

水中翼付双胴型高速客船の縦運動制御に関する研究*

寺尾 裕*²・宮川典久*²・森鼻英征*²・谷上明彦*³

A Study of the New Longitudinal Motion Control System for Catamaran-type High-speed Passenger Ship with Hydrofoils

Yutaka TERAU, Michihisa MIYAGAWA, Hideyuki MORIHANA
and Akihiko TANIGAMI

Abstract

Recently, high-speed performance is required even in the seaways. In the previous papers, authors discussed the speed performance of the hybrid catamaran with 150 passengers and the strength of the hydrofoil in the seaways. (Miyagawa, etc. 1999; Morihana, etc. 1999). Hybrid catamaran consists of twin catamaran hulls and fore and aft hydrofoils connect each other hulls. In this case study, even in the high cruising speed, the total lift force of the hydrofoils supports up to 75 % of the hull weight and the buoyancy force acting on the hull supports residual hull weight. This buoyancy force gives her the self-height control mechanism and contributes to the stability of the lateral motion. But in the seaways, hydrofoil lift control is necessary for seaworthiness and comfort for passengers.

In this paper, we propose a new hydrofoil control method, which is based on the simple fuzzy control algorism. Towing tank test is carried out to examine the algorism under the conditions of heading and following seas. Using the scale model with newly developed hydrofoil motion control mechanism, foil control algorism and experimental data measurement system are installed in a laptop computer and tested. From the experiment, characteristics of the hydrodynamics of the hydrofoils are clarified and effectiveness of this algorism is proved.

* 東海大学海洋学部業績 A 第634号。2000年1月14日受付；2000年3月31日修正；2000年4月11日受理

*² 東海大学海洋学部マリンデザイン工学科

*³ 日本造船技術センター，研究当時・東海大学大学院海洋学研究科

1. 概 要

高い高速性能を有する高速双胴水中翼船への需要が高まる中、耐航性能への要求もまた高まっている。それに応じて多くの研究報告がなされている（宮田他（1987）、大坪他（1990、1991）、浜本他（1992）、清水他（1992）、重廣（1993））。

それらより耐航性能向上のためには、合理的翼位置配置の上で船体運動の減少が重要であると考えられる。ここでは水中翼に作用する流体力に重点をおいて検討し、船体縦運動を翼フラップにより制御する方法を検討した。

今回簡単なフラップ制御方法を考案し、実験で運動制御効果を確認したので報告する。この研究は高速双胴船の運動制御について94年より95年にわたり検討を行った結果の一部である（谷上（1995）、宮川他（1999）、森鼻他（1999））。

検討対象とした艇は

- ①150人乗り
- ②40Kt で翼走
- ③最大波高 2 m でも航行可能

とし、前後 2 翼を船体前後に正面から見て V 字となるよう配置したものである。前後翼による揚力支持配分は 1:1 とし、両者あわせて全重量の 75% までを支える方式とした。

2. 運動制御アルゴリズム

94年度に、水平翼付き高速双胴船の平水中曳航による模型実験をおこなった。その結果、40 Kt ($F_n = 1.08$) 相当航走時に水中翼が水面より飛び出し、Air Draw が発生する現象が観察された。そのため、波浪中を航走する場合には、波浪外力あるいは他の外力によって、同様の現象が発生する可能性がより高いことが予想された。

これらの現象は、水中翼を適切に制御すれば、回避出来る可能性がある。また、シミュレーション計算によっても、水中翼に対して、単純な制御をかけることで、船体運動を有効に押さえることが可能である事が示された。これらより、水中翼制御システムの開発が必要であると考えた。そのため新たに簡便な制御システムの開発を行った。また、この制御システムには模型実験による効果の検証を前提とした配慮も加えた。

2.1 制御アルゴリズムの決定

本船は、船体前後端に水中翼を装備する。この場合、船体の Pitching 運動によっても、水中翼の露出が起こる危険性がある。また、本船の場合、装備されている水中翼の没水深度が浅く、水中翼の没水深度影響による揚力低下、キャビテーションの発生、あるいは Air Draw 等の危険が予想されるため、Heaving の制御もあわせて行うこととした。

船体の運動制御に関しては、前翼のみの制御で、十分な効果が得られるとの報告もある。し

かし、前翼は航行時に破損しやすく、また、本船では前述の通り、水中翼の没水深度をほぼ一定に保つ必要性からも、前後の水中翼両方について独立した制御を行うこととした。したがって、制御アルゴリズムには、Pitch 角を押さえ、かつ、Heave 量を規定量に保つ事の出来る性能が要求される。

制御の効果を確認するために行う模型実験は、船速・船体寸法と重量との関係から全拘束状態での実験とした。そのため制御信号の入力には、Heaving Force, Pitching Moment を用い、それぞれを軽減する制御を行うこととする。この軽減が可能となれば船体運動はおさえることが可能であるからである。そのため制御システムは、Heaving Force, Pitching Moment の入力に対して、前後翼揚力の制御を行う 2 入力 2 出力形式を採用する事とした。

