双胴水中翼実験船の定常直進航走試験

正員 宮 田 秀 明* 正員 川 口 洋**
 正員 松 野 清 孝** 正員 有 井 俊 彦***
 正員 土 屋 好 寛* 正員 白 枝 哲 次*
 菊 地 裕*

Full-Scale Experiments of a Hydrofoil Catamaran on a Steady Straight Course

by Hideaki Miyata, *Member* Hiroshi Kawaguchi, *Member*
 Kiyotaka Matsuno, *Member* Toshihiko Arie, *Member*
 Yoshihiro Tsuchiya, *Member* Tetsuji Shiroeda, *Student Member*
 Yutaka Kikuchi

Summary

A 12m long full-scale model of a new-type hydrofoil catamaran is constructed and served for experiments in the sea. The experimental results are presented for the properties on steady straight course, i.e., resistance, longitudinal stability and so forth. A 1/10-scale model is also manufactured in order to measure total forces and to study the correlation properties. The results of the tank experiments are presented and discussed.

1. 結 言

著者らは、双胴水中翼船の研究を進めて来たが^{1)~5)}、排水量200トン程度までの小型高速旅客船の形状システムとして、双胴型水中翼船が最も優れたものの一つであろうという認識が深まったのは1988年頃のことである⁴⁾⁶⁾。既報のように、多くの既存システムより抵抗面でも優れているが、何よりも全没水中翼形式による耐航性能の圧倒的な高さ、双胴船体による形状システムの単純さと安全性の高さが、一番大きな利点であろう。1000トン以上の大型化も不可能でない³⁾⁷⁾という点も大きな魅力である。

このような新型システムを実現するためには、実海面試験を行うのが不可避のプロセスである。高速船の場合水槽試験では、斜め波中の試験や操縦性試験が難しい上に、尺度影響を伴う水槽試験のシナリオではカバーできない多くの状態は、実海面試験でしか調査することができない。同種のシステムを開発中のノルウェーの研究グループでは、1989年末に、小型の実海面実験船による実験を実施し、

1990年には商業船の設計・建造にとりかかったようである。

筆者らの研究開発グループでも、1990年に入ってから、長さ12mの実験船を建造し、同年中に合計4回の実験を実施し、高度な運動制御を除く、多くの部分で満足な結果が得られた。1991年には、残された高度な運動制御や翼システムの動的応答などを中心とした実海面試験を引き続き行う予定であるが、本報告では、最も基本的な性能である、定常直進航走状態での諸性能について報告する。また一方、実験船の縮尺1/10の模型船を製作し、抵抗、運動、6分力計測を中心とした水槽試験を行った。実船実験では船体全体に加わる力やモーメントを計測できないことや、外乱としての波の定量的評価が難しいことなどの欠点を補うことができる。実船実験と模型実験を平行して行い評価を重ねることは最も確実な新システム開発の手法であろう。水槽試験結果について関連部分を報告する。両者を使った動的応答、制御などの研究も平行して行ったが稿を改めて報告する予定である。

2. 実 験 船

2.1 船体計画

本論文で報告する双胴水中翼船 (Hydrofoil Catama-

* 東京大学工学部

** 瀬戸内クラフト(株)

*** 日立造船(株)

ran; HC) は、断面の薄い双胴船体を複数の全没水中翼で結合した形状システムを持っているので、実験船の計画にとっては、主機と推進器の配置がポイントになる。建造費や保守等の面から inboard/outboard 方式の採用も検討したが、主機と推進器軸の高低差に無理が生じるので、HC の主な主機/推進器の組み合わせである高速ディーゼルとウォータージェットとの組み合わせを動力・推進システムとして採用することとした。全長は小型船舶の範囲内に収まるように 12 m とし、アルミ合金製とした。決定された主要目を Table 1 に外形図を Fig. 1 に示す。全幅は所要翼スパン長と 2 基の主機幅によって決定された。中央部断面形状を Fig. 2 に示す。高速ディーゼル機関の幅は、小出力のものでもそれほど小さくならず、船型が小型になるほど、主機収納が困難になる。採用した主機の幅は約 800 mm であるので、Fig. 2 のような船体断面形状を船体中央部に降に採用した。抵抗面・耐航性の両面から好ましくないが、やむを得なかった。ウォータージェットの吸入口の配置については、CFD シミュレーションによる定性的な検討を行った。

Table 1 Principal particulars of the experiment ship and its model.

