

### 4-2-3 熱帯低気圧の構造

台風は、直径数百～千 km にもおよぶ巨大な大気の渦です。渦の内部では強い上昇流が発生して積乱雲が形成されています。積乱雲の中心には、発生する下降気流によって「台風の日」が形成されますが、「目の壁雲（アイウォール）」の下では最も強い風が吹き、雨も激しく降っています。一方、目の上部の圏界面付近では、地表付近とは反対にコリオリの力によって時計回りで外側に吹き出す「巻雲」の渦ができています。（図 34、35）

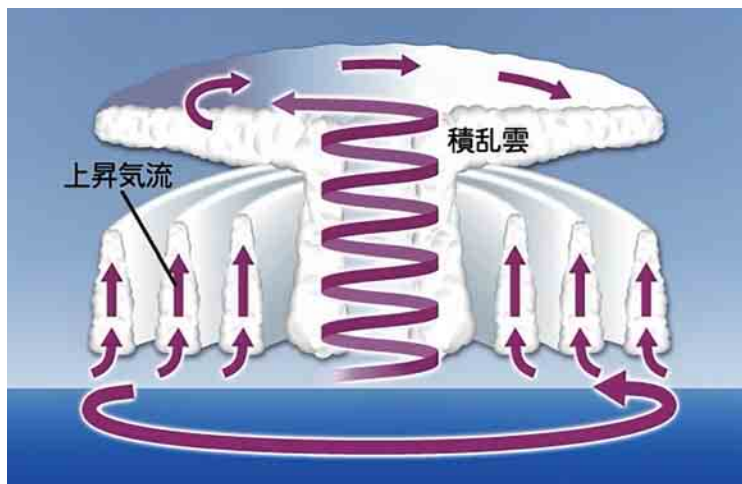


図 34 （出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD）

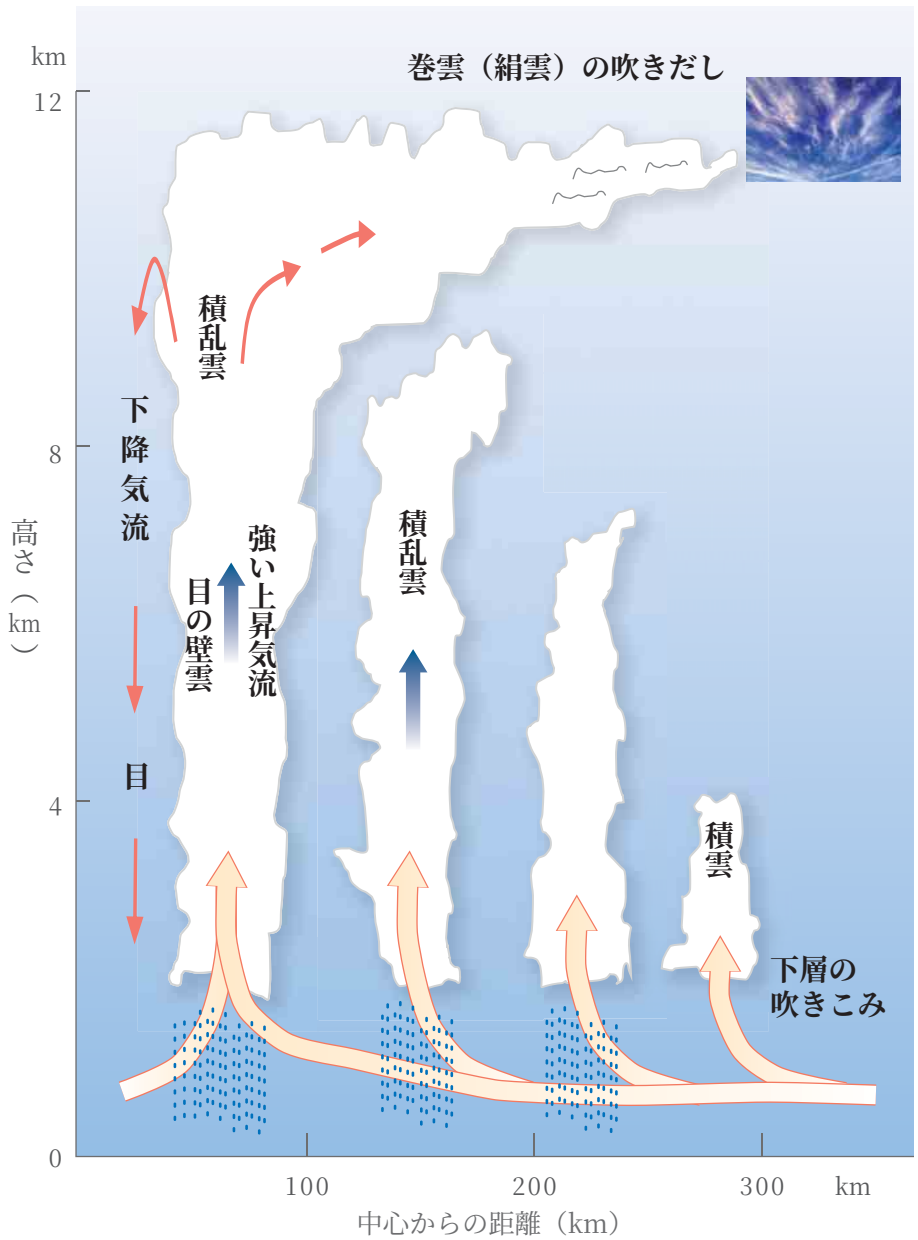


図 35 台風の鉛直断面

台風を取り巻く「らせん状の積乱雲の帯」はスパイラルバンドと呼ばれています。スパイラルバンド内では台風の中心に向って巻き込むような広域的な強風と、積乱雲に起因する局地的な突風と驟雨<sup>しゅうう</sup>が発生し荒天状態と視界不良になっているので注意が必要です。(図 36、図 37)

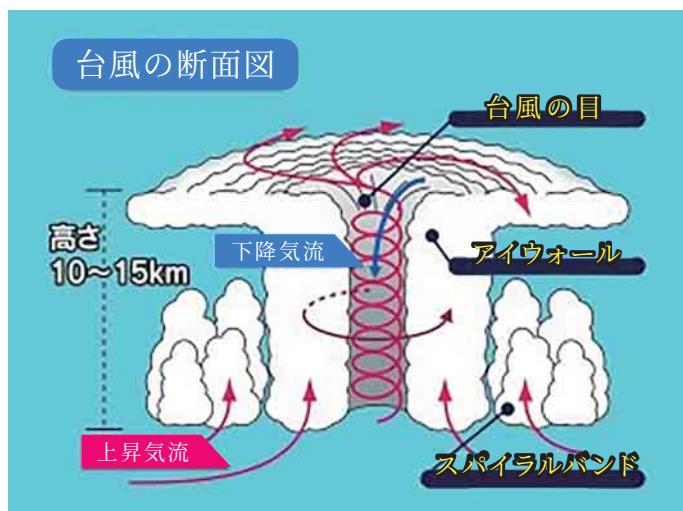


図 36 (出典：気象庁ウェブサイト)

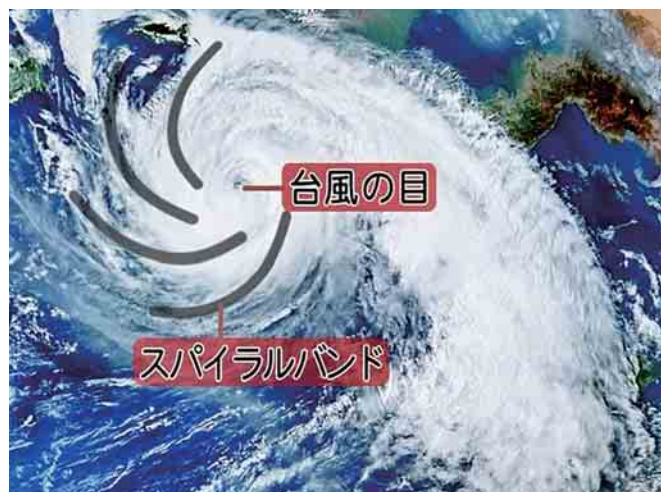


図 37 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

#### 4-2-4 熱帯低気圧の進路

P&I ロスプリベンションガイド第 43 号（2018 年 7 月発行）の中で日本近海の台風の進路についても紹介していますので参照ください。



低緯度地域で発生した台風は、当初、偏東貿易風に流され、時速 10km から 20km で西方向に進みます。（図 38）

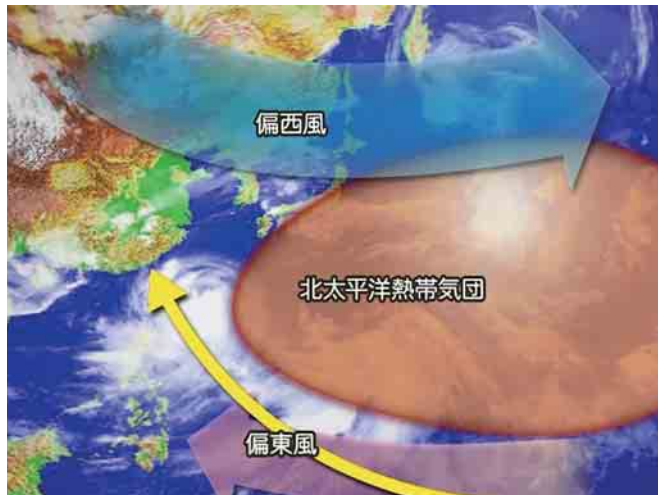


図 38 （出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD）

その後、上空の気流と北太平洋高気圧の影響で北よりに進路を変更して北上します。北上するにつれて、上空の偏西風の影響を受けて東方向に進路を変えますが、この進行方向を大きく変える地点を「転向点」といい、台風の勢力が最も強い状態となります。

転向後、北東進に移ると速度が上がり、北緯 30 度付近では時速 30 ～ 40km、北緯 40 度付近では時速 50km 程度となって、一般的には台風は北上に伴って低下する海

水温度や気温の関係で勢力が衰え、オホーツク海または北海道沖の太平洋上に抜けて温帯低気圧に変わります。(図 39)

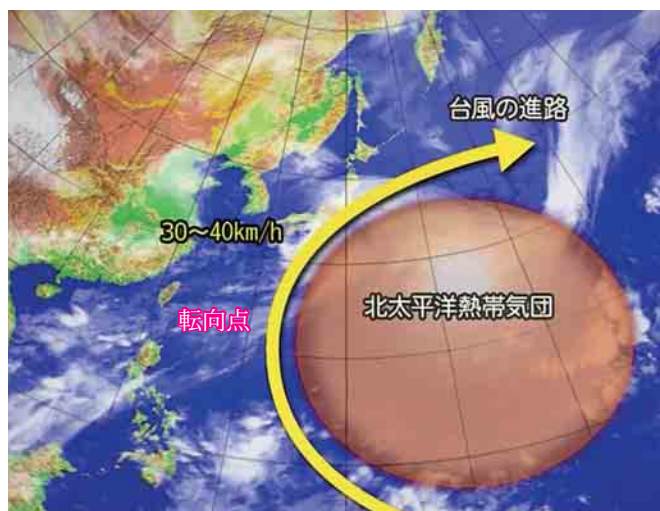


図 39 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

500 hPa 高層天気図上において北太平洋高気圧の西への張り出しが強く、中国大陸付近まで達していれば、西進している台風の転向の可能性は低く、一方、高気圧が東に退き、大陸付近が気圧の谷になっていると、台風は高層の西寄りの風に流されて北太平洋高気圧の西の端で東に転向して北東に進む可能性が高いといわれています。

また、台風は、500 hPa 天気図上で、北太平洋高気圧を右に見て、その周囲を回るように進む場合が多く、このことをステアリングといいます。統計的には、台風が北緯 20 度、東経 130 度の東を通過した場合は、東に進路を変えて日本南岸方面に向い、西または南を通過した場合は、西向きの進路のまま台湾方面へ向う場合が多いことがわかっています。(図 40)