次いで制御アルゴリズムについて検討をおこなう。本船の設計条件は速力 40Kt, 半波高 1.0 m での定常航行を想定しているため、出会い波周期が一般商船の 2 倍以上短い場合を想定しなければならない。また模型船ではスケールを 1/20 と想定したために、実船以上に高速で制御を行う必要がある。したがって、船体運動を制御するためには、信号入力に対する追従性能を重視した制御システムを開発する必要がある。

以上より、入力情報判断部に判断時間の短いアルゴリズムを採用し、制御の応答は、前後翼の制御条件の関連をあらかじめ定義して逐次制御戦略表を用いる方式を採用した。

2.2 制御戦略について

一般に線形制御を行う場合、入力値に対してある関係を持った制御量のある関数によって求める。しかし、制御装置にコンピュータを用いる場合、入力される信号は、特定のサンプリング周期によって入力された離散値を取り、制御出力は、その離散値（瞬間値）の関数として出力される。ここで、サンプリング周期が十分に速ければ、与える制御量が直前の制御量からの変位方向ベクトル、すなわち、符号をもつ単位制御量のみであっても、その時間的累積によって線形な応答に近似できる。また、複数の制御要素を組み合わせる場合についても、入出力の関係について単位制御量がきまれば、その有限個の組み合わせとして表現可能である。また単位制御量による制御出力の組み合わせは、求める制御特性に応じて、任意の組み合わせに変更可能である。これは、非線形サンプル値制御において、関数又は特例処理として記述していた関係式を、有限個の入出力の組み合わせだけで表現できることを意味する。

この有限個の入出力関係の組み合わせを制御戦略とし、制御戦略を表として整理し、定義したものを、制御戦略表とする。

2.3 制御戦略表の定義

入力された Heaving Force, Pitching Moment から、目標値からの偏差 ΔL , ΔM を算出する。 ΔL , ΔM は、次式によって算出する。

$$\Delta L = L - L_c$$

$$\Delta M = M - M_c$$

ここで、

L_c : 定常航走時の Heaving Force (目標値)

L : Heaving Force

M_c : 定常航走時の Pitching Moment (目標値)

M : Pitching Moment

なお、モーメントは船首上げを正、揚力は上向きを正と定義する。この時 ΔM および ΔL について以下の場合分けが考えられる。

$$(1) \quad \varepsilon_M < \Delta M$$

$$(2) \quad -\varepsilon_M \leq \Delta M \leq \varepsilon_M$$

$$(3) \quad \Delta M < -\varepsilon_M$$

$$(4) \quad \varepsilon_L < \Delta L$$

$$(5) \quad -\varepsilon_L \leq \Delta L \leq \varepsilon_L$$

$$(6) \quad \Delta L < -\varepsilon_L$$

ここで、 ε_M , ε_L , はそれぞれ、 ΔM , ΔL に対する閾値である。

以上の場合分けにおいて、閾値を ε_1 , ε_2 の 2 段階に拡張し、それぞれの場合について判断記号で表し、制御する項目である前翼、後翼の揚力をそれぞれ L_f , L_a として整理すると以下のようなになる。

ここでは実験時の最大モーメント M_{MAX} と最大揚力 L_{MAX} を推定し、その 10%, 20% を用い

$$\varepsilon_{M1} = 0.1 \cdot |M_{MAX}|; \varepsilon_{M2} = 0.2 \cdot |M_{MAX}|$$

$$\varepsilon_{L1} = 0.1 \cdot |L_{MAX}|; \varepsilon_{L2} = 0.2 \cdot |L_{MAX}|$$

とした。

このようにして作成された判断記号を 5×5 の表に整理し、計 25通りの条件における応答を整理すると以下の制御戦略表が作成できる。なお、応答を整理する際に、船首下げとなる条件は除いてある。

制御条件は以下に示す通りである。

$L_f = 1$: 前翼揚力増加 (フラップ角増加)

$= 0$: 前翼揚力維持 (フラップ角固定)

$= -1$: 前翼揚力減少 (フラップ角減少)

L_a についても同様である。

ここで、 L_f , L_a は、それぞれ前翼フラップ、後翼フラップの制御条件を表している。

なお、制御閾値 ε_L , ε_M は、船体の運動特性に応じて設定する必要がある。

Table 1. Condition Table.

