

# 実海域性能評価のための 新しい水槽試験法の開発

流体性能評価系

谷澤克治\*、北川泰士、塚田吉昭、上野道雄

環境・動力系

Oleksiy Bondarenko、福田哲吾

# 従来の水槽試験法

平水中抵抗・自航試験  
(抵抗・自航要素計測)



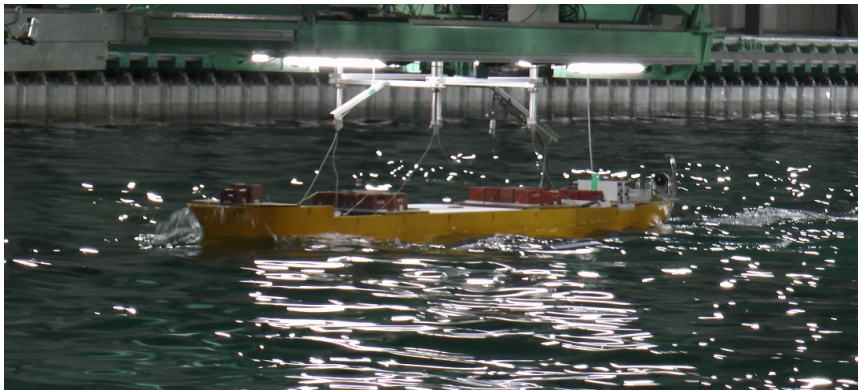
波浪中曳航試験  
(波浪中抵抗増加計測)



- ✓ 計測値を解析して模型スケールの性能を取得、実船スケールの性能は計算で推定
- ✓ プロペラ回転数は一定  
(モーター回転数は固定制御)

# 新しい水槽試験法

波浪中自走試験  
(波浪中自由航走試験による実船性能の直接計測)



## 課題

- ① 実船主機と電動モータの応答特性の違いを克服
- ② レイノルズ数影響【摩擦抵抗成分の違い】を克服
- ③ レイノルズ数影響【船尾伴流形状の違い】を克服

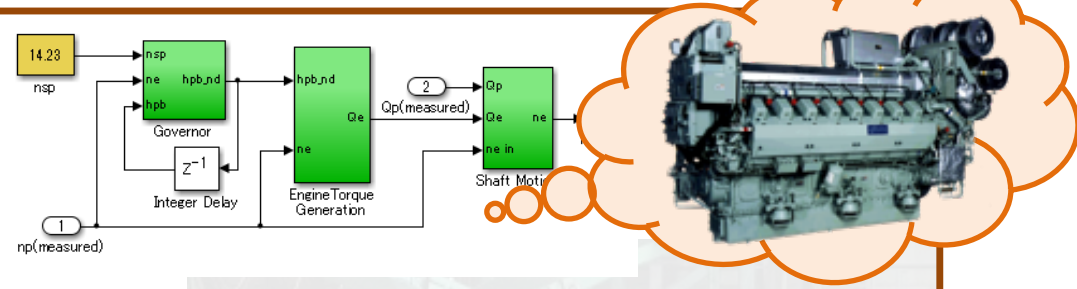
# 解決策①～主機特性自航装置の開発

模型船プロペラトルク・回転数を入力として回転数制御を行う模型船自航装置

⇒主機応答特性の考慮: Bondarenkoのディーゼル主機応答モデル

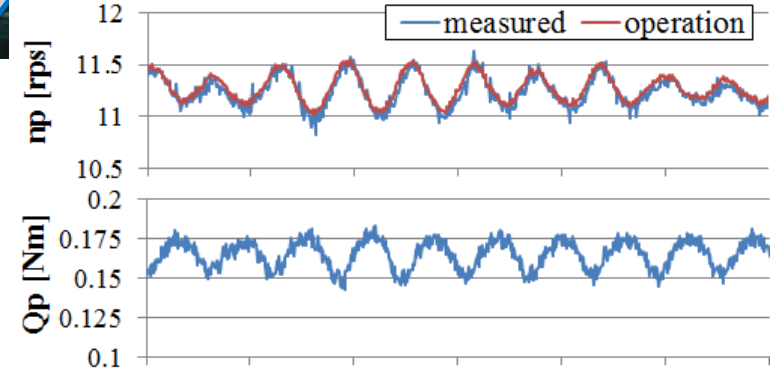
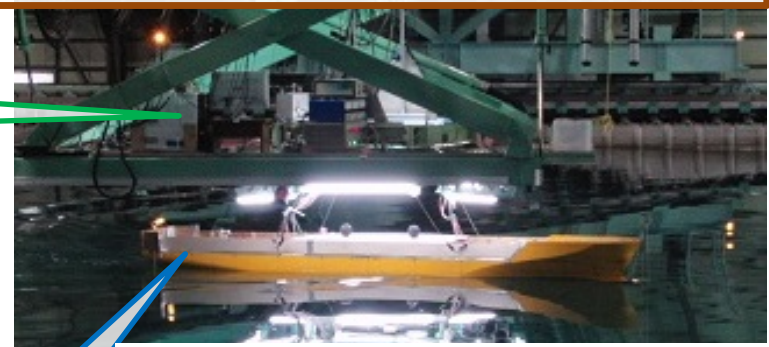
⇒模型スケールでの応答特性: 係数類をフルード相似則で模型尺度に修正

Bondarenkoの主機特性数学モデルを表現するブロックダイアグラム (MathWorks社:MATLAB & Simulink シリーズでコード開発)



