

# 大型コンテナ船の実船計測に関する研究開発

概要版

日本シップヤード株式会社  
設計本部 基本設計部 構造G

- 本研究開発は、一般財団法人日本海事協会、日本郵船株式会社、株式会社MTI、日本シップヤード株式会社との共同研究体制により研究を行うとともに、「業界要望による共同研究スキーム」より同協会の研究支援を受けております。

## 1. 成果概要

## 2. 背景・目的

## 3. 実施項目、実施体制

- 大型コンテナ船の実海域での構造応答データの取得
- 遭遇海象と波浪中垂直縦曲げ応力の相関
- 実海域での構造応答の推定手法の構築

## 4. まとめ

# 大型コンテナ船の実船計測に関する研究開発 概要

**目標**

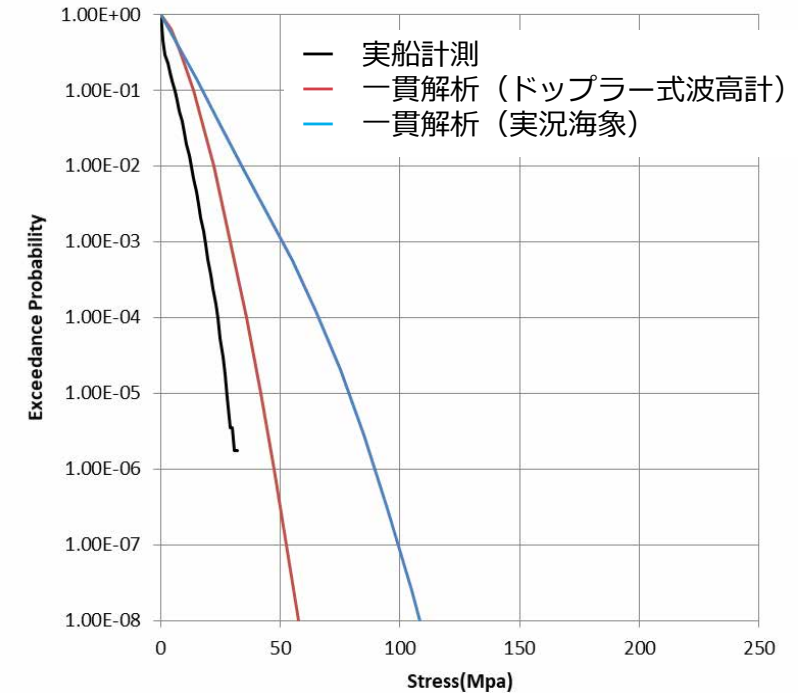
- 安全運航のための操船判断支援
- 設計手法の妥当性検証

**本研究の目的**

- 設計値と実海域での変動応力値の差を把握すること
- その実現のために必須技術である「実海域での構造応答の推定手法」を確立すること

**スケジュール**

実施項目	2016	2017	2018	2019	2020
計測準備工事	→				
実船計測データの収集		→	→	→	→
実船計測データの整理、分析			→	→	→
実海域での構造応答の推定手法の確立		→	→	→	→
		手法の検討		検証	



**成果概要**

実船計測より求めた構造応答を正解値とし、「実海域での構造応答の推定手法」の検証を実施し、以下の知見を得た。

- 実況海象より求めた構造応答は、ドップラー式波高計より求めたもの、実船計測結果より高めの結果となった。
- 本手法は正確な遭遇海象をインプットすれば、船体の波浪変動応力の正確な推定が可能であることを確認した。

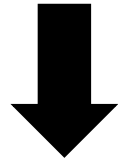
# 補足 : 実況海象の定義

- 事後分析のため、HINDCASTの代替として「実況海象」を用いる。

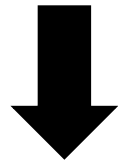


- ・ **実況海象**とは発表時刻および6時間先の予報値を連続的に並べたもの。
- ・ 1時間間隔のデータとするために、時間および船の移動に対して補正を行う。
  - 0時～6時、12時～18時のときは ●と●で時空間補正
  - 6時～12時、18時～0時のときは ●と●で時空間補正

- コンテナ船の大型化が急速に進展する中、2000年以降に大型コンテナ船の船体折損事故が発生し、大型コンテナ船への航海中の船体構造応答を把握する必要性や安全運航への機運の高まり



- 当時最大級のコンテナ船（14,000TEUコンテナ船）に船体構造ヘルスマニタリングシステム（HMS）が搭載された。ただし、センサー数が5点と少なく、船体全体の構造応答を把握するには不十分



- 船体全体の構造応答を把握する手法が求められる

### ■上位の目標

- 安全運航のための操船判断支援
- 設計手法の妥当性検証

### ■本研究の目的

- 目標達成の必須技術である「実海域での船体全体の構造応答の推定手法」を構築する

### ■実施項目

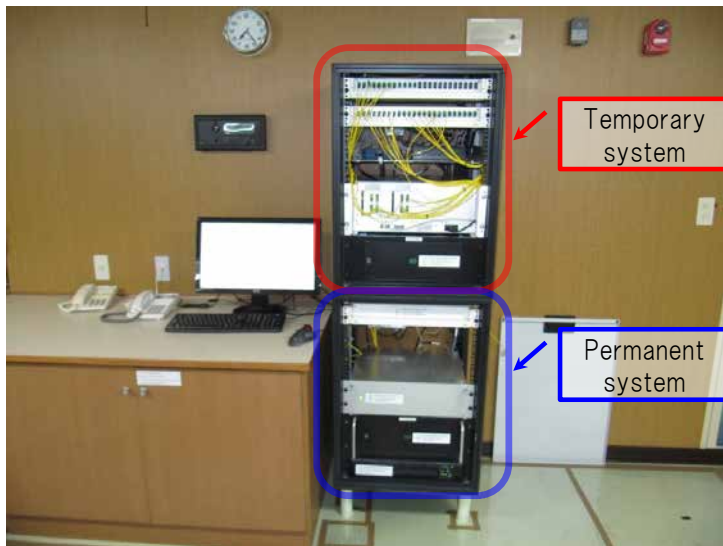
- 実船での大幅に計測点を増やした計測
- シミュレーションでの推定手法構築

- 日本海事協会 : データ評価
- 日本郵船株式会社、株式会社MTI : 機器設置と計測の協力、  
本船運航データの提供
- 日本シッパード株式会社 : 機器設置、実船データ収集、  
データ評価、推定手法の構築



