

令和2年(第20回)海上技術安全研究所講演会

操船シミュレータのための波浪中操縦 運動・船体動揺推定モデルの開発

海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所
流体性能評価系 鈴木良介, 塚田吉昭
研究統括監 上野道雄



目次

1. 背景
2. 波浪中操縦運動・船体動揺推定モデルの概要
3. モデルの検証
4. 今後の展望
5. まとめ

1. 背景：自律運航シミュでの船体運動推定の位置づけ

*シミュレーション環境



操船シミュレーター
(海技研HP)

実際の応答の
再現が不可欠



船の運動推定

環境設定

自律運航機能



- 舵角
- プロペラ回転数
- サイドスラスタ
など

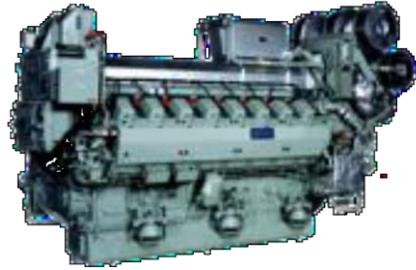
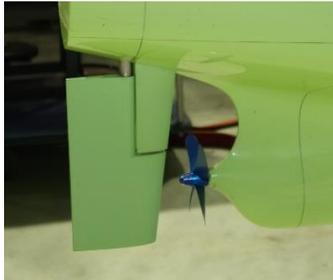
- 波風条件
- 水深、側壁影響
- 他船の交通状況

開発対象

1. 背景：船体運動に影響を及ぼす要素・本研究の対象

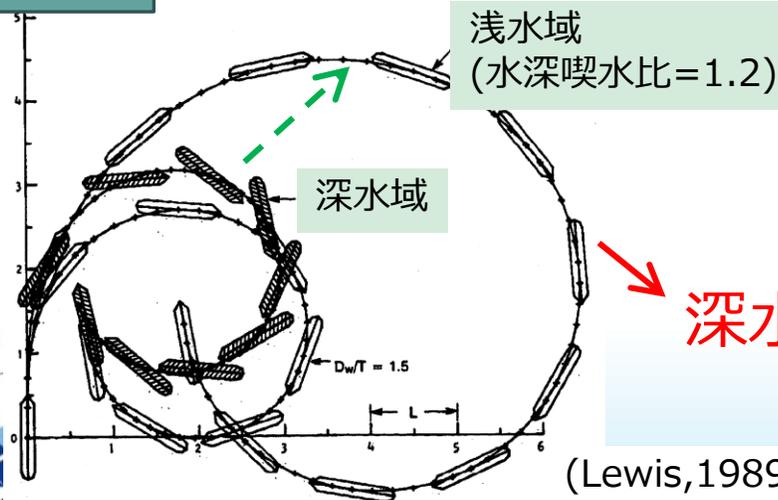
アクチュエーター

✓ 舵角, 主機回転数など



- 手動操作
- 通常航行状態：
⇒ プロペラ正転, 船前進

水深 水深:減⇒旋回径:増



深水域を想定

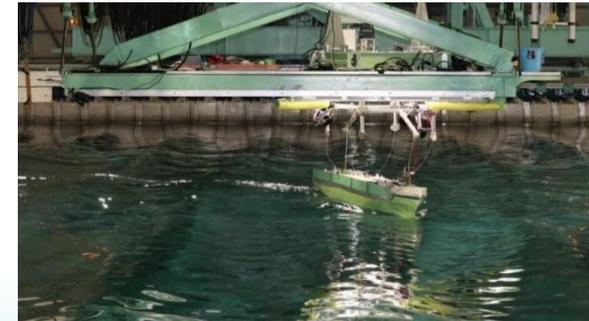
(Lewis, 1989)[1]

外乱(波・風)

など...

✓ 波 → 本研究の対象

✓ 風 ⇒ 回帰式[例えば2]で
実用的に推定可能



[1] E. V. Lewis (1989), Principles of Naval Architecture, SNAME, Vol3.

[2] 藤原敏文ほか(2005), 成分分離型モデルを利用した新しい風圧力推定方法, 日本船舶海洋工学会論文集 第2号, pp.243-255.

