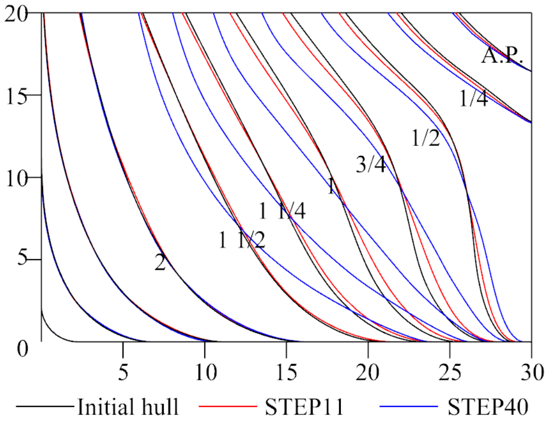
馬力最小化を目的とした CFD による船尾船型最適化

Optimization of Stern Hull Form by Using CFD for Minimizing BHP



技術研究所 流体研究グループ

岡本　直也　　OKAMOTO Naoya

増田　聖始　　MASUDA Satoshi

牧野　功治　　MAKINO Koji

概　要

従来の船型設計では、船型を CFD（Computational Fluid Dynamics）計算で評価し、より燃費性能の高い形状となるよう、技術者が形状変形を実施し最適化形状を探索する。しかし、意図した形状を作成、評価するまでに多くの時間と労力を要すため、開発期間内では限られた隻数しか評価できず、最適形状が得られない可能性がある。そこで、自動的に最適形状を探索する船尾船型最適化手法を開発した。また、VLCC 船型に本手法を適用し得られた船型について、水槽試験を行うことにより本手法の有効性を確認した。

Summary

Usually, hull form design is conducted by deforming manually the hull form and then the performance is estimated. This procedure is repeated until new forms with less fuel consumption are obtained. However in the development period the repetitive work is limited because the procedure needs a lot of times and human resources. Therefore the final hull form was not always the best form. In this study, instead of these manual-operation based procedures, hull form optimization methods are developed. This paper shows the results of VLCC hull optimization and verification by comparing with results of CFD and tank test.

1.　緒　　言

従来の船型設計では、技術者が意図した船型を作成し、作成した形状の性能を CFD で評価し、燃費性能が向上するように、形状の改良を行う。形状の改良方法は技術者の経験や試行錯誤的な方法であったりするため、燃費性能の高い船型を取得するのに多くの時間と労力を要し、限られた開発期間で検討できる隻数は限られる。技術者による船型変更と性能推定の繰り返し作業を減らし、効率的に性能の良い船型を得るために、数値シミュレーションを用いた船型最適化手法が研究され、多くの手法が報告されてきた [1]。

近年では、コンピュータ性能の向上から CFD を用いた船型最適化手法が注目され、研究が進められている [2]。CFD では抵抗及び自航要素の推定が可能なため、船体後半部における性能要素を全体的に考慮できるよう、制動馬力 BHP（Brake Horse Power）最小化を目的とした CFD による船尾船型最適化手法を開発した [3]。本稿では、開発した船尾船型最適化手法の概要と、VLCC（Very Large Crude oil Carrier）船型への最適化手法の適用事例を紹介する。また、最適化により得られた船型の実験結果を用いて、本最適化手法が有効な船型設計ツールとなるかを検証する。

2.　船尾船型最適化手法

船体形状変形手法、計算用格子生成、CFD による性能要素の算出、馬力推定手法、最適化手法を組み合わせ、船型最適化手法を構築する（図 1）。初期船型をインプットとして船型を変更し、CFD により性能要素を推定し、得られた結果から BHP を推定する。推定された BHP を目的関数として最適化手法で評価し、SQP（Sequential Quadratic Programming）で BHP が小さくなる船型形状の探索を繰り返し実施する、という手順により船型最適化が実行される。

