

首振り型推進器を有する船の操縦性に関する研究

正員 安川 宏 紀* 正員 平 田 法 隆*
正員 田 中 進* 正員 小 瀬 邦 治**

Study on Maneuverability of a Ship with Azimuthing Propellers

by Hironori Yasukawa, *Member* Noritaka Hirata, *Member*
Susumu Tanaka, *Member* Kuniji Kose, *Member*

Summary

Captive model tests were carried out to capture the hydrodynamic force characteristics of a ship with the azimuthing propellers (hereafter we call the ship Podded ship) which are arranged in parallel at stern part. The measured hydrodynamic force characteristics were compared with those of usual ship model with twin propeller and twin rudder. The Podded ship has better performance with respect to ship control force in case of large azimuthing angle. However, the course stability becomes worse. Comparing push and tractor types of azimuthing propeller, tractor type is superior to performance for both ship control force and course stability. Based on the measured results, a simulation model was developed for hydrodynamic forces related to azimuthing propellers. Using the model, maneuvering simulations were carried out for the Podded ship and usual ship with twin rudder. As a result, it was shown that the Podded ship does not keep to IMO criteria of 10/10 zig-zag maneuvers, even though the usual ship is no problem. It is necessary to pay attention to ensure the course stability in the new development of Podded ships.

1. 緒 言

NO_x や SO_x を大幅に削減できる電気推進船技術の進展, さらに POD 推進器という新しい推進・操舵装置の出現により, 今までになかった新しいコンセプトの船が出現してきた。例えば, POD 推進器を複数台装着した大型客船や通常の 1 軸船におけるプロペラの後方に反転する形で POD 推進器が備えられたフェリー等が挙げられよう。これらは, POD 推進器を備えているため, 舵を持たないことを特徴とする。

一般に, POD 推進器を備えた船は, 操縦性に優れているといわれている。しかし, POD 推進器は, 操舵装置として, 舵を凌駕していると考えるのは早計である。舵は, 操舵力を発生するだけでなく, 針路を保持するためのダンパーの役割も担っているからである。実際に, POD 推進器を備えた船が著しい針路不安定性を示した水槽試験例が公表されている¹⁾。

操縦性の見地から見た POD 推進器の役割を詳細に調べるためには, 水槽試験等により, 操縦性に関わる流体力特性 (操縦流体力特性と呼ぶ) を把握する必要がある。POD 推進器単独時の水槽試験結果は多く公表されているが (例えば, 文献²⁾), 船後状

態において, POD 推進器を備えた船の操縦流体力特性については, あまり公表されていないのが実状である。唯一, タンデム型ならびに 2 重反転型の POD 推進器を装着した場合の塚田等の実験例³⁾がある程度であろう。

本論文では, 模型船を用いた水槽試験により, POD 推進器を備えた船の操縦流体力特性の計測結果ならびにこの計測結果をもとに実施した操縦運動シミュレーション計算結果を報告する。そして, 船の操縦性に及ぼす POD 推進器の影響について, 従来の舵を用いた船舶との比較を通じ議論する。本研究では, 国内初の電気推進内航船「千祥」を対象とする。「千祥」は化学製品を運搬する内航ケミカルタンカーであり, 実際に問題なく運航されている。本船は電気推進船であることから, POD 推進器と類似の垂直軸型推進器が装着されている。

研究は次のように進めることとした。まず最初に, 比較のベースとして, 「千祥」模型船に作用する操縦流体力特性を把握する。次に, 「千祥」から舵を取り払い, その代わりに現有の垂直軸型推進器を首振り可能なものとする。推進器の向きとして, push 型と pull 型の 2 つを考える。push 型と pull 型とは, POD の向きが 180(deg) 異なる。それらの操縦流体力を計測し, オリジナル「千祥」のそれと比較する。そして, 得られた流体力特性をベースに, オリジナル「千祥」, push 型, pull 型の 3 つについて, 操縦運動シミュレーション計算を実施し, それぞれを比較することにより, 操縦運動の特徴を把握する。「千祥」の操縦運動については, 実船試験結果が一部公表されている⁴⁾。このように, 実際に航行している船から舵を取り払い, その代わりに首振り式推進器が装着されたという設定の下で議論することに, 本論

* 広島大学大学院工学研究科

** 広島大学名誉教授

原稿受理 平成 20 年 11 月 19 日

文の特徴がある。

なお、本論文で用いる「POD 推進器」という言葉は、垂直軸型推進器やアジマススラストと呼ばれる首振り型推進器をも含む広い意味で使用する。また、POD 推進器を備えた船のことを、単に「POD 船」と呼ぶことにする。

2. 「千祥」の概要

本研究では、国内初の電気推進船「千祥」を対象とする。Table 1に本船の主要目を示す。「千祥」は化学製品を運搬する内航ケミカルタンカーである。「千祥」には、従来船型に比べて抵抗が少ないといわれるバトックフロー船型が採用されている⁴⁾。「千祥」は、Fig.1に示すように、機関室配置の自由度を増すために垂直軸型推進器が2基、またプロペラの後方に、吊り下げ型の舵が2基装着されている。また、針路安定性の確保のため、比較的大きなセンターステグが取り付けられている。

Table 1 Principal particulars of SENSHO

Length overall L_{oa} (m)	62.92
Length perpendiculars L_{pp} (m)	57.00
Breadth B_{mld} (m)	10.00
Depth D_{mld} (m)	4.50
Design draft d (m)	3.54
Displacement ∇ (m^3)	1506
Block coefficient C_{bpp}	0.742
Midship coefficient C_m	0.9912
Gross tonnage (GT)	498
Dead weight (ton)	964.4
Service speed V_s (kn)	11.9

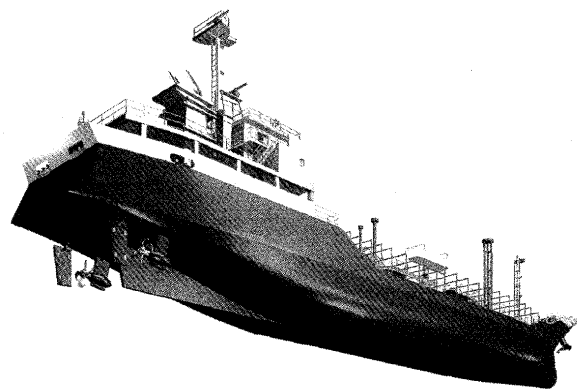


Fig. 1 Skewed view of SENSHO

3. 水槽試験の概要

3.1 模型船の概要

Fig.2に水槽試験で用いた「千祥」の模型船の全景を、Table 2にその主要目を示す。模型縮尺比は 1/26.25 である。

水槽試験では、まず最初に、「千祥」模型船に作用する操縦流体力特性を把握する。この「千祥」を「オリジナル (original)」と呼ぶ。次に、「千祥」から舵を取り払い、その代わりに現有の垂直軸型推進器を首振り可能なものとする。推進器の向きとして、push 型と pull 型の2つを考えることとし、それぞれ「push 型

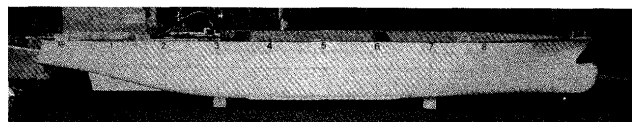


Fig. 2 Side view of a ship model

Table 2 Principal particulars of a ship model

Length perpendiculars L_{pp} (m)	2.171
Length of water line L_{wl} (m)	2.267
Breadth B_{mld} (m)	0.381
Depth D_{mld} (m)	0.171
Design draft d (m)	0.135
Displacement ∇ (m^3)	0.0833
Block coefficient C_{bpp}	0.7419
Midship coefficient C_m	0.9912

