



# レイノルズ応力乱流モデルを用いた実船CFD計算手法の開発と実船伴流計測技術の研究

松田, 識史

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2024-09-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第9036号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100492545>

※ 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 松田 識史

専 攻 海事科学専攻

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

レイノルズ応力乱流モデルを用いた実船 C F D 計算手法  
の開発と実船伴流計測技術の研究

指導教員 勝井 辰博 教授

(氏名： 松田 識史 NO.1)

地球温暖化を抑制するために、国連の専門機関である IMO で、海事産業として 2050 年までに船舶から排出される CO<sub>2</sub> 排出量をゼロ（ゼロエミッション）とする目標が採択された。そこで、ゼロエミッションを達成するには重油に代わる代替燃料や自然エネルギーの利用、革新的な推進装置の開発等が必要である。しかしながら、代替エネルギーは燃料効率が一般に下がるため、これまで以上に船型の最適化や、高効率な省エネ装置の開発を行う必要がある。そのためには従来の模型船レイノルズ数での船の推進性能の高精度予測技術だけでなく、実船レイノルズ数での高精度予測技術が求められている。実船レイノルズ数での計算手法が確立すれば、検証のための模型製作を行う水槽試験数を大幅に減らすことが出来、より小さなコストで実船の船型設計が可能となることが期待される。また、伴流分布の高精度予測により省エネ装置の設計及びプロペラ設計においても限界設計が可能となり、より高効率な省エネ装置及び高効率・低騒音を目指したプロペラ設計が期待出来る。加えて、実船伴流計測データを取得して、実船 CFD 計算手法の検証を行うことも重要である。

これまでの CFD 計算に関する研究では、乱流モデルに k-omega SST を用いた事例は多くあるものの、レイノルズ応力モデル（以下、RSM）のいくつかの種類に対して、粘性抵抗及び伴流分布の実験結果との比較を詳細に実施されたものは無く、船舶の CFD 計算に最も適切な RSM の計算手法が確立されていなかった。さらにこれまでの実船レイノルズ数での CFD 計算に関する研究では、線形及び非線形の 2 方程式乱流モデルにより計算されたものがほとんどであり、渦粘性仮定によらない RSM かつ粗度を考慮した CFD 計算例は実施されていない。また、模型船レイノルズ数での PIV システムによる非接触画像計測による高密度伴流計測データ取得が一般的になってきたものの、実船への適用例は少なく、本手法による実船計測方法の確立とデータの充実が重要である。そこで、本論文では粘性抵抗及び伴流分布推定の高精度化と高密度実船伴流データの取得を目指して、粘性抵抗及び船尾縦渦の予測精度が高いことが報告されている RSM に着目し、模型船レイノルズ数での粘性抵抗及び伴流分布の実験結果との評価と実船レイノルズ数での伴流分布の評価を行った。さらに、実船で粗度を考慮する場合の条件設定方法を開発して設計レベルに適用可能な実用的な実船レイノルズ数での CFD 計算手法の開発を行った。また、実船レイノルズ数での伴流分布取得のために実船 SPIV 計測手法の検討・実施を行った。

2 章「模型船 Rn での粘性抵抗及び伴流推定精度の検証」では、2 方程式である k-omega SST と RSM を適用して模型船レイノルズ数での粘性抵抗及び伴流分布の推定精度を評価し、船型の違いによる RSM の粘性抵抗及び伴流分布推定精度を評価した論文「Hydrodynamic Forces and Wake Distribution of Various Ship Shapes Calculated Using a Reynolds Stress Model」の内容を取りまとめた。さらに、模型船レイノルズ数でのレイノルズ応力分布比較を行った「Ship flow of the Ryuko-maru calculated by

(氏名： 松田 識史 NO.2)