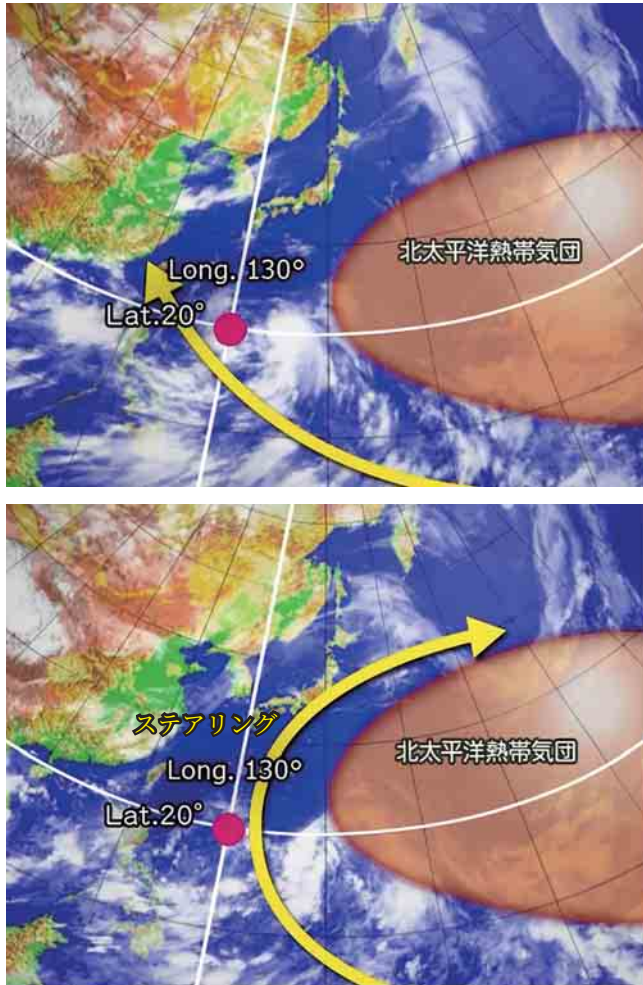


図 40 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

#### 4-2-5 熱帯低気圧の進路図の見方

テレビの天気予報や新聞・インターネットで台風や熱帯低気圧の予想進路を目にすることが多いと思います。(図 41) 台風の進路をより正確に予想するためには、この予想進路図に記載されている内容を正しく理解しておく必要があります。



## 進路図の解説



図 41 (出典：気象庁ウェブサイト)

## ① 現在の中心位置

発表時における台風の中心位置を示しています。

## ② 暴風域

平均風速が毎秒 25 m以上の風が吹いていると考えられる範囲を赤線で示しています。現在の中心位置とした暴風域は、その時点におけるものです。

## ③ 強風域

発表時における平均風速が毎秒 15m 以上の風が吹いていると考えられる範囲を黄色で示しています。

## ④ 予報円

予想時刻に台風の中心位置が 70% の確率で予報円内に進むことを表しています。

## ⑤ 暴風警戒域

中心位置の予報円の外側に赤線で示しています。これは、台風の中心が予報円内に進んだ場合、暴風域に入る範囲を表しています。

台風避航計画を立てる場合、本船の現在位置、台風予想進路図のそれぞれの時間において、仮に本船が原針路で航走した場合の本船の予定位置を確認します。暴風警戒域内に入るようであれば避航することを計画し、その後に発表される天気図を都度確認しながら避航計画を修正することが求められます。

#### 4-2-6 危険半円と可航半円

台風の風は、反時計回りに中心に向かって吹き込むため、進路の右側では、吹き込む風と進む速さが加わり、左側に比べて強風が吹く傾向があります。台風の右半円は、左半円に比べて波も高く、また風も強いので「危険半円」と呼ばれています。一方、台風の進路の左半円は台風の進む速さと吹き込む風が逆になるので、右半円と比べると風は弱くなるので「可航半円」と呼ばれています。(図 42)

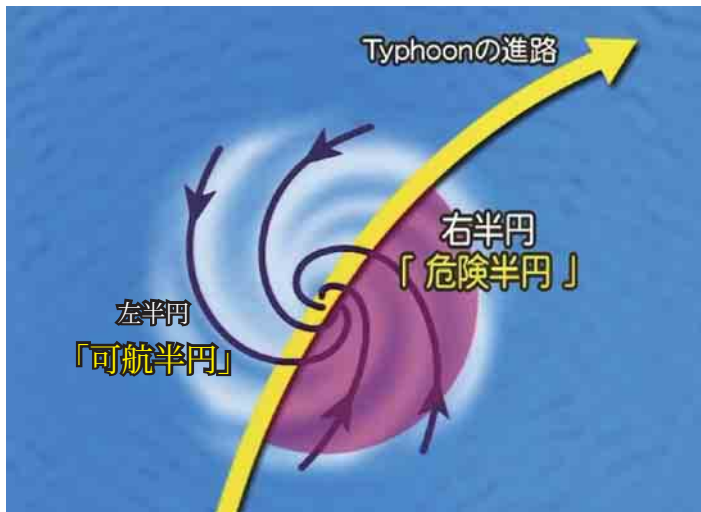


図 42 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

船が「危険半円」に迫いつかれて暴風域に入り、風・波を右舷後方から受けて航行すると、台風と同じ方向に進むことになり(図 43)、暴風域から抜け出しにくくなります。また、風・波を左舷後方から受けて航行すると、台風の原因に向かって進むこととなり、より強い暴風域に突入することになってしまいます。(図 44)



台風の右半円に入りかけた時には、風を右舷船首に受けて大きく右転するようにして、暴雨域から遠ざかるように避航することが求められます。(図 45)

船が「可航半円」の前方から暴風域に入った場合、風・波を右舷後方から受けて航行すると、台風の外方向に進み暴風域から抜け出すことができます。したがって、左半円に入りかけたときには、風を右舷船尾に受けて大きく左転するように暴雨域を避けて避航します。(図 46)

ただし、可航半円とはいえ暴風域に変わりはなく危険性が高いので、暴雨域に進入しないように細心の注意が必要です。「可航半円」は「航行可能な半円」ではなく、**「避航が可能な半円」**と理解すべきです。

航海中に台風遭遇する場合は、その進路と大きさ、および、遭遇する場所が「右半円か左半円か」など自船との

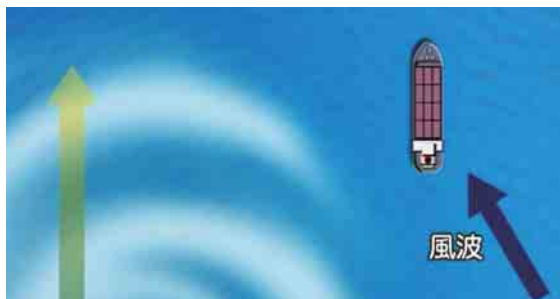


図 43 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

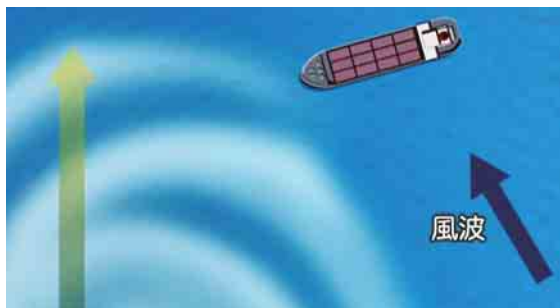


図 44 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)



図 45 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)



図 46 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

位置関係、さらに自船の性能などを勘案しながら、可能な限りその暴風域から遠ざかるべきです。

また、停泊中や、荷役中に台風が接近する恐れがある場合は、港長の指示に従うとともに、十分前広に情報を収集し、時間的に余裕をもって避難することが基本です。

## 第五章 気象情報の入手

航海において、台風や急速に発達する低気圧（爆弾低気圧）などによる荒天を避けるためには、最新の気象情報の入手とその理解が重要です。気象庁が発行する「各種天気図」や、インターネットを介して無料で得られる「台風進路予報」、各気象情報会社が「有料で提供する気象情報」などがあります。中には、台風の進路を1週間程度先まで予測しているものもあり、避航計画立案に有用です。

したがって、本船の船長・航海士には、こうして入手した気象情報を読み取ることができる知識が求められます。気象関係の解説本は多数出版されているので、本船に配布して日々勉強することも必要です。ここでは、気象庁から発行される各種天気図と、その利用法を紹介します。

### 5-1 地上天気図

通常、天気図というと「地上天気図」を指し、地上付近の気象状況を表わしているものです。

地上天気図は、1,000 hPa を基準にして4 hPa ごとの等圧線が描かれ、6時間ごとに新しい天気図が作成されて気象庁から発表されます。

地上天気図には、気圧分布だけでなく、気温、風、天気なども表記されていて、これらから等圧線や前線などの天気現象を解析しています。（図 47）

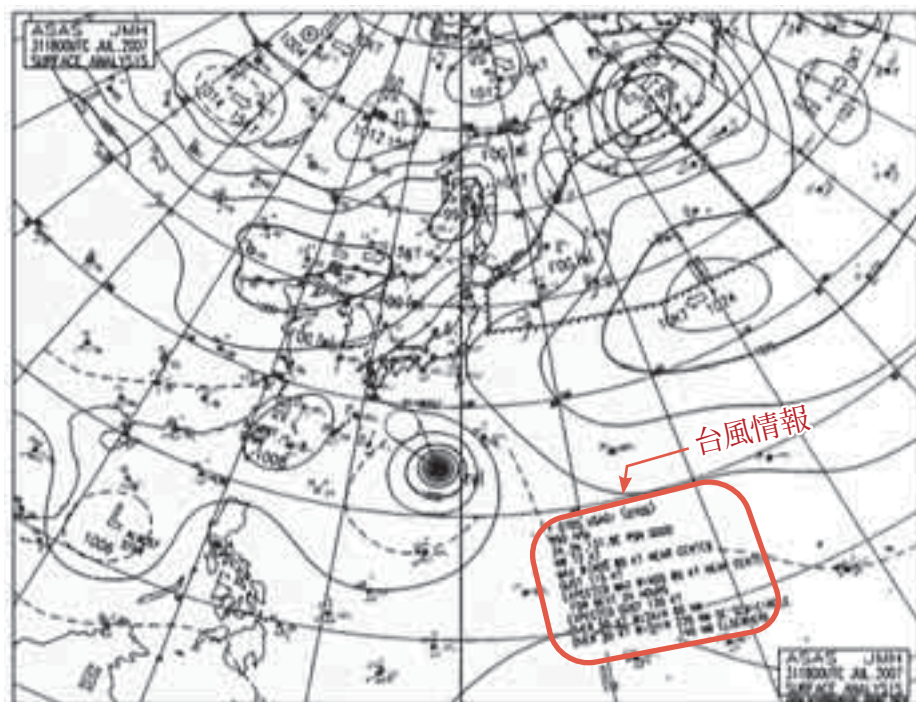


図 47 地上天気図 (出典：気象庁ウェブサイト)

また、地上天気図には台風情報なども記載されています。例えば、台風の中心位置の精度に関する情報は以下のように表示されており、この意味を理解しておくことも必要です。

信頼度の「Good」は中心位置の誤差が 30 マイル以下、「Fair」は、中心位置の誤差が 30 マイル超 60 マイル以下、「Poor」は、中心位置の誤差が 60 マイルを超える場合を指しています。

このような情報以外でも、記載されている情報が何を意味するのかを理解しておく必要があります。

## 5-2 波浪図

気象庁が発表している波浪図には以下があります。

|   |               |
|---|---------------|
| 1 | 外洋波浪実況図       |
| 2 | 外洋波浪 24 時間予想図 |
| 3 | 沿岸波浪実況図       |
| 4 | 沿岸波浪 24 時間予想図 |

実況図・予想図ともに、波浪図には1mごとに波浪及びうねりの有義波高を合成した「等波高線」「卓越波向」「高気圧、低気圧の中心位置」や「前線」等が記載されています。(図48)

地上天気図や後述する上層天気図（高層天気図）と同様、記載されている内容を読み取ることが必要です。



図 48 外洋波浪図 (出典：気象庁ウェブサイト)

特に、荒天操船時には実際の波の周期や波高、波長を把握することが重要です。こうした情報も波浪図から読み取って、実際の波と比べることが求められます。

例えば、図 49 に示す白抜きの矢印は、その海域で最も卓越していると思われる波の伝播方向を表しています。矢印が示す方向に波は進み、この例では、北西から南東に向けて卓越した波が進んでいることがわかります。

