学術刊行物　ISSN 0919-9985

日本航海学会誌 NAVIGATION

21世紀の新しい針路を求めて

「船の安定性理論」に関する応用例題

堀　　勉

An Advanced Example on Ship's Stability Theorem

— Solution for Stable Attitude of an Inclined Ship —

Tsutomu HORI

令和３年
10月
第218号

解説・展望

「船の安定性理論」に関する応用例題
― 横傾斜状態での安定姿勢の求解 ―

堀　　勉

An Advanced Example on Ship's Stability Theorem
― Solution for Stable Attitude of an Inclined Ship ―

Tsutomu HORI

キーワード： *船，安定性理論，傾斜状態，安定姿勢，応用例題*

1．まえがき

船の安定性理論に関する例題として，前報(1)では，長方形断面（任意の材質と任意の幅）を有する柱状船が，直立状態（甲板が水平な姿勢）で安定に浮く条件について，浮心・重心・メタセンターの位置関係の観点から，その解法を紹介した．

一方，上記の条件を満たさない場合，船がどのような状態で浮くのか？も，力学的には興味あるところである．

この問題については，防衛大学校の五十嵐らが，正方形断面(2)と長方形断面(3)の角材の姿勢について，その重心と浮心に関する幾何学的考察から，詳細に解明されている．

本稿では，前報(1)の延長線上の応用例題として，長方形断面の柱状船の，傾斜状態での安定姿勢を求解する手法を，解説させて頂く次第である．

2．設定変数としての材質 α と幅 β

本稿では，設定変数として，前報(1)と同様に，柱状船の比重量 γ_t（下添字の t は，木材の $\underline{t}imber$ の頭文字）と水の比重量 γ_w（下添字の w は，水の $\underline{W}ater$ の頭文字）の 比を α（以下，**材質**と呼ぶ）として，断面の幅 βh と深さ h の比（アスペクト比）を β（以下，**幅**と呼ぶ）として，

$$\left.\begin{aligned} &\alpha \equiv \frac{\gamma_t}{\gamma_w} \quad (\text{但し，} 0<\alpha \leq 1) \\ &\beta \equiv \frac{\text{幅}}{\text{深さ}} = \frac{\beta h}{h} \quad (\text{但し，} \beta>0) \end{aligned}\right\} \cdots\cdots(1)$$

のように，定義したものである． ここに，γ_w が真水の場合，α は柱状船の比重を表わす．

3．直立した
長方形断面の柱状船の安定条件

前報(1)では，直立状態（甲板が水平な姿勢）で 安定に浮く条件は，(1)式の α と β の関係として，

$$\beta^2 - 6\alpha\,(1-\alpha) > 0 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2)$$

のように，書くことができるから，

● 材質 α を固定した場合の，幅 β に対する安定条件は，

$$\left.\begin{aligned} &\beta > \sqrt{6\alpha\,(1-\alpha)} \\ &\quad \text{例えば，} \alpha = \frac{1}{2} \rightarrow \beta >= \frac{\sqrt{6}}{2} \fallingdotseq 1.225 \end{aligned}\right\} (3)$$

であり，

● 幅 β を固定した場合の，材質 α に対する安定条件は，

ⅰ）幅が広い $\left(\beta > \dfrac{\sqrt{6}}{2}\right)$ 場合は，

材質 α に依らず，浮体は常に安定し，

ⅱ）幅が狭い $\left(\beta < \dfrac{\sqrt{6}}{2}\right)$ 場合は，

$$\left.\begin{array}{l} 0 < \alpha < \dfrac{1}{2} - \kappa \quad \text{（軽い材質）} \\ \dfrac{1}{2} + \kappa < \alpha \le 1 \quad \text{（重い材質）} \\ \text{但し，}\left\{\begin{array}{l} \kappa \equiv \dfrac{\sqrt{3(3-2\beta^2)}}{6} \\ \text{例えば，} \beta = 1 \rightarrow \kappa = \dfrac{\sqrt{3}}{6} \fallingdotseq 0.289 \end{array}\right. \end{array}\right\} \quad (4)$$

のように，軽い材質と重い材質で，安定することを，解説した(1).

