

CFDを用いた載貨状態と抵抗性能の関連調査
および
満載状態の自航性能推定法の研究

概要成果報告書

財団法人 日本船舶技術研究協会

研究の背景1

- 1994年に造工中手7社が「中手CFD研究会」を
発足させ、当時の船舶技術研究所（現、（独）海上技術
安全研究所）の指導のもと、（財）日本造船技術セン
ターが技術的な取り纏めを担当して2005年まで継続
して船型設計に対するCFD実用化に取り組んできた。
- 2006年からは（社）日本造船工業会 中手技術連絡
会の要請により「中手CFD研究会」を母体に船型性能
計算グループ（SPCG）を設立し、2011年現在、
造船所10社が（独）海上技術安全研究所の指導と
（財）日本造船技術センターの技術的取り纏めの下、船
型設計へCFDの活用に取り組んでいる。

研究の背景2

- 2006年から2008年にかけて実施したSPCGの共同研究では、肥大船の満載状態の抵抗性能計算手法について、日本財団の支援ならびに（財）船舶技術研究協会の協力の下、調査研究を行なった。
- 2009年から2011年まで実施した本共同研究では、日本海事協会の支援ならびに（財）船舶技術研究協会の協力の下、バラスト状態の抵抗性能計算手法と満載状態の自航性能計算手法について、SPCGとして研究を行なった。

研究の目的

- 載貨状態と抵抗性能の関連をCFD等により定量的に把握し、様々な載貨状態での抵抗性能推定精度向上のための資料を整備する。
- CFDによる満載状態における自航計算方法を提案するとともに、上記自航計算方法の妥当性を水槽試験結果と比較して確認する。
- 中手造船所各社の若手設計担当者の技術ポテンシャルの向上をはかる。

研究内容

- ① バラスト状態における抵抗性能の標準的な計算手法の提案
- ② 様々な載貨状態での抵抗性能計算と抵抗試験の実施
- ③ 満載状態の自航性能の標準的な計算手法の提案

① バラスト状態における抵抗性能の標準的な計算手法の提案

- 1) 界面捕獲法による、バラスト状態におけるCFD試計算
- 2) バラスト状態における抵抗計算の格子依存性の検討、標準的な計算手法の提案
- 3) バラスト状態における抵抗性能の標準的な計算手法の妥当性検証

①ー1) 界面捕獲法によるバラスト状態におけるCFD試計算

○試計算

Neptune界面捕獲法による試計算を行い、バラスト状態への適用性を検討した。

○対象船型（括弧内は C_B の値）

M. S. No. 4475 (0.80)、4476 (0.82)、4904 (0.82)、
4961 (0.84)、4951 (0.91)、4951A (0.91) の5隻

○計算条件等ーその1

上記船型について、以下の条件にて計算を行い、試験結果と比較する。

- ー舵なしのO-Oグリッド
- ーKを求めるための低速抵抗は二重模型流れ
（ガス方向の格子は再配置）で計算
- ー自由表面付き計算は界面捕獲法を用い、姿勢変化を考慮
- ー乱流モデルはS Aモデル

①ー1) 界面捕獲法によるバラスト状態におけるCFD試計算

計算条件等ーその2

ーフルード数に対するレイノルズ数は、
全長6.2mの模型船の場合に相当する
以下の値

$$\text{低速抵抗} \quad \cdot \cdot \cdot \text{Re} = 4.58 \times 10^6$$

$$\text{Fn} = 0.16 \quad \cdot \cdot \cdot \text{Re} = 7.33 \times 10^6$$

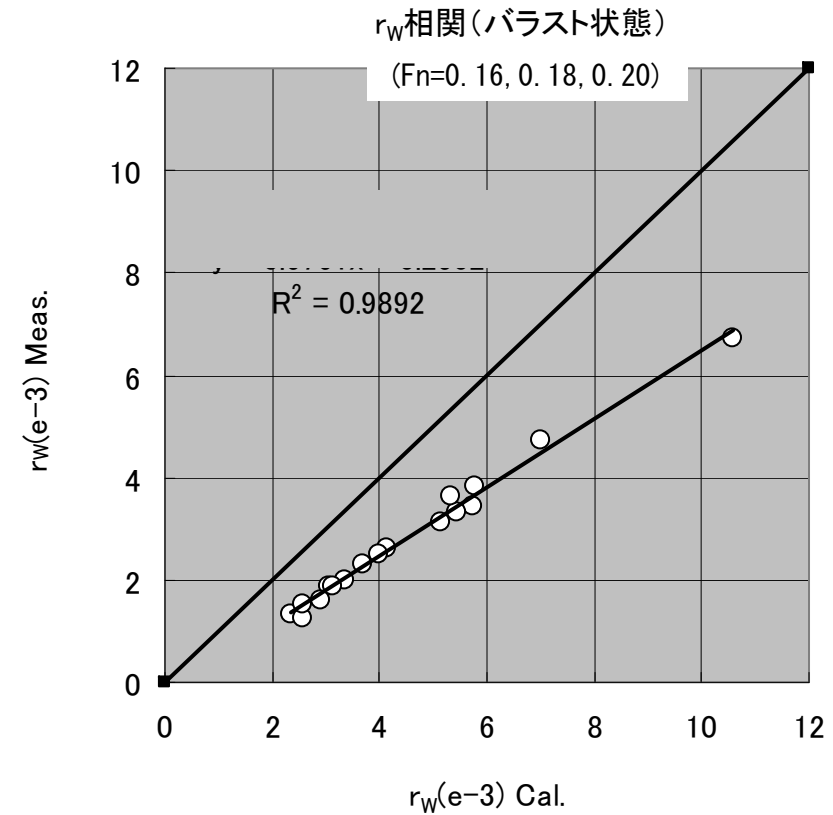
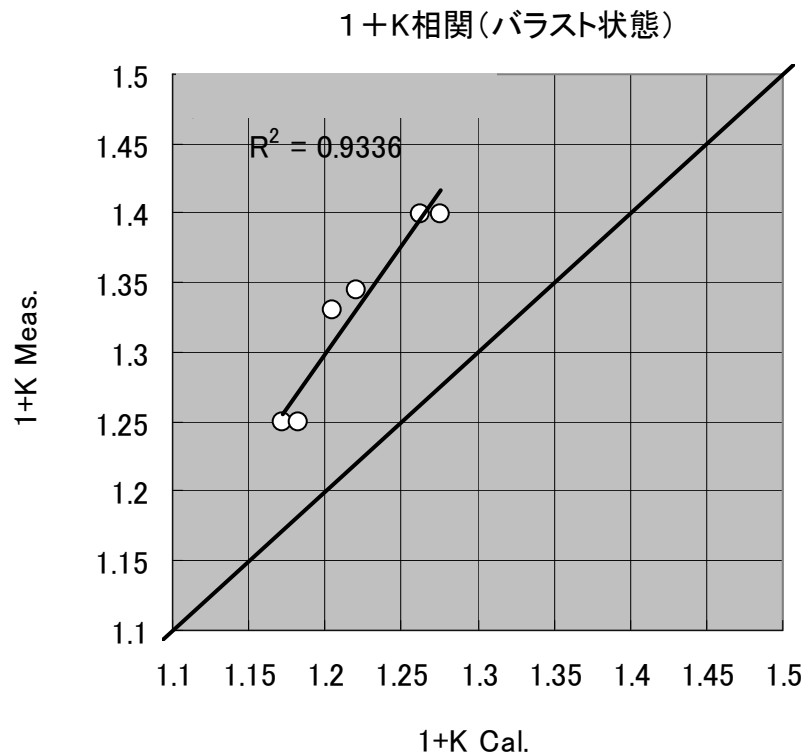
$$\text{Fn} = 0.18 \quad \cdot \cdot \cdot \text{Re} = 8.25 \times 10^6$$

$$\text{Fn} = 0.20 \quad \cdot \cdot \cdot \text{Re} = 9.17 \times 10^6$$

ー格子の総数（セル数）；414,720

①ー1) 界面捕獲法によるバラスト状態におけるCFD試計算

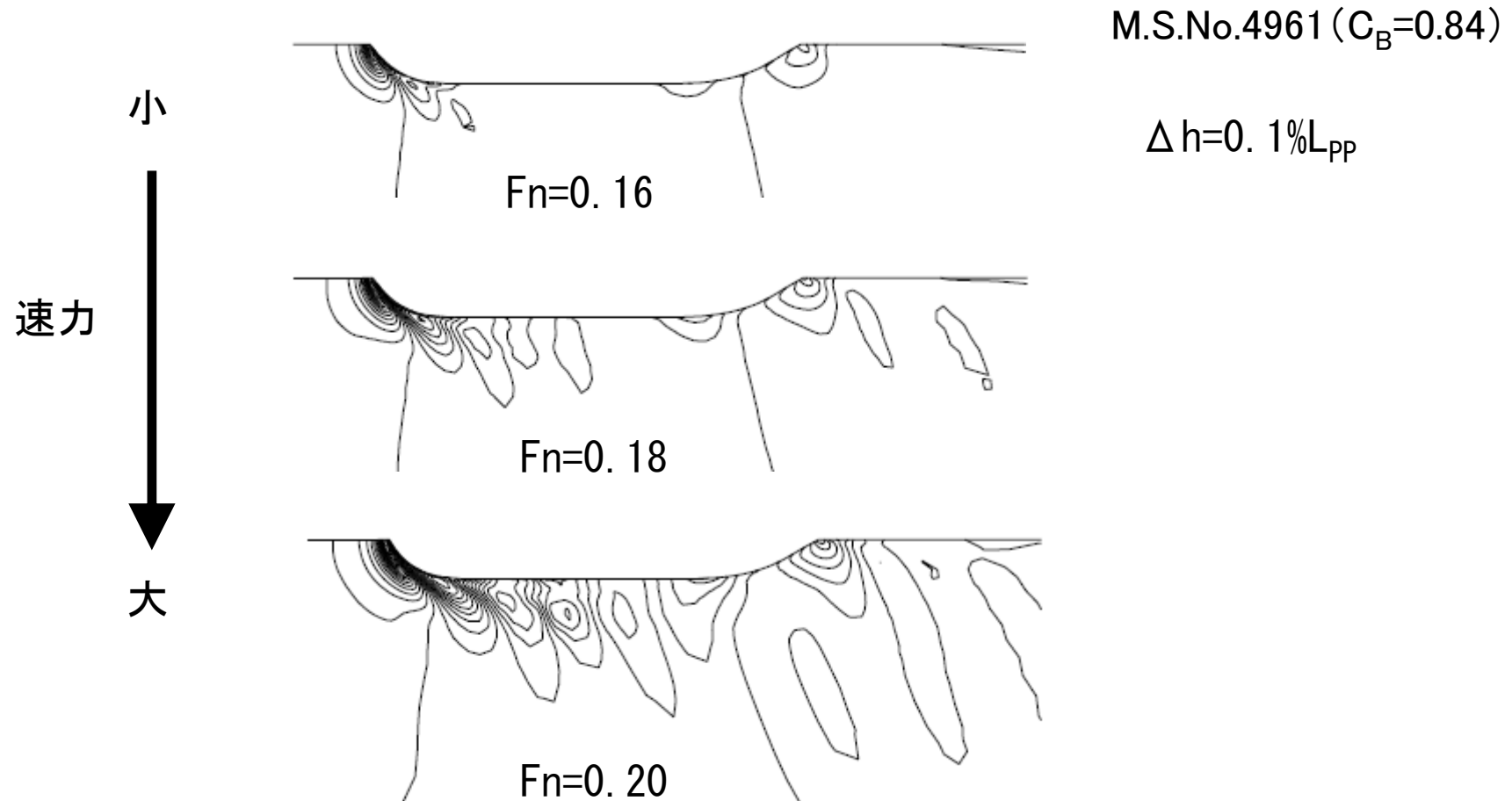
試計算の結果 (1 + K、 r_w ※)



※ここでは、M. S. No. 4951AのFn=0.20の結果は、計算が収束しなかったため、プロットしていない

①ー1) 界面捕獲法によるバラスト状態におけるCFD試計算

試計算の結果（波形等高線の例）



①ー1) 界面捕獲法によるバラスト状態におけるCFD試計算

○試計算の結果のまとめ

- 界面捕獲法のNeptuneによる計算結果と水槽試験結果とを比較することで、低速抵抗、造波抵抗ともにおおむね妥当な結果が得られることが分かった。
- 非常に肥った、 C_B が0.9の船型で計算が不安定になる場合があったので、非常に肥った船型については、安定性に注意して計算を行なう必要があることが分かった。

①—2) バラスト状態における抵抗計算の格子依存性の検討、標準的な計算手法の提案

○格子依存性の検討

Neptune界面捕獲法により格子分割数を変えた計算を行ない、格子依存性を検討した。

○対象船型（括弧内は C_B の値）

M. S. No. 4475 (0.80)、4476 (0.82)、4505 (0.80)、4506 (0.82)、
4537A (0.80)、4538A (0.82)、4904 (0.82)、4961 (0.84)、
4951 (0.91)、4951A※ (0.91) の10隻

○計算条件等—その1

上記船型について、以下の条件にて計算を行い、試験結果と比較する。

- 舵なしのO-Oグリッド
- Kを求めるための低速抵抗は二重模型流れ（ガス方向の格子は再配置）で計算
- 自由表面付き計算は界面捕獲法を用い、姿勢変化を考慮
- 乱流モデルはSAモデル

