

大型コンテナ船の構造強度に関するNKの取り組み

2016 ClassNK技術セミナー

講演内容

1. コンテナ船の構造規則に関する規則改正について
2. 面外荷重影響を考慮した縦曲げ最終強度の簡易算式について
3. ホイッピングによる波浪中縦曲げモーメントへの定量的影響の推定

講演内容

1. **コンテナ船の構造規則に関する規則改正について**
 - 1) 改正の背景
 - 2) 改正の概要
 - 3) 本会独自の縦曲げ最終強度要件について
2. 面外荷重影響を考慮した縦曲げ最終強度の簡易算式について
3. ホイッピングによる波浪中縦曲げモーメントへの定量的影響の推定

IACSの動き

2007年1月 大型コンテナ運搬船(MSC Napoli)の海難事故



UK MAIB(英国海難調査局)が縦強度要件見直しを提言

IACSにおいて縦強度要件を議論



2010年11月
統一規則S11(Rev.7)採択
(縦強度要件の適用範囲拡大)



2013年6月 大型コンテナ運搬船の海難事故



IACSにおいてコンテナ運搬船
に対する強度要件を検討



2015年5月 統一規則S34採択



2015年6月統一規則S11A採択

2013年6月 大型コンテナ運搬船の海難事故

2013年8月
JGコンテナ運搬船
安全対策検討委員会

2014年2月
NK大型コンテナ船
安全検討会

2015年3月 最終報告書公表

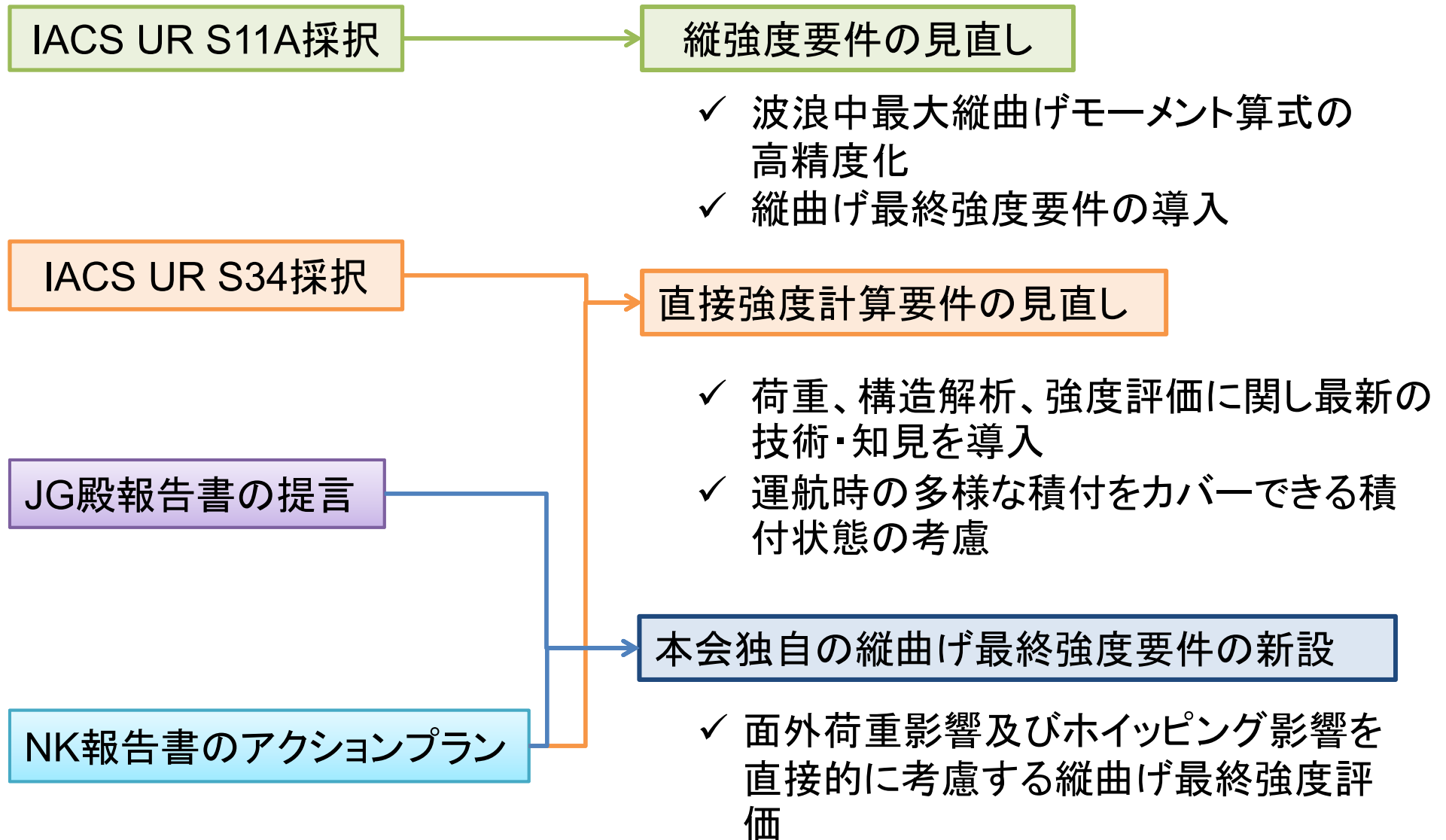
2014年9月 報告書公表

JG殿報告書の提言

- ① 船底構造における応力の2軸性を含む横荷重(面外荷重)の影響を考慮する船体縦曲げ最終強度の規則とすること。
- ② ホイッピング応答の影響を直接的に考慮する縦曲げ強度の規則とすること。
- ③ 縦強度に関する規則の技術的背景の提示の在り方を検討すること。

NK報告書のアクションプラン

- ① 面外荷重の影響を考慮した実用的な縦曲げ最終強度評価手法を開発する。
- ② 横強度に関する直接強度計算要件の見直しを行う。
- ③ ホイッピング応答の影響を含めた波浪荷重の評価手法について検討する。



船の就航期間における最大の縦曲げモーメントに対し、船体梁の耐荷力が適切な安全率を有していることを確認する強度要件

従来の降伏強度や座屈強度の要件は、必ずしも損傷の発生と結びつく要件ではなかったが、縦曲げ最終強度要件は、損傷に対する安全率という形で評価を行うことが可能

縦曲げ最終強度(船体梁の耐荷力)

船体に縦曲げモーメントのみが働くことを考慮することによりスミス法という簡易法により計算が可能

評価式

$$\frac{M_U}{\gamma_{M_U}} \geq M_S + \gamma_{M_w} M_w$$

静水中許容最大縦曲げモーメント

船の就航期間における最大波浪中縦曲げモーメント

IACS 統一規則S11Aの縦曲げ最終強度要件

スミス法により算出した縦曲げ最終強度

$$\frac{M_U}{\gamma_M \gamma_{DB}} \geq M_S + \gamma_w M_w$$

面外荷重影響等を考慮した安全率

波浪中縦曲げモーメントに対する安全率

本会独自の縦曲げ最終強度要件

$$M_{UDB} \geq M_S + \gamma_{wh} M_w$$

面外荷重影響を直接考慮した
縦曲げ最終強度

ホッピング影響を考慮した波浪中縦
曲げモーメントの安全率

面外荷重影響を考慮できる
簡易算式の開発

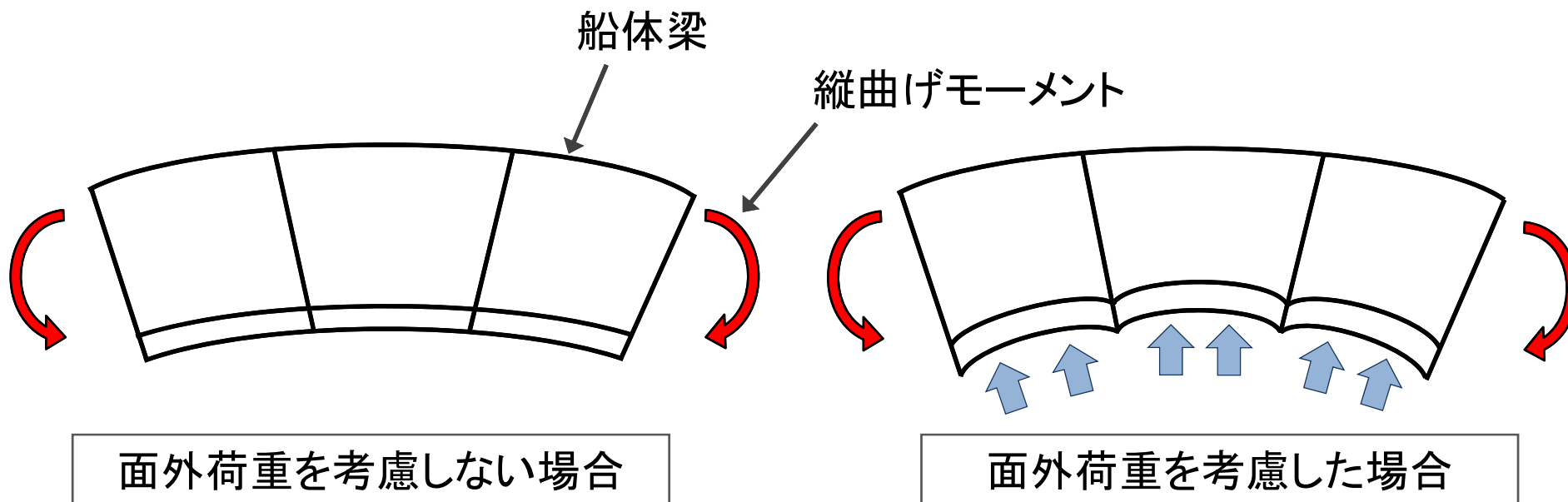
ホッピング影響の定量的推定

個船に応じた適切な安全率を与えることが可能

講演内容

1. コンテナ船の構造規則に関する規則改正について
2. 面外荷重影響を考慮した縦曲げ最終強度の簡易算式について
 - 1) 背景
 - 2) 面外荷重影響を考慮できる簡易算式の開発
 - 3) 試計算による精度検証
 - 4) 規則要件への反映
3. ホイッピングによる波浪中縦曲げモーメントへの定量的影響の推定

