

(昭和54年11月 日本造船学会秋季講演会において講演)

## 操縦運動の新しい数学モデルについて

正員 小瀬 邦 治\* 正員 佐伯 敏 朗\*\*

On a New Mathematical Model of Manoeuvring Motions of a Ship

by Kuniji Kose, *Member* Toshiro Saeki, *Member*

## Summary

In this paper, a new mathematical model describing manoeuvring motions of a ship is presented according to the detailed investigation of captive model tests. This model, based on the method proposed by the subcommittee of JTTC named Group-MMG, is composed of individual characteristics of hull, propeller and rudder and their interactions.

First, the model for longitudinal hydrodynamic forces is dealt with.

Second, the method to describe the hydrodynamic forces concerning to rudder is treated. A simple model consisting of open characteristics of rudder, inflow angle and velocity at rudder is proposed.

Two problems as to lateral hydrodynamic forces acting on hull are then argued. One of them is the matter of nonlinear terms and, from the practical point of view, third order terms with rate of turn and swaying velocity are recommended. The other factor is the fin effect of propeller, and it is verified not to be negligible for manoeuvrability.

Last, comparing the free-running results with estimated manoeuvres calculated by the present model, satisfactory coincidence is obtained. Consequently, the proposed model describing manoeuvring motions of a ship is found promising.

## 1 緒 言

船の操縦性能を知るために、拘束操縦性試験が広く利用されている。この試験を解析し、操縦性能を求めらうと、船に働く流体力を記述する数学モデルが重要な役割を果たす。どのようなモデルを利用するかによって、試験の仕様が異なるのみならず、それから得られる操縦性に関する情報も変化するのである。

ところで、今日迄に広く用いられてきた数学モデルは船全体に作用する流体力を運動状態を表わす諸量 ( $u, v, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{r}$ ) と操縦量 ( $\delta, n$  など) の多項式で記述している例が多い<sup>1)</sup>。この形のモデルは個々の船の流体力を形式的に記述する限りにおいては確かに有効である。しかし、大幅な船速の変化がある場合の操縦性能とか、舵面積の変更の影響を効果的に見積る場合のように、問題が多少、複雑になるとその有効性に疑問が生じる。

筆者らは加減速時の操縦性能を取り扱う際に、船に作用する流体力を舵によるものとそれ以外とに分離して記述する方法が有効であることを示した<sup>2)</sup>。このような舵力分離型とでもいふべき数学モデルの例として、JTTC

第二部会の下に設けられた操縦運動の数学モデル検討グループ (MMG) の提案がある。この提案の詳細は別に述べられているので省略させていただく<sup>3)</sup>が、要するに船体、プロペラおよび舵の単独性能をベースに、相互干渉をつけ加えた形で流体力の記述を試みたものといつてよい。

本稿はこの MMG の提案に沿って、操縦性研究に多年の実績をもつ供試船に作用する流体力について詳しく調査し、数学モデルの具体化を試みたものである。以下、船の各部に働く流体力の記述方法を説明し、最後に自航操縦性試験成績との比較を通じてその検証を行う。なお、この供試船の微小運動時の性能については別に報告しているので<sup>2)</sup>、本稿は重複を避け、比較的強い操縦運動の局面について述べる。

## 2 供試船型および実施した拘束試験の概要

本研究の供試船は Series 60 船型の母型であり、その要目を Table 1 に示す。

拘束試験は広島大学の PMM と東京大学の CMT 装置を用いて実施した。この研究の目的に従って、プロペラと舵の両方を取りつけた状態の船 (以下、HPR と略す) の他、主船体のみ (H)、舵つきの船体 (HR)、さらに

\* 広島大学工学部

\*\* 広島大学大学院工学研究科

Table 1 Principal particulars of the model

Hull		Rudder	
L	(m) 4.000	$\lambda$	2.17
B	(m) 0.571	$\bar{A}R/Ld$	1/66.7
d	(m) 0.229	Propeller	
$\nabla$	(m <sup>3</sup> ) 0.366	D	(m) 0.160
CB	0.700	P.R.	1.100
LCB	0.5%Fore	E.A.R.	0.500
kzz	0.25L	Z	4

(Series 60 Parent Model)

Table 2 Test conditions

$F_n$	$J_s$	0.50	0.904	1.30	1.60
0.15	—	○	○	○	○
0.10	○	○	○	○	—

ロペラつきの船体 (HP) といった状態の試験を実施した。HPR の場合の試験状態を Table 2 に示す。この試験状態のうちには、船速 ( $U$ ) とプロペラ回転数 ( $n$ ) を組合せて得られる見かけの前進率 ( $J_s=U/nD$ ) を揃えた場合があり、この結果から無次元化した形の流体力はおおよそ  $J_s$  で決まるという結論が確認できた。

試験はすべて  $\alpha$  を座標原点としており、流体力の記述も同様である。この場合の運動方程式は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} m'(\dot{u}'-v'r'-x'_G r'^2) &= X' + X'_E \\ m'(\dot{v}'+u'r'+x'_G \dot{r}') &= Y' + Y'_E \\ (I'_{ZZ} + m'x_G'^2)\dot{r}' + m'x'_G(\dot{v}'+u'r') &= N' + N'_E \end{aligned} \right\} (1)$$