4．横傾斜した 長方形断面の柱状船の安定姿勢

本章では，前章で述べた，直立状態での安定条件を満たさない場合，どんな傾斜状態で安定するのか？，その姿勢（傾斜角）を求めよう．

図 1 に示すように，深さ h，幅 βh の長方形断面を有する長さ L の柱状船（均質な材質で，比重量 γ_t の角材）が，直立状態から，右舷側に θ だけ横傾斜した状態で，安定して浮いている場合を想定する．

まず，吃水を定めるために，傾斜状態での水面下の横断面積 A_w を，求めておこう．

その形状は，高さ βh の台形であるから，直立時の吃水を d とすれば，上底と下底は，左舷と右舷の浸水長の増減 $\dfrac{\beta h}{2}\tan\theta$ を考慮して，

$$A_w = \frac{1}{2}\left\{(d - \frac{\beta h}{2}\tan\theta) + (d + \frac{\beta h}{2}\tan\theta)\right\}\cdot \beta h$$
$$= \beta h d \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5)$$

のように求まり，直立時の水面下形状である長方形の面積に等しいことが分かる．

柱状船の重量 W と 浮力 F_B は，それぞれ，

$$\left.\begin{array}{l} W = \gamma_t V_t = \gamma_t \cdot \beta h \cdot h \cdot L \\ F_B = \gamma_w V_w = \gamma_w A_w L = \gamma_w \cdot \beta h d \cdot L \end{array}\right\} \cdots (6)$$

のように求められる． 前者の重量 W は，柱状船の比重量 γ_t と全体積 V_t の積として，後者の浮力 F_B は，*Archimedes* の原理により，水の比重量 γ_w と排水体積 V_w の積として得られている． V_w は，(5)式の横断面積 A_w と船長 L の積で得られる．

浮体は，重量と浮力が平衡した状態

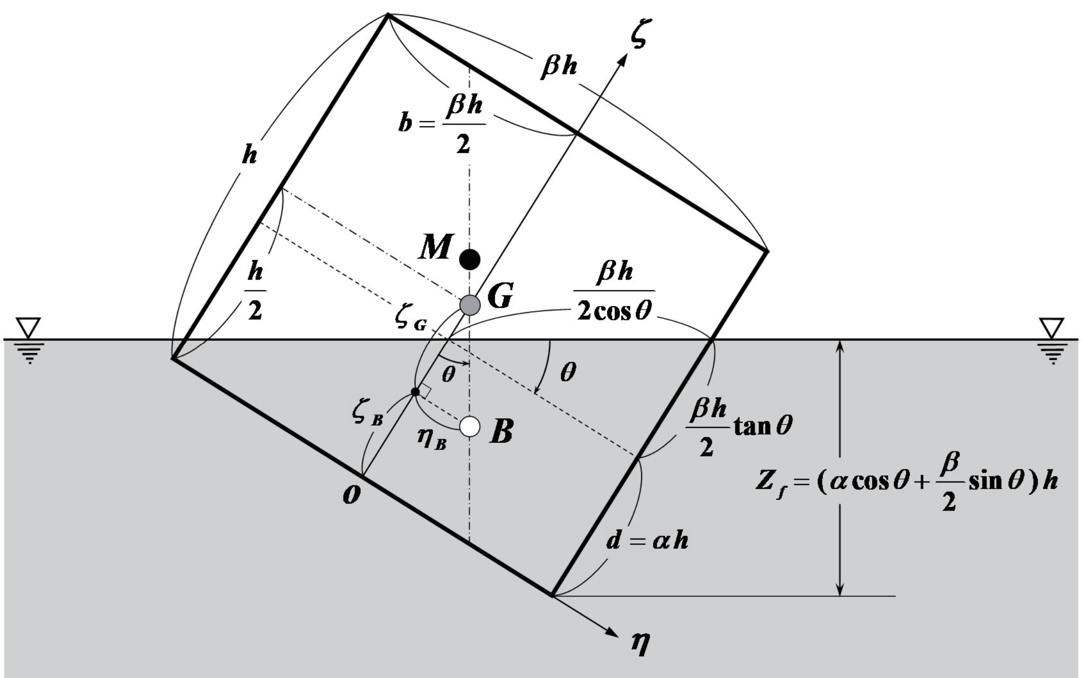

図 1　横傾斜状態で安定している長方形断面を有する柱状船（長さ L）

$$W = F_B \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (7)$$

で安定するから，(6)式の W と F_B を等置すれば，

$$\gamma_t \cdot \beta h \cdot h \cdot L = \gamma_w \cdot \beta h \cdot d \cdot L \quad \cdots\cdots\cdots (8)$$

となる． これを解くことにより，直立時の吃水 d を，

$$d = \frac{\gamma_t}{\gamma_w} h = \alpha h \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (9)$$

のように，深さ h の α 倍として，決めることができる．

本論では，問題を簡単化するために，横傾斜しても，図 1 のように，全幅に亙って，甲板（長方形断面の上辺）は水面上に，船底（長方形の下辺）は水面下にあり，(5)式で計算したように，水面下の横断面形状が台形である場合について，解説する．

