

# 第二世代非損傷時復原性基準の理論的背景



写真：池田良穂

国立大学法人 大阪大学 大学院工学研究科

地球総合工学専攻 船舶工学講座 教授 梅田 直哉

# 研究項目（阪大在学時：1979-1982）

## ▶ 漁船の復原性

- 追波中復原力喪失現象
- パラメトリック横揺れ
- 波乗り現象

# 研究項目（水工研在職時：1982-1999）

- ▶ 漁船の復原性
  - ⇒ 追波操船ガイダンス
- ▶ 漁港内静穏度（北海道開発庁）
- ▶ 漁業採算性（TAC規制）
- ▶ 漁船漁業への自動制御の応用（中層トロールなど）

# 研究項目（阪大在職時：1999-2023）

## ▶ 船舶復原性

客船、貨物船、漁船、ヨット、艦艇...

⇒ 漁船の復原性規則改正、第二世代非損傷時復原性基準

## ▶ 荒天下操縦性（最低出力ガイドライン）

## ▶ 電気推進による波浪中省エネルギー

（船舶からのGHG排出削減）

## ▶ 生物への船舶騒音影響

## ▶ 客船内の新型コロナ感染事案

# 本日の構成

- ▶ 第二世代非損傷時復原性基準の意義・構成と直接評価基準・操船ガイダンス
- ▶ 追波中復原力喪失現象
- ▶ パラメトリック横揺れ
- ▶ ブローチング
- ▶ デッドシップの復原性

# 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「2007~2008年度復原性に係る基準に関する調査研究、2009~2011年度新世代復原性基準に関する調査研究、2012~2022年度目標指向型復原性基準に関する調査研究」で実施した。

また、日本学術振興会科学研究費補助金、US Office of Naval Research、漁船協会、UK Engineering and Physical Science Research Council, Australians' Asia-Pacific Maritime Research Centre, 日本造船工業会 (REDAS)、三菱重工業などの支援を受けた。



# 謝辞

1999年から現在まで、  
卒論・修論・博士論文に関連し、多数の大阪大学の学  
生諸君との共同で、  
水産工学研究所（現在の水産研究教育機構水産技術研  
究所水産工学部）の方々、特に松田秋彦主幹研究員の  
協力のもとで、  
実施した成果である。

# 第二世代非損傷時復原性基準の意義・ 構成と直接評価基準・操船ガイダンス



写真：池田良穂

国立大学法人 大阪大学 大学院工学研究科

地球総合工学専攻 船舶工学講座 教授 梅田 直哉



# 復原性基準

- ▶ 非損傷時復原性    intact stability
- ▶ 損傷時復原性    damage stability

# 船舶非損傷時復原性基準

## ▶ 2008 非損傷時復原性コード (2008 IS Code)

Part A 強制要件

Part B 一部船種への勧告要件と補足ガイドライン

Part C 解説文書

## ▶ 非損傷時復原性基準

→ 2008 International Code on Intact Stability (2008 IS Code) 2008年12月5日、IMOでadopt (Resolution MSC 267(85))

→ そのPart Aを2010年7月1日以降、強制化 (74SOLAS条約と88LL議定書の改正の結果)

