

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」に関する一例題

堀 勉

*A Typical Example on Ship's Stability Theorem*

*Tsutomu HORI*

---

令和3年

7月

第217号



## 解説・展望

# 「船の安定性理論」に関する一例題

堀 勉

## A Typical Example on Ship's Stability Theorem

Tsutomu HORI

**キーワード：** 船, 安定性理論, 復原性, 例題, メタセンター

### 1. まえがき

船の横安定性について、著者は勤務校で、工学部船舶工学コース<sup>(1)</sup>の2年生に対し、前期に、浮力や浮心<sup>(2),(3)</sup>など、浮体の力学的基礎を「浮体静力学」(必修科目)で講義した上で、後期に「船体復原論」として、メイン・テーマのメタセンター半径の導出理論<sup>(4)</sup>を説明し、その後、幾つかの簡単な例題で、その理解を深めるように、講義している。恐らく、全国の造船・船舶系や商船系の大学や高等専門学校でも、科目名称は異なるにしても、凡そ上述の流れで、講義を展開しているものと思われる。

その例題として、多くの航海力学<sup>(5),(6)</sup>や造船学の<sup>(7)</sup>教科書に記載されているのは、正方形断面を有する柱状船(水の半分の比重量の木材)は、その一辺が水平な状態では安定に浮くことができず、正方形の対角線が水線に平行な状態まで横傾斜して安定することを、メタセンターと重心の位置関係から、解き示すものであろう。

その例題を一步進めて、幅の異なる長方形断面の柱状船(水の半分の比重量の木材)が、どのくらい幅が広がったら、長辺が水平な状態で安定に浮くのか?とか、材質(比重量)の異なる正方形断面<sup>(6)</sup>の柱状船が、どのような比重量(木材より、軽かったり、重かったり)だったら、一辺が水平な状態で安定に浮くことができるのか?といった問題を設定し、その安定条件を求める例題を、数年前から、著者の勤務校の「船体復原論」で講義している。

その結果、船の安定性に対する理解度が、それを講義する前に較べて、格段に向上したので、今後この分野を教える教員や学ぶ学生諸君に対し、供する部分もあると考え、その例題を整合的に纏めて、本学会誌の「解説・展望」で、紹介させて頂く次第である。

### 2. 任意の材質 $\alpha$ と任意の幅 $\beta$ を有する、長方形断面の柱状船の安定条件

図1に示すように、深さ $h$ 、幅 $\beta h$ 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 $\gamma_t$ の角材)が、比重量 $\gamma_w$ の水に、その長辺 $\beta h$ が水線と平行な状態で、安定に浮くための条件を決めることを考えよう。図1の左が直立状態、右が $\theta$ だけ横傾斜した断面に作用する力やモーメントを示す。

設定変数として、柱状船の比重量 $\gamma_t$ (下添字の $t$ は、木材の timber の頭文字)と水の比重量 $\gamma_w$ (下添字の $w$ は、水の Water の頭文字)の比を $\alpha$ (以下、**材質**と呼ぶ)として、断面の幅 $\beta h$ と深さ $h$ の比(アスペクト比)を $\beta$ (以下、**幅**と呼ぶ)として、

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

のように、定義したものである。ここに、 $\gamma_w$ が真水の場合、 $\alpha$ は柱状船の比重を表わす。

まず、吃水 $d$ を決めることを考える。この柱状

船の重量  $W$  (*Weight*) と浮力  $F_B$  (浮心  $B$  と別記するために, *Force of Buoyancy*) は, それぞれ,

$$\left. \begin{aligned} W &= \gamma_t V_t = \gamma_t \cdot \beta h \cdot h \cdot L \\ F_B &= \gamma_w V_w = \gamma_w \cdot \beta h \cdot d \cdot L \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

のように求められる. 前者の重量  $W$  は, 柱状船の比重量  $\gamma_t$  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  $\gamma_w$  と柱状船の排水体積  $V_w$  の積として得られている.

浮体は, 重量と浮力が平衡した状態

$$W = F_B \dots\dots\dots(3)$$

で安定するから, 両辺に(2)式の  $W$  と  $F_B$  を代入すれば,

$$\gamma_t \cdot \beta h \cdot h \cdot L = \gamma_w \cdot \beta h \cdot d \cdot L \dots\dots\dots(4)$$

となる. これを解くことにより, 未定の吃水  $d$  を,

$$d = \frac{\gamma_t}{\gamma_w} h = \alpha h \dots\dots\dots(5)$$

のように, 深さ  $h$  の  $\alpha$  倍として, 決めることがで

きる.

次は, メタセンター  $M$  (傾心: *Metacenter*) の位置を定めることを考える.

