

可変ピッチプロペラ装備船の舵への流入速度に関する一検討*1

正会員 湯室彰規 *2, 内田賢治 *3

A Consideration on Inflow Velocity to Rudder of Ship Equipped with Controllable Pitch Propeller

By Akinori YUMURO (*Member*) and Kenji UCHIDA

This report provides results of model experiments concerning hydrodynamic forces on the rudder of a ship equipped with controllable pitch propeller (CPP). Captive model tests were performed under condition of steady straight course. In this test, rudder normal force and propeller thrust were measured by changing advance speed of a ship, CPP blade angle, and rudder angle systematically.

By using these experimental results, characteristics of inflow velocity to rudder behind CPP is examined on the basis of the momentum theory for a actuator disc. Here, state of flow around rudder is classified into three regions, considering whether the momentum theory may be applied or not. The correction factor which appears in the formula of expressing the inflow velocity is assumed to be applied in the wide range of CPP blade angle. The factor, which gives added velocity due to the propeller at the rudder position, is evaluated by applying the experimental results mentioned above.

As a result, it is indicated that values of the factor lie almost between 1.0 and 2.0. Moreover, it is found that generally speaking the factor gives different values for different regions of the flow states.

Keywords : *Maneuverability, CPP Equipped Ship, Rudder Inflow Velocity, Prediction Method*

1. 緒言

一般に操縦運動の解析・計算においては、プロペラ逆転状態では舵力は小さいとして無視する取扱いが行なわれる場合がある。しかし、たとえば可変ピッチプロペラ装備船 (CPP 船) の後進ピッチへの移行後の運動航跡を予測するためには、このような局面での舵力がある程度の精度で推定することが必要となる。また、逆転状態や後進ピッチの状態の舵力を無視する場合も、この大きさを正しく評価した上で行なわれることが望ましい。

一般に、舵形状が与えられると舵面積と舵力係数勾配は既知の量となるので、舵力は舵への流入速度によって決まる。従って、舵力の推定に当たり、流入速度は最も基本的な要素となる。本研究では、CPP 船の

舵への流入流速の特性をプロペラ運動量理論に基づいて検討している。まず、CPP 船の船速、プロペラ翼角および舵角を系統的に変化させた場合の舵直圧力とプロペラ推力の模型実験の結果を示す。次いで、これらの結果を基にして、一般に後進ピッチ時の舵への流入流速の特性と表示法について考察している。ここでは第一段階として、船体が直進している状態を取り扱う。なお、一般の操縦運動している状態では、舵力の推定において上述の流入流速の他に流入角が基本的要素として付け加わることになる。

従来のこの種の研究として文献 1) が挙げられるが、本報告の取扱いは主として次の点において異なる。ここでは、プロペラによる速度変化分の表示を、運動量の法則の適用の可否の観点から、プロペラの作動状況に応じて 3 つの種類に分類する取扱いを行なっている。また、文献 1) では船体部を除いたプロペラ・舵系の実験の結果が用いられているが、ここではより実際に即した取扱いを行なうという意味で船体背後の舵特性の実験結果を用いている。

*1 平成 13 年 5 月 24 日 関西造船協会春季講演会において講演、原稿受付 平成 13 年 6 月 8 日

*2 埼玉大学工学部

*3 石川島播磨重工業 (株)

2. プロペラ翼角を変化させた場合の舵力の実験要領

実験に用いた船型は長さ 207.0m のタンカーの縮尺模型である。要目を Table 1 に示す。本船には変動ピッチプロペラが採用されており、同表には 0.7R (R: プロペラ半径) におけるピッチ比が示してある。直進曳航された拘束模型船において、船速、プロペラ翼角および舵角を系統的に変化させ、そのときの舵直圧力とプロペラ推力の計測を行なっている。

Table 1 Principal particulars of ship model equipped with CPP.

L _{pp}	(m)	4.000
B	(m)	0.696
d	(m)	0.228
C _b		0.794
Propeller diameter	(m)	0.135
Pitch ratio at 0.7R (Standard)		0.782
Boss ratio		0.257
Number of blades		4
Rudder height	(m)	0.172
Chord length(mean)	(m)	0.104
Aspect ratio		1.66
Rudder area ratio		1/51.2

変数としては、後進ピッチ開始から船体停止に到るまでの範囲を考える。定常航走状態の船速を $F_N = 0.171$ とし、これを基準値とする。船速はこの基準値とその 2/3, 1/3 および零の 4 種類である。プロペラ回転数は一定とし、単純な縮尺による実船対応値とする。プロペラ翼角については、定常航走状態に対応するピッチ角を基準とし、この状態から翼角を変化させる。この基準ピッチ角は 20° (0.7R) であり、ピッチ角の範囲は $20^\circ \sim -15^\circ$ とする。以後このピッチ角を θ の変数で表わす。また、舵角の範囲は $0^\circ \sim \pm 20^\circ$ であり、符号の正は右旋回の方に対応する。以後、舵角を δ の変数で表わす。

