

多段積みコンテナの挙動解析とコンテナ拘束方法に関する研究

— 第 1 報：弾性変形を考慮しない場合 —

正員 深 沢 塔 一* 大 月 信 哉**
正員 植 西 清 人***

Numerical simulation of the behavior of multi high container stack and the consideration on the container securing system
- 1st Report: Rigid-body modeling -

by Toichi Fukasawa, *Member* Nobuya Ohtsuki
Kiyohito Uenishi, *Member*

Summary

With the increase of the size of container ship, the number of container stack on deck is increasing up to 8 high. The multi high stack containers are secured with the use of securing system such as twistlock or lashing rod; however, incidences of container loss due to stack failure have been reported in recent years. In the present paper, behaviors of a container stack on deck were analyzed by a motion simulation software of complex mechanical assemblies. The container is assumed to be rigid and modeled in a column-plate structure. The twistlock and the lashing rod are also model in a rope. The dominant ship motion to container stack failure was clarified firstly, and the effectiveness and limitation of the use of twistlock and/or lashing rod were investigated. The securing system with the use of twistlock and the lashing rod were discussed based on the simulation results.

1. 緒 言

近年、コンテナ船は大型高速化し、デッキ上にコンテナを 6 段～8 段と多段に積上げて大量に輸送することにより、大きな経済効果を得ている。デッキ上コンテナは緊締金具や固縛装置により固定されているものの、船体運動に伴う過大荷重などによりコンテナの変形や固縛装置の破壊等が生じ、コンテナが崩落するといった事故も報告されている。

そこで、本論文では機構・構造解析用ソフトウェアを用い、コンテナおよび緊締・固縛装置をモデル化して、多段積みコンテナの挙動を解析することとする。デッキ上のコンテナは緊締金具により互いに固定されているが、金具とコンテナの間にはガタがあり、またコンテナ自体もラッキング変形し、固縛ロッドなども伸び縮みするため、実際のコンテナの挙動を正確に評価するにはかなりの困難が伴う。そこで本研究では、まず多段積みコンテナの挙動の大略を明らかにするため、コンテナを剛体と仮定し、緊締・固縛装置を含めたコンテナの簡易モデル化について検討を行う。さらに、この簡易モデ

ルを用いて船体運動に対する挙動を解析し、コンテナ崩落に対する船体運動の影響、コンテナや緊締・固縛装置に作用する荷重、コンテナの緊締・固縛方法についての検討を行う。

2. 解析モデルと解析条件

解析に用いる MSC.visualNastran 4D は、アセンブリ内の任意のボディについての機構解析（運動シミュレーション）と MSC.Nastran による構造解析を統合したシミュレーションが可能であり、各点の変位・速度・加速度やジョイント反力、各パーツの応力などを求めることができるものである¹⁾。

解析対象としたコンテナ船は ($L_{pp} \times B \times D - d = 282\text{m} \times 32.22\text{m} \times 21.85\text{m} - 13.5\text{m}$) で、コンテナは、JIS 規格より²⁾、国際貨物コンテナ 1AA 種類 40 ft コンテナ (長さ 12.192m × 幅 2.438m × 高さ 2.591m) を対象とした。多段積みコンテナの重量はそれぞれのコンテナで異なり、空のものから 30 トンを越えるものまでさまざまであるが、本研究ではコンテナスタックの挙動を明らかにするため同一重量の多段積み仮定し、平均的な値として 1 コンテナ 10 トンとした。また、実際のコンテナは複数のはりと板材により構成されているが、解析時間短縮のため、Fig.1 に示すように水平板 2 枚（屋根板、床板）と 4 隅の垂直柱（すみ柱、corner post）、およ

*金沢工業大学 機械系

**山洋電気（株）、研究当時 金沢工業大学大学院工学研究科

***三菱重工業（株）神戸造船所

びコンテナ上・下側に設けた4隅のすみ金具 (corner fitting) により構成される板・骨組み構造と簡略化し、コンテナと積荷の重量は、重心高さがコンテナ中央となるように、水平板と垂直柱に分散した。コンテナモデルの寸法と重量を Table 1 に示す。また今回は現象を単純化して多段積みコンテナの全体挙動を把握するため、コンテナを剛体構造と仮定した。

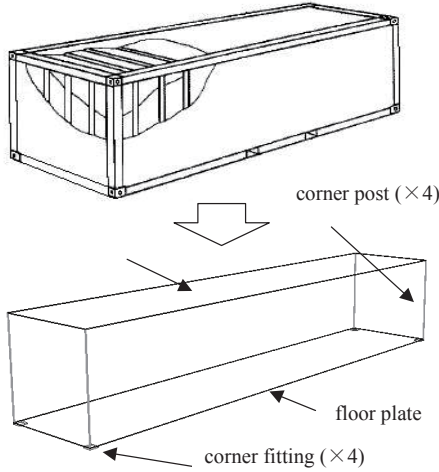


Fig.1 Container model

Table 1 Dimension and weight of container elements

	Dimension [mm]	Weight [kgf]
Vertical Column	2534 × 20 × 20	250 × 4
Horizontal Plate	12192 × 2438 × t16	4500 × 2
Corner Fitting	200 × 200 × t25	9.42

Table 2 Ship motions

	Roll	Pitch	Heave
Amplitude	23.8 [deg]	5.0 [deg]	3.525 [m]*
Period [s]	25.78	8.22	8.40

* Heave amplitude is assumed to be $L_{pp}/80$.

