

令和 3 年 6 月 4 日現在

機関番号：12701

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2019～2020

課題番号：19K22013

研究課題名(和文)境界層相似模型を用いた船舶の省エネルギーデバイス性能推定法の開発

研究課題名(英文)Development of performance evaluation method for energy saving devices of a ship using boundary layer Similarity model

研究代表者

日野 孝則(Hino, Takanori)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：60373429

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：模型試験によって、実船における省エネルギーデバイスの性能評価を可能にする新たな試験法を開発した。対象船型の船尾部のみを用いる部分模型を採用し、この模型の船尾における境界層厚さの対船長比が実船の場合と同じになり、かつ船尾の形状が実船と相似となるように設計する。この境界層相似模型により粘性流れの相似性と幾何的相似性を同時に満たす性能評価を可能にした。CFD(計算流体力学)によるシミュレーションを用いて、模型船、実船、境界層相似模型の粘性流れの検討および推進性能評価を行い、境界層相似模型の流れと推進性能が実船をよく近似することを示し、本手法の有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

模型試験による船舶の省エネルギーデバイスの推進性能評価は、模型船と実船のレイノルズ数の差に起因する尺度影響が不可避であった。実際、模型試験では良好な性能が確認された省エネルギーデバイスが実船では期待された効果を発揮しない例も見られる。本研究では、計算流体力学手法による粘性流れシミュレーションを活用して尺度影響を評価し、模型船において実船の流れを再現する新しい性能評価法を提案した。本研究成果により、流体力学的相似性と幾何的相似性を同時に満たす模型試験が可能となり、船舶の省エネルギー性能のさらなる向上によって温室効果ガスの削減を推進するものと思われる。

研究成果の概要(英文)：The new method has been developed which enables the propulsive performance evaluation of energy saving devices of an actual ship by using model test. In order to overcome the difficulty associated with the scale effect of the boundary layer thickness between full-scale and model scale-ships, a special model called the Boundary Layer Similarity model (BLS) was conceived. The model is designed to reproduce the aft-part of a ship only and to have the same boundary layer thickness ratio as an actual ship. Using this model, it is possible to achieve the geometrical similarity and the hydrodynamic similarity for the performance evaluation at the same time. Simulations by Computational Fluid Dynamics are applied to assess the flow fields and the propulsive performance of an energy saving device for the usual model ship, full-scale ship and the BLS. It turned out that the results of the BLS are in good accordance with the full-scale results and the validity of the new method was confirmed.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：船舶流体力学 省エネルギーデバイス CFD 境界層

1. 研究開始当初の背景

計算流体力学(CFD)の登場によって、経験工学的アプローチをベースとしていた船舶流体力学における性能評価法に新たなトレンドが生まれようとしている。水槽試験をシミュレートする模型スケールの CFD 計算においては、実験との比較による詳細な精度検証も行われ、その実用性は広く認識されている。船型試験の最終目標である実船スケールの性能推定に関しては、従来のアプローチでは水槽試験による模型スケールの実験値に尺度影響を考慮して、実船の性能を評価していたが、CFD 手法によって実船スケールの性能を直接評価することが可能になりつつある。実船の性能は、尺度影響だけではなく表面粗度などの複雑な流体力学現象も関係しており、現状の実船スケールの CFD 手法は必ずしも十分に検証されていないが、水槽試験を補完するツールとして期待されている。

実際、船型試験法の標準化や技術評価を行っている国際組織である、国際試験水槽会議(ITTC)でも、CFD 技術の進展に着目しており、計算・実験流体力学の融合に関する専門家委員会を設置し、CFD と水槽試験の連携による新たな性能評価法の検討を開始している。

流体力学的性能評価における尺度影響が非常に重要な事例として、省エネルギーデバイスの性能評価があげられる。業界関係者との情報交換において、従来の水槽試験ベースの性能推定では尺度影響の評価が難しく、模型ベースでの設計が実船では効果を発揮しない事例も見られるという情報を得た。CFD による性能評価への期待が高いが、一方で CFD による実船スケールシミュレーションの計算精度にも不確実性があり、水槽試験と CFD の連携による新たな性能評価法が求められている。

