

自動操縦による操縦性能の向上について

正員 元 良 誠 三*

正員 小 山 健 夫*

On an Improvement of the Maneuverability of
Ships by means of Automatic Steering.

By Seizo Matora, *Member**

Takeo Koyama, *Member**

Summary

It has been well known that there is an incompatibility between the course keeping quality and the turning ability of ships, i. e., it will be impossible to improve the course keeping quality of a ship without spoiling her turning ability unless the rudder area is increased drastically.

In this paper, the authors show a method of overcoming this incompatibility by means of automatic control of helm angle. It is shown that an automatic control of helm angle proportional to the angular velocity as well as the angular acceleration of a ship will result in an effective change in the ship's stability derivatives, and that it is possible then to make a ship more stable on course.

Therefore, it will be possible to design a ship originally to have good turning ability with poor course keeping quality consequently, then apply the automatic control so that the ship becomes effectively to have good course keeping quality with rather poor turning ability.

In this way, one can switch the ship's maneuverability in dual way according to the circumstance, i. e., when a better course keeping quality is required, the automatic control will be applied superposed with the manual control to make the ship more stable on course, and when a better turning ability is required, the automatic control will be cut off so that the ship can turn more efficiently.

1 緒 言

船の操縦性能は、旋回性能と方向安定性能とに分けて考えられる。

ところが、これらの二つの性能は通常相反し舵面積を一定とすれば、両方を同時に向上することは不可能である。すなわち、これらの相関関係は、Fig. 1 に示される通り、舵面積を一定とする限りほぼ一直線上に示され、船型を変えることにより方向安定性を良くすれば、旋回性は悪くなるし、旋回性をよくすれば、方向安定性が悪くなる。

ところで、後に示すとおり、船に自動操縦をかけると、その操縦係数がある程度かえることができる。そこで、次のような方法をとれば、旋回性、方向安定性共に良好な性能をもちうるのではなからうか。すなわち、Fig. 1 において旋回

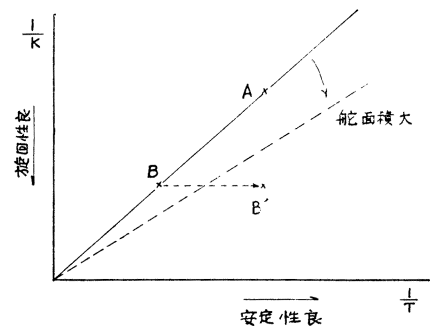


Fig. 1 旋回性と方向安定性の関係

原稿受付 昭和 39 年 6 月 20 日

* 東京大学工学部

性能はよいが方向安定性は悪い船Bに自動操縦を行ない、Aと同様な方向安定性をもたせ、その自動操縦はいつでもきれるようにしておく。すると、必要に応じて、A、B いずれの状態をもとりうるわけで、見掛け上 B' のような性能となり、旋回性、方向安定性共に満足できる船ができることになる。

もちろん、舵面積を大きくすれば、このような性能にすることはできるが、それには限度があり、性能を大幅に向上することはできない。

自動操縦による方法にも限度があることは当然であり、これにより大幅な性能の向上ができるかどうかは疑問であるが、数種の条件のもとで自動操縦が要求する舵角を調べてみて、自動操縦による操縦性能の向上法についての提案を行ないたい。

2. 自動操縦による操縦性能の向上法

線型化した船の運動方程式は次のように書かれる。

$$\left. \begin{aligned} -(m'+m_y')\dot{\beta}' &= Y_{\beta}'\beta' + \{-(m'+m_x') + Y_r'\}r' + Y_{\delta}'\delta' \\ (I_z'+J_z')\dot{r}' &= N_{\beta}'\beta' + N_r'r' + N_{\delta}'\delta' \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ただし

β' : drift angle

r' : 旋回角速度

$(m'+m_y')$: y 方向の見掛質量

$(I_z'+J_z')$: z 軸まわりの見掛慣性モーメント

Y : 横方向の力

N : z 軸まわりのモーメント

' は無次元化したことを示す。

いま、理想的な方向安定性をもつ船を仮想し、これをAとし、方向安定性は劣るが旋回性のよい船B、C、D、Eに自動操縦を行なうことによつて、Aと同じ方向安定性をもたせる方法について考えよう。

現実の問題としては、船の操縦系は舵だけであるから、線型な制御要素としては、角加速度 \dot{r}' 、角速度 r' 、操舵手の命令舵角 δ'^* 、に比例したしものが考えられる。すなわち次のような舵角の制御が考えられる。

$$\delta' = -\sigma_1 r' - \sigma_2 \dot{r}' + \sigma_3 \delta'^* \quad (2)$$

一方、(1)式をみると、船によつて変り得る係数は、両辺を $(m'+m_y')$ または $(I_z'+J_z')$ で割り、 Y_{δ}' 、 N_{δ}' を同一と考えても6個であり、(2)式に示される制御では、B以下の船の式と、Aの式を同一にすることはできない。

しかし、実際問題としては、方位角変化に対する性質が合っていれば、drift angle は多少違つていてもかまわないと考えられる。そこで(2)式から β' を消去して、次の r' のみに関する方程式について考えてみる。

$$\ddot{r}' + 2a_{1s}\dot{r}' + a_{2s}r' = c_{1s}\dot{\delta}' + (a_{4s}c_{1s} + a_{3s}c_{2s})\delta' \quad (3)$$