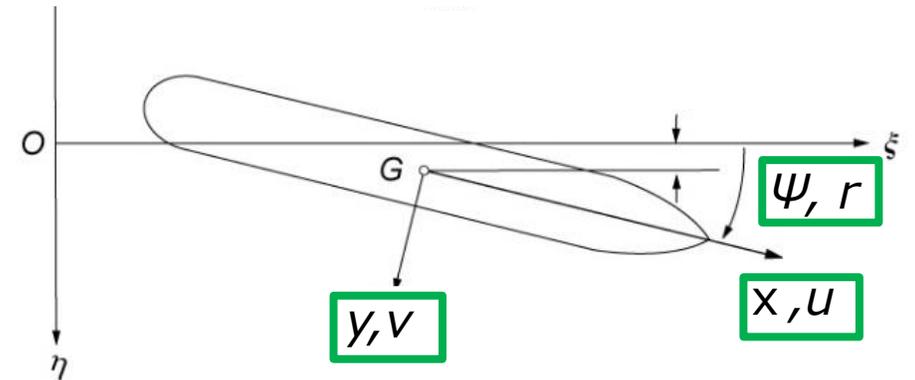
1. 背景：平水中操縦運動モデル

* 操舵応答モデル：K-Tモデル^[1](最も簡潔な型)

回頭： $T\dot{r} + r = K\delta$

- ✓ 1or2自由度
- ✓ 操縦運動は微小
- ✓ 船速一定

- T ：時定数
- K ：旋回力の指数
- δ ：舵角



* 流力モデル：MMGモデル^[例えば2]

船の慣性力 外力項

前後： $m(\dot{u} - vr) = X_P + X_R + X_H$

左右： $m(\dot{v} + ur) = Y_R + Y_H$

回頭： $I_{ZZ}\dot{r} = N_R + N_H$

✓ 3自由度

- m ：船の質量, $I_{i,j}$ ：船の慣性モーメント
- P ：推進機による力
- R ：操舵による力
- H ：船体運動による流体力(直進抵抗など)

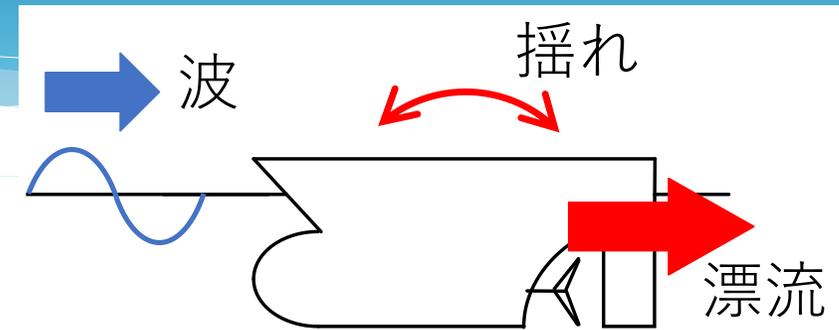
[1] Nomoto K.ほか (1959), On the steering qualities of ships, International Shipbuilding Progress, Vol. 4, No.35, pp.354-370.

[2] Yasukawa H. ほか (2015), Introduction of MMG standard method for ship maneuvering prediction, JMST, Vol. 20, No. 1, pp. 37-52.

1. 背景：波浪中の船舶操縦性能

* 実海域を航行する船舶の波浪影響

- ✓ 船の動揺
⇒ 積み荷の損傷, 乗客の安全性
- ✓ 漂流運動
⇒ 荒天下での操船性能の制限



より安全な自律運航を
目指すために不可欠

* 6自由度での評価が必要

* 波浪中の操縦・漂流運動と動揺を総合的かつ妥当に推定する手法は
これまでに必ずしも確立されていない

目次

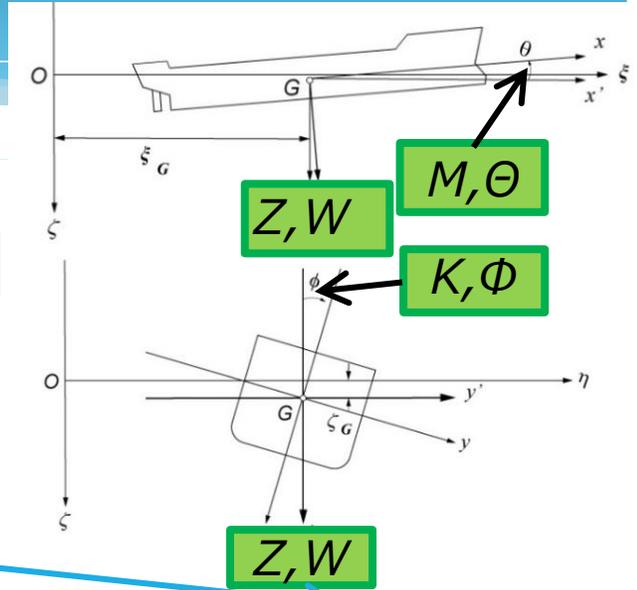
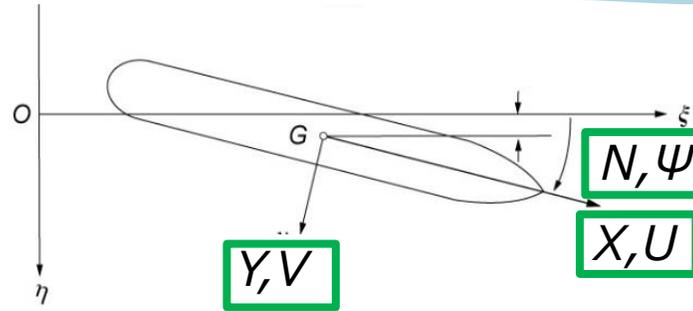
1. 背景
2. 波浪中操縦運動・船体動揺推定モデルの概要
3. モデルの検証
4. 今後の展望
5. まとめ

