

5 第二世代非損傷時復原性基準に関する研究 －概要と過大加速度モードの基準策定に関する研究－

黒田 貴子*

Study on the Excessive Acceleration Failure Mode for the Second-generation Intact Stability Criteria

by

KURODA Takako

Abstract

The International Maritime Organization finalized interim guidelines for the second-generation intact stability criteria in 2020 (MSC.1/Circ.1627). The criteria are necessary to prevent stability failure due to pure loss of stability, parametric rolling, surf-riding/broaching, excessive acceleration, and dead-ship conditions. The criteria are classified into three levels. Vulnerability criteria consisting of Level 1 and Level 2 are simplified criteria, and Level 3 is a direct stability assessment. The vulnerability criteria are assessed by a simplified calculation method according to highly-safe. Meanwhile, assessing direct stability requires advanced numerical simulations in irregular waves and model tests to verify the calculation. If a ship is determined to be vulnerable by these criteria, operational measure will be necessary.

The National Maritime Research Institute has conducted research on the excessive acceleration failure mode, which is one of the five stability failure modes, and has contributed to the development of the intact stability criteria. This paper outlines the second-generation intact stability criteria and our research on the excessive acceleration failure mode.

* 流体性能評価系耐航性能研究グループ

原稿受付 令和3年5月17日

審査日 令和3年6月9日

1. はじめに

船の復原性は衝突や座礁による破口からの浸水による転覆を扱う損傷時復原性と、無傷の船体に作用する波や風による転覆を扱う非損傷時復原性に分けられる。このうち損傷時復原性は海上人命安全条約(SOLAS条約)で、非損傷時復原性は2008非損傷時復原性コード(2008 IS Code)で扱われている。近年、船の大型化、推進性能や構造強度の最適化によってこれまでの船型とは異なる新しい船型が増え、非損傷状態での大きな横揺れによる積み荷や乗員への被害が生じる事例が報告されている。横風横波中を漂流する状況を想定した半経験則の現基準ではこのような新船型に対応できないという認識のもと、国際海事機関(IMO)では非損傷時復原性について2008年から物理則に基づく動的復原性要素を導入するための審議を日本が主導して行い¹⁾、2020年に第二世代非損傷時復原性基準の暫定ガイドライン(MSC.1/Circ.1627)²⁾が承認された。

本稿は第二世代非損傷時復原性基準暫定ガイドラインの概要と、本基準で扱う5つの危険モードの1つである過大加速度モードの基準策定のための研究をまとめたものである。

2. 第二世代非損傷時復原性基準の概要

第二世代非損傷時復原性基準暫定ガイドライン²⁾は(1)デッドシップ状態(現基準で扱う現象)、(2)過大加速度、(3)復原力喪失、(4)パラメトリック横揺れ、(5)波乗り/ブローチングの5つの危険モードを対象としている。第一、第二段階基準(vulnerability criteria:脆弱性基準)と第三段階基準(direct stability assessment:直接復原性評価)の3段階評価と運航制限(operational limitation)と運航ガイダンス(operational guidance)で構成されている。第一段階は簡易な計算で安全側に評価し、評価の段階が上がると計算精度が高度化し、要求される安全レベルが抑えられるが計算負荷が増える。

以下に5つの危険モードのうち、過大加速度は次章で述べることで、ここでは他の4モードの脆弱性基準の概要を簡潔に示す。

2.1 デッドシップ状態

デッドシップ状態で漂流する船が厳しい横からの風波浪を受ける状態の復原力を評価するものである。第一段階基準は2008 IS Codeにあるweather criterionと同じであり、横揺れ固有周期が20秒以上は若干緩和される。第二段階基準は(1)式に示す不規則横波中危険角度を超える横揺れ角の長期発生確率 C が基準値 $R_{DS0}=0.06$ 以下であれば合格である。

$$C = \sum_{i=1}^N W_i C_{s,i} \leq R_{DS0} \quad (1)$$

ここで、 N は計算する短期海象の数、 W_i は短期海象の波浪発生頻度、 $C_{s,i}$ は暴露時間3600sに少なくとも1回風上・下に閾

値の横揺れ角を超える確率を現したもので0から1の間で変化する。ただし、風によるモーメントレバーがGZ曲線を超える、または風波による傾斜角が風下側危険角度より大きい場合は1が入る。波浪条件は北大西洋における有義波高17ケース×平均ゼロアップクロス波周期18ケースの合計306ケース(IACS No.34)である。デッドシップ状態で脆弱性を示す船型の特徴は乾舷が小さく最大復原力角が小さい船や低喫水背高船である。

