

(昭和 44 年 11 月日本造船学会秋季講演会において講演)

回流水槽における操縦性試験および 設定航路自動航法実験 (第1報)

正員 田古里哲夫* 正員 田中厚成**
岡本恒* 中村明彦*

Model Experiments on Manoeuvrability and Automatic Navigation on
Settled Route in the Circulating Water Channel (First Report)

By Tetsuo Tagori, *Member*, Atsushige Tanaka, *Member*
Hisashi Okamoto, Akihiko Nakamura

Summary

At first, in order to obtain the manoeuvrability and response to wind, waves and oblique current, various experiments on a 1.3 m self-propelled model of passenger ship were carried out in the circulating water channel. Utilizing these values, the optimal control system of this model, which reduces the following integral to a minimum, was analysed.

$$I = \int_{t_0}^t \{r_1(\Delta\eta)^2 + r_2(\Delta\theta)^2 + \delta^2\} dt$$

where

$\Delta\eta$: trajectory error

$\Delta\theta$: azimuth error

δ : helm angle

r_1, r_2 : coefficients

t : time

Moreover, the experiments of optimal automatic navigation on settled route with this ship model were performed by use of above calculated value in calm water, wind, waves and oblique current, in circulating water channel.

1 緒 言

現在船舶の経済性安全性向上, 船内労働の軽減などの目的のため, 船舶のより一層の自動化が要請されてきている。これまでは主に機関関係, 載貨関係等で自動化が行なわれ, 航海(操縦)関係では航海業務の複雑さからオート・パイロット以後, システムの自動化が進んでいない状態である。

現在広く使用されているオート・パイロットは船の進路をあらかじめ設定された方向に保つように自動的に操舵するもので, 外洋航行中の動作を中心に考えられている。このため, 内海, 港湾付近, 運河あるいは船舶航行量の多いところでは有効ではないように思われる。したがって, これからの船舶航行の自動化の方向としてはあらかじめ設定された航路に従って船を自動的に誘導するような制御技術を開発することであろう。もし船舶航行量の多いところ, あるいは危険な海域等に, 何らかの方法によつて自動誘導用の航路が設定され, 自動的にこの航路に沿つて誘導する装置が備えられれば, 単に経済的な目的だけでなく航行の安全や海難防止にも有効であろう。またさらに風, 波, 海流, 潮流等の海況や積荷等を考慮した航路を選定し, その航路に適した制御を行なうことにより, 経済効果を向上させることなども考えられる。

* 東京大学工学部

** 東京大学工学部, 石川島播磨重工

しかしながら船舶の設定航路自動航法に関する研究はこれまで僅しかない¹⁻³⁾。最適制御法⁴⁻¹¹⁾により予め設定した航路に従って自動的に船舶を航行させる研究を行なつた例はなく、風、波、海流、潮流などの外乱がある場合についても検討した例はないようである。また回流水槽において自航模型船により操縦性試験を行なつた例もほとんどない。

今回まず回流水槽において自航模型船により各種の操縦性試験を行ないその結果を検討し、つぎに風、波、海流、潮流の影響を実験により求めた。この結果を使用して、船舶が直線に近い航路の追跡を行なう場合について、平水中ならびに風、波、海流、潮流中における最適操舵法を検討した。さらに以上の結果にもとづいて予め設定した航路に従って自動航行させる模型実験を行なつた。

2 実験方法、供試模型および装置

自航模型船の操縦性試験を回流水槽で行なう場合一般に水槽幅が狭いため比較的小角度の実験しか出来ない。また模型寸法が小さいため実船との相関は悪いと思われる。しかし回流水槽の特徴である長時間連続測定可能という点を利用した操縦性試験の検討ができると思われる。また最適操舵法計算のため操縦性能を求めておく必要がある。そのためまず平水中で正弦操舵試験、Z試験、オートパイロット作動時応答試験を行ない、結果の解析方法を求める。

つぎに外乱として風、波、および海流、潮流に相当する斜流を回流水槽で発生させ、この3つの外乱に対する模型船の応答を実験により求める。評価関数および設定航路を与えて以上により求めた船の伝達関数を用い電子計算機により最適フィードバック係数、航跡を求める。

さらに以上の結果を使用して評価関数に応じて求められる最適予測時間の値を用いて回流水槽において広義の予測制御を行なう。

以上の手順を Fig. 1 に示す。ただし図中の記号などについては後に述べる。

供試模型としては小型模型船でも比較的尺寸影響が小さいと推定されること、上部構造が大きく風の影響が大きいこと、実船の操縦性試験が行なわれていること¹²⁾、航行量

Table 1 Particulars for Kurenai Maru Model

L_{PP} (m)	1.300
B (m)	0.218
T_{AP} (m)	0.076
T_{FP} (m)	0.050
Dia. of Prop. (mm)	45
Appendage	with All Appendages

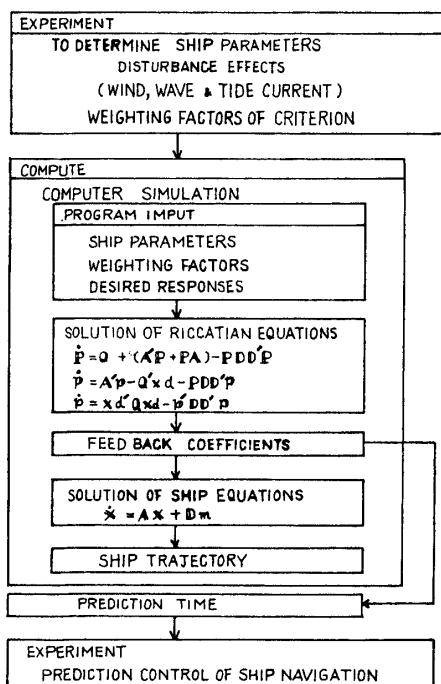


Fig. 1 Block Diagram of Optimum-Control

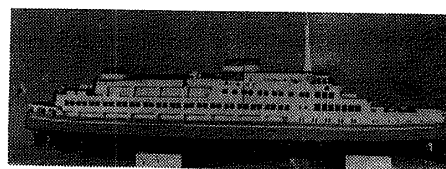


Fig. 2 1.3 m Kurenai Maru Model

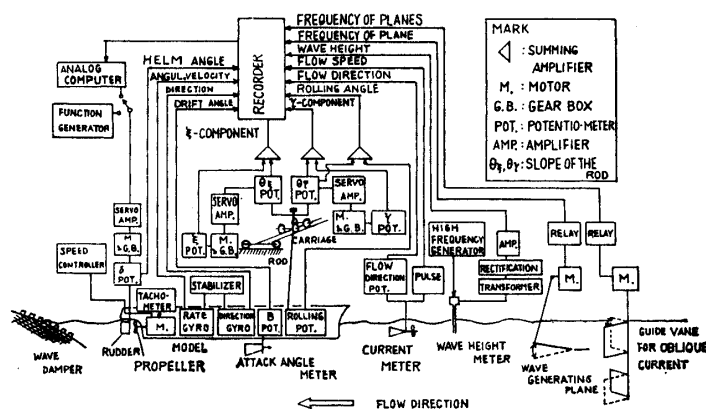


Fig. 3 Diagram of Experimental System.

