

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。

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

6 - 2 「風浪」と「うねり」の違い

図 57 をご参照ください。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となります。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 気象庁ホームページ

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良いのか、十分な経験と併せて荒天向い波

に対応した操船技術が求められています。

船が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 (一社)日本船長協会 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、船体の長さ（ L_{pp} ）と波長の関係で、次の通りです。

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）

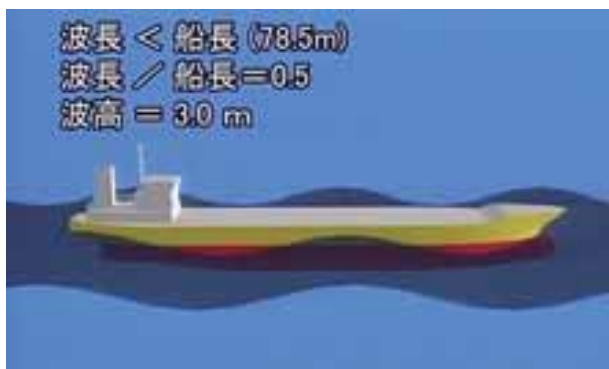


図 59 （一社）日本船長協会 DVD

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）

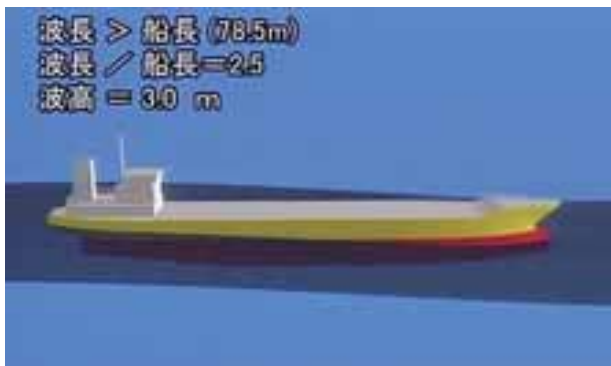


図 60 （一社）日本船長協会 DVD

波長が船の長さ（ L_{pp} ）とほぼ同じ長さの場合

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 (一社)日本船長協会 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（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）。

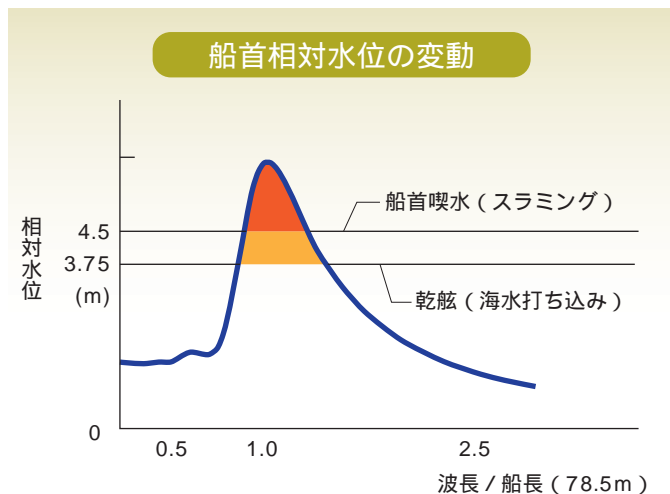


図 62 (一社)日本船長協会 DVD

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、プロペラに働く荷重が突然減少するために、プロペラは振動を伴い激しく回転をします。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 (一社)日本船長協会 DVD



写真 64 (一社)日本船長協会 DVD

荒天時は、出来るだけ船尾喫水を深くし、プロペラの水面下没入率をプロペラの直径の 20 パーセント以上にすることが推奨されています。但し、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)

