

波浪中船体運動に係る流体力の簡易推定式の開発 —その1：復原力係数—

松井 貞興*, 篠本 恭平**, 杉本 圭**

Development of Simplified Formula of Hydrodynamic Force Acting on Ship in Waves - 1st report: Restoring Force Coefficient -

by

MATSUI Sadaoki, SHINOMOTO Kyohei, and SUGIMOTO Kei

Abstract

We have developed simplified formulae for the restoring force coefficient of the pitch and roll motion as a fundamental study to develop closed formulae for ship motion in waves. Assuming the initial design stage in which the metacenter height has not been determined, estimation formulae for the restoring force coefficient 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 longitudinal center of floatation x_f) were developed on the basis of geometrical considerations. The proposed formulae were evaluated through comparisons with numerical calculations using actual hull-forms of 77 ships \times 2 loading conditions. We determined that the formulae achieved high accuracy 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24日

目 次

1. 緒言	46
2. パラメータの定義と検証に用いる船舶	47
3. 縦運動の復原力係数	48
3.1 復原力係数の定義	48
3.2 Pitch の復原力係数と水線面二次モーメント係数	48
3.3 Pitch の復原力係数の算式	49
4. Roll の復原力係数	51
4.1 Roll の復原力係数の定義	51
4.2 浮心高さ KB の算式	52
4.3 浮心上メタセンタ高さ BM の算式	53
4.4 重心高さ KG の算式	54
4.5 横メタセンタ高さ GM の算式 (BM+KB-KG を基にした場合)	56
4.6 横メタセンタ高さ GM の算式 (フィッティングにより定める場合)	56
5. 結言	58
謝 辞	58
References	58

1. 緒言

構造設計は通常船級規則に基づいて行われ、その中でも波浪荷重は簡易算式による推定値が用いられる。近年では構造設計のさらなる合理化のため、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⁾。簡易算式は通常、複数の船舶の応答計算に対するフィッティングによって作成されるが、その精度および汎用性を向上させるには基礎理論を踏まえたアプローチによる支配的な船型パラメータの抽出が重要であると考えられる。

波浪中応答の船型影響の調査やそれに基づき簡易推定式を示した研究は Bales による報告²⁾に始まり数多く存在する^{3,4)}が、その殆どは数値計算や実験結果から応答の傾向を見出すもので、基礎理論に基づいて検討された例は Jensen による研究^{5,6)}を除けばほとんど見られない。その理由は、浮体に作用する流体力成分のうち、radiation/scattering 流体力の周波数依存性・形状依存性が複雑であるためと思われる。これらの成分を求めるには一般には数値計算（あるいはチャートなど）が必要になり、数学的に solvable な問題は単純な形状かつ高/低周波数の極限の領域に限定される。一方で、流体力のうち特に高い精度が求められるのは主要な割合を占める復原力と Froude-Krylov 力であり、これらに対する船型影響は比較的明確に求めることができる。また、radiation/scattering 流体力についても 2 次元問題に限定すれば古典的な解析解等から要因抽出がある程度可能であり、それをもとに 3 次元流体力に拡張することで一定の合理性を有する簡易算式が作成可能であると考えられる。

以上の背景のもと、著者はすでに船体運動にとって主要な流体力成分である Froude-Krylov 力の簡易算式を開発している⁷⁾。同論文では、運動モードごとに圧力の船体表面積分を求められるような単純な船型形状を仮定することで、船型パラメータおよび波条件のパラメータを用いた場合分けの不要な簡易算式を導いている。

本論文では同様のアプローチによって、静的復原力係数の基本的な船型パラメータを用いた汎用的かつ高精度な簡易算式を開発する。具体的には、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 、重心基準の浮面心前後位置 x_f を既知とし、これらのパラメータを用いて、復原力係数のうち左右対称船で非ゼロとなる全成分（heave C_{33} , pitch C_{55} , heave-pitch 連成 $C_{35}(=C_{53})$, roll C_{44} ）の、船種や積付条件等の場合分けを必要としない算

式を示す。復原力係数は船型情報から容易に求まる量であるが、設計の初期段階では詳細なオフセットデータが定まっていない場合も想定され、そういった状況において主要目のみから得られる提案算式は特に有用である。Rollの復原力係数、すなわち横メタセンタ高さ \overline{GM} の推定には重心高さ \overline{KG} の情報が必要になるが、 \overline{KG} についても上述した船型パラメータから推定できる実用的算式を示す。提案算式の精度検証には、船種を問わない延べ154隻の近年の実際の船舶を用いる。

2. パラメータの定義と検証に用いる船舶

簡易推定式に用いる船型パラメータは、船の基本パラメータである船長 L 、船幅 B 、平均喫水 d 、方形係数 C_b 、水線面積係数 C_w 、重心基準の浮面心前後位置 $x_f (= LCF - LCG)$ とし、縦/横メタセンタ高さ $\overline{GM}_L, \overline{GM}$ およびキール上重心高さ \overline{KG} は未知とする。また、堅柱形係数 $C_{vp} (= C_b/C_w)$ の記号を適宜用いる。座標系および運動の向きはFig. 2.1に示すとおりで、モーメントは重心まわりで定義される。

開発した簡易算式の検証は、実際の77隻×満載・バラスト状態の計154の船型との比較を通して行う。実船の復原力係数は、3次元グリーン関数法プログラム⁸⁾によるパネル上の積分計算によって算出している。154隻の船型パラメータのヒストグラムをFig. 2.2に示す。船種は、ばら積み船、油タンカー、コンテナ船、セメント運搬船、アスファルト運搬船、チップ運搬船、鉍石運搬船、LNG運搬船、LPG運搬船、自動車運搬船、RO-RO船、一般貨物船など多種にわたる。

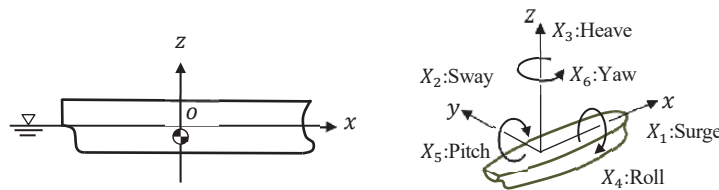


Fig. 2.1 Definition of coordinate system and motion.

