資料 1-3

第一回　i-Shipping（design）推進のための CFD 高度化検討委員会

今年度の実施計画

1.　実施体制図

本調査業務の実施体制を以下に示す。

事業受託者

（幹事会社）

日本海洋科学

全体取りまとめ
委員会・WG取りまとめ

大阪大学

模型伴流PIV計測（水槽試験）

海上技術安全研究所

実船伴流PIV計測準備
模型伴流PIV計測（水槽試験）
CFDシミュレーション

日本海事協会

水中騒音計測

研究協力

Rostock大学

実船伴流PIV計測コンサルティング

日本造船技術センター

船体表面圧力計測機器検討

横浜国立大学

CFDシミュレーション

実船計測①

今治造船

バルクキャリアを想定

ナカシマプロペラ

実船計測②

？？？

やせ形船型？

？？？

2. 調査内容

本調査業務においては、以下に掲げる事項を実施するものとする。

(1) 実船流場等に係る動向調査

(2) 実船流場等計測の実施に向けた検討

(3) CFD の高度化等に向けた検討

(4) 模型レベル流場計測に関する検討

本調査業務は、以下に示す実船計測の項目の実施を検討するものである。これらの計測により得られるデータは、CFD の高度化に資するものである。

- 粒子画像流速計測法（Particle Image Velocimetry, PIV）システムによる実船プロペラ周りの流場の計測
- FBG（Fiber Bragg Gratings）圧力センサーを用いた船体表面圧力分布の計測
- ハイドロホン（水中マイクロホン）を用いた、対象となる実船が放射する水中騒音の計測

2.1. 実船流場等に係る動向調査

実船流場、船体表面圧力及び水中騒音（以下「流場等」という。）計測について、海外を含め実施事例や使用機材、計測船舶や実施期間、その成果等について調査、整理する。

2.1.1. 実船流場計測に関する動向調査

- 日本国内で過去に実施された実船流場計測について、旧日本船舶振興会の補助事業として昭和 56 年-58 年に実施された、「船尾振動・騒音の軽減を目的としたプロペラ及び船尾形状の研究」（通称”SR183”）および同会の補助事業として昭和 61 年-平成元年に実施された、「プロペラ起振力推定法改善のための実船伴流、実船プロペラキャビテーションの計測」（通称”無振動船プロジェクト”）を中心に実施例を調査し、計測方法・計測結果について整理する。
- 海外で過去に実施された実船流場計測について、International Towing Tank Symposyum（国際試験水槽委員会、通称”ITTC”）、EU プロジェクト（EFFORT）、ドイツ国内プロジェクト（KonKav II, Hykops）を中心に実施例を調査し、計測目的・計測方法・計測結果および計測結果の活用法について整理する。
- 日本国内・海外で実施された実船流場の CFD を用いた推定および検証について、日本船舶海洋工学会論文集、ITTC を中心に実施例を調査し、計算精度および現状の課題について整理する。

2.1.2. 船体表面圧力計測に関する動向調査

- 日本船舶海洋工学会、SMP（International Symposium on Marine Propulsors[1]、国際舶用プロペラシンポジウム）を通じて、世界の実施例を調査して、整理する。

[1] http://www.marinepropulsors.com

2.1.3.　実船水中騒音計測に関する動向調査

- EU プロジェクトの最新の動向を HTF の各水槽機関での試験結果を比較・検証する目的で実施されている持ち回りプロペラキャビテーションノイズ計測試験を通じて、実施事例や使用機材、計測船舶や実施期間、その成果等について入手し、整理する。
- 米国音響学会を通じて米国の最新動向を調査して、整理する。
- Ocean Engineering 学会 [2]、SMP や Inter-noise 学会 [3]を通じて、世界の実施例を調査して、整理する。

2.2.　実船流場等計測の実施に向けた検討

2.2.1.　実船スケールの流場計測機器等の検討

実船スケール流場等の CFD の高度化等を目的とした、実船流場等データを得ることを可能とする機材やその能力、計測に適した船舶等について調査を行う。

（1）実船流場計測機器の検討

PIV による実船流場計測に必要な以下の機材について、具体的な形式、仕様を調査する。以後の用語説明のため、図 1 に PIV 装置の計測原理概要を示す。PIV 計測では、流場の中にトレーサー粒子と呼ばれる、直径数 μm～数十 μm の微細な粒子を混入する。実海域では、海中を浮遊するプランクトンや微細気泡がその代替となる。流場に対してレーザーを照射し、照射範囲内に取った計測面において、トレーサー粒子からの散乱光を、異なる 2 時刻（図 1 では、t および t'）で撮影する。そして、撮影した画像上における粒子の変位量 Δ を画像解析によって求める。画像撮影の時間間隔が dt である時、トレーサー粒子の流速 V を V=Δ/dt として計算することで、計測面内における流場が分かる。

