

船用省エネ装置 IHIMU 半円型ダクトの作動原理と 実船流場への適用

Energy-Saving Principle of the IHIMU Semicircular Duct and Its Application to the Flow Field Around Full Scale Ships

犬 飼 泰 彦 株式会社アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド 基本設計部
金 子 唯 明 株式会社アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド 基本設計部
長 屋 茂 樹 技術開発本部総合開発センター船舶海洋技術開発部 主査 博士(工学)
越 智 文 俊 株式会社 IHI 検査計測 研究開発事業部 試験技術部

地球温暖化に伴う GHG (温室効果ガス) 削減への社会的要求を背景に、船用省エネ装置に対する期待が大きくなっている昨今、IHIMU では模型レベルで開発済みの半円型ダクトを実船に適用するため、CFD (数値流体力学) や PIV (粒子画像流速計) を援用してその省エネ原理を再検証し、実船流場に適合したダクト形状の検討を実施した。その結果、ダクトの作動原理について新たな知見が得られ、それに基づき模型と実船の流場の違いを考慮した実機ダクト形状を決定した。本稿では、この半円型ダクトの作動原理および実機形状について紹介する。

IHI Marine United Inc. (IHIMU) has already developed several energy-saving devices, such as their L.V. Fin (Low Viscous Fin), A.T. Fin (Additional Thrusting Fin), CRP (Contra-Rotating Propeller) and the IHIMU Semicircular Duct. The L.V. Fin, A.T. Fin and CRP have been employed in full-scale ships, and the energy savings expected have been confirmed. In order to employ the IHIMU Semicircular Duct in full scale ships, we verified the energy-saving principle of this device and optimized a full-scale shape for it, taking into account flow-field differences between the models and full-scale ships, through the use of CFD (Computational Fluid Dynamics) and PIV (Particle Image Velocimetry) techniques. This paper describes the energy-saving principle of this device and an outline of a design for its employment in full scale ships.

1. 緒 言

地球温暖化問題に対する国際的な動向に伴い、国土交通省では環境施策の一つとして「船舶 GHG 30%削減のための革新的な省エネ化に関するプロジェクト」が進められている。また、IMO (国際海事機関) では EEDI (エネルギー効率設計指標) を用いた船舶の CO₂ 排出量に対する規制化が進められており、段階的に大幅な燃費削減が求められることになる。昨今の燃料油高騰はもとより上記の環境問題に対応するためには、船型改良や高効率プラントの採用に加えて、省エネ装置の装備によるさらなる推進性能の向上が必要不可欠である。

株式会社アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド (IHIMU) ではこれまでに A.T. Fin (Additional Thrusting Fin) ⁽¹⁾、⁽²⁾ や L.V. Fin (Low Viscous Fin) ⁽³⁾、CRP (Contra-Rotating Propeller) ⁽⁴⁾ などの省エネ装置を開発し、海上公試によってその省エネ効果を確認している。今回、水槽試験レベルですでに開発済みの半円型ダクト ⁽⁵⁾

を新たに実船適用省エネ装置のラインアップに加えるため、CFD (Computational Fluid Dynamics) や PIV (粒子画像流速計) といった新たな開発ツールを援用してその省エネ原理を再検証し、実船流場に適合した実機形状を検討した。その結果、半円型ダクトの作動原理について新たな知見が得られ、それに基づき模型と実船の流場の違いを考慮した実機ダクト形状を決定した。

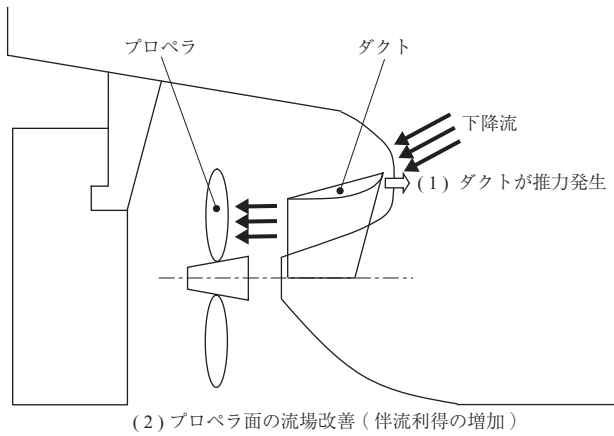
本稿では、この半円型ダクトの作動原理および実機形状についての検討結果を報告する。

