

海技研DLSAセミナー2019  
ユーザー事例講演

# DLSAを使った 船体構造の安全性評価

九州大学大学院工学研究院  
海洋システム工学部門  
柳原 大輔



九州大学

# 本日の講演内容

---

- 船体作用荷重のばらつき推定
- 最終強度に対する船体構造デジタルツイン
- DLSAを使った他の研究展開
  - 単純化した波モデルのパラメータ同定
  - 断面力同定のための効果的なひずみ計測位置

# 船体構造の安全性評価

## 従来の安全性評価

- 船体構造強度，船体作用荷重の設計値 + 安全率

## 近年の安全性評価

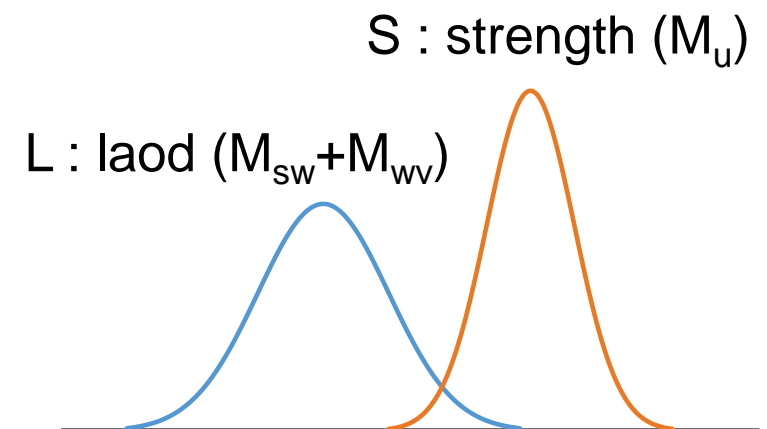
- 船体構造強度，船体作用荷重のばらつきを推定
- 確率的アプローチによる信頼性解析
- 目標信頼性（目標破損確率）との比較

## 精度の高い安全性評価

- 妥当なばらつきの設定，特に精度の高い作用荷重分布推定が必要

破損関数

$$S - L \leq 0$$



# 船体作用荷重のばらつき（静水荷重）

現在の船体作用荷重推定：

- 通常は規則（CSR等）で与えられた荷重を想定
- 北大西洋25年航行時の最大構造応答に対応

しかし，例えば縦曲げモーメントを考えると，

静水モーメント：

$$M_{sw} = \chi_{sw,m} \chi_{sw,st} M_{sw,c}$$

$M_{sw,c}$  : CSRで定められる許容静水曲げモーメント

$\chi_{sw,st}$  : 統計的不確実性（モーメントの大きさばらつき）

$\chi_{sw,m}$  : モデル不確実性（許容モーメントの精度のばらつき）

# 船体作用荷重のばらつき（波浪荷重）

波浪モーメント：

$$M_{wv} = B_{wv,oper} B_{wv,envir} \chi_{wv,m} \chi_{wv,nl} \chi_{wv,st} M_{wv,c}$$

$M_{sw,c}$  : CSRで定められる許容波浪モーメント

$\chi_{wv,st}$  : 統計的不確実性（モーメントの大きさのばらつき）

$\chi_{wv,nl}$  : 非線形応答に対する不確実性（非線形応答によるばらつき）

$\chi_{wv,m}$  : モデル不確実性（許容モーメントの精度のばらつき）

$B_{wv,envir}$  : 実航海域とCSR想定海域との違いによる不確実性

$B_{wv,oper}$  : 荒天回避に関する不確実性



これだけ多くの荷重に関する不確実性（ばらつき）  
を決めなければならない!!

# 船体作用荷重の推定

---

現在，不確実性パラメータは明確には分かっていない  
(既存の信頼性解析では適当に決められている?)



何らなかの根拠のあるパラメータの同定には，  
数値解析に基づく荷重推定が必要?