2.2 復原力喪失

船の長さに近い波長の波の中では、船体中央が波の山に、船首尾が波の谷にあると水線面積が減り、横復原力は平水中の時よりも低下する。追波中、波の速度に近くて比較的速い速度で航行時に波の山が船体中央にあると、横復原力が低下する時間が長くなり、大傾斜を起こす。復原力喪失はこのような現象を評価するもので、適用範囲は航海速力のフルード数0.24以上である。

第一段階基準は規則縦波により横復原力が低下するとき、(2)式にある最小のGM(メタセンタ高さ) GM_{min} が基準値 $R_{PLA}=0.05m$ 以上であれば合格である。ただし、評価する喫水 d 上の容積が喫水とともに大きくなる場合である。

$$GM_{min} \geq R_{PLA} \text{ and } \frac{\nabla_D - \nabla}{A_w(D-d)} \geq 1.0 \quad (2)$$

ここで、 D は型深さ、 ∇_D は型深さの排水容積、 A_w は評価する喫水 d での水線面積である。

第二段階基準には2つの基準があり、北大西洋における波浪条件(IACS No.34)下で、復原力喪失による大傾斜の危険のある海象に遭遇する確率がどちらも基準値 $R_{PL0}=0.06$ 以下であれば合格となる。具体的には①波浪中の復原力喪失角(30deg)による基準 CR_1 と②操縦運動に伴う遠心力による定傾斜角(客船=15deg, その他25deg)による基準 CR_2 の2つの基準があり、それぞれ(3)式で判定する。式中の $C1_i$ は求めた消失角が30deg未満であれば1, そうでなければ0, $C2_i$ は求めた定常傾斜角が閾値を超えれば1, そうでなければ0が入る。復原力喪失現象で脆弱性を示す船型の特徴は平水中に比べて波の山で水線面積が大きく減少する瘦型船(フェリー, コンテナ船等)である。

$$\left. \begin{aligned} \max(CR_1, CR_2) &\leq R_{PL0} \\ CR_1 &= \sum_{i=1}^N W_i C1_i \\ CR_2 &= \sum_{i=1}^N W_i C2_i \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

2.3 パラメトリック横揺れ

復原力喪失は一瞬の現象だが、より低速の船では、周期的に復原力が変動することで大きな横揺れが発生することがある。縦波中、波の谷が船体中央にあるとき、横復原力は大くなり、横揺れ角速度は大くなる。次に波の山が船体中央に来ると、横復原力が小さくなり横揺れ角が大きくなる。このように波による横復原力が船の横揺れを増幅させるよう働くと、横揺れが徐々に大きくなる。このような現象をパラメトリック横揺れと呼び、発生するのは横揺れ固有周期が出会い波周期（横復原力変化の周期）の2倍になる時である。北太平洋上でポストパナマックスコンテナ船³⁾が大きな横揺れを経験し、同様な事例が自動車専用運搬船⁴⁾で報告されている。

第一段階基準は(4)式に示す平水中での GM と波浪中の GM 変動 δGM_1 との比で評価する。基準値 R_{PR} はビルジキールの影響を考慮した中央横断面係数 C_m ごとの横揺れ減衰率である。

$$\frac{\delta GM_1}{GM} \leq R_{PR} \text{ and } \frac{\nabla_D - \nabla}{A_w(D-d)} \geq 1.0 \quad (4)$$

