

TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

電気モータ推進システムにおけるプロペラ周囲気泡
による負荷変動のセンシングと動特性評価

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2018-12-18 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 大出, 剛 メールアドレス: 所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/1651

博士学位論文

電気モータ推進システムにおけるプロペラ周囲
気泡による負荷変動のセンシングと動特性評価

平成 30 年度
(2018 年 9 月)

大 出 剛

目 次

第 1 章 序論	1
1.1 背景	1
1.2 研究の目的と内容要旨	6
1.3 本論文の概要	8
1.4 記号の定義	11
第 2 章 電気推進システムの基礎とこれまでの研究	13
2.1 電気推進システム概要	13
2.2 モータ特性とモータ制御	18
2.2.1 電気推進方式における交流方式	18
2.2.2 永久磁石内蔵型同期電動機とその制御方式	19
2.2.3 交流駆動モータの基本特性	20
2.3 プロペラ特性	25
2.4 従来の研究	32
第 3 章 実験装置	36
3.1 実験装置	36
3.2 実験条件と実験方法	45
3.3 画像処理方法とノイズ処理方法	47
3.3.1 ノイズ低減	47
3.3.2 画像信号処理方法	47
第 4 章 電気モータ推進システムによるプロペラ周囲の気泡の計測	51
4.1 緒言	51
4.2 トルク一定制御におけるプロペラ周囲の気泡の計測	52
4.2.1 実験結果	52
4.2.2 回転速度ピーク値と輝度ピーク値の相関に関する考察	58
4.2.3 回転速度ピーク値とスラストピーク値の相関に関する考察	58
4.3 回転速度一定制御におけるプロペラ周囲の気泡の計測	60
4.3.1 実験結果	60
4.3.2 トルクピーク値と輝度ピーク値の相関に関する考察	65
4.3.3 トルクピーク値とスラストピーク値の相関に関する考察	66
4.4 結言	68

第5章	気泡によるモータドライブ動特性とプロペラ動特性の評価	69
5.1	緒言	69
5.2	トルク一定制御におけるプロペラ周囲気泡とスラスト変動の特性評価	70
5.2.1	トルク一定制御におけるプロペラ特性の理論的相関	70
5.2.2	実験結果と考察	74
5.2.2.1	プロペラの回転速度とプロペラ周囲気泡の相関	78
5.2.2.2	プロペラの回転速度とスラストの相関	82
5.2.2.3	結論	86
5.3	回転速度一定制御におけるプロペラ周囲気泡とスラスト変動の特性評価	87
5.3.1	回転速度一定制御におけるプロペラ特性の理論的相関	87
5.3.2	実験結果と考察	90
5.3.2.1	プロペラのトルクとプロペラ周囲気泡の相関	94
5.3.2.2	プロペラのトルクとスラストの相関	96
5.3.2.3	結論	99
5.4	結言	100
第6章	電気モータ推進における制御方式の評価と考察	102
6.1	緒言	102
6.2	モータ制御におけるプロペラ特性の理論的相関	103
6.3	制御方式における気泡によるモータ出力変動の検証	107
6.4	制御方式における気泡によるスラスト変動の検証	111
6.5	結言	115
第7章	結論	116
7.1	電気モータ推進システムによるプロペラ周囲の気泡の検出結果	117
7.1.1	トルク一定制御方式の結果	117
7.1.2	回転速度一定制御方式の結果	117
7.2	気泡によるモータドライブ動特性とプロペラ動特性の評価結果	118
7.2.1	トルク一定制御方式の結果	118
7.2.2	回転速度一定制御方式の結果	118
7.3	電気モータ推進における制御方式の評価と考察結果	119
7.3.1	制御方式における気泡によるモータ出力変動の検証結果	119
7.3.2	制御方式における気泡によるスラスト変動の検証	119
7.4	総括	120
7.5	今後の展望	122

謝辞	123
参考文献	124
Appendix A List of Publication	128
Appendix B 電池推進船とその電気モータ推進システム	131

第1章 序論

1.1 背景

船舶の船体動揺や海面の波動はプロペラ周辺の気泡吸い込み（Propeller ventilation）、キャビテーション（Cavitation）やプロペラの一部あるいは全部を波面より露出させプロペラ空転を引き起すプロペラレーシング（Propeller racing）などを引き起こし、これらによって発生するプロペラの空転現象はプロペラのスラスト、ひいては船舶の推進効率を大きく低減させるだけではなく、トルクやスラスト等に著しい変動を生じ、騒音と振動を発生して機関や推進器にダメージを与える[1]。

プロペラ空気吸い込みの研究は、浅い喫水の高速船舶に採用されたサーフェスプロペラ（Surface piercing partially propeller：部分的に没水したプロペラとも呼ばれる）での研究から始められた。完全に没水したプロペラの場合、プロペラ翼上のキャビテーション現象は高速では避けられないが、高速船舶用のサーフェスプロペラは、キャビテーションを完全に抑制することができる。しかしながら、サーフェスプロペラは理論的な解析と設計方法がないため一般的な推進装置とされていないのが現状である[2]。近年では、海洋開発事業で使用されるアンカーハンドリング・タグ・サプライ船やプラットフォームサプライ船などオフショア船（Offshore vessel：陸から離れた沖合で OIL&GAS 開発等に用いる作業船や輸送船）によるスラスターの空気吸い込みが水中で連続的なサイクルでスラストプロペラの周囲で発生することにより、スラスト減少と激しい衝撃荷重をもたらし、アジマスとトンネルスラスターのシャフトベアリングとギアを損傷するなどが報告され、スラスターのプロペラ空気吸い込みに関するさまざまな実験的研究が実施された。その後、航海中の推進力とそれに伴うスラストと効率の平均的な低下に関して広く研究され、空気吸い込みを理解するために、プロペラ没水率の関数として時間平均化されたスラスト減少のモデル化などが行われた。また、プロペラ単独試験で空気が吸い込まれたプロペラの動的荷重を測定し、一般的に使用されているプロペラ没水率や前進係数に加えて、波など海上で通常発生する要因の影響まで考慮するなど、数多くの空気吸い込みによるスラスト減少の予測モデリングが試みられてきた。しかしその性質は本質的に非線形で時間依存性があるため、空気吸い込みの数値モデリン

グは難しいとされている。最近では、空気吸い込み中にプロペラに作用する力の調査や空気吸い込みの発生がプロペラ没水深度およびプロペラ負荷のような運転パラメータにどのように依存するか報告されている[3][4]。しかしながら、空気吸い込み現象は複雑な現象で、発生メカニズムなど理論的説明が未だなされていない[5]。空気吸い込みによる推進損失は、半経験的手法を用いて説明されているが、変動負荷の計算方法や物理現象の基礎を知る方法はほとんどないのが現状である[6]。

通常の内燃機関船すなわちディーゼル直接駆動船では、機関の回転速度が所要以上に増減した時、ガバナー (Speed governor) すなわち調速機により、燃料油の供給量を自動的に加減して所要の回転速度を維持させている。また、機関が空転、急回転を起こしたとき直ちに燃料油を遮断して機関の安全を図っている[7]。このようにガバナーを用い、プロペラ回転数を計測し燃料噴射量を制御することにより、このプロペラ周辺の気泡吸い込み、キャビテーションやプロペラレーシングなどによって発生するプロペラの空転の発生を抑制している。この時、プロペラ回転トルク変動を計測するためには、回転計やトルク計などの計測器付与が必要であるが、計測精度に制約があり、加えて時定数が長くなるため応答性に課題がある。例えば内燃機関などで使用される軸馬力計は、各種あるがいずれも軸に生じる捩れ歪を電気的、光学的な方法で検出し、同時に計測される回転数から軸馬力を計測している。精度は軸捩れ検出部の個体精度、および G 値と呼ばれる軸の横弾性係数の確度により、軸捩れを検出するための変位センサーは、アモルファス合金膜などを用い張力の変化を固有振動数の変化に置換し軸捩れを検出している。それらは、軸が無負荷時を示す値である ZERO POINT 調整が必要であり、チェックは数か月毎に定期的実施する必要がある。変位センサーは、温度変化の補正と遠心力による膜張力の変化に対しても同様に補正を要し、レスポンスも通常 5 秒間の平均値を用いている[8]。

一方、ディーゼルエレクトリック方式電気推進船 (Diesel-electric transmission ship) や小型船舶で普及し始めている電池推進船 (Battery electric boat、Battery-powered electric boat) などで用いられる電気モータ推進は、高い推進効率・操船性・快適性・環境性のためにその数を急速に増やしている。

ディーゼルエレクトリック方式の電気船では、ディーゼルエンジンで発電機を回して発電させた電力を制御し指令した回転速度で電動機を回転させプロペラを駆動している。最近では誘導電動機や永久磁石同期電動機とパワーエレクトロニクス技術を用いた可変電圧可変周波数型のインバータで速度制御を行う方式のモータドライブシステムが採用され始めている。出力は、大きいものでは 10 MW 級も用

意されていて、客船、調査船、フェリー、練習船などで用いられて、特に環境性を重視するヨーロッパが進んでいるといわれている。インバータやコンバータで組み立てられているドライブ盤が空冷式で大きく機関室を圧迫し、さらに機関室の空調強化をしなければならないなど課題もあるが、海外では、すでに水冷式のドライブ盤があり、空冷式の 1/3 程度まで小型化し、空調の問題も解決している。これらは、電気自動車や電池推進船と同様に永久磁石内蔵型同期モータ（水冷）との組み合わせで、広い負荷率の範囲で高効率を達成している[9]。

電池推進方式の小型船舶は、リチウムイオン 2 次電池などに充電されたエネルギーからインバータを用い回転速度制御やトルク制御でプロペラを駆動している。電池推進船に搭載するモータインバータの出力は、25 kW から 200 kW 程度のものが採用されたり、検討されたりしている。大型化が困難な理由として、搭載する電池のエネルギー密度が小さく、エネルギーストレージを大きく取れないことがあげられる。小型の移動体用モータインバータは、水冷方式で FA (Factory Automation) 用に比べると、重量、容積とも約 1/5 程度に小型軽量化されているのが特徴である。モータは永久磁石内蔵型同期モータを用いインバータとの組み合わせで 95 %程度の高効率を達成している。燃料電池 (Fuel cell) や内燃機関発電機と組み合わせたハイブリッドが増えつつあるが、エネルギーのストレージが大きく取れないこともあり高効率の永久磁石内蔵型同期モータを用いた交流モータドライブシステムが主流である。

ここで、内燃機関とモータドライブシステムの比較を行う。内燃機関(ここでは、応答性の早いガソリン機関を例にした)では、スロットル開度からマニホールド圧までの応答遅れに加えて、シリンダー内に空気と燃料を吸入し(吸入行程)、それを圧縮し(圧縮行程)、燃焼させてピストンを押し下げる(膨張行程)までの間デッドタイムが存在する。そのため、トルクの応答は数百 ms を要する。また、制御精度においては、燃料反応によりトルクを発生するため気圧、気温、油温などの影響を受けやすい。一方、交流モータドライブシステムは、トルク指令から電流が立ち上げるまでの電氣的応答遅れのみと数 ms であり内燃機関に比べ 2 桁早い。制御精度においても、ベクトル制御に励磁分電流とトルク分電流を高精度に調整できるため発生トルクも高精度に制御できる。さらに、モータドライブシステムで用いる制御信号を出力することで、モータの状態(電流、電圧、トルク、回転速度)を精度よくリアルタイムにモニタリングすることが原理的に可能である。Fig. 1 に内燃機関図とモータドライブ図を示し、表 1 にそれらのトルク応答性、制御精度、状態計測に対する比較をまとめて示す[10]。これらプロペラ推進系とモータドライブシ

システムで構成するパワートレインにおいて、交流モータドライブシステムは、高トルク、高応答性（応答時間数ミリ秒）、高精度の状態出力（電流、電圧、トルク、回転速度）など高い性能とトルク制御モード、回転速度制御モードなどの運転機能が準備されている。従って、これらの出力信号を処理する事によりプロペラ周辺の気泡発生及びその量、またスラスト変動を知ることができれば、通常のカバナーよりも速くかつ細かなプロペラ回転制御が特別なセンサーなどの付与なしに可能になり、プロペラ周辺の気泡吸い込み、キャビテーションやプロペラレーシングなどに起因するスラスト減少及び推進効率の低減を抑制し、トルクやスラスト等の著しい変動による騒音、振動や衝撃荷重から機関や推進器のダメージが抑制されるために用いられるセンサー機能として期待できる。

また、モータドライブシステムは、トルク一定制御方式や回転速度一定制御方式が容易に構築できる。これらの制御方式において、プロペラ周囲気泡の影響による負荷変動がプロペラの動特性にどのような挙動を与え、モータ出力やスラスト減少にどのような差異があるかなどの研究文献はほとんどない。これら制御方式によるプロペラ周囲気泡の影響の差異がモータドライブからの信号により理論的に表すことができれば、航行時、天候による外乱などの状態によってモータドライブの制御方式を適時に切り替えることで、運転時の制御方式の最適化が図れる。最適化された制御方式のもとでモータドライブからの状態信号を用いてプロペラ周囲気泡の影響を抑制する制御を行えば、より効果が期待できる。

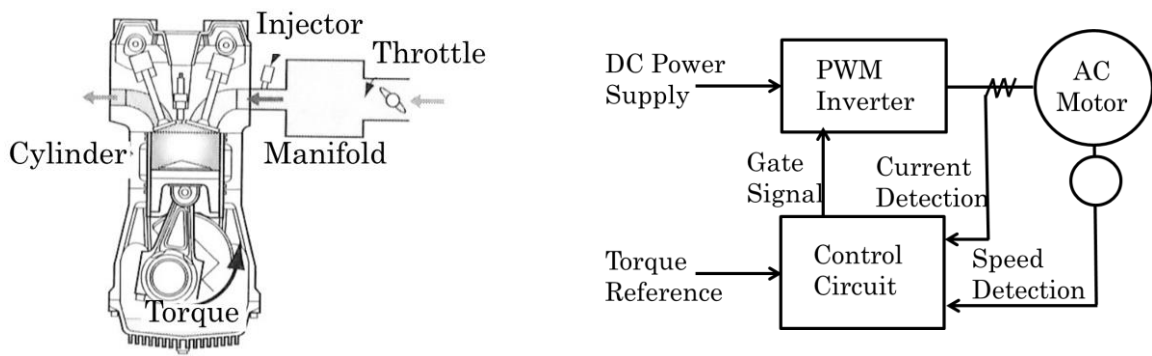


Fig. 1 Internal combustion engine diagram and motor drive diagram

表 1 内燃機関とモータドライブシステムとの比較

	内燃機関	モータドライブシステム
トルク応答性	数百 ms	数 ms : トルクの応答が 2 桁短い
	スロットル開度からマニホールド圧までの応答遅れ、シリンダー内に空気と燃料を吸入し (吸入行程)、それを圧縮し (圧縮行程)、燃焼させてピストンを押し下げる (膨張行程) までの間デッドタイム	トルク指令から電流が立ち上げるまでの電氣的応答遅れのみ
制御精度	燃料反応によりトルクを発生するため気圧、気温、油温などの影響を受ける	ベクトル制御は励磁分電流とトルク分電流を高精度に調整できるため発生トルクも高精度に制御できる
状態計測	軸馬力計を用いなければトルク、軸出力が観れない	モータドライブシステムで用いる制御信号を出力することで、モータの状態 (電流、電圧、トルク、回転速度) を精度よくリアルタイムにモニタリングすることが可能

1.2 研究の目的と内容要旨

前節の背景にて、プロペラ推進システムにおけるプロペラ周辺の気泡吸い込み、キャビテーションやプロペラレーシングなどは、スラストロスや船舶の推進効率を大きく低減させるのみでなく、プロペラ負荷変動に起因するトルクやスラスト等の著しい変動による騒音、振動や衝撃荷重として機関や推進器にダメージを与えることを記述した。プロペラ推進系とモータドライブシステムで構成する電気モータ推進システムにおいて、使用される交流モータドライブシステムは、パワーエレクトロニクスの進歩により、高トルク、高トルク応答性（トルク指令から電流が立ち上げるまでの電氣的応答遅れのみの数 ms）、ベクトル制御による高精度制御、高精度の状態出力（電流、電圧、トルク、回転速度）など高い性能と、トルク制御モード、回転速度制御モードなどの運転機能を準備している。しかしながら、電気モータ推進システムが従来の内燃機関と同様に使われその持っている機能、性能が有効に活用されていない。著者は 2010 年から研究開発してきている急速充電対応型電池推進船「らいちょう」3 隻において、交流モータドライブシステムとアジマスドライブ、ウォータジェットドライブ、アウトドライブなどの推進器と組み合わせた電気モータ推進システムを研究してきた。Appendix B に 1 例を示す。これらを礎に本研究へ展開した。

本研究の目的は、プロペラ駆動用モータドライブシステムがプロペラ周囲の気泡状態やスラスト変動をセンシングすることができ、センシング信号がモータ出力変動及びスラスト変動を制御するための信号となり得ることを実験と理論から明らかにすることにある。この目的に基づき、本研究では次に示す実験と解析を行った。

実験では、電気モータ推進システムを、空気の吸い込みが発生しやすい条件（プロペラ没水深さ、流速、トルク、回転速度など）で設置・設定し、プロペラ周囲に気泡を発生させる環境にて、トルク一定制御方式と速度一定制御方式で動作させた。初めにモータドライブからのトルクモニター信号、回転速度モニター信号と高速度ビデオ画像解析によるプロペラ周囲気泡挙動を、回流水槽内で同時計測し、モータドライブからの状態信号（トルク、回転速度）の解析により、気泡発生及びその量（プロペラ周囲の平均相対輝度）、スラスト減少とそのピークの大きさを正確にセンシングできることを世界で初めて確認した。この確認できたセンシングデータを用いれば、特別なセンサーを要さず、モータドライブからの状態信号により、プロ

ペラ周囲の気泡の状態やそれに起因するスラストの変動などがプロペラ特性式で表せると仮定し、実験結果より検証を行い以下に示す結果を得た。

プロペラ周囲の平均相対輝度が気泡発生量（ボイド率）と線形であると仮定すると、トルク一定制御方式ではプロペラ特性式より実験で得られた回転速度と平均相対輝度の相関を良く説明でき、プロペラ特性式よりスラストとスラスト係数の相関を良く整理できる。実験から得られたスラスト係数は、平均相対輝度が増すと減少する。すなわち気泡の発生により回転速度は上昇するがスラストは減少することを示した。また回転速度一定制御方式においても、プロペラ特性式より実験で得られたモータドライブからの計測値と平均相対輝度の相関を良く説明でき、プロペラ特性式よりスラストとスラスト係数とトルクの相関を良く整理できる。また、プロペラ周囲気泡によりスラストは、スラスト係数とトルクの乗算に比例して変動することを示した。さらに、回転速度一定制御方式とトルク一定制御方式において、プロペラ周囲気泡によるモータ出力変動とスラスト変動の挙動の違いを、モータドライブから得たモニター信号と理論式を用い検証し次の結果を得た。i) 回転速度一定制御方式では、気泡の発生に従いモータ出力は、平均相対輝度に比例して出力減に変動する。トルク一定制御方式では、平均相対輝度の平方根に反比例して出力増に変動する。同じ出力の運転において、モータ出力変動量は、気泡が一定範囲内において、平均相対輝度の平方根に反比例するトルク一定制御の方が少ない。ii) スラスト変動において、回転速度一定制御方式では、スラスト係数とトルクの乗算に比例し、トルク一定制御方式は、スラスト係数に比例する。同じ平均相対輝度によるスラストへの影響は、トルクの減少を伴う回転速度一定制御方式の方が大きい。すなわちトルク一定制御方式のほうがプロペラ周囲気泡によるモータ出力変動、スラスト変動に対しロバストである。以上これらのことをモータドライブからのモニター信号とプロペラ理論式から説明できることを示した。すなわち、モータドライブのモニター信号は、その制御方式によらずモータ出力変動及びスラスト変動を制御するために用いるセンシング信号として期待できる。

1.3 本論文の概要

論文の構成について示す。

第2章は、本論文の基底となる電気推進システムの概要、本論文の主なる要素となっているモータドライブシステムのモータ特性とその制御、プロペラ特性及び従来の研究で構成している。第3章から第6章までは、論文の中心となる実験と考察で構成している。第3章は実験装置と実験条件、実験方法を示し、データ処理で重要な役目をする高速度ビデオカメラの画像処理方法と、計測データのノイズ処理方法とで構成している。第4章は、トルク一定制御方式と回転速度一定制御方式において、モータドライブからの状態信号が、プロペラ周囲の気泡の状態とスラストを計測できることを示し、その時間的検証から、それらが動的に追従していることを示している。第5章は、第4章で得た負荷変動データが、モータ特性とプロペラ特性式で理論的に表すことができることを示している。第6章では、トルク一定制御方式と回転速度一定制御方式での差異を第5章の結果から比較検証している。またこれら制御方式の違いによるモータ出力の変動とスラスト変動の挙動の違いをデータと理論から示している。第7章では、各章で得られた成果を要約し結論としている。

次に論文の概要を示す。

第2章電気推進システムの基礎とこれまでの研究について述べる。電気推進システム概要では、電気推進船の特徴と電気推進方式について記述している。本論文の主なる要素として、プロペラとモータドライブシステムがあり、この章で示すモータドライブシステムでは、最近の電気推進方式である交流方式について概要を示し、交流方式のなかでパワーエレクトロニクス技術の進歩により最も進んでいるモータとして永久磁石内蔵型同期電動機と電力変換器として可変電圧可変周波数型のインバータについて詳細を示し本論文で用いる重要なモータ特性とその理論式を示している。もう一つの要素であるプロペラ特性に関しては、推力発生 の原理と、プロペラが水中で作動するとき各翼で生じる揚力および抗力からスラストとトルクを得ることを、それぞれ運動量理論と翼理論で示し、本論文で用いているプロペラ単独での性能を示す係数であるスラスト係数 K_h 、トルク係数 K_q 、プロペラ前進係数 J について示した。従来の研究については、本研究のような観点からの研究はなく、空気吸い込みに起因する推進損失などは、半経験的手法を用いて説

明されているが、変動負荷の計算方法や物理現象の基礎を知る方法はほとんどないのが現状である。

第3章実験装置について述べる。実験は、単一インペラー式水平循環型の大型回流水槽に交流モータシステムで構成した電気モータ推進システムを空気の吸い込みが発生しやすい状態にプロペラ没水深さを設置し、トルクと回転速度を設定することでプロペラ周囲に気泡を発生させる環境を構築した。プロペラ周辺気泡挙動を光学的に観察するために、高速度カメラを回流水槽の側面観測部に設置し得た画像は処理し輝度データとした。スラスト計測用にロードセルを推進装置に設置した。交流サーボモータドライブシステムは、出力 5 kW、制御周期 126 μ s、トルク制御モードと回転速度モードにより運転した。推進機部のプロペラ直径、プロペラ浸水深さ、水槽流速はそれぞれ 187 mm、185 mm、0.5 m/s とした。モータドライブは電子制御ユニットから指令を受け取りトルクモニターと回転速度モニターをデータロガーに出力する。モータの実効電流・電圧・電力は電流プローブと電圧プローブを用いて電力系を介してデータロガーに接続している。画像を含め、これらデータにはノイズ成分が含まれるため、有限インパルス応答 (FIR; Finite Impulse Response) フィルタを採用している。

第4章電気モータ推進システムによるプロペラ周囲の気泡の計測について述べる。トルク一定制御方式においては、プロペラ周囲に気泡が発生しプロペラ負荷が変動すると、トルクは一定に保たれ、回転速度が変動する。この時、モータの回転速度の変動とプロペラ周囲の気泡の状態に相関があり、回転速度の変動とスラストにも相関があることを、回転速度ピーク値と高速度ビデオカメラで得た輝度ピーク値の相関、回転速度ピーク値とスラストピーク値の相関にて検証した。回転速度一定制御方式においては、プロペラ周囲に気泡が発生しプロペラ負荷が変動すると、回転速度は一定に保たれ、トルクが変動する。この時、モータのトルクの変動とプロペラ周囲の気泡の状態に相関があり、トルクの変動とスラストにも相関があることを、トルクピーク値と高速度ビデオカメラで得た輝度ピーク値の相関、トルクピーク値とスラストピーク値の相関にて検証した。これらの検証によって、モータドライブからの状態信号が、プロペラ周囲の気泡の状態とスラストの変動をセンシングしていることを示し、それらの時間的相関の検証から、動的に追従していることも示した。

第5章気泡によるモータドライブ動特性とプロペラ動特性の評価について述べる。第4章でモータドライブからの状態信号が、気泡発生及びその量、スラスト減少とそのピークの大きさを正確に計測できることを示した。本章では、これら確認

したデータを第 2 章で示したプロペラ特性式を用いて理論的に検証した。高速度カメラで得たプロペラ周囲の平均相対輝度がボイド率と線形の関係にあると仮定した場合、トルク一定制御されたモータ推進系においては、プロペラ特性式より実験で得られた回転速度と平均相対輝度の相関、スラストとスラスト係数の相関が整理でき、気泡の発生により回転速度は上昇するがスラストは減少することを理論式から示した。回転速度一定制御されたモータ推進系においては、プロペラ特性式より実験で得られたトルクと平均相対輝度の相関、スラストとスラスト係数の相関が整理でき、気泡の発生により、トルクは減少しスラストは、スラスト係数とトルクの乗算に比例して減少することを理論式から示した。

第 6 章電気モータ推進における制御方式の評価と考察について述べる。本章では、トルク一定制御方式での実験結果と回転速度一定の実験結果を整理し比較し、相関を検証した。さらに、双方の制御方式におけるモータ出力変動とスラスト変動を比較、検証した。回転速度一定制御方式は、気泡の発生に従いモータ出力は、平均相対輝度に比例して出力減に変動し、トルク一定制御方式では、平均相対輝度の平方根に反比例して出力増に変動する。スラスト変動においては、回転速度一定制御方式は、スラスト係数とトルクの乗算に比例し、トルク一定制御方式は、スラスト係数に比例する。同じ平均相対輝度によるスラストへの影響は、トルクの減少を伴う回転速度一定制御方式の方が大きい。すなわち、トルク一定制御方式は、負荷変動に対しロバストであることを理論的に示した。

第 7 章結論では、各章で得られた成果を要約し結論としている。

1.4 記号の定義

Nomenclature

p	Water pressure	(kgf/cm ²)
ρ	Density of water	(kg/m ³)
v	Flow velocity	(m/s)
n	Rotational speed	(1/s)
ω	Angular velocity	(rad/s)
η_0	Single propeller efficiency	(%)
Th	Thrust	(N)
Tq	Motor torque	(Nm)
Sp	Propeller areasquare	(m ²)
D	Propeller diameter	(m)
J	Propeller advance coefficient	(-)
Va	Forward speed	(m/s)
Kq	Torque coefficient	(-)
Kt	Thrust coefficient	(-)
I_m	Motor current	(A)
Φ	Motor magnetic flux	(Wb)
V_m	Motor voltage	(V)
P_m	Motor power	(W)
Dp	Depth of propeller	(m)
Vf	Flow velocity	(m/s)
Ds	Measurement position	(m)
α	Void fraction	(%)
B	Average brightness around the propeller with air bubbles	(%)
B_0	Average brightness around the propeller without air bubbles	(%)
B'	Average relative brightness	(-)
Kq'	Torque coefficient	(-)
Kt'	Thrust coefficient	(-)

P_t	Motor power at constant torque control	(W)
P_r	Motor power at constant rotational speed control	(W)
THP	Thrust power	(W)
PHP	Propeller power	(W)
DHP	Delivered power	(W)

第2章 電気推進システムの基礎とこれまでの研究

2.1 電気推進システム概要

電気推進船は、電動機でスクリーブローパを駆動する船で、蒸気タービン、ディーゼルエンジンからの動力をいったん電力に変え電動機を駆動する方式のものと、蓄電池の電力を用いて電動機を駆動するタイプのものがある。前者の発電機を用いるタイプは、一般的に大型船に多く、艦艇や巡視船などを除くと、砕氷船、探査船、練習船など特殊船に限られてきたが、近年、欧州を中心にクルーズ客船、一般貨物船に電気推進システムの導入が拡大している[11]。利点としては、小型の発電機を複数使うことで、大きな主機を小型の複数の機関に分割できることが可能になる。このことは、

- ・複数の（発電機）原動機を負荷に応じて自由に組み合わせて使用でき、かつ二重化できるので冗長性に優れる。
- ・空調用電源などとの総合的運用ができ船内システムがシンプルになる。
- ・機器配置の自由度が向上し、貨物、客室などスペースが広く取れる。

また、電動機を推進システムに用いることで、

- ・低速航行時での高トルクにより操船性能が向上する。
- ・逆転や回転の制御が容易になる。
- ・低振動、低騒音により居住性が向上する。
- ・荒天時の水面露出においても過速することがない。

などの優れた特徴を持つ。

電気推進方式は、1880年代に潜水艦に蓄電池による直流電動機を搭載したことに端を発し、誘導（同期）電動機を駆動機として用いる交流方式、直流電動機を駆動機として用いる直流方式、および交直併用方式など発展してきたが、パワーエレクトロニクス技術の進歩に伴い交流方式では、サイリスタモータ方式、サイクロコンバータ方式やマトリックスコンバータ方式へと展開されている[12]。最近では誘導電動機や永久磁石内蔵型同期電動機とパワーエレクトロニクス技術を用いた可変電圧可変周波数型のインバータで速度制御を行う方式へと移行している。国内では、インバータやコンバータで組み立てられているドライブ盤が空冷式で大きく機関室を圧迫しているが、海外では、水冷式のドライブ盤があり、空冷式の1/3程度まで小

型化・電気自動車や電池推進船と同様に永久磁石内蔵型同期モータ（水冷）との組み合わせで、広い負荷率の範囲で高効率を達成している。ここで、最近の主流であるディーゼルエレクトリック方式の電気推進船（Diesel-electric transmission）のパワートレインの構成図を Fig. 2.1 に示す。複数の発電機で構成され負荷に応じて自由に組み合わせて使用し、効率向上を図っている。この方式は、燃費や排ガスの環境対策の面でも利点はあるが、船価があがるのは否めない。

一方、後者の蓄電池を用いるタイプは、潜水艦など艦艇を除くと、自律型無人潜水機（autonomous underwater vehicle、AUV）などに用いられるが、近年、小型舟艇でも環境対応や人にやさしい面から、普及し始めている。先の Diesel-electric transmission と区別するために、蓄電池の電力を用いて電動機を駆動するタイプの船舶に対して電池推進船（Battery Electric Boat、Battery Power Electric Boat）という名称を使用している[13]。Fig. 2.2 にパワートレインの構成を示すようモータ推進システムは、出力の違いはあるが構成は同じである。さらに水素燃料電池を搭載した水素燃料電池船の開発が行われている。Fig. 2.3 に東京海洋大学の水素燃料電池を搭載した電池推進船「らいちょう N」のシステムブロック図を示す[14]。水素燃料電池船は、自動車のように燃料電池の出力のみでの駆動は難しい。現状の燃料電池の出力とそのエネルギーである水素の体積密度が小さく、船舶で主電源として用いると占有体積が多くなりすぎるため、補助発電装置的に用いる。すなわち、リチウムイオン2次電池などの蓄電池と組み合わせ、レンジエクステンダータイプのハイブリッドシステムとして用いられることになる。このことは、Fig. 2.3 の赤破線で囲った部分に示すよう水素燃料電池船は電池推進船と同じパワートレインになることを示している。

Fig. 2.2 に示している電池推進船のパワートレインに用いられるモータドライブシステムは、高効率の永久磁石内蔵型同期モータとベクトル制御を用いたインバータで構成され、モータドライブシステムで用いる制御信号を出力することで、モータの状態（電流、電圧、トルク、回転速度）を精度よくリアルタイムにモニタリングすることが可能である。

以上示したよう、ディーゼルエレクトリック船や電池推進船のプロペラ推進系とモータドライブシステムで構成するパワートレインに用いられるパワーエレクトロニクスの進歩は目覚ましく、自動車業界のパワートレインの電動化にも牽引され高い性能機能を有するようになった。このパワーエレクトロニクスを活用したディーゼルエレクトリック船すなわち電気モータ推進船は、高い推進効率・操船性・快適性のために国内外でその数を増やしつつある。しかしながらそのプロペラ軸系（特

に回転制御系)については通常ディーゼル船のものをそのまま用いており、モーターの特質が十分に生かされているとは言えないのが現状である。

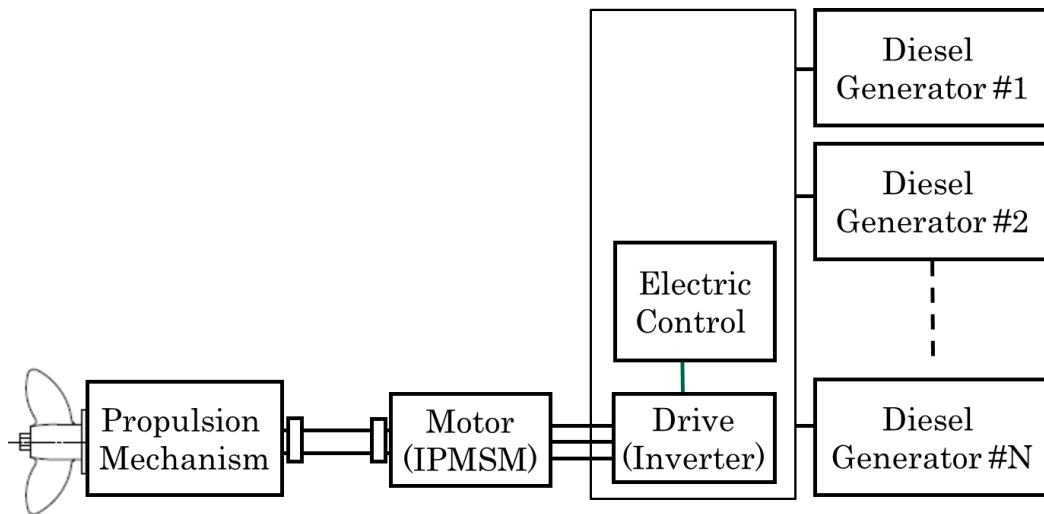


Fig. 2.1 Configuration diagram of diesel electric transmission

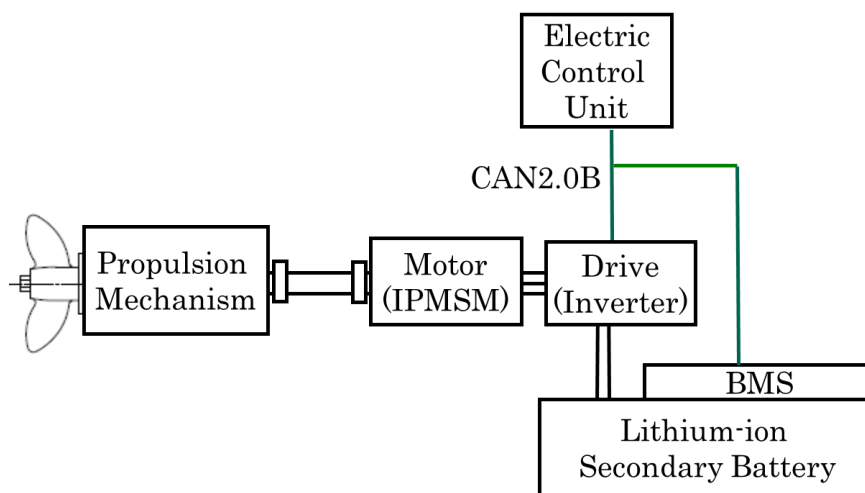


Fig. 2.2 Configuration diagram of battery power electric boat

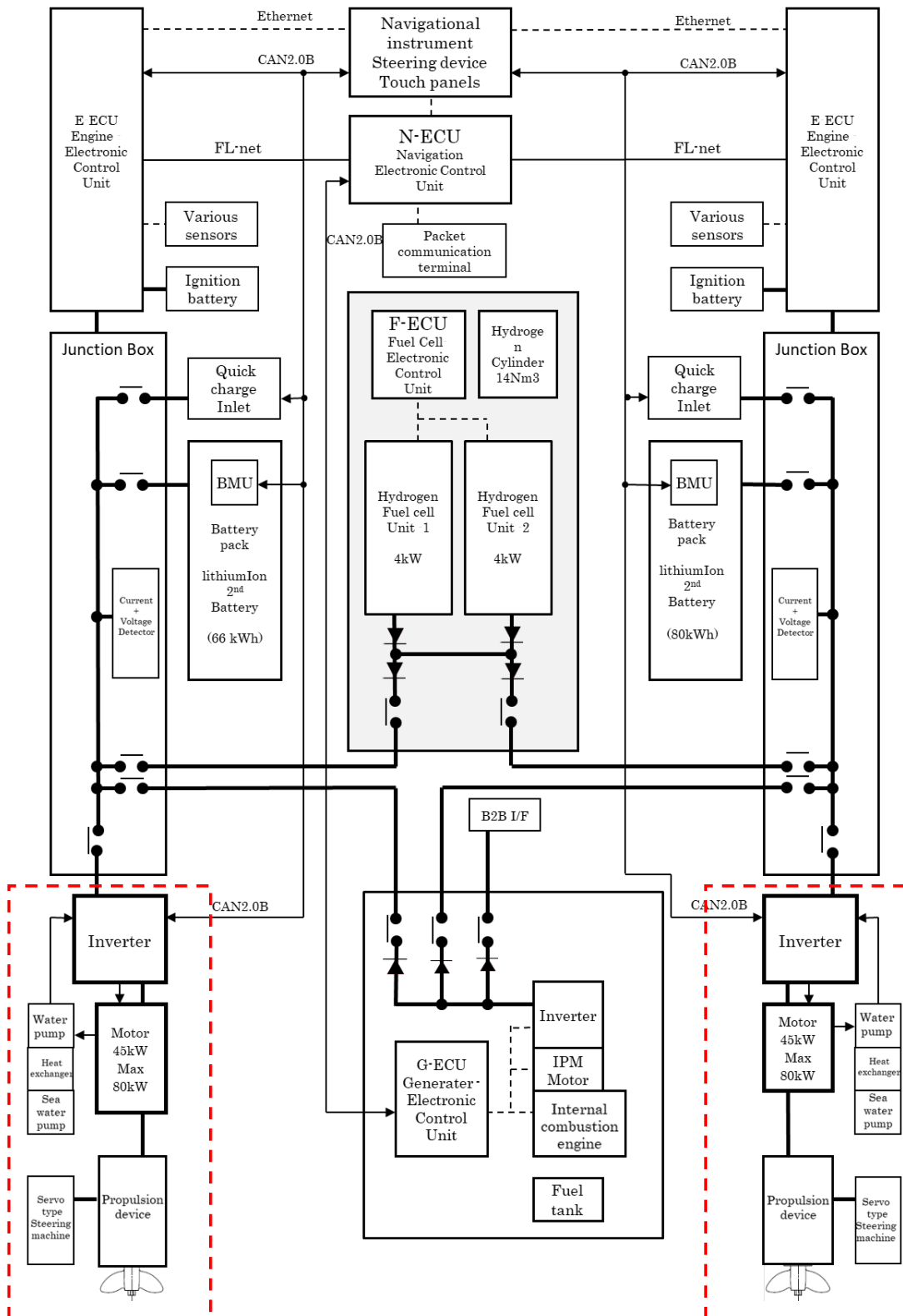


Fig. 2.3 “Raicho N” system block diagram

2.2 モータ特性とモータ制御

前節 2.1 電気推進システム概要で示したよう、最近の電気推進方式は、誘導電動機や永久磁石内蔵型同期電動機とパワーエレクトロニクス技術を用いた可変電圧可変周波数型のインバータで速度制御を行う方式へと移行している。ここでは、交流方式であるサイリスタモータ方式、サイクロコンバータ方式やマトリックスコンバータ方式について以下に概要を示し[12]、永久磁石内蔵型同期電動機と可変電圧可変周波数型のインバータについては詳細を示す。

2.2.1 電気推進方式における交流方式

サイリスタモータ方式は、交流からいったん直流に変換したのち、所望の交流電圧に再変換する方式である。主回路変換器が、直流電源を作る電源側変換器（コンバータ）と電動機に交流を供給する電動機側変換器（インバータ）から構成される。その中間に直流回路を持っているのが大きな特徴で、電動機の色度調整は、コンバータのサイリスタ制御によって電流の位相角を調整し、直流中間回路の電圧を変えることにより行われる一方、インバータは、磁極位置検出装置からの信号をもとに分配器でゲートパルスを形成し、サイリスタにゲート信号を与えれば転流動作を行い、電動機の回転速度に合わせた矩形波交流電流を供給する即ち、電動機誘起電圧で転流することになり、誘起電圧の低い始動時や低速時（0–10%）は転流が困難で、この範囲の運転はできないのが普通である。主回路にサイリスタを装備するために高調波を発生して他機器への悪影響があり、また出力できる周波数に制約がある。

サイクロコンバータ方式は、交流から、別の周波数・電圧の交流に直接変換する方式である。正弦波電流形無整流子電動機のことをいう。固定周波数の交流電源から直流中間回路を介さずに直接異なった周波数の交流に変換する方式であるが、特に正弦波電流形の場合、変換効率が高く、また、出力周波数を 0 から連続的に調整することができるため、矩形波電流形と比較し低速機に適している。出力周波数の最大値は入力周波数の 1/3～1/2 程度であり、また力率が悪いなどの問題がある。

マトリックスコンバータ方式は、同じ交流電源から直接新たな周波数の交流を作り出す電力変換装置を直接式周波数変換器と呼ばれる変換器でサイクロコンバータもその分類にはいる。サイクロコンバータがスイッチ素子としてサイリスタを用い

ているのに対し、双方向の電流のスイッチングを高速にできる素子を用いることで、電源電圧を直接パルス幅変調 (PWM) 制御して、任意の電圧・周波数を出力する。PWM 方式では、電圧波形を細かく切り刻むことで高調波抑制用のリアクトルを小型化でき、また装置本体も大幅に高効率化・小型化できる。

2.2.2 永久磁石内蔵型同期電動機とその制御方式[10][16]

