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*

大 出 剛** 賞 雅 寛 而***
波津久 達 也** 井 原 智 則**

Characterization of Near-Propeller Bubbles and Thrust Fluctuation in a Constant Rotational Speed Control Motor Propulsion System

By Tsuyoshi ODE, Tomoji TAKAMASA, Tatsuya HAZUKU, Tomonori IHARA

In this study, we aimed to improve the propulsion efficiency of the motor drive system by suppressing the load fluctuation caused by the generation of air bubbles around the propeller. Experiments were conducted to verify the detection of air bubbles around the propeller using status monitor signals from the motor drive and the correlation between the monitor signals and the thrust in the AC motor drive system, when driven by the constant rotational speed control method. Experimental data such as the motor power fluctuation were compared, and verified by comparison with previously reported experimental results. This established that the correlation between the monitor signal from the motor drive and the bubble generation and quantity around the propeller, as well as the thrust, can be expressed using the propeller characteristic equation and the motor characteristic equation for the motor drive system when driven by the constant rotational speed control method. We showed that the monitor signal of the motor drive system can be considered a sensing signal, and used to stabilize the motor power and thrust fluctuations in the motor drive system when driven by either the constant torque control or the rotational speed control method.

1. はじめに

プロペラ空気吸い込みやキャビテーションなどは、プロペラのスラスト、推進効率を大きく低減させるだけでなく、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⁾。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²⁾³⁾。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解明が未だなされていない⁴⁾。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⁵⁾。大出らは、前報⁶⁾⁷⁾において、交流モータドライブシステムをトルク一定制御で駆動させ、ドライブシステムからの状態出力信号が、プロペラ周

囲状態やスラスト変動を精度よく高速に検知することが可能であることを検証し、回転速度モニター信号から、回転速度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を、プロペラ特性式で説明ができることを示した。本報告では、交流モータドライブシステムを回転速度一定制御方式にて駆動させ、ドライブシステムからのトルクモニター信号から、トルク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実験から得た測定値とプロペラ特性式から理論的に検証する。また、前報⁶⁾⁷⁾で報告したトルク一定制御方式での実験結果を整理して示し、回転速度一定制御方式での実験結果との比較、相関を検証する。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、検証する。

2. 実験

2.1. 実験装置と実験方法

実験は、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⁸⁾にて、前報⁶⁾⁷⁾でのトルク一定制御方式の実験と同じ装置で、プロペラ没水深度、回流速

*原稿受付 平成30年1月25日。
**正会員 東京海洋大学
(東京都江東区越中島2-1-6)
***名誉会員 富山高等専門学校
(富山県富山市本郷町13番地)

度など同じ実験条件で行った。Fig. 1 のブロック線図で示すようモータドライブシステム、電子制御ユニット、推進装置、ロードセル、高速度カメラ、電力計とデータロガーで構成する実験装置を用いている（詳細は前報⁶⁾）。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。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⁷⁾。

2.2. モータ制御におけるプロペラ特性の理論的相関

Fig. 2 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¹⁰⁾とプロペラのトルク・回転速度特性を示す。

モータ出力 P_m (W) は、

$$P_m = T_q \cdot 2\pi n \quad (1)$$

で表され、 T_q (N) はトルク、 n (s^{-1}) は回転速度である⁷⁾。

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。この時モータ出力は、式 (1) より $(T_{q2} - T_{q1}) \cdot 2\pi n_1$ 分降下することになる。

一方、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

Fig. 2 Torque - Rotational Speed Characteristics

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、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 (1) より $T_{q1} \cdot 2\pi (n_2 - n_1)$ 分上昇することになる⁷⁾。

3. 実験結果と考察

まず、回転速度一定制御方式の実験結果を示す。その後、前報⁶⁾でのトルク一定制御方式での実験結果を整理して示し、回転速度一定制御方式での実験結果との比較、相関を検証する。回転速度一定制御方式におけるトルク、回転速度、スラスト、プロペラ周囲の画像輝度の計測値の一例を Fig. 3 (実験条件: 回転速度 33.3 (s^{-1})) に示す。図の横軸は経過時間を、縦軸の左軸はトルク T_q 、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、トルクが減少し、同時にスラストも減少していることがわかる。ここでは、プロペラ周囲気