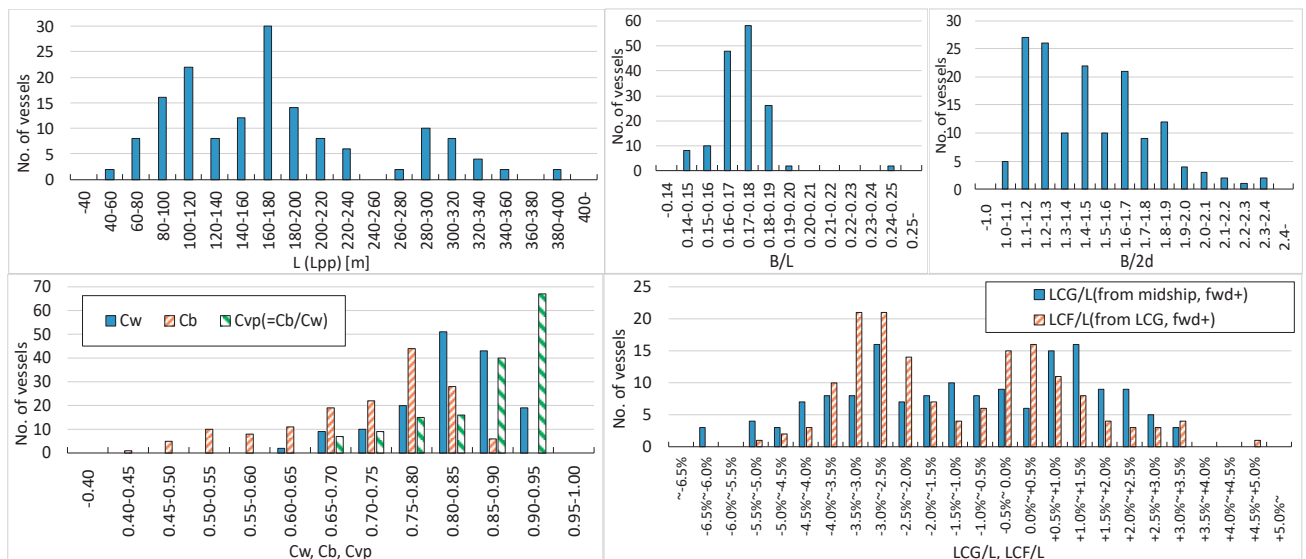


Fig. 2.2 Histogram of hull-form parameters of actual 154 ships used for validation.

3. 縦運動の復原力係数

3.1 復原力係数の定義

Heave, pitch に関する復原力係数 C_{33} , $C_{35}(=C_{53})$, C_{55} を無次元で表すと、それぞれ次のように定義される。

$$\frac{C_{33}}{\rho g B L} := -\frac{1}{B L} \iint_{S_H} n_z dS = \int_L \bar{B}_w(\bar{x}) d\bar{x} = C_w \quad (3.1)$$

$$\frac{C_{53}}{\rho g B L^2} := \frac{1}{B L^2} \iint_{S_H} x n_z dS = -\int_L \bar{x} \bar{B}_w(\bar{x}) d\bar{x} = -C_w \bar{x}_f \quad (3.2)$$

$$\frac{C_{55}}{\rho g B L^3} := -\frac{1}{B L^3} \iint_{S_H} x \{x n_z - (z - z_G) n_x\} dS = \int_L \bar{x}^2 \bar{B}_w(\bar{x}) d\bar{x} + \frac{dC_b}{L^2} (z_B - z_G) = \frac{dC_b}{L^2} \overline{GM}_L \quad (3.3)$$

ここに ρ, g はそれぞれ海水密度、重力加速度、 S_H は船体表面、 n_x, n_z は船体表面の外向き法線ベクトルの x, z 方向成分、 z_B, z_G はそれぞれ浮心、重心の z 座標である。また、 \bar{x}, \bar{x}_f はそれぞれ x, x_f を L で無次元化した値、 $\bar{B}_w(\bar{x})$ は水線幅 $B_w(x)$ を B で無次元化した値である。 C_{33}, C_{53} についてはこれ以上の変形は必要ないので、以降は C_{55} の推定式について考える。

3.2 Pitch の復原力係数と水線面二次モーメント係数

今、midship まわりの水線面二次モーメント係数 C_{w2}^M および重心まわりの水線面二次モーメント係数 C_{w2}^G をそれぞれ次のように定義する。

$$C_{w2}^M := \frac{12}{L^3 B} \iint_{A_w} (x - x_M)^2 dx dy = 12 \int_L (\bar{x} - \bar{x}_M)^2 \bar{B}_w(\bar{x}) d\bar{x} \quad (3.4)$$

$$C_{w2}^G := \frac{12}{L^3 B} \iint_{A_w} x^2 dx dy = 12 \int_L \bar{x}^2 \bar{B}_w(\bar{x}) d\bar{x} \quad (3.5)$$

ここに、 A_w は水線面積、 x_M は midship の x 座標（重心基準の midship 位置）である。 C_{w2}^M, C_{w2}^G は水線面形状が $L \times$ 合1をとるように正規化されている⁹⁾。 C_{w2}^M, C_{w2}^G を用いて、 C_{55} は次のように表される。

$$\begin{aligned} \frac{C_{55}}{\rho g B L^3} &= \frac{C_{w2}^G}{12} + \frac{dC_b}{L^2} (z_B - z_G) \\ &= \frac{C_{w2}^M}{12} + \frac{C_w \{x_f^2 - (x_f - x_M)^2\} + \frac{dC_b}{L^2} (z_B - z_G)}{\quad} \end{aligned} \quad (3.6)$$

右辺の一重下線部の項は縦メタセンタ半径 \overline{BM}_L から縦メタセンタ高さ \overline{GM}_L に変換する項で、その影響は小さい。最右辺の二重下線の項はモーメントの基準点を midship から重心に移すことで生じる項であり、平行軸の定理により導かれる。下線および二重下線の項の影響を調べるため、Fig. 2.2 の 154 隻の実船について、 $12C_{55}/\rho g B L^3$ と C_{w2}^M, C_{w2}^G を比較したものを Fig. 3.1 に示す。 $12C_{55}/\rho g B L^3$ と C_{w2}^G の差は高々2%程度で、一重下線部項の影響は殆ど無視でき、 $C_{55}/\rho g B L^3 \cong C_{w2}^G/12$ は問題なく成立することが分かる。一方で $12C_{55}/\rho g B L^3$ と C_{w2}^M の差は、75%の船舶が2%以内に収まるものの一部の痩せ型船型では10%程度になり、二重下線部項は場合によっては有意な値を持つことが確認された。

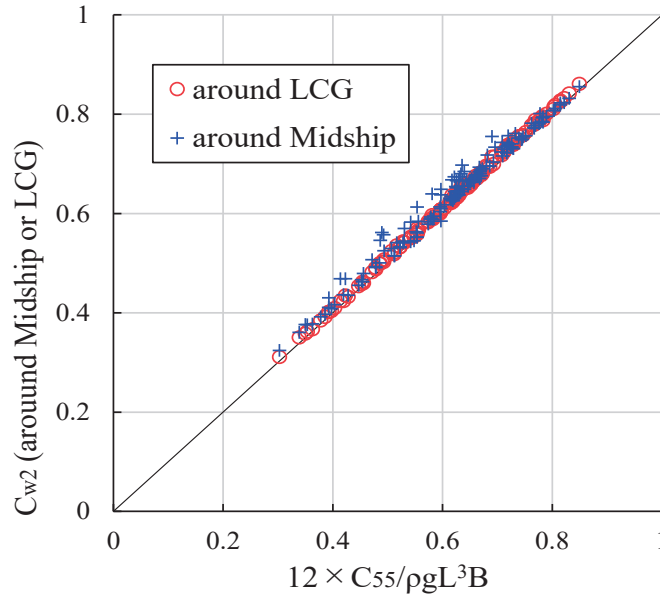


Fig. 3.1 Comparison of C_{w2}^M, C_{w2}^G and $12C_{55}/\rho gBL^3$.