ただし

$$\begin{aligned} 2a_1 &= \frac{Y_{\beta}'}{m'+m_y'} - \frac{N_r'}{I_z'+J_z'} \\ a_2 &= \frac{-Y_{\beta}'N_r' - \{(m'+m_x') - Y_r'\}N_{\beta}'}{(m'+m_y')(I_z'+J_z')} \\ a_3 &= \frac{N_{\beta}'}{I_z'+J_z'} & a_4 &= \frac{Y_{\beta}'}{m'+m_y'} \\ c_1 &= \frac{N_{\delta}'}{I_z'+J_z'} & c_2 &= \frac{Y_{\delta}'}{m'+m_y'} \end{aligned}$$

suffix s は船により A, B, C, D, E とする。

(3)式においては、船により変りうる係数は4個に減つているが、(2)式の制御ではやはり δ' 、または $\dot{\delta}'$ に比例する係数をAと同一にできない。しかし、 $\dot{\delta}'$ に比例する項は一致できなくても、後に示すようにそれによる誤差はわずかである。

さて、(2)式を(3)式に代入すると、

$$(1+c_{1s}\sigma_2')\ddot{r}' + \{2a_{1s}+c_{1s}\sigma_1' + (a_{4s}c_{1s} + a_{3s}c_{2s})\sigma_2'\}\dot{r}' + \{a_{2s} + (a_{4s}c_{1s} + a_{3s}c_{2s})\sigma_1'\}r'$$

$$= \sigma_3' c_{1s} \delta'^* + \sigma_3 (a_{4s} c_{1s} + a_{3s} c_{2s}) \delta'^* \tag{4}$$

ただし

δ'^* : 操舵手がとつた命令舵角

したがつて

$$\left. \begin{aligned} 2a_{1s} + \sigma_1' c_{1s} + \sigma_2' (a_{4s} c_{1s} + a_{3s} c_{2s}) &= 2a_{1A} (1 + c_{1s} \sigma_2') \\ a_{2s} + \sigma_1' (a_{4s} c_{1s} + a_{3s} c_{2s}) &= a_{2A} (1 + c_{1s} \sigma_2') \\ \sigma_3' (a_{4s} c_{1s} + a_{3s} c_{2s}) &= (a_{4A} c_{1A} + a_{3A} c_{2A}) (1 + c_{1s} \sigma_2') \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

によつてきめられる σ_1' , σ_2' , σ_3' をとれば, B 以下の船の応答は, A の応答とほぼ等しくなる。

なお, (2) 式の中の σ_3' は, B 以下の船を操縦する操舵手が, 舵輪をまわすにあつて, A に乗船していると同じ感覚を起こさせるためだけのもの, いわば気分の問題であるので, 本質的な意味はないと考えてよい。

3. 数 値 例

3-1 比例係数 σ_1' , σ_2' , σ_3'

理想的な方向安定性をもつた船 A として, Series 60, $C_b=0.60$ の船を用いた。もちろん, この船が理想的な方向安定性をもっているというわけではなく, 現在のところ, どのような性能が理想であるというはつきりとした規準はなく, またこの論文の目的からすると, ある船に自動操舵をかけることにより, 他の船の性能とほとんど同一にすることができることを示せばよいので, 便宜的にこれをえらんだわけである。

B, C, D, E としては, (1) 式の derivatives の中, 他は A と同じで, N_{β}' のみを順に大きく変えたものを仮想した。したがつて, B, C, D, E の順に旋回性はよくなるが, 方向安定性は悪くなる。また, N_{β}' のみを大きくするという事は, 近似的には A の側面積中心を, Dead Wead をきるとかして, 前方にずらせたことに相当すると考えてよからう。

Table 1 各船の諸係数

	A	B	C	D	E
N_{β}'	0.1146	0.1568	0.1990	0.2412	0.2623
$2a_1$	3.670	"	"	"	"
a_2	1.029	0.5146	0.	-0.5146	-0.7683
a_3	4.503	6.161	7.819	9.477	10.306
a_4	0.8645	"	"	"	"
c_1	0.7858	"	"	"	"
c_2	0.1207	"	"	"	"

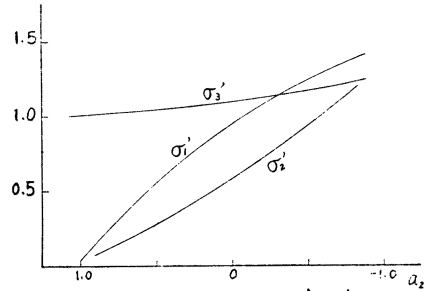


Fig. 2 A と同等な性能をもたせるに要する σ_1' , σ_2' , σ_3'

A, B, C, D, E の N_{β}' および (3) 式における a_2 の値は Table 1 に示すとおりである。通常の船では a_1 は正であるから $a_2 > 0$ が船の安定条件となる。従つて, C は中立, D, E は不安定船である。なお Table 1 の Series 60 の derivatives の値は船研の江田氏の文献 1) を参照した。

B 以下の船について, A と同じ方向安定性をもたせるに必要な条件, σ_1' , σ_2' , σ_3' を (5) 式から求め, 安定指数 a_2 を横軸にそれらの値を plot してみると Fig. 2 のようになる。注目すべきことは, 船が不安定になつても, 制御量が急激に増加するという事はないということである。

3-2 Inditial 応答

Step 操舵に対する応答をしらべてみる。この応答が等しければ, 全ての同一の外力に対する応答は, Inditial 応答の重ね合せで表せるので, 等しいとすることができる。