Reynolds Stress Model using the roughness function at the full scale」の内容の一部を取りまとめた。本章では、k- $\omega$  SST と 4 種類の RSM (RSM-LPS, RSM-Linier Pressure Strain Two layer(RSM-LPST), RSM-QPS, RSM-Elliptic Blending (RSM-EB)) を用いて、公開船型である JBC の抵抗計算を行い、粘性抵抗である  $1+K$  (形状影響係数) と伴流分布を比較した。また、粘性抵抗の格子依存性を調べることで、乱流モデルの計算モデル不確かさを検証するために V&V を行った。低レイノルズ数型の k- $\omega$  SST の数値計算不確かさは、他の乱流モデルよりも計算の結果小さかった。したがって、壁関数を用いない k- $\omega$  SST は、他の乱流モデルに比べて粘性抵抗の計算における格子依存性が小さいことがわかった。しかしながら、k- $\omega$  SST の比較誤差  $E$  は、CFD 総合精度評価不確かさよりもはるかに大きい。したがって、乱流モデルの改善が必要である。一方、RSM-LPS と RSM-LPST の  $E$  は CFD 総合精度評価不確かさよりもはるかに小さい。したがって、これらの乱流モデルは、実験から得られた結果と精度良く一致することが確認出来た。このように、各 RSM の粘性抵抗の計算精度を定量的に示すことができ、RSM-LPS と RSM-LPST がこの設定における CFD 計算では実用的なコストで最も妥当な計算手法であることを確認した。伴流分布比較の結果、RSM は実験結果の特徴のほとんどを正確に予測するのに対し、2 方程式モデルは全体的な定性的傾向のみを予測することがわかった。RSM を用いて計算された伴流分布は、RSM-QPS を除いて、SPIV 計測結果と良い一致を示し、特に RSM-LPS と RSM-LPST を用いると、船尾縦渦の大きさと軸下の伴流分布を高い精度で推定することができることを示した。次に検証を行った RSM-LPST を用いて、瘦せ型船から肥大船まで様々な船型を持つ 20 隻の船に適用し、 $1+K$  を計算して実験結果と比較した。計算の結果、RSM-LPST は肥大船だけでなく、瘦せ型船の粘性抵抗も高い精度で予測することが確認された。KVLCC2 を対象とした伴流分布比較結果は、同じ肥大船である JBC 船型と同じ傾向を示しており、RSM-LPST は船尾縦渦のフック形状を正確に推定できることが分かった。また、瘦せ型船である KCS および Model5415 の計算結果は、k- $\omega$  SST および RSM-LPST の計算結果とほとんど差がなかった。したがって、瘦せ型船での伴流分布推定精度は k- $\omega$  SST でも十分であることを確認した。また、龍光丸を対象として、伴流分布推定精度の詳細を確認するために RSM を用いて模型船スケールでの CFD 計算を実施し、鈴木らが実施した風洞実験から得られたレイノルズ応力に対して比較を行った。CFD 計算の結果、RSM-LPST は k- $\omega$  SST と比較して、船尾縦渦周りの伴流の予測精度が若干高いことがわかった。特に実験結果と比較して RSM-LPST のピークの大きさと位置は、k- $\omega$  SST よりも優位性が確認された。工学的見地から、これは船舶設計において非常に重要な知見が得られ、様々なタイプの船舶の設計にも適用出来ることを確認出来た。

第 3 章「船体表面粗度を考慮した実船  $R_n$  での CFD 計算手法の提案と評価」では、

「Ship flow of the Ryuko-maru calculated by Reynolds Stress Model using the roughness function at the full scale」の内容の一部をとりまとめた。船体表面の粗さの影響は壁関数を用いて、粗度関数を導入し、龍光丸で過去に実施された、実船伴流分布データとの比較を通じて適切な粗さの長さスケールを探った。本研究では、ITTC推奨値である粗度高さ  $150\ \mu\text{m}$  を Roughness length scale(ks)に設定すると伴流分布を過大に推定することを示した。また、ITTC1957式で得られる粗度修正係数 $\Delta C_p$ となるように ks を設定すると、妥当な伴流分布が得られることを示し、実船伴流を推定する際の手法を確立した。

第4章「実船 SPIV 計測手法の検討及び計測」では、「SPIVによる深江丸実船流場計測について」及び「RSMによる実船レイノルズ数でのCFD計算に関する考察」の内容をとりまとめた。本章では、PIVシステムによる非接触画像計測による実船伴流分布を取得する事を目的として、神戸大学附属練習船深江丸を対象として実船 SPIV 計測システムの検討及び計測を行った内容について報告する。具体的には実船に搭載した SPIV 計測システム及びその配置と、実船伴流計測方法について報告する。実船試験ではプロペラ回転数及び翼角を変更させた実験を行い、SPIV計測に適した計測条件の考察及び実船伴流分布の解析を行った。また、SPIV計測の課題についてまとめた。