2. 半円型ダクトの作動原理

水槽試験レベルで開発済みの半円型ダクトを実船流場に適用するため、実機形状を検討するに当たって、作動原理 (省エネ原理) の再検証を行った。本章では半円型ダクトの省エネ原理について述べる。

2.1 省エネ原理

半円型ダクトはプロペラ直前に設置され、その省エネ原理は以下のとおりである。第 1 図に省エネ原理の概念を示す。



(注) (1), (2)は、本文 2 章 半円型ダクトの作動原理の番号を示す。

第 1 図 省エネ原理概念
Fig. 1 Basic energy-saving principle

(1) ダクトによる推力の発生

第 1 図に示すように、船尾では船体に沿った強い下降流が存在する。したがって、ダクトの迎角および翼形状を適切に設定することによって、ダクト自体に推力を発生させることができる。

(2) 伴流利得の増加

ダクトの存在によってダクト後方の流れが遅くなり、さらにその遅い流れをプロペラ面へ導くことによって、伴流利得を増大させることができる。

ここで、(1)のメカニズムについては明確になっている⁽⁵⁾が、(2)については解明すべき点が残っていた。そこで、CFD および PIV を用いてダクト後方の流場を詳細に調査した。

2.2 省エネ原理の検証

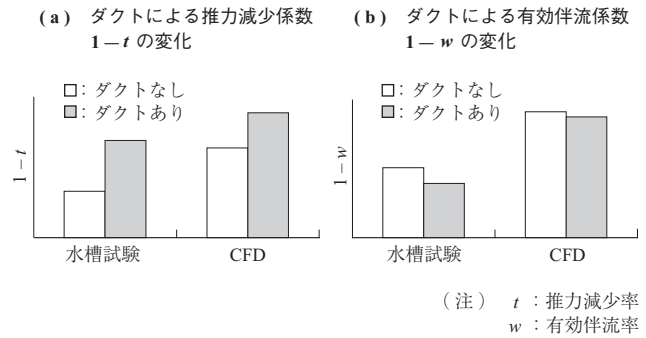
2.2.1 検証の方法

設計で実際に用いられている CFD、および新しい計測法 PIV⁽⁶⁾を使用して船体、ダクトまわりの流れの解析および計測を行い、流場を詳細に調査することで省エネ原理の検証を行った。また CFD については、実機形状検討のため実船スケールでの計算も実施した。

CFD 計算には、独立行政法人海上技術安全研究所で開発され、数多くの造船所で設計に使用されている NEPTUNE⁽⁷⁾および SURF⁽⁸⁾コードを用いた。

2.2.2 CFD の推定精度

CFD を用いてダクト省エネ効果を検証するに当たり、その推定精度を確認した。ダクトありなしでの自航要素の変化に対する、水槽試験と CFD (SURF コード) の比較を第 2 図に示す。