第二段階基準は2つの基準があり、それぞれ(5)式で判定する。2つの基準のどちらかの危険のある海象に遭遇する確率が一定値以下であれば合格する。①基準 $C1$ は波浪中 GM 変動と平均 GM の比または船速のどちらかで評価し、式中の C_i は16ケースの波条件での波浪中 GM 変動が第一段階の基準値 R_{PR} 未満、または船速が閾値未満であれば0、そうでなければ1が入る。基準値 R_{PR1} は0.06である。②基準 $C2$ は最大横揺れ角で評価し、波との出会い角の影響を考慮した25船速(7.5deg刻み)を扱う。 $C_{S,i}$ は最大横揺れ角が25deg以上であれば1、そうでなければ0が入る。式中の添え字 h はhead、 f はfollowである。なお、ここでの最大横揺れ角は設定された波条件での時間領域計算で求める。パラメトリック横揺れに脆弱性を示す船型の特徴はトランサム型船尾や船首フレアなど波の山谷で水線面積が大きく変化する船（コンテナ船、自動車専用運搬船等）である。

$$\left. \begin{aligned} C1 &= \sum_{i=1}^N W_i C_i \leq R_{PR1}; \text{ or} \\ C2 &= \left[\sum_{i=1}^{12} C2(Fn_i, \beta_h) + \frac{1}{2} \{ C2(0, \beta_h) + C2(0, \beta_f) \} \right. \\ &\quad \left. + \sum_{i=1}^{12} C2(Fn_i, \beta_f) \right] / 25 \leq R_{PR2} \\ C2(Fn_i, \beta) &= \sum_{i=1}^N W_i C_{S,i} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

2.4 波乗り/ブローチング

ブローチングは追波中を高速で航行する船で発生し、船速が波の速度に近づき波の下り波面で長く留まる波乗り状態になった際、最大限の操船努力をもってしても操縦不能になる現象である。基準ではブローチングが発生する際に生じる波乗り現象が起こるか否かで評価する。

第一段階基準は船の長さが200m以上、船速フルード数0.3以下で合格である。船の長さの基準は、波乗り現象は波長が船長に近づくと発生しやすいため、海洋波で発生する波長よりも船長が十分に長い船は危険性が低いためであり、船速の基準は操船ガイダンス MSC.1/Circ.1228にある波乗りが発生しやすい船速を追波状態で計算した値である。

第二段階基準は波乗り現象が発生する限界速度を求め、(6)式に示す北大西洋の波浪条件での波乗りの発生確率 C を求めて評価する。式中の $C2_{ij}$ は海象下での限界速度を波長船長比 $(\lambda/L)_i$ が $N_\lambda=81$ ケース、波粗度 $(H/\lambda)_j$ が $N_\alpha=101$ ケースで計算した限界速度が設定速力より大きければ0、そうでなければ1が入る。 $W2$ は北大西洋の波浪発生頻度、 W_{ij} は波粗度と波長船長比で求まる重み係数である。基準値 R_{SR} は0.005である。波乗り現象で脆弱性を示す船型は船速が早い船（漁船、フェリー等）である。

$$C = \sum_{H_s} \sum_{T_z} \left(W2(H_s, T_z) \sum_{i=0}^{N_\lambda} \sum_{j=0}^{N_\alpha} W_{ij} C2_{ij} \right) \leq R_{SR} \quad (6)$$

3. 過大加速度モード

3.1 概要

過大加速度モードは、2008年9月に香港沖で台風回避中のコンテナ船 Chicago Express のブリッジに居た乗組員の大きな横加速度による死傷事故がきっかけでドイツの提案により本基準へ取り入れられた危険モードである。旅客あるいは乗組員が居る最も高い位置にある居住区や船橋に働く横方向の加速度に関する基準である。Chicago Express の事故報告書に記載のある正面線図より書き起こしたコンテナ船の一般配置図を図1に、事故発生時の载荷状態を表1に示す。

