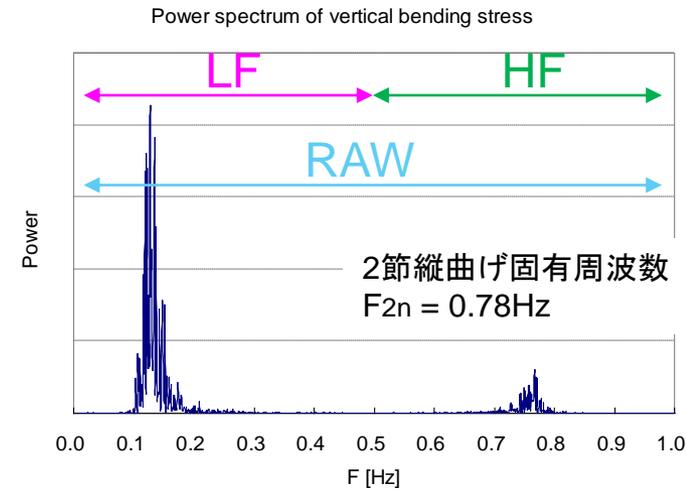
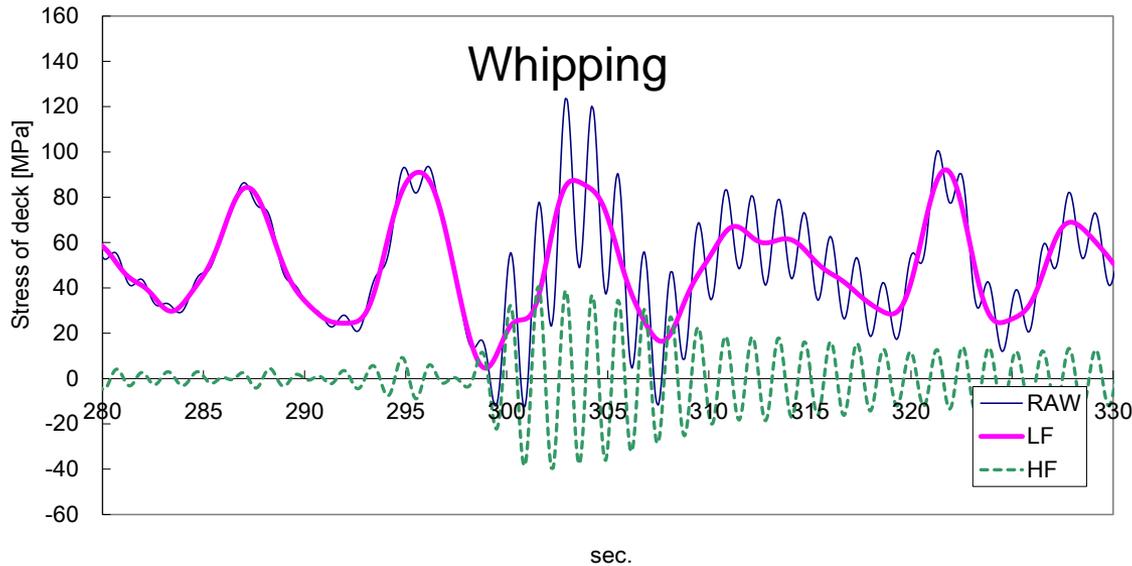


# ホイップングを考慮した疲労寿命推定 と船上モニタリング

構造安全評価系 構造解析研究グループ 岡 正義 \*  
構造基盤技術系 丹羽 敏男  
東京大学大学院 新領域創成科学研究科 高木 健

# 研究の背景 (応力モニタリング)



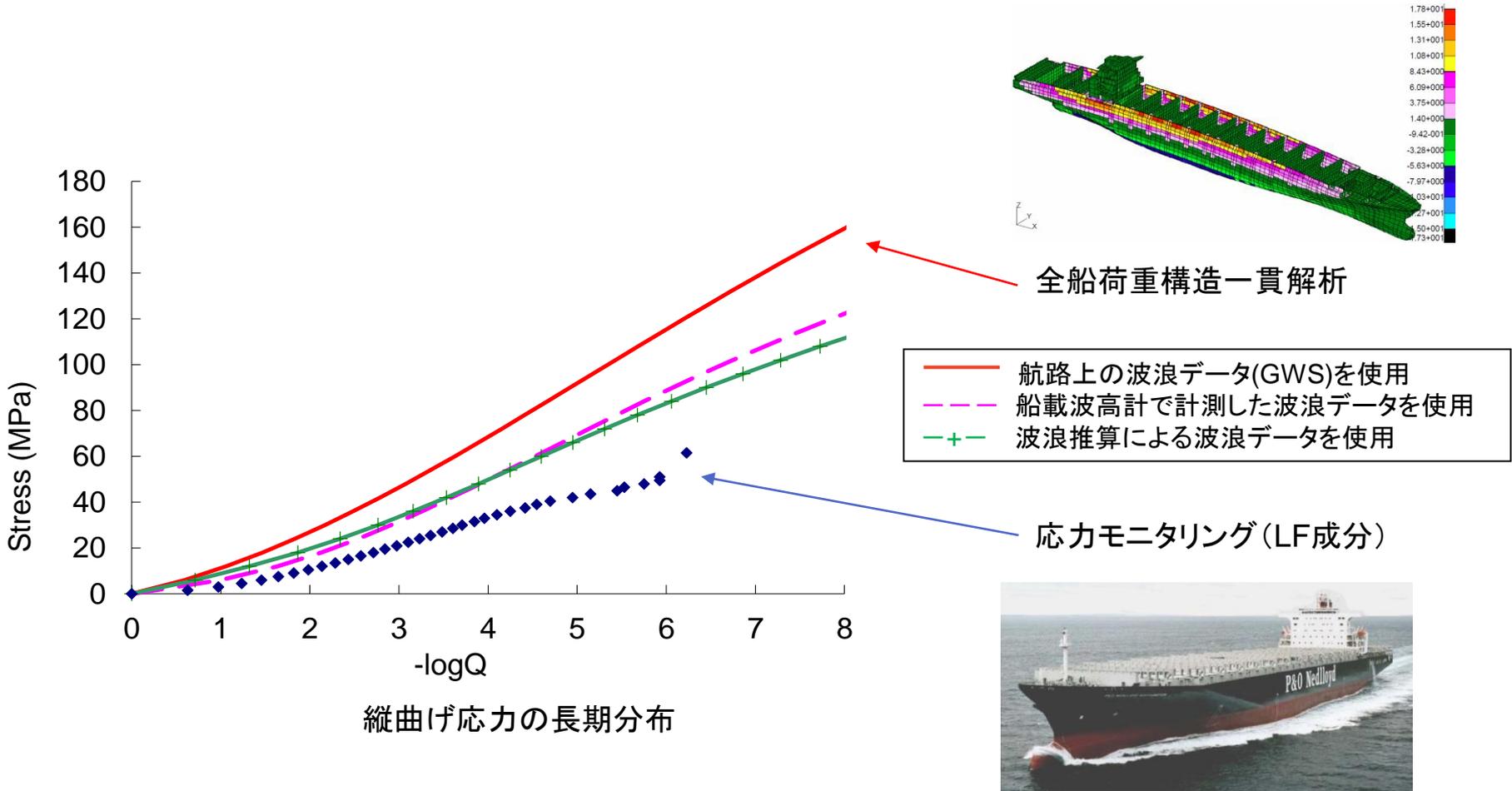
ポストパナマックスコンテナ船で計測された  
縦曲げ応力波形(RAW)と各周波数成分(LF, HF)<sup>1)</sup>

