

# コンテナスタックの非線形動的運動解析

076896 二岡 佑介

指導教員 鈴木 克幸 教授

The numerical model has been developed to simulate single row multiple stacked containers. The experiment was carried out by using 1/4 size container model to investigate the responses of single row stacked containers. A parameter that will affect the backlash was found, thus enabling to simulate the backlash close to the experimental condition. The numerical models were compared with the experimental result and there were close agreements in some conditions.

Key words: Container Stack, Dynamic FEM, Twist lock, Backlash, Damping

## 1 緒言

コンテナ船の大型化に伴い、港での荷役作業も長時間化の傾向にある。FAT（フルオートマティック・ツイストロック）と呼ばれる新しいラッシング金物の導入や、ラッシングバー等の軽量化により、荷役効率の改善、荷役時間の短縮が期待される。ツイストロックには現状、広く使われるセミオートマティックツイストロック（SAT）と、近年普及する FAT があり、Fig. 1 がそれらの写真である。

現在の船級規則では、最近の技術である FAT については安全評価基準が実際上定められておらず、ユーザーであるオーナー自身がメーカーの情報に基づいて、ないしは自身の技術評価を行なう評価する必要がある。FAT による固縛は、港湾での荷降ろし時にロック解除作業が不要である反面、航海中にも、万が一、コンテナを上を引き上げると同等の力がかかればロック解除状態になる懸念がある。

船体の大型化によって、従来のローリングやピッチングといった剛体運動に加えて、スラミングによる船体のウィッピングや、船体の振れといった弾性体挙動が荒天時には引き起こされ外力あるいは加速度も剛体運動によるものに加わるが、これによってコンテナスタックがどのような挙動を示すか、といった問題についてはこれまでに計算方法が確立しておらず、船級規則にも反映されていない。特に、FAT のようなギャップのある構造のモデル、デッキ上の複数コンテナスタックのモデル、外力についても、弾性体挙動による加速度影響、といった要素を取り込んだ計算シミュレーション技術の開発を今後検討していかざるを得ない。

そこで本研究で著者ら<sup>1)</sup>は、ツイストロックを含むコンテナスタックの数値モデルの構築に取り組むことを試みる。



Fig. 1 ツイストロック FAT（左）、SAT（右）

## 2. 実験概要

### 2.1 コンテナスタックの挙動

これまでのコンテナの剛性などの規則は、基本的にローリングによる静的な荷重に基づいて行われているが、スラミングによる船体のウィッピングなどの荷重を正しく評価するためには、加速度による慣性力や、ツイストロックのガタやなど動的な影響の評価が不可欠である。特に、FAT の安全評価を行う上では、ガタによる衝撃的な荷重が重要になると考えられるが、これらは非常に非線形性の強い現象で、解析には非線形有限要素法を用いた高度な解析技術が必要になる。Fig. 2 にコンテナスタックの挙動に影響を与える要因を示す。これらがコンテナ挙動にどのような影響を与えるかを評価するための数値モデルを構築する。Fig. 2 にコンテナスタックの挙動を示す。

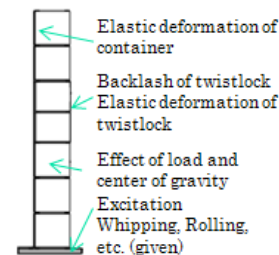


Fig. 2 コンテナスタックの挙動

### 2.2 1/4 模型制作方法

本研究では、MTI(株)とともに、MTI が所有する MCS(大型輸送環境実験装置)を用いて実験を行った。なお、MCS においては2段積みのコンテナの振動試験を行うことができる。実際のコンテナ船においては、7、8段のコンテナをオンデッキに積む可能性があり、この状態を模擬した試験を行うために、1/4スケールモデルによる模型試験を試みた。相似則に従い、Fig. 3 に示すモデルを作成した。

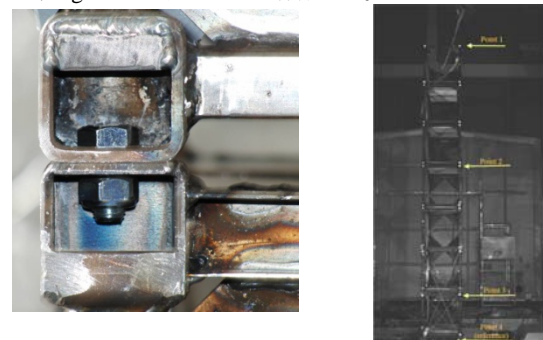


Fig.3 1/4 スケール模型:ツイストロック部分(左), 測定位置(右)

