

「パラメトリックロール対策に関するガイドライン」の紹介

武田 勝利*, 赤木 正則*, 石橋 公也*

1. はじめに

近年、大型コンテナ船等においてパラメトリックロールに起因すると考えられる荷崩れ事故が相次いで発生し¹⁾、パラメトリックロールに注目が集まるとともに、その対策が急務となっている。

IMOは2020年に「第二世代非損傷時復原性基準に関する暫定ガイドライン（Interim Guidelines on the Second Generation Intact Stability Criteria - MSC.1/Circ.1627）」（以下、SGISc）を公表し、パラメトリックロールを含む動的復原性モードに対する評価基準を定めるとともに、パラメトリックロールによる推定ロール角の計算方法や、適切な回避のための運航ガイダンスの策定等について提言している²⁾。また、関連業界においては、波浪レーダーやウェザーサービスを利用したパラメトリックロールの回避、またアンチローリングタンクの設定による過大なロールの低減等の様々な対策が実用化されてきている。

このような背景のもと本会は、パラメトリックロールの回避及び防止対策の普及を図るため、2023年2月に「パラメトリックロール対策に関するガイドライン（図1）」（以下、ガイドライン）を発行した³⁾。

2. ガイドラインの概要

本会は、有効なパラメトリックロール対策を講じた船舶に対して、その旨を船級符号へ付記することとした。これは、パラメトリックロール対策を講じた船舶の識別とともに、船舶の付加価値の向上、パラメトリックロール対策の普及促進を意図したものである。ガイドラインの本編には、本会が有効と認めるパラメトリックロール対策の種類、船級符号への付記（表1）、そのために必要な資料や検査、適用すべき機能要件等を規定している。

なお、パラメトリックロールの現象は以前から知られており、その研究も近年急速に進んできているが、今後はさらにパラメトリックロールに関する十分な認知や有効な対策を普及させていくことが重要

である。そこで、ガイドラインのAppendixには、パラメトリックロールの発生メカニズムや回避のための基本的な注意点等、運航関係者や本船乗組員等に向けて役立つような内容を掲載した。

さらに、Appendixにはパラメトリックロール応答の計算概要やパラメトリックロールの発生領域を示したポーラーチャートの作成方法についても記載した。なお、ポーラーチャートの作成については、梅田ら⁷⁾が提唱した理論に基づく具体的な手順を解説している。この方法はSGIScのレベル2-C2で採用されているGrimの有効波理論⁹⁾ ¹⁰⁾を拡張し、短波頂不規則波中のロール応答を推定する実用的な方法である。この方法を用いることで、あらゆる海象、積付条件に対して、比較的短時間でポーラーチャートを作成することが可能である。

表1 船級符号への付記

対策の種類	略号
(1) SGISc（第二世代非損傷時復原性基準）への適合	PRPM(Design)
(2) アンチローリングタンク等のパラメトリックロール防止及び軽減装置の搭載	PRPM(Device)
(3) ポーラーチャート等の運航による回避	PRPM(Operation)



図1 パラメトリックロール対策に関するガイドライン⁶⁾

* 技術研究所

3. パラメトリックロール

3.1 発生メカニズム

パラメトリックロールは一種の共振現象であるが、通常のシンクロナスロール（同調横揺れ）とは発生メカニズムが異なる。船のシンクロナスロールは、船体のロール固有周期と波との出会い周期が一致することによって発生する共振現象であり、波による強制動揺の周期と同調することにより、振幅が増大する。

一方、パラメトリックロールも波浪に起因する共振現象ではあるが、波による強制動揺ではなく、向波、追波あるいは斜波中で、船体の復原力が周期的に変化することにより共振が発生する現象である。特に、コンテナ船や自動車運搬船のような船首・船尾付近に大きなフレア形状を持つ瘦せ型船において、パラメトリックロールが発生しやすい。

