

# 直接計算を活用した非損傷時 復原性能評価と安全基準の動向



流体設計系  
構造安全評価系

白石 耕一郎  
小川 剛孝

## 発表の概要



1. IMOにおける復原性安全基準の動向

2. 第2世代非損傷時復原性基準案の  
検証

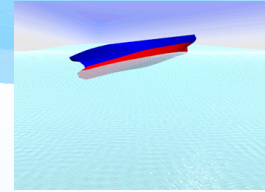
3. 直接計算(第3段階基準)の開発と  
高度化の研究

4. まとめ

# 1. IMO復原性基準の動向

## 第2世代非損傷時復原性基準

5つの事象に対して3段階基準で評価



①パラメトリック横揺れ, ②復原力喪失,

③ブローチング, ④デッドシップ状態, ⑤過大加速度

パラメトリック横揺れ

• 第1段階基準: 手計算ベースの算式

→ 動的復原性が問題にならない船を除外

• 第2段階基準: 表計算ベースの算式

→ 動的復原性の影響を評価すべき船を抽出

• 第3段階基準: 直接計算(シミュレーション計算)

→ 動的復原性が無視できない船、操船ガイダンスの付与が必要

本研究: ①パラメトリック横揺れと復原力喪失の  
第1及び2段階基準計算プログラム開発

②直接計算法の高度化

2

## パラメトリック横揺れ(第1段階基準)

### 第1段階基準

$$\frac{\Delta GM}{GM} \geq R_{PR}$$

$$\Delta GM = \frac{I_H - I_L}{2V}$$

$\Delta GM$ : 波浪中でのメタセンター高さの  
振幅

$GM$ : 平水中のメタセンター高さ

$R_{PR}$ : 閾値(ビルジキールの関数)

$V$ : 排水量

$I_H, I_L$ : 喫水 $d_H, d_L$ における水線面の断面  
二次モーメント

(計算方法)

- 波の山谷から定まる上下2つの喫水における断面2次モーメント( $I_H, I_L$ )を算出
- これらの断面2次モーメントの差を排水量で割ることによって $\Delta GM$ を算出
- $\Delta GM$ と平水中の $GM$ の比を算出し、その値が閾値を超えるか否かで判定

# パラメトリック横揺れ(第2段階基準)



## 第2段階基準(第1チェック)

$$V_{PRi} > V_D$$

$$\frac{\Delta GM(H_i, \lambda_i)}{GM(H_i, \lambda_i)} < R_{PR} \quad \text{and} \quad GM(H_i, \lambda_i) > 0$$

$\Delta GM(H_i, \lambda_i)$  : 波長 $\lambda_i$ と波高 $h_i$ の波において計算されるGM変動の振幅  
 $GM(H_i, \lambda_i)$  : 波長 $\lambda_i$ と波高 $h_i$ の波が通過する間のGMの平均値  
 $V_{PR}$  : parametric resonance状態における船速  
 $V_D$  : 航海船速、または設計船速

### (計算方法)

- 平水中GM, 定義した波長と波高について、波の山の位置を船長方向に分布した場合の平均GMと変動GMを算出して、これらの比を算出
- パラメトリック横揺れの同調条件に一致する参照船速( $V_{PR}$ )を算出
- 上記二つの基準式のうち、どちらかが真であれば判定値は0、それ以外は1
- 重み付けした判定値の総和を算出し、これが閾値を超えるか否かで判定

# パラメトリック横揺れ(第2段階基準)(2)



## 第2段階基準(第2チェック)

$$\left\{ \frac{\pi^2 \hat{\omega} (3A^2 \hat{\omega}^2 \gamma + 8\alpha)}{(2\pi^2 - A^2) \omega_\phi^2} \right\}^2 + \left\{ \frac{6A^2 \omega_\phi^2 - 8\pi^2 \omega_\phi^2}{4(\pi^2 - A^2) \omega_\phi^2} \frac{GM_{mean}}{GM} + \frac{-5\pi^2 A^4 l_3 \omega_\phi^2 - 6\pi^2 A^2 l_3 \omega_\phi^2 + 8\pi^2 \hat{\omega}^2 - 8\pi^2 \omega_\phi^2}{4(\pi^2 - A^2) \omega_\phi^2} \right\}^2 = \left( \frac{GM_{amp}}{GM} \right)^2$$

