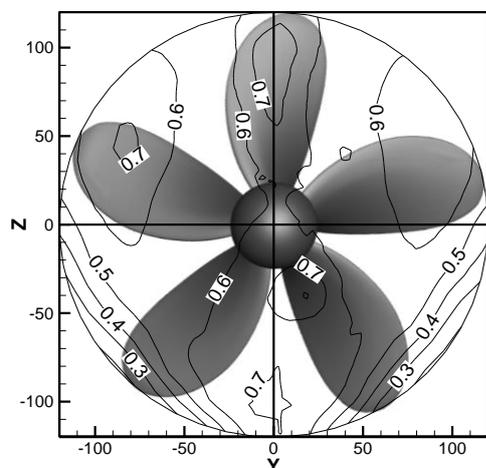


# CFD を用いたプロペラ形状最適化

## Propeller shape optimization using CFD analysis



技術研究所 流体研究 G

齋藤 裕樹

SAITO Yuki

### 概要

近年、計算技術の進歩により、性能推定ツールとして流体の粘性も考慮する Computational Fluid Dynamics (CFD) の活用が船用プロペラの設計においても一般的なものとなっている。例えば、プロペラは粘性影響を強く受ける船体後流中で作動することから、最適化システムと CFD を組み合わせることで、省エネ付加物や実船スケール伴流の影響を CFD 上で直接考慮したプロペラ形状の最適化を実施することができ、より高い実船性能を実現することが可能になると期待される。そこで、第一段階として模型伴流中での CFD を用いたプロペラ形状最適化手法を開発し、船用プロペラの効率向上を図った。また、本手法により得られたプロペラ形状について水槽試験を行い、本手法の有効性を確認した。

### Summary

In recent years, due to advances in computing technology, Computational Fluid Dynamics (CFD) capable of dealing with the viscous effects as a performance estimation tool has become common in the design of marine propellers. Since the propeller is working in the wake field which is influenced by viscous effects, it is expected that propulsion performance will be further improved by combining the optimization system and CFD with effects of energy saving devices and actual ship wake field taking into account.

As the first step, we developed a propeller shape optimization system using CFD for the purpose of improving the efficiency of marine propeller, which is working in the model wake field. In addition, tank tests were conducted on various propeller shapes obtained by this system, and the effectiveness of this system was confirmed.

## 1. 緒言

昨今、船舶の省エネルギー性能に対する要求は日々高まっており、たとえば、プロペラに関しては伴流中設計を行うことでより推進効率の高いプロペラを得る試みが旧来からなされている。Lerbs<sup>1)</sup>は最適循環分布に基づいて、プロペラのピッチ分布を調整することで、伴流分布に適合したプロペラを設計する手法を考案している。また、近年はプロペラ形状の自動最適化

に関する検討も多く行われており、伴流中設計に自動最適化技術を組み合わせた、伴流中プロペラ形状最適化の事例<sup>2)3)4)5)6)</sup>なども多く報告されている。これらの事例ではプロペラの性能評価にポテンシャル流れに基づいたパネル法などの計算手法を用いているが、近年の流体解析で一般的となりつつある粘性影響を考慮した CFD 解析をプロペラ形状最適化に適用した事例<sup>7)8)9)</sup>は少ない。この理由としては、パネル法等が CFD 解析に比べて計算負荷が小さく計算時間も短い

ことから、大量の形状について性能評価を行う必要がある最適化に対してはパネル法の方が適しているとされていた点が挙げられる。一方で、今日では計算機性能の向上に伴い、CFD 解析に要する時間的コストが従来に比べて小さくなってきており、CFD を用いたプロペラ形状最適化が現実的になりつつある。

そこで、本稿では船用プロペラのさらなる効率向上を実現するための高精度な形状最適化システムとして、性能推定に流れの粘性影響を考慮する CFD を用いたプロペラ形状最適化システム<sup>10)</sup>を構築し、水槽試験でその効果を確認した。このシステムにより、船型や省エネ付加物などにより生じた粘性影響を強く受ける複雑な流れや実船スケール伴流を CFD 上で直接考慮した中でプロペラ形状を最適化することが可能となり、これまで以上の高い推進性能を有した船舶の設計につながると期待される。