ここで、パラメトリックロールの発生によってロールが増幅されるメカニズムを簡単に説明する。図2のように、縦波中を航行している船が傾斜状態から正立位置に戻る領域（図2の①）でTrough（波の谷）状態となると、水線面積が増加し、GM（メタセンタ高さ）が大きくなる。すると、復原力も増加して定常横揺れ状態に比べて大きな角速度で正立位置を通過する。さらに、正立位置から反対舷に揺れる領域（図2の②）においてCrest（波の山）状態となると、反対に水線面積が減少して復原力が低下し、その結果、定常横揺れ状態に比べて、より大きなロール角で反対舷に横揺れすることになる。このようなサイクルが繰り返されることで、振幅が増大して大きなロールが発生する。

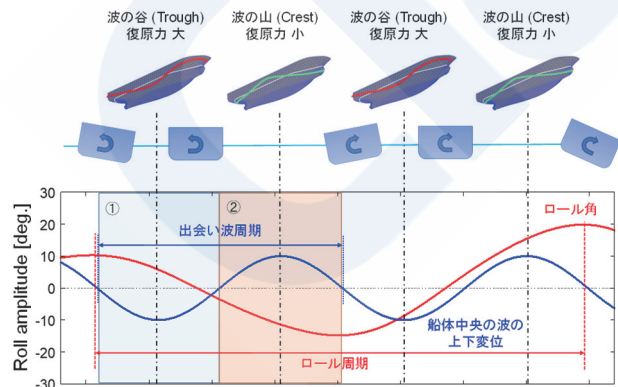


図2 パラメトリックロールの発達

図2を見ると、ロール1周期の間に船が波の山谷をそれぞれ2回ずつ通過している。よく知られているように、パラメトリックロールの発生条件の一つが、波との出会い周期 T_E が船体のロール固有周期 T_R

のほぼ半分になる場合である ($T_R \cong 2T_E$)。なお、理論上は、 $T_R:T_E \cong 2:n$ ($n = 1,2,3 \dots$) の条件に合致するとパラメトリックロールが生じる可能性があるが、一般的には $n = 1$ の条件のみを検討対象としている。

もう一つの条件は、復原力変動によって生じる増幅効果が、減衰力による振幅低減効果を上回るような大きさをもつことであり、式(1)のように表すことができる。これはSGISCのレベル1の評価基準のベースとなった理論である¹⁰⁾。

$$\frac{GM_{max} - GM_{min}}{2GM} > \frac{4\alpha}{\omega_0} \quad (1)$$

GM_{max} : GMの最大値（波の谷）(m)

GM_{min} : GMの最小値（波の山）(m)

$\overline{GM}(= (GM_{max} + GM_{min})/2)$: GMの平均値 (m)

α : 線形横揺れ減衰係数

$\omega_0(= 2\pi/T_R)$: 横揺れ固有円周波数 (rad./s)

この式(1)から、GMが小さく、その変動幅が大きいほどパラメトリックロールが発生しやすいといえる。一般的に、波高が大きくなるにつれてGMの変動幅が増加し、同じ波高の場合には波長が船の長さ等に等しくなると、GMの変動幅が最も大きくなる。すなわち、波高が大きく、船の長さに相当する長い波長のうねりに遭遇すると、パラメトリックロール発生の危険性が高まることになる。

3.2 パラメトリックロール回避の基本事項

前述の通り、パラメトリックロールは大きなうねりを伴う海象で縦波あるいは斜波を航行中に突発的に発生する特異な現象である。パラメトリックロールを発生させる海象条件に遭遇すると、極めて短時間に大きなロール角が生じる恐れがあり、そうなる回避行動をとるのが困難である。そのため、パラメトリックロールの発生を念頭においた事前準備が肝要であり、発生する可能性の高い危険領域を早期に回避する、その兆候を認めた場合には直ちに船速を変える、大きく転針するといった操船が必要である。そこで次に、パラメトリックロールの回避のために重要と考えられる注意点や心構えについて述べる。

