

論文の内容の要旨

論文題目 複合材料製プロペラに関する研究

氏 名 山磨 敏夫

世界の経済や物流を支えているのは、海上輸送である。一度に大量の貨物や巨大な重量物、そして多くの人を遠くまで低コストで運ぶことが可能である。日本の経済活動を維持していくために必要なエネルギーや鉱物資源そして食糧等の多くは海外に依存しており、その大半を輸送する船舶は国民生活・経済活動を支える極めて重要な役割を担っている。また、国内輸送、漁業やレジャーにも船舶は利用されている。一方で、日本は四方を海で囲まれ経済水域や領海を守るために防衛省の海上自衛隊や海上保安庁も多岐にわたる艦艇や船舶を保有しており、その責任はかなり高い。

これらの船舶は多くの機器類で構成されているが、その中でも推進器は重要であり、一般商船は運航中の燃料消費を抑えるための省エネ、レジャー関連では加速性や乗り心地等の嗜好性が求められ、特殊船については制振性や非磁性等、様々な要求がある。

その中で船用プロペラ材料は、銅系ニッケルアルミブロンズ(NAB)が一般的である。この材料の主原料は銅であり、可採可能年数が約40年程度であり、銅は投機対象となりLMEでも高値で推移し変動も激しい。このような背景で、船用プロペラの代替材料が求められている。

その代替材料として、注目されるのは複合材料である。金属材料と比較して比強度が高く、耐腐食性が高いなどの利点があり、航空機、自動車、風力発電のタービンなどに利用されている。船用分野において、複合材料はボートやヨットの船体に通常使用されている。一方、大型船への応用はまだ少ない。しかしながら、複合材料は様々な船のプロペラや舵等の付加物として将来有望な構造材料になり得ると期待される。その中で、複合材料を船用推進器に適用した製品も幾つか発表され、複合材料を船用プロペラに適用するための多くの研究が行われている。しかし、複合材料のコストは従来の金属材料に比べ高価であるが、比較的高コストが容認される艦船や潜水艦などの特殊船のプロペラとして使用されている。近年、複合材料の航空宇宙や自動車への幅広い普及や生産技術の進歩により複合材料のコストは下がっており、一般商船のプロペラ材料として利用可能な域まで達していると考えられる。

一般商船に使用するための課題として、キャビテーション・エロージョンの問題が挙げられるが、船用プロペラを対象とした複合材料に関するキャビテーション・エロージョンの研究は僅かしか発表されていない。また、船用プロペラで重要な疲労強度、弾性変形を利用したプロペラ設計法を確立するための系統的な水槽試験評価、ならびに実船試験による性能評価および耐久性評価が、ほとんど行われていないのが実情である。

そこで、本研究では以下の項目について研究を行った。

1) 複合材料の材料特性試験

船用プロペラの代替材料として複合材料を選定した。材料特性試験として、引張、曲げ、層間せん断およびアイゾット衝撃試験を行い、炭素繊維のFRPは船用プロペラの一般的な材料であるニッケルアルミブロンズ(NAB)と同等以上の強度を有するこ

とが分かった。また、弾性率が1/5～1/3程度と低く同荷重でも大きな変形が生じることが分かった。

次に、2種類のCFRPについてイオン交換水および3%NaCl水に1年以上に亘り浸漬させ、膨潤による強度劣化およびプロペラ材料として重要な疲労強度について、材料特性試験ならびに疲労試験を行った。材料強度の低下はほとんど見られず、劣化は確認されなかった。また、疲労試験を3%NaCl水に浸漬状態で行い、疲労強度は約10%程度低下したが、NABより4倍以上の疲労強度を有する結果を示した。

2) 複合材料のキャビテーション・エロージョン試験

船用プロペラは、作動状況にもよるが一般的に翼面上にキャビテーションが発生しエロージョンを引き起こし、表面悪化や損傷等を受ける。

数種類の複合材料やフィラー材について、磁歪式超音波キャビテーション試験を実施した。

まず、数種類の複合材料についてキャビテーション試験を行い、アラミド繊維のFRPがエロージョン耐性が高かった。また複合材料のキャビテーション・エロージョンのメカニズムも得た。

次に、繊維と樹脂との界面強度がキャビテーション・エロージョンにどのように影響を与えるか確認するためにガラス繊維のFRPについて、樹脂と繊維のサイジングを変更した。界面強度の計測にはマイクロドロップレット試験を行い、本材料では樹脂による影響が大きく、不飽和ポリエルステルが高かった。しかし、キャビテーション試験結果は、エポキシ樹脂の方がエロージョン耐性が高かった。この結果から、母材である樹脂の特性を変更することでエロージョン耐性が向上することが推定された。

さらに母材特性変更するために数種のフィラー材を用い、キャビテーション試験を行った。その結果、ガラスのマイクロバブルズを混ぜたフィラー材が、AFRPよりもエロージョン耐性が高かった。

