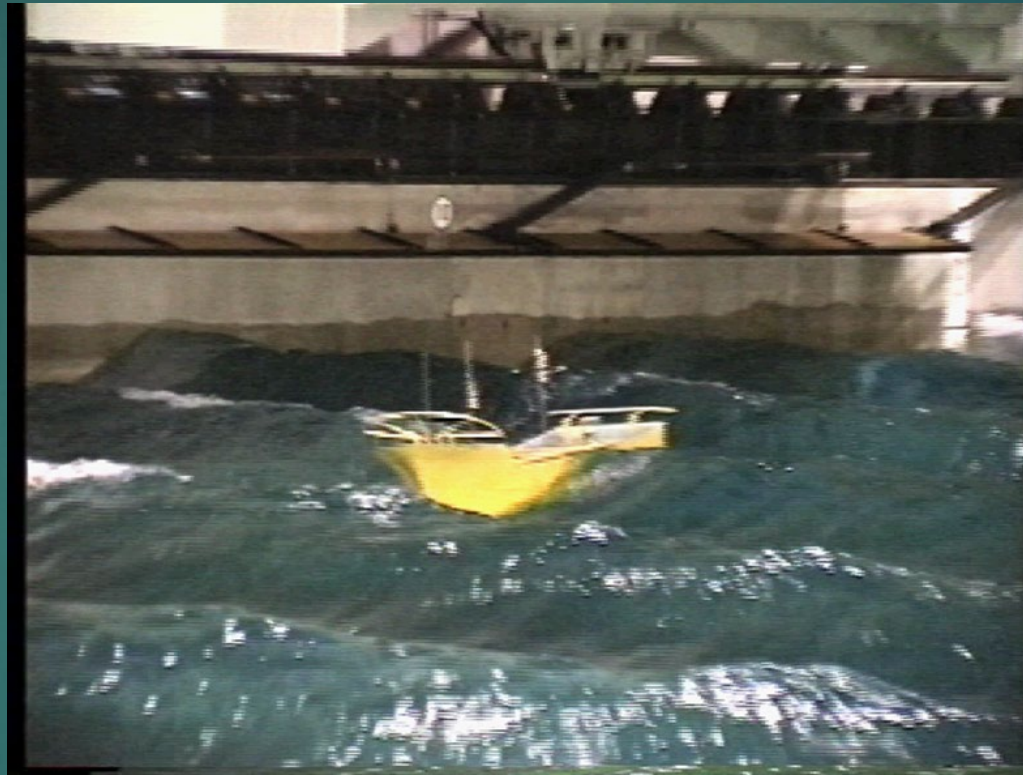


ブローチング現象



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

ブローチング

- ▶ 最大限の操舵努力にもかかわらず船が一定の針路を維持できないこと。
- ▶ 多くの場合、追波中で波乗りを起こし、逆方向に最大の舵角にもかかわらず下り波面で急旋回し、その遠心力で転覆する。

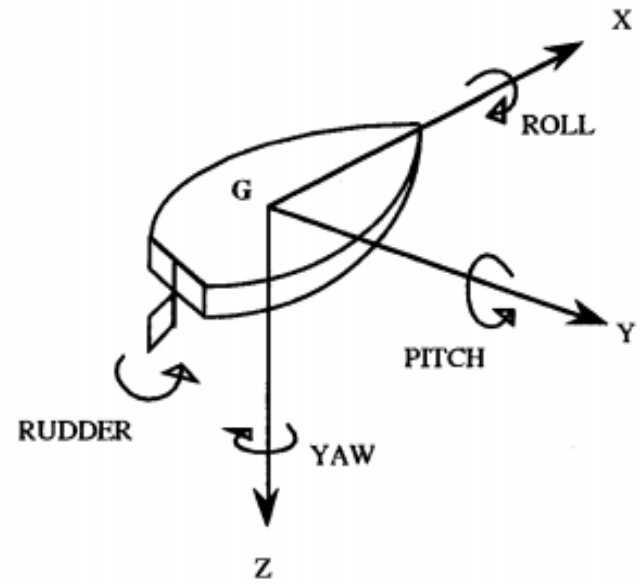
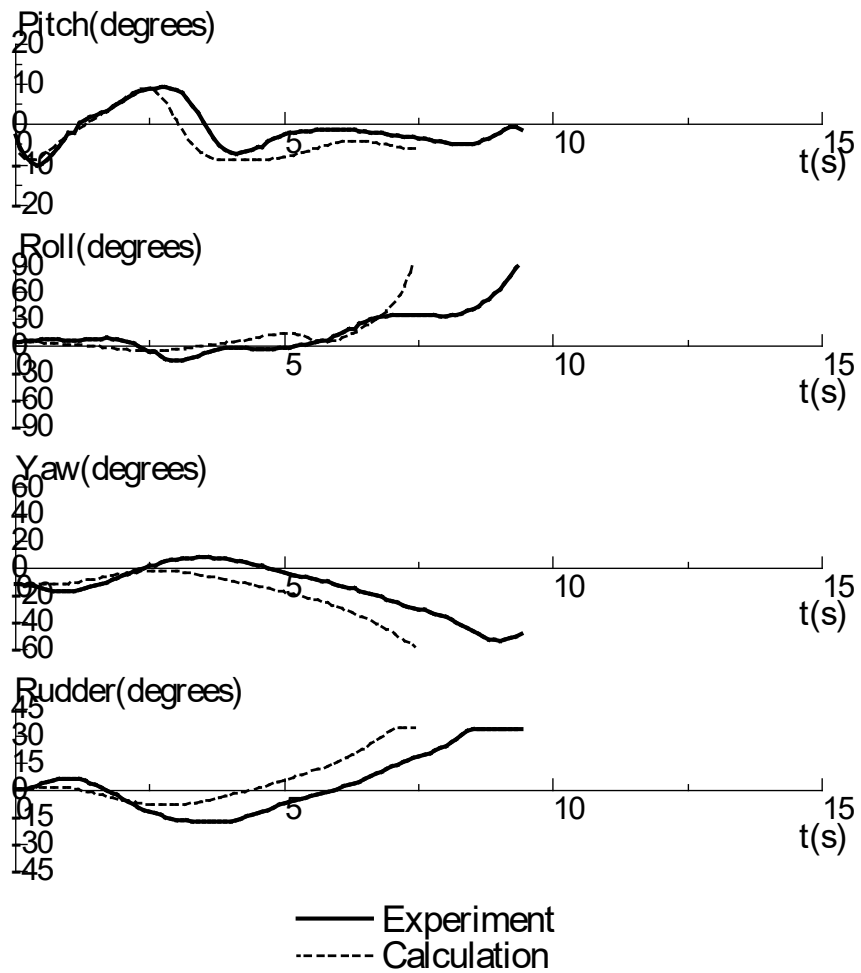
具体例：ポルトガル海軍駆逐艦

大西洋上をフルード数0.43で追波航行中、大きな波に運ばれ逆方向に最大限の操舵を行ったにもかかわらず右舷に回頭させられ、その間遠心力の方向にあたる左舷へ67度まで横傾斜

