

翼付き半没型高速船の開発 (第3報)

—自走模型船による直進自走実験

正員 茂里一紘*	正員 土井康明*
正員 二宮伸治*	正員 北野献慈**
正員 小林正典***	正員 島田 潔***

A Study on Semi-Submersible High Speed Ship with Wings (3rd Report)
—Forward Running Experiments by Free-Running Model

by Kuzu-hiro Mori, <i>Member</i>	Yasuaki Doi, <i>Member</i>
Shinji Ninomiya, <i>Member</i>	Kenji Kitano, <i>Member</i>
Masanori Kobayashi, <i>Member</i>	Kiyoshi Shimada, <i>Member</i>

Summary

Free-running experiments are carried out to make clear the stable running of a semi-submersible high speed ship with wings. The ship is an unconventional new type of high speed ship consisting of a main hull, main and tail wings with flaps, and a strut to support the super-structure. The ship floats as a conventional ship but the downward lifting force makes the ship semi-submerged during the operation condition.

The model used is a self-propelled free-running model. The carriage follows the model at a constant speed on which all the controllers are placed. Experiments are carried out not only under the calm condition but also among waves of following and head seas, although all the experiments are limited to the forward running tests.

Through the experiments it is made clear that the ship can run stably by the control of flaps except under the following sea condition. The induced motions by waves are notably reduced by the submergence. The thrust estimated from the number of revolution of propellers is almost same as the measured resistance and no appreciable increments in the resistance are experienced even among waves. It may be necessary to study more on the flow phenomena and the forces acting on the hull under the following sea condition.

Although all the knowledge is limited to the model level, it can be concluded that such an unconventional new type of high speed ship is promising from the hydrodynamic aspects.

1. 緒 言

著者らは、航空機と在来型船舶の中間的ないしは相補的な新しい輸送手段を提供することを目的に、1987年以來、翼付き半没型高速船の流体力学的諸問題について研究

してきた¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。これは在来型船舶と航空機との速度差があまりに大きいため、国際貨物輸送でも、あえて航空機輸送によっている場合が少なくないことによる。もし適当な第三の輸送手段が提供されれば、輸送に新しいフェーズをもたらずであろうし、限られたエネルギーの有効利用にも貢献するであろう。

船舶の高速化をはかる方法として、翼の発生する揚力により船体を浮揚させる形式をとることが多い。ところで、この種の船舶には高速の実現(速度40~50ノット)とともに安価の維持が必須条件である。そのためには一定の大きさの搭載重量が必要とされ、ここでは排水量3000トン程度を想定する。通常、揚力の発生は不可避的に抗力の増加を

* 広島大学工学部

** 広島大学工学研究科

*** (株)三井造船昭島研究所

原稿受理 平成4年7月10日

秋季講演会において講演 平成4年11月9, 10日

伴う。浮揚させる物体の重量が大きいと増加もそれだけ大きくなる。そのため浮揚方式は高速艇のように小型である場合には有利であるが、一連の研究で考えているような比較的大型の場合は必ずしも適当ではない。しかも、船体の浮上によって翼の作動空間となる自由表面近くは、揚抗比の低下、キャビテーション（空気吸い込み）の発生、波浪外力の影響など、翼の作動空間としては苛酷な空間である。

このような流体力学上の初歩的な性質から、一連の研究では、浮揚式とは異なる翼付き半没型高速船（High Speed Semi-Submersible Vehicle with wings；以下略してHSVと称する）について調べてきた。基本的には浮力で自重を支える排水量型船舶であるが、船体に取り付けられた翼の発生する鉛直下向きの揚力で主船体を没水させ、造波抵抗の軽減をはかる。静止時は通常の船舶のようにある吃水で浮かんでいるが、走行とともに船体は沈降を始め、サーブ速度では主船体は完全に水面下に潜り、船橋だけが水面上に残る半没状態となる。したがって、基本的には依然浮力を利用しているので、高速の実現と同時に多量・安価の維持が期待できる。

文献1)2)ではHSVの抵抗性能と波浪中性能について調べた。HSVは浮力による復原力が小さく、基本的に不安定であるため、何らかの制御の導入が必要である。そこで3)では、主翼・尾翼フラップを船体運動と連動させた制御（active control）の導入による安定走行の可能性について調べた。4)では運動シミュレーションによって実験が難しい特殊な状態での安定性能や境界要素法による流場計算で翼の流体力などについて調べた。

これらの研究によって、翼と自由表面影響の干渉によって抵抗はむしろ減少すること、波浪外力の影響は小さいこと、簡単な制御の導入で安定走行が可能であることなどが明らかにされた。翼は比較的深水域で作動することから、空気吸い込みもなく、静水圧が高いためキャビテーションの恐れも少ないと思われる。

