

# 「実海域におけるホイッピングを考慮した船体構造応答及び貨物固縛応答」に関する調査研究

## 【最終報告】

### 目次

1. 事業の目的・目標
2. 期待される効果
3. 研究概要
4. 実施スケジュール
5. 活動内容
  - 1) 会合開催状況
  - 2) 実船計測データを用いたホイッピング現象に関する検討
  - 3) シミュレーションによるホイッピング現象に関する検討
  - 4) 自動車船におけるホイッピング発生時の固縛資材への影響評価
  - 5) コンテナ船におけるホイッピング発生時の固縛資材への影響評価
6. 付録
  - 1) 実船計測データを用いたホイッピング現象に関する検討
  - 2) シミュレーションによるホイッピング現象に関する検討
  - 3) 自動車船におけるホイッピング発生時の固縛資材への影響評価
  - 4) コンテナ船におけるホイッピング発生時の固縛資材への影響評価



## 事業の目的・目標

### 事業の目的

- 各船種における実船計測結果に基づき、船体及び貨物に対するホイッピング現象の影響を検証することで、船舶の安全な運用に寄与する。

### 事業の目標

- 5船種(バルク、タンカー、LNG、コンテナ船、自動車船)における実船計測の実施。
- 実船計測データに基づく、ホイッピング発生条件及び発生頻度の検討。
- 弾性応答影響を考慮した数値シミュレーションの実施。
- 陸上試験による、ホイッピング発生時に貨物及び固縛資材に発生する荷重の推定。
- コンテナスタックシミュレーションの実施。

## 期待される効果

### 技術的效果

- 各船種において、荒天時にホイッピングにどの程度遭遇するか、その発生確率と発生条件、また、発生時の船体構造及び貨物固縛への影響度合いについて、知見・データの整理が行われ、船体構造基準の検討材料の一つとして活用される見込みである。また、船会社にとっては安全運航の基準検討にとって有効な材料となる。

### 経済的效果

- 船舶設計の基準作りに資するデータ蓄積であり、より船の実運航に即した基準作りにつながると考えれば、より合理的な船舶設計、構造設計に役立てられると考えられる。また、船会社にとっては、船の荒天時の運航に関する知見の蓄積につながり、安全性と経済運航の両立を進める上で有用な知見が得られると期待される。

## 研究概要

### 研究題目

「実海域におけるホッピングを考慮した船体構造応答及び貨物固縛応答」に関する調査研究

### 研究体制

- 主体
  - ・株式会社MTI
- 共同研究者
  - ・一般財団法人日本海事協会
  - ・日本郵船株式会社
  - ・株式会社三井造船昭島研究所
  - ・東京大学人工物工学研究センター 鈴木克幸教授

### 研究期間

・平成24年2月～平成25年4月

## 実施スケジュール

|             | 平成24年 |     |     |     | 平成25年 |     |
|-------------|-------|-----|-----|-----|-------|-----|
|             | 1/4   | 2/4 | 3/4 | 4/4 | 1/4   | 2/4 |
| ①実船計測       | ←     |     |     |     | →     |     |
| ②実船計測データの分析 | ←     |     |     |     | →     |     |
| ③固縛評価(自動車)  |       | ←   |     |     | →     |     |
| ④固縛評価(コンテナ) |       | ←   |     |     | →     |     |
| ⑤ホッピング評価    |       |     | ←   |     | →     |     |
| ⑥報告書作成      |       |     |     |     |       | ←   |



## 活動内容 1

### 1) 会合開催状況

| 会合     | 開催日時               | 開催場所     |
|--------|--------------------|----------|
| 2012年度 |                    |          |
| 第1回    | 5月9日 15:00～17:30   | MTI本社    |
| 第2回    | 7月9日 15:00～17:30   | MTI本社    |
| 第3回    | 8月1日 15:00～17:30   | 三井昭島研究所  |
| 第4回    | 10月2日 15:00～17:30  | NK管理センター |
| 第5回    | 11月9日 17:00～17:30  | MTI本社    |
| 第6回    | 12月10日 15:00～17:30 | 三井造船本社   |
| 2013年度 |                    |          |
| 第7回    | 1月18日 16:00～18:00  | 東京大学     |
| 第8回    | 2月22日 15:00～17:30  | MTI本社    |
| 第9回    | 3月25日 10:00～12:00  | NK管理センター |
| 第10回   | 4月15日 15:00～17:30  | 三井造船本社   |
| 第11回   | 4月22日 15:00～17:30  | NK管理センター |

## 活動内容 2

### 2) 実船計測データを用いたホッピング現象に関する検討

- 実船計測データの分析により、加速度データにおいても、ホッピングと思しき弾性振動を観察可能な事を確認した。
- これにより、加速度の実船計測～応力の実船計測に比して廉価で実施可能～による、ホッピング現象検討の可能性を示した。

### 3) シミュレーションによるホッピング現象に関する検討

- 非線形ストリップ法を用いて、PCC船の3077時間分の船体運動及び構造応答の時系列を解析した。
- 有義波高と応答の有義振幅の関係、応答の超過確率を調査したが、強い非線形性を示す応答はほぼ発生しなかった。
- 今後の研究の基礎データとして4船種(バルク、タンカー、PCC、LNG)の周波数応答関数を求めた。



## 活動内容 3

### 3)自動車船におけるホイッピング発生時の固縛資材への影響評価

- 振動台を用いた試験を実施し、加振加速度と加振加速度により発生する張力の関係を調査した。
- この結果、加振により発生する張力は、加振加速度に比例することを確認した。
- また、固縛方法による差についても評価し、以下を確認した。
  - 3点固縛/2点固縛の比較では、2点固縛の方が大きな張力が発生しているケースがあった。
  - ホイールラッシングでは、車体の揺れが大きく、安定性に問題がある可能性がある。
  - 車体の水平面内での回転については、加振加速度及び固縛方法に依らず、問題となることはない。

## 活動内容 4

### 4)コンテナ船におけるホイッピング発生時の固縛資材への影響評価

- 振動台を用いた試験及び、数値モデルを用いたコンテナスタックの非線形解析を行なった。
- この結果、以下の知見を得た。
  - ツイストロックのギャップ拡大によって、ローリング時及びホイッピング時ともに荷重が増大する。ツイストロックのギャップ拡大にともなって、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。
  - ラッシングロッドを付与し、スタックの挙動を抑制することで、ローリング時及び、ホイッピング時の荷重を低減することができる。特に、スタック高所のコンテナを固縛すると低減効果が高い。
  - スタックにおけるコンテナの配置、並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により、コンテナに加わる荷重を低減できる。またスタックの荷重を均質にする事により、スタック間の接触を防止することができる。

## 課題と今後の展開

### 本研究で残された課題

- 実船計測期間が1年弱と短かく、計測されたホイッピングのデータ数が十分でなかった。
- 非線形ストリップ法により、ホイッピング現象を再現できることを確認できた。但し、時間の制約により、十分なケースの解析を実施できなかった。
- 本研究では、実船計測データからホイッピングと思しき弾性振動を、目視で抽出した。この方法では、ホイッピングの判定基準～観察された弾性振動がホイッピングであるか否か～が曖昧になりがちであった。

### 今後の展開

- 十分な数の数値シミュレーションを実施し、統計的な評価を実施する事が望ましい。
- ホイッピング発生時のデータを充実させるため、追加の実船計測を実施することが望ましい。
- ホイッピング判定の基準を明確にし、ホイッピングを機械的に抽出可能にする必要がある。
- 実船計測データ及び数値シミュレーションから、ホイッピング現象の発生条件等を明らかにし、遭遇海象における船体運動、船体構造、固縛資材へのホイッピング影響の評価を可能とすることが望まれる。

以上

## 付録

- 1) 実船計測データを用いたホイッピング現象に関する検討
- 2) シミュレーションによるホイッピング現象に関する検討
- 3) 自動車船におけるホイッピング発生時の固縛資材への影響評価
- 4) コンテナ船におけるホイッピング発生時の固縛資材への影響評価



# 付録1

## 実船計測データを用いたホッピング現象に関する検討

### 背景及び目的

#### 本研究の背景

- 近年、流力弾性応答が船体構造に及ぼす影響について活発な議論がなされている。
- 特に、ホッピングが最終強度及び疲労強度に及ぼす影響が指摘されている。
- 数値解析、水槽試験、実船計測等の様々な方法によって、ホッピングの影響が検討されてきた。
- この内、実船計測は操船等の影響を含み、最も合理的な方法であると想定される。
- 但し、実船計測～船体に発生する応力を計測する～は多額の費用を要する。
- 過去の研究において、応力及び加速度の実船計測を実施したところ、加速度の計測データ～加速度は応力よりも廉価で計測可能～においても、弾性応答が観察された。

#### 本研究の目的

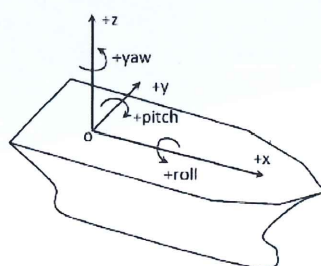
- 5船種(バルク、タンカー、コンテナ船、JNG船、自動車船)の加速度の実船計測を実施する。
- この実船計測データを基にホッピング現象について検討する。

## 実船計測概要

### 計測対象船及び計測期間

| 対象船種  | 計測開始       | 計測終了        |
|-------|------------|-------------|
| 自動車船  | 2012年2月28日 | 2012年6月26日  |
| LNG船  | 2012年2月23日 | 2012年7月2日   |
| タンカー  | 2012年1月10日 | 2012年9月11日  |
| コンテナ船 | 2012年8月10日 | 2012年11月23日 |
| バルク-1 | 2012年4月27日 | 2012年9月19日  |
| バルク-2 | 2012年2月16日 | 2012年9月19日  |