2. 波浪中操縦運動・船体動揺推定モデル：運動方程式^[4]

* 運動方程式：✓6自由度

並進

前後	$\begin{cases} m(\dot{U} - V\dot{\Psi}) = X_{HBA} \\ m(\dot{V} + U\dot{\Psi}) = Y_{HBA} \\ m\dot{W} = Z_{HBA} + mg \end{cases}$
左右	
上下	



船の慣性力

外力項

回転

横揺	$\begin{cases} (I_{xx} \cos^2 \theta + I_{yy} \sin^2 \theta) \ddot{\Phi} - I_{yy} \dot{\Phi} \dot{\Psi} - (I_{xx} - I_{yy}) (\ddot{\Psi} \sin \theta \cos \theta + \dot{\theta} \dot{\Phi} \sin 2\theta + \dot{\theta} \dot{\Psi} \cos 2\theta) = K_{HBA} \\ I_{yy} \ddot{\Theta} + (I_{xx} \cos^2 \theta + I_{yy} \sin^2 \theta) \dot{\Phi} \dot{\Psi} - (I_{xx} - I_{yy}) \dot{\Psi}^2 \sin \theta \cos \theta = M_{HBA} \\ (I_{xx} \sin^2 \theta + I_{yy} \cos^2 \theta) \ddot{\Psi} - (I_{xx} - I_{yy}) (\ddot{\Phi} \sin \theta \cos \theta + \dot{\theta} \dot{\Phi} \cos 2\theta - \dot{\theta} \dot{\Psi} \sin 2\theta) = N_{HBA} \end{cases}$
縦揺	
回頭	

□ (U, V, W): 船の前後・左右・上下速度

□ (Φ, Θ, Ψ): 船の横揺れ・縦揺れ・回頭方向角速度

2. 波浪中操縦運動・船体動揺推定モデル：外力項

* 運動方程式の右辺：各流体力の重ね合わせ

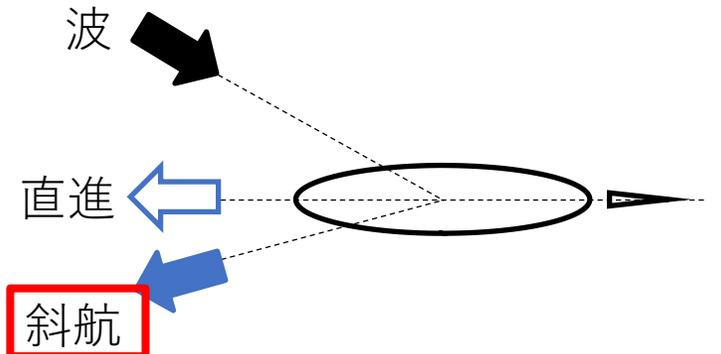
$$\begin{array}{l}
 \text{前後} : \\
 \text{左右} : \\
 \text{上下} : \\
 \text{横揺} : \\
 \text{縦揺} : \\
 \text{回頭} :
 \end{array}
 \left\{
 \begin{array}{l}
 X_{HBA} = X_H + X_p + X_R + X_{f.k.} + X_{W.D} \\
 Y_{HBA} = Y_H + Y_R + Y_{f.k.} + Y_{dif.} + Y_{W.D} \\
 Z_{HBA} = Z_H + Z_{f.k.} + Z_{dif.} \\
 K_{HBA} = K_H + K_R + K_{f.k.} + K_{dif.} \\
 M_{HBA} = M_H + M_{f.k.} + M_{dif.} \\
 N_{HBA} = N_H + N_R + N_{f.k.} + N_{dif.} + N_{W.D}
 \end{array}
 \right.$$

波浪外力

船体の反射波

- ・ 変動成分(左)
- ・ 漂流成分(右)

⇒ 斜航, 旋回影響を考慮[5]



動揺の影響を考慮 → 船体 プ 舵

平水中MMGモデルと同じ： 入射波(静水圧含む)