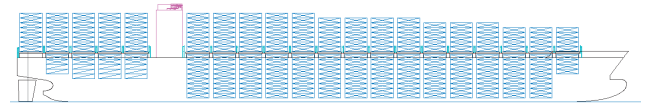


図1 コンテナ船一般配置図

3.2 脆弱性基準

過大加速度の第一段階基準は前進速度零、横波中での横加速度を(7)式で計算し、基準値 $R_{EA1}=4.64\text{m/s}^2$ 以下であれば合格である。式中、横揺れ振幅 ϕ は1自由度の横揺れ運動方程式を基に、ITTC スペクトルを用いた横揺れ分散値から求める。 K_L は横揺れ、船首揺れ、縦揺れの連成運動影響係数、 h は横揺れ中心から人が居る位置までの高さである。

$$\phi K_L(g + 4\pi^2 h/T_r^2) \leq R_{EA1} \quad (7)$$

第二段階基準は北大西洋の波浪条件で横波を主方向とする短波頂不規則波中で横加速度の閾値 $R_2=9.81\text{m/s}^2$ を超える長期発生確率 C が基準値 $R_{EA2}=0.00039$ 以下であれば合格である((8)式)。 σ_{LAi}^2 は横加速度の分散値である。

$$C = \sum_{i=1}^N W_i C_{s,i} \leq R_{EA2} \quad (8)$$

$$C_{s,i} = \exp(-R_2^2/2\sigma_{LAi}^2)$$

日本は基準値の検討のため複数の船種を含む37隻の満載・空載状態での脆弱性基準の計算を行った。対象船の内訳はバルクキャリア10隻、コンテナ船4隻、PCC2隻、LNG船2隻、VLCC2隻、ケミカルタンカー11隻、PSV2隻、フェリー1隻、タンカー2隻、一般貨物船1隻である。37隻の計算結果を図2に示す。満載・空載状態ともに合格した船は全体の30%であり、70%の船はいずれかの載荷状態で不合格となり、直接復原性評価か、運航制限、運航ガイダンスで評価することになる。過大加速度に脆弱性を示す船型はブリッジが高く、載荷状態によりGMが大きくなる船(コンテナ船等)と考えられるが、計算したすべての船種で不合格の載荷状態が存在した。

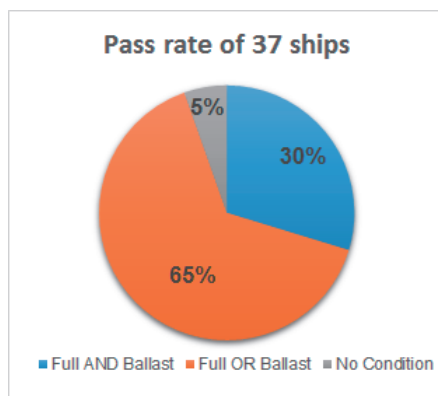


図2 過大加速度モード脆弱性基準適合状況

なお、過大加速度の脆弱性基準の基準値は事故を起こした Chicago Express が不適合となり、かつ第一段階、第二段階基準の判定に整合性が取れるよう設定されたもので、厳しい値になっている。

4. 直接復原性評価

直接復原性評価は横揺れ角40deg、横加速度 9.81m/s^2 を閾値とし、北大西洋の波浪発生頻度表にあるすべての有義波高と波周期での波向きと船速を変化させた不規則波中船体運動計算を行い、発生確率を求める完全確率的評価(Full probabilistic assessment)と、代表海象条件として発生確率密度 $10^{-5}(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$ の海象に限定し、モード毎に設定された条件(design situations)で確率的に評価する、または発生確率密度 $7\cdot 10^{-5}(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$ の海象に対して決定論的に評価する方法がある。完全確率的評価の平均長期危険事象発生確率の基準値は $2.6\cdot 10^{-8}(1/\text{s})$ 、design situationsでの確率論評価の基準値は2時間に1回危険事象が発生しないこと、つまり $1/7200(1/\text{s})$ 、決定論的評価の基準値は3時間の最大横揺れ角および横加速度が直接復原性評価の閾値の半分を超えないことである。なお、直接復原性評価で用いる船体運動は不規則波中とし、その計算法は模型実験で精度を確認する必要がある。以下に図1に示すコンテナ船を対象に実施した模型実験と、時間領域計算法と周波数応答の線形重ね合わせ法による直接復原性評価⁹⁾について述べる。