3. 実験結果

船速を固定し、ピッチ角 θ をパラメータとして表示した場合の舵直圧係数 C_N の実験結果を Fig. 1 に示す。ここで無次元化には船速を用いている。ただし、船速零に対しては船速の代わりに $n \cdot D$ (n : プロペラ回転数, D : プロペラ直径) を用いてある。船速が低い状態では、ピッチ角が負でその絶対値がある大きさ以上になると、実験点に大きなばらつきが現われるようになる。また舵角に対する舵力の直線性が低下し、舵角の正負による対称性が損なわれるという結果が得られている。

一方、プロペラの推力係数 K_T の実験結果を Fig. 2 に示す。本実験の範囲では舵角による差はわずかであるという結果が得られている。いま $\delta = 0^\circ$ の K_T の結果から有効伴流率を求めると $1 - w = 0.470$ となる。ただし、 $\theta > 0$ の範囲の平均値である。以後、近似的にこれを一定値として取り扱う。

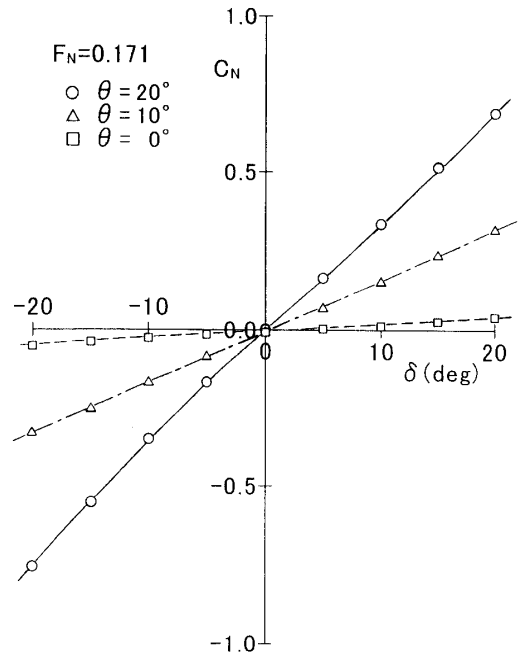


Fig. 1 (a) Measured normal forces on rudder ($F_N = 0.171$, pitch angle = $20^\circ \sim 0^\circ$).

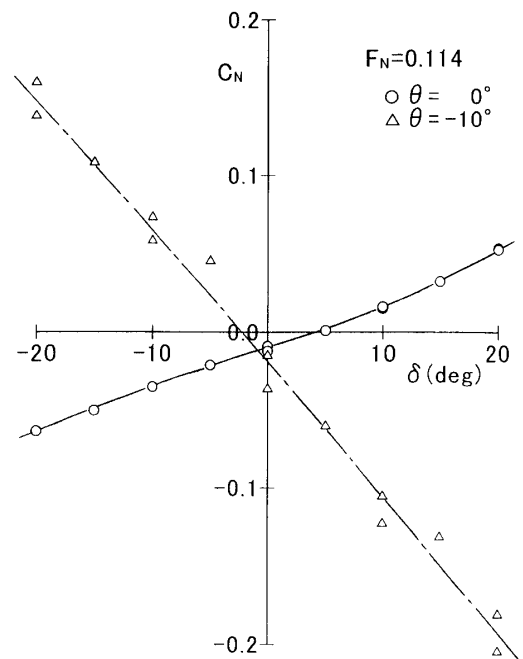


Fig. 1 (b) Measured normal forces on rudder ($F_N = 0.114$, pitch angle = $0^\circ, -10^\circ$).