第6章「結論」では第2章から第5章の成果全体をまとめた。本研究成果は、工学的見地からRSMを利用した模型船レイノルズ数及び船体表面粗度を考慮した実船レイノルズ数でのこの研究成果は、船舶設計において重要な知見が得られ、実用的な計算時間でかつ精度良く、様々なタイプの船型・省エネ設計に適用出来ることが期待される。また、付録として実船 SPIV 計測に関連した装置の事前検討試験、キャリブレーション治具及びその方法、実船計測機器の船上での設置方法についてまとめた。

氏名	松田 識史		
論文 題目	レイノルズ応力乱流モデルを用いた実船 CFD 計算手法の開発と実船伴流計測技術の研究		
審査 委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教 授	勝井 辰博
	副 査	教 授	西尾 茂
	副 査	教 授	笹 健児
	副 査		印
	副 査		印
要 旨			
<p>本論文は計算流体力学的手法を用いた船舶の抵抗推進性能予測の高精度化を目的としたものである。高精度予測のためには渦粘性の仮定を用いない乱流モデルの適用が重要であることを指摘し、いわゆるレイノルズ応力モデルの適用によって船舶の抵抗推進性能が高精度で予測できることを示したうえで、その検証のための実船伴流計測を実施している。実船周り流場の CFD 計算例はこれまでも多数存在するものの、乱流モデルにレイノルズ応力モデルを用いた例は極めて少なく、その計算結果の特性と流場予測精度の検証が求められていた。本研究ではレイノルズ応力モデルを用いた実船周りの流場解析を船体表面の塗料による表面粗度を考慮して実施するというこれまでに報告されていない計算を実施していることに独自性を有していると評価できる。また、伴流分布の計算結果について実船計測結果と比較し、粗度を考慮した場合はレイノルズ応力モデルの適用によって両者がよく一致するという有益な知見を得ていると評価している。以下に学位論文の各章に記載された内容に沿って、その評価を示す。</p> <p>本論文第 1 章では序論として本研究を行うにあたっての社会的背景と本研究の意義について述べている。最初に船舶由来の GHG 削減が厳しく求められるようになり、その解決手段である代替燃料利用に伴う燃費効率の著しい低下が懸念されており、船舶の抵抗推進性能の向上が今後さらに強く求められることを指摘している。この達成のためには性能予測ツールとして最も有望視されている CFD 解析法の高精度化が喫緊の課題であり、これを本研究の目的としている。海上輸送に関する社会的重要課題を適切に把握し、それを解決するための一助となる研究課題を設定していると評価できる。また、船舶の抵抗推進性能の評価指標として粘性圧力抵抗とプロペラ面での伴流分布を設定しており、計測データを取得しやすく、かつ船舶性能の客観的かつ本質的指標を評価対象として設定している。さらに、現状の CFD 解析による船舶抵抗推進性能推定精度が不十分である要因が主として乱流モデルにあるのではないかという学術的問いかけを行っており、これまでの研究成果を適切に調査した上で、問題解決の方法を提案していると評価できる。精度評価には検証データの計測が不可欠である。実船を対象としている本研究課題はそのデータ取得が困難であるが、その重要性を改めて指摘するとともに、実船計測の実施と検証データの取得を行うことを目指しており、その挑戦的姿勢を高く評価できる。</p> <p>第 2 章では実船 CFD の実施に先立って、レイノルズ応力モデルを用いて模型船スケールでの CFD 解析とその精度検証を実施している。従来から船舶分野でよく用いられてきた 2 方程式乱流モデルの 1 つである k-<math>\omega</math> SST モデルによる解析結果と不確かさ解析を実施した上で詳細な比較を行い、船舶粘性圧力抵抗および船尾伴流分布の予測においてレイノルズ応力モデルの適用に優位性があることを示している。対象船型は、実に 21 船型に及び、粘性圧力抵抗の計測結果と計算結果の比較検証を詳細に行っており、計算精度の検証において信頼性の高い結果を得ている。その中で、特に船尾縦渦が大規模に発生する船尾肥大度の大きな船型ほど、レイノルズ応力モデルの方が粘性圧力抵抗の予測精度が高いことを示している。この知見は、すべての船型において計算コストが高いレイノルズ応力モデルを用いる必要はなく、求められる予測精度に応じて、計算モデルを使い分けることが可能であることを示しており、船型設計の高効率化に資すると考えられる。また、レイノルズ応力モデルが優位である理由を明らかにするために肥大船船尾乱流場のレイノルズ応力について計算結果と計測結果の比較を行っている。船尾縦渦中心近傍におけるレイノルズ応力のピーク値およびピーク位置の予測においてレイノルズ応力モデルは k-<math>\omega</math> SST モデルより優れていることを示し、これが船尾伴流場予測精度が高い理由の一つであると結論付けている。渦粘性の仮定に基づく乱流モデルでの予測精度が低いという事実は、縦渦近傍の船尾乱流場では乱れ</p>			

