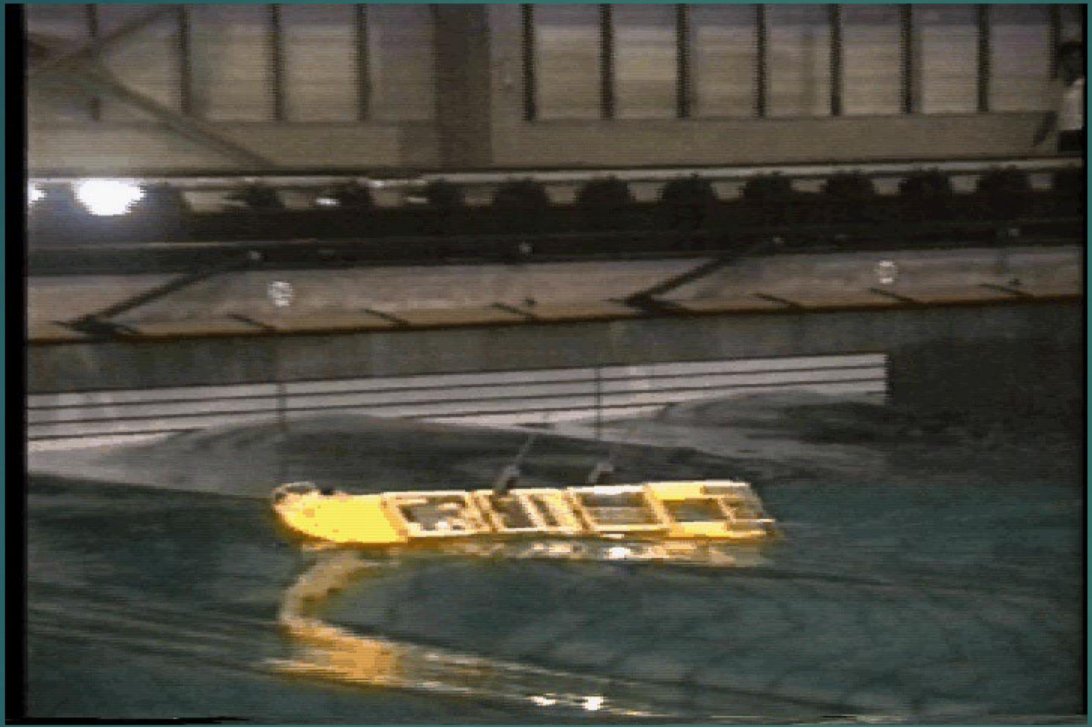
パラメトリック横揺れ



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

第２世代非損傷時復原性基準の必要性

C11級ポストパナマックスコンテナ船（5100TEU）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（1998年　北太平洋）

L_{BP}=262m, B=40m, d=12.34m, GM=2.0m, T_{φ} = 25.7 s

H_s=14.9m, T_p=16.4s

35~40度の横揺れにより、1300の搭載コンテナの1/3を船外流出、1/3を損傷。

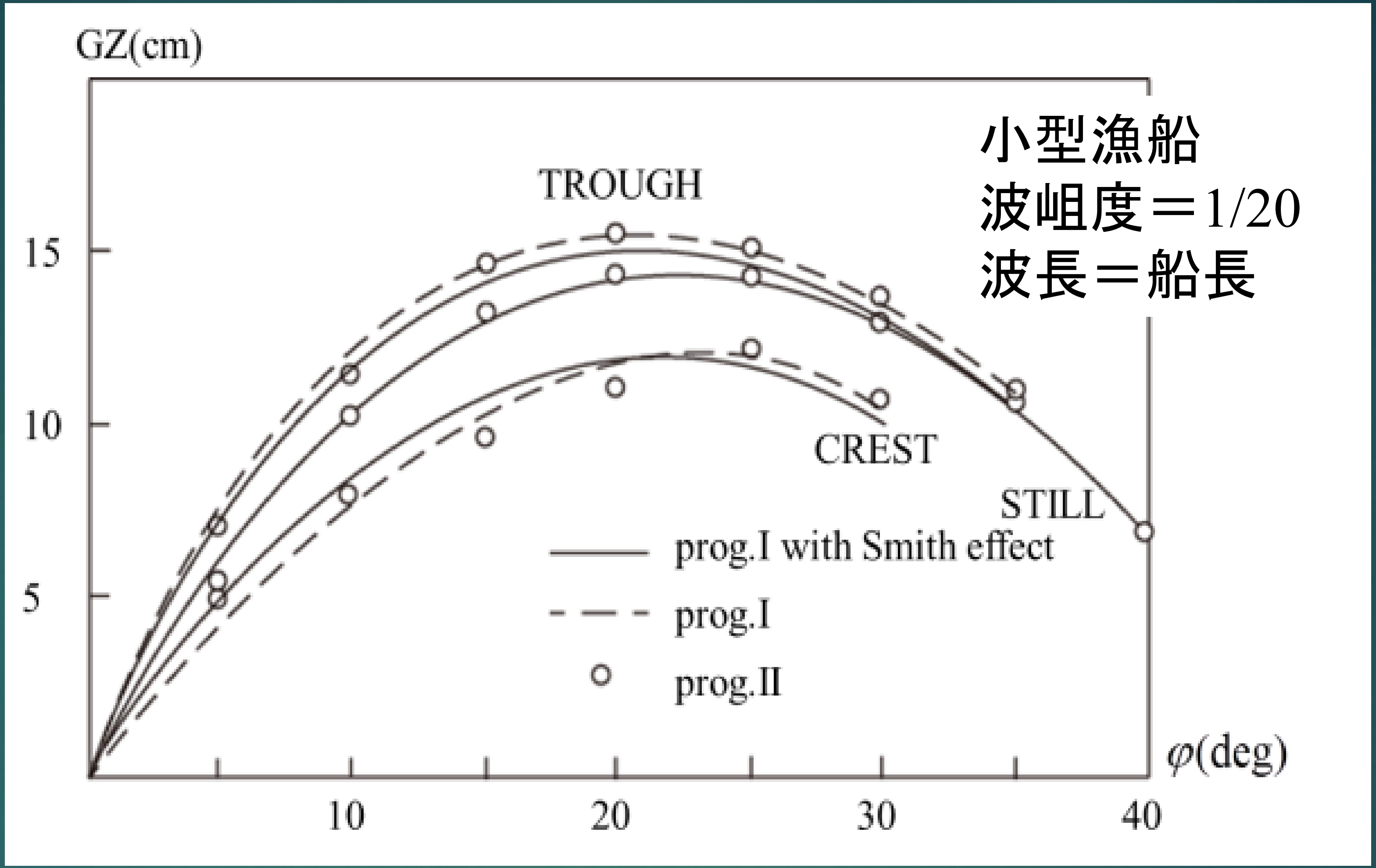
Ref: France, W.N. et al.: Marine Technology, 40(1), 2003

