

追波中復原力喪失現象



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

第2世代非損傷時復原性基準

1. 追波中復原力喪失現象
2. パラメトリック横揺れ
3. ブローチング現象
4. デッドシップ状態の同調横揺れ
5. 過大加速度

我が国カーフェリーの大傾斜例（2005-2009）

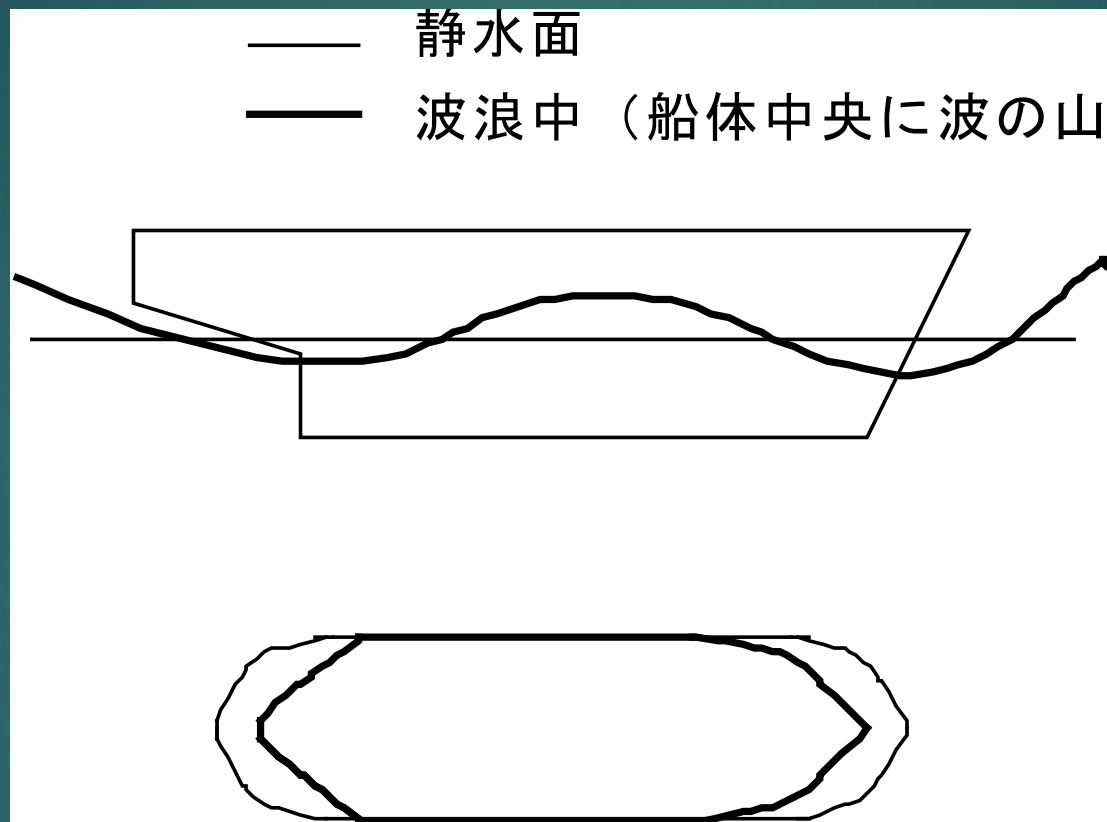
Ship Gross tonnage	Water Area	Wave direction	Maximum Roll angle (degrees)	Reported incidents
12,000	Off Ibaraki Prefecture	Following waves	27	The Ship suffered large roll due to a large wave from stern. As a result, Cargo damage was reported.
10,000	Off Ibaraki Prefecture	Stern quartering waves	More than 30	Large roll occurred due to swell from port stern. Onboard vehicles were shifted.
13,000	Off Ibaraki Prefecture	Stern quartering waves (heading of 30 degrees from wave direction)	40	The Ship rolled to 40 degrees due to restoring reduction in a following wave and strong wind and then rolled back to 20 degrees in the opposite direction with increased restoring. As a result, onboard vehicles were shifted.
14,000	Off Miyagi Prefecture	Stern quartering waves	25	During the navigation wave height increases so that large list and cargo shift occurred.
11,000	Off Aomori Prefecture	Stern quartering waves	More than 25	Combination of Ship Oscillation due to swell from stern and punching due to swell from bow. As a result, lashing equipment was damaged.
14,000	Off Wakayama Prefecture	Stern quartering waves	26	After course change due to wind from starboard stern, large list occurred due to swell from stern. As a result, cargo shift was reported.
7,900	Off Wakayama Prefecture	Stern quartering waves	40	The Ship rolled to 25 degrees due to a wave from starboard stern. It induced cargo shift and then the large heel due to cargo shift occurred.