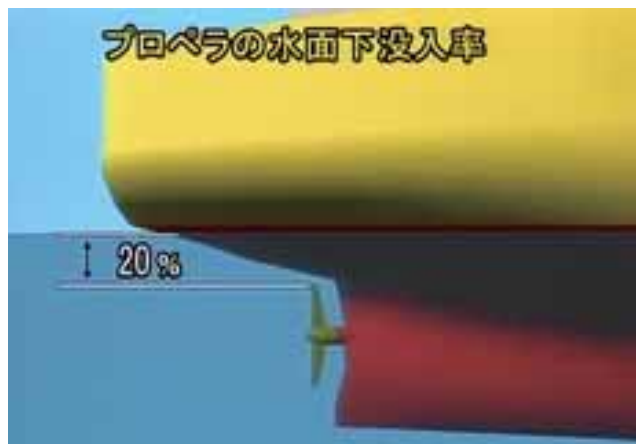


図 65 (一社)日本船長協会 DVD

7 - 1 - 2 速度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。

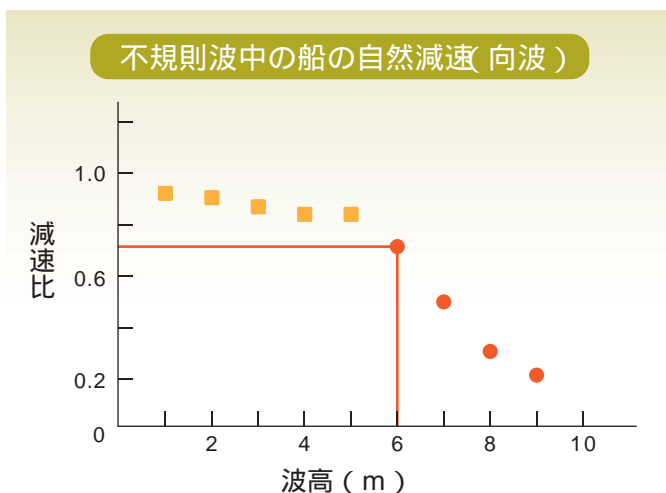


図 66 (一社)日本船長協会 DVD

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が、エンジンに異常な力が加わったままで運転することになります。この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 (一社)日本船長協会 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一杯踏み込んでスピードを一定にしようとしていますが、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事になります。これがトルクリッチの状態です。



図 68 (一社)日本船長協会 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二つの衝撃があります。



写真 69 (一社)日本船長協会 DVD



写真 70 (一社)日本船長協会 DVD



写真 71 (一社)日本船長協会 DVD



写真 72 (一社)日本船長協会 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。

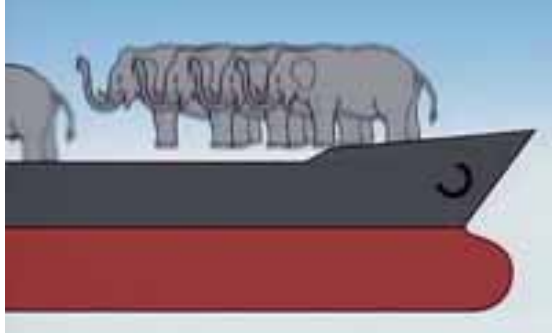


図 73 (一社)日本船長協会 DVD

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	船の長さ	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

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 度づ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。

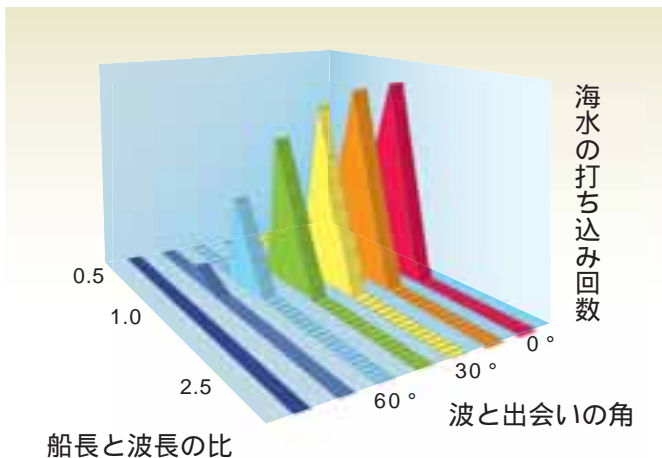


図 74 (一社)日本船長協会 DVD

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 度～ 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 度～ 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（一社）日本船長協会 DVD



