

水中翼船の自動安定装置

三菱重工業株式会社* 伊藤正雄

1. まえがき

水中翼船の歴史は可なり古く、1891年に Charles Alexandre de Lambert が、セーヌ河で図1¹⁾に示すような構想の Hydroplane と称する船で試験したことが報ぜられている。其の後 Enrico Forlanini その他の人々によって開発が進められたが、1940年頃迄は余り活発な発展を見る事が無かった。然し第2次大戦頃から1950年にかけて再び見直されるようになり、其の後各国で次々と種々な形式のものが建造され実用に供されている。図2は水中翼船と、他の船舶および航空機との比較の一面を示した図²⁾で、横軸は最大速力、縦軸は重量1頓当りの装備機関出力を示したものである。図より水中翼船の占める凡よその位置を把握することが出来る。

水中翼船は、航空機が翼に生ずる揚力によって空中に支えられて飛行するように、水中翼に生ずる揚力によって船体重量を水面上に支えて航走するもので、水中翼に生ずる揚力の大きさ(L)はよく知られているように大略下記の関係で与えられる。

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_{L\alpha} \alpha \quad \dots [1]$$

- 但し ρ : 海水(または水)の密度,
- V : 水中翼すなわち船の速さ,
- S : 水中に没している部分の水平面投影翼面積,
- $C_{L\alpha}$: 水中翼の揚力係数傾斜,
- α : 水中翼の迎え角,

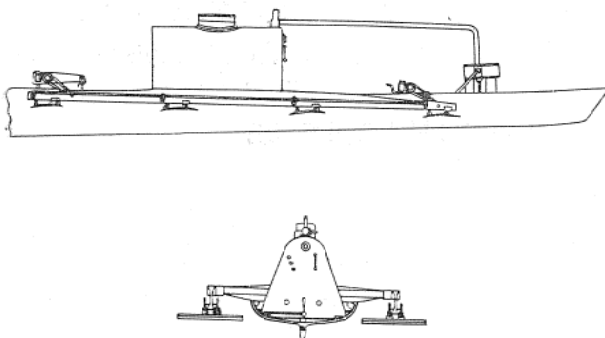


図1 Alexandre de Lambert 構想の Hydroplane

* 東京都千代田区丸の内2丁目10番地

$\rho, C_{L\alpha}$ を一定と見做した場合、Lは、 V, S, α の関数であり、更に船の速さが一定の場合はLは、 S, α の関数である。航空機の翼と、水中翼とは、空気中と水中航行との相違がある為、流体の密度 ρ は約1:800の割合である。この為同じ重量を支える場合は、水中翼の場合は非常に小さい面積のものでよいが然し一方、波のある海上を航行することに関し、つぎのような特別の現象がある。

海の波は一般には非常に複雑であるが、海面に近い波は普通図3³⁾に示す様なモデルで考えられている。すなわち、(i) 任意の1点に於ける水の粒子は、1サイクル後の水平方向の動きは無い、(ii) 同一垂直面内の粒子の動きの速度は総て同位相・同方向であり、その大きさは深さと共に指数関数的に減少する。波の進行はこの様

