

= 波長の長い大きな波を受けているかどうかの判定 =

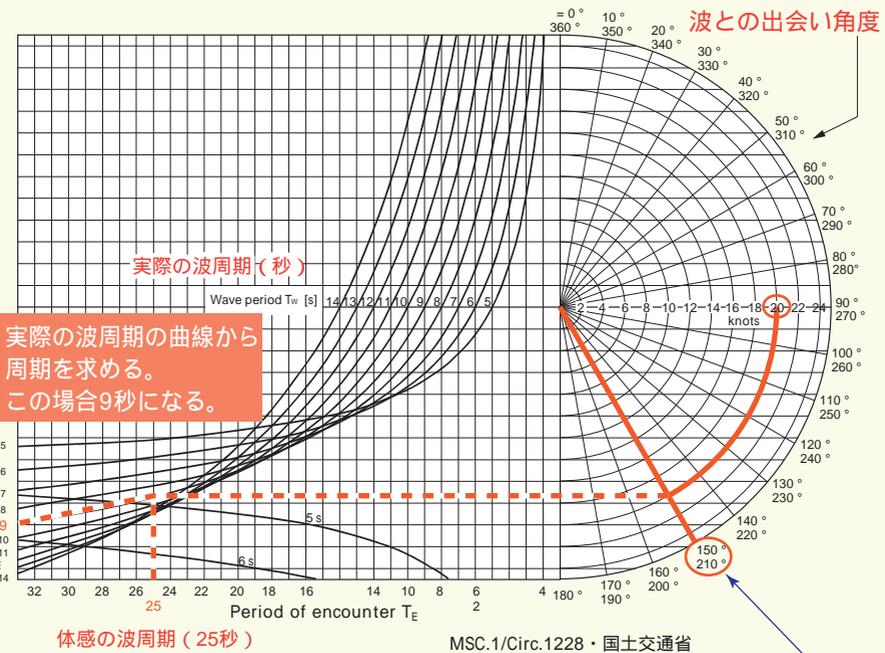
例えば、本船 L_{pp} : 120 m、波長 126 m、有義波高が 5 m の場合、次のようになるので、波長の長い大きな波を受けていると判定できます。(計算式 97)

| | | | | | |
|-------|---|------|---|-------|-------|
| 120 m | × | 0.8 | = | 96 m | 126 m |
| 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 及び国土交通省「フェリー・RORO 船の安全対策」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



船速 (20ノット) と波との出会い角 (150°) の交わる点を求める

図 98 IMO MSC.1/Circ.1228 及び国土交通省フェリー・RORO 船の安全対策

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 左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で、およその波長が「計算式 99」で求められます。

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

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)

V/T ダイアグラム

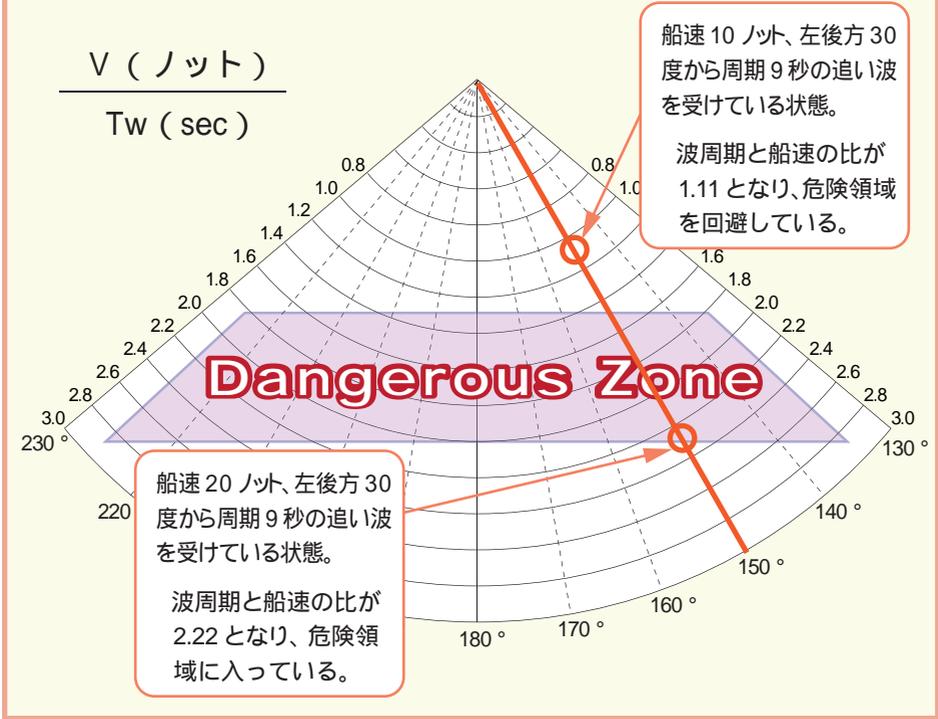


図 100 IMO MSC.1/Circ.1228 及び国土交通省フェリー・RORO 船の安全対策

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)