写真 76（一社）日本船長協会 DVD

速力を落とした場合

次に、波長と船長（ L_{pp} ）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、また出会い角を 0 度～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。

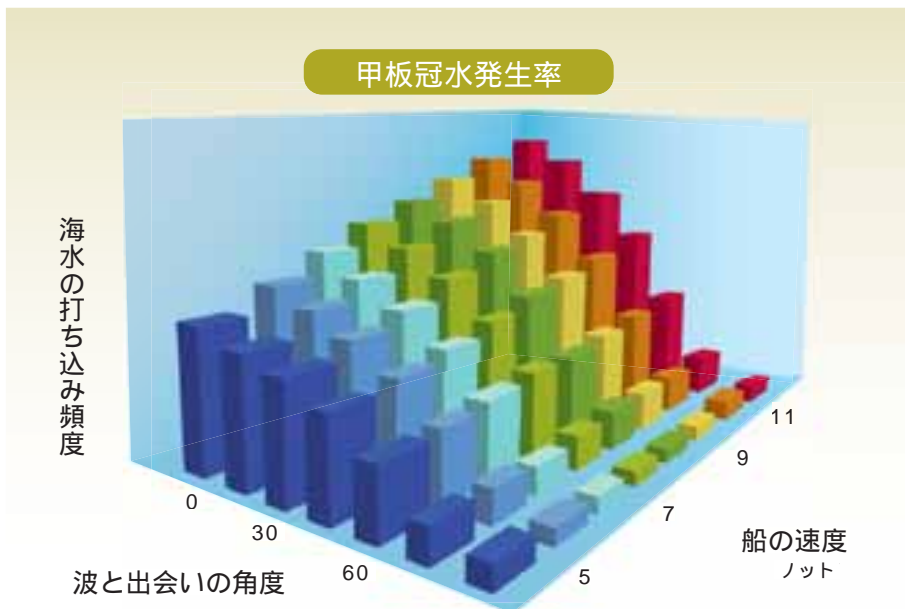


図 77 (一社)日本船長協会 DVD

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 の通りです。

模型船

海水打ち込み頻度
= 10回 / 時間

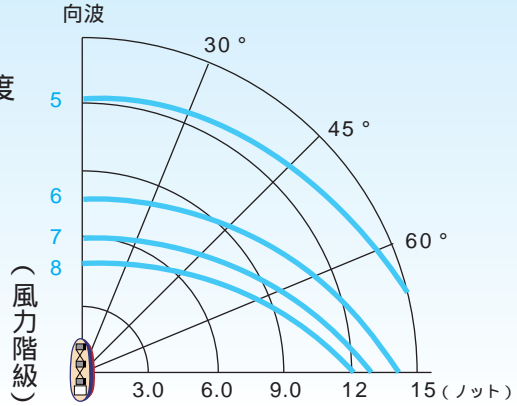


図 78 (一社) 日本船長協会 DVD

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では、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

