

荒天中の船体運動と貨物拳動 シミュレーション

2023年12月4日

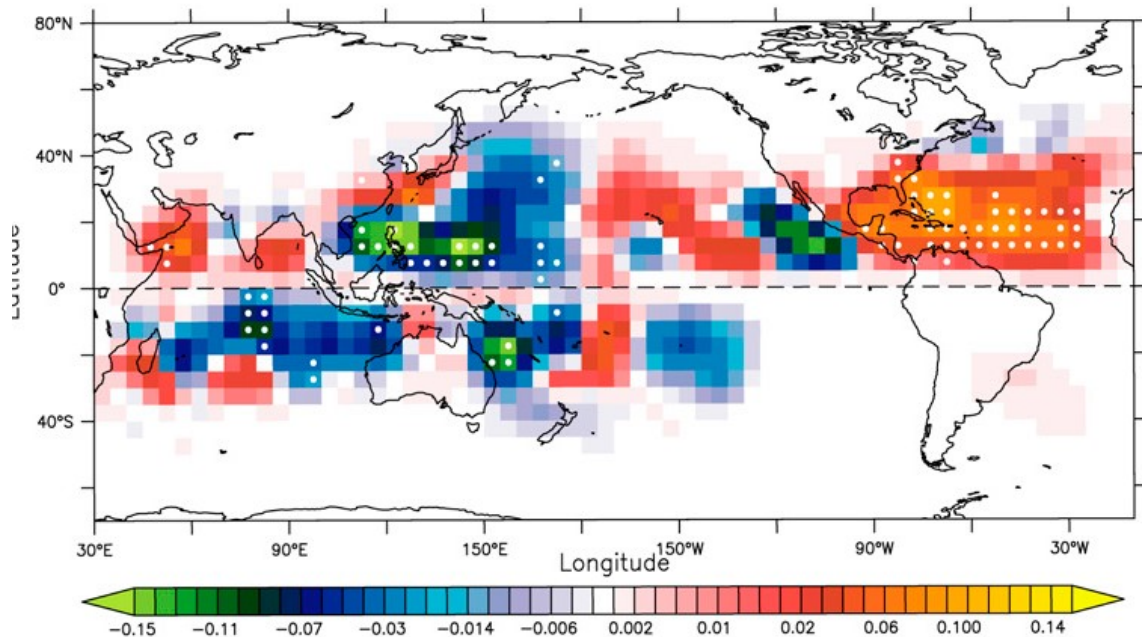
株式会社MTI 船舶物流技術グループ シミュレーションチーム
角田 領

概要

- 背景
- 波浪と動揺の計測
- 荒天中の船体運動予測
- 貨物拳動シミュレーション
- まとめ

背景

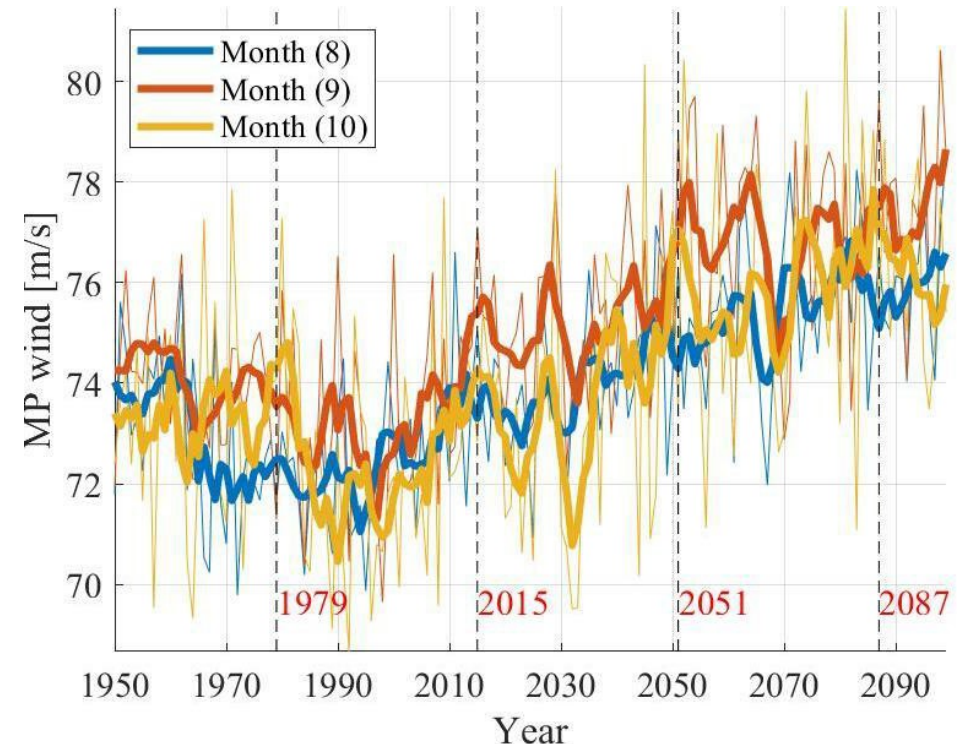
- 貨物の安全輸送と輸送品質向上は海運会社の重要課題
- 気候変動による台風等の極端海象の頻度及び強度の変化
- 研究開発、技術開発の必要性の高まり



熱帯低気圧発生数の変化(1980年-2018年)

Murakami et al. 2020, Detected climatic change in global distribution of tropical cyclones

© 2023. MTI Co., Ltd. All rights reserved.



最大可能性風速の推移(北西大西洋)

Shimura et al. 2022, Seamless Projections of Global Storm Surge and Ocean Waves Under a Warming Climate