※M. S. No. 4951Aについては、計算パラメータを工夫することで、 $Fn=0.20$ でも安定した結果が得られるようになった

①—2) バラスト状態における抵抗計算の格子依存性の検討、標準的な計算手法の提案

○計算条件等—その2

—計算フルード数と計算レイノルズ数

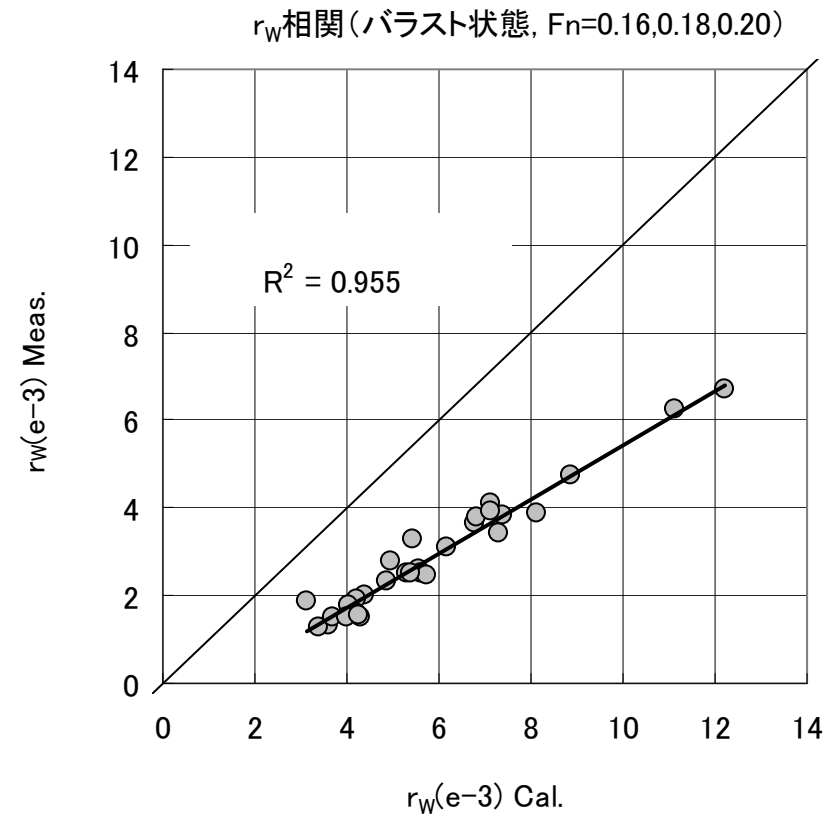
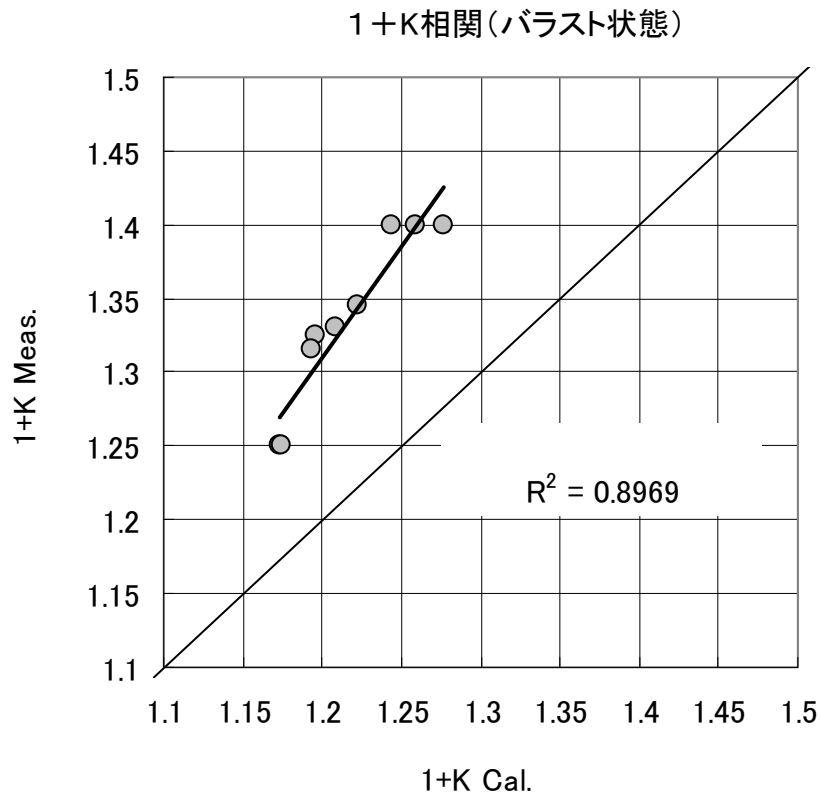
低速抵抗 . . . $Re = 4.58 \times 10^6$
 $Fn = 0.16$. . . $Re = 7.33 \times 10^6$
 $Fn = 0.18$. . . $Re = 8.25 \times 10^6$
 $Fn = 0.20$. . . $Re = 9.17 \times 10^6$

—格子の総数（セル数）

粗い Coarse ; 294,912
普通 Medium ; 414,720
細かい Fine ; 563,200

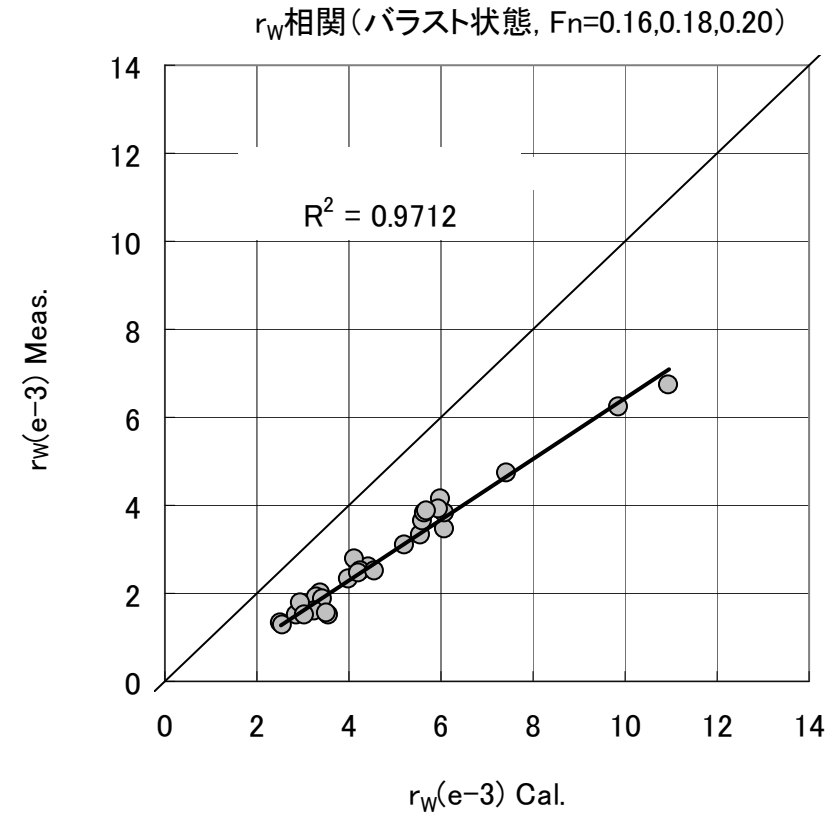
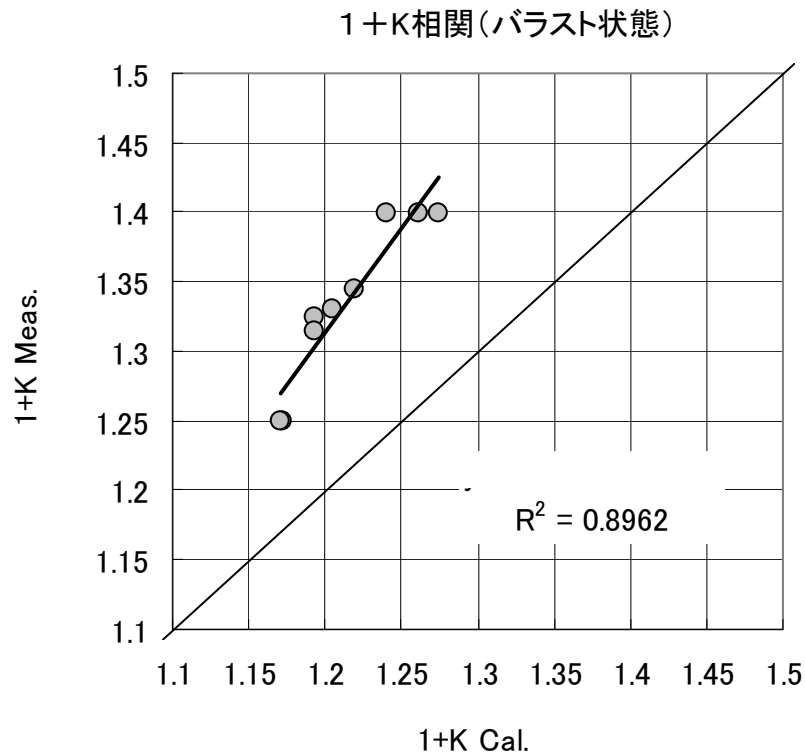
①—2) バラスト状態における抵抗計算の格子依存性の検討、標準的な計算手法の提案

Coarseでの結果 (1 + K、 r_w)



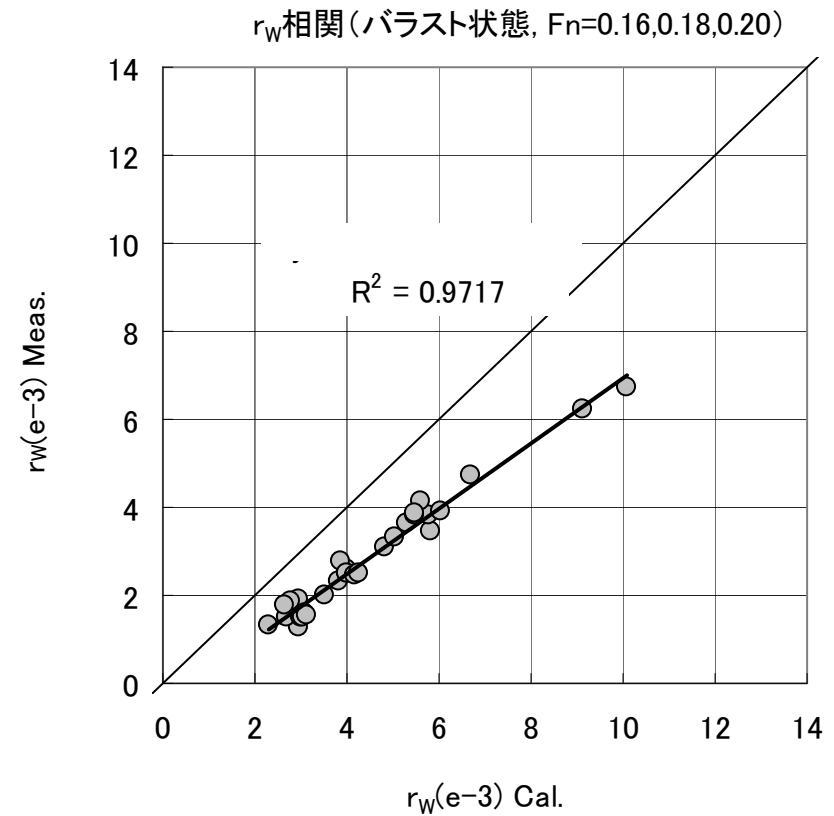
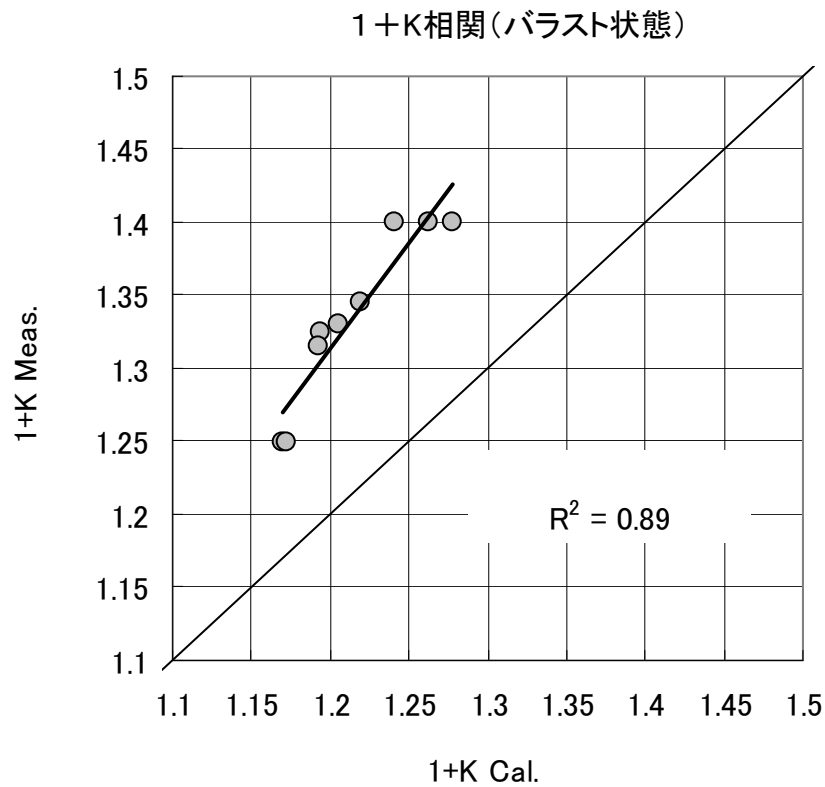
①—2) バラスト状態における抵抗計算の格子依存性の検討、標準的な計算手法の提案

Mediumでの結果 (1 + K、 r_w)



①—2) バラスト状態における抵抗計算の格子依存性の検討、標準的な計算手法の提案

Fineでの結果 (1 + K、 r_w)



①—2) バラスト状態における抵抗計算の格子依存性の検討、標準的な計算手法の提案

○格子分割数と相関の関係

— 計算結果と試験結果から求めた回帰直線の決定係数 (R^2 値) を以下に示す。決定係数が1に近いほど、回帰直線に対するばらつきの少ない、妥当な計算結果とみなす。

	$1 + K$	r_W (Fn=0.16,0.18,0.20)
Coarse ;	0.9045	0.9535
Medium ;	0.9001	0.9781
Fine ;	0.8954	0.9674

