

コンテナの積付け及び固縛に関するガイドライン（第3.0版）に おける改正点と今後の展望

柳本 史教*

1. はじめに

コンテナ船はホールド内のみならずデッキ上にも貨物を積載することから、ラッシングと呼ばれる、コンテナの固定技術が必要になる。コンテナ船運航の経済性向上のためには、一つでも多くのコンテナを積載することが求められているため、現在では10段を超えるコンテナスタックが珍しくなくなっている。このようなコンテナスタックには、自重に加えてコンテナ船のロール運動やピッチ、ヒープ運動による荷重が生じることから、コンテナスタック及びラッシング方法は、過度な荷重がコンテナやラッシング機材に発生しないようにするため、固縛強度の計算が必要になる。本会を含め、各船級協会ではこのような固縛強度の計算手順を規則あるいはガイドラインで提供している。

本会の「コンテナの積付け及び固縛に関するガイドライン」（以下、本ガイドライン）は初版が2009年に発行されたのち、2014年に第2版が発行されているものの、船舶の運動評価式や固縛強度計算手順については初版から変更されていない。一方で、コンテナ船の大型化はその間も続き、今では24,000TEU級の超大型コンテナ船（ULCS）が現れていることから、2009年当時の半経験式的な運動評価式の適用性に懸念があった。また、近年のフルオート型ツイストロックの登場に伴うコンテナスタックの非線形な挙動を考慮に入れる必要が指摘されていたことから、2022年まで実施されていた鋼船規則C編全面改正の成果や、技術研究所の研究成果を取り入れることで、より合理的なコンテナの積付の実現に資するべく、本ガイドラインの改正を行った。

2. 本ガイドラインの概要と構成及び主な改正点

2.1 本ガイドラインの概要と構成

本ガイドラインの章立てを表1に示す。本ガイドラインの構成は第2版から変更されていない。第1

章から第3章まではコンテナ積付に関する概要などの一般的な事項について記載されている。第4章はコンテナ固縛強度評価手順の基礎的なコンセプトを説明している。第5、6章ではコンテナ固縛強度評価において用いる荷重及び強度評価法が規定されている。今回の改正は主に第5、6章を対象としたものである。第7、8章は2014年の本ガイドライン第2版発行時に新設された章であり、それぞれラッシング計算プログラム（いわゆるラッシングコンピュータ）の搭載に対応した船級符号と、IMO CSSコードAnnex 14に対応した船級符号について規定している。

表1 本ガイドラインの章構成

| | |
|----|----------------------|
| 1章 | コンテナの積付け及び固縛の概要 |
| 2章 | コンテナ及び固縛金物の強度 |
| 3章 | 積付け及び固縛における船体強度上の注意点 |
| 4章 | 積付け及び固縛についての強度評価手法 |
| 5章 | 積付け及び固縛強度検討に用いる設計荷重 |
| 6章 | コンテナの積付け及び固縛強度評価 |
| 7章 | ラッシング計算プログラム |
| 8章 | コンテナ固縛作業の為の安全設計 |

2.2 主な改正点

本ガイドライン第3版においては様々な改正が行われているが、主要な改正は以下の3点である。括弧内は該当する章を意味する。

- ① 運動、荷重算式の見直し（第5章）
- ② 航路修正係数のアップデート（第5章）
- ③ 固縛強度計算法の修正（第6章）

また、これらの改正に加えて、本ガイドラインの利便性の向上を図り、より多くのユーザーにとって使いやすくするため、本ガイドラインの内容に対応した計算ツールやウェブアプリの提供を予定している。これらのデジタルツールの提供についても、次章で各種改正の詳細と合わせて記載する。

* 技術研究所

3. 主要な改正の概説

3.1 運動、荷重算式の見直し

コンテナ固縛強度評価において、本ガイドラインでは縦波の場合と横波の場合を考えている。前者においてはヒープ加速度とピッチ角による重力加速度の傾斜成分、ピッチ角加速度、後者においてはロール角による重力加速度の傾斜成分、ロール角加速度及びヒープ加速度によってコンテナスタックに働く荷重を固縛強度計算において考えている。また、風に暴露するコンテナに対しては風荷重による圧力を与えている。横波における荷重の模式図を図1に示す。

