

平成23年度
複合材料による高効率低コスト型プロペラの技術開発
成果報告書

平成24年3月

社団法人 日本船用工業会

はしがき

本報告書は、競艇の交付金による日本財団の助成金を受けて、平成 23 年度に社団法人日本船用工業会が実施した「複合材料による高効率低コスト型プロペラの技術開発」の成果をとりまとめたものである。

本開発は、近年、複合材料がその軽量、高強度、耐摩耗性などから、航空機、宇宙船、車両、小型船舶や風力発電用ブレード等多くの分野に採用され、技術進歩とともにより安価になってきていることから、これを利用することで、船用プロペラの高効率化および低コスト化を図ることを目的としている。

本開発は、平成 21 年度、22 年度、23 年度の 3 年計画で、ナカシマプロペラ株式会社に委託して実施しており、その成果を取り纏めた報告書である。

ここに、貴重な開発資金を助成いただいた日本財団、並びに関係者の皆様に厚く御礼申し上げる次第である。

平成 24 年 3 月
(社)日本船用工業会

目 次

1. 事業の目的	1
2. 事業の目標および計画	2
2.1 事業の目標	2
2.2 事業の計画	2
3. 事業内容	3
3.1 船用プロペラに適応する複合材料の素材組合せおよび製作手法の選定・確立	3
3.1.1 強化繊維	3
3.1.2 樹脂	5
3.1.3 成形方法	6
3.1.4 まとめ	8
3.2 複合材料の機械的性質、キャビテーション・エロージョン等の実験計測	8
3.2.1 機械的性質	9
3.2.2 キャビテーション・エロージョン	12
3.2.3 CFRP の振動評価試験	14
3.3 複合材料における構造解析手法の確立および流体解析との連成計算の検討	15
3.3.1 概要	15
3.3.2 設計手順	15
3.4 モデルプロペラの設計、製作および水槽試験	17
3.4.1 モデルプロペラ	18
3.4.2 単独性能試験	20
3.4.3 キャビテーション試験	22
3.4.4 ブレード変位量および連成計算との比較	25
3.4.5 まとめ	26
3.5 プロペラ材料を複合材料製にすることによる高効率の確認試験	27
3.5.1 金属製モデルプロペラ	27
3.5.2 樹脂製モデルプロペラ	28

3.5.3	まとめ	29
3.6	複合材料製プロペラの実船試験	29
3.6.1	実船試験用プロペラ	29
3.6.2	実船試験	31
3.6.3	試験艇	32
3.6.4	計測項目	32
3.6.5	試験条件	34
3.6.6	計測結果	34
3.6.7	水槽試験との比較	37
3.6.8	連成計算による推定性能との比較	37
3.6.9	まとめ	38
3.7	製造コスト	39
4.	事業成果および課題	40
4.1	船用プロペラに適応する複合材料	40
4.2	複合材料における構造解析手法の確立および流体解析との連成計算の検討	40
4.3	複合材料製プロペラの実船試験	40
4.4	高効率化	40
4.5	コストダウン	41

1. 事業の目的

船舶の燃費向上のため、プロペラについてはブレード形状変更による損失軽減やプロペラの二重反転化による損失回収等の技術開発が行われ、現状の金属材料プロペラに対するこれらの努力により一定の成果があった。しかし、既に飽和状態に達しており、さらなるプロペラ効率の向上は困難な状況にあると言わざるを得ない。

一方、プロペラ材料の主成分である銅は値動きが激しくコスト高になっており、可採年数約 30 年の枯渇性鉱物とされ、今後も高値で維持されるかさらに高騰する可能性がある。これに対し、複合材料は軽量、高強度、耐摩耗性、耐腐食性に優れ、航空機、宇宙船、車両、小型船舶や風力発電用ブレード等多くの分野に採用され、その普及速度は速く安価になりつつある。

そこで、本開発では発展著しい繊維強化プラスチック（FRP）を利用することで、船用プロペラの高効率化および低コスト化を図ることを目的とする。

高効率化については、例えば高強度である炭素繊維（CF）はプロペラ設計で重要な疲労特性にも優れ、疲労強度は金属材料の 4 倍以上が期待できる。このためブレードの薄肉化および小翼面積化が図れ、形状抵抗および摩擦抵抗の低減が可能となり、プロペラ効率の向上を実現することができる。また、FRP の比重が金属材料の約 1/4～1/5 と軽いことから、ブレードの軽量化により軸系のサイズダウンが可能となり、軸系装置の転がり抵抗の削減による効率アップが期待できる。

低コスト化については、FRP の強化繊維として高強度炭素繊維の他にガラス繊維（GF）やアラミド繊維等をハイブリッドに組み合わせることで船用プロペラに適合した強度設計が可能であり、炭素繊維使用量を低減することで材料コストを下げることができる。同仕様のプロペラを製造する場合、金属材料での鋳造成形についてはその都度鋳型を造形し鋳造終了後に壊すが、複合材料については成形型を何度も使用でき型製作工数の削減が図れる。さらに、金属材料は鋳物であることから材料を熔融（約 1200℃）させるエネルギーが必要となるが、通常複合材料は樹脂を硬化させる温度（室温～約 200℃）に上昇させるだけであるから熱エネルギーの削減も図れる。したがって、複合材料にすることで材料費および製造費のコストを削減することが可能となる。

このように複合材料製プロペラは優れているが、製作するためには幾つかの課題がある。

成型方法として、本開発では確実に積層間に樹脂を含浸できるレジニンフュージョン法もしくは低温硬化樹脂プレプリグ・オープン成形でプロペラ製作することを考える。これらの成形法は先進的であり風力発電のブレード成形や競技用ヨットに採用されているが、船用プロペラのような中実肉の一体成形は行われておらず成形法開発が必要である。

また、プロペラ作動中においては原動機の力を吸収しなければならないことや海水中で駆動することから、上記の適用用途（風力用ブレードやヨット等）に比較して運転条件が厳しく、技術的ハードルは高い。特に、面外のせん断強度およびキャビテーション・エロージョンが重要な課題となる。

当社は日本船用工業会の平成 19 年度および 20 年度の FS 助成事業を受け「複合材料製プロペラの研究」において上記のレジニンフュージョン法および新基材として炭素繊維マルチアキシアル材を用いて部材を成形し基礎的な材料評価を行ってきた。その結果、複合材料は船用プロペラ材料として十分な強度を有していること、および積層構成の工夫によりキャビテーション・エロージョン耐性向上の可能性が確認された。

この成果を踏まえて本技術開発では、プロペラに最適な強度およびキャビテーション・エロージョン耐性に優れた材料・成形法を選定し、高効率化とコストダウンを実現するプロペラを開発するもので、開発内容としては、モデルプロペラを数種類製作し、試験水槽で性能試験およびキャビテーション試験を行う。そして、この水槽試験結果を用いて複合材料製プロペラの形状変形や性能を推定するために構造解析と流体解析との連成解析手法の開発を行い、最終的には実機プロペラを製作し実船試験を行うことにしている。

販売先としては、特に燃費向上による燃料削減が望まれる一般商船をターゲットとする。同時に推進器の機能要求の高い特殊船も視野に入れながら開発を行うものとし、将来的には価格競争の厳しい小型船への適用も視野に入れている。

2. 事業の目標および計画

2.1 事業の目標

1) 高効率化

プロペラ効率を従来の金属材料と比較して3%向上を目指す。

2) コストダウン

金属材料より20%コストダウンを目指す。

2.2 事業の計画

事業の計画表を表2.2.1に示す。

表 2.2.1 事業計画表

実施項目	平成 21 年度				平成 22 年度				平成 23 年度			
	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4
複合材料の素材組合せおよび製作手法の選定・確立	←	→										
機械的性質、キャビテーション・エロージョン等の実験計測		←	→									
構造解析手法の確立および流体解析との連成計算検討			←									→
実船試験に使用する試作プロペラの設計および製作				←	→	←	→					
モデルプロペラの製作および水槽試験					←	→						
薄肉化および小翼面積化による高効率確認試験							←	→				
実船試験						←	→		←	→		
報告書作成											←	→

3. 事業内容

3.1 船用プロペラに適応する複合材料の素材組合せおよび製作手法の選定・確立

プロペラ材料として使用可能な強化繊維や母材樹脂について数種の素材を選定し、製作手法である積層構成や成形方法を選定した。

3.1.1 強化繊維

船用プロペラの強化繊維として、カーボン繊維、ガラス繊維、アラミド繊維、ポロン繊維が挙げられる。これらの繊維を以下解説する。

<カーボン繊維>

炭素繊維は1959年アメリカのユニオンカーバイド社がレーヨン为原料として開発した。現在では原料や性能の異なる種々の製品が生産され、主に複合材料として利用されている。炭素繊維はレーヨン、アクリルなどを前駆体とする製造方法（PAN系）と、石油、石炭などのピッチを原料として紡糸し製造（ピッチ系）する二通りの方法がある。2008年の炭素繊維の生産量はPAN系が48,850トン（生産能力7.1万トン/年）で、ピッチ系がその10%程度である。

PAN系炭素繊維はアクリル繊維を空气中で200～300℃で加熱酸化して耐炎火繊維とし、続いて不活性ガス中で1000～1800℃の高温で処理して炭化することによって炭素繊維になる。さらに樹脂との接着性をよくするために表面処理を行い、サイジングして製品にする。炭素繊維を不活性ガス中で更に2000～3000℃で処理すると黒鉛繊維が得られる。黒鉛繊維は一般的に、炭素繊維に比べて強度が低下し、弾性率が向上する。

ピッチ系炭素繊維は石油、石炭のピッチを紡糸し、織物にしてから空气中で200～400℃で繊維形状の固定化のため、表面処理を行う（不融化）。次いで、PAN系と同様に処理して炭化、黒鉛化を行い炭素繊維、黒鉛繊維とする。ピッチ系は炭化率は80%以上で、PAN系が50%程度であるのに対し、コスト的には有利といえる。また、ピッチ系は、弾性率が高いのが特徴であるが、圧縮強度が低いのが弱点で、用途が限定される。

炭素繊維は単位質量当たりの強度、弾性率（比強度、比弾性率）が優れた特性を利用し、軽量化効果が発揮しやすい、宇宙・航空機分野及び自動車分野で複合材料の基材として使われている。また、釣り竿、ゴルフシャフト、テニスラケットなどのスポーツ・レジャー用品にも優れた力学的特性が認められて急速に普及している。

船用プロペラの材料は信頼性が重要視されることから、カーボン繊維が主となる材料である。カーボン繊維は現時点で船用プロペラを実現するための強度部材となり、カーボン繊維を中心に研究開発を実施した。

<ガラス繊維>

ガラス繊維は1940年ごろアメリカで開発された。そのガラス繊維を織物にして、不飽和ポリエステル樹脂を流し込んで成形し、ガラス繊維強化複合材料が開発された。第2次世界大戦中にアメリカで、軍用機の燃料タンクとして実用化された。現在、ガラス繊維は日本国内で65万トン以上生産され、その2/3が長繊維で、1/3が短繊維である。

ガラス繊維用のガラスの組成は、板ガラスやコップのガラスとは成分が異なっていて、ソーダ石灰ガラスに近いものから、アルカリ成分の極めて少ないものまで用途により使い分けられる。一般にアルカリ成分の少ないものは、耐熱性、耐食性、強度などの点で優れている。

ガラス繊維は機械的強度が極めて高く、伸びがほとんどなく、電気絶縁性、耐熱性も極めて高く、不燃性である。その反面、屈曲と摩擦に弱く、脆い性質がある。

長繊維のほとんどはアルカリ含有率 1%以下のホウケイ酸ガラスで作られた E ガラスである。E ガラスは電気絶縁用として実用化され、今日では、強度や耐熱性などの特性から強化プラスチック補強剤として、ボート、自動車、航空機、浴槽、スキー板、ヘルメットなどに大量に使われている。建築分野では、ガラス繊維織物に四フッ化エチレン樹脂をコーティングして、ドームの膜素材に使われている。ガラス繊維の直径は 2~3 μm で、細いものは防災カーテン、電気絶縁用クロス、産業資材用クロスとして、太いものは複合材料の基材として使い分けられている。

短繊維用のガラスはアルカリ含有率 8~14%のソーダ石灰ガラスが主に使用されている。ガラス短繊維は、熔融したガラスを高速の気流で吹き飛ばし製造され、グラスウールと呼ばれている。直径は 5~7 μm 、長さは 10~50mm 程度に分布している。この綿状のガラス繊維にフェノール系のバインダーを吹き付けて、成型もしくはシート状にして断熱材や防音材として利用されている。

ガラス繊維は、船用分野では小型ボートに採用されており一般的な材料となっている。しかし、疲労強度の低下は 30%程度以下になる。この場合、本研究の目標となる薄翼化や小翼面積にすることによる高効率化は困難である。したがって、応力負荷の小さなプロペラ内部にガラス繊維を使用することでプロペラ費用を安価に抑えることを考えた。

<アラミド繊維>

アラミド繊維は 1960 年代前半にデュポン社で開発された。日本では、帝人が 1971 年に独自に開発した界面重合法で生産を始めた。ナイロンの一種であるが区別されている。

アラミド繊維はメタ系とパラ系があり、メタ系は耐熱や耐薬品性、パラ系は引っ張り強度が大変強くなる。アラミド繊維は、構成している分子が規則正しく並んでいるため、高強度を発揮することが可能となった。生産量はメタ系で年間約 2.2 万、パラ系で年間約 4.5 万トンである。

メタ系アラミド繊維はポリエステルなどの汎用繊維と同等の強度をもち、熱分解点が 400 $^{\circ}\text{C}$ 以上と高い耐熱性があり、500 $^{\circ}\text{C}$ 前後で熱分解する。また、空気中では燃えず自己消火性を持つとともに、熱溶解性もなく、燃焼ガスの毒性も少ないなど、極めて優れた難燃性繊維である。分子構造はジグザグ状になっている。パラ系アラミド繊維は剛直な分子構造のため、メタ系アラミド繊維に比べ、強度、弾性率などの力学的性質で優れている。

アラミド繊維は、高い耐衝撃性、耐蝕性を有し防刃衣や防弾衣として使用されている。また、有機繊維のなかでも、高度な難燃性能をもっていて、有毒ガスや煙の発生が少ないことから炎や高熱に曝される危険の大きい場面での衣料製品、例えば消防服、自動車レース用のレーシングスーツ、製鉄用作業服または溶接用

作業服および手袋などの防護衣料として好んで用いられている。一般的にはタイヤや、ベルト、光ファイバーコード、ロープなどに用いられている。

船用プロペラは、通常キャビテーションは避けて通れない事象であり、プロペラ表面にエロージョン（壊食）を引き起こす可能性がある。アラミド繊維の高い耐衝撃性、耐蝕性の特徴を活かしてプロペラ表面に設定し、キャビテーション・エロージョン耐性の効果を確認した。

