

「船語の説明から船舶算法まで」 「初期復原性」

元今治造船寄付講座教授
愛媛大学客員教授 土岐直二

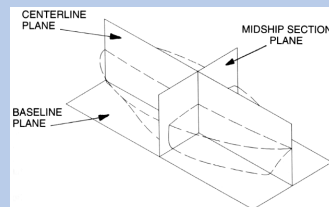
話の流れ

- **船に係わるイロハ** ----- 造船海運業は近代の先駆けであったためか船独特の言葉使いがあり、「船語」と揶揄されることがある。
- **流体静力学と船舶算法** ----- 船は重量と浮力が釣り合って浮いており、浮力が水面下容積に比例しているため、船体の形状データから重量と喫水の関係などの基本的な諸量を推定できる。
- **重量と浮力のバランス** ----- 貨物比重の影響と局所的なバランスの崩れから起こることの例。
- **復原性** ----- 上下運動と船首上げ船尾下げの回転運動(縦揺)は十分な復原性を持つが、左舷上げ右舷下げの回転運動(横揺)は復原性確保に配慮が必要である。

船語の説明 船の基準面

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は水面に平行でないのが普通であろうが、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。

排水量(典型的な船語1)

排水量(displacement)という言葉の意味は、言葉自体から言えば「(船が有ることによって)排除される水の量」である。

アルキメデスの原理より、排水量分の水の重量は船に働く浮力に等しく、船は重量と浮力が釣り合って浮いているから、船の重量と等しい。

そのため、排水量は「船の重さ」(ないしは「船に働く浮力」)を意味する言葉として使われる。

「排水量1万トンの船」は「総重量が1万トンの船」を意味し、「喫水x mにおける排水量がy ton」は「喫水x mの状態に船に働く浮力はy ton」という意味である。

海里とノット(典型的な船語2)

国際海里 (metric nautical mile) = 1852メートル。ベッセル楕円体の極と赤道の距離の90×60分の1。従来どこが決めたかにより僅かな相違があったが、現在では国際的に統一された。

1海里/時の速度を1ノットと呼ぶ。

(旧)英海里 (old) admiralty mile = 6082フィート = 1853.793メートル。緯度1分の平均。

(新)英海里 (new) admiralty mile = 6080フィート = 1853.184メートル。緯度48度での緯度1分。

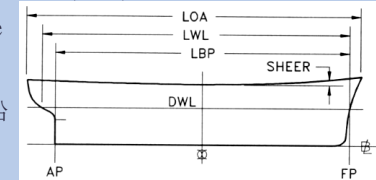
メートル = 地球の北極から赤道までの子午線の長さの1,000万分の1 (革命後のフランスで決めた長さの標準。これで計算すると、国際海里と15cmの差がある)

1海里 = 10,000,000m/90/60 = 1851.85m

長さなど

▶ 側面図ではBaseline PlaneはBaseline (B.L.)として示される。

▶ 計画喫水線(Design Water Line = DWL)が船首Profileと交差する点を通る垂直線が船首垂線(Forward Perpendicular: FP)、船尾の舵軸を通る垂直線が船尾垂線(After Perpendicular: AP)。



▶ その間を二等分する横断面を船央断面(Midship Section= 船央断面と呼ぶ)。

▶ 二つの垂線間の距離が垂線間長(Length between Perpendiculars = LBP or LPP)で、単に船長というときはLBPであることが多い。船尾垂線が舵軸を通るため、水線が船尾Profileと交差する点は船尾垂線と一致しないので、水線が船首と船尾Profileと交差する点の間の長さはLBPと異なり、水線長(Water Line Length = LWL)と呼ぶ。更に水面上の張り出し部も含めた船殻部の全長をLength Over All = LOAと呼ぶ。

Sheer, Trim

▶ 船首尾は中央部に比べて海水を被りやすいため甲板を傾斜させて高くすることがあるが、その量をSheerと呼ぶ。

▶ 古い貨物船(三島型貨物船)では上甲板(Upper Deck)にSheerを付けるだけでなく、更に船首尾の甲板をUpper Deckより上に一層多く取っていて、船首側の甲板を船首楼甲板(Forecastle Deck = F'cle Deck)、船尾側の甲板を船尾楼甲板(Poop Deck)と呼んでいた。



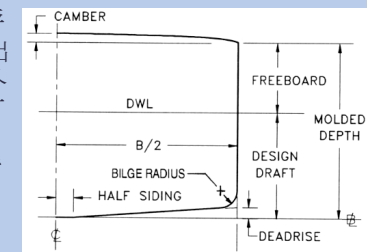
▶ 計画状態では水面がBaselineと平行になっていると想定して居り、船首でも船尾でも喫水は同じであるが、一般的には船首喫水と船尾喫水は異なる。その場合、船首喫水を T_F 、船尾喫水を T_A と書き、平均喫水(Midshipにおける喫水): $T_M = (T_F + T_A) / 2$ のように書き表す。

▶ 船首と船尾における喫水の相違量をトリム(Trim)と言い、通常は船尾喫水が大きい場合を正とするので、

Trim (by Stern) = $T_A - T_F$
である。

幅、深さなど

▶ 昔の船は船底に竜骨(Keel)と呼ばれる前後方向の部材が張り出していたが、現在では若干厚い外板(幅の半分がHalf Siding)が有るだけで、その上面がBaseline Planeである。船底は殆ど平らで外側に向かって僅かに競り上がっており(DeadriseまたはRise of Floor)、船側面は垂直である。



Midship断面

▶ 甲板の線が最大幅の線と交差する点のBase Lineからの高さが型深さ(Molded Depth)。同じ点の計画喫水線からの高さが乾舷(舷側の乾いている部分という意味。Freeboard)。甲板は中心線部分が高くなっていて、一番高い中心線上と型深さの高さの差をCamberと呼ぶ。船側面と船底面は滑らかに繋げられ、Midship断面付近では船体前後方向を向いた円筒表面に接する形に整形されているが、その円筒の半径をBilge Radiusと呼ぶ。

主寸法などの定義、Mold

- ▶ 計算機制御の鋼板切断機や型材曲げ装置などの無い時代には、船体の断面形状の実寸大の型(Mold)を作り、Moldに合わせてFrameを加工して組み立ててSkeltonを造り、それに外板を張って船体を造っていた。
- ▶ 船の図面ではその時代からの伝統(因習)が残っていてMoldの図面を作る場合が多く、例えば単に幅(Breadth)というのはMoldの幅=型幅(Breadth molded)である。実際にはその外に外板が張られるので、実際の幅は型幅より外板厚さの2倍だけ大きい。
- ▶ 先に説明した主寸法も、通常はMoldの値を意味する。