2. 研究の目的

船舶の性能設計では、建造船の設計速力を保証することから、その流体力学的性能の推定が極めて重要な課題である。設計仕様が個船毎に異なり、試作によって性能を確認することもできないため、従来より、性能推定には模型試験が用いられてきた。縮尺模型による船舶の性能推定における大きな制約は、船舶抵抗の流体力学的相似則のパラメータであるフルード数とレイノルズ数の両方を実船と模型船で同時に合わせるができないことである。通常的水槽試験では、フルード数が等しくなるように速度を定めて造波抵抗を推定し、レイノルズ数に關係する粘性抵抗については相似則が適用できないので、経験的に尺度影響を考慮して実船抵抗を推定する、という手法が取られる。模型試験データと実船性能データの膨大な蓄積により、尺度影響に関する相関データベースが構築され、実用的な精度で実船の抵抗・推進性能を推定することが可能になっている。

一方、近年の地球環境問題を反映して、船舶の省エネルギー化に対する要求は厳しさを増しており、国連の世界海事機関(IMO)は国際航行船舶からの CO₂ 排出量の規制を制定している。これに対応して、船舶設計においては船型や推進器の改良に加えて、船体後部にフィンやダクトなどの省エネルギーデバイスを装着し、流場を制御することで効率向上を達成することが一般化している。このような省エネデバイスの性能評価を模型試験で行う際には、実績データが少ないことから従来の相関データベースを用いることが難しい。さらに、省エネデバイスの多くは船尾部の境界層の中に置かれることから、粘性に関する尺度影響を強く受ける。そのため、模型試験による省エネデバイスの効果はデバイスの大きさを変えた計測などによって経験的に評価されており、流体力学的妥当性や推定精度には問題があると考えられる。実際、模型試験で効果を確認した省エネデバイスが実船に装着すると性能を発揮しないという事例もしばしば見られる。

以上の困難を克服するために、本研究では近年船舶設計において広く用いられている計算流体力学(CFD)技術を援用することで、レイノルズ数の差による尺度影響の壁を超えて、模型試験によって実船における省エネルギーデバイスの性能評価を可能にする新たな試験法を提案する

3. 研究の方法

新たな試験法では、省エネデバイスが置かれる船尾相当部分で幾何的相似性と流体力学的相似性の両者を同時に満足するような特殊な模型を用いることで、実船における省エネデバイスの性能を評価する。

長さ 300m、速度 15kn の肥大船を例にとると、経験則によれば境界層厚さは船尾端において約 1.5m である。対応する長さ 10m の模型船を想定すると、フルード数を合わせた模型船速度は 1.4 m/s となり、船尾端の境界層厚さは約 0.14m である。実船の境界層厚さは船長との比で $\delta/L=0.005$ なので、10m の模型船に当てはめると 0.05m となる。すなわち、模型船の境界層は、実船相当の境界層の約 3 倍の厚さがある。そのため、模型船に省エネフィンを装着する際に、幾何的に相似なフィンを用いた場合、フィンが境界層の下層に埋もれてしまい、流れを制御する効果が著しく弱くなる。これを勘案して水槽試験では実際より幅の大きいフィンを用いることが多い。しかし、幾何的相似性を失うことから、省エネ効果の流体力学的な妥当性には疑問がある。

図 1 に示す境界層の長手方向の発達を見ると、10m 模型で境界層厚さが実船の船尾端相当の厚み 0.05m と同等になるのは船首からおよそ 3m 付近の位置である。全長 3m の模型船を用いれば、船

尾の境界層厚さを 0.05m にできるが、幾何的相似性から省エネデバイスも小さくなり、計測精度が問題となる。そこで、3m 模型を幾何的相似模型ではなく、10m 模型の船尾部(省エネデバイスが装着される部分)と同じ形状になるようにする(図2)と、見かけ上 10m 模型を境界層厚さ 0.05m の流場に置いた状況を再現できる。これにより、境界層厚さと仮想模型長さ(10m)の比は実船と同様になるので、省エネデバイスの形状は実船の形状を仮想模型長さ(10m)に合わせて幾何的に縮小すればよいことになる。船首部分の形状は、船尾の流れが全長模型のそれと出来る限り同じになるように適切に設計する。