Condition	Mar	L_f	L_a
$\varepsilon_{M2} \leq \Delta M$	$M \gg$	-1	1
$\varepsilon_{M1} \leq \Delta M < \varepsilon_{M2}$	$M >$	0	1
$-\varepsilon_{M1} \leq \Delta M < \varepsilon_{M1}$	$M =$	0	0
$-\varepsilon_{M2} \leq \Delta M < -\varepsilon_{M1}$	$M <$	1	0
$\Delta M < -\varepsilon_{M2}$	$M \ll$	1	-1
$\varepsilon_{L2} \leq \Delta L$	$L \gg$	-1	-1
$\varepsilon_{L1} \leq \Delta L < \varepsilon_{L2}$	$L >$	0	-1
$-\varepsilon_{L1} \leq \Delta L < \varepsilon_{L1}$	$L =$	0	0
$-\varepsilon_{L2} \leq \Delta L < -\varepsilon_{L1}$	$L <$	1	0
$\Delta L < -\varepsilon_{L2}$	$L \ll$	1	1

Table 2. Tactical Table.

	$L \ll$		$L <$		$L =$		$L >$		$L \gg$	
	L_f	L_a	L_f	L_a	L_f	L_a	L_f	L_a	L_f	L_a
$M \ll$	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
$M <$	1	0	1	0	1	0	0	-1	0	-1
$M =$	1	1	0	0	0	0	0	0	-1	-1
$M >$	0	1	0	1	0	1	-1	0	-1	0
$M \gg$	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1

2.4 制御アルゴリズムの特徴

本研究で開発した制御アルゴリズムについて以下の特徴が挙げられる。

(1) 任意の次元に拡張が容易である

本アルゴリズムは、入力信号弁別部分は、閾値 ε との単純な比較であり、常に1入力1出力である。このため、多入力多出力制御に応用する場合も、制御戦略表の次元を増やし、判断部分を拡張された次元に応じて増設するのみで良い。また、これによる処理負担もほとんど増加しない。

(2) 制御に要する処理時間が短い

入力に対して出力を選択する処理が、単なる表の参照のみであるので、処理に要する時間が短い。このため、特に高速性が要求されるリアルタイム制御に向く。

(3) 制御特性の変更が容易である

一般に線形制御では、ゲインを変更することで、特性の調整を行う。特長としては、入力信号に対してリニアな反応を期待が出来る点が挙げられる。その反面、非線型な入力に対して特定の反応を返すことが要求される制御の場合、特例処理を割り込ませる必要があり、システムが複雑になる傾向があった。これに対し、本制御アルゴリズムでは、リニアな出力特性は得にくいものの、特定入力に対する特定出力が期待される処理については、特例処理を用いる必要

がなく、システムの変更は不要である。また、それによるシステムの数値低下は全くない。以下に制御フローを示す。

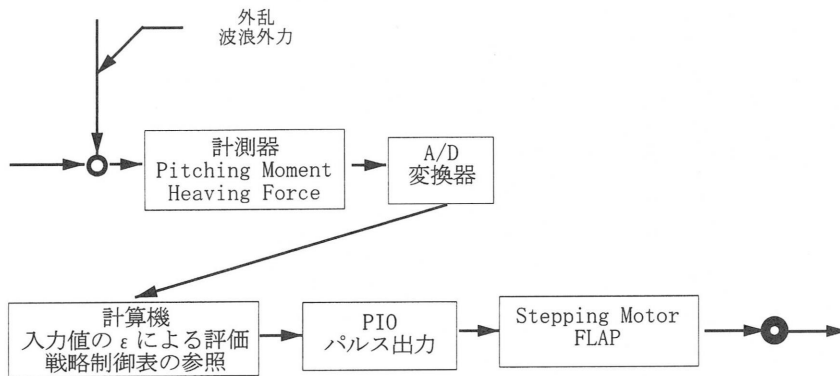


Fig. 1. New control diagram.

3. 模型実験システム

3.1 模 型

模型実験による波浪中の運動制御を考え、縮尺20分の1の硬質発泡ウレタン製で軽量の模型を作成した。翼形状は新設計とし、CFRPで製作し強度および剛性と重量軽減要求を満たした。

Table 3. Model Principal Dimensions.

L	1.81 m	
B	0.425 m	Foil Area (Fore & Aft) 0.0186 m ²
D	0.185 m	Flap Area (Fore & Aft) 0.0031 m ²
d	0.0725 m	Displacement 0.0149 m ³

翼構造

前後の水中翼は2本のストラットで支えられ、ストラットは検力計にとりつけられている。ストラットの中にはコントロールロッドが配置されていて、下端で翼のフラップコントロールにつながれている。コントロールロッドは上端がピンで結合され、それをステップモータに取り付けられた腕が前後に移動させ、フラップ角度を制御する。フラップ角度は最大上下5度とした。フラップの変位角が小さいため、駆動機構には十分な精度を確保することが要求された。