— $1 + K$ の決定係数の違いは少ないことが分かった。

— r_W では、Mediumの決定係数が一番大きい。

①—2) バラスト状態における抵抗計算の格子依存性の検討、標準的な計算手法の提案

○バラスト状態における抵抗計算の標準的な計算手法の提案

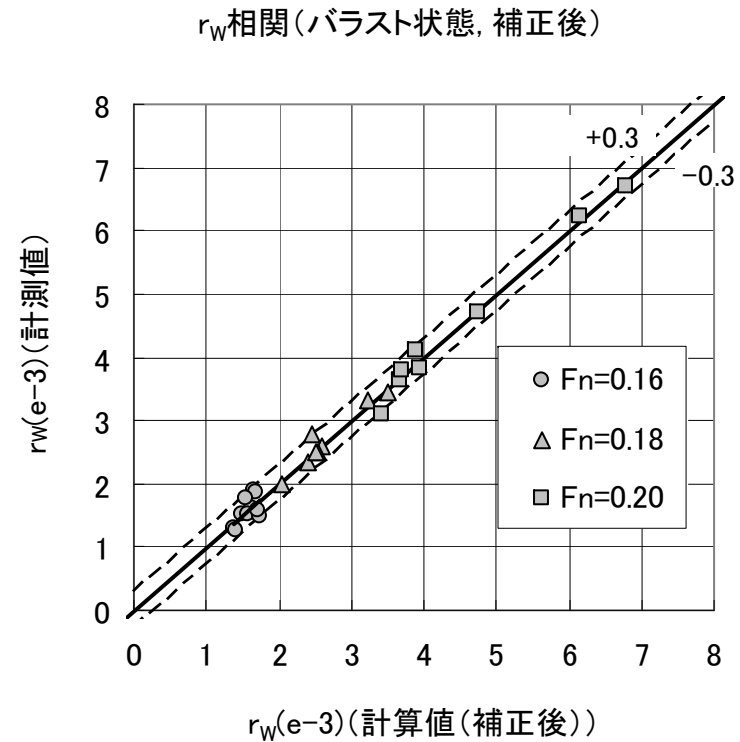
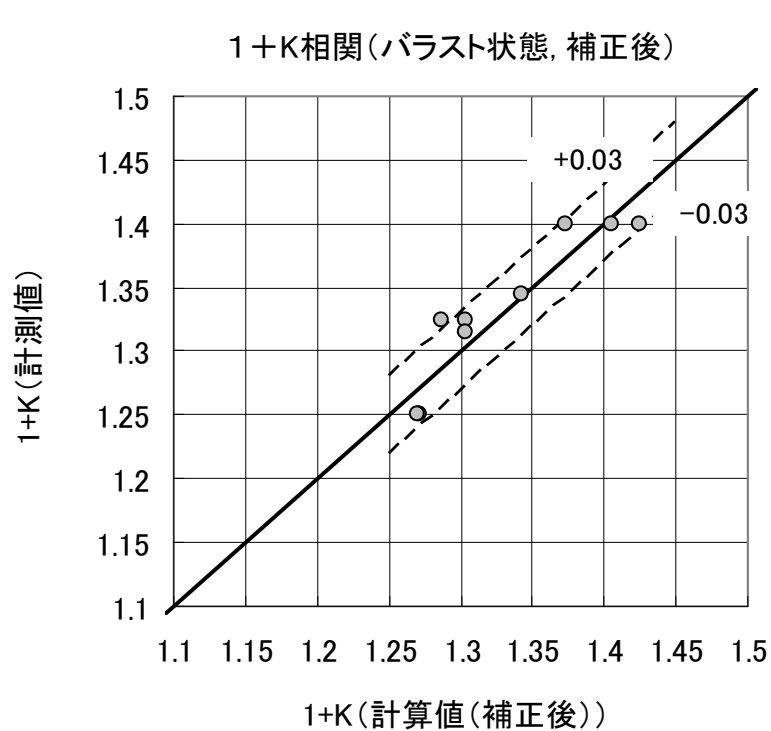
以下を提案する。

- 舵なしの〇—〇グリッド
- Kを求めるための低速抵抗は二重模型流れ（ガス方向の格子は再配置）で計算
- 自由表面付き計算は界面捕獲法を用い、姿勢変化を考慮
- 乱流モデルはS Aモデル
- 格子分割数はMedium

①—3) バラスト状態における抵抗性能の標準的な計算手法の妥当性検証

○試験結果との比較による検証

— $1+K$ は概ね ± 0.03 、 $r_w(e-3)$ は ± 0.3 の範囲内で実用上、妥当な計算結果を得られることが分かった。



※上のグラフの計算値は回帰直線により補正した後の値

② 様々な載貨状態での抵抗性能計算と抵抗試験の実施

- 1) SPCG基本船型群を対象とした、バラスト状態におけるCFD計算
- 2) 様々な載貨状態での抵抗試験の実施
- 3) 満載状態の抵抗性能と、バラスト状態の抵抗性能の関連調査

②—1) SPCG基本船型を対象とした、
バラスト状態におけるCFD計算

OSPCG基本船型 (42隻)

船首・船尾肥大度の組み合わせ

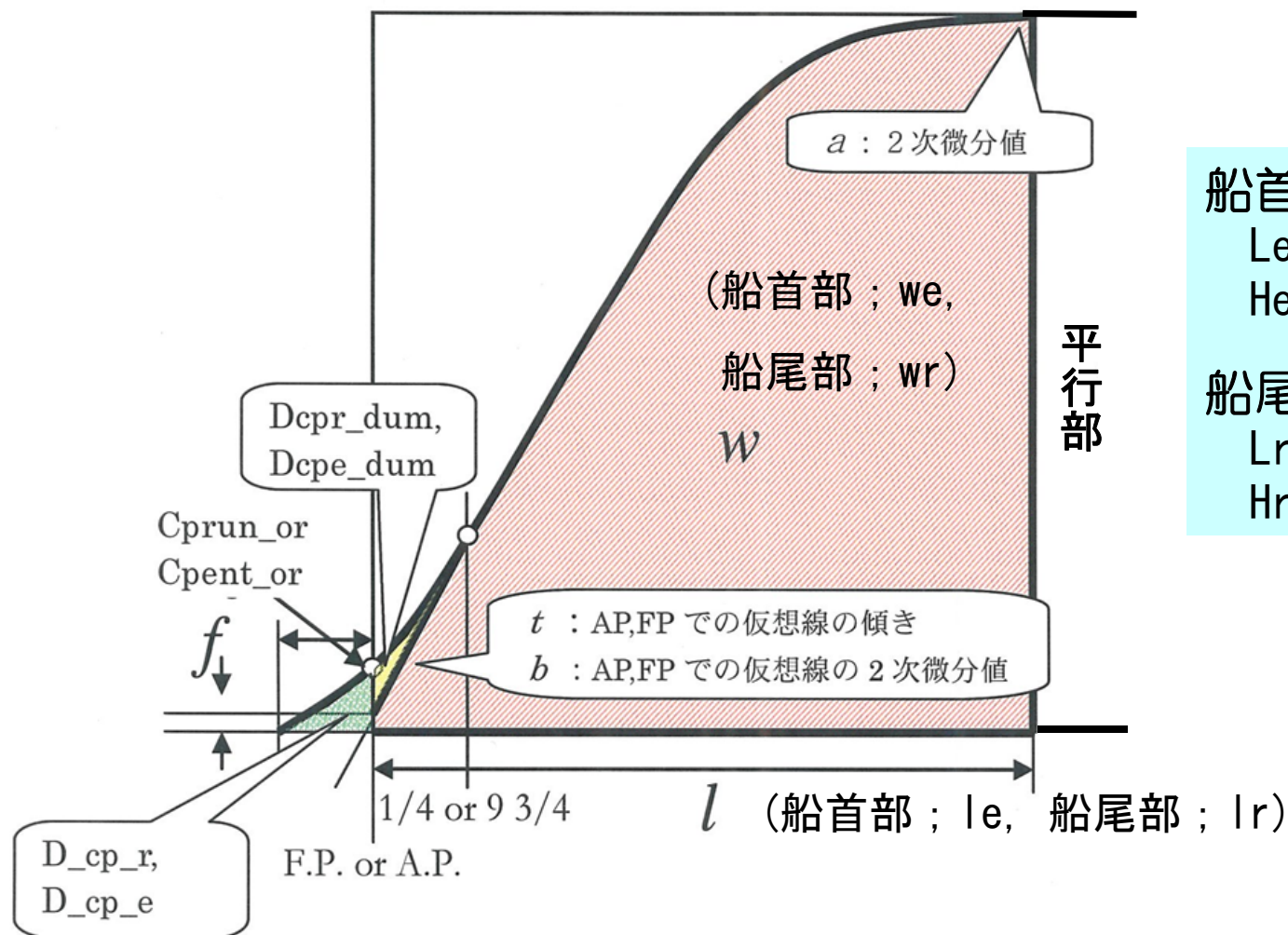
—肥大船として実用的な範囲で船首肥大度 (H_e/B) と船尾肥大度 (H_r/B) をそれぞれ変えて組み合わせた船型群
($CB=0.86\sim0.74$)

—船型名は、B_C船型 ($H_e/B=0.3$ 、 $H_r/B=0.65$) のように船首尾肥大度に対応している。

瘦 ↑ ↓ 肥	F	0.5	○	○	○	○	○	○
	E	0.45	○	○	○	○	○	○
	D	0.4	○	○	○	○	○	○
	C	0.35	○	○	○	○	○	○
	B	0.3	○	○	○	○	○	○
	A	0.25	○	○	○	○	○	○
	AA	0.2	○	○	○	○	○	○
	He/B Hr/B		0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8
		肥 ←————→ 瘦						

②—1) SPCG基本船型を対象とした、
バラスト状態におけるCFD計算

○船首肥大度・船尾肥大度の定義



船首肥大度 ; H_e/B

$$L_e = l_e \times L_{pp}$$

$$H_e/B = (1 - w_e) \times L_e/B$$

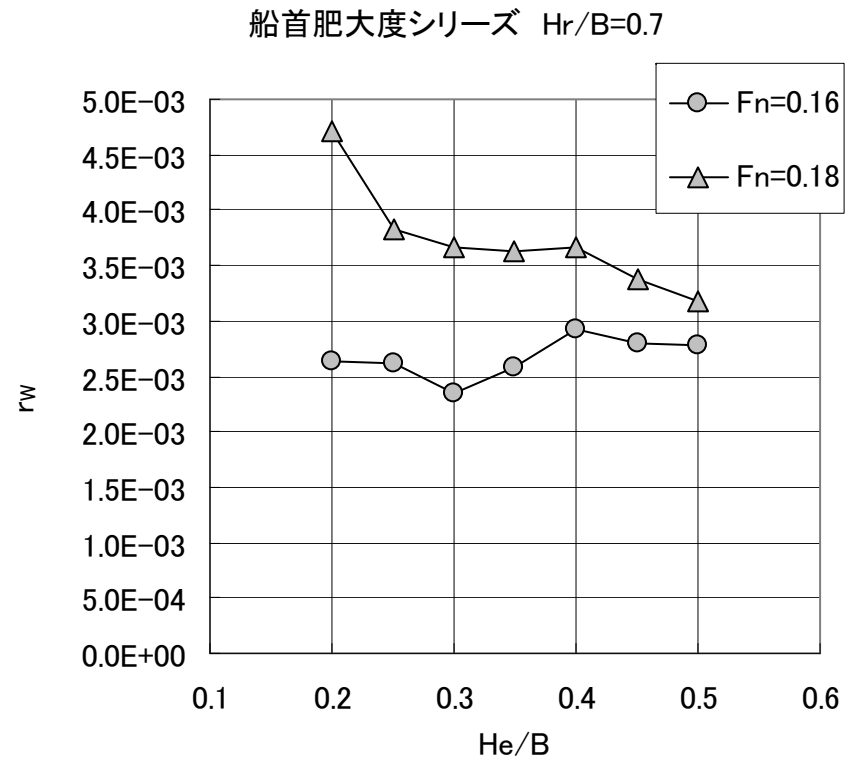
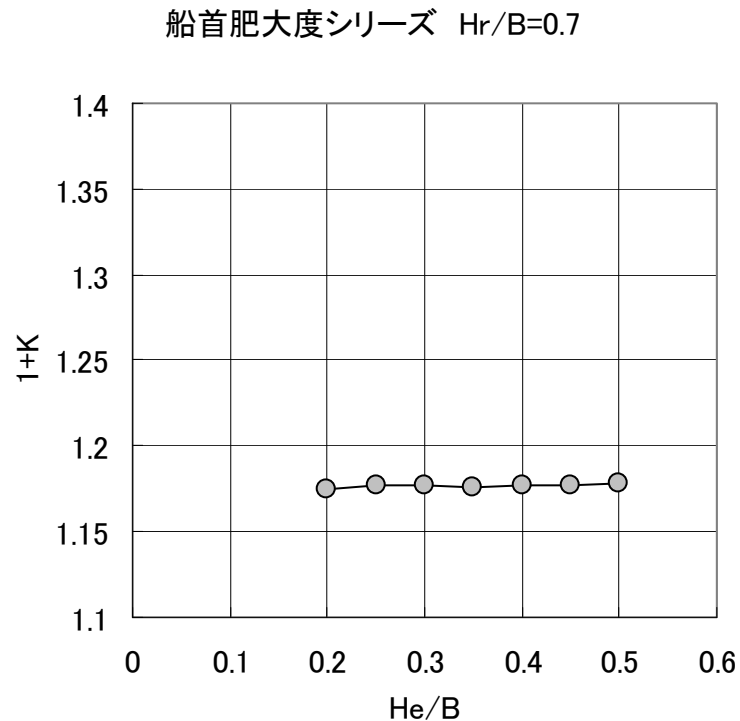
船尾肥大度 ; H_r/B

$$L_r = l_r \times L_{pp}$$

$$H_r/B = (1 - w_r) \times L_r/B$$

②—1) SPCG基本船型を対象とした、 バラスト状態におけるCFD計算

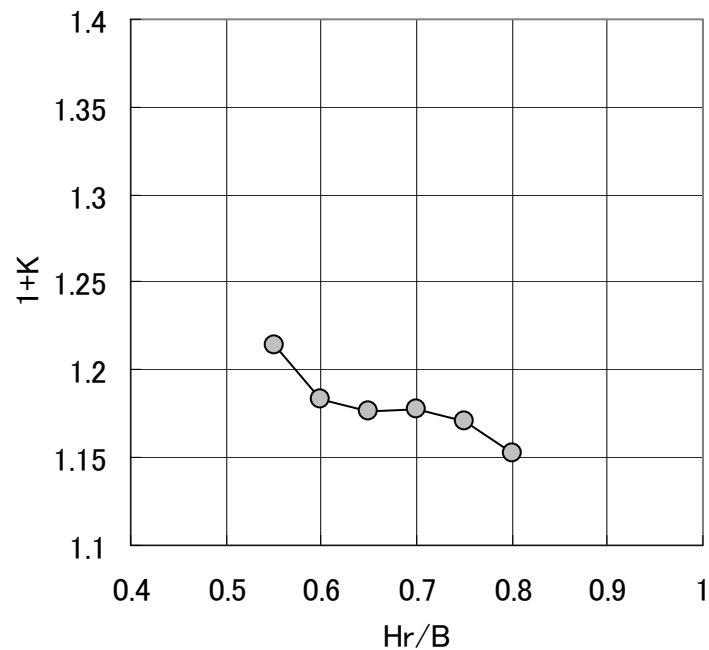
OSPCG基本船型 船首肥大度シリーズ計算結果 ($He/B=0.2\sim0.5$ 、 $Hr/B=0.7$)



