

第二世代非損傷時復原性基準に基づく操船支援システムの開発

黒田 貴子*, 大田 大地*

Development of Ship Operational Support System based on the Second Generation Intact Stability Criteria

by

KURODA Takako*, OTA Daichi*

Abstract

The International Maritime Organization has approved the interim guidelines for the second generation intact stability criteria (SGIS) in 2020. The criteria assess stability failures due to dead ship condition, excessive acceleration, pure loss of stability, parametric rolling, and surf-riding/broaching. In addition to the design-driven safety criteria, a framework has been agreed upon to impose operational measures for avoiding hazardous phenomena due to ship stability. The National Maritime Research Institute has contributed to the formulation of the excessive acceleration failure mode. This failure mode assesses the lateral acceleration at the highest location where a person is present and differs from other modes because vessels with large metacentric heights may be highly vulnerable. As many existing vessels do not comply with assessment of this failure mode. Therefore, measures against excessive acceleration failure modes must be considered. In addition, the operational measures need to be able to be implemented without undue constraints on conventional operations.

In this study, we focused on the excessive acceleration failure mode and developed a ship operational support system using the vulnerability assessment method that can be utilized for operational guidance, which is an operational measure of SGIS. In addition, the impact of operational measures on conventional navigation was verified using actual operational data. A container ship that recorded a large lateral acceleration at a bridge during navigation under ballast conditions was selected and assessed using the developed ship operational support system. The assessment results indicated that the ship operational support system did not affect conventional operations and that the threshold to be avoided was appropriate.

* 流体性能評価系 耐航性能研究グループ

原稿受付 令和6年7月18日

審査日 令和6年8月13日

目 次

1. 緒言	34
2. 復原性による危険事象の評価	34
2.1 第二世代非損傷時復原性基準暫定ガイドライン	35
2.2 過大加速度モード	36
2.3 既存船の適合率	36
3. 操船支援システムの開発	37
4. 実運航データを用いた検証	38
4.1 対象船	38
4.2 実運航データ	39
4.3 海象データ	40
4.4 操船支援システムの適用	42
5. 結言	45
謝 辞	45
References	45

1. 緒 言

海難事故の再発防止及び安全性の向上と評価に関する研究成果を用いて基準策定を主導することは、船舶の安全運航の確保と同時に日本の海事産業の国際競争力強化の観点からも重要である。国際海事機関では、近年の動的復原性に起因する海難事故を防ぐために第二世代非損傷時非損傷時復原性基準暫定ガイドラインが 2020 年に承認された。第二世代非損傷時復原性基準では 5 つの危険事象に対する船舶の耐性を評価する設計主体の安全基準に加え、危険を避けるための運航措置を課すことで運航を可能とする枠組みが合意されている。設計者が主体の安全基準と一部の危険を運航者が回避する運航努力の組み合わせの導入は従来の基準にはなかった試みであるが、このような運航措置は従来の実運航へ過度な制約が発生せずに行き、かつ有用なものである必要がある。

海上技術安全研究所は第二世代非損傷時復原性基準で扱う 5 つの復原性に起因する危険事象の 1 つである過大加速度モードに関する研究成果を基に、その基準策定に貢献してきた^{1),2),3),4),5)}。過大加速度モードは他の 4 モードと異なりメタセンタ高さ (GM) が大きい場合に脆弱性を示すモードであり、これまでの調査研究で既存船の適合率が低い傾向にあることが分かっている。本研究では過大加速度モードに着目し、第二世代非損傷時復原性基準で規定される運航措置の 1 つである運航ガイダンスに活用できる操船支援システムの開発を行った。さらに開発した操船支援システムにより出力された運航措置の従来の運用への影響および有用性をバラスト状態で航行中に比較的大きな横加速度を記録したコンテナ船の実運航データを用いて検証した。

2. 復原性による危険事象の評価

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伴う損傷時復原性と、無傷の船体に作用する波や風による転覆を伴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) により、それぞれ国際的な基準が定められている。近年、船の大型化や貨物の専用船化、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、2020年に第二世代非損傷時復原性基準暫定ガイドライン (MSC. 1/Circ.1627)⁶⁾と2022年にその説明文書 (MSC. 1/Circ. 1652)⁷⁾が承認された。この暫定ガイドラインでは波浪中を航行する船に発生する復原性に起因する5つの危険事象を評価する設計主体の安全基準に加え、操船努力によって危険を回避する、または航行可能な有義波高や航路を限定するといった危険を避けるための運航措置を課すことで運航可能とする枠組みが合意されている。

本研究では第二世代非損傷時復原性基準の運航措置に活用できる、危険事象の評価に基づき運航時に操船による危険の回避を支援するための操船支援システムの開発を行った。開発したシステムは第二世代非損傷時復原性基準で扱う5つの危険事象のうち、既存船の適合率が低く、運航措置を適用する船が多くなる可能性が高い過大加速度モードを扱っている。

以下に第二世代非損傷時復原性基準と過大加速度モードの概要と、既存船の適合率について述べる。

2.1 第二世代非損傷時復原性基準暫定ガイドライン

第二世代非損傷時復原性基準暫定ガイドラインで扱う危険事象モードは(1)デッドシップ状態(現基準で扱う事象)、(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つである。この5つの危険モードに対する船舶の耐性を、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段階で評価する構成となっている (図1)。第一段階は簡易な計算で安全側に評価し、第二段階は各モードの危険事象が発生する長期発生確率で評価する。評価基準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ことになる。

直接復原性評価は横揺れ角 40 deg, 横加速度 9.81 m/s² を閾値とし、北大西洋の波浪発現頻度表に表示されるすべての有義波高と波周期の組み合わせに対して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 (m·s)⁻¹ の海象に限定し、モード毎に設定された条件 (design situations) で確率論的に評価する、または発生確率密度 7·10⁻⁵ (m·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 2.6·10⁻⁸ s⁻¹, 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 s⁻¹, 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。