主寸法の制限と船体の形状

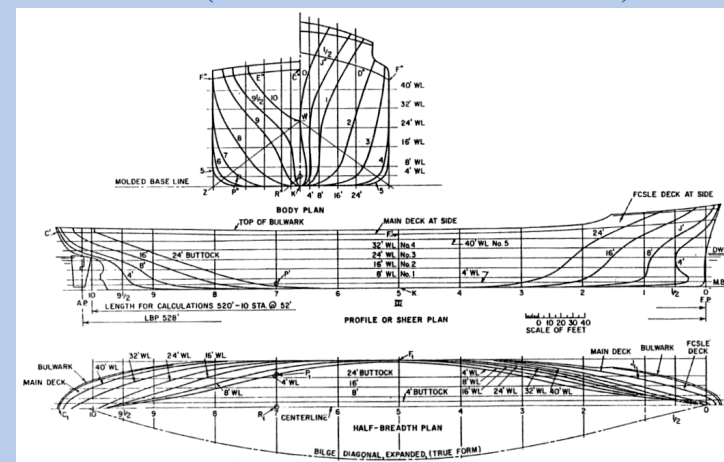
- ▶ 普通の船では船側は垂直かつ船底は平らに近く、船首尾が細く整形されているだけであるが、このような形状は船の周囲の水の流れをスムーズにするという観点からは好ましくない。しかし、港湾には喫水の制限があり、水路には幅の制限があるので、主寸法制限の中で船を設計せざるを得ず、出来るだけ多くの荷物を積み込む(大きな排水量を確保する)には上記のような形状が望ましい。また、建造上も好都合である。
- ▶ そうした制限を度外視した設計の例が近代の潜水艦である。図形の面積と外形線の長さの比が最大の平面図形は円であるから、船体横断面を円形にすれば一定排水量に対する浸水面積を最小にして摩擦抵抗を低減することが出来る。
- ▶ 船体長手方向の断面積分布を前進抵抗を最小にする観点から決めたのが、潜水艦に採用されている涙滴型(Tear Drop type)の船型である。



船体形状の表現

- ▶ 船体の形状、特に通常の状態で水面下にある部分の形状は船の速力性能と関連で重要であるが、船体表面は船が走る際の抵抗を少なくするため滑らかな曲面になっているので、それをキチンと定義することは結構難しい。
- ▶ 表現手段の代表格は、線図(Lines drawing, the Lines)と呼ばれる図面と船体表面上の点の座標値を表にしたTable of Offsetsである。
- ▶ 三面図表示される所は、線図も通常の機械などの図面と同じであるが、船体表面に表れた線は殆ど無いので、多数の断面線を表示することによって形状の詳細を表現している。
- ▶ 最近では三次元CADの図面で表現されることが多くなっているが、滑らかな船体表面を扱う難しさは解消されていない。

線図(Lines Line図ではない)



Linesの例(Mariner型貨物船)

船体断面の名称

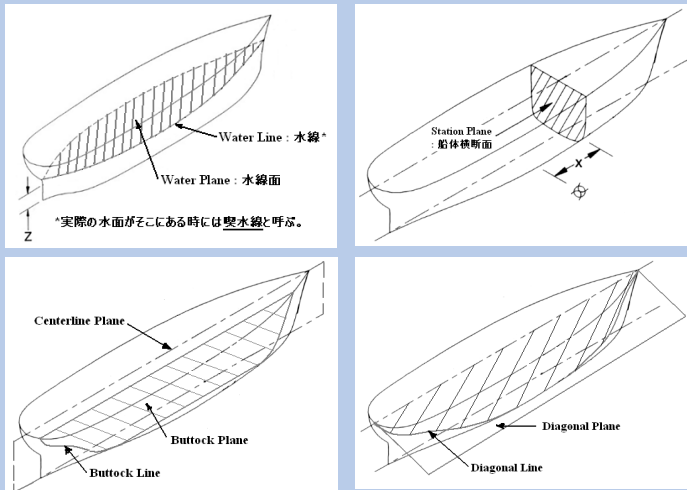


Table of Offsets

- Linesができれば、特定の場所の寸法を読み取ってTable of Offsetsを作る。これを使って、排水量や浮心など船の流体静力学的な諸量を計算し、他方では建造に必要な諸図面を用意する。

(Dimensions given in feet, inches and eighths)													
Half breadths at waterlines and decks													
Station (FWD End)	0'-0" WL	4'-0" WL	8'-0" WL	16'-0" WL	32'-0" WL	32'-0" WL	40'-0" WL	Fwd/deck	Main deck	Second deck	Third deck	Station	
0-FP	—	3-0-5	2-8-2	1-0-1	0-2-5	0-5-0	1-8-6	11-1-2	7-0-3	1-11-0	0-2-3	0	1/2
1	—	4-8-7	5-0-7	4-3-5	4-0-6	5-0-6	7-8-3	20-4-2	14-6-0	7-7-2	4-1-4	1	1/2
2	—	6-10-2	7-11-6	8-8-1	8-3-0	11-1-0	14-5-5	20-6-5	13-9-4	9-4-7	4-1-4	2	1/2
3	2-4-0	13-7-6	16-9-3	19-0-0	21-10-2	24-1-7	26-11-6	30-3-6	26-0-2	21-0-2	11-0-2	3	1/2
4	8-2-0	24-1-0	27-5-1	30-10-3	32-8-1	34-0-5	35-5-7	39-1-1	34-4-4	27-0-2	11-0-2	4	1/2
5	21-4-0	33-3-0	35-8-1	37-2-2	37-5-5	37-10-4	37-11-6	38-0-0	37-11-2	37-6-7	17-0-0	5	1/2
6	25-5-8	36-2-8	37-10-3	38-0-0	38-0-0	38-0-0	38-0-0	38-0-0	38-0-0	38-0-0	17-0-0	6	1/2
7	24-10-4	34-8-1	37-0-7	37-11-7	38-0-0	38-0-0	38-0-0	38-0-0	38-0-0	38-0-0	17-0-0	7	1/2
8	13-8-4	27-1-4	31-2-6	35-8-1	37-5-2	37-11-6	38-0-0	38-0-0	38-0-0	38-0-0	17-0-0	8	1/2
9	6-5-2	15-0-3	19-3-3	26-2-2	31-9-2	35-7-3	37-4-2	37-8-1	36-9-7	26-11-4	11-0-1	9	1/2
9 1/2	—	6-0-7	7-0-4	11-2-4	18-1-0	25-8-5	31-3-1	33-8-7	29-6-3	11-10-1	10	1/2	
API0	—	2-8-7	5-4-1	11-2-4	18-1-0	25-8-5	31-3-1	33-8-7	29-6-3	11-10-1	10	1/2	
Alt end	—	—	—	—	—	8-8-3	17-10-1	25-3-4	22-5-2	10-11-6	—	10	1/2

Heights above molded baseline													
Forecastle deck													
Station (FWD End)	4-ft buttock	8-ft buttock	16-ft buttock	24-ft buttock	Forecastle deck	Forecastle deck	Main deck	Main deck	Second deck	Third deck	Station		
0-FP	47-5-6	67-0-7	—	—	63-11-0	63-11-0	55-8-0	55-8-0	40-10-2	25-0-0	0	1/2	
1	23-0	40-8-3	55-4-4	—	63-4-5	63-5-1	55-0-2	54-11-5	40-8-6	25-0-0	1	1/2	
2	6-11-7	8-8-7	43-4-1	56-8-4	62-2-8	61-0-5	53-2-5	51-8-2	39-10-4	25-0-0	2	1/2	
3	0-0-4	0-0-0	0-0-7	31-11-1	61-0-6	60-4-1	49-3-3	48-4-1	37-5-1	20-10-0	3	1/2	
4	—	—	0-0-0	0-1-1	—	—	46-5-5	46-11-6	35-8-7	17-0-0	4	1/2	
5	—	—	0-0-0	0-0-0	—	—	46-0-0	46-0-0	35-4-0	17-0-0	5	1/2	
6	—	—	0-0-0	0-0-0	—	—	46-1-0	46-7-0	35-7-0	17-0-0	6	1/2	
7	—	—	0-0-6	2-1-0	—	—	46-4-5	46-10-5	35-10-4	17-0-0	7	1/2	
8	0-0-0	0-3-3	4-0-6	13-3-3	—	—	46-0-7	45-4-3	34-4-4	17-0-0	8	1/2	
9	1-2-1	8-6-6	21-11-3	30-0-4	—	—	47-3-3	46-1-1	37-0-0	17-0-0	9	1/2	
9 1/2	14-3-4	22-4-1	30-3-6	38-4-6	—	—	47-6-1	46-7-3	37-0-7	17-0-0	10	1/2	
API0	25-5-0	31-6-5	38-11-0	—	—	—	47-8-0	47-2-4	—	—	—	—	
Alt end	37-1-4	41-7-0	44-1-6	—	—	—	47-11-6	47-11-6	—	—	—	—	

