

# 5. 第二世代非損傷時復原性基準に関する研究

-概要と過大加速度モードの基準策定に関する研究-



流体性能評価系 耐航性能研究グループ  
黒田 貴子



# はじめに ～船舶の復原性～

## 非損傷時復原性

無傷の船体に作用する波や風による転覆  
非損傷時復原性コード (2008 IS Code)

## 損傷時復原性

衝突や座礁による破口からの浸水による転覆  
海上人命安全条約(SOLAS条約)



船の大型化, 新しい船型の出現  
非損傷状態での大きな横揺れによる積み荷や乗員への被害

- 2008年～日本主導での物理則に基づく動的復原性要素の導入の審議
- 2020年 **第二世代非損傷時復原性基準暫定ガイドライン**(MSC. 1/Circ.1627)
- 2022年 解説文書最終化

# 第二世代非損傷時復原性基準とは

物理則に基づく動的復原性に起因する5つの危険モードの脆弱性を3段階で判定

## 危険モード

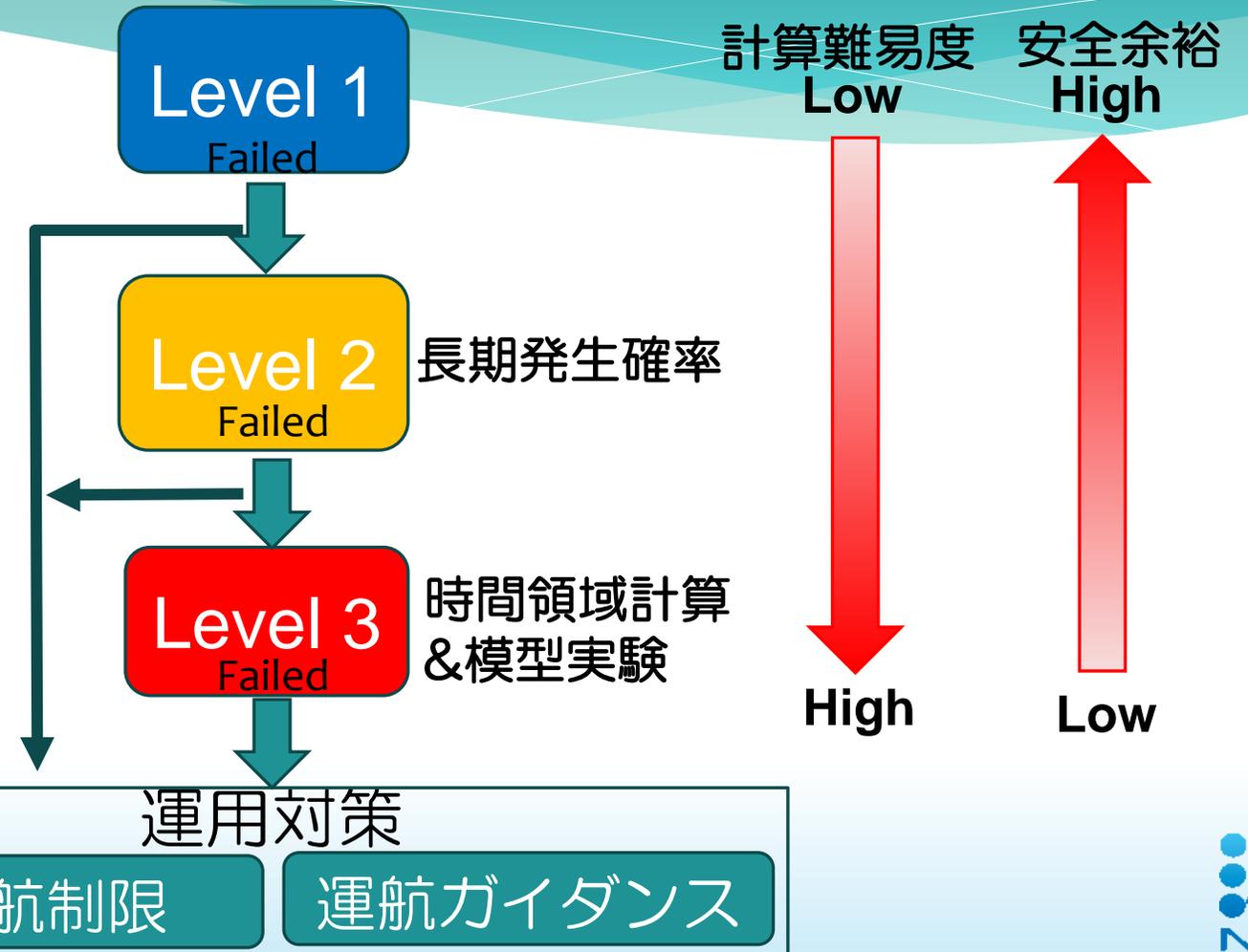
1.デッドシップ

2.過大加速度

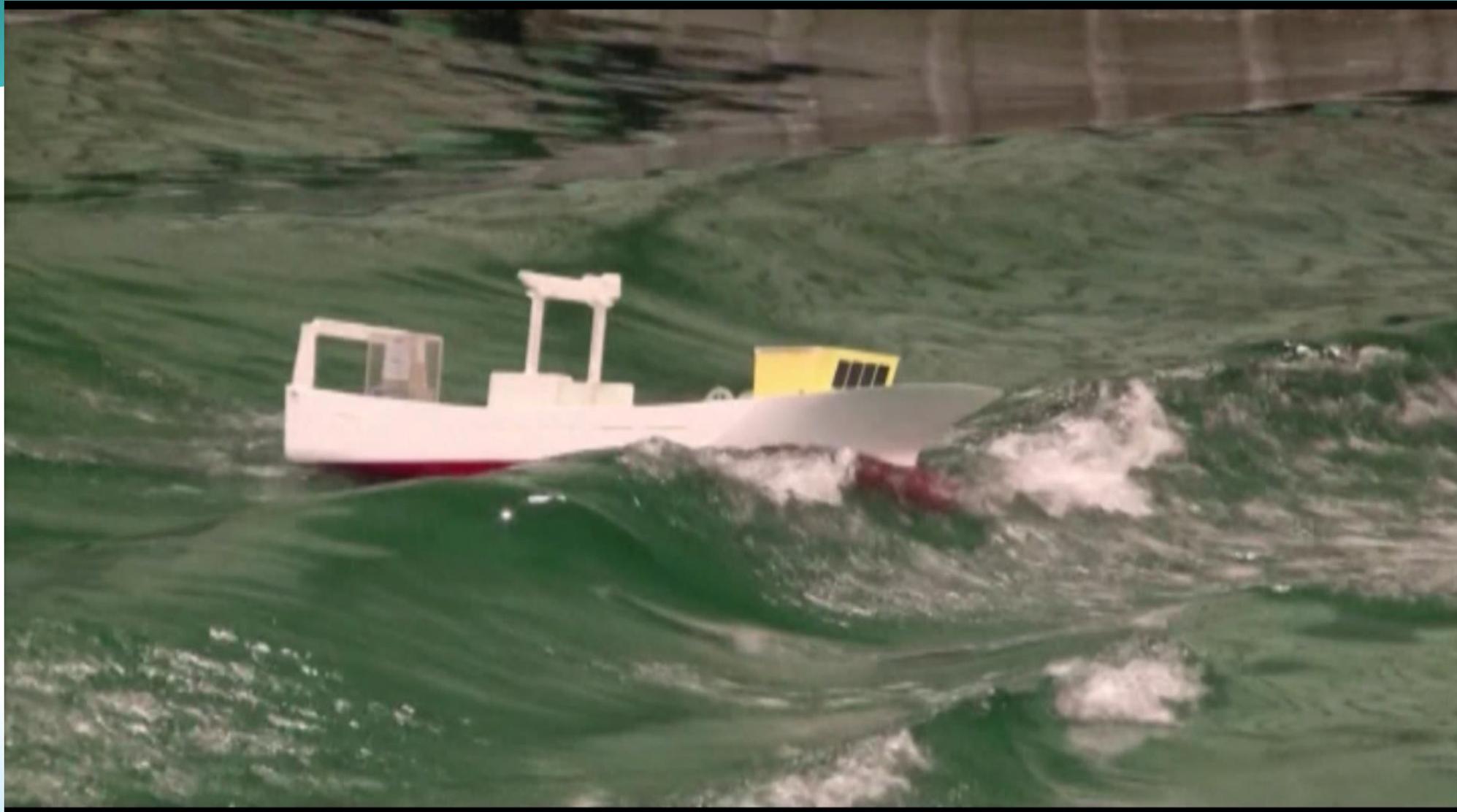