が多く航路設定が望ましい航路に実船が就航していることなどから瀬戸内海航路客船くれない丸 1.3m 模型を採用した。本模型の主要目を Table 1 に示す。上部構造および機装品は主要なものにとどめた。Fig. 2 に模型船外形を示す。模型船の速度 U は今回は実験の便宜上 0.5 m/s だけとした。

実験に使用した回流水槽は東京大学工学部舶用機械工学科のものである。

実験装置の概略を Fig. 3 に示す。計測する模型船の運動は模型船追跡台車による船位 $\xi-\eta$, 方位ジャイロによる方位角 θ , レートジャイロによる回頭角速度 $\dot{\theta}$, ポテンショメータによる横傾斜角 θ_r , 船底の流向計による横滑り角 β である。模型船追跡台車が模型船の船首から 0.225 Lpp, BL 上 135 mm の点の直上に来るように, その点と台車の一点とを連結する棒が常に垂直になるように台車を制御した。しかし追跡精度が不十分であつたので残つている棒の傾斜を求め台車の位置測定値を修正し船位を求めた。船底流向計の位置は船首から 0.3 Lpp である。

正弦操舵試験の時の操舵信号用および航路設定用には関数発生器を用いた。

造波機は, 水面付近の流速分布を悪化させないため, 十分な没水深度で設けた水中翼型とした。この型の造波機は 4 種の波を同時に作るといわれるが¹⁹⁾, 外乱として使えば良いので使用した。水中翼は没水深度 0.28 m, 弦長 (フラップ部を含み) 0.40 m, 翼厚 18 mm, フラップ弦長 0.25 m, フラップ角 $\pm 30^\circ$, フラップ揺動周期 0.4~10.0 sec である。

水槽測定部後部には 10 mm の角材の簀とサラン網からなる消波装置を設けた。波高測定には電気抵抗式波高計を用いた。造波機試験結果のうち, 波高記録例を Fig. 4 に示す。解析の便宜上波の最大振幅を $A_{\max}$, 最小振幅を $A_{\min}$ とし, $A_D = A_{\max} - A_{\min}$ と $A_M = (A_{\max} + A_{\min})/2$ と周波数の関係を Fig. 5 に示す。 A_M は主に造波板の効果を表わしていると考えられる。これらから, 船に対する影響が大きい波長が船長に近い領域は共振域からはずれており, 実験に使用できると思われる。

風は簡単のため 30 cm 扇風機 3 台を使用して起こし, 模型船に横からあてた。風車型風速計による風速測定結果を Fig. 6 に示す。

斜流の発生は測定部上流に設けた可動案内板によつた。可動案内板は上下 2 群に別れ, 互に逆方向に動き測定部水流全体を振り, 水面付近に斜流を発生させる。案内板は周波数応答も求められるように電動機およびスコッチ・ヨークにより $\pm 30^\circ \sim \pm 5^\circ$ の範囲で揺動できる。斜流の流向流速測定は風見式流向計および翼車式流速計によつた。斜流発生装置試験結果を Fig. 7 と Fig. 8 に示す。正弦状に案内板を動かした時の応答は, 本実験の周波数領域では一定であつた。えられた斜流の最大角度は約 30° で, 案内板を揺動させた時水槽幅中央付近では後方まで一様な斜流が発生し流向変化は比較的正弦状に近い。また水槽幅による共振が少しみられた。

これら諸装置の配置を Fig. 9 に示す。

3 模型船の伝達関数の測定

伝達関数の測定法には各種の方法があるが今回は Z 試験, 正弦操舵試験, 負帰還をを加えた直進試験の 3 つを行なう。回流水槽での測定法には壁面効果, 共振域の存在および方位角の大きい領域では

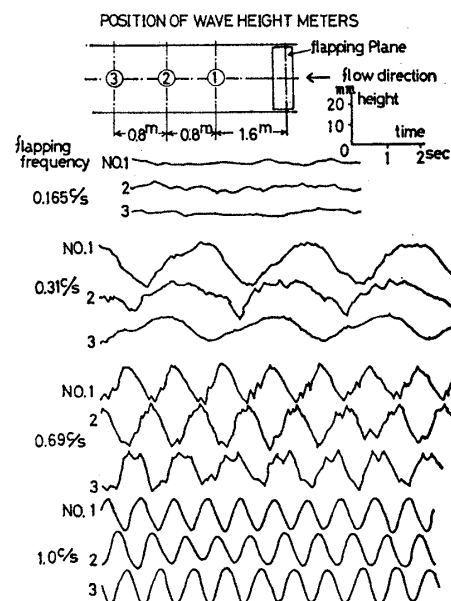


Fig. 4 Records of Wave Height Meter

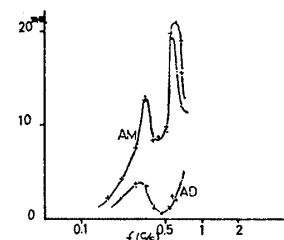


Fig. 5 Results of Wave Generator Test, $U=0.50$ m/s

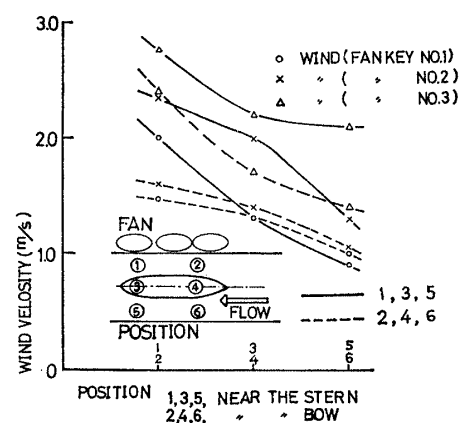


Fig. 6 Results of Wind Velocity Measurements

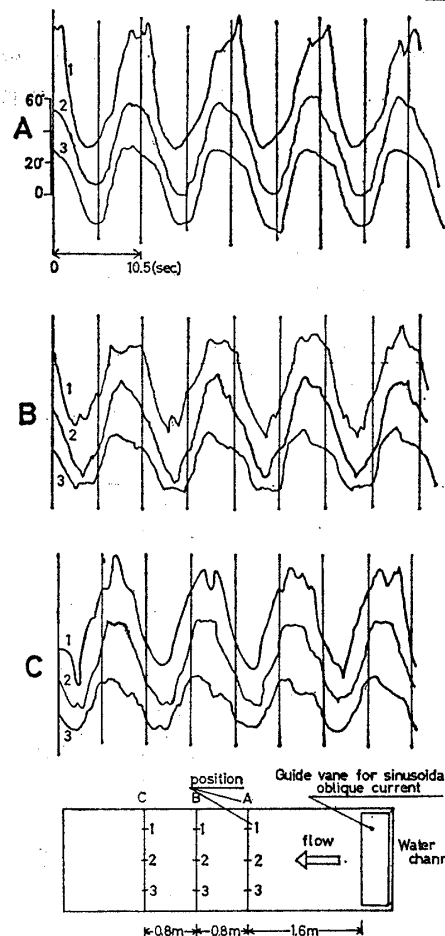


Fig. 7 Records of Flow Yaw Meter, Timming Lines show Instant When Angle of Guide Vane Equal Zero, $U=0.50$ (m/s)

1) 平水中操縦性試験

i) 正弦操舵試験

直進整定後、一定の振幅、周期で左右に正弦状に操舵する。この試験からえられる船の特性は、変針運動や衝突回避等の強い操船における特性を示すものであり、今回の自動操舵の解析には有効である。入力として舵角 δ 、出力として角速度 $\dot{\theta}$ 、方位角 θ 、横すべり角 β の入出力実験記録の一例を Fig. 10 に示す。解析方法は Bode 線図により位相、ゲイン両方から求める。Bode 線図を Fig. 11 に示す。これより角速度 $\dot{\theta}$ は、次の一次系

$$T_{\theta}\dot{\theta} + \dot{\theta} = -K_{\theta}\delta \quad (1)$$

で与えられ、 $T_{\theta}=1.8$ sec, $K_{\theta}=0.63^{\circ}/\text{sec}$ となる。

ii) Z 試験

模型の直進整定後、一定舵角 δ_0 まで操舵してこれを保ち方位角 θ がある一定値 θ_0 に達した時、反対に同舵角をとり方位角 $-\theta_0$ に達するまで舵を保つ。方位角が $-\theta_0$ を越えた時舵角 δ_0 まで操舵して以後これを繰返す。入出力実験記録の 1 例を Fig. 12 に示

