(昭和 41 年 5 月造船協会春季講演会において講演)

可動 Anti-pitching Fin について

正員 松 井 政 博* 正員 根 角 幸 明*
 正員 柰 中 勝** 正員 高 木 又 男*

On Activated Anti-pitching Fins

By Masahiro Matsui, *Member*, Yukiharu Nekado, *Member*
 Masaru Mokunaka, *Member*, Matao Takagi, *Member*

Summary

Recently, researches on the reduction of the pitching motion of ships are actively pursued. The anti-pitching tank and anti-pitching fin etc. may be cited as examples.

This paper presents the effect of activated anti-pitching fins upon pitch reduction. The attack angle of the fins can be varied by signals of $K_1\phi + K_2\dot{\phi} + K_3\ddot{\phi}$, where ϕ is pitching angle and K_1 , K_2 and K_3 are constant.

According to the theory which was introduced in this paper, it is desirable to take a combination, $K_1 > 0$, $K_2 > 0$ and $K_3 < 0$, in order to reduce the maximum amplitude of the frequency response. But from the viewpoint of comfort of passengers in ships, it is suitable to take a combination, $K_1 < 0$, $K_2 > 0$ and $K_3 > 0$. And it is expected from the calculation that the maximum pitch amplitude of a ship with controlled fins is about 50% lower than a ship's with fixed fins, and 60% lower than a ship's without fins.

On the other hand, an experimental study has been conducted in regular waves using pitching angle and it's angular velocity as signals to move fins. And the results of the experiments showed that more than 80% pitch reduction can be obtained, and that anti-pitching fins are also very effective for heave reduction.

1 緒 言

船舶はすべての輸送機関のなかで、最も動揺のはげしいものであり、動揺による弊害は決して軽視できない。通常の排水型の船舶では、横揺れ、縦揺れ、上下揺れの三つが代表的な動揺の形式であるが、このうち横揺れは船舶の乗りごこち性能および安全性能に最も大きな関連を有しているために、古くから数々の研究が行なわれ、横揺れを減少させる有効な方法も数多く開発されている。一方、縦揺れおよび上下揺れについては、横揺れの場合のように直接船舶の安全性を脅かすことがないために、比較的その研究が遅れていたが、最近海洋波および船体造波に関する理論が進展するとともに、縦揺れおよび上下揺れ性能に関する研究が活発に行なわれ、これが推進性能と密接な関連を有することが明らかになるにいたつて、その軽減対策についても種々のものが、試みられるようになってきた。特に、縦揺れは推進性能以外に乗りごこち性能および船首部船底スラミングなどにも密接な関連があり、これを軽減することは、船舶の耐航性能を向上させる上に不可欠と考えられる。

縦揺れ軽減方法として現在試みられているものに Anti-pitching tank¹⁾²⁾ と Anti-pitching fin³⁾ の二つがある。これらはいずれもかなりの効果を期待できるものであるが、両者とも受動的な性質のために機器の単位あたりの効果が小さく、装備が大きくなって実用上の制約を受けることが大きい。そこで筆者らはこれらを能動化して効果を高め、実用的な大ききの装備によつて効果を得ることを企図して、後者の Anti-pitching fin を自動制

原稿受付 昭和 41 年 1 月 10 日

* 日立造船(株)技術研究所

** 日立造船(株)船舶事業部

御することを考えた。

本研究はフィン駆動を自動制御によつて行なつた場合の縦揺れ軽減効果を理論的、実験的に論じたものである。

2 船体縦動揺の運動方程式

2.1 フィンを装備しない場合

図 1

図1のように、船体に固定した座標系をとり、上下揺れを z 、縦揺れ角を ϕ で表わすならば、上下および縦揺れの運動方程式は一般には次のように表わされる。

$$M_{zz}\ddot{z} + N_{zz}\dot{z} + B_{zz}z + M_{\phi z}\ddot{\phi} + N_{\phi z}\dot{\phi} + B_{\phi z}\phi = F_{zz} \cdot h(t) \quad (1)$$

$$M_{z\phi}\ddot{z} + N_{z\phi}\dot{z} + B_{z\phi}z + M_{\phi\phi}\ddot{\phi} + N_{\phi\phi}\dot{\phi} + B_{\phi\phi}\phi = F_{\phi\phi} \cdot h(t) \quad (2)$$