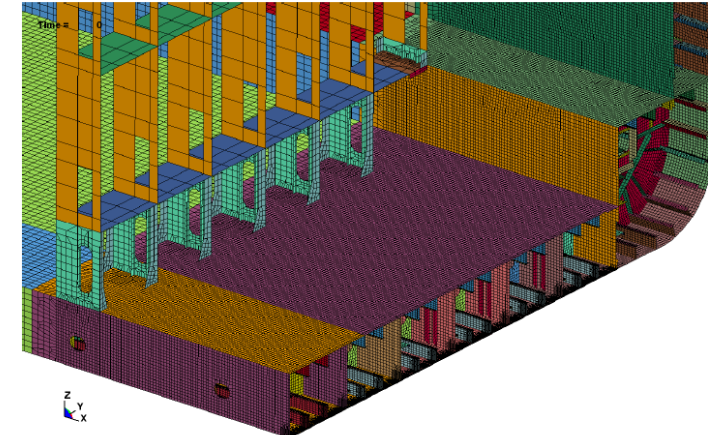
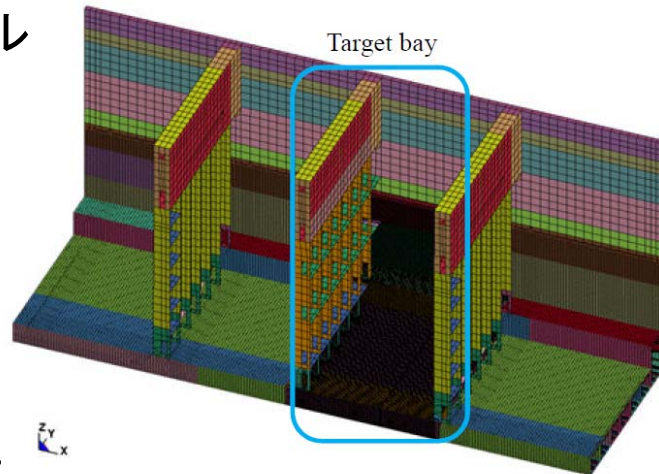
面外荷重影響とは？



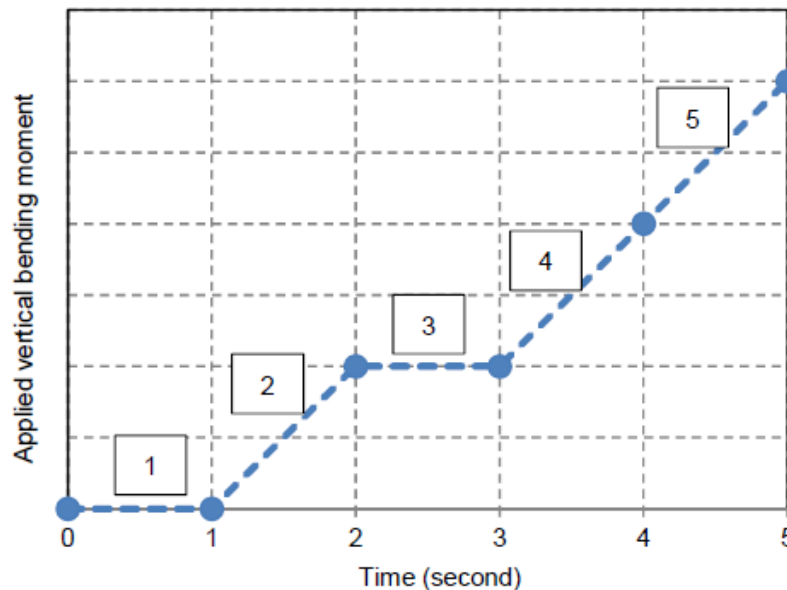
船底及び船側水圧等の面外荷重が働くことで、船底外板において縦曲げによる応力と面外荷重による応力が重畳することにより縦曲げ最終強度は低下

➤ 解析手法 材料の降伏、大変形の影響を考慮できる動的陽解法 (LS-DYNA)

➤ 解析モデル



➤ 荷重条件

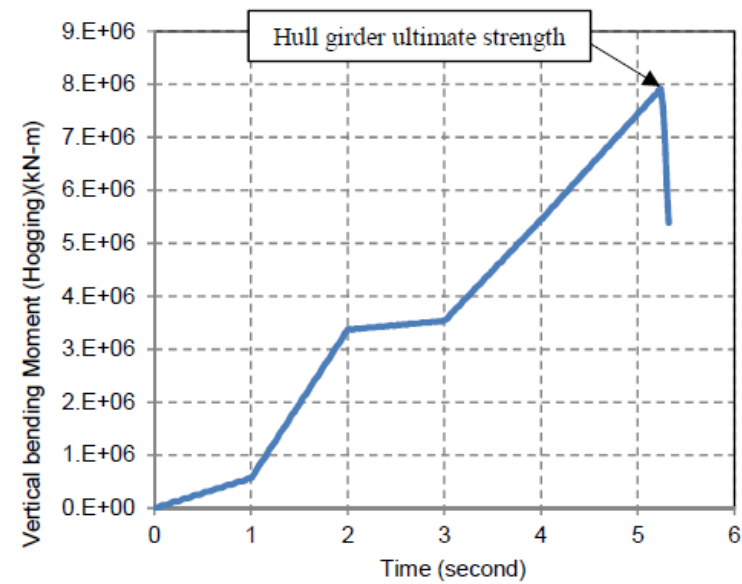
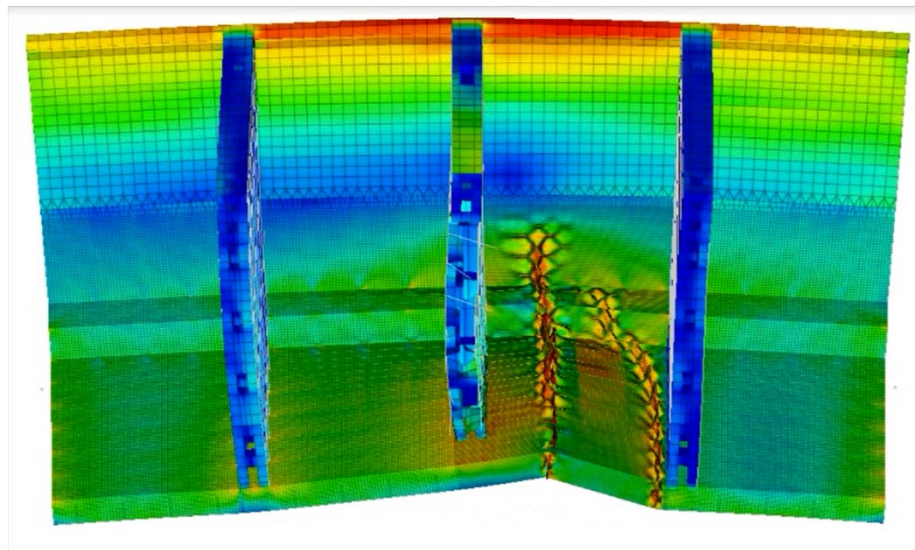


座屈、塑性崩壊を表現できる詳細メッシュ

- 1: 静水圧、コンテナ重量、船殻重量
- 2: 静水中ホギングモーメント(M_s)
- 3: 波浪圧力
- 4: 波浪中ホギングモーメント(M_w)
- 5: 崩壊までホギングモーメントを増加

➤ 解析結果の一例

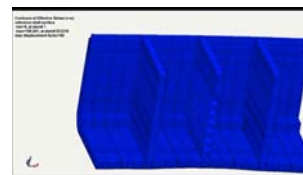
崩壊断面に働く垂直曲げモーメントより、
縦曲げ最終強度を求める



従来の縦曲げ最終強度要件

- ✓ UR S11A、CSR BC&OTを始め様々な構造規則に採用
- ✓ スミス法を用いて縦曲げ最終強度を算定
- ✓ 船底水圧等の面外荷重の影響は安全率で考慮

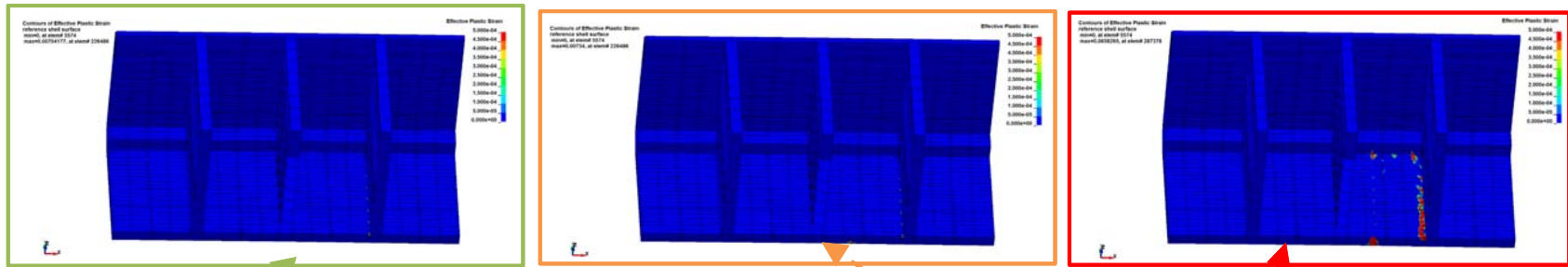
現状、ホールドモデルを用いた大規模な弾塑性解析でしか面外荷重の影響を定量的には考慮できない
→設計時の強度評価法としては不向き



