

全没型水中翼双胴船の開発

Development of Fully Submerged Hydrofoil Catamaran

長崎造船所 木原和之^{*1} 濱田知聰^{*2}
 下関造船所 三好章夫^{*3}
 船舶・海洋事業本部 末岡英利^{*4}
 技術本部 土岐直二^{*5}

高速ディーゼル機関を搭載した速力 40 ノット、341 人乗りの大型全没型水中翼双胴船を開発、建造した。現在島根県隠岐航路に定期就航中である。本船の特徴は次のとおりである。(1) 双胴船型の採用により、縦横比が大きい幅広水中翼となり、離水時の船体抵抗を軽減、また、単胴型に比べ船底傾斜角が大きいため、大波高中での船底波浪衝撃が軽減されている。(2) 前後同型のタンデム翼配置によって、従来のカナード配置に比べ、全体の揚抗比が高くなり、性能が向上している。(3) 船体姿勢制御装置により、安定した翼走を可能としている。(4) 推進システムは、新規開発の高出力軽量ディーゼル機関 4 基と高効率軽量ウォータージェット推進装置 2 基から成っている。

A diesel driven fully submerged hydrofoil catamaran has been completed. She is a newly developed passenger ferry with the speed of 40 knots and passenger capacity of 341 and now in commercial service on the Oki Islands route in Shimane Prefecture. Her technical features are as follows: (1) Catamaran hull brings hydrofoils with bigger span and small hull resistance in take-off condition and relatively soft wave impact in rough seas because of greater dead rise of the bottom than the mono-hull type. (2) Tandem foil configuration where fore and aft hydrofoils are exactly the same shape brings higher aspect ratio with high lift to drag ratio in comparison with the canard foil configuration on existing craft. (3) Automatic ride control system keeps foilborne condition stable. (4) Her propulsion system consists of 4 sets of light weighted high-speed diesel engines and 2 sets of newly-developed light weighted water-jet propulsors.

1. ま え が き

近年、海上旅客輸送の高速化・快適化の要求が急速に高まっており、各種高速艇が就航しているが、離島航路などの外洋においては、通常的高速艇では高速性と快適性の両立が困難であり、全没型水中翼船がふさわしいと考えられる。しかしながら、経済的で取扱いが容易であるため、高速艇の主機関として最も一般的に用いられている高速ディーゼル機関を搭載した全没型水中翼船は、重量の面から実現が困難とされ、従来から試みられたことはなかった。

しかるに、最近の高速ディーゼル機関の軽量化は著しいものがあり、船体及び水中翼の軽量化技術、船型技術及び制御技術等最新の造船技術の組合せによっては、ディーゼル駆動の全没型水中翼船が実現可能と考えられたため、高速旅客艇として実用化を図ることとした。開発実用化に当たっては、高速ディーゼル機関の一層の軽量化及び水中翼船に最適なウォータージェット推進装置の開発も併せて行うこととした。

本艇は、1992 年 2 月に建造に着手し 1992 年 10 月に海上運転を開始、約 6 か月にわたる調整、慣熟運転を経て、1993 年 3 月に(株)隠岐振興に引渡し 4 月から島根県隠岐航路に定期旅客船として就航している。

2. 設 計 の 概 要

水中翼船の設計建造において、最も重要なことは全体重量の軽減である。中でも全没型水中翼船は、水面貫通型に比べ離水時の抵抗が大きくなるため、一層の軽量化が必要であり、主機関をディーゼルとする場合は、主機関本体だけでなく船体及び水中翼など全体の軽量化に留意しなければならない。

しかしながら、軽量化にもおのずから限度があるため、全没型水中翼船の従来の設計思想では翼面積当たりの重量が大きくなり過ぎ離水性能と翼走性能とのバランスが取れた設計は極めて困難である。したがって、種々検討を行った結果、船体は双胴船型を採用することになり、従来の全没型水中翼船と大幅に異なる特徴を有することとなった。以下にこれらの特徴を示す。