その仮定は，横傾斜による浸水長の増加分が，直立時の乾舷 $h-d$ や吃水 d を超えない条件として，

$$\frac{\beta h}{2}\tan\theta \le \begin{cases} h-d = (1-\alpha)h & (\alpha \ge \frac{1}{2} \text{ の場合}) \\ d = \alpha h & (\alpha < \frac{1}{2} \text{ の場合}) \end{cases} \quad \cdots\cdots (10)$$

を課すことになるから，傾斜角 θ は，

$$\tan\theta \le \begin{cases} \dfrac{2(1-\alpha)}{\beta} & (\alpha \ge \frac{1}{2} \text{ の場合}) \\ \dfrac{2\alpha}{\beta} & (\alpha < \frac{1}{2} \text{ の場合}) \end{cases} \quad \cdots\cdots (11)$$

の範囲内に収まる, 小傾斜角に限定する．例えば，

$$\left.\begin{array}{l} \beta = 1,\ \alpha = \dfrac{1}{2} \\ \rightarrow \tan\theta \le 1 \quad \therefore \theta \le \dfrac{\pi}{4} \end{array}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots (12)$$

の設定範囲を意味する．

θ だけ横傾斜したときの浮心位置 $B(\eta_B, \zeta_B)$ は，静水圧の圧力中心として，堀[(4),(5)]によって求められている． 図 1 に示すように，船底中央に原点 o を取り，浮体に固定して傾斜した $o-\eta\zeta$ 座標系で，直立時の吃水を d，半幅を b としたとき，

$$\left.\begin{array}{l} \eta_B = \dfrac{b^2}{3d}\tan\theta \\ \zeta_B = \dfrac{d}{2} + \dfrac{b^2}{6d}\tan^2\theta \end{array}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (13)$$

のように，得られている[(4)]． この結果は，附録に示すように，横傾斜時の水面下の横断面形状である台形の図心を，面積モーメントから幾何学的に求めた，(A-5)式の結果と一致しており，正しく，周知の浮心位置と合致するものである．

ここに，(13)式において，d と b を，それぞれ，

$$\left.\begin{array}{l} d = \alpha h \\ b = \dfrac{1}{2}\beta h \end{array}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (14)$$

に置き換えることにより，η_B, ζ_B は，

$$\left.\begin{array}{l} \eta_B = \dfrac{\beta^2 \tan\theta}{12\alpha} h \\ \zeta_B = \dfrac{\alpha h}{2} + \dfrac{\beta^2 \tan^2\theta}{24\alpha} h \end{array}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots (15)$$

のように書くことができる． 重心 G は，均質な材質を仮定しているから，傾斜後も長方形断面の図心（＝中心）に位置し，ζ_B と ζ_G の和が $\dfrac{h}{2}$ になることを用いれば，図 1 の ζ_G は，

$$\begin{aligned} \zeta_G &= \frac{h}{2} - \zeta_B \\ &= \frac{1-\alpha}{2} h - \frac{\beta^2 \tan^2\theta}{24\alpha} h \\ &= \frac{12\alpha(1-\alpha) - \beta^2\tan^2\theta}{24\alpha} h \quad \cdots\cdots\cdots (16) \end{aligned}$$

のように，求められる．

ここに，図 1 の傾斜状態を保持して浮くには，まず，浮心 B と重心 G が，同一鉛直線上に位置する必要があるから，η_B と ζ_G の間に，

$$\left.\begin{array}{l} \dfrac{\eta_B}{\zeta_G} = \tan\theta \\ \therefore \eta_B = \zeta_G \tan\theta \end{array}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (17)$$

の関係を要求される． η_B, ζ_G に，(15), (16)式を用いることにより，

$$\beta^2 \tan^2\theta = 2\left\{6\alpha(1-\alpha) - \beta^2\right\} \quad \cdots\cdots\cdots (18)$$

の関係式が得られる．これにより，所定の材質αと幅βに対して，傾斜姿勢θの正接は，

$$\tan\theta = \frac{\sqrt{2\left\{6\alpha(1-\alpha)-\beta^2\right\}}}{\beta} \quad \cdots\cdots\cdots(19)$$

によって求められ，右辺の根号内が正になるとき，傾斜角θの解が存在することになる． 結果は，五十嵐ら[(3)]の (1-h) 式や (4-f) 式に一致する． これは，分子の中括弧内が正値を取ること

$$6\alpha(1-\alpha)-\beta^2 > 0 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(20)$$

を要求するものであるが，3 章(2)式の直立状態で安定する条件と，不等号が逆の条件式となっており，本章での解析の正当性を，確認できる．

次に，上述の傾斜姿勢θが，安定であるか？を，検討するために，メタセンターMの位置決めをしておく必要がある．

メタセンター半径$\overline{BM}$は，造船学の基本公式[(6)]

$$\overline{BM} = \frac{I_{CL}}{V_w} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(21)$$

