

# 中学生のための船舶工学の話

岩本才次（九州大学大学院工学研究院）

---

## 目次

1. はじめに
  2. フネと船舶：常識と法律
  3. 船を運航するための3要素
  4. 船の種類
    - 4.1 用途による分類
    - 4.2 推進方法による分類
    - 4.3 形による分類
    - 4.4 航行区域による分類
  5. 船の大きさや形状の表し方
  6. 船の運動とその名称
  7. 船はなぜ浮くのか？
  8. 船はなぜ揺れるのか？
  9. 船はなぜ転覆するのか？
  10. おわりに
- 参考文献

## 1. はじめに

この地球に人類が誕生して、いつから「フネ」を使うようになったか、はっきりしたことは分かっていません。しかし、人間の有史以前から「フネ」と人間の関わりは密接で、「フネ」は荷物の運搬や人の移動手段として川や湖や海で日常的に使われてきたといわれています。日本の古代のフネについては、図1、2に示すような古墳から出土する埴輪などによって、わずかにその様子を知ることができますが、詳しいことは判っていません。

人類が海や川で最初に用いたのは、丸太や羊などで作った革袋であったとされています。今でも丸太を簡単な交通手段として用いることがありますし、中国の黄河流域のある地方では、橋や渡し舟がないために、羊の革袋の中に荷物を入れ、革袋の中に息を吹込み風船のようにふくらませ、

それにしがみついて手で水を掻きながら川を渡ることが今でも行われています。しかし、私たちが一般的に「フネ」と言う時に連想するのは、大海原を航行する客船や貨物船や川や湖に浮ぶ手漕ぎの小さな「フネ」などです。では、筏や砂利などを積んで動力船に押されたり引っ張られたりして行き来するバージ（斛）と呼ばれる「フネ」のような物や潜水艦は「フネ」と呼んでよいのでしょうか。

私たちが「フネ」を見る時に、その姿や形にとらわれうっかり見過ごしがちなのが、「フネはなぜ浮くのだろう？」という疑問です。ほんとうに、何万トンもの鉄でできたあんな大きな物体が、どうして水に浮くことができるのでしょうか？それと同じ疑問は飛行機にも言えることです。翼を大きく広げ、金属でできた何百トンもある大きな物体が、どうして飛ぶことができるのでしょうか？

ここでは、大学の工学部の造船学科または船舶工学科で講義されていた内容の一部を、中学生や高校生の皆さんがすでに教わった数学や理科の知識で、なるべく数式を使わずに理解できるようにお話ししたいと思います。船を通して皆さんに工学（最終的には物を作るということ）に興味をもってもらおうと同時に、これがきっかけとなって、皆さんの中から将来一人でも多くの方が日本の工業、技術または研究を支える一員となってくれることを期待して、本題に移ります。



図1：宮崎西都原古墳から出土した舟形埴輪



図2：滋賀県栗東町新開4号墳から出土した舟形埴輪

## 2. フネと船舶：常識と法律

「フネとは何だろう?」、こんなことを問われたとき、みなさんはどのように説明するでしょうか?

図2のように沖合いを航行しているものは確かにフネですね。

皆さんが思い浮かべる「フネ」は人によって違うと思われませんが、そこにはきっと共通した要素があるに違いありません。ここでは「フネとは何か?」ということを考えてみましょう。



図2：独立行政法人 航海訓練所練習船「銀河丸」

まず、丸太を考えてみましょう。単に両端をスパッパッと切り落としただけの丸太を見て、「これはフネだ」という人は余りいず、ほとんどの人が「ただの丸太じゃないか」と思うでしょう。では古代の遺跡から発見された、丸太の中心部をくりぬき両端を細くした材木はどうでしょう。きっとほとんどの人が「丸木舟だ」と直感するでしょう。この一本の丸太から作られた(単材)の丸木舟(削舟)は、古代人たちが森から大木を切出し刃物や火を用いて木をくりぬき、物や人を運ぶのに使ったに違いありません。その形を見てみると、凹型(中央部がくぼんだ形)をしています。けれども丸太を削り抜いただけのものですから構造物(複数の部材を組合わせて作ったもの)とはいえません。

では、中国の黄河流域で川を渡るのに用いられた革袋はどうでしょう。川を渡る時は、皮袋の中に荷物を入れ水に浮かべ、人がそれにしがみつき足と手で水を掻いて対岸に渡ります。川を渡り終わると革袋はリュックサックに早変わりします。ある時は水を運ぶ水筒の役割もあるようです。そう考えていくと、革袋の持ついくつかの働き(多機能性)の一つに「フネ」によく似た機能があるものの、私たちはこの革袋を「フネ」とは呼ばないようです。

ここまで考えてくると、私達が普通に考える「フネ」とは、次の要件(必要な条件)を備えた物とすることができないでしょうか。

1. 水に浮くことができること。(浮揚性)
2. 物や人を積むことができること。(積載性)
3. 水上を移動できること。(移動性)
4. 上の目的のため人が工作した物であること。(工作物)

以上の条件を備えていれば、私たちが普段考えている「フネ」とイメージが一致するのではないのでしょうか。ここで注意しなければならないのは、「フネ」は必ずしも複材を組合わせた構造物である必要はなさそうだということです。

「フネ」について細かくいえば、推進手段、つまり、オールや帆やスクリュープロペラ（螺旋推進器）など、移動する装置がなければ「フネ」とはいえないという考えも成り立ちますが、「フネ」というものを広く考えるか狭く考えるかによって意見が異なってくるところです。

ところが法律ではこれとは少し違った見方がされています。船に関する法律をまとめた「船舶六法」という法律書があります。（法律では「フネ」のことを「船舶」と呼んでいます。）その中には船舶とは何かという明確な記述はありませんが、条文全体からみると船舶とは、次のようなものを指すものと思われます。主要な要件を箇条書きにすると、

1. 水に浮くことができること。（浮揚性）
2. 物や人を積むことができること。（積載性）
3. 水を移動できる能力があること。（移動性）
4. 構造物であること。（構造物）

これは上で述べた常識的な「フネ」の要件とよく似ていますが、もう少し詳しく見てみましょう。

1. の浮揚性とは、船が水に浮くということですから、水面を移動する普通の船舶はもちろん、水中に潜ることも浮くこともできる潜水艦も、この要件を満たしていることになります。

2. の積載性とは、人や物を積載するために、凹型構造をしているか、部屋（船舶では船室(Cabin)、船倉(Hold)などといいます）を持っているということです。それ以外のものは船舶に該当しません。従って、水上オートバイやサーフボードなどは船舶として認められません。