パワースペクトル

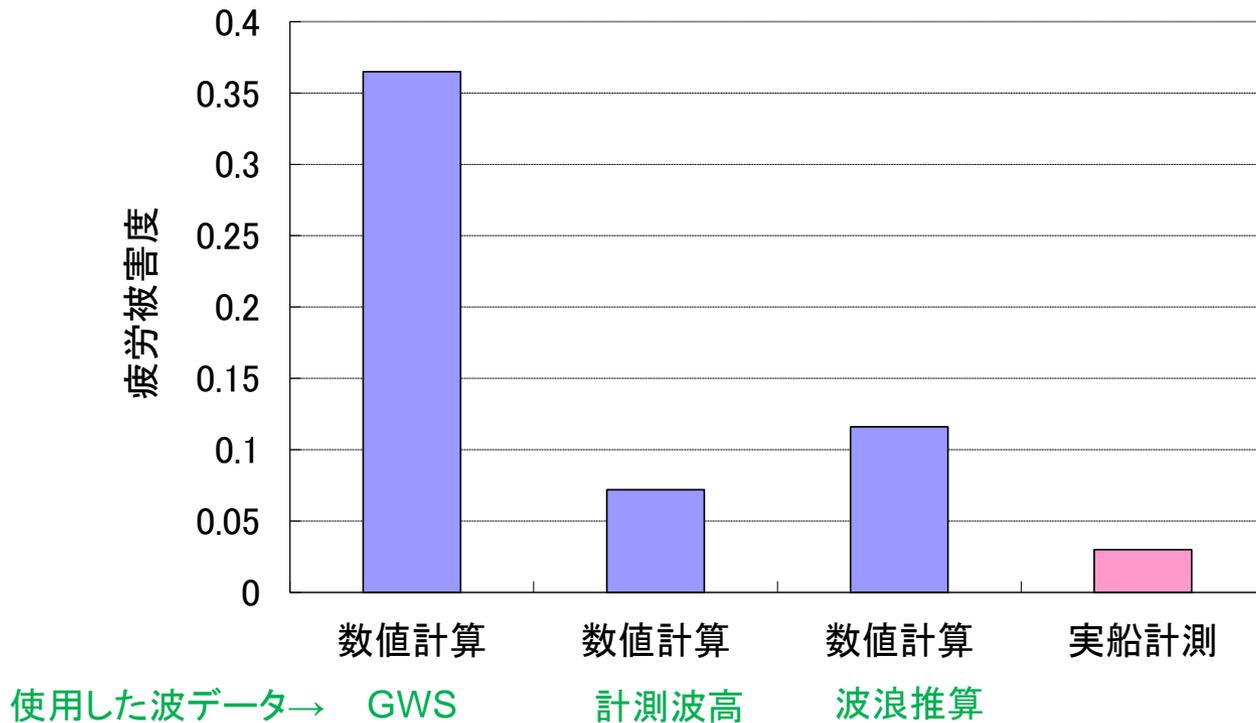
RAW	: 0.01 ~ 1.0Hz	(計測された生波形)
LF	: 0.01 ~ 0.5Hz	(波周波数成分)
HF	: 0.5 ~ 1.0Hz	(弾性振動成分)

1) Oka, M. et al : A fatigue design for large container ship taking long-term environmental condition into account, OMAE2011

# 疲労寿命推定の現状（その1）



# 疲労寿命推定の現状（その2）

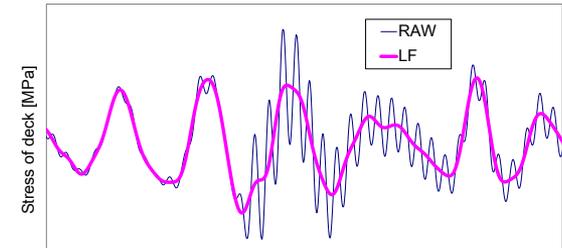
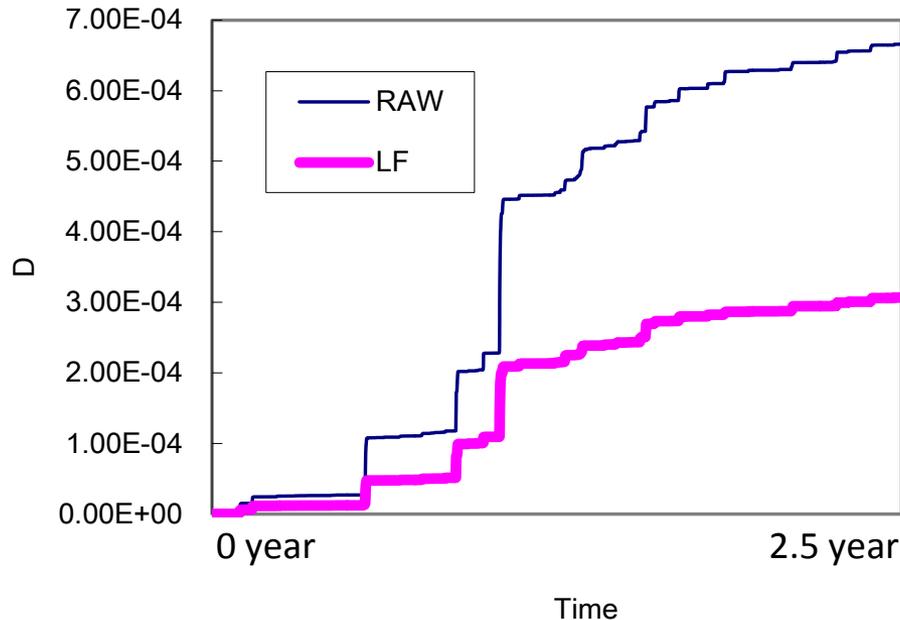


25年後の累積疲労被害度の推定結果

船上での計測波高、あるいは波浪推算の波高を用いたとしても推定精度は悪い。解析法が正しいとすれば、船速、波向き情報が異なること(操船影響)が主要因。

→ D/A(デザインバイアナリシス)を確立するには、航海情報の整備が必要

# ホイッピングの影響



応力モニタリングに基づく疲労被害度D  
(レインフロー法・マイナー則による推定)

累積疲労被害度は、ホイッピングによって約2倍に増加  
他の実船モニタリング<sup>2)</sup>においても**1.3倍~2倍(30%~100%)**の報告

2) 例えば Heffelund, S. et al : Full scale measurement of fatigue and extreme loading including whipping on an 8600TEU post panama container vessel in the Asia to Europe trade, OMAE2011