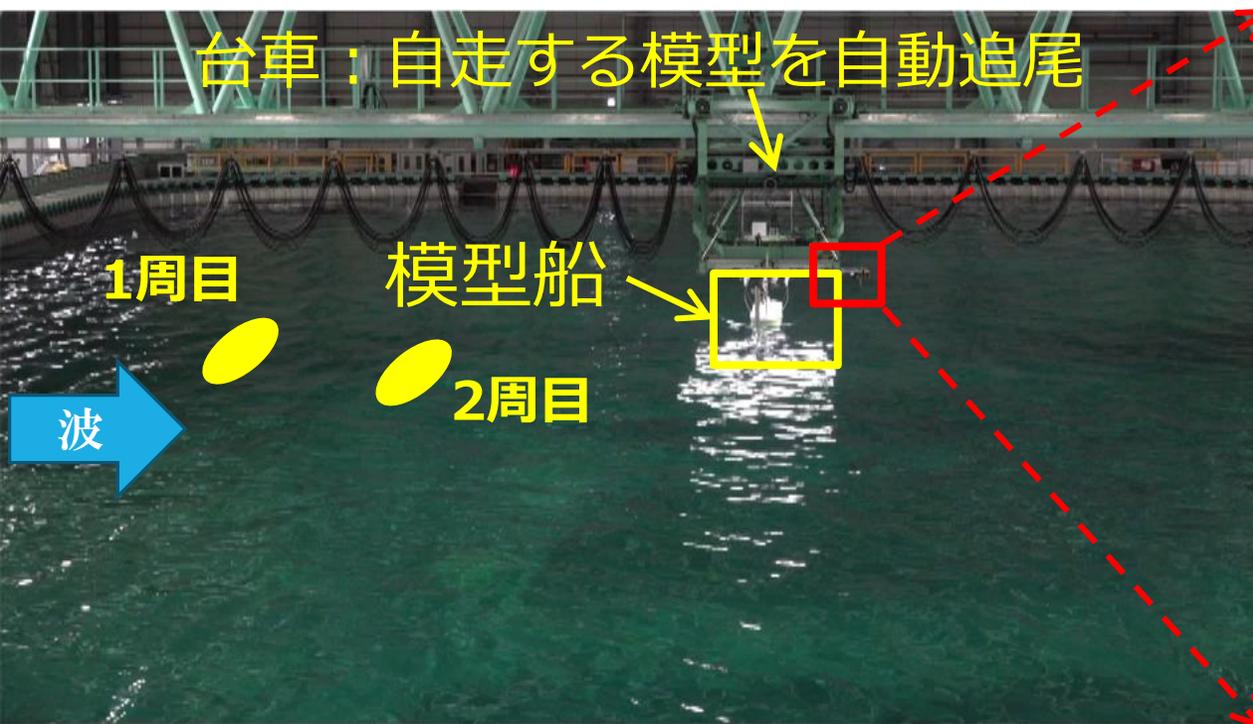


[5] 上野道雄ほか (2001), 短波長波中を操縦運動する船に働く定常流体力について, 日本造船学会論文集 第188号, pp.163-172.



2. 波浪中操縦運動・船体動揺推定モデル：評価対象

* 水槽模型試験の様子：タンカー，多方向不規則波(BF9相当)，右35度旋回，旋回開始時右舷横波



目次

1. 背景
2. 波浪中操縦運動・船体動揺推定モデルの概要
3. モデルの検証
4. 今後の展望
5. まとめ

3. モデルの検証(模型実験)

* 実験施設：実海域再現水槽@海技研

自由航走試験

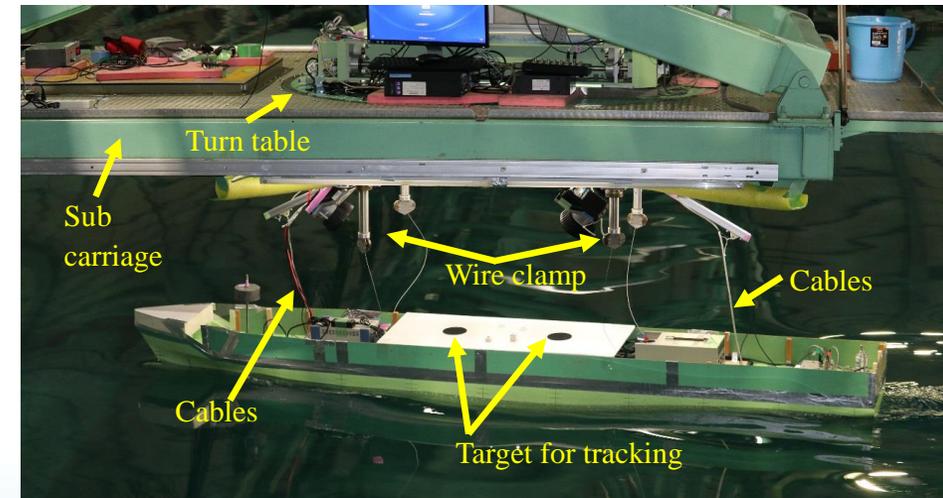
* 模型船： {
✓タンカー(船長:模型2.91m, 実船320m)
✓コンテナ船(船長:模型3.05m, 実船230m)

