

浅水域における船のプロペラ逆転停止 性能について

正員 藤 野 正 隆* 正員 影 本 浩*
石 井 裕 司* 常 楽 弘 明**

Stopping Ability of a Ship in Shallow Water

by Masataka Fujino, *Member* Hiroshi Kagemoto, *Member*
Yuji Ishii Hiroaki Joraku

Summary

Stopping characteristics of a ship due to the reverse rotation of its propellers in a shallow water area are investigated. Extensive captive model tests are carried out in order to identify the characteristics of the hydrodynamic forces acting on the ship in its stopping manoeuvres. Experiments on the stopping manoeuvres using a free running ship model are also conducted. The time history of the behaviours of the ship as well as the macroscopic stopping characteristics such as the distance & the time consumed for the stopping are examined through the comparison with the corresponding data obtained in deep water. Finally numerical simulations of the stopping manoeuvres are carried out while using the experimentally determined hydrodynamic forces to see how accurate the prediction can be achieved. The possible causes for the discrepancies (although it is not very large) between the numerical simulation results and the experimental results are discussed.

1. 緒 論

船舶の航行安全確保の見地から船舶の操縦性能を代表する指標およびそれらに基準値を定めようとする動向が国際海事機構(IMO)をはじめ各種監督機関で検討されはじめていることは周知のとおりである。たとえば, 1 MO 海上安全委員会では操縦性能を代表する 6 種の性能を挙げ, 個々の船舶の設計の段階でこれらの性能を推定するよう指針をまとめている¹⁾。さらに, 1990 年 4 月に開催された IMO 設計設備小委員会では, これら指標に対する基準値を暫定的にとりまとめた。ただし, 停止性能については推定ならびに計測ともに困難であるという理由などから基準値の提案はなされなかった。

しかし, 輻輳した海域で緊急に停止する場合, 操船者が自船の停止性能を事前に十分承知しておくことは極めて重要である。このような見地から, IMO の動向に対応すべく組織された日本造船研究協会の RR742 研究委員会では, プロペラ逆転停止性能の推定法についても鋭意, 検討がすすめられてきた。

プロペラ逆転による停止性能の研究は, 当初, 専ら操船者の立場からの検討が主であったが, 超大型タンカーの出現を機に造船技術者の立場からの研究が我が国で精力的に行われた。しかし, 多くの研究は深水域における停止性能を扱ったもので, 浅水域や制限水路での停止性能を検討した例は少ない^{2,3)}。

著者らは RR742 研究委員会の活動の一環として数か年にわたってプロペラ逆転による停止性能の研究を行ってきた。文献〔3〕はその一部を報告したものであるが, その後も停止運動のシミュレーション計算法を改善するなど引き続き研究を行ってきた。本論文はその結果を取纏めたものであり, その構成は以下のとおりである。

最初に, 垂線間長 3.0 m の PCC 船模型を用いて実施した自由航走模型実験結果について述べる。本実験は, 主として停止性能に及ぼす水深の影響を調べる目的で計画されたもので, 水深のほか初期船速 U_0 , プロペラ逆転回転数 n_0 , 逆転整定時間 t_r および逆転発令時の回頭角速度 r_0 などを系統的に変化させた。実験結果の整理は停止時間, 停止距離, 停止時の横偏倚および方位角などが, これらのパラメータにどのように依存するかを深水と浅水で比較するとともに, プロペラ逆転発令から船体停止に到るまでの船体運動やプロペラ推力の時刻歴変化に対する水深の影響を

*東京大学工学部船舶海洋工学科

**日本 IBM(株)

検討することとした。

また、別途実施した詳細な各種拘束模型試験^{3,4)}によって明らかになった船体流体力やプロペラ逆転による制動力および回頭力のデータを用いて、停止運動の数値シミュレーションを実施した。本シミュレーションの目的は、自由航走模型実験で明らかになった停止性能に対する水深、船速、プロペラ逆転回転数、逆転整定時間、初期回頭運動などの定性的かつ定量的な影響を現状のシミュレーション計算でどの程度まで明らかにできるかを調査することである。したがって、停止に到るまでの過渡状態での船体運動とプロペラ推力の定量的な一致度等についての詳細な検討は、さらに今後の研究に残されたところもあるが、これについても可能な限り検討を加えることとした。

2. 自由航走模型実験

2.1 実験方法

2.1.1 供試模型

実験に使用した船型は RR 742 研究委員会での研究用に新たに設計された垂線間長 180 m の PCC 船で⁵⁾、供試模型は縮尺 1/60 の木製模型である。模型船の主要目を Table 1 に示す。

2.1.2 実験状態

初期船速 U_0 、プロペラ逆転回転数 n_0 、逆転整定時間 t_r 、初期回頭角度 r_0 および水深 H を次のように変えた。

(1) 水深 H

実験点数が膨大となるのを避けるため、水深は次の 2 種類とした。すなわち、水深 H と喫水 d の比 H/d を 16.7 と 1.3 とした。ただし、後述する拘束模型実験では 16.7 の代わりに 4.7 とした。これは拘束模型実験に使用する装置の制約のためであるが、従来の経験から $H/d=4.7$ であれば船体流体力に対する有限水深の影響は十分小さく、実際上は十分深いと考えてよい。

(2) 初期船速 U_0

想定実船の船速 6, 12, 19 ノットの船速に相当する $U_0=0.399, 0.797, 1.262$ m/sec とした。ただし、 $H/d=1.3$ の浅水域を 19 ノットの船速で航行することは非現実的であるこ

Table 1 Principal particulars of PCC ship model

Length between perpendiculars (L)	3.0000 m
Moulded breadth (B)	0.5367 m
Moulded draft (d)	0.1500 m
Displacement	132.94 kgf
Block coefficient (C_b)	0.550
Propeller diameter (D)	0.1067 m
Propeller pitch (P)	0.928 m
Number of blades	5
Direction of rotation	right
in forward motion	
Mass moment of inertia (I_{zz})	7.625 kgf·m·sec ²

とから計画の段階から割愛した。

(3) プロペラ逆転回転数 n_0

次項に述べる逆転整定時間と同様、実船に搭載される主機の種類等によって現実的な逆転回転数の値が存在するが、本研究では実船の航海速力 19 ノットに相当する正転回転数 110 rpm を参考にし、その 30, 50, 70 % にあたる回転数として、次のように定めた。すなわち、 $n_0=-4.26, -7.10, -9.94$ rps とした。

(4) 逆転整定時間 t_r

ある船速で航行中、プロペラ逆転を発令して所定の逆転回転数に到るまでの現実の経過は、たとえば搭載されている主機の種類などにより異なる。しかし、本研究では簡単化のため、プロペラ逆転発令とともに瞬時に回転数を 0 とし、直ちに逆方向に回転させはじめることとした。所定の回転数に到るまでは時間的に直線状に回転数を増加させた。このような回転数の制御は予めプログラム化した数値制御方式で行った。実験に用いた整定時間は模型の縮尺を考慮し、 $t_r=5, 10, 15$ sec とした。これらは想定実船に換算すると 38.7, 77.5, 116.2 sec に相当する。

(5) 初期回頭角速度 r_0

プロペラ逆転発令時の僅かな回転運動の存在が、どのように停止性能に影響するかを調べるため、逆転発令前に $\pm 5^\circ$ の操舵 (δ_0 とかく) (+: 右舵, -: 左舵) を行い、回頭角速度が十分発達したところでプロペラ逆転を発令することとした。ただし、逆転発令直前には舵角は 0° に戻すこととした。

以上の実験状態の組み合わせを Table 2 に示す。表中の欄は水槽の大きさの制約から船体停止までに到らず計測が完了できなかったケースを示す。

2.1.3 計測方法

実験の再現性を検証するため、前項に述べた U_0, n_0, t_r, δ_0 の各組み合わせについて複数回航走することとした。実

Table 2 Conditions of the free running model tests

(in deep water. $H/d=16.7$)

U_0	t_r	δ	0°			$+5^\circ$			-5°		
			n_0	n_0	n_0	n_0	n_0	n_0	n_0	n_0	n_0
0.399m/s (6 kt)	10 sec		-4.26 rps	-7.10 rps	-9.94 rps	-4.26 rps	-7.10 rps	-9.94 rps	-4.26 rps	-7.10 rps	-9.94 rps
	5 sec										
	15 sec										
0.797m/s (12 kt)	10 sec										
	5 sec										
	15 sec										
1.262m/s (19 kt)	10 sec										
	5 sec										
	15 sec										

(in shallow water. $H/d=1.3$)