4.1 模型実験概要

横方向を主方向とする短波頂不規則波中前進速度零でのコンテナ船の船体運動と横加速度の計測と自由横揺れ試験を、ITTC7.5-02-07-04に基づいて実施した。模型船の全長 L_{OA} は3.5m、縮尺1/96.054である。模型船の載荷状態は事故発生時と同じ状態とした。縦慣動半径は0.25Lである。船体運動の6軸は自由とし、前後揺れ、左右揺れ、船首揺れには模型船の計測位置を保持するために変位に比例する復原力をばね定数で与えた。不規則波の周波数スペクトルはITTC型を、方向スペクトルは横波90degを主方向とした COS^4 分布で与えた。波形表現はシングルサンメンション法とし、初期位相と方向角初期値は乱数で設定した。計測時間は実船時間で3時間相当の20分とした。なお、模型実験前に短波頂不規則波の波検定を実施し、設定した波条件に則した波浪場が計測時間の間保たれていることを確認した。

4.2 不規則波中船体運動計算

4.2.1 時間領域計算

コンテナ船を対象に短波頂不規則波中の時間領域船体運動計算を実施した。扱う運動は6自由度、流体力は3次元特異点分布法で求め、メモリー影響

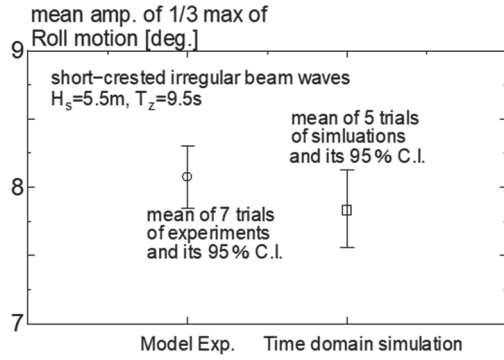


図3 不規則波中横揺れの時間領域計算と模型実験

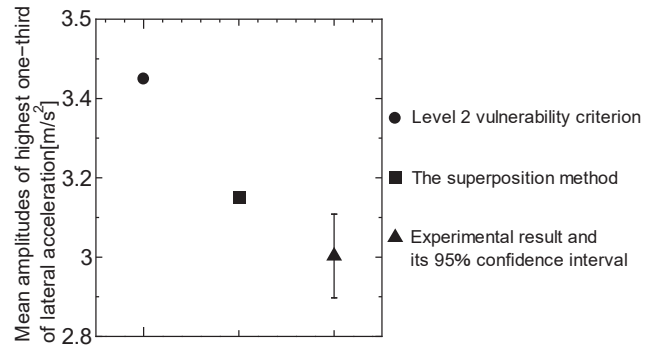


図5 第二段階基準と線形重ね合わせ法及び模型実験の比較

4. 2. 2 周波数応答の線形重ね合わせ法

次に、簡易な計算法としてストリップ法の1種であるSTF法 (Salvesen, Tuck and Faltinsen's Method)を用いた周波数領域計算による船体応答関数を求め、それに波スペクトルをかけたものを線形重ね合わせし、短波長不規則波中の応答を求めた。ここで用いたSTF法は前後揺れを除く5自由度であり、流体力は2次元の特異点分布法で求めている。横揺れ減衰力の扱いは時間領域計算と同じである。図4に規則横波中の横加速度の計算結果と実験結果を比較して示す。両者はよく一致しており、STF法の計算精度は十分であることが確認できる。

図5に有義波高5.5m、平均ゼロアップクロス波周期9.5sでの第二段階基準、線形重ね合わせ法と模型実験での横加速度の1/3最大平均値を比較して示す。第二段階基準は模型実験と比べて安全側評価であり、線形重ね合わせ法と模型実験は良い一致を示しており、かつ第二段階基準との整合性を持っている。よって、本評価法は過大加速度の直接復原性評価に有用であることが確認できる。

表2に北大西洋のすべての波浪条件下で横波を主方向とする不規則波中前進速度零での横加速度を線形重ね合わせ法、時間領域計算法で計算し、波浪発現頻度で加重平均した一波当たりの平均長期危険事象発生確率 p を示す。線形重ね合わせ法と時間領域計算法を用いた結果は近い値となり、かつ、第二段階基準との整合性もとれている。よって過大加速度モードの直接復原性評価には計算負荷が抑えられる線形重ね合わせ法が有用である。