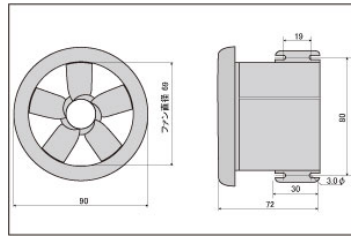
主機応答計算 & 回転数応答値 指令出力

トルク・回転数入力

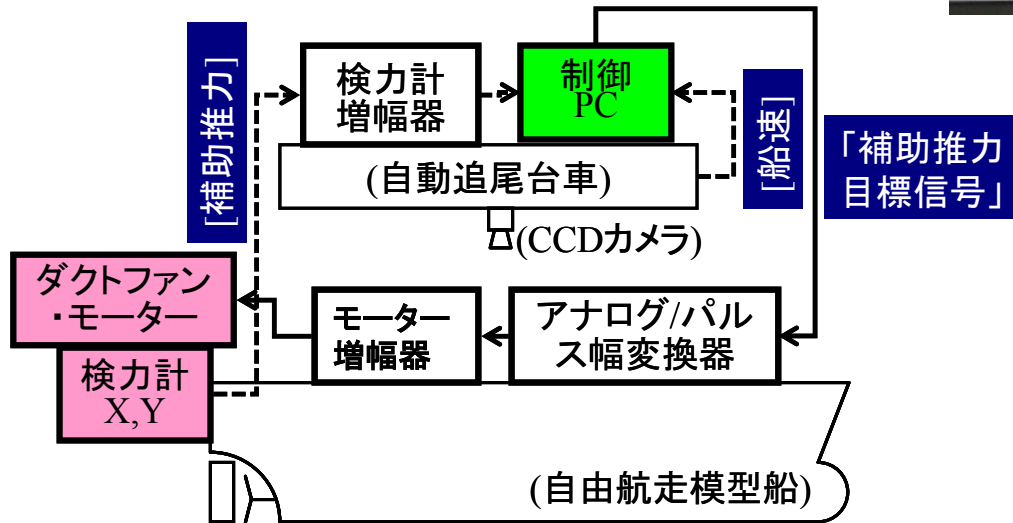


# 解決策②～補助推力装置の開発

ファン直径69mm 推力1kgf以上



模型船にセッティング



“特徴”

- 検力計計測値より、ダクトファン推力が目標値となるように回転指令量をフィードバック制御
- 波浪中でも目標値通りの補助推力を付与可能

船速に応じた摩擦修正量に相当する補助推力を航走する模型船に与えればプロペラ推力(および荷重度)を実船と相似に出来る

# 解決策③～入力トルク・回転数の補正 (模型船の伴流影響の考慮)

ND surge equilibrium (Actual scale)

$$\begin{cases} (\bar{m} + \bar{m}_x) \bar{\omega}_S = (1 - t_S) \bar{T}_S - \frac{1}{2} \bar{S} \bar{V}^2 \cdot C_{TS} + \bar{X}_{Wind} + \bar{X}_{Wave} \\ C_{TS} = C_F [Re_S] + C_W [F_n] \\ \bar{T}_S = \bar{n}_S^2 \bar{D}^4 K_{TS} \left[ \bar{V} (1 - w_{TS}) / \bar{n}_S \bar{D} \right] \end{cases} \quad / \rho_S g L_S^3$$

ND surge equilibrium (Model scale)

$$\begin{cases} (\bar{m} + \bar{m}_x) \bar{\omega}_M = (1 - t_M) \bar{T}_M - \frac{1}{2} \bar{S} \bar{V}^2 \cdot C_{TM} + \bar{X}_{Wind} + \bar{X}_{Wave} + \bar{T}_A \\ \bar{T}_A = \frac{1}{2} \bar{S} \bar{V}^2 (C_F [Re_M] - C_F [Re_S]) \\ C_{TM} = C_F [Re_M] + C_W [F_n] \\ \bar{T}_M = \bar{n}_M^2 \bar{D}^4 \cdot K_{TM} \left[ \bar{V} (1 - w_{TM}) / \bar{n}_M \bar{D} \right] \end{cases} \quad / \rho_M g L_M^3$$

$$\begin{cases} \underline{(\bar{1} - t_S) \bar{T}_S = (\bar{1} - t_M) \bar{T}_M} \\ \bar{T}_{(S)} = \bar{n}_{(S)}^2 \bar{D}^4 K_{T(S)} \left[ \bar{u}_{(S)} \left( 1 - w_{T(S)} \right) / \bar{n}_{(S)} \bar{D} \right] \end{cases}$$

プロペラ有効推力は両尺度で同じ  
⇒ 主機応答特性に基づく波浪中回転数  
応答が実船相当となればよい

$$\bar{Q}_S = \bar{n}_S^2 \bar{D}^5 K_{QS} \left[ \bar{V} (1 - w_{TS}) / \bar{n}_S \bar{D} \right] / \eta_R \quad \neq \quad \bar{Q}_M = \bar{n}_M^2 \bar{D}^5 K_{QM} \left[ \bar{V} (1 - w_{TM}) / \bar{n}_M \bar{D} \right] / \eta_R$$

プロペラトルク・回転数は伴流形状が異なるため尺度によって異なる  
⇒ そのまま主機特性自航装置に入力すると回転数応答は実船相当とならない

主機特性自航装置に入力する計測値を実船相当に補正する  
⇒ 実船馬力推定法を応用すれば可能！

# 主機特性自航装置 入出力の補正

$$(1 - w_{TMm}) \Leftrightarrow \begin{cases} K_{TMm} = T_m / \rho_M n_m^2 D_M^4 \\ K_{TMm} = c_{M0} + c_{M1} \cdot J_{Mm} + c_{M2} \cdot J_{Mm}^2 \\ J_{Mm} = V_m (1 - w_{TMm}) / n_m D_M \end{cases}$$



$$w_{TS} = (t + \varphi) - (w_{TMm} - t - \varphi) \frac{(1+k)C_{F0}[Re_S] + \Delta C_F}{(1+k)C_{F0}[Re_M]}$$