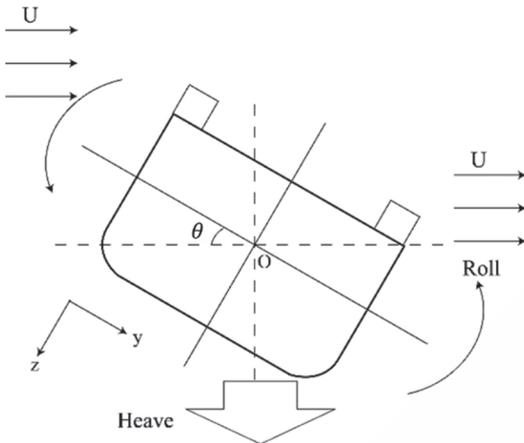


図1 横波における荷重模式図

これまでの本ガイドラインでは、船体運動及び加速度については、半ば経験的な算式として与えられていたことから、近年の超大型コンテナ船への適用性に疑問があった。そこで、2017年から2022年にかけて実施された、鋼船規則C編全面改正の成果を踏まえることで、物理的な意味を有し、また構造強度評価と関連した算式を用いることとした。C編全面改正における運動及び荷重算式導出の流れを図2に示す。単位波振幅に対する船体運動・加速度を簡易算式化した値と、直接荷重解析 (DLA) 及び北

大西洋の波浪発現頻度表を用いた長期予測結果から得られた25年に一度の最大波高を用いて求めた船体の最大運動変位及び加速度に、非線形影響及び操船影響を係数として与えることで、規則及び本ガイドライン上の運動・荷重評価式を求めている。この流れの詳細については本技報No.3掲載論文²⁾を参考にされたい。

図2のフローにて考慮する操船影響は、AISデータとHindcastデータを用いて、船舶が実際に遭遇する海象を評価することで求めている。詳細はMiratsu et al. (2022)²⁾に譲るが、IACS Rec.34に規定された波浪発現頻度表から求めた長期予測値と、実遭遇海象から求めた波浪発現頻度表から求めた長期予測値を比較することで操船影響係数を導出している。同様の技術は、後述する航路修正係数の見直しにおいても活用されている。

荷重算式の見直しに加え、本ガイドライン改正では、従来規定されていたロール角の最低値を20度とする規定を削除した。従来、この規定はコンテナ固縛強度評価において支配的となるロール角について、安全余裕を十分確保するために設けられていたものであるが、コンテナ船の遭遇海象についてAISデータとHindcastにより定量的な評価が可能になったこと、C編全面改正において物理的な意味のある運動算式を構築することができるようになったこと、またこれまでの実船計測データ分析の結果から、ロール角20度はパラメトリック横揺れを除いては非現実的な要求であること、といった理由から本改正において当該規定を削除することとした。一方で、C編全面改正と同様、ロール角の計算上のGM下限値を与えることで、一定のロール角が発生すると仮定して固縛強度計算を行うようにしている。GMの下限値は一定値ではなく船幅Bの関数として与えられるため、船舶の大型化に対応可能な形になっている。

