

「船舶工学入門」 流体関係

内容構成は大筋で以下の通り

- ① 浮体の静力学と復原性
- ② 船が受ける抵抗
- ③ 推進器
- ④ 船の動揺

他に比べて流体関係だけ密度が違うが、造船系の大学院に進学しない限り「船の流体」を学ぶ機会が無いと思うので、一通りの基礎をカバーしておくことにした。

「浮体の静力学と復原性, 船舶算法」

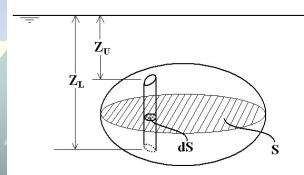
流体静力学(アルキメデスの原理など)に基づく計算は船舶の運用や初期設計では非常に重要な役割を演じて居り, 安定性判別に拘わる性質を(初期)復原性と呼んでいる。

また, それに用いる諸計算法を「船舶算法」と呼んでいる。

流体静力学, アルキメデスの原理 (1)

アルキメデスの原理:「流体中にある物体は, その物体が排除した体積を持つ流体の重量に相当する浮力を受ける」を証明するには静水圧の式: $P_s = \rho \cdot g \cdot z$ (z : 水面からの深さ)を使う。

任意形状の物体が水中にあるとし, 右図のように, 物体の水面に平行な面への投影面積: S の微小部分 ds の断面面積を持ち鉛直に延びる筒を想定する。



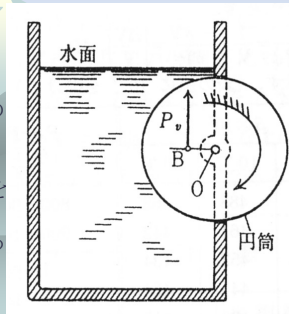
筒が物体を貫通する部分の上端を z_U , 下端を z_L とすれば, 大気圧: p_A に加えて上端には $\rho \cdot g \cdot z_U$, 下端には $\rho \cdot g \cdot z_L$ の静水圧が作用しているので, この筒には $\rho \cdot g \cdot (z_L - z_U) \cdot ds$ の浮力が作用することになる。これを投影面積: S 全体について積分すると, 下式のように浮力: F_B を得る。

$$F_B = \rho \cdot g \cdot \int_S (z_L - z_U) \cdot ds = \rho \cdot g \cdot \nabla$$

流体静力学, アルキメデスの原理 (2)

アルキメデスの原理から, 「水中にある物体はそれが排除した水の重量に相当する浮力を受ける」ので, 浮いている物体の重量は浮力に等しく船の重量を排水量と呼ぶのだが, これは飽くまで圧力積分の結果だということを忘れてはいけない。それを理解するためには次の例題(大串雅信:「理論船舶工学」上巻より)が好適である。

水を入れた容器の側壁に, 図のように円筒をその片側半分だけが容器内にあるように設置し, 軸 O の周りに自由に回転できるようにする。この場合, 半円筒断面の面積中心 B を通って鉛直上方に浮力が作用するので, この円筒は永久に回転運動を続ける。これが正しければ永久機関ができることになるので, 間違いであることは明白である。何処に論理矛盾があるか?

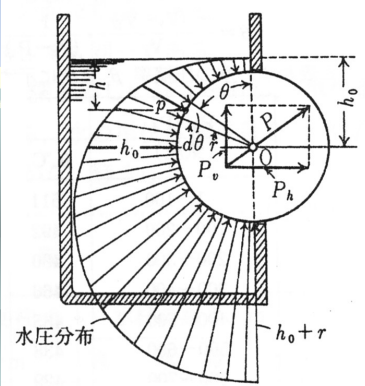


流体静力学, アルキメデスの原理 (3)

答えは「これは飽くまで圧力積分の結果だということを忘れてはいけない」という説明に書いてあるようなもので、右図に示すように、圧力は表面に垂直な方向に作用するので、そのベクトルは全てO点を通り円筒を回転させるO点の周りのモーメントはゼロになるからである。

では、アルキメデスの原理は「半円筒の面積中心Bを通して鉛直上方に浮力が作用する」ことを示唆しているのに、何故こうなるのか？

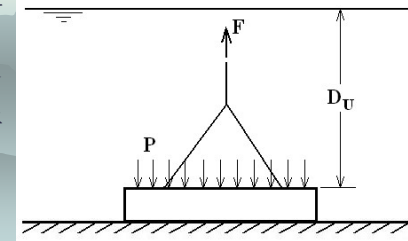
それはこの半円筒の片面が水に浸って居ないからである。片面が水に浸って居れば図の P_h の逆向きの力を受け、 P_v だけが残るのである。



海底に密着した物体 (1)

浮力が作用するのは物体が水中にある(周りを水に囲まれている)場合であって、海底にある場合は「周りを水に囲まれている」とは言えないので、意外に大きな差を生ずる。

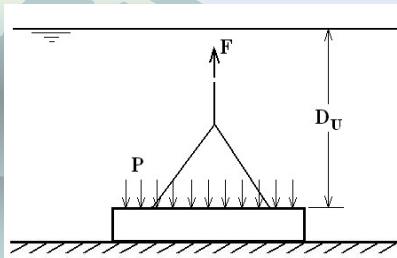
図で物体の上面に作用する静水圧は $\rho \cdot g \cdot D_U$ であるが、現実の圧力はこれに大気圧が加わる。大気圧は水頭換算で約10mであるから、現実の圧力は $\rho \cdot g \cdot (D_U + 10m)$ となる。これを上面の面積に掛けた値が下向きの力になり、それと物体の空中重量: W の和に釣り合う力: $F = \rho \cdot g \cdot S \cdot (D_U + 10m) + W$ で引かないと物体は持上らない。