ここで、 $X', Y', N'$  は船に作用する流体力、 $X'_E, Y'_E, N'_E$  は検力計を介して船に加える力を表わし、 $(1/2)\rho L^2 U^2$ ,  $(1/2)\rho L^3 U^2$  で無次元化している。その他、本稿で用いる記号は特に断らぬ限り、MMG の推奨に従うものとする。

試験中の計測項目は  $X'_E, Y'_E, N'_E$  の他、プロペラスラスト ( $T'$ ) および舵に働く2力 ( $F'_N, F'_T$ ) である。なお、舵直圧力 ( $F'_N$ ) は MMG の推奨とは逆に、右舷方向を正とする。なお、検力システムはすべての試験を通して同一で、広島大学 PMM の標準システムを使用している。

### 3 縦方向の流体力と記述法

MMG の提案によると、船に作用する縦方向の流体力は船体単独時の抵抗に、プロペラと舵の影響を取り入れて表現できる。

$$\begin{aligned} X' &= X'(u') + X'_u \dot{u}' + X'_{uv} v'^2 \\ &\quad + (X'_{vr} - Y'_v)v'r' + X'_{rr} r'^2 \\ &\quad + (1-t)T' + F'_N \sin \delta + F'_T \cos \delta \end{aligned} \quad (2)$$

最初の2項は直進中の抵抗と付加質量力、続く3項が

Table 3 Derivatives of longitudinal forces (bare hull)

	$X'_{vv}$ $\times 10^3$	$X'_{rr}$ $\times 10^3$	$X'_{vr}-Y'_v$ $\times 10^3$	$-Y'_v$ $\times 10^3$	$\frac{X'_{vr}-Y'_v}{-Y'_v}$
CMT	-0.894	-0.046	8.80	—	0.77
PMM Test	-1.974	-0.874	9.45	11.4	0.83

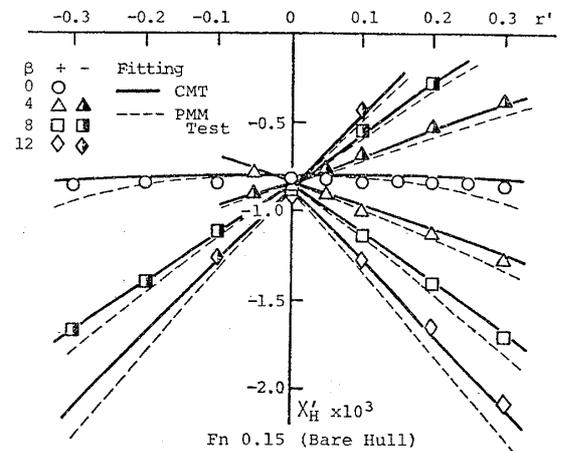


Fig. 1 Longitudinal forces measured by CMT and their fitting curves

操縦運動による抵抗増加を示す。この船体単独時の流体力に有効スラストと舵に働く力の抵抗成分が加わる形で縦方向の力を記述できる。 $F'_T$  は小さく、省略してよい。

船体単独時の試験結果を Fig. 1 および Table 3 に示す。PMM 試験と CMT の結果はよい対応を示しており、流体力の計測は十分な精度をもつと思われる。この結果から、操縦運動による抵抗増加の主力は  $v'r'$  の項であることがわかる。この  $v'r'$  の項の係数は横流れによる付加質量係数 ( $-Y'_v = m'_y$ ) を用いることが多いが、この船の場合  $(X'_{vr} + m'_y)/m'_y = 0.77$  となっている。筆者らの経験によると、この比は船型によって 0.5~1.0 の値をとるようで、 $X'_{vr}$  は一概に無視できないから今後の実績に注意したい。

続いて、プロペラの影響について考える。直進中のプロペラ単独試験を行い、斜流中においても軸方向の流速を用いる限り、この特性は変わらないとみなして解析をすすめた。スラスト一致法で求めた伴流率 ( $1-w_p$ ) を Fig. 2 に示す。肥大船型の場合、伴流率に対するプロペラ荷重度の影響は一概に無視しえないようであるが<sup>4)</sup>、本船の伴流率は荷重度によらず、直進時では 0.68~0.69 の値をもつ。他方、操縦運動による伴流率の変化は相当に複雑で、左右の非対称性も顕著である。この伴流率の変化を多分に形式的にはあるが、直進時の値 ( $1-w_{p0}$ ) に運動の影響をつけ加え、次式で記述する。

$$(1-w_p) = (1-w_{p0}) + \tau(v'_p + c_p|v'_p|v'_p)^2 \quad (3)$$

ただし、 $v'_p = v' + x'_b r' = -(\beta - x'_b r')$

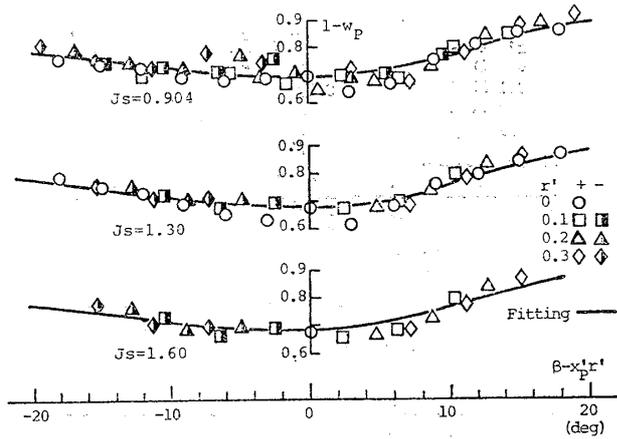


Fig. 2 Effective wake factor under manoeuvring motions

伴流率の非対称性を考慮して解析すると次の値をうる。

$$\begin{aligned} \tau &\doteq 1.3 \sim 1.4 & c_p &\doteq -0.6 \sim -0.7 & v_p' &> 0 \\ \tau &\doteq 3.9 \sim 4.0 & c_p &\doteq -1.0 \sim -1.1 & v_p' &< 0 \\ x_p' &= -0.42 \end{aligned}$$