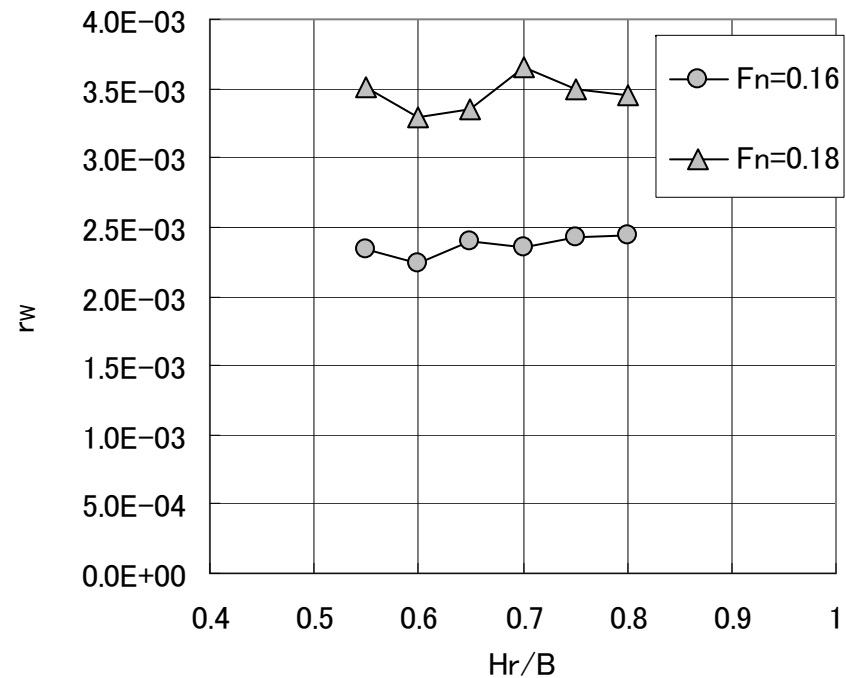
②—1) SPCG基本船型を対象とした、 バラスト状態におけるCFD計算

OSPCG基本船型 船首肥大度シリーズ計算結果 ($He/B=0.3$ 、 $Hr/B=0.55\sim 0.8$)

船尾肥大度シリーズ $He/B=0.3$



船尾肥大度シリーズ $He/B=0.3$



②—1) SPCG基本船型を対象とした、 バラスト状態におけるCFD計算

OSPCG基本船型のバラスト状態における船首肥大度、 船尾肥大度シリーズ計算のまとめ

- 船首肥大度の違いが $1 + K$ に与える影響は小さい。
- 船首肥大度の違いが r_W に与える影響は、 $Fn=0.16$ では小さいが、 $Fn=0.18$ では大きい。
- 船尾肥大度の違いが $1 + K$ に与える影響は大きい。
- 船尾肥大度の違いが r_W に与える影響は小さい。
- 以上のバラスト状態における船首・船尾肥大度の違いが $1 + K$ 、 r_W に与える影響は、以前のSPCG共同研究で、満載状態について得られたそれと似ていることが分かった。

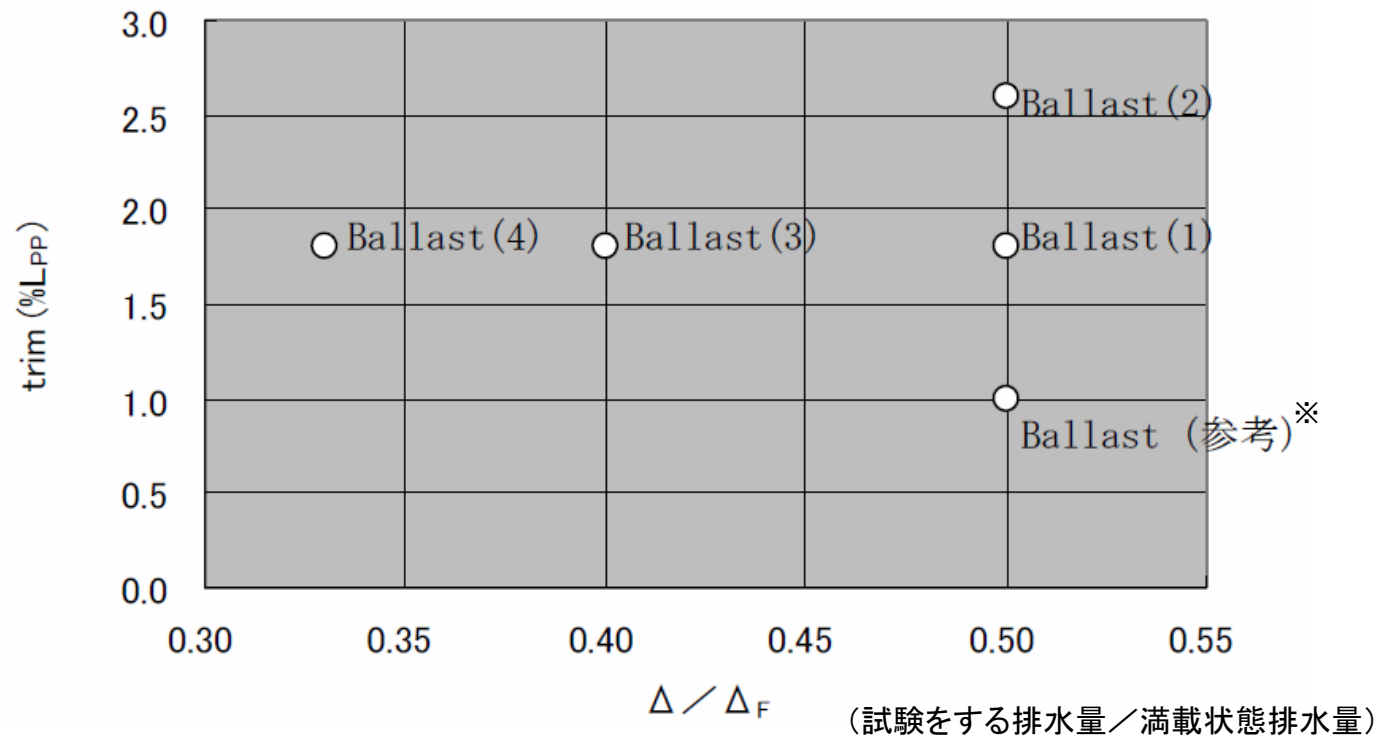
②—2) 様々な載貨状態での抵抗試験の実施

OSPCG船型の模型船を用いた抵抗試験

—使用した模型船；M.S.No.4904 (B_D船型)、
M.S.No.4961 (AA_D船型)

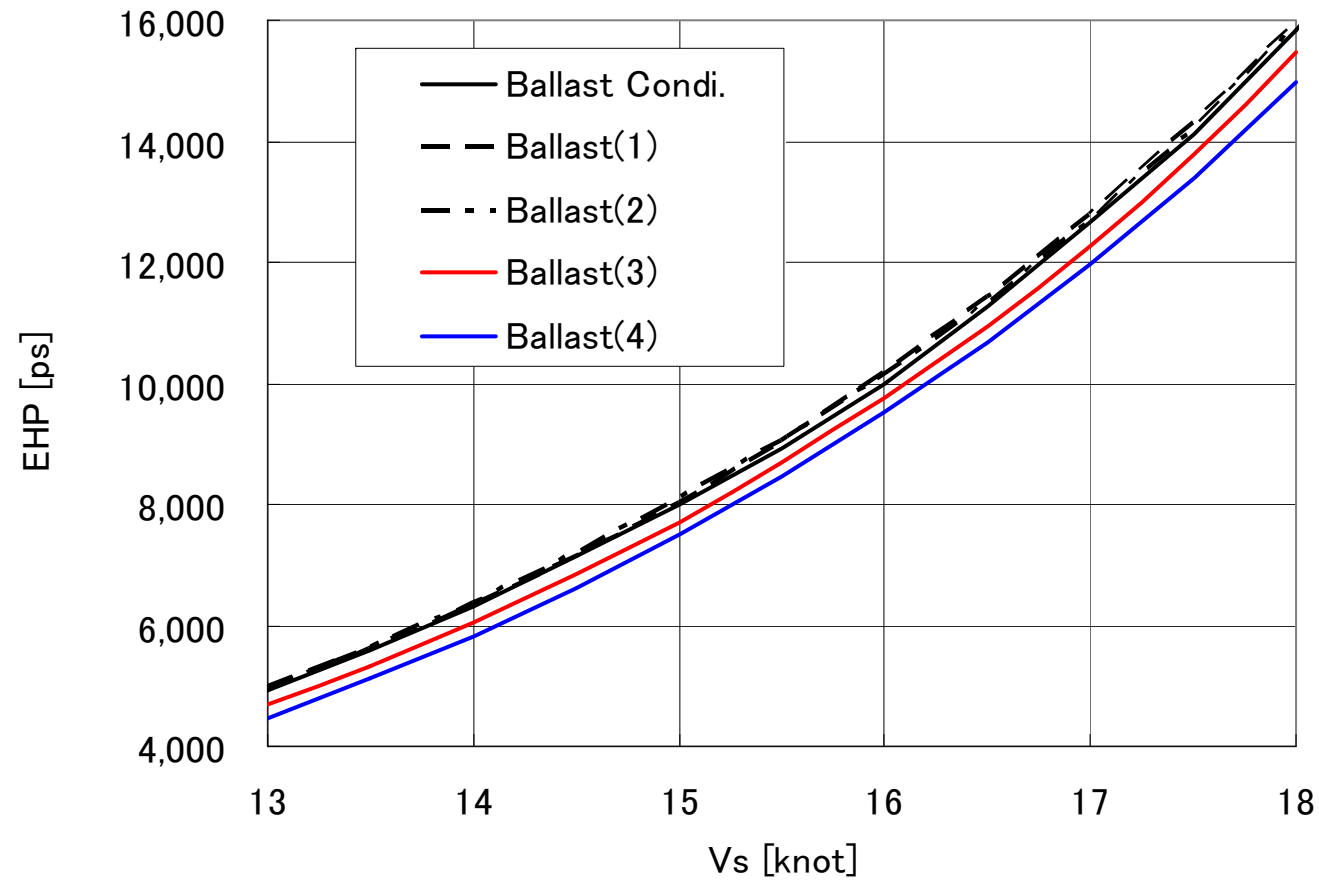
—試験をした載貨状態はBallast(1)～Ballast(4)

