特 集

高 速 船

超高速全没翼型水中翼船 “ジェットフォイル” *

長 谷 川 康 夫**

Super High Speed Fully Submerged Hydrofoil
“Jetfoil”*

by Yasuo Hasegawa**

キーワード：ジェットフォイル，全没翼型水中翼船，ガスタービンエンジン，ACS

写真 1 川崎ジェットフォイル 10 号艇 “すいせい”

1. はじめに

近年，経済発展や余暇利用の多様化に伴い，各種交通機関における快適化，高速化に対するニーズがとみに高まってきている。旅客船分野においても例外ではなく，快適性，高速性にすぐれた超高速船の導入機運が盛り上がりを見せている。

高速船はその重量支持方式により，浮力支持，空気圧力支持および揚力支持方式に大別できる。全没翼型水中翼船「ジェットフォイル」は揚力型に属し，文字通り水中翼を海中に全没させ，その揚力により

船体を持ち上げて航行する。このため波浪の影響を受けず，速くて，揺れない画期的な旅客船である。

以下にこのジェットフォイルの概要を紹介させていただく。

2. 主要目

本船の主要目を以下に示す。

全長（水中翼を上げた状態）	30.3 m
全長（水中翼を下げた状態）	27.4 m
垂線間長	24.0 m
型幅	8.5 m
最大幅	9.1 m
型深さ（メインデッキ）	2.6 m
満載喫水（水中翼を下げた状態）	約 1.5 m
最大喫水（水中翼を上げた状態）	約 2.2 m

*原稿受付 平成 4 年 7 月 22 日

** 川崎重工業株式会社 Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

最大喫水（水中翼を下げた状態）	約 4.9 m
総トン数	約 170 トン
最大搭載人員	約 270 名
翼走速力	約 45 ノット
航続距離	約 300 海里

3. 一般配置

本船にはメインデッキ、アッパーデッキ、ハウストップの各甲板が設けられており、メインデッキ下は水密隔壁により 16 の区画に分けられている。メインデッキ下の区画は後部よりガスタービン室、減速機・ウォータージェット推進機室、後部補機室、燃料タンク、前部補機室がいずれもコンパクトに配置されており、水密隔壁はいずれの 2 区画に浸水しても、安全なように配置されている。

客室は上部客室と下部客室の 2 層から成り、約 270 名の乗客及び乗員を乗せることができる。各客室の舷側および下部客室の前方には大きな角窓が設けられていて、十分なクリアーハイト、ゆったりとしたエントランス、階段スペース及び通路と相まって、明るく広々とした空間を作り出している。

客室の椅子は軽量であるのはもちろんのこと、坐り心地のよいものを採用している。

上部客室の前方に操縦室が設けられており、操縦に必要なすべての機器・計器・警報等がこの操縦室内にコンパクトかつ機能的にまとめて配置されており、さながら航空機の操縦室の様相を呈して

いる。また、通常の状態ではすべてのシステムが操縦室より制御できるようになっている。図 1 に一般配置図を示す。

4. 船体構造・材質

船体構造材料は軽量化のため 5456 アルミニウム合金、ストラットおよびフォイルには高強度及び耐食性のすぐれた析出硬化型ステンレス鋼 (15-5 PH) やチタン合金が使用されている。アルミニウム合金の溶接はティグ溶接法とミグ溶接法を併用し、15-5 PH 鋼の溶接はティグ溶接、ミグ溶接、プラズマアーク溶接及び電子ビーム溶接を併用している¹⁾。

15-5 PH 鋼は溶接部の材料特性を母材と同等に確保するために溶接組立終了後に固溶化および時効の熱処理を必要とする材料でありその施工および品質管理が難しい材料である。最近この 15-5 PH 鋼と同程度の性能を有し溶接後の熱処理が不要である新材料が開発された²⁾。