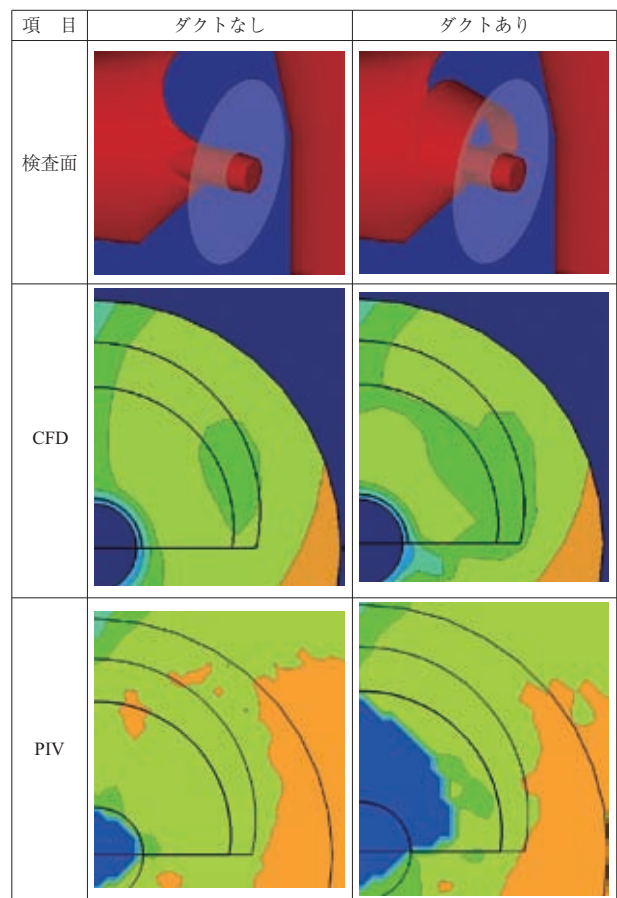


第 2 図 水槽試験と CFD による自航要素の変化の比較
Fig. 2 Comparison of changes due to employment of duct obtained by tank test and CFD in self propulsion factor

第 2 図から、水槽試験と CFD とで、値そのものに定量的な差は見られるものの、変化の傾向は一致している。したがって、ダクトの省エネ効果を検証するに当たり、CFD を用いた検討は有用であると考えられる。

2.2.3 ダクト作動流場

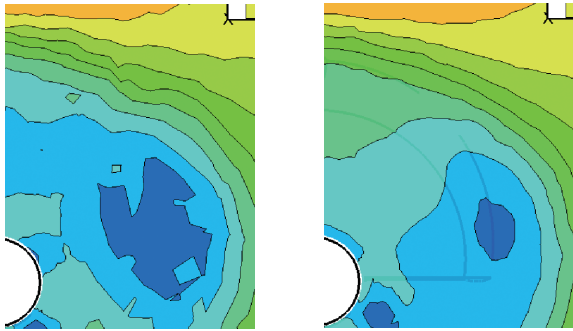
CFD および PIV によるダクト後方の流速分布、圧力分布および渦度分布を第 3 図~第 5 図に示す。



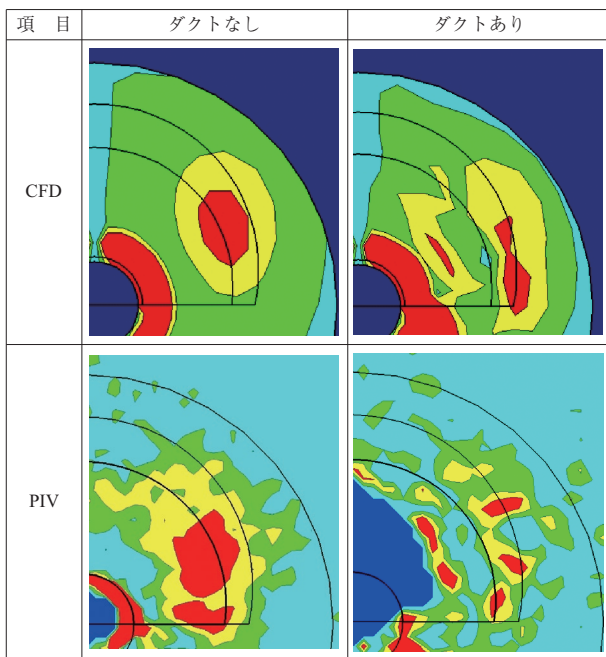
(注) 緑色の範囲が遅い流れを示しており、流れが遅いほど伴流利得が大きい。

第 3 図 プロペラ作動時のダクト後方の流速分布比較
Fig. 3 Comparison of flow velocity distribution behind duct during propeller operation

(a) ダクトなし (b) ダクトあり



第 4 図 CFD によるプロペラ作動時のダクト後方の圧力分布比較
Fig. 4 Comparison of CFD estimates of pressure distribution behind duct during propeller operation



(注) 赤色の範囲が強い渦度を示しており、この渦度が強いほど船体抵抗が大きくなる。

第 5 図 プロペラ作動時のダクト後方の渦度分布比較
Fig. 5 Comparison of vorticity distribution behind duct during propeller operation