### 計測センサーの座標計



## 実船計測概要

### 計測センサー取り付け位置

|                                     | X(Midshipから<br>船長方向を正) | Y(CLから<br>左舷側を正) | Z(BLから) | 設置場所        |
|-------------------------------------|------------------------|------------------|---------|-------------|
| 自動車船<br>(2012年2月28日～<br>2012年6月26日) | -64.32m                | -1.85m           | 41.46m  | Wheel House |
| 自動車船<br>(2012年6月26日～)               | -76.40m                | -5.14m           | 40.78m  |             |
| LNG船<br>(2012年2月23日～<br>2012年月2日)   | 96.80m                 | -3.26m           | 51.45m  |             |
| LNG船<br>(2012年8月3日～)                | 96.50m                 | -7.47m           | 51.49m  |             |
| タンカー                                | 128.60m                | -0.30m           | 48.33m  |             |
| バルク-1                               | 116.75m                | 2.44m            | 40.06m  |             |
| バルク-2                               | 91.52m                 | -4.58m           | 32.97m  |             |
| コンテナ船                               | 82.52m                 | -2.90            | 47.80m  |             |



## データ解析方法 1

### Z方向加速度のフィルタリング

#### ➤ RAWデータ

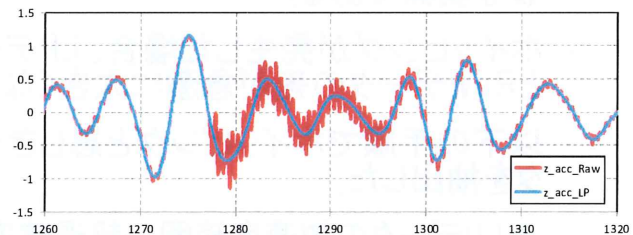
- 弾性応答を含むZ方向加速度
- 計測したZ方向加速度から重力加速度成分を差し引き作成

#### ➤ LPデータ

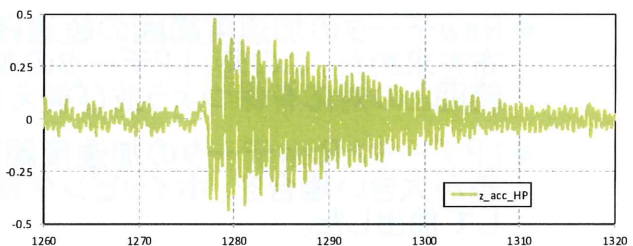
- 波浪変動によるZ方向加速度
- Rawデータに、船体の固有振動数を考慮し、ローパスフィルター(0.33[Hz]以上をカット)をかけて作成

#### ➤ HPデータ

- 波浪変動によるZ方向加速度
- RawデータとLPデータの差から作成



RAWデータ及びLPデータ

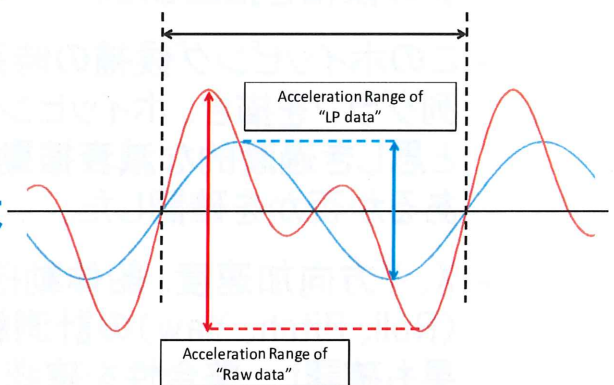


HPデータ

## データ解析方法 2

### 超過確率分布によるホイッピング候補の抽出

- LPデータをゼロアップクロスカウントし、波浪変動による加速度応答をカウントした。
- ゼロアップクロスで取り出した、各加速度応答中で、LPデータの最大値と最小値の差を求め、これをLPデータの加速度範囲とした。
- また、同じ加速度応答中で、HPデータの最大値と最小値の差を求め、これをHPデータの加速度範囲とした。

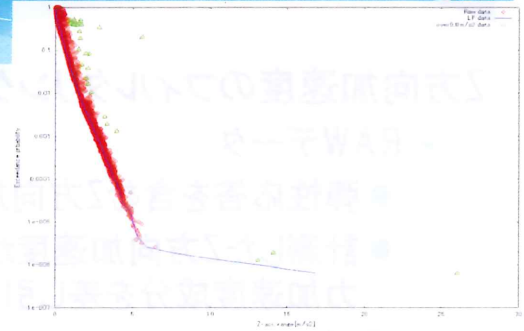


LPデータ、HPデータの  
応力範囲の定義

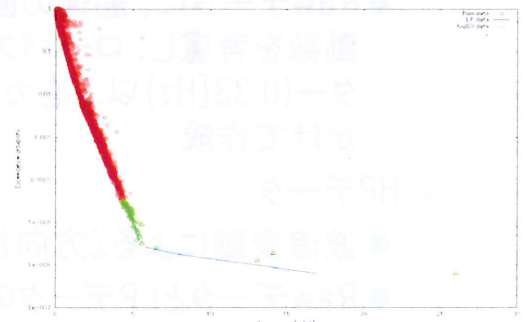
## データ解析方法 3

### 超過確率分布によるホイッピング候補の抽出

- ホイッピングはスラミング等による非線形な現象である。
- ホイッピングが発生した場合、LPデータとRawデータの差が急激に大きくなる。
- 以下の手順でホイッピングと思しきデータを抽出した。
  - LPデータの加速度範囲の超過確率分布を求めた。
  - Rawデータの加速度範囲の超過確率分布を求めた。この時、LPデータの加速度範囲との対応を保つよう並び替えた。
  - LPデータとRawデータの加速度範囲の差が大きい場合を、ホイッピング候補として抽出した。
- LPデータの加速度範囲の大きい上位50箇所をホイッピングの候補として抽出した。



LPデータ及びHPデータ加速度範囲の超過確率分布 (RAWデータ範囲とLPデータ範囲の差が大きい場合を抽出)

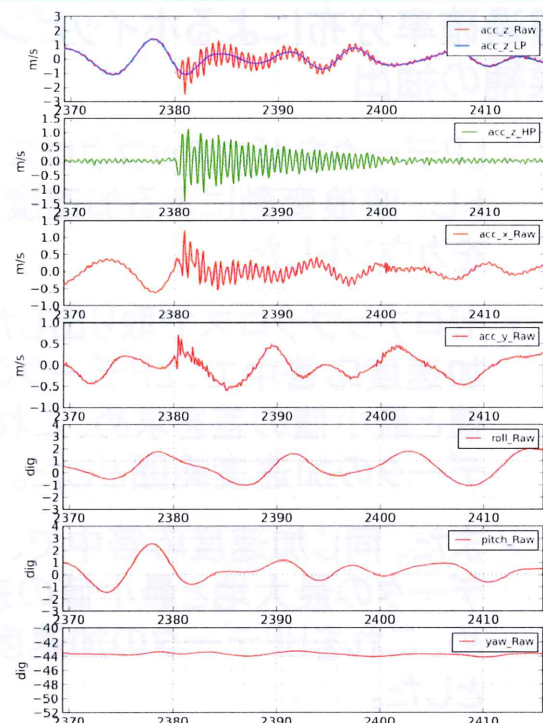


LPデータ及びHPデータ加速度範囲の超過確率分布 (上位50箇所を抽出)

## データ解析方法 4

### 時系列データの観察

- 超過確率分布からホイッピングの候補を抽出した。
- このホイッピング候補の時系列グラフを描き、ホイッピングと思しき過渡的な減衰振動であるか否かを確認した。
- X、Y方向加速度、船体動揺 (Roll、Pitch、Yaw) の計測結果も確認し、整合性を確認した。



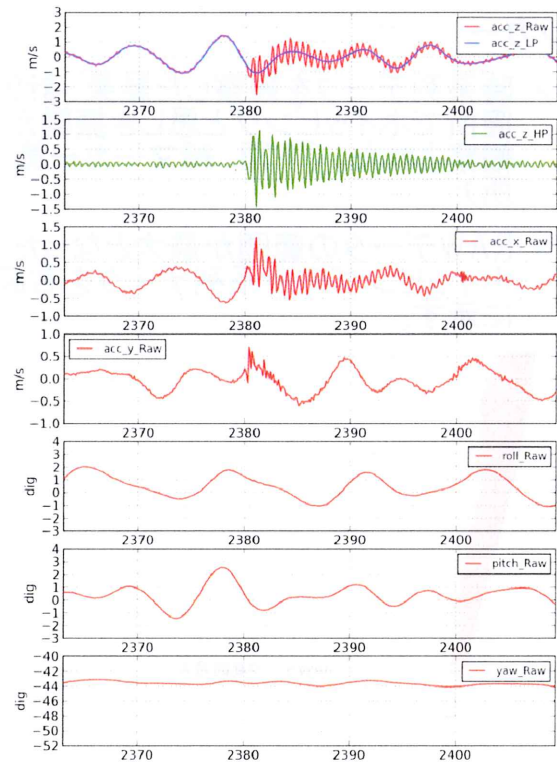
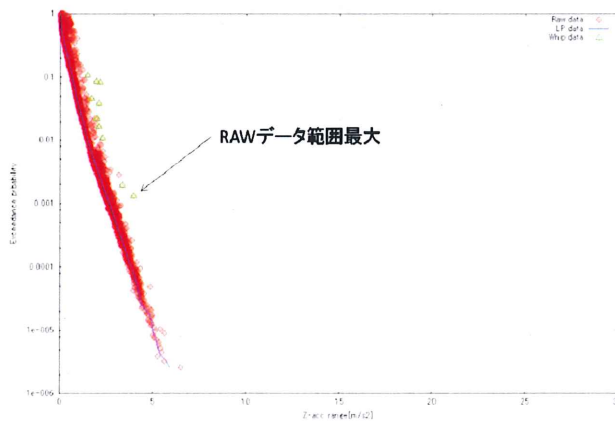
船体動揺及び加速度の時刻歴グラフ