船体の構造方式は縦肋骨方式であり、溶接接合を極力少なくするために、押出材が多用され、また板材についてはさらなる軽量化のために減肉加工を施している部材もある。

船体強度については、規則で要求される強度の他、荒天航海中に遭遇する波による船底への衝撃荷重や緊急着水時の衝撃荷重等に対し十分な強度を有する様に設計されている。船体中央断面図を図 2 に示す。

この他、内装材についても、航空機でよく使用さ

図 1 一般配置図

図 2 船体中央断面図

れている軽くて強いハニカム材が使われている。

5. ストラット (支柱) およびfoil (水中翼)

本船の前部及び後部には全没翼型水中翼が設けられており、翼走中はこれらのfoilにより発生する揚力で船体を海面上に持ち上げて航走する。

これらのfoilと船体とはストラットと呼ばれる翼型断面を有した支柱で結合されている。前部ストラットは1本でfoilとはちょうど逆T字形に結合されている。一方、後部ストラットはストラットを下げた状態では海水吸入口をも形成する中央のストラットと左右舷側のストラットの計3本がfoilに接合されている。

foilとストラットは水深が許せば下ろした状態が本船にとって通常の航行状態であるが、水深が浅い個所では油圧アクチュエーターにより両方のストラットおよびfoilを上げて航行することもでき、さらに艇走時の操縦性能が重視される場合には前部ストラットだけを下ろして航行することもできる。各ストラットの上げ下ろしに要する時間はおよそ1~2分である (図3参照)。

前部ストラットを下ろした状態で航行する場合、これを通常船舶の舵のように回転させることができ、艇走中は舵として、そして翼走中は傾斜釣合い旋回(バンクターン)中の水流に合い、サイドフォースがほとんど加わらないよう工夫されている。また、水中浮遊物や大形水中生物と万一衝突した時に、ス

図 3 水中翼と推進システム

トラットや船体を保護する目的で、前部ストラットには衝突エネルギーを吸収するショックアブソーバーが、そして後部ストラットにはシアーピンがそれぞれ設けられており、安全性の面でも十分な配慮がなされている。

6. ウォータージェット推進システム

本船の推進力としては、翼走中、艇走中ともウォータージェット推進機が生み出すウォータージェットを利用している。本船の推進システムは左右舷それぞれ独立の2系統のシステムから成り、それぞれのシステムはガスタービン、減速ギア及びウォータージェット推進機から構成されている (図3参照)。従って、もし、いずれか片舷のシステムが故障した場合でも、残るシステムにて艇走航行することができるようになっている。

6.1 ガスタービン

ガスタービンはゼネラルモーターズ・アリソン社製の501KF型で、C-130(ハーキュリーズ)輸送機、P3C対潜哨戒機、その他の航空機に使用されているジェットエンジンの船舶への転用型であり、数多くの実績を有している。また、このガスタービンは軽量かつコンパクトであるにも拘らず、毎分13,120の高回転数で3,800馬力を生み出す驚異的なパワーを持っている。

ガスタービンはコンプレッサー、燃焼室、ガスジェネレーターおよびパワータービンから構成されており、付属システムとして、始動装置、燃料供給システム、潤滑油供給システム等が装備されており、燃料油としては軽油を使用する。この他、デミスター付空気取り入れダクトとタービン給気スクリーンおよび排気ダクトが各タービンに設けられている。

14段軸流式コンプレッサーはエンジン内へ空気を取り入れ、燃焼室での使用に必要な圧力まで空気を圧縮する。燃焼室は6個のライナーチューブから成

図4 ガスタービンエンジンの構造

り、このライナーチューブの1次区域で圧縮空気と燃料の混合および連続した燃焼が行われる。2段ガスジェネレータービンは高温ガスのエネルギーを、コンプレッサーを駆動する軸力へ変換する。パワータービンは、減速ギアを通じてウォータージェット推進機を駆動する動力源であり、高温ガスから動力を取り出す2段の軸流タービンから成る。排ガスは排ガスコレクターおよび排気ダクト、煙突を通して船外へ放出される（図4参照）。