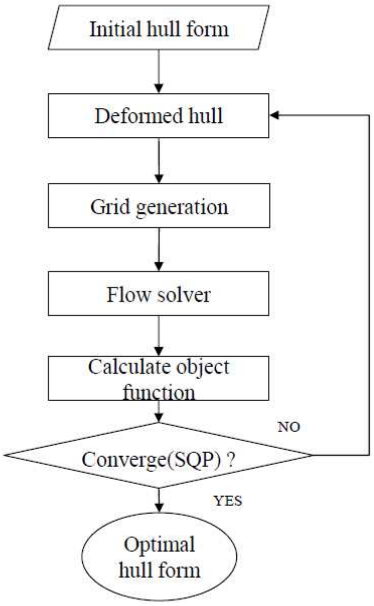


図 1 船型最適化の流れ
Fig.1 Flow of hull form optimization

3.　船型最適化手法の検証実験

3.1　VLCC の船型最適化事例

開発した船型最適化手法を用い、表 1 の VLCC 船型を初期船型として、船尾フレームラインを最適化する。CFD 計算は 1/39.2 スケール（実船プロペラ直径：9.8m，模型プロペラ直径：250mm）で行い、形状変形範囲は、S.S.2 から A.E.までとする。本来は、船体抵抗、自航要素、伴流分布等からプロペラ要目を最適化し、プロペラ単独効率 η_o を算出する必要があるが、ここではプロペラ設計は省略し、どの船型でもプロペラは同一として馬力推定を実施している。本最適化事例では、初期船型の排水量を下回らない、及び、幅 *B* を超えないことを制約条件として与えている。

表 1 VLCC 初期船型の主要目
Table 1　Principal dimensions of initial VLCC

垂線間長 *Lpp* (m)	320.0
幅 *B* (m)	60.0
喫水 *d* (m)	20.0
方形係数 *Cb*	0.820
計画速力 *Vs* (knot)	16.0

最適化の履歴を初期船型との比で図 2 に、初期船型、最適化過程の STEP11、最終結果の STEP40 での船型比較を図 3 に示す。STEP11、STEP40 は初期船型からの排水量増加量が 0.1%以下であり、減少もしていないため、制約条件を満足している。最適化の履歴では全体的に徐々に BHP が減少しているが、STEP17 で急激に BHP が減少している。STEP17 では、STEP40 同様に船尾船底部が大きく痩せており、本最適化事例では船尾船底部の変化が、BHP に大きな変化を与えたと考えられる。

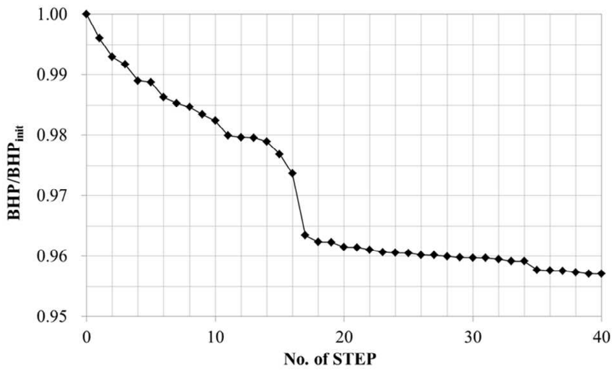


図 2 BHP 比の履歴
Fig.2 Optimal history of BHP ratio

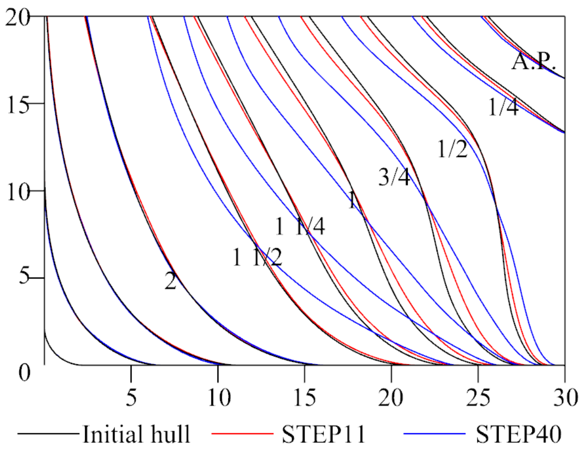


図 3 船型比較
Fig.3 Comparison of body plans

図 4 に各船型の船体後半部の抵抗状態における圧力分布を、図 5 にプロペラ位置における公称伴流分布を示す。圧力分布、公称伴流分布ともに、初期船型に対し、STEP11 に大きな変化はないが STEP40 では大きく変化している。STEP40 は初期船型から船底部を大きく削ったことで圧力回復が増加し、低抵抗型の船型となっていることが確認できる。一方、STEP40 の伴流分布では、初期船型及び STEP11 と比較して、伴流利得が大きく悪化していることが分かる。船尾船底部が痩せるような V 字傾向が強まるフレームラインは、経験的に粘性圧力抵抗が減少し、伴流が悪化することが知られており、CFD 計算結果の傾向と一致している。初期船型から STEP40 のように、抵抗と伴流の関係は経験的に相反するため、実際はこのバランスを見ながら船型開発を実施するが、本最適化結果では、伴流の悪化分を上回る抵抗低減が達成できたため BHP の減少につながっている。