- (1) 出力増と軽量化を行った高速ディーゼル機関は、馬力当たりの重量において世界最高クラスを達成しているが、ガスタービンに比べれば、関連補機類も含めて相当の重量となる。したがって、これを賄うには翼の揚抗比が大きくなる大縦横比の水中翼すなわち翼のスパンを大きくする必要があるが、船体を双胴とすることにより実現が可能となる。
- (2) 波浪中航行において船底に当たるような大波に出会った場合、従来の単胴船型では、船底がフラットに近いので大きな衝撃力を受けるが、双胴の場合は船底傾斜角が大きいため、波浪衝撃が小さくなるのが期待できる。また、離水時の船体抵抗が、船体が細長いので浮上に伴って小さくなり、離水が容易となる。
- (3) 従来の全没型水中翼船の翼配置は、主機関が後端にあるため重心が後側にあり、主として後翼が船体重量を支えることになり、前翼が小さいカナード型となっている。これに対し、本船では、所要の出力を得るため前後に連結された 2 台の主機関[左右両舷(げん)で合計 4 台]がほぼ船体の中央に配置され、重心が船体中央付近となって、前後の翼が分担する船体重量が等しくなる。したがって、翼は前後同じ形状面積のタンデム配置として最大の縦横比を採ることが可能となる。

主要目を表 1 に示す。また、航走中の写真を図 1 に、進水吊上げ時の写真を図 2 に、一般配置を図 3 に示す。

*1 造船設計部高速艇開発センター長 工博 *3 舟艇部長
 *2 造船設計部高速艇開発センター主務 *4 新製品部主務
 (現 下関造船所舟艇部主務) *5 長崎研究所船舶・海洋研究推進室主務

