

水槽試験の活用による 主機特性及び設計が波浪中 推進性能へ与える影響の検証

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所
海上技術安全研究所

北川泰士*, 塚田吉昭 (流体性能評価系)

Bondarenko Oleksiy, 福田哲吾 (環境・動力系)

谷澤克治 (研究統括監)

はじめに

- ✓ EEDI基準への対応も含め、主機特性も考慮して船舶の実海域推進性能を評価できることは重要である
- ✓ 実船に作用する流体力は水槽模型試験結果に基づいて相似則を考慮した評価をすることが未だ一般的
- ✓ ただし、主機応答特性は水槽試験時には基本的に考慮されない
- ✓ 海技研では主機応答特性を模擬する自航装置(主機特性自航装置)を開発し、主機応答特性も陽に考慮して実船の実海域推進性能を直接評価できる水槽試験法を構築した¹⁾

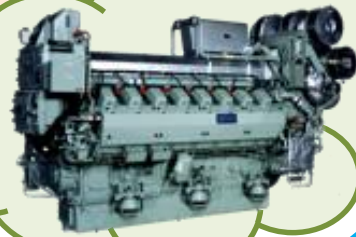
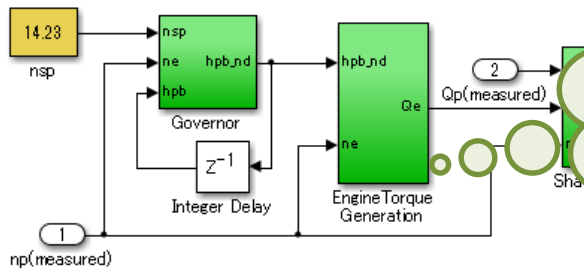
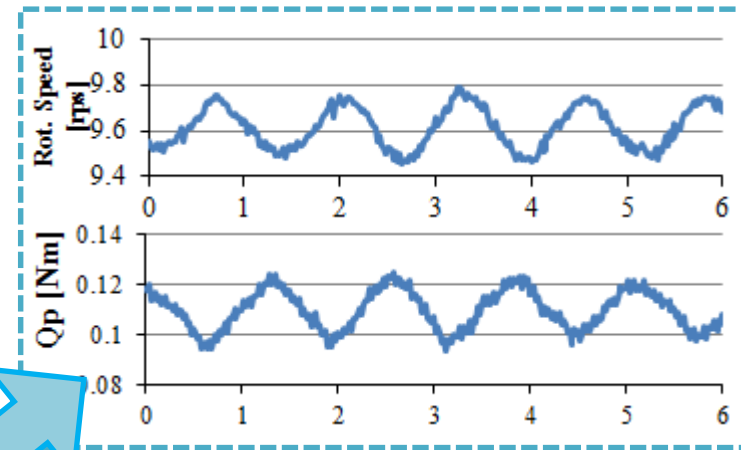


1) 北川泰士, 他: 実船の波浪中船速低下を直接計測する水槽試験法の開発, 日本船舶海洋工学会論文集, 第22号, 2015.

主機特性自航装置の開発

特徴: 主機応答特性数学モデルを内装し、航走中のプロペラトルク・回転数を入力としてリアルタイムで回転数応答を計算し、出力値通りにモーター回転数を制御する

規則波航走中トルク・回転数変動の計測例

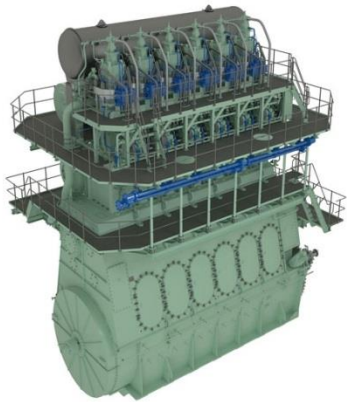


主機応答特性数学モデル

リアルタイム制御



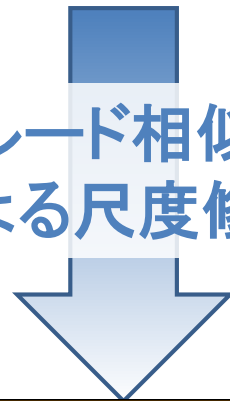
主機応答特性数学モデル



for PXBC@Full Scale	
Output [W]	9.35×10^6
n_e [RPM / rps]	91.0 / 1.52
(Lpp [m])	217

フルード数: $F_n = \frac{V}{\sqrt{gL}}$
 (船速の無次元値)

フルード相似則
 による尺度修正



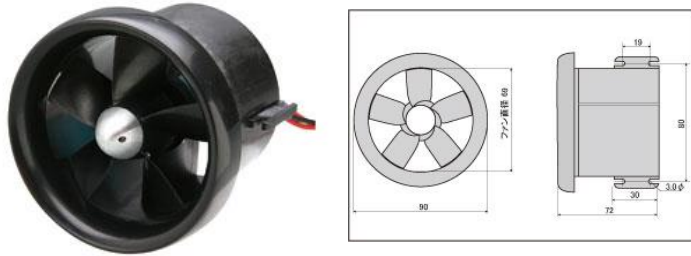
for PXBC@Model Scale	
Output [W]	12.5
n_e [RPM / rps]	5460 / 10.4
(Lpp [m])	4.58

- ✓ ガバナーモデル、エンジントルクモデル(燃焼モデル)、軸系運動方程式による構成が基本
- ✓ モデル内の応答性や出力特性を表す係数・定数はフルード相似則により実船尺度から尺度修正する
- ✓ 模型尺度では粘性抵抗や船尾伴流の尺度影響により、同フルード数では実船相当値よりプロペラトルクが大きくなる(⇒対策が必要)