14000TEU　コンテナ船
ONE APUS (2020年12月)

ワン・アパスは中国塩田港（深セン）から米国ロングビーチ港に向けて航行していた11月30日夜、ハワイの北西沖1600カイリの海域で嵐に遭遇。危険物コンテナ64本を含む1816本のコンテナが海上に流出して失い、行き先を神戸港に修正して航行を続け、8日同港に入港した。（ロジスティック　ツデイより）

パラメトリック横揺れ

N. Umeda, et al.　JSNAJ (1995)

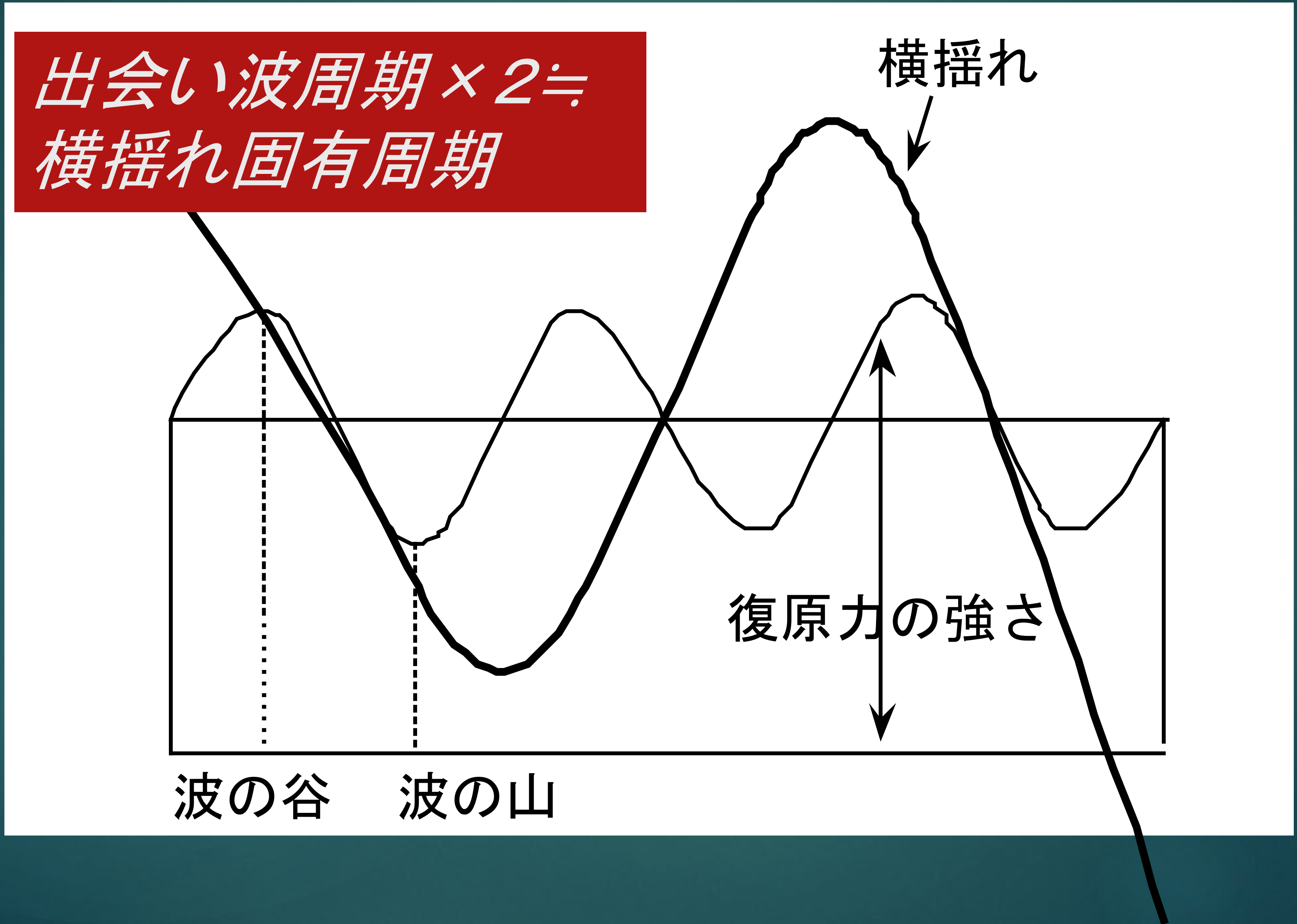


$$p = \rho g \zeta - \rho g \zeta_a e^{-k\zeta} \cos k(\xi - ct)$$

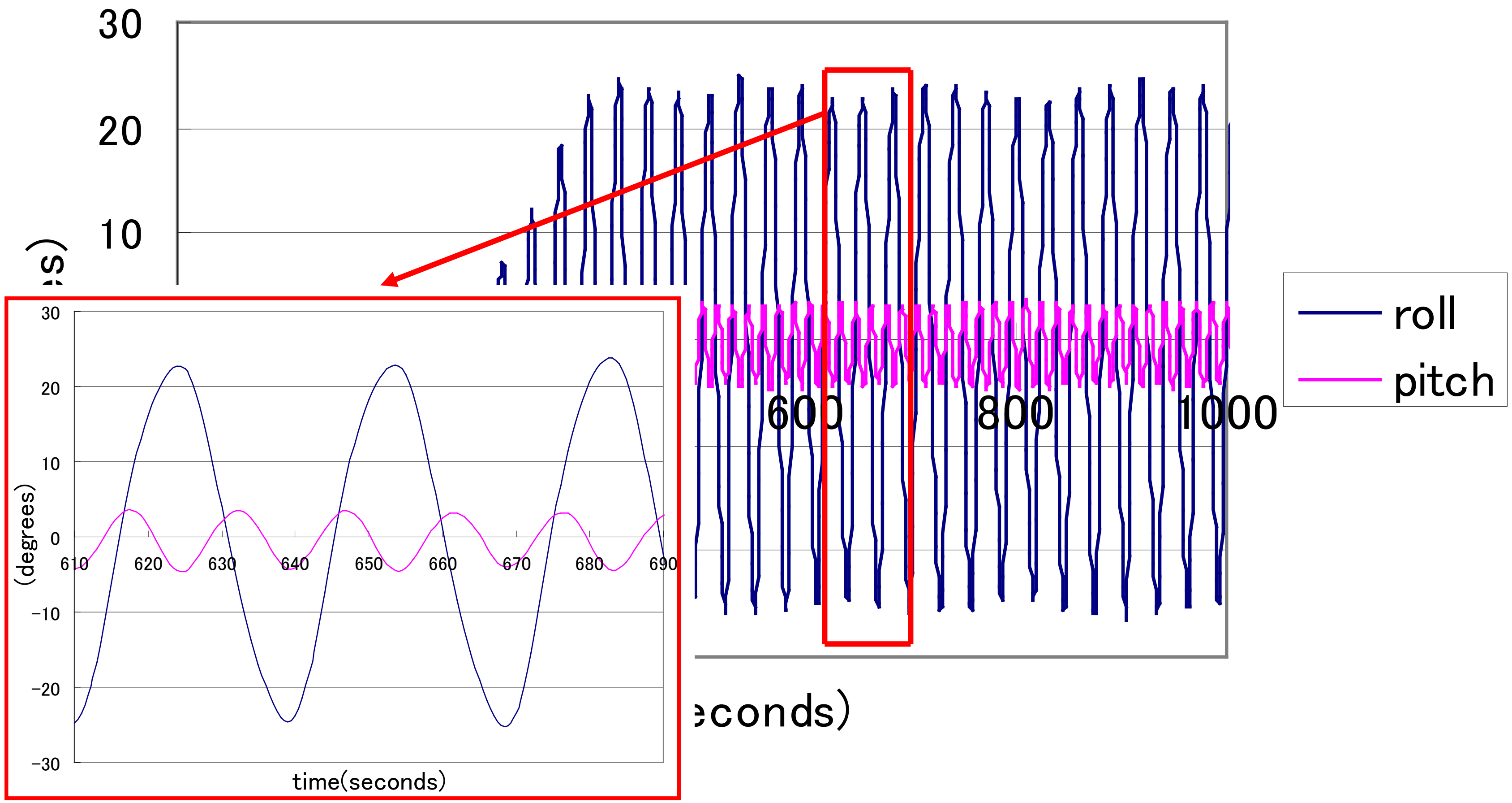
$$p \approx \rho g \zeta - \rho g \zeta_a \cos k(\xi - ct)$$

梅田直哉：漁船　258（1985）

パラメトリック横揺れのメカニズム



$\lambda/L=1.3 \quad H/\lambda=0.03 \quad Fn=0.036 \quad \omega_{\Phi}/\omega_{e}=0.482$



