



JAPAN P&I CLUB

第45号 2019年4月

P&I ロスプリベンションガイド

編集：日本船主責任相互保険組合 ロスプリベンション推進部

気象・海象と荒天操船

＝「向い波」と「追い波」航法＝



目次

第一章 はじめに	1
第二章 大気の大循環	1
第三章 気団	4
第四章 低気圧	5
4-1 温帯低気圧	7
4-2 熱帯低気圧と台風 (Typhoon)	18
第五章 気象情報の入手	33
5-1 地上天気図	33
5-2 波浪図	35
5-3 上層天気図 (高層天気図)	38
第六章 風浪とうねり	41
6-1 波の基本形	41
6-2 「風浪」と「うねり」の違い	42
第七章 荒天操船：「向い波」と「追い波」航法	43
7-1 向い波航法	43
7-2 追い波航法	65
第八章 おわりに	88
参考文献	89
添付資料 MSC.1/Circ. 1228 (11 January 2007)	90

第一章 はじめに

走錨事故は強風時に発生しますが、特に、台風が来襲したときに多く発生しています。関西地区に上陸した台風 21 号により、航空燃料を揚荷したタンカーが走錨した結果、関西空港の連絡橋に大きな損傷を与えた 2018 年 9 月の事故が、その例です。この事故の数か月前、私たちは「走錨事故例と防止」を題目にしたロスプリベンションセミナーを日本国内で開催しました（2018 年 4～6 月）。多数の方にご参加いただいたこのセミナーの内容をとりまとめたのが、P&I ロスプリベンションガイド第 43 号「走錨事故例と防止」（2018 年 7 月発行）です。この中で、台風について解説しました。

今回は、気象・海象における荒天発生のメカニズムの要点に触れながら、荒天操船の中でも特に注意が必要な「向い波」と「追い波」航法についてご紹介いたします。上述の P&I ロスプリベンションガイド第 43 号と併せて参考にしてください。

第二章 大気の大循環

大気の動き（流れ）は非常に複雑ですが、地球全体の視点で見ると、持続的な特徴のある大きな動き（流れ）が見えます。これを大気の大循環といいます。

大気の大循環の地上付近の風分布を年平均の場合について模式的に表したものを図 1 に示します。

地球に達する太陽エネルギーは、約半分を可視光線が占め、残りのほとんどを赤外線が占めています。そして、地球は、受け取っ

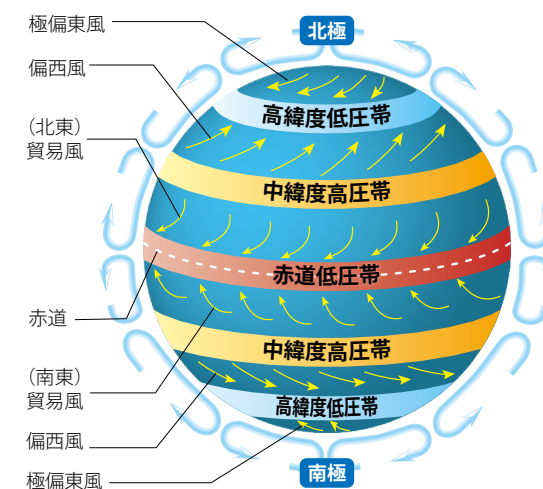


図 1

た太陽エネルギーを赤外線として宇宙に放射しますが、大気が受け取る正味の放射エネルギーは、低緯度で正、高緯度では負となるので、この放射の効果によって低緯度と高緯度の間に大きな気温差が生じます。

もし、赤道から極に熱が運ばれないと、赤道付近は生物の住むことができないほど熱くなってしまいます。逆に、極付近で積雪が多いと、それがとけずに氷河となります。しかし、実際には赤道付近の熱が極方向に運ばれ、地球は動植物の生存に適した気温になります。地球の南北の気温差をほどよく調整するのが風です。風は空気の温度差で生じ、この温度差を小さくする役割を果たしています。

また、大気役目は、こうした地球の気温を平準化し、気候を和らげているだけでなく、次の3つの役割もあります。

生物に必要な酸素と、植物の光合成に必要な二酸化炭素を供給する。

オゾン層により、生物に有害な紫外線を吸収する。

宇宙から飛来する隕石を摩擦熱で消滅させ、地表に届かせない。

太陽と地球の大きさや位置関係を図2に示します。地球の半径は6,369kmありますが、太陽はその109倍にあたる695,508kmもあり、地球からの距離は1億4,900万kmです。地球の半径の23,395倍もあり、地球の半径の太陽～地球間の距離に対する割合はわずか0.0004%です。それでも地球の赤道付近と極の温度差は60℃以上もあります。



図2

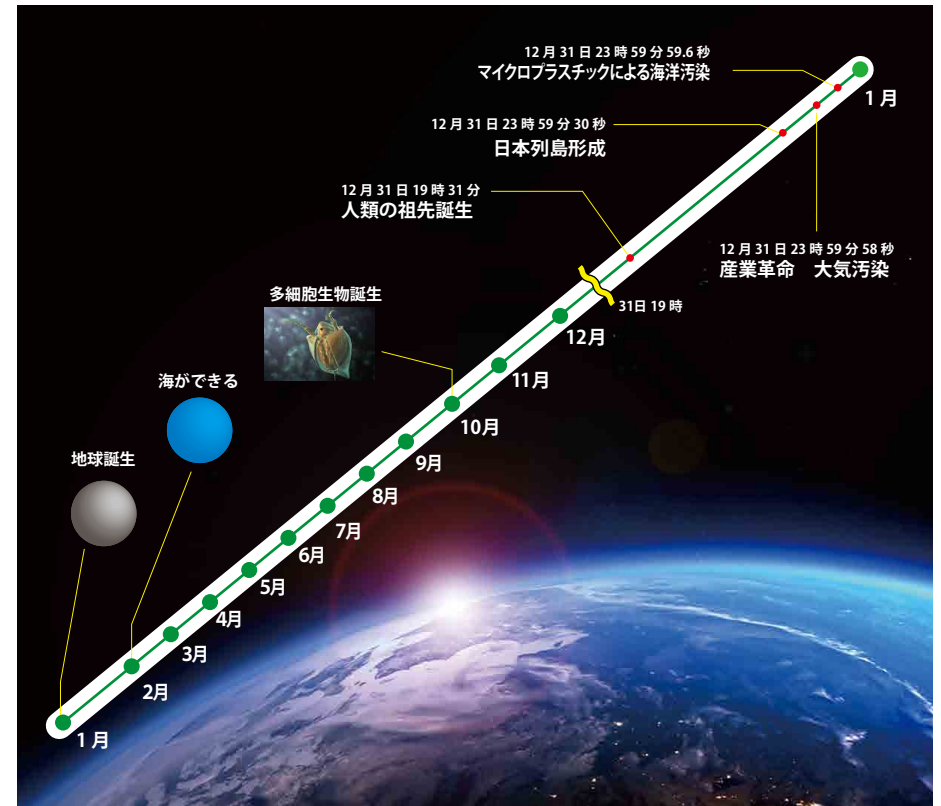


図3

近年、地球の温暖化や環境汚染が問題になっています。地球の誕生は約46億年前といわれていますが、この46億年を1年に圧縮し、地球誕生を1月1日00:00とした場合、二酸化炭素の排出が多くなり始めたのが18世紀半ばの産業革命からですので、圧縮した時間軸で見れば「12月31日23時59分58秒」頃から大気汚染を人類が始めたこととなり、わずか2秒間に化石燃料の大量消費などを拡大して、温暖化という地球環境問題を発生させていることになります。

また、マイクロプラスチックによる海洋汚染は1980年代に始まっていますが、これを時間軸に置き換えれば12月31日23時59分59.6秒と、わずか0.4秒前です。

地球の直径（12,739km）と大気圏（カーマンライン：100km）を比較すると図4のとおり、ごく薄い範囲（地球直径のわずか0.8%）に大気が存在していることがわかります。

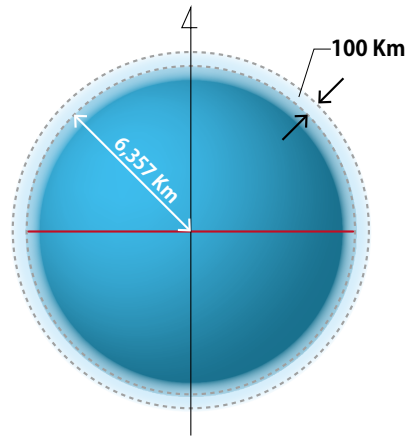


図4

このようにして見ると、わたしたち人類はきわめて短時間に、46億年かけて作りあげられたごく薄い範囲の大気による地球環境を、劇的に変化させてきたことがわかります。改めて、大気の高い役割を認識した上で環境問題に取り組む必要があると考えます。

第三章 気団

大陸や海洋は、それぞれ1,000km以上の水平の広がりがあり、地球規模で考えると、地表面の状態がほぼ一様な地域として見るができます。空気が大陸や海洋上に長い間（例えば1週間以上）とどまっていると、次第にそれぞれの地表面に沿った特有な性質を持つようになります。このような空気の大きな塊りを「気団」といい、気団ができる地域を発源地といいます。

異なる気団の季節ごとの勢力の変化により、地域の気候の変化が生まれます。気団の分類を図5に示します。

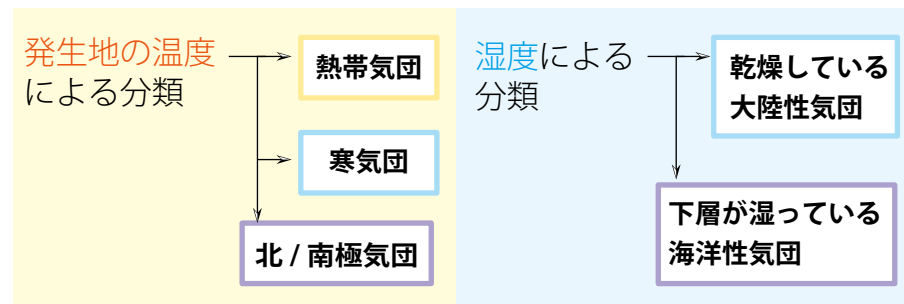


図5

日本付近は気団の発源地ではありませんが、広大なユーラシア大陸と太平洋が相接する中緯度に位置しているため、その気候は周囲の気団の影響を大きく受けています。

日本の気候に大きな影響を持つ3つの気団を図6に示します。



図6（出典：国土地理院ウェブサイトより加工して作成）

第四章 低気圧

低気圧とは、周りより気圧が低いところです。等圧線の形が漠然としていて、まとまりがないときは単純に低圧部と呼びます。低気圧内の風系は地球の自転の影響で、北半球では反時計回りに中心に向かって吹き込みます。この吹き込んだ風は収束して上昇気流となり、空気の上昇によって断熱冷却（註1）が起これ、雲が発生して雨が降るので、低気圧内では一般的に天気が悪いという状況になります。

低気圧は発生する場所と原因によって次のように分類されています。頻繁に発生するのは、温帯低気圧で、単に低気圧という場合には、温帯低気圧を示します。

温帯低気圧	中・高緯度で発生し、前線を伴う
寒冷低気圧 / 地形性低気圧 / 熱的低気圧	中・高緯度で発生し、前線を伴わない
熱帯低気圧	低緯度の熱帯の洋上で発生する低気圧。温帯低気圧とは発生の仕組みも構造も全く異なるので、4－2で解説します。

註 1 断熱冷却

外部と熱のやりとりがない状態における変化を「断熱変化」といいます。気体は断熱膨張すると、冷やさなくても自然に温度が下がります（断熱冷却）。逆に、気体を断熱圧縮すると自然と温度が上がります（断熱昇温）。
気体が断熱膨張するという事は、エネルギー（熱）が与えられない条件では、外からの圧力に抗して体積を増やすということなので、これは外に対して仕事をするを意味します。つまり、自分自身のエネルギー（熱）を使ってしまうので、温度が下がることになります。断熱圧縮は、その逆です。
空気塊は上昇すると、まわりの圧力が下がるので自然に膨張します。このときに膨張するといった仕事をするのですが、外部との熱の出入りはほとんどないと考えてよいので、断熱膨張するとエネルギーを放出するので、温度が下がります。この割合は高度 100m の上昇に対して 1.0℃ですが、このときの条件は、空気塊の温度が下がってもまだ水蒸気が飽和に達していない（気温が露点にまで下がっていない）という前提です。この水蒸気が飽和に達していない空気塊の上昇に伴う気温の高さによる下がり方を、乾燥断熱減率といいます。空気塊が下降するときは、断熱圧縮により乾燥断熱減率の割合で気温が上昇します。

乾燥断熱減率 = 1.0℃ / 100m

しかし、ふつうの空気塊には水蒸気が含まれています。このため、上昇する空気塊の気温が下がっていくと、そのうちに水蒸気が水に変わる露点に達しますが、空気塊が含んでいた水蒸気が凝結（凝縮）して、このときに細かい水滴ができ始めて雲が発生します。雲ができつつある空気塊（水蒸気が飽和に達した空気塊）が上昇するときは、水蒸気の凝結に伴って潜熱が放出されることを考えなくてはなりません。この潜熱によって空気塊は暖め

られるので、雲ができつつある空気塊の気温の下がり方は、乾燥断熱の割合よりも小さくなります。
雲ができつつある空気塊（水蒸気が飽和に達した空気塊）が上昇するときの、高度による気温の下がり方を湿潤断熱減率といい、この割合は条件によって異なりますが、平均すると 100m の上昇につき 0.5℃です。逆に、雲が存在している空気塊が下降するときは、水滴が蒸発するときの（気化）熱を奪うので、乾燥断熱減率の割合で温度は上がらずに、湿潤断熱減率の割合で温度が上がることになります。スプレー缶の噴霧気体が冷たいのと同じです。

湿潤断熱減率 = 0.5℃ / 100m

こうした空気の動きを見ると、例えば、夏に湿った南東の風が日本列島に吹き込み、山脈に沿って 2,000m 上昇したときに雨を降らせながら湿潤断熱率で温度が下がると、海面付近の気温が 30℃とすれば、山頂の気温は 10℃低い 20℃となります（湿潤断熱率：0.5℃ / 100m x 2,000m）。
この空気が今度は山の斜面に沿って下降すると、水蒸気が含まれていなければ乾燥断熱率で温度が上昇することになり、海面では 40℃ (2,000m x 1℃ / 100m) に達します。日本海側のフェーン現象はこのような仕組みで発生します。

4－1 温帯低気圧

4－1－1 発生段階

前線を伴った温帯低気圧は、寒冷な寒帯気団と温暖な亜熱帯気団がほぼ同じ勢力で接しているところに、まずは停滞性の寒帯前線（図 7）が発生し、この空気の温度差によって生じる「位置エネルギー」が温帯低気圧の発生エネルギー源になります。

やがて、この寒帯前線を中心として、寒気と暖気の風速の差がある程度以上になると前線の波（空気のうねり）ができ始めます。これは、海面の上を風が吹くと波が発生するのと同じ原理です。すなわち、性質の違う 2 つの流体の境界面では波が生じます。海の波は上下に変動しますが、前線の波は南北方向と上下変動をする波動です。この様子を図 8 に示します。

前線が波打ち、寒気の中に暖気が入り込んだところでは、気圧が下がって低圧部が

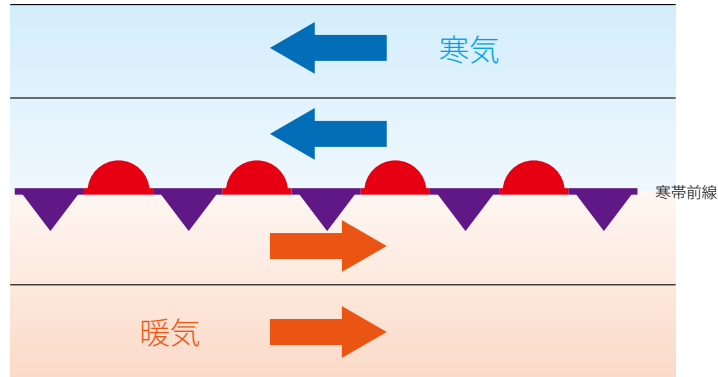


図7 (出典:『新 百万人の天気教室』成山堂書店)

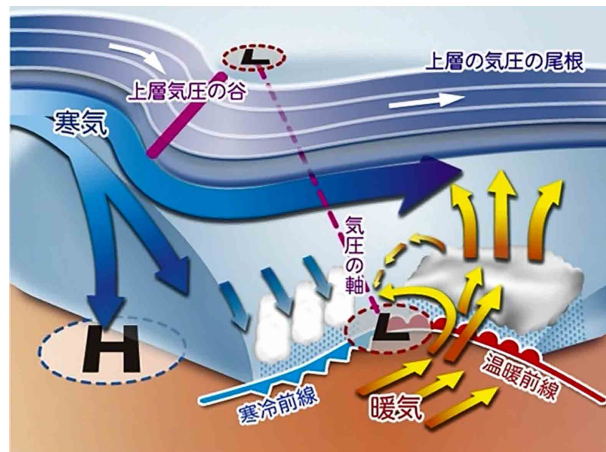


図8 (出典:一般社団法人 日本船主協会 DVD)

できます。北半球では、前線のふくらみの東側では、風は北向きの成分を持ち、暖気が寒気の上を這いあがるように進むので温暖前線となります。

一方、ふくらみの西側では、風は南向きの成分を持ち、寒気が暖気の下に潜り込むようにして進むので寒冷前線となります。この他の低圧部は2つの前線の接合部にあります。また、地上の低圧部と上空の低圧部の中心を結ぶ軸を「気圧の軸」と呼び、この軸は西に傾いています。

4-1-2 温帯低気圧の構造と発達

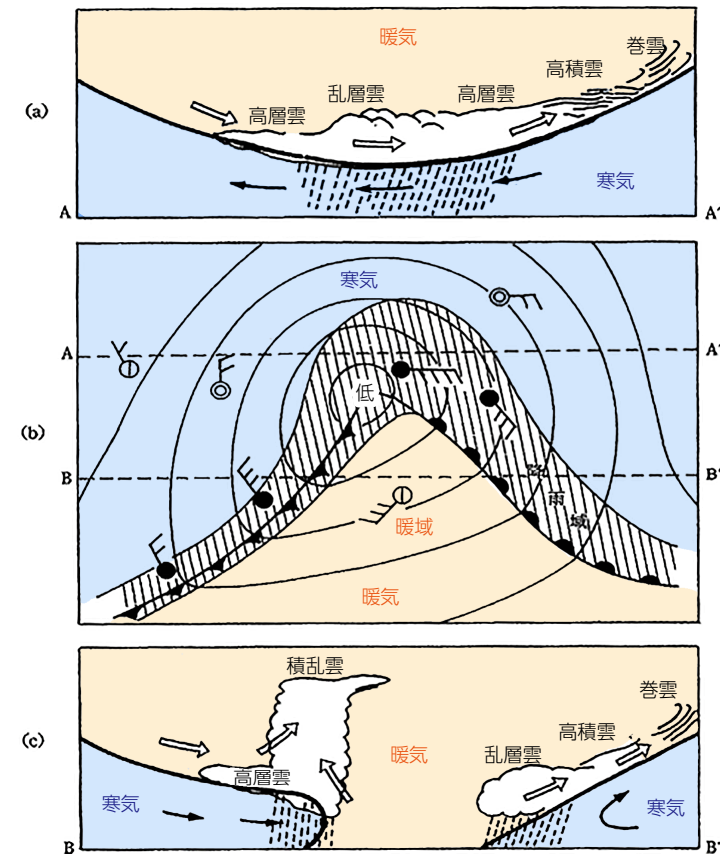


図9 温帯低気圧の構造 (出典:『新 百万人の天気教室』成山堂書店)

発達状態の温帯低気圧の構造を図9に示します。(b)図は、水平面の構造で模式的な天気図と雲域・降雨域などを斜線で示しています。低気圧の中心から南東に温暖前線が伸び、南西には寒冷前線が伸びています。

密に並んだ等圧線により、一段と強い低気圧性の空気の流れが生じて、反時計回りに回転しながら低気圧の中心に向かって風が吹き込んでいます。(a)図は低気圧の中心より北側の東西方向 A-A'に沿った鉛直方向の断面図、(c)は中心より南側の東西方向 B-B'に沿った鉛直方向の断面図を示します。

発達状態の温帯低気圧の上層にある偏西風とジェット気流は、図8に示すように、

気圧の谷が地上低気圧の西側にあり、波の振幅（蛇行の程度）の大きい状態が続いています。この構造は発達中の温帯低気圧に共通した特徴です。もう1つの特徴は、上層の気圧の谷の東側に上昇気流があり、西側に下降気流があることです。

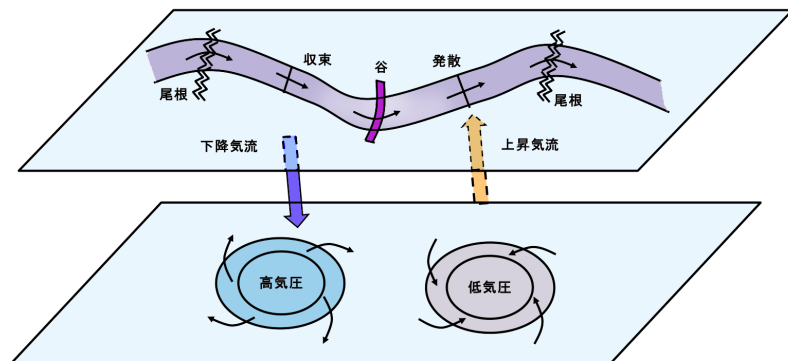


図10 (出典:『新 百万人の天気教室』成山堂書店)