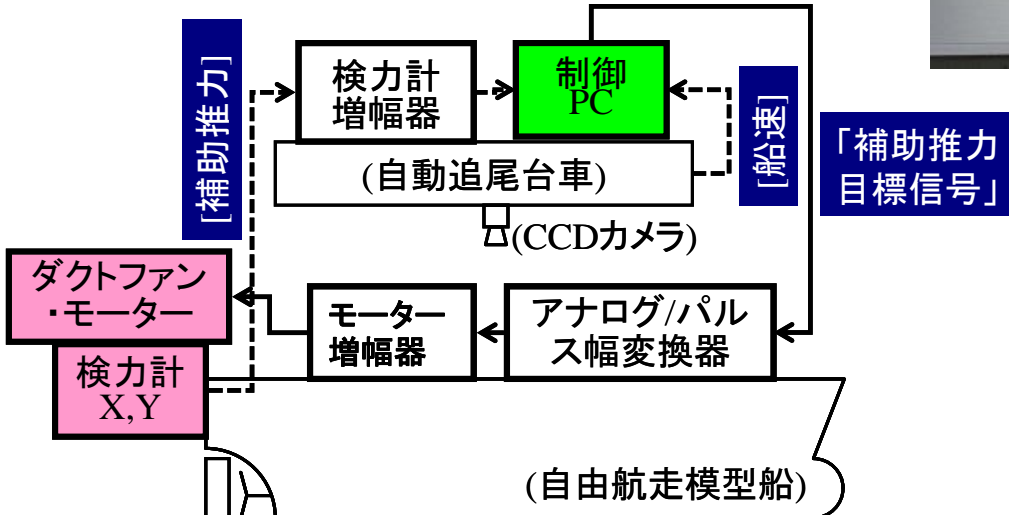
新しい水槽試験法の開発(1)

粘性抵抗の差への対応 (“Model-point”から”Ship-point”へ) :
 航走中の船速に応じた粘性抵抗の差(摩擦修正量)を補助推力装置²⁾で付与

ファン直径69mm 推力1kgf以上



模型船にセッティング



“特徴”

- 推力が目標値となるようにファン回転指令量をフィードバック制御
- 任意の目標推力を設定可能

2) 塚田吉昭, 他: 自由航走試験のための補助推力装置の開発, 日本船舶海洋工学会論文集, 第20号, 2014.

新しい水槽試験法の開発(2)

船尾伴流(プロペラ有効伴流率)の差への対応

実船尺度:
$$\overline{Q}_S = \overline{n}_S^{-2} \overline{D}^5 K_{QS} \left[\overline{u}_S (1 - w_{TS}) / \overline{n}_S \overline{D} \right] / \eta_R$$

同じフルード数では… 

模型尺度:
$$\overline{Q}_M = \overline{n}_M^{-2} \overline{D}^5 K_{QM} \left[\overline{u}_M (1 - w_{TM}) / \overline{n}_M \overline{D} \right] / \eta_R$$

 入力する計測トルク・回転数: Q_{Pm}, n_{Pm}

実船馬力推定法により、同フルード数で航走する実船のトルク・回転数をリアルタイムで計算し、計測値の定常値を補正

定常値を実船相当にした計測トルク・回転数: Q_{Pmc}, n_{Pmc}

主機特性
自航装置



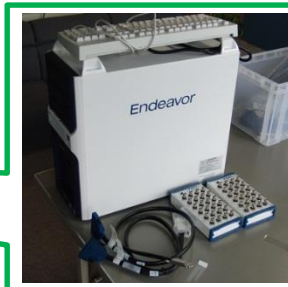
主機出力特性はフルード相似則で模型尺度に

主機特性を含めてプロペラ回転数が実船相似となる
⇒プロペラ推力及び船速が実船相似になる

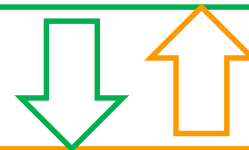
新しい水槽試験法の開発(3)

航走中の模型船の船速を合理的に実船と相似にする試験法(船速相似法)

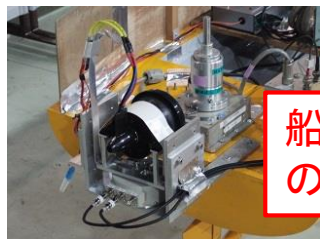
- (1) 主機特性に基づいた回転数応答を与える主機特性自航装置
- (2) 補助推力装置による船速に応じた摩擦修正量の付与
- (3) 主機特性自航装置への制御入力(トルクと回転数)を実船相当に補正する方法(実船馬力推定法の応用)



- ① 回転数・トルク計測値を実船相当値に補正
- 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・スラストの計測と演算機への出力
& モータ回転を指令値通り制御

船速相似法による自由航走試験

実海域再現水槽 (@NMRI)



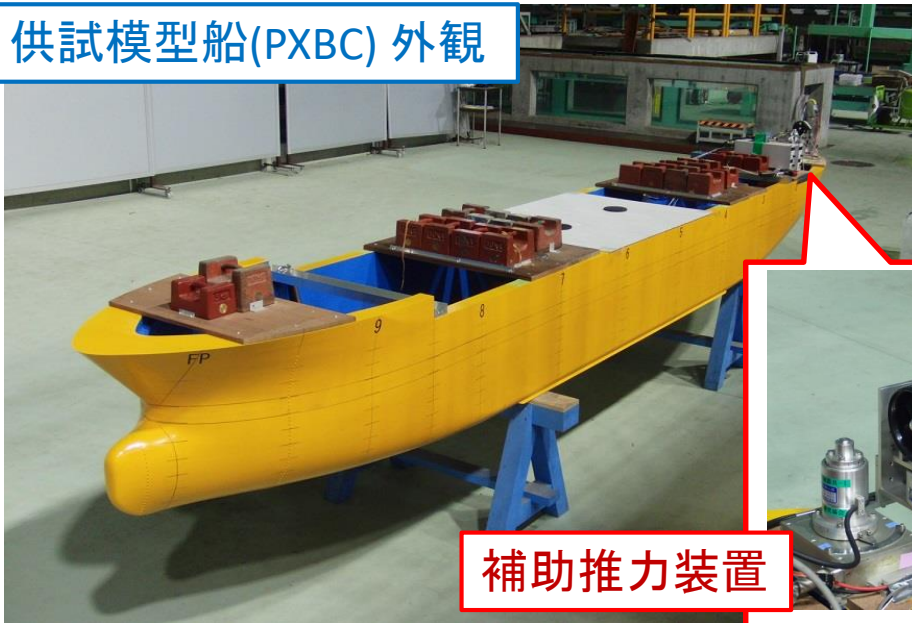
- ✓ 実海域再現水槽@海上技術安全研究所で船速相似法による自由航走速力試験を実施
- ✓ 自動操舵による保針で直進航走
- ✓ 曳引台車自動追尾システムを使用(自走する模型船を台車が自動で追従する)
- ✓ 設定した初期速度までに達する台車がワイヤークランプで模型船を加速曳航、その後にクランプリリースで自走状態とさせる