3.2.1 本船のロール固有周期

パラメトリックロールは、復原力の周期的変動と本船のロール固有周期が関係する現象であって、本船のロール固有周期を把握しておくことが極めて重要となる。船体のロール固有周期 T_R は、理論的に式(2)で求めることができる。

$$T_R = \frac{2\pi K}{\sqrt{gGM}} \quad (2)$$

ここで、 g は重力加速度、 K は付加質量を考慮した横環動半径である。ガイドラインでは経験則的に $K \approx 0.4B$ (B : 船幅) と設定した簡易的な式(3)を提示している。

$$T_R \approx \frac{0.8B}{\sqrt{GM}} \quad (3)$$

簡易式ではなく、ロールのモニタリングデータから本船のロール固有周期を直接推定する場合には、その適用範囲や信頼性を考慮した上で、当該モニタリングで得られた値を使用することが有効である。ただし、航海中に観測されるロール周期は、波浪や風力の影響を受けるため常に変化し、ロール固有周期とは必ずしも一致しないことに留意する。また、ロールのモニタリングデータから信頼性の高いロール固有周期を推定するためには、長期間にわたる計測データが必要と考えられる。

なお、本船の復原性資料やローディングマニュアルで引用されている2008 IS Code¹¹⁾ (International Code on Intact Stability, 2008) においては式(4)が定義されている。船上に搭載されるスタビリティコンピュータやローディングコンピュータの中には、式(4)に基づいてロール固有周期を出力するものが存在する。しかしながら、式(4)の推定式は1980年代までの客船、貨物船や漁船等の比較的小型な船舶の実績値に基づくものであり、近年建造された一般商船に対しては適用すべきでない旨が注意喚起されている¹²⁾。よって、2008 IS Codeの算式で求めたロール固有周期を参照しないよう特に注意する必要がある。

$$T_R = \frac{2 \times C \times B}{\sqrt{GM}} \quad (4)$$

$$C = 0.373 + 0.023 \left(\frac{B}{d} \right) - 0.043 \left(\frac{L_{wl}}{100} \right)$$

ここで、 d は喫水、 L_{wl} は船の水線長さである。

3.2.2 うねりの方向と出会い周期

一般的にパラメトリックロールが発生しやすい条件は、船の長さ以上の大きなうねりを船首または船尾方向から左右60°程度の範囲で受けて、且つ波との出会い周期がロール固有周期の半分に近い場合である。本船上に波浪レーダーが搭載されて、うね

りの波長、方向、周期、波高等を直接計測できる場合には、それらの計測値を使用するが、図3のチャート¹⁴⁾を用いた方法でもうねりの波長を概算できる。図3の例では、船速20ktで航行中に出会い周期25秒で斜め後方30°方向からうねりを受けている場合、実際の波周期は約9秒となることを示している。うねりの波長は1.56に波周期の2乗を掛けることで簡易的に求まるため、図3の例では波長が126mと推定される。

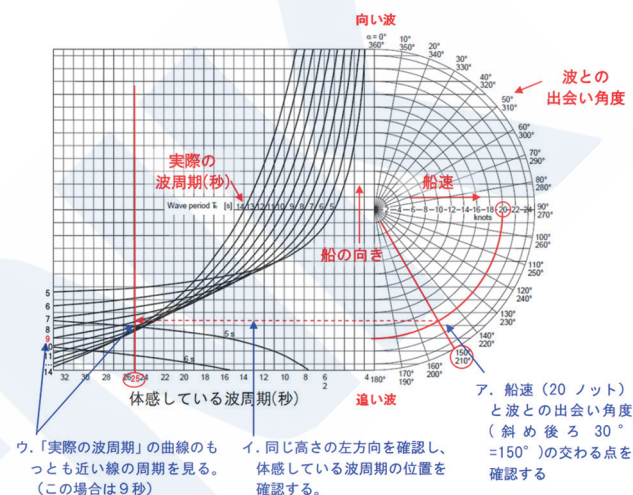


図3 実際の波周期の推定

(MSC Circ. 1228¹³⁾に基づく国土交通省資料¹⁴⁾)

