

# 非線形動解析による安全なコンテナ積載手法の研究

47-106688 市川 達也  
指導教員 鈴木 克幸 教授

This paper discourse about dynamic nonlinear analysis of container stack on the ships deck. Now a days many containers useing for marine transportation, and increasing traffic volume container carrier became very large. Always on deck containers are fixed by some device but in storm condition container, fixed device break and stack is disrupted. Using numerical analysis to this problem, research how behaviour container stack and how to ship containers on deck in safety.

Key words: Nonlinear Finite Element Method, Dynamic Analysis, Container Lashing

## 1 緒言

経済のグローバル化が進む中で、国家間物流も増加の一途を辿り、それを支える海上輸送も増加を続けている。1960年代に登場したコンテナ船は現在では海上物流の中核を担うものであり、昨今は船体の大型化により10000TEUを超えるものも就航している。積載量の増加をを目的として、船倉だけではなくデッキ上にもコンテナを積載することが恒常的となっている。このようにデッキ上に段積みで積載されたコンテナスタックはツイストロックやラッシングロッド等の固縛器具を用いて船体に固定される。しかし、荒天時の船体運動によってコンテナ、固定器具が損傷し、スタックが崩壊しコンテナの流出、積載物の破損のような事故が問題となっている。これに対して船体運動に伴うコンテナの挙動を実験的に求めることはその大きさから非常に困難である。そこで本研究においては数値モデルを作成し、船体運動、固縛器具によって変化するコンテナの挙動を数値解析をもちいて評価し、コンテナスタックの安全な船体への積載手法を検討することを目的としている。

## 2 コンテナ船におけるコンテナ固縛方法

大型コンテナ船のデッキ上に積載されるコンテナは7段程度積み上げられる。これらを相互に繋ぎ、船体に固定するためにツイストロックやラッシングロッドと呼ばれる固縛器具が用いられる。ツイストロックはコンテナの四隅に存在するコーナーキャスティング間を締結するために用いられる。荷役の効率化、時間短縮を目的として、近年では半自動ツイストロックや全自動ツイストロックが一般的に使用されている。

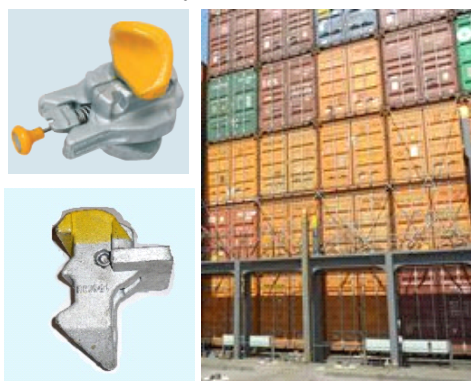


Fig.1 Twistlock and Container Stack on the Deck

ラッシングロッドはコンテナ同士を固縛するものではなく、船体とコンテナを固縛するものであり、デッキ上に

設置されたアイプレートとコンテナのコーナーキャスティング間を締結する。ラッシングロッドはその形状によってスタック下部のコンテナの固縛にのみ用いられる。近年建造、就役している大型コンテナ船ではデッキ上にラッシングブリッジと呼ばれるラッシングロッドを設置する設備を有した船舶も存在している。これら器具を用いてコンテナはデッキ上に固縛される。図1にツイストロックの形状を示す。

## 3 実船計測

本研究においては実海象条件においてコンテナ船甲板上に存在するスタックの挙動を把握すると共に数値解析モデルとの整合性検証を目的として実船計測を行った。計測にはBluetooth通信を利用した加速度計測装置を用いて、コンテナ船に積載されている艀装品であるギアボックスにこれを取り付けることによって加速度変化の計測を行った。計測においては無線通信による加速度計測は行えたが、オペレーションの都合上、ギアボックスがデッキ上に設置されたことからスタックの運動ではなく船体運動の取得に留まった。計測結果に関しては割愛する。