3.復原力喪失

4.パラメトリック横揺れ

5.波乗り/ブローチング



復原力喪失 速い速度で追い波中航走時に、波の山が船体中央にある時間が長くなると、復原力が減少して大傾斜を起こす現象



# パラメトリック横揺れ 復原力の周期的変動（横揺れ固有周期が出会う波周期の2倍）により大振幅横揺れを起こす現象



# 波乗り現象

追波中を高速航行時に船速が波の速度に近づき波の下り波面で長く留まる現象。  
ブローチングを引き起こす。



# 過大加速度モード

旅客や乗組員が居る，最も高い位置（居住区や船橋）に働く横方向の加速度

香港沖台風回避中のコンテナ船Chicago Expressのブリッジに居た乗組員の大きな横加速度による死傷事故(2008)\*がきっかけでドイツの提案により本基準に取り入れられた危険モード。

船長/GM	336.19m/8.54m
積載状態	バラスト
船速	2~4kts
有義波高/平均波周期	7.5m/9~10sec
出会波角度	120~150°
横揺れ角/横加速度	最大32° /1.0g越
人身被害	死亡1名，重傷1名



転倒した人が転がって当たった  
キャビネット\*

# Level 1

適用範囲：喫水から人が居る最も高い位置までの距離が船幅の70%を超え，GMが船幅の8%を超える場合

**Level 1** 前進速度0，不規則横波中での同調横揺れ時の横方向加速度が基準値  $R_{EA1} = 4.64m/s^2$  以下であること

横加速度の式

$$\phi K_L (g + 4\pi^2 h / T_r^2)$$

重力加速度の横方向成分

横揺れによる横方向成分

横揺れ振幅

横揺れ回転中心から人が居る位置までの高さ

# Level 2

## Level 2

北大西洋の波浪条件 (IACS No.34) で横波を主方向とする短波頂不規則波中にある船の横加速度が閾値  $R_2 = 9.81m/s^2$  を超える長期発生確率  $C$  は基準値  $R_{EA2} = 0.00039$  以下であること

基準値の設定法：事故船が不合格と判定され、かつLevel1と2の判定が逆転しないこと

Level 2の基準値：事故船の計算値（ドイツ）

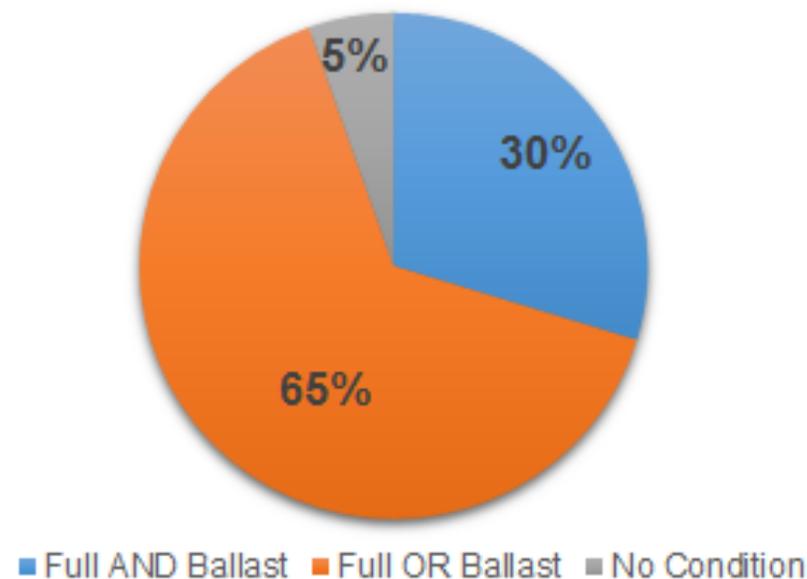
Level 1の基準値：既存船に対する計算結果でLevel 2と判定が逆転しない値（日本）