< ボロン繊維 >

ボロン繊維はタングステン線を芯材として、化学蒸着法により製造される。機械的特性が優れ、特に圧縮強度が引張り強度の2倍もあるユニークな材料である。繊維強化プラスチック（FRP）や繊維強化金属（FRM）などの複合材料として宇宙・航空機分野、スポーツ・レジャー用品に利用されている。ただし、ボロン繊維は、かなり高価な材料であり通常使用するには難しい材料である。

ボロン繊維は、高強度であり船用プロペラに有望であるが、高価であり実現性は難しいと考えられる。今回の研究開発では、ボロン繊維は除外した。

以上のことから、カーボン繊維は、船用プロペラの強度部材として優位であると共に、アルミニウム合金の後継材料として航空機やレジャー品にも多様化され、今後安価になると期待される。ガラス繊維は一般的に使用され生産量も多く安価であり、カーボン繊維との組合せにより材料のコストダウンに寄与できると考える。アラミド繊維は耐衝撃性に優れキャビテーション・エロージョン耐性が期待できる。一方、ボロン繊維は未だ一般的な材料になっておらず高価である。

したがって、船用プロペラに適応できる強化繊維材料として、強度的に有利であるカーボン繊維、コストダウンを図るために一般的なガラス繊維、さらに耐衝撃性が高くキャビテーション・エロージョン耐性が期待できるアラミド繊維を選定した。

3.1.2 樹脂

複合材料の代表的な母材となる樹脂として、以下が挙げられる。

< エポキシ樹脂 >

エポキシ樹脂(Epoxy)とは高分子内に残存させたエポキシ基で架橋ネットワーク化させることで硬化させることが可能な熱硬化性樹脂の総称である。架橋ネットワーク化前のプレポリマーと硬化剤を混合して熱硬化処理を行うと製品として完成するが、プレポリマーも製品化した樹脂も両者ともエポキシ樹脂と呼ばれる。プレポリマーの組成と硬化剤の種類との組み合わせで物性が多様に変化するので、エンジニアリングプラスチックとして利用される。航空宇宙の複合材料の母材にも採用され信頼性が高い。特に寸法安定性や耐水性・耐食性・耐薬品性および電気絶縁性が高いことから、電子回路の基板やICパッケージの封入剤として汎用されている。また接着剤、塗料、積層剤としても利用される。これらの多くは2液型で混合して使用する。

船用プロペラにとって、強度ならびに耐水性、耐食性は重要であり、カーボン繊維の母材として一般的に使用されるエポキシ樹脂が有効であり、本研究開発での母材樹脂とする。勿論、ガラス繊維やアラミド繊維にも使用できる。

<不飽和ポリエステル樹脂>

不飽和ポリエステル(Unsaturated Polyester)は、熱硬化性樹脂の一種で、無水マレイン酸などの不飽和一塩基酸と、エチレングリコールなどの多価アルコールとの重縮合で得られる。単にポリエステルと呼ばれることがある。

不飽和ポリエステルは、ガラス繊維の母材として一般的に使用されている。強度的にはエポキシより劣るためカーボン繊維との組合せにはアンバランスな樹脂である。したがって、船用プロペラの母材としては使用しない。

<ビニルエステル樹脂>

ビニルエステル樹脂(Vinylester)は、熱硬化性樹脂の一種であり、ベース樹脂はエポキシ樹脂のエポキシ基の部分をアクリル化したものであるため、エポキシアクリレートともいう。不飽和ポリエステル樹脂と比べると、一般的に強度や耐蝕性は良い。

ビニルエステル樹脂は、エポキシ樹脂と不飽和ポリエステルの間の強度である。価格もエポキシ樹脂より安価である。しかし、船用プロペラとして実用するには信頼性に欠けるように思われる。エポキシ樹脂によるプロペラ実績ができた後に考えたい樹脂材であり、コストダウンに期待が持たれる。

<ポリプロピレン樹脂>

ポリプロピレン(polypropylene)とは熱可塑性樹脂で、プロピレンを重合させたポリマーであり、プラスチックの分類を表す略号はPPで、リサイクルマーク(SPIコード)は5番である。石油精製の複製ガス中のプロピレンを重合してつくられる。繊維中で比重が最も小さく、水に浮かぶ。強度が高く、吸湿性がなく、薬品に強い特色がある。

ポリプロピレンは熱可塑性樹脂であり、熱を加えることで形状変更や補修が可能な樹脂であり、船用プロペラが損傷を受けた場合に補修が可能である。ただし、強度が上記の樹脂に比べ低いこと、また流動性が悪いため厚いブレードの成形が難しい等の問題がある。これらを改善できれば、プロペラ製作のコストダウンが期待できる材料である。

船用プロペラには高強度、耐食性、耐水性、信頼性が要求される。上記の各樹脂の特徴を踏まえ、先に選定したカーボン繊維、ガラス繊維およびアラミド繊維の母材として一般的に使用される熱硬化性樹脂であるエポキシ樹脂を本研究開発の母材樹脂として選定した。また、比較として、コストダウンが期待でき、補修が容易な熱可塑性樹脂であるポリプロピレン樹脂も選定した。

3.1.3 成形方法

複合材料の成形方法としては、以下が挙げられる。

1) ウェットレイアップ法

オープンモールドに強化繊維のセットと樹脂含浸を型上に置いて行う方法で、代表的な成形方法にハンドレイアップ法とスプレイアップ法がある。ハンドレイアップ法は最も基本的な積層方法であると共に、広く用いられている方法である。

以下の成形方法に比べて作業者の高いスキルを要し、成形品の機械物性も低い。小型 FRP 船の船体の成形法がこれに当たる。

2) リキッドレジン法 (FW 法、PT 法)

成形時に液状の樹脂を強化繊維に含浸しながら成形する方法である。フィラメントワインディング法 (FW 法) とプルトルージョン法 (PT 法) がある。フィラメントワインディングは筒状の製品成形に用いられ、プルトルージョンはフラットバー材や L アングル材・パイプ材の成形に用いられ、両者共に長尺物の連続的に成形する方法である。

軸や構造部品の成形に適応するもので、プロペラ成形には向いていない。

3) レジントランスファ法 (RTM 法)

強化繊維を成形型内にセットした後、樹脂 (レジン) を強制的に送り込んで含浸・成形を行う方法である。基本的に成形材の周囲全てが型面として規定される。そのため成型品は周囲のトリム加工などが不要で材料歩留まりも良い。しかし、樹脂の加圧注入に耐えるよう成形型には耐圧剛性・強度を持つ材料・構造が要求される。そのため比較的小型部品の量産品に適応される。

小形の船用プロペラには適応可能と考えられる。直径 1m 以下はこの成形法で可能である。

4) レジンインフュージョン法 (VaRTM 法)

レジンインフュージョン (RI) 法は RTM 法と同様に、強化繊維を先に成形型内にセットした後、真空バッグで密閉し、型内を真空バキュームすることで樹脂を注入し含浸・成形を行う。しかし、オープンモールドを使用し、樹脂注入時に加圧せず、バッグ内の負圧に頼って、なかば浸透圧を利用するように含浸させる点が異なっている。2つの特長 (オープンモールド、負圧浸透圧) から成形型、注入設備ともにコストが低く抑えられ、多層の積層・含浸工程が短縮できるなどの利点がある。真空圧を利用することから VaRTM (Vacuum assisted Resin Transfer Molding) 法とも呼ばれている。

風力発電のブレード成形はほとんどこの成形法が用いられている。船用プロペラの形状は風力発電用ブレードと同様であり、この成形法が適応可能と考えた。ただし、大形プロペラが対象になるものとする。

5) プリプレグ・オートクレーブ法

先端複合材料の成形として最も品質信頼性と性能が期待できる方法であり、現在 CFRP (Carbon FRP) に対して一番多く利用されている成形方法である。予め強化材に樹脂 (エポキシ樹脂が多い) を含浸させた薄いプレプリグ (Prepreg) シートを成形型に積層し、真空バッグとオートクレーブ (Autoclave) により加圧・熱硬化させる。一般に耐衝撃性や靱性に富むエポキシ樹脂は粘度が高くハンドレイアップや VaRTM に適さないが、プレプリグ化することでそれらの性能の良い樹脂が使用でき、さらに必要最低限の樹脂量を品質良く含浸することでボイドが無いシートとすることができる。

船用プロペラは、信頼性が重要であり、プリプレグ法は高品質で高強度が期待できることから適応可能と考える。ただし、オートクレーブ装置の大きさにより製品のサイズが左右される。現状としては、大型プロペラの成形は困難であるが、直径 4m 以下程度の中形プロペラであれば成形可能と考える。

以上のことから、複合材料による船用プロペラの成形法として、大形プロペラまで製造可能なレジントランスファ法 (RTM 法) やレジンインフュージョン (VaRTM 法)、高品質で強度的に信頼性のあるプリプレグ・オートクレーブ法 (Prepreg-A/C 法) が有効である。本研究開発の材料試験に使用する試験材は、RTM 法と同様の VaRTM 法および Prepreg-A/C 法で成形する。

3.1.4 まとめ

1) 強化繊維

船用プロペラに適応できる強化繊維材料として、強度的に有利であるカーボン繊維を選定する。機械的性質試験は、カーボン繊維に絞って実施した。

コストダウンを図るために一般的に使用されているガラス繊維、また耐衝撃性が高くキャビテーション・エロージョン耐性が期待できるアラミド繊維を選定する。ここで、複合材料のキャビテーションに関する研究は行われておらずカーボン繊維、ガラス繊維、アラミド繊維についてキャビテーション試験を実施した。

2) 樹脂

樹脂は、強度、耐水性・耐食性が高く、カーボン繊維に多く使用されている熱硬化性のエポキシ樹脂とする。勿論、ガラス繊維やアラミド繊維にも使用されるものである。

3) 織り方および積層配交

強化繊維の織り方は、繊維を平織りした Fabric (クロス) 材、一軸方向に繊維を配列しその軸方向に強度の高い UD (一軸方向) 材およびその UD 材を直交に重ね合わせステッチングした Multi-Axial (多軸) 材を採用する。

積層の配交は、これらの繊維材を擬似等方になるように積層する。

4) 成形法

成形法は、大形プロペラまで製造可能な RTM 法と類似した VaRTM 法、高品質で強度的に信頼性のあるプリプレグ・オートクレーブ法を選定する。

3.2 複合材料の機械的性質、キャビテーション・エロージョン等の実験計測

上記選定した強化繊維や母材樹脂の積層組合せを変更した試験片を製作し、キャビテーション・エロージョン試験および機械的性質を求める材料試験を実施した。

3.2.1 機械的性質

1) 試験片の種類および対象試験

表 3.2.1.1 に試験片の種類および対象試験を示す。

強化繊維は、プロペラの強度部材となるカーボン繊維についてのみとした。

樹脂は、熱硬化性樹脂のエポキシ樹脂を主とした。

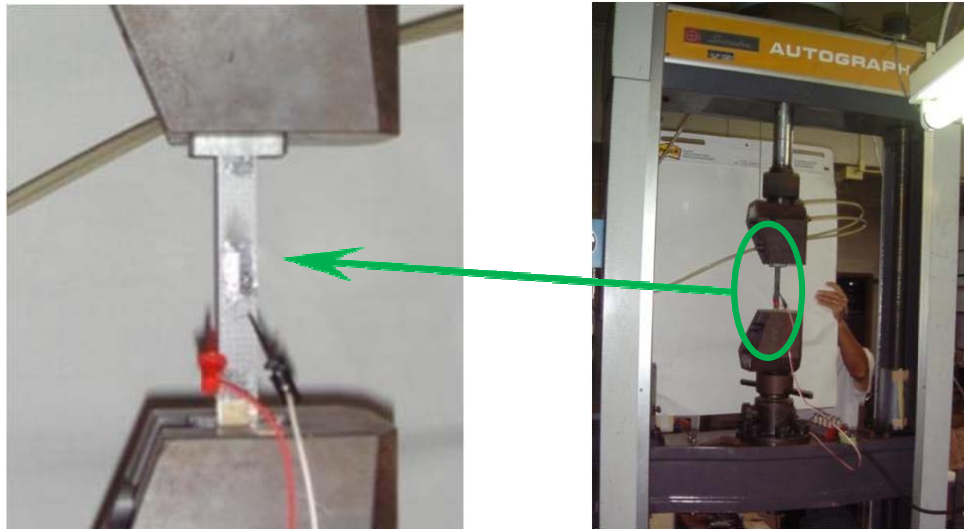
ここで、表中の名称で Prepreg-A/C は成形法のプリプレグ・オートクレーブ法を示す。付記の“-iso”は擬似等方を意味している。

表 3.2.1.1 試験片の種類および対象試験

名 称	VaRTM Fabric-iso	VaRTM Multi-Axial-iso	Prepreg-A/C Fabric-iso	Prepreg-A/C UD-iso
織 維	CF	CF	CF	CF
織 方	Fabric	Multi-Axial	Fabric	UD
樹 脂	エポキシ	エポキシ	エポキシ	エポキシ
成 形 法	VaRTM	VaRTM	プリプレグ・オートクレーブ	プリプレグ・オートクレーブ
繊維含有率 Vf (%)	50.8	42.4	51.0	55.0
比 重	1.50	1.45	1.49	1.54

2) 引張試験

JIS K 7073 に基づく引張試験方法により、引張強さおよび縦弾性係数を求めた。試験状況を図 3.2.1.1 に示す。



(a) 試験部詳細

(b) 引張試験機

図 3.2.1.1 引張試験状況

3) 曲げ試験

JIS K 7074 および ASTM-D790M-86 に基づき、3点曲げ試験を行い、曲げ強さ σ と曲げ弾性率 E を求めた。試験方法の概要図を図 3.2.1.2 に、試験状況を図 3.2.1.3 に示す。

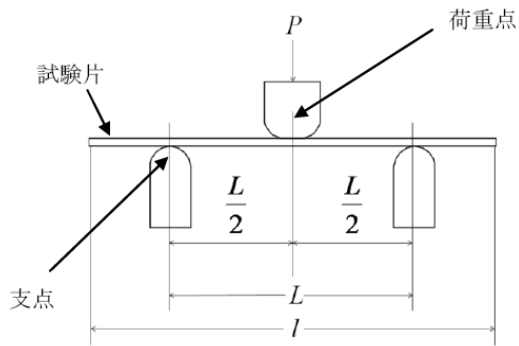


図 3.2.1.2 3点曲げ試験概要図



図 3.2.1.3 3点曲げ試験

4) 層間せん断試験

JIS K 7078 に基づいて、短い試験片の 3 点曲げを行い、見かけの層間せん断強さ τ を求めた。試験方法の概要図を図 3.2.1.4 に、試験状況を図 3.2.1.5 に示す。

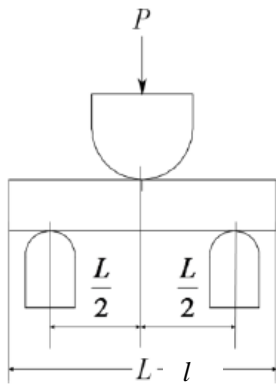


図 3.2.1.4 層間せん断試験概要図



図 3.2.1.5 層間せん断試験

5) 衝撃試験

JIS K 7062 に基づいて、アイゾット衝撃試験方法により、試験片にエッジワイズ衝撃を与えてアイゾット衝撃値 a_T を求めた。試験方法の概要図を図 3.2.1.6 に、試験状況を図 3.2.1.7 に示す。