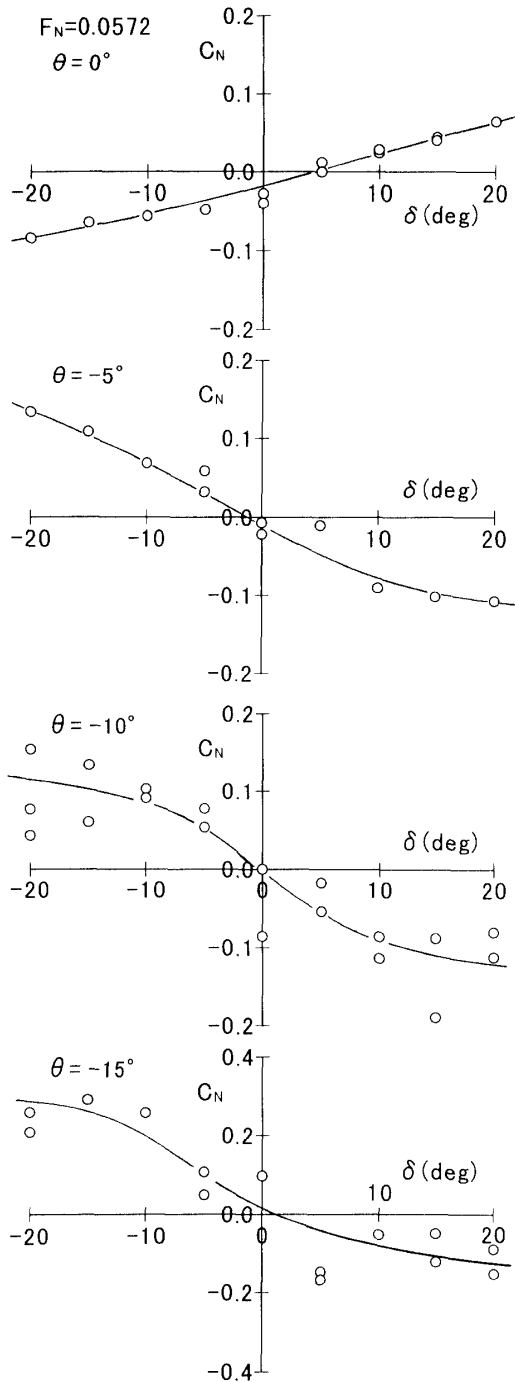


Fig. 1 (c) Measured normal forces on rudder ($F_N=0.0572$, pitch angle= $0^\circ \sim -15^\circ$).

Fig. 1 の結果から、舵直圧力一致法²⁾により舵への有効流入速度を求める。ここで舵単独の直圧力は藤井の式³⁾による。なお簡単のため、舵の後方から流れが入る場合も同一の式を用いる。プロペラ直径と舵の高さに差異があるので、舵への平均流入速度 V_m として

$$V_m = \sqrt{\frac{A_1}{A} V_R^2 + \frac{A_2}{A} V_0^2} \quad (1)$$

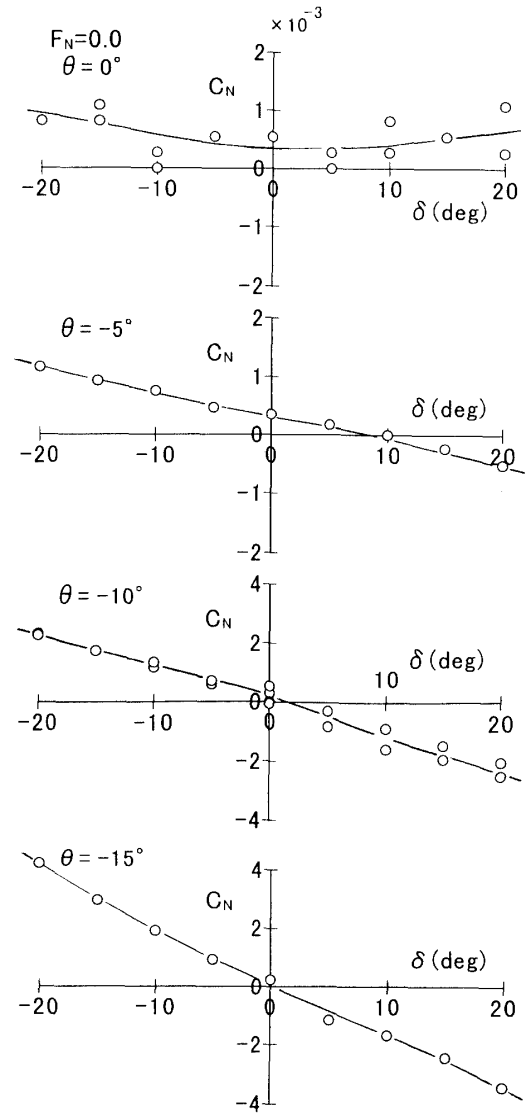


Fig. 1 (d) Measured normal forces on rudder ($F_N=0$, pitch angle= $0^\circ \sim -15^\circ$).

の関係式を用いる。ここで A_1, A_2, A_3 はそれぞれプロペラ後流に入っている部分と入っていない部分の舵面積ならびに舵の全面積とし、 V_R, V_0 は舵に入るプロペラ後流の速さおよび後流以外の部分のそれとする。 V_0 の値として上述の有効伴流率を用いた伴流速を用いる。(1)式において V_m が実測値であり、 V_m と V_0 を既知として V_R が求められる。

なお、文献1)では舵への流入速度を特に V_R と V_0 に分離せず、舵力を V_m のみで表わす取扱が行なわれている。後述する舵への流入速度の推定式における修正係数のもつ意味を限定させることから、分離する取扱いの方が効果的であると考えられる。

従来、CPP 船の舵力に関する模型実験において、同時にプロペラ推力の計測が行なわれた文献は比較的少ない。しかし、一般にプロペラ推力は舵力特性の解析において有用な情報を与える。たとえば CPP 船の操