メタセンター半径  $\overline{BM}$  (浮心  $B$  とメタセンター  $M$  間の距離: *Metacentric Radius*) は, 造船学の基本公式<sup>(4)</sup>

$$\overline{BM} = \frac{I_{CL}}{V_w} \dots\dots\dots(6)$$

を使って, 算定できる. 分子の  $I_{CL}$  は, 水線面の中心線 (図1(左)の一点鎖線で, 下添字の  $CL$  は, *Center Line* の略記) に関する2次モーメント, 分母の  $V_w$  は排水体積を意味する. 今の場合, (6)式の分母・分子は, それぞれ,

$$\left. \begin{aligned} I_{CL} &= \frac{1}{12} (\beta h)^3 L \\ V_w &= \beta h \cdot d \cdot L = \beta h \cdot \alpha h \cdot L = \alpha \beta h^2 L \end{aligned} \right\} \dots\dots(7)$$

のように計算できる. 式中, 前者の  $I_{CL}$  は, 図1(左)に示すように, 水線面が, 長さ  $L$ , 幅  $\beta h$  の

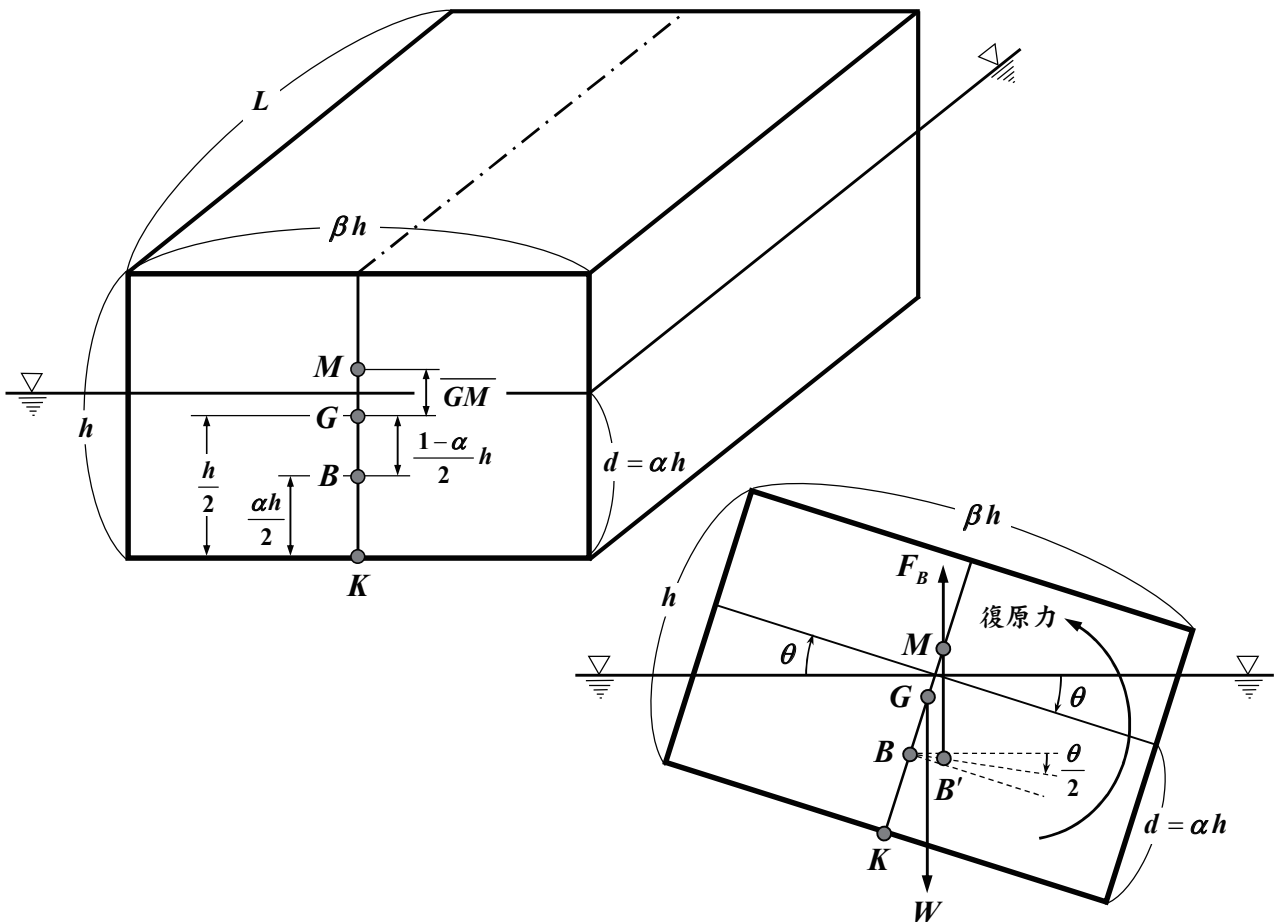


図1 長方形断面を有する柱状船の直立状態(左)と横傾斜状態の横断面(右)