3. の移動性とは、水上または水中を移動できるということですから、固定されていず、何らかの方法で自由に移動できればよいということになります。

ここでいう移動できる能力とは、人力、風力あるいは機械力による航行能力だけを指すのではなく、自力では移動できないけれども、他のフネの助けを借りて移動する艇なども船舶だと解釈されています。いずれにしても、何らかの移動手段によって、いつでも水に接して移動できなければならないこととなります。

ところが、船舶法施行細則では「浚渫船八推進器ヲ有セサレハ之ヲ船舶ト看做サス」としていません。カタカナの部分は適当に濁点（゜）を補って読んでください。つまり、浚渫船（土砂の採取や水底を深くする目的で海底や川底を掘る船）は、自分で動く手段を持たない場合は、これは法律で定める「船舶」には含めませんよ、とっています。さっきは自力で移動できないものも船舶ですよと言っておきながら、このように例外規定を設ける場合がありますから、気を付けないといけません。肝心なことは、水上を移動することを主な働きとしているということのようです。従って、完全に水上を離れ、高高度を飛行する水上飛行艇は船舶とみなされませんが、ホバークラフトのように海面すれすれを浮いて移動するものは船舶の範疇に入れられています。ある定まった場所に係留して使用さ

れる浮標、浮ドック、浮ホテルなどは移動できても、定まった場所に係留されることでその目的を達成するものですから船舶とはみなされません。

4. の構造物とは、複数の部材を組み合わせた構造物であるということです。

そして、その構造物は凹型構造をしており、部屋（船舶では船室 (Cabin)、船倉 (Hold) など）があることが重要です。そして、船の大きさや航行する海域によって決められた構造や設備を満たさなければなりません。従って、1本の大きな材木から削り抜いた古代の丸木舟（削舟）は、構造物とはみなされませんし、法的には船舶の扱いを受けませんので、海上保安庁の特別な許可がない限り普通の船のように航海も係留もできません。

結局、船舶法や船舶安全法などで定められた規則を満し、政府または地方自治体の検査に合格したものが法律上の「船舶」で、それが「日本船舶」として認められ登録されるのです。すなわち、船舶が実際にどこにどれだけあるかを把握することとその安全を確保すること、動産（不動産ではない）として税金の対象として認めることが目的ですので、「船舶」を法律で厳格に定義しているということです。

こう考えてくると、私達が常識的に「フネ」と呼ぶものと、法律で言う「船舶」とは若干異なっていることが分かります。

これは笑い話のような話ですが、ある学生がこんなことを質問したそうです。

「亀を助けた浦島太郎は、助けた亀にのって龍宮城へ行ったそうですが、あの亀はフネですか？」

皆さんはどう思いますか？

漢字では「フネ」を表記する場合、「舟」と「船」を使い分けることがありますが、比較的小さいのを「舟」、大きいのを「船」と書きます。どこまでが「舟」で、どこからが「船」というはっきりした区別はありません。また、「フネ」を運搬手段として一般的に総称する場合は、「船」の字を当てます。

因みに、艦は戦闘用の船、艇は細長い小型の舟に用います。「艦艇」とは正に戦闘用の細長い船を言いますが、「艇」の字を使っても、必ずしも小さい船と言えないものもあります。「舟艇」は字義の通り小型の細長い舟に用います。「フネ」の特性からいって、「細長い」とは高速であることを意味しており、「艇」の字が付いた「フネ」はその大きさに比べ高速の場合が多いようです。

これからは、慣習的な判断に従って、「フネ」を「舟」または「船」という文字を使って表記します。

### 3. 船を運航するための 3 要素

船の主要部分は「船体 (Hull)」と呼ばれます。この船体が人や物を積んで安全に航海し港に着くためには、船体を制御 (Control) しなければなりません。自動車の場合はそれを「運転」と言いますが、船の場合は「操縦」または「操船」と言います。船を安全に運航するためには最低限何が必要か、自動車を運転する場合と比較しながら考えてみます。

まず、加速と減速について。自動車にはアクセルとブレーキのペダルがあり、それらを踏むとエンジンの回転がタイヤに伝達され、タイヤと路面との大きな摩擦によってほとんどスリップ (滑り) することなく自動車は加速減速されます。船でもエンジンの回転はそのままプロペラに伝達されますが、プロペラと水の間には常にスリップが生じていて、自動車のようには自在に加速と減速ができないという特徴があります。プロペラの回転数を上げて直ぐには船のスピードは上がりませんし、プロペラを逆転させても直ぐには減速できず、大きい船では減速を開始してから停船するまで数キロメートルを必要とします。

次に、方向転換について。自動車はハンドルを切ると前輪のタイヤが右左方向に向き、車体は忠実に右左方向に曲がります。船の場合は舵輪 (自動車のハンドルと同じ) を右左に回すと、船尾 (船の後ろ) の舵が船尾を左右に振るように動き、船体を回頭 (船が向きを変えること) させます。船尾を左に振ると船は右方向を向き、右に振ると左方向に向きます。この時、舵と水の作用によって船の向きを変えようとする力 (正確には偶力 (モーメント)) が働きますが、重量の大きな船は慣性のためになかなか向きを変えることができず、船体は斜めに滑りながら旋回します。

最後に停止について。自動車では停車させる時は、ブレーキを踏んで停止した後サイドブレーキを引きます。これでタイヤの回転がロックされ、坂道でも自動車は動き出しません。船には自動車のようなサイドブレーキはありませんが、その代わりにイカリ (錨、碇) が用意されています。イカリは海底の泥や岩に引っ掛けて、船の動きを制限しようとするものです。しかし、海底の土質によってイカリの引っ掛ける力 (把駐力) は変化しますし、大風が吹くとその風圧力によって船体が押され、それに伴ってイカリがズルズルと引きずられることがあります。船は常に水の上に浮いていますので、自動車のように一定の場所に完全に停止させることはできません。

以上のように、水に浮いている船体を制御することは大変難しく、操船する資格を得るためには専門的な長い訓練を受けなければなりません。船の運航の全責任を負っている船長 (Captain) には大きな権限が与えられています。

細かく言うと、他にも船の運航に必要なものがたくさんありますが、移動するためのプロペラ (一般的には推進装置)、船の針路を変更するためのカジ (舵)、そして停泊するためのイカリ (錨、碇)