(↑ ITTC法、矢崎のチャートでも可)



$$n_m, Q_{Pm}, T_m$$

$$Q_{PS} = \rho_S n_S^2 K_{QS} (J_S) / \eta_R$$

## 主機応答計算

$$\begin{cases} Q_{Pin} = Q_{Pm} - Q_M + Q_{SM} \\ Q_M = \rho_M n_m^2 D_M^5 K_{QM} (J_M) / \eta_R \\ Q_{SM} = \rho_M n_S^2 (L_S / L_M) D_M^5 K_{QS} (J_S) / \eta_R \\ \quad (= Q_{PS} \cdot \rho_M g L_M^4 / \rho_S g L_S^4) \\ J_{(M,S)} = V_{(m,S)} (1 - w_{T(m,S)}) / n_{(m,S)} D_{(M,S)} \end{cases}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{K_{TS}}{J_S^2} &= \frac{S_S}{2D_S^2} \frac{C_{TS}}{(1-t)(1-w_{TS})^2} \\ K_{TS} &= c_{S0} + c_{S1} \cdot J_S + c_{S2} \cdot J_S^2 \\ n_S &= \frac{V_m \sqrt{L_S / L_M} (1 - w_{TS})}{J_S D_S} \end{aligned} \right\}$$

(備考)  
 ・推力減少率  $(1 - t)$   
 ⇒ 曳航試験で求めておく  
 ・プロペラ効率比  $\eta_R$   
 ⇒ 計測値から航走中に計算するか、曳航試験で求めておく



$$\begin{cases} n_{in} = n_m - n_C \\ n_C = n_{m.steady} - n_{SM} \\ n_{SM} = n_S \sqrt{L_S / L_M} \end{cases}$$

変動成分を保持するため  
 補正は定常値で行う  
 (航走中の平均値)



## 主機応答計算

$$n_{out} = n_{e.cal} + n_C$$

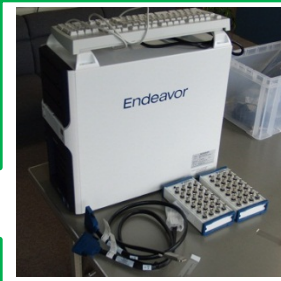
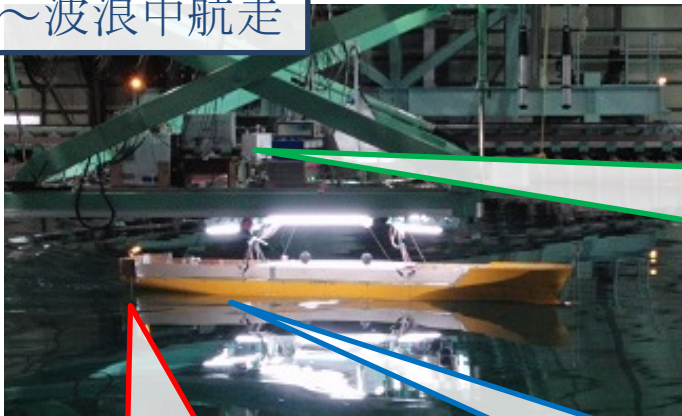
リアルタイム制御



# 開発した水槽試験法まとめ(船速相似法)

- ①主機特性に基づいた回転数変動を与える主機特性自航装置
  - ②補助推力装置による船速に応じた摩擦修正量の付与
  - ③主機特性自航装置への制御入力(トルクと回転数)を実船相当に補正する方法(実船馬力推定法の応用)
- ⇒波浪航走中の模型船速を合理的に実船と相似にすることが可能に！

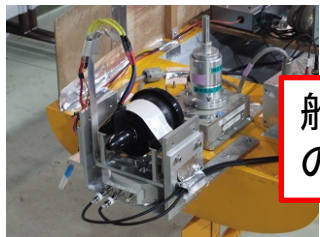
～波浪中航走



- ①回転数・トルク計測値  
実船尺度への補正計算
- ②主機応答計算
- ③回転数応答値を模型尺  
度へ再補正、出力



リアルタイム制御！



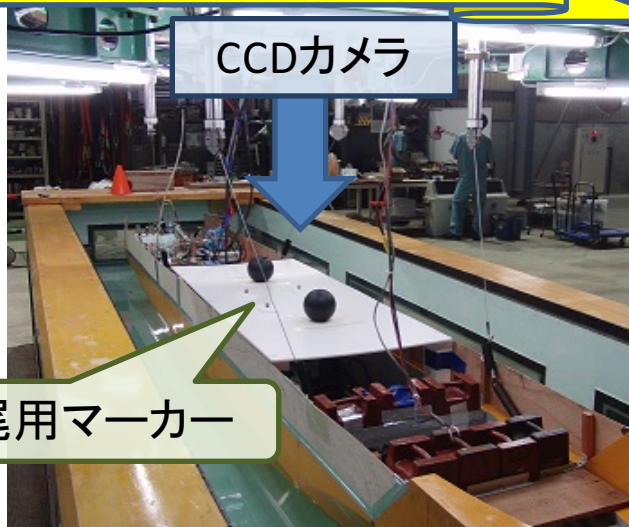
船速に応じた摩擦修正量  
の付与



回転数・トルク・スラスト  
計測 & 出力



# 船速相似法による水槽試験の実施



## ➤ 試験条件

### ➤ 入射波

- 規則波(向波)
- 多方向不規則波(向波)