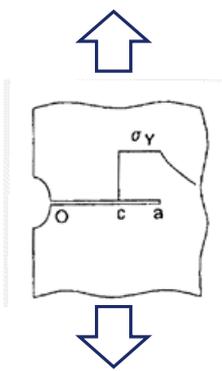
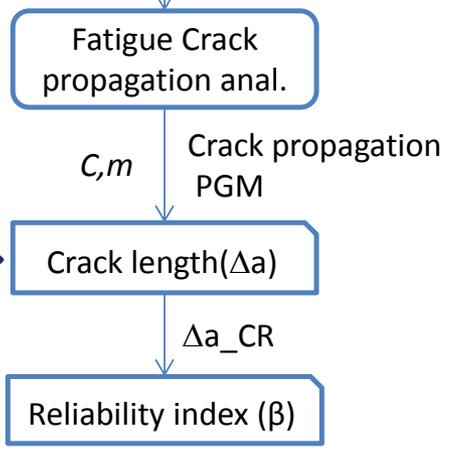
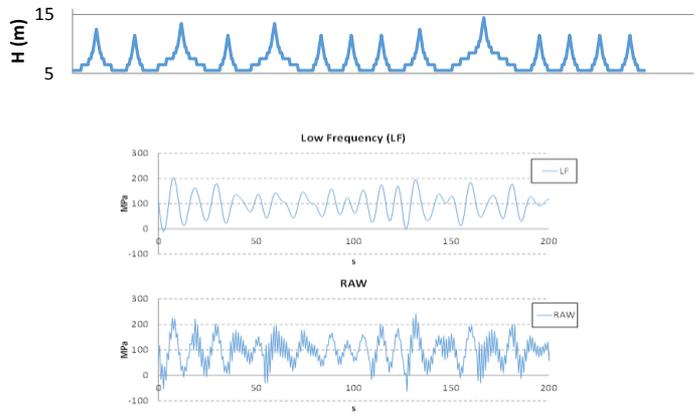
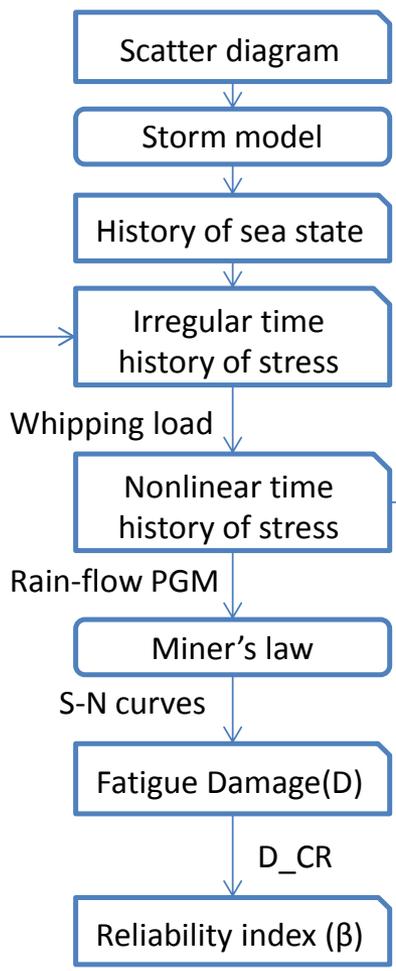
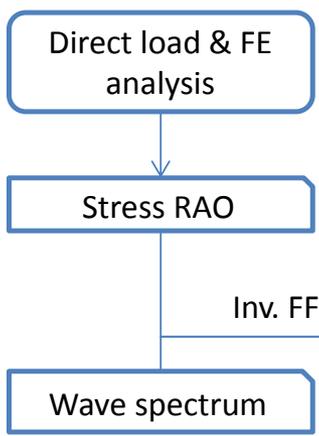
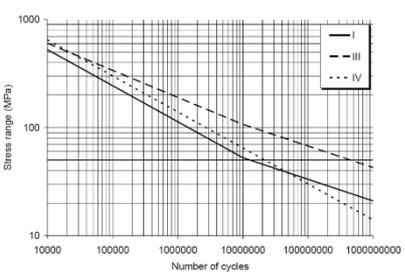
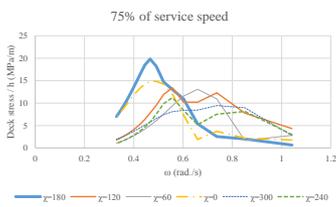
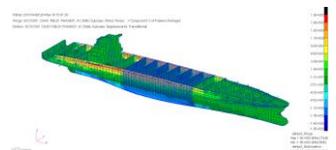
# 研究課題

- 実船応力計測で、ホイッピングによる応力及び疲労被害度の増加が多数報告。大型船の疲労強度評価に影響
- 一方、疲労損傷は目立っていない
- 一般には、操船影響で済ませているが、例外も起こりうる
- 大型船の安全就航のため、予測と実態とのギャップの解明を急ぐ
- これに加えてIMO/GBSによる構造規則の強化

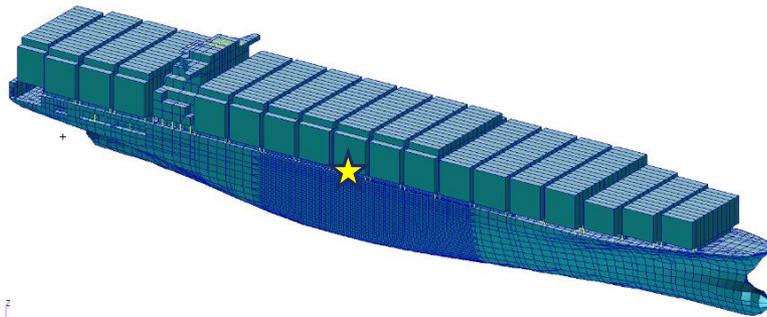


1. 疲労き裂伝播解析手法を用いた船体き裂成長の現象解明
2. 構造信頼性解析手法を用いた操船影響の定量的評価

# 評価システム

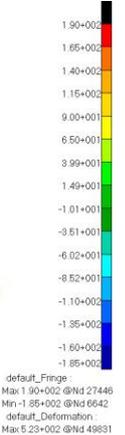
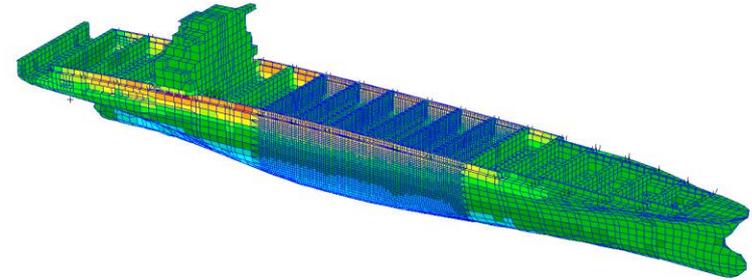


## 対象船: ポストパナマックスコンテナ船



★ 評価対象

Patran 2013 64-Bit 20-May-16 15:41:33  
Fringe: SC101001: CAI01 RBL01 PHASE01, A1 Static Subcase, Stress Tensor, X Component, 2 of 4 layers (Average)  
Deform: SC101001: CAI01 RBL01 PHASE01, A1 Static Subcase, Displacements, Translational