Table 3 Principal dimensions of a propeller model

diameter(mm)	80.00
pitch ratio	0.800
number of blade	4
expanded area ratio	0.700
boss ratio	0.300
rake angle(deg)	5.00
sectional shape	MAU

(push-type)”, “pull 型 (pull-type)” と呼ぶ。push 型と pull 型とは、POD の向きが 180(deg) 反転している。この3つについて水槽試験を行う。Fig.3に、オリジナル、pull 型、push 型の船尾の様子を示す。POD 推進器を支えるストラットは円筒形である。また、pull 型と push 型については、POD 推進器を模擬するため、下部に三角形のフィンをつけることとした。Table 3に模型プロペラ (代用プロペラ) の主要目を示す。

3.2 座標系

Fig.4に使用する座標系を示す。空間に固定された座標系 $O-X_0Y_0Z_0$ と船体に固定された座標系 $o-xyz$ の2つの座標系を考える。 o は船のミッドシップに取り、船首方向に x 軸、鉛直下向きに z 軸、横方向に y 軸を取る。ここで、 U は船速、 u は前後方向の速度、 v は横方向の速度、 ψ は方位、 β は船体斜航角、 r は回頭角速度である。

2つの POD 推進器のうち、右舷側に装着した POD 推進器を POD1、左舷側に装着した POD 推進器を POD2 と呼ぶ。 T_{x1} , T_{x2} は POD 推進器が発生する前後力、 T_{y1} , T_{y2} は POD 推進器に作用する横力を表す。船体固定座標系における POD1 の位置を (x_T, y_T) と表す。具体的には、POD のプロペラ軸と POD ストラット中心軸の交点の位置で代表させることとし、プロペラ位置とは異なる点に注意が必要である。また δ_1 , δ_2 は首振り角を意味する。ただし、本論文では通常航行時の操船を主な対象とするので、左右舷の POD 首振り角は同一とし、単に δ と表記する。

3.3 計測項目

水槽試験は、広島大学工学部の船型試験水槽で実施された。流体力に関する計測項目は、船体に働く前後力 X 、横力 Y 、船のミッドシップ周りの回頭モーメント N 及び左右の POD に働く前後力 T_{x1} , T_{x2} 、横力 T_{y1} , T_{y2} である。POD に作用す

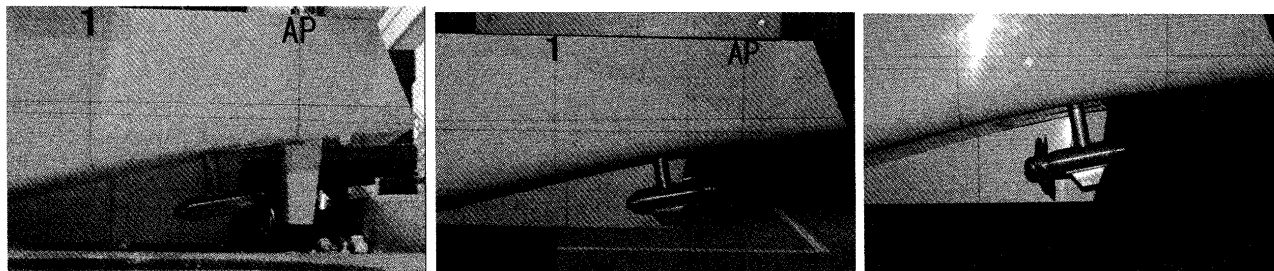


Fig. 3 Comparison of three stern arrangements (left:original, middle:push-type, right:pull-type)

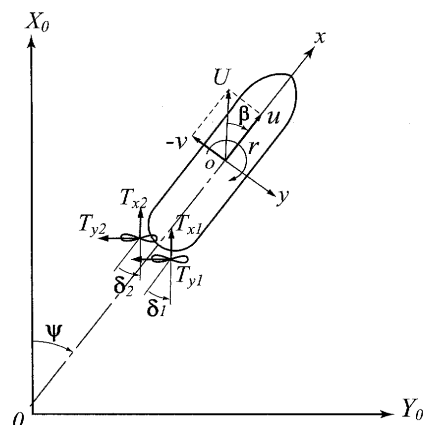


Fig. 4 Coordinate systems

る流体力は、POD 装置の上部に備えた 3 分力計により計測した。従って、POD ストラットを含む、POD 装置全体に作用する流体力を計測することとなる。本研究では、模型船の船速 $U_0 = 1.226(\text{m/s})$ (フルード数 $F_{nwl} = 0.26$) におけるシップポイントでのプロペラの回転数をベースとした。

計測された流体力は、原則として、力については $(1/2)\rho L_{pp} dU^2$ で、モーメントについては $(1/2)\rho L_{pp}^2 dU^2$ で除して無次元化することとした。 ρ は水の密度である。肩字 ' の付いた流体力は、この方法で無次元化されたことを意味する。

3.4 試験の種類

POD 推進器の単独特性試験、定常首振り角試験、CMT 試験の 3 つを実施した。

POD 推進器の単独特性試験では、シップポイントにおけるプロペラ回転数において、船速を種々変更させ、前進常数を変化させた。さらに、首振り角 $\delta = -35 \sim 35(\text{deg})$ の範囲を $5(\text{deg})$ 刻みで変化させて、POD 装置全体に作用する前後力と横力を計測した。push 型と pull 型の 2 つについて試験を実施した。Fig.3 から分かるように、本船の POD 推進器は船尾流れに沿うように装備され、プロペラの軸方向が若干傾斜している。ただ、この傾斜角は小さいため、POD 推進器の単独特性試験では付けないものとした。

定常首振り角試験とは、模型船に POD 推進器模型を装着させ、push 型と pull 型のそれぞれにおいて、首振り角をつけた状態で直進運動させた場合の流体力を計測する試験である。オリジナル「千祥」の試験においては、POD 推進器の首振り角の代わりに舵角を変化させる。水槽試験では、プロペラの回転数を $U_0 = 1.226(\text{m/s})$ におけるシップポイントとし、 $U = 1.226, 0.920, 0.613(\text{m/s})$ ($U/U_0 = 1.0, 0.75, 0.5$) と変化させた。左

右舷において同一の首振り角 (舵角) をとることとし、 $\delta = -35 \sim 35(\text{deg})$ の範囲を $5(\text{deg})$ 刻みで変化させた。

CMT 試験とは、「Circular Motion Test」のことであり、模型船を定常的に旋回運動させることにより斜航運動・円弧運動が組み合わさったときの流体特性を求める試験である。船速は $U_0 = 1.226(\text{m/s})$ とし、原則として、プロペラは回転させた状態で試験を行った。ミドシップ位置での斜航角は $\beta = -20 \sim 20(\text{deg})$ の範囲を $5(\text{deg})$ 毎、また無次元化された旋回角速度は $r' = -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2$ と変化させた。なお、 $r' = r L_{pp}/U$ である。また、push 型においてプロペラを取り除いた状態 (ストラットは残る) での水槽試験を追加した。この状態を「push ペラ無型 (push-NP)」と呼ぶ。

4. 船体に作用する流体力特性の比較

まず、オリジナル「千祥」と POD 船 (pull 型と push 型) に作用する流体力特性を比較し、操舵時の船に作用する流体力や操縦流体力微係数について議論する。なお、「操舵」という言葉は、POD 装置の首振りという意味を含むこととする。