U_0	t_r	δ	0°			$+5^\circ$			-5°		
			n_0	n_0	n_0	n_0	n_0	n_0	n_0	n_0	n_0
0.399m/s (6 kt)	10 sec		-4.26 rps	-7.10 rps	-9.94 rps	-4.26 rps	-7.10 rps	-9.94 rps	-4.26 rps	-7.10 rps	-9.94 rps
	5 sec										
	15 sec										
0.797m/s (12 kt)	10 sec										
	5 sec										
	15 sec										

験中、計測した諸量および計測方法を以下に述べるが、各航走における実験の手順は次のとおりである。

目的の船速に相当するプロペラ回転数でプロペラを正転させた後、曳航台車で所定の船速まで加速する。所定の船速に達したところで曳航を解除するとともに、オートパイロット装置で直進を保つ。その際、曳航台車上に設置した光学式精密追跡装置で模型船内に固定した光源を自動的に追跡することにより、曳航台車は常に模型船の直上を走行することとなる。曳航の解除後、2ないし3船長程直進したのち、オートパイロットを解除し所定の舵角 δ_0 を与える。回頭角速度がほぼ定常値に達したところで舵角を 0° に戻し、同時にプロペラを逆転させ、船体が停止し後進をはじめまで計測を続ける。

(1) 船位、船速、横流れ角

時々刻々の模型船の位置は、曳航台車の水槽内の位置に精密追跡装置から見た船の位置を加算することにより決定される。これと後述する船体方位角の連続記録より船体の前後および左右方向の速度 u, v を計算する。したがって、これらより船体の横流れ角 β も直ちに計算できる。

(2) 回頭角速度、船体方位角

回頭角速度はレートジャイロで検出し、その電気的信号をアナログ積分器で積分して方位角を求めた。この方法による方位角が実用上十分な精度を持つことは、レートジャイロを方位角目盛板を有する回転台の上に載せ、所定の角度だけ回転させたときの積分値と目盛板の読みとの対応を調べることにより確認した。

(3) プロペラ回転数、プロペラ推力

正転および逆転時のプロペラ推力はプロペラ動力計により、プロペラ回転数は動力計に内蔵された回転計によってそれぞれ検出した。

2.2 実験結果

自由航走模型実験のうち、最も広範に実験が行われた $U_0=0.797\text{ m/sec}$ (実船換算12ノット)の場合の結果をまとめてFigs. 1~5に示す。Figs. 1~3が深水の場合で、Figs. 4, 5が浅水の場合である。各図は実験によって求められたTrack reach, Head reach, Lateral deviation (横偏倚), Stopping time (停止時間) および Stopping angle (停止方位角) を逆転発令時の回頭角速度 r_0 に対して整理したものである。ただし、舵角 δ_0 が 0 でない場合は、逆転発令時の船体合速度の方向の前進距離でHead reachを、その方向に直角方向の変位をLateral deviationとして定義した、なお、Lateral deviationは進行方向から右方向への変位を正、左方向を負とした。また、停止方位角は逆転発令時から $u=0$ で定義した船体停止までの方位角変化を表す。

以下に実験結果から判明した事柄をまとめて記す。

2.2.1 深水域での停止性能

前述のように同一航走条件で複数回 (最低3回) 航走さ

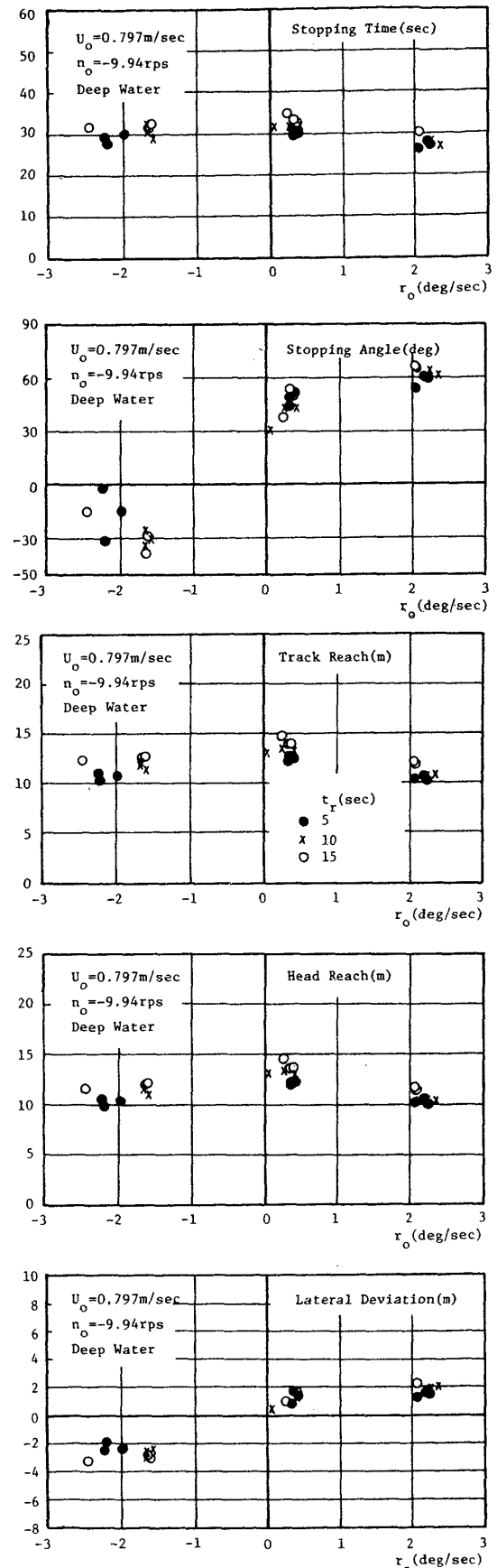


Fig. 1 Results of the free running model tests ($U_0=0.797\text{ m/sec}$, $n_0=-9.94\text{ rps}$, in deep water)

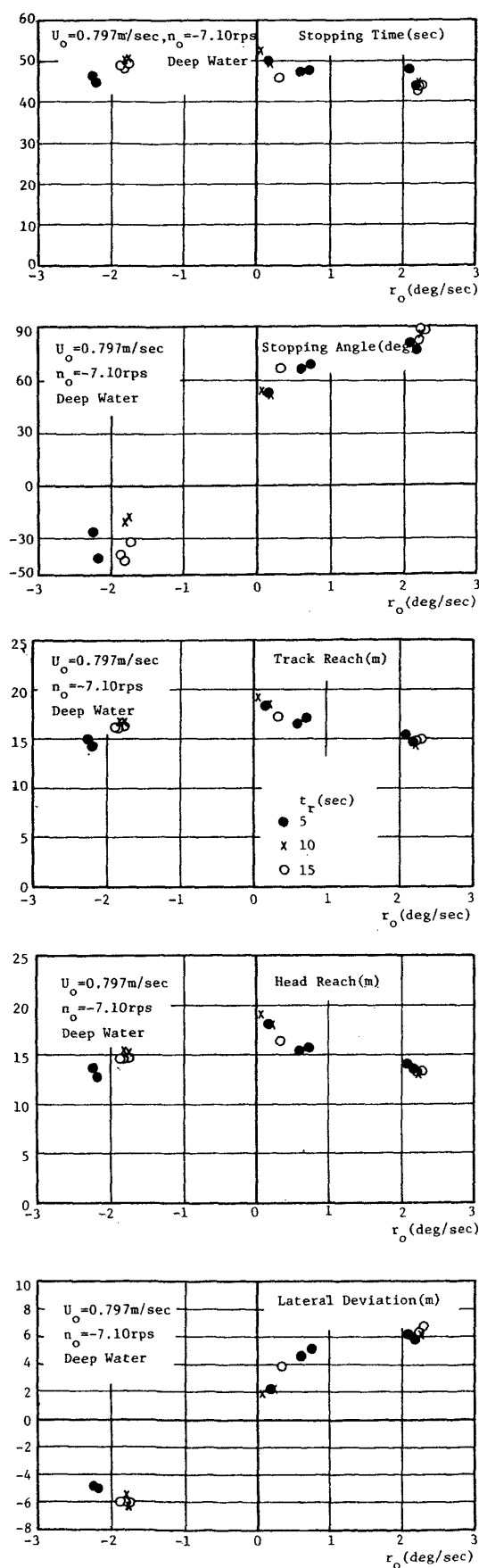


Fig. 2 Results of the free running model tests
($U_0 = 0.797 \text{ m/sec}$, $n_0 = -7.10 \text{ rps}$, in deep water)

