(昭和 50 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 1 報：運動方程式の誘導と形状決定因子の検討)

正員 飯 高 弘* 梅 谷 陽 二**

Fundamental Research of the Dynamics and the Control
of an Unmanned Submersible for Underwater Exploration
—Part 1: Derivation of the Equations of the Motion
and Consideration of the Shape Factors—

by Hiroshi Iitaka, Member Yoji Umetani

Summary

This paper deals with the most basic and fundamental problems, the motion analysis of an unmanned submersible for underwater exploration. Some shape parameters derived from the analytical results for designing the vessel to be automatically controlled are also considered.

The analysis is based upon the slender body theory for obtaining the linearized characteristics of the motion. The shape parameters related to the motion and control of the vessel are extracted, discussing optimum relationship in order to design the control system to be stable and controllable. Finally, some results of experiment are shown to verify the theoretical characteristics of the parameters to be valid.

1 緒 言

海洋開発にとって、水中調査用無人自動潜水船の開発の必要性は多くの識者の指摘するところである¹⁾。

筆者らは、流れ場である海洋空間において調査および計測プログラムにしたがって 3 次元運動を行う無人自動潜水船（以後、単に潜水船と呼称）を対象として、その開発の基礎となる運動と制御に関する基礎的問題を取扱う。このような潜水船は、有人のそれと較べて、乗員の安全性を考える必要のない反面、大幅な調査観測能力を実現するには、基本設計のときから自動制御系との兼ね合いを充分考慮に入れた運動特性^{***}に関する詳細な検討が要求される。

本報では、その第 1 段階として、潜水船の運動特性と形状などの設計パラメーターの関係を把握するために、つぎの順に行った研究の結果を記述する。

(1) 潜水船は海洋の調査および計測を行いながら運動するので、その航走速度がしばしば海洋流速と同じもしくはそれ以下になることは当然予想されることである。この点、従来提出されてきた潜水船の運動方程式^{2~4)}は、本報で対象とする潜水船の運動制御を検討する場合、充分なものといえない。したがって、まず海洋流速を考慮した潜水船の制御目的に充分と考えられる運動方程式を導く。ついで海洋流速が潜水船におよぼす影響について検討を行う。

(2) 潜水船の運動制御性能を向上させるためには、形状などの設計パラメーターと運動特性すなわち運動方程

* 電子技術総合研究所

** 東京工業大学

*** 任意の入力に対する潜水船の応答性と定義する。すなわち、安定性、操縦性などを含む広義の運動の性質を意味している。

式の係数（以後、単に運動係数と呼称）の間の量的な関係を把握することが望ましい⁵⁾。そのための基礎として、船体形状が細長体という仮定のもとに理論解析を行ない、運動係数を形状などに関連する設計上重要な少数のパラメータによって表現する。

(3) 潜水船の運動特性にとって、とくに形状関連の設計パラメータが重要である。したがって、運動係数を表現するパラメータのうち、形状関連のものの幾何学的意味を分析し、潜水船の設計検討の便宜性を充分考慮に入れた具体的な形状決定因子を提起する。すなわち、潜水船の設計は多くの運動係数を同時に取扱わなければならない関係上、このような形状決定因子は、設計者に定性的かつ具体的な検討において有力な糸口を与えられ考えられるからである。つぎに形状決定因子を使って運動特性に重大な影響をおよぼす 2, 3 の運動係数およびその組み合わせについて検討する。

(4) 回流水槽（三井造船千葉研究所）において行なった基本的な潜水船モデルに関する静特性実験（抵抗試験および 6 分力試験）の結果をもとに 2 種類の理論値に関する実験的検証を行なう。

記号と座標系の説明

(x, y, z) : 運動座標系	(m_x, m_y, m_z) : x, y, z 軸方向の付加質量
(x_0, y_0, z_0) : 静止座標系	(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
(ϕ, θ, ψ) : オイラー角	C_R : 抵抗係数
t : 時間	z_R : 抵抗作用点の z 座標
m : 質量	P_x : 推進機力
V : 体積	z_R : 推進機力作用点の z 座標
G : 重量	(p, q, r) : x, y, z 軸回りの角速度
B : 浮力	(X, Y, Z) : x, y, z 軸方向に働く力
(I_x, I_y, I_z) : x, y, z 軸回りの重心に関する慣性モーメント	(L, M, N) : x, y, z 軸回りに働くモーメント
(U, V, W) : 海流との相対速度	(W_x, W_y, W_z) : 海洋流速
$(U_0, 0, w_0)$: 海流との定常相対速度	$\tau (\equiv t U_0 / l)$: 無次元化時間
(u, v, w) : 海流との微小相対速度	" $\cdot$ " : $d/d\tau$
$\alpha (\equiv w/U)$: 迎角	" $-$ " : 無次元化したことを表示
$\beta (\equiv v/U)$: 横滑り角	" Δ " : 微小変化量を表示
$(x_G, 0, z_G)$: 重心の位置座標	$C_{x\bar{u}} \equiv \partial(\bar{X} - \bar{X}_I) / \partial \bar{u}$: 定常状態における導関数, X_I は慣性力の x 軸方向の成分, 他も同様
$(x_B, 0, z_B)$: 浮心の位置座標	