※Designed FullとBallast状態は別途、試験済み



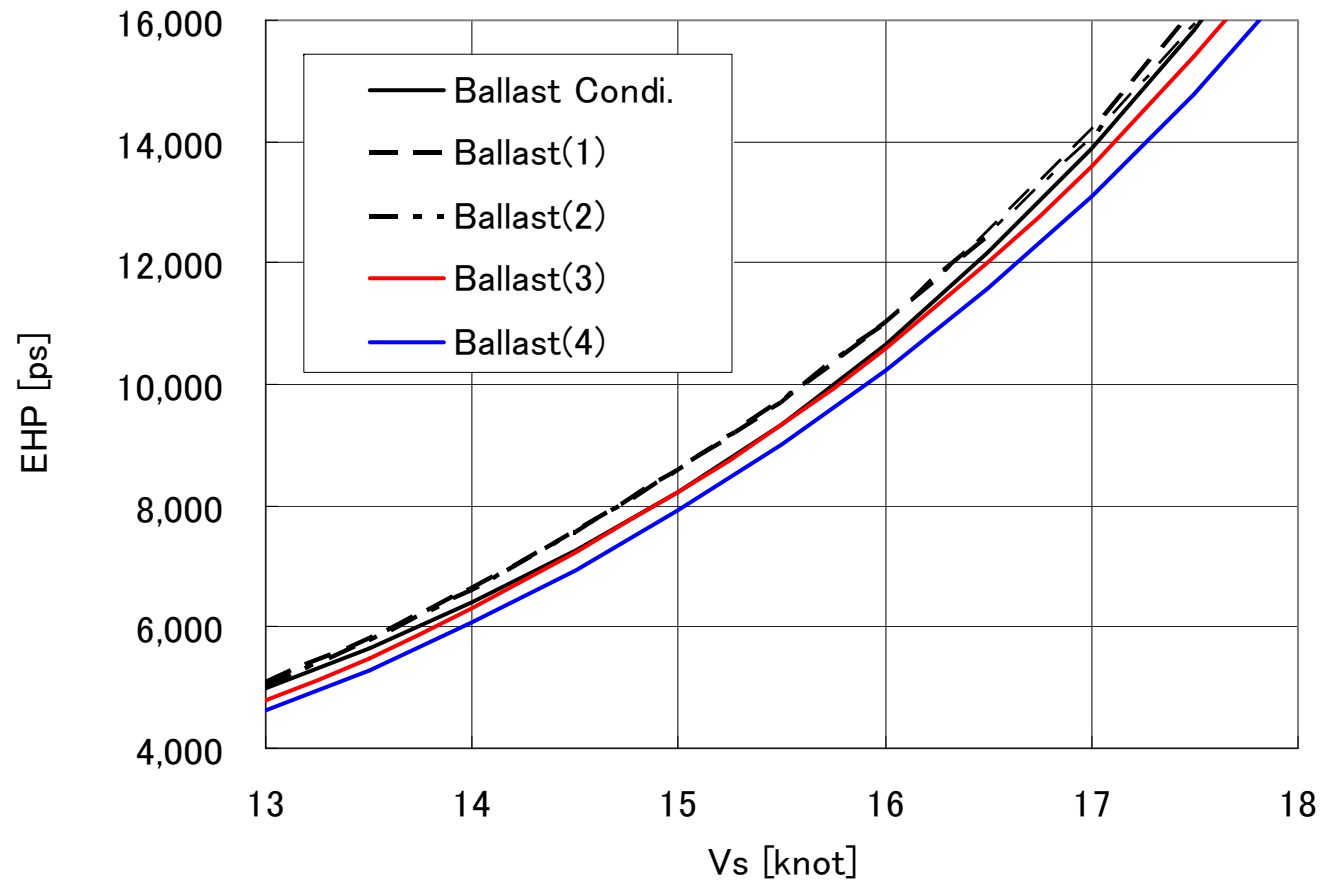
②—2) 様々な載貨状態での抵抗試験の実施

OM.S.No.4904 試験結果 (有効馬力)



②—2) 様々な載貨状態での抵抗試験の実施

OM.S.No.4961 試験結果 (有効馬力)



②—3) 満載状態の抵抗性能と、バラスト状態の抵抗性能の関連調査

○満載状態でのCadm_EHPとバラスト状態でのCadm_EHPの関連を調査する。

Cadm_EHPの計算式；

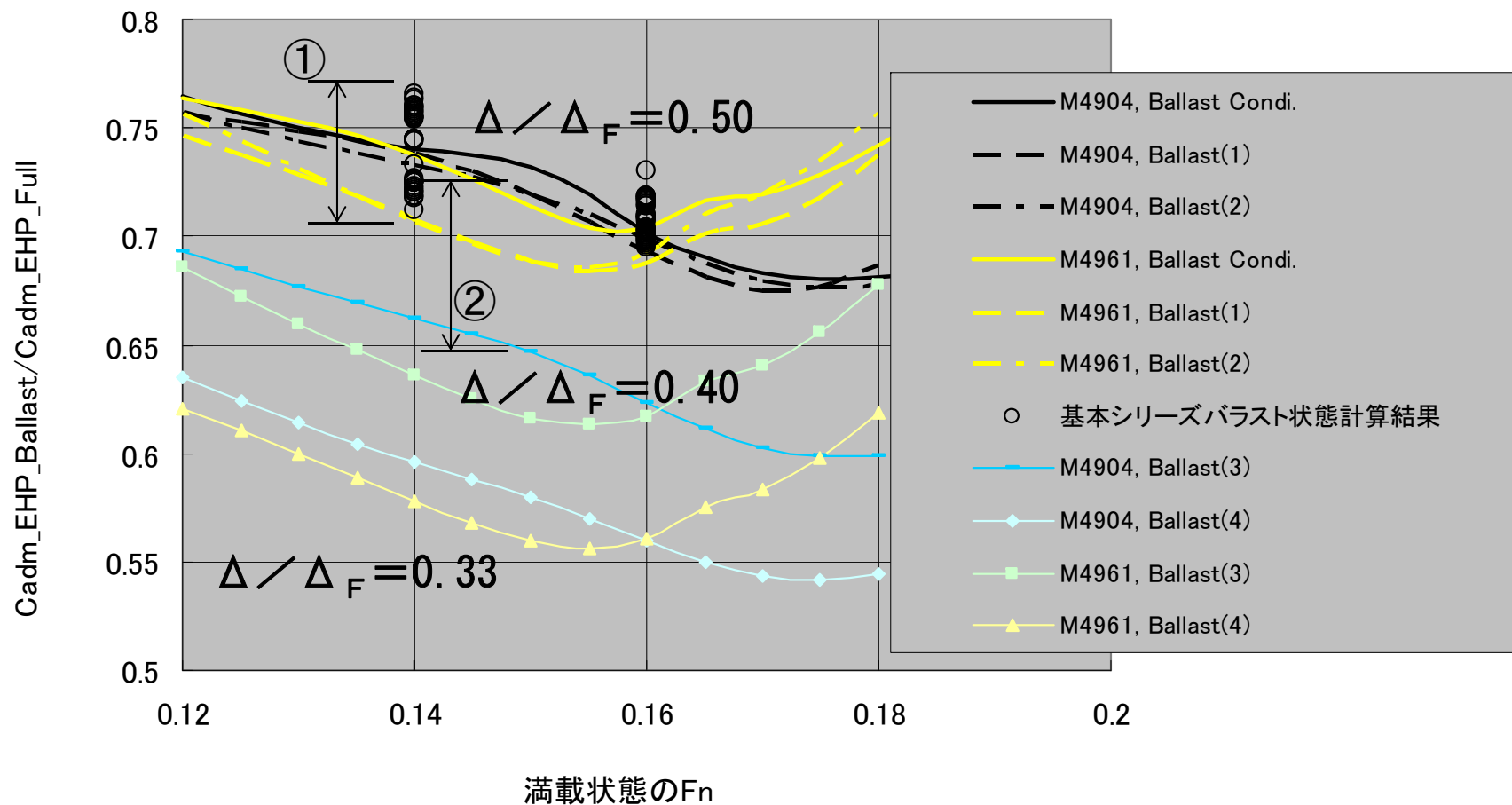
$$(\text{排水量[ton]})^{2/3} \times (\text{船速[knot]})^3 / (\text{EHP[ps]})$$

○M.S.No.4904と4961の試験結果とSPCGシリーズ基本船型（42隻）の計算結果を次のとおりまとめる。

—満載状態でのCadm_EHP_Fullとバラスト状態でのCadm_EHP_Ballastの比をとる。その際のバラスト状態のフルード数は、満載状態のフルード数に0.2を加えたものとする。

②—3) 満載状態の抵抗性能と、バラスト状態の抵抗性能の関連調査

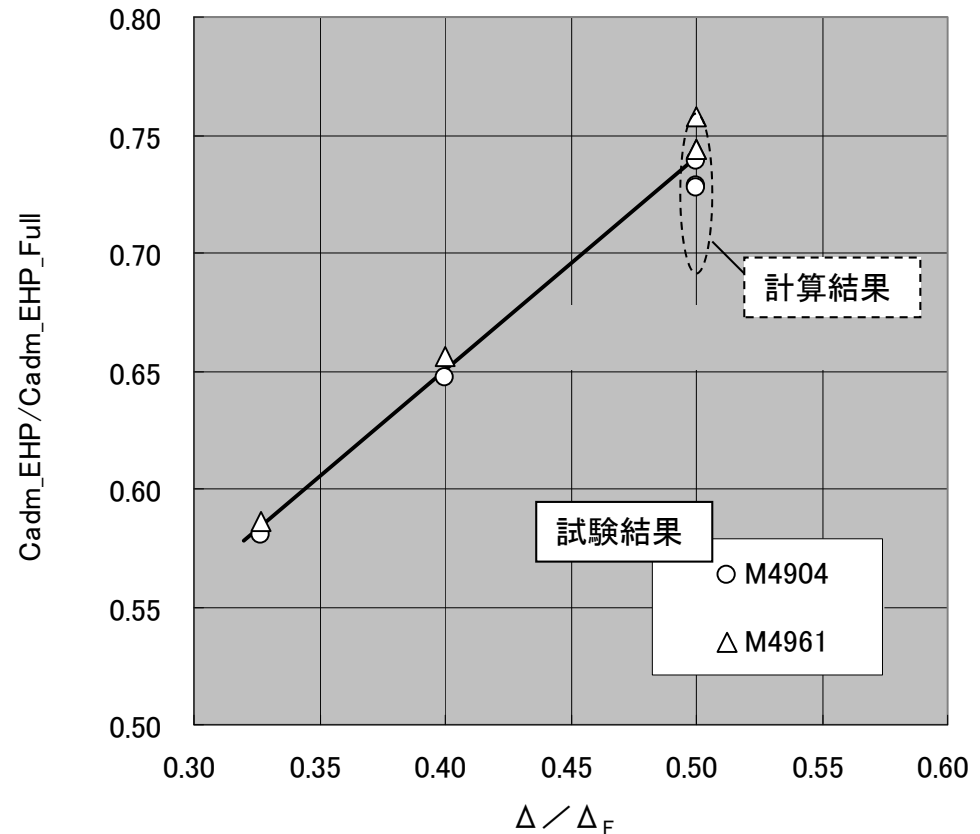
—Cadm_EHPの比で評価すると、船首・船尾肥大度やバラスト状態のトリムの違いによる影響①は、排水量比の10%の違いによる影響②と同程度かそれ以下であることが分かった。



②—3) 満載状態の抵抗性能と、バラスト状態の抵抗性能の関連調査

Δ / Δ_F と C_{adm_EHP} の関係

一概ね、直線的な関係性
で整理できることが
分かった。



③ 満載状態の自航性能の標準的な計算手法の提案

- 1) 満載状態における自航計算の格子依存性、乱流モデルの検討、標準的な計算手法の提案
- 2) 満載状態における自航性能の標準的な計算手法の妥当性検証

③—1) 満載状態における自航計算手法の格子依存性、乱流モデルの検討、標準的な計算手法の提案

○格子依存性の検討

満載状態において、格子分割数を変えて自航計算を行ない、格子依存性を検討した。

○対象船型（括弧内は C_B の値）

M. S. No. 4449 (0.84)、4461 (0.84)、4473 (0.86)、4474 (0.86)、
4475 (0.80)、4476 (0.82)、4505 (0.80)、4506 (0.82)、
4537A (0.80)、4538A (0.82)、4951A (0.91)
の11隻

○計算条件等—その1

上記船型について、以下の条件にて計算を行い、試験結果と比較する。

- 舵なしのH-Oグリッド
- 二重模型流れ（ガス方向の格子は再配置）で計算
- 姿勢変化は考慮しない
- 乱流モデルはSAモデル

③—1) 満載状態における自航計算手法の格子依存性、乱流モデルの検討、標準的な計算手法の提案

○計算条件等—その2

—計算レイノルズ数

$$Re = 7.33 \times 10^6$$

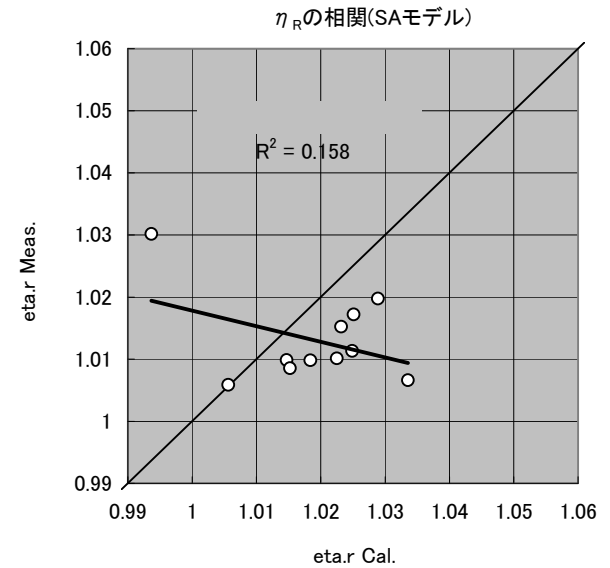
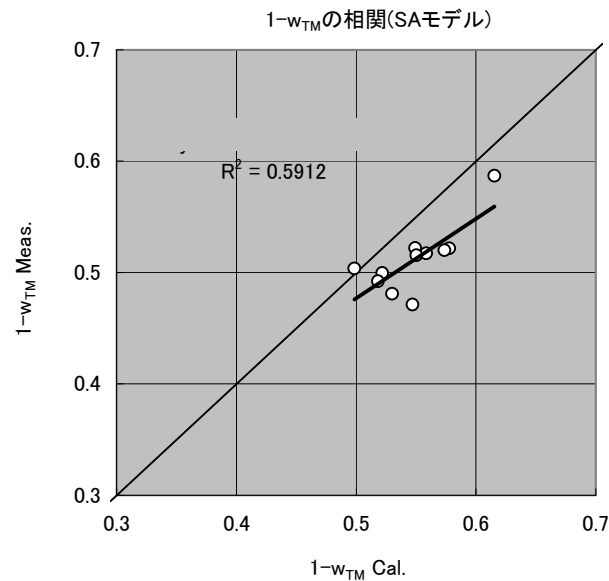
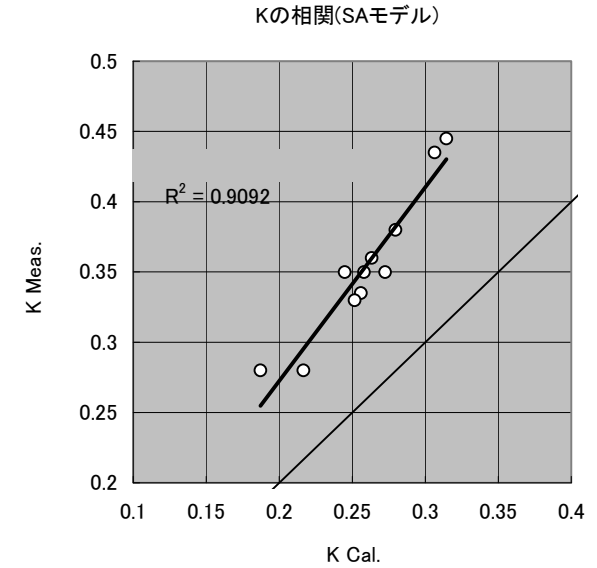
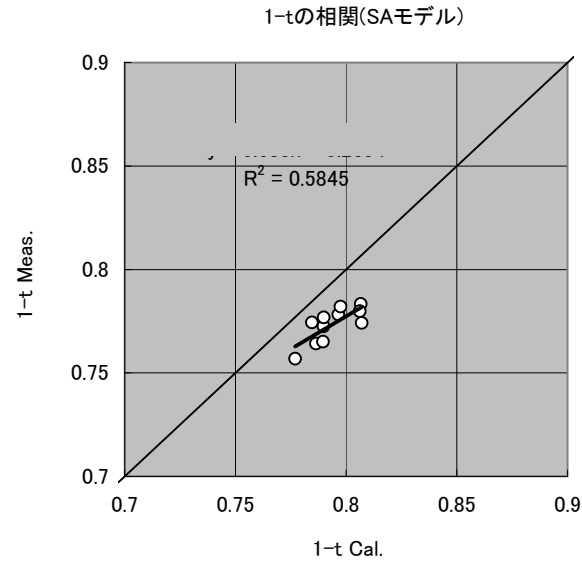
—格子分割数を右表に示す