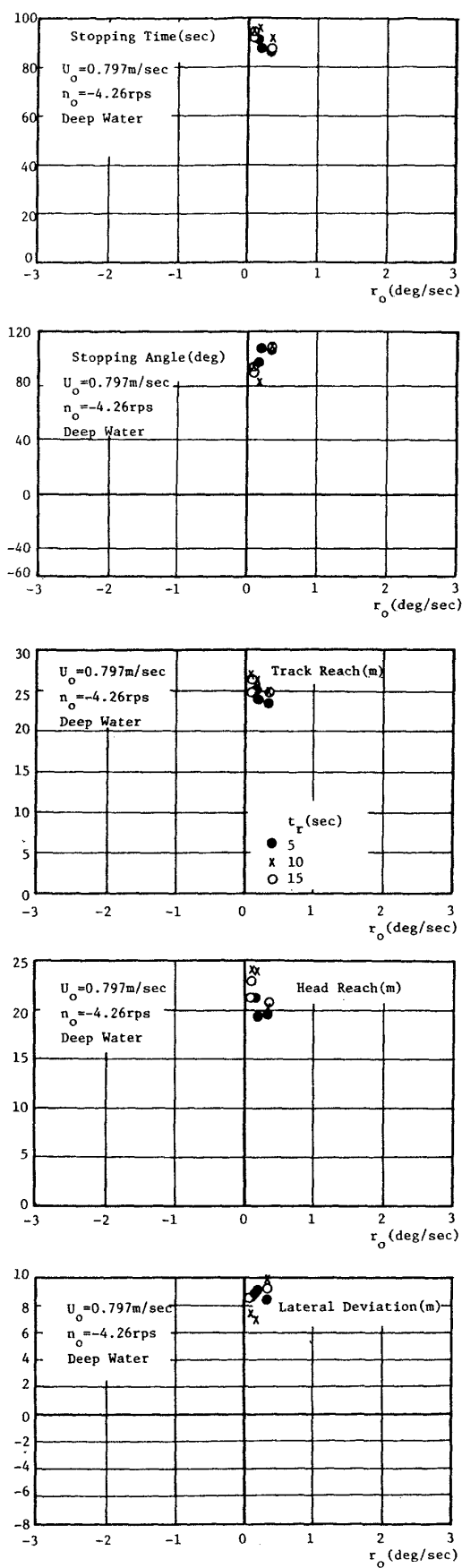


Fig. 3 Results of the free running model tests
($U_0 = 0.797 \text{ m/sec}$, $n_0 = -4.26 \text{ rps}$, in deep water)

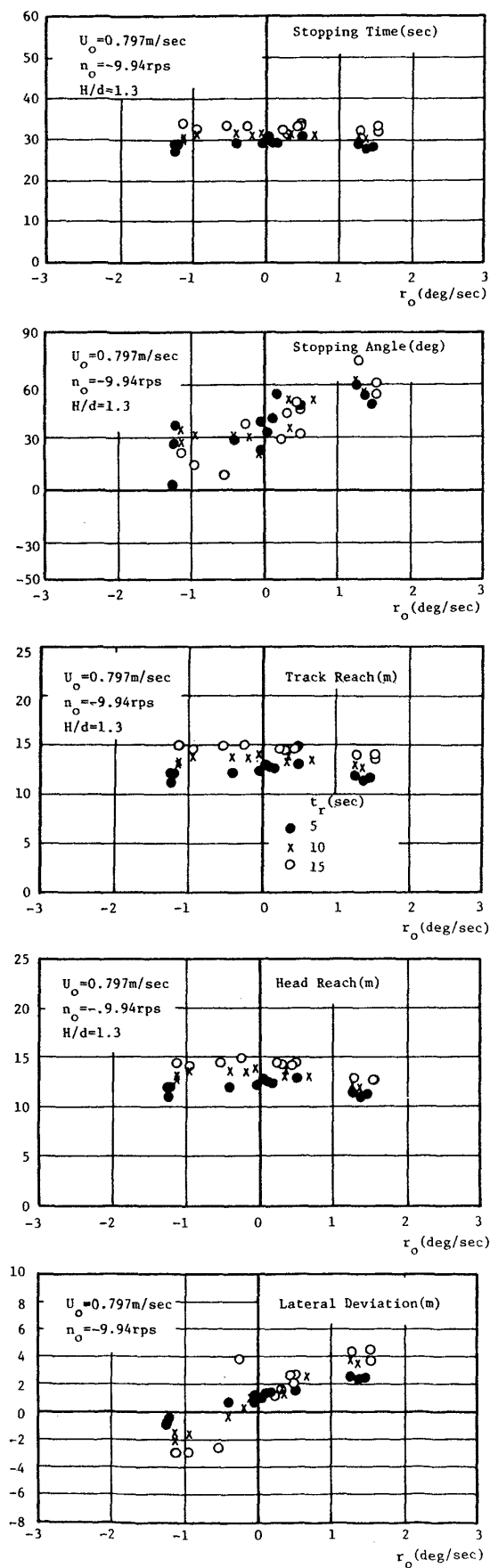


Fig. 4 Results of the free running model tests ($U_0 = 0.797 \text{ m/sec}$, $n_0 = -9.94 \text{ rps}$, in shallow water)

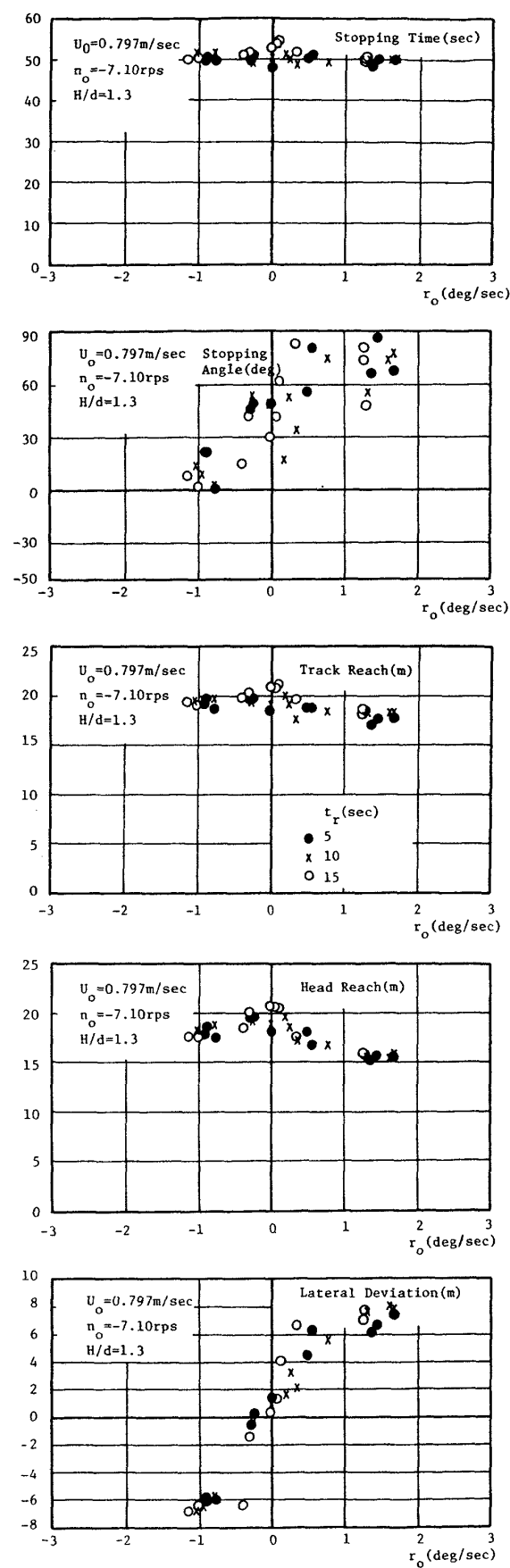


Fig. 5 Results of the free running model tests ($U_0 = 0.797 \text{ m/sec}$, $n_0 = -7.10 \text{ rps}$, in shallow water)

せたが、深水の場合は逆転発令から船体停止に到るまでの船体運動及びプロペラ推力の時間的変化の再現性は極めて良好であった。この事は Figs. 1~3 においても、 U_0 , n_0 , t_r の航走条件が同一で r_0 もほぼ等しい場合の置点がよく纏まっていることから判る。

