研究開発レポート

コンテナ船の実遭遇船体応答分析と航路・季節に応じた荷重補正係数の活用

一般財団法人日本海事協会開発本部技術研究所 安全性評価部門

1. 概要·目的

船体構造強度評価の観点からは、実際に遭遇する最大の荷重を精度よく推定することは過不足のない船体構造予測実現 のために重要である。疲労強度評価を除けば、発生確率の低い荒天中以外の船体応答は船体構造強度評価を考えるうえで 重要ではない。一方で、コンテナ積み付けの決定は、航海ごとにそれぞれの航海海域に対応した海象を考慮して求めた船体運 動を用いてコンテナスタックに作用する荷重を計算することが一般的である。また、コンテナ船の場合、一定以上の波高が生じる と予測される海域を回避することでコンテナ流出事故の予防が図られているほか、短期間の航海であれば海象予報に基づき積 高を決定するケースも見られる。

しかし、コンテナの積高に直結するような船体運動の実測データの分析は、実船計測計画が多数存在するにもかかわらず、 予測荷重との対比という点で検討されておらず、実海域において船舶がどのような運動を生じているか必ずしも明らかではない。 特定の海象における船体運動は単位波高当たりの周波数領域の応答(Response Amplitude Operator: RAO)と波浪 スペクトル、海象情報を用いて評価されることが多いが、パラメトリックロールのような上述した手法で評価することが難しい特異 な運動がコンテナ船の大傾斜を生じることがあり得る(Luthy, 2023)等、いまだに実海域において船舶に生じる運動には不確 実性が少なからず残っている。そこで、本研究では、過去の実船計測プロジェクトで計測された船体運動データを分析することで、 実際に船舶が遭遇し、コンテナ固縛の強度に影響する船体運動を明らかにすることで、コンテナ船の安全運航において考慮す るべき船体応答について検討した。

2. 手法

2.1 分析対象及び手法

過去の実船計測プロジェクトにおいてジャイロデータが蓄積されたメガコンテナ船複数隻を分析対象とした。コンテナ固縛問題に おいては、ロール運動が最も支配的になる他、ピッチ角やピッチ角加速度も影響することから、これら3つを分析対象としている。 実測データを扱うにあたり、AIS データと紐づけることで、場所、時間、運動をセットで分析できるようにしている。

分析対象船については,統計値だけではなく時系列ジャイロデータが存在するため,ゼロアップクロスにて船体運動の振幅を求めた。また,データ量が膨大であるため,データを航海ごとに区分し,それぞれの航海における運動の最大値に着目することとした。各航海にデータを分割するにあたり4kts以下の時間が5時間を超えた場合に港湾に寄港しているとみなし,航海のくぎりとした。尚,この基準は試行錯誤的に決定している。

本分析では、時系列データが存在することから、運動の周期を取得することができる。2.2 で述べる通り、計測データの比較 対象として各航海の予測荷重を用いることから、予測ロール角の計算のために GM が必要である。GM は AIS データや実船計 測データには含まれないことから、ロール角時系列データに対してバンドパスフィルタを適用してフーリエ変換することでロール固有 周期を計算, GM を推定している。尚, ここでバンドパスフィルタは過去の経験より設定している。

上記の航海単位での分割の結果, 605 航海 3726 日間のデータが得られている。1 航海の平均長さは 6.2 日間である。

2.2 比較対象

2.1 で得られた航海ごとの船体運動の最大値を,有義波高や予測荷重と比較した。コンテナ固縛強度評価の予測荷重として,GWS (Global Wave Statics)から求めた各海域の波浪発現頻度表を用いて事前に係数を算出,ルール上に規定しておくことが一般である(例えば,Helge Rathje et al, 2013)。これに対し,NKではAISデータと波浪追算データを組み合わせ,船舶の荒天回避挙動を考慮した航海パターンモデルを開発することで,より現実的な船舶の遭遇波浪発現頻度表を作成している(Fujimoto et al., 2024)。本調査報告では、よりコンテナ船の実際の遭遇運動に近いと考え、上述した計測データとの比較対象として、上述したFujimoto et al.の方法により作成した航路及び季節ごとの遭遇波浪発現頻度表に基づき評価した船体運動の想定値を用いている。

