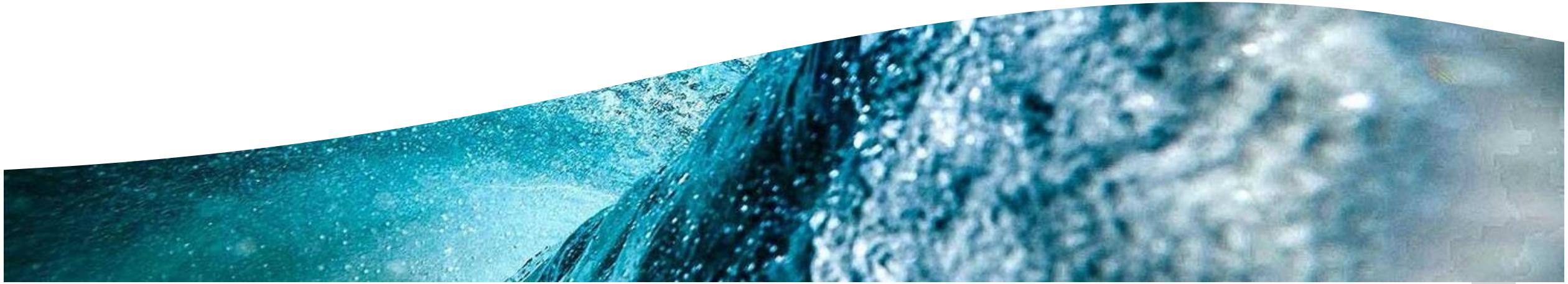
8,600TEUコンテナ船の長期・短期予測

大阪大学大学院工学研究科　地球総合工学専攻　船舶海洋工学部門
大沢直樹

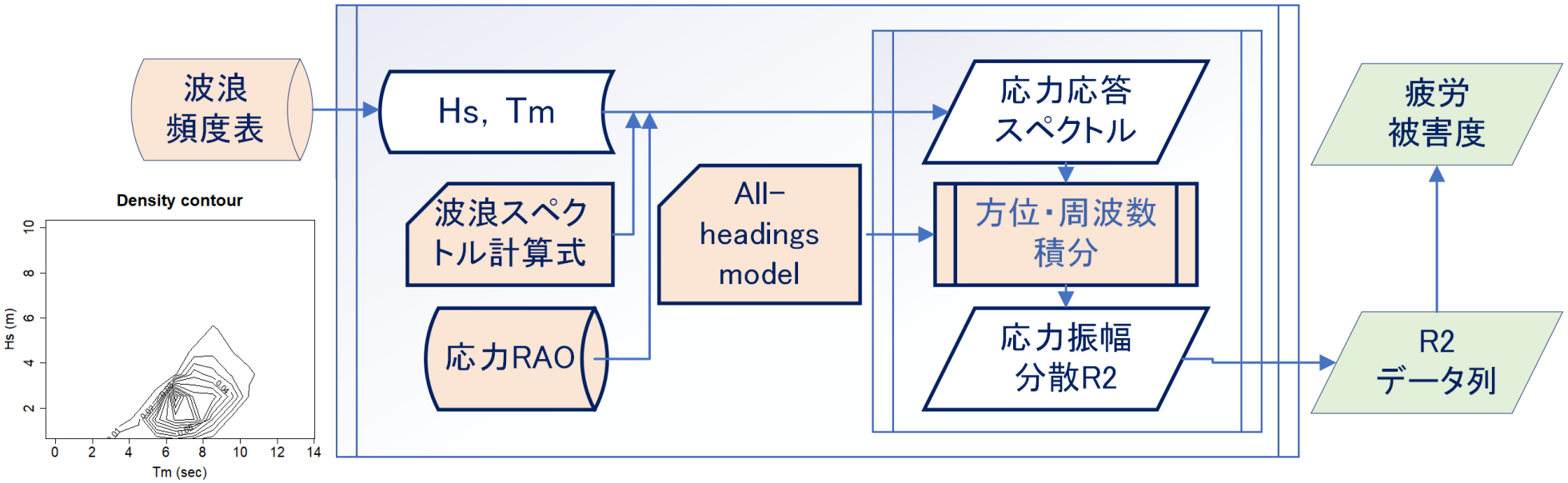


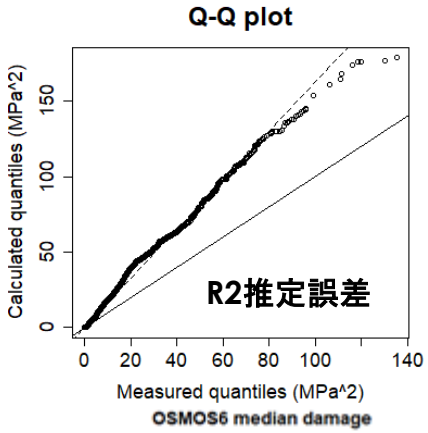
長期予測

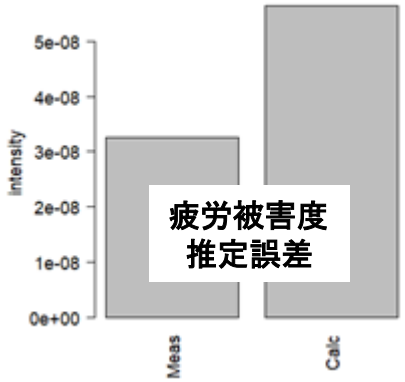
船体全体の疲労被害度の長期予測

疲労長期予測：線形理論

- 線形R2推算手続き（応力長期予測，Fukuda method）
- 誤差要因（除船体弾性振動）：非線形効果，波浪頻度表，波浪スペクトル式，RAO，方位角モデル，数値積分
- AIS情報により実遭遇海象列を与えても正しい被害度推定はできない；将来の遭遇波浪頻度の予想は困難.
- 計測疲労被害度の時系列解析しかできない；非計測箇所の推定は困難