対象船 (PXBC)

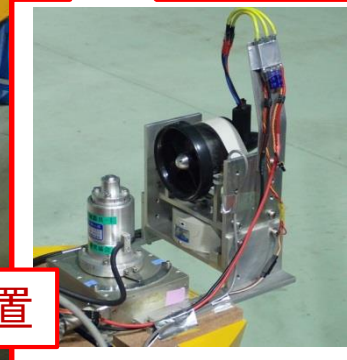
設定する補助推力量:
摩擦修正量 (ITTC1957ベース)

$$\begin{aligned}
 T_A &= SFC \\
 &= \frac{1}{2} \rho S_W u^2 \left[(1+k) \{ C_{F0}(R_{eM}) - C_{F0}(R_{eS}) \} - \Delta C_F \right] \\
 C_{F0}(R_e) &= \frac{0.075}{\{ \log_{10}(R_e) - 2 \}^2}
 \end{aligned}$$

供試模型船(PXBC) 外観



補助推力装置



主要目

	Model	Full
L_{pp} [m]	4.585	217.0
B [m]	0.682	32.3
d_m [m]	0.258	12.2
C_B	0.840	
S_W [m ²]	11000.0	4.91
D_P [m]	0.150	7.10
Propeller boss ratio	0.180	
Propeller blade section	MAU	
Propeller blade number	4	

- 海技研にて設計されたパナマックスバルクキャリア(実船は無し)
- 満載時計画速力: 14.5 kt @90%MCR

対象主機

主機応答特性数学モデル

➤ 抵抗試験・自航試験による実船馬力推定結果と主機の陸上試験結果を基に、実在の6気筒2ストロークディーゼル主機を対象主機として選定

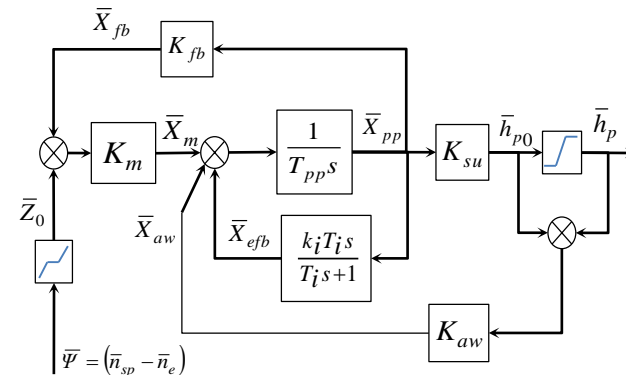
推進軸系 回転運動方程式

$$2\pi I_{PS} \frac{dn_e}{dt} = Q_e - Q_P$$

エンジントルクモデル(燃焼モデル)

$$\begin{cases} \frac{dQ_e(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_{TC}} [Q_e(\bar{n}_e, \bar{h}_p) - Q_e(\bar{n}_{e0}, \bar{h}_{p0})] - \frac{1}{\tau_{TC}} Q_e(t) \\ \bar{Q}_e(\bar{n}_e, \bar{h}_p) = f_P(\bar{n}_e, \bar{h}_p) / 2\pi\bar{n}_e \end{cases}$$