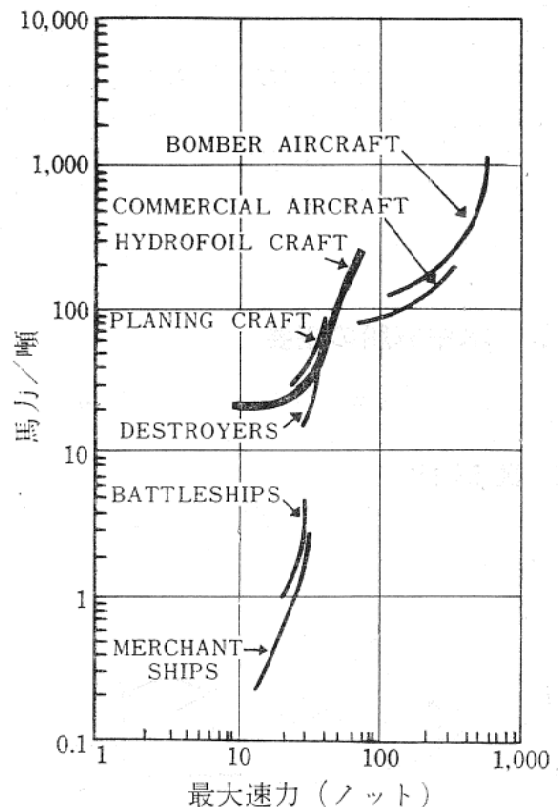


図2 各種船舶、航空機の馬力—速力—重量の関係

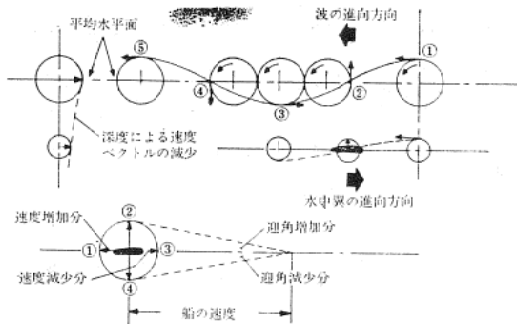


図3 波のオービタル運動の水中翼に及ぼす影響

な個々の水の粒子の円運動すなわちオービタル運動として考えられるので、図中の各点①②③④⑤におけるオービタル速度は矢印の方向となる。これらの点においては水中翼の進行速度とこのオービタル速度とがベクトル的に合成されたものが水中翼に対する相対速度となるので、水中翼の進行方向が図示の如く波の進行方向に向って進む場合（向波）には、①、⑤点においては相対速度は大となり②点においては翼の迎角が増し、③点においては相対速度が減少し、④点においては翼の迎角が減少することになる。以上は波の表面のみでなく水中翼の存在する深度の点で考えても同様のことが言える。また水中翼の進行方向が波の進行方向と同方向に進む場合（追波）にも、各点の関係は向波の場合と逆ではあるが同様のことが言える。以上のことは波の各点において水中翼を考えた場合、〔1〕式における V および α が変ることであり、また後述する水面貫通形の水中翼においては S も変ることになるので、波の各点において時々刻々揚力の変動が生じることになる。このような現象のための揚力変動をおさえるために水中翼船の自動安定装置が種々考案されている。