縦波中のパラメトリック横揺れ

復原力変動

$$GM = GM_0 + \Delta GM cos\omega_e t$$

運動方程式

$$\ddot{\phi} + 2\alpha\dot{\phi} + \omega_\phi^2(1 + bcos\omega_e t)\phi = 0$$

次の解を仮定する

$$\phi = \mathrm{A}cos\omega t + \mathrm{B}sin\omega t$$

よって、

$$\dot{\phi} = -A\omega sin\omega t + B\omega cos\omega t$$
$$\ddot{\phi} = -A\omega^2 \cos\omega t - B\omega^2 sin\omega t$$

これらを運動方程式に代入

$$-A\omega^2 cos\omega t - B\omega^2 sin\omega t - 2\alpha A\omega sin\omega t + 2\alpha B\omega cos\omega t + \omega_\phi^2(1 + bcos\omega_e t)(Acos\omega t + Bsin\omega t) = 0$$

ここで、$\omega_e = 2\omega$とおくと、

$$\left(-A\omega^2 + 2\alpha B\omega + \omega_\phi^2 A\right)cos\omega t + \left(-B\omega^2 - 2\alpha A\omega + \omega_\phi^2 B\right)sin\omega t + \omega_\phi^2 bcos2\omega t(Acos\omega t + Bsin\omega t) = 0$$

次の関係

$$cos2\omega tcos\omega t = \frac{1}{2}[cos3\omega t + cos\omega t]$$
$$cos2\omega tsin\omega t = \frac{1}{2}[sin3\omega t - sin\omega t]$$

を考慮して、

$$\left[\left(\omega_\phi^2-\omega^2\right)+\frac{1}{2}b\omega_\phi^2\right]A+2\alpha\omega B=0$$
$$\left[\left(\omega_\phi^2-\omega^2\right)-\frac{1}{2}b\omega_\phi^2\right]B-2\alpha\omega A=0$$

すなわち、

$$\begin{bmatrix}\left(\omega_\phi^2-\omega^2\right)+\frac{1}{2}b\omega_\phi^2 & 2\alpha\omega \\ -2\alpha\omega & \left(\omega_\phi^2-\omega^2\right)-\frac{1}{2}b\omega_\phi^2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathrm{A}\\ \mathrm{B}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0\\ 0\end{bmatrix}$$

この連立一次方程式が自明でない解を持つ条件は、

$$\begin{vmatrix}\left(\omega_\phi^2-\omega^2\right)+\frac{1}{2}b\omega_\phi^2 & 2\alpha\omega \\ -2\alpha\omega & \left(\omega_\phi^2-\omega^2\right)-\frac{1}{2}b\omega_\phi^2\end{vmatrix}=0$$

つまり、

$$\left(\omega_\phi^2-\omega^2\right)^2-\frac{1}{4}b^2\omega_\phi^4+4\alpha^2\omega^2=0$$

よって、

$$b_{cr}^2\triangleq b^2=\frac{4}{\omega_\phi^4}\left\{\left(\omega_\phi^2-\omega^2\right)^2+4\alpha^2\omega^2\right\}$$

$$b_{cr}^2 \triangleq b^2 = \frac{4}{\omega_\phi^4}\left\{\left(\omega_\phi^2 - \omega^2\right)^2 + 4\alpha^2\omega^2\right\}$$

$b = b_{cr}$ならば、

$\phi = A\cos\omega t + B\sin\omega t$

の周期解が存在。

よって、パラメトリック横揺れの発生条件は、

$$b > 2\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_\phi}\right)^2\right\}^2 + 4\left(\frac{\alpha}{\omega_\phi}\right)^2\left(\frac{\omega}{\omega_\phi}\right)^2}$$

$\omega = \omega_\phi$が最も危険なので、これを代入すると、

$$b > 4\left(\frac{\alpha}{\omega_\phi}\right)$$

この条件が、パラメトリック横揺れの簡易基準レベル1に採用。

また$\alpha=\alpha_0+\beta_0\phi_0$と減衰力が非線形であるとすると、

$$b=2\sqrt{\left\{1-\left(\frac{\omega}{\omega_\phi}\right)^2\right\}^2+4\left(\frac{\alpha_0+\beta_0\phi_0}{\omega_\phi}\right)^2\left(\frac{\omega}{\omega_\phi}\right)^2}$$

これを解くと、横揺れ振幅ϕ_0がωの関数として求まる。

例えば、$\omega=\omega_\phi$　では、

$$b=4\frac{\alpha_0+\beta_0\phi_0}{\omega_\phi}$$

$$\phi_0=\frac{1}{\beta_0}\left(\frac{b\omega_\phi}{4}-\alpha_0\right)$$

これが最大横揺れ振幅となる。ただし復原力は線形と仮定。レベル2基準では、復原力の非線形性も考慮したより複雑な式を用いている。

パラメトリック横揺れの基準

- 簡易基準　レベル1

　パラメトリック横揺れの発生条件の計算式

$$\frac{\delta \mathrm{GM}}{\mathrm{GM}} < 4\frac{\propto}{\omega_{\phi}}$$

ここで、

∝ ：線形横揺れ減衰力係数（池田の簡易推定法をさらに簡略化して、ビルジキール面積とC_mの関数として与える）、

δGM:　GM変動の片振幅（波振幅だけ喫水が上下したときのGMの変化をハイドロカーブから読み取る：波岨度は0.0167）、

ω_{ϕ}: 横揺れ固有周波数

パラメトリック横揺れの基準

- 簡易基準　レベル2　チェック１

  パラメトリック横揺れの発生条件

$$\frac{\delta \mathrm{GM}}{\mathrm{GM}} < 4\frac{\propto}{\omega_{\phi}}$$

を満たし、出会い波周期が横揺れ固有周期の1/2となる船速V_{PR}の絶対値よりも航海船速が低いこと。

$$\frac{\mathrm{T}_{\phi}}{2} = \frac{\lambda}{\sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} - V_{PR}}$$