ブローチング現象

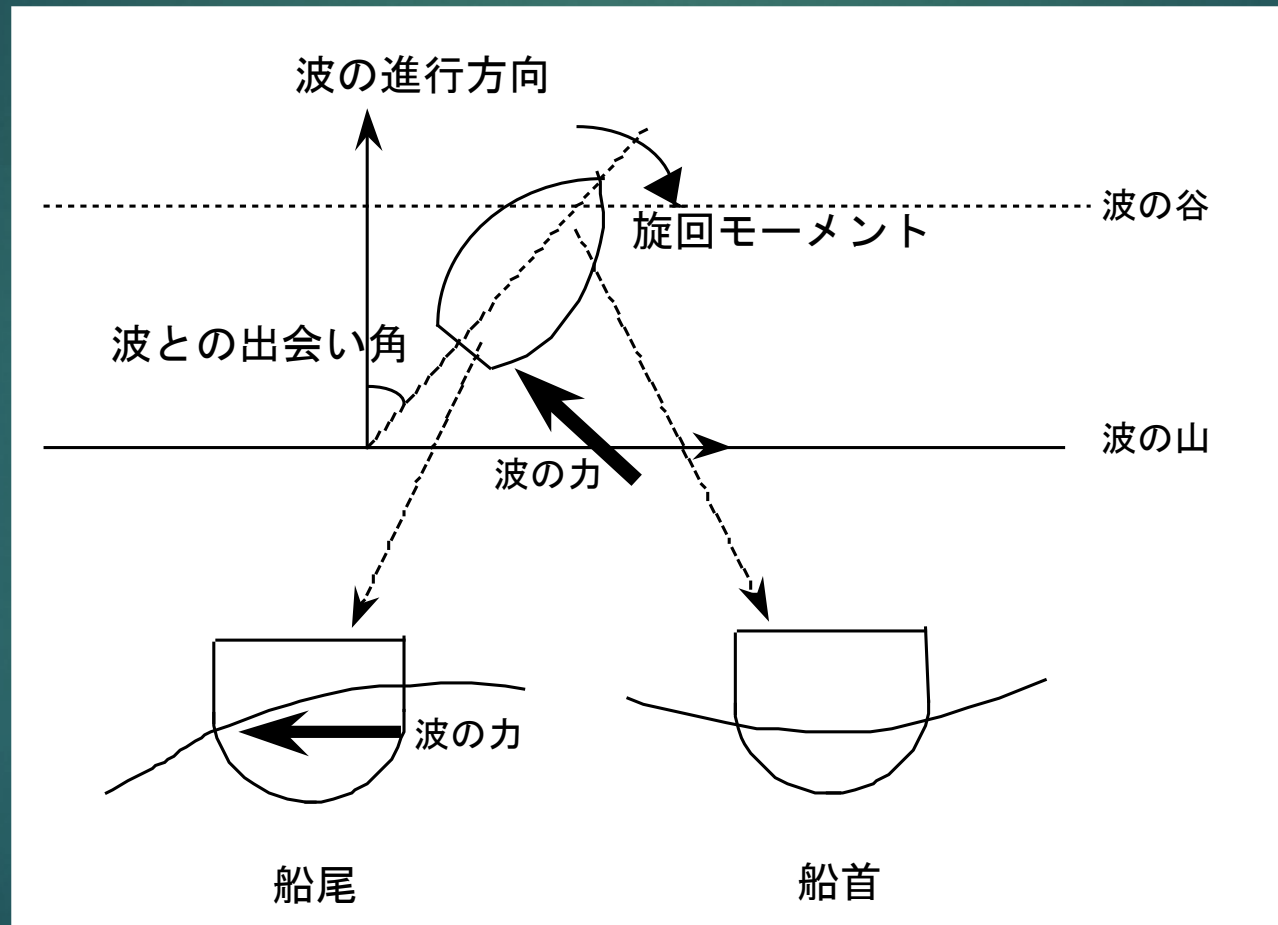


N. Umeda & M.
Hamamoto: Phil.
Proc. Royal
Society London
(2000)

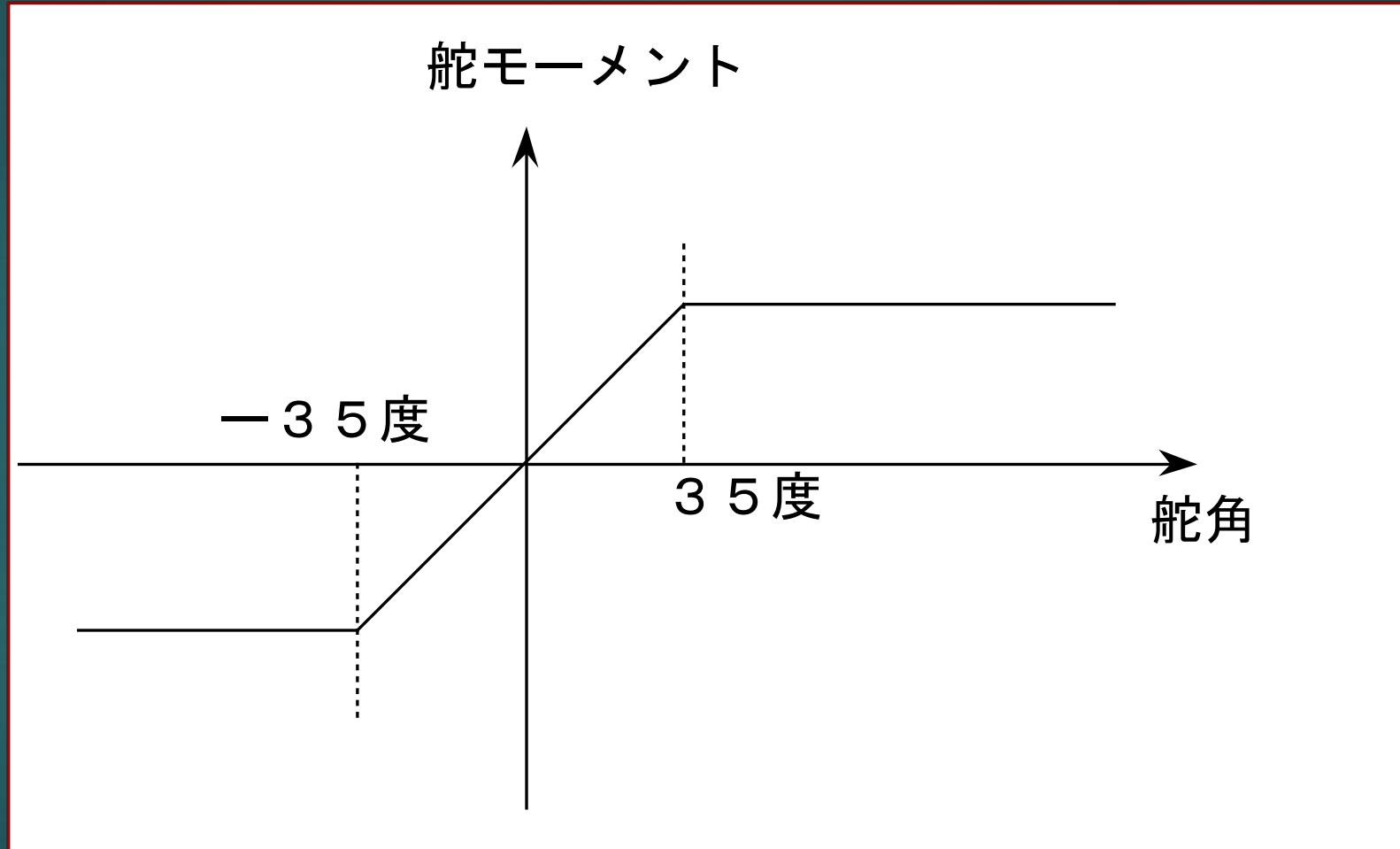


N. Umeda、H. Hashimoto:
 JMST (2001)
 橋本博公：阪大卒論 (2000)

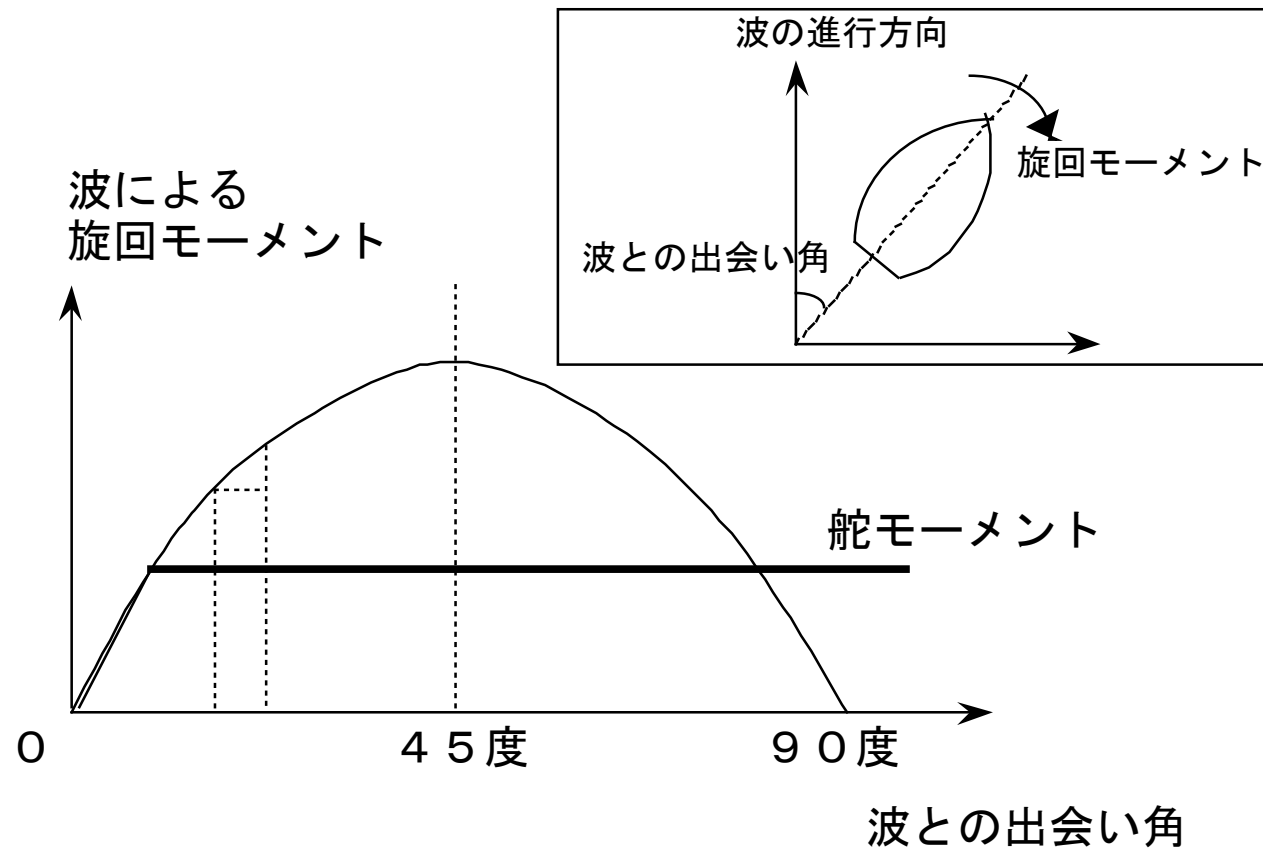
波による回頭



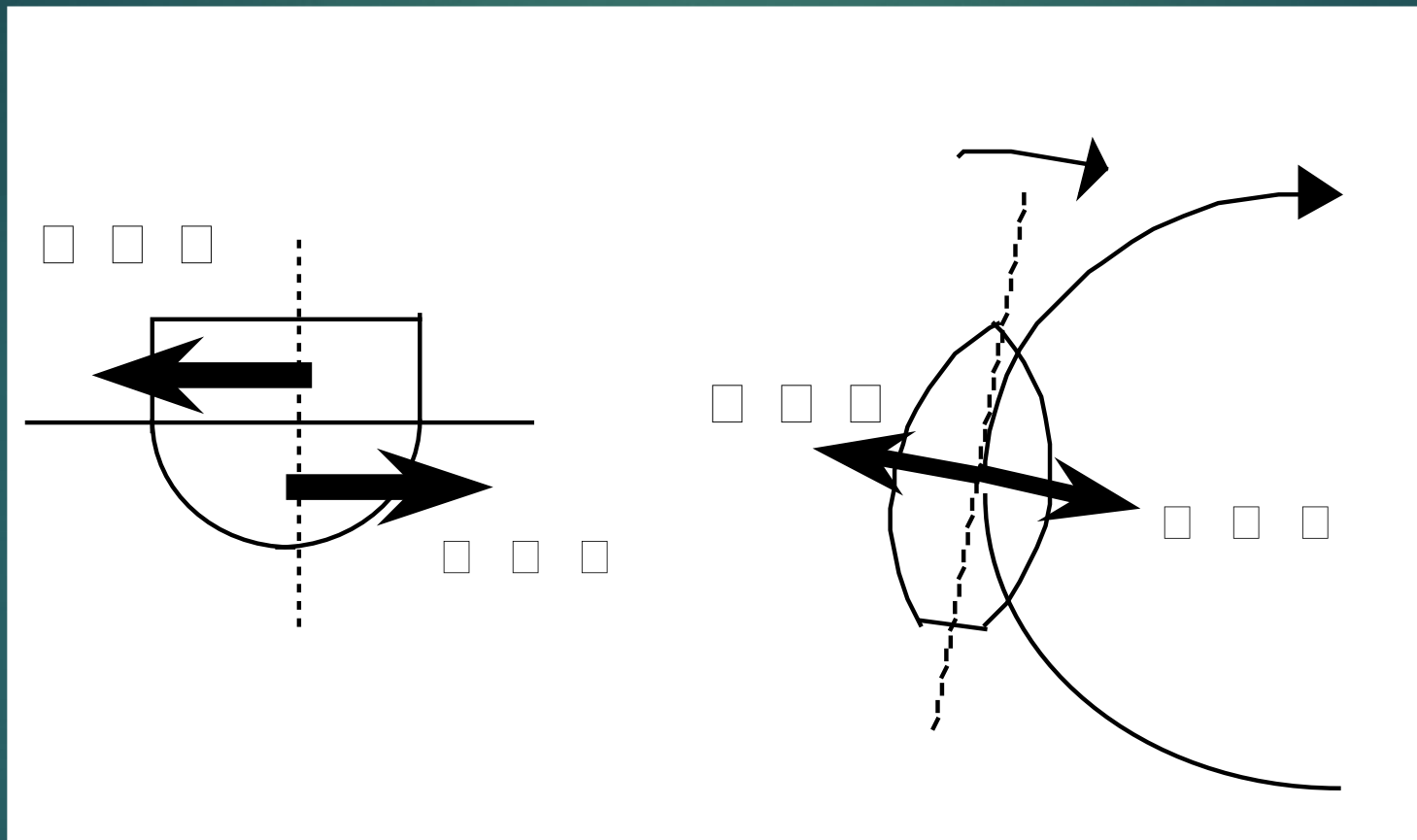
舵の作用の限界



舵力と波の力のバランスの喪失

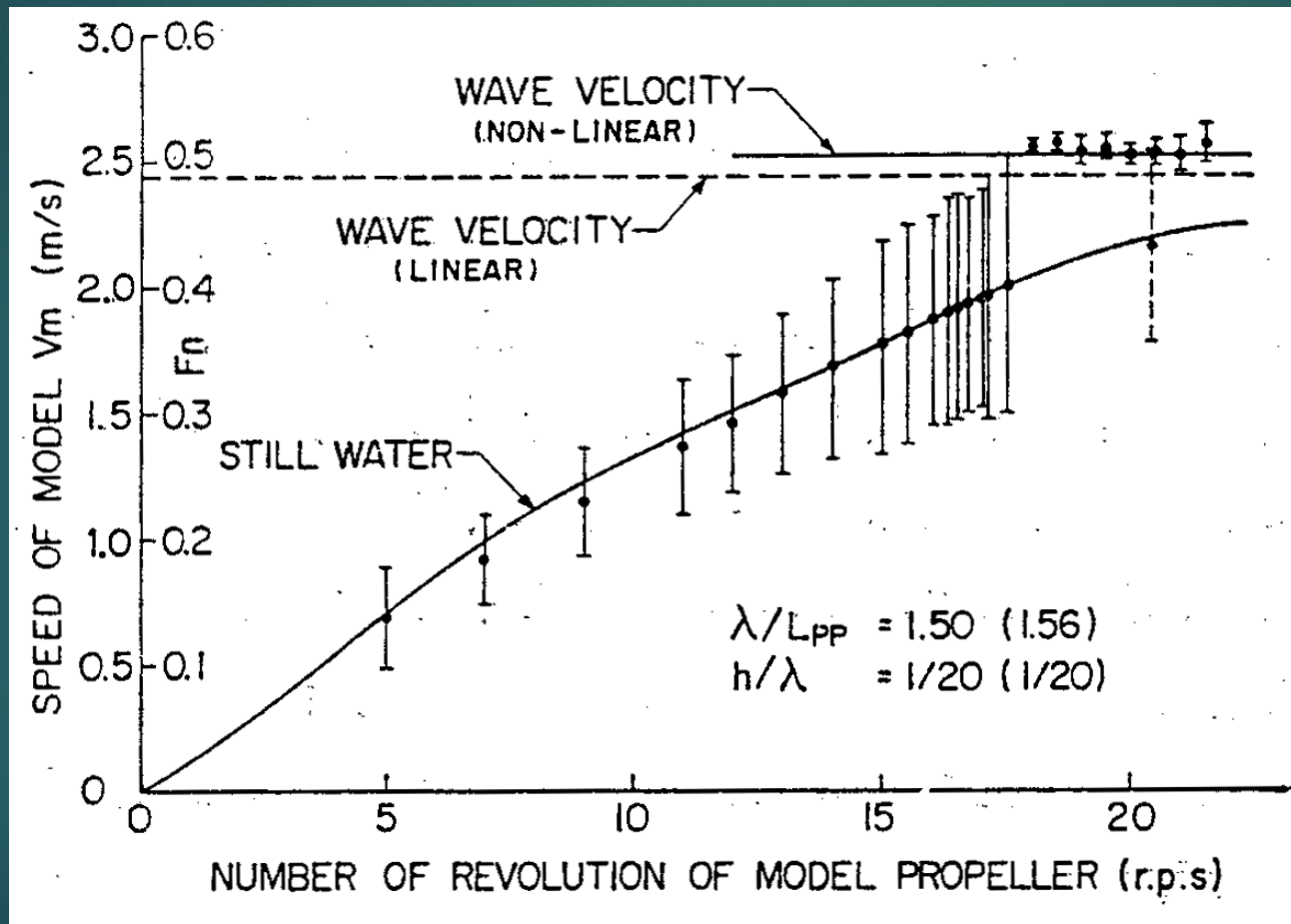


