



第89回実海域推進性能研究会

令和7年9月26日

実海域船型学

Hull design engineering in actual seas

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

研究監 辻本 勝



本日の発表



1. はじめに
2. 実海域実船性能
3. 実海域船型学
4. まとめ

1. はじめに



1998年3月 大阪大学大学院工学研究科船舶海洋工学専攻 博士後期課程修了

博士論文：船舶の実海域性能に関する研究

1998年4月 運輸省船舶技術研究所

以降 企画室、推進性能部、運動性能部、海上安全研究領域、流体性能評価系、流体設計系

主な研究テーマ：船舶の実海域性能

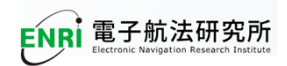
プロジェクト スーパーエコシッププロジェクト (2001.4-2003.3)

実海域性能評価プロジェクト (2005.4-2008.3)

海の10モードプロジェクト (2008.4-)

OCTARVIAプロジェクト (2017.10-2024.3)

分野横断研究の推進（うみそら研）



1. はじめに



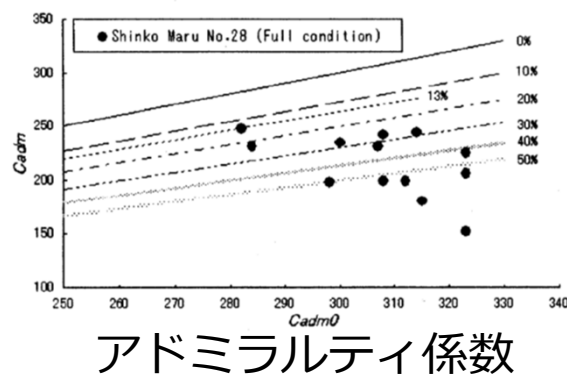
スーパーエコシッププロジェクト (2001.4-2003.3)

プロジェクトの目標

環境にやさしい次世代内航船の開発

電気推進
SMGT (スーパーマリンガスタービン)
CRPポッド
船型開発
性能評価

内航船のシーマージン評価



TOSHIBA

NAKASHIMA
We Go Beyond

Kawasaki
Powering your potential



IHI

SRC

一般財団法人
日本造船技術センター



国土交通省

辻本他：シーマージンの設定法についてー内航コールドール油槽船ー、日本造船学会論文集、第195号（2004）

Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所／National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

1. はじめに



実海域性能評価プロジェクト（2005.4-2006.10）

プロジェクトの目標

実海域性能を試験・計測できる施設を整備

キープラン作成

屋外水槽（80m角水槽）から屋内水槽へ

※力の計測（曳引車）、全周造波機

仕様作成

実海域再現水槽（2010年8月）

80m×40m×4.5m

全周造波（吸収式造波機382台）

送風装置有り



1. はじめに



海の10モードプロジェクト（2007.4-2011.3）

プロジェクトの目標

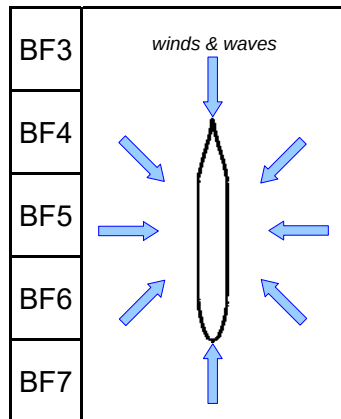
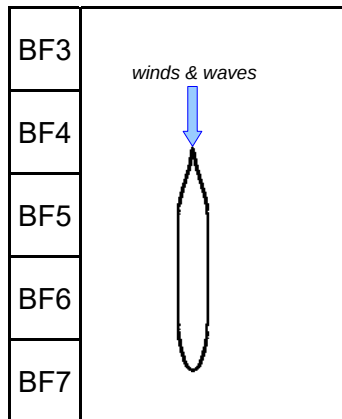
実海域性能（速力低下）の評価指標を開発

出会方向の
2モード

BF風力階級の
5モード

向波・向風

波・風の全方位平均



BF3

BF4

BF5

BF6

BF7

National Weather Service, U.S.A.

辻本他：海の10モード指標計算法、日本船舶海洋工学会論文集、第10号（2009）

Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所／National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.



海の10モード指標計算プログラム



TopMenu

InputData

10 mode Index for Ships

weather	ship speed [knot]
BF0	25.88

weather	direction [deg]	decrease of ship speed [knot]
BF3	0	0.20
BF4	0	0.36
BF5	0	0.73
BF6	0	1.31
BF7	0	2.36

weather	direction [deg]	decrease of ship speed [knot]
BF3	average	0.07
BF4	average	0.13
BF5	average	0.28
BF6	average	0.53
BF7	average	0.99

Calculated Items

Added resistance in short crested irregular waves

Wind force and moment coefficients

Hydrodynamic coefficients

Decrease of ship speed

SPICA version alpha

1. はじめに



海の10モードプロジェクト (2007.4-2011.3)

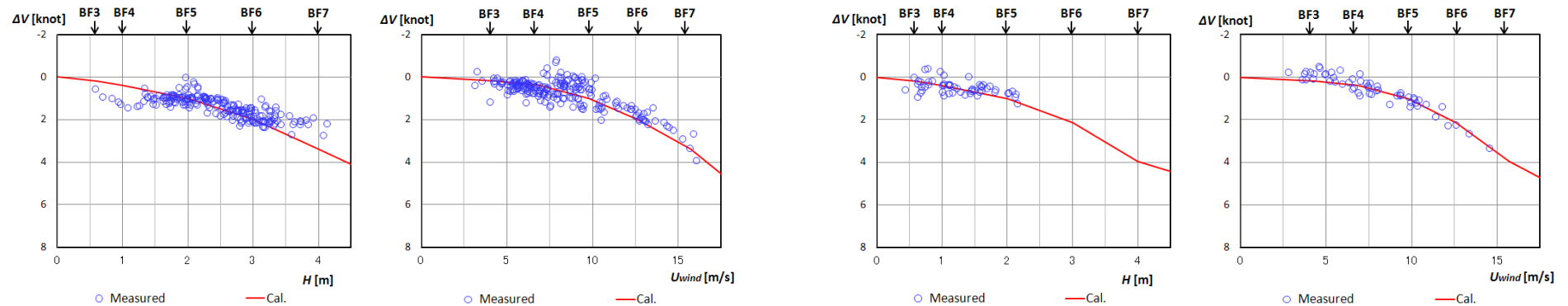
実船検証



VLCC

計画満載状態

バラスト状態



速力低下についてSPICAによる結果が実船計測データと概ね一致することを確認

粉原他：実船計測による実海域性能評価法の検証、日本船舶海洋工学会論文集、第12号（2010）

粉原他：自動車運搬船及び大型油槽船の実船計測による速力低下計算法の検証日本船舶海洋工学会論文集、第12号（2010）

Kuroda et al.: Onboard Measurement for a Container Ship in view of Container Load Condition, J. JASNAOE, Vol. 15(2012)

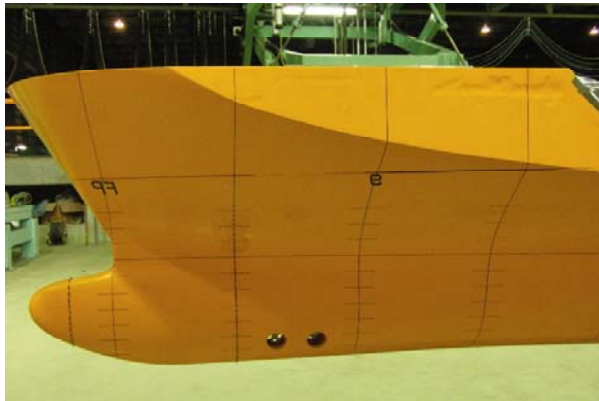
Ichinose et al.: Decrease of Ship Speed in Actual Seas of a Bulk Carrier in Full Load and Ballast Conditions -Model Test and Onboard Measurement-, J. JASNAOE, Vol. 15(2012)

Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所／National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

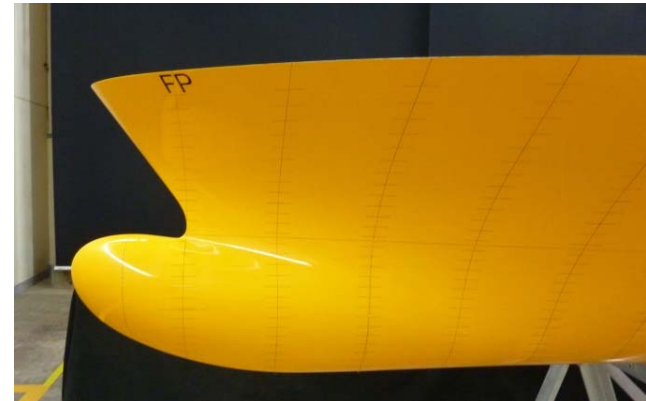
2. 実海域実船性能



船型学：バルバスバウ



バルバスバウ (通常)



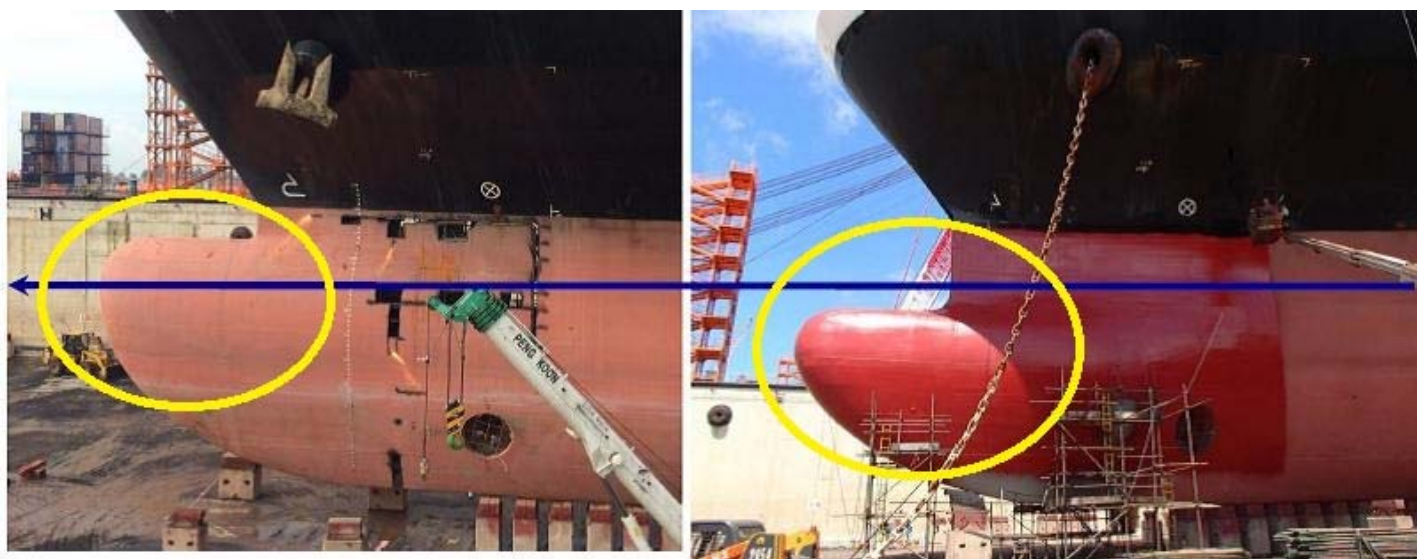
バルバスバウ (グーズネック)

