



大規模LES計算による船用プロペラ周りの流場推定に関する研究

藤澤, 竹春

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2020-03-25

(Date of Publication)

2021-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第7789号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1007789>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



(別紙様式 3)

論文内容の要旨

氏 名 藤澤 竹春

専 攻 システム情報学研究科 計算科学専攻

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

大規模 LES 計算による船用プロペラ周りの

流場推定に関する研究

指導教員 坪倉 誠

(注) 2, 000 字～4, 000 字でまとめること。

近年、省エネルギー・低環境負荷を求める社会的要求は年々強まっており、国際物流の主流をなす大型商船においても、IMO (International Maritime Organization) の定める EEDI 基準(Energy Efficient Design Index) により、縮尺模型実験を実施し、実験の結果から推定される実船の輸送量当たりの CO2 排出量が一定の基準値を満足することを求められている。この基準は段階的に引き上げられる予定であり、将来にわたって継続的に船舶の推進性能の向上に取り組むことが求められている。

スクリュウプロペラ (以下プロペラと略す) は、一般的な船舶での作動条件において高い推進効率を持つこと、かつ単純に回転させることで持続的な推力の維持が可能であることから、船舶の推進器として広く用いられている。プロペラ単独性能と呼ばれるプロペラを一樣流中で一定の前進速度、回転速度で定常的に動作させた場合の性能は、プロペラの性能を評価する上で基礎となるものであり、船舶の推進性能にも直接的に影響する重要な要素である。

船舶に限らず、機械の開発においては設計した製品の性能を確認することが重要となるが、大型船舶においてはプロペラや舵などの要素部品単体でさえ、作成および実験計測に要する費用・期間が非常に大きくなるため、実寸大模型による実験を行うことは実際上不可能である。

そのため現在は、縮尺模型を用いた実験を行い、その結果に尺度影響と呼ばれるレイノルズ数の違いによる性能の違いを考慮した修正を施して性能推定が行われている。実船での流場は完全乱流状態であるのに対し、模型実験では層流部分が存在する遷移状態になっており流場の状態が異なっている。実際に Yamasaki は直径 0.95m までの模型プロペラを用いた限界隆線観察実験を行い、翼表面の流れが模型実験でのレイノルズ数で実施された場合と、より高いレイノルズ数で実施された場合とで異なっていることを報告している。Hasuike かも回流水槽での実験で限界流線観察を行い、同様のことを報告している。以上のように尺度影響には乱流遷移による性能の変化が含まれるが、乱流遷移を理論的に解明することは困難であり、尺度影響についても、これを正確に推定する手法は未だ開発されていない。

通常、船舶は建造してから引き渡される際に試運転を行い所定の性能を満たしていることを確認する実験が行われており、一般には過去に行われた試運転結果と模型実験結果の相関を、新たに開発した船舶に適用する補正が行われている。しかし、試運転では経済的な理由から、船舶の総合的な性能を推定するための最低限のデータ計測しか行われず、また、実験解析技術の面でも実船の計測結果からプロペラや船体・舵などの要素ごとの性能を分離し、各要素における尺度影響を検討することは出来ていない。また、このような経験的な方法では新規に開発された省エネ技術を適用する場合などに、推定精度が不十分である可能性があり、今後船舶推進性能のさらなる向上を行っていくうえで問題である。

以上のように、実験的に実船性能を得ることが困難であり、模型実験結果から尺度影響

を考慮して推定する手法にも完全ではないことから、数値流体力学 (CFD) に基づく数値的な手法により推定することが考えられる。現在、造船分野における数値計算による推定手法では、RANS モデルを用いた CFD に基づく手法が広く用いられており、推定精度は模型実験に劣るものの、近年の計算機の急速な発達もあり、性能開発にも利用されている。RANS モデルを用いた CFD 手法においては実船レイノルズ数の計算も実施可能であり、研究もおこなわれている。しかし、実船レイノルズ数での推定精度の検証および改善を検討するうえで、実船レイノルズ数における流場との比較検討を行うことが重要となるが、近年 計測技術の向上により計測が可能となりつつあるものの、前述のように実船計測自体が非常に困難であり、かつ実海域における風や波・潮流などの外乱影響の排除の方法など課題も多く、数値的な予測手法の推定精度の検証及び改善を検討する上で問題である。