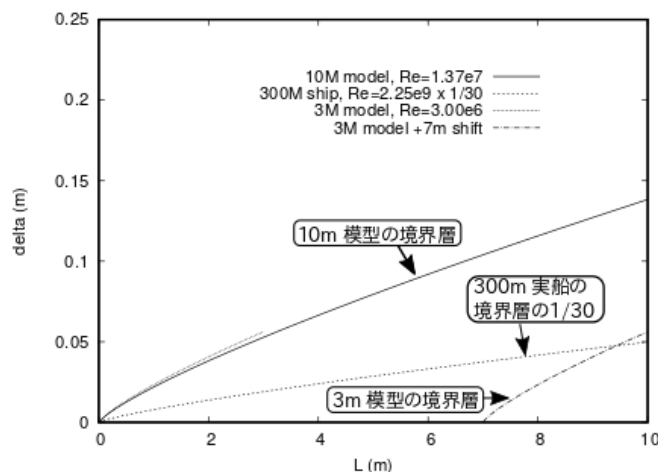


図 1 境界層厚さの発達



図 2 全体模型(10m:上)と境界層相似模型(3m:下)

このコンセプトの有効性を検証するため、以下のような項目について検討する。

1)境界層再現の検証

境界層相似模型の境界層の厚さが実船の境界層厚さと相似になることを検証するために、実船、模型船、部分模型のそれぞれについて CFD 解析を行い境界層の性状を相互に比較する。

2)省エネデバイス性能評価法の検討

実船、全体模型、境界層相似模型のそれぞれについて省エネデバイスを装着した CFD 計算を行い、境界層相似模型による性能推定が実船スケールの性能に対応することを示す。

4. 研究成果

対象船型はよく用いられるベンチマーク船型の KVLCC2 とし、長さ 10m の模型を想定した。船型を図 3 に、主要目を表 1 に示す。

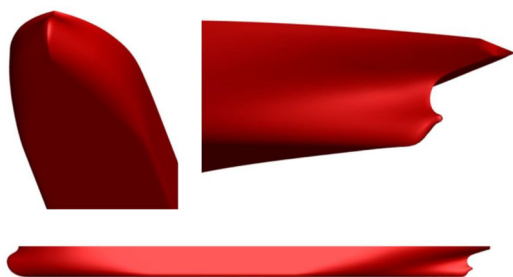


図 3 KVLCC2 船型

表 1 KVLCC2 主要目

	主要目	
	Model	Full
$L_{pp}[m]$	10	320
$U[m]$	1.41	7.97
$B_{WL}[m]$	1.81	58.0
$D[m]$	0.94	30.0
$T[m]$	0.63	20.0
F_n	0.142	
R_n	1.23×10^7	2.15×10^9

長さ 10m の KVLCC2 模型の船尾部を切り出して、長さ 3m の境界層相似模型を設計した。船型を図 4 に、要目を表 2 に示す。

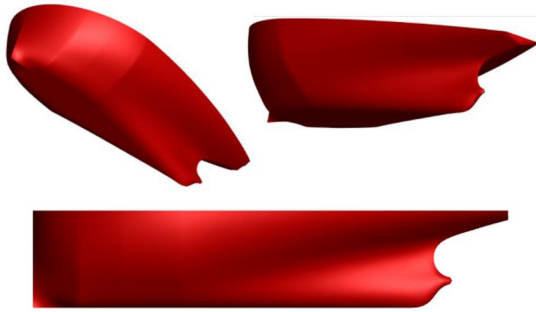


図 4 境界層相似模型

表 2 境界層相似模型主要目

主要目(BLS)	
$L_{pp}[m]$	3.0
$U[m]$	1.41
$B_{WL}[m]$	1.78
$D[m]$	0.94
$T[m]$	0.63

省エネルギーデバイスとして、船尾フィンを想定する。図 5 に船体まわりの計算格子とフィンまわりの計算格子を示す。CFD 計算では複数の格子ブロックを重ね合わせる重合格子法を採用し、重合格子の前処理には UP_GRID、ナビエ・ストークス・ソルバーとして NAGISA を用いた。模型船、実船、境界層相似模型それぞれについてのレイノルズ数と計算格子の概要を表 3 に示す。