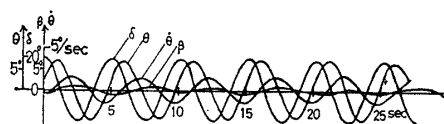


Fig. 10 A Record of Sinusoidal Steering Test

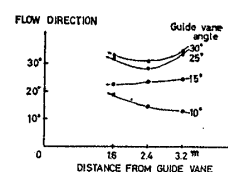


Fig. 8 Results of Oblique Current Tests (Static)

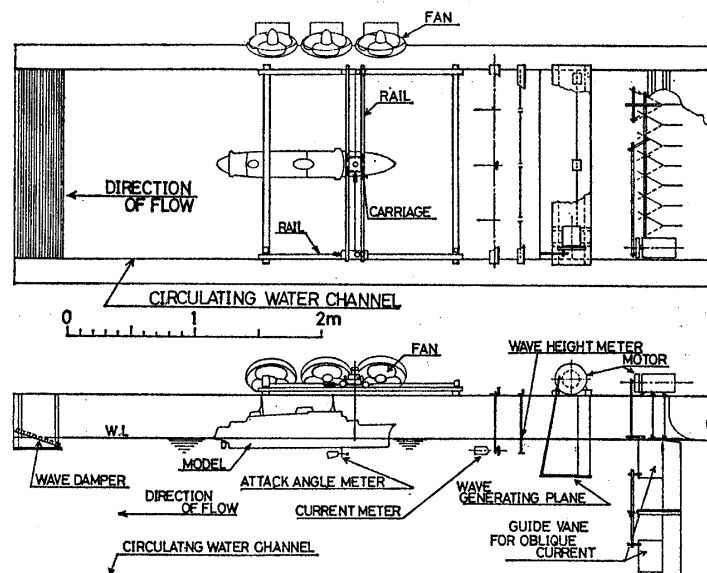


Fig. 9 Arrangement of Apparatus

測定不可能という欠点があるが、水槽中央付近で測定し、共振域をさけ¹⁴⁾、設定航路が直線に近い時の応答性を今回は求めているのでその影響は無視できるであろう。

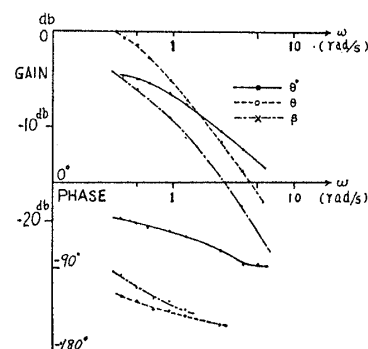


Fig. 11 Bode Diagram of Sinusoidal Steering Tests

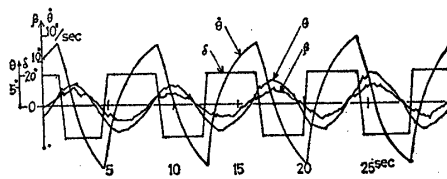


Fig. 12 A Record of Zig-zag Test

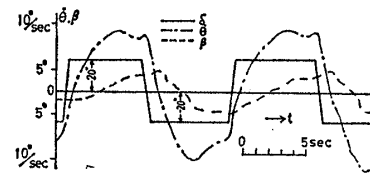


Fig. 13 A Record of Zig-zag Test

す。解析方法として、(a) 舵の周期的操舵の影響を無視してステップ(あるいは台形)入力への応答として角速度 $\dot{\theta}$ から求める方法、(b) 方位角 θ に着目して位相平面を用いた解析と Krylov & Bogoliubov の非線形振動近似解法¹⁵⁾とを併用して解析する方法が考えられる。一定方位角 θ_0 が大きく舵角 δ_0 が小さい場合は (a) の解析方法を用い、逆の場合は (b) の方が適当である。

(a) 台形近似による解析

Fig. 13 のような Z 試験結果がえられたとする。舵が逆方向に操舵されてちょうど舵角零になった時から時間を t とすると船の操縦性が一次系であらわせる時¹⁶⁾ 操舵時間が船の時定数、操舵周期に比して小さい場合角速度 $\dot{\theta}$ は

$$\dot{\theta} = (1 - 2.0 e^{-t/T_\theta}) K_\theta \delta_0 \quad (2)$$

で近似される。これを図示すると Fig. 14 のようになる。実験値を代入すると、 $K_\theta = 0.45^\circ/\text{sec}$ 、 $T_\theta = 1.5 \text{ sec}$ になる。

β も解析の都合上一次系

$$T_\beta \dot{\beta} + \beta = K_\beta \delta \quad (3)$$

で近似すると $K_\beta = 0.2$ 、 $T_\beta = 4 \text{ sec}$ となる。

(b) 非線形振動近似解法

操舵に対する方位角 θ の関係は

$$T_\theta \ddot{\theta} + \dot{\theta} = -K_\theta \delta(\theta) \quad (4)$$

で与えられる。ここで $\delta(\theta)$ は操舵機に遅れがなく Fig. 15 に示すようなヒステリシスで与えられるとする。これから $\theta - \dot{\theta}$ を直交座標に取ると Fig. 16 のようなリミットサイクルがえられる。リミットサイクルの角周波数を ω_p 、最大方位角を θ_p とし $\delta_0/\theta_0 = \alpha$ 、 $(\theta_0/\theta_p)^2 = a$ とすると、 T_θ 、 K_θ は次式で近似される。

$$\left. \begin{aligned} K_\theta &\doteq \frac{\omega_p}{4\alpha a} \pi \\ T_\theta &\doteq \frac{1}{\omega_p} \sqrt{\frac{1}{a} - 1} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

実験結果の一例を Fig. 17 に示す。これより実験値 $a = 0.44$ 、 $\alpha = 3.0$ 、 $\omega_p = 0.80$ を代入すると $K_\theta \doteq 0.48^\circ/\text{sec}$ 、 $T_\theta \doteq 1.4 \text{ sec}$ となる。これは正弦操舵試験よりも小変針の時の値を示しているともいえる。

iii) オートパイロットを加えた時の step 応答試験

回流水槽において流速が速い場合、または波浪中で模型船の操縦性を知りたい場合には通常の Z 試験、正弦操舵試験では安定した結果がえにくい。そこで方位角を舵入力に負帰還させた閉ループの特性を求め、それにより船の操縦性を推定する方法が考えられる。この方法は精度は良くないが外乱に対する影響の受け方を知る上にも、また実船試験でオートパイロットを作動しつつ航路変針させる試験と同一である長所がある。

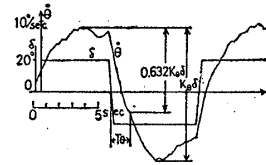


Fig. 14 Analysis of Zig-zag Test

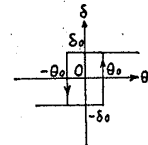
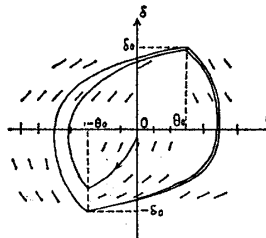
Fig. 15 Relation between θ and δ 