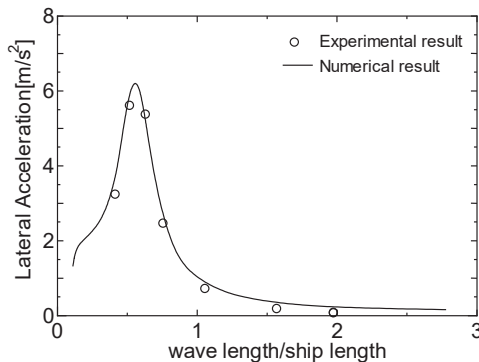


図4 規則波横波中横加速度のSTF法と模型実験

表2 一波ごとの平均長期危険事象発生確率

Average long-term failure probabilities per encounter wave	Method		
	Level 2	Linear superposition method	Time-domain situations
	$5.35 \cdot 10^{-5}$	$2.02 \cdot 10^{-5}$	$1.68 \cdot 10^{-5}$

4. 3 評価法

直接復原性評価は時間単位時間当たりの危険事象発生確率 r (1/s)で評価する。コンテナ船を用いた線形重ね合わせ法による完全確率論的評価の適用例を示す。北大西洋のすべての波浪条件で波向きを向波から追波まで30deg刻みで計算した平均長期危険事象発生確率を図6に示す。なお、ここでの波の方向分布は $\cos^2$ 分布である。波向きの分布を均一として扱えば、一波当たりの平均長期危険事象発生確率 p は $2.33 \cdot 10^{-6}$ である。単位時間当たりの平均長期危険事象発生確率 r は(9)式で求める。

$$r = -\ln(1-p)/T_e \quad (9)$$

ここで T_e は船速ごとの平均出会い周期であり、前進速度零の場合は波周期の期待値になる。

単位時間当たりの平均長期危険事象発生確率 r は $2.63 \cdot 10^{-7}$ であり、基準値 $2.6 \cdot 10^{-8}$ より大きく、図1に示したコンテナ船は不合格となる。

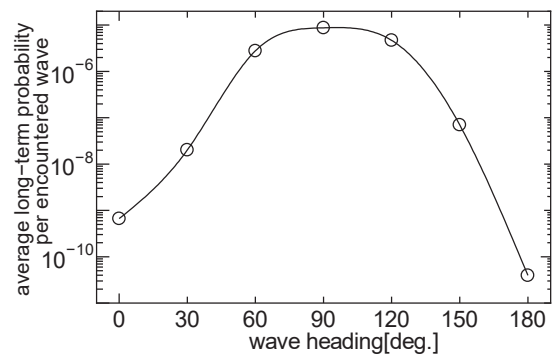


図6 波向き毎の一波当たりの平均長期危険事象発生確率

5. 運航制限・運航ガイダンス

脆弱性基準に適合しない場合、選択肢として直接復原性評価の他に、運航制限、運航ガイダンスがある。評価法は脆弱性基準及び直接復原性評価での計算法を適用する。どちらも総運航時間に対して推奨される条件での合計存続時間は比率0.8以上としている。

5.1 運航制限

運航制限とは、最大有義波高によるものと、航行海域または航行する季節を指定するものがある。特定の有義波高 H_s 以上をカットした、または風統計の修正に対応した特定環境条件を用いて作成される。

過大加速度モードの第二段階基準を用いた最大有義波高による運航制限を図1に示すコンテナ船に適用する。北大西洋の波浪発現頻度(IACS No. 34)の場合、総運航時間に対する基準に適合した状態での運航時間の比率を0.8以上にするには最大有義波高による運航制限は4.5m以上でなければならない。設定有義波高以上の発生確率を0として第二段階基準で評価した結果を表3に示す。対象船の最大有義波高による運航制限は7.5mである。この値は4.5m以上であり、総運航時間に対する7.5m以上の回避すべき海象の割合は0.024であることから、運航制限による運用が認められる。

表3 有義波高による運航制限

Cutting H_s	Navigable H_s	C	Judge
8.5 m	7.5 m	2.55E-04	PASS
9.5 m	8.5 m	4.06E-04	FAIL