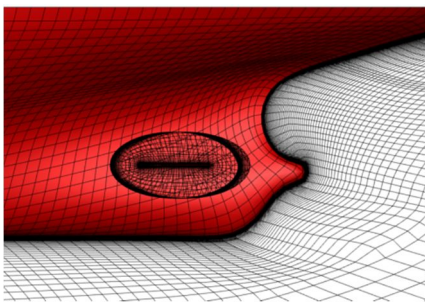


図 5 船尾船型と船尾フィンまわりの計算格子

表 3 計算条件

	Model	Full	BLS
R_n	1.23×10^7	2.15×10^9	1.23×10^7
格子数	9,591,808	9,953,280	2,150,400
最小格子間隔	5.1×10^{-6}	1.7×10^{-8}	3.0×10^{-6}

船尾フィンのない状態でのプロペラ面の伴流分布の比較を図 6 に示す。境界層相似模型の伴流分布は模型の伴流より薄くなっており、実船の伴流をよく再現している。図 7 は船尾フィンがある場合の伴流分布であり、フィンによって発生した渦がプロペラ面に流入している。模型船の場合は渦による低速域は船体伴流と一体化しているが、境界層相似模型では実船と同様に船体伴流の外側に低速域が見られる。

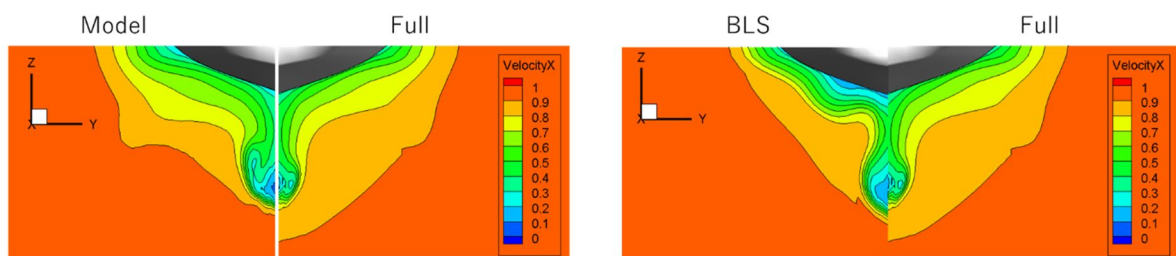


図 6 フィンなし状態の伴流分布の比較(プロペラ面)

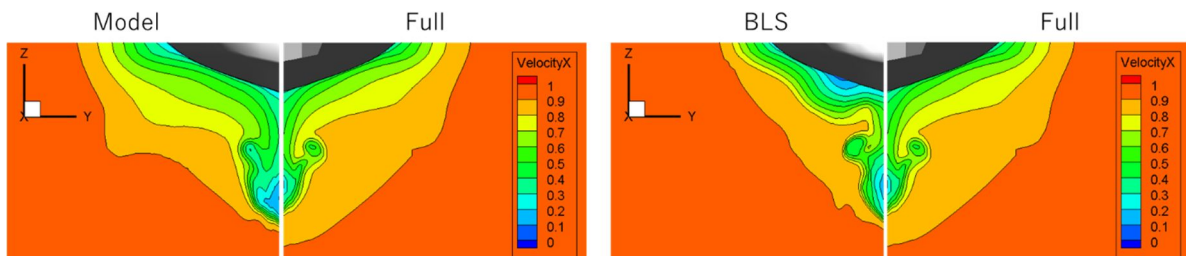


図 7 フィンあり状態の伴流分布の比較(プロペラ面)

プロペラディスク内の平均速度から求めた公称伴流係数の比較を表 4 に示す。フィンによる渦

がプロペラディスクのやや外側にあるため、フィンの有無による伴流係数の違いは明瞭ではないが、境界層相似模型の係数の値は実船の値に近く、実船境界層をよく再現している。

表 4 公称伴流係数の比較

	Model	Full	BLS
w/o fin	0.66396	0.77440	0.75761
with/ fin	0.66161	0.76785	0.75448
改善率	0.354%	0.846%	0.413%

フィンによる渦の生成を可視化するために、図 8 において実船、模型船、境界層相似模型について x 軸まわりの渦度 $\omega_x=-80$ の等値面を比較した。境界層相似模型の渦の強さは実船のそれにより近く下流方向に延びていることがわかる。

