



大型キャビテーション試験水槽
50周年記念講演集

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

目次

序	1
講演会資料	
大型キャビテーション試験水槽 50 周年記念講演会	3
流体設計系長 辻本 勝	
流体設計系の中長期ビジョンと大型キャビテーション試験水槽の将来像	6
流体設計系長 辻本 勝	
大型キャビテーション試験水槽の概要	11
水槽試験技術グループ長 藤沢 純一	
研究紹介: キャビテーション水槽における空気潤滑実験	25
流体制御研究グループ 川島 英幹	
流体制御研究グループ長 久米 健一	
研究紹介: 可視化技術	31
水槽試験技術グループ 澤田 祐希	
研究紹介: 水中放射騒音関連	42
実海域性能研究グループ 新川 大治朗	
水槽試験技術グループ 澤田 祐希	

序

大型キャビテーション試験水槽は、昭和 50 年 10 月に稼働を開始し、令和 7 年で 50 周年を迎えました。

キャビテーションとは、液体中の圧力が急激に下がることで局所的に液体が沸騰し、気泡が発生・崩壊する現象です。空洞現象とも言われます。プロペラにキャビテーションが発生するとプロペラの損傷や、船体振動の増加が生じます。

当時はコンテナ船の高速化等でキャビテーション試験を実施する必要があり、キャビテーション試験水槽（空洞試験水槽：昭和 16 年完成、中心高さ 5.0m、中心線間隔 6.5m、測定部断面 0.5m×0.5m、最高流速 8.5m/s、試験プロペラ直径 250mm：完成時は目白地区に設置、後に三鷹地区に移転）では試験要望に十分応えられないため、大型キャビテーション試験水槽を設置したものです。昭和 41 年の三鷹第 2 船舶試験水槽（400m 試験水槽）稼働、昭和 46 年の三鷹第 3 船舶試験水槽（150m 試験水槽）稼働に続くもので、船舶の性能試験を行う大型研究施設が当所に整備されました。

本書には、これまで大型キャビテーション試験水槽を使用して実施した主な研究について紹介しています。キャビテーションの発生状況を調べる試験の他、最近の研究事例として、船底から空気を吹き出すことで省エネを行う空気潤滑船での推進効率の調査、キャビテーションボリューム等を計測する可視化試験、プロペラ作動により生じる水中騒音の計測が挙げられます。それらの成果は IMO（国際海事機関）で GHG 削減のため導入されたエネルギー効率指標（EEDI）規制での最低出力ガイドライン、ISO（国際標準化機構）での船舶水中放射音の測定法、ITTC（国際試験水槽会議）での推奨試験手法等の国際的な議論に活用され、合理的な標準・基準の策定に貢献しています。また、令和元年には、ISO9001 による品質マネジメントシステムを当水槽に適用拡大し、推進性能試験の品質管理への取り組みを開始しました。

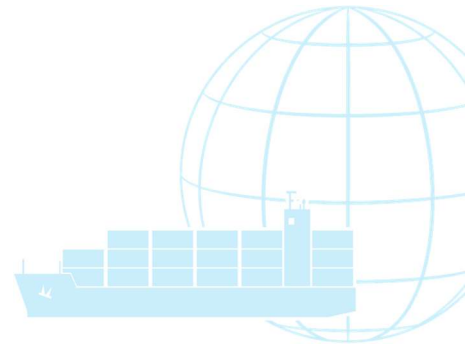
これからのプロペラ研究では、流体設計系ビジョンにも記載していますが、スーパー400m 水槽での実機プロペラ試験とキャビテーション水槽での模型プロペラ試験との接続も構想し、さらに自律計測等も進め、当水槽の利用を進めて参ります。

令和 7 年 11 月

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所
研究監、海上技術安全研究所 流体設計系長
辻本 勝

大型キャビテーション試験水槽50周年記念講演会

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 流体設計系長 辻本 勝



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

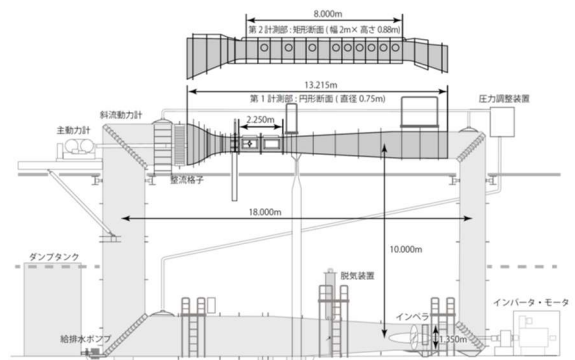
大型キャビテーション試験水槽



昭和50年（1975年）10月 竣工

豎型減圧回流式

2胴交換（第1計測胴・第2計測胴）方式



大型キャビテーション試験水槽

第1計測胴（丸型断面）

計測部：長さ2.25m、円形断面：直径0.75m

最大流速：20m/s

最大プロペラ直径：400mm



第2計測胴（矩形断面）

計測部長さ：8m、矩形断面：2m×0.88m

最大流速：6.5m/s

最大模型船長さ：7m



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

建設時の様子



基礎工事



杭工事



鉄筋工事



建屋工事



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.

4

主な設備更新

- 平成6年（1994年） インペラ駆動電動機を交流方式に更新
- 平成18年（2006年） インバータ盤・コンバータ盤・交流電動機更新
- 平成28年（2016年） 主幹制御盤更新
- 令和元年（2019年） ISO9001（推進性能試験）の認証取得
- 令和4年（2022年） サイリスタ制御盤更新
（主動力計・斜流動力計等）

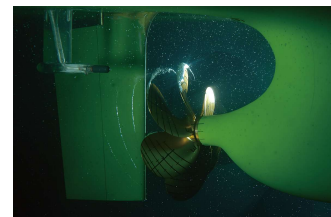
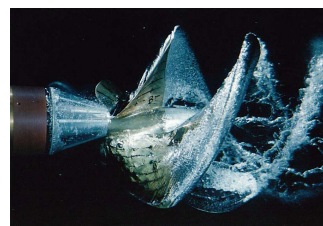


Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所／National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

5

講演

1. 流体設計系の中長期ビジョンと大型キャビテーション試験水槽の将来像
2. 大型キャビテーション試験水槽の概要
3. 研究紹介
 - (1) 空気潤滑法試験
 - (2) 可視化試験
 - (3) 水中騒音試験



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.

6

流体設計系の中長期ビジョンと 大型キャビテーション試験水槽の将来像

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 流体設計系長 辻本 勝



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

流体設計系の中長期ビジョン



所の運営方針

コア技術（流体関係）
① 環境に優しい新コンセプト船開発技術

流体設計系のビジョン

実運航状態の船舶推進性能の向上を通して
我が国海事産業の国際競争力強化に貢献します。

流体設計系の中長期ビジョン

今後20年/30年先を見据え、次代を担う中堅で検討

世界一/世界初を目指した研究開発を実施

▶ 将来のコア技術の提案

- ① 高精度な実海域実船性能計測・解析評価技術
- ② 計測データによる運航診断・設計への応用技術
- ③ 水槽実験・理論解析による実海域性能推定技術

▶ コア技術に則した20、30年後の研究ビジョンの提案

- ① 高精度実船計測：新しい実船計測の実運用と設計応用
- ② 海上水槽（高精度の実船計測フィールド）による設計改善



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

パラダイムシフト：スーパー400m水槽

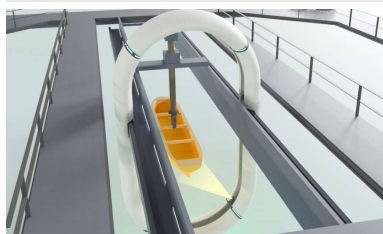
世界最高精度の実船計測技術の開発

海上水槽

実船PIV装置

高精度計測機器
(流速・トルク計測等)

新実船計測機器の実現・検証

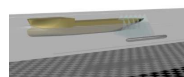


スーパー400m水槽

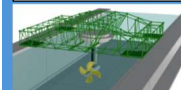
- 力のみの計測から流場・圧力場の計測に移行
- 水槽で確立した技術を実船応用
- 自動化・無人化・安全管理、データ品質管理、自律化による高精度計測

流場・圧力場データのデータベース化

PIV
(AUV形式：実船展開へ)



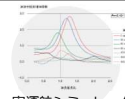
実機プロペラ試験
(流場・圧力場の計測)



シミュレーション



CFD



実運航シミュレータ
VESTA



ライフサイクル燃費評価
実船モニタリングデータ解析

流場・圧力場データによる
シミュレーションの高精度化



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.

4

パラダイムシフト：スーパー400m水槽

スーパー400m水槽での実機プロペラ試験（流場・圧力場の計測）

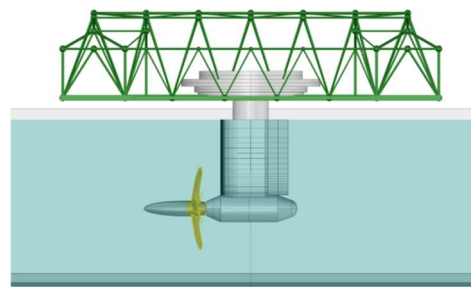
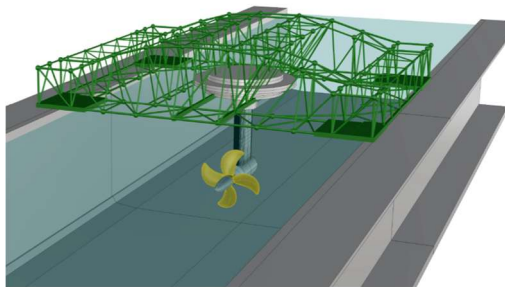
プロペラ直径（最大）：4.0mまで実施可能

動力計付高速副台車：速度20m/s（無人運転）

※低速から高速まで幅広い曳航速度により、キャビテーション試験に対応可能



青雲丸(1)
(プロペラ直径3.6m)



400m水槽：長さ400.275m、幅18m、水深8.1m



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.

5

実船計測フィールド：海上水槽

▶ 世界一/世界初を目指す技術

科学的に現象を把握

世界最高精度の実船計測技術の開発

シミュレーション

スーパー400m水槽

- 実機プロペラ試験
(直径4m以下)

連携

実船性能計測

海上水槽 25年後～

- 実船スケールでの高精度計測フィールド
- 波・風の影響を最小
- 流れは計測(本船/地上局)



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.

6

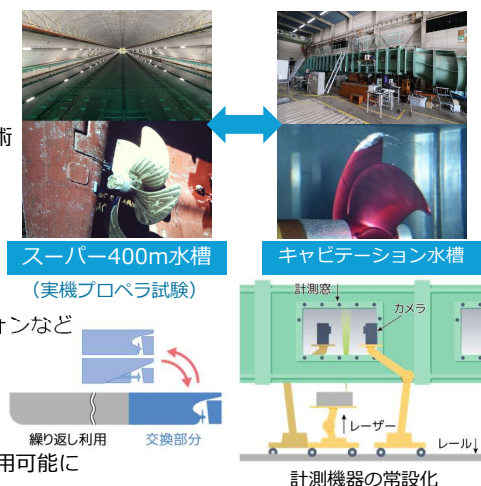
キャビテーション水槽（スーパー400m水槽との連携強化）

世界一/世界初を目指す技術

- 実海域実船省エネデバイス評価
 - ✓ 実船レイノルズ数に近づけ、空気潤滑などの特殊試験に対応
 - ✓ 実海域の流場変動を考慮した試験技術
 - ✓ 400m水槽とキャビテーション水槽の試験データによる同化技術
- キャビテーション・気泡の計測・解析
 - ✓ PIV, キャビティ体積, 気泡径分布, ターボ機械への適用 等
- 水中騒音計測・解析

その実現に向けて

- 試験の自動化・無人化・自律化の推進
 - ✓ 計測機器の常設化・自動化：カメラ、PIV、LDV、ハイドロフォンなど
- 実船に近い試験条件の実現に向けた流速の増加
 - ✓ 全長8mの大型模型に対応した計測胴
 - ✓ 400m水槽との連携強化
- 船尾形状交換可能な実船伴流再現模型
 - ✓ 模型製作の負担軽減することで多様な試験において模型船を使用可能に