しかしながら、3)で行なった実験は曳航模型によるため、上下揺（heaving）、横揺（rolling）、縦揺（pitching）および船首揺（yawing）は自由であるが、前後揺（surging）と左右揺（swaying）を拘束したものであった。また波浪中の実験は全て向波中でのものである。安定性能を調べるには拘束のない自走状態で調べる必要がある。また、HSVは高速であるため追波状態になることはまれであるが、安定性能が劣化する追波状態での性能についても調べる必要がある。

このような観点から、模型船レベルでの安定性能を明らかにする目的で、自走模型を用いて静水中と向波および追波中での自走模型実験を実施した。ここで用いた模型船はプロペラで自走させる。運動の計測とともに、プロペラオープンテスト結果からスラストの概算も行なった。ただ、

実験は曳航水槽で行なったため、直進走行実験に限られる。

本研究でいう安定走行とは制御命令に近い形で模型船が進行することを意味する。制御方式は前報³⁾と同じく最も簡単な線形制御方式を用いており、より適切な制御方法については将来専門的な立場から検討されることを想定している。

2. 供試模型と実験方法

2.1 供試模型

Fig. 1に実験に用いた模型船の外形を示す。模型船本体は前報³⁾で用いた模型（HSV-03）と同じであるが、自走の推力をうるために2軸プロペラが新たにとりつけられている。この自走模型船をここでHSV-04と称する。HSV-03はもともと1舵船であったため、HSV-04は2軸1舵となっている。

水面貫通部の中心部はほぼS.S.2の位置にある。そのため船の沈降とともに浮心は後方に移動することになる。模型船からの電力・信号ケーブルなどは全てこの水面貫通部を通して電車上に接続される。船底中心線上には、進路安定性をよくするため、センターボードがつけられている。

制御に用いるフラップなどはHSV-03と同じで、主翼フラップの他に、水平固定尾翼、水平尾翼フラップ、垂直尾翼、垂直舵が付いている。尾翼フラップは水平固定尾翼とは別に取り付けられている。

プロペラはストックプロペラを用いており、ここでは、単に自走のためのスラストを発生させる装置とみなす。そのため性能については一切考慮されていない。ただ装置の制約から回転数がおさえられているため、プロペラ直径は船の大きさに比べて相対的に大きくなっている。

模型船およびプロペラの主要寸法をTable 1に示す。

2.2 実験方法

実験は曳航水槽で実施し、模型船が自走し曳航電車が追従する。ケーブル類は水面貫通部から電車上に取り出し、実験走行中は手で保持して模型船に対して外力とならない

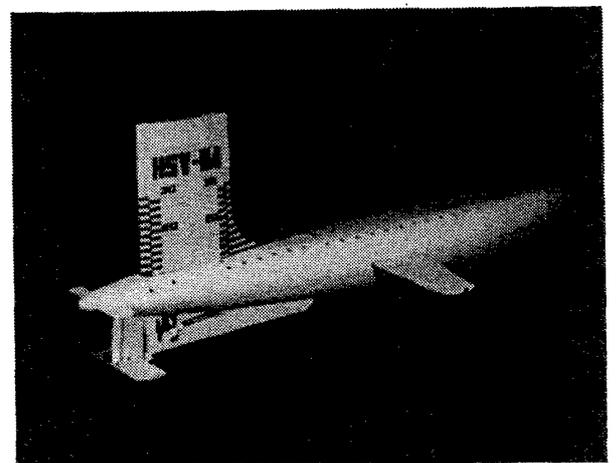


Fig. 1 HSV-04 Model

Table 1 Principal Dimensions of Model and Propeller

Model		
Length (m)		2.000
Breadth (m)		0.300
Displacement (m ³)		0.0656

Propeller		
Diameter (m)		0.0725
Number of Blades		5
Pitch Ratio		0.9

ようにする。

横揺と縦揺の制御は、前報³⁾と同様、主翼フラップと水平尾翼フラップによって行なうが、角速度計で計測された角速度とその積分による変位を用いた線形比例制御による。一方、模型船の速度と前後揺、および左右揺と船首揺は、目視によって電車速度との相対速度がゼロで直進するように、プロペラ回転数および舵角を手動で調整し制御する。これは、模型船速度の計測を精度よく行なうことが容易でないこと、また模型船が2軸1舵で舵効きが必ずしも十分でなく簡単な自動制御ではうまくいかなかったことによる。走行中の没水深度の制御は行なわず、走行前に予め主翼の迎角を設定することによって調整する。

船首揺は模型船に搭載した角速度計で計測するが、船速左右揺および上下揺（没水深度）はビデオカメラ画像の画像解析によって算定する。画像取り込みのため、模型船は90 cmの前後移動幅しか許されない。そのため模型船の抵抗や姿勢が急激に変化する時はプロペラ回転数や操舵角などの操作量を大きくとることを余儀なくされる。