2. 水中翼船の概要

水中翼船の自動安定装置について述べる前に、水中翼船の概要について述べておきたい。

2.1 翼形式

水中翼船に使用される翼は下記の二形式に大別される。

(1) 水面貫通形水中翼

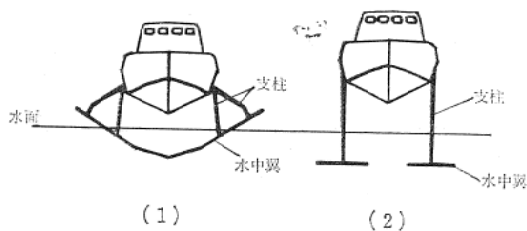


図4 水中翼の形式

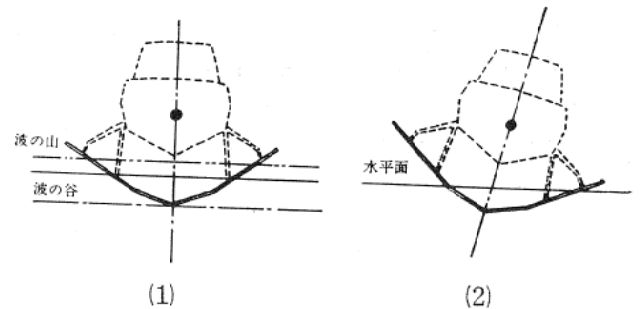


図5 水面貫通翼の復元性説明図

水面貫通形水中翼（以下水面貫通翼と略記）は図4—(1)に示す如く、水中翼が水面下と水面上に股がつた形式の翼で、この翼を装着した水中翼船はそれ自体で自己復元性を持つ。すなわち図5—(1)の如く、波の山がきて翼の没水深度が深くなった場合を考えると、それに従って没水面積が増すので揚力が増加し船体を上方に持ち上げる。これとは逆に翼が波の谷間に入り翼の没水深度が浅くなった場合は、揚力が減じ船体の自重の方が勝ち船体は下ろうとする。また図5—(2)の如く、何らかの原因で船体が左舷側に傾いた場合を考えると、左舷の翼の没水面積が増し従って左舷の方の揚力がより大きくなり船体を右側に廻そうとする復元モーメントがまさり、船の傾斜を自動的に元に戻すことが出来る。右に傾いた場合も全く同様である。このように水面貫通翼はそれのみで船体に自己復元性を持たせることが出来るので、何らの自動安定装置も必要としないがその反面、水中翼に生ずる揚力の大きさが翼の没水面積に直接関係するので、波の高い水面を翼走航行する場合には翼に生ずる揚力が波面につれて時々刻々変化するので、船体が波の影響を直接受け上下左右に大きく揺れることになる。

(2) 全没形水中翼

全没形水中翼（以下全没翼と略記）は図4—(2)に示す如く、水中翼全体が完全に水面下に没した形式のもので、波面の高低に対して没水面積の変化を生じないので船体の動揺が非常に少くなる。然し乍ら反面、全没形水中翼のみを使ったいわゆる全没形水中翼船においては、船体が上下または左右に傾斜した場合の復元性が殆んど無い為、何らかの自動安定装置を装備しなければならない。

2.2 水中翼に対する重量配分

前述の如く水中翼船は水中翼に生ずる揚力によって船体重量を水面上に支えて翼走航行（Foilborne or Flying Cruising）するものであるから、船体重量を各々の翼に配分分担させることになる。普通図6に示す様な翼の没水面積の配分形式が取られている。図の上から順次カナード形、タンデム形、航空機形と呼ばれている。大略の特性としてはカナード形は操縦性に優れ、航空機形は安定性に優れると言われているが、本来操縦性と安定性は

相反する表裏の関係にあり、またその特性は使用する翼形式等にも関係するので、一概に優劣を云々することは出来ない。尚図6に示した形式以外に、更に第三の翼を船首または船の中央部に装着したもの等もある。

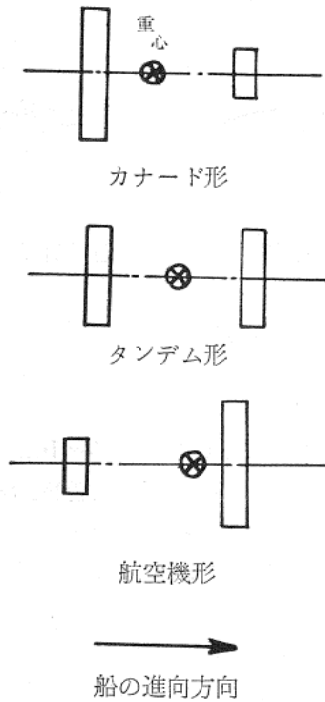


図6 水中翼の面積配分による形式分類

2.3 水中翼船の形式

水面貫通翼および全没翼を組合せて各種形式の水中翼船が製作されている。図7はその代表的な形式を示したものである。図7—(1)は前・後翼ともに水面貫通翼を用いたいわゆる水面貫通形水中翼船と呼ばれるもので、SupramarのPT-20、PT-50などがその例である。図7—(2)は前翼が水面貫通翼、後翼が全没翼のもので、Combined または Hybrid 形と呼ばれているもので、三菱MH-3、MH-30などがその例である。図7—(3)は船首