対象：LLでは24m以上の客船・貨物船、SOLASではすべての客船、500トン以上の貨物船

▶ これを先取りして、国内法（船舶復原性規則）を改正（2009年1月1日施行）

# 2008ISコード Part A

## ▶ GZ曲線基準

事故統計とGZ曲線の関係に基づく経験則

フィンランドのRahola教授の方法（13隻）に基づき、IMCOが約100隻の事故データで1965年に決定。

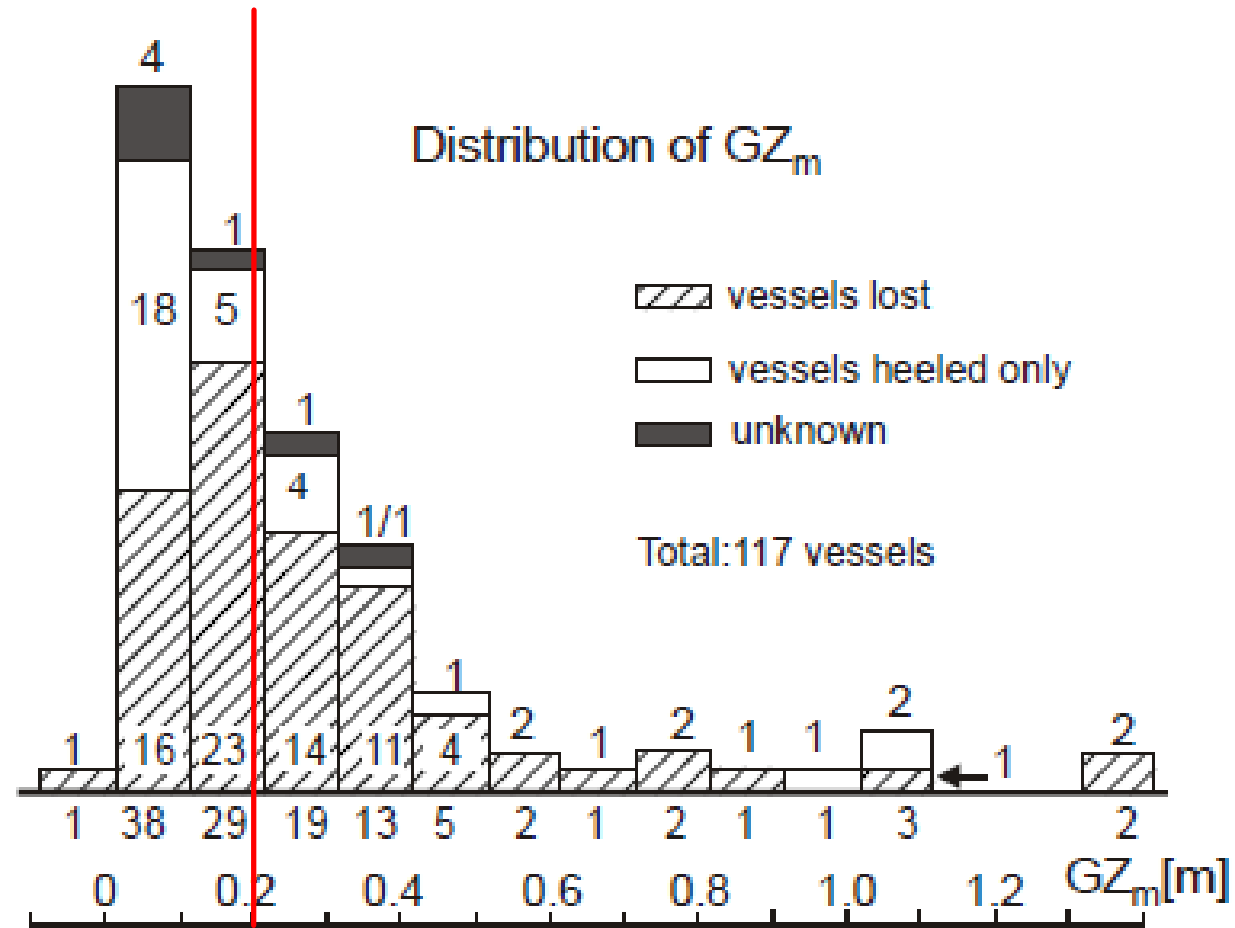
## ▶ ウエザークラテリオン

横波横風中の同調横揺れのエネルギーバランスのモデルでその風速を事故統計でチューニングした半経験則

渡辺恵弘教授らの方法にもとづき日本が作成した国内規則（乙基準）をソ連国内規則の横揺れ角の実験式と組み合わせてIMCOが1985年に作成。

## ▶ 客船、木材運搬船などへの付加基準

Distribution of  $GZ_m$



# 2008 IS Code Part A, 2.2

## General Criteria (Res. A. 167(ES.IV))

$$E(30 \text{ degrees}) > 0.055 \text{ m} \cdot \text{rad}$$

$$E(40 \text{ degrees}) > 0.09 \text{ m} \cdot \text{rad}$$

$$E(40 \text{ degrees}) - E(30 \text{ degrees}) > 0.03 \text{ m} \cdot \text{rad}$$