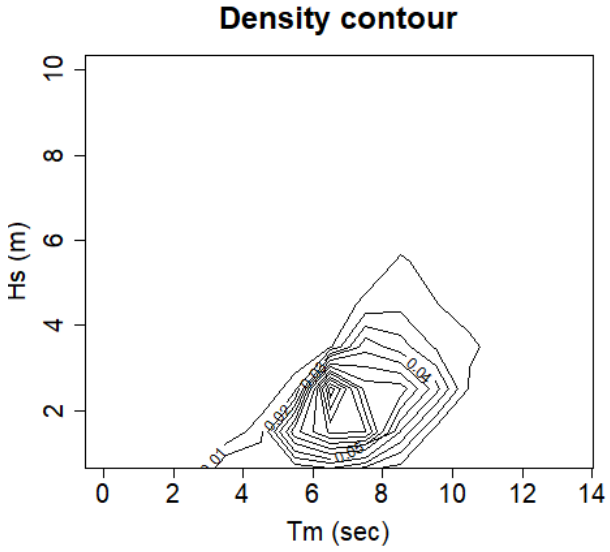






疲労長期予測のためのデータ同化

- R2推算手続き内部のデータ同化は困難．推算手続きをブラックボックス化（誤差・不確実性を許容）
- 波浪頻度分布の数学モデル．母数$\{m,\eta,a_0,a_1,b_1,b_2\}$＝海象パラメタ
- R2観測値データが得られる尤度が最大となる入力$\{m,\eta,a_0,a_1,b_1,b_2\}$をベイズ推定（データ同化）
- $\{m,\eta,a_0,a_1,b_1,b_2\}$から得られる“等価波浪頻度分布”（実遭遇頻度分布とは一致しない．単なるフェアリングではない）



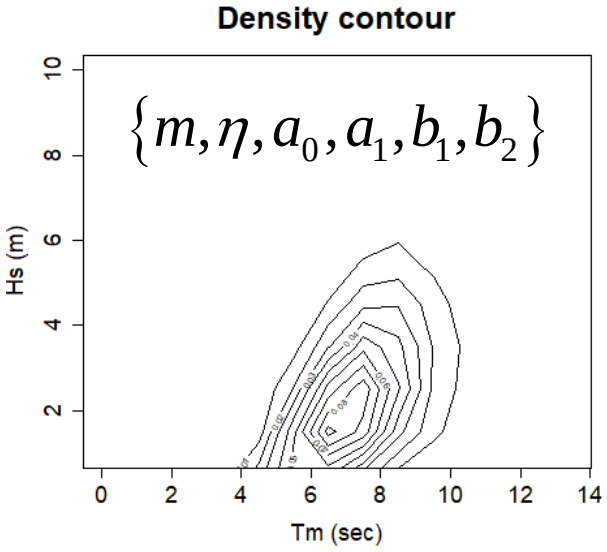
$$p(H_S,T_m)=p(H_S)\,p(T_m\,|\,H_S)$$

$$F(H_S)=\mathrm{weibull}(\mathrm{shape}=m,\ \mathrm{scale}=\eta)$$

$$p(T_m\,|\,H_S)=\mathrm{weibull}(\mathrm{shape}=\alpha,\ \mathrm{scale}=\beta)$$