3. 未拘束コンテナの挙動

まず、緊締・固縛されていない多段積みコンテナが船体運動によってどのような挙動をするか検討した。船体運動は roll, pitch, heave とし、ABS のガイドラインにしたがって最大振幅と周期、roll, pitch の回転中心を定め³⁾、船体にそれぞれの運動を単独に与えた時の挙動をシミュレートした。用いた運動の最大振幅と周期を Table 2 に示す。この結果、2～6 段積みの拘束されていないコンテナについて船体運動を与えたところ、pitch, heave においてはコンテナが微妙にずれる程度で崩落することはないことがわかった。一方、roll については、2 段積みコンテナでは崩落することはないが、3 段積み以上の多段積みコンテナは崩落することが判明した。よって、以下では、3 段積み以上の多段積みコンテナについて roll 運動に対する挙動を検討することとする。

4. コンテナ緊締方法の検討

4.1 ツイストロックのモデル化

コンテナの緊締 (securing) とは下部すみ金具の下穴を使用し緊締金具によってコンテナを固定することである。ここでは、コンテナ上下4隅に設けたすみ金具にツイストロックを取り付けた場合のコンテナの挙動について検討を行う。ツイストロックとは、コンテナ積上げ時にコンテナの上下面4隅に設けたすみ金具の穴にロックを挿し込み、ロックを回転させることによって相対移動量を制限する緊締金具である。

まず、ツイストロックを Fig.2 に示すように主要部品を正確にモデル化して解析を行った。ツイストロックとすみ金具の間には、コンテナ長手方向に±8mm、幅方向に±4mm、高さ方向に5mmのギャップがあり、船体動揺によってすみ金具とツイストロックが接触・衝突や離反を繰り返す。

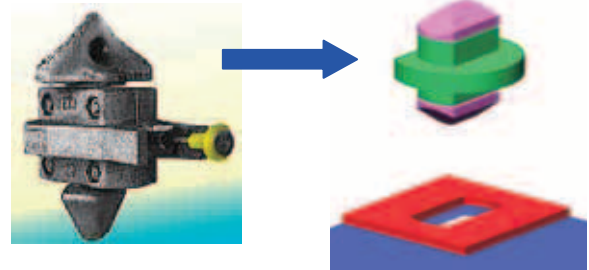


Fig.2 Twistlock and corner fitting

Figs.3, 4 に、デッキ上にコンテナを1段載せた場合の roll 時のデッキとコンテナの接触力の水平・上下方向成分の時間変化 (半周期分) を示すが、コンテナとツイストロックが数ミリのギャップの間で弾性衝突と離反を繰り返すことによって鋭いピークの衝撃力が生じていることがわかる。また、本解析により、このような精密なツイストロックモデルを用いて計算すると、複雑な衝突現象により十分に小さいタイムステップを指定しているにもかかわらず接触判定で解析エラーが生じ、またコンテナ1段のみでも計算時間が非常にかかるため、多段積みコンテナの解析はほぼ不可能であることがわかった。なお、図で Door End と Closed End の結果に差が生じているが、これは緊締金具とコンテナの初期状態が数値的に必ずしも対称でないことによる。

そこで、ツイストロックの中央部の部品を取り除き、Fig.5 のように I 字型のピンで簡略化したモデルによる計算を行った。結果を Figs.6, 7 に示すが、衝突・離反現象が単純化され、計算時間はかなり短縮できた。しかしながら、Figs.3, 4 と比較すると、全体の最大接触力はほぼ等しいものの、最大接触力が発生するコンテナコーナー位置に違いが現れており、I 字型ピンモデルでは、衝突のタイミングが実際と異なる可能性があることがわかった。