3. 分析結果

3.1 航路及び積み付けパラメータ

対象船の航海履歴を図 3.1.1 に示す。アジア~欧州航路が多いが、アジア~北米航路や大西洋航路にも配船されている。 尚,航海日数は 3 日以下が 263 航海と最も多く、30 日を超える航海は 3 回のみであった。このような長い航海は考えにくい ため,航海分割がうまくできていなかった(複数の航海が一つの航海にまとめられている)ものと考えられるが、このような航海単 位でのデータ分割は便宜的なものであるため、ここでは特に問題にしない。



図 3.1.1 分析対象船の航路

続いて、喫水と航海期間、GMと航海期間の関係をそれぞれ図 3.1.2,3.1.3 に示す。尚、喫水は夏季満載喫水で、 GMは船幅で正規化している。航海期間が長い場合、GMが小さく、喫水が深い傾向がみられている。また、図 3.1.4 に GM と喫水の関係を示すが、概ね負の相関関係にある。また、図 3.1.4 では喫水・GM ともに小さいデータが見られる。このようなデ ータについては、ロール応答が小さい場合、時系列データより固有周期を推定する際に明瞭なピークが認められず、GMの推定 が適切に行われていない可能性があることから、必ずしも信頼できないデータといえる。







3.2 実測データの超過確率

図 3.2.1, 3.2.2, 3.2.3 には実測データのロール角、ピッチ角、ピッチ角加速度の超過確率をそれぞれ示す。およそ 10 年 分のデータしか存在しないため、十分とはいいがたいものの、外挿した場合には船舶の予測寿命(25 年)に対する北大西洋 における船体運動の最大値(いわゆる10⁻⁸相当値)よりは小さい値を取ると考えられる。



3.3 船体運動予測最大値との比較

3.3.1 船体運動予測最大値の評価法

船体運動が、一般的な長期予測ベースのアプローチにより安全側の評価を与えるか検討するために、2.2 で述べた手法により各航海の海域及び月に対応した荷重補正係数を算出し、unrestricted service に相当するケースの船体運動予測最大値に乗じることで各航海の予測荷重を評価した(式 3.3.1)。このような船体運動予測最大値は一般的には船舶や貨物固 縛強度評価に対する予測荷重として使用される。

$$X_{LC} = \frac{X_{i,j}}{X_{NA25}} X_{NewC}$$
 3.3.1

ここで、 X_{LC} は荷重補正後の予測荷重、 X_{NA25} は操船影響係数を考慮した北大西洋における 25 年長期予測値、 $X_{i,j}$ は荒 天回避を考慮したある航路、ある月を対象とした 25 年長期予測、 X_{Newc} は NK 鋼船規則 C編(2023)に規定された航路 制限がない荷重(操船影響、非線形影響込み)である。尚、ここで求めている荷重補正係数は、NK が今年リリースした WACDAS により同じものを求めることができる。また、長期予測を行うにあたり必要な運動 RAO は松井(2021)に基づき計算 した。ただし、ここで荷重補正係数 $X_{i,j}/X_{NA25}$ の下限値として NK コンテナ固縛ガイドライン第 3.2 版に従い 0.65 を与えた。ま た、同様に GM についても、GM 最小値([0.002 – 10⁻⁵(B – 40)] B^2)を下回ることがないよう設定している。

3.3.2 予測船体応答との比較結果

3.3.1 に示した評価法により求めた船体応答と、実測された船体応答を航海ごとに比較した。ロールについて、図3.3.1 に示 す。すべてのケースにおいて、予測値が実測値を上回っており、安全側の評価を与えていることがわかる。横軸に示した予測ロー ル角が10度付近に集中しているが、これは3.3.1 で述べた補正係数の最小値0.65 によるものである。また、図3.3.2 及び 3.3.3 にピッチ角とピッチ角加速度についても同様に実測値と予測値の比較を示した。ピッチ角はすべての航海において3 度以 下であり、予測値に比べて余裕がある。一方で、ピッチ角加速度は比較的予測値に近い値も見られている。これは、ピッチ角 加速度はピッチ角よりも同調周期が短いためと考えられる。