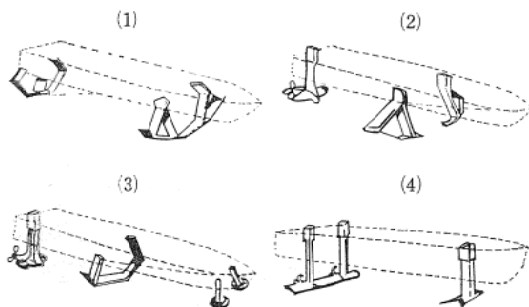


図7 水中翼船の形式

に水中橈を装着し、前翼を水面貫通翼、後翼を全没翼としたもので Aquavion, Aquastroll などがその例である。図7—(4)は前翼、後翼ともに全没翼としたいわゆる全没形水中翼船と呼ばれるもので、前述の如くこの形に対しては必ず何らかの自動安定装置を装備する必要がある。図7—(4)はカナード形で Boeing PC(H)1, Tucumcari などがその例であるが、この形式の航空機形翼配置のものに、三菱MH-3実験艇、GrummanのDolphin などがある。尚お以上の他にも種々の形式のものがある。

3. 自動安定装置

全没形水中翼船を含めて、各種形式の水中翼船の自動安定性・耐波性・乗り心地等を向上させるために、以下に述べるような種々の形式の自動安定装置が考案実用化されている。

(1) 水中橈を用いたもの

これは1937年 Grunberg⁵⁾が考案し Aquavion に用いられている形式のもので、図8—(1)に其の原理図を示す。船首に一对の固定水中橈を取付けたもので、例えば波の山が来た時は船首の水中橈により船首が持ち上げられ、この結果後翼の全没翼の迎え角も正側に増大するので後翼の揚力が増大し船体後部を持ち上げることになる。波の谷に船首が突つ込んだ時は上記と逆になる。このようにして波に応じて船体の姿勢を制御するようにしたものである。実際の Aquavion では図8—(2)の如く船体の中央部に水面貫通翼を装着しており、後翼の全没翼は補助的な安定制御翼の作用をしている。

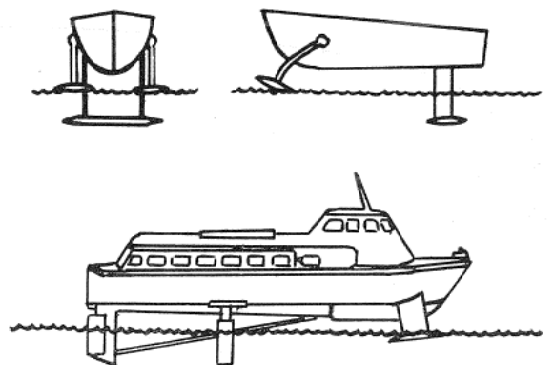


図8 Grunbergの水中橈

(2) 小形サーボ翼を用いたもの

1947年に Christopher Hook が全没形水中翼船に用いた装置で、図9⁶⁾にその原理図を示す。バネで支えられた板片は微小な波面を、小形サーボ翼は大きな波面を予め検出し、リンク機構によって全没形前翼の迎え角を制御し、船体のピッチ角、上下動、ロール角を制御するようにしたものである。