長方形であることを、分母の $V_w$ は、吃水が(5)式で求めた $d = \alpha h$ であることを用いた。

得られた(7)式の結果を、(6)式に用いることにより、 $\overline{BM}$ は、

$$\overline{BM} = \frac{\frac{1}{12}(\beta h)^3 L}{\alpha \beta h^2 L} = \frac{\beta^2}{12\alpha} h \quad \dots\dots(8)$$

のように、船長 $L$ とは無関係に、算定できる。

続いて、 $\overline{BG}$ （浮心 $B$ と重心 $G$ 間の距離）を求めておこう。

重心 $G$ （*Center of Gravity*）は長方形断面の図心（＝中心）、浮心 $B$ （*Center of Buoyancy*）は水面下の長方形の図心（＝中心）に位置するから<sup>(2)</sup>、図1（左）に示すように、船底の中心線上の点を $K$ （*Keel*の略記）とすると、それぞれ、

$$\left. \begin{aligned} \overline{KG} &= \frac{h}{2} \\ \overline{KB} &= \frac{d}{2} = \frac{\alpha h}{2} \end{aligned} \right\} \dots\dots(9)$$

のように定まるから、 $\overline{BG}$ は、

$$\begin{aligned} \overline{BG} &= \overline{KG} - \overline{KB} \\ &= \frac{h}{2} - \frac{\alpha h}{2} = \frac{1-\alpha}{2} h \quad \dots\dots(10) \end{aligned}$$

のように求まる。

以上の準備計算から、メタセンター高さ $\overline{GM}$ （重心 $G$ とメタセンター $M$ 間の距離：*Metacentric Height*）は、(8)式から(10)式を減ずることにより、

$$\begin{aligned} \overline{GM} &= \overline{BM} - \overline{BG} \\ &= \frac{\beta^2}{12\alpha} h - \frac{1-\alpha}{2} h = \frac{\beta^2 - 6\alpha + 6\alpha^2}{12\alpha} h \end{aligned} \quad \dots\dots(11)$$

のように、定めることができる。

柱状船の長辺 $\beta h$ が、水線と平行な図1（左）の直立状態で、安定に浮くためには、図1（右）に示すように、傾斜状態から直立状態に戻す復原力（力学的には、復原モーメント）が働くことが要請され、そのためには、メタセンター $M$ が重心 $G$ より上方に位置する必要がある。換言すれば、メタセンター高さ $\overline{GM}$ が正値を取ればよく、安定条件として、

$$\overline{GM} > 0 \quad \dots\dots(12)$$

のように、記述できる。左辺に、(11)式で求めた結果を用いれば、

$$\overline{GM} = \frac{\beta^2 - 6\alpha + 6\alpha^2}{12\alpha} h > 0 \quad \dots\dots(13)$$

のように、書くことができる。上式中の $h$ も分母の $\alpha$ も正だから、数学的には、分子が正であればよく、結果として、本例題の安定条件は、

$$\beta^2 - 6\alpha + 6\alpha^2 > 0 \quad \dots\dots(14)$$

のように、得られる。

## 2.1 材質 $\alpha$ を固定した柱状船の、幅 $\beta$ に対する安定条件

まず、2.1節では、柱状船の材質 $\alpha$ を固定して、どんな幅 $\beta$ だったら、長辺が水平な図1（左）の状態に安定に浮くか？を、考えることにする。

(14)式の安定条件式を、 $\beta$ について解けば、

$$\begin{aligned} \beta^2 &> 6\alpha - 6\alpha^2 = 6\alpha(1-\alpha) \\ &= \frac{3}{2} - 6\left(\alpha - \frac{1}{2}\right)^2 \equiv \Omega \quad \dots(15) \end{aligned}$$

となる。右辺を $\Omega$ と置けば、幅 $\beta$ は正値だから、

$$\beta > \sqrt{\Omega} = \sqrt{6\alpha(1-\alpha)} \quad \dots\dots(16)$$

を満たせば安定することが分かり、 $\sqrt{\Omega}$ が安定する限界値を示している。

例えば、 $\alpha = \frac{1}{2}$ の木材であれば、

$$\beta \Big|_{\alpha=\frac{1}{2}} > \sqrt{6 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2}} = \frac{\sqrt{6}}{2} \doteq 1.225 \quad \dots(17)$$

となり、幅が深さの約1.3倍以上広ければ、安定することが分かる。

この結果、 $\beta=1$ の正方形は、一辺が水平な状態で安定して浮くことはできないことになり、多くの教科書に典型的な例題<sup>(5),(6)</sup>や問題<sup>(7)</sup>として書かれていることを、包含している。