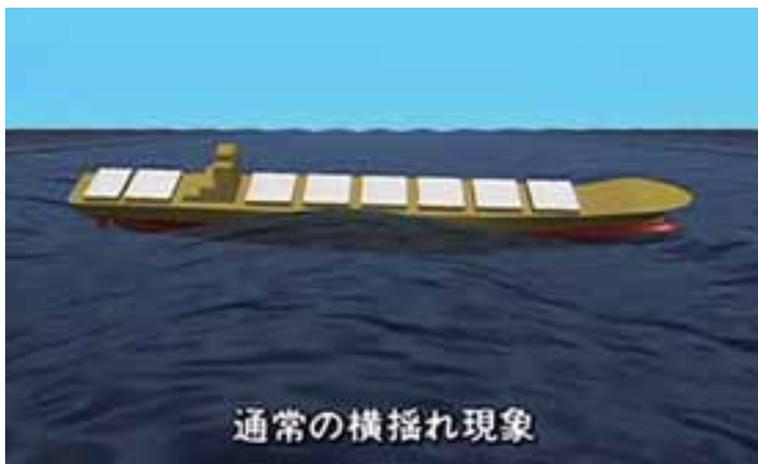


図 101 (一社)日本船長協会 DVD

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二分の一の時に大きくなっていきます。(図 102)

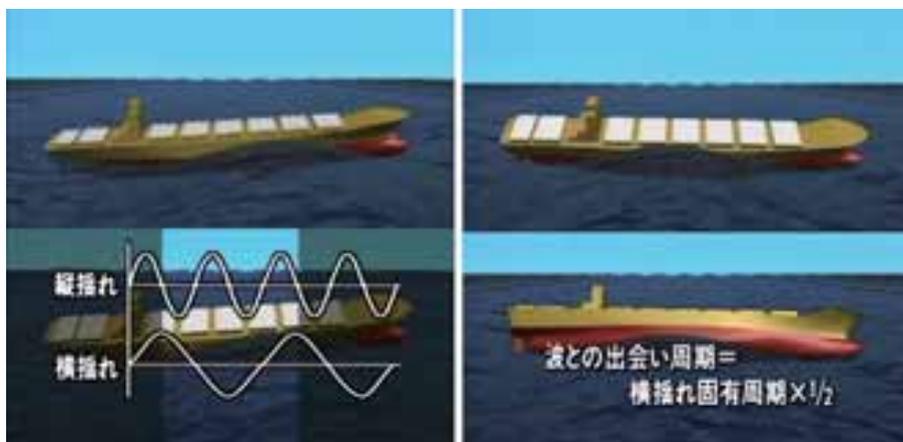


図 102 (一社)日本船長協会 DVD

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上記の条件になると発生します。

筆者も自動車運搬専用船でインド洋を航行中、風力2の風を右30度前から受けていましたが、長大なうねりを右後方から受けるような条件で航行中、最初は小さな横揺れを感じただけでしたが、徐々に横揺れが大きくなり、突然、左に15～20度も傾斜するといった経験をしました。

特に、大洋航海中は風が弱い時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通りです。

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回の中に横揺れが一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を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、復元力の消失をまねくおそれがあります。(図103)

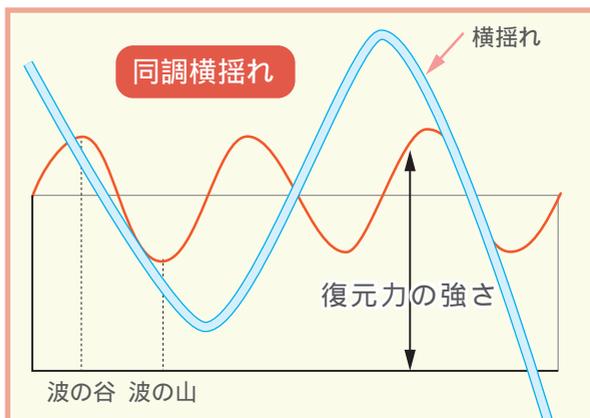


図 103

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)

