

2022年度 船舶工学コース卒業研究発表概要

研究課題	三角柱の浮心と長方形断面を有する柱状船の傾斜状態での安定姿勢に関する解析
------	--------------------------------------

指導教員	堀 勉 教授
------	--------



学籍番号	氏名	学籍番号	氏名
1519007	北原 敬次郎	1519017	鳥居 文汰
1519024	森下 翼		

1. 研究目的

昨年度の卒業研究^[1]で、幾つかの傾斜姿勢について、理論計算の妥当性を小水槽実験で確認しているため、今年度は横断面の幅や材質に対する傾斜姿勢の依存性を、計算で明らかにする。また、三角柱の浮心^[2]についても、圧力中心であることを証明する。

2. 「浮心=圧力中心」の証明

2.1 三角柱が傾斜した状態での証明

$$X_B = X_G = \frac{1}{3} f \frac{2 \tan^2 \theta + 3 \varepsilon^2 - 1}{1 - \varepsilon^2} \sin \theta, Y_B = Y_G = \frac{1}{3} f \cos \theta \dots\dots (1)$$

X_B, Y_B は圧力中心の座標, X_G, Y_G は、図1に示す θ 傾斜した三角柱の水面下面積における図心の座標であり、計算した結果、(1)式に示すように、両者の値が一致した。

$$X_B|_{\theta=0} = X_G|_{\theta=0} = 0, Y_B|_{\theta=0} = Y_G|_{\theta=0} = \frac{f}{3} \dots\dots (2)$$

$\theta=0$ とすれば、直立状態での座標となり、周知の三角形の浮心と一致し、「浮心=圧力中心」であることが証明できた。

2.2 長方形が傾斜した状態での証明

図2は、横傾斜した長方形断面に働く静水圧分布を示している。 θ だけ傾斜した、 $-\xi, \eta$ 方向に働く圧力による力 $F_{-\xi}, F_{\eta}$ は

$$F_{-\xi} = P_R - P_L = 2\gamma f b \sin \theta, F_{\eta} = 2\gamma f b \cos \theta \dots\dots (3)$$

ξ, η 方向の圧力成分によるモーメント M_{ξ}, M_{η} は、

$$M_{\xi} = \frac{f}{2} + \frac{b^2}{bf} \tan^2 \theta, M_{\eta} = \frac{2}{3} \gamma b^3 \sin \theta \dots\dots (4)$$

のように求められる。これらを用いて圧力中心 $B(\xi_B, \eta_B)$ を求める。

$$\xi_B = \frac{M_{\eta}}{F_{\eta}} = \frac{b^2}{3f} \tan \theta, \eta_B = \frac{M_{\xi}}{F_{-\xi}} = \frac{f}{2} + \frac{b^2}{bf} \tan^2 \theta \dots\dots (5)$$

この結果は、水面下の台形の図心と一致するため「浮心=圧力中心」であることを証明できた。

3. 長方形断面を有する浮体の直立状態での安定条件

図3は復原モーメントが働く安定な状態を示している。直立時の喫水 d は、 $d = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} h = \alpha h$ となり、 α は浮体の比重を表す。

このときのメタセンター半径 \overline{BM} とメタセンター高さ \overline{GM} を計算すると、

$$\overline{BM} = \frac{I_t}{V} = \frac{\beta^2}{12\alpha} h, \overline{GM} = \overline{BM} - \overline{BG} = \frac{\beta^2 - 6\alpha(1-\alpha)}{12\alpha} h \dots\dots (6)$$

となる。 $\overline{GM} > 0$ となる安定条件は、(6)式の分子が正になる縦横比 β を求めれば

$$\beta > \sqrt{6\alpha(1-\alpha)} \dots\dots (7)$$

となり、 $\alpha = \frac{1}{2}$ のとき、 $\beta > \frac{\sqrt{6}}{2} \approx 1.22$ で安定することが分かる。