$$GZ(\phi_{\max}) > 0.2 \text{ m}$$

$$\phi_{\max} > 25 \text{ degrees}$$

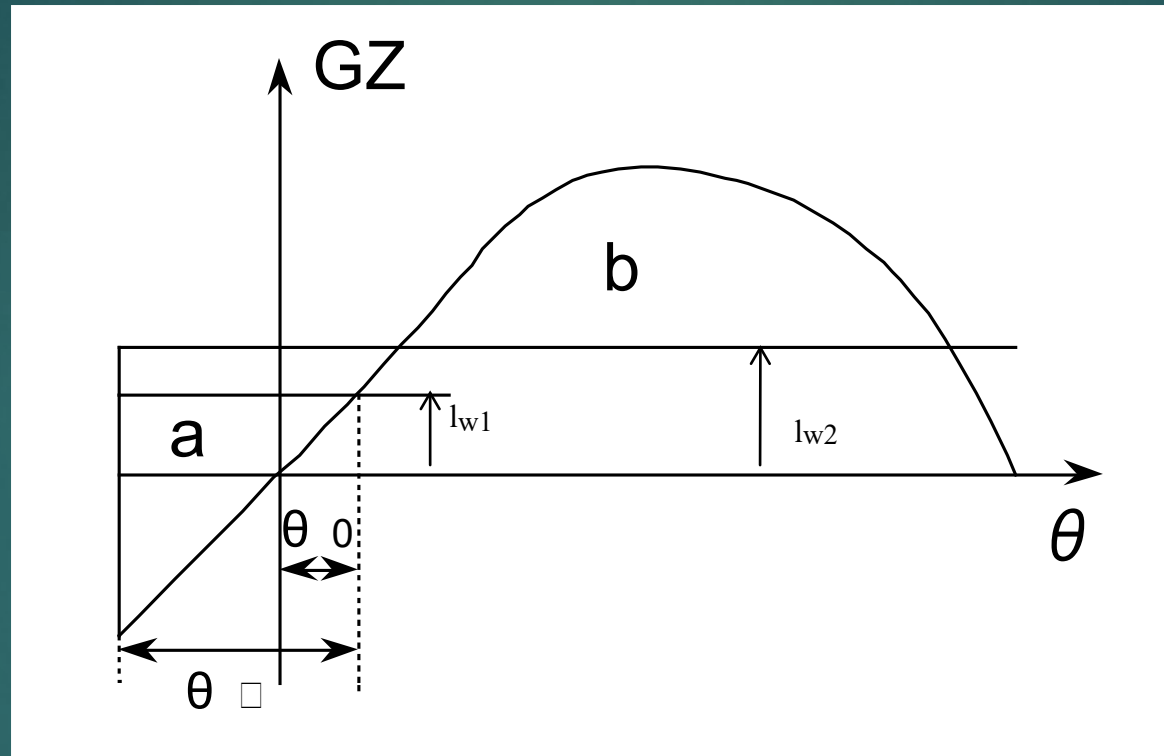
$$GM > 0.15m$$

$$E(\phi) = \int_0^{\phi} GZ(\phi) d\phi$$



# 2008 IS Code Part A, 2.3

## Weather Criterion (Res. A. 562(14))



$$b/a > 1$$

横波、横風、船は停船中

日本の国内基準に準拠but横揺れ角はソ連国内基準で計算

# Weather criterionの計算式

JAPAN

$$\phi_1 = 109kX_1X_2\sqrt{rs} \text{ (degrees)}$$

$k$ : ビルジキール面積の関数 (数表)

$X_1$ :  $B/d$ の関数 (数表)

USSR

$X_2$ :  $C_b$ の関数 (数表)

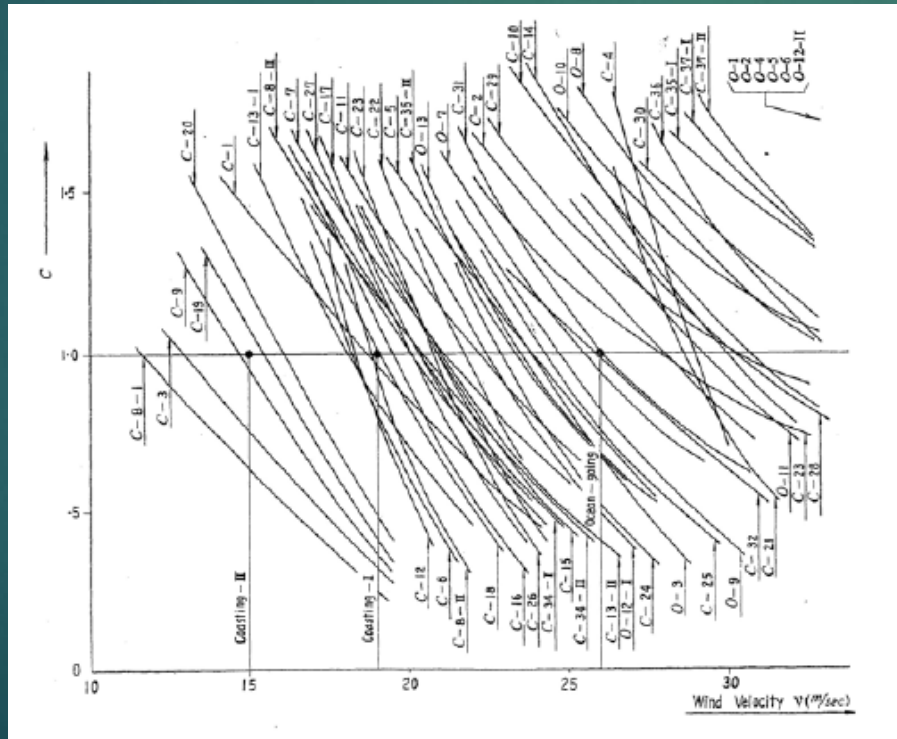
$r=0.73+0.6$  (OG/d)

$s$ (波岨度): 横揺れ固有周期の関数 (数表)