しかし, 図 3.3.1 にみられる通り, ロール角では実測値で 10 度程度のロール角が見られており, 予測値に比べてわずかに小 さいもののほぼ一致している。このような比較的大きなロール角が見られていることから, ロール角について実船計測データを詳細 に調査した。





3.3.3 船体応答と海象及び積付パラメータの関係

一般に波浪に対する船体応答は波高に相関があること、またロール角は GM が大きいほうが大きくなる傾向にあることから、図 3.3.4 及び 3.3.5 にロール角とそれぞれ有義波高と GM の比較を示した。比較のためピッチ角及びピッチ角加速度についても有 義波高に対する値を図 3.3.6 及び 3.3.7 に示した。また、ロール角と Hs の関係については、GM ごとにロール角と Hs の関係 を図 3.3.8 に示す。図 3.3.4、3.3.6、3.3.7 によれば、確かに有義波高とロール角、ピッチ角、ピッチ角加速度には正の相 関がみられる。特にピッチ角は波高に対してよい正の相関を見ることができる。一方、最大ロール角(航海 No.104)は有義波 高 6m 程度で見られてはいるものの、有義波高 2~3m 程度でも 8 度以上の比較的大きなロール角が計測されている。また、 GM が0.04B前後という固有周期が長い(26~28s 程度)状態であっても図 3.3.8 においては 8 度前後のロール角が見られ る他、最大ロール角時には*GM* = 0.056*B*と固有周期がやはり比較的長い(約 23s)状態になっている。このような長い固有 周期では、実海象に同調する波が少なくなることが知られている。例えば、IACS Rec.34 rev1 に掲載されている波浪発現頻 度表では平均波周期の上限は 19.5s である。

尚, ピッチ角に比ベロール角の有義波高への相関が薄い理由として, ロールの同調周期が長く, 短い波と遭遇した場合, 波 高が高くてもほぼ運動が生じないことに起因すると思われる。



図 3.3.4 ロール角と有義波高の関係



図 3.3.5 ロール角と GM の関係



図 3.3.6 ピッチ角と有義波高の関係



図 3.3.7 ピッチ角加速度と有義波高







そこで、ロール角が比較的大きく、一方で有義波高が小さいあるいは GM が小さいケースに着目してさらなる検討を行った。調 査対象とした航海の情報を表 3.3.1 に示す。まず、このように有義波高が小さく(外力が小さい)、あるいは GM が小さい (固有周期が長い)条件で比較的大きな揺れが生じる原因として、パラメトリックロールが考えられる。パラメトリックロールが生じ ている場合、ロール周期とピッチ周期が 2:1 になることが知られているため、最大ロール角発生時より 300s から発生時までの時

系列データからゼロアップクロスによりロールとピッチの周期を取得した。Voyage No.120 について取得したロールとピッチの時系列 データを一例として図 3.3.9 に示す。また, 航海ごとに平均化した結果を図 3.3.10 に示す。Voyage No.396 ではロールとピ ッチの平均周期はほぼ 1:1 で, このとき相対波向きは 28 度であった。条件が完全に一致しているわけではないが, 過去の水槽 試験や計算によるロール角 RAO によれば, 相対波向き 30 度程度でも一定程度のロールが見られる。そのため, No.396 は 同調横揺れに起因するものと推定される。また, Voyage No. 386 についても, ほぼ横波ではあるものの斜め追い波かつ船速 が 17kts 超と早く, 出会い波周期が長くなりやすい条件がそろったために同調横揺れが発生したものと推察される。一方で, Voyage No. 492 は波向きが 13 度でありロール角 RAO は小さいものと推察されるため, 必ずしも原因がはっきりしない。