$GZ_w$ : 波による復原てこの変動       $I_{xx}$ : 横揺れの慣性モーメント  
 $GM_{mean}$ : 変動メタセンター高さの平均値       $A$ : 横揺れ振幅  
 $GM_{amp}$ : 変動メタセンター高さの振幅       $\alpha, \gamma$ : 横揺れ減衰係数

### (計算方法)

- GZ曲線の近似曲線を表現する係数と減衰係数の値及び第1判定で算出した平均GMならびに変動GMを用いて横揺れについての12次代数方程式を導出
- 導出した代数方程式から、出会い周波数の半分の周波数で揺れる横揺れを算出
- 算出した横揺れ応答が閾値を超えているかどうか判定



# 復原力喪失現象（第1段階基準）



## 第1段階基準

$$GM_{\min} > R_{PLA}$$

$$GM_{\min} = KB(d) + \frac{I_L}{V(d)} - KG$$

$GM_{\min}$  : 最小GM

$V(d)$  : 喫水 $d$ における排水量

$KB(d)$  : 喫水 $d$ におけるKB

$KG$  : 喫水 $d$ におけるKG

$I_L$  : 喫水が $d_L$ の場合の水線面の断面2次モーメント

$R_{PLA}$  : 閾値

(計算方法)

- 波の山谷から定まる喫水における断面2次モーメント ( $I_L$ ) を算出
- 算出した断面2次モーメントを用いて、対象の喫水におけるBMを求め、最小GMを算出
- 最小GMが閾値を超えるか否かで判定

6

# 復原力喪失現象（第2段階基準）



## 第2段階基準

$$\max(CR_1, CR_2, CR_3) > R_{PL0}$$

$$CR_1 = \sum_{i=1}^N W_i C1_i \quad C1_i = \begin{cases} 1 & \phi_v (\text{deg rees}) > R_{PL1-1} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$
$$CR_2 = \sum_{i=1}^N W_i C2_i \quad C2_i = \begin{cases} 1 & \phi_{loll} (\text{deg rees}) > R_{PL2} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$
$$CR_3 = \sum_{i=1}^N W_i C3_i \quad C3_i = \begin{cases} 1 & GZ_{\max}(m) < R_{PL3} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

(計算方法)

- 波の山の位置を変化させた場合のGZ曲線、最大GZを算出
- 算出したGZ曲線から最小の復原力消失角( $\phi_v$ )、最大のロル角( $\phi_{loll}$ )、最大GZの最小値( $GZ_{\min}$ )を算出
- 算出した復原力消失角、ロル角、最大GZの最小値のそれぞれについて、閾値を超えるかどうかを判定し、超えている場合は1とする。
- 各波浪条件において重み付けした評価値の総和を算出し、総和が閾値を得るか否かで判定

7

## 2. 基準案の検証結果（パラメトリック）



Kind of Ships	Lpp[m]	B[m]	d_full[m]	d_light[m]	D[m]
Container	283.0	42.8	14.0	8.8	26.0
VLCC	307.0	54.0	19.5	10.0	29.3

(満載) **パラメトリック横揺れ：第1段階基準の試算結果** (軽荷)

Kind of Ships	GM [m]	$\Delta GM$ [m]	$\Delta GM/GM$	Result	Kind of Ships	GM [m]	$\Delta GM$ [m]	$\Delta GM/GM$	Result
Container	1.000	1.180	1.18	Failed	Container	7.00	1.773	0.253	OK
VLCC	7.100	0.363	0.051	OK	VLCC	20.00	0.627	0.031	OK

(満載) **パラメトリック横揺れ：第2段階基準の試算結果** (軽荷)

Kind of Ships	CR_step1	CR_step2	Result	Kind of Ships	CR_step1	CR_step2	Result
Container	0.977	0.000	OK	Container	0.247	0.000	OK
VLCC	0.000	0.000	OK	VLCC	0.000	0.000	OK

8

## 検証結果（復原力喪失）



(満載) **復原力喪失現象：第1段階基準の試算結果** (軽荷)

Kind of Ships	KB [m]	KG [m]	GM_min [m]	Result	Kind of Ships	KB [m]	KG [m]	GM_min [m]	Result
Container	7.602	18.239	-1.730	Failed	Container	4.78	13.028	5.223	OK
VLCC	10.107	15.155	5.48	OK	VLCC	5.158	7.709	19.138	OK

(満載) **復原力喪失現象：第2段階基準の試算結果** (軽荷)