上空の気圧の谷の東進により、地上の前線は、より大きく不安定に波動して、発達しながら日本付近を通過していきます。(図11)

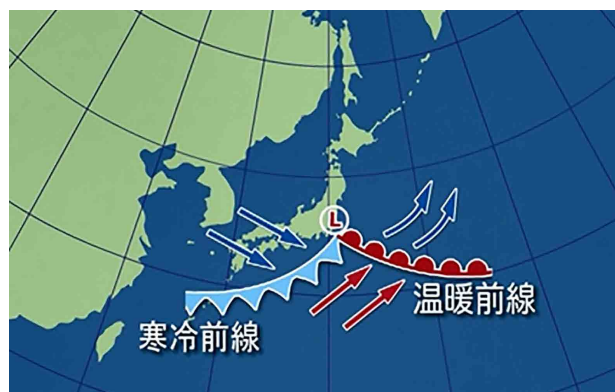


図11 (出典:一般社団法人 日本船主協会 DVD)

4-1-3 温帯低気圧の最盛期

そして、本邦東方海域で温帯低気圧の中心気圧は最低となり、前線は閉塞し始めて閉塞前線の形成を開始します。このときの温帯低気圧の勢力は最大となります。(図12)

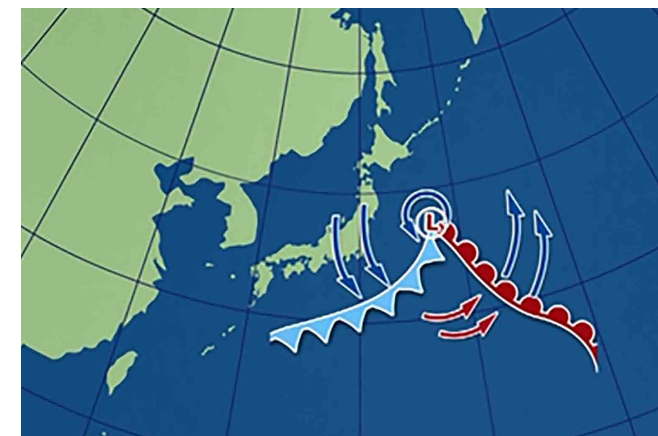


図12 (出典:一般社団法人 日本船主協会 DVD)

冬季 野島崎(千葉県房総半島南端)東方における低気圧の急発達

冬期、野島崎東方から東北太平洋側にかけては、低気圧の急激な発達に注意が必要です。この海域では、黒潮の影響で海水温度は南ほど高い状態となり、海水温度の等温線は東西に走り、北に行くにつれて冷たくなっています。(図13)

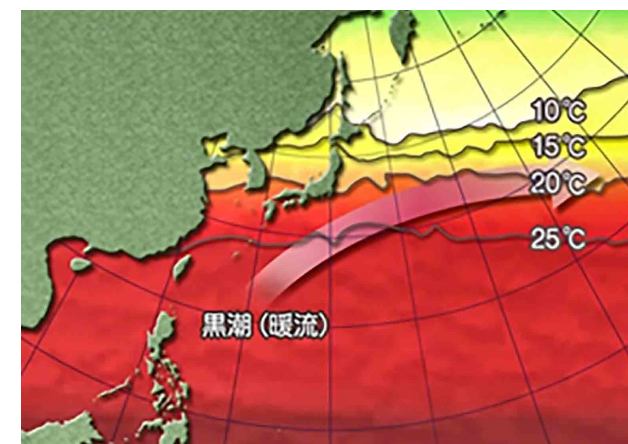


図13 (出典:一般社団法人 日本船主協会 DVD)

一方、上層寒気は、寒冷前線に向って「くさび状」に南に突き出し、低気圧の東進とともに西から東へ移動します。(図14)

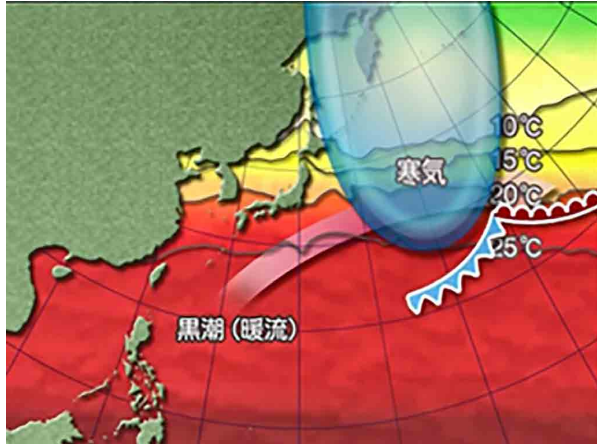


図 14 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

海水温度が高い野島崎沖に上空の寒気がくさび状に南下すると、上空の寒気と海水の温度差が南ほど大きくなり、水蒸気が供給されるので波がより高くなる傾向があります。

ここに、前に通過した低気圧による方向の異なるうねりが衝突すると、いわゆる「三角波」が発生し、船舶にとって非常に危険な波浪が発生します。特に高波高域は注意が必要です。(図 15)

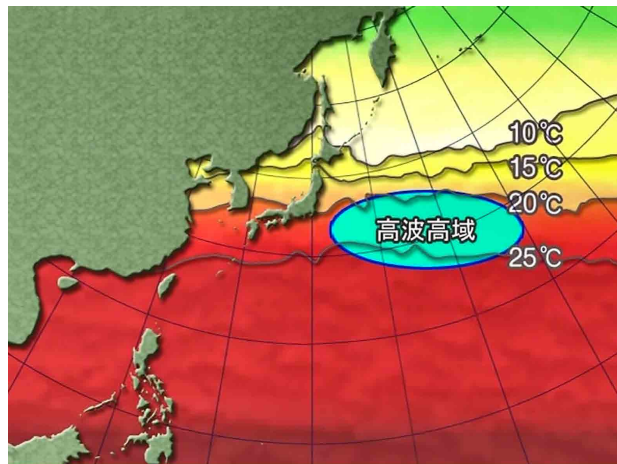


図 15 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

1969 年 1 月 5 日に、ばら積船「ほりばあ丸：総トン数 33,814、全長 (Loa) 223m」、
1970 年 2 月 9 日には、ばら積船「カリフォルニア丸：総トン数 34,002、全長 (Loa)

218m」が沈没。この 2 隻以外にも 1970 年 1 月 5 日にタンカー「ソフィア・P 号：船舶明細不明」、同年 2 月 7 日には貨物船「アントニオ・デマデス号：船舶明細不明」もこの海域で遭難・沈没しています。

4-1-4 温帯低気圧の衰退期

温帯低気圧がアリューシャン海域に達する頃には、寒冷前線は温暖前線に追いつき、完全に閉塞して閉塞前線を形成します。この時上空の気圧の谷は地上低気圧の真上にあつて、気圧の軸(図 8)は垂直になり、低気圧を取り巻く気流は孤立した渦状になります。こうなると、温帯低気圧の勢力は減衰し始め、やがて消滅します。(図 16)

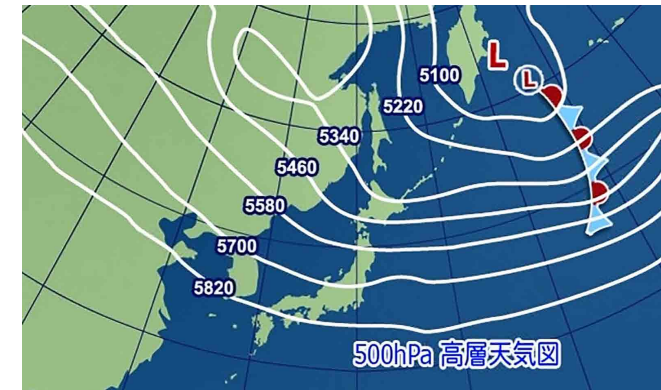


図 16 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

しかし、近年の冬季北太平洋では、温帯低気圧が勢力を維持したままアリューシャン列島の南を東進し、アラスカ湾付近で最強となって北米大陸に上陸してから消滅するということが増えています。

その結果、日本～北米西岸の冬季太平洋横断では、特に西航時(北米⇒日本)の航海において、総距離は 4,610 海里ですが、荒天航海区域を航海することになる北回り(北米⇒ユニマック海峡⇒ベーリング海⇒アッツ島⇒金華山(または犬吠崎)⇒東京)航路と、距離は 4,890 海里に増加します。荒天を避ける南回り航路とどちらを選択すべきか悩ましいところです。

サンフランシスコ～東京のコンテナ船での航海では、南回り航路の総距離がベーリング海経由の北回りに比べて280海里長くなり、20ノットの速力ならば航海時間が14時間余分にかかるので、北回り航路でうまく荒天を回避できた場合と比べると距離が増大した分だけスケジュール遅延となります。この遅れを取り戻すためには増速するしかなく、結果として燃料消費量が増えることになるので南回り航路の選択について苦渋の決断を迫られます。(図17)



図 17

特に冬季北太平洋の西航時には本船船長の提案を尊重しながら、船舶管理会社、備船者と綿密に事前打ち合わせを行い、関係者の合意の元に安全な最適航路を選定することが重要と考えます。

4-1-5 ブロッキング高気圧「切離(せつり) 高気圧」

冬期のアリューシャン海域では「ブロッキング現象」が起きやすい状況にあります。上空に「切離高気圧」(註2)ができると、地上の移動性高気圧や温帯低気圧は行く手を遮られ、衰退しないまま停滞し、荒天が長期間続くので注意が必要です。(図18)

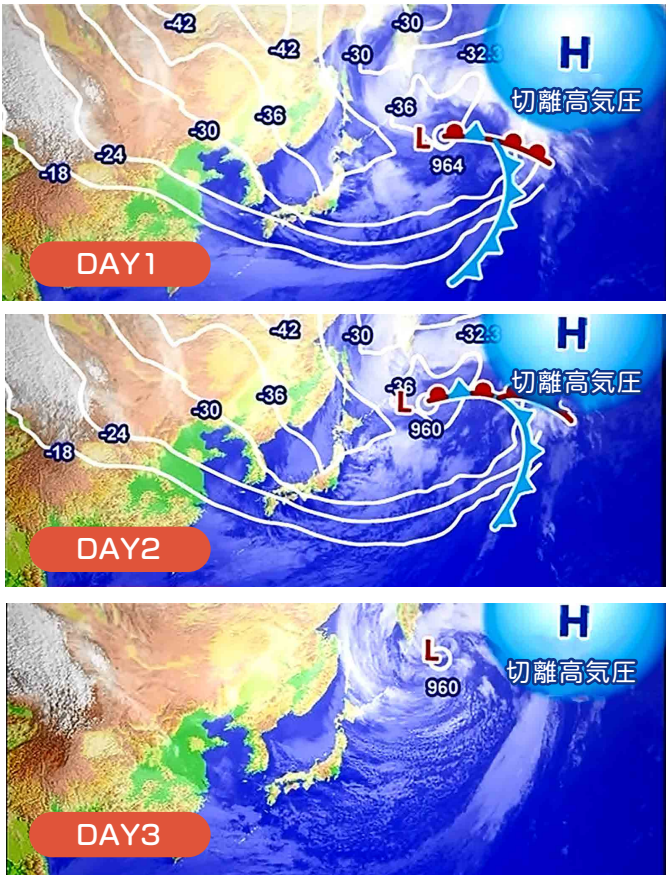


図 18 低気圧の停滞 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

註 2 切離高気圧（せつりこうきあつ）

カットオフ高気圧ともいう。上空の偏西風帯中のジェット気流が大きく南北に蛇行する際、その北の部分で低緯度側の暖気が高緯度側に分離してできた上空の温暖高気圧。通常、地上にも対応するような大きな停滞性高気圧が現れてブロッキング現象を起こす。地上天気図でみられる移動性の高気圧、低気圧はふつう偏西風に流されて東進するが、それが中緯度の対流圏を貫いて長期間停滞する優勢な高気圧（ブロッキング高気圧）の西側で阻止されるので、南北への迂回、逆行などを示す現象。このとき高層には切離高気圧が顕著に現れる。（図 19）

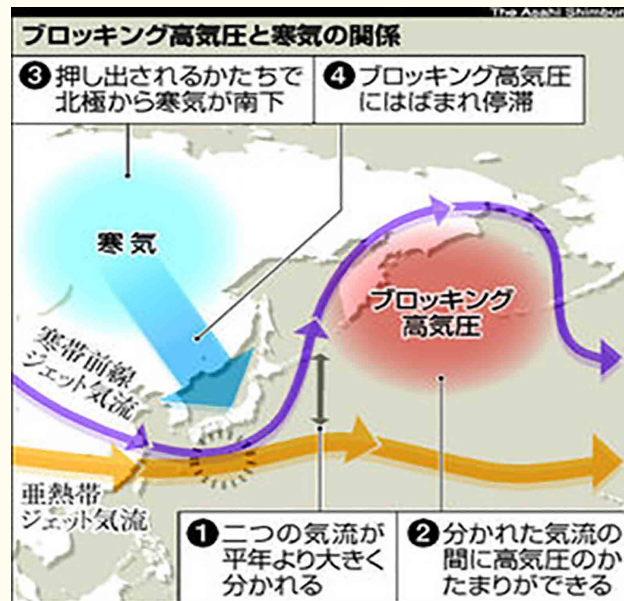


図 19 ブロッキング高気圧
（出典：気象庁ウェブサイト）

4-1-6 急速に発達する低気圧（爆弾低気圧）（図 20、21）

急速に発達する温帯低気圧を「爆弾低気圧」といいます。気象科学事典等によれば、「中心気圧が 24 時間で $24\text{hPa} \times \sin(\phi) / \sin 60^\circ$ 以上低下する温帯低気圧（ ϕ は緯度）」を爆弾低気圧と定義しており、たとえば北緯 40° ならば 1 日に $17.8\text{hPa}/24\text{h}$ 以上気圧が低下する場合です。

春先に広い範囲に強風をもたらす日本海低気圧や北日本付近で急発達する低気圧、冬に日本の東や千島近海で急発達する低気圧などが爆弾低気圧と呼ばれています。しかし、今日では気象庁は「爆弾」という用語が不適切であるという理由から気象用語としては使用しておらず、「急速に発達する低気圧」と表現しています。（図 20、図 21）

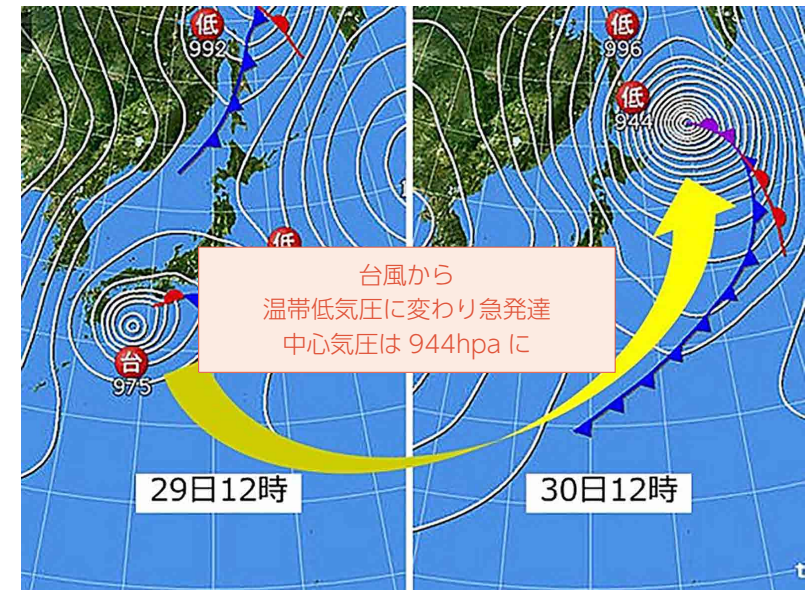


図 20 （出典：日本気象協会ウェブサイト）

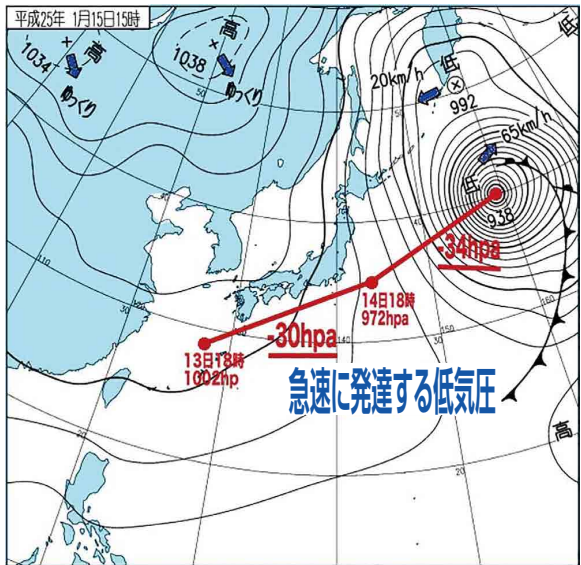


図 21 (出典：気象庁ウェブサイト)

このような低気圧は、思いがけず急激な天候の悪化をもたらすので、安全航行のために細心の注意を払う必要があります。

4-2 熱帯低気圧と台風 (Typhoon)

4-2-1 熱帯低気圧の分類と名称

熱帯低気圧は、熱帯から亜熱帯の海洋上で発生する低気圧のことをいい、その発生には持続的な水蒸気の供給が必要です。したがって、その発生海域は、海面水温が26℃以上の海域とほぼ一致し、概ね赤道周辺海域を除く緯度5度から20度の海域です。(図 22、23)

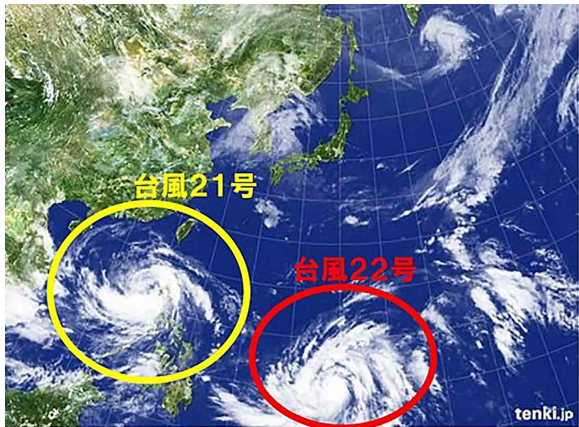


図 22 (出典：日本気象協会ウェブサイト)

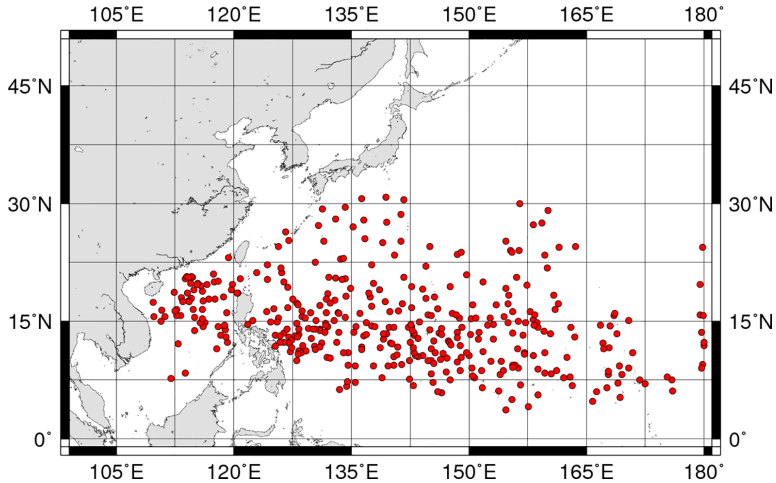


図 23 (出典：気象庁ウェブサイト)

熱帯低気圧は、国際的には表 24 に示すように最大風速によって4つに分類されています。

国際的な熱帯低気圧の分類					東太平洋 カリブ海	日本 (気象庁)	インド洋 南太平洋
略称	分類	最大風速		風力			
		(m/sec)	Knot				
TD	Tropical Depression	~ 17.1	~ 33	~ 7	Tropical Depression	熱帯低気圧	Tropical Depression
TS	Tropical Storm	17.2 ~ 24.4	34 ~ 47	8 ~ 9	Tropical Storm	台風	サイクロン (Cyclone)
STS	Severe Tropical Storm	24.5 ~ 32.8	48 ~ 63	10 ~ 11	Severe Tropical Storm		
T	Typhoon	32.7 ~	64 ~	12 ~	ハリケーン (Hurricane)		

表 24 熱帯低気圧の分類

この内、最大風速が64ノット（32.7m/sec）以上のもので、北太平洋西部に存在するものを台風と呼んでおり、北太平洋東部やカリブ海周辺ではハリケーンと呼んでいます。