本ガイドライン改正前後のロール角の比較を表2

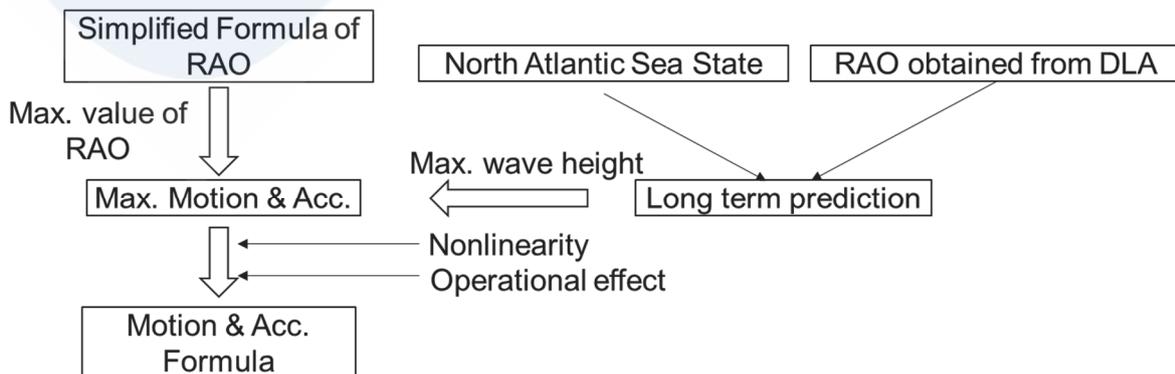


図2 運動・荷重算式計算フローチャート

に示す。GMはいずれの船型も1.5mとした。ロール角はGM以外にも C_w やKG等の様々なパラメータに影響されるため、表2の計算は一例であることに留意されたい。8,000TEU級以上の船型では、第2版では最低ロール角20度の制約によりロール角が決まっていたが、第3版ではその制約がなくなったため2~5度程度ロール角が減少している。フィーダーコンテナ船（A,B）においてもロール角が5度程度減少している。C編全面改正で得られたロール角評価式は、構造強度評価における影響評価から、実績と矛盾しないものであると考えられることから、本改正により、荷重評価式について、過度な安全率を除去できたと言えよう。

表2 ロール角の比較（GM=1.5m）

| No. | | A | B | C | D | E |
|----------------------|------------------------|------|------|------|------|------|
| Size(TEU) | | 2.5k | 3k | 8k | 14k | 24k |
| Roll angle (deg.) | 2 nd ed. | 26 | 25.6 | 20 | 20 | 20 |
| | 3 rd ed. | 20.6 | 20.4 | 17.7 | 16.8 | 14.9 |

尚、近年のコンテナ落下事故は、縦波でも大きなロール角が生じるパラメトリック横揺れが原因であることが多いとされている。パラメトリック横揺れは極めて非線形性の強い現象であるほか、有義波高や平均波周期が同じ海象であっても船舶が遭遇する波の順序によって最大横揺れ角が変わることから、上述したC編全面改正において用いられた手法で最大応答を求めることは困難である。そのため、パラメトリック横揺れは操船により回避することを前提としている他、ポーラーチャートなどのパラメトリック横揺れの避航を支援する手法を別途提供している。

3.2 航路修正係数のアップデート

一般に、船体構造強度評価に用いられる荷重は、最も海象が厳しい海域である北大西洋（IACS Rec.34）を、25年間船舶が航行すると想定して求められる。3.1で述べた、C編全面改正において求められた荷重も同様である。これは、船舶がその寿命において、中古売買船を含めて、どのような海域で使用されるか不明であるためである。一方で、短期間の航海において、航路が事前にわかっているならば、その通過海域における遭遇海象を想定した運動・加速度を用いたとしても、固縛強度評価を行う上では安全上問題がない。

そのため、コンテナ固縛強度計算においては、事前に求めておいた航行海域を想定して求めた荷重を

用いることが可能である。図3に海域ごとの有義波高の値を示すが、海域によって大きく異なることがわかる。このように、航行する海域に応じた、3.1で述べた荷重算式に対する軽減係数を、航路修正係数と呼んでいる。