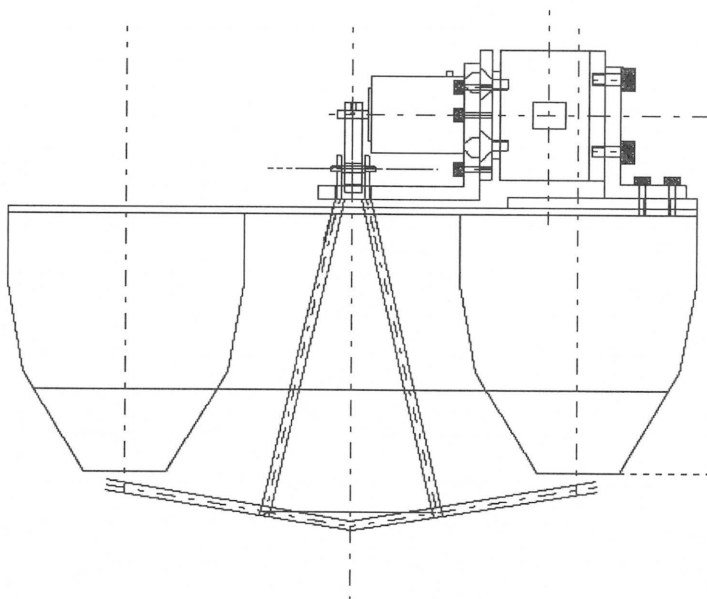


Fig. 2. Rear view of flap control device and forced meter.

3.2 計測制御システム

2. に示す制御アルゴリズムを組み込み、計測制御プログラム作成をおこなった。プログラムは Turbo Pascal で制作した。また使用計算機は運搬の事も考え、ラップトップ式の NEC PC-9801 NS/A (i486SX 33MHz) 1 台+拡張ボックス 1 台+拡張ボード 1 枚の構成とし、これですべての処理をおこなうシステムとした。

船体全体に働く外力は 6 分力計で、前後の水中翼に働く揚力はそれぞれ水中翼に取り付けられた独立した 1 分力計で計測する。それぞれ検力計の出力と前後翼フラップ角・マーカーなどの変位データを A/D 変換ボードを通してデジタル信号に変換し、数値フィルターをかけた上で計算機に取り込み、記録する。同時に入力計算機画面にグラフィック出力し、データの逐次チェックを行う。

計算機は入力された信号を用いて、高速で制御判断を行い前後 2 台のフラップ制御を行う。制御信号は PIO ポート出力させ、モータコントロールアンプに導き、ステッピングモータを駆動させ直接翼フラップ制御をおこなう。フラップ微小角度の制御は微小高精度のステッピング角駆動とスライダ機構で確保した。

センサー入力から制御信号出力までは、2 m sec 毎で行う。また計算機に取り込まれたデータは、計算機のメモリー内に 25Hz (40m sec) 毎で記録し、実験終了後ファイルに出力した。また、データをパソコンに取り込むのと同時に、船体に起こる現象を知るためビデオ撮影と写真撮影をもあわせて行った。

Table 4. Experimental condition.

Still water test						
Lift/Displacement (%)		60%		75%		
Speed	Actual (Kt)	30		34.8		
	Model F_n	0.871		1.01		
	V_m (m/s)	3.451		4.0		
Flap control		with	without	with	without	
Heading sea condition						
Lift/Displacement (%)		60%		75%		
Speed	Actual (Kt)	30		34.8		
	Model (m/s)	3.451		4.0		
Flap control		with	without	with	without	
Wave condition						
m	m	λ/L				
Actual	(Model)	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0
0.5 (0.025)					○	
1.0 (0.05)			○	○	○	○
2.0 (0.10)					○	

4. 模型実験結果および考察

1995年11月9日～14日の4日間にわたり模型船の運動制御及び翼強制動揺実験を日本造船技術センター第1水槽(200m)において行った。

始めに、抵抗値が低く、トリムが小さい最適航走になるように前後水中翼の迎角の組み合わせを決定した。拘束曳航実験より前翼 4° 後翼 6° と決定した。実験状態は、Table 4に示す。波は向波を基準とした。

また、波浪中実験でも、模型船の強度を考慮して、模型船曳航速度も実船速度40ノットに相当する曳航速度4.6m/sec. から、実船速度約35ノットに相当する4 m/sec. を曳航最大速度として実験を行った。

以下に模型実験結果を図にして示す。Fig. 3にフラップ翼制御有無の時系列データとピッチモーメントの変化の1例を示す。図上部に前後フラップ角を示し、その下に船体に作用するピッチモーメントを無次元化して示す。フラップ制御により船体に作用するピッチモーメント減少の様子がわかり、この場合の制御効果を見て取れる。

また図中に、平水中航走時にフラップの強制動揺試験より求めた翼モーメントの最大値を示す。

Fig. 4に船体に作用する上下力の翼制御有無による変化を示す。平水中の曳航実験より得た翼の定常揚力と、平水中でフラップ角度を最大まで変化させたときの翼発生揚力を書き入れて

