

浮体の転倒条件

3602 赤津 孟

1. 研究の動機（背景）・目的

浮力、重心、力のモーメントといった履修済みの範囲の知識を活用して行える研究であるため。また、2014年4月に韓国で発生したセウォル号転覆事故の原因として、違法な改造、過積載、更に貨物の固定不十分などによる重心位置の変化があったことから、この研究内容に通ずるものが含まれると考え、こうした船舶事故全般に関して物理学的な視点から考察していきたいと思ったから。

$$h \begin{cases} I y / V - a > 0 \\ I y / V - a < 0 \end{cases} \quad \dots \alpha$$

浮体の安定条件を調べるために上記の公式を用いて、浮体の安定条件は浮体の重心位置が変化することによって変動するという仮説をもとに実験をおこなっていく。

2. 研究の方法・過程

本格的な実験の前段階で浮体に関する原理などの情報収集をおこなった。その結果から、浮体の安定条件と重心位置との関係を研究の中心の置くこととした。

今回の研究では実験と数理的計算の結果を比較して浮体の転倒条件を考察していく。

まず、浮体の転倒条件を判断するための式について解説していく。

重心Gから上向きにメタセンターMまでの距離をh、浮心Cから上向きに重心Gまでの距離をaとする。浮心がO点を中心に微小な角度θだけ時計回りに回転した場合を考える。求めるべき値はhである。この距離hをメタセンター高さという。

メタセンターは浮心の移動距離で決まる。浮心の移動は回転によって水没した部分が受ける浮力と水面から出た部分が失う浮力によって生じ、この移動量と獲得・消失した浮力を結びつけて考える。このため元の浮心位置C点周りのモーメントについて考える。(図1)

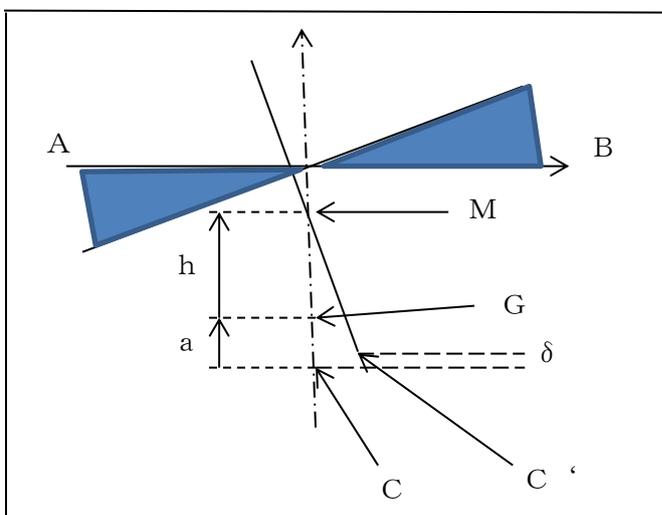


図1

回転後のC点周りのモーメントは獲得した浮力によって生じる反時計回りのモーメントと消失した浮力による反時計回りのモーメントの和で表される。回転前も回転後も没水している部分は同じ大きさの浮力が作用しているののでC点についてのモーメントには影響しない。

浮体の没水部分の体積をV、水の密度を ρ とすると、浮力の大きさBは $B = \rho g V$ となる。浮心の水平方向の移動距離を δ とすると、回転後のC点周りのモーメントは $(B \times d)$ の大きさで反時計回りである。

次に、回転によって獲得・消失した浮力のモーメントを考える。O点を原点に、右向きにx軸をとる。また、y軸を水面と平行に図2のようにとる。図中の幅 dx 、高さ $x \tan \theta$ 、奥行きYの塗りつぶし部分は点Oから距離xのところにあるので、この部分によって生じる浮力によるモーメントは $\rho g x^2 Y \tan \theta dx$ の大きさで反時計回りとなる。この微小部分は右端の点Aから、左端の点Bまでであるので、獲得・消失した浮力によるモーメントはこの微小部分の全ての和（図2の塗りつぶし部分）で表される。