2. 実海域実船性能



船会社の取り組み

当社独自技術でコンテナ船の省エネ運航を推進
—23%のCO2削減効果を検証—



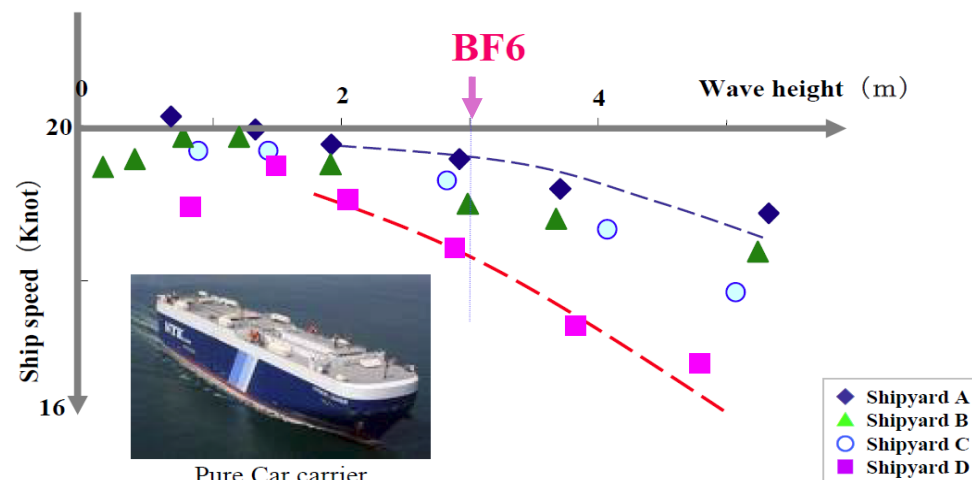
2015年2月27日 日本郵船（株）、（株）MTIプレス発表

2. 実海域実船性能



ユーザー（船社）の視点

平水中性能は同じでも
実海域で差が生じている



- (1) 生涯燃費に差が出る。
- (2) 実海域性能を持って船舶性能を評価、確認（保証）する標準手法の構築が必要である。
- (3) 平水中性能をターゲットに船型を設計するのではなく、実海域性能をターゲットに設計すべき。

田中良和、運航に求められる性能とその問題点について、第50回実海域推進性能研究会（記念講演）（2002年）

田中良和、最適速力と実海域での性能差、TECHNO MARINE、884号（2005年）

2. 実海域実船性能 (1) 生涯燃費



NMRIの取り組み

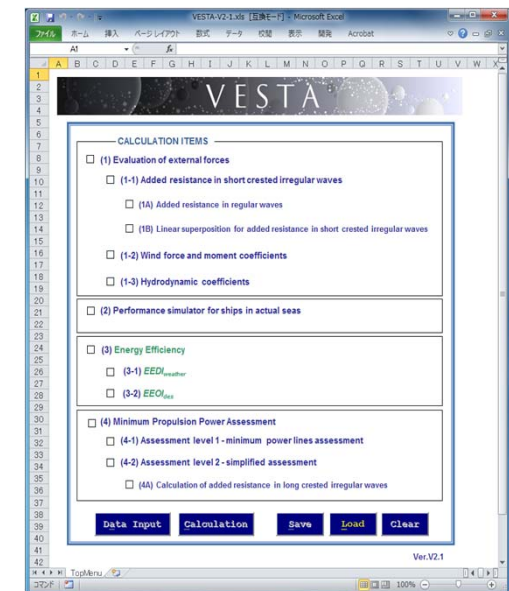
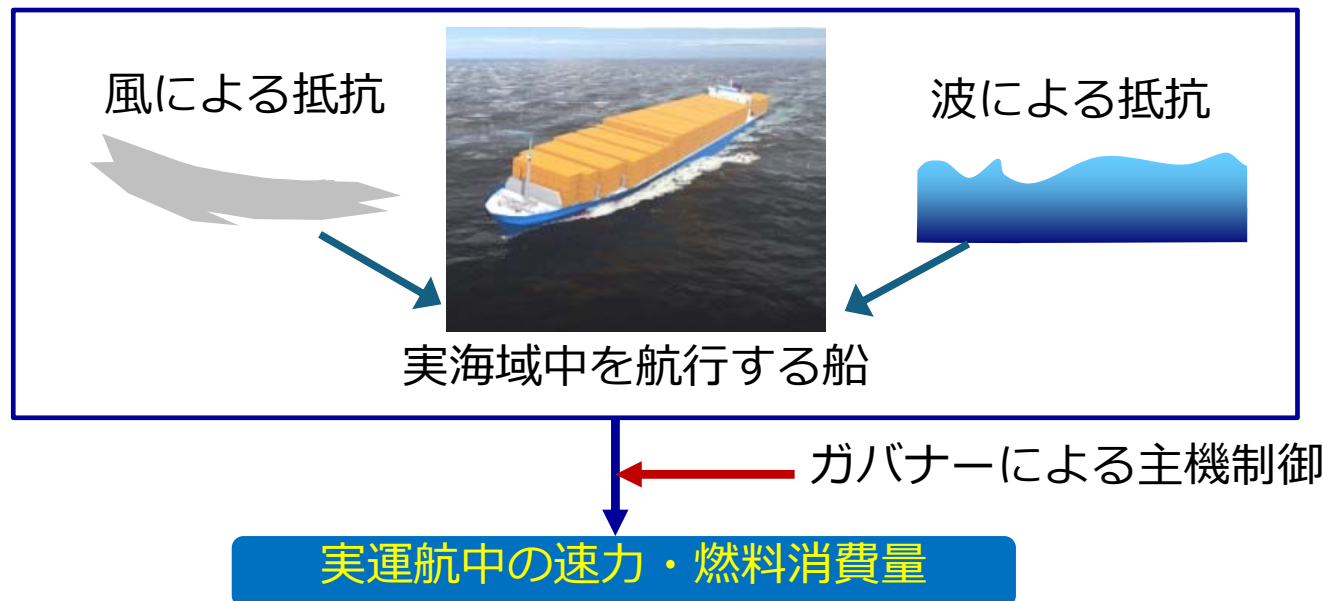
■実運航性能シミュレータ（VESTA）の開発

…本船を特定の航路に就航させた際の性能を評価

技術1：波、風による外力を十分な精度で評価。

技術2：主機・ガバナー作動特性を考慮した速力・燃費評価。

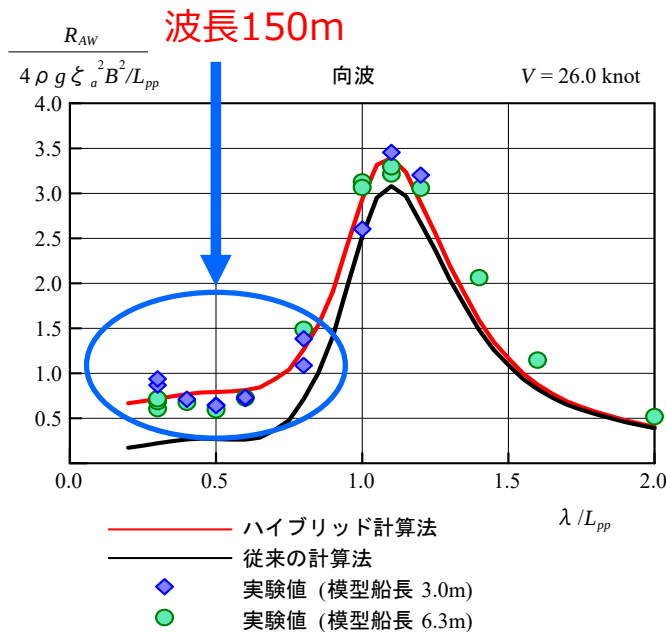
…**運航の改善（省エネ運航）が可能。**



2. 実海域実船性能 (1) 生涯燃費



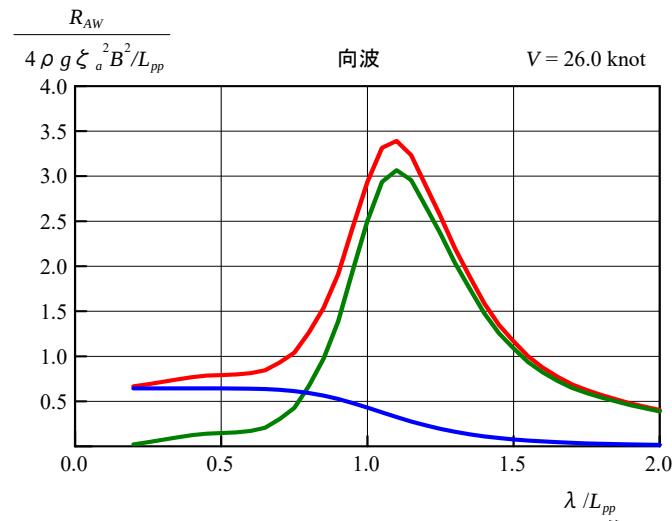
波浪中抵抗増加計算法の改良 (NMRI法)