Table of Offsetsの例(Mariner型貨物船)

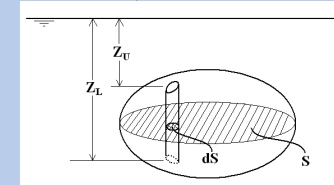
話の流れ

- 船に係わるイロハ ----- 造船海運業は近代の先駆けであったためか船独特の言葉使いがあり、「船語」と揶揄されることがある。
- **流体静力学**と船舶算法 ----- 船は重量と浮力が釣り合って浮いており、浮力が水面下容積に比例しているので、船体の形状データから重量と喫水の関係などの基本的な諸量を推定できる。
- 重量と浮力のバランス ----- 貨物比重の影響と局所的なバランスの崩れから起こることの例。
- 復原性 ----- 上下運動と船首上げ船尾下げの回転運動(縦揺)は十分な復原性を持つが、左舷上げ右舷下げの回転運動(横揺)は復原性確保に配慮が必要である。

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。

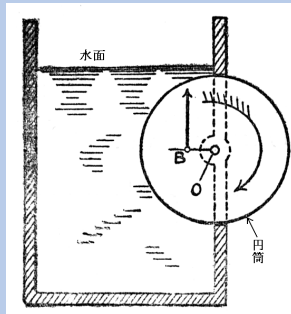
$$F_B = \rho \cdot g \cdot \int_S (z_L - z_U) \cdot ds = \rho \cdot g \cdot \nabla$$

流体静力学、アルキメデスの原理 (2)

さて、「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。

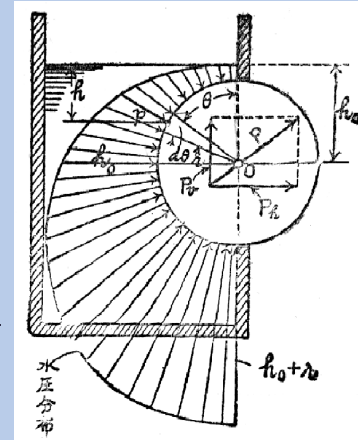
水を入れた容器の側壁に、図のように円筒をその片側半分だけが容器内にあるように設置し、軸Oの周りに自由に回転できるようにする。この場合、半円筒断面の面積中心Bを通過して鉛直上方に浮力が作用するので、この円筒は永久に回転運動を続ける。

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)

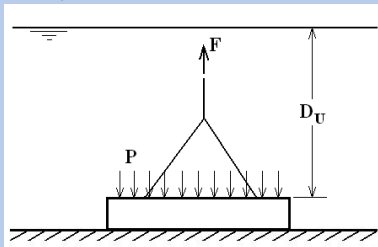
答えは「これは飽くまで圧力積分の結果だということを忘れてはいけない」という説明に書いてあるようなもので、右図に示すように、表面に垂直な方向に作用する圧力ベクトルは全てO点を通るので、円筒を回転させるO点の周りのモーメントはゼロになるからである。では、アルキメデスの原理は「半円筒の面積中心Bを通過して鉛直上方に浮力が作用する」ことを示唆しているのに、何故こうなるのかと言えば、それはこの半円筒の片面が水に浸って居ないからである。片面が水に浸って居れば図のPhの逆向きの力を受け、Pvだけが残るのである。



海底に密着した物体 (1)

没水容積部分に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。前のスライドの矛盾が生じた半円筒も「水中にある」とは言えない。

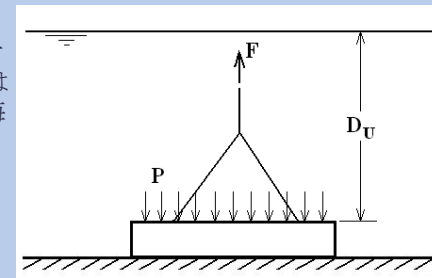
図で物体の上面に作用する静水圧は $\rho \cdot g \cdot D_U$ であるが、現実の圧力はこれに大気圧が加わる。大気圧は水頭換算で約10mであるから、現実の圧力は $\rho \cdot g \cdot (D_U + 10m)$ となる。これを上面の面積に掛けた値が下向きの力になり、それと物体の空中重量:Wの和に釣り合う力: $F = \rho \cdot g \cdot S \cdot (D_U + 10m) + W$ で引かないと物体は持上らない。



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は $F = W - \rho \cdot g \cdot S \cdot T$ となり、海底からごく僅か離れる前後で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。



話の流れ

- 船に係わるイロハ ----- 造船海運業は近代の先駆けであったためか船独特の言葉使いがあり、「船語」と揶揄されることがある。
- 流体静力学と船舶算法 ----- 船は重量と浮力が釣り合って浮いており、浮力が水面下容積に比例しているため、船体の形状データから重量と喫水の関係などの基本的な諸量を推定できる。
- 重量と浮力のバランス ----- 貨物比重の影響と局所的なバランスの崩れから起こることの例。
- 復原性 ----- 上下運動と船首上げ船尾下げの回転運動(縦揺)は十分な復原性を持つが、左舷上げ右舷下げの回転運動(横揺)は復原性確保に配慮が必要である。

船舶算法

- マンガ「一休さん」で見た記憶があるが、調べてみたら元々は三国志に書かれている話らしい。
- 『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。大人達が困っていると、曹沖という10歳の少年が答を出した。
- 先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。
- 巨大な船の重量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。
- とはいえ石を積んでCalibration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。

排水量(排水容積) (1)

- (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。
- 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。
- 各横断面について没水部の面積を計算して置き、それを船体長手方向に積分するか、喫水の関数として水線面積を計算して置き、それを船体上下方向に積分すれば排水容積を計算できるが、通常は前者を使う。

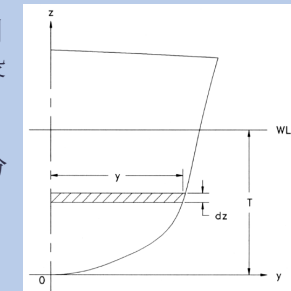
排水量(排水容積) (2)

- 先ず、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(Immersed Station Area): $A_S(Z)$ は

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

で計算できる。このように $A_S(Z)$ を計算しておけば、任意の喫水: T に対してStationの没水部面積が得られる。

- $A_S(Z)$ をZの関数として図示したものを、最初に作ったフランスの造船技師の名をとってBonjean Curveと呼んでいる。



排水量(排水容積) (3)

$A_s(Z)$ 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、

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

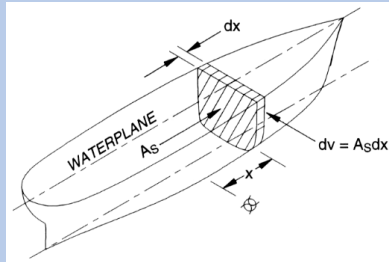
である。

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で定義される。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Baselineからの高さと同様位置が分かれば良い。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

