

プロペラの付加水質量並びに付加水 慣性モーメントに関する研究—I*

付加水極慣性モーメントについて

竹内 正明・大崎 栄喜

Studies on the Added Mass and Added Moment
of Inertia of Propellers—I

On the Added Polar Moment of Inertia

By

Masaaki TAKEUCHI and Eiki OSAKI

In order to calculate the critical speed of a propeller shaft, it is necessary to know the accurate values of the added mass and the added moment of inertia of a marine propeller. When the principal specifications of a propeller are given, the values of the added mass and the added moment of inertia can be calculated by a two-dimensional theory. However, in practice, a three-dimensional correction is necessary for the value obtained through a two-dimensional theory because the three-dimensional influence exerted on a propeller is great. This study aims to evaluate accurately the added effect of water on a propeller. The authors defined that the coefficient of the three-dimensional correction J_T is the ratio of the three-dimensional lift coefficient to the two-dimensional lift coefficient. The former is obtained through the lifting line theory. The latter is given by the KUTTA-JOUKOWSKI condition. In order to confirm the effect of J_T for the added polar moment of inertia of the propellers under torsional vibration, the experiments were carried out using two propellers each with a different aspect ratio. As a result, the calculated values of the added polar moment of inertia obtained from the two-dimensional oscillating airfoil theory became almost equal to the experimental values by using the three-dimensional coefficient J_T . Therefore, it can be understood that the three-dimensional coefficient J_T is very effective for calculating the added polar moment of inertia.

* 水産大学校研究業績 第941号, 1982年2月10日受理.
Contribution from Shimonoseki University of Fisheries, No. 941. Received Feb. 10, 1982.

1. 緒 言

推進軸系の危険回転数の計算においては、プロペラの付加水質量や付加水慣性モーメントの正確な値を知ることが必要である。

従来、付加水質量や付加水慣性モーメントの値としては、空気中における値のある割合を経験的に付加する方法があるが、各文献¹⁻³⁾によってかなりの差がある。ある割合を経験的に付加する方法では、プロペラの形状変化を正しく評価できない。

そこで、プロペラの形状変化を考慮した2次元理論を用いて3次元修正を行なう方法がある⁴⁻⁶⁾。しかし、これらは静止した流体の中で物体が運動する場合であり、一般流の中で翼のまわりに循環がある場合の付加水効果は評価できない。したがって、非定常性を正しく考慮して付加水効果を求めるために、2次元振動翼理論を応用した方法^{7,8)}や、さらに、これに3次元修正を行なう方法等がある。

3次元修正としては、一般にポテンシャル理論から求めた楕円体と楕円板の付加水質量の比や付加水慣性モーメントの比^{6,9,10)}を用いたり、LAMBの3次元慣性係数に実験的修正を行なった3次元修正係数⁹⁾を用いたりしている。

本研究では、より正確に付加水効果を評価するために、揚力線理論をプロペラ翼に適用して3次元修正係数を求めた後、推進軸系のねじり振動の計算に必要な付加水極慣性モーメントについて、理論と実験により検討した。

2. 理 論

2.1 記号の説明

- V : 翼と水の相対速度 (cm/s)
- Z_a : 基準位置から翼中心までの距離 (cm)
- θ : 一様流 V に対する迎え角 (rad)
- B : 翼の弦長 (cm)
- ω : 翼の円振動数 (rad/s)
- $L(t)$: 一様流 V に対して直角方向に生じる揚力
- ρ : 流体の密度 ($\text{kg}\cdot\text{s}^2/\text{cm}^3$)
- ν : Reduced frequency ($B\omega/2V$ で表され、非定常性を示す無次元のパラメータ)
- $C(\nu)$: THEODORSEN 関数と呼ばれる複素関数

$$C(\nu) = F(\nu) + iG(\nu) \\ = \frac{J_1(\nu) - iY_1(\nu)}{J_1(\nu) + Y_0(\nu) + i\{J_0(\nu) - Y_1(\nu)\}}$$