永久磁石同期モータ (Permanent magnet synchronous motor: PMSM) は Fig. 2.4 に示すよう永久磁石を回転子表面に取り付けた表面永久磁石同期モータ (Surface permanent magnet synchronous motor: SPMSM) と永久磁石を回転子内部に埋め込んだ内部永久磁石同期モータ (Interior permanent magnet synchronous motor: IPMSM) とに大別できる。

ここでは、駆動用モータとして広く使われている内部永久磁石同期モータ (IPMSM) について示す。IPMSM は、永久磁石によるトルクだけではなく、界磁の磁気抵抗の非対称性によるリラクタンストルクをも利用できるものでインバータと組みあわせ高効率を実現している。Fig. 2.5 に IPMSM のトルク特性を示す。図は、左からマグネットトルク、リラクタンストルク、これらの合成トルク特性を示している。マグネットトルクは、磁石と磁石の吸引力あるいは反発力により発生し、回転磁界と回転子磁石の相対角度が 90° の時に最大トルクを発生し、発生トルクは電流振幅に比例する。リラクタンストルクは、磁石と鉄の吸引力により発生する、回転磁界と回転子鉄心の相対角度が 45° の時、最大トルクを発生し、発生トルクは電流振幅の 2 乗に比例する。それらの合成トルクは電流位相を進ませれば、マグネットトルクだけでなくリラクタンストルクも有効に利用でき大きなトルクを発生する。常にトルクを最大点に保つには、負荷に応じて電機子電流の振幅と位相を適切に制御する必要がある。広い負荷率で高効率、高力率の IPMSM の長所は、回転子構造が簡単であるため小型化できるが、短所は、磁石が高価で高温時熱減磁するなどがあげられる。

次に、内部永久磁石同期モータのベクトル制御を示す。一般的に交流モータモータのベクトル制御は、巻線に鎖交する磁束とそれに直交するトルク成分を独立に制御することを指す。固定子電流ベクトルはその角周波数で回転するが、その回転座標上において励磁電流とトルク分電流をベクトル合成した電流が交流モータの電流であり、PWM インバータを用いてモータ電流を制御して瞬時トルクを制御している。内蔵永久磁石同期モータの場合は、永久磁石による磁束があるので励磁電

流を流さなくても瞬時トルクが制御可能であり、これによって効率を上げている。Fig. 2.6 に内部永久磁石同期モータのベクトル制御システムを示す。指令されたトルクは、最大トルク制御、界磁弱め制御により電流指令値を演算し、演算が簡単な2相にて回転座標に変換する。それを2/3相変換にて3相電流値に変換され電流制御形電力変換器に電流指令を行う。電力変換器は、与えられた各相の電流指令値に対して出力電流をフィードバックし誤差をなくすよう制御する。電流制御はPWM制御法を用い電流制御の操作量を電圧指令としてインバータに与えモータを駆動する。低速域では、最大トルク制御により効率が最大となるように電流指令を行い、中高速域では界磁弱め制御にてモータ端子電圧がインバータの最大出力電圧を超えないように電流指令を出力する。ここで、最大トルク制御は、振幅一定の電流（銅損一定）、最適電流進み角で最大のトルクを発生させる制御であり、界磁弱め制御は、モータ誘導起電力が回転数に比例するため、回転数の上昇でモータ端子電圧がインバータ最大出力電圧を越さないように磁束を弱める制御である。

2.2.3 交流駆動モータの基本特性

Fig. 2.7 に基本特性を示す。モータ出力トルク Tq (Nm) は、式(2.1)に示すよう磁束 Φ (Wb) の大きさと駆動電流 I_m (A) の積に比例するので、高トルクを得るためには、磁気飽和の範囲内で磁束 Φ を最大に保つことである。

$$Tq \propto \Phi \cdot I_m \quad (2.1)$$

磁束 Φ を一定に保ったときトルク電流 I_m の最大値はインバータの定格電流により制限されるので、モータが出力可能な最大トルク Tq もまた制限されることになる。このため磁束 Φ (Wb) を一定に保っている基底速度 n_B (s⁻¹) 以下の領域ではモータの最大トルクは回転速度にかかわらず一定であり、この領域をトルク一定領域という。このときのモータ出力 P_m (W) は、式(2.2)で求めることができ、回転速度 n (s⁻¹) に比例する。

$$P_m = Tq \cdot 2\pi n \quad (2.2)$$

モータ巻線に発生する誘起起電力 V_m (V)は、内部磁束 Φ (Wb)と回転速度 n (s⁻¹)の積に比例する。モータの端子電圧が誘起起電力に等しいと仮定すると式(2.3)を得る。

$$V_m \propto \Phi \cdot 2\pi n \quad (2.3)$$

基底回転数以下の領域では磁束 Φ が一定なので V_m は回転速度 $2\pi n$ に比例して増加するが、基底速度以上の中高速域では PWM インバータは最大出力電圧より大きな電圧を出せないため、界磁弱め制御にて磁束 Φ を回転速度 $2\pi n$ に対して反比例するように制御することでモータ電圧 V_m を回転速度 $2\pi n$ によらず一定に保つことが出来る、よって界磁弱め制御を行っている速度範囲では出力可能なトルク Tq は回転速度 $2\pi n$ に反比例して減少し出力 P_m は一定になる。この領域を出力一定領域という。

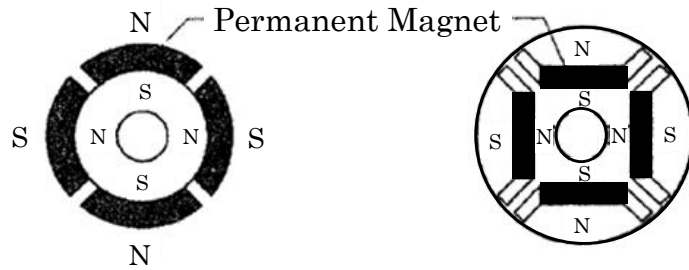


Fig. 2.4 Surface permanent magnet synchronous motor and interior permanent magnet synchronous motor

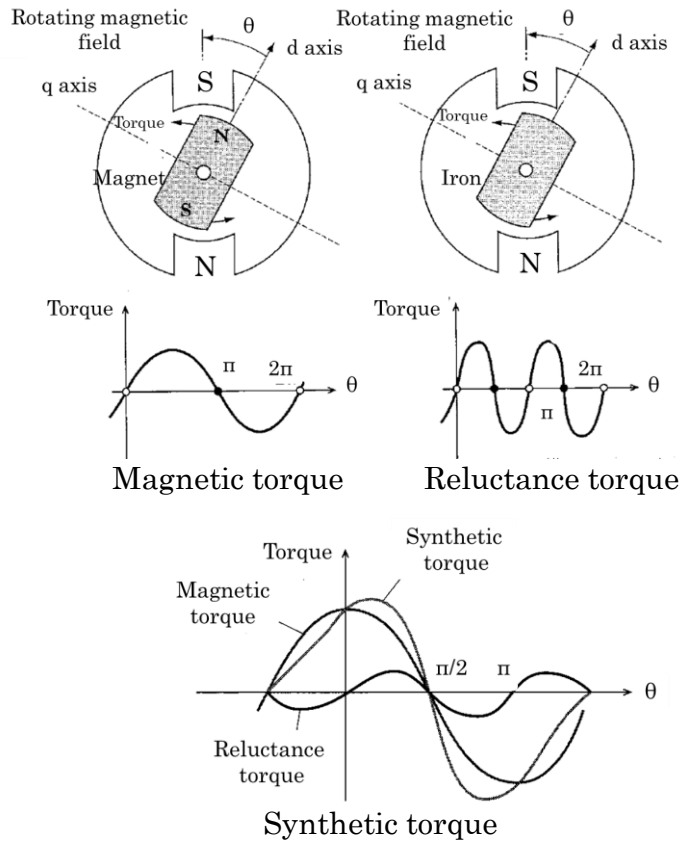


Fig. 2.5 Characteristics of interior permanent magnet synchronous motor

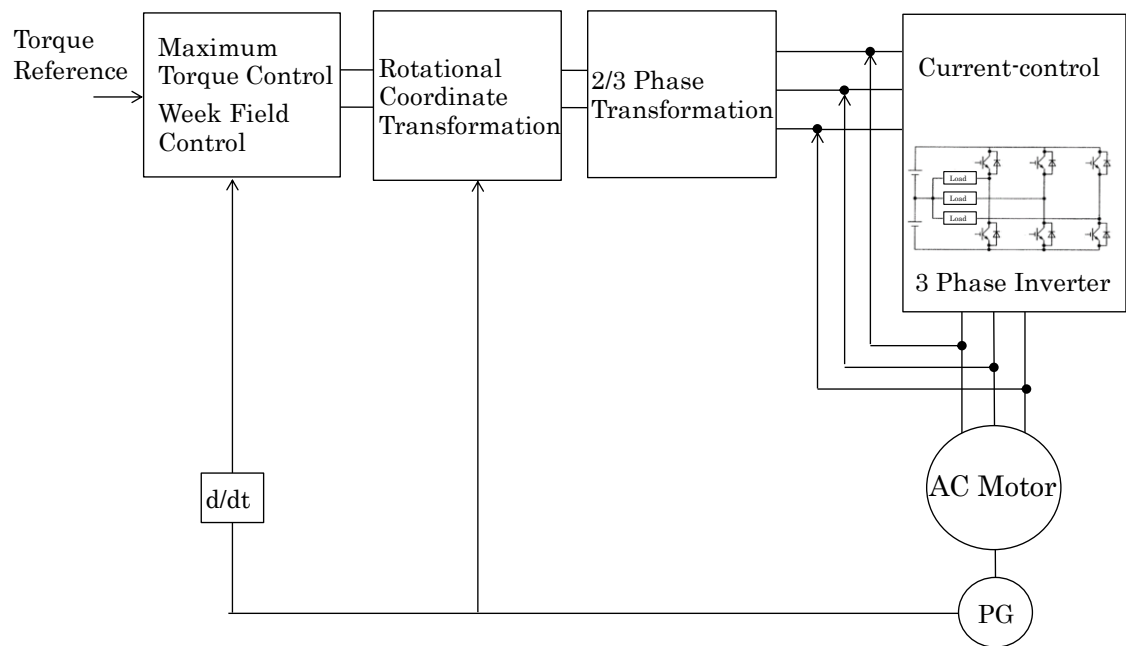


Fig. 2.6 Vector control system for internal permanent magnet synchronous motor

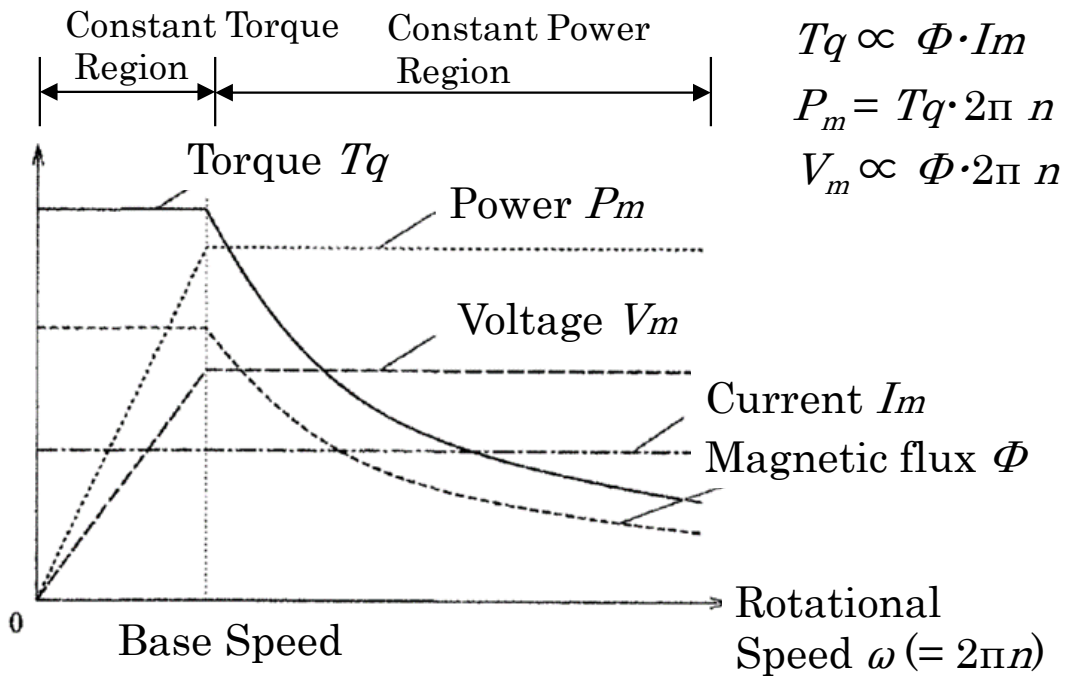


Fig. 2.7 Basic characteristics of AC motor

2.3 プロペラ特性[11][15]

ここでは、推力発生 の原理とプロペラが水中で作動するとき各翼で生じる揚力および抗力からスラストとトルクを得ることを、それぞれ運動量理論と翼理論で示したのち、プロペラ単独での性能を示す諸係数について示す。推進理論は、スクリュープロペラ (Screw propeller) を対象にして発展してきた。それらの理論は、大別して次の3種類に分類できる。(1) 運動量理論、(2) 翼素理論、(3) 渦理論である。また、最近では、ナビエ・ストークス方程式に基づく数値計算法 (CFD) も開発されている。

運動量理論から推力発生 の原理を示す。Fig. 2.8 はプロペラが単独で作動しているときの流体の速度と圧力を示したものである。プロペラに近づいた流体は、その作動円盤とも呼ぶべき空間を通り過ぎ加速される。このとき、流体はプロペラから運動量をもらう。運動量と力および速度の間には、運動量 = Mv 、力 = $M\delta v / \delta t$ の関係がある。ここで M は質量、 v は速度、 t は時間を表す。すなわち、運動量の時間微分が力となる。圧力を p と表しプロペラを通過する流管にこの関係を適用したのが、プロペラの運動量理論である。

運動量理論では、流場全体での密度 ρ が変わらないとし、プロペラ面を通過する流管に対して、プロペラ面 (propeller disc) の上流側と下流側のそれぞれの領域でベルヌーイの定理を適用すると、プロペラ円盤前方とプロペラ円盤後方は、以下に表せる。

$$p_0 + 1/2 \cdot \rho v_0^2 = p_1 + 1/2 \cdot \rho v_1^2 \quad (2.4)$$

$$p_1 + 1/2 \cdot \rho v_1^2 + \Delta p = p_2 + 1/2 \cdot \rho v_2^2 \quad (2.5)$$

式(2.4)と式(2.5)から次の式が得られる。

$$p_0 + 1/2 \cdot \rho v_0^2 + \Delta p = p_2 + 1/2 \cdot \rho v_2^2 \quad (2.6)$$

一方、プロペラで発生しているスラスト Th とプロペラ面での圧力差 Δp の関係は、次のように表せる。

$$Th = \Delta p Sp \quad (2.7)$$

ここで Sp は、プロペラ円盤の面積である。また、速度との関係は運動量の微分を用いて、

$$Th = \rho v_1 Sp (v_2 - v_0) \quad (2.8)$$

で与えられる。よって、式(2.6)、(2.7)、(2.8)および無限前方と後方の圧力が等しいと仮定すると次に示す定理となる。

$$v_1 - v_0 = 1/2 \cdot (v_2 - v_0) \quad (2.9)$$

これは、無限後方における流体速度 v_2 と無限前方における流体速度 v_0 の差、すなわちプロペラによって加速される速度は、プロペラ面においては、そのちょうど半分だけ加速されるということを示している。

次に、翼素理論からプロペラが水中で作動するとき各翼で生じる揚力および抗力からスラストとトルクを示す。翼素理論は、プロペラ翼を幅の狭い 2 次元翼（これを翼素と呼ぶ）の集合と考え、翼素に働く流体力を半径方向に積分することでプロペラの流体力が求められるとした理論である。半径方向に多数の要素に分割し、それぞれに翼理論を適用し、生じる揚力と抗力から計算して得られる部分推力と部分トルクを翼全体にわたって積分することで、プロペラに働く力を調べる理論である。Fig. 2.9 において、プロペラの回転角速度 ω 、前進速度 v_A とする。半径 r のところの翼素を考えると、流入速度は v_r で、これにより揚力 dL と抗力 dD が生じる。プロペラ作動面と v_r のなす角を前進角 β とする。図より、スラスト Th は

$$dTh = dL \cdot \cos\beta - dD \cdot \sin\beta \quad (2.10)$$

トルク Tq は、

$$dTq = r(dL \cdot \sin\beta + dD \cdot \cos\beta) \quad (2.11)$$

となるため、この翼全体のスラストとトルクを得るには、これらをそれぞれ積分すればよいことになる。

ここで、プロペラ単独での性能を示す諸係数について示す。直径 D のプロペラが単独で一様流のなか、毎秒回転数 n で作動するときのスラストとトルクをそれぞれ Th 、 Tq とする。スラスト Th について、上記式(2.8)から、スラストは $\rho \cdot S \cdot v^2$ に比例すると考えられるため、速度 v としてプロペラ先端の周速度 $\pi n \cdot D$ をとり、面積 S としてプロペラ回転円の面積 $\pi/4 \cdot D^2$ をとると、

$$Th \propto \rho \cdot \pi/4 \cdot D^2 \cdot (\pi n \cdot D)^2 \quad (2.12)$$

となる。これを代表物理量で整理すると

$$Th \propto \rho \cdot n^2 \cdot D^4 \quad (2.13)$$

の関係を得る。ここで比例係数を Kt とすると

$$Th = Kt \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^4 \quad (2.14)$$

と表せる。これより

$$Kt = Th / (\rho \cdot n^2 \cdot D^4) \quad (2.15)$$

と得られる Kt をスラスト係数という。

次に、トルク Tq について示す。翼素理論によれば、トルクはプロペラ翼の各要素に生じる揚力および効力の回転方向分力に半径を乗じたものを積分して得られる。すなわち力としてのスラスト Th 、距離として直径 D をとり、代表物理量で整理すると

$$Tq \propto \rho \cdot n^2 \cdot D^4 \cdot D = \rho \cdot n^2 \cdot D^5 \quad (2.16)$$

の関係を得る。ここで比例係数を Tq とすると

$$Tq = Kq \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^5 \quad (2.17)$$

と表せる。これより

$$Kq = Tq / (\rho \cdot n^2 \cdot D^5) \quad (2.18)$$

と得られる Kq をトルク係数という。

プロペラの前進速度を v_A とし、角速度を ω とすると、回転方向の速度は $\omega \cdot D/2 = \pi n \cdot D$ である。この翼素は回転しながら前進するため、翼素の進む方向はこれらの合速度の方向となる。前進方向の速度と回転方向の速度の比は $v_A / \pi n \cdot D$ と表せる。プロペラ翼先端位置については $D/2$ であり、 π は定数であるため係数としては省略し、このときの比を J とすると

$$J = v_A / (n \cdot D) \quad (2.19)$$

この比例係数 J をプロペラ前進係数といい、プロペラ前進速度とプロペラ翼先端の回転速度の比を表す。

Kt 、 Kq および J を用いて、最も基本的なプロペラ性能を示す単独プロペラ効率を表すと下記の関係式が得られる。

$$\begin{aligned} \eta_0 &= \text{THP} / \text{PHP} = Th \cdot v_A / (2\pi n \cdot Tq) \\ &= Kt / (2\pi \cdot Kq) \cdot v_A / (n \cdot D) \\ &= (J / 2\pi) \cdot (Kt / Kq) \end{aligned} \quad (2.20)$$

ここで、THP (Thrust power、Thrust horse power) は、プロペラが推力 Th を発してプロペラ前進速度 v_A を得るときの出力で、 $THP (W) = Th (N) \cdot v_A (m/s)$ である。PHP は単独状態での伝達出力 DHP (Delivered power、Deliverd horse power) のことでプロペラの回転数 n (rps)、プロペラに伝えられるトルクを Tq (Nm) とすると $PHP (W) = Tq (Nm) \cdot 2\pi n (rps)$ である。

以上により一様流中の単独状態のプロペラ性能を示す単独プロペラ効率 η_0 は、無次元係数のプロペラ前進係数 J 、スラスト係数 Kt 、トルク係数 Kq で表せる。プロペラ前進係数 J を横軸にとった時の Kt 、 Kq および η_0 との関係の例を Fig. 2.11 に示す。式(2.14)と式(2.17)で示したスラスト係数 Kt とトルク係数 Kq は、Fig. 2.11 でも示したようプロペラ前進係数 J によって変化する。

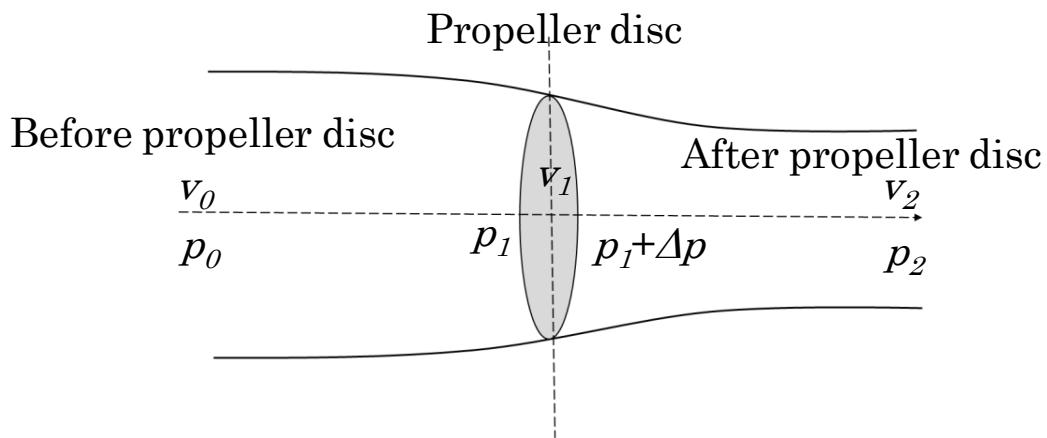


Fig. 2.8 Speed and pressure around the propeller

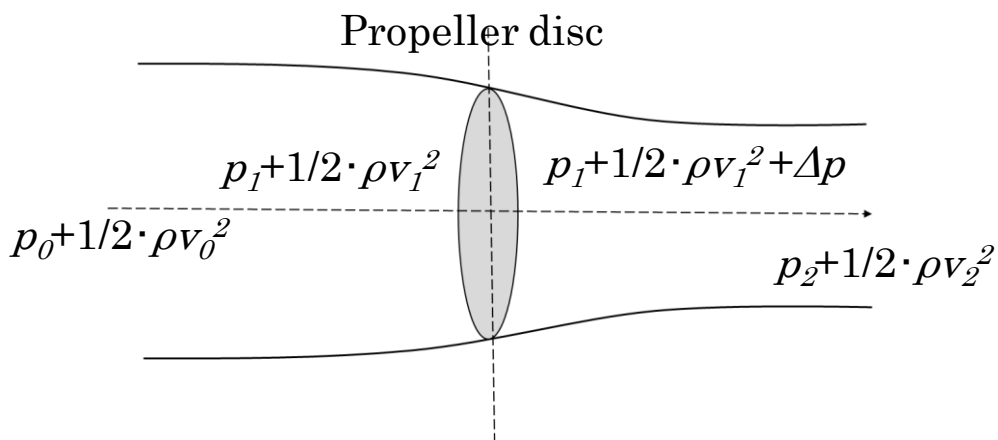


Fig. 2.9 Application of Bernoulli's theorem

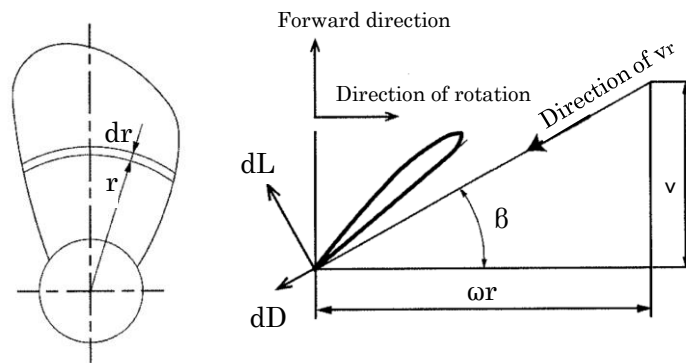


Fig. 2.10 Blade element of propeller and force acting on the blade element

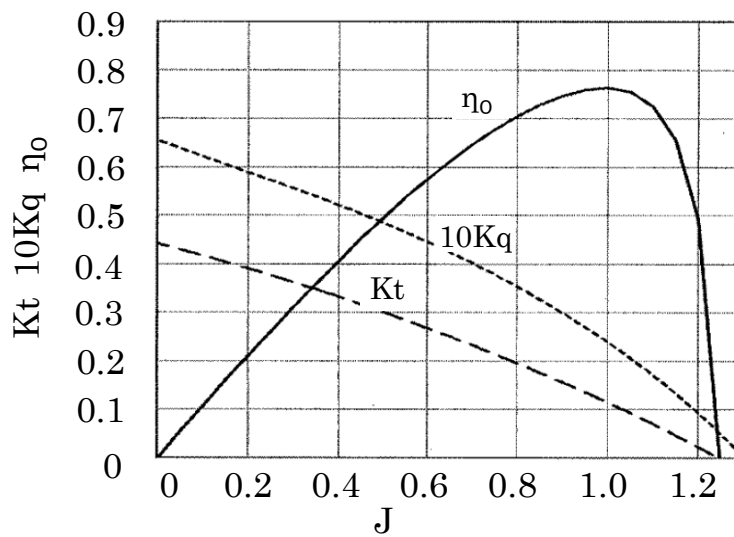


Fig. 2.11 Sample of propeller characteristic chart in open

2.4 従来の研究

プロペラの空気吸い込みに関する研究は、歴史的には、浅い喫水の高速船舶で用いられたサーフェスプロペラと呼ばれる半没水プロペラの研究からスーパーキャビテーションプロペラの研究へと段階をあげ、最近では、オフショア船と呼ばれる陸から離れた沖合で OIL&GAS 開発等に用いる作業船や輸送船で用いているスラストの空気吸い込みに関する研究が行われている。

先駆的には、1950 年代に志波が、プロペラの空気吸い込みに関する様々な実験的研究を実施している[34]。空気吸い込みによるスラストロスモデリングは、1960 年代から試みられている。例えば、ブレード要素法、リフティング・ライン理論、リフティング・サーフェス理論。最近では、サーフェスプロペラの非定常性能を予測するため 3 次元境界要素法が Young と Kinnas (2004) によって拡張されている。最も良く使われる乱流の計算方法 RANS (Reynolds averaged numerical simulation) を用いたサーフェスプロペラのモデル化を試みた最初の既知の研究は、Caponnetto (2003) によって報告されている。さらに、RANS による完全没水プロペラの空気吸い込みをモデル化する最初の試みは、Califano and Steen (2009) によって実施され、最も厳しいスラストロスの実験結果との良好な一致を得ていると報告されている。

プロペラ周辺の空気吸い込み (Ventilation) について、特に、船位保持 (Dynamic positioning : DP) に用いられるスラストでは、空気吸い込みによるスラスト低下が発生しやすく、位置制御やエネルギーマネジメントに多大な影響を与えるため、様々なプロペラ特性を示すパラメータを用いて研究されてきたが、近年、数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics : CFD) 解析による数値化する研究が行われるようになってきた (Califano and Steen, 2011; Kozłowska et al., 2011)。

Califano and Steen では、空気吸い込みによる影響に関するこれまでの研究について概観することにより、半没水プロペラ (surface piercing propeller) に関する研究成果を評価するが、高い負荷がかかった完全に没水したプロペラ (fully submerged propeller) については、より精度の高い数値シミュレーションの実現が目的とされ、数値モデルによる計算結果が、実験結果とも有意な結果が得られたことが報告されている。

Kozłowska et al.では、さらに、高速度カメラで空気吸い込み状態を撮影することによって、CFD による数値シミュレーションの精度を検証するための実験が行

われた。プロペラが発生させるスラストと、軸に負荷されたトルクとの関係について、空気吸い込みが発生していない状態と、空気吸い込みが発生した状態について、数値シミュレーションと実験による計測結果との比較を行うことによって検証が行われた。

いずれの数値シミュレーションにおいても、プロペラ特性のうちのスラスト係数およびトルク係数に着目し、これら係数の定義について説明しているが、スラストロスがない状態のスラスト係数を KT_0 と定義し、空気吸い込みが発生することによってスラストが低下した際のスラストスラスト係数を KT と定義した場合の、 KT/KT_0 の時間変動が分析指標としてもちいられている。スラストは、Kozłowska et al.においては動力計 (dynamometer) を用いて計測されている。

また、船位保持システムのスラストは電動モータで駆動されることが多く、空気吸い込み等を原因とした急激な負荷変動をもたらすスラストの変動が船内の電力系統に与える悪影響が問題とされてきた。モータのフィードバック制御に用いるパラメータとして、軸回転数およびトルクについては容易に取得できるものの、スラストを計測することは困難であることから、取得したトルクあるいは回転数を示す値からスラストを推定する手法が研究されてきた (Pivano et al., 2008; Sorensen and Smogeli, 2009) [17][18]。

Pivano et al.では、従来のスラスト推定方法は、計測されたプロペラトルクとの直線的な関係に基づいて推定されるスラストを算出する点にあると認識し、プロペラトルクおよび軸回転数を推定するためのロバストで非線型的なオブザーバーに基づいて、スラストを算出する手法が提案されている。プロペラ特性には、伝統的に用いられてきたスラスト係数やトルク係数のみではなく、前進係数を-1~-0.5、-0.5~0、0~0.5、0.5~1 の4象限で分析するための4象限係数を用いたスラスト推定手法を提唱している。推定されたスラストの精度を検証するために、ウェーキスクリーンを用いてスラストを計測する実験が行われ、有用性が検証された [19][36]。

Sorensen and Smogeli では、電動モータで駆動されるプロペラの特解析は、もっぱら船位保持システムに用いられるスラストを中心として行われてきたことを指摘し、船舶の推進に用いられるプロペラに対して、空気吸い込み等による負荷変動に対応したモータの制御を可能とすることを目的として行われた。プロペラ特性としては、従来から用いられているスラスト係数およびトルク係数を用いており、空気吸い込み等によって発生するスラストロスについては、上述の Califano and Steen や Kozłowska et al.と同様に、 KT/KT_0 で表されるスラスト減少係数が用い

られている。ここでは、回転数制御、トルク制御、およびこれらを合成した制御について実証実験を行い、精度の比較がなされた結果、スラスト変動の抑制には、他の2方式と比較してトルク制御が有効であることが報告された[20]。

一方、気泡流中において、ボイド数をパラメータとした研究もおこなわれている。気液二相流中の流体機械の性能を明らかにすることを目的として、構成要素である翼回りの二相流動、中でも基本となる気泡流動について実験及び数値解析が行われている。二相流回流水槽を建設し単独翼回りの気泡流動について観察された結果、翼の揚力係数がボイド率の上昇とともに低下、気泡は翼背面に集中し翼の下流に高ボイド率領域からなる後流を形成することを明らかにしている。さらに、気泡流に対する支配方程式を気液間の相対速度を考慮し定式化し、数値解析を行っているが、ボイド率分布の特徴など、実験と計算で定性的な一致は見られるが、定量的にはかなりの違いがみられ、現象の解明には至らないとしている[30]。

また、船舶における二酸化炭素排出量を削減するため、航行時の船体抵抗の主成分である乱流摩擦抵抗削減法のうち船体近傍に空気を注入する空気潤滑法が研究されている[31]。空気潤滑法を船舶に提要すると、船底を流れた気泡は船尾で作動するプロペラに流入し、実船実験において流入気泡によってプロペラ性能が低下したことが報告されている[32][33]。そこで、曳航水槽において均一な気泡流中でのプロペラ単独性能試験（POT 試験）を行い、プロペラに働くスラスト、トルクを計測しプロペラ単独性能に及ぼす気泡影響が実験的に調べられている。実験結果より、空気潤滑による船体抵抗低減とプロペラ特性の変化について検討され、気泡の流入によるプロペラ効率の低下は、船体抵抗の低減によるプロペラ荷重度の低下とプロペラ流入速度の増加によるプロペラ効率の向上に補われる傾向にあり、実船における気泡流入によるプロペラ効率の低下は比較的小さいと推測できるとしている[21]。

これらの研究はすべて、問題を簡素化することを目的とした何らかの近似に依存しているため、空気吸い込みをカテゴリに分類することが可能であり空気吸い込みとその効果を理解するためには重要であるが、船舶システムとのリンクを十分に考慮していない。これらとは対照的に、船舶システムと空気吸い込みの関係を通常運転中の船舶の推進システムによって検出するフルスケールでの研究もある。これは、ロールスロイス・マリン（Rols Royce Marine）が開発した HeMoS（Health Monitoring System）が提供するデータを使用し空気吸い込み事象を検出する研究である。HeMoS システムは、推進システム構成要素の故障の可能性を早期に評価することを目指している監視システムで、推進システム状態、および船体動的位置

決めシステムを 1 Hz で連続的に記録するものである。船舶運行のほぼ 1 年半のデータを分析し、船舶が運航している海域の気象観測と比較している。しかしながら HeMoS システムによって収集されたデータの解析手法を紹介するにとどまっている [35]。

第3章 実験装置

3.1 実験装置

Fig. 3.1 に示す東京海洋大学の単一インペラー式水平循環型の大型回流水槽[22]は、本体寸法 L 22.00 m × B 8.35 m × H 3.05 m、送流用インペラー直径 1.6 m、最高流速 2 m/s に至るまで測定部流速の平均値に対する偏差は±2.0 %以内である。主要仕様を Table 3.1 に示す。

上記の単一インペラー式水平循環型の大型回流水槽に次に示す実験装置を設置した。実験装置のブロック線図を Fig. 3.2 に、詳細ブロック図を Fig. 3.3 に示し、構成する装置を説明する。モータには出力 5 kW の交流サーボモータ（安川電機製 SGM7A-50AFA61）を用いモータドライブ（安川電機製 SGD7S-330A00A）によって駆動した。モータドライブの制御周期は 126 μ s である。今回の研究では、トルク制御モードと回転速度モードによりモータを運転した。推進機部はヤマト発動機製 321 型を用いた。プロペラ直径は 187 mm である。

モータドライブは電子制御ユニット（横河電機製 FA-M3）が発生するトルク指令を受け指令値に追従したモータの動作をさせると同時に、トルクモニター出力と回転速度モニター出力をした。モータの実効電流・電圧・電力を計測するためモータドライブからモータへ動力を伝える主回路ケーブルに電流プローブ（日置電機製 model3274）と電圧プローブ（日置電機製 modelL9438-50）を設置して電力計（日置電機製 model3183）によってモータ実効電圧・電流・電力を計測した。また、スラスト力を計測するために、ロードセル（A&D 製 LC1122-K500）を推進機と水槽への固定との間に設置した。これらのデータをデータロガー（キーエンス製 NR-600）によりサンプリング速度 1 kHz で集録した。データロガーで収集するデータは、回転速度指令値、トルク指令値、回転速度モニター出力値、トルクモニター出力値、モータ実効電圧値、モータ実効電流値、モータ実効電力値とロードセル測定値である。

また、プロペラ周辺気泡挙動を光学的に観察するために、高速度カメラを回流水槽の側面観測部に設置した。実験に用いた高速度ビデオカメラは Photron 社製 Fastcam SA4 であり、レンズにはニコン社製 AF-S Micro NIKKOR 60mm f/2.8G ED を用い、シャッター速度およびフレーム速度は 125 Hz、絞り値は 2.8 とした。水槽底部に設置したハロゲンライト光源により気泡およびプロペラ部を可視化し

た。電子制御ユニットからのトリガー信号でモータ回転速度とカメラの撮影開始を同期させた。

装置とその設置を画像で示す。モータを含む推進装置とスラスト測定用ロードセルは Fig. 3.4 に示すよう水槽上部測定部に設置した。Fig. 3.5 に測定部窓に設置した高速度カメラと実験風景を示す。モータドライブ、ロガーなど制御機器と計測器を Fig. 3.6 に、実験装置の操作とデータ整理を行う PC を Fig. 3.7 に示す。Fig. 3.8 に使用したモータとドライブの外形図とモータとドライブの組み合わせによる T・N 特性（トルク－速度特性）と主仕様[23]を示す。Fig. 3.9 と Fig. 3.10 に実験で使用したセンサーとして、プロペラ周囲気泡状態を画像観察する高速度ビデオカメラ[24]とスラスト測定に用いたロードセル[25]の外観と主仕様を示す。

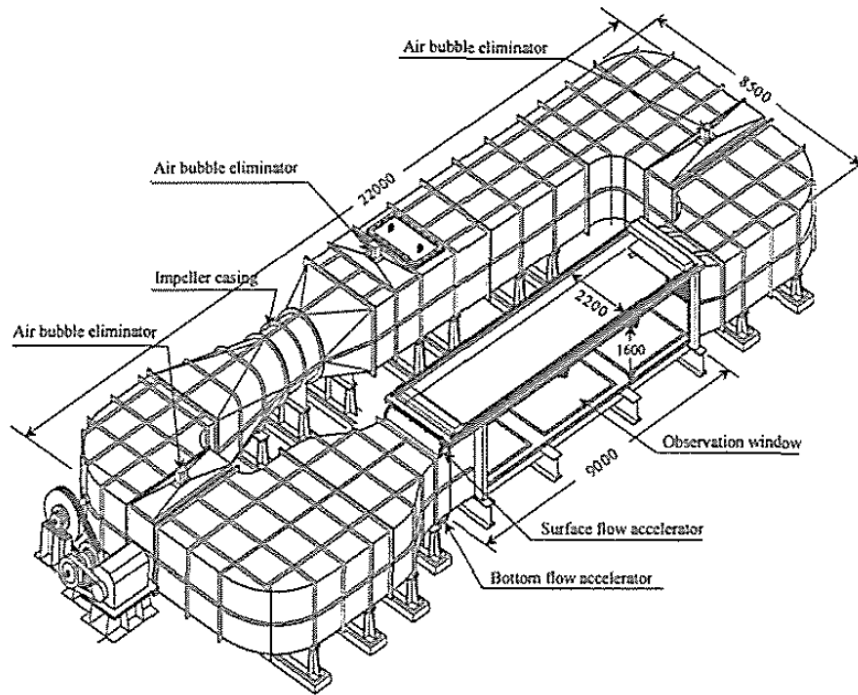


Fig. 3.1 Horizontal circulation water channel

Table 3.1 Spec of horizontal circulation water channel

Horizontal circulating channel with open water section	
Max. dimensions of device	L 22.00 m × B 8.35 m × H 3.05 m
Dimension of test section	L 9.00 m × B 2.20 m × D 1.60 m
Impeller motor output	90 kW
Diameter of impeller	1.60 m (Kaplan type 4 blade)
Flow velocity	0-2.0 m/s (Homogeneity/±2.0 %)
Reciprocatory oscillation flow	Amplitude/±0.5 m/s、 Frequency/20 s
Acceleration flow	0.1-1.5 cm/s ² (Final velocity 1.0 m/s)
Surface and bottom flow accelerator	Water setting rotor with control of secondary flow
Air bubble eliminator	Diaphragm type vacuum pump (4 set)
Water volume	150 ton