3.3 Pitch の復原力係数の算式

水線面二次モーメントは水線面積にくらべ一般的な主要目ではないため、 C_w を用いた水線面二次モーメントの近似式を求めておくことと便利である。 C_{w2}^M, C_{w2}^G は、水線面形状を C_w によって一意に定まる何らかの形状で仮定することで C_w に関する陽関数として表すことができる。今、 $\bar{B}_w(\bar{x})$ の分布を次の前後対称な矩形、台形、冪関数で仮定する。

$$\bar{B}_w^{\text{Rec}}(\bar{x}) := \begin{cases} 1 & \text{for } |\bar{x}| \leq C_w/2 \\ 0 & \text{for } C_w/2 < |\bar{x}| \end{cases} \quad (3.7)$$

$$\bar{B}_w^{\text{Tra}}(\bar{x}) := \begin{cases} 1 & \text{for } |\bar{x}| \leq C_w - 1/2 \\ \frac{1 - 2|\bar{x}|}{2(1 - C_w)} & \text{for } C_w - 1/2 < |\bar{x}| \end{cases} \quad (3.8)$$

$$\bar{B}_w^{\text{Pow}}(\bar{x}) := 1 - (2|\bar{x}|)^{\frac{C_w}{1-C_w}} \quad \text{for } |\bar{x}| \leq 1/2 \quad (3.9)$$

これらの区間 $[-1/2, 1/2]$ における積分値は確かに C_w に一致することが確認できる。これらの分布を Fig. 3.2 に示す。式(3.7)~(3.9)をそれぞれ式(3.4)に代入することで、矩形、台形、冪関数の $\bar{B}_w(\bar{x})$ に対応する C_{w2}^G はそれぞれ次のように書ける。

$$C_{w2}^G = \begin{cases} C_w^3 & \text{(Rectangular)} \\ C_w(2C_w^2 - 2C_w + 1) & \text{(Trapezoid)} \\ \frac{C_w}{3 - 2C_w} & \text{(Power func.)} \end{cases} \quad (3.10)$$

以上の関数近似に基づく式とは別に、実船の C_{w2}^M に基づき C_w の2次関数で近似した大串による式が存在する¹⁰⁾。しかしながら、1971年当時の船舶と現在の船舶とでは一般的な船型が多少変わっているため、ここでは Fig. 2.2 に示した現存する船舶に合うように係数を調整し、次のように定めた。

$$C_{w2}^G \cong 2.2C_w^2 - 1.8C_w + 0.6 \quad \text{(Proposed)} \quad (3.11)$$

この式でも $C_w = 1$ で $C_{w2}^G = 1$ となるようにしている。

以上の C_{w2}^G の近似式(3.10),(3.11)と154隻の実船の C_{w2}^M ならびに C_{w2}^G の値を比較したものを Fig. 3.3 に示す。図より、実船の C_{w2}^M と C_{w2}^G のうち、ばらつきが小さく C_w との相関が強いのは C_{w2}^M ではなく C_{w2}^G であることが分かる。こ

の理由は、水線面積との相関が強いのは幾何学的に浮面心前後位置 LCF まわりの水線面二次モーメントであり、重心前後位置 LCG が LCF と近い値をとるためである、式(3.10)の近似式のうち、 $C_w < 0.8$ の痩せ型船型については $\bar{B}_w(\bar{x})$ を台形で近似した式の精度が良く、 $C_w > 0.85$ の肥大船型では冪関数で近似した式の精度が良いことが分かる。これに対し、式(3.11)の2次関数近似の式は全域にわたって良好な精度になっている。

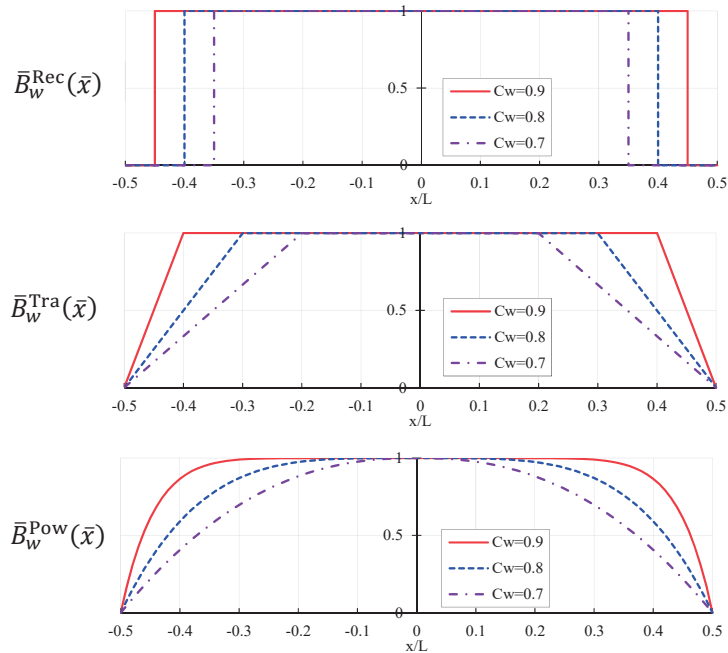


Fig. 3.2 Distribution of \bar{B}_w^{Rec} , \bar{B}_w^{Tra} and \bar{B}_w^{Pow} .

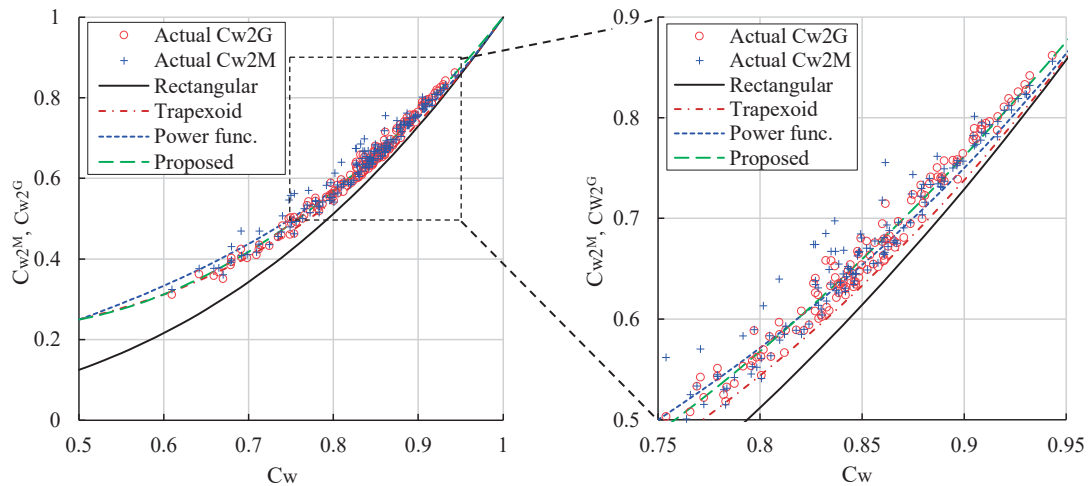


Fig. 3.3 Comparison of C_{w2}^M, C_{w2}^G between the approximated formulae and actual ship's value.