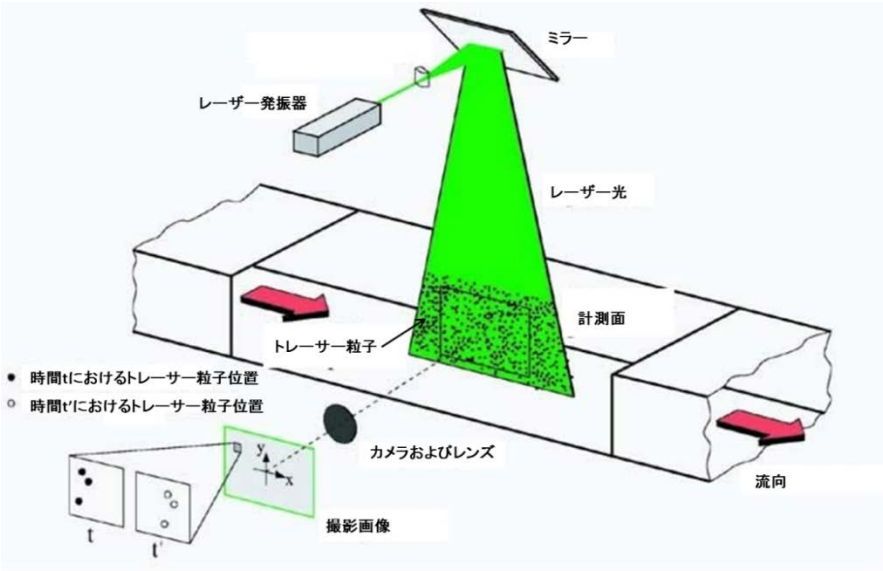

図 1　PIV の計測原理概要 [4]

- パルスレーザー：パルスレーザーの出力は、2.2.2 に後述する計測領域を十分にカバーし、かつ

[2] http://www.journals.elsevier.com/ocean-engineering
[3] 国際騒音制御工学会議 http://www.internoise2016.org
[4] 出典：http://www.dlr.de/

トレーサー粒子に画像解析に必要な輝度を与えるレベルとすることが必要である。パルスレーザーの照射角度を変える際には、レーザー発振器の入った筐体を回転させなければならないため、その使用法がレーザー発振器の冷却を阻害しないことが必要である。

- カメラおよびレンズ：カメラに取り付けるレンズは、2.2.2 に後述する計測領域を十分にカバー出来るスペックが必要である。カメラは高解像度カメラとする必要がある。
- 船底観測窓に取り付ける液体プリズム：海中に照射されるレーザーは、観測窓に対して鉛直に照射されるとは限らないため、液体プリズムを用いて光路の補正を行うことが必要である。
- カメラの較正方法：画像撮影時のカメラ較正は通常、図 2 に示すよう較正板等を用いて実施される（図 2 中、"Calibration Target"と書かれている部分が、較正板）。しかし今回検討する実船計測は実運航中の実施が想定されており、かつ計測領域への較正板設置が不可能であることから、画像撮影毎に較正板を使用することが出来ない。このため、較正板を使用しないカメラ較正法が必要となり、今回の計測で最も重要なポイントとなる。

図 2　PIV 計測に用いられる較正板の例 [5]

- 計測システムを搭載する架台：架台にはレーザー発振器筐体および高解像度カメラを取り付ける。画像撮影精度を高めるため、架台は船体振動の影響を受けにくいものとする必要がある。また、レーザー発振器筐体および高解像度カメラのトラバース機構（カメラの位置調整機能）が必要である。これらのイメージを、図 3 に示す。

[5] 出典：Atsavapranee P., 2008, “Full-scale PIV measurements at sea”, Proc. 25th International Towing Tank Conference (ITTC), Volume III, Fukuoka, Japan.

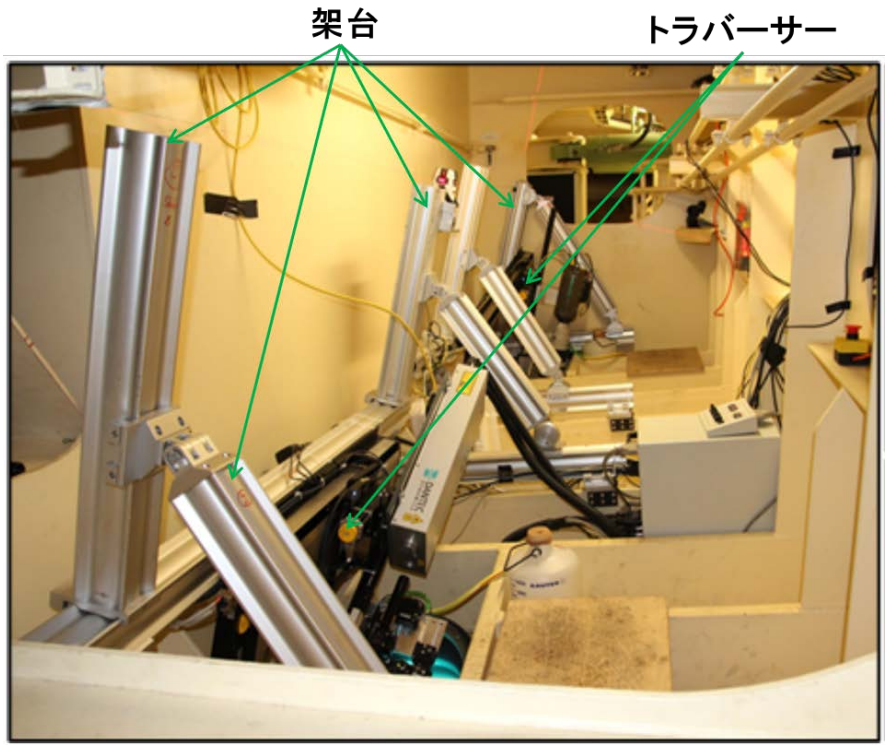

図 3　計測システムを搭載する架台およびトラバーサーの例[6]

- 画像処理システム：撮影画像は高解像度であるため、１枚あたりのファイルサイズが大きい。従い、カメラから画像処理システムへの画像転送には、Ethernet/USB3.0/IEEE 1394 等、転送速度が高速な規格を使用する必要がある。また、画像処理システムにはトレーサー粒子変位を算出するアルゴリズム（FFT 法、アンサンブル相関法、全画像変形法）が実装されている必要がある。画像転送・画像処理を効率よく行うためには、大容量の HDD およびメモリを持つワークステーションが必要となる。
- 電源：パルスレーザーおよび画像処理システムに、安定した電力を供給することが必要である。
- 配線：配線は、船内区画のマンホールを通すため、実際の取り付け前には、マンホールサイズの調整等が必要である。