## 4 数値解析

### 4.1 コンテナスタックモデル

現在、コンテナの寸法に関してはISOによって規格化されており、全世界で共通のコンテナが使用されている。本解析では寸法6058×2438×2591[mm]の20ftコンテナをモデル化している。コンテナを固定するツイストロックは200[mm]程度とコンテナと比較すると小さく、モデルをソリッドで作成した際にはメッシュ制御の困難さ、メッシュ増加による計算コストの増加が想定される。そこで計算コストを削減と妥当な計算結果取得の両立が可能なモデル作成が必要である。本研究においてはコンテナのモデルを9節点28要素のモデルで作成することで要素削減を行い、計算コストを減少させた。NK(日本海事協会)の規定するコンテナのラッキング剛性を満たすものとしている。コンテナならび積載物の重量は内部1節点を質量要素として定義することで付与している。コンテナは鋼鉄製であり変形は等方性、線形弾性変形領域と座屈破壊による塑性変形領域が存在する。ヤング率 $E=210$ [GPa]、ポアソン比 $\nu=0.3$ 、密度 $\rho=7850$ [kg/m<sup>3</sup>]としている。積載重量に関しては記載が無い限りは各コンテナに対して10tを付与している。

また、波浪による船体運動は船体を模擬した剛体要素に強制変位もしくは加速度を与えることで定義している。スタックは現行の大型コンテナ船で運用される積載段数の7段としている。

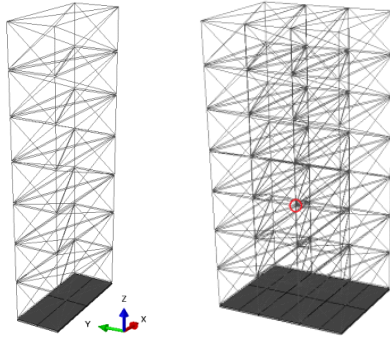


Fig.2 Schematic of Container Stack Model

#### 4.2 ツイストロック解析モデル

固縛器具であるツイストロックは数値解析を行う際にはモデル化が必要であるが、ツイストロックは構造的にギャップ(隙間)が存在する。このギャップによってコンテナとツイストロックは常に接触しているわけではなく、コンテナの浮き上がりによってコンテナとツイストロックは離れることとなる。この接触の判定を非線形バネ要素によって定義する。図3にはツイストロックを模擬した非線形バネ要素の荷重-変位のグラフを示している。原点近傍において微小な荷重によって変位が拡大する部分がギャップを表現するものである。

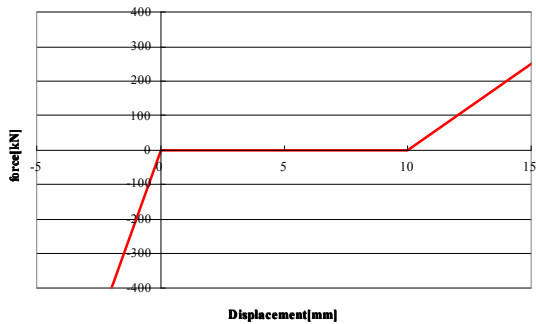


Fig.3 Numerical Model of Twist Lock

#### 4.3 ラッシングロッドモデル

デッキ上のコンテナを固縛するもう一つの要素としてラッシングロッドが存在する。このラッシングロッドもツイストロックと同様に非線形バネとしてモデル化を行った。ラッシングロッド自体は長軸材であるために圧縮方向の荷重に対しては作用せず、引張方向の荷重にのみ作用するよう仮定している。本研究においては各コンテナを拘束した際の効果を評価するために各段のコンテナに対して4つのラッシングロッドをクロスさせて使用する。さらに2,3段目のコンテナを固縛する際にはラッシングブリッジを模擬した剛体節点とコンテナ間をロッドでつなぐものとした。