J_0, J_1 : 0次および1次の第1種 BESSEL 関数

Y_0, Y_1 : 0次および1次の第2種 BESSEL 関数

m_w : 翼の単位幅当りの付加水質量 ($\text{kg}\cdot\text{s}^2/\text{cm}$)

I_w : プロペラの付加水極慣性モーメント ($\text{kg}\cdot\text{cm}\cdot\text{s}^2$)

Z : 翼数

J_T : 3次元修正係数

C_{L3} : 3次元翼の揚力係数

C_{L2} : 2次元翼の揚力係数

$B(r)$: プロペラの半径 r における翼幅 (cm)

$\theta(r)$: プロペラの半径 r における幾何学的ピッチ角 (rad)

r_0 : プロペラボス半径 (cm)

R : プロペラ半径 (cm)

A : アスペクト比 $\{(\text{翼長})^2/\text{翼面積}\}$

$\Gamma(r)$: 循環分布

w_i : 誘導速度

m_∞ : 2次元翼の揚力傾斜 (rad)

2.2 2次元振動翼理論による付加水極慣性モーメント

Fig. 1 に示すように、流速 V の一様な流れの中で、弦長 B の薄い2次元翼が一様流と直角方向に並進運動 (上向き正) をするとともに、翼中心まわりに回転運動 (頭上げ正) を生じるときの非定常揚力について考える。

これらの運動は全て円振動数 ω の微小振動とすれば、

$$Z_a = \bar{Z}_a e^{i\omega t}, \quad \theta = \bar{\theta} e^{i\omega t} \quad (1)$$

で表される。

このとき、一様流に直角方向に生じる揚力 $L(t)$ は、平板翼の場合、次式で与えられる¹¹⁾

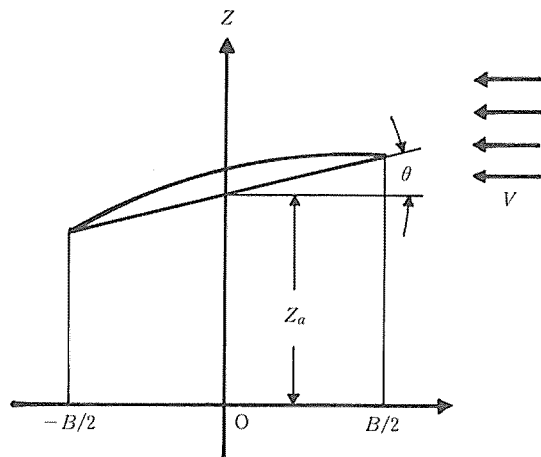


Fig. 1. Two-dimensional thin airfoil.

$$L(t) = \pi\rho\left(\frac{B}{2}\right)^2(-\ddot{Z}_a + V\dot{\theta}) + \pi\rho VBC(\nu)\left(-\dot{Z}_a + \frac{B}{4}\dot{\theta} + V\theta\right) \quad (2)$$

式(2)をプロペラ翼へ応用すると、次のようになる。

ここで、円振動数 ω の正弦振動を考えると、

$$\left. \begin{aligned} i\omega\dot{Z}_a &= \dot{Z}_a, & i\omega Z_a &= \dot{Z}_a \\ i\omega\dot{\theta} &= \dot{\theta}, & i\omega\theta &= \dot{\theta} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

の関係が成り立つ。

そこで、式(3)を用いて、式(2)の複素表示を実数形に書き変えと、

$$L(t) = -\frac{1}{4}\pi\rho B^2\left\{1 + \frac{2G(\nu)}{\nu}\right\}\dot{Z}_a - \pi\rho BVF(\nu)\dot{Z}_a + \frac{1}{6}\pi\rho B^3\left\{\frac{G(\nu)}{\nu}\right\}\dot{\theta} + \frac{1}{4}\pi\rho B^2 V\left\{1 + F(\nu) + \frac{2G(\nu)}{\nu}\right\}\dot{\theta} + \pi\rho BV^2 F(\nu)\theta \quad (4)$$