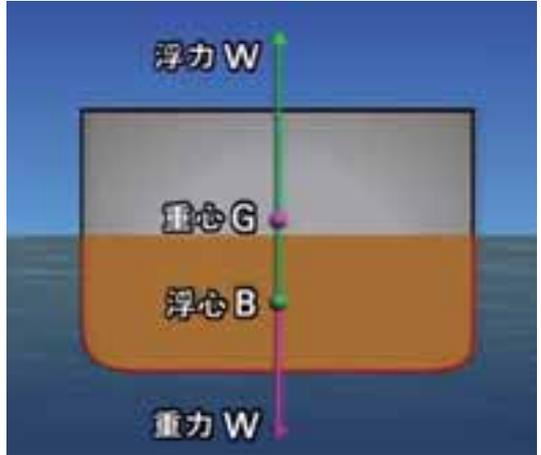


図 104 (一社)日本船長協会 DVD

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、浸水部の形状の変化が変化するので、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 をメタセンターと言い、重心 G からこの M までの長さを GM と言います。この GM の大きさが船の安定性

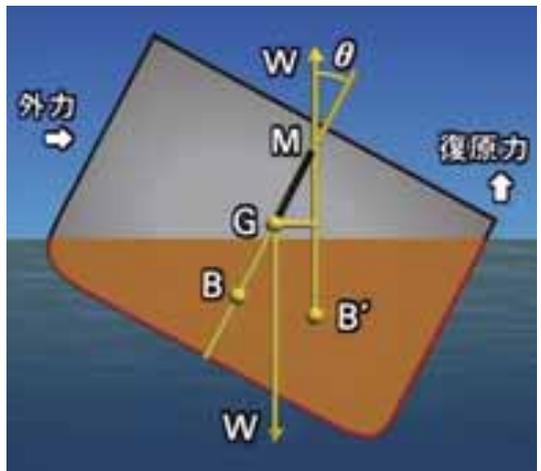


図 105 (一社)日本船長協会 DVD

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。

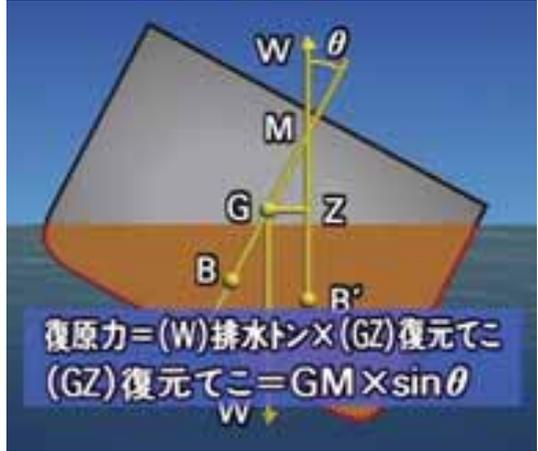


図 106（一社）日本船長協会 DVD

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

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）

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

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

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

T：動揺周期 (sec)

K：環動半径(大型船の場合 0.4B)m

B：船の幅 (m)

g：重力加速度 (9.8m / sec²)

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 には殆ど差はありません。

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。」

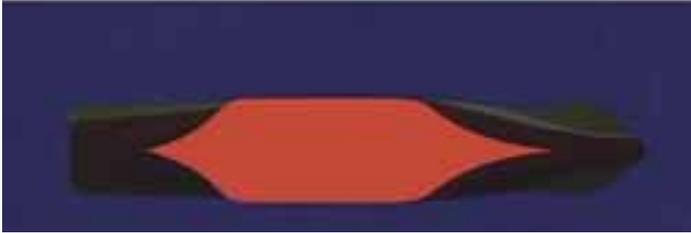
筆者も 8,000TEU コンテナ船に乗船していた際、計算した出港喫水より実際の喫水が 30cm 以上大きい場合を何度か経験しています。コンテナ 1,000 本積載時で、TPC (Ton per Centimeter : 船体を 1 cm 沈めるのに必要な重量) が 100ton でしたので、総重量で申告重量より 3,000 トンも重いコンテナ (1 本当たり平均 3 ton 重い) が積載されたこととなります。したがって、計算 GM と実際の GM も異なります。(差が大きい場合は、実測 GM が計算 GM より 30cm くらい小さいこともありました。)

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、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きます。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 復元力減少

図 108 (一社)日本船長協会 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元力は増大します。(図 109)



波の谷が船体中央 水線面積 大 復元力増

図 109 (一社)日本船長協会 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が、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)

