(昭和 56 年 11 月 日本造船学会秋季講演会において講演)

水中調査用自動潜水船の運動と 制御に関する基礎的研究

(第4報:縦状態方程式の誘導とそのシステム構造)

正員飯高 弘*

Fundamental Research of the Dynamics and the Control of an Unmanned Submersible for Underwater Exploration (Part 4: Derivation of the State Equation of the Longitudinal Motion and the System Structure)

by Hiroshi Iitaka, Member

Summary

In the previous papers, a set of fundamental equations of motion for a submersible was derived in order to analyze the motion characteristics, and the relationships between the motion characteristics and the design parameters were investigated.

This paper deals with the research on the relationships between control system structure in longitudinal motion and design parameters of the submersible, that moves at constant speed along the orbit where a series of measuring points is prescribed. First, the state equation in the longitudinal direction suitable for the body design is derived. The control system of the submersible is provided. Quadratic function is defined so as to estimate the control performance of the motion. Finally, the kind and the range of design parameters are determined from the engineering standpoint.

The main results are obtained as follows.

- (1) Even if a sudden change of the direction of water current occurs consistently, the submersible can be controlled to move along the demanded orbit by utilizing a regulator composed of the state variables.
- (2) The state equation can be decomposed in two parts; one is the equation expressing surging motion, and another the equation expressing both heaving and pitching motions if the submersible design is satisfied with conditions for improvement of idealized controllability.
- (3) 15 design parameters are derived from the coefficients of the state equation.
- (4) The submersible which is designed symmetrical around the body axis is controllable to the large extent of deformation.
- (5) The control system is lack of observability, in the case that nondimensional time constant of the steering apparatus is approximately 2.1.

It is concluded that the method to obtain the relation between the design of submersible and its performance applying to the optimal control has been established and that the indispensable knowledge to quantitatively evaluate various kinds of submersible has been provided.

1緒 言

海洋調査用無人自動潜水船(以後,単に潜水船と呼称) の機動性を生かした代表的な計測機能として,流れ場で ある海中空間にはり巡らされた軌道上の各指定点を一定 の対地速度で通過しながら計測作業を行ような機能があ

* 電子技術総合研究所

げられる。運動プログラムで指定される軌道パターンと して各種のものが考えられるが,たとえば海洋発電施 設,海底パイプライン,および海底火山などの近傍を往 復するような zig-zag 形のものがある。

本論文の一連の研究は、このような運動制御機能をも つ潜水船の最適設計資料を得るため、運動制御性能と船 体設計因子との関係を体系化するとともに、船体設計因 子,制御設計因子,運動特性,運動制御特性,運動制御 性能などの階層的かつ横断的な関係をあきらかにするこ とを目標とする。前報までは、とくに運動制御を前提と しない範囲における船体設計因子との対応を考慮した運 動方程式の誘導,船体設計因子の抽出,運動特性の分析, 運動特性と船体設計因子との関係の検討などに関する研 究で得た諸成果を紹介した^{1)~3)}。一方,本報より以後で は制御設計を前提とした研究について述べることとす る。

船体設計および制御設計を同時に含めた潜水船のシス テム設計の最適化を意図する場合,まず計測ミッション に適合する運動制御性能の評価指標を設定する必要があ る。また各種の船体設計が及ぼす運動制御性能への影響 をあきらかにするため,制御設計を統一して考えること が要求される。

このような観点から,運動制御性能の評価指標として 計測ポイントからの位置偏差と制御入力を要素とする2 次形式の評価関数を用いるとともに,制御設計の対象と して最適制御則を用いることとする。2次形式の評価関 数および最適制御則を用いる理由は,

- 評価関数値を最小にする最適制御則が線形フィー ドバックによって実現できる
- ② 各種の船体設計に対し評価関数値はそれぞれ運動 制御性能の限界を示すため、異なる船体設計相互の 良否が判定できる
- ③ 最適制御則は各種の船体設計に対しそれぞれ固有 なものとして決まるとともに制御設計にとって最良 の限界を示す。よって一般的な制御設計の判定基準 および努力目標をあきらかにすることができる

からである。また2次形式評価関数の値の最小化は最適 制御理論が体系化する以前からしばしば用いられている ことからも,2次形式評価関数の適用が工学的に無理の ないものであるといえよう。

本報では最適制御則の適用を前提に縦運動制御性能と 船体設計因子との関係などを求める基礎をつくるため, 次のような順で行った研究の結果について述べる。

(1) 船体設計および制御設計を見通しよく行うため、基本状態量である潜水船の対地位置を表わす静止座標系について吟味し、持続性のある海流変化を考慮した縦状態方程式を誘導する。そして運動制御目標の達成の可否などの側面から縦状態方程式の意味するところなどについて検討する。

(2) 前報までと同様,理想応答性をほぼ満たす軸対称に近い船体形状をもつ潜水船を対象に,前述のような2つの評価関数を設定するとともに,2組の制御システムを構成する。

(3) 船体抵抗および舵のヒンジモーメントと船体設

計因子との関係を求め,前報までに得た諸関係と組み合 せて船体設計の基本軸となる船体設計因子を抽出し,か つ整理する。そして船体設計および制御設計に関する具 体的な資料を得るため,船体設計因子を軸に基準モデル を中心としたモデル仕様を定める。

(4) 運動制御目標の達成の可否をあきらかにするため、まず船体設計によって具体的に定まる制御システム 構造の可制御および可観測条件式を導く。ついで(3) で定めた船体設計範囲におけるその構造の可制御性および可観測性と船体設計因子との関係を把握する。

<記号の説明(共通性のあるもののみ)>

なお無次元化は、 U_0 を代表速度、 $l(=\Gamma^{1/3})$ を代表長 さ、 ρ を流体の密度として、SNAMEの記号表⁴⁾に従っ た。

2 縦状態方程式の誘導

本章ではまず潜水船の運動を定常航走状態とその回り の微小変化に分けて考え、微小変化を表わす線形化およ び無次元化した縦状態方程式を誘導する。ただし、見通 しのよい設計検討を実現するため、表現の簡素化を意図 する。

以下に前提条件を示す。

- 定常航走状態は海流速度一定の海中空間に設定した軌道上の各計測ポイントを一定の対地速度で通過する状態とする。
- ② 実際の海流状態から、海流は瞬時的のみならず持続的に変化するものとみなす。
- ③ 前報までと同様に、制御操作は前進運動のための 1つの推進機と、方向変化のための尾翼に含まれる 4つの舵によって行うものとする。ただし、左右の 水平舵は1対として考え、等しく操作する。
- ④ 無次元化した推力 \bar{P}_x および操舵軸回りのヒンジ モーメント C_h は次式のようにそれぞれの制御入力 u_1 および u_2 に対し1次遅れで表わせるものとす る。

$$\dot{\bar{P}}_x + b_1 \bar{P}_x = b_1 u_1 \tag{1}$$

$$C_h + b_2 C_h = b_2 u_2$$
 (2)

ただし、両者とも以下同様、無次元化してある。 b_1 および b_2 は推進機および操舵機の遅れ時定数の逆 数を表わす。

⑤ ヒンジモーメント係数 C_h は,船舶工学や航空工

学で近似的に用いられている関係式,

$$C_{h} = C_{h\alpha} \cdot \alpha + C_{h\dot{\theta}} \, \Delta \dot{\theta} + C_{h\delta_{\theta}} \cdot \delta_{\theta} \qquad (3)$$
で表現する⁵⁾。

なお,以下では無次元化した諸量が,"-"などの記 号によって自明の場合,そのことをとくに断らないこと とする。

潜水船が計測ポイントの通過を運動制御目標の一つと する以上,状態量の中に対地的に表わされる位置を含め なければならない。以下ではまず潜水船の対地位置を表 わす Fig.1の3種の静止座標系の相互関係について検討 する。同図に示すもう1種の座標系すなわち運動座標系 は運動方程式を導くにあたって第1報¹⁾で用いたものと 同じである。

Fig.1 の静止座標系は X 軸を目標軌道と一致させた (X, Y, Z), 定常航走状態における潜水船の機軸と *1 軸が重なる (x_1, y_1, z_1) , ならびに北向きに x_0 軸, 下 向きに zo 軸をもつ(xo, yo, zo)の3つである。以後の ため、順に軌道座標系、制御座標系、および基準座標系 と呼称する。基準座標系に対する軌道座標系、制御座標 系、および運動座標系の方位関係を決めるオイラー角は それぞれ $(0, \Theta, \Psi)$, $(0, \theta_0, \psi_0)$, (ϕ, θ, ψ) で表わす (Fig.1参照)。ただし第1報同様, $\phi = \Delta \phi$, $\theta = \theta_0 + \Delta \theta$, $\psi = \psi_0 + \Delta \psi$ の関係をもつとしている。 Fig.1 は各座標 系の方位関係を見易くするため、座標原点をすべて潜水 船の質量と左右方向の付加質量との合成中心に一致させ て描いたものである。この理由は第1報1)を参照された い。運動座標系の方向はオイラー角が示すように定常航 走状態において制御座標系と重なることはあきらかであ ろう。