Fig. 3 に自動操舵をかけないときの応答, Fig. 4 に制御を行なつたときの応答, Fig. 5 にそのときの舵の動きを示す。

Fig. 3 をみると, 船が方向不安定になるにしたがつて角速度は急増しているが, 自動操舵を行なえば Fig. 4

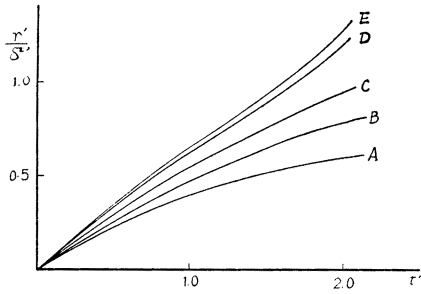


Fig. 3 自動操縦を行なわな
いときの Inditial 応答

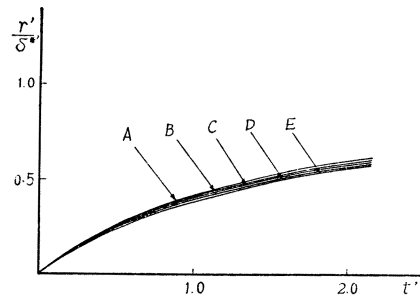


Fig. 4 自動操縦を行な
ったときの Inditial 応答

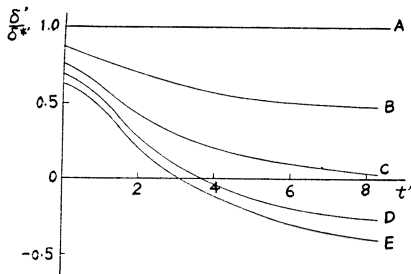


Fig. 5 自動操縦が要求する舵角

のように、B以下の船の応答を、ほとんどAの応答に一致させることができる。もちろん、制御をとけば直ちに、Fig. 3の応答にもどる。従つて、B以下の船はFig. 4いずれの状態も必要に応じて任意にとることができる。この二様の応答をうまく使いわけることにより、旋回性能、方向安定性能を共に満足できる状態で操船できるのではないかというのが、この論文で提案する操縦性能改善法である。

一方 Fig. 5 をみると、制御を行なつたときの舵の動きは、不安定船が増すにしたがつて当然制御舵角は増大し、不安定船では、ある時間の後、実際にとつている舵角は、操舵手にとつている舵角と逆になってしまう。この制御舵角のとり得る限界がすなわち操縦性能改善の度合の限界となるので、どの程度の舵角まで許せるかという

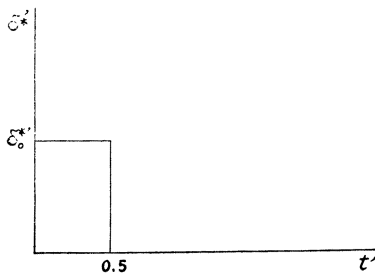


Fig. 6 矩形 Impulse 操縦

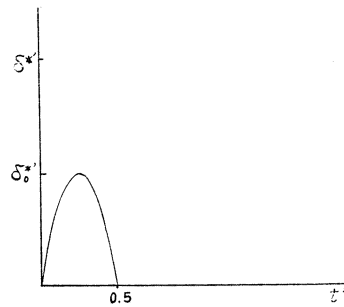


Fig. 7 Sine Impulse 操縦

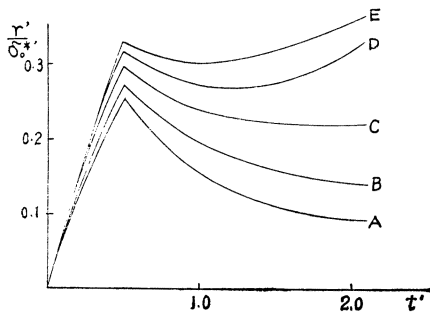


Fig. 8 自動操縦を行なわな
いときの応答

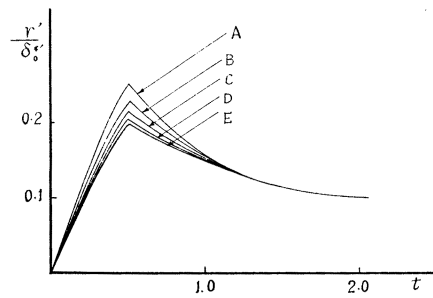


Fig. 9 自動操縦を行な
ったときの応答

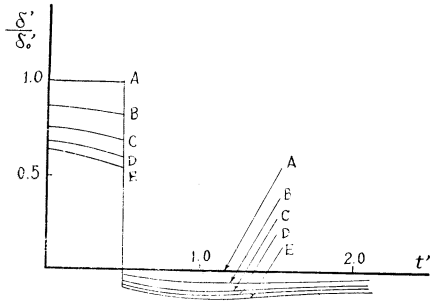


Fig. 10 自動操舵を行なったときの舵の動き

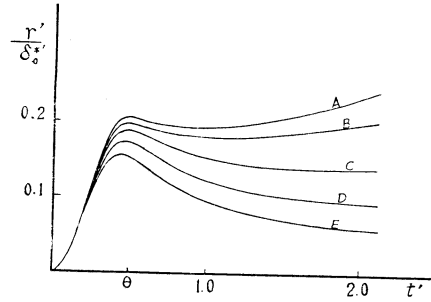


Fig. 11 自動操舵を行なわないうきの応答

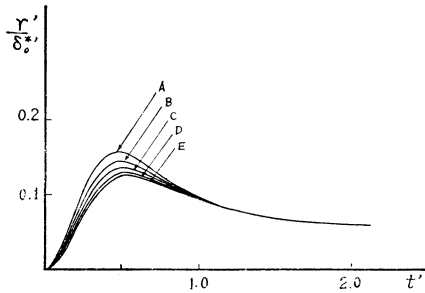


Fig. 12 自動操舵を行なったときの応答

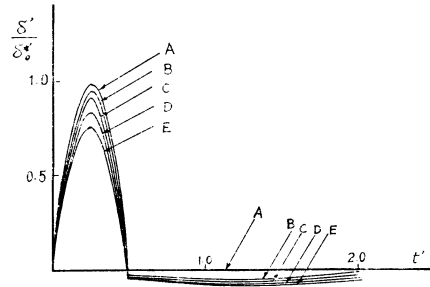


Fig. 13 答自動操舵による舵の動き

問題は非常に重要であるが、この問題はあまりにも大きすぎて簡単には結論できない。

3-3 Pulsive な操舵に対する応答

つぎに、Fig. 6, Fig. 7 に示されるように、パルスの舵を指令したときの応答をしらべてみる。

自動操舵を行なわないうきの応答をそれぞれ Fig. 8, Fig. 11 に、行なつたときの応答を Fig. 9, Fig. 12 示す。また自動操舵を行なつたときの舵の動きをそれぞれ Fig. 10, Fig. 13 に示す。