(注)H22年5月 国土交通省海事局調べ

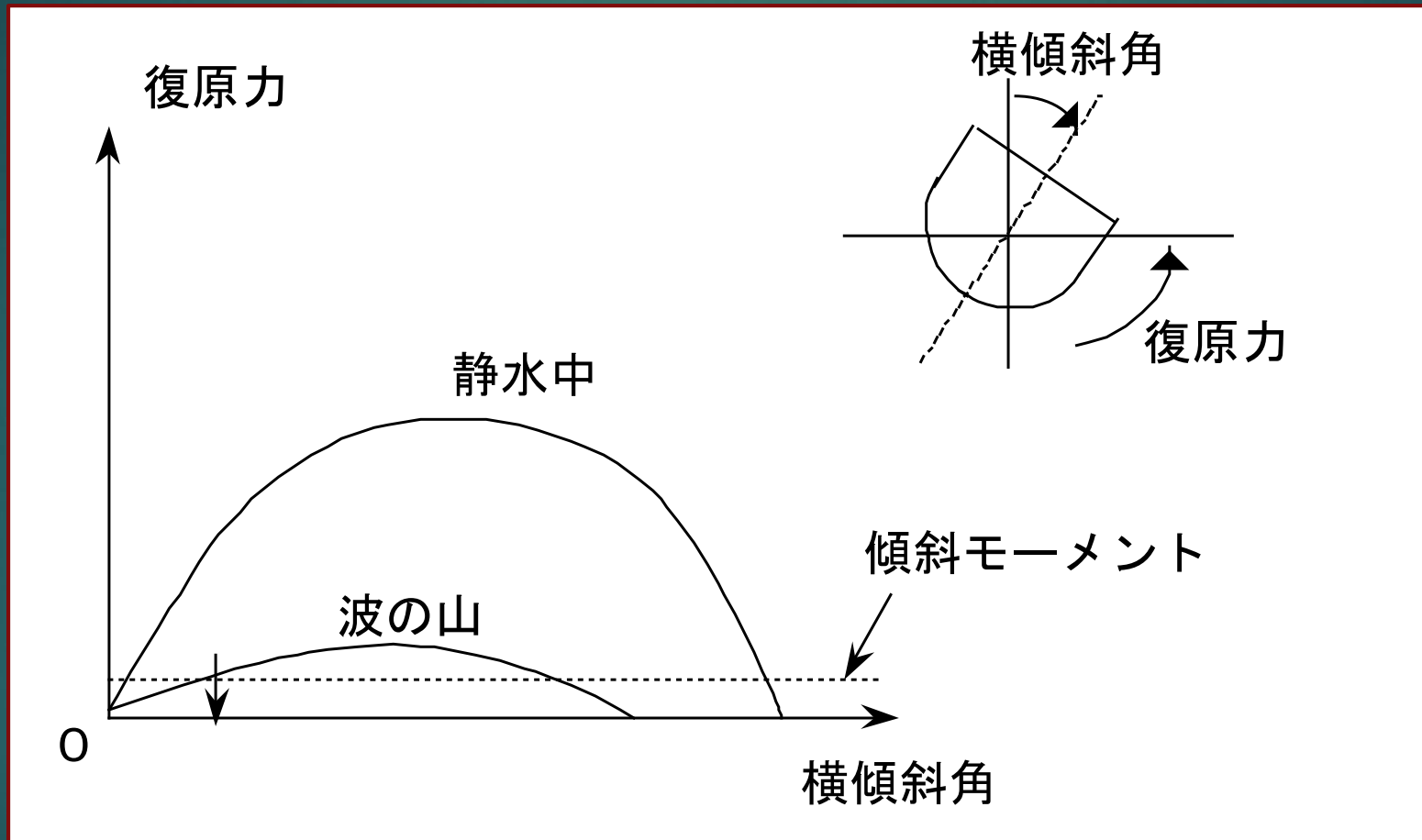
追波中復原力喪失現象

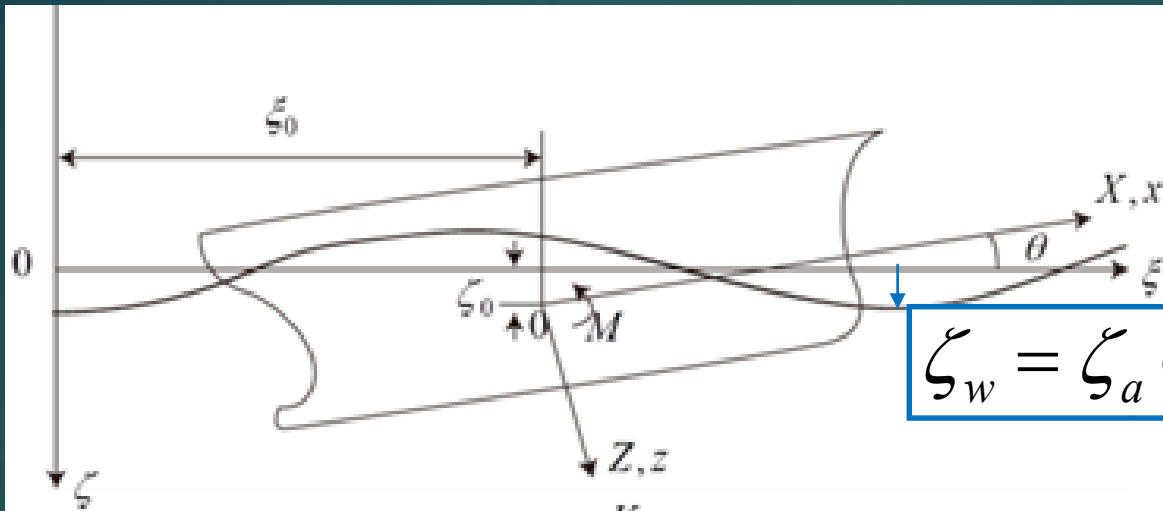


縦波中の復原力変動

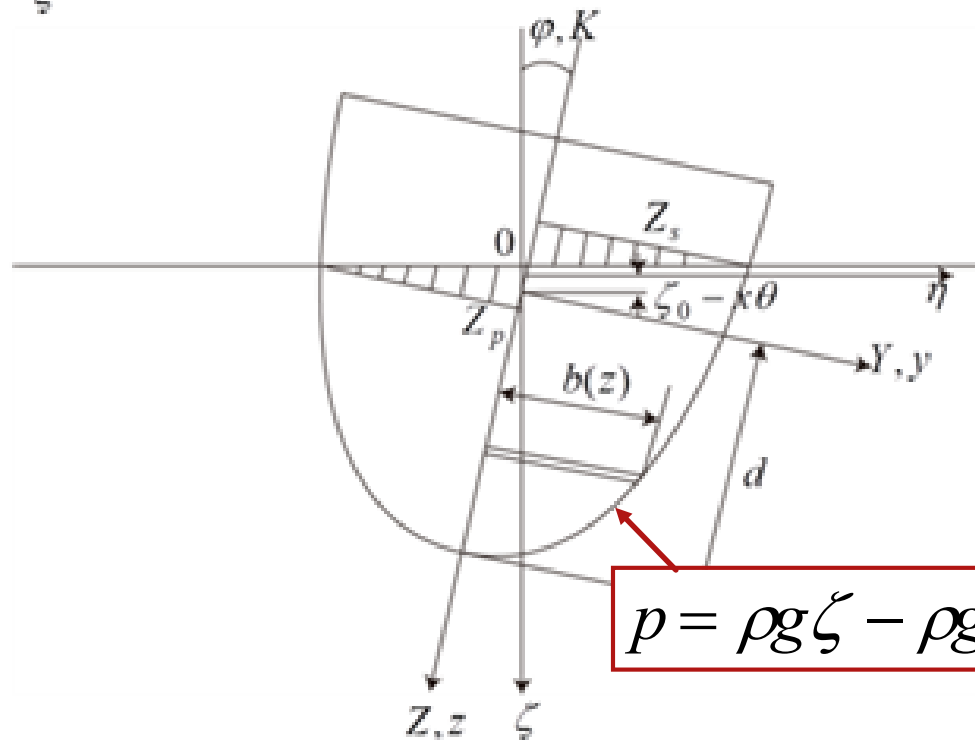


波による復原力の変化

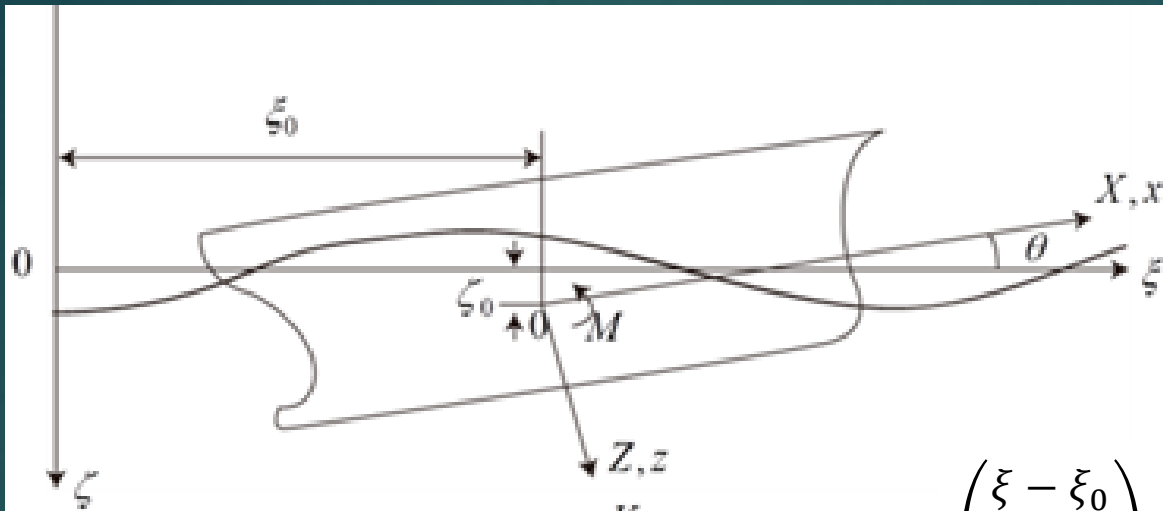




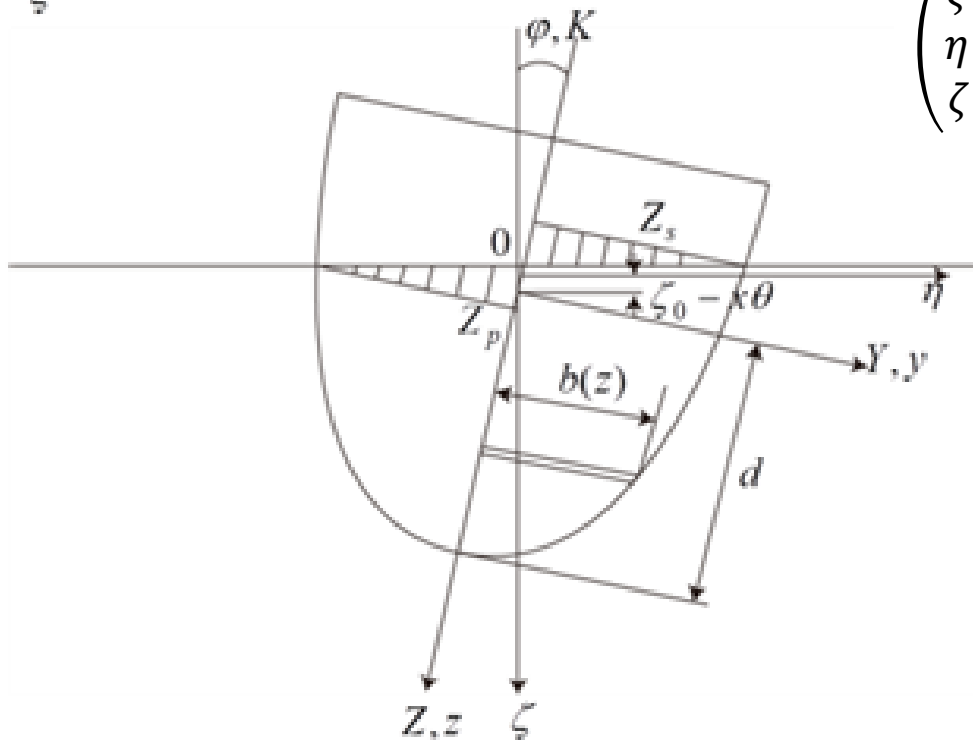
$$\zeta_w = \zeta_a \cos k(\xi - ct)$$

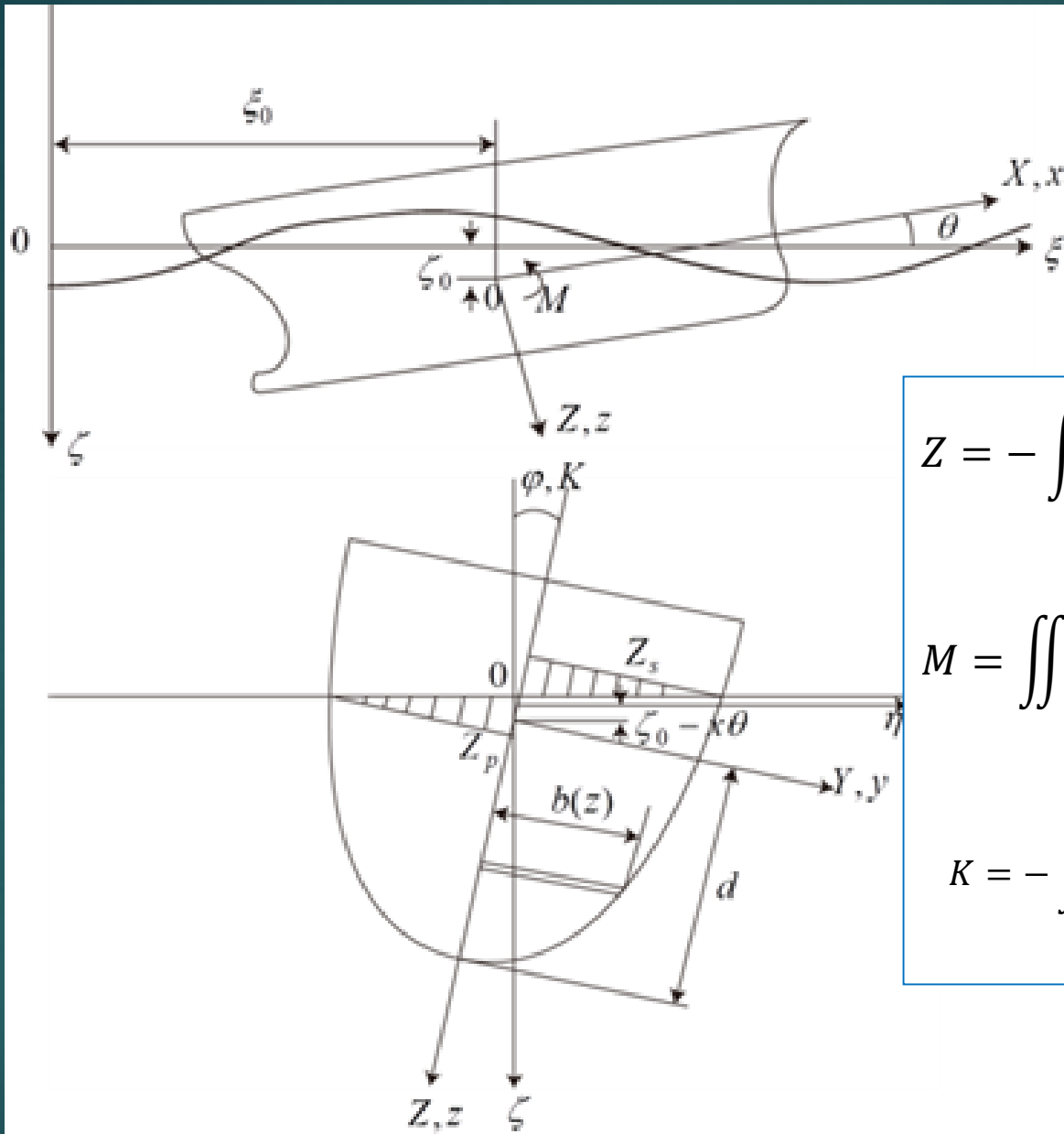


$$p = \rho g \zeta - \rho g \zeta_a e^{-k\zeta} \cos k(\xi - ct)$$