CFD 手法の中で、基礎方程式をモデル化せずに解く DNS (Direct Numerical Simulation) では原理的に基礎方程式に従う正確な流場を推定することが可能であるが、乱流中に存在する最小スケールの流れ構造までを解像する必要があり、非常に膨大な計算資源を必要とする。近年、2次元翼のような単純な問題に対し、船舶の模型実験と同程度のレイノルズ数での DNS が可能となっているが、現在は船舶分野で実用的な問題に適用することは出来ない。LES (Large Eddy Simulation) は、流場を空間的にモデル化する方法で、一定のサイズ以下の流れのみをモデル化し、それより大きい流れはモデル化せずに直接解く方法である。LES では計算格子と呼ばれる空間の分割を細かくしていくことで、モデル化の影響が小さくなっていき、推定結果が DNS での推定結果に漸近することが確かめられている。DNS と同等の結果を得るためには RANS による計算よりもはるかに大規模な計算が必要となるが、DNS で必要とされる計算規模よりは小さく、船舶分野における縮尺模型実験程度のレイノルズ数なら実施可能となりつつある。例えば Nishikawa らは 300 億セル規模の大規模計算により、レイノルズ数が低くプロペラ翼面がほぼ層流状態であるものの、船体とプロペラを合わせた状態での計算をも実施している。計算機性能は急速な発達を続けており、今後船舶推進性能分野においても、大規模 LES 計算により乱流現象を含む尺度影響を正確に予測し、実船の性能推定をより高精度に行うための検討が広く行われるものと予想される。

そこで、本研究では、大規模 LES 計算を用いた船舶推進性能推定手法を開発するための基礎とすることを目的として、船舶の性能を評価する上で重要であり、かつ比較的単純で大規模計算の実施が可能な条件である、縮尺模型におけるプロペラ単独状態を対象とし、スーパーコンピュータ「京」を用いた大規模 LES 計算を実施し、その計算結果の検証を行った。

本論文の構成を以下に述べる。

第 1 章においては上述のように、本研究の背景及び目的について示す。

第 2 章では本研究で使用した計算の手法および格子、実施条件について示す。

本研究で使用した計算格子では、1 億要素の格子を作成してから各格子要素を各方向に 2

分割する Refine 処理により 8 億要素の格子を作成し、8 億要素の格子に再度 Refine を行うことで 64 億要素の格子を作成している。また、壁面に垂直な方向と水平な方向の解像度を調整することでほぼ同じ格子要素数で解像度の異なる 2 種類の格子で計算を実施している。同じ条件で解像度を変えて計算した場合の表面水平方向の格子解像度を wall unit で表すと $25y^+ \sim 200y^+$ である。

計算に用いた模型プロペラは典型的な 4 翼の MAU 翼型であり、条件は一般的に実験が行われる $Re_D (=ND^2/\nu)$ 、 N : 回転数、 D : プロペラ直径、 ν : 動粘性係数 $= 1.1 \times 10^6$ を中心に、実験で実施可能な $Re_D = 0.3 \times 10^8 \sim 2.0 \times 10^8$ である。作動条件を示すプロペラ前進係数 $J (=VA/ND)$ 、 V_A : 前進速度) は 0.5 とし、前進係数が異なる場合についても計算を行った。

第 3 章では前進係数の異なる場合の推定結果と実験結果を比較した。

作動条件を変えた場合の大規模 LES 計算による推定結果と実験で得られた推力トルクとの比較、および表面流線の実験観察結果と計算結果を比較から、大規模 LES 計算により、推定結果が妥当であることを確認した。

また、同条件での RANS との比較により、大規模 LES 計算と RANS 計算で推定される流れ場の違いについて検討した。

第 4 章では格子解像度が推定に与える影響について検討を行った。

推力とトルクは解像度が高いほど実験値に近づいており、十分な解像度で大規模 LES を実施することができれば実際の流場を再現することが可能であると考えられる。プロペラ翼表面の微細な渦構造の可視化から解像度が高いほど詳細な流れが現れており、それらを検討することにより、十分な解像度に至った場合の流場についての考察を行った。

また、64 億要素の格子でも DNS 相当といえる十分な解像度には至っていないと考えられるが、1 億要素の格子による計算でも表面での微細渦の形成過程は定性的にはとらえられており、粗い格子でも流場の定性的な変化を検討することは可能である。

第 5 章ではレイノルズ数が流場に与える影響についての検討を行った。

プロペラ翼表面に形成される微細な渦はレイノルズ数が高いほど複雑化し、壁面垂直方向の速度分布において対数則に従う範囲が広がるなど、レイノルズ数が高いほど乱流の特徴が強く現れる妥当な結果となった。

また、 $Re_D = 0.3 \times 10^8$ の条件では Reynolds 数が低いことにより wall unit で見た解像度が高いため他の条件に比べて実験と良く合う結果となったが、翼面上の流れが乱流化していなかった。実験において直径の小さい模型を使用する場合などには $Re_D = 0.3 \times 10^6$ 程度の低い Reynolds 数で実験が行われることがあるが、そのような場合には流れが乱流化しているか層流であるか十分注意する必要があることを確認した。