急旋回による横傾斜



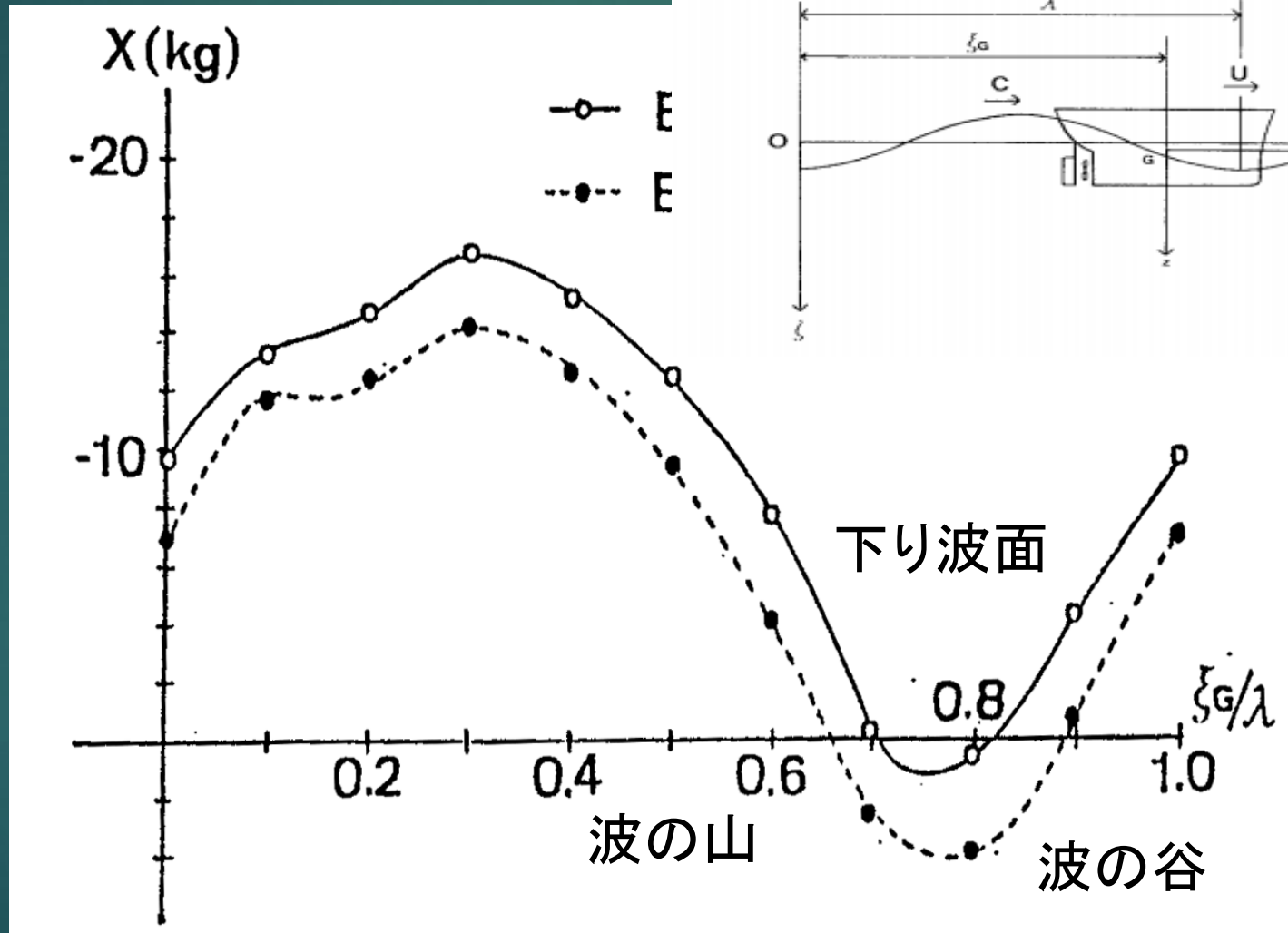
波乗り

- ▶ 船が本来の自航速度から波の位相速度まで波の作用によって加速または減速される現象

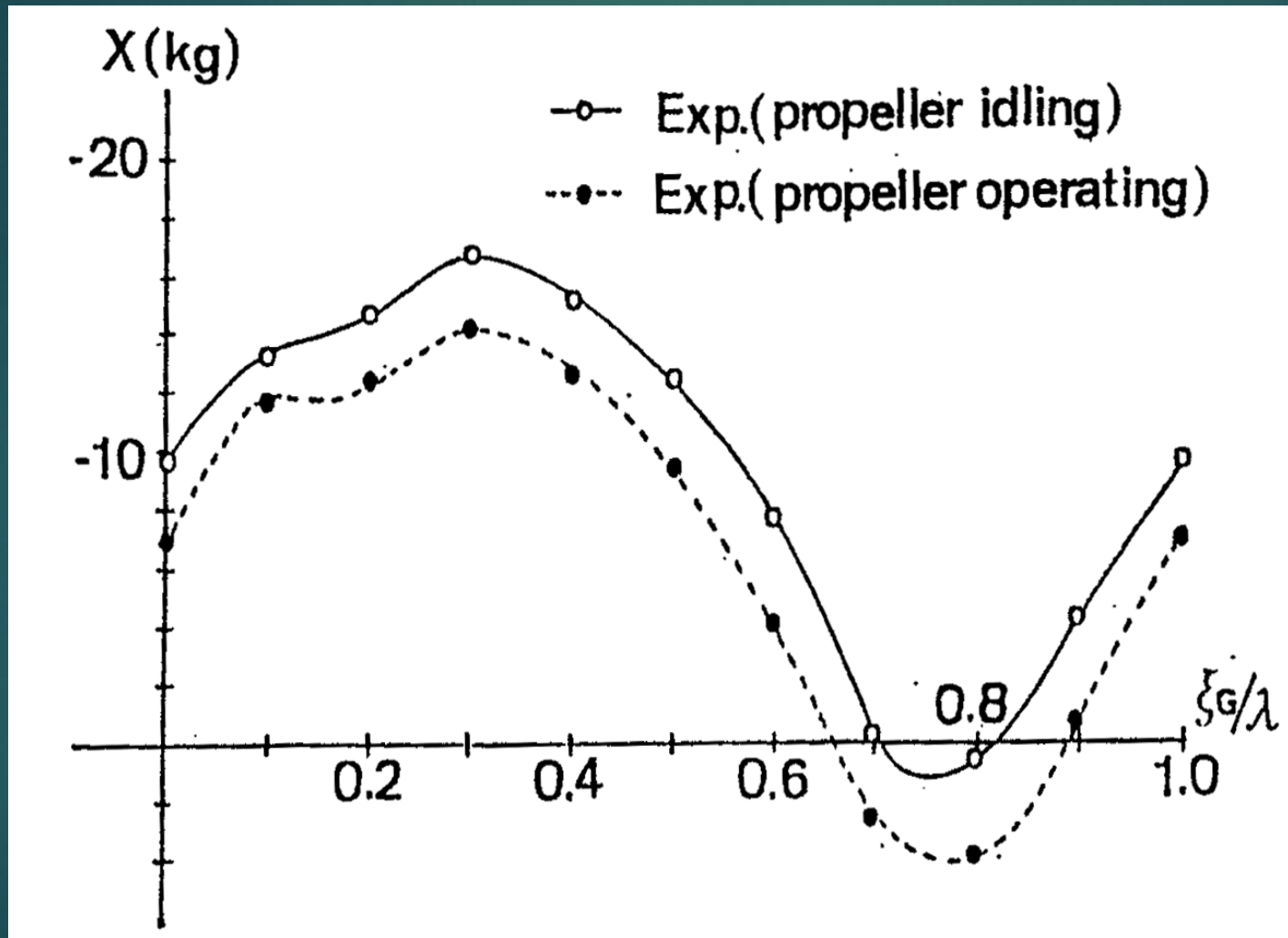


菅信：日本造船学会
論文集166号
(1989)