（２）船体表面圧力計測機器の検討

船体表面圧力計測に必要な以下の機材について型式、仕様を調査する。

- 圧力センサー
- 上記用のアンプ
- データレコーダー
- 電源
- 配線
- 検定装置

[6] 出典：Kleinwachter et al., 2014, “Full-scale total wake field PIV-measurements for an enhanced cavitation prediction”, Proc. 17th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal

圧力センサーの有力候補である FBG 圧力センサーについては、実船への取り付け・取り外し方法の検討および動作確認を行う。実船用大容量 FBG 圧力センサーを図 4 に示す。FBG 圧力センサーを使用するメリットは以下の通りである。

- 物体表面に貼り付けることを前提として開発されているため、設置が容易であり、設置に際し船体の強度に関わるような加工を施す必要がない。
- センサー部分への給電が不要なため、漏電等による事故が起こらない。
- 同時多点計測が可能（最大 320 点、1kHz での同時計測が可能）である。
- 並列にしか配置できない歪ゲージ型圧力センサーと比較すると、FBG 圧力センサーは直列に配置することが可能であるため、配線が単純である。

図 4　実船計測用大容量 FBG 圧力センサー（試作品）

（３）実船水中騒音計測機器の検討

水中騒音計測に必要な以下の機材について型式、仕様を調査する。

なお､ハイドロホンおよびアンプについては､HTF 持ち回りキャビテーション水槽試験で使用して、動作を確認する。

- ハイドロホン
- 上記用のアンプ
- 分析用記録用 PC
- GPS/DGPS
- 近接センサー（プロペラ回転検出用）
- 水温、塩分濃度センサー
- レーザー距離計（計測船と対象船の最接近距離の計測用）

（4）計測に適した船舶の検討

以下の観点から計測に適した船舶について計測対象船として使用可能かどうか調査する。

- 結果利用の観点より、汎用性が高い（建造量の多い）船種であること
- 船主や造船所が船体外板に孔を開けたり、外板上に装置を取り付けたりすることに協力してもらい易いこと
- 船尾船内に装置を設置するスペースがあること
- CFD 計算のために船主や造船所に対象船の線図を提供してもらえること

2.2.2.　実船流場等計測方法の検討

実船流場等計測を行うため、次年度以降の実船での計測を想定した、船舶への資機材の搭載方法、必要となる計測期間、計測結果の検証等を含む具体的な計画を策定する。

（1）実船流場計測方法の検討

- 流場計測位置の検討

想定する最大の計測範囲を、図 5 中緑線囲み部分および図 6 中赤斜線部分に示す。座標系を、x 軸正を船首→船尾、y 軸正を左舷→右舷、z 軸正を船底→甲板に取った場合、計測断面は左舷側となる。計測速度成分は、x 方向流速 u および z 方向流速 w を想定している。

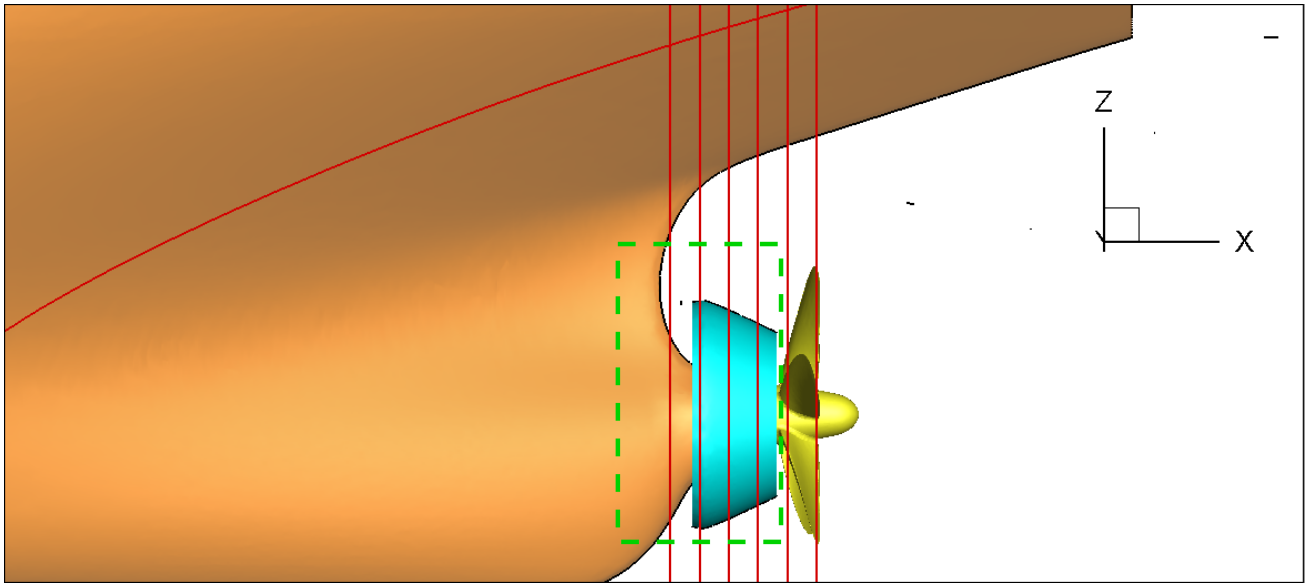

図 5　最大計測範囲(xz 断面)