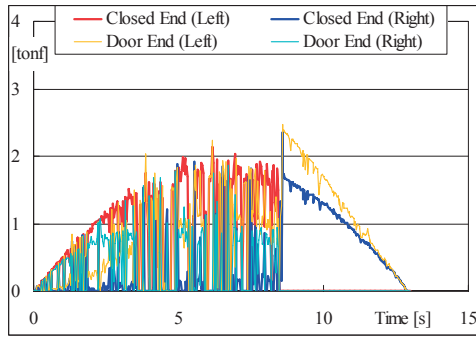


Fig.3 Horizontal securing force on corner fitting

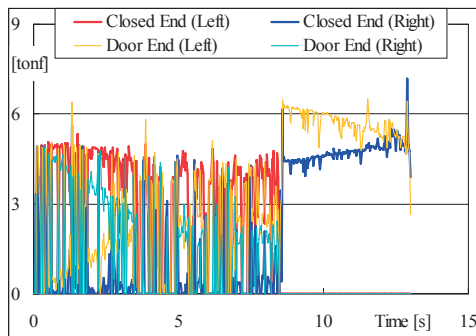


Fig.4 Vertical securing force on corner fitting

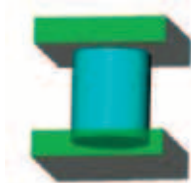


Fig.5 I-type pin model

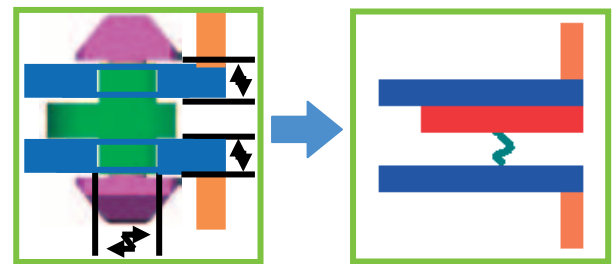


Fig.8 Rope model

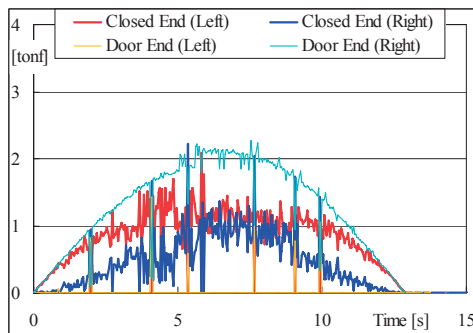


Fig.6 Horizontal securing force on corner fitting (Pin model)

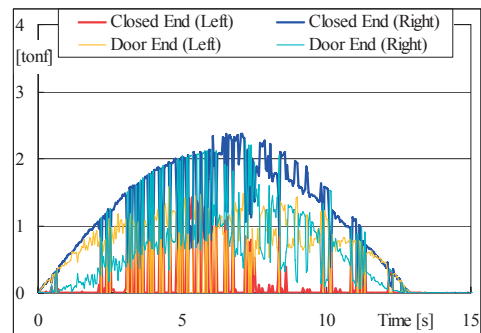


Fig.9 Horizontal securing force on corner fitting (Rope model)

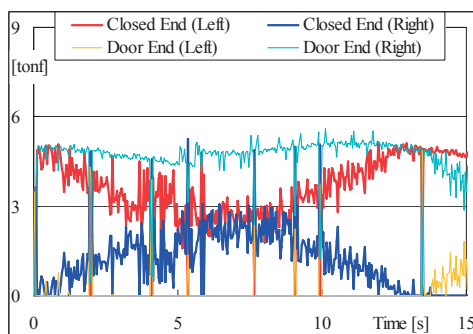


Fig.7 Vertical securing force on corner fitting (Pin model)

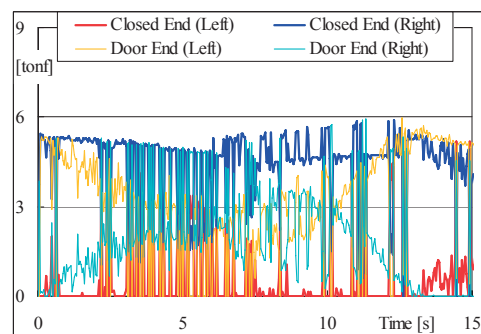


Fig.10 Vertical securing force on corner fitting (Rope model)

そこで、Fig.8 に示すように、ツイストロックとコンテナの孔におけるギャップ量をロープ長として与え、ロープが指定された長さを超えると張力が発生するモデル(ロープ拘束モデル)を用いることとする。このモデルでは、ツイストロックにかかるせん断力や引張荷重はロープに働く張力とその角度より求めることができる。Figs.9, 10 に計算結果を示すが、Figs.3, 4 とほぼ同程度の最大値が得られ、最大値の発生するタイミングも I 字型ピンモデルよりも厳密なモデルに近い結果となった。さらに、はるかに計算時間を短縮することができ、多段積みコンテナの解析にも利用可能であることが判明した。これより、以下ではロープ拘束モデルによりツイストロックをモデル化して解析を行うこととする。なお、ツイストロックとコンテナとの摩擦係数であるが、0.5、0.15、0.015、0.0015 と変化させて解析を行ったが、接触力の最大値に大きな変化が無いことがわかったので、以下では計算の安定のため摩擦係数を 0.5 として解析を行うこととする。

4.2 ツイストロックを用いた解析

ここでは、多段積みコンテナをツイストロックのみにより拘束した場合、roll 運動によってコンテナ接触部やツイストロックにどの程度の荷重が発生するのかを検討する。まず、コンテナの段数を1~6と変化させた場合の roll 時の最下段コンテナとデッキとの接触力の水平・上下方向成分の時間変化を Figs.11, 12 に、最下段のツイストロックの張力（ロープ拘束モデルの張力）を Fig.13 に示す。なお、図は、コンテナ4隅の内、closed end の左側のものである。

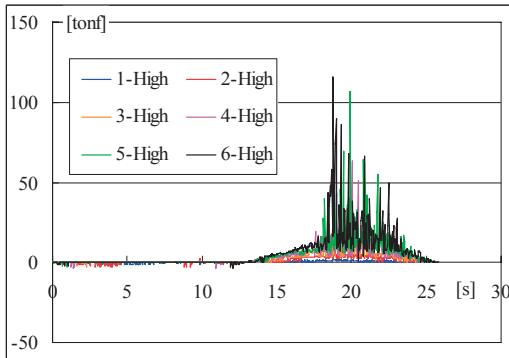


Fig.11 Horizontal securing force on corner fitting (Twistlock)