があれば、取り敢えず船舶を運航することができるので、これらは船を運航するための 3 要素ということが出来ます。

## 4. 船の種類

船の種類には、用途、推進方法、形状、航行区域などによって、様々な分類の仕方があります。

### 4.1 用途による分類

人類が舟を使用するようになった初期の頃には、舟を用途によって区別することはなかったと思われますが、船による交易が発達してくると、目的に適した船が造られるようになりました。特に、近年は、いわゆる専用船が現れ、ある目的のためだけに使用される船が多くなりました。

用途別に分類すると、

客船：旅客を運ぶことを目的とする船。

貨物船：貨物を運ぶことを目的とする船で、最近はある特定の貨物だけを運ぶ専用船が多い。

貨客船：貨物と旅客両方を運ぶ船で、13 人以上の乗客設備を備えていれば貨客船という。

漁船：漁業に従事する船

特殊船：作業船、官庁船、軍艦、護衛艦など。

多くの書物では漁船を特殊船に分類しているようですが、生活に密着し、船の隻数では圧倒的に多い漁船を特殊船とするのは、無理があるように思えますので、ここでは独立した項目として扱っています。

貨物の専用船には、

オイルタンカー、プロダクトキャリアー、ケミカルタンカー、液化ガスタンカー、鉱石運搬船、

コンテナ船、自動車運搬船、

などがあります。

### 4.2 推進方法による分類

船の推進力は、最初は人の手で水を掻くことから始まり、棹、櫂、櫓などによって得られました。以上は人力によるものです。

次いで帆が発明され、自然の力（風）によって、人間の力とは比較にならない大きな推進力を得ることができるようになりました。しかし、初期の帆は性能が悪く、風向きが悪い時には、日和見といって島影でよい風を待ったり、海上で風が凪いだ時には櫓を漕いだりして人力に頼らなければならな

い時が多くありました。それも徐々に改良され、風上<sup>かざかみ</sup>に向って航行することができる帆が考案され、高速帆船<sup>はんせん</sup>も現れるようになりました。有名なイギリスのカティーサーク号はその代表例です。

18世紀になって蒸気機関が発明されると、それを船に積んで動力源としました。最初は、水車のような外輪<sup>がいりん</sup>を船の両舷<sup>りょうげん</sup>（船の側面を舷側<sup>げんそく</sup>といい、左右合わせて両舷または両舷側という）で回転させ推進器にしていたのですが、スクリーブプロペラ<sup>らせんすいしんき</sup>（螺旋推進器）が発明されてからはこれを推進器とする船が主流となっていきました。また、熱効率のよい内燃機関が発明されると、内燃機関とスクリーブプロペラを組合わせて推進手段とする船が普通となりました。

特殊な例として、原子炉を積んだ原子力潜水艦などがありますが、安全性の問題が解決されておらず、現在では原子力商船はありません。一般に原子力と言うと何か特別な動力源のように思われがちですが、これは誤解で、ウランなどの核分裂時に発生する熱で高温の蒸気を発生させ、その蒸気でタービン（多翼の回転翼）を回して動力としていますので、単に熱源が石炭や石油からウランになったというだけで、熱源としては新しいけれども、全く新しい動力源と言うわけではありません。原子力船は、いわば、ウランを熱源とする蒸気タービン船とすることができます。

また、博多埠頭<sup>ふとう</sup>と壱岐、対馬、韓国の釜山<sup>プサン</sup>の間を行き来する図5のような、いわゆるジェットフォイルはジェット推進船です。一旦海水を取り込み、それをウォータージェットで一気に吐き出し、その反動で推進力を得るのがジェット推進船ですが、エネルギー効率がよくないので、大型船には用いられないようです。これもノズル内のスク

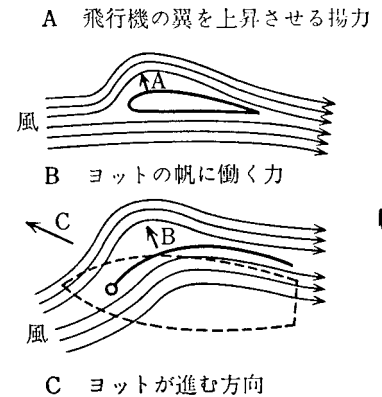


図3：翼と帆の類似性[2]

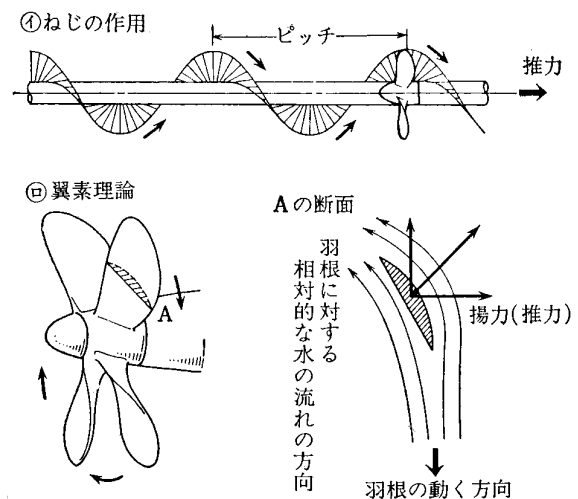


図4：螺旋推進器の原理[2]



図5：博多 釜山間に就航しているジェットフォイル（ビートル）

リューを高速で回転させ、取り入れた水を一気に噴出させ、その反力を推進力としているので、元をただせばスクリュープロペラと原理的には同じということになります。

まとめると、

熱源は、

薪 石炭 石油 ウラン

動力源は、

人力 風力 機械力（蒸気機関、蒸気タービン、内燃機関）

と変遷（<sup>へんせん</sup> 移り変わること）してきたこととなります。

また、推進器は、

人の手 棹、櫂、櫓 帆 外輪 スクリュープロペラ、ウォータージェット

と変遷してきました。

### 4.3 形による分類

外見上からの分類として、次のものがあります。

1. <sup>みしません</sup> 三島船 (Three Islander) :

<sup>まんさい</sup> 満載状態（貨物を積めるだけ積んだ状態）で船を横から

見ると、<sup>せんしゅうろう</sup> 船首楼、<sup>せんきょうろう</sup> 船橋楼、

<sup>せんびろう</sup> 船尾楼が突き出て、三つの

島が浮かんでいるように見えるところから、こう呼ばれている。

2. <sup>ひらこうはんせん</sup> 平甲板船 (Flush Decker) : <sup>じょうこうはん</sup> 上甲板上に船楼構造を持たず、<sup>こうはんしつ</sup> 甲板室だけがある船。例えば、大型のタンカー、<sup>づみ</sup> ばら積貨物船など。（テレビニュースなどでは甲板をカンパンと読んでいますが、船舶工学ではコウハンと読みます。）