DLSAを用いて，船体に生じる荷重の周波数応答関数 (RAO) を求め，  
運航想定海域の波条件から，船体に生じる荷重のばらつきを推定

現在，海技研との共同研究で，荷重のばらつきを求める解析を実施中！

# 最終強度に対する船体構造デジタルツイン

日本船舶技術研究協会では、藤久保昌彦・大阪大学教授を委員長とした「**超高精度船体構造デジタルツインの研究開発委員会**」を設立

海上技術安全研究所，大阪大学，九州大学で，**最終強度に対するアラートシステム**の開発を実施中

## 3つのレベルのシステム

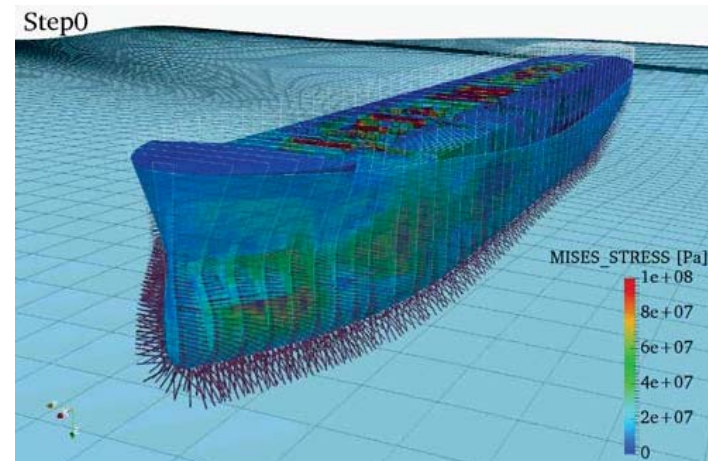
- レベル1：板/防撓パネル最終強度ベース
- レベル2：船体横断面の縦曲げ最終強度ベース
- レベル3：3ホールド非線形FEA最終強度ベース

# 最終強度アラートシステム（レベル1）

レベル1：板/防撓パネル最終強度ベースアラートシステム

- (1) 波長，波向き，船速，積載状態を変えたDLSEAの全船解析から，板や防撓パネルに働く応力応答関数を計算
- (2) 船体に設置したセンサーの応答を逆解析して現在の波条件を決定  
(波スペクトルを決定して，今後起こるであろう極限状態を計算)
- (3) (1)で計算した応答関数に(2)の波条件を代入して，板や防撓材に働く応力成分を算定
- (4) 複合応力下の板や防撓パネルの強度評価式から最終強度を求める
- (5) (3)と(4)の比較から板や防撓パネルの安全余裕をコンター表示

安全余裕表示のイメージ  
要素の色が板/防撓パネルの最終強度  
に対する安全余裕を表す



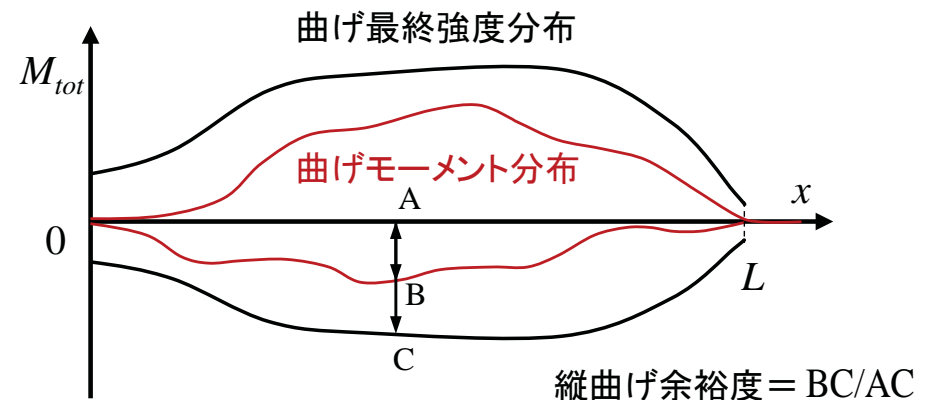


# 最終強度アラートシステム（レベル2）

レベル2：船体横断面の縦曲げ最終強度ベースアラートシステム

- (1) 波長，波向き，船速，積載状態を変えたDLSEAの全船解析から，各断面の縦曲げ，水平曲げ，捩りモーメントの応答関数を計算
- (2) 船体に設置したセンサーの応答を逆解析して現在の波条件を決定  
(波スペクトルを決定して，今後起こるであろう極限状態を計算)
- (3) (1)で計算した応答関数に(2)の波条件を代入して，各断面に働くモーメントを算定
- (4) Smith法により各断面の縦曲げ最終強度を計算（水平曲げ，捩りの影響も考慮）
- (5) (3)と(4)の比較から安全余裕を評価