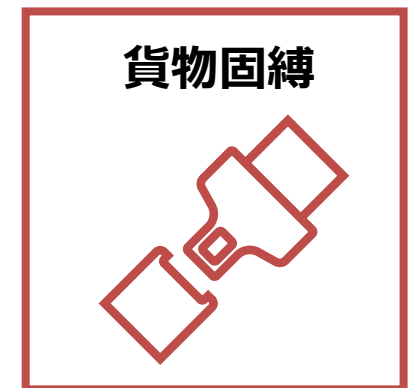
背景：波浪-動揺-固縛

貨物の安全輸送における重要要素 - 研究開発のポイント

①**波浪** : 波浪によって船体は動揺する

②**動揺** : 波浪と航行条件によって動揺は大きく変化する

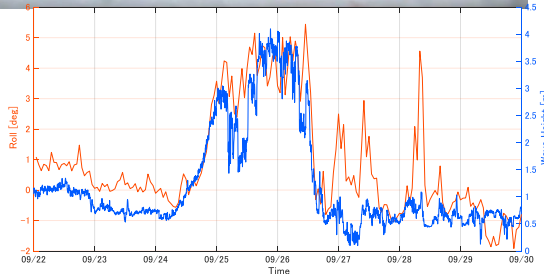
③**固縛** : 動揺する船体と貨物は固縛資材によって固定される



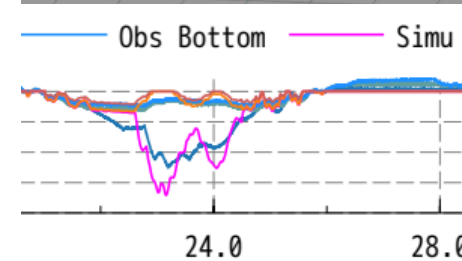
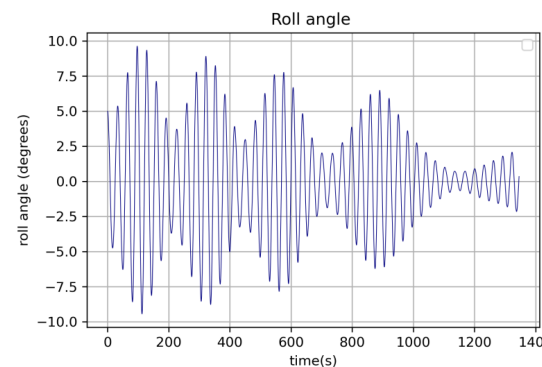
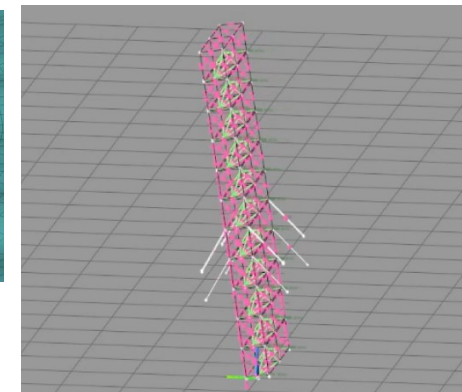
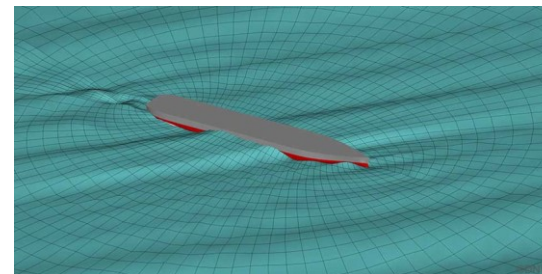
アプローチ

- 計測、シミュレーションの組み合わせにより、高度な安全運航支援、輸送品質向上を実現する

現実世界



仮想環境



運航支援
基準の高度化

様々な海象条件下での船体動揺予測
貨物挙動、固縛力の予測

概要

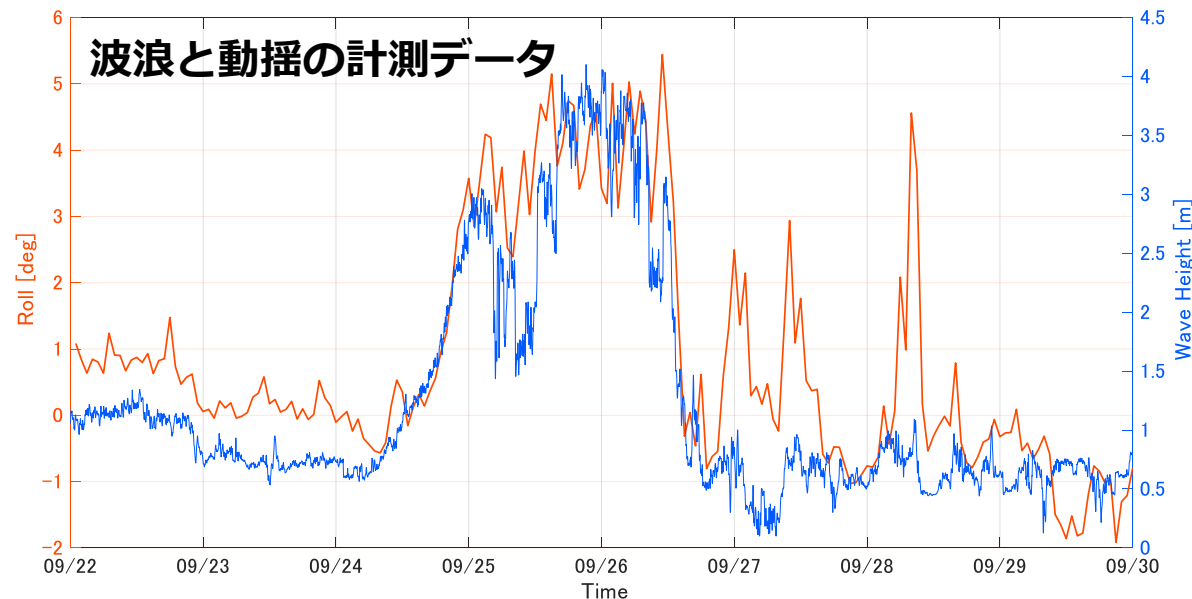
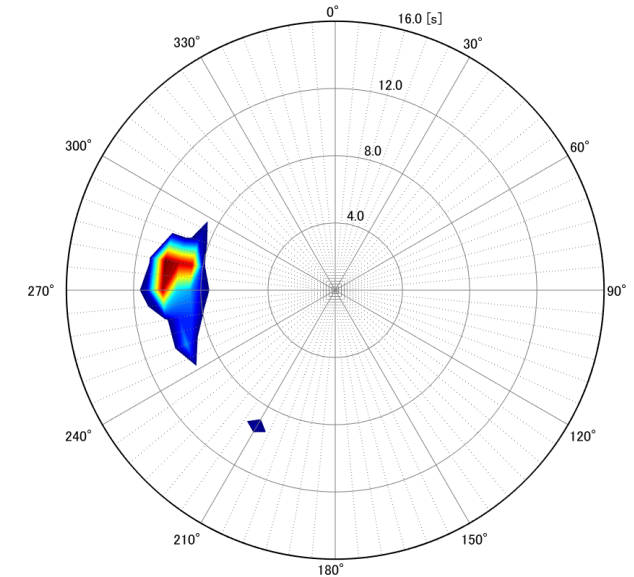
- 背景
- **波浪と動揺の計測**
- 荒天中の船体運動予測
- 貨物拳動シミュレーション
- まとめ

① 波浪と動揺の計測

波浪：予報や目視観測 + **波浪レーダ**による計測
⇒ 波浪情報をより精緻に把握

動揺：本船の動揺データを計測

波浪レーダによって計測された波浪スペクトル



波浪計測データ

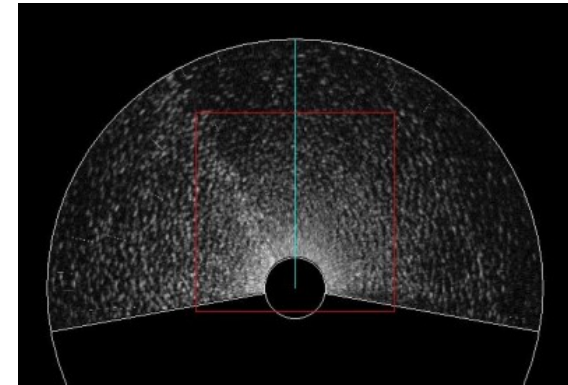
- 動揺予測との統合による運航支援
- 実海域性能の把握

動揺計測データ

- 動揺予測モデルの検証に活用

① 波浪と動揺の計測 – 波浪レーダー

- 2010年頃から波浪レーダーの精度評価の取り組みを開始
- 2014年 波浪レーダーを用いた波浪モデル高度化(気象庁との共同研究)
- 2016-2018年 国交省 i-Shipping 構造ヘルスマニタリングでの活用