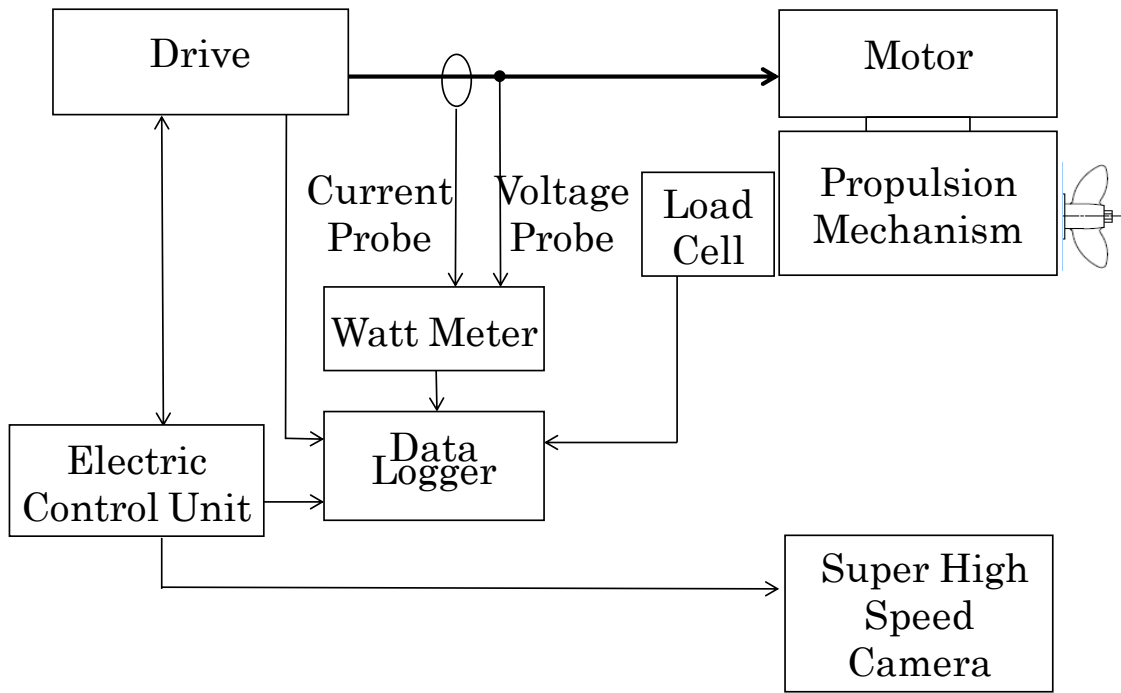


Fig. 3.2 Block diagram of the experiment

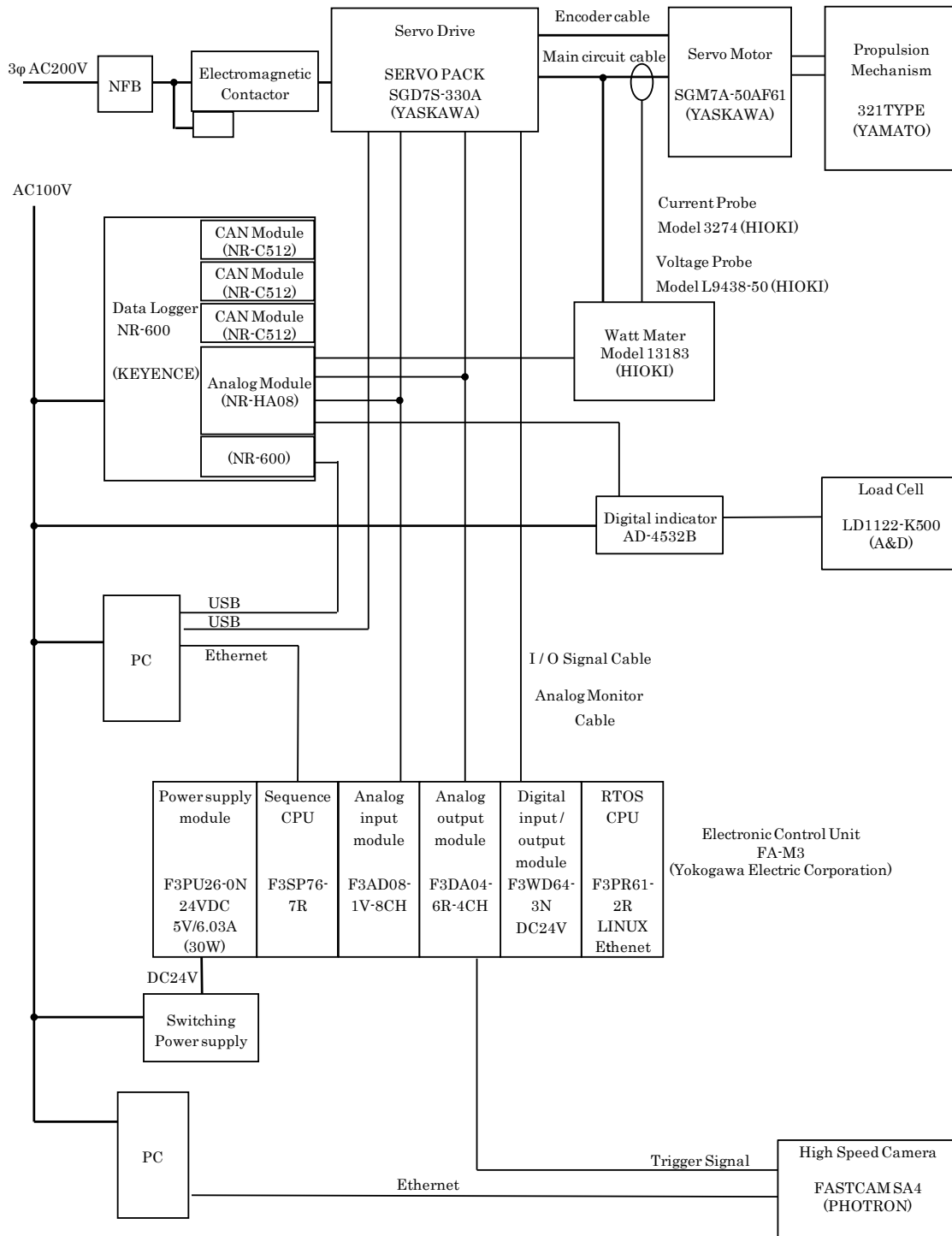


Fig. 3.3 Details block diagram of the experiment

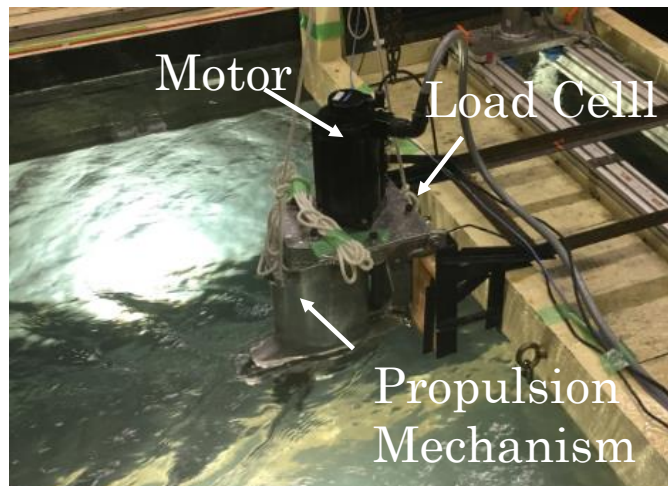


Fig. 3.4 Measuring part of horizontal circulation water channel



Fig. 3.5 Observation window of horizontal circulation water channel

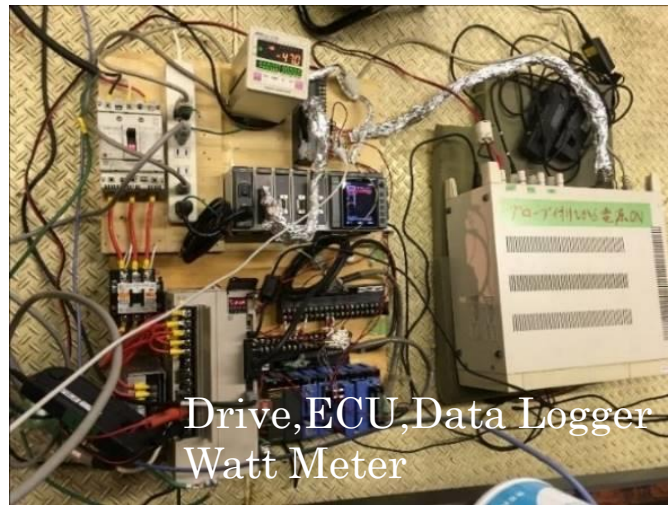
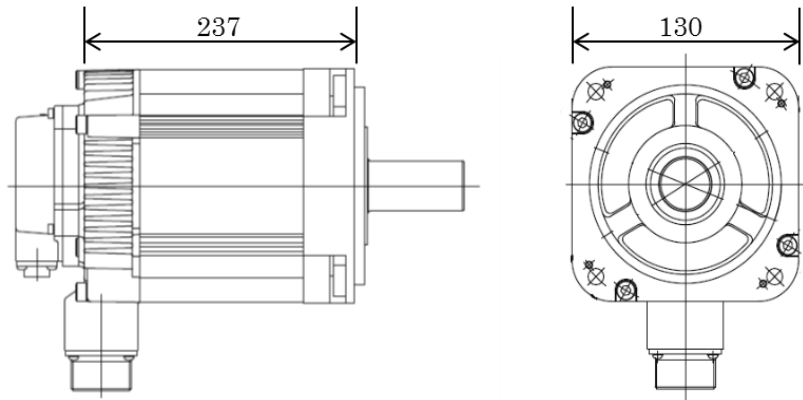


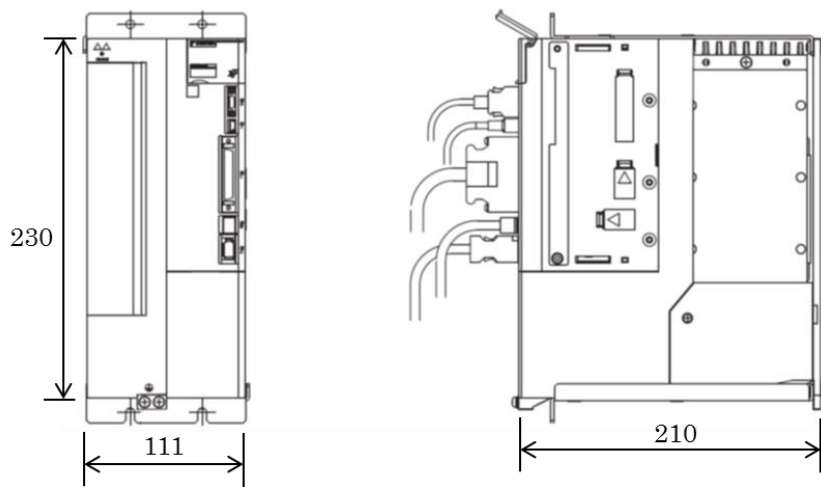
Fig. 3.6 Control equipment and measuring equipment



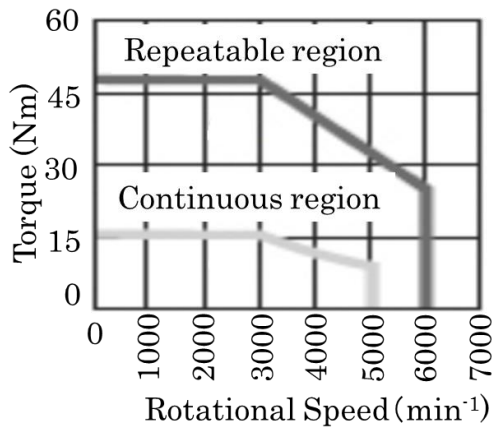
Fig. 3.7 PC for operation and data collection



Motor :SGM7A-50AFA61



Drive :SGD7S-330A00A



T - N characteristic

Rated power	5 kW
Rated/ Peak Torque	15.8 Nm/ 47.6 Nm
Rated/ Peak Current	3000 min ⁻¹ / 6000 min ⁻¹
Torque constant	0.604 Nm/ A

Main specification

Fig. 3.8 Details block diagram of the experiment

High-speed digital video camera : FASTCAM SA4



Imaging element	C-MOS Image sensor
Element resolution	1024 x 1024 pixel
Density gradation	Monochrome AD conversion 12 bits Color AD conversion 36 bits (RCB each 12 bits) Bayer color filter system
Shutter type	Electronic shutter
Recording method	IC memory
Gain control	Hardware LUT installed
Video output signal	NTSC / PAL or HD-SDI

Fig. 3.9 High-speed digital video camera

Load cell : LC1122-K500



Rated Capacity (R.C.)	5000 Nm
Rated Output	1.0197mV/V+20%−0%
Maximum safe overload (R.O.)	150% of R.C.
Compensated Temperature range	−10°C~50°C
Temperature Coefficient on zero balance	0.1% of R.O./10°C
Temperature Coefficient on rated output	0.03% of Load/10°C Typ.
combined error	0.04% of R.O.

Fig. 3.10 Load cell

3.2 実験条件と実験方法

プロペラの水槽における設置状態を Fig. 3.11 に示す。実験装置は、気泡吸い込みによるプロペラ負荷が大きいボラードプルに近い状態になるよう、推進装置を回流水槽に固定し、また、プロペラ没水深度、回流速度とプロペラ径を、それぞれ、185 mm、0.5 m/s と 0.187 mm に設定した。将来的に前進速度やプロペラ没水深度の影響を含めた議論が必要になるが、実験は、これらの条件を固定した単純体系において、プロペラ周囲気泡形成と負荷変動の関係に着目した実験としている。

実験では、水面からアンチキャビテーションプレートまでの深さ D_s を測ることでプロペラ浸水深さ D_p ($D_p = D_s + 115$) を決めている。事前の予備実験から空気の吸い込みが発生しやすい条件として、プロペラ浸水深さ $D_p = 185$ mm、水槽流速 $V_f = 0.5$ m/s とした。トルク一定制御モータ推進システムでの実験では、モータトルクは、定格トルク 15 Nm の 100 %、95 %、90 %、の指令値を設定し、0 (Nm) からトルク設定値(Nm)までを 10 秒間でリニアに上昇後トルク一定状態で 20 秒間動作させた。さらに、回転速度一定制御モータ推進システムでの実験では、モータ回転数は、2000 (rpm)、1950 (rpm)、1900 (rpm)指令値を設定し、0 (rpm)から回転速度設定値(rpm)までを 10 秒間でリニアに上昇後回転速度一定状態で 20 秒間動作させた。

Table 3.2 に実験に用いたモータドライブシステムとプロペラ推進メカニズムの仕様を示す。モータとモータドライブの組み合わせでの T-N (トルク・回転速度)特性は、Fig. 3.8 に示した。実験では、トルクは 15 (Nm)以下、回転速度は、2000 (rpm)以下と連続使用領域内で使用している。

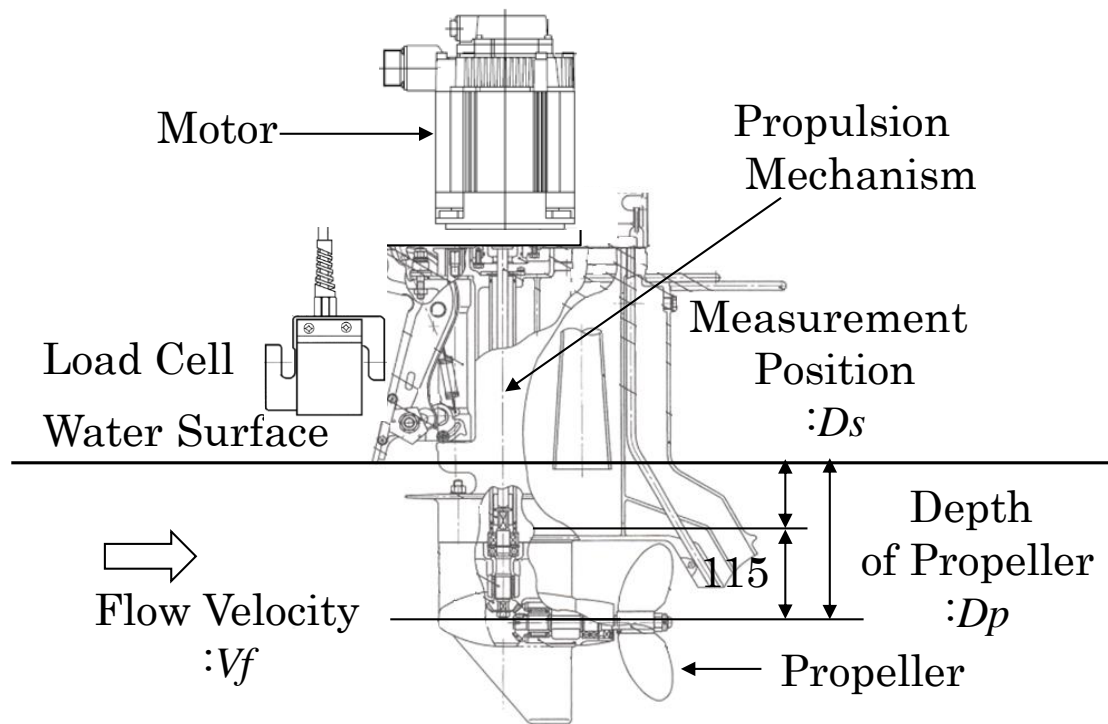


Fig. 3.11 Propulsion mechanism installed in the circulation water channel

Table 3.2 Spec of motor drive system and propulsion mechanism

AC Servo Motor YASKAWA Electric Corporation	
Model	SGM7A-50AFA61
Rated power	5 kW
Rated/Peak Torque	15.8 Nm / 47.6 Nm
Rated/Peak Current	3000 min ⁻¹ / 6000 min ⁻¹
Torque constant	0.604 Nm/A
Servo Drive YASKAWA Electric Corporation	
Model	SGD7S-330A00A
Rated / Peak Current	32.94 A/84 A
Propulsion Mechanisms YAMATO MOTOR CO.LTD	
Model	model321
Propeller Dia'/Pitch	187 mm/ 215 mm

3.3 画像処理方法とノイズ処理方法

3.3.1 ノイズ低減

データロガーにより取得した信号にはノイズ成分が重畳している。ノイズの原因となるのはプロペラ・サーボモータの回転に対する電氣的・機械的な変動が主となる。これらはドライブの制御周期及びプロペラの回転速度に起因する。従って、ノイズ成分は高周波成分として扱うことが出来るため、低域通過フィルタを用いて実現象に相当する信号成分を抽出した。

低域通過フィルタの実装に当たっては、周波数毎の位相遅れを防ぐために有限インパルス応答 (FIR; Finite Impulse Response) フィルタ [26] を採用した。フィルタの設計には窓関数法を用い、時定数 101 ms (タップ数: 101) とし、カットオフ周波数をプロペラ回転数の半分に相当する周波数に設定した。計測中にプロペラ回転数は変化しているため、カットオフ周波数も経時的に可変させた。

3.3.2 画像信号処理方法

光学像の中から、プロペラ周囲の領域を切り出し、その領域内の輝度値を各撮影フレームで算出した。処理フレーム領域は、プロペラ直径が 600 px に対して、250 px × 620 px の領域 (横 370-620 px、縦 210-830 px) であり、換算寸法としては 78 mm × 190 mm となる。撮影画像における処理領域を Fig. 3.12 に白線で示す。各画素における 12 bit の輝度信号を百分率に置き換え、領域内の画素全体の平均輝度を算出した。フレーム領域内平均輝度値はプロペラの回転に応じて、プロペラ自体からの反射強度で変化している。したがって、有限インパルス応答 (FIR; Finite Impulse Response) フィルタを用いた低域通過フィルタにて、プロペラ回転による輝度変動成分を除去し気泡平均輝度への変動寄与成分のみを抽出した。フィルタの時定数は 1 秒 (タップ数: 125) に設定した。Fig. 3.13 の画像例は、プロペラ周囲に気泡が発生状態の画像で、白線でフレームを示している。領域内平均輝度値がプロペラ後方の気泡の影響を受けていないことがわかる。

Fig. 3.14 は、フレーム領域内平均輝度値をグラフに表した例で、回転速度一定制御モータ推進システムでの実験において、モータ回転数が 1950 (rpm) におけるプロペラ周辺の気泡を高速度カメラで捉えた画像から得ている。上記のノイズ成分

があることがわかる。**Fig. 3.15** はこれを上記フィルター処理をして得たグラフである。

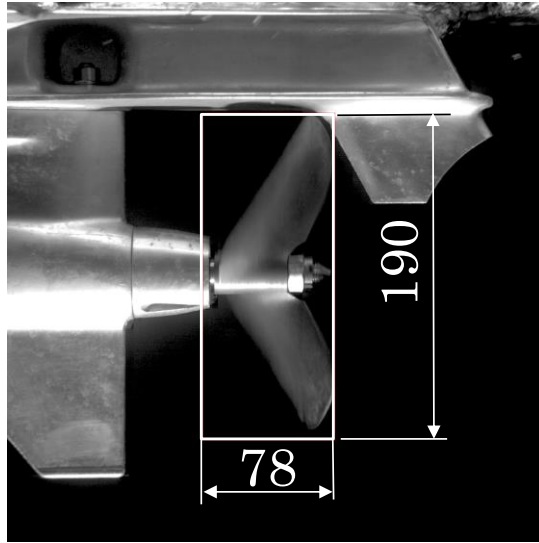


Fig. 3.12 Image processing region (mm)

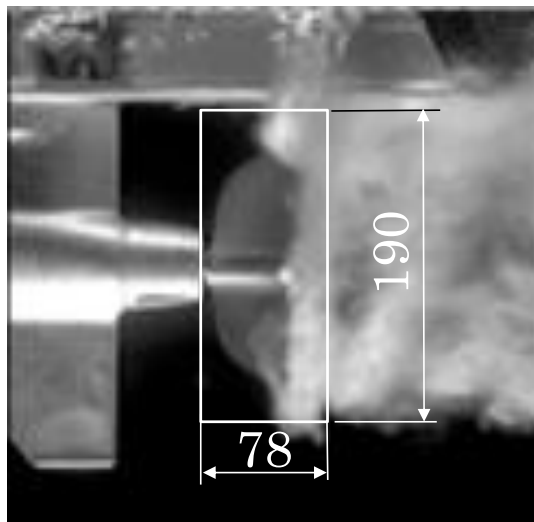


Fig. 3.13 Image processing area and typical images of near-propeller bubbles (mm)

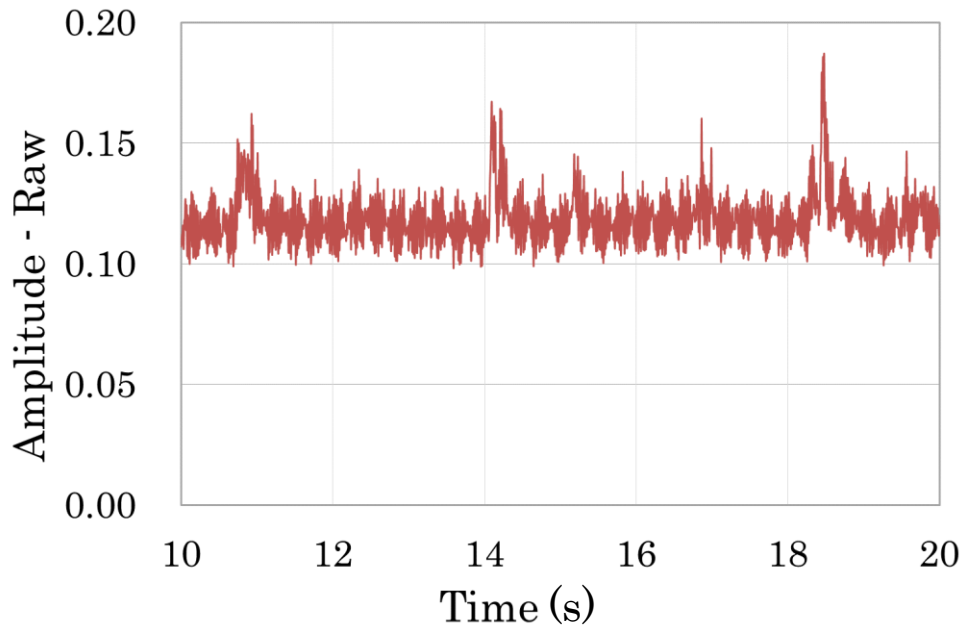


Fig. 3.14 Average brightness value

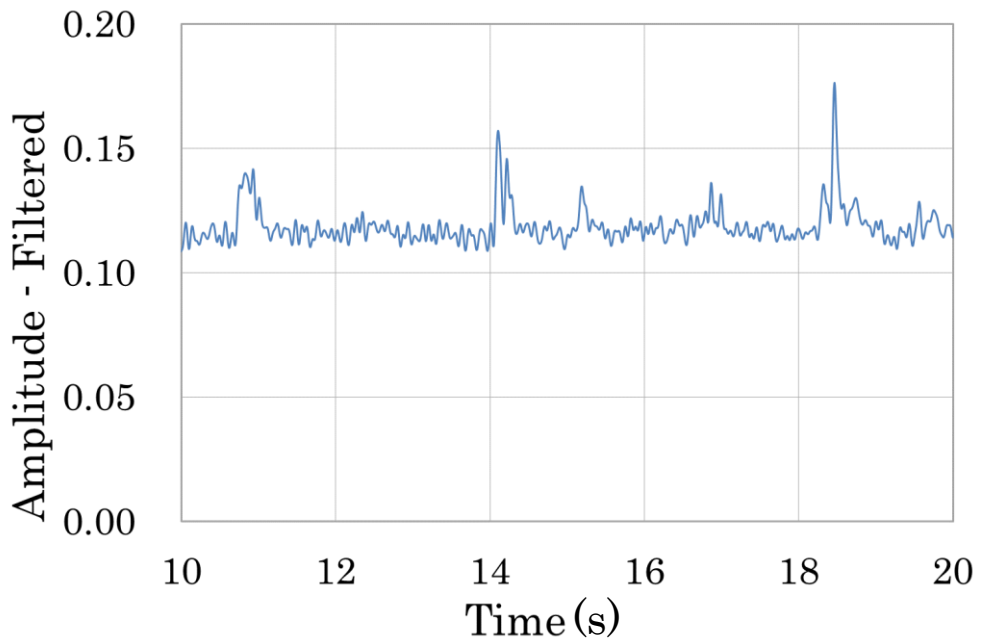


Fig. 3.15 Average brightness value after filtering

第4章 電気モータ推進システムによるプロペラ周囲の気泡の計測

4.1 緒言

プロペラ推進系とモータドライブシステムで構成する電気モータ推進システムにおいて、使用される交流モータドライブシステムは、パワーエレクトロニクスの進歩により、高トルク、高トルク応答性（トルク指令から電流が立ち上げるまでの電氣的応答遅れのみ数 ms）、ベクトル制御による高精度制御、高精度の状態出力（電流、電圧、トルク、回転速度）など高い性能と、トルク制御モード、回転速度制御モードなどの運転機能を準備している。しかしながら、電気モータ推進システムが従来の内燃機関と同様に使われその持っている機能、性能が有効に活用されていない。電気モータ推進システムでは、モータは、トルク一定制御方式や回転速度一定制御方式で制御され、トルク一定制御方式では、指令したトルクに対しプロペラ特性に沿った回転速度で動作しモータ出力が決まる。回転速度一定制御方式では、指令した回転速度に対しプロペラ特性に沿ったトルクで動作しモータ出力が決まる。それゆえ、モータドライブへの指令が一定時にモータ動作が変動（トルク一定制御方式では回転速度が変動し、回転速度一定制御方式ではトルクが変動する）すると、プロペラ特性が気泡などの影響で変動していることになり、モータドライブからの状態信号は、負荷変動の状態を表していることになる。すなわち、モータドライブからの状態信号でプロペラ周囲の状態をセンシングできることを示している。

本章では電気モータ推進システムを、空気の吸い込みが発生しやすい条件（プロペラ没水深さ、流速、トルク、回転速度など）で設置・設定し、プロペラ周囲に気泡を発生させる環境にて、トルク一定制御方式と回転速度一定制御方式で動作させた。モータドライブからのトルクモニター信号、回転速度モニター信号と高速度ビデオ画像解析によるプロペラ周囲気泡挙動を、回流水槽内で同時計測し、モータドライブからの状態信号（トルク、回転速度）の解析により、気泡発生及びその状態、スラスト減少とそのピークの大きさを正確にセンシングできることを初めて確認した。

4.2 トルク一定制御におけるプロペラ周囲の気泡の計測[27]

4.2.1 実験結果

第 3 章で示した実験条件により、トルク一定制御モータ推進システムで実験を行った。初めに、空気の吸い込みが発生しない状態としてモータトルクは、定格トルク 15 Nm の 85 % に指令値を設定し、0 (Nm) からトルク設定値(Nm)までを 10 秒間でリニアに上昇後トルク一定状態で 20 秒間動作させた。Fig. 4.1 に計測した結果を示す。横軸は回転開始からの経過時間を、縦軸は左軸と右軸でそれぞれの示す項目を表している。図中①～⑥は、①モータトルク(Nm)、②モータ回転速度(s⁻¹)、③モータ実効電圧(V)、④モータ実効電流(A)、⑤スラスト(N)、⑥プロペラ周辺の輝度(%)、⑦モータ実効出力(kW)を示す。横軸は時間で秒を示している。データのサンプリングは 1 ms である。モータトルクをリニアに上昇させるとモータ回転速度 (図中②) は、2.2 節プロペラ特性式(2.17)で示した特性に沿ってトルクの 1/2 乗に比例して上昇し一定回転速度になり、スラスト (図中⑤) は、式(2.14)に示すよう回転速度の 2 乗に比例するのでリニアに上昇し、一定スラストになる。2.2.3 交流駆動モータの基本特性式(2.1)で示すようモータトルクはモータ電流に比例する、図中のモータ実効電流がモータトルクに比例してリニアに上昇しているのが確認できる。また、式(2.3)で示すようモータ電圧はモータ回転速度に比例する、図中のモータの実効電圧がモータ回転速度に比例しているのが確認できる。

次に、空気の吸い込みが発生する状態としてモータトルクは、定格トルク 15 Nm の 95 % に指令値を設定し、0 (Nm) からトルク設定値(Nm)までを 10 秒間でリニアに上昇後トルク一定状態で 20 秒間動作させた。Fig. 4.2 に計測した結果を示す。0 (Nm) からトルク設定値(Nm)までの 10 秒間は、上記空気の吸い込みが発生しない状態と同様に回転速度はトルクの 1/2 乗に比例し、スラストはトルクに比例していることが確認できる。モータ実効電流はモータトルクと同様ピークの発生はなく定トルク制御がされている。モータ実効電圧とモータ実効出力は回転速度②に同調してピークを計測できているが時間遅れが発生している。この原因としては、電流と電圧の計測に用いた電力計の処理遅延のためであり、ピーク変動の検討において、電流値と電圧値を除外した。Fig. 4.3 は Fig. 4.2 の出力トルクが一定の領域を拡大したもので、Table 4.1 に示すデータは、図上の数字 1-13 点のピークポイント値を表す。輝度が上昇した際、すなわち、気泡の吸い込みが発生したタイミングでスラ

ストが低下し、同時に定トルクが保たれているため回転速度が上昇している事が分かる。Fig. 4.4 にピークポイント 1 の発生からピークまでの推移を約 80 ms 毎に示す。吸い込み発生直前からキャビテーションが観られるが、先で示したフレーム領域では、プロペラ後方の気泡に影響されず吸い込み状態が観測で来ているのがわかる。

回転速度ピーク時刻を基準時刻として、その時刻に対応する高速度ビデオカメラによるプロペラ近傍平均輝度ピーク時刻データとの差異を Fig. 4.5 に示す。輝度ピーク時刻は回転速度ピーク時刻に対して最大 19 ms のばらつきがある。このばらつきは高速度カメラのフレームレート 8 ms による誤差と、気泡の詳細な挙動によってプロペラ負荷特性が変化しているためだと考えられるが、全体的に同期しており、定性的な傾向はみられない。従って、回転数の上昇が気泡吸い込みと同時に起こっていることが分かる。このことから、モータドライブ（制御周期 126 μ s）が気泡吸い込みによる負荷変動を計測し、高速に回転速度を制御されていることが分かる。従って、定トルク制御モードにおいては、ドライブからの回転数出力信号をモニタリングすることで、吸い込み現象を計測できる事が示された。一方、回転速度ピーク値とスラストピーク時刻との差異を Fig. 4.6 に示す。全体的にスラストピークは回転速度ピークより遅延しており、平均で約 50 ms 程度の遅延が観測された。この理由としては、ロードセルを推進装置の固定するレールに設置したことによって、推力の計測が、推進装置の固定機構の撓みの影響を受け、これにより、実際の推力変化に対してロードセルへの応答が機械的に遅延したためであると考えられる。

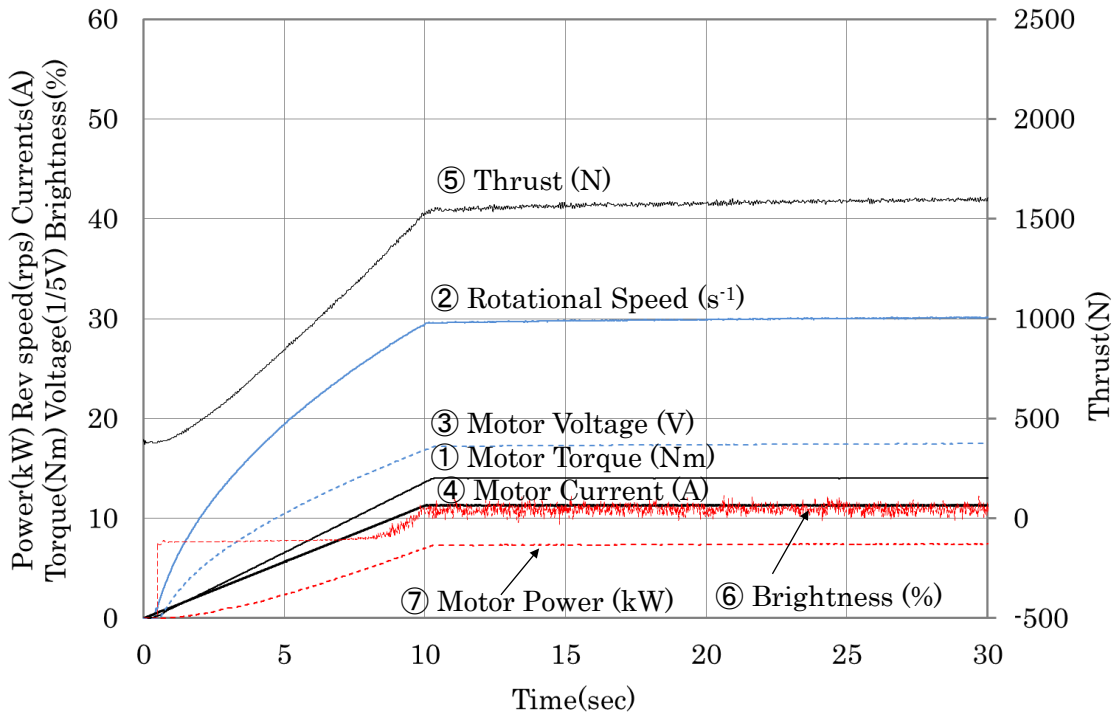


Fig. 4.1 Measurement example without bubble entrainment

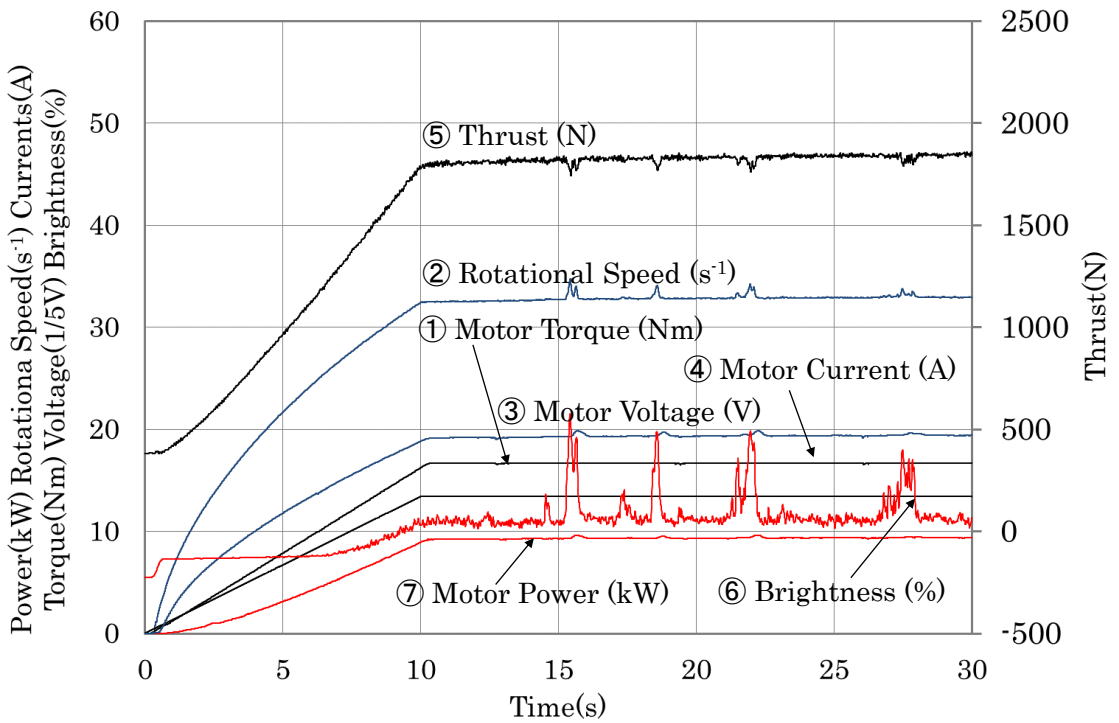


Fig. 4.2 Measurement example with bubble entrainment

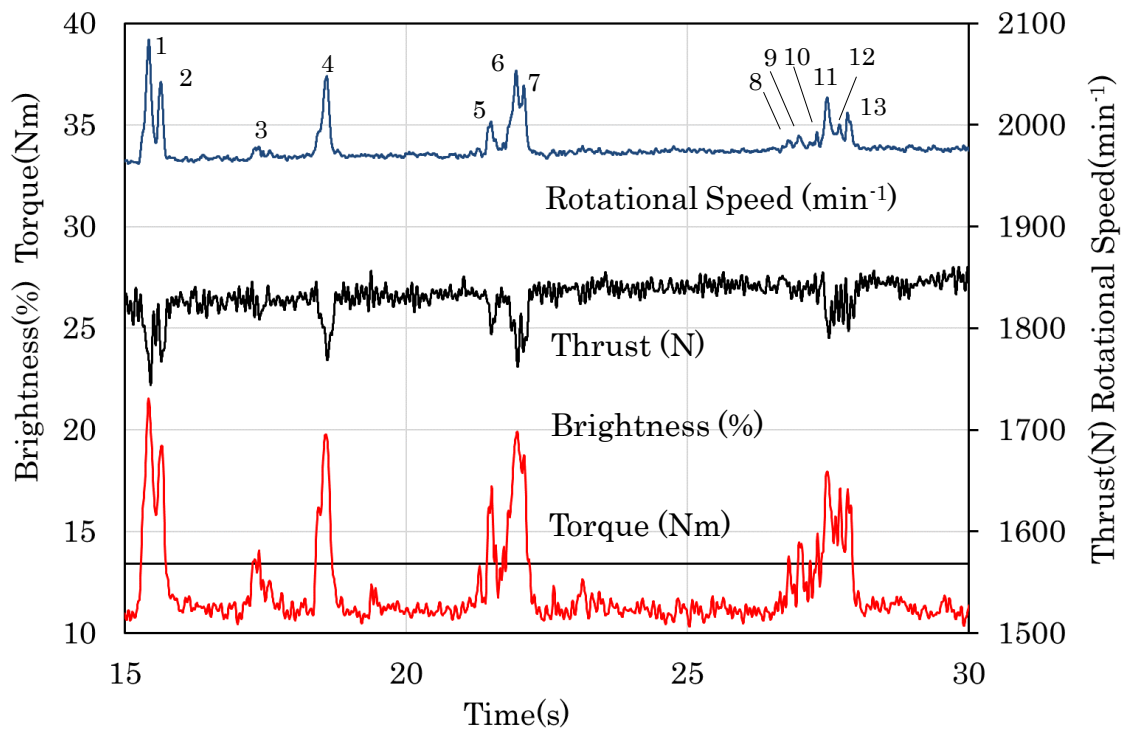


Fig. 4.3 Peak point graph

Table 4.1 Peak point data

	1	2	3	4	5	6
Brightness (%)	21.54	19.24	14.08	14.08	17.22	19.90
Rev speed (s^{-1})	34.73	34.04	32.98	34.13	33.39	34.22
Thrust (N)	2,073	1,851	1,355	1,355	1,657	1,915
	7	8	9	10	11	12
	18.74	13.79	14.49	14.90	17.96	17.11
	33.98	33.07	33.16	33.22	33.78	33.33
	1,803	1,327	1,394	1,434	1,729	1,642