この場合、 $x_p'$  は実験常数とみなして解析したが、およそ幾何的なプロペラ位置を示す値となっている。

この記述式の結果を Fig. 2 の実線で示すが、ほぼよい近似を与える。しかし、プロペラの影響が強い  $J_s=0.5$  の場合、データは割愛したが左右の非対称性が極端であり、(3) 式では  $(1-w_p)$  の特徴を表現しきれない。また、保針中のような微小運動状態の伴流変化も複雑で、この記述にも問題がある。結局、取り扱う運動の局面に応じて、 $(1-w_p)$  の表現法を工夫すべきであろう。

スラスト減少率の計測結果を Fig. 3 に示す。これによると、 $(1-t)$  は操縦運動の影響を受けにくい、プロペラ荷重度によって値を変えている。これは伴流率と逆の結果である。筆者らの経験によると、船型肥大化に従って、 $(1-w_p)$ 、 $(1-t)$  はプロペラ荷重度の影響を受けるようである。また、操縦運動の影響は  $(1-w_p)$  に顕

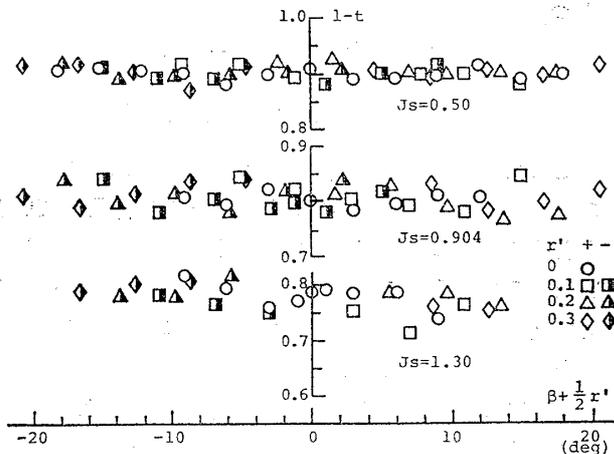


Fig. 3 Thrust deduction factor under manoeuvring motions

著であるが、 $(1-t)$  には少ないと考えてよい。

縦方向の流体力に関する残る問題は操舵の影響であるが、常用舵角の範囲においては舵に働く力の抵抗成分のみを考慮すればよい。従って、この問題は次章で扱う。

#### 4 舵による流体力と記述法

舵による流体力は舵自体に作用する力とその干渉で船体に生じる力の和である。この舵自体に作用する力の主力は直圧力であり、舵の単独性能に、その位置の流速  $U_R$ 、流向  $\alpha_R$  を組合せ、次式で考える。

$$F'_N = \frac{1}{2} \rho A_R U_R^2 \alpha_R f_\alpha(A) \left/ \frac{1}{2} \rho L^2 U^2 \right. \quad (4)$$

ここで、 $A_R$  は舵面積、 $f_\alpha(A)$  は舵の単独性能である。本稿では舵の単独性能を藤井の式<sup>9)</sup>で考える。

直進中の舵位置における縦方向の流速 ( $u_R$ ) は別に報告した通り<sup>2)</sup>、次式で記述できる。

$$u_R/u = (1-w_{p0}) \varepsilon \sqrt{1 + \kappa \frac{8}{\pi} \cdot \frac{K_T}{J^2}} \quad (5)$$

このうち、 $\sqrt{1 + \kappa \frac{8}{\pi} \cdot \frac{K_T}{J^2}}$  はプロペラによる増速率を表わす。また、 $\varepsilon$  はプロペラと舵の位置における伴流率の相違、舵単独性能に対する船体の影響などを表わす修正係数である。この船型においては、 $\varepsilon$ 、 $\kappa$  は次の値をとる。

$$\varepsilon = 0.87 \quad \kappa = 0.68$$

操縦運動がある場合の舵位置の流速を Fig. 4 に示す。この複雑な流速変化を表現する際、伴流率にのみ操縦運動の影響を取り入れ、残る頃は直進中の値が使えれば便利である。Fig. 4 における実線はこの形で求めた  $u_R/u$  を示すが、総じて実験値をよく表現している。 $J_s=0.5$  場合は多少、近似が劣るが、これはプロペラの伴流率の表現の方に問題があるため、実用上プロペラによる増速率に操縦運動の影響はないと考えてよさそうである。結局、舵位置の流速は次式で与えられる。