試験流速の増加と400m水槽との連携により、実船性能評価を可能とする

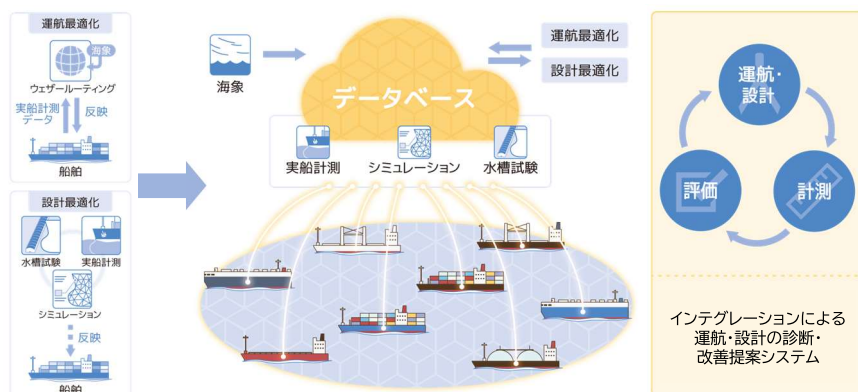


Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 / National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

7

船舶性能統合データベース

個別システムのインテグレーションを実現



実船計測、海象、船舶推進性能データベース情報による解析・評価から、
運航や設計に関する診断・改善提案を行う

将来の系のコア技術（①②③）の獲得による実現



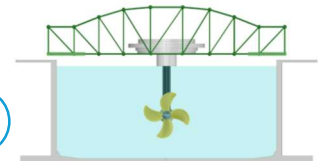
Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 / National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

8

まとめ

流体設計系の中長期ビジョン

- 実海域・実船性能の計測・解析・評価技術の確立
- 水槽試験・理論解析による実海域性能を高度推定できる技術の確立
 - ✓ 流場計測技術と計算技術との融合→新技術開発
 - ✓ 研究基盤（施設装置、データ等）の強化を実施
 - ✓ 自動化・無人化・安全管理、データ品質管理、自律化による高効率・高精度計測技術の確立
- 実海域・実船性能評価技術の応用技術の開発
 - ✓ 設計応用・運航診断→改善実行を可能とする新技術開発



▶ 世界一/世界初を目指した研究開発を実施する

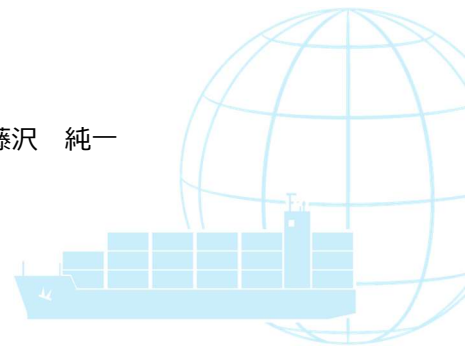
スーパー400m水槽での実機プロペラ試験とキャビテーション水槽との連携

≫ 価値の創出・向上+人材育成

大型キャビテーション試験水槽の概要

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 流体設計系 水槽試験技術グループ長 藤沢 純一



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

目次

1. 概要
2. 沿革
3. 大型キャビテーション試験水槽を用いたキャビテーション試験紹介
4. まとめ

概要

- 昭和16年（1941年）に建造されたキャビテーション試験水槽（小型キャビテーション試験水槽）を使用してきた。
 - 老朽化が著しくなり、その性能を十分に発揮し得ない状況。
 - 大型高速コンテナ船などのニーズに対応できない。
- 昭和47年（1972年）より大型キャビテーション試験水槽の建設が開始され、昭和50年（1975年）に完成した。



建築中の大型キャビテーション試験水槽



完成した大型キャビテーション試験水槽



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

概要

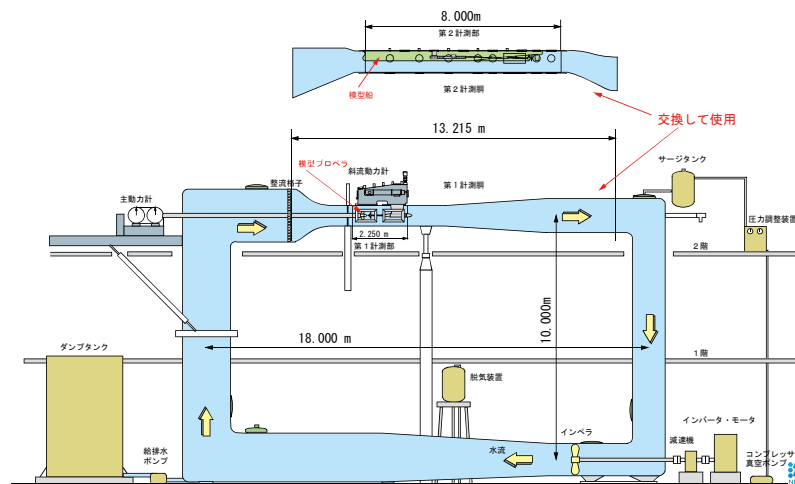
- 大型キャビテーション試験水槽の特徴
 - 計測部が2つ有り用途に応じて交換できる。
 - 主にプロペラのキャビテーション試験を行う円形断面の第1計測部。
 - 主に模型船を設置し船尾でのキャビテーション試験を行う矩形断面の第2計測部。
 - 第1計測部で使用する2つの動力計。
 - 上流から下流に向かってシャフトが出ている主動力計。プロペラ後方に舵などの設置が可能。
 - シャフトの傾斜が変更でき、下流から上流に向かってシャフトが出ている斜流動力計。斜流中のプロペラ試験が可能。主動力計と組み合わせることで二重反転のプロペラの試験が可能。



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.

4

概要



大型キャビテーション試験水槽側面図

中心線間高さ [m]	10.000	
中心線間長さ [m]	18.000	
計測部	第1計測部	第2計測部
断面形状	円形	矩形
寸法 [m]	$\Phi=0.75$	$B \times H=2 \times 0.88$
長さ [m]	2.250	8.000
最高流速 [m/s]	19.7	6.5
最大圧力 [kPa]	200	
最小圧力 [kPa]	5	
インペラ直径[m]	1.346	
インペラ翼数	4	
駆動電動機出力[kW]	355	
最高回転数 [RPM]	1150	
インペラ回転数 [RPM]	419.7	



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.

5

計測胴交換

- 2つの計測胴の交換は職員（研究者）で行っている。



第1計測胴



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.

6

計測胴交換

- 2つの計測胴の交換は職員（研究者）で行っている。



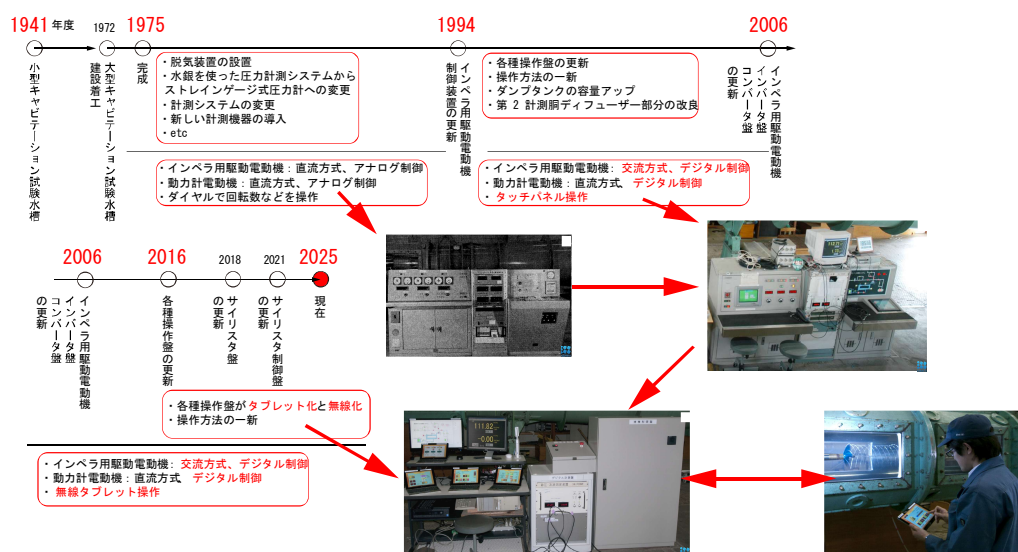
第2計測胴



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.

7

沿革



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.

8

大型キャビテーション試験水槽を用いたキャビテーション試験紹介

●キャビテーションとは

キャビテーションとは、液体中で圧力が急激に低下することによって、液体の蒸気圧を下回ると液体の沸騰、蒸発により小さな気泡（空洞）が発生する現象です。気泡が消滅するとき、大きな圧力が局部的に発生することで、周囲の物質に損傷や騒音が生じることがあります。



プロペラ表面に発生したキャビテーションの例

スクリュー・プロペラにキャビテーションが発生すると、プロペラの損傷、推力低下、船体振動の増加、騒音などの原因となります。

身近なキャビテーションの例
関節がポキッと鳴る。超音波洗浄機、歯科、美容機器などでも利用。



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.

9

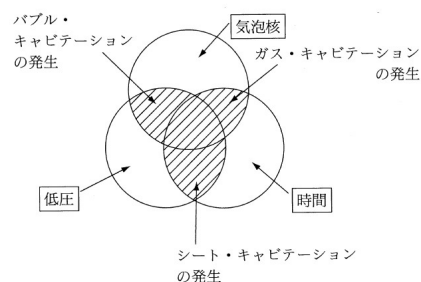
大型キャビテーション試験水槽を用いたキャビテーション試験紹介

●キャビテーション発生のための三条件*。

- 蒸気圧より低い圧力場が必要。
- キャビテーションの発生の元となる気泡核と呼ばれる小さな泡の存在が必要。
- 気泡核が滞在するための時間が必要。

●キャビテーション試験はこれらの三条件を、実船プロペラと同様な状態とした模型試験を行っている。

- キャビテーション数を一致させる。
- 気泡核や空気含有率をコントロールして水槽水の特性を実船状態に合わせる。
- プロペラ翼表面を乱流促進する。
- 高レイノルズ数で試験をする。



流れの条件と発生するキャビテーションの種類*

* 加藤洋治：新版キャビテーション 基礎と最近の進捗，槇書店，1999年

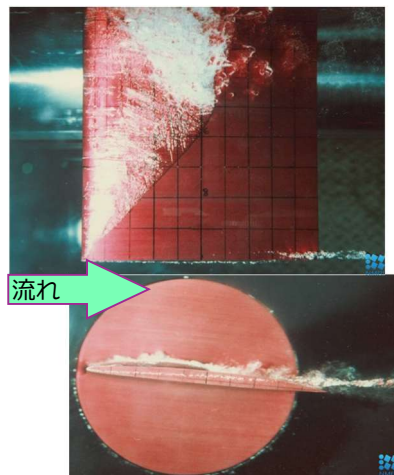


Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 / National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

10

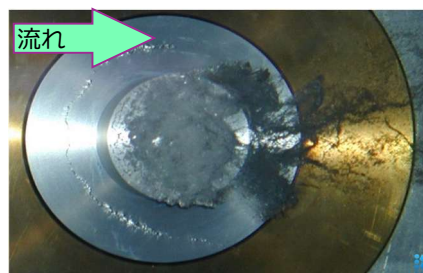
大型キャビテーション試験水槽を用いたキャビテーション試験紹介

●キャビテーションの例



翼型に発生したキャビテーション

上より撮影



円柱に発生したキャビテーション



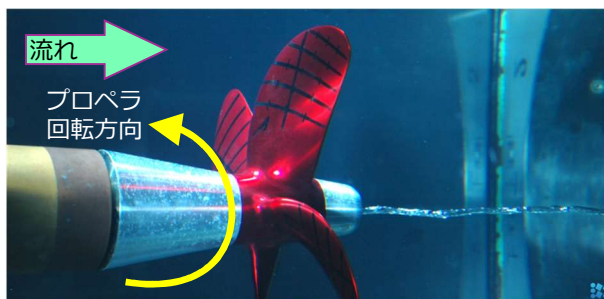
Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 / National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