日本では、風速34ノット（17.2m/sec）以上のものを台風と呼んでいます。また、インド洋や南太平洋では、サイクロンと呼んでいます。（図25）



図25 熱帯低気圧名称（出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD）

4-2-2 熱帯低気圧の発生メカニズム

赤道付近では北半球の中緯度高圧帯から吹き出す北東貿易風と、南半球の中緯度高圧帯からの南東貿易風が赤道地域に吹き込んで、低圧帯が形成されます。（図26、27）

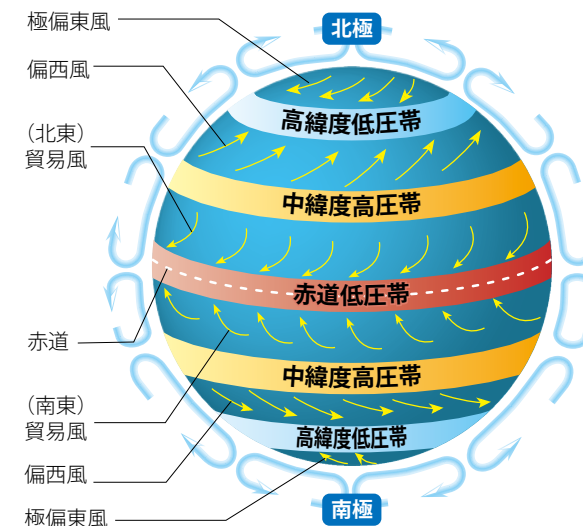


図26

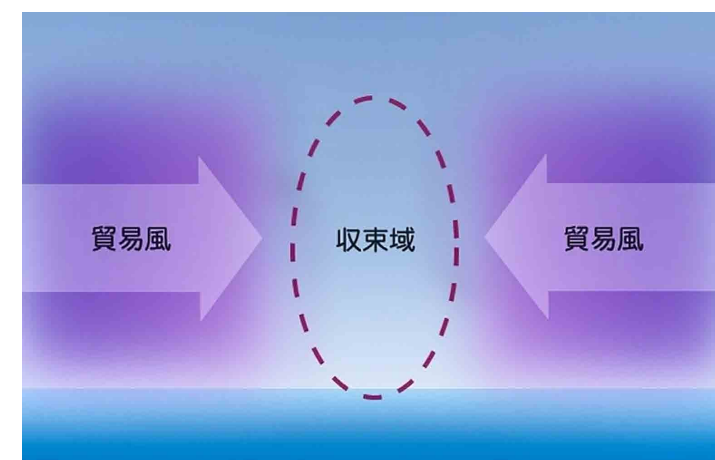


図27（出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD）

この低圧帯は「赤道低圧帯」または「熱帯収束帯 = ITCZ : Intertropical Convergence Zone」と呼ばれています。このITCZは、通常南北に波動しながら西進し、波動が不安定化して大きくなると渦を形成して熱帯低気圧を発生させます。（図28）



図 28 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

温帯低気圧のエネルギー源は、空気の温度差によって生じる「位置エネルギー」です。熱帯低気圧のエネルギー源は、持続的に供給された水蒸気が、上昇して冷却され、水滴として凝結する際に放出される潜熱（せんねつ）です（P.6 註1 参照）。即ち、湿った海上付近にあった空気が、わずかなきっかけで上昇を開始し（図 29）、特に ITCZ では気流が収束しているので上昇気流が発生しやすく、水蒸気が凝結をし始めると積雲や積乱雲が発生します（図 30）。



図 29 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

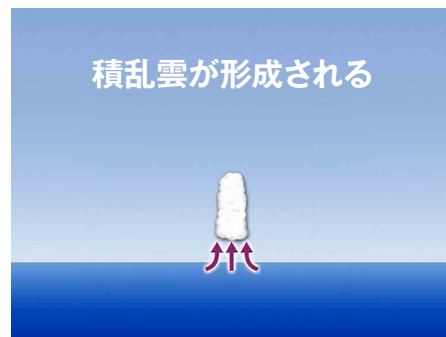


図 30 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

この放出された潜熱により、雲のないところと比べると温度が高くなります。すると、暖められた空気は密度が小さくなって軽くなるので、さらに上昇を続け、中心気圧が下がって熱帯低気圧として発達を続けます。このような条件付不安定となった大気中では、水平規模が 10km 程度の積乱雲がいくつも発達し（図 31）、それらが集まった効果として水平規模が 100km を超える熱帯低気圧が発生します（図 32）。

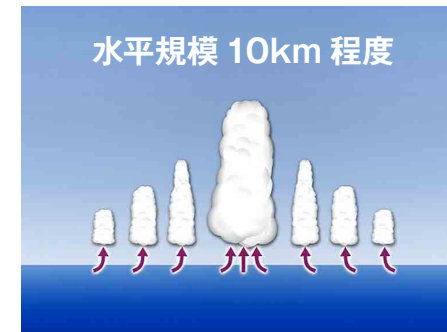


図 31 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

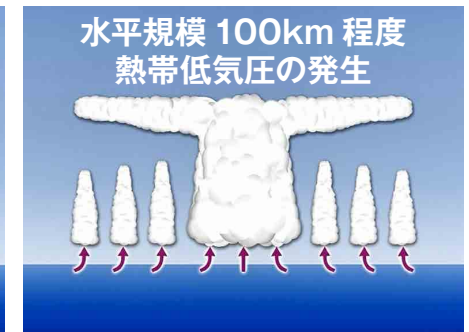


図 32 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

熱帯海域に発生した熱帯低気圧は、表 24 に示すとおり、日本の分類では域内の最大風速が 34 ノット (17.2m/sec) 以上を超えるまで成長すると台風という呼称になります。どのような雲の塊りが台風にまで発達するかについて、まだ解明されていません。しかし、台風のエネルギー源は海面から蒸発する水蒸気であることはわかっているため、海面温度が高いところで発生した台風ほど、強い台風になります。また、強い台風にまで発達するには、海水温度が 28℃ 以上の海域を通過することが必要とされています。

逆に、28℃ 以下（或いは、26℃ 以下）の海域に台風が達したり、陸地に上陸すると台風が持つエネルギーは排出されて衰弱を開始し、その後、温帯低気圧に変貌して、やがて消滅します。



写真 33 イメージ写真 (台風発生ではない)

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「台風の目」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）

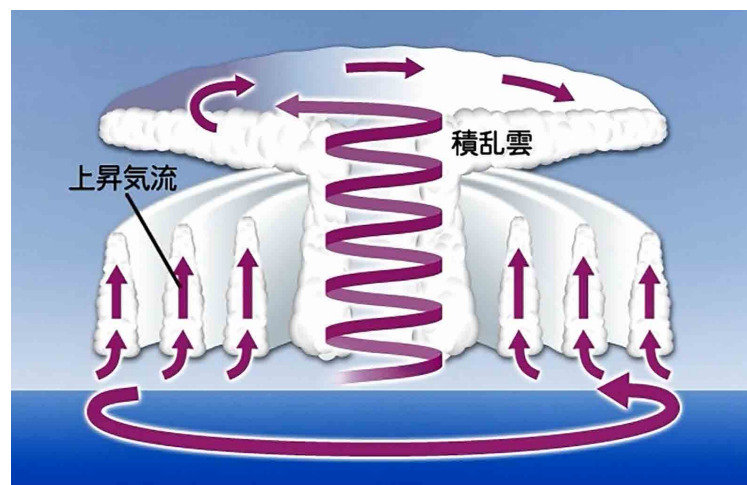


図 34 （出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD）

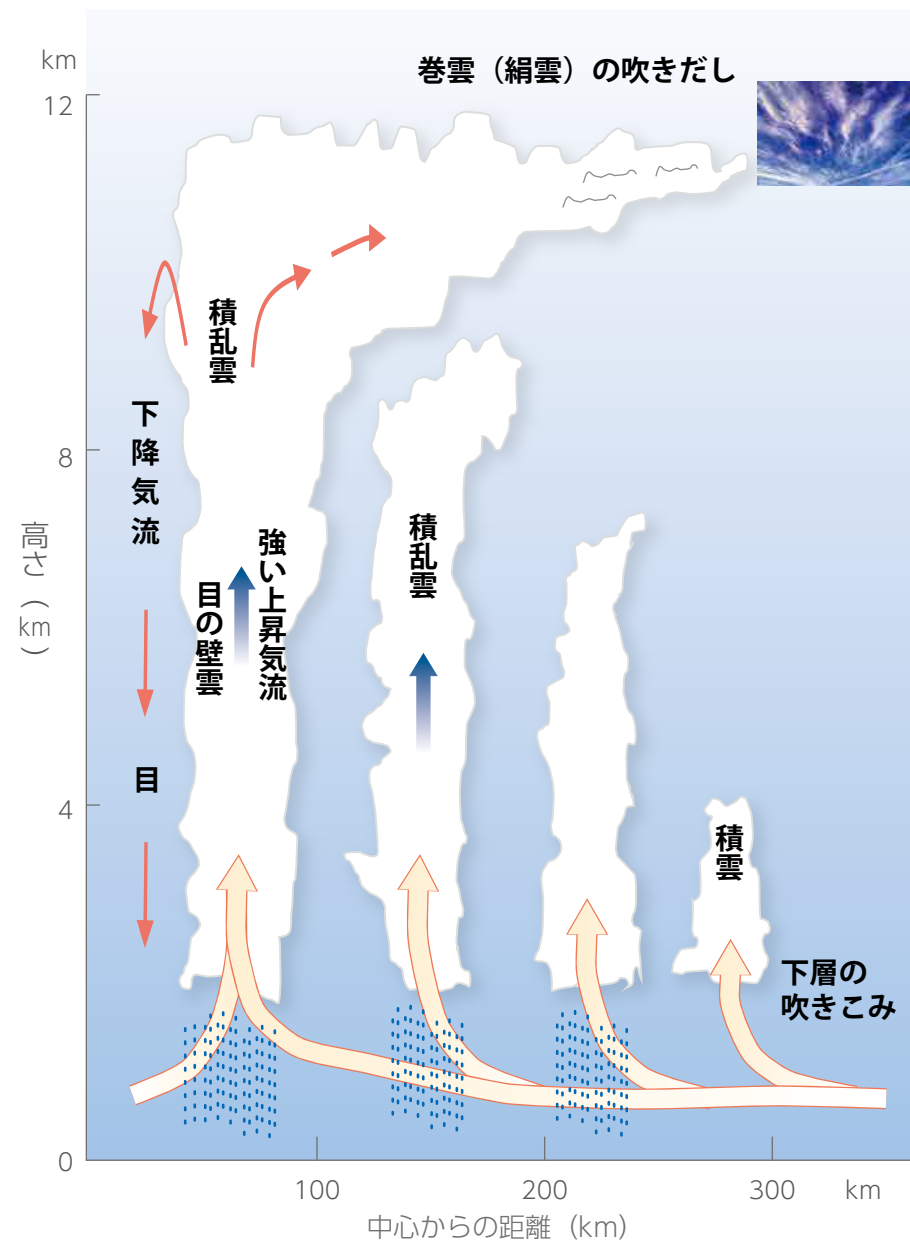


図 35 台風の鉛直断面

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か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^{しゅうう}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)

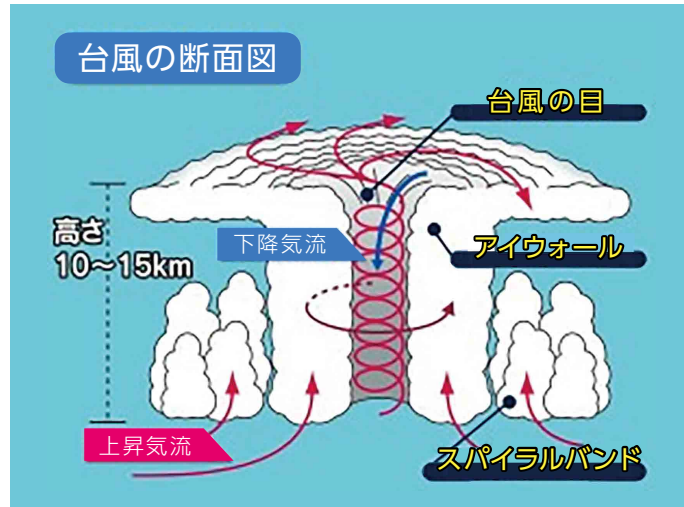


図 36 (出典：気象庁ウェブサイト)



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)

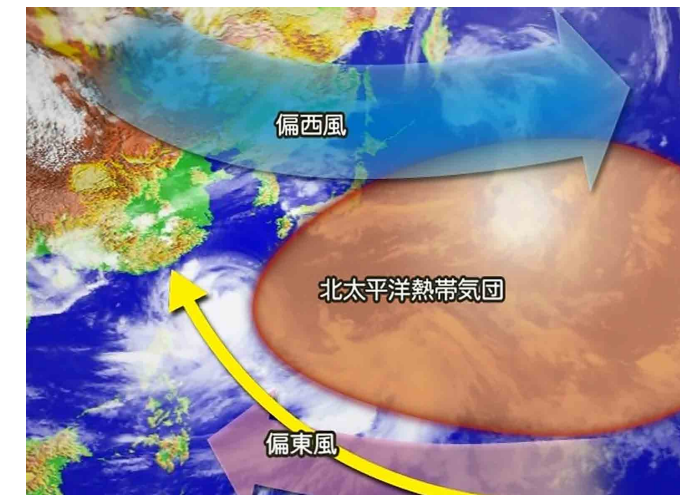


図 38 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

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)

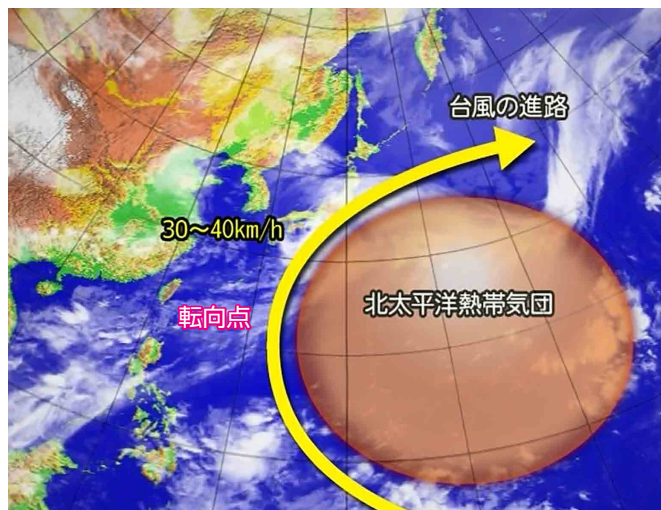


図 39 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

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、西向きに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)

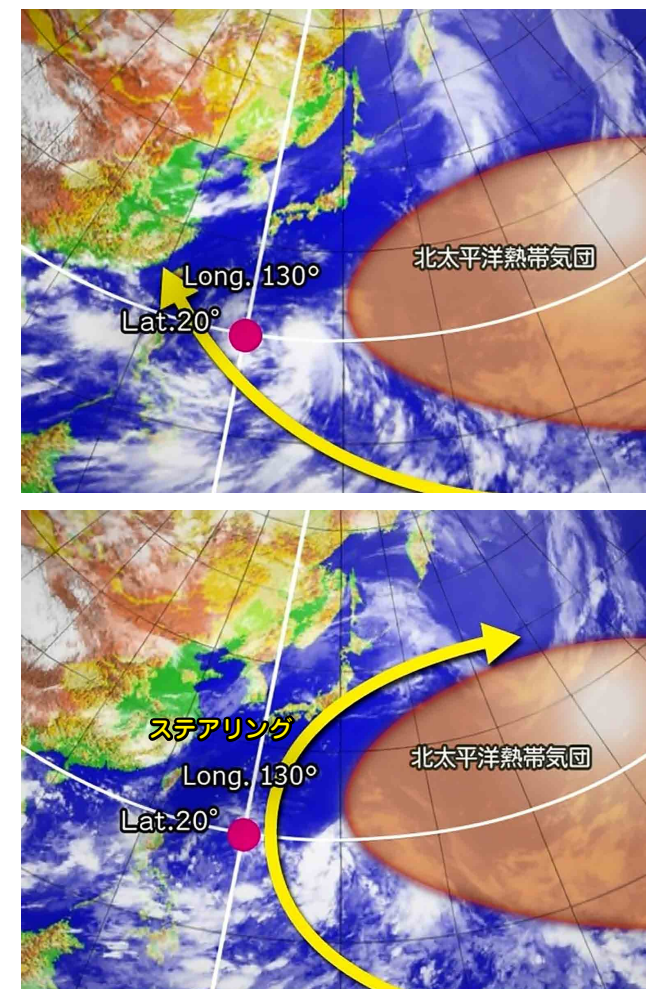


図 40 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

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)

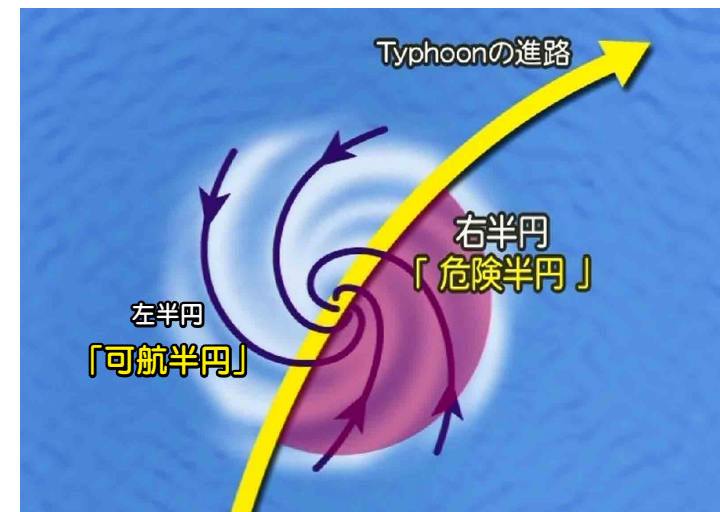


図 42 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

船が「危険半円」に追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、台風の中心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)

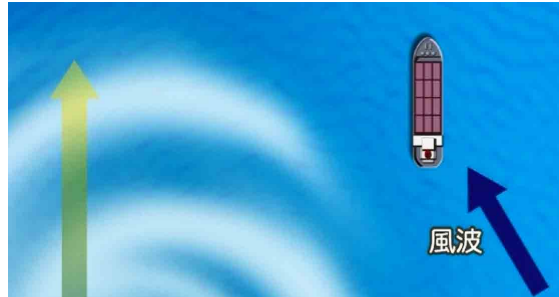


図 43 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

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)

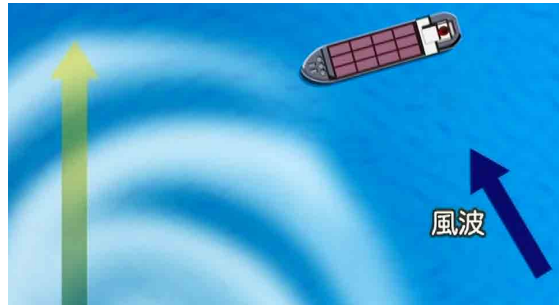


図 44 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

ただし、可航半円とはいえ暴風域に変わりで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。

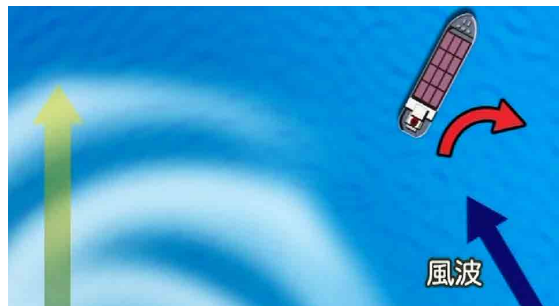


図 45 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

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

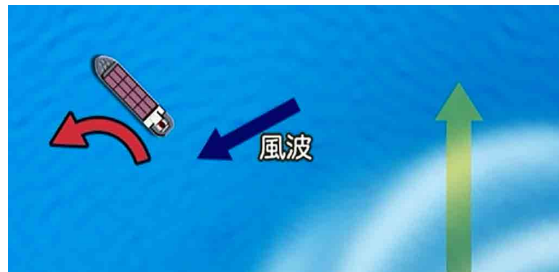


図 46 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

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)

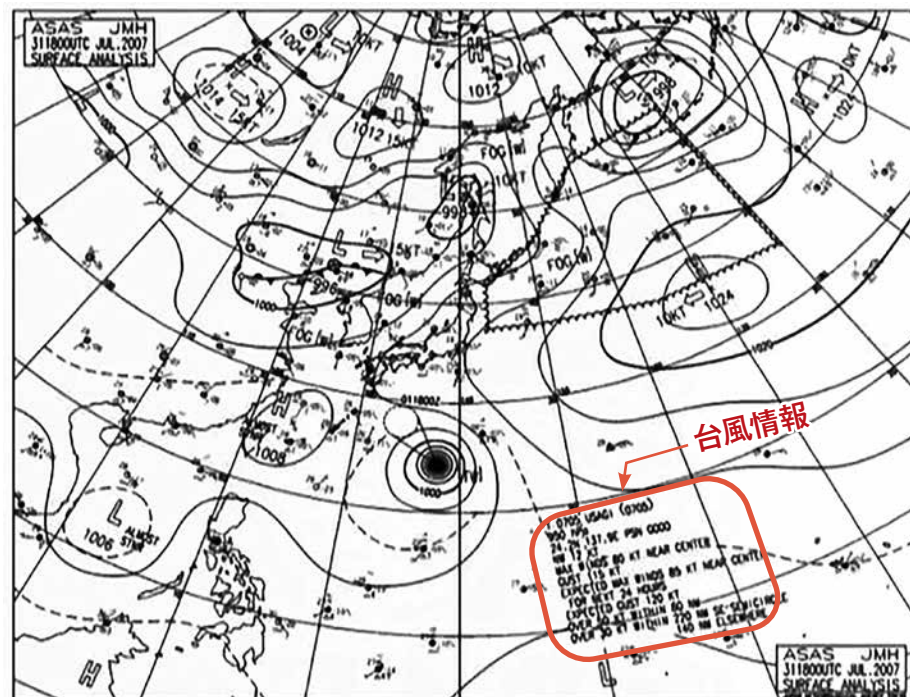


図 47 地上天気図 (出典：気象庁ウェブサイト)