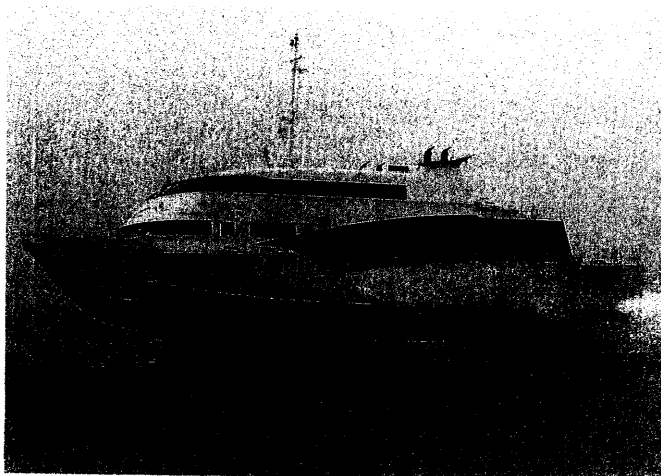


図1 翼走中写真
Photo of profile of foil-borne

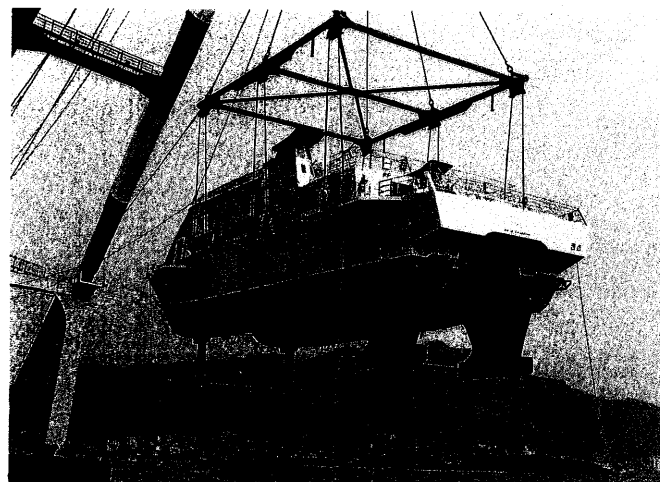


図2 進水吊上げ状態
Scene of launching

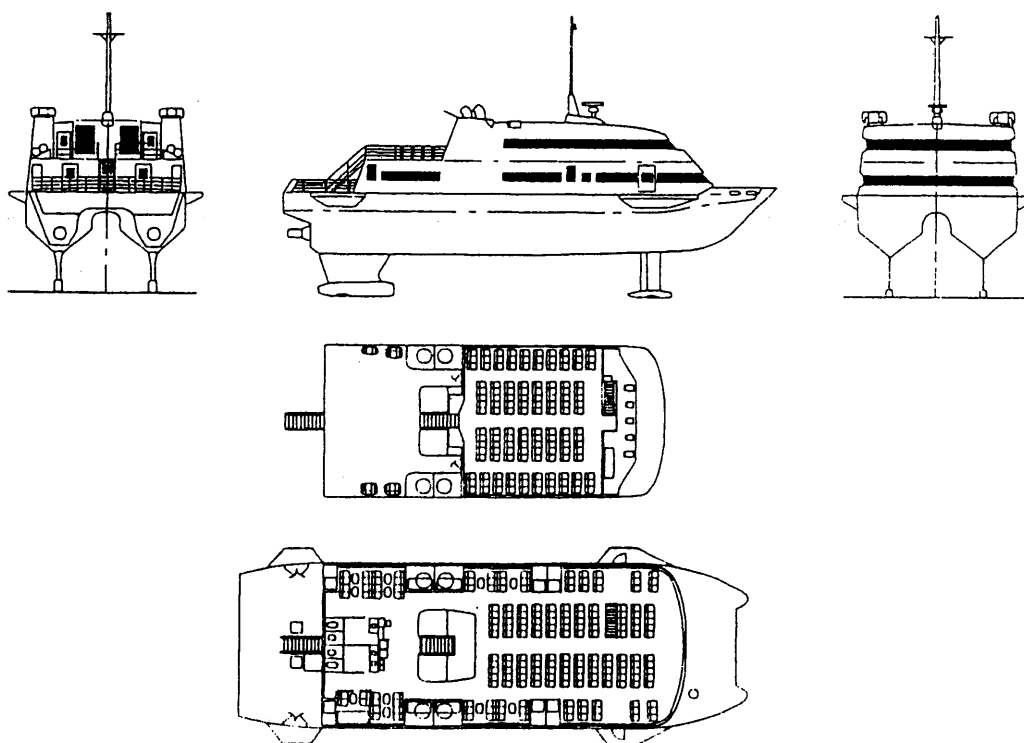


図3 一般配置図
General arrangement

表1 主要目
Principal particulars

全 長	33.24 m	総トン数	302 トン
全 幅	13.20 m	航海速力	38~40 kn
深 さ	4.20 m	旅客定員	341 人
喫水 (艇走)	4.50 m	乗 員	4 人
喫水 (翼走)	2.10 m	載荷重量	35 t

3. 船体構造及び水中翼

3.1 船 体 構 造

船体の軽量化に当たっては、十分な強度を有することが絶対条件であり、水槽試験とシミュレーションによって推定した波浪荷重を基に詳細な検討を行った。特に、水中翼支柱と船体との結合部に作用する集中荷重などについては、細心の注意を払った。な

お、上甲板の大部分は発電機、前後主機関の取出し用の開口部となっているが、軽量化のためアルミハニカム製のリムーバブルプレートとしている。

3.2 防振・防音対策

軽量構造に大出力のディーゼル機関を搭載するため、主機関の振動と騒音によって生じる客室の騒音を低減することが、ガスタービン船の場合に比べ、より重要な課題となる。対策は軽量でなければならず、上甲板客室床は浮床式、すべての壁及び天井は新たに開発したハニカム内装パネルの防振支持取付、二重窓の採用などにより、騒音レベルは76 dB(A)を達成した。

3.3 水中翼及び支柱

水中翼は前後全く同じ形状であり、翼幅（スパン）は船体幅よりやや広く12.8 mである。船体姿勢制御用の翼フラップは、前後とも翼の全幅にわたって設けている。翼及び支柱の構造設計に