これらの評価で脆弱と判定された場合でも運航措置 (Operational measure) で危険を回避する運航制限 (Operational limitation) または運航ガイダンス (Operational guidance) を適用することで運航することができる。

運航制限は、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評価する。運航ガイダンスは危険事象を操船で回避するためのもので、载荷状態ごとに波浪条件における許容可能な前進速度と針路 (波向き) について推奨条件を提供する。これらの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し、運航できるのは総運航時間に対する推奨される条件での合計存続時間との比率が 0.8 以上の場合としている。

本研究で取り上げる過大加速度モードの第一、第二段階基準の評価方法については次節で述べる。

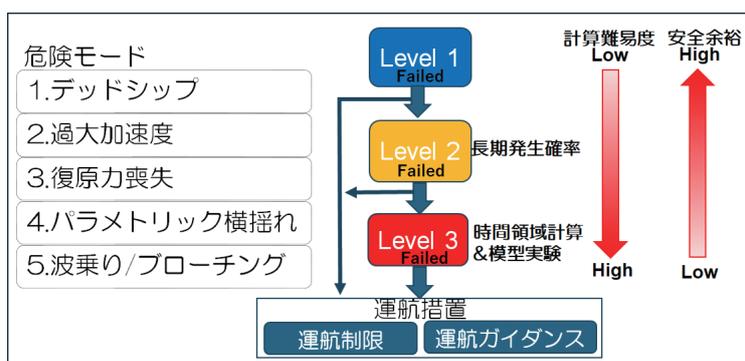


図1 第二世代非損傷時復原性基準暫定ガイドラインの構成

2.2 過大加速度モード

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り、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ブリッジに働く横方向の加速度を評価する基準である。

過大加速度の第一段階基準は低速域で不規則横波中の横加速度を(1)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、Bretschneider型波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。

$$\left. \begin{aligned} \varphi K_L (g + 4\pi^2 h / T_r^2) &\leq R_{EA1} \\ \varphi &= 4.43 Y_s / \sqrt{\delta_\varphi} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

第二段階基準は国際船級協会連合(IACS)発行の北大西洋の波浪発現頻度表 IACS.No.34 (Corr. Nov.2001)⁸⁾にある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((2)式)。 $C_{s,i}$ は短期発生確率、 W_i は短期波浪に対する重み係数、 σ_{LAi}^2 は横加速度の分散値である。

$$\left. \begin{aligned} C &= \sum_{i=1}^N W_i C_{s,i} \leq R_{EA2} \\ C_{s,i} &= \exp(-R_2^2 / 2\sigma_{LAi}^2) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

なお、第一段階及び第二段階基準の基準値は、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結果に整合性が取れるよう設定されたものである。

過大加速度モードの直接復原性評価計算法については著者が提案した線形重ね合わせ法が採用されている。計算法の検討時には時間領域計算法や模型実験も実施しており、成果をまとめて発表している^{9), 10), 11)}。

2.3 既存船の適合率

過大加速度モードの既存船の適合率を把握するために、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評価を実施した。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った。計算したすべての船種で不合格の載荷状態が存在したが、ブリッジが高く、載荷状態によりGMが大きくなる船型(例えばコンテナ船)がより強く脆弱性を示す。脆弱性基準で脆弱性が認められた場合、直接復原性評価、または運航措置である運航制限か運航ガイダンスを適用することになる。

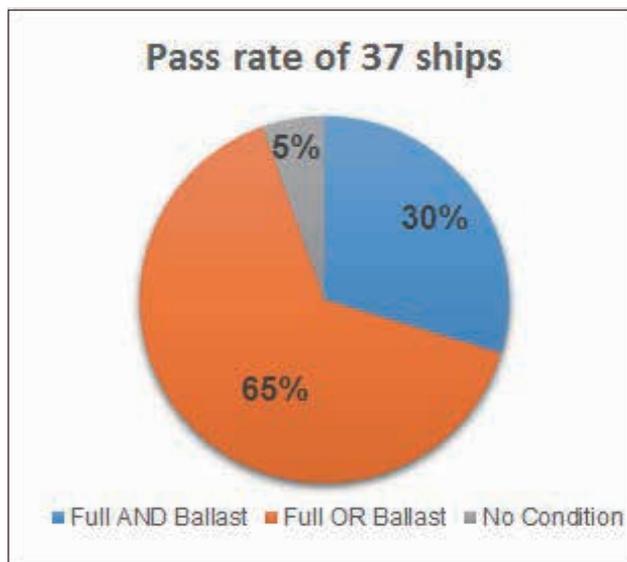


図2 過大加速度モード脆弱性基準適合状況

3. 操船支援システムの開発

過大加速度モードの既存船を対象とした試算の結果、多くの既存船が脆弱性を示したことから、運航措置である運航ガイダンスに活用できる過大加速度を指標とした操船支援システム¹²⁾の開発を行った。運航ガイダンスは操船者へ載荷状態ごとに波浪条件下での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度な計算法での評価の他に、高度な計算法よりも安全側評価であることが示されている脆弱性基準の計算法も使用できる（簡易運航ガイダンス）。過大加速度モードの運航ガイダンスを適用する場合、危険事象の短期発生確率が 10^{-6} 以上となる海象、運航条件を回避することになる。

開発した操船支援システムでの過大加速度の評価は第二段階基準の評価法を基にしており、横加速度を算出する時には波の周波数を波との出会い周波数に置き換え、横揺れ減衰力の推定に前進速度影響を考慮し、波向きに対しては波との出会い角の正弦の絶対値と乗算した。この評価法を用いて指定した載荷状態及び船速の範囲と分割数に対して、北大西洋の海象条件を示す IACS No.34 にあるゼロアップクロス波周期の範囲 3.5 s から 18.5 s を 1 s 刻み、有義波高の範囲 0.5 m から 16.5 m を 1 m 刻みですべての短期海象条件を扱い、波向きは向波から追い波まで 30 deg 刻みの波条件下で短期発生確率 $C_{s,i}$ の計算を行う。計算結果は膨大となるため、評価結果を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。