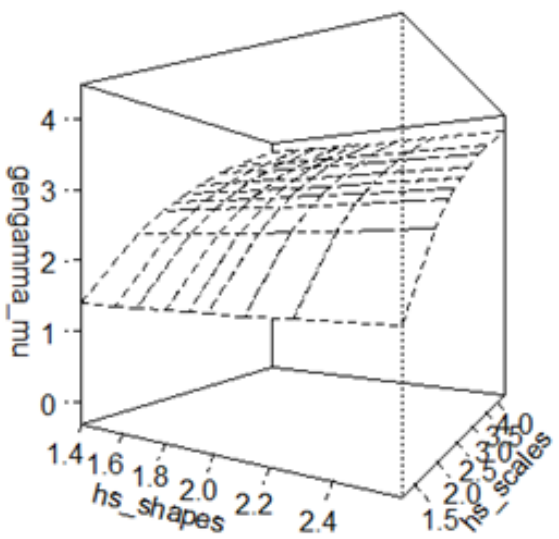
$$\alpha(H_S)=a_0+a_1H_S$$

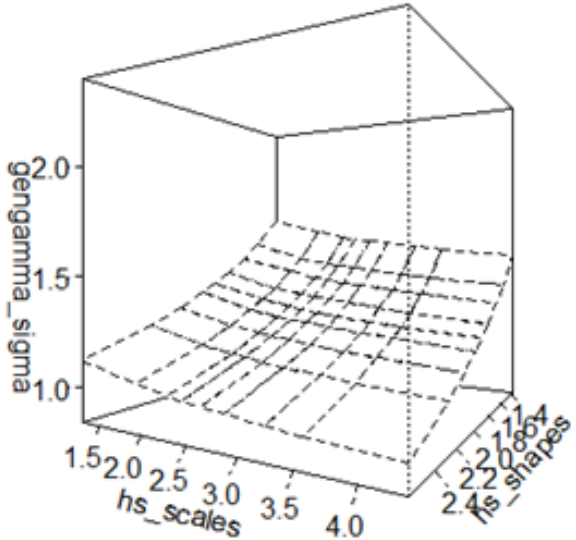
$$\ln\{\beta(H_S)\}=b_1+b_2\ln(H_S)$$

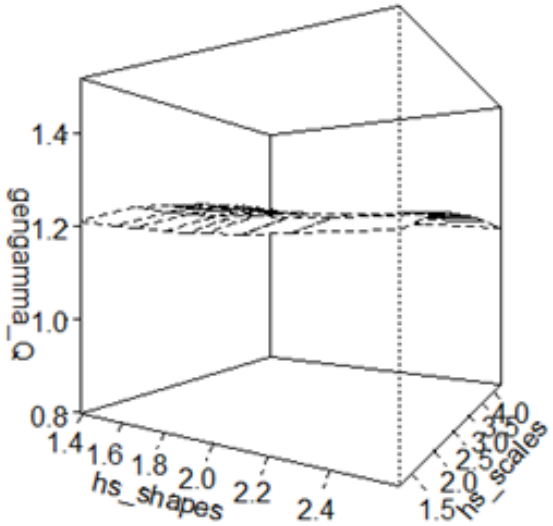


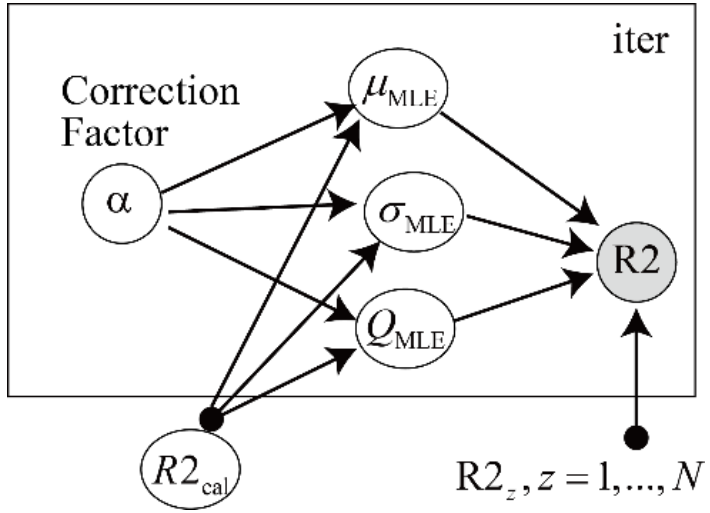
海象パラメタ～R2分布母数統計モデル

- R2発現頻度を一般化gamma分布で近似する．R2分布母数： μ, σ, Q
- GWS104海域の$\{m,\eta,a_0,a_1,b_1,b_2\}$発現範囲全域でR2推算を実施．$\{m,\eta,a_0,a_1,b_1,b_2\}$～{μ, σ, Q}データベースを構築．
- センサ毎に$\{m,\eta,a_0,a_1,b_1,b_2\}$～{μ, σ, Q}関係の回帰式（ R2統計モデル）を決定．統計モデル係数＝“システム係数”
- 実遭遇海象から計測R2発現頻度を再現するには，一定期間のモニタリング結果を用いてセンサ毎に異なるモデル化誤差修正係数αの導入が必要（入渠間隔程度のモニタリングでOK）． α：Bayes推論で決定



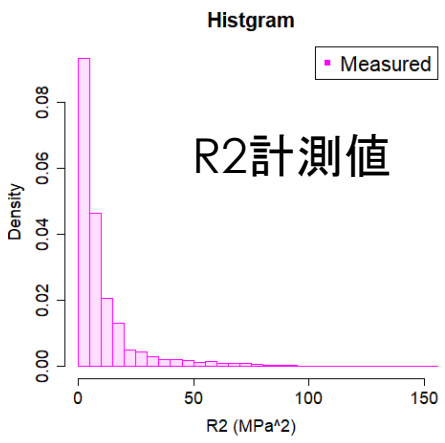


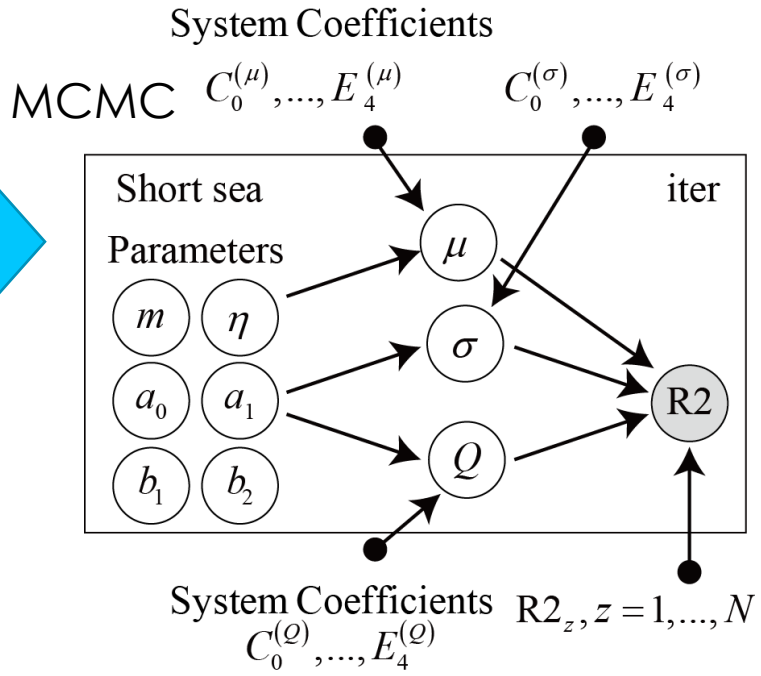


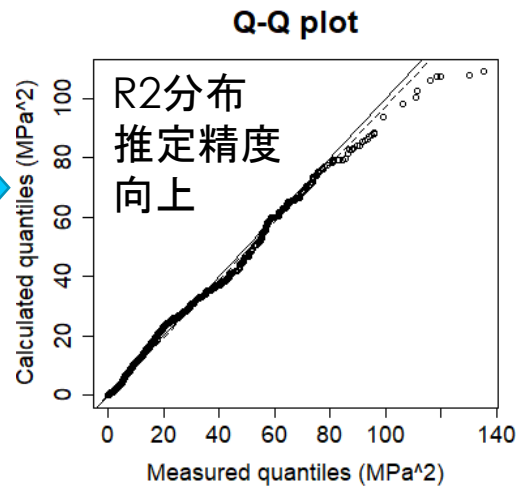


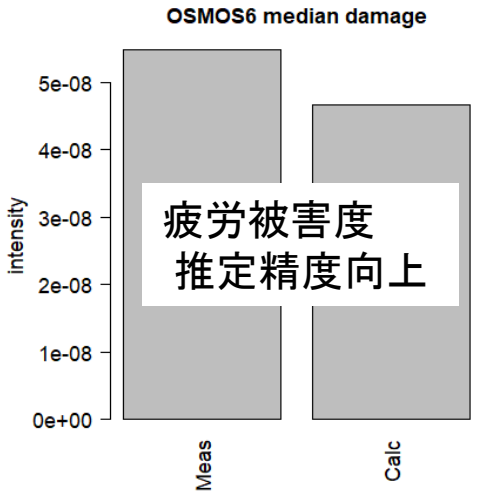
R2観測値からの海象パラメタ推定

- R2計測データ列を観測値，$\{m,\eta,a_0,a_1,b_1,b_2\}$をサンプリングするMCMC Bayes推定を実施
- $\{m,\eta,a_0,a_1,b_1,b_2\}$推定値を入力とするR2推算で計算するR2発現頻度・疲労被害度は当該センサの計測値に一致
- 少数センサで決定した$\{m,\eta,a_0,a_1,b_1,b_2\}$を入力に，他のセンサのR2発現頻度・疲労被害度が近似的に評価できる.
- 各センサのシステム係数を決定するためのモニタリング期間が終われば，少数センサのみ残せば全船の疲労被害度を高精度に評価できる.