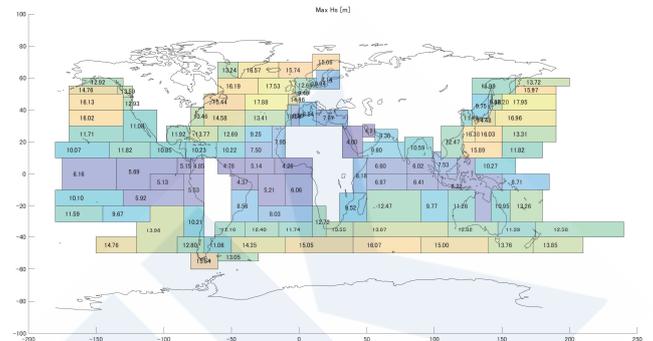


図3 海域ごとの最大有義波高

航路修正係数は、改正前の本ガイドラインにおいても規定されていたが、主要な航路に対する係数のみ記載されており、任意の航路に対して使用することが出来なかった。また、その係数も経験的に求められた式であり、個船の船型を考慮した手法は提供されていなかった。そこで、今回の改正では、航路修正係数を求める一般的な手法を記載するとともに、任意の航路に対して航路修正係数を評価するウェブアプリを提供する予定である。

また、各航路において発生する海象は、季節によっても異なる。図4, 5, 6にIOWAGAと呼ばれる波浪追算値のデータベースから1994年から2018年間のデータを取得し、それぞれ通年、夏季、冬季の有義波高コンターを求めた結果を示す。通年では赤道周辺を除いて全世界的に高い有義波高が見られるが、夏季あるいは冬季になると、通年で高い有義波高が見られる海域であっても有義波高が低くなっていることがわかる。今回の本ガイドライン改正においては、航路修正係数を計算するにあたり、どこを通るかだけでなく、どの季節に通過するかに応じて異なる係数が得られるよう規定している。

航路修正係数を求めるにあたっては、例えば有義波高の比を用いて計算することも一つのやり方であるが、本ガイドラインでは、遭遇海象を対象とした当該航路及び季節の波浪発現頻度表を求めたうえで、個船のRAO（Response Amplitude Operator：単位振幅の規則波に対する応答）を用いて長期予測を行うことが推奨される。尚、このRAOは直接荷重解析（Direct Load Analysis：DLA）により求めることもできるが、煩雑な手順が必要になるため、C編全面改正において採用された、Matsui et al.

(2023)による簡易算式³⁾を用いることとしている。これを分子にし、分母として北大西洋の通年の波浪発現頻度表を用いた長期予測値に操船影響係数²⁾をかけたものを用いることで航路修正係数を求めることを標準としている。これは、技術研究所で実施した系統的な評価の結果、波高比では過度に安全側の評価になることがわかっているためである。また、個船に応じて同調周期が異なるなどの理由により、個船のRAOを用いて長期予測を実施したほうがより正確な航路修正係数を求めることが出来るためである。

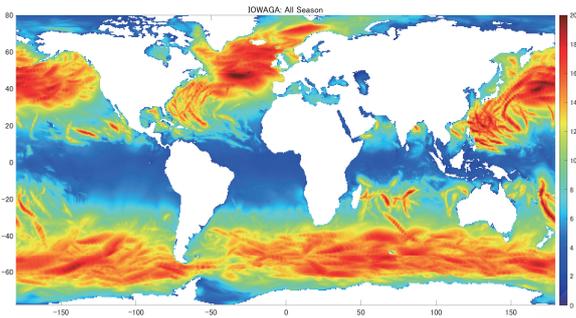


図4 通年の有義波高マップ

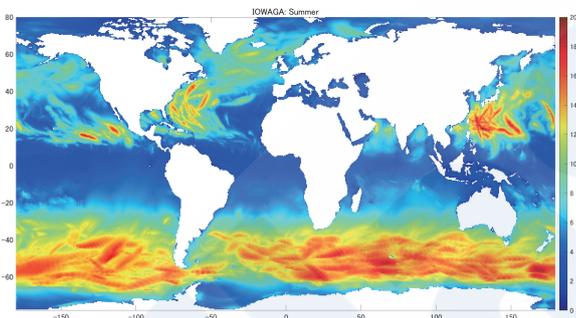


図5 夏季の有義波高マップ

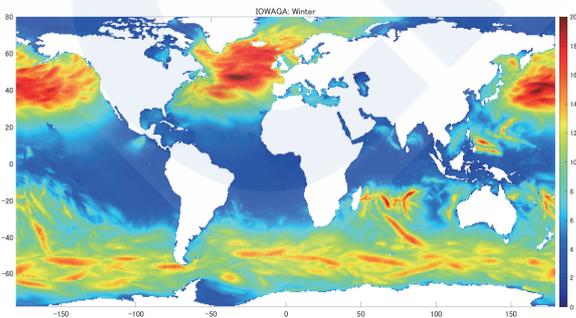


図6 冬季の有義波高マップ

長期予測を行うにあたって用いる波浪発現頻度表として、例えば北大西洋のものはIACS Rec.34で与えられている他、Global Wave Statistics (GWS)