操船支援システムは、喫水、GM、トリムで表す載荷状態のマトリックスに対して北大西洋の波浪条件下での危険事象の発生確率が 10^{-6} 以上となる有義波高、ゼロアップクロス波周期、波向き、前進速度を示し、操船によって危険を回避できるよう操船者に情報を可視化して示すものである。操船支援システムの結果表示例を図3に示す。画面左側で載荷状態（喫水、GM、トリム）を選択すると、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} で除した値を4段階に色分けして表示しており、短期発生確率が基準値を超える条件は赤く示される。すなわち、赤で示すゾーンは回避すべき条件を意味している。極座標図の中心に船首を上向きにして船が位置するものとし、0 deg.が追波を示す。放射軸はゼロアップクロス波周期を示している。このように評価したい載荷状態、海象、船速にあった情報を運用者に視覚的に示すことで、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。

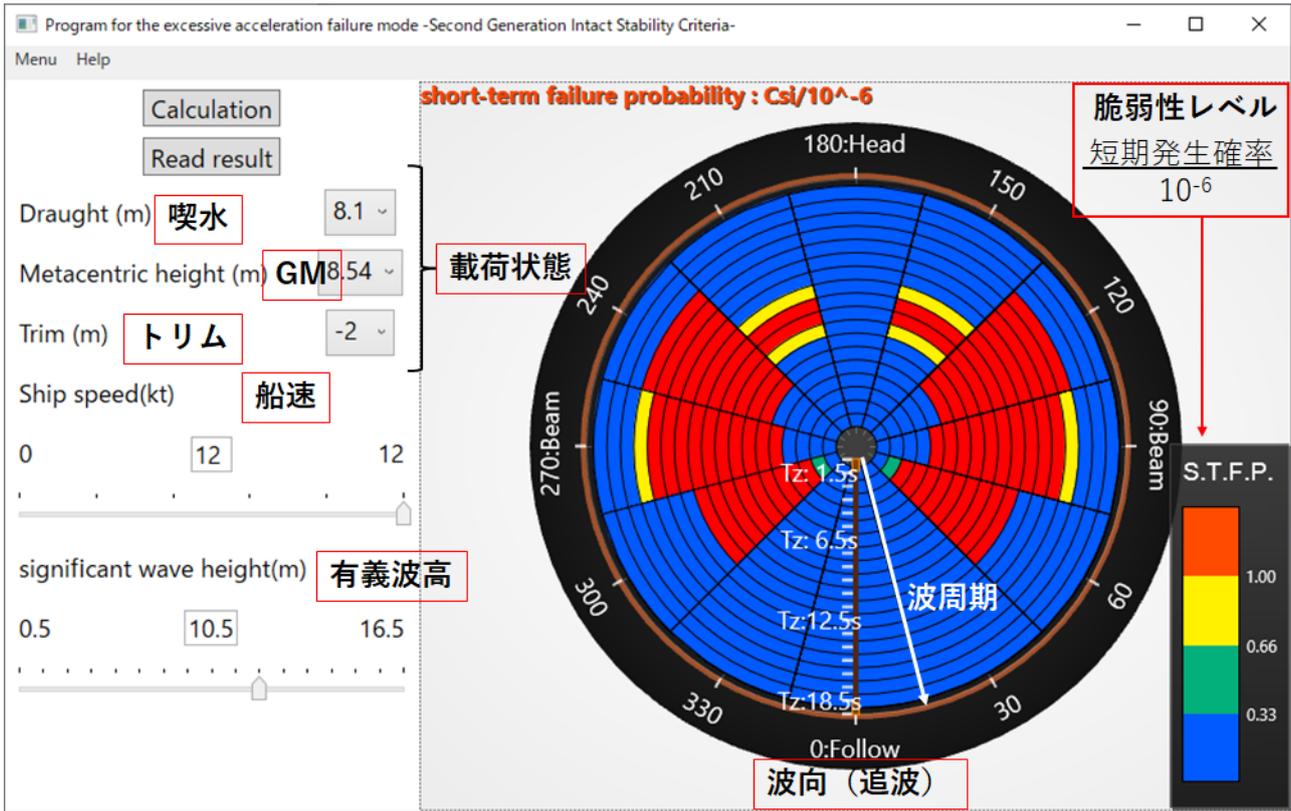


図3 操船支援システム

4. 実運航データを用いた検証

船舶の実運航データと航行海域の波浪推算値を用いて操船支援システムの評価を検証した。慣性運動計測機器（ジャイロ）を搭載したコンテナ船を運用する運航会社からバラスト状態で航行中に比較的大きな横加速度が発生した実運航データを、日本気象協会から実運航データに該当する時間、航路上の波浪推算値を入手した。対象船を操船支援システムで評価し、操船支援システムの従来への影響及び有用性を検証した^{13), 14)}。

4.1 対象船

対象船は船長約 350 m のコンテナ船である。実運航データ記録時の载荷状態はドック航海中の完全なバラスト状態であり、通常運航の载荷状態ではない。この時の载荷状態での過大加速度モード脆弱性基準の評価結果を表 1 に示す。判定結果は Level 1, 2 とともに不適合である。

第二世代非損傷時復原性基準では脆弱性基準が不適合だった場合、直接復原性評価（Level 3）又は運航制限及び運航ガイダンスを適用することになる。最大有義波高による運航制限を適用するには、計算で用いる波浪発現頻度での総運航時間に対する基準に適合した状態での運航時間との比率が 0.8 以上必要であり、北大西洋の波浪発現頻度である IACS No. 34 を使用する場合は 4.5 m 以上でなければならない。対象船の有義波高による運航制限は 5.5 m と算出され、4.5 m を超えているため適用が可能である。