式(3.10)の近似式は船型を仮定して求めた式なので意味がクリアであるが、本研究では痩せ型・肥大船型によらず精度が確保された式(3.11)の C_{w2}^G を提案式として採用する。結局、式(3.11)を式(3.6)に代入し下線部の項を無視した次式を C_{55} の C_w を用いた近似式とする。

$$\frac{C_{55}}{\rho g B L^3} \cong \frac{1}{12} (2.2 C_w^2 - 1.8 C_w + 0.6) \quad (\text{Proposed}) \quad (3.12)$$

式(3.12)と実船の C_{55} の比較を Fig. 3.4 に示す. 図より, 提案式は良好な精度を有していることが分かる.

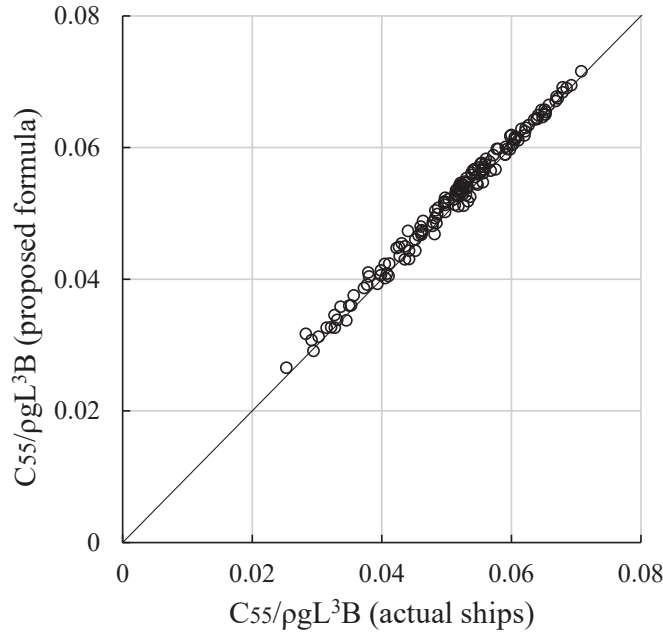


Fig. 3.4 Comparison of $C_{55}/\rho g B L^3$ between the proposed formula and actual ship's value.

4. Roll の復原力係数

4.1 Roll の復原力係数の定義

重心まわりの roll の復原力係数 C_{44} は次のように定義される.

$$\frac{C_{44}}{\rho g B^3 L} := \frac{1}{B^3 L} \iint_{S_H} y \{ y n_z - (z - z_G) n_y \} dS = \int_L \frac{\{ \bar{B}_w(\bar{x}) \}^3}{12} d\bar{x} + \frac{dC_b}{B^2} (z_B - z_G) = \frac{dC_b}{B} \frac{\overline{GM}}{B} \quad (4.1)$$

ここに, メタセンタ高さ \overline{GM} は次のように分解される.

$$\overline{GM} = \overline{BM} + \overline{KB} - \overline{KG} \quad (4.2)$$

ここに, \overline{BM} は浮心上メタセンタ高さ (メタセンタ半径), $\overline{KB}(= d + z_B)$ はキール上浮心高さ, $\overline{KG}(= d + z_G)$ はキール上重心高さであり, いずれも正の値を取る距離である. 参考までに, Fig. 4.1 にメタセンタ M , 重心 G , 浮心 B , キール K の位置関係の例を示す. \overline{BM} は式(4.1)右辺第1項に対応する項であり, オイラーの公式より

$$\overline{BM} = \frac{1}{L B d C_b} \int_L \frac{\{ B_w(x) \}^3}{12} dx \quad (4.3)$$

と表される. また, キール上浮心高さ \overline{KB} は

$$\overline{KB} = d + z_B = d + \frac{1}{L B d C_b} \iiint_{V_H} z dV \quad (4.4)$$

と表される.

さて、 \overline{GM} が既知であれば式(4.1)最右辺より roll の復原力係数が定まるが、本論文では \overline{GM} が定まっていない状況を想定し、 L, B, d, C_b, C_w より \overline{GM} の推定式を作成する。 \overline{GM} は式(4.2)より $\overline{BM}, \overline{KB}, \overline{KG}$ によって定まるが、式(4.3),(4.4)より、 $\overline{BM}, \overline{KB}$ については幾何学的考察より合理的な推定式の開発が可能であるものの、 \overline{KG} は船型とは全く独立な量であり、船型パラメータのみから物理的根拠を伴う推定をすることは困難である。そこで、154隻の実船を用いて以下の2つのアプローチをとることとする。

- I. $\overline{BM}, \overline{KB}$ を幾何学的考察から定め、 \overline{KG} はフィッティングにより定めたのち、式(4.2)より \overline{GM} の式を定義する
- II. \overline{GM} を直接フィッティングにより定める

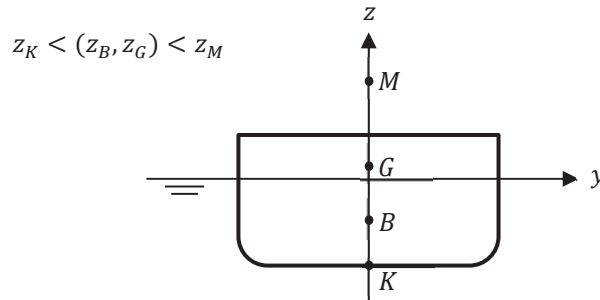


Fig. 4.1 Positional relationship of metacenter M, center of gravity G, center of buoyancy B and keel K.

4.2 浮心高さKBの算式

浮心高さは、水線面積 $\times d$ の体積に対する排水容積の比、すなわち喫水線下の船体形状の瘦せを表す堅柱形係数 $C_{vp}(=C_b/C_w)$ への依存性が強いと考えられる。そこで、 \overline{KB}/d を C_{vp} によって表すことを試みる。

キール上浮心高さ \overline{KB} の推定式はいくつか提案されており、それらを以下に列挙する。

$$\frac{\overline{KB}}{d} = \begin{cases} \frac{5}{6} - \frac{1}{3}C_{vp} & \text{(Morrish's formula)} \\ \frac{1}{1 + C_{vp}} & \text{(Kanda \& Hayase's formula)} \\ 0.827 - \frac{1}{3}C_{vp} & \text{(Okushi's formula)} \end{cases} \quad (4.5)$$

モーリッシュの式は、排水容積が等しくなるよう水面下の断面形状を二直線で近似して導出されたもの¹¹⁾で、一方神田・早瀬の式は冪関数で近似して導出されたものである¹²⁾。大串の式は、1948年当時の船舶に対するフィッティングにより決定されている¹³⁾。以上に対し、本研究ではFig. 2.2に示した近年の船舶に合うように決定した次式を提案式とする。

$$\frac{\overline{KB}}{d} \cong 0.49C_{vp}^{-0.4} \quad \text{(Proposed)} \quad (4.6)$$

