

論文の内容の要旨

論文題目 数値流体力学を用いた船用半没水プロペラ
性能解析法の高度化に関する研究

氏 名 姫井 弘平

船用プロペラ（以下、単にプロペラと呼ぶ）は一般に船尾で回転することで推力を得るというシンプルで持続性が保ちやすい機構であることに加え、多種ある船用推進器のうちで最も高い推進効率を達成できる大きな利点があり、さまざまな船舶に広く利用されてきた。この推進効率における優位性は最大船速50ノット以上のいわゆる超高速域になっても同様で、船用半没水プロペラ（以下、単に半没水プロペラと呼ぶ。）は、この超高速域が最大船速として達成可能な滑走艇に主に装備されるプロペラである。

半没水プロペラは、おおよそプロペラボスより上部のプロペラ翼が水面上に露出した状態で作動する。水面上にあるプロペラ翼は推力を発生しないため半没水であるハンディキャップがあるが、船体が滑走することで船体抵抗が軽減されるぶん超高速航行を可能とし、船体トータルの推進性能面では極めて有利となる。現在は海面効果翼船、ホバークラフト、バスボート、レース艇、軍用途など限られた船種のみには装備されているが、優秀な推進特性が得られることから、高速フェリーなどさまざまな高速船向け推進器として広範囲に採用される期待が高まっている。

しかしこのような超高速艇を対象とする実際の採用事例においては、推進器の主役はウォータージェット推進器に取って代わられるケースが多い。その主な理由の1つとして、半没水プロペラの特長上、複雑な物理諸現象を伴った作動状態であることと、その物理現象に対応した特殊な翼断面形状が採用されることから、プロペラの性能推定が非常に難しいことが挙げられる。

半没水プロペラ翼は入水時に空気吸い込み現象を誘起し、翼が離水するまでの約半回転の間、翼後流は水面まで通気されたベンチレーション状態となる。プロペラの作動状態によってはベンチレーションは翼背面側を覆うまで発達し、プロペラ周りの水面は翼回転に伴って複雑な隆起と沈降が生じる。そしてこのとき、プロペラ翼は水中でのみ荷重を受けるため周期的で大きな荷重変動が生じ、プロペラ翼の疲労やプロペラ軸振動に対し大きなリスクを伴うことになる。

自由表面流れの中で作動し、翼端部付近で特殊形状を有する半没水プロペラの性能推定では、高回転で入水・離水を繰り返すプロペラ翼周りの、このようなベンチレーション現象や界面隆起・沈降を精度良く捉える必要があり、その上でプロペラ単独性能やプロペラ軸系アライメント評価に用いるためのプロペラ1翼6分力変動およびプロペラ翼強度推定に用いるための翼面上圧力分布を解析する必要がある。したがって、推進性能推定法としてはプロペラ周りで起こる複雑な物理諸現象の考慮や正確なプロペラ形状表現が可能であるCFD解析が有効であり、翼強度推定法としてはCFD解析結果を利用することでプロペラ翼に生じる大きな応力振幅を評価する応力解析手法が求められる。

本研究では、以上に述べた半没水プロペラ性能推定に関する要求を満たし、実用設計機会や高性能プロペラ開発時において必要となる船用半没水プロペラ性能推定解析手法の構築を行う。

CFDを用いた実用的な半没水プロペラ推進性能解析手法の構築においては、高精度解析と実用的な解析コストを両立した効率的な格子生成法と適切な解析条件の確立が重要である。

まず、CFD解析格子に関しては、プロペラ翼周りや翼後流空間に発生するベンチレーションの解像を目的とし、その空間における解析格子密度を丁寧に調整することで界面捕捉精度を向上させるとともに、解析領域全体の格子総数を抑えつつも解析精度を保つ格子生成手法を構築した。このとき、半没水プロペラは3次元的に翼の捻りが大きく、翼断面形状は薄く局所的な形状変化が大きいため、このような複雑な翼形状においても比較的柔軟に高品質な解析格子を設置可能な非構造テトラ格子をベースとした。格子総数は1400~1600万要素数を目安とし、今後の実設計時の運用を見据えてプロペラ10回転の解析を5日間で終了させることを目標とした。

自由表面流れの数値解析手法としては界面捕獲法（Interface Capturing Method）の1つであるVOF（Volume-Of-Fluid）法を適用した。VOF法は界面変形に合わせて要素を再構築する必要がなく、半没水プロペラ翼周りで生じるベンチレーションや翼端より放出される飛沫体のような界面の大変形に伴う複雑な自由表面流れを解析することに適している。また、界面捕獲法は要素内の幾何的な界面形状を捕捉せず、他の離散方程式と同様に界面移流のマトリックスを代数的に解く手法であり、界面が割り当てられる要素での移流計算が緩和され、並列計算スケーラビリティが向上し解析時間の短縮が望める。