## 2. プロペラ形状最適化システム

最適化システムを図 1 に示すフローに従い構築した。本システムの概略は、最初に母型となるプロペラ形状（母型プロペラ）を与え、母型プロペラに対する形状変更と CFD 計算による性能推定を繰り返し行い、形状変更後のプロペラについてプロペラ効率が最大かつ制約条件を満たしたプロペラが得られた場合、そのプロペラ形状を最適形状として出力するものである。

最適化手法としては SQP (Sequential Quadratic Method)<sup>11)</sup>を用い、スラストまたはトルク性能が作動条件から大きく逸脱しないことを制約条件とし、プロペラ効率を目的関数とすることでプロペラ効率の最大化を図るものである。

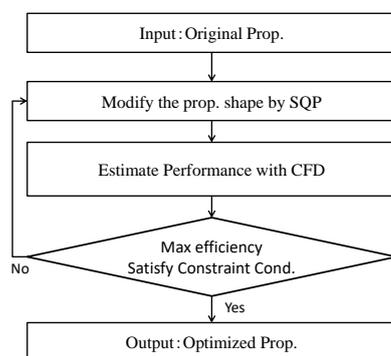


図 1 最適化システム概略図

Fig.1 Outline of Optimization system

## 3. 最適化結果の効果確認

### 3.1 最適化適用事例

開発した最適化システムの有効性確認を目的に

MAU プロペラ<sup>12)</sup>に本システムを適用した事例を示す。適用対象として、図 2 に示す船型 A の伴流中で作動することを想定し、図 3 に示す伴流分布中で作動するプロペラ形状の最適化を実施した。なお、プロペラ作動点は後述する自航試験による効果検証も考慮して、モデルポイントに於ける作動点とし、伴流分布は模型スケールに於ける分布とした。伴流影響は最適化システム実行時の CFD 性能計算に於いて流入境界条件に伴流分布を組み込むことで考慮した。

最適化は以下の手順で実施した。

#### 最適化手順

- 1st 母型プロペラを一様流中最適化
- 2nd 1st 結果を初期形状として伴流中最適化

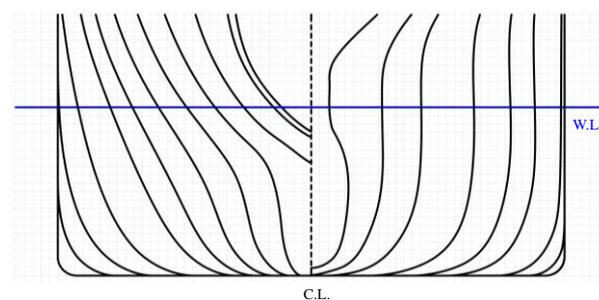


図 2 船型 A 正面線図

Fig.2 Body plan of ship A.

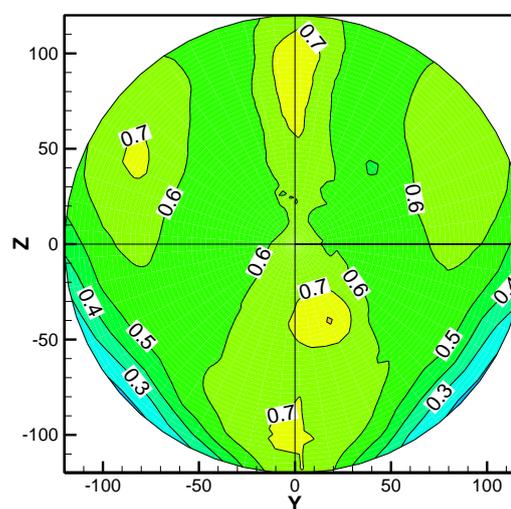


図 3 船型 A 伴流分布

Fig.3 Wake distribution of ship A.