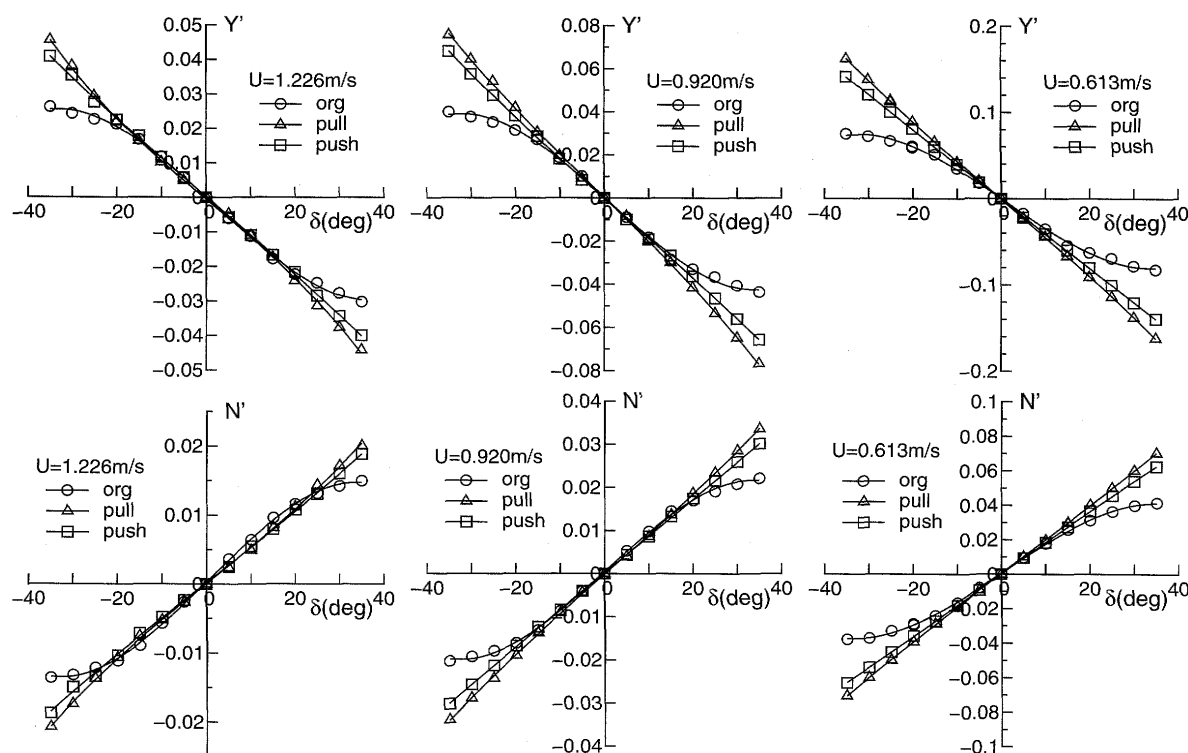
4.1 操舵による横力と回頭モーメント

Fig.5 に、定常首振り角試験によって得られた船体に作用する無次元化された横力 Y' と回頭モーメント N' を示す。横軸には首振り角 (舵角) δ をとっている。小舵角時には、オリジナルと POD 船 (push 型, pull 型) の流体力特性は似ているものの、大舵角時には、オリジナルは舵角に対する流体力の傾きが小さくなるのに対し、POD 船は小さくならない、というように流体力の傾向が異なる。その結果、POD 船はオリジナル船に比べ、大舵角時に大きな操舵力を発生する。この傾向は、船速が変わり、プロペラ荷重度が変わっても同じである。具体的には $U = 1.226(\text{m/s})$, $\delta = 35(\text{deg})$ の時に、push 型では約 32%, pull 型では約 46%, オリジナルよりも横力が増加している。また、pull 型は push 型より約 14% 増加する。

4.2 操縦流体力微係数と針路安定性

Fig.6 に、オリジナル, pull 型, push 型の CMT 試験の結果を示す。横軸に船体ミドシップにおける斜航角 β をとり、縦軸に船に作用する力とモーメントの無次元値 X', Y', N' をとっている。

オリジナル, pull 型, push 型 3 種の差異を明確にするため、計測結果から流体力微係数を導出して比較する。CMT 試験によって計測される流体力の無次元値 X', Y', N' は次のような微

Fig. 5 Lateral force and yawing moment acting on ship model in steered condition ($\beta = 0$)

係数表示で表される⁵⁾。

$$\left. \begin{aligned} X' &= X'_0 \cos^2 \beta + X'_{\beta\beta} \beta^2 + X'_{\beta r} \beta r' + X'_{rr} r'^2 \\ Y' &= Y'_\beta \beta + Y'_{rr} r' + Y'_{\beta\beta\beta} \beta^3 + Y'_{\beta\beta r} \beta^2 r' \\ N' &= N'_\beta \beta + N'_{rr} r' + N'_{\beta\beta\beta} \beta^3 + N'_{\beta\beta r} \beta^2 r' \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ただし、

$$\begin{aligned} X'_{\beta r} &= X'_{\beta r} - m' - m'_y \\ Y'_{rr} &= Y'_{rr} - m' - m'_x \end{aligned}$$

ここで、 $X'_{\beta\beta}$, $X'_{\beta r}$, X'_{rr} , Y'_β , Y'_{rr} , $Y'_{\beta\beta\beta}$, $Y'_{\beta\beta r}$, N'_β , N'_{rr} , $N'_{\beta\beta\beta}$, $N'_{\beta\beta r}$ が操縦流体力微係数である。 $X'_{\beta r}$ と Y'_{rr} の項には、慣性力成分 (船の質量 m や付加質量 m_x, m_y による成分) が混入することに注意が必要である。Table 4に最小自乗法で得られた操縦流体力微係数の比較を示す。この表には、オリジナル, pull 型, push 型に加えて, push ペラ無型における結果も含む。CMT 試験は, push ペラ無型の結果を除き, プロペラを作動させた条件下で実施されているので, オリジナル, pull 型, push 型における流体力微係数にはプロペラもしくは舵の影響を含むことに注意が必要である。得られた微係数のフィッティング精度を確認するため, (1) 式による計算結果を Fig.6に示している。精度は十分であることが分かる。

次に, CMT 試験で得られた線形流体力係数を用いて, 次式で定義される針路安定性指数 C を算出する。

$$C = \frac{N'_{rr}}{Y'_{rr} - m' - m'_x} - \frac{N'_\beta}{Y'_\beta} \quad (2)$$

C が正のとき, 船は針路安定と見なせる。Table 4には, この C の値も示している。オリジナルの C はわずかに負であるものの,

他と比較すると値が最も大きい。実際の運航では「千祥」に針路不安定に関する不具合は発生しておらず, C は負であるものの問題のないレベルであると考えられる。このオリジナルの C を基準とすれば, 研究の主対象である POD 船の push 型, pull 型はより針路不安定となっていることが分かる。これは舵を取り払ったためであり, 舵は針路安定性を確保する上で重要であることが分かる。push 型と pull 型を比較すると, pull 型のほうがわずかに針路安定性に優れている。これは pull 型の場合には, 円筒状の POD ケーシング部ならびに POD 下部の三角フィンがプロペラ後流中における舵のような役割をするためと考えられる。また, push 型と push ペラ無型を比較することにより, 針路安定性に及ぼすプロペラの影響が分かる。プロペラをつけている push 型のほうが C の値が大きく, プロペラは針路安定性を増す効果のあることが分かる⁶⁾⁷⁾。

Table 4 Hydrodynamic derivatives on maneuvering and course stability index

symbol	original	push-NP	push-type	pull-type
$X'_{\beta\beta}$	-0.0061	-0.0713	-0.0452	-0.0232
X'_{rr}	-0.0256	-0.0369	-0.0295	-0.0159
$X'_{\beta r}$	-0.5343	-0.4632	-0.4870	-0.4840
Y'_β	0.4384	0.4241	0.4295	0.4369
Y'_{rr}	-0.1996	-0.2143	-0.2024	-0.2079
$Y'_{\beta\beta\beta}$	0.9751	1.1112	1.0872	1.1575
$Y'_{\beta\beta r}$	1.1579	1.4395	1.1272	0.9757
N'_β	0.1838	0.1778	0.1813	0.1750
N'_{rr}	-0.0700	-0.0588	-0.0586	-0.0611
$N'_{\beta\beta\beta}$	0.3541	0.3486	0.3760	0.3751
$N'_{\beta\beta r}$	-0.5825	-0.6335	-0.7011	-0.6814
C	-0.0661	-0.1447	-0.1325	-0.1067