高速瘦型船
短波長域で実験値と計算値の一致が悪い

実海域性能評価には精度改善が必要

コンテナ船 船長：300m



主として船体運動に
起因する運動成分

+ 修正項

全体

ハイブリッド計算法の開発

2. 実海域実船性能 (1) 生涯燃費



短波長域での抵抗増加 (ハイブリッド計算法)

$$R_{AWr} = \frac{1}{2} \rho g \zeta_a^2 B B_f \alpha_d (1 + \alpha_U)$$

反射波抵抗増加 (半実験式)

$$\alpha_d = \frac{\pi^2 I_1^2(k_e d)}{\pi^2 I_1^2(k_e d) + K_1^2(k_e d)}$$

喫水・周波数影響係数

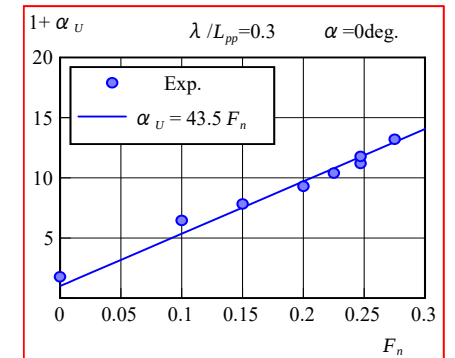
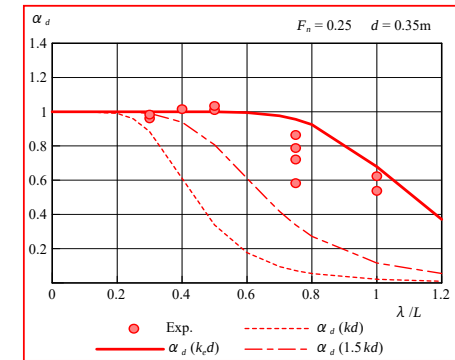
$$\alpha_U = C_U F_n$$

速度影響係数

短波長での速度変更試験より求める係数

$$B_f = \frac{1}{B} \left\{ \int_I \sin^2(\alpha + \beta_w) \sin \beta_w dl + \int_{II} \sin^2(\alpha - \beta_w) \sin \beta_w dl \right\}$$

ブラントネス係数



Kuroda et al. : Investigation on Components of Added Resistance in Short Waves, J. JASNAOE, Vol. 8 (2008)

Tsujimoto et al. : A Practical Correction Method for Added Resistance in Waves, J. JASNAOE, Vol. 8 (2008)

Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 / National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

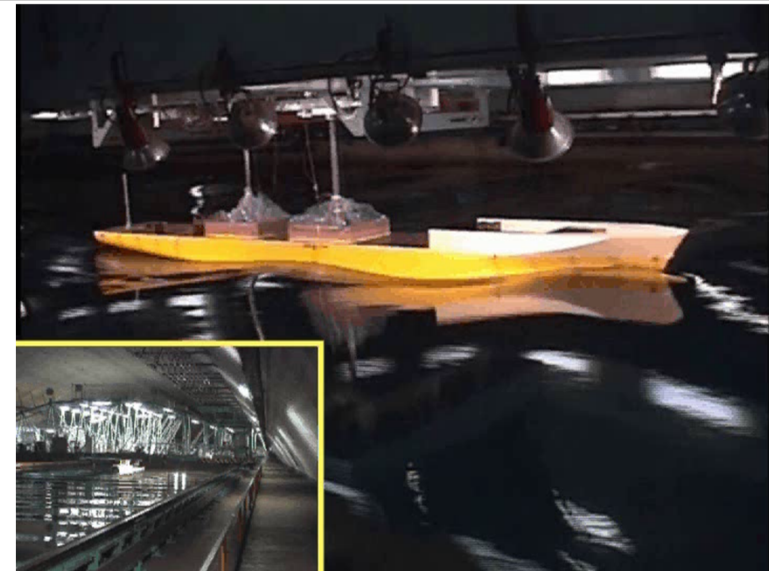
2. 実海域実船性能 (1) 生涯燃費



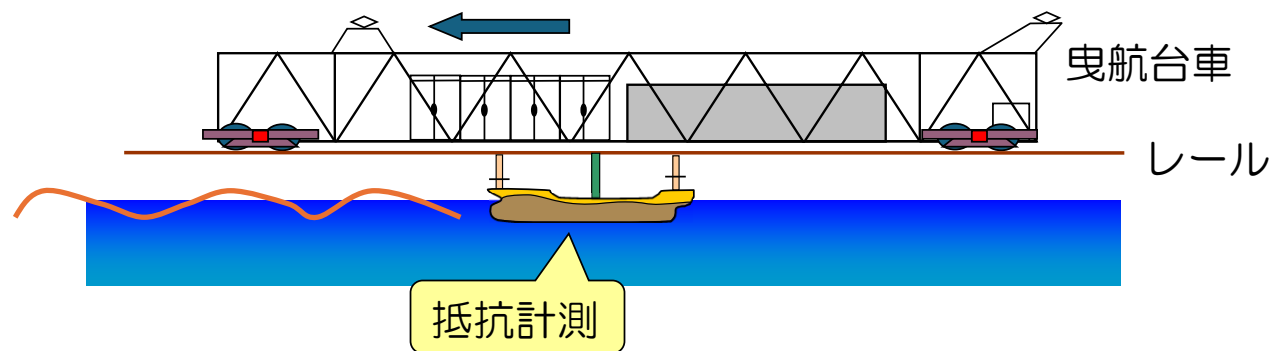
水槽試験法

船体運動がほとんどない
・・・平水中抵抗試験と同じセッティング
が可能

試験点数：3速度（各2点）



波浪中抵抗試験（400m水槽）



2. 実海域実船性能 (1) 生涯燃費

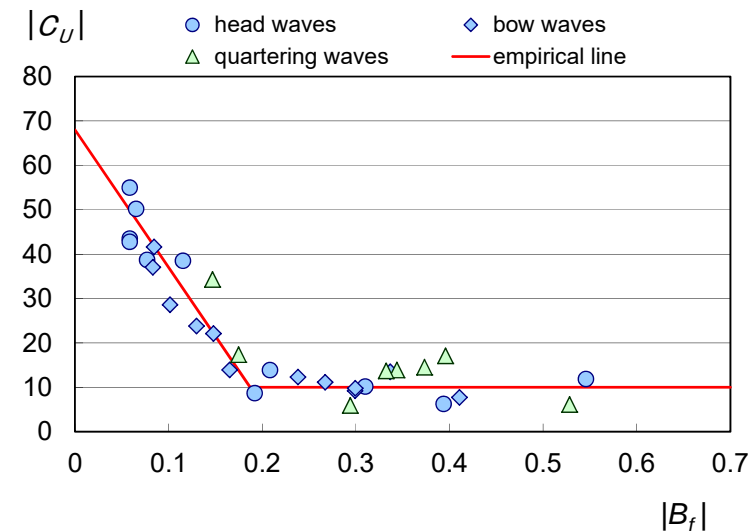


短波長域の修正がポイント

関数形（速度）を仮定→短波長のみの試験へ
水槽試験で速度影響係数を決定

斜波

多数の実験からチャート化
…ブラントネス係数で整理できる

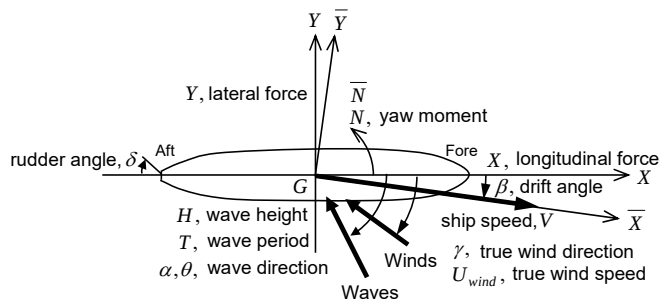


2. 実海域実船性能 (1) 生涯燃費

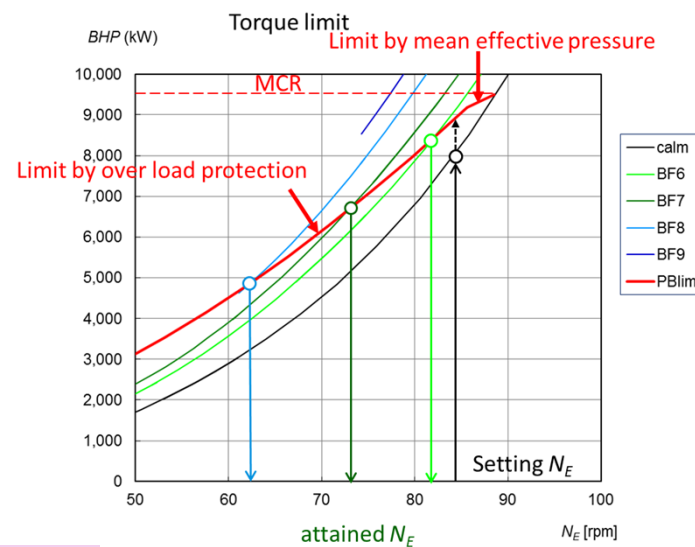


実運航性能シミュレータ (VESTA) の開発

実海域中の力の釣合い



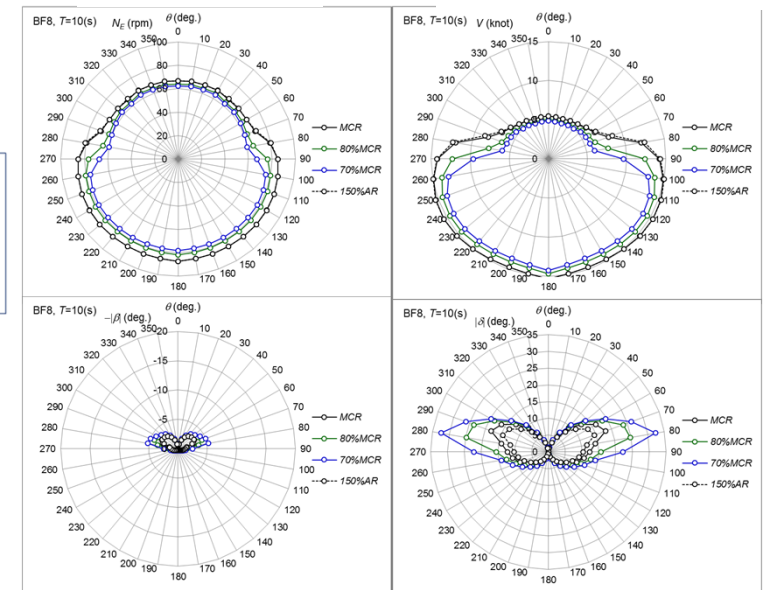
実海域中の主機作動



実海域中の到達値が求まる

主機回転数

船速



斜航角

舵角

BF8の例

ポイント：波浪中抵抗増加の精度

辻本他：実海域での燃費評価法、日本船舶海洋工学会論文集、第16号(2012)

Tsujimoto et al.: Development of a Ship Performance Simulator in Actual Seas, OMAE2015 (2015)