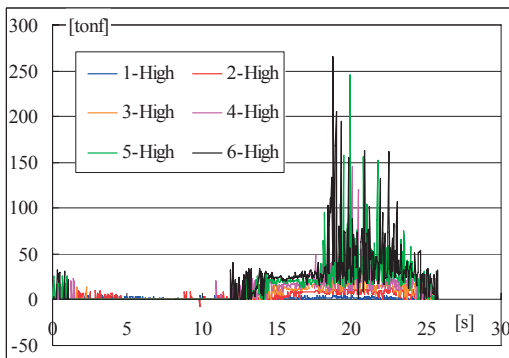


Fig.12 Vertical securing force on corner fitting (Twistlock)

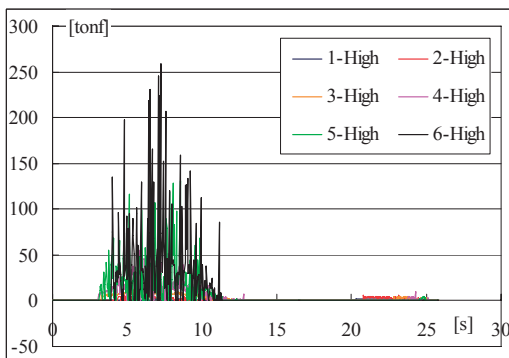


Fig.13 Twistlock tension (Twistlock)

Figs.11-13 より、0 秒から 13 秒くらいまでは、closed end 左側のコーナーが浮き上がっているため接触力は働かず、ツイストロックの張力で拘束されている。また、それ以降の時間ではコンテナのすみ金具による接触力によって拘束が起

こっていることがわかる。また、これらの力はコンテナの積上げ段数が増えるとともに増加している。

コンテナ荷重については、ABS により Table 3 に示すような許容値が定められている^{3, 4)}。Figs.11-13 の計算結果にはコンテナとツイストロックの衝突・離反による鋭い力のピークが現れているが、これらのピークの最大値は数値的時間積分の時間幅によって変動する。また、コンテナの構造応答周波数を考慮すると、緊締・固縛装置の強度にとって重要であるのはこのピークの最大値ではなく、船体運動周波数成分の力であると考えられるので、ここではそれらに注目して比較を行う。

Table 3 Loads on Containers

		Load [tonf]
Corner Post Compression		86.4
Vertical Compression on Bottom Corner Fitting		97.2
Transverse Securing Force on Corner Fitting	Top Corner	25.4
	Bottom Corner	35.6
Lashing Force on Corner Fitting	Vertical	30.5
	Horizontal	15.2
Vertical Tension on Top Corner Fitting		20.3
Vertical Tension on Bottom Corner Fitting		25.4

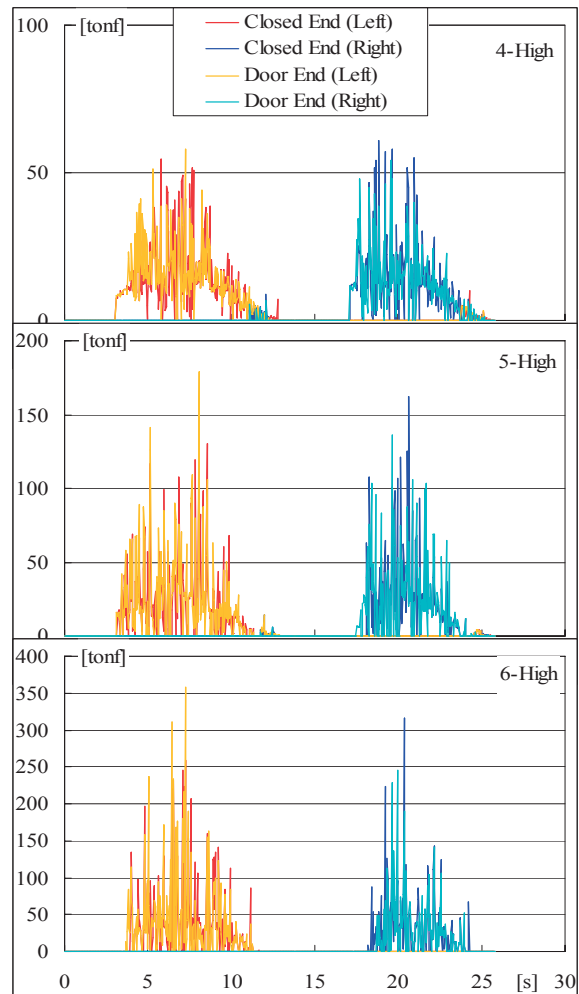


Fig.14 Twistlock tension (Twistlock)

まず、Fig.11 の最下段コンテナとデッキの水平接触力や Fig.12 の上下接触力を見ると、ピーク値を除いた値は最大で Table 3 の底部すみ金具の横方向緊締荷重許容値 35.6 [tonf] や上下方向圧縮荷重許容値 97.2 [tonf] 程度となっている。したがって、コンテナすみ金具については、6 段積みとしても大きな問題は生じないといえる。一方、Fig.13 のツイストロック張力は、底部すみ金具の引張荷重許容値 25.4 [tonf] を大きく超えている。

そこで、コンテナ 4 段～6 段積みのそれぞれについて、コンテナ 4 隅でのツイストロック張力をまとめて Fig.14 に示す。これより、5 段積み以上では底部すみ金具の引張荷重許容値 25.4 [tonf] を大きく超えているので、4 段積みまでが限界であることがわかる。以上のように、ツイストロックのみの緊締で強度的に耐えられる限界はせいぜい 4 段積みまでであり、これ以上の段数になると、ラッシングなどの他の固定方法を併用してツイストロックにかかる負荷の低減を図る必要があることがわかった。