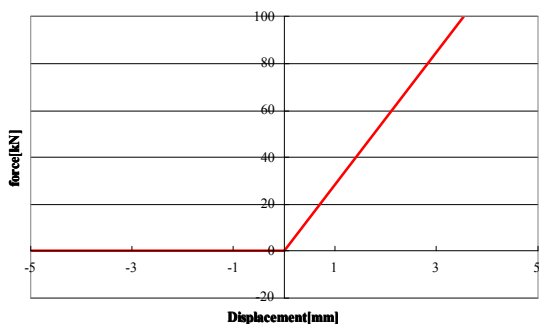


Fig.4 Numerical Model of Lashing Rod

#### 4.4 スタック間接触を考慮した解析モデル

デッキ上に積載されているスタック同士の間隔は非常に短く、船体運動によってスタックが動揺し接触することで相互に影響を及ぼす。スタック間の接触を考慮した解析を行うために前述の7×1スタックモデルを基として、このスタックをY方向に3列並べた7×3スタックモデル、ならびに9列並べた7×9スタックモデルを作成した。

7×3、7×9スタックモデルの両者とも7×1スタックモデルと同様にビームおよびスプリング要素で構成されており、接触を定義することは非合理的である。そこで図5に示すようにコンテナの同士のY方向を非線形バネ要素をつなぐことで擬似的に接触を定義している。

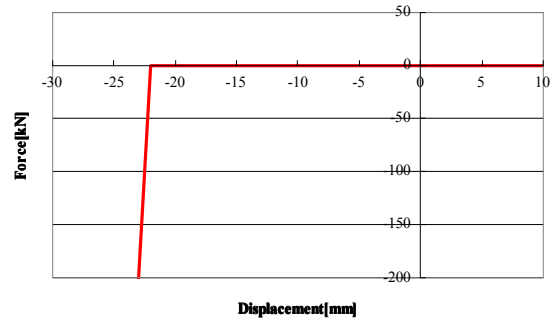


Fig.5 Numerical Model of Stack Contact

#### 4.5 座屈考慮モデル

コンテナスタック崩壊事故の事例を考えた際に、事故原因はスタック下部のコンテナが座屈により圧潰することで、スタックが倒壊している。本研究ではこれを表現することで、船体運動によってスタックが崩壊した際に他のスタックに与える影響を評価する。通常の座屈解析の場合には座屈モード等が重要なファクタとなるが、本研究の場合には座屈モードを解析することが目的ではなく、スタック全体の崩壊挙動を表現することが目的となるため、座屈モードを考慮せずに座屈破壊を考える。本研究ではNKのコンテナ積載ガイドラインに従い座屈荷重の境界値を942[kN]とし、コンテナにおける許容圧縮荷重を超えた負荷がビーム要素に生じた際に破壊を生じるように材料定数を用いて定義を行う。座屈破壊は幾何学的形状に依存し、古典的にはオイラーの座屈式等によってその荷重を求めてきたが、今回の場合には許容圧縮荷重の超過のみを判別して解析を行う。この材料の数値モデルを図6に示す。座屈荷重を超えるとビーム要素はほぼ一定応力のままひずみが拡大し、破壊を模擬する。解析の評価はスタック最下部のツイストロックに加わる荷重とした。