	Experiment ship " EXCELLER "	model
material	aluminum alloy	wood and urethane
class	J C I. calm sea	-----
Loa	12.00 m	1.200 m
B	3.70 m	0.370 m
D	1.60 m	0.160 m
d	0.80 m	0.080 m
accommodation	12 persons	-----
main engine	YANMAR 4CX-ETZ 2 sets	-----
	195 PS × 2500 RPM	-----
propulsor	water jet by Hamilton	-----
	type 271 × 2 sets	-----

Fig. 1 Configuration of the experiment ship.

満載排水量が約 7 トン、実験速度 25~27.5 ノットと推定して計画した。

2.2 翼システム計画

小型でかつ速度が低く、翼強度、キャビテーションの問題がほとんどないので、なるべく容易に製作できる構造とするが、高度な制御実験にも対応できるものとするを基本方針とした。軟鋼の簡易切削による翼の組み立てを行い、船体中心線上のアルミ合金製のストラットとポッドで支持した。船体側へはフランジ型式で固定し、フランジ面は突起したままで、多少パテ処理した。Fig. 3 に見るように、前後 2 枚の翼には、それぞれ 2 枚のエロンと 2 枚のフラップを設けた。補助翼コード長は主翼コードの 25% の長さとし、 $-10^{\circ} \sim +20^{\circ}$ の補助翼角を充分高い応答速度で取れるようにした。中心線近くに位置するフラップは左右同角度となるようなロッド機構で駆動している。従って合計 6 本のアクチュエーターを装備している。本報告では、動的な制御を行わないので、制御系の詳細には触れない。

翼の平均揚力係数は、80% foilborne 時で 0.4 前後になるように計画した。Table 2 に示すように 3 つの状態のうち A と B は全く同じ翼システムの状態であるが、状態 C では、船体重量増加に伴い翼迎角を変更すると共に、前翼

Fig. 2 Midship section of the experiment ship.

Fig. 3 Hydrofoils of the experiment ship.

Table 2 Condition of experiment.

	Experiment ship			model		
	A	B	C	A	B	C
fore draft	200 mm	600 mm	300 mm	27.0 mm	44.1 mm	25.0 mm
aft draft	600 mm	900 mm	700 mm	41.4 mm	70.1 mm	51.6 mm
trim	2.28 deg	1.52 deg	2.28 deg	0.75 deg	1.35 deg	1.42 deg
displacement	8.60 ton	8.60 ton	8.90 ton	7.80 kg	7.80 kg	7.80 kg
incident angle (fore)	4.0 deg	4.0 deg	4.0 deg	6.0 deg	1.0 deg	5.0 deg
incident angle (aft)	2.5 deg	2.5 deg	4.0 deg	6.5 deg	2.0 deg	5.0 deg
speed	26.0 kt	17.8 kt	18.8 kt	3.741 m/s	3.741 m/s	3.741 m/s
foilborne ratio	76.6 %	27.1 %	67.8 %	82.7 %	57.4 %	77.7 %

没水度を約 150 mm 高めた。

2.3 機装

JCI 規則を満足する装備の他、総圧管型および翼車型速度計、エルロン・フラップ操作盤、超音波式前部水位計を備えた。計測制御関係システムについては別稿で報告する予定である。速度計の検定は弓削島沖マイルポストにおいて行った。

船体外板上およびストラット上のキール上 1.0 m のレベル以下には 60 cm×20 cm (一部 60 cm×10 cm) のチェックマーク塗装し、浮上量の計測に便利ようにした。

2.4 建造・実験日程

1990 年 3 月に起工、同年 7 月 27 日進水し、エクセラー (Exceller) と命名された。第 1 回実験を 8 月 1 日～8 月 3 日、第 2 回実験を 8 月 23 日～8 月 25 日、第 3 回実験を 10 月 16 日～10 月 18 日、第 4 回実験を 12 月 4 日～12 月 6 日に実施した。本報告に関連する実験は第 1 回、第 2 回および第 3 回実験の初日に行ったものである。実験海域は、瀬戸内海の向島、因島、弓削島周辺海域である。

2.5 模型船

実験船の 1/10 縮尺模型とした。曳引車の最高速度の制約から実船で 24 ノットに対応する速力までしか実験を実施できないが、計測精度の点からこの縮尺率とした。船体は単胴中心面とデッキに合板とバルサ材を用い、その他の部分はウレタン材を使った。表面は、ポリエステル・レジによる硬化、パテによる平滑化処理を行ったのち塗装した。翼は既存の 2 次元翼型を加工して製作したので、翼断面形状は実験船と異なっている。

模型実験は東京大学船型試験水槽で実施した。実験方法は既報のもの^{2)~4)}と全く同じである。

3. 模型船抵抗試験

3.1 試験状態

実験船、模型船ともに Table 2 に示す A, B, C の 3 つの状態で行った。状態 A, B は前翼位置を下げる以前の状態で、それぞれ foilborne 率の高い状態および低い状態である。状態 C は、前翼を実験船で約 150 mm 下げた後、foilborne 率を A に近づけた状態である。模型船の場合

Fig. 4 Total resistance curve of the model

Fig. 5a Foilborne ratio of the model (condition A and B).