# 大型コンテナ船の実海域での構造応答データの取得

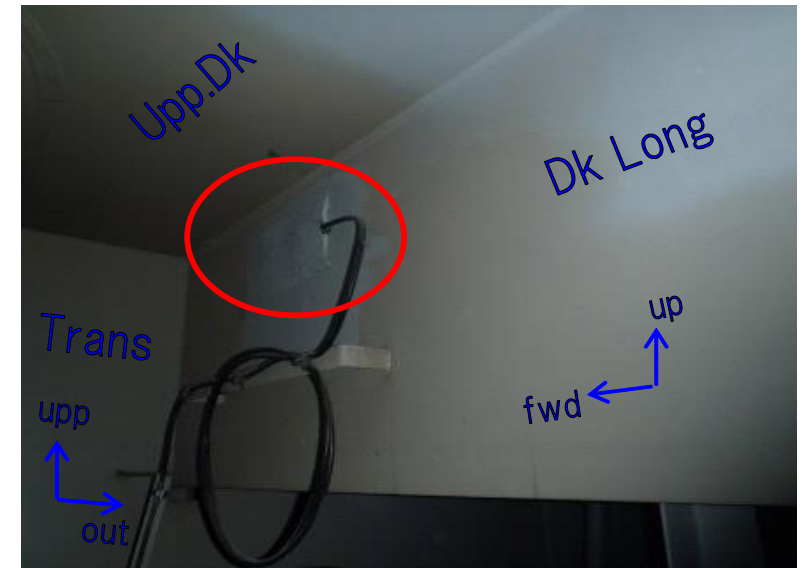
- 対象船 : ONE FALCON
- 計測システム : Light Structure社のHMS system
- 計測期間 : 2017年7月～2021年3月



計測機



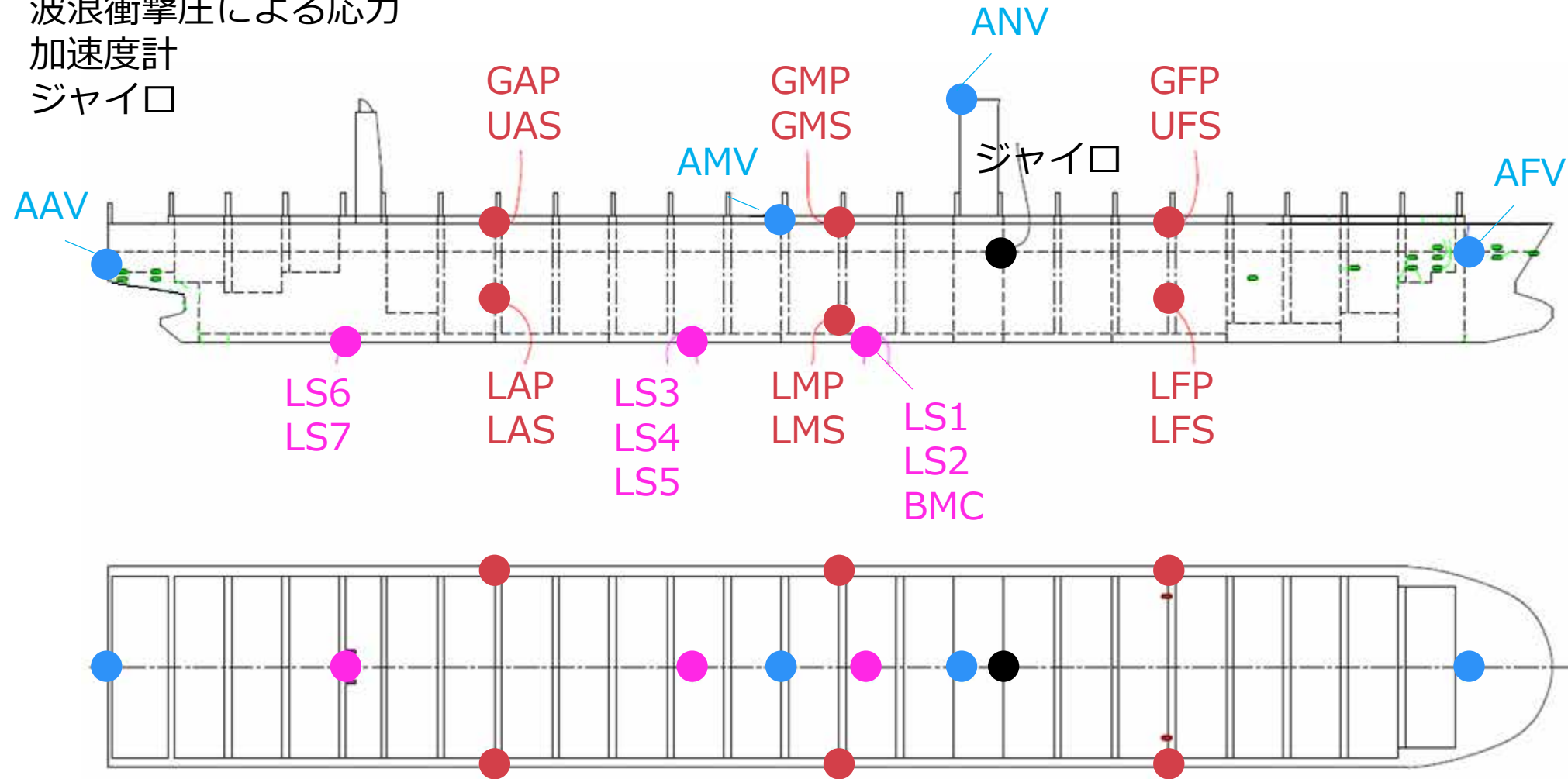
FBG STRAIN SENSOR (1軸)