表 1 コンテナ船の脆弱性基準及び最大有義波高による運航制限の評価結果

	基準値	評価値	判定
Level 1	4.64 [m/s ²]以下	13.74 [m/s ²]	不適合
Level 2	0.00039 以下	0.00186	不適合
最大有義波高による運航制限	0.00039 以下	5.5 m	適用可

4.2 実運航データ

対象船の実運航データである船体運動と航海データを解析した。船体運動は対象船に搭載されたジャイロで計測されたもので、前後、左右、上下方向の加速度、角加速度及びロール、ピッチの角度が記録されている。対象船の2020年8月15日から8月25日までの11日間の航跡を図4に示す。対象船は完全なバラスト状態で中国沿岸を南下してドックに向かっており、8月18日に波高が大きくなる中で船速を落として待機、漂流している時に比較的大きな横揺れと横加速度が発生した。この時の対象船の位置は図4の図中赤枠で示す位置であり、この場所に8月18日から8月24日まで待機していた。

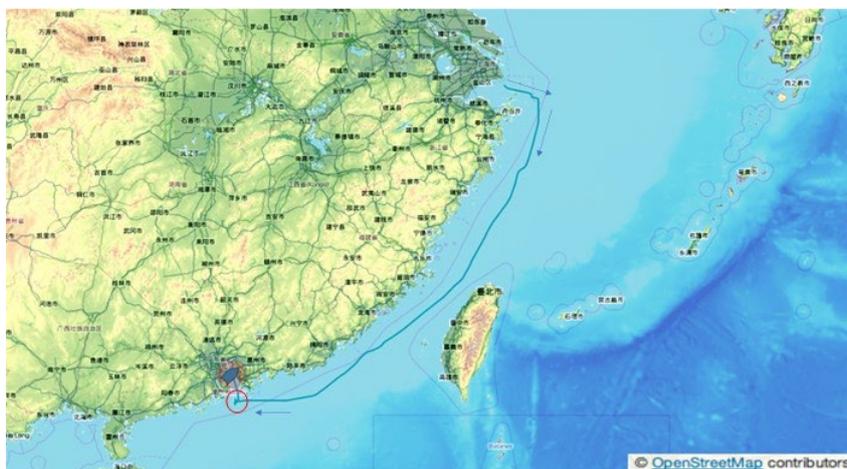


図4 対象船の航路

航海期間中の対地速度を図5に示す。8月18日に船速を落としてほぼ零になったことが分かる。図中の破線で示す範囲は8月18日に横揺れと横加速度が大きくなった時間を含む2時間（15:30から17:30）を示す。

8月18日の15:30から17:30までの横揺れと横加速度の計測値を図6、図7に、横加速度が大きくなった範囲を拡大した縦揺れと横揺れを図8、横加速度を図9に示す。サンプリング周期は5 Hz、横加速度はブリッジ位置での値を示している。この期間の横加速度の最大値と最小値は 5.341 m/s^2 と -5.784 m/s^2 、横揺れ角の最大値は 14.7 deg とコンテナ船としては比較的大きな横揺れが発生していた。なお、横加速度及び縦揺れと横揺れの運動周期はほぼ同じであり、パラメトリック横揺れではないことが分かる。2時間のデータを5つに分割して解析した30分毎（最初と最後のデータは15分）の横加速度の最大・最小値及び分散値を表2に示す。

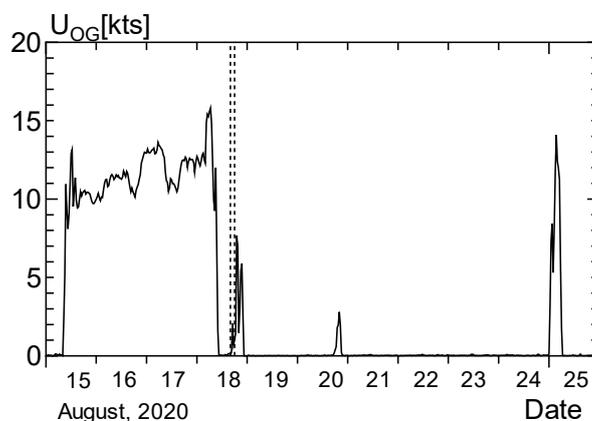


図5 対象船の対地速度 (2020/8/15-8/25)

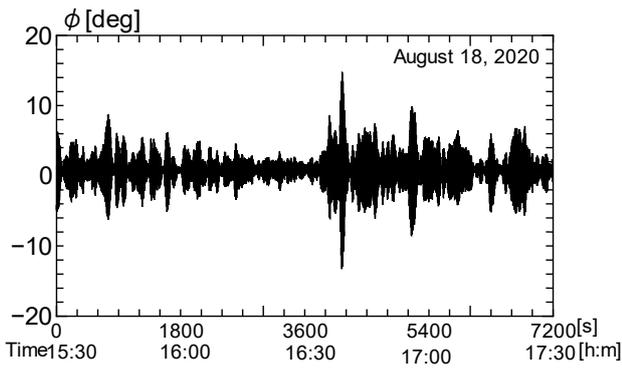


図6 横揺れの時系列データ
(2020/8/18 15:30~17:30)