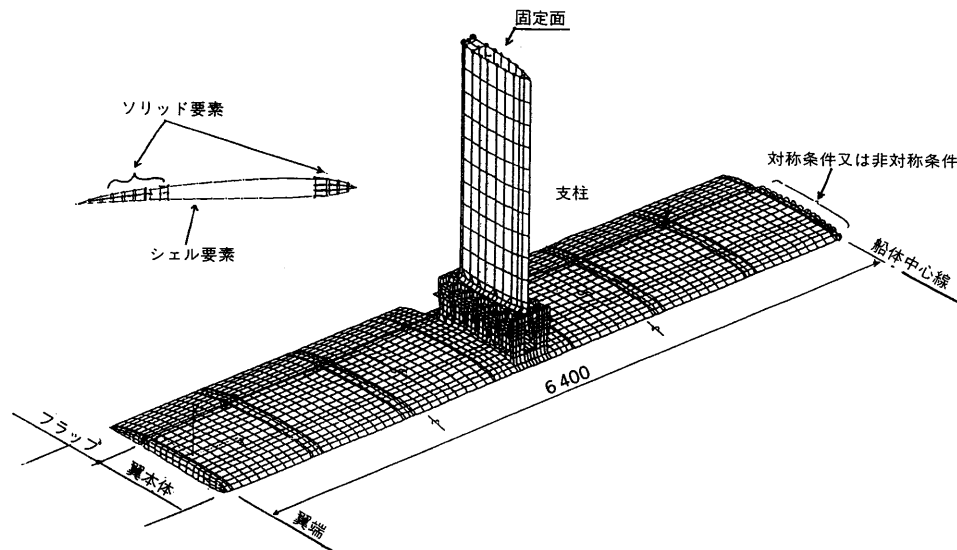


図4 前翼のFEM 構造解析モデル 応力が高くなる翼と支柱の結合部は要素を細かくして計算。
Finite element model of fore foil and strut

表2 15-5 PH 鋼の強度と熱処理の効果
Effect of heat treatment on strength of 15-5 PH

	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	絞り (%)	破断 位置	衝撃値 (J)
素 材	1 014	1 054	20.0	61.8	—	62.71
溶接後	母 材	832	903	24.0	75.3	—
	溶接部	825	902	24.0	76.6	溶金

当たっては、船体構造と同様に各種の詳細な検討を行った。図4に計算モデルを示す。材質は、翼本体を析出硬化型ステンレス(15-5 PH) 鋼の溶接組立、フラップをチタン合金の一体削り出しとして軽量化を図っている。翼本体は海水中を考慮して所要の強度と靱性を確保するため溶接組立後熱処理を行う必要があり、あらかじめ約2分の1の大きさの試作翼を製作して検討を行った。実艇翼に用いた熱処理条件は、

溶体化処理：790℃×3h 時効処理：570℃×4h

であり、その効果を表2に示す。素材は、強度は高いものの、衝撃値すなわち靱性が低く、海水中の使用に問題があるが、低温による溶体化処理と時効処理により、溶接組立後において靱性を大幅に向上しながら、所要の強度を保持している。なお、熱処理に当たっては、温度分布を均一にするため、全体をステンレスの箱(マッフル)に入れて行い、さらに、最終の仕上げとして、全体を切削し、精度を確保している。また、前翼の支柱は、できるだけ薄型にするため翼本体と同じ材料、構造とし、後縁には操舵用の縦フラップを装備しているが、後翼の支柱は、ウォータージェットのインレット及びダクトをかねているため、船体と一体の軽合金構造としている。

4. 推 進 装 置

本船の推進装置は左右舷2機ずつ前後方向に連結し各双胴船体内に据付けられた計4機の高速ディーゼル機関と各双胴の後端に1基ずつ装着された計2基のウォータージェット推進装置から成っている。

4.1 高速ディーゼル機関

高速ディーゼル機関S-16 R-MTK-Sは、汎用軽量ディーゼル機関として多数の実績のあるSRシリーズを高出力化し、さらに

表3 S 16 R-MTK-S 主要目
Particulars of S 16 R-MTK-S

型 式	V 型, 4 サイクル, 過給機付
シリンダ数	16
シリンダ径	170 mm
シリンダ行程	180 mm
総排気量	65.4 l
連続最大出力	2 100 kW
最大回転数	2 000 rpm
乾燥重量	5 500 kg

軽量化を行うことで当社で開発された。重量出力比は、2.6 kg/kW であり、最高レベルの軽量化を達成している。表3に機関要目を示す。なお、2機の連結方法としては、従来行われているユニバーサル継手に替え、軽量化の面から平行歯車とコニカル歯車を組合せた減速機を採用している。