Fig. 5b Foilborne ratio of the model (condition C).

は、すべて 23 ノット (3.741 m/s) 一定での姿勢計測から求めた吃水であり、一方実験船は、VTR、スチルカメラ撮影から求めた外側水線位置より求めた前後吃水を示す。水面の盛り上がりのため、この実験船の吃水は大きめに計測

される。実験船では、補助翼の状態や主機出力により、多様な状態を作ったため、Table 2 に示したものは、そのうち平均的な状態である。実験船と模型船の船体は全く相似で縮尺を 1/10 とし、翼形状も相似であるが、翼断面形状は既製の異なったものを使った。このことと、模型船の翼が補助翼を持たないことから、前後翼の設定迎角は実験船と模型船で異なる。

3.2 抵抗試験結果

全抵抗係数曲線を Fig. 4 に示す。フルード数 F_n および全抵抗係数 $C_t (= R_t / 1/2 \rho U^2 \nabla^{2/3})$ はそれぞれ排水容積の 1/3 乗および 2/3 乗で無次元化している。実験船で 24 ノットに対応する速度範囲まで実験を実施し、高速度の 9 点の速度の間隔は、実験船で 1 ノットに対応する。HC 200 に関する第 1, 2 報¹⁾²⁾では排水量 200 トン、速度 40 ノットを設計条件としたが、このフルード数は、今回の実験で、23 ノットの基準とした状態 (Table 2) とほぼ一致する。

主機配置等の面から、船体形状は HC 200 と大幅に異なり、さらに、水線入角が HC 200 より大きく、多少スプレーを出す船首形状をしているにもかかわらず、Fig. 2 の全抵抗曲線は HC 200 のものに非常に近い、計画フルード数における状態 A, C の全抵抗係数の値も、ほとんど差がない。本システムの抵抗特性は、foilborne 率さえ同じであれば、船体形状には、あまり敏感に影響されないと言える。foilborne 率の変化を Fig. 5 に示す。計測された浮上量とトリムから浮力支持量を求め、これを全重量から差し引くことにより算定したものである。24 ノットで状態 A, C とともに約 86% で抵抗値も一致している。状態 B での最大 foilborne 率は約 62% である。

Fig. 6 に Fig. 4 の全抵抗係数より推算した EHP を示す。計画速度近くでの全抵抗係数の減少率は、速度の 2 乗

Fig. 6 Effective horsepower estimated from the model test results.

の増加率より大きいので、特に状態 A, C では EHP の変化は、極端に小さい。状態 C では 10% 足らずの EHP の増加で、21 ノットから 24 ノットに増速する。foilborne 率 80% 程度で顕著になる全没翼型水中翼船の特徴と思われる。高速で foilborne 率が高くなると、全体効率が急速に上昇するということであるが、逆に計画速度の設定が比較的難しいということも意味する。

3.3 拘束抵抗試験結果

模型船 (C 状態) を 3 分力計で固定した状態で曳引し、吃水、トリム、ヒールの諸量を変化させたときの抵抗変化を計測した。トリム、ヒールの各角度を変えるときは、重心位置および中心線の高さを一定とした。結果を Fig. 7~9 に示す。

Fig. 7 Variation of total resistance coefficient due to change of draft (condition C).

Fig. 8 Variation of total resistance coefficient due to change of trim (condition C).

Fig. 9 Variation of total resistance coefficient due to change of heel angle (condition C).