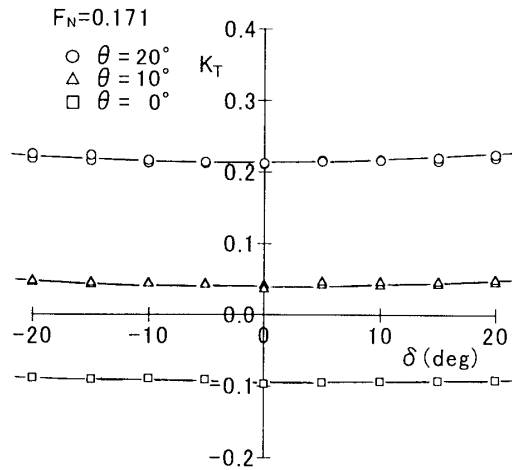


Fig. 2 (a) Measured propeller thrust ($F_N=0.171$, pitch angle= $20^\circ \sim 0^\circ$).

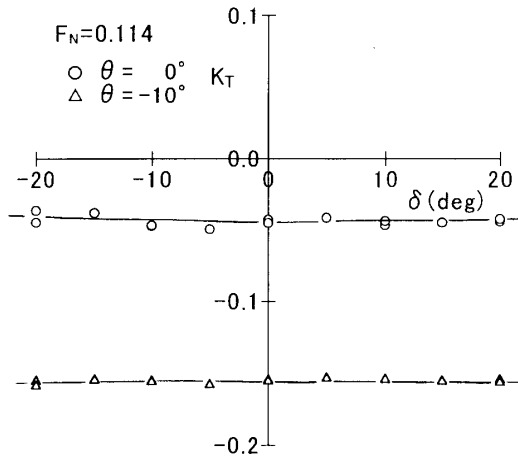


Fig. 2 (b) Measured propeller thrust ($F_N=0.114$, pitch angle= $0^\circ, -10^\circ$).

縦性に関する問題の一つとして、固定ピッチプロペラ (FPP) 装備船との舵力の比較がある^{4),5)}。この問題に関連して、FPP 船のプロペラ回転停止の場合と、CPP 船がプロペラ翼角を零にした場合とでは、舵効果は等価でないと考えらるべきであり、プロペラによる流れの遮蔽をその原因とする議論がある⁴⁾。このあたりの考察にも、本来はプロペラ推力の値は不可欠であると考えられる。

Fig. 2 に見られるごとく、一般に $\theta = 0^\circ$ はプロペラ逆転状態に相当する範囲にある。従って舵力特性に対しては、プロペラ停止状態とは、プロペラ翼の発生する揚力の点からも基本的に異なることになる。

4. プロペラ運動量理論に基づく舵流入速度の表示

4.1 プロペラ運動量理論

プロペラの作動状況に応じて、流れの状態を Fig. 3 の3つの CASE に分類する。これはヘリコプタの回転翼の分野で行なわれている分類を適用したものであ

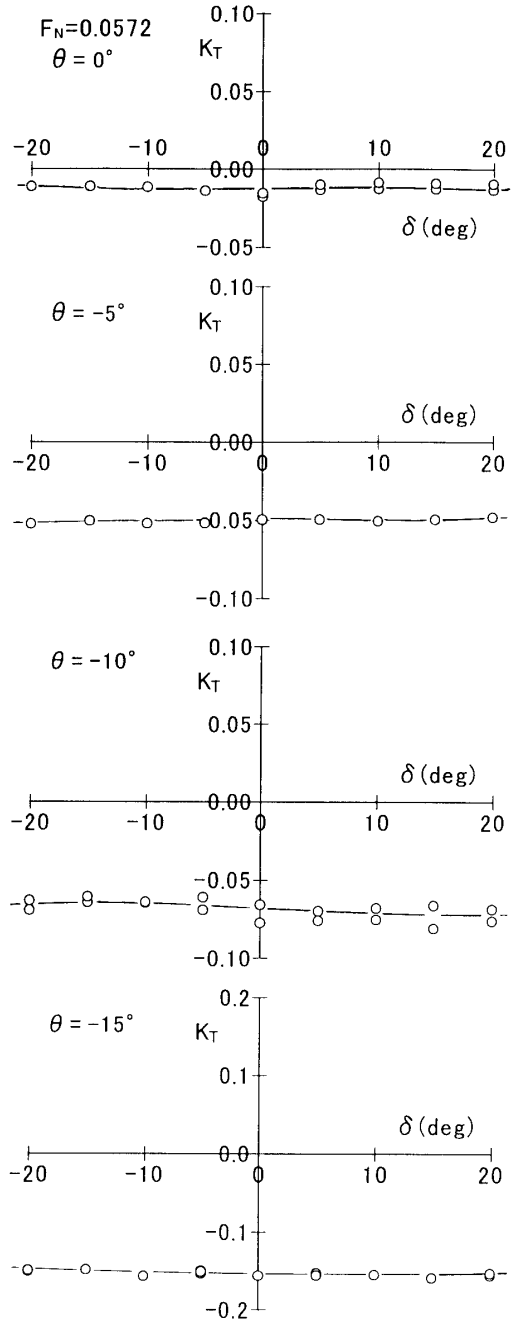


Fig. 2 (c) Measured propeller thrust ($F_N=0.0572$, pitch angle= $0^\circ \sim -15^\circ$).