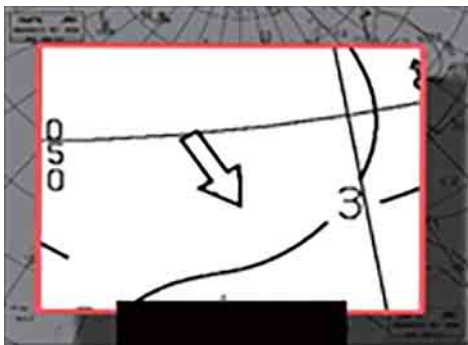


図 49 （出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD）

また、図 50 に示す「白丸付きの白抜き矢印」が予想図に記載されていれば、それは、予想される波の向きを示しており、図に示されている 1 単位の数字は波の周期を秒単位で、0.1 単位の数字は有義波高（ゆうぎはこう 註 3）をメートル単位で、それぞれの予想値を表しています。

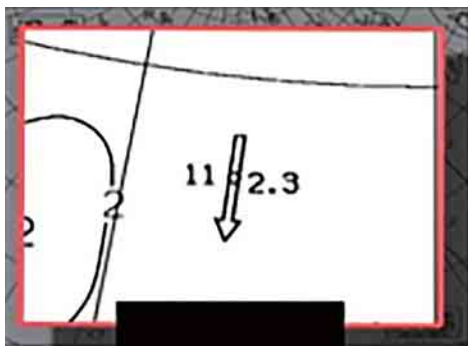


図 50 （出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD）

この例では、北からの波、周期 11 秒、波高 2.3 メートルと予想されています。

### 註3：有義波高

20 分程度の時間内に観測された波を、高いものから順にその 1 / 3 を選んで、それらの波の平均波高と平均周期の波を有義波と呼ぶ。この定義から 1 / 3 最大波と呼ぶこともある。(出典：気象庁ウェブサイト)

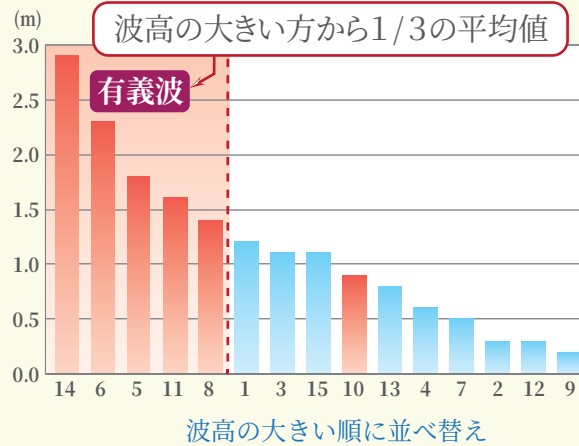
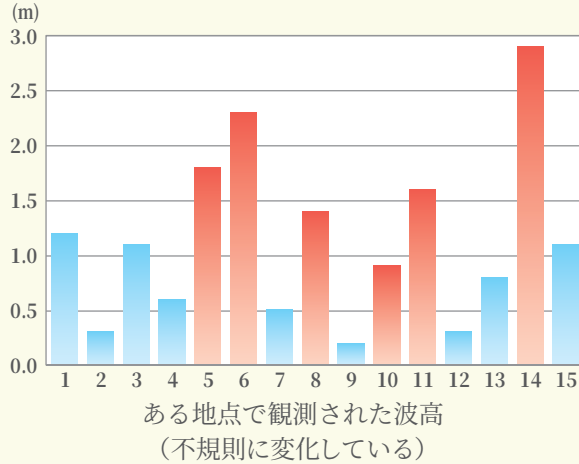


図 51



### 5－3    上層天気図（高層天気図）

上層の大気の状態は、一般の方法としては気球を用いて気圧・風・温度・湿度を観測しています。上層天気図は高層天気図ともいい、気圧が一定な面の上に世界各地で測定した上層の気象要素の値を記入したものです。気圧が一定な面を等圧面といいます。上層天気図に示される曲線は、等圧面の高さであり、地図と同じく等高線線です。表 52 に示す 4 つの上層天気図（高層天気図）が気象庁から発表されています。

|          |       |       |       |       |
|----------|-------|-------|-------|-------|
| 等圧面（hPa） | 850   | 700   | 500   | 300   |
| 高度（m）    | 1,500 | 3,000 | 5,500 | 9,500 |

表 52

気象現象は地上から圏界面までの対流圏における大気の運動現象なので、3次元で見る必要があります。この点、地表の気象状態を表した地上天気図だけでは気象の一面しか見ていないため、不十分です。地形・日射・放射などの影響を大きく受ける地上天気図では、温位解析（気団の解析）や相当温位解析（前線の解析）が行えず、規模の大きい高気圧や低気圧、台風などの発生や移動を的確に把握・予報するのが困難です。

一方、上層では空気の乱れがなく均一で、気圧系の動きを長期にわたって追い、予報することが可能です。そして、上層の大気の状態と下層とは密接な関係があることがわかっています。したがって、上層天気図（高層天気図）と併せて解析することが重要といえます。

船でよく利用している天気図は地上天気図の他、850 hPa（AUAS85）と 500 hPa（AUAS50）の上層天気図（高層天気図）です。

---

#### 5－3－1    500 hPa（AUAS50）上層天気図（高層天気図）

---

図 53 に 500 hPa（AUAS50）の上層天気図（高層天気図）の例を示します。

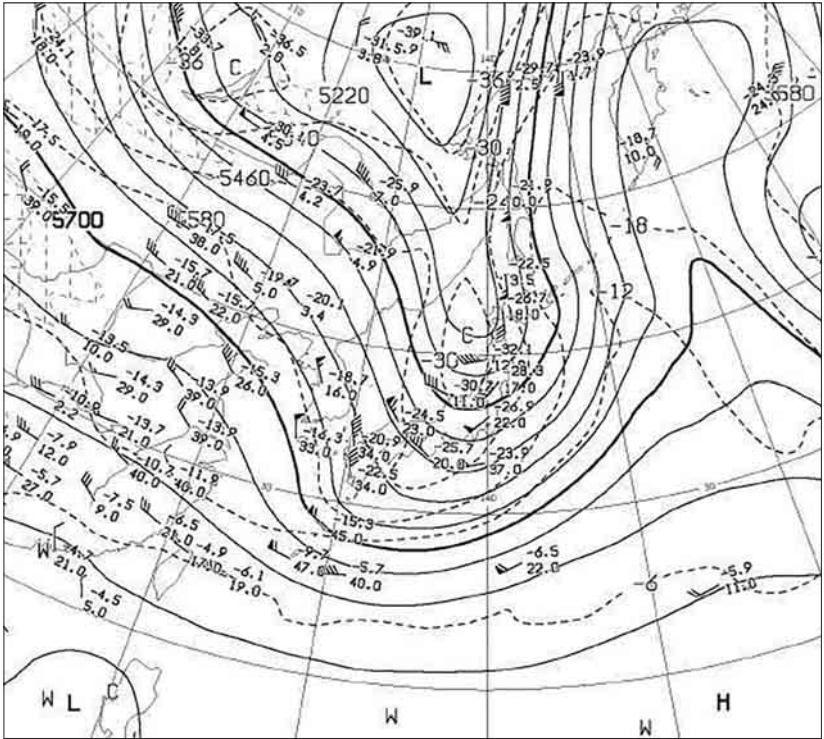


図 53 500 hPa 上層天気図 (出典：気象庁ウェブサイト)

図の中で実線は等高度線を示し、破線は等温線を示しています。等高度線は 60 m ごとに引いてあり、等温線は 6℃ (必要に応じて 3℃) ごとに引いてあります。記号の W は温暖域、C は寒冷域を示しています。地点円の左上には気温が、左下には湿数 (気温から露点温度を引いた数値が ℃などの温度を表す単位で値が示されています。したがって、相対湿度が 100% の場合、湿数は 0℃となる) が、どちらも 0.1℃単位で示されています。

500 hPa 天気図の等高度線分布から、偏西風の波動やジェット気流の位置・強さを推定することができます。また、気温分布からは寒気や暖気の領域がわかり、寒気の程度によって降水の強さや雨雪の判別が確定できます。

上層の偏西風の波動は、地上の高気圧や低気圧と密接に関係しており、500 hPa の上層天気図 (高層天気図) の等高線によって、地上の気圧分布に現れるいろいろな気象現象のうち、基本的な空気の流れを読み取ることができます。このため、500

hPa 上層天気図で気圧の谷や峰の移動を捕捉すると、地上天気図の情報で高気圧や低気圧の移動を捕捉するよりも確実な動きが予測できます。

### 5-3-2 850hPa (AUAS85) 上層天気図 (高層天気図) (図 54)

図 54 に 850hPa (AUAS85) の上層天気図 (高層天気図) の例を示します。

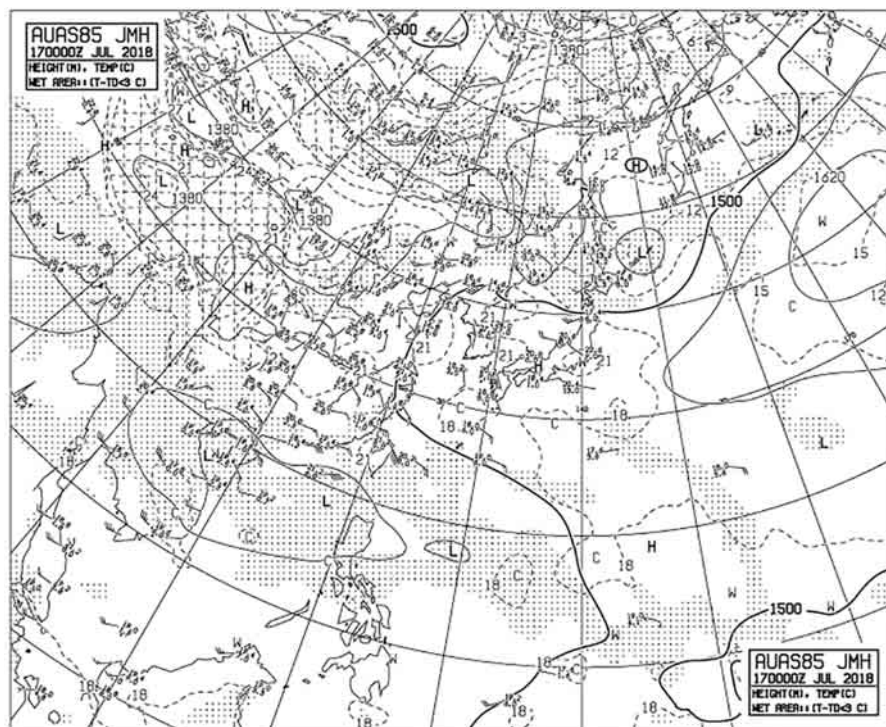


図 54 850 hPa 上層天気図 (出典：気象庁ウェブサイト)

地上天気図は、地表の摩擦の影響があるので、観測された風向と気圧傾度による風向が一致していない場合もあります。

850 hPa の上層天気図 (高層天気図) では、地表摩擦の影響がなくなる高さなので、大気下層の収束や発散は 850 hPa の天気図に現れやすいとされています。また、温度分布の情報から前線や気団を見つけやすくなっています。すなわち、850 hPa 面と前線面が交わる場所は等温線が混み、風向や風速の変化が大きいところです。

また、温度分布と風分布から温度移流が把握できます。

850 hPa と 700 hPa の天気図では、湿数が 3℃以下の領域に影がつけられています。  
この領域は、850 hPa では下層雲の広がりにはほぼ一致しています。

## 第六章 風浪とうねり

荒天操船時には、風による風浪と複数方向のうねりを同時に受け、船は複雑な動揺を繰り返しています。その中で、風浪やうねりの波長・周期・波高を正確に把握することは安全運航のためにも重要です。ここでは、風浪とうねりについて解説します。