を使って，算定できる． I_{CL}は，水線面の *Center Line* に関する 2 次モーメント，V_wは 排水体積を意味する．

分子のI_{CL}は，傾斜時の水線面が，長さL，幅$\dfrac{\beta h}{\cos\theta}$の長方形であるから，

$$I_{CL} = \frac{1}{12}\left(\frac{\beta h}{\cos\theta}\right)^3 L \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(22)$$

となる． 分母のV_wは，(5)式のA_wに，(9)式のdを用いることにより，

$$V_w = A_w L = \beta h d\cdot L = \alpha\beta h^2 L \quad \cdots\cdots\cdots(23)$$

のように計算できる．

得られたI_{CL}とV_wの結果を，(21)式に用いることにより， $\overline{BM}$は，

$$\overline{BM} = \frac{\frac{1}{12}\left(\frac{\beta h}{\cos\theta}\right)^3 L}{\alpha\beta h^2 L} = \frac{\beta^2}{12\alpha\cos^3\theta}h \quad \cdots\cdots\cdots(24)$$

のように，算定できる．

続いて，傾斜状態での$\overline{BG}$は，図 1 により，(15)式のη_Bとの三角比を用いて，

$$\overline{BG} = \frac{\eta_B}{\sin\theta} = \frac{\beta^2}{12\alpha\cos\theta}h = \overline{BM}\cos^2\theta \quad \cdots(25)$$

のように求まるから，メタセンター高さ$\overline{GM}$は，(24)式から(25)式を減ずることにより，

$$\begin{aligned}\overline{GM} &= \overline{BM} - \overline{BG}\\ &= \frac{\beta^2(1-\cos^2\theta)}{12\alpha\cos^3\theta}h = \frac{\beta^2\sin^2\theta}{12\alpha\cos^3\theta}h\\ &= \overline{BM}\sin^2\theta \geq 0 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(26)\end{aligned}$$

のように，定めることができる．

この結果から， $\overline{GM}$は，傾斜角θや，材質α，幅βに依らず，正値を取って，メタセンターMは常に重心Gより上方に位置することになるから，(19)式で決められる傾斜姿勢θは，安定な状態であることが分かる． 只，計算されたθが，仮定した(11)式の小傾斜角の範囲内であることを，確認する必要がある．

例えば，以下の状態では，(19), (25), (26)式により，

$$\left.\begin{aligned}&\beta=1,\ \alpha=\frac{1}{2} \to \theta = \frac{\pi}{4}\\ &\therefore\ \overline{GM} = \overline{BG} = \frac{\sqrt{2}}{6}h\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots\cdots(27)$$

となる． これは，正方形断面の対角線が，水線と一致した状態で浮いている場合に相当し，傾斜角θも(12)式の設定範囲内であり， $\overline{BG}$と$\overline{GM}$も，多くの教科書の例題[(7),(8),(9)]に書いてある結果と一致している．

また，図 1 は，

$$\left.\begin{aligned}&\alpha=0.4,\ \beta=1.1 \to \theta = 31.7^\circ\\ &\therefore\ \overline{GM} = 0.113h,\ \overline{BG} = 0.296h\\ &\quad Z_f = 0.629h\end{aligned}\right\} \cdots(28)$$

の状態を示したものであり，傾斜姿勢θや，B, G, Mの位置も，正確に描画している．

(28)式中のZ_fは，右舷側の船底での水深で，

$$\begin{aligned}Z_f &= (d + \frac{\beta h}{2}\tan\theta)\cos\theta\\ &= (\alpha\cos\theta + \frac{\beta}{2}\sin\theta)h \quad \cdots\cdots\cdots(29)\end{aligned}$$

によって，計算したものである．

5. 安定姿勢 θ の計算結果

本章では，横傾斜して安定する姿勢 θ の，幅 β や材質 α に対する依存性を把握する．

図 2 は，幅 β に対する依存性（α を固定）を，図 3 は，材質 α に対する依存性（β を固定）を示すために，(19)式の傾斜角 θ を *Excel* で計算した結果である．

$\theta = 0$ は, 甲板が水平な状態で安定する (2)式の不等号の限界点であり, 図 2 の場合の β は(3)式により，図 3 の α は(4)式によって求めた．

図 2, 図 3 とも，材質の α と $1-\alpha$ の傾斜角 θ が等しく得られているのは，(19)式の根号内の因数からも分かる通りである．

なお，図 2 の $\alpha = 0.5$ に対する $\beta < 1$, $\alpha = 0.4$, 0.6 に対する $\beta < 1.06$ ， $\alpha = 0.3$, 0.7 に対する $\beta < 1.04$ の場合, 置点できていないのは, (11)式の小傾斜角の範囲を超えているためである．