3. <sup>こうはんせん</sup> ウェル甲板船 (Well Decker) : 船尾楼と船橋楼が連続しており、船首楼との間がくぼんだ形に見えることから、こう呼ばれている。例えば、大型帆船などによく見られる。

4. <sup>ぜんつうせんろうせん</sup> 全通船楼船 (Shelter Decker) : 船首楼、船橋楼、船尾楼が連続した船。客船、フェリーボート、自動車運搬船などに見られる。

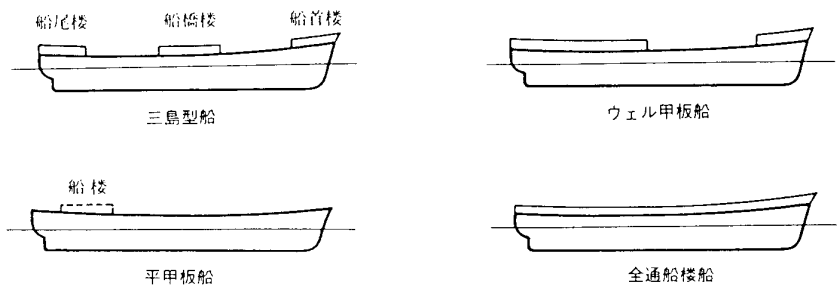


図6：外見形状による船の分類[3]

構造の形から、

1. 単胴船 (Monohull) : 普通、船といわれるものはこの形のものが多く。(図7左)

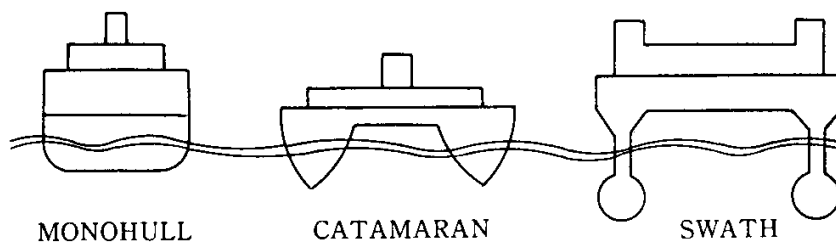


図7：構造形状による船の分類(1) [4]

2. 双胴船 (Catamaran) : 二つの細長い船体の上に甲板を張り渡した船。(図7中) 双胴船には水面下の船体の形によって、半没水型双胴船 (Semisubmerged Catamaran) と呼ばれるものがある。それは双胴船の水中部が魚雷のような形をしており、水面付近の水線面積 (水平な面で切った切り口の面積) が小さいため単胴船に比べて揺れにくく、SWATH (Small Waterplane Area Twin Hull) とも呼ばれる。(図7右)

3. 水中翼船 (Hydrofoil Craft) : 水中に突き入れた翼で、船体を水面上に浮かせて航行する船。(図8) 例えば、博多埠頭と壱岐、対馬、釜山の間を行き来するジェット推進船。(図5)

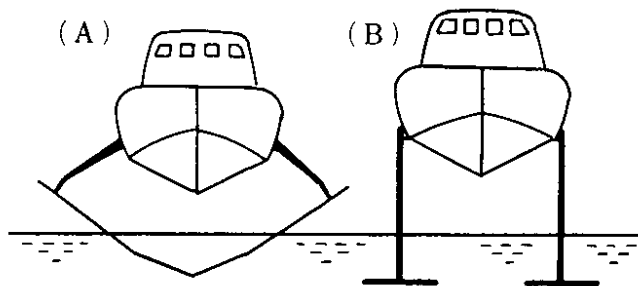


図8：構造形状による船の分類(2) [4]

4. ホバークラフト (Hovercraft) : 船体周辺をゴム製のスカートで包み、下に噴出す空気を利用して浮上航行する船。(図9)

5. 潜水船 (潜水単胴船) または潜水艦 (Submarine) : 最近の潜水艦は涙滴型という流線形をしており、水上を航行するときよりも水中を潜水する時のほうが速度が速い。(図10)

など。

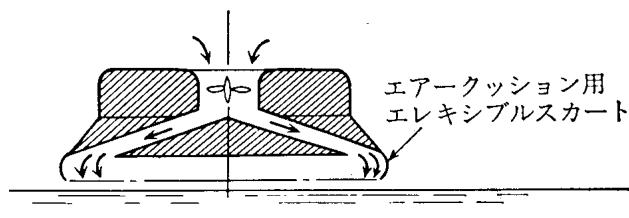


図9：構造形状による船の分類(3) [2]

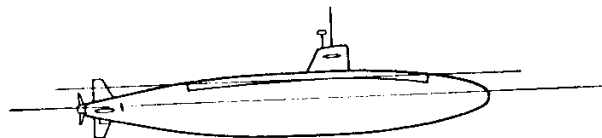


図10：構造形状による船の分類(4) [2]

#### 4.4 航行区域による分類

設備や構造によって船の航海できる範囲は法律で規制されており、どこでも自由に航行できるという訳ではありません。「船舶安全法」では、船舶の航行する区域を次の四つに分けています。それぞれの区域を航行する船舶は、法律で決められた設備・構造の基準を満足しなければなりません。

1. 平水区域<sup>へいすいくいき</sup>：湖、川、港内<sup>こうない</sup>。
2. 沿岸区域<sup>えんがんくいき</sup>：海岸より 20 海里<sup>かいり</sup>(約 37 km : 1 海里は 1.852 km) 以内の水域(図 1 1 の左図に示す日本列島の沿岸に沿って破線で囲まれた水域)。
3. 近海区域<sup>きんかいくいき</sup>：図 1 1 の右図に示す水域(東経 175°、南緯 11°、東経 94°、北緯 63°で囲まれた水域)
4. 遠洋区域<sup>えんようくいき</sup>：全ての水域