$$\begin{pmatrix} \xi - \xi_0 \\ \eta - \eta_0 \\ \zeta - \zeta_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \theta \sin \varphi & \theta \cos \varphi \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ -\theta & \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

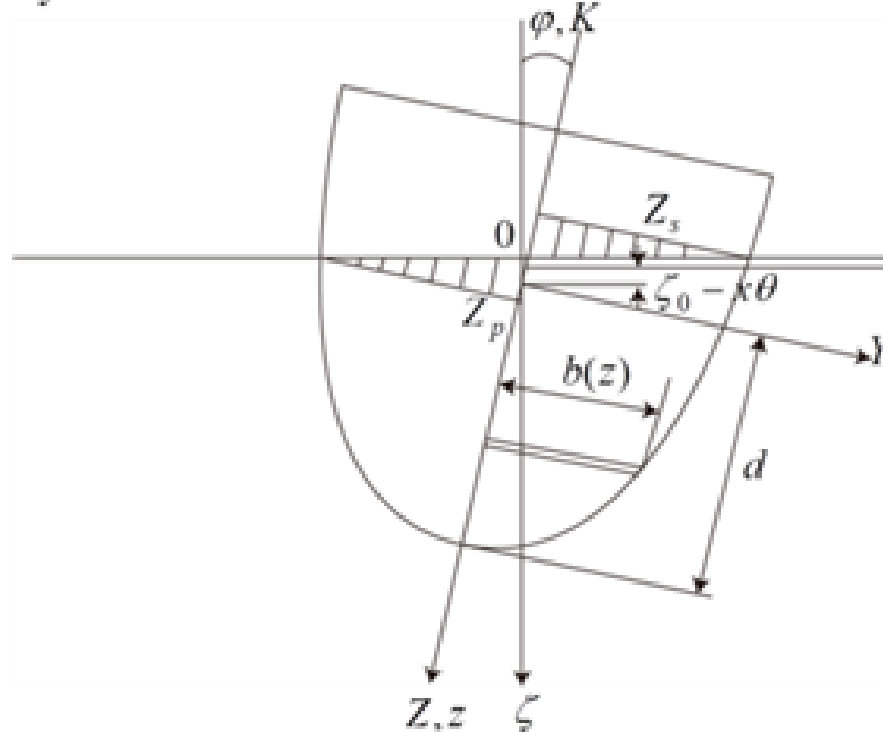
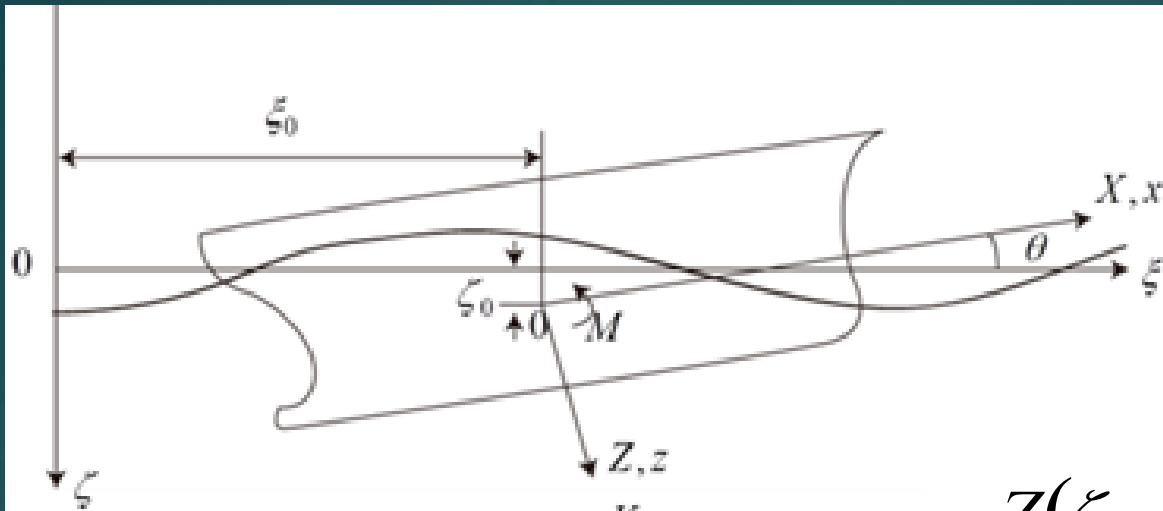




$$Z = - \iint_{S_w} p \cos(nz) dS$$

$$M = \iint_{S_w} xp \cos(nz) dS$$

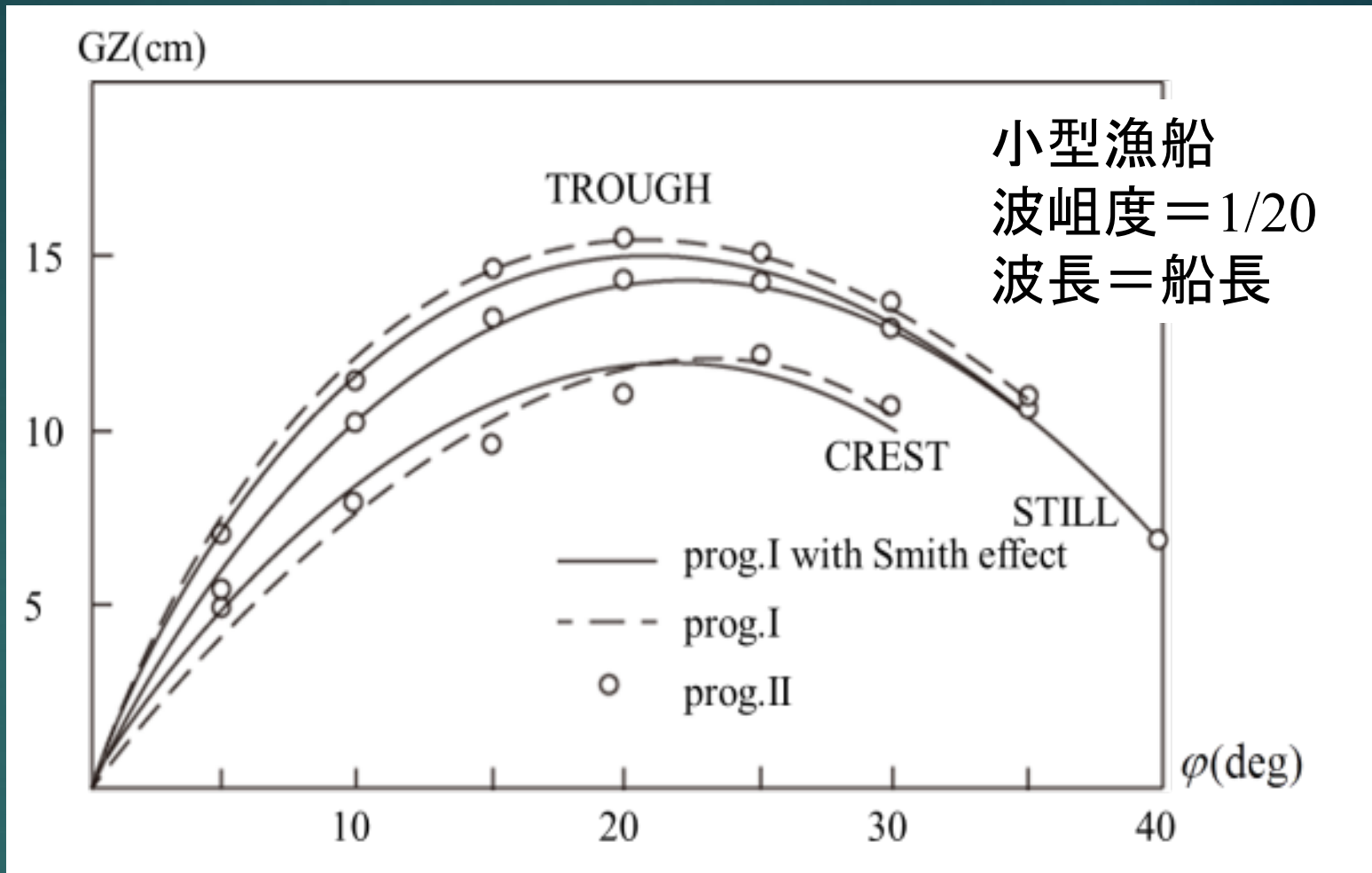
$$K = - \iint_{S_w} \{yp \cos(nz) - zp \cos(ny)\} dS$$