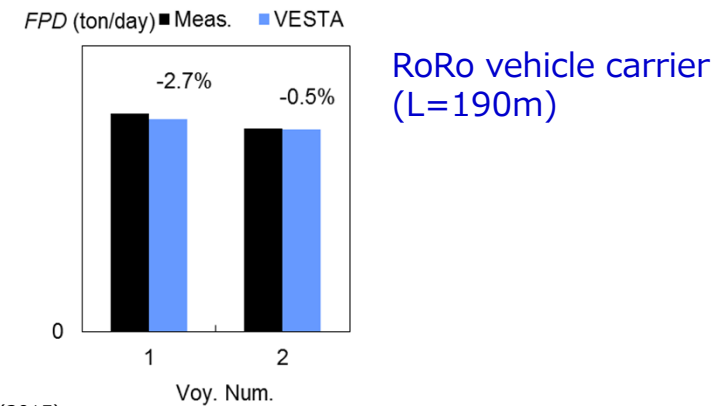
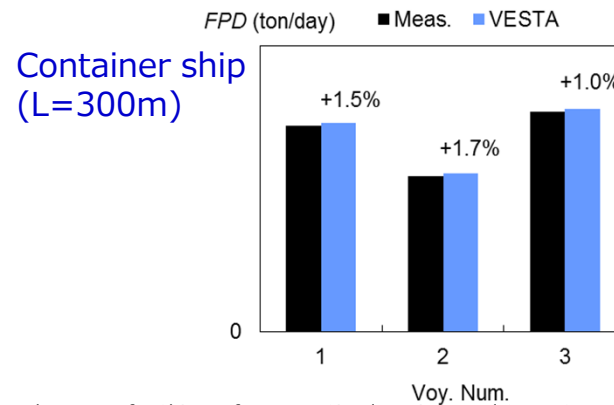
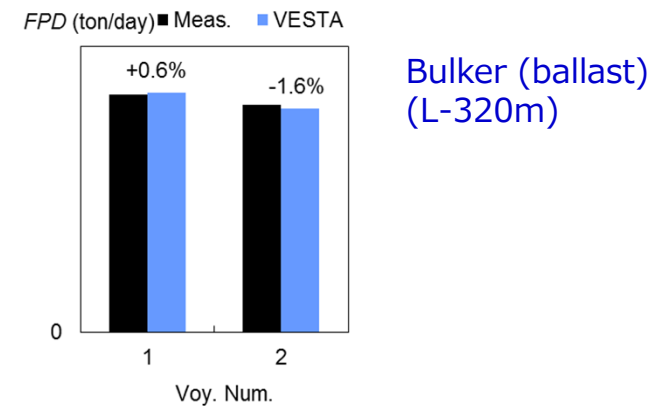
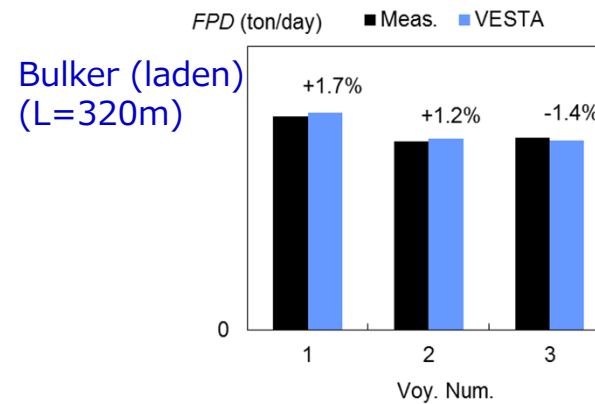
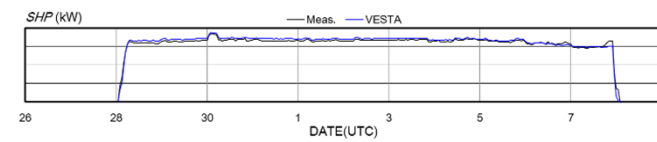
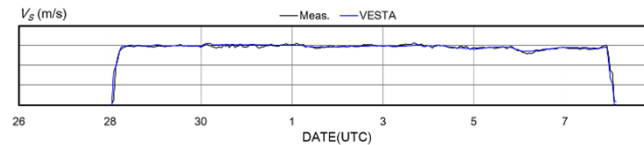
Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 / National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.



2. 実海域実船性能 (1) 生涯燃費



実船検証



Tsujimoto et al.: Development of a Ship Performance Simulator in Actual Seas, OMAE2015 (2015)

Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 / National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

2. 実海域実船性能 (1) 生涯燃費



実海域実船性能評価 (OCTARVIA) プロジェクト (2017.10-2024.3)

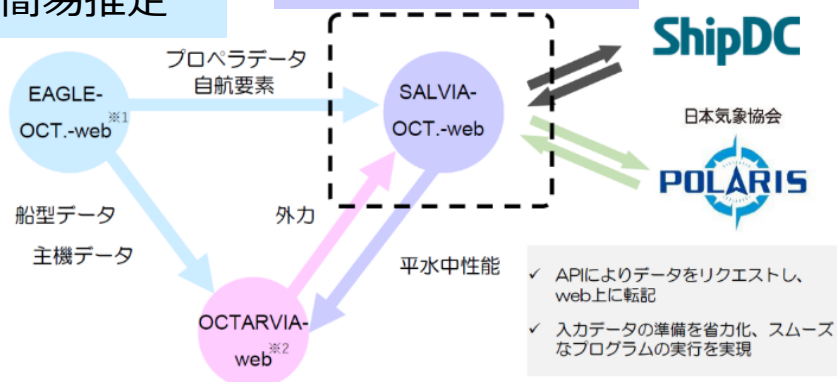
プロジェクトの目標

世界中の船舶をほぼ同じ精度で客観的に評価・比較できる「ものさし」の確立。

OCTARVIAアプリの開発

船型・性能
の簡易推定

実船データ解析



実海域性能推定・ライフサイクル主機燃費



2. 実海域実船性能 (1) 生涯燃費



実海域実船性能評価 (OCTARVIA) プロジェクト (2017.10-2024.3)
標準運航モデルでの計算

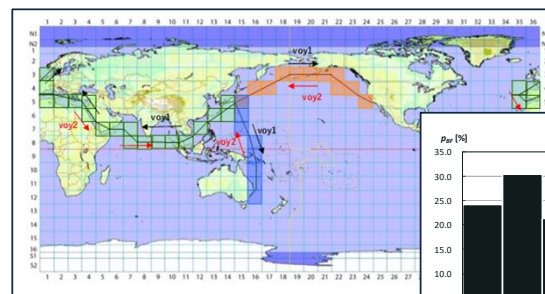
ライフサイクル主機燃費評価法

入力 評価期間・航路
個船情報・生物汚損／経年劣化

出力 総燃料消費量・GHG排出量

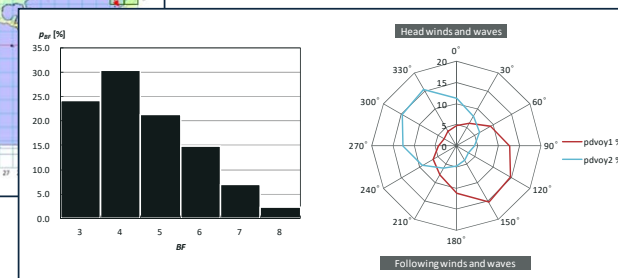
分析的に調達での比較、性能改善・
投資効果の判断が可能

燃料使用量から経済性評価も可能



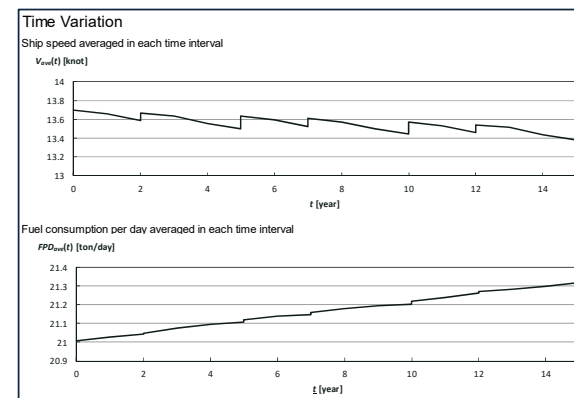
標準航路 (選択)