ここに、 M, N, B は慣性、抵抗および復元力の項の係数を表わし F は外力の項を表わす。また、 $h(t)$ は船体中央部の静止喫水線よりの波の高さを

表わす。添字 ϕz は上下揺れの縦揺れに関する連成の項を示し、 $z\phi$ は縦揺れの上下揺れに関する連成の項を示す。各運動方程式の係数は本来、周波数の関数で本質的には非線形な運動方程式である。なお、上下揺れ外力と縦揺れ外力の位相差は F に含めてあらわしている。

さて、連成の項を加味して考察をすすめることは、それほど容易ではないので、連成の項を無視することにする。第4章において吟味されているように、このために本筋を大幅にそれることはないものと思われる。このとき、(1)、(2)式は、

$$M_{zz}\ddot{z} + N_{zz}\dot{z} + B_{zz}z = F_{zz} \cdot h(t) \quad (3)$$

$$M_{\phi\phi}\ddot{\phi} + N_{\phi\phi}\dot{\phi} + B_{\phi\phi}\phi = F_{\phi\phi} \cdot h(t) \quad (4)$$

となる。

2.2 フィンを装備した場合

つぎにフィンを装備した船の運動方程式を導く。運動は連成を無視したものを考えるゆえに、図2においてOを中心に船は縦揺れのみを行なっているものとする。いまOから前方に l なる距離の船首底部に、Anti-pitching fin を取り付けたとする。このとき船体運動と波によつてフィンに働く揚力、およびOまわりの揚力モーメントは次のようになる。

まず、フィンの上向きの速度 $\dot{z}_p$ は、

$$\dot{z}_p = -l\dot{\phi} \quad (5)$$

であり、フィンの船に対する角度を翼角 δ とすれば、フィンに流入する水の真の流入角 δ_p は、

$$\delta_p = \delta + \phi - \frac{l}{u}\dot{\phi} \quad (6)$$

となる。ここに u は船の速さである。ただし厳密には波の orbital motion による影響を考慮する必要があるが、ここでは省略した。いま、フィンに働く揚力 L_f は付加質量を無視すれば

$$L_f = \frac{1}{2}\rho u^2 s \frac{\partial C_L}{\partial \delta_p} \cdot \delta_p \quad (7)$$

となる。ここに、 s は翼面積、 C_L は揚力係数である。

さて、揚力によるモーメントを M_f とすれば、 M_f は次のように表わされる。

$$\begin{aligned} M_f &= l \cdot L_f = \frac{l}{2}\rho u^2 s \frac{\partial C_L}{\partial \delta_p} \delta_p \\ &= \frac{l}{2}\rho u^2 s \frac{\partial C_L}{\partial \delta_p} \left(\delta + \phi - \frac{l}{u}\dot{\phi} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

よつて、フィンを装備した船の運動方程式は(8)式を(4)式の右辺の外力の項に加えてもとめられる。すなわち、

図 2

$$\begin{aligned}
 M_{\psi}\ddot{\psi} + \left(N_{\psi}\psi + \frac{l^2}{2}\rho u s \frac{\partial C_L}{\partial \delta_p} \right) \dot{\psi} + \left(B_{\psi}\psi - \frac{l}{2}\rho u^2 s \frac{\partial C_L}{\partial \delta_p} \right) \psi \\
 = F_{\psi}\psi h_{(t)} + \frac{l}{2}\rho u^2 s \frac{\partial C_L}{\partial \delta_p} \delta_{(t)}
 \end{aligned} \quad (9)$$

これがフィンを装備した船の運動方程式である。ここで、 $\delta_{(t)} \equiv 0$ とおけば、フィンを船体に固定した場合のいわゆる固定フィン装備の船の運動方程式が得られる。

3 フィンの駆動制御

さて、本研究の目的は上記のごとく装備したフィンを固定したままにおかず、駆動した場合のフィン（便宜上、可動フィンと呼ぶ）が縦揺れにおよぼす軽減効果について論じるものであるが、単に駆動するのみであれば、波の状態の急変とか、船の進路の変化によつて、むしろ揺れを助長するおそれもあり、軽減効果も十分なものを望み難い。そこで、いかなる外界の変化があつても常に最適な駆動を行なうには、すでに横揺れ防止に用いられているフィン⁴⁾のごとくその運動を自動制御するのがもつとも妥当であると考えられる。