$$Z(\zeta_0, \theta, \phi) + W \cos \phi = 0$$

$$M(\zeta_0, \theta, \phi) + W \overline{MG} \cos \phi = 0$$

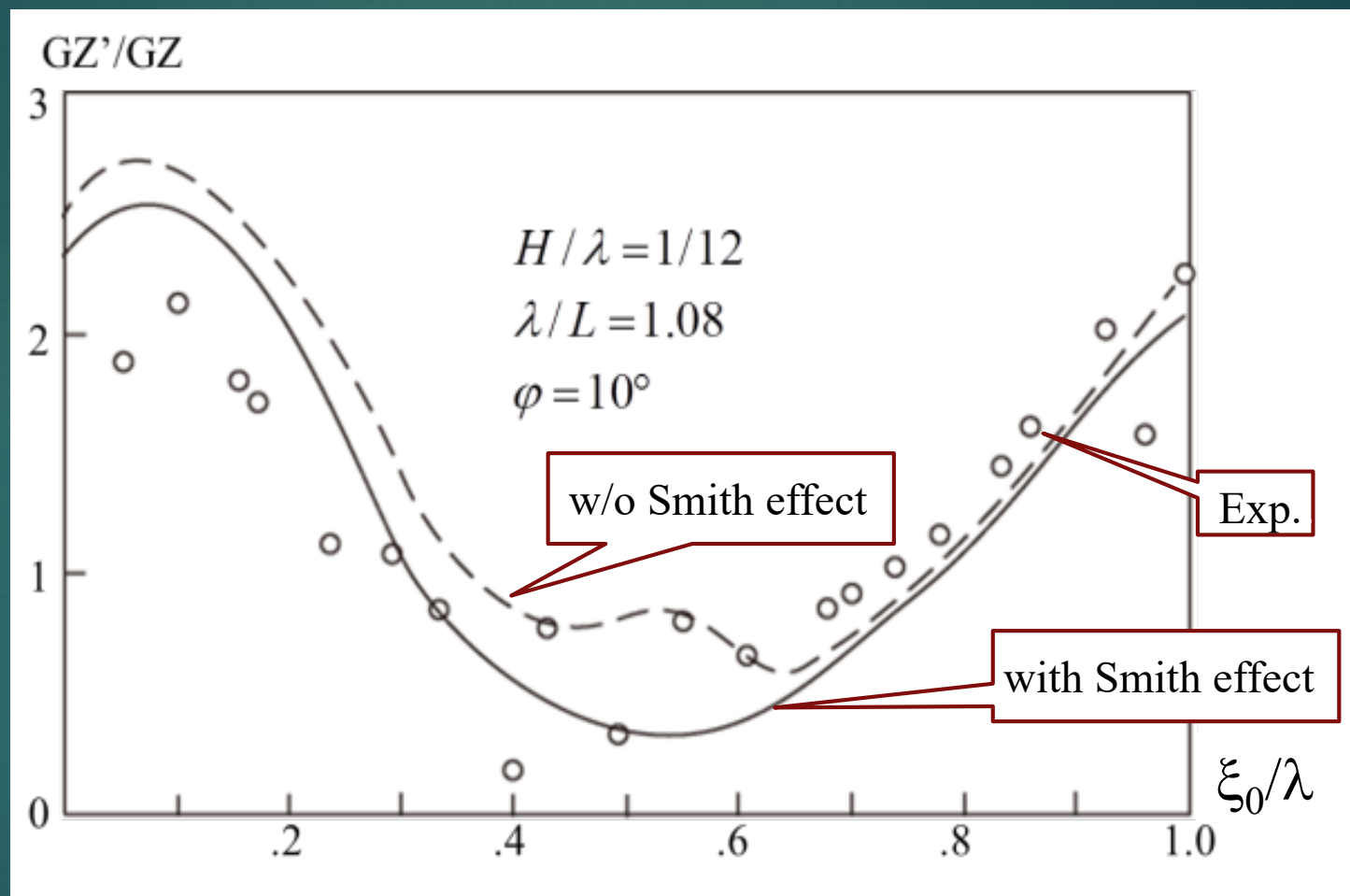
$$WGZ = -K + W \overline{OG} \sin \phi$$



$$p = \rho g \zeta - \rho g \zeta_a e^{-k\zeta} \cos k(\xi - ct)$$

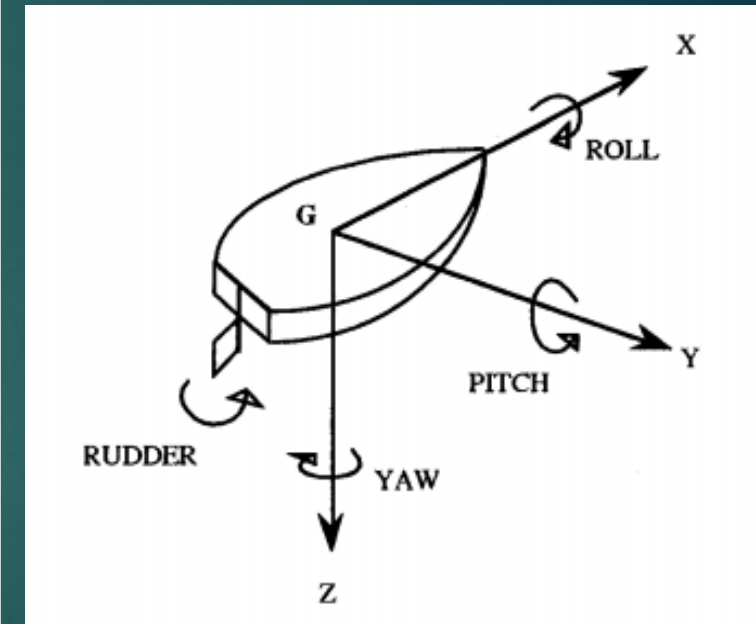
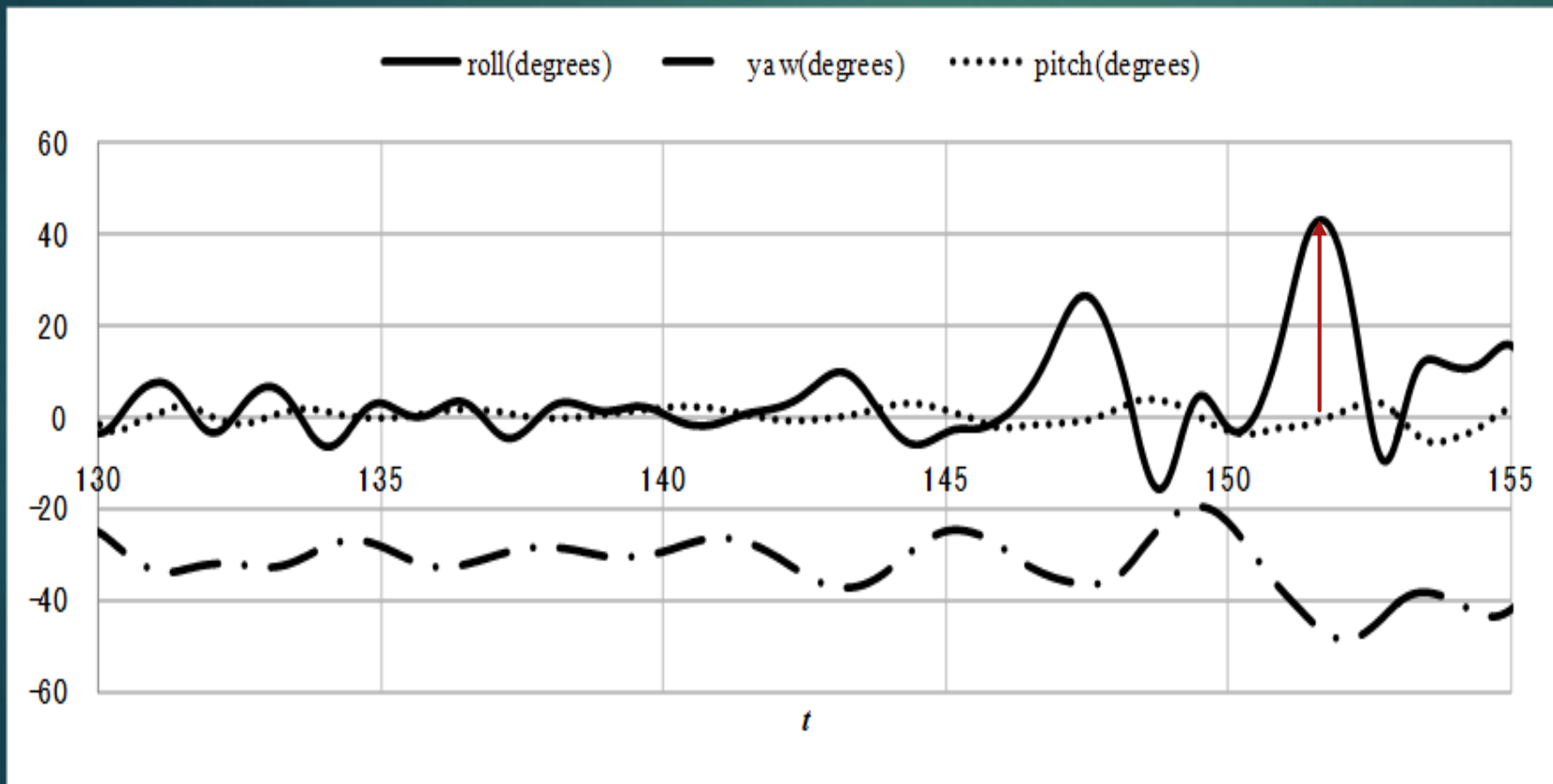
$$p \approx \rho g \zeta - \rho g \zeta_a \cos k(\xi - ct)$$