### 6-1 波の基本形

単体の波は図 55 に示すようにサインカーブの動きをしており、波長・波の速度と周期の関係は次に示す式のとおりです。

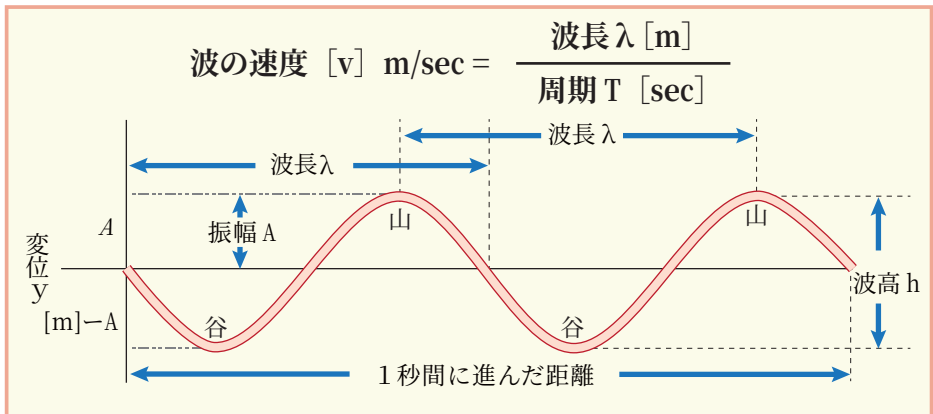


図 55

実際には、1つの風浪またはうねりを受けることはほとんどなく、船は波長・速度・周期・方向の異なる複数の風浪とうねりを受けています。これらの合成波の例を図 56 に示します。

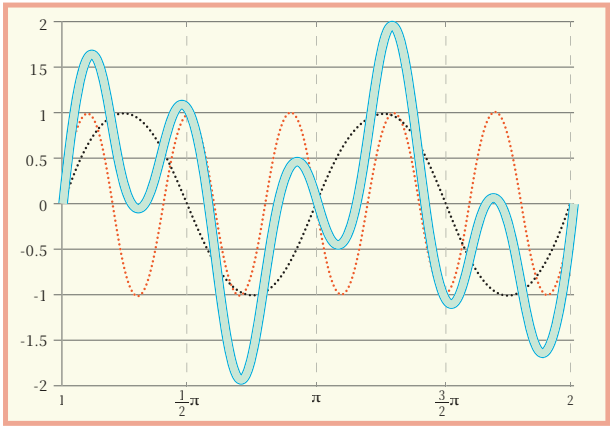


図 56

複数の波が混在するときの波高 [Hc] は、それぞれの波高の 2 乗の平方根により以下の計算式で推定できます。

$$Hc = \sqrt{H_w^2 + H_a^2 + H_b^2 + \dots}$$

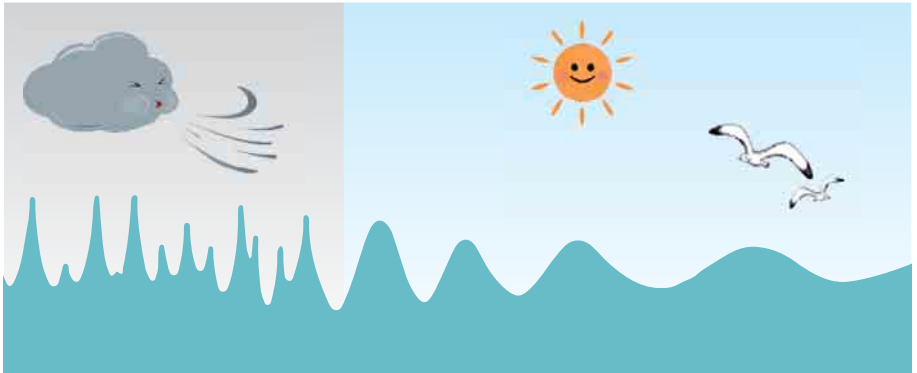
例えば、風浪の波高が 1 m、うねりの波高が 2 m の場合の合成波の波高は 2.236m になります。

$$\sqrt{1^2 + 2^2} = \sqrt{5} = 2.236m$$

## 6-2 「風浪」と「うねり」の違い

図 57 を参照ください。海上で風が吹くと、海面には波が立ち始め、立ち始めた波は風の吹く方向に進んでいきます。波が進む速さ（以下、波速）より風速が大きければ、波は風に押されて発達を続けることになります。こうした海上で吹いている風によって生じる波を「風浪」と呼びます。

そして、風浪が風の吹かない領域まで進んだり、海上の風が弱まったり、風向きが急に変化するなどして、風による発達がなくなった後に残される波を「うねり」と呼びます。うねりは減衰しながら伝わる波で、同じ波高の風浪と比較すると、その形状は規則的で丸みを帯び、波の峰も横に長く連なっています。



## 波浪

(不規則で尖っている)  
[発達過程の波]

## うねり

(規則的で丸みを帯びている)  
[減衰過程の波]

All rights reserved. Copyright © Japan Meteorological Agency

図 57 (出典：気象庁ウェブサイト)

## 第七章

### 荒天操船：

### 「向い波」と「追い波」航法

本章では、荒天操船のうち、「向い波」と「追い波」を受けた場合の船体動揺やその危険性について解説します。

#### 7-1 向い波航法

船が荒天の中を向い波の中で航行すると、大きな衝撃や揺れが発生します。船長や航海士は、そのことを経験的に知っていて、船の速度を落としたり針路を変更したりしてきました。

しかし、このような現象がどのようにして起こるのか、また、これらの現象を避けて安全な航海を行うためにはどうしたらよいのか、正確に理解する必要があります。



十分な経験と併せて荒天のときの向い波に対応した操船技術が求められます。

複数方向からの風浪やうねりを受けると、船は波の力によって上下揺れ、縦揺れ、横揺れが繰り返されています。また、船が波の頂上や波の底にあるときは、ホギング、サギング、ツイストといった、大きなたわみが船体に発生します（図 58）。この他、風と波によって抵抗が増え、船の速力が低下します。特に向い波の中では、そうした現象が顕著に現れます。

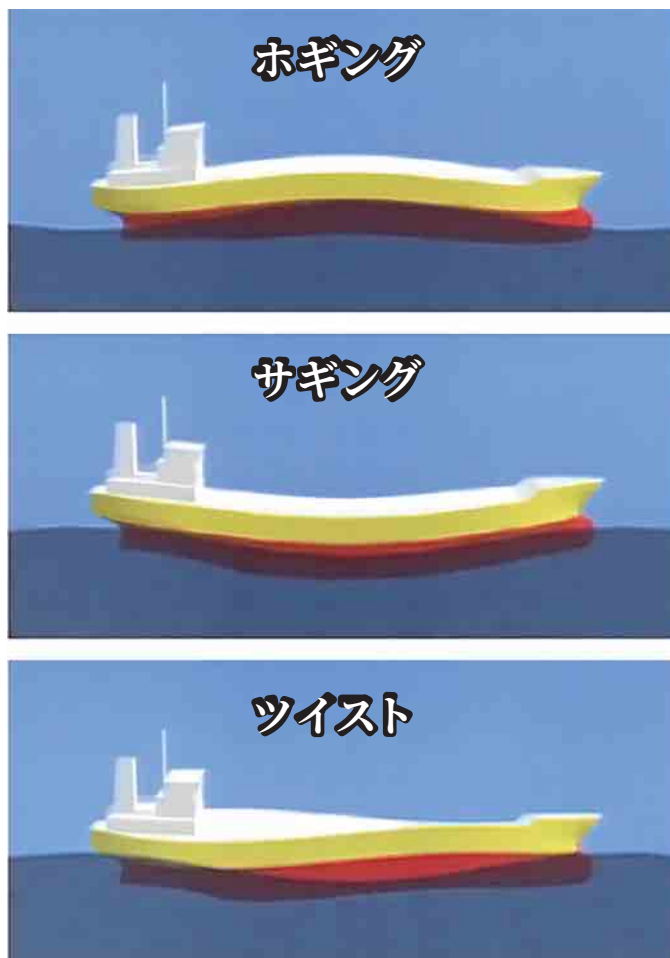


図 58 （出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD）

荒天向い波の中での縦揺れに着目してみると、縦揺れは、船舶の安全性に最も関係の深い運動で、特に注意しなければならないのは、船の長さ（ $L_{pp}$ ）と波長の関係です。くわしくは、次のとおりです。

### ① 波長が船の長さ（ $L_{pp}$ ）より短い場合

波の影響力が小さいので、船の運動も小さく、船首船底部を露出したり、海水が打ち込むほどの大きな運動にはなりません。（図 59）

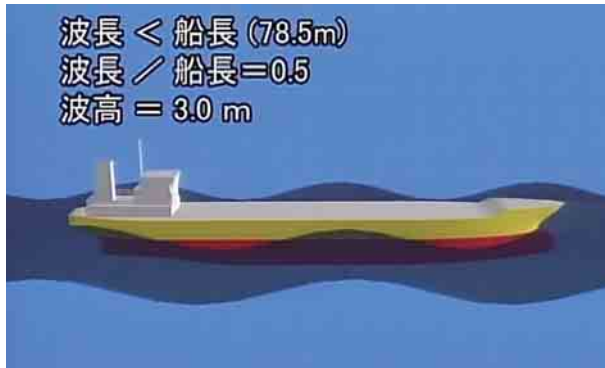


図 59 （出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD）

### ② 波長が船の長さ（ $L_{pp}$ ）より長い場合

船は波の傾斜に沿ってゆっくりとした縦揺れ、上下揺れを起こすのみで、大きな運動にはなりません。（図 60）



図 60 （出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD）

### ③ 波長が船の長さ（ $L_{pp}$ ）とほぼ同じ場合

波の長さが船の長さとはほぼ等しい場合に最も激しい船体運動が発生します。波の頂上で船首を持ち上げられた船は、次の波に向かって激しく船首が突っ込みます。（図 61）

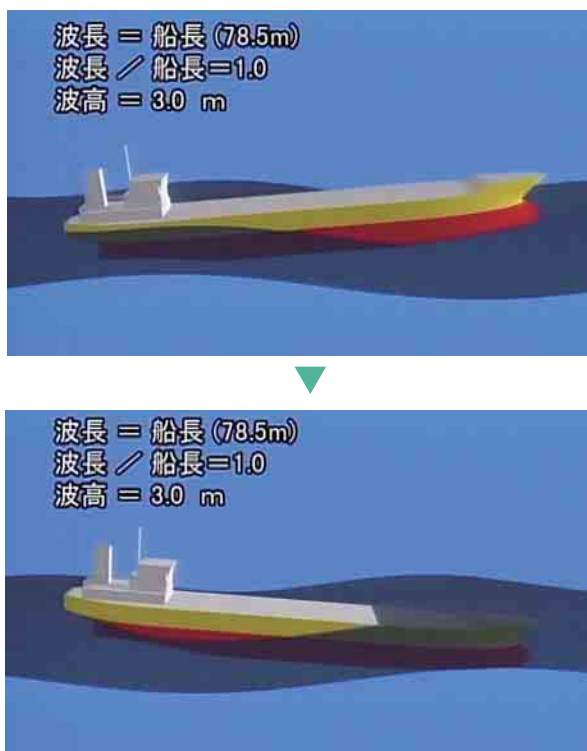


図 61 （出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD）

このような場合、特に規則波の中では船首部、船尾部の喫水の変動が大きくなります（図 62）。波長と船長（ $L_{pp}$ ）が等しいときに船首相対水位の変動は最大となり、相対水位が船の乾舷を越えると海水の打ち込みが発生し（図のオレンジ色部分）、さらに、船首の喫水を越えて船底が露出すればスラミングが発生します（図の赤色部分）。

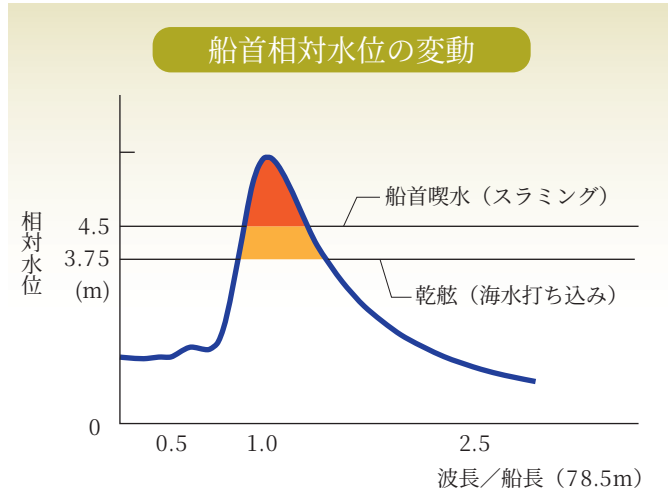


図 62 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

この向い波によって、次のような現象が発生します。

|   |                |
|---|----------------|
| 1 | プロペラのレーシング     |
| 2 | 速力低下と機関のトルクリッチ |
| 3 | 海水の打ち込み        |
| 4 | スラミング現象        |