3.2.3 パラメトリックロール特性及び運航ガイドダンス

IMOのSGISc (第二世代非損傷時復原性基準) では、デッドシップ状態、波乗り状態、復原性喪失、パラメトリックロール等の動的復原性上の問題を生じうる諸現象に対して、それぞれレベル1からレベル3までの3つの評価基準を規定している。パラメトリックロールの脆弱性評価に関して言えば、Grimの有効波理論を適用したレベル2-C2が評価精度と難易度の両面において実用的な方法である。

SGIScは非強制の基準(2023年7月時点)であるが、パラメトリックロール対策の一環として今後注目されることが予想される。また、SGIScでは脆弱性基準に適合しない場合、ポラーチャート等の運航ガイドダンスの適用が定められている。本船にポラーチャートが備えられている場合には、その内容や利用方法についてよく理解しておくことが重要である。

4. ポーラーチャートの作成

4.1 ポーラーチャートの概要

前述したポーラーチャートとは、様々な積付、海象条件に対して、予測されるロール角、あるいは閾値を超えるロールの発生頻度を視覚的に表示したチャートであり、パラメトリックロールを回避するための有効なツールの一つである。例えば図4のポーラーチャートでは、波との出会い角及び船速を動径方向とした範囲において、推定最大ロール角を示している。ここでは、向波を0°、追波を180°と定義し、船の向きは0°に固定されている。推定最大ロール角がコンター表示されていて、パラメトリックロールが発生し得る危険領域が分かりやすく示されている。

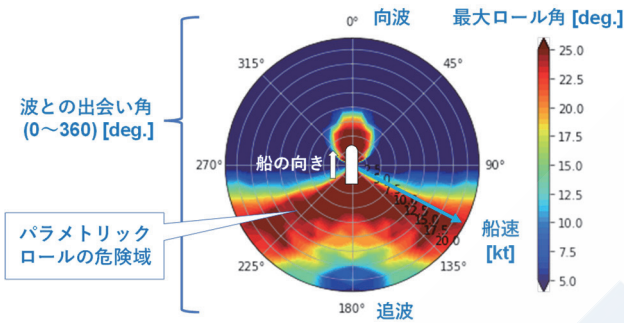


図4 予測パラメトリックロール角のチャート例

4.2 パラメトリックロール応答計算

パラメトリックロールの応答値を求めるための1自由度の支配方程式は式(5)で表すことができる。

$$\ddot{\phi} + 2\alpha\dot{\phi} + \gamma\phi^3 + \omega_0^2 f(\phi, t) = 0 \quad (5)$$

ここで、 ϕ はロール角、 α 、 γ はそれぞれ減衰に関する1次及び3次の係数、 $f(\phi, t)$ は非線形の復原力項でGMとGZ（復原てこ）の変動成分が含まれる。パラメトリックロールの応答は、基本的には次の条件に基づいて数値シミュレーションを実行して求める。

- ・波長 λ は本船の垂線間長さ L_{PP} に等しい正弦波を想定する。
- ・波の進行による復原力変動を考慮する。
- ・船体が5°傾斜した状態を初期条件とする。
- ・十分な時間のシミュレーション計算を実施する。
- ・計算した時間領域におけるロール角振幅の収束値をもって応答値とし、収束しない場合には必要に応じ計算ステップ数を増加させる。

4.3 ポーラーチャートの作成手順

ポーラーチャートを作成する方法はいくつかあるが、ガイドラインでは梅田ら⁷⁾⁸⁾が提唱した方法に基づく作成手順を記載している。この方法を用いれば、1自由度モデルを用いた計算であっても、斜波中の応答を考慮したポーラーチャートを作成することができる。図5にその作成フローを示す。