レーダーで観測される海面反射

Monohakobi Technology Institute

運航モニタリングシステムの進捗

2-5-3 波浪解析装置の精度評価

波浪解析装置の精度評価トライアル開始

2013年より日本無線がX-band レーダー・ECDISに標準機能としての搭載を予定

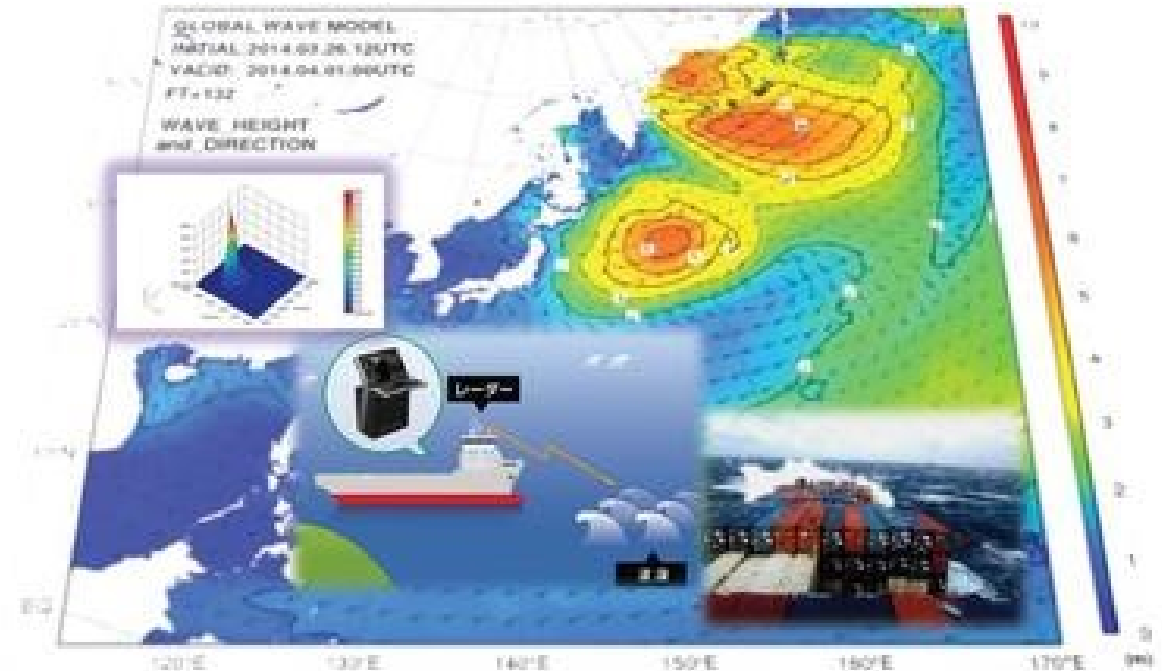
波高計設置箇所

X-band レーダー 波浪解析装置

マイクロ波式波高計

27 Monohakobi Techno Forum 2010 © Copyright 2010 Monohakobi Technology Institute

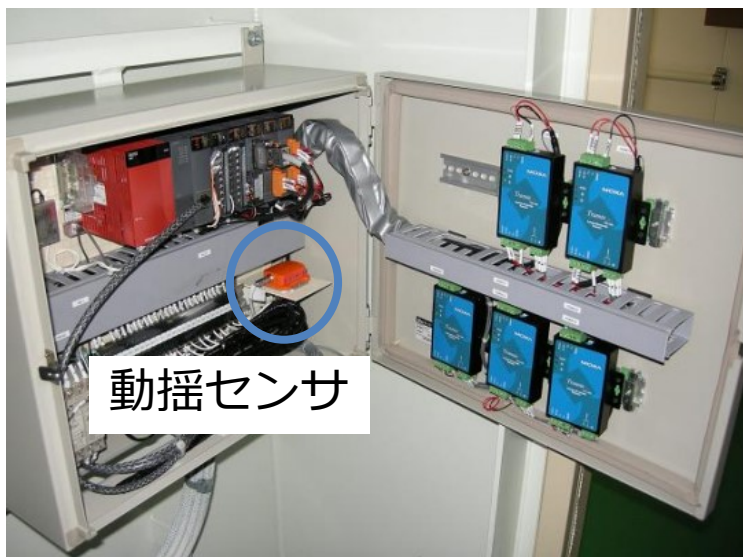
2010年MTF発表資料



<https://www.nyk.com/news/2014/003273.html>

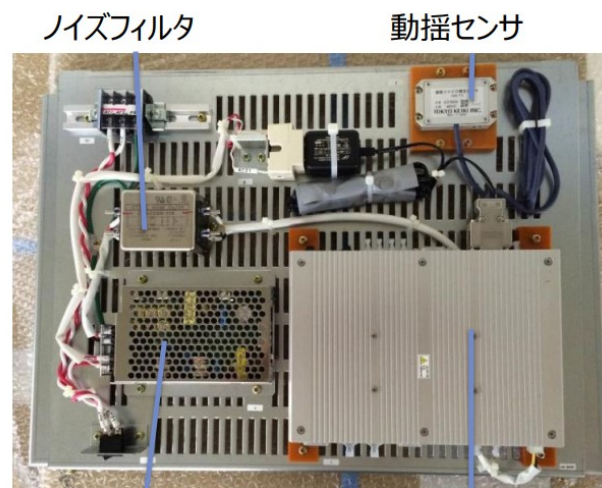
① 波浪と動揺の計測 – SIMSによる動揺・加速度計測

- SIMSでの動揺・加速度計測、モニタリング
 - Roll, pitch, yaw
 - X, Y, Z方向加速度
 - FFT解析
- リモートで詳細な動揺・加速度データを手入手できる仕組みの構築



動揺センサ

SIMS



ノイズフィルタ

動揺センサ

AC電源信号端子

BOX PC

SIMS2



陸側ビューワーでのモニタリング (SIMS3)

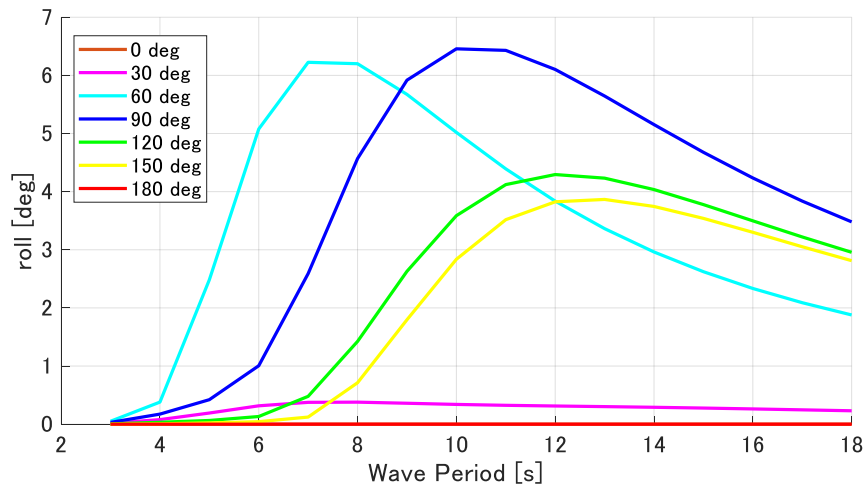
概要

- 背景
- 波浪と動揺の計測
- **荒天中の船体運動予測**
- 貨物拳動シミュレーション
- まとめ

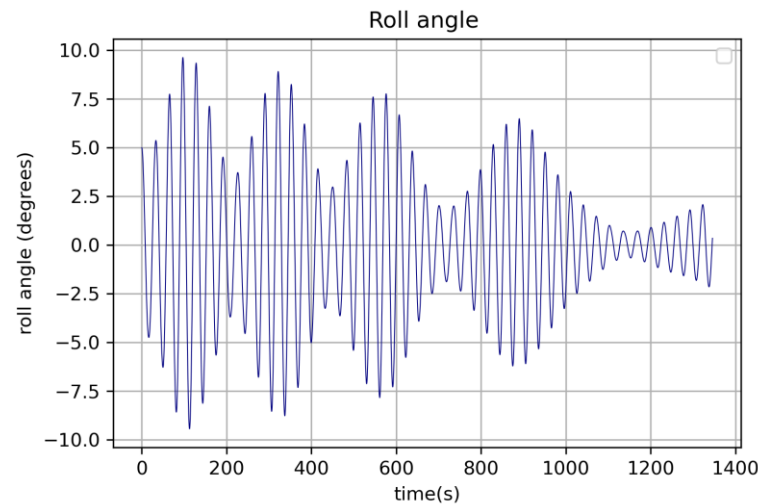
② 荒天中の船体運動予測

動揺予測：動揺シミュレーションにより荒天中の動揺を推定する
異なる現象に対して適切なモデルを用いて計算を実施

- 同調横揺れ/パラメトリックロールを対象



同調横揺れによる動揺角の推定の例
(周波数領域での解析)