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 1 m 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。

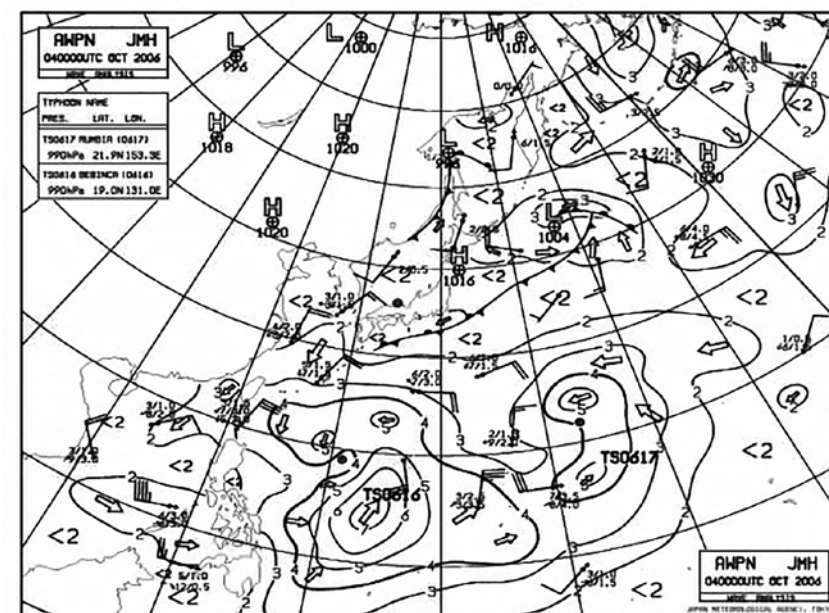


図 48 外洋波浪図 (出典：気象庁ウェブサイト)

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。

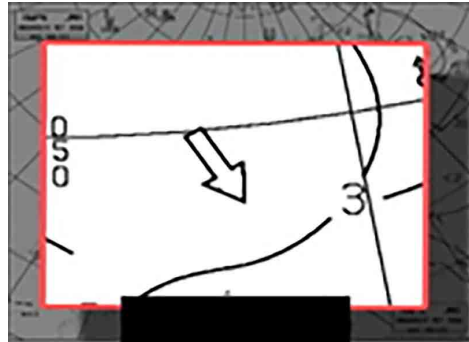


図 49 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

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（注 3）をメートル単位で、それぞれの予想値を表しています。

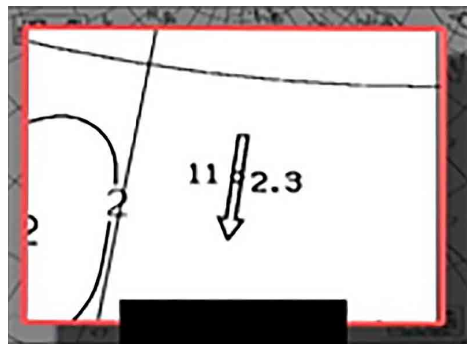
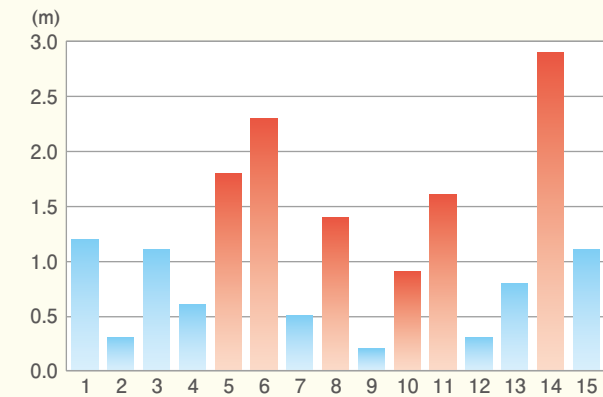


図 50 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

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。

注 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)



ある地点で観測された波高
(不規則に変化している)

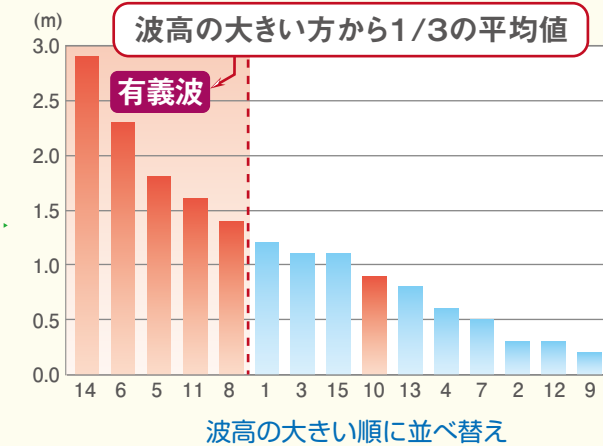


図 51

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。

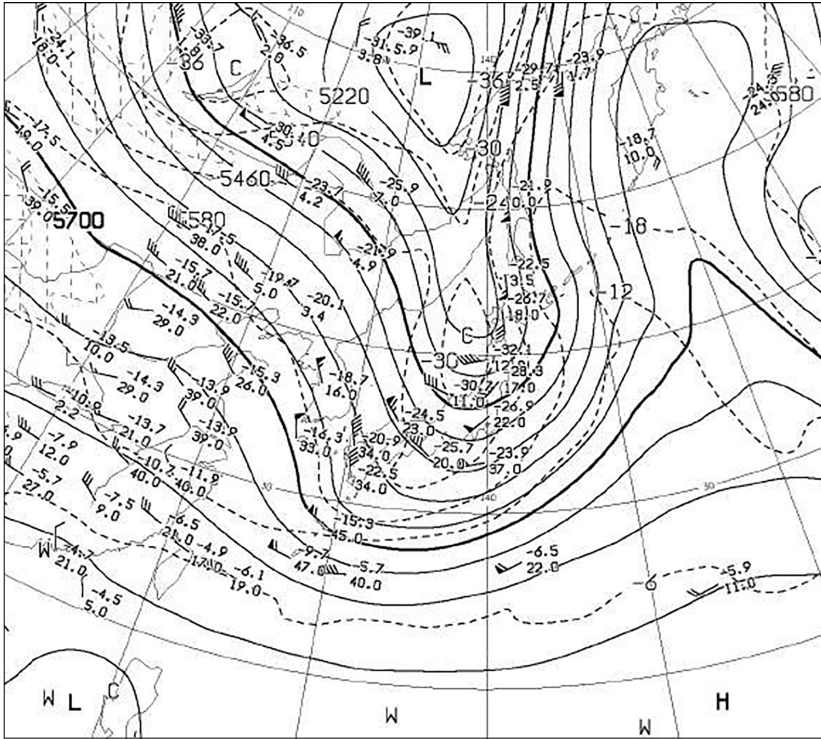


図 53 500 hPa 上層天気図（出典：気象庁ウェブサイト）

図の中で実線は等高線を示し、破線は等温線を示しています。等高線は 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、寒気の種類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。

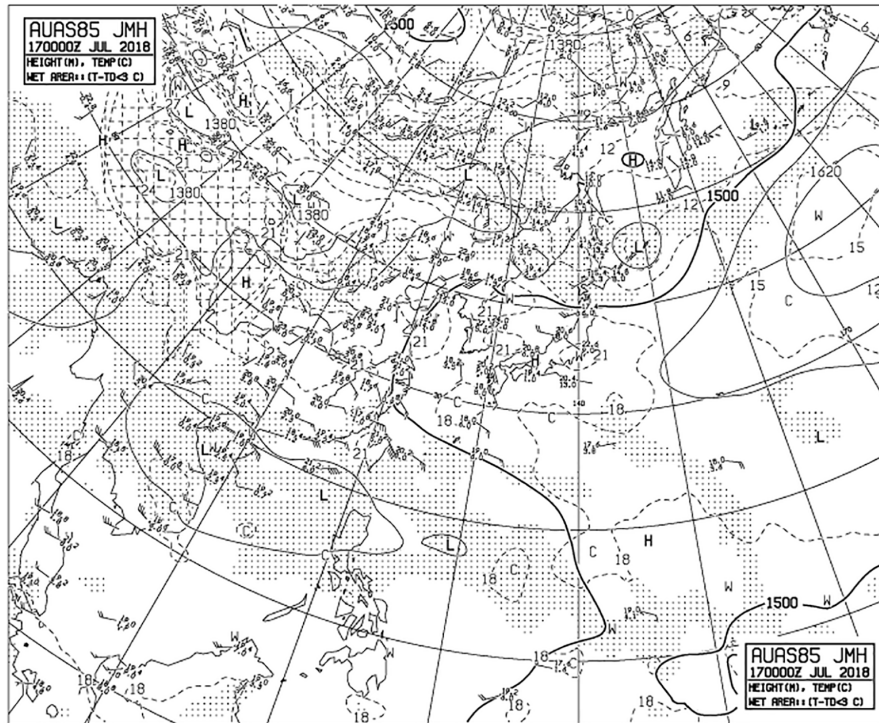


図 54 850 hPa 上層天気図 (出典: 気象庁ウェブサイト)

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。

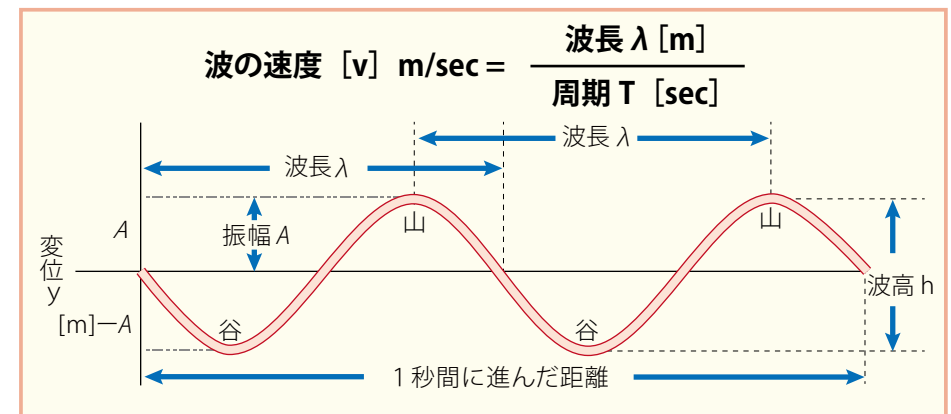


図 55

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。

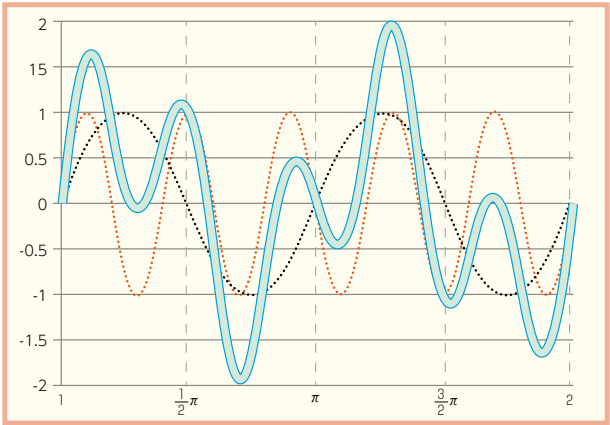


図 56

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。

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

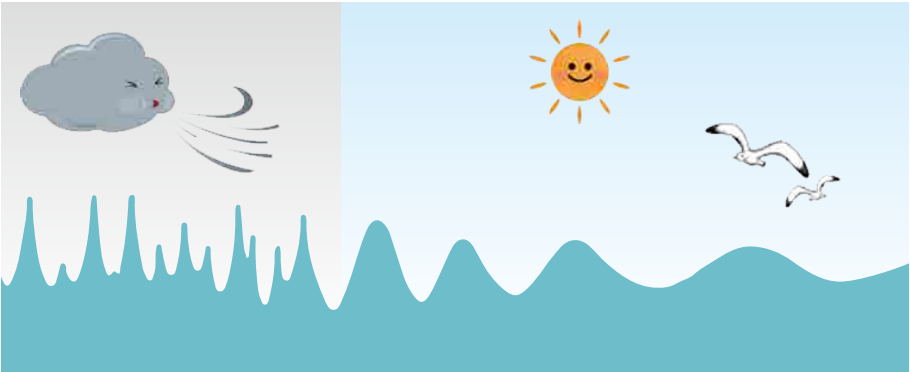
例えば、風浪の波高が 1 m、うねりの波高が 2 m の場合の合成波の波高は 2.236m になります。

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

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。

充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。

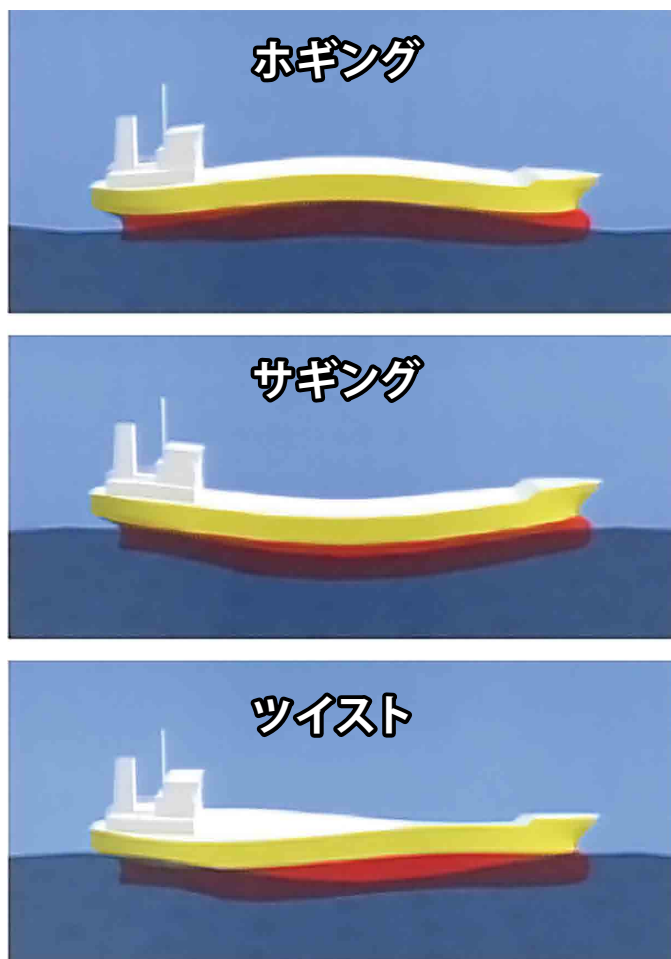


図 58 （出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD）

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）

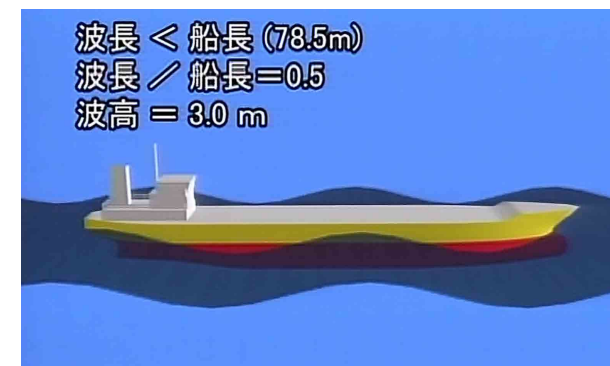


図 59 （出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD）

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）

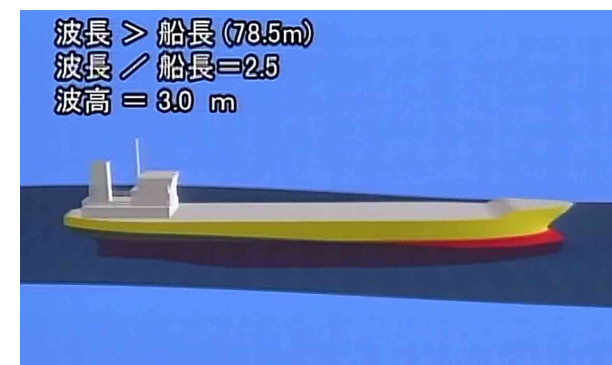


図 60 （出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD）

③ 波長が船の長さ (Lpp) 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)

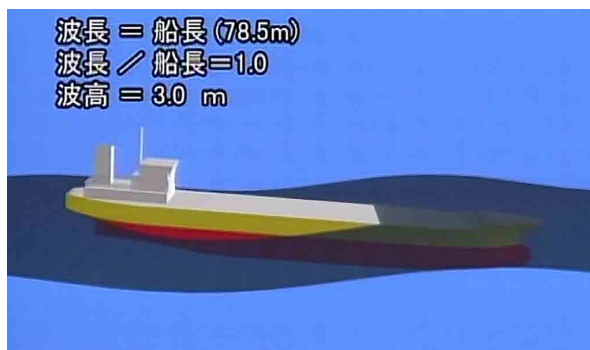
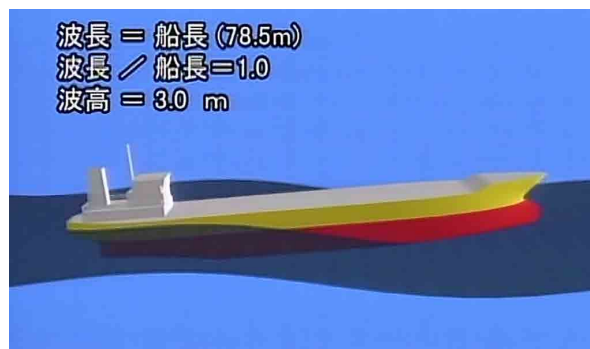


図 61 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

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 (Lpp) 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)。

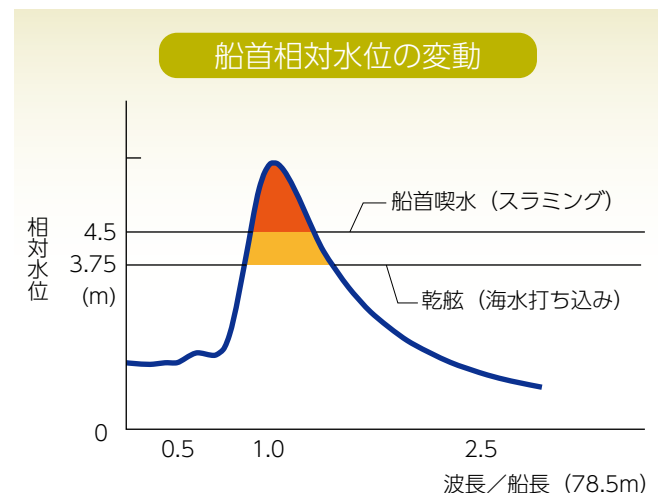


図 62 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

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)

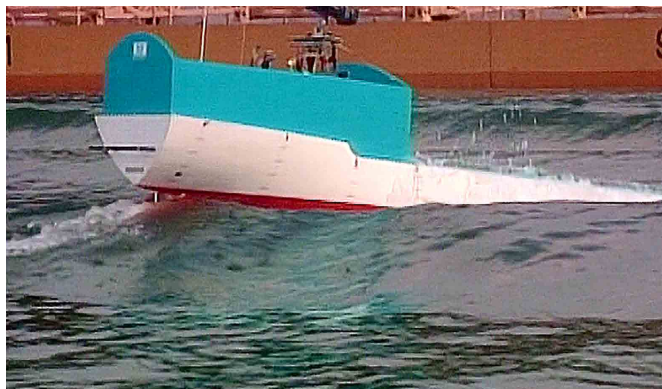


写真 63 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

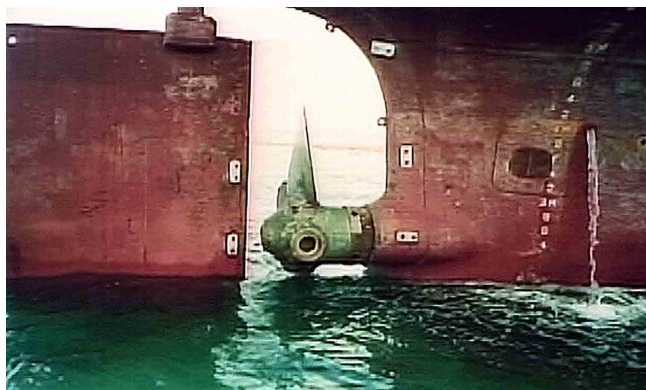


写真 64 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

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)