これらの図をみると、このようにパルスの舵の動きに対しても、自動操舵を行なえば、B 以下の船の応答は、A の応答とほとんど等しくなっている。

4 不規則波中航行時の舵の動き

前章まで、自動操舵による操縦性能の向上法について述べ、そのような操舵を行なえば船の応答がどのように変わるかを調べてみた結果、角速度および角加速度に比例した操舵を行なうことにより、ある船の応答をある程度自由にかえることができることが分つた。しかし、このような方法による操縦性能の向上には限度があることはもちろんである。その限界は、前にも述べたとおり、航行中どの程度の舵角が要求されるかによることは明らかである。

ここで、その限界について論ずることはできないが、そのための資料を提供するという意味で、不規則波中を航行するとき、自動操舵が要求する平均舵角を求めてみる。

波の energy spectrum を $[r(\omega)]^2$ 、舵の response amplitude operator を $[A\delta(\omega)]^2$ とすると、舵角の energy spectrum は次の式で与えられる。

$$[\delta(\omega)]^2 = [r(\omega)]^2 [A\delta(\omega)]^2 \tag{6}$$

またそのとき、平均舵角は

$$\bar{\delta} = 1.77 \sqrt{R} \tag{7}$$

ただし

$$R = \int_0^\infty [\delta(\omega)]^2 d\omega \tag{8}$$

として求める²⁾。

Ryllill⁴⁾によると、波の進行方向と、波の主方向とがなす角 χ が、 30° (追波)、 120° (向波) のとき、角速度の応答にピークが出るので、この二つの角度について求めてみる。また波の energy spectrum としては、20K、30K、40K の風速における Neumann spectrum を用いた。

4-1 波の強制外力

波の強制外力としては、三菱重工の田村氏が、波の中に固定した船にかかる横力を Lewis Form について求めておられる³⁾ので、その資料を使わせて頂いた。

田村氏の論文中の係数、 K_r 、 K_i を用いると、波傾斜 $\alpha = \cos \omega t$ の波が船に対して χ の方向からくるとき、船の重心から x の所の断面が受ける単位長さ当りの力は、

$$Y(x) = [K_r(x) + iK_i(x)]e^{i(\omega t - kx \cos \chi)} \tag{9}$$

ただし

k : 波数

の実数部で与えられる。

したがって、船全体が受ける力は、これを全長にわたって積分すれば求まるが、船の形を前後対称と考えれば、横力の式の $\sin k'x$ の項、モーメントの式の $x \cos k'x$ の項は省略できる。

$$\left. \begin{aligned} y &= \int_L Y(x) dx = \int_L K_r(x) \cos k'x dx \cdot \cos \omega t \\ &\quad - \int_L K_i(x) \sin k'x dx \cdot \sin \omega t \\ n &= \int_L x Y(x) dx = \int_L K_i(x) x \sin k'x \cdot dx \cos \omega t \\ &\quad + \int_L K_r(x) x \cos k'x \cdot dx \sin \omega t \end{aligned} \right\} \tag{10}$$

ただし

$$k' = k \cos \chi$$

このようにして、Aの長さを 100 M として求めたときの横力およびモーメントを Fig. 14, Fig. 15 に示す。B以下の船はAの側面積中心を前方にずらせたものと考えているので、Aとほぼ同一の外力を受けると考えた。横軸の ν は波数、Bは船の幅である。

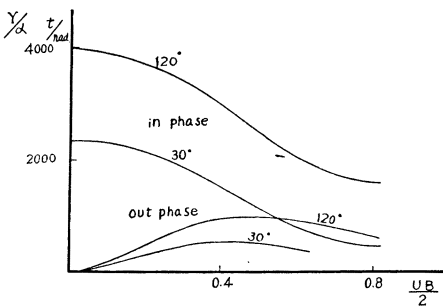


Fig. 14 L=100M の実船に働く力

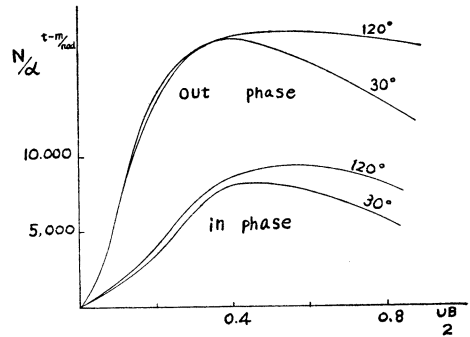


Fig. 15 L=100M の実船に働くモーメント

4-2 Response Amplitude Operator

後の計算の便宜上、ここでは海上の一定に原点をおき、 x 軸を船の prescribed direction においた固定座標系で求める²⁾。

波の方向が χ 、角周波数 ω' の波の中での角速度の応答は次のようになる。

$$r' = E_r' \cdot \mu_r' \cos\{(1-\alpha)\omega' t' + \phi' - \psi'\} \tag{11}$$

ただし

$$E_r' = \frac{1}{a_2(m' + m_y')(I_z' + J_z')}$$

$$\times \sqrt{\{m'+m_y'\}a_4D'+\omega'C'\}-a_3(I_z'+J_z')A'\}^2+\{(m'+m_y')(a_4C'-\omega'D')-a_3(I_z'+J_z')B'\}^2$$