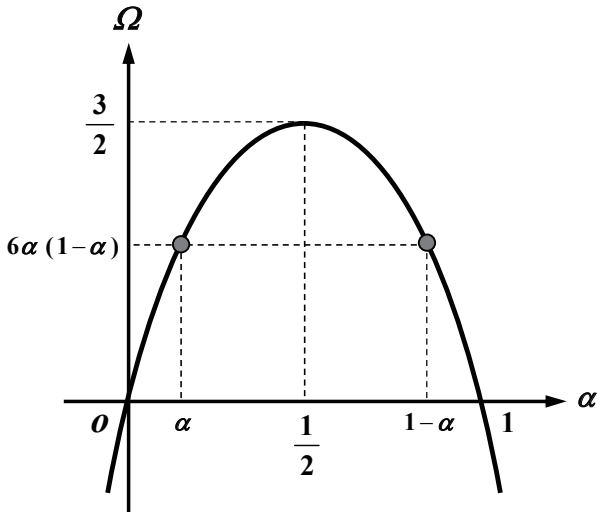


図2 幅の安定限界  $\Omega$  と材質  $\alpha$  の関係

幅の安定限界  $\sqrt{\Omega}$  の材質  $\alpha$  に対する依存性を、少し検討してみると、 $\alpha$  と  $\Omega$  の関係は、(15)式の右辺  $\Omega$  の平方完成した結果から、図2に示すように、上に凸の形状で、 $\alpha = \frac{1}{2}$  で最大値  $\frac{3}{2}$  を取り、材質  $\alpha$  の設定区間  $0 < \alpha \leq 1$  間で正値を取って、両端の  $\alpha = 0, 1$  でゼロになることが分かる。

したがって、上記  $\alpha = \frac{1}{2}$  に対する(17)式の  $\beta$  が最も厳しい幅の条件であって、材質が、それより軽かったり、重かったりした場合は、 $\beta$  の限界値  $\sqrt{\Omega}$  は小さくなり、幅が深さの1.3倍より狭くても、安定することになる。具体例を挙げると、

$$\left. \begin{aligned} \alpha = \frac{1}{3}, \frac{2}{3} &\rightarrow \beta > \sqrt{6 \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{2}{3}} = \frac{2\sqrt{3}}{3} \doteq 1.155 \\ \alpha = \frac{1}{4}, \frac{3}{4} &\rightarrow \beta > \sqrt{6 \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{3}{4}} = \frac{3\sqrt{2}}{4} \doteq 1.061 \\ \alpha = \frac{1}{5}, \frac{4}{5} &\rightarrow \beta > \sqrt{6 \cdot \frac{1}{5} \cdot \frac{4}{5}} = \frac{2\sqrt{6}}{5} \doteq 0.980 \end{aligned} \right\} \dots\dots(18)$$

のように、 $\alpha = \frac{1}{2}$  を中心に両側(軽い側と重い側)に離れるに連れて、 $\beta$  の限界値  $\sqrt{\Omega}$  は、1.225より小さくなっていく。特に、 $\alpha$  が  $\frac{1}{5}$  や  $\frac{4}{5}$  のときは、 $\beta$  の限界値は0.98であり、正方形( $\beta = 1$ )より幅が狭くても、安定することが分かる。

また、(16)式の因数や(18)式の結果からも分か

るが、図2に●印で示すように、 $\alpha$  と  $1-\alpha$  の材質では、安定する  $\beta$  の限界値  $\sqrt{\Omega}$  が同じであることも、物理的に興味深いところである。

**2.2 幅  $\beta$  を固定した柱状船の、材質  $\alpha$  に対する安定条件**

次に、2.2節では、柱状船の幅  $\beta$  を固定して、どんな材質  $\alpha$  だったら、長辺が水線と平行な図1(左)の状態、安定に浮くか?を考えよう。

(14)式の安定条件式を、 $\alpha$  について解くために、左辺を  $\Gamma$  と置き、平方完成すると、

$$\begin{aligned} \Gamma &= 6\alpha^2 - 6\alpha + \beta^2 \\ &= 6\left(\alpha - \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{2\beta^2 - 3}{2} \dots\dots\dots(19) \end{aligned}$$

となり、(14)式の安定条件は、

$$\Gamma > 0 \dots\dots\dots(20)$$

と書くことができる。左辺の  $\alpha$  に関する2次式  $\Gamma$  は、定数項  $2\beta^2 - 3$  の正負によって、状況が異なるから、以下の i), ii) に場合分けして検討する。

