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)

正員 宮 田 秀 明* 土 屋 好 寛*
魚 谷 宜 弘* 中 山 博 文*
正員 梶 谷 尚*

Development of a New-Type Hydrofoil Catamaran
(2nd Report : Design of a System with Flaps and Motion Properties)

by Hideaki Miyata, *Member* Yoshihiro Tsuchiya
Nobuhiro Uotani Hirofumi Nakayama
Hisashi Kajitani, *Member*

Summary

Hydrodynamical configuration design is made for a hydrofoil catamaran equipped with a flap system. In spite of the additional elements and the larger hydrofoil area the resistance derived from towing test shows same order of magnitude with the simpler models described in the first report. It is also demonstrated that the use of the flap system extends the speed range of low resistance with high elevation of the hull. The ship motion tests in regular incident waves show that the heave and pitch transfer functions are on the much lower level than the other designs currently used.

1 緒 言

シンセシスによる船舶工学の重要性が認識されている。与えられた流体力学的システム, 例えば在来排水量型船舶の性能を解析する研究の生産性は低下してきていると考えられている。「流力的形状システム設計」とでも呼べるような研究は, シンセシス的な研究の典型例の一つであり, 40~50 ノットまたはそれ以上の速力を持つ高速船は, 最もふさわしい対象の一つと思われる。このような研究を推進すると, 新しい海面輸送システムが開発され, 在来型の高速船の改良という点での貢献が期待されるだけでなく, 新しい海上輸送の市場を開拓する可能性も秘めている。

著者等は, 各種の高速船型の中で, 双胴水中翼船 (Hydrofoil Catamaran, HC と略す) が, 速力 40~50 ノット, 重量 2,000 トン程度以下の範囲で最も優れた特徴を持つ船型として計画できると考え, 流力的形状システム設計と模型実験を行ってきた。第一報では, 200 トン速力 40 ノットを設計条件とし, 2 隻の模型の設計と

その抵抗試験を実施し, かなり単純な形状を持ち優れた安全性を持つ船型が, 在来型高速船型よりかなり低い抵抗値を示すことを明らかにした¹⁾。一方, 第一報の船型は, 翼システムを中心に実船システムとは少し離れた単純すぎる部分が含まれていた。

そこで, 本報告では, 第二段階として, 翼システムを中心線上のストラットとフラップ・システムを付けたものとし, また, 船体にも種々の改良を加えた船型として新しい設計を行った。この実用的な方向に改良した船型の抵抗が劣化していないか, フラップの有効な利用による航走姿勢の制御が行えるかどうかを, 実験的に調べることにした。更に, 第一報の船型を含めた HC の正面規則波中の運動性能を調査した。高速船型の流体力学的性能としては, 抵抗性能と並んで耐航性能が最も重要であるからである。

2 船 型 計 画

2.1 船 体 形 状

第一報に引き続いて, 排水量 200 トン, 巡航速力 40 ノットで旅客または車両運搬用として計画した。第一報で試験した HC 200 A, HC 200 B を含めて要目の比較

* 東京大学工学部船舶工学科

Table 1 Principal particulars

	HC200A		HC200B		HC200C		HC200D	
	Ship	Model	Ship	Model	Ship	Model	Ship	Model
Loa (m)	51.2	1.600	38.08	1.190	39.504	1.2345	40.000	1.2500
L (m)	48.32	1.510	35.84	1.120	38.003	1.1875	38.000	1.1875
B (m)	12.8	0.4	11.584	0.362	12.992	0.4060	12.992	0.4060
D (m)	5.44	0.170	6.592	0.206	5.576 (5.60)	0.143 (0.175)	5.440 (6.464)	0.1700 (0.202)
d still (m)	3.36	0.105	3.84	0.120	3.500 (4.525)	0.109 (0.141)	4.272 (5.296)	0.1335 (0.166)
Δ	200 ton	6.185 Kg	200 ton	6.185 Kg	200 ton	6.185 Kg	200 ton	6.185 Kg
V	40 Kt	3.654 m/s	40 Kt	3.654 m/s	40 Kt	3.654 m/s	40 Kt	3.654 m/s
F	2.72	2.72	2.72	2.72	2.72	2.72	2.72	2.72
Foils		circular arc		circular arc		NACA16-012 camber (2.5% <i>c</i>)		NACA16-012 camber (2.5% <i>c</i>)
span (m)	8.30	0.259	8.32	0.260	10.10	0.316	10.10	0.316
chord (m)	0.90	0.0282	0.90	0.0282	1.28	0.04	1.28	0.04

Numbers in parentheses indicate length including the foil system.