海底に密着した物体 (2)

ところが、海底から僅かでも離れると物体の下側にも水圧が作用し、その値は $\rho \cdot g \cdot (D_U + T + 10m)$ となる。ここに T は物体の厚さである。したがって上下面の圧力の差から $B = \rho \cdot g \cdot S \cdot T$ の上向きの力(浮力)が作用するので、物体を持上げるのに必要な力: $F = W - \rho \cdot g \cdot S \cdot T$ となり、海底から僅かでも離れる前後で F には $\rho \cdot g \cdot S \cdot (D_U + T + 10m)$ もの差が発生する。

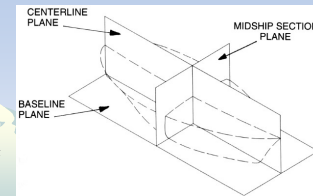
$S = 20m^2$, $D_U = 10m$, $T = 5m$, $W = 300t$ の例で計算すると、海底にある時は $F = 710t$ であったものが海底から僅かでも離れると $F = 197.5t$ になり、30%以下にまで激減することが分かる。



船の基準面など

船では、相直交する3つの平面を基準として使う。

1つ目の基準面はBaseline Planeと呼ばれる水平面で高さ方向の基準面、2つ目の基準面はCenterline Planeと呼ばれる垂直面、3つ目の基準面はMidship Section Planeと呼ばれる垂直面である。



船は底をBaseline Planeに接する形で乗っていると想定される。船体の形状は通常の場合左右対称であるが、Centerline Planeはその対称面に相当する。Midship Section Planeは船体長手方向の中央に位置する横断面である。

船が浮いている時、Baseline Planeが必ずしも水面に平行であるとは限らないが、計画状態では平行であると考え、水面からBaseline Planeまでの深さを喫水(Draught or Draft)と呼ぶ。

船舶算法

三国志に書かれている話

『呉』の孫権が『魏』の曹操に、象を贈った。初めて見る象の大きさに驚いた曹操は、家臣に象の重さを量るように命じた。大人たちが途方にくれる中で、曹冲という10歳の少年が答を出した。

まず象を舟に乗せて喫水線に目印をつける。次に同じ沈み具合になるように石を載せ、個々の石の重さを量って合計すれば象の重さが分かる。

巨大な船の重さを量るのは困難であるから、造船・海運の世界では今も同じ考え方を使い、計測した喫水をベースに船の総重量(排水量)や復原性などの諸量を推定している。貨物を積み下ろしする場合も、貨物重量の積算結果と喫水変化からの推定値を併用する。

とは言え、石を積んでCalibration(検定)をする訳には行かないので、Table of Offsetsを使った数値計算によりHydrostatic Tableと呼ぶ特性表を作成しておく。その際の計算法を「船舶算法」を呼んでいる。

船舶算法と計画諸計算の意義

船は流体静力学的な力:浮力(アルキメデスの原理より「水面下にある船の容積と同じ容積の水の重量に等しい」)に支えられて浮いている。「釣り合い状態」の必要条件は「浮力と重力の大きさが同一で、同じ鉛直線上で(逆向きに)作用している」ことであるから、船の初期設計においては、船を構成する要素の重量を積み上げて総重量と重心位置を予測するとともに、浮力の大きさと作用位置を推定することが基本的かつ極めて重要な仕事となる。つまり、浮力の大きさから空の船の重量を差引いたのが積載可能な貨物の重量であり、浮力に見合う水面下容積を移動させるのに必要な動力消費等の支出を貨物を運ぶことによる収入が上回る必要がある。

「船舶算法」とは、流体静力学的な計算に基づき、浮力の大きさと作用位置など、船の基本的な性質を規定する諸量を推定する手順である。具体的には、船体の形状データから任意の喫水状態における排水容積(水面下にある船の容積)と容積中心などを計算して居る。

排水量等曲線(Hydrostatic Curves)

喫水が最も浅い状態から最も深い状態までをカバーする範囲について排水量や水線面積などの諸量を計算し、喫水ベースにプロットした図を作成するが、それを排水量等曲線(Hydrostatic Curves)と呼ぶ。以下のような項目が含まれる。

- (1) 排水量(Displacement)
- (2) 浮心の前後位置(Longitudinal Center of Buoyancy)
- (3) 横メタセンター高さ(Height of Transverse Metacenter above Keel)
- (4) 浮面心の前後位置(Longitudinal Center of Floatation)
- (5) 浮心の上下位置(Vertical Center of Buoyancy)
- (6) 縦メタセンター高さ(Height of Longitudinal Metacenter above Keel)
- (7) 方形係数(C_B : Block Coefficient)
- (8) 中央横断面係数(C_M : Midship Section Coefficient)
- (9) 柱形係数(C_p : Prismatic Coefficient)
- (10) 水線面積係数(C_w : Water Plane Coefficient)