# 過大加速度モードLevel 2適合率

10種の船種，37隻の満載・空載状態でのLevel 2の計算を実施

船種	隻数
バルクキャリア	10
コンテナ船	4
PCC	2
LNG船	2
VLCC	2
ケミカルタンカー	11
PSV	2
フェリー	1
タンカー	2
一般貨物船	1

Pass rate of 37 ships



満載・空載状態ともに合格した船は全体の**30%**

運用する際の問題点として指摘

# Level 3

- 横揺れ角 $40^\circ$ ，横加速度 $9.81\text{m/s}^2$ を閾値として不規則波中船体運動計算を行い，確率論的または決定論的に評価する（全モード共通）。  
⇒不規則波中時間領域計算が必要
- 模型実験との比較で精度が確認された計算ツールを使用する必要がある。

過大加速度モードはLevel3を使う可能性が高いため，簡易な計算法が必須。  
復原力の非線形影響が表れにくい。

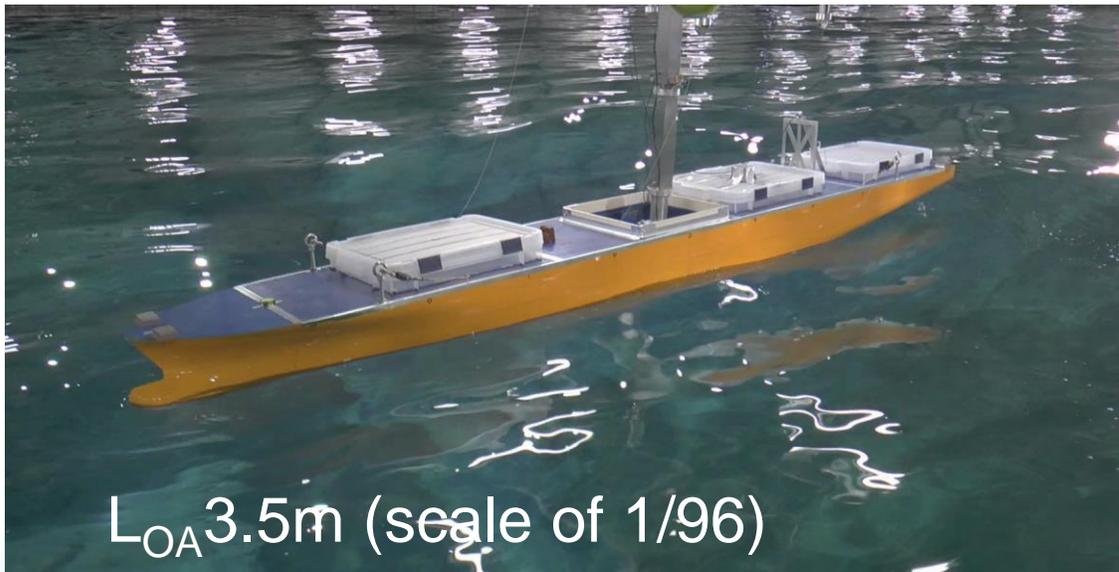


時間領域計算法の他に周波数応答の線形重ね合わせ法を提案

事故船を対象とした模型実験と，不規則波中時間領域計算及び線形重ね合わせ法を実施し，有用性を調査

# 模型実験 -短波頂不規則波中運動計測-

実海域再現水槽にて横波を主方向とする短波頂不規則波中前進速度零でのコンテナ船(Chicago Express)の船体運動とブリッジ高さでの横加速度を計測

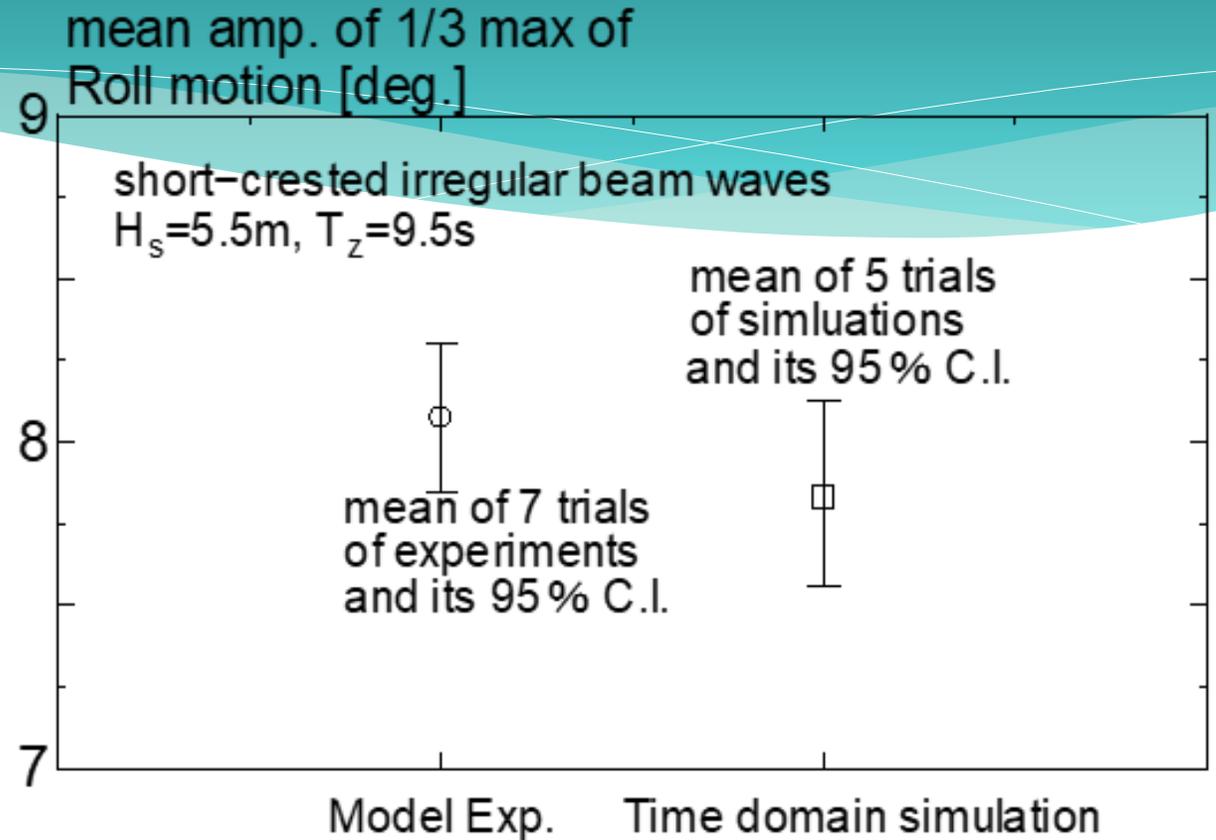


運動	6軸自由 前後, 左右, 船首揺れには変位に比例する復原力をばね定数で与える
波	ITTC型周波数スペクトル 横波を主方向とした $\text{COS}^4$ 分布 初期位相と方向角を乱数で変更
計測時間	20分 (3時間相当) 波浪場が計測中保たれていることを確認