第 3 図から、ダクトがある場合は遅い流れの領域（緑のコンター）が広がっており伴流利得が大きくなっていることが分かる。次に第 4 図を見ると、ダクトがある場合は圧力の低下が緩和されており、この効果でダクト後方の流れが遅くなっていると考えられる。最後に第 5 図を見ると、船尾渦（赤色のコンター）がダクトによって分断されて弱められていることが分かる。すなわち、船尾渦が分断されて弱められたことによって圧力低下が緩和され、その効果でダクト後方の流れが遅くなり伴流利得が大きくなったと考えられる。

そこで、船尾渦の分断が省エネ効果に与える影響を検証

するため、最新の 30 万 t 大型原油輸送タンカーを対象としてダクト径のシリーズ試験を実施した。第 6 図にダクト後方の渦度計測結果、第 7 図に水槽試験結果から得られたダクトによる伴流利得の改善率を示す。

第 6 図および第 7 図から、船尾渦中心がダクトの内側にくるようなダクト径（中径、大径）では船尾渦が十分弱められ、大きな伴流利得が得られる結果となっている。一方、小径ダクトでは船尾渦がダクト後方にも残存し伴流利得が小さく省エネ効果も減少することが分かった。したがって、伴流利得を十分得るためには船尾渦を分断するようなダクト径の内側にくるようなダクト径にすることが重要である。

2.2.4 ダクト推力

ダクト推力による省エネ効果はダクト前縁での迎角に大きく左右される。そこで、肥大船 3 船型を対象としたダクト取付角大小シリーズ試験結果と CFD によるダクト前縁位置に沿った推定迎角の相関を整理した。ダクト前縁に沿う位置（Top から Side）を横軸に表し、ダクト取付角シリーズ試験に対応するケースでの迎角（CFD による推定値）を縦軸に表したものを第 8 図に示す。Top 付近である一定の迎角となり、そこから Side にかけて迎角が減少していることが分かる。そして水槽試験結果から、Top 付近での迎角がある値になるケースでダクト推力による省エネ効果が大きいことが分かった。すなわち、ダクト推力による十分な省エネ効果を得るためには、Top 付近でこの迎角となるようダクト取付角を設定することが重要である。

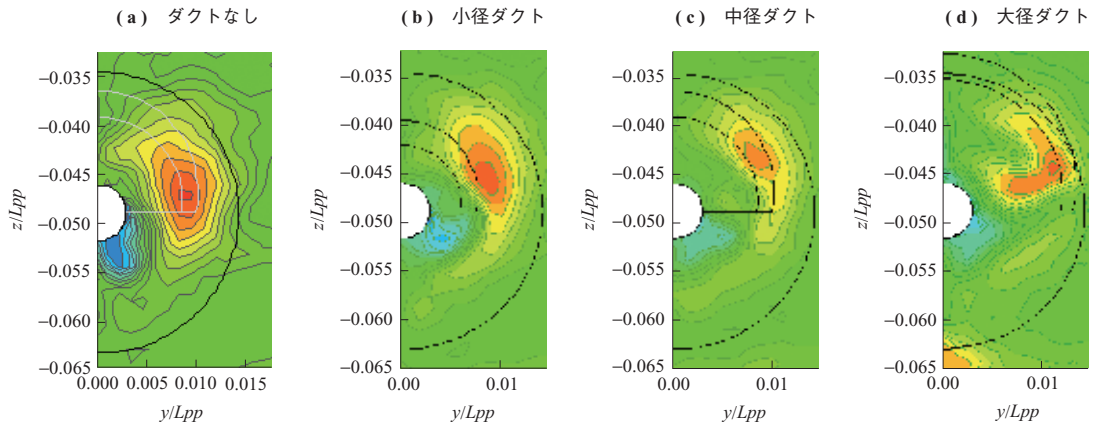
2.3 半円型ダクトの設計コンセプト

以上の省エネ原理に基づき、ダクト形状および配置についての設計コンセプトを以下にまとめた。

- ・下降流の強い位置に、ある迎角となるような取付角でダクトを配置し、ダクトの発生する推力を増加させる（原理（1））。
- ・船尾ビルジ渦の強い位置にダクトを配置することで船尾渦を分断し圧力低下を緩和する。その効果として大きな伴流利得を得る（原理（2））。