潜水船の位置を Fig.1 が示す各座標系で表わした場合 に成立する基礎的な関係式を次に示す。

$$\begin{bmatrix} \bar{X} - \bar{X}_{i} \\ \bar{Y} \\ \bar{Z} \end{bmatrix} = M_{2}(\Theta) M_{3}(\Psi) \begin{bmatrix} \bar{x}_{0} - \bar{x}_{0i} \\ \bar{y}_{0} - \bar{y}_{0i} \\ \bar{z}_{0} - \bar{z}_{0i} \end{bmatrix}$$
$$= M_{2}(\Theta) M_{3}(\Psi) M_{3}(\psi_{0})^{-1} M_{2}(\theta_{0})^{-1} \begin{bmatrix} \bar{x}_{1} - \bar{x}_{1i} \\ \bar{y}_{1} - \bar{y}_{1i} \\ \bar{z}_{1} - \bar{z}_{1i} \end{bmatrix}$$
(4)

ただし、 M_1 ()、 M_2 () および M_3 () はカッコ 内に示すオイラー角を要素とする座標変換マトリクスで ある(付式(1)参照)。このマトリクスに付した右肩の 記号"-1"は逆マトリクス化の操作を表わす。また添字 "*i*"のついた座標変数は潜水船が追従中の直線軌道の 出発点を示す。

次に状態方程式を導くため,(4)式を定常航走状態の 回りでテーラー展開し,2次以上の微小変化量を無視し て得た関係式に運動方程式の諸変数との関係を加えた結



Fig.1 Four sets of co-ordinate systems and their allocating relation

果, 次式を得た。

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{X} \\ \Delta \bar{Y} \\ \Delta \bar{Z} \end{bmatrix} = M_2(\Theta) M_3(\Psi) \begin{bmatrix} \Delta \bar{x}_0 \\ \Delta \bar{y}_0 \\ \Delta \bar{z}_0 \end{bmatrix}$$

$$= M_2(\Theta) M_3(\Psi) M_3(\Psi_0)^{-1} M_2(\theta_0)^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \bar{x}_1 \\ \Delta \bar{y}_1 \\ \Delta \bar{z}_1 \end{bmatrix}$$

$$= M_2(\Theta) M_3(\Psi) M_3(\Psi_0)^{-1} M_2(\theta_0)^{-1}$$

$$\times \begin{bmatrix} \int_{0\tau}^{\tau} (\bar{u} + \Delta \bar{W}_{x1}) d\tau \\ \int_{\tau_0}^{\tau} (\beta + \bar{U}_0 \Delta \psi \cos \theta_0 + \Delta \bar{W}_{y1}) d\tau \\ \int_{\tau_0}^{\tau} (\alpha - \bar{U}_0 \Delta \theta_0 + \Delta \bar{W}_{z1}) d\tau \end{bmatrix}$$
(5)

ただし,海流流速の微小変化 $4\overline{W}_{x1}$ などは, 添字 " x_1 " が示すとおり,関係式の表現を簡単にするため制 御座標系で表わしたものである。

(5)式と対をなす定常航走条件式はつぎのとおりである。

$$\begin{bmatrix} \bar{X}' - \bar{X}_{i} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = M_{2}(\Theta) M_{3}(\Psi) \begin{bmatrix} \bar{x}_{0}' - \bar{x}_{0i} \\ \bar{y}_{0}' - \bar{y}_{0i} \\ \bar{z}_{0}' - \bar{z}_{0i} \end{bmatrix}$$
$$= M_{2}(\Theta) M_{3}(\Psi) M_{3}(\psi_{0})^{-1} M_{2}(\theta_{0})^{-1} \begin{bmatrix} \bar{x}_{1}' - \bar{x}_{1i} \\ \bar{y}_{1}' - \bar{y}_{1i} \\ \bar{z}_{1}' - \bar{z}_{1i} \end{bmatrix}$$
$$= M_{2}(\Theta) M_{3}(\Psi) M_{3}(\psi_{0})^{-1} M_{2}(\theta_{0})^{-1} \\ \times \begin{bmatrix} \int_{\tau_{0}}^{\tau} (\bar{U}_{0} + \bar{W}'_{x1}) d\tau \\ \int_{\tau_{0}}^{\tau} \bar{W}'_{y1} d\tau \\ \int_{\tau_{0}}^{\tau} (\alpha_{0} + \bar{W}'_{z1}) d\tau \end{bmatrix}$$
(6)

²⁵⁶

ただし, 添字","は定常航走状態の諸量であること を示す。

- (4)~(6)式についての検討結果を以下に示す。
- (3) (5)式およびそれを微分して得られる式により、 ある静止座標系で表わした位置および対地速度の微 小変化をゼロとすれば、他の座標系でも同様にゼロ となることがわかる。よって状態方程式を単に得る という点で、いずれの静止座標系も同じ資格をもつ といえる。
- (5)式を微分することによって、3つの静止座標系で表現される対地速度と運動方程式の諸変数との3組の関係を得る。このうち、状態方程式をもっとも簡単にする関係は、両辺で座標変換マトリクスが相殺できる制御座標系を用いるもの、すなわち次式、

$\lceil \Delta_{\dot{x}}, \rceil \rceil$	ū		0		ΔW_{x1}	
$\Delta \dot{\bar{y}} =$	β	$+ \overline{U}_0$	$\varDelta\psi\cos heta$	0 +	$\varDelta \overline{W}_{y_1}$	
$\Delta \dot{\overline{z}}_1$	_α_		$ - \Delta \theta $		$\Delta \overline{W}_{z_1}$	
					('	7)

で表わせることが分った。また Fig.1 に示す以外の 静止座標系で(7)式より表現を簡単にするものは 考えられない。

② 定常航走状態は(6)式とそれを微分して導かれる関係式によって表わせる。運動制御目標は定常航走状態において達成されている。Fig.2 は軌道方向の目標対地速度をベクトル Vr で表わしたときの潜水船の定常航走状態を示す。すなわち Xⁱ=|Vr| である。同図は,潜水船の姿勢が対流速度ベクトル Uと海流速度ベクトル W との和が制御目標どおりの運動条件を意味する次式,

$$U+W=V_T \tag{8}$$

によって決められることを表わしている。したがっ



Qo: Attack Angle

Fig. 2 Stationery moving direction $\vec{U} + \vec{W}$ concurrent with orbit X て W=0 および $\Theta=0$ のケースすなわち海流ゼロ ならびに追従軌道が水平面上にある場合,潜水船の 機軸は軌道と重なることが分る。

④ 定常的な姿勢を表わすトリム角 θ_0 および水平方 位角 ψ_0 は©からもあきらかなように,目標対地速 度 V_T などから決まる。すなわち,次式,

$$\psi_{0} = \sin^{-1} \left\{ -\frac{\overline{W}'_{y_{1}}}{|\overline{V}| \cos \Theta} \right\} + \Psi$$

$$\theta_{0} = \frac{v_{1} \overline{W}'_{z_{1}} + v_{3} (\overline{U}_{0} + \overline{W}'_{z_{1}})}{[(v_{1}^{2} + v_{3}^{2}) - v_{1} \{C_{z\delta_{e}}(\overline{z}_{B}\overline{B} - \overline{z}_{G}\overline{G})/(C_{z\delta_{e}}C_{m\alpha} - C_{m\delta_{e}}C_{z\alpha})\}]}$$
(9)

ただし、 $v_1 = |V_T| \cos \Theta \cos (\Psi - \phi_0), v_2 = |V_T| \cos \Theta$ $\sin(\Psi - \phi_0), v_3 = -|V_T| \sin \Theta$ から求められる。W = 0および $\Theta = 0$ のケースでは、あきらかに $\Psi = \phi_0, v_3 = 0$ より $\theta_0 = \Theta = 0$ となるため、ⓒで述べたように潜水船の 機軸と軌道が重なることが分る。

以上より,船体設計および制御設計の見通しの良さを 最優先して考えれば,第1報で導いた運動方程式(付式 (2)~(3))に(1)~(3)および(7)式を組み合せ て縦状態方程式を導くことがもっとも望ましいと考えら れる。