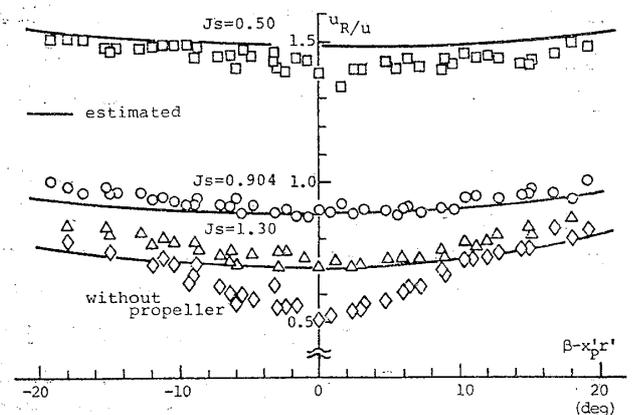


Fig. 4 Effective rudder inflow velocity under manoeuvring motions

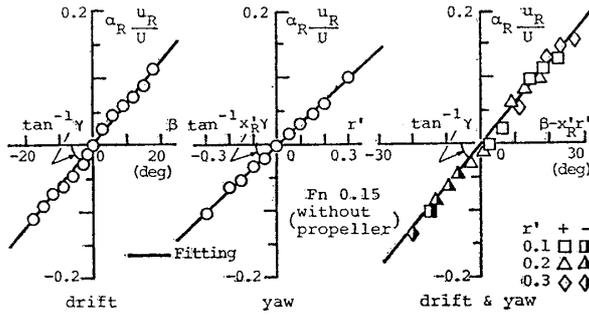


Fig. 5 Effective rudder inflow angle under manoeuvring motions (without propeller)

$$u_R/u = \{ (1-w_{p0}) + \tau(v'_p + c_p|v'_p|v'_p)^2 \} \varepsilon \sqrt{1 + \kappa \frac{8}{\pi} \cdot \frac{K_T}{J^2}} \quad (6)$$

舵直圧力を求めるためのもう一つの要素である舵位置の流向を考える際、直進中にプロペラの作用で生じる流向  $\delta_0$  と、操縦運動によるそれを区別して取り扱う必要がある<sup>2)</sup>。両者は操縦運動に対する寄与の仕方が異なるのみならず、プロペラ増速率の影響の現われ方も違うからである。

$$\alpha_R = -(\delta - \delta_0) - \gamma(v_R/u_R) \quad (7)$$

まず、プロペラを外した場合の流向を舵位置における流速の影響を考慮した形  $\alpha_R(u_R/U)$  で示すと、Fig. 5をうる。この流向は舵直圧力が零となる舵角である。この結果によると、 $\alpha_R(u_R/U)$  は  $\beta(-v')$  や  $r'$  におよそ比例している。舵位置の流向は複雑そうに見えるが、これは縦方向の流速（伴流）のためであることがわかる。この流向の記述法はMMGモデルで最も懸念されたものの一つであるが、結局、簡略な次式をうる。

$$\alpha_R \left( \frac{u_R}{U} \right) = -(\delta - \delta_0) \left( \frac{u_R}{U} \right) - \gamma(v' + x'_R r') \quad (8)$$

この  $\gamma$  は船体の整流効果を表わし、本船では  $\gamma = 0.364$  をうる。 $x'_R$  は  $v'$  と比較した形で  $r'$  の寄与を与える実験常数である。従来、この  $x'_R$  は幾何的な舵位置 ( $x'_R = -0.5$ ) として取り扱われているが、本研究の結果によると  $x'_R = -0.907$  である。他の船型の例も参考にする<sup>5)</sup>  $x'_R$  は  $-1.0$  程度の値を取る実験常数と考えられる。

プロペラ稼動時の流向を求めた結果を Fig. 6 に示す。図の横軸は  $\beta - x'_R r'$  であり、 $x'_R$  はプロペラなしの場合の値を用いている。 $\beta - x'_R r' < 0$  における多少の範囲で  $\alpha_R(u_R/U)$  が一定値を保つものの、特性の傾斜  $\tan^{-1} \gamma$  はプロペラなしの場合によく一致している。このことから、プロペラの整流効果は軸方向の流速を増加させた分だけ、操縦運動によって生じる舵位置の流向を減らすと考えてよいことがわかる。この流速増加を  $u_R$  で考慮した  $\alpha_R(u_R/U)$  の形で流向を表現すると、1軸プロペラ

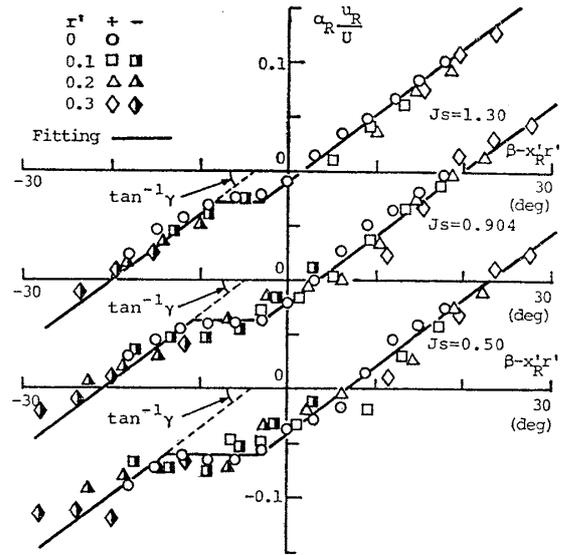


Fig. 6 Effective rudder inflow angle under manoeuvring motions (with propeller)

の非対称性などを除いて考える限り、プロペラなしの結果を用いる。より正確に流向を記述する必要がある際には、直進時の流向  $\delta_0$ <sup>2)</sup>のほか、 $\beta - x'_R r'$  が負の領域に現われる非線形性を簡単な折れ線特性の形で取り入れるのが実際的であろう。これを Fig. 6 の実線で示すが、流向変化の特徴をうまく表現している。