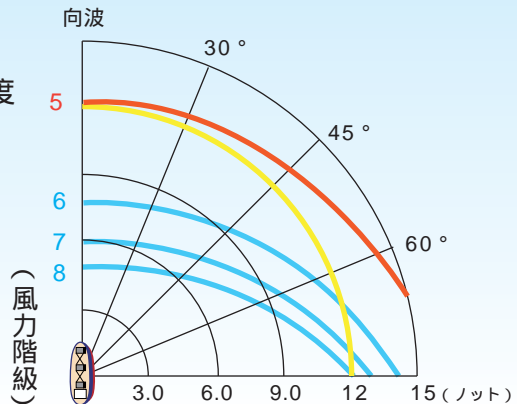


図 80 (一社) 日本船長協会 DVD

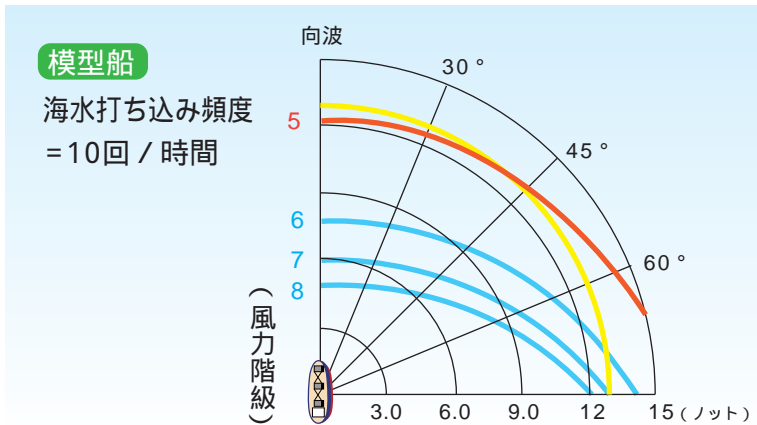


図 81 (一社)日本船長協会 DVD

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 ノットで航行する事になります (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。

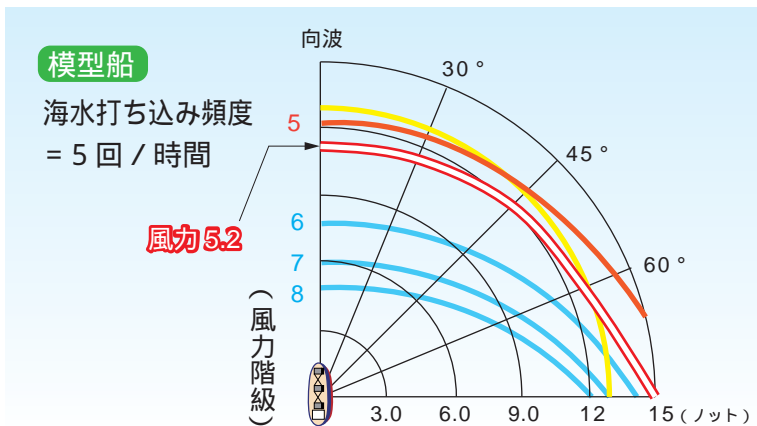


図 82 (一社)日本船長協会 DVD

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 回に半減出来ました。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 ノットに減速すれば、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、海水の打ちこみ回数を半減させることが出来ます。

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 (一社)日本船長協会 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。

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 (一社)日本船長協会 DVD

船首フレアスラミング

海面と船首フレア一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、漁船などで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 (一社)日本船長協会 DVD

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 (一社)日本船長協会 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、更には、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 (一社)日本船長協会 DVD



写真 88 (一社)日本船長協会 DVD

特に、大型化したコンテナ船では、スプリングングという、「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」とホイッピングという、「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。

筆者も 6 隻の大型コンテナ船に船長として乗船しましたが、斜め前からの風浪やう

ねりで船首フレアスラミングが発生すると、船首マストや No.1 Hold の甲板積コンテナが左右平行に動き、後にスプリングやホイッピング現象であることを知りました。タンカーやバルカーが縦にしなる（撓る）ことは経験していましたが、こうした左右の振動は初めての経験だったので外板の亀裂発生を心配しました。入渠時の点検で強度的に弱い艙内階段の手すりや Under Deck Passage 床面に小さな亀裂も見つかったことを記憶しています。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通りです。

条件は以下です。波長と船長（ L_{pp} ）の比は 1.0 です。

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通りです。

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	船の長さ	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れると、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となります。この時に加わる最大の力は、船首部を上に向ける力です。（図 89）