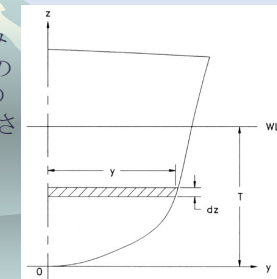
排水量(排水容積) (1)

船はアルキメデスの原理に基づく浮力によって自重を支えられて、水面に浮いている。すなわち、船の質量と同じ質量を持つ水の体積に相当する容積が水面下にあつて、没水部の容積中心と船の重心は同じ鉛直線上にある。重量と浮力およびそのモーメントが釣り合っているのである。したがって、没水部の容積(これを排水容積と呼ぶ)を計算する必要がある。

まず、各Stationについて適当な刻みで与えた喫水の値に対応して没水部の面積を計算する。Stationの形状が図のように与えられた時、Baselineからの高さがZ以下の部分の面積: $A_s(Z)$ は

$$A_s(Z) = 2 \cdot \int_0^Z y(z) \cdot dz$$

で計算できる。



排水量(排水容積) (2)

$A_s(Z)$ を船体長手方向に積分すれば, 排水容積: ∇ が計算できる. すなわち,

$$\nabla(Z) = \int_{AE}^{FE} A_s(Z) \cdot dx$$

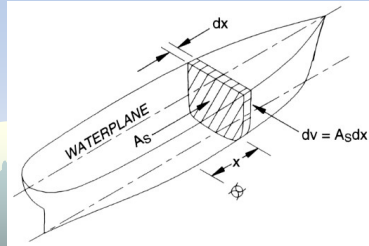
である.

排水量は慣例として「重量」で定義されて来たが, 工学に対してもSI unitが適用されたのに伴って質量で定義することも増えてきた. そのため

$$\Delta = \rho \cdot g \cdot \nabla$$

$$\Delta_m = \rho \cdot \nabla$$

の二通りで定義する. Δ_m は排水量(質量)の意味である.



浮心の前後位置

「浮力の作用中心(浮心:Center of Buoyancy)は没水部の体積中心だ」と定義している. 船体形状は左右対称であるから, 傾斜していない状態での浮心左右位置は船体中心面上である. したがって, 浮心の前後位置(とBaselineからの高さ)が分かれば良い. 浮心の前後位置(Longitudinal Center of Buoyancy: LCB)は排水容積の船体長手方向モーメントを

$$M_v(Z) = \int_{AE}^{FE} x \cdot A_s(Z) \cdot dx$$

で計算し, 排水容積で割れば計算できる. すなわち,

$$LCB(Z) = \frac{\int_{AE}^{FE} x \cdot A_s(Z) \cdot dx}{\nabla(Z)}$$

である.

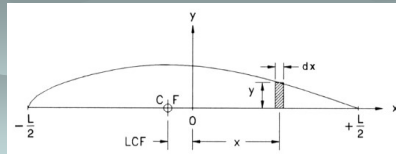
水線面積と浮面心 (1)

Baselineからの高さが z である水線面の片幅(Half Breadth)が $y(x,z)$ と与えられた時, 水線面積: $A_w(z)$ は

$$A_w(z) = 2 \cdot \int_{AE}^{FE} y(x,z) \cdot dx$$

で計算できる. 次に, 水線面の中心(浮面心)の前後位置: LCF (Longitudinal Center of Floatation)を計算するため, 水線面の船体長手方向モーメント: $M_{AW}(z)$ を下式で計算する.

$$M_{AW}(z) = 2 \cdot \int_{AE}^{FE} x \cdot y(x,z) \cdot dx$$



浮面心 (2)

水線面の船体長手方向モーメント: $M_{AW}(z)$ と水線面積: $A_w(z)$ から浮面心位置は下記のように求められる.

$$LCF(z) = \frac{2 \cdot \int_{AE}^{FE} x \cdot y(x,z) \cdot dx}{A_w(z)}$$

船の中で重量物が前後方向に移動した時には, 排水量が変わらずに船首尾の喫水を変える方向のモーメント(トリムモーメントと呼ぶ)だけが変化する.

その場合, LCFの位置における喫水は変化せず, 浮面心を通る左右方向の水平線を軸として船体は回転する(トリムする). 重心における喫水は変化せず, 重心周りにトリムしたのでは, 重心と浮面心のズレのために排水容積が変化してしまう.

浮面心 (3)

船の中で重量物が前後方向に移動すると、排水量が変わらずに船首尾の喫水を変える方向のモーメントだけが変化するが、その場合、LCFの位置における喫水は変化せず、浮面心を通る左右方向の水平線を軸として船体は回転する(トリムする)。