### 7-1-1 プロペラのレーシング

船が船首部で激しい縦揺れ、上下揺れを行っているときは、船尾部でも激しい上下運動が繰り返されています。そのために、プロペラの一部が周期的に海面から露出し、そこに働く荷重が突然減少するので、プロペラは振動を伴い激しく回転します。こうした現象をプロペラのレーシングといい、プロペラ自体や、プロペラ軸、あるいはエンジンに悪い影響を与えます。(写真 63、64)



写真 63 （出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD）



写真 64 （出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD）

荒天時は、できるだけ船尾喫水を深くし、プロペラの水面下没入率をその直径の20%以上にすることが推奨されています。ただし、バラスト航海時にはトリムを付け過ぎると船首喫水が浅くなり、後述するスラミング現象の可能性も大きくなるので、船体コンディションには十分注意が必要です。（図 65）

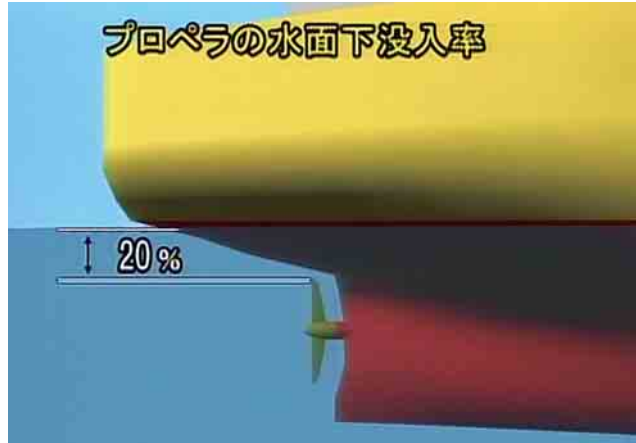


図 65 （出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD）

## 7-1-2 速力低下と機関のトルクリッチ

風浪やうねりを正面から受けると、風圧抵抗に加えて風浪とうねりの抵抗も加わるので船速が低下するとともに、機関のトルクリッチという現象が生じます。

図 66 は、不規則波中の速度低下の特性を示したものです。例えば長さ 250m のコンテナ船では、波高 6 m 以上となると減速量が著しく増大し、速力は 3 割程度減少します。

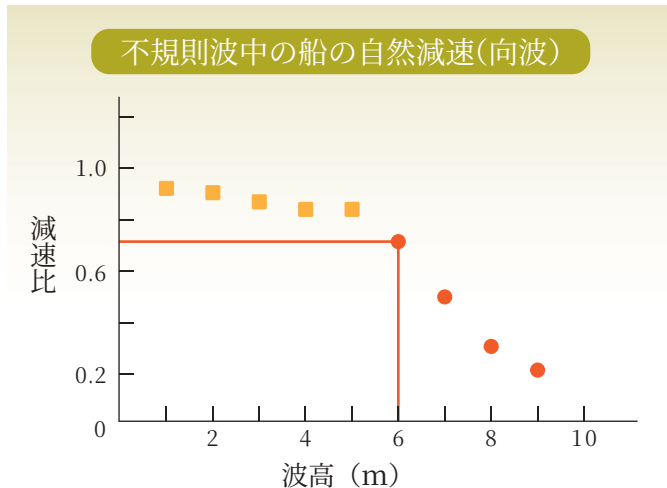


図 66 （出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD）



このように船体の抵抗が増加すると、エンジンは静穏時に設定した回転数を維持しようとして燃料を多くつぎ込もうとします。このエンジンに異常な力が加わったまままで運転することになる状態がトルクリッチという現象です。この場合、エンジンが過熱によって損傷したり、無駄な燃料を大量に消費することにもなるので、船の速度を落とす必要があります。(写真 67)



写真 67 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

トルクリッチをマニュアル車にたとえて説明すると、以下のような状態を経験された方も多数いると思います。平地を走行している車が急な登り坂にさしかかると、スピードが低下します。この場合アクセルをいっぱい踏み込んでスピードを一定にしようとしませんが、エンジンが出す力には限界がありスピードがあがりません。この状態を続けるとエンジンが過熱を起こすことになります。これがトルクリッチの状態です。



図 68 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

これと同様に、船舶でトルクリッチの現象が発生した場合は、機関の負荷状況を船長と機関長で綿密に打ち合わせ、適正な回転数まで下げなければなりません。

### 7-1-3 海水の打ち込み

海水の打ち込み現象とは、船が大きく縦揺れすることにより、青波が船首を越えて甲板に激突する状態になることです。こうした海水の打ち込みによって、船体は大きな損傷を受けることがあります。時には、甲板機器や甲板上の積荷が損傷したり、ハッチカバーが破損して船艙に浸水することもあります。この衝撃は、海水の打ち込みによって発生する波浪衝撃と、その後に続く海水が甲板上を走って甲板機器に激突する場合の2つの衝撃があります。



写真 69 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)



写真 70 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)



写真 71 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)



写真 72 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

甲板を上下方向に叩く波浪衝撃は、落下加速度も加わるので甲板上の海水の高さの2倍程度の圧力がかかることになります。例えば、100 トンの海水が甲板上4 mの高さから落ちると仮定すれば、この圧力は、広さ40㎡の甲板上に、1頭あたり5トンの大人の象20頭が4 mの高さから連続して3秒で甲板に飛び乗った時の衝撃に匹敵します。こうして考えると、いかに波浪衝撃が大きいものかわかります。

また、打ち上げられた海水が甲板上を走る際の水の塊による衝撃は船速の二乗に比例し、甲板上を上下に叩く波浪衝撃とほぼ同じ程度の圧力になります。サウンディングパイプなどの甲板機器に損傷を与える可能性があります。

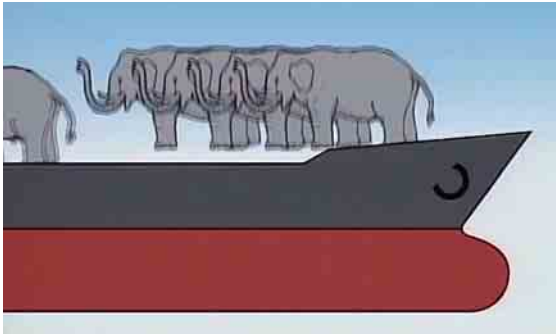


図 73 （出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD）

模型船を使った海水打ち込みの実験結果をまとめると次のような結果となりました。条件は以下を想定しています。

| 総トン数       | 船長             | 船幅     | 型深さ  | 喫水                 | 風力 | 波高  | 周期     | 速度   |
|------------|----------------|--------|------|--------------------|----|-----|--------|------|
| 699<br>G/T | 78.5m<br>(Lpp) | 12.8 m | 7.8m | 4.52m<br>Even Keel | 6  | 3 m | 7.13 秒 | 9ノット |

① 波長および波との出会い角度を変えた場合

波長と、船長（Lpp）の比を 0.5（波長 39m）、2.5（波長 196 m）、1.0（波長 79m）と変え、それぞれの場合における波との出会い角度を 0 度～ 90 度の間で 15 度ずつにして実験した結果を図 74 の 3 次元グラフに示します。

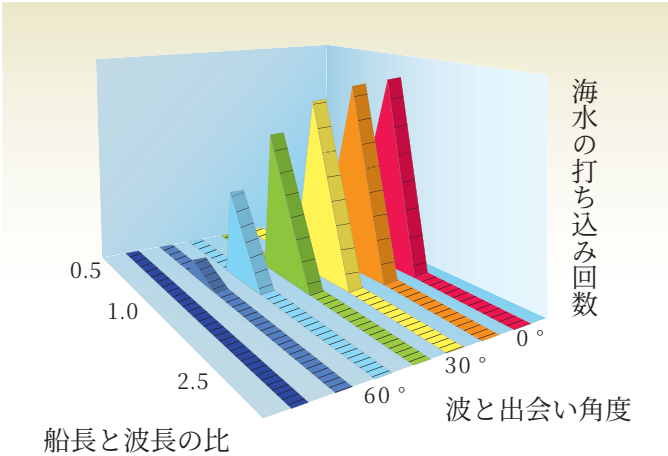


図 74 （出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD）

波長と船長（ $L_{pp}$ ）の長さの比が 0.5（波長 39m）のときは、波の影響が小さいので、船の動揺も小さく、海水の打ち込みはありませんでした。

また、波長を船長（ $L_{pp}$ ）の比を 2.5（波長 196 m）に変えてみると、船は波の斜面に沿ってゆっくりとした縦揺れや上下揺れを起こすだけで、この場合も海水の打ち込みはありませんでした。

波長と船長（ $L_{pp}$ ）の比が 1.0（波長 79m）の場合、船は激しく縦揺れを起こし、常時海水の打ち込み現象が発生しました。

一方、波との出会い角度を 0～90 度に変えてみると、波長と船長（ $L_{pp}$ ）の比が 1.0 の場合、出会い角が 0～45 度では海水の打ち込み頻度は殆ど変わりありませんでした。

出会い角度を 45 度以上にすると、海水の打ち込み頻度は減少していき、60 度を超えると急激に海水の打ち込み頻度が少なくなりました。一方、出会い角が 60 度になると横揺れが大きくなりました。（写真 75、76）

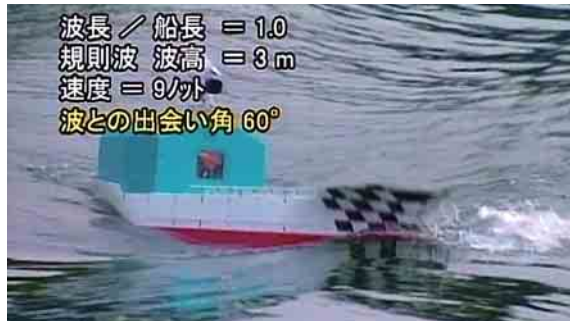


写真 75 （出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD）



写真 76 （出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD）

② 速力を落とした場合

次に、波長と船長（Lpp）の比を 1.0（波長 79m）とし、船の速度 11 ノットから 3 ノットまで変え、また出会い角度を 0 ～ 90 度に変えて実験した模型船の「甲板冠水発生確率」の結果を図 77 に示します。

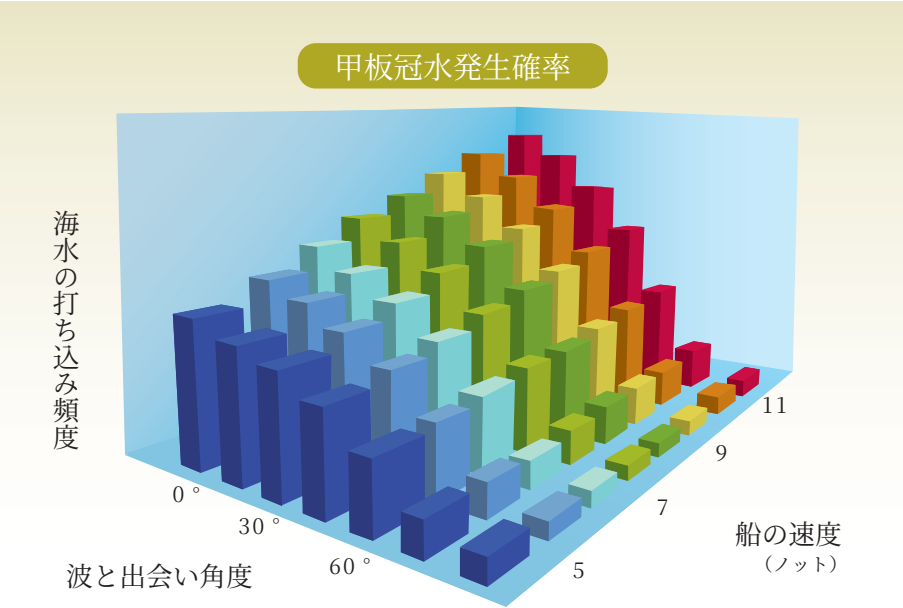


図 77 （出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD）

正面から波を受けた場合の海水打ち込み回数（甲板冠水確率）は船速が 11 ノットから 6 ノットになると、その頻度は大きく減少し、3 ノットでは海水の打ち込みはありませんでした。また、同じ速力では波との出会い角度を 60 度以上まで変針すると、海水打ち込み回数は大きく減少しました。

実験の結果をまとめてみると、海水の打ち込み現象は、船の速度に比例して頻度が増しており、波との出会い角度を 60 度以上にしないと効果があまりないことがわかります。