氏名

松田 識史

の生成と消散が局所的には釣り合っていないことを示唆するものであり、船舶流体力学が解決すべき問題に対する重要な知見を得ていると評価できる。なお、本章の内容は Journal of Marine Science and Engineering に投稿され、すでに掲載されている。

第 3 章では実船の流場計測が行われた実績のあるタンカー船型（龍光丸）を対象に、実船スケールでの CFD 解析を実施している。乱流モデルとしては、模型船レベルのレイノルズ数で実施した計算結果からその優位性が確認されたレイノルズ応力モデルと多数の実船での計算実績がある k- $\omega$  SST モデルの 2 つを用いて、両者の計算結果を比較している。船体表面の境界条件としては、粘性低層を細かく解像するいわゆる低レイノルズ型の境界条件ではなく、対数速度分布の相似則を利用する壁関数型の境界条件を用いている。これは実船での計算では船体表面に塗布する塗料による粗度影響の考慮が不可欠であるため、粗度の考慮が簡便であり、かつ対象とする粗度特性に適した粗度関数を設定できる壁関数法が適切であると判断したためである。過去の研究成果に基づき適切と判断された Colebrook 型の粗度関数を用いた壁関数を基礎とする粗面境界条件を適用して計算を行っている。k- $\omega$  SST モデルを用いた計算では、これまでも指摘されてきたように粗度高さを 150 $\mu\text{m}$  程度に大きく設定しないと伴流分布が実船計測結果に一致しないのに対して、粗度による抵抗増加が想定される量に比べて非常に大きいという問題があったが、レイノルズ応力モデルを適用した場合はそのような問題は生じず、伴流分布は粗度高さ 40 $\mu\text{m}$  程度で計測結果によく一致し、粗度抵抗についても ITTC の推奨値程度になることが分かった。これによりレイノルズ応力モデルの適用によって実船流場の予測精度が向上することを示している。また、Colebrook 型の粗度関数を用いる場合の適切な粗度高さの目安を示していることから、今後多数行われることが予想される実船周りの CFD 解析に対して一つの基準を示したと言える。レイノルズ応力モデルを用いた実船周りの流場計算自体、過去の研究例がほぼ存在しないことを考えると、船体表面粗度も考慮した計算結果を示し、実船計測結果との比較検証を行った上で、本手法の優位性を示したことは、新規性独創性に優れ、船型設計に資する有益な結果であると評価できる。なお、本章の内容も Journal of Marine Science and Engineering に投稿され、すでに掲載されている。

第 4 章ではステレオ PIV(SPIV)手法を用いて実船の伴流を計測するシステムを構築し、実際に練習船「深江丸」の伴流分布を計測した結果を示している。実船を対象に SPIV 法を用いて伴流計測を行うことは、複雑かつ大規模な計測システムを構築する必要があること、実海域において外乱影響を極小化、あるいは排除して CFD 解析結果の検証データとなり得るデータを取得する必要があること、大量のデータを取得してその処理を行う必要があることなどから極めて実施が困難であり、それを遂行してデータ取得に成功したこと自体、高く評価されるべき成果であると考えられる。本章では SPIV 手法による計測が実船船尾流場の計測に適していることを示したうえで、本計測システムの構成について詳細に解説するとともに、データ解析手法ならびに標準誤差の推定結果を示した上で、プロペラ断面直前の伴流の計測結果を示している。この計測結果は CFD 解析結果とも比較され、計測範囲が狭いもの k- $\omega$  SST モデルの計算結果に比べてのレイノルズ応力モデルの計算結果に優位性があることを示している。なお、本章の内容は日本船舶海洋工学会講演会で発表され、講演論文集にも 2 編掲載されている。

第 5 章では、全体を総括し得られた知見をまとめている。

以上のように本研究は、実船の抵抗推進性能予測法に関する重要な知見を得たものとして価値のある集積である。提出された論文は海事科学研究科学学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の松田 識史は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。