と呼ばれる波浪統計データが用いられることが多い。しかし、GWSは航行している船舶から目視で観測された海象情報を用いていることから、船舶の操船影響（荒天海象の避航）が暗に含まれている。そこで、波浪モデルより作成された波浪追算値のデータベースを自然海象として用いている。このようなデータベースとしては、上述したIOWAGAと呼ばれるフランスIFREMER（フランス国立海洋開発研究所）によるものやECMWF（ヨーロッパ中期予報センター）によるERA5がある。このような波浪モデルについては、本技報No.6掲載論文を参照されたい⁴⁾。

自然海象データに対し、AISデータを用いたコンテナ船の航行データを組み合わせることでコンテナ船の遭遇海象を求めて遭遇海象の波浪発現頻度表を作成している。この時、AISデータは限られた期間のものしか存在しないため、どのように統計的に処理するかが重要となる。このような統計的処理方法にはいくつかの方法があるが、その一例として一般化パレート分布（GPD）を用いた結果を図7に示す。

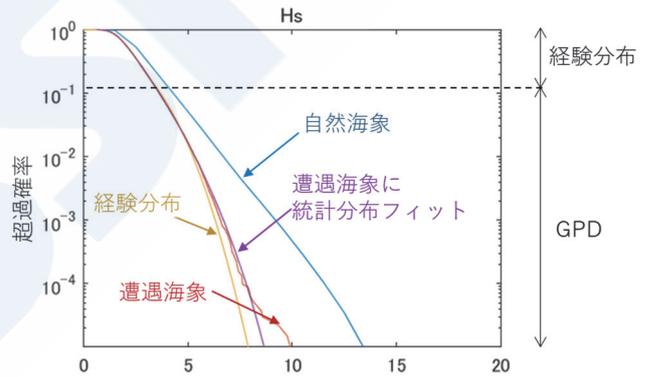


図7 遭遇海象の統計的処理

同じ航路であっても、季節因子を考慮することにより、その航路の通年の荷重に対して、例えばフィーダーコンテナ船であればアジア内航路で春は30%程度荷重の低下が見込まれる。また、10,000TEUを超えるメガコンテナ船であれば、アジア-ヨーロッパ航路で春は10%程度、夏は20%程度の荷重低減が期待できる。

以上の航路修正係数のアップデートにより、季節ごとの海象を踏まえた、個船の航海海域に対応した最適な固縛強度設計荷重を設定することが出来る。こうした航路・季節に応じた航路修正係数を、容易に計算できるアプリを今後提供する予定である。

3.3 固縛強度計算法の修正

コンテナスタックは、一般に図8のように、ラッキング変形、コーナーキャスティングの浮き上がり、

圧縮、そしてせん断変形が生じる。これらの変形において生じる荷重が許容値（Safety Working Loadを許容値とすることが一般的）を超えないようにコンテナの固縛方法や積載するコンテナの重量及びその順番を決定する必要がある。また、図9のようにラッシングロッドを接続している場合、コンテナスタックのラッキング変形に伴い、ラッシングロッドに引張荷重が生じることとなるため、ラッシングロッドの許容荷重にも注意を払う必要がある。ラッシングが行われていない場合、コンテナラッシングシステム各部に作用する力は、コンテナスタックを一つのはりとみなすことで求めることができる。一方で、ラッシングが行われている場合は、ラッシングロッドが受け持つ力を評価するために、その伸びを求める必要がある。このとき、コンテナラッシングシステムが線形であれば、式(1)に示すラッキング力の釣り合い式を解くことでラッキング変位量ベクトル U を求めることができる。尚、 K はラッキング剛性テンソル、 $F_{racking}$ はラッキング外力ベクトルである。