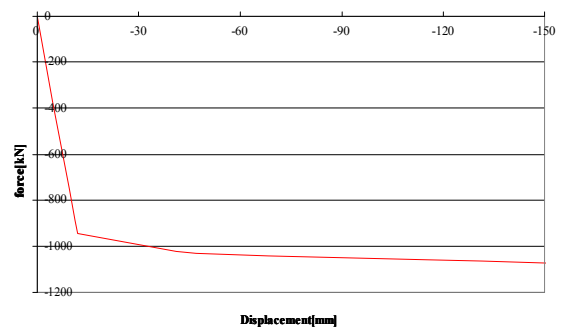


Fig.6 Numerical Model of Buckling Failure

## 5 解析結果

### 5.1 ツイストロックギャップ影響

ツイストロックはスタックの全てのコンテナに対して固縛のために使用される。ツイストロックのギャップは経年劣化によって拡大するが、これに対して現在の船級規則では明確な基準が存在していない。ギャップによってスタックの挙動が変化した際にスタック最下部のツイストロックに生じる荷重の差異を比較検討した。図7にはギャップを変化させ周期20[s]、角度20[deg]のローリングを加えた際の時間一荷重変動を示している。ギャップの拡大にともなって荷重が増加しており、ロールによってスタックが動揺する際にギャップ分だけ余分に挙動するためと考えられる。ギャップ拡大に伴う、荷重増分は100[kN]を超えるものであり、安全に対して看過できない値である。

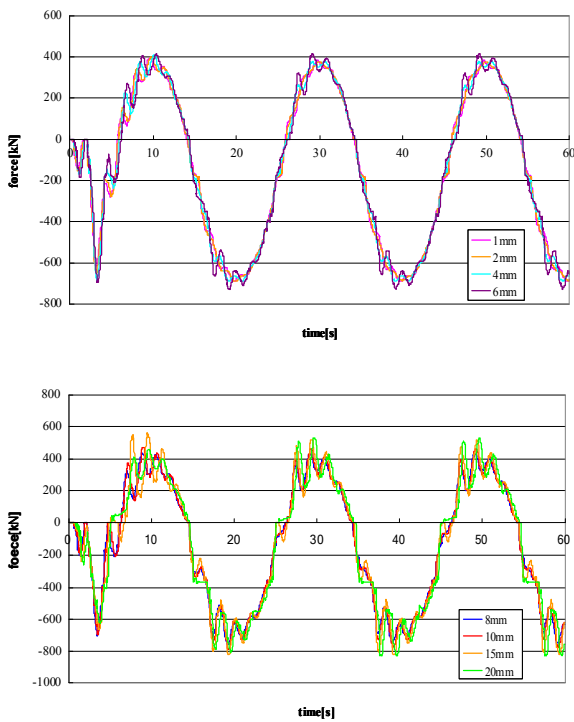


Fig.7 Force History with Different of Twist Lock Gap

大型化する船舶においてはスラミング等の異常波を受けた際に船体の弾性振動を伴う周期が短い加速度変化が生じることが報告されている。前述のローリングは恒常的に発生するが、船体の弾性振動であるウィッピングは特定の状態においてのみ生じる。ウィッピングに対してツイストロックのギャップ変動がコンテナに加わる荷重に対して与える影響の評価を行った。最大の加速度を15[m/s<sup>2</sup>]、周期0.5[s]として、-sin波形で1周期だけ入力した。図8はギャップを変化させた際にツイストロックに加わるか圧縮荷重の最大値を示している。ギャップの拡大にともなって、荷重が増加していることが分かる。船体運動によってコンテナが浮上がり、落下することによって衝撃が生じるが、ギャップが拡大することで浮上がり幅が増加することで荷重が増加すると考えられる。

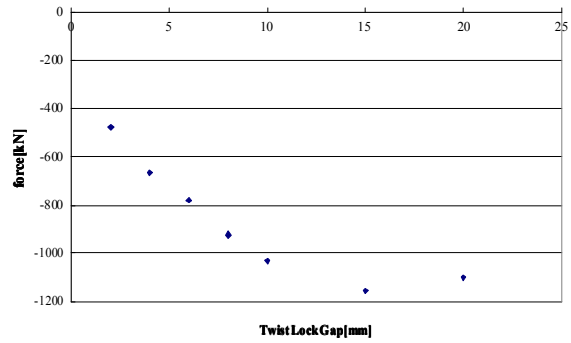


Fig.8 Maximum Compression Force with Twist Lock Gap

両者の結果よりツイストロックのギャップはコンテナに加わる荷重に影響を与え、ギャップの拡大が荷重を増加させる要因となる。これよりギャップ幅を一定程度で収めるような対策が必要となると考えられる。