## 2.3 実験条件

実験では、実際のコンテナ船オンデッキ上の状態を模して震動台をヒールさせた上で、デッキ（震動台）に対して垂直方向に加振を行った。コンテナ模型は7段1列で行った（Fig.3）。7段1列はスタックの基本的な動的特性の検証を行うことを目的としている。実験を行ったヒール角、加振周波数、振幅を表1に示す。

表1 実験条件

Loading	Empty	45kg loaded		
Frequency	0.5Hz	1Hz	2Hz	5Hz
Amplitude	2mm	4mm	6mm	
Gap	1mm	2mm		
Rotation Degree	0degree	2degree	5degree	10degree

## 2.4 実験条件数値モデルと実験結果との比較検証

主な頂点における加速度および画像処理により頂点の変位の計測を行った。Fig.5 に示す Point1 から Point4 の値を引き、Point1 での垂直方向における相対変位を比較した。

数値モデルにおいて、ヒール角=0の条件下においては数値モデルが実験上で起こっているガタの影響を再現することができた。実験と数値モデルとの比較を行い、その一例(case 0degree2HzAmplitude4mm Gap1mm No weight Vertical Direction)を Fig.4 に示す。

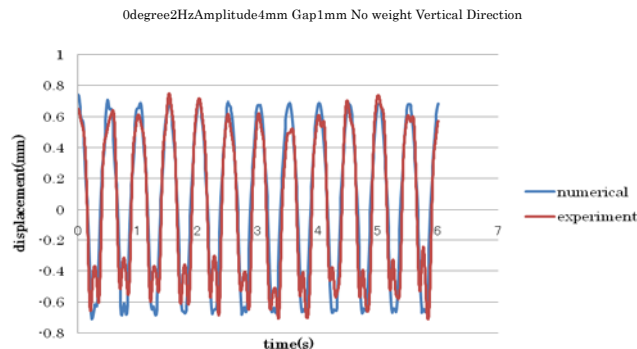


Fig.4 実験と数値モデルとの比較

## 3. コンテナスタックの数値モデル

### 3.1 コンテナスタックの構築方法

本研究での数値シミュレーションモデルを構築するために、Simulia(株)の製品である汎用有限要素プログラム Abaqus を使用した。

コンテナを模すために、Fig. 5、Fig6 に示すような簡易モデルを用いた。コンテナ各頂点と重心の9個のノードによって構成される。各頂点を剛フレームおよびクロスバーで結び、それらの剛性を調整することで全体としてのコンテナの剛性を調整することが可能になる。9番目の節点は重心の位置に置かれ、周りと同要素によって結ばれている。この節点に質量および慣性モーメントを付与することにより、実際の貨物を積載したコンテナの表現に対応できる。また、この9節点モデルは多くの汎用有限要素コードにおいて、1つのコンテナユニットを1つの外部要素とし

て定義することも可能である。本数値モデルでは陰解法<sup>2)</sup>を用いて計算し、各モデルを計算する際には20秒間の解析モデルに約10分の解析所要時間を有した。

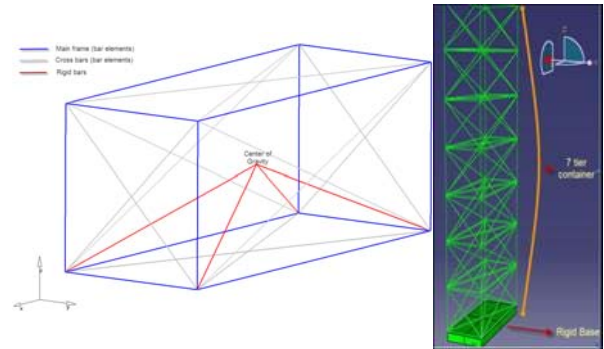


Fig. 5 簡易コンテナユニットモデル（9節点要素）（左）  
Fig.6 1列 x7 段の数値モデル(右)

### 3.2 Kinematic Coupling 変更による改良

Kinematic Coupling とは、1点に連動しよう1点がすべて同方向に動く束縛条件であり、既往モデルでは重心の挙動に連動するようにコンテナ下部の4頂点を束縛している。(Fig.7)この束縛条件が存在するが故に、垂直方向の変位が過度に固定されており、ガタの影響が見られないシミュレーションケースが存在した。