ただし、これに依りがたい場合は、模型実験による推定も可

# Weather criterionの考え方 (我が国の昭和20年代の研究成果による)

- ▶ 平均風速 ← 事故統計 (50隻) とのチューニング



遠洋・近海：風速26m/s

沿海：風速19m/s

限定沿海：風速15m/s

(危険) 水雷艇、駆逐艦、客船3隻

(安全) 貨物船2隻、客船3隻、大型客船3隻

# IS Code

- ▶ IMOでは以下の項目について、機能要件化（模型実験or/and 数値シミュレーションによる代替承認）または物理則による新基準策定を図ることで合意(Part A, 1.2)
  1. パラメトリック横揺れなど復原力変動問題
  2. ブローチングなど操縦性関連問題
  3. デッドシップの生存性

# 第2世代非損傷時復原性基準の必要性

- ▶ 現在の非損傷時復原性基準は、経験則（GZ曲線基準）と半経験則（ウェザークライテリオン）であり、ここでの事故データは50年以上前のものと古い。
- ▶ その後、船舶は専用船化、大型化、高速化が進んだ。
- ▶ そのような船種では、近年事故が多発したり、現行基準での設計に困難をきたすようになった。



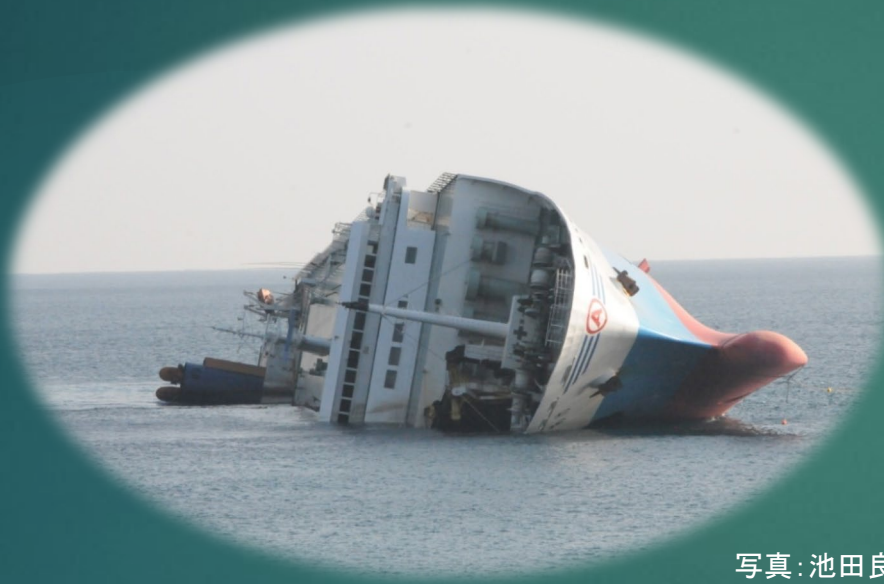
# 第2世代非損傷時復原性基準の必要性



大型コンテナ船の横揺れによるコンテナ損傷事故



# 第2世代非損傷時復原性基準の必要性



写真：池田良穂



from New Zealand Transport Accident  
Investigation Commission report

高速カーフェリーの追波中大傾斜事故

# 第2世代非損傷時復原性基準の必要性

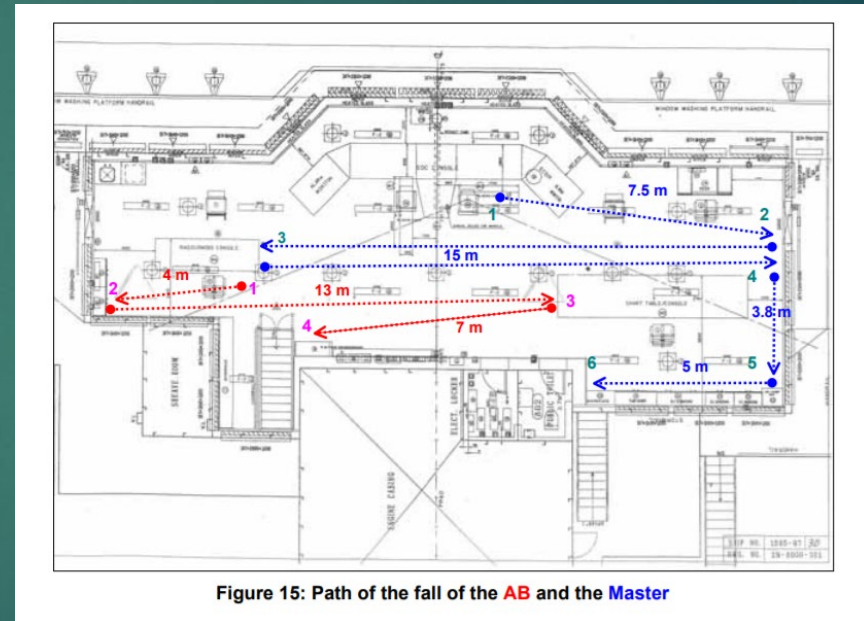


大型クルーズ客船のウェザークライテリオン適合困難

# 第2世代非損傷時復原性基準の必要性



[https://www.atsb.gov.au/media/3446314/bsu%20investigation%20report%20510\\_08%20-%20cmv%20chicago%20express.pdf#search=Chicago+Express+accident+container](https://www.atsb.gov.au/media/3446314/bsu%20investigation%20report%20510_08%20-%20cmv%20chicago%20express.pdf#search=Chicago+Express+accident+container)