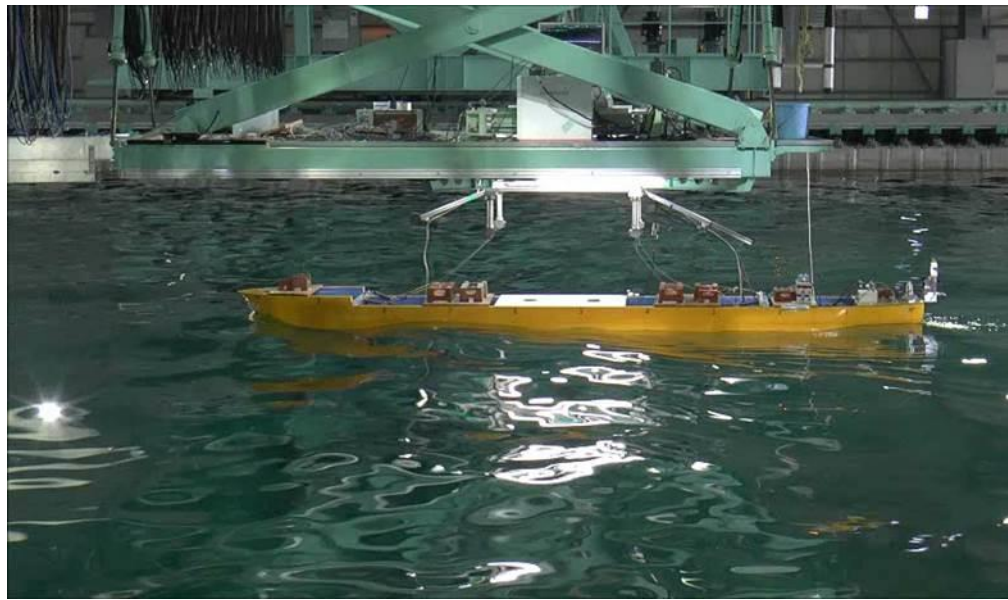
機械式ガバナーモデル



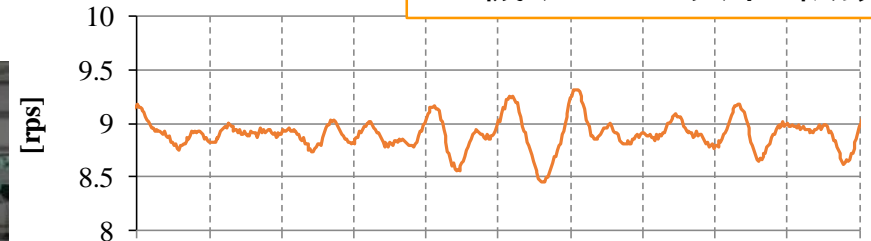
Item	Full	Operator	Model
Output [W]	9.35×10^6	$\rho g^{1.5} L^{3.5}$	12.5
$n_{e(MCR)}$ [rps]	1.517	$(g/L)^{0.5}$	10.43
$Q_{e(MCR)}$ [Nm]	9.81×10^5	$\rho g L^4$	0.1907
I_{PS} [kg*m2]	2.99×10^5	ρL^5	1.226×10^{-3}
τ_{TC} [s]	0.303	$(L/g)^{0.5}$	0.044

船速相似法による計測例

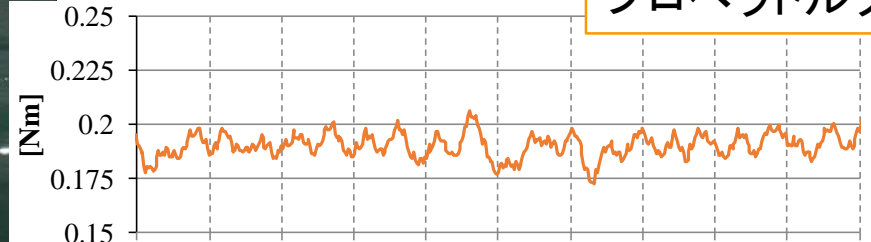
ビューフォート風力階級7相当の短波頂波中試験
 (有義波高: 8.3cm/4.0m、平均波周期: 1.2s/7.7s)



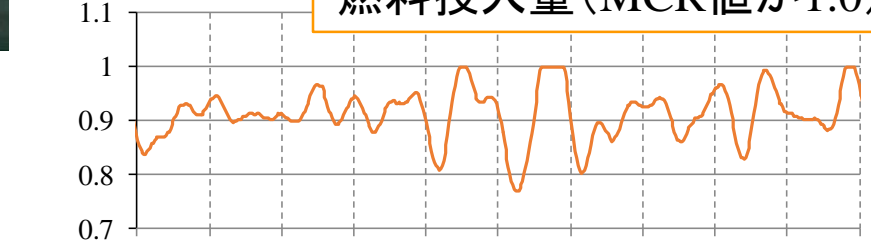
主機(プロペラ)回転数



プロペラトルク



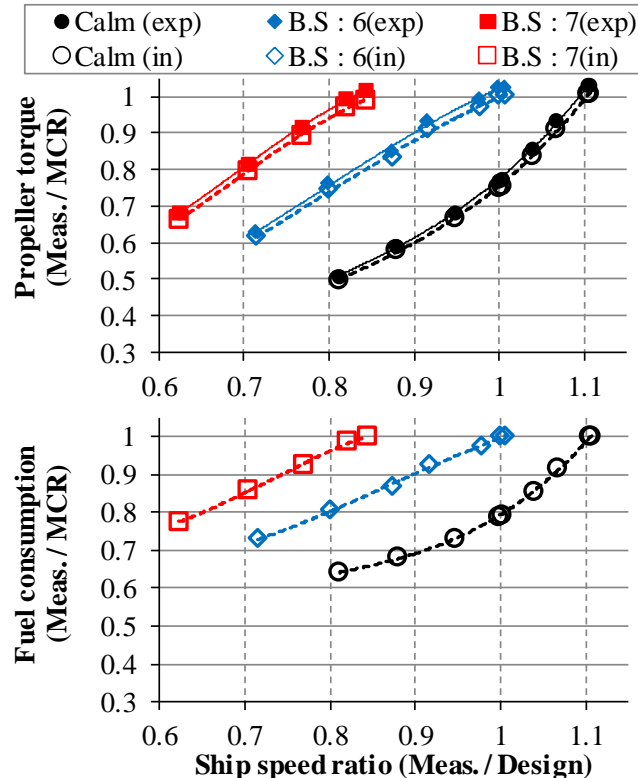
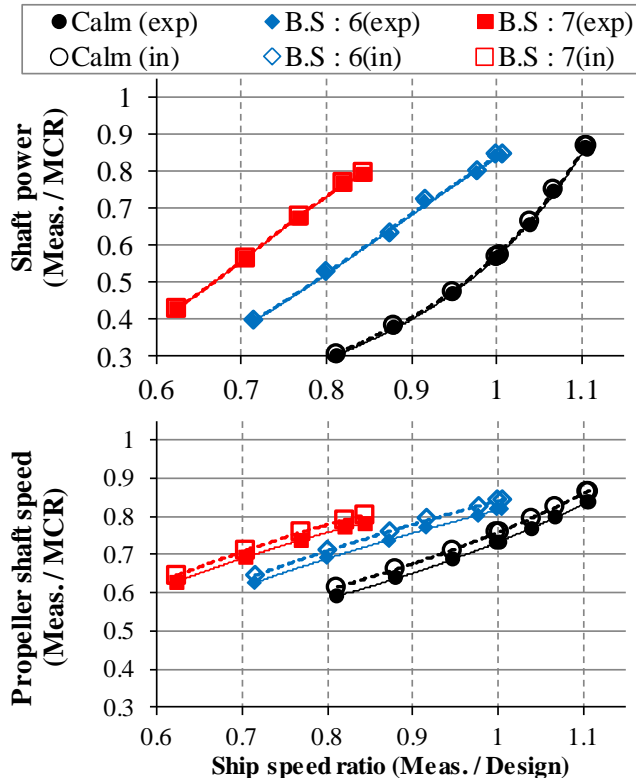
燃料投入量(MCR値が1.0)