### ➤ 操舵

- 自動操舵による針路保持

### ➤ 推進制御

	記号	補助推力	モーター制御
1	MP	なし	回転数一定
2	SP	SFC相当	回転数一定
3	ENG	SFC相当	主機特性模擬

# 対象船(コンテナ船)

$$T_A = SFC$$

補助推力装置 設定

SFC

$$= \frac{1}{2} \rho S_w u^2 \left[ (1+k) \{ C_{F0}(Re_M) - C_{F0}(Re_S) \} - \Delta C_F \right]$$

$$C_{F0}(Re) = \frac{0.075}{\{ \log_{10}(Re) - 2 \}^2}$$

1+k	1.112
$\Delta C_f$	1.934E-04

ITTC推奨法に準拠

$$Re = \frac{u \cdot L_{PP}}{\nu}$$

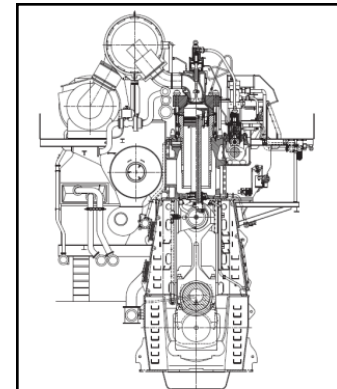


供試模型船 外観

主要目

	Lpp[m]	B[m]	dm[m]	Sw[m <sup>2</sup> ]	Cb	Dp[m]
Model	4.0	0.533	0.187	2.823	0.65	0.12
(Actual)	300.0	40.0	14.0	15879.7		9.0

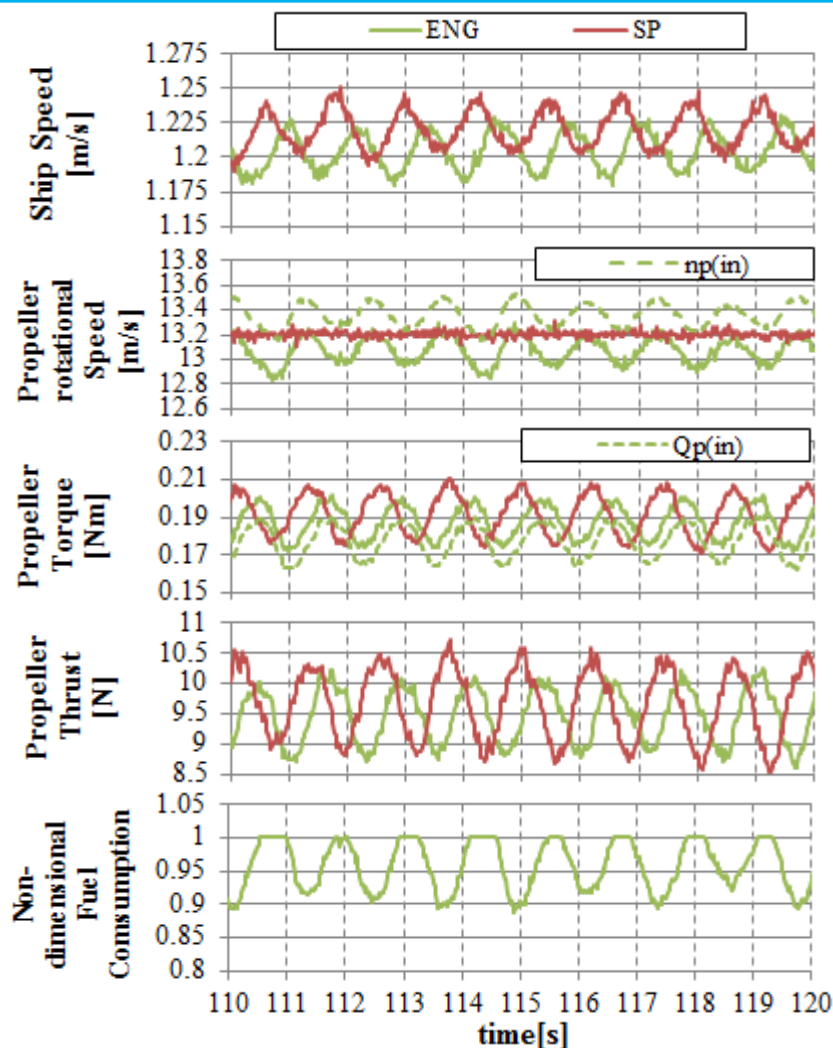
- ✓ 海技研開発船型
  - ✓ 実船排水量: 約11万ton
  - ✓ 計画速力: 25.1kt@75%MCR
  - ✓ 選定主機: 約6万6千[kW]
- (主機特性自航装置で応答特性を再現)



K98MC-C7 型(11気筒)  
(MAN B&W社 カタログより)

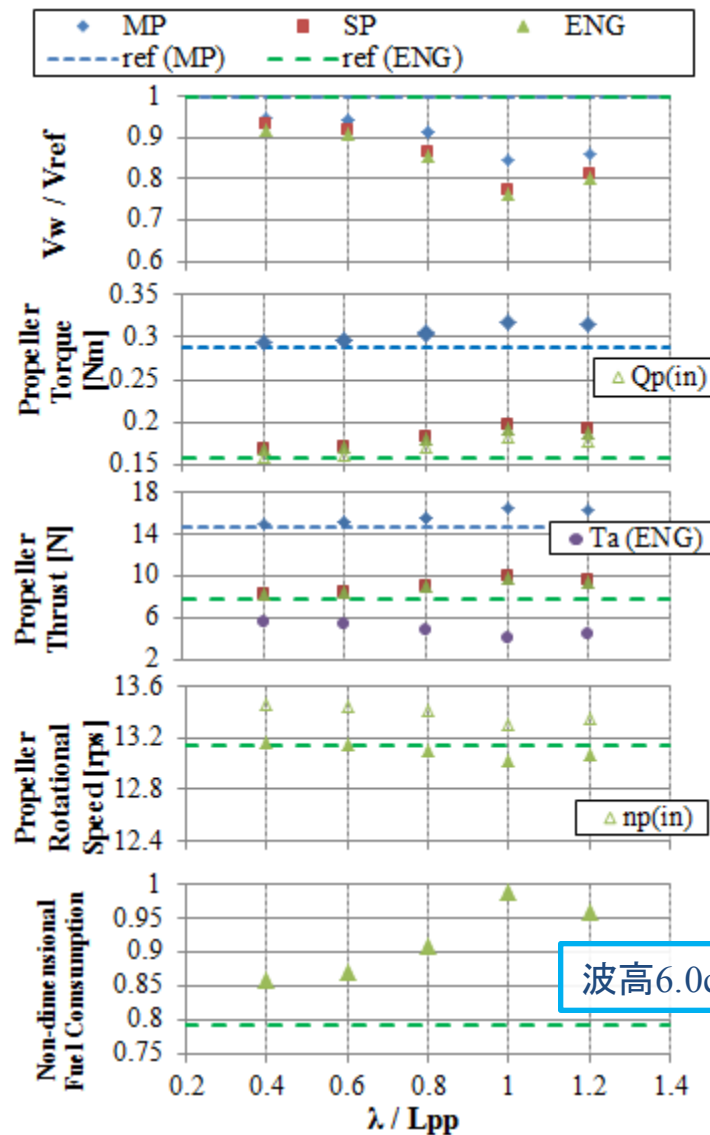
# 規則波中速力試験計測値(時系列)