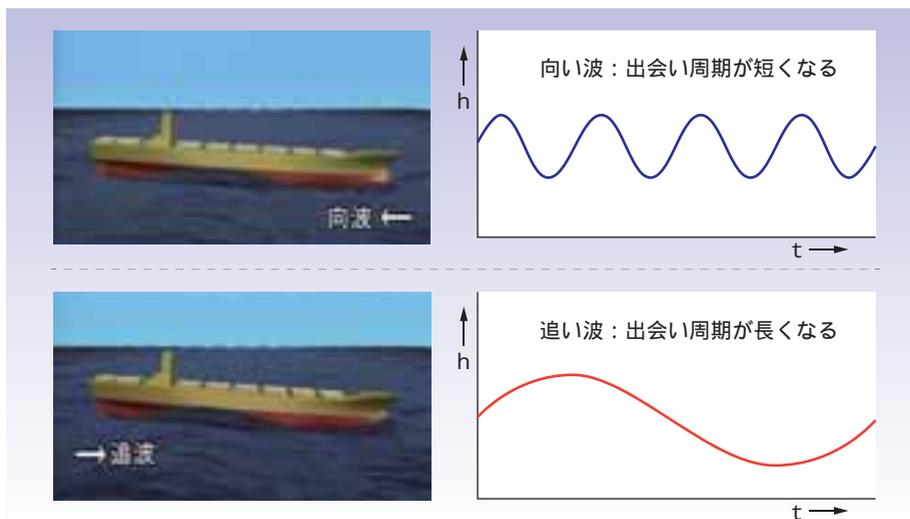


図110 (一社)日本船長協会 DVD

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。

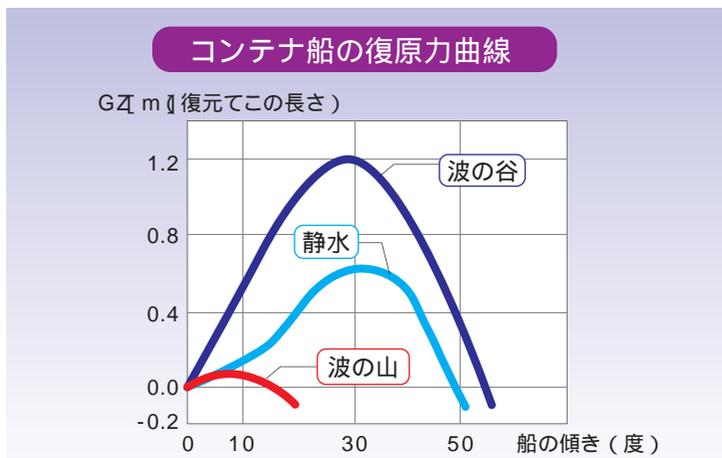


図111 (一社)日本船長協会 DVD

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痩せ形でフレア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殆ど発生しません。(図 112)

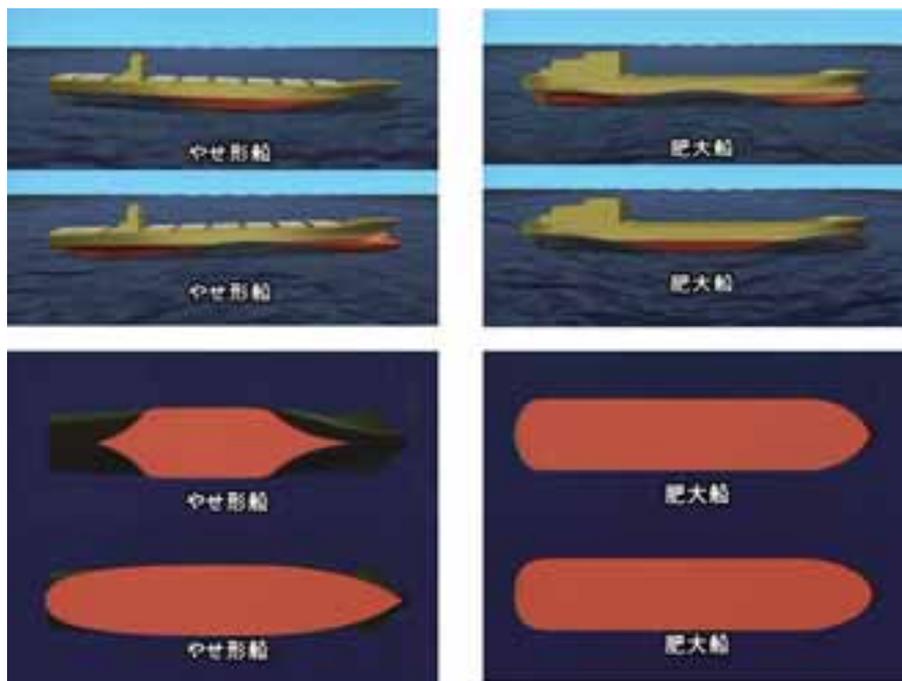


図 112(一社)日本船長協会 DVD

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判ります。

(想定船の大きさ)

| 長さ | 幅 | 深さ | 喫水 |
|--------|-------|-------|------|
| 150.0m | 27.2m | 13.5m | 8.5m |