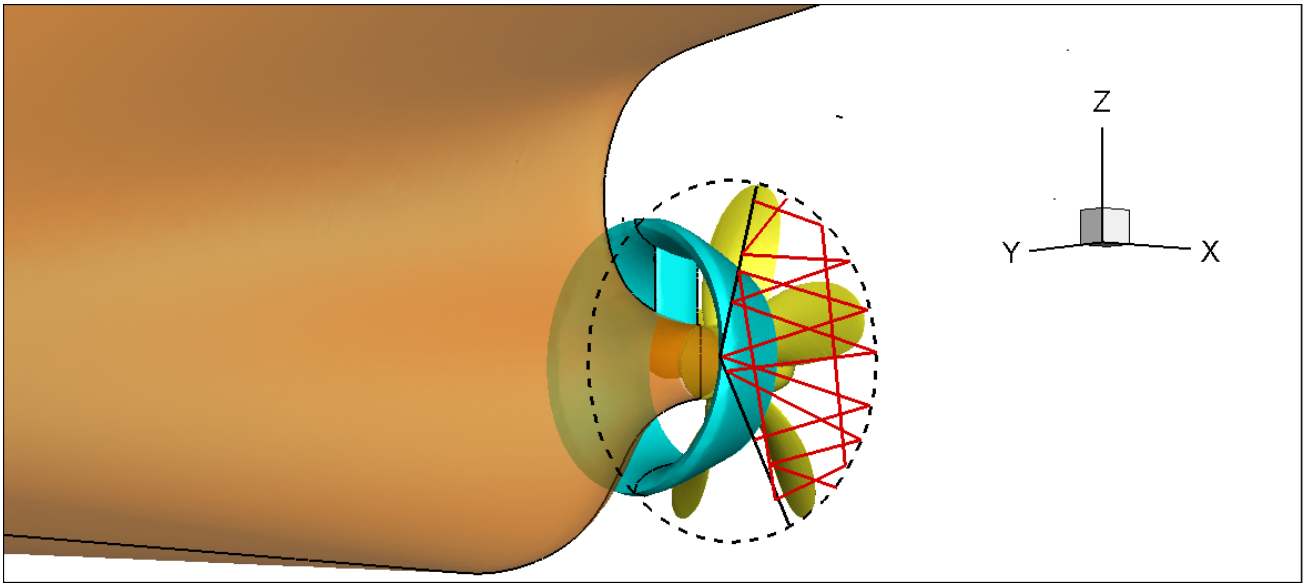

図 6　最大計測範囲(yz 断面)

・　観測窓配置の検討

計測対象領域に対してレーザー照射および画像撮影のためにはそれぞれに開口が必要であり、船底に観測窓を 2 つ以上設置する必要がある。図 7 に示すような船舶を想定した場合、船尾構造の制約上、観測窓の設置が可能なフレーム（Fr）は図 7 中、Fr.6 から Fr.10 までの間となる。図 5 および図 6 に示す計測範囲にレーザーを照射するのであれば、レーザー照射用の観測窓の位置は図 7 に示す Fr.6 と Fr.7 の間、かつ船体中心線に近い位置、画像撮影用の観測窓の位置は、同じく Fr.6 と Fr.7 の間で、かつ 1 つ目の観測窓から左舷側に最も距離の取れる位置となる。