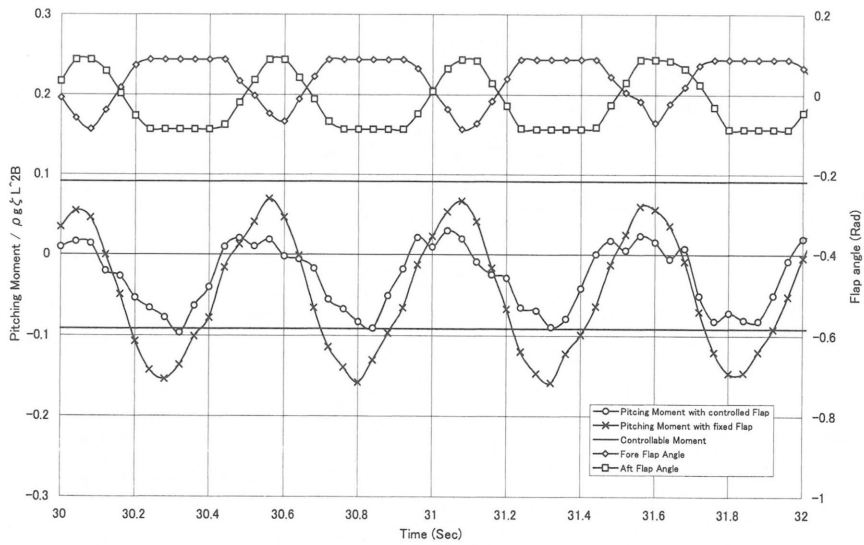


Fig. 3. Time history of non-dimensional pitching moment.
($\lambda/L = 2.0$, $\zeta = 0.05\text{m}$, $F_n = 1.01$)

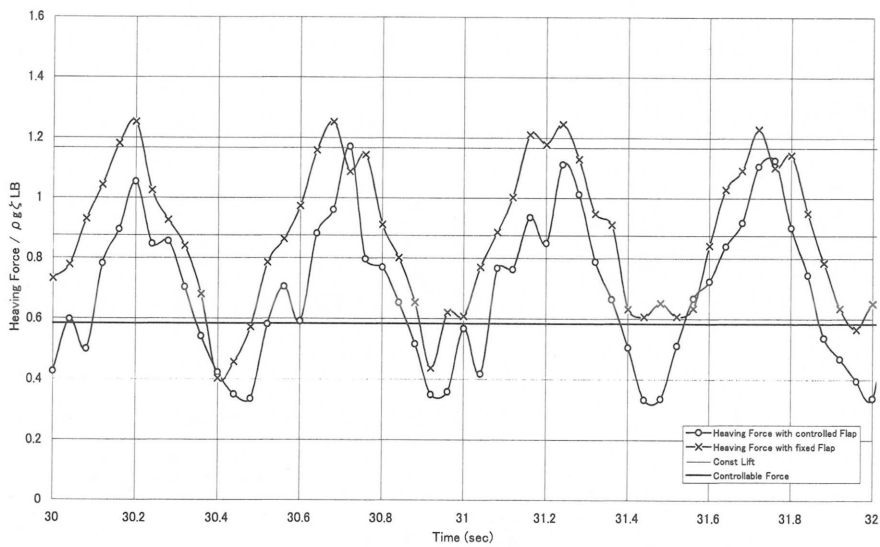


Fig. 4. Time history of non-dimensional heaving force.
($\lambda/L = 2.0$, $\zeta = 0.05\text{m}$, $F_n = 1.01$)

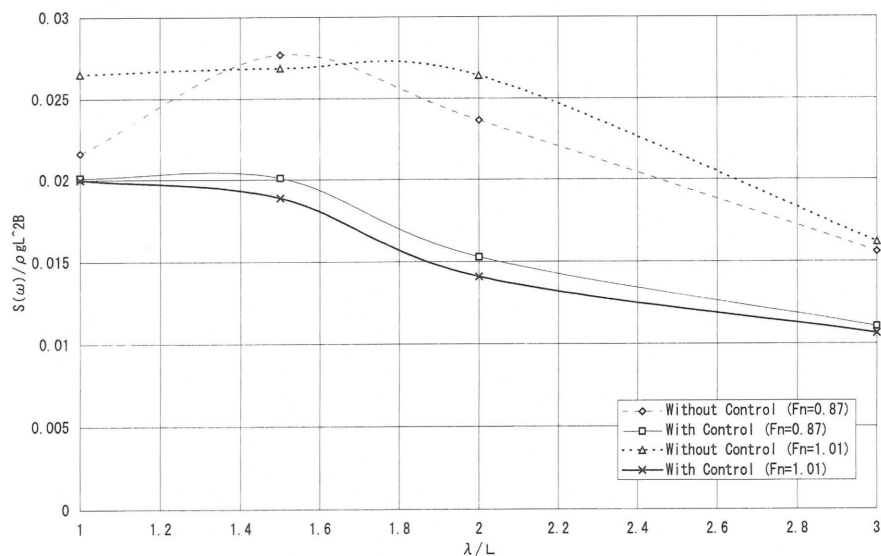


Fig. 5. Non-dimensional amplitude of pitching moment. (λ/L base)