4.2 ウォータージェット推進装置

水中翼船の推進器は、離水低速航行時に最大の推力を発揮することが要求されるため、船速が低い状態での吸込み、加速性能が優れていなければならない。一方、翼走状態で高速を保持するためには高速時の効率を確保しなければならない。これらは、ウォータージェット推進装置にとって相反する要求であり、一般に両立するのは困難とされてきた。特に、本船では重量が重く要求が一層厳しくなるため、二重翼列羽根車方式すなわち6枚の前羽根車によって吸込み性能を高め、12枚の後羽根車によって高効率を保持するという従来例のない新方式とすることによって、本船に最適の推進装置を当社で開発することとした。形状寸法の設定に当たっては、水槽試験と理論検討を併用し詳細な検討を行った。材料については、軽量化のため二相ステンレス鋼及び析出硬化型のステンレス鋼を用いており、羽根車は一体削り出しとしている。また、推進効率に直接関係するダクト及びインレット形状についても、風洞試験、キャビテーション試験及び流場計算を行って決定した。なお、操縦装置としては、初めての固定ルーバ方式を採用し、後進力を確保しながら軽量化を実現した。要目を表4に、二重翼列羽根車を図5に示す。また、図6に推力特性を示すが、船速40 kn 翼走時の推力を確保する場合、通常型では、最大推力

表4 ウォータジェット推進装置主要目
Water jet propulsion unit MWJ-500 A

装置型式	特殊軸流（二重翼列）
最大入力	5 500 PS
回転数	1 022 rpm
回転方向	船尾から反時計方向
羽根車径	814 mm
後進・操舵装置型式	固定ルーバ型
重量	2.2 t

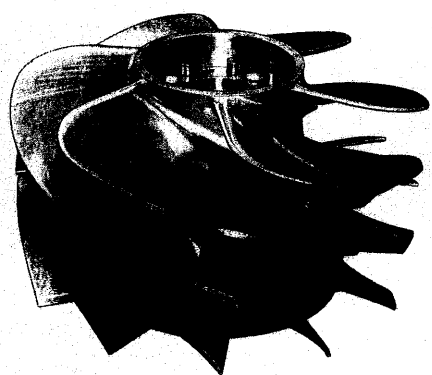


図5 二重翼列式羽根車 一体削り出しの前側6枚
後側12枚の羽根車が隣接している。
Double cascade type impeller

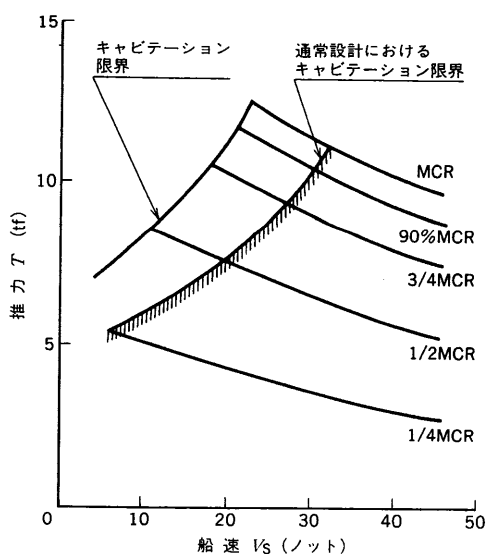


図6 推力特性 二重翼列式羽根車により離水速度
(25 kn 付近)におけるキャビテーション限界を
広げ離水性能を向上。
Thrust characteristics

を出すには、船速 32 kn 程度が必要であり、離水が困難になるのに対し、二重翼列では、キャビテーション性能の向上により、25 kn 付近で最大推力となり、かつ推力が大きいため離水が容易となっている。

5. 船体姿勢制御装置

全没型水中翼船は、自己安定性が十分でないため、船体姿勢制御装置の装備が不可欠である。したがって、船体姿勢制御は、各装置の中で最も重要な位置を占めることになり、従来の例では、

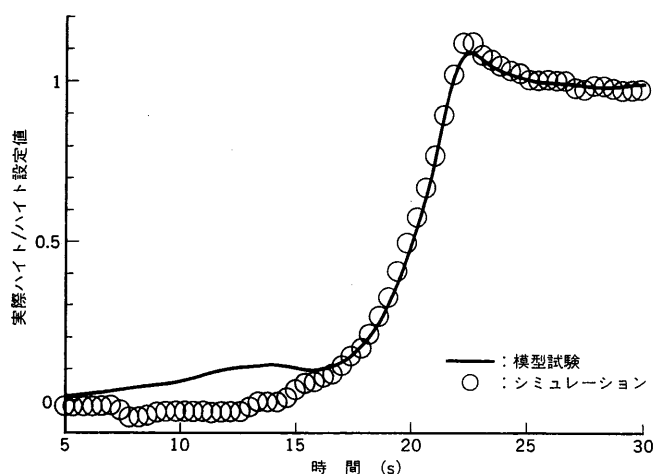


図7 ハイト：模型試験と計算値の比較 目標ハイト1mでの模型試験とシミュレーション計算との離水状態の比較、良く一致している。
Height : Comparison of height between model test and simulation