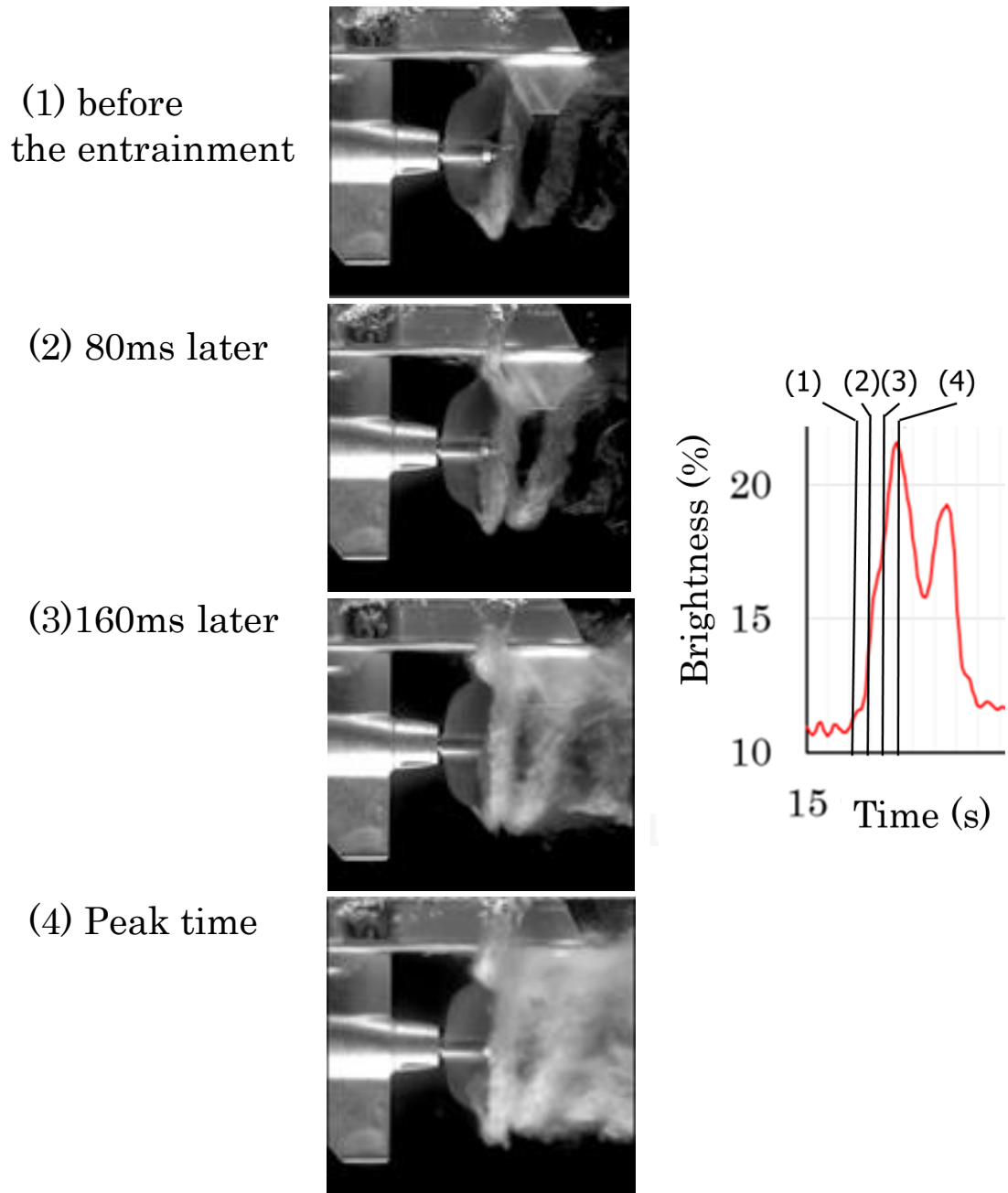


Fig. 4.4 Transition image of bubble entrainment

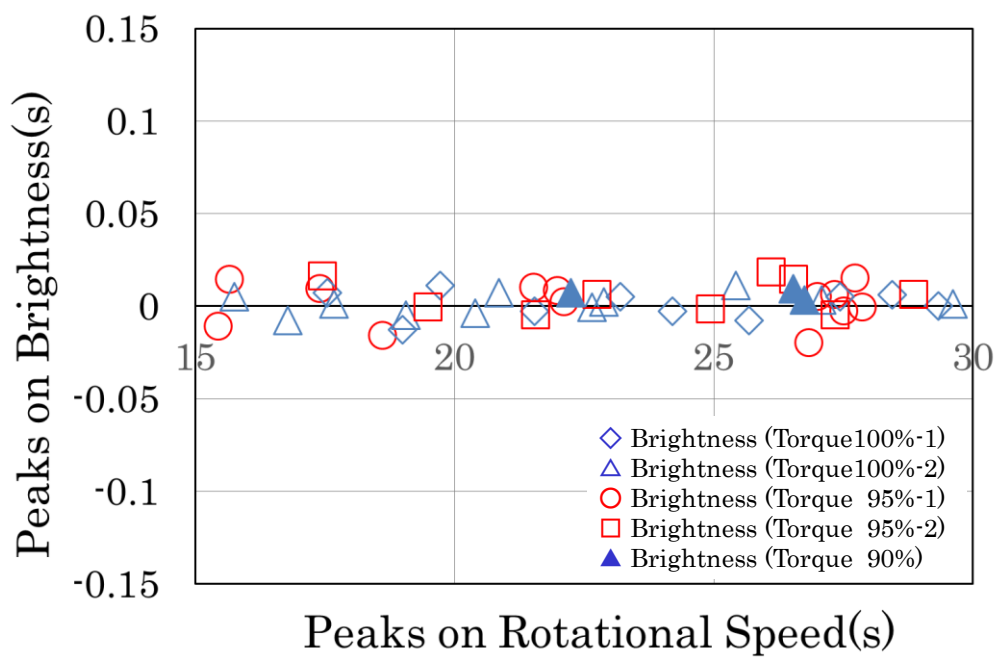


Fig. 4.5 Difference between brightness peak time and rotational speed peak time

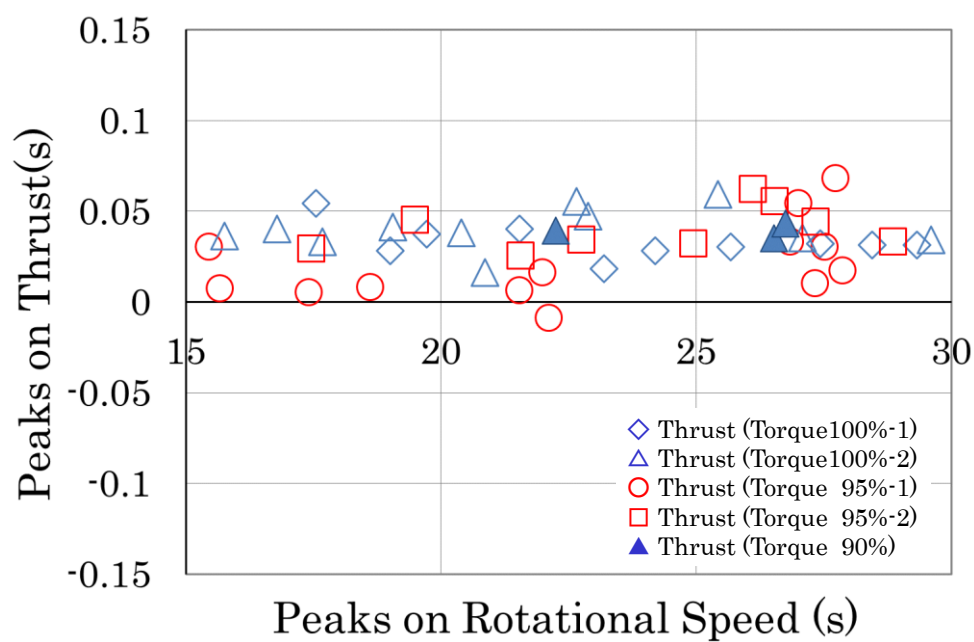


Fig. 4.6 Difference between thrust peak time and rotational speed peak time

4.2.2 回転速度ピーク値と輝度ピーク値の相関に関する考察

Fig. 4.7 に定格トルク 15 Nm の 100 %、95 %、90 %トルクを一定トルク設定値とした時の回転速度と輝度のピークデータを示す、90 %トルクにおいては、吸い込み発生が少なかったため、ピークデータが少なくなっている。回転速度ピークが発生していない状態の輝度値の関係を図中左下の赤枠で示した。これら吸い込み未発生時の輝度値は、トルク設定値が異なってもほぼ同じで、回転速度はトルク設定値が大きいほど高くなっているのがわかる。気泡吸い込みに従い、輝度と回転速度が上昇しデータ点が右上方に移動している。それぞれのトルク設定値において輝度と回転数は相関を持って上昇している。従って、回転速度ピーク値により輝度ピーク値を計測できることがわかる。

4.2.3 回転速度ピーク値とスラストピーク値の相関に関する考察

一定トルク設定値 100 %、95 %、90 %トルクでの回転速度とスラストのピークデータを Fig. 4.8 に示す。気泡吸い込みが発生していない状態の回転速度値とスラスト値の関係を図中左上の赤枠で示した。回転速度ピークが発生していない状態では、トルク設定値が大きいほど回転速度が高く、スラストも大きくなることがわかる。気泡吸い込み時には、それぞれのトルク設定値において回転速度ピーク値が大きくなるほどスラストピーク値は減少する。つまり、トルク一定時、輝度ピーク値が大きくなるにつれ回転速度ピーク値は上昇するが、スラストは上昇せず、気泡の影響により、逆にスラストが減少する。Fig. 4.8 で 100 %トルク時のスラスト値が 95 %トルク時のスラスト値に比べばらついているのは、推進装置取付けの剛性不足によるものと思われる。

気泡の吸い込みでスラストが減少する[22]ことは既知であるが、回転速度の変換で気泡量を計測できることは新しい結果である。

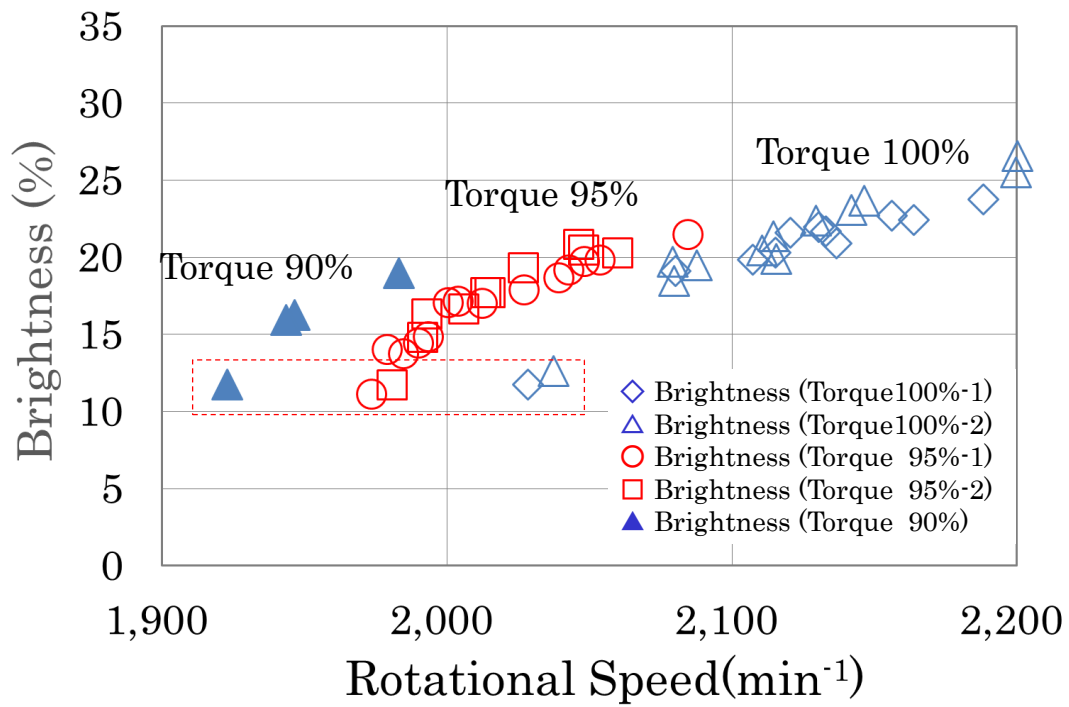


Fig. 4.7 Correlation between brightness and rotational speed

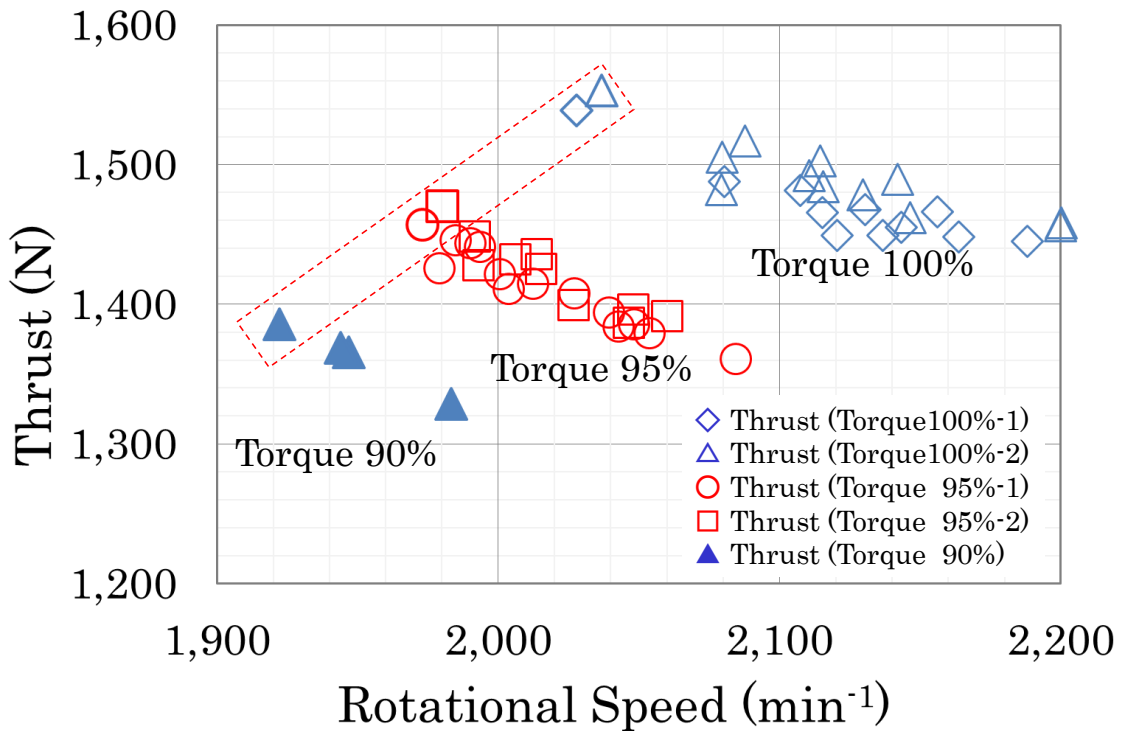


Fig. 4.8 Correlation between thrust and rotational speed

4.3 回転速度一定制御におけるプロペラ周囲の気泡の計測

4.3.1 実験結果

4.2 節と同様に、第 3 章で示した実験条件により、回転速度一定制御モータ推進システムで実験を行った。初めに、空気の吸い込みが発生しない状態としてモータ回転速度は、1850 rpm に指令値を設定し、0 (rpm) からトルク設定値(rpm)までを 10 秒間でリニアに上昇後トルク一定状態で 20 秒間動作させた。Fig. 4.9 に計測した結果を示す。横軸は回転開始からの経過時間を、縦軸は左軸と右軸でそれぞれの示す項目を表している。図中①～⑥は、①モータトルク(Nm)、②モータ回転速度(s^{-1})、③モータ実効電圧(V)、④モータ実効電流(A)、⑤スラスト(N)、⑥プロペラ周辺の輝度(%)、⑦モータ実効出力(kW)を示す。横軸は時間で秒を示している。データのサンプリングは 1 ms である。モータ回転速度をリニアに上昇させるとモータトルク (図中①) は、2.2 節プロペラ基特性式(2.17)で示した特性に沿ってトルクの 2 乗に比例して上昇し一定トルクになり、スラスト (図中⑤) は、式(2.3)に示すようトルクと同様に 2 乗に比例して上昇し、一定スラストになる。2.2.3 交流駆動モータの基本特性式(2.1)で示すようモータトルクはモータ電流に比例する、図中のモータ実効電流がモータトルクに比例してリニアに上昇しているのが確認できる。また、式(2.3)で示すようモータ電圧はモータ回転速度に比例する、図中のモータの実効電圧がモータ回転速度に比例しているのが確認できる。

次に、空気の吸い込みが発生する状態としてモータ回転速度は、1950 rpm に指令値を設定し、0 (rpm) から回転速度設定値(rpm)までを 10 秒間でリニアに上昇後トルク一定状態で 20 秒間動作させた。Fig. 4.10 に計測した結果を示す。0 (Nm) からトルク設定値(Nm)までの 10 秒間は、上記空気の吸い込みが発生しない状態と同様にトルクは回転速度の 2 乗に比例し、スラストもトルクに比例していることが確認できる。モータ実効電圧はモータ回転速度と同様ピークの発生はなく定速度回転制御がされている。モータ実効電流とモータ実効出力はトルクに同調してピークを計測できているが 4.2 節と同様に時間遅れが発生しているため、ピーク変動の検討において、電流値と電圧値を除外した。Fig. 4.11 は Fig. 4.10 の出力回転速度が一定の領域を拡大して示した。輝度が上昇した際、すなわち、気泡の吸い込みが発生したタイミングでスラストが低下し、同時に回転速度が一定に保たれているためトルクが減少している事が分かる。

トルクピーク時刻を基準時刻として、その時刻に対応する高速度ビデオカメラによるプロペラ近傍平均輝度ピーク時刻データとの差異を Fig. 4.12 に示す。輝度ピーク時刻はトルクピーク時刻に対して、前節のトルク一定制御モータ推進システムより全体的に 40 ms 程度の遅れがある。トルク制御は電流ループを直接制御するため制御帯域が広く、速度ループのマイナーループにあり短い周期でループが構成される。速度ループは電流ループより帯域が一般には 1 桁以上狭く、レスポンスも遅くなる。この影響がここで現れていることがわかる。また、ばらつきがあるが、これは前節と同様、高速度カメラのフレームレートによる誤差と、気泡の詳細な挙動によってプロペラ負荷特性が変化しているためだと考えられるが、全体的に同期しており、定性的な傾向はみられない。従って、トルクの減少が気泡吸い込みと同時に起こっていることが分かる。このことから、モータドライブが回転速度一定制御モードにおいても気泡吸い込みによる負荷変動を計測し、高速に回転速度を制御されていることが分かる。従って、回転速度制御モードにおいても、ドライブからのトルク出力信号をモニタリングすることで、吸い込み現象を計測できる事が示された。一方、トルクピーク値とスラストピーク時刻との差異を Fig. 4.13 に示す。全体的にスラストピークはトルクピークより遅延しており、前節のトルク一定制御モータ推進システムと同様に、平均で約 50 ms 程度の遅延が観測された。この理由も同様であり、ロードセルを推進装置の固定するレールに設置したことによって、推力の計測が、推進装置の固定機構の撓みの影響を受け、これにより、実際の推力変化に対してロードセルへの応答が機械的に遅延したためであると考えられる。

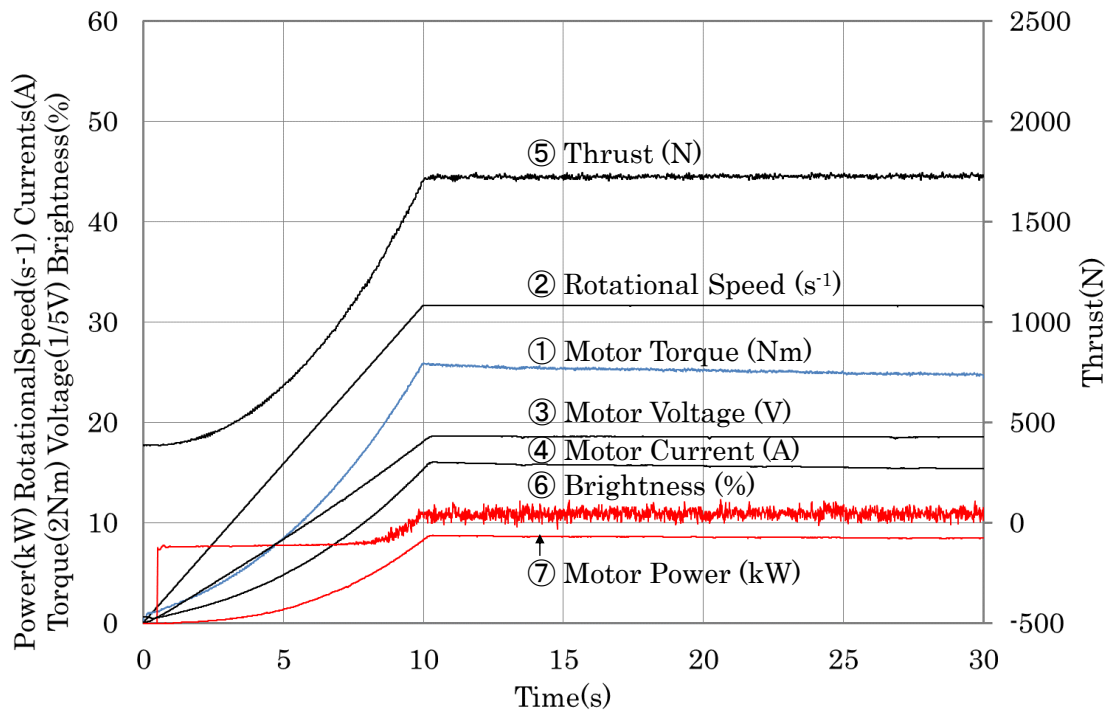


Fig. 4.9 Measurement example without bubble entrainment

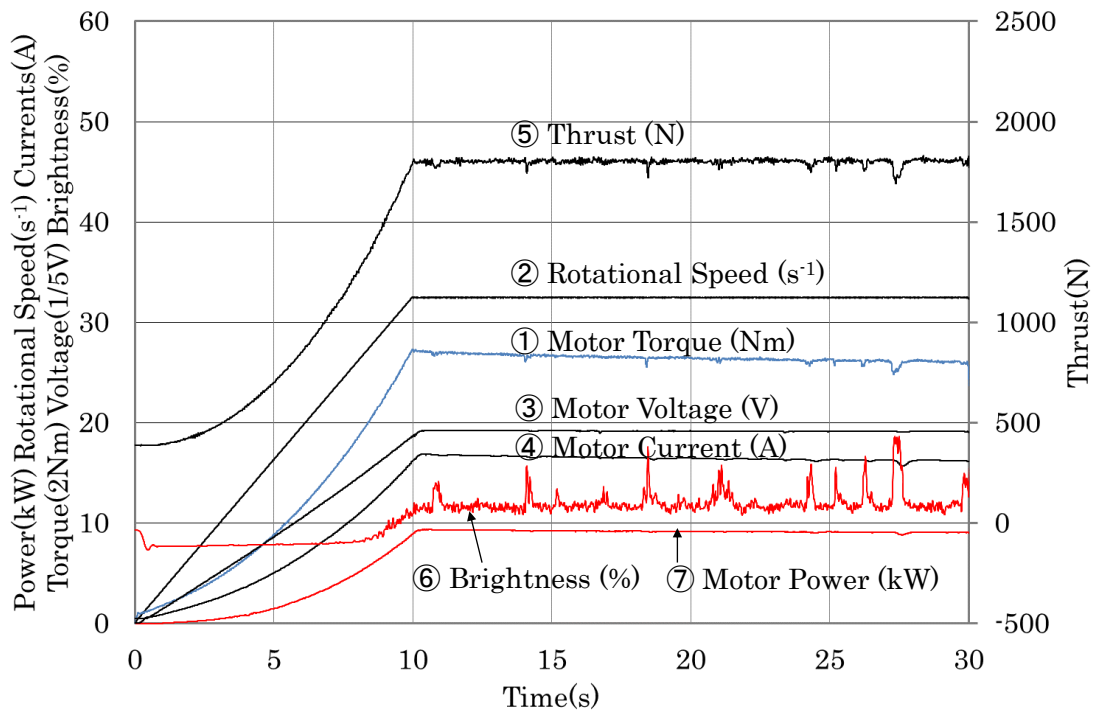


Fig. 4.10 Measurement example with bubble entrainment

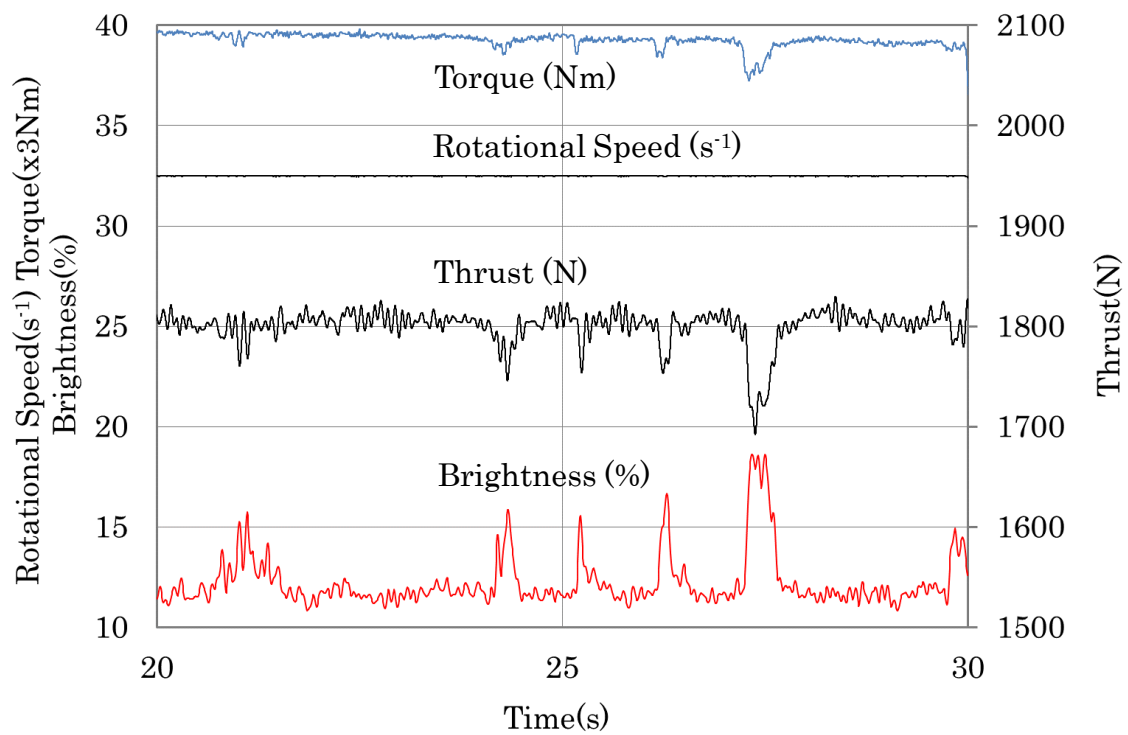


Fig. 4.11 Peak point graph

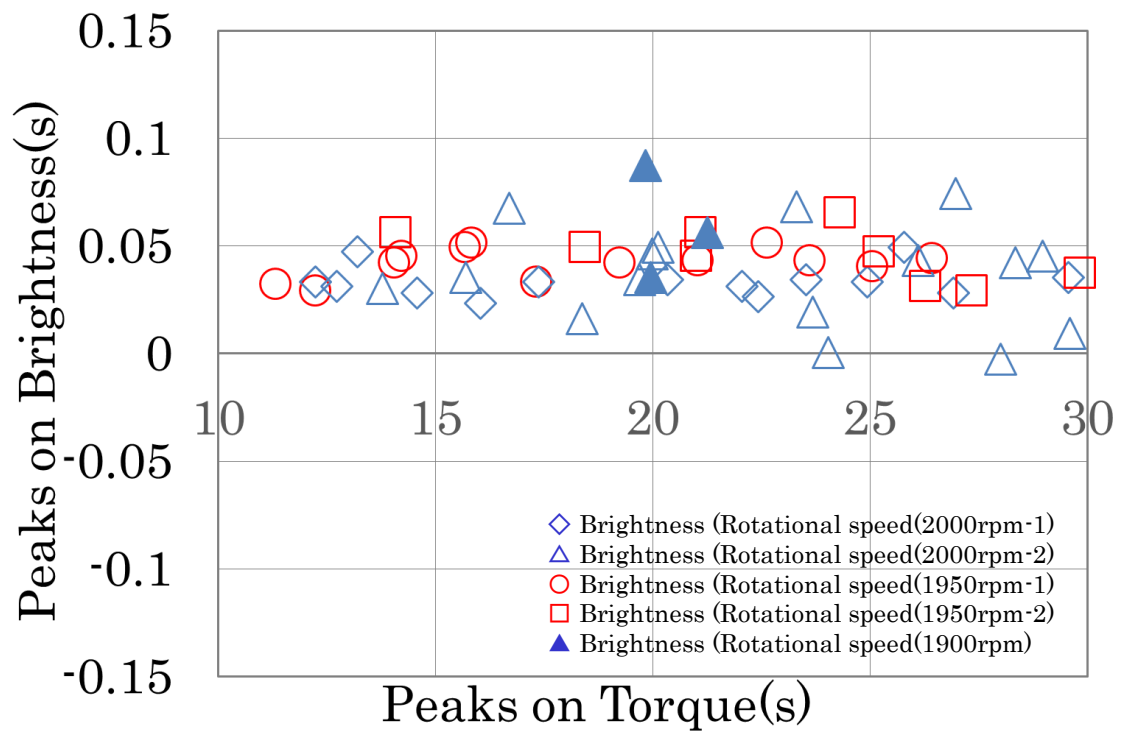


Fig. 4.12 Difference between brightness peak time and torque peak time

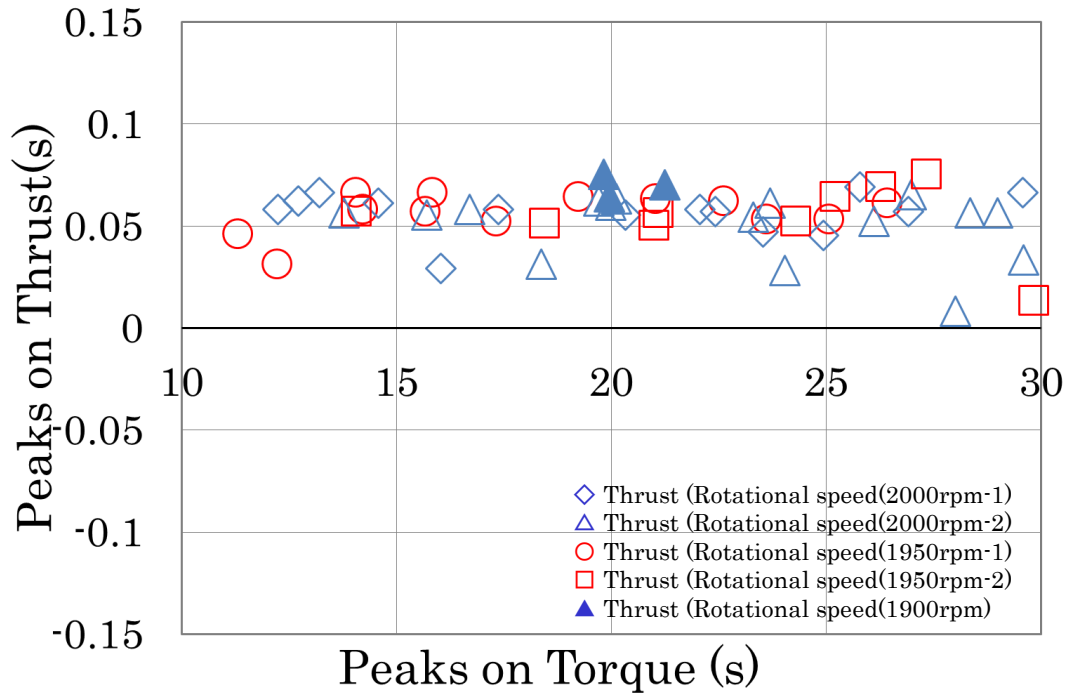


Fig. 4.13 Difference between thrust peak time and torque peak time

4.3.2 トルクピーク値と輝度ピーク値の相関に関する考察

Fig. 4.14 に回転速度 2000 rpm、1950 rpm、1900 rpm を一定回転速度設定値とした時のトルクと輝度のピークデータを示す。回転速度 1900 rpm においては、吸い込み発生が少なかったため、ピークデータが少なくなっている。トルクピークが発生していない状態の輝度値の関係を図中右下の赤枠で示した。これら吸い込み未発生時の輝度値は、回転速度設定値が異なってもほぼ同じで、トルクは回転速度設定値が大きいほど高くなっているのがわかる。気泡吸い込みに従い、輝度が増しトルクが減少しデータ点が左上方に移動している。それぞれの回転速度設定値において輝度とトルクは相関を持っている。従って、トルクピーク値により輝度ピーク値を計測できることがわかる。

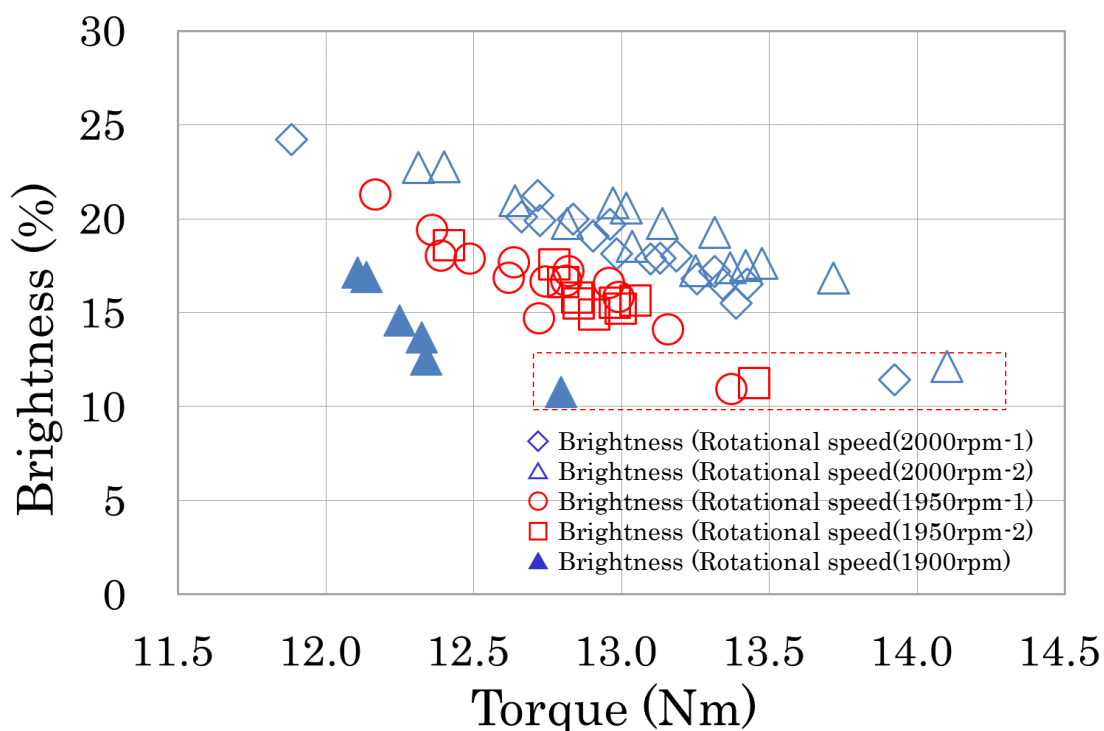


Fig. 4.14 Correlation between brightness and torque

4.3.3 トルクピーク値とスラストピーク値の相関に関する考察

はじめに、回転速度 2000 rpm、1950 rpm、1900 rpm を一定回転速度設定値とした時の輝度とスラストのピークデータを Fig. 4.15 に示す。先の Fig. 4.14 に示した輝度とトルクの相関と同様な相関を示している。スラストピークが発生していない状態の輝度値の関係を図中右下の赤枠で示した。これら吸い込み未発生時の輝度値は、回転速度設定値が異なってもほぼ同じで、スラストは回転速度設定値が大きいほど高くなっているのがわかる。気泡吸い込みに従い、輝度が増しスラストが減少しデータ点が左上方に移動している。それぞれの回転速度設定値において輝度とスラストは相関を持っている。すなわち、トルクとスラストがリニアな相関を持つことを示唆している。そこで Fig. 4.16 にスラストとトルクの相関を示す。回転速度一定制御モードでは、気泡の吸い込みなどで負荷変動が発生しても、回転速度は一定に保たれるが、負荷変動の影響でトルクが変動し、スラストがトルクに比例して変動していることが、図からも分かる。

気泡の吸い込みでスラストが減少することは既知[22]であるが、トルクの変換で気泡量を計測できることは前節と同様に新しい結果である。

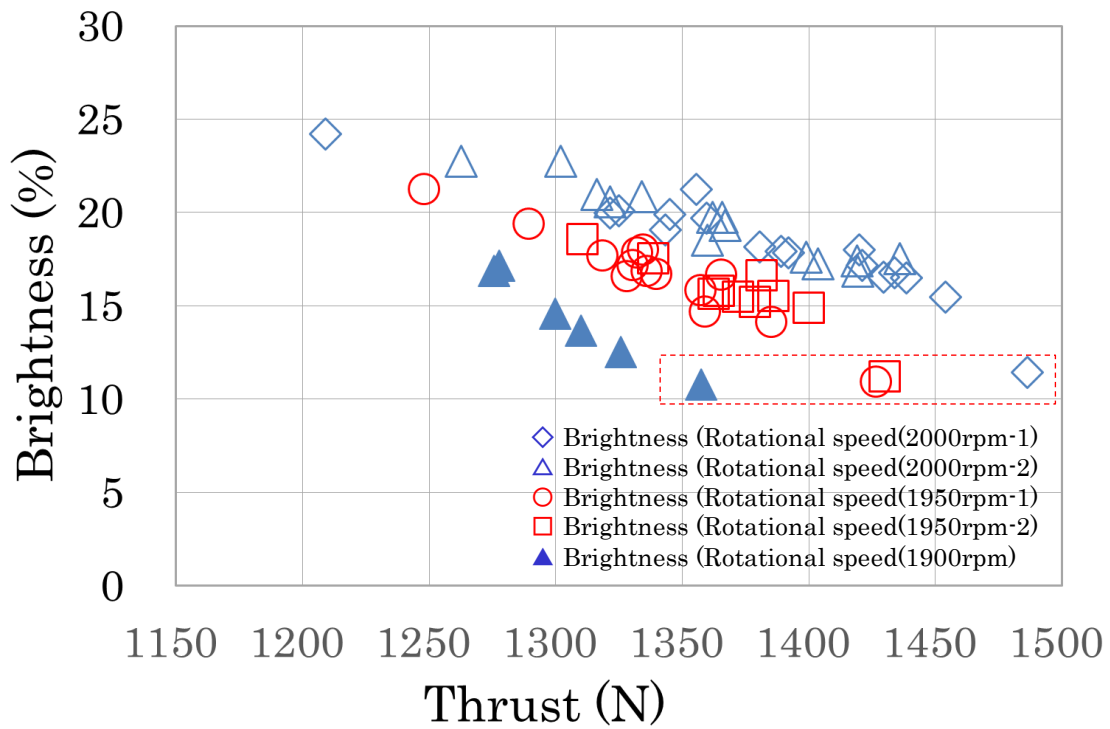


Fig. 4.15 Correlation between brightness and thrust

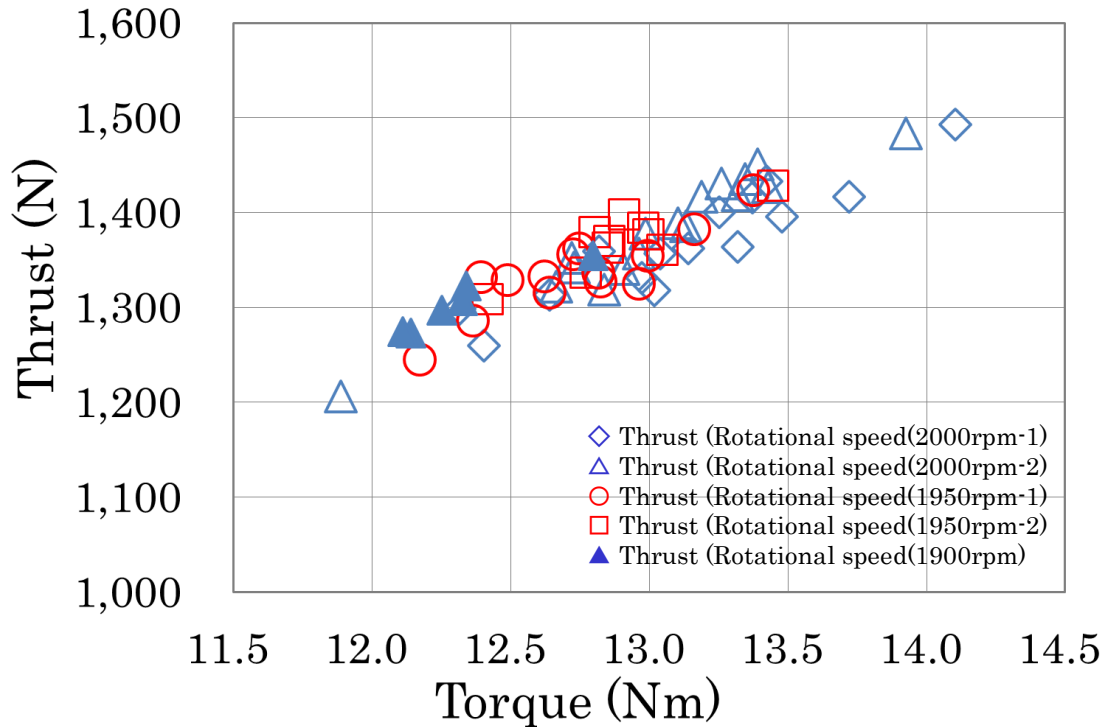


Fig. 4.16 Correlation between thrust and torque

4.4 結言

電気モータ推進システムにおいて、モータドライブシステムをトルク一定制御方式で駆動し、空気吸い込みによる気泡発生とその状態及びスラストの変動を計測した。これらは、モータドライブからのトルクモニター信号、回転速度モニター信号、ロードセルによるスラスト及び高速度ビデオカメラによるプロペラ周囲の輝度を同時に計測することで得られ、それらの相関を評価検証し以下の結果を得た。

1. 気泡発生時のピーク時間及び振幅は、モータドライブからリアルタイムで得られる回転速度モニター信号とよく相関している。したがって、プロペラ周囲の気泡発生及び状態はモータドライブの状態信号を計測することでセンシングできることを確認した。
2. プロペラ周囲の気泡によるスラスト変動は、モータの回転速度とよく相関している。これは、モータドライブからの回転速度信号の信号処理によってスラストを推定できることを示唆している。ロードセルの設置機構に剛性不足のためスラストピークに約 50 ms の遅延が見られたが、スラストピークの発生時間はモータ回転速度信号によってよくセンシングできた。

回転速度一定制御方式で駆動した場合においても、トルク一定制御方式と同様に計測データ間の相関を評価検証し、以下の結果を得た。

3. 気泡発生時のピーク時間及び振幅は、モータドライブからリアルタイムで得られるトルクモニター信号とよく相関している。したがって、プロペラ周囲の気泡発生及び状態はトルク一定制御方式と同様にモータドライブの状態信号を計測することでセンシングできることを確認した。
4. プロペラ周囲の気泡によるスラスト変動は、モータのトルクとよく相関している。これは、モータドライブからのトルク信号の信号処理によってスラストを推定できることを示唆している。

以上のように、モータドライブから状態信号がプロペラ周囲の気泡の状態とスラスト変動をセンシングできることを確認した。次章ではこれらセンシングが確認できたデータをもとに理論的な検証を行う。

第5章 気泡によるモータドライブ動特性とプロペラ動特性の評価

5.1 緒言

プロペラ推進系とモータドライブシステムで構成する電気モータ推進システムは、応答性が数ミリ秒オーダーと内燃機関に比べて格段に短く、モータドライブシステムで用いる制御信号を出力することで、モータの状態（電流、電圧、トルク、回転速度）を精度よくリアルタイムにモニタリングすることが原理的に可能であることを示してきた。それらを活用し、電気モータ推進システムでは、モータは、トルク一定制御方式や回転速度一定制御方式で制御され、気泡混入の影響によるプロペラ変動やスラスト変動はモータドライブからの状態信号によってセンシングできることを第4章で示した。本章では、上記センシングが確認できたデータを用い、負荷変動に及ぼすプロペラ周囲気泡の影響を、第2章で示したプロペラ特性式を用い、トルク一定制御方式と回転速度一定制御方式の双方においてプロペラ周囲気泡とスラスト変動の特性を理論的に示し検証と評価をした。この場合、センシングしたデータが、それら変動との相関を示し、プロペラ特性式で理論的に示すには、プロペラ周囲のボイド率（気体の占める体積比率）を知る必要がある。しかしながら、プロペラ周囲のボイド率の実測及びその非線形検証は困難である。そのため、本研究では高速度ビデオカメラでの光学像の中からプロペラ周囲の領域を切り出し、その領域内の輝度値を算出しその平均相対輝度がボイド率と線形の関係にあると仮定し実験と解析を行った。以下に本章の内容を示す。

1. トルク一定制御におけるプロペラ特性の理論的相関、実験結果によるプロペラの回転速度とプロペラ周囲気泡の相関とプロペラの回転速度とスラストの相関に関する検証、評価と考察。
2. 回転速度一定制御におけるプロペラ特性の理論的相関、実験結果によるプロペラのトルクとプロペラ周囲気泡の相関とプロペラのトルクとスラストの相関に関する検証、評価と考察。

以上の結果を章の結論として示した。

5.2 トルク一定制御におけるプロペラ周囲気泡とスラスト変動の特性評価[28]