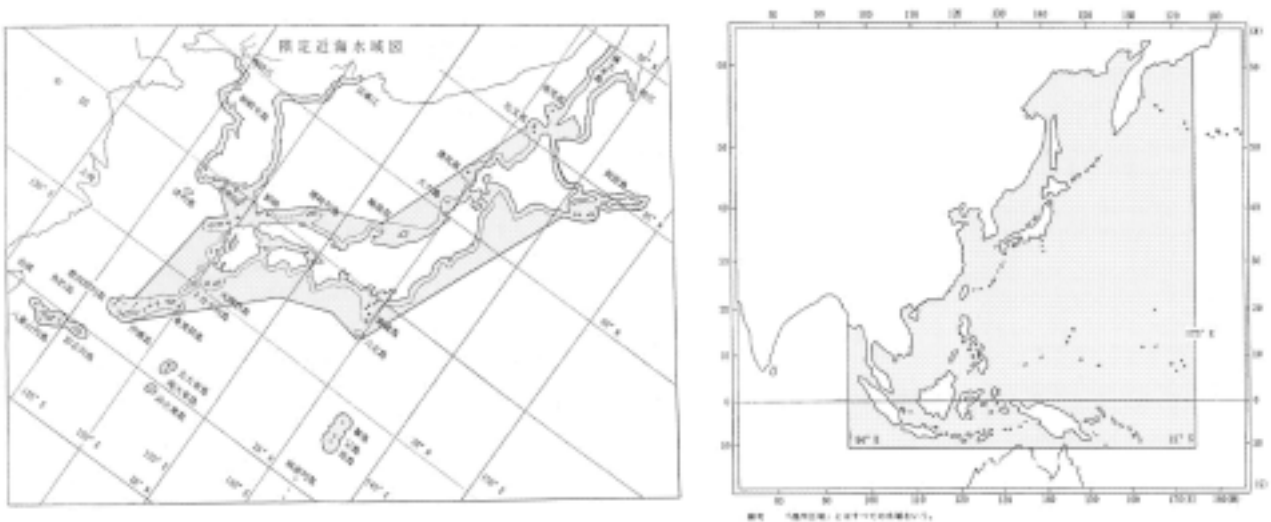


図 1 1 : 近海区域と限定近海水域

平成 13 年 10 月に「限定近海水域<sup>げんていきんかいすいいき</sup>」が新たに設けられました。それは図 1 1 の左図で実線で囲まれた水域です。これは、内航船<sup>ないこうせん</sup>(日本国内の港から港へ貨物を運搬する船)の運航コストと建造コストの低減を目的として設定されたもので、沿岸区域と近海区域の中間的な水域です。限定近海水域を航行する内航船は、沿岸区域を航行する貨物船とほぼ同じ設備・構造で、ほぼ同じ量の貨物を積んで、直線的なコースを選択できるため経済的といえます。

#### 5. 船の大きさと形状の表し方

船の大きさや形を表現するために、船舶工学では船の測り方が決められています。

船を風景としてただ漫然と見ていたのでは、感覚的に実感できても、具体的にその船がどのくらい大きいのか、ずんぐりしているのか、ほっそりしているのか、などを正確に人に伝えることはできません。船の大きさを誰でも間違いなく認識するためには、または、伝えるためには、あるルールが必要になります。船を学問的に扱おうとする場合には、なおさらです。

工学的にある物の量を測る場合には、決められた方法に従って計測し数量化することが必要になります。この数量化こそが、工学においては客観的な物差しになります。従って、皆がこの方法を理解しておけば、測られた数字を見るだけで、物の絶対量を知ることができますし、この物はある物より何倍大きいのか、または、何分の一かという相対的な比較も数字で知ることができます。

船の大きさや、船体が肥えているか瘠せているかなどを知るために、船舶工学では図6に示すような測り方を用いています。図12は、浮んでいる船の水面より下の部分の形状を表しています。そうして、ちょうど水面の位置での船の長さを

$L$ 、水面の位置で一番幅の広いところの長さを  $B$ 、水面から船体中央部の船底までの深さを  $d$  としています。これらを、

- $L$ ：船長
- $B$ ：船幅
- $d$ ：喫水

と呼びます。

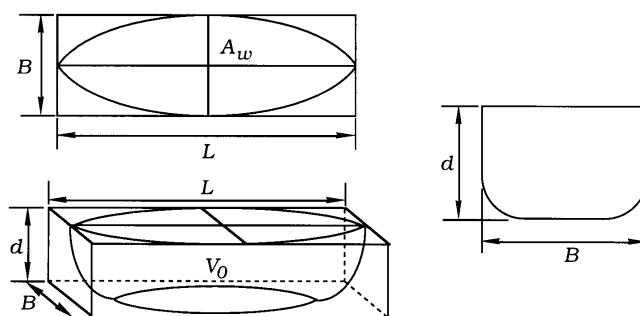


図12：船の測り方

また、水面下に沈んでいる船体の容積を  $V_0$ 、船を水面で横に切ったときの切り口の面積を  $A_w$  としています。これらを、

- $V_0$ ：排水容積
- $A_w$ ：水線面積

と呼んでいます。

また、船が肥えているか瘠せているかを表す物差しとして、肥瘠係数という概念を用いています。その中でも代表的なものが方形係数と呼ばれるものです。方形係数はブロック係数とも言い、 $C_b$  という記号で表されます。方形係数と船長、船幅、喫水、排水容積との関係は次式のようにになります。

$$C_b = \frac{V_0}{L \times B \times d}$$

$C_b$  が大きければ肥えた船、小さければ瘠せた船ということになります。この  $C_b$  は 1 より小さい

値で、船の種類によって大きさが大体決っています。

## 6. 船の運動とその名称

水に浮いている船は、船の上の物や人が移動することによって、または、風や波によって傾いたり揺れたりします。船の揺れにはその方向によってそれぞれ名前が付けられています。船の揺れを解りやすく説明するために、船に座標軸を付けます。図 1 3 に示すように座標軸の原点を船の重心  $G$  に一致させ、船の長さ方向に  $x$  軸、横方向に  $y$  軸、深さ方向に  $z$  軸とします。それぞれの座標軸は互いに直角です。 $z$  軸が下向きなのは不自然な感じがするかもしれませんが、船に働く力を考えるときに、重力の働く方向を正とした方が便利な場合が多いのです。

このような船体に固定された座標系を船体固定座標系といいます。

船の運動には大きく分けて 2 種類の運動があります。それは座標軸に沿った往復運動（並進運動ともいう）と座標軸回りの回転運動です。

これらの運動をさらに細かく分けると、座標軸に沿った往復運動が 3 種類、座標軸回りの回転運動が 3 種類あり、合せて 6 種類あります。これら運動の様子を、船舶工学や航空工学では「6 自由度の運動」と呼びます。