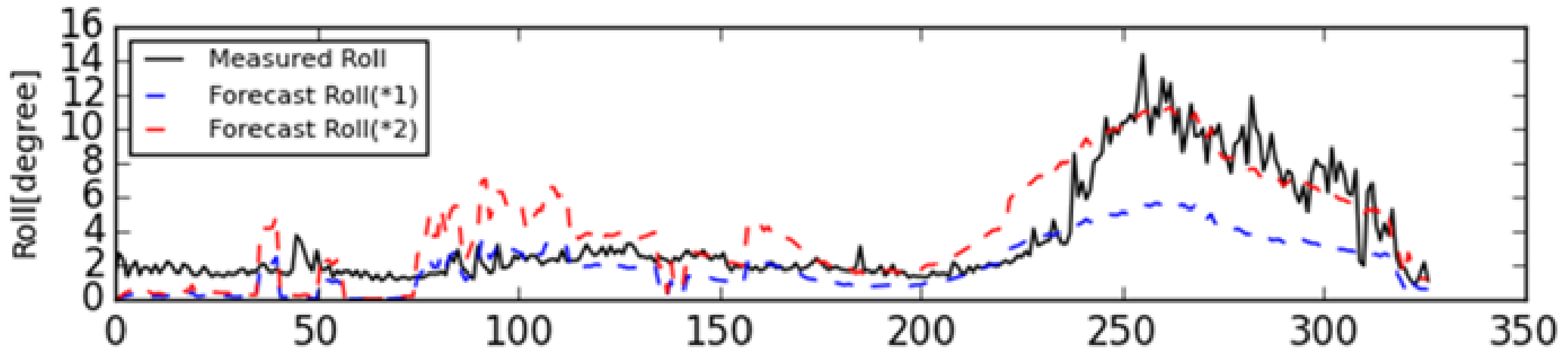
パラメトリックロールによる動揺角の推定の例
(時間領域での解析)

- 動揺シミュレーションを活用し、本船で起こりうる動揺角を予測
⇒ 安全運航支援のための情報を提供

② 荒天中の船体運動予測 同調横揺れ

• 同調横揺れ

- 船の横揺れ固有周期が波との出会い周期に一致することで引き起こされる共振現象
- 線形理論で説明可能
- 周波数応答関数(RAO)に波高を乗じて応答を求める



RAOと波浪計測から求めた横揺れ予測値とSIMSによる計測値(1時間最大値)の比較例

② 荒天中の船体運動予測 パラメトリックロール

・パラメトリックロール

- ・ 追い波、向い波、斜波中で船体の復原力が周期的に変化することで共振が発生
- ・ 横揺れ固有周期 \approx 出会い波周期 $\times 2$ の状況で起こりやすい
- ・ 振幅が徐々に増大するという特徴がある
- ・ 非線形現象であり、時間領域での計算が必要

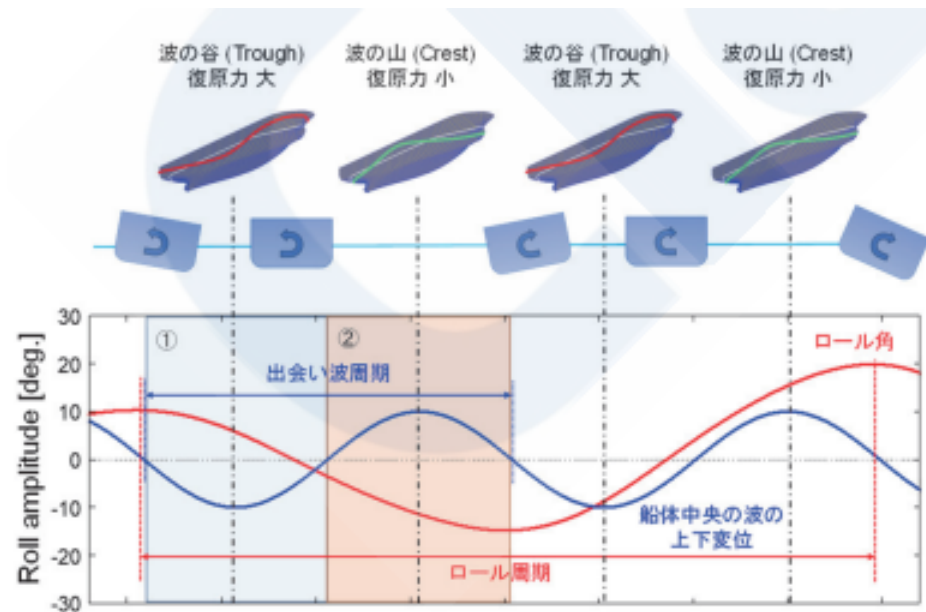


図2 パラメトリックロールの発達

https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/research/rd/2023/07_j03.pdf

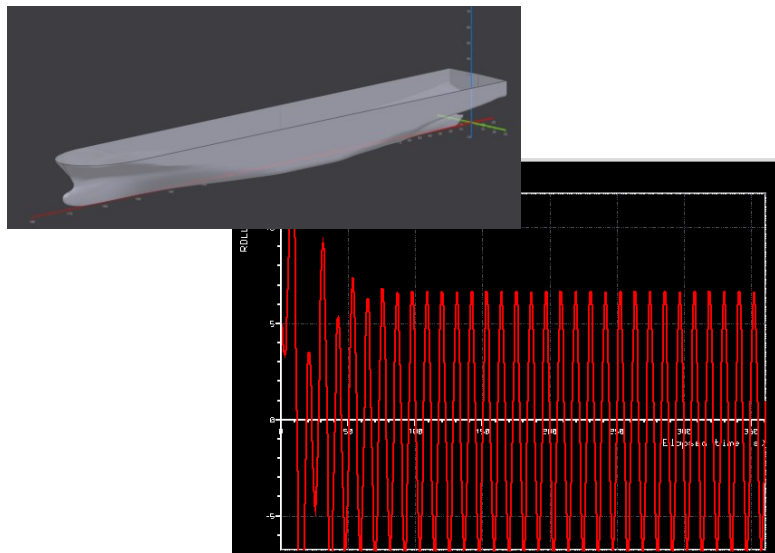


水槽試験の映像(MARIN TopTier JIP)

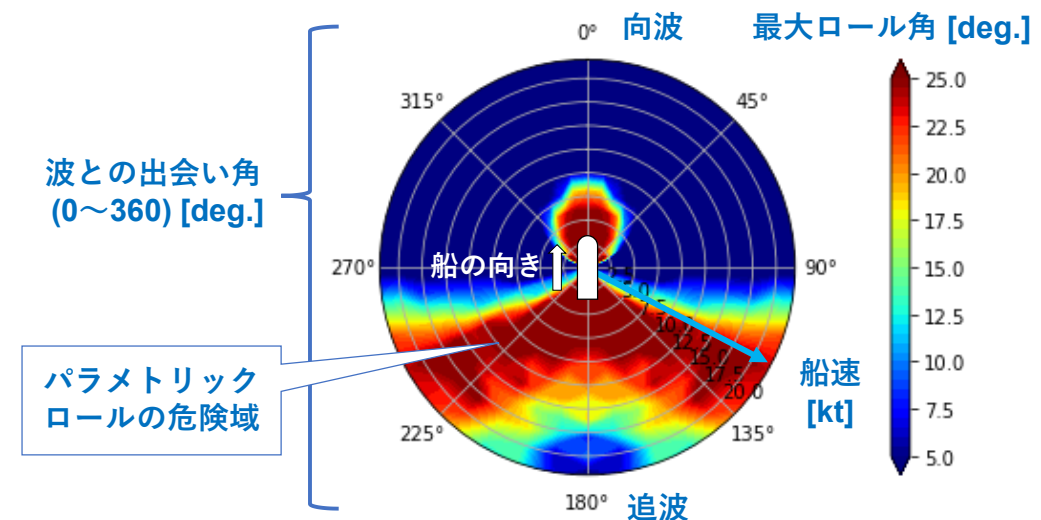
<https://www.youtube.com/watch?v=NaJaxxG7K6M>