(a) 本実験結果に関する限り、逆転整定時間 t_r の相違による停止性能の差異は顕著でない。ただし、本件については、後述の Fig. 15 に示したようにプロペラ逆推力は見かけの前進率 $J_p (=u/nP)$ とともに変化するもので、プロペラ逆転回転数が定常に達するまでのプロペラ逆推力の時間的変化の様相が、逆転整定時間 t_r の長短によって著しく異なる場合も予想されるので、一般的結論とすることは出来ない。

(b) 今回の実験で模型船に初期に与えた回頭角速度 r_0 は小舵角 $\pm 5^\circ$ による旋回角速度であるので、 r_0 の影響を顕著に生じさせるようにしたものではないが、停止時間に対する r_0 の影響はとくに小さく、Track reach や Head reach では $\delta_0 = \pm 5^\circ$ の場合が $\delta_0 = 0^\circ$ に比し若干小さめとなる程度で、 r_0 による目立った相違はない。

(c) ほぼ直進の状態では逆転を発令する場合、逆転回転数の高い方が停止時の横偏倚および停止方位角が小さくなる傾向がある。

2.2.2 浅水域での停止性能

同一航走条件で複数回航走したときの再現性は深水域に比べて悪く、ある航走条件での停止運動の再現性を確認するために、大略、深水域での航走数の倍近く航走する必要があった。その理由としては、船底と水槽底との間の狭い隙間のため、船首から船尾に向かう流れのうち船底を通過してプロペラ付近に流入する流れが一定せず脈動し、このためプロペラ逆転により船首に向かうプロペラ流が前方から流入する流れと衝突する擾乱域も時間的に変動するため、プロペラ逆転発令時の船体運動も一定しないためと考えられる。

このように浅水域での停止運動がばらつきやすいことは、浅水域での実験結果を示す Fig. 4 を深水域の結果をまとめた Fig. 1 と、同様に Fig. 5 を Fig. 2 と比較することからも判る。

以下に実験結果から得られた主な結論を纏める。

(a) 停止距離、停止時間に対する逆転整定時間の影響は深水域の場合より若干明瞭に現れている。とくに Fig. 4 に示した $U_0 = 0.797 \text{ m/sec}$, $n_0 = -9.94 \text{ rps}$ の場合で t_r が短いほど停止距離、停止時間が小さくなる傾向が明らかである。しかし、総じていえば、本実験程度の相違であれば、停止性能に際だった差異は生じない。

(b) 一方、同一の航走条件の下での停止距離と停止時間を浅水域と深水域で比較すると、裸殻船体の直進時ならびに旋回時の流体力が浅水域で大きいにも拘らず、浅水域での停止距離および停止時間は深水域での値とほとんど変

わらないか若干大きめであることが判る。これは、プロペラ逆転による逆推力が浅水域では深水域に比べて $|J_p|$ の大きい範囲で小さいことが、主な原因と考えられる。

(c) 浅水域では深水域に比べ、 $\delta_0 = \pm 5^\circ$ の操舵による回頭角速度が $\pm 1.5 \text{ deg/sec}$ と一層小さくなることもあり、停止距離や停止時間に対する初期回頭角速度 r_0 の影響を論ずるほどの差異は現れていない。

(d) 一方、横偏倚や停止方位角に対する r_0 の影響は、浅水域では深水域に比べほぼ等しいか若干大きめにでているようである。

(e) 以上を総合すると、初期船速、プロペラ逆転回転数、逆転整定時間が同一であるならば、浅水域での停止距離、横偏倚、停止方位角は深水域とほぼ同一かやや大きめであると言える。

2.2.3 停止運動中の時刻歴

初期船速 $U_0 = 0.797 \text{ m/sec}$, プロペラ逆転回転数 $n_0 = -7.10 \text{ rps}$, 逆転整定時間 $t_r = 10 \text{ sec}$ で、 $\delta_0 = 0^\circ$ または $\pm 5^\circ$ での停止運動中の船体軌跡と運動変数およびプロペラ推力の時刻歴を Fig. 6 から 11 に示した。図中、実線が実験結果であり、点線が後述する数値シミュレーションの結果である。また、船体航跡中の船位は停止時をのぞき、逆転発令後 10 秒毎の船位と姿勢を示す。これらの図に示された実験結果のうち興味あるのは、

(a) 逆転発令直後のプロペラ逆推力が、浅水域ではほぼ 0 より徐々に増大しているのに対し、深水域では逆転発令直後から直ちに大きな値となることである。

また、

(b) 浅水域の場合、直進状態での逆転発令直後と回頭状態での逆転発令直後とは逆推力の大きさが明らかに異なり、回頭状態での値の方が大きい。

これは、浅水域をほぼ直進しているときは船底を通過

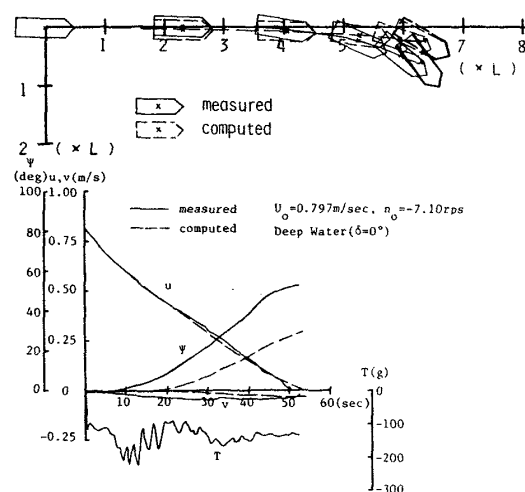


Fig. 6 Stopping manoeuvre in deep water
($U_0 = 0.797 \text{ m/sec}$, $n_0 = -7.10 \text{ rps}$, $t_r = 10 \text{ sec}$, $\delta = 0^\circ$)

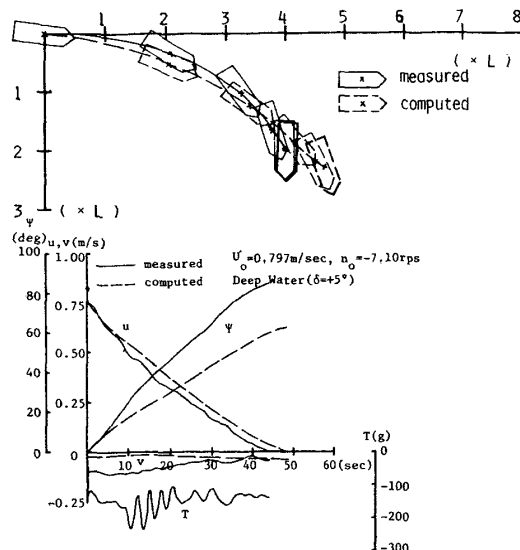


Fig. 7 Stopping manoeuvre in deep water
($U_0=0.797$ m/sec, $n_0=-7.10$ rps, $t_r=10$ sec, $\delta=+5^\circ$)

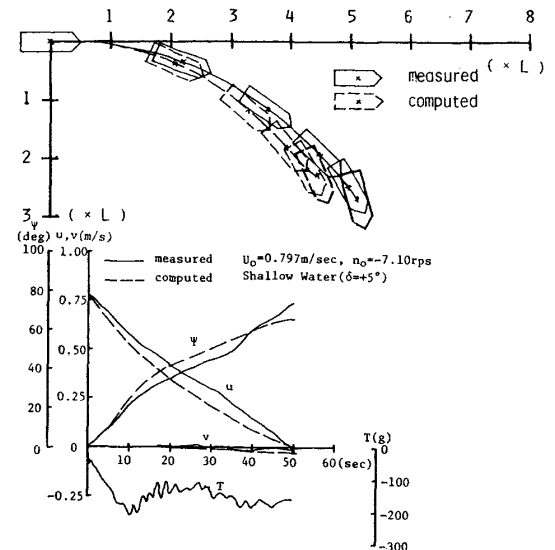


Fig. 10 Stopping manoeuvre in shallow water
($U_0=0.797$ m/sec, $n_0=-7.10$ rps, $t_r=10$ sec, $\delta=+5^\circ$)