船速と波速の等しい場合の追波中の 前後力

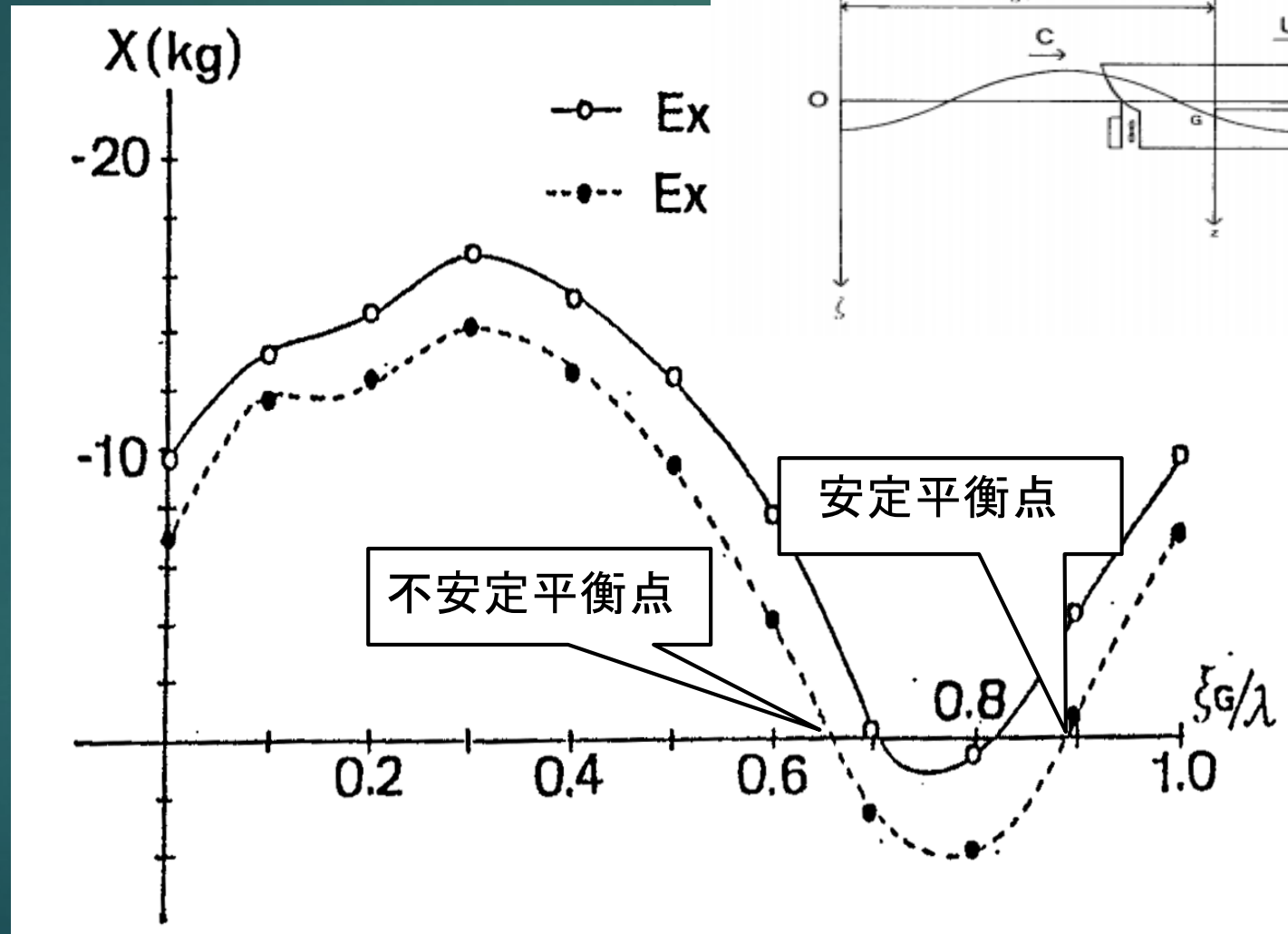


船速と波速の等しい場合の追波中の 前後力



梅田：日本造船学会論文
集152号（1983）

船速と波速の等しい場合の追波中の 前後力



波乗りの発生条件

- ▶ 第1の条件： 平衡点の発生
船体抵抗 + プロペラ推力 + 前後方向波力 = 0
安定平衡点と不安定平衡点が発生
- ▶ 第2の条件： ?

前後運動の力学

真追波中の前後運動方程式

$$\ddot{\xi}_G + \mu \dot{\xi}_G + f \sin(k\xi_G + \varepsilon) = b$$

(変位が波の影響を表す正弦関数の引数に含まれるので非線形)

この平衡点は次式の解である

$$f \sin(k\bar{\xi}_G + \varepsilon) = b$$

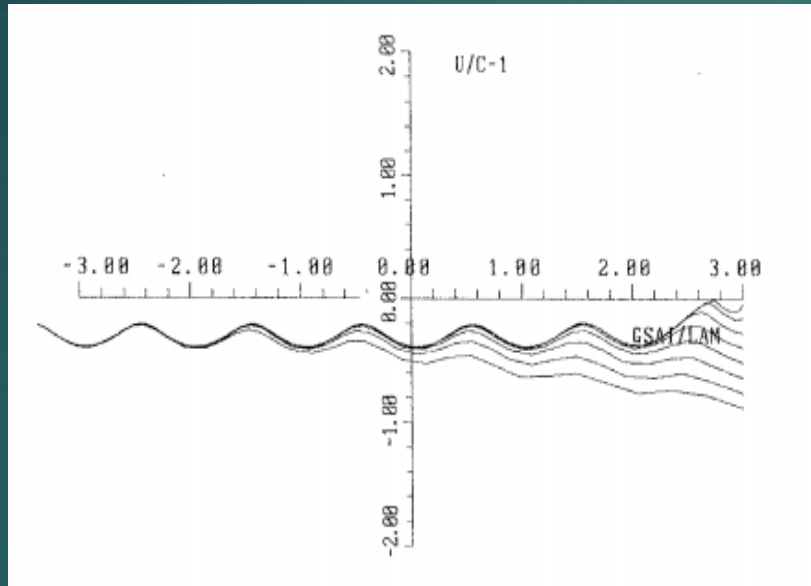
この平衡点付近で運動方程式を線形化すると,

$$\ddot{\xi}_G + \mu \dot{\xi}_G + k(\xi_G - \bar{\xi}_G)f \cos(k\bar{\xi}_G + \varepsilon) = 0$$

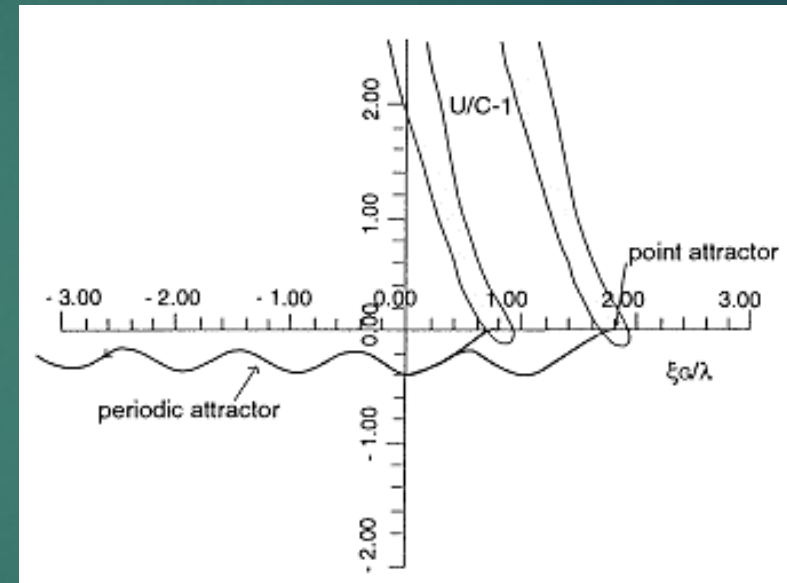
この線形系の2つの固有値の実部の両方が負であれば、 $\bar{\xi}_G$ は安定な平衡点であり、そうでなければ不安定な平衡点である。ここでは安定と不安定の2つの平衡点をもつ可能性があり、波乗りはこのうち安定な平衡点に捕捉されること

前後運動の力学

位相面 この系では, ξ_G と $\dot{\xi}_G$ という2つの変数だけで運動が記述できるため, 位相面上の軌道でそのすべてが表現される。



周期運動のみ

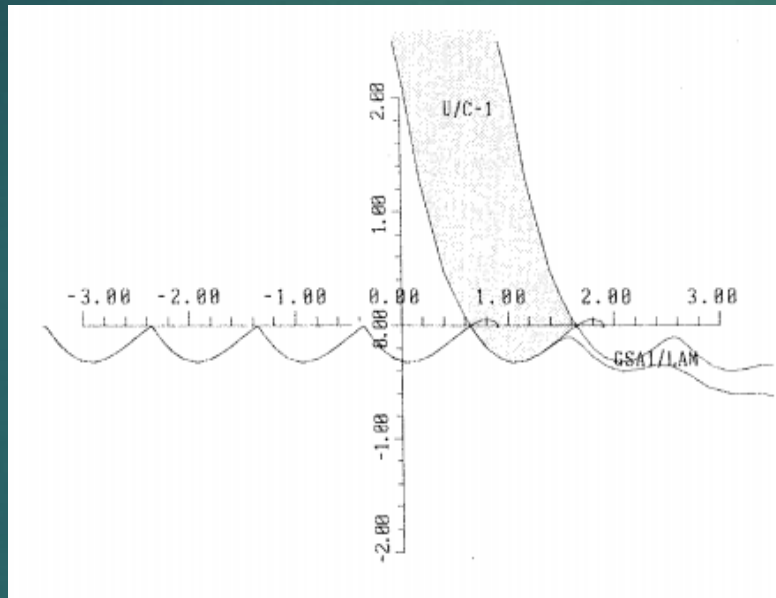


周期運動と波乗りが共存

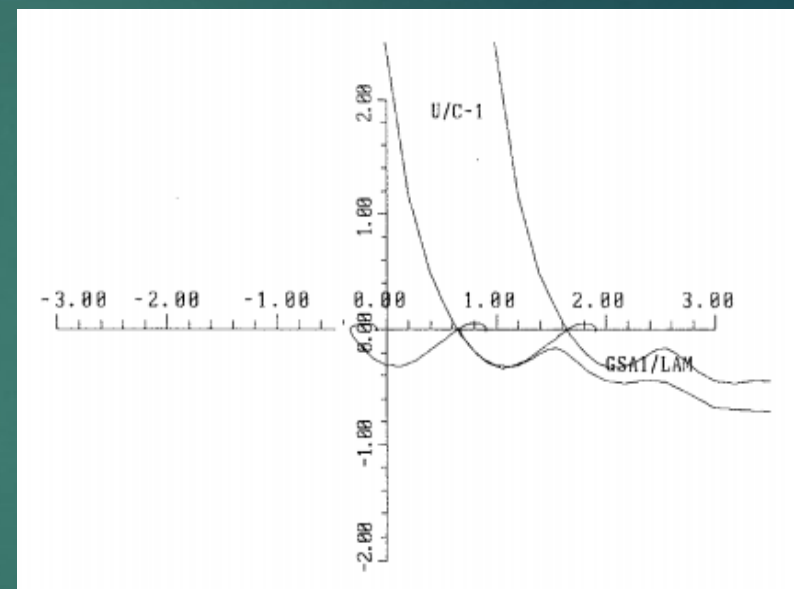
両者の境界; 平衡点の発生

前後運動の力学

位相面 この系では, ξ_G と $\dot{\xi}_G$ という2つの変数だけで運動が記述できるため, 位相面上の軌道でそのすべてが表現される.