このような観点から縦状態方程式を導いた結果,次に 示す一連の式を得た。

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u} + \boldsymbol{C}\boldsymbol{w} \tag{10}$$

 $\begin{aligned} & \text{tril}, \\ & \mathbf{x}' = (\Delta \bar{x}_1, \bar{u} - \bar{u}^*, \bar{P}_x - \bar{P}_x^*, \Delta \bar{z}_1, \alpha - \alpha^*, \Delta \theta - \Delta \theta^*, \Delta \dot{\theta}, \\ & \delta_e - \delta_e^*) \end{aligned}$

 $C_{H\dot{\theta}} = -\left\{C_{h\alpha}C_{z\dot{\theta}} + C_{h\dot{\theta}}\left(C_{M\dot{\theta}} + b_{2}\right)\right\}/C_{h\delta_{\theta}}$

 $C_{H\delta_e} = -\{(C_{H\alpha}C_{z\delta_e} + C_{h\delta}C_{M\delta_e})/C_{h\delta_e}\} - b_2$ (15) である。状態ベクトル x などの右肩にある記号"'"は ベクトルおよびマトリクスの転置操作を表わす。状態マ トリクス A((12)式),入力マトリクス B((13)式),お よび外乱マトリクス C((14)式)の各要素のうち,潜水 船が理想応答性を満たす場合にゼロとなるものは下線を 引いてある。さらに、状態ベクトルxおよび入力ベクト ル u の諸要素に含まれる"*"のついた諸量(以後、微小 目標量と呼称)は次式から求められるものである。

$$Ax^{*} + Bu^{*} + w_{0} = 0 \tag{16}$$

ただし、

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^{*\prime} &= (0, \bar{u}^*, P_x^*, 0, \alpha^*, \Delta\theta^*, 0, \delta_e^*) \\ \mathbf{u}^{*\prime} &= (u_1^*, u_2^*) \\ \mathbf{w}_0 &= (\Delta \bar{W}_{x1}, 0, 0, \Delta \bar{W}_{z1}, 0, 0, 0, 0) \end{aligned}$$
(17)

である。

誘導された状態方程式は8つの状態変数,2つの入力 変数,および2つの外乱変数から構成されている。外乱 変数として取扱われている海流変化の時間微分量 $\Delta \dot{W}_{x1}$ および $\Delta \dot{W}_{z1}$ は,海流変化によって潜水船に加わる慣 性力および慣性モーメントを表わすためのものである¹⁾。 またヒンジモーメントに関する $C_{H\tilde{u}}$ などの諸係数は (3)式を導入した結果得られたもので,運動方程式(付 式(2)および(3))の諸係数 $C_{z\tilde{u}}$ などとは(15)式 の関係をもつ。

以下に縦状態方程式の意味するところについて検討し た結果を示す。

(1) すべての状態変数がゼロ収束している状態(以後,単にゼロ収束状態と呼称)では,(10)および(16) 式から,次式

 $\begin{aligned} \Delta \bar{x}_{1} = \Delta \bar{z}_{1} = \Delta \dot{\theta} = 0 \quad (18) \\ \bar{u} - \bar{u}^{*} = \bar{u} + \Delta \bar{W}_{x1} = \Delta \dot{\bar{x}}_{1} = 0 \\ (\alpha - \alpha^{*}) - U_{0} (\Delta \theta - \Delta \theta^{*}) = \alpha_{0} + \bar{U}_{0} \Delta \theta \\ + \Delta \bar{W}_{z1} = \Delta \dot{z}_{1} = 0 \quad (19) \end{aligned}$

が満たされる。よって、海流変化 $\Delta \overline{W}_{z1}$ および $\Delta \overline{W}_{z1}$ の大きさに応じて潜水船をゼロ収束状態にする運動制御 を行えば、対流速度 \overline{u} およびピッチ角 $\Delta \theta$ などの収束 目標を変えつつ、 $\Delta \overline{x}_1 = \Delta \overline{z}_1 = \Delta \overline{x}_1 = 0$ より、計測 ポイントの通過および対地速度一定の条件を示す運動制 御目標を達成できる。あきらかに海流変化が瞬時的な場 合、いずれ $\Delta \overline{W}_x = \Delta \overline{W}_{z1} = 0$ となるため、潜水船はも との定常航走状態に引きもどされることが分る。

(2) 持続性のある海流変化の場合も瞬時的な場合と 同様,追従制御を考えるまでもなく,一貫して定値制御 でゼロ収束状態にもっていける。また特別な海域を除い て海流変化はステップ状およびインパルス状の変化の組 み合せで充分近似できると考えられるため,状態変数を 要素とするフィードバックで良好な運動制御性能が期待 できる。よって制御設計はいわゆる線形レギュレータ問 題として取扱える。

(3) 潜水船をゼロ収束状態にもっていく運動制御を 行えば,持続性のある海流変化が起った場合,対流速度 \bar{u} , ピッチ角 $\Delta\theta$, および制御入力 u_1 などは,(16) 式 に海流変化の大きさ $\Delta \overline{W}_{x1}, \Delta \overline{W}_{z1}$ の値を代入して得ら れる \bar{u}^* など,それぞれの微小目標量の値に収束する。 たとえば対流速度 \bar{u} は $\bar{u} = -\Delta \overline{W}_{x1}$ ((19) 式)より $\Delta \overline{W}_{x1}$ を打消す値に収束する。

(4) Fig.3 はステップ状の海流変化の前後の定常航 走状態とゼロ収束状態を表わす。縦運動と横運動は第1 報で述べたように分離して考えられるので潜水船の左右 の方向の海流すなわち \overline{W}_{u1} はゼロとしている。同図は 海流変化前後の定常航走状態とゼロ収束状態では,対流 速度 \overline{u} およびピッチ角 $d\theta$ などが異なっていることを 示している。したがってすべての状態変数をゼロに収束 させるような運動制御を行えば,潜水船は海流変化に応 じて対流速度や姿勢を刻々と変えつつ, Fig.2 が示すよ うな制御目標に向って運動することが分る。

(5) 縦状態方程式((10)式)を用いた制御設計が工 学的な意味をもつためには、すべての状態変数が、直接 的あるいは間接的に測定できるようなものでなければな ちない。とくに海流変化 $d\overline{w}_{x1}$ および $d\overline{w}_{z1}$ を測定す ることなく状態変数の要素である微小目標量 \bar{u}^* などは 求まらない。そこで海流変化 $d\overline{w}_{x1}$ などの測定について 検討した結果、対地速度 $d\bar{x}_1$ および $d\bar{z}_1$ 、ならびに \bar{u} , α などの諸量の測定値を(7)式に代入して得られるこ とが分った。他の諸量についてはいずれも測定可能であ る。

(6) 計測対象である海洋発電施設などのスケールは 一般に潜水船のスケールに比べて大きいため,直線軌道



V_T : Vector of Objective Grand Speed W (=(Wx1,Wz1)): Vector of Sea Current Speed

Fig. 3 Comparison of relative speeds and pitching angles at different states due to sea current variation (in case of $W_{y1}=0$) 上の計測ポイントを一定速度で通過する機能の実現を目 的に,(10)式のもとで基本的な船体設計および制御設 計を行っても充分であると考えられる。

(7) 理想応答性を満たす船体設計によって状態マト リクス A((12)式)の左下および右上の非対角4半成分 のすべての要素はゼロにできる(第2報参照)。その結 果,潜水船の運動制御は機軸方向の並進運動(以後,前 進運動と呼称)とそれに対し垂直な方向の運動(以後, 上下運動と呼称)に分けて検討できる。

以上より,すべての状態変数((11)式)をゼロ収束で きるような運動制御が実現できれば,誘導した縦状態方 程式((10)式)を用いて制御設計および船体設計を進め られることが分った。このような運動制御は(10)式と 次章で設定する出力方程式によって決まる制御システム の構造が可制御性をもつ場合実現できる。可制御性につ いては第4章で検討する。

3 運動制御に関する船体設計因子の抽出

潜水船は前報までと同様,軸対称の細長い船体形状を もつものとする。このような潜水船は理想応答性をほぼ 満たすことが分っているため,すなわち理想応答性のも とで制御設計を行って基本的に誤まることはないと考え られる。

本章では制御設計を進めていき,次章の可制御性およ び可観測性と船体設計との関係をあきらかにするための 基本式を求める。そして,以後の研究対象とする船体モ デルの仕様を定めるとともに,仕様設定の軸とした船体 設計因子の抽出結果について述べる。