5.2.1 トルク一定制御におけるプロペラ特性の理論的相関

交流モータドライブシステムの構成を Fig. 5.1 に示す。図に示すようトルク制御は速度制御を介さないでトルク指令部に直接指令値を入力する方式で、モータに流す電流と位相を制御し、指令値に追従したモータ発生トルクを制御するモードである。トルクモニター出力信号、回転速度モニター出力信号は内部制御信号から作られ、制御サイクルは、一般的なモータドライブシステムでは数 ms であるが実験で使用したモータドライブシステムは 126 μs とより短い。そのためプロペラの挙動をほぼリアルタイムに観測できる。

プロペラ周囲の気泡挙動を光学的に観察するために用いた高速度ビデオカメラのシャッター速度およびフレームレートは 125 Hz である。水槽底部に設置したハロゲンライト光源により気泡およびプロペラ部を可視化した。カメラの撮影開始の同期は、電子制御ユニットからのトリガー信号で行っている。

Fig. 5.2 に実験に使用したモータドライブシステムのトルク-回転速度特性とプロペラのトルク-回転速度特性を示す。第 2 章で示した交流モータドライブシステムの特性において、基底回転速度 $n_B(\text{s}^{-1})$ 以下では、モータ出力 $P_m(\text{W})$ は、

$$P_m = Tq \cdot 2\pi n \quad (5.1)$$

で表され、回転速度 $n(\text{s}^{-1})$ に比例する。

実験では、モータトルクを定格トルク 15 Nm の 100%、95%、90%、回転速度を 40 s^{-1} 以下になるよう条件を設定し、基底回転速度以下のトルク一定領域で行っている。トルク一定制御においては、トルク指令を与えるとモータの回転速度は負荷特性に対応した回転速度になる。図中で示すようトルク一定値 Tqc が出力されている時、負荷特性が曲線 1) の場合モータ回転速度は n_1 になる。負荷特性が変化して曲線 2) になると、モータトルクは一定で、回転速度は変化した特性曲線 2) 上の回転速度 n_2 になる。また、式(5.1)で示すようモータ出力は、トルク一定であるので回転速度に比例して変化する。図の場合モータ出力は $Tqc \cdot 2\pi(n_2 - n_1)$ 分上昇することになる。

次にプロペラの理論的特性を示す。第2章で示した前進係数 J 、トルク係数 Kq およびスラスト係数 Kt を以下に用いる。

$$J = Va / (n \cdot D) \quad (5.2)$$

$$Kq = Tq / (\rho \cdot n^2 \cdot D^5) \quad (5.3)$$

$$Kt = Th / (\rho \cdot n^2 \cdot D^4) \quad (5.4)$$

ここで、 Va は前進速度(m/s)、 Tq はトルク(Nm)、 Th はスラスト(N)、 n は回転速度(s⁻¹)、 ρ は水の密度(kg/m³)、 D はプロペラ径(m)である。トルク係数、スラスト係数は前進係数 J によって変化するが、実験では推進装置を回流水槽に固定しボラードプル状態にすることで前進係数を一定としている。

空気吸込みなどでプロペラ周囲に気泡が発生した場合、ボイド率 α 、液体積率(1- α)とすると、式(5.3)からトルクは、

$$Tq = Kq \cdot (1-\alpha) \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^5 \quad (5.5)$$

と表すことができる。実験はトルク一定制御であるので、式(5.5)においてトルク Tq は一定値となる。前進係数が一定であるのでトルク係数 Kq も一定値になると仮定すれば、水の密度 ρ 、プロペラ径 D は固定値であるため、式(5.5)より代表物理量で整理し、

$$(1-\alpha) \cdot n^2 = \text{constant}$$

$$(1-\alpha) \propto 1 / n^2 \quad (5.6)$$

と表すことができる。このプロペラトルク-回転速度特性は Fig. 5.2 で示したよう2次曲線になり、式(5.5)で表しているように液体積率(1- α)によって特性が変化する。モータドライブシステムは、このプロペラトルク-回転速度特性曲線上に沿って動

作する。よってトルク一定制御の場合、式(5.6)に示すような気泡の状態と回転速度の関係から、回転速度を観測することによって気泡の状態を推定できる。

スラストは、前述のトルクと同様に、式(5.4)より、

$$Th = Kt \cdot (1-a) \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^4 \quad (5.7)$$

と表すことができる。スラスト-回転速度特性はトルク-回転速度特性と同じよう 2 次曲線になり、液体積率(1-a)によって特性は変化するが、式(5.6)より(1-a)・n²が一定とすると、水の密度 ρ、プロペラ径 D は固定値であるため、代表物理量で整理すると式(5.8)になる。

$$Th \propto Kt \quad (5.8)$$

すなわち、気泡が発生して変化するスラストはスラスト係数に比例する。

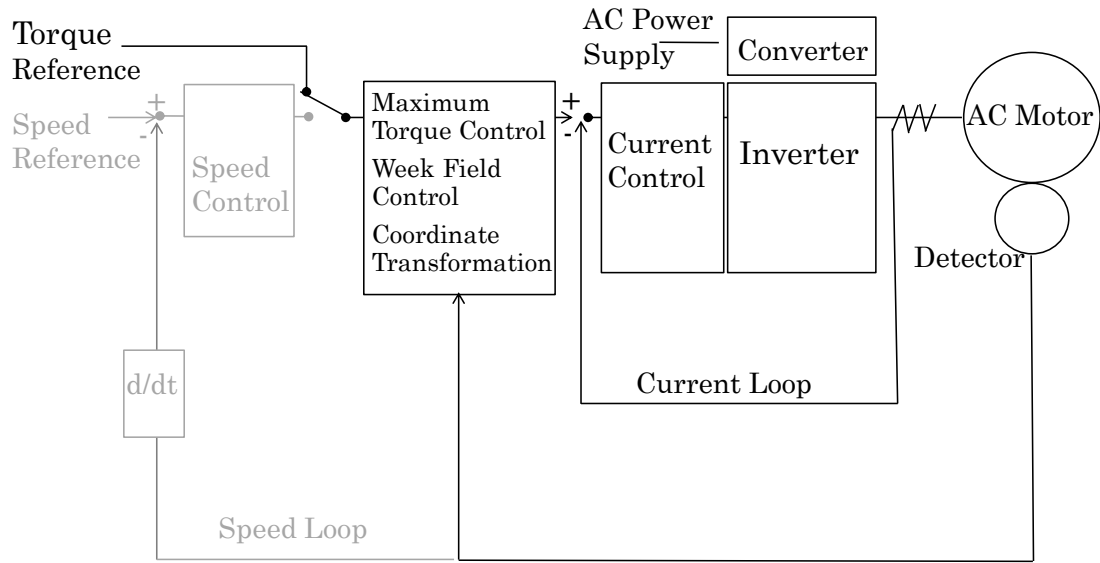


Fig. 5.1 Motor drive system configuration diagram

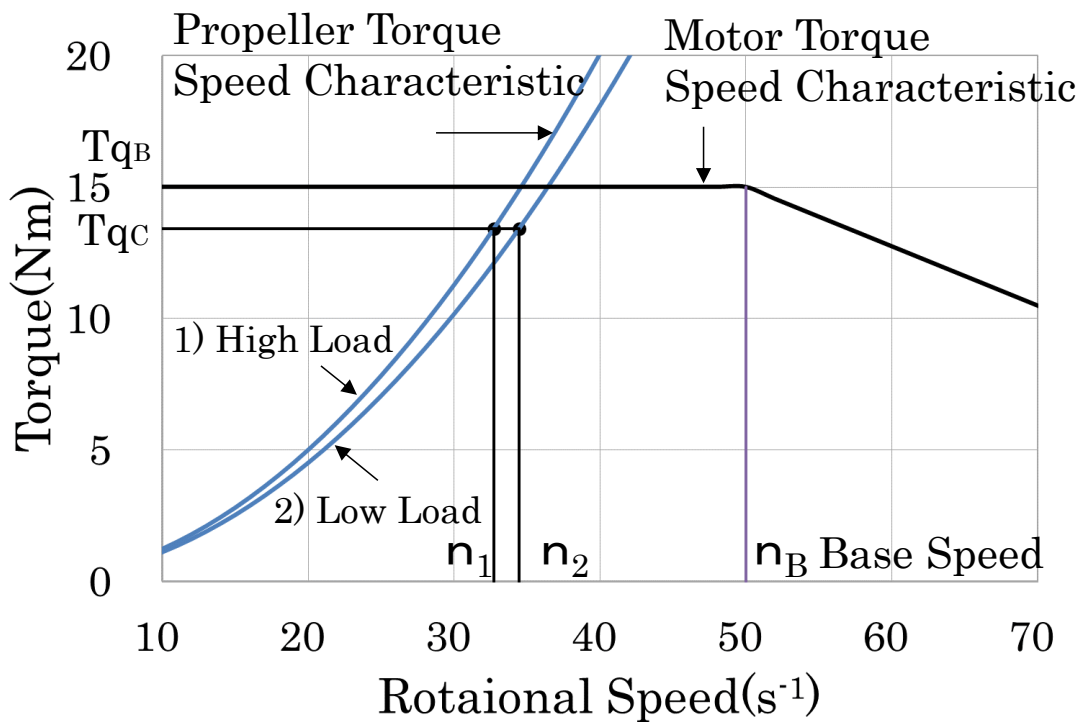


Fig. 5.2 Torque - rotational speed characteristics

5.2.2 実験結果と考察

実験は、第3章で示した実験条件により、トルク一定制御方式で行った。モータトルクは、定格トルク 15 Nm の 100 %、95 %、90 % に指令値を設定し、0 (Nm) からトルク設定値(Nm)までを 10 秒間でリニアに上昇後トルク一定状態で 20 秒間動作させた。解析に用いる計測データは、起動後、トルクが一定状態に達した後のプロペラ周囲気泡発生時のデータとした。

解析に用いたデータを Fig. 5.1 から Fig. 5.5 に示す。図の横軸は経過時間を、縦軸の左軸はトルク Tq 、回転速度 n 、輝度 B 、右軸はスラスト Th を表している。図より気泡の吸込みが発生したタイミングでトルク一定を保つために回転速度が上昇し、同時にスラストが低下していることがわかる。解析には図中のピーク値をデータとして使用した。

ここでは、トルク一定制御時のプロペラ周囲気泡状態とプロペラ特性（トルクおよびスラスト特性）の関係を、前節で示した理論と実験値に基づき評価する。

以降の検討では、プロペラ周囲気泡状態を、式(5.9)により算出されるプロペラ周囲の平均相対輝度 B' を用いて整理する。

$$B' = (B - B_0) / 100 \quad (5.9)$$

ここで、 B_0 は、プロペラ周囲気泡が無い場合のプロペラ周囲の平均輝度である。

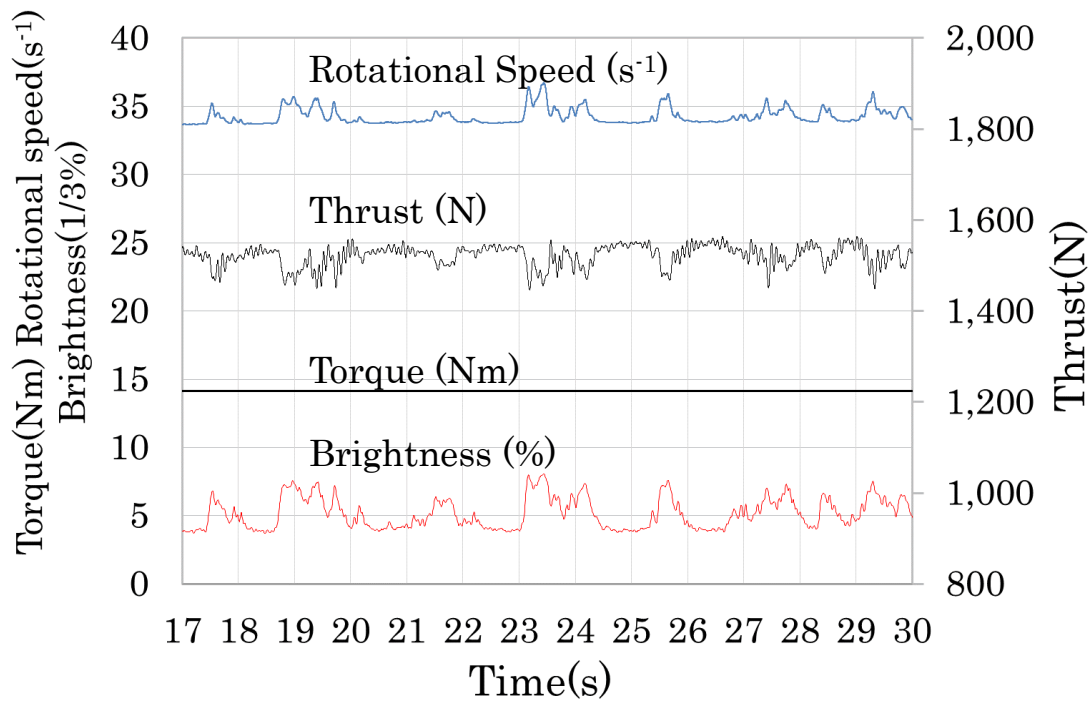


Fig. 5.1 Torque 100 % 1st time

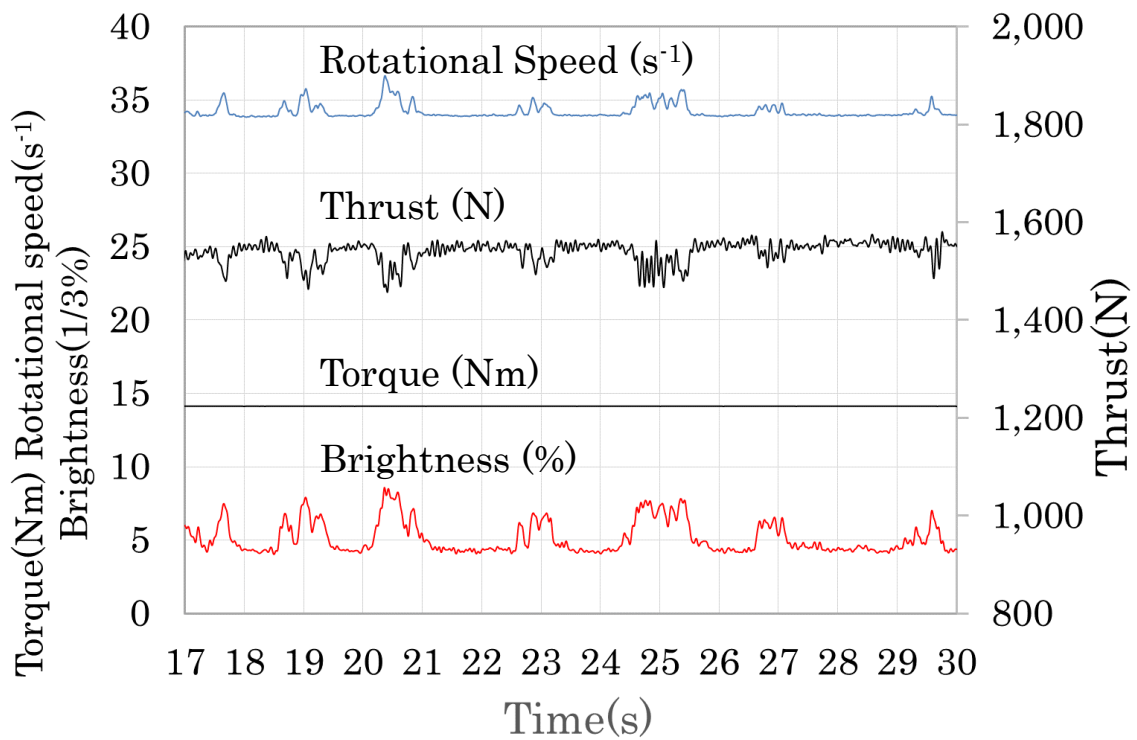


Fig. 5.2 Torque 100 % 2nd time

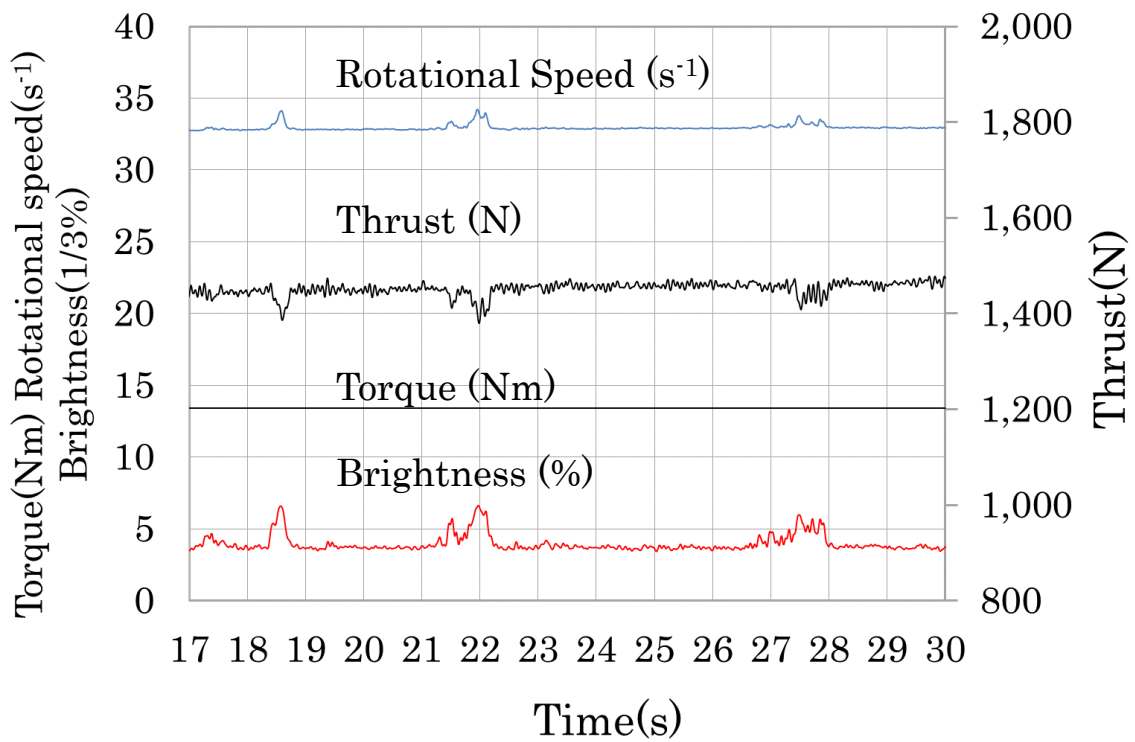


Fig. 5.3 Torque 95 % 1st time

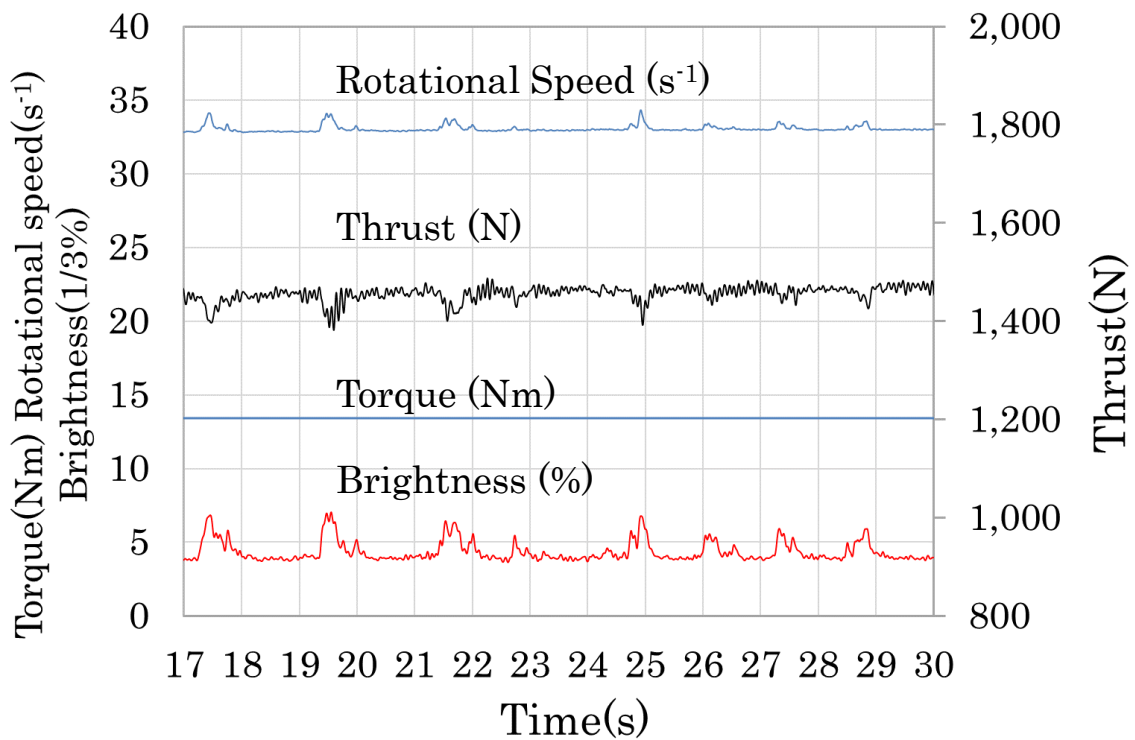


Fig. 5.4 Torque 95 % 2nd time

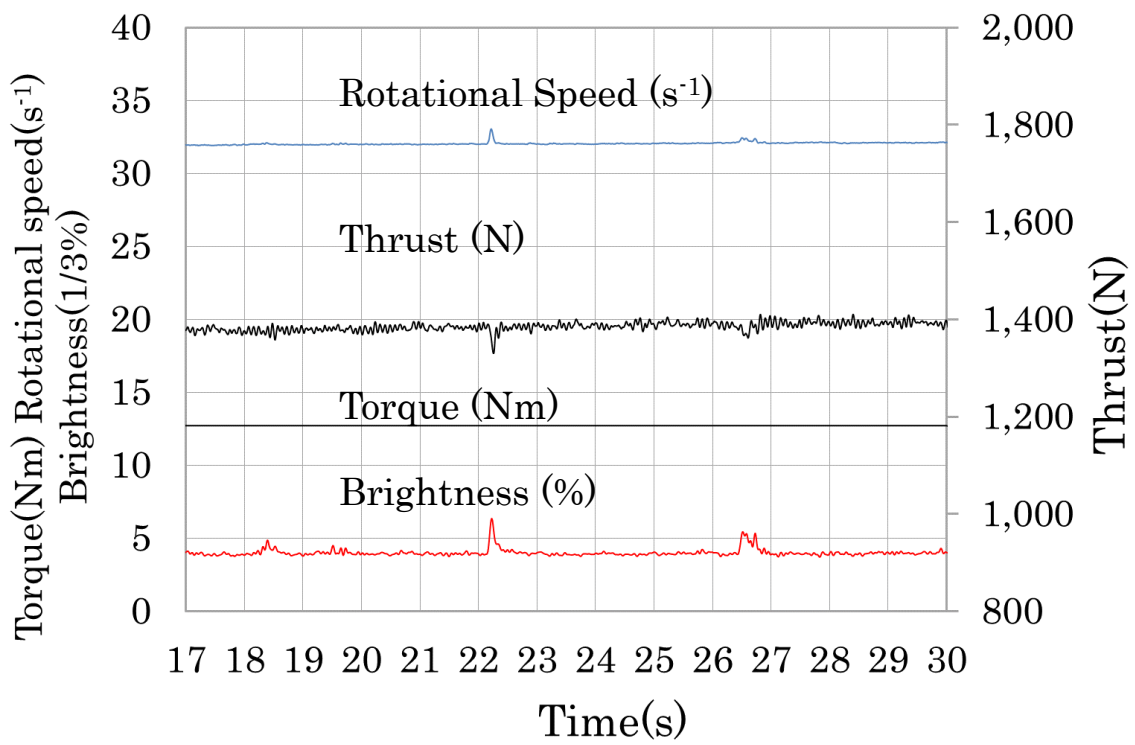


Fig. 5.5 Torque 90 %

5.2.2.1 プロペラの回転速度とプロペラ周囲気泡の相関

Fig. 5.7 にプロペラ周囲の平均相対輝度と回転速度の関係を示す。図中の破線は後述する推定曲線である。トルクの各設定値が大きいほど回転速度は高くなっている。これは、式(5.5)において負荷状態を表す係数 ($Kq \cdot (1-a) \cdot \rho \cdot D^5$) が同じであれば、トルク Tq を大きくすると回転速度 n が高くなることによるものである。トルクの各設定値において、平均相対輝度 B' が大きく ($(1-B')$ が小さく) になると回転速度が上昇している。このことは Fig. 5.1 から Fig. 5.5 に示す輝度と回転速度が連動して上昇していることから確認できる。

はじめに、これら実験から得られたプロペラ周囲の平均相対輝度を用いて気泡吸込み時のトルク係数を評価する。一般に気液界面における反射光は気液界面の瞬時形状によって大きく影響されるために反射光輝度はボイド率に対して非線形になる。もとより回転するプロペラ周囲のボイド率の実測及びその非線形検証は困難である。しかしながら、プロペラ回転に起因する乱流によって発生気泡径がほぼ均一になりその反射率が一定になるとすれば、反射光輝度は気泡数もしくは気泡体積 (すなわちボイド率) に対しほぼ線形関係になるだろうと考えられる。従って、ここではプロペラ周囲の平均相対輝度の計測値とボイド率が線形の関係にあると仮定する。この仮定を用いて、トルク係数 Kq' は、式(5.5)より次のように表せる。

$$Kq' = Tq / \{(1-B') \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^5\} \quad (5.10)$$

計測したトルク値 Tq (Nm)、回転速度 n (s^{-1})、平均相対輝度 B' と水の密度 ρ (kg/m^3)、プロペラ径 D (m) を式(5.10)に代入し得たトルク係数と平均相対輝度の関係を Fig. 5.6 に示す。図から、気泡が発生し回転速度と平均相対輝度に変化してもトルク係数が一定であることが確認できる。気泡の吸込みに関わらずトルク係数が一定であり、かつ、トルク一定制御によりトルク Tq が一定であることから、平均相対輝度とプロペラ回転速度は、式(5.10)より以下の関係にある。

$$(1-B') \cdot n^2 = \text{constant}$$

$$(1-B') \propto 1 / n^2 \quad (5.11)$$

すなわち、プロペラ周囲気泡状態を示す平均相対輝度 B' を回転速度 n から推定できる。回転速度と平均相対輝度の関係を Fig. 5.7 に示す。図中の破線は式(5.10)を書き換えた式(5.12)による推定値である。

$$(1-B') = (Tq / Kq' \cdot \rho \cdot D^5) \cdot 1 / n^2 \quad (5.12)$$

ここで、式(5.12)の右辺の $(Tq / Kq' \cdot \rho \cdot D^5)$ は各トルク設定値により決まる固定値となる。図中の各線は、上部からトルク値を定格トルクの 100 %、95 %、90 % と設定した際の値を示している。図から、実験で得られた平均相対輝度は推定曲線と良く一致していることが確認できる。Fig. 5.8 は、Fig. 5.1 から Fig. 5.5 におけるピーク値を対象に、平均相対輝度の実測値と推定値を比較した結果である。図中の縦軸と横軸は、それぞれ、平均相対輝度の実測値と推定値を表している。両者の相対平均偏差は 0.6 (%)であった。

上述のように、トルク一定制御状態でプロペラ周囲気泡が発生した場合、トルク係数 Kq' は、トルク Tq 、回転速度 n 、平均相対輝度 B' の変化に関係なく一定であることが確認でき、これにより、平均相対輝度 B' を回転速度 n から推定できることを理論と実験から示した。すなわち、平均相対輝度とボイド率が線形であれば、プロペラ特性式より回転速度の実測値と平均相対輝度（プロペラ周囲気泡状態）の相関を良く説明できる。

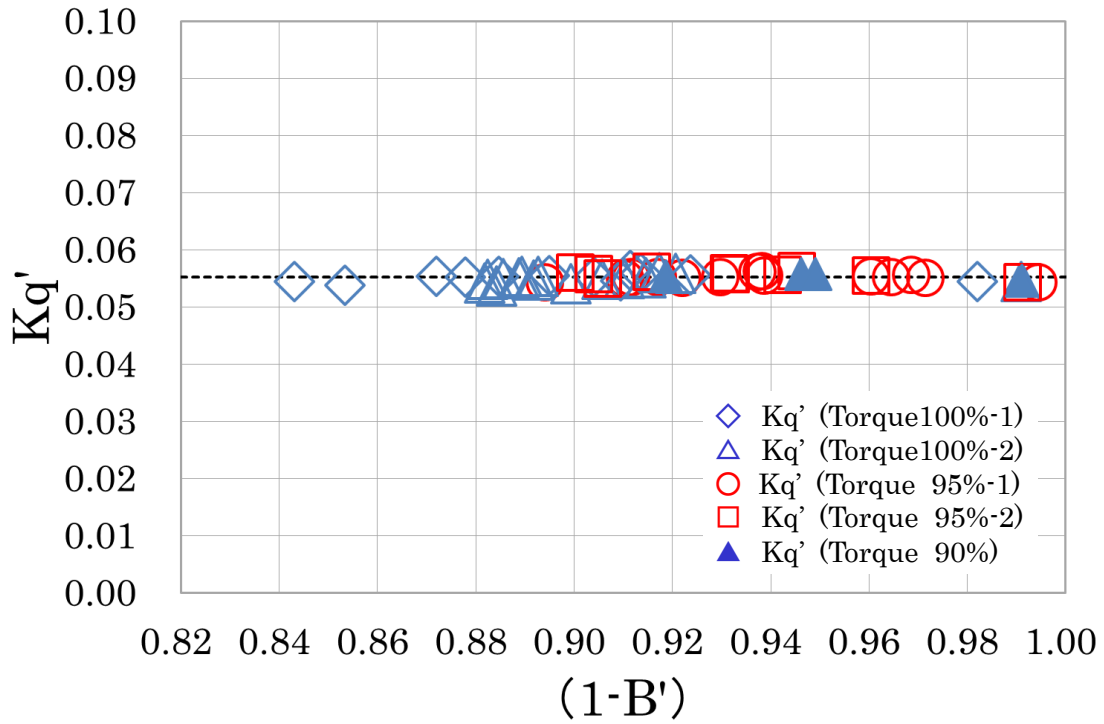


Fig. 5.6 Torque coefficient and relative brightness

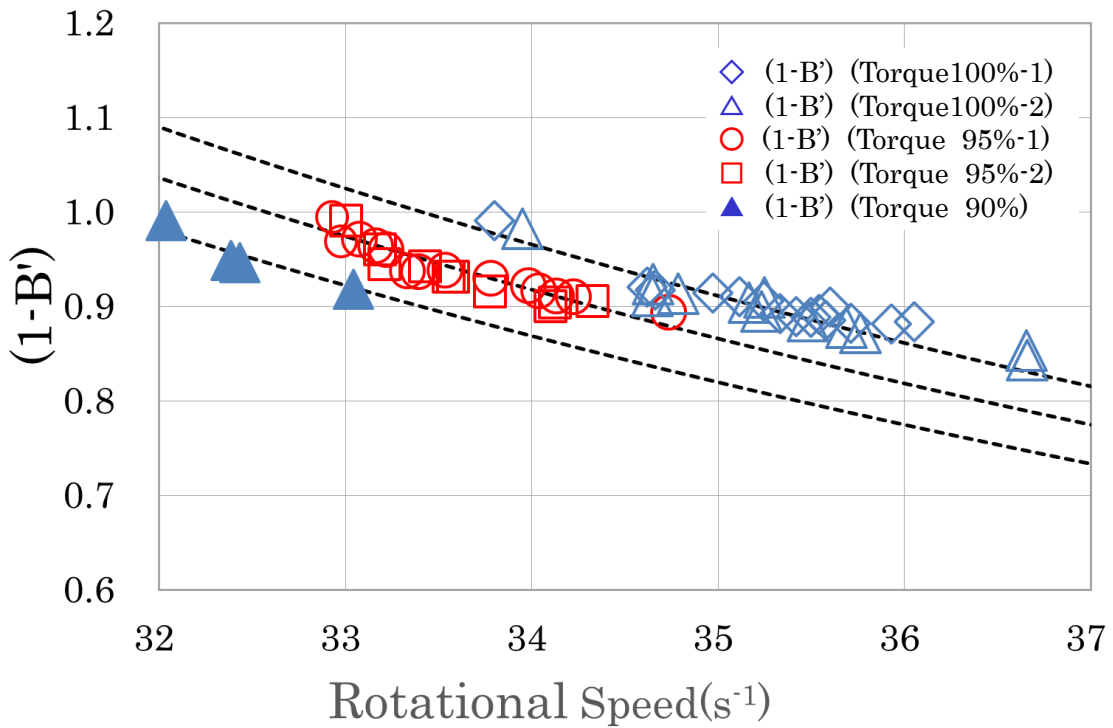


Fig. 5.7 Correlation between relative brightness and rotational speed

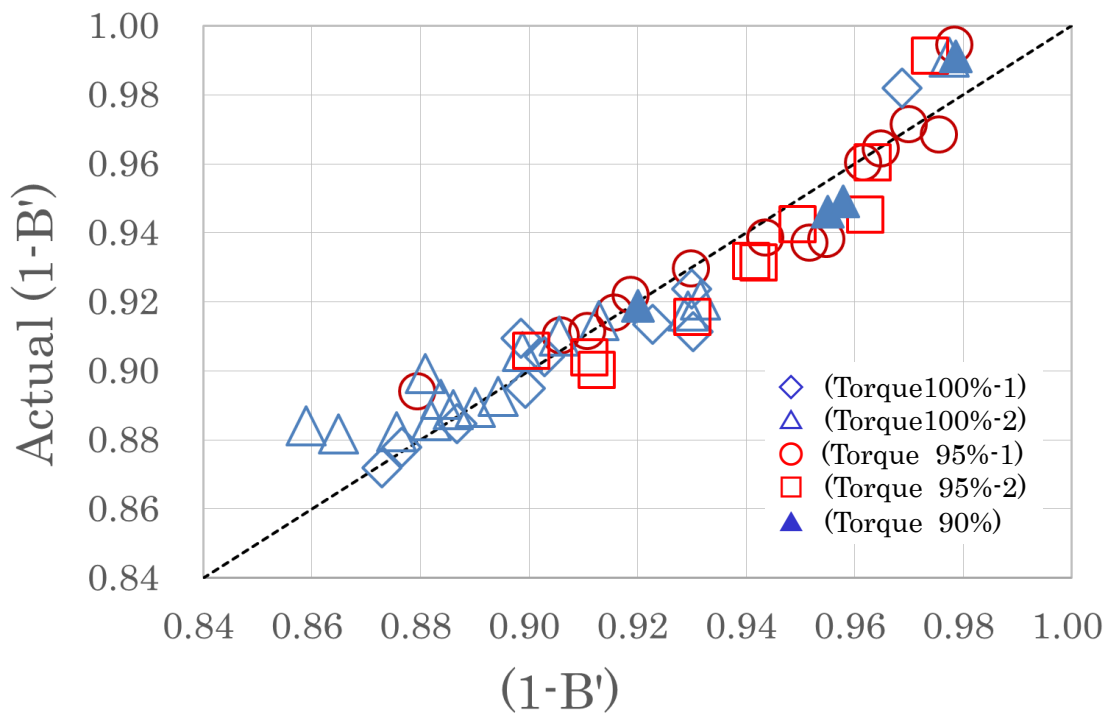


Fig. 5.8 Correlation between actual relative brightness and estimated relative brightness

5.2.2.2 プロペラの回転速度とスラストの相関

Fig. 5.9 に実験により得られたスラストと回転速度の各ピーク値の関係を示す。前節でも示したように、トルクの設定値が大きいほど回転速度は高くなる。スラストは、気泡が発生していない状態では回転速度の 2 乗に比例することから、トルクの設定値が大きいと回転速度は高くなり、スラスト値も大きくなる。一方、気泡発生時には、図からわかるように、トルクの各設定値において回転速度が高くなるほどスラストピーク値は減少する。

平均相対輝度とスラストの相関を Fig. 5.10 に示す。平均相対輝度 B' が大きく ($(1-B')$ が小さく) になるとスラストは減少しているのが確認できる。平均相対輝度とボイド率が線形であるとする、スラストは、式(5.7)より以下の式で表せる。

$$Th = Kt' \cdot (1-B') \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^4 \quad (5.13)$$

ここで、 Kt' はスラスト係数である。前節において $(1-B') \cdot n^2$ は一定であることが示されている。よって式(5.13)は、

$$Th \propto Kt' \quad (5.14)$$

となる。したがって、気泡の発生でスラストが低下している結果は、スラスト係数が減少していることを示唆している。そこで、次に平均相対輝度とスラスト係数の関係を確認する。式(5.13)よりスラスト係数 Kt' は、以下の式で表せる。

$$Kt' = Th / ((1-B') \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^4) \quad (5.15)$$

スラスト値 Th (N)、回転速度 n (s^{-1})、平均相対輝度 B' の各計測値と水の密度 ρ (kg/m^3)、プロペラ径 D (m) を式(5.15)に代入し得たスラスト係数を Fig. 5.11 に示す。平均相対輝度 B' が大きく ($(1-B')$ が小さく) になるとスラスト係数は減少している。これらにより、トルク一定制御時にプロペラ周囲気泡が発生した場合、式(5.15)においてスラスト係数 Kt' は、平均相対輝度 B' が増すと減少するということになる。前節で示したよう $(1-B') \cdot n^2$ は一定であることから、トルク一定制御

時では、気泡の発生により回転速度は上昇（式(5.1)で示すように出力も上昇）し、スラストの低下を抑制するように働くが、スラスト係数が減少することで、結果としてスラストは低下することを確認した。このスラスト係数の減少は、気泡の混入によりプロペラ翼面における壁面せん断応力が低下し、それに起因してプロペラ特性が変化したことによると考えられる。

このようにトルク一定制御されたモータ推進系において、モータドライブシステムの応答性は数 ms（実験では 126 μ s）と短く、前章や Fig. 5.1 から Fig. 5.5 に示した回転速度変化は、吸込みなどによる気泡の発生やスラストの減少の立ち上がりや立ち下りをリアルタイムに正確に捉えることができる。これらの特性は、プロペラ特性式から説明できることが上記のように示されている。したがって、例えば、トルク一定制御モータドライブシステムでは、それぞれの回転速度の立ち上がりに対応した適正な回転速度上限リミットを設定することで気泡発生の抑制とモータ出力の安定が期待でき、すなわち推進効率の向上が得られる可能性が十分にあると考えられる。