大型コンテナ船の船橋での過大加速度による船員死傷事故

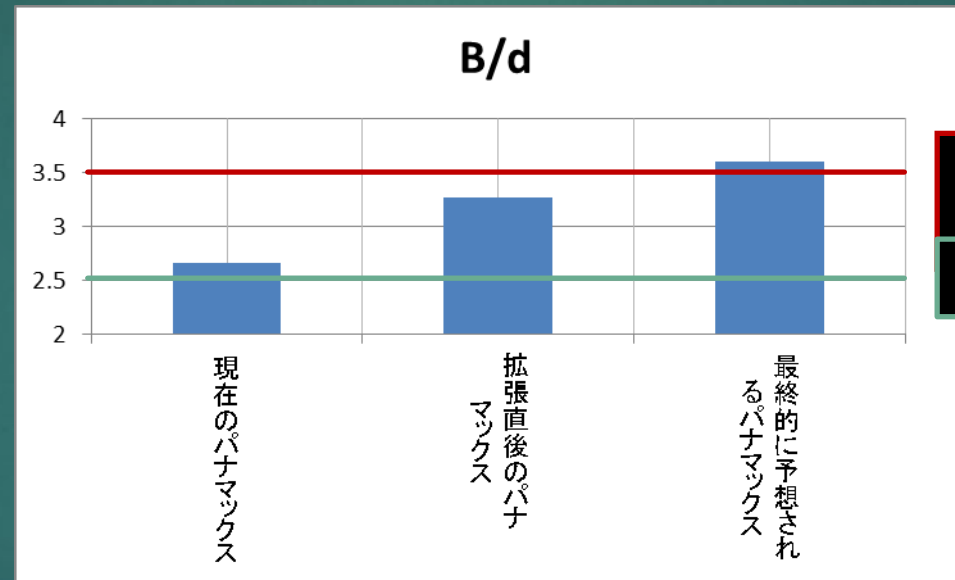
# 第2世代非損傷時復原性基準の必要性

- ▶ 現在の非損傷時復原性基準は、経験則（GZ曲線基準）と半経験則（ウェザークライテリオン）であり、ここでの事故データは50年以上前のものと古い。
- ▶ その後、船舶は専用船化、大型化、高速化が進んだ。
- ▶ そのような船種では、近年事故が多発したり、現行基準での設計に困難をきたすようになった。例：大型コンテナ船の向波中パラメトリック横揺れによるコンテナ損傷事故、高速カーフェリーの追波中大傾斜事故多発、大型クルーズ客船のウェザークライテリオン適合困難。
- ▶ 現行基準だけでは事故を防ぐことには限界があり、新形式船の開発を困難としている。



# その新船型の開発の例？

- ▶ パナマ運河の拡張に対応できる船型



ウェザークライテリオン

最大復原力角基準

# 第2世代非損傷時復原性基準

- ▶ I M OのSLF小委員会において、2008年より本格審議開始。（2002年～2007年は、主にIS Code改正）
- ▶ 現行の経験則的基準で対応できない、以下の動的危険モードについて、物理則で対応。
  - ▶ パラメトリック横揺れ
  - ▶ 追波中復原力喪失
  - ▶ ブローチング
  - ▶ デッドシップ状態の同調横揺れ
  - ▶ 過大加速度



# 第2世代非損傷時復原性基準

- 物理則による時間領域数値シミュレーションは有効なツールであるが、全船舶に強制化することは無駄である。
- 対象とする危険モードごとに、簡易な基準で危険の有無をまず判定。
- 危険があるとされた船のみについて、数値シミュレーションによる直接評価を行う。
- 簡易基準は第1段階と第2段階に分けて、いずれかに合格すれば、直接評価は不要。
- 直接評価に不合格となると、操船ガイダンスによる運航制限を課する。
- ただし、第2段階から操船ガイダンスによる運航制限を課することも可とする。

# 第2世代非損傷時復原性基準の構成

- 簡易基準（第1段階） 電卓使用レベル  
海象条件を代表的な規則波に置き換えてOX判定
- 簡易基準（第2段階） 表計算ソフト使用レベル  
海象条件と代表規則波の関係を考慮して確率で判定
- 直接復原性評価基準 PCプログラム使用レベル  
不規則な海象の下での時間領域シミュレーションにより求めた確率で判定
- 操船ガイダンス  
遭遇海象下で安全な船速、針路を指定
  - 上記を定める暫定ガイドライン（2020年11月）  
MSC.1/Circ.1627
  - その解説文書（2022年6月） MSC.1/Circ.1652