Kind of Ships	CR1	CR2	CR3	Result	Kind of Ships	CR1	CR2	CR3	Result
Container	0.00	0.00	0.00	OK	Container	0.00	0.00	0.00	OK
VLCC	0.00	0.00	0.00	OK	VLCC	0.00	0.00	0.00	OK

コンテナ船のようなfineな船型では相対的に厳しい結果になる。

9

### 3.直接計算による評価

- 第2世代非損傷時復原性基準に係る検討項目の中で、直接計算の活用による評価が最も重要になるのは、

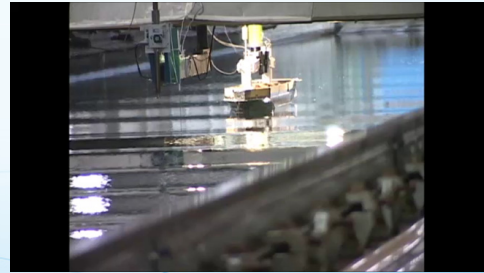
①パラメトリック横揺れと復原力喪失:

不規則波中での直接計算による発生の有無の評価

②デッドシップ：既にウェザークライテリオン(C係数基準)を適用

③ブローチング：フルード数0.3以上の高速船に多く発生する現象

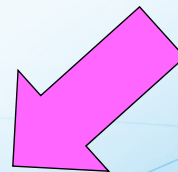
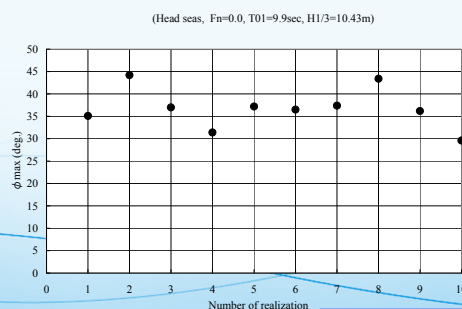
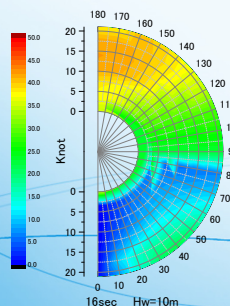
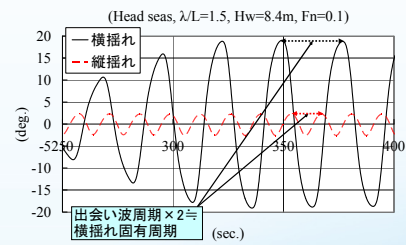
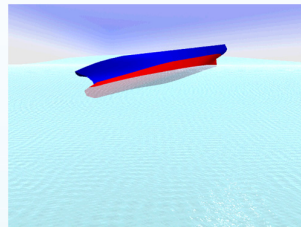
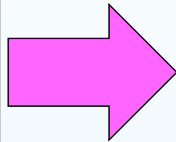
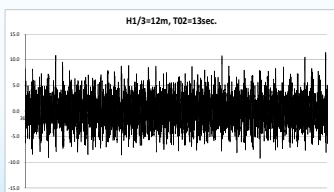
$\lambda/L$	Hw[m]	3.3	6.6	8.7	10.9
1.0				×	
1.2		×	○	○	○
1.5		×	○	○	



水槽試験によるパラメトリック横揺れの発生の有無 (Fn=0.06)  
：直接計算結果は実験結果との比較を通じて検証

### 短期海象下での直接評価

長期波浪頻度表で定義する短期海象(平均波周期と有義波高の組み合わせ)下でのシリーズ計算  
実スケール1時間の計算を10回実施して評価



パラメトリック横揺れの計算例

# 直接計算の高度化に向けて



- \* 激しい横揺れが発生するような荒天中では、定常回頭や横傾斜しつつ航行している場合がある。これらの影響をどこまで考慮するのか否かは明確でない。
- \* このため、流体力の計測を行い、これらの影響を評価するとともに、必要な流体力について近似式を作成した