3. 半円型ダクトの実機設計

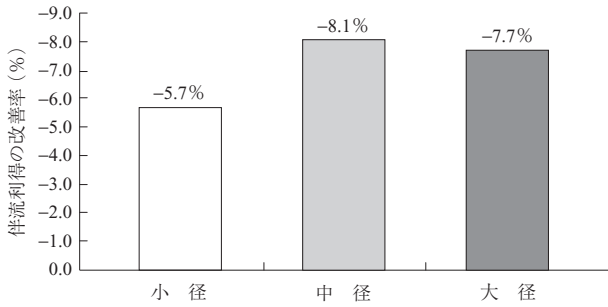
船尾渦および船尾下降流とダクトとの相対関係が省エネ効果に大きな影響を与えることから、実機設計に当たっては実船と模型船の船尾渦位置および船尾下降流の差を考慮することが重要である。そこで、ダクト作動流場の尺度影響について調査した。



(注) 1. 赤色の範囲が強い渦度を示しており、この渦度が強いほど船体抵抗が大きくなる。
 2. 記号は下記を示す。
 L_{pp} : 船長
 y : 幅方向座標
 z : 深さ方向座標

第 6 図 PIV 計測によるプロペラ作動時のダクト後方の渦度分布比較

Fig. 6 Comparison of PIV measurements of vorticity distribution behind duct during propeller operation



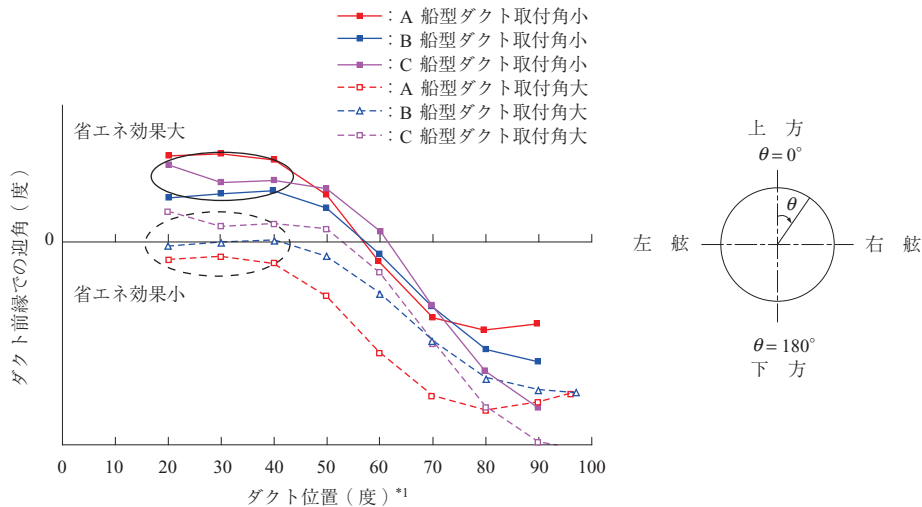
(注) マイナス方向は改善していることを示す。

第 7 図 水槽試験で得られたダクトによる伴流利得の改善率

Fig. 7 Improvement of wake gain due to employment of duct obtained by tank test

3.1 ダクト作動流場の尺度影響

CFD によるダクト前縁位置付近の実船および模型船の推定流場を第 9 図および第 10 図に示す。第 9 図から、模型スケールに比べて実船スケールでは船尾渦が強まり、渦中心は船体中心側に寄る傾向となっている。したがって、船尾渦位置の変化に伴い、実機のダクト径は小さくする必要がある。また、第 10 図から、模型スケールに比べて実船スケールではダクト前縁 Top 付近での流入角が減少する傾向となっている。したがって、流向の変化に伴い、実機のダクト開口角は小さくする必要がある。