# 第2世代非損傷時復原性基準 の対象

- 対象船：すべての船舶（ただし、OSVのような長く低い暴露甲板を持つ船は除外）
- パッシブな横揺れ防止装置は考慮可
- アクティブな横揺れ防止装置は操船ガイダンスに限っては考慮可
- 海象条件：北大西洋、ただし航行海域や季節が限定される場合はその海域・季節、短波頂波での方向分布は $\cos^2$ 乗
- 危険判定の閾値：次のいずれか
  - ① 横揺れ角40度または海水流入角、復原力消失角以上  
40度はC11コンテナ船「APLチャイナ」のパラメトリック横揺れ事故での値
  - ② 横加速度1g以上（船上の人員搭載場所で）  
1gはコンテナ船「シカゴエクスプレス」過大加速度による死傷事故での値

# 直接復原性評価基準の選択肢

- 全面確率論的評価

北大西洋における復原性事故の長期発生率の平均値を尺度

- 設計短期海象の確率論基準

設計短期海象（北大西洋における出現確率 $10^{-5}$ ）下での事故発生率の95%信頼区間の上限を尺度

- 設計短期海象の決定論基準

設計短期海象（北大西洋における出現確率 $10^{-5}$ ）下での3時間最大横揺れ振幅または横加速度を尺度

# 直接復原性評価基準における危険モードの検証

## verification

いずれにおいても、シミュレーション上での事故判定が対象とする復原性事故モードと一致していることを確認すること。

- パラメトリック横揺れ：局所的な横揺れ周期が局所的な波周期の約2倍で、横揺れ固有周期にほぼ近いこと。
- 復原力喪失現象：追波・斜め追波中において局所的な横揺れ周期が局所的な波周期にほぼ等しく、GMが最小となる波面上の位置付近で最大横揺れ角が生じること。
- 波乗りを伴うブローチング：逆方向に最大の舵角を取っているときに、方位角や旋回角速度が増加すること。
- 同調横揺れ：横波中での局所的な横揺れ周期が局所的な波周期にほぼ等しいこと。



# 直接復原性評価基準用の計算コード 検証法 validation

- 定性的検証

例：パラメトリック横揺れが再現できるかどうか

- 定量的検証

例：模型実験によるパラメトリック横揺れ角の分散を95%信頼性  
区間内または安全側に推定できるかどうか

- 検証に用いる模型実験は、ITTCガイドライン（非損傷時復原性試験）  
に準拠していること

# 直接復原性評価基準における事故率計算法

## □ ダイレクトカウンティング法

- ✓ 復原性事故発生は独立事象と仮定
- ✓ 事故発生率の95%信頼性区間の上限に着目
- ✓ 各試行における最初の事故発生までの時間  $T$  から事故率  $r$  の計算

$$r = 1/T$$

- ✓ または、一定時間  $t_{exp}$  のシミュレーションでの事故発生確率  $p$  より、

$$p = 1 - \exp(-rt_{exp})$$

## □ 外挿法の例

- 波高による外挿法
- 包絡線閾値越え極値法 (EPOT)
- スプリットタイム/運動摂動法 (MPM)
- クリティカル・ウェーブ法 (ブローチング)
- 線形重ね合わせ法 (過大加速度)

外挿法はダイレクトカウンティング法と95%信頼区間が重複するならば使用可



# 第2世代非損傷時復原性基準 の安全レベル

## □ 直接復原性評価基準（全面確率的評価）要求安全（リスク）レベル：

①  $2.6 \cdot 10^{-3}$  （1年あたり1隻あたりの確率）

種々のFSA結果から、荒天によるコンテナ船の事故頻度を採用

$1/2.6 \times 10^{-3} = 384.6$ 年に1事故

②  $2.6 \cdot 10^{-8}$  （単位時間あたりの事故発生率の長期平均値）

• 問題のある載荷状態の割合を0.1, 航海中の割合を0.8, 北大西洋がより厳しい割合0.2, 荒天回避の割合0.2として、

•  $384.6 \times 0.1 \times 0.8 \times 0.2 \times 0.2 = 1.2$ 年に1回事故

•  $1/(1.2[\text{年}] \times 365[\text{日/年}] \times 24[\text{時間/日}] \times 3600[\text{秒/時間}]) = 2.6 \cdot 10^{-8}$