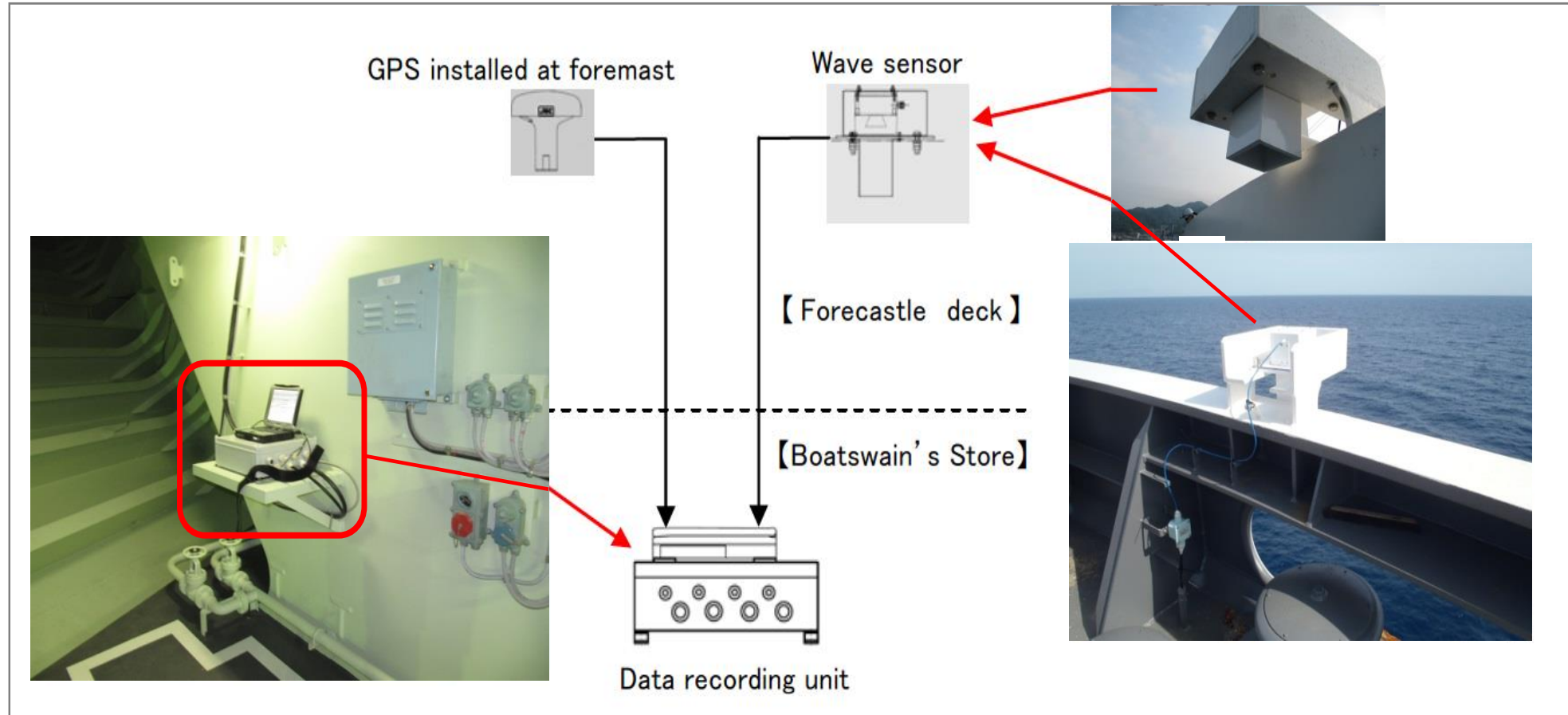
センサ設置例

# センサー配置とセンサー名

- ハルガードー応力
- 二重底曲げ応力（ハルガードー応力含む）
- 波浪衝撃圧による応力
- 加速度計
- ジャイロ



## ■ ドップラー式波高計を船首Upper deckのブルワークに設置

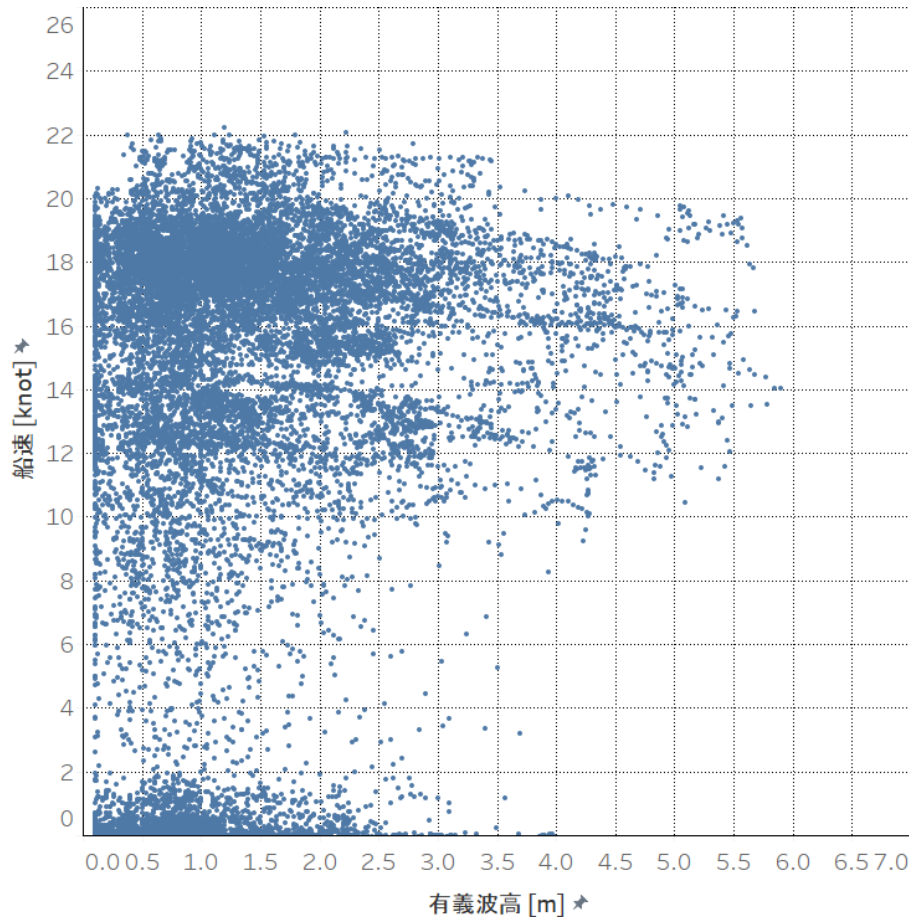


- 計測データを分析していくにあたり、時系列データのまま取り扱うよりも統計量として取り扱う方が便利である。そこで、1時間あたりの統計量へ変換した。この処理を「1次処理」と呼ぶこととする。以降のデータ分析には1次処理データを用いた。
- 1次処理した統計量の一覧を下表に示す。