上記の検討を、１６の代表的な規則波（波浪頻度表の各波周期について、有義波高の平均値を代表として選定）に適用し、不合格となる波条件の重み平均値C1が、0.06以下であれば、合格と判定。

(C11級コンテナ船を不合格とするようにこの要求値を決定)

パラメトリック横揺れの基準

- 簡易基準　レベル2　チェック2

$$\ddot{\phi}+2\alpha\dot{\phi}+\gamma\dot{\phi}^3+\omega_\phi^2\frac{1}{GM}GZ(\phi,t)=0$$

ここで、

α, γ: 横揺れ減衰力係数（標準としては池田の簡易推定法で算出）

GZ: 波浪中の復原てこ

上記の運動方程式を、ルンゲクッタ法により、初期横揺れ角5度、初期横揺れ角速度0で解き、定常横揺れ振幅を求める。

横揺れ減衰力の推定（池田の方法）

-
  - 摩擦成分
  - 造波成分
  - 裸殻の造渦成分
  - 揚力成分
  - ビルジキール成分

そのそれぞれに、半経験式が確立（池田の推定式）

$\mathrm{M}_r = B_{44}\dot{\phi}$

$\mathrm{B}_{44} = \mathrm{B}_\mathrm{F} + \mathrm{B}_\mathrm{W} + \mathrm{B}_\mathrm{E} + \mathrm{B}_\mathrm{BK} + \mathrm{B}_\mathrm{L}$（等価線形横揺れ減衰係数）

