

水槽試験と CFD の統合による船型設計支援システムの開発

47-146727 和中 真之介
指導教員 大和 裕幸 教授

In this paper, an integrated design database for management of ships' hull information, towing tank test results, and CFD simulation results is constructed by using metadata and a ship design support system based on the database is developed. 2 case studies are conducted. First case is analysis about the drag coefficient of a sphere using tank test and CFD data, and second case is comparison of a container ship's resistance estimated by tank test and CFD. From the result of case study, it is demonstrated that the system's function to support comparison and integration between CFD and tank test data is useful and the accuracy of the system's CFD simulation is validated.

Key words: Ship Design, Integration of CFD and Tank Test, Data management system

1 緒言

船型設計とは船の型を決めていく船舶の基本設計であり、特に重要なプロセスである。船型設計の基盤となるのは船型試験水槽における模型試験による性能推定である。水槽試験における性能推定結果に基づき、最も効率の良い船型を設計する。しかし、水槽試験の時間的、金銭的コストを考えると、設計した全ての船型に対して水槽試験を行うことは、非現実的である。そのため模型試験の前に行うだけで最適な船型に近づける必要がある。

性能推定のもう一つの手段として CFD 計算による手法がある。近年のコンピューターの発展とともにその精度は向上し、船型設計において重要なツールとなりつつある。一方で、CFD 計算が水槽試験に代替できるほどの精度は確保できていないのが現状である。

船型設計支援には、水槽試験と CFD の両者を組み合わせ、効率的に活用することで、船型と性能の関係をあらかじめデータベース化し、設計を効率化することが考えられる。既に航空機分野では、水槽試験と CFD の統合を目的としたシステムの開発が行われているが、設計プロセスに基づいたデータベースの構築という点では不十分である。

本研究では、船型開発のプラットフォームとして水槽試験データと CFD データを統合的に管理し、船型設計を支援するシステムの開発を行う。具体的には、水槽試験データや CFD データなどの過去の船型に関するデータをメタデータによって管理する設計データベースを構築し、設計条件に応じて過去の船型の水槽試験の結果や CFD の結果から船型設計を支援する設計支援システムの開発を行う。本論文では 2 つのケーススタディを通して開発システムの機能の確認を行う。1 つ目のケースとしては船舶の簡易モデルとして流れの中にある没水球が水から受ける抵抗に関して水槽試験と CFD の比較を行い、システムの比較分析機能の検証を行う。2 つ目のケースとしては実際の船舶設計プロセスの一つである船型の抵抗試験とその CFD の結果を用いて開発システム上で CFD 計算の精度を検証し、設計プロセスにおける船型の決定、性能の推定というループ 1 周が実現できることを示す。

2 開発した船型設計支援システム

2.1 概要

本研究における船型設計支援システムは大きく設計データ統合管理システム、性能推定システム、造船 CAD シ

ステムである。性能推定システムとは水槽試験や CFD 計算によって性能推定を行うシステムを指し、造船 CAD システムとは、船型の修正を行うための CAD システムを指す。性能推定システムや造船 CAD システムから得られる船型、水槽試験、CFD データを統合的に管理するシステムが設計データ統合管理システムである。システムの想定する設計プロセスを図 1 に示す。船主要求に対し、基準船を選択し、その修正と数値計算による性能推定を行うことで、模型試験を行う船型を決定する。模型試験の結果、船主要求を満たしているようであれば、詳細設計へと移る。

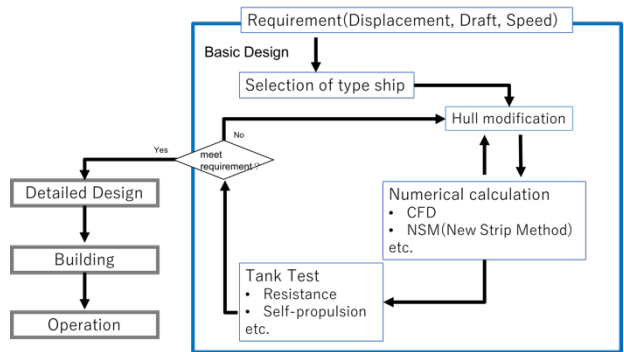


Fig. 1 Design process supported by the developed system

Table 1 Requirements of ship design platform

Name of subsystem	Requirement
Design data management system	Design database and search function
	Tank test data viewer
	CFD data viewer
	Hull data viewer
	Interface to compare Tank test and CFD
	Knowledge accumulation function of
CAD system for shipbuilding	Hull modification function
	Automatic fairing function
Performance estimation system	Towing tank
	Application for CFD

CFD 比較分析機能の有用性の検証を行う。具体的には水槽試験の結果と粗いメッシュ、細かいメッシュの 2 種類のケースを比較し、メッシュ細かさに関する検討を開発システム上で行う。

このケーススタディにおける水槽試験の様子を図 5 に示す。3 分力計に L 字型ロッドを固定し、その先に球体をセットする。この状態で台車による曳航を行い、抗力の計測を行った。台車の速さは 0.26、0.42、0.51、0.75、1.0[m/s] の 5 ケースで行い、球の没水深さは自由表面の影響が出ないよう 24.4[cm]とした。