操縦室コンソールには推進プラントの運転・制御・監視用のパネルが配備されており、ガスタービンエンジンは操縦室より遠隔操作され運転中機関室無人である。エンジン始動は、操縦室コンソールに組み込まれている起動ボタンを押した後は、自動起動回路により自動的に進行する。エンジン停止は、同様に停止ボタンを押してエンジン付きの燃焼弁を閉とすることにより行われる。

また、各エンジンに対し1個のスロットルレバーが装備されており、このレバー操作によってエンジン回転数を制御する。これらのレバーは両方同時に片手で位置を決めることができるように配置されている。

6.2 減速ギア

減速ギアは、シングル・ヘリカル型で、ガスタービンの出力軸の回転数を、ウォータージェット推進機の回転数にまで、減速比6.37で減速するものである。

6.3 ウォータージェット推進機

ウォータージェット推進機は、インデューサー、インペラー、ポンプ軸、ハウジング（内部点検孔付き）、インデューサーライナ、ノズルから構成されており、1台当り毎分90 m³の高圧水をジェット流として吐出する能力を有するものである。

ウォータージェット推進機へ取り入れる海水は、後部ストラットを下げた状態では後部中央ストラット下部から、また、ストラットを上げた状態では船底吸水口から取り入れられ、Y型ダクトにより各舷

の推進機に導かれ、推進機により加速されてノズルより船外に噴射される。ウォータージェット推進機にゴミが吸入されるのを防ぐため、船底吸水部にゴミ排除用のインレットグリルが取り付けられており、圧縮空気によるゴミ排除装置（エアブローダウンステム）を設けてある。

ウォータージェット推進機のノズル後方には、ウォータージェットの噴射方向を左右に偏向させるデフレクターと、噴射方向を前後逆転させるリバーサーが取り付けられており、航行時の進路変更、後進を行う。これらは油圧アクチュエーターにより作動する。

6.4 ガスタービンエンジン無負荷保護装置

ガスタービンエンジンには無負荷保護システムが装備されている。これは、ウォータージェット推進機への吸水口が海面に露出するなど、吸水が少なくなると推進機の負荷が急激に低下した時、タービンのオーバースピードによるシャットダウンを防ぐため、推進機入口圧の減少を検出し、自動的にガスタービンの回転数をアイドル回転数まで下げ、吸水口が再び水中に入り推進機入口圧が上昇し始めると、自動的にガスタービンを元の設定回転数まで戻す一連の過程を制御するシステムである。本システムは、荒天時翼走の際に非常に有効な働きをする装置である。

7. 自動姿勢制御装置（ACS）^{3,4)}

浮力により全重量を支える一般船とは異なり、揚力で船体を支える本船にとって自動姿勢制御装置（ACS-AUTOMATIC CONTROL SYSTEM）は必要不可欠のシステムであり、このACS無くしては本船特有の素晴らしい乗り心地はあり得ないと言っても過言ではない。

一般に船のモーションは下記の如く3つの直線運動と3つの回転運動に分けられる。

- ・サージ（前後直線運動）
- ・スウェイ（左右直線運動）
- ・ヒープ（上下直線運動）
- ・ピッチ（船の長さ方向の垂直面上の回転運動）
- ・ロール（船の幅方向の垂直面上の回転運動）
- ・ヨー（水平面上の回転運動）

実際の船の運動はこれらが複雑に組み合わせられるが、このうち、本船ではサージとウェイを除く主要な4つの運動を検知し、コントロールサーフェイスと称している6つの制御翼面（前部ストラット、前

部フラップ, 4 組の後部フラップ) を制御しているので, 一般船に比べ, 格段に乗り心地の面においてすぐれていると言うことができる。

この ACS には自動的に船の姿勢を一定に保つためのセンサーとして, 船体の海面上の高さを検知する高度センサーと船体のピッチ角及びロール角を検出する垂直ジャイロ, それと乗り心地改善のためのセンサーとして加速度計及びヨーレイトジャイロが装備されている。