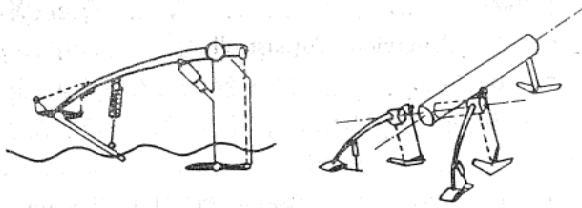


図9 Christopher Hook のサーボ翼装置

(3) 水面効果を用いたもの

Raketa, Meteor, Sputnik などのソ連の水中翼船は、全没翼の水面効果⁷⁾ (Immersion depth effect) を利用したものである。水面効果とは、水面近くにおける水中翼の揚力係数が、翼の没水深度 d 、翼弦長 c 、水面より d の深さにおける揚力係数を $C_{L\infty}$ 、非常に深い深度に於ける揚力係数を C_{L0} とした場合、 $C_L/C_{L\infty}$ と d/c との間に図10の如き関係があることを言う。すなわち $d/c=2$ 程度の範囲では $C_L/C_{L\infty}$ が図示の如く変るので、この範囲の没水深度においては全没翼のみを用いた水中翼船においても自己復元性をもたせることが出来る。尚この効果は水面近くの効果であるので浮上する時には、補助的に水中橈または補助翼を併用する必要がある。また実際には翼走航走時の全没翼の没水深度は翼弦長の約1/10程度であるといわれているので、河川・運河・湾内の様に水面の平穏な水域には適しているが、波のある海上翼走には不向きである。

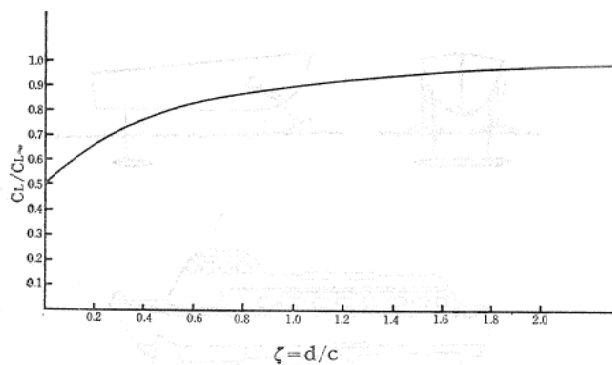


図10 水面効果の特性曲線

(4) 空気制御方式を用いたもの

Supramar によって開発された方式⁸⁾で、図11-(1)に示す様に空気大気中からダクトを通じて導きこの空気を翼表面に開けた孔から流出させ、これによって翼表面の流れを剥がして揚力を減少させるようにしたものである。すなわち制御弁によって空気流出量を調節することにより揚力の大きさを制御することが出来る。船体運動の検出器としては、ダンパー付きの振子、レートジャイロ、

加速度計を用い、これら検出器からの制御信号を流体増幅器を介して増幅し、制御弁を制御するようにした装置である。

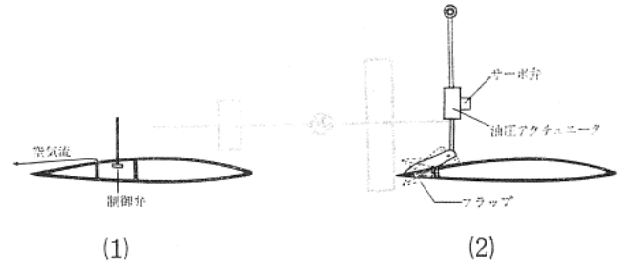


図11 水中翼の構造説明図

(5) 電子—油圧制御方式を用いたもの

航空機のオートパイロット装置に用いられているものと同様な装置を、水中翼船にも用いる計画が1952年頃から始められ、1957年に Gibbs & Cox Inc. が電子—油圧式の自動安定装置を備えた全没形実験艇 Sea Legs (排水量約5噸、最高速力約30ノット) を製作した。これは船体運動をパーティカルジャイロ、レートジャイロ、加速度計、超音波高度計により検出し、これら検出器からの制御信号をアナログ形演算部、電気油圧変換器(サーボ弁)を経て、油圧アクチュエータを駆動させ、図11-(2)に示した水中翼の制御翼(フラップ)を動かして翼に生ずる揚力を変化させるようにした装置である。

以上水中翼船の自動安定装置として代表的なものの概要について述べたが、これ以外にも種々の方式のものが考案されている。

4. MH-3 全没形水中翼船

三菱重工 k/k では MH-3 形および MH-30 形の商用水中翼船の開発に引き続き、1963年より全没形水中翼船の開発研究に着手し、図12および図13に示すような MH-3 全没形実験艇⁹⁾ (排水量約4.2噸、最高速力約40ノット) を製作、1964年7月その翼走航走に成功した。以下簡単にその概要について述べる。