本事例では母型とした MAU プロペラ (Case0) のピッチ分布、最大キャンバー分布、翼断面（翼断面後半部翼厚分布）を設計変数とし、トルク性能変化を 0.5%以内とした制約条件の下に最適化を実施した。図 4 に SQP の反復回数に応じたプロペラ効率の向上

率を示す。黒プロットが一樣流中最適化、赤プロットが伴流中最適化の効率変化を示す。一樣流中最適化で約 2% (STEP10 ; Case1)、伴流中最適化で更に 0.3% (STEP13 ; Case2) の効率向上効果を得られていることが確認できる。

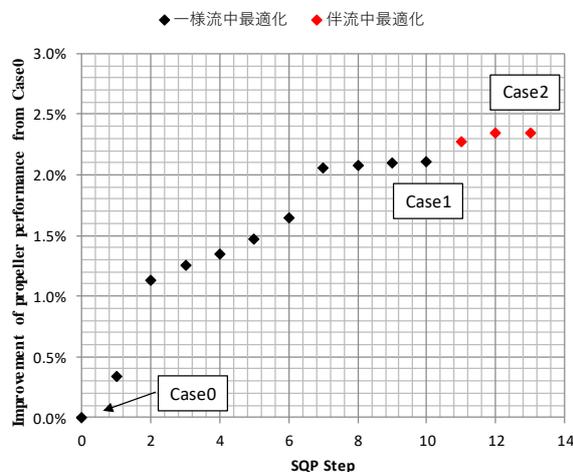


図 4 SQP 最適化履歴

Fig.4 Optimization history of SQP steps.

図 5 に母型プロペラおよび最適化結果の半径方向ピッチ分布を示す。図 6 に母型プロペラおよび最適化結果の最大キャンバーを翼弦長で無次元化したものの半径方向分布を示す。図 7 に母型プロペラおよび最適化結果のプロペラ半径 70%位置における翼断面形状を示す。それぞれ、黒線が母型プロペラ、赤線が一樣流中最適化結果、緑線が伴流中最適化結果を示す。なお、 $R$  はプロペラ半径、 $r$  はプロペラ中心から半径方向の距離を示し、 $r/R=1.0$  は翼端 (プロペラ半径 100%位置) を示す。両最適化結果共に全体的にピッチが低減し、翼端部のピッチ減少量が大きい一方で最大キャンバーは翼端付近で大きくなっている。最大キャンバーが大きくなることで翼断面形状が変化し流力性能が向上する一方で、制約条件としているトルク性能を逸脱しないようピッチが減少したものと考えられる。また、伴流中最適化結果は一樣流中最適化結果より翼端付近のピッチが増加しているが、これは伴流分布が  $r/R=0.7$  付近から翼端にかけて相対的に流入速度が大きくなることから、流速の増大に応じてピッチが大きくなっているものと推察され、伴流分布の影響を捉えられているものと考えられる。

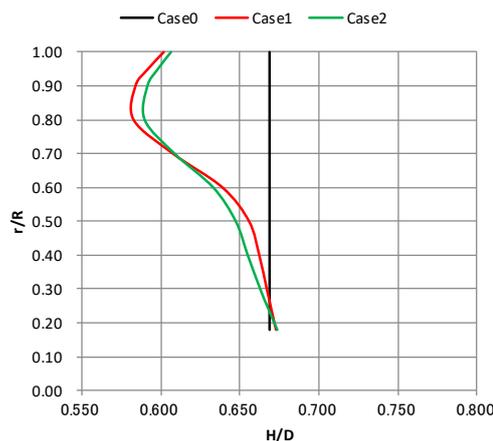


図 5 プロペラピッチ分布比較

Fig.5 Comparison of pitch distribution.

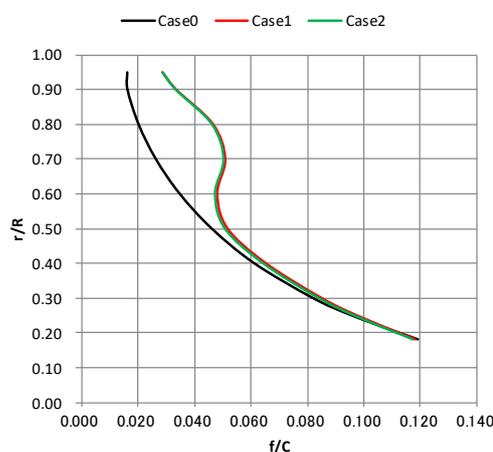


図 6 最大キャンバー翼弦長比分布比較

Fig.6 Comparison of camber chord length ratio distribution.