—格子の総数（セル数）

粗い	Coarse	;	609,280
普通	Medium	;	856,064
細かい	Fine	;	1216,512

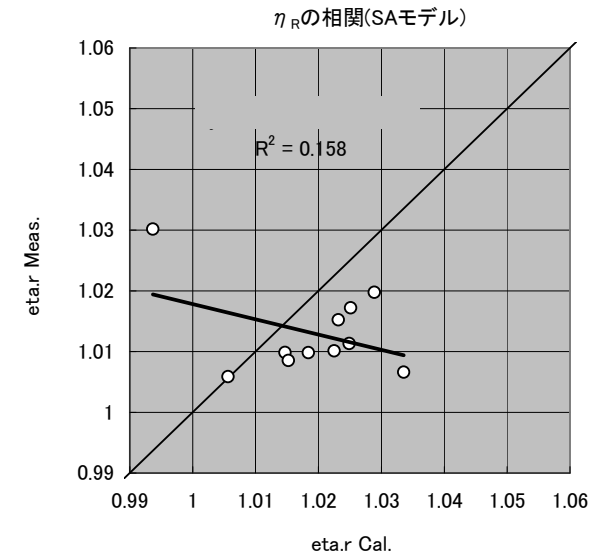
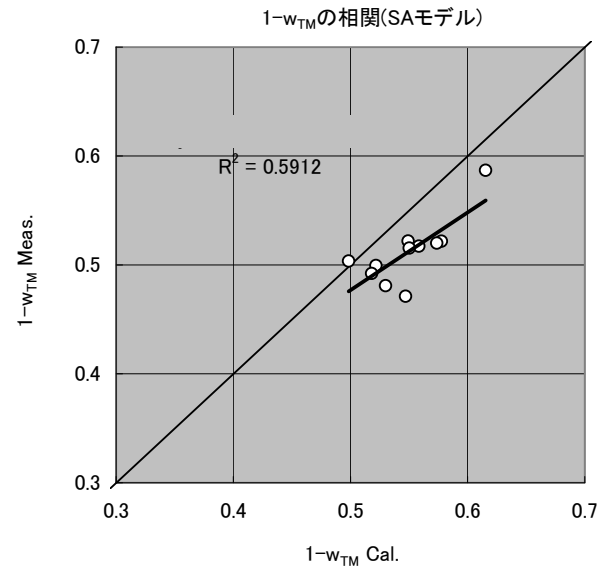
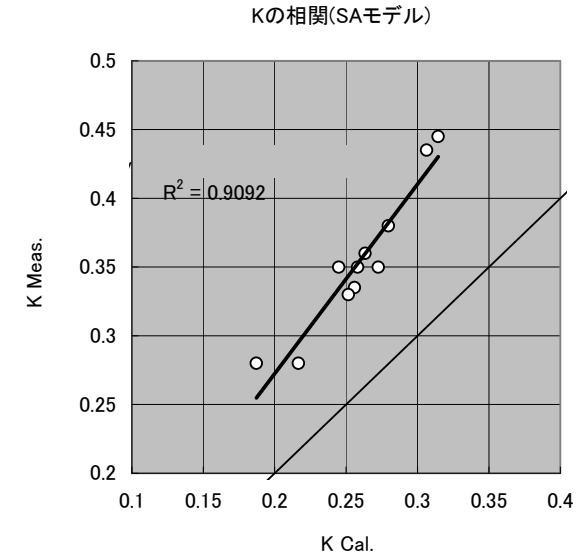
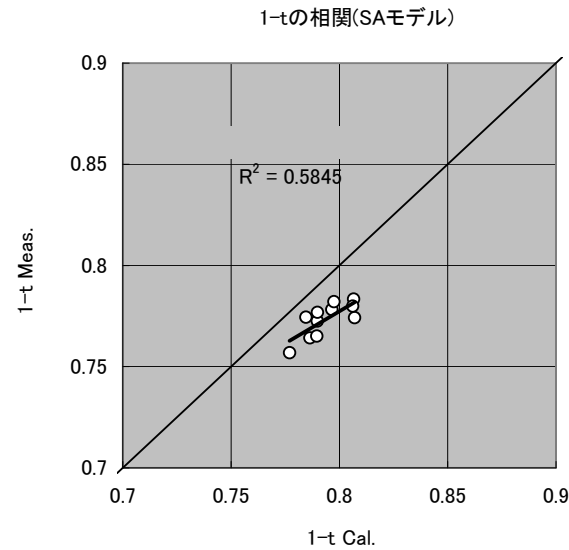
③—1) 満載状態における自航計算手法の格子依存性、乱流モデルの検討、標準的な計算手法の提案

○試験結果と計算結果との相関 (Coarse)



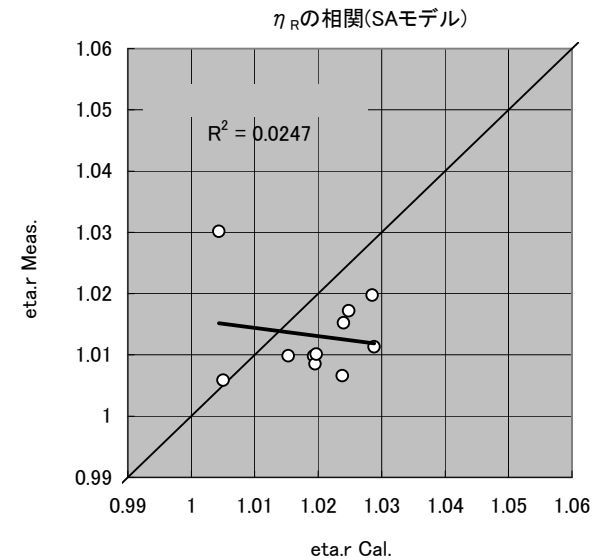
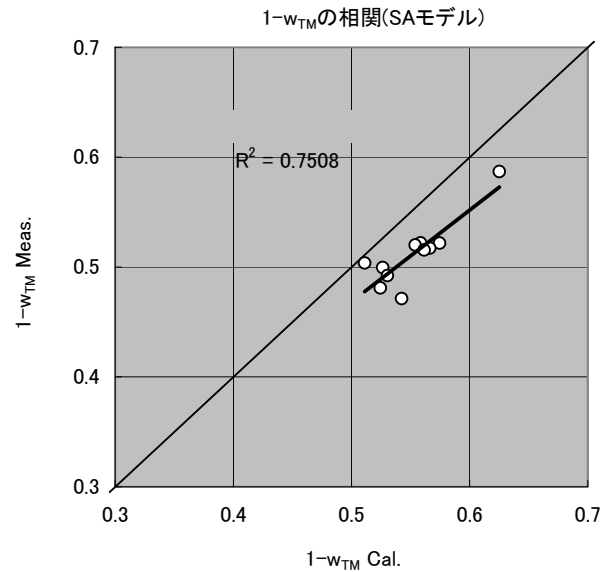
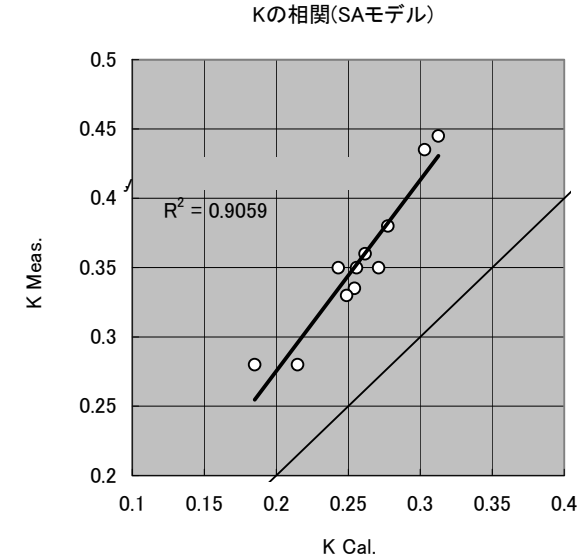
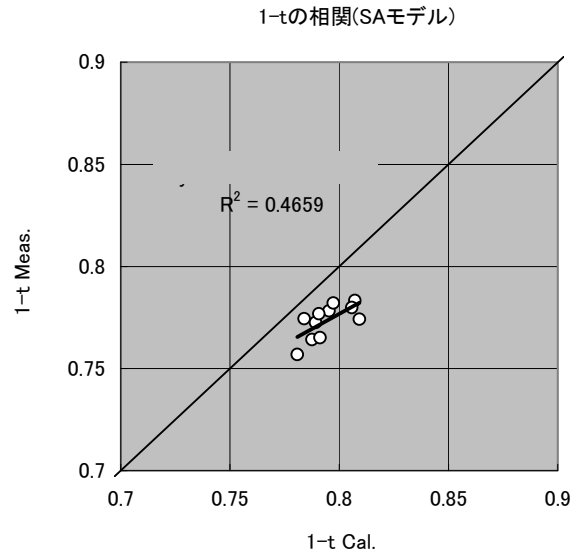
③—1) 満載状態における自航計算手法の格子依存性、乱流モデルの検討、標準的な計算手法の提案

○試験結果と計算結果との相関 (Medium)



③—1) 満載状態における自航計算手法の格子依存性、乱流モデルの検討、標準的な計算手法の提案

○試験結果と計算結果との相関 (Fine)



③—1) 満載状態における自航計算手法の格子依存性、乱流モデルの検討、標準的な計算手法の提案

○格子依存性の検討まとめ

—計算結果と試験結果の相関の R^2 値を以下に示す。

	Coarse	Medium	Fine
K	0.907	0.909	0.906
1-t	0.576	0.585	0.466
1-w _{TM}	0.603	0.591	0.751
η_R	0.130	0.158	0.025