計測および制御のブロック線図を Fig. 2 に示す。

船長 80 m で 40 ノット程度の実船を想定するとき、そのフルード数はおおよそ 0.7 程度となる。これに対応する模型船の速度は約 3.0 m/s となる。しかし、本研究では、水槽長さの制約などから、模型船の速度は、1.70~1.90 m/s を中心に行なう。フルード数は 0.38~0.43 となる。実験では、この速度域でも十分な没水深度がえられるよう、主翼の迎角をあらかじめ調整している。

波浪中の実験は波高・波長比 1/60 と 1/100 の規則波を用い、波長（したがって波高および位相速度）を変化させて行なう。向波中では、模型船がまだ浮上している時や最も不安定になると考えられる沈降の最中に波の外乱があたるようにするため、模型船に波があたっている状態から走行を開始する。また追波の実験は造波機側から走行するので、波そのものは模型船の存在によって乱されるが、ここではその影響は特に考えない。

実験結果は船の進行方向と鉛直下向きをそれぞれ x および z 軸とする右手座標系で表示する。船体運動、フラップ等の操作の回転方向は全て右ネジの方向を正とする。

2.3 スラストの解析

スラストは Fig. 3 に示す。プロペラオープンテストの結

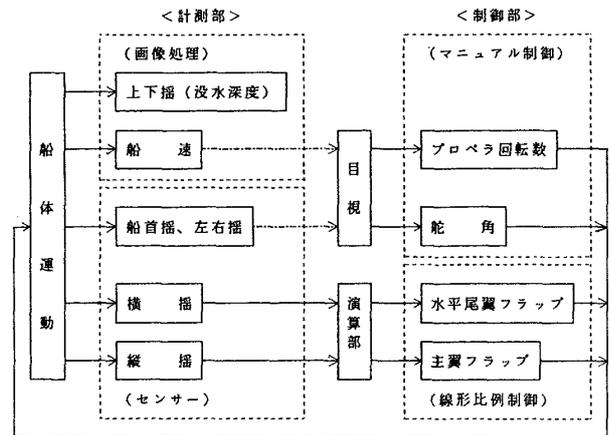


Fig. 2 Diagram of Control System

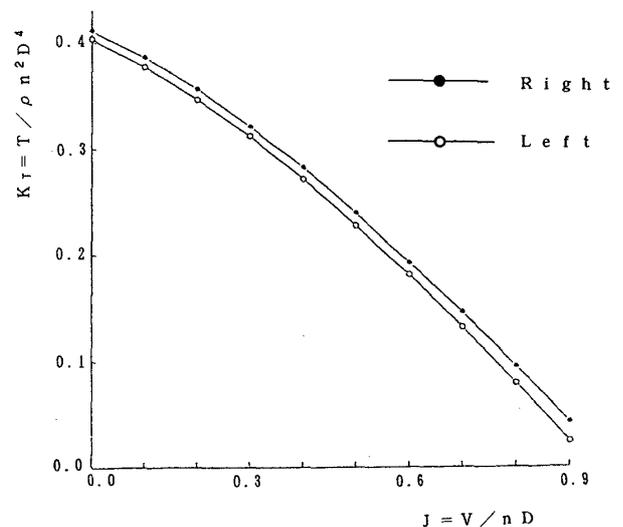


Fig. 3 Propeller Open Test Results

果から解析する (T :スラスト, n :プロペラ回転数, D :プロペラ直径, V :プロペラ流入速度, ρ :流体密度)。模型船形状やプロペラの位置からみて伴流は十分小さい。本実験では船速は画像処理から算定している関係で、プロペラ流入速度には曳航電車の速度を用いる。したがって船の前後揺の影響は無視される。

プロペラオープンテストの結果によれば左右プロペラの特性に差がみられる。しかしここではその差が小さいことと装置の制約から、プロペラは左右同じ回転数で制御して

いる。スラストの解析では左右プロペラの平均値を用いる。

3. 静水中走行実験

Fig. 4は電車速度が1.8 m/sの静水中の船体運動の記録である (V : 船速)。時間軸は模型船の走行開始時からの時刻である。船は、速度が徐々に加速するにつれ、走行開始後15秒あたりから沈降し始め、約25秒後には所定の没水深度(約20 cm)で定常状態に達している。振幅1 cm程度の上下揺がみられる。

船が沈降し始める15秒付近で横揺が生じ始め、横揺角が大きくなっている。これは没水によって正のGMが消滅し、船が不安定になったためである。没水後は主翼フラップによって横揺を制御することになるが、揺れ角 1° 程度で中立平衡が保たれている。この揺れ角は必ずしも許容できるものではないが、制御部の機械的遅れやバックラッシュなど供試模型船の制約からくるもので本質的な問題ではない。