り、以下に述べる CASE I, II および III はそれぞれ、Normal working state, Windmill brake state, Vortex ring state と称せられている状態に対応する⁶⁾。

CASE I はピッチ角が正で比較的大きい場合に対応する。図中、 F_R は舵直圧力、 T はプロペラ推力、 V_0 はプロペラへの流入速度 (伴流速)、 V_R は舵への流入速度 (プロペラ後流域) である。 $u, 2u$ はそれぞれプロペラ位置および十分後方での速度増加量を表わす。このとき運動量の法則より次式が成り立つ。

$$T = \rho A (V_0 + u) \cdot 2u \quad (2)$$

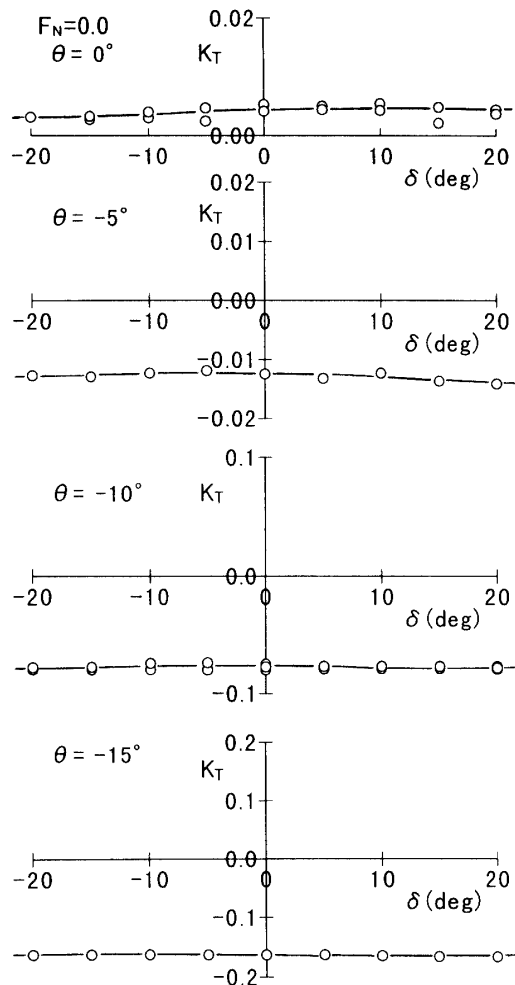


Fig. 2 (d) Measured propeller thrust ($F_N=0$, pitch angle= $0^\circ \sim -15^\circ$).

ここで A はプロペラ円盤面積である。これより

$$\frac{u}{V_0} = \frac{1}{2} (-1 + \sqrt{1 + C_T}) \quad (3)$$

が得られる。 C_T は次式で定義されるプロペラの荷重係数とする。

$$C_T = T / \left(\frac{1}{2} \rho V_0^2 A \right) \quad (4)$$

(3) 式の誘導では、 $u > 0$ の条件が用いられている。

CASE II はピッチ角が比較的小さい場合に相当する。CASE I の場合と比べ、一般にプロペラ推力および速度増加量の符号は負となるが、その絶対値をそれぞれ \tilde{T}, \tilde{u} で表わす。以後でも、原則として負の値の絶対値を波型記号で表わす。この CASE の場合も運動量の法則が適用でき、 \tilde{T} と \tilde{u} の間に次の関係式が成り立つ⁴⁾。

$$\tilde{T} = \rho A (V_0 - \tilde{u}) \cdot 2\tilde{u} \quad (5)$$

なお、この場合も十分後方の速度変化量はプロペラ位置のその 2 倍で与えられる。この CASE は $V_0 - 2\tilde{u} > 0$ の条件で特徴づけられる。この条件を用いると、(5)