安全余裕表示のイメージ  
長さ方向の分布を表示

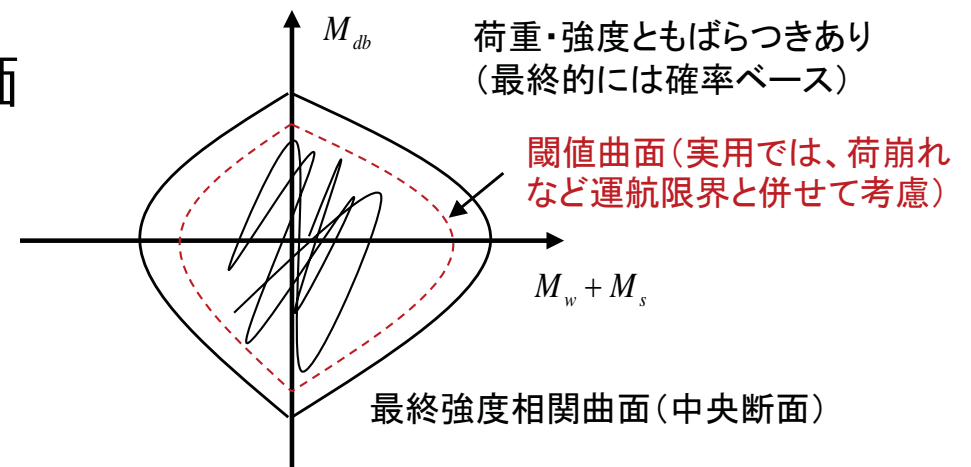


# 最終強度アラートシステム（レベル3）

レベル3：3ホールド非線形FEA最終強度アラートシステム

- (1) 波長，波向き，船速，積載状態を変えたDLSEA全船解析から，中央ホールドの縦曲げ，水平曲げ，捩りモーメント，外圧の応答関数を計算
- (2) 船体に設置したセンサーの応答を逆解析して現在の波条件を決定  
(波スペクトルを決定して，今後起こるであろう極限状態を計算)
- (3) (1)で計算した応答関数に(2)の波条件を代入して，中央ホールドに働くモーメント，外圧を算定
- (4) 事前に3ホールド非線形FEAを実施して，複合断面力下の縦曲げ最終強度を計算
- (5) (3)と(4)の比較から安全余裕を評価

安全余裕表示のイメージ  
例えば縦曲げと水平曲げの相関関係

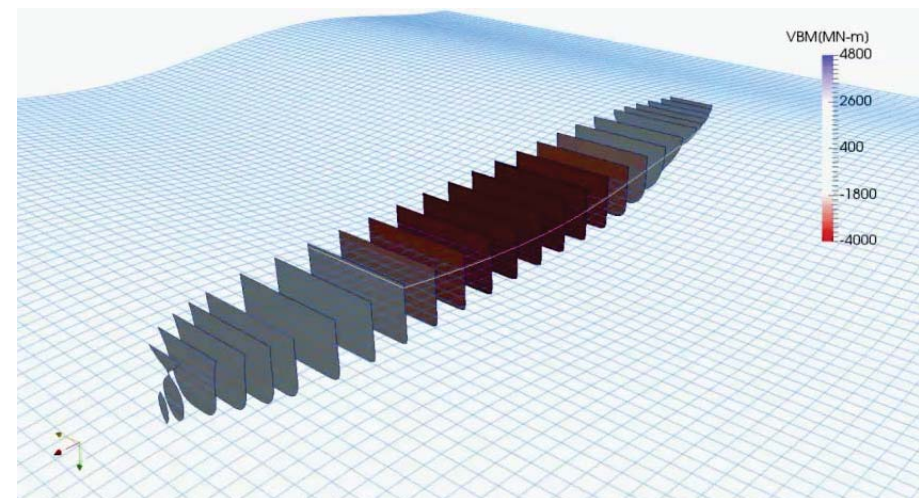
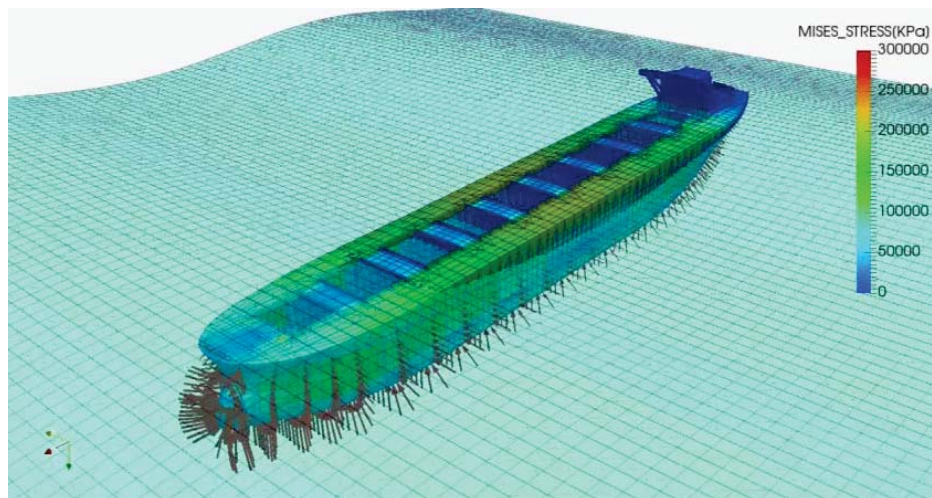