縦状態方程式は前章の結果から,

$\dot{x}_1 = A_1 x + b_1 (u_1 - u_1^*) + c_1 w$	(20)
---	------

 $\dot{x}_2 = A_2 x + b_2 (u_2 - u_2^*) + c_2 w$ (21)

ただし,
$$x_1 = (\Delta \bar{x}_1, \bar{u} - \bar{u}^*, P_x - P_x^*)$$
 (22)

 $\mathbf{x}_2 = (\varDelta \bar{z}_1, \alpha - \alpha^*, \varDelta \theta - \varDelta \theta^*, \varDelta \dot{\theta}, \delta_e - \delta_e^*)$

である。上式の状態マトリクス A_1 および A_2 は,それ ぞれマトリクス A((12)式)の左上および右下の対角4 半成分を表わす。 b_1 および b_2 についても同様である。 外乱マトリクス c_1 および c_2 は,それぞれ C((14)式) の左半分および右半分であり、Wは前章と同じである。

(19) 式は前進運動,(20) 式は上下運動の状態を表わ すもので,以後同様,添字"1"および"2"によって区 別している。制御システムを構成するためには,それぞ れの状態方程式に対応する出力方程式を定める必要があ る。そこで出力方程式をそれぞれ,

$$y_1 = \boldsymbol{h}_1 \boldsymbol{x}_1 \tag{23}$$

$$y_2 = h_2 x_2 \tag{24}$$

ただし,
$$h_1 = (1, 0, 0), h_2 = (1, 0, 0, 0, 0)$$

とする。 $y_1(=\Delta \bar{x}_1)$ および $y_2(=\Delta \bar{z}_1)$ はそれぞれの運動

に関する出力, h1 および h2 は出力ベクトルを表わす。

また縦運動制御性能の判定指標として次の2つの評価 関数を用いることとする。

$$J_{1} = \frac{1}{2} \int_{0}^{\infty} \left\{ \mathbf{x}_{1}^{\prime} Q_{1} \mathbf{x}_{1} + (u_{1} - u_{1}^{*})^{2} / \rho_{1} \right\} d\tau$$

$$= \frac{1}{2} \int_{0}^{\infty} \left\{ y_{1}^{2} + (u_{1} - u_{1}^{*})^{2} / \rho_{1} \right\} d\tau \qquad (25)$$

$$J_{2} = \frac{1}{2} \int_{0}^{\infty} \left\{ \mathbf{x}_{2}^{\prime} Q_{2} \mathbf{x}_{2} + (u_{2} - u_{2}^{*})^{2} / \rho_{2} \right\} d\tau$$

$$= \frac{1}{2} \int_{0}^{\infty} \left\{ y_{2}^{2} + (u_{2} - u_{2}^{*})^{2} / \rho_{2} \right\} d\tau \qquad (26)$$

ただし、 ρ_1 および ρ_2 は出力すなわち計測ポイントか らの位置偏差と制御入力との兼ね合いを決める重み係数 を表わす。縦運動制御性能と船体設計因子との関係を求 めるにあたって前提とされる最適制御則はそれぞれ (25) および (26) 式の評価関数の値を最小とするものである。 また上式は計測作業を行うポイントの通過をとくに強調 したものであるといえる。

状態方程式および出力方程式の設定によって制御シス テムの構造の骨格が定まった。システム構造をはじめ、 運動制御性能と船体設計因子との諸関係をあきらかにす るためには、潜水船の船体設計の基本軸となる船体設計 因子を抽出し、その因子を軸に以後の研究対象とする船 体モデルの設計仕様を定めておく必要がある。Table 1 はこのような観点から抽出した因子を整理し、船体モデ ルの仕様を定めた結果を表わすものである。同表の15 種の船体設計因子の値を代入することによって、縦状態 方程式のみならず横状態方程式のすべての係数の値が求 められるため、基本設計の段階では充分な組み合せであ ると考えられる。胴体尾部の流速変化に関係すると考え られる因子すなわちプロペラの形式については本報の対 象外として"ー"で示した。また各種の船体設計におい て共通する因子については左右の境界線をはぶいて示さ れている。

Table 1 からもあきらかなように,船体モデルの仕様 は,基準モデルを中心に 15 種の因子を1種ずつ右側の 範囲で変えて得られる幅広い範囲にとってある。基準モ デルは本論文の研究対象とする潜水船と同じような機能 をもつ潜水船 UARS, SPURV, SF-3,および OSR-H などの諸資料を検討した結果設定したものである。 UARS などの概要は文献 6)を参照されたい。Fig.4 は 基準モデルおよび設計範囲の限界を表わす船体モデルの 外観を表わす。同図の矢印は各因子を大きくする設計の 方向を示す。

Table 1 の船体設計因子のうち,尾翼厚と尾翼の平均 翼長の比,ならびに舵面と尾翼との面積比は Fig. 5~6 に示す船体抵抗と船体船計因子との関係などから,あら たに抽出したものである。また推進機および操舵機の時

Design Parameters of Submersible		Value of Standard Model	Numerical Computation Range	
ı	Stenderness Ratio of Body	5.0	4.0 ~ 7.0	
2	Body Shape	Trajection of Nose and Tail from NACA0035 Middle parts : Cylindrical		
3	Tail Fin Width Body Diameter	1.75	1.25 ~ 2.50	
4	Geometric Aspect Ratio of Tail Fin	1.0	0.3 ~ 1.7	
5	Taper Ratio of Tail Fin	0.5	0.0 ~ 0.7	
6	Tail Fin Thickness Mean Chord Length	0.15 (NACA0015)	0.15 (NACAQO15) 0.09 (NACAQO09)	
7	Tail Fin Fixing Position	Length of Body End behind Toil Fin End Length of Toil Cone = 0.0225		
8	BG Body Diameter	0.03	0.00 ~ 0.06	
9	Mass Distribution	Determinative so to satisfy $I_A = I'_A + m (r_A - r'_A)^2$		
10	Rudder Type	Plain Sealed Flap		
11	Rudder Area Tail Fin Area	I.O (All Movable Rudder)	0.1~1.0	
12	Configuration of Propeller			
13	Time Constant of Steering Apparatus	0.5 sec	0.1 ~ 1.5 sec	
14	Time Constant of Propulsion Apparatus	0.5 sec	0.1 ~ 1.5 sec	
15	Representative Length	0.7m (330kg)	0.3 ~ 1.6m (27kg ~ 4.(ton)	

Table 1 Standard model and design range for numerical computation

★) I_A: Moment of Inertia about A-axis, I_A: The Value (I_A) assuming Uniform Mass Distribution, m: Mass, r_A: Center of Mass in the A-Directin, r_A: The Value (r_A) assuming Uniform Mass Distribution.

定数もそれぞれ(1)および(2)式によって本報で導入されたものである。一方,プロペラ形式に関するものを除く他の因子については前報までに抽出したものである。新しい因子を得るための基礎となった Fig.5~6 に示す関係は文献7)~10)の実験データなどをもとに計算した結果得たものである。計算するにあたっていくつかの前提を含む。

以下にこれらの前提を含め Fig.5~6 について説明する。



Fig. 4 Various and Ultimate shape deformations



Fig. 5 Drug coefficient based on volume vs. design parameters⁷⁾



Fig. 6 Hinge moment coefficient of rudder based on volume vs. (rudder area/ tail fin area)^{8)~10)}

- ① Fig.5 の示す船体抵抗と船体設計因子との関係は 水温 15℃ のもとで,尾翼の厚さによる速度増加, 境界層の影響,および胴体と尾翼による流れの干渉 などを考慮した魚雷に関する文献 7)の準実験式お よび諸図を用いて求めたものである。ただし,胴体 部は乱流,尾翼部は層流として計算した。準実験式 などの詳細については文献 7)を参照されたい。
- ② 舵面設計には各種のものがあるが、ヒンジモーメントと舵面設計との関係に関する基本的な資料を得るため、固定翼とのギャップがシールされた単純フラップ(以後、単に単純フラップと呼称)形式の舵を前提とした。Fig.6のヒンジモーメント係数 Cha,

 $C_{h\delta_{\theta}}((3)$ 式参照)は、舵面翼長と尾翼長との比を パラメータに得られている2次元翼に関する同一翼 断面をもつ同様な係数 $\bar{C}_{ha}, \bar{C}_{h\delta_{\theta}}$ についての実験デ ータ(文献 8)~10))をもとに、次式^{5),8)},