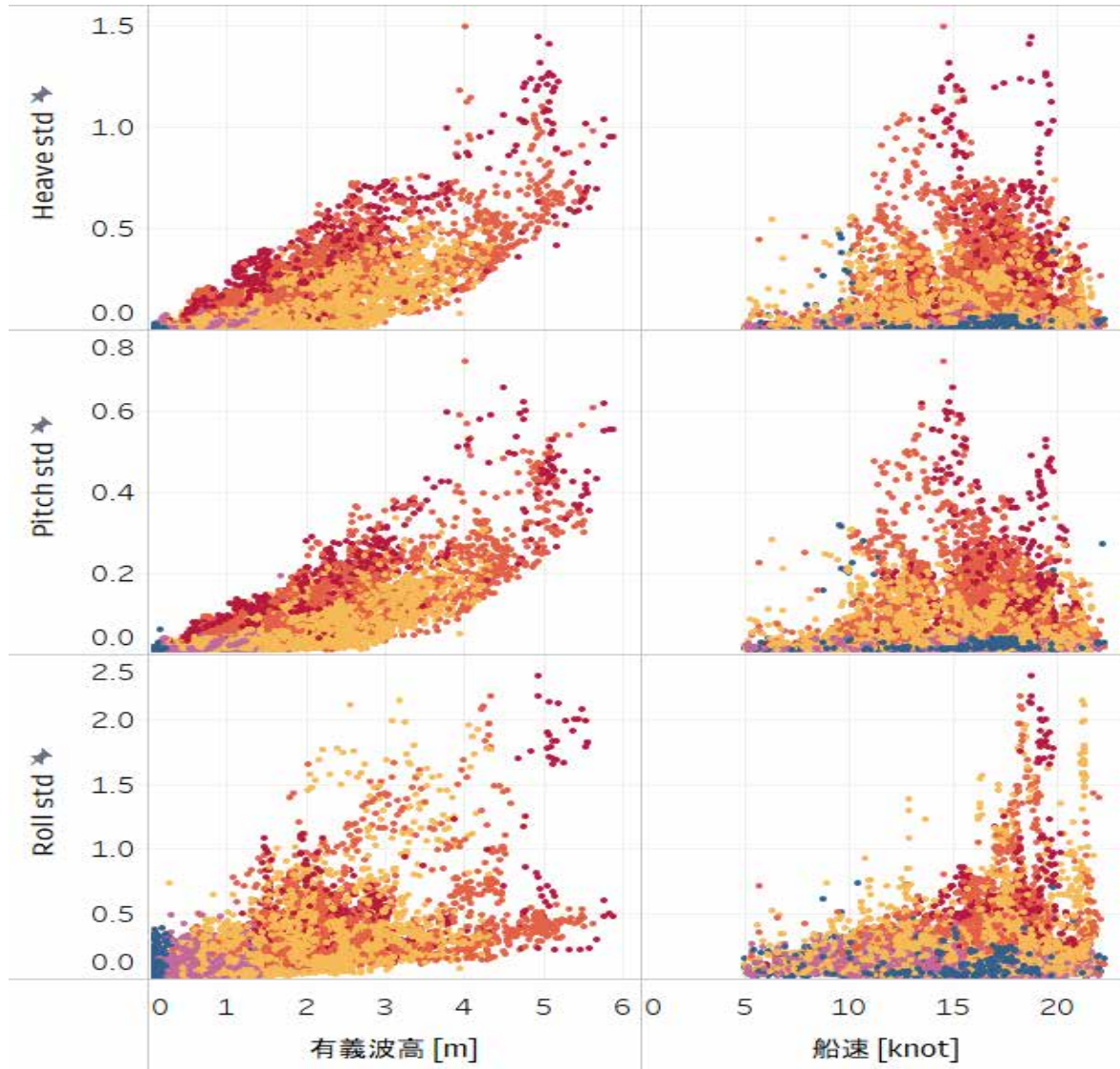
計測項目		統計量
航海情報	船速	平均値
	船位（緯度・経度）	平均値
海象	ドップラー波高	1/3有義波高、平均波周期
船体応答	船体運動（Pitch/Heave/Roll）	標準偏差、最大値
	加速度（船首／船央／船尾／船橋）	標準偏差、最大値
	船体各部の応力	平均値、標準偏差、最大値、 1/1000期待値、応力の頻度分布

■ ドップラー式波高計で計測した有義波高と船速の関係図を示す。

→ 有義波高4m超過時は20kt以下で航行していたことが見て取れる。



# 計測データ分析の一例 : 船体運動



- 波周期 0 ~ 3秒
- 波周期 3 ~ 6秒
- 波周期 6 ~ 9秒
- 波周期 9 ~ 12秒
- 波周期 12 ~ 15秒

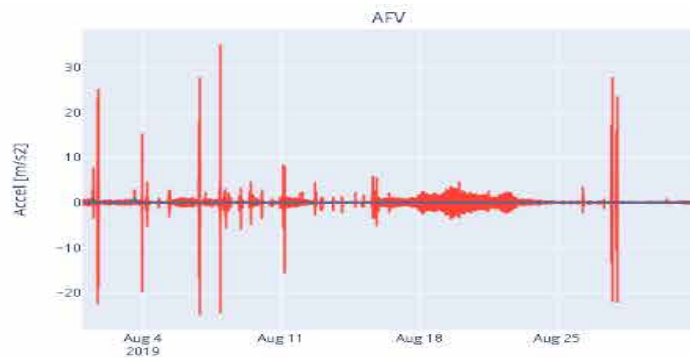
- 船体運動と波高との相関  
Heave、Pitchは波高が大きくなるに従い、上昇。  
波周期11秒で最大値が生じていた。