以上から、舵位置の流速、流向を表わすモデルが得られた。ここで重要なことは、この流速、流向に対する船体とプロペラの影響が分離された形で記述しうることである。この点に関して、最近、湯室が同様な指摘をしている<sup>6)</sup>。簡単な試験から舵特性を推定する方法を確立する上で、これは明るい展望を与えるものである。

舵による流体力に関する残る問題は、船体に対する干渉である<sup>7)</sup>。MMGモデルでは、舵直圧力の  $a_H$  倍の横方向の力が  $x_H$  の位置に働く<sup>2)</sup>と表現している。この船型の場合、別に報告した通り<sup>2)</sup>、 $a_H, x_H$  はおよそ次の値をもつ。

$$a_H = 0.35 \quad x_H = -0.40$$

### 5 船体による流体力と記述法

ここで取り扱う船体（プロペラを含む）による横方向の流体力は船全体に働いている力から舵に作用している力とその干渉によって船体に誘起される干渉力を差し引いたものである。この力はHPの試験から求めるべきともいえるが、実験工数を軽減するためにHPRの試験から上述の方法で求めた。

船体による横方向の流体力を記述するうえで、まず問題になるのは非線形項の扱いである。この非線形項は  $r'$  と  $v'$  の多項式で表現されることが多く、井上<sup>8)</sup>は cross flow drag の考えで2次式を用いている。また、Abko-

witz<sup>1)</sup> は流体力を形式的にテイラー級数で表わし、左右対称性から  $r'$  と  $v'$  の 3 次式を用いている。MMG モデルにおいては cross-flow drag 係数  $C_D(x')$  を用いて、船体による横方向の力を次式で記述している。

$$\left. \begin{aligned} Y'_{HP} &= Y'_{HP0}v' + Y'_{HP1}r' + Y'_{HP2}v'^2 + (Y'_{HP3} + X'_u u')r' \\ &+ \int_{-1/2}^{1/2} C_D(x') |v' + x'r'| (v' + x'r') dx' \\ N'_{HP} &= N'_{HP0}v' + N'_{HP1}r' + N'_{HP2}v'^2 + N'_{HP3}r'^2 \\ &+ \int_{-1/2}^{1/2} C_D(x') |v' + x'r'| (v' + x'r') x' dx' \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

この記述法はその物理的な意味が明瞭であり、流体力の理論的な推定を可能にするうえでも魅力的である。そこで、この cross-flow model の形で流体力を表現する際の  $C_D(x')$  の関数形状について考察する。まず、 $C_D(x')$  を  $x'$  の多項式で記述することにし、次式で考える。

$$C_D(x') = \sum_{j=0}^m C_j x'^j \quad (10)$$

この  $m$  を大きくすると、流体力の近似は改善されるはずであるが、他方、無意味な項を増す結果になる。そこで、山内らによって紹介された AIC 推定法<sup>10)</sup>でこの次数の選択を試みた。AIC を次式で定義する。

$$AIC(m) = n \log \sigma_m^2 + 2(m + m_0) \quad (11)$$

この第 1 項は近似の良さを表現し、次式で考える。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_m^2 &= \sum_{i=1}^n \left\{ Y'_i - \left( Y'_0 + Y'_1 v' + (Y'_2 + X'_u u') r' \right. \right. \\ &+ \left. \left. \int_{-1/2}^{1/2} C_D(x') |v' + x'r'| (v' + x'r') dx' \right) \right\}^2 \\ &+ \lambda \sum_{i=1}^n \left\{ N'_i - \left( N'_0 + N'_1 v' + N'_2 r'^2 \right. \right. \\ &+ \left. \left. \int_{-1/2}^{1/2} C_D(x') |v' + x'r'| (v' + x'r') x' dx' \right) \right\}^2 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

ただし  $\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i^2}{\sum_{i=1}^n N_i^2}$

第 2 項は流体力を記述するパラメータの増大に対するペナルティを意味し、この場合  $m_0=8$  である。

こうして得られた  $AIC(m)$  の例を Fig. 7、流体力の記述例を Fig. 8 に示す。この例あるいはプロペラ稼動時の同様な解析例によると、 $m=2\sim 3$  が最適のようである。しかし、 $m=0$  の場合 ( $C_D(x')=C_0$ ) に較べてその近似が顕著に改善されているとはいえず、他方、 $m$  が 3 以上になると  $C_D(x')$  が正になる場合が生じ、物理的に不合理な結果となる。

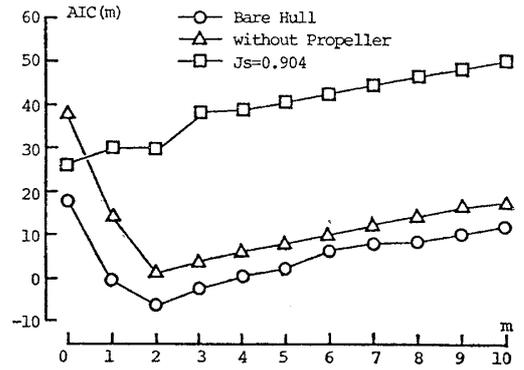


Fig. 7 Behaviour of AIC values

さて、非線形項を  $r'$  と  $v'$  の多項式で表現する従来のモデルと  $C_D(x')=C_0+C_1x'+C_2x'^2$  とした場合との比較例を Fig. 9 に示す。試験が比較的小さい運動状態に限られているので、非線形性そのものが弱く、この結果から記述法の優劣を最終的に判断することは難しい。しかし、全般的に判断すると、 $r', v'$  の 3 次式が最も優れ、 $C_D(x')$  モデルは少ないパラメータで  $Y', N'$  を同時に表現するだけに近似の程度が悪いといえる。