図 89 （一社）日本船長協会 DVD

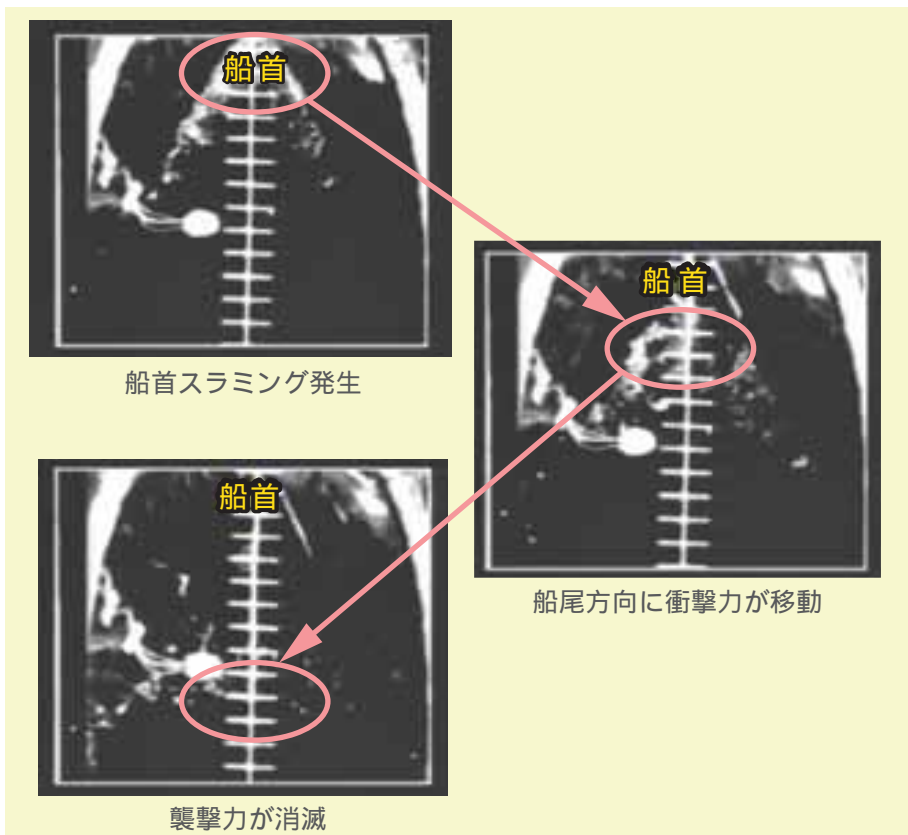


図 90 (一社)日本船長協会 DVD

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分かります。

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

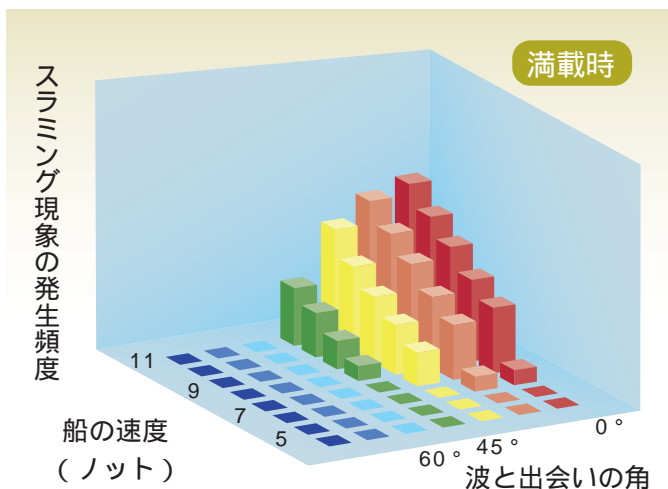


図 91 (一社)日本船長協会 DVD

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。出会い角を60度にする、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 (一社)日本船長協会 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。即ち、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。

減速して原針路通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.) :

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

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

所要時間を同じにした場合の変針角 () 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

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

$$\text{Cos } \theta = \frac{x}{y} = \frac{(S - R)}{S} = 1 - \frac{R}{S}$$

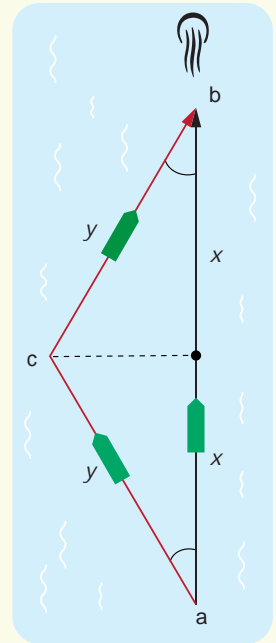


図 93

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.59) と 92 (P.64) からわかるように、向い波による海水打ち込み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となります。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）で到着時刻が同じとなります。