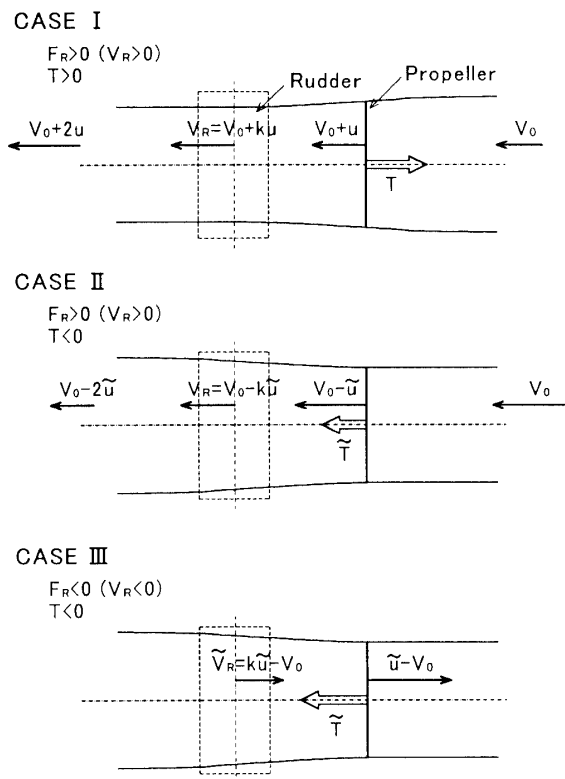


Fig. 3 Variation of propeller induced velocity with magnitude of pitch angle.

式より

$$\frac{\tilde{u}}{V_0} = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \tilde{C}_T} \right) \quad (6)$$

の表示が得られる。ここで \tilde{C}_T は (4) 式における T を \tilde{T} と置いたものである。この CASE では (6) 式より $\tilde{C}_T < 1$ の条件が課せられる。

なお、CASE II に対して (5) 式が成り立つことは次のように示される。一般に Fig.4 の状態を考える。図中、 p_0 はプロペラの十分前方および後方における圧力、 p' はプロペラ後面の圧力、 p はプロペラによる圧力上昇分を示す。 \tilde{u}, \tilde{u}' はそれぞれプロペラ位置および十分後方で速度変化分とする。ベルヌーイの定理より、プロペラ前方部と後方部に対し、それぞれ

$$\left. \begin{aligned} \frac{p_0}{\rho} + \frac{V_0^2}{2} &= \frac{p' + p}{\rho} + \frac{(V_0 - \tilde{u})^2}{2} \\ \frac{p_0}{\rho} + \frac{(V_0 - \tilde{u}')^2}{2} &= \frac{p'}{\rho} + \frac{(V_0 - \tilde{u})^2}{2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

が成り立ち、両式の差を取ると

$$p = \rho \left(V_0 - \frac{1}{2} \tilde{u}' \right) \cdot \tilde{u}' \quad (8)$$

が得られる。またプロペラ推力について

$$\tilde{T} = pA = \rho A (V_0 - \tilde{u}) \cdot \tilde{u}' \quad (9)$$

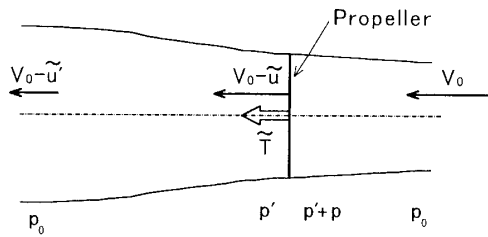


Fig. 4 Flow state in region of CASE II corresponding to windmill brake state.

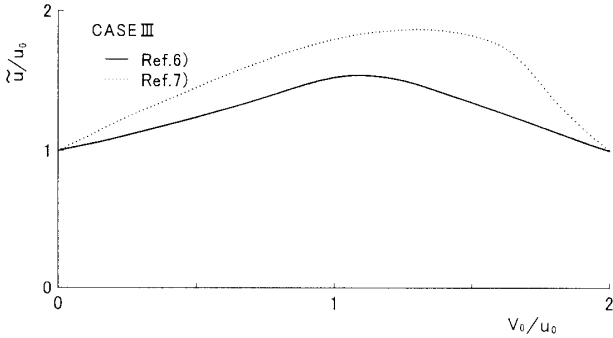


Fig. 5 $u/u_0 \sim V_0/u_0$ curves in region of CASE III corresponding to vortex ring state. (ref. 6, 7)

が成り立つので、(8)式と(9)式より

$$\tilde{u}' = 2\tilde{u} \quad (10)$$

の関係式が得られる。

CASE III はピッチ角が負でそれが十分に大きい場合に相当する。この CASE は $V_0 - \tilde{u} < 0$ の条件で特徴づけられ、 $\tilde{C}_T > 1$ の範囲が対象となる。この場合は運動量の法則が適用できないので、 \tilde{u} の推定については別の方法による必要がある。ここでは、ヘリコプタの回転翼の分野で示されている実験的結果によるとする。例として文献 6), 7) に示されている結果を用いる。

Fig. 5 は、同文献中の CASE III (vortex ring の状態) の範囲における \tilde{u} と \tilde{T} の関係を転載したものである。ここで横軸、縦軸は原論文に従っており、それぞれ V_0 , \tilde{u} を $u_0 (= \sqrt{\tilde{T}/2\rho A})$ で無次元化した量で表示されている。なお、横軸における両境界では理論上は 1 の値を取るため、この近傍で多少の変形を行なっている。本報告ではプロペラによる速度変化を荷重係数 C_T を変数として取り扱っているが、これに伴い Fig. 5 の関係を C_T を横軸にして描いたものが Fig. 6 である。同図には (3) 式および (6) 式による値を併記し、それぞれの CASE の荷重係数に対する特性も示してある。