→ 複数の船で検証

* 波条件：規則波, 波高船長比 $2\zeta_w/L=1/50$

→
・まずは基礎的な検証
・不規則波は現在検証中

* 操舵方法： {
✓オートパイロットによる保針航行
→ 出合い波向き一定
✓35度旋回



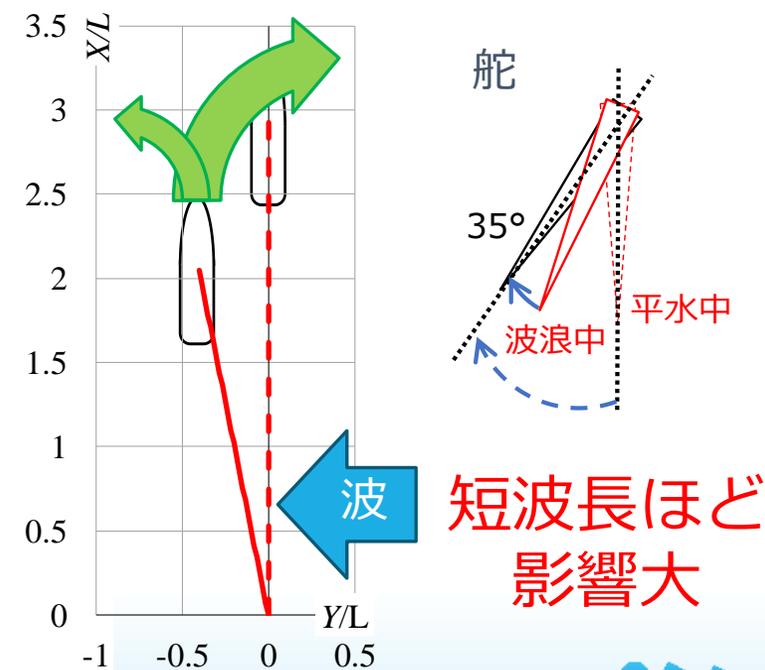
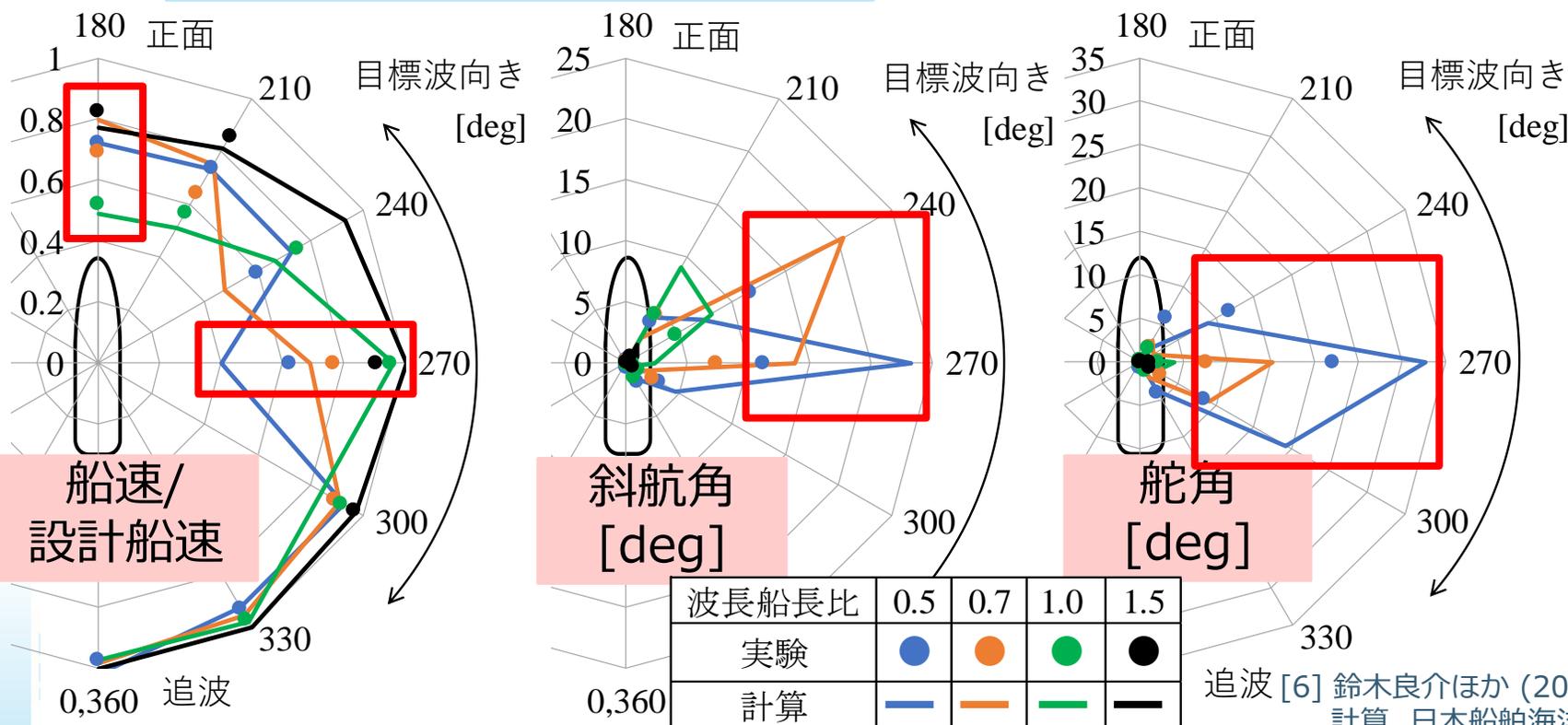
* プロペラ回転数：平水中設計速力の値で一定