荷重計算: 線形ストリップ法

規則波高:  $H_w=5\text{m}$

FE解析の時間刻み: 1周期を12分割

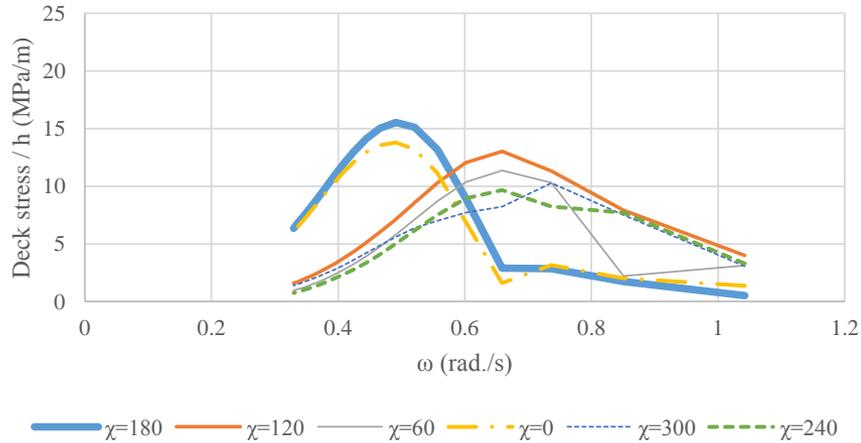
FEモデル: 要素数約95,000、ロングスペースサイズのシェル要素

慣性リリース機能で倉内荷重を付与

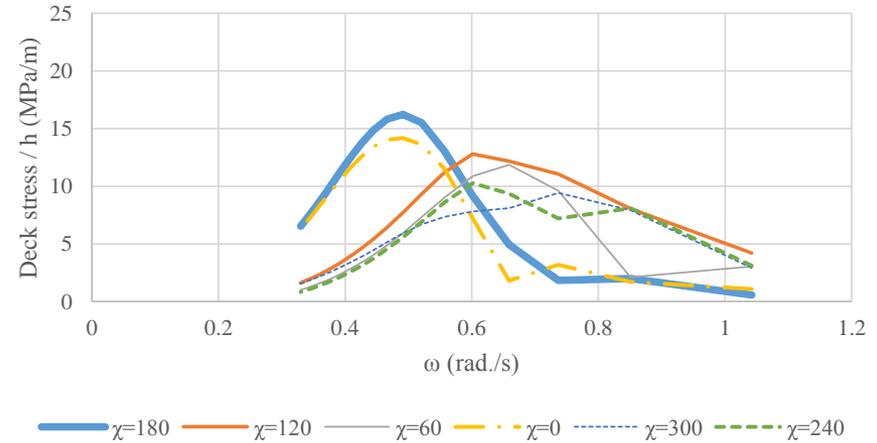
コンテナをソリッド要素(質量モデル)でモデル化

# 応力RAO

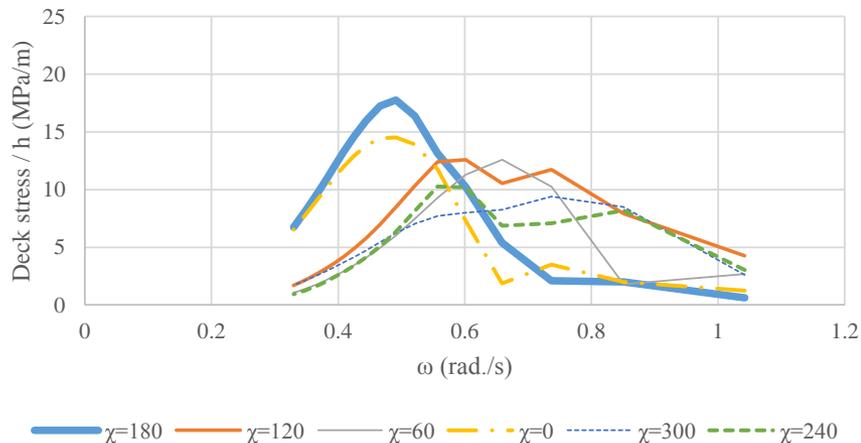
0% of service speed



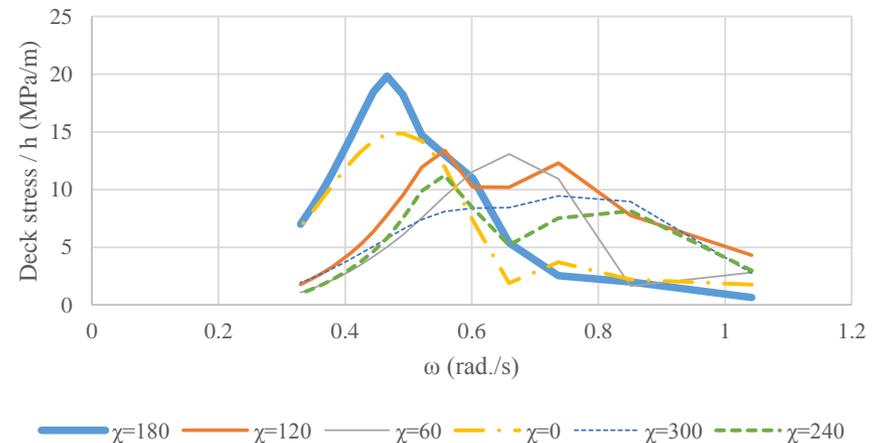
25% of service speed



50% of service speed



75% of service speed



全船荷重構造一貫解析で求めた応力RAO (Response Amplitude Operator)

# 嵐荷重の作成

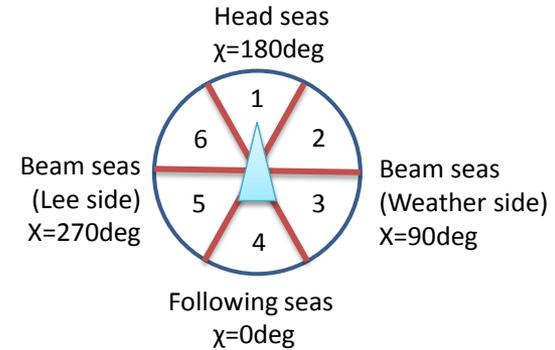
北大西洋の波浪発現頻度(IACS Rec.34)