同様な事情で，図 3 についても，$\beta = 1.10$, 1.15, 1.20 の 3 状態について置点しているのは，幅 $\beta > 1.06$ の場合，材質 α の全範囲に亙って，(11)式の小傾斜角の範囲内に収まるからである．

本論で計算できていない, 大傾斜角 (甲板の一部が水面に浸かったり, 船底の一部が空中に浮いたり) の場合も含めた全ての傾斜状態について，五十嵐ら[(2),(3)]が詳細に解析し，α と β に対する依存性を，マップや表で整理し，実験でも検証して，完璧に解明されているので，興味のある方は，是非ご一読をお願いしたい．

図 4 は，材質を $\alpha = 0.5$ に固定して，幅 $\beta = 1.0$, 1.1, 1.2, 1.3 のときの 4 状態の姿勢を，B, G, M の位置も含めて，図示したもので，幅 β が広くなるに連れて，傾斜角 θ が小さくなる様子が分かる．

図 5 は，幅を $\beta = 1.06$ に固定して，材質 α = 0.25, 0.3, 0.5, 0.7, 0.75 のときの 5 状態の姿勢を示す． 材質 $\alpha = 0.5$ を中心に，重くなったり，軽くなったりするに連れて，吃水は増減するが，傾斜角 θ は，対称に小さくなる様子が分かる．