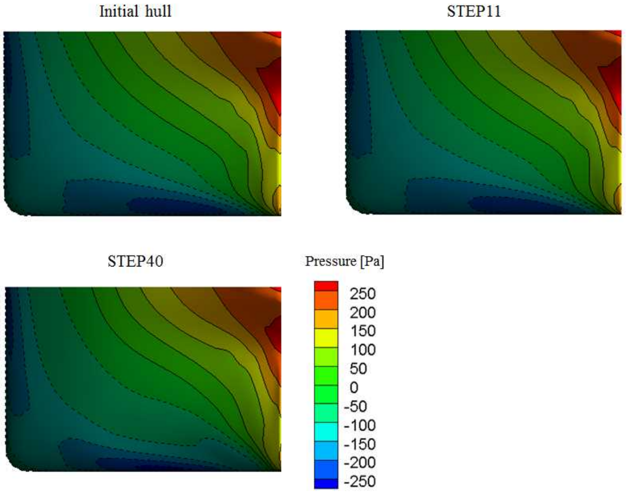


図 4 圧力分布比較

Fig.4 Comparison of pressure distribution

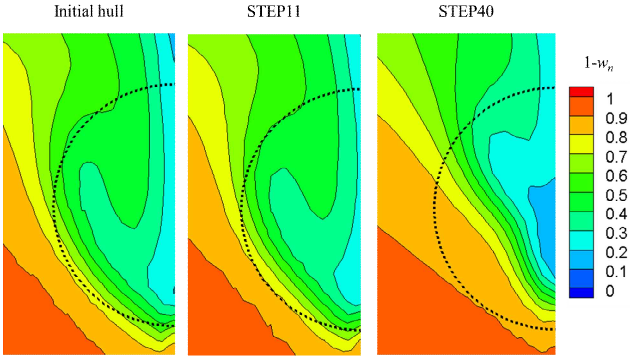


図 5 公称伴流分布比較

Fig.5 Comparison of nominal wake distribution

3.2 水槽試験による最適化効果確認

開発した SQP による船型最適化手法の効果を確認するため、模型船を製作し、当社の船型試験水槽で試験を実施する。供試船型は、最適化事例で示した初期船型である VLCC 船型、最適化過程の STEP11 及び最適解となった STEP40 の船型とする。ただし、水槽試験実施にあたり、最適化により得られた船型をフェアリングした形状を元に模型船を製作している。3 船型について、それぞれ抵抗、自航試験を実施し、CFD による推定結果と比較することで、推定精度を検証する。模型スケールは、最適化計算と同様の 1/39.2 である。図 6 は水槽試験に用いた STEP40 のパラフィン模型船であり、船体後半部が取り換えられるよう、前後分割模型となっている。

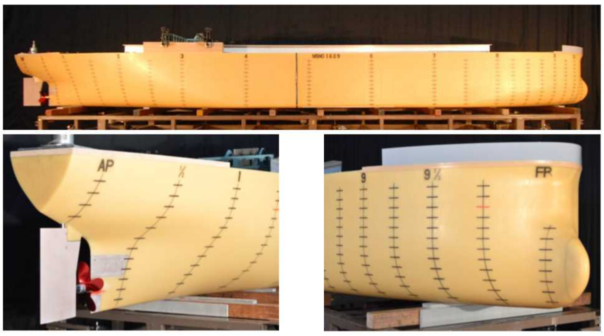


図 6 模型船（STEP40）

Fig.6 Model ship of STEP40

図 7～9 に水槽試験結果に基づく形状影響係数（$1+K$）、推力減少係数（$1-t$）、有効伴流係数（$1-w_T$）の尺度修正値（$1-w_s$）と、最適化計算によって得られたそれぞれの結果を比較して示す。水槽試験結果では、最適化する過程において形状影響係数が徐々に小さくなり、推力減少係数が僅かに改善するが、伴流係数が悪化しており、最適化計算結果の各性能要素の変化の様子と一致している。また、各性能要素の変化は定量的にも水槽試験と計算でよく合っている。水槽試験結果から得られた各性能要素を用いて馬力推定を実施する（表 2）。ただし、最適化計算では船型毎のプロペラ設計を省略しているため、水槽試験でもプロペラは設計せずに、プロペラ単独試験によって得られた POC を用いて馬力推定を実施する。STEP11 では初期船型との比が 0.980、STEP40 では 0.961 となり、最適化計算のそれぞれ 0.980、0.957 と同等の値が得られる。以上の結果より、今回用いた CFD による馬力推定手法には船型設計に使用するのに十分な推定精度があり、最適化手法も有効であるとみなすことができる。