## □ 直接復原性評価基準（設計短期海象）要求安全（リスク）レベル：

① 2時間に1回（発生確率 $10^{-5}$ の海象下での事故発生間隔）

シミュレーション結果の比較より、全面確率的評価での長期事故率 $2.6 \cdot 10^{-8}$ に相当する $10^{-5}$ の海象下での短期事故率 $1.38 \cdot 10^{-4}$

# ダイレクトカウンティング法の手順

- 1) 不規則波中数値シミュレーションを反復して実施（各試行で、波と風のスペクトルは同じで、位相はランダムに変化）
- 2) 最初の50揺れを無視して、最初の復原性事故発生まで計算を実施し、その発生時間 $T_i$ を記録。その平均値を $T$ とする。
- 3) この発生時間の平均値、 $1/r$ 、の $(1-\alpha \cdot /2)$  100%信頼区間は、次式で与えられる。

$$\frac{2N}{\hat{r}\chi_{1-\alpha/2,2N}^2} < \frac{1}{r} < \frac{2N}{\hat{r}\chi_{\alpha/2,2N}^2}$$

ここで、 $\chi_{p,f}^2$  は、 $f$ 自由度のカイ2乗分布の $p \cdot 100\%$ 分位数。

- 4) これより事故発生率 $r$ の95%信頼区間の上限が求まる。

# ダイレクトカウンティング法の理論

- 事象発生は、危険と安全の2値の確率過程は2項過程となるが、そのうちの危険が独立に発生しその発生率 $r$ が十分小さいとすると、ポアソン過程となる。
- ポアソン過程では、危険事象発生までの時間 $T$ は指数分布となる。

$$F(t) = 1 - e^{-rt}$$

- その危険発生までの時間の $N$ 回試行の平均値 $m$ の $N$ 倍は、パラメータ $N$ ,  $r$ のガンマ分布となる。すなわち、指数分布はガンマ分布の特殊な場合である。その確率密度関数は

$$f(x) = \frac{r^N}{\Gamma(N)} x^{N-1} e^{-rx} \quad x > 0$$

# ダイレクトカウンティング法の理論

$$f(x) = \frac{r^N}{\Gamma(N)} x^{N-1} e^{-rx} \quad x > 0$$

- よって、パラメータ  $r$  の  $100(1-\alpha)\%$  の信頼区間の下限  $r_L$  は、以下の条件を満たせばよい。

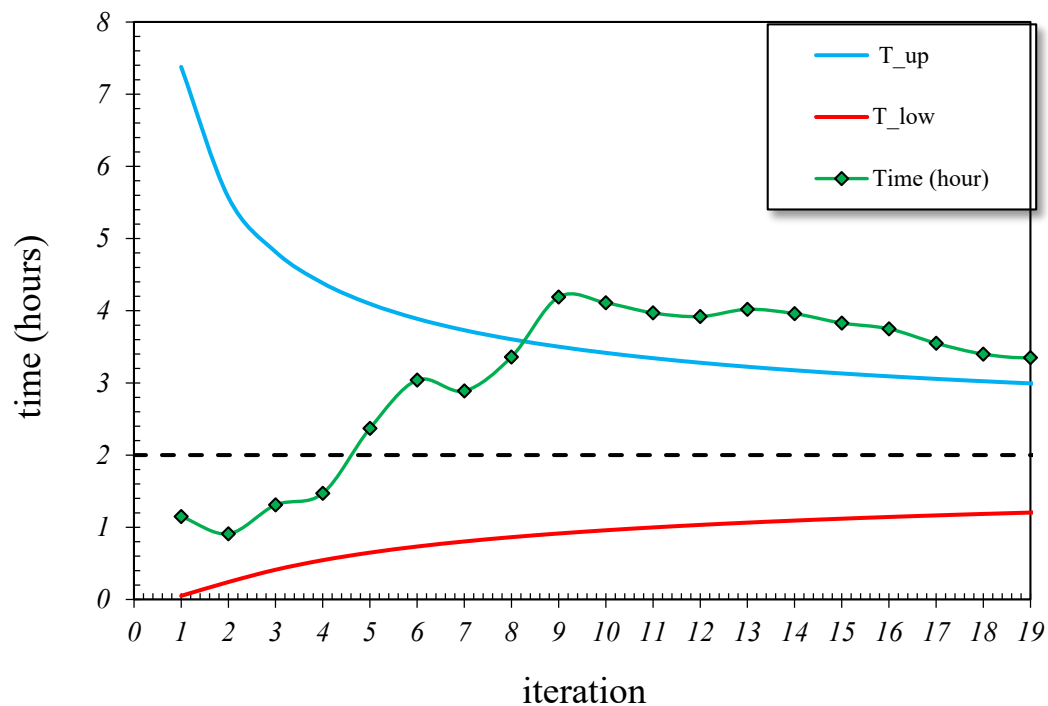
$$\frac{\alpha}{2} = \int_0^{Nm} \frac{r_L^N}{\Gamma(N)} x^{N-1} e^{-r_L x} dx = \int_0^{2Nm r_L} \frac{1}{2\Gamma(N)} \left(\frac{\tau}{2}\right)^{N-1} e^{-\frac{\tau}{2}} d\tau$$