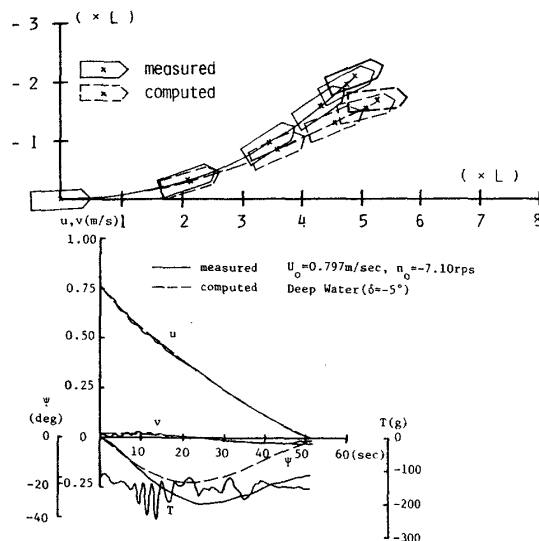


Fig. 8 Stopping manoeuvre in deep water
($U_0=0.797$ m/sec, $n_0=-7.10$ rps, $t_r=10$ sec, $\delta=-5^\circ$)

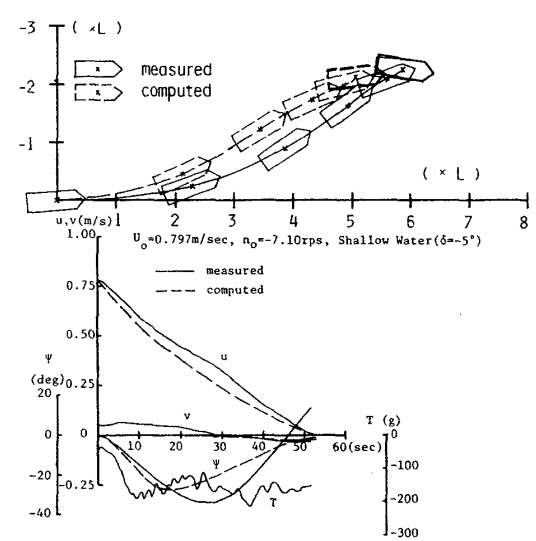


Fig. 11 Stopping manoeuvre in shallow water
($U_0=0.797$ m/sec, $n_0=-7.10$ rps, $t_r=10$ sec, $\delta=-5^\circ$)

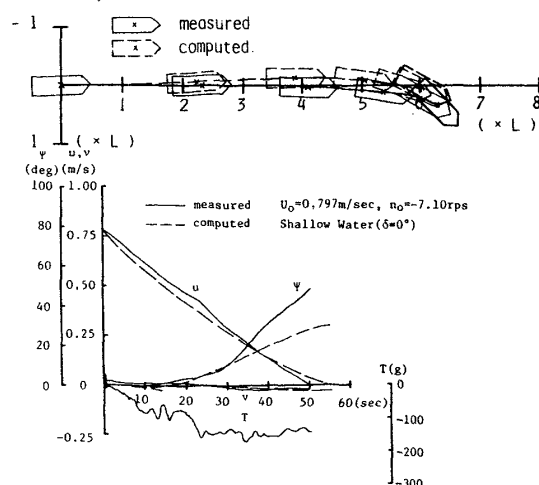


Fig. 9 Stopping manoeuvre in shallow water
($U_0=0.797$ m/sec, $n_0=-7.10$ rps, $t_r=10$ sec, $\delta=0^\circ$)

プロペラに流入する流れが水槽底の存在により拘束されるのに対し、回頭状態では船側をまわる流れがプロペラに流入することによると思われる。一方、深水域では、いずれの場合も比較的強い流れがプロペラに流入すると考えられる。このように、プロペラ逆推力に関しては、単に船速の前後方向成分とプロペラ回転数のみを考慮した準定常の考え方ではプロペラ逆転発令直後の逆推力の時刻歴変化を説明するのは困難であることがわかる。

3. 数値シミュレーション

3.1 運動方程式

プロペラ逆転停止時の船体の運動としては水平面内の運動のみを考慮すれば十分であるから、数値シミュレーションには次式で表わされる運動方程式を用いた。

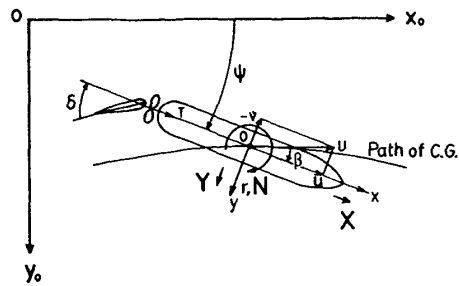


Fig. 12 Coordinate system

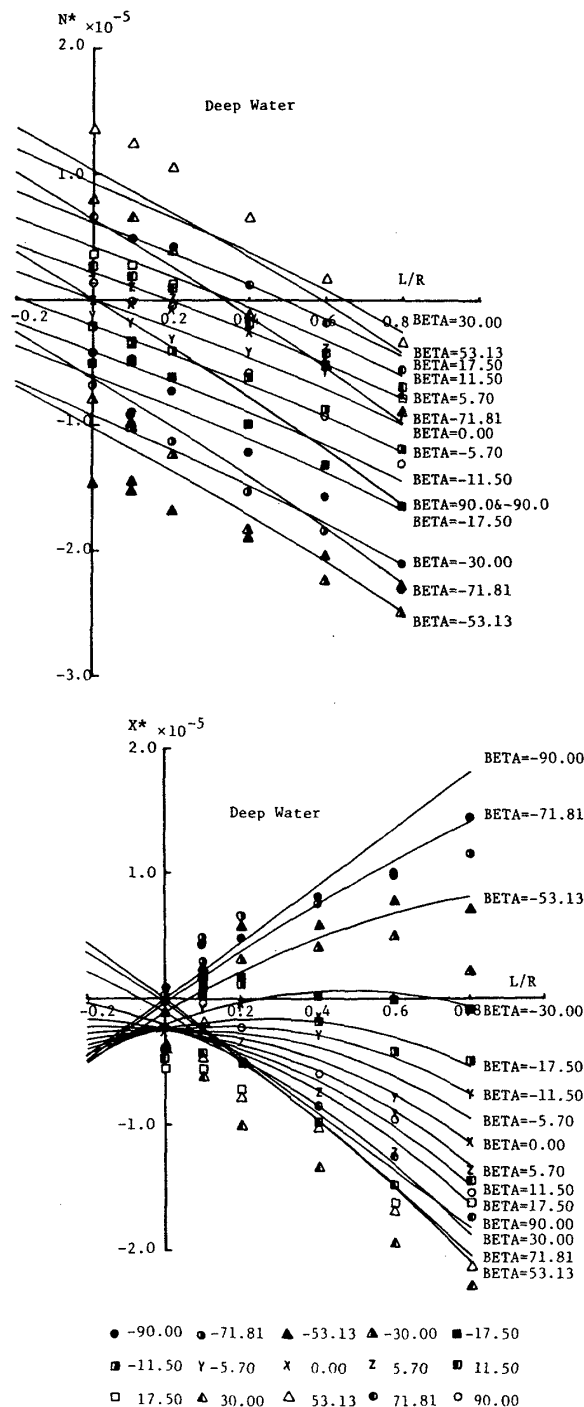


Fig. 13 Curve fitting of the hydrodynamic forces and moment in deep water

$$m(\dot{u} - v\gamma) = X_H + X_P + X_R \quad (1)$$

$$m(\dot{v} + u\gamma) = Y_H + Y_P + Y_R \quad (2)$$

$$I_{zz}\dot{\gamma} = N_H + N_P + N_R \quad (3)$$

ここで座標系は Fig. 12 に示す様に船体重心に原点を一致させた船体固定の右手座標系 ($x-y-z$) を用い、 m, I_{zz} は各々船体の質量、 z 軸まわりの慣性能率である。また u, v は各々 x, y 軸方向の速度を表わし、 γ は z 軸まわりの角速度を表わす。右辺の X, Y, N は各々船体に働く流体反力の x, y 軸方向成分及び z 軸まわりの回頭モーメントを表わすが、ここでは X, Y, N 共に裸殻船体(舵、プロペラの取り付けしていない船体)に働く力/モーメント、プロペラ逆転に基づく力/モーメント、舵に働く力/モーメントの単純和として表わされると仮定しており⁶⁾、各々を添字 H, P, R で示している。

3.2 流体力の取扱い

(a) 舵に働く力

プロペラ逆転停止時に舵に働く力 X_R, Y_R, N_R は、停止直前以外は他の力やモーメントに比べて非常に小さいので⁶⁾、実際の数値シミュレーションにあたっては(1)~(3)式右辺のうち X_R, Y_R, N_R は無視した。