i)  $2\beta^2 > 3$  (即ち、 $\beta > \frac{\sqrt{6}}{2}$ ) の幅が広い場合

このとき、(19)式の  $\Gamma$  は、図3に示すように、

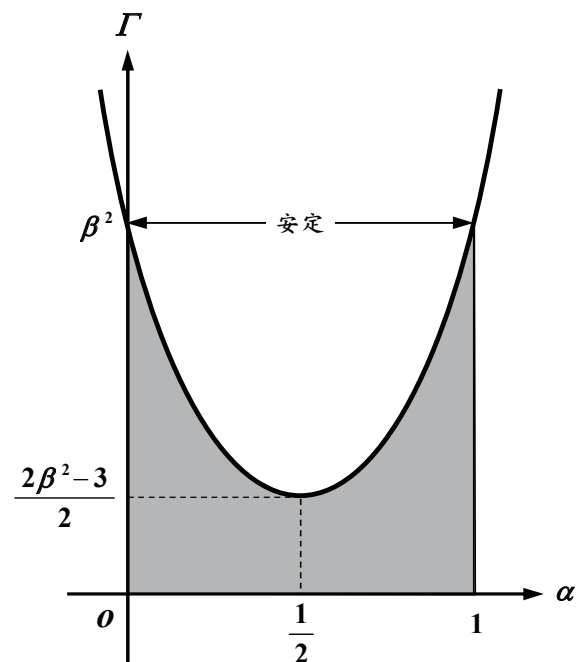


図3 幅が広い ( $2\beta^2 > 3$ ) 場合

下に凸の形状であるから、グレーで塗った範囲で、 $\Gamma$  は常に正となって、(20)式の安定条件は、 $\alpha$  に依らず成立し、浮体は常に安定する。

この(i)の場合は、2.1節(17)式の $\alpha = \frac{1}{2}$  に対する $\beta$ の安定条件に一致する。

ii)  $2\beta^2 < 3$  (即ち、 $\beta < \frac{\sqrt{6}}{2}$ ) の幅が狭い場合

このとき、(19)式の $\Gamma = 0$  の解は、

$$\alpha = \frac{1}{2} \pm \frac{\sqrt{3(3-2\beta^2)}}{6} \equiv \frac{1}{2} \pm \kappa \quad \left\{ \begin{array}{l} \dots\dots(21) \\ \left( \text{但し、} \kappa \equiv \frac{\sqrt{3(3-2\beta^2)}}{6} \right) \end{array} \right.$$

のように、2個ある。図4に○印で示すように、これが $\alpha$ 軸との交点で、2次式 $\Gamma$ は下に凸の形状であるから、(20)式の安定条件 $\Gamma > 0$ を満たす、グレーで塗った $\alpha$ の範囲は、

$$\left. \begin{array}{l} 0 < \alpha < \frac{1}{2} - \kappa \quad (\text{軽い材質}) \\ \frac{1}{2} + \kappa < \alpha \leq 1 \quad (\text{重い材質}) \end{array} \right\} \dots\dots(22)$$

のように、 $\alpha = \frac{1}{2}$  を挟んで、両側の軽い材質と重い材質で、安定することが分かる。また、 $\Gamma < 0$ となる不安定領域 $2\kappa$ は、 $\alpha = \frac{1}{2}$  を中心に、

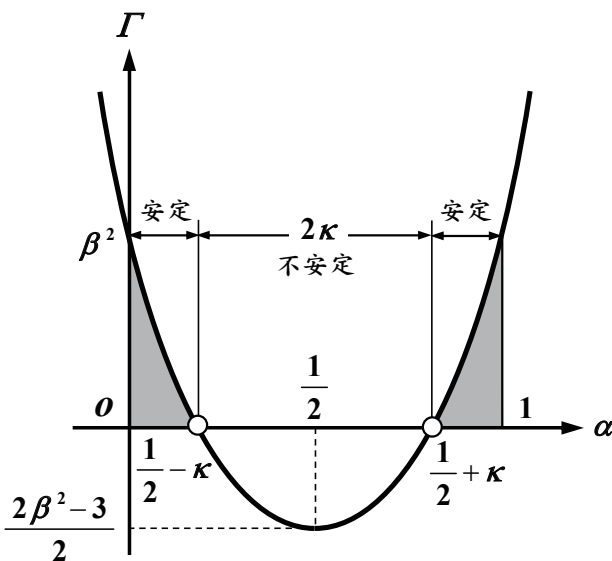


図4 幅が狭い ( $2\beta^2 < 3$ ) 場合

$$2\kappa = \frac{\sqrt{3(3-2\beta^2)}}{3} \quad \dots\dots(23)$$

であるから、 $\beta = \frac{\sqrt{6}}{2}$  では $2\kappa = 0$ で、それより幅 $\beta$ が狭くなるに連れて、不安定領域 $2\kappa$ が広がるのが分かり、 $\beta = 0$ で $2\kappa = 1$ となる。

以下、具体的に3例ほどの $\beta$ に対して、 $\Gamma = 0$ を満たす $\alpha$ を、(21)式を使って計算してみると、

$$\left. \begin{array}{l} \beta = 1 \rightarrow \kappa = \frac{\sqrt{3(3-2 \cdot 1)}}{6} = \frac{\sqrt{3}}{6} \doteq 0.289 \\ \quad \quad \quad \therefore \alpha = 0.5 \pm \kappa = 0.211, 0.789 \\ \beta = \frac{1}{\sqrt{2}} \rightarrow \kappa = \frac{\sqrt{3\left(3-2 \cdot \frac{1}{2}\right)}}{6} = \frac{\sqrt{6}}{6} \doteq 0.408 \\ \quad \quad \quad \doteq 0.707 \quad \therefore \alpha = 0.5 \pm \kappa = 0.092, 0.908 \\ \beta = \frac{1}{2} \rightarrow \kappa = \frac{\sqrt{3\left(3-2 \cdot \frac{1}{4}\right)}}{6} = \frac{\sqrt{30}}{12} \doteq 0.456 \\ \quad \quad \quad \therefore \alpha = 0.5 \pm \kappa = 0.044, 0.956 \end{array} \right\} \dots\dots(24)$$