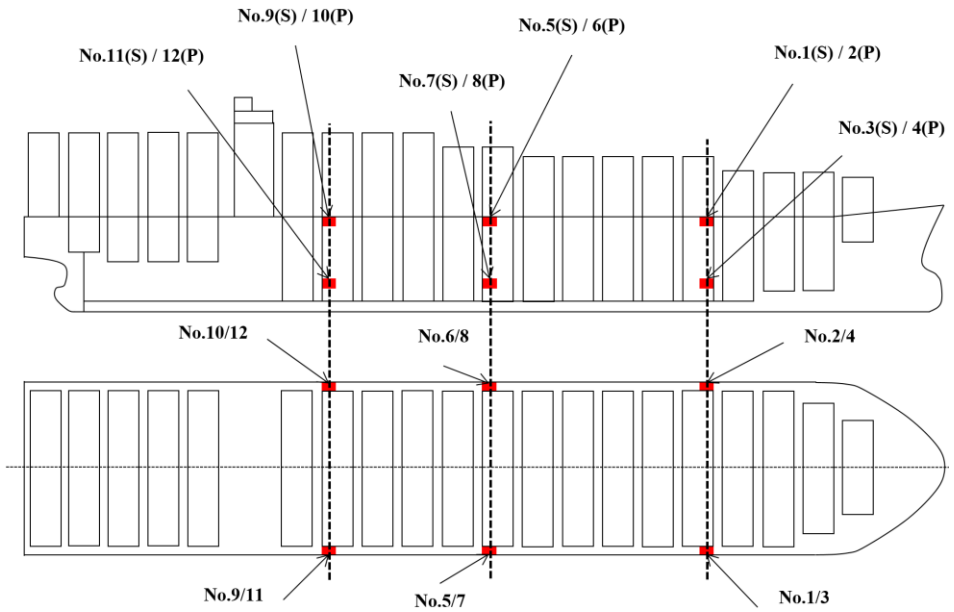




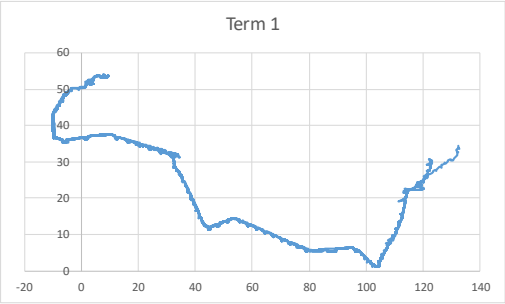


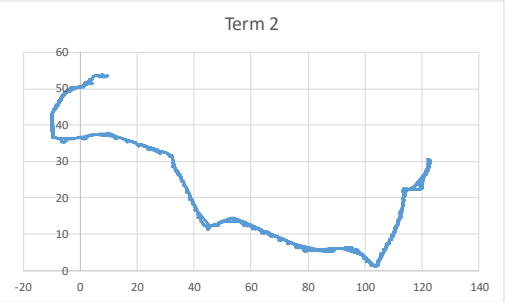


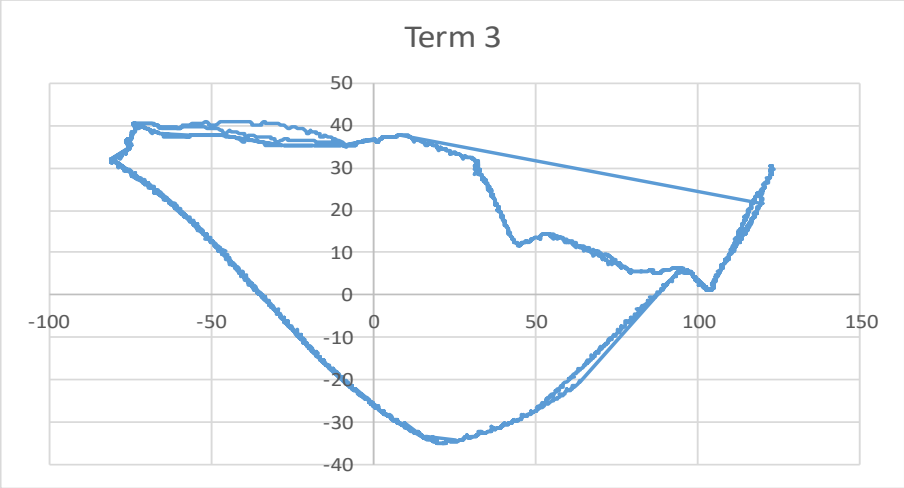
実船モニタリング



- 8600TEU Container Ship
- Aft., Mid., Fore　3断面；P/S HSC/BTM
- 光ファイバ歪センサ（OSMOS1～12）で船長方向歪をf=20Hzで計測
  - Term1：2012/05/01~2013/03/04（外洋航海時間5,105Hr.），極東～スエズ～欧州往復
  - Term2：2013/06/30~2015/02/14（外洋航海時間11,790Hr.），極東～スエズ～欧州往復
  - Term3：2015/07/01~2016/04/30（外洋航海時間3,645Hr.），極東～スエズ～欧州；欧州～北米