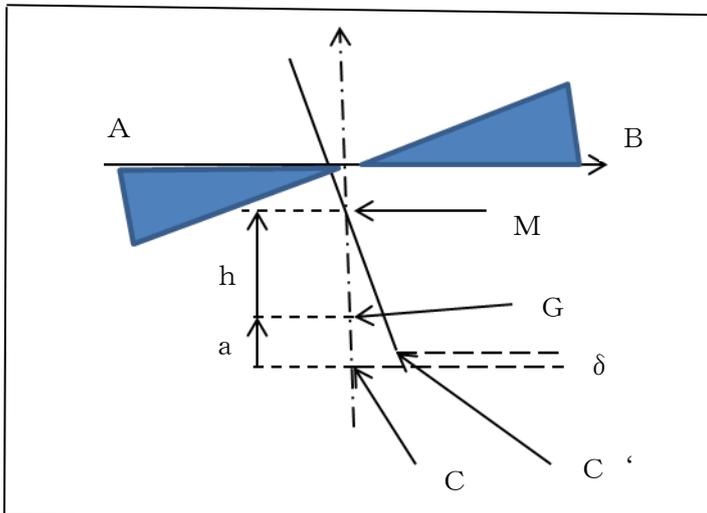


図2

$$\int_{-d}^d \rho g x^2 Y \tan \theta dx$$

これで塗りつぶしの部分で獲得・消失した浮力によるモーメント（これを断面二次モーメントという）が表される。

したがって、

$$\rho V g \times d = \int_{-d}^d \rho g x^2 Y \tan \theta dx$$

ここで、幾何学的関係を用いて

$$d = (h + a + \delta) \tan \theta$$

が得られる。ここでは $\delta \ll d$ であり、 θ も十分に小さいため、 $\delta \times \tan \theta = 0$ として、

$$h + a = \frac{1}{V} \int_{-d}^d x^2 Y dx = \frac{I y}{V}$$

以上より、

$$h \begin{cases} I_y / V - a > 0 & (\text{安定}) \\ I_y / V - a < 0 & (\text{不安定}) \end{cases} \quad \dots \alpha \quad \text{が得られる。}$$