のようになる。幅 $\beta$ が小さくなるに連れて、上記 $\Gamma = 0$ を満たす2個の $\alpha$ の外側の安定領域が、減っていく様子が分かる。

### 2.3 図1の長方形断面の $\alpha, \beta, \overline{GM}$

図1の長方形断面の材質 $\alpha$ と幅 $\beta$ は、

$$\left. \begin{array}{l} \alpha = 0.58 \\ \beta = 1.62 \end{array} \right\} \dots\dots(25)$$

であり、(13)式で計算した $\overline{GM}$ は、

$$\overline{GM} = 0.167h > 0 \quad \dots\dots(26)$$

である。実際、図1(左)の $B, G, M$ は、正しく測った位置関係を示していて、図1(右)に示すように、横傾斜状態から直立状態に戻す復原力が働いて、安定な状態である。

また、図1(右)で、直立状態の浮心 $B$ は、 $\theta$ だけ横傾斜すると、半角 $\frac{\theta}{2}$ の方向に移動するから<sup>(4)</sup>、



その延長線と、メタセンター  $M$  から降ろした鉛直線との交点として、傾斜後の浮心  $B'$  の位置を定め得る。よって、図1(右)に置点してある  $B'$  も、(25)式の条件下での、正しい位置を示している。

### 3. 材質 $\alpha$ や幅 $\beta$ を指定した、柱状船に対する安定条件

第2章では、材質  $\alpha$  も幅  $\beta$  も任意の値を取るものとして、問題を設定し、その解法を示してきた。

学生諸君に講義するときは、 $\alpha$  と  $\beta$  のどちらかは、代表的な値を指定して説明した方が、理解が得られ易いと考えられる。第3章は、そのような観点から、記述したものである。

#### 3.1 材質 $\alpha = \frac{1}{2}$ (木材) の柱状船の、幅 $\beta$ に対する安定条件

まず、2.1節の例題を、当初から、材質として  $\alpha = \frac{1}{2}$  の木材を設定して、解いてみる。

その場合、(15)式の安定条件は、 $\Omega = \frac{3}{2}$  となり、

$$\beta^2 - \frac{3}{2} > 0 \dots\dots\dots(27)$$

のように、極めて簡単な不等式になる。

これを満たす正值の  $\beta$  は、暗算で、

$$\beta > \sqrt{\frac{3}{2}} = \frac{\sqrt{6}}{2} \doteq 1.225 \dots\dots\dots(28)$$

のように求まり、2.1節(17)式の結果に一致する。

物理的には、材質が木材の長方形断面の柱状船は、その幅が深さの約1.3倍以上広げれば、長辺が水平な状態で、安定に浮くという結論を、容易に導くことができる。

#### 3.1.a 材質 $\alpha = \frac{1}{2}$ (木材) の柱状船の、幅 $\beta = \frac{\sqrt{6}}{2}, \sqrt{3}$ の場合

ここでは、3.1節の(28)式で示した、幅  $\beta$  に関する安定条件に対して、具体的に、限界値(中立)の  $\beta = \frac{\sqrt{6}}{2}$  と、それを満たす  $\beta = \sqrt{3}$  の2例を取り

挙げて、その状態を示しておく。

このときの  $\overline{GM}$  は、第2章の(13)式において、 $\alpha = \frac{1}{2}$  とすることにより、

$$\overline{GM} \Big]_{\alpha=\frac{1}{2}} = \frac{2\beta^2 - 3}{12} h \dots\dots\dots(29)$$

となるから、それぞれ、

$$\left. \begin{aligned} \beta &= \frac{\sqrt{6}}{2} (\doteq 1.225) \\ &\rightarrow \overline{GM} = \frac{2 \cdot \frac{3}{2} - 3}{12} h = 0 \text{ (中立)} \\ \alpha &= \sqrt{3} (\doteq 1.732) \\ &\rightarrow \overline{GM} = \frac{2 \cdot 3 - 3}{12} h = \frac{h}{4} \text{ (安定)} \end{aligned} \right\} \dots\dots(30)$$

のように、計算できる。

上記2状態の長方形断面の形状と、 $B, G, M$  の位置関係を、図5に示す。左は  $M$  と  $G$  が一致する中立状態で、これより少しでも幅が広くなれば、この状態で安定に浮くことができる、