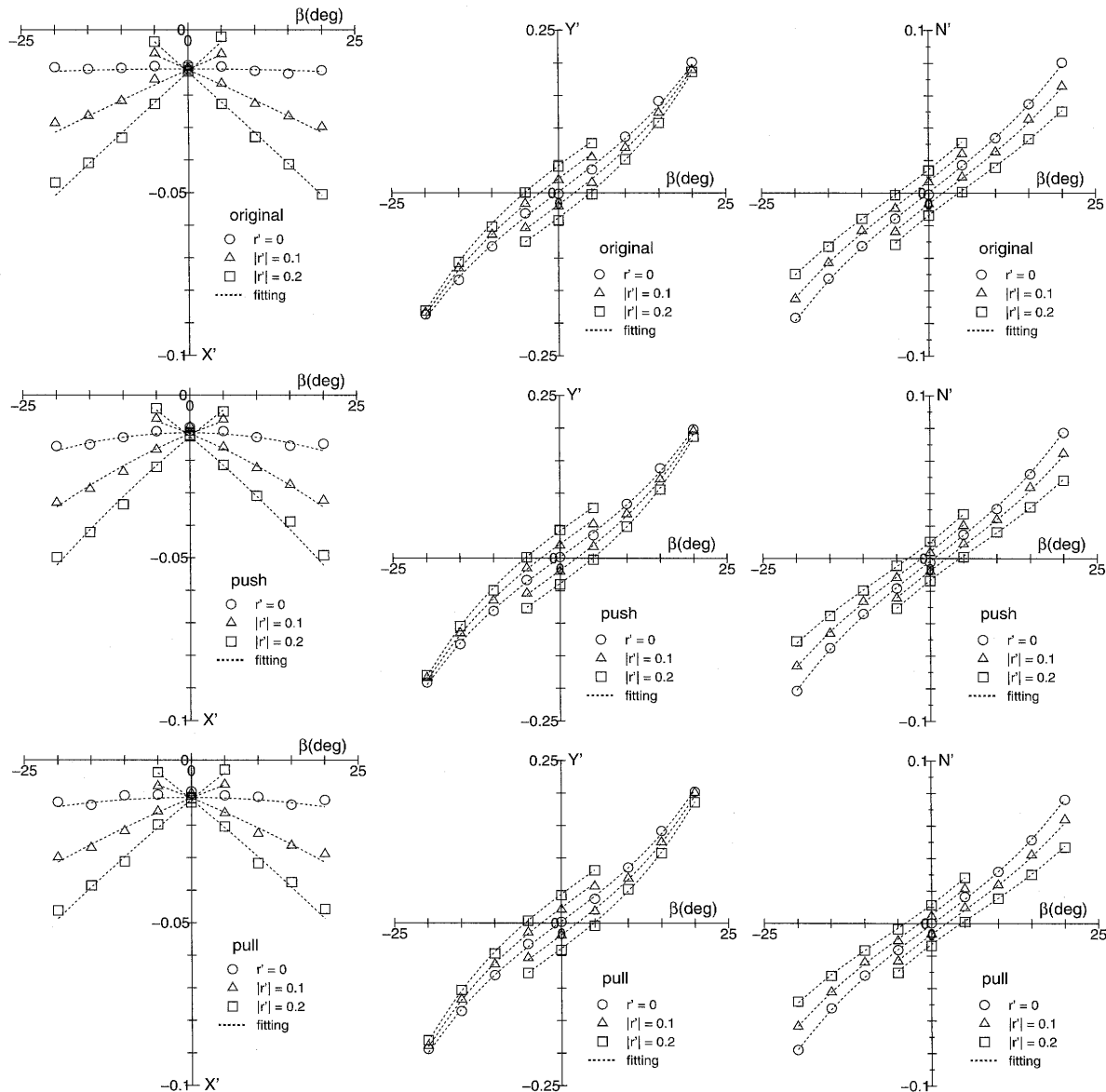


Fig. 6 Circular Motion Test results: forward force X , lateral force Y and yawing moment N acting on ship model

以上をまとめると、次のようになる。首振り式 POD 推進器を舵の代わりにした場合、大舵角時の操船力は舵無し POD 船 (push, pull 型) の方が優れている。一方、舵無し POD 船 (push, pull 型) は、オリジナル船と比べると、針路不安定性が増加する。push 型と pull 型を比較すると、pull 型の方が操船力に優れ、舵を無くしたことによる針路不安定性悪化の影響も小さい。

5. 操舵による POD 推進器の流体力特性

本章では、水槽試験結果を基に、POD 推進器の流体力特性について述べ、操縦運動シミュレーション計算における数学モデルについて考える。このような流体力の数学モデルに関する研究例として、Haraguchi 等¹⁾、佐々木²⁾、Woodward 等⁸⁾の研究がある。彼らは、POD 推進器に作用する流体力モデルを考えると、プロペラによる流体力成分とストラット部に作用する流体力成分の 2 つに分離している。本水槽試験においては、模型船が

比較的小型ということもあり、そのような成分に分離することが困難であった。ここでは、プロペラとストラット部を一体として流体力のモデル化を行う。なお、POD 装置全体に作用する前後力と横力を、単に推力と横力と呼ぶ。

5.1 POD 推進器の単独特性試験結果

Fig.7に、首振り角 0 の状態における POD 推進器の推力特性試験結果を示す。ここでは、左舷側プロペラ (POD2) の結果のみを示している。図の横軸は前進常数であり、 $J = u/(n_P D_P)$ と定義される。 u は船の前進速度、 n_P はプロペラ回転数、 D_P はプロペラ直径である。また、縦軸は推力係数であり、 $K_{x2} = T_{x2}/(\rho n_P^2 D_P^4)$ と定義される。図には、pull 型と push 型の 2 つの結果を示している。pull 型の推力係数は、push 型のそれよりも、約 0.5% 大きなものとなった。この K_{xi} は $K_{xi} = a_0 + a_1 J + a_2 J^2$ と J の 2 次式で表示することとし、そのときの係数 a_0, a_1, a_2 は、Table 5 に示す通りとなった。

次に、前進速度 $U_0 = 1.226(\text{m/s})$ とし、プロペラ回転数を一

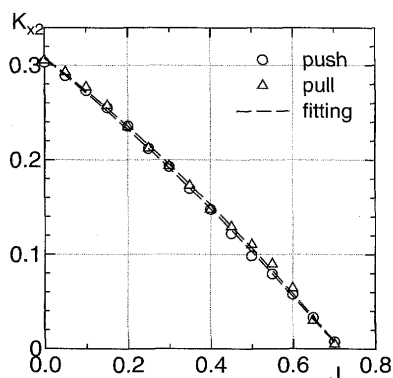


Fig. 7 Thrust open water characteristic (for POD2)

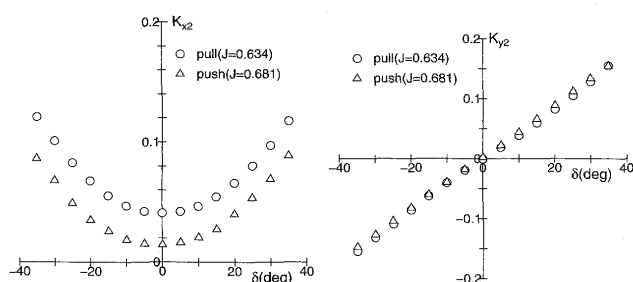


Fig. 8 Thrust and lateral force open water characteristics in steered condition (for POD2)