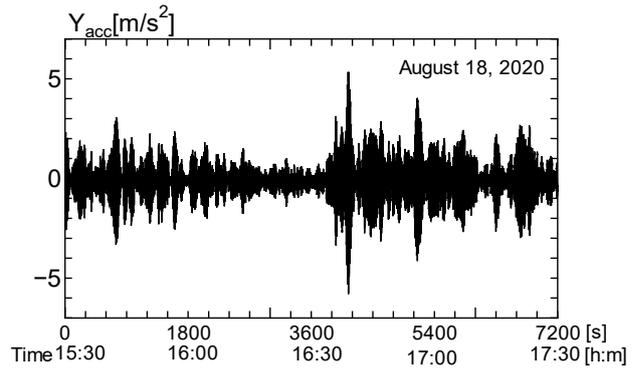


図7 横加速度の時系列データ
(2020/8/18 15:30~17:30)

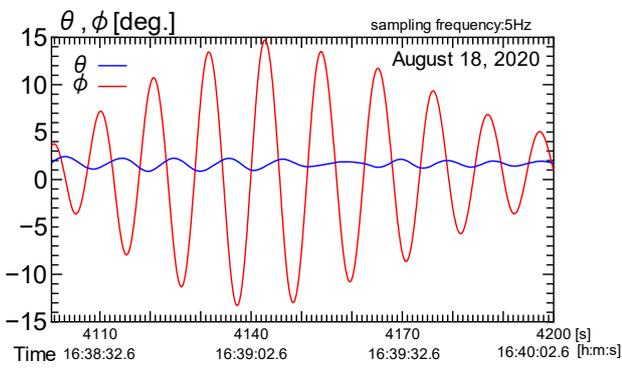


図8 横揺れ ϕ と縦揺れ θ の計測値の抜粋
(2020/8/18 16:38-16:40)

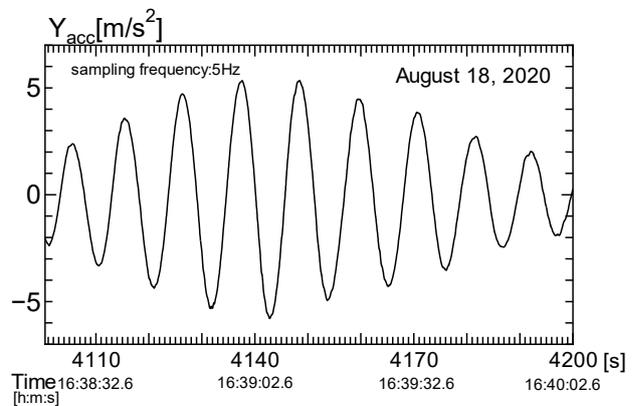


図9 横加速度の計測値の抜粋
(2020/8/18 16:38-16:40)

表2 横加速度の最大・最小値と分散値

2020/8/18	Lateral acceleration [m/s ²]			
	Time	Max	Min	Variance
	15:30	3.057	-3.311	1.010
	16:00	2.362	-2.557	0.588
	16:30	5.341	-5.784	1.034
	17:00	4.000	-4.134	1.252
	17:30	2.670	-2.991	0.913

4.3 海象データ

日本気象協会が算出した対象船の航路上の位置と時間に紐づけされた、風浪とうねりを分離したそれぞれの波スペクトルと風浪とうねりを統合した総合波のスペクトルから有義波高 H_s 、平均波周期 T_{01} を次式で解析した結果をそれぞれ図10、図11に示す。

$$\left. \begin{aligned} H_s &= 4.0\sqrt{m_0} \\ T_{01} &= 2\pi\frac{m_0}{m_1} \end{aligned} \right\} (3)$$

有義波高は、8月18日前半では風浪が支配的で、同日後半以降はうねりが支配的であることが分かる。総合波の有義波高が一番大きく、対象船の横加速度が一番大きくなった時間(破線部)で最大になることを示している。なお、風浪の有義波高が8月21日から8月23日の間で欠けているのは風浪の波スペクトルデータがない(推算値がない)ためである。

平均波周期は、対象船の横加速度が大きくなった時間(破線部)での風浪は5~5.5s、総合波は6s、うねりは7sと一番長い。その後はうねりが支配的になり、うねりと総合波の平均波周期はほぼ同じとなる。

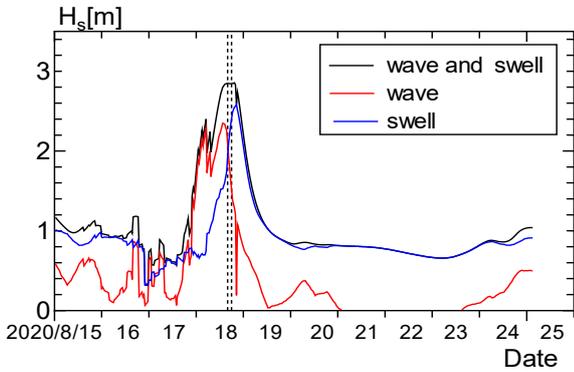


図10 航路上の有義波高(風浪, うねり, 総合波)

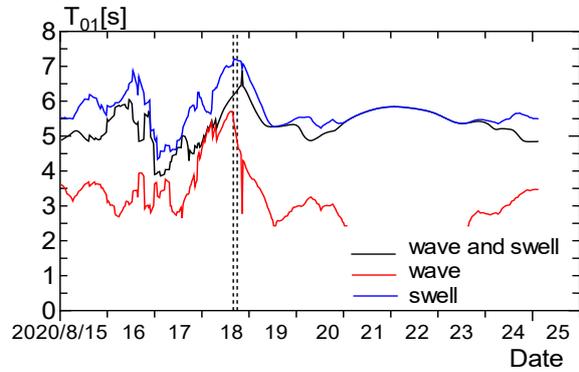


図11 航路上の平均波周期(風浪, うねり, 総合波)