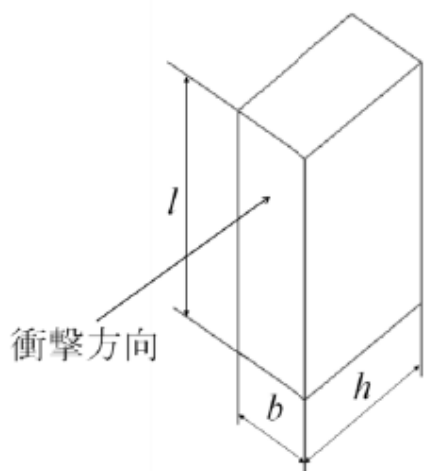


図 3.2.1.6 エッジワイズ衝撃



図 3.2.1.7 アイゾット衝撃試験機

6) 疲労試験

一年以上に亘り 3%NaCl 水に浸漬させた CFRP の試験片について、3%NaCl の水槽内での三点曲げ疲労試験を図 3.2.1.8 の疲労試験機で実施した。図 3.2.1.9 に負荷状況の一例を示す。最大負荷 250N を作用させる場合、初期負荷は最大負荷の 10%である 25N とし、平均負荷は 137.5N で振幅は 112.5N となる。



図 3.2.1.8 曲げ疲労試験機

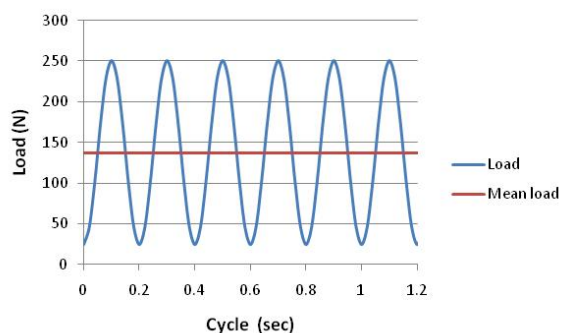


図 3.2.1.9 負荷状況の一例(最大負荷 250N)

7) 機械的特性のまとめ

表 3.2.1.2 に上記の静的機械的性質の結果を示す。参考に表の下欄に船用プロペラ材料である NAB (ニッケルアルミブロンズ) の機械的性質を記載した。全ての CFRP は NAB と同等の強度で、降伏応力は見られず引張強さまでリニアで、NAB の 0.2%耐力の 245MPa よりも大きいことが分かった。

また、3%NaCl 水槽内での疲労強度試験を図 3.2.1.10 に表した。CFRP の疲労強度は、NAB に対して Fab で 4 倍以上、UD で 6 倍以上を示し、高い疲労強度を示した。

表 3.2.1.2 静的機械的特性

名 称	VaRTM Fabric-iso	VaRTM Multi-Axial-iso	Prepreg-A/C Fabric-iso	Prepreg-A/C UD-iso
繊維含有率 Vf(%)	50.8	42.4	51.0	55.0
比 重	1.50	1.45	1.49	1.54
引張強さ(MPa)	578	569	594	694
比例限(MPa)	同上	同上	同上	344
縦弾性係数(GPa)	40.5	41.2	41.5	42.0
曲げ強さ(MPa)	607	576	665	1102
曲げ弾性率(GPa)	27.9	23.0	29.3	45.0
層間せん断強度(MPa)	48.8	44.7	58.1	63.3
アイゾット衝撃値(kJ /mm ²)	57.2	58.0	54.1	69.3

参考) NAB : 比重=7.6、引張強さ=590MPa、比例限(0.2%耐力)=245MPa、縦弾性係数=123GPa

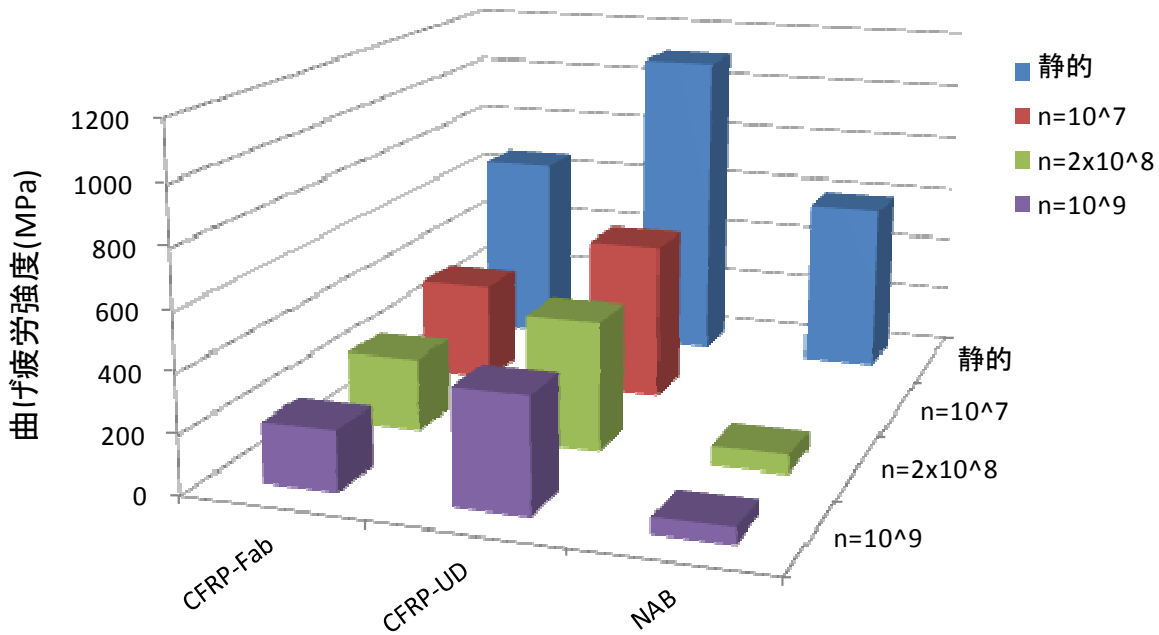


図 3. 2. 1. 10 疲労試験結果

3. 2. 2 キャビテーション・エロージョン

プロペラ作動中、翼面上にキャビテーションが発生することは避けて通れない。キャビテーションが翼面上で潰れた場合、そのときの衝撃圧によりエロージョンが発生する。

そこで、複合材料におけるキャビテーション・エロージョンの評価を行った。

1) 試験装置および試験方法

キャビテーション試験には、磁歪式超音波振動装置（図 3. 2. 2. 1 参照）を用いた。試験条件は ASTM-G32 に準じ、対向式キャビテーション試験（図 3. 2. 2. 2 参照）を行った。

キャビテーション・エロージョンの状況については、15 分毎に精密質量計測器で質量を計測した。試験片表面を目視（デジカメ撮影）および顕微鏡写真で観察した。また、試験水をフィルターに通して損耗破片を採取し観察した。

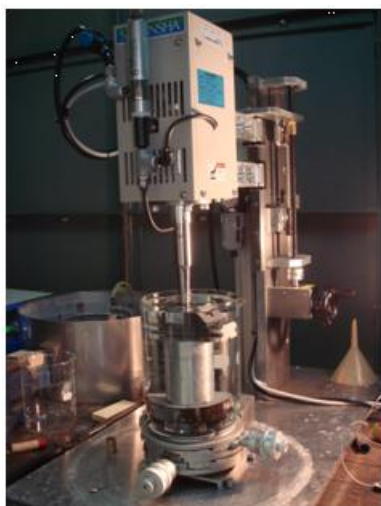


図 3. 2. 2. 1 超音波振動装置



図 3. 2. 2. 2 試験状況

2) 試験結果

ガラス繊維、カーボン繊維およびアラミド繊維で個々に強化した複合材料を 8 種類 (CFRP を 4 種類、GFRP を 2 種類、アラミド繊維を 1 種類、エポキシのみ 1 種類)、また、複合材料にフィラー材をコーティングした 6 種類 (ガラスバルーン、フェライトバルーン、アラミド長繊維、アラミド短繊維、アラミドパウダ、チタン酸アルミ)、さらに船用プロペラ材料の NAB について、キャビテーション試験を実施した。

図 3.2.2.3 に各材料の試験時間とキャビテーション・エロージョンによる損耗体積を示す。損耗体積は、損耗質量を比重で除して求めた。図中には、6 種類のフィラー材とエポキシ樹脂のみ“Resin-only”、アラミド・クロス材“AF-Fab-VaR”、カーボン・クロス材“CF-Fab-VaR”および“CF-Fab-Pre”を比較のために示す。

全ての材料について損耗量は、時間と共に増加している。損耗量の傾きは初期に大きく、時間と共に傾斜が緩くなっていることが分かる。これは、キャビテーションが発生する振動子端面とエロージョンが生じる面との距離が、浸食が進むに連れて大きくなって行くことが考えられる。基本的に複合材料化することでエロージョン耐性が悪化する傾向であるが、母材のエポキシ樹脂よりも損耗量が少なかったのは、CF-Fab-VaR、TA-5、MBF、AF-12-1、AF-Fab-VaR、MBG の順であった。NAB はエロージョンの痕跡は観察できたが、損耗量としてはかなり少なかった。

キャビテーション試験で、NAB は複合材料に比べエロージョン耐性が高いことが分かった。アラミド繊維系を CFRP 表層に配置することでエロージョン耐性が上がることが分かった。また、フィラー材の効果も観察できた。

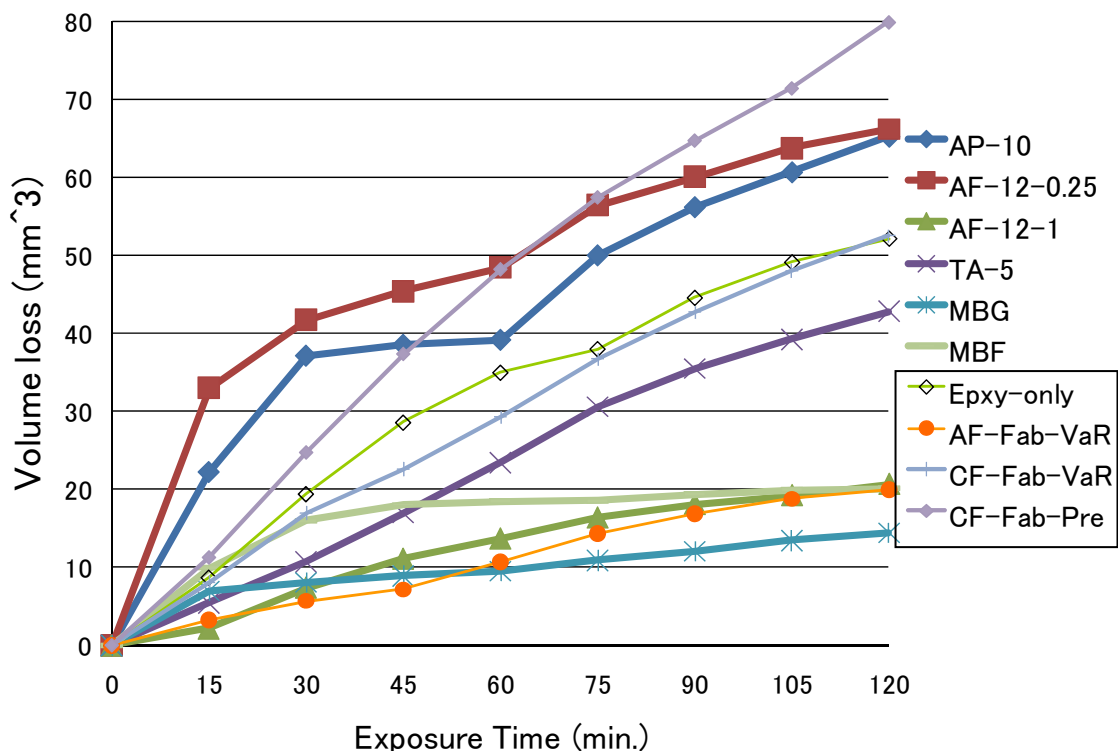


図 3.2.2.3 損耗量

3.2.3 CFRP の振動評価試験

材料の制振性は、ヒステリシスに起因すると考えられることから、損失係数 η が一般に用いられる。ここでは図 3.2.3.1 に示すような中央加振法によって、材料の損失係数の測定を行い、減衰率は損失係数 η に対する等価な減衰比を示す $\zeta = \eta/2$ の関係を用いて求めた。なお、この測定方法は、基本的に JIS K7391 に添った形で行った。

試験は、2 種類の CFRP の Prepreg-A/C-Fabric-iso および Prepreg-A/C-UD-iso、ならびに従来プロペラの NAB について行った。

計測試験結果を図 3.2.3.2 に示す。測定結果から、両者の CFRP 材の減衰率 0.1% 以上であり、NAB の最大減衰率 0.025% と比較して 4 倍以上であり、制振性が期待できる。また、CFRP 材料の中では、Fabric 材の方が制振性が高い結果となった。これは、Fabric 材の場合、直交した繊維同士が接触しており、繊維間での摩擦が大きいことが要因として考えられる。

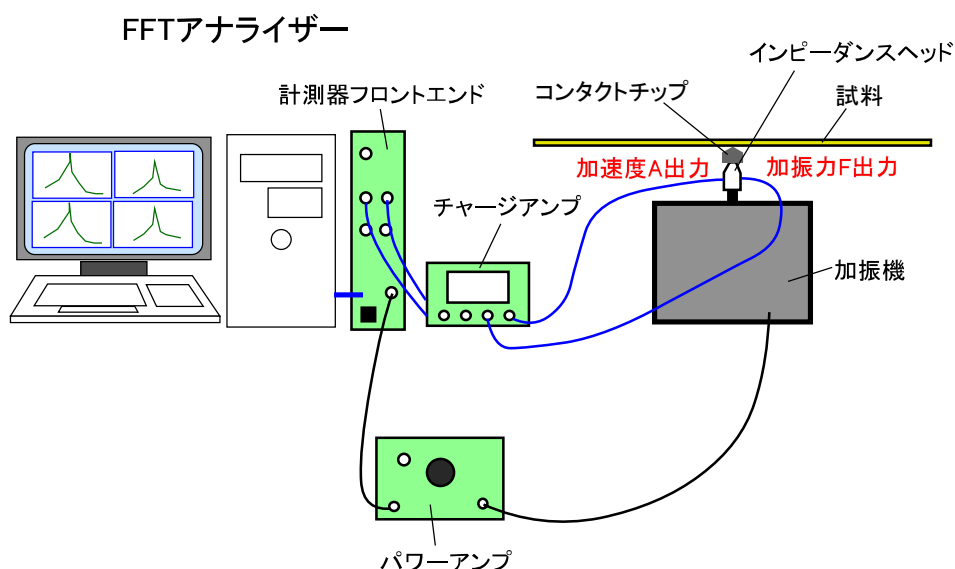


図 3.2.3.1 中央加振法

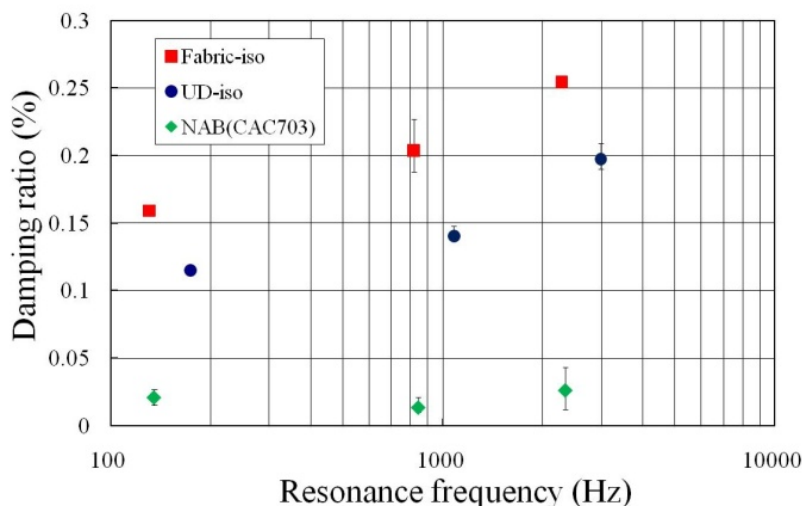


図 3.2.3.2 共振周波数と減衰率の関係（横振動）

3.3 複合材料における構造解析手法の確立および流体解析との連成計算の検討

プロペラ設計の構造解析手法として有限要素法（以下 FEM）を、流体解析手法として揚力面理論（以下 LST）を用いる。流体力の作用によりプロペラは変形し、この変形により流体力は変化するため、変形量が大きい場合には構造変形による流体力の変化を考慮する必要がある。