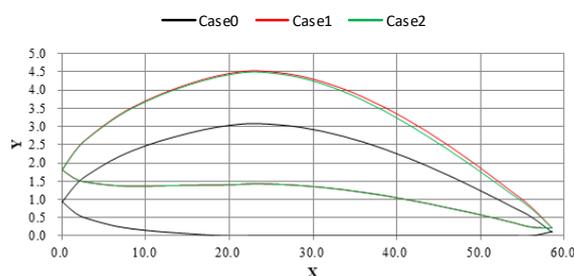


図 7 最大キャンバー翼弦長比分布比較

Fig.7 Comparison of wing section at  $r/R=0.7$ .

以上より、最適化システムにより効率が向上したプロペラ形状を得られた。一方で、形状としては翼端付近で最大キャンバーが大きくなっていることから、翼面上の圧力低下が大きくなることが予想される。図 8 に、CFD 推定結果から得られた式(1)に示す圧力係数

の翼 Back 面上分布を示す。図中に示した黒線は  $r/R$  を 0.1 刻みで半径位置を示したものである。最適化結果では  $r/R=0.8$  付近の翼中心付近に負圧領域が形成されていることが確認でき、キャビテーション性能の悪化が懸念される結果となった。

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho n^2 D_p^2} \quad (1)$$

P : 圧力

$\rho$  : 流体密度

n : プロペラ回転数

$D_p$  : プロペラ直径

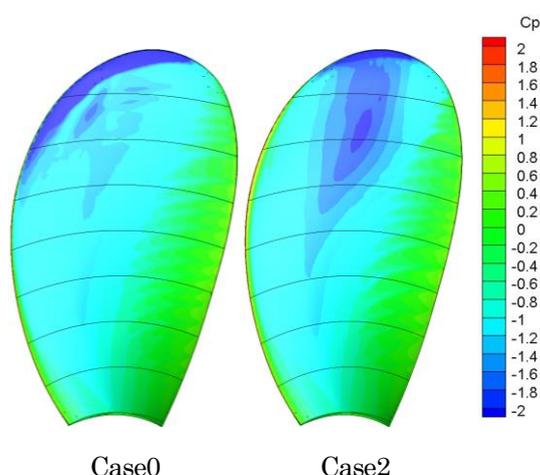


図8 伴流中最適化結果 Back 面圧力分布  
Fig.8 Pressure distribution on back side.

このことから、 $r/R=0.8$  付近の翼中心付近に生じる負圧値に制約を設け、負圧領域の増大を抑制することでキャビテーション性能悪化を抑制することを考えた。負圧値の制約は、実船のプロペラ作動条件を想定し、飽和蒸気圧を下回る程度の圧力低下がプロペラ表面に生じないように、圧力低下量に制約を与えた。

図9に Case1 を母型として、翼面上の圧力制約を課した状態での SQP による伴流中最適化履歴を示す。STEP13 の結果を Case3 とし、図10に CFD 推定結果から得られた圧力係数の翼 Back 面上分布を Case2 と比較して示す。Case2 と比べると Case3 は翼端付近の負圧領域が軽減されており、キャビテーション性能の悪化が抑制される圧力分布が得られた。図11に Case0 に対する Case2 および Case3 の性能変化量を示す。Case2 と比べると Case3 は、圧力制約を付加した事により若干改善量が低下する結果となっている。

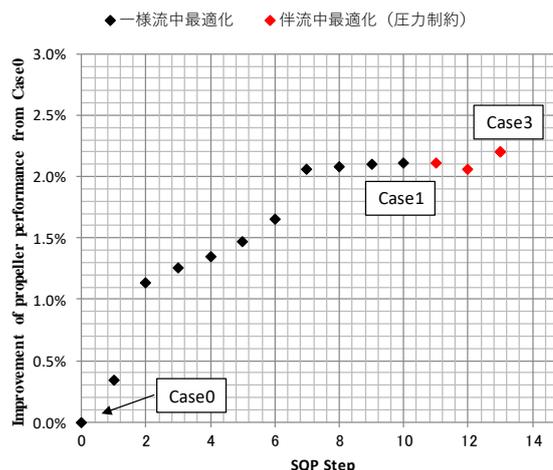


図9 SQP 最適化履歴 (圧力制約あり)  
Fig.9 Optimization history of SQP steps.