 $C_{h\alpha} = \bar{C}_{h\alpha} \cdot a/a_0 \tag{27}$

 $C_{h\delta_e} = \bar{C}_{h\delta_e} + (d\alpha/d\delta_e)_r (C_{h\alpha} - \bar{C}_{h\alpha})$ (28) を用いて計算したものである。ただし, 翼型は $\bar{C}_{h\alpha}$, $\bar{C}_{h\delta_e}$ と尾翼の長さに対する舵面翼長との比(舵面 積と尾翼面積との比に相当)との関係が実験的に得 られている NACA 0009⁹)と文献 8) でそれらの関 係が推定できる NACA 0015 の2種に限定した。 舵面積は操舵軸の位置の表現も考慮し,(27)~(28) 式において尾翼(3次元翼)に対応する2次元翼の 流体に影響する操舵軸よりうしろの面積とする。舵 面は胴体部までに及ぶ単純な矩形型のものとしてい る。また ($d\alpha/d\delta_e$)r は舵の効きを表わ係数で,全 動型の場合あきらかに1である。aおよび a_0 はそ れぞれ尾翼と同一断面をもつ2次元翼の揚力係数を 表わすものである。

③ (3) 式の C_{hi} は C_{ha} と座標中心から舵面の圧力
 中心までの距離との積で表わされる。この距離の計
 算は NACA 0009 の断面をもつ2次元翼の圧力分布
 を参考に行ったものである⁹⁾。

なお, 舵面設計に関する詳細な検討は以後予定し ている運動シミュレーション結果が必要なこと, あ る種の舵面設計で可制御性などが吟味されれば, 他 の舵面設計について容易に可制御性などが検討でき ることなどから, Table 1 の基準モデルでは船舶で 多く見受けられる全動型の舵を採用している。

以上より、制御システムが構成され、また制御システムの構造決定に必要な 15 種の船体設計因子が抽出された。よって縦運動制御性能と船体設計因子との関係などをあきらかにするための道具立ては整ったといえる。次章では制御システムの構造と船体設計因子との関係、とくに前章のおわりで述べた可制御性について吟味することとする。

4 可制御性および可観測性と船体設計因子との関係

本章では潜水船の運動制御系の設計に不可欠なシステ

ム構造をあきらかにするため,縦状態方程式((20)~ (21)式)および出力方程式((23)~(24)式)をもとに 可制御性および可観測性を吟味し,船体設計因子との関 係を検討する。潜水船はとくに断らない限り,対流速度 1.5 m/sec(約3/ット)およびトリム角ゼロの代表的な 定常航走状態の回りで運動しているものとする。船体設 計の範囲は Table 1 に示すとおりである。

可制御性および可観測性は一般にn個の状態変数をも つ制御システムの状態マトリクス A の特性方程式,

$$|\lambda I - A| = 0 \tag{29}$$

のすべての根すなわち固有値 λ_i (i=1,2,...n) に対し, それぞれ,

RANK
$$[\lambda_i I - A, B] = n$$
 (30)

$$\operatorname{RANK} \begin{bmatrix} \lambda_i I - A \\ H \end{bmatrix} = n \tag{31}$$

の関係式が成立すれば保証される¹¹⁾。マトリクスBおよ びHはそれぞれ入力および出力マトリクスを表わす。出 力マトリクスは前章で示した行ベクトル h_1, h_2 に相当す る。また RANK[]]はマトリクスの階数を求める操作 を表わす。

船体設計によって不可制御あるいは不可観測になる場合,各固有値に対応するそれぞれの運動モードのうちそれに該当するものを即座に判定することが望ましい。そこで可制御性および可観測性の判定式として(30)~(31)式のような表現形式のものを採用した¹¹⁾。(29)~(31)式に前章で示した A_1, b_1 および b_1 を代入した結果を次に示す。

$$\lambda(\lambda - C_{x\bar{u}})(\lambda + b_1) = 0 \tag{32}$$

$$\operatorname{RANK}\begin{bmatrix}\lambda_{i} & 1 & 0 & 0\\ 0 & \lambda_{i} - C_{x\bar{u}} & -C_{x\bar{p}z} & 0\\ 0 & 0 & \lambda_{i} + b_{1} & b_{1}\end{bmatrix} = 3 \quad (33)$$
$$\operatorname{RANK}\begin{bmatrix}\lambda_{i} & 1 & 0\\ 0 & \lambda_{i} - C_{x\bar{u}} & -C_{x\bar{p}z}\\ 0 & 0 & \lambda_{i} + b_{1}\\ 1 & 0 & 0\end{bmatrix} = 3 \quad (34)$$

さらに, A_2 , b_2 , h_2 を代入し, 見通しのよい検討が行 えるように行列式の演算規則にもとづいて変形した結果 を以下に示す。

$$\lambda(\lambda+b_{2})\begin{vmatrix}\lambda-\{C_{z\alpha}(C_{h\alpha}/C_{h\delta_{e}})C_{z\delta_{e}}\} & -\{C_{z\dot{\theta}}-(C_{h\dot{\theta}}/C_{h\delta_{e}})C_{z\delta_{e}}\}\lambda\\ -\{C_{M\alpha}-(C_{h\alpha}/C_{h\delta_{e}})C_{M\delta_{e}}\}\lambda^{2}-\{C_{M\dot{\theta}}-(C_{h\dot{\theta}}/C_{h\delta_{e}})C_{M\delta_{e}}\}\lambda-C_{M\dot{\theta}}\end{vmatrix} = 0$$
(35)

$$\operatorname{RANK}\begin{bmatrix}\bar{\lambda}_{j}[\bar{\lambda}_{j}-\{C_{z\alpha}-(C_{h\alpha}/C_{h\delta_{e}})C_{z\delta_{e}}\} & -\{C_{z\dot{\theta}}-(C_{h\dot{\theta}}/C_{h\delta_{e}})C_{z\delta_{e}}\}\bar{\lambda}_{j}+\bar{U}_{p}[\bar{\lambda}_{j}-\{C_{z\alpha}-(C_{h\alpha}/C_{h\delta_{e}})C_{z\delta_{e}}\}] & -C_{z\delta_{e}}\\ -\bar{\lambda}_{j}\{C_{M\alpha}-(C_{h\alpha}/C_{h\delta_{e}})C_{M\delta_{e}}\} & \bar{\lambda}_{j}^{2}-\{C_{M\dot{\theta}}-(C_{h\dot{\theta}}/C_{h\delta_{e}})C_{M\delta_{e}}\}\bar{\lambda}_{j}-C_{M\theta}-\bar{U}_{0}\{C_{M\alpha}-(C_{h\alpha}/C_{h\delta_{e}})C_{M\delta_{e}}\}-C_{M\delta_{e}}\} & -2\\ =2$$
(36)

$$\operatorname{RANK}\begin{bmatrix} -\{C_{z\dot{\theta}}-(C_{h\dot{\theta}}/C_{h\delta_{e}})C_{z\delta_{e}}\}\bar{\lambda}_{j}+\bar{U}_{0}[\bar{\lambda}_{j}-\{C_{z\alpha}(C_{h\alpha}/C_{h\delta_{e}})C_{z\delta_{e}}\}] & -C_{z\delta_{e}}\\ \bar{\lambda}_{j}^{2}-\{C_{M\dot{\theta}}-(C_{h\dot{\theta}}/C_{h\delta_{e}})C_{M\delta_{e}}\}\bar{\lambda}_{j}-C_{M\theta}-\bar{U}_{0}\{C_{M\alpha}-(C_{h\alpha}/C_{h\delta_{e}})C_{M\delta_{e}}\}}-C_{M\delta_{e}}\\ 0 & \bar{\lambda}_{j}+b_{2} \end{bmatrix} = 2$$
(37)

以上の諸式のうち,はじめの3式は順に3つのモード をもつ前進運動の特性方程式,可制御条件式,および可 観測条件式である。一方,あとの3式は5つのモードを もつ上下運動に関するものである。

$$\bar{\lambda}_{1}=0, \ \bar{\lambda}_{5}=-\bar{b}_{2}$$

$$\bar{\lambda}_{2}, \bar{\lambda}_{3}, \bar{\lambda}_{4}: \begin{vmatrix} \lambda - \{C_{z\alpha} - (C_{h\alpha}/C_{h\delta_{e}})C_{z\delta_{e}}\} - \{C_{z\dot{\theta}} - (C_{h\dot{\theta}}/C_{h\delta_{e}})C_{z\delta_{e}}\} \lambda \\ - \{C_{M\alpha} - (C_{h\alpha}/C_{h\delta_{e}})C_{M\delta_{e}}\} \lambda^{2} - \{C_{M\dot{\theta}} - (C_{h\dot{\theta}}/C_{h\delta_{e}})C_{M\delta_{e}}\} \lambda - C_{M\dot{\theta}} \end{vmatrix} = 0 \ \mathcal{O}$$

$$(39)$$

のように番号によって区別する。ただし、 $\bar{\lambda}_2$, $\bar{\lambda}_3$,および $\bar{\lambda}_4$ は、(35)式の左上の対角成分をゼロとおいて得られ る方程式の根にもっとも近いものを $\bar{\lambda}_2$,右下の対角成分 に対しては $\bar{\lambda}_3$, $\bar{\lambda}_4(|\lambda_3| < |\lambda_4|)$ のように区別する。この ような区別は、(35)式の非対角成分は軸対称に近い船体 形状をもつ潜水船の場合あまり大きくなく、その固有値 はほぼ対角成分のみで決まるため行うものである。各固 有値の番号はそれぞれの運動モードに対応するものであ る。たとえば $\bar{\lambda}_2$ は Heaving 運動、 $\bar{\lambda}_3$, $\bar{\lambda}_4$ は Pitching 運動に対応する。詳細は前報を参照されたい。