## 解析結果 1

### PCC船

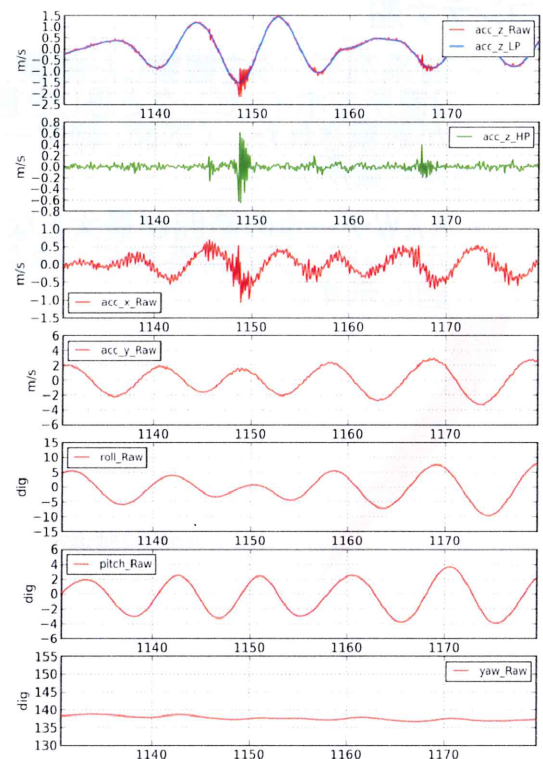
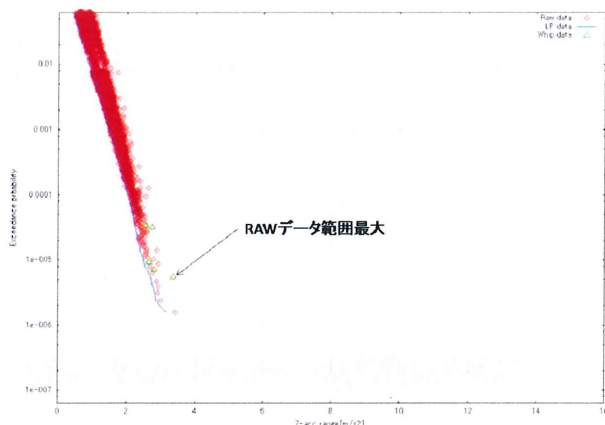
- 時系列データを観察した結果、ホッピングと思しき振動が計10箇所観察された(下図、緑マーカー箇所)。
- RAWデータの範囲が最大となったホッピングの時系列データを右図に示す。



## 解析結果 2

### LNG船

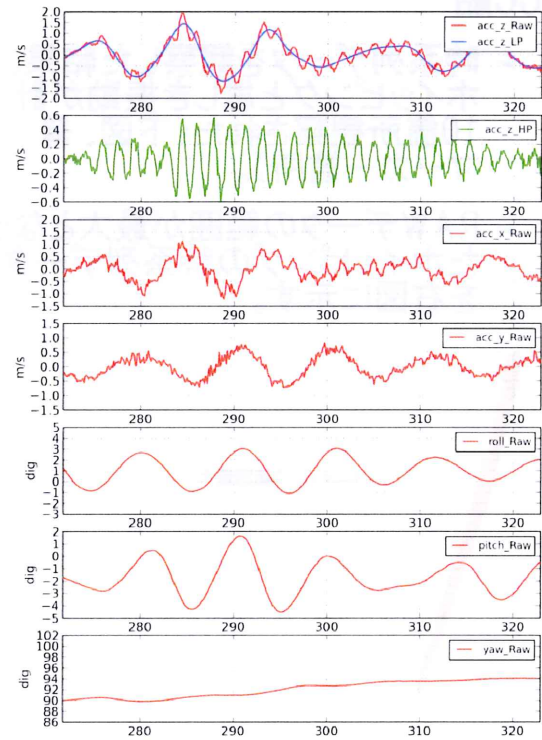
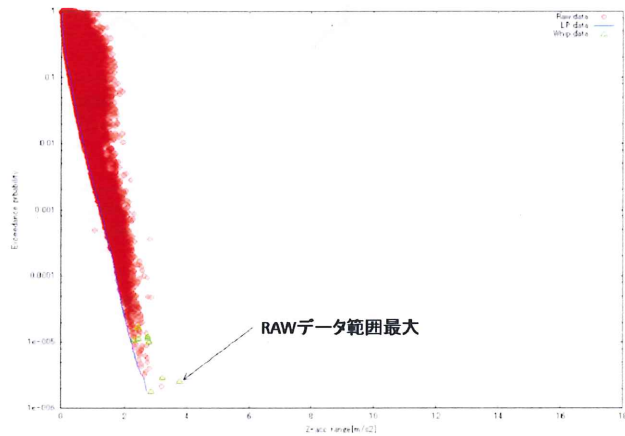
- 時系列データを観察した結果、計5箇所ホッピングと思しき振動が観察された。(下図、緑マーカー箇所)
- RAWデータの範囲が最大となったホッピングの時系列データを右図に示す。



## 解析結果 3

### タンカー

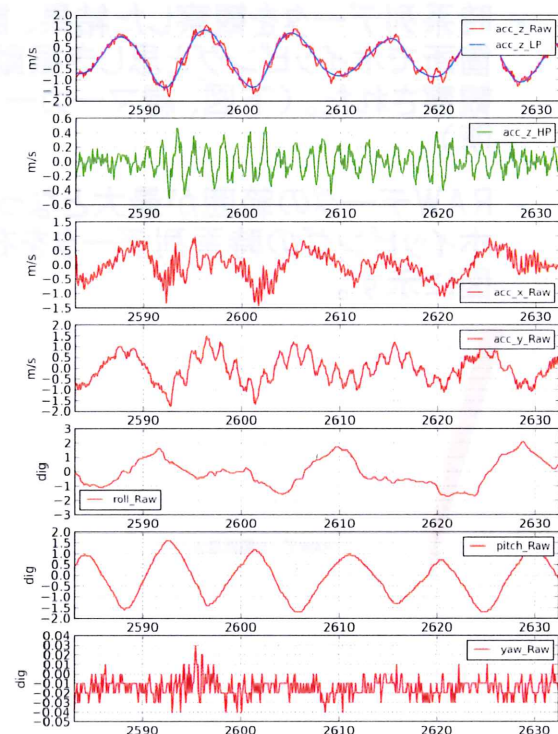
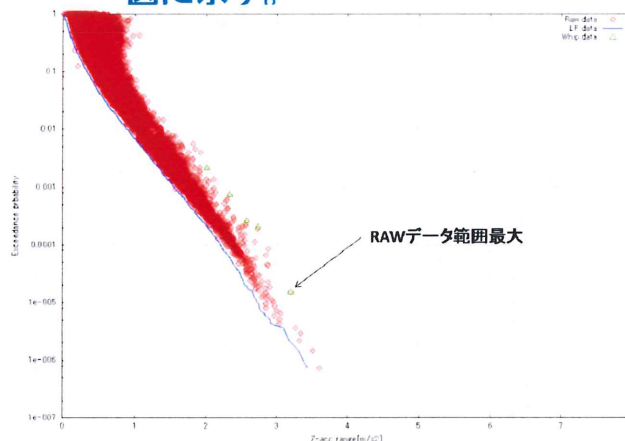
- 時系列データを観察した結果、計9箇所でホイッピングと思しき振動が観察された。(下図、緑マーカー箇所)
- RAWデータの範囲が最大となったホイッピングの時系列データを右図に示す。



## 解析結果 4

### コンテナ船

- 時系列データを観察した結果、計9箇所でホイッピングと思しき振動が観察された。(下図、緑マーカー箇所)
- RAWデータの範囲が最大となったホイッピングの時系列データを右図に示す。

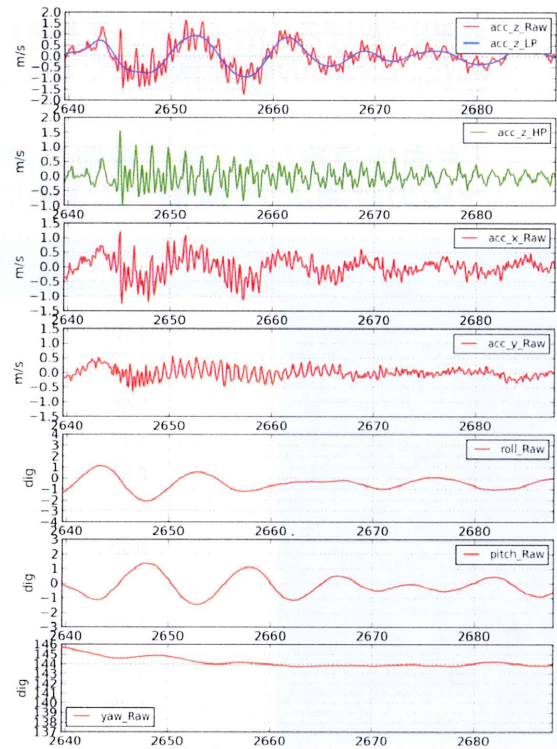
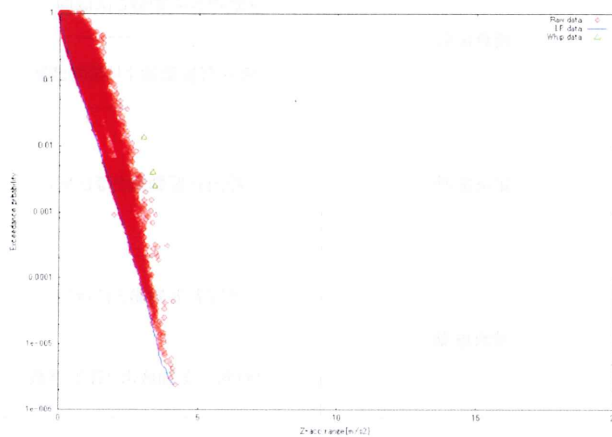