なお、CASE II では $F_R > 0$ かつ $V_R > 0$ としているが、 $F_R > 0$ であっても $V_R < 0$ の場合があり得る。このときは CASE III の取扱いによる必要がある。

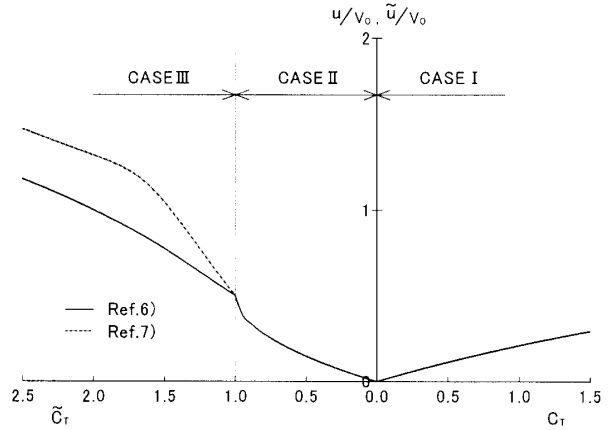


Fig. 6 Values of u/V_0 as a function of C_T .

実験範囲におけるもう一つの状態として、 $V_0 = 0$ でピッチ角が負の場合がある。運動量の法則が適用できるという意味からは CASE I に含まれ、このときは

$$\tilde{u} = \sqrt{\frac{\tilde{T}}{2\rho A}} \quad (11)$$

となる。

4.2 舵への流入速度に対する修正係数

(3), (6), (11) 式などで示される u あるいは \tilde{u} は、プロペラ面における速度変化量を与えるが、舵位置における値はこれに修正係数を乗じて表わされるとする⁸⁾。以下ではこの修正係数を k で表わす。Fig. 3 中の k は、この係数を表わしたものである。この係数は通常、プロペラ増速率と呼ばれる。このような取扱いによると、CASE I の場合の舵への流入速度は

$$V_R = V_0 + ku \quad (12)$$

のように表わされる。ここで

$$u = \frac{1}{2} \left(-V_0 + \sqrt{V_0^2 + \frac{2\tilde{T}}{\rho A}} \right) \quad (13)$$

の表示から知られるごとく、 T が実測値として与えられるとすると、 u は計算により定められる量となる。

(12) 式において V_R は実測値として既知とすると、修正係数は

$$k = \frac{V_R - V_0}{u} \quad (14)$$

により求められる。同様に CASE II では

$$V_R = V_0 - k\tilde{u} \quad (15)$$

ただし

$$\tilde{u} = \frac{1}{2} \left(V_0 - \sqrt{V_0^2 - \frac{2\tilde{T}}{\rho A}} \right) \quad (16)$$

より,

$$k = \frac{V_0 - V_R}{\tilde{u}} \quad (17)$$

となる. また CASE III の場合は, \tilde{T} が既知とすると Fig. 5 から \tilde{u} が推定され,

$$\tilde{V}_R = k\tilde{u} - V_0 \quad (18)$$

の関係式より

$$k = \frac{V_0 + \tilde{V}_R}{\tilde{u}} \quad (19)$$

が得られる. ここで, \tilde{V}_R は CASE I の場合の V_R の符号を変えたものであり, \tilde{V}_R 自体は正の値を表わす.

このように定めた k の値は, 本来のプロペラ面からの距離の影響の他に, プロペラと舵位置の伴流差, プロペラの縮流などの影響が含まれたものとなる.

Fig. 7 は k の値を各 CASE に対して示したものの例である. ここで横軸には荷重係数が取ってある. 図中, \tilde{k}_T は \tilde{T} の推力係数を表わす. ただし, T はその都度計測された実測値を用いている. なお, CASE II の k の値については, この領域に入る実験相当値を補間により求めた結果を用いてある. CASE I における k の値は 1.6 前後となっており, 通常用いられている 1.2 より大きめである. この要因の一つとして, 舵位置での伴流を考慮していないことが挙げられる. また, $k = 1.2$ は元々プロペラへの流れは一樣流 (open water の状態) であるとして定められたものであり, 本報告における k は, このような意味の影響も含まれた等価的な値を示していることになる.

一方, CASE II および III における k は大略 1 前後の値を示しており, CASE I よりも小さい値を取る傾向が見られる. また $V_0 = 0$ でピッチ角が負の場合の k は, 上述の 3 つの CASE の値よりも大幅に小さく 0.3 前後の値を取る. ここで CASE I よりも CASE III が小さい値を取ることにについては, 前者では舵面がプロペラによる流れの下流側に位置しているのに対し, 後者では上流側にあることも理由の一つと考えられる. CASE III では \tilde{u} が正確に推定できれば, k は本来は 1 以下の値を取ると考えられる. 以上のように k は一般には各 CASE によって異なった値を取り, 必ずしも滑らかにつながる形にはならない.