$$\mu_r' = \frac{a_2}{\sqrt{\{a_2-(1-\alpha)^2\omega'^2\}^2+4a_1^2(1-\alpha)^2\omega'^2}}$$

$$A' = \int_L K_r(x) \cos k'x dx$$

$$B' = \int_L K_t(x) \cos k'x dx$$

$$C' = \int_L K_r(x) \cdot x \sin k'x dx$$

$$D' = \int_L K_t(x) \cdot x \sin k'x dx$$

$$\alpha = \omega U \cos \chi / g, \quad \omega_e = (1-\alpha)\omega$$

U : 前進速度

したがって、舵の Response Amplitude Operator は、(2) 式より

$$A\delta'(\omega') = A_r'(\omega') \sqrt{\sigma_1'^2 + (1-\alpha)^2\omega'^2\sigma_2'^2} \tag{12}$$

ただし

$$A_r'(\omega') = E_r' \cdot \mu_r' \quad \delta'^* = 0$$

普通、波の energy spectrum は、半波高 r_m についてえられているので、舵についてもそれになおすと次のようになる。

$$\frac{A\delta(\omega)}{r_m} = \frac{\omega^2}{g} \cdot \frac{A\delta(\omega)}{\alpha_m} \tag{13}$$

以後、有次元値は“.”をつけずに示すと、舵の動きの energy spectrum は $A\delta'(\omega') = A\delta(\omega)$ に注意して次のようにもとまる。

$$[\delta(\omega)]^2 = [r(\omega)]^2 [A\delta(\omega)]^2$$

$$= [r(\omega)]^2 [\omega^4/g^2 \cdot A_r'(\omega')^2 \{\sigma_1'^2 + \sigma_2'^2(1-\alpha)^2\omega'^2\}] \tag{14}$$

各船の $[A\delta(\omega)]^2$ を Fig. 16, Fig. 17 に示す。

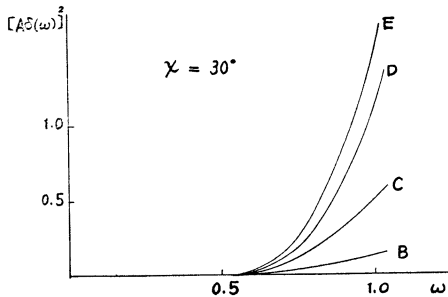


Fig. 16 Response Amplitude Operator

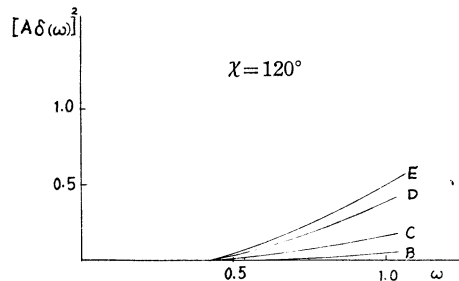


Fig. 17 Response Amplitude Operator

(14) 式をみて気づくことは、角加速度制御の項に ω'^2 が入っていることである。これは、 $\omega'=1$ 以上、すなわち $\omega=U/L\omega'$ が、 $U=10$ m/s、 $L=100$ m としたとき 0.1 rad/s より早い周期の波に対して、角加速度制御が要求する舵角は、非常ないきおいで増加することを示している。一方、不規則波中には、1 rad/s 以上もの高周波の成分が相当入っているので、角加速度制御を行うことは、 σ_2' の値をよほど小さくとらないかぎり不可能と考えられる。

以上の考察から、角加速度制御も加えた、自動操舵による操縦性能の向上法は、不規則波中では不可能、あるいは可能としても向上の度合は極く小幅なものになるのであろうと考えられる。しかし、角加速度制御は何のために必要であつたかを考えてみると、ある理想的な船Aを考え、B以下の応答をAに等しくしようとしたことから起こつたわけであるから、これが理想的な船だという決定版のない今日、角加速度制御は除いてしまつてもか

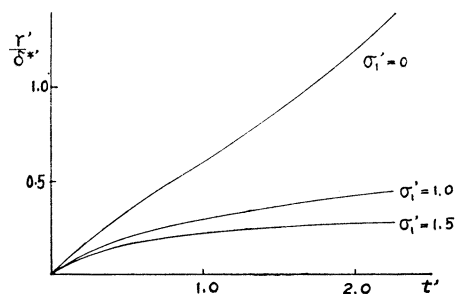


Fig. 18 Dに角速度制御のみを行なったとき

度制御のみを行なったときの平均舵角を Table 3 に示す。

Table 2 船の平均舵角 (radian)

風速	α	A	B	C	D	E
20K	30°	0.	0.296	0.604	0.954	1.188
	120°	0.	0.202	0.416	0.637	0.729
30K	30°	0.	0.493	1.120	1.743	2.002
	120°	0.	0.388	0.890	1.359	1.572
40K	30°	0.	0.692	1.490	2.232	2.625
	120°	0.	0.554	1.251	1.881	2.340

Table 3 Dに角速度制御のみをかけたときの平均舵角

風速	α	σ_1'	
		1.0	1.5
20K	30°	0.126	0.202
	120°	0.039	0.053
30K	30°	0.252	0.359
	120°	0.081	0.145
40K	30°	0.311	0.443
	120°	0.175	0.254

前節で述べたように、角加速度制御の影響は甚大であつて、最も制御量の少いBでも、実用化はほとんど望めないであろう。

一方、Table 3 では、角速度制御が入らないため、平均舵角は、Dが不安定船であり、大きな σ_1' の値をとつたにもかかわらず、角加速度制御を加えたときのBの平均舵角をさげ下まわつている。