5.2 運航ガイダンス

運航ガイダンスは載荷状態ごとに波浪条件における船の前進速度と針路（波向き）について正確かつ詳細な推奨条件を提供するもので、直接復原性評価で用いる高精度な計算手法と模型実験を必要とする。ただし、高度な計算手法よりも安全側評価であることが示されている計算法は使用できる。よって脆弱性基準で用いる簡易で安全側評価となる計算法は使用可能であり、許容可能な前進速度や針路のガイダンスを作成することができる。

ここでは過大加速度の第二段階基準を用いた簡易運航ガイダンスを図1に示すコンテナ船に適用する。第二段階基準で定義される北大西洋の波浪条件下での危険事象の短期発生確率 C_i が 10^{-6} 以上となる海象条件、前進速度、波向を回避することになる。過大加速度の第二段階基準では前進速度無し、主方向横波の短波頂不規則波としているため、波の周波数を波との出会い周波数に置き換え、横揺れ減衰力推定に前進速度影響を考慮し、波との出会い角の正弦の絶対値と乗算した。脆弱性基準で不合格となった載荷状態で航行しうる船速、波向すべての計算が必要になるため、計算結果は膨大となる可能性があり、操船者に分かりやすく、かつ適切に示すよう工夫が必要である。図8に当所で開発した過大加速度モードの運航ガイダンス計算および操船者への評価結果表示

機能を有する操船支援システムの表示例を示す。画面左側で載荷状態（喫水、GM、トリム）と選択すると、その載荷状態での有義波高、船速ごとのすべての波向での過大加速度に対する短期発生確率 C_i を基準値 10^{-6} で除した値が表示される。このように評価する載荷状態、海象、船速、波向にあった情報を運用者に示すことで、出港前の検討、航行中の危険を回避する支援を行うことができる。

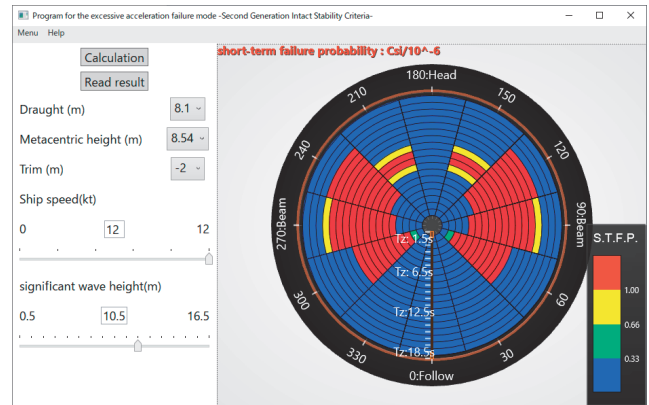


図7 運航ガイダンスに基づく操船支援システム

6. まとめ

第二世代非損傷時復原性基準暫定ガイドラインの概要を紹介し、本基準で扱う5つの危険モードの1つである過大加速度モードの基準策定のための調査研究および適用例を示した。過大加速度モードの基準値は厳しく設定されており、既存船に適用すると多くが不適合となる。今後は本基準に適合する対応策を検討する必要がある。

謝辞

本研究の一部は日本財団助成事業の一環として一般財団法人日本船舶技術研究協会からの受託研究「目的指向型復原性基準の策定に関する調査研究」（平成28年度から令和1年度）で実施しました。

References

- 1) Umeda, N.: Towards New Generation Intact Stability Criteria for Ship, Report of National maritime Research Institute, Vol.10, No. 2 (2010), pp.19-39.
- 2) IMO: Interim guidelines on the second generation intact stability criteria, MSC. 1/Circ. 1627 (2020).
- 3) France, W.N., Levadou, M., Treake, T.W., Pauling, J.R., Michel, R.K. and Moore, C.: An investigation of head-sea parametric roll and its influence on container lashing system, Marine Technology, 40(1) (2003), pp.1-19.
- 4) Sweden: Recordings of head sea parametric rolling on a PCTC, SLF47/INF.5, IMO (2004).
- 5) Kuroda, T., Hara, S., Houtani, H. and Ota, D.: Direct Stability Assessment for excessive acceleration failure mode and validation by model test, Ocean Engineering,