このうち船体の姿勢制御に直接関連するセンサーおよび ACS 電源はフェイルセーフの設計思想に基づき 2 重系になっていて, ひとつのセンサー, または電源が故障しても安全に翼走を継続できるように設計されている。万一, 電源が 2 重故障した場合でも, 安全に自動着水できるように工夫されている。

これらのセンサーの信号は絶えずコンピューターに送られ, ヘルム (舵輪) や翼深度設定レバーの信号と比較され, コンピューターがリアルタイムに最適姿勢を計算しフラップおよび前部ストラットを駆動する油圧アクチュエーターに対し最適姿勢に見合った信号を出力し, 船体の姿勢をコントロールする。

8. 操縦

このように ACS がヘルム等の信号と海面状況, 加速度等を検知して, 絶えず安定した船体姿勢を自動的に保つように姿勢制御を行なっているため, 離水中および翼走中の操縦は極めて簡単で, 艇走中に翼深度設定レバーをセットし, 所定のスイッチを入れた後スロットルを徐々に上げていくだけでよい。船はある船速に達すると離水し始め, 自動的に翼走に移行する。通常翼走中はヘルムを操作するだけで良く, 一定の針路をとる時はヘディングホールド (オートパイロット) をセットすれば, 完全に自動運航となる。

翼走中の旋回は, ヘルムからの信号に応じて, ACS が後部フォイルの左舷側のフラップと右舷側のフラップを互いに逆になるように動かす仕組みとなっておりその応答は非常に速い。例えば, 左に旋回する場合, 左舷側のフラップを上向き (揚力が減る) にし, 右舷側のフラップを下向き (揚力が増える) にする。この結果, 船体は左舷を下にするように傾き, この傾斜により旋回する。傾斜角度は遠心力を打ち消すように, すなわち, 遠心力と重力の合力が甲板面に垂直になるように ACS が制御する。

この時, 前部ストラットも水流に沿うように回転し, 他の船では見られない滑らかでダイナミックな傾斜旋回 (バンクターン) を生み出している。

荒天時においてもヘルムと翼深度設定レバーを使い, 波高 3 m から 4 m の波でも影響を受けずほとんど船速低下なく乗り切ることができる。

翼走時の停止はスロットルを下げ, タービン出力を下げることで通常行なうが, 非常の場合はこのスロットルをフルリバースまで下げることににより, 後進力を発生させると共に, これと同時に前部フォイルの深度が自動的に最深となるように設計されており, 船体を強制的に着水させることもできるようになっており, その際の制動距離は自動車並みである。

艇走中の操縦装置として, 前述のデフレクターとリバーサーが装備されている。また, 前部ストラットを下げた状態ではこれを回して舵のように作用させることもできる。デフレクターと前部ストラットはヘルムにより, リバーサーはスロットルにより動くようになっている。これらのデフレクターおよびリバーサーでウォータージェットの向きが自由に換えられるばかりでなく, 左右舷のタービン出力も変更できるので, ウォータージェットの推力の大きさそのものも換えられ, これらの組み合わせによりさまざまな操縦をすることができる。

しかも, もっとも難しいと言われる離着岸時の操船性を容易にするために, 両方のデフレクターをある一定位置に固定するためのドッキングスイッチも装備されていて, このスイッチを入れて, スロットルを調整すると通常船舶では難しい横移動やその場回頭をすることができる。

9. 電気設備

主電源として, AC 450 V, 60 kW のディーゼル発電機が 2 台装備されていて, 船内の必要負荷を賄っているが, このうち 1 台が故障した時でも推進や安全に不要な負荷を切離すことにより, 1 台の発電機でも翼走を継続することができるようになっている。

ディーゼル発電機により発電された AC 440 V はエアコン装置, 潤滑油ポンプ等に, 変圧器を通した AC 100 V は照明機器や飲料水ポンプ等に, また, 変圧器/整流器を通した DC 24 V は ACS をはじめとする各種制御機器, 計器, 非常灯, 通信機器等に給電されている。