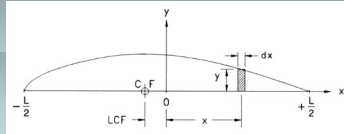
初期状態の喫水を $T_1(x)$ 、重量物の移動後の喫水を $T_2(x)$ とし、その差を $\Delta T(x)$ と書けば、これは x の一次関数になるので

$$\Delta T(x) = a \times (x - x_0)$$

と書ける。 x の位置で船長方向に微小幅: dx の帯を考え、この部分の浮力の変化: $\Delta B(x)$ を計算すると

$$\Delta B(x) = 2\rho g \times y(x) \times \Delta T(x) \times dx$$

を得る。これを船全体にわたって積分すれば、この喫水変化による船全体の浮力変化: ΔB が得られる。



浮面心 (4)

$$\begin{aligned} \Delta B &= 2\rho g \cdot \int_{AE}^{FE} y(x) \cdot \Delta T(x) \cdot dx = 2\rho g \cdot a \cdot \int_{AE}^{FE} y(x) \cdot (x - x_0) \cdot dx \\ &= 2\rho g \cdot a \cdot \left[\int_{AE}^{FE} y(x) \cdot x \cdot dx - x_0 \cdot \int_{AE}^{FE} y(x) \cdot dx \right] \end{aligned}$$

を得るが、この場合、船の中で重量物が移動しただけであるから排水量は変化せず、したがって浮力も変化しない。すなわち

$$\Delta B = 0$$

である。これより

$$\begin{aligned} 2 \int_{AE}^{FE} y(x) \cdot x \cdot dx &= 2x_0 \cdot \int_{AE}^{FE} y(x) \cdot dx = x_0 \cdot A_w \\ \Rightarrow x_0 &= \frac{2 \int_{AE}^{FE} y(x) \cdot x \cdot dx}{A_w} = LCF \end{aligned}$$

を得る。

浮心の上下位置

浮力は、没水容積の中心を通る鉛直線に沿い、上方に作用する。浮力の作用中心(浮心)の上下位置は定まらないが、便宜的に「没水部の容積中心を浮心」と定義している。

排水量は水線面積: $A_w(z)$ を上下方向に積分しても求めることができる。

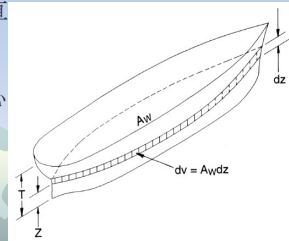
$$\nabla(Z) = \int_0^Z A_w(z) \cdot dz$$

同様にして排水量の上下方向モーメントを

$$M_{VK}(Z) = \int_0^Z z \cdot A_w(z) \cdot dz$$

で計算すれば、浮心の上下位置: KB を下式で計算できる。

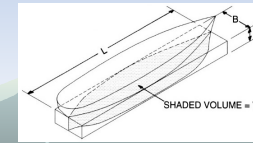
$$KB(Z) = \frac{\int_0^Z z \cdot A_w(z) \cdot dz}{\nabla(Z)}$$



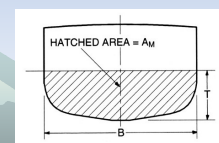
船型肥瘦係数 (Fineness Coefficients)

以上の諸量から、船型の肥瘦度(太っているか痩せているかの度合い)を表す係数が計算される。太っていることと痩せていることをあらわす形容詞が、fullとfineである。

$$\begin{aligned} C_B &= \frac{\nabla}{L \cdot B \cdot T} \\ C_M &= \frac{A_{S, \text{Midship}}}{B \cdot T} \\ C_P &= \frac{\nabla}{A_{S, \text{Midship}} \cdot L} \end{aligned}$$

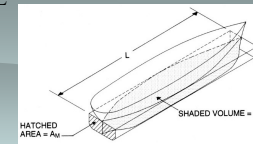


方形係数(Block Coefficient)

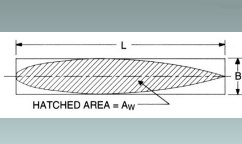


Midship断面係数(Midship Section Coefficient)

$$\begin{aligned} C_P &= \frac{C_B}{C_M} \\ C_W &= \frac{A_w}{L \cdot B} \end{aligned}$$



柱形係数(Prismatic Coefficient)



水線面積係数(Waterplane Area Coefficient)

排水量長比

Displacement-Length Ratio, Volumetric Coefficient

船型肥瘦度係数が直方体を基準にした肥瘦度係数であるのに対して、主寸法比も考慮した肥瘦度係数が排水量長比である。排水量は重さないし質量の次元を持つから船長の3乗で割っても無次元にならず、正確には排水容積長比でなければならないが、排水容積長比を習慣的に「排水量長比」と呼んでいる場合も多い。

下の定義式から明らかなように、 C_B に主要目の細長度を表す L/B と L/d を加味した形になっており、船型の細長度を総合的に反映した係数であるが、商船の速度領域では抵抗係数への寄与度が C_B や C_p に比べて小さいのであまり使われない。高速船を扱う時には重要な係数である。

$$\text{排水量長比} = \frac{1000 \cdot \nabla}{L^3} = 1000 \cdot \frac{\nabla}{L \cdot B \cdot d} \cdot \frac{B}{L} \cdot \frac{d}{L} = 1000 \cdot C_B \cdot \frac{B}{L} \cdot \frac{d}{L}$$

復原力について

(普通の)船はアルキメデスの原理に基づく浮力によって自重を支えられて、水面に浮いている。すなわち、船の質量と同じ質量を持つ水の体積に相当する船の容積が水面下に有って、没水部の容積中心と船の重心は同じ鉛直線上にある。重量と浮力およびそのモーメントが釣り合っているのである。