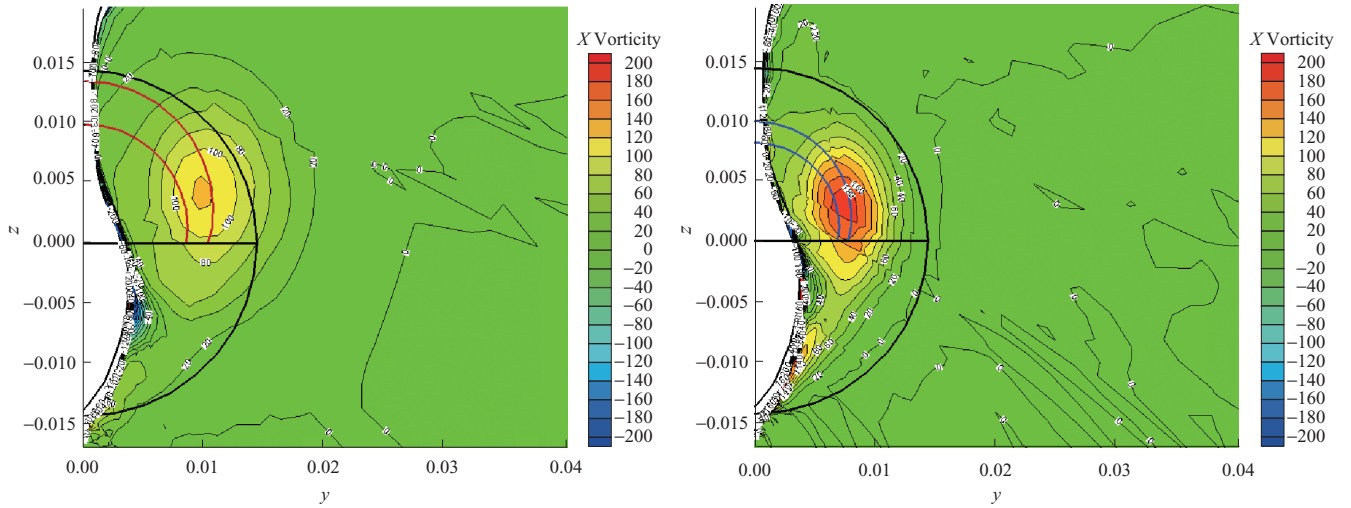
(注) *1: 0 度が Top を示す。

第 8 図 CFD によるプロペラ作動時のダクト前縁の迎角

Fig. 8 CFD estimate of attack angle of duct leading edge during propeller operation

(a) 模型スケール

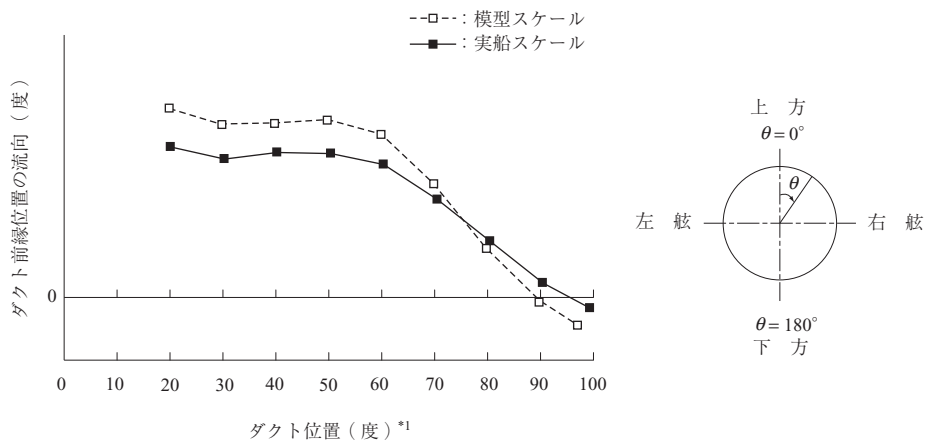
(b) 実船スケール



(注) X Vorticity: 船長方向を軸とする渦度
 y : 幅方向座標
 z : 深さ方向座標

第 9 図 プロペラ作動時のダクト前方の推定渦度分布

Fig. 9 CFD estimate of vorticity distribution at the front of duct during propeller operation