上記を回帰分析により、船型詳細でなく、主要目のみで利用可としたものが、簡易推定法

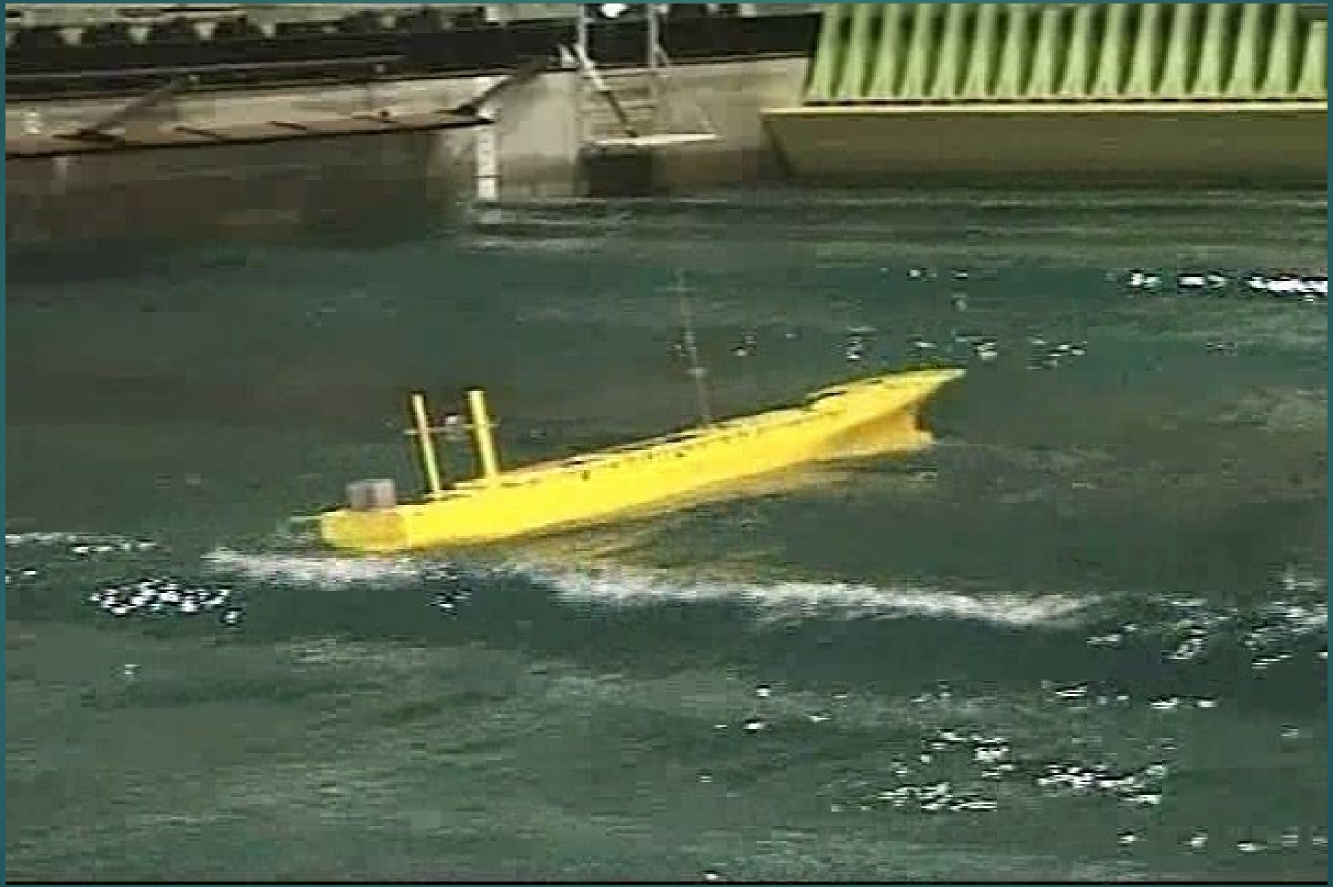
パラメトリック横揺れの基準

- 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、1/3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曲線を用いて、
  - ✓ 運動方程式の数値解で求まった定常横揺れ振幅が25度以上ならば、$C_{Si} = 1$
- 北大西洋の波浪頻度を用いて、 C_{si}を重み平均し、$C2(\mathrm{F}_n, \beta)$とする。
- そのうえで、航海船速で25種の波向きで航行するケースを、追波と向波を区別のうえ、船速の方向余弦として船速に換算して$C2(\mathrm{F}_n, \beta)$を平均し、C2とする。