Rollは明確な相関がみられない。  
波周期14秒で最大値が生じていた。

- 船体運動と船速との相関  
明確な相関がみられない。

■ すべては掲載できないので、代表的なものについてのみ示す。

- 船首加速度計 (AFV) と船体応力 (GMP、GMS、GAP、GFP、BMC)
- 青線が1時間あたりの平均値、赤線が最大・最小値である。





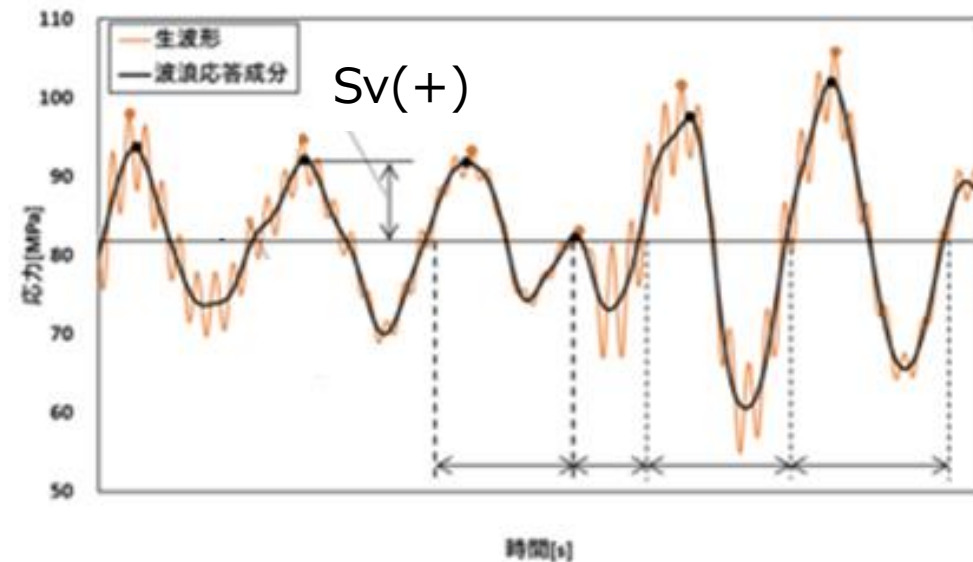
# 遭遇海象と波浪中垂直縦曲げ応力の相関

1. Svの時系列データに対して、0.01Hz以下の低周波および0.3Hz以上の高周波をフィルタリングで除去する。
2. 1時間の平均値がゼロとなるようにオフセットする。
3. ゼロアップクロス法によりゼロクロッシング周期を求め、各周期において片振幅極値をカウントする。この時、+側をSv(+)、-側をSv(-)とする。

注)

ここでSvは以下の式で求めた。垂直縦曲げ成分と軸応力成分の合力となるが、軸応力は小さいと仮定した。

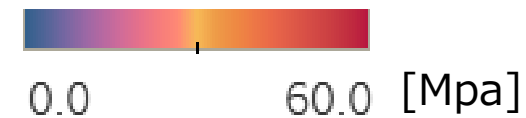
$$S_v = \frac{\text{GMPの応力値} + \text{GMSの応力値}}{2}$$



# 遭遇海象と波浪中垂直縦曲げ応力の相関

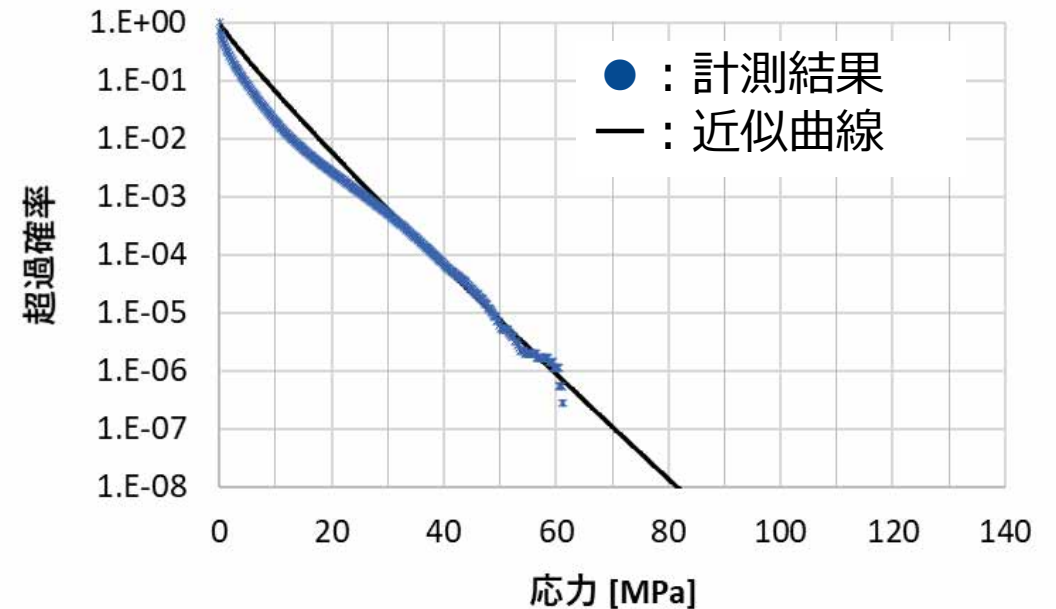
- 海象との相関を把握するため、有義波高と相対波向きごとに波浪中垂直縦曲げ応力 $S_v$ を整理した。
- 有義波高と相対波向きは、実況海象を用いた。船速5kt以下のデータは除外した。
- 一例として、向波での結果を示す。有義波高が大きいほど $S_v$ が大きくなる傾向が見て取れる。