② 荒天中の船体運動予測 パラメトリックロール

- 複数の時間領域での動揺計算手法を用いてパラメトリックロール発生時の最大横揺れを推定(日本海事協会殿との共同研究)
 - 3Dパネル法を用いた6自由度計算
 - 第二世代非損傷時復原性暫定ガイドラインに基づく1自由度計算
- 計算結果をポーラーチャートとして可視化し、一部船舶に提供
 - 危険な船首方位、船速を分かりやすく提示。安全運航に活用。



時間領域での横揺れ計算の例(1自由度)



一般的なポーラーチャートの例

https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/research/rd/2023/07_j03.pdf

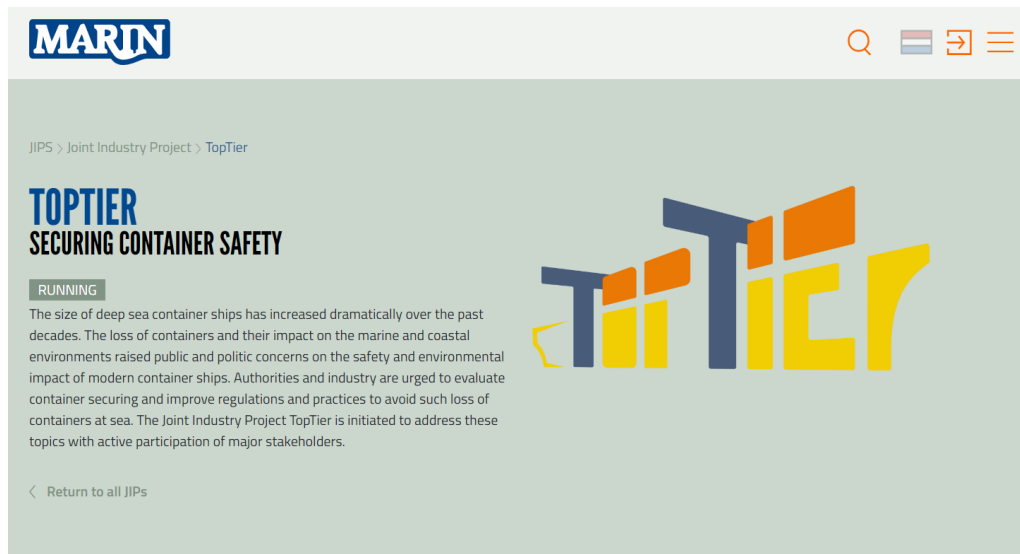
概要

- 背景
- 波浪と動揺の計測
- 荒天中の船体運動予測
- **貨物拳動シミュレーション**
- まとめ

③ 貨物拳動シミュレーション

貨物拳動シミュレーション

- 動揺中の貨物拳動を予測し、固縛や各部材にかかる荷重を推定
- コンテナスタックのモデル化、模型実験による検証を実施
 - TopTier JIPへの参加



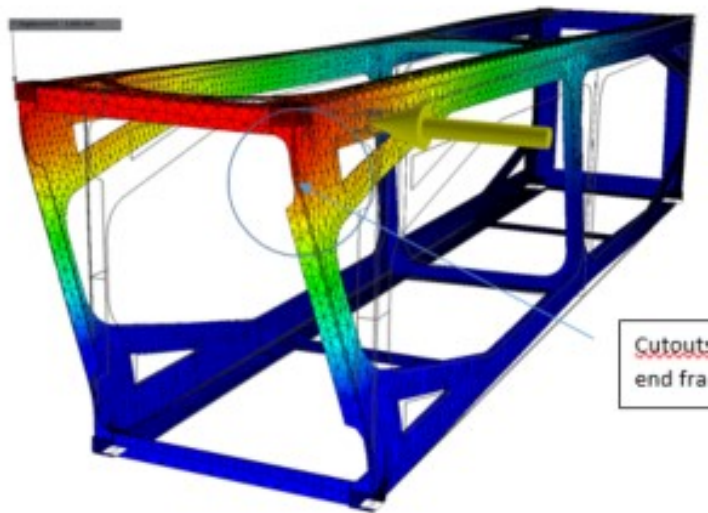
<https://www.marin.nl/en/jips/toptier>

- コンテナ船大型化に各種ルールや計算が対応できていないという業界の懸念から、オランダのMARINが国際的なJIPを企画
 - コンテナ船社、船級、造船所、大学、研究所等が参加
- MTIは固縛力計算に関するWorking groupに参加し、模型実験に協力

- ⇒JIPでの活動を通じ業界全体の安全性向上に貢献する

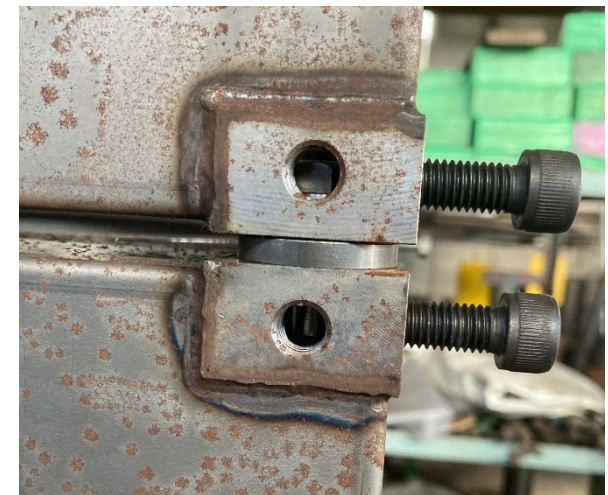
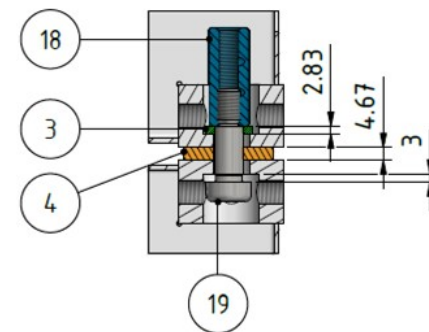
③貨物拳動シミュレーション アプローチ

- 各船級が提供している固縛力計算ソフトは、計算方法が統一されておらず、同じ条件でも異なる計算結果が示される
- 詳細な3次元計算モデルによる計算と模型実験による計測データを比較し、固縛力計算で考慮すべき物理的要素、パラメータを明らかにする



Open side, close sideでの剛性差

K-K (1 : 2) (Twistlock)



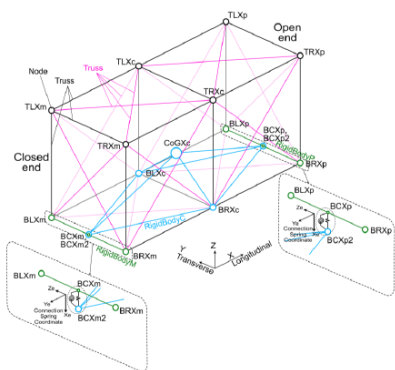
ツイストロックの縦方向のガタ
(フルスケールで12 - 18mm程度)