## 解析結果 5

### バルク-1

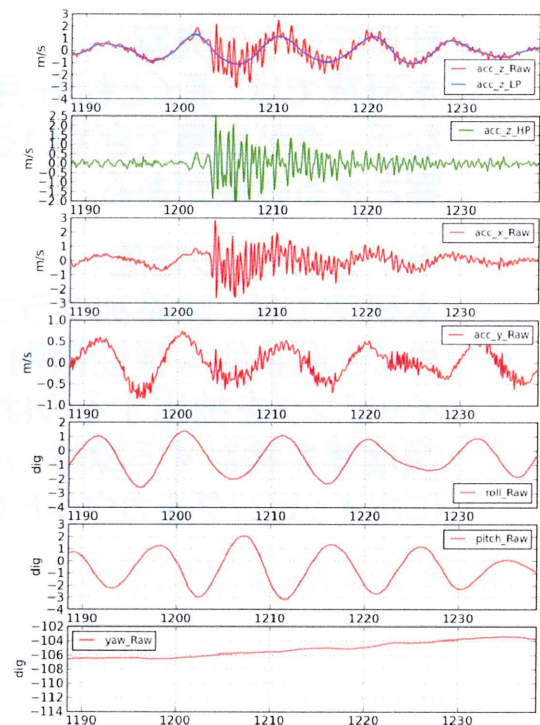
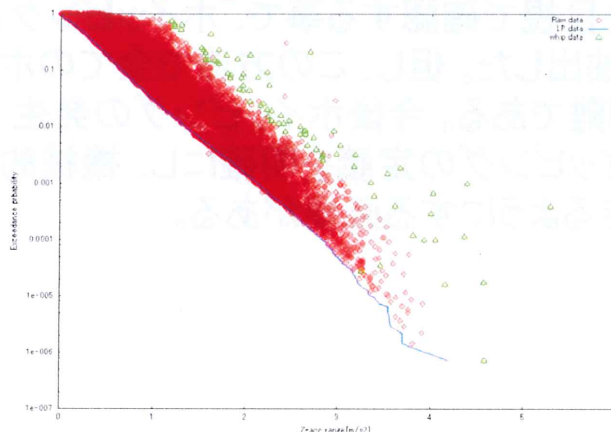
- 時系列データを観察した結果、計9箇所でホッピングと思しき振動が観察された。(下図、緑マーカー箇所)
- RAWデータの範囲が最大となったホッピングの時系列データを右図に示す。



## 解析結果 6

### バルク-2

- 時系列データを観察した結果、計78箇所でホッピングと思しき振動が観察された。(下図、緑マーカー箇所)
- RAWデータの範囲が最大となったホッピングの時系列データを右図に示す。



## まとめ

- 自動車船、コンテナ船、バルク、VLCC、LNG船で実船計測(船体動揺及び加速度)を実施した。
- 各船における、ホイッピングと思しき弾性振動には、下表に示す特徴が観察された。これらの弾性振動が、ホイッピングであるか否かは、さらなる検討を要する。
- Z方向加速度にも、弾性振動応答を観察できた。これにより加速度の実船計測～応力計測よりも廉価～によるホイッピング検討の可能性を示すことができた。

| 船名    | 船体の2節固有振動数[Hz] | 弾性振動応答の形状 | 弾性振動の応答周波数    |
|-------|----------------|-----------|---------------|
| PCC   | 1.70           | 減衰振動      | 2節固有振動数とほぼ同じ  |
| LNG   | 0.68           |           | 2節固有振動数より高周波数 |
| タンカー  | 0.60           | 定常振動      | 2節固有振動数とほぼ同じ  |
| コンテナ船 | 0.60           |           |               |
| バルク-1 | 0.63           | 減衰振動      | 2節固有振動数とほぼ同じ  |
| バルク-2 | 0.75           |           | 2節固有振動数より高周波数 |

## 今後の課題

- 計測データの充実:  
本研究では、長くとも8ヶ月程度の計測しか実施しておらず、十分なデータが収集できているとは言い難い。今後、計測データを充実させる必要がある。
- ホイッピングの定義:  
本研究では、時系列グラフを目視で確認する事で、ホイッピングと思しき過渡的な弾性振動を抽出した。但し、この方法で全てのホイッピングを抽出するのは困難である。今後ホイッピングの発生頻度等を検討する際は、ホイッピングの定義を明確にし、機械的にホイッピングをカウントできるようにする必要がある。



## 付録2

### シミュレーションによるホイッピング現象に関する検討

#### 目的

- スラミングが生ずるような海象下では、線形理論から導かれる動揺の応答予測と異なった応答が生じる事が、実測データの解析から、示された。(超過確率図を作成した際に、直線では表されないような応答)
- 実船の遭遇海象条件を入力条件として、時系列の非線形ストリップ法解析を実施し、実測データと同様の直線的でない超過確率分布が得られることを確認する。
- 解析で得られた非線形な応答～超過確率分布において直線で表されない応答～を確認することにより、実船で生じている現象の理解を深める。

# 計算方法および入力条件

## 解析コード

- 非線形ストリップ法
  - Nowl : 船体を剛体として扱う
  - Nowl-e : 船体を弾性梁として扱う

## 解析条件

- 解析対象 : PCC船
- 海象条件 : 2012年/3/3~2012/11/8にPCC船が遭遇した海象の波高、波周期(NOAAの波浪推算)から生成された不規則波
- 喫水、船速、方位については航海日誌に記された値を使用

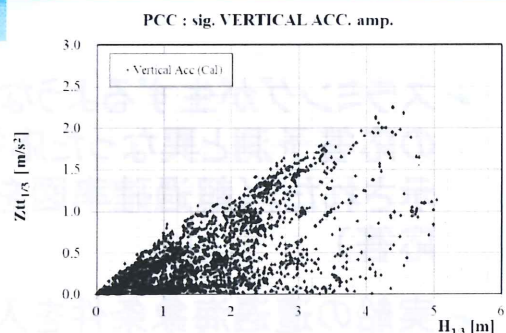
## 解析結果

- 1時間毎の時系列シミュレーション
- 1時間毎のシミュレーション結果に対する極値解析結果
- 全てのシミュレーション結果(3077時間分)に対する極値解析結果

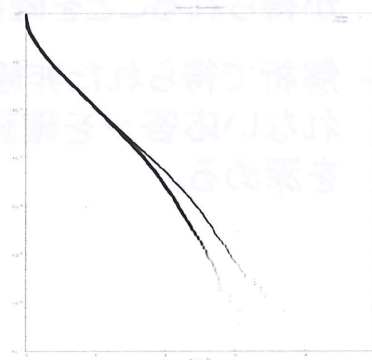
# 剛体計算

## 剛体計算の概要

- 解析対象 : PCC船
- シミュレーション時間 : 3077時間
- 検討項目
  - 入射波高と揺有義振幅(上下揺、横揺、縦揺)、加速度有義振幅(左右、上下)の関係
  - 入射波、Heave、Roll、Pitch、横加速度、鉛直加速度、Midship縦曲げモーメントの超過確率分布
- 検討結果
  - 剛体計算では超過確率分布に強い非線形性は観察されなかった。



入射波高と上下加速度有義振幅



超過確率(鉛直加速度)



# 弾性計算

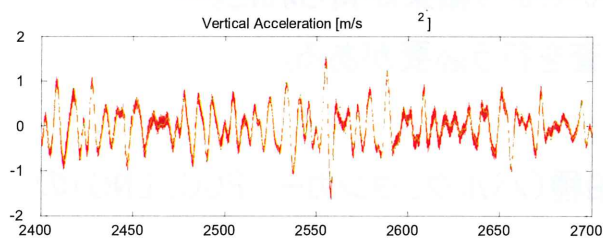
## 弾性計算の概要

- 解析対象:PCC船
- 解析条件:ほぼ同様の以下の2条件で解析を実施した

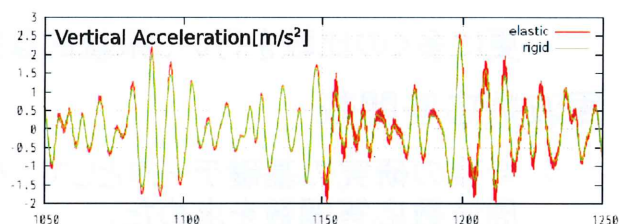
|        | d[m] | Vs[knot] | H <sub>1/3</sub> [m] | T <sub>01</sub> [s] | C[°]  |
|--------|------|----------|----------------------|---------------------|-------|
| Case 1 | 7.88 | 16.2     | 4.39                 | 7.86                | 86.4  |
| Case 2 | 7.37 | 18.0     | 5.0                  | 10.56               | 103.0 |

### ➤ 解析結果 :

- Case1、Case2はほぼ等しい条件であるにもかかわらず、Case2のみで大きな弾性振動が発生した。
- 原因調査の為に、追加解析を実施し、系統的に調査する必要がある。



鉛直加速度(Case1)