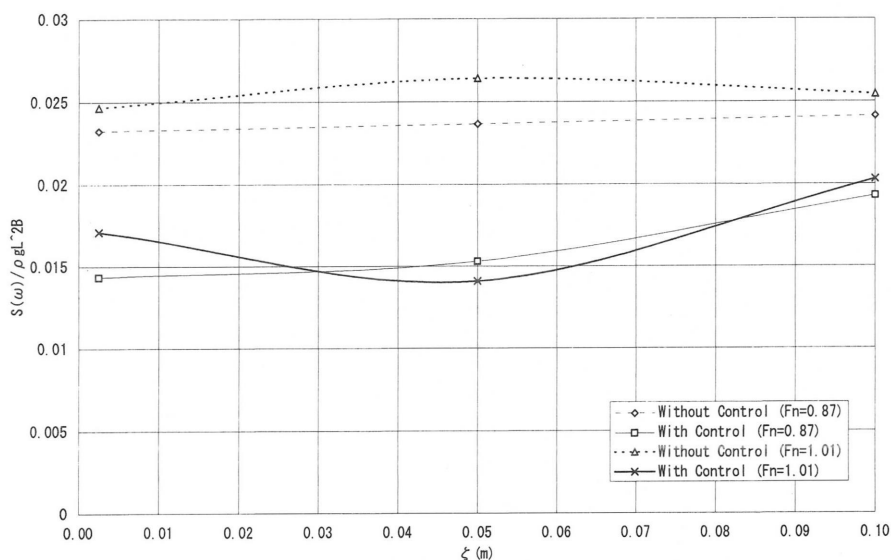


Fig. 6. Non-dimensional amplitude of pitching moment. (Wave height base)

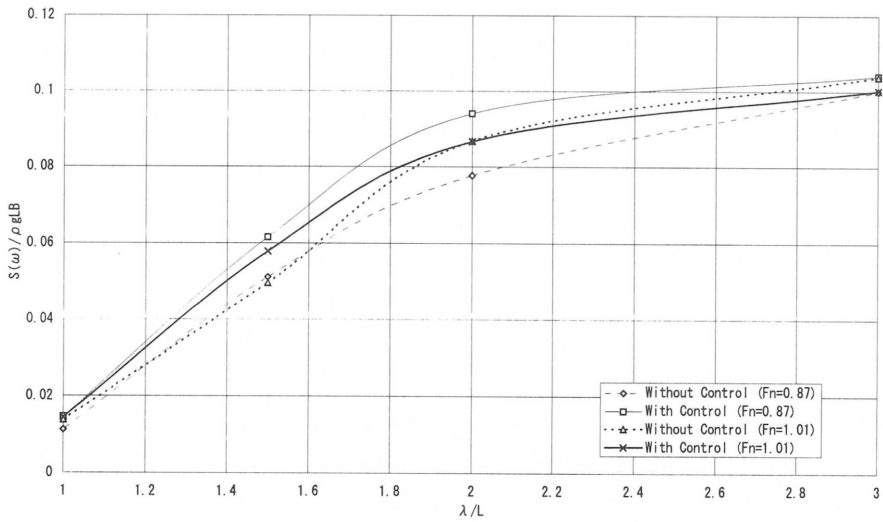


Fig. 7. Non-dimensional amplitude of heaving force. (λ/L base)

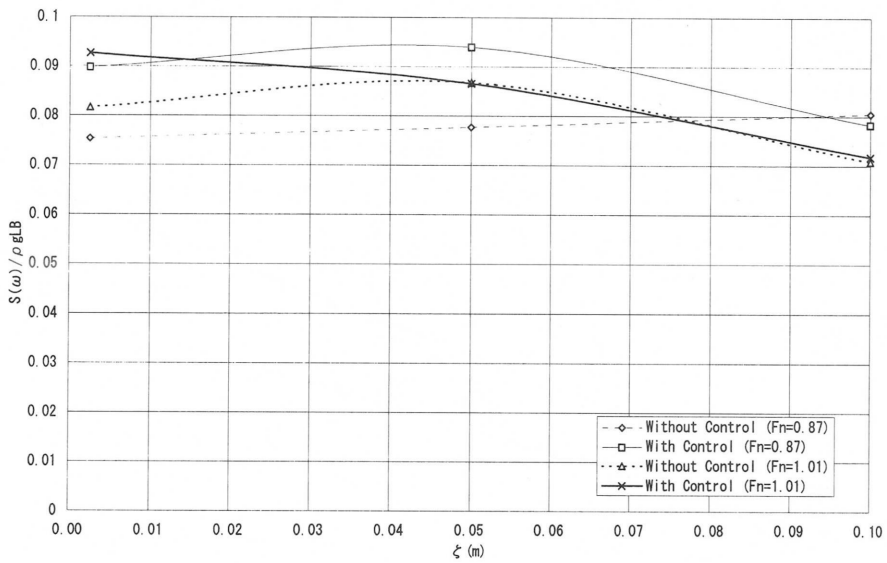


Fig. 8. Non-dimensional amplitude of heaving force. (Wave height base)