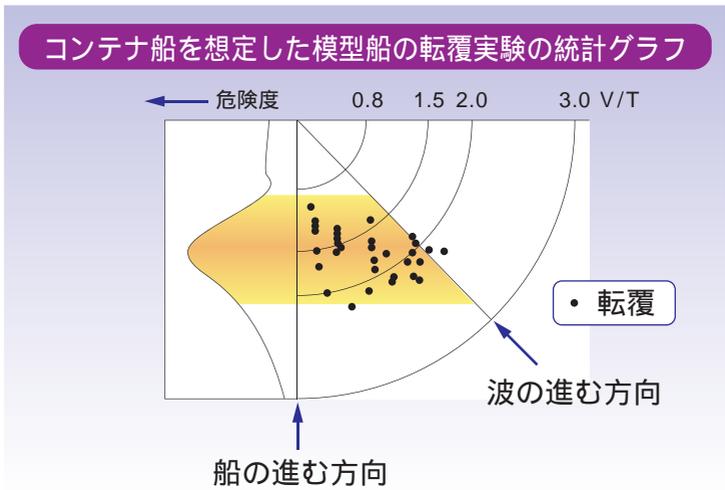


図 113(一社) 日本船長協会 DVD

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分かります。

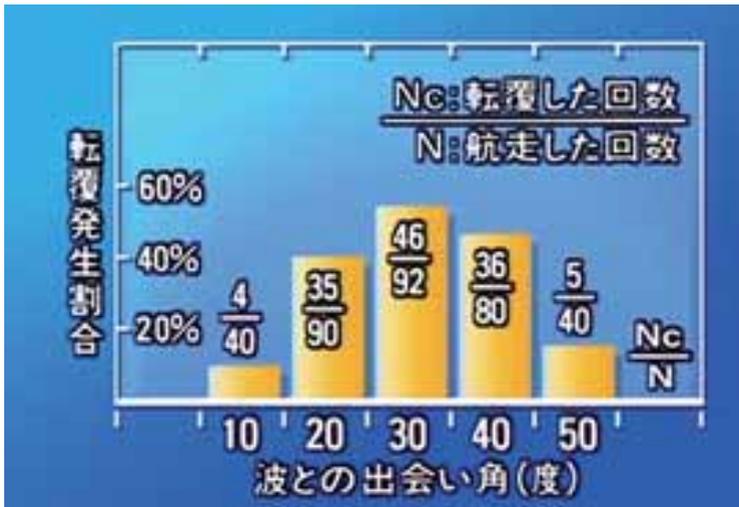


図 114(一社) 日本船長協会 DVD

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分かります。(図 115)