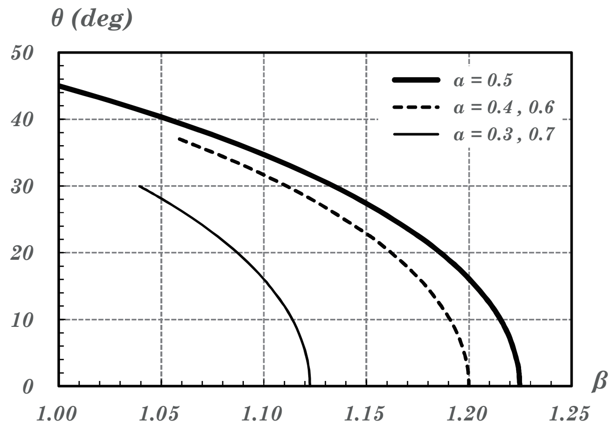

図 2 幅 β に対する安定姿勢 θ

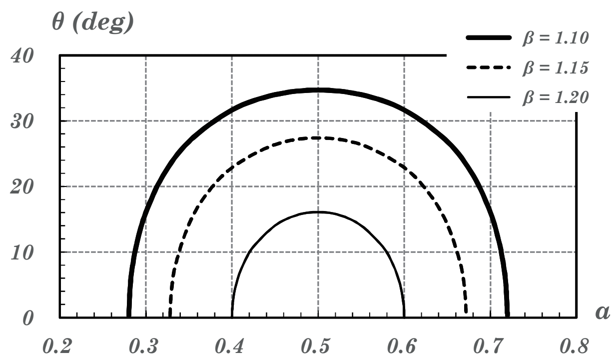

図 3 材質 α に対する安定姿勢 θ

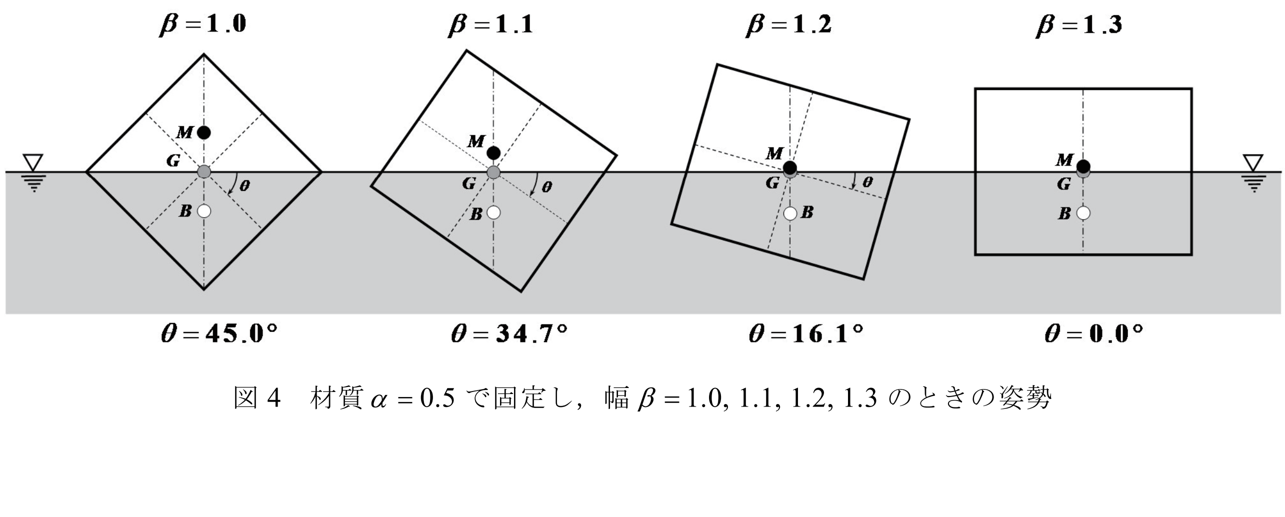

図 4 材質 $\alpha = 0.5$ で固定し，幅 $\beta = 1.0$, 1.1, 1.2, 1.3 のときの姿勢

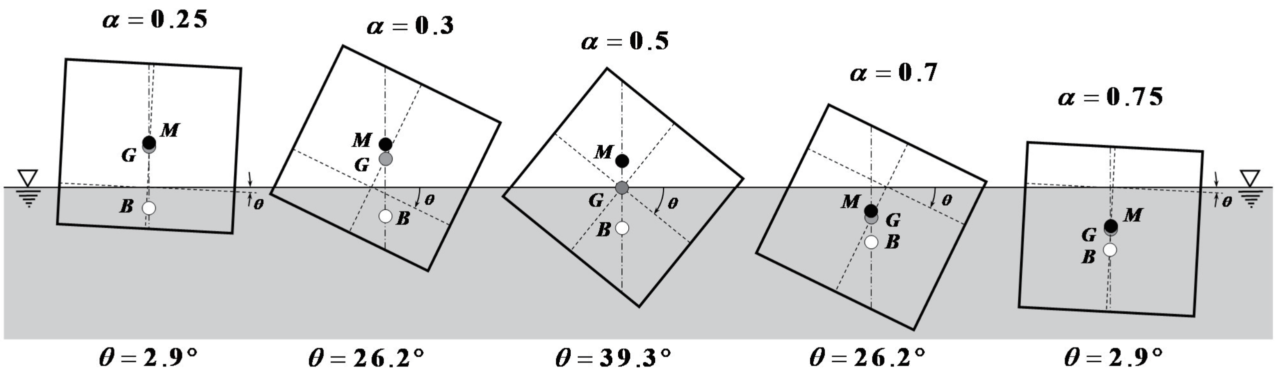

図 5　幅を $\beta=1.06$ で固定し，材質 $\alpha=0.25, 0.3, 0.5, 0.7, 0.75$ のときの姿勢

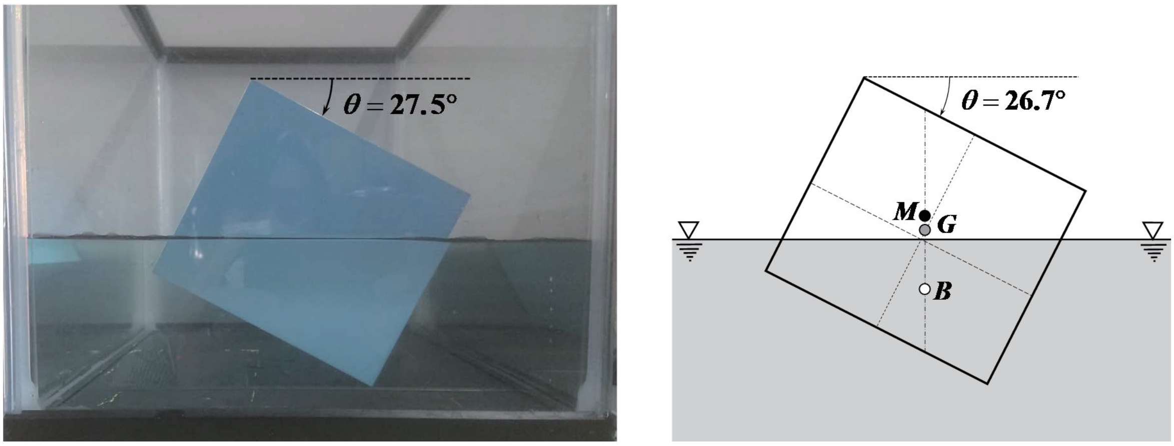

図 6　材質 $\alpha=0.458$，幅 $\beta=1.15$ の場合の実験（左）と計算（右）の比較

6. 実験による検証

図 6 は，材質 $\alpha=0.458$，幅 $\beta=1.15$ の場合について，模型実験（左）と計算結果（右）を，比較したものである．

模型は，長さ $L=35.0\,cm$，深さ $h=10.0\,cm$，幅 $\beta h=11.5\,cm$，重量 $W=1845\,grf$ であり，ケミカルウッド 2 枚を上下に中央で貼り合わせて，（有）宇宙模型で製作して頂いた．それを，小水槽に浮かべて，確認実験を行なった．