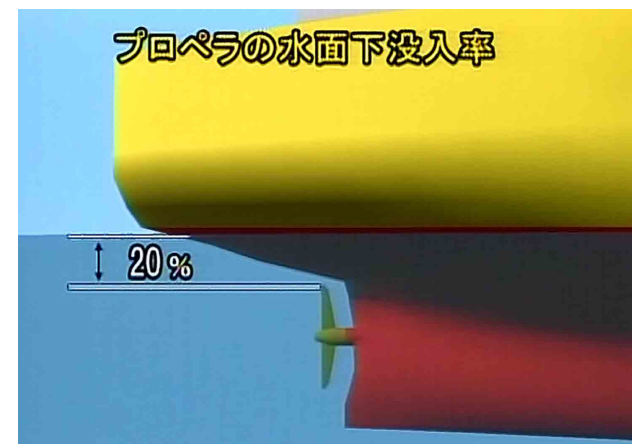


図 65 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

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 6m 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。

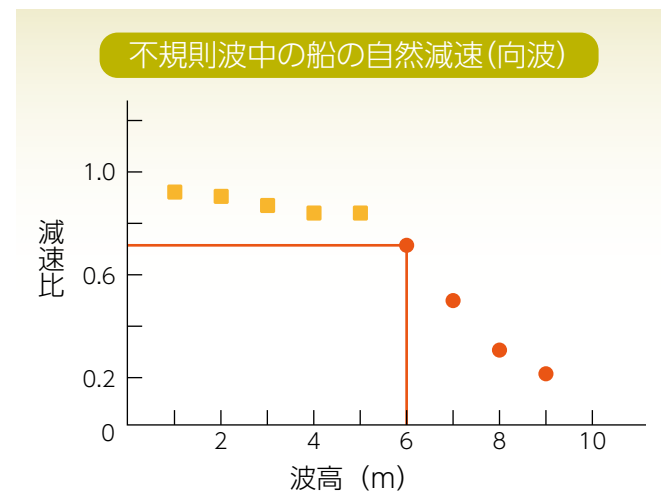


図 66 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

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、船の速度を落とすことが必要です。(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ととえて説明すると、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上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4m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4m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がわかります。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。

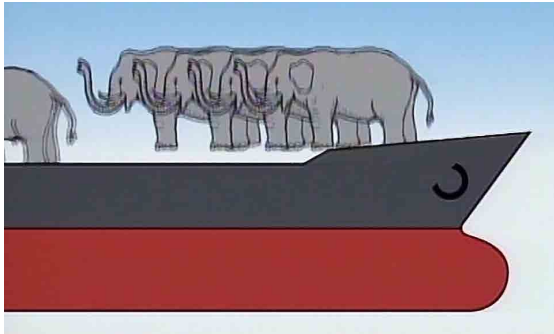


図 73 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

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 G/T	78.5m (Lpp)	12.8 m	7.8m	4.52m 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。

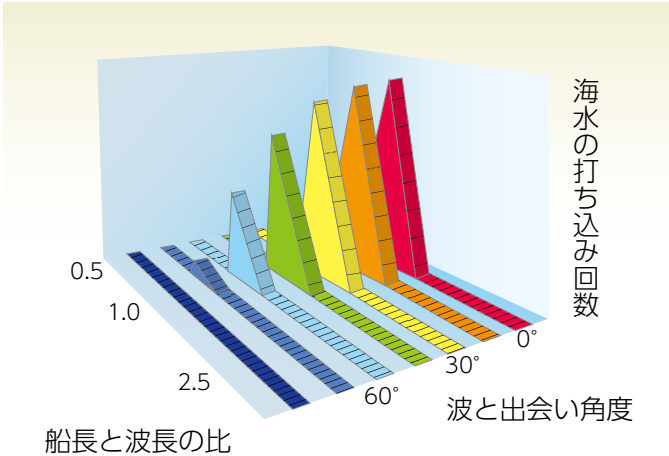


図 74 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

波長と船長 (Lpp) 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 (Lpp) 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 (Lpp) 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 (Lpp) 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。

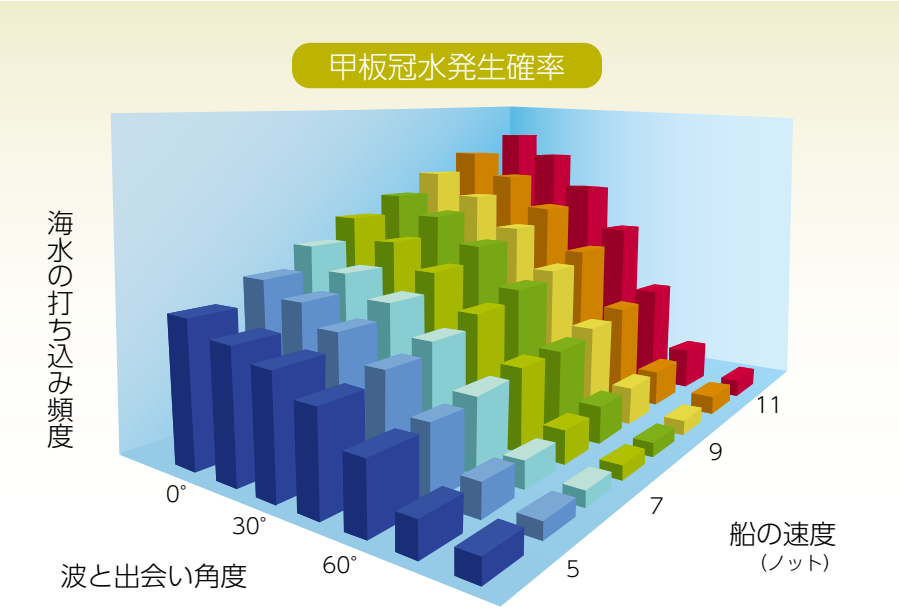


図 77 （出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD）

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。

模型船

海水打ち込み頻度
=10回／時間

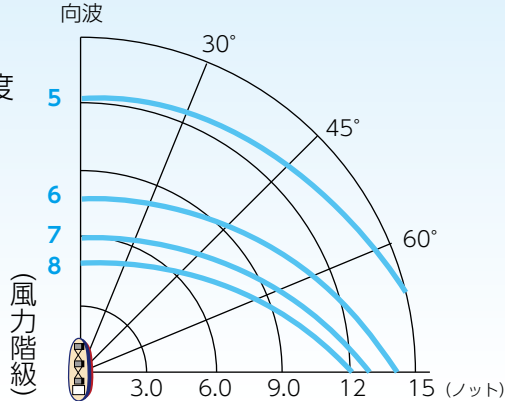


図 78 （出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD）

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）

模型船

海水打ち込み頻度
=10回／時間

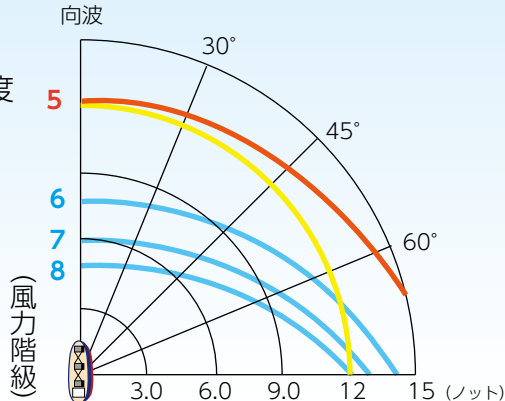


図 80 （出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD）

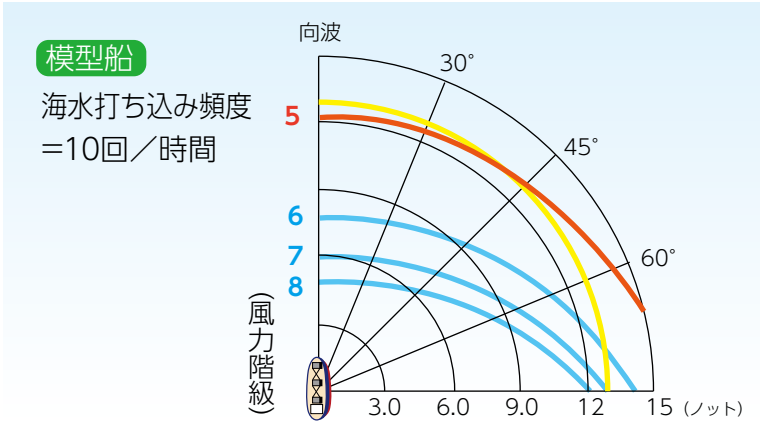


図 81 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

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。

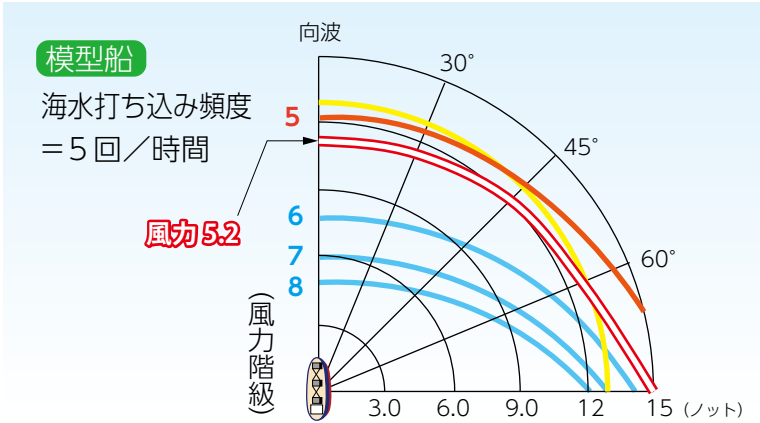


図 82 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

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 万トンの満載の鉾石船では、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)

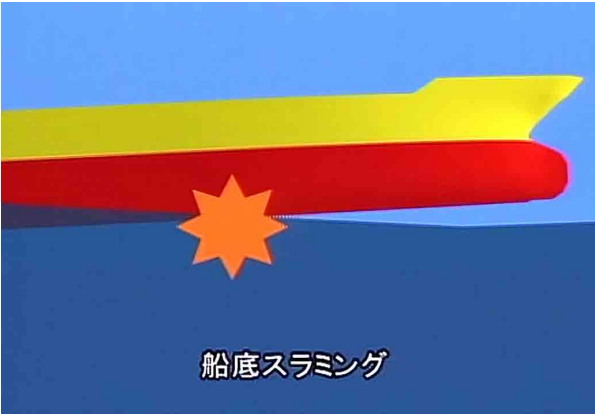


図 84 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

② 船首フレースラミング

海面と船首フレア一部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)

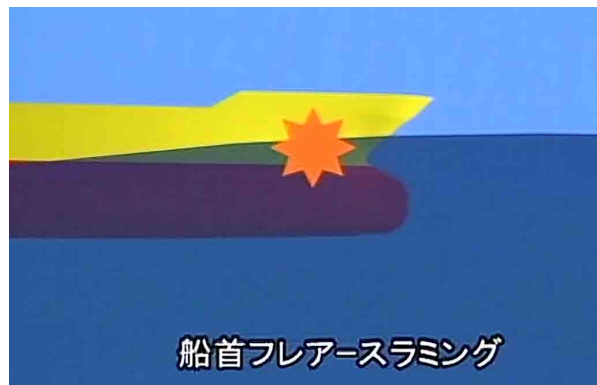


図 85 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

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)

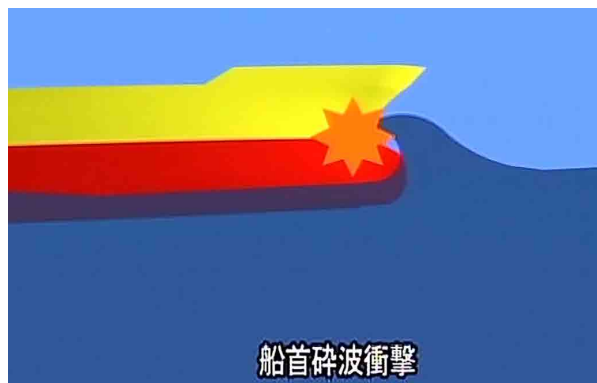


図 86 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

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)

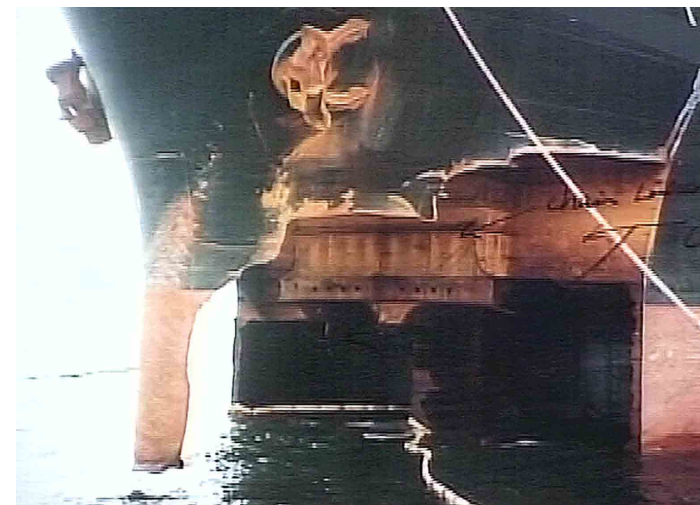


写真 87 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)



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（ L_{pp} ）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 G/T	78.5m (L_{pp})	12.8 m	7.8m	4.52m Even Keel	6	3 m	7.13 秒	79m	11 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）

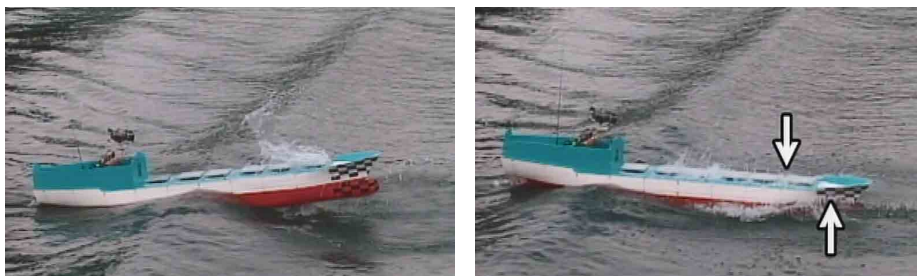


図 89 （出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD）

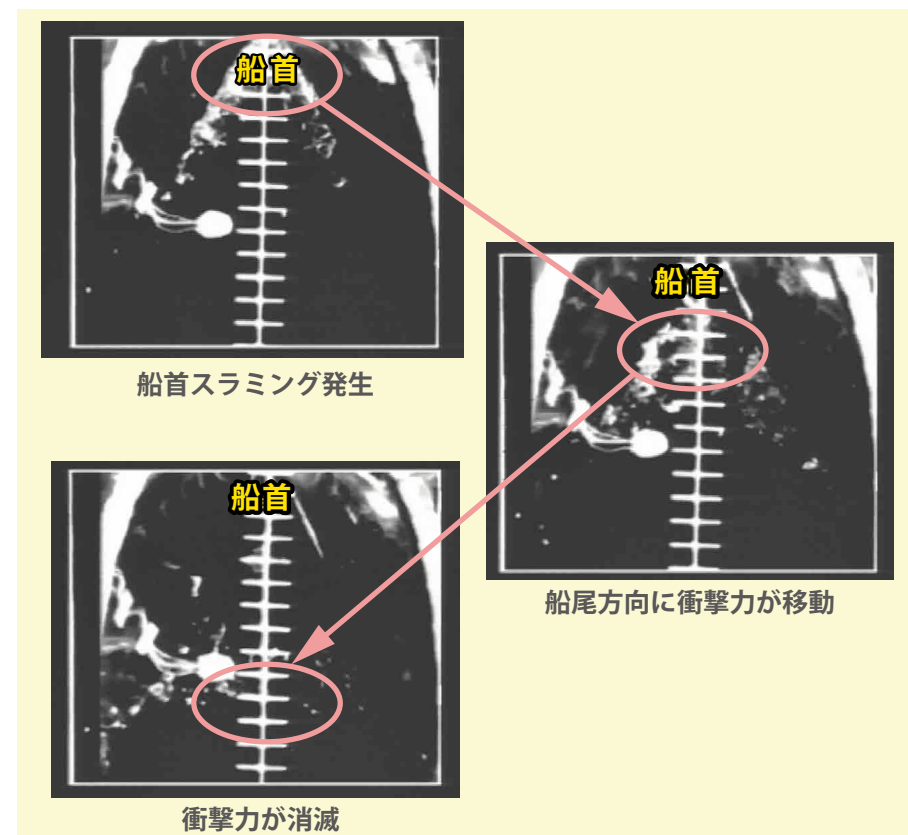


図 90 （出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD）

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。

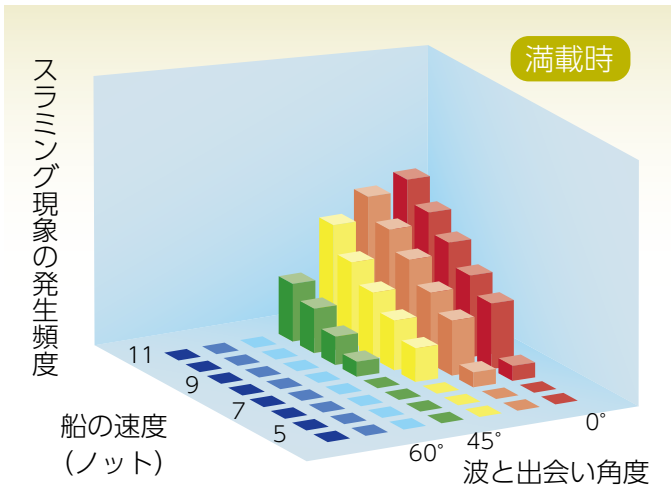


図 91 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

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⇒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⇒c⇒b）を図 93 に示します。それぞれの関係は以下のようになります。

初速 (ノット) : S

減速量 (ノット) : R

変針角度(deg.) : α

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のようになります。

減速して直航した場合の所要時間 (a⇒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 (a⇒c⇒b)

$$\frac{2 \times y}{S} \text{ 時間}$$

所要時間を同じにした場合の変針角 (α) 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

$$\frac{2 \times x}{(S-R)} = \frac{2 \times y}{S}$$
$$\cos \alpha^\circ = \frac{x}{y} = \frac{(S-R)}{S} = 1 - \frac{R}{S}$$

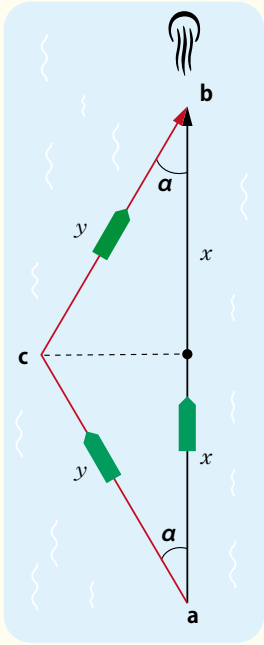


図 93

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 (ノット)	初速 20 ノット		初速 15 ノット	
	減速後速力 (ノット)	変針角 (度)	減速後速力 (ノット)	変針角 (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労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 「出会い群波現象」
2	動揺が次第に大きくなっていく 「パラメトリック横揺れ」
3	波の山が船体中央部に来たときに復原力が減少する 「復原力の減少」
4	船が波乗り状態となり、操船が不能になる 「ブローチング現象」

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

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

出会い角の定義

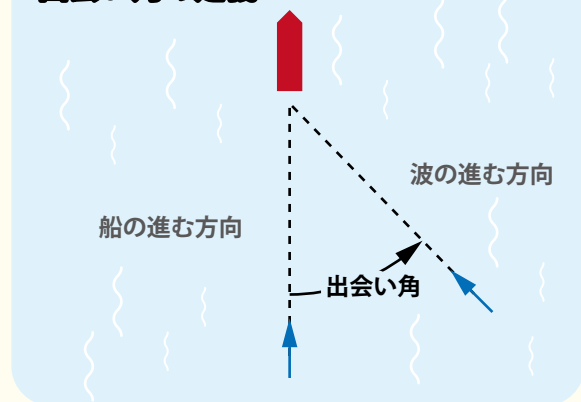


図 95 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVDより加工して作成)