Fig. 1 Block Diagram of Apparatus⁶⁾

Fig. 3 Measurement Example (Constant Rotational Speed Control)

泡状態とプロペラ特性の関係を、理論と実験値に基づき評価する。

以降の検討では、前報⁷⁾と同様にプロペラ周囲気泡状態を、式 (2) 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。

$$B' = (B - B_0) / 100 \quad (2)$$

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。

以降の図においてマーカー説明の -1, -2 は、同じ条件で実験の 1 回目と 2 回目を表している。

3.1 プロペラ周囲気泡とトルクとの相関

Fig. 4 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. 3 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、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 (詳細は前報⁷⁾)。この仮定を用いて、トルク係数 Kq' は、プロペラ特性式¹⁰⁾より次のように表せる。

$$Kq' = Tq / \{(1-B') \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^5\} \quad (3)$$

ここで、 Tq (Nm) はトルク、 n は回転速度 (s^{-1})、 ρ は水の密度 (kg/m^3)、 D はプロペラ径 (m) である。前報⁷⁾と同様に、これらを式 (3) に代入し得たトルク係数と平均相対輝度の関係を Fig. 5 に示す。図中には前報⁷⁾で得たトルク一定制御時のトルク係数も示した。制御方式によらず気泡が発生し平均相対輝度が変化してもトルク係数が一定でかつ一致していることが確認

Fig. 4 Correlation between Relative Brightness and Torque

Fig. 5 Torque Coefficient and Relative Brightness

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の関係は、トルク係数が一定であることから、

$$(1-B') \propto Tq \quad (4)$$

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. 4 の図中の破線は式 (3) 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。

3.2 スラストとトルクとの相関

スラスト Th とトルク Tq の関係は、プロペラ特性式¹⁰⁾から下記のように表せる。

$$Tq / Th = (Kq' \cdot D) / Kt' \quad (5)$$

ここで、 Kt' はスラスト係数である。3.1 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、

$$Th \propto Kt' \cdot Tq \quad (6)$$

と表すことができる。

ここで、スラスト係数を検証する。前報⁷⁾と同様に計測したトルク、回転速度、平均相対輝度から得たスラスト係数を Fig. 6 に示す。図中に前報⁷⁾で得たトルク一定制御時のスラスト係数も示した。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、制御方式によらずスラスト係数が一致してい

ることが確認できる。

次に、式 (5) で計算したスラストと、計測したスラストの相関を Fig. 7 に示す。さらに式 (5) 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. 8 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. 7

Fig. 6 Thrust Coefficient and Relative Brightness

Fig. 7 Comparison between Actual Thrust and Calculated Thrust

Fig. 8 Comparison between Actual Thrust and Calculated Thrust ($Kt' = \text{constant}$)

と Fig. 8 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。ここでは、前報⁷⁾で検証したトルク一定制御方式との比較を行う。トルク一定制御方式での、平均相対輝度との相関、スラストとの相関を下記に示す。

トルク一定制御では、式 (3) よりトルク Tq 及びトルク係数 Kq' が一定であり、水の密度 ρ とプロペラ径 D は固定値であるので次のように表せる。

$$(1-B') \propto 1/n^2 \quad (7)$$

さらに、式 (8) で表されるスラストは、式 (7) より $(1-B') \cdot n^2$ が一定であることから、式 (9) と表せる。

$$Th = Kt' \cdot (1-B') \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^4 \quad (8)$$

$$Th \propto Kt' \quad (9)$$

式 (7) 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、4.1 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。式 (4) で示す回転速度一定制御方式では、トルクが平均相対輝度に比例しているの、モータ出力が減少の方向に変動することを示している。スラストにおいては、回転速度一定制御方式は式 (6) 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 (9) に示すようスラスト係数のみに比例しているの、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⁷⁾。スラストの変動の比較に関しては、4.1 節で述べる。

4. 制御方式の比較と考察

回転速度一定制御方式とトルク一定制御方式において、それぞれの制御方式で、プロペラ周囲気泡によるモータ出力変動の挙動は異なり、スラスト変動の挙動も異なる。これらの違いを、モータドライブからのモニター信号と理論式から検証し考察する。回転速度一定制御方式とトルク一定制御方式の実験装置、実験環境に差異がないことを、3.1 節と 3.2 節にて、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から確認している。