Fig. 16 Limit Cycle

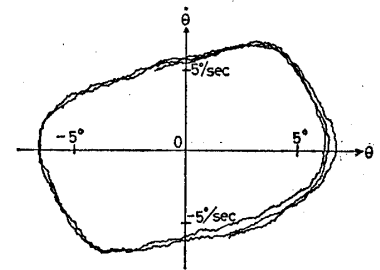


Fig. 17 Limit Cycle of Zig-zag Test

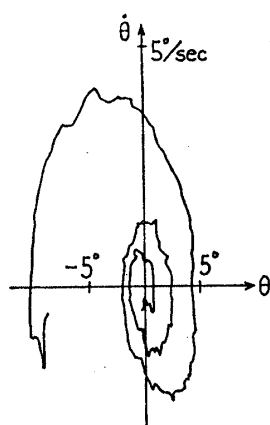


Fig. 18 Response of Auto Pilot System (Phase Plane), $U=0.45$ (m/s)

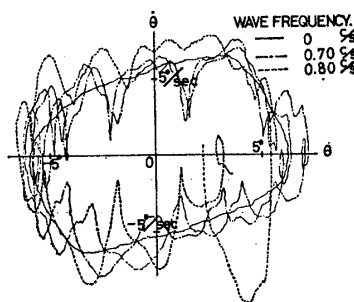


Fig. 19 Phase Plane of Zig-zag Test in Waves

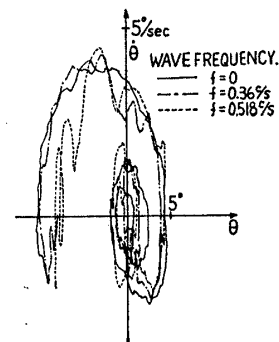


Fig. 20 Response of Auto Pilot System in Waves (Phase Plane), $U=0.45$ (m/s)

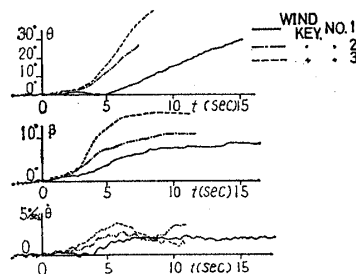


Fig. 21 Results of Step Wind Tests

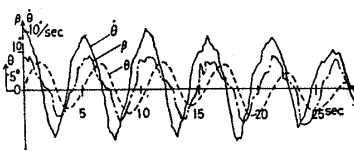


Fig. 22 Response to Sinusoidal Oblique Current, $\delta=0$

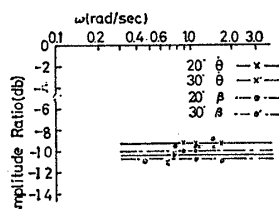


Fig. 23 Bode Diagram in Sinusoidal Oblique Current, $\delta=0$

今回実験では操舵機の応答性等がかなりはいり信頼できる値が少ないため、出力の様子を位相平面 (Fig. 18) に示すにとり次ぎの機会に述べることにする。

2) 波浪中試験

波浪中で設定航路航行を行なう場合波による速度変化, rolling, yawing, pitching などの伝達関数に及ぼす影響, および横漂流の影響など知る必要がある。本実験では向波の場合の Z 試験, オートパイロットを加えた時の step 応答試験を試みた。

波浪中で舵角 20° , 方位角 5.5° の時の Z 試験結果を Fig. 19 に示す。1.3 m 模型で船速 0.5 m/sec の時波高 10 mm 位では Z 試験が困難であることがわかる。さらに波が高い場合のオートパイロットを加えた時の step 応答を Fig. 20 に示す。Fig. 18 と 20 を対比すると向波の場合として操縦性に関しては影響ないことがわかる。

3) 横風中試験

船がステップ状の横風を受けた場合の応答を調べた結果を Fig. 21 に示す。船はまず風により風下に押し流され、模型船の風圧中心が後方にあるためやがて風の来る方向に船首を向けはじめる。

4) 斜流中試験

強い潮流, 海流は航行に大きな影響を及ぼす。そこで船の潮流, 海流に対する応答を調べるため回流水槽測定部水面の流向を正弦状に変化させて舵中立で航行している船に対する影響を調べた。実験結果を Fig. 22 に、解析結果を Fig. 23 に示す。これより船の潮流, 海流に対する応答は速く, しかも影響も大きく受けることがわかる。流向が一定周期でかわる時の Z 試験を行ない, 位相平面にえがく。その結果の一例を Fig. 24 に示す。この結果からは十分な精度で操縦性に及ぼす影響を測定できないようである。Z 試験の操舵周期よりも小さい周期の流向変化に対しては, Z 試験すら行なえなかつた。したがって Fig. 23 を後述の航行計算に使用する。

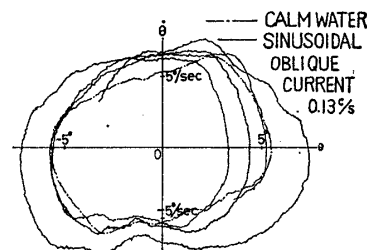


Fig. 24 Phase Plane of Zig-zag Test in Sinusoidal Oblique Current, $\delta=20^\circ$

4 最適操舵方法

1) Riccati 方程式

船の運動に関する関係式が次式で与えられるとする。

$$\dot{X} = AX + Dm \quad (6)$$

ただし

X : 船の状態ベクトル

m : 操舵信号

A : 係数行列

D : 操作行列

評価関数を追跡誤差と舵角の二次形式の時間積分

$$I(m) = \int_0^t \{X - Xd\}' Q (X - Xd) + m^2\} dt \quad (7)$$

ここで

Xd : 設定航路ベクトル

Q : 評価係数行列, X' : X の転置行解

とし, これを最小にする最適操舵方法 m_0 を求める。 $I(m_0)$ は

$$I(m_0) \equiv f(X, t) = X'PX + 2pX + p \quad (8)$$

P : 対称行列

p : ベクトル

p : スカラー

で与えられる⁹⁾。

(7) 式を差分式で表わすと

$$-\frac{\partial f}{\partial t} = \min_m \left\{ (X - Xd)' Q (X - Xd) + X' \frac{\partial f}{\partial X} + m^2 \right\} \quad (9)$$

(9) 式の括弧内を, m で偏微分し零とおくと, 最適操舵

$$m_0 = -D'(PX + p) \quad (10)$$

(9) 式に代入して

$$\begin{aligned} -\frac{\partial f}{\partial t} &= (X - Xd)' Q (X - Xd) + (PX + p)' AX + (AX)' (PX + p) \\ &\quad + D \left(-\frac{1}{\lambda} D' (PX + p) \right) + \lambda \left(-\frac{1}{\lambda} D' (PX + p) \right)^2 \end{aligned} \quad (11)$$

(11) 式が X の値にかかわらず成立するために (11) 式を整理して

$$X' K X + kX + k = 0 \quad (12)$$

とすれば次の Riccati 方程式が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} K &= PDD'P - Q - (A'P + PA) - \dot{P} = 0 \\ k &= PDD'p + Q'Xd - A'p - \dot{p} = 0 \\ k &= p'DD'p - Xd'QXd - \dot{p} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

最終の到着状態が定まっているため, 逆時間にし, 初期条件 $P(0) = 0$, $p(0) = 0$, $\dot{p}(0) = 0$ として (13) 式より

$$\left. \begin{aligned} \dot{P} &= Q + (A'P + P'A) - PDD'P \\ \dot{p} &= A'p - QXd - PDD'p \\ \dot{p} &= Xd'QXd - p'DD'p \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

2) 船の運動方程式

Fig. 25 のような座標系を考える。空間に固定した座標系を $0, \xi, \eta$, 船の重心に固定した座標系を G, x, y とする。船の運動は平面で考えれば十分であり, 操縦運動で前進速度に大きな変動がないかぎり x 方向の運動方程式を考えなくてよく, いわゆる Sway Yaw 運動を表わす次式で考える。

$$\left. \begin{aligned} (m + m_y) \dot{v} + (m + m_x) \dot{\theta} u &= Y \\ (I_z + J_z) \dot{\theta} + (m_y - m_x) uv &= N \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