- ✓ 周波数スペクトル:ISSC型
- ✓ 方向分布:cos²型
- ✓ 成分数:1024、造波方法:シングルサンメーション

波浪中主機要求出力等の計測例

～短波頂波向波中 速力試験(“B.S”:ビューフォート風力階級)



“補足”

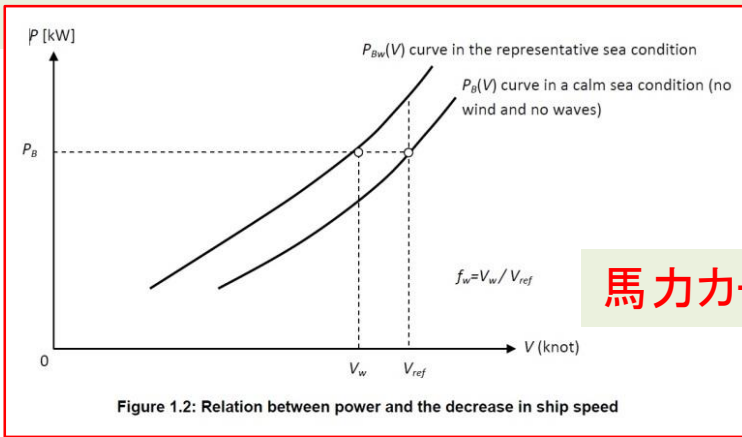
- (1) 実験点1つは出会い波100～150の平均値
- (2) 船速は計画速力、軸出力等はMCR値で正規化
- (3) “exp”:計測値
“in”:補正入力値
- (4) 風圧抵抗も考慮した計測値

- 実船尺度のMCR値や計画船速で有次元化すると実船相当値
- 主機特性を厳密に考慮した性能曲線が得られる

従来の主機選定・設計の考え方

造船会社(商船会社)

対象船の想定海象下における要求出力と要求回転数を査定(定常問題)



エンジンメーカー

ラインナップから最適な物を選定(あるいは新仕様品を開発?)
ただし、基本的に重視するのは定常的な出力特性

EEDI, NOx, SOx

IMO regulation

- 対象船に関する主機設計・選定は定常的な出力特性をベースとする
- 実海象下での負荷を想定した設計を行うとしても検証は困難

波浪中変動性に対する設計を行う時代は?



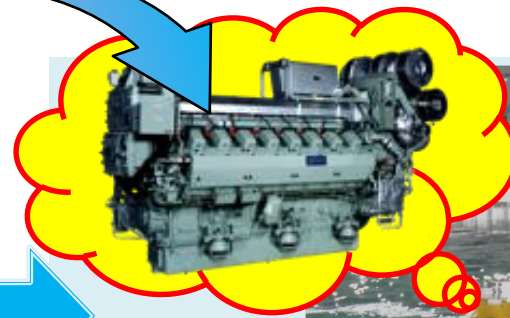
船速相似法では...

- 主機の設計要素(ガバナー、推進軸系寸法・慣性モーメント、ターボチャージャー系)が主機特性数学モデルに反映されている
- 船速相似法では波浪中プロペラ負荷変動等の物理現象が陽に考慮できる

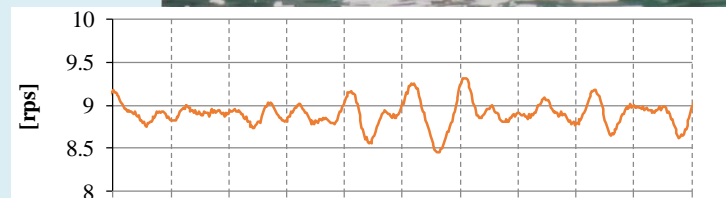
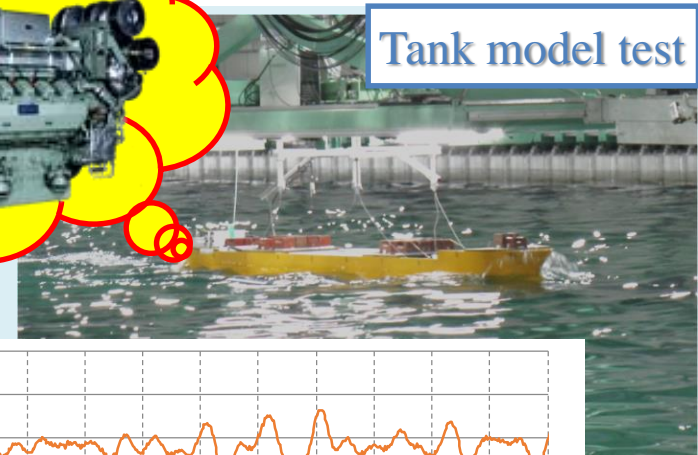


*出力特性
*波浪中負荷変動に関する設計要素

主機設計を
水槽試験で検証？



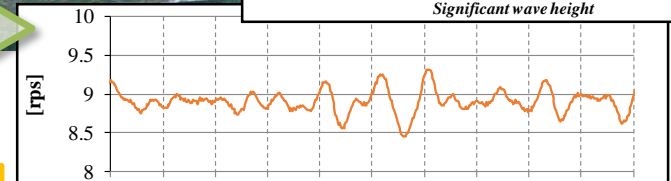
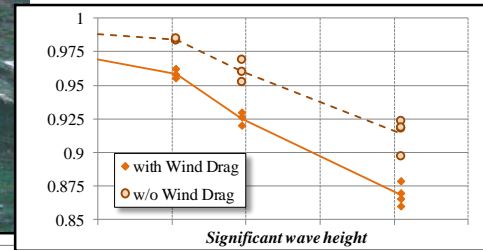
Tank model test