波周期	有義波高					
	0~1m	1~2m	2~3m	3~4m	4~5m	5~6m
3~4s	5.8					
4~5s	6.7	4.3				
5~6s	3.7	8.2				
6~7s	3.8	10.2	11.2			
7~8s	9.4	11.4	20.1	22.2		
8~9s	7.1	18.2	22.2	39.9	36.0	
9~10s	6.0	19.5	24.3	43.7	63.8	54.6
10~11s	7.6	14.1	26.4	26.3	56.2	50.9
11~12s	2.2	18.0	28.5	31.6	56.8	58.4
12~13s	3.3	24.6	32.4	45.1	41.2	57.9
13~14s	3.9	24.5	26.6	43.0	53.2	
14~15s	2.7					



※各カテゴリーでの片振幅最大値を表示

- Svの超過確率を求めて長期予測を行った。
- 計測データをワイブルフィッティングして、近似曲線を作図し、この曲線からSvの超過確率が $10^{-6}$ 、 $10^{-8}$ レベルとなる応力を求めた。
  - 超過確率 $10^{-6}$ レベルの応力は約60MPa
  - 超過確率 $10^{-8}$ レベルの応力は約80MPa



- 計測点における断面性能を用いて波浪中垂直縦曲げモーメントを算出した。この結果、IACS UR S11Aに対する計測結果の比は0.71である。

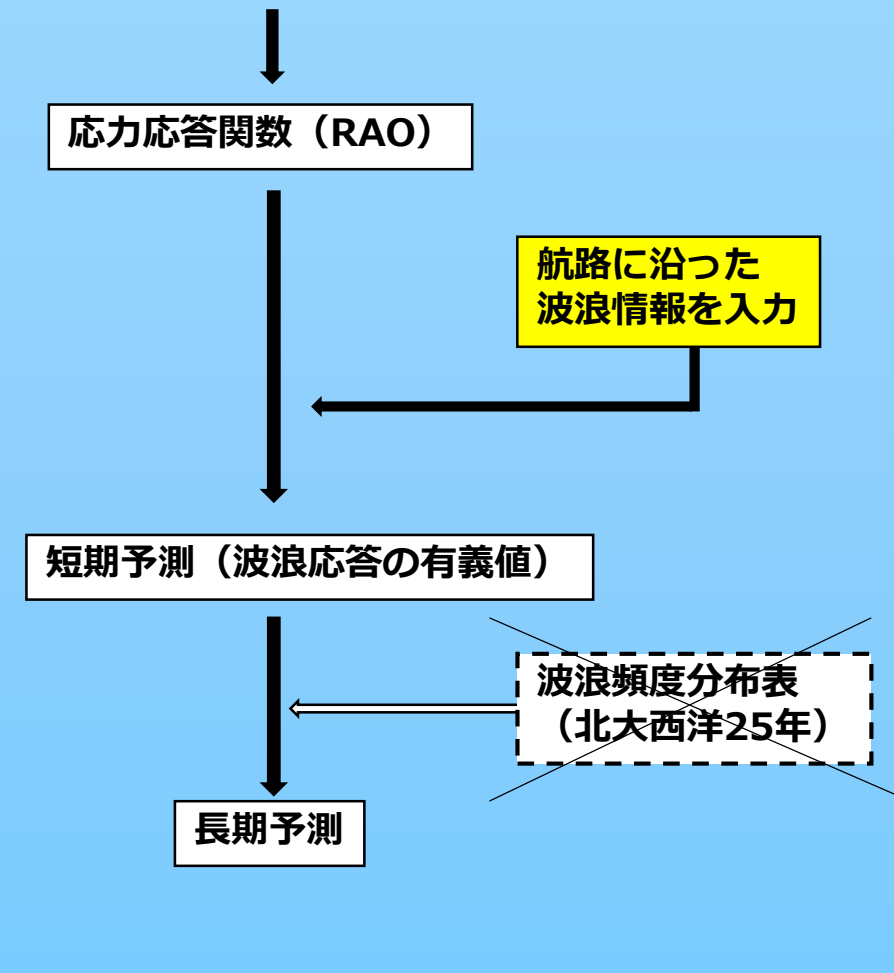
波浪中垂直縦曲げモーメント (kN-m)		比率 ②/①
規則 (IACS UR S11A) ベース ①	実船計測 $10^{-8}$ ベース ②	
$8.6 \times 10^6$	$6.1 \times 10^6$	0.71

- 本検討で対象とした計測期間、海域においては、IACS UR S11Aで規定された波浪中垂直縦曲げモーメントを超過していないことを確認した。

- 注記：本研究期間内ではアジア-北米航路3.5往復分の限られた海域および期間のデータしか得られていない。

# 実海域での構造応答の推定手法の構築

## 荷重構造応答一貫解析システム



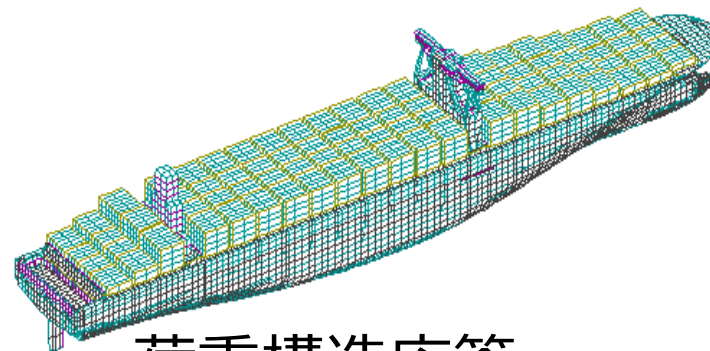
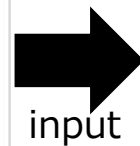
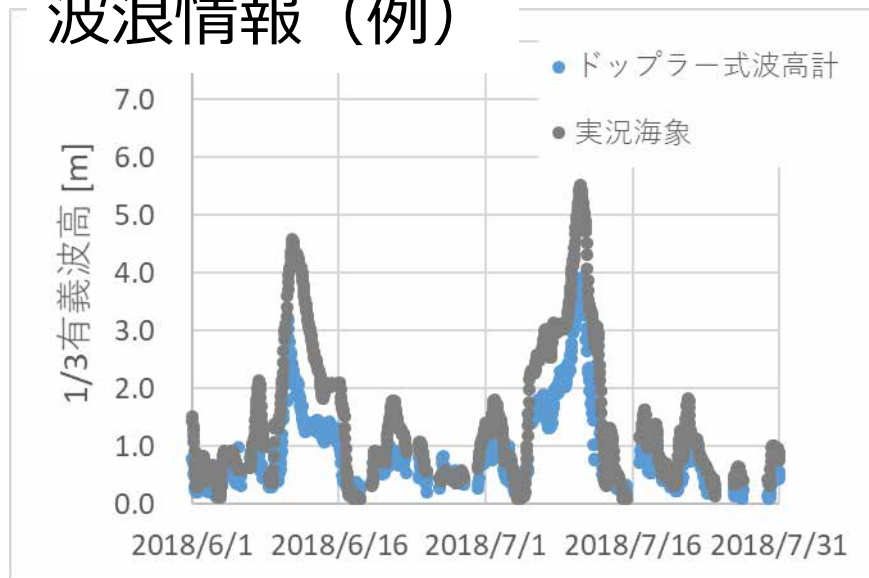
- 解析システムはジャパン マリンユナイテッド株式会社で開発したものを使用
- 通常、北大西洋25年の波浪頻度分布表を用いて長期予測を行う。
- 本研究では、上記システムに航路に沿った波浪情報をインプットとして、応力評価できるようにシステムを拡張