周期運動と波乗りが共存

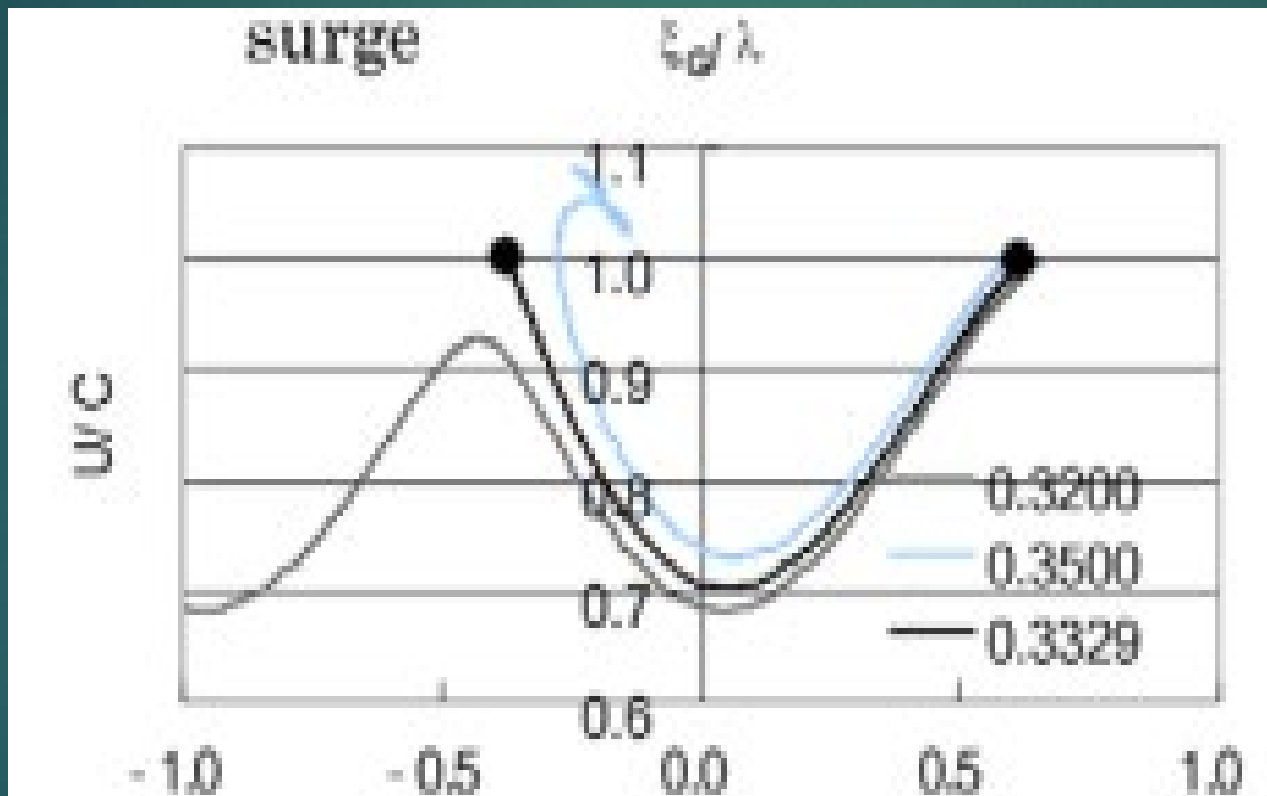


波乗りのみ

両者の境界: 周期運動の消滅(ヘテロクリニック分岐)

前後運動の力学

ヘテロクリニック分岐 不安定平衡点と不安定平衡点を結ぶ軌道
の出現



Umeda, Hori, Hashimoto:
International Shipbuilding
Progress, 54(4), (2007)

ヘテロクリニック分岐点の近似推定法(メルニコフ解析)

$$\frac{d^2\eta}{ds^2} + \beta \frac{d\eta}{ds} + \sin\eta = \alpha$$

ここで、 $\alpha = \beta = 0$ ならば、解析解がある。

$$\frac{d^2\eta}{ds^2} + \sin\eta = 0$$

$\dot{\eta} = \frac{d\eta}{ds}$ とおくと、

$$\frac{d^2\eta}{ds^2} = \frac{d\dot{\eta}}{ds} = \frac{d\dot{\eta}}{d\eta} \frac{d\eta}{ds} = \dot{\eta} \frac{d\dot{\eta}}{d\eta} = \frac{d}{d\eta} \left(\frac{\dot{\eta}^2}{2} \right) \text{となるので、}$$

$$\frac{d}{d\eta} \left(\frac{\dot{\eta}^2}{2} \right) = -\sin\eta$$

すなわち

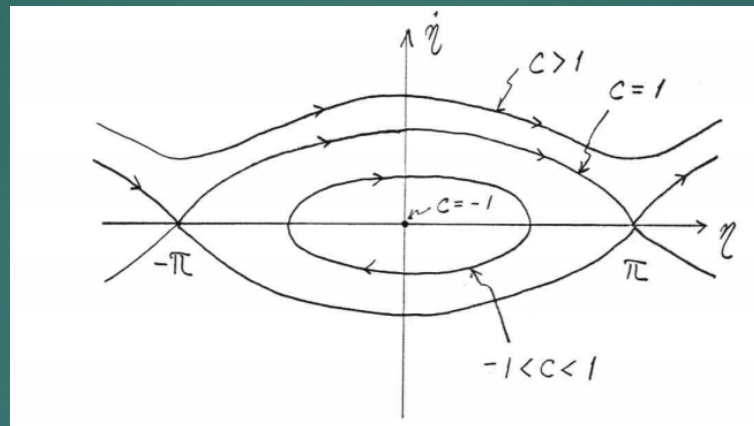
$$\frac{\dot{\eta}^2}{2} = \cos\eta + C$$

ただしCは任意定数

菅信：日本造船学会
論文集166号
(1989)

$$\frac{\dot{\eta}^2}{2} = \cos\eta + C \quad \dot{\eta} = \pm\sqrt{2C + 2\cos\eta}$$

図示すると、



- 1 < C < 1 安定平衡点まわりの軌道（波乗りに対応）
- C = 1 不安定平衡点をつなぐ軌道
 （ヘテロクリニック軌道）
- C > 1 平衡点に達しない軌道（周期運動に対応）

$\dot{\eta} = \pm\sqrt{2C + 2\cos\eta}$ は $\alpha = \beta = 0$ についての結果である。

$\alpha \neq 0$ 、 $\beta \neq 0$ とすると、

$$\frac{d}{d\eta} \left(\frac{\dot{\eta}^2}{2} \right) = \alpha - \beta\dot{\eta} - \sin\eta \text{ となるが、}$$

右辺の $\dot{\eta}$ に $\alpha = \beta = 0$ の解を第1近似として代入する。

すると、低速からの波乗りに対応する $\dot{\eta} < 0$ について、

$$\frac{d}{d\eta} \left(\frac{\dot{\eta}^2}{2} \right) = \alpha + \beta\sqrt{2C + 2\cos\eta} - \sin\eta$$

$-\pi$ から π まで積分すると、

$$\begin{aligned} E(C) &= \int_{-\pi}^{\pi} \frac{d}{d\eta} \left(\frac{\dot{\eta}^2}{2} \right) d\eta = \frac{\dot{\eta}^2(\eta=\pi)}{2} - \frac{\dot{\eta}^2(\eta=-\pi)}{2} \\ &= \int_{-\pi}^{\pi} \{ \alpha + \beta\sqrt{2C + 2\cos\eta} - \sin\eta \} d\eta \\ &= 2 \int_0^{\pi} \{ \alpha + \beta\sqrt{2C + 2\cos\eta} \} d\eta \end{aligned}$$