を Table 1 に示す。静止時の水線間長さを L と表示し、基準長さとしたが、新しく設計した HC 200 C と HC 200 D の L は、共に HC 200 B より約 6% 長く、HC 200 A より大幅に短い。構造重量上の問題を考慮した長さとしている。双胴間の距離を約 20% 拡大し、横安定性の強化を図っている。HC 200 C, HC 200 D 共に船体断面形状は単純な三角形を基本とし、全長の約 1/2 は角柱に三角柱を接合したような断面になっている。HC 200 B のような丸いコーナ処理は採用しなかった。HC

200 C と HC 200 D との一番大きな差は、側面形状におけるステップの有無である。模型の写真、外形図、body-plan を Figs. 1~4 に示す。双胴船体は、pitch, roll 等の運動に対して、最も保守的な形で安定性を付加するが、同時に必要以上に没水すると抵抗増加の原因となる。一方では、翼の没水度が小さくなると翼の揚抗比が低下するだけでなく、波浪中運動性能の低下を招くことになる。ステップ付船型 HC 200 D は、この問題に対する解答を与えるべく設計された。後述のように翼に上反角を持たせたことによる翼システム自身の横安定性の付加によって、双胴船体の浮力による所要横安定モーメントを大幅に減らすことができるとの前提に立っている。

Fig. 1 Model HC 200 C

Fig. 2 Model HC 200 D

Fig. 3 Configuration of HC 200 C (above) and HC 200 D (below)

Fig. 4 Body-plans of HC 200 C (left) and HC 200 D (right)

両船型共に、フラップを使った船体運動制御試験を行うため、デッキ上にサーボ・モータとギア・ボックスを2組搭載する。したがって、主船体重量を極力軽くする必要があったので、バルサ材とウレタン材のみの構造とし、重量を約 1.5 kg とすることができた。

2.2 翼システム

翼システムの形状を Fig. 5 に模型寸法で示す。船体中心線上のストラットにより翼を支持し、翼は 12° の上反角を持つ。発生揚力の点からは、HC 200 A, HC 200 B のように 28 mm 程度の翼弦長で十分であるが、40% 強長くし、単位面積当たりの荷重を下げ、実用的な設計とした。翼断面形状は、水中翼に良く使われる NACA

16 を基本とし、多少のスーパーキャビテーション翼的な特性（正面正圧の増大）の付加を考え、翼後端の翼弦長の $1/3$ の長さにキャンバーを付け、全体で 2.5% のキャンバー付き翼とした。

フラップは、全翼面積の 20% を占め、Fig. 5 に示すように、船体中心線に近いところに位置している。前後それぞれの翼にある 2 本ずつのフラップは、ストラット後方の垂直ロッドを通して、デッキ上のモータとギアによって駆動される。したがって、左右のフラップは、すべて同じ角度にしか設定できない。ピン、垂直ロッドなど以外の翼主要部は、アルミ合金でできている。

Fig.5 Hydrofoil with flaps

3 抵抗試験

3.1 試験方法

東京大学船型試験水槽で抵抗試験を行った。試験方法は、第一報の場合と全く同じである。pitch, roll 運動に対しては拘束を加えていないので、静水中では、自己安定な状態に限って実験を実施したことになる。

HC 200 C は、初期トリムと翼の前後の迎角の組み合わせにより a~d の 4 状態で実験を行った。a~c の初期トリムが 2.6% で、d のみ 3.4% である。(前・後)の迎角の組み合わせは、a から d 順番に (3.8°, 3.0°), (4.0°, 3.0°), (5.0°, 3.0°), (4.0°, 3.0°) である。HC 200 D は、1 状態 a のみとし、定常フラップ角の変化により状態を変化させた。初期トリムは、2.0%, 前後翼の迎角は、(1.24°, 0.53°) である。