遭遇海象の長期統計



船速低下

1日当たり
燃料消費量
の増加



ライフサイクル変化

2. 実海域実船性能 (2) 標準手法・保証



EEDI規制

国際海運からのGHG排出規制

2013年1月1日から開始（第1世代の規制）

- ・ **新造船**に対するエネルギー効率設計指標（EEDI）規制
- ・ **就航船**に対する船舶エネルギー効率管理計画（SEEMP）保持の義務化

IMO/MEPCの議論

◆ 実海域影響の考慮が必要！

→ f_w と $EEDI_{weather}$ の導入

◆ 恣意性のない実行が必要！

→ 海上試運転での船速補正

◆ 安全性の担保が必要！

→ 最低推進出力の適合性判定の導入

第2世代の規制

経済的手法（MBM）

GHG強度規制
2027年開始予定

EEDI : Energy Efficiency Design Index

SEEMP : Ship Energy Efficiency Management Plan

MBM : Market Based Measures

2. 実海域実船性能 (2) 標準手法・保証



EEDI規制

f_w とEEDI_{weather}の導入

f_w は海の10モード指標のうちの1モード

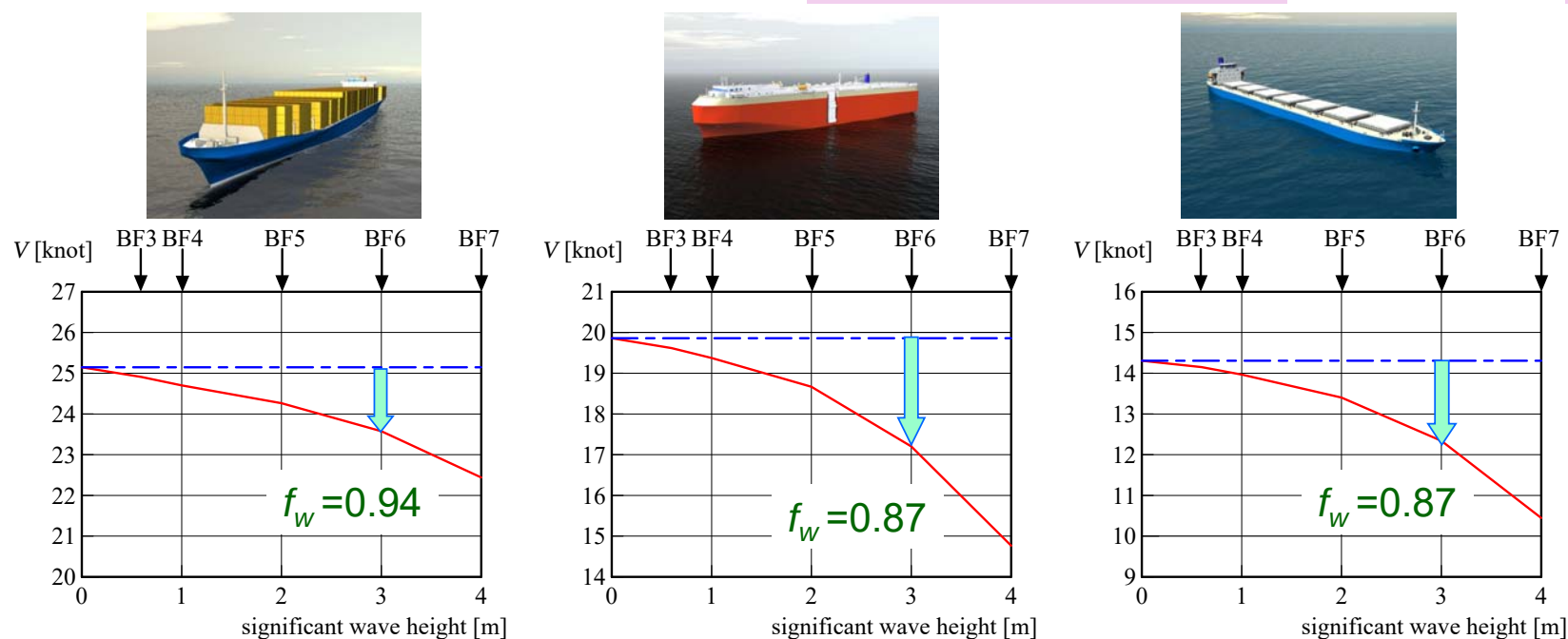
EEDI_{weather}はEEDIを f_w で割った値

BF6・向波・向風

代表海象：BF6

EEDIの分母の船速 (V) を実海域中船速 (V_w)
としたもの

$$V_w = f_w \cdot V$$



2. 実海域実船性能 (2) 標準手法・保証



評価法と標準化 (EEDIweather)

**E E D I の実海域係数で認証、N K から世界初
ケミカルタンカー竣工、G H G 削減に期待**

*fw*をE E D I に取り入れた数値EEDIweatherの認証を日本海事協会から19型ケミカルタンカー、35型ケミカルタンカーで世界で初めて取得

平成26年7月30日付プレス発表 (北日本造船(株)、(独)海上技術安全研究所)



19型ケミカルタンカー
CHEM HOUSTON (全長145m)



*fw*認証のための波浪中水槽試験の様子

<GHG強度規制>



MEPC83 (2025.4.7-11) (ハイブリッド会議)

GHG中期対策を承認

(1) GHG強度規制

GHG強度 [gCO₂/KJ]

各船で1年間に使用する燃料エネルギー当たりのGHG排出量

well-to-wake (生産から消費) で評価

他船との合算・相殺可能

IMO基金に負担金を支払う

負担金額は2030年以降見直し

GHG強度[gCO₂/KJ]

規制値

追加負担金 (超過CO₂: 1トン当たり\$380)

基準値

負担金 (超過CO₂: 1トン当たり\$100)



<GHG強度規制>



MEPC83 (2025.4.7-11) (ハイブリッド会議)

GHG中期対策を承認

(2) ゼロエミッション船等に対する
経済的インセンティブ制度

規制値

基準値

を使って経済的手法を開始

途上国・島嶼国への船舶の燃料
転換プロジェクト等への支援

IMO基金から支出

報償金

報奨金の具体的な金額は今後

GHG強度[gCO₂/KJ]

規制値

追加負担金 (超過CO₂: 1トン当たり\$380)

基準値

負担金 (超過CO₂: 1トン当たり\$100)



2. 実海域実船性能 (2) 標準手法・保証



実海域性能保証

平水中、波浪中を通した「総合性能保証」

平山次清：船体運動およびその制御と海象－我が国における運動性能研究の歩みと展望－、運動性能研究会・第13回シンポジウム（1997年、日本造船学会）

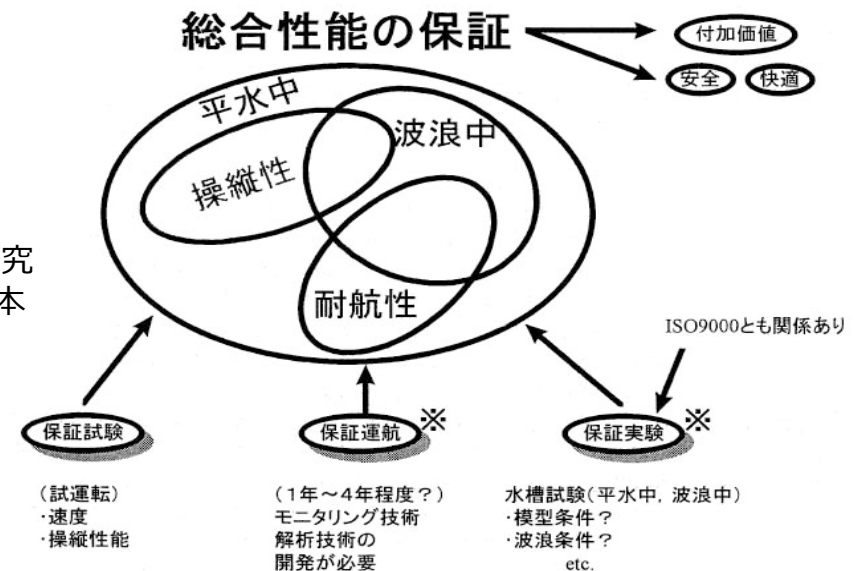
保証海象（平均海象、荒天海象）を設定

平均海象：船のスケールに依存せず

荒天海象：船のスケールによって変わる

という視点を示す。

平山次清：荒天海象の設定に関する一考察：－就航時性能保証に向けて－、日本造船学会論文集、第189号（2001年）



2. 実海域実船性能 (2) 標準手法・保証



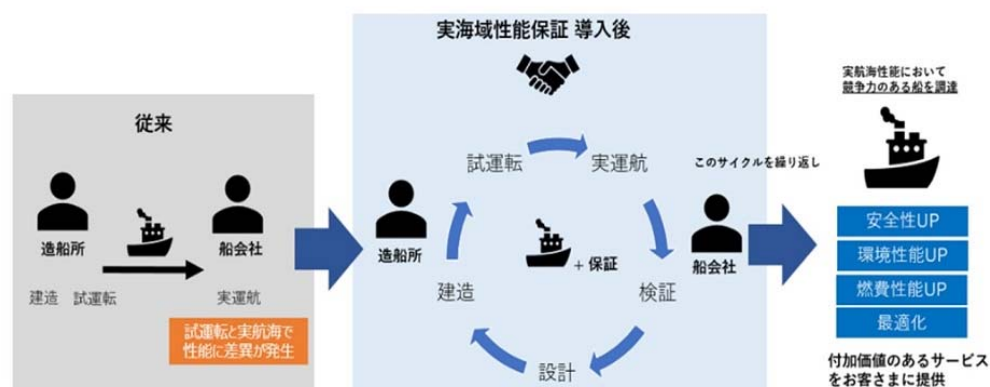
新造船の建造契約における実海域性能保証導入へ

日本郵船＋ジャパン マリンユナイテッド

2020年9月25日 プレス発表（日本郵船）より抜粋

これまで造船契約においては、波風のない平穏な海象下における船速と馬力の関係から保証速力を定義し、建造中に行われる海上公試運転にて相互確認を行うというのが一般的でした。一方、就航後の営業航海においては、波風のない平穏な航海は稀で荒天海象に遭遇することも度々あり、**実際の気象海象下における推進性能の良い船を見極めて調達することは海運会社にとって重要な課題**でした。

昨今、様々な運航データを効率良く収集することが可能となっており、国際海運における厳しい競争の中、**一層の差別化を実海域性能に求める当社と、それを差別化の源泉としたいJMUの意向**が一致し、造船契約における実海域性能保証条項の導入に至りました。



2. 実海域実船性能 (3) 設計



耐航性の船型開発

平水中船型開発との調和

「平水中の抵抗、推進性能がよい船」という評価指標と「波浪中で抵抗、推進性能が良く、安全性に優れている船」という評価指標は違う事はいまや明確である。

比較的穏やかな海象での船型

水面下の形状には触れないで、実海域で性能の良い船の型を考えることが重要。

荒れた海象下での船型（推進性能の良い船：安全性が高い船）

水線面上形状の検討

船首尾端における現象

内藤林：実海域における船舶性能に関するシンポジウム、試験水槽委員会シンポジウム（2003年、日本造船学会）

2. 実海域実船性能 (3) 設計



船型学：水面上形状

松本光一郎氏（当時：ユニバーサル造船）

大阪大学との共同研究を通じ、波浪中抵抗増加低減船首形状を開発し実用化を行った。

従来の波のない海面状況を前提とした平水中性能の最適化を追求した船首形状から、波や風のある実海域での波浪中性能向上を考慮した新たな船首形状を開発し、実用化した。これにより、従来の船首形状に比べ、波浪中抵抗増加を20～40%低減するとともに、燃費低減率3～5%を実現した。



従来型

Ax-Bow

LEADGE-Bow

この成功を受け、造船各社は実海域性能向上の取り組みを進める。

松本：波浪中省工率船首形状の開発・実用化、第8回海洋立国推進功労者表彰(2015)

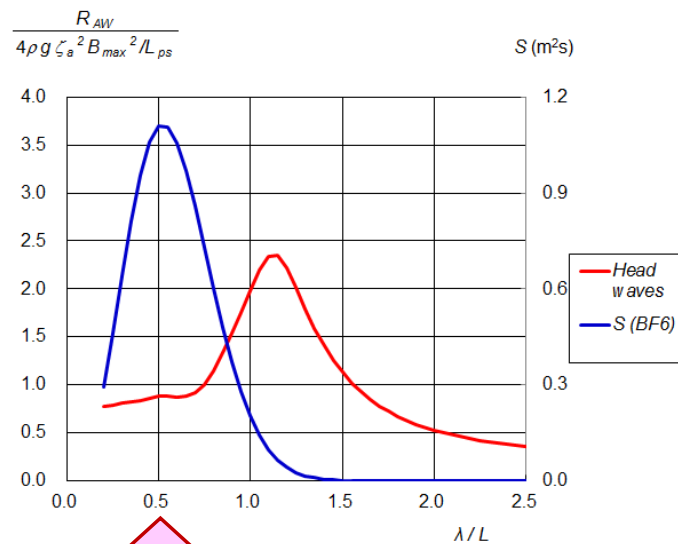
Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所／National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