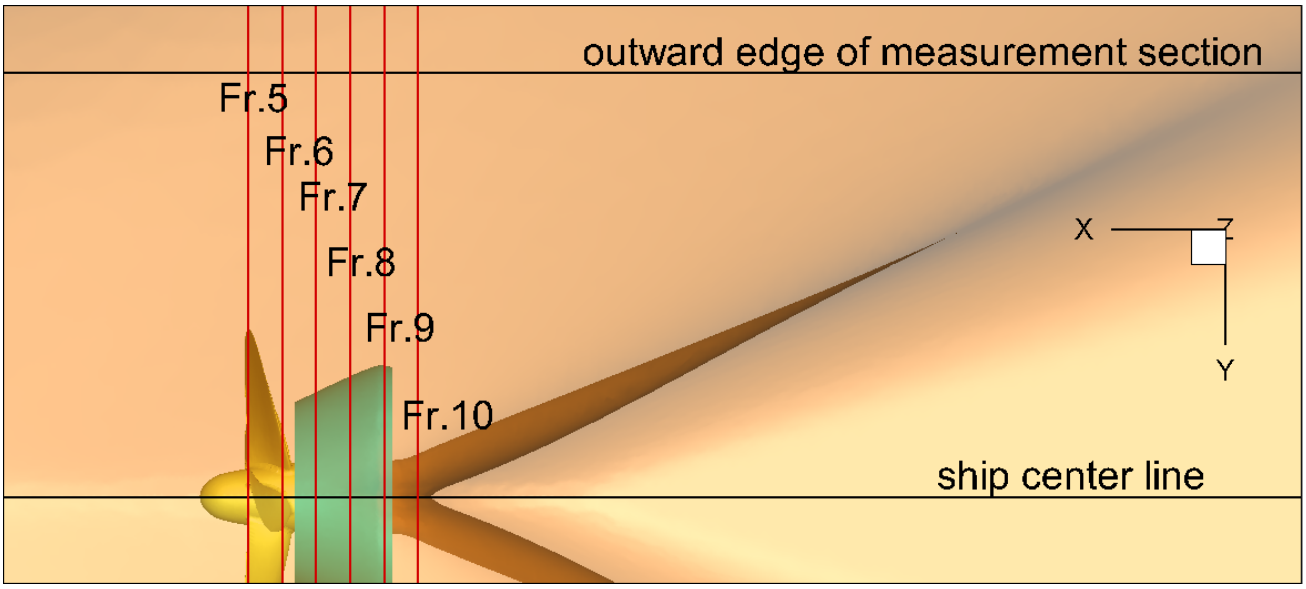

図 7　観測窓の配置が可能な左舷船尾フレーム位置

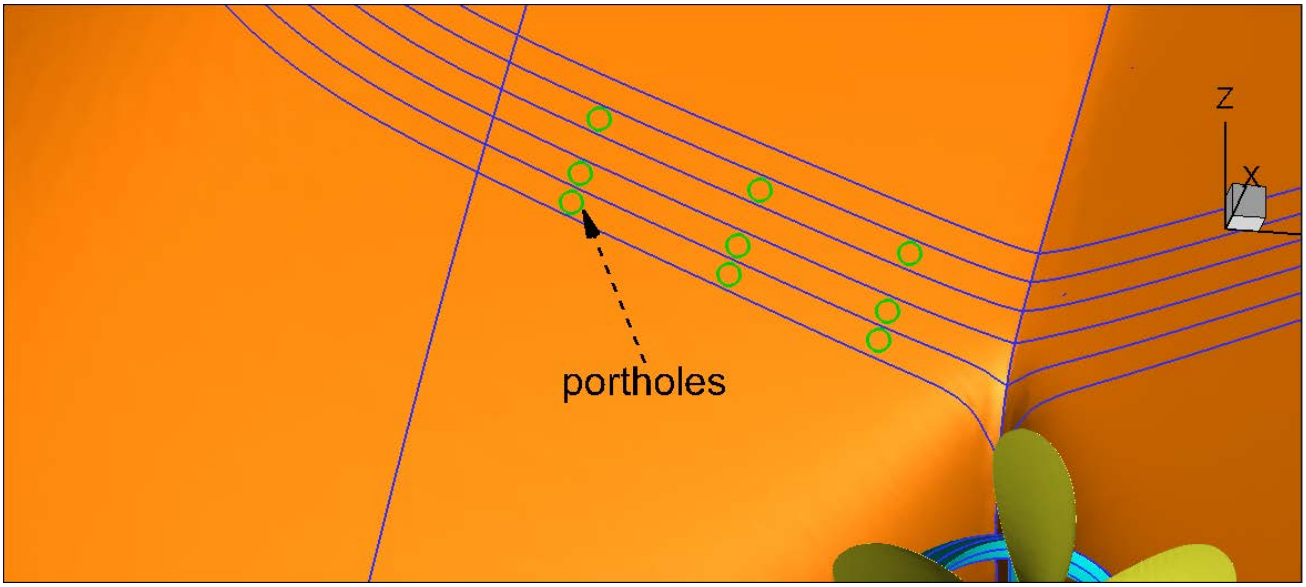

図 8　観測窓の配置案

・　計測機器配置の検討

計測機器のうち、光学系（パルスレーザー・レンズ・カメラ）、およびそれらの稼働に必要な架台・電源ユニット・ケーブルは図 7・図 8 中の観測窓が配置されているフレームに配置する。パルスレーザー・カメラの制御装置、および画像処理システムは、Ethernet 等で光学系と接続した上で、船尾フレーム内ではなく舵機室への配置を想定している。

・　実船伴流計測手順の検討

現時点で考えうる実船流場計測の手順を以下に示す。

1. 観測窓の製作
2. 計測機器の設置
3. 試験海域への移動（出港後）
4. カメラ較正
5. 計測
6. 計測終了および画像解析
7. 計測機器取り外し（入港後）

（２）実船船体表面圧力計測方法の検討

今年度は、来年度の実船試験に向けて、実船用 FBG 圧力センサー取付け方法を水槽試験によって検討する。具体的には以下の作業を行う。

① FBG 圧力センサー取付け方法およびセンサー用フェアリングの検討
FBG 圧力センサーの取り付け方法を検討する。またセンサーが船体表面より突出することにより周囲の流体へ与える影響を抑える目的で設置するフェアリング形状の検討を行う。

② キャビテーション水槽における FBG 圧力センサー取付け方法の検証
①で検討したセンサー取り付け方法およびセンサーフェアリングを用い、キャビテーション水槽において実船相当の流速を負荷する試験を行う。これにより、選択したセンサー取り付け方法が十分な固定力を持つか確認するとともに、センサーフェアリングの効果を確認する（計測項目；圧力、抗力）。

③ FBG 圧力センサーによる実船試験の検討
②の試験結果より、FBG 圧力センサー取付け方法、センサーフェアリング形状を提案する。

以上の検討を通じ、実船における船体表面圧力計測の実現可能性を議論する材料を提供することを今年度の目的とする。

（３）実船水中騒音計測方法の検討

水中騒音計測方法は、①ISO/DIS 16554.3 に準拠した計測方法を基本とするが、計測規模が大きいためより簡便な方式として、②プロペラ近傍船体外板上にハイドロホンを取り付ける方式を併用して、計測結果を比較検証する。後者でも十分プロペラキャビテーションノイズの音源レベルが評価できると判断された場合は、計測法②を ISO へ提案することが期待される。

計測法①における計測対象船のプロペラ位置とハイドロホンの角度 α の定義を図 9 に、計測対象船と計測船との位置関係および計測船とハイドロホンとの位置関係を図 10 及び図 11 に示す。対象船が計測船の前を航走する間に計測船で水中騒音を計測する。A 点から B 点の間を周波数解析区間とする。CPA（Closest Point of Approach）は計測船と対象船のプロペラ中心位置との最接近位置を示す。CPA と計測船との距離は、航走ごとに変化させる。