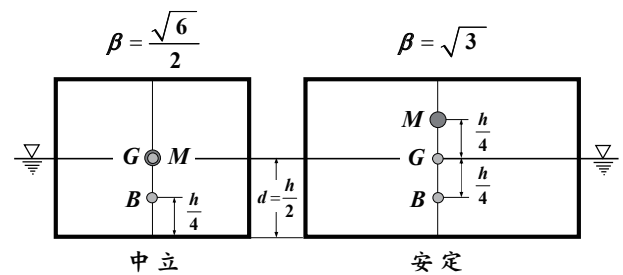


図5 材質  $\alpha = \frac{1}{2}$ 、幅  $\beta = \frac{\sqrt{6}}{2}, \sqrt{3}$  の場合

#### 3.2 幅 $\beta = 1$ (正方形) の柱状船の、材質 $\alpha$ に対する安定条件

次に、2.2節の例題を、幅として  $\beta = 1$  の正方形断面を設定して、解いてみよう。

この場合、(19),(20)式の安定条件は

$$\begin{aligned} \Gamma &= 6\alpha^2 - 6\alpha + 1 \\ &= 6 \left( \alpha - \frac{1}{2} \right)^2 - \frac{1}{2} > 0 \dots\dots\dots(31) \end{aligned}$$

のような、 $\alpha$  に関する2次不等式になる。

$\Gamma = 0$  を満たす  $\alpha$  は、平方完成の式により、簡単に解けて、

$$\alpha = \frac{1}{2} \pm \frac{\sqrt{3}}{6} \doteq 0.211, 0.789 \dots\dots\dots(32)$$

となり、2.2 節の幅が狭い(ii)の場合の(24)式の第1のケースの結果に一致する。

(31)式の安定条件  $\Gamma > 0$  を満たす  $\alpha$  の範囲は、図4に示すように、 $\Gamma$  が下に凸の2次式であるから、

$$\left. \begin{aligned} 0 < \alpha < 0.211 \quad (\text{コルクなど: 軽い材質}) \\ 0.789 < \alpha \leq 1 \quad (\text{ゴム・皮革など: 重い材質}) \end{aligned} \right\} \dots\dots(33)$$

のように求まる<sup>(6)</sup>。このときの、それぞれの  $\alpha$  に対する吃水は、(5)式に示す通り、 $d = \alpha h$  である。

一方、不安定な  $\alpha$  の範囲は、

$$0.211 < \alpha < 0.789 \quad (\text{檜・唐松など: 木材}) \dots\dots(34)$$

である。

この結果から、正方形断面の柱状船は、(33)式に示すように、コルクや発泡スチロールなどの軽い材質や、ゴムや皮革などの重い材質では、一辺を水線に平行な状態で、安定に浮くが、逆に(34)式に示すような、檜や唐松などの木材では、一辺が水平な状態では、浮かないことが分かる。

**3.2.a 幅  $\beta = 1$  (正方形) の柱状船の、**

**材質  $\alpha = \frac{1}{6}, \frac{5}{6}$  の場合**

ここでは、3.2 節の(33)式で示した安定する材

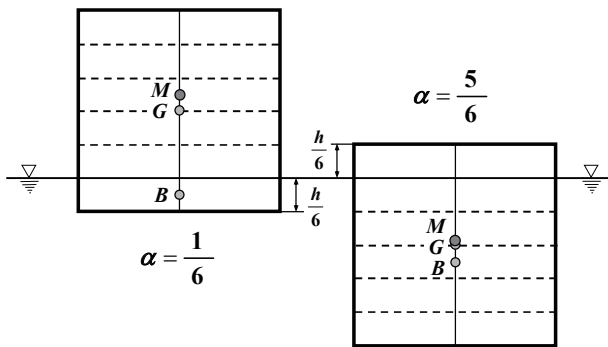


図6 幅  $\beta = 1$  , 材質  $\alpha = \frac{1}{6}, \frac{5}{6}$  の場合

質  $\alpha$  として、軽い  $\frac{1}{6}$  と重い  $\frac{5}{6}$  を、具体的に取り上げて、その状態を示しておこう。

このときの  $\overline{GM}$  は、(13)式において、 $\beta = 1$  とすることにより、

$$\overline{GM} \Big]_{\beta=1} = \frac{1 - 6\alpha + 6\alpha^2}{12\alpha} h \dots\dots\dots(35)$$

であるから、それぞれ、

$$\left. \begin{aligned} \alpha = \frac{1}{6} (\doteq 0.167) \\ \rightarrow \overline{GM} = \frac{1 - 6 \cdot \frac{1}{6} + 6 \cdot \frac{1}{6 \cdot 6}}{12 \cdot \frac{1}{6}} h = \frac{h}{12} = \frac{h}{12} \\ \alpha = \frac{5}{6} (\doteq 0.833) \\ \rightarrow \overline{GM} = \frac{1 - 6 \cdot \frac{5}{6} + 6 \cdot \frac{25}{6 \cdot 6}}{12 \cdot \frac{5}{6}} h = \frac{h}{60} = \frac{h}{60} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(36)$$