3. 実海域船型学



不規則な海面を規則波の重ね合わせで表現

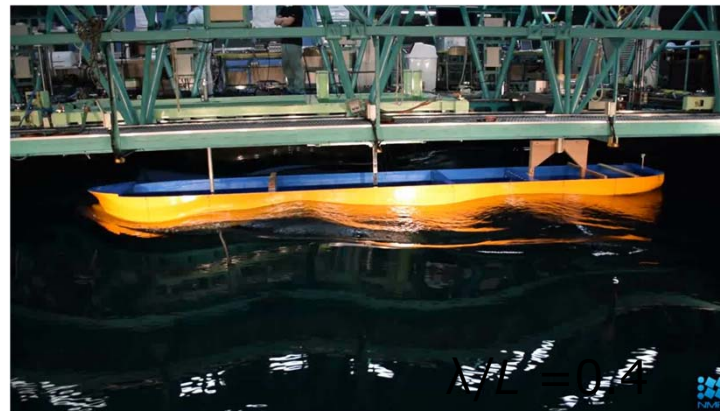
規則波中抵抗増加
周波数応答関数 ($L=225\text{m}$ の例)



スペクトラムは短波長域に集中



$\lambda/L=1.1$



$\lambda/L=0.4$

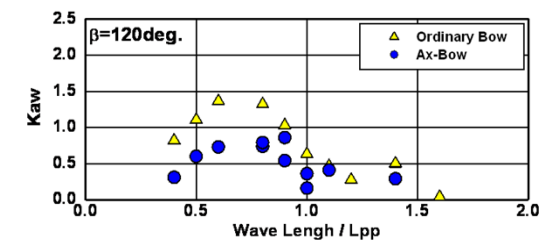
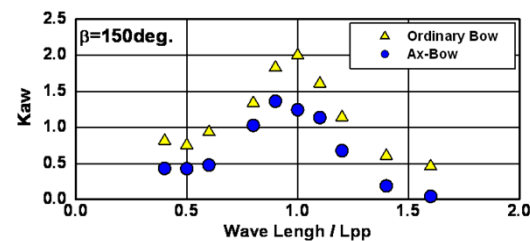
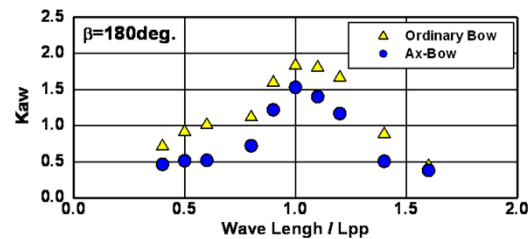
短波長規則波
short waves

3. 実海域船型学



水面上形状を工夫することにより実海域性能が向上

水面上形状の工夫



Hirota et al.: Verification of Ax-Bow Effect based on Full Scale Measurement, J. Kansai Soc. N. A., Japan, No.241, 2004

3. 実海域船型学



実海域船首COVE（ケーブサイズバルカー）

実船14.5knot、波高3m相当
向波中($\lambda/L=0.4$)

Original



COVE



Sakurada et al.: Application of Energy Saving Bow Shape in Actual Seas to JBC, OMAE2021 (2021)

Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所／National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