今回は木製の浮体を利用した実験をおこなった。実験には以下の浮体を用いた。

3. 研究の成果・考察

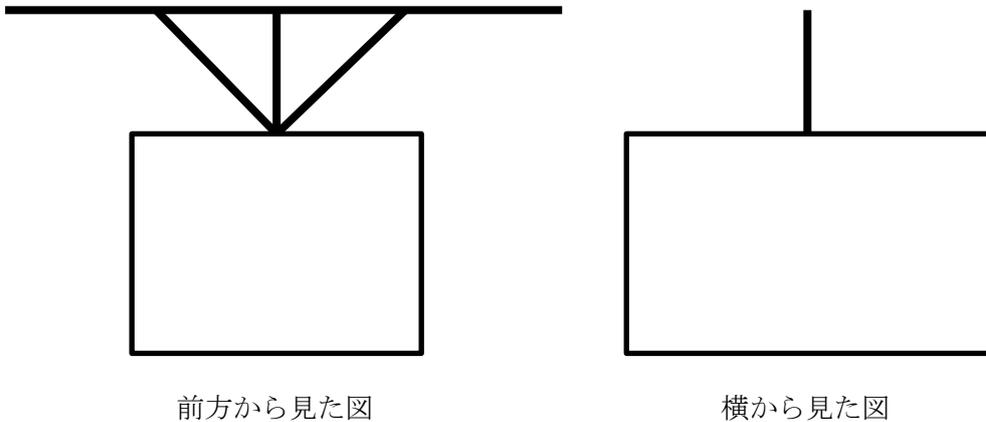
<実験方法1>

・使用する機材

発泡スチロール製の浮体（寸法：）…下図

上部おもり（大：35g、小：54g）

下部おもり（大：49g、中：20g、小：5.4g）



<実験方法1の結果>

上図のような浮体を用いて、下部おもりを浮体底面につり下げたうえで、上部おもりを浮体上面に設けた棒の左右につり下げ、上下だけでなく左右にも重心を移動させながら安定条件を測定していこうと考えた。しかし、実験用浮体単体を水に浮かべた時点で浮体の質量が極めて小さかったため、浸水した部分の体積が小さく、浮心を求めることが困難な状態であった。また、浸水部分を大きくするため、下部おもりの大をつり下げたところ、重心位置が極端に低くなり、上部おもりを取り付けると、その質量の大きさと奥行き小ささによって左右の方向ではなく、前後方向の安定条件もほぼ同時に喪失してしまう結果となった。また、左右に重心を移動させるため、計算が煩雑になってしまい、実験を行うことができなかった。

この実験方法1での反省をふまえて、以下の実験方法2で改めて浮体を作成し、実験を行った。

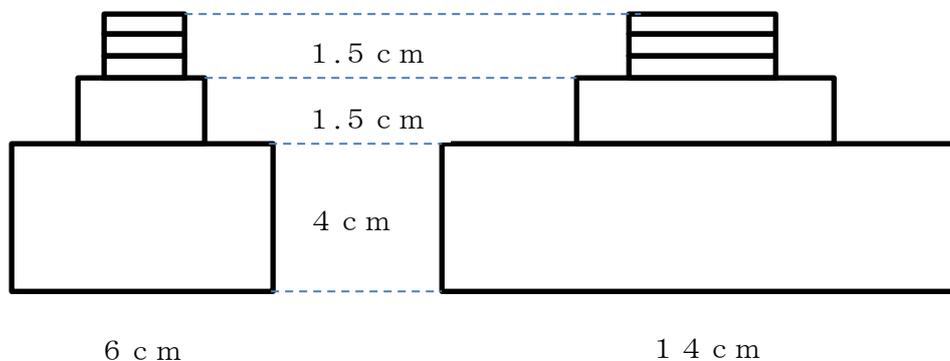
<実験方法2>

・使用する機材

木製の浮体（寸法：4×6×14 cm、質量：159 g）…下図

上部おもり（大：35 g、小：54 g）

下部おもり（大：49 g、中：20 g、小：5.4 g）



実験方法1での失敗をふまえ、浮体単体の質量と奥行きを大きくした上の木製の浮体を水に浮かべ、上部おもりを上面中央にのせ、安定条件を検証し、不安定の場合は下部おもりで調整しつつ安定条件を考察していく。今回は

<実験結果>

浮体に上面おもりのみをのせたときの各値は以下のとおりである。

上面おもり大をのせた時点で初めて浮体全体が転覆し、計算上hの値も負になった。よって、この時点で浮体は安定条件を喪失したとみなせるので、浮体に上面おもり大以上の質量をのせた場合に下部おもりを加え、安定を回復するまでに要した個数とhの値の変化を調べた。

	I_y/V	a	h
浮体のみ	0.017	0.011	0.006
浮体+上面大	0.009	0.0125	-0.0035
浮体+上面大+小1	0.005	0.013	-0.008
浮体+上面大+小3	0.004	0.018	-0.014

上表の状態の浮体の底面に下部おもりをつけたときの各値は以下のとおりである。

	下部おもり	I_y/V	a	h
浮体のみ				
浮体+上面大	中：1 小：3	0.006	0.001	0.005
浮体+上面大+小1	中：2	0.005	0.001	0.004
浮体+上面大+小3	大：1 中：1 小：1	0.004	0.001	0.003