以上を、中間発表で報告した。

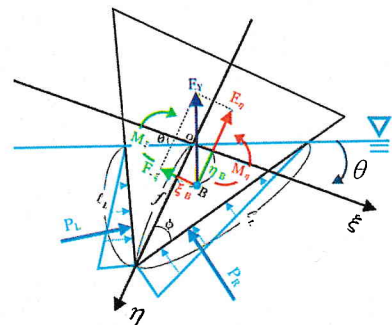


図1 三角柱に働く静水圧の分布

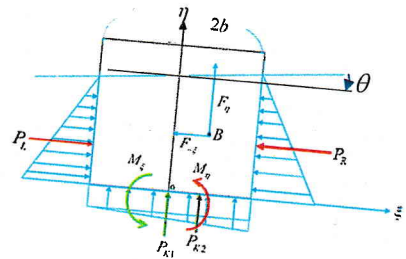


図2 長方形断面に働く静水圧の分布

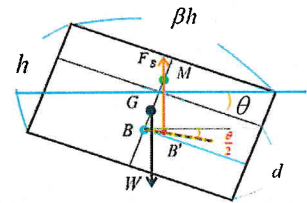


図3 復原モーメントが働く安定な状態

4.長方形断面を有する浮体の傾斜状態での安定姿勢

4.1 理論

傾斜して安定するには、浮心 B と重心 G が同一鉛直線上にあればよい。

このとき、図 4 に示す直角三角形 $\triangle GQB$ に対して

$$\overline{QB} = \overline{GQ} \tan \theta \dots\dots\dots(8)$$

の関係式が成立するから、傾斜角 θ は次式によって求められる。

$$\tan \theta = \frac{\sqrt{2\{6\alpha(1-\alpha) - \beta^2\}}}{\beta} \dots\dots\dots(9)$$

(9)式の分子の根号内が正になるためには、

$$\sqrt{6\alpha(1-\alpha)} > \beta \dots\dots\dots(10)$$

上式が成立すれば、(9)式で傾斜角を計算できる。また、(10)式は(7)式の符号が、反転していることが分かる。

メタセンター半径 \overline{BM} と、浮心 B と重心 G の距離 \overline{BG} は

$$\overline{BM} = \frac{I_x}{V} = \frac{\beta^2}{12\alpha \cos^3 \theta} h, \quad \overline{BG} = \frac{\xi_B}{\sin \theta} = \frac{\beta^2}{12\alpha \cos \theta} h \dots\dots\dots(11)$$

従って、メタセンター高さ \overline{GM} は

$$\overline{GM} = \overline{BM} - \overline{BG} = \frac{\beta^2 \tan^2 \theta}{12\alpha \cos \theta} h \dots\dots\dots(12)$$

(12)式を構成する α, β, θ はいずれも正の値を取ることから、 \overline{GM} は常に正の値となり、メタセンター M は重心 G より上方に位置することを意味し、(9)式より得られる傾斜角 θ は常に安定な状態である。

4.2 水面下形状が台形の小傾斜角

本卒論では、図 5 に示すように、材質が重い $\alpha \geq \frac{1}{2}$ と軽い $\alpha \leq \frac{1}{2}$ のどちらの場合でも、

浸水長の増減が乾舷 $h-d$ もしくは喫水 $d = \alpha h$ を超えない、

即ち、水面下の断面形状が台形を維持する状態を対象とする。

$\alpha \geq \frac{1}{2}$ の重い場合(左)

$$\frac{\beta h}{2} \tan \phi \leq h-d \quad \therefore \tan \phi \leq \frac{2(1-\alpha)}{\beta} \dots\dots\dots(13)$$

$\alpha \leq \frac{1}{2}$ の狭い場合(右)

$$\frac{\beta h}{2} \tan \phi \leq d \quad \therefore \tan \phi \leq \frac{2\alpha}{\beta} \dots\dots\dots(14)$$

(9)式で得られる傾斜角 θ は、(13),(14)式で得られる限界角 ϕ より小さくて

$$\theta \leq \phi \dots\dots\dots(15)$$

を満たす小傾斜角の範囲で有効である。

4.3 VBA による計算と図形の自動作成

傾斜した浮体の図は、Excel で計算した値をもとに作成する。これを手作業で行うと、ミスが発生する可能性や、一定の作業時間内で作成できる図の数に限りがあることがネックである。これを解決するために Excel の VBA にて、任意の材質 α と幅 β を入力すると、自動で計算をし、作図するマクロを組んだ。そのソースコードの一部を図 7、実行画面を図 8 に示す。