まず、座標軸に沿った往復運動ですが、 $x$  軸方向を前後揺 (Surge)、 $y$  軸方向を左右揺 (Sway)、 $z$  軸方向を上下揺 (Heave) といいます。次に座標軸回りの回転運動ですが、 $x$  軸回りを横揺 (Roll)、 $y$  軸回りを縦揺 (Pitch)、 $z$  軸回りを船首揺 (Yaw) といいます。

往復運動では座標軸の正の方向の運動を正、回転運動では、座標軸の正の方向に向って右ねじの回転方向を正とします。すなわち、右利きの人々が、座標軸の正の方向に向って木ねじを締める回転方向を正とします。

座標軸について少しくどく述べましたが、工学では物の位置や運動を測る基準を厳密に定義しないと、後で何をやっているのか曖昧になってしまいます。それで、工学では言葉の定義や計測の基準をうるさく言いますし、特に、物体の位置や運動方向の正負を明確にすることは重要です。符号を一つ

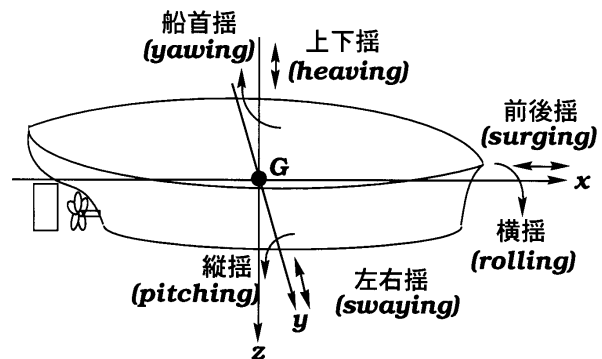
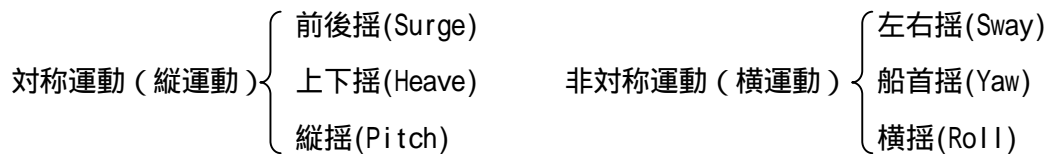


図 1 3 : 運動の名称

間違っただけでも、現象が全く違った形で理解されますし、間違っただけで結論が導かれることになるから  
です。

また、こういう分類の仕方もあります。船は普通  $x$  軸に関して左右対称ですから、 $x$  軸と  $z$  軸で  
決る平面内の運動、つまり前後揺、上下揺そして縦揺を対称運動（または縦運動）といい、 $x$  軸と  
 $y$  軸で決る平面内の運動、つまり左右揺と船首揺それに横揺を一緒にして非対称運動（または横運  
動）ということもあります。まとめると、次のようになります。



どうしてこのような分類の仕方をするかという、前後揺と上下揺と縦揺の運動、また、左右揺と船  
首揺と横揺の運動はそれぞれ関連性が強いからです。

このような運動の種類とその名称を知っているだけでも船に対する見方が変わってくるのではない  
でしょうか。

運動ではないのですが、船の浮いている姿  
勢にも名前が付けられています。たとえば、  
図 1 4 の右図のように船が長さ方向に傾いて浮  
いている時は「トリム (Trim) している」と  
いいます。また、図 1 4 の左図のように船の幅  
方向に傾いて浮いている時は「ヒール (Heel)  
している」といいます。トリムやヒールをす

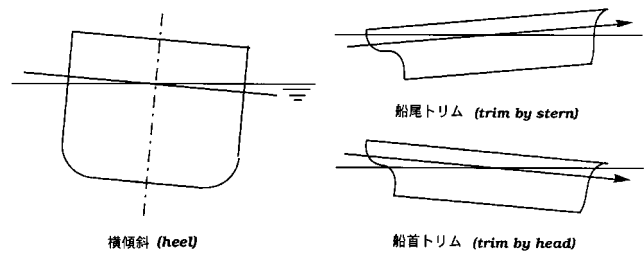


図 1 4 : 船の姿勢

るかしないかは、船の浮心（浮力の中心）と重心（船の重さの中心）の位置によって決ります。つま  
り、船は一般に左右対称ですから、 $x$  軸と  $z$  軸で作られる平面内に浮心と重心があればヒールはしま  
せんが、積荷などが横方向に移動したりすると重心が横方向に移動してヒールすることになります。  
また、荷物を前に積みすぎたり後ろに積みすぎたりすると、重心が前後に移動してトリムすること  
になります。

このように、船の浮いている姿勢や波による船の運動はたいへん複雑です。でも、今では、「船体  
運動論」といって、船の複雑な運動を数学的に表現し、船の運動の性質を調べる学問が確立され、更  
に発展し続けています。

## 7. 船はなぜ浮くのか？

船はなぜ水に浮くことができるのでしょうか？

このような疑問を持つことはまれかも知れませんが、しかし、「船はなぜ浮くのか？」という疑問は、船の本質をつくものです。実は、大きな船も小さな船も、「浮く原理」は同じなのです。

皆さんはもう「アルキメデスの原理」を教わったでしょうか。アルキメデスの原理は、中学校の教科書にはこう書かれています。

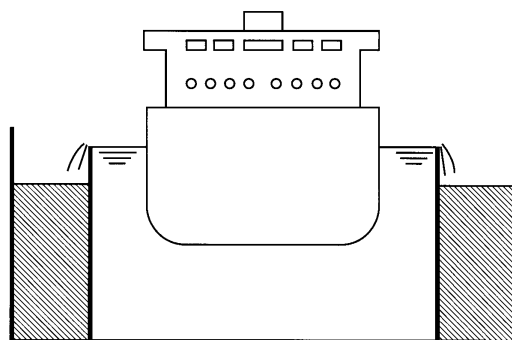


図15：アルキメデスの原理

液体内の物体は、その物体と同体積の液体の重さに等しい大きさの上向きの力を受ける。

液体から受ける、この上向きの力を「浮力」といいます。

アルキメデスの原理を、図15を使ってもう少し分かりやすく説明します。図15のように、水がいっぱい入った内側の器に船を浮かべたとします。すると、船が浮かぶと同時に、船によって押し退けられた水が外側の器にあふれ出ます。水面より下の船の体積は、あふれ出た水の体積に等しくなるはずですが、アルキメデスの原理では、船を持ち上げようとしている力（浮力）の大きさは、あふれ出た水の重さ、つまりその水に働く重力の大きさと等しいと言っているのです。