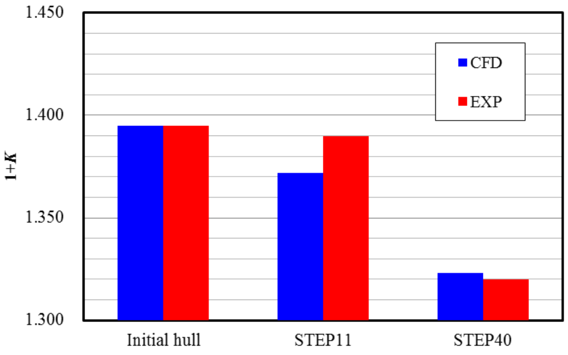


図 7 CFD と水槽試験の $1+K$ 比較

Fig.7 Comparison of CFD and EXP $(1+K)$

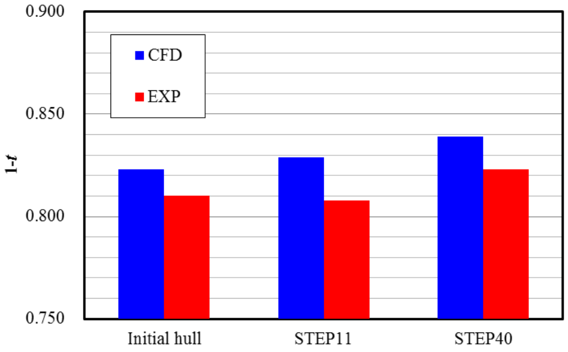


図 8 CFD と水槽試験の $1-t$ 比較

Fig.8 Comparison of CFD and EXP $(1-t)$

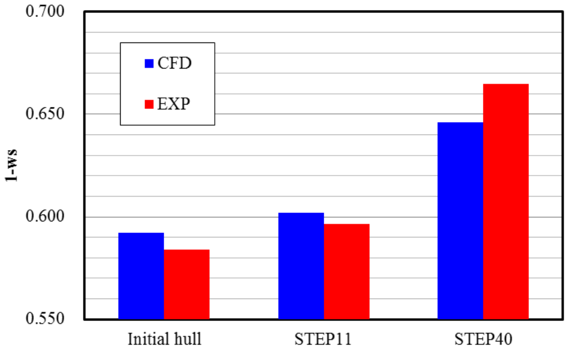


図 9 CFD と水槽試験の $1-w_s$ 比較

Fig.9 Comparison of CFD and EXP $(1-w_s)$

表 2 BHP 比の比較

Table.2 Comparison of BHP ratio

	BHP/BHP_{init}	
	Result of Opt. Cal.	Tank Test
Initial Hull	1.000	1.000
STEP11	0.980	0.980
STEP40	0.957	0.961

4. 結言

BHP 最小化を目的とした CFD による船型最適化手法を構築し、VLCC 船型に適用した。その結果、初期船型から自動的に BHP を減少させる船型を探索できることを確認した。また、最適化によって得られた船型の模型船を製作し、水槽試験を実施し、CFD で得られた結果と比較することで、水槽試験でも CFD 同様に最適化船型では BHP が減少することを確認した。

以上より、開発した船尾船型最適化手法が船型設計において有効なツールとなることを示した。

本稿で紹介した最適化事例は簡単な例であり機関配置による制約を含めていないが、実際の船型設計へ本最適化手法を適用する際は、機関配置等の制約を考慮している。

参考文献

1) 鈴木和夫：流体力学的形状最適化問題、試験水槽委員会シンポジウム - 船型設計と流力最適化問題 - 、日本造船学会、pp67-89、(1999)

2) 田原裕介、西田隆司、安東潤、姫野洋司：CFD によるタンカー船型の船尾形状最適化(第 3 報) - 自航シミュレータを用いた伝達馬力最小化 - 、関西造船協会誌、第 234 号、pp41-50、(2000)

3) 岡本直也、鈴木和夫、日野孝則、増田聖始：BHP 最小化を目的とした船尾船型最適化手法（第 1 報）－最適化手法の検討－、日本船舶海洋工学会論文集、第 23 号、pp19-26、(2016)

岡本 直也　増田 聖始　牧野 功治