11

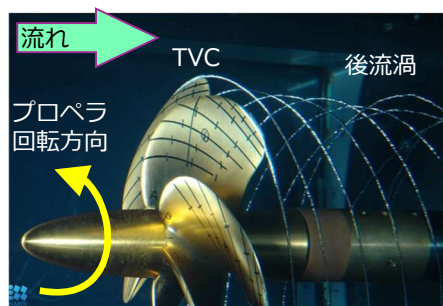
大型キャビテーション試験水槽を用いたキャビテーション試験紹介

●キャビテーションの例

キャビテーションは通常プロペラの背面（負圧面、バック面）に発生します。まれに正面（圧力面、フェース）に発生することがあります。



プロペラ中心より発生したキャビテーション
(ハブボルテックスキャビテーション；ハブ渦)



プロペラ先端より発生したキャビテーション
(チップボルテックスキャビテーション；TVC)
と後流渦

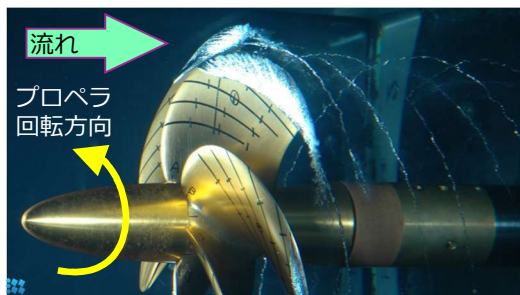


Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 / National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

12

大型キャビテーション試験水槽を用いたキャビテーション試験紹介

●キャビテーションの例



プロペラ背面に発生したシート上のキャビテーション（シートキャビテーション）



プロペラ正面に発生したキャビテーション（フェースキャビテーション）

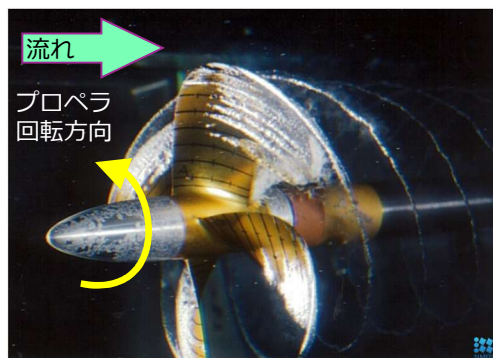


Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 / National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

13

大型キャビテーション試験水槽を用いたキャビテーション試験紹介

●キャビテーションの例



プロペラ背面に発生した筋状のキャビテーション（ストリークキャビテーション）



翼根部に発生したキャビテーション（ルートキャビテーション）

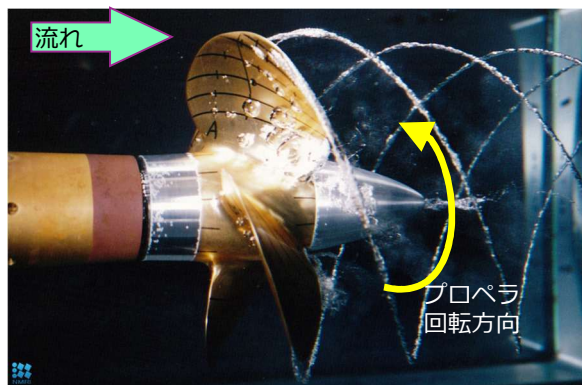


Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 / National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

14

大型キャビテーション試験水槽を用いたキャビテーション試験紹介

●キャビテーションの例



プロペラ背面に発生した泡状のキャビテーション
(バブルキャビテーション)



プロペラ背面に発生した雲状のキャビテーション
(クラウドキャビテーション)

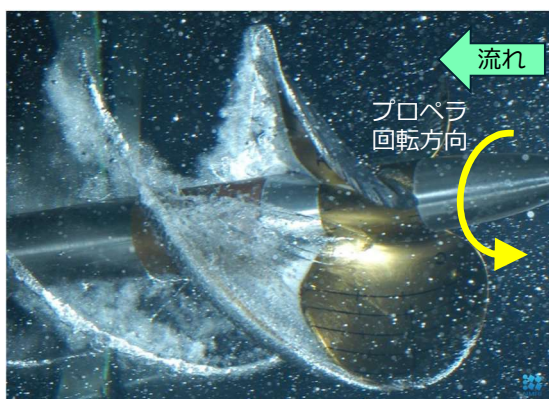


Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 / National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

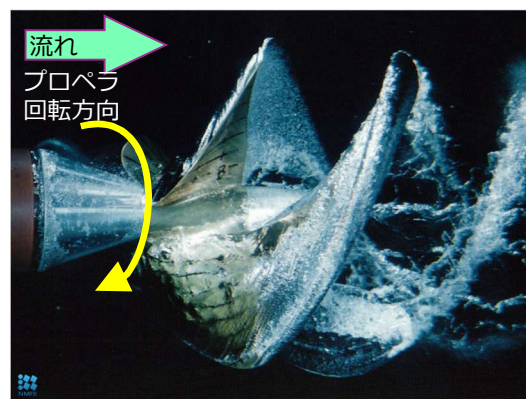
15

大型キャビテーション試験水槽を用いたキャビテーション試験紹介

●キャビテーションの例



プロペラ背面が覆われたキャビテーション
(スーパーキャビテーション)



スーパーキャビテーティングプロペラと
スーパーキャビテーション

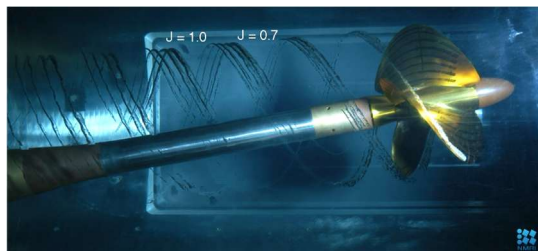


Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 / National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

16

大型キャビテーション試験水槽を用いたキャビテーション試験紹介

●キャビテーションの例



前進係数の違いによる後流渦の変化



ストロボと連続光を用いた後流写真

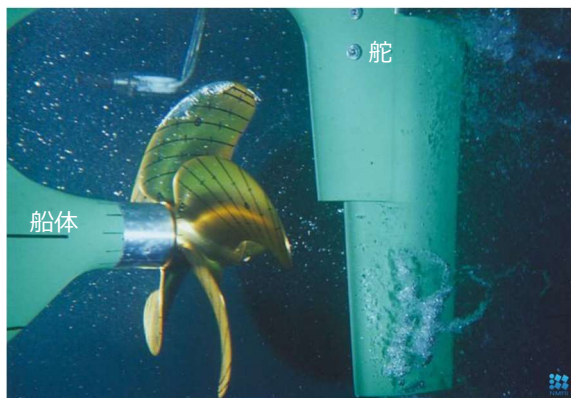


Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 / National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

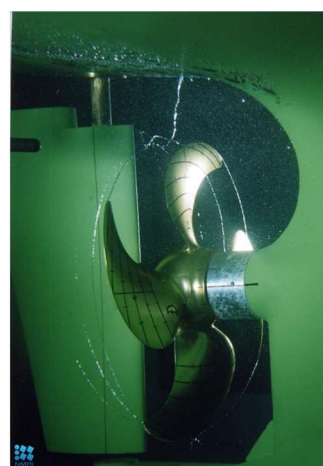
17

大型キャビテーション試験水槽を用いたキャビテーション試験紹介

●キャビテーションの例



プロペラ、舵に発生したキャビテーション



TVCが船体に繋がるプロペラハルボルトックスキャビテーション (PHVC)

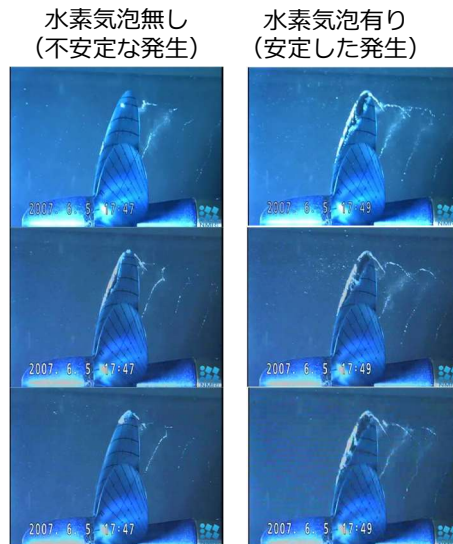


Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 / National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

18

気泡核の供給

- キャビテーションの発生には十分な**気泡核**が必要。
- キャビテーション水槽内は気泡核が**不十分**。
- レイノルズ数によってはキャビテーションの発生が**不安定**。
- 海上技術安全研究所では第1計測部、第2計測部共に水の電気分解による**水素気泡**を気泡核として提供し**安定**したキャビテーションを発生させている。



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.

19

第1計測部を使った計測例

- 第1計測部。主にプロペラ模型や翼型模型を使った試験を行う。
- 2つの動力計が利用可能。
 - プロペラシャフトが**上流から下流へ**出ている**主動力計**。プロペラ後方に舵の配置も可能。
 - プロペラシャフトが**下流から上流へ**出ている**斜流動力計**。シャフトの**角度（斜流角）を変えた計測**が可能。



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.

20

第1計測部を使った計測例

- 主動力計による計測例。翼の位置によりキャビテーションの大きさが変わる様子が観測できます。



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.

21

第1計測部を使った計測例

- 斜流動力計と高速度ビデオによる計測例。ボス表面のキャビテーションが消滅していく様子が観測できます。

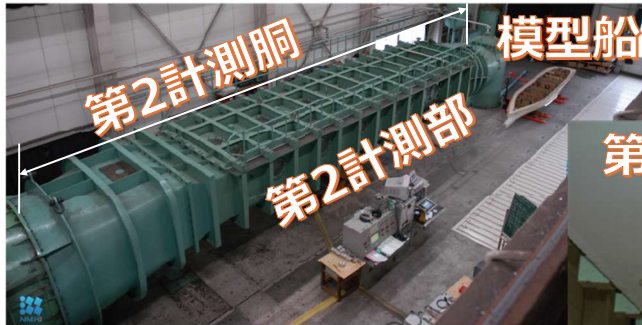


Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所／National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

22

第2計測部を使った計測例

- 第2計測部。曳航水槽で使用した模型船を使ったキャビテーション試験が可能。
- 3次元伴流中での計測となる。

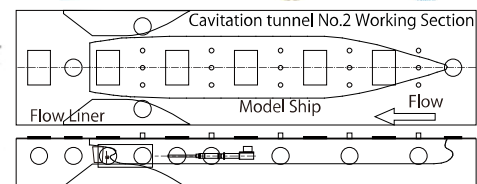
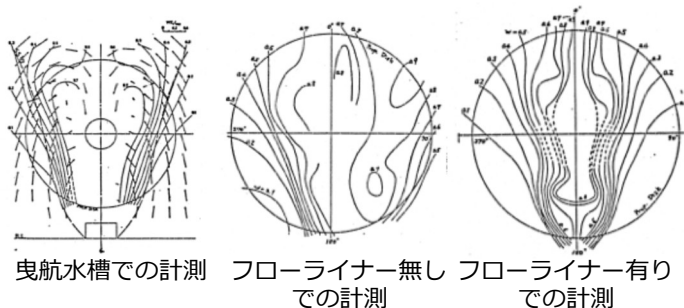


Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 / National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

23

第2計測部での伴流シミュレーション

- 第2計測部の断面積に対して、肥大船のような大きな模型船を用いると側壁影響 (Wall Effect) により伴流が非対称になる。
- フローライナーを用いることで側壁影響の除去や実船推定伴流をシミュレーションできる。



第2計測部に設置されたフローライナー



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.

24

第2計測部を使った計測例

- 船体、舵、その他付加物が付いた状態でのキャビテーションの様子が観測できます。

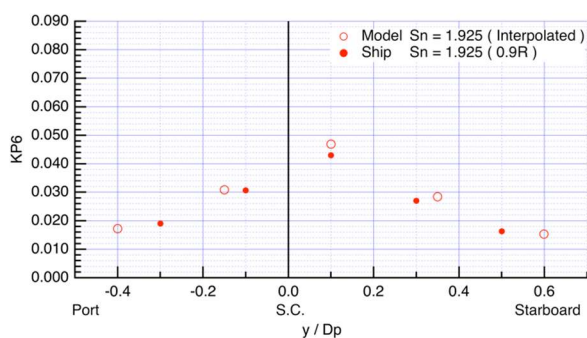


Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 / National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

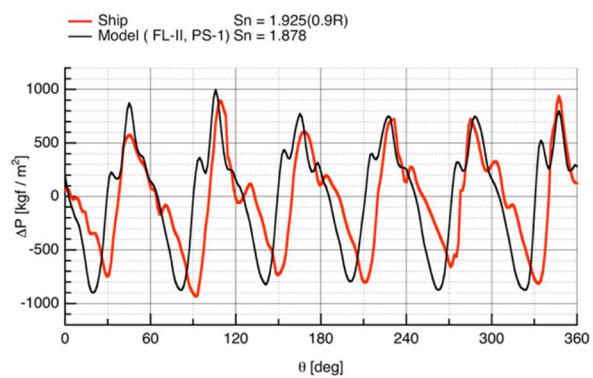
25

第2計測部を使った計測例

- 船尾変動圧力の実船と模型船による比較。
 - 良い一致を示している。



変動圧力（無次元値）の比較



時系列波形の比較



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.