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。

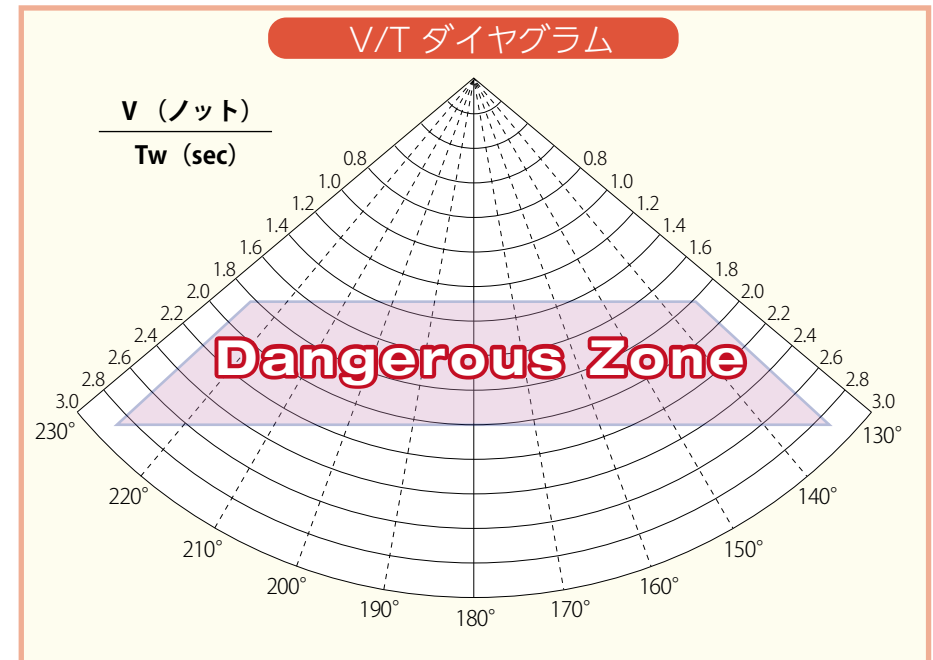


図 96 IMO MSC.1/Circ.1228

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 (Lpp : 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 (Lpp : 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 L_{pp} : 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)

$$\begin{aligned} \textcircled{1} &\Rightarrow 120 \text{ m} \times 0.8 = 96 \text{ m} \leq 126 \text{ m} \\ \textcircled{2} &\Rightarrow 120 \text{ m} \times 0.04 = 4.8 \text{ m} \leq 5 \text{ m} \end{aligned}$$

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度があるので、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

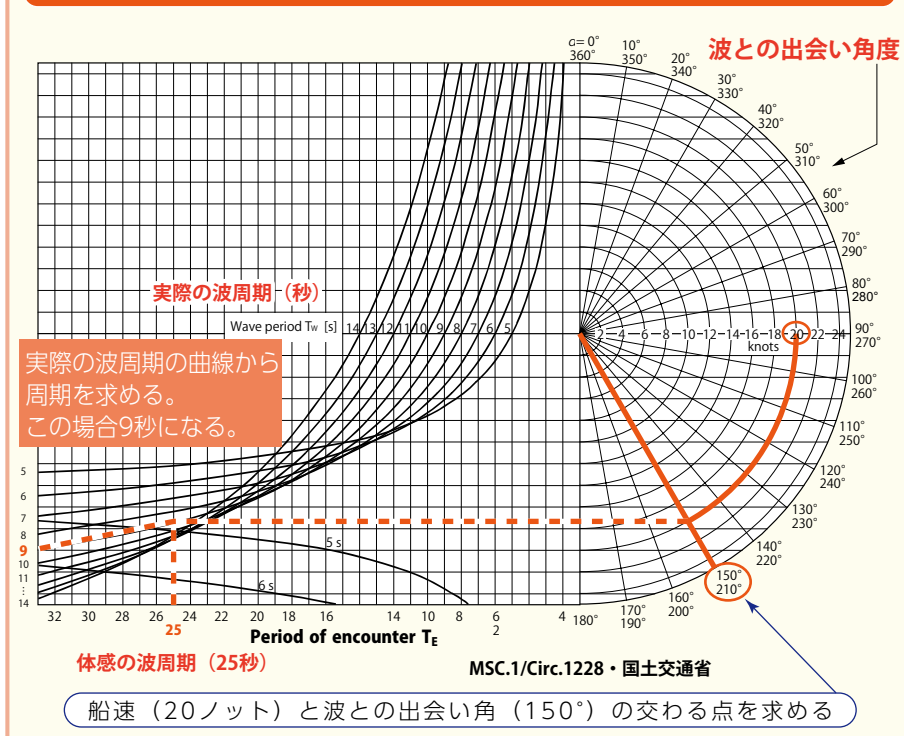


図 98 IMO MSC.1/Circ.1228 および国土交通省海事局「フェリー・RORO 船の安全対策について」(平成 23 年 4 月 28 日)

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、 $1.56 \times 9 \times 9 = \text{波長 } 126 \text{ m}$ 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)

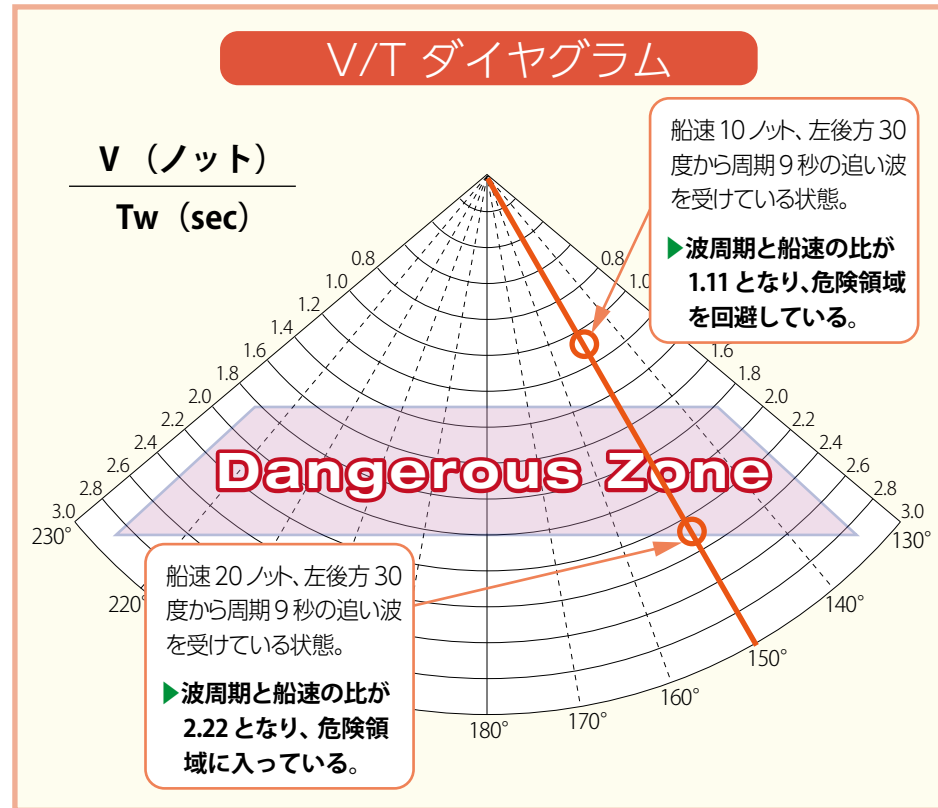


図 100 IMO MSC.1/Circ.1228 および国土交通省海事局「フェリー・RORO 船の安全対策について」
(平成 23 年 4 月 28 日)

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)

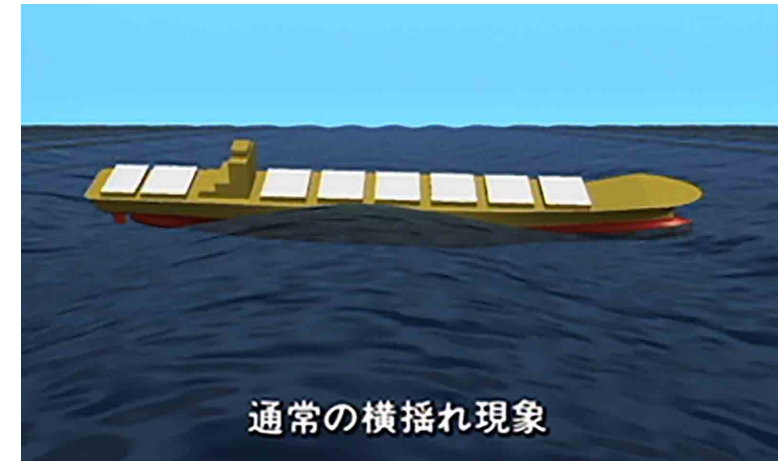


図 101 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

パラメトリック横揺れが起こると、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)

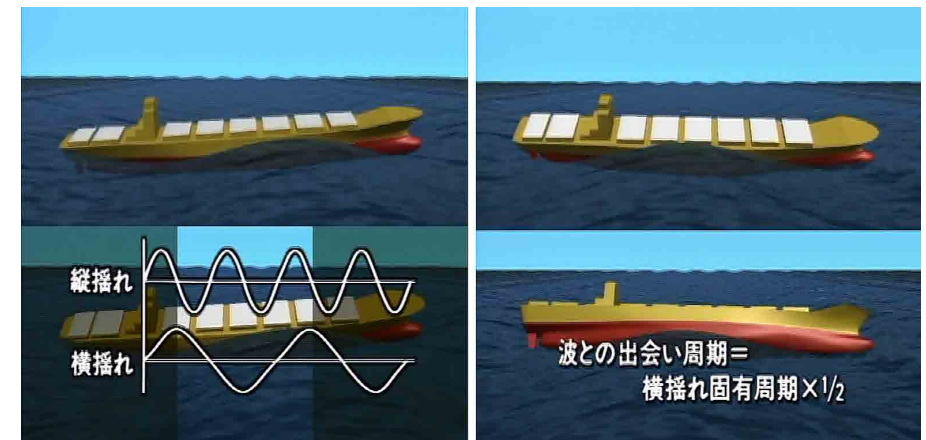


図 102 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

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)

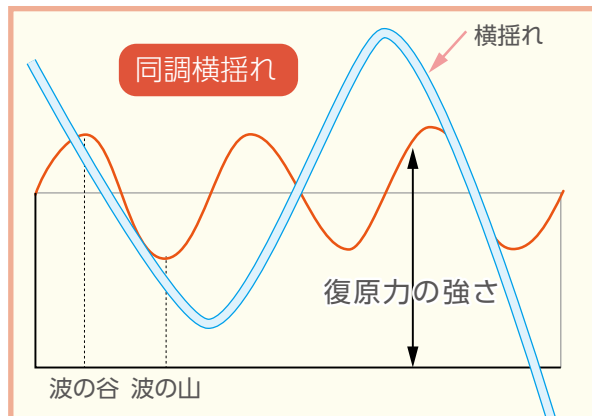


図103

7-2-3 復原力の減少

最初に復原力について解説します。

=復原力=

船が静水中に安定して水に浮かんでいる場合、船の重心Gから下に働く重力と船の浮心Bから上に働く浮力が同じ線上にあり、同じ大きさになっています。(図104)

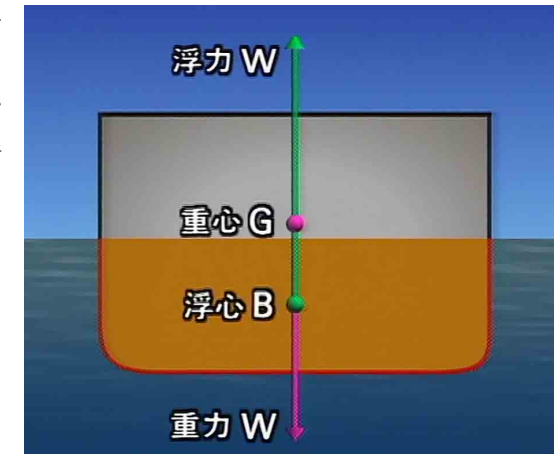


図104 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

船が外力のために傾くと、船の重心Gの位置は変わりませんが、浸水部の形状が変化するので、浮心Bは浸水部形状の中心に移動します。すると、今まで同じ線上にあった重力と浮力の方向に食い違いが生じます。(図105)

この食い違った浮力線と船体中心線の交わる点Mをメタセンターといい、重心GからこのMまでの長さをGMといいます。このGMの大きさが船の安定性

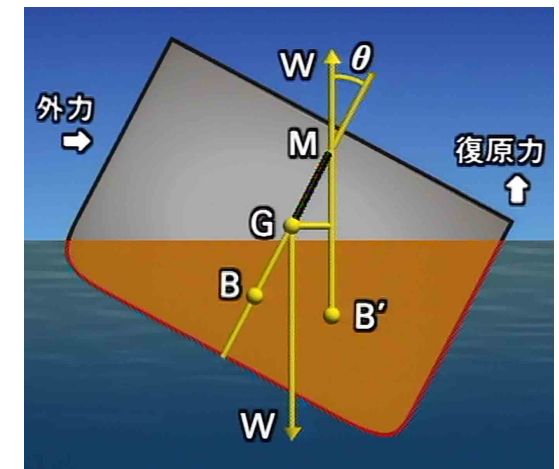


図105 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

や復原力に影響します。

重心 G から傾斜したときの浮力線に延ばした垂線と浮力線の交点を Z とすると、復原力の大きさは、浮力と重力の線の間隔 GZ の長さ（復元てこ）で表されます。

この GZ は、 $GM \times \sin \theta$ （ θ ：傾斜角度）で求められます。（図 106）復原力は次の計算式で求めることができます。

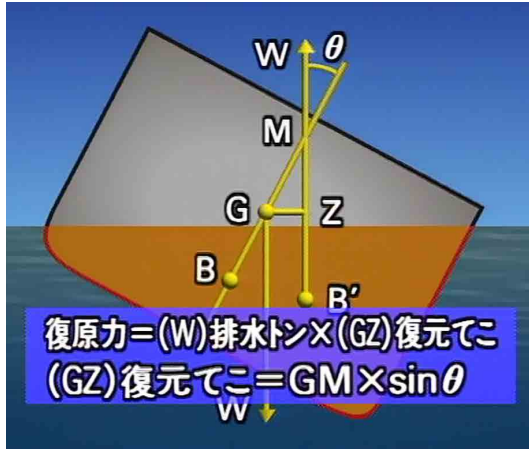


図 106 （出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD）

$$\text{復原力} = \text{排水トン (W)} \times \text{復元てこ (GZ)}$$

また、復原力と密接な関係にある GM と船の固有横揺れ周期（T）には次のような関係があります。（式 107）

$$GM = \frac{4\pi^2 \times K^2}{g \times T^2}$$

$$\div 0.64 \times \frac{B^2}{T^2}$$

$$T \div \frac{0.8 \times B}{\sqrt{GM}}$$

T：動揺周期（sec）

K：環動半径（大型船の場合 $\div 0.4B$ ）m

B：船の幅（m）

g：重力加速度（ 9.8m/sec^2 ）

式 107

バルカーで撒積貨物を積載した場合やタンカーのように液体貨物を積載する船では、積み付けソフトで求めた計算 GM と実際の GM にはほとんど差はありません。

しかし、コンテナ船のように実際の貨物重量が申告重量と異なるような場合では、ターミナルから提供された貨物情報を使用して求めた計算 GM と、実際の GM が大きく異なる場合があります。

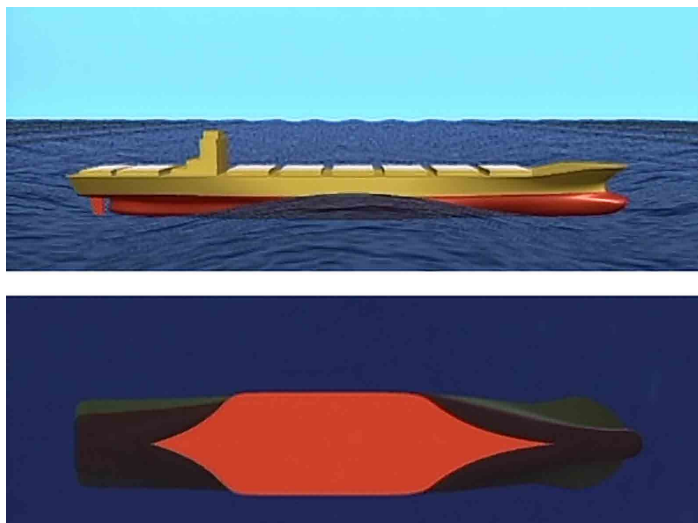
* 2016 年 7 月より、外航コンテナ船では重量の誤申告を規制するため、VGM（Verified Gross Mass：確認された総重量）により、貨物重量の確定方法が規定されました。

コンテナ船のように寄港地が多い場合では、港ごとの「申告重量」と「実際の重量の差」を喫水から読み取り、データを蓄積し、経験値から、Stability 計算（出港予想喫水、強度、GM の計算）を行い、その誤差を盛り込むために、まずはターミナル提供の貨物情報で最初に計算します。その後、経験値によるコンテナ 1 本当たりの差額などに本数を掛けた数値を、船体重心 G の至近の甲板積 1 段目に意図的に入力し、安全サイドで出港予想喫水や GM を計算していました。

出港後、各当直航海士に横揺れ周期を計測させ、GM・横揺れ周期表（青図で造船所から提供されています）から実際の GoM（タンク内の自由表面を持つ液体による GM の減少も加味したもの）を把握していました。

= 追い波による復原力の減少 =

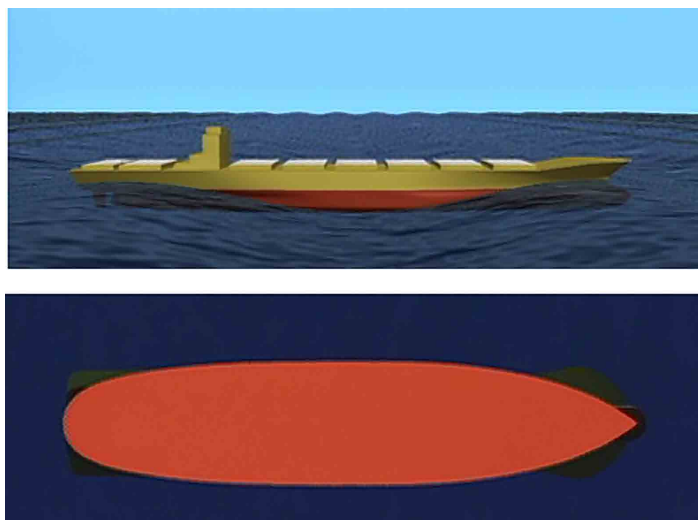
静水中の復原力の大きさは上記で確認できますが、実際の復原力は一般的に水線面積の大きさでまします。例えば、船の長さと同じ長さの波を考えた場合、波の山が船体の中央部に来たときは、船首と船尾では水面が下がって水線面積が小さくなって復原力の減少が発生します。（図 108）



波の山が船体中央 水線面積 ▶ 小 ▶ 復原力減少

図 108 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

一方、波の谷が船体中央部に来たときには、船首と船尾では水面が上がって水線面積は大きくなるので復原力は増大します。(図 109)



波の谷が船体中央 水線面積 ▶ 大 ▶ 復原力増

図 109 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

このような復原力が減少した状態は、向い波のなかでも発生しますが、ごく短時間ですむので問題になりません。しかし、船が波と一緒に走る追い波中では、この状態が長く続くことになって危険です。(図 110)

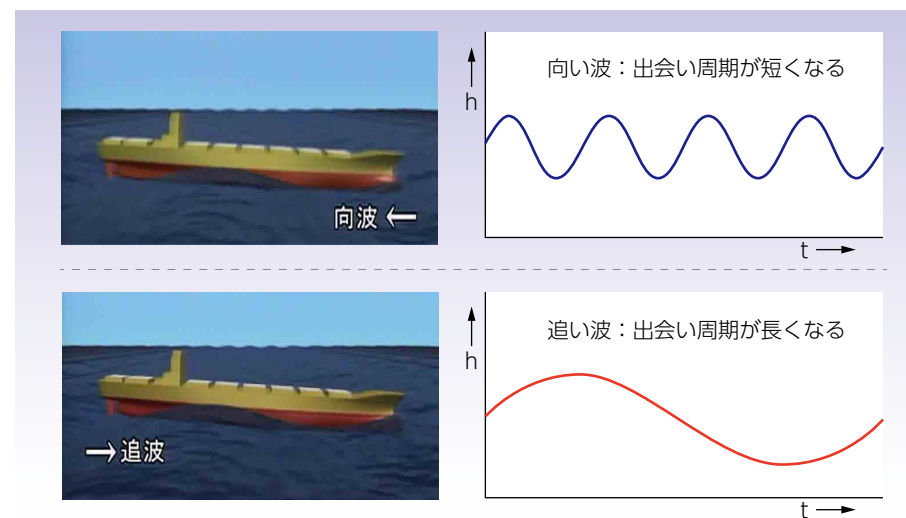


図 110 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

図 111 は、コンテナ船の復原力の増減を示したものです。波の山で復原力が極端に減少することがわかります。

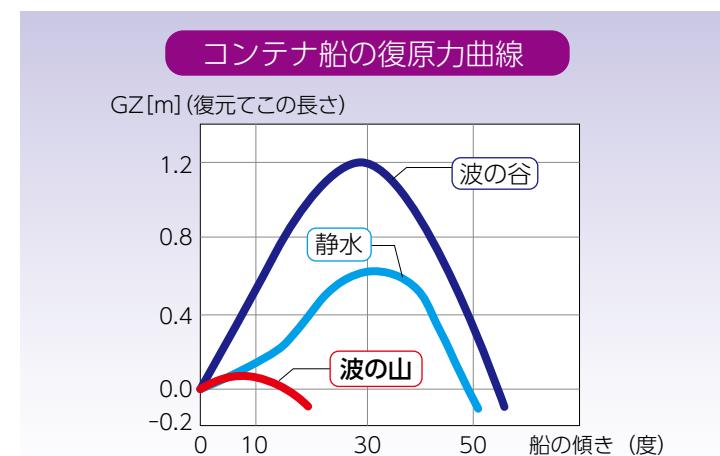


図 111 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

このような復原力の減少は、コンテナ船、漁船、レジャーボートのようなやせ形でフレアーの大きな船で著しく、タンカーやバルカーのような肥大船ではほとんど発生しません。(図 112)