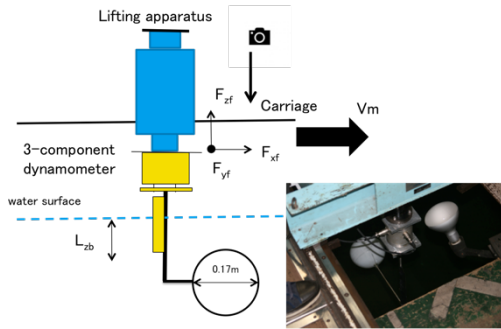


Fig. 5 Interface for viewing CFD data

CFD 計算では支持のための機材については考えず、空間中に球体を固定し、一様流からどのような抗力を受けるかを計算する。用いたメッシュの様子を図 6 に示し、流速 u 、圧力 p 、乱流エネルギー k 、比散逸率 ω の境界条件を表 2 に示す。メッシュに関しては流速の進行方向に 5[m]、それ以外は 3[m]の幅で計算格子を確保した。球表面のセル数が 2040 個のもの と 496104 個のものを用意し、両方の計算を行った。境界層適合メッシュは厚さが $1/\sqrt{Re}$ で 10 層となるように挿入している。乱流エネルギーや比散逸率の境界条件には壁関数を用いた境界条件を設定している。乱流モデルとしては $k-\omega$ SST モデルを使用し、乱流強度を 0.5%、長さスケールを代表長さの 20%とした。

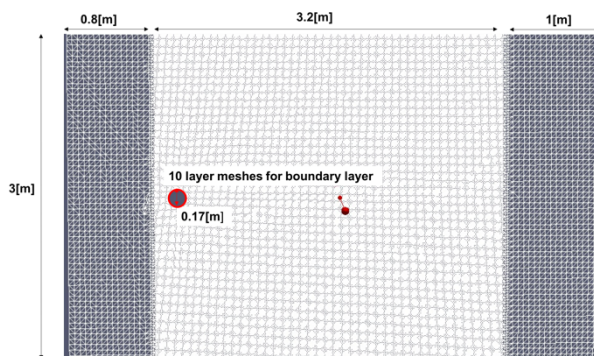


Fig. 6 Interface for viewing CFD data

開発システムによる水槽試験の結果および CFD 計算の結果を表 3 に示す。表 3 は開発システムによって作成した比較のグラフをもとに作成している。最も左の列がレイノルズ数 Re を表し、それに対応する水槽試験と CFD の結果を示している。示している数値は抗力を無次元化した抗力係数である。

Table 2 Boundary condition

u	Inlet	Constant
	Wall	0
	Outlet	$\partial u / \partial n = 0$
p	Inlet	0
	Wall	$\partial p / \partial n = 0$
	Outlet	0
k	Inlet	Constant
	Wall	Wall function
	Outlet	$\partial k / \partial n = 0$
ω	Inlet	Constant
	Wall	Wall function
	Outlet	$\partial \omega / \partial n = 0$

Table 3 Comparison of drag coefficient

Re	Tank Test	CFD (rough)	CFD (smooth)
44370	0.421	0.492	0.489
75170	0.440	0.501	0.492
86700	0.423	0.492	0.491
127500	0.420	0.161	0.488
170000	0.393	0.144	0.499

3.3 コンテナ船の抵抗性能推定

本ケーススタディでは、コンテナ船の抵抗性能を推定する問題に対して、水槽試験と CFD 計算を行い、開発システム上で比較することで CFD 計算の精度の検証を行う。

対象とするコンテナ船の主要目を表 4 に示す。またこの船型の線図を図 7 に示す。左側が正面図、右側が背面図である。このような船型に対してフルード数 0.176~0.244 の 6 ケースにおいて東京大学船型試験水槽での水槽試験、OpenFOAM による CFD 計算の結果を比較し、精度の検証を行う。

Table 4 Information of the target container ship

	Full scale	Model scale
L_{pp} [m]	283.8	2.00
Breadth[m]	42.80	0.302
Depth[m]	24.4	0.172
Volume[m ³]	107072.1797	0.00375
WSA[m ²]	15300.6758	0.760
Draft[m]	14.00	0.099

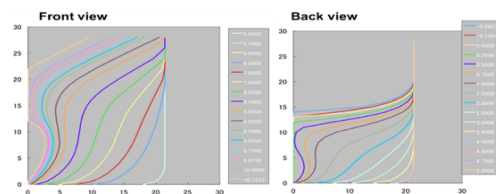


Fig. 7 Lines of the target container ship

OpenFOAM での CFD 計算のために、図 8 で示した線図のオフセットデータより 3 次元形状を作成し用いた。計算に用いた 3 次元形状及びメッシュの様子を図 8 に示す。