エロージョン耐性を向上させるために、ポリプロピレン樹脂についてもキャビテーション試験を行い、今回試験した樹脂材の中で一番高いエロージョン耐性を示した。また、CFRPに軟質のシリコン系樹脂を塗装したものは、かなりエロージョン耐性が向上した。

以上のように、複合材料の母材である樹脂の特性を変更することや軟質のコーティングを実施することでエロージョン耐性が向上することが分かった。しかし、船用プロペラの一般材料であるNABよりもエロージョン耐性は劣っていた。

3) 複合材料製プロペラの設計法および水槽試験

複合材料の材料特性試験から、塩水中での疲労強度がNABより高いこと、および弾性率が低いことを利用したプロペラの設計法について、水槽試験で性能および設計法の確認を行った。

複合材料の疲労強度を考慮して、ハンディーバルクキャリアを対象船とし、ブレードを薄肉化および小翼面積化したモデルプロペラを設計・製作した。プロペラ単独性能試験を行い、効率は最大で2.4%向上した。この効率向上で大きく影響したのは小翼面積化で支配的であった。

次に、弾性プロペラ設計のために対象船を3.3G/T遊漁船として複合材料プロペラの変位率を相似にしたポリ塩化ビニル製のモデルプロペラを設計・製作した。プロペラの設計には、揚力面理論(LST)と構造解析(FEM)とを繰り返し計算する双方向

連成計算を用いた。この連成計算法をLST-FEM法と呼ぶこととした。

LST-FEM法で設計したモデルプロペラをプロペラ単独性試験を実施し、プロペラの輪郭形状でピッチの増減方向が変化することを確認した。この傾向は、LST-FEM法でも確認しており、良い一致を示していた。

プロペラ作動時の変位を計測するためにキャビテーション水槽でブレードの前後縁位置をレーザで変位計測を行った。その結果、計測した前後縁端の変位は、計測誤差を考慮すると設計点付近ではLST-FEM法で推定した変位と合致することが分かった。しかし、設計点から外れてくると推定値と計測値の誤差が大きくなることが分かった。これは、LSTの計算保証範囲を超えているからである。ところが、前後縁の位置からピッチに換算すると、設計点から外れていても推定と計測で5%未満であり、傾向を十分捉えていることが分かった。

以上から、本研究で提案したLST-FEM法でプロペラ性能を推定するには完全ではないが、ブレードのピッチ変化は推定と計測である程度合致しており、プロペラ設計に使用可能である。今後、設計点を外れた箇所についても設計を行うためにはLSTだけではなく、CFDの適用も考えていきたい。

4) 実船試験

3.3G/T遊漁船のプロペラをLST-FEM法により複合材料で設計・製作した。

先ず、複合材料プロペラの制振性を評価するために2種類のCFRPとNABについて振動試験を行った。材料単体では、CFRPはNABの4倍以上の減衰比を示した。実機プロペラについては、CFRPプロペラはNABプロペラに比べ減衰率が1次曲げで10倍以上、1次ねじりで5倍以上高くなっており、複合材料の特徴である高い制振性を示した。

次に、3種類CFRP製と2種類の金属製のプロペラについて実船試験を行った。その結果、1つのCFRPプロペラが、到達船速や加速性が高く、振動も低かった。複合材料プロペラの持つ幅広い運転状態への適合性の可能性が見出せた。

水槽試験と実船試験との結果に関して、キャビテーションを考慮することで良い一致を示し、水槽試験のモデルプロペラの剛性相似則が成り立っていることを証明するものであった。

LST-FEM法による推定トルクと実船試験を比較すると、LST-FEM法においてもキャビテーションを考慮した計算を行うことで実験値に良い一致を示した。

本研究で考案したLST-FEM法で完全にプロペラ性能を推定することはできなかったが、十分に複合材料プロペラの設計が行える領域にある。

一方で、プロペラとして問題となるキャビテーション・エロージョンがルート部に発生していた。今後、実船において上記のエロージョン耐性向上技術を研究し、適用したい。

上記の通り、複合材料プロペラを実用化するために、材料強度評価から水槽試験、実船試験まで一通りの研究を行った。その中で複合材料の弾性を利用したプロペラの設計が行えるLST-FEM法を考案し、ある程度の精度でプロペラ設計できるようになった。しかし、CFRPプロペラの実船試験でルート・キャビテーション・エロージョンが発生してしまった。今後も取り組まなければならない大きな課題であるが、本研究においてその解決策の糸口を得たものと考えている。

現段階では、制振性もありキャビテーションの発生しない条件で運転される特殊船等には十分適用の可能性はある。また、一般商船については、チップ部のキャビテーショ

ン・エロージョンが問題になるが、複合材料の弾性およびテーラリングを利用してチップ部のキャビテーションを抑制させることも可能である。ルートエロージョンを解決することで、嗜好性の高いレジヤートにも加速性や静寂性もあり広がって行くと期待できる。