試験結果は、排水容積ベースで無次元化している。設計速力 40 ノットは、排水容積の 1/3 乗ベースのフルード数 F_F で 2.72 に対応する。

3.2 試験結果

HC 200 C (b 状態) の航走中の写真を Figs. 6, 7 に示す。静止時の平均吃水線が、一番上の吃水目盛りであるので、 $F_F=2.01$ の約 30 ノット相当の速度で、吃水の半分程度浮上している。この状態で既に約 75% の foil-borne 率である。その後、速度の上昇と共に浮上量が増大するが、foil-borne 率の増加は速度の 2 乗比例より緩やかで、翼の没水度減少により、翼の揚力係数が低下していることが推定される。この間、抵抗の絶対値が低下しつづける。船首からの造波は、非常に小規模

Fig. 6 Forward view of HC 200 C towed at $F_F=2.01, 2.29, 2.58$ and 2.72 from above

Fig. 7 Rear view of HC 200 C towed at $F_r = 2.01, 2.29, 2.58$ and 2.72 from above

が目立たないが、低速域での船尾波は、かなり激しい。設計速度での造波は、全体的に非常に低レベルでストラットの水切りも悪くないようである。

HC 200 D の場合を Fig. 8 に示す。下段の設計速力では、foil-borne 率は、97% 程度まで上がっており、上反角を持った翼による横安定性の向上がこのような航走を可能にしたことが分かる。上段は、同じ状態で速度を $F_r = 2.44$ に落とした状態である。この状態で、前 10° 後ろ -9° のフラップ角を付けると、翼システム全体の迎角が増大し、中段のように設計速力におけるのと同程度の浮上姿勢がとれる。後方ステップ外側の水切りは、あまり良くない。

Fig. 9 に HC 200 C と HC 200 D の標準的な状態での全抵抗係数曲線を示す。Fig. 7 に見るような状態で航走すれば、HC 200 C は、原型である HC 200 A とほぼ同じレベルの抵抗を示す。実用的な翼システムにしたことによる抵抗増分を翼没水深の高さと、上反角と幅広化による横安定性の向上 (foil-borne 率の向上) が、よく補っている。HC 200 D は、設計速力では HC 200 A や

Fig. 8 HC 200 D towed at $F_r = 2.44$ without flap angle (top), with flap angles ($10^\circ, -9^\circ$) (middle) and at $F_r = 2.72$ without flap angle (bottom)

Fig. 9 Total resistance coefficient curves of HC 200 C and HC 200 D in comparison with HC 200 A

Fig. 10 Total resistance curves of HC 200 C on various conditions

Fig. 11 Total resistance curves of HC 200 D on various flap conditions

HC 200 C と同レベルの抵抗を示すが、少し速度を落とすと、抵抗値はかなり増大する。4本のステップが薄くて、これによる浮力が小さいため、foil-borne 率が高い割に、浸水面積が大きいたことが原因と思われる。

HC 200 C の全抵抗係数曲線の比較を Fig. 10 に示す。初期トリムを2.6%から3.4%に増加させたd状態では、有効な翼迎角が大きくなるため浮上量が大きくなり、従って設計速力の少し手前までの抵抗はb状態より低い。しかし、浮上量には限界があり、設計速力では、特に良い値を示さない。この状態で、翼迎角を減らすようにフラップを前 -10° 、後ろ 10° とすると、全体的に抵抗値が増大するものの、比較的安定した航走状態が得られる。a状態では、フラップ角を変えた状態も示されているが、これらは、後述の船体運動試験状態に対応するものである。

Fig. 11 に HC 200 D の詳細を示す。フラップは、定常的に角度を与えて好ましい航走姿勢を得る目的と、動的に運動させて船体運動制御する目的の2つを持っている。本来、それぞれ独立したシステムとすることが望ましいが、本模型では、一系統のフラップ機構を両目的に使うことを考えている。Fig. 11 に見るように、定常フラップ角を適当に変更して、好ましい姿勢を作ると、設計速力だけではなく広い速度範囲で低抵抗状態を作ることができる。 $F_r=2.44$ (約35ノット)での抵抗は、定常フラップ角を与えて有効な迎角を増加させると、フラップを使わない場合の半分近くまで落ちる。このようなフラップの使いかたは、発進浮上時にも有効と思われる。