<実験からの考察>

この実験から、以下のことが観察された。

1. 浮体上面に鉛直上方向に質量を加えていくと浮体は安定条件を喪失する
2. 1の状態では浮体下部に質量を加えていくと浮体は安定条件を回復する

これらの変化は実験方法2において、重心位置が深く関わっていると考えられる。

1に関しては、 I_y は計算結果より、浮体上面が水中に沈まないとき一定と考えられる。したがって、浮体上面に上部おもりをのせると重心位置は高くなり、浮体全体としての質量も増加するため、浸水部分が大きくなる。このとき、浮心位置は上昇するものの、相対的に a の値は大きくなっていく。したがって、 I_y/V の値が小さくなり、同時に a の値も大きくなるため、 h の値は0に近づいていき、ある程度の上部おもりをのせた時点で安定条件を失う。

同様に2に関しても下部おもりを浮体下面につり下げたことで浮体全体としての重心位置は下がり、同時に浮心位置も上昇していくので、結果的に a の値は小さくなる。 V の値も大きくなるが、安定条件の回復が観察されたことから a の変化と比較すると小さな変化だったと思われる。

また、浮体が木製であることから、密度が均一ではなく吸水性もあるため、作成時に浮かべてみながら重心位置の調整を図ったものの、比較的大きな誤差があったと考えられる。今回の実験では多少の傾きは安定状態にあると考えて行ったが、実際には上面おもり大をのせる以前に安定条件を喪失していた可能性も考慮し、上面おもり大をのせ、浮体が完全に横倒しになった状態のデータは正確性が高いと判断し、使用した。

これより、不安定な浮体に対して下部におもりを装着して重心を鉛直下向きに移動させる I_y/V 、 a の値は小さくなり、全体として h の値は正になり、浮体は安定する。したがって、この実験から静水上での浮体の安定条件は浮体の重心位置に影響されるという公式 α が確かめられた。

～2014年韓国フェリー転覆事故～

2014年に韓国で発生した大型フェリーセウォル号の転覆事故は、乗員・乗客295名が犠牲となった。ここからは今回の実験を踏まえ、この未曾有の船舶事故の原因について考察していこうと思う。なお、この事件に関してはいくつかの人為的要因が指摘されているが、ここでは重心位置の変化による安定条件の乱れに視点をおいて考えていく。

<事故時のセウォル号>

- ・貨物3608トン積載（最大積載量：987トン）
- ・バラスト水580トン（基準量：2000トン）
- ・コンテナはロープによる固定のみ
- ・客室を増やすなど、不適切な改造が加えられていた

<セウォル号沈没の経緯>

4月15日午後9時頃 - セウォル号出港

4月16日8時49分 - セウォル号、突然右45度（南西方向）の方向に旋回

4月16日8時52分 - セウォル号、さらに北に向けて旋回

急激な旋回船体は横倒しになる（すでに90度近く傾く）

4月16日10時17分 - 船体が船首底部を残して沈没

<事故原因の考察>

事故時のセウォル号の状態から、事故原因を次のように考察した。

過程1

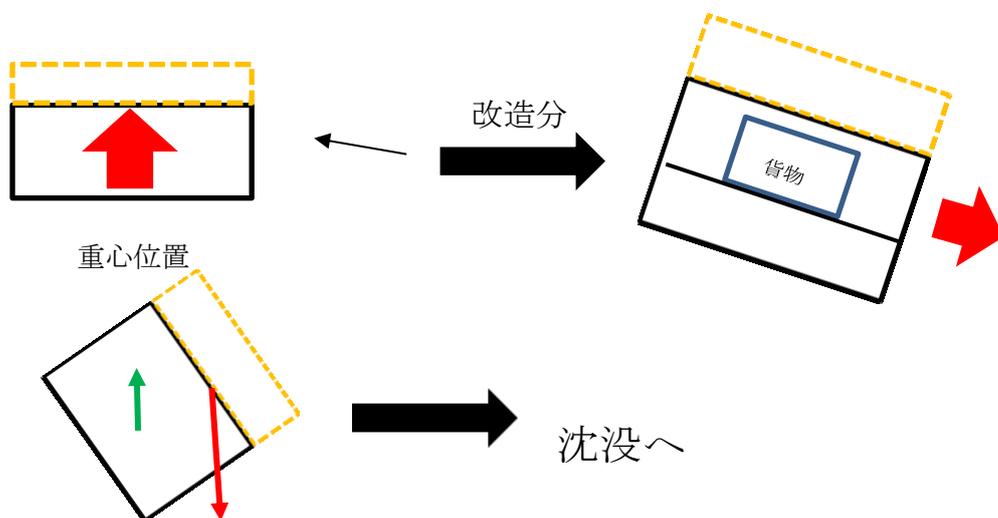
不適切な改造によって重心が上部、さらに後部に移動していた船体に積載上限の三倍に及ぶ過積載がおこなわれたうえに、重心位置を下部にずらし、船体を安定させるためのバラスト水が基準の4分の1程度であったことも重なり、セウォル号の重心は相当上部に移動していた状態と考えられる。