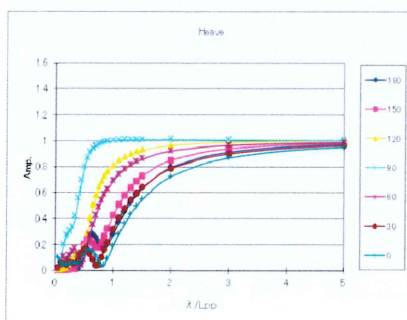


鉛直加速度(Case2)

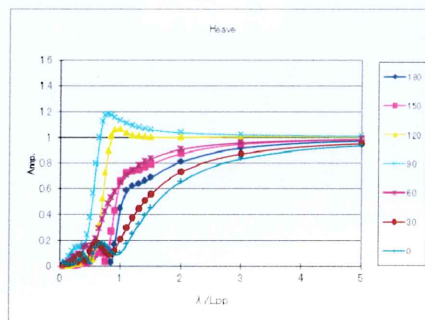
# 周波数応答関数

## 周波数応答解析の概要

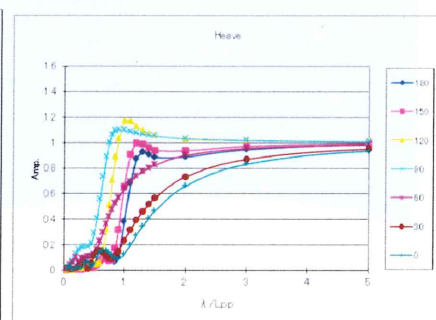
- 解析対象 :
  - PCC (船速 : 8.5、13、17knot)
  - バルク (船速 : 11、13.5、16knot)
  - タンカー (船速 : 14.5、16、17.5knot)
  - LNG (船速 : 16、18、20knot)
- 解析結果 :
  - 船体動揺 : Heave、Roll、Pitchの周波数応答関数



PCC船 Heave(8knot)



バルク Heave(11knot)



タンカー Heave(14.5knot)

## まとめ

### 非線形ストリップ法解析(剛体計算)

- PCCに的を絞って、非線形ストリップ法コードを用いて解析を行った。
- 当該船舶が遭遇したであろう有義波高、波周期～NOAAの波浪追算による値～を用いて、入射波時系列を生成し、時系列計算を行った。
- 今回の解析では応答の強い非線形性を示すデータは得られなかった。

### 非線形ストリップ法解析(弾性計算)

- 全期間中で大きな応答が得られている2時刻の条件において、剛体計算と、弾性計算を実施し、結果を比較することで弾性応答の発生を調査した。
- 2時刻ともほぼ横波状態で、波高がほぼ等しいものの、一方はあまり弾性応答が無く、他方は弾性応答が大きいという結果が得られた。
- 更に多くの比較を行い、系統的な調査を行う必要がある。

### 周波数応答関数

- 今後の研究の基礎データとして、4船種(バルク、タンカー、PCC、LNG)の周波数応答関数を求めた。

## 付録3

### 自動車船におけるホイッピング発生時の固縛資材への 影響評価



## 目的及び試験概要

### 目的

- 自動車船において、ホイッピング発生時に貨物及び固縛資材に追加でかかる荷重を推定する為、陸上試験を実施し、クラスパーに掛かる荷重を計測した。

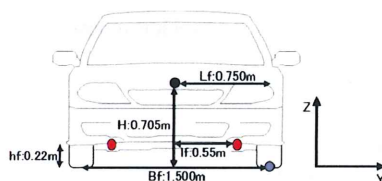
### 試験概要

- 場所：MTI新杉田研究所 MCS振動台
- 日時：2012年10月9日～2012年10月10日
- 車両情報：下表参照

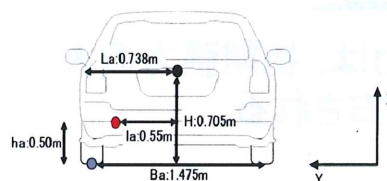
| 右前輪荷重<br>[kg] | 左前輪荷重<br>[kg] | 前輪荷重<br>[kg] | 右後輪荷重<br>[kg]  | 左後輪荷重<br>[kg]  | 後輪荷重<br>[kg]  | 総荷重[kg] |
|---------------|---------------|--------------|----------------|----------------|---------------|---------|
| 464.0         | 471.0         | 935.0        | 333.0          | 332.0          | 665.0         | 1600.0  |
| 全長[m]         | 全幅[m]         | 全高[m]        | ホイール<br>ベース[m] | フロント<br>レッド[m] | リヤトレッド<br>[m] | 重心高[m]  |
| 4.635         | 1.720         | 1.850        | 2.825          | 1.500          | 1.475         | 0.705   |

## 試験条件

### ラッシング位置

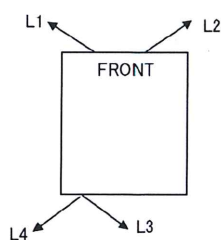


FRONT VIEW

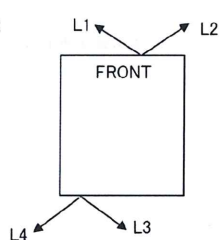


REAR VIEW

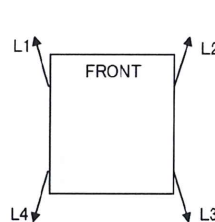
### ラッシング方法



3点固縛



2点固縛



ホイール  
ラッシング

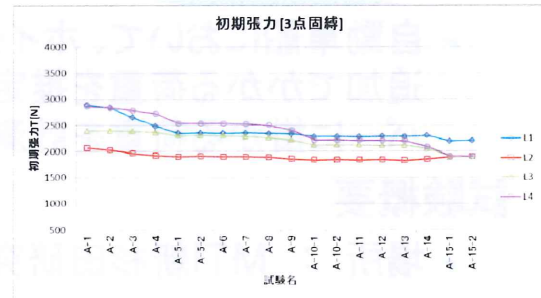
### 加振パターン

| 方向  | X軸方向<br>Y軸方向<br>Z軸方向                                           |
|-----|----------------------------------------------------------------|
| 加振力 | 0.25[G]<br>0.50[G]<br>0.10[G]<br>0.20[G]<br>0.30[G]<br>0.40[G] |

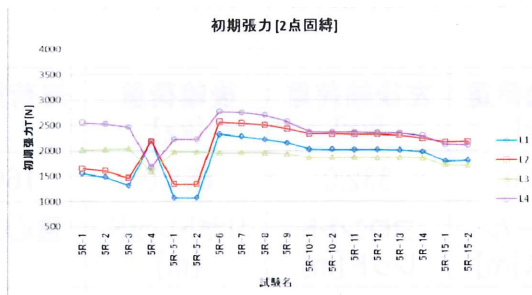
## 試験結果 1

### 初期張力

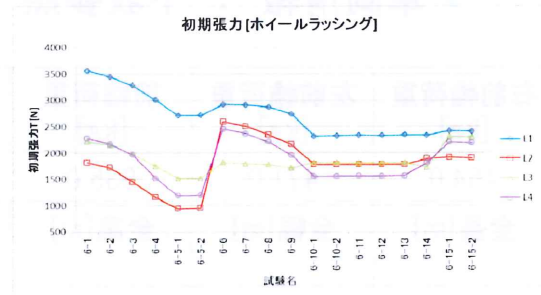
- 人の手によってクラスパーを締めるため、初期張力にはバラつきがあるが、概ね2500N程度の初期張力であった。
- 試験の進行にしたがって、徐々に緩んでいく様子が確認できる。
- 途中で初期張力が増えている箇所では、締め直しを行っている



クラスパー初期張力(3点固縛)



クラスパー初期張力(2点固縛)

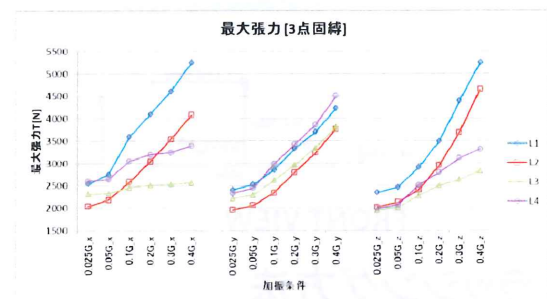


クラスパー初期張力(ホイールラッシング)

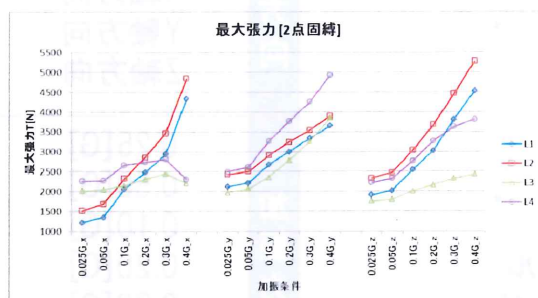
## 試験結果 2

### 最大張力

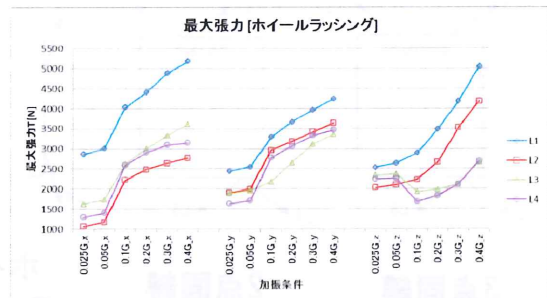
- 最大張力は、初期張力の大きさに左右される。



クラスパー最大張力(3点固縛)



クラスパー最大張力(2点固縛)