船舶工学では、船が押し退けた水の重さを排水量といいますが、つまり、排水量という言葉は船の重さと同じ意味に使われています。

もう少し詳しい説明をします。図16に示すように、水面の下にある船体は水から圧力を受けます。皆さんがプールで泳ぐ時、自分の背丈ほども潜ると胸が苦しくなるくらい水から力を受けたという経験があると思いますが、あの力が水圧といわれるもので大変大きな力です。水面の下にある船体は、その深さに応じて（比例して）船体の表面に直角の方向に水圧を受けます。船体のある点に働く水圧は、図16のように上向きと横向きの方向に分けて考えることができます。

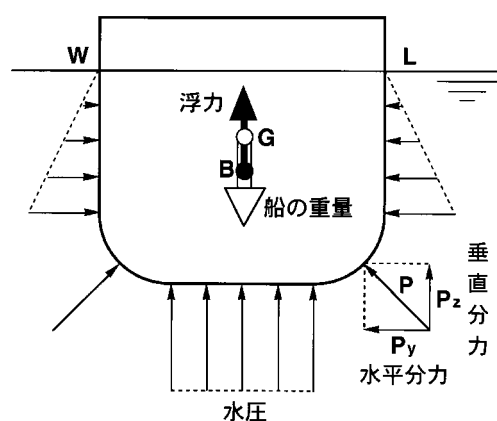


図16：船が浮く原理

これを「ぶんりょく」といいます。横方向の力（水平分力）は船の左右両側の横向き方向の力どうして打ち消し合いますが、上向きの力（垂直分力）は残ります。この上向きの力を水面下の船体表面全体にわたって足し合わせると、この力がちょうど、アル

キメデスの原理でいう、水面下の「物体と同体積の液体の重さ」に等しくなるのです。

つまり、船は、水面より下にある船体が押し退けた水の量の重さと同じ力で上向きに力を受けており、その力が下向きの船の重さと釣り合っているからいつまでも浮いていることができるのです。言い換えると、船の重さと船が水から受ける浮力が釣り合っているから浮き続けることができるのです。

それにひきかえ、飛行機は止れば翼に生じる揚力（翼の上面と下面を通過する空気の圧力差によって生じる上向きの力）がなくなり墜落するのですから、常に推進器を働かせエネルギーを消費し続けなければ飛び続けることができないのです。

船は浮くことに関しては、何の動力も仕掛けもいらぬのですから、天からの恵みを受けているということができ、全くの省エネルギーだということができます。

## 8. 船はなぜ揺れるのか？

船は何の動力がなくとも、また何の仕掛けがなくとも水に浮くことができます。しかし、水面は普通は鏡のように滑らかではなく、水に浮いた物は風や水面の波によって揺れることになります。

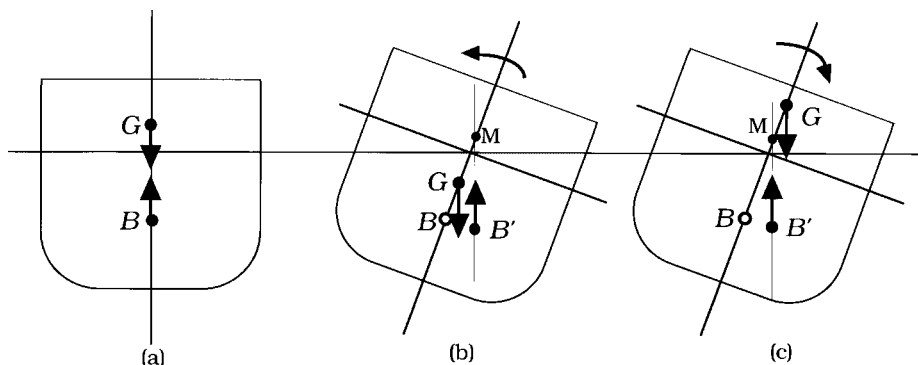


図17：船の復原力

では、船はどうして揺れるのでしょうか。図17に船が水に浮いている状態を、船体の横断面（船を横に輪切りにした時の切り口の形）で示しています。

図17(a)に示すように、波や風がない場合は、船は水面に対して真っ直ぐに浮いています。この時、船の重心と浮心の位置は両方とも水面に対して垂直な船体の中心線上にあります。また、普通、船の重心は浮心よりも上にあります。一見、不安定のように見えますが、それはあとで述べる条件によって、安定になったり不安定になったりします。

図17(b)に示すように、静水中（波も流れもない水の中）に浮ぶ船が、何らかの力で片舷（船の片側、図では右）に傾いたと考えて下さい。船が傾いても、船の重心  $G$  の船に対する位置に変化はありませんが、水面下の船の形が変化するので、浮心  $B$  は  $B'$  に移動します。船舶工学では、浮力の作用線と船体中心線との交点  $M$  をメタセンターと呼びますが、重心  $G$  には下向きの重力、メタセンタ

-M には上向きの浮力が働いています。この二つの力は互いに平行で反対向きで離れたところに働きます。このような力を偶力といいます。偶力は物体を回転させる働きがあります。今考えている船の場合、G が M より下にあれば船の傾きをもとに戻そうとする偶力が働きます。これを復原モーメントといいます。この場合、外から加わっていた力がなくなると、復原モーメントの働きで、船の傾きが減る方向(左)に戻り始めます。一端戻り始めると船は、慣性で、元のまっすぐ(傾き角0)の位置で止まらず、さらに左に傾いてゆきます。すると、今度は復原モーメントの向きが逆になりますから、ある程度左に傾くとそこで一端止まり、続いてまた右の方に傾き始めます。ですから、一端傾くと船は外力がなくなっても左に右に揺れ続けるのです。もしこの運動に対する水などの抵抗が無ければ左右の最大の傾き角は等しく、この運動は永久に続きます。傾きが小さければ復原モーメントは傾きの角度に比例し、傾きの角度は時間とともに単振動(あるいは調和振動)と呼ばれる変化をします。実際には、水の抵抗がありますから、振動は段々減衰してついには角度0の元の位置に止まります。以上は船の横揺(Roll)について述べたのですが、縦揺(Pitch)についても上と同様なことがいえます。