が得られる。

式(4)において加速度の項、すなわち、 \dot{Z}_a の係数が翼の単位幅当りの付加水質量 m_w となり、次式で表される。

$$m_w = \frac{1}{4}\pi\rho B^2\left\{1 + \frac{2G(\nu)}{\nu}\right\} \quad (5)$$

以上より、一様流の中で翼が振動すると、その付加水質量は $\pi\rho B^2/4$ ではなく、循環の影響を受けて $\{1 + 2G(\nu)/\nu\}$ なる因子が加わる。

静止した流体の中でプロペラが運動している場合の2次元理論による付加水極慣性モーメントは、熊井⁶⁾によって求められている。これに、式(5)を用いれば、非定常性を考慮した付加水極慣性モーメント I_w は、次式で得られる。

$$I_w = \frac{\pi\rho Z}{4} \int_{r_0}^R r^2 \left\{ B(r) \sin \theta(r) \right\}^2 \left\{ 1 + \frac{2G(\nu_r)}{\nu_r} \right\} dr \quad (6)$$

2・3 3次元修正係数

実際のプロペラ翼はアスペクト比 A が小さいので2次元翼とは言えず、その他、3次元的な影響が現れる。したがって、2次元理論から求めた値は、実際の値よりかなり大きくなるので、3次元的修正が必要である。

そこで、3次元修正係数 J_T を次のように定義する。

$$J_T = \frac{\text{3次元翼の揚力係数 } C_{L3}}{\text{2次元翼の揚力係数 } C_{L2}} \quad (7)$$

3次元翼の揚力係数 C_{L3} は、揚力線理論により次のようにして求められる¹²⁾

Fig. 2 に示すように、翼長に沿っての位置 r は、次式によって定義される φ を用いる。

$$r = -R \cos \varphi \quad (8) \\ 0 \leq \varphi \leq \pi$$

また、循環分布は

$$\Gamma(r) = 2RV \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin n\varphi \quad (9)$$

で表されるものとする。

したがって、式(9)から誘導速度 w_i を求め、PRANDTLの積分方程式に代入すれば、

$$\sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin n\varphi (n\mu + \sin \varphi) = \mu\theta \sin \varphi \quad (10) \\ \mu = \frac{m_w B}{4R}$$

が得られる。

翼形が指定されると、 B , m_w , θ は φ の函数として定まるから循環分布が定まり、揚力係数 C_{L3} は次式で求まる。

$$C_{L3} = \pi A A_1 \quad (11)$$

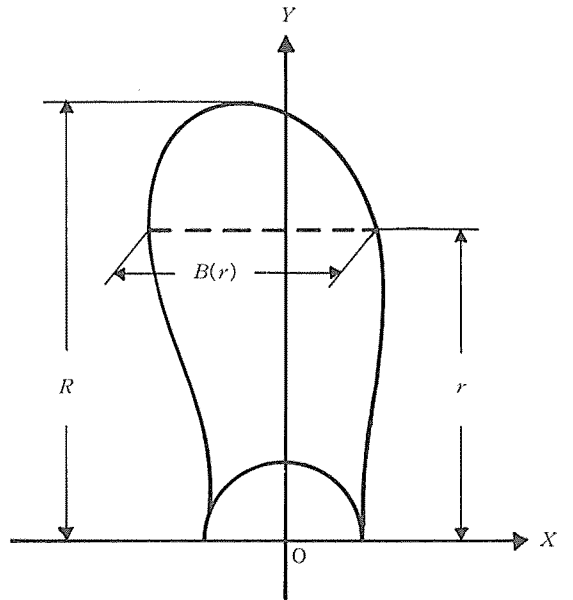


Fig. 2. Datum line of propeller blade.