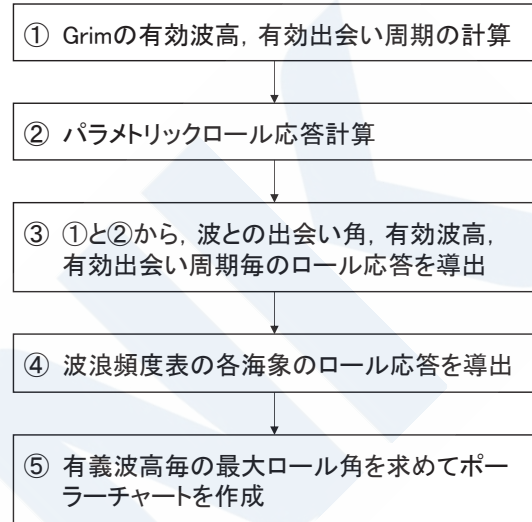


図5 ポーラーチャート作成手順

まず、式(6)、(7)から波浪頻度分布表の有義波高 H_S とゼロクロス平均波周期 T_Z の組合せで定義される各海象及び波との出会い角毎にGrimの有効波高 (effective wave height, H_{eff}) を計算する。なお、2022年にIACS Rec.34が改正されたが¹⁵⁾、ガイドラインではSGIScと同様に、2001年のIACS Rec.34¹⁶⁾におけるPierson-Moskowitz型の波スペクトル (式(8)) 及び波浪頻度分布表を参照している。IACS Rec.34は北大西洋の海象条件に対応するものであり、特定の海域あるいは航路を対象とするポーラーチャートを作成する場合においては、異なる波浪スペクトルを使用することが可能である。

$$H_{eff} = 4.0043 \sqrt{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{-\infty}^{\infty} S\eta_{eff}(\omega, L_{PP}, \alpha) d\omega d\alpha} \quad (6)$$

$$S\eta_{eff}(\omega, L_{PP}, \alpha) = \left[\frac{\frac{\omega^2}{g} L_{PP} \cos \chi \sin \left(\frac{\omega^2}{2g} L_{PP} \cos \chi \right)}{\pi^2 - \left(\frac{\omega^2}{2g} L_{PP} \cos \chi \right)^2} \right]^2 S(\omega, \alpha) \quad (7)$$

$$S(\omega, \alpha) = \frac{H_s^2}{4\pi} \left(\frac{2\pi}{T_z} \right)^4 \omega^{-5} \exp \left[-\frac{1}{\pi} \left(\frac{2\pi}{T_z} \right)^4 \omega^{-4} \right] k \cos^2 \alpha \quad (8)$$

$$k = 1 / \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos^2 \alpha \, d\alpha$$

ここで、 $S\eta_{eff}$ は有効波スペクトル、 ω は円周波数、 χ は波との出会い角を表す。

次に、有効波スペクトル、船速 U 、波との出会い角から、式(9)を用いて有効出会い円周波数 $\bar{\omega}_e$ 、有効出会い周期 \bar{T}_e を求める。前述の通り、本稿では 0° を向波、 180° を追波と定義しているが、本方法の参考文献⁷⁾⁸⁾では波向きの定義や関係式中の符号の正負が本稿と異なることに留意する。なお、有効出会い周期は有義波高に依存しないが、出会い角、船速及びゼロクロス平均波周期毎に計算しておく必要がある。

$$\bar{\omega}_e = \sqrt{\frac{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{-\infty}^{\infty} \left(\omega + \frac{\omega^2}{g} U \cos \chi \right)^2 S\eta_{eff} \, d\omega d\alpha}{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{-\infty}^{\infty} S\eta_{eff} \, d\omega d\alpha}} \quad (9)$$

$$\bar{T}_e = \frac{2\pi}{\bar{\omega}_e}$$

有効波高及び有効出会い周期が計算できれば、パラメトリックロール応答の計算結果と組み合わせることで、波浪頻度表の各海象に対して推定最大ロール角を求めることができる。ガイドラインの手順では、最終的にポーラーチャートのロール角はゼロクロス平均波周期毎の結果ではなく、ある有義波高に対して最大値を示している。

4.4 ポーラーチャートの例

ガイドラインの手順に従って作成したポーラーチャートの例を図6に示す。ここでは、本会独自の14,000TEU相当の仮想コンテナ船の船型及び要目¹⁷⁾を用いた(表2)。