26

まとめ

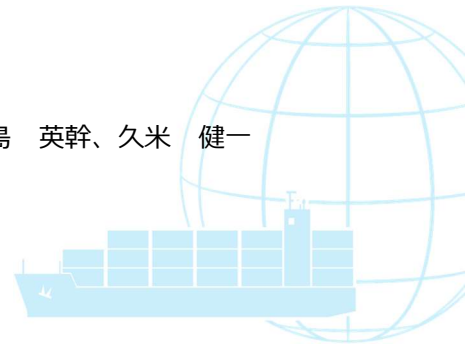
- 第1計測部では、プロペラ単独や翼型などについての基礎的実験が行われる。
- 第2計測部では、曳航水槽で用いた模型船を用いる船後キャビテーション試験が行われる。
- 水素気泡発生やフローライナー等の工夫をすることで、精度の高い計測を実現している。
- 大型キャビテーション試験水槽により、多くの成果を発表してきた。
- 完成50年を迎え今後も系ビジョンに従い研究が実施される。



研究紹介: キャビテーション水槽 における空気潤滑実験

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 流体設計系 流体制御研究グループ 川島 英幹、久米 健一



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

キャビテーション水槽における空気潤滑実験

- 気泡で船底を覆い水との摩擦抵抗を減らす空気潤滑法の実用化においても大型キャビテーション試験水槽は大きな役割を果たしている。

- 大型キャビテーション試験水槽で、空気潤滑法に関して以下の実験を実施した。

第一計測部

2次元翼を対象とした、圧力勾配が摩擦抵抗低減効果に与える影響を調査する実験

気泡流中POT試験（右上図）

空気吹き出し部を対象とした、吹き出し部の圧力損失を調査する実験



気泡流中POT試験

第二計測部

傾斜平板模型を用いた、船底傾斜が気泡流分布に与える影響を調査する実験（右下図）

縮尺模型船を用いた、空気潤滑の自航要素、船尾変動圧への影響を調査する実験

（久米他：空気潤滑船の自航要素と船尾変動圧力についての考察、平成23年日本船舶海洋工学会春季講演会論文集）



傾斜平板試験

空気潤滑船の自航要素と船尾変動圧力への影響調査

目的

- 空気潤滑システム搭載船舶の気泡が**自航要素**（推力減少係数・伴流係数）に及ぼす影響を調査する。
- 気泡吹き出し位置と**船尾変動圧力**の関連を調査する。

内容

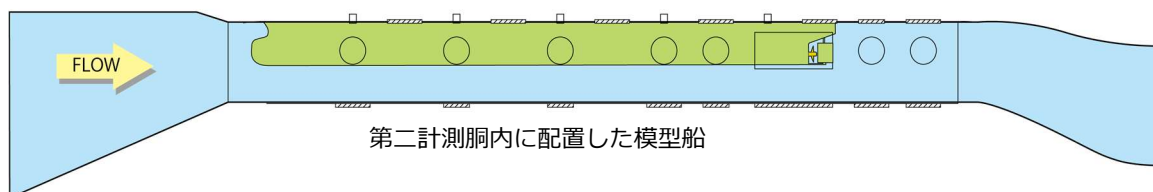
- 船体表面圧力計測により、圧力抵抗の変化から気泡の推力減少係数への影響を調べる。
- 伴流分布計測により、気泡による伴流係数の変化を調べる。
- 船尾変動圧力計測により、気泡吹き出し位置と変動圧力レベルの関連を調べる。



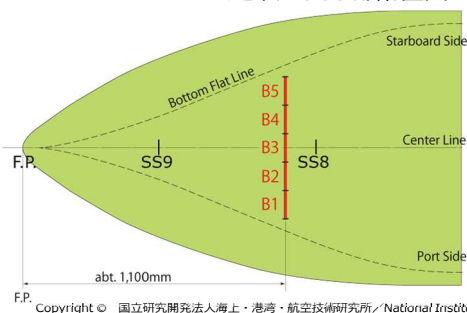
Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 / National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

3

空気潤滑船の自航要素と船尾変動圧力への影響調査



気泡吹き出し部配置図



吹き出し位置B1～B5
幅1mm、長さ102mmのスリット × 5箇所



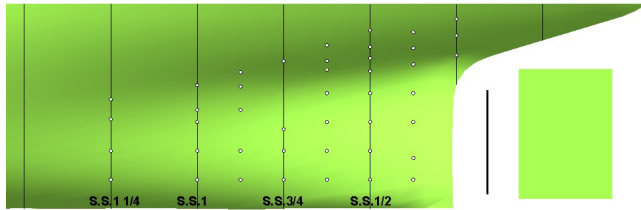
Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 / National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

4

推力減少係数の評価

評価方法（１）

- 船体表面圧力計測を行い、船長方向成分の圧力積分を行う。
- 気泡による圧力抵抗の変化を船体抵抗の変化（ ΔR ）とみなす。



○印：船体表面圧力計測位置（両舷に対称配置）

評価方法（２）

- 気泡投入時の推力減少係数（ $1-t$ ）

$$1-t = \frac{R + \Delta R}{T + \Delta T} \approx \underbrace{\frac{R}{T}}_{\text{気泡無し状態の}1-t} + \underbrace{\frac{\Delta R}{T} - \frac{R \cdot \Delta T}{T^2}}_{\text{気泡による影響項}}$$

T ：スラスト
 R ：船体抵抗
 ΔT ：スラストの変化
 ΔR ：圧力抵抗の変化

- 船体の圧力抵抗の変化が（ $1-t$ ）に及ぼす影響を調べるため、 $\frac{\Delta R}{T}$ の項に着目する。



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.

5

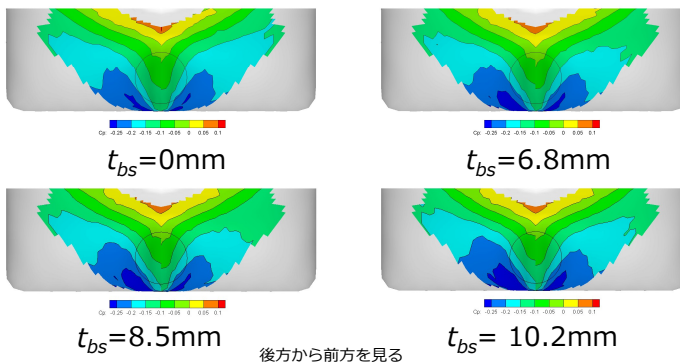
推力減少係数の評価

相当空気膜厚さ $t_{bs} = \frac{Q}{B \cdot V_{mid}} \cdot \frac{1000}{\alpha}$

t_{bs} : 実船換算された相当空気膜厚さ
 Q : キャビテーション水槽内での空気 の 体積[m³]
 B : 船幅の約85% (=0.91m)
 V_{mid} : ミッドシップ位置における水槽内平均流速[m/s]
 α : 模型船の縮率

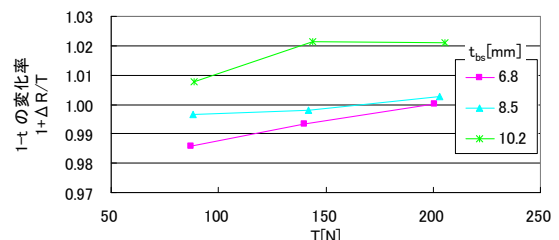
- 船体表面圧力分布

スラスト係数 $K_T = 0.159$ の場合



- 空気流量と荷重度に対する（ $1-t$ ）の変化率※

※ 泡無し状態（ $t_{bs}=0\text{mm}$ ）を基準



実用的な空気量の範囲において
 （ $1-t$ ）の変化は小さく、気泡の影響は無視できる。

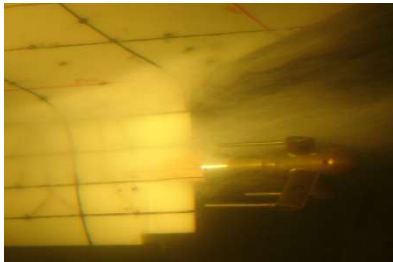


Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所／National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

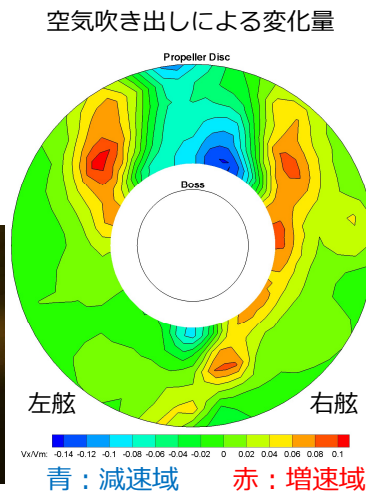
6

伴流係数の評価

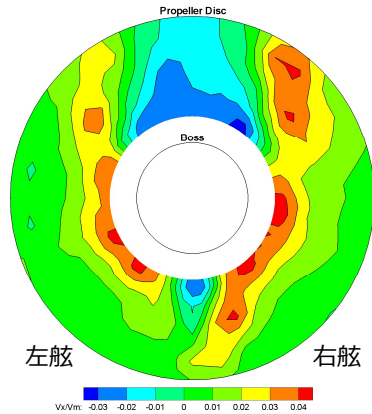
- 計測装置
4脚5孔ピトー管
- 空気吹き出し位置
B2, B3, B4 (中央寄り3か所)
- 空気流量
 $t_{bs}=0.0, 5.3\text{mm}$



伴流計測の様子



レイノルズ数増加による変化量
(気泡無し)



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.

7

伴流係数の評価

公称伴流係数

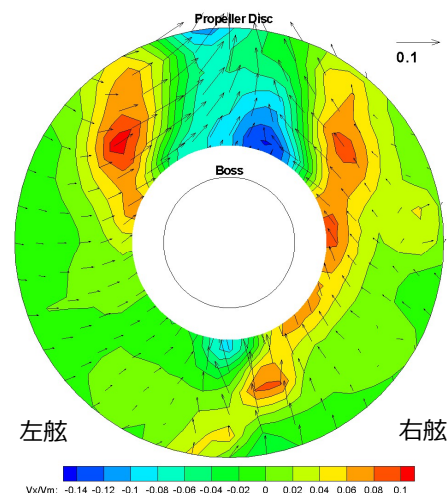
気泡	$t_{bs}[\text{mm}]$	$1-w_n$
無	0.0	0.711
有	5.3	0.716

$1-w_n$ には有意な差が見られなかった

しかし、模型試験では気泡径が実船よりも相対的に大きく、上昇流が強まることで減速域が過大に表れている可能性がある。

実船では上昇流が弱まり、減速域が縮小し、伴流係数が増加する可能性を否定できない

伴流分布図 (空気吹き出しによる変化量)



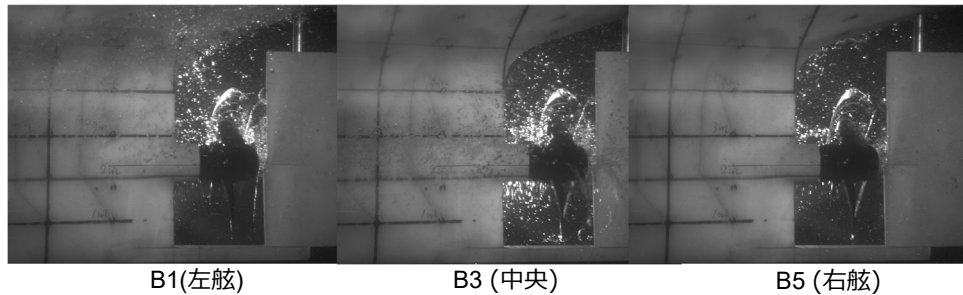
Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 / National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