図 78 は円周方向に船の速度と波との出会い角度を、1 時間に 10 回の海水打ち込み頻度に対応する波高条件（風力階級）を青い線で示しています。実験の条件とした風力階級と波高の関係は表 79 のとおりです。

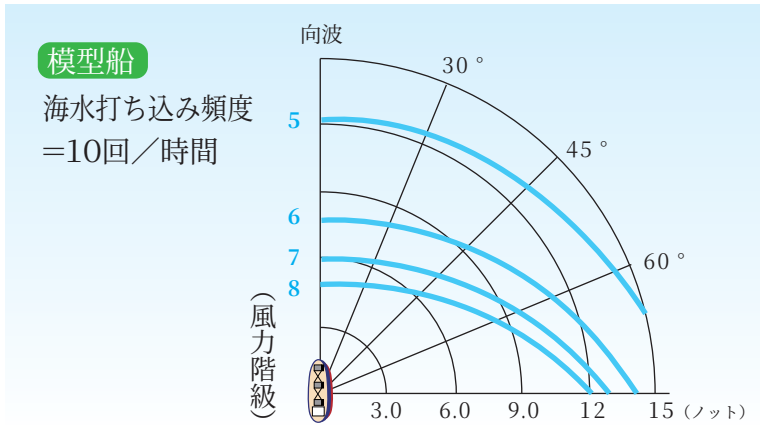


図 78 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

| 風力階級   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11   |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| 波高 (m) | 2.0 | 3.0 | 4.5 | 6.5 | 7.5 | 9.0 | 11.5 |

表 79 (一社) 日本船長協会 DVD

この実験を行った模型船の場合、海水の打ち込み許容頻度を1時間に10回と仮定すれば、風力階級5、真正面の波であれば、12ノットで航行する事になります。(図80) また、波との出会い角を45度に変針すれば、13ノットで航行することも可能です。(図81)

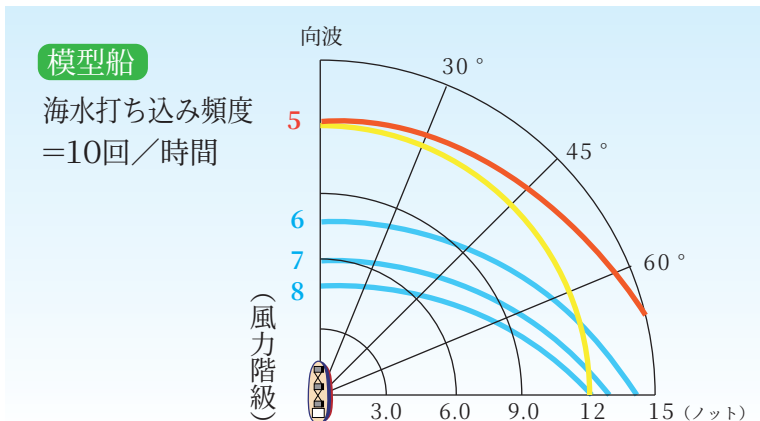


図 80 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

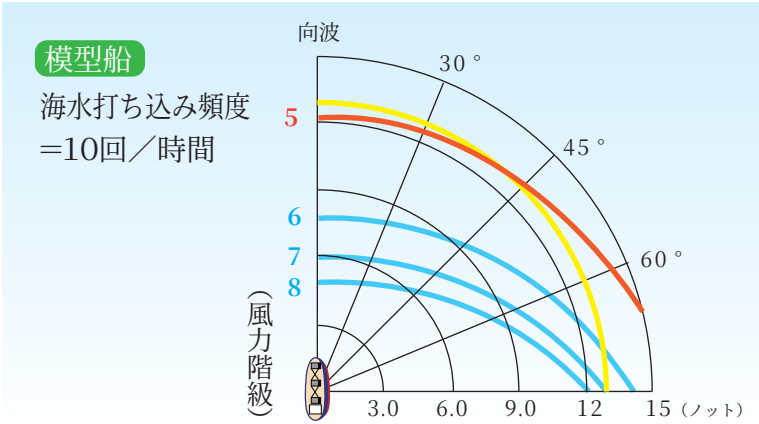


図 81 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

海水の打ち込み許容頻度を 1 時間に 5 回と仮定すれば、真正面の波では、11 ノットで航行することになります (図 82)。すなわち、風力階級が 5.2 程度まで強くなったとしても、速度を 12 ノットから 11 ノットに減速すれば、海水の打ち込み回数は、10 回から 5 回に減少することがわかります。

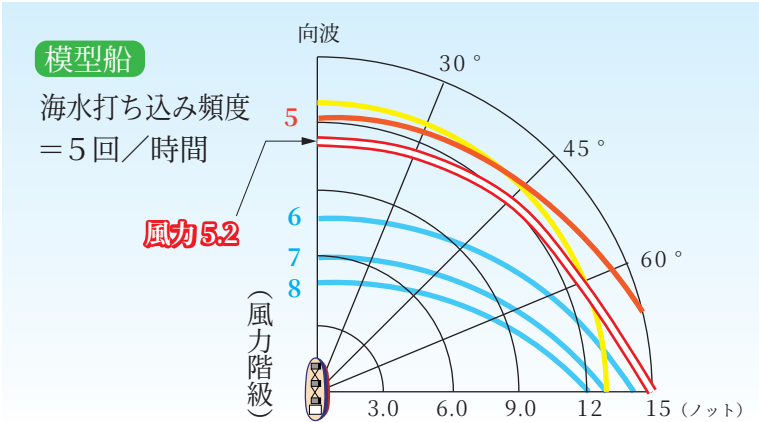


図 82 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

同様に、総トン数 4 万トンの満載のコンテナ船では、風力階級 10 の海象条件で、真正面の波の場合に速力を 19 ノットから 17 ノットに減速すれば、海水の打ち込み回数を、10 回から 5 回に半減できました。総トン数 11 万トンの満載の鉱石船では、風力階級 5 の海象条件で、真正面の波の場合、13 ノットから 12 ノットに減速すると、海水の打ち込み回数を、10 回から 5 回に半減しました。



これらの結果をまとめてみると、表 83 のように速力を僅かに 1～2 ノット程度減速すれば、海水の打ち込み回数を半減させることがわかります。

#### 減速による海水の打ち込み頻度の軽減

|           | 内航船    | コンテナ船  | バルカー   |
|-----------|--------|--------|--------|
| GT        | 699 トン | 4 万トン  | 11 万トン |
| Lpp       | 78.5m  | 250m   | 280m   |
| 海水打ち込み頻度  | 風力 5   | 風力 10  | 風力 5   |
| 10 回 / 時間 | 12 ノット | 19 ノット | 13 ノット |
| 5 回 / 時間  | 11 ノット | 17 ノット | 12 ノット |
| 速力差       | 1 ノット  | 2 ノット  | 1 ノット  |

表 83 （出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD）

## 7-1-4 スラミング現象

荒天向波の中を高速で航行すると、スラミングという現象が発生します。スラミングは、以下の 3 種類に分類することができます。

### ① 船底スラミング

露出した船体が海面に突入する際に船底を激しく叩く現象。（図 84）



図 84 （出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD）

## ② 船首フレアスラミング

海面と船首フレア部との大きな相対速度によって生じる現象です。比較的瘦せ形のコンテナ船、PCC、漁船などの船首フレアの大きい船で発生することが多い現象。(図 85)



図 85 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

## ③ 船首砕波衝撃

船が静かな海面を航走する際、海水を押し分けて前進します。その際、船首では海水が持ち上がります。(船首波)

船首波と向波が重なって発生する砕波による衝撃で、タンカーやバルカーのような肥大船の満載時に発生することが多い現象。(図 86)



図 86 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

これらのスラミングは、船首部、船底部、フレアー部に損傷を発生させたり、場合によっては衝撃によって積み荷に大きな被害を及ぼしたり、さらには、船体の折損による沈没を引き起こしたりします。(写真 87、88)



写真 87 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)



写真 88 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

特に、大型化したコンテナ船では、スプリンキングという、「比較的穏やかな海象でも発生する周期的な波浪外力と船体構造との共振による定常的な船体振動」とホッピングという、「荒天下におけるスラミング衝撃荷重のような衝撃的波浪外力により誘発される瞬間的な船体振動」も同時に発生します。

船の大型化が進む中で、このような振動に対する新しい荒天操船指針が求められると考えます。

海水の打ち込み現象と同様に模型船を使った船底スラミング現象の実験結果は次のとおりです。

条件は以下です。波長と船長（Lpp）の比は 1.0 です。

| 総トン数       | 船長             | 船幅     | 型深さ  | 喫水                 | 風力 | 波高  | 周期     | 波長  | 速度        |
|------------|----------------|--------|------|--------------------|----|-----|--------|-----|-----------|
| 699<br>G/T | 78.5m<br>(Lpp) | 12.8 m | 7.8m | 4.52m<br>Even Keel | 6  | 3 m | 7.13 秒 | 79m | 11<br>ノット |

船底スラミグが起こると、船首付近の船底部が海面から大きな衝撃力を受けることになります。この時に加わる最大の力は、船首部を上曲げる力です。(図 89)



図 89 （出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD）

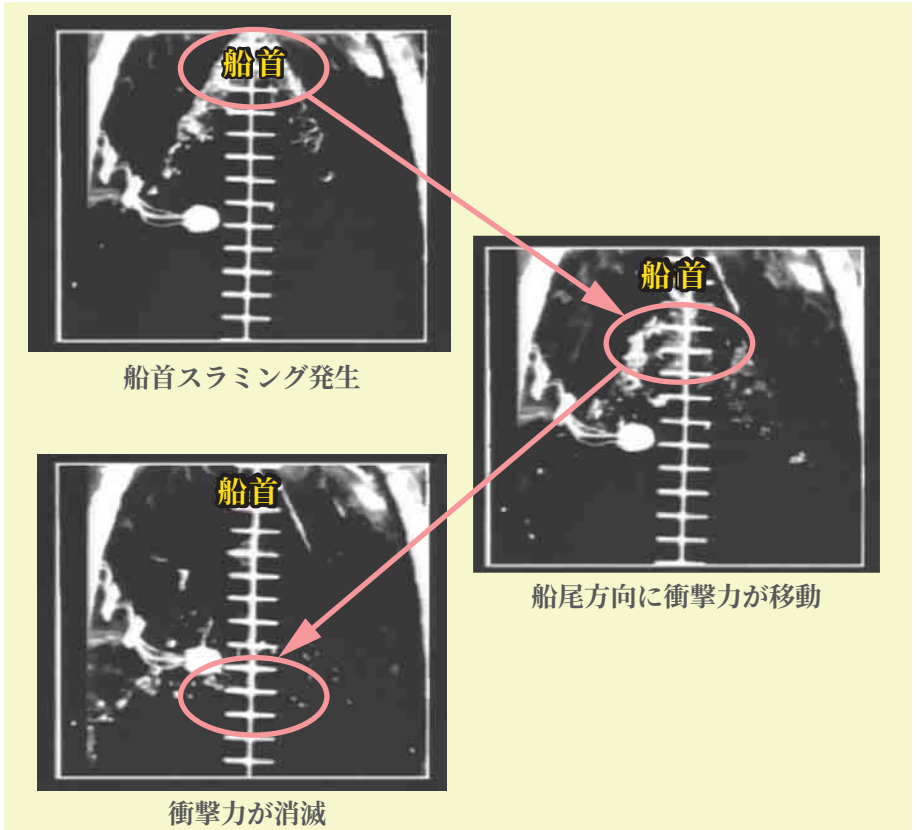


図 90 （出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD）

図 90 は、透明な模型船で船底 スラミング発生の様子を撮影したものです。衝撃による水圧が船首から船尾に走る様子がわかります。

船底スラミング現象発生頻度の実験結果を 3 次元グラフにまとめたものを図 91 に示します。

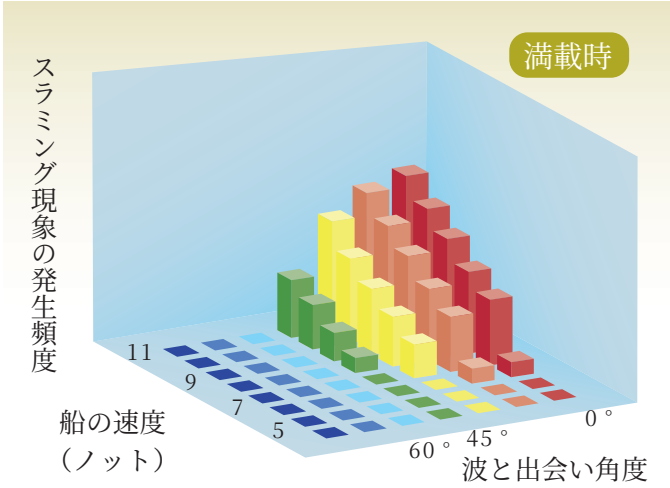


図 91 （出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD）

真正面の波を受けると船底スラミングが多く発生しましたが、6 ノットまで速力を落とすと船底スラミングの回数はかなり減ってきました。

一方、速力は 11 ノットのままで、出会い角度を変えた場合（変針した場合）でも、変針角度が 45 度以下では船底スラミングの回数はさほど減りませんでした。出会い角度を 60 度にするると、回数はかなり減少しましたが横揺れが大きくなりました。これを海水打ち込み現象と同様にコンテナ船、バルカーの模型船で実験を行い、その結果をまとめたものを表 92 に示します。減速することで発生回数を大幅に減少させることができます。