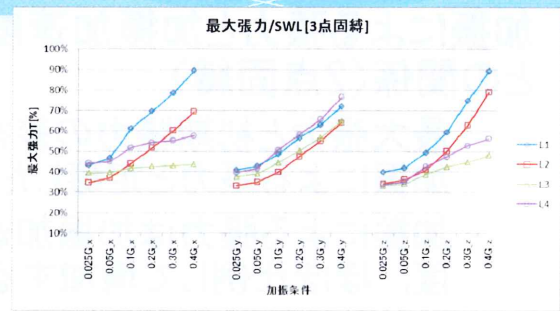
クラスパー最大張力(ホイールラッシング)



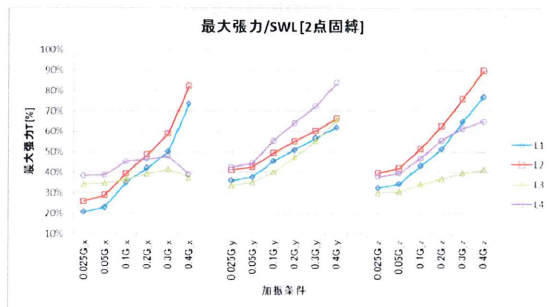
## 試験結果 3

### 最大張力(割合)

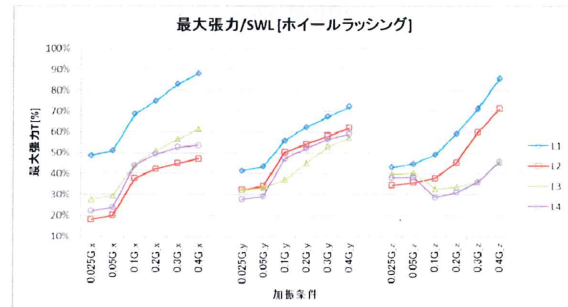
- SWL(安全荷重):600kgに対する最大荷重の割合を示す
- SWLに対して、最大で90%程度の張力が出ている。(3点固縛、x方向に0.4Gで加振時)



クラスパー最大張力割合(3点固縛)



クラスパー最大張力割合(2点固縛)

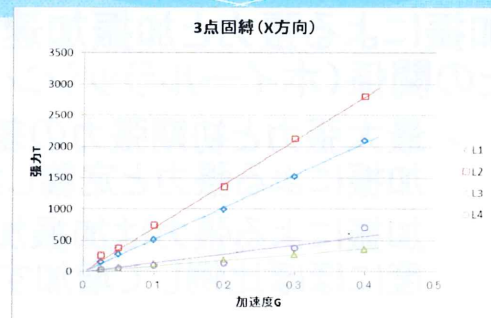


クラスパー最大張力割合(ホイールラッシング)

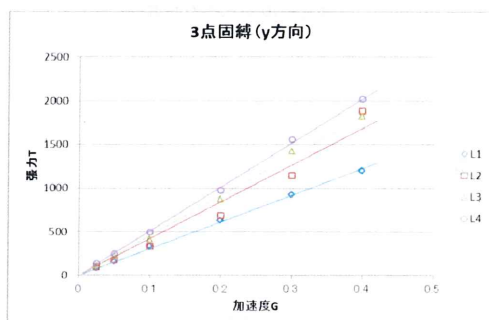
## 試験結果 4

### 加振による張力と加振加速度の関係(3点固縛)

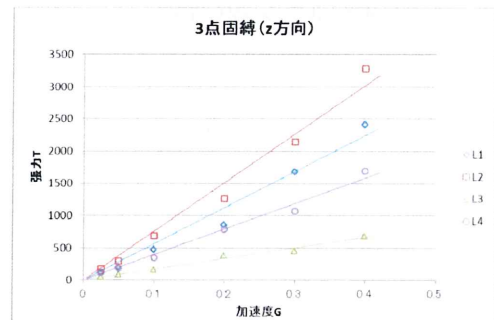
- 最大張力と初期張力の差を、加振による張力と定義した。
- 加振による張力は加振加速度にほぼ比例して増加する。



加振による張力(3点固縛 : x方向加振)



加振による張力(3点固縛 : y方向加振)

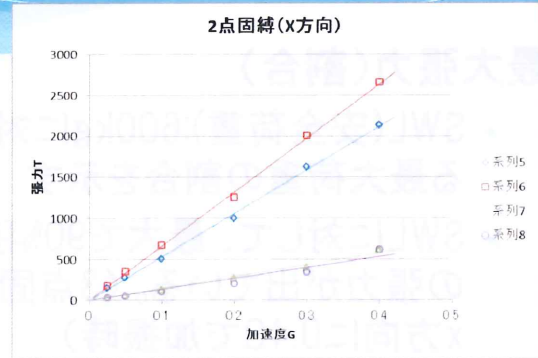


加振による張力(3点固縛 : Z方向加振)

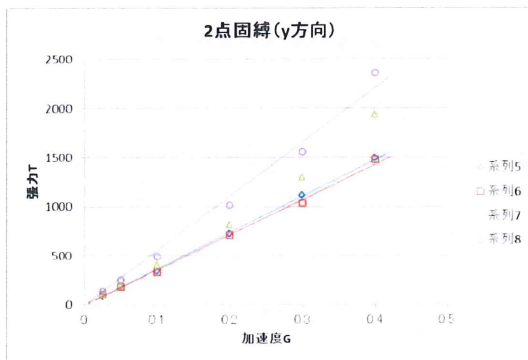
## 試験結果 5

### 加振による張力と加振加速度との関係(2点固縛)

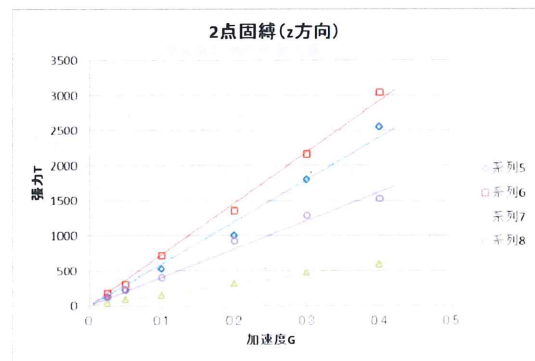
- 最大張力と初期張力の差を、加振による張力と定義した
- 加振による張力は加振加速度にほぼ比例して増加する



加振による張力(2点固縛：x方向加振)



加振による張力(2点固縛：y方向加振)

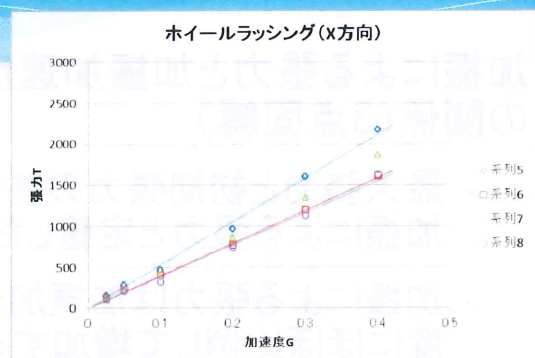


加振による張力(2点固縛：z方向加振)

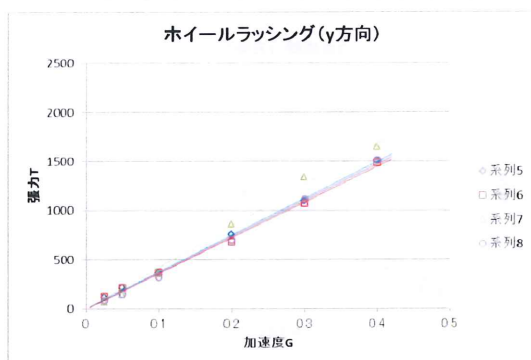
## 試験結果 6

### 加振による張力と加振加速度との関係(ホイールラッシング)

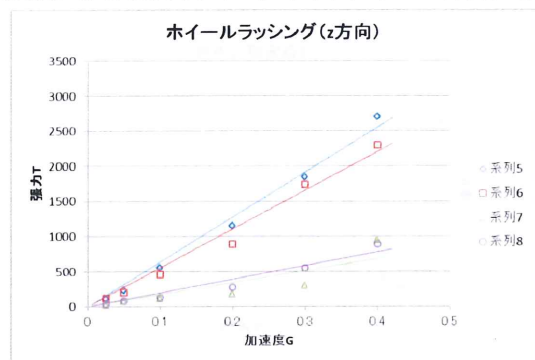
- 最大張力と初期張力の差を、加振による張力と定義した
- 加振による張力は加振加速度にほぼ比例して増加する。



加振による張力(ホイールラッシング：x方向加振)



加振による張力(ホイールラッシング：y方向加振)



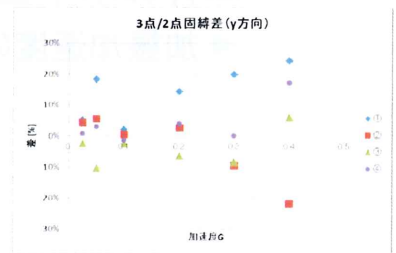
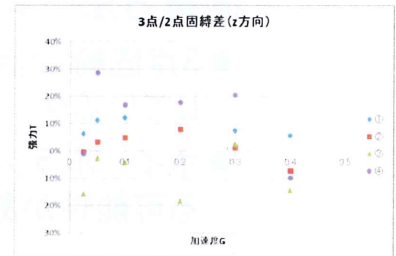
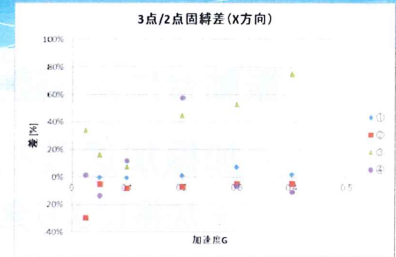
加振による張力(ホイールラッシング：z方向加振)