Table 5 Coefficients of thrust open water characteristics

	a_0	a_1	a_2
pull-type for POD1	0.306	-0.348	-0.115
pull-type for POD2	0.317	-0.341	-0.112
push-type for POD1	0.303	-0.321	-0.204
push-type for POD2	0.293	-0.365	-0.108

定として、首振り角 δ を種々変更した試験を行った。Fig. 8に、首振り角に対する POD 推進器の推力特性と横力特性の試験結果を示す。横力係数は、推力と同じく、 $K_{y2} = T_{y2} / (\rho n_P^2 D_P^4)$ と定義した。図には、pull 型と push 型の 2 つの結果を示している。 K_{x2} は首振り角の絶対値の増加とともに、推進器に流入する速度が遅くなるため、顕著に大きくなる。 K_{y2} は首振り角にほぼ比例することが分かる。 K_{y2} は push 型と pull 型において、大きな差異は見られなかった。

ここで、首振り角が 0 のときの POD 推進器の推力特性を用いて、操舵時の推力特性を推定することを考える。首振り角 δ が付くと、POD 推進器への幾何学的な流入速度は $u \cos \delta$ となる。さらに、 δ に修正係数 C_δ を導入して、次式で定義される前進数を考える。

$$J_x = \frac{u \cos(C_\delta \delta)}{n_P D_P} \quad (3)$$

この J_x を横軸にとり、 $K_{xi} = a_0 + a_1 J_x + a_2 J_x^2$ の式を用いて計算した推力係数を図示したものが、Fig. 9の左図である。 $C_\delta = 1$ では、推力係数の計算値は実験値との一致度が劣るものの、 $C_\delta = 1.2$ とすることにより、計算値が実験値と良い一致

を示すようになる。これは、首振り時の POD 推進器には、幾何学的な流入角よりも大きな角度で流れがプロペラに流入していることを意味する。なお、pull 型では $C_\delta = 1.2$ 、push 型では $C_\delta = 1.15$ において、計算と実験が最も良い一致を示した。

操舵時の横力係数についても、同様に

$$J_y = \frac{u \sin(C_\delta \delta)}{n_P D_P} \quad (4)$$

を定義して、この J_y を横軸にとって表すと、Fig. 9の右図のようになる。そのとき、横力係数は $K_{yi} = b_1 J_y$ という形で表示すると、係数 b_1 は Table 6に示す通りとなった。pull 型の b_1 は左右舷とも push 型よりやや大きめの値となっている。これは pull 型の場合には、プロペラ後流中に円筒状の POD ケーシング部ならびに POD 下部の三角フィンが存在し、それらが横力を発生するためと考えられる。

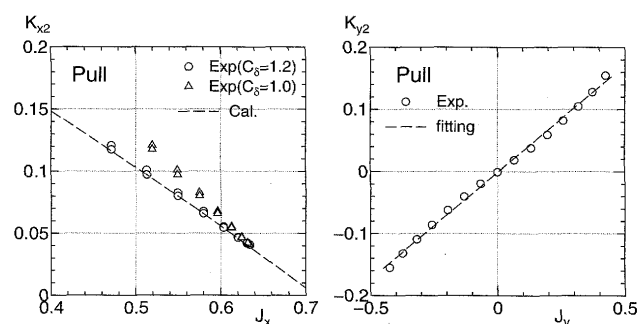


Fig. 9 Comparison of thrust and lateral force open water characteristics in steered condition

Table 6 Coefficient of lateral force open water characteristics

	b_1
pull-type for POD1	0.337
pull-type for POD2	0.344
push-type for POD1	0.307
push-type for POD2	0.335

5.2 直進航行時の操舵による流体力

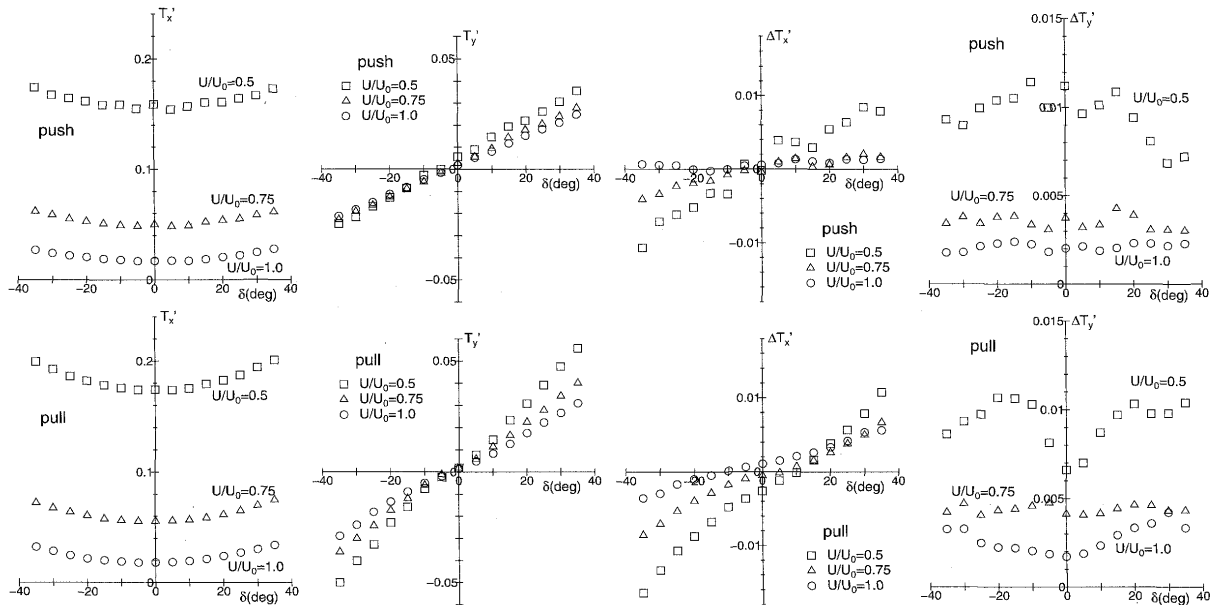
次に、直進航行する船の船後状態において POD 推進器が作動する場合の流体力について考える。

(1) 操舵時の船体に作用する流体力成分

定常首振り角試験で計測される船に作用する流体力 X, Y, N と、2 基の POD に作用する流体力 $T_{x1}, T_{y1}, T_{x2}, T_{y2}$ との間には、力ならびにモーメントの釣り合いの条件から、次式が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} X &= (1-t)(T_x \cos \delta - T_y \sin \delta) \\ Y &= -(1+a_Y)(T_x \sin \delta + T_y \cos \delta) \\ N &= -(1+a_N)[(\Delta T_x \cos \delta - \Delta T_y \sin \delta)y_T \\ &\quad + (T_x \sin \delta + T_y \cos \delta)x_T] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここで、 (x_T, y_T) は右舷側に装着された POD 推進器位置の座標である。 t は推力減少率、 a_Y は操舵による横力の増加係数、 a_N は操舵による回頭モーメントの増加係数である。 T_x は左右 2

Fig. 10 Measured results of T_x , T_y , ΔT_x and ΔT_y

つの POD に作用するトータル推力, T_y は左右 2 つの POD に作用するトータルの横力であり, 次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} T_x &= T_{x1} + T_{x2} \\ T_y &= T_{y1} + T_{y2} \\ \Delta T_x &= T_{x1} - T_{x2} \\ \Delta T_y &= T_{y1} - T_{y2} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