(b) 裸殻船体に働く力

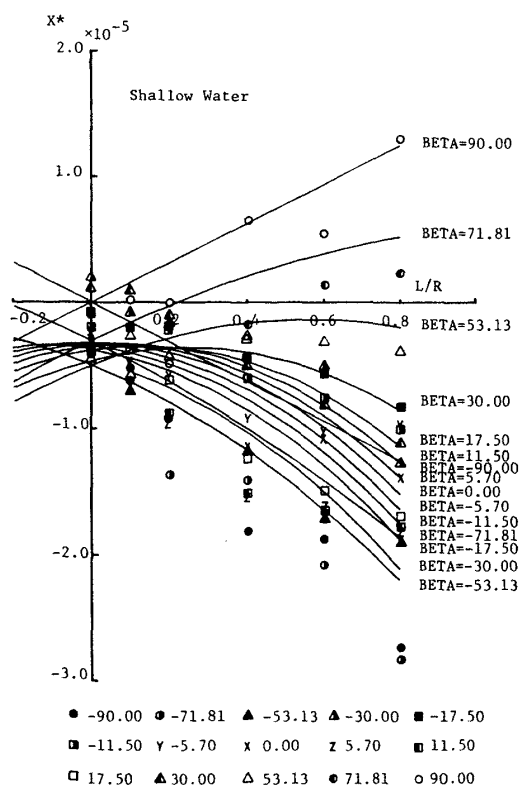
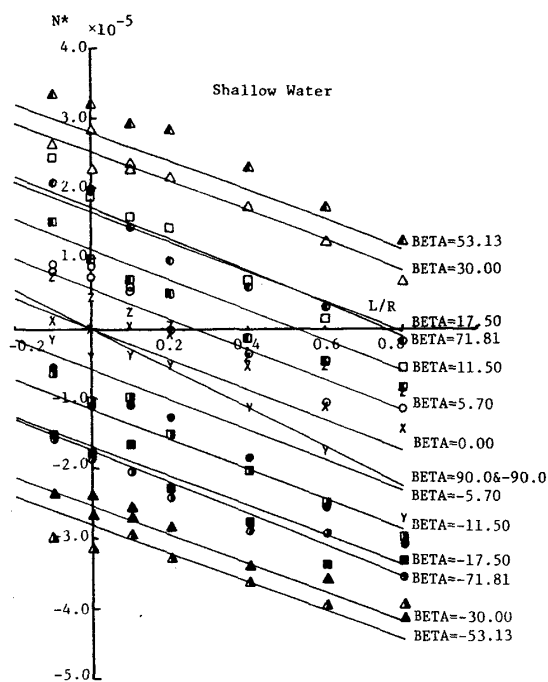
裸殻船体に働く力及びモーメント X_H, Y_H, N_H は、小瀬等により提案された数学モデル⁷⁾を若干修正した次式

$$X^* = -m_x^* \dot{u}^* + a_1 v^* r^* + a_2 u^* |u^*| + a_3 u^* v^{*2} / U^* + a_4 u^* r^{*2} \quad (4)$$

$$Y^* = -m_y^* \dot{v}^* + b_1 U^* v^* + b_2 |v^*| v^* + b_3 r^* + b_4 u^* r^* + b_5 v^{*2} r^* u^* / U^{*2} + b_6 v^* r^{*2} / U^* \quad (5)$$

$$N^* = -J_{zz}^* \dot{r}^* + c_1 u^* v^* + c_2 r^* + c_3 r^{*3} + c_4 u^* r^* + c_5 v^{*2} r^* \quad (6)$$

$$\left(\begin{array}{l} X^*, Y^* = X_H, Y_H / \frac{1}{2} \rho L^3 g, N^* = N_H / \frac{1}{2} \rho L^4 g \\ m^* = m / \frac{\rho}{2} L^3, J_{zz}^* = J_{zz} / \frac{\rho}{2} L^5 \\ u^*, v^* = u, v / \sqrt{gL}, r^* = r \sqrt{L/g} \\ \dot{u}^*, \dot{v}^* = \dot{u}, \dot{v} / g, \dot{r}^* = \dot{r} L / g \end{array} \right)$$



により表現し得ると考えた。(4)~(6)式の係数 $a_1 \sim a_4$, $b_1 \sim b_6$, $c_1 \sim c_5$ は、合速度 U 一定 (0.3 m/sec) で横流れ角 β , 旋回半径 R を広範に変化させた裸殻船体の CMT 試験により計測された流体反力から最小二乗法により決定した。(4)式中の $\sim$ をほどこした部分が修正項である。深水域における付加質量 m_x, m_y 付加慣性性能率 J_{zz} は、元良のチャート⁸⁾より推定し、浅水影響は参考文献[9]中のグラフから PCC 船に対する値を読みとった。

CMT 試験により計測された裸殻船体に働く (遠心力を差し引いた) 流体力及びモーメントと、(4)~(6)式による fitting の結果を比較して、Fig. 13(深水域), Fig. 14(浅水域)に示す。横軸の L/R は無次元化された角速度 (R は旋回半径) を表わす。 Y_H, N_H については(5), (6)式による fitting の精度は十分であるが、 X_H については CMT 試験の結果との間にやや差が見られる。横力、回頭モーメントは浅水域 ($H/d=1.3$) の方が深水域での値に比べてかなり大きく、最大3倍程度となる。 x 方向の力についても、速度を変化させて別途行った実験によれば、裸殻船体に働く直進抵抗は浅水域 ($H/d=1.3$) の場合は深水域における抵抗の1.2~1.3倍となる。

(4)式中の修正項は実験結果に明らかに見られる X_H の r に対する非線形な依存性を考慮するために加えた。この項をつけ加えることで、流体力の fitting の精度、及び後に述べるシミュレーション計算の精度が明らかに改善される

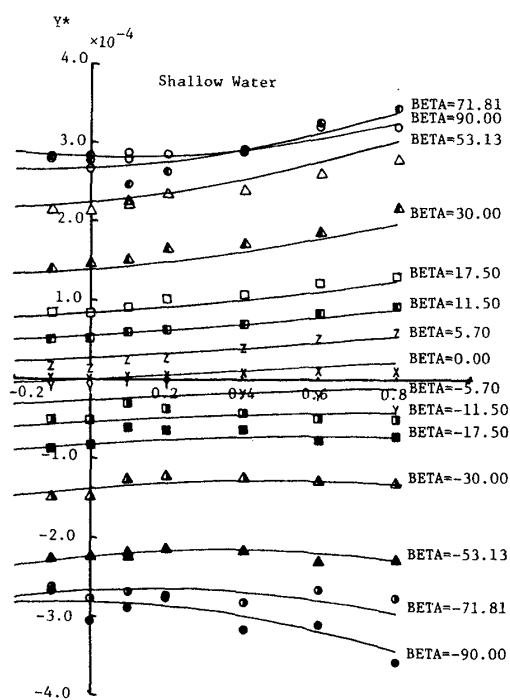


Fig. 14 Curve fitting of the hydrodynamic forces and moment in shallow water

ことが確認された。

数学モデルに更に多くの項を追加して、fittingの精度を上げることは可能ではあるが、物理的に合理的なものでなければ、プロペラ逆転停止時のように u がプロペラ逆転時の速度からゼロまで変化し、その間に横流れ角 β や回転速度 r も広範囲に変化するような状態をシミュレーション計算する場合に、時として思わぬ不合理な流体力を与えてしまうことになる。従って、プロペラ逆転停止時の流体力を十分な精度で近似し得る数学モデルが確立されていない現状では、やや誤差があるものの、広い速度範囲において同程度の精度を保持する(4)式を用いることとした。なお、直進時に裸殻船体に働く抵抗は別途速度を0.1~0.85 m/secに変化させて計測し、 u の3次式で近似した。

著者が先に発表した同様なシミュレーション計算では³⁾、裸殻船体に働く流体力の数学モデルとして(4)~(6)式の代わりに、単純なテイラー展開型の多項式モデルを用いたが、深水域では実験結果との一致は良好であるが、浅水域では実験結果との差が大きいという結果が得られた。

これらの結果をふまえ、多項式モデルは元来速度の変化が小さい場合に成り立つモデルであることから、今回は比較的低速域において有効とされている小瀬等のモデルを用いることとした。

(c) プロペラ逆転に基づく力

プロペラ逆転に基づく力による x, y 軸方向の力、 z 軸まわりの回頭モーメントは

$$X_p = X_{p0}(J_p) + X_p(v, r) \quad (7)$$

$$Y_p = Y_{p0}(J_p) + Y_p(v, r) \quad (8)$$

$$N_p = N_{p0}(J_p) + N_p(v, r) \quad (9)$$

の如く、前進定数 $J_p(=u/nP, n$: プロペラ逆転回転数, P : プロペラピッチ)のみに依存する成分と、横運動に基づく成分の和として近似的に表される⁶⁾。更に、深水域では横運動に基づく成分は、近似的に次式で定義されるプロペラ部における横方向速度 v_s 。

$$v_s = v - (1/2)L \cdot r \quad (10)$$

(L : 船体長さ)