比較的簡単に計測できる縦揺れの運動量は縦揺れ角 ψ 、角速度 $\dot{\psi}$ 、角加速度 $\ddot{\psi}$ である。

さて、もつとも簡単な制御系として、船体運動を直接フィンにフィードバックする方法を考えてみる。すなわち、 ψ 、 $\dot{\psi}$ および $\ddot{\psi}$ を適当に組合わせてできた信号を帰還量とし、操作量はフィンの回転角 δ とする。

いま、簡単のために、(9) 式を次のように表わす。

$$a\ddot{\psi} + b\dot{\psi} + c\psi = d\delta_{(t)} + eh_{(t)} \quad (10)$$

ここに、

$$a = M_{\psi}$$

$$b = N_{\psi}\psi + \frac{l^2}{2}\rho u s \frac{\partial C_L}{\partial \delta_p}$$

$$c = B_{\psi}\psi - \frac{l}{2}\rho u^2 s \frac{\partial C_L}{\partial \delta_p}$$

$$d = \frac{l}{2}\rho u^2 s \frac{\partial C_L}{\partial \delta_p}$$

$$e = F_{\psi}\psi$$

である。(10) 式をラプラス変換すれば、

$$(as^2 + bs + c)\psi(s) = d\delta(s) + eh(s) \quad (11)$$

ここに、 $\psi(s)$ 、 $\delta(s)$ 、および $h(s)$ は $\psi(t)$ 、 $\delta(t)$ および $h(t)$ のラプラス変換を示す。ここで、 $\delta(t) = 0$ あるいは $h(t) = 0$ とおくことによつて、縦揺れの波に対するあるいは、フィンに対する伝達関数を求めることができる。すなわち、

$$\Phi_h(s) = \frac{\psi(s)}{h(s)} = \frac{e}{as^2 + bs + c} \equiv e\Phi(s) \quad (12)$$

$$\Phi_\delta(s) = \frac{\psi(s)}{\delta(s)} = \frac{d}{as^2 + bs + c} \equiv d\Phi(s) \quad (13)$$

ここに、

$$\Phi(s) = \frac{1}{as^2 + bs + c} \quad (14)$$

である。伝達関数 $\Phi_h(s)$ および $\Phi_\delta(s)$ はともに $\Phi(s)$ より構成されているので、この $\Phi(s)$ を船体運動の伝達関数と呼ぶことにする。

制御系を図示すると図3のようになる。ここで K_1 、 K_2 、および K_3 は角度、角速度、角加速度の信号の大きさを定めるものである。図3をさらに簡潔にすれば、図4のように描ける。

図3 制御系の構成

図4

ここに、 $H(s)$ はフィードバック要素であつて

$$H(s) = K_1 + K_2 s + K_3 s^2 \quad (15)$$

となる。これはきわめて簡単な構成であるが一つの制御回路を構成している。実際にはサーボ機構が介在するために、一次遅れ要素を考えに入れる必要があるが、これは、模型実験でかなり余裕のある駆動装置を用いる場合はあまり影響をおよぼさないものと思われるので、ここでは無視する。

次に図4より

$$\phi(s) = -d\Phi(s)\delta(s) + e\Phi(s)h(s) \quad (16)$$

$$\delta(s) = H(s)\phi(s) \quad (17)$$

を得る。この二式より、波の縦揺れ角に対する伝達関数およびフィンに対する伝達関数は、

$$\frac{\phi(s)}{h(s)} = \frac{e\Phi(s)}{1 + d\Phi(s)H(s)} \quad (18)$$

$$\frac{\delta(s)}{h(s)} = \frac{d\Phi(s)H(s)}{1 + d\Phi(s)H(s)} \quad (19)$$

である。(18), (19) 式の分母は自動制御系の特性を示すもので、 $d\Phi(s)H(s)$ は一巡伝達関数と称されているものである。

$$1 + d\Phi(s)H(s) = 0 \quad (20)$$

(20) 式は、この自動制御系の特性方程式であり、これから可動フィンを装備した場合の縦揺れの運動方程式の特性方程式、

$$(a + dK_3)s^2 + (b + dK_2)s + (c + dK_1) = 0 \quad (21)$$

を得る。また、(21) 式を変形して、

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \quad (22)$$

とできる。ここに、

$$\zeta = \frac{1}{2} \cdot \frac{b + dK_2}{\sqrt{(a + dK_3)(c + dK_1)}}, \quad \omega_n = \sqrt{\frac{c + dK_1}{a + dK_3}} \quad (23)$$