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

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

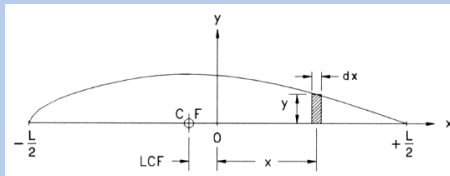
$$A_w(z) = 2 \cdot \int_{AE}^{FE} y(x,z) \cdot dx$$

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: LCF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、浮面心: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)。重心における喫水を変化せず重心周りにトリムしたのでは、重心と浮面心が前後方向にズレているために排水容積が変化してしまう。

浮心の上下位置 (1)

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。すなわち、

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

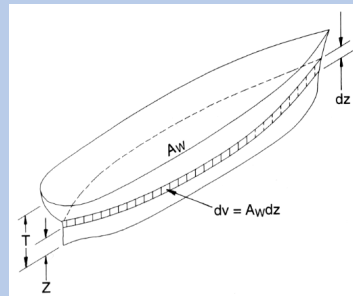
である。同様にして排水量の上下方向モーメントを

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

で計算すれば、浮心の上下位置: KBを

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

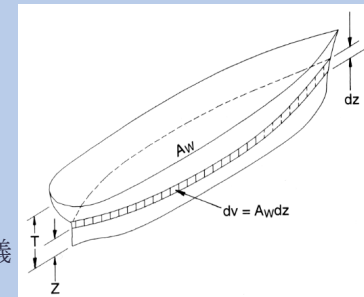
で計算することができる。



浮心の上下位置 (2)

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

で計算したKBは本当に浮心(浮力の作用中心)の上下位置か?という議論がある。浮力の作用中心の上下位置は定まらないのではないかという議論である。



先に、「浮力は表面に作用する静水圧を積分した結果であり、没水部の容積中心に浮力が作用すると短絡的に考えてはならない」と説明したが、静水圧を積分した結果(浮力)の作用点は水平面内の位置しか定まらず、上下位置は定まらないというのが厳密には正しい。

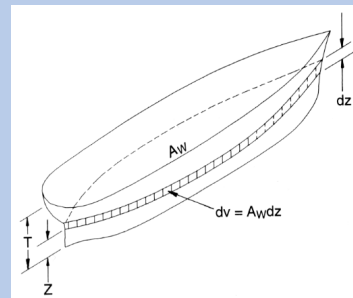
浮心の上下位置 (3)

では

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

で計算した上下位置は何なのか?という、それは(前後位置も含めて)没水容積の中心という意味合いである。

没水部を図に示すように薄くスライスして多くの層に分け、各層の境界面にも静水圧が作用すると考えれば、相接する境界面の圧力はキャンセルするから、各層に作用する浮力の総和は全体に働く浮力に等しい。そのように考えると、全体に働く浮力の着点(作用点)は容積の中心と捉えることもできるので、それを浮心(浮力の作用点)だと定義しているのである。



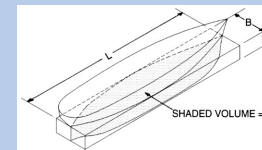
船型係数 (Fineness Coefficients)

排水量と主寸法から、船型の肥積度を表す係数が計算される。太っている(full)というのは直方体に近いこと、痩せている(fine)というのはその逆である。Fineな船の方が抵抗を減らし易いので、こうした係数が重要視される。

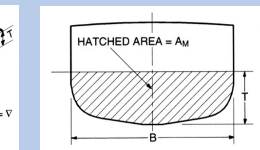
$$C_B = \frac{\nabla}{L \cdot B \cdot T}$$

$$C_M = \frac{A_{S, \text{Midship}}}{B \cdot T}$$

$$C_P = \frac{\nabla}{A_{S, \text{Midship}} \cdot L}$$

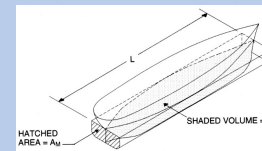


方形係数(Block Coefficient) Midship断面係数(Midship Section Coefficient)

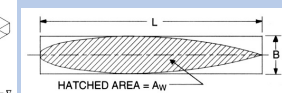


$$= \frac{C_B}{C_M}$$

$$C_W = \frac{A_w}{L \cdot B}$$



柱形係数(Prismatic Coefficient) 水線面積係数(Waterplane Area Coefficient)



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

フルード数 (Fr: Froude Number) [1]

右の式で定義される速度: v の無次元値で、航走する長さ: L の船が水面に波を起こすことによる抵抗 $Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L}}$ の特性を支配する。ここに g は重力の加速度である。

船が速い遅いという時、普通は速度: v の大小を言うが、船の世界ではフルード数の大小を言う場合がある。フルード数が大きくなると造波抵抗は急激に増加するので、**速い船を設計** する際には「水面下の形状を出来るだけ波を起こさないような形にする」ことが大事で、方形係数(Block Coefficient)、柱形係数(Prismatic Coefficient)の小さいFineな形にする必要がある。

フルード数の定義から、造波抵抗を減らすには**大きな船をゆっくり走らせるのが一番**であるが、大きさと運航速度は船の用途に応じて決まるので、そうして決まったフルード数に対応した形状を設計することになる。

フルード数 (Fr: Froude Number) [2]



VLCC (超大型タンカー)
長さ: 約300m
速度: 約13ノット
 $Fr = 0.123$



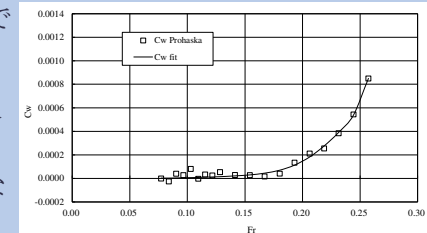
コンテナ船 (3,000TEU)
長さ: 約200m
速度: 約22ノット
 $Fr = 0.256$

フルード数 (Fr: Froude Number) [3]

下のグラフは、Norwayの研究所で試験されたLPGC船型の造波抵抗係数: C_w を Fr ベースにプロットした図です。

これより、VLCCのフルード数: $Fr = 0.123$ では殆ど $C_w \approx 0$ で、コンテナ船のフルード数: $Fr = 0.256$ では急激に増加する途上にあることが分ります。造波抵抗はこの係数に速度の2乗、推進馬力は3乗を掛けた量に比例しますので、 $Fr = 0.123$ と 0.256 では大変大きな違いになることが分ると思います。

つまり、VLCCの設計では造波抵抗に大きな注意を払う必要がありませんが、コンテナ船の場合には造波を抑えることが重要で、Fineな船型にならざるを得ないのです。



フルード数 [4] (コンテナ船の大型化)



3,000TEU
長さ: 約200m
 $Fr = 0.256$ 速度は全て
約22ノットと
仮定した。



14,000TEU
長さ: 約350m
 $Fr = 0.193$



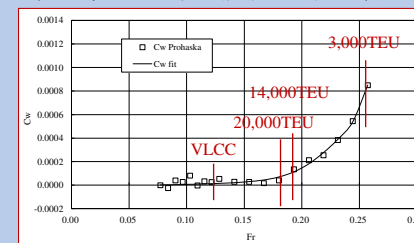
20,000TEU
長さ: 約400m
 $Fr = 0.181$

大型化につれ、 Fr は $0.256 \Rightarrow 0.193 \Rightarrow 0.181$ と減少した。

フルード数 (Fr: Froude Number) [5]