■ 下記の2種類の波浪情報をインプットに用い、運航履歴にそったそれぞれの応力推定、長期予測を行い、その結果と実船計測結果を比較・精度検証を実施した。

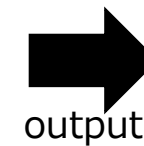
- 実況海象（有義波高、平均波周期、波向き）
- ドップラー式波高計による実船計測値（有義波高、平均波周期 ※）

※波向きは計測できないため、長期予測の際はAll Headingと仮定した。

## 波浪情報（例）



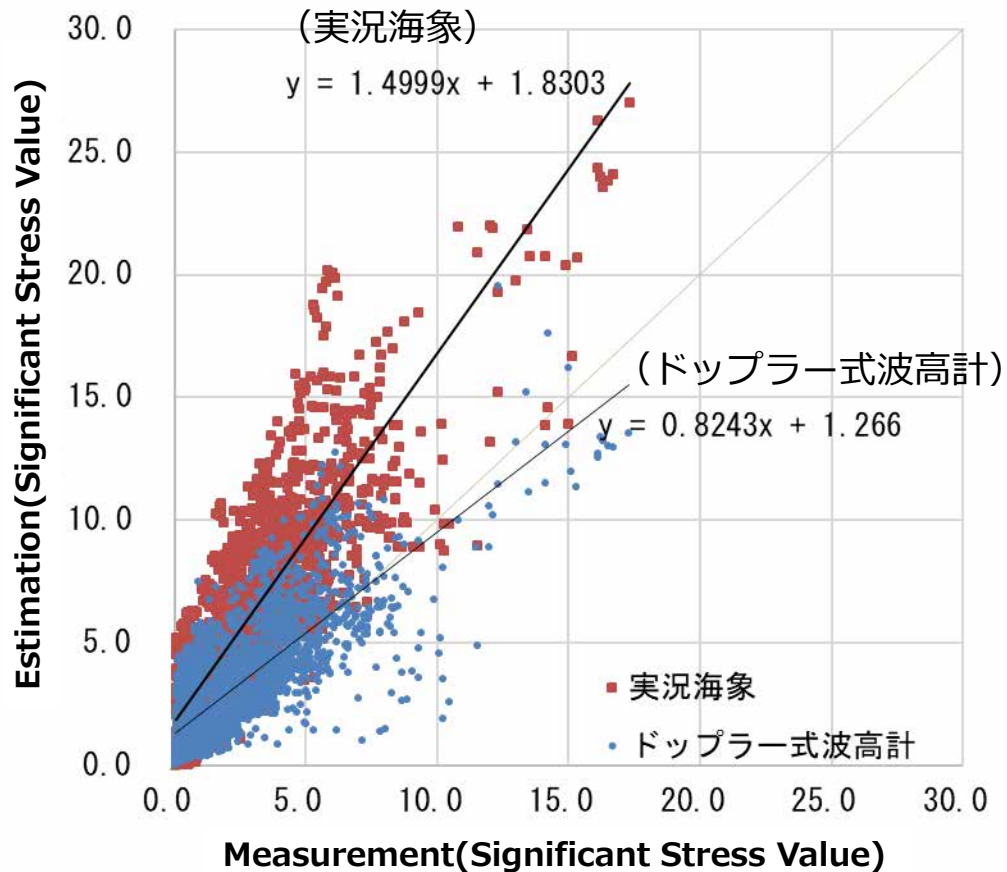
荷重構造応答  
一貫解析システム



運航履歴にそった  
応力（統計値）

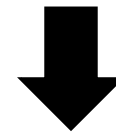


- 船速 : 17.7kt
- 波長船長比 : 0.1~5.0
- 波向き : 0°~330°の範囲を15°刻み
- 積付け : 満載（喫水15.71m）
- 短期予測
  - 波スペクトル : Modified Pierson-Moskowitz型を使用
  - 方向性分布 :  $\cos^2(\chi)$ で近似 ( $-\pi/2 < \chi < \pi/2$ ) ,  $\chi$ は波向き