ここで

m, m_x, m_y : 船の質量, x, y 方向の付加質量

I_x, J_x : 船の慣性モーメント, 付加慣性モーメント

Y, N : 力, モーメント

$u, v, \dot{\theta}$: x, y 方向速度, 回転角速度

v を横すべり角 β , 合成速度 U により

$$v = U \sin \beta \approx U\beta$$

で近似し, U は殆んど一定と扱い Y, N を $\dot{\theta}, \dot{\beta}, \delta$, 舵角 δ および風, 潮流等の外力 Y_0, N_0 の一次形式で近似できるとすると (15) 式は

$$\left. \begin{aligned} \dot{\beta} &= -b_1 \dot{\theta} - b_2 \beta + b_3' \delta + Y_0 \\ \dot{\theta} &= -a_1 \dot{\beta} - a_2 \beta - a_3' \delta + N_0 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

ここで $a_1, a_2, a_3', b_1, b_2, b_3'$ は操縦性に関する係数。

船の変位 η , 方位角 θ に関して

$$\eta = \int_0^t U \sin(\theta + \beta) dt + \eta_0$$

η_0 : 初期値

$$\therefore \dot{\eta} \approx U(\theta + \beta)$$

(17)

(16), (17) 式より船の状態ベクトル X を

$$X = \begin{pmatrix} \eta/U \\ \theta \\ \dot{\theta} \\ \beta \end{pmatrix}$$

とえらぶと, 船の運動方程式は

$$\dot{X} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -a_1 & -a_2 \\ 0 & 0 & -b_1 & -b_2 \end{pmatrix} X + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -a_3' \\ b_3' \end{pmatrix} \delta + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ N_0 \\ Y_0 \end{pmatrix} \quad (18)$$

となる。

船の操縦性が一次系

$$\left. \begin{aligned} T_\theta \cdot \dot{\theta} + \dot{\theta} &= -K_\theta \delta \\ T_\beta \cdot \dot{\beta} + \beta &= K_\beta \delta \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

であらわせる場合には, $a_1 = 1/T_\theta$, $a_2 = b_1 = 0$, $b_2 = 1/T_\beta$, $a_3' = K_\theta/T_\theta$, $b_3' = K_\beta/T_\beta$ となる。 $\delta/\delta_{\max} = m$, $a_3' \delta_{\max} = a_3$, $b_3' \delta_{\max} = b_3$, $N_0 = a_4$, $Y_0 = b_4$ とおくと (18) 式は

$$\dot{X} = AX + Dm + N \quad (20)$$

ただし

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -a_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -b_2 \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -a_3 \\ b_3 \end{pmatrix}, \quad N = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ a_4 \\ b_4 \end{pmatrix} \quad (21)$$

$$|m| \leq 1$$

設定航路が直線近くはほぼ方向とする。通常の航路を航行する場合, 問題となるのは航路偏差方位角偏差および操舵量による安全性, 経済性である。すなわち

$$I(m) = \int_0^t \left\{ r_1 (\Delta \eta)^2 + r_2 (\Delta \theta)^2 + \left(\frac{\delta}{\delta_{\max}} \right)^2 \right\} dt \quad (22)$$

を最小にする操舵方法を最適操舵とする。(7) 式の形で表わすと (22) 式は

$$I(m) = \int_0^t \{ (X - Xd)' Q (X - Xd) + m^2 \} dt \quad (23)$$

$$Q = \begin{pmatrix} r_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad Xd = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (24)$$

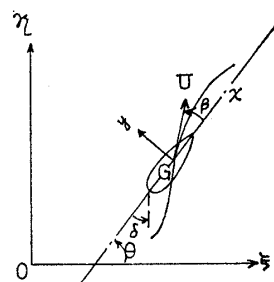


Fig. 25 Coordinate

ここで d_1 は設定航路, d_2 は設定方位角。

3) 強制外力の無い時の最適操舵法

風, 海流, 潮流, 波浪, 狭水路影響, 浅水影響等が無視できる状態で航路追跡を行つている場合を扱う。

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{12} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{13} & p_{23} & p_{33} & p_{34} \\ p_{14} & p_{24} & p_{34} & p_{44} \end{pmatrix}, \quad p = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{pmatrix} \quad (25)$$

とおき, (14) 式に代入すると次の連立 15 次方程式となる。

$$\left. \begin{aligned} \dot{p}_{11} &= \gamma_1 - q_1^2 \\ \dot{p}_{12} &= p_{11} - q_1 q_2 \\ \dot{p}_{13} &= p_{12} - a_1 p_{13} - q_1 q_3 \\ \dot{p}_{14} &= p_{11} - b_2 p_{14} - q_1 q_4 \\ \dot{p}_{22} &= \gamma_2 + 2 p_{12} - q_2^2 \\ \dot{p}_{23} &= p_{13} + p_{22} - a_1 p_{23} - q_2 q_3 \\ \dot{p}_{24} &= p_{12} + p_{14} - b_2 p_{24} - q_2 q_4 \\ \dot{p}_{33} &= 2 p_{23} - 2 a_1 p_{33} - q_3^2 \\ \dot{p}_{34} &= p_{13} + p_{24} - a_1 p_{34} - b_2 p_{34} - q_3 q_4 \\ \dot{p}_{44} &= 2 p_{14} - q_4^2 - 2 b_2 p_{44} \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{p}_1 &= -\gamma_1 d_1 - q_0 q_1 \\ \dot{p}_2 &= p_1 - \gamma_2 d_2 - q_0 q_2 \\ \dot{p}_3 &= p_2 - a_1 p_3 - q_0 q_3 \\ \dot{p}_4 &= p_1 - p_2 p_4 - q_0 q_4 \\ \dot{p} &= \gamma_1 d_1^2 + \gamma_2 d_2^2 - q_0^2 \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} q_0 &= -a_3 p_3 + b_3 p_4 \\ q &= \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -a_3 p_{13} + b_3 p_{14} \\ -a_3 p_{23} + b_3 p_{24} \\ -a_3 p_{33} + b_3 p_{34} \\ -a_3 p_{34} + b_3 p_{44} \end{pmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

ここで $b_3=0$, p_{14} , p_{24} , p_{34} , $p_{44} \equiv 0$ とおくと横すべりを無視した時の最適操舵を求める式になる。(26), (27) 式で求められた P , p , $\dot{p}$ を (10) 式に代入すると

$$m_0 = -q' X - q_0 \quad (29)$$

となる。これは Fig. 26 に示されるように, 入力を $-q_0$ とし, η , θ , $\dot{\theta}$, β のフィードバック係数を各々 q_1 , q_2 , q_3 , q_4 にえらび, 航行するのが, 評価関数を最小にする操舵方法である。 q_0 を最適入力航路と呼ぶことにする。 $q=q(t)$ であるが, t が十分大きい場合 q は定数ベクトルに近づき, 特に制限のある場合を除き, 実際の面では収束値を使用すれば十分である。

4) 強制外力のある場合の操舵方法

一定の海流, 潮流, 横風を受けながら一定の航路上を航行する時, 船は横すべりの影響を多く受ける。そこで (21) 式において $|a_4| \ll |b_4|$ の場合を取扱う。簡単化して $a_4=0$ とする。

C を次のように取る。

$$C = \begin{pmatrix} 0 \\ b_4/b_2 \\ 0 \\ -b_4/b_2 \end{pmatrix} \quad \text{すなわち} \quad AC = N \quad (30)$$

$X_N = X + C$, $X_e = Xd + C$ とすると (6), (7) 式と同様の関係式が成立し, Xd による (27) 式が少しかわる。すなわち