Fig. 5はFig. 4に示した実験の走行状態を示す。(a)(b)(c)(d)はそれぞれ、静止時、走行開始後、沈降中(Fig. 4で20秒付近)、および一定没水深度での定常走行中の様子である。(c)は抵抗が最も大きくなる時に対応しており波も大きい。没水後は主船体の波の谷が船体中央付近にあり、水面貫通部では薄い膜状の波がみられる。水面貫通部長さにもとづくフルード数は1.0程度となる。

Fig. 6は走行時の主翼フラップ、水平尾翼フラップ、舵お

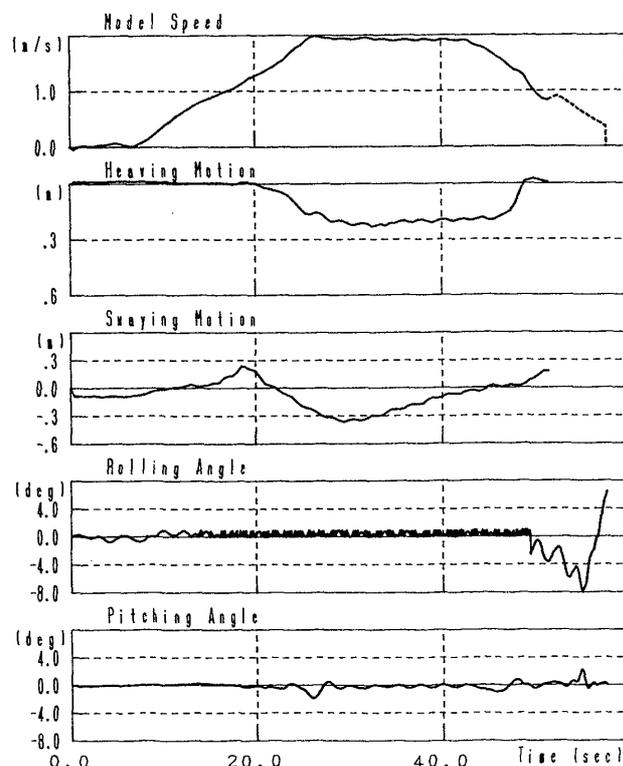


Fig. 4 Time History of the Motions in the Calm Water ($V=1.8$ m/s)

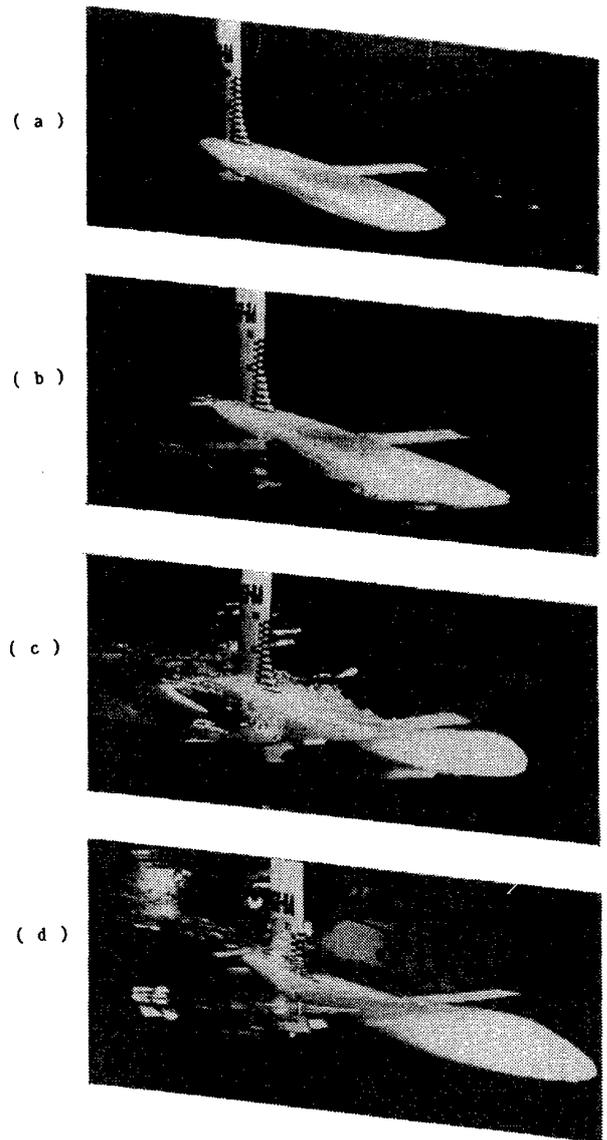


Fig. 5 Free-Surface Flows during Free-Running in the Calm Water ($V=1.8$ m/s); before starting (a), still floating (b), at the maximum thrust (c) and after steady state (d)

およびプロペラ回転数の制御の様態とスラスト変化を示したものである。走行開始25秒後付近でプロペラ回転数は最大となり、スラストも最大となっている。これは、その付近で速度は最高速度に達するがまだ十分没水しておらず、抵抗が最大となっているためである。