(注) *1: 0 度が Top を示す。

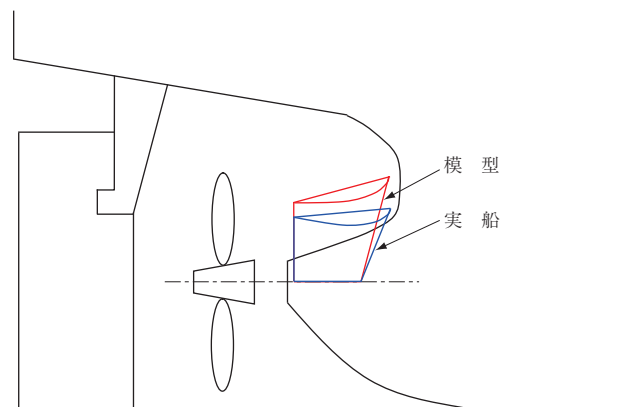
第 10 図 CFD によるプロペラ作動時のダクト前縁流向の比較

Fig. 10 Comparison of CFD estimates of inflow angle at leading edge of duct during propeller operation

3.2 実機ダクトの形状

3.1 節に示したダクト作動流場の尺度影響に基づき設計した実機ダクト形状を第 11 図に示す。実船では船尾渦が船体中心側に寄る傾向があるのでダクト径を小さくし、ダクト前縁での流入角が小さくなるためダクト開口角を小さくして迎角が模型船と同一となるようにした。

流場とダクトの相対関係を模型スケールと合わせることで、実船スケールでも模型と同等の省エネ効果が得られると考えられる。



第 11 図 ダクト形状の比較

Fig. 11 Comparison of the duct arrangement

4. 結 言

地球温暖化に伴う GHG 削減への社会的要求を受けて、模型レベルですでに開発済みの省エネ装置半円型ダクトを実船に適用するため省エネ原理の再検証を実施した。その結果、ダクトの作動原理について新たな知見が得られ、それに基づき実船流場に適合した実機ダクト形状を決定した。また、CFD や PIV といったツールの有効性を確認できたことも、今後の設計作業にとって非常に大きな意味をもつ。

今後は、流場だけではなく馬力計算における尺度影響についても詳細に調査し、実船での省エネ効果についてさらなる検討を進める予定である。

参 考 文 献

- (1) 森 正彦, 山崎禎昭, 藤野良亮, 太田垣由夫: IHI A.T.Fin - 第 1 報 原理および開発の要点 - 石川島播磨技報 第 23 卷 第 3 号 1983 年 5 月 pp. 266 - 273
- (2) 太田垣由夫, 荒井 誠, 溝口純敏, 村岡賢二, 森 正彦: IHI A.T.Fin - 第 2 報 平水中推進性能と耐波浪性能 - 石川島播磨技報 第 25 卷 第 2 号 1985 年 3 月 pp. 90 - 96

- (3) 増子 章, 小柴幸雄, 石黒 剛: 船舶の省エネルギー付加物 IHI-L.V.Fin 石川島播磨技報 第 38 卷 第 6 号 1998 年 11 月 pp. 392 - 397
- (4) Y. Inukai and F. Ochi: A Study on the characteristics of self-propulsion factor for a ship equipped with Contra-Rotating Propeller The First International Symposium on Marine Propulsors smp '09 (2009.6) pp. 112 - 116
- (5) 犬飼泰彦, 板橋正泰, 須藤康広, 武田 尚, 越智文俊: 船用省エネ装置 - IHIMU 半円型ダクト - 石川島播磨技報 第 46 卷 第 4 号 2006 年 12 月 pp. 151 - 155
- (6) 長屋茂樹: ステレオ PIV によるプロペラ作動時の船尾流場計測 日本船舶海洋工学会講演会論文集 第 9E 号 2009 年 11 月 pp. 101 - 104
- (7) N. Hirata and T. Hino: An efficient algorithm for simulating free-surface turbulent flows around an advancing ship J. of the Soc. Naval Arch. Japan Vol. 185 (1999.6) pp. 1 - 8
- (8) T. Hino: A 3D Unstructured Grid Method for Incompressible Viscous Flows J. of the Soc. Naval Arch. Japan Vol. 182 (1997.12) pp. 9 - 15