ζ はダンピング係数、 ω_n は固有角周波数である。

いま、 $h(t) = h_0 \sin \omega_e t$ なる入力加わるものと仮定する。このとき、(18) 式より

$$\phi(s) = \frac{e}{(a + dK_3)(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)} \cdot \frac{\omega_e h_0}{s^2 + \omega_e^2} \quad (24)$$

となる。この微分方程式の解は、

$$\begin{aligned} \phi = & A \exp(\sigma t) \cdot \sin(\omega t + \epsilon_1) \\ & + \frac{e h_0}{c + dK_1} \cdot \frac{\sin(\omega_e t + \epsilon_2)}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{\omega_e}{\omega_n}\right)^2\right\}^2 + \left(2\zeta \frac{\omega_e}{\omega_n}\right)^2}} \end{aligned} \quad (25)$$

ここに、 σ, ω は特性方程式の根（特性根）の実数部および虚数部を示すものである。この特性根と ζ, ω_n の関係は次式で示される。

$$\sigma = -\zeta\omega_n \quad (26)$$

$$\omega = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (27)$$

(24) 式より動揺の振幅を小さくするには、 ζ, ω_n をともに大きくする方向に K_1, K_2 および K_3 を採ればよい。このためには、(23), (25) 式を考慮して、 $K_1 > 0, K_2 > 0, K_3 < 0$ とすることが望ましい。一方乗りごこの観点からは、角加速度を小さくする必要があり、加速度が ω_e^2 に比例することを考えれば、共揺れ附近では ω_n を小にすることが必要でそのためには、 $K_1 < 0, K_2 > 0, K_3 > 0$ とすることが望ましいと思われる。

4 数 値 計 算 例

前章までで、フィンを駆動するためのだいたいの指針がもてめられたのであるが、ここで実験に用いる模型船を例にとつて、簡単な計算を行なってみる。（模型船の主要目は第5章の表3を参照のこと）

運動方程式の係数 M, N, B の計算は、Vossers の著書⁶⁾に詳述されている。これにしたがつて計算を実行した結果を表1に示す。

表 1 運動方程式の係数

λ/L	M_{zz} kgm ⁻² s ²	N_{zz} kgm ⁻¹ s	B_{zz} kgm ⁻¹	$N_{\phi z}$ kgs	$B_{\phi z}$ kg	F_{zz} kgm ⁻¹	$M_{\phi\phi}$ kgms	$N_{\phi\phi}$ kgms	$B_{\phi\phi}$ kgm	$N_{z\phi}$ kgs	$B_{z\phi}$ kgms ²	$F_{\phi\phi}$ kg
0.75	16.32	30.13	793.7	21.06	64.29	-43.4	4.99	16.29	279.8	-2.22	64.29	-78
1.00	15.81	40.80	"	20.95	"	65.2	5.00	18.64	"	-0.97	"	-175
1.25	15.58	47.31	"	20.68	"	198.4	5.14	19.81	"	-0.62	"	-215
1.50	15.79	52.24	"	20.34	"	313.9	5.30	20.44	"	-1.52	"	-226
1.75	16.32	55.90	"	21.76	"	384.0	5.49	21.29	"	-1.52	"	-220
2.00	16.71	56.00	"	20.80	"	439.0	5.63	20.74	"	-3.44	"	-214

図 5 ガードゲイン線図—縦揺れ—

図 6 ボードゲイン線図—上下揺れ—

これを用いて、(2)，(1)，(4)および(3)式のボードゲイン線図を描けば、図5，図6，図7および図8となる。ここに、 Z_4 ， Φ_4 は(1)，(2)式からもとめられる上下揺れおよび縦揺れの4次系の伝達関数であり、 Z_2 ， Φ_2 は(3)，(4)式からもとめられる2次系の伝達関数である。これらの図から連成項を無視した場合においても実験値とほぼ一致しており、連成項を無視したための影響の小さいことがわかる。 M ， N ， B などの各係

図 7 ボードゲイン線図（連成を無視したもの）—縦揺れ—

図 8 ボードゲイン線図（連成を無視したもの）—上下揺れ—

図 9 模型船のダンピング係数（縦揺れ）

図 10 模型船のダンピング係数（上下揺れ）

数は波長 λ によつて異なつた値をとるが、異なつた λ/L に関する各運動方程式の固有角周波数およびダンピング係数を求めると図 9 および図 10 のようになる。これによれば、連成を断たれた 2 次系の運動方程式は上下揺れに関しては、外力の項がかなり大きく変化していることが見られるが、縦揺れに関するかぎり、その変化は小さく、実用上 $\lambda/L \geq 1.00$ の範囲ではほぼ一定とみてさしつかえないものと思われるので、以下の考察は各係数の値の平均値をとり一定とみなす。