横軸を C_{vp} にとって算式と実船の \overline{KB}/d の値を比較したものをFig. 4.2に示す。提案式以外の推定式は、浮心高さを高めに見積もっている。これは、当時の船舶は現在のように大きなバルバスバウを持たなかったことが原因と推察される。また、 $C_{vp} = 1$ に近いほど水面下の断面形状は矩形に近づき、 $\overline{KB} = d/2$ となるであろうことが想定され、モーリッシュの式と神田・早瀬の式もそのようになっているが、実際の船舶では大きなバルバスバウを持つために \overline{KB} が $d/2$ を下回るものが存在する。バルバスバウの大きさに関するパラメータを考慮すれば推定精度はより向上するものと考えられるが、Fig. 4.2からもわかるように \overline{KB} のばらつきは高々 $\pm 0.05d$ 程度であり、それが \overline{GM} に及ぼす影響は軽微である。簡便さの観点から、 $\overline{KB} = d/2$ としてしまっても \overline{GM} を推定する上で大きな問題は生じないことを付言しておく。

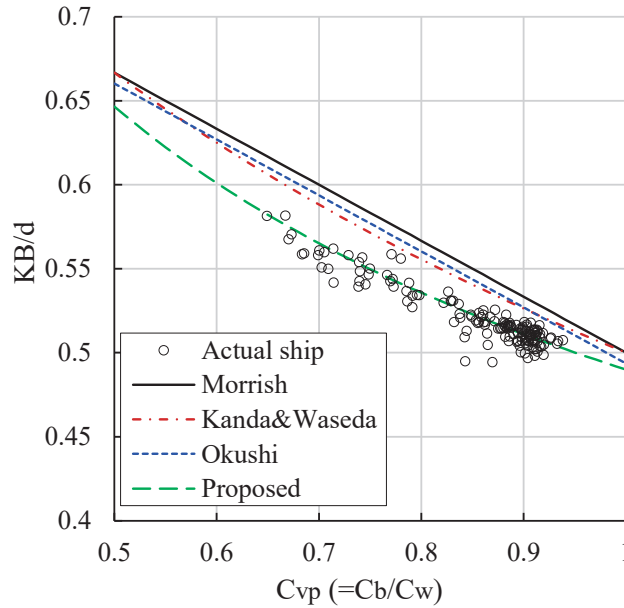


Fig. 4.2 Comparison of \overline{KB}/d between simplified formulae and actual ship's value.

4.3 浮心上メタセンタ高さ BM の算式

浮心上メタセンタ高さ \overline{BM} は、水線面積の x 軸回りの二次モーメントによって表されるため、 C_w に強く依存するものと考えられる。

まず、次の x 軸まわりの水線面二次モーメント係数 C_{w2}^x を定義する。

$$C_{w2}^x := \frac{12}{LB^3} \iint_{A_w} y^2 dx dy = \int_L \{\overline{B}_w(\bar{x})\}^3 d\bar{x} = 12 \frac{\overline{BM}}{B} \frac{dC_b}{B} \quad (4.7)$$

Pitch の復原力係数で行った検討と同様に、水線幅を Fig. 3.2 の矩形 $\overline{B}_w^{Rec}(\bar{x})$ 、台形 $\overline{B}_w^{Tra}(\bar{x})$ 、冪関数 $\overline{B}_w^{Pow}(\bar{x})$ で仮定した場合、 C_{w2}^x は C_w を用いてそれぞれ次のように表される。

$$C_{w2}^x = \begin{cases} C_w & \text{(Rectangular)} \\ \frac{3C_w - 1}{2} & \text{(Trapezoid)} \\ \frac{6C_w^3}{(2C_w + 1)(C_w + 1)} & \text{(Power func.)} \end{cases} \quad (4.8)$$

また、過去に作成された C_{w2}^x の推定式としては、大串によって 1971 年に発表された次式が存在する¹⁰⁾。

$$C_{w2}^x = 12(0.106C_w - 0.0286) \quad \text{(Okushi's formula)} \quad (4.9)$$

以上に対し、本研究では Fig. 2.2 に示した現存の船舶に合うように決定した次式を提案式とする。

$$C_{w2}^x \cong C_w^{1.7} \quad \text{(Proposed)} \quad (4.10)$$

$$\therefore \overline{BM} \cong \frac{B^2}{dC_b} \frac{C_w^{1.7}}{12} \quad \text{(Proposed)} \quad (4.11)$$

本式は $C_w = 0, 1$ のときそれぞれ $C_{w2}^x = 0, 1$ となるため上下限において妥当性を持つ。

以上に示した算式(4.8)~(4.10)と実船の C_{w2}^x の値を比較したものを Fig. 4.3 に示す。大串の式は $C_w = 1$ に近い肥大船において精度が低下しているが、これは大串がフィッティングの対象とした船舶で $C_w > 0.85$ のものが存在していなかったためである。形状近似による算式に関しては、台形近似は痩せ船型で精度が良く、冪関数近似は肥大船型で精度が良いことが確認できる。これらに対し、提案式は形状近似に基づいていないが、 C_w に依らず一定の精度を有しており、式も単純である。

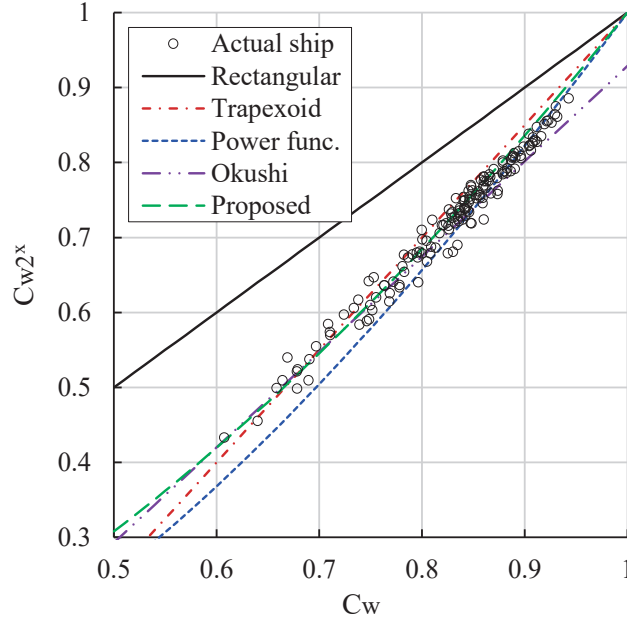


Fig. 4.3 Comparison of C_w^x between simplified formulae and actual ship's value.

4.4 重心高さ \overline{KG} の算式

前節では重心高さ \overline{KG} が既知の場合の \overline{GM} の推定式を示したが、 \overline{KG} の推定式についても示しておく。ただし、 \overline{KG} は船型とは全く独立な量であるため、船型パラメータのみから物理的根拠を伴う合理的な推定をすることは困難である。そこで、154 隻の実船について \overline{KG} や \overline{GM} と他のパラメータとの相関を調べ、フィッティングにより推定式を定めることにする。

まず、 \overline{KG} の上下限は次式で与えられる。

$$0 < \overline{KG} < \overline{KM} \quad (4.12)$$

ここで、キール上メタセンタ高さ $\overline{KM} (= \overline{BM} + \overline{KB})$ の値は式(4.6),(4.11)より

$$\overline{KM} \cong \frac{B^2}{dC_b} \frac{C_w^{1.7}}{12} + 0.49dC_{vp}^{-0.4} \quad (4.13)$$

であるが、箱船の場合は

$$\frac{\overline{KM}}{B} = \frac{1}{12} \frac{B}{d} + \frac{1}{2} \frac{d}{B} \quad (C_b = 1) \quad (4.14)$$