直進航行時に操舵する船に作用する流体力は, T_x , T_y , ΔT_x , ΔT_y を組み合わせることによって表示できる。

Fig.10に, 舵角 δ に対する T'_x , T'_y , $\Delta T'_x$, $\Delta T'_y$ の計測結果を示す。 $\Delta T'_x$, $\Delta T'_y$ は, T'_x , T'_y と比較して値が小さく, 第一近似として無視できることが分かる。これ以降は, ΔT_x と ΔT_y を無視して, T_x と T_y についてのみ取り扱う数学モデルを考えることとする。

(2) 船後状態における推力と横力の数学モデルとその検証

先に述べた方法を応用して, 船後で作動する POD 推進器の T_x と T_y を推定する。具体的には, (3)(4) 式において, 有効係数 w_P を導入する。

そのとき, POD 推進器の推力 T_x は次式で表される。

$$T_x = \sum_{i=1}^2 \rho n_P^2 D_P^4 K_{xi}(J_x) \quad (7)$$

ただし,

$$J_x = \frac{u(1-w_P)\cos(C_\delta\delta)}{n_P D_P} \quad (8)$$

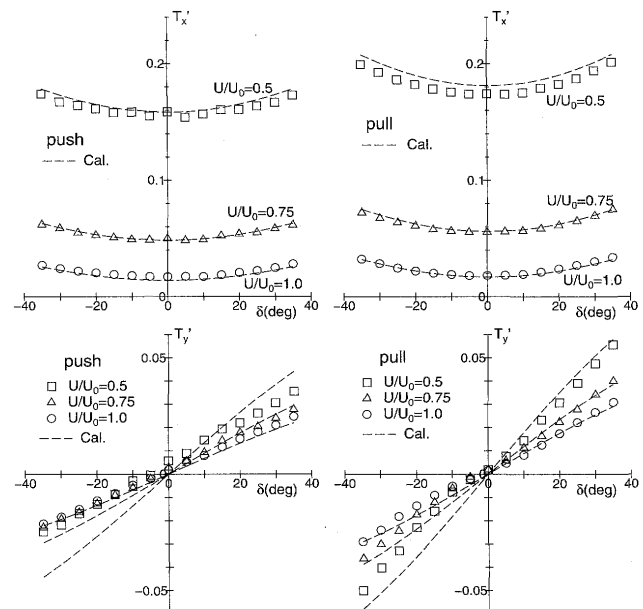
また, POD 推進器の横力 T_y は次式で表す。

$$T_y = \sum_{i=1}^2 \rho n_P^2 D_P^4 K_{yi}(J_y) \quad (9)$$

ただし

$$J_y = \frac{u(1-w_P)\sin(C_\delta\delta)}{n_P D_P} \quad (10)$$

推力係数 K_{xi} や横力係数 K_{yi} は, 先に求めた a_0, a_1, a_2, b_1 の値を用いて推定できる。Fig.11に, 以上の諸式を用いて計算した T_x , T_y と水槽試験結果の比較を示す。 T_x は, pull 型, push 型において, 実用上の精度で推定できていることが分かる。 T_y は $U/U_0 = 0.5$ のような荷重度の大きなところで, 推定結果が大きめであるが, 通常航行時の荷重度のところ ($U/U_0 = 1.0$) では, pull 型, push 型ともに, 実用上の精度で推定可能である。

Fig. 11 Comparison of T_x and T_y in calculation and experiment

(3) 操舵時の横力と回頭モーメントに関する船体・POD 推進器の干渉係数

POD 船の操舵時の横力と回頭モーメントに関する船体・POD 推進器の干渉係数 a_Y , a_N について考える。(5) 式を次のように

書き換える。

$$\left. \begin{aligned} Y &= (1 + a_Y)Y_T \\ N &= (1 + a_N)N_T \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

ただし、POD 推進器に発生した流体力成分を意味する Y_T, N_T は、近似的に

$$\left. \begin{aligned} Y_T &= -(T_x \sin \delta + T_y \cos \delta) \\ N_T &= -(T_x \sin \delta + T_y \cos \delta)x_T \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

と表す。(11) 式より、 Y_T, N_T に対する Y, N の傾きが、 $1 + a_Y, 1 + a_N$ となることが分かる。Fig.12に、 Y'_T, N'_T を横軸にとり、縦軸に船に作用する流体力 Y', N' をとった図を示す。 Y'_T, N'_T に対する Y', N' はほぼ直線となり、首振り角にかかわらず a_Y, a_N は定数とみなされることが分かる。得られた a_Y, a_N を Table 7に示す。pull 型の a_Y, a_N は小さく、干渉影響による操船力の増加はわずかである。push 型の a_Y, a_N は、pull 型のそれらと比べて、値が大きくなっている。本船の場合、POD 船における横力と回頭モーメントに関する船体・POD 推進器の干渉は、あまり顕著でないと考えられる。

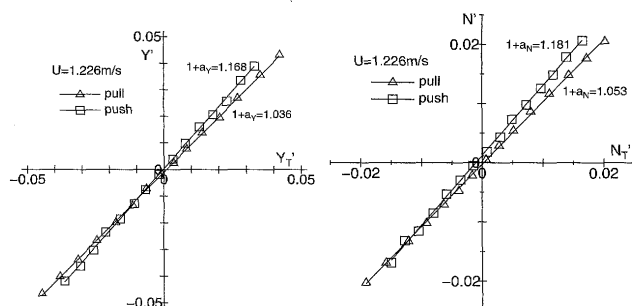


Fig. 12 Lateral force and yawing moment acting on ship hull versus Y'_T and N'_T

Table 7 Analysis values of a_Y and a_N ($U/U_0 = 1.0$)

symbol	push-type	pull-type
a_Y	0.168	0.036
a_N	0.181	0.053

5.3 操縦運動時の操舵による流体力

次に、操縦運動時における船の船後状態において POD 推進器が作動する場合の流体力について考える。

(1) 操縦運動時の推力と横力の数学モデルとその検証

POD 推進器に流入する船体固定系における長さ方向ならびに横方向の速度成分 (u_P, v_P) は次のように表される。

$$u_P = (1 - w_P)u \quad (13)$$

$$v_P = -U\gamma_P\beta_P \quad (14)$$

ここで、 β_P は POD 推進器のプロペラ位置での操縦運動による幾何学的な流入角であり、 $\beta_P \equiv \beta - x'_T r'$ と表される。 x'_T は推進器位置の x 座標を L_{PP} で除したものである。 γ_P は船体のみによる整流係数¹⁰⁾と呼ぶべき係数であり、POD 推進器のプロ

ペラ位置での操縦運動による幾何学的な流入角に対する修正を意味し、通常 1.0 よりも小さな正の値をとる。 w_P は POD 推進器に流入する速度成分の伴流率を意味する。 w_P は操縦運動によって変化することが知られており、次のように表す⁹⁾。