- この右辺の被積分関数は自由度  $2N$  のカイ二乗分布の確率密度関数であるから、 $r_L$  は 自由度  $2N$  のカイ二乗分布の上側  $100\frac{\alpha}{2}\%$  パーセント点を  $2Nm$  で除したものである。
- $r$  の  $100(1-\alpha)\%$  の信頼区間の上限  $r_U$  も同様に計算できる。

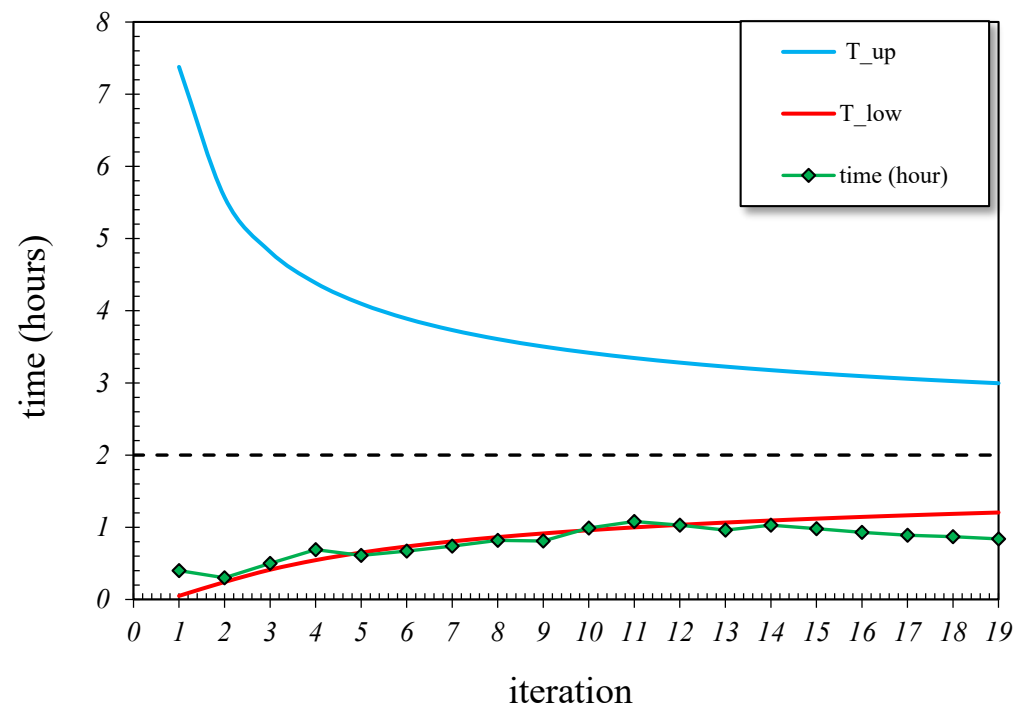
# ダイレクトカウンティング法の計算例

## 復原力喪失現象

Direct counting method  
 $F_n = 0.23$



Direct counting method  
 $F_n = 0.24$



# 操船手段の構成

## □ 操船制限

- 航行可能な海域・季節の制限
- 航行可能な有義波高の上限を定める  
波浪頻度表を利用して作成できる

## □ 操船ガイダンス

各短期海象下で避けるべき船速と（波の主方向に対する）針路を指定

### ➤ 確率論的操船ガイダンス

事故発生率推定値の95%信頼区間  $< 10^{-6}$

### ➤ 決定論的操船ガイダンス

3時間最大横揺れまたは横加速度の振幅の2倍  $< 40$ 度または  $1\text{ g}$

### ➤ 簡易操船ガイダンス

直接復原性評価より安全側であればどのような方法でも可  
(簡易基準の方法など)



# 操船手段利用の制限

- 有義波高の上限を定める操船制限や操船ガイダンスにおいて、全航海時間の内2割以上の避航時間がある場合は、その載荷状態の利用を不可とする。
- この計算では、海象は波浪頻度表の全体、波向きと船速は一様分布と仮定する。
- 適用例：標準波浪頻度表であれば、有義波高の上限を5mとしなければならない。C11級コンテナ船（GM=1.965m：簡易基準不合格）では、レベル2チェック2合格の限界有義波高は10mとなった。よって、有義波高の上限を定める操船制限は利用可能となる。

# 非損傷時復原性基準の位置づけ

- ▶ 経験則      GZ曲線と事故統計（1968）
- ▶ 半経験則    横波横風モデル  
+ 事故統計（1985）
- ▶ 物理則      確率論的力学モデル  
+ 許容確率  
= 第2世代非損傷時復原性基準  
（2020）