全抵抗係数は、吃水の増大にほぼ比例して増大すること、翼迎角を固定したままトリム角を変化させたにもかかわらず、通常航走状態である5%以下のトリムであれば抵抗増加はあまり大きくないことが判る。ヒールの影響は更に小さい。

4. 実験船定常航走試験

4.1 試験状態

Table 2 に試験状態を示す。時間経過とともに計測器材や制御機器を追加したため、第1回実験(A状態)、第2回実験(B状態)、第3回実験(C状態)の間に、約800 kgの船体重量の増加があった。しかし、第2~3回実験では燃料搭載量を減らしたので、中心的な状態は、Table 2 に示すとおりであり大きな変化はない。乗船人員の変化(5人~12人)は考慮していない。

エルロン4枚、フラップ4枚の合計8枚の補助翼を調整して、後述のような各種の状態を作り航走試験を行ったが、整理を簡単にするため、本報告では、前翼平均補助翼角(α_f)と後翼平均補助翼角(α_a)を使って検討することとする。

速力は、弓削島マイルポストで検定を行った翼車型およびピトー管型速度計による対水速度とした。foilborne率は、陸上よりVTR・スチル両カメラで撮影した船体外側吃水に依った。双胴間水面は相対的に低いので、幾分少なめの値となる。

実験船の静止状態をFig. 10に示す。乗船者が5名しかいないにもかかわらず、かなり吃水が深いことがわかる。

Fig. 11に平均的な航走状態を示す。

4.2 速力と foilborne 率

第1回実験では、主機回転数を固定して直進航走し、前後の補助翼角を段階的に上げていき、それぞれの組み合わ

Fig. 10 Experiment ship "EXCELLER" on the still condition.

Fig. 11 Experiment ship "EXCELLER" at 21 kt.

Fig. 12 Relation between foilborne ratio and speed (condition A).

せによる、トリム、速度、foilborne率の変化の関係を求めた。約68%程度のfoilborne率から90%を超えるfoilborne率まで、自由に変更することができたので、定常航走用としての補助翼の配置と規模は充分であることが判った。

速力と foilborne 率の関係を Fig. 12 に示す。同一速力に対して、約 8% 程度の foilborne 率の広がりがあるが、速度と foilborne 率との間には正の相関があり、この主機出力では、図中の直線以下の領域は実現出来ないものと考えられる。水中翼船の計画にとつては、充分な foilborne 率を得られる主機出力と翼面積の組み合わせが、特に重要である。揚抗比の高い低迎角範囲内で充分な foilborne 率が達成されないと、航海速力は急減するからである。

第 1 回実験での最高速度は 26.5 ノットであった。このときの主機出力を 230 馬力と仮定し、さらに推進効率をウォータージェット特性曲線から 0.45 と推定すれば、全抵抗係数は、0.0284、重量抵抗比は 7.55 となる。模型実験では、曳引車の速度の限界から、実船 24 ノットの状態 ($C_f = 0.0348$) までしか、全抵抗係数の計測を行っていないが、26.5 ノットで $C_f = 0.0320$ と外挿すると、実船の全抵抗係

数は模型船の 89% となる。しかし、模型船では翼スパン中心のストラットおよび前部ポッドがないこと、実船におけるウォータージェット吸入口の損失、翼取り付け部などの不要の突起による抵抗増加を考えると、この値は大幅に低下するものと考えられる。

4.3 定常姿勢変更試験

前後のエルロン、フラップの角度を調整して、色々な航走姿勢を作り、エルロン、フラップの縦方向姿勢制御に対する感度、各状態での速力や安定性を調べた。状態 B についても実施したが foilborne 率が低すぎて、興味ある結果とならなかった。状態 A、C についてのみの結果を Fig. 13, 14 に示す。状態 A では、補助翼角をさらに大きくし、没水度不足による前翼失速に到る状態の試験も何度か行ったが、図中には含んでいない。

データが少なく、誤差も大きいので、Fig. 13 中の等トリ

Fig. 13a Relation between aileron angle and trim (condition A, numbers indicate trim in percent).

Fig. 14a Relation between aileron angle and foilborne ratio (condition A, numbers indicate foilborne ratio in %).

Fig. 13b Relation between aileron angle and trim (condition C, numbers indicate trim in percent).

Fig. 14b Relation between aileron angle and foilborne ratio (condition C, numbers indicate foilborne ratio in %).