$$w_P = w_{P0} \exp[C_1 \beta_P^2] \quad (15)$$

ここで、 w_{P0} は直進時の伴流率であり、 β_P の関数として表す。 C_1 は特性を表す定数であり、CMT 試験より求める。

そのとき、POD 推進器のプロペラ軸方向の流入速度成分 u_A とその横方向成分 v_A は、幾何学的に次のように表される。

$$u_A = u_P \cos(C_\delta \delta) - v_P \sin(C_\delta \delta) \quad (16)$$

$$v_A = u_P \sin(C_\delta \delta) + v_P \cos(C_\delta \delta) \quad (17)$$

従って、POD 推進器によるトータルの推力 T_x は次式で表される。

$$T_x = \sum_{i=1}^2 \rho n_P^2 D_P^4 K_{xi}(J_x) \quad (18)$$

ただし、

$$J_x = \frac{u_A}{n_P D_P} \quad (19)$$

また、POD 推進器によるトータルの横力 T_y は次式で表す。

$$T_y = \sum_{i=1}^2 \rho n_P^2 D_P^4 K_{yi}(J_y) \quad (20)$$

ただし、

$$J_y = \frac{v_A}{n_P D_P} \quad (21)$$

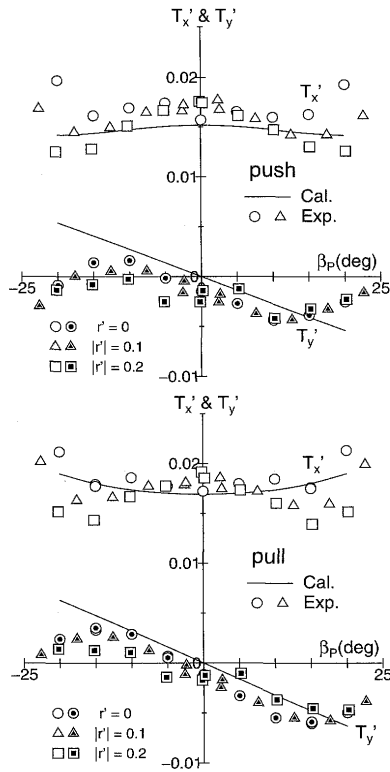
述べた数学モデルの検証のため、Fig.13に、斜航・旋回時の T'_x と T'_y の計算結果を水槽試験結果と比較する。計算において、 γ_P の値は、pull 型、push 型ともに 0.4 とした。計算結果は、push 型、pull 型ともに、水槽試験結果と略一致している。しかし、詳細に見ると差異も見られる。例えば、 β_P の絶対値の大きなところでの T'_x の計算精度があまり良くないようである。これは β_P の絶対値の大きなところでの w_P の推定精度が良くないことに起因する。また、計算における T'_y の絶対値は、 β_P に比例して線形的に増加するが、水槽試験における T'_y は、 β_P に対して非線形的に変化するようであり、傾向が異なる。これは、 γ_P が一定値ではなく、 β_P とともに変化する可能性を示唆するものである。数学モデルの精度向上についてのさらなる検討が必要であろう。

(2) 針路安定性に及ぼす POD 推進器の影響に関する考察

ここで述べた数学モデルをもとに、POD 推進器の操舵力が船の針路安定性に及ぼす影響について考える。POD 推進器による横力と回頭モーメント (Y_P, N_P) は、(11) 式より、近似的に次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} Y_P &= -(1 + a_Y)(T_x \sin \delta + T_y \cos \delta) \\ N_P &= -(1 + a_N)(T_x \sin \delta + T_y \cos \delta)x_T \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

ここで、首振り角 δ 、斜航角 β 、回頭角速度 r は微小量 ($O(\varepsilon)$) と仮定する。また、左右の POD 推進器の流体力特性は同一であ

Fig. 13 Comparison of T_x and T_y versus β_P

ると仮定する。さらに、横力については $(1/2)\rho L_{pp} d U^2$ で、回頭モーメントについては $(1/2)\rho L_{pp}^2 d U^2$ で除して無次元化すると次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} Y'_P &= Y'_\delta \delta + \Delta Y'_\beta \beta + \Delta Y'_r r' + O(\varepsilon^2) \\ N'_P &= N'_\delta \delta + \Delta N'_\beta \beta + \Delta N'_r r' + O(\varepsilon^2) \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

ただし、

$$Y'_\delta = -4(1 + a_Y) \left(\frac{a_0}{J_0^2} + \frac{a_1 + b_1 C_\delta}{J_0} u'_P + a_2 u_P'^2 \right) \times \frac{D_P^2}{L_{pp} d} \quad (24)$$

$$N'_\delta = -4(1 + a_N) x'_T \left(\frac{a_0}{J_0^2} + \frac{a_1 + b_1 C_\delta}{J_0} u'_P + a_2 u_P'^2 \right) \times \frac{D_P^2}{L_{pp} d} \quad (25)$$

$$\Delta Y'_\beta = 4(1 + a_Y) \frac{b_1 \gamma_P}{J_0} \frac{D_P^2}{L_{pp} d} \quad (26)$$

$$\Delta Y'_r = -4(1 + a_Y) x'_T \frac{b_1 \gamma_P}{J_0} \frac{D_P^2}{L_{pp} d} \quad (27)$$

$$\Delta N'_\beta = 4(1 + a_N) x'_T \frac{b_1 \gamma_P}{J_0} \frac{D_P^2}{L_{pp} d} \quad (28)$$

$$\Delta N'_r = -4(1 + a_N) x_T'^2 \frac{b_1 \gamma_P}{J_0} \frac{D_P^2}{L_{pp} d} \quad (29)$$

なお、 $u'_P = u_P/U$ 、 $J_0 = U/(n_P D_P)$ である。 Y'_δ と N'_δ はいわゆる操舵による横力ならびに回頭モーメント係数であり、推力特性を表す a_0, a_1, a_2 と深い関係がある。一方、船の針路安定性に影響を及ぼす $\Delta Y'_\beta, \Delta Y'_r, \Delta N'_\beta, \Delta N'_r$ の4つは、 a_0, a_1, a_2 に無関係であることが分かる。これは、PODの推力特性は針路

安定性に全く寄与しないことを意味する。一方、4つの微係数に大きな影響を及ぼすのが γ_P と b_1 である。 γ_P は通常型船舶における整流係数と同様な働きを示し¹¹⁾、 γ_P の増加は針路安定側への変化となる。 b_1 はPOD推進器の横力特性を表し、それが増加することにより針路安定側への変化となる。同じ船型でありながら、オリジナルと比べて本POD船の針路安定性が劣る理由は、本POD船の b_1 が小さいためと考えられる。 b_1 を大きくするには、POD下の三角フィンのサイズをより大きくすることや、ストラットを舵のような形状に変更すること等が有効と考えられる。また、全ての微係数は J_0 に反比例、すなわちプロペラ荷重度に比例する。プロペラ荷重度が増加すると、針路安定性も向上することが分かる。

6. シミュレーション計算による操縦運動の比較

前述のPOD推進器を備えた船に作用する流体力の数学モデルを用いて、pull型ならびにpush型のPOD推進器を備えた実船の操縦運動シミュレーション計算を実施し、オリジナル「千祥」の結果と比較した。シミュレーション計算では、surge, sway, yawの3自由度における運動方程式を数値的に解き、操縦運動を求めた。なお、オリジナル「千祥」の操縦運動シミュレーション計算結果は、試運転結果と良い一致を示すことをすでに確認している⁴⁾。

Fig.14に舵角(首振り角)35degにおける船の重心位置の旋回航跡の比較を示す。シミュレーション計算では、左右の旋回航跡は全く同一となるので、右旋回の結果だけを示している。そのときの旋回縦距(A_D)と旋回径(D_T)の比較をTable 8に示す。POD船(push型)の A_D は約11%、 D_T で約25%、オリジナルよりも小さくなり、POD船は旋回性能に優れていることが分かる。これは、オリジナルよりも針路安定性が劣ることに加えて、操舵力が増加したことによる。また、push型の旋回半径はpull型のそれよりもわずかに小さくなった。

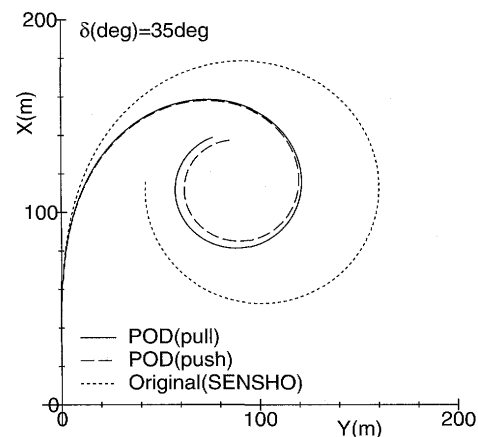
Fig. 14 Turning trajectory simulations ($\delta = 35\text{deg}$)