(32)~(37) 式を用い, Table 1 の船体設計範囲にお いて可制御および可観測性について検討した結果を以下 に示す。

(1) 前進運動に関する可制御条件式(33)式は $C_{x\bar{P}x}$. $b_1 \neq 0$ であれば成立する。縦状態方程式の係数 $C_{x\bar{P}x}$ および b_1 は,第2章のはじめに述べた制御操作に関す る前提条件,ならびに現実的な推進機の時定数を想定す ればゼロでない。よって前進運動に関する制御システム の可制御性および可観測性は船体設計および固有値いか んにかかわらず保証される。

以後の検討のため、前進運動の固有値 λ_i (i=1,2,3)

(38)

と上下運動の固有値 $\bar{\lambda}_{j}$ (*j*=1, 2, …5) は記号"一"で区

別する。また λ_i および $\overline{\lambda_j}$ のそれぞれは,

 $\lambda_1 = 0, \quad \lambda_2 = C_{x\overline{u}}, \quad \lambda_3 = -b_1$

(2) Table 1 の船体設計範囲において,具体的な数 値を上下運動に関する可制御条件式((36)式)および可 観測条件式((37)式)に代入した結果,可制御性はつね に成立すること,ならびに可観測性については時定数 1.0 sec および代表長さ 0.36m(約47 kg に相当)のそ れぞれの近辺で不可観測になることが分った。不可観測 の2つのケースはいずれも無次元化時定数が約2.1の場 合に生ずる。

(3) 不可制御あるいは不可観測の場合,入出力関係 を表わす伝達関数において必ず極・ゼロ相殺が起る。上 下運動に生ずる不可観測のケースについて検討するた め、外乱項を除いた(21)および(23)式を用いて伝達 関数 $G_2(s)$ を導き,かつ検討のため分子式の表現を多 少変えると,

$$G_{2}(s) = \frac{-(b_{2}/C_{h\delta_{e}}) \Big[s^{2} - \{C_{k\delta} - (C_{h\delta}/C_{h\delta_{e}})C_{z\delta_{e}}\}s + \bar{U}_{0}[s - \{C_{z\alpha} - (C_{h\alpha}/C_{h\delta_{e}})C_{z\delta_{e}}\}] - C_{z\delta_{e}}\Big]}{s(s+b_{2})[s - \{(C_{z\alpha} - (C_{h\alpha}/C_{h\delta_{e}})C_{z\delta_{e}}\}s - C_{M\theta} + \bar{U}_{0}\{C_{M\alpha} - (C_{h\alpha}/C_{h\delta_{e}})C_{M\delta_{e}}\} - C_{M\delta_{e}}\Big]} - \{C_{z\delta} - (C_{h\delta}/C_{h\delta_{e}})C_{z\delta_{e}}\}s - C_{M\theta} - (C_{h\delta}/C_{h\delta_{e}})C_{h\delta_{e}}\}s - C_{M\theta} - (C_{h\delta}/C_{h\delta_{e}})C_{z\delta_{e}}\}s - C_{M\theta} - (C_{h\delta}/C_{h\delta_{e}})C_{z\delta_{e}}\}s - C_{M\theta} - (C_{h\delta}/C_{h\delta_{e}})C_{z\delta_{e}}\}s - C_{M\delta_{e}}\Big]$$

$$(40)$$

となる。上式のラプラス演算子 s のかわりに固有値 $\bar{\lambda}_{j}$ (j=1,2,...5) を代入すれば,分子に示す行列式と可観 測条件式((37) 式)の点線で囲まれた部分の小行列式は 同じになる。モード 5 の固有値 λ_{5} の場合,あきらかに $\bar{\lambda}_{5}+b_{2}=0$ であると同時に $\bar{\lambda}_{5}$ は (40) 式の極値である ため,(37) 式が成立しない場合,(40) 式で極・ゼロ相 殺が起こる。よって上下運動に関する 2 つの不可観測の ケースは伝達関数 $G_{2}(s)$ の極・ゼロ相殺によって具体 的に裏づけられることが分った。

(4) (3)の結果から、上下運動の2つの不可観測の ケースは操舵機の時定数 t_5 あるいは代表長さ $l(=P^{1/3})$ に対する伝達関数 $G_2(s)$ ((40)式)の極値およびゼロ値 との関係からあきらかにできる。Fig.7 および8はそれ ぞれの関係を表わす。ただし、 $\nu_1, \nu_2(\nu_1 < \nu_2)$ はゼロ値 を表わすものである。Fig.7 では、ゼロ値 ν_1 とモード 5の固有値 $\bar{\lambda}_5$ が約 1.0 sec の時定数で一致することを 示している。一方、0.36mの代表長さのとき、 $\nu_1 \ge \bar{\lambda}_5$ が一致することを Fig.8 は示している。またゼロ値 ν_2 はプラスの値をもつため、いずれの固有値とも一致しな いことは同図からもあきらかである。したがって(2) の結果は Fig.7~8 より具体的に示されている。



Fig. 7 Eigen-values and žero-values vs. time constant of steering apparatus. ([] points pole-zero cancellation).

水中調査用自動潜水船の運動と制御に関する基礎的研究



Fig. 8 Eigen-values and zero-values vs. representative length $(V^{1/8})$. (1 points pole-zero cancellation).

(5) モード5以外で上下運動が不可観測になるため には、(37) および(40) 式より、他のモードの固有値が モード5の固有値 $\bar{\lambda}_5$ に一致すると同時に、伝達関数の ゼロ値と一致する必要がある。Table 1 の設計範囲で $\bar{\lambda}_5$ に一致する5以外のモードの固有値をさがしたところ、 モード4の固有値 $\bar{\lambda}_4$ が $\bar{\lambda}_5$ と一致する Fig.7 および8 の2つのケースが見つけられた。しかし両図からもあき らかなように いずれのケースも $G_2(s)$ のゼロ値 ν_1 お よび ν_2 とは一致しない。したがって、モード5 に関す る2つのケースを除いて、上下運動は不可観測にならな いことが分った。

(6) 可制御条件式((36) 式)により,伝達関数 G_2 (s)((40) 式)が極・ゼロ相殺の状態で不可観測になっ ても不可制御にならない理由について検討できる。まず 点線で囲まれた部分の小行列式は可観測条件式((37) 式)における点線で囲のれた部分の小行列式と一致する ため,極・ゼロ相殺のケースでゼロとなる。また第3列 を除いた小行列式は特性方程式((35)式)の右辺を(λ + b_2)で割ったものに相当する。したがって不可制御とな るためには、少なくとも第3列を除いた小行列式がゼロ になることが必要であるため、特性方程式は $\bar{\lambda}_5(=-b_2)$ に等しい重根をもたなければならない。しかし、極・ゼ ロ相殺のケースで固有値が重複しないことは Fig.7 お よび8で示されている。よって極・ゼロ相殺が起っても 可制御性は保たれる。

(7) 前進運動に関する伝達関数 G₁(s) は,

 $G_1(s) = (C_{xPz} \cdot b_1)/\{s(s - C_{xu})(s + b_1)\}$ (41) となる。上下運動の場合と異なり、伝達関数はゼロ値を もたないため、(1)で得た結果同様、分子の定数項 $C_{xPz} \cdot b_1$ がゼロとならない限り、可制御性および可観測



Fig. 9 Eigen-values and zero-values vs. representative speed U₀(m/s). (↓ points pole-zero cancellation).