造波抵抗係数: C_w を Fr ベースにプロットした図に、それぞれのフルード数を縦線に入れてみると、下図のようになります。VLCC程ではありませんが、メガコンテナ船は3,000TEUとの中間辺りにあり、同じ「コンテナ船」という名称で呼ばれながら、全く別物だとも言えることが理解できると思います。

したがって、従来のコンテナ船ほどFineではない所に船型的な最適値がある筈で、そのような設計に落ち着いています。



呉で見た14,000TEU

2016年4月のこと、松山からスーパージェットにのって呉港到着の前に呉造船所の岸壁に係留されている14,000TEUコンテナ船を見つけ、窓越しに撮影したのが下の写真です。大型化してフルード数が下がったのに従来と大差ないFineな形状をしているのに驚きました。

その後、丸亀のドックで今治造船の14,000TEUコンテナ船を見せて貰って、「此方は妥当だ」と思いましたが、今回、公開されている写真を搜した限りでは明確な違いは認められませんでした。



排水量等曲線 (Hydrostatic Curves)

以上に述べた流体静力学的に計算された量の喫水ベースの変化をまとめて、グラフにしたものを、排水量等曲線 (Hydrostatic Curves)と呼ぶ。表にまとめることも多い。

「排水量等」に含まれるものには、以下のものがある。

- (1) 排水量、浮心の前後・上下位置、浮面心の前後位置
- (2) 横・縦メタセンター高さ(above Keel)
- (3) 方形係数(C_B)、中央横断面係数(C_M)、柱形係数(C_P)、水線面積係数(C_W)
- (4) センチメートル喫水変化に対する排水量変化
- (5) センチメートルトリム変化に対するモーメント変化
- (6) センチメートルトリム変化に対する排水量変化
- (7) 浸水面積(WS: Wetted Surface Area)

喫水・トリム変化に関連する量 (1)

喫水変化(cm)に対する排水量変化(TPC: Tons per Centimeter Immersion)

喫水の微小変化に対する排水量の変化割合は、水線面積: A_w で決まる。海水の密度は 1.025 ton/m^3 であるから、

$$d\nabla (\text{ton}) = 1.025 \text{ ton/m}^3 \cdot A_w (\text{m}^2)$$

$$\text{TPC} (\text{ton/cm}) = A_w (\text{m}^2) / 0.01025 \text{ ton}/(\text{m}^2 \cdot \text{cm}) = A_w (\text{m}^2) / 97.56$$

センチメートルトリム変化に対するモーメント変化(MTcm: Moment to change Trim one Centimeter)

トリム変化に対するモーメントは縦復原艇: GM_L で決まるから、厳密に言えば時々積み付けに依存するが、重心と浮心の高さの差に比べて GM_L は圧倒的に大きいので、 GM_L の代わりに BM_L を使っても実用上の相違は無視できる。そこで、下記で計算する。

$$dMT (\text{ton} \cdot \text{m}) = \Delta (\text{ton}) \cdot BM_L (\text{m}) \cdot \text{Trim} (\text{cm}) / [100 \cdot L (\text{m})]$$

$$MTcm = dMT (\text{ton} \cdot \text{m}) / \text{Trim} (\text{cm}) = \Delta (\text{ton}) \cdot BM_L (\text{m}) / [100 \cdot L (\text{m})]$$

喫水・トリム変化に関連する量 (2)

センチメートルトリム変化に対する排水量変化($d\Delta PC$: Change in Displacement per Centimeter Trim by Stern)

船は船首尾に喫水マークと喫水計を備えており、通常、船首尾の喫水とそれらを平均した値(平均喫水: Midship の値)が使われる。しかし、トリムがある時には、平均喫水に対応する排水量は正確でない。排水量が変わらないのは浮面心(LCF)周りの傾斜であるので、平均喫水を LCF における喫水: T_{LCF} に補正する必要がある。

$$T_{LCF} = T_{\text{Midship}} + LCF \cdot \text{Trim} / L$$

であるから、1cmのトリムに対する喫水の補正量はcm単位で LCF/L となる。したがって、それによる排水量変化は

$$d\Delta PC = \text{TPC} \cdot LCF / L$$

となる。

浸水面積 (Wetted Surface Area)

水に浸っている船体表面積を浸水面積と呼び、摩擦抵抗を推定する際に使用される。試験水槽や造船所では必要な情報であるが、船を運用する側が使う機会は無いので、公式の「排水量等曲線」には載せない場合もある。

浸水面積を計算する前段階として、Body Plan上でBaselineと船体中心線の交点から横断面の外周線に沿って測った弧の長さ(Girth Length)を求める必要がある。Girth LengthはStation位置と喫水の関数であるから、 $GL(x, T)$ という形になる。これを船体長手方向に積分して、浸水面積を得る。

$$\text{Wetted Surface Area} (T) = \int_{AE}^{FE} GL(x, T) \cdot dx$$

Water Lineの曲がりの影響が考慮されないため、厳密には水に浸っている船体表面積に一致しない。しかし、摩擦抵抗を計算するには、この浸水面積の方が合理的である。

話の流れ

- 船に係わるイロハ ----- 造船海運業は近代の先駆けであったためか船独特の言葉使いがあり、「船語」と揶揄されることがある。
- 流体静力学と船舶算法 ----- 船は重量と浮力が釣り合って浮いており、浮力が水面下容積に比例しているため、船体の形状データから重量と喫水の関係などの基本的な諸量を推定できる。
- 重量と浮力のバランス ----- 貨物比重の影響と局所的なバランスの崩れから起こることの例。
- 復原性 ----- 上下運動と船首上げ船尾下げの回転運動(縦揺)は十分な復原性を持つが、左舷上げ右舷下げの回転運動(横揺)は復原性確保に配慮が必要である。

貨物の比重の影響

船は水から受ける浮力で浮いているので、総重量と同じ重さの水の体積以上の容積を持つ必要がある。

見掛け比重量の大きな貨物(重量貨物)を運ぶ船は、船体内部がガラ空き。逆に見掛け比重量の小さな貨物(容積貨物)を運ぶ船は、水面上の高さが大きくなる。

⇒ 貨物の比重量によって設計すべき船の形状は変化する。

貨物の種類と見掛け比重量
見掛け比重量 (t/m^3) = 1m^3 の容器に積める重さ

貨物の種類	見掛け比重量(密度) (t/m^3)
原油	0.9前後
鉄鉱石	1.9~3.3
石炭	0.7~1.2
小麦	0.65~0.8
粗糖	0.8~1.0
木材チップ	0.2~0.4

VLCCと木材チップ運搬船

比重0.9前後の原油を積むVLCCと、比重0.4以下の木材チップを運搬する船を比較する。貨物の比重が1.0に近いと船の大部分が水面下に沈み、1.0より大幅に小さいと水面上の部分が大きくなる。

VLCCの三次元模型



木材チップ運搬船 (船底は赤線付近)



コンテナ船と客船

コンテナ船の積荷の比重がどの程度か、設計仕様書には記載されているだろうが、標準値が公表されている訳ではない。積載貨物の種類、実入りと空コンの割合などに依存するが、恐らく木材チップと同等か、更に軽い0.3くらいではないかと思われる。

客船となると、乗船料の額に依存する部分が大きと思われるので、更に分からなくなる。乗船料の高い客は占有容積が大きくなるので、大衆的な船では比重が大きめかもしれないが、船種別では最小の比重であらうと思われる。