図 11 フィン形状

つぎに可動フィンとして使用する翼の形状は、特に考慮する必要もないと思われるので、設計、製作の便宜上長方形形状対称翼を採用する。翼の形状および大きさは図 11 に示す通りである。

さて翼理論によれば、揚力係数こう配は次式で与えられる。

$$\frac{\partial C_L}{\partial \delta_p} = \frac{m}{1 + \frac{m(1+\tau)}{\pi \lambda_a}} \quad (28)$$

ここに、 m は定数で、平板翼の理論値は 2π なる値をとるが、粘性の影響を考慮すれば、 $0.7 \times 2\pi$ 程度の値をとるものと思われる。 τ は λ （アスペクト比）の関数で

$$\tau = 0.019 \lambda + 0.067 \quad (29)$$

となる。 λ は翼の一方が船体に連なっているため、若干の修正を要し、次式で計算される必要がある。すなわち、

$$\lambda_a = \left(1 + \frac{1}{3}\right) \frac{b}{c} \quad (b: \text{翼幅}, c: \text{翼弦長})$$

以上から、翼を装備した場合の運動方程式の各係数をもとめると表 2 のようになる。

a	b	c	d	e
5.39	26.00	273.7	6.07	-218.8

さて、フィン駆動を自動制御した場合の縦揺れの軽減効果は K_1, K_2 および K_3 の値に大きく影響される。 K_1, K_2, K_3 の組合せ (K_1, K_2, K_3) を $\mathbf{K}$ で表わすことにすれば、特性方程式の根は $\mathbf{K}$ によつて変わる。 $\mathbf{K}$ が定まれば (σ, ω) は一意的にもとまり、

複素平面上に一つの点を決定する。このように $\mathbf{K}$ を連続的に変化させる場合 (σ, ω) は一つの曲線を描くが $\mathbf{K}$

の動かし方は無数にあり、そのすべてを描くことは不可能である。そこでごく簡単な場合について考察をすすめる。まず、 K_1, K_2 および K_3 のうちの一つが $(-\infty, +\infty)$ の範囲で連続的に動くとき、他の二つは 0 であるとする。このときの根の軌跡を図示すれば、図 12 のようになる。この図によれば、制限係数 $K_1 \neq 0$ の場合は、すなわち縦揺れ角 ψ による信号のみをフィードバックする場合は、 ω を変えても σ は変らずしたがって自由動揺の減衰の程度はあまり改善されない。また、制限係数 $K_3 \neq 0$ の場合は、 ω を増すと同時に、 $|\sigma|$ を増すため、ダンピング係数 ζ を大きくしがたい点がある。最後に、 $K_2 \neq 0$ の場合は、 ω を減少すると同時に、 $|\sigma|$ を増すため、 $K_2 > 0$ 、すなわち $\dot{\psi}$ による信号をネガティブフィードバックする方法がもつとも顕著にダンピングを増すことになる。これは図 13~図 15 を見れば一そうはつきりする。さらに制限係数の動きうる範囲を $(-\infty, +\infty)$ としたが、実際にはこれは実現できない。 K を増すことは、結果的にはフィンの回転角を増すにすぎず、

図 12 根 軌 跡

図 13 縦揺れの周波数応答 (K_1 変化) 図 14 縦揺れの周波数応答 (K_2 変化) 図 15 縦揺れの周波数応答 (K_3 変化)

得られる揚力が、かぎられたものである以上意味がない。すなわち図 12 は K に応じて揚力がいくらかでも大きくとれる理想の場合であつて、 K の動きうる範囲は限られたものとなる。 K の動きうる範囲を正確にもとめるには以上述べてきたような簡単な考察からは、困難であるように思われるが、可動フィンの最大角振幅を δ_0 、そのときの縦揺れ角振幅 ψ が ψ_0 よりも大きくなり得ないものとし、 $H(s)$ が、 $K_1, K_2 s, K_3 s^2$ で表わされると、もし ψ が単弦運動を行なうならば、(17) 式より

$$\left. \begin{aligned} |\delta(t)| &= |\phi_0 K_1 \sin \omega_e t| \leq |\delta_0 \sin \omega_e t| \\ |\delta(t)| &= |\omega_e \phi_0 K_2 \cos \omega_e t| \leq |\delta_0 \cos \omega_e t| \\ |\delta(t)| &= |-\omega_e^2 \phi_0 K_3 \sin \omega_e t| \leq |\delta_0 \sin \omega_e t| \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