AC 電源が故障した際の非常用電源としてバッテ

リーが設けられていて、重要な DC 機器に給電されるシステムとなっている。

10. 夜間航行

交通機関の高速化の進展に伴い、超高速旅客船（ジェットフォイル）の導入の活発化と併せて夜間航行の要望が高まってきていることに鑑み、ジェットフォイルの夜間の高速航行に関する安全上の問題およびその解決策について、平成元年度から平成2年度まで2か年にわたって学識者、ジェットフォイル運航船社、造船事業者および関係団体からなる超高速旅客船夜間航行問題調査検討委員会によって検討されている。

その結果、平成3年7月運輸省より全没翼型水中翼船の夜間翼走について認可基準が定められ、その条件を満足すればジェットフォイルの夜間翼走が可能となった。

各関係者の尽力によって、平成3年11月より佐渡汽船㈱にて、夜間の営業航海が開始されている。

9. あとがき

ジェットフォイルは、従来の船の概念とは全く異なった思想のもとに設計・建造された高性能の全没翼型水中翼船であり、その高速性、快適性、さらには新奇性の点で際立ったものがある。このジェットフォイルが、船酔いから乗客を開放し、快適な船旅を約束する“海の新幹線”として時代のニーズに添えていくものと確信する。

参考文献

- 1) 松井, 松村, 中山, 古賀: 「析出硬化型ステンレス鋼 (15-5 PH 鋼) の電子ビーム溶接」第133回溶接法研究委員会資料 (1991年7月)
- 2) 鴨井, 村上, 小島, 松村, 古賀, 中澤, 仁瓶, 上門, 水田: 「超高速水中翼船用高強度ステンレス鋼の溶接工作法に関する研究」川崎重工技報 第111号 (1991年10月)
- 3) 今村, 斉藤, 浅尾, 寺田, 小林, 岩田, 有元: 「ジェットフォイルの自動姿勢制御システム」川崎重工技報 第107号 (1990年10月)
- 4) 岡, 斉藤, 黒井: 「ハイドロfoil艇の航走安全及びその制御」運動性能研究委員会第6回シンポジウム (1989年12月)

(本誌会告欄 68 頁に関連)

溶接接合工学会第3回セミナー

各種新材料の溶接接合の問題解決のための情報システム化

第1日 12月8日 (火)

1) 開会の挨拶 (13:00-13:05)

司会 小林教授

2) 話題1. TMCPを含む新開発鋼と溶接技術 (13:05-13:45)

新日鉄鋼研接合研究部 堀井 行彦

3) 話題2. 高耐食・高耐熱・高強度ステンレス鋼と溶接技術 (13:45-14:25)

住金基礎技術研接合研究室 小川 和博

4) 話題3. 車体軽量化のためのアルミ適用とその溶接の問題点 (14:25-15:05)

日軽技研接合研究室 松本 二郎

5) 話題4. チタンおよびチタン合金の適用拡大とその溶接 (15:05-15:45)

神戸製鋼エネルギー開発本部製造部 広瀬 博章

6) 話題5. クラッド材料の適用拡大とその溶接 (15:45-18:25)

NKK 福山研究所鋼材チーム 長江 守康

7) 話題6. 宇宙航空材料とその溶接 (16:25-17:05)

三菱重工名古屋航空宇宙システム 清藤晋一郎

8) 第一日の議論のまとめ (司会 百合岡)

(17:05-17:30)

第2日 12月9日 (水)

司会 野本教授

9) 話題7. 材料と溶接法のデータベース化を考える (9:00-10:00)

新日鉄鋼研接合研究部 糟谷 正

司会 百合岡部長

10) 総合討論

話題1-7の講演を中心に、参加者全員による各種材料の溶接接合について現在抱えている問題点をまとめると共に、材料とプロセスの情報システム化の将来について討論します。

11) 閉会の挨拶 (11:55-12:00)
(申込先)

〒141 東京都品川区北品川5丁目3-20 愛知産業㈱3階 第2エースビル

財団法人 溶接接合工学会事務局

TEL 03-3449-2144 FAX 03-5488-5520