作図の精度は、図 9 に記す通り、図形の水深と傾斜角を測った結果、計算した値と一致したので、信頼性は高いものとする。

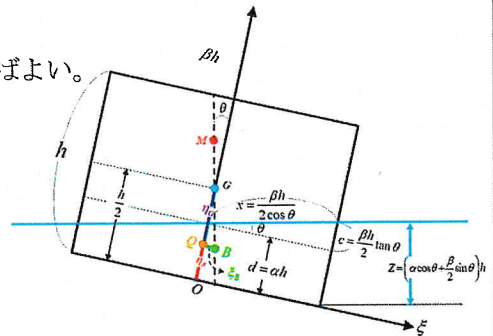


図 4 浮体が傾斜して安定する状態

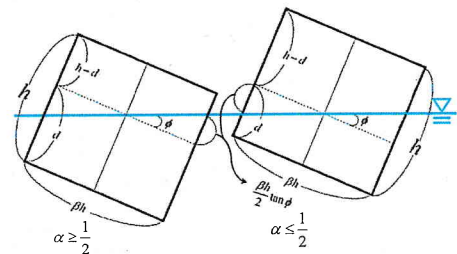


図 5 材質 α が 0.5 より大きいとき(左)と、小さいとき(右)の浮体

```

With Worksheets("Sheet1").Shapes("断面図")
.Height = Range("B3") * i
.Width = Range("B3") * Range("A3") * i
.Left = 13.36 * i
.Top = 5.13 * i - (Range("B3") / 2 - R:
.Rotation = Range("B3")
End With
With Worksheets("Sheet1").Shapes("Y軸")
.Left = 13.36 * i + (Range("B3") * Ran:
.Top = 0.67 * i
.Height = 18.22 * i
End With
With Worksheets("Sheet1").Shapes("重心")
.Width = 0.4 * i
.Height = 0.4 * i
.Left = 13.36 * i + (Range("B3") * Ran:
.Top = 5.13 * i + Range("B3") * i / 2
End With
With Worksheets("Sheet1").Shapes("G")
.Width = 1 * i
.Height = 1 * i
.Left = 13.5 * i + (Range("B3") * Rang:
.Top = 5.13 * i + Range("B3") * i / 2
End With

```

図 7. VBA ソースコードの一部

4.4 傾斜姿勢の計算結果

4.3 節の VBA プログラムによって、浮体の傾斜姿勢を作図した。
 図 8 の実行画面で、このように数値を入力すると、自動で計算して、作図できる。

幅β	高さh	材質α	θ(deg)	θ(deg)
1.1	10	0.4	31.65898	0.552518

喫水d	BG	BM	水深Z	初期化
4	2.951456	1.125854	6.291401	

φ(deg)	(φ-θ)deg	リセット
36.02737	4.370409	

傾斜姿勢一図形作成
計算
図形作成

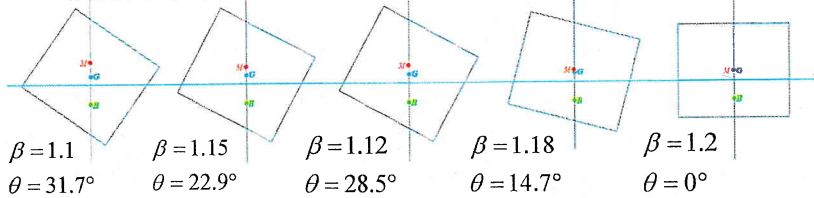


図 10 α=0.4 で固定し、β を変化させた場合

図 8 VBA プログラムの実行画面

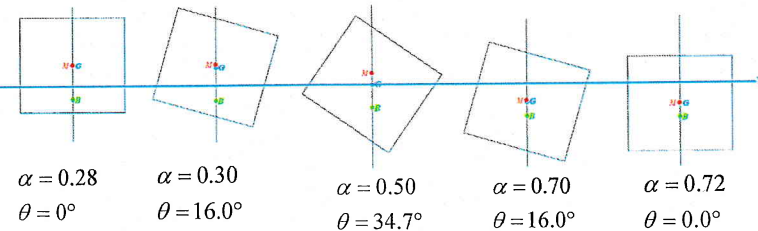


図 11 β=1.1 で固定し、α を変化させた場合

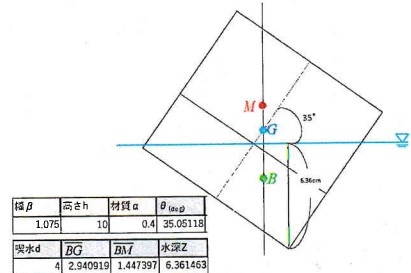


図 9 自動作画した図形の精度確認

図 10 材質を α = 0.4 で固定し、幅を β = 1.1, 1.12, 1.15, 1.18, 1.2 と変化させ、
 図 11 は幅を β = 1.1 で固定し、材質を α = 0.28, 0.3, 0.5, 0.7, 0.72 と変化させた結果である。
 この図 10 の結果から、β が狭い時は傾き θ が大きく、幅が広くなるに連れて、θ が徐々に小さくなっていく。また図 11 からは、材質 α が 0.5 (木材) の場合、傾きが最も大きく、それより重くなったり、軽くなれば、傾き θ が小さくなる様子が分かる。