25秒付近で、水平尾翼フラップは縦揺運動を制御するため大きく動いている。没水時にはかなり不安定な力が働いていると考えられ、それを制御しているためである。主翼フラップはタイミングベルト等の機械特性が異なるため左右非対称な動きがみられる。

舵は沈下時に生じた船首揺を制御するため大きく動いているが、Fig. 4でみたように、それでもなお若干の左右揺がみられる。HSV-04の舵は2軸1舵でしかも垂直翼の一部を可動としたフラップ型であるため、舵効きは必ずしも十

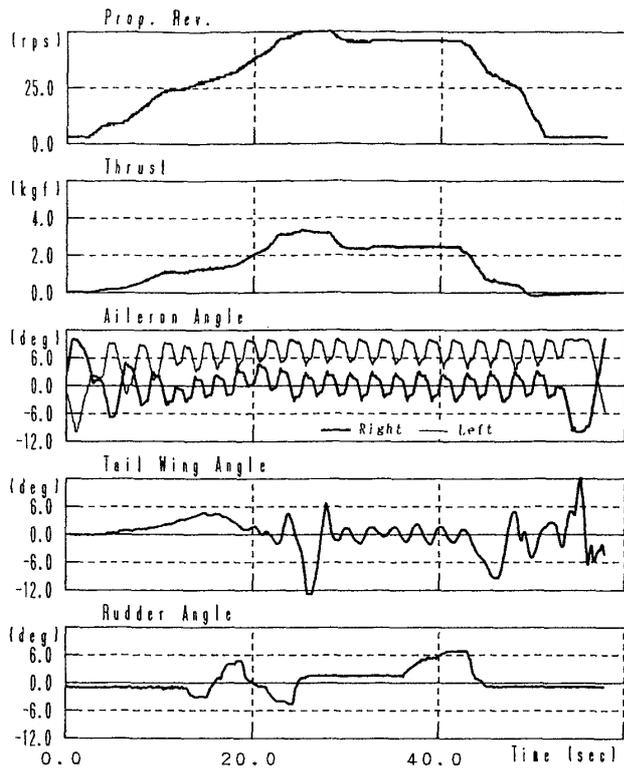


Fig. 6 Time History of the Movements of Controlling Devices and Resultant Thrust in the Calm Water ($V=1.8$ m/s)

分ではない。このためマニュアルによる制御には操舵者の熟練度が大きく入ることになった。ただ、0.5 m程度の左右揺は進行距離の80 mに比べて十分小さい。

他の速度でもほぼ同じ様子であった。Fig. 7にいくつかの設定速度における平均没水深度とスラストを示す。スラストは没水直前に現れる最大値と定常走行時の平均値を示す。スラストの定常値は1 m模型船の抵抗試験結果¹⁾より若干小さいが、これはレイノルズ数の違いによるもので、ほぼ等しいとみなすことができる。スラストの最大値については、速度1.8 m/s以上では、プロペラ回転数が最高値に到達してしまっているため、1.9 m/sではむしろ低下している。

没水深度は速度にほぼ比例して深くなっている。これは没水深度を特に制御していないためである。最終的には主翼フラップ角の調整ないしはトリムの調整による主翼迎角変化などによって制御する。もっとも簡単な方法として、水面貫通部の水線面積を吃水方向に変化させ、水面貫通部の浮力による調整も可能である。

なお定常走行中の船体に人為的に横揺モーメントを与え横安定性についても調べたが、主翼フラップの制御によりほとんど問題なく復帰することが確認できた。

これらの自走実験結果からHSVの静水中の安定走行に関しては全く問題ないといえる。また必要馬力もこの種の高速船としては比較的小さく、抵抗試験から直接推定して

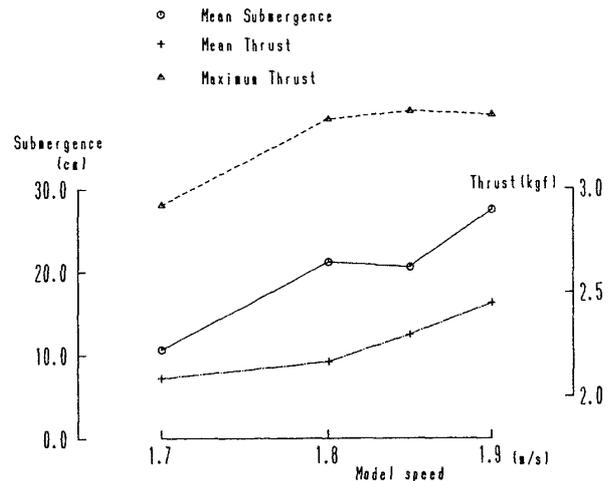


Fig. 7 Average Thrust and Submergence Depth in the Calm Water

も差しつかえない。今回用いた供試模型船はその抵抗性能については一切考慮されていない上に、Fig. 1でみるように、センターボードなど多くの付加物がついていることを考慮すると、実際には、スラストをもっと小さくすることができるであろう。