8

船尾変動圧力の評価

- 気泡吹き出し位置はB1（左）、B3（中央）、B5（右）のいずれか1カ所
- $t_{bs}=2.1\text{mm}$

計測時の気泡の様子 $t_{bs}=2.1\text{mm}$ 翼角度29度でストロボ撮影



B1(左舷)

B3 (中央)

B5 (右舷)

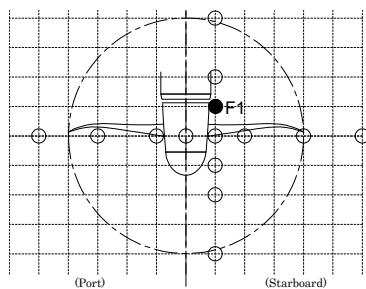


Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所/National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

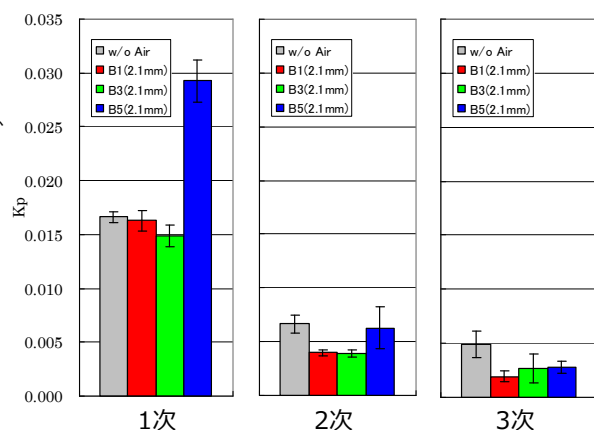
9

船尾変動圧力の評価

- 気泡吹き出し位置はB1（左）、B3（中央）、B5（右）のいずれか1箇所
- $t_{bs}=2.1\text{mm}$
- 相対的にキャビテーションが発生しやすい方のプロペラ半面に流入する気泡により1次成分が増加
- プロペラ荷重度が低い領域へ流入する気泡による悪影響はなく、むしろ高次成分は減衰



F1位置の変動圧力係数



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.

10

まとめ

空気潤滑船の自航要素と船尾変動圧力への影響調査

自航要素への影響

- 推力減少係数

実用的な空気投入量 ($t_{bs} < 9\text{mm}$) の範囲では、圧力抵抗の変化による推力減少係数の変化は無視できる。

- 伴流係数

船底境界層の変化により、伴流分布に増速域と減速域が生じる。実船では増速域が卓越し、伴流係数が増加する可能性がある。

船尾変動圧力への影響

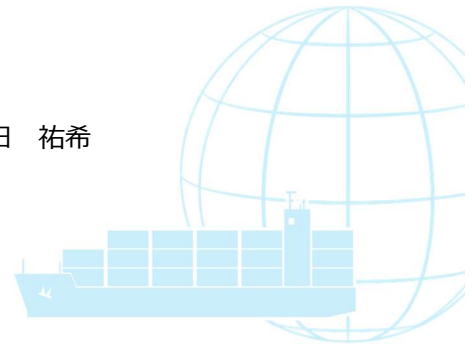
- 相対的にキャビテーションが発生しやすい方のプロペラ半面に流入する気泡により1次成分が増加する。
- プロペラ荷重度が低い領域へ流入する気泡による悪影響はなく、高次成分は減衰する。



研究紹介：可視化技術

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 流体設計系 水槽試験技術グループ 澤田 祐希



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

目次

● 可視化技術の紹介

1. 大型キャビテーション試験水槽の概要
2. PIVによる流場計測
 - プロペラ翼端渦計測
 - 模型船後流場計測
3. 組合せラインCCD法を用いた計測
 - キャビテーション形状計測
 - 弾性プロペラ翼変形量計測
4. シャドウグラフィを用いた気泡径分布計測
5. まとめ

1. 大型キャビテーション試験水槽の概要

●可視化に関する各計測部の特色

■第1計測部

- プロペラまでの距離が近く、観測窓が大きい(400x900 [mm])ため観測可能領域が大きい
- 計測部周りの空間が広く、複数台のカメラやレーザーの設置が容易



■第2計測部

- 7m以下の模型船を用いた試験が可能
- プロペラキャビテーション観測、省エネ付加物や舵付の計測も可能
- 模型船伴流中の光学計測が可能



■共通

トレーサー粒子の流用や試験状態を容易に変更が可能
⇒連続した計測が可能



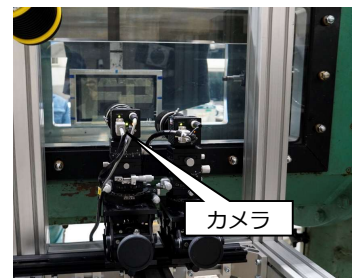
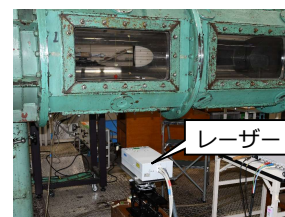
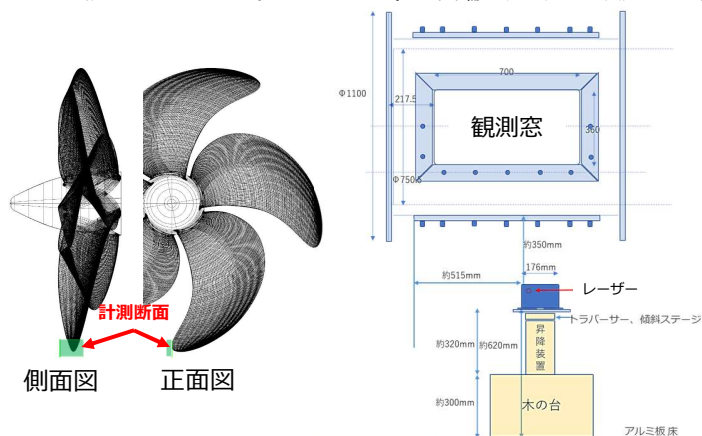
Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 / National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

3

2. PIVによる流場計測 -プロペラ翼端渦計測

●研究目的：プロペラ翼端渦のモデル構築

- 局所領域の流場計測を実施
- 青雲丸 I 世プロペラ (Seiun HSP-II) の翼端後流に対し2次元PIVを実施



PIV：粒子画像速度計測法 (Particle Image Velocimetry)

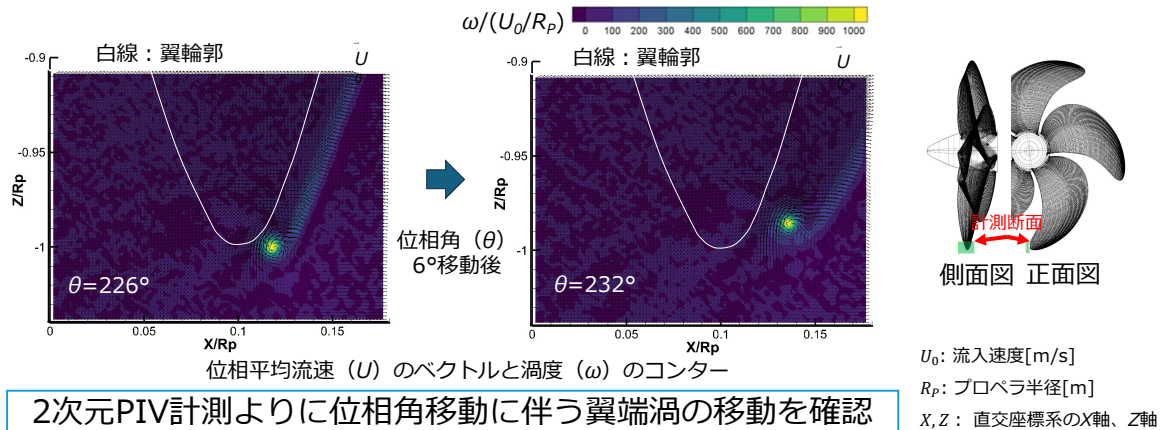
Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 / National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

4

2. PIVによる流場計測 -プロペラ翼端渦計測

●プロペラ翼端渦の流場計測結果

■回転数： $n_p=20\text{rps}$, スラスト係数： $K_T=0.25$, 位相角： $\theta=226^\circ, 232^\circ$, (青雲丸 I 世プロペラ (Seiun HSP-II))



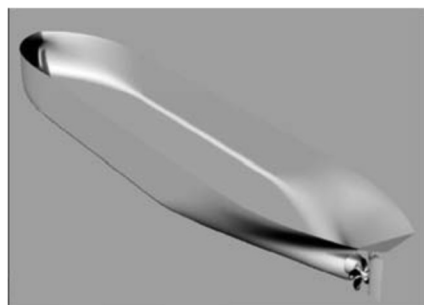
Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 / National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

5

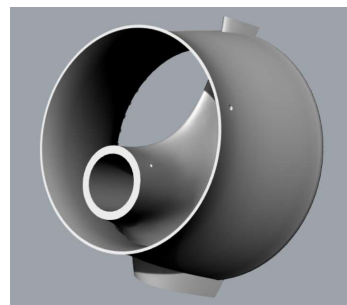
2. PIVによる流場計測 -模型船後流場計測

●ダクト型省エネ付加物取り付け時のダクト後流場計測

- 撒積貨物船：Japan Bulk Carrier(JBC)の平行部短縮模型を使用 (第2計測胴用に平行部を実船スケールで40m短縮)
- 光学実験用のために船体表面は黒色に塗装
- ステレオPIVを使用したダクト有り無しの流場計測を実施



模型船形状
(MS No.879、垂線間長6.0m、木製)



WAD (Weather Adapted Duct)



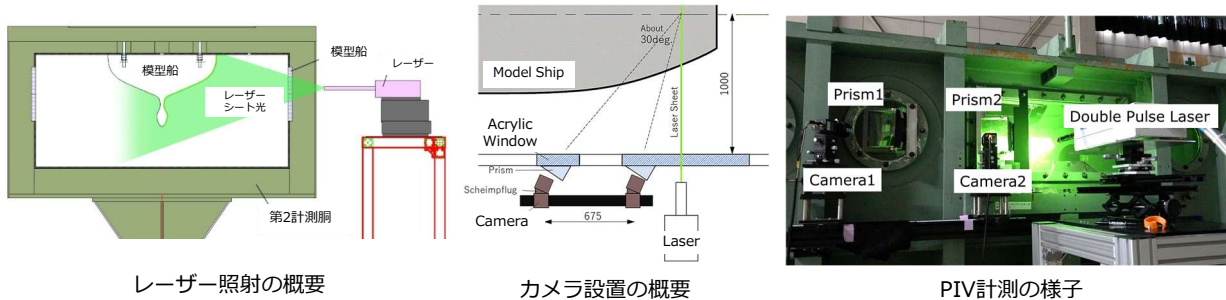
Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 / National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

6

2. PIVによる流場計測 -模型船後流場計測

● 第2計測胴におけるPIV装置について

- 水槽側面側からレーザー照射可能（レーザーは光学ステージによる6自由度調整が可能）
- カメラは計測胴側面に設置した光学レール上にて平行移動が可能
- カメラ焦点はScheimpflugを用いて調整、レンズ前には水プリズムを設置



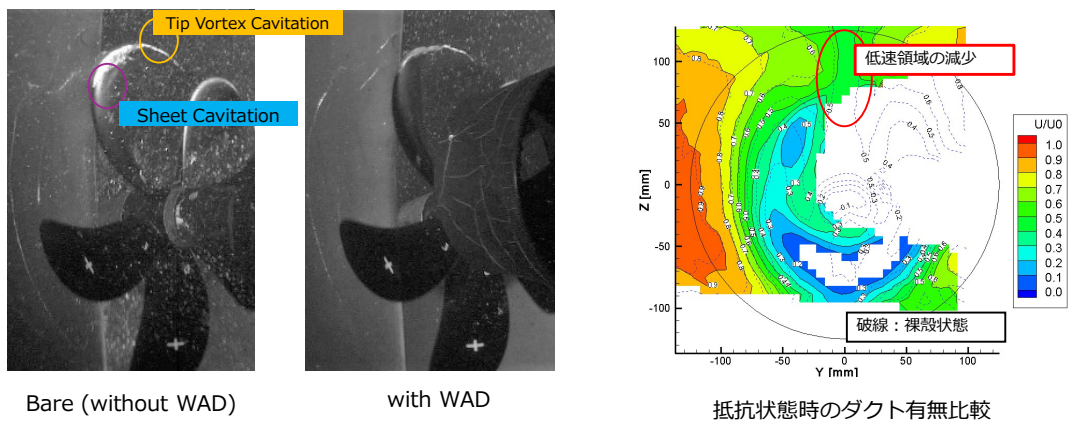
Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 / National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

7

2. PIVによる流場計測 -模型船後流場計測

● ダクト有無比較の一例

ダクト効果により低速領域の減少に伴いキャビテーションの発生が減少



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.