### 5.2 ラッシングロッド付与効果

通常、コンテナ船においてはツイストロックだけではなく、ラッシングロッドを併用して固縛が行われる。このラッシングロッドによる荷重の低減効果について評価を行った。図9はラッシングロッドを付与してローリングを加えた際の荷重の変化を示している。ラッシングロッドを付与することでコンテナの挙動を抑制し、荷重を低減していることが分かる。ただし、1段目のみを拘束した場合には圧縮荷重には大きな変化がなく、このことから2段目以上のコンテナに対してラッシングロッドを付与した方が効果的に荷重を低減できると考えられる。

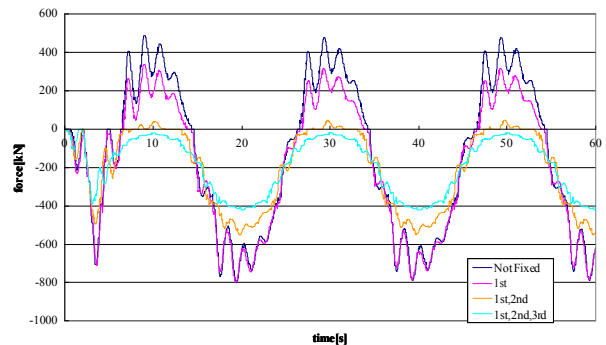


Fig.9 Force History with Lashing Rod Fixed

ウィッピングに対しても同様にラッシングロッドの効果を検証した。図10はウィッピングによって生じた圧縮荷重の最大値をラッシングロッドの拘束に応じて評価したものである。ローリングの際と同様により高所のコンテナに対して固縛を行うことによって最大の圧縮荷重を低減できていることが分かる。これは固縛位置が変化することによってウィッピングを受けた際に飛び上がるコンテナの数が増えることによって生じてくるためであり、より高所までコンテナを固縛することで飛び上がるコンテナ数を減少させ、荷重を抑制できると考えられる。

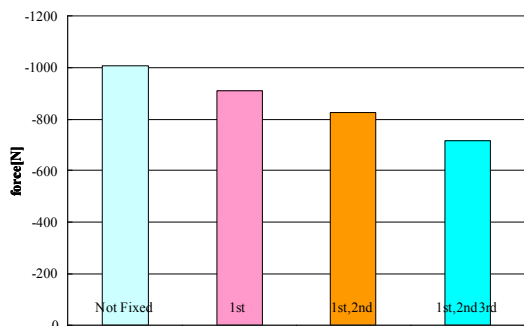


Fig.10 Maximum Compression Force with Lashing Rod Fixed (Whipping)

### 5.3 重量配置

ここまでは固縛器具に対して荷重変動を見てきたが、これらを使用した際にも事故が生じることがある。より安全な積載を考えた際には荷役において設定されるコンテナの固縛位置が考えられる。解析においては各コンテナの荷重を一定としてきたが、1つのコンテナの荷重を25tとして、この設置位置を変更したさいの荷重の変化を検証した。図11は25tのコンテナを1,3,5段目に積載した際に生じる荷重の時間変化である。コンテナの位置が高くなるに連れて荷重が増加していることが分かる。ローリングは船体中心軸に与えられており、回転中心となる。回転中心から離れることによって慣性モーメントが大となり、これによってスタックに加わる荷重が増加すると考えられる。このことより、スタック積載においては積載重量の重いコンテナを下段に据えることで荷重を抑制できる。