4. 波浪中自走実験

波浪中での自走実験はすべて船速1.8 m/で行なった。実験に用いた波の公称値をTable 2に示す。波高/波長比(H_w/λ)は、[追波③]の他は全て1/60である。[追波③]は後述する理由で1/100とする。

4.1 向波

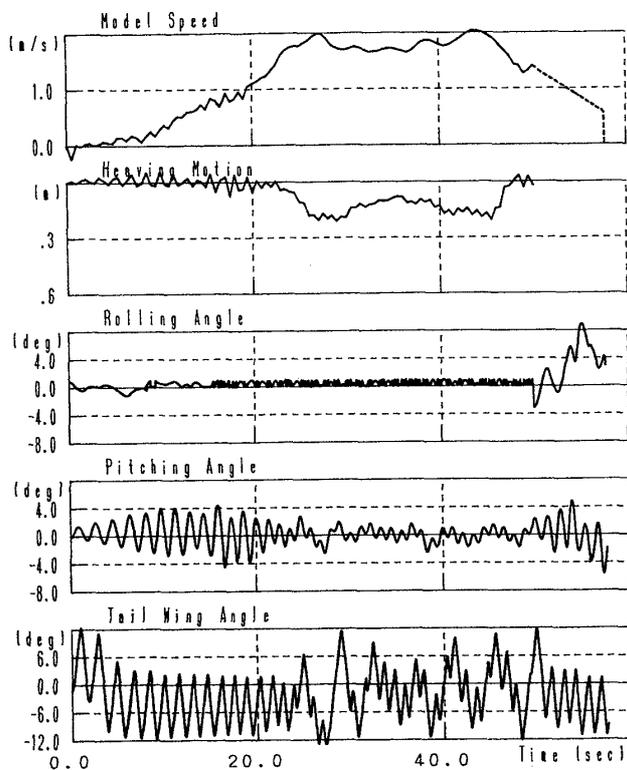
Fig. 8に[向波②]の船体運動と尾翼フラップの動きを示す。船の加速中にも船体に波があたっているため、走行開始後、8°程度の縦揺運動がみられる。しかし船体が没水する約25秒付近から、縦揺運動は急激に小さくなる。没水深度が一定になり定常走行している時は、揺れ振幅は約2°程度に制御されている。この間、尾翼フラップは静水中に比べてかなり激しく動いている。一方横揺は、ここで用いた波が正面波であることから、静水中とほとんど変わらない。上下揺の記録をみると、この走行では、船体は25秒から30秒にかけてオーバーシュート気味に没水し、その後若干浮上し40秒付近で定常になっているように見える。この動きは船速と対応している。

[向波①]や[向波③]の運動の様も、運動振幅は異なるが、[向波②]とだいたい同じで、特に特徴的な違いはなかった。Fig. 9に没水深度がほぼ定常となった状態での縦揺と上下揺の運動振幅を示す(θ_i :縦揺幅, h_i :上下揺幅, H_w :波高, K :波数, λ :波長, L :船長)。縦揺と上下揺のいずれも、比較的小さく、HSVは波による影響は受けにくい船型といえよう。

Fig. 9には向波中の定常状態でのスラストの平均値も示

Table 2 Characteristics of Waves Used for Experiments

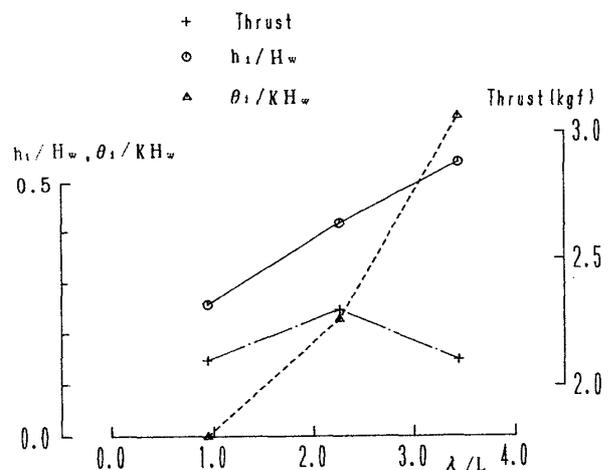
		Wave length(m)	Wave height(m)	phase velocity (m/s)
head sea	①	1.887	0.031	1.716
	②	4.510	0.075	2.653
	③	6.882	0.115	3.277
following sea	①	1.263	0.021	1.404
	②	1.887	0.031	1.716
	③	2.637	0.026	2.340

Fig. 8 Time History of the Motions and Tail Wing Angle in the Head Sea ($V=1.8$ m/s, $H_w=0.075$ m)