例えば図10のケースを考えると、式(1)の K はコンテナのラッキング剛性 $K_{container}$ と、ラッシングロッドが接続されている位置（変位 U_2 に対応）及びそれより下についてはラッシングロッドの水平方向剛性 K_{rod} から構成される。線形問題については式(1)を解くことで容易に変位量を求めることができるが、非線形問題にそのまま適用することはできない。非線形性を考慮してコンテナ固縛強度を計算するにあたっては、Ghesmi and Brindley (2021)⁵⁾やLi et al. (2021)⁶⁾のように有限要素解析を用いることで直接的にコンテナラッシングシステム各部に作用する力を評価することができる。一方で、有限要素法を本ガイドライン上の評価手法として用いることは、モデル化の手間や、非線形問題における収束性の課題があったことから、本ガイドラインでは、式(1)を式(2)のように拡張することで非線形なラッキング力の釣り合い方程式を作成した。 F_{rod_NL} はラッシングロッド張力の非線形成分である。

$$KU = F_{racking} - F_{rod_NL} \quad (2)$$

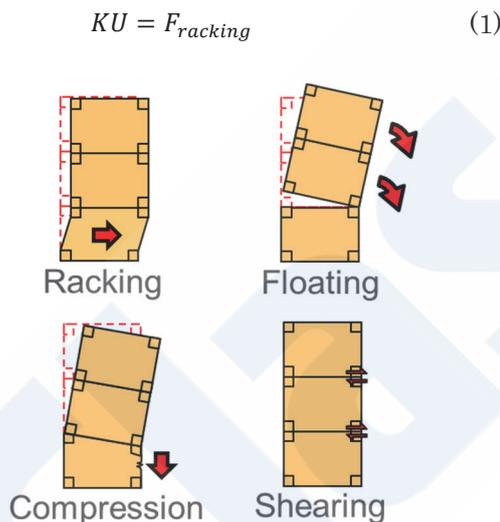


図8 コンテナスタックの挙動

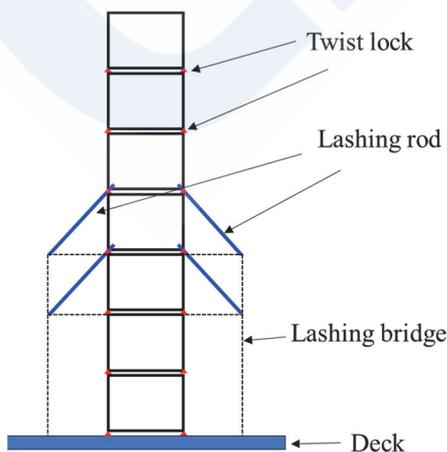


図9 ラッシングされたコンテナスタック

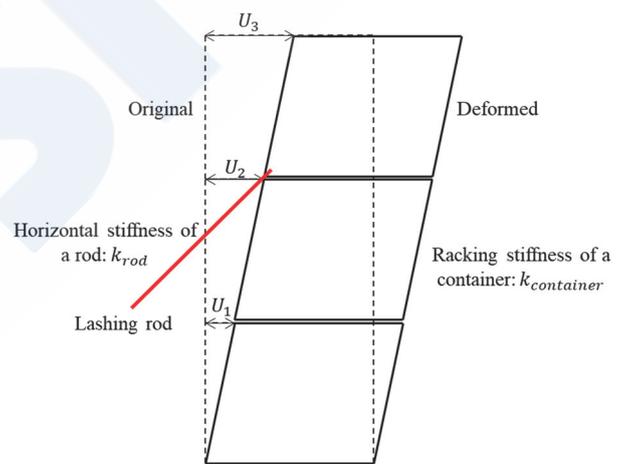


図10 ラッシングされたコンテナスタック模式図

コンテナラッシングシステムの非線形性は、図11に示すような、ツイストロックとコーナーキャスティングの間に存在する隙間（clearance）に起因する。コーナーキャスティングが浮き上がる際、ツイストロックにあたるまでに隙間が存在するため、その間自由に浮き上がることが出来る（separation）、つまりその際に上側のコーナーキャスティングに接続されているラッシングロッドが伸びることが出来る。このような、コーナーキャスティングの自由浮上に起因するラッシングロッドの張力（非線形張力）が式(2)にいう F_{rod_NL} に相当する。