以上から、角加速度制御を行なうことは、まず不可能で、自動操縦による安定化は角速度制御のみによるべきであろう。

ところで、Rydill の説によると⁴⁾、船が一応安定であれば、安定不安定の差が大きくなるのは、その周波数応答を求めてみると、低周波の部分においてのみであり、高周波部分 ($\omega' > 1$) ではその差は船の安定度にかかわらず僅少になる。

いいかえれば、高周波の範囲では、自動操縦を行なつても、行なわなくても船の応答はさほど変わらないということとなり、結局、この部分では自動操縦を行う必要はないという事になる。

一方、不規則波中での自動操縦の平均舵角が大きくなるのは、まさにこの $\omega' > 1$ の範囲で角加速度制御による項が急増するためであるから、適当な low pass filter を通せば、自動操縦の性能をそこなわないで、平均舵角を減少させ得る可能性があり、また必要とあらば、角加速度制御も加えることができよう。ここで注意しておくべきことは low pass filter を通すとき、高周波成分に対しては、自動操縦はきかなくなるるので、始めから方向不安定な船を自動操縦によつて安定にすることはできないということである。

船の操縦系は、いわば一次遅れ系のつみ重ねであるから、操縦系の各部品の応答をうまく調整すれば、非常に良好な low pass filter を形成できる可能性がある。

5 実 験

以上の理論を実地に確かめるために、Initial 応答を中心に簡単な実験を行なつた。実験は東京大学動揺水槽で行ない、模型は原模型Aとして、Series 60 の 2M モデルを使用し、 N_B をかえたものとして、原模型Aの Dead Wood を切り、これをBとしたA, B, 二つの模型を用いた。なお、Bの Derivatives は不明である。

まわらないと考えられる。

一例として、Dに角速度制御のみを加えたときの Initial 応答をしらべてみると、Fig. 18 のようになる。このように、船を安定にすることだけならば、 a_2 を大きくすればよいので、角速度制御のみで足りるわけである。

4-3 平均舵角

前節の結果を(6),(7),(8)式に代入して、平均舵角を求めてみた。

風速 20K, 30K, 40K, $\alpha = 30^\circ, 120^\circ$ の条件で、B, C, D, E に要求される平均舵角を Table 2, D に角速

5-1 実験の方法

実験 1 **Initial 応答 (A)** Aの模型を自航直進させておき、急に 10° の舵角をとつたときの応答を求め、実験は種々の σ_1, σ_2 の組合せで行ない、計算結果と比較する。

実験 2 **Initial 応答 (B)** Bの模型についてAと同じような実験を行うが、Bの Derivatives が不明なので、計算結果と比較することはできない。そこで、ある適当な σ_1, σ_2 の組合せで操舵を行なえば、Bの応答をAに等しくすることができるかどうかを考えてみる。

実験 3 **Over Shoot Test** Over Shoot Test とは、Fig.19のように、 $t=0$ で急に舵角を δ_0 にとる。船が定常旋回に入つたら、今度は逆に $-\delta_0$ の舵角をとる。その間の船の方位角変化は ψ のようになり、図に示す量を Over Shoot Angle と定義する。

一般に、この角度が小さいほど船は安定であると言える。Aの模型でこの Test を行ない、自動操舵によるこの角度の変化をしらべる。

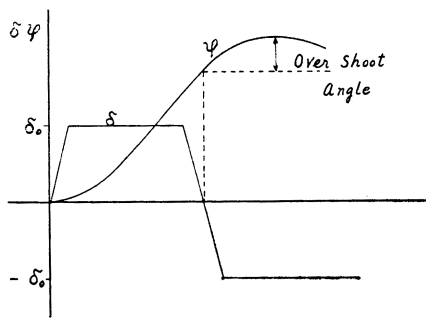
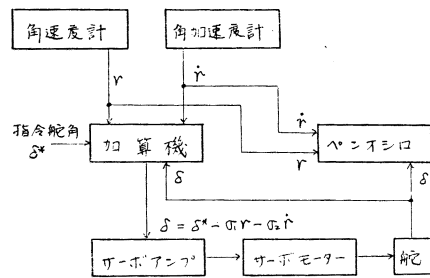


Fig.19 Over Shoot Test

Table 4 Block Diagram



5-2 実験装置

この実験に要する装置は複雑多岐にわたり、その上、角速度、角加速度の検出器に良好な性能のものが得られなかつたので、精度の良い実験は望めなかつた。今後、検出器をはじめ、装置全体に手を加える必要がある。

実験装置の Block Diagram は Table 4に示す通りである。

角速度計、角加速度計によつて得た r, \dot{r} は加算機に入り、指令舵角 δ^* と共に $\delta = \delta^* - \sigma_1 r - \sigma_2 \dot{r}$ の演算をされて、操舵サーボ機構の入力信号となる。サーボ機構は現在とつている舵角をポテンシオメータでよみとり、入力信号と比較して、その差が0になるように追値する。一方、 r, \dot{r}, δ はペンオシロに記録される。

模型の動力用電源、検出器の電源および信号等はすべて電車を通して、電線を通じて行なつたので、その電線が模型に及ぼす影響はある程度さけることができなかつた。模型の Dead Wood をきる前と、きつたあとの比較を写真 1、写真 2 に、測定装置の全景を写真 3 に、航走中の模型を写真 5 に示す。