次に、2次元翼の揚力係数 C_{L2} は、KUTTA-JOUKOWSKI の条件により、翼のまわりの循環が定まると求まる。

JOUKOWSKI の翼型において平板翼の場合、2次元翼の揚力係数は、

$$C_{L2} = 2\pi \sin \theta \quad (12)$$

で与えられる。

3. 実 験

3・1 実験装置

Fig. 3 に実験装置の概要を示す。直流サーボモータ①からの回転力は、減速歯車⑤を通しプロペラ軸⑦を回転させるとともに、ユニバーサルジョイント③を介することによりトルク変化を生じ、ねじり振動の強制力となる。この強制力は、トルクコンバータ④によって電磁オシログラフ⑬に記録する。また、プロペラ軸のねじり振動は、ストレインゲージ⑥からスリップリングを通して、同様に電磁オシログラフに記録する。

水槽⑧は、プロペラ⑨に対する流体力が水槽壁によってできるだけ影響を受けないように、プロペラ直径の倍の距離を両側に設けている。回転数は、フライホイール②にマークした一点を静電容量型ピックアップ⑩により電磁オシログラフに記録し、グラフより正確に求める。実験には、アスペクト比の異なる2種類のプロペラを使用した。Table 1 にプロペラの主要目を示す。

Table 1. Principal specifications of the propeller P1 & P2

Propeller	P1	P2
Number of blades	3	3
Diameter (cm)	32.8	33.0
Pitch ratio	0.979	0.948
Boss ratio	0.123	0.139
Exp. area ratio	0.343	0.517
Direction of turn	Right	Right
Weight (kg)	1.404	2.699
Aspect ratio	2.781	1.846

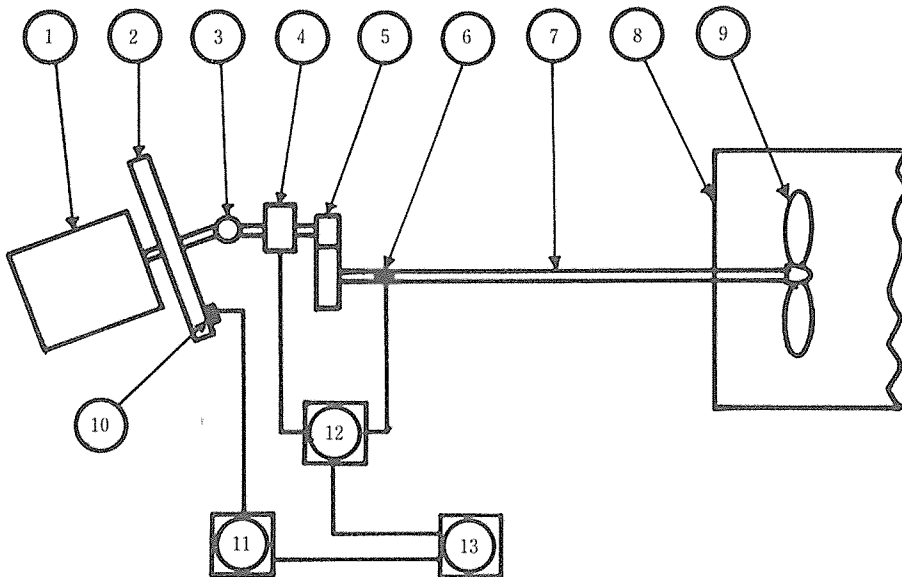


Fig. 3. Schematic diagram of the experimental apparatus.

Notes

- ① : D. C. Servo-motor,
- ② : Inertia wheel,
- ③ : Universal joint,
- ④ : Torque converter,
- ⑤ : Reduction gear,
- ⑥ : Strain gage and slip ring,
- ⑦ : Propeller shaft,
- ⑧ : Water tank,
- ⑨ : Propeller,
- ⑩ : Magnetic pick-up,
- ⑪ : Magnetic micrometer,
- ⑫ : Strain meter,
- ⑬ : Electric oscillograph.