おく。フラップ翼の発生揚力は、平水時定常航走時と比べて揚力減少する場合があることがわかる。

Fig. 5, Fig. 6 に船速をかえた実験で、ピッチモーメントをフーリエ係数解析のうえ無次元化し、それぞれ波長／船長ベースおよび波高ベースに表示する。また Fig. 7, Fig. 8 にも上下力をフーリエ係数解析のうえ無次元化しそれぞれ波長／船長ベースおよび波高ベースに表示する。

Fig. 5 より、ピッチモーメントは船速の差によらず所定通り減少していることがわかり、波長／船長比 2 で最大効果を示すことがわかる。Fig. 6 より波高が大きくなるとピッチモーメント減少効果が少なくなることもわかる。これは 1 つには船体拘束曳航試験により、大波高時には水中翼が小波高時と比較して相対的に水面に近い状態となり、翼の効果が減じたとも見て取れる。

Fig. 7 および Fig. 8 を見ると、ピッチングモーメントに比較して、上下力は反対に多少増加していることがわかる。これは物理的に船体上下力を押さえる制御量より外力が大きいためでもあるが、制御アルゴリズムで、船首翼飛び出しを押さえることを考え、ピッチングを減少させることを優先し、上下揺れを積極的に小さくする方策を取らなかった結果だと思われる。また模型の関係上、フラップ面積は翼面の 1/6 とし、フラップ翼迎角も $\pm 5^\circ$ であり、上下揺れをおさえるためには制御量自体も小さかったと思われる。

Fig. 9 より Fig. 11 までに翼の平水中の揚力特性を示す。

Fig. 9 には前後翼のフラップ角を 0 度に固定し、迎角を変化させて揚力係数の変化を示したものである。前後翼とも同型の翼としたが、後翼は揚力発生能力が低下する。船首翼および船体後流の影響と思われるが、翼設計時には十分配慮する必要があると思われる。

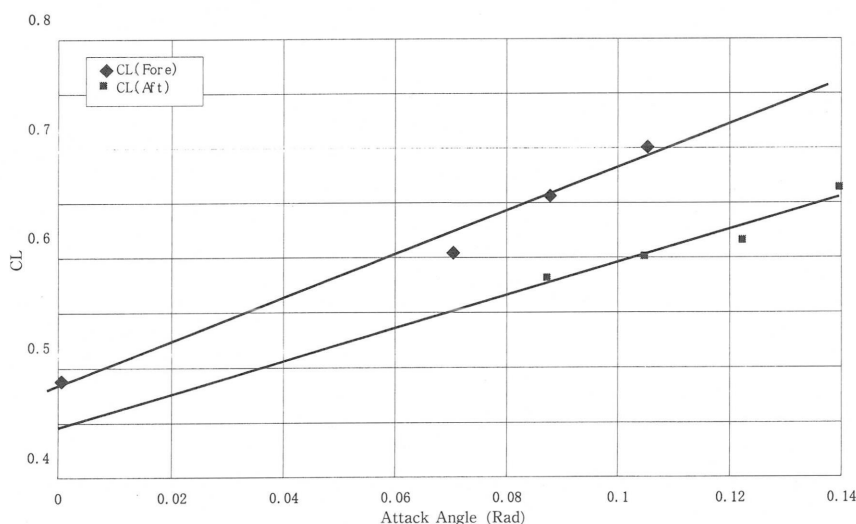


Fig. 9. Lift coefficient of hydrofoil. (Still water towing test. $F_n = 0.87$)

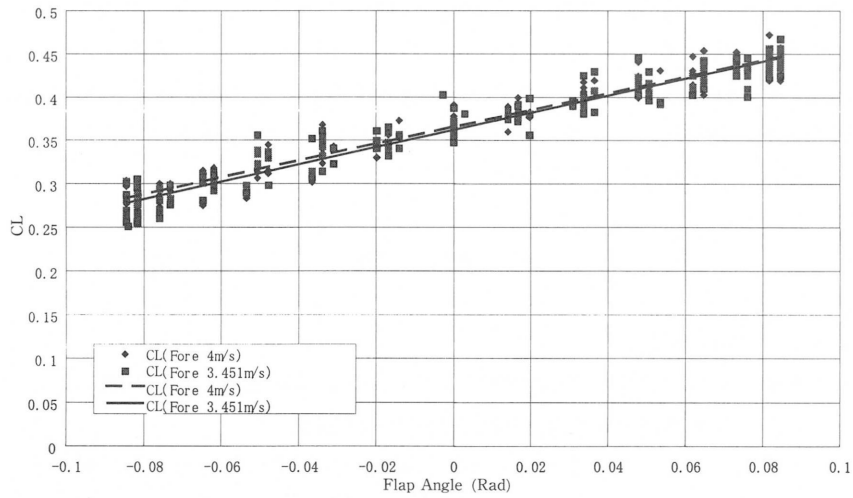


Fig. 10. Fore hydrofoil lift coefficient due to forced flap oscillation test.
(Attack angle: 4°, period: 1.25 Sec.)