性は保たれる。

(8) 操舵機に関する無次元化時定数 $\tau_5 = t_5 U_0/l$ を 約2.1とするような2つの船体設計ケースで不可観測に なることを(2) で述べた。ただし、 τ_5 および t_5 はそ れぞれ操舵機に関する時定数の無次元量および有次元量 を表わす。 τ_5 を約 2.1 とするようなケースは基準モデ ル ($t_5=0.5 \, {\rm sec}, \ l=0.7 \, {\rm m}$) においても対流速度 U_0 が 約 2.9 m/sec の運動状態で起こる。Fig.9 はこのような 運動状態における可観測性を判定するための関係を示 す。すなわち基準モデルの対流速度 U_0 に対する固有値 $\bar{\lambda}_j$ およびゼロ値 $\bar{\nu}_j$ の関係を表わす。同図によって基準 モデルにおいても対流速度 U_0 が約 2.9 m/sec となるよ うな運動状態では極・ゼロ相殺が起り、モード5が不可 観測になることが示されている。したがって無次元化時 定数 τ_5 を約 2.1 とするすべての、すなわち3つのケー スではいずれも不可観測になることが分る。

以上より,はじめに述べたような定常航走状態を前提 とすれば,Table 2 が示すすべての船体設計範囲で可制 御性が成立することがあきらかになった。すなわち1つ の推進機と1対の水平舵を用いた制御操作によって,海 流変化に支配されるゼロ収束状態に潜水船の運動を収れ んするような制御が行えることが分った。一方位置偏差 のみを出力としても,操舵機の無次元化時定数が約 2.1 となるような3つのケースを除いてほとんどの場合可観 測性が保たれ,状態観測器を想定すれば最適制御則は実 現できることが分った。これらの成果によって最適制御 則の適用を前提に,縦運動制御性能と船体設計因子との 関係などを得るための基礎ができたといえる。

5 結

本報の結論を以下に示す。

(1) 簡単化を最優先して導いた縦状態方程式の意味 するところは他の静止座標系を用いた状態方程式と変ら ない。よって基本的な船体設計および制御設計に充分用 いることができる。

言

(2) 持続性のある海流変化の場合でも瞬時的な場合 同様,縦状態方程式のすべての変数をゼロ収束させる定 値制御を行えば,海中空間に設定された軌道上の計測ポ イントを一定速度で通過するような運動制御目標を達成 できる。

(3) 計測対象の時空間スケールは潜水船に比べ大き く,かつ特殊な海域を除いて海流変化もなだらかである と考えられるため,縦状態方程式に基づく状態フィード バックを前提に船体設計および制御設計を行っても充分 な成果が期待できる。

(4) 理想応答性を満たす潜水船の縦状態方程式は機 軸方向の前進運動を表わす部分と Heaving 運動および Pitching 運動を合成した上下運動を表わす部分との2 つに分割できる。よってほぼ理想応答性を満たす軸対称 の船体形状をもつ潜水船を対象とする場合,縦状態方程 式を2分割して構成した制御システムのもとで船体設計 および制御設計を行っても充分である。

(5) 軸対称潜水船の場合, 胴体の細長化, 尾翼幅な ど合計 15 種の船体設計因子の値を代入すれば, 縦状態 方程式のみならず横状態方程式のすべての係数は求まる ため, 潜水船の基本設計は 15 種の船体設計因子を軸に 充分行える。

(6) 対流速度 1.5m/sec(約3ノット) およびトリ ム角ゼロの代表的な定常航走状態において,それぞれの 位置偏差を出力とする前進および上下運動に関する制御 システムは,15種の船体設計因子を軸に幅広くとった 本報の船体設計範囲においてすべて可制御性をもつ。よ って1つの推進機と1対の水平舵の制御操作によって, 船体設計にかかわらず状態変数をすべてゼロ収束でき る。したがって(2)の仮定は成り立つ。

(7)(6)と同じ定常航走状態および船体設計範囲 において,前進運動に関する制御システムは,可制御性 同様,可観測性をもつ。一方,上下運動に関しては操舵 機の時定数を約1.0 sec および代表長さを約0.36m(質 量にして約47 kgに相当)の,いずれも操舵機の無次元 化時定数を2.1程度にする2つの船体設計のケースを除 いて可観測性をもつ。さらに対流速度の範囲を幅広くと った場合,基準モデルにおいて操舵機の無次元化時定数 を2.1程度にする対流速度が約2.9 m/sec のケースで不 可観測となる。 次報では本報の成果のもとに最適制御則を前提に導い た縦運動の制御性能と船体設計との関係などについて紹 介する。

終りに本研究は当初より全面的に梅谷陽二教授(東京 工業大学)の御指導によって進めたもので,梅谷教授に 対しここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 飯高,梅谷:水中調査用自動潜水船の運動と制御 に関する基礎的研究(第1報:運動方程式の誘導 と形状決定因子の検討,日本造船学会論文集,第 138 号,1975.
- 2) 飯高,梅谷:水中調査用自動潜水船の運動と制御 に関する基礎的研究(第2報:理想応答性向上条 件に関する理論的検討,日本造船学会論文集,第 139 号,1976.
- 3) 飯高,梅谷:水中調査用自動潜水船の運動と制御 に関する基礎的研究(第3報:運動特性と設計因 子との関係,日本造船学会論文集,第140号, 1977.
- SNAME : Nomencalture for Treating the Motion of a Submerged Body through a Fluid, SNAME Technical and Research Bulletin No. 1~5, 1956.
- Perkins, C. D., Hage, R. E.: Airplane Performance Stability and Control, John Willey & Sons, 1963, pp. 267~297.
- 6) 野本:海洋計測ロボット,日本造船学会誌,1980, pp.478~486.
- Greiner, L.: Under Water Missile Propulsion, Compass Publication, 1967, pp. 117~146.
- Hoerner, S. F.: Fluid-Dynamic Lift, Hoerner, 1975, pp. 117~146.
- Sears, R.I.: Wind-Tunnel Data on the Aerodynamic Characteristics of Airplane Control Surfaces, NACA WR L-663, 1943.
- Mandel, P.: Ship Maneuvaring and Control, Principles of Naval Architecture, Third Ed. SNAME, 1965, pp. 489~510.
- 11) 伊藤, 木村, 細江:線形制御系の設計理論, 1978, 計測自動制御学会, pp.16~58.

付

録

$$M_{1}(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}$$
$$M_{2}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}$$
$$M_{3}(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{fr} \ddagger (1))$$