5. コンテナ固縛方法の検討

5.1 ラッシングのモデル化

コンテナの固縛 (lashing) とは上部すみ金具または下部すみ金具を使用しワイヤ/ロープ/ロッドなどによってコンテナを固定することである。ここでは、すみ金具と船体に設置されている支柱 (lashing bridge) とをラッシングロッドにより固定するラッシング装置を取り付けた場合のコンテナの挙動について検討を行う。なお、ラッシングロッドは、Fig.15 に示すラッシング角度 (θ , α) を変化させることにより、固定位置を自由に変更できる。

5.2 ラッシングを用いた解析

ここでは、まず、ツイストロックのみでの強度上の限界である 4 段積みコンテナに 1 対のラッシングロッドをクロスに張り、ラッシングロッドの固定位置やラッシング角度を変化させ、各部の荷重に対する影響について検討を行う。なお、簡単のために、ラッシングロッドの初期張力はゼロとした。

まず、ラッシングロッドの取り付け位置であるが、3 段目コンテナ底部のすみ金具から、2 段目コンテナ底部と同じ高さのラッシング支柱にとるのが一般的であるが、本研究ではこのようなラッシング取り付け位置にこだわらず、もう少し幅広く取り付け位置を検討する。コンテナ側の取り付け高さやラッシング支柱の取り付け高さの間にコンテナが複数入ることを想定して、まず、ラッシングロッドのコンテナ側の取り付け位置は 4 段目コンテナ底部のすみ金具とし、ラッシング支柱への取り付け高さを、4 段目コンテナ底部と同じ高

さ、0.5H 下方、1.0H 下方、1.5H 下方、2.0H 下方となるように Fig.15 の角度 θ を変化させた。ここで、H はコンテナ 1 段の高さである。なお、本解析では roll 運動のみを考えているため、ラッシングは横方向の負荷が主となるので、簡単のために、ラッシングの支柱とコンテナの間隔を 0m (Fig.15 の α を 90 度) とした。また、ラッシング支柱のコンテナ幅方向間隔は 2.5m とした。

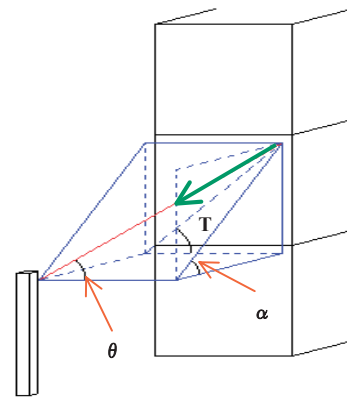


Fig.15 Lashing system

Figs.16-19 に計算結果を示す。まず、Figs.16, 17 の最下段コンテナとデッキとの水平方向・上下方向接触力ではラッシング支柱との取り付け高さを 1.5H 以上下方にすると衝撃的な荷重が顕著になっている。また、衝撃的な値を除いた荷重値はラッシング角度 θ によってそれほど大きな変化は無いが、ラッシングの無い時よりは低下している。一方、Fig.18 の最下段ツイストロックの張力は、ラッシングを取り付けたことにより荷重値が大幅に低下し、ラッシングロッドの支柱との取り付け高さをある程度以上低くすると荷重値はほとんどゼロとなる。また、Fig.19 のラッシング張力より、コンテナ拘束のための上下方向荷重はラッシング張力で受け持たれていることがわかるが、水平・上下接触力と同じくラッシング支柱との取り付け高さを 1.5H 以上下方にすると衝撃的な荷重が顕著になっている。なお、この衝撃的な力を除いたラッシング張力は Table 3 の許容値よりも低くなっている。これらより、ラッシングロッドをラッシング支柱に取り付ける場合、コンテナ側よりも、コンテナ一段の高さ H 程度下方以内にするのが望ましいといえる。

次に、4 段積み、5 段積みコンテナについてラッシング支柱への取り付け高さをコンテナ側より 0.5H 下方とし、コンテナ側の取り付け位置によって緊締・固縛荷重がどのように変化するかを調べた。得られた結果を Figs.20-27 に示す。なお、ラッシングの取り付け位置によっては必ずしも最下段のコンテナとデッキとの間の緊締力が最大となるとは限らないので、図にはすべての接触点における水平方向・上下方向接触力、ツイストロック張力、ラッシングロッド張力を表示し、

その最大値に注目する。

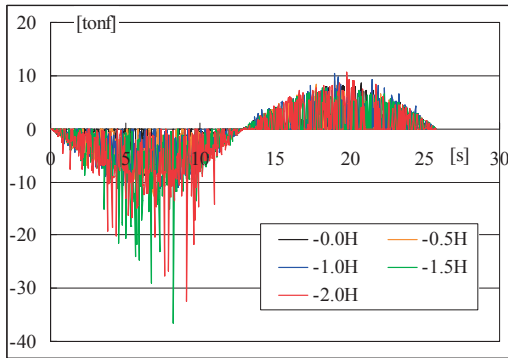


Fig.16 Horizontal securing force on corner fitting (Twistlock + Lashing)