航空機形の翼配置で、左右の前翼および後翼はともに制御翼をもつた全没翼である。一般に全没形水中翼船に対しては、水面よりの浮上高さ、船のピッチ角、ロール角を制御することが必要である。このために、浮上高さの制御は左右の前翼制御翼により、ピッチ角は後翼制御翼により、ロール角は左右の前翼制御翼を差動して制御する方式を取っている。図14に、使用した自動安定装置の構成ブロック図を示す。方式としては前述の電子—油圧制御方式である。船の浮上高さ、姿勢角(ピッチ角、ロール角)は翼走航走中に運転者が運転席計器盤のダイ

ヤルを操作して自由に変更設定出来るようになっており、また航空機が旋回する時と同様ないわゆる釣り合い旋回 (Co-ordinated turn) も出来るようになっていいる。始走後種々の性能試験を行い1964年末に実験艇としての試験を完了した。

図15は翼走航行中に艇のピッチ角を-2度から0度に変更したデータの一例で、図中の(A)が入力の設定ピッチ角、(C)が出力の艇体ピッチ角を示している。(B)は超音波型高度計の出力信号、(D)、(E)はそれぞれ前翼および後翼の制御翼角を示したものである。写真1に関門海峡

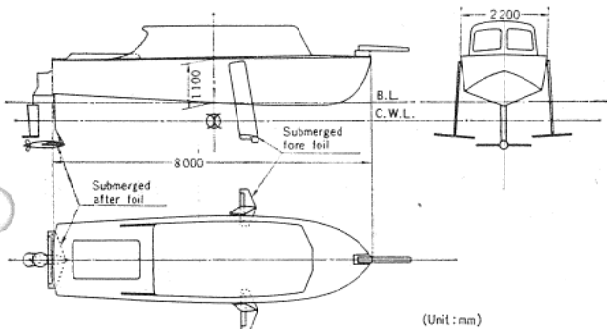


図12 MH-3 全没形水中翼船の外形図

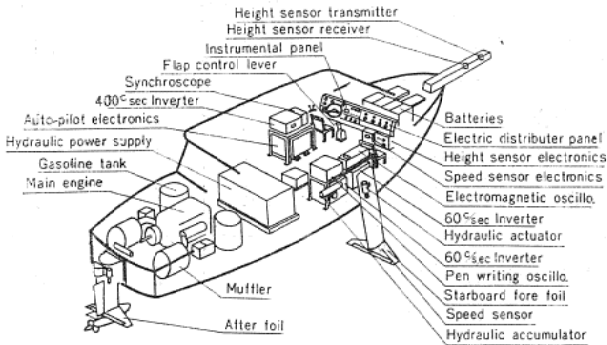


図13 MH-3 全没形水中翼船の自動安定装置各機器配置図

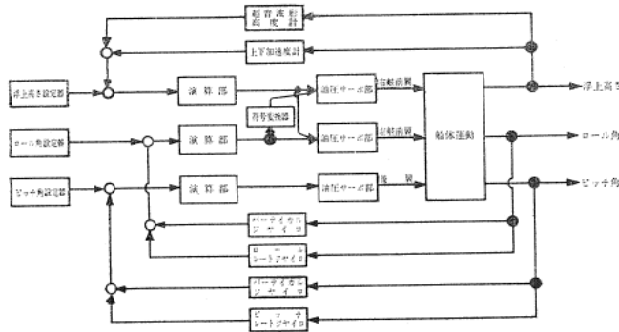


図14 MH-3 全没形水中翼船の自動安定装置構成ブロック図

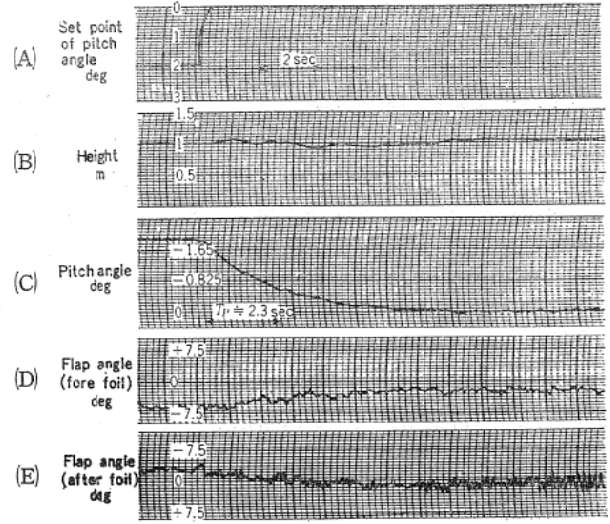


図15 ピッチ角ステップ応答試験の一例

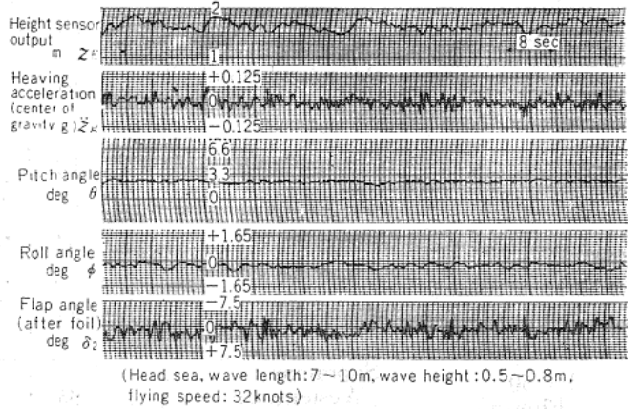


図16 海上翼走試験データの一例



写真1 海上試験中の MH-3 全没形水中翼船

彦島付近を翼走航行中の実験艇を示した。図16はその時の記録データの一例で、上から順次、高度計の出力信号、艇重心における上下加速度、ピッチ角、ロール角、および後翼制御角を示したものである。

5. むすび

以上水中翼船の自動安定装置の一端について述べたが、自動安定装置を装備するか否か、またどのような装置を装備するかについては、船の大きさ、航行海域、使用目的、経済性等に関係するものと思われる。近時自動安定装置を備えた大形水中翼船の実用船が次々と建造または計画されていることが報告されている。代表的なものを表1に集録した。