実験と計算の比較 (小型漁船: 波速 = 船速)



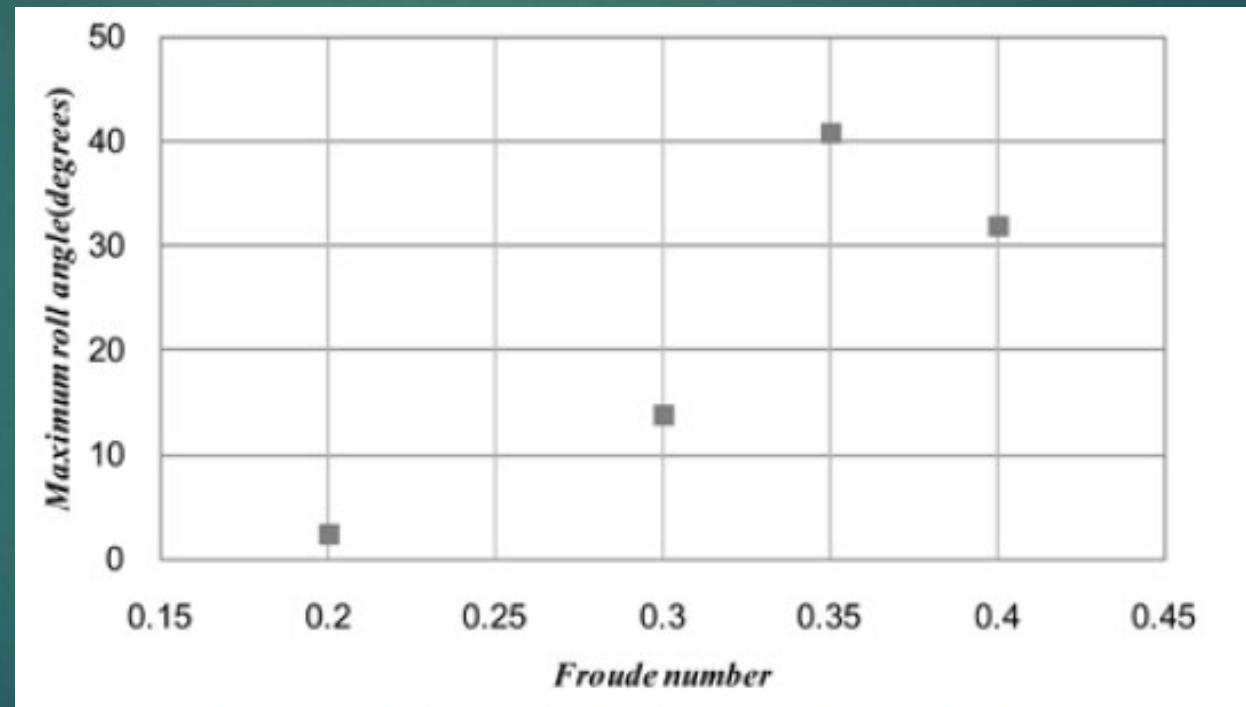
追波中復原力喪失現象

(模型実験：ポストパナマックスコンテナ船、
有義波高10.5m、平均波周期17.5 s)

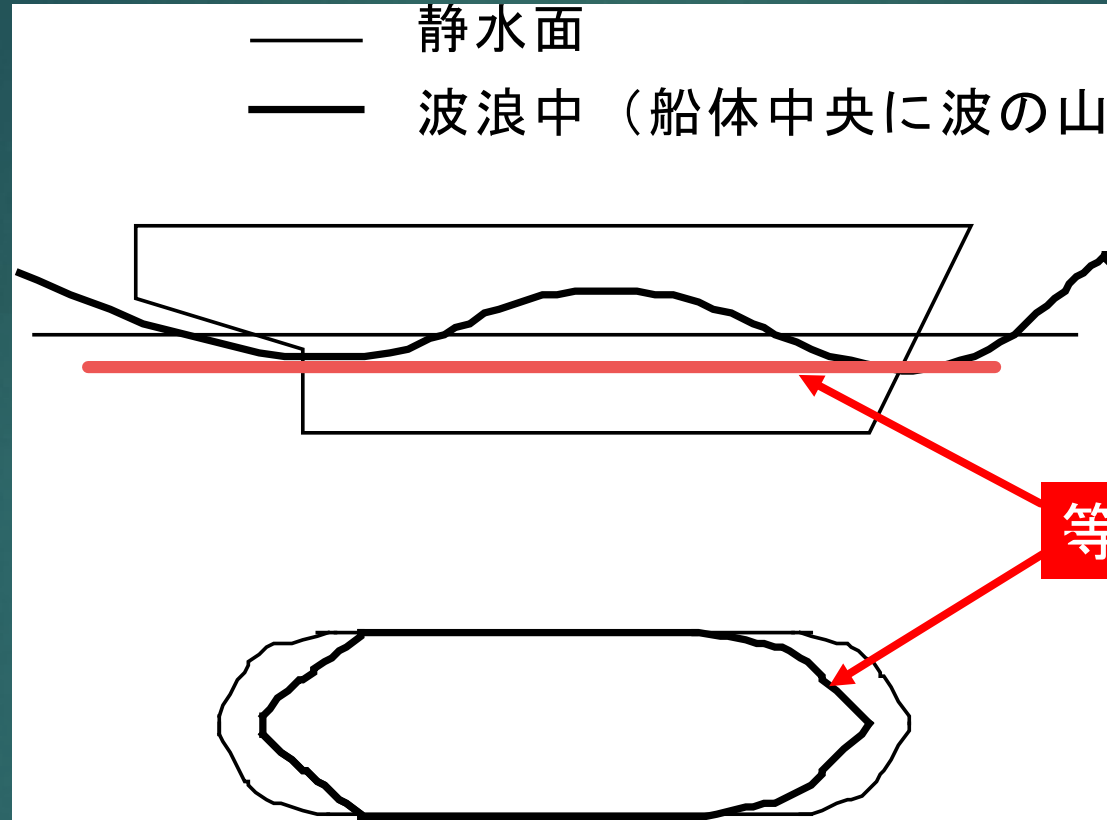


追波中復原力喪失現象

(模型実験：ポストパナマックスコンテナ船、
波長船長比 = 1.0、波岨度 = 0.05、指令進路 = 30
(degrees)、オートパイロットの比例ゲイン
= 3.0)