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、向い波荒天対策は、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が、船長や航海士といった本船運航者から見ると、向い波荒天操船は前章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う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。逆に、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

大洋の波は色々な波長、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が、図 95 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

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

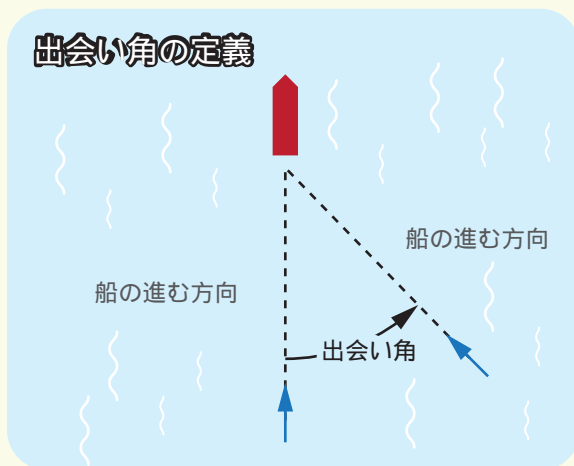


図 95 (一社)日本船長協会 DVD

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。

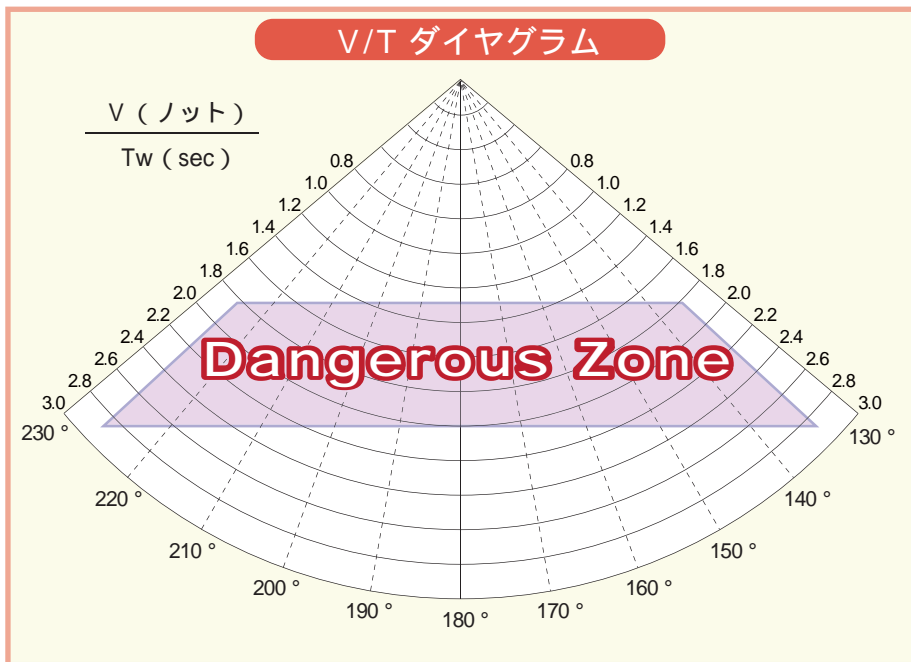


図 96 IMO MSC.1/Circ.1228

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。

波長が船の長さ (L_{pp} : 垂線間長) の 0.8 倍以上 (MSC/Circ.1228) (註 4)
 波高 (有義波高) が船の長さ (L_{pp} : 垂線間長) の 0.04 倍以上

註 4 : 国土交通省「フェリー・RORO 船の安全対策について:平成 23 年 4 月 28 日」では 0.6 倍以上