Hs/Tz	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5	SUM
0.5	0.0	0.0	1.3	133.7	865.6	1186.0	634.2	186.3	36.9	5.6	0.7	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3050
1.5	0.0	0.0	0.0	29.3	966.0	4976.0	7738.0	5669.7	2375.7	703.5	160.7	30.5	5.1	0.8	0.1	0.0	0.0	0.0	22575
2.5	0.0	0.0	0.0	2.2	197.5	2158.8	6230.0	7449.5	4860.4	2066.0	644.5	160.2	33.7	6.3	1.1	0.2	0.0	0.0	23810
3.5	0.0	0.0	0.0	0.2	34.9	666.5	3226.5	5675.0	5099.1	2836.0	1114.1	337.7	94.3	18.2	3.5	0.6	0.1	0.0	19128
4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	186.1	1354.3	3288.5	3857.5	2685.5	1275.2	455.1	130.9	31.9	6.9	1.3	0.2	0.0	13269
5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	51.0	498.4	1602.9	2327.7	2008.3	1128.0	463.6	150.9	41.0	9.7	2.1	0.4	0.1	8328
6.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	12.6	167.0	690.3	1257.9	1268.6	825.9	386.8	140.8	42.2	10.9	2.5	0.5	0.1	4906
7.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	52.1	270.1	594.4	703.2	524.9	276.7	111.7	36.7	10.2	2.5	0.6	0.1	2968
8.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	15.4	97.9	255.9	350.6	296.9	174.6	77.6	27.7	8.4	2.2	0.5	0.1	1309
9.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	4.3	33.2	101.9	159.9	152.2	99.2	48.3	18.7	6.1	1.7	0.4	0.1	626
10.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	10.7	37.9	67.5	71.7	51.5	27.3	11.4	4.0	1.2	0.3	0.1	285
11.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	3.3	13.3	26.6	31.4	24.7	14.2	6.4	2.4	0.7	0.2	0.1	124
12.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1.0	4.4	9.9	12.8	11.0	6.8	3.3	1.3	0.4	0.1	0.0	51
13.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.4	3.5	5.0	4.6	3.1	1.6	0.7	0.2	0.1	0.0	21
14.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	1.2	1.8	1.8	1.3	0.7	0.3	0.1	0.1	0.0	8
15.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	0.6	0.7	0.5	0.3	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	3
16.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	1
SUM:	0	0	1	165	2091	9290	19922	24879	20670	12898	6245	2479	837	247	66	16	3	1	100000

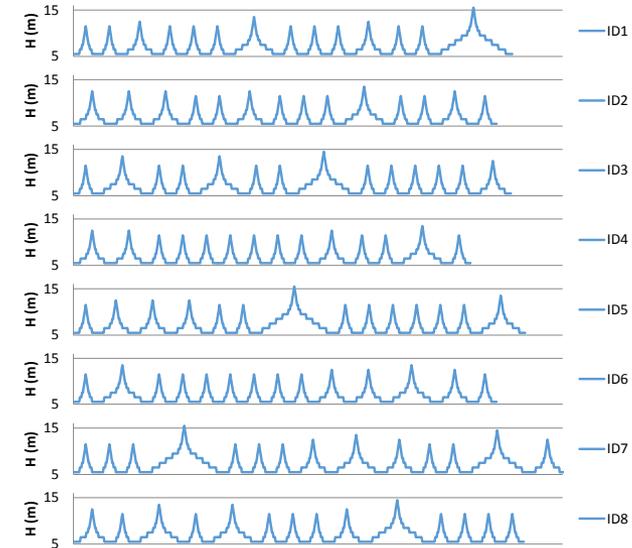


嵐モデルに基づく荷重履歴

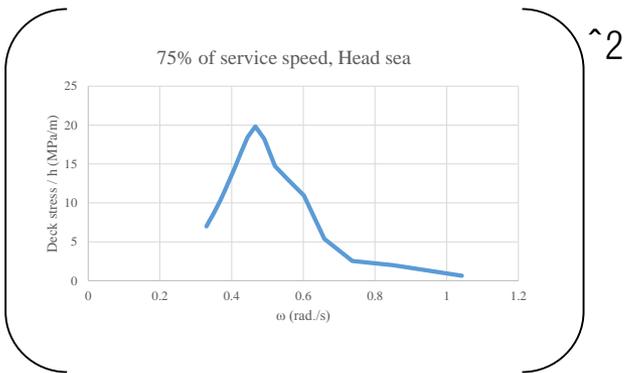
- ・ H<sub>max</sub>=11.5m以上の嵐を対象
- ・ 向い波状態(カテゴリ1)を想定
- ・ 8パターン(ID1~ID8)の荷重履歴を作成



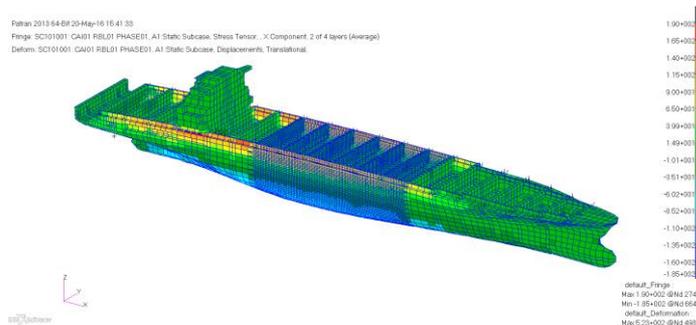
波向のカテゴリ分け



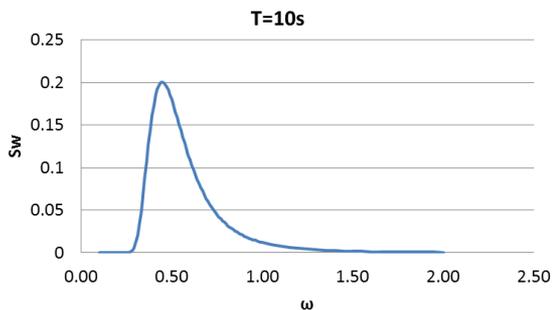
# 波周波数成分(LF)の荷重履歴



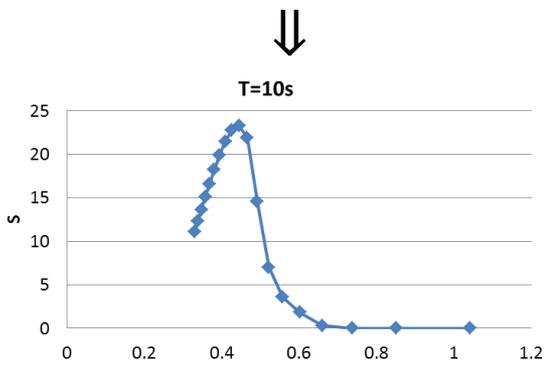
応力RAO



全船荷重構造一貫解析



波スペクトル (ISSC1964)