Voyage	Roll angle	Hs [m]	Normalized	Heading*	Ratio of
No.	[deg.]		GM	[deg.]	period
104	9.93	5.87	0.056	-8.55	1.68
120	6.68	5.44	0.030	-48.75	2.71
179	7.31	4.05	0.036	49.93	1.52
386	8.71	5.50	0.053	75.10	1.23
396	8.36	4.71	0.044	27.86	1.07
474	7.37	5.13	0.031	6.12	1.66
492	8.78	4.76	0.052	-13.00	1.20
554	7.82	4.56	0.055	-48.30	1.41

表 3.3.1 GM が小さいにもかかわらずロール角が大きいデータ

*Heading 0 度:追い波

そこで、パラメトリックロールが生じた可能性を検討するために、有義波高 4m、ロール固有周期 28s、追い波(波向き 0 度)とした場合の類似サイズコンテナ船のポーラーチャート¹を Grim の有効波理論により作成した。船速は 0kts としている。その 結果を、同調周期に対するピーク波周期 Tp の割合を横軸に、ポーラーチャート上のロール角を縦軸として図 3.3.11 に示した。 横軸の値が 2.0 であることが船体のロール周期とピッチ周期の比が 2:1 であると近似的にみなすことができる。この結果として、

¹ パラメトリックロールに起因するロール角を円周方向にプロットした図を指す。詳細な作成方法は Takeda et al.(2024)を参照のこと。

初期ロール角を 5 度としていることを踏まえると、比較的広い範囲の周期比においてパラメトリックロールに起因したロール応答が 生じることが確認できる。図 3.3.11 によれば、表 3.3.1 でいえば No.104, No.474 はパラメトリックロールとみなしてよいもの と考えられる他, そのほかの条件についてもパラメトリックロールが発生する可能性を否定できない結果になっている。ただし、これ はあくまで簡易的な推定の結果であるため、本来であれば波向きも考慮して検討したほうが良いと思われる。



図 3.3.11 ポーラーチャートにおけるロール角

3.4 予測下限値の設定

3.3.2 に示した予測値と実測値の比較では、荷重補正係数の下限値 0.65 を適用していたことは上述した通りである。図 3.4.1 に示すように、下限値を設けない場合、ロール角が小さい領域において遭遇値に比べて予測値が過小評価されているケ ースが見られる。これは、式 3.3.1 において、unrestricted service を想定した北大西洋 25 年最大値に相当する予測船 体応答が、荒天回避影響及び非線形影響(特にロールに顕著)を織り込んだものであることに起因すると推測される。そもそ も高波高な海象が存在しない海域であれば波浪発現頻度表を用いた長期予測値に対して荒天回避影響は考えるべきではな い他、ロールの非線形性は波高に依存することが知られているものの、実海域・実船における非線形影響を評価することは難し く、また水槽試験や数値計算において正確に求めることも困難がある。また、3.3 で見た通り、軽度のパラメトリックロールの可 能性がある船体運動が計測期間の間だけでも数回見られることを考えると、これらの不確実性への対応として最小ロール角とし



図 3.4.1 下限値を考慮しない場合の予測ロール角と遭遇ロール角の比較

4. 他の船舶との比較

3.で分析したデータは、時系列データを有する、つまりロール固有周期の推定が可能なデータという点で貴重なものといえる。 しかし、合計 10 年程度のデータでしかなく、期間が限定的であるといえる。そこで、運動データはないものの、波浪追算データ と AIS データからその他の船舶についても遭遇海象を分析することで、何らかの示唆を得ることができないか検討した。対象船と してはある海象に対して概ね同様の運動を行うことが期待される、類似サイズのコンテナ船 24 隻(ここに運動データが存在する 船舶も含まれるが、運動データを記録していない期間についても含んでいる)の遭遇有義波高を取得した。データ分析対象期 間は延べ 30940 日、つまり約 85 年である。遭遇有義波高の比較を図 4.1 に示す。運動データ保有船のほうが比較的穏や かな海象を航行する傾向にはあるものの、最大遭遇有義波高は同程度であるといって差し支えないものと考えられる。