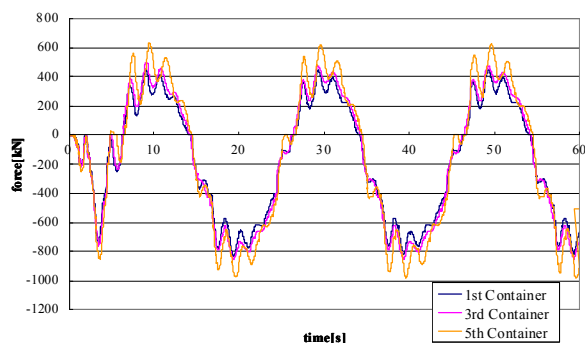


Fig.11 Force History with Heavy Container Location

### 5.4 コンテナ間接触

コンテナが積載されているデッキ上には何列ものスタックが存在し、動揺によってスタック同士が衝突、接触することがある。そこで7×3スタックモデル中央の荷重を変更し、解析を行うことでスタックの衝突、接触による荷重変化を検証した。またラッシングロッドの有無による接触の抑制効果についても評価を行った。図12はスタックの衝突によって変化する圧縮荷重の最大値の変化を示している。ラッシングロッドがない場合には15t以降で、付与した場合には20t以降で接触によって荷重が増加していることが分かる。ラッシングロッドを付与することによってスタック上部のコンテナの挙動を低減し、これによって接触による荷重増加が抑止されていると考えられる。

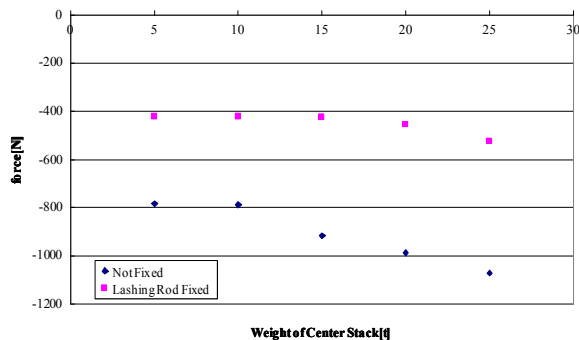


Fig.12 Maximum Compression Force with the Effect of Stack Contact

### 5.5 座屈破壊とスタック配置影響

輸送に際して事故が生じないことが大前提であるが、仮にコンテナが許容値以上の積載物を輸送した際に他のスタックに対して与える影響を座屈モデルを用いて評価を行った。スタックの配置に際して重量スタックを評価スタックから距離を置くことによって加わる荷重が減少していることが図13から分かる。船舷に近い場所に重量コンテナを設置することによって隣接するスタックも崩壊し被害を拡大させる可能性がある。逆に、船体中央部に設置した場合には荷重を分散させることによって、スタック流出の可能性を低減させることが可能になると考えられる。

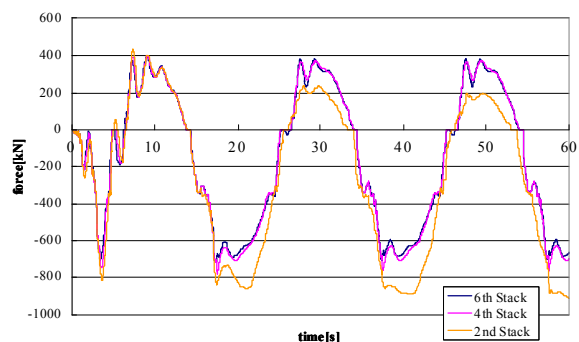


Fig.13 Force History with the Effect of Heavy Stack Location

## 6 結言

本研究においてコンテナスタックの数値モデルを用いた解析によって以下の知見を得た。

1. ツイストロックのギャップ拡大によってローリング、ウィッピング共に荷重を増大させる。これはツイストロックのギャップ拡大ともなってコンテナの挙動が増加することが原因として考えられる。
2. ラッシングロッドを付与することでスタックの挙動を抑制し、ローリング並びにウィッピングでの荷重を低減する。特にスタック高所のコンテナを固縛した場合、低減効果が高い。
3. スタックにおけるコンテナの配置、ならびに船体におけるスタックの配置によってコンテナに加わる荷重は変化する。重量コンテナをスタック下部に置くことで荷重を低減でき、スタックごとの荷重を均質にすることで接触を防止することが出来る。