3. 実海域船型学



実海域推進性能を考慮した設計

多様な設計条件をどう決める（単純化する）か

設計条件

船速



実海域での速力低下を考慮した設計ポイント

気象海象

長期予測（確率）ベース

設計不規則波



絞り込み（代表的な短期海象）

大型船・・・短波長向波（波長船長比0.3～0.5）

→BF6（大洋の平均海象に近い）

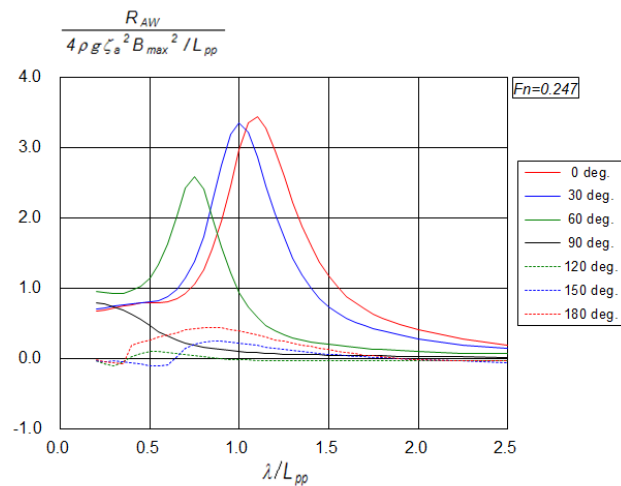
有義波高3m相当

3. 実海域船型学



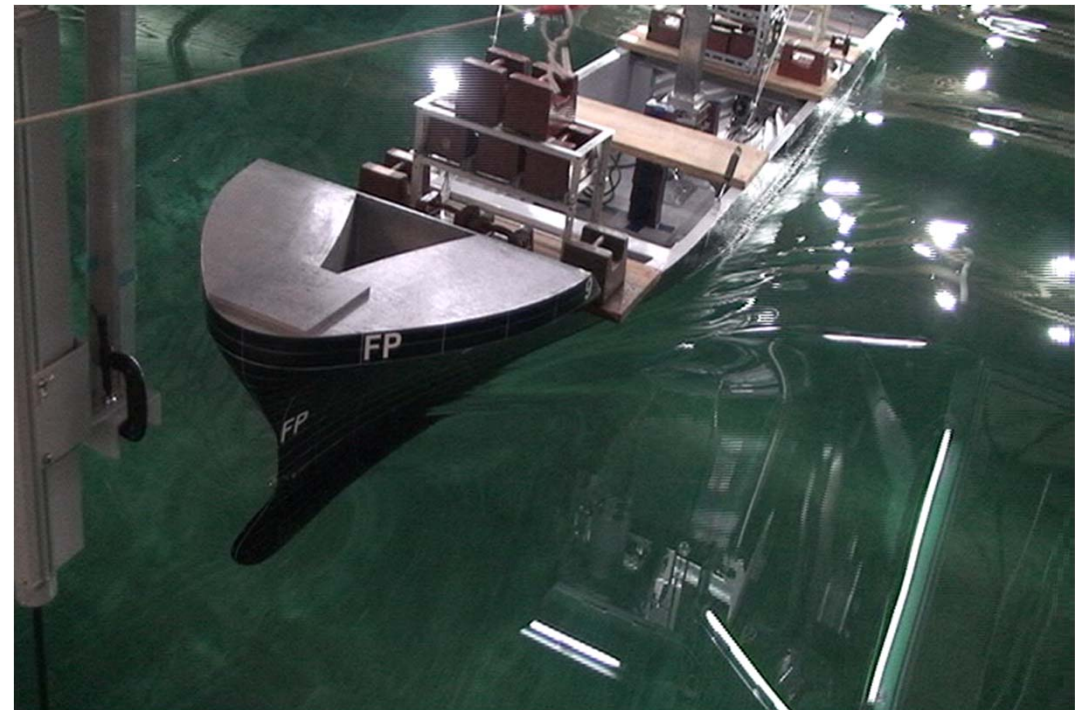
波浪中抵抗増加

規則波中抵抗増加周波数応答関数



波長船長比

短波長中抵抗増加の
推定精度を向上



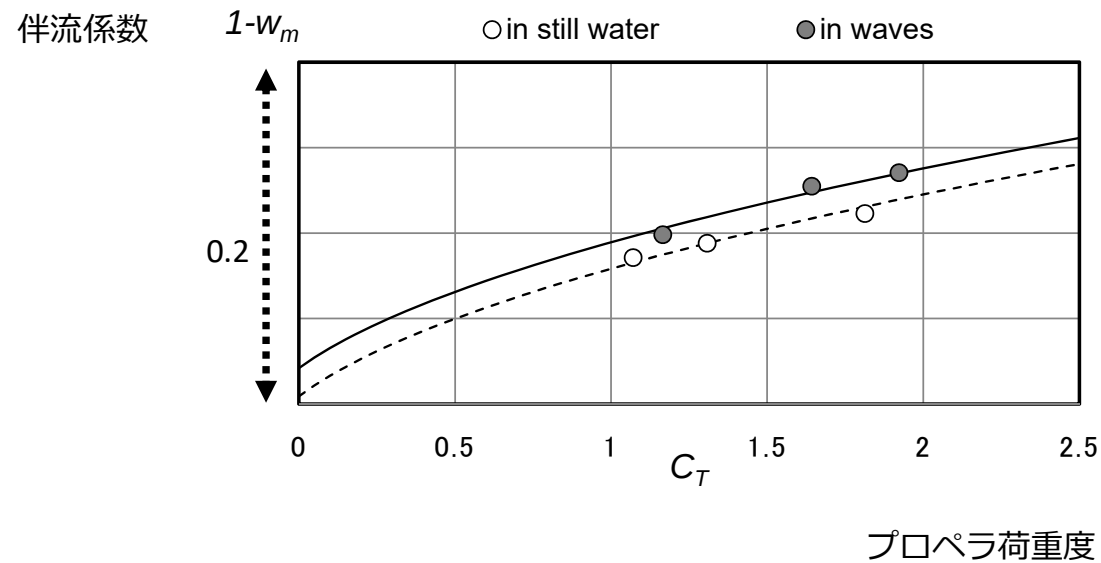
実海域再現水槽での計測
波長船長比0.4, 波高2m相当
追波

3. 実海域船型学



波浪中自航要素

荷重度変更法

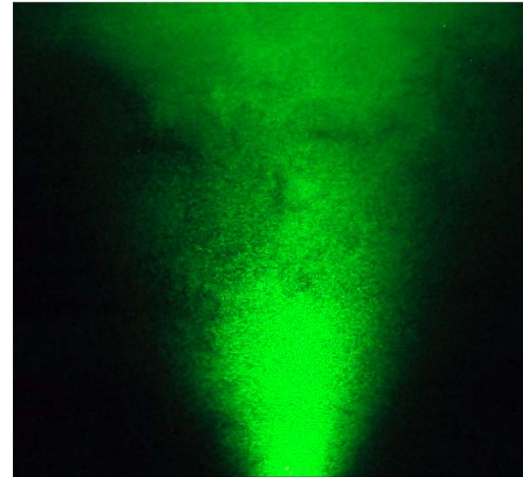


3. 実海域船型学



μバブルPIVによる流場調査

生成したμバブル



レーザシート光
により可視化

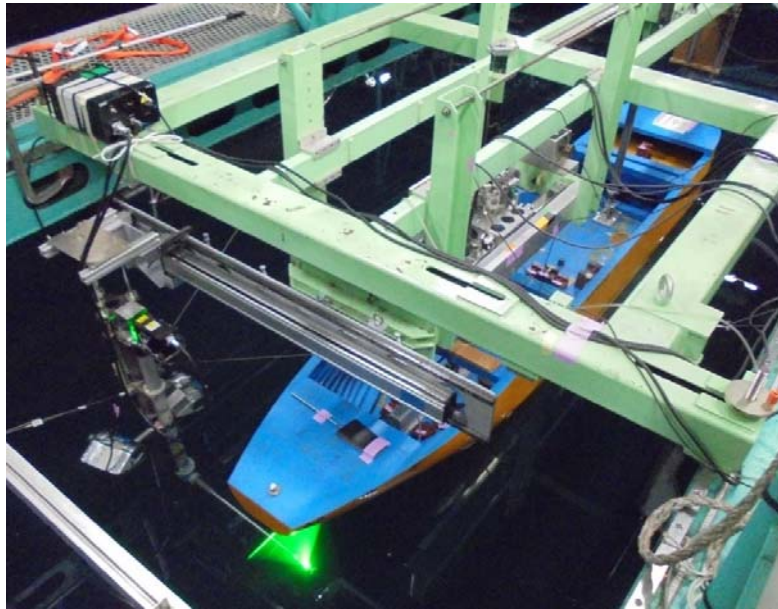
曳航水槽でのセットアップ（中水槽）



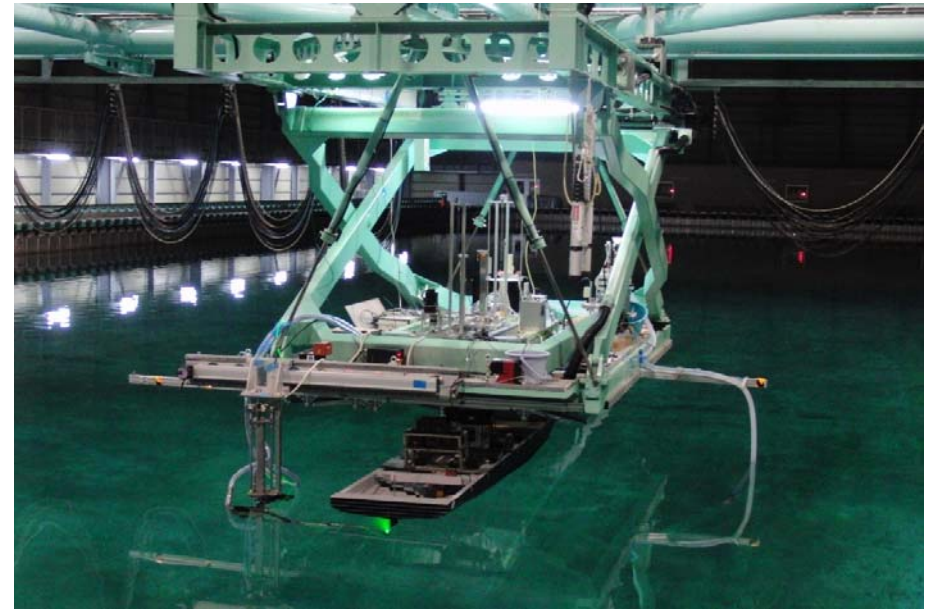
3. 実海域船型学



可視化 (μバブルPIV)



400m水槽



実海域再現水槽

大場他：船舶試験水槽におけるマイクロバブルをトレーサに用いたPIV計測法の開発－様流及び規則波の計測－、日本船舶海洋工学会講演会論文集第18号 (2014)
大場他：船舶試験水槽におけるマイクロバブルをトレーサに用いたPIV計測法の開発－模型船周りの流場計測－、日本船舶海洋工学会講演会論文集第20号 (2015)
大場他：船舶試験水槽におけるマイクロバブルをトレーサに用いたPIV計測法の開発－船尾流場と波高との関係－、日本船舶海洋工学会講演会論文集第22号 (2016)

Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所／National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

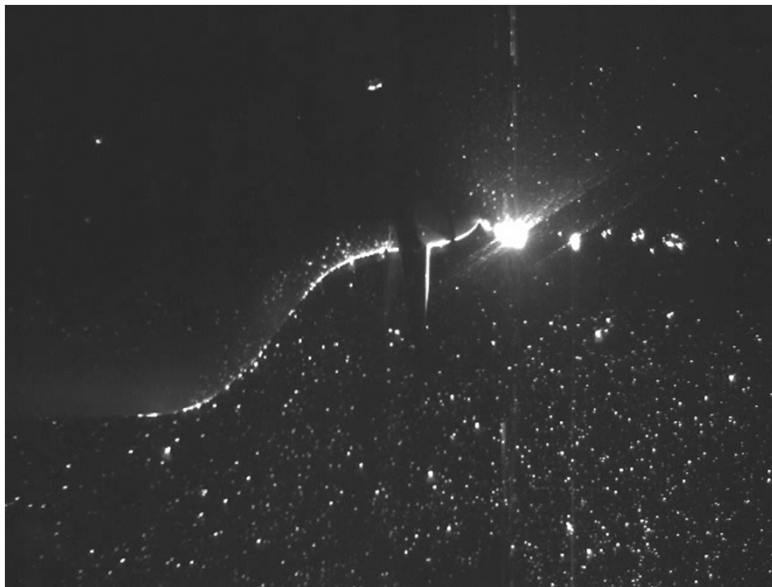
3. 実海域船型学



μバブルPIVによる流場調査

規則波中自航試験

船尾センターラインを側面から撮影



波浪中($\lambda/L=0.4$)

船体運動はほとんどない



波浪中($\lambda/L=1.1$)