に比例する形で表わされる⁶⁾。しかしながら、浅水域では、(7)~(9)式右辺第二項の v_s への依存性は単純でなく³⁾、かつ v_s への依存性を同定するための実験量は膨大なものになるので、今回は(7)~(9)式右辺第二項は省略し、浅水域、深水域共に、 X_p, Y_p, N_p は前進定数 J_p だけによって決定されるものとして扱った。

この仮定の下で、 Y_p, N_p はプロペラを逆転させつつ船体を拘束直進させて、横力、回頭モーメントを計測することにより決定した。更に、同様の状態でプロペラを含む船体に加わる全抵抗 X と、プロペラなしの裸殻船体に働く直進抵抗 R から

$$(1-t)T + X = R \quad (11)$$

としてプロペラ有効制動力 $(1-t)T$ (T : プロペラ推力)を

求め、この値を X_p として用いた。ただし浅水域(水深/喫水比: 1.3)においては、水深によって決まる波の位相速度に船速が近づくと(11)式によって $(1-t)T$ を精度よく決定することが困難になるので、実際上の計算には、プロペラシャフト部で計測されたプロペラ推力 T と深水域の計測から求められた $(1-t)$ を掛けた値を、浅水域における X_p として使用した。

浅水域、深水域におけるプロペラ推力 T と、深水域における $(1-t)$ の実験値を各々Fig. 15, Fig. 16に示すが、 $|J_p| > 0.8$ において浅水域におけるプロペラ推力が深水域での値に比べて小さいことが特徴的である。

3.3 シミュレーション計算結果及び考察

3.2節で述べたことから明らかなように、以下の仮定のもとにシミュレーション計算を行った。

① プロペラ逆転停止時の速度は時々刻々変化して定常的ではないが、時々刻々船体に働く流体力としては速度一定の定常状態で計測された値を用いる。

② 舵に働く力は無視し、流体力は裸殻船体に働く力とプロペラ回転に基づく力の和として表わされる。

③ プロペラ逆転に基づく力に対する船体の横運動の影響は無視できる。

シミュレーション計算は初期船速 $U_0 = 0.797$ m/sec, プロペラ逆転回転数 $n_0 = -7.10$ rps, 逆転整定時間 $t_r = 5, 10$,

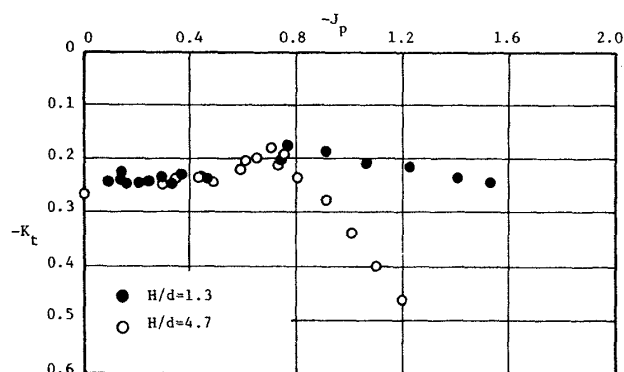


Fig. 15 Propeller thrust forces

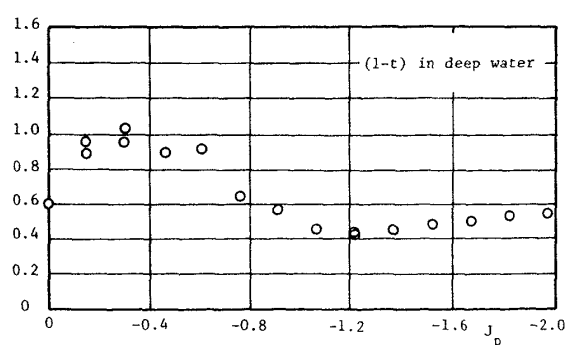


Fig. 16 $(1-t)$ in the reverse rotation of the propellers

15 sec の場合について、 $\delta_0 = 0^\circ, \pm 5^\circ$ に対する実験時の初期速度 v_0, r_0 、初期回頭角 ϕ_0 を初期値として行った。しかしながら、定常旋回状態に達しているはずのプロペラ逆転開始時の初期速度 v_0, r_0 の計測値を(5)、(6)式に代入すると、不合理に大きな横力、回頭モーメントとなる場合があった。これは、2.1.3 で述べたように、曳航台車の位置に曳航台車からみた船の相対位置を加算して求めた船の位置の時刻歴から v_0 を求めているために生じた計測誤差であると考え(r_0 はジャイロで計測しているため誤差は小さいと考えられる)、その場合には計測された r_0 と(6)式から、プロペラ逆転開始時の回頭モーメントが零となるように v_0 を逆に決めて、その値を初期値として使用した。

シミュレーション計算の結果得られた船体軌跡及び速度 u, v 、方位角 ψ の時刻歴を、実験結果と比較するため深水域の場合について Fig. 6~Fig. 8 に、浅水域の場合について Fig. 9~Fig. 11 に示す。停止に至る過渡状態における船体軌跡、速度、方位角等の実験結果との一致度は必ずしも満足すべきものとはいえず、更にシミュレーションの精度を上げるためには、時々刻々の過渡状態において船体に働く流体力の推定精度を更に高める必要があると考えられる。また、プロペラ逆転開始時の速度、方位角等の初期条件のわずかな違いによってもシミュレーション結果が大きく影響されることがあり、実験との比較を行うには、実験におけるプロペラ逆転開始時の速度、方位角等を精度よく測定することが必要である。

実験結果とシミュレーション結果を更に詳細に比較すると、停止に至るまでの Track Reach や Head Reach は深水域においてはシミュレーション計算結果の方がわずかに長く、逆に浅水域においてはシミュレーション計算結果の方がわずかに短い。これは、後に示すように、シミュレーション計算の結果得られた Track Reach や Head Reach をまとめた Fig. 17, 18 から明らかである。この原因の一つとして、3.2(c) で述べた様に、浅水域では、シミュレーション計算に使用するプロペラ逆転に基づく x 方向力を求める際に、深水域の実験において得られた $(1-t)$ を流用していることが挙げられる。

次に、Fig. 2, Fig. 5 と同様に、 $U_0 = 0.797 \text{ m/sec}$ 、 $n_0 = -7.10 \text{ rps}$ の場合につき、横軸に r_0 をとってシミュレーションの結果得られた Track reach, Head reach, Lateral deviation, Stopping time, Stopping angle をまとめたものを Fig. 17 (深水域)、Fig. 18 (浅水域) に示す。

逆転整定時間 t_r の相違による停止性能の差異は(大きくはないが)深水域、浅水域共に明らかで t_r が短いほど停止距離、停止時間が短くなる。しかしながらその影響は、浅水域の実験値にみられるほど顕著ではない。

初期回頭速度 r_0 の停止性能に対する影響はほぼ実験結果を定性的にも定量的にもうまく説明しているが、Stopping angle については実験値より計算値の方が少し小さ