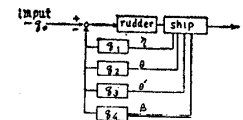


Fig. 26 Optimal Feedback System

$$\left. \begin{aligned} \dot{p}_1 &= -r_1 d_1 - q_0 q_1 \\ \dot{p}_2 &= p_1 - r_2 \left(d_2 + \frac{b_4}{b_2} \right) - q_0 q_2 \\ \dot{p}_3 &= p_2 - a_1 p_3 - q_0 q_3 \\ \dot{p}_4 &= p_1 - b_2 p_4 - q_0 q_4 \\ \dot{p} &= r_1 d_1^2 + r_2 \left(d_2 + \frac{b_4}{b_2} \right) - q_0^2 \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

操舵方法は (10) 式より

$$\begin{aligned} m_0 &= -D'(PX_N + p) \\ &= -q'X - q_0 - q'C \end{aligned} \quad (32)$$

最適フィードバック係数は Fig. 27 に示されるように、あらかじめ修正項 $(q_2 - q_4)b_4/b_2$ を加えておく必要がある。

向波の時 N は時間の関数となる。

すなわち

$$\dot{X}(t) = AX(t) + Dm(t) + n(t) \quad (33)$$

(33) 式の解が

$$X(t) = \phi(t, t_0)X(t_0) + \int_0^t \phi(t, \tau)[Dm(\tau) + n(\tau)]d\tau \quad (34)$$

ここで $\phi(t, t_0)$ は次の同次微分方程式

$$\frac{d\phi(t, t_0)}{dt} = A\phi(t, t_0)$$

を満足する

$$\phi(t_0, t_0) = \Pi, \quad \Pi: \text{単位行列}$$

のように与えられるなら $n(\tau)$ が ϕ と無相関で、平均値が零と扱え、波の周波数が高い場合は特に操舵方法を変える必要はないであろう。

5 予測制御¹⁷⁾

定常状態におけるフィードバック係数が (26) 式で求めた後、入力信号 q_0 を求める。(27) 式で p_3 のかわりに q_0 を用いて書き直すと次の線形微分方程式になる。

$$\begin{pmatrix} \dot{p}_1 \\ \dot{p}_2 \\ \dot{p}_4 \\ \dot{q}_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -q_1 \\ 1 & 0 & 0 & -q_2 \\ 1 & 0 & -b_2 & -q_4 \\ b_3 & -a_3 & a_1 b_3 - b_2 b_3 & -a_1 + a_3 q_3 - b_3 q_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_4 \\ q_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -r_1 d_1 \\ -r_2 d_2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (35)$$

初期値 $p_1(0) = p_2(0) = p_4(0) = q_0(0) = 0$ より (35) 式を Laplace 変換すると

$$d(q_0) = \frac{(l_1 s^2 + l_2 s) \mathcal{L}(-r_2 d_2) + (m_1 s^2 + m_2 s + m_3) \cdot \alpha(-r_1 d_1)}{s^4 + k_1 s^3 + k_2 s^2 + k_3 s + k_4} \quad (36)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= a_1 + b_2 - a_3 q_3 + b_3 q_4 \\ k_2 &= a_1 b_2 + b_3 q_1 - a_3 q_2 - a_3 b_2 q_3 + a_1 b_3 q_4 \\ k_3 &= (a_1 b_3 - a_3) q_1 - a_3 b_2 q_2 \\ k_4 &= -a_3 b_2 q_1 \\ l_1 &= a_3 \\ l_2 &= a_3 b_2 \\ m_1 &= b_3 \\ m_2 &= a_1 b_3 - a_3 \\ m_3 &= -a_3 b_2 \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

航路が直線に近い場合、 s の二次までで近似し、しかも普通 $sd_1 = d_2$ の関係から d_2 の影響も小さいと考えられる。更にここで操舵に対する横すべりの応答の時定数 T_β が方位角の時定数 T_θ に比し、かなり大きい場合には (36) 式は

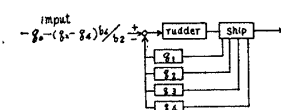


Fig. 27 Block Diagram of Feedback System

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}(q_0) &\doteq \frac{1 + \left(\frac{1}{b_2}\right)s}{1 + \left(\frac{q_2}{q_1} + \frac{1}{b_2}\right)s + \frac{q_2}{b_2 q_1} s^2} |q_1| \mathcal{L}(d_1) \\
 &= \frac{|q_1|}{1 + \frac{q_2}{q_1} s} \mathcal{L}(d_1)
 \end{aligned} \quad (38)$$

逆時間解で求めているため (39) 式は、実際に q_2/q_1 だけ位相を進めていると近似して差支えない。

以上のことより最適操舵方法を具体的に行なうには Fig. 28 のように、 $q_2/q_1 \doteq \tau$ だけ前方を予測した予測制御でゲイン q_1 で航跡追跡を行なえばアナログ計算機でも十分良い近似が行なえるであろう。ただし、本実験では r_2 の値が大きく、しかも、正弦航路を航行させたので (38) 式の修正式として

$$\mathcal{L}(q_0) = \frac{K}{1 + \frac{q_2}{q_1} s} \mathcal{L}(d_1) \quad (39)$$

ここで

$$K = q_1 - ar_2/\omega^2$$

ω : 正弦航路の角周波数, a : 修正係数

を用いる。これは横すべりなどを積極的に利用した広義の予測制御となつている。

6 設定航路航行計算

1) 諸定数の決定

評価関数の決定には安全性、経済性両面の取扱いがある。安全性の面から考えると、操舵角制限、航路偏差に伴う危険領域突入、方位角偏差による船首船尾の危険物との接触、あるいは船の運動方程式からの逸脱等による制限条件である。経済性から考えると、操舵による抵抗増加、操舵機損失、航路偏差、方位角偏差による航路延長、および目標値近くでのその修正に要する諸損失等から評価する方法も考えられる。これらは操舵の度合いによる着眼点の相違であり、本実験ではまず安全性の面から検討する。舵角制限は $\pm 35^\circ$ であるがこれを修正して $\pm 20^\circ$ とする。航路偏差、方位角偏差の制限を各々 1 m, 1° と定める。これより評価関数の $r_1=0.25$, $r_2=15$ となる。直進時の経済性からみた評価関数として、方位角偏差と舵角による損失に関して $(\Delta\theta)^2 \approx \lambda \delta^2$; $\lambda=8$ という研究結果¹⁸⁾があり、これを r_2 に直すと $r_2=1.0$ となる。計算では参考のため $r_2=0.0 \sim 50.0$ まで変化させた船の航路追跡状態を調べ、実験では $r_2=1.0$ と 15.0 の二通りを行なう。

模型船の諸定数は回流水槽内の伝達関数の測定より $a_1=0.55$, $a_3=0.1$, $b_2=0.25$, $b_3=0.03$ である。

船の航路は一般に低周波数の和で表わされるものと考え、設定航路を正弦波で与える。

2) 計算機によるシミュレーション

計算機の簡単なフロー・チャートを Fig. 29 に示す。まず船の伝達関数、評価関数、設定航路が定まった後、Riccati 方程式を解いて最適フィードバック係数を求める。ついで平水中の最適入力航路、および外乱の存在する時の最適入力航路を求め、運動方程式より航路の追跡状態を計算させる。

$r_2=0.0 \sim 50.0$ まで変化させた時のフィードバック係数 q_1 , q_2 , q_3 , q_4 の値を Fig. 30~Fig. 33 に示す。フィードバック係数は時間が 200 sec 以上では殆んど一定である。これは航路追跡において最終到達時間の 200 sec 前まで定数フィードバック制御により追跡を行なうことを示す。