そこで、改良モデルとして Fig.7 に示す K1,K2 を無くし、垂直測定面が自由端となるモデルを構築した。このモデルを用いてシミュレーションを行った結果、既往のモデルでガタの表すことのできなかったケースにおいてもガタを表すことができた (case 0degree2HzAmplitude2mm Gap1mm No weight Vertical Direction) を Fig.8 に示す。

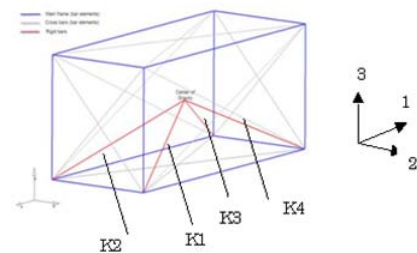


Fig.7 Kinematic Coupling

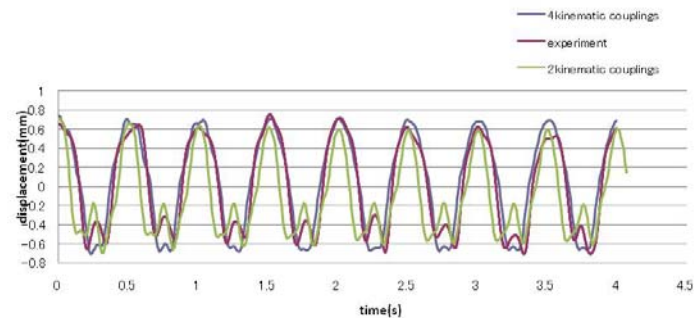


Fig.8 実験とオープンエンド Kinematic Coupling モデルとの比較

### 3.3 線形バネを用いた改良

しかし、現実にはこの束縛条件は存在しないため、より実コンテナに近いモデリングとして非線形バネを K1,K2,K3,K4 に設定するモデルを構築した。KC 方式のモデルでは、限られた振動数においてのみガタの影響が表現できていた。しかし、この改良により、Fig.9、Fig10 に示すように一列 7 段モデルにおいては、全振動数、振幅、傾斜角度においてガタを表現することができるようになった。その例(case 0degree0.5HzAmplitude6mm Gap1mm No weight Vertical Direction)を Fig.9 に、(case 0degree1HzAmplitude6mm Gap1mm No weight Vertical Direction)を Fig.10 に示す。

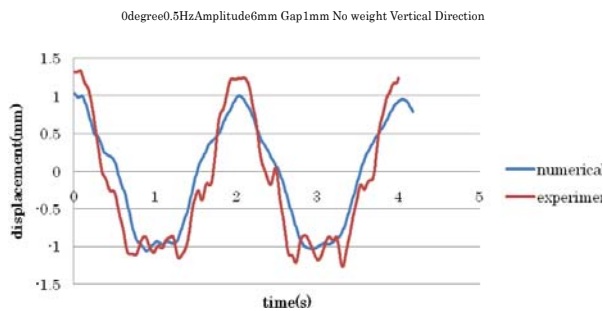


Fig.9 線形バネ数値モデルと実験結果との比較

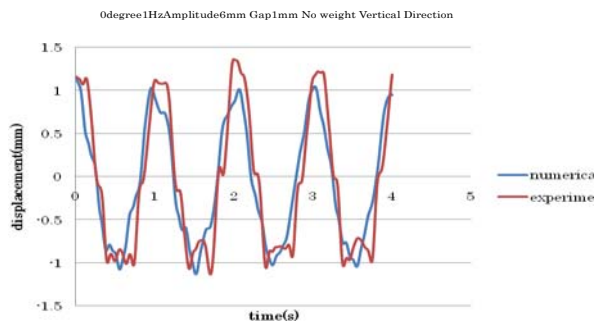


Fig.10 線形バネ数値モデルと実験結果との比較

## 4. フルスケールモデル構築

### 4.1 1/4 から 1/1 スケールモデルへの構築方法

本研究では Fig.11 に示すように相似側を用いてコンテナの 1/4 サイズ試験体を作成し、その模型をもとにシミュレーションモデルを構築した。

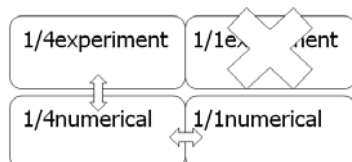


Fig.11 シミュレーションモデル構築組織図

### 4.2 数値モデルに用いた相似則

そこで、今度は 1/4 スケールからフルスケールモデルを相似側(表 2)によって構築することにより、フルスケールサイズの複数段積載コンテナを模することができる。

表 2 シミュレーションに用いた相似側

parameters	scale law
length	$\lambda$
time	$\lambda^{1/2}$
mass	$\lambda^3$
stiffness	$\lambda^2$
frequency	$1/\lambda^{1/2}$