3. モデルの検証：オートパイロットによる保針航行状態[6]

- *タンカー, 出会い波向き一定で船が前進するように自動操舵
- *波向き, 波長船長比の違いによる変化を数値計算が大略とらえている

時間平均の絶対値

波による操船性能の変化



追波 [6] 鈴木良介ほか (2020), 規則波中保針航行時の6自由度船体運動計算, 日本船舶海洋工学会講演論文集 第30号, pp.581-584.

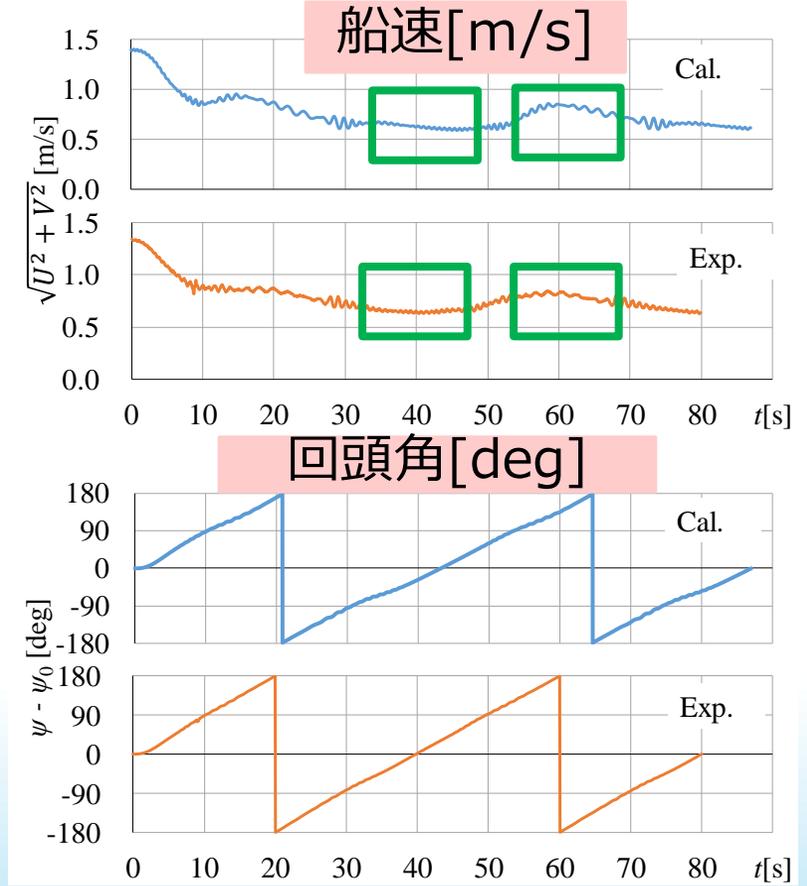
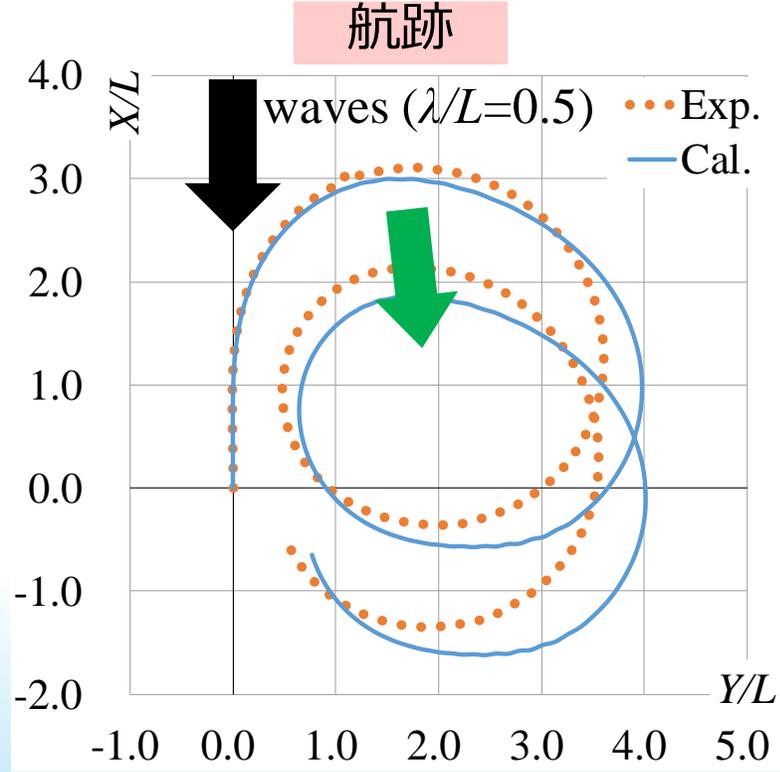
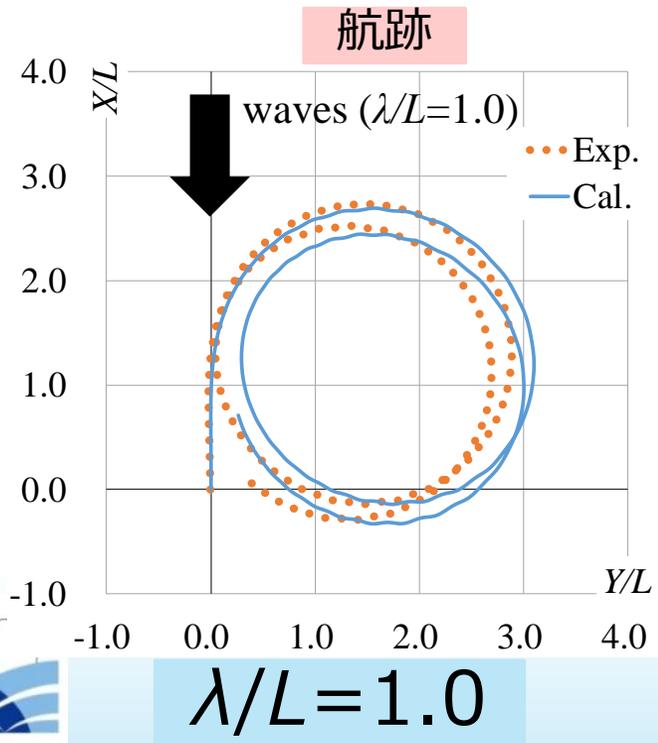


3. モデルの検証：35度旋回[4]

- * コンテナ船, 操舵時正面向波, 波長船長比 $\lambda/L=0.5$
- * 旋回航跡の漂流方向・距離などのマクロな傾向をとらえている
- * 他の波長でも検証済み