と d/B のみの関数となる。以上を踏まえ、154 隻の実船の重心およびメタセンタの高さの関係を調べるため、 \overline{KM}/B および \overline{KG}/B を、 d/B を横軸にとってプロットした図を Fig. 4.4 に示す。同図には箱船の \overline{KM}/B の式(4.14)も示しており、 \overline{KG}/B のプロットには C_b の値に応じて色分けをしている。Fig. 4.4 は縦軸がベースラインで、 \overline{KM}/B および \overline{KG}/B のプロットがそのままメタセンタ、重心の高さになる (Fig. 4.5 参照)。Fig. 4.4 より、 \overline{KM}/B の値は d/B によって概ね式(4.14)に従う傾向にあり、船種や積付条件によらず 0.4~0.7 といった比較的限定的な範囲をとる。一方で \overline{KG}/B は \overline{KM}/B によって上限は抑えられるものの、 \overline{KG} と \overline{KM} 間に直接的な相関は見られない。しかし、 $\overline{OG}/B (= \overline{KG}/B - d/B)$ が大きい (重心が喫水より高い) ほど C_b が小さく、その逆だと C_b が大きくなるという傾向が確認できる。

そこで \overline{KG}/B を d/B および C_b の関数とみなし、関数形や係数は実船の傾向と合うように決め、 \overline{KG}/B の推定式を次のように決定した。

$$\frac{\overline{KG}}{B} \cong 0.27 \frac{d}{BC_b^{1.6}} + 0.176 \quad (\text{Proposed}) \quad (4.15)$$

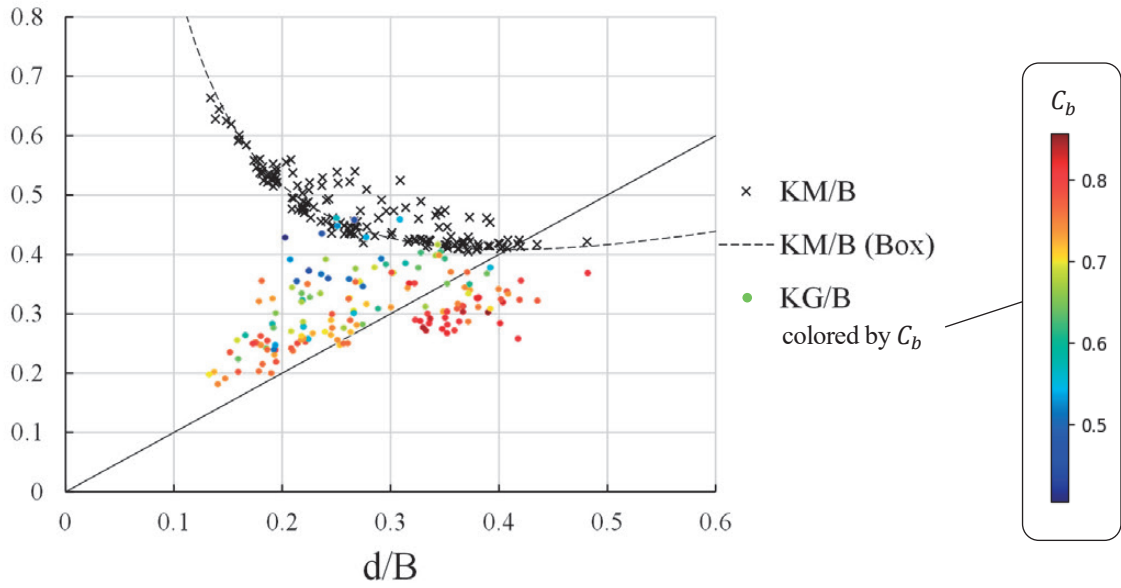


Fig. 4.4 \overline{KM}/B and \overline{KG}/B of real 154 ships against d/B . \overline{KG}/B -plots are colored by C_b .

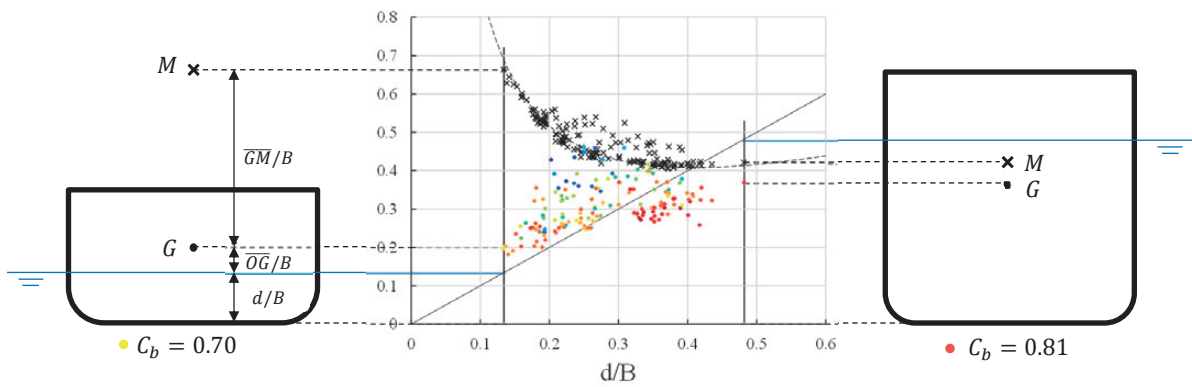


Fig. 4.5 How to read the Fig. 4.4.

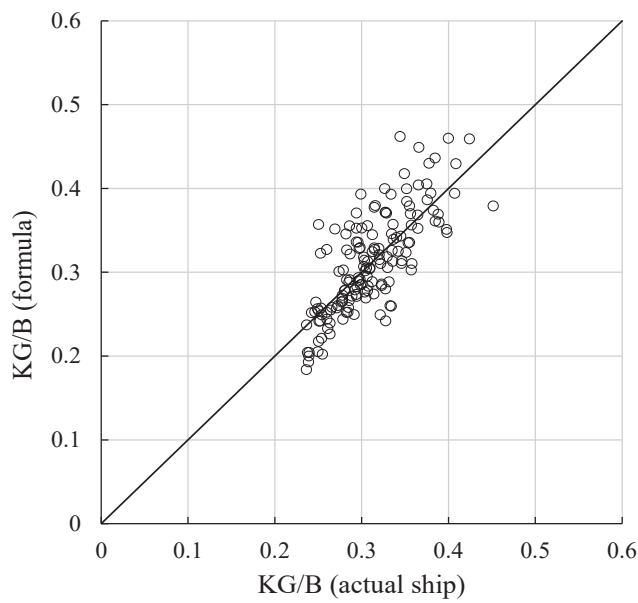


Fig. 4.6 Comparison of \overline{KG}/B between proposed formula and actual ship's value.