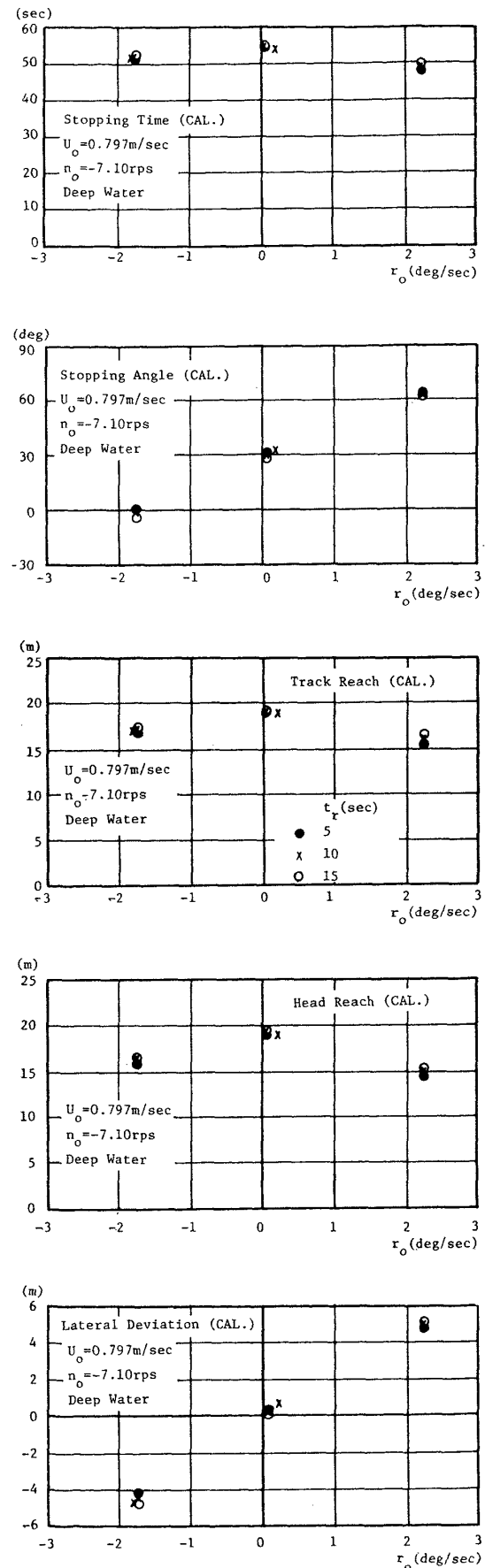


Fig. 17 Results of the numerical simulation ($U_0 = 0.797 \text{ m/sec}$, $n_0 = -7.10 \text{ rps}$, in deep water)

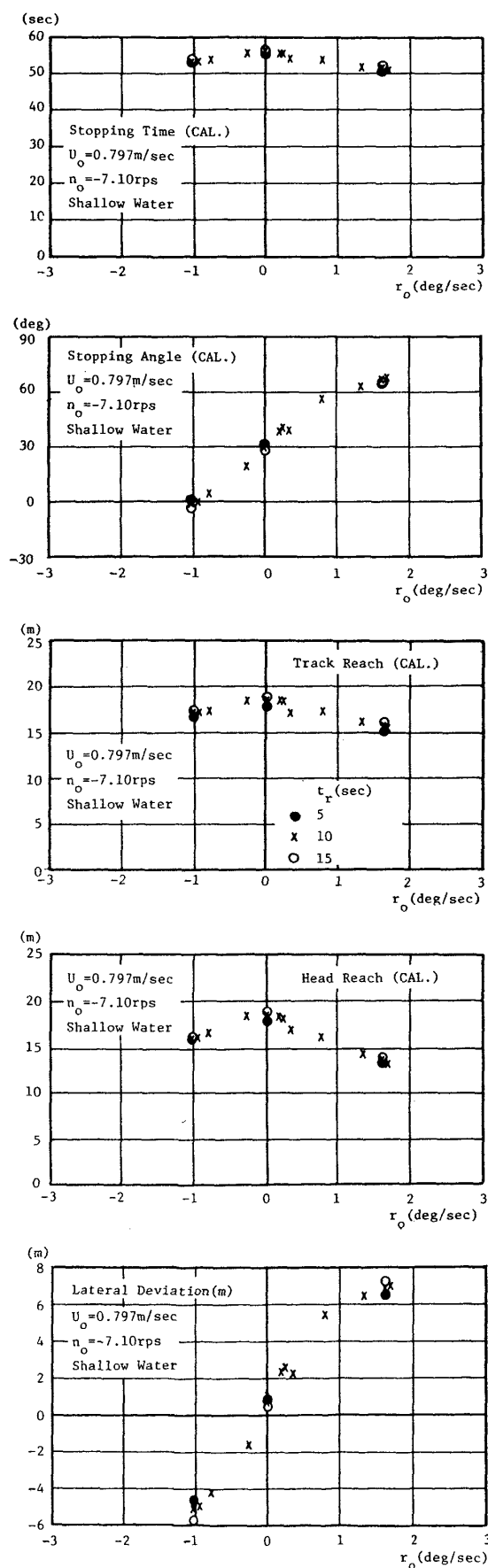


Fig. 18 Results of the numerical simulation
($U_0 = 0.797 \text{ m/sec}$, $n_0 = -7.10 \text{ rps}$, in shallow water)

い。浅水域での停止距離、停止時間は実験と同様に、計算でも深水域の場合とほとんど変わらない結果が得られる。

以上の検討により、シミュレーション計算により得られる船体軌跡や速度、方位角の時刻歴を細かく分析すると、Fig. 6~Fig. 11に示したように実験結果との差が少しみられるが、Fig. 17, Fig. 18に示したマクロな停止性能については実用上満足すべき精度で実験結果と一致する結果が得られることがわかった。特に、浅水域における推定精度は、著者らが先に示した結果³⁾に比べて著しく改善されたが、これは裸殻に働く流体力の数学モデルの差によることは明らかである。

今後、更にシミュレーション計算による推定精度の向上を図るためには以下の事項を検討すべきであると考えられる。

① プロペラ逆転停止時の流体反力を物理的に合理的に記述する数学モデルを開発し、特に速度の変化による船体の針路安定性の変化を合理的に取り入れ得るモデルを開発すること。

② プロペラ逆転による横力、回頭モーメントに対する横運動の影響を何らかの方法で考慮し、プロペラ逆転による針路安定性の劣化をシミュレーション計算に取り入れること。

③ プロペラ逆転開始直後の過渡的なプロペラ有効制動力の特性を考慮すること。

4. 結 論

本研究の結果得られた主な結論を列挙すると以下の様になる。

(1) 自由航走模型実験によれば、初期船速、プロペラ逆転回転数、逆転整定時間が同一であるならば、浅水域での停止距離、停止時間、横偏倚、停止方位角は深水域とほぼ同一かやや大きめとなる。

(2) 本研究で用いたシミュレーション計算法で、停止距離、停止時間、最終的な横偏倚等のマクロな停止性能は定量的にも実用上十分な精度で実験結果と一致する結果が得られるが、船体軌跡、速度、方位角の時刻歴について見るとやや差異が認められる。

(3) シミュレーション計算による推定精度の向上を図るためには、合理的な数学モデルの開発と共に、プロペラ逆転による横力、回頭モーメントに対する横運動の影響及び、プロペラ逆転開始直後のプロペラ有効制動力の過渡的特性を考慮することが必要であると考えられる。

本研究では浅水域として $H/d = 1.3$ の場合のみを対象としたが、更に水深が浅くなった場合の停止性能の推定について本研究の結果を基にして考察すると次のようになると考えられる。

即ち、裸殻船体に働く流体力は他の研究結果とも定性的に良く対応しているので、更に水深が浅い場合の流体力も

既存の結果を参考にして推定可能である。しかしながら、停止性能の推定には裸殻船体に働く流体力と共に、プロペラ逆転に基づく x, y 方向の力及び z 軸回りの回頭モーメントを精度よく推定することが必要であり、極浅水域におけるこれらの力、モーメントに関しては既存のデータも少なく、また本実験からの推定も困難なので、今後更に検討を要する。

終わりに、本研究を進めるに際し、水槽実験及び実験解析の面で多大な御助力をいただいた元東京大学技官の加藤孝義氏に深く感謝いたします。尚、本研究は、平成元年度及び2年度の科学研究（総合研究(A)）の一部として行われたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) IMO Maritime Safety Committee: "Interim Guidelines for Estimating Manoeuvring Performance in Ship Design", IMO Document MSC/Circ. 389, 1985
- 2) 井上正裕, 貴島勝郎他: "制限水路における船の減速時のシミュレーション", 西部造船会々報 第60号, 1980
- 3) Fujino, M. and Kagemoto, H.: "Predictions of Stopping Manoeuvres", Proc. MARSIM and ICSM 90, pp. 309-330, 1990
- 4) 日本造船研究協会第7基準研究部会: 船舶の操縦性能に関する研究, 研究資料 No. 176R, 1990
- 5) 日本造船研究協会第7基準研究部会: 船舶の操縦性能に関する研究, 研究資料 No. 150R, 1986
- 6) 藤野正隆, 切田篤: "プロペラ逆転による制動時の船の操縦性について(第一報)", 関西造船協会誌, 第169号, pp. 57-70, 1983
- 7) 小瀬邦治, 日當博喜他: "低速で航行する船の操縦運動モデルについて", 日本造船学会論文集, 第155号, pp. 132-138, 1984
- 8) 元良誠三: "船体運動に対する見掛質量効果の影響に関する研究", 学位論文(東京大学), 1959
- 9) 芳村康男, 桜井仁: "浅水域の操縦運動数学モデルの検討(第3報)", 関西造船協会誌, 第211号, pp. 115-126, 1989