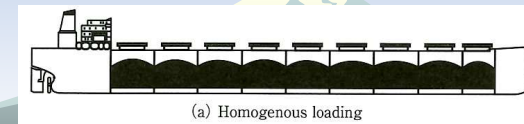
写真から分るように、どちらも水面上の部分が巨大である。



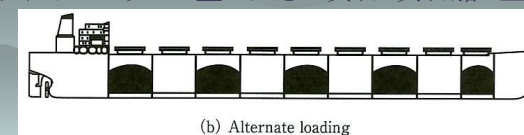
バラ積み貨物船 (Bulk Carrier) の場合

バラ積み貨物船の積荷は、穀物のように比重が0.7程度のもの中から鉄鉱石のように比重が3.0近いものまで様々であるので、積荷の比重に応じて積み方を変えている。

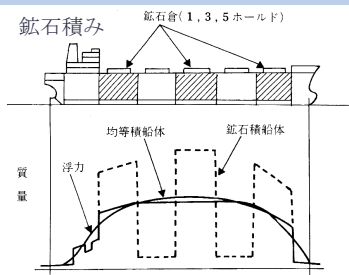
➤ 穀物のように比重が小さい貨物: 各艙均等に積む。



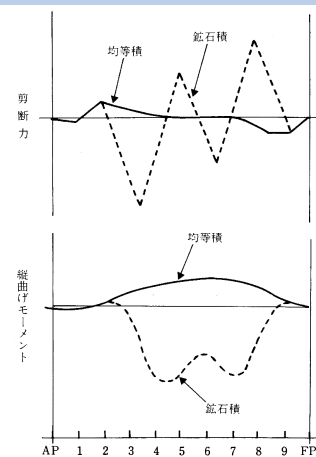
➤ 鉄鉱石のように比重が大きい貨物: 貨物艙と空艙に分ける。



バラ積み貨物船の静的全体荷重



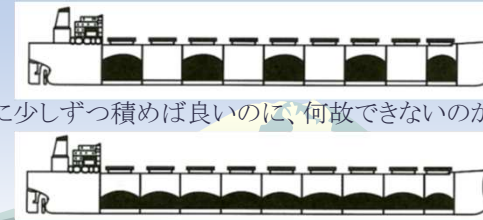
- ⇒ 個々の船倉部に作用する浮力と自重の不釣り合いが大きい。
- ⇒ 静的全体荷重が大きくなる。
- 均等に荷を積んでいる場合
- ⇒ 静的全体荷重は小さい。
- これに動的荷重が重畳する。



バラ積み貨物船 (Bulk Carrier) の場合

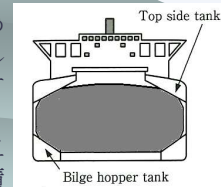
前のスライドのようなことが起こるなら、こんな積み方は止めて、

各艙に少しずつ積みれば良いのに、何故できないのか?



右の船倉横断面のようにTop side tankはあるが、積荷が浅過ぎて表面が広過ぎると横移動して船が傾斜する恐れがあるので、表面を狭くするために深く積む。

鉄鉱石専用を使うなら船倉の幅を小さくすることもできるが、鉄鉱石を降ろした港で小麦を積むといった使い方が出来ないのはイタイ。



話の流れ

- 船に係わるイロハ ----- 造船海運業は近代の先駆けであったためか船独特の言葉使いがあり、「船語」と揶揄されることがある。
- 流体静力学と船舶算法 ----- 船は重量と浮力が釣り合って浮いており、浮力が水面下容積に比例しているので、船体の形状データから重量と喫水の関係などの基本的な諸量を推定できる。
- 重量と浮力のバランス ----- 貨物比重の影響と局所的なバランスの崩れから起こることの例。
- **復原性** ----- 上下運動と船首上げ船尾下げの回転運動(縦揺)は十分な復原性を持つが、左舷上げ右舷下げの回転運動(横揺)は復原性確保に配慮が必要である。

復原力について

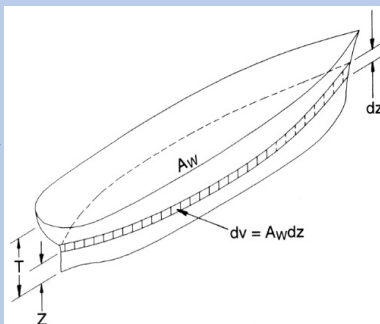
- (普通の)船はアルキメデスの原理に基づく浮力によって自重を支えられて、水面に浮いている。すなわち、水面下にある船の容積分の水の質量は船の質量に等しく、没水部の容積中心と船の重心は同じ鉛直線上にある。つまり、重力と浮力およびそのモーメントが釣り合っている。
- 釣り合いの状態から船が鉛直方向の変位を伴う形で変位した時、船に働く浮力およびその作用中心が変化して、変化分に応じて復原力が発生する。
- 復原力が発生することは「釣り合い状態が安定である」ことを意味して好ましいが、横揺れの場合には、必ずしも発生した変位を戻す方向のモーメントが働くとは限らない。⇒ **横揺れ**については**復原性の確保が重要**になる。

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 $A_w \cdot dz$ だけ変化するので、船体に働く浮力は $\rho \cdot g \cdot A_w \cdot dz$ だけ変化し、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として作用するが、上下揺れの場合は水線面積があるので、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)。

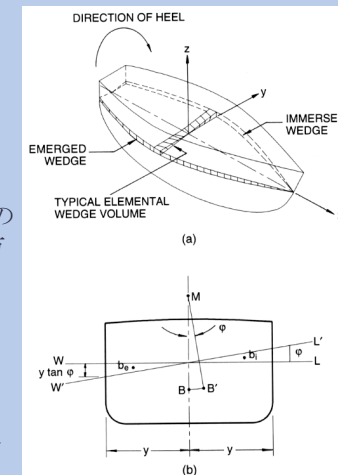


横揺れの復原力: (横)メタセンター

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)に断面図示する。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が(横)メタセンター:Mである。

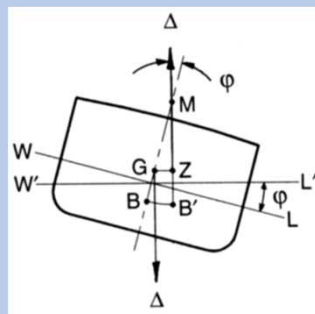
Mが重心より上にある時には傾斜時の船体に働く浮力と重力による偶力のモーメントは傾斜を戻す方向に働く(復原モーメント)が、下にあると不安定モーメントとなる。



(横)メタセンター高さ、横安定

傾斜角が小さい場合、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)

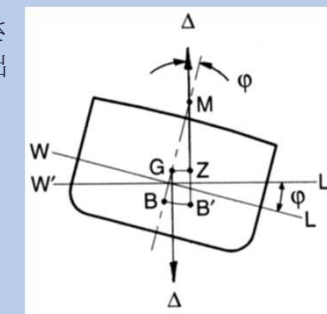
では横メタセンター:Mの高さはどのようにしたら知ることが出来るのだろうか？

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、

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

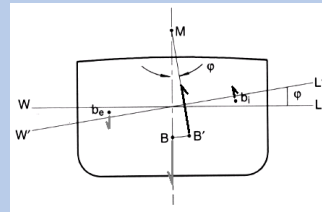
であるから、 BB' が分かれば

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は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 $BB' \cdot S$ (没水断面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 $y^2 \cdot \tan \phi / 2$ と書ける。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_i の面積の出入りによって生じるモーメント M_T は

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

であるが、これが $BB' \cdot S$ に等しいので

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

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($\nabla = L \cdot S$, $BR = 2y$)、