これは、軌道に沿っての $-\pi$ と π での運動エネルギーの変化の近似値にあたる。

よって、 $E(C)=0$ ($C \geq 1$) であれば、その軌道は周期的となる。

$$E(C = 1) = 2 \int_0^\pi \{\alpha + \beta \sqrt{2 + 2\cos\eta}\} d\eta = 0$$

とすると、 $\alpha = \beta = 0$ でのヘテロクリニック軌道での $-\pi$ と π での運動エネルギー変化零（周期性）が、 $\alpha \neq 0$ 、 $\beta \neq 0$ でも変わらないことを示している。すなわち、 $\alpha \neq 0$ 、 $\beta \neq 0$ でもヘテロクリニック軌道が存在すると近似的にみなせる。

よって

$$\int_0^{\pi} \{\alpha + \beta \sqrt{2 + 2\cos\eta}\} d\eta = \alpha\pi + \sqrt{2}\beta 2\sqrt{2} [\sin\frac{\eta}{2}]_0^{\pi}$$

$$= \alpha\pi + 4\beta = 0$$

$$\begin{aligned} \therefore \int \sqrt{1 + \cos\eta} d\eta &= \int \sqrt{1 + \cos 2\frac{\eta}{2}} d\eta = \int \sqrt{1 - 1 + 2\cos^2\frac{\eta}{2}} d\eta \\ &= \sqrt{2} \int \cos\frac{\eta}{2} d\eta = 2\sqrt{2} [\sin\frac{\eta}{2}] \end{aligned}$$

すなわち、

$$\alpha = -\frac{4\beta}{\pi}$$

波乗り条件

$$\frac{d^2\xi_G}{dt^2} + \mu \frac{d\xi_G}{dt} + f \sin(k\xi_G + \varepsilon) = b$$

次の変数変換を行う

$$k\xi_G + \varepsilon = \eta$$

$$t = \frac{s}{\sqrt{fk}}$$

すると、

$$\frac{d\xi_G}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\eta}{k} \right) = \frac{d}{ds} \left(\frac{\eta}{k} \right) \frac{ds}{dt} = \sqrt{\frac{fd\eta}{kds}}$$

$$\frac{d^2\xi_G}{dt^2} = \frac{d}{dt} \left(\sqrt{\frac{fd\eta}{kds}} \right) = \frac{d}{ds} \left(\sqrt{\frac{fd\eta}{kds}} \right) \frac{ds}{dt} = \sqrt{fk} \sqrt{\frac{fd^2\eta}{kds^2}} = f \frac{d^2\eta}{ds^2}$$

よって、

$$f \frac{d^2\eta}{ds^2} + \mu \sqrt{\frac{fd\eta}{kds}} + f \sin \eta = b$$

波乗り条件

$$f \frac{d^2 \eta}{ds^2} + \mu \sqrt{\frac{f}{k}} \frac{d\eta}{ds} + f \sin \eta = b$$

$$\frac{d^2 \eta}{ds^2} + \mu \sqrt{\frac{1}{fk}} \frac{d\eta}{ds} + \sin \eta = \frac{b}{f}$$

これを先の方程式

$$\frac{d^2 \eta}{ds^2} + \beta \frac{d\eta}{ds} + \sin \eta = \alpha$$

と比較すると、

$$\alpha = \frac{b}{f}$$

$$\beta = \mu \sqrt{\frac{1}{fk}}$$

よって、波乗り条件は、 $\alpha = -\frac{4\beta}{\pi}$ すなわち、

$$\frac{b}{f} = -\frac{4}{\pi} \mu \sqrt{\frac{1}{fk}}$$

波乗り条件

$$\frac{d^2\xi_G}{dt^2} + \mu\frac{d\xi_G}{dt} + f \sin(k\xi_G + \varepsilon) = b$$

$$\frac{b}{f} = -\frac{4}{\pi}\mu\sqrt{\frac{1}{fk}}$$

整理すると、

$$f = \frac{k(\pi b)^2}{16\mu^2} = \frac{k(\pi b)^2}{16\mu^2} = \frac{k}{16}\left(\frac{\pi b}{\mu}\right)^2$$

f: 前後方向波浪強制力の振幅の指標

k: 波数

b: 平水中で自航速度から波速まで増速に要する力の指標

μ : 平水中抵抗 + 推力の速度に対する変化率の指標

この条件式は、船体抵抗とプロペラ推力が船速に比例すると近似している。

実際には、船体抵抗は船速の5次式、プロペラ推力は船速の2次式で表現されることから、

レベル2基準ではこれらを反映したメルニコフ解析の式を用いている。

Ref. A. Maki, N. Umeda et al. : JMST, 2010

波乗り条件 (実験と計算の比較)

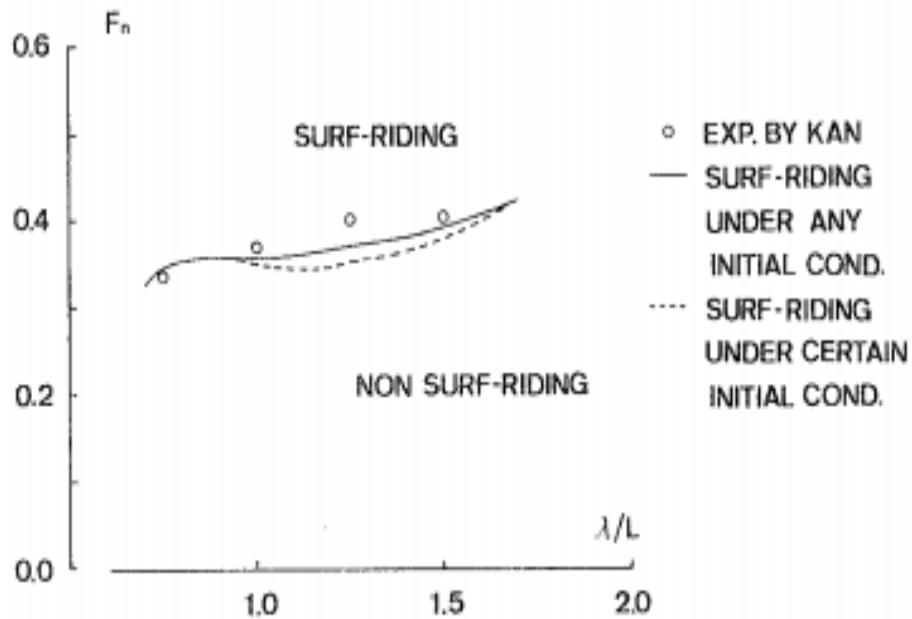


Fig. 14 Critical velocity for surf-riding($H/\lambda = 1/20$)