第1段階簡易基準

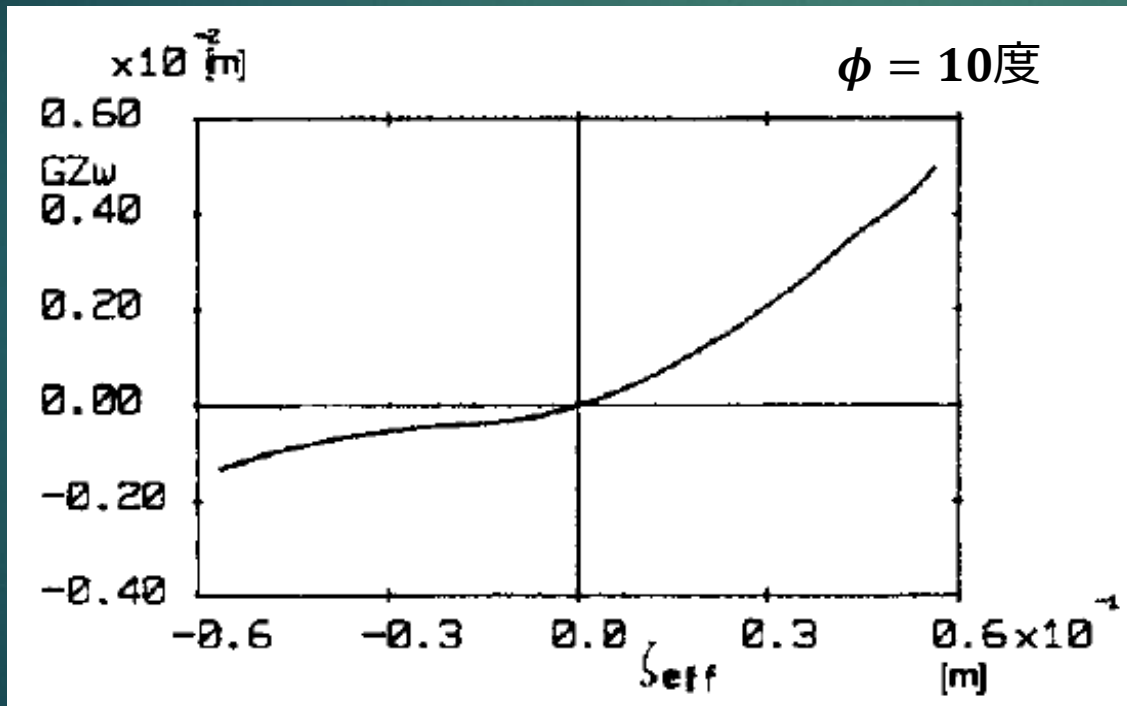


$F_n < 0.24$ かつ
縦波中 $GM > 0.05m$

$$GM = KB + \frac{I}{V} - KG$$

第2段階簡易基準

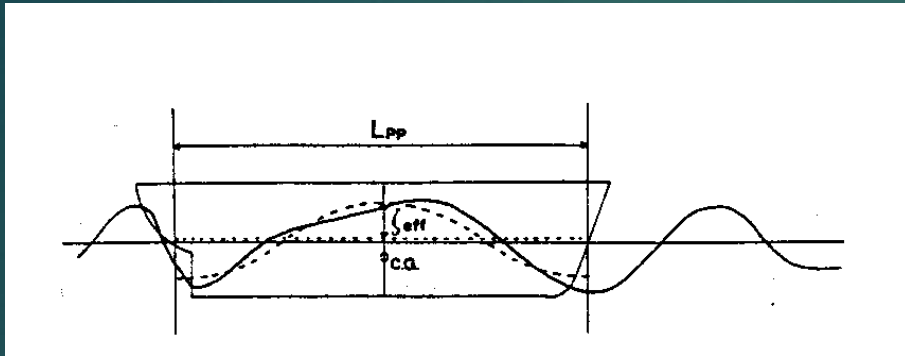
- $F_n < 0.24$ であれば合格
- 北大西洋の波浪頻度表における各有義波高、平均波周期の組み合わせに、グリムの有効波の考え方で、3%最大有効波高を計算する。



GM変動は、
入射波に対して非線形
⇒線形重ね合わせ×

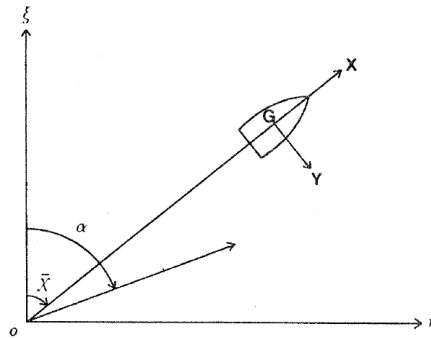
ただノンメモリーなので
⇒グリムの有効波

Grim's effective waves



空間波形を余弦波($\lambda/L=1.0$, ship center on a wave crest)で
最小二乗近似

$$\zeta_w(\xi, \eta, t) = \int_0^{\infty} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \sqrt{2S(\omega)D(\alpha)} d\omega d\alpha \cos(\omega t - k\xi \cos \alpha - k\eta \sin \alpha + \delta_b)$$

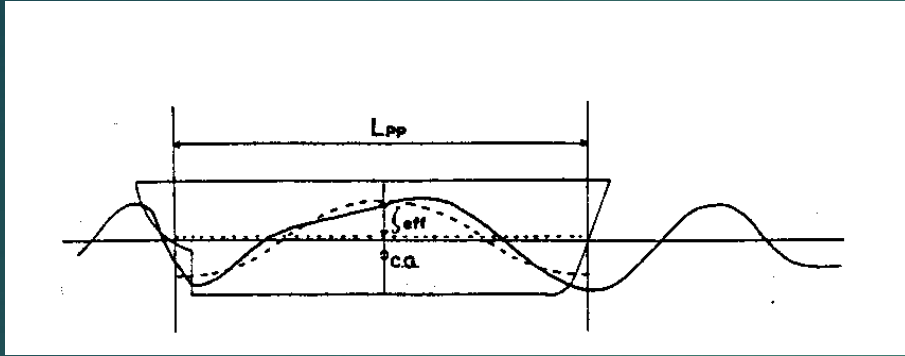


$$\xi = \xi_G + x \cos \bar{\chi} - y \sin \bar{\chi}$$

$$\eta = \eta_G + x \sin \bar{\chi} + y \cos \bar{\chi}$$

$$J = \int_{-L/2}^{L/2} \left\{ \zeta_w(\xi, \eta, t) - \left[a(\xi_G, \eta_G, \bar{\chi}, t) + \zeta_{eff}(\xi_G, \eta_G, \bar{\chi}, t) \cos\left(\frac{2\pi}{L}x\right) \right] \right\}^2 dx$$

Grim's effective waves



空間波形を余弦波($\lambda/L=1.0$, ship center on a wave crest)で
最小二乗近似

$$\zeta_w(\xi, \eta, t) = \int_0^\infty \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \sqrt{2S(\omega)D(\alpha)} d\omega d\alpha \cos(\omega t - k\xi \cos \alpha - k\eta \sin \alpha + \delta_b)$$

$$J = \int_{-L/2}^{L/2} \left\{ \zeta_w(\xi, \eta, t) - \left[a(\xi_G, \eta_G, \bar{\chi}, t) + \zeta_{eff}(\xi_G, \eta_G, \bar{\chi}, t) \cos\left(\frac{2\pi}{L}x\right) \right] \right\}^2 dx$$

$$\frac{\partial J}{\partial \zeta_{eff}} = 0$$

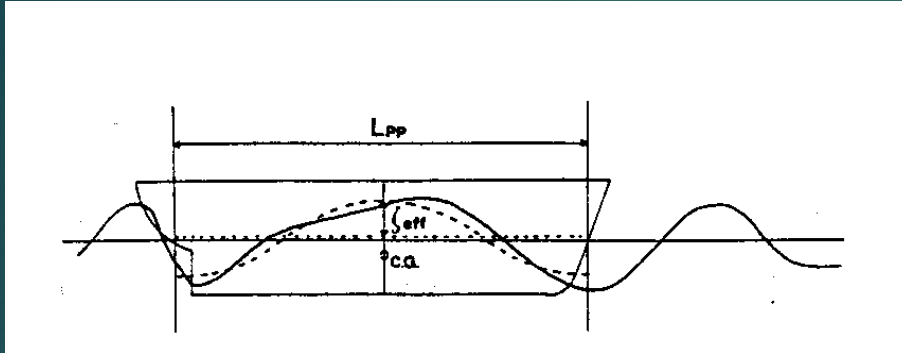
$$y = 0$$

$$\xi = \xi_G + x \cos \bar{\chi} - y \sin \bar{\chi}$$

$$\eta = \eta_G + x \sin \bar{\chi} + y \cos \bar{\chi}$$

$$\zeta_{eff}(\xi_G, \eta_G, \bar{\chi}, t) = \int_0^\infty \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \sqrt{2S_{eff}(\omega, \alpha, \bar{\chi})} d\omega d\alpha \cos(\omega t - k\xi_G \cos \alpha - k\eta_G \sin \alpha + \delta_b)$$

Grim's effective waves



空間波形を余弦波($\lambda/L=1.0$, ship center on a wave crest)で
最小二乗近似

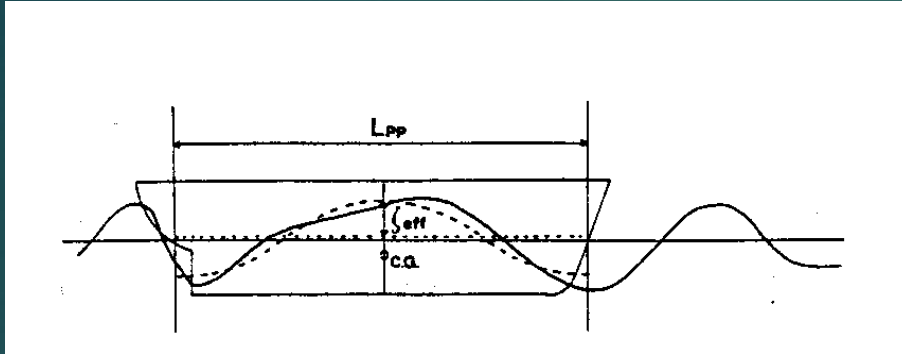
$$\zeta_w(\xi, \eta, t) = \int_0^{\infty} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \sqrt{2S(\omega)D(\alpha)} d\omega d\alpha \cos(\omega t - k\xi \cos \alpha - k\eta \sin \alpha + \delta_b)$$

$$\zeta_{eff}(\xi_G, \eta_G, \bar{\chi}, t) = \int_0^{\infty} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \sqrt{2S_{eff}(\omega, \alpha, \bar{\chi})} d\omega d\alpha \cos(\omega t - k\xi_G \cos \alpha - k\eta_G \sin \alpha + \delta_b)$$

$$S_{\eta_{eff}}(\omega, \alpha, \bar{\chi}) = \left[\frac{\frac{\omega^2}{g} L_{pp} \cos(\bar{\chi} - \alpha) \sin\left(\frac{\omega^2}{2g} L_{pp} \cos(\bar{\chi} - \alpha)\right)}{\pi^2 - \left(\frac{\omega^2}{2g} L_{pp} \cos(\bar{\chi} - \alpha)\right)^2} \right]^2 S(\omega) D(\alpha)$$