③ 貨物挙動シミュレーション モデリング

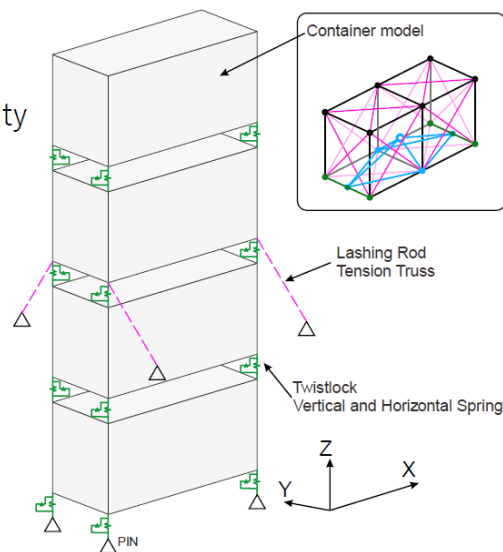
- コンテナスタックのシミュレーションモデル開発
 - Open end, closed endの剛性差など非線形性を考慮したFEMモデル
 - ツイストロックのガタ等の非線形影響のモデル化
 - 東京大学との共同研究及び株式会社構造計画研究所との共同開発

Simulation method

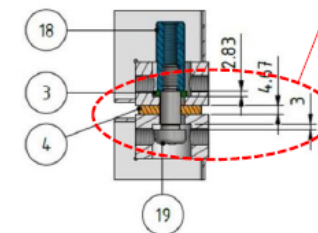
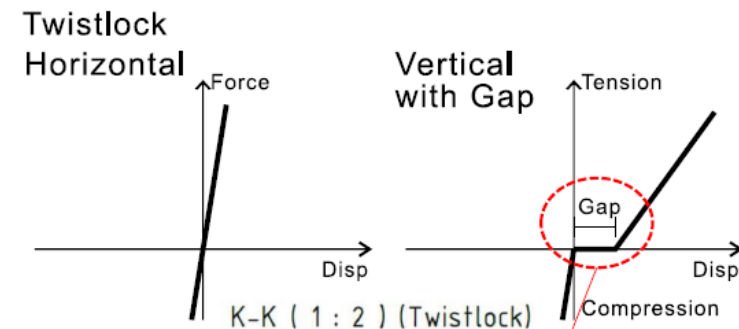
- FEM considering geometrical nonlinearity
- Frame based model



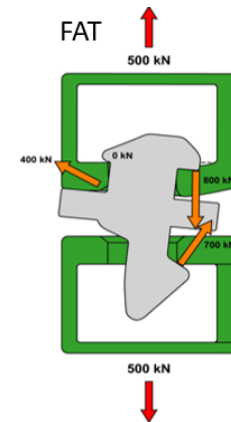
Schematic figure of a container



Schematic figure of stacked containers



非線形影響のモデル化

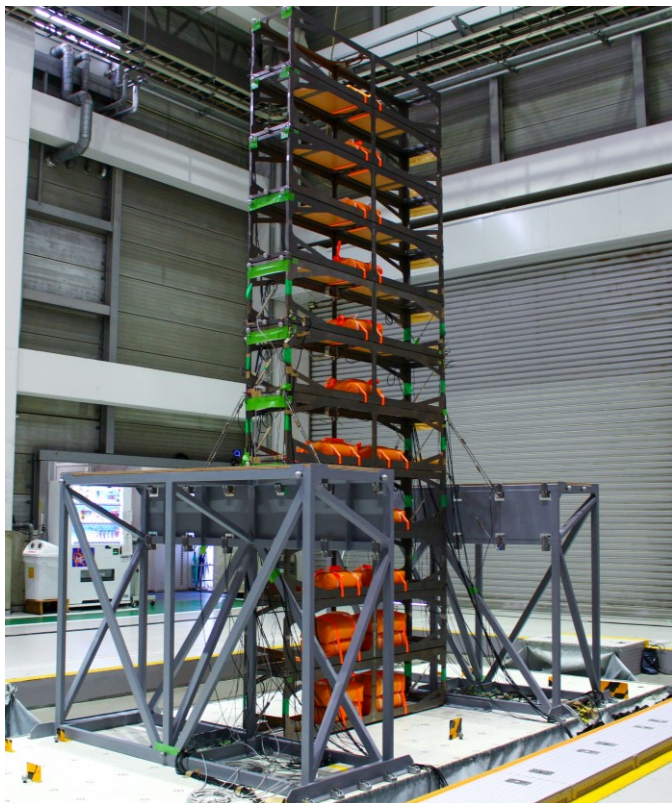


コンテナ及びコンテナスタックモデル

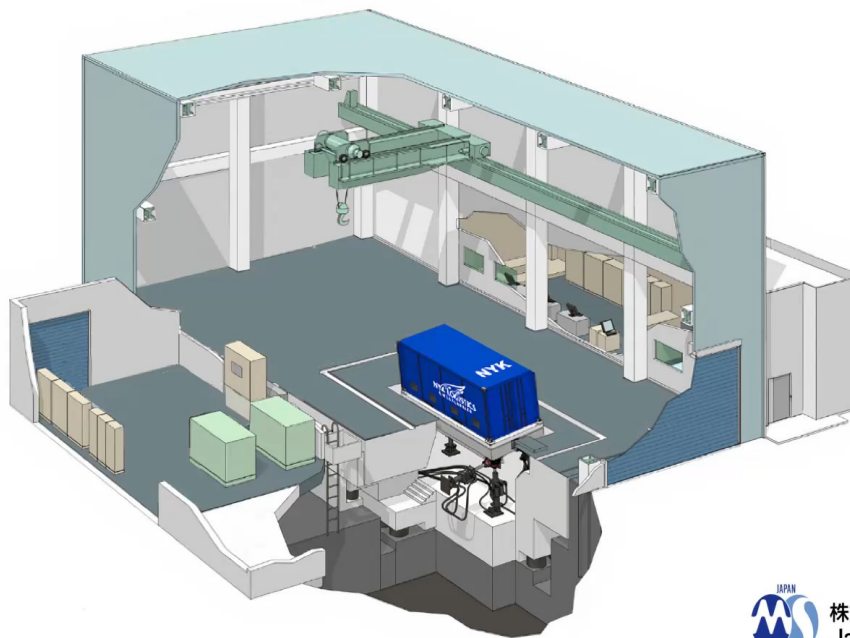
③貨物挙動シミュレーション 模型試験

- 1/6スケールのコンテナ模型を11個作成
- ラッシングブリッジ、ラッシングロッド等、できるだけ実際に近い状況を準備し、様々な加振条件でラッシングロッドにかかる張力等の計測を実施