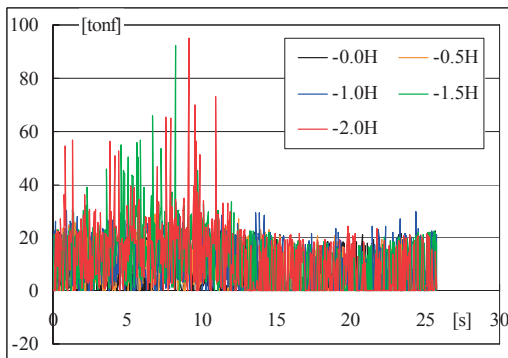


Fig.17 Vertical securing force on corner fitting (Twistlock + Lashing)

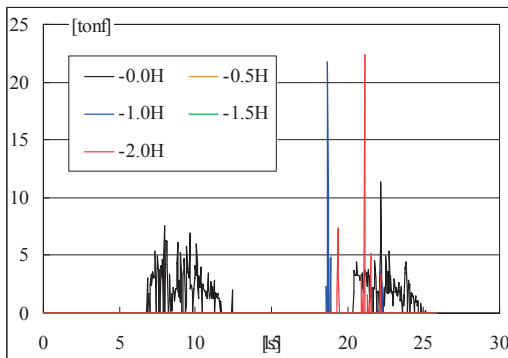


Fig.18 Twistlock tension (Twistlock + Lashing)

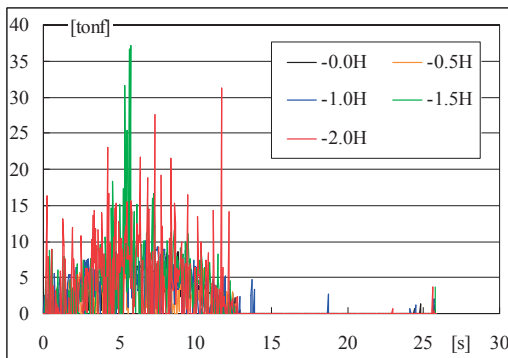


Fig.19 Lashing tension (Twistlock + Lashing)

Figs. 20-23 は4段積みコンテナに1対のラッシングを取

り付けた場合であるが、ラッシングロッドのコンテナ側の取り付け位置を2段目の屋根板側のすみ金具、3段目の床板側のすみ金具、4段目の床板側のすみ金具と変化させた。図より、4段積みコンテナの場合は、ラッシング取り付け位置全体を上方にもっていくにしたがって各荷重が小さくなっていることがわかる。ただし、Fig.22のツイストロックの張力については、ラッシング取り付け位置全体を上方にもっていくと衝撃的な荷重が顕著になっている。一方、Figs.24-27は5段積みコンテナに1対のラッシングを取り付けた場合であるが、ラッシングロッドのコンテナ側の取り付け位置を3段目、4段目、5段目の床板側のすみ金具と変化させた。4段積みコンテナの場合と同様、Figs.24, 25の水平方向・上下方向接触力についてはラッシング取り付け位置全体を上方にもっていくと値が減少しているが、Figs.26, 27のツイストロック張力とラッシングロッド張力については、4段積みの場合と若干様子が異なり、4段目の床板側のすみ金具に取り付けた場合はツイストロック張力が小さいのに対してラッシング張力が大きく、5段目の床板側のすみ金具に取り付けた場合は、その逆となっている。

これらより、ラッシング取り付け位置全体を上方にもっていくと全体の荷重を軽減することができるが、ある程度上方である場合、ツイストロックとラッシングロッドの張力の配分を考えてその位置を決定する必要があることがわかる。なお、今回の計算では、コンテナのラッキング変形やラッシングロッドの初期張力を考慮していないため、実際にはこれらの影響によりガタやゆるみが生じ、張力の配分も若干異なってくると思われる。今後、これらの弾性変形を考慮して詳細な検討を行う必要がある。

6. 結 言

本研究では、機構・構造解析ソフトウェアを使用し、多段積みコンテナの挙動を弾性変形を考慮しない場合について解析し、コンテナ緊締・固縛力とコンテナ拘束方法の検討を行った。得られた結果は以下のとおりである。

1. 機構・構造解析ソフトウェアを用いてデッキ上のコンテナの挙動を解析できることがわかった。また、コンテナを必要最低限の構造に簡略化しツイストロックとラッシングロッドをロープ拘束モデルとすることで、計算時間を短縮化することができた。
2. コンテナの崩落に重要となる船体運動は roll であり、roll 運動時、未拘束の多段積みコンテナは2段までは崩落しないが3段以上になると崩落することがわかった。
3. ツイストロックのみでコンテナを拘束した場合、4段積み程度から設計許容荷重を超えるツイストロック張

力が多く発生する。

4. ラッシングロッドをラッシング支柱に取り付ける場合、コンテナ側よりもコンテナ高さの 0.5 倍からせいぜい 1.0 倍程度下方にすることが望ましい。
5. ラッシングロッドのコンテナ側取り付け位置は、ラッシング全体が上方である方が全体の荷重を軽減するが、ある程度より上方である場合、ツイストロックとラッシングロッドの張力の配分を考えてその位置を決定する必要がある。
6. 今回の計算ではコンテナのラッキング変形やラッシングロッドの初期張力を考慮していないが、実際にはこれらの変形によりガタが生じ、張力の配分や荷重の大きさも異なってくると思われるため、今後、これらを

考慮して解析を行う必要がある。

参考文献

- 1) MSC.Software, MSC.visualNastran 4D, [http:// www.mscsoftware.co.jp/solutions/software/p_nas_4d.htm](http://www.mscsoftware.co.jp/solutions/software/p_nas_4d.htm).
- 2) 日本規格協会：国際貨物コンテナ — 外のり寸法及び最大総質量、(1994).
- 3) Guide for Certification of Container Securing Systems, 1988, America Bureau of Shipping, (1988).
- 4) Guide for Certification of Container Securing Systems 1988, Notice No.2-1 February 2003 (Rev.on 24 March 2004), America Bureau of Shipping, (2004).