このため、構造-流体連成計算設計手法（以下 LST-FEM 法）を開発し、LST-FEM 法を用いて実船試験の実機複合材料製プロペラ、および水槽試験用に複合材料を模擬したモデルプロペラを設計・製作した。水槽試験、実船試験結果より LST-FEM 法の妥当性を評価した。詳細な LST-FEM 法の評価は、3.4 節の水槽試験および 3.6 節の実船試験で述べることとし、本節では LST-FEM 法による複合材料製プロペラの設計手法を示す。なお、本設計手法では流体解析手法として LST を用いているが、数値流体解析（CFD）を用いても行うことができる。

3.3.1 概要

複合材料製プロペラを設計するに当たり、複合材料はプロペラに通常使用されているアルミ青銅鋳物に比べ弾性係数が低いため同荷重下でも変位が大きくなり、プロペラ作動中の形状が初期形状と異なるため、プロペラ性能が変化する。

そこで、プロペラ設計に作動中の変形を考慮して、設計点で最適形状（基本設計）になるような初期プロペラ形状を求めなければならない。

以下に複合材料製プロペラの設計手順を示す。

3.3.2 設計手順

<第 1 ステップ>

通常プロペラの設計に使用している揚力面理論(LST)により、作動時の最適プロペラ形状を設計する。ここで最適プロペラとは、以下の設計条件から求める通常のリジット型プロペラである。

設計条件：入力馬力 P 、入力回転数 n 、船速 V_s 、伴流係数 w 、スラスト減少係数 t 等

<第 2 ステップ>

<第 1 ステップ>で設計したプロペラのブレード上の圧力分布を LST（もしくは CFD（Computational Fluid Dynamics））から求める。図 3.3.2.1 が各半径位置での圧力分布である。

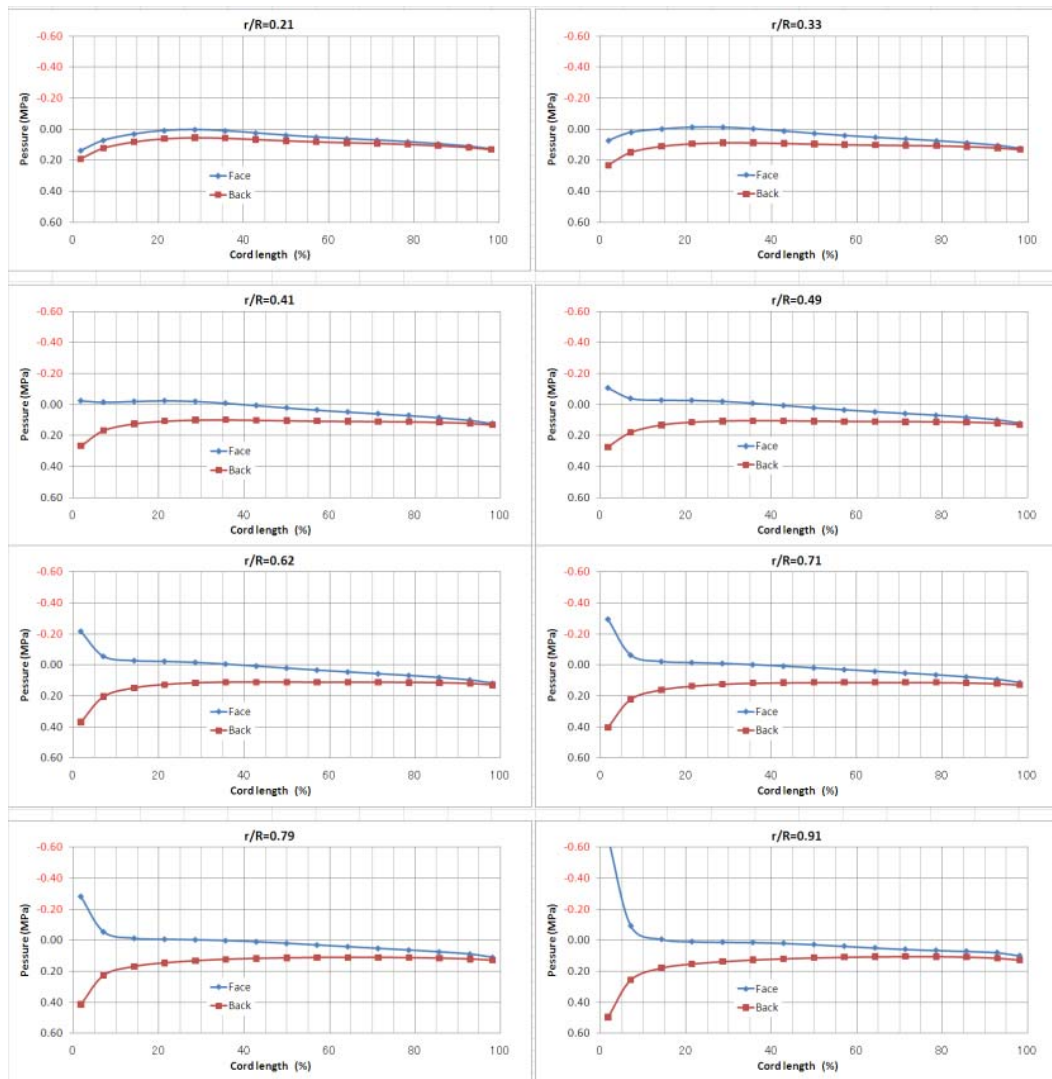


図 3.3.2.1 各半径位置 (r/R) の翼断面上の圧力分布

< 第 3 ステップ >

最適プロペラ形状に圧力分布およびプロペラ回転数を境界条件として、構造解析 (FEM) を行い応力および変位を求める。図 3.3.2.2 に構造解析結果として変位状況を示す。図は変位を 20 倍で表示している。この変形後の形状について、各 r/R のピッチを求める。

< 第 4 ステップ >

変形後の形状が最適プロペラ形状になるように、ピッチ量およびレーキ量を最適プロペラ形状から差し引いた作動前のプロペラ形状を推定する。ステップ 2 と同じ方法で、推定した形状での圧力分布を計算する。

< 第 5 ステップ >

ステップ 4 で求めた圧力分布およびプロペラ回転数を境界条件として、構造解析 (FEM) を行い応力および変位を求める。

ここで、変形後の形状が作動時の最適形状になるまで、< 第 4 ステップ > および < 第 5 ステップ > を何度か繰り返す。

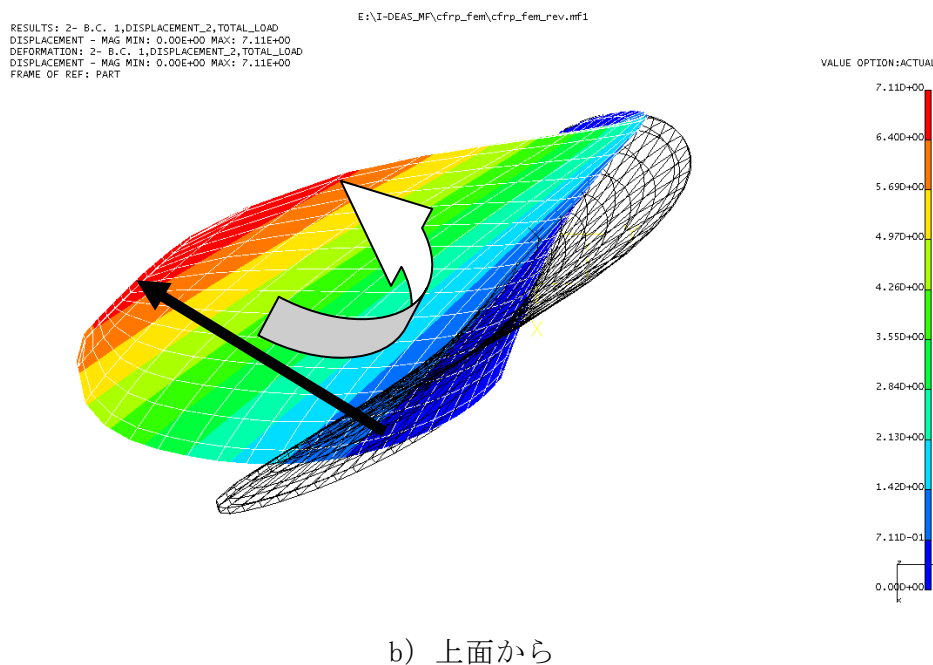
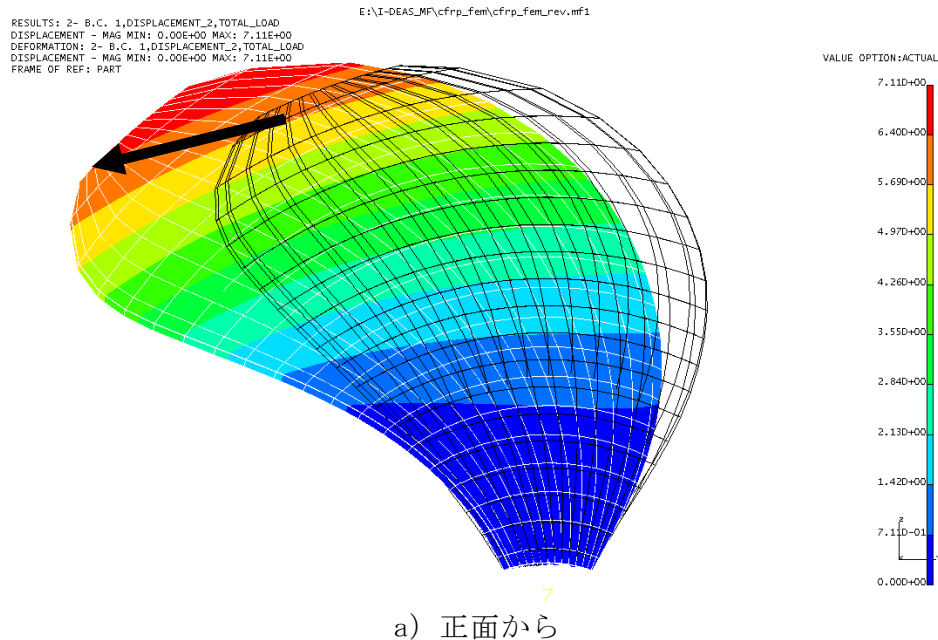


図 3.3.2.2 構造解析結果 (変位×20 倍)

LST-FEM 法により、水槽試験用のモデルプロペラおよび実船試験用の実機 CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) 製プロペラを設計、製作し、水槽試験および実船試験を行い評価・検討した。

3.4 モデルプロペラの設計、製作および水槽試験

LST-FEM 法の妥当性を把握するためにモデルプロペラを用いた水槽試験を行った。水槽試験は、曳航水槽およびキャビテーション水槽を使用した。曳航水槽ではプロペラのブレードのみが発生するスラストやトルクを計測してプロペラ単独効率を求めた。キャビテーション水槽では、ブレードの変位の計測、実機プロペラに相当したキャビテーションが発生する条件下でモデルプロペラを作動させたときのキャビテーションパターンおよび騒音を計測した。

3.4.1 モデルプロペラ

試験に用いたモデルプロペラの要目を表 3.4.1.1 に示す。またモデルプロペラの写真を図 3.4.1.~4 に示す。モデルプロペラの対象船は、実船試験で使用した 3.3G/T 遊魚船である。No. 1-5、1-6 および 1-7 の実機は複合材料製プロペラ、No. 1-8 の実機は NAB 製プロペラに相当する。本試験では No. 1-8 を基準として評価した。

モデルプロペラの形状について説明する。No. 1-8 と No. 1-5 は同形状となっている。No. 1-7 は No. 1-5 よりもスキューを大きくし、さらにプロペラの作動中の変形を考慮して、変形後の形状が最適となるようにしている。No. 1-6 は No. 1-7 よりも翼幅、翼厚を小さくしたもので、こちらも変形後の形状が最適となるようにしている。No. 1-6、1-7 は、加速時にピッチが減少し、巡航状態になるにつれてピッチが増加していくという考え方で設計されている。複合材料製プロペラのモデルプロペラは実機と同じ構造の組立式とした。組立式の概念図を図 3.4.1.5 に示す。

モデルプロペラに用いた材質として、NAB 製プロペラに対してはアルミ、複合材料製プロペラに対しては樹脂を用いた。NAB 製プロペラのモデルプロペラには、変形が無いものと考えて一般にアルミ材が使用される。一方、複合材料製プロペラは弾性変形を活用したプロペラであり、変形を考慮しなければならない。このときモデルプロペラに CFRP をそのまま用いると剛性が高くなり、モデルプロペラと実機の複合材料製プロペラの変形が合わない。そこで、それらが等しくなるようにモデルプロペラの材料特性を曲げ剛性の相似則で求め、樹脂を採用した。

表 3.4.1.1 モデルプロペラ要目

No.	1-5	1-6	1-7	1-8
モデル材質	樹脂製			耐食アルミ
翼数	3			3
直径	250			250
ピッチ比 0.7r	1.647	1.737	1.675	1.647
展開面積比	0.55	0.44	0.55	0.55
ボス比	0.2			0.2
スキュー角	20	35	35	20



图 3.4.1.1 No. 1-5 (左：前進面、右後進面)



图 3.4.1.2 No. 1-6 (左：前進面、右後進面)