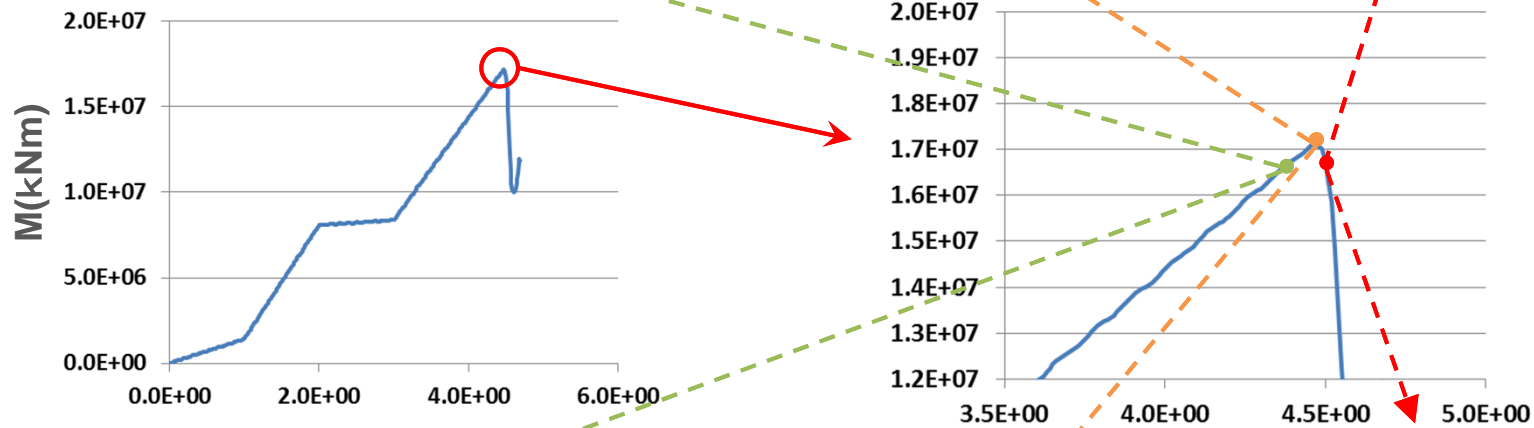
面外荷重影響が縦曲げ最終強度を低下させる程度は、個船の横強度に依存

船体が海水や貨物から受ける面外荷重を考慮し縦曲げ最終強度を精度良く評価する簡易手法を確立することが必要

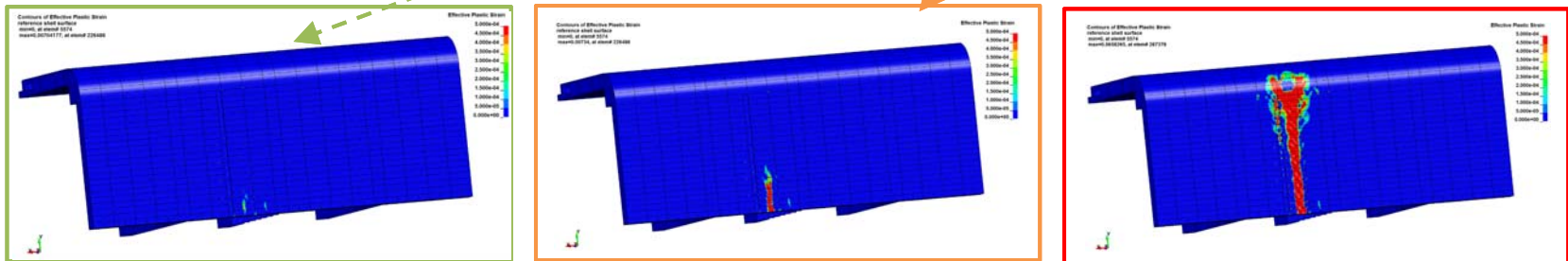
内底板側



垂直曲げモーメント



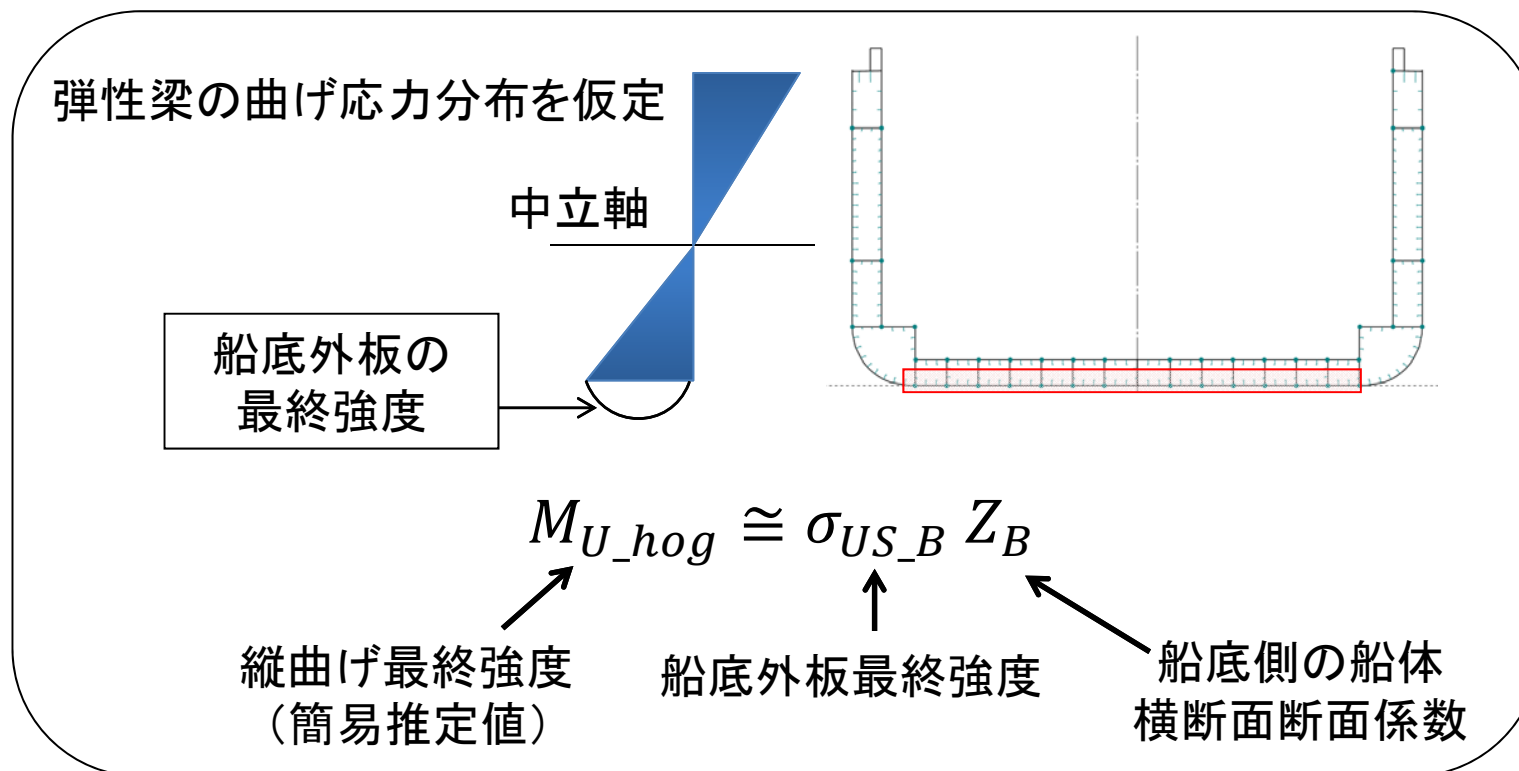
船底側



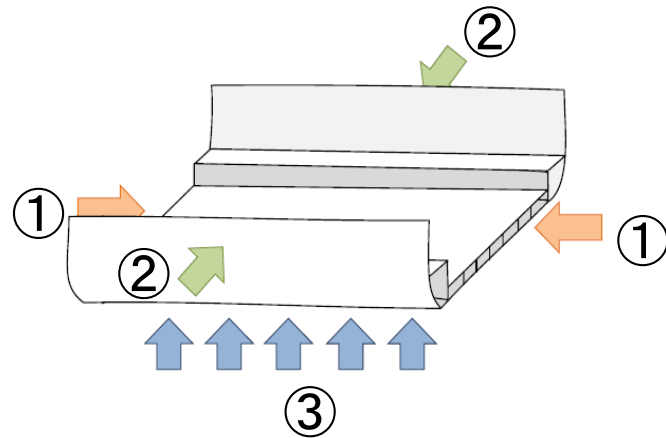
船底外板崩壊時に縦曲げ崩壊が生じる

簡易算式のコネプト

- ✓ 縦曲げ最終強度 ≡ 船底外板の崩壊時に船体に働く縦曲げモーメント
(安全側の設定)
- ✓ 船底外板が崩壊する瞬間までは、船体梁の殆どの部材は弾性応答



面外荷重影響を考慮した船底外板防撓パネルの最終強度の推定



① 縦曲げによる船長方向圧縮荷重

面外荷重

② 船側水圧による船幅方向圧縮荷重

③ 船底水圧による突き上げ荷重

直接強度計算(線形FEM)より船底外板に働く応力を抽出

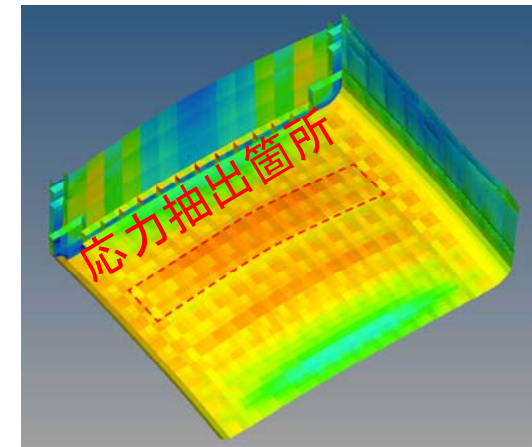


大阪大学で提案された防撓材要素最終強度式を適用

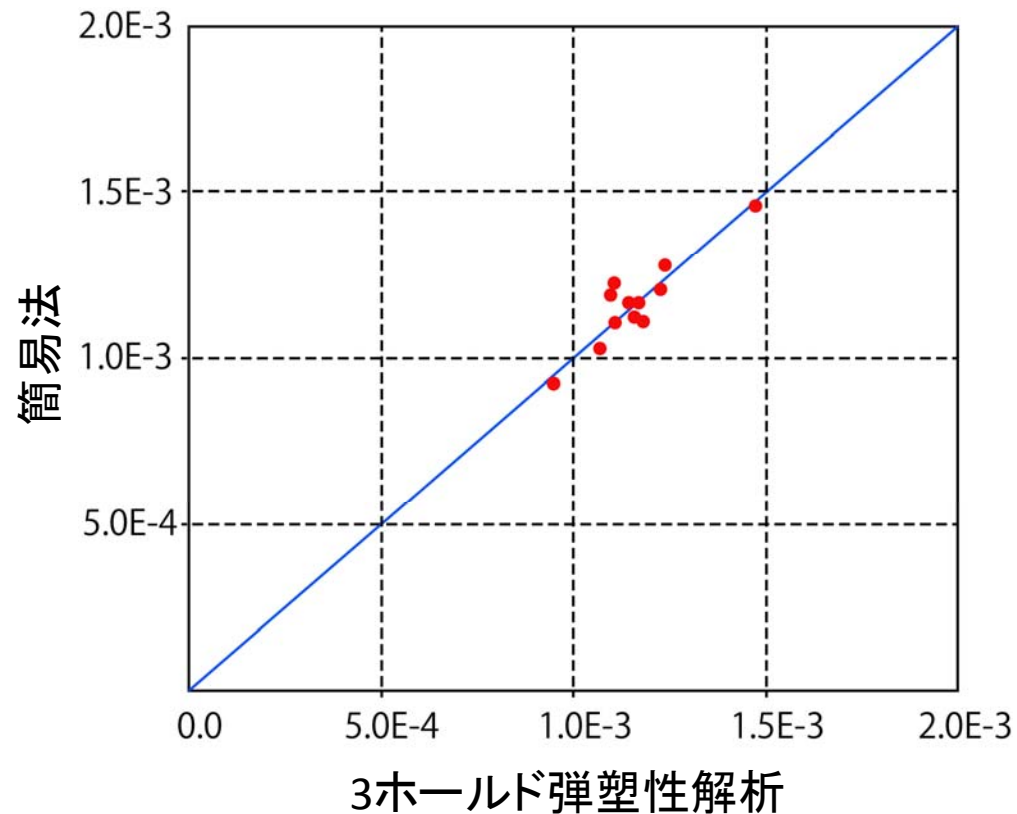


船底外板の最終強度を導出

線形FEM解析結果



対象船: 6000~10,000超TEUの大型コンテナ船