その釣り合いの状態から船が変位した時、水平面内の移動であれば有意な変化は無いが、鉛直方向の変位を伴う場合には、船に働く浮力およびその作用中心が変化する。

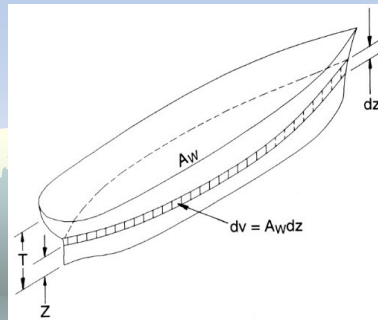
その変化分を復原力と呼ぶ。復原力は「もとの状態に戻す力」を意味するが、普通の船で上下揺れと縦揺れの場合には復原力であるものの、横揺れの場合には必ずしも発生した変位を戻す方向に働くとは限らない。

上下揺れの復原力

船が浮いている水面と船体が交差する部分の面積(右図の A_w)を水線面積と呼ぶ。

船が上下方向に dz だけ変位すると、水面下の船体容積は $A_w \cdot dz$ だけ変化する。船体に働く浮力は $\rho \cdot g \cdot A_w \cdot dz$ だけ変化する。船体重量と浮力は釣り合わなくなる。

その不釣り合い力が復原力であるが、上下揺れの場合は必ず変位を戻そうとする方向に作用する(上下揺れは常に安定である)。



「船舶工学入門」 流体関係

全5週の講義計画は大筋で以下の通り

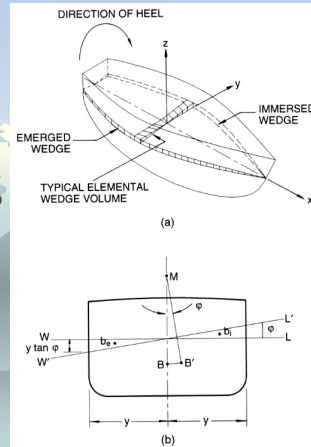
- 第1週 浮体の静力学と復原性(1)
- 第2週 浮体の静力学と復原性(2), 船が受ける抵抗(1)
- 第3週 船が受ける抵抗(2)
- 第4週 推進器, 船の動揺(1)
- 第5週 船の動揺(2)

横揺れの復原力: (横)メタセンター

船が水平状態から右図(a)のように小さな角度 ϕ だけ横傾斜したとする。右図(b)に断面図示す。ここでは、初期水面をWL、横傾斜後の水面をWL'と書いている。

初期状態における浮心: Bに作用する浮力の作用方向と傾斜後の浮心: B'に作用する浮力の作用方向が交差する点(横)メタセンター: Mである。

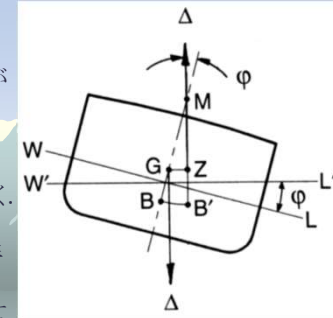
Mが重心より上にある時には傾斜時の船体に働く浮力と重力による偶力のモーメントは傾斜を戻す方向に働く(復原モーメント)が、下にあると不安定モーメントとなる。



(横)メタセンター高さ, 横安定

傾斜角が小さい範囲で、浮力ベクトルは常に横メタセンター: Mを通るから、重心: Gが横メタセンター: Mより下側に有れば、浮力と重力からなる偶力のモーメントは、図のように傾斜を元に戻す方向に働く。逆に重心: Gが横メタセンター: Mより上側に有れば、浮力と重力からなる偶力のモーメントは、傾斜を更に増大させる方向に働く。

したがって、重心: Gが横メタセンター: Mより下にあること、すなわち $GM > 0$ が横安定の条件となるのである。

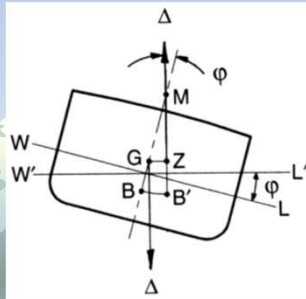


(横)メタセンター高さの計算 (1)

では横メタセンター: Mの高さはどのようにしたら計算することが出来るのだろうか？傾斜の前後で浮心が移動した距離を BB' 、浮心から横メタセンターまでの高さを BM と書けば、

$$\overline{BB'} = BM \cdot \tan \phi$$

であるから、 BB' が分かれば BM を知ることが出来、船底から浮心までの高さ: KB は流体静力学の計算で求めることが出来るから、船底から横メタセンターまでの高さ: KM を知ることが出来る。



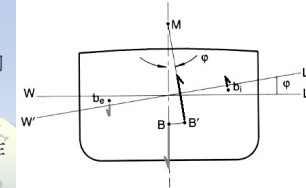
(横)メタセンター高さの計算 (2)

傾斜前後の浮力の変化を図に示す。傾斜前に作用していた傾斜後に消滅した浮力を逆向きの灰色矢印で、傾斜前には無くて傾斜後に作用している浮力を黒の矢印で示しているが、Bに作用していた浮力がB'に作用することになった変化分:

$BB' \cdot S$ (S: 没水断面積)の偶力モーメントは、 b_e の浮力が無くなって b_i の浮力が現れたことによって生じている筈である。

横傾斜角: ϕ は極めて僅かな角度であるから、水面上に現れた船体部分の三角形と水面下に没した三角形の面積は $y^2 \cdot \tan \phi / 2$ である。それらの三角形の面積中心を b_e , b_i とすると、船体中心面からの距離は共に $2y/3$ である。したがって、 b_e の面積が無くなって b_i の面積が現れたことによって生じるモーメントは下式となる。

$$M_T = y^2 \cdot \tan \phi / 2 \cdot \{2y/3 - (-2y/3)\} = 2 \cdot y^3 \cdot \tan \phi / 3$$



(横)メタセンター高さの計算 (3)

b_e と b_l の面積の出入りによって生じるモーメント: M_T

$M_T = y^2 \cdot \tan \varphi / 2 \cdot \{2y/3 - (-2y/3)\} = 2 \cdot y^3 \cdot \tan \varphi / 3$
は $BB'S$ に等しいので

$$BB'S = 2 \cdot y^3 \cdot \tan \varphi / 3$$

を得る。二次元体の長さを L とし、
浮心 B と区別するために幅を BR
と書けば($\nabla = L \cdot S$, $BR = 2y$),

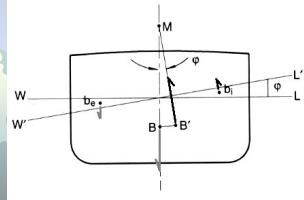
$$BB' = L \cdot BR^3 \cdot \tan \varphi / (12 \cdot \nabla)$$

となるが, $BB' = BM \cdot \tan \varphi$ であるから, 結局,

$$BM = L \cdot BR^3 / (12 \cdot \nabla)$$

を得る。ここに, $L \cdot BR^3 / 12$ は長さ L , 幅 BR の長方形(水線面)の中心線周りの二次モーメント: I_T であるから, 最終的に下式を得る。

$$BM = I_T / \nabla$$



図形の二次モーメント: I_T

長方形(水線面)の中心線周りの二次モーメント: I_T と言ったのは, 材料力学で梁に作用する曲げモーメントと歪の関係を表す際に出てくる「断面二次モーメント」のことである。

断面形	中性軸A(cm):C	断面積A (cm ²)	断面二次モーメント I (cm ⁴)	断面係数Z (cm ³)
	$h/2$	bh	$bh^3/12$	I/C
	$(b_1 h_1 (h_2 + h_3/2) + b_3 h_3 (h_2/2)) / A$	$b_1 h_1 + b_2 h_2 + b_3 h_3$	$(b_1 h_1^3 + b_1 (h_1 - C)^3 + b_2 (C - h_3)^3) / 3$	I/C
	$(b_1 h_1 (h_2/2) + b_3 h_3 (h_2/2)) / A$	$b_1 h_1 + b_2 h_2 + b_3 h_3$	$(b_1 h_1^3 + b_3 (h_1 - C)^3 + b_2 (C - h_3)^3) / 3$	I/C
	$(b_1 h_1 (h_2/2) + b_3 h_3 (h_2/2)) / A$	$b_1 h_1 + b_2 h_2 + b_3 h_3$	$(b_1 h_1^3 + b_3 (h_1 - C)^3 + b_2 (C - h_3)^3) / 3$	I/C
	$(b_1 h_1 (h_2 + h_3/2) + b_3 h_3 (h_2/2)) / A$	$b_1 h_1 + b_2 h_2 + b_3 h_3$	$(b_1 h_1^3 + b_1 (h_1 - C)^3 + b_2 (C - h_3)^3) / 3$	I/C
	$b_1 h_1 (h_2 + h_3/2) + b_3 h_3 (h_2/2) + b_4 h_4 (h_2/2) + b_5 h_5 (h_2/2) / A$	$b_1 h_1 + b_2 h_2 + b_3 h_3 + b_4 h_4 + b_5 h_5$	$(b_1 h_1^3 + b_1 (h_1 - C)^3 + b_2 (C - h_3)^3 + b_4 (h_4 - C)^3 + b_5 (C - h_5)^3) / 3$	I/C

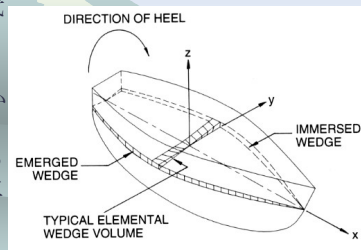
(横)メタセンターの計算 (4)

船のような三次元体の場合には水線面の中心線周りの二次モーメント: I_T は

$$I_T = \int_{AE}^{FE} 2 \cdot \int_0^{y(x)} y^2 \cdot dy \cdot dx = \frac{2}{3} \int_{AE}^{FE} y(x)^3 \cdot dx$$

で計算できるから, 先の式に代入すれば BM が得られる。

これは, 傾斜によって, 片方が楔状の船体部分が水面下から水面上に現れ, 反対側では楔状の船体部分が水面上から水面下に没することによって生ずるモーメントを計算していることになる。



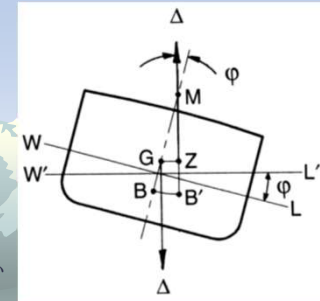
(横)メタセンター高さ (最初のスライド)