フィードバック係数 q_1 , q_2 の定常状態にな

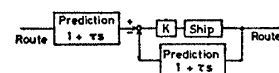


Fig. 28 Prediction Control System

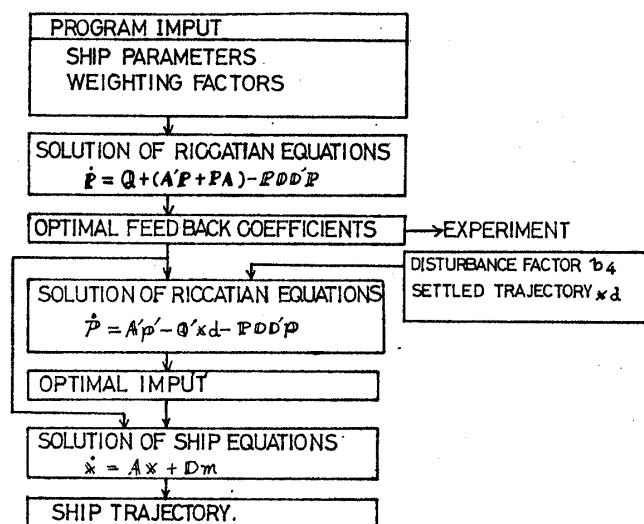
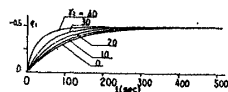
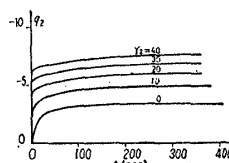
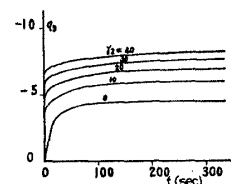
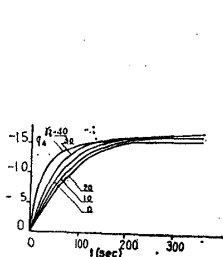
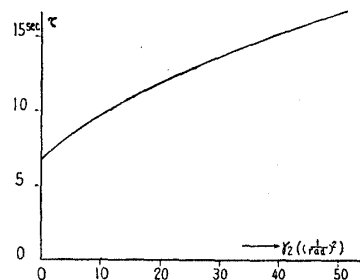
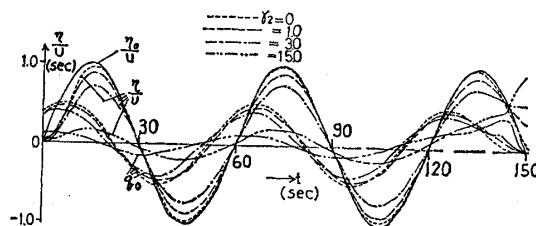


Fig. 29 Block Diagram of Computer Simulation

Fig. 30 Feedback Coefficient of η -componentFig. 31 Feedback Coefficient of θ Fig. 32 Feedback Coefficient of Angular Velocity $\dot{\theta}$ Fig. 33 Feedback Coefficient of Drift Angle β Fig. 34 Optimal Prediction Time for r_2 Fig. 35 Optimal Trajectory for r_2

つた値から一般の航路を追跡していく上での最適予測時間 $\tau = q_2/q_1$ を求め Fig. 34 に示す。 r_2 を小さくするにつれ予測時間は減少し $r_2 = 0$ で 6.8 秒になる。これは人間にたとえれば、速度 0.5 m/sec の時、3.4 m 前方の位置のずれを目で判断して進むのと等しい。航路上に乗ることのみを考えるならば $r_2 = 0$ のみで十分であろう。平水中における $r_2 = 0.0, 1.0, 3.0, 15.0$ の場合の追跡状態を Fig. 35, 36 に示す。

7 設定航路航行実験

回流水槽において流速 $U = 0.5$ m/sec に保ち、船速をほぼこれに等しくして設定航路航行実験を行なう。航路 η_0 は振幅 0.30 m, 周期 60 sec の正弦波で設定し設定航路の予測 η_p はアナログ計算機でシミュレーションする。予測制御の概略図を Fig. 37 に示す。

1) 最適操舵による平水中の航行実験

計算機による最適フィードバック係数を用いて、評価関数の係数 $r_2 = 1.0$ と 15.0 の場合の実験を行なう。予測制御は通常 Fig. 37 において $K = q_1$ であるが、航路に曲率がある場合、 $K = q_1$ となり r_2 の値が大きくなるにしたがつて違いは大きくなる。そこで最適の K の近くで K を変化させて、航路追跡状態を調べた。実験結果を Fig. 38, 39 に示す。 K の値が q_1 に近くなるにしたがい

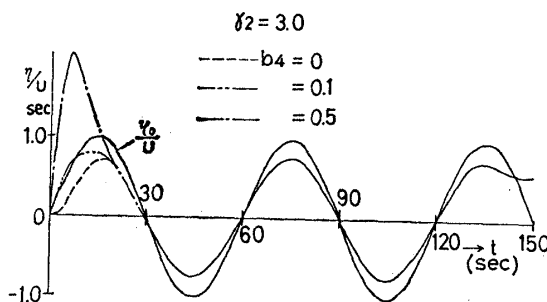


Fig. 36 Optimal Trajectory in Disturbance

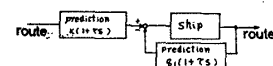


Fig. 37 Prediction-Control System

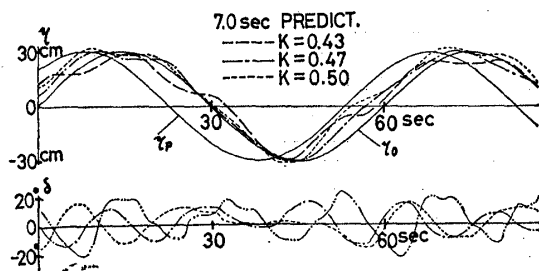


Fig. 38 Results of Automatic Navigation Tests in Calm Water

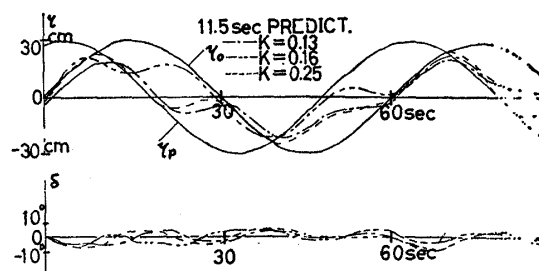


Fig. 39 Results of Automatic Navigation Test in Calm Water

位相は進むが航跡は正弦状になつてくる。逆に最適操舵法は外乱の影響を受けやすく、一見航路偏差は大きくなるようであるが位相は設定航路と一致し、操舵量も少い。したがって最適操舵法としては、特に曲がる時などは曲率を設定航路よりも小さめに追跡するよう操舵し、航路の曲率、船の横すべり等を積極的に利用することが望ましい。ただしこれは外乱の少ない場合であり外乱が多い場合はさらに調べる必要がある。評価関数の係数 r_2 の理想的な値を実験結果から逆に求めるのは、この場合評価基準が違いため良くなくまた船によつてもかなり異なると思われる。

2) 外乱の存在する場合の最適操舵による航行実験

横風と斜流中での実験方式を Fig. 40 に示す。3の3), 4) で述べた実験結果から風, 斜流により船が航路からずれる分だけあらかじめ余分に操舵して、平水と同様の最適操舵法を行なう。 $r_2=1.0$ で風, 潮流を受けた時の航路追跡状態を Fig. 41, 42 に示す。方位角制限から風の強い場合は制御が不可能になつてくるが、潮流, 風にあまりさからわない操舵法である。 $r_2=15$ の場合は方位角制限がさらに強いため、潮流, 横風中の操舵法としては $r_2=1$ の時よりも航路追跡の面だけから見ると悪い。実際問題として、風, 潮流を受けた時でも航路偏差を平水中と同じ程度におさめるために r_2 の値を外乱に応じて変化させ、適当に予測時間を変える方がよいと思われる。波および短い周期の斜流変化に対しては、平水中の最適操舵法がそのまま用いられるので、波, 斜流の周期を数種類かえて実験を行なつた。その結果も Fig. 41, 42 に示す。これより向波と短い周期の潮流変化による航路のずれは、揺れるにまかせておいてもかなり良い制御が行なわれることがわかる。