Grim's effective waves

20



空間波形を余弦波($\lambda/L=1.0$, ship center on a wave crest)で
最小二乗近似

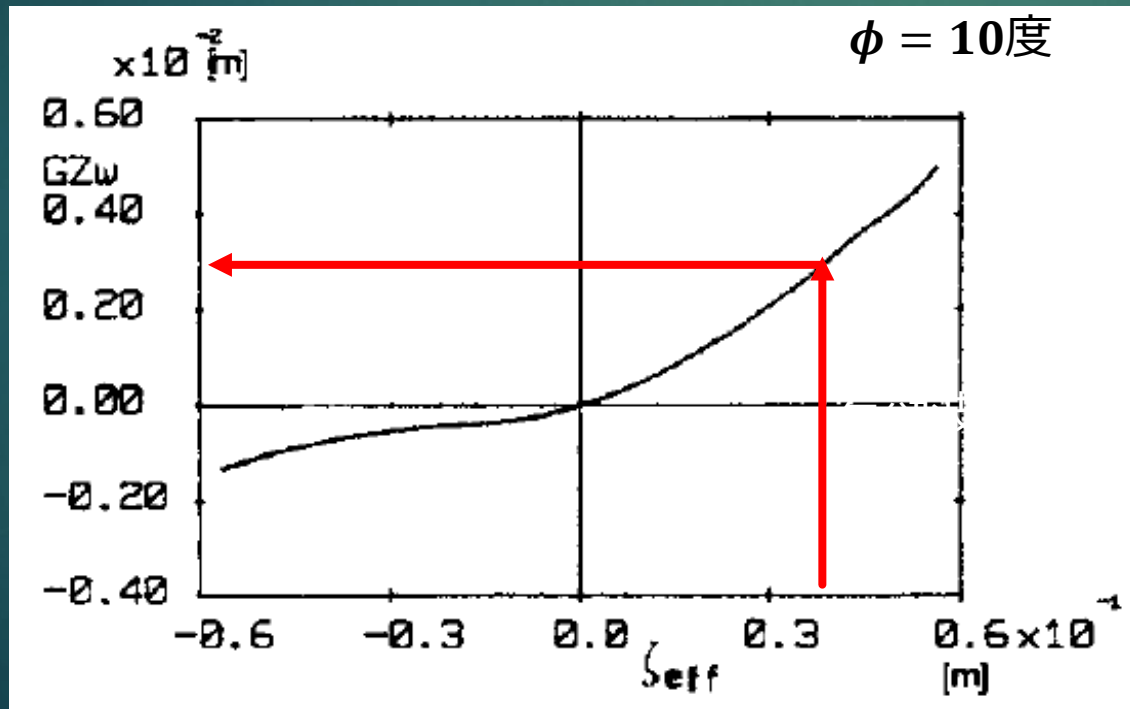
$$S_{\eta_{eff}}(\omega, \alpha, \bar{\chi}) = \left[\frac{\frac{\omega^2}{g} L_{pp} \cos(\bar{\chi} - \alpha) \sin\left(\frac{\omega^2}{2g} L_{pp} \cos(\bar{\chi} - \alpha)\right)}{\pi^2 - \left(\frac{\omega^2}{2g} L_{pp} \cos(\bar{\chi} - \alpha)\right)^2} \right]^2 S(\omega) D(\alpha)$$

$$H_{eff}^{3\%} = 5.973 \sqrt{m_{0eff}}$$

$$m_{eff0}(\bar{\chi}) = \int_{\alpha=-\pi/2}^{\alpha=\pi/2} \int_{\omega=0}^{\omega=\infty} S_{\eta_{eff}}(\omega, \alpha, \bar{\chi}) d\omega d\alpha$$

第2段階簡易基準

- $F_n < 0.24$ であれば合格
- 北大西洋の波浪頻度表における各有義波高、平均波周期の組み合わせに、グリムの有効波の考え方で、3%最大有効波高を計算する。
- その波高の頂が船体中央にあって波長=船長の時の余弦波の中でのGZ曲線を船舶算法的に計算する。



有効波高

縦波中復原力

$$\zeta_{eff}(t)$$

$$GZ(\phi, t)$$

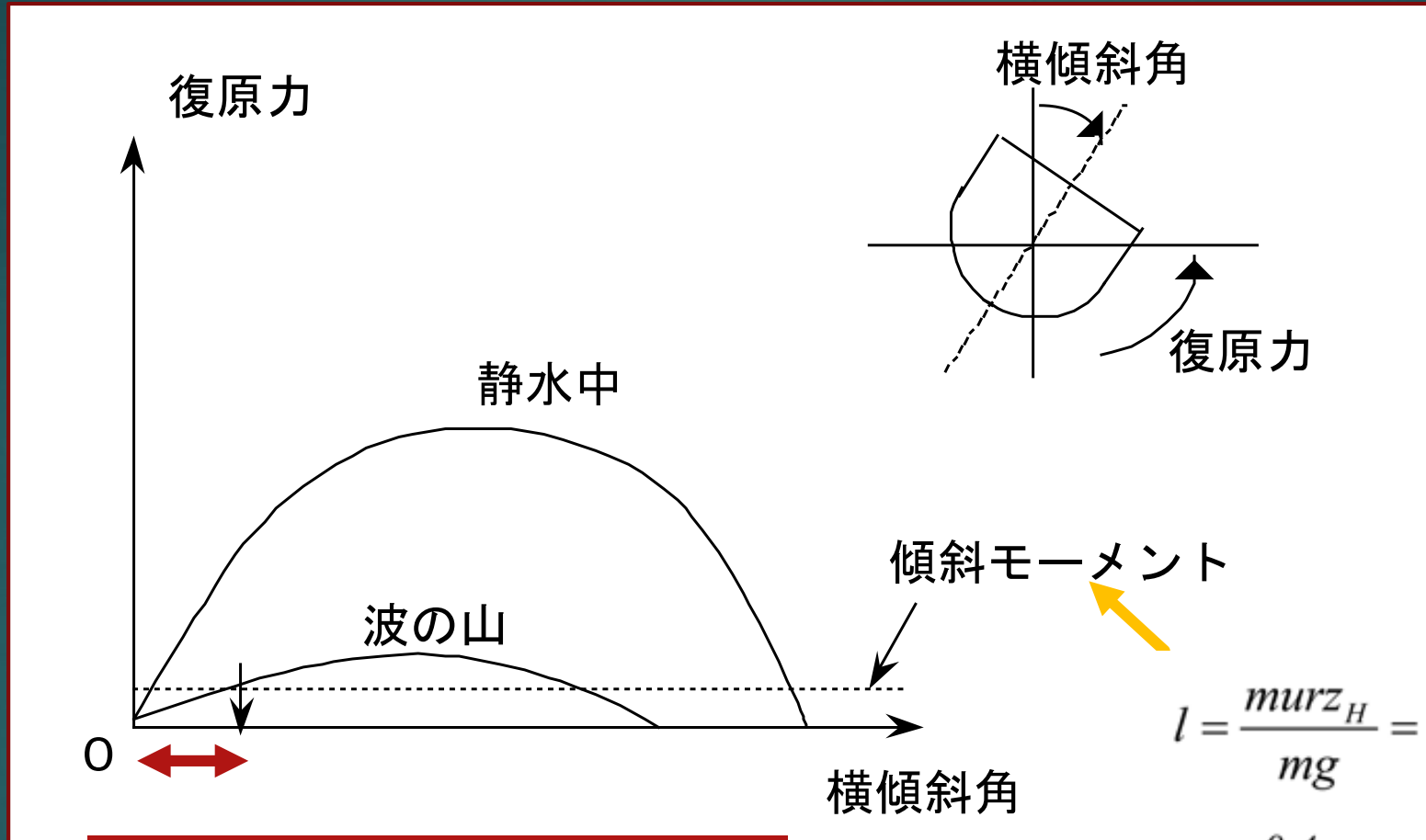
有効波高と縦波中
復原力の非線形・
ノンメモリー関係

第2段階簡易基準

- $F_n < 0.24$ であれば合格
- 北大西洋の波浪頻度表における各有義波高、平均波周期の組み合わせに、グリムの有効波の考え方で、3%最大有効波高を計算する。
- その波高の頂が船体中央にあって波長=船長の時の余弦波の中でのGZ曲線を船舶算法的に計算する。
- そのGZ曲線に対して、
 - ✓ 復原力喪失角 < 30 度ならば、 $C_{1i} = 1$
 - ✓ 遠心力による横傾斜モーメントを加えたときの定傾斜角 $>$ 許容角ならば、 $C_{2i} = 1$