图 3.4.1.3 No. 1-7 (左：前進面、右後進面)



图 3.4.1.4 No. 1-8 (左：前進面、右後進面)

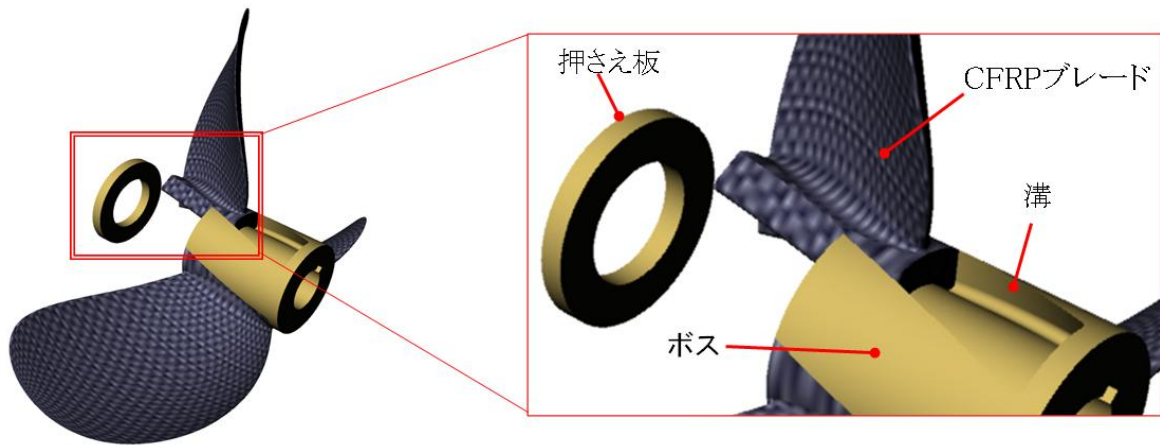


図 3.4.1.5 組立式プロペラの概要

3.4.2 単独性能試験

単独性能試験ではプロペラの単独性能を求めることができる。プロペラの単独性能とは、プロペラの前進係数 J に対する、プロペラに作用するスラストやトルクから求められるスラスト係数 K_T やトルク係数 K_Q 、さらにはプロペラ単独効率 η_o のことである。単独性能試験において必要な無次元数の定義や物理量を以下に示す。

$$\text{ケンプのレイノルズ数} \quad : \quad \text{RnK} = \frac{C_{0.7} \sqrt{V_A^2 + (0.7\pi nD)^2}}{\nu}$$

$$\text{前進係数} \quad : \quad J = \frac{V_A}{nD}$$

$$\text{スラスト係数} \quad : \quad K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$$

$$\text{トルク係数} \quad : \quad K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$$

$$\text{プロペラ単独効率} \quad : \quad \eta_o = \frac{J \cdot K_T}{2\pi K_Q}$$

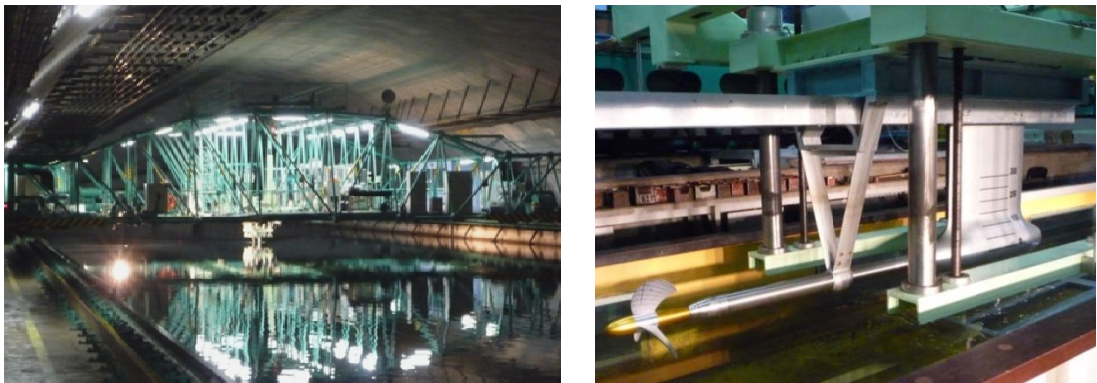
ここで、

- $C_{0.7}$: プロペラ半径×0.7位置での翼の幅[m]
- n : プロペラ回転数[rps]
- D : プロペラ直径[m]
- ν : 動粘度[m²/s]
- V_A : 前進速度 (プロペラへ流入する流速) [m/s]
ここで、 $V_A = (1-w) V_s$
- T : スラスト[N]
- Q : トルク[Nm]
- ρ : 密度[kg/m³]

1) 試験方法

試験は海上技術安全研究所殿所有の 400m 試験水槽にて行った。図 3.4.2.1 に試験水槽を示す。試験水槽には長手方向にレールが設置されており、図 3.4.2.1 (a) に示す水槽に架けられた台車 (曳航車) がそのレール上を指定の速度で移動する。曳航車にはモデルプロペラのスラストやトルクを計測するために、図 3.4.2.1 (b) に示す動力計が設置されている。試験時には水面下の指定の没水深度までプロペラ軸を降下する。

動力計にモデルプロペラを取り付けて没水し、任意のプロペラ回転数に設定して曳航車を走せる。曳航車の速度を変えることで J を変化させ、ある J におけるスラストおよびトルクを計測し、 K_T 、 K_Q を求める。



(a) 曳航車

(b) 動力計 (上昇時)

図 3.4.2.1 試験水槽

2) 計測結果

No. 1-5 ではレイノルズ数 (インペラ回転数) を上げていくと K_T 、 K_Q が増加しており、計画通りピッチが増大する方向に変化したものと推定できた。逆に、No. 1-6、1-7 についてはインペラ回転数を上げて行くと K_T 、 K_Q は減少し、ピッチが減少する方向に変形したことを確認でき、これも推定通りであった。

また No. 1-5 と No. 1-8 とを比較すると、樹脂製の 1-5 の方が K_T 、 K_Q が大きくなっていた。これは設計形状であるアルミ製プロペラ No. 1-8 の形状から、作動中に樹脂製の No. 1-5 が変形し、その結果 K_T 、 K_Q が増加する方向、すなわちピッチが増加する方向に変形し、推定通りであった。

次に η_0 について見てみる。表 3.4.2.1 に No. 1-8 の設計点の荷重度 K_T/J^2 における各プロペラの効率を記す。 $\Delta \eta_0$ は基準の No. 1-8 に対する η_0 の増減量である。No. 1-8 と No. 1-5 とを比べた際、効率に大きな違いはなかった。スキューを付けた No. 1-7 の効率は 2.91% の向上、さらに展開面積比を下げ、薄肉化した No. 1-6 では 3.74% の向上する結果が得られた。

表 3.4.2.1 荷重度一定における各プロペラ単独効率の比較 (1-8 設計点基準)

	1-5	1-6	1-7	1-8
η_0	0.691	0.717	0.711	0.691
$\Delta \eta_0$	0.00	3.74	2.91	基準

3.4.3 キャビテーション試験

キャビテーション試験とは、実機のプロペラに発生するキャビテーションパターンやそれに伴う振動等の現象のシミュレーションをするための試験である。キャビテーション試験では実機プロペラの任意の位置における静圧と蒸気圧との差圧とそ
の場での動圧との比（キャビテーション数 σ_n という）が、モデルプロペラの任意の
位置でも同じになるように、水槽内の圧力状態を調整して試験を行う。ここでキャ
ビテーション数の定義と必要な物理量を以下に示す。

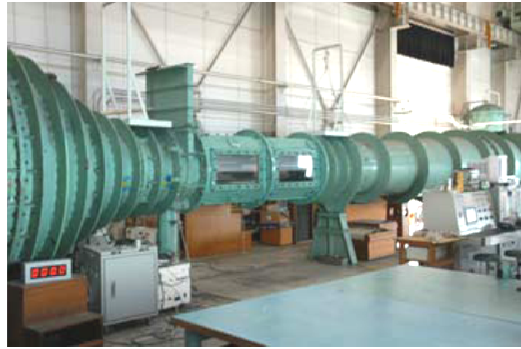
$$\text{キャビテーション数} \quad : \quad \sigma_n = \frac{P - P_v}{\frac{1}{2} \rho n^2 D^2}$$

ここで、 P : 任意の位置における静圧（=大気圧+水深×流体の密度）[N/m²]
 P_v : 流体の蒸気圧[N/m²]
 ρ : 流体の密度[kg/m³]
 n : プロペラ回転数[rps]
 D : プロペラ直径[m]

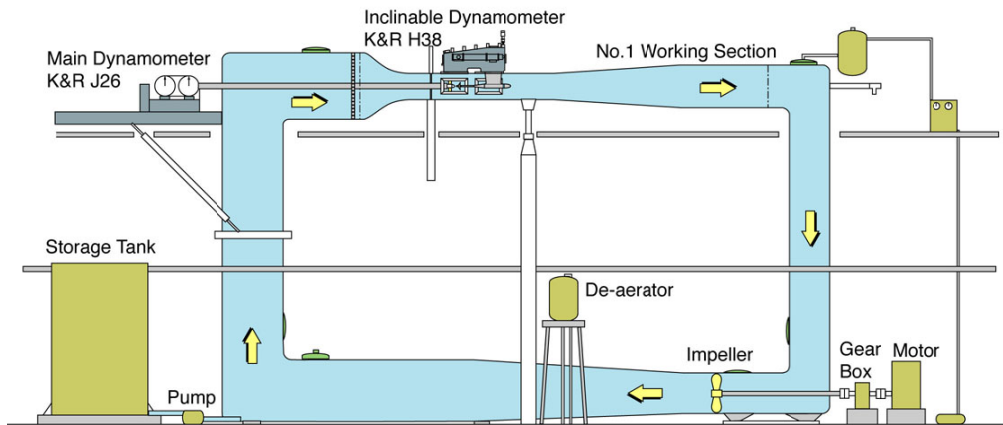
1) 試験方法

試験は海上技術安全研究所殿所有のキャビテーション水槽にて行った。図
3.4.3.1にキャビテーション水槽の外観（a）と全体図（b）を示す。水槽は閉空間
になっており、内部の圧力が調整できる。また水槽内に設置されたインペラによ
って、水は水槽内を回流しており、それによってモデルプロペラへ流入する流速
を調整できる。

図 3.4.3.2 に計測部の外観を示す。計測部は全方面にアクリル窓が取り付けら
れており、試験時のモデルプロペラの様子が高速度ビデオ、ストロボ撮影等によ
り確認できるようになっている。本研究で使用した動力計は、斜流中で動作する
プロペラのキャビテーション観察をするため斜流動力計を用いた。図 3.4.3.3(a)
に示された計測胴の上部に位置する装置が斜流動力計である。図 3.4.3.4 (b) に
示すように斜流中で確認する際は軸の先端（モデルプロペラを取り付けている側）
が上方に上がる。ただし、実船において斜流中で航行する際、プロペラ軸の影響
を受けるため、本試験でそれを再現するため、キャップの先端を伸ばし軸状にし
た。これにより、動力計の軸を傾けた際、プロペラ軸の影響を考慮した試験が可
能となる。



(a) 外観図



(b) 全体図

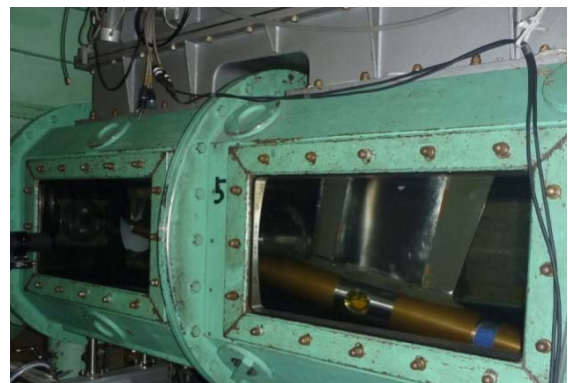
図 3.4.3.1 キャビテーション水槽



図 3.4.3.2 キャビテーション水槽計測部



(a) プロペラ軸水平時



(b) プロペラ軸傾斜時

図 3.4.3.3 斜流動力計

2) 計測結果

a) キャビテーションパターン

図 3.4.3.4 (a) ~ (d) に、キャビテーションパターンを示す。いずれのモデルプロペラにおいても、翼先端から流れていくキャビテーション（チップボルテックスキャビテーション）が見られる。また、前縁側から発生したシート状のキャビテーション（シートキャビテーション）によって翼面が覆われている。

シートキャビテーションの範囲は No. 1-5 が最も広く 0.4R まで広がっている。同形状の No. 1-8 よりもその範囲は広く、若干のピッチ増加の影響が考えられる。No. 1-7 について、キャビテーションの発生範囲は 0.7R 程度までに留まっており、その発生範囲は減少した。No. 1-6 は展開面積比を小さくし、翼面の荷重条件が厳しくなったため、キャビテーションの発生範囲は広がり、前縁 0.6R 位置から発生し、後縁近くで最大 0.42R まで広がったと考えられる。

次に斜流中におけるキャビテーションパターンをそれぞれ図 3.4.3.5 に示す。いずれのモデルプロペラにおいても全周に渡ってチップボルテックスキャビテーションが発生している。



(a) No. 1-5

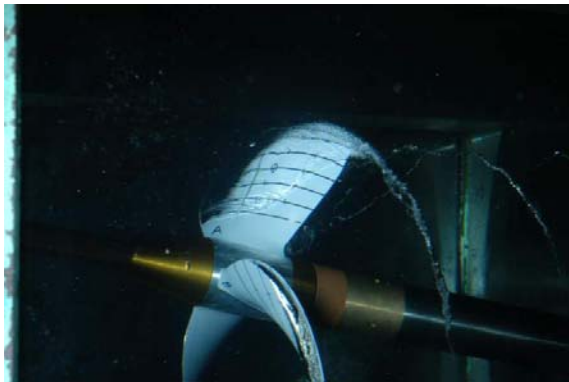
(b) No. 1-6



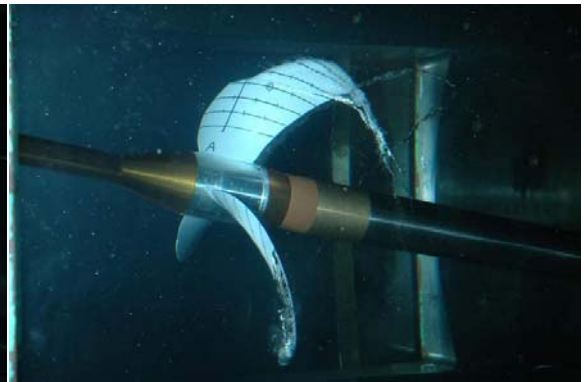
(c) No. 1-7

(d) No. 1-8

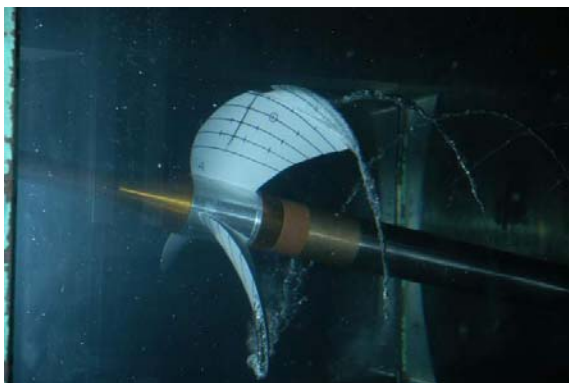
図 3.4.3.4 キャビテーションパターン（水平流）



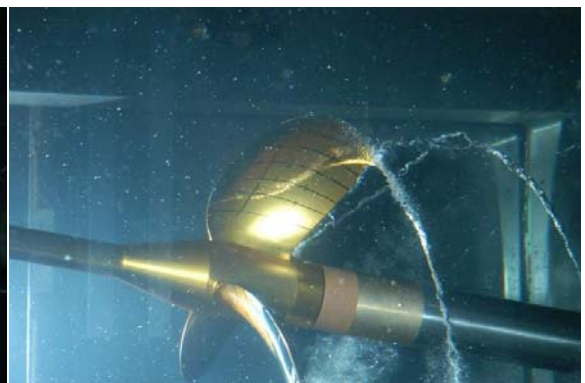
(a) No. 1-5



(b) No. 1-6



(c) No. 1-7



(d) No. 1-8

図 3.4.3.5 キャビテーションパターン (斜流中)