乱流モデルについては、高レイノルズ数モデルであるk-ε方程式モデル系よりMP k-εモデルを適用した。層流・乱流混在の流れ場であれば、CFD解析時には壁面境界層内の第1層プリズム格子厚みを小さくし、粘性成分を精度良く解析できる低レイノルズ数モデルを選択すべきではあるが、半没水プロペラの作動状態が実機および解析比較対象とした模型実験のいずれにおいてもレイノルズ数が高く、水中時に翼背面がベンチレーションで覆われる作動状態であることも多いため、翼面近傍は乱流が卓越した状態となる

ためである。

解析にはソフトウェアクレイドル社製の非構造格子系汎用熱流体解析ソフトウェアであるSCRYU/Tetra Version 10を用いた。SCRYU/Tetra Version 10では不連続接合や界面捕獲法を用いた自由表面流れ解析に対応し、多数の乱流モデルを搭載しており、プロペラ性能解析においても適用実績がある。しかし、半没水プロペラを対象とするCFD解析はこれまでの研究例や知見が少なく、本研究は新規性が強いため、解析結果の信頼性確保を目的に十分な検証と妥当性確認を実施した。解析領域範囲、イタレーション回数、解析時間刻み幅、格子粗密、翼面上圧力分布に対するMP k- ϵ モデルの整合性など種々の解析パラメータに対して解析結果への影響を確認することで、構築した手法が妥当であり、これら解析手法や解析条件が解析結果のエラーに依存しないことを検証した。

その後、半没水プロペラ単独性能、1翼6分力変動、翼周りのベンチレーションパターンを模型実験結果と比較することで解析結果を評価するとともに、プロペラ単独性能に及ぼす相似則特性について検証した。

プロペラ単独性能や1翼6分力変動の解析結果は模型実験結果と概ね一致し、とくにプロペラ前進係数がプロペラ設計点より高い範囲で高精度であり、実設計機会において本解析手法が十分に有効であることを確認した。ただし、プロペラ単独性能のパラメータであるプロペラスラスト、トルクとも模型実験と比較して15%程度過大評価している作動状態もあり、主な要因が乱流モデルによるトルクの摩擦成分の過大評価、プロペラ翼背面上ベンチレーションの過小評価、プロペラボスに沿って隆起するプロペラ上流側界面変化の過大評価が挙げられることを確認した。

6分力解析は、プロペラ単独性能と同様にプロペラ作動状態に対する変化傾向を良く捉えている結果となった。またプロペラ1回転中の6分力変動値においても、とくに流速が速いプロペラ設計点近くでは模型実験結果と良く一致した。ただし、プロペラ単独性能と同様に、ベンチレーションの過小評価が6分力に大きな影響を及ぼし、部分ベンチレーションとなるプロペラ作動状態の範囲では6分力の差がやや大きくなる結果となった。

フルード数やウェーバー数については、他の研究者が論じていることと同様に臨界値が存在し、臨界値以上ではプロペラ単独性能に殆ど影響を及ぼさないことを確認した。臨界値以下のフルード数では、ベンチレーション形成の減少とプロペラ翼が離水する際の水の連れ回りの増加によってプロペラトルクが増大し、臨界値以下のウェーバー数では、主に翼周りのベンチレーション形成の減少によってプロペラスラスト、トルクが増大することを確認した。また、レイノルズ数変化による境界層厚みの影響が全没水通常プロペラ同様にプロペラ単独性能に影響を及ぼすことを確認した。

また、個々の半没水プロペラ模型実験において採用される実験仕様がプロペラ単独性能へ影響を及ぼすことを示し、CFD解析における考慮の重要性を論じた。

翼強度推定技術の構築においては、異なるプロペラ間での局所的形状変化の影響差を含めて評価しうるべく、CFDによって推定された翼面上圧力を外力とした翼応力解析とその評価手法を構築した。

まず船級規定翼厚を半没水プロペラに適用した場合、翼の応力変動が未考慮である問題点を指摘し、次に規定翼厚をベースに実機採用された半没水プロペラ2種を対象としてCFD解析を実施して翼面上圧力分布を導き、それを適用した構造解析にて翼応力を推定する解析手法を構築した。その結果、翼根部の翼応力が0.2%耐力値の近くまで高くなることを確認し、翼後縁部に特殊なカップ形状が設けられた場合では、更にカップ部に応力集中が生じる結果を得た。

次に、プロペラ翼1回転中の荷重状態変化を簡易なモデルで仮定し、構造解析で求めた翼応力を適用して応力振幅と最大平均応力を推定する方法を論じるとともに、プロペラ実体材試験片を用いた疲労試験結果に求めた応力振幅を適用することで疲労寿命を推定した。半没水プロペラの応力振幅は非常に大きくなるため、疲労寿命が数百時間とかなり短期間となることを確認した。また、鋳造品であるプロペラには鋳造欠陥は大なり小なり避けられないため、鋳造欠陥による疲労寿命への影響を検証した。