8

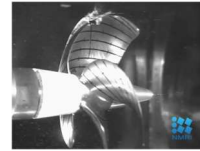
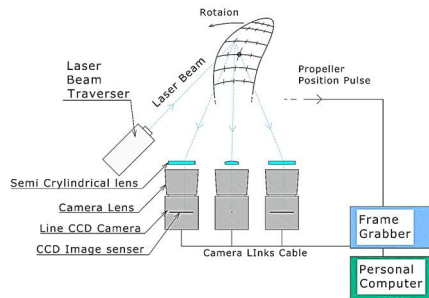
3. 組合せラインCCD法を用いた計測 -キャビテーション形状計測

- 目的：プロペラキャビテーションおよび樹脂製弾性プロペラの作動時変形量の三次元計測

⇒組合せラインCCD法を用いた三次元計測システムを開発(特許取得済)

■ 組合せラインCCD法

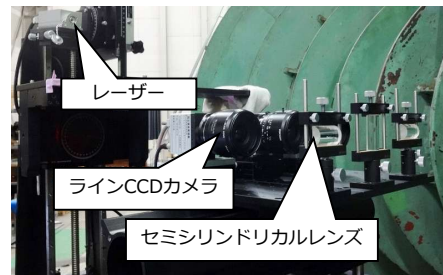
ラインCCDカメラを3台以上使用してレーザースポット光の三次元位置を求める計測法



キャビテーションの様子



樹脂製模型弾性プロペラ



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.

9

3. 組合せラインCCD法を用いた計測 -キャビテーション形状計測

- ラインCCDカメラとは

	エリアCCDカメラ	ラインCCDカメラ
素子の違い		
画素数	100~500万px (1ライン 1000~3000px)	1ライン4000~10000px
撮影速度	フレームレート 30~200fps	スキャンレート 3~12kHz
主な用途	画像解析・PIVなど	工業製品の製品チェックなど

主な特徴

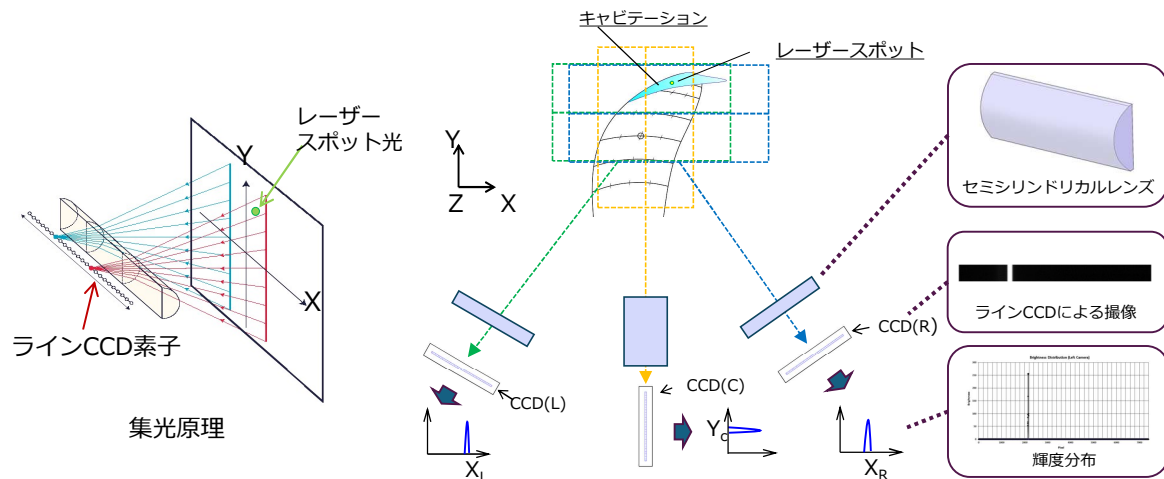
- ・ 0.1msecの露光時間で撮影可能、1px当たり約0.2mmの解像度
- ・ 画像処理が非常に高速、1次元輝度分布からのピーク値検出のみ



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.

10

3. 組合せラインCCD法を用いた計測 -キャビテーション形状計測



3台のカメラから得られた輝度分布のピーク座標から
三角測量の原理を用いてレーザースポットの三次元座標を求める



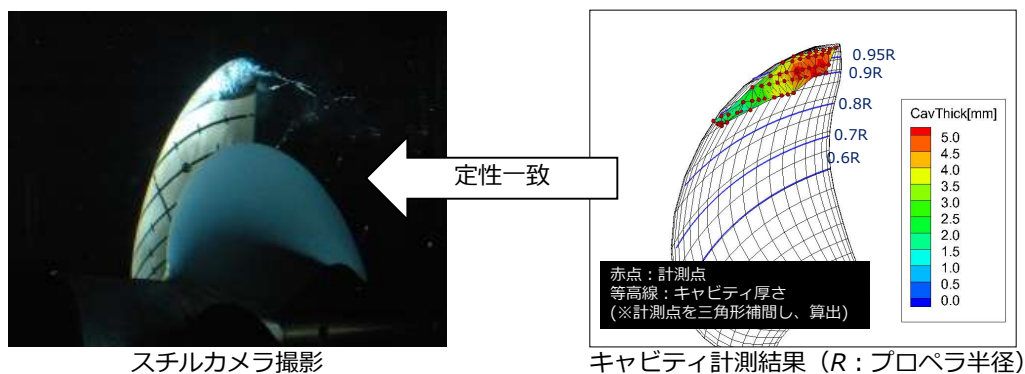
Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 / National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

11

3. 組合せラインCCD法を用いた計測 -キャビテーション形状計測

● 青雲丸 I 世プロペラ (Seiun HSP-II) の計測結果

計測条件 : キャビテーション数 (σ_N) = 2.99, n_p = 30.0 [rps], K_T = 2.01
位相角 (θ) = 40.0 [deg.]



キャビテーション形状の定性一致を確認



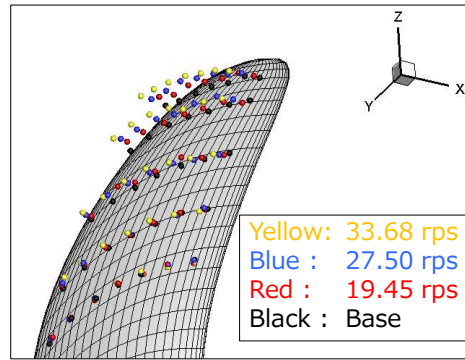
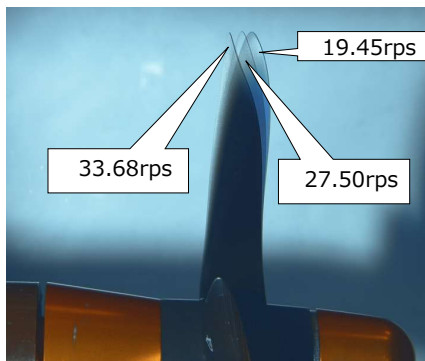
Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 / National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

12

3. 組合せラインCCD法を用いた計測 –弾性プロペラ翼変形量計測

● プロペラ回転数変化による変形量結果 (位相角を0deg.として表示)

計測条件 : $n_p=19.45, 27.50, 33.68\text{ rps}$ $K_T=0.117$
 位相角 (θ) =0.0deg.



回転数の増加により、翼先端付近のバック面(-X)方向への変形を確認



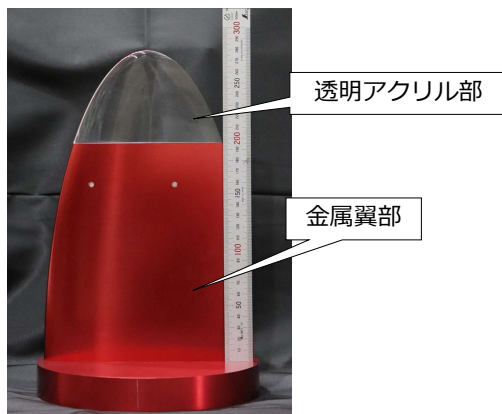
Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 / National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

13

4. シャドウグラフィを用いた気泡径分布計測

● 透明模型翼型を用いたキャビテーション気泡の可視化

- 水中放射雑音の高精度推定するため、キャビティ形状と気泡径分布の時間変化の把握が必要
- 透明翼型を製作し、シャドウグラフィを用いた気泡径分布を計測



翼輪郭	楕円分布
翼断面	NACA0012
スパン	280mm
コード	190mm
材質	透明部：アクリル樹脂 金属部：アルミアルマイト
透明部 スパン長	84mm (スパンの0.3に相当)

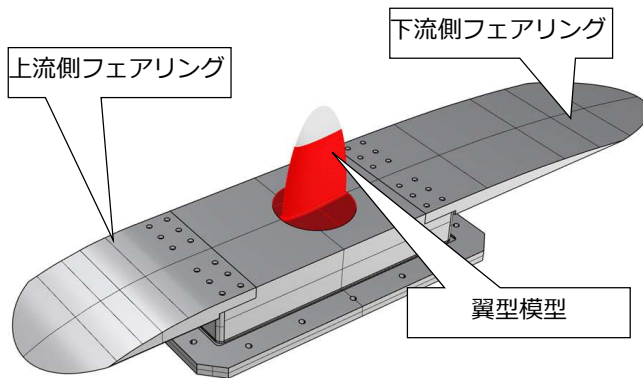


Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 / National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

14

4. シャドウグラフィを用いた気泡径分布計測

- 翼型模型の設置および水槽固定用治具について



翼型治具組立



試験の様子一部

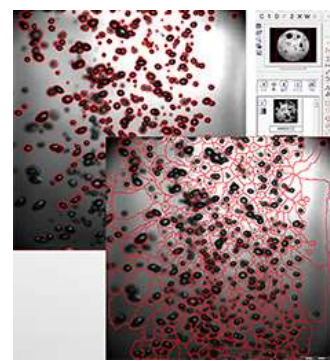
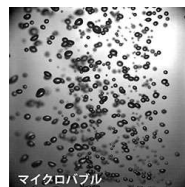
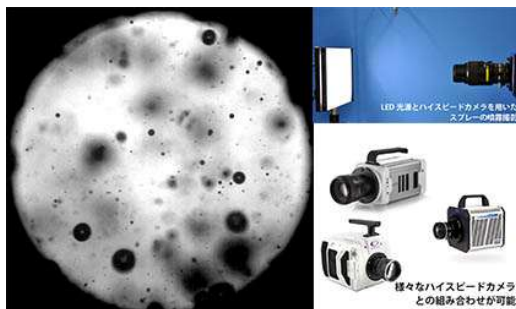


Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 / National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

15

4. シャドウグラフィを用いた気泡径分布計測

- シャドウグラフィによる計測について



西華デジタルイメージ株式会社HPより

- ・計測対象の背景方向から照明を照射し、カメラで粒子の画像を取得
- ・影絵となった粒子の画像を解析することで気泡情報を取得
(気泡情報：粒子の個数や平均直径、形状など)



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.