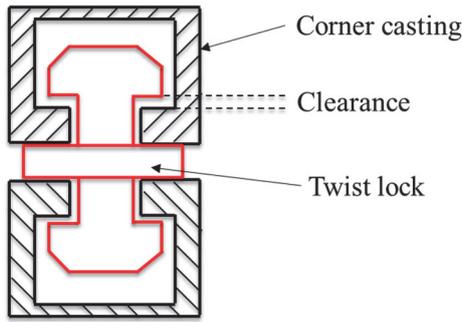


図11 コーナーキャスティングとツイストロック

ラッシングロッドの非線形張力はツイストロックの浮き上がり量によって決まるが、浮き上がり量は式(2)の結果として得られるラッシングロッドの張力が決定されないと決まらない。従って、式(2)は繰り返し計算によって解く必要がある。この時、ラッシングロッドの接続部より下に位置するツイストロック全てについて、より上方に存在するツイストロックから順にそのツイストロックの開閉及び浮き上がり量を二分法により求めるアルゴリズムを開発し、非線形有限要素解析の結果と比較してその妥当性を検証している。

以上の非線形性を考慮することによって、コンテナスタックの変形挙動をより現実に即した形で評価することが出来る。特にExternal lashingにおいて、ラッシングロッドが張力発生側のコーナーキャスティングに接続されていることから、ツイストロックの鉛直方向浮き上がり量が直接的にラッシングロッドの伸びに反映されるため、上記非線形性の寄与が大きくなる。一方でInternal lashingではツイストロックの浮き上がりにより生じるコンテナの剛体回転に伴う水平方向変位の増加のみがラッシングロッド張力に寄与するため、External lashingに比べて非線形性によるコンテナスタック変形抑制効果は小さくなる。

新ガイドラインでは上記の非線形性の導入に加え、ラッシングブリッジの剛性を考慮するようにしたほか、昨今の動向を反映してコーナーキャスティングの許容荷重の見直しを行っている。

4. 試計算結果

14,000TEUクラスのメガコンテナ船を想定して、ここまでで述べた改正を考慮した試計算を行い、第2版の評価結果と比較した。風荷重は考えていない。10段積みコンテナスタックであり、External lashingを2つ行っている。第3版の計算ではラッシングブリッジの剛性を加味している。

また、ロール角、ロール角加速度、ヒープ加速度はそれぞれの本ガイドラインに規定されている算式を用いて計算した。特に厳しくなりがちなコーナーキャスティング圧縮荷重をターゲットとした評価結果を図12及び図13に示す。図12と図13はそれぞれコンテナスタックの重心が低いもの、高いものである。

図12及び図13のいずれの結果も、使用係数（作用力の許容値に対する割合）は従来ガイドラインに対して低下している。特に第3版では高重心ケースにおいて、ツイストロックのseparationが生じることでラッシングロッドがより働き、第2版の計算結果に比べて大きく使用係数が低下している。低重心ケースではseparationが生じないため、荷重の低減及び許容値の見直しが計算結果の差異を生んでいることになる。ただし、ラッシングロッドの剛性は第2版、第3版の計算でそれぞれ同じ値を用いているが、第3版の計算ではラッシングブリッジの剛性を考慮しているため、ラッシングロッドの剛性は低下していることに気を付ける必要がある。