表2 試算に用いた仮想コンテナ船の要目¹⁷⁾

Length (L_{pp})	352.0m
Breadth	50.0m
Draft	15.0m
C_b	0.676
Bilge keel (length)	From S.S.3.95 to S.S.6.0
Bilge keel (width)	0.4m

また、ロール固有周期は、 $0.77B/\sqrt{GM}$ から簡易的に推定した値を使用した。図6を見ると、GMが

1.5m ($T_R = 31.4s$)では、有義波高が比較的小さい海象でも、追波下でパラメトリックロールが発生し、特に斜め追波については、ロール角の大きい領域がほとんど船速に依らないことがわかる。GMが大きくなり、ロール固有周期が25秒以下になると、向波においてもパラメトリックロールが発生する傾向になる。さらにGMが4.5mになり、ロール固有周期が18秒程度になると、パラメトリックロールがほとんど発生しないこともわかる。GMが小さい大型コンテナ船においては、特に追波から斜め追波に注意を向ける必要がある。このように、ポーラーチャートを準備しておくことで、各GMに対するパラメトリックロールの発生領域を事前に把握することができる。

なお、図6はガイドラインの手順に従って作成した有義波高毎のポーラーチャートである。すなわち、全てのゼロクロス平均波周期における最大ロール角が有義波高毎に表示されている。一方、図7はGM 1.5mの条件でゼロクロス平均波周期を6.5秒、8.5秒、10.5秒、12.5秒とした場合のポーラーチャートを示している。パラメトリックロールの発生は、本船のロール固有周期と波との出会い周期の条件が関係するため、実際の波周期を特定できれば、図7のようにパラメトリックロールの発生領域を絞ることが可能である。実際の運航では、例えば、波浪レーダーやウェザールーティング等と連携することで、船上で実海象を反映したポーラーチャートを表示させることも可能であり、より実用的な操船支援への活用が期待される。