(向波) 波峯度=0.0125[波高6cm], 波長船長比=1.2

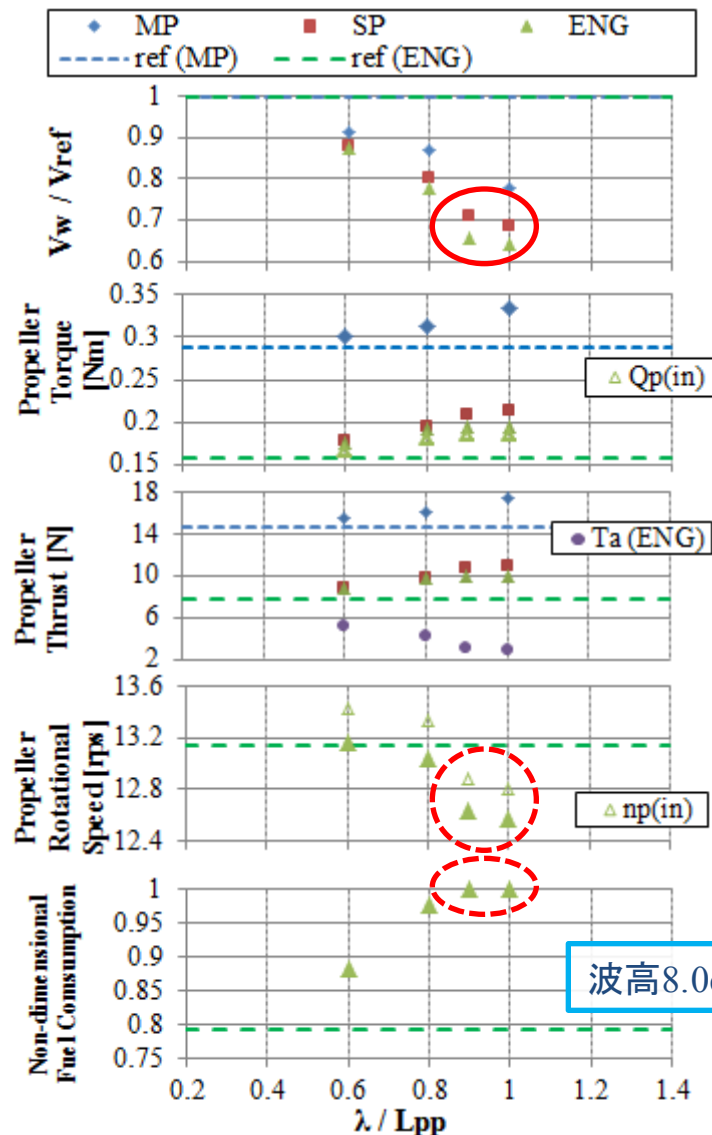


- ✓ トルク変動に応じて回転数が変動(逆位相)
- ✓ トルク・スラスト変動量はSPよりENGが低い(主機応答の再現)
- ✓ 模型尺度の計測値と実船尺度相当への補正值には差がある
- ✓ 燃料投入量の複雑な挙動を水槽試験で計測・評価

# 規則波中速力試験計測値(平均値)



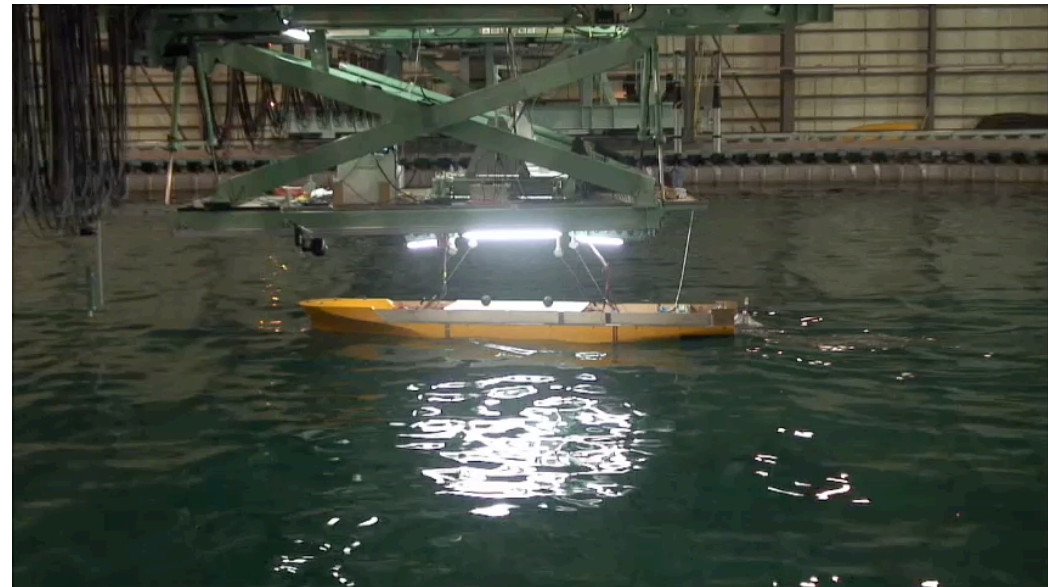
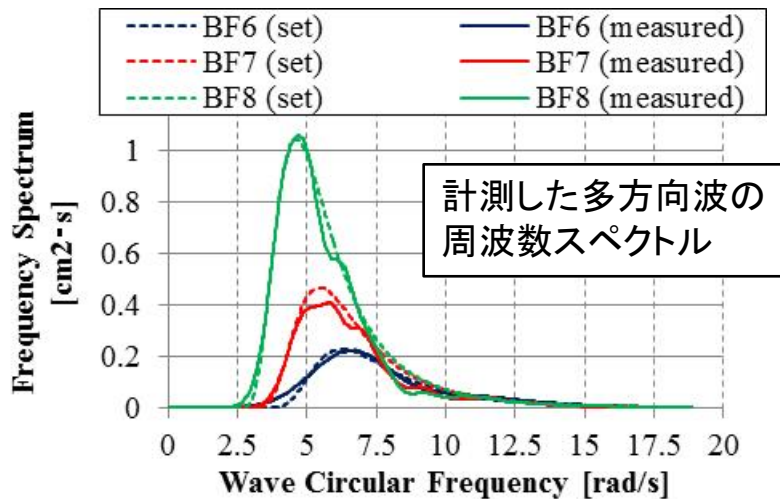
波高6.0cm