一方で,2.に示した手法を用いて,非運動データ保有船についても航路及び月を考慮した予測ロール角を求めた結果を図 4.2 に示す。ただし,GMを推定することができないので,全ての状態においてコンテナ固縛ガイドライン第 3.2 版における最小 GM 値を適用している他,その他不明なパラメータについては,運動データを有している船舶と同じものを用いている。ただし,喫 水が浅い場合は最小 GM よりも大きいG Mになっているものと推測されることから, 図 3.1.4 を参考にして正規化喫水 0.7 以 上のみを対象としている。いずれも 10 度以上の予測荷重となっており, 実船計測データと遭遇有義波高から推測される最大遭 遇ロール角を上回っていることがわかる。



図 4.2 非運動データ保有船の航海ごとの船体運動予測最大値(ロール角)

5. まとめ

メガコンテナ船複数隻を対象にした実船計測データのうち、コンテナ固縛問題に関係するロール角、ピッチ角、ピッチ角加速度 を対象にして大型コンテナ船がどのような運動を生じるか分析した。対象船は主に太平洋航路、アジア-欧州航路を航行してお り、航海期間の平均は約6日であった。この分析で得られた情報及び考察を以下に示す。

- ・ 計測された運動について超過確率を計算したところ, 10⁻⁸相当の外挿値はいずれも北大西洋 25 年最大値よりも小さい ことが推測された。
- ロール角、ピッチ角、ピッチ加速度のいずれも計測されたデータは航路及び月に対応した、実遭遇波浪発現頻度表を考慮した船体運動予測最大値(予測荷重)を上回ることはなかった。尚、いずれの実測値も概ね有義波高に正の相関があるが、ロール角が最も相関係数が小さくピッチ角が最も相関係数が高かった。
- 特にコンテナ固縛問題と直結するロール運動に着目して、GM が小さいにもかかわらず比較的大きい(7~10 度) ロール 角が生じているケースを分析した。最大ロール角が発生する直前の 300s についてゼロアップクロス周期をロールとピッチにつ いて評価したところ、パラメトリックロールの疑いがあるケースが複数見られた。
- ・ 特にロール運動についてはパラメトリックロールや GM について不確実性が大きいものの,適切な下限値を設定することで安 全側の予測荷重を与えることができている。
- ・ 尚,図 5.1と5.2に、遭遇ロール角の予測値と最大遭遇ロール角の比の確率分布及び累積確率分布を示す。荷重補 正係数の適用有無にかかわらず、基本的には多くの場合に遭遇ロール角は予測ロール角に対して非常に小さい、言い換 えるとコンテナスタックの強度のキャパシティに余裕があるといえる。コンテナスタックの積み高を増加させるには、キャパシティを 十分に活用することが必要であることを考えると、荷重補正係数によりよりキャパシティの有効活用率を増大させることがで きているといえよう。



図 5.1 荷重補正係数適用有無に応じた遭遇ロール角と予想最大遭遇ロール角の比の確率分布



図 5.2 荷重補正係数適用有無に応じた遭遇ロール角と予測ロール角の比の累積確率分布

Reference

- Fujimoto et al., Analyzing AIS and wave hindcast data for global wave scatter diagrams with seasonality Ocean Engineering, Vol. 314(1), 119647, 2024
- Helge Rathje et al., Route-Specific Container Stowage, Proceedings of the PRADS2013, 2013
- Vivien Luthy, Probability of occurrence of parametric roll on a predefined sea state. Fluids mechanics [physics.class-ph]. HESAM Université, 2023.
- Takeda et al., Tank Tests of Parametric Roll for Validation of Polar Chart and Assessment of Anti-Rolling Tank, The 2nd International Conference on the Stability and Safety of Ships and Ocean Vehicles, 2024
- ・ 松井,船型パラメータが波浪中船体運動/波浪荷重に及ぼす影響に関する研究一新しい数学船型の提案と波浪中応 答の理論的考察一,横浜国立大学大学院博士論文,2023