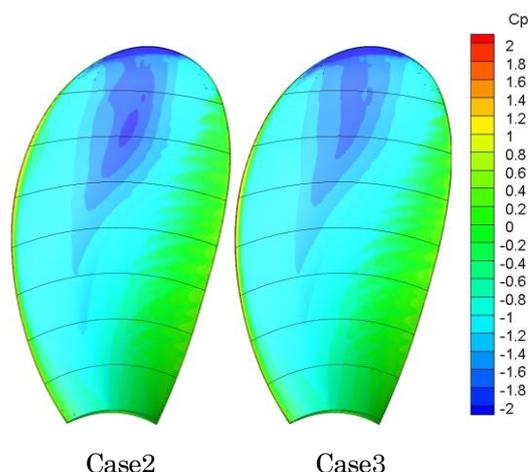


図10 伴流中最適化結果 Back 面圧力分布  
Fig.10 Pressure distribution on back side.

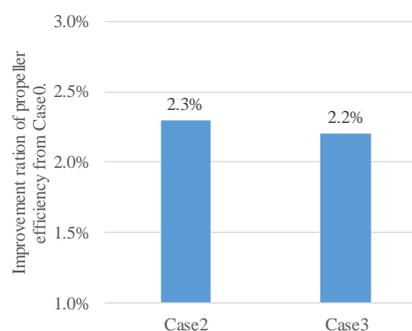


図11 プロペラ最適化結果 効率改善率

Fig.11 Improvement ratio of propeller efficiency of optimization results (CFD).

### 3.2 水槽試験による有効性の確認

開発したプロペラ形状最適化システムの有効性を確認するため、模型プロペラおよび模型船を製作し、当社の船型試験水槽で自航試験を実施することで、プロ

ペラ性能の差を確認した。本試験ではモデルポイントでの自航試験を各プロペラで実施し、模型スケールにおける制動馬力(BHP)を算出することで、その性能差を確認した。供試プロペラは Case0、Case2、Case3 とした。

図 12 に自航試験結果から算出した BHP を Case0 からの低減率として示す。これより Case2、Case3 共に Case0 に比べて BHP 低減を達成していることが確認できる。また、圧力制約を付加した Case3 の方が、性能改善量が小さく、最適化システム推定値の大小と定性的に一致している。ただし、定量的には、Case2 と Case3 の性能差は推定と比べると大きい結果となっている。本検討では最適化実行時の大規模な繰り返し計算を実行することを考慮して、一般的な計算と比較して粗い格子 (200 万以下) を使用としていることから、今後、生成格子と推定精度及び計算時間の関係を検討する必要がある。

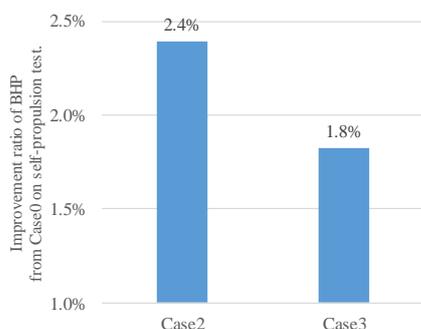
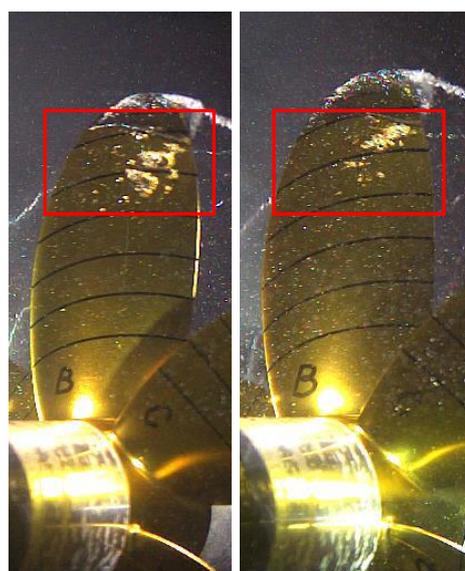


図 12 自航試験結果 (BHP 改善率)

Fig.12 Improvement ratio of BHP (model point self-propulsion test results).