最終強度相関曲面 (中央断面)

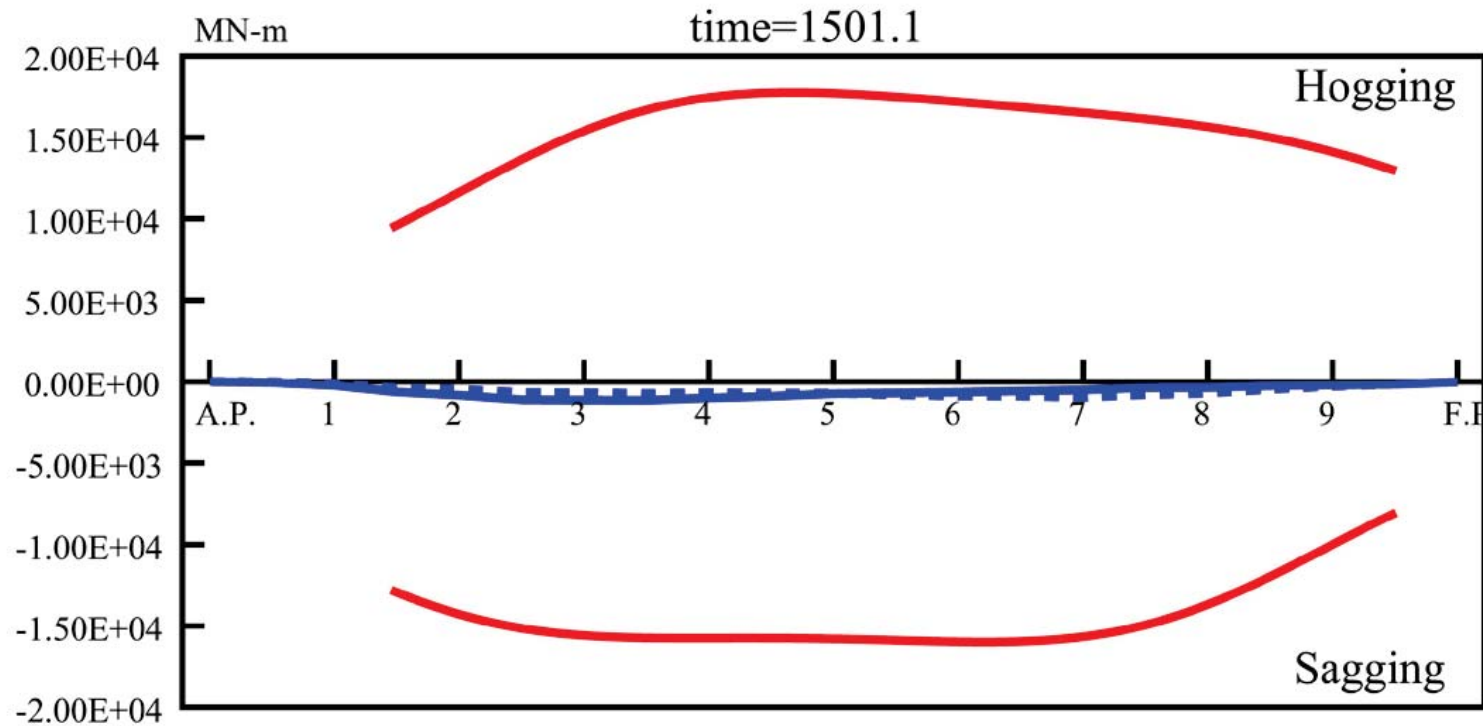
# 縦曲げ最終強度ベースアラートシステム

## レベル2システムの具体例

- バルクキャリア L=278.0m, B=32.3m
- 均等積み条件, 追い波状態: 有義波高7m, 平均周期10s
- **DLSAの線形解析**から全21断面の縦曲げモーメントの応答関数を生成
- ISSC波スペクトルから各断面縦曲げモーメントを計算  
(実システムではセンサー計測値等から計算)
- 各断面の縦曲げ最終強度はSmith法により計算
- **船長方向の最終強度分布とリアルタイム縦曲げモーメント分布**を表示



# 最終強度と縦曲げモーメントのリアルタイム表示



赤実線：縦曲げ最終強度分布

青点線：静水縦曲げモーメント分布

青実線：静水+波浪縦曲げモーメント分布

- 最も波浪曲げモーメントが大きくなる時刻周辺をピックアップ
- 実時間の5倍の速度で表示

# 最終強度アラートシステムの今後の予定

レベル2システム：

(1) センサーの応答から波浪条件を推定する手法との連携

波スペクトル推定（横国大 岡田先生），

カルマンフィルタ法（阪大 飯島先生），等...