Propeller shaft speed in waves

水槽試験による主機特性・設計の検証

主機特性や設計変更が船舶性能へ与える影響を水槽試験で直接的に検証することが可能³⁾



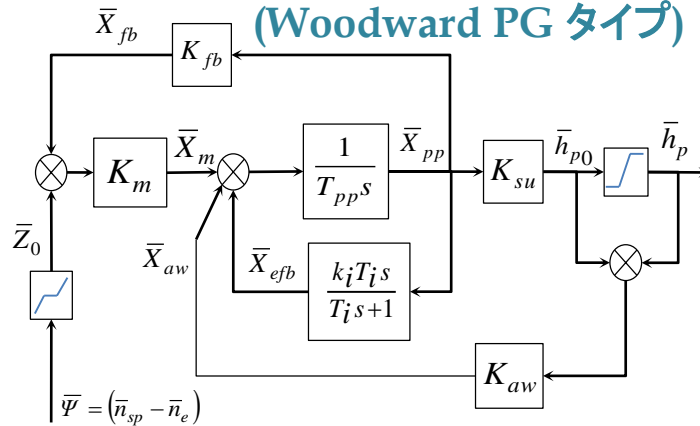
ケーススタディ

1. 安全機構の1つであるトルクリミット機構が波浪中船速低下等を与える影響
2. 機械式ガバナーの安全設計を検証 ⇒ 目的: 燃料投入量の変動量を保持しつつ、主機回転数変動を抑制する

ガバナーモデル上での反映



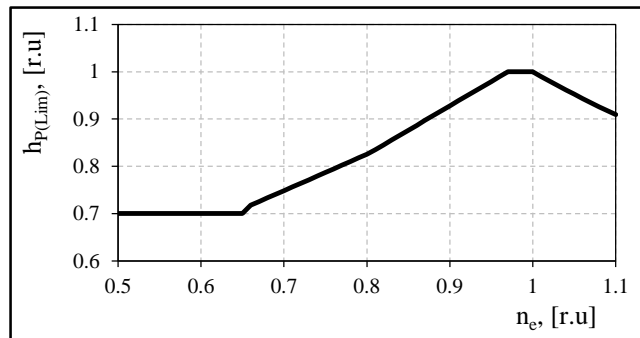
機械式ガバナーモデル
(Woodward PG タイプ)



- ✓ 燃焼室に投入する燃料投入量を決定
- ✓ 回転数の指令値と計測値の差に応じて燃料投入量を決定
- ✓ 比例フィードバック、積分系フィードバック機構を有する

トルクリミット機構(TLF)モデル:

回転数に応じて燃料投入量の上限を設定



$$\bar{h}_p = \begin{cases} \bar{h}_{p0}, & \text{if } \bar{h}_{p0} < \bar{h}_{p(Lim)} \\ \bar{h}_{p(Lim)}, & \text{if } \bar{h}_{p0} \geq \bar{h}_{p(Lim)} \end{cases}$$

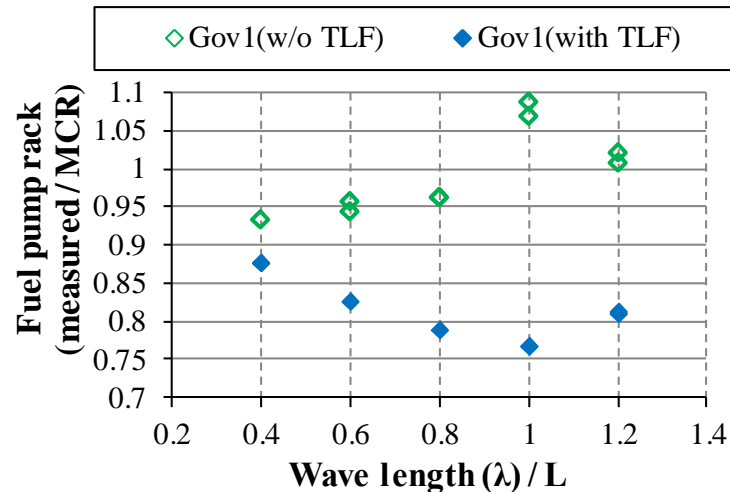
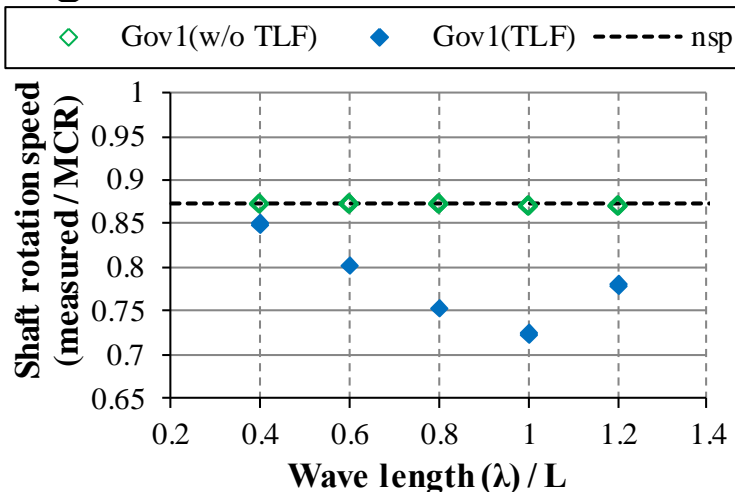
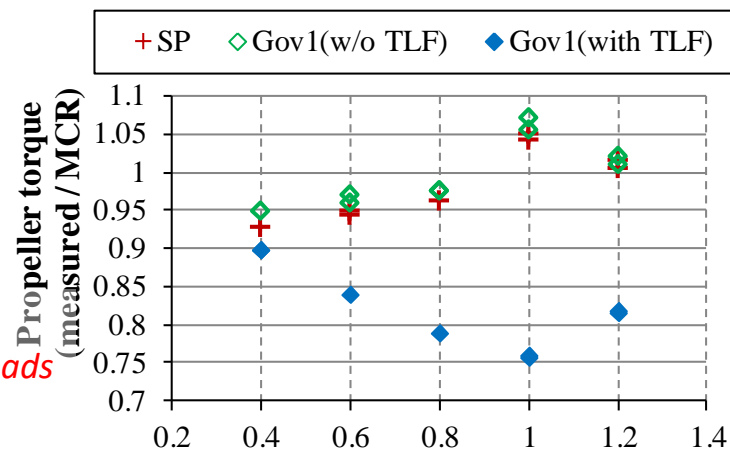
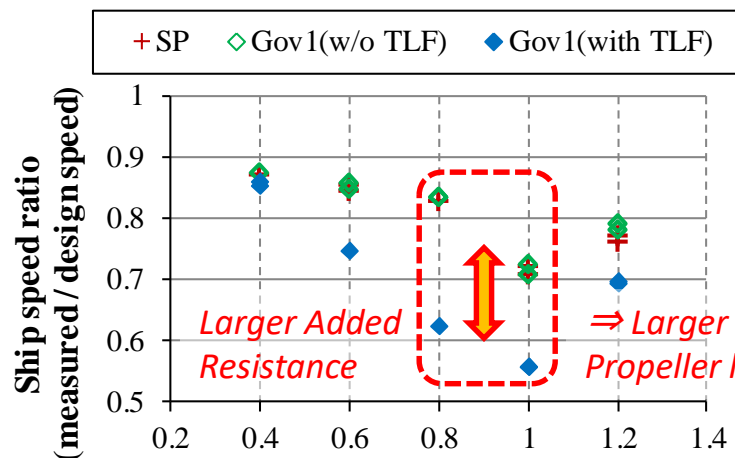
ガバナーモデル “Gov1”: 係数・定数設定 標準設定