# 不規則波中船体運動計算 -時間領域計算-

- 扱う運動：6自由度
- 流体力：3次元特異点分布法  
メモリ-影響考慮
- 横揺れ減衰力：等価線形化

模型実験（試行回数7回）と  
時間領域計算（試行回数5回）での  
横揺れ振幅の1/3最大平均値の平均  
値と95%信頼区間を比較



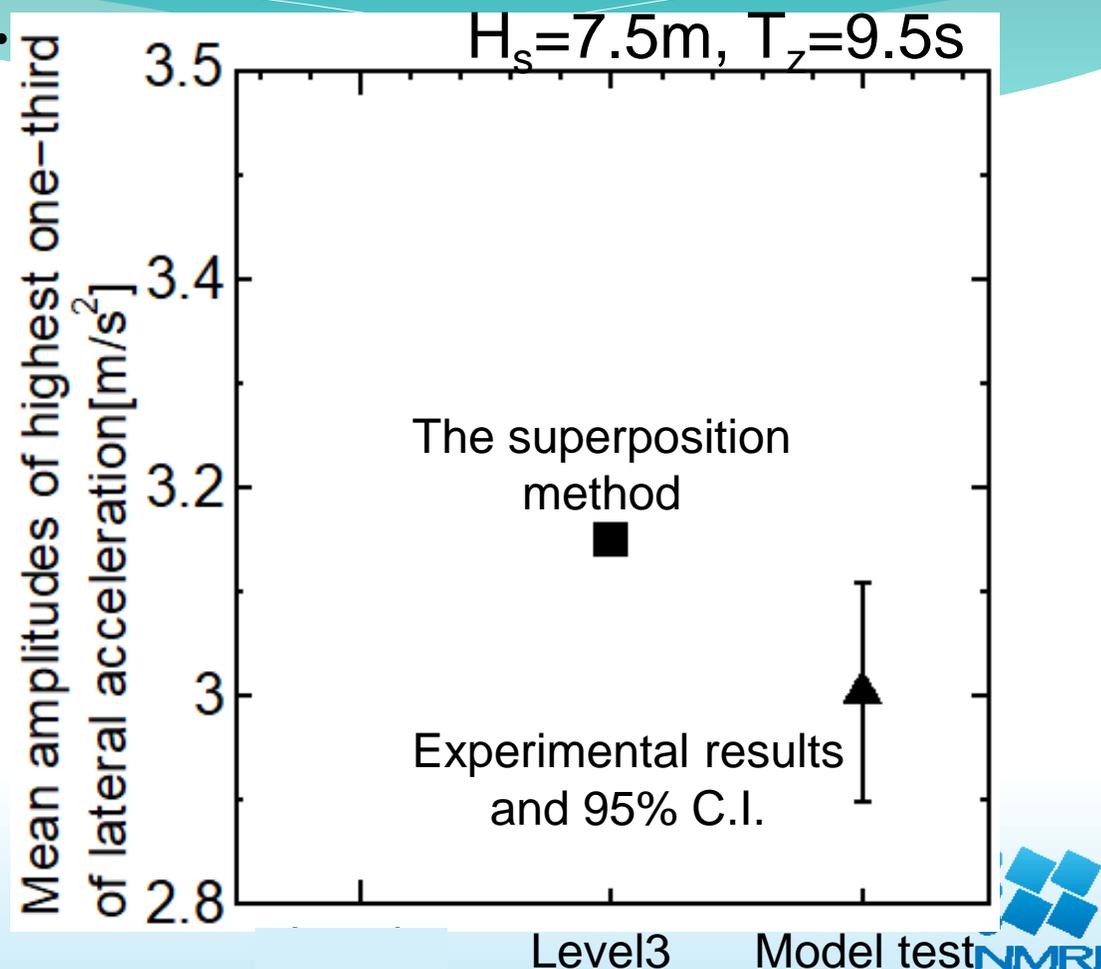
模型実験と比較し，使用する時間領域  
計算法が十分な精度であることを確認

# 不規則波中船体運動計算-周波数応答の線形重ね合わせ法-

横加速度の周波数応答に波スペクトルをかけ，波の方向分布に従い線形重ね合わせし，短波頂不規則波中の横加速度を求める。

- 周波数応答計算：STF法（ストリップ法）  
前後揺れを除く5自由度
- 横揺れ減衰力：等価線形化

線形重ね合わせ法でも十分な精度であることを確認



# 各計算法の整合性

- IACS No.34の海象条件(197ケース)で横波を主方向とする不規則波中前進速度零での横加速度を線形重ね合わせ法, 時間領域計算法で計算し, **一波当たりの平均長期危険事象発生確率 $p$** を算出。
- 線形重ね合わせ法と時間領域計算法を用いた結果は近い値となり, かつ, Level 2との整合性もとれている。

Average long-term failure probabilities per encounter wave $p$	Method		
	Level 2	Linear superposition method	Time-domain situations
	$5.35 \cdot 10^{-5}$	$2.02 \cdot 10^{-5}$	$1.68 \cdot 10^{-5}$

過大加速度Level3計算法に線形重ね合わせ法を提案

# 運航制限, 運航ガイダンス

- Level 1, 2に適合しない場合, Level 3の他に, **運航制限, 運航ガイダンス**がある.