これから, $|K_1| \leq \frac{\delta_0}{\phi_0}$, $|K_2| \leq \frac{\delta_0}{\omega_e \phi_0}$, $|K_3| \leq \frac{\delta_0}{\omega_e^2 \phi_0}$

が得られる。

図 16 縦揺れの周波数応答

図13～図15は, K_1, K_2, K_3 がそれぞれ独立に動くときの縦揺れの周波数応答曲線を示したものである。また, 図 16 は前章で導いた結論にしたがって, 適当な K をとつた場合の周波数応答曲線を示している。これによると, 可動フィンを装備した船では, 裸船に比して同調時で約 60% の減揺れがみられ, 固定フィンを装備した場合のほぼ 3 倍近くの軽減効果が期待できるように思われる。

5 模型実験

5.1 模型船と供試フィン

実験に使用する模型船としては, 中型客船を選び, その 1/25 模型を製作した。主要目および実験状態を表 3 に示す。

実験で横揺れは拘束されているが, 環動半径を調整するため横揺れ周期は 1.8 秒に合わせ, 縦揺れの自由動揺による固有周期は 0.9 秒に調節されている。

表 3 供試模型の主要目および実験状態

船長(垂線間) L_{pp}	2.400m	TGM	0.032m
船 幅 B	0.412m	水 線 面 積 A_w	0.798m ²
深 さ D	0.200m	方 形 係 数 C_B	0.581m
計画満載喫水	0.124m	噴 水 $\left\{ \begin{array}{l} d_f \\ d_a \\ d_m \end{array} \right.$	0.117m
排 水 量 Δ	74.8kg		0.139m
KG	0.164m		0.128m

表 4 供試フィンの要目

フィン面積	0.035 A_w
翼 幅	240mm
最大翼厚	15mm
縦 横 比	2.00*

備考 * 両舷含めた値

供試フィンは, 対称断面を持つ平面翼が用意された。その要目は表 4 に示す通りである。これらの数値は固定フィンによる実験結果⁶⁾を参照して決めたものであり, その効果を顕著に得たいという考えからいくぶん大きなものを選んでいる。

取付状況を図に示すように, フィンは船首部 (ORD. 9 $\frac{1}{4}$, Base Line から 34mm 上方) に設けられている。揚力モーメントを増すためには, 重心からの距離 l は十分大きくとればよいのであるが, 駆動装置を設ける必要上 F. P. よりもわずかに船尾方向に下げた。

動揺実験は大阪府立大学の船舶試験水そうを借用して規則波中を向い波で, 出会周期を変えて行なわれた。出会周期を変えるには, 波の波長のみを変化させて行ない, 波高, 船速は一定に保った。

計測方法としては, 上下揺れに対してポテンショメーターを利用したが, 縦揺れ角に対しては, パーチカルジャイロを利用している。また, これは計測のための信号を得ると同時に, 制御のためのフィードバック要素に必要な信号も得ることができるものである。

5.2 制御装置について

第 3 章に述べた制御系を模型船について実現したのが, 図 18 に示すブロック線図である。図に鎖線で囲んで示した制御装置は, その動作から三つの部分に分けて考える。

まず, 船体の運動を検出する検出部がある。この装置では, 縦揺れ角 ψ をパーチカルジャイロで, 角速度 $\dot{\psi}$ をレイトジャイロで求めている。なお今回は, 角加速度計を用いて $\ddot{\psi}$ の信号を取り出すことは省略した。

つぎに検出部から動作信号を受けて, 制限係数に応じて各信号が組合わされ, 次段の操作部を動作させるに必要な電力をもつた直流信号に変換する調節部がある。この装置ではジャイロ出力 (400 c/s 搬送波) を増幅し,

図 17 供試模型

図 18 ブロック線図

位相弁別を行なう前置増幅器とその出力信号を制限する係数器（ポテンシオメーター）および加算器を具え、直流電力増幅を行なうサーボ増幅器（最大入力電圧 $\pm 10\text{V}$ ）で構成されている。