次に、2020年8月18日の総合波の卓越波向 θ_p (日本気象協会解析結果)と、総合波、風浪、うねりの平均波向 θ_m (方向スペクトルの重心方向)を次式で解析した結果を合わせて図12に示す。平均波向は北から南への波向きが0deg.の時計回りが正である。

$$\theta_m = \tan^{-1} \frac{m_{01}}{m_{10}} \tag{4}$$

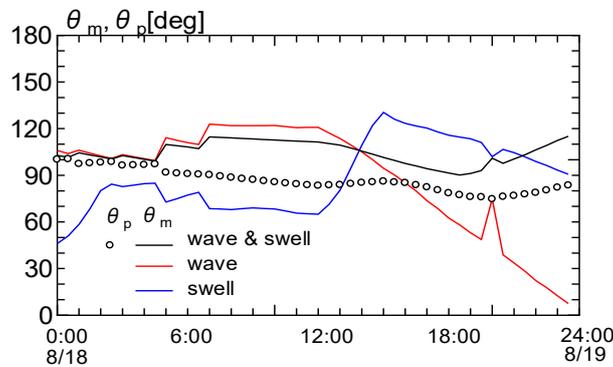


図12 航路上の平均波向(風浪, うねり, 総合波)

横加速度が大きくなった2020年8月18日15:30から17:30までの30分毎の総合波、風浪、うねりの諸元をそれぞれ表3、表4、表5に示す。有義波高が最も大きくなるのは総合波で2.8mである。総合波の平均波周期 T_{01} は6.2s、風浪は5.2s、うねりは7.2sである。総合波の平均波向き θ_m と卓越波向き θ_p に大きな差は生じていない。

表 3 総合波の諸元

2020/8/18 time	有義波高 H_s [m]	平均波周期 T_{01} [s]	平均波向 θ_m [deg.]	卓越波向 θ_p [deg.]
15:30	2.847	6.2	99.6	85.6
16:00	2.847	6.2	97.6	85.2
16:30	2.845	6.2	96.0	83.8
17:00	2.844	6.3	94.3	82.4
17:30	2.845	6.3	92.9	80.5

表 4 風浪の諸元

2020/8/18 time	有義波高 H_s [m]	平均波周期 T_{01} [s]	平均波向 θ_m [deg.]
15:30	2.093	5.5	90.3
16:00	1.919	5.3	85.2
16:30	1.788	5.2	80.0
17:00	1.646	5.0	73.6
17:30	1.521	4.8	68.6

表 5 うねりの諸元

2020/8/18 time	有義波高 H_s [m]	平均波周期 T_{01} [s]	平均波向 θ_m [deg.]
15:30	1.930	7.1	126.1
16:00	2.102	7.2	123.4
16:30	2.214	7.2	121.7
17:00	2.319	7.2	120.4
17:30	2.404	7.2	117.9

4.4 操船支援システムの適用

対象船に操船支援システムを適用し、当時の海象条件下での運航状況が適合するか否かを調査し、操船支援システムの従来の運用への影響及び有用性を検証した。

横加速度が大きくなった時の対象船の運航状態と海象状態を整理する。2020年8月18日の船速と進路を総合波の有義波高と合わせて図13、14に示す。有義波高が大きくなる頃に船速を大きく落としており、進路は横加速度が一番大きくなった時間（破線部区間）では継続的に変化している。ただし、この時の船速は零に近いドリフト状態だったため、進路と針路の差が大きい可能性がある。

2020年8月18日15:30から17:30までの30分毎の横加速度、総合波諸元及び運航状況を整理して表6に示す。表中に示す波との出会い角は、船尾からの波が0 deg.、時計まわりを正としている。船は斜め向波から追い波へ変化している。2時間の間での有義波高は2.8 m、平均波周期は6.2 s、船速は零、出会い角は追い波から斜め向波までである。

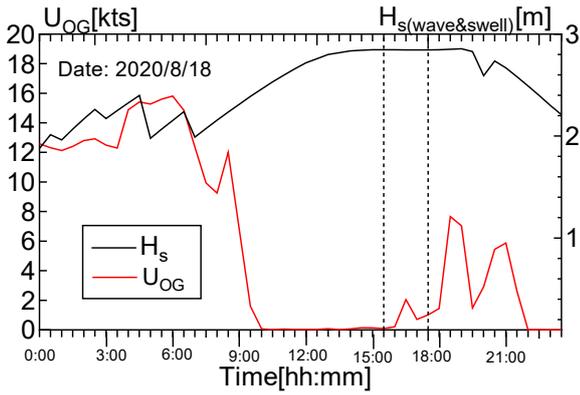


図 13 船速と総合波の有義波高 (2020/8/18)

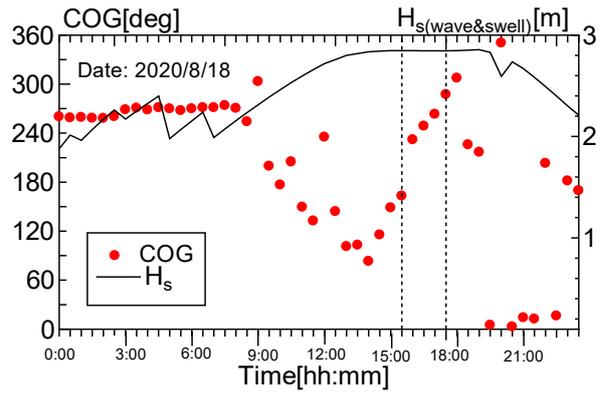


図 14 進路と総合波の有義波高 (2020/8/18)

表 6 横加速度, 総合波, 運航状況の諸元 (2020/8/18 15:30~17:30)