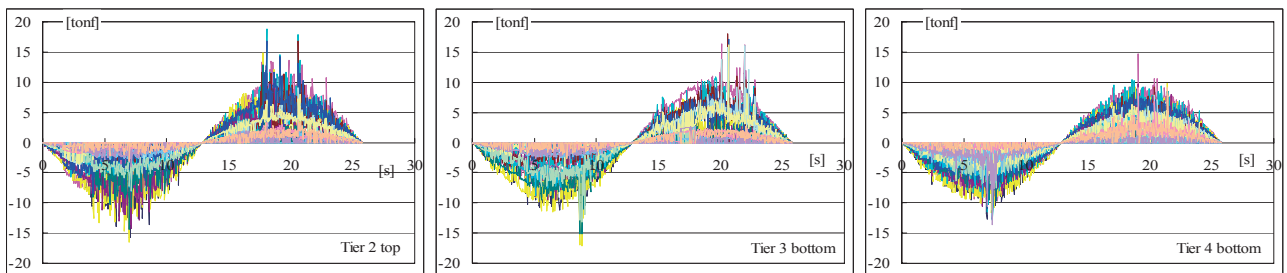


Fig.20 Time history of horizontal container securing force on corner fitting (Twistlock + Lashing, 4 high container stack)

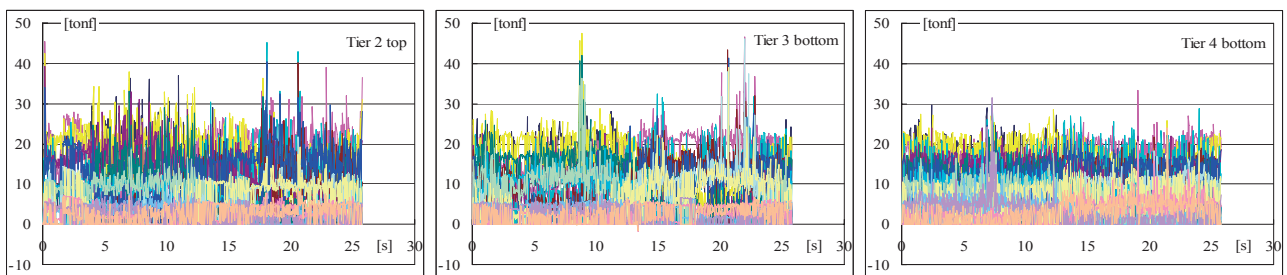


Fig.21 Time history of vertical container securing force on corner fitting (Twistlock + Lashing, 4 high container stack)

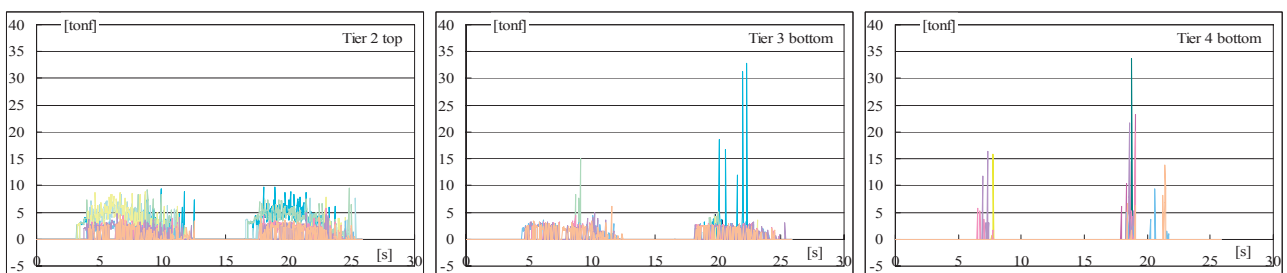


Fig.22 Time history of twistlock tension (Twistlock + Lashing, 4 high container stack)

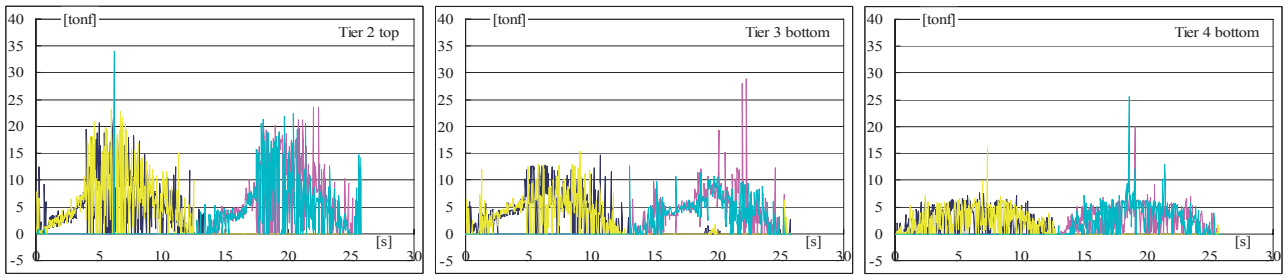


Fig.23 Time history of lashing tension (Twistlock + Lashing, 4 high container stack)