—Kは相関の違いは少ない。

—1-w t の決定係数はFineが一番良く、1-t ではMediumが一番良い。

— η_R の相関は格子分割数にかかわらず、ほぼ無相関。

—計算の安定性、相関の程度など総合的に勘案して、Mediumが適当と判断する。

③—1) 満載状態における自航計算手法の格子依存性、乱流モデルの検討、標準的な計算手法の提案

○乱流モデルのパラメータの検討

満載状態において、格子分割数Mediumにて乱流モデルのパラメータ(Cv値)を変えた自航計算を行ない、乱流モデルの適合性を検討した。

対象船型

格子依存性を検討した11隻と同じとする。

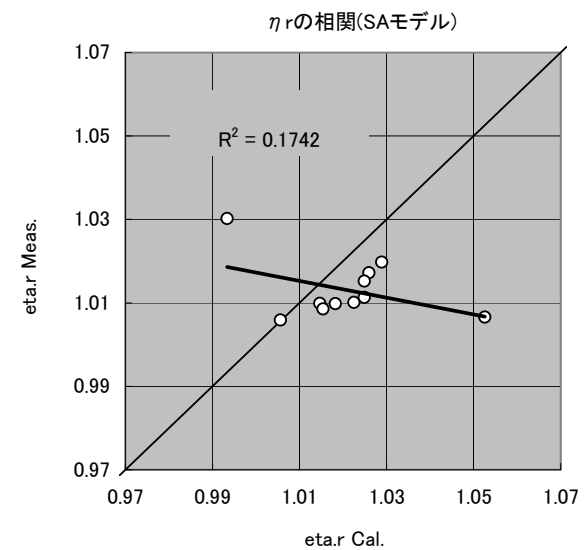
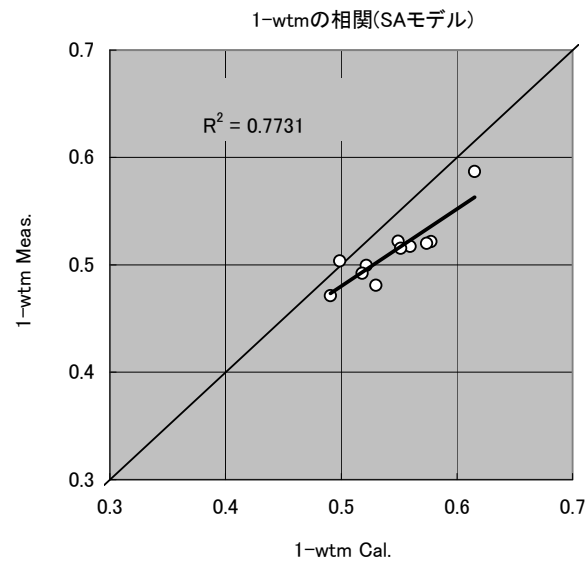
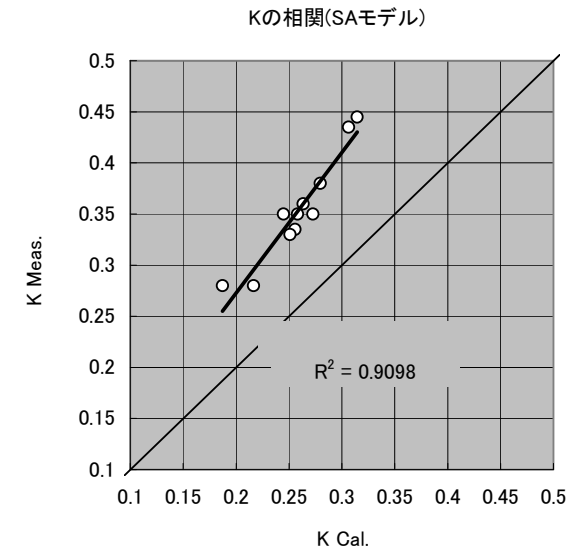
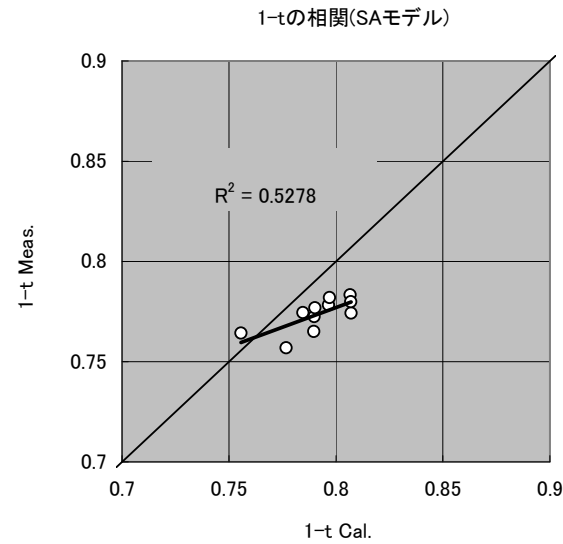
計算条件等

以下の条件にて計算を行い、試験結果と比較する。

- 舵なしのH-Oグリッド
- 二重模型流れ（ガス方向の格子は再配置）で計算
- 姿勢変化は考慮しない
- 乱流モデルはSAモデル（Cv=0）、MSAモデル（Cv=10, 20, 30, 40）
- 計算レイノルズ数 $Rn=7.33 \times 10^6$
- 格子分割数はMedium

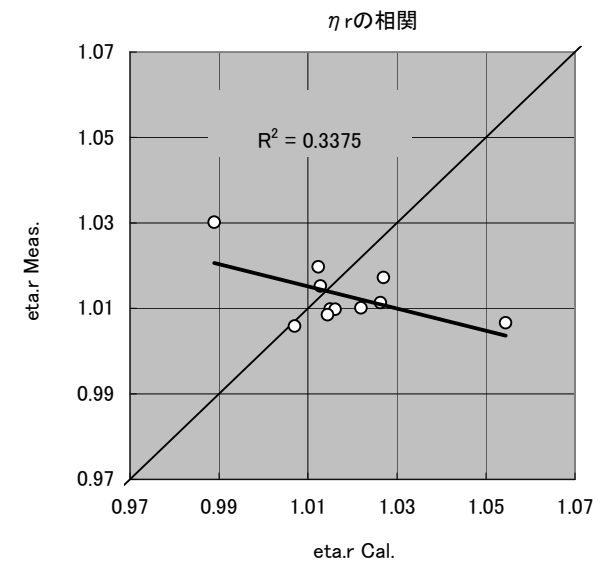
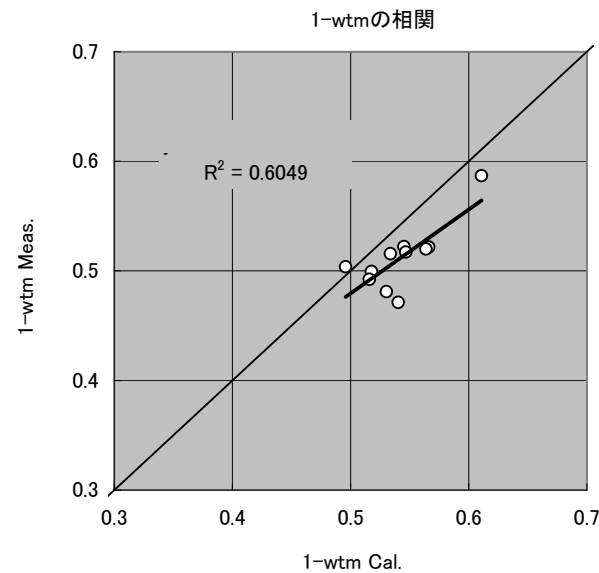
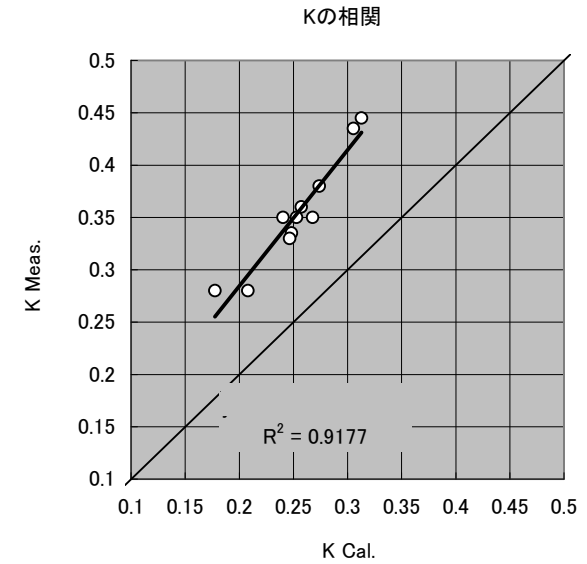
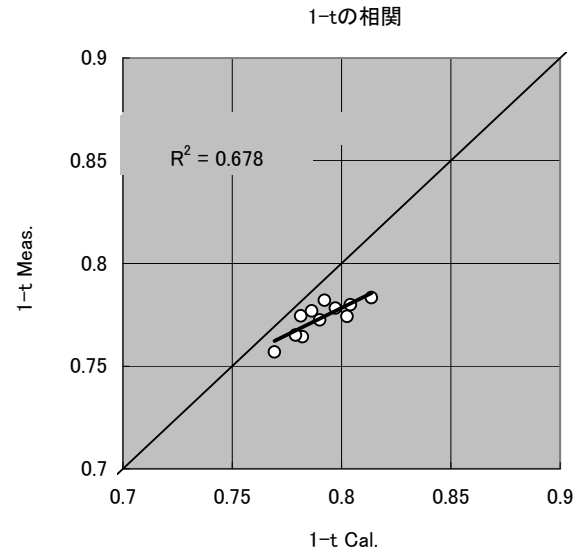
③—1) 満載状態における自航計算手法の格子依存性、乱流モデルの検討、標準的な計算手法の提案

○試験結果と計算結果との相関 (SA Cv=0)



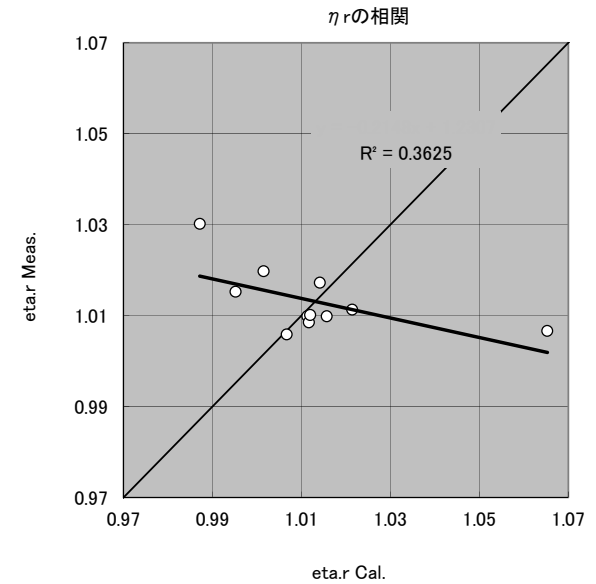
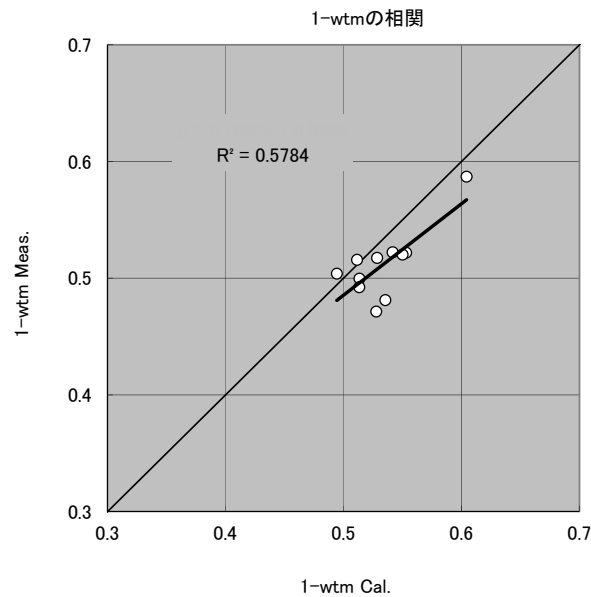
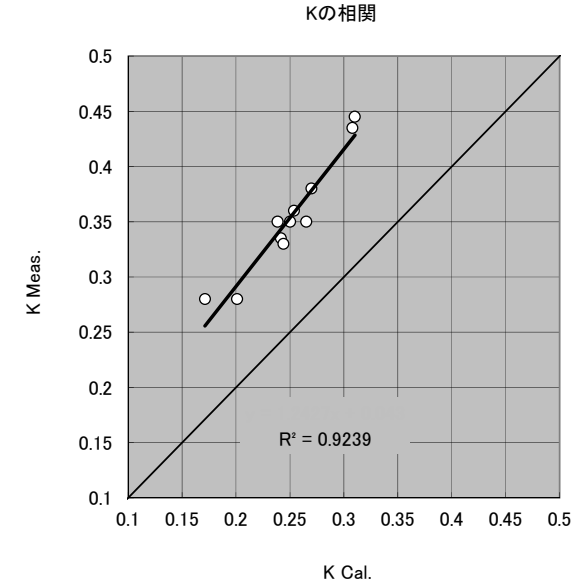
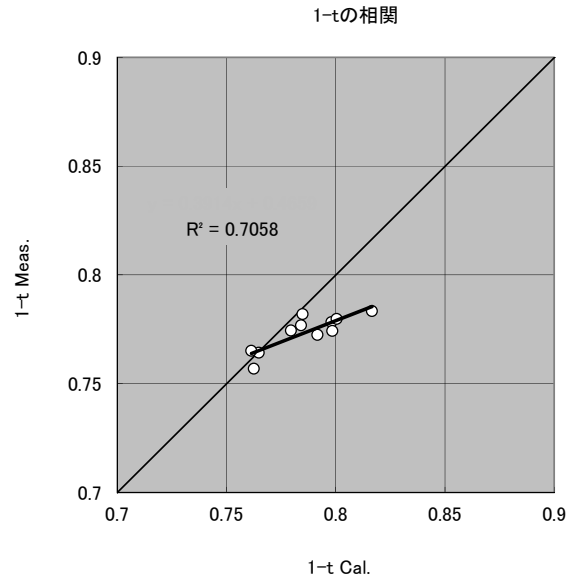
③—1) 満載状態における自航計算手法の格子依存性、乱流モデルの検討、標準的な計算手法の提案

○試験結果と計算結果との相関 (MSA Cv=10)