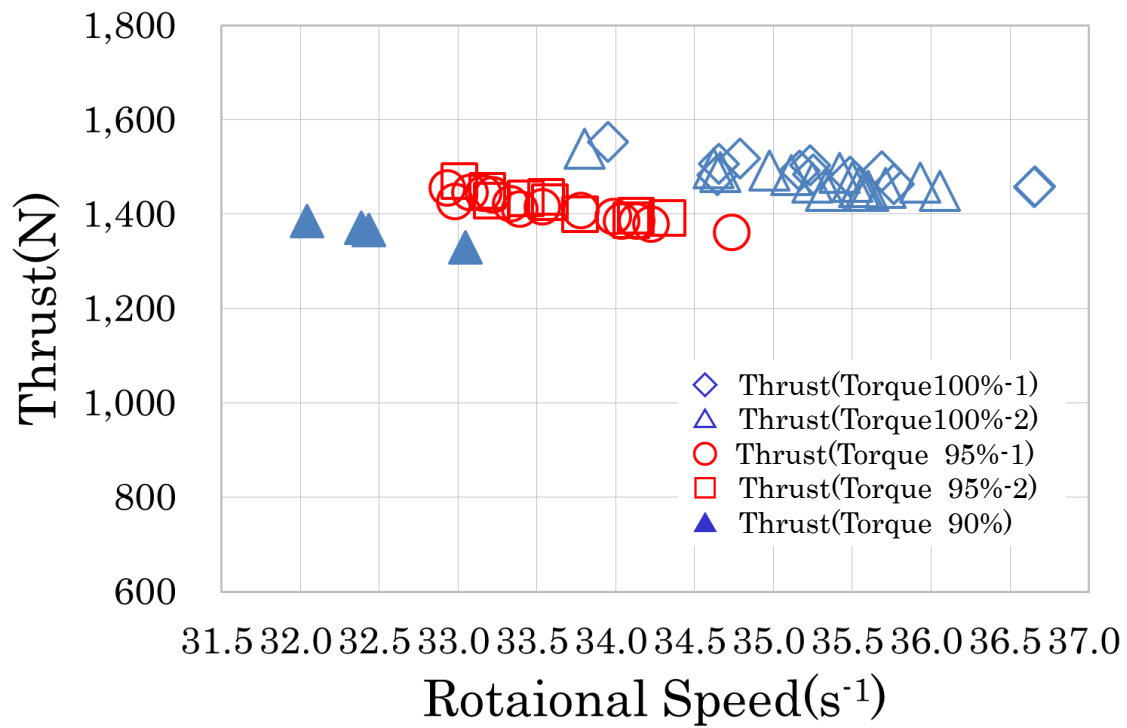


Fig. 5.9 Correlation between actual thrust and rotational speed

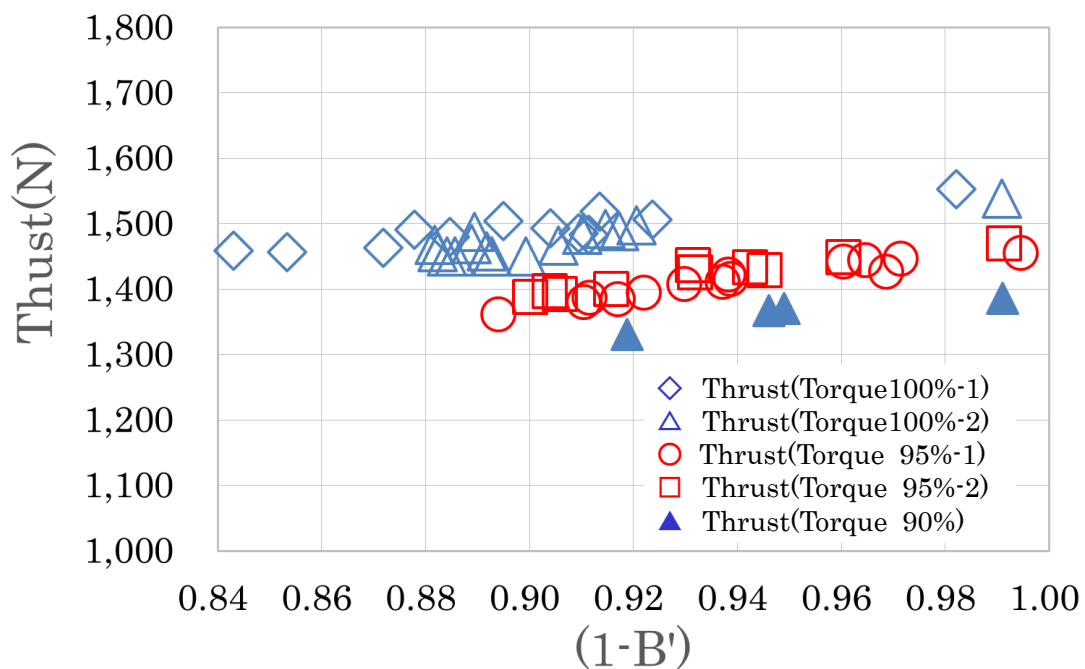


Fig. 5.10 Correlation between actual thrust and relative brightness

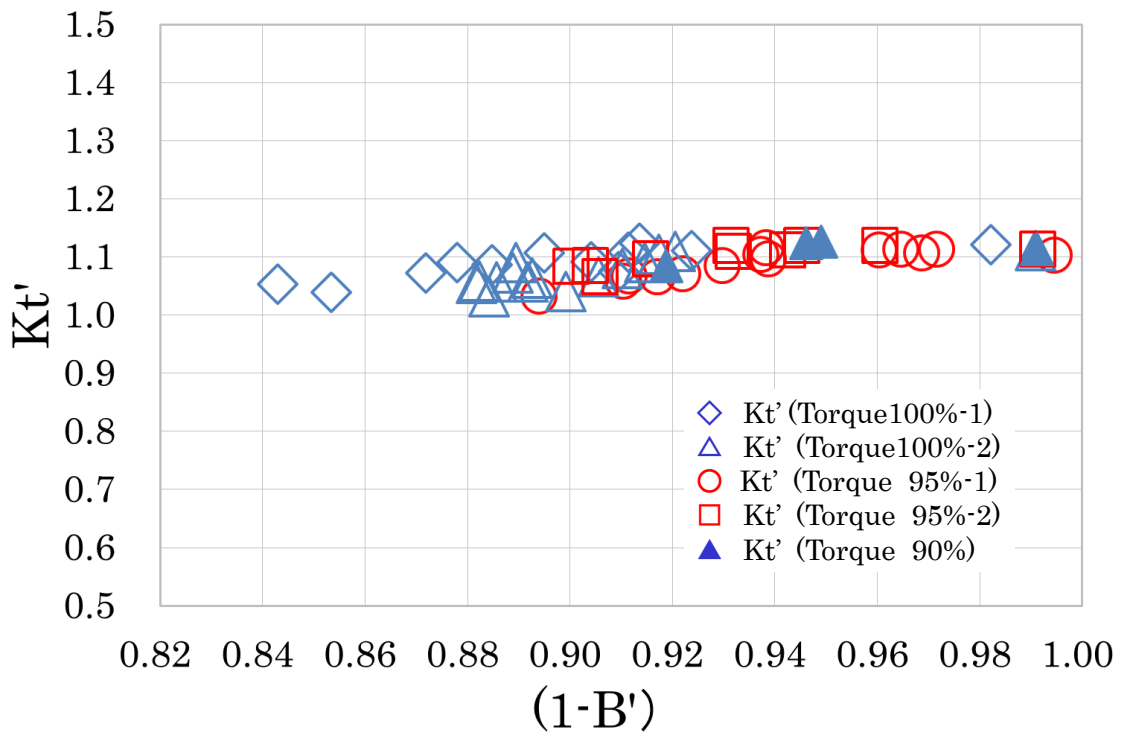


Fig. 5.11 Thrust coefficient and relative brightness

5.2.2.3 結論

5.2 節では、トルク一定制御されたモータ推進系におけるトルクモニター信号、回転速度モニター信号、高速度ビデオ画像解析によるプロペラ周囲平均相対輝度およびロードセルによるスラスト測定値など実験結果を理論的に検証し、次の結果を得た。

- 1) トルク信号、回転速度信号から得られたトルク係数は、平均相対輝度によらず一定である。
- 2) 本実験条件では、プロペラ周囲の平均相対輝度が気泡発生量（ボイド率）と線形であると仮定すると、プロペラ特性式より実験で得られた回転速度と平均相対輝度の相関を良く説明できる。
- 3) 2) と同様に、プロペラ周囲の平均相対輝度が気泡発生量（ボイド率）と線形であると仮定すると、プロペラ特性式よりスラストとスラスト係数の相関を良く整理できる。実験から得られたスラスト係数は、平均相対輝度が増すと減少する。すなわち気泡の発生により回転速度は上昇するがスラストは減少する。

5.3 回転速度一定制御におけるプロペラ周囲気泡とスラスト変動の特性評価

5.3.1 回転速度一定制御におけるプロペラ特性の理論的相関

交流モータドライブシステムの構成を Fig. 5.12 に示す。トルク制御が、モータに流す電流と位相を制御し、指令値に追従したモータの発生トルクを制御するのに対し、回転速度制御は、指令として回転速度を入力しモータの回転速度出力との差がなくなるようにトルクを発生させ、指令値に追従したモータの回転速度を制御する。速度ループの制御帯域は電流ループの制御帯域より狭いが、トルクモニター出力信号、回転速度モニター出力信号は内部制御信号から作られ、制御サイクルは、一般的なモータドライブシステムでは数 ms であるが実験で使用したモータドライブシステムは 126 μs とより短い。そのためプロペラの挙動をほぼリアルタイムに観測できる。

トルク一定制御と同様に、プロペラ周囲の気泡挙動を光学的に観察するために用いた高速度ビデオカメラのシャッター速度およびフレームレートは 125 Hz である。水槽底部に設置したハロゲンライト光源により気泡およびプロペラ部を可視化した。カメラの撮影開始の同期は、電子制御ユニットからのトリガー信号で行っている。

Fig. 5.13 に実験に使用したモータドライブシステムのトルク-回転速度特性とプロペラのトルク-回転速度特性を示す。

実験では、モータ回転速度を 2000 rpm (33.3 s^{-1})、1950 rpm (32.5 s^{-1})、1900 rpm (31.7 s^{-1})とし、回転速度を 40 s^{-1} 以下になるよう条件を設定し、基底回転速度以下のトルク一定領域で行っている。

回転速度一定制御方式においては、回転速度指令を与えるとモータのトルクは負荷特性に対応したトルクになる。図中で回転速度一定値 n_1 が出力される時、負荷特性が曲線 1) の場合モータトルクは T_{q1} になり、負荷特性が変化して曲線 2) になると、モータ回転速度は変わらず、トルクは変化した特性曲線 2) 上のトルク T_{q2} になる。また、式(5.1)で示すモータ出力は、回転速度一定であるので、トルクに比例して変化する。図の場合モータ出力は $(T_{q2} - T_{q1}) \cdot 2\pi n_1$ 分降下することになる。

次にプロペラの理論的特性を示す。回転速度一定制御において、空気吸込みなどでプロペラ周囲に気泡が発生した場合、トルク一定制御と同様に、ボイド率 α 、液体積率 $(1-\alpha)$ とし、前進速度 J が一定であるのでトルク係数 Kq も一定と仮定すれ

ば、水の密度 ρ 、プロペラ径 D は固定値であり、また、回転速度 n は一定に制御されているため、式(5.5)より、代表物理量で整理すると

$$(1-\alpha) \propto Tq \quad (5.16)$$

と表すことができる。

このプロペラトルク-回転速度特性は Fig. 5.13 で示したよう 2 次曲線になり、式(5.5)で表しているように液体積率(1- α)によって特性が変化する。モータドライブシステムは、このプロペラトルク-回転速度特性曲線上に沿って動作する。よって回転速度一定制御の場合、式(5.16)に示すような気泡の状態とトルクの関係から、トルクを観測することによって気泡の状態を推定できる。

スラストは、式(5.7)で表され、スラスト-回転速度特性はトルク-回転速度特性と同じよう 2 次曲線になり、液体積率(1- α)によって特性は変化するが、式(5.7)に式(5.16)を代入し代表物理量で整理すると、

$$Th \propto Kt \cdot Tq \quad (5.17)$$

と表せる。すなわち、気泡が発生して変化するスラストはスラスト係数とトルクの乗算に比例する。

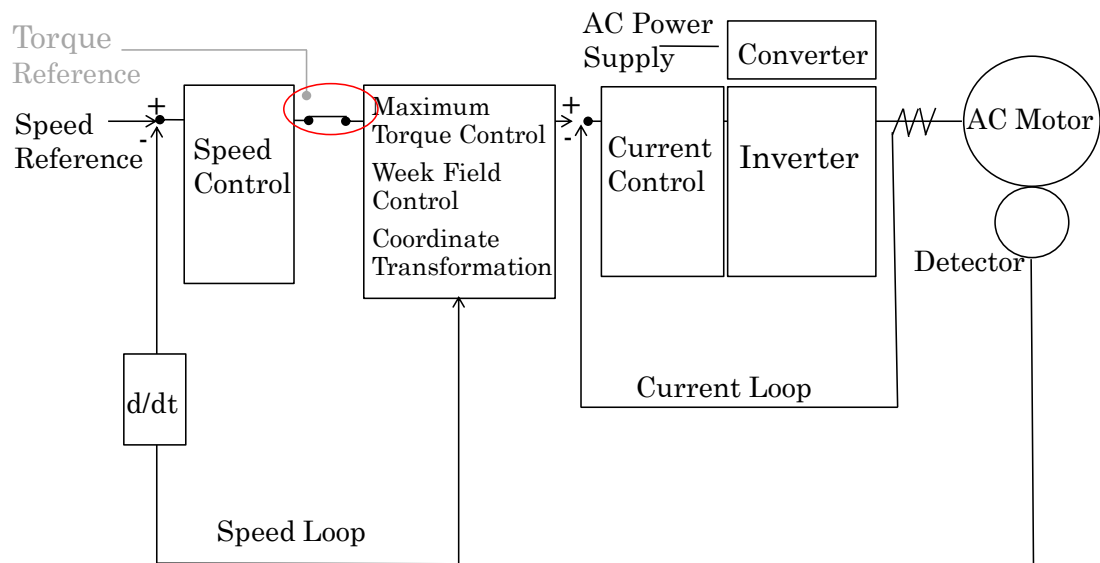


Fig. 5.12 Motor drive system configuration diagram

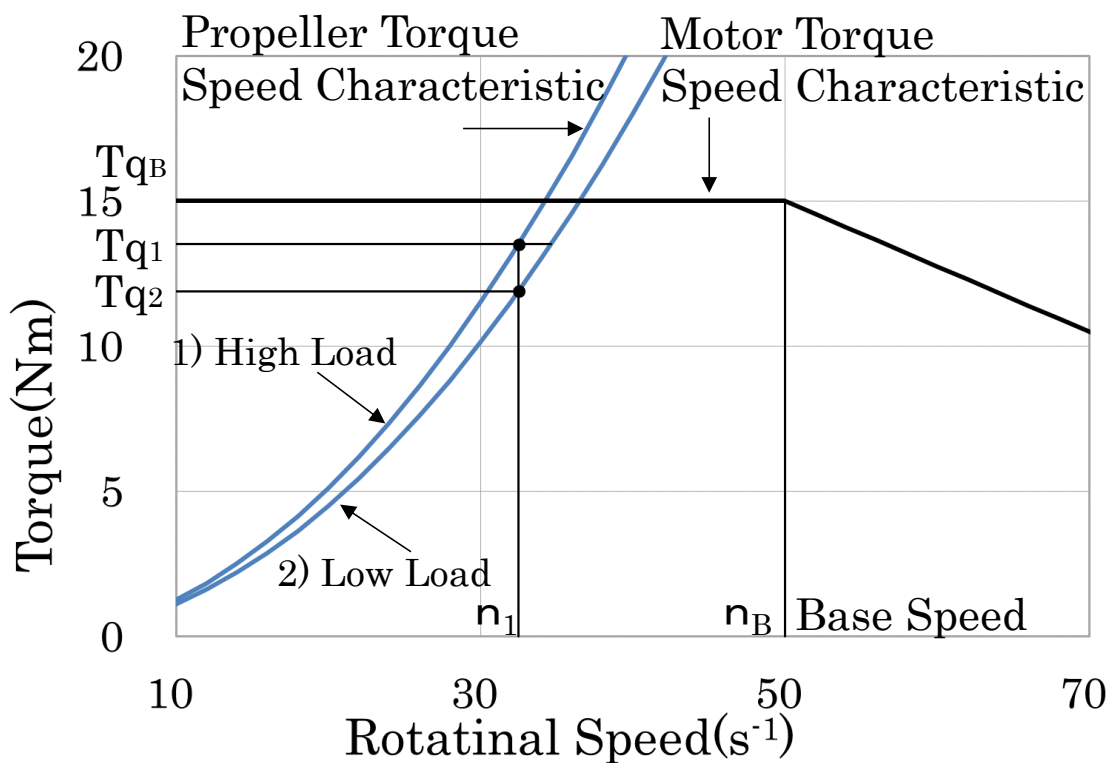


Fig. 5.13 Torque - rotational speed characteristics

5.3.2 実験結果と考察

実験は、第3章で示した実験条件により、回転速度一定制御方式で行った。モータ回転速度を 2000 rpm (33.3 s^{-1})、1950 rpm (32.5 s^{-1})、1900 rpm (31.7 s^{-1}) 90 % に指令値を設定し、0 (rpm)から回転速度設定値(rpm)までを 10 秒間でリニアに上昇後、回転速度一定状態で 20 秒間動作させた。解析に用いる計測データは、起動後、回転速度が一定状態に達した後のプロペラ周囲気泡発生時のデータとした。解析に用いたデータを Fig. 5.14 から Fig. 5.18 に示す。図の横軸は経過時間を、縦軸の左軸はトルク Tq 、回転速度 n 、輝度 B 、右軸はスラスト Th を表している。図より気泡の吸込みが発生したタイミングで回転速度一定を保つためにトルクが減少し、同時にスラストが低下していることがわかる。解析には図中のピーク値をデータとして使用した。

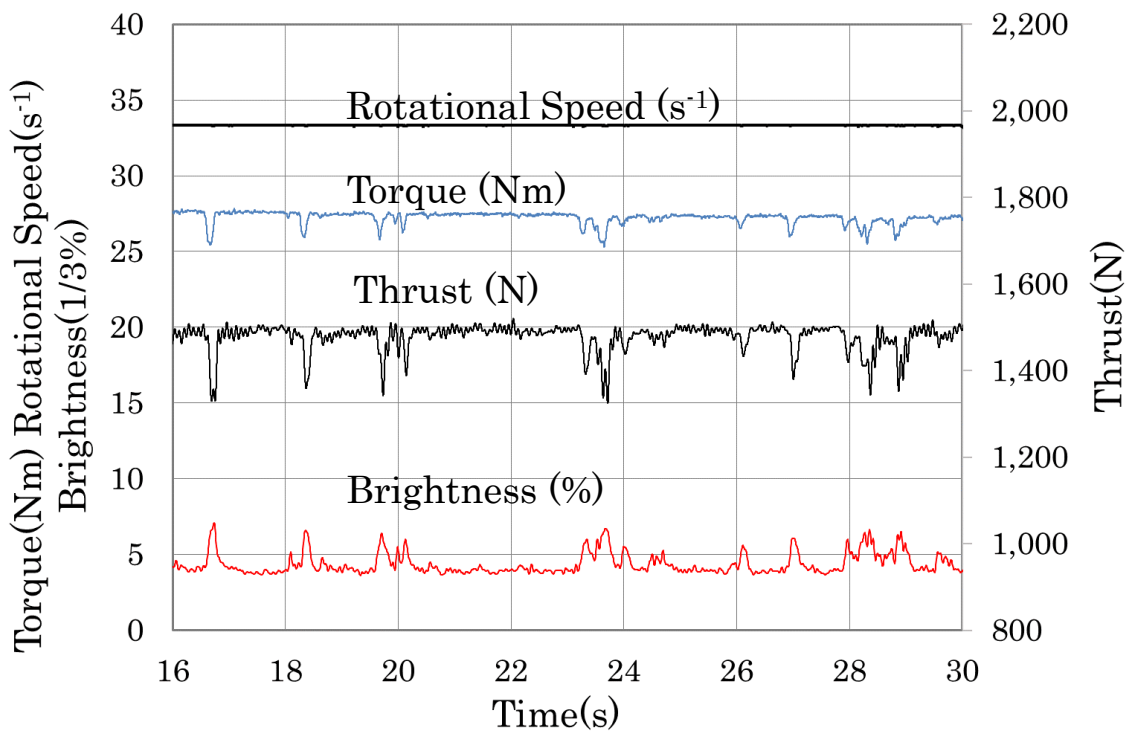


Fig. 5.14 Rotational speed $33.3 s^{-1}$ 1st time

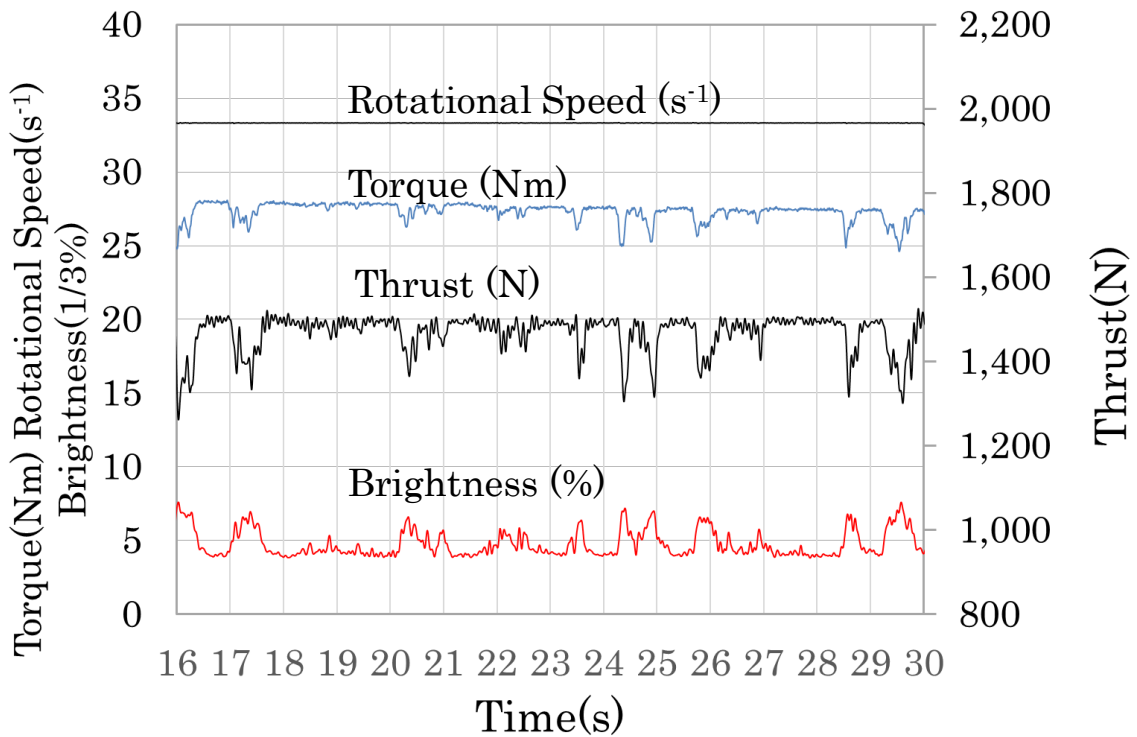


Fig. 5.15 Rotational speed $33.3 s^{-1}$ 2nd time

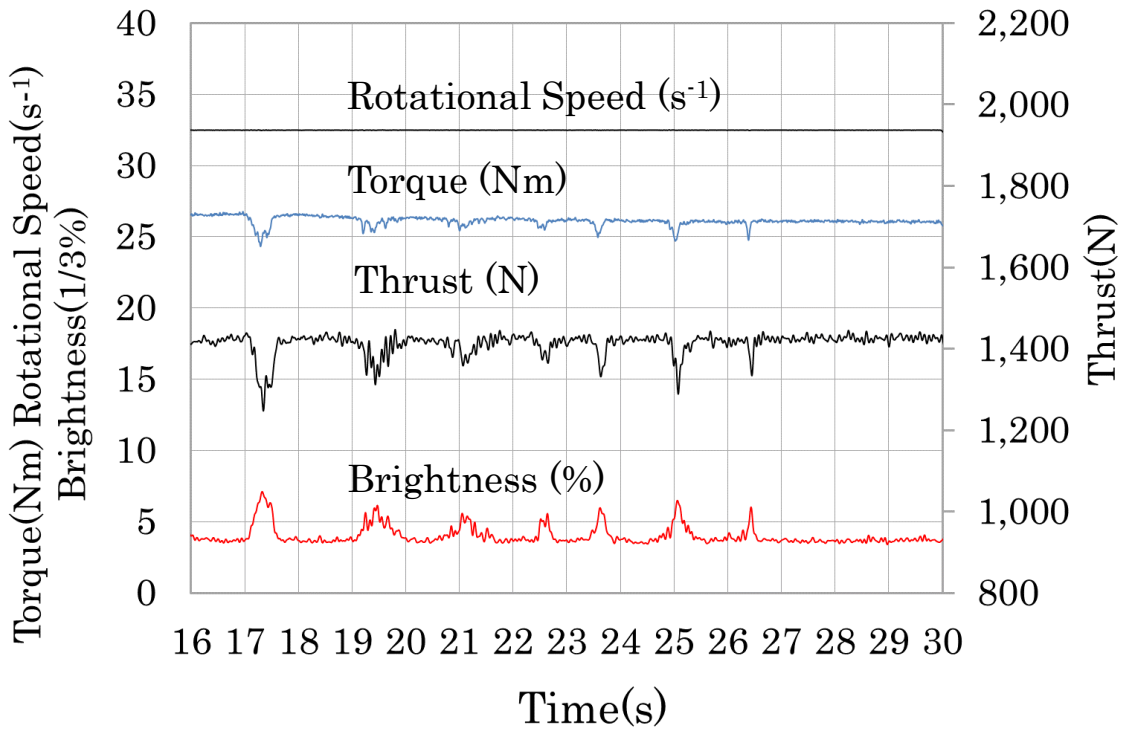


Fig. 5.16 Rotational speed 32.5 s⁻¹ 1st time

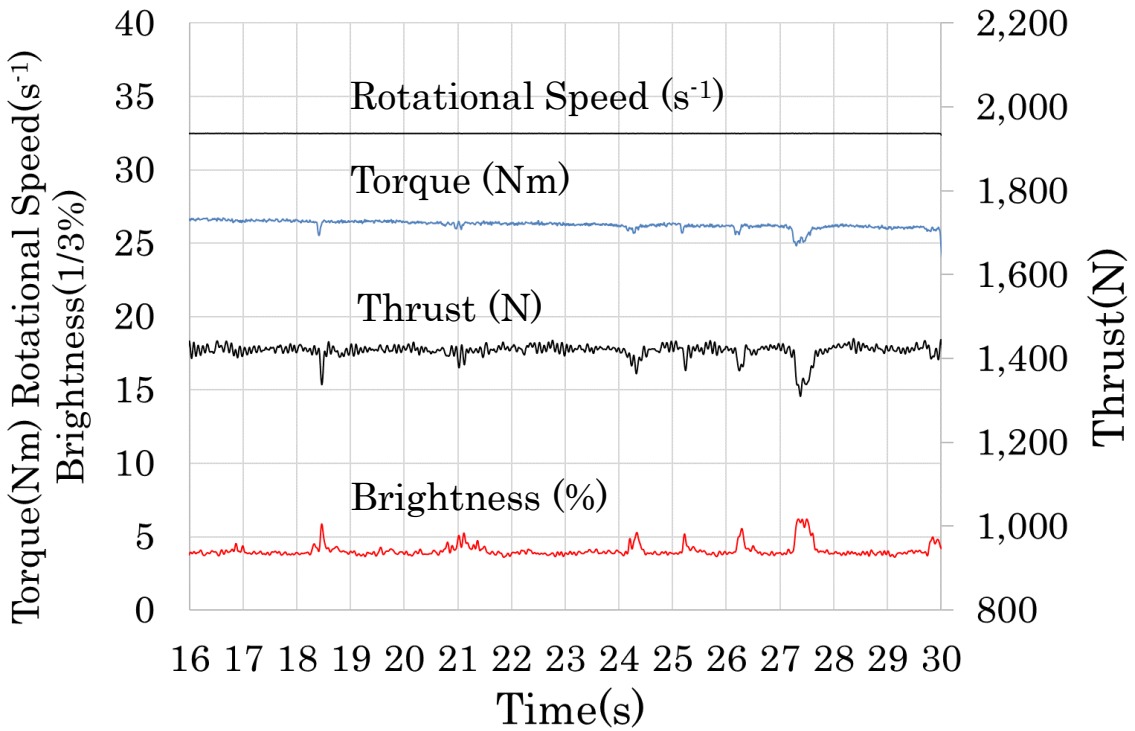


Fig. 5.17 Rotational speed 32.5 s⁻¹ 2nd time

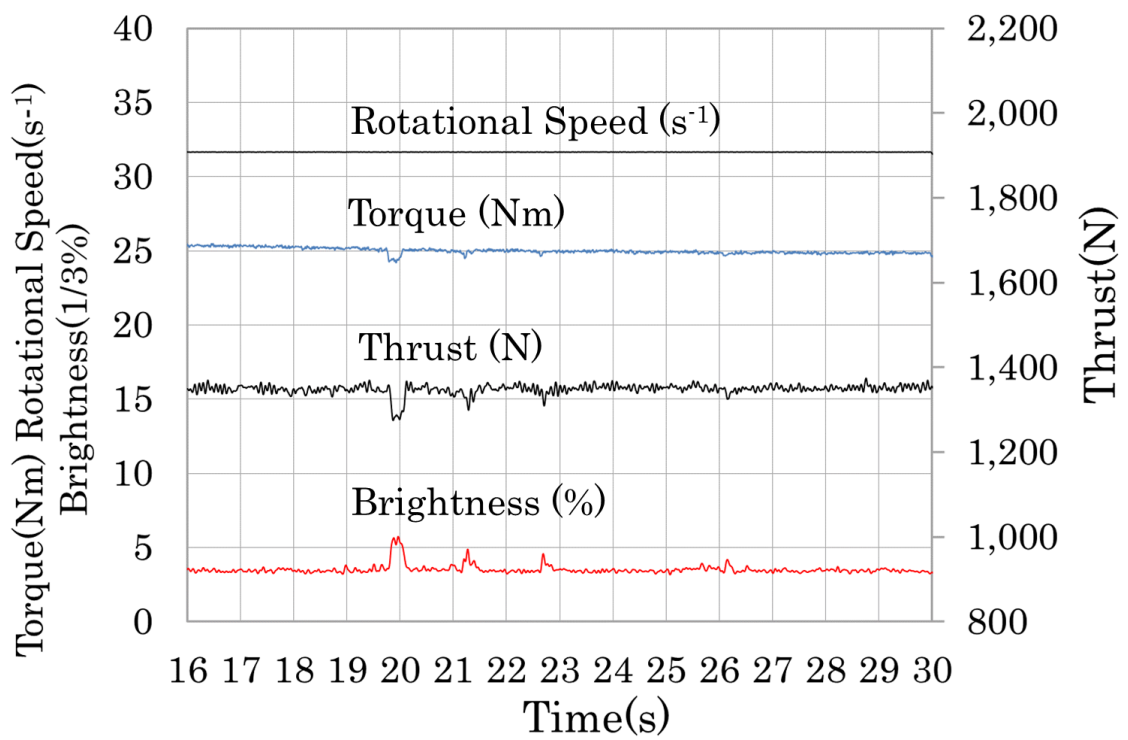


Fig. 5.18 Rotational speed 31.7 s⁻¹

5.3.2.1 プロペラのトルクとプロペラ周囲気泡の相関

Fig. 5.19 に回転速度一定制御方式におけるプロペラ周囲の平均相対輝度とトルクの関係を示す。回転速度の各設定値において、平均相対輝度 B' が大きく ($(1-B')$ が小さく) になるとトルクが減少している。このことは Fig. 5.14 から Fig. 5.19 に示す平均輝度とトルクが連動して減少していることから確認できる。図中の破線は後述する推定曲線である。ここで、トルク一定制御方式と同様に、式(5.10)にトルク Tq 、回転速度 n 、平均相対輝度 B' 、水の密度 ρ 、プロペラ径 D を代入し、得たトルク係数 Kq' と平均相対輝度 B' の関係を Fig. 5.20 に示す。トルク一定制御方式と同様に気泡が発生し平均相対輝度 B' が変化してもトルク係数が一定であることが確認できる。

回転速度一定制御方式における平均相対輝度とトルク Tq の関係は、トルク係数が一定であることから、

$$(1-B') \propto Tq \quad (5.18)$$

と表され、プロペラ周囲気泡状態を示す平均相対輝度 B' をトルク Tq から推定できる。Fig. 5.19 の図中の破線は式(5.10)を用いた推定値である。 $Kq' \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^5$ が各回転速度設定値により決まる固定値となり、上部から回転速度値 31.7 (s⁻¹)、32.5 (s⁻¹)、33.3 (s⁻¹) を示している。図より実験で得られた平均相対輝度は推定曲線と良く一致していることが確認できる。

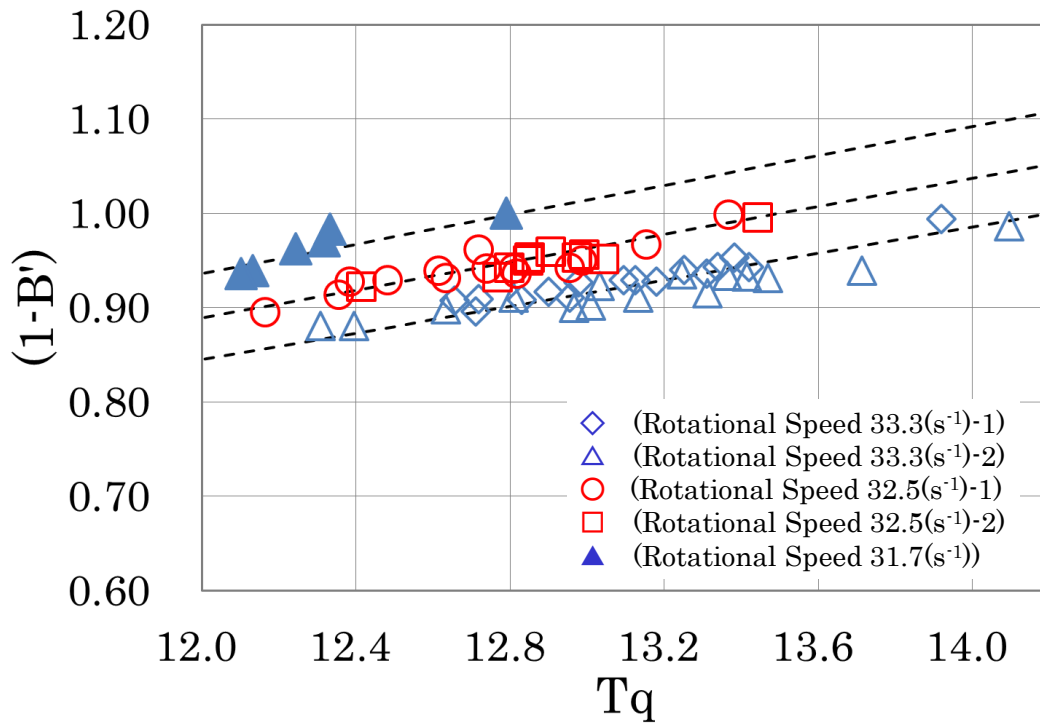


Fig. 5.19 Correlation between relative brightness and torque

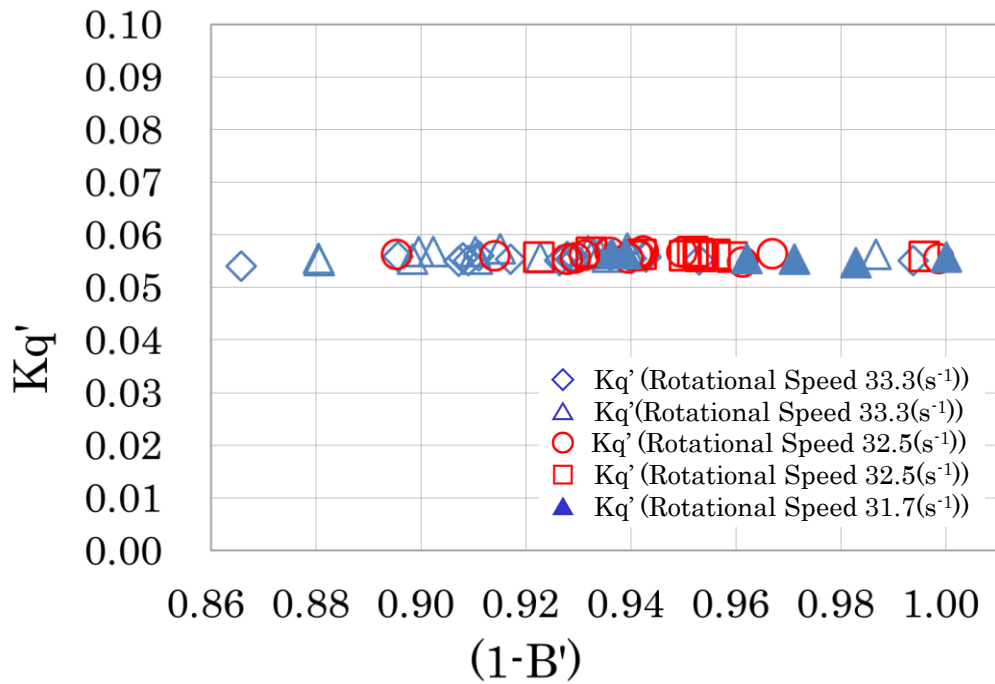


Fig. 5.20 Torque coefficient and relative brightness

5.3.2.2 プロペラのトルクとスラストの相関

スラスト Th とトルク Tq の関係は、プロペラ特性式より式(5.5)と式(5.7)から下記のように表せる。

$$Tq / Th = (Kq' \cdot D) / Kt' \quad (5.19)$$

ここで、 Kt' はスラスト係数である。前節よりトルク係数 Kq' は一定であり、プロペラ径 D は固定値である。回転速度一定制御方式では、プロペラ周囲気泡によりトルクが変動することより、

$$Th \propto Kt' \cdot Tq \quad (5.20)$$

と表すことができる。

ここで、スラスト係数を検証する。トルク一定制御方式と同様に、計測したトルク、回転速度、平均相対輝度を式(5.15)に代入し得たスラスト係数を Fig. 5.21 に示す。平均相対輝度 B' が大きく ($(1-B')$ が小さく) になるとスラスト係数は減少していることが確認できる。

次に、式(5.19)で計算したスラストと、計測したスラストの相関を Fig. 5.22 に示す。さらに式(5.19)においてスラスト係数を平均値 $Kt' = 1.102$ に固定した場合のスラストと計測したスラストの相関を Fig. 5.23 に示す。回転速度一定制御では、スラスト変動はトルク変動の影響が支配的であるが、スラスト係数の影響も Fig. 5.22 と Fig. 5.23 の比較から確認できる。以上により回転速度一定制御におけるスラストの計測値と理論式がほぼ一致していることが確認できる。以上、回転速度一定制御方式について検証した。

スラスト係数の減少は、気泡の混入によりプロペラ翼面における壁面せん断応力が低下し、それに起因してプロペラ特性が変化したことによると考えられる。スラストの変動の比較に関しては、第 6 章で述べる。

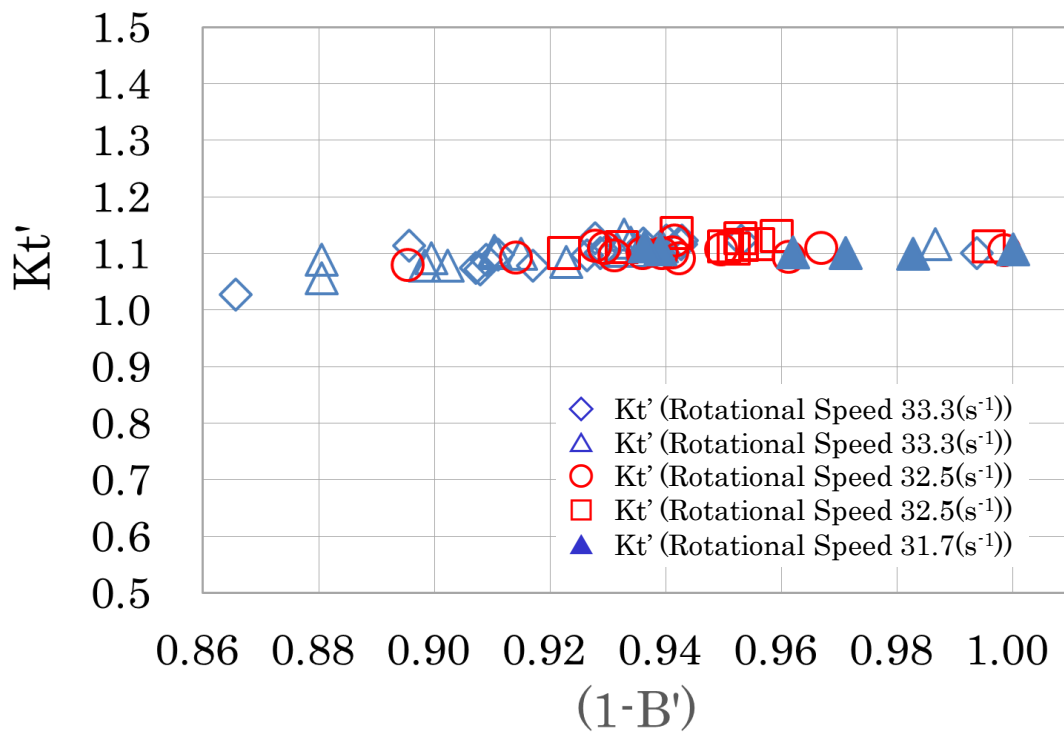


Fig. 5.21 Thrust coefficient and relative brightness

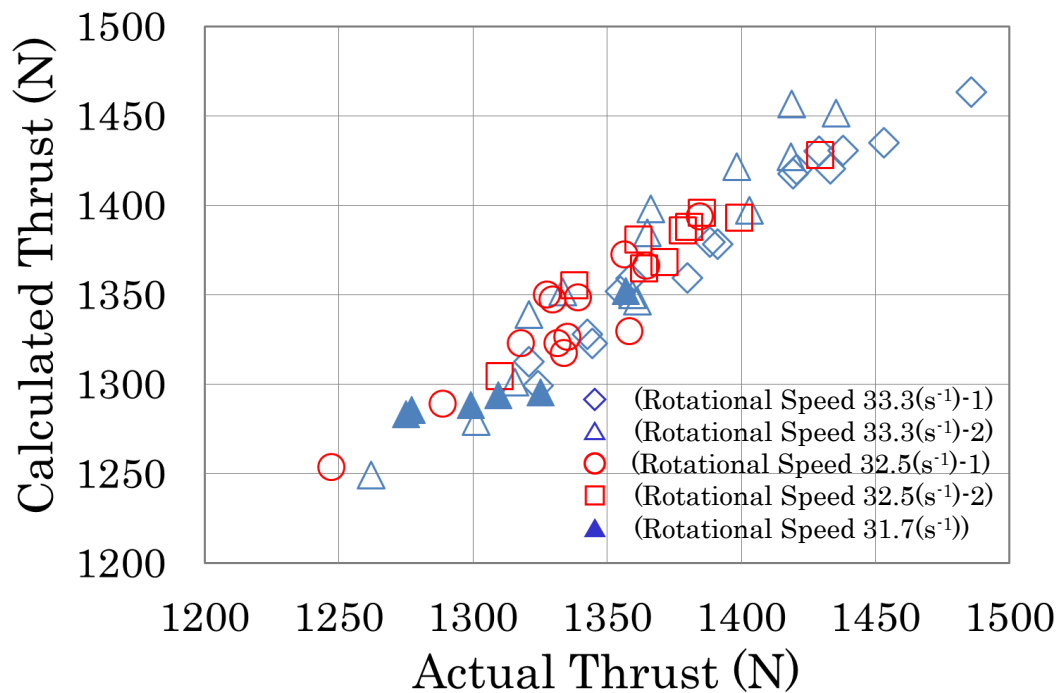


Fig. 5.22 Comparison between actual thrust and calculated thrust

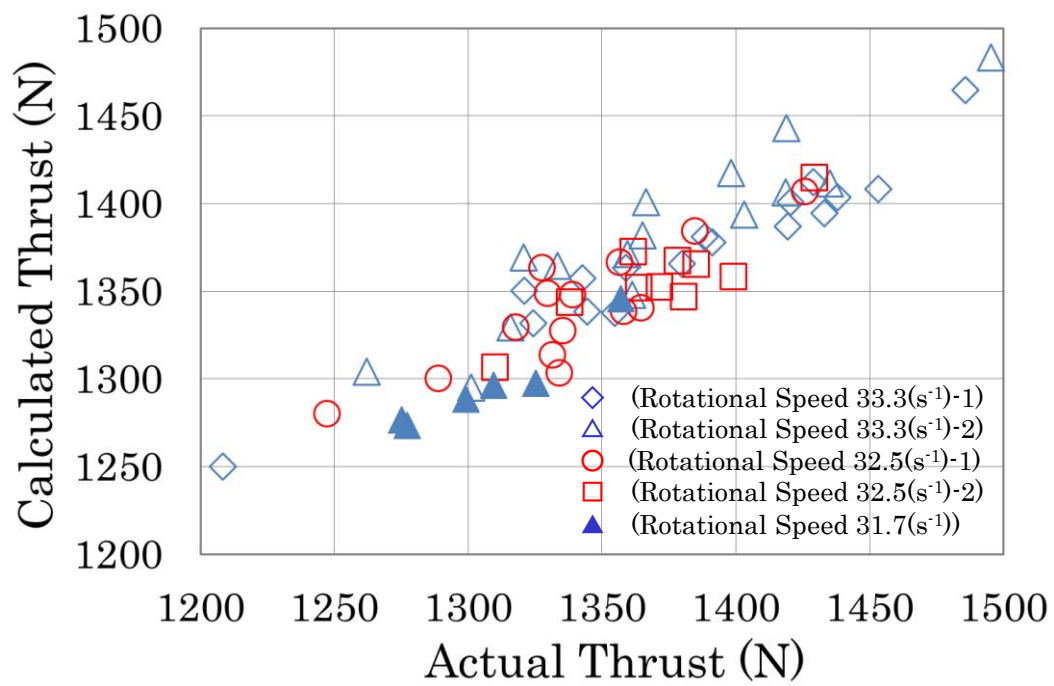


Fig. 5.23 Comparison between actual thrust and calculated thrust ($Kt' = \text{constant}$)