図 13 に Case2 および Case3 についてキャビテーション試験を実施した結果を示す。図中赤枠に囲った範囲内で発生しているキャビテーション量は、Case2 と比べて Case3 の方が小さいことが確認でき、図 10 で示した負圧領域の減少と対応してキャビテーションの発生が抑制されていることが確認できた。今後はキャビテーション性能と圧力制約の関係をより詳細に把握し、最適化システムに組み込む事が重要であろう。

以上より、今回開発したプロペラ形状最適化システムを用いることでプロペラ性能を向上することができ、必要に応じてキャビテーション性能の悪化を抑制することが水槽試験から確認された。



Case2 Case3

図 13 キャビテーション試験結果

Fig.13 Result of cavitation test.

#### 4. 結言

本稿では、船用プロペラ効率のさらなる向上実現を目的とした高精度な最適化システムとして、性能推定に流れの粘性影響を考慮する CFD を用いたプロペラ形状最適化システムを構築した。MAU プロペラを対象とした最適化計算を行い、本最適化システムによりプロペラ効率が向上することを確認した。また、最適化により得られた形状の模型プロペラを製作し水槽試験を実施し、CFD 結果と同様にプロペラ効率が向上することを確認した。さらに、最適化時にプロペラ翼面上圧力へ制約を与えることでキャビテーション性能の悪化を抑制した形状を得ることが可能であることを確認した。

以上より、本システムがプロペラ性能の向上を図る上で有効なことを確認した。

本稿で紹介した事例は有効性検証のための簡単な例ではあるが、今後本システムを用い省エネ付加物影響や実船スケール伴流などを CFD により考慮した最適化を実施することで、より高い実船性能を実現することが可能になると期待できる。

#### 参考文献

- 1) H. W. Lerbs : Moderately Loaded Propellers with a Finite Number of Blades and an Arbitrary Distribution of Circulation, Trans. SNAME, Vol. 60, 1952, pp. 73-117
- 2) 安東潤 : 船尾伴流を考慮した高性能プロペラ設計法の開発, 科学研究費助成事業 (学術研究助成基金助成金) 研究成果報告書, 2011.  
<https://kaken.nii.ac.jp/ja/grant/KAKENHI-PROJECT->

23656552/

- 3) F. Vesting, R. Bensow : Propeller Optimization Considering Sheet Cavitation and Hull Interaction, Second International Symposium on Marine Propulsors, 2011
- 4) S. Gaggero, M. Viviani, et al. : A Design by Optimizaiton of Tip Loaded Propellers, Fourth International Symposium on Marine Propulsors, 2015
- 5) K. Shiraishi, K. Koyamai, H. LmKamiiirisa. : A Calculation Method Based on QCM for Characteristics of Propeller with Energy Saving Duct in Steady Ships Wake, Fourth International Symposium on Marine Propulsors, 2015
- 6) 新川大治郎 : プレスワールフィンによる旋回流が船舶の推進性能に及ぼす影響および旋回流中のプロペラ翼形状最適化に関する研究.  
[catalog.lib.kyushu-u.ac.jp/handle/2324/1654860/eng2552.pdf](http://catalog.lib.kyushu-u.ac.jp/handle/2324/1654860/eng2552.pdf)
- 7) T. Ikeda, K. Kimura et al. : Advanced propeller design optimization system based on open source codes and its application, Proceedings of PRADS2016, 2016
- 8) 池田剛大、木村校優他 : 変動圧力を考慮した高効率プロペラ設計システムの構築とその応用、日本船舶海洋工学会講演論文集 Vol. 24、2017、pp. 495-500
- 9) J. Park, G. Choi, D. Park : Syste、atic propeller optimization considering hull interaction based on CFD、Proceedings of PRADS2016、2016
- 10) 齋藤裕樹 : 推進効率向上を目的とした CFD による伴流中プロペラ形状最適化, 横浜国立大学 学位論文, 2018.  
[https://ynu.repo.nii.ac.jp/?action=repository\\_uri&item\\_id=9114&file\\_id=20&file\\_no=1](https://ynu.repo.nii.ac.jp/?action=repository_uri&item_id=9114&file_id=20&file_no=1)
- 11) ASNOP 研究会 : パソコン FORTRAN 版 非線形最適化プログラミング, 日刊工業新聞社, 1997, pp. 70-75
- 12) 山崎正三郎 : 設計図表と理論設計を用いたプロペラ設計, 第 5 回 船用プロペラに関するシンポジウム, 日本船舶海洋工学会, 2005, pp. 1-32



齋藤 裕樹