3.4.4 ブレード変位量および連成計算との比較

図 3.4.4.1 に各 J におけるモデルプロペラの変位状況の画像を示す。画像から分かるように、複合材料を模擬したブレードは大きく変形していることが確認できる。

水槽試験および構造-流体連成計算から得られた結果を比較した。その一例を図 3.4.4.2 に示す。設計点の J ではいずれのモデルプロペラにおいても計測値との差は 0.5mm 以下と比較的近い値となっていた。しかし、J の値が低くなるに従い計測値との差は増加する傾向にあり最大で約 2.2mm の差が生じていた。

前後縁で変形前後の形状を比較した場合、後縁がより計測値と一致している傾向にある。これは、後縁側がレーザ変位計に近いために誤差が生じたものと推測する。

いずれのプロペラにおいても計算値より計測値の方が過大な値となっている。この計算値からの誤差が生じる要因としては以下の様なことが考えられる。

- 1) 流体解析値に用いた圧力分布が実際の圧力分布と異なっている
- 2) レーザ変位計の計測値の読み取り精度による誤差等

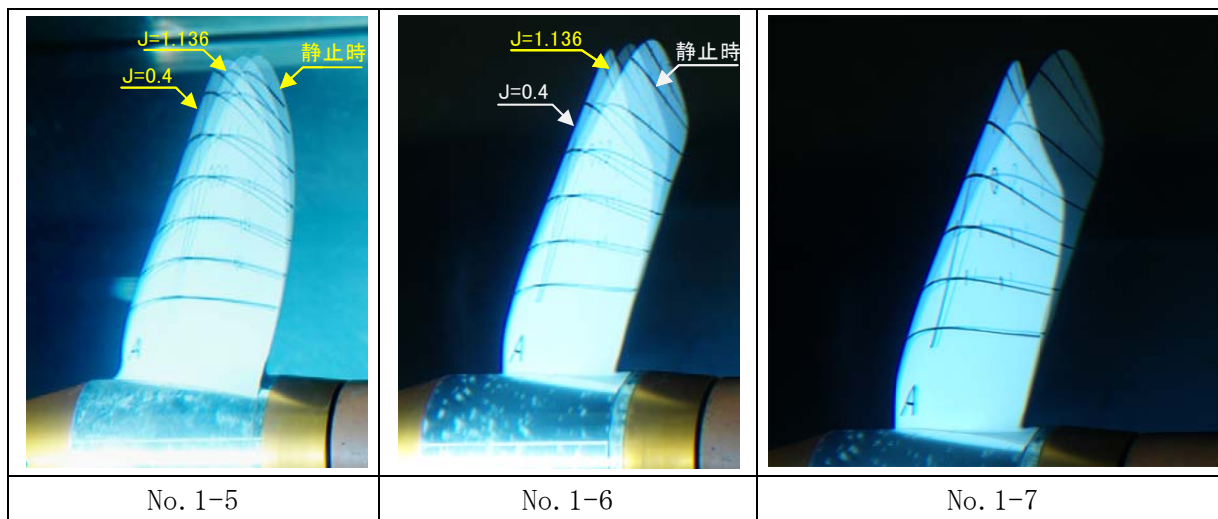


図 3.4.4.1 水槽試験動作時のプロペラ翼形状の変化

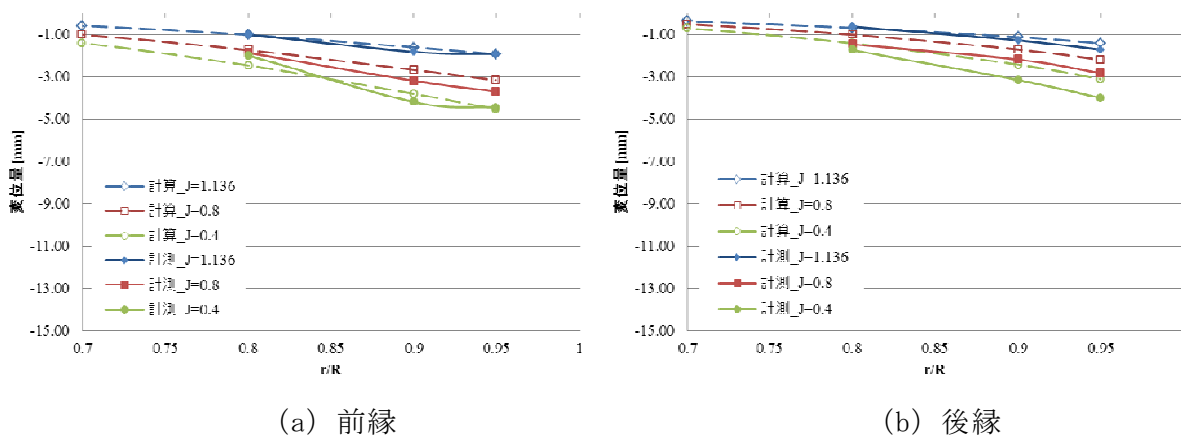


図 3.4.4.2 No. 1-5 の変形

3.4.5 まとめ

モデルプロペラを用いた水槽試験によって複合材料製プロペラの特徴について確認することができた。単独性能試験では複合材料製プロペラに及ぼす回転数の影響が、キャビテーション試験ではキャビテーションパターンや翼の変形していく傾向を把握することができた。また、変形を考慮した設計において、変形の傾向は計画したように変形することが把握できた。

3.5 プロペラ材料を複合材料製にすることによる高効率の確認試験

3.2 節で示したように複合材料の方がプロペラ従来金属の NAB より疲労強度が優位なため、プロペラの薄肉化および小翼面積化が図れ、プロペラ効率アップが期待できる。

ここでは、金属製のモデルプロペラと複合材料を模擬した樹脂のモデルプロペラについて検討を行う。

3.5.1 金属製モデルプロペラ

対象船としては世界的に多く運航されているハンディバルクの平均的な 2~3 万 DWT を想定した。

試験中のブレード変形による影響を省くためにモデルプロペラの材質は、一般的にモデルテストの使用される耐食アルミニウム材料とした。モデルプロペラは、表 3.5.1.1 に示した通常ブレード (No. 1-1)、小翼面積 (20%減) -標準肉厚のプロペラ (No. 1-2)、標準翼面積-薄翼肉 (50%減) (No. 1-3)、小翼面積 (20%減) -薄翼肉 (50%減) (No. 1-4) の 4 種類を用意した。それらの写真を図 3.5.1.1~図 3.5.1.4 に No. 1-1、No. 1-2、No. 1-3 および No. 1-4 をそれぞれ示す。これらのプロペラについて、プロペラ単独性能およびキャビテーション試験を行った。

プロペラ単独性能試験結果として、設計荷重度についてこのときのプロペラ性能を表 3.5.1.2 に示す。この結果から、小翼面積化および薄翼肉化することでプロペラ効率が最大で 2.4%程度上がることを確認した。性能アップは、薄翼化により 0.11~0.64%、小翼面積化により 1.78~2.32%で小翼面積による効果の方が高かった。

次に、キャビテーション試験を行った結果、No. 1-2 の小翼面積の方が、No. 1-1 の通常プロペラに比べキャビテーションの発生が多くなっていた。これは、小翼面積の方がプロペラに作用する荷重度が面積低下により増加したためキャビテーションが発生し易くなったからである。小翼面積で肉厚を変更した結果、若干薄肉の No. 1-4の方がキャビテーションは少ないように観られるが、大きな差は観られなかった。

以上の試験結果から薄翼肉化よりも小翼面積化の方が、プロペラ効率に影響を与えている割合が大きいことが分かった。

表 3.5.1.1 水槽試験用モデルプロペラ要目表 (薄肉、小翼面積の効果確認)

No.	1-1	1-2	1-3	1-4
翼数 Z	4			
直径 D	250mm			
ピッチ比	0.711			
展開面積比	0.52	0.42	0.52	0.42
翼 厚	1t	1t	0.5t	0.5t
材 質	耐食アルミ	耐食アルミ	耐食アルミ	耐食アルミ
形 状	面積：標準 翼厚：標準	面積：20%減 翼厚：標準	面積：標準 翼厚：50%減	面積：20%減 翼厚：50%減



図 3.5.1.1 No. 1-1



図 3.5.1.2 No. 1-2



図 3.5.1.3 No. 1-3



図 3.5.1.4 No. 1-4

表 3.5.1.2 プロペラ効率 ($Kt/J^2=同一$)

No.	1-1	1-2	1-3	1-4
η_o	0.5346	0.5441	0.5352	0.5476
$\Delta \eta_o / \eta_o$ (%)	-	1.78	0.11	2.43
小翼面積効果 (%)	-	1.78	-	2.32
薄翼効果 (%)	-	-	0.11	0.64

3.5.2 樹脂製モデルプロペラ

3.4 節で実施した水槽試験において、基準プロペラ（金属製）が No. 1-8 であり、複合材料化を模擬したプロペラは No. 1-6 および No. 1-7 である。特に、No. 1-6 は No. 1-7 を小翼面積-薄肉化を図ったものである。

これら 3 つのモデルプロペラについて、単独性能試験結果を比較した表が表 3.5.2.1 である。基準プロペラの No. 1-8 に比べ、複合材料を模擬した No. 1-6 および 1-7 の方が効率がそれぞれ 3.7% および 2.9% 向上した。

表 3.5.2.1 プロペラ性能

No.	1-8	1-7	1-6
ブレード材質	アルミニウム	樹脂	樹脂
ブレード形状	標準形状	変形考慮	1-7を薄肉 小翼面積
η_0	0.691	0.711	0.717
$\Delta \eta_0 / \eta_0$ (%)	基準	2.91	3.74

3.5.3 まとめ

ハンディバルク船および小型遊漁船向けモデルプロペラについて水槽試験を行い、薄翼化および小翼面積化によるプロペラ性能改善が期待できることを確認した。

ハンディバルク船に関しては、薄翼化および小翼面積化することでプロペラ効率が2.3%向上した。特にプロペラ効率に影響を与えたのは、小翼面積化であった。

小型遊漁船に関して、複合材料を想定して変形を考慮して設計したプロペラは、2.9%効率が向上し、さらに薄翼化および小翼面積化することで3.7%向上した。

ただし、両者について小翼面積化することでキャビテーションリスクが高くなるため最適な面積にする必要がある。

3.6 複合材料製プロペラの実船試験

本研究開発では、複合材料を用いて実際に複合材料製プロペラを製作し、実船試験を行った。実船試験は3.3G/T遊漁船を使用した。

プロペラは、複合材料製プロペラを3種類、従来金属のNAB製プロペラを1種類製作した。全てのプロペラについて、船速、プロペラ回転数、軸トルクおよび振動を計測し、比較検討した。また、複合材料製プロペラについては、実船試験前後に非破壊検査としてX線撮影を行い内部欠陥の確認を行った。

3.6.1 実船試験用プロペラ

試験に用いたプロペラの要目を表3.6.1.1に示す。表中に水槽試験で用いたプロペラに対応するモデルプロペラNoも示す。

実船試験用プロペラの外観を図3.6.1.1~4に示す。図3.6.1.1は平成21年度にプリプレグ・オートクレーブ成形した21PAC、図3.6.1.2は平成22年度にVaRTM成形した22VaRTM、図3.6.1.3に平成23年度にVaRTM成形した23VaRTM、および図3.6.1.4に平成22年度に従来材料のCAC703で製造したもので平成21年度に製作した21PACと同形状であることから21NABと呼ぶ。

複合材料製プロペラは組立式で、プロペラのブレードの材質がCFRP、ボス材質がNABとなっている。

表 3.6.1.1 実船試験用プロペラ要目

No.	21PAC	22VaRTM	23VaRTM	21NAB
モデルプロペラ No.	1-5	1-7	1-6	1-8
翼 数	3			
直径 (mm)	680			
ピッチ比 0.7R	1.647	1.675	1.737	1.647
展開面積比	0.55		0.44	0.55
製 造 法	プリプレグ・オートクレーブ	VaRTM		鋳物
備 考		変形考慮設計	22VaRTM の小翼 面積&薄肉	21PAC と同形状



図 3.6.1.1 21PAC (プリプレグ+オートクレーブ成形、形状 : No. 1-5)



図 3.6.1.2 22VaRTM (VaRTM 成形、形状 : No. 1-7)



図 3.6.1.3 23VaTM (VaTM 成形、形状 : No. 1-6)



図 3.6.1.4 21NAB (形状 : No. 1.-8)

3.6.2 実船試験

実船試験は岡山県瀬戸内市牛窓沖にて行った。海域を図 3.6.2.1 に示す。風向、潮流等の影響によるばらつきを考慮し、各試験項目について往路・復路を計測した。

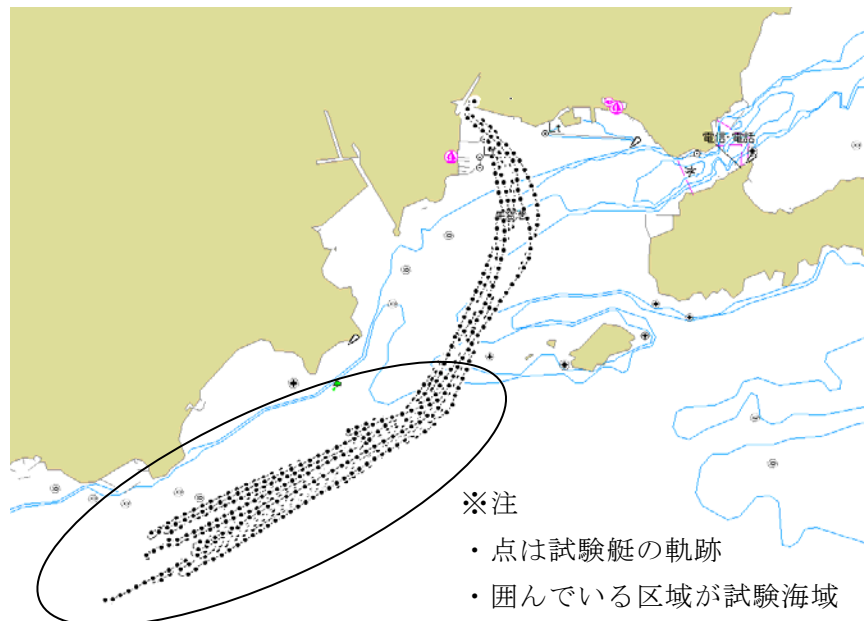


図 3.6.2.1 試験海域 (岡山県瀬戸内市牛窓沖)