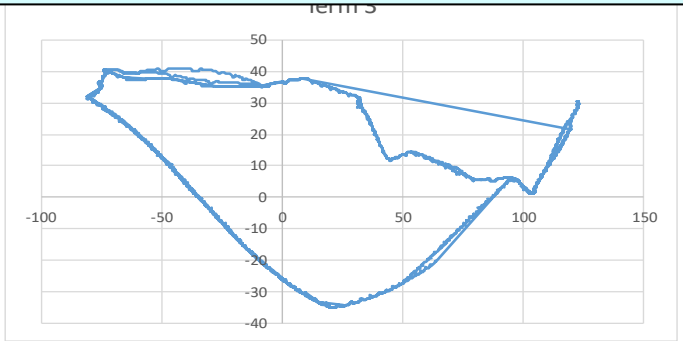


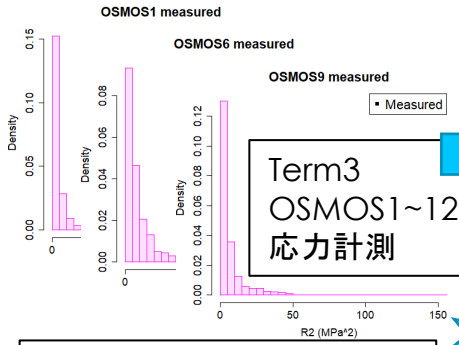




実船モニタリングによる精度検証

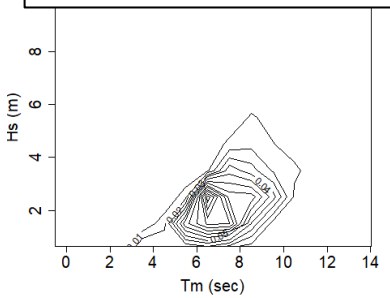
Term3 全センサ応力計測・データ同化





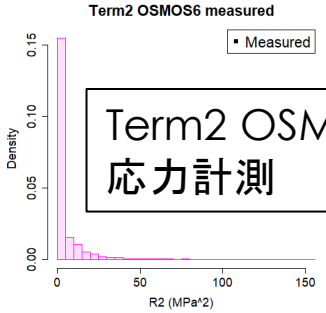
Term3
OSMOS1~12
応力計測

Term3遭遇海象



OSMOS1~12
同化修正係数
・同化済
システム係数

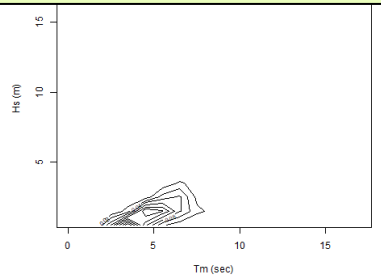
OSMOS1~12
RAO



Term2 OSMOS6
応力計測

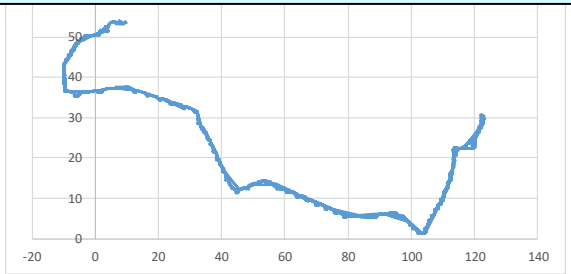
OSMOS6同化済システム
係数を用いたBayes推定

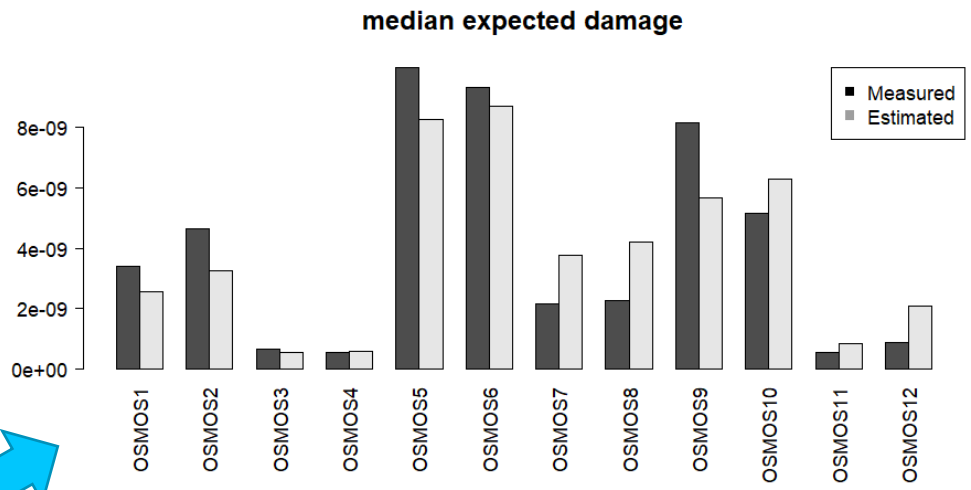
Term2 等価波浪頻度分布



OSMOS1~12モデル化誤
差修正係数を用いたス
ペクトル法R2推算

Term2 OSMOS6のみの応力計測からの
OSMOS1～12応力分散・疲労被害度推定

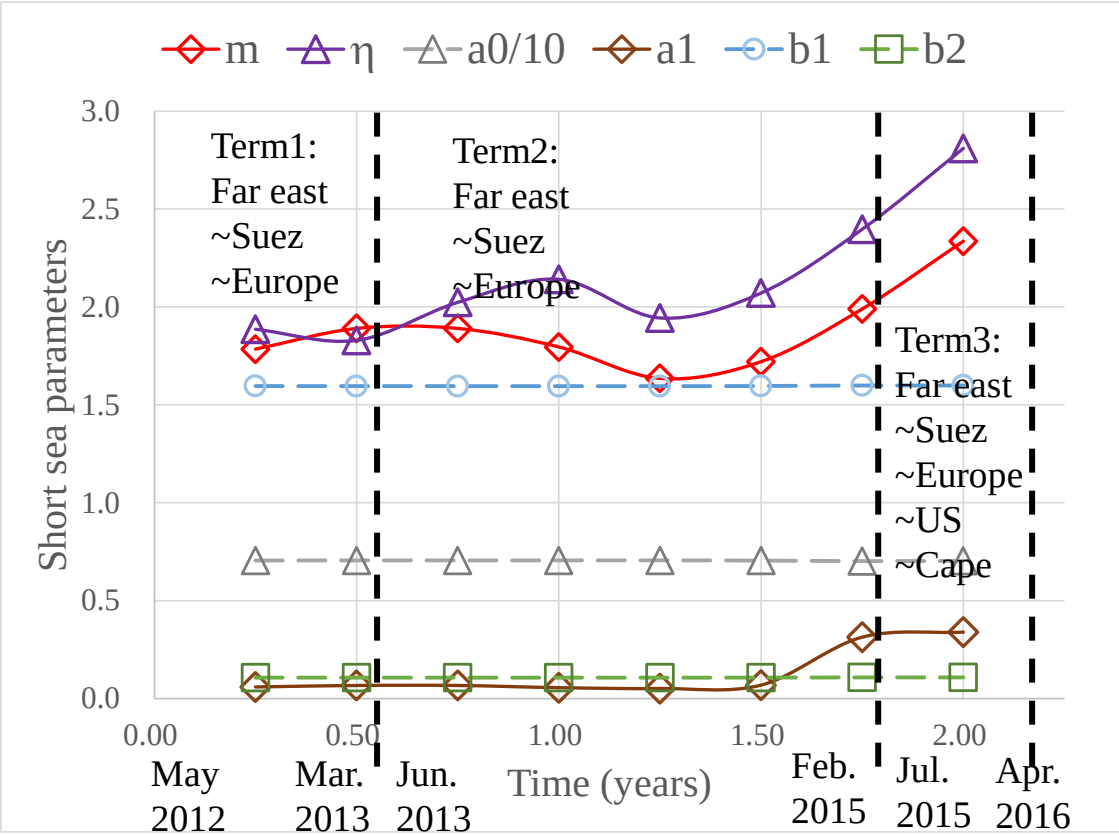




1点の応力計測のみで多数の非計測点
の疲労被害度を推定できる

海象パラメータの時刻歴

- OSMOS6計測結果から作成した海象パラメタ時刻歴
- Term1, Term2
  - 北半球の比較的平穏な海域を航行
  - Hs周辺分布Weibullパラメタm, ηのみ1年周期の緩やかな変動
- Term3
  - 北大西洋，喜望峰など荒天海域の比率が高い.
    南北両半球を航行
  - m, ηがTerm1, Term2の変動範囲上限を超えた大きな値を示し，Term1, Term2で変化がなかったTm条件付き確率のパラメタa1に有意な増大が生じる.
- 就航航路，配船季節，積付等により海象パラメタの時間変動が異なる.