傾斜姿勢について，実験は $\theta=27.5°$，計算は，(19),(25),(26),(29)式により，

$$\left.\begin{array}{l}\theta=26.7°\ \ (\alpha=0.458,\ \beta=1.15)\\ \quad\overline{GM}=0.068\,h,\ \overline{BG}=0.269\,h\\ \quad Z_f=0.668\,h\end{array}\right\}\cdots\cdots(30)$$

である．　両者に1° 程度の差はあるものの，実験の傾斜角 θ は，写真から $\tan\theta$ を計測して求めていることと，重心位置 G が模型の製作上，中心から若干のズレを生じている可能性も考慮すれば，本稿の計算が，実際の状態を正しく計算できていることを，検証できたと考える．

7. あとがき

本稿では，船の安定性理論を理解するために，前報[1]の延長線上の応用例題として，長方形断面の柱状船の，横傾斜状態での安定姿勢を求解する手法を，小傾斜角（甲板が水没せず，船底も浮上しない）の範囲に限って，解り易く解説したつもりである．

今後，前報[1]の基本例題から一歩進んで，この分野を教える教員や，学ぶ学生諸君にとっての一助にでもなれば，著者望外の幸に思う．

謝　辞

本稿を閉じるに臨み，その内容を読んで，とても感銘を受けた，防衛大学校 の 五十嵐 保 名誉教

授らの，貴重な論文 2 篇[(2),(3)]に，敬意を表させて頂きます.

終わりに，著者が自宅で論文を書いているとき，いつも横で見守ってくれている娘の愛美（White Swiss Shepherd Dog；3 歳）に，感謝の言葉を伝えたい.

参考文献

(1) 堀　勉：「船の安定性理論」に関する一例題，日本航海学会誌 NAVIGATION，第 217 号「解説・展望」，pp.39～46，2021 年 7 月.

(2) 五十嵐 保：静水に浮く角材の姿勢，日本流体力学会誌「ながれ」，第 19 巻 4 号，pp.253～262，2000 年 8 月.

(3) 五十嵐 保，中村 元：静水に浮く矩形断面柱の姿勢解析，日本流体力学会誌「ながれ」，第 26 巻 6 号，pp.393～400，2007 年 12 月.

(4) 堀　勉：静水圧の圧力積分による船の浮心位置の決定 ― 浮心＝圧力中心の証明 ―，日本航海学会誌 NAVIGATION，第 203 号「研究・調査」，pp.88～92，2018 年 1 月.

(5) 堀　勉：静水圧の圧力積分による船の浮心位置の決定 ― その 6：任意形状の没水体と浮体に対する証明 ―，日本航海学会誌 NAVIGATION，第 215 号「研究・調査」，pp.69～77，2021 年 1 月.

(6) 堀　勉：船のメタセンター半径 $\overline{BM}$ の導出に関する一考察，日本航海学会誌 NAVIGATION，創刊第 200 号記念号「研究・調査」，pp.75～79，2017 年 4 月.

(7) 杉原 喜義：理論運用学（船舶力学編），第 3 章 横復原力，海文堂，pp.58～59，1964 年 7 月（初版）.

(8) 明渡 範次：基本 航海力学，第 3 章 船舶の安定性，海文堂，pp.125～132，1983 年 6 月（初版）.

(9) 大串 雅信：理論船舶工学（上巻）新訂版，第 4.4 節 横メタセンタ および $\overline{BM}$，問題 2 & 3，海文堂，pp.82～83，1971 年 6 月（初版）.

附　録

横傾斜時の水面下の横断面形状である，台形の図心 B' を，面積モーメントから，幾何学的に求めておく.

図 A-1 に示すように，船底中央に原点 o を配し，浮体に固定して傾斜した $o-\eta\zeta$ 座標系で解析することにしよう．直立時の吃水を d，半幅を b，横傾斜角を θ とし，水面下の台形領域を，長方形（図心 g_1）と三角形（図心 g_2）に，一点鎖線で分けて，考えよう.