した。Fig. 7に示した静水中の値とほぼ同じ値で波による抵抗増は認められない。また波高による違いも小さい。これは抵抗試験結果¹²⁾と対応する(抵抗試験では若干ではあるが波浪中の抵抗が小さくなることもあった)。これは鉛直下向き揚力を発生する翼のためと考えられるが、物理的な説明については今後の研究に待ちたい。

4.2 追波

[追波①] [追波②]の波の位相速度は船速より遅く、相対速度からみると、向波になる。ただし[追波②]は船速より若干遅いだけである。しかし[追波③]は文字通り追

Fig. 9 Transfer Functions of the Amplitudes of Pitching and Heaving Motions, and Thrust in the Head Sea ($V=1.8$ m/s, $H_w=0.075$ m)

波状態となる。

Fig. 10は[追波①]と[追波②]の縦揺と上下揺を示したものである(c :波速)。 $[追波①]$ の走行の様子は向波の場合と全く同じで安定である。しかし、 $[追波②]$ では、縦揺でみるように、船の姿勢が変化し、それにとまう揚力の変化から没水深度も大きく変化している(負の縦揺角は主翼迎角が増す方向でその結果沈下力が増す)。 $[追波②]$ での走行では運動変化が大きく、マニュアル制御がうまくいかず、不安定な走行となる場合もあった。

スラストの平均値は[追波①]、[追波②]でそれぞれ2.4 Kgf, 1.9 Kgfであった。 $[追波①]$ の値は静水中と比べて、若干大きい、 $[追波②]$ では小さい。

Fig. 11は[追波③]の運動である。 $[追波③]$ の場合、模型船本体が完全に没水した後も船速やスラストが大きく変化している。現象は極めて不安定であった。前後揺を制御するにはスラストをかなり大きく変化させる必要があったが、これが系の不安定性を増幅したきらいもある。前後揺

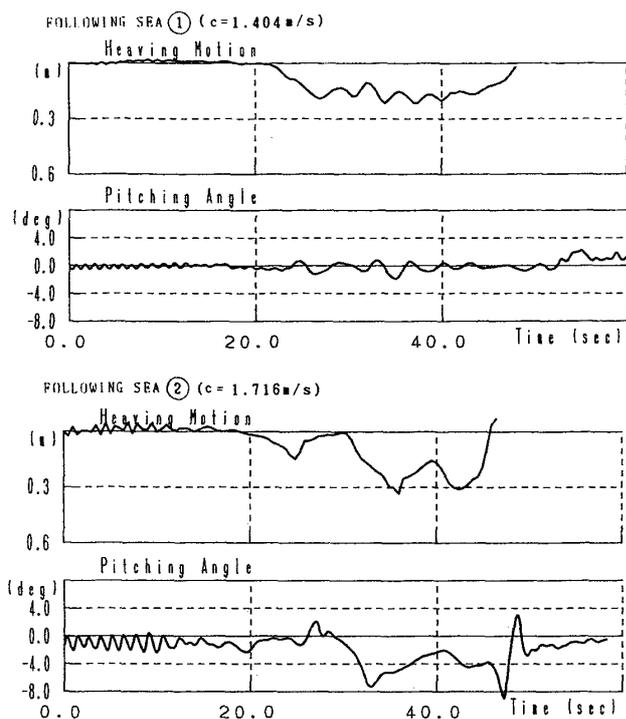


Fig. 10 Time History of the Pitching and Heaving Motions in the Following Seas ($V=1.8$ m/s, $c=1.404$ and 1.716 m/s)

幅のある範囲内におさえる安定な制御は容易でなかった。波高を波長の $1/100$ としたのはそのため、 $1/60$ の波では制御は非常にむづかしかった。船速の変化にみられる前後揺は縦揺とも関連し、上下揺を大きくしている。ただこの場合でも、横揺は静水中とほとんど変わらない。

追波中で船体が大きな前後揺れをするこの現象は、小型船に生ずるブローチングより、菅ら⁵⁾の一連の研究の現象に近い。岩下ら⁶⁾の回転没水体に対する計算によれば、追波による強制力は向波のそれに比べて大きくかつ船速による変化も大きい。

今回の実験によって、波高がただかだか 2 cm 程度の追波でも大きな力の変動が現れていることわかった。しかもその変動は今回用いた制御システムでの制御範囲をはるかに越える程のものであった。追波におけるこのような現象は、HSVに限らず一般的なものではあるが、翼の存在がその現象をさらに増幅しているとも考えられる。追波中での流体力や抵抗増加についてはなお調査する必要がある。

5. 結 言

翼付き半没型高速船の自走模型船を用いて、静水中および波浪中で自走実験を行ない、安定走行について調べた。またプロペラ回転数から走行中のスラストを算定した。実験は小型模型船に限られたものであるため、結果は必ずしも一般化できないが、HSVの性能として以下のようなことがわかった。