近距離音場での計測法②の方式を図 12 に示す。ハイドロホンをドック工事で取付ける必要はあるが計測船が不要のため、航走中計測が可能な方式である。

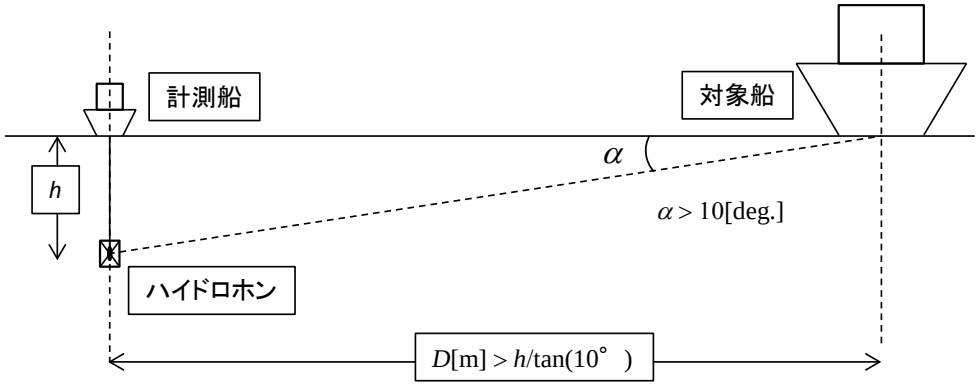

図 9　ISO/DIS 16554.3 に示される対象船と計測船の位置関係

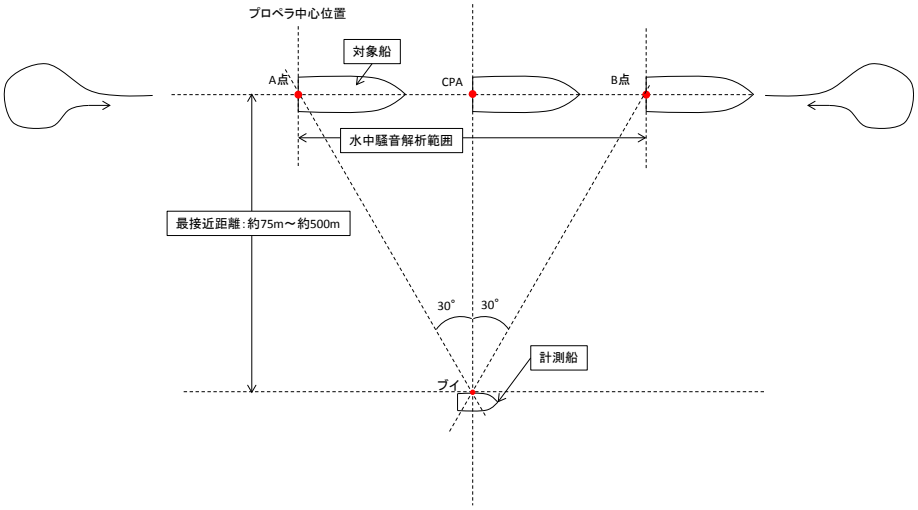

図 10　対象船と計測船との位置関係

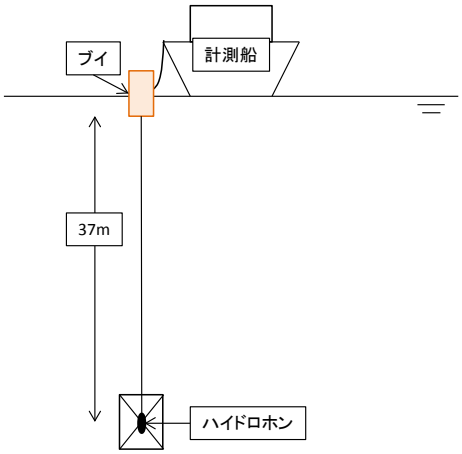

図 11　計測船とハイドロホンとの位置関係

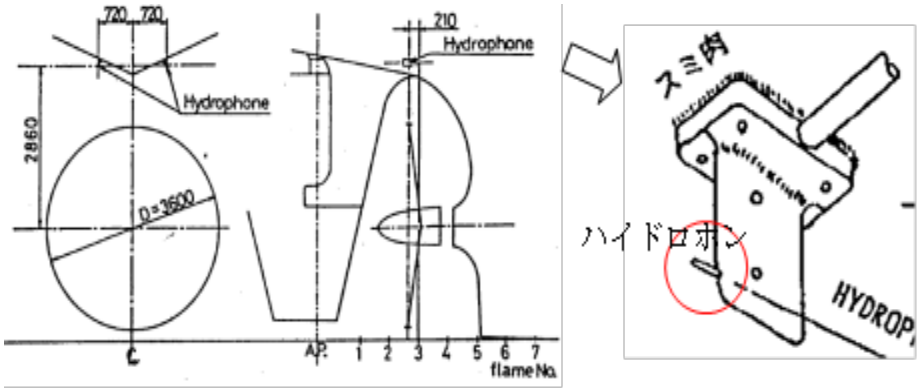

図 12　プロペラ近傍船体外板上にハイドロホンを取り付ける方式(SR183)

a）資機材搭載方法

上記の 2 つの計測方式について、

・　ハイドロホンやアンプ等の音響計測機器の配置を計画する。

・　ハイドロホンの位置、取付方法や配線要領などの船体外板取付要領を計画する。
・　試験海域の水温や塩分濃度の計測システムの計測要領を計画する。

また、試験中の船速（対地＆対水）、プロペラ回転数、船位などを船内 LAN システムから自動収集する装置の製作仕様を検討、設計、製作する。

b）計測期間

以下の項目を計測パラメータとして、試験スケジュールを計画する。

・　主機回転数
・　最接近距離（CPA における計測船と対象船のプロペラ中心位置との距離）
・　右舷、左舷

c）計測結果の検証

計測データは図 13 に示す 1/3 オクターブおよび狭帯域スペクトラム分析し、音源特性や試験条件による相違等を明らかとする。

上記 2 方式での計測結果については以下の要領での検証法を計画する。

・　音源から 1m 離れた位置での音源レベルについて、2 つの計測方式での計測結果を比較、検証
・　計測法①（計測船方式）で計測した結果の距離減衰
・　計測パラメータによる音源レベルの相違とその要因
・　CFD による数値シミュレーション結果との整合性