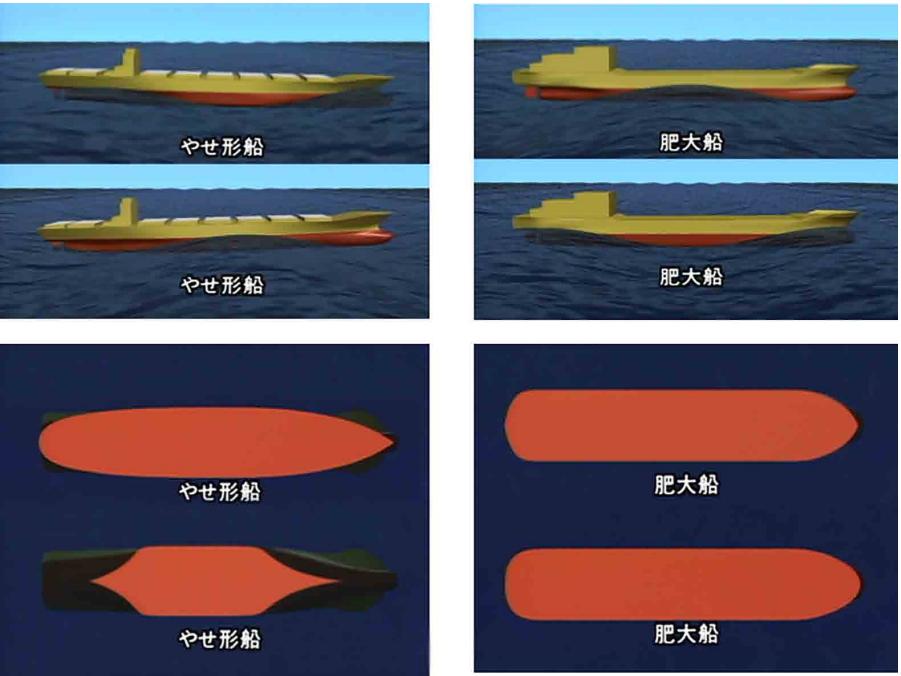


図 112 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

こうした復原力の減少は、船の速度と波の進む速度が同じ程度で、波の山が船体中央に留まると危険が増大します。図 113 は、コンテナ船を想定した模型船の転覆実験の統計グラフです。危険な出会い群波現象の起こる条件 $V/T = 1.5$ を中心に、転覆が発生していることがよくわかります。

(想定船の大きさ)

長さ	幅	深さ	喫水
150.0m	27.2m	13.5m	8.5m

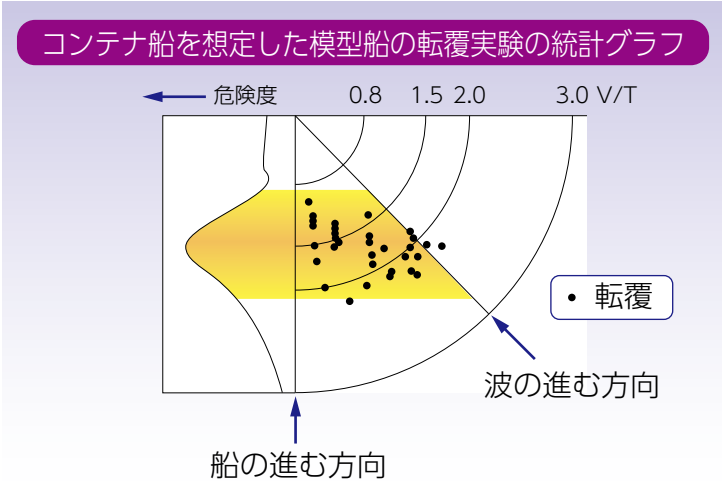


図 113 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

また、図 114 は同じ模型船で速力 22 ノットを想定して、追い波の出会い角度を変えて転覆頻度をまとめたものです。波の角度が後方より 10 度から 50 度の範囲で転覆が発生しています。特に、波の角度が後方より 20 度から 40 度の範囲が危険であることがわかります。

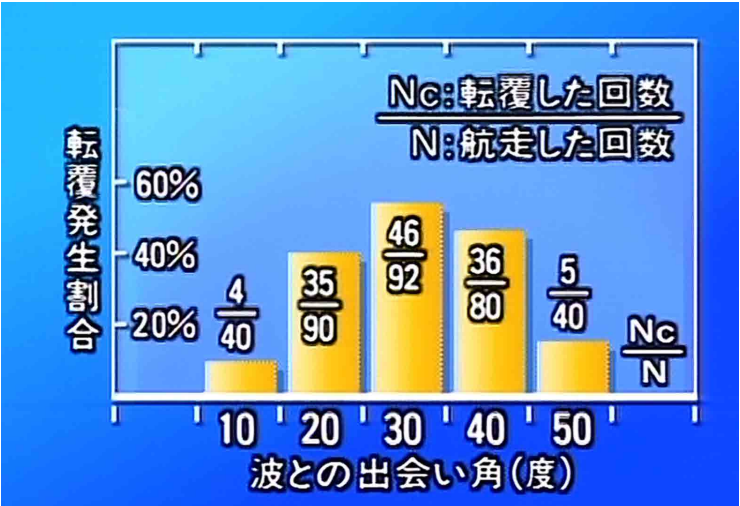


図 114 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

船の速度を変えて復原力減少による転覆割合がどのように変化したのかを、過去の実験データから見ると、高速で航行するほど危険は増し、速度を下げれば転覆発生の割合が減少していることがわかります。(図 115)

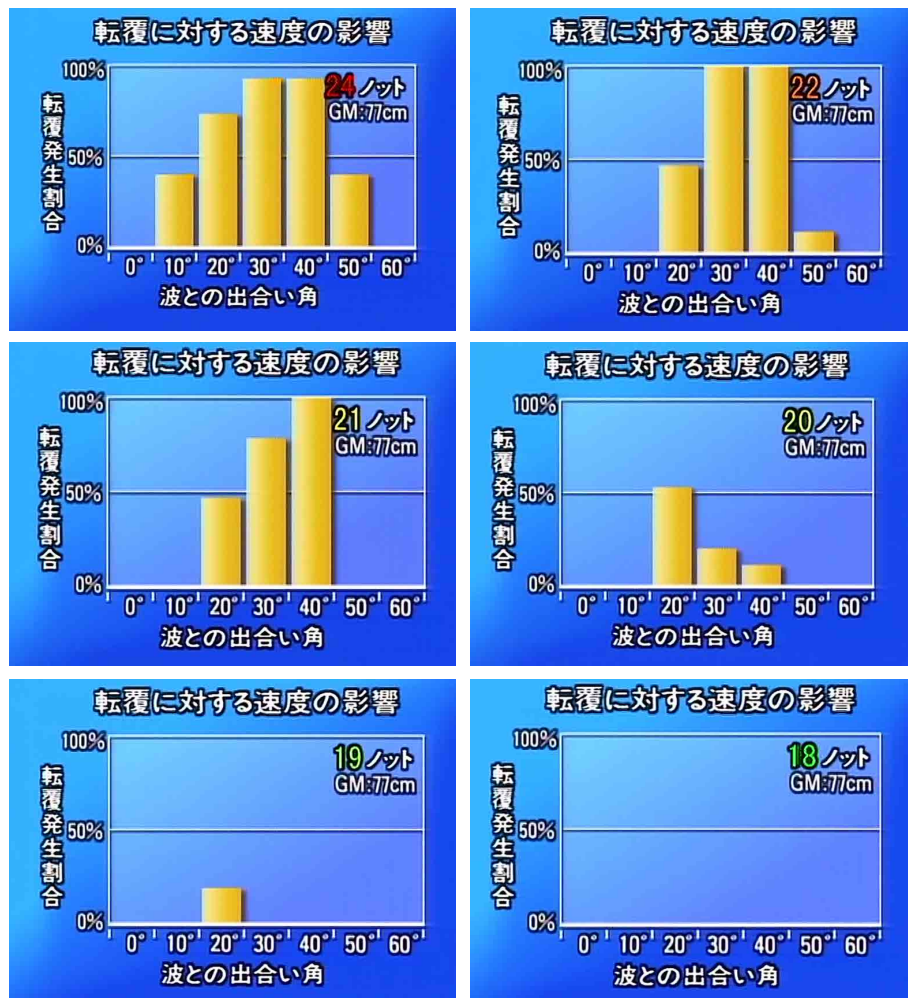


図 115 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

＝追い波による復原力減少対策＝

出合い角度を 20～40 度にしないように変針することで、転覆する可能性も小さくなりますが、そうした状況になる前に、前述したように船体中央部に波の山が留まらないようにするための減速が有効です。

7-2-4 波乗り(ブローチング)現象

ブローチング現象は、波の速度が船速と同じ、または早い場合の追い波中を航行したときに、波の下り斜面で加速されて波乗り状態となって操舵不能に陥る現象です。操舵不能になるため、船の急激な回頭運動が起こり、その遠心力と横波を受けて瞬時に転覆する非常に危険な現象です。

図 116 は、横軸に模型船のプロペラ回転数を、縦軸に模型船の速度を示しています。波のない状態でプロペラの回転数を上げていくと速度はこうに変わっていきます。回転数と速力は比例しますが、スリップがあるので、緩い曲線になります。

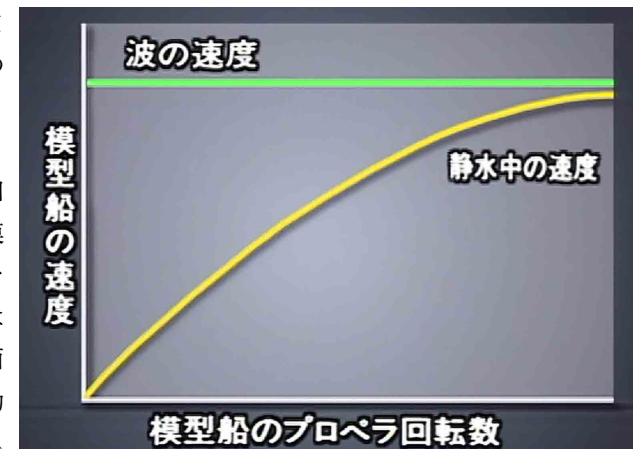


図 116 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

追い波の中でプロペラ回転数を上げていくと、模型船の速度は波の影響を受けて波の上り斜面では減速され、波の下り斜面では加速されて速度変動が発生します(青色領域)。プロペラ回転数の上昇とともに、速度変動の大きさは大きくなっていきます。(図 117)

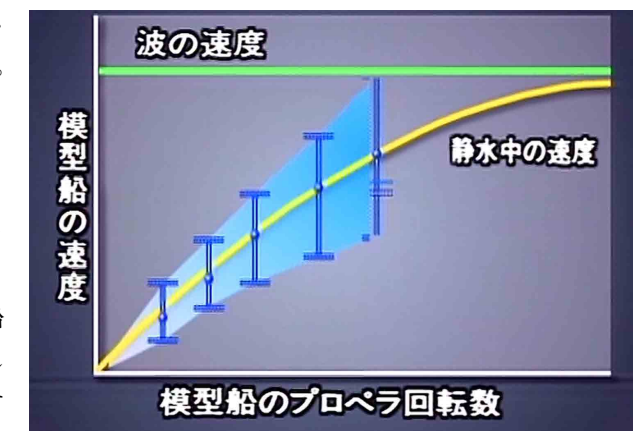


図 117 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

ところが、あるプロペラ回転数のところで、突然、速度変動が消え、模型船の速度が不連続に上昇していることがわかります(オレンジ色の部分)。す

なわち、模型船の速度変動の最大値が波の速度に達すると、波乗り現象が発生します。(図 118)

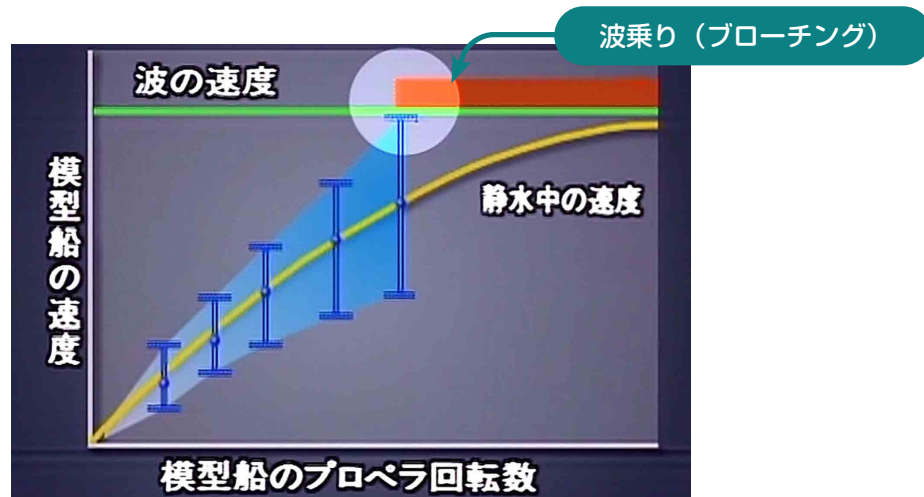


図 118 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

図 119～図 121 は、縦軸に船速、横軸に時間を取り、追い波を受けて航行した場合の「速力変動の一定時間内における変化」を示しています。波の上り斜面で速力が減少し、波の下り斜面では速度が上がっています。

図 119 は速力が遅い場合の速力変動です。変動は小刻みで正弦波を示しています。



図 119 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

速力が上がるにつれて、波の速度に近づいてくるので、速力変動の回数が減っていきます。(図 120、121)

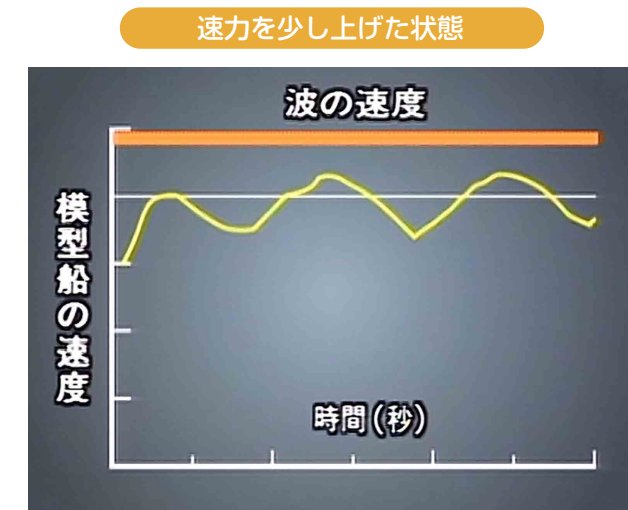


図 120 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

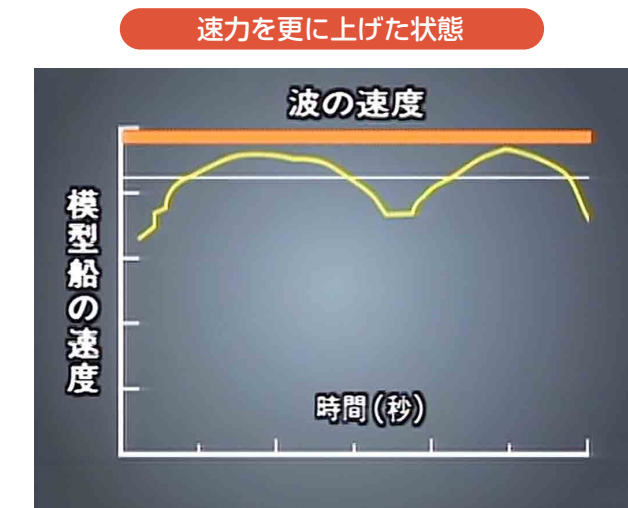


図 121 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

図 122 に示すように、波の速度に船速が近づくと、波の下り斜面で加速されている

時間も長くなる一方、波の上り斜面で減速している時間の割合が減っていきます。

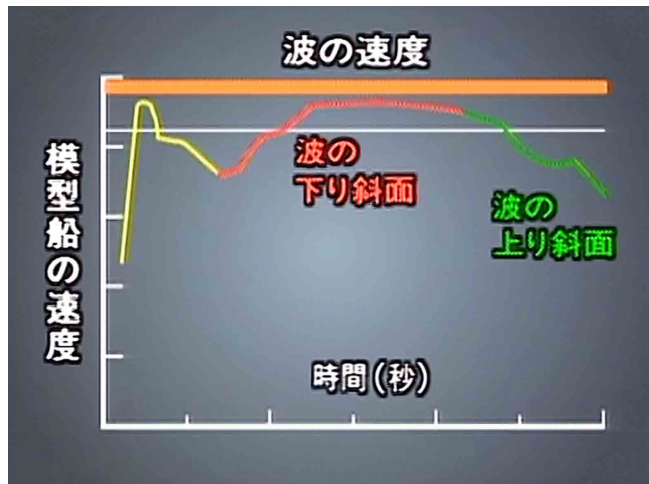


図 122 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

更に船速を上げると、波乗り状態（ブローチング状態）となり、速度の変動もなくなります。波乗りに移行する様子がわかります。(図 123)

波乗り（ブローチング）状態に移行

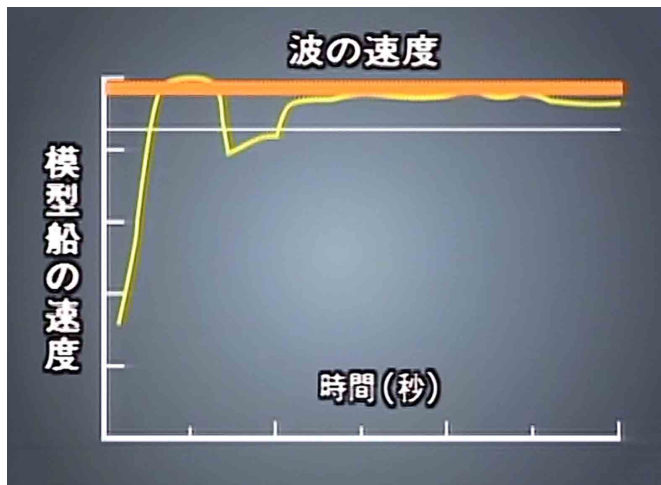


図 123 (出典：一般社団法人 日本船主協会 DVD)

波乗り（ブローチング）を避けるためには、それが発生する限界速度を知る必要があります。その限界速度は、波長・波向により変化しますが、下記で計算される船速が限界速度（式 124）として MSC.1/Circ. 1228 の 4.2.1 で指針として示されています。

ブローチング発生 **限界速度**（ノット）＝

$$1.8 \times \sqrt{\text{船の長さ (Lpp: 垂線間長)} \div \cos(180 - \alpha)}$$

$$\alpha \text{ の範囲: } 135^\circ < \alpha < 225^\circ$$

式 124

したがって、波乗り（ブローチング）を避けるためには、船の速度を $1.8 \times \sqrt{\text{船の長さ (Lpp)}}$ よりも遅くしなければなりません。

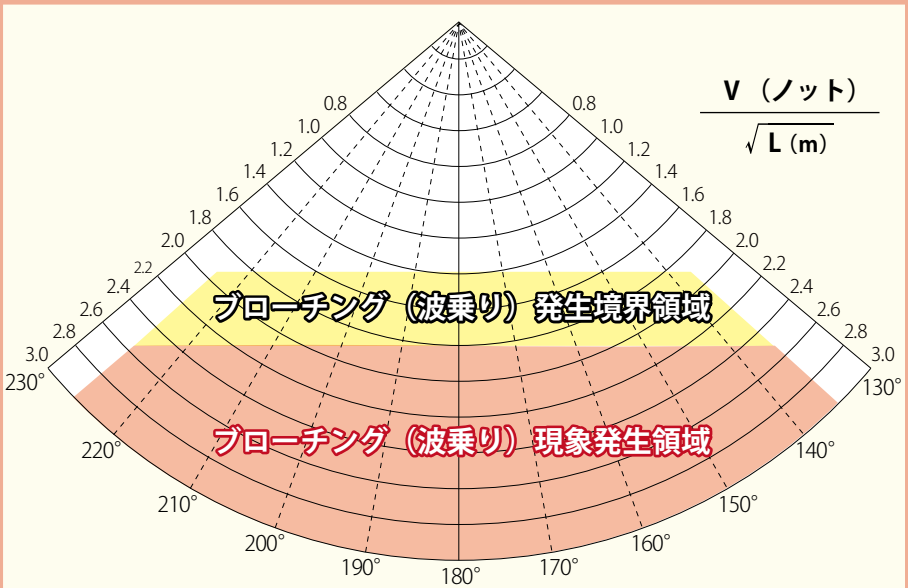
MSC.1/Circ. 1228 では削除されていますが、改正前の MSC.1/Circ. 707 (19 October 1995) の中では、「ブローチング発生領域」と波乗りまでには至らないものの、ブローチングを発生させる恐れがある、大きな速力変動を避けるための「ブローチング境界領域」を、以下の計算式（式 125）で示しています。安全を考えれば、この領域にも入り込まないようにすることが必要です。

ブローチング発生 **境界速度**（ノット）＝

$$1.4 \times \sqrt{\text{船の長さ (Lpp: 垂線間長)} \div \cos(180 - \alpha)}$$

式 125

MSC.1/Circ.1228 の 4.2.1 では「ブローチング発生領域」を図 126（ピンク色の領域）で紹介しています。これに MSC.1/Circ. 707 (19 October 1995) で示されている「ブローチング境界領域：黄色の領域」を追記して示します。