5.3.2.3 結論

5.3 節では、回転速度一定制御されたモータ推進系におけるトルクモニター信号、回転速度モニター信号、高速度ビデオ画像解析によるプロペラ周囲平均相対輝度およびロードセルによるスラスト測定値など実験結果を理論的に検証し、次の結果を得た。

- 1) トルク信号、回転速度信号から得られたトルク係数は、平均相対輝度によらず一定である。
- 2) 本実験条件では、プロペラ周囲の平均相対輝度が気泡発生量（ボイド率）と線形であると仮定すると、プロペラ特性式より実験で得られたトルクと平均相対輝度の相関を良く説明できる。
- 3) 2) と同様に、プロペラ周囲の平均相対輝度が気泡発生量（ボイド率）と線形であると仮定すると、プロペラ特性式よりスラストとスラスト係数の相関を良く整理できる。実験から得られたスラスト係数は、平均相対輝度が増すと減少する。すなわち気泡の発生によりトルクは減少し、スラストは減少する。

5.4 結言

第 4 章では、電気モータ推進システムをトルク一定制御方式と回転速度一定制御方式で駆動し、モータドライブからのトルクモニター信号、回転速度モニター信号、ロードセルによるスラスト計測と高速度ビデオ画像解析によるプロペラ周囲気泡挙動を、回流水槽内で同時計測し、その結果、モータドライブから状態信号がプロペラ周囲の気泡の状態とスラスト変動をセンシングできることを確認した。

本章では、これらセンシングを確認した実験結果を理論的に検証し、次の結果を得た。

トルク一定制御されたモータ推進系において

- 1) トルク信号、回転速度信号から得られたトルク係数は、平均相対輝度によらず一定である。
- 2) 本実験条件では、プロペラ周囲の平均相対輝度が気泡発生量（ボイド率）と線形であると仮定すると、プロペラ特性式より実験で得られた回転速度と平均相対輝度の相関を良く説明できる。
- 3) 2) と同様に、プロペラ周囲の平均相対輝度が気泡発生量（ボイド率）と線形であると仮定すると、プロペラ特性式よりスラストとスラスト係数の相関を良く整理できる。実験から得られたスラスト係数は、平均相対輝度が増すと減少する。すなわち気泡の発生により回転速度は上昇するがスラストは減少する。

回転速度一定制御されたモータ推進系において

- 1) トルク一定制御と同様に、トルク信号、回転速度信号から得られたトルク係数は、平均相対輝度によらず一定である。
- 2) 本実験条件では、プロペラ周囲の平均相対輝度が気泡発生量（ボイド率）と線形であると仮定すると、プロペラ特性式より実験で得られたトルクと平均相対輝度の相関を良く説明できる。
- 3) 2) と同様に、プロペラ周囲の平均相対輝度が気泡発生量（ボイド率）と線形であると仮定すると、プロペラ特性式よりスラストとスラスト係数の相関を良く整理できる。プロペラ周囲気泡によりスラストは、スラスト係数とトルクの乗算に比例して変動し、実験から得られたスラスト係数は、平均相対輝度が増すと減少する。

以上に示すようトルク一定制御方式における回転速度モニター信号とプロペラ周囲気泡の相関、その時の回転速度とスラストの相関、また回転速度一定制御方式

におけるトルクモニター信号とプロペラ周囲気泡の相関、その時のトルクとスラストの相関を、それぞれプロペラ特性式で説明ができることを示した。

これらのことをモータドライブからのモニター信号とプロペラ理論式から説明できることを示した。すなわち、モータドライブのモニター信号は、その制御方式によらずモータ出力変動及びスラスト変動を制御するために用いるセンシング信号として期待できる。

第6章 電気モータ推進における制御方式の評価と考察[29]

6.1 緒言

電気モータ推進システムにおいてモータドライブからの状態信号を用い、前章では、トルク一定制御方式における回転速度モニター信号とプロペラ周囲気泡の相関、その時の回転速度とスラストの相関、また回転速度一定制御方式におけるトルクモニター信号とプロペラ周囲気泡の相関、その時のトルクとスラストの相関を、それぞれプロペラ特性式で説明ができることを示した。さらに、トルク一定制御方式では、実験から得られたスラスト係数は、平均相対輝度が増すと減少し、気泡の発生により回転速度は上昇するがスラストは減少する。一方、回転速度一定制御方式では、実験から得られたスラスト係数は、平均相対輝度が増すと減少し、トルクも減少する。このように制御方式によって、プロペラ周囲気泡による挙動は異なる。

本章では、トルク一定制御方式と回転速度一定制御方式を比較し、プロペラ周囲気泡の影響による負荷変動が与えるモータ出力変動とスラスト変動の挙動の違いを理論式に示し、双方の制御方式において、モータドライブから得た状態信号を用い実験結果と理論式からプロペラ周辺気泡によるモータ出力、スラストへの影響の度合いの比較と検証を行った。以下に本章の内容を示す。

1. モータ制御におけるプロペラ特性の理論的相関
2. 制御方式における気泡によるモータ出力変動の検証
3. 制御方式における気泡によるスラスト変動の検証

以上の結果を章の結論として示した。

6.2 モータ制御におけるプロペラ特性の理論的相関

はじめに、Fig. 6.1 に実験に使用した交流モータドライブのトルク・回転速度特性とプロペラのトルク・回転速度特性を示す。トルク一定制御方式においては、トルク指令を与えるとモータの回転速度は負荷特性に対応した回転速度になる。図中で示すようトルク一定値 T_{q1} が出力されている時、負荷特性が曲線 1)の場合モータ回転速度は n_1 になり、気泡などで負荷特性が変化して曲線 2)になると、トルクは変動せず、回転速度が特性曲線 2)上の回転速度 n_2 になる。この場合モータ出力は、式(5.1)より $T_{q1} \cdot 2\pi (n_2 - n_1)$ 分上昇することになる。一方、回転速度一定制御方式においては、回転速度指令を与えると、モータのトルクは負荷特性に対応したトルクになる。図中で回転速度一定値 n_1 が出力される時、負荷特性が曲線 1)の場合モータトルクは T_{q1} になり、気泡などで負荷特性が変化して曲線 2)になると、モータ回転速度は変わらず、トルクは変化した特性曲線 2)上のトルク T_{q2} になる。この時モータ出力は、式(5.1)より $(T_{q2} - T_{q1}) \cdot 2\pi n_1$ 分降下することになる。

ここでは、平均相対輝度との理論的相関から考察する。トルク一定制御では、平均相対輝度と回転速度の関係を表す式(5.11) $(1-B') \propto 1/n^2$ より回転速度 n は平均相対輝度の平方根に反比例することになり、次節で述べるプロペラ周囲気泡によるモータ出力が増加の方向に変動することを示している。回転速度一定制御方式では、平均相対輝度とトルクの関係を表す式(5.18) $(1-B') \propto Tq$ よりトルクが平均相対輝度に比例しているため、モータ出力が減少の方向に変動することを示している。すなわち、プロペラ周囲の気泡発生によってプロペラ負荷が減少すると、トルク一定制御はモータ出力が増加し、回転速度一定制御ではモータ出力が減少することを示している。

次に、スラストとの理論的相関を考察する。スラストにおいては、回転速度一定制御方式は式(5.20) $Th \propto Kt' \cdot Tq$ で示すようスラスト係数とトルクの乗算に比例するが、トルク一定制御方式では式(5.14) $Th \propto Kt'$ に示すようスラスト係数のみに比例しているため、スラストへの影響は、トルク一定制御方式のほうが少ないといえる。スラスト係数の減少は、気泡の混入によりプロペラ翼面における壁面せん断応力が低下し、それに起因してプロペラ特性が変化したことによると考えられる。スラストの変動の比較に関しては、次節で述べる。

比較に関して、トルク一定制御方式と回転速度一定制御方式の実験装置、実験環境に差異がないことを、それぞれの制御方式のトルク係数とスラスト係数が一致していることを、Fig. 6.2、Fig. 6.3 から確認している。

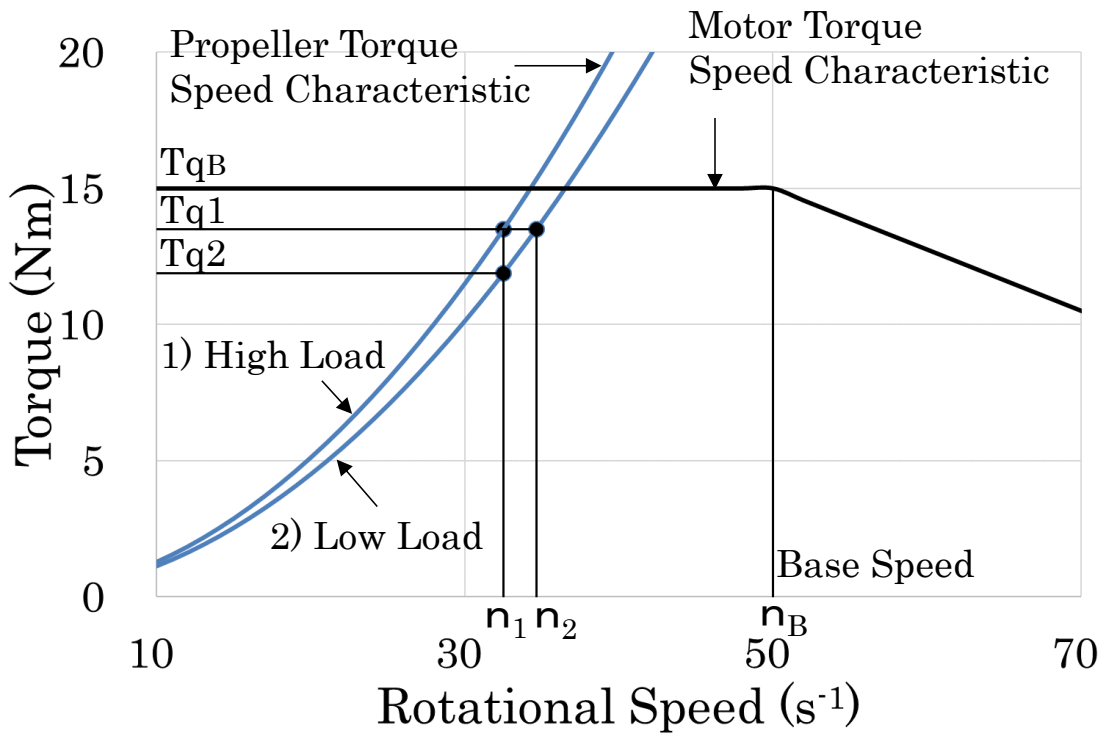


Fig. 6.1 Torque - rotational speed characteristics

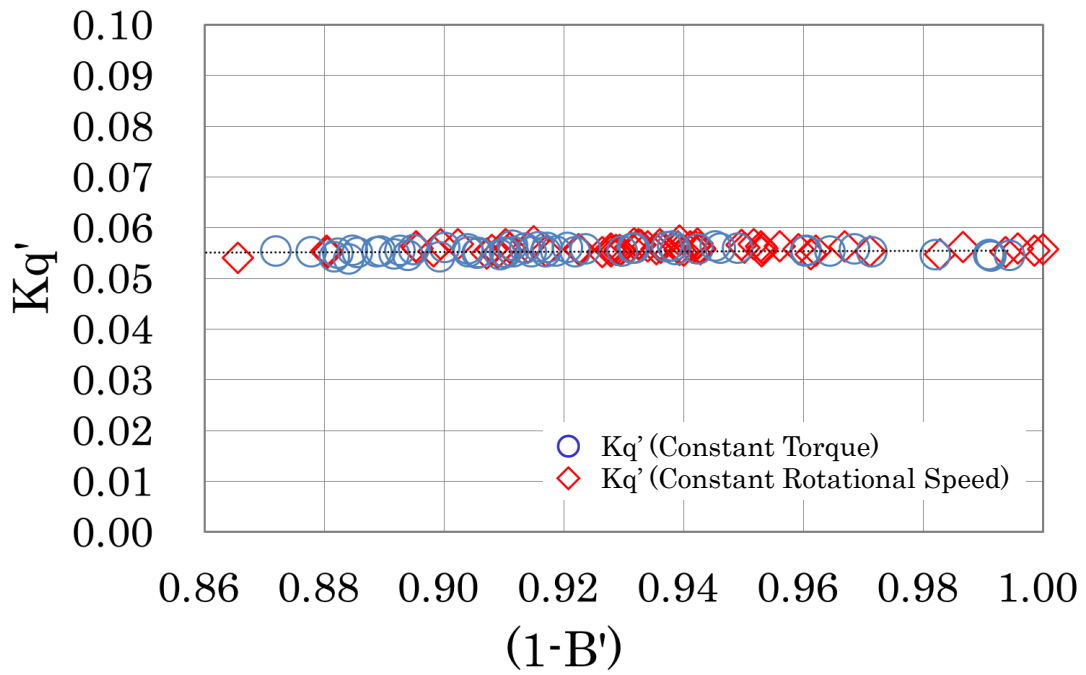


Fig. 6.2 Torque coefficient and relative brightness

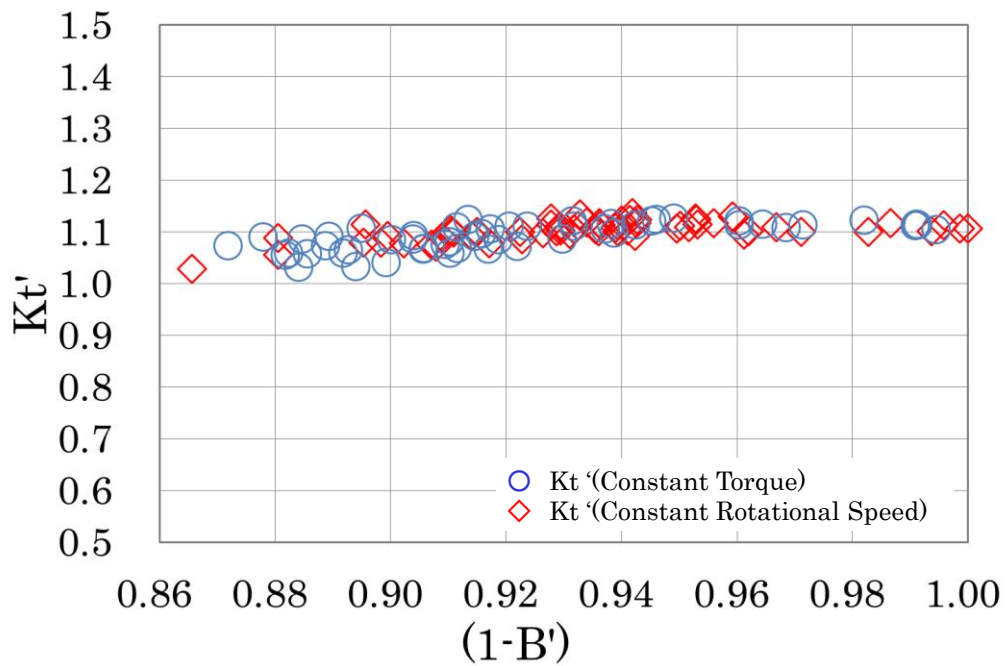


Fig. 6.3 Thrust coefficient and relative brightness

6.3 制御方式における気泡によるモータ出力変動の検証

プロペラ周囲気泡によるモータ出力において、トルク一定制御方式では、モータ出力を表す式(5.1)と平均相対輝度と回転速度の関係を表す式(5.11)によりモータ出力 P_t (W)は、以下の式で表せる。

$$P_t \propto 1 / \sqrt{(1-B')} \quad (6.1)$$

すなわち、プロペラ周囲気泡によるモータ出力は平均相対輝度の平方根に反比例して変動する。

一方、回転速度一定制御方式は、モータ出力を表す式(5.1)と平均相対輝度とトルク T_q の関係を表す式(5.18)により、モータ出力 P_r (W)は、以下の式で表せる。

$$P_r \propto (1-B') \quad (6.2)$$

ここでは、プロペラ周囲気泡によるモータ出力は平均相対輝度に比例して変動する。

次に、モータ出力と平均相対輝度の相関を検証する。計測したトルクと回転速度を式(5.1)に代入して、モータ出力と平均相対輝度の相関を得る。

トルク一定制御方式のモータ出力と平均相対輝度の相関を Fig. 6.4 に示す。図中の推定曲線（破線）は、プロペラ特性式の式(5.10)を用いて求めた回転速度 n を式(5.1)に代入して得ている。モータ出力が平均相対輝度の平方根に反比例している。

一方、回転速度一定制御方式のモータ出力変動を Fig. 6.5 に示す。図中の推定曲線（破線）は、トルク一定制御方式と同様に式(5.10)より求めたトルク T_q を式(5.1)に代入して得ており、モータ出力が、平均相対輝度に比例している。これら計測したモータ出力が、推定曲線とよく一致しているのが確認できる。

以上より、トルク一定制御方式では平均相対輝度と指数関数の相関で変動し平均相対輝度が大きくなると上昇する。回転速度一定制御方式では、モータ出力は、平均相対輝度と線形の相関で変動し、平均相対輝度が大きくなると減少する。推定式では平均相対輝度が 0.6 までは、トルク一定制御方式のほうが回転速度一定制御方式よりモータ出力変動量は少なくなる。

次に、プロペラ周囲気泡によるモータ出力変動量の比較を行う。気泡のない状態でのモータ出力差が2%以内の回転速度一定制御方式(2.78 kW)とトルク一定制御方式(2.73 kW)のモータ出力変動量の比較を Fig. 6.6 に示した。 $(1-B') = 0.894 - 0.895$ における出力変動に着目すると、トルク一定制御と回転速度一定制御のモータ出力変動量は、それぞれ 0.2 kW と 0.3 kW であり、回転速度一定制御の方が 1.5 倍大きいことが確認できる。

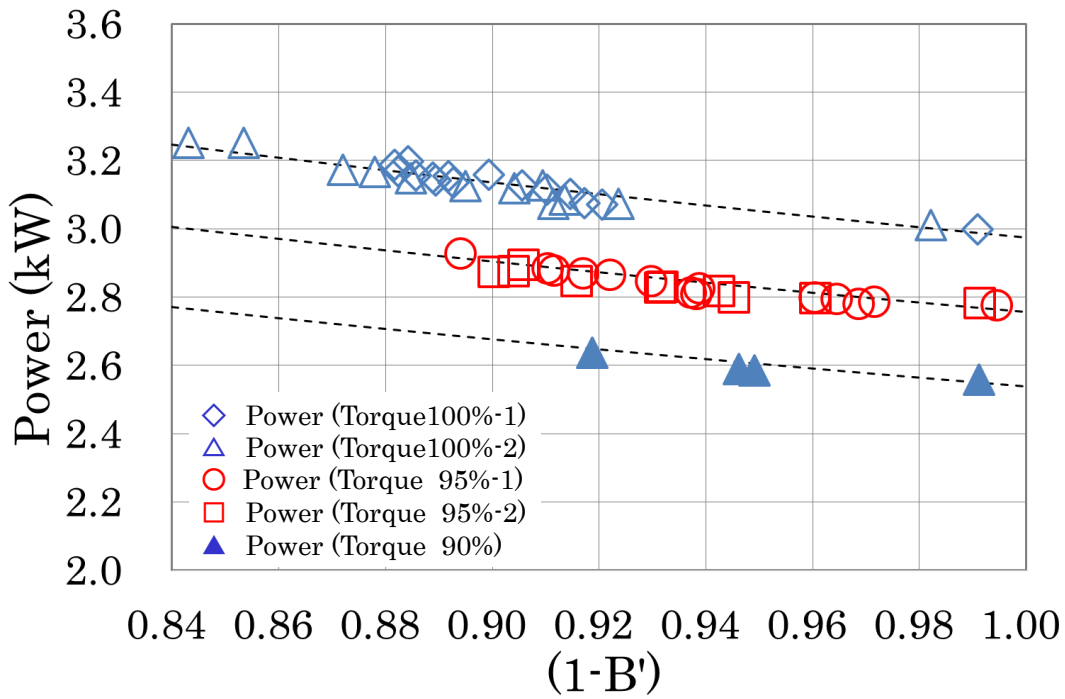


Fig. 6.4 Correlation between relative brightness and power (constant torque control)

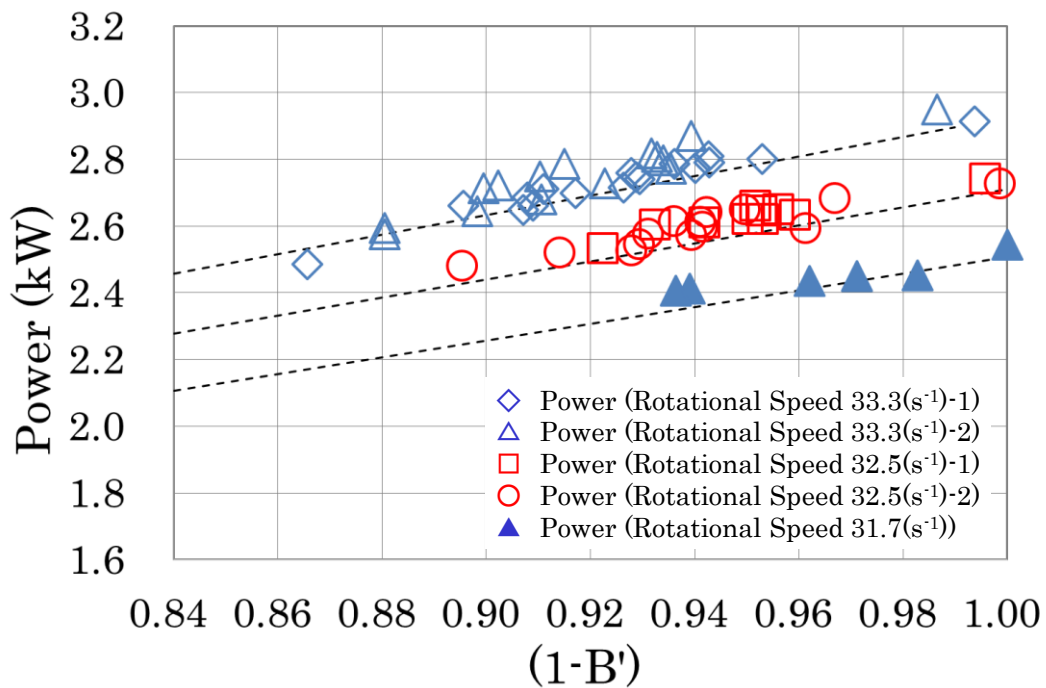


Fig. 6.5 Correlation between relative brightness and power (constant rotational speed control)

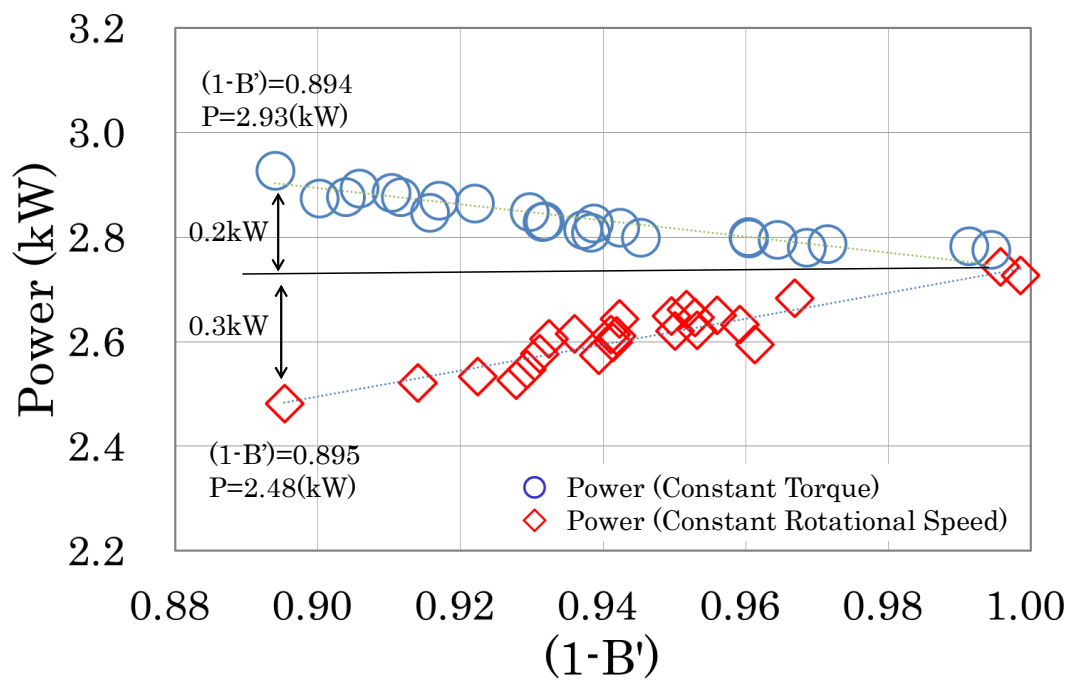


Fig. 6.6 Correlation between relative brightness and power

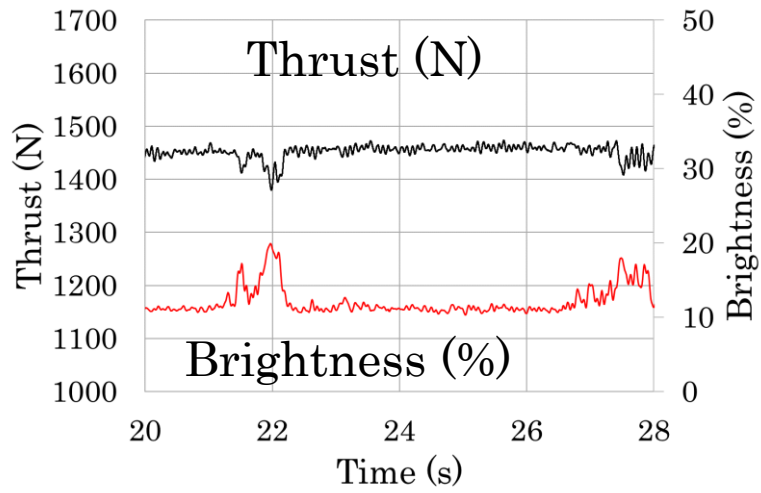
6.4 制御方式における気泡によるスラスト変動の検証

次にスラスト変動について示す。Fig. 6.7 は、上記モータ出力変動量の比較で用いたモータ出力におけるトルク一定制御方式と回転速度一定制御方式のスラスト変動の例を示している。プロペラ周囲気泡発生により起こるスラストの変動量に差があることが分かる。これらを以下で検証する。トルク一定制御方式では、式(5.14)に示すようスラスト変動は、スラスト係数に比例する。一方、回転速度一定制御方式では、式(5.18)に示すようプロペラ周囲気泡により、トルクは平均相対輝度 B' が大きく ($(1-B')$ が小さく) となると減少し、3.2 節に示すようスラスト係数 Kt' も、平均相対輝度 B' が大きく ($(1-B')$ が小さく) となると減少する。すなわち、スラスト変動は、式(5.20)に示すようスラスト係数とトルクの乗算に比例して減少する。

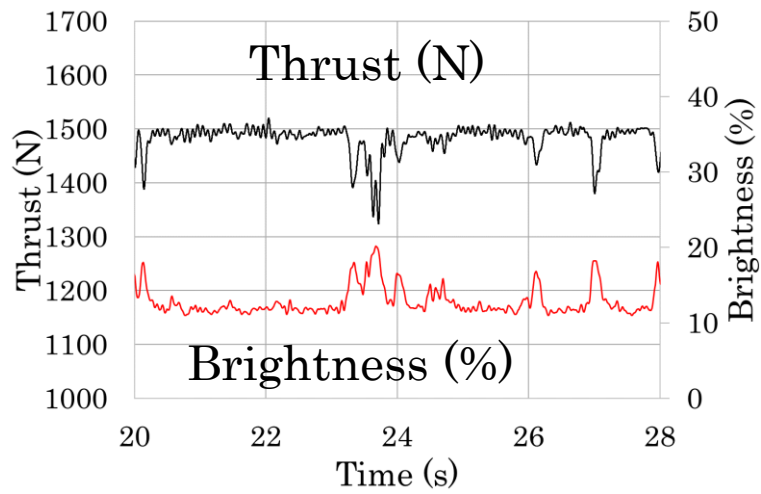
Fig. 6.8 は、Fig. 6.6 と同じ出力にて、平均相対輝度に対するスラストの変動量の比較を示している。モータ出力変動と同様に、 $(1-B') = 0.894 - 0.895$ におけるスラスト変動に着目すると、トルク一定制御と回転速度一定制御のトルクの変動量は、それぞれ 0 Nm と 1.29 Nm であり、スラスト変動量は、それぞれ 93 N と 183 N である。スラスト変動量は、回転速度一定制御の方が、トルクの変動がないトルク一定制御より 2.0 倍大きいことが確認できる。トルク係数のみに比例するトルク一定制御に比べ、スラスト係数とトルクの乗算に比例する回転速度一定制御方式のほうがスラスト変動量が大きくなる。理論式で示す差異があることが確認できる。

以上より、同じ出力で運転時にプロペラ周囲気泡が発生した場合、気泡の影響によるモータ出力変動は、回転速度一定制御では出力減に変動し、トルク一定制御では出力増に変動する。気泡が一定範囲内では回転速度一定制御のほうが変動は大きくなる。また、スラストへの影響も、トルクが減少する回転速度一定制御のほうが大きくなる。A. J. Sørensen らの報告においてもトルクコントローラは、流入の乱れによる推力損失の補償に関して優れているとしている[20]。最後に、Table 6.1 にモータ制御方式による各種相関を整理して示す。

これらにより、回転速度一定制御とトルク一定制御とでは、プロペラ周囲気泡によるモータ出力変動の挙動とスラスト変動の挙動が異なることを、モータドライブからの信号を用い、プロペラ特性式とモータ特性式から理論的に示した。



Constant Torque Control



Constant Rotational Speed Control

Fig. 6.7 Thrust variation

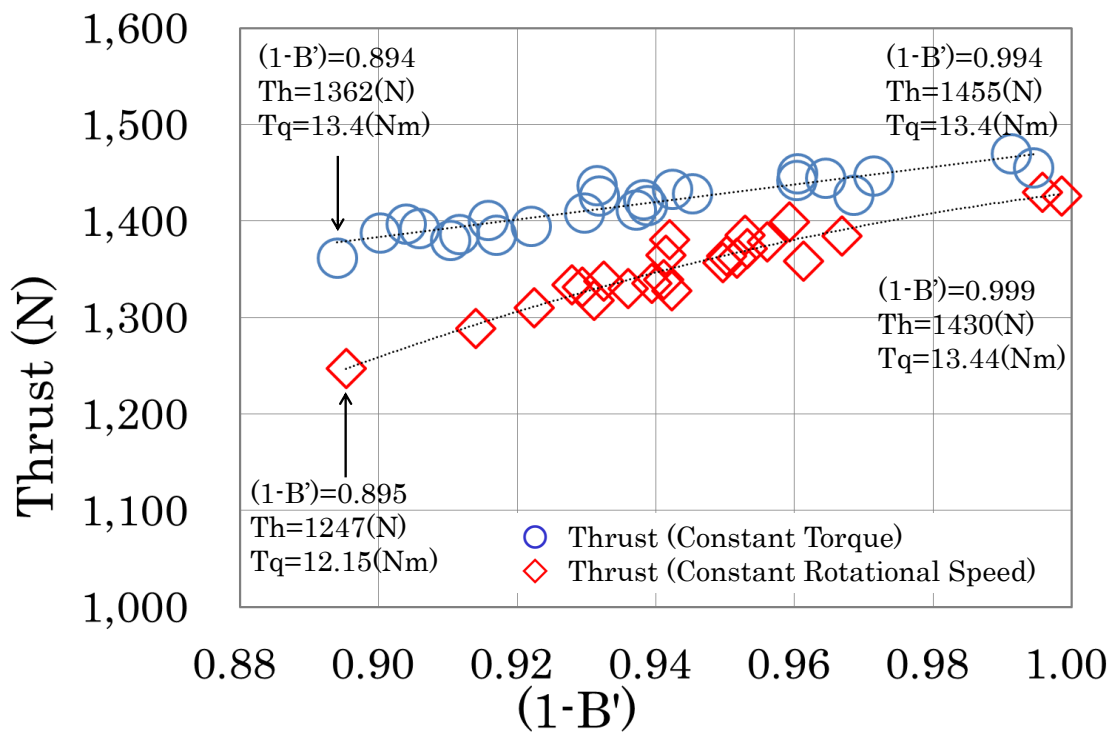


Fig. 6.8 Correlation between relative brightness and thrust

Table 6.1 Various correlations by control method

	Constant Torque Control	Constant Rotational Speed Control
Relative Brightness	$(1-B') \propto 1/n^2$	$(1-B') \propto Tq$
Motor Power	$Pt \propto 1/\sqrt{(1-B')}$	$Pr \propto (1-B')$
Thrust	$Th \propto Kt'$	$Th \propto Kt' \cdot Tq$

6.5 結言

トルク一定制御方式での実験結果と回転速度一定制御方式での実験結果との比較、相関を検証した。また、双方の制御方式におけるモータ出力変動とスラスト変動を比較、検討した。

回転速度一定制御方式とトルク一定制御方式において、プロペラ周囲気泡によるモータ出力変動とスラスト変動の挙動の違いを、モータドライブから得たモニター信号と理論式を用い検証し次の結果を得た。

- i) 回転速度一定制御方式では、気泡の発生に従いモータ出力は、平均相対輝度に比例して出力減に変動する。トルク一定制御方式では、平均相対輝度の平方根に反比例して出力増に変動する。同じ出力の運転において、モータ出力変動量は、気泡が一定範囲内において、平均相対輝度の平方根に反比例するトルク一定制御の方が少ない。
- ii) スラスト変動において、回転速度一定制御方式では、スラスト係数とトルクの乗算に比例し、トルク一定制御方式は、スラスト係数に比例する。同じ平均相対輝度によるスラストへの影響は、トルクの減少を伴う回転速度一定制御方式の方が大きい。

以上これらのことをモータドライブからのモニター信号とプロペラ理論式から説明できることを示した。さらに、トルク一定制御方式のモータ出力、スラスト減少が負荷変動に対しロバストであることを実験結果と理論式から示した。このことは、荒天時航行などプロペラ周囲気泡が発生する場合には、トルク一定制御が優位と考えられる。モータドライブからの信号を解析し、回転速度一定制御とトルク一定制御の切替えを適時に行うことで最適な運転が期待できる。

第7章 結論

近年、ディーゼルエレクトリック船 (Diesel-electric transmission ship) や小型船舶で普及し始めている電池推進船 (Battery-powered electric boat) などで用いられる電気モータ推進システムは、高い推進効率・操船性・快適性・環境性のためにその数を急速に増やしている。これらプロペラ推進系とモータドライブシステムで構成する電気モータ推進システムにおいて、使用される交流モータドライブシステムは、パワーエレクトロニクスの進歩により、高トルク、高トルク応答性 (トルク指令から電流が立ち上げるまでの電氣的応答遅れのみの数 ms)、ベクトル制御による高精度制御、高精度の状態出力 (電流、電圧、トルク、回転速度) など高い性能と、トルク制御モード、回転速度制御モードなどの運転機能を準備している。しかしながら、電気モータ推進システムが従来の内燃機関と同様に使われその持っている機能、性能が有効に活用されていない。著者は 2010 年から研究開発してきている急速充電対応型電池推進船「らいちょう」3 隻において、交流モータドライブシステムとアジマスドライブ、ウォータジェットドライブ、アウトドライブなどの推進器と組み合わせた電気モータ推進システムを研究してきた。これらを背景に本研究では次に示す実験と解析を行った。実験では、電気モータ推進システムを、空気の吸い込みが発生しやすい条件 (プロペラ没水深さ、流速、トルク、回転速度など) で設置・設定し、プロペラ周囲に気泡を発生させる環境にて、トルク一定制御方式と速度一定制御方式で動作させた。初めにモータドライブからのトルクモニター信号、回転速度モニター信号と高速度ビデオ画像解析によるプロペラ周囲気泡挙動を、回流水槽内で同時計測し、モータドライブからの状態信号 (トルク、回転速度) の解析により、気泡発生及びその量 (プロペラ周囲の平均相対輝度)、スラスト減少とそのピークの大きさを正確にセンシングできることを世界で初めて確認した。この確認できたセンシングデータを用いれば、特別なセンサーを要さず、モータドライブからの状態信号により、プロペラ周囲の気泡の状態やそれに起因するスラストの変動などがプロペラ特性式で表せると仮定し、実験結果より検証を行い以下に示す結果を得た。

7.1 電気モータ推進システムによるプロペラ周囲の気泡の検出結果

電気モータ推進システムの交流サーボモータシステムをトルク一定制御方式とトルク一定制御方式で駆動した場合において、モータドライブからの状態信号であるトルクモニター信号、回転速度モニター信号、ロードセルによるスラスト計測と高速度ビデオ画像解析によるプロペラ周囲気泡挙動を、回流水槽内で同時計測した。それにより得た結果を次に示す。

7.1.1 トルク一定制御方式の結果

- 1) モータドライブからのモータ回転速度信号の増加ピークの発生及び大きさにより、気泡発生ピーク及び発生量の増加の大きさを、よく整理でき、モータ回転速度信号の信号処理によりプロペラ周辺の気泡発生及びその量（プロペラ周囲の平均相対輝度）をセンシングできることを確認した。
- 2) モータ回転速度信号の増加の大きさにより、プロペラスラストの減少がよく整理でき、モータ回転速度信号の信号処理によりプロペラスラスト力をセンシングできることを確認した。また歪ゲージの取り付け剛性不足のために 50 ms 程度の遅延があるが、モータ回転速度信号によりスラストピークのピーク発生を計測できた。

7.1.2 回転速度一定制御方式の結果

- 1) モータドライブからのモータトルク信号の減少ピークの発生及び大きさにより、気泡発生ピーク及び発生量の増加の大きさを、よく整理でき、モータトルク信号の信号処理によりプロペラ周辺の気泡発生及びその量（プロペラ周囲の平均相対輝度）をセンシングできることを確認した。
- 2) モータトルク信号の減少の大きさにより、プロペラスラストの減少がよく整理でき、モータトルクの信号処理によりプロペラスラストをセンシングできることを確認した。

7.2 気泡によるモータドライブ動特性とプロペラ動特性の評価結果

前節の実験結果に基づき、トルク一定制御方式と回転速度一定制御方式におけるプロペラ周囲気泡とスラスト変動の特性評価を行った。以下にその結果を示す。

7.2.1 トルク一定制御方式の結果

- 1) トルク信号、回転速度信号から得られたトルク係数は、平均相対輝度によらず一定である。
- 2) プロペラ周囲の平均相対輝度が気泡発生量（ボイド率）と線形であると仮定すると、プロペラ特性式より実験で得られた回転速度と平均相対輝度の相関を良く説明できる。
- 3) 2)と同様に、プロペラ周囲の平均相対輝度が気泡発生量（ボイド率）と線形であると仮定すると、プロペラ特性式よりスラストとスラスト係数の相関を良く整理できる。実験から得られたスラスト係数は、平均相対輝度が増すと減少する。すなわち気泡の発生により回転速度は上昇するがスラストは減少する。

7.2.2 回転速度一定制御方式の結果

- 1) トルク一定制御と同様に、トルク信号、回転速度信号から得られたトルク係数は、平均相対輝度によらず一定である。
- 2) プロペラ周囲の平均相対輝度が気泡発生量（ボイド率）と線形であると仮定すると、プロペラ特性式より実験で得られたトルクと平均相対輝度の相関を良く説明できる。
- 3) 2)と同様に、プロペラ周囲の平均相対輝度が気泡発生量（ボイド率）と線形であると仮定すると、プロペラ特性式よりスラストとスラスト係数の相関を良く整理できる。プロペラ周囲気泡によりスラストは、スラスト係数とトルクの乗算に比例して変動し、実験から得られたスラスト係数は、平均相対輝度が増すと減少する。

7.3 電気モータ推進における制御方式の評価と考察結果

双方の制御方式におけるモータ出力変動とスラスト変動を比較、検討した。トルク一定制御方式と回転速度一定制御方式とにおいて、プロペラ周囲気泡によるモータ出力変動とスラスト変動の挙動の違いを、モータドライブから得たモニター信号と理論式を用いて検証し、次の結果を得た。

7.3.1 制御方式における気泡によるモータ出力変動の検証結果

回転速度一定制御方式では、気泡の発生に従いモータ出力は、平均相対輝度に比例して出力減に変動する。トルク一定制御方式では、平均相対輝度の平方根に反比例して出力増に変動する。同じ出力の運転において、モータ出力変動量は、気泡が一定範囲内において、平均相対輝度の平方根に反比例するトルク一定制御の方が少ない。すなわち、プロペラ周囲の気泡発生によってプロペラ負荷が減少すると、トルク一定制御はモータ出力が増加し、回転速度一定制御ではモータ出力が減少することを示している。

7.3.2 制御方式における気泡によるスラスト変動の検証

回転速度一定制御方式では、スラストは、スラスト係数とトルクの乗算に比例し、トルク一定制御方式は、スラストは、スラスト係数のみに比例する。同じ平均相対輝度によるスラストへの影響は、トルクの減少を伴う回転速度一定制御方式の方が大きい。