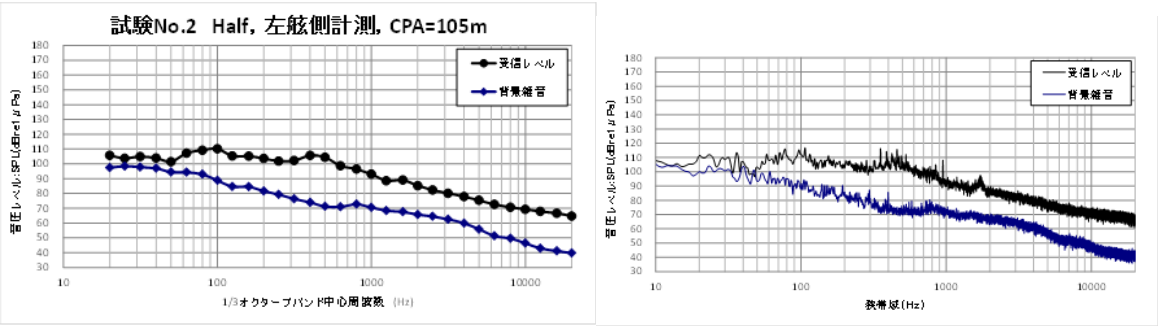

図 13　1/3 オクターブおよび狭帯域スペクトラム分析結果の例

2.3.　CFD の高度化等に向けた検討

CFD 解析は、その結果を実験結果と比較検証することにより初めて実用的な価値を持つ。このため、CFD の高度化を推進するためには、実験データによる CFD 解析結果の検証が不可欠である。このような検証のためには、抵抗・自航要素などの積分量に加えて詳細な流場情報が必要になる。次年度以降の実船での計測を想定し、過去に実施された省エネ付加物付き船体の水槽試験結果を用いて、以下の検討を進める。

(1)　模型船スケールにおいて省エネ付加物がある場合とない場合のそれぞれについて、CFD を用いた数値抵抗試験および数値自航試験を行い、流力特性や省エネ性能について水槽試験結果と比較検討する。

(2) 上記の検証データに対応した CFD 解析において、格子（格子点数、格子ブロックの大きさ、格子の細密化）や乱流モデルなどを変更させたパラメータ検討を行い、各パラメータの模型船スケールにおける計算結果への影響を調査する。

なお、本検討では、省エネ付加物付き船体のような複雑形状（本検討では、船尾に装備されたダクト）まわりの流体解析を可能にするために、海上技術安全研究所が開発を進めている次世代 CFD ソフトウェア NAGISA 等（NAGISA：重合格子法に対応した Navier-Stokes ソルバー、UP_GRID：重合格子・重合情報生成ソフトウェア）を用いる。

CFD による船舶水中放射雑音推定では、

- プロペラ近傍の発生するキャビテーションのうち、翼面上の発生面積およびキャビテーション気泡体積
- プロペラの回転そのもの、およびキャビテーション気泡の体積変化による圧力変動の、受音点までの伝搬

が、重要となる。次年度以降の実船での計測を想定し、上記の項目に対して、以下に示す基礎的な検討を行う。

(1) 水槽試験結果と CFD 計算結果の比較
水槽試験結果が存在するコンテナ船用のプロペラを用いて、一様流中のプロペラキャビテーション計算を行い、計算結果を検証する。具体的には、シート・翼端渦キャビテーションの、格子解像度および乱流モデルに対する影響を調査し、キャビテーションパターンについて、水槽試験結果と計算結果の比較を行う。

(2) プロペラキャビテーション騒音推定法の検討
上記計算条件において、プロペラが発生するキャビテーション騒音の伝搬を、Ffowcs Williams-Hawkings（FW-H）方程式法により解析するための方法を調査する。FW-H 方程式法とは、騒音源となる物体（本検討の場合はプロペラ）近傍の流場を CFD で解くことで音源をモデル化し、モデル化した音源から受音点までの音の伝搬は、波動方程式一種である FW-H 方程式を用いて解析的に解く方法である。具体的には、FW-H 方程式法を適用する際の、解の計算領域サイズ依存性、FW-H 方程式を介した時・介さない時の、ある受音点（近距離）における圧力時系列の差、遠距離の受音点における FW-H 方程式法で求めた音と、水槽試験結果との差について調査する。

本検討で用いる CFD ソルバーには、プロペラキャビテーションが解けること（二相流）、および FW-H 方程式法が実装されていることが必要である。NAGISA に対する上記機能の実装は現段階では未対応であり、その開発および実問題への適用には相当な時間を要する。従って今回は、上記機能を備え、プロペラキャビテーションの解析に必要な大規模並列計算が可能なソフトウェアを用いて解析を行う。

2.4. 模型レベル流場計測に関する検討

実船の流場レベルの計算に対応した CFD 高度化に資するため、模型と実船における流場の定性・定量的な差異等を把握する必要があることから、実船流場計測を行う船舶の模型レベルの流場のデータ取得を行う。