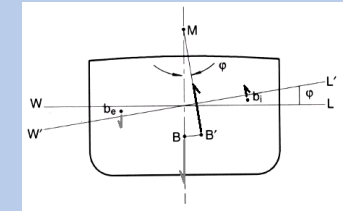
$$BB' = L \cdot BR^3 \cdot \tan \phi / (12 \cdot \nabla)$$

となるが、 $BB' = BM \cdot \tan \phi$ 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。

$$BM = I_T / \nabla$$

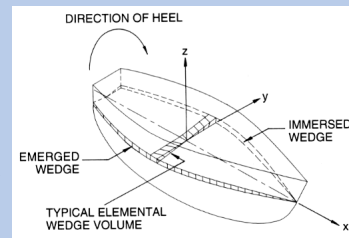


(横)メタセンターの計算 (4)

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

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

で計算できるから、これを前スライドの式に代入すれば BM が得られる。これは、傾斜によって、片方で楔状の船体部分が水面上から水面上に現れ、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)メタセンター高さの計算、復原艇

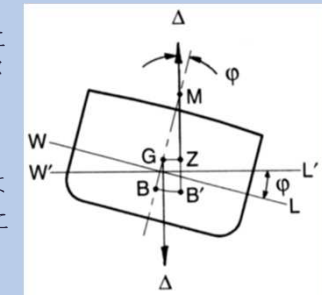
図より、微小角度：だけ傾斜した時の偶力のモーメント(復原モーメント) M_T が

$$M_T = \Delta \cdot GZ \cong \Delta \cdot GM \cdot \phi$$

となることが理解される。ここに Z は重心から浮力の作用線に下ろした足で、 GZ は横復原艇と呼ばれる。

ϕ が大きくなると GZ は $GM \cdot \phi$ から

離れて複雑な変化を示すが、 GZ に排水量 Δ を掛けたものが復原モーメントになるので、広範囲の ϕ に対して復原性の特質を表わす復原モーメント曲線の代わりに GZ 曲線が使われることが多い。



縦揺れの復原力

縦揺れの復原力の由来も、横揺れの場合と同じである。つまり、これらの場合には浮力の大きさは傾斜前と同じ値を保っているが、傾斜によって浮心が移動するために、不釣り合いモーメント

$$M_p = W \cdot GM_L \cdot \theta$$

が発生するのである。ここに、 GM_L は縦メタセンターと呼ばれ、横揺れに対するものと区別する。

船が細長いため、横揺れの場合はメタセンターが微妙な高さとなるが、縦揺れの場合は幅の代わりに長さが作用するので、縦メタセンターは遥か高い所に位置し、重心高さとの関係で縦揺れ復原力の正負が云々されることは(普通は)無い。したがって、単にメタセンターと言えば「横メタセンター」のことである。

縦メタセンター高さの計算

横メタセンターと同様に、浮心から縦メタセンターまでの高さ： BM_L は次式で得られる。

$$BM_L = \frac{I_L}{\nabla}$$

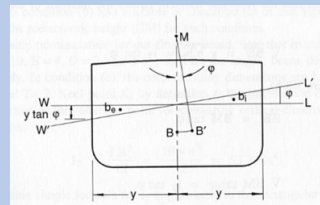
ここに、 I_L は浮面心を通る船体横断方向軸周りの水線面の二次モーメントで、

$$\begin{aligned} I_L &= 2 \cdot \int_{AE}^{FE} y(x) \cdot (x - LCF)^2 \cdot dx \\ &= 2 \cdot \int_{AE}^{FE} x^2 \cdot y(x) \cdot dx - LCF^2 \cdot A_w \\ &= I_{L, \text{Midship}} - LCF^2 \cdot A_w \end{aligned}$$

で計算できる。船首尾が浮き沈みする方向の傾斜は浮面心を中心として発生するので、ここでは浮面心を通る船体横断面周りの水線面の二次モーメントを計算するのが正しいが、 $I_{L, \text{Midship}}$ は $LCF^2 \cdot A_w$ に比べて非常に大きな値となるので、 I_L を $I_{L, \text{Midship}}$ で代用しても実質的に殆ど問題は無い。

メタセンターとは (1)

横メタセンター高さの計算で右の図を見せた。船が傾斜した時に浮心は或る曲面上を移動するが、メタセンターとは浮心の移動曲面の曲率中心なのである。その曲面は横方向に曲率が大きく、前後方向には平らに近い。



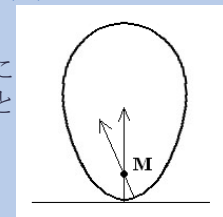
メタセンターは浮体に特有の概念だと思っていたが、そうでも無いらしい。卵を右図のような向きに立てられるか? というのは「コロンブスの卵」の逸話の出だしである。コロンブスは殻を割って立てたと言われるが、そうでもしなければ立たない。では何故この状態が不安定なのか?

それを説明するために、メタセンターが使える。



メタセンターとは (2)

先ほどの卵が、直立している状態で床から卵に作用する反力ベクトルを書き、僅かに傾斜した時の反力ベクトルも重ね書きすると右図を得る。これらの反力は卵の殻を示す曲面に垂直に作用して居り、その交点:Mは卵の殻の曲面の曲率中心である。

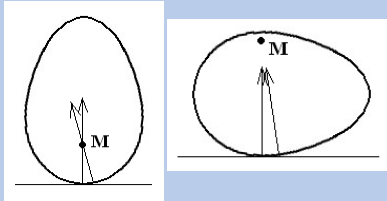


メタセンターは浮力作用点の移動曲面の曲率中心だと書いたが、それを言い換えれば「物体の重さを支える力(反力)の作用点が移動する面の曲率中心」だということである。したがって、この点:Mはメタセンターに他ならない。

卵の重心は明らかにMより上にあるから、 $GM < 0$ である。したがって、この状態は安定にはなり得ず、卵は倒れてしまうのである。

メタセンターとは (3)

同様な図を残る2ケースについて書くと、右のようになる。底が若干平らになっても、左側では無理で、卵は横向きに転がって初めて安定になることがわかる。

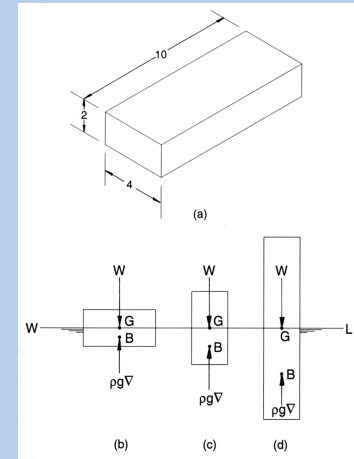


右上図の面に垂直に切った断面は円形であるから、メタセンターは円の中心になる。卵の中身が均質であれば重心も円の中心に来るから、この方向には $GM=0$ となり、中立な平衡しか得られない。卵の中身には流動性が有って重い黄身が下がり重心が下がりそうであるが、傾斜すると黄身は移動するので、見掛けの重心は円の中心から変化しない。

底が平らな物体を平らな床に置いた場合は、支持力のベクトルは鉛直方向を向くので、メタセンターは無限上方にある。

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。

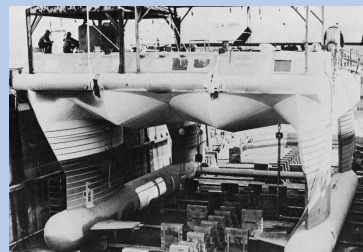


初期復原性 (Initial Stability)