実験 
 計算 

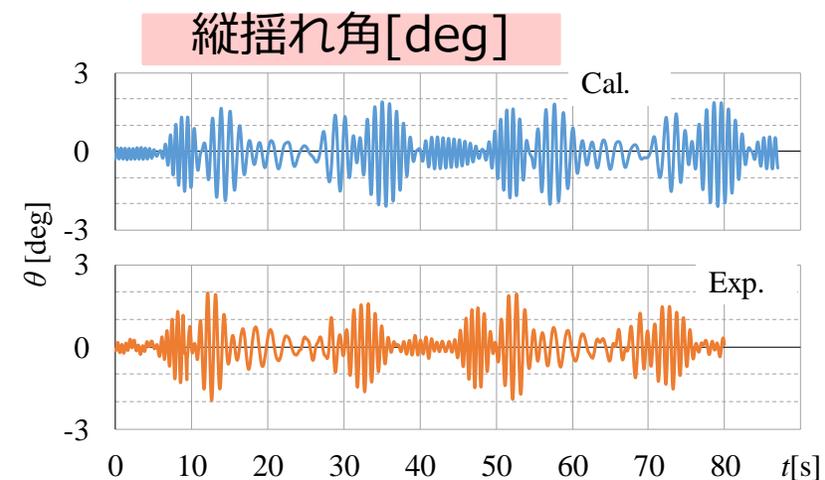
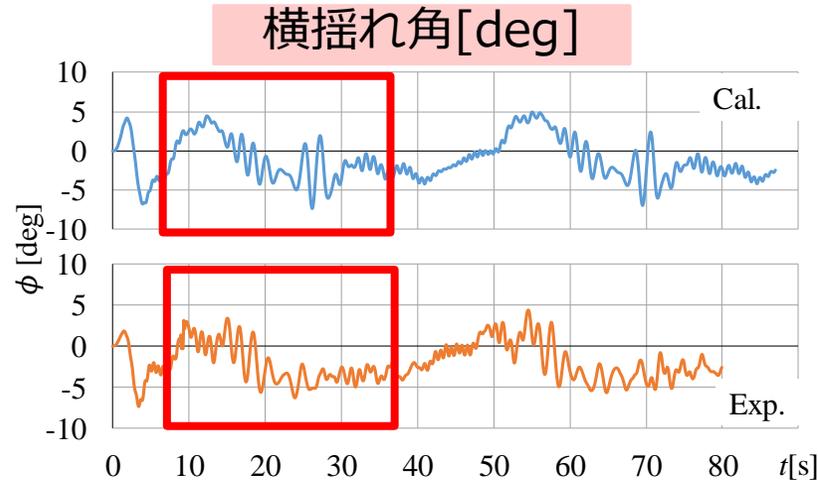
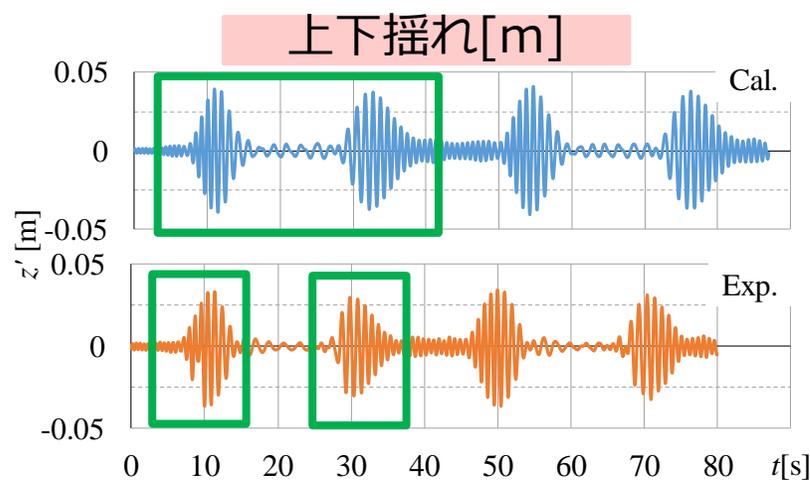
$\lambda/L=0.5$



3. モデルの検証：35度旋回[4]

- * コンテナ船, 操舵時正面向波, 波長船長比 $\lambda/L=0.5$
- * 運動振幅の増減、周期の変化をおおよそとらえている
⇒波向き, 船速, 出会い波周波数の変化による影響
- * 改善点：過去の運動の影響の考慮など

実験 
計算 



目次

1. 背景
2. 波浪中操縦運動・船体動揺推定モデルの概要
3. モデルの検証
4. 今後の展望
5. まとめ

4. 今後の展望

1. 低速・逆転・着棧航行：

別途所内重点研究でモデル検討中[例えば8]

2. 浅水影響：

模型試験/CFDを活用した浅水域流体力
特性の把握

3. 主機応答特性：

別途所内重点研究で詳細な主機応答モデルを開発 [例えば9]

4. リアルタイム計算：

操船シミュレータ等に組み込む際に検討(並列計算など)



[8] 北川泰士ほか(2015), プロペラ逆転時のプロペラ・舵の数学モデルに関する検討, 日本船舶海洋工学会講演論文集 第20号, pp.117-120.

[9] O. Bondarenkoほか (2020), Development of a diesel engine's digital twin for predicting propulsion system dynamics, Energy, Vol. 196, paper No.117126.



目次

1. 背景
2. 波浪中操縦運動・船体動揺推定モデルの概要
3. モデルの検証
4. 今後の課題
5. まとめ

5. まとめ

波浪中操縦運動・船体動揺推定モデルの計算法概要および水槽模型試験との比較による検証結果を紹介した。

本モデルによって実海域を航行する**船の操船性能の波浪による変化**や**積み荷・乗客に加わる加速度**等がより現実的にシミュレーションできることから、**自動運航船を含めた船の安全性向上**につながると考えられる。

自律運航機能を支える重要な要素の1つとして、今後とも本研究を継続していく(分野の最先端に)。