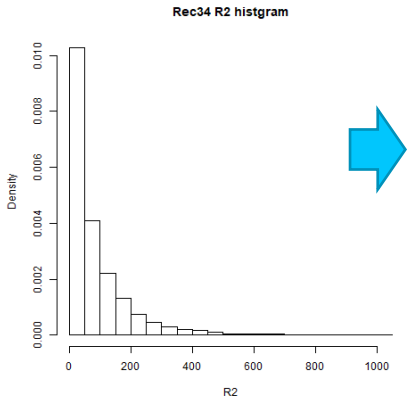


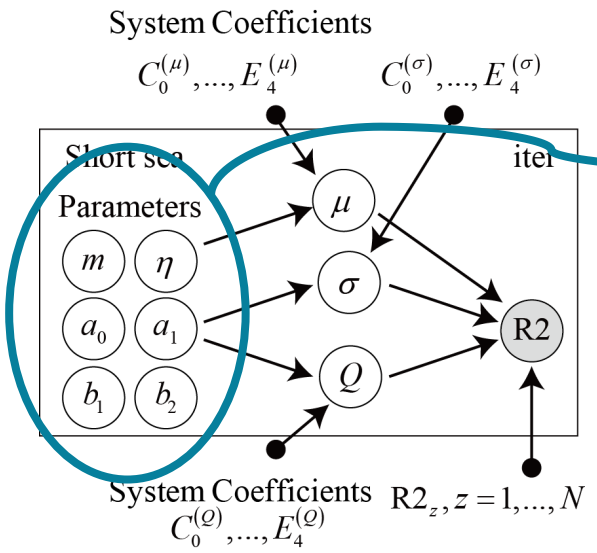
等価波浪頻度を用いた疲労被害度の長期予測

- 海象パラメタ時系列データに運航条件（就航航路，配船期間，積付等）を関連付ければ，想定した運航条件に対する海象パラメタの長期予想が可能

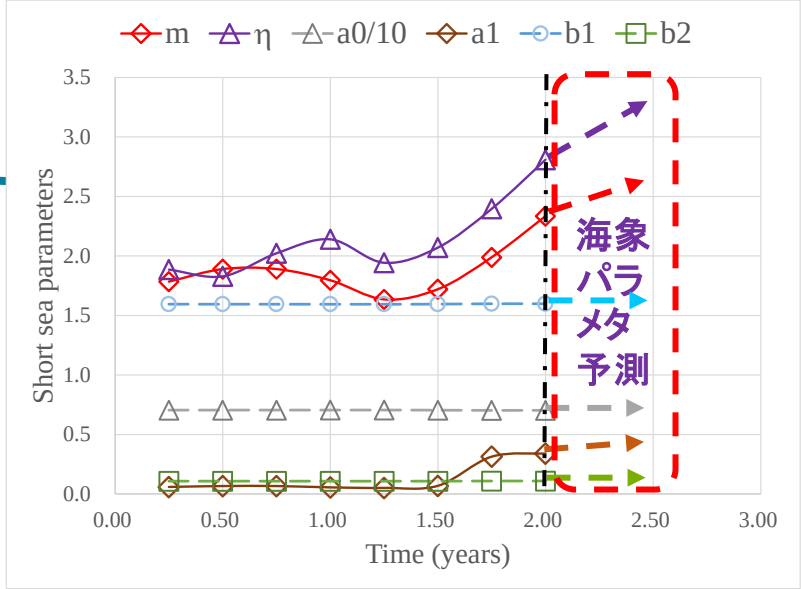
- 少数センサの応力モニタリングを行って海象パラメタ時系列データを作成すれば，想定した運航条件に対する入渠間隔相当期間（2年程度）の疲労被害度増大量を全船で推定でき，点検・修繕計画の合理化とフリート管理の最適化が可能になる．

1点の応力
モニタリング





ベイズ推論



海象パラメタ時系列解析

全船長期疲労
被害度予測

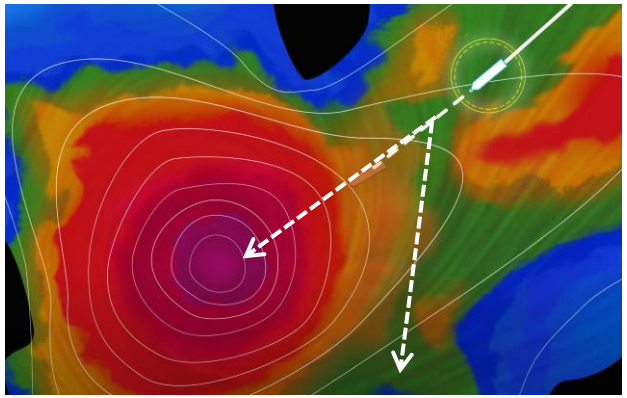
保守計画
フリート管理
最適化

短期予測

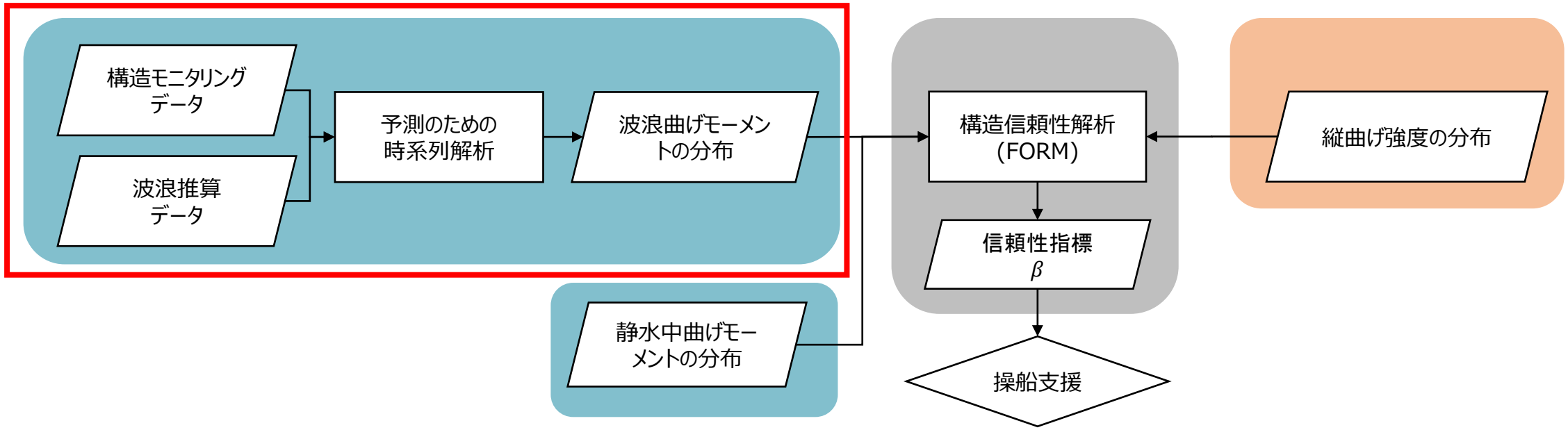
縦曲げ崩壊の危険度予測

縦曲げ崩壊の危険度予測のフロー

- 構造安全性の視点で，「嵐を回避すべきか？そのまま進むべきか？」の判断を支援したい.
- 構造モニタリングデータと波浪推算データを組み合わせて，危険度の予測を行うことを提案.
- 本ウェビナーでは**波浪曲げモーメントの分布の予測手法**について説明.