減速によるスラミング頻度の軽減

|          | 内航船    | コンテナ船  | バルカー   |
|----------|--------|--------|--------|
| GT       | 699 トン | 4 万トン  | 11 万トン |
| Lpp      | 78.5m  | 250m   | 280m   |
| スラミング頻度  | 風力 6   | 風力 10  | 風力 11  |
| 5 回 / 時間 | 5 ノット  | 17 ノット | 8 ノット  |
| 2 回 / 時間 | 4 ノット  | 13 ノット | 5 ノット  |
| 速力差      | 1 ノット  | 4 ノット  | 3 ノット  |

表 92 （出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD）

## 7-1-5 荒天 向い波対策

荒天向い波対策としては減速することがもっとも有効です。すなわち、模型船の実験結果などからもわかるように、変針する場合は波との出会い角度を 60 度以上にしないと、大きな効果はありません。

変針することでも向い波の 4 つの現象を軽減することができますが、この場合、横揺れが大きくなるといった問題も生じます。特に同調横揺れには注意が必要です。

減速して原針路どおり目的地に向かう場合 ( $a \Rightarrow b$  直行) と、減速前の速力を維持し、迂回 (Deviation) して目的地に向かう場合 ( $a \Rightarrow c \Rightarrow b$ ) を図 93 に示します。それぞれの関係は以下ようになります。

初速 (ノット) : S  
減速量 (ノット) : R  
変針角度(deg.) :  $\alpha$

b 点到着時刻を、直行・迂回の場合とも同じとした場合、それぞれの関係は以下ようになります。

減速して直航した場合の所要時間 ( $a \Rightarrow b$ )

$$\frac{2 \times x}{(S-R)} \text{ 時間}$$

変針して初速を保ちながら迂回した場合の所要時間

$$\frac{2 \times y}{S} \text{ 時間} \quad (a \Rightarrow c \Rightarrow b)$$

所要時間を同じにした場合の変針角 ( $\alpha$ ) は以下のようになります。

所要時間が同じとした場合の変針角と速力の関係

$$\frac{2 \times x}{(S-R)} = \frac{2 \times y}{S}$$

$$\cos \alpha^\circ = \frac{x}{y} = \frac{(S-R)}{S} = 1 - \frac{R}{S}$$

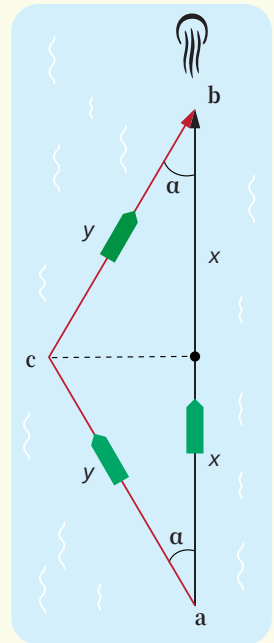


図 93



減速直航と迂回した場合の所要時間を同一とした場合の変針角度を初速 20 ノットと 15 ノットの船で表 94 に示します。

減速によるスラミング頻度の軽減

| 減速量<br>(ノット) | 初速 20 ノット      |            | 初速 15 ノット      |            |
|--------------|----------------|------------|----------------|------------|
|              | 減速後速力<br>(ノット) | 変針角<br>(度) | 減速後速力<br>(ノット) | 変針角<br>(度) |
| 2 Kts        | 18 Kts         | 26 度       | 13 Kts         | 30 度       |
| 3 Kts        | 17 Kts         | 32 度       | 12 Kts         | 37 度       |
| 4 Kts        | 16 Kts         | 37 度       | 11 Kts         | 42 度       |
| 5 Kts        | 15 Kts         | 41 度       | 10 Kts         | 48 度       |
| 6 Kts        | 14 Kts         | 45 度       | 9 Kts          | 53 度       |
| 7 Kts        | 13 Kts         | 49 度       | 8 Kts          | 57 度       |
| 8 Kts        | 12 Kts         | 53 度       | 7 Kts          | 62 度       |
| 9 Kts        | 11 Kts         | 56 度       | 6 Kts          | 66 度       |
| 10 Kts       | 10 Kts         | 60 度       | 5 Kts          | 70 度       |

表 94

表 83 (P.57) と 92 (P.62) からわかるように、向い波による海水の打ち込み頻度と船底スラミング現象は速力を 2～3 ノット減少すれば、その回数は半減します。

一方、仮に 3 ノットの減速を行わずに迂回して、目的地までの所要時間を減速した場合と同時刻にする場合の変針角（度）を求めると、20 ノットの場合で 32 度、15 ノットの場合では 37 度以下の変針を行うことになります。すなわち、海水打ち込みと船底スラミングなどを受けないように、変針角度を 60 度以上にした場合は、仮に初速を維持できたとしても、迂回することにより、却って到着時間は遅くなることがわかります。

逆に、こうした影響を受けないように 60 度の変針を行った場合、20 ノットの船で

は10ノットまで減速、15ノットの船では7ノットまで減速した場合（おおよそ半減）、到着時刻が同じになります。

迂回した場合と比べて、機関出力を調整して減速すれば、燃料消費の削減もできます。また、前述したように、実際には複数方向からの風浪とうねりを受けるので、仮に変針したとしても初速を維持できることはまずありません。

以上から、荒天向い波対策は、荒天が収束するまでは、主機関にトルクリッチを発生させない程度まで大胆に減速し、目的地到着予定時刻（ETA）を守らなければならない場合は、荒天が収まった後に増速して遅れを取り戻すといった対策を取ることが、結果として無理をしないことに繋がります。

## 7-2 追い波航法

一般的には、風や波に向かって進む向い波航法が追い波航法に比べて苦勞が多いと思われるかも知れません。しかし、船長や航海士といった本船運航者は、荒天向い波操船は前項で紹介した船体への影響に注意しながら風や波に対して船を立てるといった操船を行うことで本船のコントロールが可能となり、追い波荒天操船と比べると容易と考えます。とはいえ、追い波を受ける場合では、本船が操縦不能となるといった事態もあるので、より慎重な荒天操船が求められます。

追い波で航行するときに特に注意しなければならないのは、次の4つの現象です。

|   |                                                       |
|---|-------------------------------------------------------|
| 1 | 高い波と一緒に航行することで、高い波を連続して受けることになる<br>「 <b>出会い群波現象</b> 」 |
| 2 | 動揺が次第に大きくなっていく<br>「 <b>パラメトリック横揺れ</b> 」               |
| 3 | 波の山が船体中央部に来たときに復原力が減少する<br>「 <b>復原力の減少</b> 」          |
| 4 | 船が波乗り状態となり、操船が不能になる<br>「 <b>ブローチング現象</b> 」            |

## 7-2-1 出会い群波現象

大洋の波はいろいろな波長、波高、波向きからなる不規則な波の集まりです。特に、船が高い波の群れと同じ速度で航行したり、船の速度より早い波の速度を後ろから受けて航行すると、連続した大波を常に受けることになって姿勢制御が困難となります。

また、時には向い波と同じように船尾から海水の打ち込みを受けて（プープダウン）、船体や舵に損傷を与えるといった現象も発生させます。これが危険な出会い群波現象です。多くの実験によれば、危険な出会い群波現象がもっとも起こりやすい条件は、後方から来る波と船がなす角度（波との出会い角）、船の速度、波の周期の組み合わせです。図 95 で示すように、以下のような条件の場合に危険な出会い群波現象が発生します。

### 危険な出会い群波現象の発生する条件

$$\frac{V \text{ (船の速度：ノット)}}{T \text{ (波の平均周期：秒)}} = 1.5$$

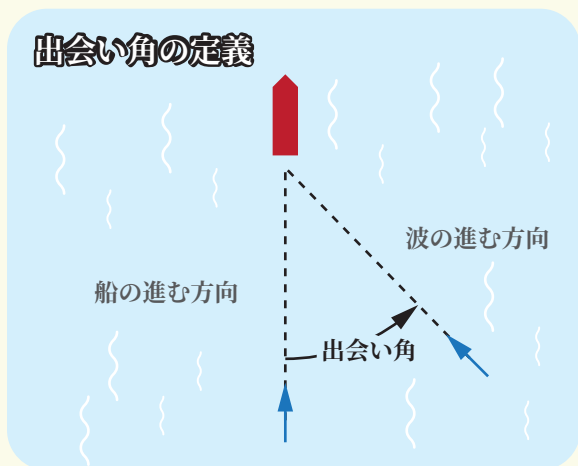


図 95 （出典：一般社団法人 日本船主協会 DVDより加工して作成）

国際海事機関 IMO の操船指針 (MSC.1/Circ.1228 : 11 January 2007) の 4.2.2 For successive high-wave attack では、真後ろから追い波を受けた場合、1.3 ～ 2.0 の範囲で図 96 に示すような危険範囲を定めています。

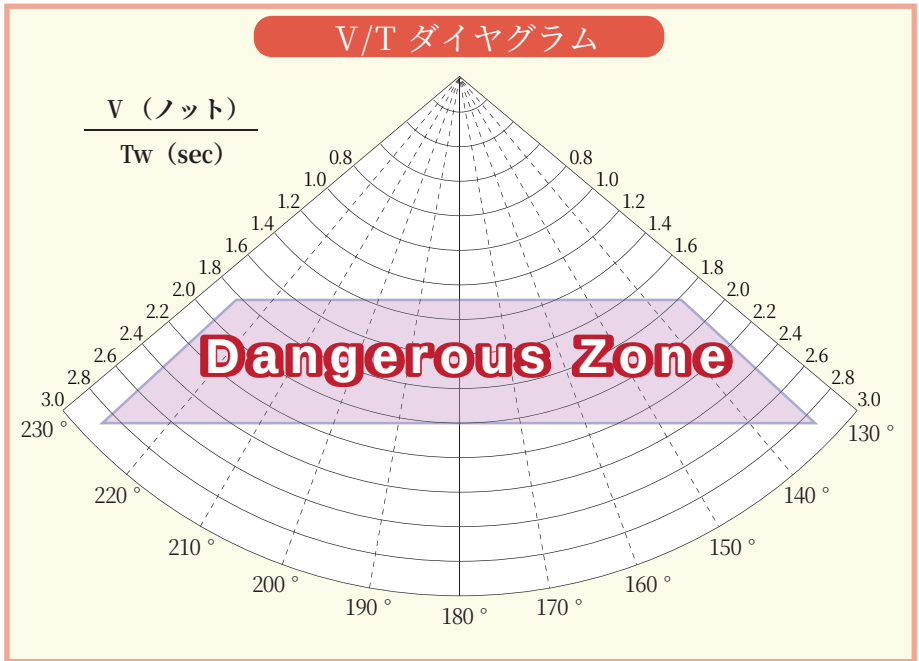


図 96 IMO MSC.1/Circ.1228

また、この操船指針 4.2.2.1 では「波長の長い大きな波を受けているかの判定」について次のように定めています。

- ① 波長が船の長さ ( $L_{pp}$ : 垂線間長) の 0.8 倍より大きい (MSC./Circ.1228)
- ② 波高 (有義波高) が船の長さ ( $L_{pp}$ : 垂線間長) の 0.04 倍より大きい

＝波長の長い大きな波を受けているかどうかの判定＝

例えば、本船 Lpp : 120 m、波長 126 m、有義波高が 5 m の場合、次のようになるので、波長の長い大きな波を受けていると判定できます。(計算式 97)