(2) 水平曲げや外圧の考慮 ➡ 縦曲げ最終強度も変動

(3) 最終強度や作用モーメントに不確定因子を考慮し，ばらつきのあるデータ（幅のある線）として表示 ➡ 最終的には破損確率を使用？

レベル1システム，レベル3システムについても実施

（特にレベル1，ただし，莫大な数の応答関数の store が問題）

# DLSAを使った他の研究展開 (1)

縦曲げ最終強度評価に対応した波状態推定：

- 縦曲げ崩壊時の波：波長の長い大きな波 ➡ 波長の短い小さな波は無視できる？
- 波を，波長，波振幅，波の尖度，波向きの4つだけのパラメータだけで表せるとしたら？
- 数10点のひずみデータだけで現在の波状態を推定可能？（4つのパラメータを同定）  
最小二乗法，ディープラーニング，...

DLSAを使った全船解析を実施

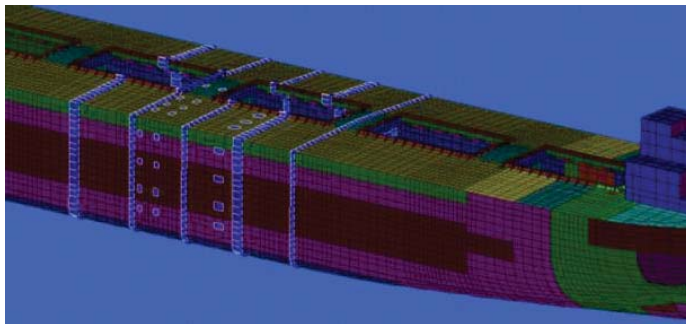
- 簡易的な波パラメータが同定可能か？
- それが最終強度に対する安全性評価に使用できるか？  
を調査する。

# DLSAを使った他の研究展開 (2)

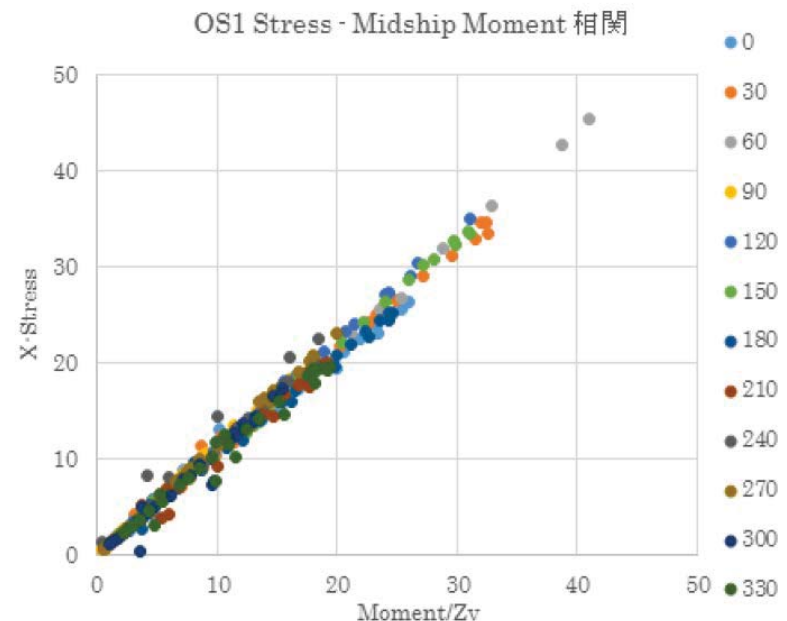
- 縦曲げ最終強度評価では断面力を推定が必要
- 船体に取り付けたひずみゲージの計測値から断面力を推定する場合、効果的な取り付け位置があるはず？



現在，海技研がDLSAを使って実施した研究をさらに進めている。



DLSAで解析したデッキコーナー付近での船長方向応力と，曲げモーメントと断面係数から計算される応力との関係



コーナー部であれば，断面力を推定しやすい？