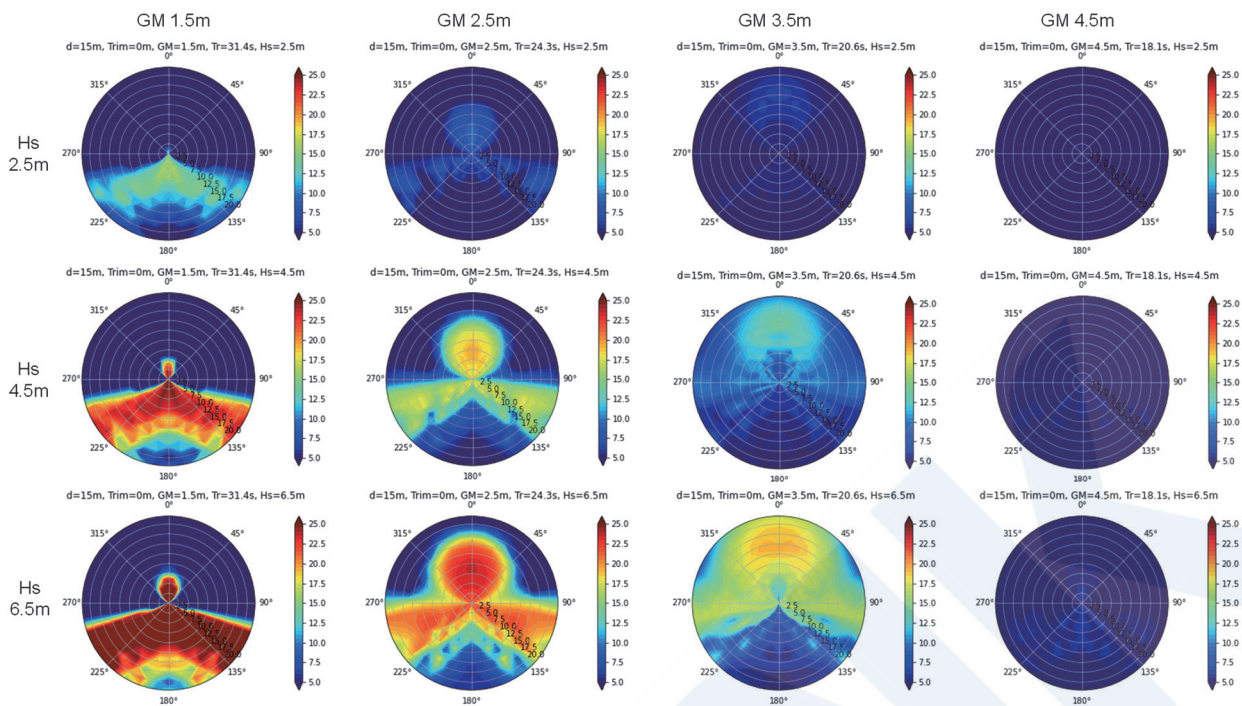


図6 GM及び有義波高毎のポーラーチャート例
(GM 1.5m, 2.5m, 3.5m, 4.5m / 有義波高 Hs 2.5m, 4.5m, 6.5m)

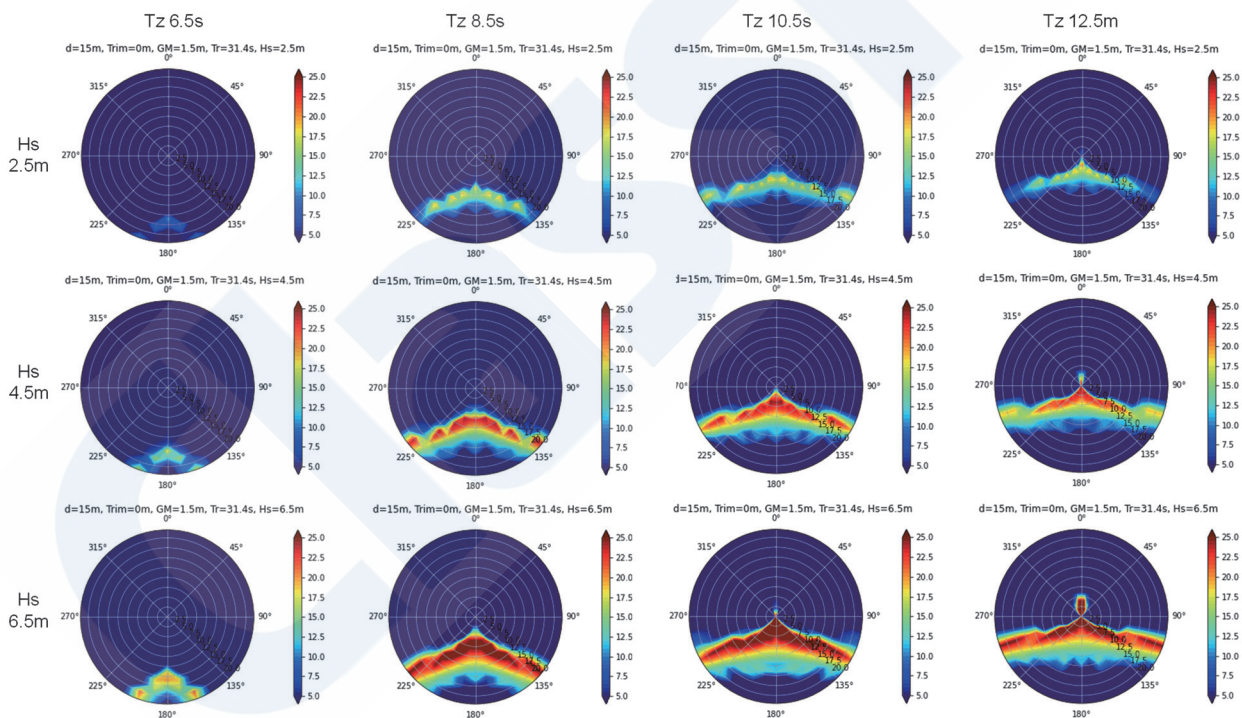


図7 GM1.5mにおける有義波高及びゼロクロス平均波周期毎のポーラーチャート例
(ゼロクロス平均波周期 Tz 6.5s, 8.5s, 10.5s, 12.5s / 有義波高 Hs 2.5m, 4.5m, 6.5m)