※縦曲げ最終強度値は無次元化した値

3ホールド弾塑性解析との比較より十分な精度で縦曲げ最終強度を算定できることを確認

本会独自の縦曲げ最終強度要件

$$M_{UDB} \geq M_S + \gamma_{wh} M_w$$

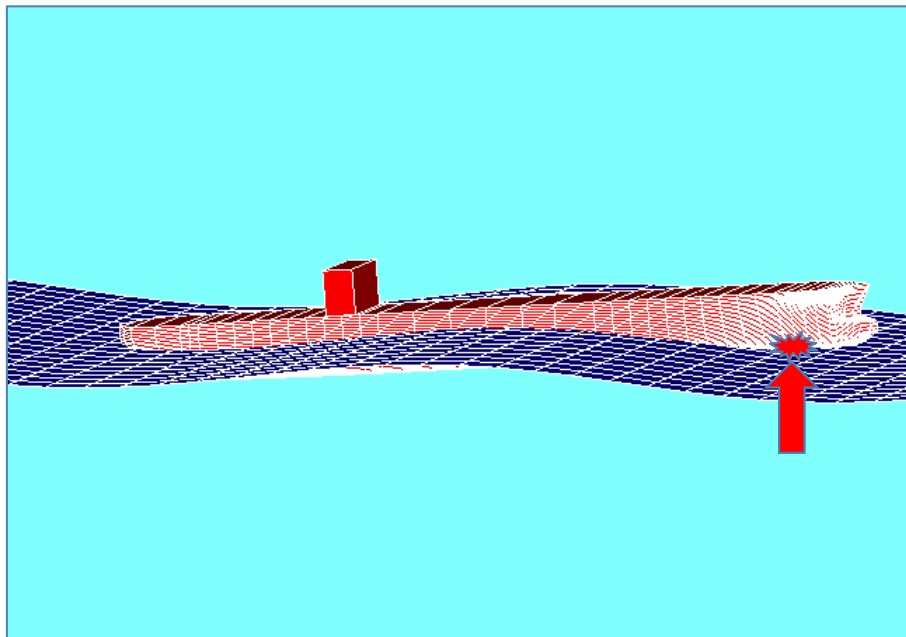
簡易算式より面外荷重影響を考慮した縦曲げ最終強度を計算

別途実施される線形FEMに基づく直接強度計算要件の結果と今回開発された簡易算式により、3ホールドモデルを用いた大規模な弾塑性解析を行わずとも、個船の構造配置及び寸法に応じた面外荷重影響を考慮することが可能となった。

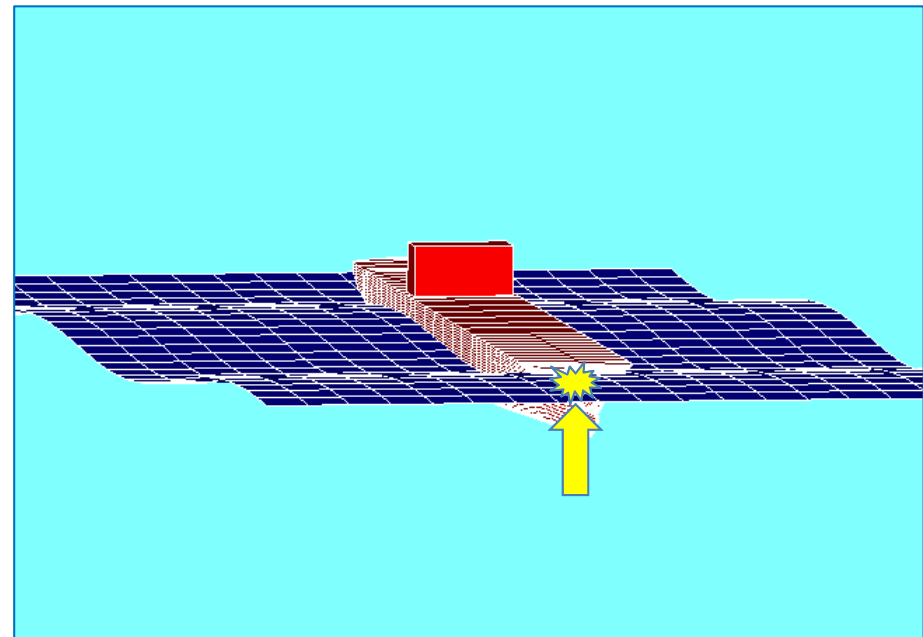
講演内容

1. コンテナ船の構造規則に関する規則改正について
2. 面外荷重影響を考慮した縦曲げ最終強度の簡易算式について
3. **ホイツピングによる波浪中縦曲げモーメントへの定量的影響の推定**
 - 1) ホイツピングについて
 - 2) ホイツピング影響の定量的評価の必要性
 - 3) ホイツピング影響を考慮した縦曲げモーメントの評価方法
 - 4) 定量的評価の手順と結果
 - 5) 規則要件への反映

- 船舶が大波高の波浪中を航行するとき、大振幅の船体運動を行い、船首船底の露出から波浪に突入する時に船底に衝撃的な荷重が作用する。あるいは、船首のフレアが急激に波に没入する時に衝撃力が働く。この現象をスラミングという。
- フレアが大きいコンテナ船の場合は、船首フレアスラミングの影響が大きい。