長方形部分と三角形部分の面積を，A_1, A_2 と置

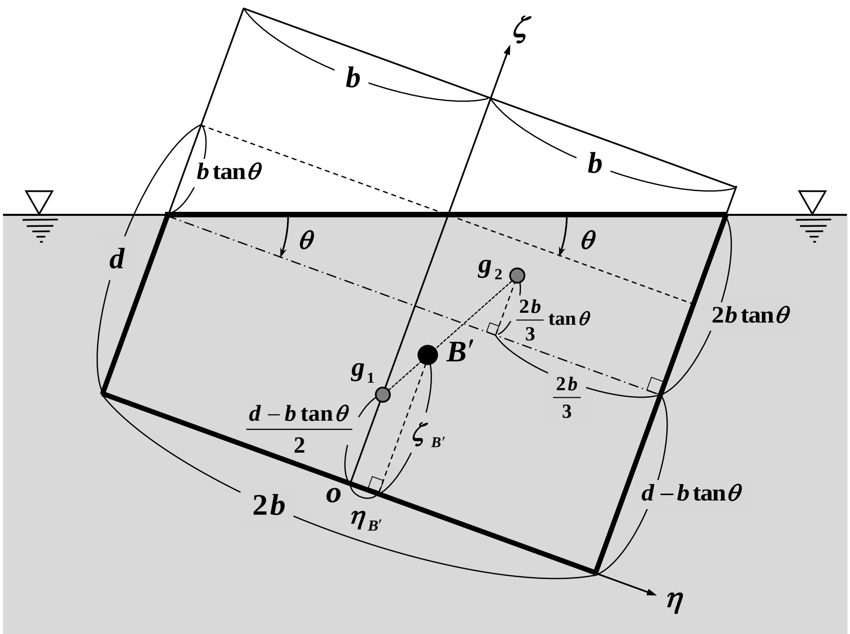

図 A-1　水面下の台形領域の図心 B'

けば，各々とその和は，

$$\left.\begin{aligned} &A_1 = 2b\,(d - b\tan\theta) \\ &A_2 = \frac{1}{2}\cdot 2b\cdot 2b\tan\theta = 2b^2\tan\theta \\ &A_1 + A_2 = 2bd \end{aligned}\right\}\cdots\cdots\text{(A-1)}$$

のように求まる．

次に，η 軸に関する面積モーメント M'_η は，

$$\begin{aligned} M'_\eta &= A_1 \times \frac{d - b\tan\theta}{2} \\ &\quad + A_2 \times \left\{ (d - b\tan\theta) + \frac{2b\tan\theta}{3} \right\} \\ &= bd^2 + \frac{1}{3}b^3\tan^2\theta \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\text{(A-2)} \end{aligned}$$

のように，ζ 軸に関する面積モーメント M'_ζ は，

$$\begin{aligned} M'_\zeta &= A_1 \times 0 + A_2 \times \left(b - \frac{2b}{3} \right) = A_2 \times \frac{b}{3} \\ &= \frac{2}{3}b^3\tan\theta \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\text{(A-3)} \end{aligned}$$

のように計算される．

台形の図心位置 B' の座標を $(\eta_{B'}, \zeta_{B'})$ とすれば，上記の面積モーメント M'_η, M'_ζ は，それぞれ，全面積とレバーの積として，

$$\left.\begin{aligned} M'_\eta &= (A_1 + A_2)\,\zeta_{B'} \\ M'_\zeta &= (A_1 + A_2)\,\eta_{B'} \end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\text{(A-4)}$$

のように書くことができるから，$\eta_{B'}, \zeta_{B'}$ は，

$$\left.\begin{aligned} \eta_{B'} &= \frac{M'_\zeta}{A_1 + A_2} = \frac{b^2}{3d}\tan\theta \\ \zeta_{B'} &= \frac{M'_\eta}{A_1 + A_2} = \frac{d}{2} + \frac{b^2}{6d}\tan^2\theta \end{aligned}\right\}\cdots\cdots\text{(A-5)}$$

のように，決定される．

図 A-1 の g_1, B', g_2 は，この状態での正しい位置を置点していて，3 点は同一直線上に在る．

令和 3 年 8 月 1 日 投稿

ホリ　ツトム
堀　勉
正会員　長崎総合科学大学 工学部 船舶工学コース 教授（〒851-0193 長崎市 網場町 536）
E-mail：HORI_Tsutomu@NiAS.ac.jp，HomePage：http://www.ship.nias.ac.jp/personnel/horiken/
1987 年 大阪大学 大学院 工学研究科 造船学専攻 博士後期課程 修了，工学博士
所属学会：日本航海学会，日本船舶海洋工学会の各会員；　研究テーマ：水面波動力学

日本航海学会誌　**NAVIGATION**

令和３年10月　第218号　　OCT 2021 No. 218

日　本　航　海　学　会
Japan Institute of Navigation
c/o Tokyo University of Marine Science and Technology, 1-6, Etchujima 2, Koto-ku, Tokyo, 135-8533 JAPAN
定価 2,000 円（税込）