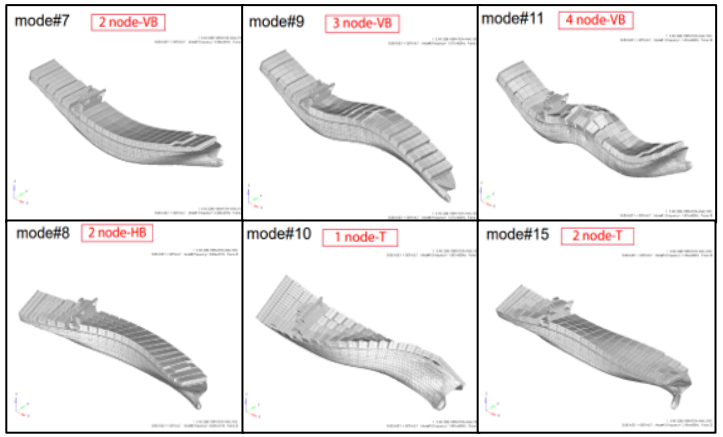
JSTRA Channel, Digital Twin for Ship Structures :
https://www.youtube.com/watch?v=lCZ2faRyfA8



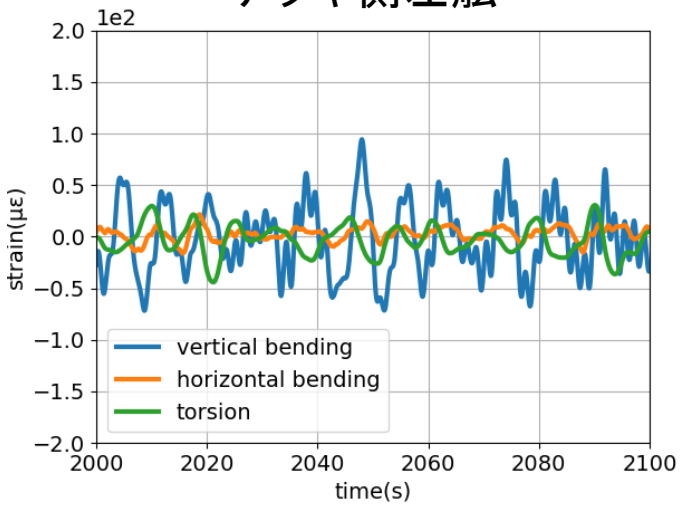
垂直曲げモーメント（VBM）の抽出

- **モード重ね合わせ法とカルマンフィルタ**の組合せ手法により，変形の成分分離．
- 3断面12点のすべてのひずみ計測データを使用．垂直曲げ４モード，水平曲げ４モード，捩り２モードを考慮．
- ボトム側の方舷では鉛直曲げと水平曲げが強め合い，もう方舷では弱め合うことを推定．弾性振動は主に垂直曲げに見られる．
- ひずみの成分分離ができた．＝**VBMを抽出可能**．

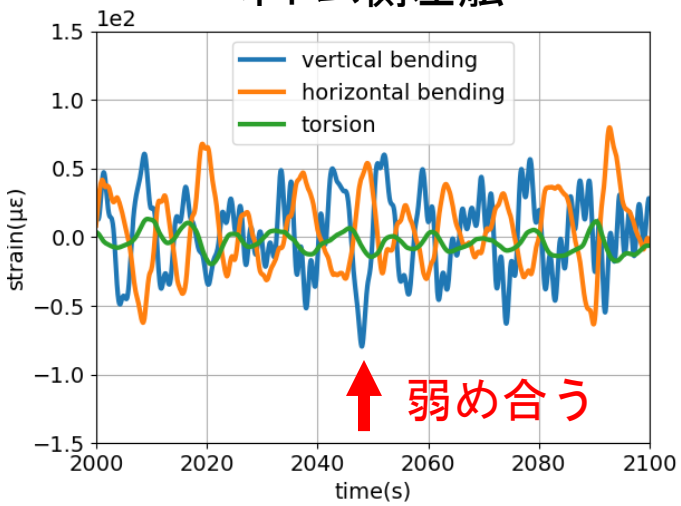
固有モードの例



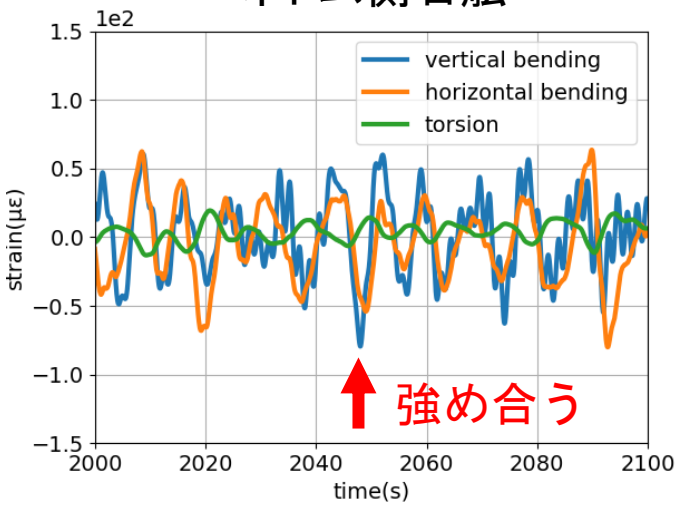
デッキ側左舷



ボトム側左舷

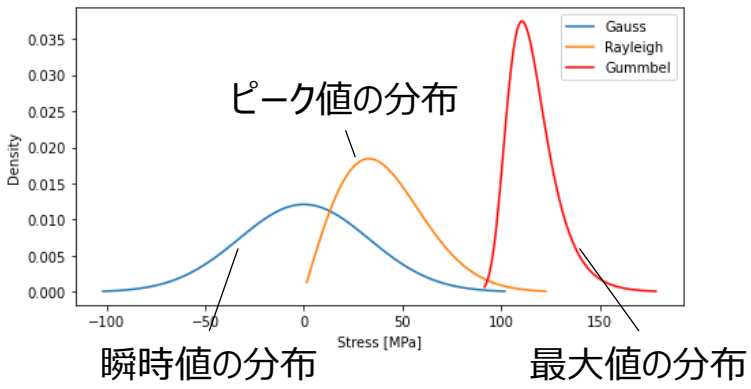


ボトム側右舷



VBMの最大値分布の予測方法

- 波浪推算データ，波浪スペクトル，VBMの応答関数を用いて，VBMの**分散r²**を予測できる．（＝**通常の短期予測**）極値統計理論に従えば，**最大値の分布は分散r²から導出できる**.
- ただし，短期予測計算には多くの仮定が含まれ，また，波浪推算や応答関数の精度に大きく依存し，一般に予測値と観測値は一致しない.
- 時系列統計モデルにより，**通常の短期予測から得られる分散r²を観測値で修正しながら予測**.