16

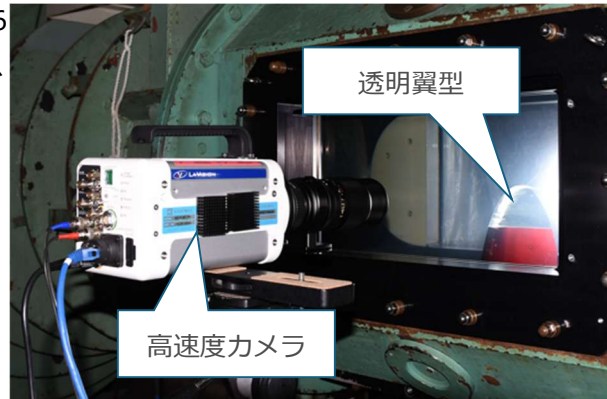
4. シャドウグラフィを用いた気泡径分布計測

● 使用機材

- ・ 高速度カメラ : Photron FASTCAM Nova s16
- ・ 照明 : LEDストロボ (IDTジャパン LED120)、
メタルハライドランプ
- ・ ディフューザー : ビニルフィルム

● 試験条件

流速 V [m/s]	7.00
キャビテーション数 σ_v	1.8、2.0
迎角 α [deg.]	10
レイノルズ数 Re	9.5×10^5
	7,200
フレームレート [fps]	100,000 200,000
露光時間 [s]	1/95,000



シャドウグラフィの試験風景



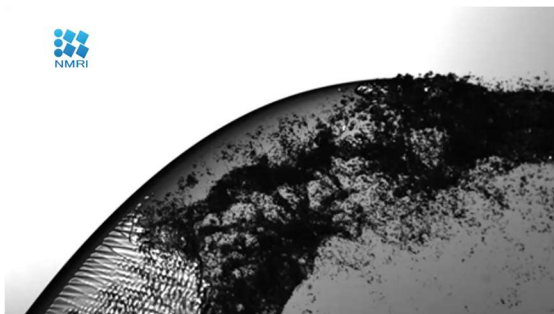
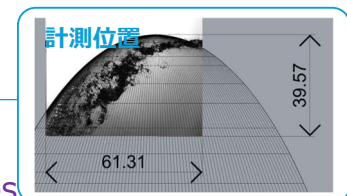
Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 / National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

17

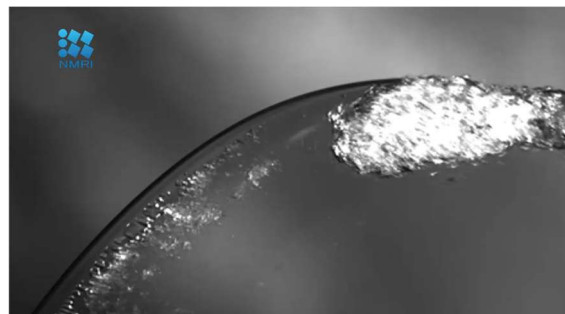
4. シャドウグラフィを用いた気泡径分布計測

● 高速度カメラ : 翼端付近の一例

$V=7.00\text{m/s}$, $\sigma_v=2.0$, $\alpha=10\text{deg.}$, Frame rate : 7,000 fps



背面照明



正面照明



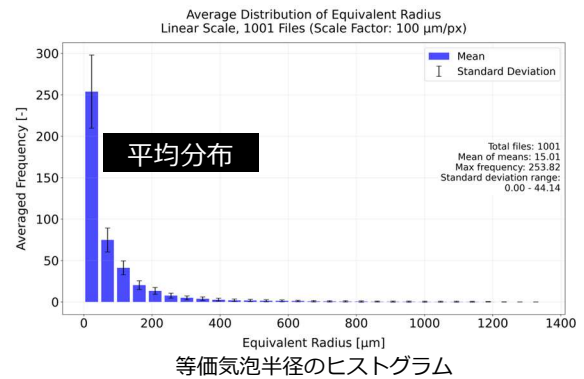
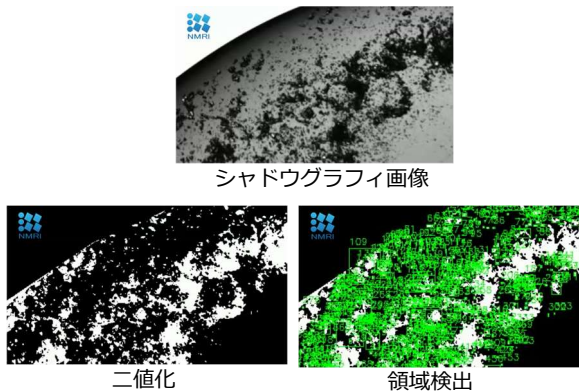
Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 / National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

18

4. シャドウグラフィを用いた気泡径分布計測

■ 解析結果の一例 (OpenCVで解析)

$V=7.00\text{m/s}$, $\sigma_v=2.0$, Frame rate = 100,000 fps



・シャドウグラフィ画像から粒子情報の解析を行い、キャビテーションの粒子径分布を確認



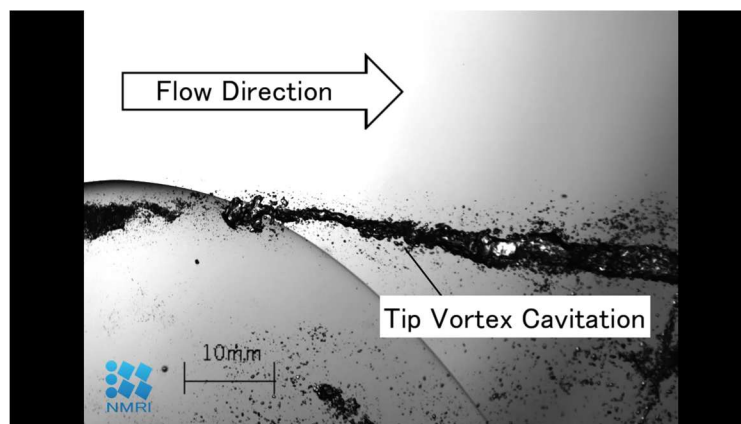
Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 / National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

19

4. シャドウグラフィを用いた気泡径分布計測

● 可視化情報学会 2025 アートコンテスト2025 (金賞受賞)

作品タイトル: どちらに旋回しているように見えますか?



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.

20

まとめ

- 海上技術安全研究所の大型キャビテーション試験水槽は模型プロペラのみを対象とした第1計測胴と模型船および模型プロペラを対象とした第2計測胴があり、それぞれの特色に合わせて流体现象の可視化を行っている。
- 大型キャビテーション試験水槽にて実施した可視化に関する研究について以下を紹介した。

- PIVによるプロペラ翼端渦および船尾流場計測
- 組合せラインCCD法を用いたキャビティ形状計測および弾性プロペラ翼の変形量計測
- シャドウグラフィによる気泡径分布解析

可視化技術を用いることで、プロペラ周りの流場の定量計測が可能である他、プロペラキャビテーション形状等に対し非接触な水中三次元計測が可能である



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.

21

研究紹介: 水中放射騒音関連

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 流体設計系 実海域性能研究グループ 新川 大治朗
水槽試験技術グループ 澤田 祐希



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

発表の流れ

- はじめに
- キャピタンの水中放射騒音計測システムと計測例
- 水中放射騒音の低減対策
- 水中放射騒音推定法
- まとめ

はじめに

■ 水中放射騒音

- 船舶からの水中放射騒音（Underwater Radiated Noise, URN）は、船体外板を介して伝わるエンジンなどの機械騒音、プロペラキャビテーション騒音、船体と海水の流体摩擦音などがある。
- 船速の増加、貨物の搭載重量の増加、波浪中での抵抗が増加すると、キャビテーションによる発生音が支配的となる傾向にある。

■ 世界の動向

- 船舶水中放射騒音は海洋生態系に悪影響を与える可能性があるため、海洋環境保護の観点から対応が求められている。
- MEPC80(2023.7)にて、商船からの水中放射騒音(URN)削減のための**改訂ガイドライン**(MEPC.1/Circ.906)が承認されて、MEPC81(2024.3)がSDC10の行動計画案を承認し、ガイドラインの普及と**経験構築フェーズ(EBP)**が2026年までの3年間に設定された。
 - URNマネジメントプランの作成
 - URN低減アプローチの提示
 - GHG（温室効果ガス）削減との調和
 - 教育訓練や管理計画プロセス標準化・強化等を議論



軍用ソナーが原因ではないかと疑われているクジラの座礁
<https://www.fisheries.noaa.gov/feature-story/beaked-whale-strandings-mariana-archipelago-may-be-associated-sonar>



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

はじめに

■ 水中放射騒音（URN）の推定方法

- 水槽試験法：キャビテーション水槽におけるプロペラ模型試験
- 理論計算法：気泡力学、CFD（数値流体力学）
- 簡易推定法：推定チャート、回帰モデル

■ 海上技術安全研究所での取り組み

- **大型キャビテーション試験水槽を用いた水中放射騒音計測技術**
- 水中放射騒音の低減対策
 - 省エネ付加物
 - **空気吹出法**
- 水中放射騒音（URN）の推定方法の開発
 - **簡易推定法**
 - パネル法と気泡力学

※ **太字**の項目を紹介



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.

4

大型キャビテーション試験水槽の水中放射騒音計測システム

■ 騒音計測システムの構成

- ハイドロフォン：B&K社 8103
- 音響計測アンプ：株式会社アクアサウンド Aquafeeler IV AQA-004
- データ収録装置（DAQ）：NI USB-6363



ハイドロフォン
https://www.hbkworld.com/ja/products/transducers/acoustic/hydrophones/8103

■ 水槽試験におけるハイドロフォンの設置の様子

- 第一計測部の場合：計測部壁、変動圧力計測平板
- 第二計測部の場合：計測部壁、模型船舶尾



第一計測部におけるハイドロフォンの配置



第二計測部における模型船とハイドロフォンの配置
(左図：船尾側から模型船を見た様子、右図：船尾のプロペラ直上の様子)



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.

5

大型キャビテーション試験水槽の水中放射騒音計測例（青雲丸 I 世）

■ 第二計測部における計測例

- 対象船型：5000トン型大型練習船 青雲丸 I 世



模型船

船型主要目

	実船	模型船
L_{pp} [m]	105.0000	6.4440
L_{oa} [m]	116.0000	6.7346
B [m]	16.0260	0.9840
d [m]	5.8000	0.3560

- 供試プロペラ：青雲丸 I 世 プロペラ Seiun HSP-II



プロペラ主要目

Diameter (2R) [m]	0.221
Boss Ratio	0.1972
Pitch Ratio (0.7R)	0.941
Number of Blade	5
Angle of Skew [deg.]	45.0



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.

6

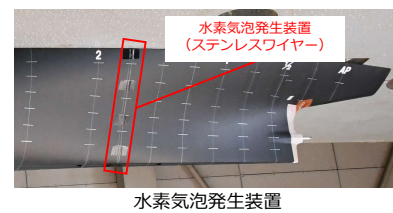
大型キャビテーション試験水槽の水中放射騒音計測例（青雲丸 I 世）

■ 試験条件

- 青雲丸 I 世の実船計測条件に合わせて、模型試験を実施
試験条件

Model				Ship
プロペラ回転数 n_p [rps]	スラスト係数 K_T	キャビテーション数 (軸心基準) σ_{nc}	キャビテーション数 (0.7R基準) $\sigma_{n0.7}$	プロペラ回転数 N_p [rpm]
20.00	0.195	3.570	3.260	149.0
20.00	0.201	2.990	2.730	163.0
20.00	0.212	2.710	2.480	171.0

- 空気含有率を30%に設定
- 水素気泡発生装置（ワイヤー）による気泡核をプロペラ上流から供給（安定したキャビテーションを発生）
- 計測項目
 - 伴流計測、変動圧力計測、水中放射騒音計測



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.

7

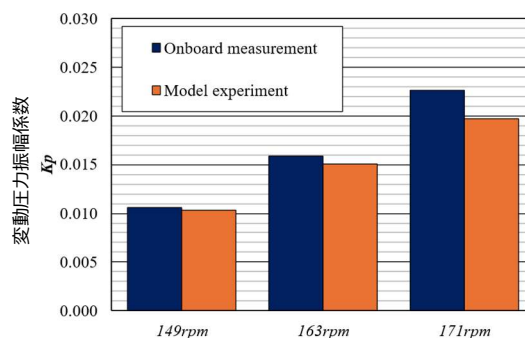
大型キャビテーション試験水槽の水中放射騒音計測例（青雲丸 I 世）

■ キャビテーション観察



ハイスピードカメラによるキャビテーション観察
計測条件: $n_p=20\text{rps}$, $K_T=0.212$, $\sigma_n=2.710$
(実船: $N_p=171\text{rpm}$)

■ 船尾変動圧力



翼周波数成分 1 次成分の比較（実船回転数）



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.