4 運動試験

4.1 試験方法

正面規則波中での heave, pitch の各運動を計測し、他船型と比較することとした。斜め波中の運動性能も重要であるが、航走速力の面から制約が多く困難であるので、次の課題とした。HC 200 B, HC 200 C, HC 200 D の3模型を作った。HC 200 B の試験は、三井造船昭島

Table 2 Wave conditions for HC 200 B advancing at $F_r=2.72$

Ship				Model				
λ s	T s	C		λ m	T m	f	ξ a	f_e / T_e
(m)	(sec)	(m/s)	(Kts)	(m)	(sec)	(Hz)	(mm)	(Hz) (s)
40	5.06	7.9	15.4	1.250	0.835	1.117	20.82	4.040/0.248
60	6.20	9.7	18.6	1.875	1.095	0.912	20.7	2.851/0.350
80	7.16	11.2	21.7	2.500	1.266	0.790	20.15	2.252/0.444
100	8.01	12.5	24.3	3.125	1.415	0.707	19.53	1.876/0.533
120	8.77	13.7	26.6	3.750	1.550	0.645	19.53	1.619/0.618
140	9.47	14.8	28.7	4.375	1.675	0.597	19.25	1.432/0.698
200	11.32	17.7	34.4	6.250	2.092	0.500	15.2	1.084/0.922

Fig. 12 Definition sketch for ship motion test

研究所で、HC 200 C と HC 200 D の試験は、東京大学船型試験水槽で実施した。

HC 200 B は、roll と sway を拘束して、設計速力で曳航した。A1 と A3 の2状態（第一報、Figs. 8, 9, 10 参照）とした。A3 の状態は、foil-borne 率を落とし、翼没水度を大きくした状態である。Pitch, heave の運動と FP, AP, 中央の3点における上下加速度を計測した。

HC 200 C と HC 200 D は、roll と sway の他に surge も拘束し、HC 200 C は $F_F=2.72$ と 2.43 の設計速力と 10% 減速の2状態、HC 200 D は 2.43 の 10% 減速の1状態で曳航し、Pitch と heave の両運動のみを計測した。HC 200 C は a 状態で各種のフラップ角をとった状態とし、HC 200 D は a 状態で (10° , -8°) のフラップ角をとった状態とした。対応する抵抗試験結

Fig. 13 Heave transfer function and phase difference of HC 200 B ($\zeta a/L=0.018$), HYCAT ($\zeta a/L=0.033$) and planing boat ($\zeta a/L=0.01$)

Fig. 14 Pitch transfer function of HC 200 B ($\zeta a/L=0.018$), HYCAT ($\zeta a/L=0.033$) and planing boat ($\zeta a/L=0.01$)

Fig. 15 Surge transfer function of HC 200 B ($\zeta a/L=0.018$)

果は, Figs. 10, 11 にある。波の条件を Table 2 に示す。 λ , T は波長と波周期, C は伝播速度を示す (Fig. 12 参照)。添字 s , m は, 実船と模型を示し, f_e , T_e は出合周波数と出合周期で, $F_F=2.72$ の設計速力におけるものを示している。波の片振幅は, HC 200 B, HC 200 C の2隻では, 2cm で一定とし, HC 200 D では 1cm と 2cm の2状態とした。実船では, 波高 0.64m, 1.28m に対応する。HC 200 B の計測結果は, フーリ

Fig. 16 Heave transfer function of HC 200 B

Fig. 17 Pitch transfer function of HC 200 B

Fig. 18 Nondimensional vertical acceleration of HC 200 B ($\zeta_a/L=0.018$) in comparison with the result of a planing boat ($\zeta_a/L=0.01$)

Fig. 19 Heave transfer function of HC 200 C ($\zeta_a/L=0.017$) at various flap angles

Fig. 20 Pitch transfer function of HC 200 C ($\zeta a/L=0.017$) at various flap angles

Fig. 21 Heave transfer function of HC 200 D at $\zeta a/L=0.008$ and 0.017

Fig. 22 Pitch transfer function of HC 200 D at $\zeta a/L=0.008$ and 0.017

Fig. 23 Comparison of vertical acceleration

エ解析して、1次成分のみを取り出し、HC 200 C と HC 200 D の計測結果は、瞬間デジタイザーの記憶装置よりペン・レコーダに書き出した振幅を読んだ。単純なサイン波形に近い結果として得られるので、両者の差は大きくないと思われる。