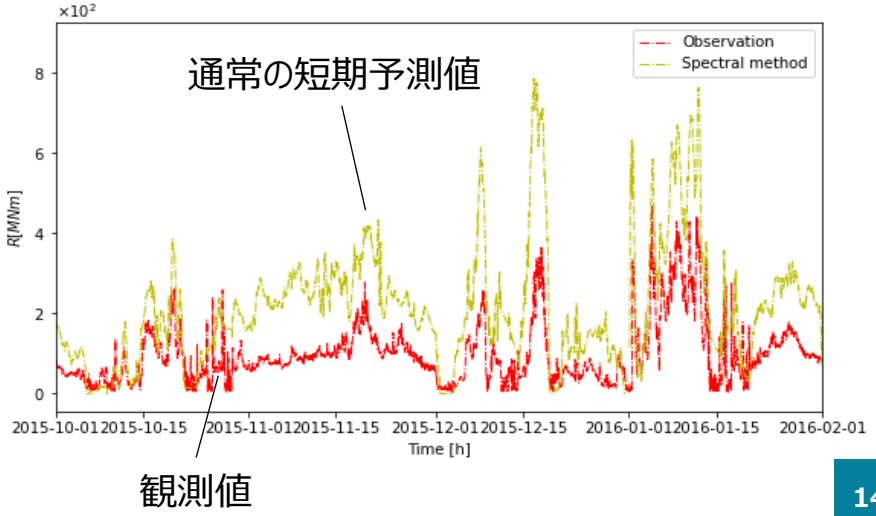


回帰係数

$$\log R_t^2 = a_t \log r_t^2 + b_t + w_R$$

分散の観測値　　通常の短期予測値　　観測誤差

- 短期予測値の変化率と観測値の変化率に線形の関係があると仮定したモデル.

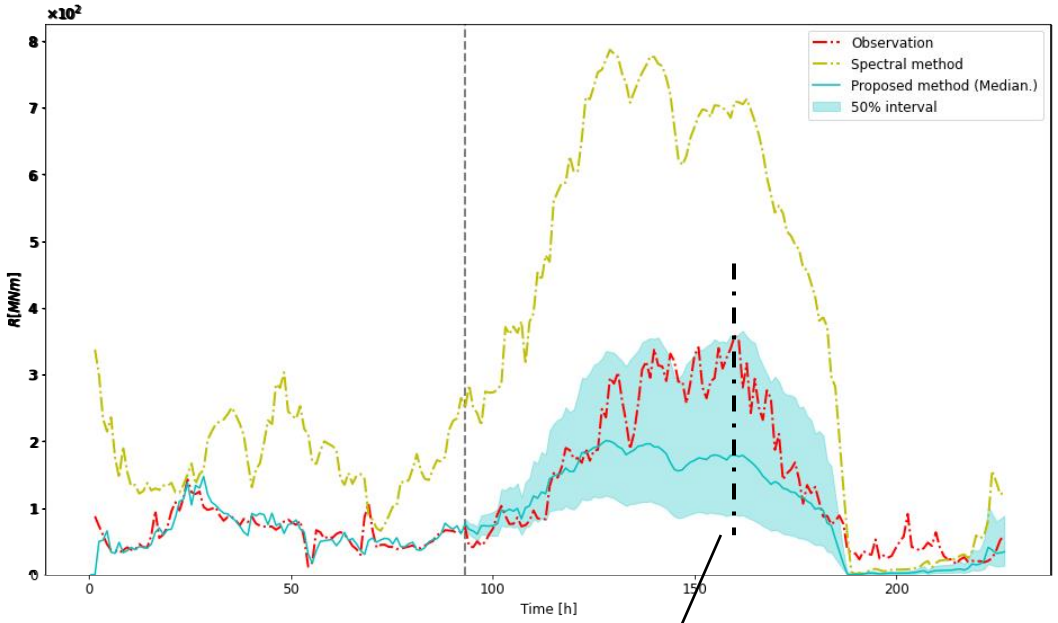
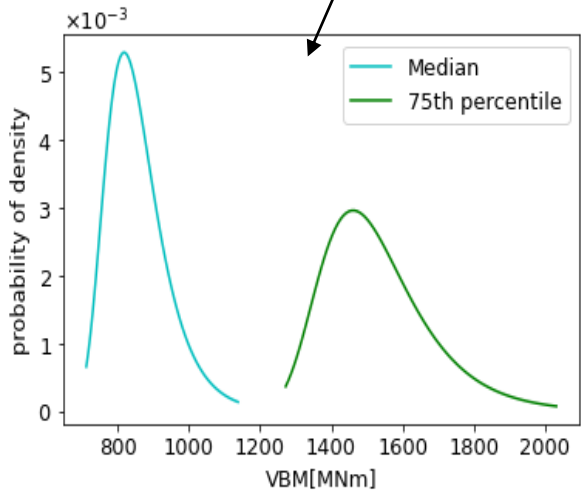


VBMの分散の予測結果（ケーススタディ）

- 評価対象：8,600TEU Container Shipの中央断面のVBM
  - ただし，弾性振動成分は除去.
- 期間：2015年12月9日～21日
- 波浪推算データ：実況推定値（Nowcast）

- 通常の短期予測によるVBMの分散は観測値に比べて大きい.
- 現時点までの観測値を用いて補正.
- 統計モデルにより予測したVBMの分散は観測値により近い.
- VBM分散からVBMの最大値の分布を推定可能.
  - 例として，中央値，75パーセンタイル点の結果を示す.

- 得られたVBMの分布と強度の分布を考慮し，構造信頼性解析を実施することで，破損確率を評価することが可能.
- 縦曲げ破損の**リスクに基づいた操船・航路選択の支援**が可能.



VBMの
最大値の分布