終りに、本稿作成に当り御高配いただいた当社技術本部技術管理岡村健二部長並びに当社下関造船所大津義徳顧問に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Hovering Craft & Hydrofoil (以下 HC & H と略記) Feb. 1963
- 2) Davison, K.S.M. : Ships of the IX Congress, International de Mécanique Appliquée, Université de Bruxelles, 1957
- 3) Aerospace Engineering, Dec. 1962
- 4) HC & H, Janu. 1965
- 5) L'Acrotechnique, No. 174, June 1937
- 6) HC & H, July 1962
- 7) HC & H, Oct. 1962
- 8) HC & H, March 1967
- 9) Technical Review, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Jan. 1966

以上

表1 自動安定装置を装備した大形水中翼船

船名	製作	排水量	最大速力	翼形式		制御方式	用途
		(噸)	(ノット)	前翼	後翼		
Victoria	Maryland Shipbuilding & Dry Dock Co.	37	37	全没	全没	電子—油圧	客船
Dolphin	Grumman	53	50	全没	全没	電子—油圧	客船
PG(H)1	Grumman	57	40+	全没	全没	電子—油圧	軍用
PG(H)2	Boeing	58	40+	全没	全没	電子—油圧	軍用
PT 50 (Flipper)	Supramar (Westermoen Shipyard)	65		水面貫通	全没	空気	客船
PC(H)1	Boeing	108	40+	全没	全没	電子—油圧	軍用
PT 150	Supramar (Westermoen Shipyard)	150	40	水面貫通	全没	空気	客船
AG(EH)	Grumman	320	50+	全没	全没	電子—油圧	研究用