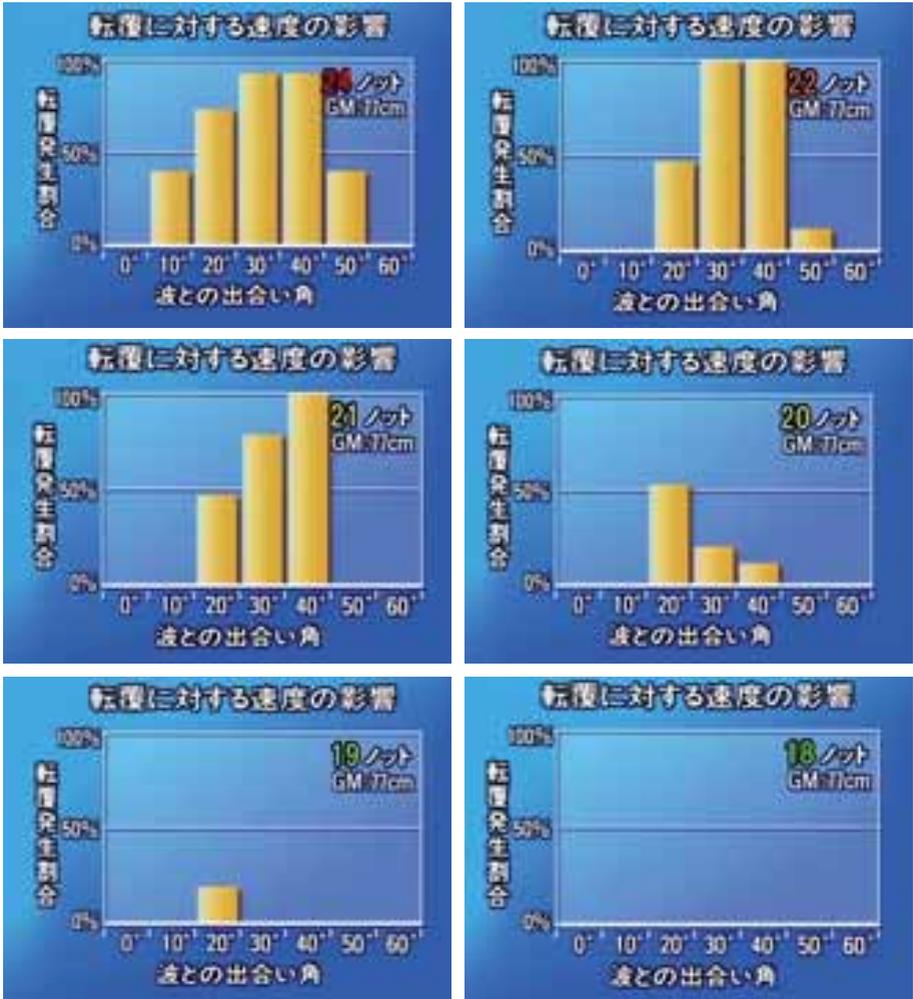


図 115 (一社)日本船長協会 DVD

= 追い波による復原力減少対策 =

出会い角度を 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挙げていくと速度はこのよ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。

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昇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)

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分かります(オレンジ色の部分)。す

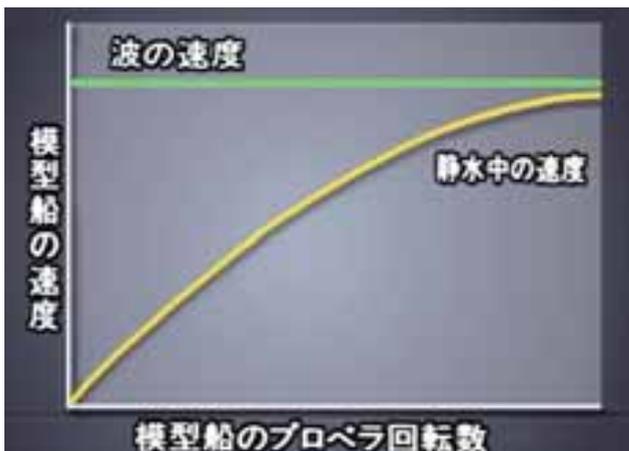


図 116 (一社)日本船長協会 DVD

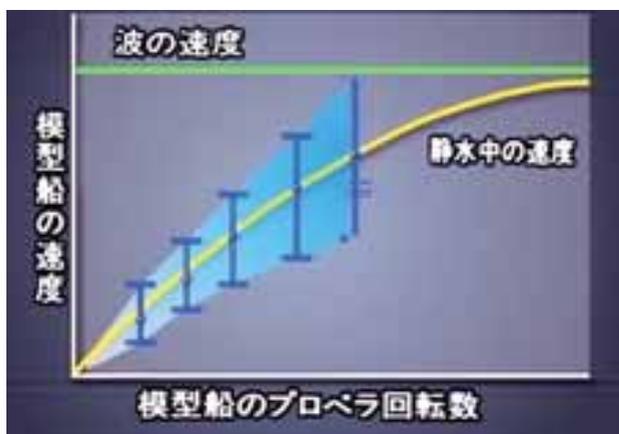


図 117 (一社)日本船長協会 DVD

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)