では横メタセンター: M の高さはどのようにしたら計算することが出来るのだろうか? 傾斜の前後で浮心が移動した距離を BB' , 浮心から横メタセンターまでの高さを BM と書けば,

$$BB' = BM \cdot \tan \varphi$$

であるから, BB' が分かれば BM を知ることが出来, 船底から浮心までの高さ: KB は流体静力学の計算で求めることが出来るから, 船底から横メタセンターまでの高さ: KM を知ることが出来る。

そして横メタセンター: M が重心: G より上にあれば, 船は安定に浮くのである。



初期復原性 (Initial Stability)

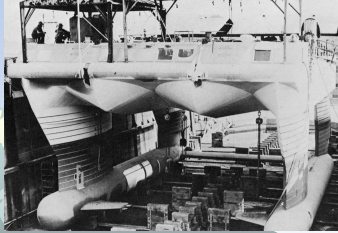
「初期」というのは変位の初期を意味し、初期復原性とは「釣りあって浮いた状態から少しだけ変位した範囲での復原性」のことである。

写真は世界で最初に建造された SWATH(Small Waterplane Area

Twin Hull)で、水線面積が小さく、波浪中動揺が小さいという特性を

持つ反面、上下揺れと縦揺れの復原力が小さいという難点を持つ。こうした特殊な例を除けば、上下揺れと縦揺れの復原性は十分であるので、復原性=横揺れの復原性であると言って良い。

横(揺れの)復原性については(横)メタセンター高さ(KM_T)が重要な量であるが、重心との相対位置関係で復原性が決まるので、重心位置の推定が重要になる。



重量・重心の推定 (1)

船の重量分布は浮力のように均質ではないから、単純な計算で重量・重心を求めることは出来ず、積上げ計算による。軽貨状態(船が出来上がったが、貨物や燃料、乗組員や乗客などの搭載物を一切載せていない状態)を構成する大区分について極めて簡略化された計算例を挙げると、次の通りである。

実際には、こうした大区分の重量・重心を求めるためにも詳細な積上げ計算が必要である。また、上下方向だけでなく前後左右方向についても計算する必要がある。

	重量(MT)	KG(m)	Moment(MT・m)
船殻	4,402	7.70	33,895.4
機関	889	5.70	5,067.3
艙装品	1,859	12.80	23,795.2
軽貨状態	7,150	8.78	62,757.9

重量・重心の推定 (2)

別の船について或る載貨状態の重量・重心を推定した例を示す。軽貨状態の重量が7,675MTで重心のKeelからの高さが9.58mである船で、或る載貨状態における通常貨物、冷凍貨物、燃料、清水、乗員などの重量、重心のKeelからの高さが下表の左上から3列7行までの通りである。

こうした推定計算を載貨状態毎に行う。

	重量(MT)	KG(m)	Moment(MT・m)
軽貨状態	7,675	9.58	73,520.0
通常貨物	8,520	8.48	72,287.0
冷凍貨物	355	8.09	2,871.6
燃料	2,456	1.64	4,033.1
清水	257	6.96	1,789.7
乗員など	63	12.16	766.3
全体	19,326	8.03	155,268.7

重量物横移動の影響と傾斜試験

図(a): 船が直立した状態から船上の重量物: Wが横移動したとする。重量物の移動による船体重心の移動量は次式で与えられる。

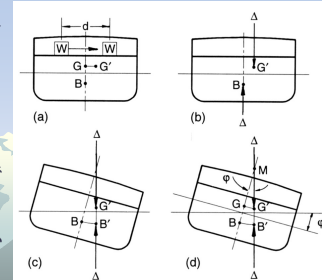
$$\Delta \cdot GG' = W \cdot d \rightarrow GG' = W \cdot d / \Delta$$

図(b): 重心移動により直立状態では傾斜モーメントが釣り合わない。

図(c): 浮心: BがB'へ移動し、重心の真下に来るまで船は傾斜する。

図(d): 傾斜角を φ と書くと、 $GG' = GM \cdot \tan \varphi$ であるから、上式に代入して次式を得る。この式は、船上で重量物を横方向に移動することによって発生する傾斜角を計測して、GMを確認するための傾斜試験の解析に用いられる。

$$\tan \varphi = \frac{GG'}{GM} = \frac{w \cdot d}{\Delta \cdot GM}$$



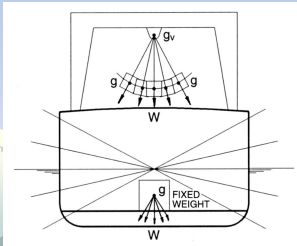
吊り上げられた重量物

船上固定と吊り上げられた重量物につき傾斜した際の重力の作用の相違を示す。吊り上げられた重量物の重心は吊り点の位置に有ると見なすべきことが理解される。貨物が船上のデリックで吊り上げられると、その瞬間に重心は g から g_v へ上昇し、下式に示すだけ船全体の重心も上昇してGMが減少する。

$$GG' = \frac{w \cdot gg_v}{\Delta}$$

しかし、普通の船の積み荷を扱う上で上記のような配慮が必要な場合は殆ど無いと言って良い。その理由は、クレーン吊り上げられる重量は船の排水量に比べて無視できる値に過ぎないからである。