## 運航制限

- 最大有義波高
- 航行海域または航行する季節を指定

## 運航ガイダンス

- 波浪条件における船の速度と針路（波向き）について推奨条件（回避すべき条件）を提供する

- Level 1, 2, 3での計算法を適用
- 総運航時間に対して推奨される条件での合計存続時間は比率0.8以上

# 最大有義波高による運航制限

- 北大西洋の波浪発現頻度(IACS No.34)の場合, 総運航時間に対する基準に適合した状態での運航時間の比率を0.8以上にするには最大有義波高による運航制限は4.5m以上でなければならない。

## コンテナ船の有義波高による運航制限

設定有義波高以上の発生確率を0としてLevel 2で評価

航行できる 最大有義波高	C	Judge
7.5m	2.55E-04	PASS
8.5m	4.06E-04	FAIL

最大有義波高7.5mまでは運航可能

# 運航ガイダンス ～操船支援システムの開発～

不合格となった载荷状態で航行しうる船速，波向すべての計算が必要になるため，計算結果は膨大となり，操船者に適切に示すよう工夫が必要である。



過大加速度モードの運航ガイダンスに基づく計算および操船者への評価結果表示機能を有する**操船支援システム**を開発

- 指定する载荷状態での有義波高，波周期，船速ごとのすべての波向での過大加速度に対する**短期発生確率 $c_i$ を基準値 $10^{-6}$ で除した値**を色分けで表示
- 载荷状態，海象，船速にあった情報を運用者に示すことで，出港前の検討，航行中の危険を回避する支援を行うことができる。

# 操船支援システムの紹介



評価指標

短期発生確率  $C_{si}$

基準値  $10^{-6}$

1.0 ~ 回避条件

0.67 ~ 0.99

0.34 ~ 0.66

0.00 ~ 0.33

S.T.F.P.

1.00

0.66

0.33

喫水  
GM  
トリム  
船速

有義波高



横波

波周期

追波



# 過大加速度モード計算プログラム

喫水, トリム, GM  
範囲設定

Level1, 2  
過大加速度モード  
第一段階・第二段階基準計算  
運航制限

運航ガイダンス  
過大加速度モード  
運航ガイダンス

### 主要目

垂線間長さ (m)

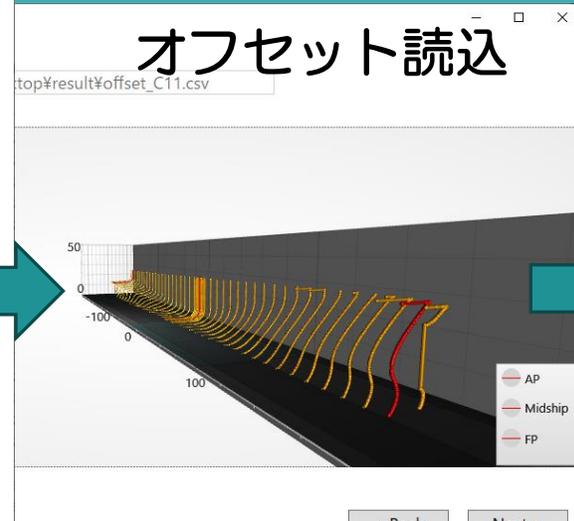
船幅 (m)

ビルジキールの長さ by 垂線間長さ

ビルジキールの幅 by 船幅

船底キールから航海ブリッジまでの距離 (m)

船尾 (A.P.) から航海ブリッジまでの距離 (m)



### 範囲設定

喫水 (m)

最小値	最大値	分割数 (最大20)
<input type="text" value="8.1"/>	<input type="text" value="8.1"/>	<input type="text" value="1"/>

トリム (m) : 船首トリム (+)