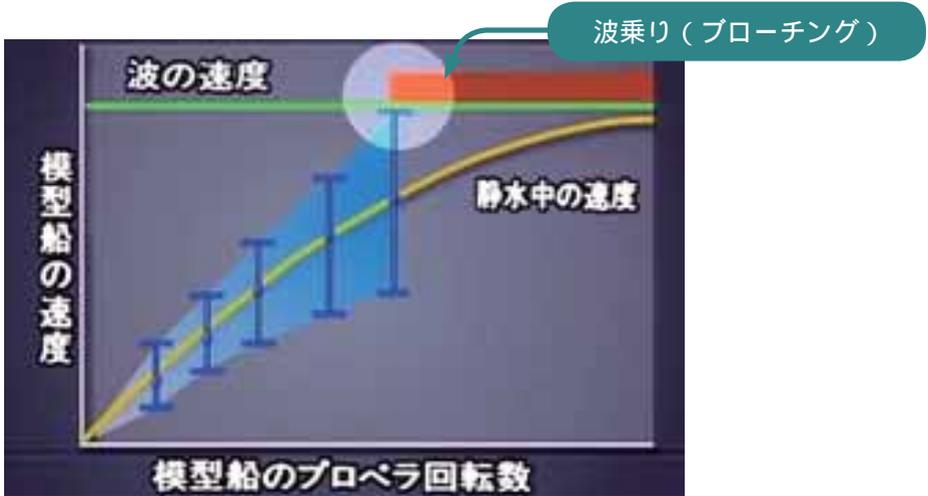


図 118 (一社) 日本船長協会 DVD

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。

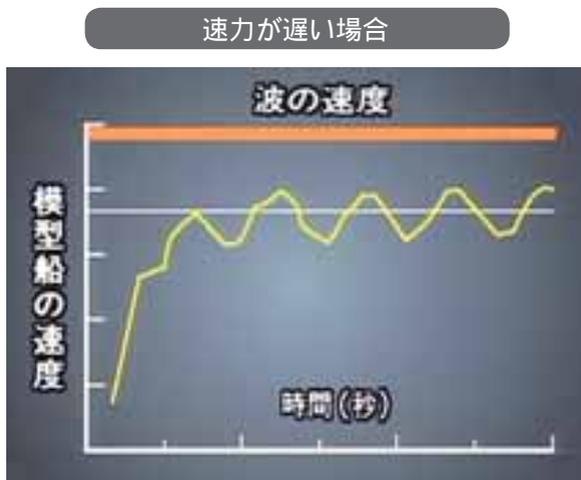


図 119 (一社) 日本船長協会 DVD

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)

速力を少し上げた状態

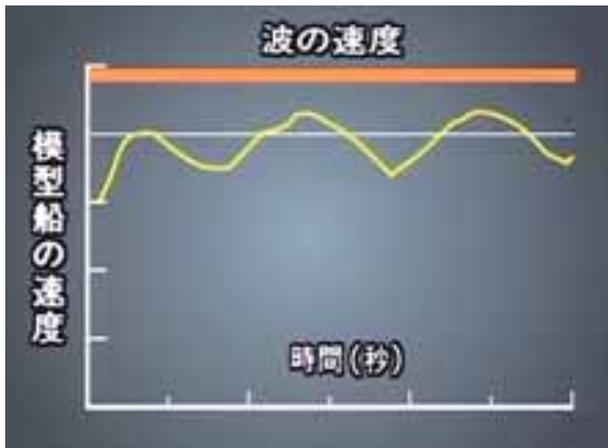


図 120 (一社)日本船長協会 DVD

速力を更に上げた状態

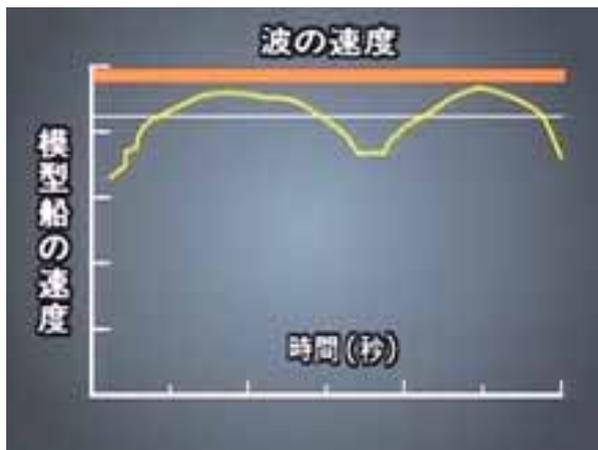


図 121 (一社)日本船長協会 DVD

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。

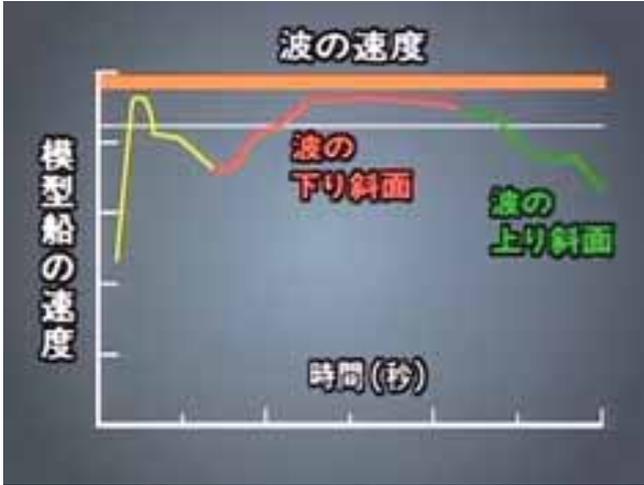


図 122 (一社)日本船長協会 DVD

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

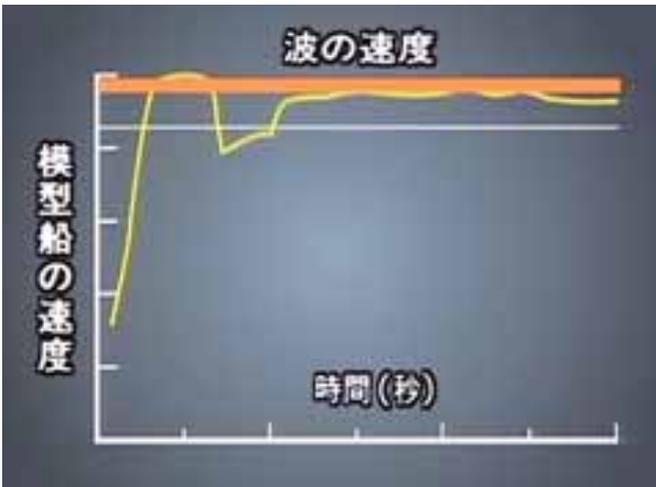


図 123 (一社)日本船長協会 DVD

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.1/1228 の 4.2.1 で指針として示されています。