8

大型キャビテーション試験水槽の水中放射騒音計測例（青雲丸Ⅰ世）

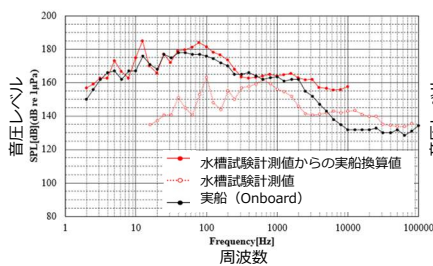
■ キャビテーション騒音の計測結果および実船の騒音レベルの推定

■ 水中放射騒音の音圧レベルと周波数をITTCの方法で補正 ITTC法（Levkobskii）

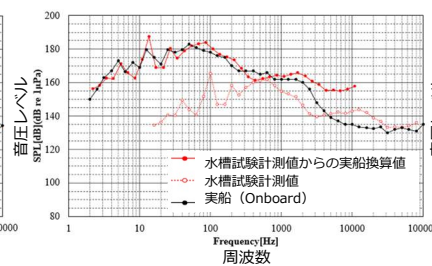
$$\text{周波数の補正: } \frac{f_s}{f_m} = \frac{n_s}{n_m}$$

$$\text{音圧レベルの補正量: } \Delta SPL = 20 \log_{10} \left[\left(\frac{r_m}{r_s} \right)^2 \left(\frac{n_s}{n_m} \right)^3 \left(\frac{D_s}{D_m} \right)^5 \left(\frac{\rho_s}{\rho_m} \right)^2 \right]$$

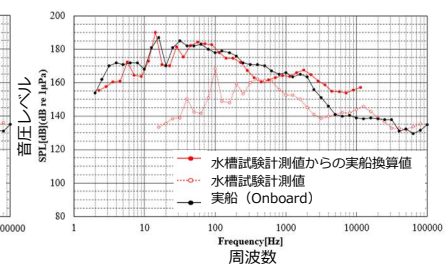
n : プロペラ回転数
 r : 音源とハイドロホンの距離
 D : プロペラ直径
 ρ : 流体密度
 σ : キャビテーション数



$n_p = 20\text{rps}$, $K_T = 0.195$, $\sigma_n = 3.570$
 (実船: $N_p = 149\text{rpm}$)



$n_p = 20\text{rps}$, $K_T = 0.201$, $\sigma_n = 2.990$
 (実船: $N_p = 163\text{rpm}$)



$n_p = 20\text{rps}$, $K_T = 0.212$, $\sigma_n = 2.710$
 (実船: $N_p = 171\text{rpm}$)

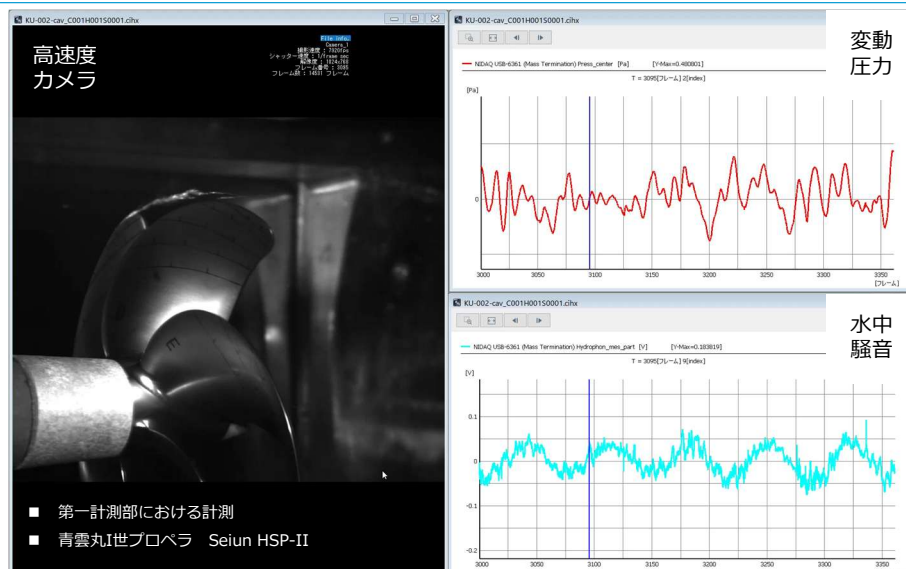
水中放射騒音の計測結果（1/3オクターブバンド解析）



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.

9

同期計測（Photron Fastcam&NI USB-6361）



- 第一計測部における計測
- 青雲丸Ⅰ世プロペラ Seiun HSP-II



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.

10

水中放射騒音の低減対策

■ 対策例

- プロペラボスキャップフィン, エンジンのディレーティング, 船首バルブの交換等の近代化改修
MAERSK 社コンテナ船 5 隻から放射される騒音レベルが6~8dB低減^[1]
- 減速運航
- プロペラの翼面積の拡大 (GHG削減とトレードオフ)
- 空気吹出

■ 空気吹出による水中放射騒音低減

- プロペラに気泡を流入させることで、キャビテーション崩壊時の圧力伝搬を緩和し、クッション効果による騒音低減が期待
- 対象船：青雲丸 I 世
- 対象プロペラ：青雲丸 I 世 プロペラ Seiun HSP-II



気泡流中キャビテーション観察 気泡径計測(シャドウグラフィ)
計測条件： $n_p=20\text{rps}$, $K_T=0.201$, $\sigma_p=2.990$ (実船： $N_p=163\text{rpm}$)
空気吹出：Ch.6 (1.2R), $Q=0.5\text{L/min}$

[1] M. Gassmann, et al.: Underwater noise comparison of preand post-retrofitted MAERSK G-class container vessels, Scripps Institution of Oceanography, MPL TM 616 (2017).

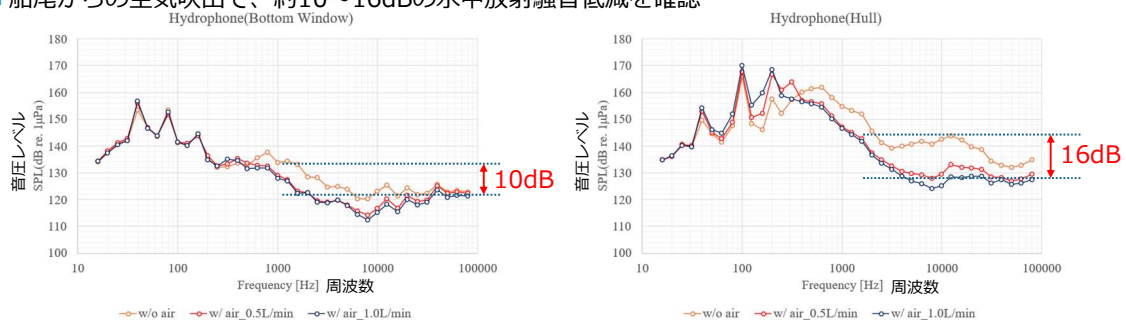


Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所/National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

11

水中放射騒音の低減対策 空気吹出 (JBC平行部短縮模型船)

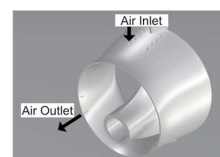
■ 船尾からの空気吹出で、約10~16dBの水中放射騒音低減を確認



水中放射騒音の計測結果 (1/3オクターブバンド解析)

■ 省エネダクトからの空気吹出の効果に関する研究も実施

- 吹出位置や流量による水中放射騒音の低減効果を調査



省エネダクトにおける空気の流れ



プロペラ角度 $\theta=50\text{deg.}$ における
右舷側70deg.位置の吹出の様子



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.

12

水中放射騒音推定法

■簡易推定法（Brown-白石法）^[2]

- 主要目・船速などの簡単な情報から船舶からの水中放射騒音の推定を行ための簡易推定法を開発
 - 船型要目最適化プログラム（HOPE Light）を用いて必要なパラメータを推定
 - キャビテーション発生面積推定チャートとBrownの式を用いて水中放射騒音レベルを算出
 - パネル法の圧力分布結果を揚力等価法で解析し、キャビテーション発生面積推定チャートを作成

Brownの式： 音圧レベル $SPL = 10 \log \left(\frac{n^3 D_p^4 Z}{f^2} \right) + 10 \log \left(\frac{A_c}{A_D} \right) + K$

プロペラ主要目に関する項
キャビテーション発生面積に関する項
定数

表 Brownの式のパラメータと推定法

パラメータ	推定方法
f : 周波数	既知
K : 定数（プロペラ: $K = 163$ ）	既知
n : プロペラ回転数	既知
D_p : プロペラ直径	Hope Lightで推定
Z : 翼数	既知
A_c/A_D : キャビテーション発生量	キャビテーション発生面積推定チャート

[2] 白石 耕一郎 他, プロペラキャビテーションノイズの簡易推定法の改善, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第39号, p.p.597-603



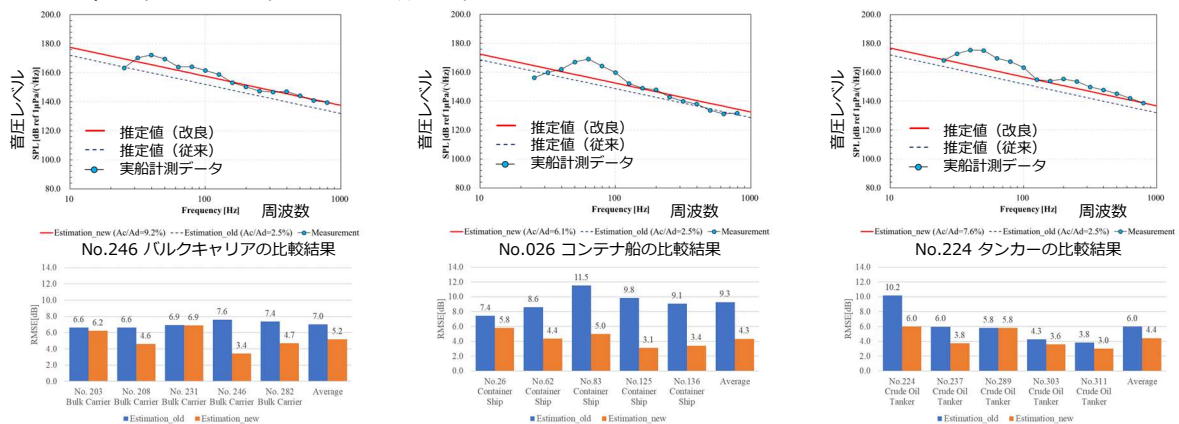
Copyright © 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所/National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. All rights reserved.

13

水中放射騒音推定法

■簡易推定法（Brown-白石法）の推定結果

- 大島南沖で実施した実船の水中放射騒音計測データと比較した結果、Burrrillのチャートを用いた従来法に比べて、水中放射騒音レベルの推定精度が向上した。船種ごとのRMSE（Root Mean Squared Error : 二乗平均平方根誤差）を平均すると、約2~5 dBの改善が確認された。



バULKキャリアのRMSEの評価結果

コンテナ船のRMSEの評価結果

タンカーのRMSEの評価結果

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.

14

まとめ

■ 水中放射騒音(URN)の合理的な管理を行うためには、個船の水中放射騒音の評価が必要になる。本発表では、海上技術安全研究所の大型キャビテーション試験水槽を用いた水槽試験法および水中放射騒音低減技術・推定技術について紹介した。

- 第二計測部における青雲丸 I 世の模型の船後プロペラキャビテーション試験による計測
 - 水槽試験結果を用いた実船騒音の推定および実船計測結果との比較検証
- 水中放射騒音・船尾変動圧力・高速度カメラの同期計測
- 空気吹出法による水中放射騒音の低減効果を確認（約10～16 dB低減）
 - 約10～16dBの水中放射騒音低減
- 水中放射騒音の簡易推定法
 - Burrillのチャートを用いた従来法に比べて、水中放射騒音レベルの推定精度が約2～5 dB向上した。



大型キャビテーション試験水槽50周年記念講演集

発 行 日 2025年11月14日

編 集 発 行 人 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 流体設計系

〒181-0004
東京都三鷹市新川6丁目38番1号