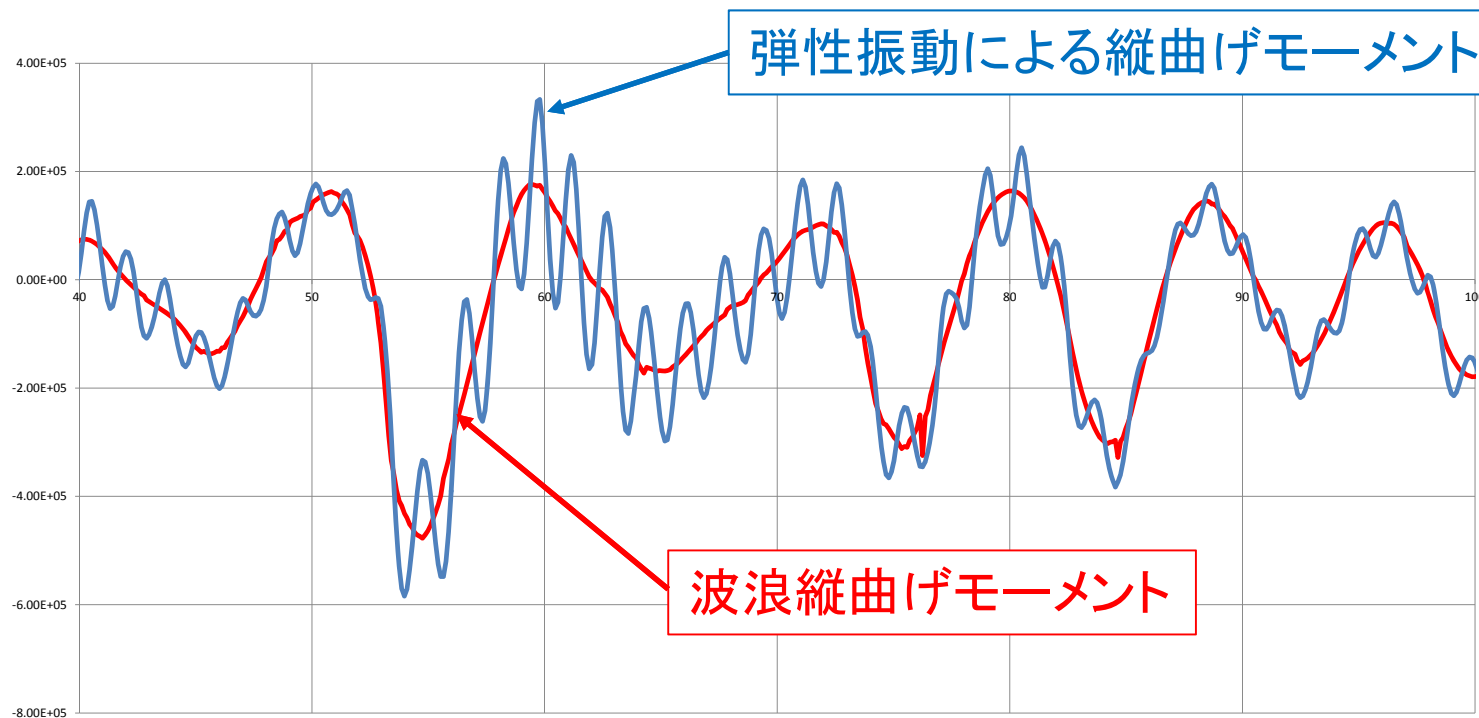


船首船底スラミング



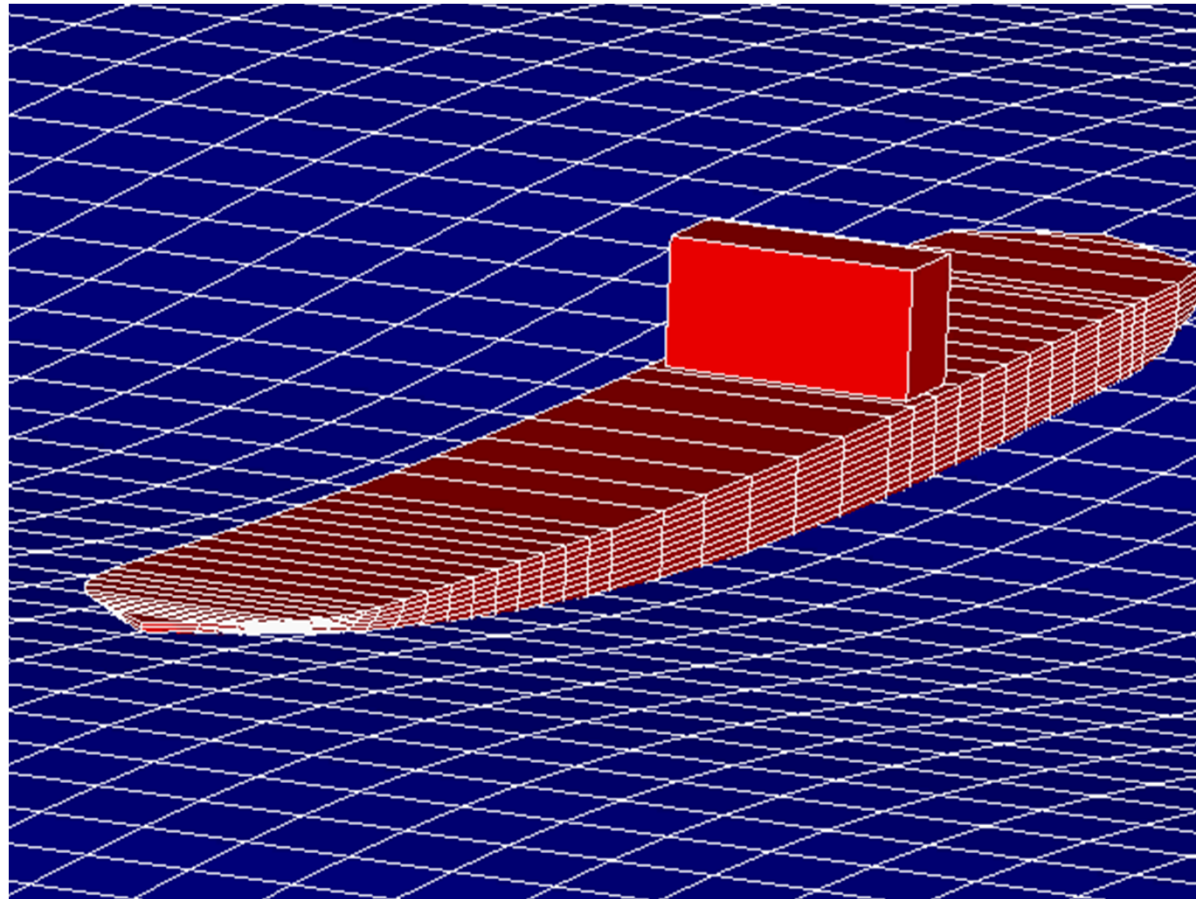
船首フレアスラミング

- スラミング衝撃力により船体に弾性振動が生じ、たわみによる縦曲げモーメントが発生する。
- 波浪縦曲げモーメントに加え、この衝撃力と弾性振動による縦曲げモーメントの重畳現象をホイッピングという。



コンテナ船の波浪中のホイッピング(3)

6500 TEU Container (L = 290 m) Vs = 15 kt. Hw = 12.0 m $\lambda/L = 1.4$ Head sea



船体の変形を約20倍に拡大

本会独自の縦曲げ最終強度要件

IACS統一規則UR S11Aに定義された
波浪中縦曲げモーメント

$$M_{UDB} \geq M_S + \gamma_{wh} M_w$$

面外荷重影響を直接考慮した
縦曲げ最終強度

ホッピング影響を考慮した波浪中縦
曲げモーメントの安全率

$$\gamma_{wh} = \frac{\text{ホッピング影響を考慮した
船の一生における最大の波浪中縦曲げモーメント}}{\text{IACS統一規則S11Aで定義された波浪中縦曲げモーメント}}$$

強度要件における適切な安全率の設定

ホッピング影響の定量的な評価が必要

船舶が生涯に遭遇する荷重の最大値の一般的な推定法

例えば、IACS Rec. 34 が提示する北大西洋の全ての短期海象に対して応答の確率分布(長期分布)を求め、その確率分布の超過確率が 10^{-8} に相当する値を求める。

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	986.0	4976.0	7738.0	5569.7	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	695.5	3226.5	5675.0	5099.1	2838.0	1114.1	337.7	84.3	18.2	3.5	0.6	0.1	0.0	19128
4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	196.1	1354.3	3288.5	3857.5	2685.5	1275.2	455.1	130.9	31.9	6.9	1.3	0.2	0.0	13289
5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	51.0	498.4	1602.9	2372.7	2008.3	1126.0	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	4806
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	2586
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	0.0	0.0	8
15.5	0.0	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	0.0	0.0	3
16.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	1
SUM:	0	0	1	165	2091	9280	19922	24879	20870	12898	6245	2479	837	247	66	16	3	1	100000

IACS Rec. 34の北大西洋における短期海象頻度分布

非線形応答であるホイッピング影響を含んだ波浪縦曲げモーメントの長期分布を求めるには、上記の短期海象の全ての組み合わせに対する数値シミュレーションが必要

最悪短期海象に基づく最大値の推定

波浪中縦曲げモーメントの最大荷重が発生する海象(最悪短期海象)を特定し、その海象中において生じるホイッピングによる最大波浪中縦曲げモーメントの値を推定する手法。

- ✓ 25年間に船舶が受ける荷重の回数: 10^8 回
(25年の最大値は、超過確率 10^{-8} の最大値)

- ✓ 船舶が25年間に遭遇する短期海象(持続時間2~3時間)の数:

$$\frac{25(\text{年}) \times 365(\text{日}) \times 24(\text{時間})}{2 \sim 3(\text{時間})} \approx 10^5$$