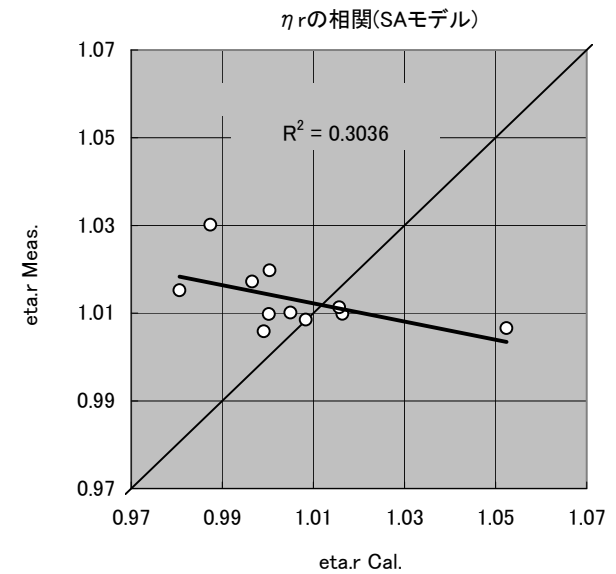
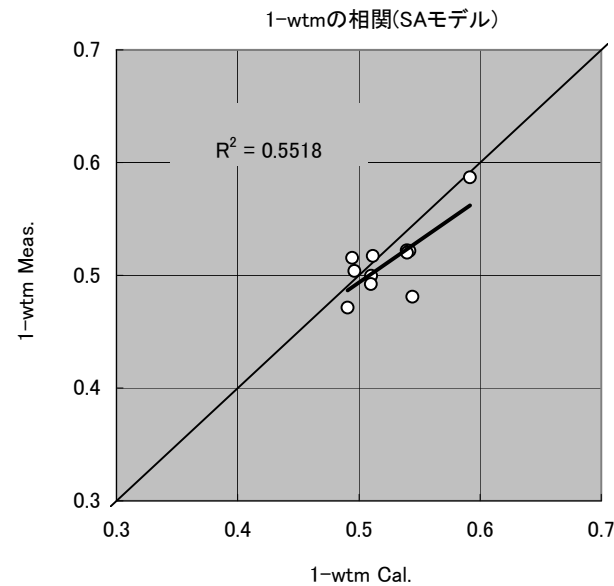
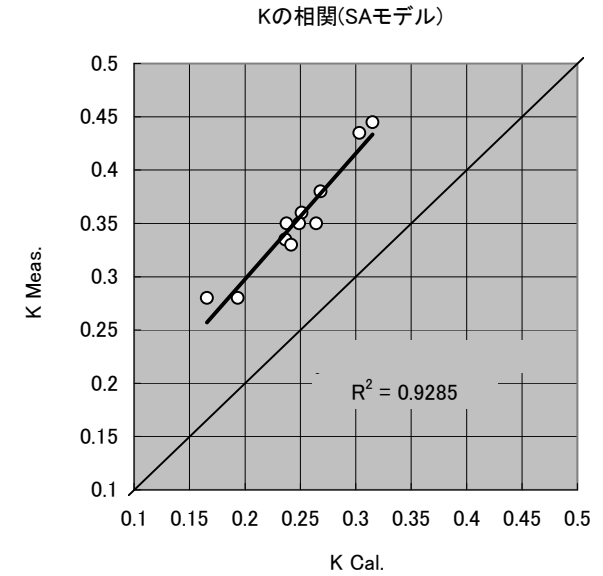
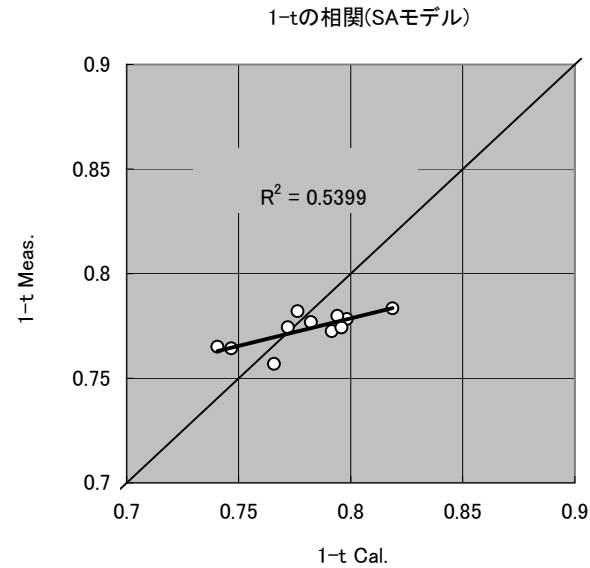
③—1) 満載状態における自航計算手法の格子依存性、乱流モデルの検討、標準的な計算手法の提案

○試験結果と計算結果との相関 (MSA Cv=20)



③—1) 満載状態における自航計算手法の格子依存性、乱流モデルの検討、標準的な計算手法の提案

○試験結果と計算結果との相関 (MSA Cv=30)

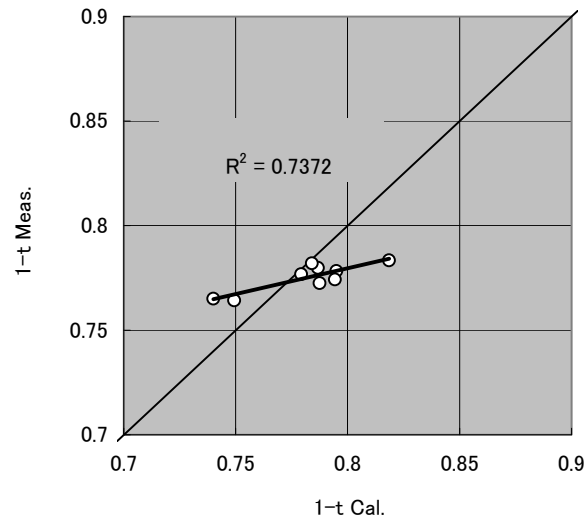


③—1) 満載状態における自航計算手法の格子依存性、乱流モデルの検討、標準的な計算手法の提案

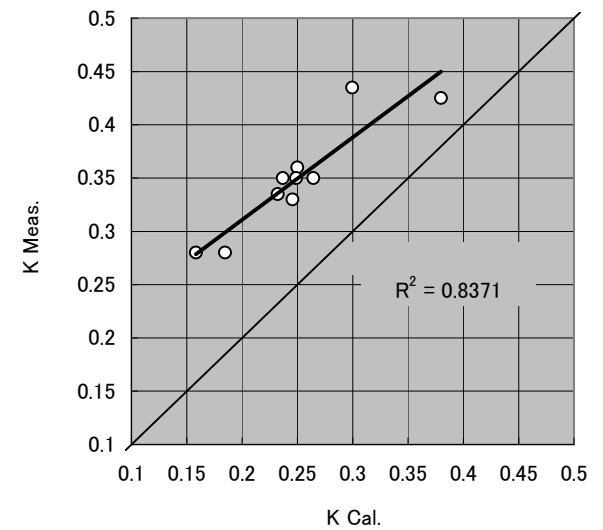
○試験結果と計算結果との相関 (MSA Cv=40)

※対象船型のうち、計算が発散した2隻はプロットしていない。

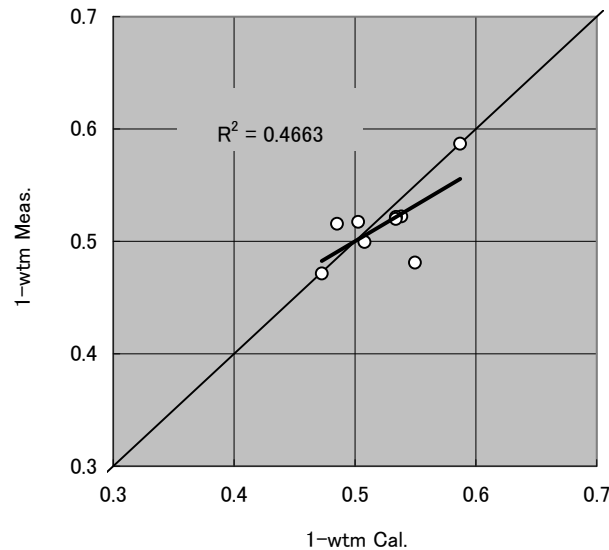
1-tの相関(SAモデル)



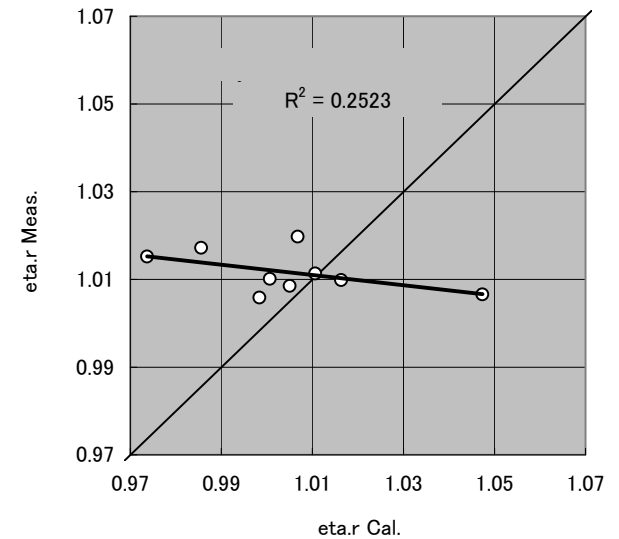
Kの相関(SAモデル)



1-wtmの相関(SAモデル)



eta.rの相関(SAモデル)



③—1) 満載状態における自航計算手法の格子依存性、乱流モデルの検討、標準的な計算手法の提案

○格子依存性の検討まとめ

一回帰直線の決定係数を以下に示す。Cv=40は計算が不安定で計算不能な船型があったため、検討対象から外した。

	SA Cv=0	MSA		
		Cv=10	Cv=20	Cv=30
K	0.910	0.918	0.924	0.929
1-t	0.528	0.678	0.706	0.534
1-w _{TM}	0.773	0.605	0.578	0.551
η_R	0.174	0.338	0.363	0.304

—Kの決定係数のCv値の違いによる影響は少ない。

—1-w t の決定係数はCv=0が一番良く、1-t ではCv=30が一番良い。

— η_R はCv値にかかわらず、ほぼ無相関。

—Cv値が大きいと計算が不安定になりやすい傾向があることが判明したため、標準的な乱流モデルとしてはSAモデル (Cv=0) を提案する。

③—2) 満載状態における自航性能の標準的計算手法の妥当性の検討

○標準的計算手法の妥当性検証

策定した、標準的計算手法により満載状態の自航計算を行なう。

対象船型

M. S. No. 4449 (0.84)、4461 (0.84)、4473 (0.86)、4474 (0.86)、4475 (0.80)、4476 (0.82)、4505 (0.80)、4506 (0.82)、4537A (0.80)、4538A (0.82)、4580 (0.87)、4851A (0.88) の12隻

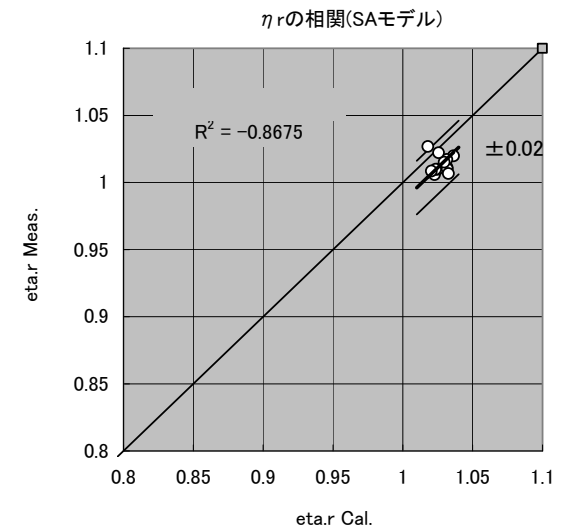
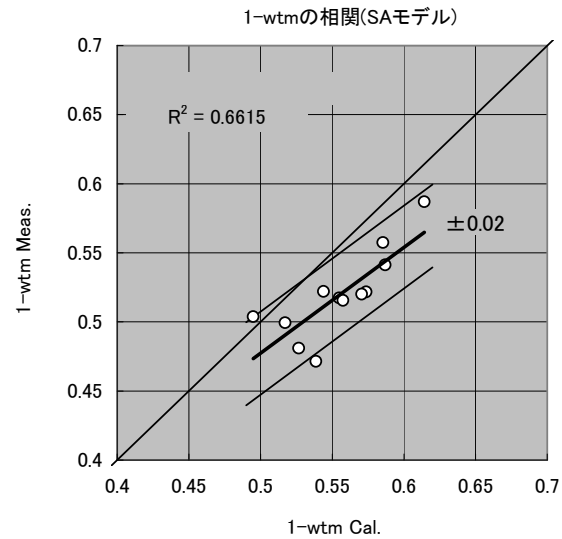
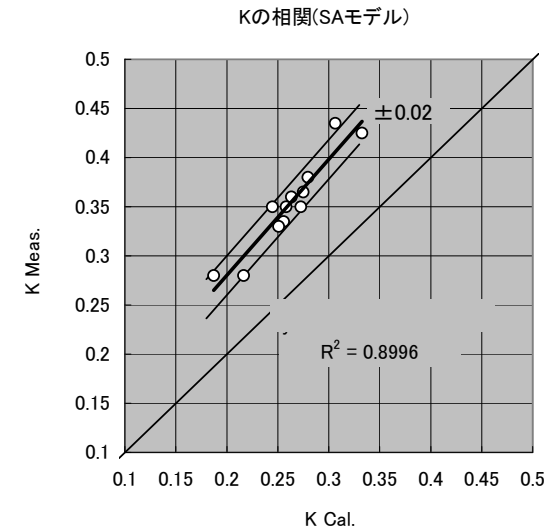
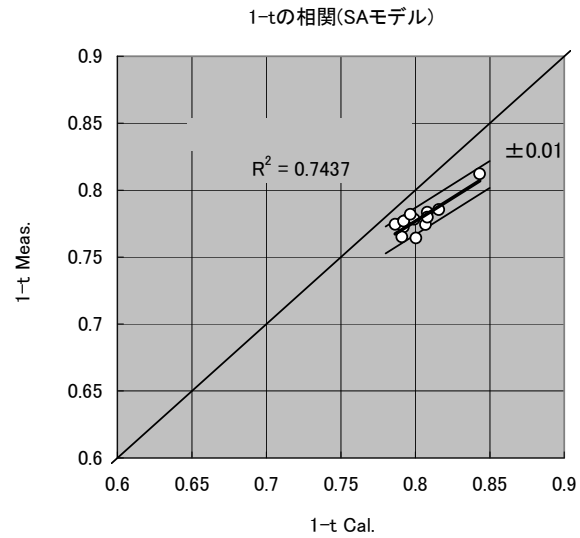
計算条件等

以下の標準的計算手法による自航計算を行い、試験結果と比較する。

- 舵なしのH-Oグリッド
- 二重模型流れ（ガス方向の格子は再配置）で計算
- 姿勢変化は考慮しない
- 乱流モデルはS Aモデル
- 計算レイノルズ数 $R_n=7.33 \times 10^6$
- 格子分割数はMedium

③—2) 満載状態における自航性能の標準的計算手法の妥当性の検討

○試験結果と標準的
手法による計算結果
との相関



③—2) 満載状態における自航計算手法の格子依存性、乱流モデルの検討、標準的な計算手法の提案

○試験結果との比較による妥当性

- K 、 $1 - w_T$ 、 η_R の計算結果は回帰直線の ± 0.01 の範囲内で得られた。
- $1 - t$ の計算結果は回帰直線の ± 0.02 の範囲内で得られた。
- なお、 η_R は相関係数 (= 1.0) を与えて回帰直線を求めた。
- 標準的な計算手法により、満載状態の自航性能について、実用上、妥当な計算結果を得られることが分かった。