“Gov2”: 回転数 変動抑制設定

	Standard (Gov1)		Modified (Gov2)	
	Full	Model	Full	Model
Ki	2.250		1.530	
Ti [s]	1.750	0.254	2.497	0.363
Ks	8.333		10.0	
Ts [s]	0.5	0.0727	0.1	0.0145
Kfb	0.0118		0.0353	
DB	0.0001		0.002	
Ksu	0.850		0.850	
KAW	10.0		10.0	

水槽試験による検証 (平均値解析によるトルクリミット影響の検証)

規則波向波中～ガバナーモデル: “Gov1”(標準)、波高:6cm

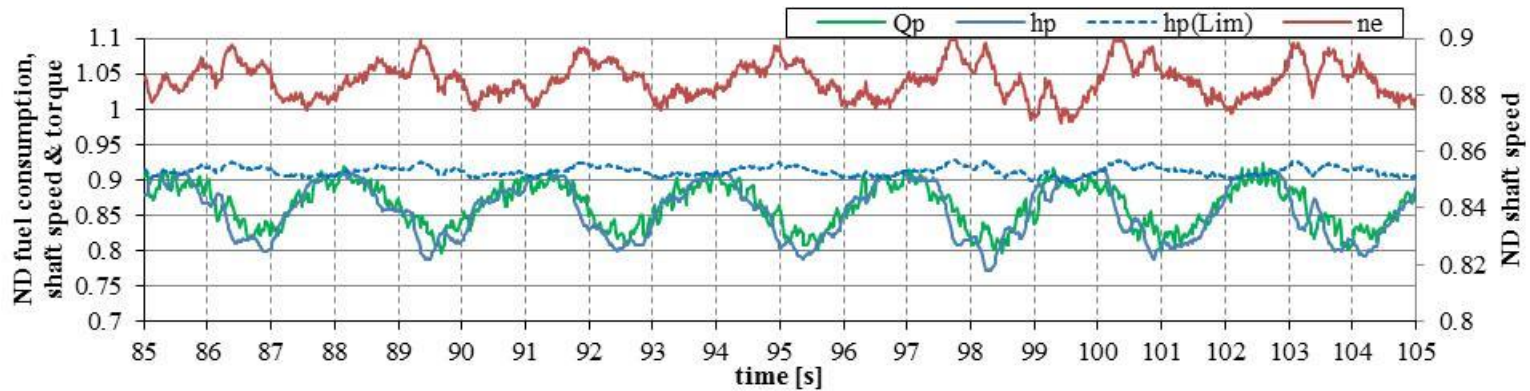


水槽試験による検証(回転数変動抑制設計)