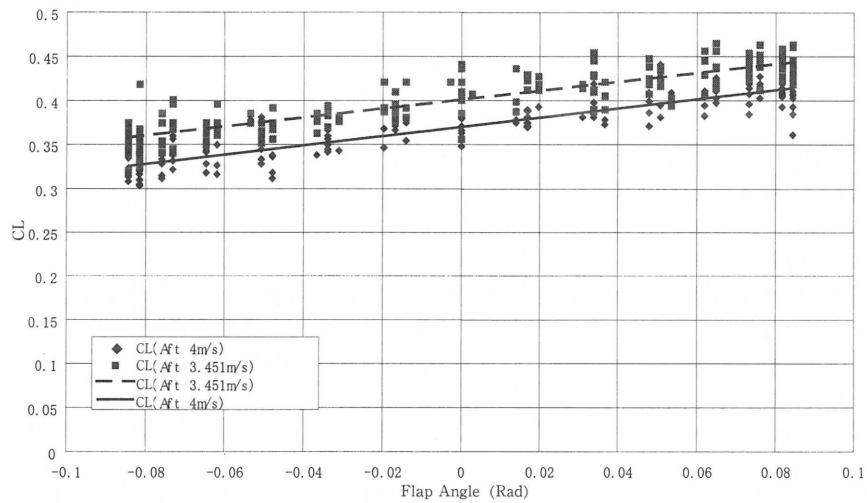


Fig. 11. Aft hydrofoil lift coefficient due to forced flap oscillation test.
(Attack angle: 6°, period: 1.25 Sec.)

Fig. 10, Fig. 11 に曳航速力を変化させて平水中のフラップ翼を強制振動させて翼揚力変化を調べた結果を示す。前後翼により船体の重量を均等に支えることから、前後翼の迎角は前4度、後6度に固定してある。データがまとまらず分布しているのは、周期1.25 sec. で強制動揺させた揚力の瞬時値を解析したためである。Fig. 9 より前後翼の発生する揚力は同じ迎角であれば前翼の方が揚力勾配は高いが、翼面荷重を前後翼とも同じ設定とすると、フラップ翼の前後翼揚力勾配はほぼ同じと考えて良いようである。

5. 結 論

これらより以下の結論を得た。

- (1) 簡単な閾値を用いたフラップ翼制御アルゴリズムを考案した。また制御および計測システムを組み、アルゴリズムの効果を模型実験により確認した。
- (2) このシステムで正面向かい波状態では船首揺れは抑制できる。しかし同時に上下揺れを抑制できていないことがわかった。
- (3) 模型実験の結果、水中翼フラップ特性を得た。

なお、本方法による制御と、今までのPD制御方法とを実験により比較し、制御結果の優劣比較を行うことは、ここでは実験の制約上おこなえなかった。しかし、実際の船の運動に本方法を適用し、従来方法による制御との比較計算を行った結果は谷上(1995)に示してあり、従来方法より本方法は良い運動制御結果を得ていることを付け加える。

参考文献

- 1) 浜本剛実他 (1992)：水面貫通型ハイドロfoil艇の縦波中の運動制御について，関西造船学会誌，第217号
- 2) 宮川典久他 (1999)：水中翼付双胴型高速客船の抵抗・推進性能の研究，東海大学海洋学部紀要，第48号
- 3) 宮田秀明他 (1987)：新型双胴水中翼船の開発（第1報），日本造船学会論文集，第192号
- 4) 宮田秀明他 (1987)：新型双胴水中翼船の開発（第2報），日本造船学会論文集，第192号
- 5) 森鼻英征他 (1999)：水中翼付双胴型高速客船の水中翼の強度に関する研究，東海大学海洋学部紀要，第48号
- 6) 大坪英臣他 (1990, 1991)：水中翼付き大型高速船の縦運動と強度（第1報，第2報），日本造船学会論文集，第168号，第170号（1991）
- 7) 重廣律男 (1993)：ハイブリッド高速カタマラン船の縦波中の運動特性，西部造船学会会報，第86号
- 8) 清水 建他 (1992)：水中翼を有する高速双胴船の波浪中運動に関する研究（第2報），日本造船学会論文集，第172号
- 9) 谷上明彦 (1995)：ハイブリッド高速カタマランの運動解析と制御，95年度東海大学大学院修士論文