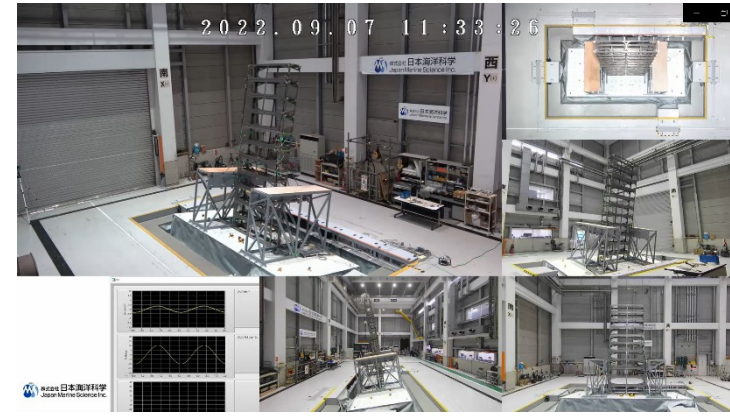
作成したコンテナ模型



株式会社日本海洋科学所有の振動台にて加振試験を実施



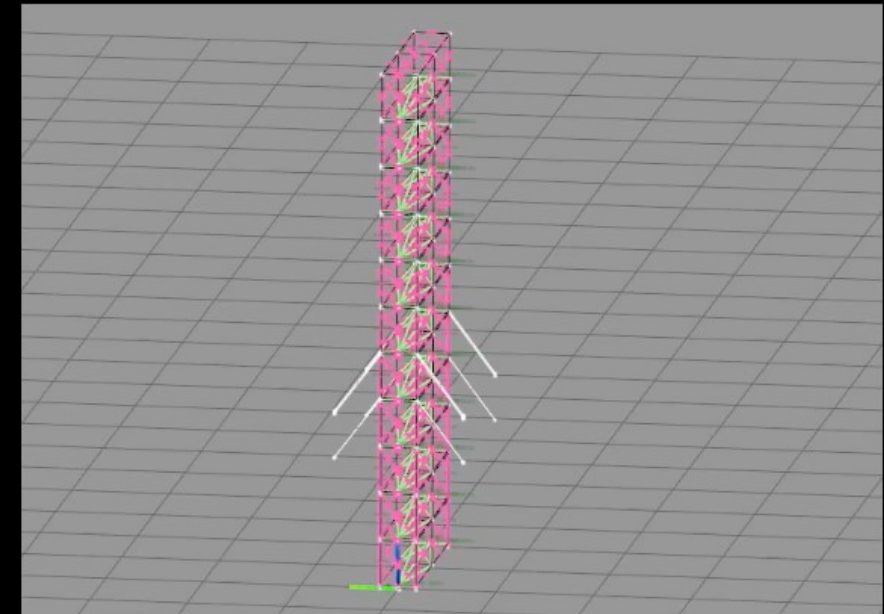
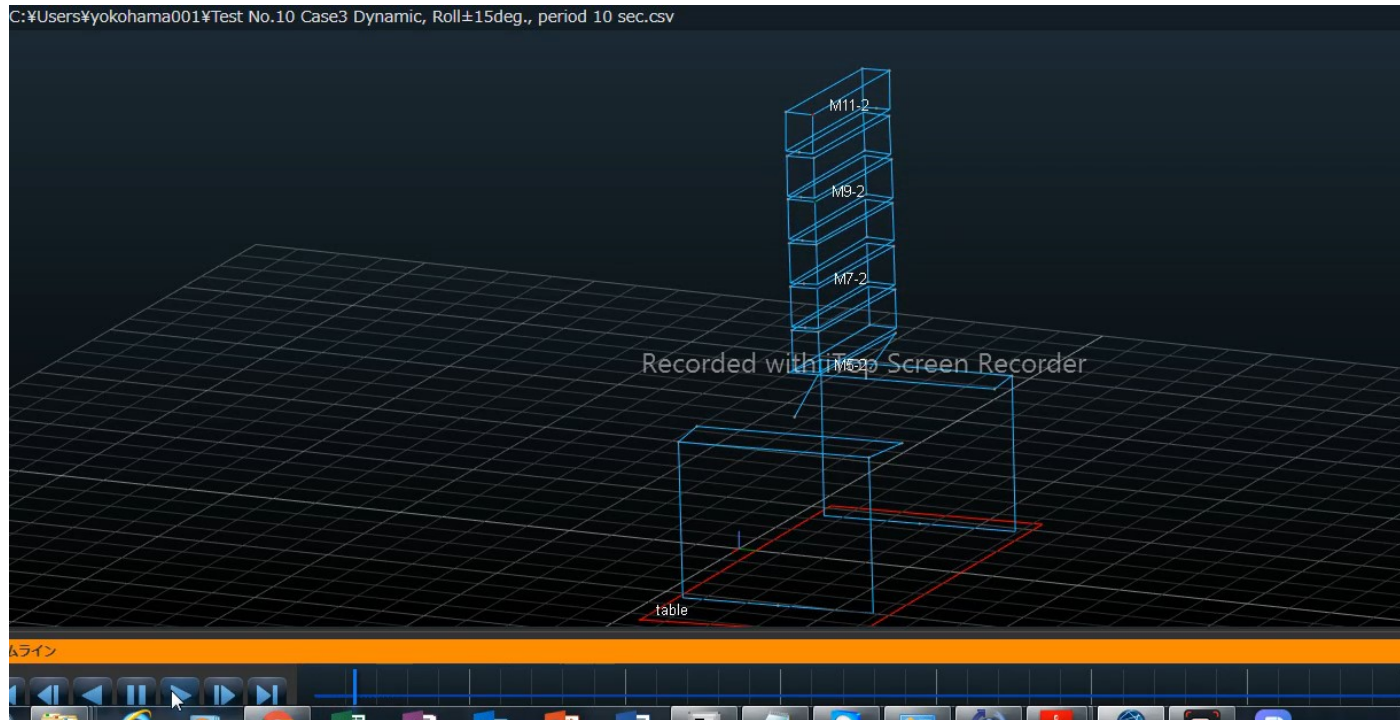
③貨物挙動シミュレーション データ計測



モーションキャプチャ、ひずみゲージ、LVDT(ラッキング変形量計測のための変位センサ)