- ✓ 1つの短期海象中に遭遇する荷重の回数: $\frac{10^8}{10^5} = 1,000$

最悪短期海象の中で1/1000最大値が、25年の最大値(長期分布の最大値)と等価

IACS S11Aに規定する波浪中縦曲げモーメントを発生させる最悪短期海象(有義波高、波周期)を定義

最悪短期海象における波浪中縦曲げモーメント
非線形応答数値シミュレーション

上記シミュレーション結果の統計解析により下記の値をそれぞれ導出

ホイッピング影響を**考慮しない**波浪中縦曲げモーメント

$$M_{w-1/1000}$$

ホイッピング影響を**考慮した**波浪中縦曲げモーメント

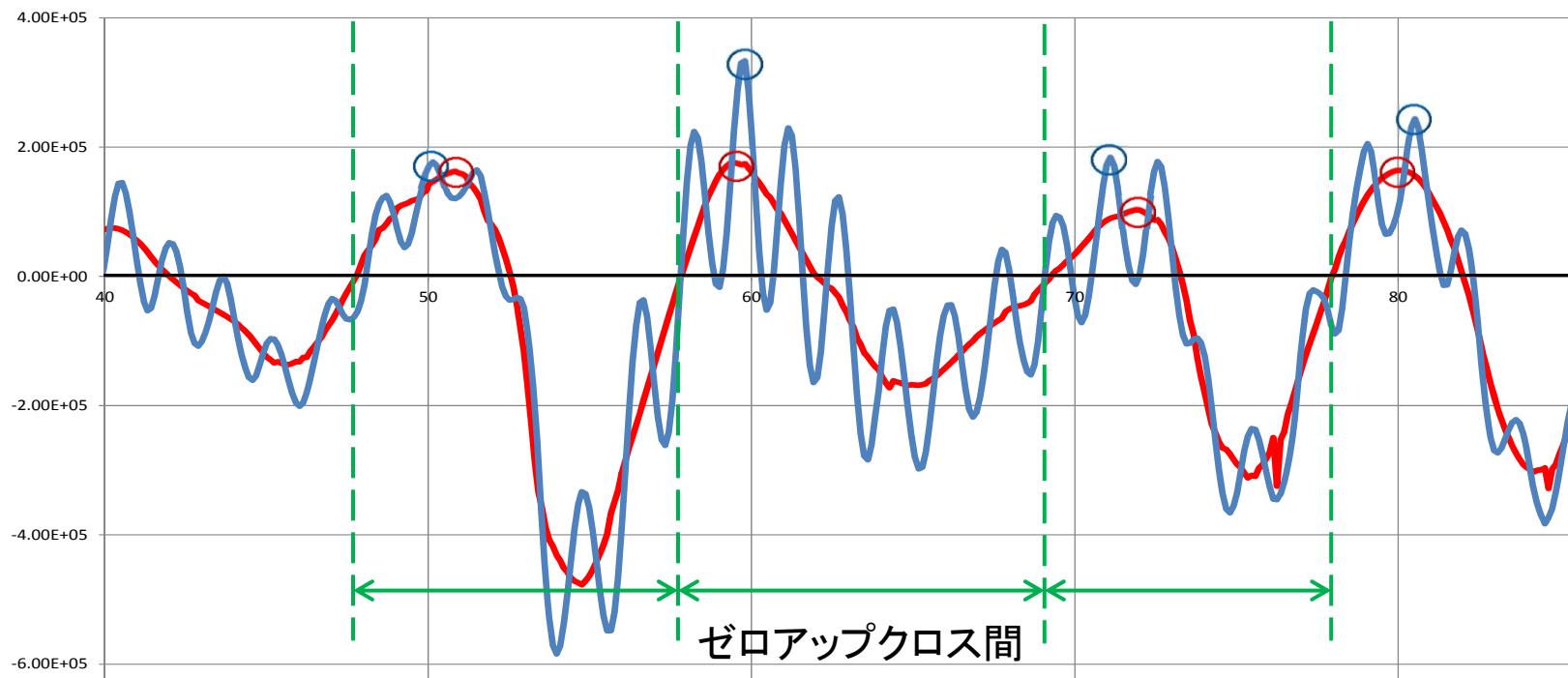
$$M_{wh-1/1000}$$

ホイッピングに関する部分安全係数

$$\gamma_{wh} = \frac{M_{wh-1/1000}}{M_{w-1/1000}}$$

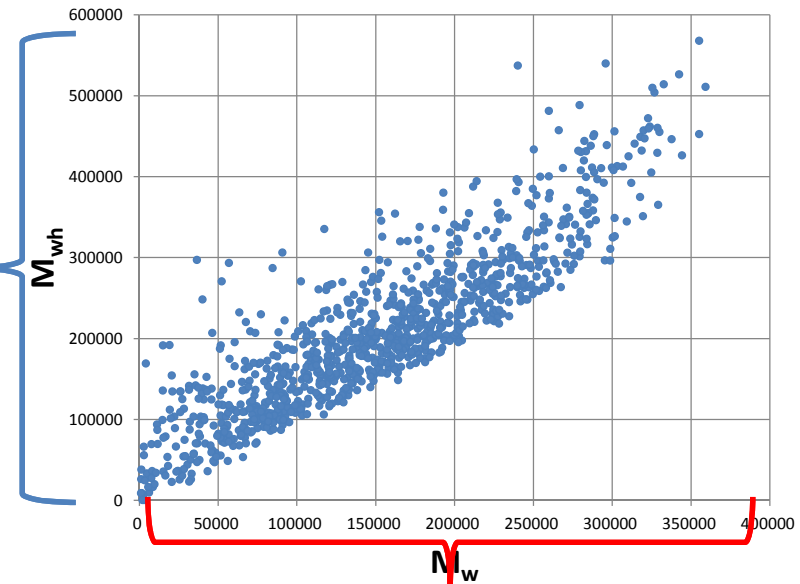
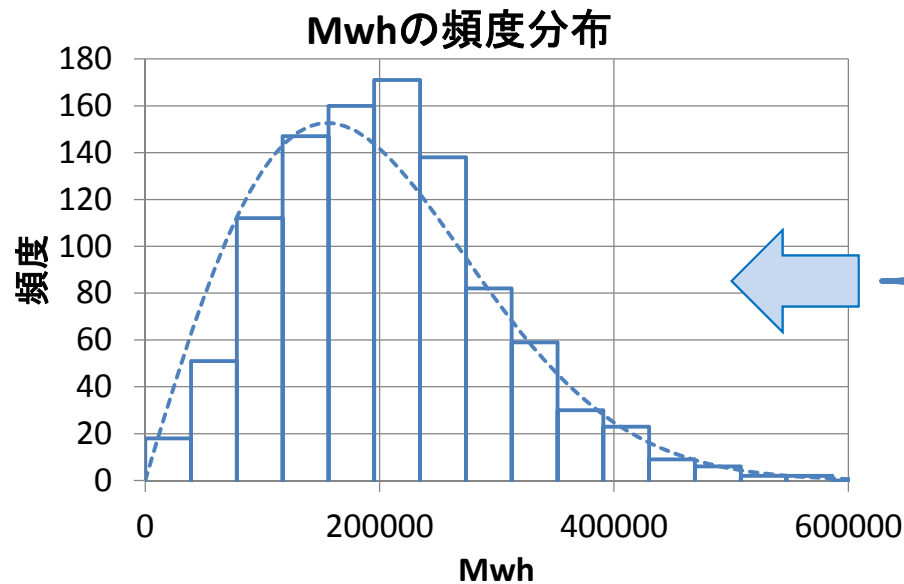
最悪短期海象中のホイッピング縦曲げモーメントの評価(1) ClassNK

最悪短期海象中での船体運動の数値シミュレーションにより、3時間(1000波相当)の船体中央の動的縦曲げモーメント時系列を計算する。

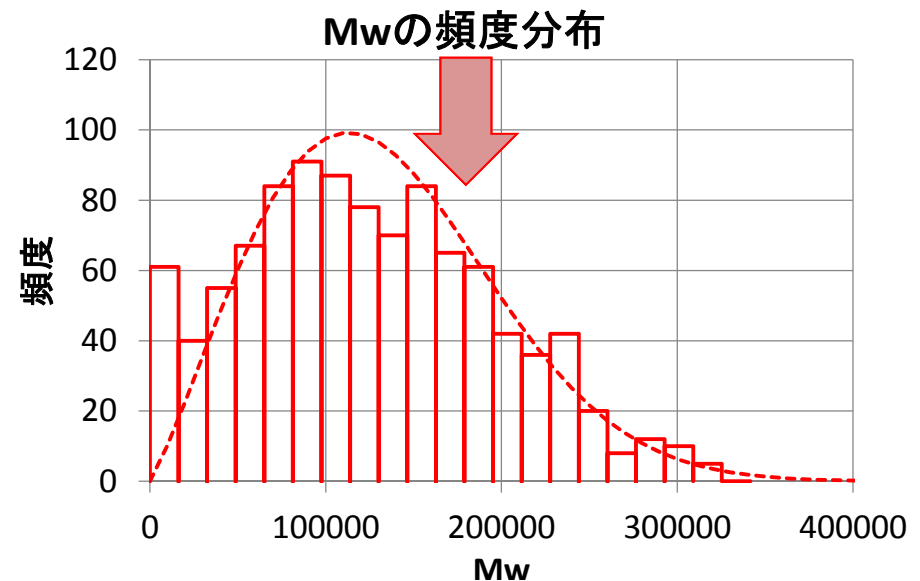


M_w : ホイッピング影響を考慮しない波浪中縦曲げモーメント
 M_{wh} : ホイッピング影響を考慮した波浪中縦曲げモーメント

3時間のシミュレーション結果におけるゼロアップクロス間の M_w 及び M_{wh} のピーク値をすべて抽出する。(すなわち約1000個ずつのピーク値を拾う)