過程2

不安定だった船体を急激に旋回させたことでより不安定な状態になった。さらに、貨物の固定がロープのみというものだったために、旋回時の円運動に伴う慣性力によって貨物が偏った位置に移動し、重心が水平方向に移動した。

過程3

過程1, 2がかさなったことで、傾斜時の重心位置がメタセンターより低くなったことで船体が物理的に不安定になり、傾斜を回復することなく沈没に至った。



<本事件からの考察>

本事件では、不適切な改造に加えて過積載など、船体の重心位置を上方移動させる要因が重複した結果引き起こされた事故である。これは今回の実験において示された「浮体上面に鉛直上方向に質量を加えていくと浮体は安定条件を喪失する」という結果が示された例であることがわかった。本来船舶は基準を満たしていれば、容易に転覆しない構造（バラスト水など）に設計されている。しかし、こういった物理的メカニズムをなおざりにしてしまうと、安定条件がみだれ、一度に多数の犠牲者を出してしまう大事故につながる。

4. 今後の研究課題

実験に関していえば、より精密な結果が得られるよう、浮体自体を改良する必要性が大いにありと感ぜられる。木材という材質の性質上、密度が均一な浮体を作成することは困難で、安定条件を喪失した点が正確に観察できなかったと思われる。しかし、確実性の高いデータからは重心位置と浮体の安定条件の関係性が実証されており、今後はプラスチックやアクリル板を用いて浮体を作成し、より正確な実験値を得られるよう浮体の改良に努めていきたい。また、 I_y の値は浮体の寸法から影響を受けるので、縦、横、奥行きがそれぞれ異なった複数の浮体を作成し、今回のような実験を行うことも非常に興味深い。

後半の船舶事故の考察では、船舶事故と物理法則は密接に関係していることがわかった。一方で船舶の機能を著しく超過した運航による事故は絶えない。また、こういった事例は船舶にとどまらず、自動車や飛行機など、様々な輸送機械において発生している。私はこのことから、大学では、より安全で豊かな生活を生み出す輸送機械に関する研究を行ってこうと考えている。

今回の研究では、テーマにした物理法則の一部に高校物理の範囲を逸脱した内容も含まれていたものの、あまり多くの文献から知識をインプットできてはおらず、平面のモーメントの考え方を活用しつつ行ったため、空間のモーメントという物理法則全体を多角的に考察しきれていなかった。そのため、今後は関係する文献を読むなどして考えを深めることができるようにしていきたい。

5. 参考文献

『船の科学』吉田文二 著

数研出版 物理

『水理学A講義ノート』www.oit.ac.jp/civil/~coast/hydro/NoteHydraulics_Printer.pdf

類似ページ

『セウォル号以降の韓国海洋安全体制の整備』

oceans.oprf-info.org/analysis_ja02/b150119.html

『過積載や「船体改造」は利益至上主義のせい？ セウォル号事故に潜む韓国経済負の構造』

www.j-cast.com/2014/04/23203042.html

『船の復原力（船の豆知識）』www.nexyzbb.ne.jp/~j_sunami76/fukugen.html

『浮力と浮体の安定』www.oit.ac.jp/civil/~coast/hydro/07_Hy_a_Note_7-8.pdf類似ページ