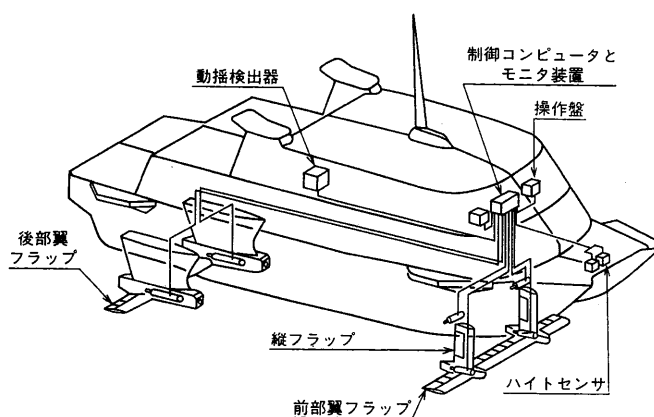


図8 船体姿勢制御装置配置図 上甲板船体中央部の動揺検出器及び船首端のハイトセンサにより検出されたデータは操縦室の演算装置に送られ、作成されたフラップ操作信号が前後翼フラップと縦フラップを駆動させ船体の姿勢を制御する。
Arrangement of APF system

実用艇に先駆けて実験艇を製作し、ハード及びソフトの改良・調整を行って実用化するという手法が取られてきた。しかるに、本艇においては、開発期間の短縮のためにシミュレーションと模型試験によって進めることとし、(1)無線操縦小型自航モデルを用いた自由航走試験による全体像の把握、(2)実船とほぼ同じ制御装置を用いた自航モデルによる離水時の過渡状態等を含めた各種試験、(3)シミュレーション計算、の順番に進めた。模型試験とシミュレーション計算結果の比較・評価及び手法の改良を行いながら検討を進めた結果、両者は比較的良く一致したため、実用する制御法の事前検証が可能となり、実船の調整運転時間を大幅に短縮することができた。図7に一例としてハイトについての模型試験とシミュレーションとの比較を示すが、両者は良く一致している。本船の制御装置 (APF : Auto Pilot on Foils) は、検知装置、演算装置、フラップ駆動用のアクチュエータとその動力源としての油圧装置及び前後翼各2組計4組のフラップと前支柱後の縦フラップから成っているが、これらの全体配置図を図8に示す。

5.1 検知装置

検知装置は、船体中央部に置かれた船体運動検知装置、船首のハイトセンサ、前後左右各支柱の直上に配置された加速度計及び

表5 検知器一覧表
List of sensors

項目	型式	数
ピッチ角	ヴァーチカルジャイロ	2
ロール角	ヴァーチカルジャイロ	2
ピッチ角速度	レートジャイロ	2
ロール角速度	レートジャイロ	2
ヨー角速度	レートジャイロ	2
ヒープ速度	ヒープ計	2
水面からの高さ	超音波式ハイトセンサ	2
上下加速度	加速度計	2
速 力	電磁ログ	2

前翼と支柱の結合部をカバーしているポッドの底部に装着されている電磁式速力計から構成されており、これらの信号は、操縦室に置かれた演算装置に送られる。各検知装置をまとめて表5に示す。検知装置は、冗長性を高めるために各2セットが装備されており、自動バックアップシステムとなっている。

5.2 演算装置

演算装置は、2台のデジタル計算機、コントロールパネル、モニタパネル及びシーケンサから構成されている。電源は24VのDCとしており、発電機が故障した場合においても、継続して演算が可能となっている。また、計算機などは、自動的に切替わる自動バックアップシステムとなっている。

5.3 フラップ駆動装置

離水及び翼走時の性能を向上するためには、翼支柱をできるだけコンパクトにする必要がある。翼フラップ駆動用の油圧アクチュエータは、メンテナンスの面から船内に置き支柱内にリンクを通して水面下のフラップを駆動するのが一般的であるが、この場合、前支柱においてはリンクを通すために必要な厚さが強度面からの要求値よりも厚くなり、また、後支柱においても、ウォータジェットダクトを避けてリンクを通さねばならず、支柱形状が大きくなる。したがって、支柱形状を最小にするため、アクチュエータを水中翼と支柱の結合部ポッド内に配置することにした。この場合、支柱を通るのは、電線と油圧管になり、支柱形状はコンパクトになる。ただし、水中にあるアクチュエータすなわち没水型アクチュエータは、メンテナンスフリーでなければならず、十分な耐久性の検証が必要である。このため、本駆動装置の海水環境下での耐久試験を行い、アクチュエータ、シール部、ベアリング部などに改良を加えた。