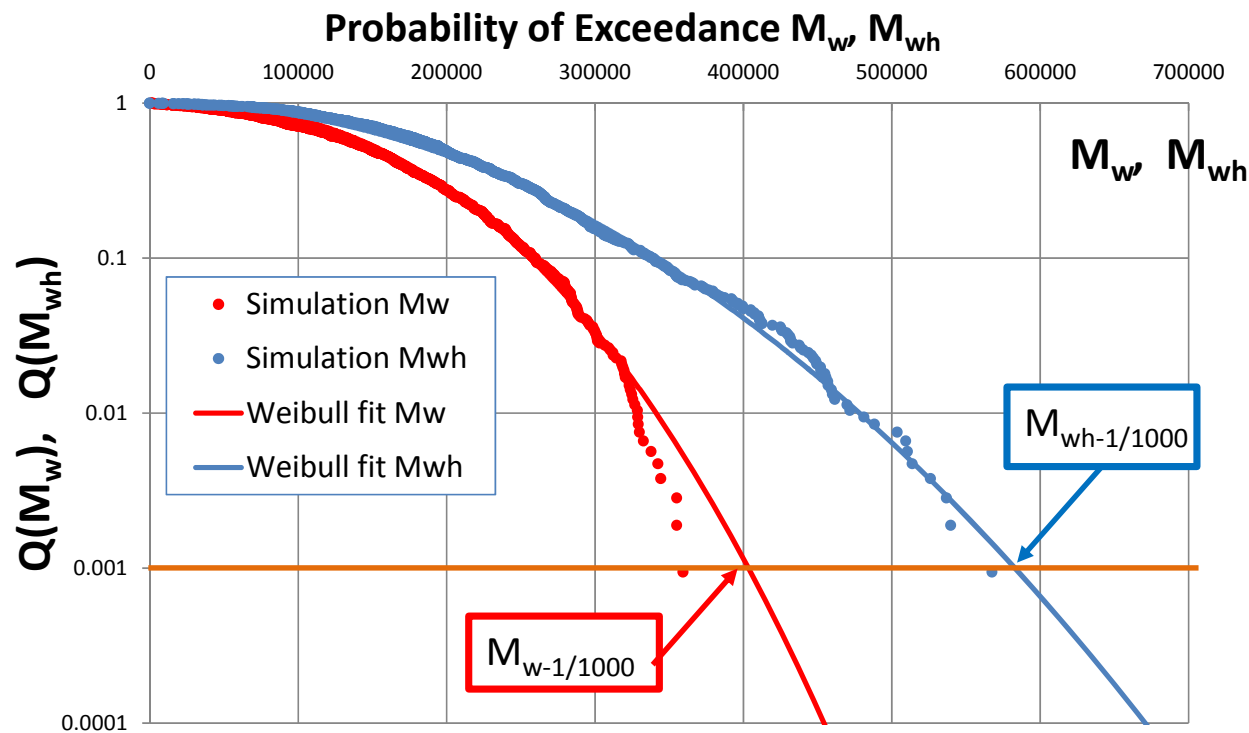


- カウントしたホギングの波浪中縦曲げモーメント M_w とホイッピング影響を含む M_{wh} の頻度分布を作成する。
- 頻度分布から、それぞれの M_w 、 M_{wh} の1/1000最大値を推定する。



最悪短期海象中のホイッピング縦曲げモーメントの評価(3) ClassNK

- カウントしたモーメント値を原則として上位の値の20%のサンプルを用いて2パラメータのWeibull分布によって近似をする
- M_w と M_{wh} の1/1000最大値(長期分布の $Q=10^{-8}$ と等価)の比をホイッピング影響の部分安全係数 γ_{wh} と定義する

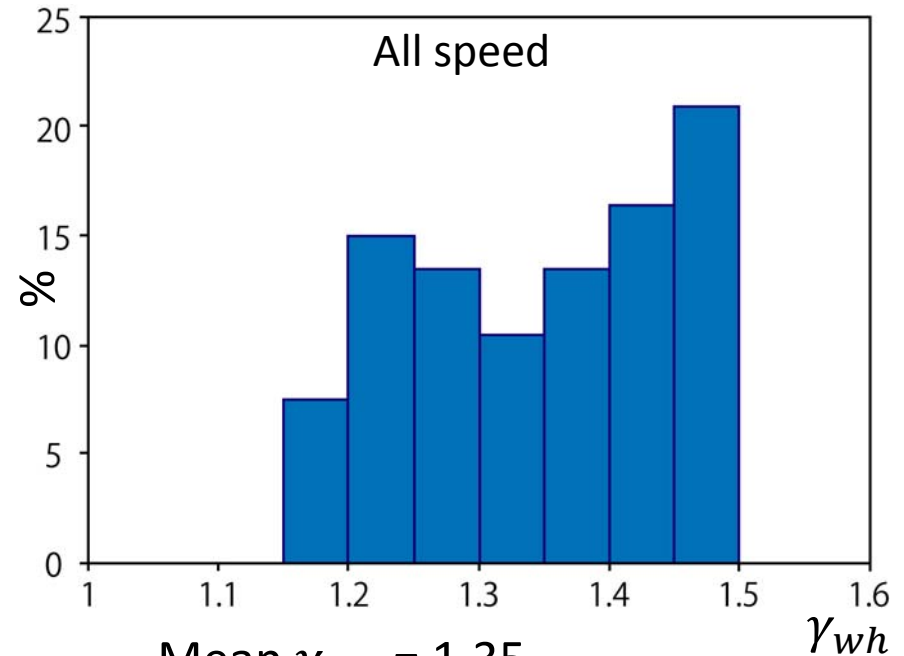


$$\gamma_{wh} = \frac{M_{wh-1/1000}}{M_w-1/1000}$$

- ✓ L_{pp} 280~350 mの7隻のコンテナ船
- ✓ 船速: 5 kt, 15 kt, 25 kt.
- ✓ 同一条件において3回の数値シミュレーション

$$7 \times 3 \times 3 = 63 \text{ Cases}$$

結果



Mean $\gamma_{wh} = 1.35$

Standard deviation $\gamma_{wh} = 0.10$

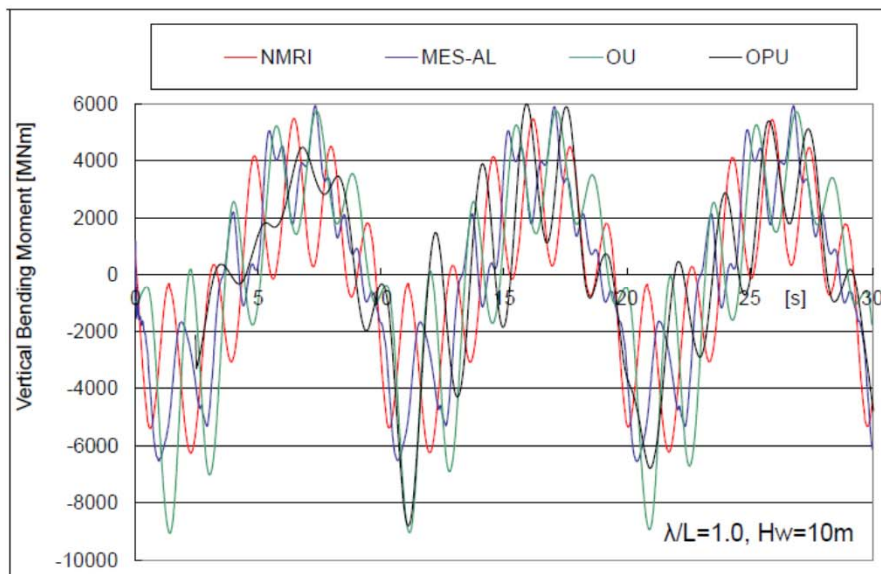
C.O.V. $\gamma_{wh} = 7.6\%$

Leeらの13000TEUコンテナ船の数値計算との比較

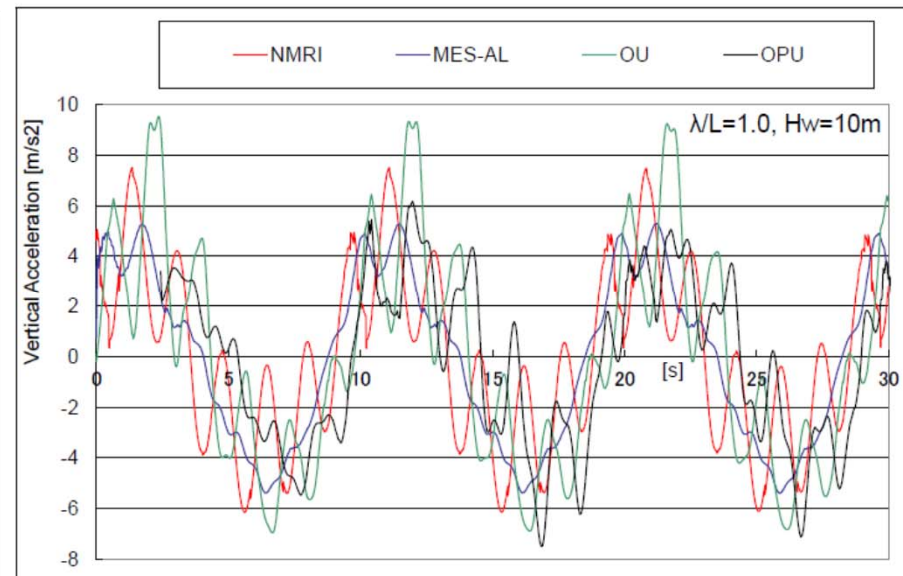
Method	Sea State	Whipping effect
This paper ($L_{pp}=280\sim350$ m, $V_s = 5$ kt)	$H_s = 15.0$ m $T = 11\sim12$ sec.	Mean $\gamma_{wh} = 1.47$
Lee et al. ($L_{pp}= 350$ m, $V_s = 5$ kt)	$H_s=14.5$ m $T = 11.5$ sec.	$\gamma_{wh} = 1.42$

ホイッピングによる縦曲げモーメントのシミュレーションに用いられる数値計算ツールは同一の要件を備えたものとしても、船体のモデル化、流体力の計算法、プログラミングによって計算結果にバラツキがある。