この船の揺れの運動は、実は、振り子の運動とある意味で本質的に同じ現象なのです。それだけではありません、水に浮いたものがゆらゆらとゆれる、旗がはためく、電車がガタゴトと振動する、自動車のエンジンが小刻みに振動するなど、身近に揺れるものまたは振動するものはたくさんありますが、それらも本質的に同じ現象といってよいでしょう。次に振り子の例を見てみましょう。振幅が小さい振り子の運動は典型的な調和振動です。

図18の(a)に示すように振り子を支点から吊り下げると、力を何も加えなければ、鉛直下向きにじっとして動きません。振り子の場合、この状態を安定な「中立の状態」にあると言います。

物体が静止しているということは、何も力が働いていない状態か、複数の力が働いていても釣り合

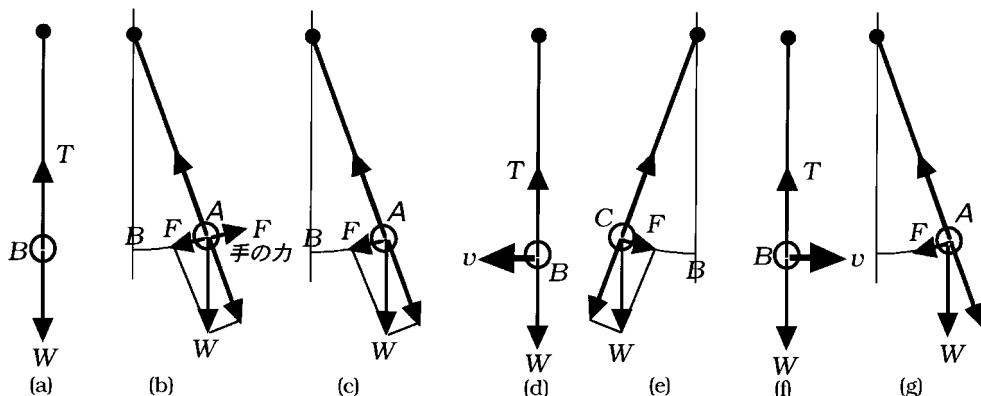


図18：振り子

っているため見かけ上何も力が働いていないように見える状態と考えられます。また、実験をすると分かりますが、揺れている自由振り子は、空気などによる摩擦(運動を妨げるこのような力を一般

に減衰力げんすいりょくといいますが)によって振れ幅が小さくなり、最終的には中立の位置に落ち着きます。

図18の(b)に示すように、この振り子をA点の位置まで持ち上げ、図18の(c)のように、突然に離れたとします。するとこの振り子は、A点からB点へ、さらにC点へと移動します。また次には、C点からB点へ、さらにA点へと元に戻り、この往復運動を何回も繰り返す、時間の経過と共に振れ幅が小さくなり、最後には安定な中立点であるB点に静止します。もし、この実験を真空中しんくうちゅうで行えば、運動を妨げる空気が存在しないので、錘おもりを吊り下げている支点や糸の内部摩擦抵抗まさつていこうがなければ、振り子運動は永久に繰り返されることとなります。錘に働く力は、糸が振れた角度が小さければ、その角度に比例します。このような元の位置からの距離(ここでは振れた角度)に比例する復原力が働いて永久に繰り返す運動を単振動(または調和振動)といい、「振動」または「動揺」の中でも減衰力げんすいりょくの働かない特別な場合です。

以上のような振動の原理を利用して、船の揺れ方を研究するのが「船体運動論(学)」または「船体動揺論(学)」です。その中でも特に、この運動を動的どうてきにではなく、静的せいてきな力の釣り合いとして幾何学的に扱う学問が「船舶算法せんぱくさんぽう」と呼ばれるものです。「船舶算法」は船舶工学の一番基礎となる学問です。

## 9. 船はなぜ転覆するのか？

ここでは、「船舶算法」のほんの一部を分かりやすく説明し、船の復原力がどのように働き、船が安定に浮いているかを考えてみようと思います。

図17(c)に示すように、船の重心GがメタセンターMより上にある場合を考えましょう。この場合、移動した浮心位置B'に働く浮力と船の重心位置に働く重力によってやはりモーメントが生じますが、この場合は船を更に傾けようとする転覆モーメントてんぷくになります。従って、この場合は船は不安定ということになり、船は転覆します。

また、メタセンターMと重心Gが一致する時には、船が傾いてもモーメントは働かず、船は傾いたままの状態じょうたいで静止します。この状態を中立ちゅうりつといいます。

以上から次のことが言えます。

**MがGより上：安定**

**MとGが一致：中立**

**MがGより下：不安定**

では、より安定であるために起き上がり小法師こぼしのように、重心位置は低ければ低いほどよいかと言

うと、必ずしもそうとは言えません。なぜかと言うと、先ず、重心が余り下に来ると、船の横揺周期が非常に短くなって、横揺加速度が大きくなり積荷に損傷<sup>つみに そんしやう</sup>を与えたり、乗り心地が悪くなったりします。

以上のようなことから、メタセンターの位置は、経験的に船の重心の上方 20~60 cm 程度ところにあるのが望ましいとされています。因みに、重心  $G$  からメタセンター  $M$  までの距離をメタセンター高さといいます。

## 10. おわりに

歴史を知っていること、科学的なものの見方を身につけていることなどは、人との会話を豊かにし、機転のきいた判断や行動を生み出します。それが、教養だと思います。

私はこのお話しで、科学的なものの見方考え方の一面を述べてきました。しかし実は、科学技術の発達は人類に利益ばかりをもたらしたのではありません。豊かさと便利さの享受<sup>きやうじゆ</sup>と引き換えに、地球の環境汚染、公害による健康被害という深刻な負の遺産も残してきたのです。科学技術はその使い方によって人類の生存にとって脅威となることもあるのです。今も科学技術の負の遺産は増えつつあります。このようなことを知ることも大切です。

皆さんが、人類の直面している様々な問題やこれから生じるであろう様々な事態を冷静に見通せる教養豊かなヒトになることを祈って、このお話しを終ることにします。

## 参考文献

- [1] 岩佐英介：新・実用船舶算法、海文堂、1972 年初版。
- [2] 吉田文二：船の科学 -- 箱船から水中翼船まで --、講談社、1977 年 第 3 刷。
- [3] 瀧澤宗人：船のはなし、技報堂出版、1992 年 1 版 2 刷。
- [4] 大阪商船三井船舶（株）広報室・営業調査室：海と船のいろいろ、成山堂、1997 年 2 訂版。
- [5] 運輸省海上技術安全局監修：船舶六法（平成 11 年版）、成山堂、1999 年。