### 4.3 時系列に基づいた 1/4 と 1/1 スケールモデル解析結果比較

表 1 条件下 において 1 列においては、荷重ありのケース、ガタ 2mm のケースを除いて、1/1 モデルが 1/4 モデルを相似側に従って模すことができた。相似側から 1/1 モデルは 1/4 モデルと比較して周期が 2 倍、振幅が 4 倍となっている。その例(case 0degree2HzAmplitude2mm Gap1mm No weight Vertical Direction)を Fig.13 に、(case 0degree0.5HzAmplitude6mm Gap1mm No weight Vertical Direction)を Fig.14 に示す。

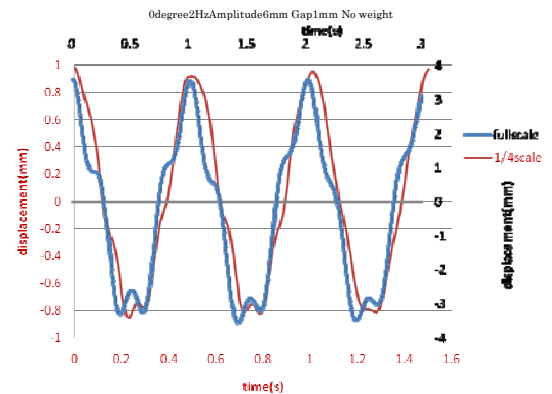


Fig.13 1/4 及び 1/1 スケールモデルの解析結果比較 (0degree2HzAmplitude6mm)

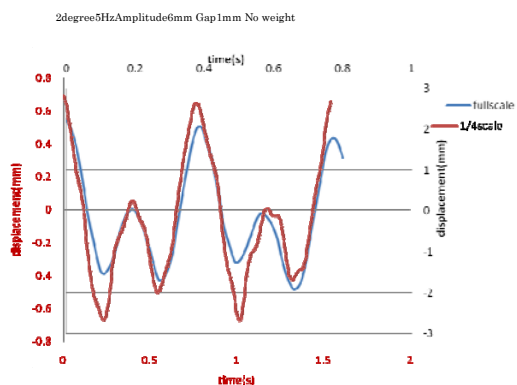


Fig.14 1/4 及び 1/1 スケールモデルの解析結果比較 (2degree5HzAmplitude6mm)

### 4.4 各パラメーターごとの解析結果比較

#### 4.4.1 応答変位と加振振幅との関係

加振振幅を変化させたケースを比較した場合(Fig.14)、応答変位のほぼ同値である 0degree2Hz4mm のケース除き、全ケースにおいて振幅が大きくなるほど垂直方向応答

変位が大きくなる傾向が見られた。また、全てのケースにおいて 4 倍の座標軸で比較した場合、1/4 スケールモデルのほうがフルスケールのケースよりも応答変位が大きい。これは力が加振動数と比例関係にあるため想定できる結果である。

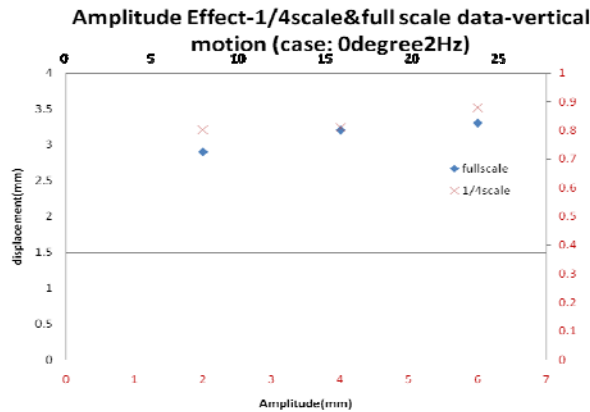


Fig.14 振幅と変位の関係

#### 4.4.2 応答変位と振動数との関係

振動数が大きくなるほど応答変位が小さくなる傾向が見られた(Fig.15)。4 倍の座標軸で比較した場合、全てのケースにおいて 1/4 スケールモデルのほうがフルスケールよりも大きな応答変位の値をとる。また、0.5Hz および 1Hz 付近で最大応答変位の値を取るなので固有振動周期があると想定できる。