3.2 実験方法

本実験においては、ねじり振動系の正確な固有振動数を測定することが必要である。したがって、プロペラ回転数を徐々に上昇させながら、強制力とプロペラ軸のねじり振動の両波形を同時に記録し、これらの波形より位相差を読み取り、固有振動数を求めた。その一例を Fig. 4 に示す。図中の振幅は電磁オシログラフの目盛で表示している。

プロペラの極慣性モーメントは、以下のようにして求めた。まず、すでに極慣性モーメントの大きさがわかっている3個の円盤 ($D1, D2, D3$) を用いて、Fig. 5 に示すように、実験装置に対する極慣性モーメントと固有振動数の関係を求めた。Fig. 5 を用いて、プロペラの空気中および水中における固有振動数の変化から、極慣性モーメントおよび付加水極慣性モーメントを求めた。また、以上の方法が正しい事を確認するため、空気中におけるプロペラ単体での極慣性モーメントを測定した結果は、Fig. 5 を使用して求めた値と完全に一致した。

4. 実験結果と検討

4.1 実験による付加水極慣性モーメントについて

3.2で述べた実験方法により得られた結果を Table 2 に示す。固有振動数はプロペラ軸回転数で表示している。また、付加水極慣性モーメントは空気中の極慣性モーメントとの割合で示す。

Table 2. Experimental results of the added polar moment of inertia for the propeller P1 & P2

Propeller		P1	P2
Natural frequency (rpm)	In the air	91.3	59.8
	In water	82.5	55.0
Polar moment of inertia ($\text{kg}\cdot\text{cm}\cdot\text{s}^2$)	In the air	0.079	0.192
	In water	0.097	0.227
Added polar moment of inertia (%)		22.8	18.2

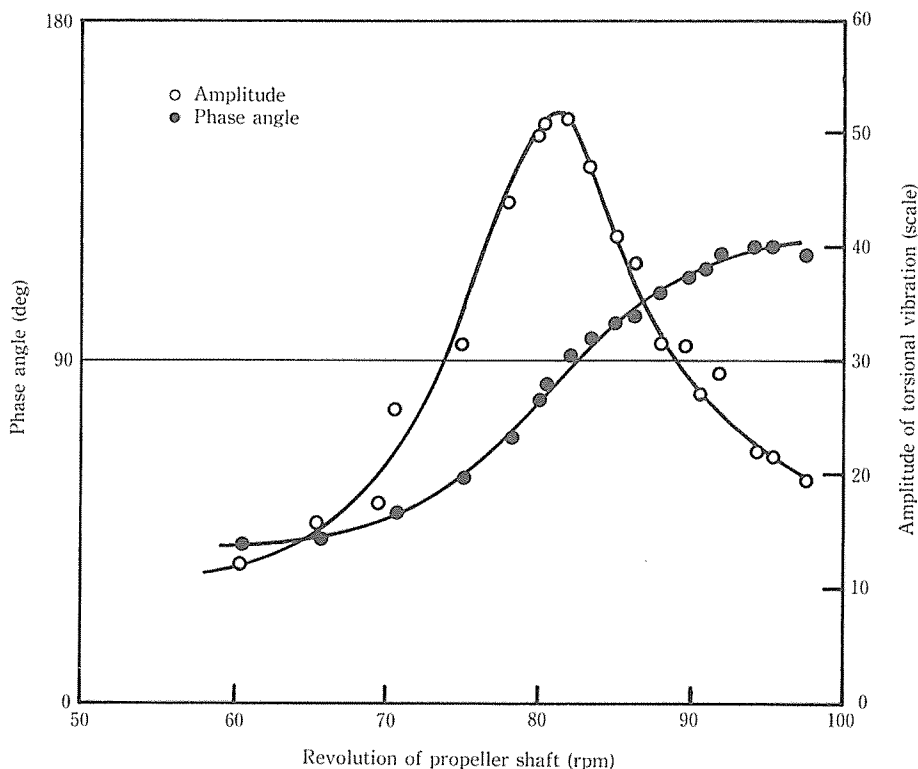


Fig. 4. Resonance curve of the propeller P1 in water.