3.6.3 試験艇

試験艇の詳細を表 3.6.3.1 に、図 3.6.3.1 に外観を示す。

表 3.6.3.1 試験艇仕様

型 式	DE35C
全長×全幅×全深	10.50m×2.75m×1.4m (登録 9.45m×2.44m×0.74m)
総 ト ン 数	3.3G/T
エンジン型式	6CH-ST
エンジン出力	221kW/2600rpm (i=2.58)
プロペラ回転数	1008rpm
船 速	約 26 ノット
型 式	DE35C



図 3.6.3.1 試験艇外観

3.6.4 計測項目

a) 船速

試験時に船に搭載されている速度表示計の値を記録した。合わせて GPS を用いて試験時の船の軌跡を連続的に記録して船速を算出した。

b) 軸トルク

プロペラ軸にひずみゲージを貼り付けて（図 3.6.4.1 参照）、そのひずみ量を FM テレメータ受信アンテナ（図 3.6.4.2 参照）を介してせん断ひずみ波形をデータロガーに記録した。

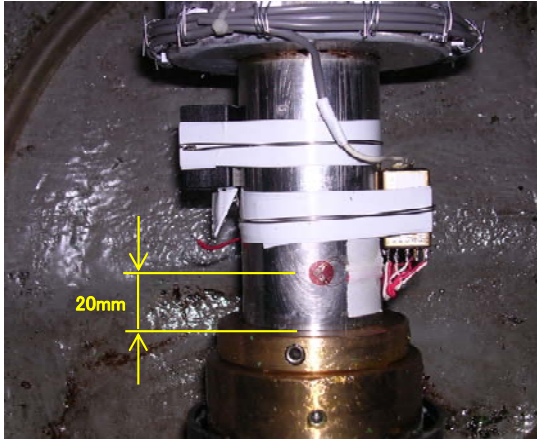


図 3.6.4.1 ひずみゲージ取付状況

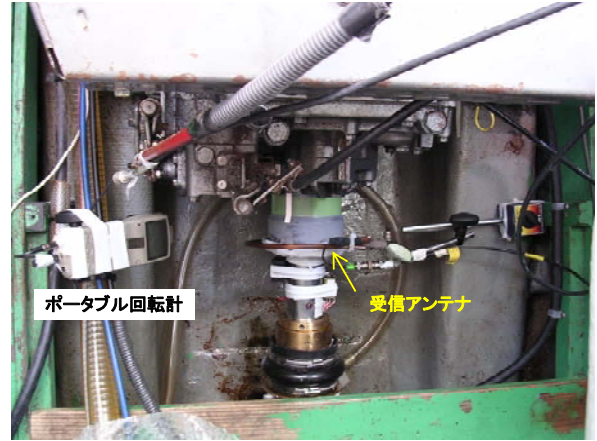


図 3.6.4.2 計測器設置状況

c) プロペラ軸回転数

プロペラ軸カップリング部へ反射テープを貼り付け、ポータブル回転計（図 3.6.4.2 参照）により回転パルスを検出し、それを F/V コンバータを用いて電圧値に変換し、データロガーに記録した。

d) 振動計測

試験艇の 4 箇所に圧電型加速度センサ（図 3.6.4.3 参照）を取り付け、センサアンプを介してその出力をデータロガーへ記録した。また計測位置を図 3.6.4.4 に示す。

- A：船体デッキ上の船尾部
- B：プロペラ直上の船底部
- C：舵取り機直上
- D：船体デッキ上の船首部



図 3.6.4.3 圧電型加速センサ

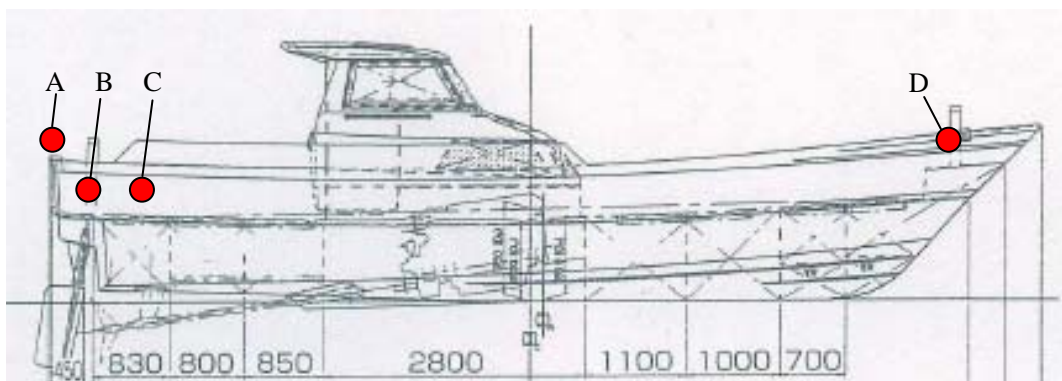


図 3.6.4.4 振動計測位置

3.6.5 試験条件

a) 航走試験

プロペラ軸回転が 760rpm、890rpm および最大回転数にて、試験海域を往復した。このとき、往路、復路にてデータを収集した。

b) 加速試験

合図とともに停船状態からクラッチをつなぎ一気にスロットルを全開にし、最大船速になるまで計測を行った。

3.6.6 計測結果

a) 船速、プロペラ回転数および軸馬力

航走試験における計測結果を図 3.6.6.1 に示す。横軸に船速、縦軸にエンジン馬力とプロペラ軸回転数を示す。21NAB と 21PAC は同形状であり、21PAC のピッチ変化はほとんど無いため、船速に対するプロペラ回転数および軸馬力共にほぼ同じ曲線上にあるが、22VaRTM と 23VaRTM とは異なっている。両者の VaRTM は到達船速およびプロペラ回転数共に高くなっている。

22VaRTM と 23VaRTM を比較すると、船速に対する軸馬力はほぼ同じ曲線であるが、プロペラ回転数が異なっている。23VaRTM の方がプロペラ回転数は高いが、船速は遅いことから、船用業界の俗語でピッチが軽かったものと考えられる。23VaRTM は 22VaRTM より展開面積が小さくなっており作動時のピッチを大きくする必要があったが、水槽試験結果との比較を考え、実機は試験と同じ形状で製作し実船試験を行った。予想した結果となっていた。

ここで、性能比較するために船速一定で軸馬力を算出した。図 3.6.6.2 に船速 25 ノット一定での軸馬力を示す。22&23VaRTM は、21NAB&PAC より 5% 軸馬力が減少し、単純に効率は 5% アップしたことになる。

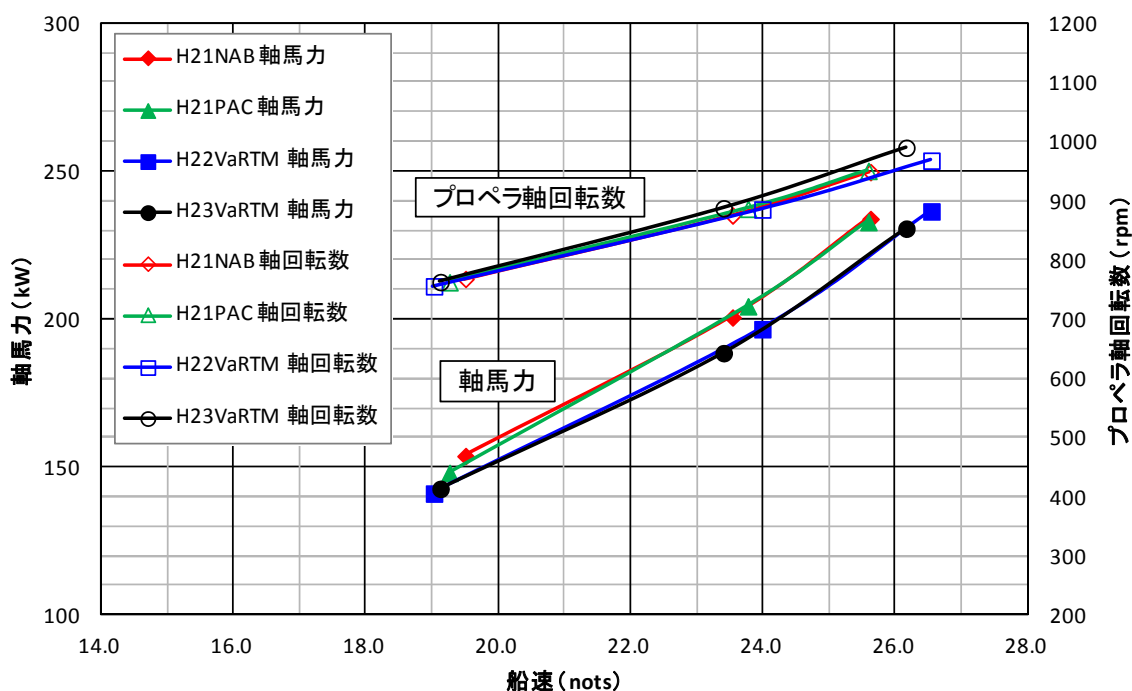


図 3.6.6.1 航走試験結果

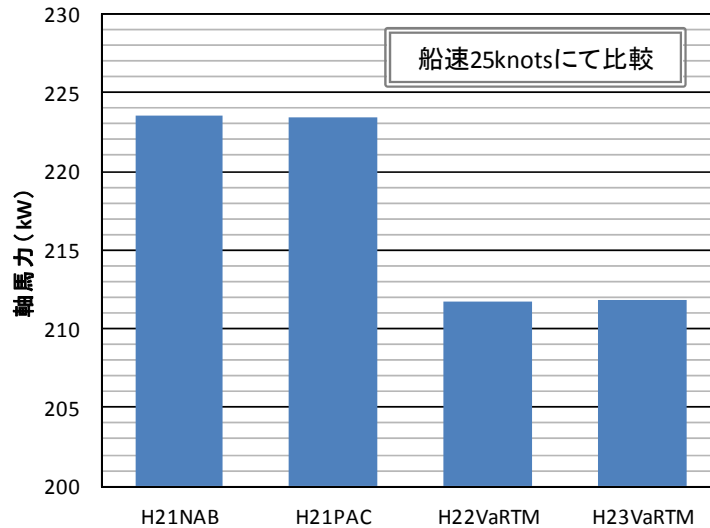


図 3. 6. 6. 2 25 ノットにおける馬力の比較

b) 振動

図 3. 6. 6. 3 (a)～(c)に定常航走時の振動振幅を示す。振動振幅は測定した加速度振幅から周波数分析を行い、オーバーオール値を平均振動振幅値として求めた。加速度計 B の平均振動振幅値が比較的高く、ここを基準に考察する。3 つのプロペラ回転条件で変形を考慮した 2 つの 22VaRTM および 23VaRTM が、21NAB および 21PAC よりも振幅値が小さいことが分かる。全てのプロペラについて、プロペラ回転数が大きくなるにしたがい振幅も大きくなっているが、23VaRTM はその変化が少なく安定している。

全般的に複合材料製プロペラは、低速時で振動が小さくなり、船速が上がってくると船体と波との衝撃が大きくなり、材料による違いは分からなくなる傾向にあった。

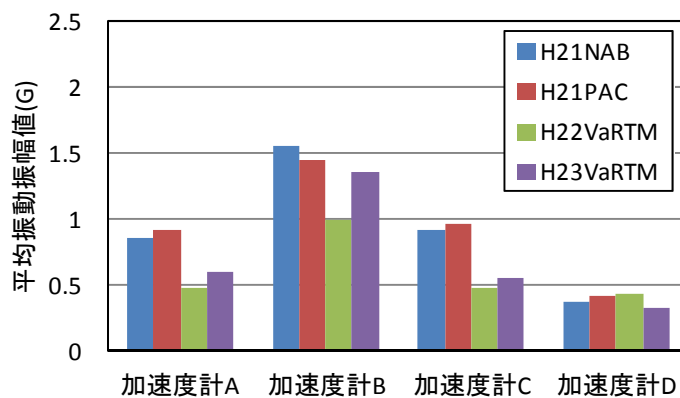


図 3. 6. 6. 3 (a) 航走時の振動振幅 (プロペラ回転数 760rpm)

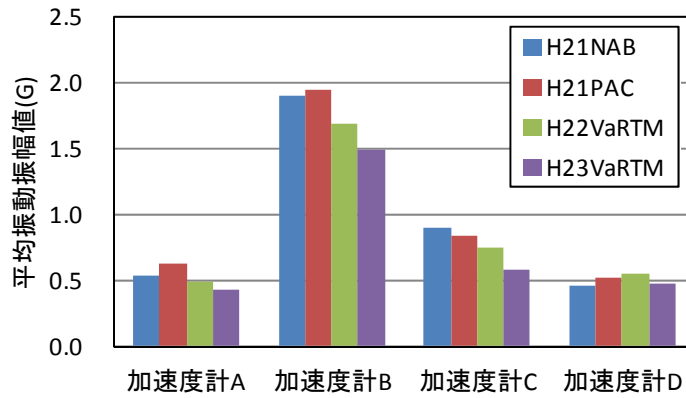


図 3.6.6.3 (b) 航走時の振動振幅 (プロペラ回転数 890rpm)

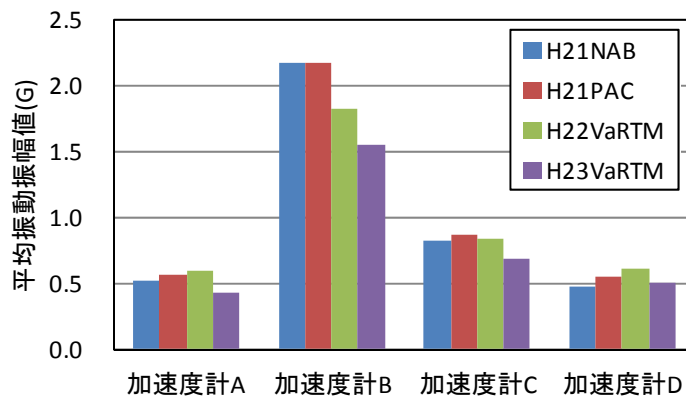


図 3.6.6.3 (c) 航走時の振動振幅 (最大回転数)

c) 加速試験

複合材料製プロペラの特徴である変形を利用して加速性を上げるよう 22VaRTM および 23VaRTM は設計している。

図 3.6.6.4 に各プロペラの加速時間に対する船速を示す。潮流や風によって船は移動しておりそれを無視するため、ここで船速はスタート時の船速をゼロとしている。図から加速性を向上させるように設計した 22VaRTM および 23VaRTM の複合材料製プロペラは、計画通り加速性が向上している。