波高8.0cm

# 多方向不規則波中速力試験(波条件)

ビューフォート風力階級8相当  
多方向波中速力試験の様子

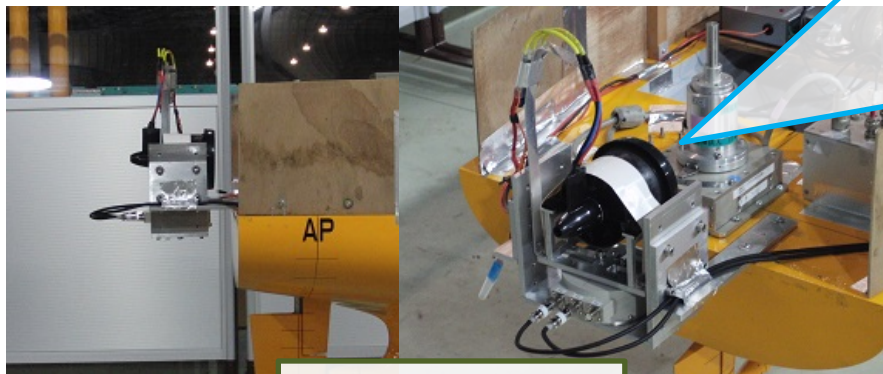


- ✓ ビューフォート風力階級6, 7, 8相当の多方向不規則波を造波
- ✓ 周波数スペクトル:ISSC型、方向分布関数:cos<sup>2</sup>型
- ✓ 船は波の主方向に向かって航走

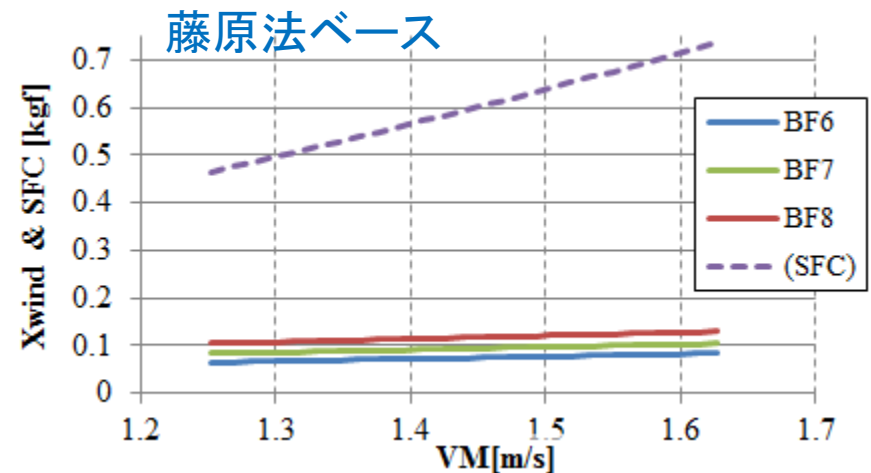
# 実船風圧抵抗を模擬する方法

- ✓ 実海象下では風による風圧抵抗が上部構造物に作用
- ✓ 水槽空間内での想定風向・風速と模型船速・船首方向が得られれば実船相当の風圧抵抗を把握できる
- ✓ 補助推力装置で与えている摩擦修正量から実船相当の風圧抵抗推定値を差し引けば風圧抵抗を模擬できる