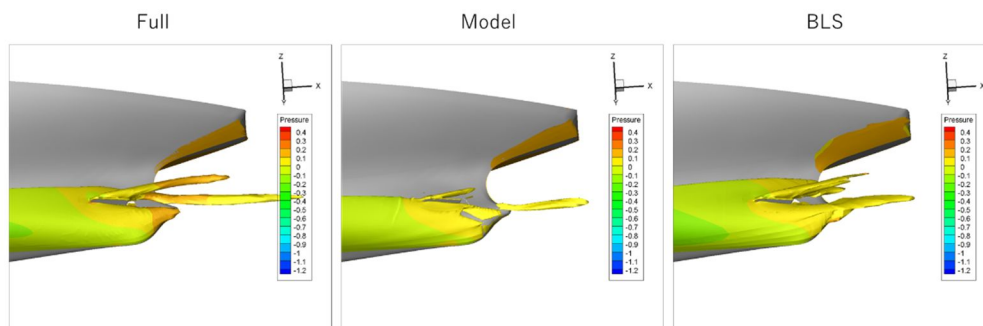


図 8 渦度 $\omega_x=-80$ の等値面の比較

図 9 にフィンあり状態におけるプロペラ作動時の速度分布を示す。ここでも、境界層相似模型の速度分布は模型船よりも実船の分布に近く、プロペラ影響も精度よく近似できていることがわかる。

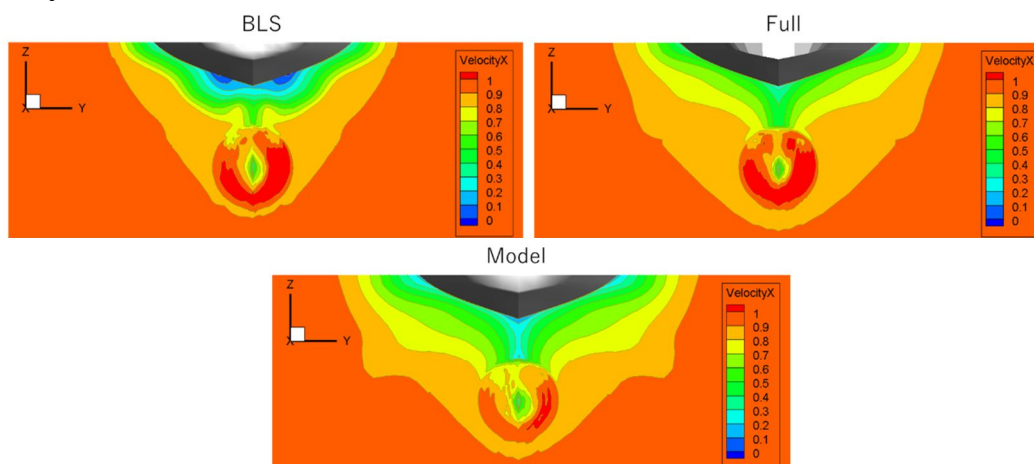


図 9 プロペラ作動時の速度分布（フィンあり状態）

表 5 に自航要素の比較を示す。上で述べたように、フィンによる速度場の変化が主としてプロペラディスクの外側に現れたため、フィンの効果は明瞭ではないが、自航要素の尺度影響は境界層相似模型によって再現されていることがわかる。

表 5 自航要素の比較

	Model	Full	BLS
1 - t w/o fin	0.8294	0.8284	0.8367
1 - t with/ fin	0.8245	0.8314	0.8325
1 - w _T w/o fin	0.6349	0.7521	0.7160
1 - w _T with/ fin	0.6346	0.7508	0.7195

以上より、境界層相似模型を用いることで、流れ場、フィンの効果ともに模型スケールよりも実船スケールに近い状況を再現することができた。このことから、境界層相似模型による省エネデバイス性能推定の有効性が確認された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 H. Ikenoue, T.Hino and Y. Takagi
2. 発表標題 Hydrodynamic Design of Energy Saving Device for Ship Scale Performance Improvement
3. 学会等名 33rd Symposium on Naval Hydrodynamics (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------