7.4 総括

第 1 章で記述したようプロペラ周囲に発生する気泡は船舶の推進効率を低減させるだけではなく、トルクやスラスト等に変動を生じ騒音・振動を発生して機関や推進器へのダメージを与える。本研究の目的は、プロペラ駆動用モータドライブシステムがプロペラ周囲の気泡状態やスラスト変動をセンシングすることができ、センシング信号がモータ出力変動及びスラスト変動を制御するための信号となり得ることを実験と理論から検証することにある。以下に本研究の総括を示す。

- ① 本研究での実験は、電気モータ推進システムを、空気の吸い込みが発生しやすい条件（プロペラ没水深さ、流速、トルク、回転速度など）で設置・設定し、プロペラ周囲に気泡を発生させる環境にて、トルク一定制御方式と速度一定制御方式で動作させモータドライブからのトルクモニター信号、回転速度モニター、ロードセルによるスラスト計測と高速度ビデオ画像解析によるプロペラ周囲気泡挙動を、回流水槽内で同時計測した。
- ② 実験結果として、モータドライブからの状態信号（トルク、回転速度）の解析により、気泡発生及びその量（プロペラ周囲の平均相対輝度）、スラスト減少とそのピークの大きさを正確にセンシングできることを確認した。それゆえ、モータドライブからの状態信号が、プロペラ周囲の気泡の状態やそれに起因するスラストの変動などをプロペラ特性式で表せると仮定し解析評価した。以下に得た結果を示す。
- ③ プロペラ周囲の平均相対輝度が気泡発生量（ボイド率）と線形であると仮定すると、トルク一定制御方式ではプロペラ特性式より回転速度と平均相対輝度の相関を良く説明でき、その時のスラストとスラスト係数の相関を良く整理できた。実験で得られたスラスト係数は、平均相対輝度が増すと減少し、気泡の発生により回転速度は上昇するがスラストは減少することを示せた。回転速度一定制御方式においても、プロペラ特性式よりトルクと平均相対輝度の相関を良く説明でき、その時のスラストとスラスト係数とトルクの相関を良く整理できる。また、プロペラ周囲気泡によりスラストは、スラスト係数とトルクの乗算に比例して変動することを示した。

- ④ 回転速度一定制御方式とトルク一定制御方式において、プロペラ周囲気泡によるモータ出力変動とスラスト変動の挙動の違いを、モータドライブから得たモニター信号と理論式を用い検証し次の結果を得た。
- i) 回転速度一定制御方式では、気泡の発生に従いモータ出力は、平均相対輝度に比例して出力減に変動する。トルク一定制御方式では、平均相対輝度の平方根に反比例して出力増に変動する。同じ出力の運転において、モータ出力変動量は、気泡が一定範囲内において、平均相対輝度の平方根に反比例するトルク一定制御の方が少ない。
 - ii) スラスト変動において、回転速度一定制御方式では、スラスト係数とトルクの乗算に比例し、トルク一定制御方式は、スラスト係数に比例する。同じ平均相対輝度によるスラストへの影響は、トルクの減少を伴う回転速度一定制御方式の方が大きい。すなわち、トルク一定制御方式のほうがプロペラ周囲気泡によるモータ出力変動、スラスト変動に対しロバストである。

以上これらのことをモータドライブからのモニター信号とプロペラ理論式から説明できることを示した。すなわち、モータドライブのモニター信号は、その制御方式によらずモータ出力変動及びスラスト変動を制御するために用いるセンシング信号として期待できる。

最後に、本研究の達成に寄与した要因を2点記述する。一つは、パワーエレクトロニクスの進歩により、交流モータドライブシステムの高速度高精度の制御サイクルの制御信号がモニターでき、モータの状態をリアルタイムに精度よく得られたこと、機能である制御方式(トルク一定制御方式、回転速度一定制御方式)の活用がある。もう一つは、プロペラ周囲のボイド率の実測及びその非線形検証が困難であるため、高速度ビデオカメラでの光学像からプロペラ周囲の領域を切り出し、その平均相対輝度がボイド率と線形の関係にあると仮定したことにある。これらにより、実験で得たデータが理論式で検証できた。

7.5 今後の展望

今回の実験は、プロペラ周囲に気泡を発生させやすくするため、前進速度を抑えたボラードプル状態で実験を行った。将来的に前進速度やプロペラ没水深度の影響を含めた議論が必要になるが、本実験は、これらの条件を固定した単純体系において、プロペラ周囲気泡形成と負荷変動の關係に着目した実験としている。トルク係数やスラスト係数は第 2 章で記述したよう前進速度で変化し、プロペラ没水深度はプロペラ周囲気泡の発生の要因になる。実船に近い状態での研究では前進速度、プロペラ没水深度などのパラメータを変化させる必要があるが、これらのパラメータを最も条件が厳しいボラードプルの状態で固定した本実験での結果は、検証データとして貢献できると考えられる。また、このように、モータドライブからの状態信号が精度よくリアルタイムに得ることができれば、トルクと回転速度から前進速度や前進係数が得られ、プロペラ単独効率をリアルタイムに求めることができ、船舶運航効率の向上に効果が見込める。

一方、大型船舶に注目すると、プロペラ効率を高めるためにはプロペラ荷重度を減らすことが大きな効果をもたらすことから、1970 年代のオイルショック以来船舶の省エネ化が大幅に進展し、その時主役になった技術がプロペラの大直径低回転化である[30]。これらは毎分 100 回転以下で回転する。ミリ秒オーダーでの制御が可能な電気モータ推進システムにおいてモータドライブから得られる状態信号やデータを用いれば、1 回転でのプロペラ翼の位置での負荷変動による振動などの制御にも適用できると考えられる。

最近、船のプロペラ、エンジン、水中掘削、ソナーなどによる海中の人為的な騒音公害は海洋生物に影響を与え、調査研究が始まっている。推進効率、機関・推進装置へのダメージだけでなく海の騒音対策にも寄与できるものと期待できる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、絶えず温かいご指導と適切なお教示を賜りました東京海洋大学 学術研究院海洋電子機械工学部門教授 波津久達也先生、富山高等専門学校 校長 賞雅寛而先生、東京海洋大学 学術研究院海洋電子機械工学部門助教 井原智則先生に心から御礼申し上げます。

また、本論文の完成に際して、ご指導とご助言を賜りました東京海洋大学 学術研究院海洋電子機械工学部門教授 清水悦郎先生、准教授木船弘康先生に厚く御礼申し上げます。

電気モータ推進システムの研究の礎となっている急速充電対応型電池推進船の研究開発を当初からご指導を賜りました賞雅先生、清水先生、波津久先生、木船先生におかれましては、重ねて御礼申し上げます。

実験環境である水平循環型の大型回流水槽をご提供、ご指導していただきました東京海洋大学 学術研究院 海洋生物資源学部門 教授 胡夫祥先生、准教授 塩出大輔先生に深く御礼申し上げます。

実験装置の製作及び実験を行うにあたっては、東京海洋大学 研究員 原誠氏、土屋和行氏、高宮敏道氏、東京海洋大学海洋工学部 梅田綾子、小柳摩純、山口源貴 学生諸氏のご助力を得ました。また、論文の整理や事務面でお世話いただきました東京海洋大学 動力エネルギー研究室秘書の大久保ユリ子氏に感謝を表します。

私が本論文を纏めることができましたのは、こうした多くの方々からのご援助の賜物であると感謝いたしております。

最後に家庭で常に私の支えとなった妻の由紀子に感謝の意を表し、謝辞とさせていただきます。

参考文献

- [1] Akiji Shinkai, Member Shuntao Wan, Youichi Konishi, Propeller Racing of Ocean-going Ships, 日本造船学会論文集, 第 182 号 (1997), pp. 435–444.
- [2] 野澤和男, 高山尚久, サーフェスプロペラの推進性能に関する実験的研究, 関西造船協会論文集 2002 巻 (2002) 237 号, p. 237_63-237_70.
- [3] K. Koushan, S. Spence, L Savio, “Ventilated Propeller Blade Loadings and Spindle Moment of a Thruster in Calm Water and Waves”, Second International Symposium on Marine Propulsors smp’11, Hamburg, Germany, June 2011.
- [4] A. M. Kozłowska, K. Wöckner, S. Steen, T. Rung, K. Koushan, S. J. B. Spence, “Numerical and Experimental Study of Propeller Ventilation”, Second International Symposium on Marine Propulsors smp’11, Hamburg, Germany, June 2011.
- [5] M. Uchida, K. Teshima, Y. Matsumoto, T. Wakamatsu, “Cavity Formation and Bearing Force by Air Ventilation on Marine Screw Propeller”, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers (2007), pp. 297–304.
- [6] A. Califano, S. Steen, “Numerical Simulations of a Fully Submerged Propeller Subject to Ventilation”, Ocean Engineering 38 (2011), pp. 1582–1599.
- [7] S. Hasegawa, HAKUYO DHIZERU KIKAN KYOUHAN, (1988) seizando.
- [8] Y. Maruyama, “Shaft Power Meter”, Journal of the JIME, Vol.50, No.4 (2015), pp.118–122.
- [9] 安川電機船用電気推進および軸発用電気品 資料 2017 年 2 月.
- [10] K. Hirota, S. Adachi, Y. Deguchi, S. Ogasawara, “Model-Based Control Systems Design for Electric Vehicles”, Tokyo Denki University Press (2009).
- [11] Merchant Marine College Career Education Research Group “Koreissastude Senpaku-kougaku-nyumon”, KAIBUNDO (2016).

- [12] 横山直彦, 実用期を迎えた先端船舶電気システムの展望, 日本船舶機関学会誌, 第 32 巻, 第 9 号 (1997-9), pp. 720–728.
- [13] 大出剛, 清水悦郎, 第 24 回 燃料電池シンポジウム講演予稿集 (2017), pp. 11–14.
- [14] 大出剛, 「東京海洋大学における燃料電池船舶の研究開発について」, 鉄道と船舶における燃料電池の利用に関する国際セミナー, 2018 年 2 月 21 日.
- [15] 荻原誠功, 山崎正三郎, 芳村康男, 足達宏之, 船舶海洋工学シリーズ 11 船舶性能設計, 成山堂書店, 2013-06-21.
- [16] 廣田幸嗣, 足立修一, 小笠原悟司, 出口欣高, 電気自動車の制御システム, 東京電機大学出版局 (2009).
- [17] A. Califano, S. Steen, “Numerical Simulations of a Fully Submerged Propeller Subject to Ventilation”, *Ocean Engineering* 38 (2011), pp. 1582–1599.
- [18] Anna Maria Kozłowska, Katja Wöckner, Sverre Steen, Thomas Rung, Kouros Koushan, Silas J.B. Spence, “Numerical and Experimental Study of Propeller Ventilation”, *Second International Symposium on Marine Propulsors smp’11, Hamburg, Germany*, (2011).
- [19] Luca Pivano, Tor Arne Johansen, Øyvind N. Smogeli, “A Four-Quadrant Thrust Estimation Scheme for Marine Propellers: Theory and Experiments”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 17(1) (2009), pp. 215–226.
- [20] Asgeir J. Sørensen, Øyvind N. Smogeli, “Torque and Power Control of Electrically Driven Marine Propellers”, *Control Engineering Practice* 17 (2009), pp. 1053–1064.
- [21] M. Hinatsu, H. Kawashima, Y. Kodama, T. Hori, M. Sakoda, M. Makino “An Experiment Study on Propeller Characteristics in Bubbly Flows Part2: Result of Propeller Open Water Test in Bubbly Flow”, *Conference proceedings, the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, vol. 9 (2009), pp. 71–78.

- [22] F. Hu, T. Tokai, S. Takeda, D. Shiode, H. Inada, Y. Hashizume, “The Performance of New Circulating Water Channel of Tokyo University of Marine Science and Technology”, *Fisheries Engineering*, Vol. 41, No. 2 (2004), pp. 153–163.
- [23] 安川電機製品マニュアル, SIJP S80001 261 Published in Japan, 2016年10月, 16-1-12.
- [24] Photron Catalog, G15590PHT, 2015年5月.
- [25] A&D Catalog, LOADCELL-ADJC-20-ZW18-16603, 2016年6月.
- [26] Oppenheim & Schafer, *Discrete-Time Signal Processing*, 3rd Edition, Pearson, (2009).
- [27] T. Ode, T. Takamasa, E. Shimizu, T. Hazuku, H. Kifune, T. Ihara, “Detection of Near-Propeller Bubbles and Thrust Power in a Constant Torque Control Motor Propulsion System”, *Journal of the JIME*, Vol. 53, No. 3 (2018), pp. 89–94.
- [28] 大出剛, 賞雅寛而, 波津久達也, 井原智則, トルク一定制御モータ推進システムにおけるプロペラ周囲気泡とスラスト変動の特性評価, *日本マリンエンジニアリング学会誌*, 第53巻, 第4号 (2018), pp. 111–116.
- [29] 大出剛, 賞雅寛而, 波津久達也, 井原智則, 回転速度一定制御モータ推進システムにおけるプロペラ周囲気泡とスラスト変動の特性評価, *日本マリンエンジニアリング学会誌*, 第53巻, 第4号 (2018), pp. 117–123.
- [30] 松本洋一郎, 翼まわりの気液二相流, *ターボ機構*第22巻11号 (1994), pp. 8–14.
- [31] 川島久信, 日夏宗彦, 児玉良郎, 堀利文, 迫田我行, 牧野雅彦, 気泡流中におけるプロペラ単独特性 第I報: 気泡吹き出しによる局所ボイド率分布と速度分布計測, *日本船舶海洋工学会論文集*, 第9号 (2009), pp. 63–70.
- [32] 日夏宗彦, 児玉良郎, 堀利文, 大型セメント運搬船を用いた空気潤滑法による省エネ実船実験(準備), *日本船舶海洋工学会論文集*, 第6号 (2008), pp. 161–162.

- [33] 日夏宗彦, 児玉良郎, 堀利文, 大型セメント運搬船を用いた空気潤滑法による省エネ実船実験 (結果と解析), 日本船舶海洋工学会論文集, 第 6 号 (2008), pp. 163–166.
- [34] 志波久光, 推進器のスキュー・バックと空気吸い込みに就いて, 造船協会論文集 第 87 号 (1950), pp. 39–46.
- [35] Luca Savio and Sverre Steen, “Identification and Analysis of Full Scale Ventilation Events”, Hindawi Publishing Corporation International Journal of Rotating Machinery Volume 2012, Article ID 951642, 19 pages doi: 10.1155/2012/951642.
- [36] Luca Pivano, Øyvind N. Smogeli, Thor Inge Fossen, Tor Arne Johansen, “Experimental Validation of a Marine Propeller Thrust Estimation Scheme”, Modeling, Identification and Control, Vol. 28, No. 4 (2007), pp. 105–112.
- [37] 小川計介: ステアリング、ブレーキで進む X-by-Wire への道, 日経 Automotive Technology, spring, 74/93, 日経 BP (2007).

Appendix A List of Publication

A1. 公表論文(Published Papers)

- 1) T. Ode, T. Takamasa, E. Shimizu, T. Hazuku, H. Kifune, T. Ihara, Detection of Near-Propeller Bubbles and Thrust Power in a Constant Torque Control Motor Propulsion System, Journal of the JIME, Vol. 53, No. 3, pp. 89-94, 2018.
- 2) 大出剛, 賞雅寛而, 波津久達也, 井原智則, トルク一定制御モータ推進システムにおけるプロペラ周囲気泡とスラスト変動の特性評価, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第 53 巻, 第 4 号, pp. 111-116, 2018.
- 3) 大出剛, 賞雅寛而, 波津久達也, 井原智則, 回転速度一定制御モータ推進システムにおけるプロペラ周囲気泡とスラスト変動の特性評価, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第 53 巻, 第 4 号, pp. 117-123, 2018.

A2. 参考論文(Reference Papers)

- 1) H. Makino, T. Ode, Motion Control of the Direct Drive Actuator, CIRP Manufacturing Technology, Volume 40, Issue 1, pp. 375-378, 1991.
- 2) M. Nishimura, E. Shimizu, T. Oode and T. Takamasa, Navigation Support System for Electric Boat, Proc. of 2012 International Offshore and Polar Engineering Conference, pp. 969-973, 2012.
- 3) 西村真佐人, 清水悦郎, 甘糟和男, 杜宇航, 大出剛, 賞雅寛而, 電池推進船と内燃機関船の水中音の比較, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol. 48, No. 4, pp. 137-142, 2013.
- 4) 西村真佐人, 清水悦郎, 大出剛, 出力制限機能付電池推進船用運航支援システムの開発, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol. 48, No. 5, pp. 84-89, 2013.

- 5) 田島宏一, 波津久達也, 清水悦郎, 大出剛, 賞雅寛而, モーター駆動ウォータージェット推進船の周期制御による旋回性能の向上, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol. 50, No. 3, pp. 101-106, 2015.
- 6) A. Umeda, E. Shimizu and T. Oode, Design Strategy of Battery Powered Boat and its Evaluation, Proc. of the 2015 International Offshore and Polar Engineering Conference, pp. 911-917, 2015.
- 7) M. Yamagishi, E. Shimizu, T. Oode and A. Umeda, Navigation Support System for Hybrid Electric Boat, Proc. of the 2015 International Offshore and Polar Engineering Conference, pp. 1182-1187, 2015.
- 8) K. Takahata, E. Shimizu, A. Umeda, T. Oode, T. Tsuchiya and Y. Tamura, Development of Remotely Operated Unmanned Boat with Long-range Wi-Fi, Artificial Life and Robotics, Vol. 21, No. 3, pp. 365-370, 2016.
- 9) K. Takahata, E. Shimizu, M. Yamaguchi, M. Yamagishi, A. Umeda and T. Oode, Operation Support System for Water Transit Service, Proc. of the International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (IEEE SMC 2016), pp. 1461-1466, 2016.
- 10) 梅田綾子, 清水悦郎, 川名優孝, 大出剛, 岡本信明, 産学連携におけるリスク管理手法としての法人の一利用法, 産学連携学会誌, Vol. 13, No. 1, pp. 65-73, 2016.
- 11) H. Kifune, M. Satou, T. Oode, A study on Battery System Design for Battery Ships Conforming to CHAdeMO, Journal of the JIME, Vol. 51, No. 6, pp. 134-141, 2016.

A3 特許(Japan Patents)

- 1) 賞雅寛而, 大出剛, 船舶の電気推進システム, 特願 2011-276141 (出願人: 東京海洋大学), 2011.

- 2) 大出剛, 清水悦郎, 電池推進移動体システム, 特願 2014-194183 (出願人: 東京海洋大学), 2014.
- 3) 大出剛, 賞雅寛而, 船舶推進機コントロール及びそれを用いた船舶推進システム, 特許第 6057381 号 (出願人: 東京海洋大学), 2016.
- 4) 大出剛, 賞雅寛而, 清水悦郎, 波津久達也, 井原智則, プロペラ負荷状態推定装置, プロペラ負荷状態推定方法およびプロペラ負荷状態推定プログラム, 特願 2017-95748 (出願人: 東京海洋大学), 2017.

A4 受賞 (Japan Awards)

- 1) らいちょう I: 日本ボート・オブ・ザ・イヤー2010 特別賞
日本ボート・オブ・ザ・イヤー実行委員会 (Mar 3, 2011)
- 2) らいちょう I: シップ・オブ・ザ・イヤー2010 小型客船部門最優秀部門賞
公益社団法人 日本船舶海洋工学会 (Jul 22, 2011)
- 3) らいちょう S: 日本ボート・オブ・ザ・イヤー2011 特別賞
日本ボート・オブ・ザ・イヤー実行委員会 (Mar 1, 2012)
- 4) 急速充電対応型電池モータ駆動ウォータージェット推進システムの開発
マリンエンジニアリング・オブ・ザ・イヤー2011 受賞
公益社団法人 日本マリンエンジニアリング学会 (Jul 25, 2011)

Appendix B 電池推進船とその電気モータ推進システム

ここでは、本研究の礎となっている電池推進船の研究について、特に電気モータ推進システムに関して記述する。

B1 急速充電対応型電池推船

電池推進船の研究開発は、著者によって下記に示すよう実施され現在に至っている。東京海洋大学の電池推進船の写真を Fig. B.1 に示す。

2010年5月にフィジビリティ艇として進水させた「らいちょう I」は世界初の急速充電対応型電池推進船で電気モータ推進システムは、電気自動車向け定格出力45 kW（最大出力80 kW）の永久磁石内蔵型同期モータ（IPMSM）、インバータとZドライブ機構で構成した（現在はアウトドライブに改造）。エネルギー源として公称容量39 kWhのリチウムイオン2次電池を搭載し、電気自動車用急速充電器CHAdemoに準拠している。この艇は、電池推進システムの開発、リチウムイオン2次電池への急速充電とモータ制御の研究を行い、日本ボート・オブ・ザ・イヤー2010特別賞とシップ・オブ・ザ・イヤー2010小型客船部門最優秀部門賞を受賞している。

2号艇は、2011年4月に「らいちょう S」として建造した。電気モータ駆動ウォータジェット推進の制御の研究、ウォータジェットの周期制御による旋回性能の向上の研究の他、福島県小名浜での東日本大震災直後の海底調査、長崎県対馬での漁港のエコ化検証、北海道寿都での寒冷地試験、沖縄県石垣島での水中リモコン試験、神奈川県小網代での薄膜太陽光試験など多くの実験を実施している。この艇も1号艇同様、日本ボート・オブ・ザ・イヤー2011特別賞、「急速充電対応型電池モータ駆動ウォータジェット推進システムの開発」にてマリンエンジニアリング・オブ・ザ・イヤー2011を受賞している。

3号艇は、2015年4月に「らいちょう N」として建造、就航した。この艇は次世代水上交通システムの研究実験船であり、ツインドライブバッテリーシステム、シリーズハイブリッドシステム、B2Bシステム、遠隔操縦システム等の特徴とする実用化レベルの電池推進船として位置付けている。さらに、内燃機関の発電機と純水素燃料電池の2種類の発電システムとでレンジエクステンダーシステムを構築し、航行距離を延ばしている。電気モータ推進システムは、アウトドライブ推進機

に永久磁石内蔵型同期モータ (IPMSM)、インバータの構成で、それを 2 基搭載する 2 基 2 軸の推進システムとしている。



Fig. B.1 Quick-charging compatible battery power electric boats "Raicho I", "Raicho S" and "Raicho N"

B2 電池推進船システム

ここでは、「らいちょう」のシステムについて記述する。Fig.B.2に「らいちょう N」のシステム構成図を示す。「らいちょう I」や「らいちょう S」の構成は、「らいちょう N」の構成に包含されている。電池推進船のシステムは、電気モータ推進システム、発電システム（らいちょう N のみ）、航海用システムとユーティリティシステムとから成り立っている。

電気モータ推進システムは、E-ECU (Engine-electric control unit) と呼んでいる制御ユニット、パワーラインの経路切替と監視を行うジャンクションボックス (Junction Box)、バッテリーマネージメントシステムで管理されるリチウムイオン 2 次電池、電気自動車用急速充電器 CHAdeMO に準拠している急速充電システム、モータドライブシステムと推進装置から構成している。Fig. B.3 に「らいちょう I」「らいちょう S」「らいちょう N」のモータドライブシステムと推進装置を示す。モータドライブシステムは全く同じ機種を使用し推進装置は異種のものを採用しそれらの差異が観測できるようにしている。

発電システムは、2種類搭載している。1つは内燃機関を用いた発電機で推進装置を駆動させているモータドライブシステムと同機種の永久磁石内蔵型同期モータ (IPMSM) ディーゼルエンジンで駆動しインバータから直流を出力させている。そのため他の電力変換器を必要とせずパワーラインに接続できる利点がある。発電制御は、ディーゼルエンジンを一定回転速度にさせ、モータをトルク制御することで発電電力を制御している。一方水素燃料電池は、右舷と左舷に最大出力 4 kW を各 1 基搭載し合わせて最大 8 kW の発電をさせている。

航海用システムでは、操舵の制御のみでなく GPS など航海計器からのデータとリチウムイオン 2 次電池の状態、燃料電池など発電装置からの電力、推進用モータ出力状態などからエネルギーマネージメント、パワーマネージメントなどを行う。それゆえ、航海システム用 N-ECU は、電気モータ推進システム用 E-ECU、内燃機関発電システム用 G-ECU、水素燃料電池用 F-ECU と連動しモータ出力、発電電力を制御できるようにしている。

各機器間の通信は、CAN2.0B (Controller Area Network) を使い、一定のサイクルで機器間の通信を行っている。これは、断線、ノイズ、機器異常などによるバスオフ状態になった場合、当該機器を制御不能とし機器を停止させることで暴走などを防止している。バスオフ (Bus Off) は、通信ケーブル上でのエラー発生率が、非常に高い状態のことで、内部のエラーカウンタが一定の閾値を超えたとき異常を検知する機能である。また、CAN 通信を用いて、操作部分から機械的な伝達機構を無くし、電気信号による伝達に置き換える X-by-Wire[37]を構築し、操舵とモータ出力用コントロールレバーに、それぞれ Steer-by-Wire (ステアリング)、Throttle-by-Wire (スロットル) として使用している。さらにジョイスティック操船にも対応している。操舵システムには、電動パワーステアリング (EPS) を採用し、レスポンスがよく精度の高い操舵機としている。このように遠隔操船、自動操船などの研究にも用いることができるようにしている。

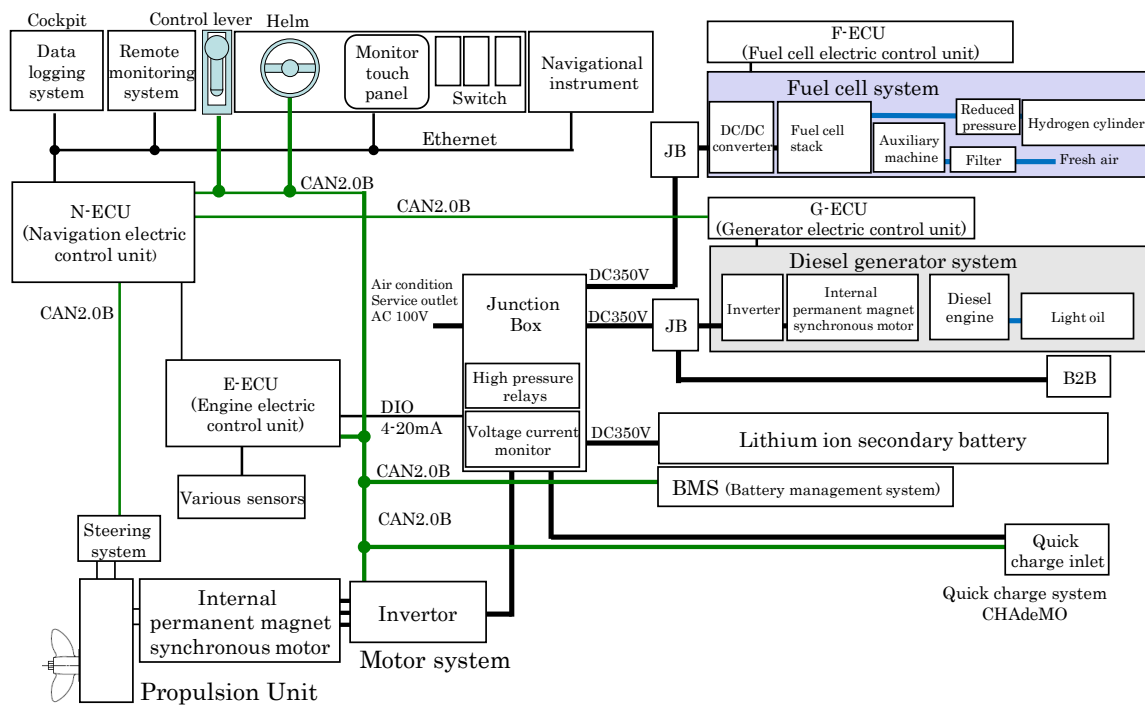


Fig. B.2 “Raicho N” system configuration

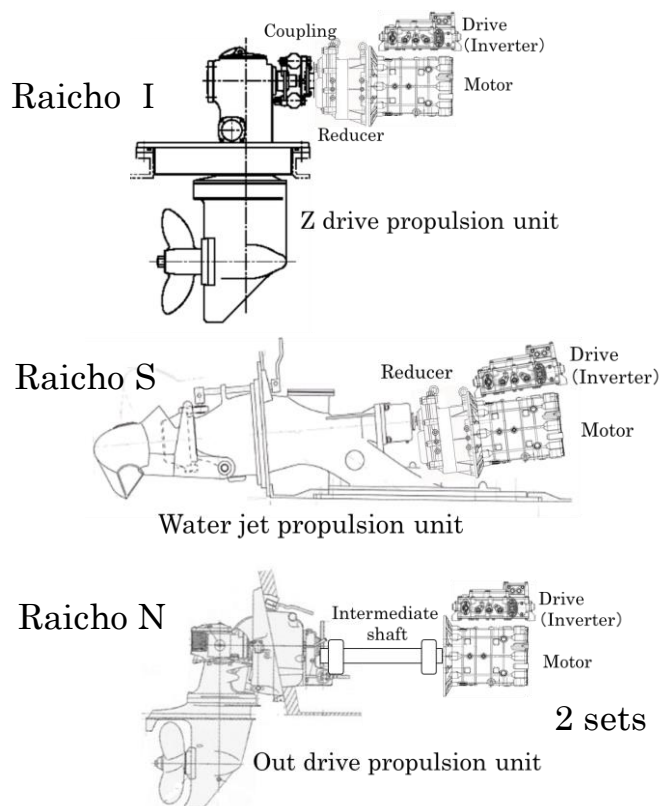


Fig. B.3 Motor drive system and propulsion unit

B3 らいちょう N の航行実験

「らいちょう N」のデータロギングシステムは全 ECU が管理しているデータ約 200 点を 1 Hz でサンプリングする。Fig. B.4 は、横浜ベイサイドマリーナから横浜象の鼻パークを経由して京浜運河、羽田沖、晴海沖、東京海洋大学越中島キャンパスポンドまでの実験航行でのロギングデータの内、リチウムイオン 2 次電池の出力電力と電力量、モータ軸出力とそれを累積した消費エネルギー、ディーゼル発電機での発電電力量、船速を示している。Fig. B.5 は、搭載しているサテライトコンパスのデータを用い航跡を示している。図中の場所番号は、Fig. B.4 の図中の番号を示している。

実験航行は、電気モータ推進システムをトルク一定制御にて行った。①横浜ベイサイドマリーナから②象の鼻パークまで 14 km を約 1 時間、②象の鼻パークから⑦東京海洋大学越中島キャンパスポンド間の 38 km を約 2.5 時間で航行しデータを収集した。モータ軸出力は、モータドライブであるインバータから出力されるトルクデータと回転速度データから算出している。データロガーに収集されたデータは、エネルギーマネジメント、パワーマネジメントなどのための解析やリチウムイオン 2 次電池の観測など多くの項目の解析、検証に使用されるが、ここでは、船速とモータトルク、モータ回転速度に注目して記述する。

Fig. B.6 に、④京浜運河入口から晴海沖までの船速、モータ軸トルクとモータ軸回転速度を示した。モータ軸トルクを一定に制御して運転しているが、時々刻々と変化する潮流や風、波浪、気温、水温等の海洋環境外乱を受け船速が変化している。この時、トルク制御されたモータ軸トルクは変動せずモータ軸回転速度が変化しているのが確認できる。Fig. B.7 では、Fig. B.6 の一部の時間帯を拡大して示した。「らいちょう N」は先に示したよう 2 基 2 軸であるため、右舷と左舷のモータ軸トルクとモータ軸回転速度が示されている。モータ軸トルクが一定で、モータ軸回転速度が船速と同様に変化しているのが観測できる。このことは、船体への外乱により前進速度が変化し、モータの負荷であるプロペラ負荷が変化したことなどが考えられるが、気泡の吸い込みなどプロペラ周囲気泡の影響なども考えられる、より詳しい解析をモータドライブシステムからの信号またはデータで行うことを研究したのが、本論文の研究につながっている。すなわち、電気モータ推進システムにおける動特性とプロペラ周囲気泡による負荷変動に関する研究へ進展した。

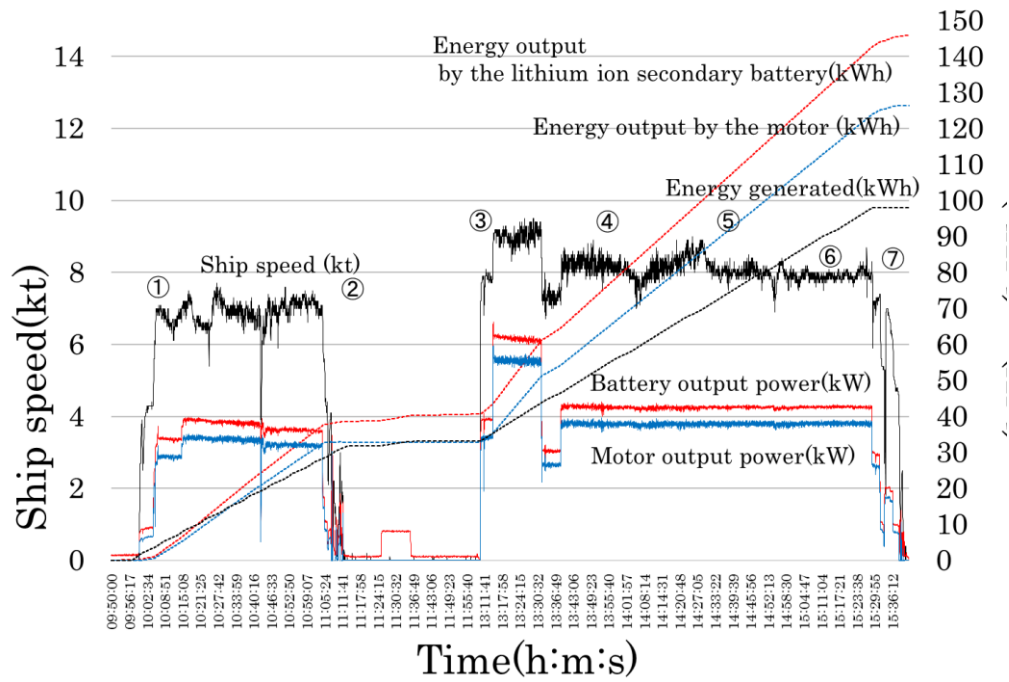


Fig. B.4 Navigational data between Yokohama and Echujima Echinoshima campuses in "Raicho N"

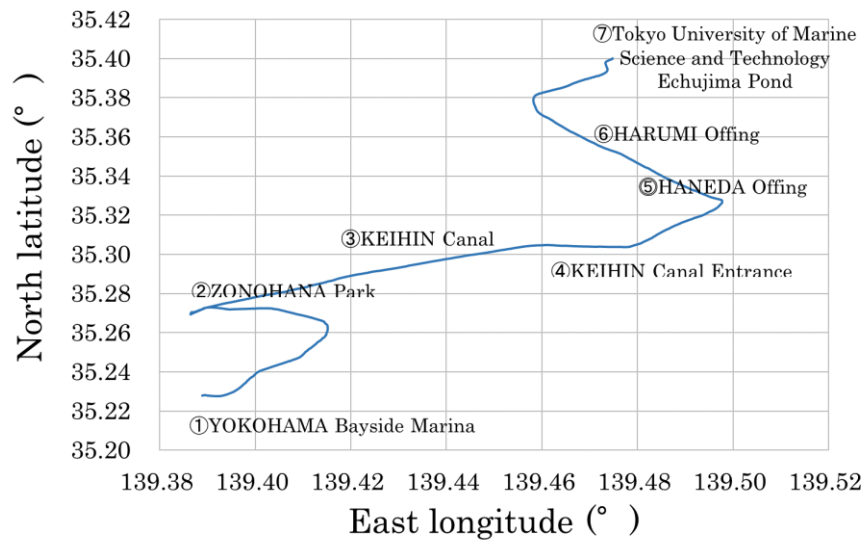


Fig. B.5 Navigational trajectory data between Yokohama and Echujima campuses in "Raicho N"

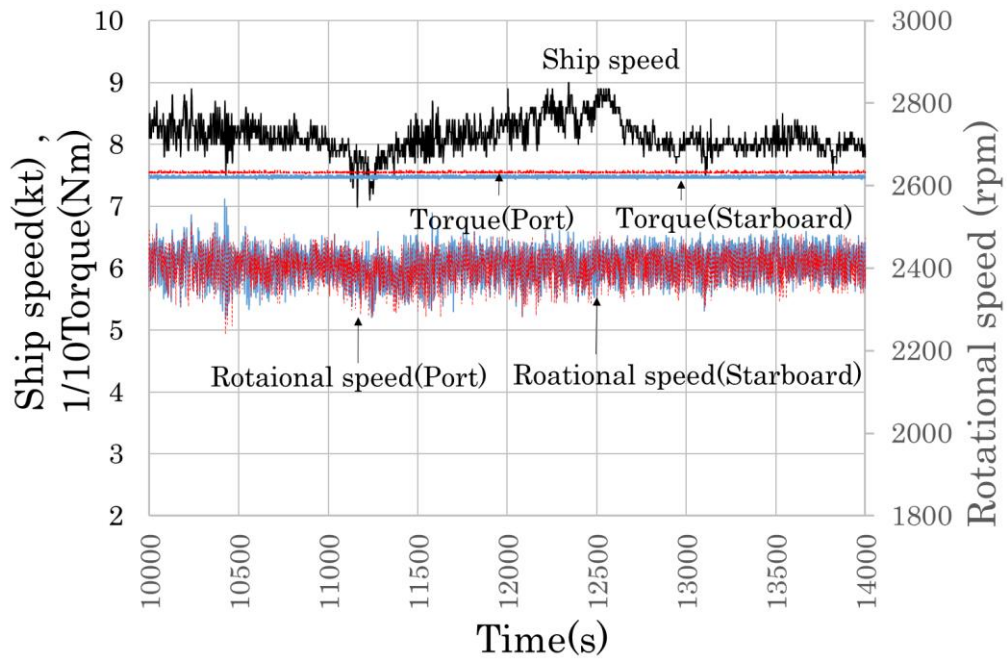


Fig. B.6 Ship speed, motor torque and motor rotational speed during navigation in “Raicho N”

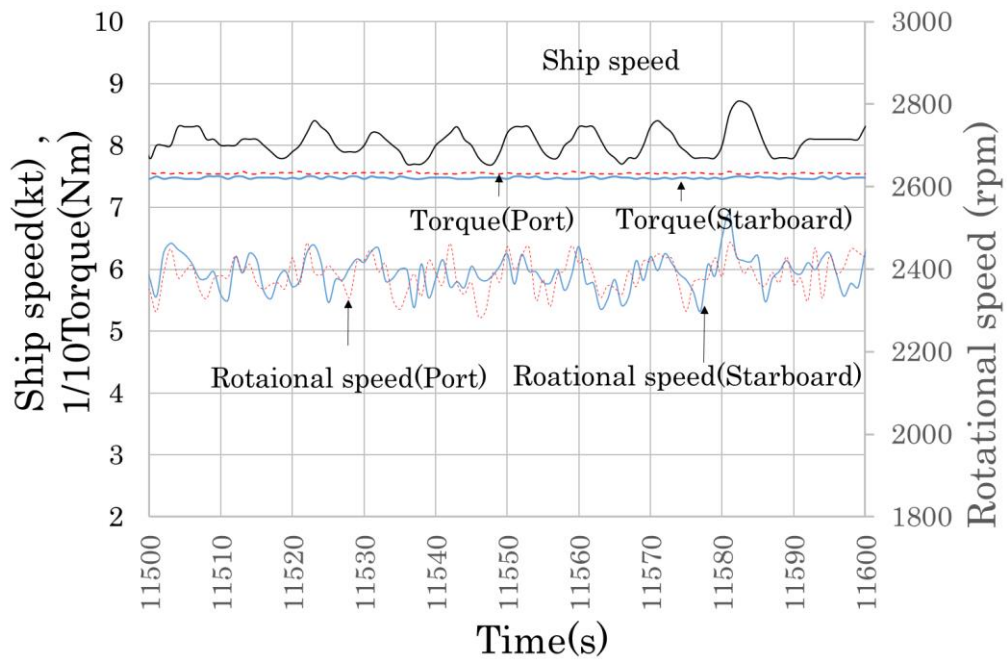


Fig. B.7 Ship speed, motor torque and motor rotational speed during navigation in “Raicho N”

Table B.1 Principal specification “Raicho N”

Principal Dimensions

Length of over all	14.0 m	
Breadth extreme	3.5 m	
Molded depth	1.5 m	
Drainage tonnage	12.0 ton	
Gross tonnage	9.7 GT	

Qualification

Navigation area	Smooth water area	Passenger ship
-----------------	-------------------	----------------

Motor system

Model	USEVW-80YS1-S1	YASKAWA ELECTRIC CO.
Rating power/ Rotational speed	45 kW / 4880 rpm	Max 80 kW
Number	2 sets	

Propulsion system

Model	SD201-3	YANMAR CO., LTD.
Reduction ratio	1:2	Gear change
Propeller diameter/pitch	16” / 13”	Fixed pitch propeller

Ship speed

Maximum speed	11 kt	
Cruising speed	8 kt	

Continuous voyage time

Voyage time	3.5 hour	50 km (8 kt)
-------------	----------	--------------

Equipped personnel

Crew / Passenger	2 /10 people	
------------------	--------------	--

Power supply

Lithium ion secondary battery energy	145 kWh	TOSHIBA SCIB
Diesel generation electric energy	280 kWh	Power 35 kW (fuel; 100 liters of diesel)
Hydrogen Fuel Cell electric energy	20 kWh	Power 4 kW × 2 (fuel; hydrogen 7 Nm ³ × 2)

以上のように、電池推進船の研究は、本論文の研究に進展しただけでなく、著者は、船用リチウム 2 次電池に関する JIS 原案作成に参画し、電池推進船の研究成果を下記 JIS 作成に反映させた。

- ・ JIS F8102 船用電気設備-リチウム二次電池を用いた蓄電池設備、
- ・ JIS F8103 舟艇—電気機器—リチウム二次電池を用いた蓄電池設備

さらに、水素燃料電池を搭載し船舶への適合規格に関する研究において、国交省海事局が一般財団法人日本船舶技術研究協会に委託した「水素燃料電池船の安全ガイドライン策定に向けた検討委員会」の委員として研究結果を「水素燃料電池船の安全ガイドライン」に反映させた。