「初期」というのは傾斜の初期を意味し、初期復原性とは「真直ぐに浮いた状態から少し傾斜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き、復原性=横揺れの復原性であると言って良い。

横復原性については(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。現実には、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。

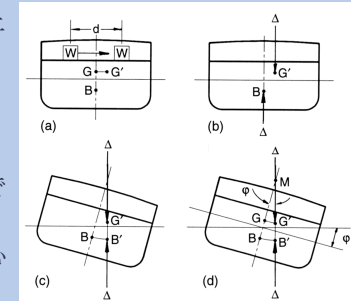
$$\Delta \cdot GG' = W \cdot d \rightarrow GG' = W \cdot d / \Delta$$

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与え、 GM を確認するための傾斜試験の解析に用いられる。

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



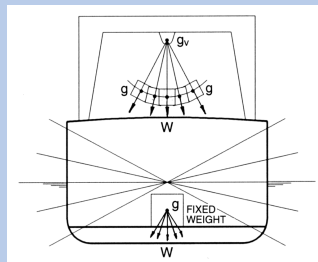
吊り上げられた重量物

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。

しかし特殊な重量物運搬船やクレーンバージの復原性検討に際しては、こうした配慮が必要になる。



自由水の影響

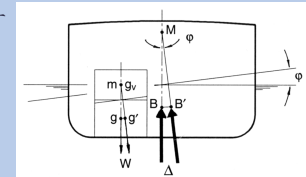
船の傾斜にしたがって自由に動き得るものが船上にあることは復原性能に悪影響を及ぼす。船で最も普通に見られる「自由に動き得る搭載物」は、不十分に満たされたタンク内の液体である。

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。

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

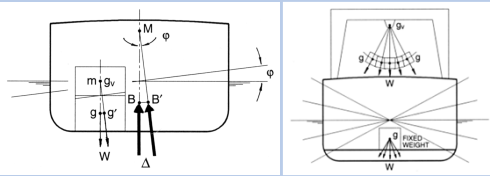
自由表面を持つタンク内の液体の場合も船が直立状態から φ だけ傾斜すると、液体は低い側へ移動して重心: g は g' に移動するが、 g' は g からの高さが次式で求められる m 点の真下にある。ここに、 i : 自由表面の船体前後方向の中心軸周りの二次モーメント、 v : タンク内の液体の体積である。

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



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 $gg_v=i/v$ 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

$$GG_v = \frac{w \cdot gg_v}{\Delta} = \frac{w \cdot i}{\Delta \cdot v}$$

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)

初期復原性は「真直ぐに浮いた状態から少しかだけ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)という。

一方、外板が破れて船内に浸水する場合の復原性をDamaged Stabilityというが、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)は帆船時代最終期の船で、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)

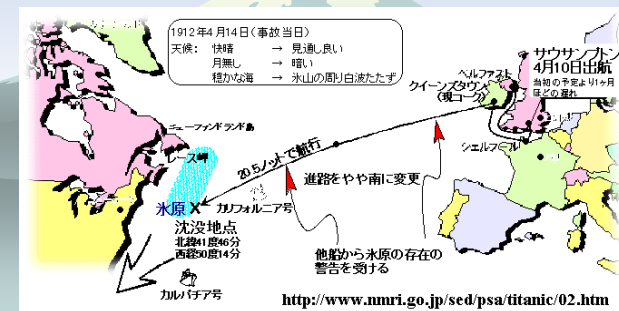
「1869年進水のTea Clipper “Cutty Sark”の頃には船内に全く隔壁が無かった」と書いたが、当然ながら船内全体が仕切りの無い一部屋である訳がないので、間仕切り壁はあった筈である。建築の場合に「構造材として考慮される壁」と「間仕切り壁」が区別されるように、隔壁(Water-Tight Bulkhead)とは区切られた片方の区画が満水になっても損傷しないだけの強度を持つ壁であるが、そういう壁は“Cutty Sark”には無かった。

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。

タイタニック号の沈没事故 (1)

1912年4月10日 予定より約1ヶ月遅れて処女航海に出航した。出航後、流氷原が行く手の海域にあるという警告を再々受けるが、速力を減速することなく高速(20.5ノット)で航行を続けた。4月14日午後11:40に冰山を発見後、回避行動をとるが船腹をなでる様に冰山をかすめ、かなりの長さの外板が損傷して、船体の多数区画に浸水をもたらした沈没に至った。

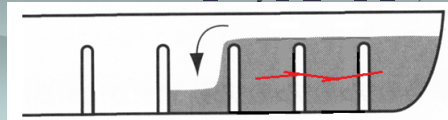


タイタニック号の沈没事故 (2)

復原性の所で「1869年に進水したTea Clipper “Cutty Sark”には全く船内隔壁が無く、タイタニック号の頃に不十分ながら隔壁ができた」という話をした。船内隔壁が無ければ、「船体外板に穴が空いて浸水する⇒穴を塞げなければ船内全体に浸水する⇒沈没」である。

“Cutty Sark”の40年あまり後に建造されたタイタニック号には船内隔壁が設けられたのであるが、タイタニック号の隔壁は甲板まで繋がって居らず、上が開いていた。そこに下図の赤線のような感じで外板損傷が起こると3区画に浸水し、多量の浸水で船首が沈下するために上部の開口を越えるまで水位が上昇し、逐次浸水が起こって船首部水没と船尾浮揚に至り、遂には船体が折損して沈没した。

本船の事故が契機となって「海上における人命の安全に関する国際条約(The International Convention for the Safety of Life at Sea)」略称SOLAS条約が制定され、逐次改訂されている。



SOLASについて

映画「タイタニック」で描かれたように、沈没に際して救命ボートに乗れない人が沢山いた。当時の旅客船では乗客・乗員の全てが乗れるだけの救命ボートが確保されていなかったのも、安い運賃の乗客は救命対象外になっていた。SOLASでは救命ボートの確保も規定されており、現在では、大傾斜が起こった状態では片舷の救命ボートが下せなくなることを考慮して、片舷だけの救命ボートで乗客・乗員の全てを収容できる量を確保することが定められている。

SOLASに限らず船の安全性規則は概して合理的にできているように思うが、知床観光船の惨事はこの認識に反する。

船の規則では、船を陸岸付近で運航する船と外洋を航海する船に分けていて、SOLAS等で対象としているのは外洋航行船舶であって、陸岸付近で運航する船は対象外である。一見不合理に思える状態になっているのは、臨機応変に陸岸へ逃げられる船に対して外洋航行船舶と同等の安全性を要求する必要は無いと考えているからで、逆に言えば「知床観光船のような船では安全性を過信した運航をしてはならない」のである。

おわりに

愛媛大学 大学院理工学研究科 博士前期課程

生産環境工学専攻 船舶工学特別コース

船舶工学入門 講義資料

2023/3 今迄における講義資料

船語と船舶算術

工学部三年生を対象とした講義：船舶工学入門の資料

1. イントロと船の種類

2. 船の規則と用語

3. 浮体の静力学

4. 船の抵抗

5. 推進装置

6. 波による船体運動

7. 船に働く荷重と船体構造

8. 強度評価と船体構造材料

9. 船体振動

10. 船の塗油と増速

11. 塗料防食とメンテナンス

<https://www.ehime-naoe.jp/nyuumon/>

長々と御付き合い頂き、有難うございました。

工学部三年生を対象とする入門講義の資料と共に、Webに資料を挙げてありますので、ご参照ください。

また、質問や要望を御寄せ頂きましたら、有難いです。