最小値	最大値	分割数 (最大20)
<input type="text" value="-2"/>	<input type="text" value="-2"/>	<input type="text" value="1"/>

GM : メタセンタ高さ (m)

最小値	最大値	分割数 (最大20)
<input type="text" value="8.54"/>	<input type="text" value="8.54"/>	<input type="text" value="1"/>

計算結果の出力場所  参照

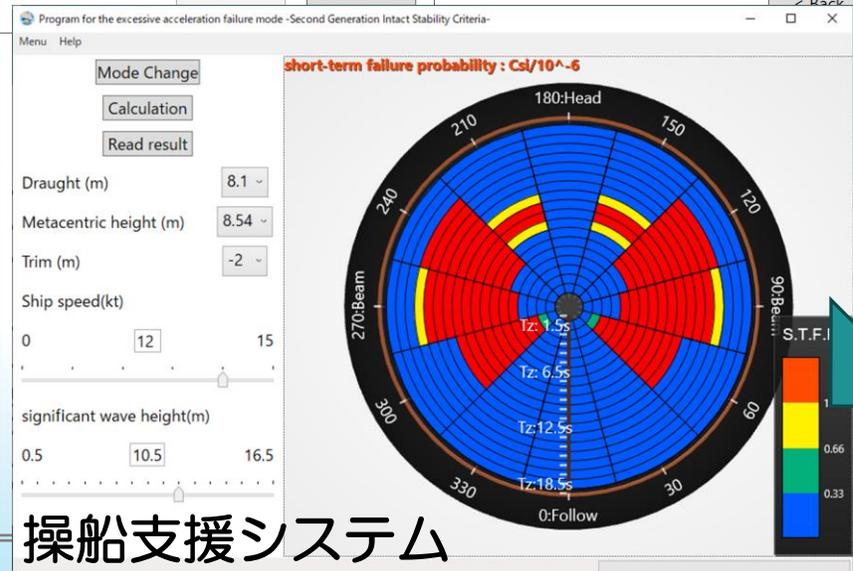
Program for the excessive acceleration failure mode - Second Generation Intact Stability Criteria

Mode Change  
Calculation  
Read result

vulnerability criteria Level 2  
Criteria value < 0.00039  
Trim No. 1 : -2.000m

Draught(m)	Draught(m)					
	8.000	9.000	10.000	11.000	12.000	13.000
8.000	0.0007993	0.0001903	0.0001993	0.0003859	0.0005696	0.000791
9.000	0.001318	0.0002776	0.0002682	0.000431	0.0006169	0.0008038
10.000	0.001593	0.0003867	0.000331	0.0004554	0.0006087	0.0007047
11.000	0.001698	0.0004925	0.000375	0.0004502	0.0005383	0.0008743
12.000	0.001709	0.0005625	0.0003837	0.0003964	0.0006859	0.001393
13.000	0.001631	0.0005745	0.0003397	0.0005288	0.001072	0.002038

GM(m)



### 計算実行

CalcConditionWindow

ケース(波向角:30,船速:0)を計算中...

GM	喫水	トリム	カウント
8.000	11.500	0.000	1 / 8
8.000	11.500	0.000	2 / 8
8.000	11.500	0.000	3 / 8

View Result

操船支援システム

## まとめ

第二世代非損傷時復原性基準暫定ガイドラインで扱う5つの危険モードの1つである過大加速度モードの基準策定のための調査研究について示した。

- Level 1, 2の試計算を実施して基準値設定に貢献し，適合率を調査
- Level 3計算法に周波数応答の線形重ね合わせ法を提案
- 運航ガイダンスに基づく操船支援システム及びLevel 1, 2計算を統合した過大加速度モード計算プログラムを作成

過大加速度モードの基準値は厳しく設定されており，既存船に適用すると多くが不適合となる。現在は本暫定ガイドラインへの対応策を検討中である。

# 謝 辞

本研究の一部は日本財団助成事業の一環として一般財団法人日本船舶技術研究協会からの受託研究「目的指向型復原性基準の策定に関する調査研究」（平成28年度から令和1年度）で実施しました。