5. おわりに

本会はパラメトリックロール対策に対する認識の高まりを受けて、ガイドラインを発行し、関連要件や船級符号への付記を公表するとともに、パラメトリックロール回避のための基本的な解説等を掲載した。また、SGIScのレベル2-C2を短波頂不規則波に拡張し、波との有効出会い周期を考慮した方法を採用した。この方法を用いることで、長時間の不規則波中のシミュレーションを実施せずとも、想定される様々な海象及び積付条件に対して、比較的短時間でポーラーチャートを作成することが可能となった。

さらに、波浪レーダーやウェザーサービスと連携することで、実際の遭遇海象に対応したポーラーチャートの船上での表示、パラメトリックロールを考慮した航海中のウェザールーティング等、より実用的な操船支援への活用も期待される。また、本稿では述べなかったが、パラメトリックロール対策の一つとしてアンチローリングタンクが注目されており、昨今は搭載事例も増えてきている。

本会はアンチローリングタンクを含めた様々な対策に関する研究開発や評価基準の策定、シミュレーションツールや関連アプリの開発、ポーラーチャート作成に関わる技術的支援等の様々な活動を通じて、今後ともパラメトリックロールの対策に取り組む所存である。

謝辞

ガイドラインの発行にあたっては、大阪大学大学院の名誉教授である梅田直哉先生に多大なご助言、ご協力を賜りました。ここに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) MAIB : Report on the investigation of the loss of cargo containers overboard from P&O Nedlloyd Genoa North Atlantic Ocean on 27 January 2006, 2006
- 2) DMAIB : SVENDBORG MAERSK Heavy weather damage on 14 February 2014, 2014
- 3) MAIB : Report on the investigation into the loss of 137 containers from the container ship CMA CGM G.Washington in the North Pacific Ocean on 20 January 2018, 2020
- 4) DMAIB : MAERSK ESSEN – Marine accident report on loss of cargo on 16

January 2021, 2022

- 5) IMO : Interim Guidelines on the Second Generation Intact Stability Criteria. MSC.1/Circ.1627, 2020
- 6) 日本海事協会：パラメトリックロール対策に関するガイドライン，2023
- 7) 梅田直哉，山越康行；斜め追波中の復原力喪失による船の転覆確率の評価，日本造船学会春季講演会，1991
- 8) Naoya Umeda, et al. : Some Remarks on Simplified Operational Guidance for Parametric Rolling, JASNAOE Annual Autumn Meeting Vol.35, 437-440, 2022
- 9) O. Grim, 1961, Beitrag zu dem Problem der Sicherheit des Schiffes in Seegang, Schiff Hafen, 6, pp. 490-497, (in German)
- 10) IMO : Development of Explanatory Notes to the Interim Guidelines on the Second Generation Intact Stability Criteria, Annex Appendix 3, SDC 8/5/Add.2, 2021
- 11) IMO : The International Code on Intact Stability (2008 IS Code). MSC.267(85), 2008
- 12) Olger René Koop, et al.; Parametric Roll Excited by Low Wave Heights: a New Method to Avoid Critical Sea States Based on 2D Spectra., Stability and Safety of Ships and Ocean Vehicles, 2021
- 13) IMO : Revised Guidance to the master for avoiding dangerous situations in adverse weather and sea conditions. MSC.1/Circ.1228, 2007
- 14) 国土交通省海事局：追波中での操船について（注意喚起），2010
- 15) IACS : Rec.34 Rev2 Standard Wave Data, 2022
- 16) IACS : Rec.34 Rev.1 Corr1 Standard Wave Data, 2001
- 17) Kei Sugimoto, et al. : Non Linear Effect on Wave-Induced Loads for Hull Structural Design -Bulk Carrier, Container Carrier, Vehicles Carrier-, Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE), 2020