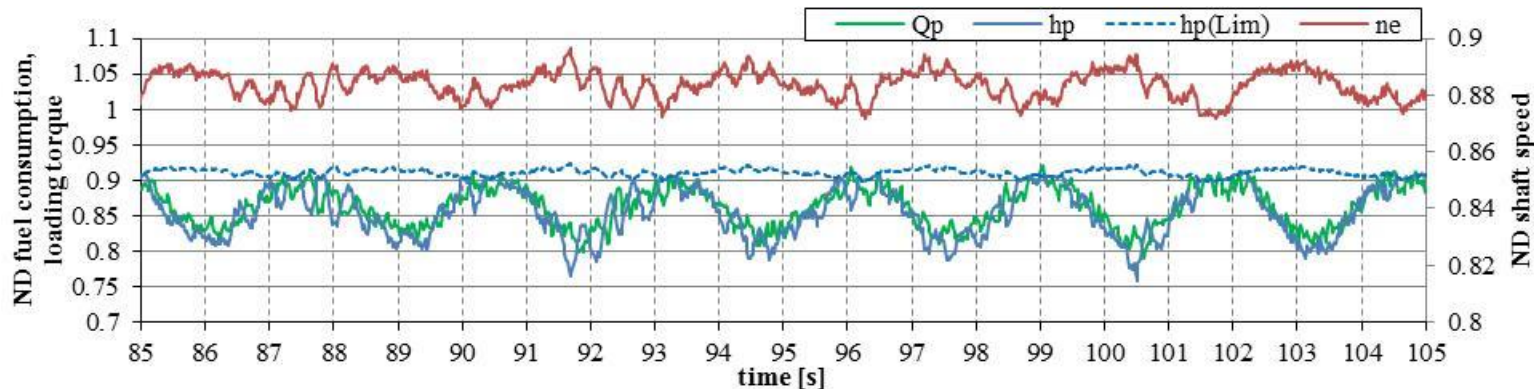
“Gov1”: 標準設計, “Gov2”: 回転数変動抑制設計

規則波追波中～波高: 6cm, 波長船長比: 1.0

“Gov1”,
with TLF



“Gov2”,
with TLF

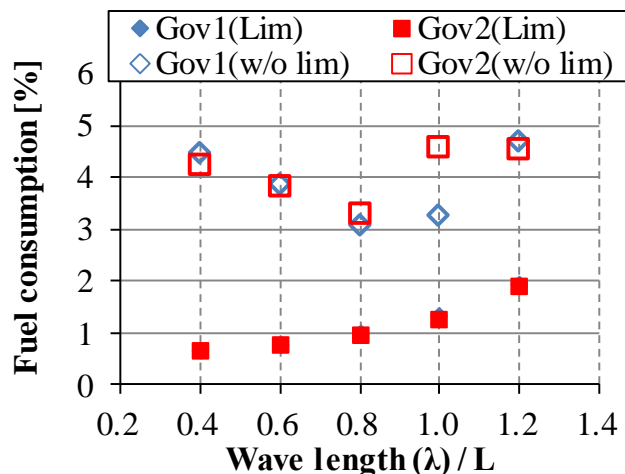
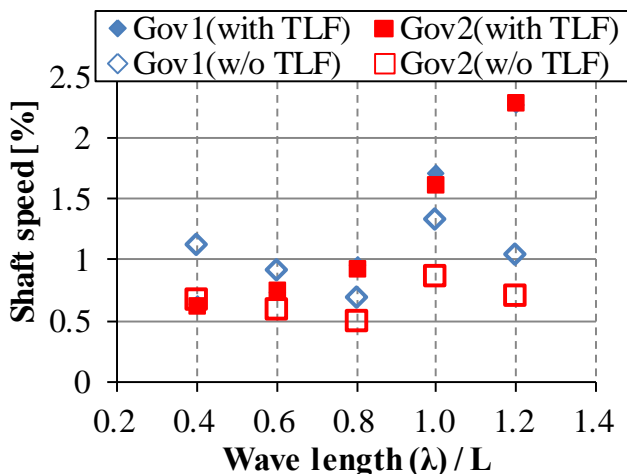


水槽試験による検証 (標準偏差解析による回転数変動抑制の検証)

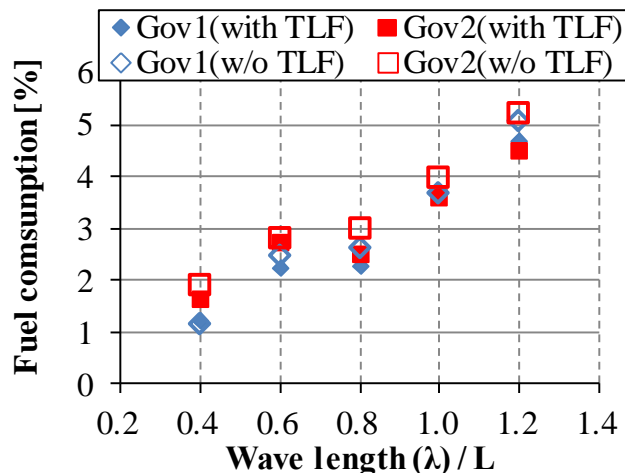
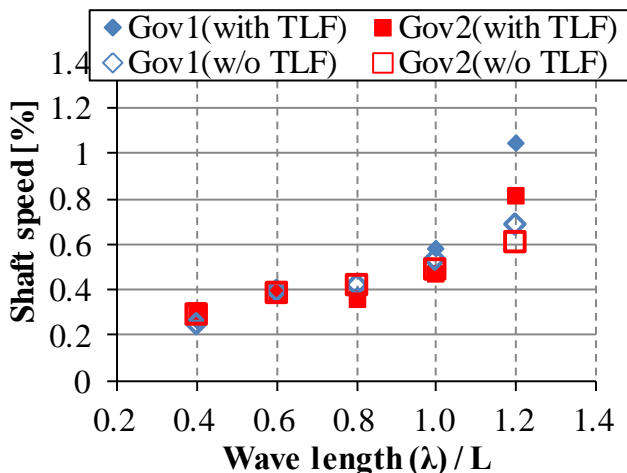


“Gov1”: 標準設計, “Gov2”: 回転数変動抑制設計 *MCR値に対する割合

規則波
向波中



規則波
追波中



➤ 向波中でトルクリミットを考慮しない場合や追波中の長波長域など、回転数変動を抑制するためのガバナー設計の効果を確認できた

まとめ

- 主機特性自航装置、及びこれを用いた実船性能を直接評価できる水槽試験法（船速相似法）について説明しました
- 船速相似法による短波頂波中推進性能の計測例を紹介しました
- 船速相似法を活用し、トルクリミット機構の影響、回転数変動を抑制するためのガバナー設計、等の主機設計の検証が水槽模型試験を通じて行えることを示しました

参考文献一覽

- A) 北川泰士, 谷澤克治, 塚田吉昭, 上野道雄: 実船の波浪中船速低下を直接計測する水槽試験法の開発, 日本船舶海洋工学会論文集, 第22号, pp. 21-34, 2015.
- B) 中村彰一, 内藤林: 波浪中における船速低下及び推進性能について、関西造船協会誌、第166号, pp.25-34, 1982.
- C) Bondarenko Oleksiy, 柏木正, 内藤林: Dynamics of Diesel Engine in the Framework of Ship Propulsion Plant, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第8号, pp.335-338, 2009.
- D) 塚田吉昭, 上野道雄, 他: 自由航走試験のための補助推力装置の開発, 日本船舶海洋工学会論文集, 第20号, pp.71-79, 2014.
- E) Yasushi Kitagawa, Oleksiy Bondarenko, et al: An Application of the Tank Test with a Model Ship for Design of Ship Propulsion Plant System, Journal. of JIME, Vol.53 No.3, pp.355-361, 2018.