4.1. 制御方式によるモータ出力変動の比較検証

プロペラ周囲気泡によるモータ出力において、回転速度一定制御方式は、式 (1) と式 (4) により、モータ出力 P_r (W) は、以下の式で表せる。

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

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に比例して変動する。一方、トルク一定制御方式では、式 (1) と式 (7) によりモータ出力 P_t (W) は、以下の式で表せる。

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

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の平方根に反比例して変動する。

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 (1) に代入して、モータ出力と平均相対輝度の相関を得る。回転速度一定制御方式のモータ出力変動を Fig. 9 に示す。図中の推定曲線(破線)は、式 (3) より求めたトルク T_q を式 (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。一方、Fig. 10 は、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示している。図中の推定曲線(破線)は、回転速度一定制御方式と同様に式 (3) を用いて求めた回転速度 n を式 (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。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、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。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

Fig. 9 Correlation between Relative Brightness and Power (Constant Rotational Speed Control)

が大きくなると上昇する。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 (2.78kW) とトルク一定制御方式 (2.73kW) のモータ出力変動量の比較を Fig. 11 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 0.2kW と 0.3kW 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。

次にスラスト変動について示す。Fig. 12 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回転速度一定制御方式とトルク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。

回転速度一定制御方式では、式 (4) 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

Fig. 10 Correlation between Relative Brightness and Power (Constant Torque Control)

Fig. 11 Correlation between Relative Brightness and Power

Fig. 12 Thrust variation

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 (6) 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. 一方, トルク一定制御方式では, 式 (9) に示すようスラスト変動は, スラスト係数に比例する. Fig. 13 は, Fig. 11 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.

Fig. 13 Correlation between Relative Brightness and Thrust

4. 2. 制御方式に関する考察

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¹²⁾.

最後に, Table. 1 にモータ制御方式による各種相関を整理して示す.

Table. 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	$Pt \propto 1/(1-B')$	$Pr \propto (1-B')$
Thrust	$Th \propto Kt'$	$Th \propto Kt' \cdot Tq$

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.

5. 結論

本報告では, 前報⁶⁾において示したトルク一定制御方式での実験結果を整理して示し, 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。

1) 回転速度一定制御方式での実験は, トルク一定制御方式での実験と同じ装置を用い, 同じ環境にて, モータ推進装置を駆動し, モータドライブから計測した回転速度モニター信号, トルクモニター信号とプロペラ特性式を用いて, これらの実験結果を理論的に検証し次の結果を得た。

i) 回転速度一定制御においても, 前報⁷⁾のトルク一定制御時と同様に, 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る。

ii) i)と同様に, 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, 回転速度一定制御では, 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。

2) 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。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。また, 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。

この研究の一部は, 日本学術振興会科学研究費補助金(16H02431)の支援を受けた。

References

- 1) S. D. Black, Thrust Breakdown Characteristics of Conventional Propellers, (2007), NSWCC-5-TR-2007/064.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) A. Califano, S. Steen, Numerical Simulations of a Fully Submerged Propeller Subject to Ventilation, Ocean Engineering 38 (2011), pp. 1582–1599.
- 6) 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, Proceedings of Journal of the JIME, Vol. 53, No. 3 (2018), pp. 89–94.
- 7) T. Ode, T. Takamasa, T. Hazuku, T. Ihara, Characterization of Near-Propeller Bubbles and Thrust Fluctuation in a Constant Torque Control Motor Propulsion System, Proceedings of Journal of the JIME, Vol.53, No.4 (2018), pp. 111–116.
- 8) 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.
- 9) A.V. Oppenheim and R.W. Schaffer, Discrete-Time Signal Processing, 3rd Edition, (2009), Pearson.
- 10) K. Hirota, S. Adachi, Y. Deguchi, S. Ogasawara, Model-Based Control Systems Design for Electric Vehicles, (2009), Tokyo Denki University Press.
- 11) S. Ogiwara, S. Yamazaki, Y. Yoshimura, H. Adachi, SENPAKU SEINO SEKKEI, (2013), The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers.
- 12) A. J. Sørensen, Ø. N. Smogeli, Torque and Power Control of Electrically Driven Marine Propellers, Control Engineering Practice 17 (2009), pp. 1053–1064.