ポストパナマックスコンテナ船 (L=280 m) の4機関の波浪中縦曲げモーメントの数値計算プログラムの比較 Fukasawa(2011)



船体中央の波浪縦曲げモーメント



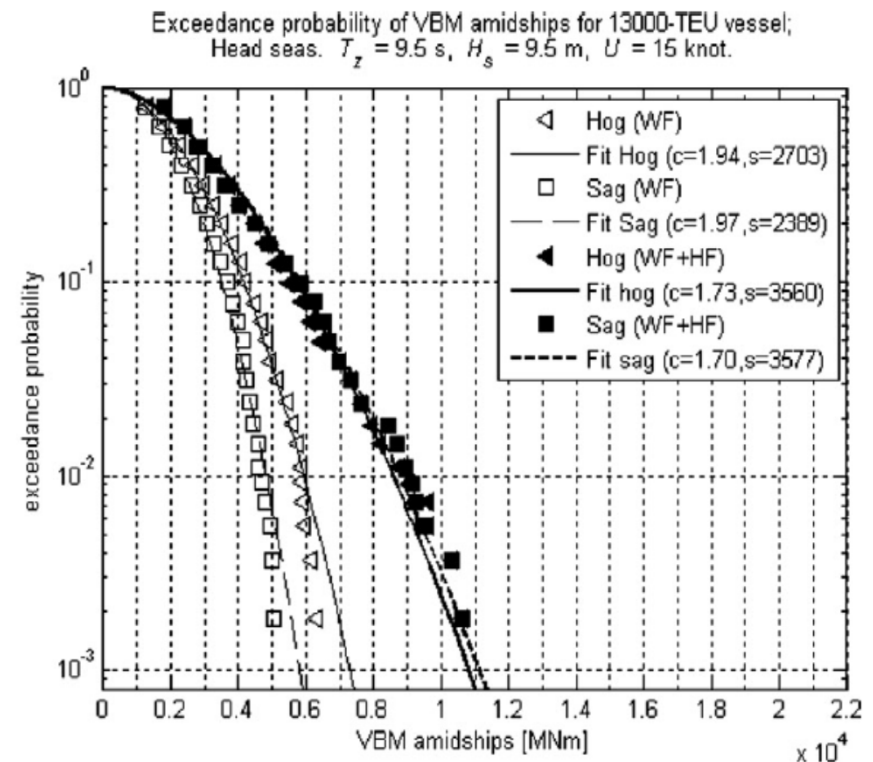
船首上下加速度

- 数値シミュレーションによって得られたホイツピング縦曲げモーメントの値が妥当なものかを、複数の観点からの検討が必要
 - ✓ 水槽試験との照合
 - ✓ 確率論に基づく検討

Zhu and Moan (2014)の13000TEUコンテナ船の弾性模型の水槽試験と比較



水槽試験の状況

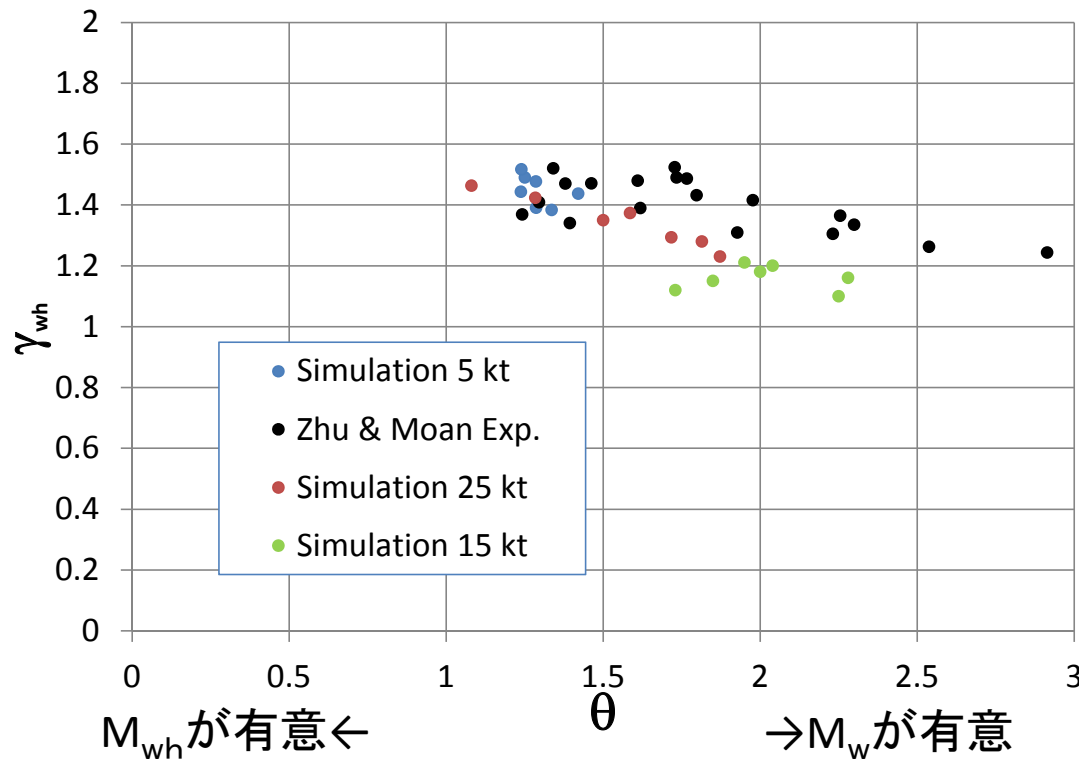


不規則波中のMw(白抜き)とMwh(塗りつぶし)の確率分布

波浪中縦曲げモーメントの標準偏差 S_w と弾性曲げモーメント成分の標準偏差 S_{el} との比 θ をパラメータとして整理する.

$$\theta = \frac{S_w}{S_{el}}$$

試験船: Zhu and Moan (13,000TEUコンテナ船)



γ_{wh} の統計量

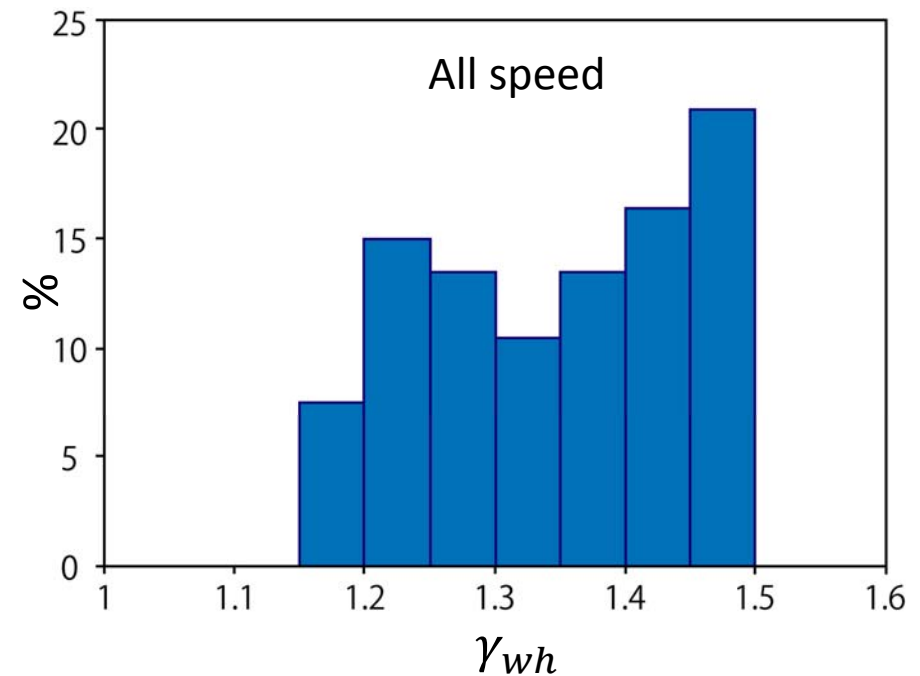
	Zhu and Moan	This paper
平均値	1.40	1.35
標準偏差	0.09	0.10
C.O.V. (%)	6.2	7.6

本会独自の縦曲げ最終強度要件

$$M_{UDB} \geq M_S + \gamma_{wh} M_W$$



ホイッピングを考慮した部分安全率 : 1.5



模型試験結果や確率理論に基づいた検証で精度を確認されたホイッピング影響の定量的評価法を用いたシリーズ計算を実施



上記シリーズ計算で得られた結果より、ホイッピング影響を考慮した部分安全率 γ_{wh} 1.5とすれば、安全側に評価が可能

本会ではコンテナ船の構造強度に関する取り組みとして以下の規則改正を行った。

- ✓ IACS統一規則S11Aに基づきコンテナ船の縦強度要件を見直した。
- ✓ 直接強度計算要件について、荷重、構造解析から強度評価に至るまで最新の技術・知見を導入した評価手法とした。また、運航時の多様な積付けをカバーできるような積付状態を考慮した。
- ✓ 面外荷重影響及びホイッピング影響をより直接的に評価し、個々のコンテナ船に応じて適切な安全率を与えることができる本会独自の縦曲げ最終強度要件を導入した。

また、本会独自の縦曲げ最終強度要件の開発にあたり、以下の研究開発を行った。

- ✓ 3ホールドモデルの弾塑性解析のシリーズ解析より得られた崩壊挙動に関する知見に基づいて面外荷重影響を考慮した縦曲げ最終強度を推定できる簡易法を開発した。
- ✓ ホイッピング応答を考慮できる非線形数値シミュレーション及び最悪短期海象を用いた最大値の統計的推定法により、ホイッピング影響を考慮した波浪中縦曲げモーメントに関する安全率(1.5)を導いた。