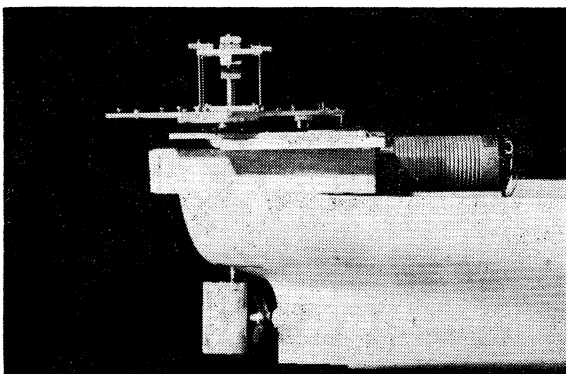


写真 1 原模型 A の船尾形状

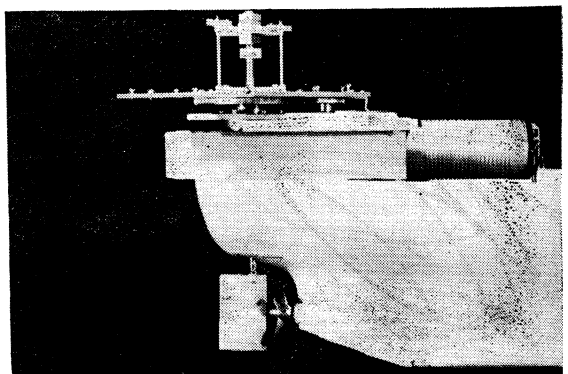


写真 2 模型 B の船尾形状

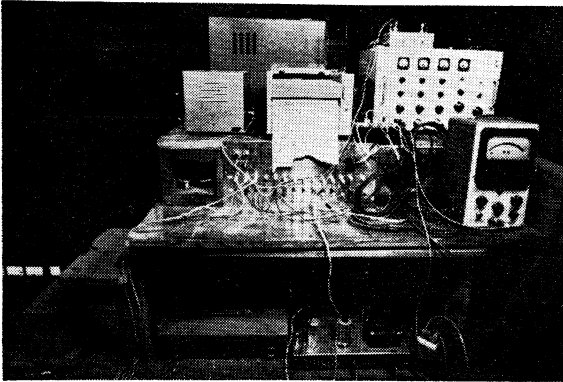


写真 3 測定装置全景

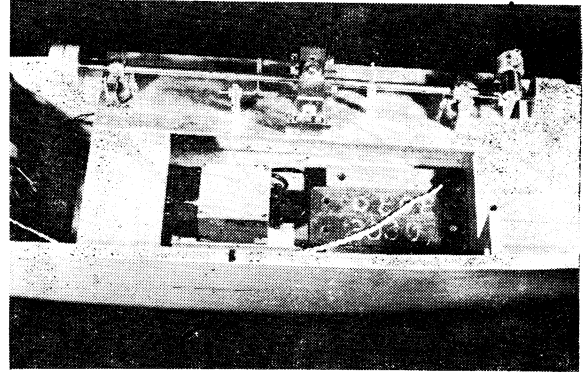


写真 4 レートジャイロおよび角速度計

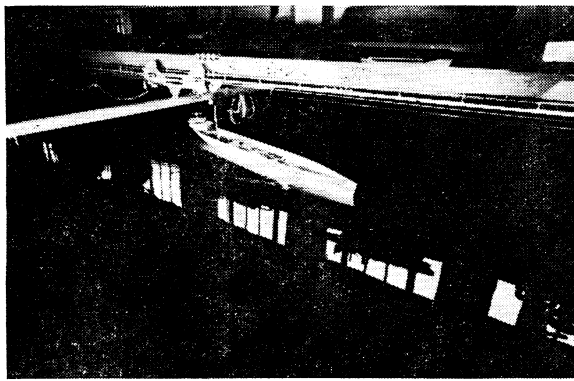


写真 5 航走中の模型

5-3 実験結果

実験1の結果を Fig.20~Fig.23 に示す。計算値は舵角 $\delta' = \delta_0 e^{-St'}$ に対する応答である。全般に割合よい一致を見せたが、時間と共に角度が増え、どうしても電線にひかれて、 $t'=2$ では計算値に比べてかなり低い値になった。

実験2の結果を Fig.24~Fig.26 に示す。Fig.24 には比較のために、同じ条件のときのAの応答も入れてある。Dead Wood を切った影響はあまり出ていないが、適当な σ_1' 、 σ_2' の値をとれば、他の船の応答に等しくすることができるであろう。

