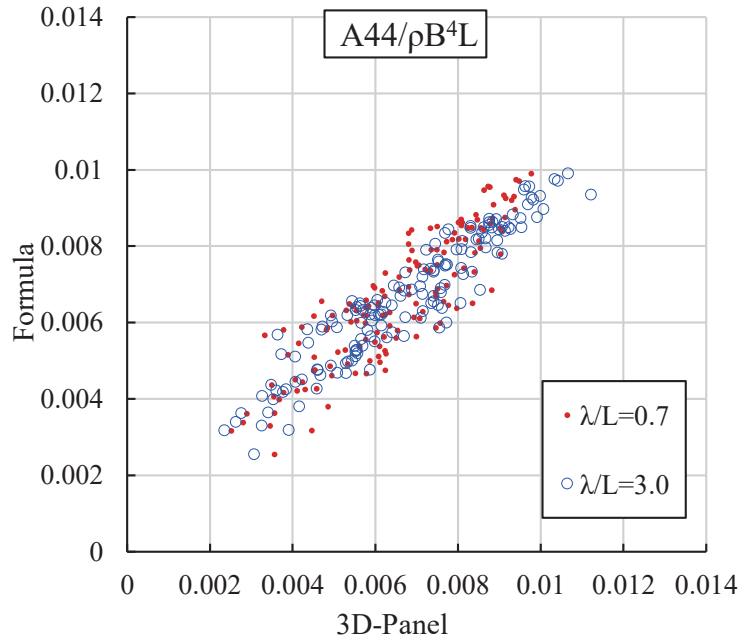


Fig. 2.9 Comparison of $A_{44}/\rho B^4 L$ between proposed formula and numerical calculation.

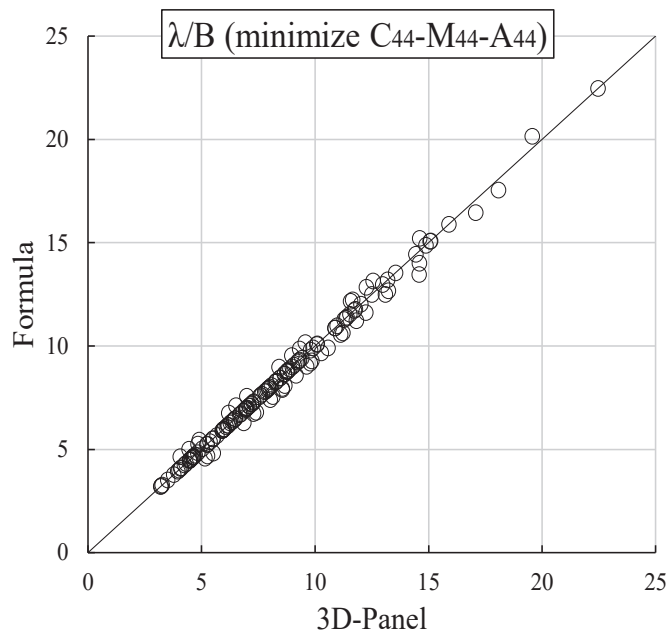


Fig. 2.10 Comparison of λ/B which minimize $\{C_{44} - \omega_e^2(A_{44} + M_{44})\}$ between proposed formula of A_{44} and numerical calculation.

3. 結言

本論文では、船種や積み付け条件によらず適用することのできる、船型パラメータ（船長 L 、船幅 B 、水線面積係数 C_w 、キール上重心高さ \overline{KG} ）を用いた重心まわりのrollの付加慣性モーメントの簡易算式を開発した。以下に、検討の過程および得られた結果の要点を示す。

1. まず2次元のroll付加慣性モーメントの傾向について調べ、rollの推定が有意な周波数帯では周波数ゼロの値に近いことを確認し、簡単のため周波数ゼロにおける水平板の解析解を断面にかかる単位長さあたりのroll付加慣性モーメントと見なした。
2. それを船長方向に積分して3次元流体力に拡張する際に、水線幅の分布を垂線面積係数によって定まる冪関数に仮定することで、船体の水線面積の痩せの影響を考慮した。
3. 原点（喫水線高さ）まわりの3次元付加慣性モーメントが幅-喫水比 (d/B) によってある程度整理されることを確認した上で、付加慣性モーメントの喫水影響の補正と重心まわりの値への変換も同時に考慮するために、幅喫水比ではなく幅-キール上重心高さ比 (\overline{KG}/B) に依存する補正係数を与えた。
4. 得られた重心まわりのrollの付加慣性モーメントの簡易算式は、簡便かつ物理的な意味が比較的明確な構成となっており、支配パラメータの傾向が適切に反映されている。提案式はrollの固有周期を推定する上で十分な精度を有することが確認された。

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、また、本研究のデータ分析等にご協力いただいた、日本海事協会の河邊寛博士、福元佑輔氏、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、川崎重工業の芦田晋作氏に深く感謝いたします。

References

- 1) 日本海事協会船体開発部：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、2018 ClassNK 春季技術セミナー（2018）
- 2) Sadaoki Matsui, Kyohei Shinomoto, Kei Sugimoto, and Shinsaku Ashida: Development of Simplified Formula of Froude-Krylov Force of 6-DOFs Acting on Monohull Ship, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.32 (2020), pp.9-19. (in Japanese)
- 3) MATSUI Sadaoki, SHINOMOTO Kyohei, and SUGIMOTO Kei: Development of Simplified Formula of Hydrodynamic Force Acting on Ship in Waves - 1st report: Restoring Force Coefficient -, Papers of National Maritime Research Institute, Vol.21-3 (2021), pp.45-59. (in Japanese)
- 4) MATSUI Sadaoki, SHINOMOTO Kyohei, and SUGIMOTO: Development of Simplified Formula of Hydrodynamic Force Acting on Ship in Waves - 2nd report: Radiation Force Coefficient and Scattering Force of Heave and Pitch Motion -, Papers of National Maritime Research Institute, Vol.21-3 (2021), pp.61-78
- 5) 海文堂：造船設計便覧第4版（1983）
- 6) 加藤弘：船の横揺周期の近似計算に就いて，造船協會論文集, Vol.89 (1956), pp.59-64
- 7) Sadaoki Matsui, Chikahisa Murakami: Calculation method of volume integration of cargo using ship FEM model - Calculation of moment of inertia, etc. and its distribution and its effect on torsional moment -, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.28 (2018), pp.203-209. (in Japanese)
- 8) IMO: Adoption of the International Code on Intact Stability, 2008 (2008 IS Code), Resolution MSC. 267/85, MSC

85/26/Add.1 Annex 2 (2008)

- 9) Masayoshi Oka, Takahiro Ando, Chong Ma, Takumi Yoshida, Naruyoshi Izumi, Naoya Matsubara, et al.: 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 (2017) pp.103-118. (in Japanese)
- 10) IACS: Common Structure Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers (2020)
- 11) Lewis F. M.: The Inertia of Water Surrounding a Vibrating Ship, Transactions SNAME, Vol.37 (1929), pp.352-254
- 12) Landweber L. and de Metcagno M. C.: Added Mass of Two-Dimensional Forms Oscillating in a Free Surface, Journal of Ship Research, Vol.1-04 (1957), pp.20-30
- 13) 別所正利: 波の中の船の横揺れ運動の理論について (続報), 防衛大学校理工学研究報告, Vol.3-3 (1966), pp.173-201