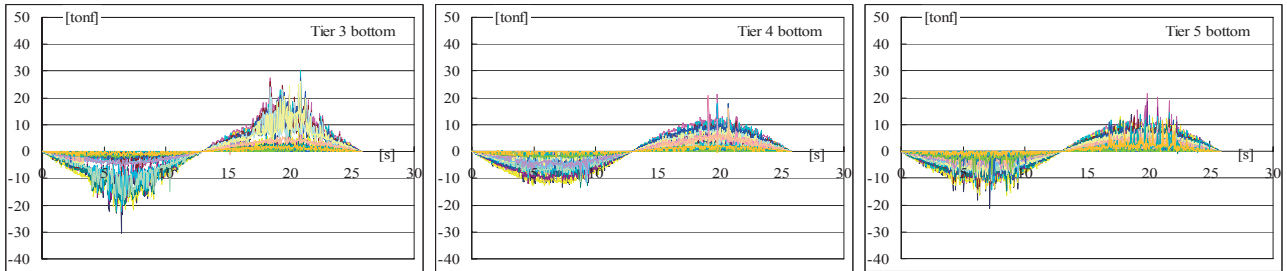


Fig.24 Time history of horizontal container securing force on corner fitting (Twistlock + Lashing, 5 high container stack)

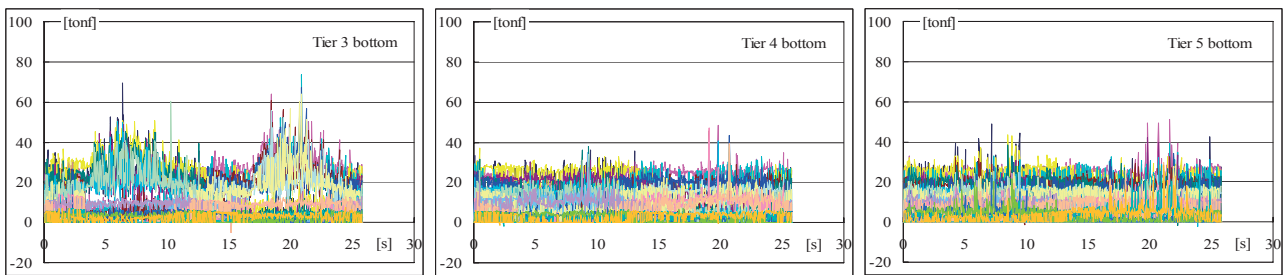


Fig.25 Time history of vertical container securing force on corner fitting (Twistlock + Lashing, 5 high container stack)

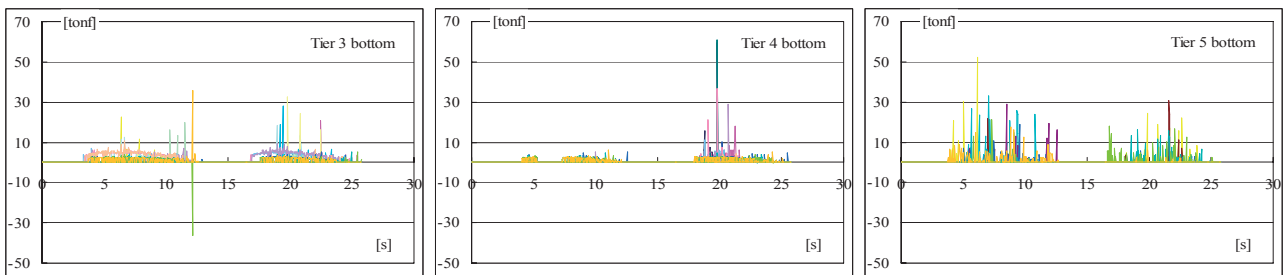


Fig.26 Time history of twistlock tension (Twistlock + Lashing, 5 high container stack)

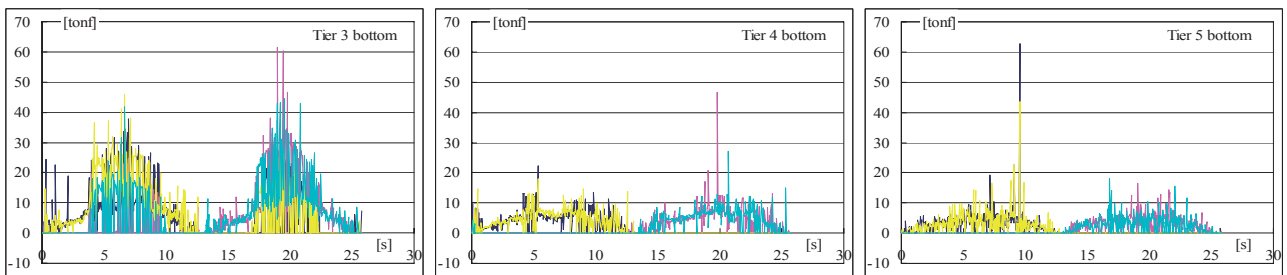


Fig.27 Time history of lashing tension (Twistlock + Lashing, 5 high container stack)