本実験では風, 波, 斜流に対する船の応答にかなり荒い近似を行なっているので、外乱存在時の最適操舵法を求めるには、さらに詳細な実験解析を行なう必要がある。

8 結 言

回流水槽においてまず平水中および風, 波, 斜流中で自航模型船の各種操縦性試験を行なつた。その結果を要約すると下記ようになる。

- (1) 正弦操舵試験により位相, ゲイン両方から操縦性を簡単に求めることができる。
- (2) 水路幅の狭い所でZ試験を行なう場合、位相平面と Krylov-Bogoliulov の非線形振動法を用いる解析法も適している。
- (3) 水路幅が不十分で船速が速い時、伝達関数を測定するには、精度は落ちるがオートパイロットを加えた応答試験が有効であろう。
- (4) 横風をうける時の応答をステップ応答試験により、また斜流をうける時の応答を周波数応答試験により、測定することができた。

船舶の設定航路航法において評価値 $I = \int_{t_0}^{t_1} \{r_1(\Delta\eta)^2 + r_2(\Delta\theta)^2 + \delta^2\} dt$ を最小にする操舵方法を最適として、

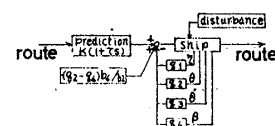


Fig. 40 Optimal Control System in Disturbance

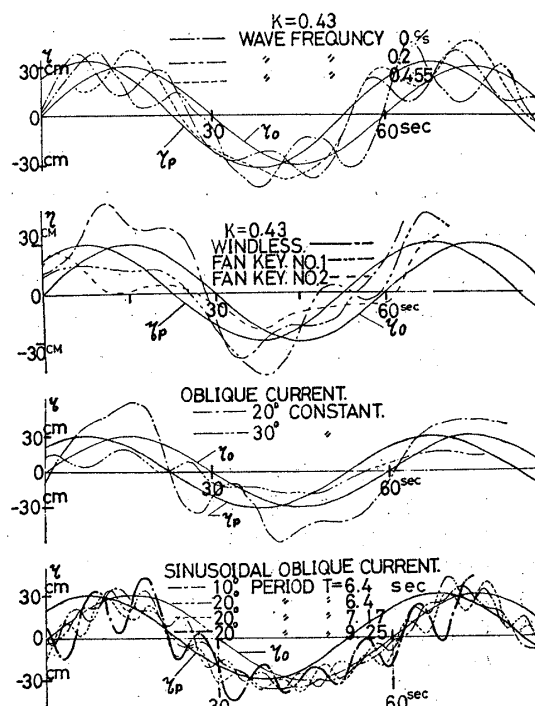


Fig. 41 Results of Prediction Control in Waves, Wind and Oblique Current

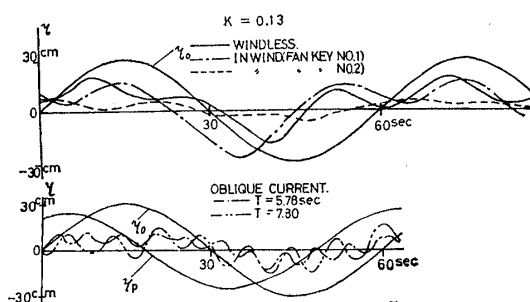


Fig. 42 Result of Prediction Control in Wind and Sinusoidal Oblique Current

平水中および外乱存在時の計算を行ない、さらに回流水槽において自航模型船により設定航路航行実験を行なった。その結果次のことがいえる。

(1) 最適操舵法は電子計算機で航路による解を求めフィードバック係数を定めておけば、実際には予測制御で十分である。

(2) 評価関数中の二次形式の係数 r_1 , r_2 によつて最適予測時間は異なり $r_2=0$ の場合が普通の予測制御となる。

(3) $r_2>0$ の場合、航路追跡は航路の曲率を考慮し実際より曲率の小さな航路を仮想しそれを予測して横すべり等を利用した操舵が望ましいと思われる。

(4) 風、波、海流、潮流などの外乱のある場合、評価値の最小値が平水時に比し大きくなり、平水時の追跡状態とかなり異なる。

今回は最適操舵法を採用して計算と実験を行なったが次の機会には装置をさらに改善するとともに、外乱の影響をさらに調べ外乱に応じて制御系を適応させて行く方法を試みる計画である。また今回は省略した各種操縦性試験解析方法についても述べる予定である。

終わりに本研究に当り御指導戴いた東京大学藤井澄二教授、井口雅一助教授、小山健夫助教授、御協力戴いた船舶技術研究所武井幸雄技官に御礼申し上げます。

なお本研究の一部は文部省科学研究費によつたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 田古里哲夫, 田中厚成: 船舶の設定航路自動航行に関する研究, 日本機械学会講演論文集, No. 195 (1968)
- 2) 渡辺 巖, 不破 健, 小山健夫, 元良誠三: 船の自動誘導について, 日本造船学会論文集, Vol. 124 (1968)
- 3) 田古里哲夫, 中島 繁: 船舶の自動航法に関する研究, 日本機械学会全国大会講演予定 (1969)
- 4) 中川憲治, 外: 最適制御理論による線形フィードバック制御系の設計法, 制御工学, Vol. 12-5 (1968)
- 5) Kalman, R. E.: When Is a Linear Control System Optimal, Trans. of ASME, March (1964)
- 6) Olsder, G. J.: This Time Optimal Course Changing of a Ship, Mathematisch Instituut Universiteit Groninger Report TW-56 April (1968)
- 7) Tyler, J. S.: The Characteristics of Model-Following Systems as Synthesized by Optimal Control, IEEE Trans. on A. C. Oct. (1964)
- 8) McGrath, Rideout: A Simulator Study of a Two Parameter Adaptive System, IRE. Trans. on A. C. Feb. (1961)
- 9) Ellert, Merriam III: Synthesis of Feedback Controls Using Optimization Theory—An Example, IEEE. Trans. on A. C. April (1963)
- 10) Tou, J. T.: Modern Control Theory, McGraw-Hill, 1964
- 11) Savas, E. S.: Computer Control of Industrial Processes, McGraw-Hill, 1965
- 12) 重満通弥, 甲斐敬三: 高速客船くれない丸における Waveless Bulb の船首波打消しに関する研究 (第二報), 造船協会論文集, Vol. 110 (1961)
- 13) Becker, von E.: Die pulsierende Quelle unter der freien Oberfläche eines Stromes endlicher Tiefe, Ingen. Arch. Bd. 24 (1956)
- 14) 藤野正隆: 制限水路における船の操縦性について, 日本造船学会論文集, Vol. 124 (1968)
- 15) Gibson, J. E.: Nonlinear Automatic Control, McGraw-Hill, (1963)
- 16) 野本謙作: 操縦性の研究における自航模型の使用について (1), (2), 造船協会論文集, Vol. 109, 110 (1961)
- 17) 吉本堅一: 予測を含む操縦モデルによる人間自動車系のシミュレーション, 日本機械学会誌, Vol. 71, No. 596 (1968)
- 18) 小山健夫: 外洋航行中の船の最適自動操舵系に関する研究, 造船協会論文集, Vol. 122 (1967)