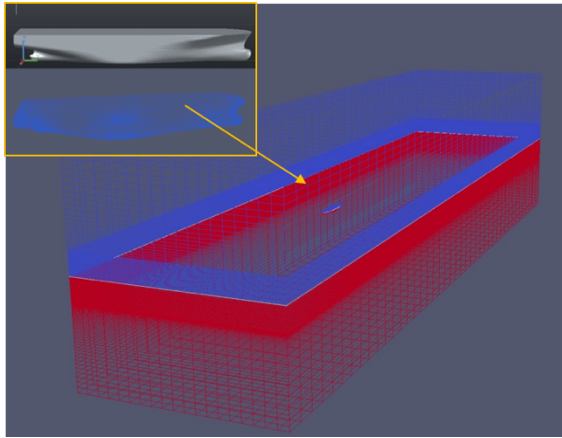


Fig. 8 Interface for viewing CFD data

計算空間を空気と水の 2 相からなる混相流で表現し、その境界に船体のメッシュを固定することで水槽試験をモデル化する。計算領域は船体の進行方向に 52[m]、その他は 10[m]確保している。船体表面のセル数は 11122 個である。境界層厚さは 0.0121[m]で 3 層のメッシュを配置している。乱流モデル、境界条件については没水球のケースと同様である。

水槽試験結果および CFD 計算による結果の比較を表 5 に示す。最も左の列がフルード数 Fn を表し、それに対応する水槽試験および CFD 計算による模型船の全抵抗値を示している。

Table 5 Results of tank test and CFD

Fn	Tank Test[kg]	CFD[kg]
0.176	0.114	0.116
0.185	0.126	0.134
0.195	0.140	0.144
0.205	0.155	0.159
0.224	0.187	0.193
0.244	0.226	0.228

4 考察

没水球に対する抗力の推定についてのケーススタディにおいて粗いメッシュの計算結果と細かいメッシュでの計算結果とでは、レイノルズ数が 127500 以上で大きな差が生じている。水槽試験の結果と比較すると、細かいメッシュの数値と非常に近く、傾向も一致していることがわかる。このことから球体の CFD 計算のためには、今回用意した細かいメッシュ程度のメッシュ分解能が必要であることがわかった。球の抗力係数についての実験式である Cheng³⁾らの式で計算した数値も同様の傾向を示すことから、水槽試験、細かいメッシュの CFD はおおよそ正しく、球の抗力を推定できていることが言える。粗いメッ

シュで正確な計算が行われなかった原因は、臨界レイノルズ数が低くなったことが原因であると考えられる。実際、Achenbach⁴⁾は球表面の粗さによって臨界レイノルズ数が低い位置に移ることを報告している。

このような分析から得られる知識は 1 種の CFD に関するノウハウである。船型のバルバス・バウ部分は球体と似た形状であると言え、今回得たノウハウをシステム内に蓄積することは非常に重要であり、開発システムの比較分析機能が有用であると言える。

表 5 から読み取れる通り水槽試験の全抵抗値に対する CFD 計算の全抵抗値の誤差は平均で約 4.33[g]であった。ITTC の水槽試験準備と計測装置に関するガイドラインでは、およそ 5.1[g]程度の精度が要求されており、今回のケーススタディで得られた CFD の精度は水槽試験で要求されている精度に近い値を示すことができている。船型の検索機能や知識の蓄積方法については第 2 章で説明した通りである。さらに CFD 計算の精度についても確認できたため、開発システムによって船型の決定、性能の推定という設計プロセスの 1 ループを実現できたと言える。

5 結論

本研究では、船型開発のプラットフォームとして水槽試験データと CFD データを統合的に用いて、船型設計を支援するシステムの開発を行った。本論文では 2 つのケーススタディを通して開発システムの機能の検証を行った。1 つ目のケースとしては船舶の簡易モデルとして流れの中にある没水球が水から受ける抵抗に関して、実際に行った水槽試験と CFD の比較分析を開発システムによって行い、水槽試験と CFD の比較分析機能の検証を行った。ケーススタディで得られた必要な計算格子数に関する知見は、この CFD 計算に関するノウハウであると言え、開発システムは必要な機能を満たしていることが検証された。2 つ目のケースとしては実際の船型の抵抗試験とその CFD の結果を用いて、開発システムにおいて CFD 計算の精度の検証を行った。抵抗試験の結果と開発システムの CFD 計算の結果を比較することで、CFD 計算によって水槽試験の数値に対して平均約 4.33[g]の精度で船型の抵抗値を計算できることを示した。このことから開発システムによって設計プロセスにおける船型の決定、性能の推定というループ 1 周が実現できることが示された。

文献

- 1) S. Watanabe, S. Kuchi-ishi, K. Murakami, A. Hashimoto, H. Kato, T. Yamashita, K. Yasue, and K. Imagawaga: "Towards EFD/CFD Integration: Development of DAHWIN –Digital/Analog-Hybrid Wind Tunnel", 52nd, AIAA Aerospace Science Meeting, (2014).
- 2) 関西造船協会：造船設計便覧，第 4 版，pp. 360，海文堂出版，(2004).
- 3) N. Cheng: "Comparison of Formulas for Drag Coefficient and Settling Velocity of Spherical Particles", pp. 395-398, Powder Technology, 189(3), (2008).
- 4) E. Achenbach: "The effects of surface roughness and tunnel blockage on the flow past spheres", pp. 113-125, Journal of Fluid Mechanics, 65(01), (1974)