- このＣ２が0.025以下であれば、合格とする。(C11級コンテナ船を不合格とするようにこの要求値を決定)

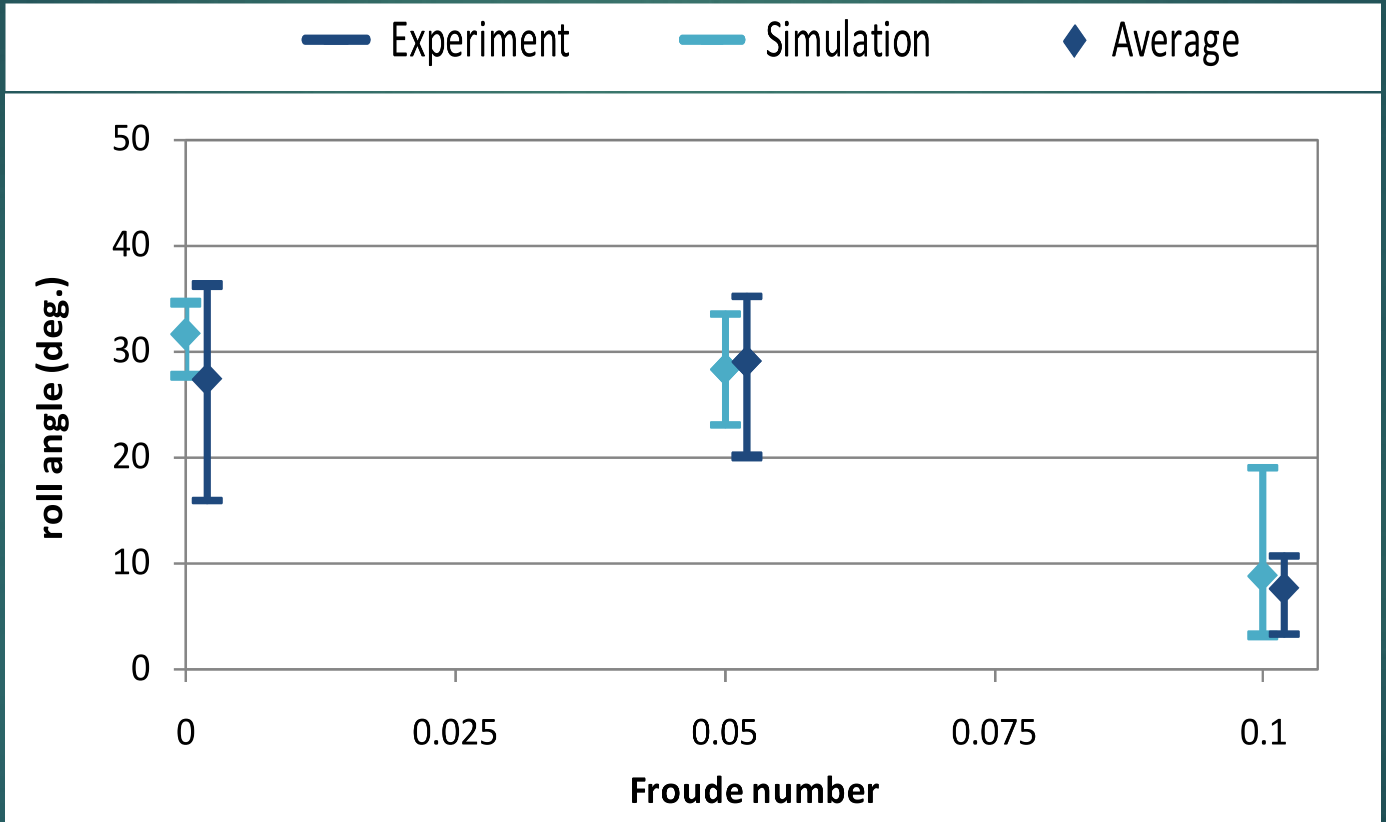
直接復原性評価（阪大）

- 短波頂不規則波中の時間領域シミュレーション
- 5自由度（sway-heave-roll-pitch-yaw）＋オートパイロットモデル
- Surge方向は指定速度で一定で進むと近似（波浪中抵抗増加の推定と切り離すため）
- 高周波数であるため、ストリップ法に、復原力変動項を付加
- 浮力成分は波面まで、フルードクリロフ成分は静止水面まで時々刻々の船体姿勢を考慮して圧力積分。
- ラディエーション成分は、縦運動は出会い波ピーク周波数、横運動は横揺れ固有周波数に対して計算。ディフラクション成分はSTFM。いずれも船体姿勢は直立。
- 平水中の操縦流体力、横揺れ減衰力、プロペラ性能は模型実験による