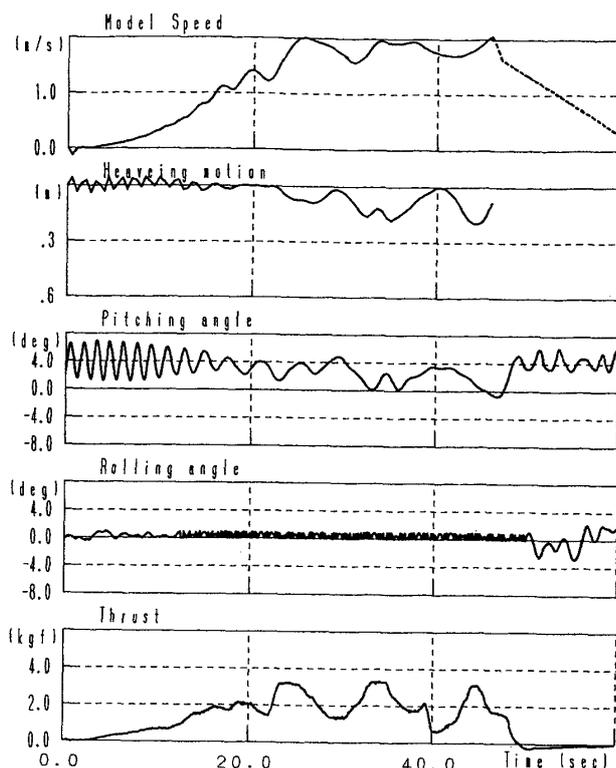


Fig. 11 Time History of the Motions and Resulting Thrust in the Following Sea ($V=1.8$ m/s, $c=2.340$ m/s)

- 1) 静水中と向波中では、主翼フラップ角と水平尾翼フラップ角および舵角を制御することによって、安定走行が可能である。適当な制御方式を導入すれば、静水中と向波中の安定走行が可能である。
- 2) 向波中では主船体が沈降し始めると縦揺は小さくなる。波による船体運動は、制御を導入した翼付き没水体であることから、通常船型に比べて小さい。
- 3) 波の位相速度が船速に近いかそれ以上となる追波中では、船体は前後方向に大きな非定常力を受け、本研究で用いた程度の制御では安定走行の実現は難しい。
- 4) プロペラ回転数からえられたスラストは静水中での抵抗試験の結果にほぼ等しい。向波中では波浪によるスラスト増加はほとんどなく、静水中の値とほとんど変わらない。
- 5) 高速船では船速が高いことから、追波に遭遇することはまれではあるが、追波中でのスラスト変化と安定走行の実現についてはなお研究する必要がある。

本研究をはじめとする一連の研究の目的は、HSVのような特殊な船型が流体力学的に可能かどうかを模型レベルで検討することであるが、実際に開発するにあたっては実船レベルでの問題をはじめとして多くの問題についてなお研究する必要がある。現在、今回の結果をふまえて開水面における自走実験による旋回時や横外力の連成運動に関する

る調査および追波中の波浪外力の計測実験を実施している。

本研究は1991年度および1992年度の広島大学卒業研究の一環として行なわれたものである。研究を遂行した荒木慶次君・種田光徳君(1991年度), 米良一郎君・大脇一秀君(1992年度)に感謝する。また関連の運動シミュレーションと制御に関する研究を遂行した広島大学大学院学生であった伊藤昌宏君, 岸本由豆流君および広島大学大学院学生の長屋茂樹君の協力をえた。あわせて謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 茂里一紘, 堀田多喜男, 箆一之, 徐琦; 翼付半没型高速船の開発——主として抵抗性能とその可能性について——, 日本造船学会論文集, 第164号(1988), pp. 74-81.
- 2) 茂里一紘, 土井康明, 肥後靖, 箆一之, 高橋直寿; 翼付半没型高速船の鉛直3自由度運動と波浪中運動性能について, 西部造船会会報, 第80号(1990), pp. 105-116.
- 3) 茂里一紘, 土井康明, 伊藤昌広, 岸本由豆流; 翼付き半没型高速船の開発(続報)——首尾翼フラップの制御による安定走行の可能性について——。日本造船学会論文集, 第169号(1991), pp. 143-149.
- 4) 茂里一紘, 土井康明, 高橋直寿, 種村博之; 翼付き半没型高速船周りの流れと6自由度運動の数値シミュレーション, 西部造船会会報, 第82号(1991), pp. 41-52.
- 5) 菅信, 猿田俊彦, 安野三樹雄, 山越康行, 鈴木四郎; 追波中の船の大振幅前後揺れと波乗り現象, 日本造船学会論文集, 第162号(1987), pp. 152-162。同(その2, 3), 第165, 166号(1989)。
- 6) 岩下英嗣, 大楠丹; 特異点法による波浪中を航走する船に作用する流体力の研究, 日本造船学会論文集, 第166号(1989), pp. 187-205.