のように、計算できる。この軽重それぞれの状態 ( $B, G, M$  の位置関係) を、図6に示す。

**4. あとがき**

本稿では、船の安定性理論を理解する上で、著者の経験上、効果的であると考えられる例題を紹介させて頂いた。

今後、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、著者望外の幸である。

**謝 辞**

本稿を閉じるに臨み、著者が学部1年生のとき、黒板に丁寧な図と式を書いて、初めて学ぶ造船学の専門科目として、船舶算法の理論を懇切に教えて下さった、今は亡き恩師 栗原 真人 先生に、深甚なる感謝の意を捧げます。

著者が、学生達に浮体静力学や船体復原論の講義をするとき、もう40年以上も前になりますが、当時の先生のお姿を範とさせて頂いているからです。



## 附 録

3.1 節で示した,  $\alpha = \frac{1}{2}$  (木材) の柱状船の幅  $\beta$  に対する安定条件を求める, 理論<sup>(8)</sup> (大学での講義) と 小水槽での実験<sup>(9)</sup> (高校生に対するゼミナール), 及び, 3.2 節で示した, 幅  $\beta = 1$  (正方形) の柱状船の材質  $\alpha$  に対する安定条件を求める講義<sup>(10)</sup> の動画を, 昨今の遠隔講義の気運から, YouTube にオンデマンド教材としてアップロードしていますので, 興味のある方は, ご覧になってみて下さい.

## 参考文献

- (1) 堀 勉: 長崎総合科学大学 工学部 工学科 船舶工学コース, 日本航海学会誌 NAVIGATION, 第 215 号「教育・研究機関 紹介」, pp.38~45, 2021 年 1 月.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) 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).
- (6) 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).
- (7) 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  $\overline{BM}$ , 海文堂, pp.82~83, 1971 年 6 月 (初版).
- (8) 堀 勉: 『船体復原論』の講義 No.8 の動画 (約 85 分), <https://youtu.be/PNVuRuZWYBM>, 2020 年 11 月 19 日.
- (9) 堀 勉: 『船の安定性理論ゼミナール』の動画 (約 15 分), <https://youtu.be/4T6znjliKPI>, 2020 年 8 月 7 日.
- (10) 堀 勉: 『船体復原論』の講義 No.9 の動画 (約 90 分), <https://youtu.be/eeVg9ThjPd0>, 2020 年 11 月 26 日.

令和3年4月22日投稿



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

巻頭言

主務幹事退任のご挨拶 / *Retirement Greeting from Competent Manager* ..... 久保 信明 / Nobuaki KUBO ... ( 1)  
 主務幹事就任のご挨拶 / *Greeting from Competent Manager* ..... 田丸 人意 / Hitoi TAMARU ... ( 2)

新たな針路へ向けて

本学会の改革検討の取組みについて / *A discussion for reformation of activity of JIN* ..... 酒出 昌寿 / Masatoshi SAKAIDE ... ( 3)

教育・研究機関紹介

朝日大学経営学部経営学科 / *Department of Business Administration, Asahi University* ..... 土井 義夫 / Yoshio DOI ... ( 5)

海事博物館紹介

神戸大学海事博物館の紹介 / *Introducing the Kobe University Maritime Museum* ..... 矢野 吉治 / Yoshiji YANO ... ( 11)

大学等奨学褒章

..... ( 20)

解説・展望

大型測量船「光洋」の就役 ～我が国の海洋権益と航海安全への貢献～  
 / *Commissioning of the Large Survey Vessel "KOYO": Contribution to Japan's Marine Rights and Interests and Safety of the Navigation* ..... 中川 正則 / Masanori NAKAGAWA ... ( 32)

IoS-OP のご紹介 / *Introduction to IoS-OP (Internet of Ships Open Platform)* ..... 池田 靖弘 / Yasuhiro IKEDA ... ( 35)

「船の安定性理論」に関する一例題 / *A Typical Example on Ship's Stability Theorem* ..... 堀 勉 / Tsutomu HORI ... ( 39)

研究・調査

大型コンテナ船の必要舵面積について - (その2) 風圧下の操舵応答 -  
 / *On Required Rudder Area for Large Container Ships - (Part 2) Response of Ships by Steering in Winds -* ..... 佐久間 俊 / Shun SAKUMA ... ( 47)

内航海運における管理統制と船腹調整事業  
 / *Management Control and "Shipping Adjustment Business(Senpuku Chosei Jigyo)" in Coastal Shipping* ..... 松尾 俊彦 / Toshihiko MATSUO ... ( 57)

研究会報告

航空宇宙研究会 ..... ( 66)

海洋工学研究会 ..... ( 67)

航法システム研究会 ..... ( 68)

GPS/GNSS 研究会 ..... ( 70)

物流研究会 ..... ( 72)

シーマンシップ研究会 ..... ( 75)

海上交通法規研究会 ..... ( 81)

海上交通工学研究会 ..... ( 83)

事務局だより、総会資料 ..... ( 85)

投稿要領 ..... (118)