船体運動の影響

大場他：船舶試験水槽におけるマイクロバブルをトレーサに用いたPIV計測法の開発－模型船周りの流場計測－、日本船舶海洋工学会講演論文集第20号、2015

3. 実海域船型学



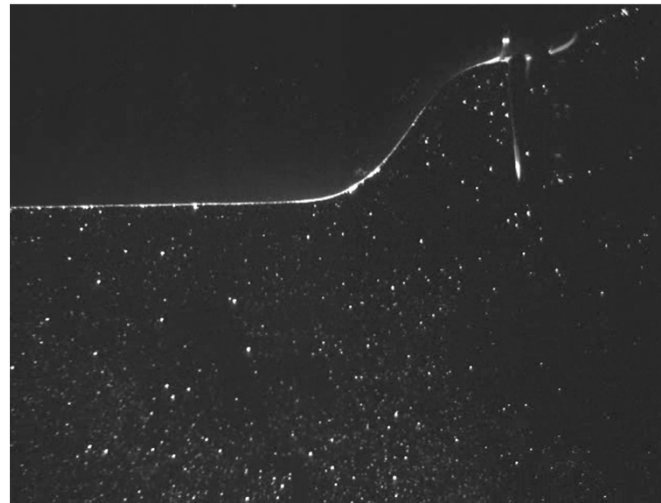
μバブルPIVによる流場調査

船尾センターラインを側面から撮影

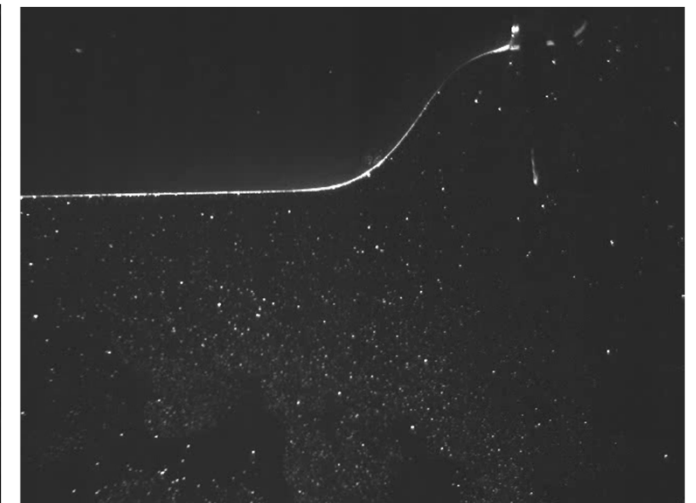
規則波中自航試験
波長船長比 (λ/L) = 1.1



波高2m相当



波高4m相当



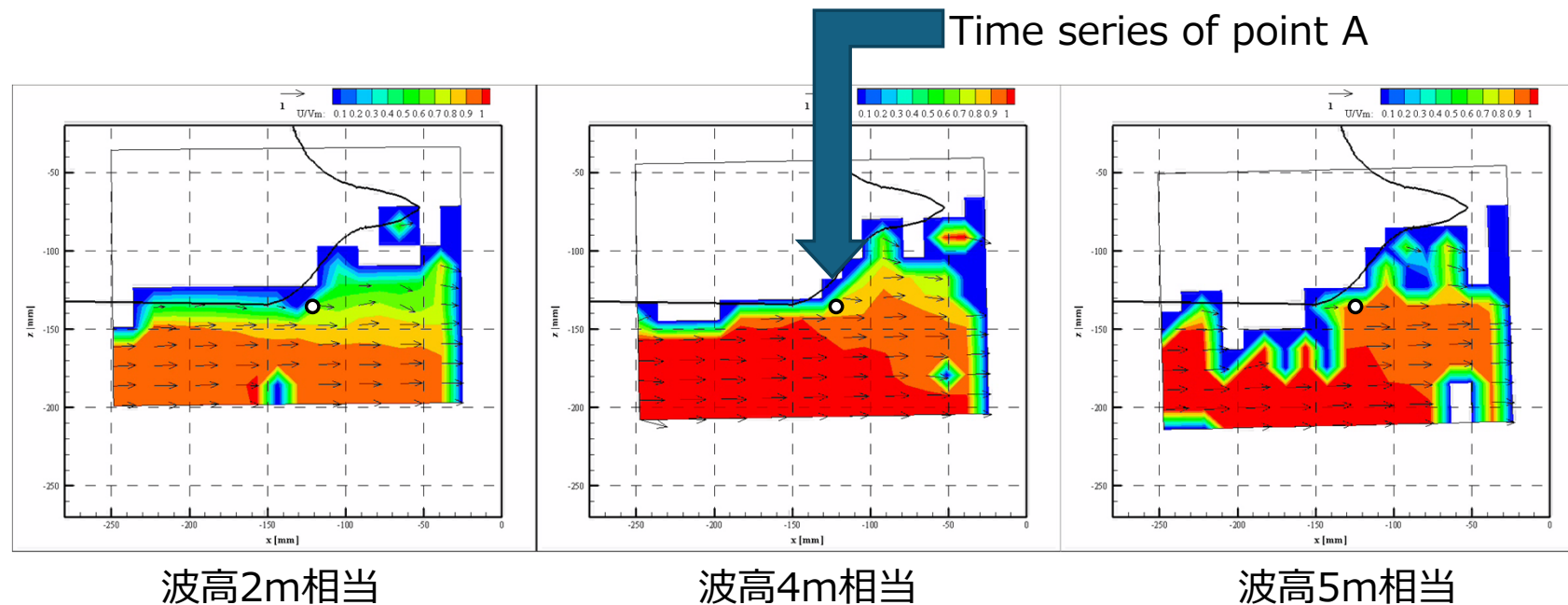
波高5m相当

3. 実海域船型学



μバブルPIVによる流場調査

規則波中自航試験
波長船長比 (λ/L) = 1.1



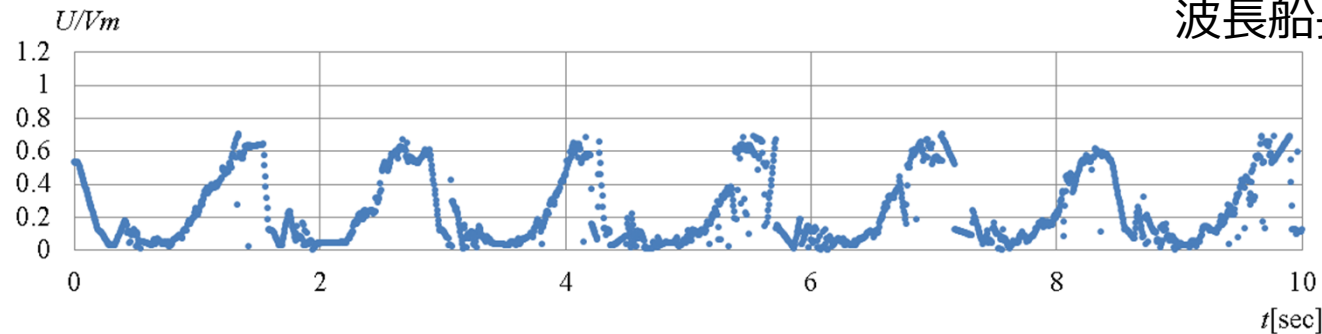
3. 実海域船型学



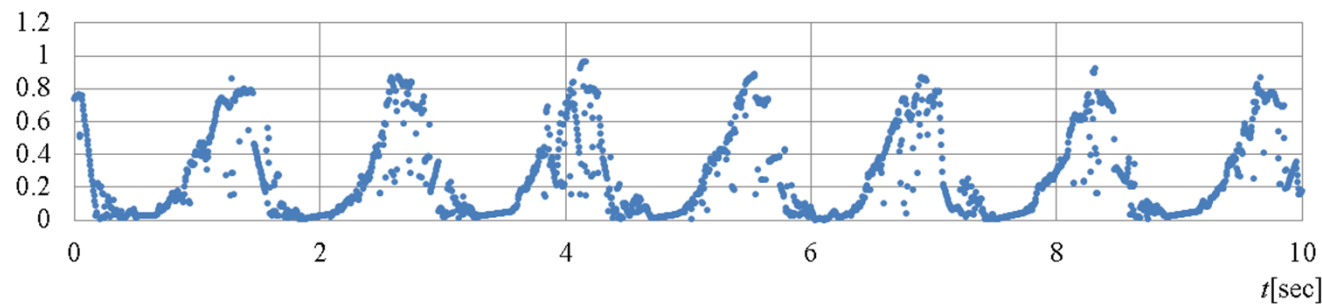
μバブルPIVによる流場調査（主流方向の速度変化）

規則波中自航試験

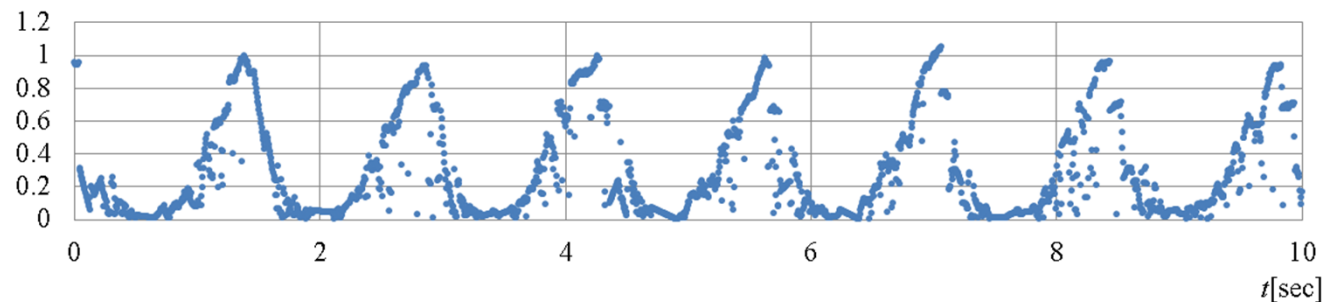
波長船長比 (λ/L) = 1.1



波高2m相当



波高4m相当



波高5m相当

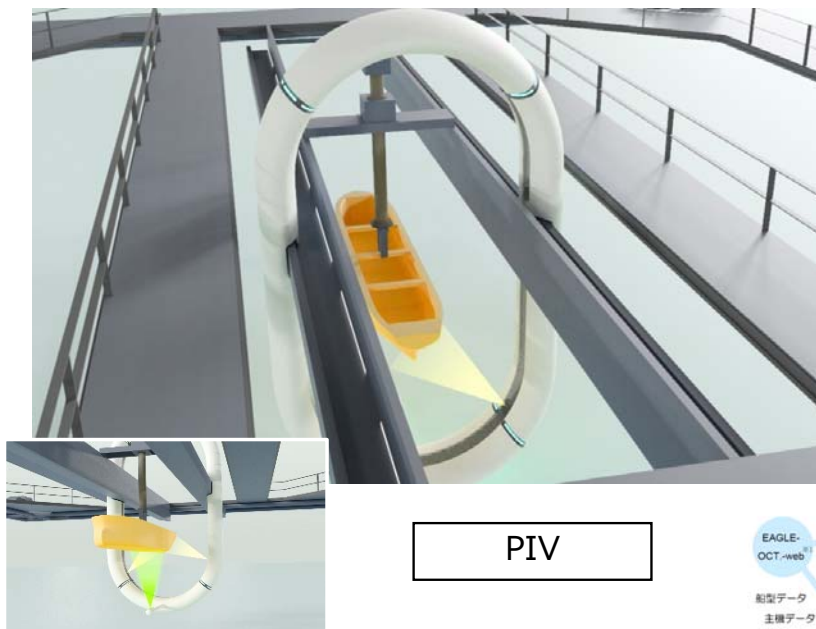
t [sec] rights reserved.

3. 実海域船型学

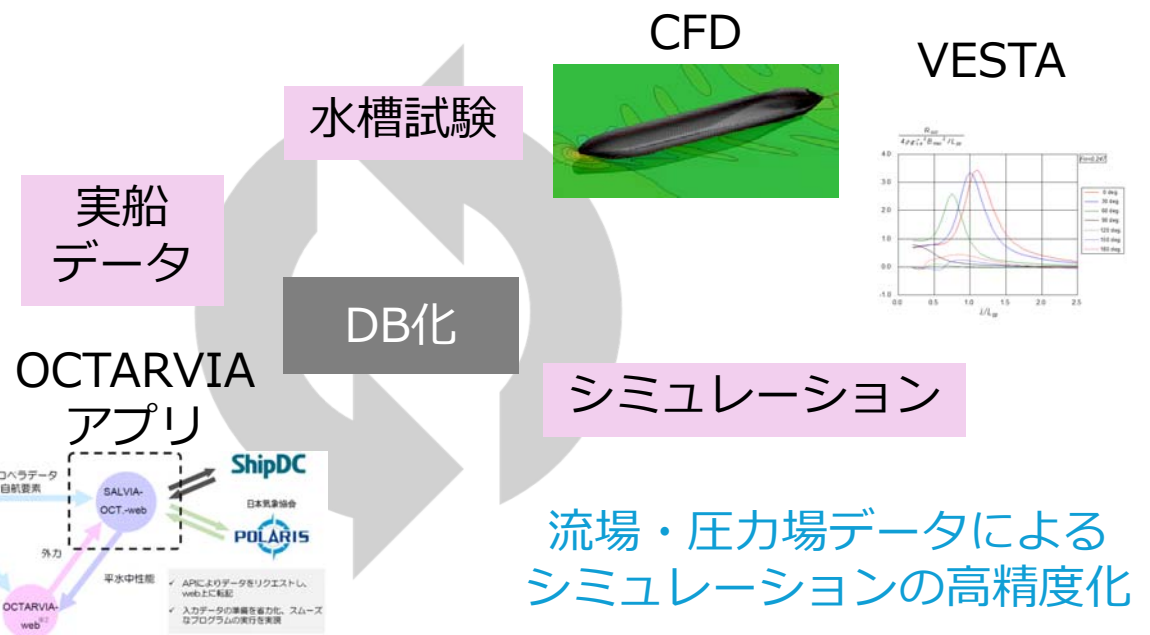


スーパー400m水槽

- 力のみの計測から流場・圧力場の計測に移行
- 自動化・無人化・安全管理、データ品質管理、**自律化**による高精度計測
- 水槽で確立した技術を実船応用



PIV



4. まとめ



実海域船型学

船舶の実海域性能を向上させる

- ・考え方

- ・設計条件

から船型に反映

実海域性能はまだ解明されていない現象が多く残る。

シミュレーションと物理実験を組み合わせることで実海域性能を向上させる考え方を進めていく必要がある。



実海域推進性能研究会で約30年、皆様にご議論戴きました。

研究会での議論は私の研究の方向性や研究実施に非常に大きく、重要な影響を与えるものでした。

会員の皆様に厚く御礼申し上げるとともに、引き続き盛会となるよう努力していきたいと思えます。