第 6 章では本研究で得られた結論をまとめる。

氏名	藤澤 竹春		
論文 題目	大規模 LES 計算による船用プロペラ周りの流場推定に関する研究		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	坪倉 誠
	副査	教授	臼井 英之
	副査	教授	横川 三津夫
	副査	教授	羅 志偉
	副査	講師	李 崇綱
要 旨			
<p>本論文では、将来的な実船スケールの数値水槽の実現に向けて、縮尺模型におけるプロペラ単独状態を対象としてスーパーコンピュータ「京」を用いた大規模 LES 計算を実施し、その有用性の検討とプロペラ性能推定のための CFD 技術の構築、並びに模型スケールから実スケールに向けてのレイノルズ数依存性検討とその流れメカニズムの解明を目的としている。</p> <p>第1章では、本研究の背景及び目的について示されている。</p> <p>第2章では、対象とする流れ場と本研究で使用した計算手法について、述べられている。計算に用いた模型プロペラは典型的な4翼のMAU翼型であり、条件は一般的に実験が行われる $Re_p (=ND^2/\nu, N:回転数, D:プロペラ直径, \nu:動粘性係数) = 1.1 \times 10^6$ を中心に、水槽実験で実施可能な $Re_p = 0.3 \times 10^6 \sim 2.0 \times 10^6$ としている。作動条件を示すプロペラ前進係数 $J (=V_A/ND, V_A:前進速度)$ は0.5とし、前進係数が異なる場合についても計算を行っている。本研究では、数十億要素規模の大規模格子を自動生成するために、1億要素の格子を作成した後は、各格子要素を各方向に2分割する Refine 処理を適用し、この処理を二回行うことで64億要素の格子を作成している。また、壁面に垂直な方向と水平な方向の解像度を変化させることで、ほぼ同じ格子要素数で解像度の異なる2種類の格子で計算を実施している。</p> <p>第3章では、前進係数の異なる場合のシミュレーション結果を実験結果と比較することで、解析結果の妥当性を検討している。作動条件を変えた場合の大規模 LES 計算による推定結果と実験で得られた推力トルクとの比較、および表面流線の実験観察結果と計算結果を比較から、大規模 LES 計算により、推定結果が妥当であることを確認している。また、RANS との比較により、RANS 計算で捕らえられなかった限界流線が LES で再現されていることを示している。</p> <p>第4章では格子解像度が推定に与える影響について検討を行っている。推力とトルクは解像度が高いほど実験値に近づいており、十分な解像度で大規模 LES を実施することができれば実際の流場を再現することが可能であると考察している。プロペラ翼表面の微細な渦構造の可視化から解像度が高いほど詳細な流れが現れており、それらを検討することにより、十分な解像度に至った場合の流場についての考察を行っている。</p> <p>尚、流体力の格子解像度を変化させた場合の漸近挙動を確認したところ、64億要素の格子を用いた場合も、DNS 相当といえる十分な解像度には至っていないと考えられるが、1億要素の格子による計算でも表面での微細渦の形成過程や遷移過程は定性的にはとらえられており、粗い格子でも流場の定性的な変化を検討することは可能であると結論づけている。</p> <p>第5章ではレイノルズ数が流場に与える影響についての検討を行っている。プロペラ翼表面に形成される微細な渦はレイノルズ数が高いほど複雑化し、壁面垂直方向の速度分布において対数則に従う範囲が広がるなど、レイノルズ数が高いほど乱流の特徴が強く現れる妥当な結果となっている。また、$Re_p = 0.3 \times 10^6$ の条件では、Reynolds 数が低いことにより wall unit で整理した場合の解像度が高いため、他の条件に比べて実験と良く合う結果となったが、翼面上の流れが乱流化していないことがわかった。実験において直径の小さい模型を使用する場合などには $ReD = 0.3 \times 10^6$ 程度の低い Reynolds 数で実験が行われることがあるが、このことから、そのような場合には流れが乱流化しているか層流であるか十分注意する必要があることが示唆された。</p> <p>第6章では本研究で得られた結論をまとめられている。</p> <p>以上のように、大規模 LES によるプロペラ性能推定の実用化に向けて重要な知見が得られており、工学、特に船舶工学と実船舶の設計開発において重要な貢献が認められる。また、内容については2本の学術論文に掲載済みであり、1本の査読付き国際会議論文を投稿中である。提出された論文はシステム情報学研究所学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の藤澤竹春氏は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。</p>			