本報告の取扱いは, MMG 数学モデルにおける舵への流入速度の推定法を可変ピッチプロペラの後進ピッチ時 (あるいは, 一般にプロペラ逆転状態) への拡張に相当する. 前述のごとく半実験的な方法であるので, 推定方法の精度を高めるためには, k の値についての実験資料の蓄積が必要である.

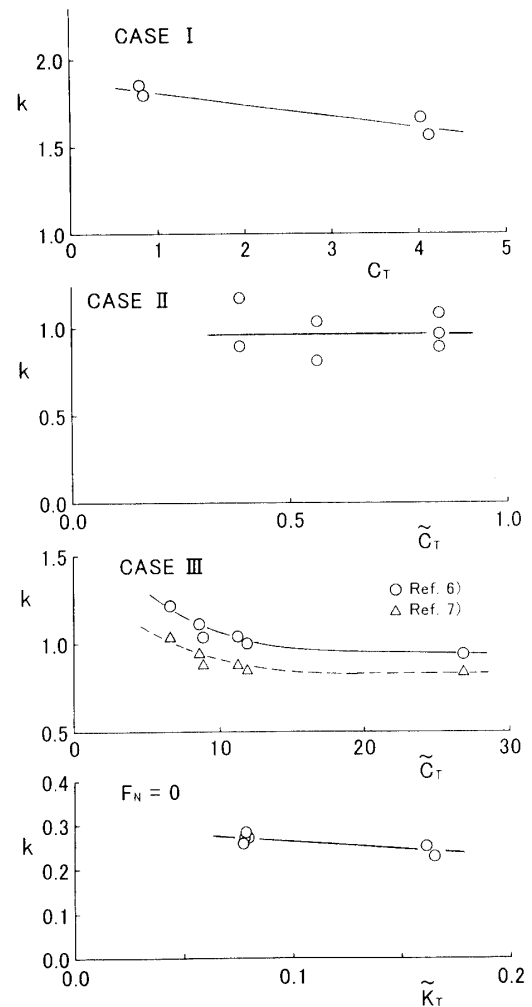


Fig. 7 Correction factor for rudder inflow velocity based on propeller momentum theory.

5. 結言

一般に舵への流入速度は舵力の推定において最も基本的な要素となる. ここでは, 可変ピッチプロペラ装備船 (CPP 船) における流入速度の特性と表示法を運動量理論に基づく方法より検討した. 結果を要約すると, おおよそ以下ようになる.

- (1) プロペラの作動状況に応じて, 流れの状態を 3 つの種類に分類する取扱い方法を示し, 各領域における舵への流入流速の表示法を示した.
- (2) CPP 船の船速, プロペラ翼角および舵角を系統的に変化させた模型実験の結果を基にして, 舵流入速度の推定式に含まれるプロペラ増速率 (実験係数) を求めた. この値は一般には各領域によって異なり, 必ずしも滑らかにつながる形にはならない.
- (3) 今後, プロペラ増速率の値の蓄積が進めば, 本報告で示した要領による取扱いは, CPP 船の舵力

のより合理的な簡易推定法を得るための一つの基礎を与えるものと考えられる。

終わりに臨み、実験にご協力いただいた石川島播磨重工業(株)山本久一氏ほか関係各位に厚くお礼を申し上げます。また、本稿の作成にご援助をいただいた埼玉大学工学部二宮俊技官に心より感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 小林弘明, 岸田政則: 可変ピッチプロペラ船のピッチ遞減時の舵力について, 日本航海学会論文集, 第 60 号, 1979, pp. 83-91.
- 2) たとえば, 湯室彰規: 斜航する船体の舵位置における流向に関する実験的研究, 石川島播磨技報, 第 14 卷, 第 4 号, 1974, pp. 406-417.
- 3) 藤井 斉, 津田達雄: 自航模型による舵特性の研究 (2), 造船協会論文集, 第 110 号, 1961, pp. 31-42.
- 4) 館 清志, 井上 欣三, 遠藤 真: CPP 装備船のピッチゼロ時の船首振れについて - I, 日本航海学会論文集, 第 86 号, 1992, pp. 225-233.
- 5) 武田誠一, 佐藤 要, 芳村康男: 1 軸 CPP 装備船の減速時の操縦性能, 日本航海学会論文集, 第 86 号, 1992, pp. 243-250.
- 6) たとえば, 加藤寛一郎, 今永勇生: ヘリコプタ入門, 東京大学出版会, 1985.
- 7) A.R.S.Bramwell: Helicopter Dynamics, Edward Arnold.
- 8) 神中龍雄, 深瀬 彊, 湯室彰規, 山崎禎昭: 高速船型の旋回に関する二, 三の問題, 造船協会論文集, 第 111 号, 1962, pp. 59-72.