ただし特殊な重量物運搬船やクレーンバージなど、重量物を吊り上げる船の復原性検討に際しては、こうした配慮が必要になる。



クレーン船による橋梁の一括架設



自由水の影響 (1)

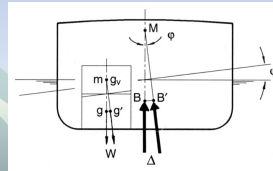
船の傾斜にしたがって自由に動き得るものが船上にあることは復原性能に悪影響を及ぼす。船で最も普通に見られる「自由に動き得る搭載物」は、不十分に満たされたタンク内の液体である。

図で、船が直立状態から ϕ だけ傾斜すると浮心: B は B' に移動するが、 B' はメタセンターの真下であり、 BM は次式で求められる。

$$BM = \frac{I_t}{V}$$

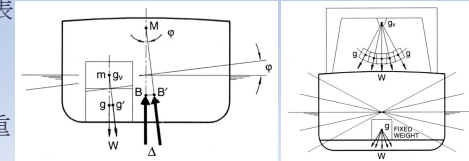
自由表面を持つタンク内の液体の場合も船が直立状態から ϕ だけ傾斜すると、液体は低い側へ移動して重心: g は g' に移動するが、 g' は g からの高さが次式で求められる m 点の真下にある。ここに、 i_t : 自由表面の船体前後方向の中心軸周りの二次モーメント、 v : タンク内の液体の体積である。

$$gm = \frac{i_t}{v}$$



自由水の影響 (2)

この様子は、自由表面を持つタンク内の液体が m 点から吊り下げられているのと同じであり、液体の重心が g ではなく m に



あると見なせば自由表面の影響を考慮して復原性の評価をすることが出来るので、 m を見掛けの重心という意味で g_v と書き直す。すなわち、自由表面の影響によってタンク内の液体の重心は $gg_v = i_t/v$ だけ上昇すると見なす必要がある。したがって、タンク内の液体の重量を w と書けば、船全体の重心が

$$GG_v = \frac{w \cdot gg_v}{\Delta} = \frac{w \cdot i_t}{\Delta \cdot v} \quad \text{ここに、}\Delta\text{は浮力の大きさ(=船の排水重量)}$$

だけ上昇することになる。この量を自由表面を持つ全てのタンクについて計算して合計すれば、自由表面による復原性の悪化量が推定できる。

損傷時復原性 (Damaged Stability)

以上に初期復原性の説明をしたが、これは「真直ぐに浮いた状態から少しでも傾斜した範囲における復原性」を意味し、限定的なものである。傾斜角が大きくなった場合や動的な影響については別途考慮する必要があるが、それらを合わせて非損傷時復原性 (Intact Stability) と称する。

一方、外板が破れて船内に浸水する場合の復原性を Damaged Stability と称し、浸水範囲を限定するため船内を如何に水密隔壁で区切るかが重要になる。

英国 Greenwich に保存されている現存唯一の Tea Clipper “Cutty Sark” (写真) は 1869 年に進水しているが、当時は船内に全く隔壁が無く、Titanic の頃に不十分ながら隔壁ができた。



隔壁 (Tight Bulkhead)

「1869 年進水の Tea Clipper “Cutty Sark” の頃には船内に全く隔壁が無かった」と書いたが、当然ながら船内全体が仕切りの無い一部屋であった筈がないので、間仕切り壁はあったに違いない。建築の場合に「構造物として考慮される壁」と「間仕切り壁」が区別されるように、隔壁 (Water-Tight Bulkhead) は区切られた片方の区画が満水になっても十分に耐え得る強度を持って居なければならないが、そういう壁は無かった。

こうした隔壁で船内を区切って置けば、外板に穴が開いた時に浸水する範囲を限定することができ、Damaged Condition における安全性を確保することが可能になる。

また「Titanic の頃に不十分ながら隔壁ができた」と書いた。それで「Titanic は不沈」と言われたが、外板の損傷範囲が想定以上に広がったこと、隔壁が区画の上端まで達して居なかったため Progressive Flooding を起こしたことが原因で沈没した。

練習問題

- 下の表の Original に書かれているような主要目を持つ船の中央部に、長さ 20m で中央断面と同じ断面を持つ平行部船体を挿入して船型を改造 (大型化) する。表の空白になっている部分を埋めよ。

	Original	New
L (m)	200	
B (m)	35	35
T (m)	10	10
C_B	0.675	
C_M	0.970	
A_W (m ²)		
C_W	0.750	
C_P		
W (ton)		

- W は海水 (比重: 1.025) 中の排水量

練習問題

- 図の (a) のように長さ 10m、幅 4m、厚さ 2m で比重が 0.5 の均一な直方体があるとする。比重が 0.5 だから半分だけ水に浸かって浮くが、力の釣り合いだけでなくモーメントの釣り合いも考慮すると、浮いた姿勢として考えられるのは図の (b), (c), (d) の 3 通りしかない。では、実際にはどの姿勢で浮くのだろうか?
- 答は、それぞれの場合について初期復原性をチェックすることで得られる。