この非線形項の記述法については操縦運動の推定精度との関連で次章でさらに検討することにし、続いて船体による横方向の力に対するプロペラの寄与について考える。従来、プロペラの影響は舵による力にのみ現われると考えられてきた。しかし、本船型の PMM 試験の結果は船体の横方向の力に対して、プロペラは無視しえない直接的影響をもち、船の針路安定性を大幅に変えることを示した<sup>2)</sup>。

このプロペラの効果は通常、フィン効果と呼ばれる。本研究においても、この現象が操縦性の尺度影響などに重大な影響を与えることを考慮し、より精度の高い結果を得やすい CMT による確認を試みた。CMT の結果を

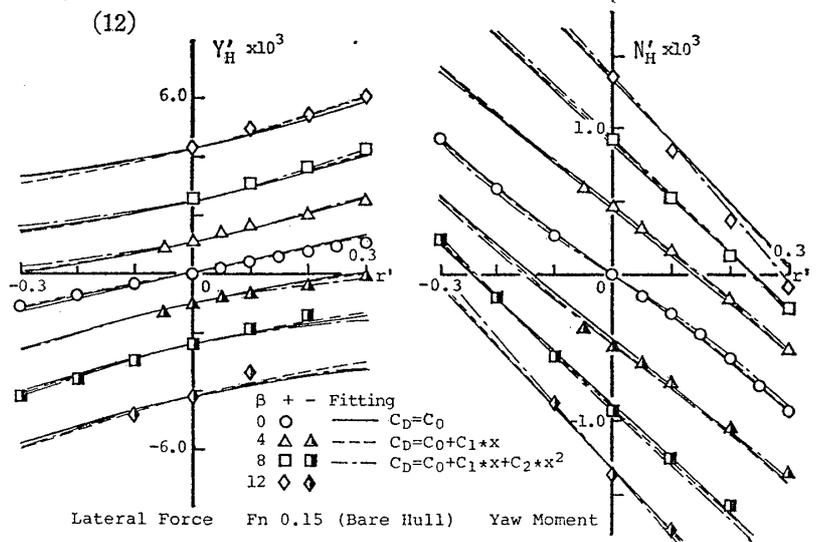


Fig. 8 Hydrodynamic forces measured at CMT and their fitting curves

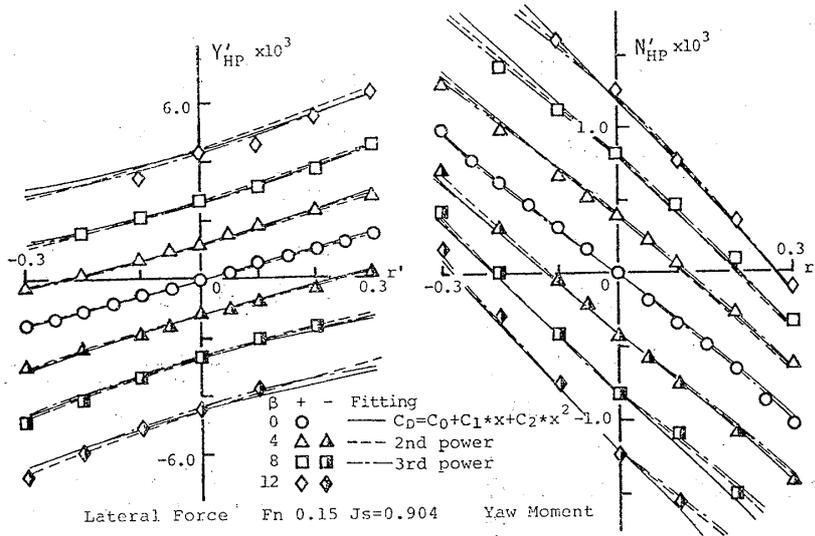


Fig. 9 Hydrodynamic forces measured at CMT and their fitting curves

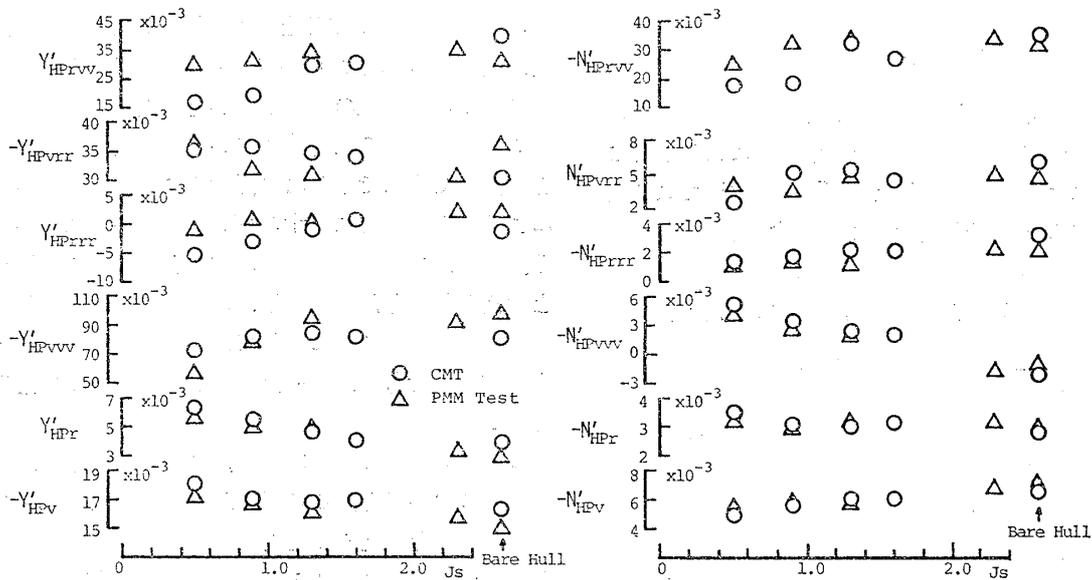


Fig. 10 Derivatives of lateral forces

Fig. 10 に示す。この場合、非線形は3次式を用いているが、プロペラのフィン効果は小さくないといえる。また、同図中には PMM の結果も示しているが、両者はよく一致している。

6 自航操縦性試験によるモデルの検証

拘束試験で計測した流体力を記述するモデルを選ぶうえで、自航操縦性試験成績との対応が参考になる。そこで同じ模型船の自航操縦性試験を実施し、本稿で検討した各種のモデルによる計算結果と比較した。

定常旋回特性の比較結果を Fig. 11 に示す。(a)~(c) は船体による横方向の力の非線形項を表わすモデルを比較したものである。(a) は cross-flow model の場合であり、 $C_D(x') = C_0$  としている。(b), (c) は  $r'$  と  $v'$  の多項式による結果である。これらを通じて、舵による

流体力は単独性能に舵位置の流向・流速を組合せて表現しているから、(a)~(c) の差は専ら船体による力の非線形項による。