NII-Electronic Library Service

水中調査用自動潜水船の運動と制御に関する基礎的研究

 $\bar{M}_x \dot{u} = C_x \bar{u} \bar{u} + C_x \dot{\bar{q}} \dot{\bar{q}} + C_{x\theta} \mathcal{L} \vartheta + \bar{P}_x + C_x \dot{\bar{w}}_{z0} \mathcal{L} \dot{\bar{W}}_{z0} + C_x \dot{\bar{w}}_{z0} \mathcal{L} \dot{\bar{W}}_{y0} + C_x \dot{\bar{w}}_{z0} \mathcal{L} \dot{\bar{W}}_{z0} + C_x \dot{$ $\bar{M}_z \dot{\alpha} = C_{z\alpha} \alpha + C_{z\bar{q}} \bar{q} + C_{z\bar{q}} \bar{q} + C_{z\theta} \mathcal{A}\theta + C_{z\delta_1} \delta_1 + C_{z\delta_2} \delta_2 + C_{z\bar{w}_{z0}} \mathcal{A}\bar{w}_{z0} + C_{z\bar{w}_{y0}} \mathcal{A}\bar{w}_{y0} + C_{z\bar{w}_{z0}} \mathcal{A}\bar{w}_{z0}$ $\bar{I}_{m}\dot{\bar{q}} = C_{m\dot{\bar{u}}}\dot{\bar{u}} + C_{m\bar{u}}\dot{\bar{u}} + C_{m\dot{\bar{u}}}\dot{\bar{a}} + C_{m\dot{\bar{a}}}\dot{\alpha} + C_{m\bar{q}}\dot{\bar{q}} + C_{m\theta}\mathcal{A}\theta + \bar{z}_{p}\bar{P}_{x} + C_{M\dot{\bar{w}}_{z0}}\mathcal{A}\dot{\bar{W}}_{x0} + C_{M\dot{\bar{w}}_{y0}}\mathcal{A}\dot{\bar{W}}_{y0} + C_{M\dot{\bar{w}}_{z0}}\mathcal{A}\dot{\bar{W}}_{z0}$ $\bar{M}_{y}\dot{\beta} = C_{y\bar{\beta}}\beta + C_{y\bar{p}}\dot{\bar{p}} + C_{y\bar{p}}\dot{\bar{p}} + C_{y\bar{p}}\phi + C_{y\bar{\tau}}\dot{\bar{r}} + C_{y\bar{\tau}}\dot{\bar{r}} + C_{y\delta_{3}}\delta_{3} + C_{y\delta_{1}}\delta_{4} + C_{y\bar{w}_{x0}}\mathcal{A}\dot{W}_{x0} + C_{y\bar{w}_{y0}}\mathcal{A}\dot{W}_{y0}$ $\bar{I}_{l}\bar{P} = C_{l\dot{s}}\dot{\beta} + C_{l\beta}\beta + C_{l\bar{p}}\bar{p} + C_{l\phi}\phi + C_{l\bar{r}}\bar{r} + C_{l\bar{s}}\bar{r} + C_{l\bar{s}}\delta_{3} + C_{l\bar{s}}\delta_{4} + C_{l\bar{w}_{x0}}\Delta\bar{W}_{x0} + C_{l\bar{w}_{y0}}\Delta\bar{W}_{y0}$ $\bar{I}_{n}\mathbf{r} = C_{n\dot{p}}\dot{\beta} + C_{n\dot{p}}\beta + C_{n\dot{p}}\bar{p} + C_{n\dot{p}}\bar{p} + C_{n\phi}\phi + C_{n\dot{\tau}}\bar{r} + C_{n\delta_3}\delta_3 + C_{n\delta_4}\delta_4 + C_{n\dot{w}_{x0}}\mathcal{A}\dot{W}_{x0} + C_{n\dot{w}_{y0}}\mathcal{A}\dot{W}_{y0}$ (付式(2)) $\overline{M}_x = \overline{m} + \overline{m}_x, \ C_x \overline{u} = 2C_R, \ C_x \overline{q} = C_m \overline{u} = -(\overline{m} \overline{z}_G + \overline{m}_x \overline{z}_{vx}), \ C_{x\theta} = (\overline{B} - \overline{G}) \cos\theta_0, \ \overline{M}_z = \overline{m} + \overline{m}_z,$ $C_{z\alpha} = -\bar{m}_{zb}, \quad C_{z\bar{q}} = C_{m\dot{\alpha}} = \bar{m}\bar{x}_G + \bar{m}_z\bar{x}_{vz}, \quad C_{z\bar{q}} = \bar{m} + \bar{m}_z + \bar{m}_{zb}\bar{x}_b, \quad C_{z\theta} = (\bar{B} - \bar{G})\sin\theta_0,$ $\bar{I}_{m} = \bar{I}_{y} + \bar{J}_{y} + \bar{m}\bar{x}_{G}^{2} + \bar{m}_{z}\bar{x}_{vz}^{2} + \bar{m}\bar{z}_{G}^{2} + \bar{m}_{x}\bar{z}_{vx}^{2}, \quad C_{m\bar{u}} = 2\bar{z}_{R}C_{R}, \quad C_{ma} = \bar{m}_{z} - \bar{m}_{x} + \bar{m}_{zb}\bar{x}_{b},$ $C_{m\bar{q}} = -(\bar{m}\bar{x}_{G} + \bar{m}_{z}\bar{x}_{vz} + \bar{m}_{zb}\bar{x}_{b}^{2}), \ C_{m\theta} = \{-(\bar{x}_{B}\bar{B} - \bar{x}_{G}\bar{G})\sin\theta_{0} + (\bar{z}_{B}\bar{B} - \bar{Z}_{G}\bar{B})\cos\theta_{0}\}, \ \bar{M}_{y} = \bar{m} + \bar{m}_{y}, \ \bar{M}_{y} = \bar{M}_{y} = \bar{M}_{y}, \ \bar{M}_{y} = \bar{M}_{y} =$ $C_{v\beta} = -\bar{m}_{vb}, \ C_{v\bar{p}} = C_{l\bar{p}} = \bar{m}\bar{z}_{G} + \bar{m}_{y}\bar{z}_{vy}, \ C_{v\bar{p}} = \bar{m}_{vb}\bar{z}_{vyb}, \ C_{v\bar{r}} = C_{n\bar{p}} = -(\bar{m}\bar{x}_{G} + \bar{m}_{y}\bar{x}_{vy}),$ $C_{v\bar{r}} = -(\bar{m} + \bar{m}_x + \bar{m}_{yb}\bar{x}_b), \ \bar{I}_l = \bar{I}_x + \bar{J}_x + \bar{m}\bar{z}_G^2 + \bar{m}_y\bar{z}_{vy}^2, \ C_{l\beta} = \bar{m}_{yb}\bar{z}_{vyb}, \ C_{l\bar{p}} = -(\bar{J}_{xb} + \bar{m}_{yb}\bar{z}_{vyb}^2),$ $C_{l\bar{\tau}} = C_{n\bar{p}} = \bar{I}_{xz} + \bar{J}_{xz} + \bar{m}\bar{x}_{G}\bar{z}_{G} + \bar{m}_{y}\bar{x}_{vy}\bar{z}_{vy} \equiv \bar{I}_{in}, \quad C_{l\bar{\tau}} = (\bar{m}\bar{z}_{G} + \bar{m}_{x}\bar{z}_{vx} + \bar{m}_{yb} + \bar{z}_{vyb}\bar{x}_{b}), \quad C_{l\phi} = (\bar{z}_{B}\bar{B} - \bar{z}_{G}\bar{G})\cos\theta_{0r}$ $\bar{I}_{n} = (\bar{I}_{z} + \bar{J}_{z} + \bar{m}\bar{x}_{G}^{2} + \bar{m}_{y}\bar{x}_{vy}^{2}), \quad C_{n\beta} = -(\bar{m}_{y} - \bar{m}_{x} + \bar{m}_{yb}\bar{x}_{b}), \quad C_{n\overline{p}} = (\bar{m}_{y}\bar{z}_{vy} - \bar{m}_{x}\bar{z}_{vx} + \bar{m}_{yb}\bar{z}_{vyb}\bar{x}_{b}),$ $C_{n\bar{r}} = -(\bar{m}\bar{x}_{G} + \bar{m}_{y}\bar{x}_{vy} + \bar{m}_{yb}\bar{x}_{b}^{2}), \quad C_{n\phi} = -(\bar{x}_{B}\bar{B} - \bar{x}_{G}\bar{G})\cos\theta_{0}$ $C_{x\bar{w}_{z0}} = -\bar{m}\cos\theta_0\cos\psi_0, \quad C_{x\bar{w}_{y0}} = -\bar{m}\cos\theta_0\sin\psi_0, \quad C_{x\bar{w}_{z0}} = \bar{m}\sin\theta_0, \quad C_{z\bar{w}_{z0}} = -\bar{m}\sin\theta_0\cos\psi_0,$ $C_{z\bar{w}_{y0}} = -\bar{m}\sin\theta_0\sin\psi_0, \quad C_{z\bar{w}_{z0}} = -\bar{m}\cos\theta_0, \quad C_{m\bar{w}_{z0}} = (\bar{m}\bar{x}_G\sin\theta_0 - \bar{m}\bar{z}_G\cos\theta_0)\cos\psi_0,$ $C_{m\bar{w}_{y_0}} = (\bar{m}\bar{x}_G\sin\theta_0 - \bar{m}\bar{z}_G\cos\theta_0)\sin\psi_0, \quad C_{m\bar{w}_{z_0}} = (\bar{m}\bar{x}_G\cos\theta_0 + \bar{m}\bar{z}_G\sin\theta_0), \quad C_{y\bar{w}_{x_0}} = \bar{m}\sin\psi_0,$ $C_{y\bar{w}_{y0}} = -\bar{m}\cos\psi_{0}, \ C_{l\bar{w}_{z0}} = -\bar{m}\bar{z}_{G}\sin\psi_{0}, \ C_{l\bar{w}_{y0}} = \bar{m}\bar{z}_{G}\cos\psi_{0}, \ C_{n\bar{w}_{z0}} = \bar{m}\bar{x}_{G}\sin\psi_{0}, \ C_{n\bar{w}_{y0}} = -\bar{m}\bar{x}_{G}\cos\psi_{0}$

(付式(3))

ただし、 (I_x, I_y, I_z) : x, y, z 軸回りの慣性モーメント、 $(x_G, 0, z_G)$: 重心の位置座標、 $(x_B, 0, z_B)$: 浮心の位置座標、 (m_x, m_y, m_z) : x, y, z 軸方向の付加質量, (J_x, J_y, J_z) : x, y, z 軸回りの付加質量中心に関する付

加慣性 モーメント, C_R :抵抗係数, z_R :抵抗の作用点 の z 座標, P_x :推進機力, z_P :推進機力の作用点の z 座 標, (p,q,r): x, y, z 軸回りの角速度, (W_{x0}, W_{y0}, W_{z0}) :基準座標系 (Fig.1 参照) で表わした海流速度である。