$$\begin{aligned} & \text{ブローチング発生 限界速度(ノット)} = \\ & 1.8 \times \sqrt{\text{船の長さ (Lpp : 垂線間長)} \div \text{COS}(180 \quad)} \\ & \text{の範囲 : } 135^\circ < \quad < 225^\circ \end{aligned}$$

式 124

したがって、波乗りを避けるためには、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、「波乗り（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、大きな速度変動を避けるための「波乗り（ブローチング）境界領域」として以下計算式（式 125）で示しています。安全サイドに考えれば、この領域にも入り込まないようにする必要があります。

$$\begin{aligned} & \text{ブローチング発生 境界速度(ノット)} = \\ & 1.4 \times \sqrt{\text{船の長さ (Lpp : 垂線間長)} \div \text{COS}(180 \quad)} \end{aligned}$$

式 125

MSC.1/Circ.1228 の 4.2.1 では「波乗り（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「波乗り（ブローチング）境界領域：黄色の領域」を追記して示します。

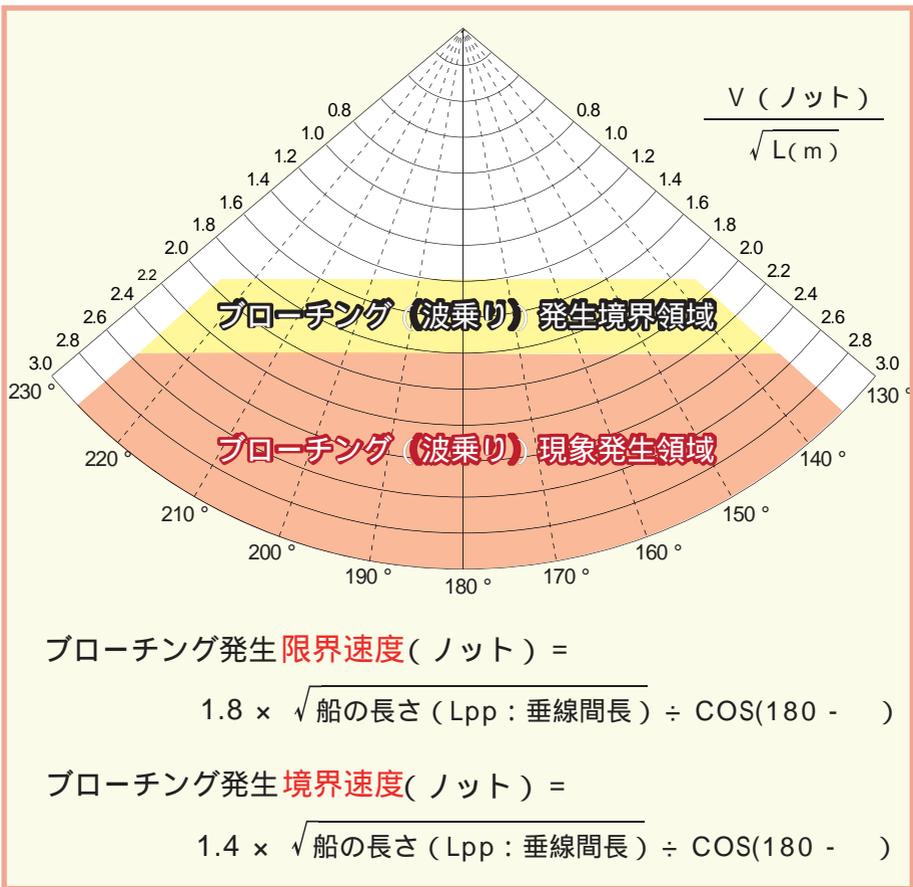


図 126 MSC.1/1228 4.2.1(ブローチング発生境界速度を追記)

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 x 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 x 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

向い波荒天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、こうした現象を発生させないよう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。

4 - 1 - 4 で冬季北太平洋西航時の航路選定の経験を紹介しましたが、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も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が、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・意図を十分尊重して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% 確実といった気象・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。筆者も冬季太平洋西航航海で何度か気象・海象予測が外れた経験があります。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

気象協会ホームページ <http://www.jwa.or.jp/>