まず、 $C_D(x') = C_0$  の場合、大舵角旋回の推定に問題がある。 $C_D(x')$  の表現を多少、複雑にしても、この問題は解決しないようであり、結局、 $Y'_{HP}, N'_{HP}$  に同じ  $C_D(x')$  を用いる限り、実用上の精度が得がたいと判断される。

(b), (c) のように、 $r'$  と  $v'$  の多項式を用いると比較的良好な推定をうる。 $r', v'$  の2次の項をとるか、3次にするかについて、特に顕著な差は認められないが、後者の方が多少、良い結果をうる。他船型の経験を参考にすると、流体力の記述精度という観点からは、3次の項を用いる方がよいといえる。問題はこの3次の項の物理的意味づけである。流体力を形式的にテイラー級数表示す

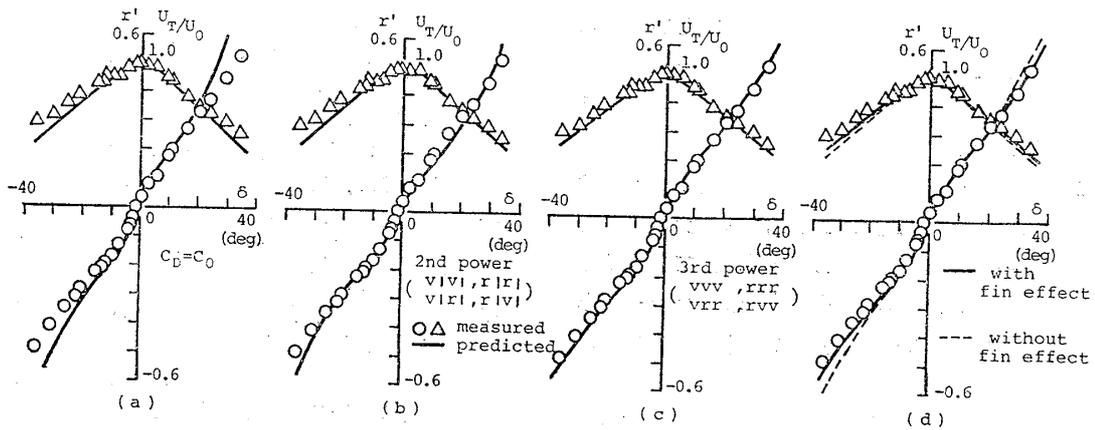


Fig. 11 Comparison of measured and predicted turning characteristics

る際に、左右対称の仮定のもとで2次の項を省略し、3次の項を残したのであるから、これに対する flow model 的な検討が今後必要であろう。

また、微小舵角時に存在する左右の旋回特性の微妙な差がうまく推定していることにも着目したい。これは舵位置の流向を記述する際、船体による整流効果などを表わす  $\gamma$ ,  $x'_R$  あるいはプロペラによる増速などのほか、簡単な折れ線状の非線形性を導入したためである。

船体による横方向の力に対するプロペラのフィン効果を考慮し、旋回時の船速低下に応じて微係数を変化させた場合と、この影響を無視し、直進時の船速に対応した微係数を使用した場合との旋回特性の相違を (d) に示す。船速低下が増すに従って、プロペラ荷重度の影響が無視しえないことがわかる。このプロペラのフィン効果をどのようにモデルに取り入れるかも今後の検討事項である。

以上、定常旋回特性の推定という観点から、操縦運動数学モデルについて検討してきた。Z 試験、あるいはこの舵力分離型モデルの長所を生かし、加速・減速中の操縦運動などについても、自航時の性能との比較を試みた。この結果は定常旋回特性の場合と同様であり、紙面の関係で割愛させていただく。