ブローチング発生 **限界速度** (ノット) = $1.8 \times \sqrt{\text{船の長さ (Lpp: 垂線間長)}} \div \cos(180 - \alpha)$

ブローチング発生 **境界速度** (ノット) = $1.4 \times \sqrt{\text{船の長さ (Lpp: 垂線間長)}} \div \cos(180 - \alpha)$

図 126 MSC.1/Circ. 1228 4.2.1(ブローチング発生境界領域を追記)

表 127 は、波乗り現象などを発生させる船の限界速力を表しています。しかし、表中の船の速力は、波の下り斜面で加速されることも考慮しなければなりません。船長 (Lpp) が 200 m を超える船でも、高速船では波乗り (ブローチング) を発生させる可能性があることに注意が必要です。

ブローチング (波乗り) 現象を発生させる限界速度								
船長 (Lpp: 垂線間長)	10 m	20 m	50 m	70 m	100 m	150 m	200 m	300 m
$1.8 \times \sqrt{Lpp}$	6 ノット	8 ノット	13 ノット	15 ノット	18 ノット	22 ノット	25 ノット	31 ノット
ブローチング (波乗り) 現象を発生させるおそれがある境界速度								
$1.4 \times \sqrt{Lpp}$	4 ノット	6 ノット	10 ノット	12 ノット	14 ノット	17 ノット	20 ノット	24 ノット

表 127

また、浅い海では船の速度が遅くても波乗り現象は発生します。すなわち、港に近いような浅い海では波の速度が遅くなるため、船が減速したとしても波の速度に近づきやすくなるからです。レジャーボート、高速化した漁船は特に注意が必要です。

7-2-5 追い波荒天対策

荒天向い波対策としては減速が有効な手段でしたが、追い波荒天の中では前述したような現象が発生し、大幅な変針と減速の組み合わせが必要です。さらに、変針する場合でも舵効力が落ちているので難しい操船が求められます。

特に、風浪と複数の長大なうねりを後方から受ける場合では、船体動揺がどの風浪や、どの方向のうねりによってもたらされているのかなどを的確に判断し、さらに風浪やうねりの波長、波高、周期、速度も正確に把握して対策を講じなければなりません。その前に、前述したような現象に陥ることのないように、これらの事態を避けるための操船を早めに行うことが求められます。

第八章 おわりに

向い波や追い波といった荒天域を航行することが予想される場合、船長は可能な限り多くの気象・海象情報を入手し、到着予定時刻（ETA）や燃料消費量、荒天による貨物損傷の可能性なども十分勘案して最適航路を選定する責任があります。傭船者は本船採算を向上させるために、スケジュール確保を依頼しながら、一方では燃料消費量を最小限とするように依頼してきます。

当然のことながら、安全性を考慮した最終航路選定は船長判断になります。傭船者、船主、船舶管理会社、推薦航路提供者と情報を共有して、出港前、或いは、荒天域に突入する前に本船運航のフロントラインに立つ船長の意見・意図を十分尊重し、関係者の合意を取りつけて航路選定を行うことが必要です。

近年では気象・海象予測の精度はかなり向上していますが、それでも 100% 確実な気象・海象予測はできていません。当然のことですが迂回航路を選定したにもかかわらず、結果として予測が外れて短距離航海のルートがひどい荒天航海に至らなかったという事態もあります。しかし、その原因は気象・海象であり、航海終了後の結果論で判断や評価をしないといったことも、傭船者や船主・船舶管理会社といった陸上関係者には求められます。

添付資料： MSC.1/Circ. 1228（11 January 2007）を掲載

参考文献

- MSC.1/Circ. 1228（11 January 2007）： 添付資料
imo.udhb.gov.tr/dosyam/EKLER/1228.pdf
- 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）
<http://www.mlit.go.jp/common/000144432.pdf>
- 一般社団法人 日本船長協会 DVD
荒天追波中の運航方法
荒天向波中の運航方法
日本近海の気象・海象及び主要港湾等の特徴
図や写真の多くは上記 DVD の映像を使用させていただきました。深謝申し上げます。
- 気象庁ホームページ
<https://www.jma.go.jp/jma/index.html>
参考図や解説について気象庁のホームページ資料を使用させていただきました。深謝申し上げます。
- 成山堂書店「新 百万人の天気教室」 白木正規 著
- 日本気象協会ホームページ <http://www.jwa.or.jp/>

添付資料：MSC.1/Circ. 1228 (11 January 2007) を掲載

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION
4 ALBERT EMBANKMENT
LONDON SE1 7SR

Telephone: 020 7735 7611
Fax: 020 7587 3210



IMO

E

Ref. T1/2.04

MSC.1/Circ.1228
11 January 2007

REVISED GUIDANCE TO THE MASTER FOR AVOIDING DANGEROUS SITUATIONS IN ADVERSE WEATHER AND SEA CONDITIONS

1 The Maritime Safety Committee, at its eighty-second session (29 November to 8 December 2006), approved the Revised Guidance to the master for avoiding dangerous situations in adverse weather and sea conditions, set out in the annex, with a view to providing masters with a basis for decision making on ship handling in adverse weather and sea conditions, thus assisting them to avoid dangerous phenomena that they may encounter in such circumstances.

2 Member Governments are invited to bring the annexed Revised Guidance to the attention of interested parties as they deem appropriate.

3 This Revised Guidance supersedes the Guidance to the master for avoiding dangerous situations in following and quartering seas (MSC/Circ.707).

I:\CIRC\MSC\01\1228.doc

MSC.1/Circ.1228

ANNEX

REVISED GUIDANCE TO THE MASTER FOR AVOIDING DANGEROUS SITUATIONS IN ADVERSE WEATHER AND SEA CONDITIONS

1 GENERAL

1.1 Adverse weather conditions, for the purpose of the following guidelines, include wind induced waves or heavy swell. Some combinations of wave length and wave height under certain operation conditions may lead to dangerous situations for ships complying with the IS Code. However, description of adverse weather conditions below shall not preclude a ship master from taking reasonable action in less severe conditions if it appears necessary.

1.2 When sailing in adverse weather conditions, a ship is likely to encounter various kinds of dangerous phenomena, which may lead to capsizing or severe roll motions causing damage to cargo, equipment and persons on board. The sensitivity of a ship to dangerous phenomena will depend on the actual stability parameters, hull geometry, ship size and ship speed. This implies that the vulnerability to dangerous responses, including capsizing, and its probability of occurrence in a particular sea state may differ for each ship.

1.3 On ships which are equipped with an on-board computer for stability evaluations, and which use specially developed software which takes into account the main particulars, actual stability and dynamic characteristics of the individual ship in the real voyage conditions, such software should be approved by the Administration. Results derived from such calculations should only be regarded as a supporting tool during the decision making process.

1.4 Waves should be observed regularly. In particular, the wave period T_w should be measured by means of a stop watch as the time span between the generation of a foam patch by a breaking wave and its reappearance after passing the wave trough. The wave length λ is determined either by visual observation in comparison with the ship length or by reading the mean distance between successive wave crests on the radar images of waves.

1.5 The wave period and the wave length λ are related as follows:

$$\lambda = 1.56 \cdot T_w^2 \text{ [m]} \text{ or } T_w = 0.8\sqrt{\lambda} \text{ [s]}$$

1.6 The period of encounter T_e could be either measured as the period of pitching by using stop watch or calculated by the formula:

$$T_e = \frac{3T_w^2}{3T_w + V\cos(\alpha)} \text{ [s]}$$

where V = ship's speed [knots]; and

α = angle between keel direction and wave direction ($\alpha = 0^\circ$ means head sea)

1.7 The diagram in figure 1 may as well be used for the determination of the period of encounter.

I:\CIRC\MSC\01\1228.doc

MSC.1/Circ.1228
ANNEX
Page 2

1.8 The height of significant waves should also be estimated.

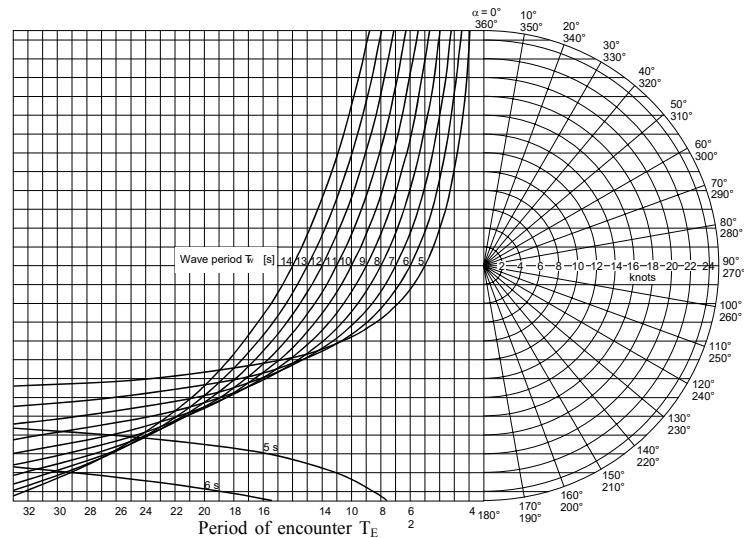


Figure 1: Determination of the period of encounter T_E

2 CAUTIONS

2.1 It should be noted that this guidance to the master has been designed to accommodate for all types of merchant ships. Therefore, being of a general nature, the guidance may be too restrictive for certain ships with more favourable dynamic properties, or too generous for certain other ships. A ship could be unsafe even outside the dangerous zones defined in this guidance if the stability of the ship is insufficient. Masters are requested to use this guidance with fair observation of the particular features of the ship and her behaviour in heavy weather.

2.2 It should further be noted that this guidance is restricted to hazards in adverse weather conditions that may cause capsizing of the vessel or heavy rolling with a risk of damage. Other hazards and risks in adverse weather conditions, like damage through slamming, longitudinal or torsional stresses, special effects of waves in shallow water or current, risk of collision or stranding, are not addressed in this guidance and must be additionally considered when deciding on an appropriate course and speed in adverse weather conditions.

2.3 The master should ascertain that his ship complies with the stability criteria specified in the IS Code or an equivalent thereto. Appropriate measures should be taken to assure the ship's watertight integrity. Securing of cargo and equipment should be re-checked. The ship's natural period of roll T_R should be estimated by observing roll motions in calm sea.

I:\CIRC\MSC\01\1228.doc

MSC.1/Circ.1228
ANNEX
Page 3

3 DANGEROUS PHENOMENA

3.1 Phenomena occurring in following and quartering seas

A ship sailing in following or stern quartering seas encounters the waves with a longer period than in beam, head or bow waves, and principal dangers caused in such situation are as follows:

3.1.1 Surf-riding and broaching-to

When a ship is situated on the steep forefront of a high wave in following or quartering sea conditions, the ship can be accelerated to ride on the wave. This is known as surf-riding. In this situation the so-called broaching-to phenomenon may occur, which endangers the ship to capsizing as a result of a sudden change of the ship's heading and unexpected large heeling.

3.1.2 Reduction of intact stability when riding a wave crest amidships

When a ship is riding on the wave crest, the intact stability can be decreased substantially according to changes of the submerged hull form. This stability reduction may become critical for wave lengths within the range of $0.6 L$ up to $2.3 L$, where L is the ship's length in metres. Within this range the amount of stability reduction is nearly proportional to the wave height. This situation is particularly dangerous in following and quartering seas, because the duration of riding on the wave crest, which corresponds to the time interval of reduced stability, becomes longer.

3.2 Synchronous rolling motion

Large rolling motions may be excited when the natural rolling period of a ship coincides with the encounter wave period. In case of navigation in following and quartering seas this may happen when the transverse stability of the ship is marginal and therefore the natural roll period becomes longer.

3.3 Parametric roll motions

3.3.1 Parametric roll motions with large and dangerous roll amplitudes in waves are due to the variation of stability between the position on the wave crest and the position in the wave trough. Parametric rolling may occur in two different situations:

- 1 The stability varies with an encounter period T_E that is about equal to the roll period T_R of the ship (encounter ratio 1:1). The stability attains a minimum once during each roll period. This situation is characterized by asymmetric rolling, i.e. the amplitude with the wave crest amidships is much greater than the amplitude to the other side. Due to the tendency of retarded up-righting from the large amplitude, the roll period T_R may adapt to the encounter period to a certain extent, so that this kind of parametric rolling may occur with a wide bandwidth of encounter periods. In quartering seas a transition to harmonic resonance may become noticeable.
- 2 The stability varies with an encounter period T_E that is approximately equal to half the roll period T_R of the ship (encounter ratio 1:0.5). The stability attains a minimum twice during each roll period. In following or quartering seas, where the encounter period becomes larger than the wave period, this may only occur

I:\CIRC\MSC\01\1228.doc

MSC.1/Circ.1228
ANNEX
Page 4

with very large roll periods T_R , indicating a marginal intact stability. The result is symmetric rolling with large amplitudes, again with the tendency of adapting the ship response to the period of encounter due to reduction of stability on the wave crest. Parametric rolling with encounter ratio 1:0.5 may also occur in head and bow seas.

3.3.2 Other than in following or quartering seas, where the variation of stability is solely effected by the waves passing along the vessel, the frequently heavy heaving and/or pitching in head or bow seas may contribute to the magnitude of the stability variation, in particular due to the periodical immersion and emersion of the flared stern frames and bow flare of modern ships. This may lead to severe parametric roll motions even with small wave induced stability variations.

3.3.3 The ship's pitching and heaving periods usually equals the encounter period with the waves. How much the pitching motion contributes to the parametric roll motion depends on the timing (coupling) between the pitching and rolling motion.

3.4 Combination of various dangerous phenomena

The dynamic behaviour of a ship in following and quartering seas is very complex. Ship motion is three-dimensional and various detrimental factors or dangerous phenomena like additional heeling moments due to deck-edge submerging, water shipping and trapping on deck or cargo shift due to large roll motions may occur in combination with the above mentioned phenomena, simultaneously or consecutively. This may create extremely dangerous combinations, which may cause ship capsizing.

4 OPERATIONAL GUIDANCE

The shipmaster is recommended to take the following procedures of ship handling to avoid the dangerous situations when navigating in severe weather conditions.

4.1 Ship condition

This guidance is applicable to all types of conventional ships navigating in rough seas, provided the stability criteria specified in resolution A.749(18), as amended by resolution MSC.75(69), are satisfied.

4.2 How to avoid dangerous conditions

4.2.1 For surf-riding and broaching-to

Surf-riding and broaching-to may occur when the angle of encounter is in the range $135^\circ < \alpha < 225^\circ$ and the ship speed is higher than $(1.8\sqrt{L})/\cos(180^\circ - \alpha)$ (knots). To avoid surf riding, and possible broaching the ship speed, the course or both should be taken outside the dangerous zone reported in figure 2.

I:\CIRC\MSC\01\1228.doc

MSC.1/Circ.1228
ANNEX
Page 5

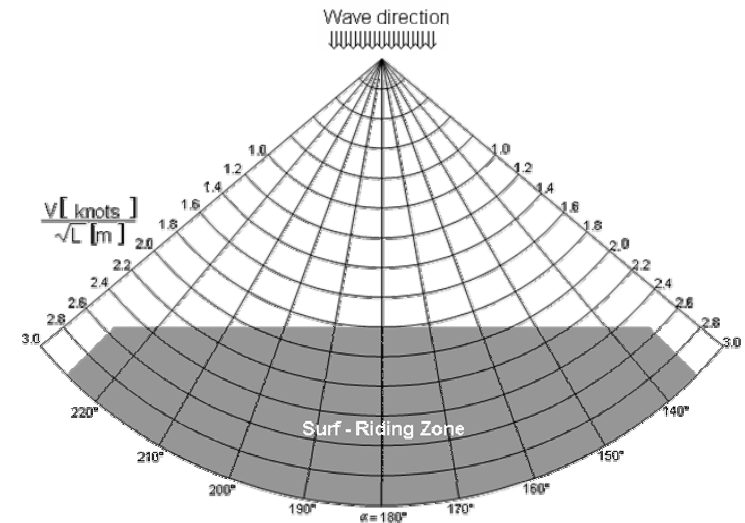


Figure 2: Risk of surf-riding in following or quartering seas

4.2.2 For successive high-wave attack

4.2.2.1 When the average wave length is larger than $0.8 L$ and the significant wave height is larger than $0.04 L$, and at the same time some indices of dangerous behaviour of the ship can be clearly seen, the master should pay attention not to enter in the dangerous zone as indicated in figure 3. When the ship is situated in this dangerous zone, the ship speed should be reduced or the ship course should be changed to prevent successive attack of high waves, which could induce the danger due to the reduction of intact stability, synchronous rolling motions, parametric rolling motions or combination of various phenomena.

4.2.2.2 The dangerous zone indicated in figure 3 corresponds to such conditions for which the encounter wave period (T_E) is nearly equal to double (i.e., about 1.8-3.0 times) of the wave period (T_W) (according to figure 1 or paragraph 1.4).

4.2.3 For synchronous rolling and parametric rolling motions

4.2.3.1 The master should prevent a synchronous rolling motion which will occur when the encounter wave period T_E is nearly equal to the natural rolling period of ship T_R .

I:\CIRC\MSC\01\1228.doc

MSC.1/Circ.1228
ANNEX
Page 6

4.2.3.2 For avoiding parametric rolling in following, quartering, head, bow or beam seas the course and speed of the ship should be selected in a way to avoid conditions for which the encounter period is close to the ship roll period ($T_E \approx T_R$) or the encounter period is close to one half of the ship roll period ($T_E \approx 0.5 \cdot T_R$).

4.2.3.3 The period of encounter T_E may be determined from figure 1 by entering with the ship's speed in knots, the encounter angle α and the wave period T_W .

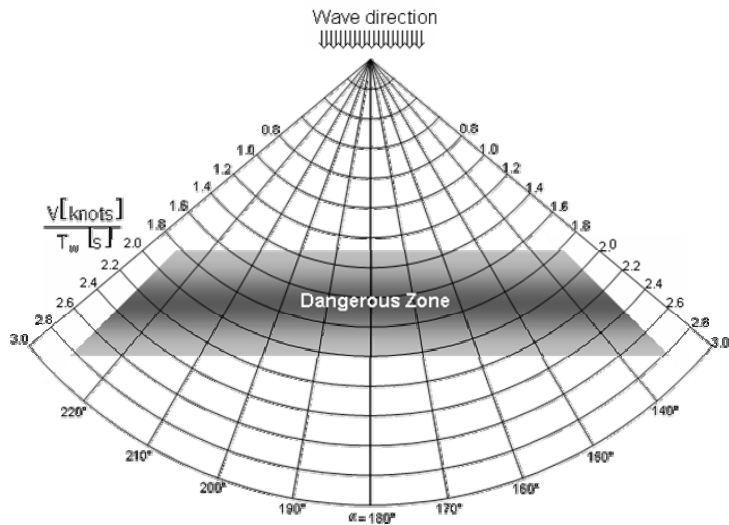


Figure 3: Risk of successive high wave attack in following and quartering seas

Abbreviations and symbols

Symbols	Explanation	Units
T_W	wave period	s
λ	wave length	m
T_E	encounter period with waves	s
α	angle of encounter ($\alpha = 0^\circ$ in head sea, $\alpha = 90^\circ$ for sea from starboard side)	degrees
V	ship's speed	knots
T_R	natural period of roll of ship	s
L	length of ship (between perpendiculars)	m



JAPAN P&I CLUB

日本船主責任相互保険組合

コーポレートサイト

www.piclub.or.jp

東京本部

Principal Office (Tokyo)

〒107-0052 東京都港区赤坂2丁目23番1号アークヒルズフロントタワー15階

15th Floor, ARK Hills Front Tower, 2-23-1, Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107-0052, Japan

Phone : 03-6687-0505 Fax : 03-6871-0051

神戸支部

Kobe Branch

〒650-0024 兵庫県神戸市中央区海岸通5番地 商船三井ビル6階

6th Floor Shosen-Mitsui Bldg. 5, Kaigandori Chuo-ku, Kobe, Hyogo 650-0024, Japan

Phone : 078-321-6886 Fax : 078-332-6519

福岡支部

Fukuoka Branch

〒812-0011 福岡県福岡市博多区博多駅前1丁目14番16号 博多駅前センタービル3階

3rd Floor Hakata-Ekimae Center Bldg., 1-14-16 Hakata Ekimae, Hakata-ku, Fukuoka, Fukuoka 812-0011, Japan

Phone : 092-260-8945 Fax : 092-482-2500

今治支部

Imabari Branch

〒794-0024 愛媛県今治市共栄町2丁目2番地1しほみビル4階

4th Floor, Shimanami Building, 2-2-1, Kyoeicho, Imabari, Ehime 794-0024, Japan

Phone : 0898-33-1117 Fax : 0898-33-1251

シンガポール支部

Singapore Branch

80 Robinson Road #14-01 Singapore 068898

Phone : 65-6224-6451 Fax : 65-6224-1476

JPI英国サービス株式会社

Japan P&I Club (UK) Services Ltd

5th Floor, 38 Lombard Street, London, U.K., EC3V 9BS

Phone : 44-20-7929-3633 Fax : 44-20-7929-7557