Date&Time	船橋での横加速度 [m/s ²]			総合波				運航状況			
				有義波高	平均波周期	平均波向	卓越波向	平均対地	平均進路	θ_m との	θ_p との出
								船速	COG	出会角	会角
MAX	MIN	Variance	Hs[m]	T01[s]	θ_m [deg]	θ_p [deg]	OG[kts]	COG[deg]	χ_{θ_m} [deg]	χ_{θ_p} [deg]	
2020/8/18 15:30	3.057	-3.311	1.010	2.847	6.2	99.6	85.6	0.1	163.2	116.4	102.4
2020/8/18 16:00	2.362	-2.557	0.588	2.847	6.2	97.6	85.2	0.2	231.9	45.7	33.3
2020/8/18 16:30	5.341	-5.784	1.034	2.845	6.2	96.0	83.8	2.1	248.6	27.3	15.2
2020/8/18 17:00	4.000	-4.134	1.252	2.844	6.3	94.3	82.4	0.7	263.1	11.2	-0.7
2020/8/18 17:30	2.670	-2.991	0.913	2.845	6.3	92.9	80.5	1.0	287.3	-14.4	-26.8

図 15 に、操船支援システムを用いた対象船の船速零, 有義波高 2.5 m の海象下での評価結果 (短期発生確率 $C_{s,i}$ /基準値 10^{-6}) を示す. いずれの波向き, 波周期でも基準値を超えない結果であった. よって, 今回解析した対象船の航海は適合した状態で航行していた, つまり操船支援システムは従来の運用へ過度な制約が発生していないことが示された.

次に同じ対象船, 船速零の状態の有義波高を 2.5 m から 1 m 大きくした 3.5 m とした場合の操船支援システムの評価結果を図 16 に示す. 有義波高が 3.5 m になると横波中の波周期 6.5 s から 8.5 s で不適合となり, このような海象条件になった場合は操船による回避が求められる. 総合波の平均波周期と不適合となる波周期は非常に近く, 実運航データと波浪推算値より有義波高約 2.8 m で比較的大きな横揺れ (14.7 deg) と横加速度 (5.8 m/s²) が発生していたことから, それより大きな有義波高になった場合には危険と評価されるのは妥当であり, 本システムは操船者に危険を回避する情報を提供するのにも有用であると考えられる.