結局、以上の結果から縦横方向の力とまわりのモーメントは次式で記述するのが妥当と考えられる。

$$\begin{aligned}
 X' &= X'(u') + X'_u u' + X'_{vv} v'^2 \\
 &\quad + (X'_{vr} - Y'_{\dot{v}}) v' r' + X'_{rr} r'^2 + (1-t) T' \\
 &\quad + F'_N \sin \delta \\
 Y' &= Y'_{HP\dot{v}} \dot{v}' + Y'_{HP\dot{r}} \dot{r}' + Y'_{HPv} v' \\
 &\quad + (Y'_{HPr} + X'_u u') r' + Y'_{HPvv} v'^3 + Y'_{HPr r r} r'^3 \\
 &\quad + Y'_{HPv r r} v' r'^2 + Y'_{HPr v v} v' v'^2 \\
 &\quad + (1+a_H) F'_N \cos \delta \\
 N' &= N'_{HP\dot{v}} \dot{v}' + N'_{HP\dot{r}} \dot{r}' + N'_{HPv} v' + N'_{HPr} r' \\
 &\quad + N'_{HPvv} v'^3 + N'_{HPr r r} r'^3 + N'_{HPv r r} v' r'^2 \\
 &\quad + N'_{HPr v v} v' v'^2 + (x'_{RG} + a_H x'_H) F'_N \cos \delta
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

スラスト  $T'$  および舵直圧力  $F'_N$  の記述式は前述した通りである。また、(13) 式で  $x'_{RG}$  は舵の幾何的位置を示し、 $x'_{RG} = -0.5$  である。

### 7 結 言

本研究では、船体、プロペラおよび舵の単独性能と相互干渉について詳細な拘束操縦性試験を実施した。またこの結果にもとづいて、新しい操縦運動の数学モデルを具体化し、自由航走模型の結果と比較した。これらの検討を通じて得られた主な結論は次の通りである。

- 1) MMG の提案を具体化した操縦運動の数学モデルは比較的簡略な形にもかかわらず、船速変化をも含む操縦運動全般を精度よく表現できる。
- 2) 舵の単独性能に舵位置の流速、流向を与えるモデルを組合せ、舵直圧力をうまく推定しうる。この流速、流向に対する船体とプロペラの影響は分離して記述できる。
- 3) 船体、プロペラによる横方向の流体力の非線形項を記述するには、旋回角速度  $r'$  と横流れ速度  $v'$  の3次式が実用的である。また、この力に対するプロペラのフィン効果も無視できない。

以上の結論は Series 60 の母型という1隻の供試船について実施した試験から導かれたものである。この結論が、今後、多数の実用船型の経験や理論的検討を通じて確認されることを期待したい。

### 謝 辞

この研究は東大工学部と広大工学部のスタッフが共同して実施した拘束操縦性試験の結果を筆者らが整理し、まとめたものである。この共同研究のメンバーであり、かつ、有益なご指導、ご援助をいただいた東大 元良誠三教授、小山健夫教授、藤野正隆助教授、広大 仲渡道夫教授に深甚の謝意を表す次第である。また、延べ2カ月以上にわたる試験にご協力いただいた東大 小柳雅志郎助手、和田暁、永島実郎、河村武男技官、広大 長谷川和

彦助手, 平尾三郎技官に心からお礼申し上げたい。さらに, 卒業研究として本研究に参加された広大 52 年卒, 大岡正憲, 53 年卒, 尾崎和行, 梅田宏規君の真摯なる努力にも感謝したい。

また, この実験の一部は日本造船研究協会 175 部会の事業に関連して実施されたものであり, 本部会の委員各位からご意見をいただいた。また, JTTC 第二部会の下に設けられたワーキンググループ MMG のメンバーからも貴重なご討論をいただいた。各位に厚くお礼申し上げたい。

なお, この研究は元良誠三教授を日本側代表とする日米科学協力研究の一部であること, 科学研究費補助金の交付を受けたことを付記する。この研究の諸計算は広大計算センターの HITAC 8700 および 船舶工学教室の PANAFACOM U-300 を利用した。

#### 参 考 文 献

- 1) Abkowitz, M. A. : Lectures on Ship Hydrodynamics - Steering and Manoeuvrability, Hydro-Og Aerodynamisk Laboratorium, Report Hy-5, 1964.
- 2) 仲渡, 小瀬, 佐伯: 船の加減速運動に関する実験的研究 (第2報), 日本造船学会論文集, 第144号, 1978.
- 3) 小川他: MMG 報告 I~IV, 日本造船学会誌, 第575, 577, 578, 579号, 1977.
- 4) 仲渡, 小瀬, 寺本, 島宗: 船の加減速運動に関する実験的研究 (第1報), 日本造船学会論文集, 第140号, 1976.
- 5) 小山: 操縦運動方程式について, MMG 資料, MMG 2-5, 1976.
- 6) 湯室: 斜航するプロペラの整流効果に関する実験結果について, 日本造船学会論文集, 第145号, 1979.
- 7) 烏野: 操舵が船体に誘起する横方向の力について, 関西造船協会誌, 第133号, 1969.
- 8) Inoue S. : On the Turning of Ships, Memoirs of the Faculty of Eng. Kyushu Univ. Vol. 16, 1956.
- 9) 藤井, 津田: 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.
- 10) 山内, 大津, 北川, 織田: データ解析の動向(1), 日本造船学会誌, 第589号, 1978.