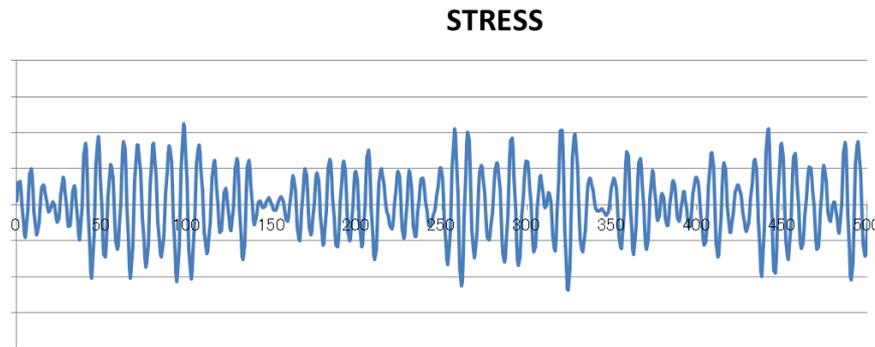


応答スペクトル

逆フーリエ変換

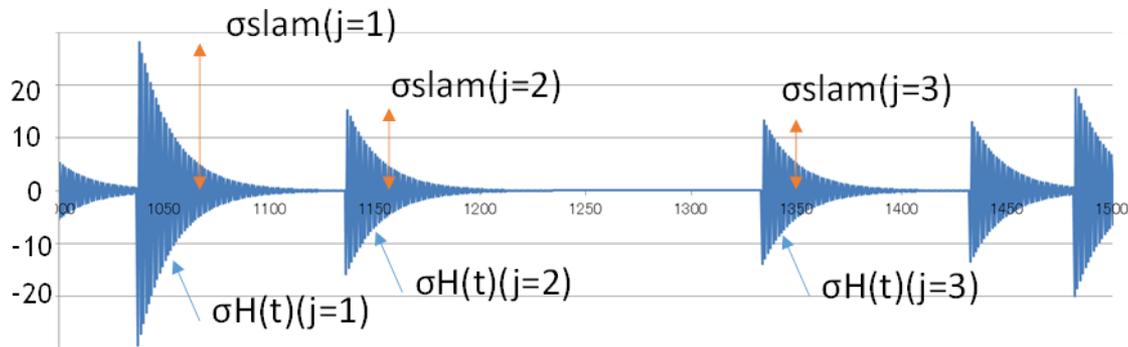


乱数発生



波周波数成分の応力波形 (LF)

# ホイッピングの荷重履歴



$$\sigma_H(t) = \sigma_{slam} \exp\left(-\frac{\delta t}{T_{2n}}\right) \cos(\omega_{2n}t + \varepsilon)$$

ホイッピングの応力波形

- 船体2節縦曲げ振動の固有周期:  $T_{2n}=1.3\text{s}$ 、対数減衰率:  $\delta=0.1$

- スラミングの発生確率(発生回数):

越智の式(船首部の船体と波面との相対速度 $V_{CR}$ に基づく理論式)

$$Q_{sl}(H, T) = \exp\left\{-\frac{d_f^2}{2R_{zr}^2} - \frac{V_{cr}^2}{2R_{vr}^2}\right\}$$

- スラミングによる初期応力( $\sigma_{slam}$ )の短期分布:レイリー分布

$$p(\sigma_{slam}) = \frac{\sigma_{slam}}{R_H^2} \exp\left(-\frac{\sigma_{slam}^2}{2R_H^2}\right)$$

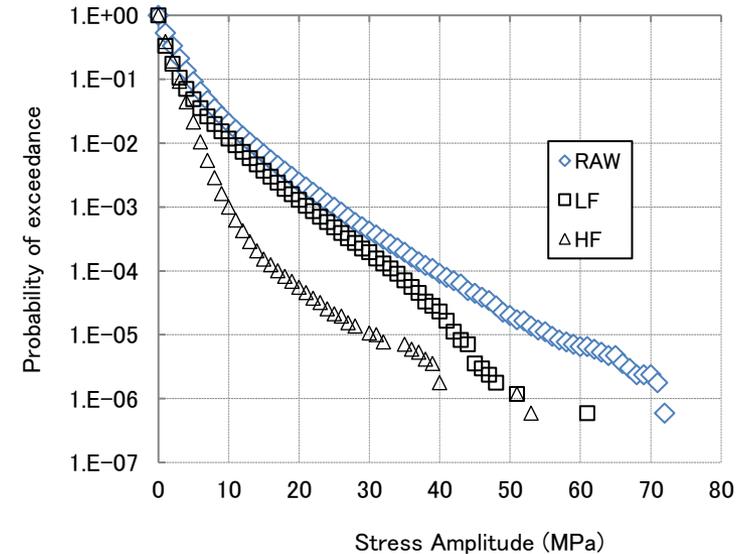
# 最大応力

最適設計を仮定して、長期の最大応力＝材料の規格降伏応力 $\sigma_Y$ (=400MPa)となるよう、 $\sigma_{slam}$ を設定

$$\sigma_{slam\_max} + MAX_{1/N} [\sigma_L]_{i\max} + \sigma_{mean} = \sigma_Y$$

各応力成分の最大値

	MPa
$\sigma_{mean}$	100
$\sigma_{LF}$ の最大値	164
<u><math>\sigma_{slam}</math>の最大値</u>	<u>136</u>
TOTAL	400



実船計測データによる応力の超過確率<sup>1)</sup>

作成した応力の成分比が  
現実に即していることを確認

1) Oka, M. et al : A fatigue design for large container ship taking long-term environmental condition into account, OMAE2011

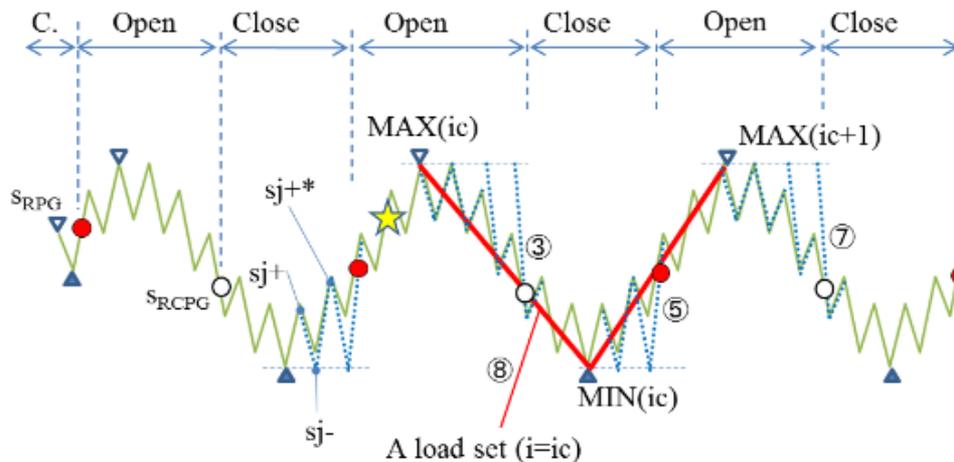
# 疲労き裂伝播解析プログラム

- き裂成長の遅延現象の再現
- 振幅がランダム変動する荷重履歴の処理

き裂先端の塑性挙動に着目した結合力モデルによるき裂伝播解析法  
(豊貞、丹羽； 2001)  
複数周波数成分を有する重畳応力条件下における疲労き裂伝播挙動解析  
(後藤、松田； 2012)