最後の部分は動作信号に応じて、動作を行なう操作部である。これは、油圧サーボと一体になったアクチュエータ（ピストンストローク 25.1mm ピストン出力 10kg 、油圧 20kg/cm^2 ）のオープンセンター型電気油圧サーボ）とフィン进行操作する機構である。図 19 の写真は、その取付け状況を示している。ピストンストロークの変化にしたがいフィン角は最大 $\pm 32.5^\circ$ まで変化することができる。実験では、ストローク変化をポテンシオメーターで検出して翼角を記録している。

ここで油圧サーボの出力 10kg というのは、実船の相似から考えると、かなり大きな値であるが、機械摩擦などを考慮して余裕をとっている。なお、この他に差動変圧器を使つて揚力を検出して記録している。

図 19 フィンと油圧サーボ機

図 20 サーボアクチュエータの周波数特性

制御装置の総合特性は、前置増幅器の入力に正弦波信号を加え、一方フィンの角度の変動を記録し、ゲインおよび位相の関係をもとめた。その入力-出力の周波数特性をボード線図に表わすと図 20 のようになるが、実験における周波数範囲から考えると、その減衰および位相遅れは、ほとんど問題にならないものと思われる。

5.3 実験結果

第 4 章において述べられているように、この種可動フィンの効果的なネガティブフィードバック量は、縦揺れ角速度 $\dot{\phi}$ によるものである。そこで実験は、 $\dot{\phi}$ をフィードバックすることに重点を置いて行なわれた。角加速度計の信号 $\ddot{\phi}$ をフィードバックすることは、あまり効果的でないと思われ、また技術的にも困難な点があつたので、本実験ではこれを省略して、次の順序で行なわれた。

- (1) レイトジャイロの信号のみを用いた場合、
- (2) パーチカルジャイロの信号のみを用いた場合、
- (3) レイトジャイロおよびパーチカルジャイロの信号を併用した場合、

ここで制御方法として、制御回路のサーボ増幅器の（ゲイン）を“大”，“中”，“小”と変えた場合と、各信号の制限度を係数器によつて調節する場合の組み合わせにより、さらに多くの種々の実験状態が考えられ、次の表 5 のように分類される。

表 5 の中の K_1' , K_2' は第 4 章における制限係数に当るものであるが、第 4 章でもちいた K_1 , K_2 とは同じ大

表 5 実験の種類

フィンの状態	制御の方法	サーボ増幅器の利得	係 数		記 号	備 考
			K_1'	K_2'		
フィンなし	—	—	—	—	○	
固定フィン	—	—	—	—	●	
可動フィン	(1) $\delta = K_2' \dot{\psi}$	小	—	1.0	○	
		小	—	0.5	■	
		中	—	1.0	●	
		大	—	1.0	※	
	(2) $\delta = K_1' \psi$	中	1.0		※	
	(3) $\delta = K_1' \psi + K_2' \dot{\psi}$	小	1.0	0.9	□	
		中	1.0	0.9	△	
		中	0.5	0.9	▽	
		中	1.0	0.45	□	
		中	0.75	0.675	×	
		中	0.5	0.675	△	
		中	0.25	0.675	□	
		中	0	0.675	▽	
		中	-0.5	0.675	○	

制御としては(1)の
 $\delta = K_2' \dot{\psi}$ と同様である

きさを示すものではない。 $K_1' K_2'$ は、信号 $\psi, \dot{\psi}$ の係数器による制限度を示し、正の値はネガティブフィードバックを、負の値はポジティブフィードバックを意味している。

図 21 実験 (1) の記録例

図 22 実験の記録例

図 21, 22 は、実験記録の一例を示すものである。前者は、計測開始時にフィンを駆動しないいわゆる固定フィンの状態を保ち、途中から駆動を始めたもので、駆動開始時の上下揺れおよび縦揺れの軽減への経過をはつきりと示している。後者は、サーボアンプの利得の大小による軽減効果の変化の具合を示している。すなわち、サーボアンプの利得が小さいと翼の動きが小さくなり、あまり大きすぎると、図の右端に見るとおり翼の動きが飽和して、台形波状のものとなるため理論的には、別のとりあつかいを必要とする。このように、フィンを駆動するための出力には、上限があるため、 K_1', K_2' の最適の組合わせを発見することは、それほど容易ではないように思われる。今回行なわれた実験からは、単に定性的な傾向が得られたのみで定量的な面は今後の問題として残されている。図 23~25 は、縦揺れおよび上下揺れの周波数応答を示す。ただし、ここでは計算値との対比上、縦揺れ角を波高で除しているため、縦軸の値は無次元化されたものではなく、rad/m のデイメンジョンをもつ。