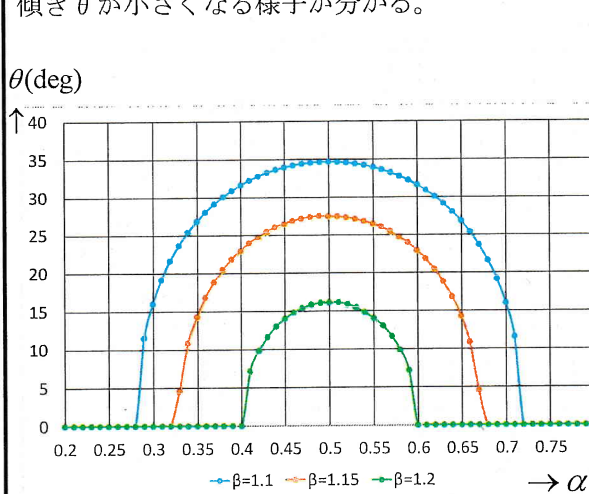


図 12 材質 α に対する傾斜姿勢 θ

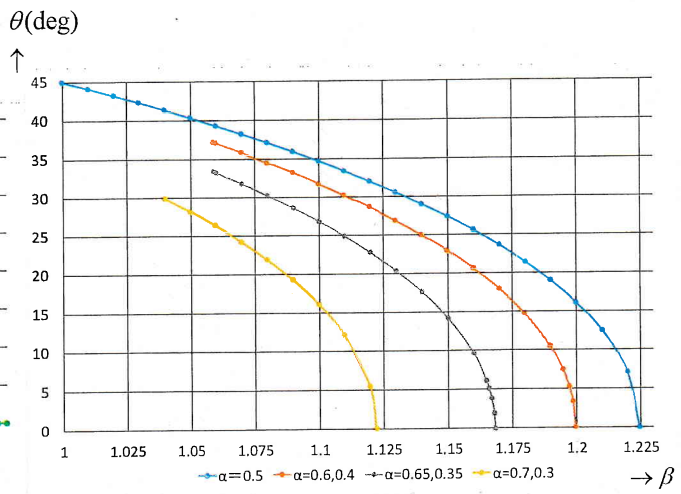


図 13 幅 β に対する傾斜姿勢 θ

図 12 は、α を横軸に取って、縦軸に θ を取っている。結果は、α = 0.5 を中心に、左右対称に得られ、α が 0.7 と 0.3 のように、足して 1 になる材質の傾斜角 θ は等しいことが分かる。また、幅 β が広くなると、θ は小さくなる。

図 13 は、β を横軸に取って、θ に対する依存性を示す。材質が α = 0.5 のとき、傾斜角 θ が最も大きく、図 12 に示したように、α と 1 - α の材質の傾斜角 θ は等しく、カーブは重なって得られる。

また、各 α について、置点できているのは、(13)、(14) 式の小傾斜角 φ の範囲内 (θ ≤ φ) であり、これより幅 β が狭くなると、傾き θ が大きくなって甲板が水没したり、船底が空中に浮上したりして、水面下形状が台形を維持できないため、本卒論の (7) 式では計算できない。

5. 結論

三角柱の「浮心=圧力中心」を証明し、長方形断面を有する柱状船の傾斜状態での安定姿勢を計算によって求め、幅や材質に対する依存性を VBA で図示することによって、明らかにした。

参考文献

- [1] 北浦 稔典, 沖野 直哉: 長方形断面の浮心と安定性に関する研究, 2021 年度長崎総合科学大学 船舶工学コース 卒業論文。
- [2] 堀 勉: 静水圧の圧力積分による船の浮心位置の決定 - その 4 : 三角柱に対する証明 -, 日本航海学会誌 NAVIGATION 第 213 号, 2020 年 7 月