実験3の結果を Fig.27~Fig.29 に示す。ここで ψ は方位角変化、 δ_0 は命令舵角、 δ はその時実際にとつている舵角である。

σ_1' 、 σ_2' の量が増えるにしたがい、Over Shoot Angle は、たしかに減少している。

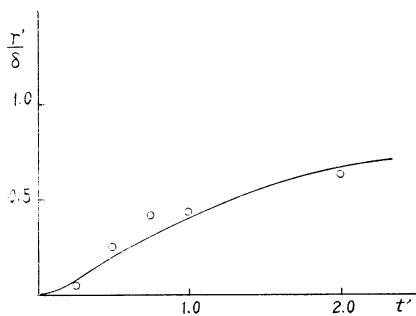


Fig. 20 $\sigma_1' = 0, \sigma_2' = 0$

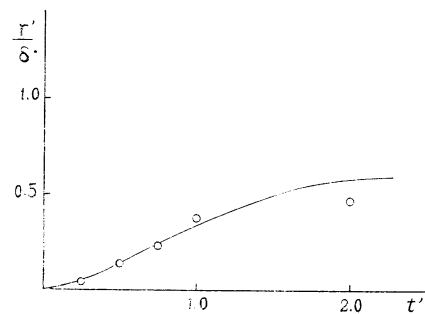


Fig. 21 $\sigma_1' = 0.11, \sigma_2' = 0.11$

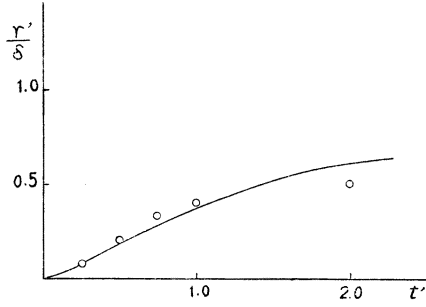


Fig. 22 $\sigma_1'=0.16, \sigma_2'=0.09$

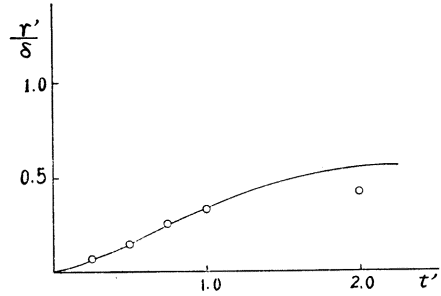


Fig. 23 $\sigma_1'=0.27, \sigma_2'=0.02$

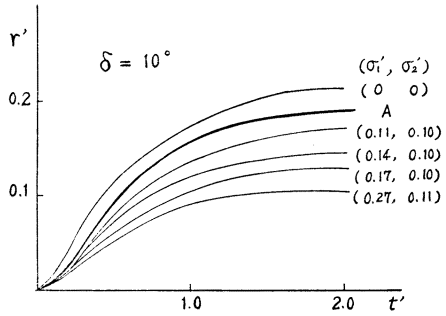


Fig. 24 Bの応答 (1)

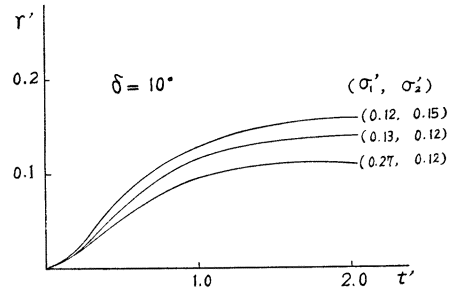


Fig. 25 Bの応答 (2)

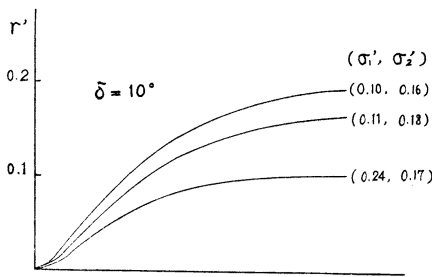


Fig. 26 Bの応答 (3)

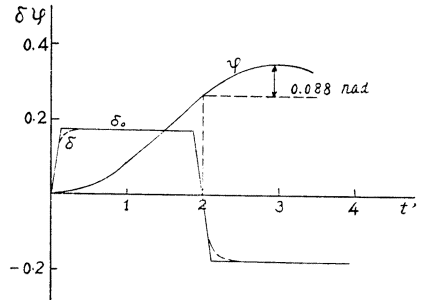


Fig. 27 $\sigma_1'=0, \sigma_2'=0$

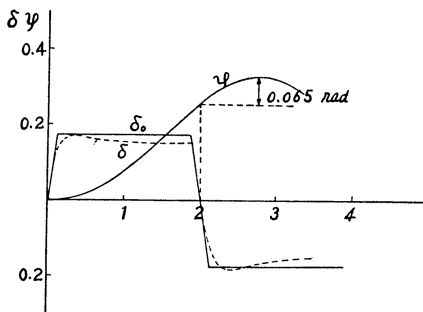


Fig. 28 $\sigma_1'=0.10, \sigma_2'=0.09$

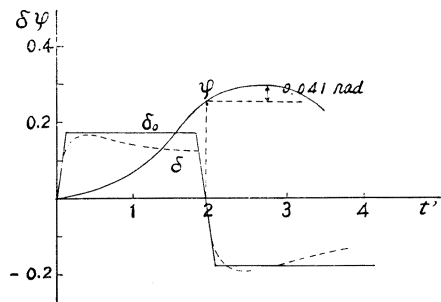


Fig. 29 $\sigma_1'=0.24, \sigma_2'=0.16$

以上実験結果をまとめてみたが、なにぶん角速度、角加速度の検出器によいものが得られず、また電線が模型に与える影響も無視できない状態で、精度の良い実験はできなかつたが、ごく定性的な傾向はつかめたと言つてよからう。

6 結 言

以上述べてきたことから結論として次のことをあげる。

1° ある船に、角速度および角加速度に比例した自動操舵を行なえば、その応答を他の任意の船の応答とほぼ等しくすることができる。このことを利用し、方向安定性は劣るが旋回性の非常に良い船を作っておき、それに自動操舵を行えば、方向安定性あるいは旋回性のどちらかに重点をおいた二つの性質を、スイッチの ON OFF により、どちらでも任意にとり得ることになり、操船上便利であろう。

2° 角加速度制御は高周波の外力に対して、非常に大きな舵角を要求する。

3° 高周波外力による過大な舵角は、low pass filter の採用により、自動操縦の性能を害する事なく相当減少させることができるであろう。

4° いかなる船の操舵装置にも時間おくれ、すなわち low pass filter, があるので、いくら旋回性の良い船を作るといつても、不安定であつてはならない。すなわち、自動操縦による操縦性の向上を行なうときは、経済的に許し得る舵角による制約と共に、本来船が安定であることも条件として加わる。

参 考 文 献

- 1) H. Eda, C. L. Crane Jr ; Steering Characteristics of the Series 60($C_b=0.60$). Davidson Laboratory Report No. 925
 - 2) W. J. Pierson, St. Denis ; On the Motion of Ships in Confused Seas. TSNAME 1953
 - 3) K. Tamura ; The Calculation of Hydrodynamical Forces and Moments Acting on the Two Dimensional Body
 - 4) L. J. Rydill ; A Linear Theory for the Steered Motion of Ships in Waves. TINA 1960
-