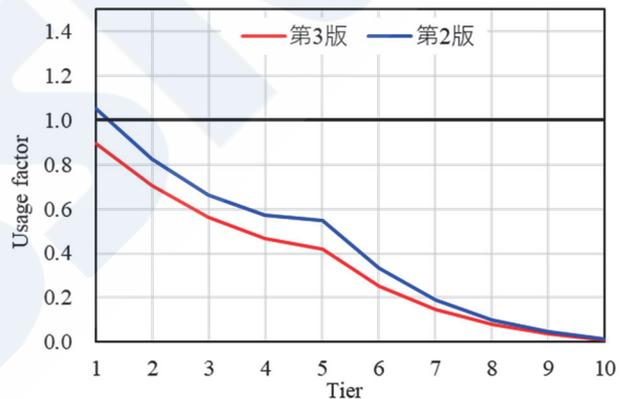


図12 コーナーキャスティング圧縮荷重に対する評価結果（低重心コンテナスタック）

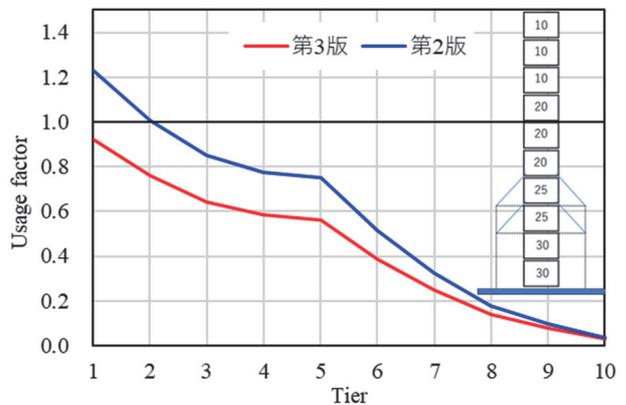


図13 コーナーキャスティング圧縮荷重に対する評価結果（高重心コンテナスタック）

5. まとめと今後の展望

ここまで概説した通り、本ガイドラインについて、C編全面改正の成果及び技術研究所の研究成果を取り入れることで、より最適化され、また実現象に即したコンテナ固縛強度評価を実現することが出来た。また、航路修正係数計算アプリと、コンテナ固縛強度評価用計算ツールを関係各社に提供する予定であり、ご関心のある方は技術研究所までお問い合わせいただきたい。

一方で、今回の改正作業を行っていく上で、今後継続的な検討が必要な事項がいくつか見つかっている。一つは、デジタルツイン技術との融合である。特に海象の予報技術を活用することで、個船が実際の航行中に遭遇する海象を用いて固縛強度評価を行うことが可能になると見込まれる。ただし、海象の予報精度は、予報日が先になるほど精度が低下することから、予報値の精度検証、技術の限界を定量的に把握する必要がある。また、コンテナラッシングに伴う機材（固縛金物やラッシングブリッジ等）は海風にさらされることから、一定の衰耗が発生することが予想される。これらの状況をリアルタイムかつ定量的に把握することが出来れば、より安全なコンテナ輸送が可能になることから、デジタルツイン技術の活用について継続的に研究していく予定である。

参考文献

- 1) 篠本ら：長期予測をベースとした波浪荷重の簡易算式の開発-Heave加速度及びPitch角-, ClassNK技報, No. 3, p.81-89, 2021
- 2) Miratsu et al.: Evaluation of ship operational effect based on long-term encountered sea states using wave hindcast combined with storm avoidance model, Marine Structures, Vol. 86, 103293, 2022
- 3) Matsui et al.: Simplified estimation formula for frequency response function of roll motion of ship in waves, Ocean Engineering, Vol. 276, 114187, 2023
- 4) 藤本ら：実船モニタリングに向けた波浪情報の推定・活用, ClassNK技報, No.6, p.55-65, 2022
- 5) Ghesmi and Brindley: A nonlinear finite element method to assess loads on container stacks, Ocean Engineering, Vol. 235, 109430, 2021

- 6) Li et al.: Experimental and numerical investigation on dynamic response of a four-tier container stack and lashing system subject to rolling and pitching, Applied Ocean Research, Vol. 109, 102553, 2021