図 23, 24 からわかるように、フィンを装備す

図 23 縦揺れ応答曲線

ることによつて生ずる縦揺れ軽減は、同調率 1 付近では固定フィンの場合で裸船に比較して約 50%，可動フィンの場合には、もつともよい時で、90%，にいたる減揺効果を見せしている。ただし、この場合のフィンの動きは台形波状のものである。すなわち、可動フィンは固定フィンに比してその駆動方法のいかんによつては、5 倍以上の軽減効果を得ることが可能であるように思われる。

また、上下揺れ減揺に関しては、固定フィンの場合で約 20%で、縦揺れの場合ほど顕著な効果をみせていないようである。可動フィンの場合には、共揺周波数が移動しているため、この実験からは、はつきりした傾向を述べることは困難であるが、それでもかなりの効果が認められる。

図 25 は、縦揺れ角の制限係数 K_1' を変化させて、その影響を見ようとしたものであるが、その軽減効果については、はつきりした傾向は見られない。これは実験点が少なすぎたことが原因ではないかと思われる。この場合、上下揺れには、かなりの減揺がみられているので、上下揺れに関しては、 K_1 の影響が大きいものと思われる。

図 24 上下揺れ応答曲線

図 25

6 結 言

船体の縦揺れを軽減する一つの手段として、自動制御による可動フィンの性能を、理論的実験的に考察してきたが、その減揺効果は実験値にみるとおり、きわめてすぐれたもので、理論値による予想をかなり上まわつたものになっている。計算値との間に違いを生じた理由は、フィンを装備することによつて、船自体の付加質量が変化したこと、波の Orbital motion を無視したことおよびフィン駆動が実験の場合と理論解析とで異なる場合が含まれていることなどがあげられるように思われる。

今回の実験で得られた結果を要約すると、

(1) 供試フィンはかなり大きなものが使用されたため、固定フィンの実験では、裸船に比べ縦揺れ45%、上下揺れ 20% の減揺がみられた。

(2) フィードバック要素に、 $\dot{\psi}$ のみを用いた場合は、フィンなしに比べ、縦揺れ 60~80%、上下揺れ、20~30%の減揺がみられ、 $\dot{\psi}$ をネガティブフィードバックすることが、縦揺れ軽減に有効であることが確認された。

(3) フィードバック要素に、 ψ のみを用いた場合は、上下揺れに 50% の減揺がみとめられ、これが上下揺れ軽減に有効であることがわかる。

(4) ψ と $\dot{\psi}$ を同時に用いた場合は、縦揺れ 60~80%、上下揺れ 70% 程度の軽減がみられたが K_1' 、 K_2' の組合わせの効果的な値は定量的には明瞭に得られていない。

以上のように、模型船では良好な結果が得られているが、実船に応用する場合は大きなフィンを使用するのは望ましいとは思えない。また、実験に使用した油圧サーボの周波数特性が、すぐれていたが、これに対応するフィン駆動装置を用いるには、馬力が非常に大きなものになるおそれがあるので、実験結果ほどの効果は期待できないとしても十分実用に供し得る可能性を有しているものと思われる。

最後に、実験の実施にあたっては、試験水そうの貸与等、いろいろのご便宜を戴いた大阪府立大学菱田教授ならびに水そう関係者の方々に厚くお礼申し上げる次第である。

なお、本研究に対しては、運輸省の補助金が交付されていることを付記しておく。

参 考 文 献

- (1) 根角幸明外：Anti-pitching Tank の理論的ならびに実験的研究，関西造船協会誌 114 号
- (2) 田坂鋭一外：Anti-pitching Tank の効果に関する実験的研究，造船協会論文集 117 号
- (3) A. Abkowitz：The Effect of Antipitching Fins on ship Motions, SNAME (1959)
- (4) E. Flipse：Stabilizer Performance on the SS Mariposa and SS Monterey, SNAME (1957)
- (5) Vossers：Fundamentals of the Behaviour of Ships in Weves, I.S.P
- (6) 高木又男外：船体縦揺れ軽減法（第2報完）-Anti-pitching fin の性能，日立造船社内報告