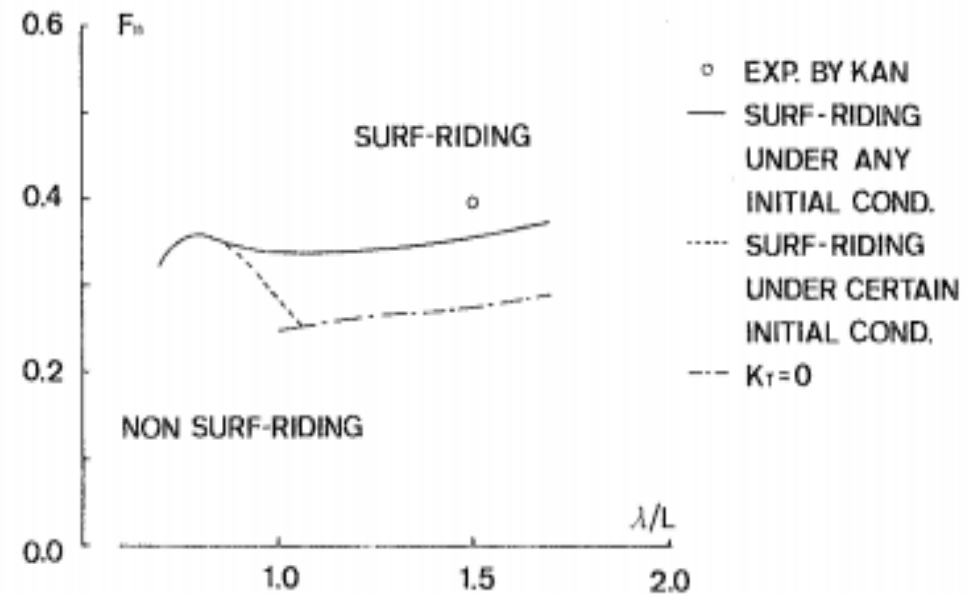
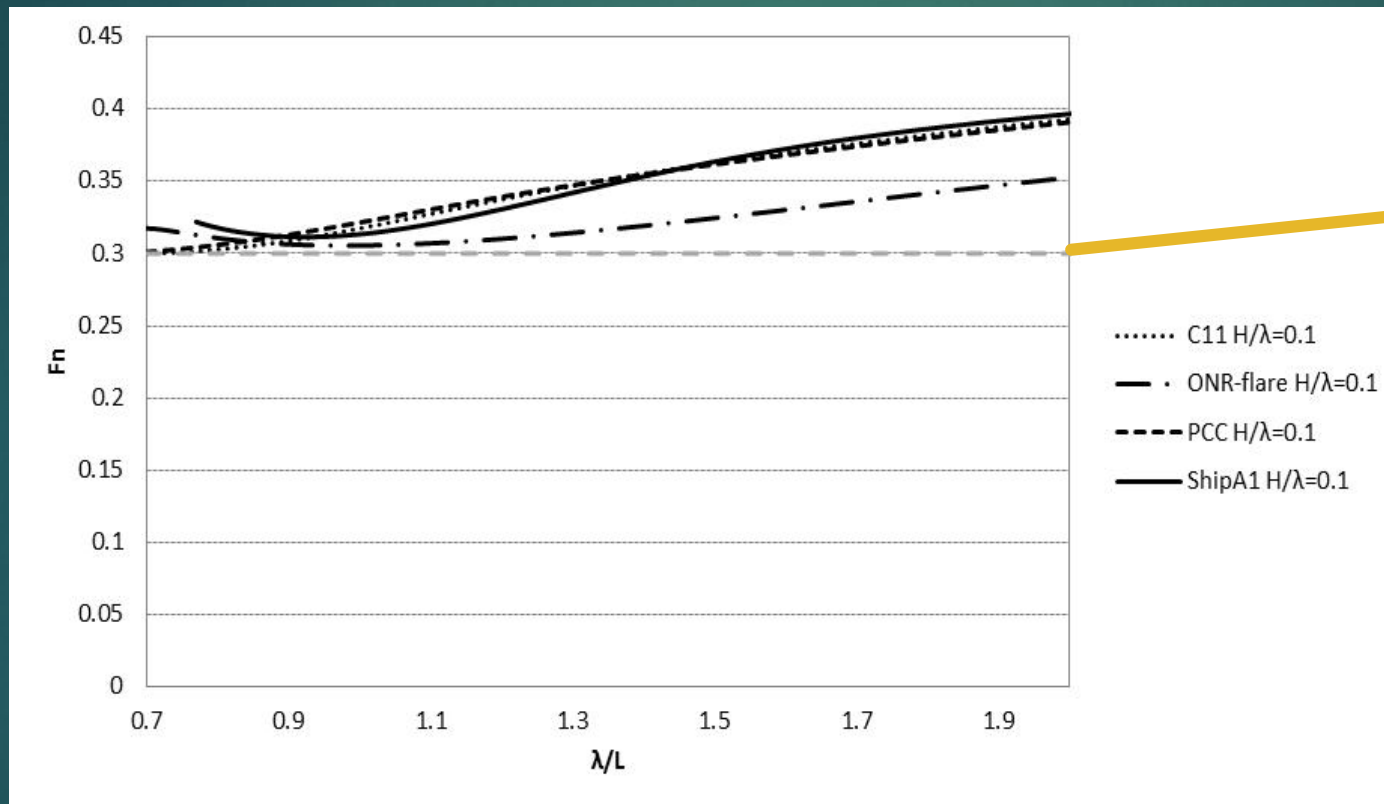


Fig. 15 Critical velocity for surf-riding($H/\lambda = 1/10$)

波乗り条件 種々の船舶への適用



第1段階簡易基準

$F_n < 0.3$ ならば合格

Y. Ito, N. Umeda, H. Kubo:
Jurnal Teknologi (Sciences
and Engineering) 66(2), 2014

波乗りの発生条件

- ▶ 第1の条件： 平衡点の発生
船体抵抗 + プロペラ推力 + 前後方向波力 = 0
安定平衡点と不安定平衡点が発生
- ▶ 第2の条件： ヘテロクリニック分岐の発生

第2世代基準のブローチングに対する要件

- ◆ レベル1： フルード数0.3以上かつ船長200m以下
- ◆ レベル2： ヘテロクリニック分岐としての波乗り発生領域の（波高、波長）の北大西洋での発生確率の計算
- ◆ 直接評価： 不規則波中時間領域シミュレーションにより、ブローチングによる40度以上の横傾斜発生の北大西洋での発生確率の計算

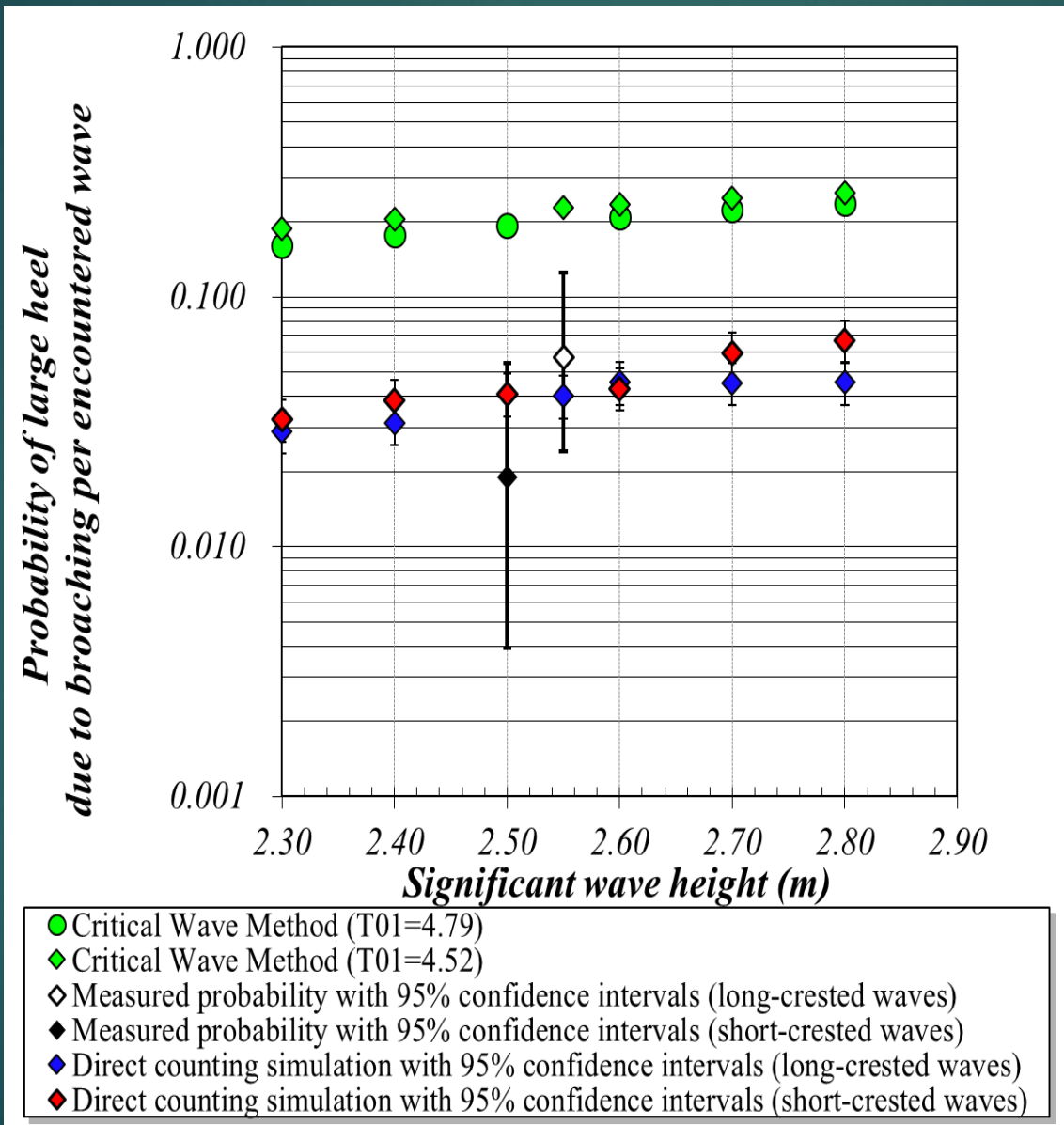
第2段階簡易基準

- ヘテロクリニック分岐の計算より、規則波中で波乗りの発生する波高と波長を求める。
- 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ついて、Longuet-Higginsの理論式（proc. Royal Society Lond., 1983）より、個別の波高と波長の結合確率密度関数を求め、それを波乗りの発生する範囲内で積分することで、1波ごとの波乗り発生確率を計算する。
- 北大西洋の波浪頻度を用いて、その確率を重み平均して、長期の1波ごとの波乗り発生確率Cとする。
- その値が0.005未満であれば、合格。
（コンテナ船2隻、RoRo、PCC、ONR-T, Fの6隻で、第1段階基準との逆転を防ぐ様に決定）

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
- ▶ 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
- ▶ 平水中の操縦流体力、横揺れ減衰力、抵抗・推進性能は模型実験による

直接復原性評価法の実験的検証



一波当たりの40度以上横傾斜発生確率

海洋調査船(L=22m)

K. Matsubara, N. Umeda and
A. Matsuda: Ocean
Engineering, 2023
(松原冬馬：阪大修論2021)