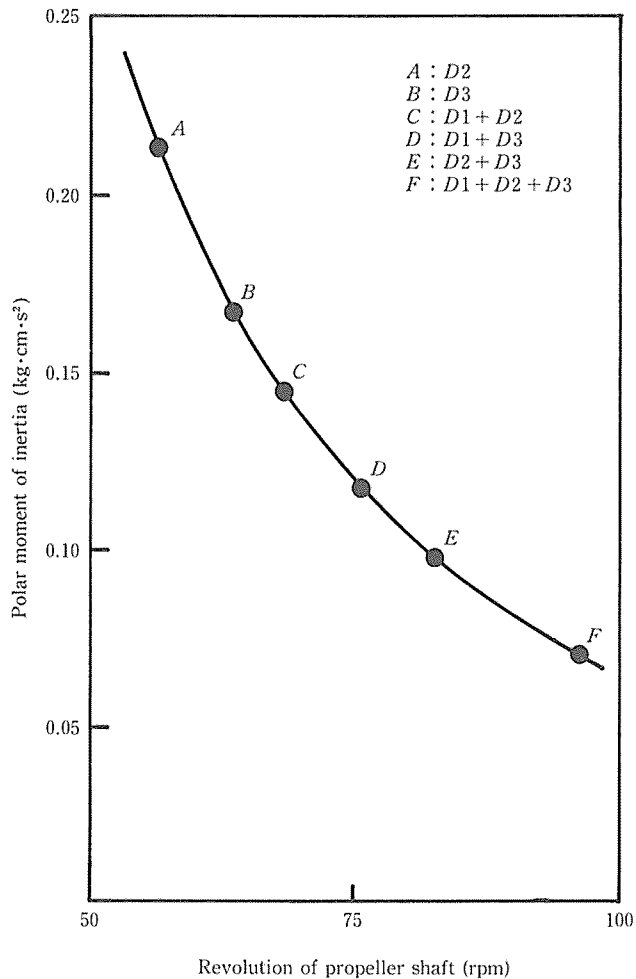


Fig. 5. Relation between polar moment of inertia and natural frequency for the test apparatus.

4・2 2次元振動翼理論による付加水極慣性モーメントについて

2・2で得られた式(6)を用い、プロペラ P1 および P2 の付加水極慣性モーメントを求める。数値計算においては、付加水極慣性モーメントは、プロペラのボス部を円柱と考え、翼部を15等分してプロペラの諸係数および実験結果を用いて計算する。

計算の結果、空気中の極慣性モーメントに対する付加水極慣性モーメントの割合は、プロペラ P1 において35.9%、プロペラ P2 において34.5%となった。これらの値を実験値と比較すると、2次元による計算値は実験値よりかなり

大きく現れるので、3次元的修正が必要となる。

4・3 3次元修正係数について

3次元修正係数 J_T は、2・3の式(7)から求めることができる。まず、3次元翼の揚力係数 C_{L3} は、プロペラ P1 および P2 について、式(10)および(11)を用いて求められる。

プロペラ軸がねじり振動を行なっている場合には、翼は本質的に平板翼であり、翼厚と断面形状の影響が非常に小さいと考えられる⁴⁾したがって、2次元翼の揚力係数 C_{L2} は式(12)を用いて求められる。

計算においては、翼部を8等分してプロペラの諸係数を上述の各式に代入することにより各翼部で C_{L3}/C_{L2} が得

られるが、その平均値を3次元修正係数 J_T とする。

計算の結果、プロペラ $P1$ および $P2$ の3次元修正係数 J_T は、それぞれ0.71および0.55の値が得られた。その結果、 J_T は $P1$ よりも $P2$ の方が相当小さい値を示していることがわかる。式(1)からわかるように、3次元的影響はアスペクト比 A によって表されているためであり、 A が大きい程2次元翼と見なすことができる。Table 3 に示すように、付加水極慣性モーメントは2次元振動翼理論による計算値に、これらの3次元修正係数 J_T を考慮すれば実験値と良く一致する。