パラメトリック横揺れ（長波頂不規則波）

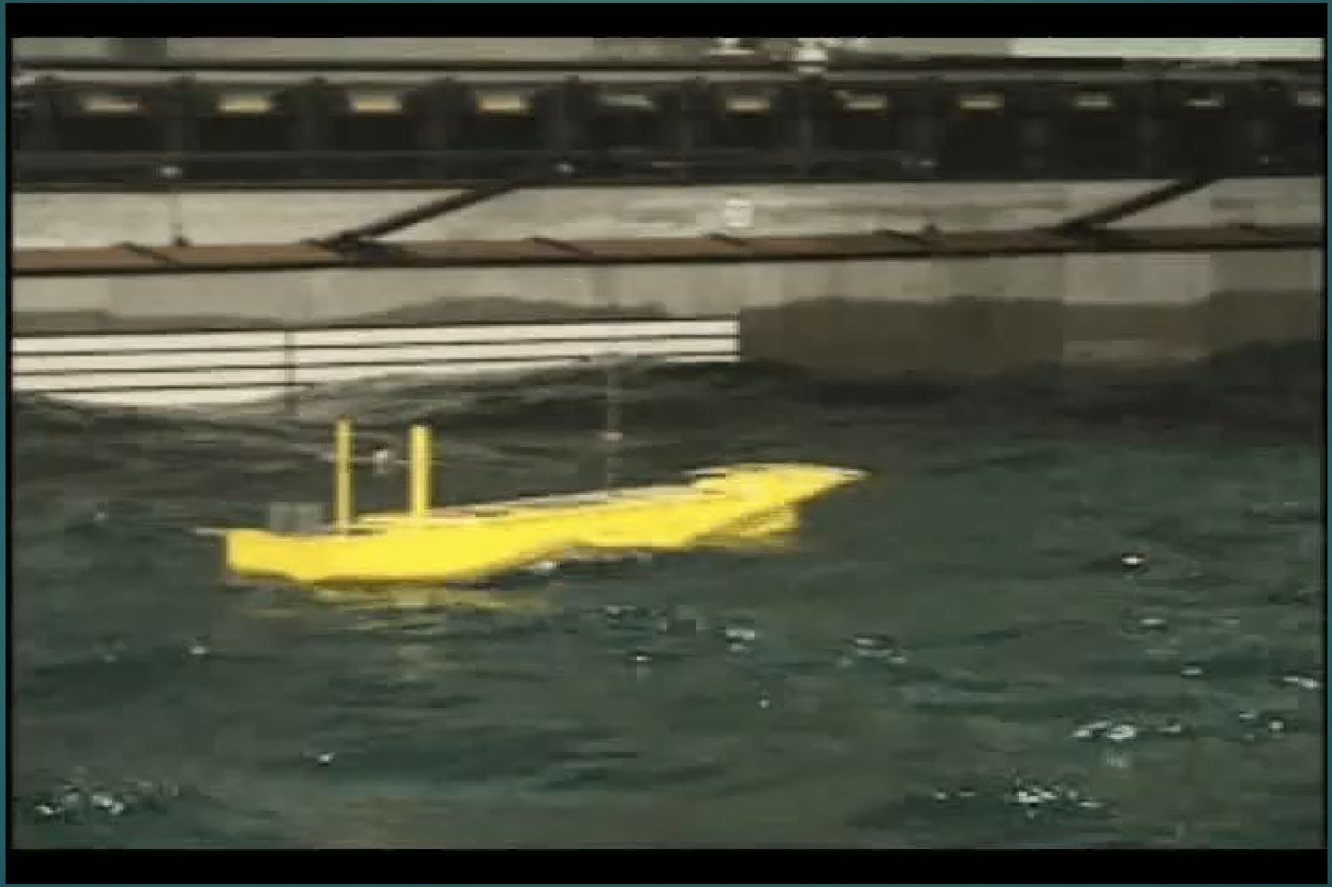


パラメトリック横揺れ
（長波頂不規則波：実験と計算の比較）

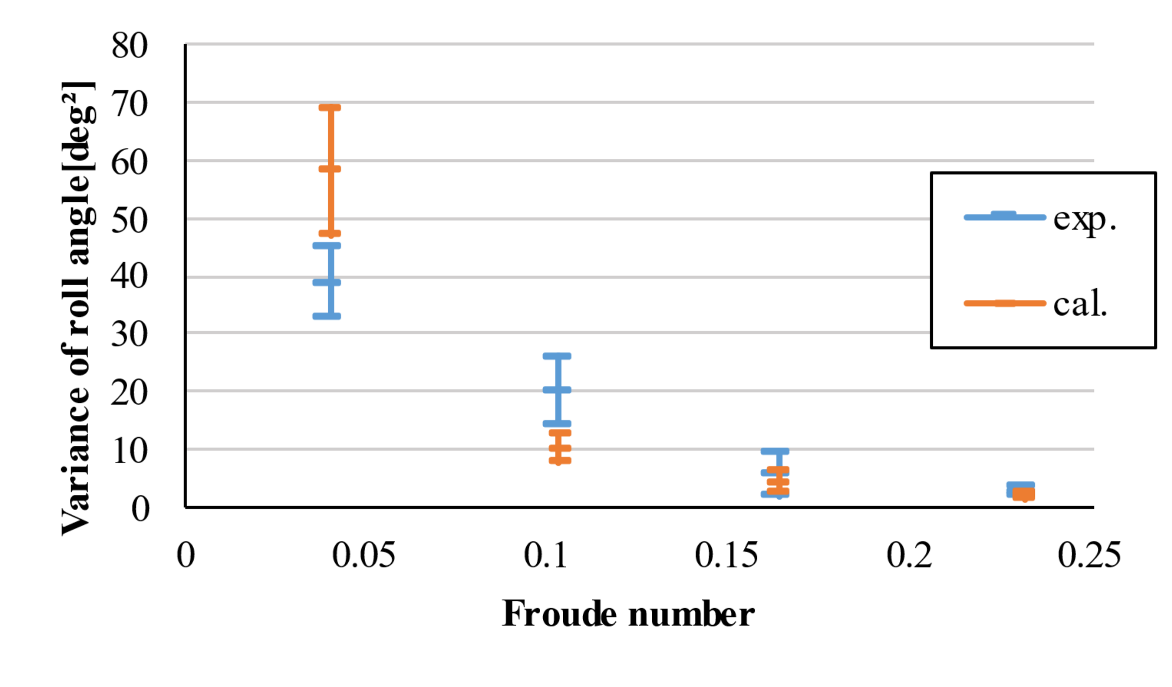


H. Hashimoto & N. Umeda: Fluid Mechanics and its Application, Springer, 119, 2019

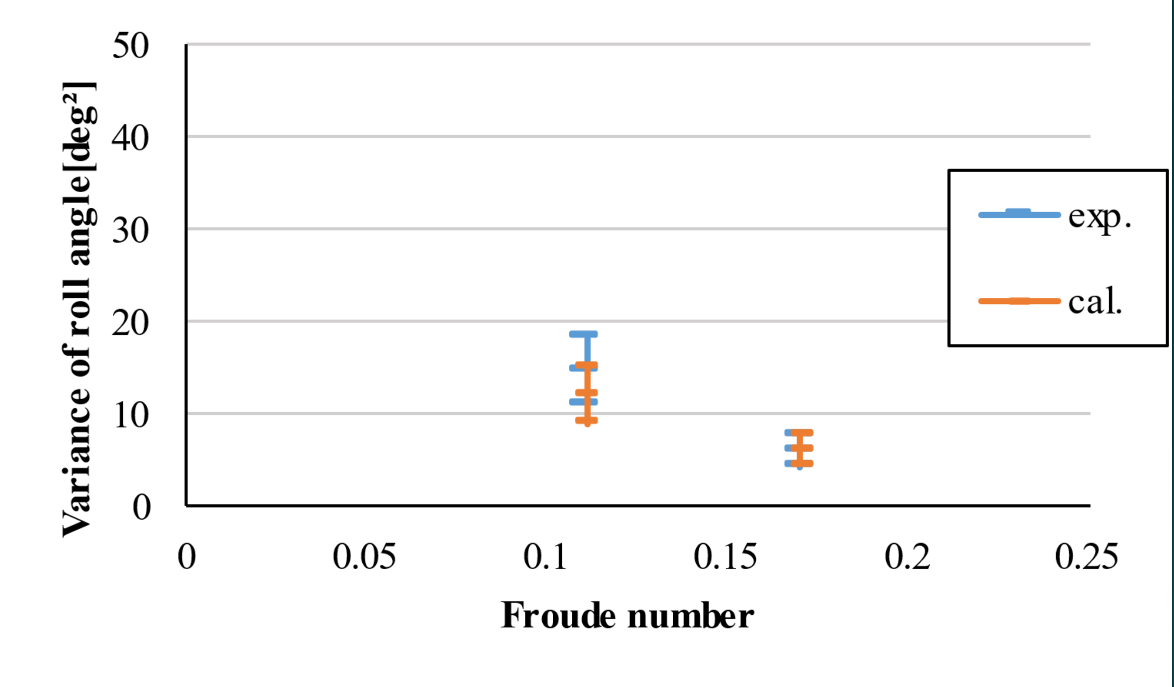
パラメトリック横揺れ
（短波頂不規則波）



パラメトリック横揺れ
（短波頂不規則波：実験と計算の比較）



X＝180度



X＝150度

岡祥広　阪大修論（2022）より

パラメトリック横揺れ基準の設計影響

- 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ではＧＭ＝0.5mのみ、L=262mではＧＭ＝4.2m以下。
- ＰＣＣ：L=190mではＧＭ＝2m以下、Ｌ＝183.7mはＧＭ＝1.8m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
chemcal tanker 7	169
cement carrier	106
RoPax 3	70