## 試験結果 7

### 固縛方法による違い

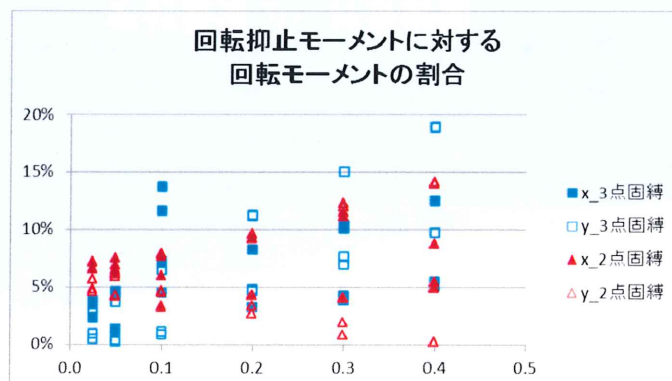
- 3点固縛/2点固縛/ホイールラッシングについて、加振による張力を比較した。
- x方向加振：
  - 概ね±10～20%程度の張力差となっていた。
  - 一部、2点固縛の方が大きな張力が発生しているケースがある。
- y方向加振：
  - 概ね±10%程度の張力差となっている。
  - 一部、2点固縛の方が10%程度大きな張力が発生しているケースがある。
- z方向加振：
  - 概ね±10～20%程度の張力差となっている。
- 必ずしも2点固縛の方が大きな張力が発生しているわけではないが、2点固縛の方が大きな張力が発生している割合が多い。



## 試験結果 8

### 回転について

- 加振時に水平面内で車体が回転する可能性について、回転モーメントにより評価を行った。
- ホイールラッシングについては、ほぼ左右対称であり、大きな回転モーメントは発生しないので、3点固縛/2点固縛の比較のみを行った。
- 3点固縛と2点固縛で割合に大きな違いは無く、回転モーメント自体も余裕があることが分かる。



## まとめ

振動台による陸上試験を実施し、以下を確認した。

- 加振加速度と加振により発生する張力の相関について
  - 加振により発生する張力は、加振加速度に比例する。
- 固縛方法による差について
  - 3点固縛/2点固縛の比較では、2点固縛の方が大きな張力が発生しているケースがある。
  - ホイールラッシングでは、車体の揺れが大きく、安定性に問題がある可能性がある。
- 車体の水平面内での回転について
  - 加振加速度の大きさ、固縛方法に依らず、問題となることはない。

## 付録4

コンテナ船におけるホイッピング発生時の  
固縛資材への影響評価



## 背景及び目的

### 背景

- コンテナ船の大型化に伴い、従来のローリングやピッチングといった剛体運動による加速度に加え、ホイッピング及び振れといった弾性挙動による加速度が発生する。
- 現状、弾性挙動による加速度がコンテナスタックに及ぼす影響について、ほとんど検討されていない。

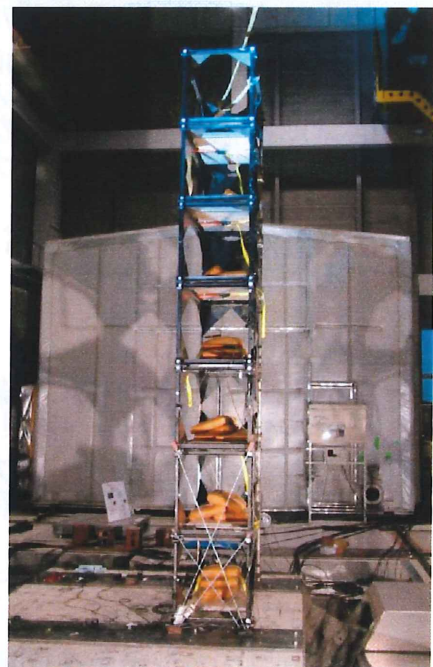
### 目的

- スケールモデルを用いてコンテナスタックの振動試験を行い、コンテナの剛性の影響、ツイストロックのガタの影響、隣り合うスタック間の衝突の影響を評価する。
- スケールモデルによる試験及び数値解析を実施し、コンテナ船オンデッキ上に積載されるコンテナの安全な固縛方法について検討する。

## スケールモデル実験

### 実験概要

- 模型概要
  - フルスケールコンテナに対して $\frac{1}{4}$ スケールのモデルを使用。
  - コンテナ模型を7個積み上げ、これを1スタックとした。
- 振動
  - 振動台により、ローリングやホイッピングを模擬した船体運動を負荷。
  - フルスケールのコンテナに対して、慣性力および弾性力と重力間に相似則が成り立つよう設定した。

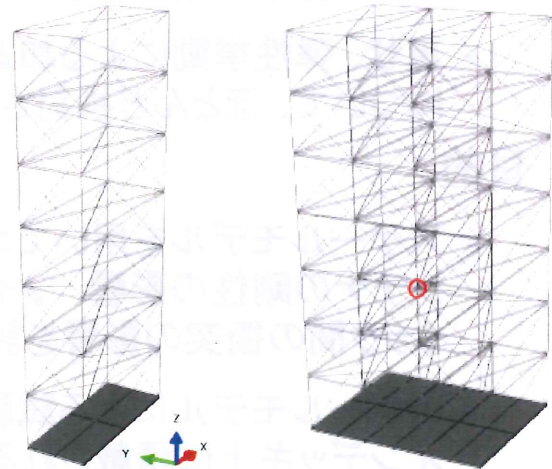


振動台模型試験外観

# コンテナ挙動の解析モデル 1

## コンテナスタックモデル概要

- 20ftコンテナ  
(6058×2438×2591[mm])
- 9節点28要素モデル
- ヤング率  $E=210$ [GPa]
- ポアソン比  $\nu=0.3$
- 密度  $\rho=7850$ [kg/m<sup>3</sup>]
- 積載重量 10t
- 積載段数 7段
- 船体運動は船体を模擬した剛性要素に強制変位として負荷

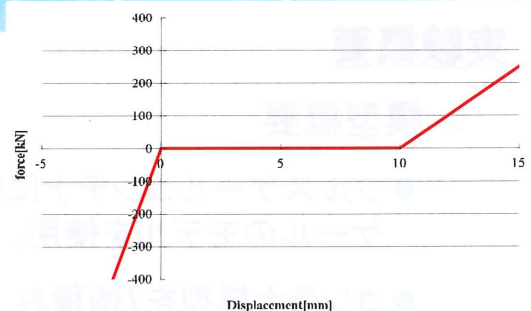


コンテナスタックの数値モデル

# コンテナ挙動解析モデル 2

## ツイストロックモデル

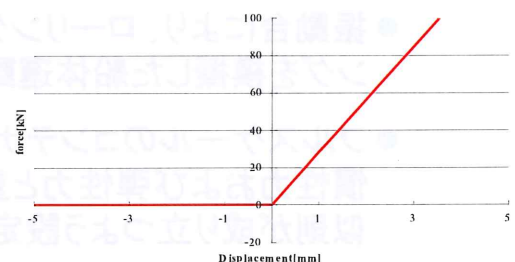
- 数値解析を実施する際には、固縛器具であるツイストロックのモデル化が必要。
- ツイストロックには構造的にギャップが存在する。この為、コンテナとツイストロックは常に接触している訳でなく、コンテナの浮き上がりにより、コンテナとツイストロックは離れる。
- この接触判定を非線形バネによって定義する。(右上図 参照)



ツイストロックの数値モデル

## ラッシングロッド

- ツイストロックと同様に非線形バネとしてモデル化。(右下図 参照)
- 長軸材であるため、圧縮方向の荷重には作用せず、引張り方向の荷重にのみ作用するように仮定した。
- 各コンテナに対し、4本のラッシングロッドをクロスさせて使用。
- 2、3段目のコンテナを固縛する際は、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結合した。



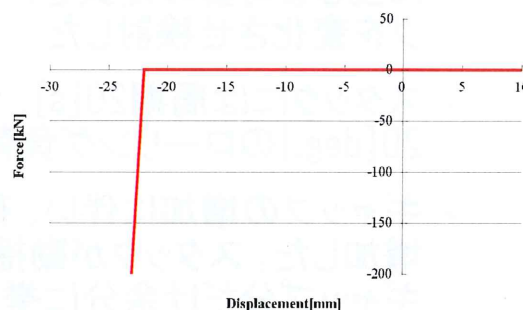
ラッシングロッドの数値モデル



## コンテナ挙動解析モデル 3

### 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狭いため、スタックが動揺することで、相互に影響を及ぼす。
- 7×1スタックを基本として、以下の条件で解析を実施した。
  - 7×3スタック(7×1スタックをY方向に3列)
  - 7×9スタック(7×1スタックをY方向に9列)
- 7×3および7×9スタックの両者とも、ビーム及びスプリング要素で定義されている。
- コンテナ同士のY方向を非線形バネ要素(右図 参照)でつなぐことで、擬似的に接触を定義した。

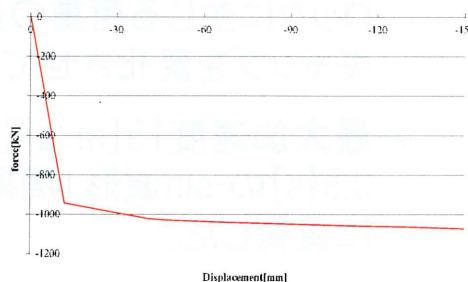


スタック間接触の数値モデル

## コンテナ挙動解析モデル 4

### コンテナ圧潰の解析モデル

- コンテナ崩壊事故では、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。
- 上記コンテナの圧潰を表現することで、スタックが倒壊した際、他のスタックに及ぼす影響を検討する。
- 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する。(座屈モードは考慮しない。)
- 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。(右図 参照)
- 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。