$$X_{Wind} = \frac{1}{2} \rho_A A_T U_A^2 \cdot C_X (\psi_A)$$

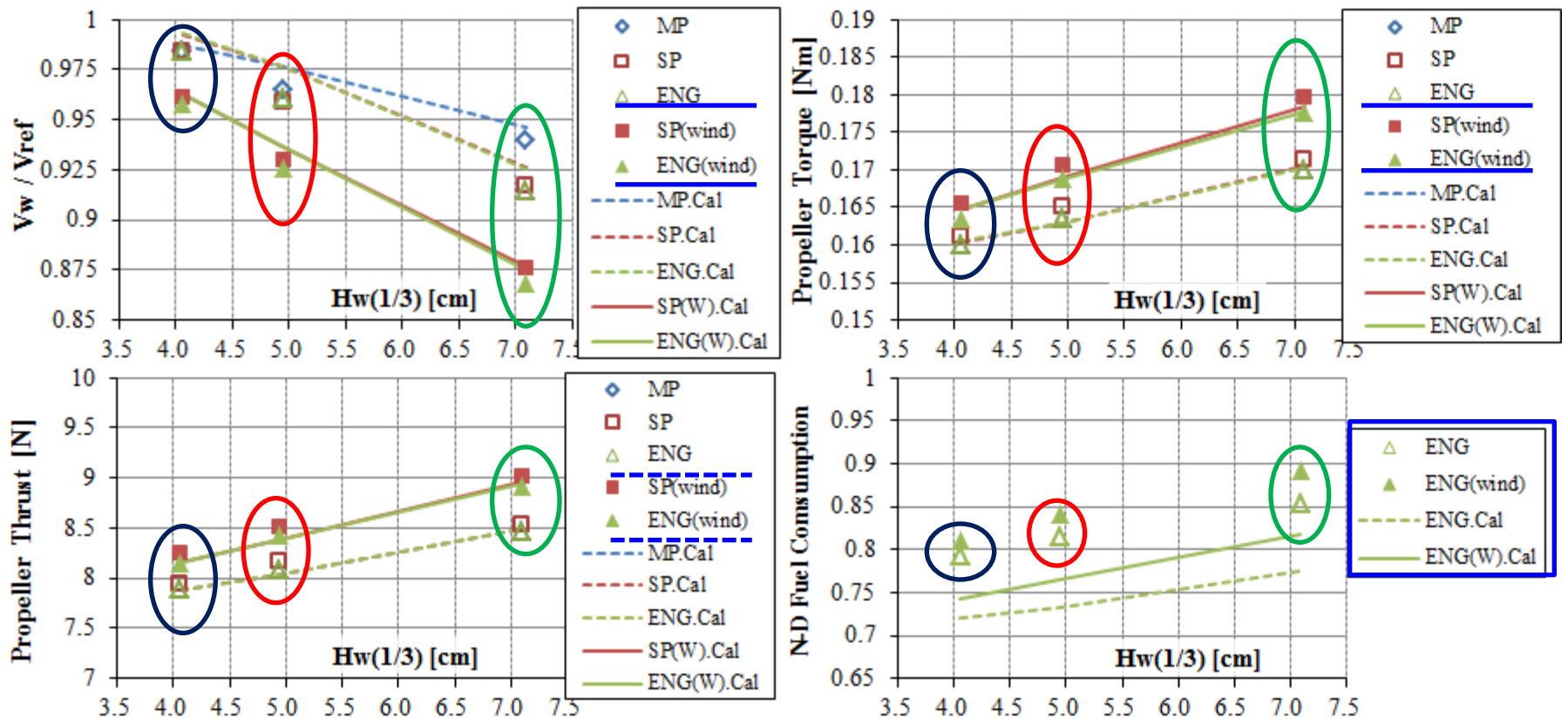


補助推力装置



風の主方向に向かって航走した場合の風圧抵抗(模型尺度)

# 多方向不規則波中 計測値と推定値 (船速比、プロペラ力、燃料消費量)



**BF6相当** **BF7相当** **BF8相当**

実船性能として直接評価が可能な模型試験結果！

# 船速相似法の活用と応用

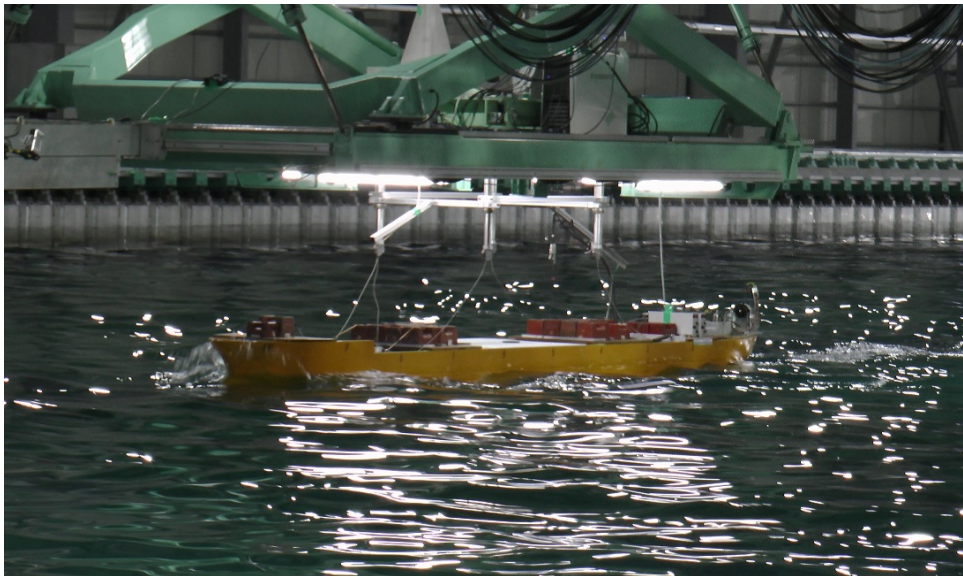
- ✓ 波浪中抵抗増加を抑制するための船型開発や省エネデバイスの効果を船速低下という指標で直接検証可能
- ✓ 想定海象中の馬力カーブを模型試験で直接計測できる
- ✓ 主機特性自航装置を使えば主機設計の検証が水槽試験で可能となる