① ⇒ 120 m × 0.8 = 96 m ≤ 126 m

② ⇒ 120 m × 0.04 = 4.8 m ≤ 5 m

計算式 97

ここで判定する際に確認する波長と波高は実際の値を使用します。しかし、船が航行中は前進速力があるので、船体の動揺による体感周期と実際の波の周期と波長は異なります。体感周期から実際の波の周期を求めるためのグラフ(図 98)を MSC.1/Circ.1228 および国土交通省海事局「フェリー・RORO 船の安全対策について」の中で紹介しています。

船上で体感している波周期から実際の波周期、波長を求める方法

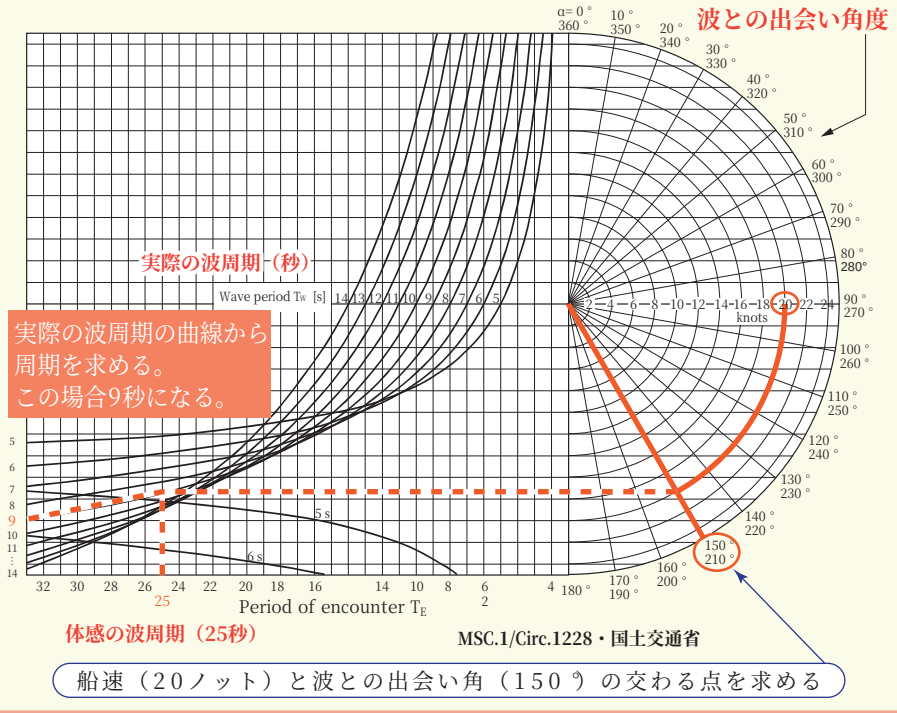


図 98 IMO MSC.1/Circ.1228 および国土交通省海事局「フェリー・RORO 船の安全対策について」  
(平成 23 年 4 月 28 日)

例えば、船速 20 ノット、体感周期 25 秒で、波を斜め後ろ 30 °方向から受けている場合は以下手順で実際の波の周期を求めます。(図 98 の赤線部分)

1 図 98 の半円グラフの中で、後方 30 度(150 度方向)と船速 20 ノットの交点を求める。



2 同じ高さで左のグラフに交点を伸ばし、体感周期(この場合 25 秒)の交点を求める。



3 「実際の波周期」の曲線のもっとも近い線の周期を見る。(この場合は 9 秒が得られる)

また、実際の波の周期から次の「計算式 99」で、おおよその波長が求められます。

$$\text{波長 (m)} = 1.56 \times \text{波の周期の二乗}$$

計算式 99

上記の例では、 $1.56 \times 9 \times 9 =$  波長 126m となります。また波高は目測で観測します。

次に、図 95 を用いて危険領域に入っているかどうかを判定します。すなわち、体感している波周期から実際の波周期と計算で求めた波長がわかったならば、実際の波周期と船速から、自船が「危険な状態」に入っているかどうかを確認することができます。(図 100)

この例では、20 ノットで航行すると、波周期と船速比が 2.22 となり、危険領域に入っていると判定できます。出会い角度はそのままとし、速力を 10 ノットまで減速すると、比は 1.11 になるので、危険領域から回避できることがわかります。(図 100)

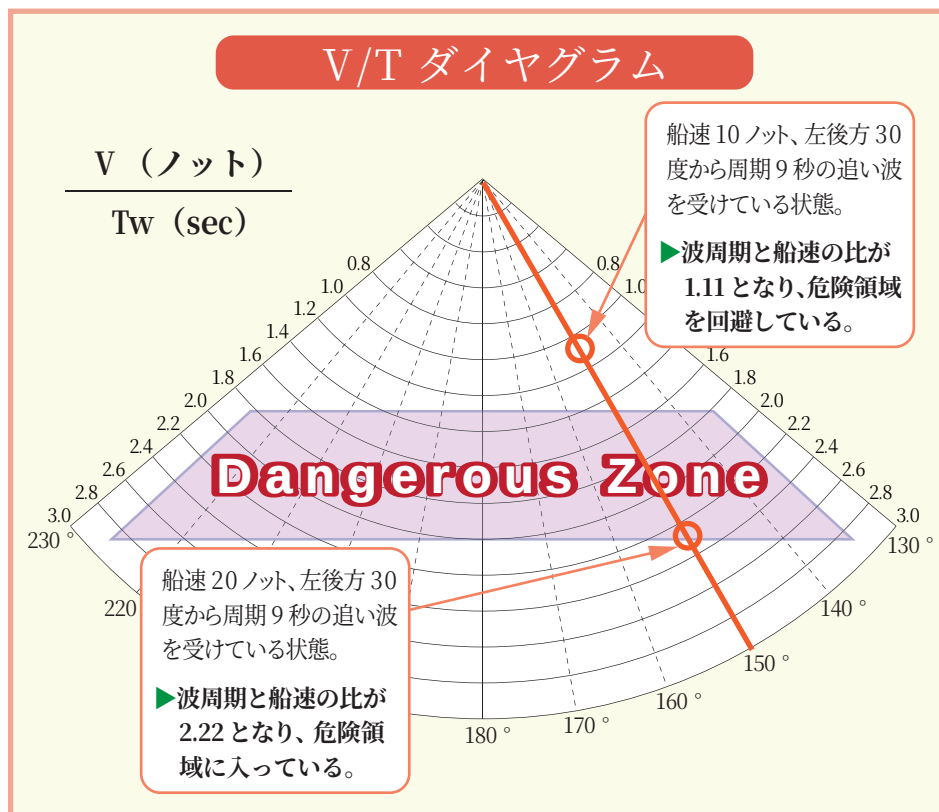


図 100 IMO MSC.1/Circ.1228 および国土交通省海事局「フェリー・RORO 船の安全対策について」  
(平成 23 年 4 月 28 日)

実際には、出会い群波現象で危険領域にいる場合、変針と減速の組み合わせで危険領域外に出る操船が求められます。

## 7-2-2 パラメトリック横揺れ

船を規則的な縦波の上を航行させると、波の速度が船速より速い場合、縦揺れだけでなく、例えば、波の山で右に揺れ、続く波の谷では左に揺れる「横揺れ」を繰り返します。(図 101)



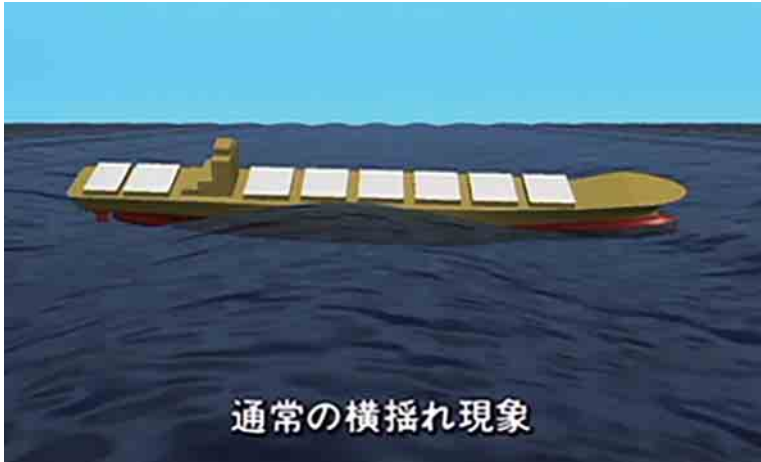


図 101 （出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD）

パラメトリック横揺れが起これと、波の山で右に揺れ、次の山で左に揺れるというように2つの波で1回揺れるという揺れ方を繰り返し、だんだん横揺れが大きくなっていきます。

パラメトリック横揺れ現象の影響により、船の縦揺れはそれぞれの波ごとに1回だけ起こるのに対して、船の横揺れは2つの波ごとに1回揺れています。このような揺れ方は、波との出会い周期が船の横揺れ固有周期の2分の1のときに大きくなっています。（図 102）

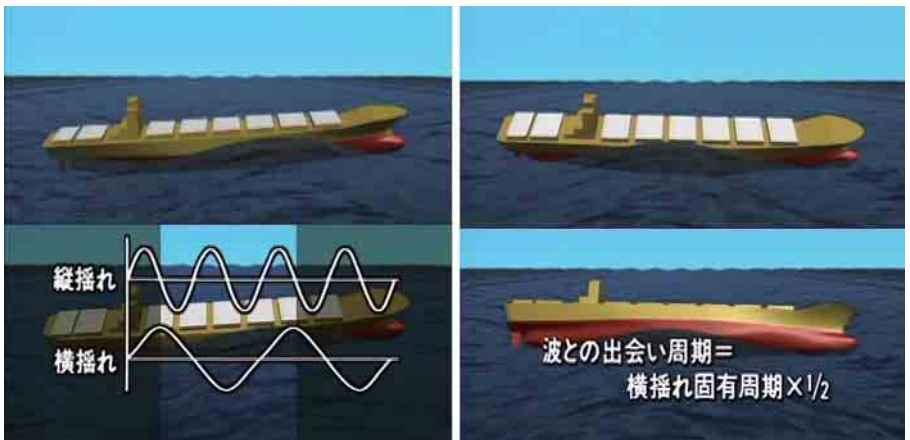


図 102 （出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD）

パラメトリック現象は荒天時だけでなく、静穏な海象のなかでも、長大なうねりを後方から受けて前記の条件になると発生します。

特に、大洋航海中は風が弱いときでも気をゆるめることなく、うねりに十分注意して航行することが求められます。また、GMの小さい船で発生しやすいことにも注意が必要です。パラメトリック横揺れの対策は次のとおりです。

### パラメトリック横揺れの対策

- 波との出会い周期が船の横揺れ固有周期の二分の一の条件にならないようにする。
- 縦揺れ2回の間に横揺れが1回起こるような場合は、パラメトリック横揺れの発生と考え、船の針路を保つための最低速力にまで船の速度を下げる。或いは、複数の長大なうねりを受けている場合は、どのうねりでパラメトリック横揺れが発生しているのかを観測し、大幅な変針をする。
- 波との出会い周期が船の横揺れ固有周期に等しくなると、同調横揺れが発生するので、これにも注意を払う必要がある。

### ＝同調横揺れ＝

船の持つ固有の横揺れ周期と波の出会い周期が一致するときに発生する現象。「同調横揺れ」は、揺れの船体運動が急激に大きくなり、大角度傾斜するなど、復原力の消失をまねくおそれがあります。(図 103)

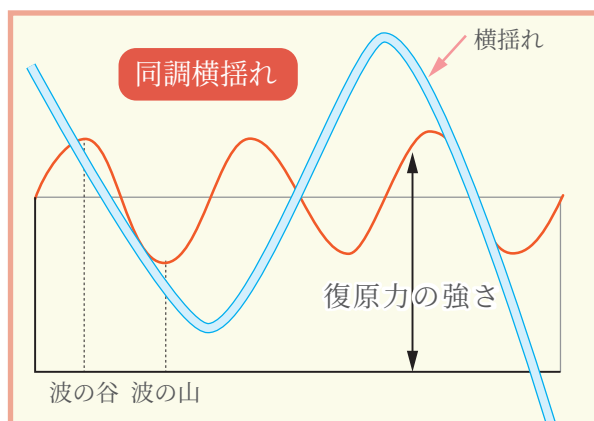


図 103