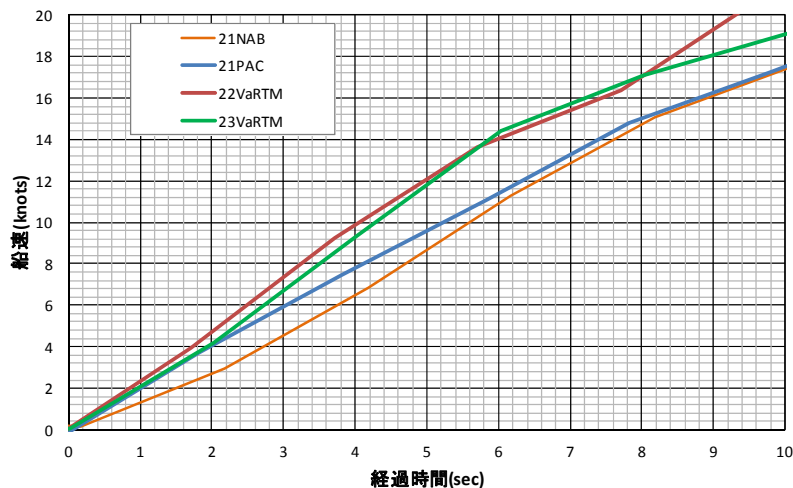


図 3.6.6.4 加速試験

3.6.7 水槽試験との比較

実船試験と水槽試験結果との比較を行う。実船試験で計測した軸トルクおよび軸回転数からトルク係数 K_Q を算出し、水槽試験で得た K_Q と比較する。図 3.6.7.1 に前進係数 J と K_Q との関係を示す。ここで水槽試験の K_Q は実船と同条件としたキャビテーション数である。

図から、実船試験と水槽試験のトルク係数の値は類似しており、水槽試験でキャビテーション発生を確認しており、実船においてもキャビテーションが発生しているものと考えられる。また、実船試験結果において、全てのプロペラについて最大回転数ではトルク係数が大きく低下しており、キャビテーションの発生量がかなり増加したものと考えられる。定量的には、22VaRTM が水槽試験値に合致している。一方、23VaRTM の実船試験値は、水槽試験値と大きく異なっており、キャビテーション発生がかなり激しかったものと考えられる。これは、スラストブレークダウンが激しかったことを表わしており、翼断面積が小さ過ぎたものと考えられる。

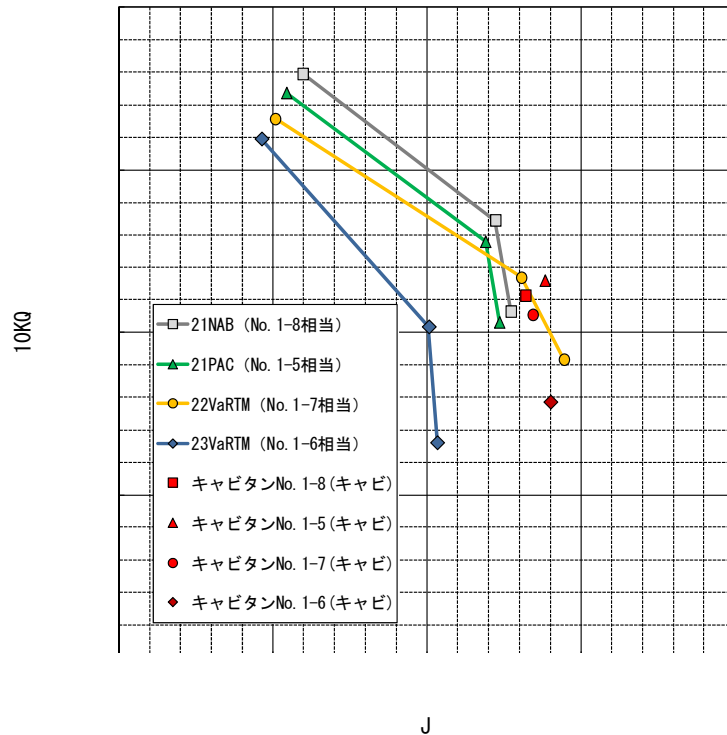


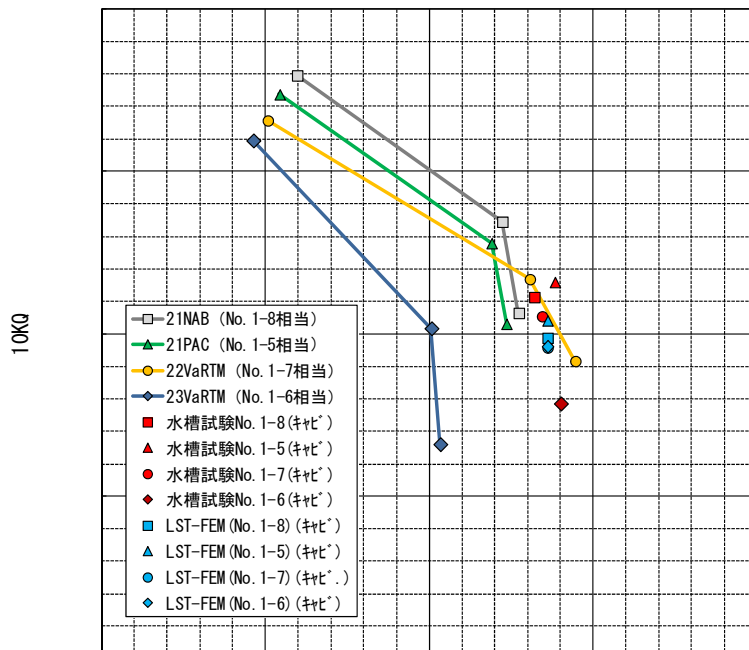
図 3.6.7.1 実船試験と水槽試験との比較

3.6.8 LST-FEM 法による推定性能との比較

図 3.6.7.1 の実船結果に LST-FEM 法の結果を追記したものを図 3.6.8.1 に示す。ここで、LST-FEM 法の値はキャビテーションを考慮した計算を行っている。

LST-FEM 法と水槽試験の値は類似していることが分かる。ただし、23VaRTM については、異なっていた。これは水槽試験でも示されたようにキャビテーション発生が多いことから、連成計算が追従できなかつたものと考えられる。

LST-FEM 法と実船試験では、キャビテーションの激しい 23VaRTM を除けば、類似した傾向を示しており、LST-FEM 法によりプロペラ設計は可能であると考えられる。



J

図 3.6.8.1 実船試験と連成計算 (LST-FEM) との比較

3.6.9 まとめ

実船試験によって実機サイズの複合材料製プロペラの特徴やその実現可能性について確認することができた。トルクや振動、船速の計測により、低速時の低振動や高い加速性能といった複合材料製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。

一方、対象船はシャフトレーキが付いておりプロペラのルート部にエロージョンが発生し易い船体である。本プロペラにおいてもルートエロージョンの発生は観察されたが、ある程度進行すると止まった。耐エロージョン材をコーティングや配置することで、エロージョン耐性が向上した。

実船試験前後に複合材料製プロペラをX線撮影したが、特に内部欠陥は観察されなかった。強度的に問題無いことが確認できた。

LST-FEM法の連成計算によって設計した複合材料製プロペラは、推定値と実船試験値と類似した結果を示した。しかし、キャビテーションの発生量が極端に増加すると推定圧力が実際と異なり、推定値と実船試験値は大きく違っていた。本研究で開発したLST-FEM法はキャビテーションの激しい条件では計算が不安定であるが、一般商船においては十分設計可能であると期待できる。

3.7 製造コスト

本研究開発で実船試験用として、プリプレグ・オートクレーブ製の PAC プロペラ、VaRTM 製の VaRTM プロペラ、従来材料の NAB 製プロペラを製作した。これらのプロペラに関して製造コストを算出し、比較検討を行った。さらに、現在考えられるコストダウンを図った製造コストも比較検討した。ただし、製造コストには設計費や間接費等を含んでいない。

これまで製作したプロペラの製造コストの比較を表 3.7.1 に示す。NAB 製プロペラの製造コストを 100 として表わしている。両者の CFRP の製造コスト合計は、従来の金属製 NAB に比べ PAC が 6.2 倍、VaRTM が 4 倍となっており、CFRP 製の方がコスト高であることが分かる。CFRP 製で一番コストの高いのは成形費である。先ず、ブレードの積層シートが多数あることによる作業工数の増加が挙げられる。次に、成形型の製作費も高くなっており、PAC はオートクレーブ成形時の熱影響を考慮して成形型も CFRP 製で製作しており高価になっている。VaRTM は成形型を石膏で製作しているため PAC より安価に抑えられているが、翼の機械加工が必要で PAC より高くなっている。

コストダウンは、VaRTM 法を採用し、成形型を簡略化し、成形の積層手法をシステム化し、翼の機械加工を無くすことで、さらに製作個数を増やし材料歩留まりを良くし型償却費を下げることで可能と考える。

上記のプロペラを一般的に販売することを念頭に製作した場合の製造コストを表 3.7.2 に示す。製作個数を 200 個とし、1 個の製作造コストを推定した。NAB は量産化によるコストダウンは余り期待できず、その理由は成形型を一つずつ成形するためである。一方、CFRP 製は、成形方法を工夫し、VaRTM 成形により製造コストは NAB 製よりも製造コストは 21%程度下がる可能性がある。

今後、銅の高騰に対して、カーボン繊維の価格が各分野での使用量の増加により下がり、さらに製造コストに差ができるものと期待できる。

表 3.7.1 実船試験用プロペラの製造コスト比較 (直径 680mm)

費 目	CFRP 製		金属製
	PAC	VaRTM	NAB
材 料 費	51	55	8
成 形 費	530	270	13
機械・仕上加工費	21	57	61
そ の 他	18	18	18
合 計	620	400	100

表 3.7.2 コストダウンした製造コスト比較 (直径 680mm)

費 目	CFRP 製		金属製
	PAC	VaRTM	NAB
材 料 費	20	17	8
成 形 費	46	20	13
機械・仕上加工費	20	24	61
そ の 他	18	18	18
合 計	104	79	100

4. 事業成果および課題

4.1 船用プロペラに適応する複合材料

各種 CFRP について、機械的性質を求める材料試験を実施し、プロペラ材料である NAB (CAC703) と同等以上の強度を有していることが分かった。特に、3%NaCl 水に浸漬した状態での疲労試験において、CFRP は NAB の 4 倍以上であることが分かった。CFRP をプロペラ材料として使用することは強度的に十分であることが分かった。

一方、キャビテーション・エロージョン試験を行った結果、複合材料は NAB に比べエロージョン耐性が低いことが分かった。アラミド繊維系を CFRP 表層に配置することでエロージョン耐性を上げられることが分かった。また、フィラー材の効果も観察できた。

4.2 複合材料における構造解析手法の確立および流体解析との連成計算の検討

水槽試験用に複合材料を模擬したモデルプロペラおよび実船試験の実機 CFRP 製プロペラの設計・製作を構造-流体連成計算を用い妥当性を評価した。

水槽試験において、連成計算から算出した変位の計算値と計測値との傾向は類似していた。しかし、定量的には一致をしていなかった。原因として、ブレード変位の計測誤差によるもの、構造解析の荷重条件となる理論計算で算出した圧力分布が実際と異なっていることが挙げられる。

実船試験においては、加速性能の改善を考慮して連成計算方法で CFRP プロペラを設計・製作し、巡航時の効率アップおよび加速性の向上を確認することができた。しかし、トルクに関して設計値と実測値に違いが見られた。この原因として、船体、ブラケットや舵等の影響でプロペラへの流入が複雑になり推定した荷重条件が異なったこと、実機でのキャビテーション発生状態が水槽試験よりも激しかったのではないかと推定される。

しかし、本研究で開発した連成計算法によって、弾性変形する CFRP 製プロペラの設計が概ね行えることを確認できた。

4.3 複合材料製プロペラの実船試験

実船試験用のプロペラとしてプリプレグ・オートクレーブ成形法を用いた PAC プロペラを 1 種類、PAC プロペラと同形状の NAB 製プロペラを 1 種類、VaRTM 成形法を用いブレード変形を考慮した 2 種類のプロペラを設計・製作した。

実船試験を通してトルクや振動、船速の計測を行い、低速時の低振動や高い加速性能といった複合材料製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。

一方、試験艇のように軸レーキが付いた船特有のプロペラのルートエロージョンの発生が確認された。NAB と同様にエロージョンはある深さまで進行すると収束する傾向にある。

4.4 高効率化

プロペラ材質を従来の NAB から CFRP に変更した場合、強度が高いため薄肉化および小翼面積化が図れ、プロペラ効率アップが期待できる。これを確認するために水槽試験を実施した。

対象船としては、世界的に多く運航されているハンディバルク船、実船試験で使用する 3.3G/T 遊漁船の 2 種類とした。

ハンディバルク船のモデルプロペラは、翼厚および翼面積の影響を確認するために 4 種類のアルミニウム製を用意した。薄肉化および小翼面積化することでプロペラ効率が 2.4%の向上が得られた。特にプロペラ効率に影響を与えたのは、小翼面積化であった。

遊漁船のモデルプロペラは、基準モデルプロペラをアルミニウム製とし 1 種類、変形を考慮した樹脂製のモデルプロペラを 3 種類用意した。複合材料を想定して変形を考慮して設計したプロペラは、2.9%効率が向上し、さらに薄肉化および小翼面積化することで 3.7%向上した。

以上から、複合材料使用による変形を考慮した翼輪郭とブレード薄肉化および小翼面積化することで効率が 3%以上向上し、目標を達成できた。

4.5 コストダウン

実船試験用に従来金属の NAB 製プロペラ、プリプレグ・オートクレーブ成形法および VaRTM 法で CFRP 製プロペラを製作した。CFRP 製プロペラの製造コストは、NAB 製に比べプリプレグ・オートクレーブ成形で 6.2 倍、VaRTM で 4 倍とかなり高額となった。

CFRP 製プロペラの製造コストを下げるためには、VaRTM 法を採用し、成形型を簡略化し、成形の積層手法をシステム化し、翼の機械加工を無くすこと、さらに製作個数を増やし材料歩留まりを良くし型償却費を下げることである。

製作個数を 200 個として試算すると、VaRTM 成形の CFRP 製プロペラは NAB 製よりも製造コストが 21%程度下がる。今後、銅の高騰に対してカーボン繊維の価格が下がると推定され、材料価格に差が生まれ、さらに製造コストがダウンするものと期待できる。



「この報告書は BOAT RACE の交付金による日本財団の助成金を受けて作成しました」

(社)日本船用工業会

〒105-0001

東京都港区虎ノ門一丁目13番3号(虎ノ門東洋共同ビル)

電話：03-3502-2041 FAX:03-3591-2206

<http://www.jsmea.or.jp>