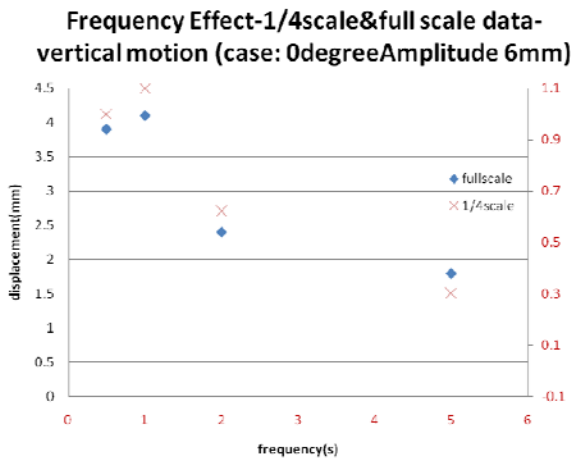


Fig.15 振幅と振動数の関係

#### 4.4.3 応答変位と回転角との関係

回転角が大きくなるにつれ、応答変位が小さくなる傾向が見られた(Fig.16)。水平方向の応答変位は傾斜角が大きくなると大きくなるが、垂直方向はより小さくなるからである。また、4 倍の座標軸で比較した場合、全てのケースにおいて 1/4 スケールモデルのほうがフルスケールよりも大きな応答変位の値をとる。

Rotation Effect-1/4scale&full scale data-vertical motion (case: 0.5HzAmplitude 6mm)

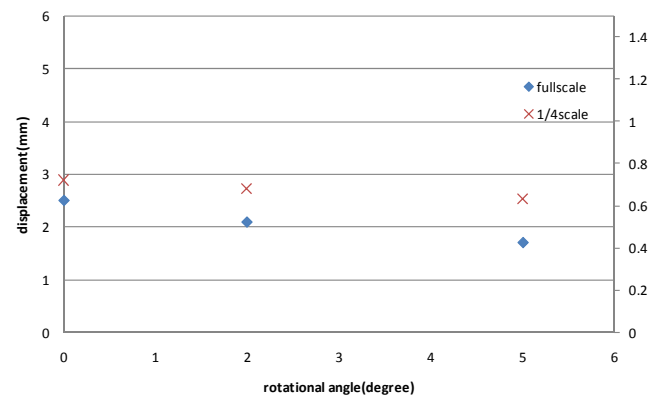


Fig.16 振幅と回転角の関係

## 5. 結論

### 5.1 まとめ

本開発で異なる条件に対応しうる最適なユニットコンテナモデルを開発した。そして、実験を行った異なる回転角、振動数、振幅、において実験と挙動の近い数値モデルを構築した。

本研究においてそれまで実験結果に似たガタを表すことのできなかった周期でのケースにおいて、KC をオープンエンドとすることでガタをさらに表すことができるようになった。さらに、重心部の固定方法を KC から線形バネに変えることで、重心部が外郭と連動しなくなり、より現実に即したモデルになった。

また、1/4 スケール数値モデルを元に相似側から 1/1 スケール数値モデルを構築し、全てのケースにおいてガタの挙動を適切に表すことができた。また解析結果のフーリエ変換によって各パラメーターと応答変位との関係の比較を行った。

### 5.2 展望

本研究ではガタの違いのあるケースを考慮していないので、ガタの大きさによる違いを数値モデルによって示す必要がある。また、フルスケールモデルが 1 列では相似側によって表すことができることがわかったことから、Vinicius Aguiar の開発した 3 列 1/4 スケールモデルを本研究と組み合わせ 3 列フルスケール数値モデルを構築する必要がある。これにより、任意の複層、複数列においての積載コンテナの数値モデルを構築でき、バネマスモデルとして一般定式化につなげていく必要がある。また、1 列多層コンテナスタックを非線形ばねモデルとして定式化する。

## 文献

- 1) レベントキルカヤック, 鈴木克幸, 二岡佑介, 出雲太郎: コンテナスタックの動的運動解析, 計算工学講演会論文集, 第 14 号(2009)
- 2) 日本機械学会: 「計算力学ハンドブック」, pp.76-86, 丸善, (1998)