4.2 試験結果

HC 200 B の3つの運動の応答関数を Figs. 13~15 に示す。各運動の片振幅 z, θ, x を無次元化したものである。HYCAT^{1),2)} と滑走艇³⁾ との比較を行っている。模型寸法だけでなく、設計速力が異なるため、このような高速船では Figs. 13~15 の横軸の取りかたは必ずしも適当ではない。そこで、出合周期より仮定の波長を算出して横軸を作ると、Figs. 16, 17 のようになる。考慮すべき波長の範囲では、HC 200 B の応答関数が1を超えることはなく、特に翼の没水度が大きい状態 A3 では、応答関数は、heave, pitch それぞれ 0.5, 0.3 程度であり、大変良好な正面規則波中運動性能を持っている。滑走艇に対する優位性は、十分予測されたものであるが、HYCAT と比較しても良好な性能といえる。実験に使われた HYCAT 模型の主船体は、ディープV型滑走艇に近く、HC に比べて浮上量が小さそうであること、相対的に高い波高中で実験が行われたことが、Fig. 16 に示された HYCAT の極端に大きな運動の原因ではないかと想像される。

HC 200 B の前後端と船体中心位置における加速度を Fig. 18 に示す。Fig. 17 で分かるように、pitching 運動が小さいので、前後位置の違いによる差は比較的小さい。かなり低い波高 ($\zeta a/L=0.01$) で行われた滑走艇のデータの半分程度の大きさである。

HC 200 C の場合を Figs. 19, 20 に示す。一部の例外を除けば、HC 200 B の場合とほぼ同様の値と傾向を示す。短波長領域での大きな応答関数の値は、ポーポイズ運動と類似の運動の振幅に対応している。翼没水度の小さい状態では、前翼の両端が水面に極端に接近するか、または空中に露出して、急激に揚力を失い、船首沈下することにより始まる運動と思われる。この運動は、HC 200 B より翼に上反角を持たせた HC 200 C の方に発生しやすい。

HC 200 D の場合を Figs. 21, 22 に示す。Pitching における低波高中の値を除けば、HC 200 B とほぼ同じ結果である。ステップがあるので、翼没水度は比較的大きく HC 200 C のような大振幅の不都合な運動は見られなかったが、ストラット部の浮力が小さいため、浮力による運動減衰力が弱く、Fig. 22 の低波高時のように相対的には大振幅の運動を起こすこともありえるようである。

幾つかの代表的な水中翼船型との、船体中心部における上下加速度の比較を Fig. 23 に示す。HC は、水面貫通型と HYCAT よりは優れており、全没水中翼船より劣っている。しかし、80% 以上の重量は、翼によって支持されているので、適切な制御によって運動と加速度を大幅に低下させることは、容易に実現できると思われる。

5 結 論

HC は、実用的な翼システムを採用しても、原型と同様の低抵抗特性を保てること、運動性能も他船型よりかなり優れていることなどを明らかにした。翼に上反角を持たせない船型は、小型で制御のレベルが低い船型に、また、翼に上反角を持たせステップを設けた船型は、大型で高い制御レベルの船型に適していると思われる。

次の報告では、斜め波中の性能、大型化の可能性の調査、広範囲の他船型とのフィージビリティの比較などを行いたいと考えている。

本研究の一部は、日本造船振興財団の 62 年度事業「小型船舶の安全性及び経済性向上に関する開発研究」の援助を受けた。実験の一部は、三井造船昭島研究所、日下氏、松井氏などの方にお手伝いいただいた。関係各位にお礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) Calkins, D. E.: "HYCAT : hybrid hydrofoil catamaran concept", AIAA paper 81-2079, (1981).
- 2) Calkins, D. E.: "Development of HYCAT", AIAA paper 86-2381, (1986).
- 3) Block, J. J., and Beukelman, W.: "The high-speed displacement ship systematic series hull forms—seakeeping characteristics", SNAME transactions, Vol. 92, (1984).
- 4) 宮田他, 新型双胴水中翼船の開発（第一報, 形状計画と抵抗特性）, 日本造船学会論文集第 162 号 (1987), pp. 11~19.