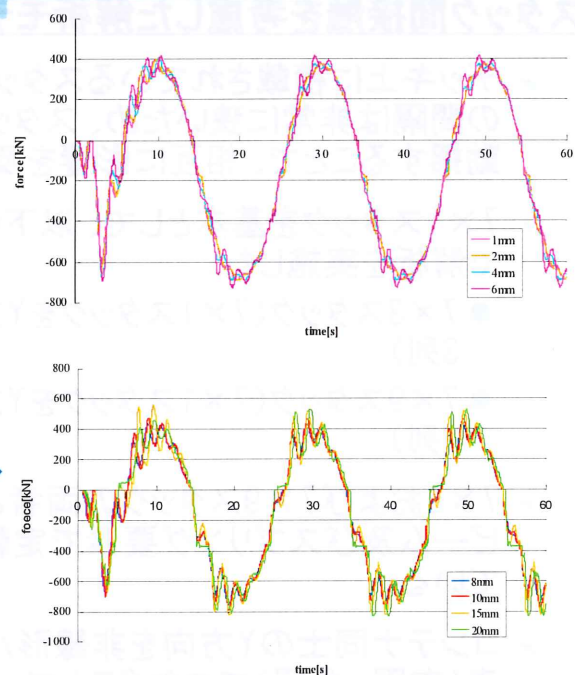


コンテナ圧潰の数値モデル

## コンテナ挙動の各種パラメータの影響評価 1

### ツイストロックのガタの影響(ローリング時)

- 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、ギャップを変化させ検討した。
- スタックには周期20[s]、角度20[deg.]のローリング負荷した。
- ギャップの増加に伴い、荷重が増加した。スタックが動揺する際、ギャップ分だけ余分に挙動することが原因と想定される。
- ギャップ拡大に伴う荷重増加分は100[kN]を超える場合もあり、安全に対して看過できない値である。

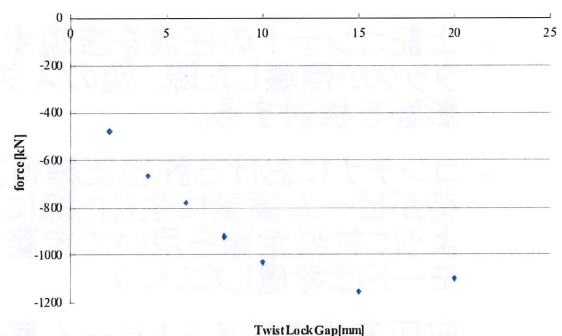


ツイストロックのガタを変化させたときの荷重履歴

## コンテナ挙動の各種パラメータの影響評価 2

### ツイストロックのガタの影響(ホッピング発生時)

- ホッピング発生時に、ツイストロックに生じる荷重の差異を、ギャップを変化させて検討した。
- 最大加速度15[m/s<sup>2</sup>]、周期は0.5[s]の-sin波形1周期をスタックに負荷した。
- ギャップの拡大に伴って、荷重が増加した。船体運動によりコンテナが浮き上がり、落下することで衝撃が生じる。ギャップが拡大することで、浮き上がり幅が増加し、荷重が増加したと想定される。



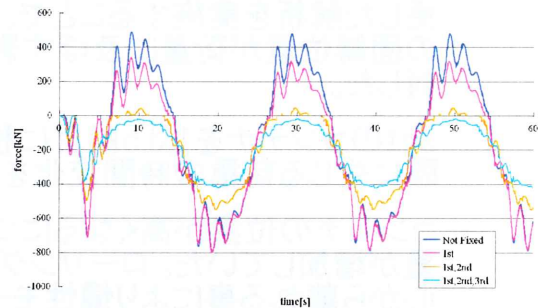
ツイストロックのガタと最大圧縮荷重



## コンテナ挙動の各種パラメータの影響評価 3

### ラッシングロッドの効果

- ラッシングロッドによる荷重の低減効果について評価した。
- 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右図に示す。
- 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。
- 但し、1段目のみを拘束した場合には、圧縮荷重に大きな変化がなかった。
- 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想定される。

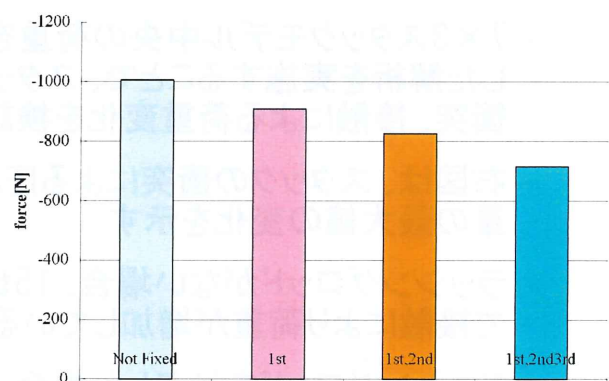


ラッシングロッドの取り付け位置による荷重履歴

## コンテナ挙動の各種パラメータの影響評価 4

### ホイッピングに対するラッシングロッドの効果

- ホイ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。
- ローリング同様、高所のコンテナに対して固縛を行うことによって最大圧縮荷重を低減できている。
- これは、固縛位置により、ホイッピング発生時に、飛び上がるコンテナ数が増える事によるものである。
- 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ることで、荷重を抑制できると想定される。

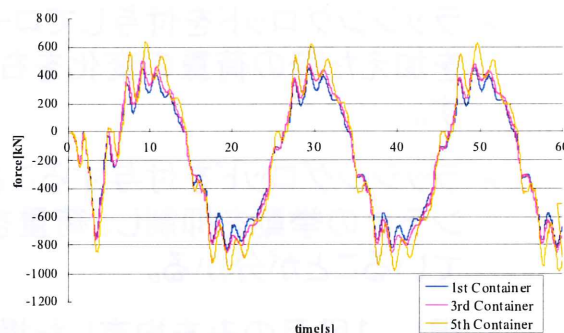


ラッシングロッドの取り付け位置による最大圧縮力

## コンテナ挙動の各種パラメータの影響評価 5

### コンテナ配置の影響

- 荷役におけるコンテナの固縛位置の影響を評価した。
- 1つのコンテナの荷重を25t(他のコンテナは10t)とし、このコンテナの位置を変更した解析を実施することで、コンテナの固縛位置が荷重に及ぼす影響を検討した。
- 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を調査した。
- コンテナの位置が高くなるにつれて荷重が増加していた。ローリングの回転中心から離れる事により慣性モーメントが大きくなる。これによりスタックに加わる荷重が増加したと想定される
- スタックの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。

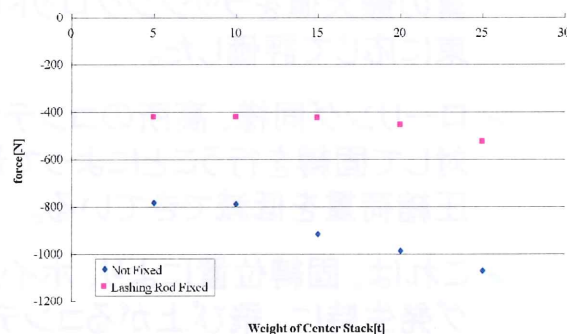


コンテナ位置の違いによる荷重履歴

## コンテナ挙動の各種パラメータの影響評価 6

### コンテナスタックの接触の影響

- 動揺によりスタック同士が衝突、接触する事がある。
- 7×3スタックモデル中央の荷重を変更した解析を実施することで、スタックの衝突、接触による荷重変化を検証した。
- 右図は、スタックの衝突による圧縮荷重の最大値の変化を示す。
- ラッシングロッドがない場合、15t以降で接触により荷重が増加している。
- ラッシングロッドを付与した場合、20t以降で接触により荷重が増加している。ラッシングロッドを付与することによりスタック上部のコンテナ挙動を低減し、接触による荷重増加が抑止されていると想定される。



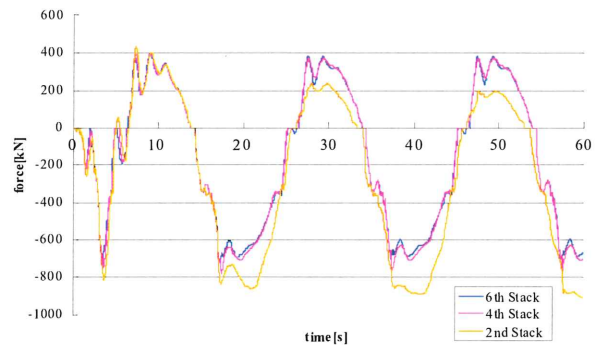
ラッシングロッドの有無による最大荷重



# コンテナ挙動の各種パラメータの影響評価 7

## コンテナスタックの圧潰とスタック配置影響

- スタックの倒壊が他のスタックに与える影響を、座屈モデルを用いて検討した。
- 評価スタックの配置に際し、重量スタックから距離を置く事によって加わる荷重が減少している。
- 船舷に近い場所に重量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。
- 船体中央部に重量スタックを設置することにより、荷重を分散させ、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想定される。



重量コンテナ位置の違いによる荷重履歴

## まとめ

本研究において、コンテナスタックの振動実験及び数値解析モデルを用いた非線形解析を実施し、以下の知見を得た。

- ツイストロックのギャップ拡大により、ローリング時、ホイッピング時の荷重は増加する。これはツイストロックのギャップ拡大にともない、コンテナの挙動が増加する事が原因と想定される。
- ラッシングロッドを付与する事により、スタック挙動を抑制し、ローリング時及びホイッピング時の荷重は低減する。特に。スタック高所のコンテナを固縛した場合に低減効果が高い。
- スタックにおけるコンテナの配置、並びに船体におけるスタック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、荷重を低減できる。また、スタック毎の荷重を均質にすることで、接触を防止できる。