Fig. 4.6 に実船と提案式(4.15)の比較を示すとおり，実船の \overline{KG} と相関はみられるものの，提案式は高精度とは言えない．式(4.15)には積荷の重心高さを表す直接的なパラメータが含まれていないため，一般的な重心高さから外れるような積載状態である場合（例えば嵩密度の大きい鉱石積やスチールコイル積等の高比重貨物積載状態，特定の1ホールドに重量を集中させるような偏積の状態，コンテナ運搬船の積付状態等）に対して精度の保証がされないことに注意が必要である．なお， \overline{KG} と型深さ D との相関についても検証したが， D は積載状態を直接説明する変数ではないため， \overline{KG} の説明変数になるほどの相関は見られなかった．

4.5 横メタセンタ高さ GM の算式 (BM+KB-KG を基にした場合)

以上の \overline{KB} , \overline{BM} , \overline{KG} の算式を踏まえ，重心まわりの roll の復原力係数 C_{44} ならびにメタセンタ高さ \overline{GM} の提案算式を次式とする．

$$\begin{aligned}\overline{GM} &= \overline{BM} + \overline{KB} - \overline{KG} \\ &\cong \frac{B^2}{dC_b} \frac{C_w^{1.7}}{12} + 0.49dC_{vp}^{-0.4} - (0.27dC_b^{-1.6} + 0.176B) \quad (\text{Proposed \#1})\end{aligned}\quad (4.16)$$

154 隻について，本算式による \overline{GM}/B の推定値と実際の \overline{GM}/B とを比較したものを Fig. 4.7 左に示す．また，式(4.16)の右辺第3項に正しい \overline{KG} の値を用いた場合の推定値と実際の値を比較したものを Fig. 4.7 右に示す．両図には，精度の定量化として R^2 値 ($:= 1 - \Sigma_i (y_i - x_i)^2 / \Sigma_i (y_i - \bar{y})^2$ ， y_i は実際の値， x_i は推定値， \bar{y} は y_i の平均) も示している．Fig. 4.7 より \overline{KG} の推定式が \overline{GM} の精度のボトルネックであり， \overline{KG} が既知である場合は，提案算式より合理的に \overline{GM} を推定することができることが分かる．

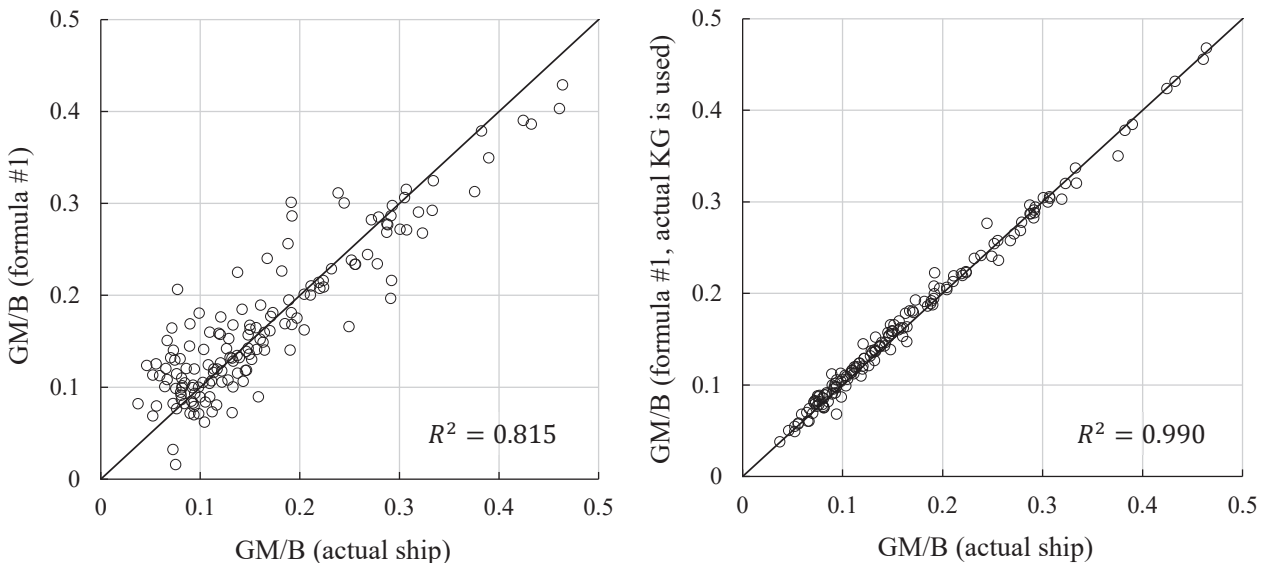


Fig. 4.7 Comparison of \overline{GM}/B between proposed formula (left: Eq. (4.16), right: Eq. (4.16) in which actual \overline{KG} is used) and actual ship's value.

4.6 横メタセンタ高さ GM の算式 (フィッティングにより定める場合)

前節より， \overline{KG} が既知である場合は式(4.16)を用いることで \overline{GM} の合理的な推定が可能であるが， \overline{KG} が未知な場合はフィッティングに基づく \overline{KG} の推定式に依らざるを得ず， \overline{KG} が \overline{GM} の精度のボトルネックになることが分かった．式の推定精度は最も推定精度の低い項で決まるため，本節では \overline{KG} が未知な場合を想定し， \overline{GM} を直接フィッティングすることで式(4.16)よりも簡単な形の \overline{GM} の推定式を求めることにする．

154隻の実船において、 \overline{GM}/B と他の船型パラメータとの相関を調べたところ、 $d/B/C_w$ との相関が比較的強いことが確認された。Fig. 4.8に、 \overline{GM}/B の $d/B/C_w$ に対する傾向および近似曲線を示す。Fig. 4.8の近似曲線をもとに、次式を \overline{GM} の第2の提案式とする。

$$\overline{GM} \cong 0.092 \frac{B^2 C_w}{d} - 0.13B \quad (\text{Proposed \#2}) \quad (4.17)$$

Fig. 4.9に実際の \overline{GM}/B と式(4.17)との比較および R^2 値を示す。Fig. 4.9より、式(4.17)の精度は前節の式(4.16) (Fig. 4.7左) とほとんど変わらないことがわかる。

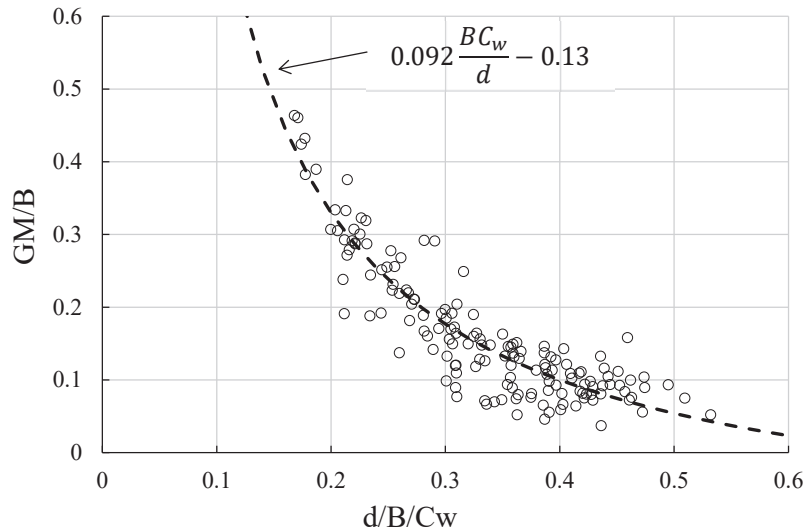


Fig. 4.8 Tendency of \overline{GM}/B against $d/B/C_w$ and approximated curve.