次に、ここで定義した J_T と各文献⁷⁻¹³⁾より求めた3次元修正係数値との比較をTable 4 に示す。他の文献から得た修正値は、本実験に使用したプロペラの長短径比および翼展開面積比を用いて、各文献のグラフまたは式から求めた。Table 4 の2番目のプロペラ $P1$ についての修正値は、 $P1$ の翼展開面積比が0.34と小さく、BURRILL⁵⁾のグラフからは求めることができなかった。Table 4 から明らかのように、一番目の高以良⁴⁾または熊井⁶⁾による修正値は J_T とほぼ同じ大きさであり、これらの修正値を2次元振動翼理論による計算値に考慮すれば、実験値と良く一致する。しかし、BURRILLやTHOMSEN¹⁰⁾の修正値は、全体的に大きく現れ、3次元修正係数としては十分満足するものではない。ここで興味深いことは、熊井によれば、ポテンシャル理論を使用して求めた3次元修正係数は、付加水極慣性モーメントに対しては不十分であったと報告している。また、その理由をいくつか考察しているが、本実験では良い一致が得られた。その原因の一つは、彼が指摘しているように実験装置に不備な点があり、十分精度の良いデータが得られなかったのではないかと考えられる。

Table 3. Theoretical and experimental values of the added polar moment of inertia (%)

Propeller	$P1$	$P2$
Value of two-dimensional oscillating airfoil theory	35.9	34.5
Experimental value	22.8	18.2
Corrected value by J_T	25.5	19.0

Table 4. Coefficient of three-dimensional correction

Propeller	$P1$	$P2$
TAKAIRA or KUMAI	0.65	0.49
BURRILL	----	0.68
THOMSEN	0.85	0.75
J_T in this study	0.71	0.55

5. 結 言

軸系のねじり振動の計算に必要な付加水極慣性モーメントを評価する方法として、揚力線理論による3次元修正係数 J_T を定義し、実験により比較、検討した。

その結果、 J_T は十分有効であることがわかった。

今後の研究課題は、付加水質量に対して、この J_T が有効であるか、検討することである。

最後に、本研究を進めるに当り、懇切なご助言を戴いた本校の井上進夫教授およびご指導を賜った東京商船大学の峰功助教授に深く感謝致します。

文 献

- 1) E. PANAGOPULOS: Trans. SNAME, 58, 329~384 (1950).
- 2) N. H. JASPER: DTMB Report 827. 890, (1954).
- 3) G. C. VOLCY: Osouf. J. IMAS. 9, 17~27 (1973).
- 4) 高以良一二男・矢野颯: 造船協会論文集, 119, 10~17 (1967).
- 5) L. C. BURRILL and W. ROBSON: Trans. N. E. C. Inst. E. S, 78, Part. 6, (1962).
- 6) 熊井豊二・原田敬・南真和: 西部造船会会報, 50, 161~171 (1975).
- 7) R. DERNEDDE: Schiffstechnik, 7-38, 199~205 (1960).
- 8) H. SCHWANECKE: Schiffstechnik, 7-38, 170~176 (1960).
- 9) 浦木侃治・中嶋俊夫・山田実・辻桂治: 日本機械学会論文集, 29-198, 304~311 (1962).
- 10) P. THOMSEN: Schiff. Hafen, 13-2, 89~100 (1961).
- 11) 鷺津久一郎: 空力弾性学, 応用力学講座, 初版, 共立出版, 東京, 1962, p. 26~37.
- 12) 阿阪三郎: 流体力学, 応用力学講座, 初版, 共立出版, 東京, 1962, p. 111~136.
- 13) 葉山真治: 日本船用機関学会誌, 12-2, 129~135および12-3, 200~207 (1977).