6. 海上試験

本船は、1992年10月に完成し、海上試験を開始した。10月末には主機関出力75%で完全浮上に成功し、離水性能は良好であることを示した。さらに、11月始めには最大速力45.4ノットを達成した。また、旋回性能については、前支柱の縦フラップと翼フラップによるバンクに加えて、浮上性能に余裕があることからウォータジェット操縦装置を併用することが可能となり、旋回径は非常に小さく400m程度となっている。図9に旋回試験の軌跡を示す。その後も引き続き海上における調整試験を続行し、1993年3月初めには就航航路である隠岐に回航し、2週間にわたって

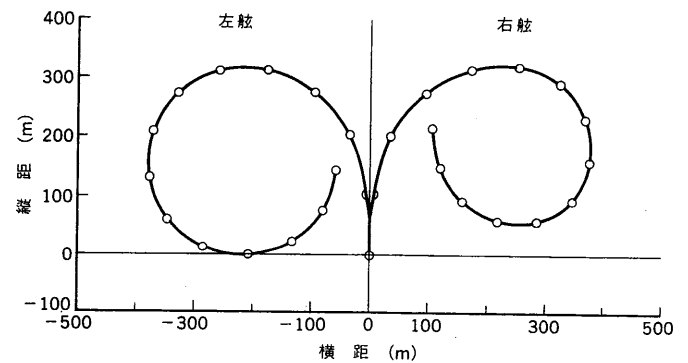


図9 旋回試験結果(翼走:41kn) 旋回径は最大400mであり従来船より大幅に向上している。
Results of turning test in foil-borne condition (Initial speed: about 41 kn)

最終の乗員訓練と実海域に合わせた制御装置の調整を行い3月20日(株)隠岐振興に引渡した。

7. む す び

高速性と快適性を合わせ持ち、運航経済性にも優れたディーゼル機関搭載の全没型水中翼双胴船“三菱スーパーシャトル400”の開発を行い第一船を建造した。本船は、1993年4月1日から隠岐汽船(株)により定期運航を開始しており、従来船に比べて高速・快適であるため乗客数は約2倍に増加している。しかしながら、第一船であり、まだ1年余の経験しかないため、今後も引き続き運航記録の解析、評価を行い、改良を続けることにしている。

最後に、第一船にもかかわらず、“スーパーシャトル400”の御発注により、開発、建造の機会を与えていただきました(株)隠岐振興岡田昌平社長、隠岐汽船(株)田黒輝夫会長ほか関係各位、島根県、西郷町、布施村、五箇村、都万村、海士村、西ノ島町及び知夫村関係各位に対し深く感謝の意を表します。また、建造中に、極めて適切な御指導と御助言を頂きました東京大学小山健夫教授、広島大学仲渡道夫名誉教授、広島大学茂里一紘教授並びに久留米高専高橋 雄教授に対し厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) Harada, T. et al., The New S16 R-S Engine for Passenger and Utility Craft, CIMAC, LONDON (1993)
- (2) Kihara, K. et al., Diesel Driven Fully Submerged Hydrofoil Catamaran Mitsubishi Super-Shuttle 400, the "RAINBOW", Proceedings of FAST '93, YOKOHAMA, JAPAN (1993)
- (3) Sueoka, H. et al., Design and Manufacturing of the Foil System for Mitsubishi Super-Shuttle 400, the "RAINBOW", Proceedings of FAST '93, YOKOHAMA, JAPAN (1993)
- (4) Toki, N. et al., Model Tests and the Development of Control System for the Super-Shuttle 400 "RAINBOW", Proceedings of FAST '93, YOKOHAMA, JAPAN (1993)
- (5) Kawakami T. et al., Water Jet-Propulsion Unit for High-Speed Hydrofoil Catamaran, Proceedings of FAST '93, YOKOHAMA, JAPAN (1993)