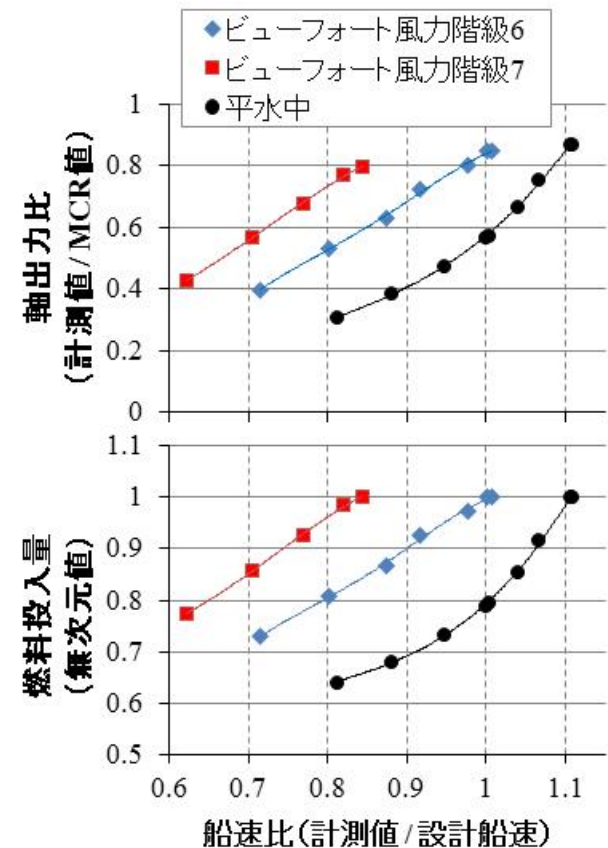
# (応用事例紹介)

## 波浪中馬力カーブの直接計測

- 想定海域での船速-軸馬力カーブを水槽試験から直接評価できる



パナマックスバルクキャリア船型によるfw算出  
ガイドライン対象の波浪場中速力試験  
(ビューフォート階級6: 有義波高=3.0m  
ビューフォート階級7: 有義波高=4.0m)



# (応用事例紹介)

## ガバナーのゲイン設計

- 主機ガバナーのゲイン設計・調整は通例では十分検討されない⇒省エネ・安全稼働のための設計の余地？

機械式ガバナーモデル

⇒比例ゲイン機構や不感帯機構などが数学モデル化

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{Z}_S = K_S (\bar{n}_{SP} - \bar{n}_e) \\ \bar{\psi} = \bar{Z}_S - \bar{Z}_{ip} - \bar{Z}_{f,b} \\ \bar{Z}_0 = \begin{cases} \bar{\psi} - \varepsilon/2 & \text{if } \bar{\psi} > \varepsilon/2; \\ 0 & \text{if } |\bar{\psi}| \leq \varepsilon/2; \\ \bar{\psi} + \varepsilon/2 & \text{if } \bar{\psi} < -\varepsilon/2; \end{cases} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} T_{pp} \frac{d\bar{h}_p}{dt} = \bar{Z}_0 \\ T_i \frac{d\bar{Z}_{ip}}{dt} + \bar{Z}_{ip} = K_i T_i \frac{d\bar{h}_p}{dt} \\ \bar{Z}_{f,b} = K_{f,b} \cdot \bar{h}_p \end{array} \right.$$

- 主機特性自航装置を使えば水槽試験でガバナー設計の効果を検証可能

# 規則波中試験による設計効果の検証

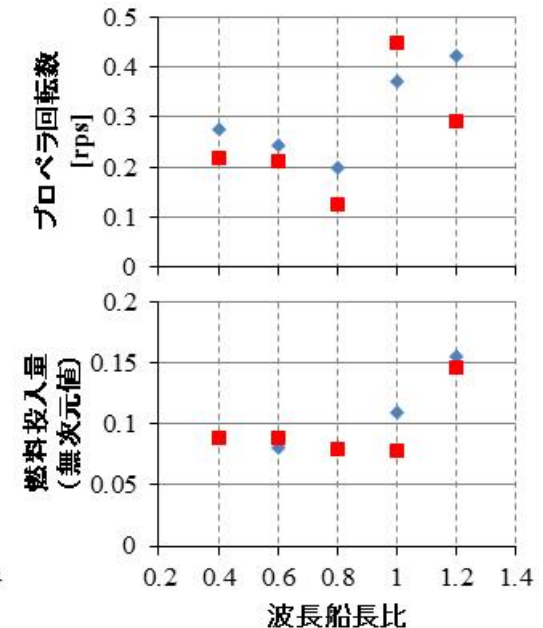
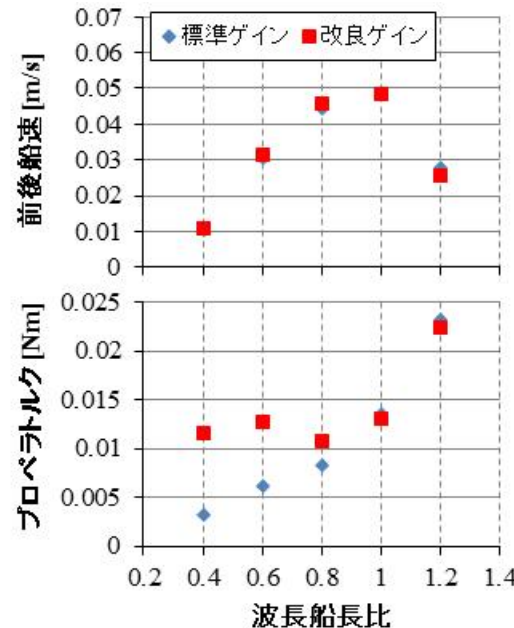
(ガバナー設計の目標方針)

燃料投入量の変動量をキープしたまま回転数変動量を抑制する

- ✓ ガバナーの機構上、燃料投入量の変動を抑制するゲイン設計をすると主機回転数の変動は増加する(逆も然り)

- 事前に数値計算で検証したゲイン設定を波浪中速力試験で確認、微調整
- ガバナー設計が目標を達成したことを水槽試験で確認した

規則波向波中(波高8cm)の変動両振幅解析値



# まとめ

- 実船の波浪中船速および推進性能を直接計測する試験法“船速相似法”を開発した
- 船速相似法を用いた計測した試験結果例(船速低下、プロペラ性能、主機応答)を分析した
- 開発した試験法を活用した事例として、要求馬力の直接計測およびガバナー設計検証の事例を紹介した

## 謝辞

本研究は科研費(23246153, 26820384)の助成を受けております。  
関係各位に御礼申し上げます