+

ランダム荷重履歴  
の処理アルゴリズム



ランダム荷重履歴下における  
き裂のOPEN-CLOSE  
の判別を行うアルゴリズムを  
作成し、プログラムに組み込み

# 解析結果

マイナー則に基づく疲労被害度D

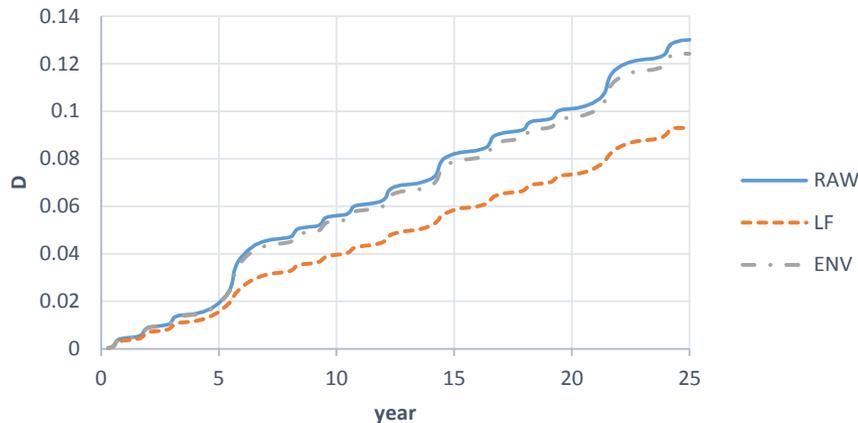
$$D = \sum \left( \frac{n_j}{N_j} \right), \quad N_j = \frac{K}{S_j^M}$$

S <sub>j</sub>	K	M
> 53.4 MPa	1.519E12	3.0
≤ 53.4 MPa	4.239E15	5.0

疲労き裂伝播解析の解析条件

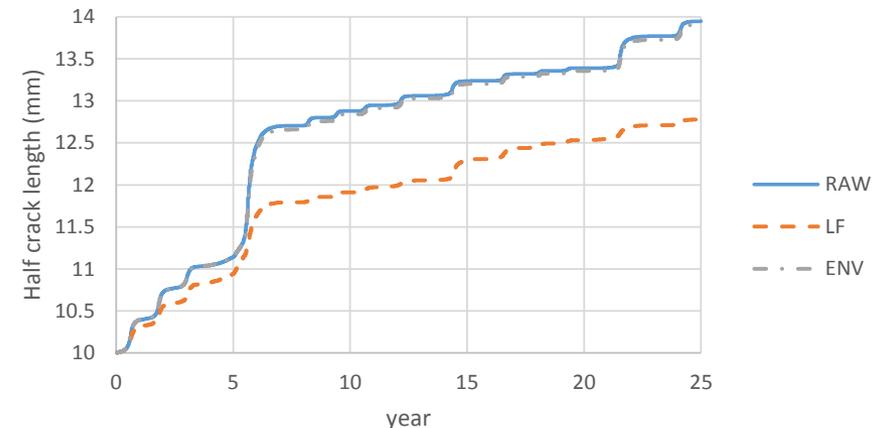
Item	Value and/or setting
Young's modulus	206GPa
Poisson's ratio	0.3
Yield stress(σ <sub>y</sub> )	460MPa
Initial crack (a <sub>0</sub> )	5mm, 20mm, 80mm ; through crack
Stress condition	Uniform stress on infinite plate
Plastic constant factor	λ=1.21 (Plane strain condition)
Material constant	C=4.505e-11, m=2.692 (SI units)

ID7



マイナー則

ID7, a<sub>0</sub>=20mm



疲労き裂伝播解析

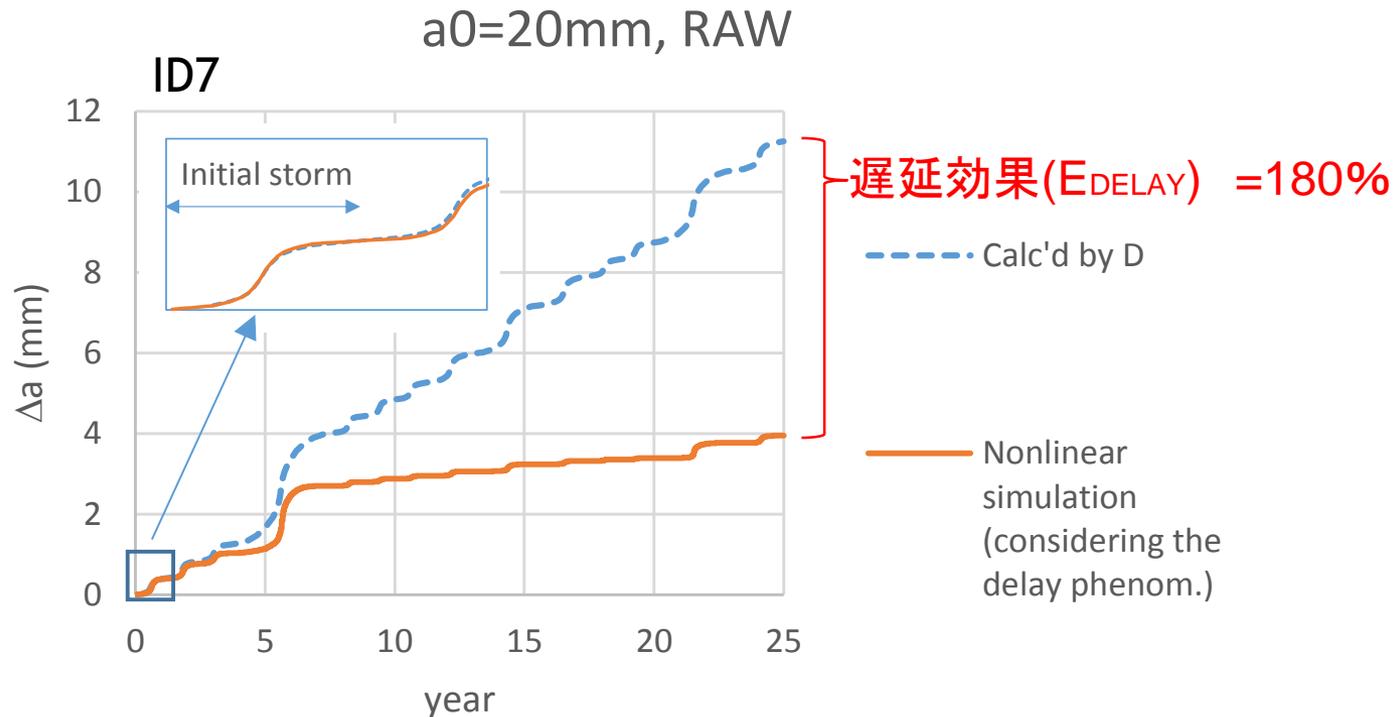
- RAWとLFの差は、評価法で同程度現れる。
- 遅延現象の有無によって、疲労被害の傾向が異なる。