Fig.15に10/10ならびに20/20 zig-zag運動における首振り角と方位の計算結果の比較を、Table 8に行き過ぎ角(OSA)の比較を示す。POD船の行き過ぎ角は、オリジナル「千祥」よりも大きくなり、針路不安定化したことが分かる。これは、先述の通り、舵を無くしたことにより、操縦運動時の船体減衰力が小さ

Table 8 Comparison of turning indices and overshoot angles of zig-zag maneuvers

	original	push-type	pull-type	IMO-rule
A_D/L_{pp} for 35deg turning	3.09	2.72	2.73	4.5
D_T/L_{pp} for 35deg turning	2.77	2.05	2.07	5.0
1st OSA for 10/10zig-zag	7.2deg	12.6deg	12.5deg	10deg
2nd OSA for 10/10zig-zag	12.5deg	26.7deg	26.1deg	25deg
1st OSA for 20/20zig-zag	17.3deg	25.1deg	24.8deg	25deg

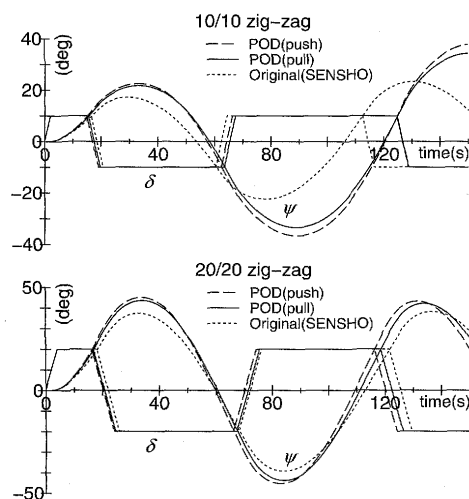


Fig. 15 10/10 and 20/20 zig-zag maneuver simulations

くなったためである。特に、POD船の10/10 zig-zag運動の第2行き過ぎ角が、オリジナルよりも顕著に大きい。一方、20/20 zig-zag運動の計算結果を見ると、オリジナル船とPOD船の差異が小さくなっている。これは、POD船の針路安定性がオリジナルよりも劣るにも関わらず、操船力の増加がそれを打ち消したためと考えられる。また、pull型の行き過ぎ角は、push型のそれよりもわずかながら小さくなった。以上の計算結果は、操縦流体力の計測結果から予想されたものと一致している。

Table 8にはIMO操縦性基準値(IMO-rule)を示している。POD船の旋回性能は全く問題ないことが分かる。一方、10/10 zig-zag性能については、push型、pull型ともに、IMOの基準値を数度ではあるが超えている。ここで対象としたPOD船は、push型、pull型ともに、針路安定性の改善が必要であることが分かる。

7. 結 言

本研究では、既存の電気推進船から舵を取り払い、首振り型POD推進器を備えた船舶(push型、pull型)についての操縦性流体力特性を水槽試験により把握した。次に、この計測結果をもとにPOD推進器に関わる流体力特性の計算モデルを作成して、操縦運動シミュレーション計算を実施し、首振り型POD推進器を備えた船舶の操縦性能の特徴を把握した。得られた知見をまとめると次の通りである。

- (1) 首振り式POD推進器を舵の代わりにした場合、大舵角時の操船力は舵無しPOD船(push型、pull型)の方が優れている。一方、舵無しPOD船(push型、pull型)は、オリジナル船と比べると、針路不安定性が増加する。push型

とpull型を比較すると、pull型の方が操船力に優れ、舵を無くしたことによる針路不安定性悪化の影響も小さい。

- (2) 操縦運動シミュレーション計算によると、舵無しPOD船(push型、pull型)は舵角35degにおける旋回性能が大きく向上する。その反面、zig-zag運動の行き過ぎ角が増加し、特に、首振り角の小さな10/10 zig-zagにおいてその傾向が顕著となる。push型とpull型を比較すると、pull型の方がわずかながら針路安定性に優れる。ここで対象としたPOD船は、10/10 zig-zag運動に関するIMO操縦性基準を満たさない結果となった。

このように、舵無しPOD船(push型、pull型)は、優れた旋回性能を示す反面、針路安定性に劣る面があることが明らかとなった。従って、舵無しPOD船の開発にあたっては、針路安定性の向上に十分留意する必要がある。そのためには、POD下の三角フィンのサイズをより大きくすることや、ストラットを舵のような形状に変更すること等が有効と考えられる。

本研究では、既存の電気推進船から舵を取り払い、固定型のPOD推進器を首振り型POD推進器に変更したとの設定の下で検討を行った。そのため、POD推進器がセンターステグに比較的近い位置に存在する。POD推進器自身や船の操縦性能に及ぼすセンターステグの影響については、その影響の有無を含め、今後検討を行う予定である。また、本論文中で実施したPOD船の操縦運動シミュレーション計算については、実験結果(実験試験もしくは自由航走模型試験)との比較による検証が行われていない。計算法の検証ならびにその精密化が今後の課題である。

謝 辞

本論文で述べた水槽試験結果に対し、広島電気推進船研究会の方々から、有益な御議論をいただいた。心よりお礼申し上げる。本論文で述べた水槽試験は、竹本慎司、堀内絵梨菜両君による広島大学卒業研究の一環として実施されたものである。本研究は文部科学省科学研究費(基盤研究(B)17360419)ならびに造船学術研究推進機構(REDAS)より交付金を受けたことを記し、関係各位に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) Haraguchi, T. and Nimura, T.: A Study on Maneuverability Standards for a Ship with a Pod Propulsion System, International Conference on Marine Simulation and Ship Maneuverability, MARSIM'03, Conference Proceedings, Vol.II, Kanazawa, Japan (2003), RB-3-1-RB-3-8
- 2) 佐々木紀幸: 第7章ポッド推進システム, 第5回船舶プロペラに関するシンポジウム, 日本船舶海洋工学会 (2005), pp.263-294

- 3) 塚田吉昭, 川並康剛, 原口富博, 加納敏幸, 榎野 純: ポッドと船体の干渉に関する模型実験, 平成 18 年度 (第 6 回) 海上技術安全研究所 研究発表会講演集 (2006), pp.179-180.
 - 4) 安川宏紀, 平田法隆, 田中 進, 小瀬邦治: 電気推進内航船「千祥」の操縦運動シミュレーション, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 第 6 号 (2008), 論文番号 2008S-G2-17, pp.279-282.
 - 5) 安川宏紀, 平田法隆, Koh Kho King, Krisana Punayangkool, 小瀬邦治: プッシャー・バージシステムの操縦流体力特性, 日本船舶海洋工学会論文集 第 5 号 (2007), pp.133-142.
 - 6) 小瀬邦治, 佐伯敏朗: 操縦運動の新しい数学モデルについて, 日本造船学会論文集 第 146 号 (1979), pp.229-236.
 - 7) Yasukawa, H.: Hydrodynamic Interactions among Hull, Rudder and Propeller of a Turning Thin Ship, 西部造船会々報 第 84 号 (1992), pp.59-83.
 - 8) Woodward, M. D., Clarke, D. and Atlar M.: On the Manoeuvring Prediction of POD Driven Ships, International Conference on Marine Simulation and Ship Maneuverability, MARSIM'03, Conference Proceedings, Vol.II, Kanazawa, Japan (2003), RB-7-1-RB-7-9.
 - 9) 平野雅祥: 初期設計段階における船の操縦運動計算法について, 日本造船学会論文集 第 147 号 (1980), pp.144-153.
 - 10) 湯室彰規: 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), pp.26-36.
 - 11) 芳村康男, 野本謙作: 増減速を伴う操縦運動の取扱いについて, 日本造船学会論文集 第 144 号 (1978), pp.57-69.
-