## 大横揺れ発生時の操縦流体力微係数の近似式

横力：
$$Y' = Y_0' + \Delta Y'$$

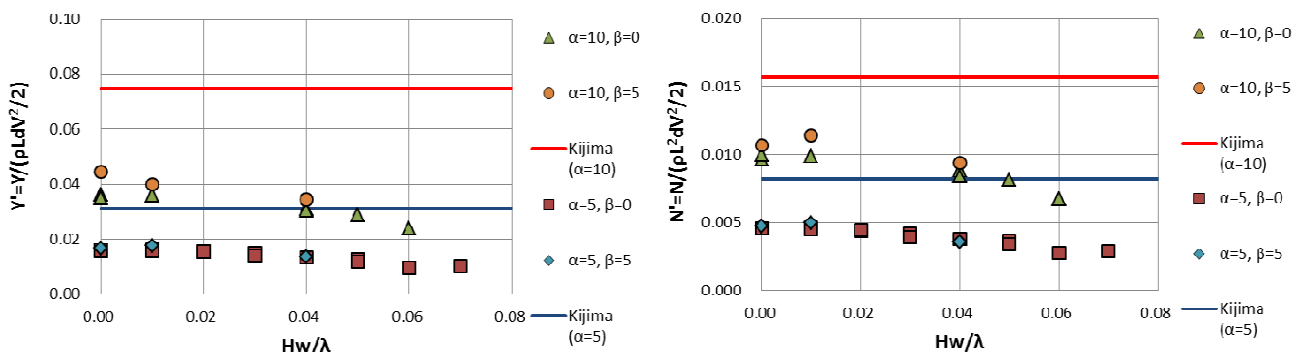
回頭モーメント：
$$N' = N_0' + \Delta N'$$

操縦流体力微係数 = 平水中の微係数 + 波浪中の微係数

↓  
斜航角と波岨度で近似

12

## 流体力計測例（高速時）



横力 $Y'$ 及び回頭モーメント $N'$ と波傾斜の関係 ( $F_n=0.3$ )

$\alpha$ : 斜航角[deg],  $\beta$ : ヒール角[deg]

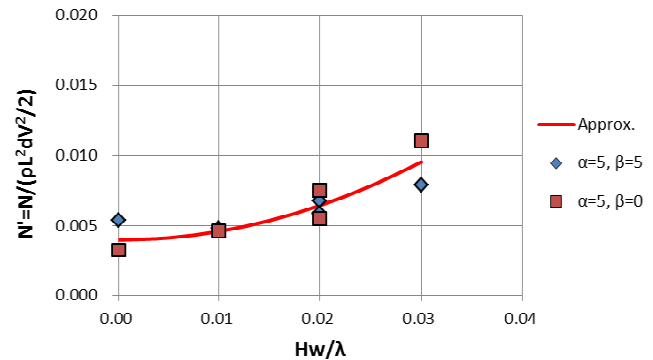
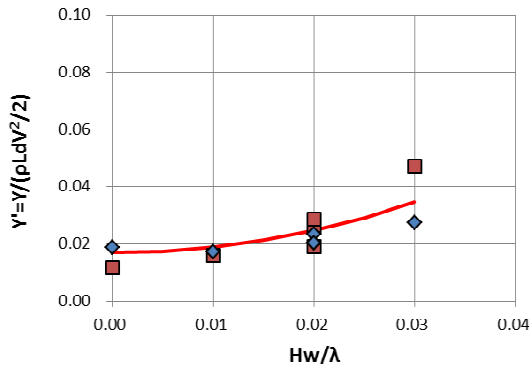
- 高速時では、ヒール角及び波の影響は小さい
- 斜航角 $\alpha$ によって、横力 $Y$ と回頭モーメント $N$ は大きく変化する  
→ 復原力喪失の解析において、横力 $Y$ と回頭モーメント $N$ が寄与するのであれば、斜航角 $\alpha$ の影響は無視できない

13



## 近似式の作成（低速時）

操縦流体力微係数の変動( $\Delta Y'$ ,  $\Delta N'$ )は、傾斜角 $\beta$ の影響は小さいと仮定し、波岨度 $H_w/\lambda$ の2次関数で表現



$$\Delta Y' = 22.6 (H_w/\lambda)^2$$

$$\Delta N' = 5.562 (H_w/\lambda)^2$$

- パラメトリック横揺れが発生するような低速時は波岨度で流体力は大きく変わりえる。

14

## 結 言

- \* IMOにおける復原性基準案の審議に参加するとともに、第1及び第2段階基準の評価を行う基準計算プログラムを開発した
- \* 直接計算を活用した操船ガイダンスを開発した
- \* 直接計算の高精度化を目的として流体力を検証した

### 謝辞

本研究は、日本財団の助成事業による(一財)日本船舶技術研究協会の2013年度目標指向型復原性基準に関する調査研究の一部として実施されたものである。改めてご関係各位に謝辞を申し上げます。

15