第2段階簡易基準

$F_n < 0.24$ かつ



横傾斜角 < 15度 (客船)
< 25度 (貨物船)

$$l = \frac{murz_H}{mg} = \frac{u}{g} r' \left(\frac{u}{L} \right) z'_H d$$

$$r' = \frac{0.4}{0.05} (H / \lambda)$$

第2段階簡易基準

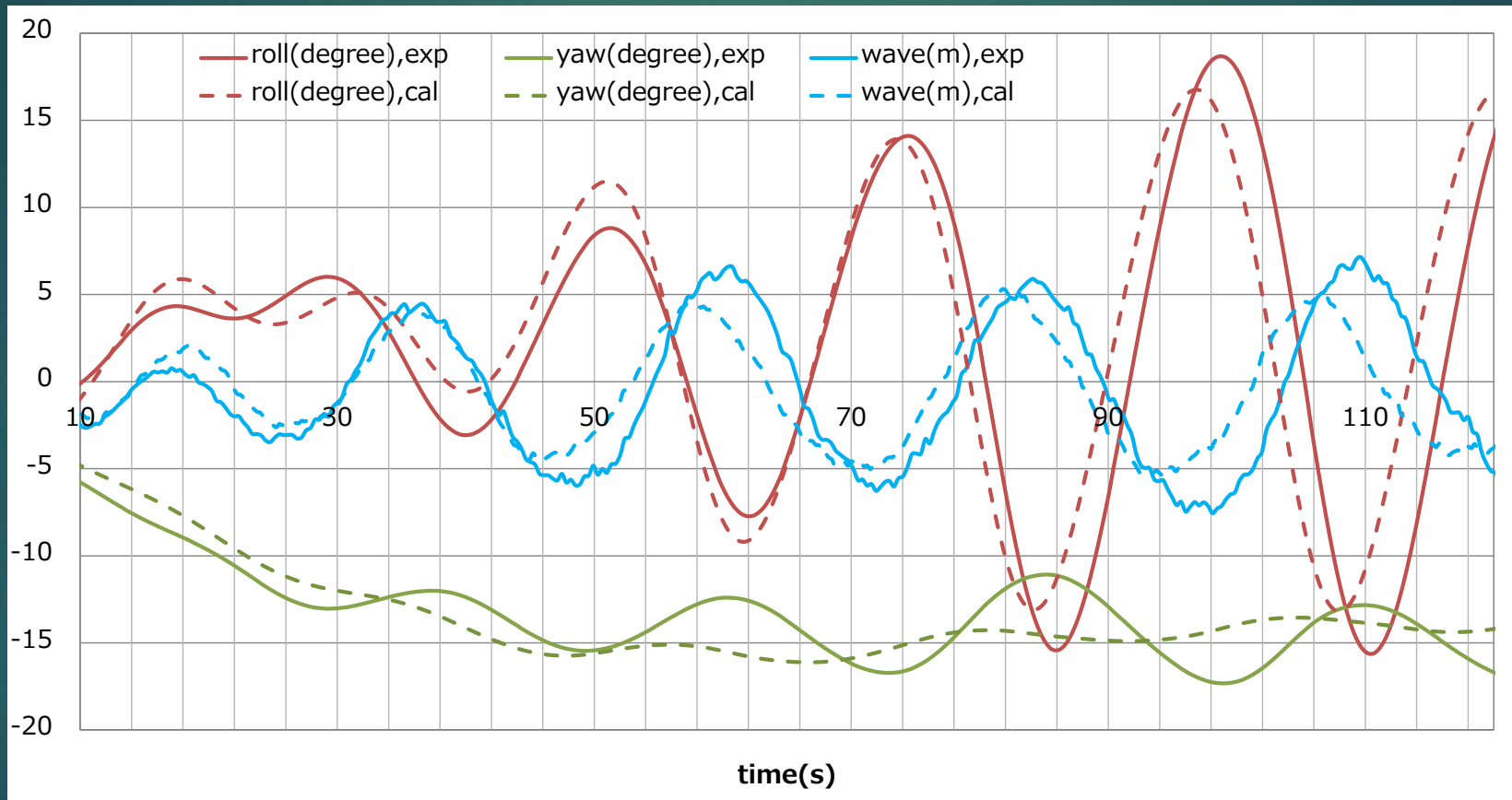
- $F_n < 0.24$ であれば合格
- 北大西洋の波浪頻度表における各有義波高、平均波周期の組み合わせに、グリムの有効波の考え方で、3%最大有効波高を計算する。
- その波高の頂が船体中央にあって波長=船長の時の余弦波の中でのGZ曲線を船舶算法的に計算する。
- そのGZ曲線に対して、
 - ✓ 復原力喪失角 < 30 度ならば、 $C_{1i} = 1$
 - ✓ 遠心力による横傾斜モーメントを加えたときの定傾斜角 $>$ 許容角ならば、 $C_{2i} = 1$
- 北大西洋の波浪頻度を用いて、 C_{1i} と C_{2i} を重み平均し、そのうち大きな値が0.06未満であれば、合格。
- 「フェリーありあけ」を不合格とするように要求値設定

直接復原性評価（阪大）

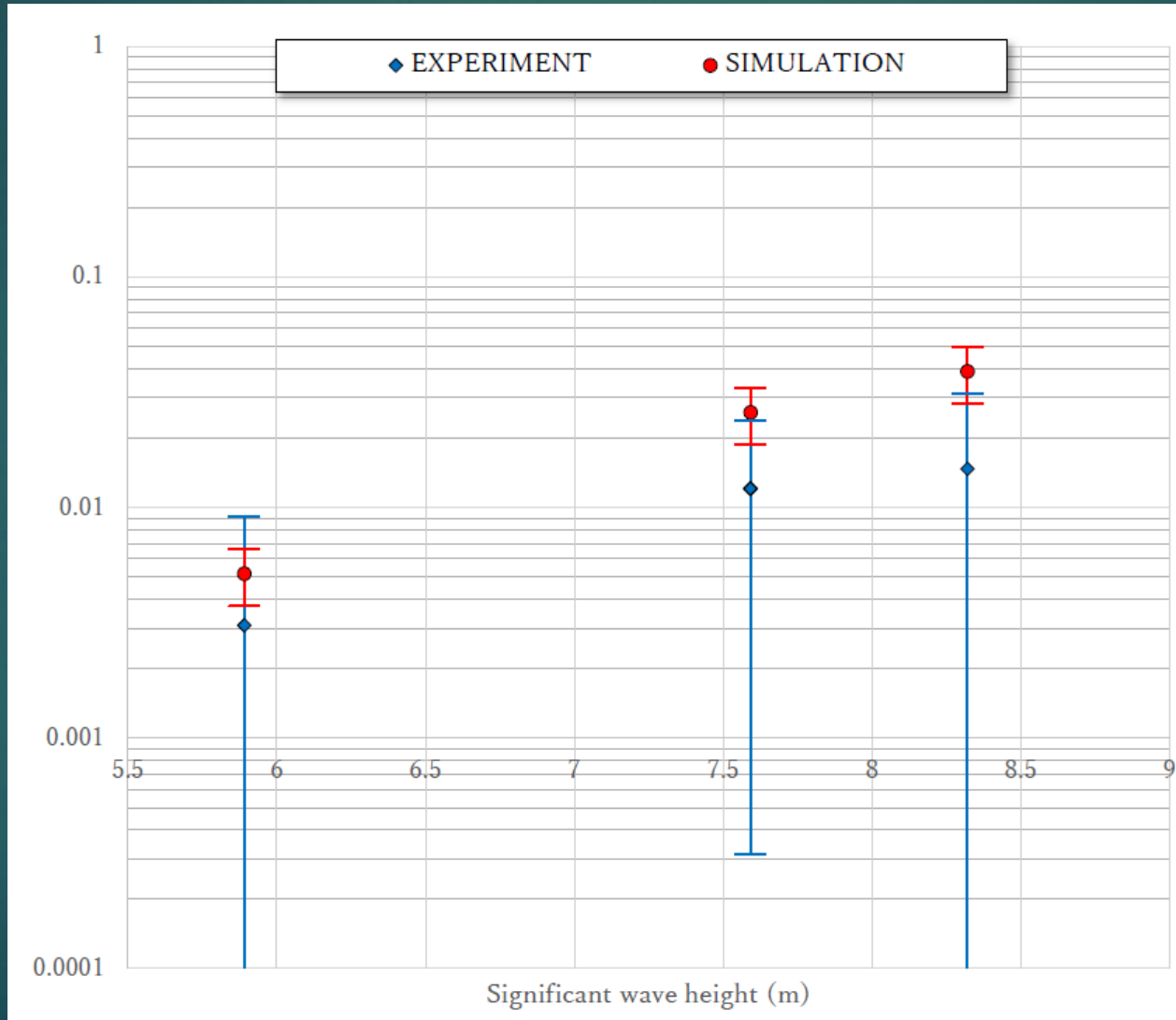
- ▶ 短波頂不規則波中の時間領域シミュレーション
- ▶ 4自由度（surge-sway-yaw-roll）+ オートパイロットモデル
- ▶ 低周波数であるため、非線形操縦性数学モデルをベースに、線形波浪強制力（揚力成分主体）を付加
- ▶ Heave-pitchは波面上での静的平衡と近似
- ▶ 復原力は、グリムの有効波を用いて推定
- ▶ 平水中の操縦流体力、横揺れ減衰力、推進性能は模型実験による

直接復原性評価計算と実験の比較

(ONR フレアー船型)



直接復原性評価法の実験的検証



一波当たりの25度
以上横傾斜発生確
率

カーフェリー「あ
りあけ」

岡本聡一郎：阪大修論
(2023)

復原力喪失基準の設計影響

- ▶ 26隻の国内での試計算結果より、第1、第2段階基準に不合格となるのは、
- ▶ コンテナ船（L=348mでGM=4m以下。L=262mでGM=1.4m以下）
- ▶ P C C（L=190mでGM2m以下。）
- ▶ カーフェリー（L=208mでGM=1.93m以下。L=100mで、GM=1.6m以下、L=70mでGM=1m以下）
- ▶ その他は合格

Ref: IMO,; SDC5/INF.4, Annex 17, 2017

ship type	Lpp (m)
bulk carrier 1	280.8
bulk carrier 2	279
bulk carrier 3	187
oil tanker 1	324
oil tanker 2	320
oil tanker 3	172
chemical tanker	108.5
LNG carrier 1	286.5
LNG carrier 2	274
general cargo	96.5
containership 1	348
containership 2	262
car carrier 1	190
car carrier 2	183.7
cruise ship	246
RoPax 1	208
RoPax 2	100
OSV 1	84.5
OSV 2	75.4
chemical tanker 2	118
chemical tanker 3	139
chemical tanker 4	119.3
chemical tanker 5	138
chemical tanker 6	149.3
chemical tanker 7	169
cement carrier	106
RoPax 3	70