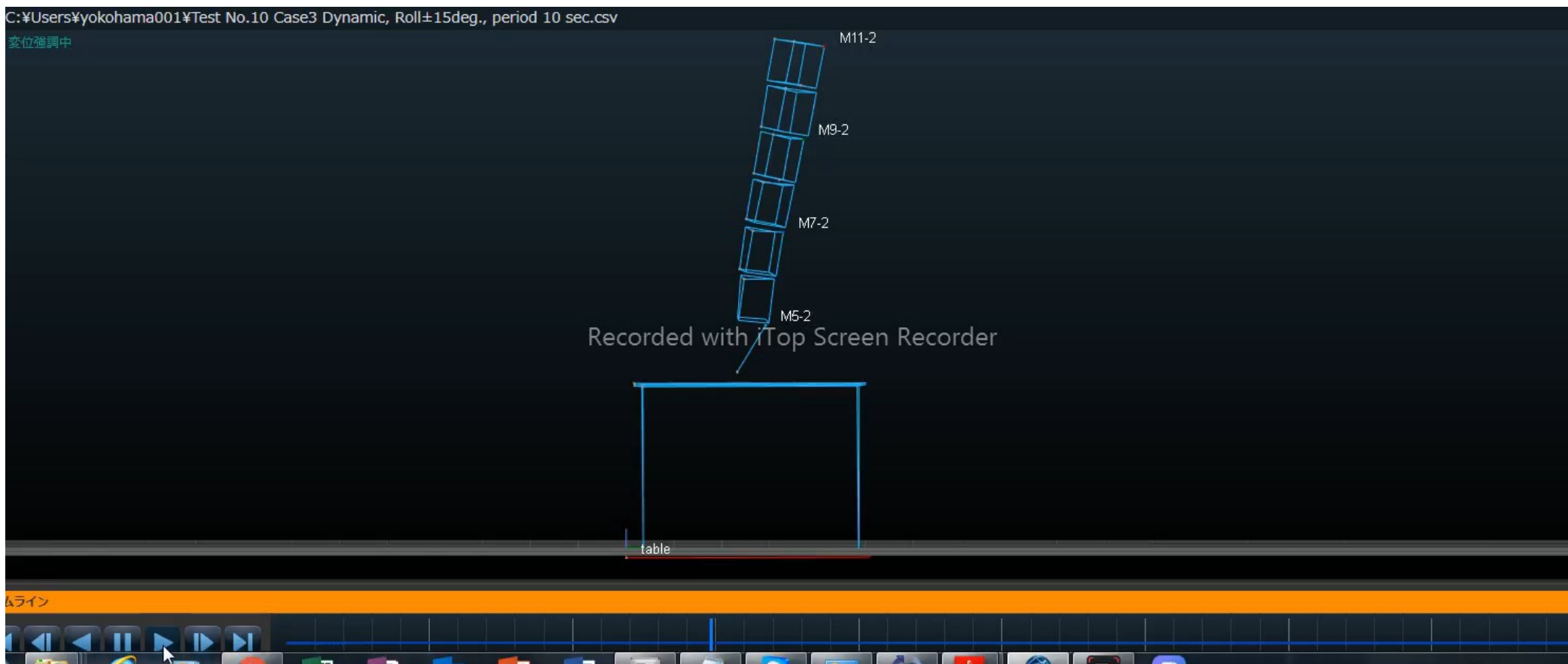
③貨物拳動シミュレーション 拳動比較

- 模型試験(モーショキャプチャ)とシミュレーションの比較



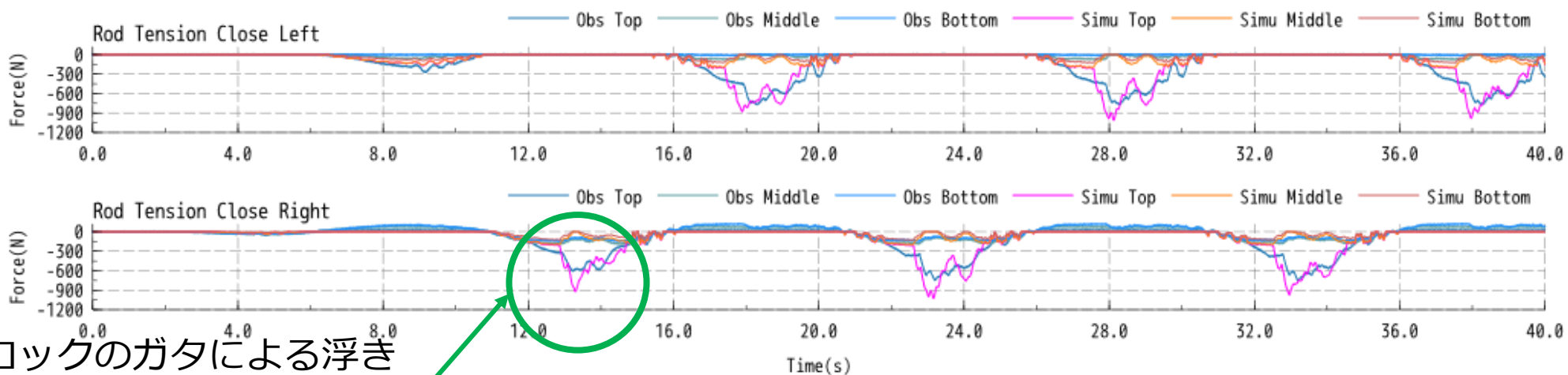
③ 貨物挙動シミュレーション モーションキャプチャ

- 相対変位を10倍に誇張して表示
- コンテナの浮き上がりや剛性差によるねじれが確認できる

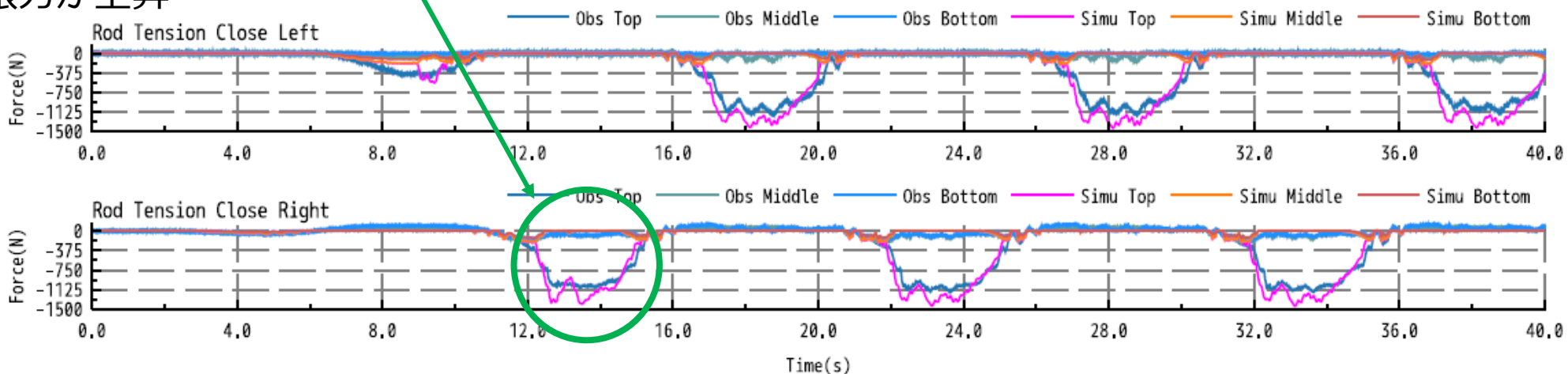


③貨物挙動シミュレーション 数値の比較

- ラッシングロッド張力の比較(上:Roll=10度、下:Roll=15度、周期10秒)

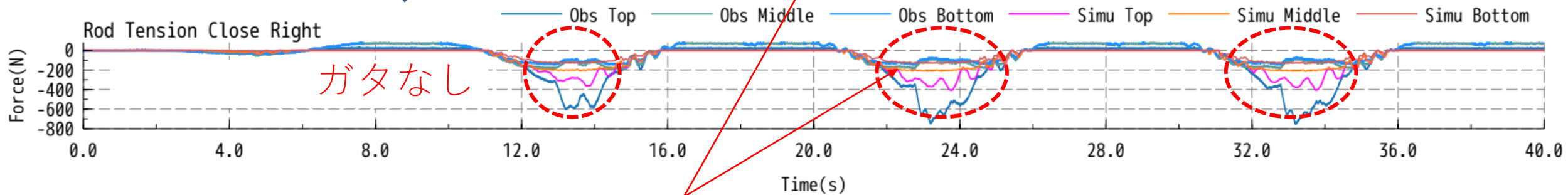
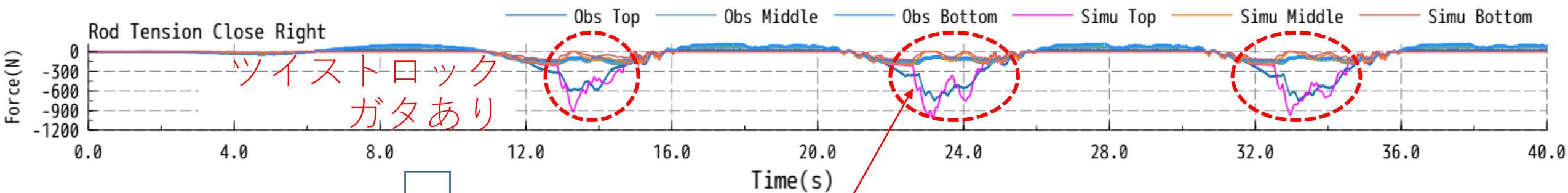


ツイストロックのガタによる浮き
上がりで張力が上昇



③貨物挙動シミュレーション 物理現象の把握

- シミュレーションモデルのツイストロックのガタを無くすと、計測結果と大きく乖離することを確認 => モデルに反映させるべき物理要素



ガタを無くすと張力の急上昇が無くなる

概要

- 背景
- 波浪と動揺の計測
- 荒天中の船体運動予測
- 貨物拳動シミュレーション
- **まとめ**

まとめ

- 波浪・動揺・貨物拳動の正確な把握が安全運航には重要
 - 波浪の正確な把握のために波浪レーダーを活用
 - SIMSによる動揺計測
 - 模型試験も活用
- 動揺予測を活用することで安全運航を支援
 - パラメトリックロールによる動揺推定(時間領域での計算)
- TopTier JIPを通じて、業界全体に貢献
 - コンテナスタックシミュレーションと模型試験
- 今後も計測とシミュレーションを組み合わせ、さらなる安全運航の実現、輸送品質向上に取り組む

ご清聴どうもありがとうございました。