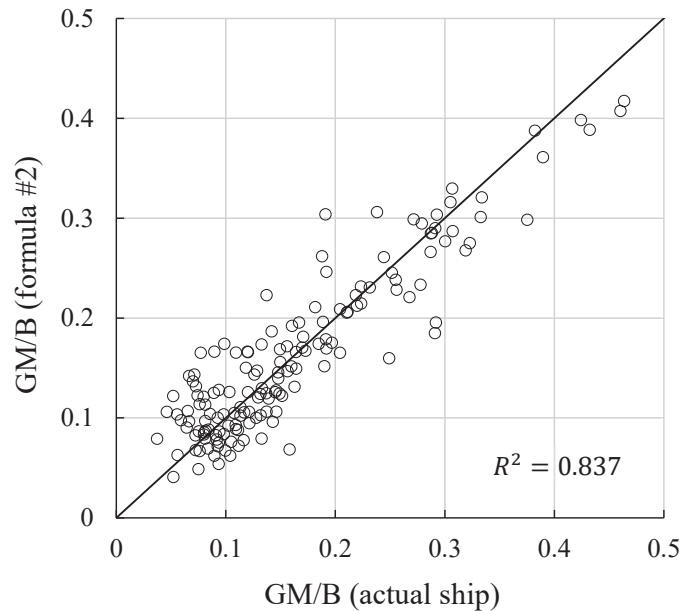


Fig. 4.9 Comparison of \overline{GM}/B between proposed formula (Eq.(4.17)) and actual ship's value.

5. 結言

本論文では、船種や積み付け条件によらず適用可能な波浪中船体応答の簡易推定式の開発を目的とし、基本的な船型パラメータを用いた Pitch, roll の復原力係数の簡易算式を開発した。Pitch, roll の復原力係数はそれぞれ縦メタセンタ高さ \overline{GM}_L 、横メタセンタ高さ \overline{GM} から求まる量であるが、これらの値は未知とし、 L, B, d, C_b, C_w, x_f から求めることのできる近似式を示した。以下に、得られた主要な結果を示す。

1. Pitch の復原力係数 C_{55} （重心回り）のうち、浮心高さと重心高さの差の影響は高々2%程度であること、重心回りと midship 回りとで最大 10%程度の差が生じることが確認された。
2. 水線幅の船長方向分布 $B_w(x)$ を水線面積係数 C_w によって一意に定まる形状に近似することで、水線面二次モーメントを C_w を用いた式で示した。その結果、瘦せ型船型については $B_w(x)$ を台形分布で近似、肥大船型については冪関数で近似した場合に実船の C_{55} との一致度がよいことが確認された。
3. 以上をふまえて、瘦せ型船型、肥大船型のどちらの範囲でも良好な精度を有するような、水線面積係数 C_w を用いた pitch の復原力係数 C_{55} の近似式を示した（式(3.12)）。
4. Roll の復原力係数 C_{44} は、横メタセンタ高さ \overline{GM} によって定まる。 \overline{GM} は $\overline{GM} = \overline{BM} + \overline{KB} - \overline{KG}$ と分解できるので、右辺の浮心高さ \overline{KB} 、横メタセンタ半径 \overline{BM} および重心高さ \overline{KG} の近似式を示すことで \overline{GM} の算式を求めるアプローチをとった。
5. 浮心高さ \overline{KB} は喫水および縦柱形係数 C_{vp} によって近似し、良好な精度を有する簡易算式を得た（式(4.6)）。
6. 横メタセンタ半径 \overline{BM} は C_{55} と同じく水線幅分布をいくつかの関数で近似した場合の式を示し、それを踏まえた C_w の冪関数で与えることで、良好な精度を有する簡易算式を得た（式(4.11)）。
7. 重心高さ \overline{KG} は船体形状からは推定できない量であるが、実際の商船について \overline{KG} と他の船型パラメータとの相関を調べ、 $d/B, C_b$ を用いた推定式を示した（式(4.15)）。同式は $\overline{KB}, \overline{BM}$ と比べ精度が高くないことが確認された。特に、重心高さが典型的な積載状態から異なる状態、例えば嵩密度の大きい鉱石積やスチールコイル積等の高比重貨物積載状態、特定の 1 ホールドに重量を集中させるような偏積の状態、コンテナ運搬船の積付状態等に対する適用に対する精度が保証されないことに注意が必要である。
8. 以上によって得た $\overline{GM}(= \overline{BM} + \overline{KB} - \overline{KG})$ の算式（式(4.16)）は、船型情報からは得られない重心高さ \overline{KG} が精度のボトルネックとなることが確認された。 \overline{KG} が既知の場合には、同算式は非常に有効である。 \overline{KG} の合理的な推定には、船種や積付状態の情報を与えるパラメータを含んだ推定式が必要と考えられる。
9. 以上に加え、 \overline{GM} を直接フィッティングすることによって求めた推定式についても示した（式(4.17)）。同算式は $\overline{BM}, \overline{KB}, \overline{KG}$ の算式から求めた \overline{GM} の推定式（式(4.16)）と同程度の精度を有することが確認されたため、 \overline{KG} の情報がない場合は同算式を用いた方が簡便である。

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フェローの深沢塔一博士、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) Bales, N. K. OPTIMIZING THE SEAKEEPING PERFORMANCE OF DESTROYER-TYPE HULLS, 13th Symposium on Naval Hydrodynamics, ONR (1981)
- 3) Hearn, G. E.: Practical Seakeeping Design Tools for Monohulls, Advanced Design for Ships & Offshore Floating

Structures, University of Newcastle Upon Tyne (1992)

- 4) Sayli, A., Alkan, A. D., and Uysal, A. O.: Automatic elimination of ship design parameters based on data analysis for seakeeping performance, *Brodogradnja*, Vol.65-4 (2014), pp.15-33
- 5) Jensen, J. and Mansour, A.: Estimation of Ship Long-term Wave-induced Bending Moment using Closed-Form Expressions, *International Journal of Maritime Engineering* (2002), pp.41-55
- 6) Jensen, J. J., Mansour, A. E., and Olsen, A. S.: Estimation of ship motions using closed-form expressions, *Ocean Engineering*, Vol.31-1 (2004), pp.61-85
- 7) 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)
- 8) 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)
- 9) Sadaoki Matsui: Development of mathematical hull-form of which principal parameters can be varied methodically - 2nd report: Introduction of hull-form parameter related to 2nd moment of water plane area and longitudinal asymmetry -, *Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, Vol.32 (2021), pp.21-33
- 10) 大串雅信: 理論船舶工学(上巻), 海文堂出版 (1971)
- 11) S.W.F.Morrish: Approximate Rule for the Vertical Position of the Center of Buoyancy, *Transactions of the Institution of Naval Architects* (1892)
- 12) 神田欽一: 船舶の水線面積係数及び方形肥瘠係数の吃水に対する変化と横 Metacenter KM を求める一つの方法, *造船協會會報*, Vol.53 (1934), pp.171-190
- 13) 大串雅信: 浮心の高さとその近似式について, *造船協會雜纂*, Vol.273 (1948), pp.1-3