# 遅延効果の定量評価

疲労被害度D と き裂伝播長さ $\Delta a$ は、直接比較ができない。

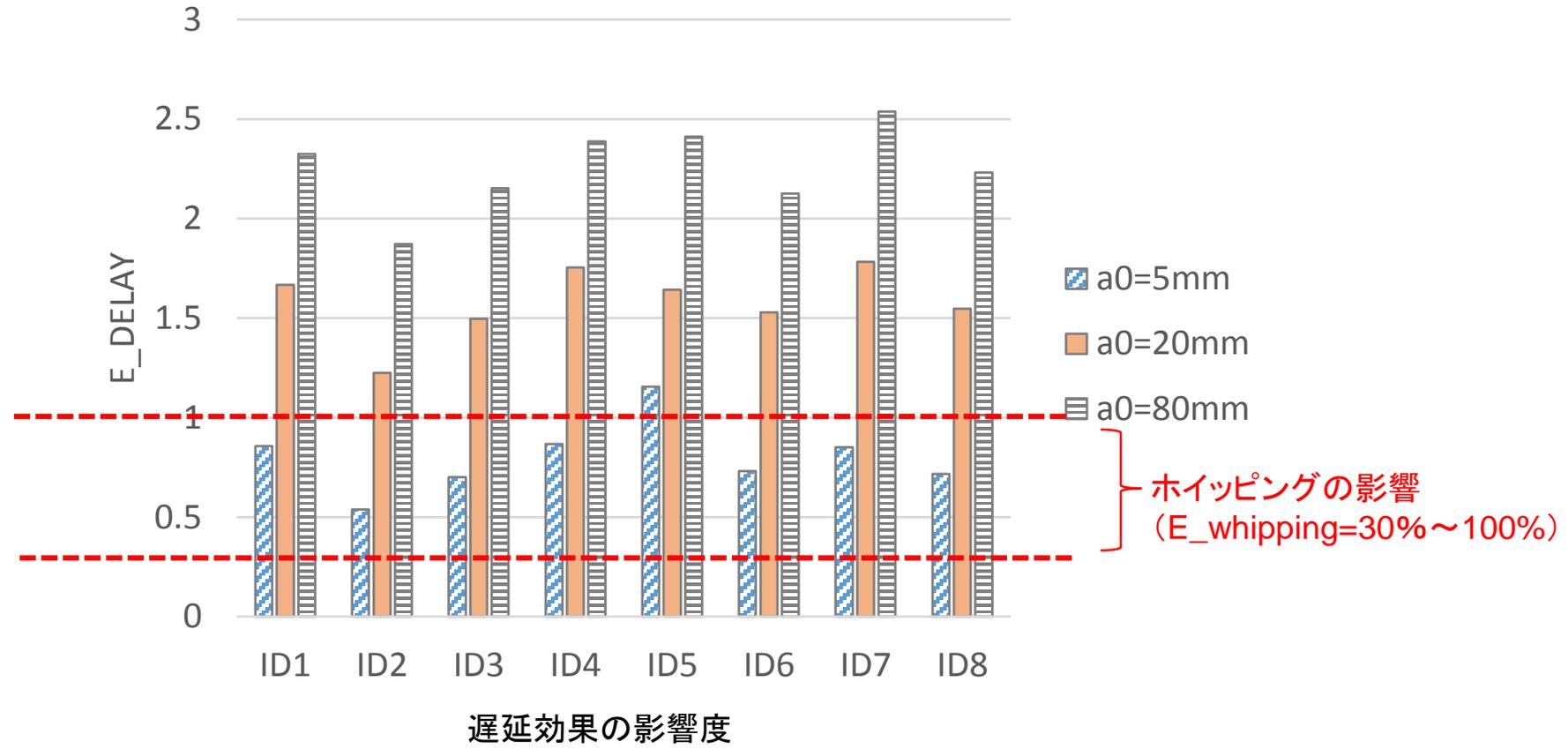
しかし、最初に遭遇する嵐の前半期間においては、遅延現象が起きにくいことから、疲労被害度とき裂長さは、ほぼ比例の関係にある。

この関係を利用して、Dと $\Delta a$ を比較することで遅延効果を定量評価する



➤遅延効果によって、マイナー則での見積りよりも疲労被害は減る傾向にある

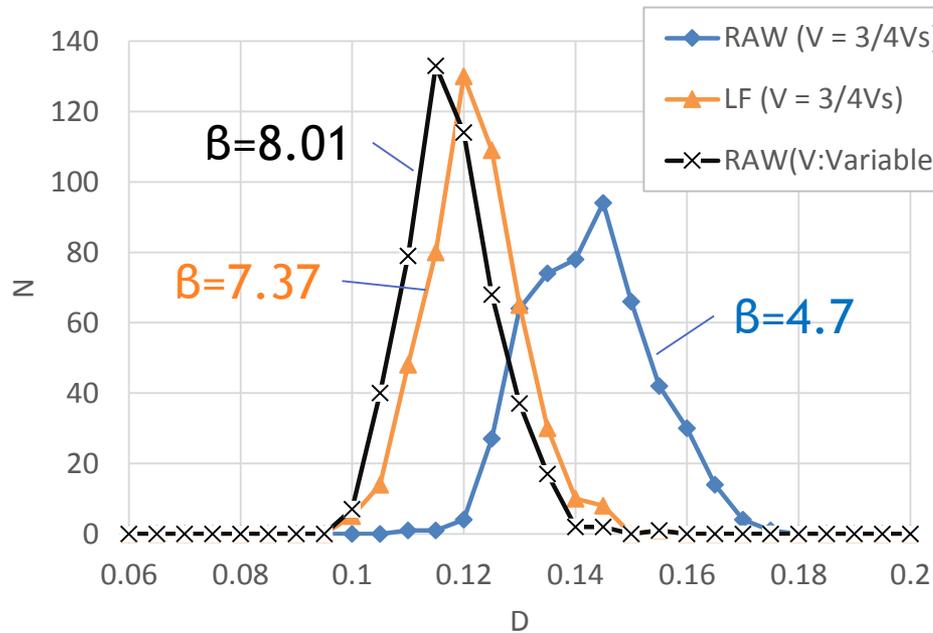
# 疲労寿命への影響度の比較



- 初期き裂(a0)が5mm以上においては、ホイップングの影響は遅延効果で相殺される
- ホイップングに起因した疲労き裂が目立っていないことを説明

# 信頼性解析手法を用いた 操船影響の定量的評価

船速 :  $H_s > 8m$ においては減速( $V=0 \sim 3/4s$ で一様分布)  
 波向 : 一様分布  
 嵐のレベル : 北大西洋の波浪テーブル



25年後の疲労被害度の確率密度

$$\beta = \frac{\mu Z}{\sigma Z}$$

$$Z = -\ln\left(\frac{D}{D_{CR}}\right)$$

$\beta$  : 信頼性指標  
 $\mu Z$  :  $Z$ の平均  
 $\sigma Z$  :  $Z$ の標準偏差  
 $D_{CR}$  : 限界破損状態(=0.2)

➤ホッピングの影響は、減速による疲労被害度の低減分（操船影響）でも相殺される可能性が高い

# 結論

- 大型コンテナ船の甲板部材においては、遅延効果によって、マイナー則での見積りよりも疲労被害が減る傾向にあることを示した。
- 操船影響については、データが不十分のため、疲労寿命が延びる可能性を示した段階に留まるものの、遅延効果と合わせて考えれば、ホイッピングに起因した疲労損傷が起きていないという実態は説明付く。
- 解析的手法を用いて疲労強度評価を行うための環境を整備した。解析精度の向上のため、航海データの集約・整備が必要不可欠である。

# 船上モニタリングに関する研究 (H28~)

- (1) 船体構造モニタリングシステムの開発
  - 1. 運航・性能モニタリングシステム等の一部として統合出来るシステム
  - 2. 安全性の観点からの減速及び変針等の操船判断の支援機能
- (2) 蓄積された実船計測データの活用