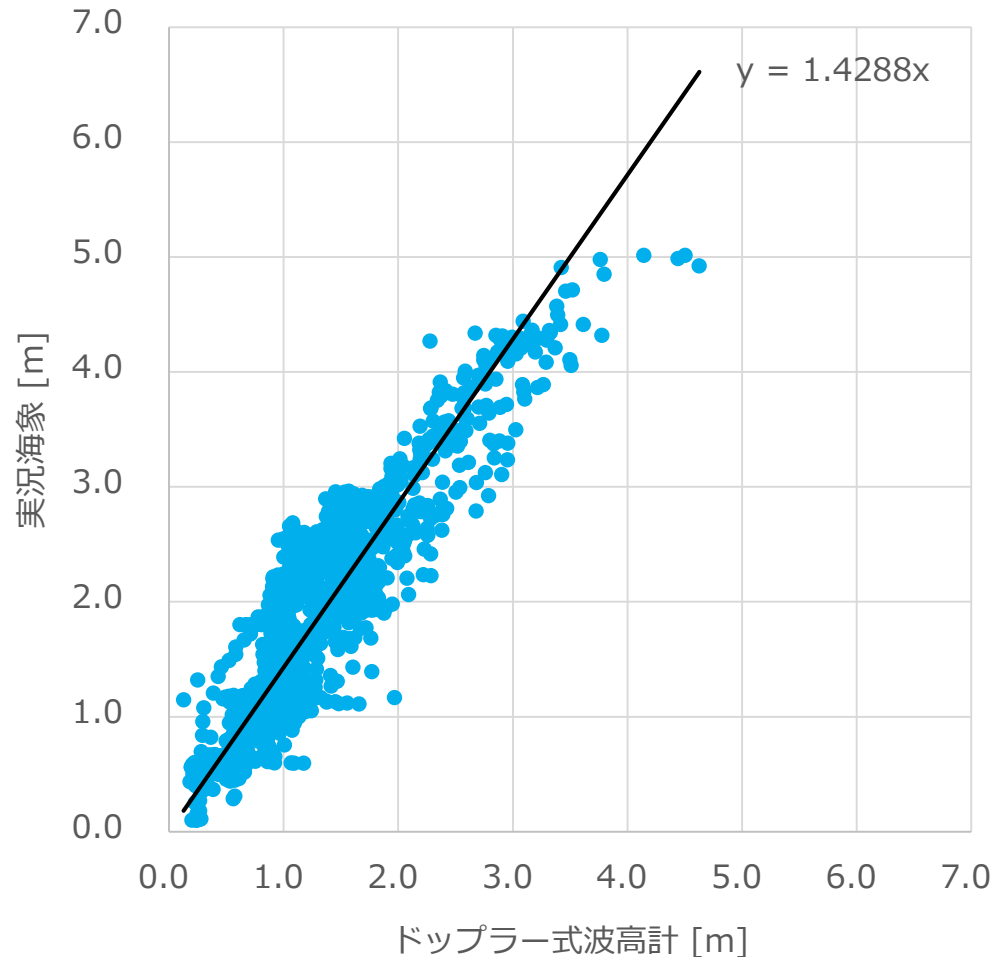


解析と実船計測結果の相関（計測点：GMP）

- 1時間海象中の応力の有義値に関し、解析結果と実船計測結果の相関図を示す。最小二乗法による回帰式も図示した。



- 実況海象を用いた場合、実船計測結果に対し、約1.5倍高めの推定結果であった。
- ドップラー式波高計で得られた波浪データを用いた場合、実況海象の結果よりも実船計測結果との相関が高い。



- 遭遇した有義波高について、ドップラー式波高計と実況海象の相関を整理した。
  - ドップラー式波高計での計測値に対し、実況海象の方が約1.4倍高めの傾向にあることが確認できる。
- ↓
- 応力推定値に差が生じた要因として、遭遇した有義波高の差異の影響が大きいことを確認できた。正確に推定することが重要であることが示唆される。

## (1) 大型コンテナ船の実船計測データの取得

- 得られた時系列データを統計値に変換して、解析結果と比較できるようにした。
- 垂直縦曲げ応力の長期予測結果および遭遇海象との関係を整理し、本検討で対象とした計測期間、海域においては、IACS UR S11Aで規定された波浪中垂直縦曲げモーメントを超過していないことを確認した。

## (2) 荷重構造一貫解析手法による実海域の波浪変動応力の推定

- ドップラー式波高計の海象データを用いた解析結果と実船計測結果の一致度は高い。
- 実況海象を用いた解析結果は実船計測結果に対して高めの傾向である。
- 応力推定精度に対し、遭遇した有義波高の頻度を正確に推定することが重要であることが確認できた。

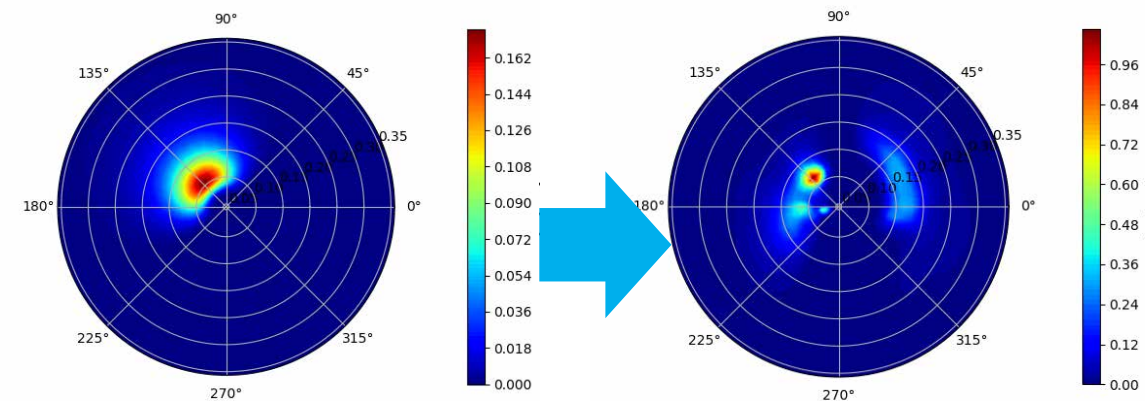
■ 応力推定を高度化するには、波浪情報の高度化が必要である。とくに正確な波スペクトルを求めることが必要である。

- 現状

- ドップラー式波高計は、正確な波向きが計測できない
- 実況海象は、正確な波スペクトルを取得できない。

■ その解決策として、以下の方法により、波スペクトルの情報を取得、併用して推定精度を向上していくことが挙げられる。

- 波浪レーダーによる観測
- Hindcast
- 船体運動・船体応力からの波浪逆推定



現状：波スペクトルを Pierson-Moskovitzの式で近似

方向波スペクトルの例 (HINDCAST)

- 応力推定のさらなる精度向上、解析誤差要因のさらなる分析検証
  - 用いる海象による精度差の検証
  - 船速、積付け影響 等
- 数日先の航海域における、有義波高の高精度な頻度分布推定法の検討
- 非計測箇所に応力評価方法の検討