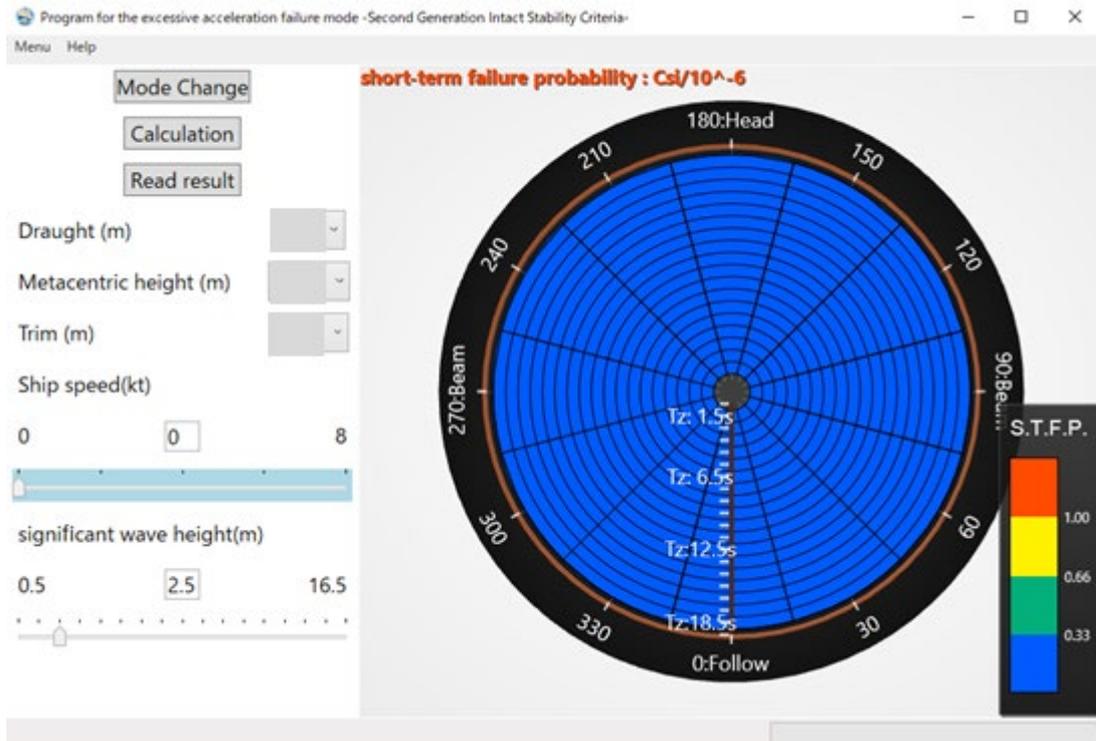


図 15 有義波高 2.5 m, 船速零での対象船の運航支援システムでの評価結果

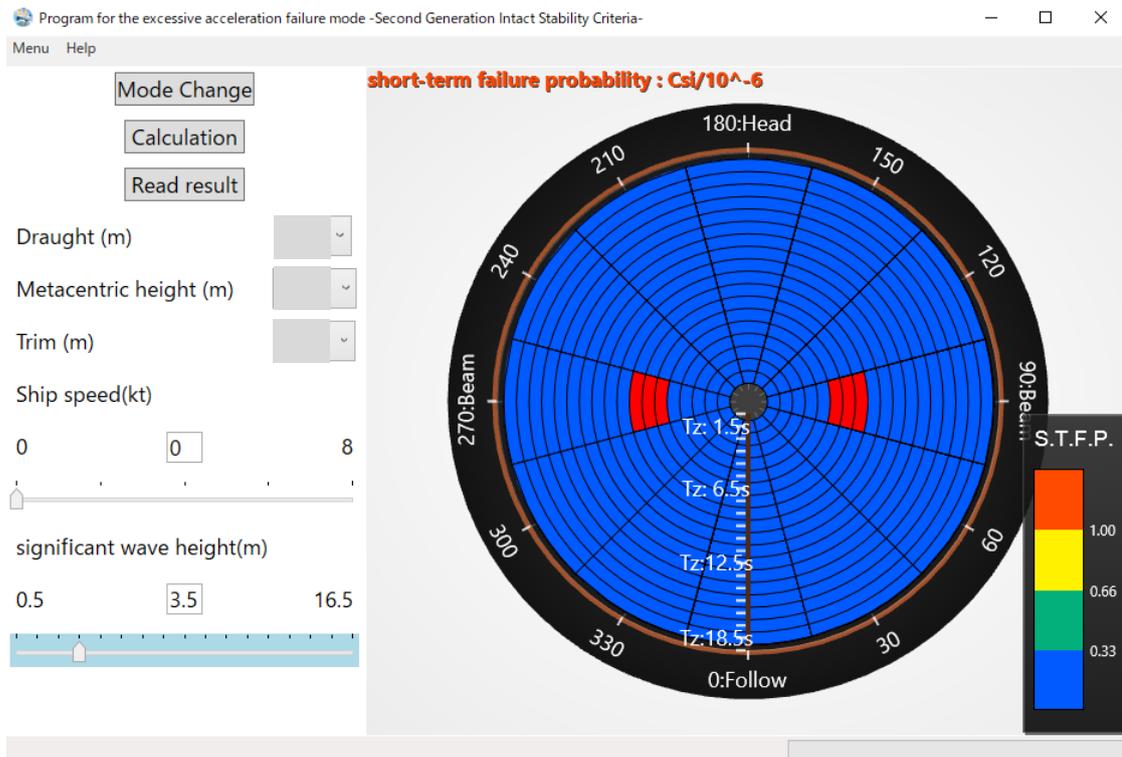


図 16 有義波高 3.5 m, 船速零の対象船の運航支援システムでの評価結果

5. 結 言

本研究では既存船で適合率が低い第二世代非損傷時復原性基準の過大加速度モードに着目し、運航措置である運航ガイダンスに活用できる操船支援システムを開発し、このシステムの従来の運用への影響および有用性の検証をバラスト状態で航行中に大きな横加速度を記録したコンテナ船の実運航データを用いて検証した。

開発した操船支援システムは IMO で承認された第二世代非損傷時復原性基準暫定ガイドラインで合意されている運航措置の1つである運航ガイダンスに活用できるものであり、脆弱性基準の第二段階基準の評価方法を基に波向きと航海速度を考慮した計算法で危険事象の短期発生確率を評価している。喫水、GM、トリムで表す載荷状態のマトリックスに対して北大西洋の波浪条件下での危険事象の発生確率が 10^{-6} 以上となる有義波高、ゼロアップクロス波周期、波向き、前進速度を示し、操船によって危険を回避するよう操船者に情報を示すものである。

操船支援システムの有用性及び従来の運用への影響を検証するために、比較的大きな横加速度を記録したコンテナ船を操船支援システムで評価した。対象船は有義波高 2.8 m、平均波周期 6.2 s の海象下で 14.7 deg. の横揺れ角と 5.8 m/s^2 の横加速度を記録していた。操船支援システムの評価は適合状態であり、本システムは従来の運用に過度な制約が発生しないことを示した。また、有義波高が 3.5 m の場合の操船支援システムの評価は、当時の波周期では不適合となった。実運航時の海象より大きな有義波高になった場合に危険と評価されるのは妥当である。以上の結果より、開発した操船支援システムが過大加速度に対する運航措置として有用であることを示した。

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「目標指向型復原性基準の策定に関する調査研究(目標指向型復原性基準プロジェクト)ー過大加速度モードの調査研究-」(令和4年度)で実施しました。

References

- 1) Japan, Comments on draft explanatory notes on vulnerability criteria for excessive acceleration failure, SDC 4//51/Add.5 Annex 10, SDC 4, IMO, 2017.
- 2) Japan, Matrix calculations of vulnerability criteria for excessive acceleration failures, SDC 4/INF.4/Add. 2 ANNEX 7, SDC 4, IMO, 2017.
- 3) Japan, Additional sample calculation results for excessive acceleration, SDC 4/INF. 10/ANNEX 2, SDC 4, IMO, 2017.
- 4) Japan, Application example of direct stability assessment for excessive acceleration failure mode, SDC 5/6/13, IMO, 2018.
- 5) Japan, Sample calculations of excessive acceleration failure mode, SDC 7/INF. 4, IMO, 2020.
- 6) Interim guidelines on the second generation intact stability criteria, MSC. 1/Circ. 1627, IMO, 2020
- 7) Explanatory notes to the interim guidelines on the second generation intact stability criteria, MSC. 1/Circ. 1652, IMO, 2023.
- 8) International Association of Classification Societies (IACS) Recommendation No. 34, Corr. Nov. 2001.
- 9) Kuroda, T., Hara, S., Houtani, H., Ota, D., Direct stability assessment for excessive acceleration failure mode and validation by model test, Journal of ocean engineering, 187, 2019.
- 10) Kuroda, T., Time domain simulation for ship motions in short-crested irregular wave, Report of NMRI, Vol. 20, No.1, 2020.
- 11) Kuroda, T., Study on the Excessive acceleration failure mode for the second-generation intact stability criteria, Report of NMRI, Vol. 21, extra issue, 2021.

- 12) Kuroda, T., Evaluation and countermeasures for excessive acceleration at the bridge caused by the ship stability, Proceedings of PRADS 2022, 2022.
- 13) Kuroda, T., Ota, D., Validation of operational guidance for excessive acceleration using container ship actual operational data, Proceedings of 10th PAAMES and AMEC 2023, 2023.
- 14) Research on Development of goal-based stability criteria, -Research on the excessive acceleration failure mode-, Contract research report of Japan Ship Technology Research Association, 2023.