ム線の精度は低い、左上に行くほどトリムが減り、右下に行くほどトリムが増える傾向が示されている。foilborne率については、さらにデータが広がっているが、当然ながら、右上（前後とも補助翼角を増やす）に行くほど大きくなる傾向が見える。しかし、等 foilborne 率線を引くと、この線は垂直線 ($\alpha_f = \text{const.}$) に近い右下がりの線になると思われる。ある範囲内の姿勢変更であれば、前翼のフラップだけを用了ので充分であることを示すと考えられる。以上のように、前後補助翼の角度調整によって、自由に航走姿勢を変更出来ることが実証された。

5. 模型船運動試験

5.1 試験状態

Table 2 の 3 状態で、正面規則波中運動試験を行った。従来²³⁾⁷⁾と同様、surge を拘束した heaving rod 方式を採用した。速力は 22 ノットの状態のみとし、波高は 4 cm と 7

cm の 2 状態とした。実験船の静止時吃水が 80 cm で、縮尺が 1/10 であるので、7 cm の波高は大変厳しい状態になる。船長 30 cm 程度以下の小型船を想定し、波長船長比 4 程度までを試験範囲とした。

5.2 試験結果

試験結果をヒープ、ピッチ応答関数の形で Fig. 15, 16 に示す。波長船長比が 1 程度では、ヒープ応答関数の値は 0.1 程度で、ほとんど揺れない状態であるが、波長船長比が 3 に近づくとも 1 を越え、かなり大きな運動となる。このような長波長域では波面に沿った航走となり、やむを得ないであろう。ヒーピング運動に対しては、3 状態間の差は小さい。

ピッチ応答関数の値は、ほとんどの状態で 1 を越えず、特に、前翼没水度を高めた、C の状態では、長波長域でも 0.8 以下になっている。前翼没水度を高めることは、直接的に耐航性向上のため有効になる。

Fig. 15a Heave transfer function of the model, wave height is 4cm.

Fig. 16a Pitch transfer function of the model, wave height is 4cm.

Fig. 15b same as Fig. 15a, wave height is 7cm.

Fig. 16b same as Fig. 16a, wave height is 7cm.

Fig. 17 The experiment ship in waves.

6. 波浪中航走試験

実験船による実験の主目的の一つは、波浪中の運動性能を調査することである。前章の水槽試験結果を確認するとともに、斜め波中や追い波中などでの性能を調査することができる。しかし、定量的な評価を得ることは技術的に容易ではないので、定量的な運動計測は運動制御実験に譲り、第1〜3回実験の範囲では、航走船の船尾波を利用した定性的な特性把握のみを行った。試験状態の1例をFig. 17に示す。その結果、これまでの水槽試験結果から予測されたとおり、比較的短波長の向い波斜め波に対する応答は非常に低く、また、ピッチングは全般的に非常に小さく、短波長域での縦方向の運動制御は、あまり重要でないことが判った。ただし、真横(90°)からの波に対しては、ある程度のローリングを行うことが、大型船の航走波の diverging wave に正逆両方向から合わせた試験などから判った。

結 論

約5年間研究開発を進めてきた双胴水中翼船の実験船を建造し、その定常直進航走試験結果を中心に報告した。動

的応答・制御関係を中心に研究を継続中であるが、本報告で述べた実験の結果から定常姿勢の調整能力さえ備えていれば、動的な制御なしでも、実用船として供しうる見通しが得られた。速力検定と状態Aの実船実験は進水翌日に行われたものである。本システムの信頼性と安全性の高さが立証されたと思われる。本報告の Hydrofoil Catamaran の特性は、小型高速船だけでなく、より大規模のシステムにとってもふさわしいものと考えられる。動的応答・制御関係の研究結果については、担当研究グループより報告される予定である。

実船実験には、非常に多くの方の暖かいご協力を頂いた。厚くお礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 宮田他, 新型双胴水中翼船の開発(第1報, 形状計画と抵抗特性), 日本造船学会論文集 162号, (1987), pp.11-19.
- 2) 宮田他, 新型双胴水中翼船の開発(第2報, フラップ付船型の計画と運動性能), 日本造船学会論文集 164号, (1988), pp.95-104.
- 3) 宮田他, 新型双胴水中翼船の開発(第3報, 大型船型の計画と流体力学的性能), 日本造船学会論文集 166号, (1989), pp.49-55.
- 4) H. Miyata, Y. Tsuchiya & M. Kanai, New conceptual design of hydrofoil catamarans, Proc. Intern. High-Performance Vehicle Conf., Shanghai, (1988)
- 5) H. Miyata, Development of a new-type hydrofoil catamaran, J. Ship Research 33, No.2 (1989), pp. 135-144
- 6) K. Holden, K. J. Minsaas & P. Werenskiold, High speed vehicle—seakeeping and propulsion—, Proc. Intern. High-Performance Vehicle Conf., Shanghai, (1988).
- 7) 宮田他, 新型双胴水中翼船の開発(第4報, 翼列干渉と4000トン型の流体力学的性能) 日本造船学会論文集 168号, (1990), pp.1-7