次年度以降の実船での計測を想定し、曳航水槽に設置可能な PIV 計測装置の導入および試計測を行う。図 14 に、曳航水槽に設置可能な PIV 計測装置の例を示す。図 14a に計測装置のコア部分、図 14b にコア部分の 3 次元イメージ、図 14c にこの装置を使用した実際の計測状態を示す。この装置を用いた場合の具体的な計測手順を以下に説明する。レーザー発振器は図 14a 中の"1"の部分に格納されており、水面上に位置する。魚雷型のケースには、カメラおよびレーザー照射用ミラーが格納されており、水中に位置する。2 台のカメラは、"3"の部分にそれぞれ格納され、"2"から照射されたレーザーシート光の照射面を、"4"の位置から画角を持って撮影する。撮影画像を画像処理することで、U, V, W を計測する。本年度は、一様流中および 3 次元船体を用いた試計測を行い、機器および手法の有効性の確認を行う。

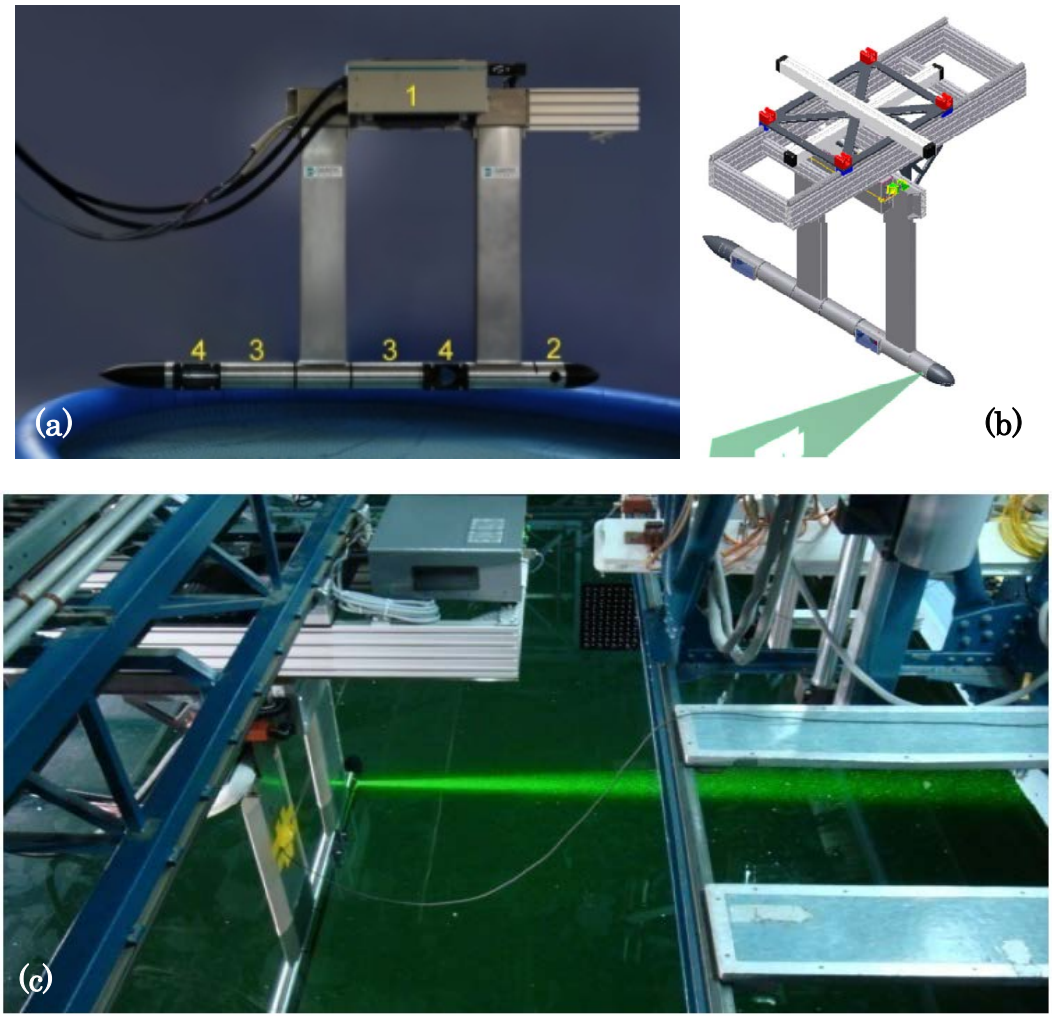

図 14　曳航水槽用 PIV システムのイメージ

(出典：http://www.dantecdynamics.com/news/dantec-towing-tank-piv-system-delivered-to-marin, Verhulst 2010)

3.　検討スケジュール

本調査の検討項目および本年度のスケジュールを以下に示す。

検 討 項 目	平成 28 年			平成 29 年		
	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月
（1）実船流場等に係る動向調査	→	→	→			
1．実船流場に関する動向調査	→	→	→			
2．船体表面圧力計測に関する動向調査	→	→	→			
3．実船水中騒音に関する動向調査	→	→	→			
（2）実船流場等計測の実施に向けた検討	→	→	→	→	→	→
実船スケールでの流場等計測機器等の検討	→	→	→			
1．実船流場計測機器の検討	→	→	→			
2．船体表面圧力計測機器の検討	→	→	→			
3．実船水中騒音計測機器の検討	→	→	→			
4．計測に適した船舶の検討	→	→	→			
実船流場等計測方法の検討	→	→	→	→	→	→
1．実船流場計測方法の検討	→	→	→	→	→	→
2．船体表面圧力計測方法の検討	→	→	→	→	→	→
3．実船水中騒音計測方法の検討	→	→	→	→	→	→
（3）CFD の高度化等に向けた検討	→	→	→	→	→	→
（4）模型スケール流場計測に関する検討	→	→	→	→	→	→