なお、無次元化は、 U_0 を代表速度、 $l (\equiv V^{1/3})$ を代表長さ、 ρ を流体の密度として、SNAME の記号表⁶⁾にしたがった。

座標系として、静止座標系と潜水船とともに移動する運動座標系をとる。両座標系の方位関係はオイラー角によって表わす。運動座標系の構成は、船体の対称面内に x 軸（船体軸方向）、 z 軸（ x 軸に垂直）、対称面に垂直に y 軸、原点は潜水船の質量 m と y 軸方向の付加質量 m_y との合成中心にとる（図 1）。

2 微小運動方程式の誘導

2.1 基礎運動方程式の提起

潜水船は流れ場である海洋空間の中を運動することから、海洋流速を考慮に入れた新しい運動方程式が必要になる。このような観点から、(1) 式に示す運動方程式を導いた。これは図 1 に示す運動座標系について表わされたものである。

$$\begin{aligned}
 m \{ dU/dt + z_G dq/dt + dW_x/dt - (V + W_y)r + (W + W_z)q - x_G(q^2 + r^2) + z_G pr \} &= X \\
 m \{ dV/dt + x_G dr/dt - z_G dp/dt + dW_y/dt - (W + W_z)p + (U + W_x)r + x_G pq + z_G qr \} &= Y \\
 m \{ dW/dt - x_G dq/dt + dW_z/dt - (U + W_x)q + (V + W_y)p - z_G(p^2 + q^2) + x_G pr \} &= Z \\
 (I_x + m z_G^2) dp/dt - (I_{xz} + m x_G z_G) dr/dt - m z_G (dV/dt + dW_y/dt) - (I_y + m z_G^2 - I_z) \\
 \times qr - (I_{xz} + m x_G z_G) pq - m z_G \{ (U + W_z)r - (W + W_z)p \} &= L
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (I_y + mx_G^2 + mz_G^2) dq/dt + m \{ z_G (dU/dt + dW_x/dt) - x_G (dW/dt + dW_z/dt) \} - (I_z + mx_G^2 - I_x - mz_G^2) \\
& \times pr + (I_{xz} + \bar{m} x_G z_G) (p^2 - r^2) - m [x_G \{ (V + W_y) p - (U + W_x) q \} + z_G \{ (V + W_y) r - (W + W_z) q \}] = M \\
& (I_z + mx_G^2) dr/dt - (I_{xz} + mx_G z_G) dp/dt + mx_G (dV/dt + dW_y/dt) - (I_x - I_y - mx_G^2) pq \\
& + (I_{xz} + mx_G z_G) qr - mx_G \{ (W + W_z) P - (U + W_x) r \} = N
\end{aligned} \quad (1)$$

この最初の3式は x, y, z 軸方向の並進成分を表わし、あとの3式は x, y, z 軸回りの回転成分を表わす。慣性項は、海洋流速を考慮に入れた慣性エネルギー $T_1 \left(= \frac{1}{2} m \{ (U + W_x + z_G q)^2 + (V + W_y + x_G p - z_G r)^2 + (W + W_z - x_G q)^2 \} + \frac{1}{2} (I_x p^2 + I_y q^2 + I_z r^2 - 2 I_{xz} pr) \right)$ を文献7) から引用した運動方程式に代入した結果、得られたものである。

2.2 微小運動方程式の導出

基礎運動方程式 ((1) 式) をある定常航走状態まわりで線形化することによって得られる微小運動方程式は、潜水船の制御系の設計のために必要である。ただし、この微小運動方程式は変数が微小変化量によって表わされているので、これとは別に定常航走状態を表わす定常特性式を導いておかねばならない。

まず導くにあたってつぎの仮定をおく。

(1) 基本形状は耐圧性および流体抵抗を考慮して、軸対称の外殻をもつ Tear Drop 型とし⁸⁾、浮心および重心は xz 平面内にあるとする。

(2) 運動制御の方式は十字形配列の尾翼についている4つの舵と1軸 (x 軸) 方向の推進機とする。ただし、水平舵 (舵角を (δ_1, δ_2) で表示) は縦運動の制御に、垂直舵 (舵角を (δ_3, δ_4) で表示) は横運動の制御に用いるものとする。

(3) 定常航走状態を、 $U = U_0, v = 0, w = w_0, p = q = r = 0, \phi = 0, \theta = \theta_0, \psi = \psi_0, W_x = W_x', W_y = W_y', W_z = W_z' (W_x', W_y', W_z' \text{ は定常海洋流速を表わす})$ と定義し、そのまわりの微小変化量として、 $u, v, w, p, q, r, \phi, \Delta\theta, \Delta\psi, \Delta W_x, \Delta W_y, \Delta W_z$ とする。ただし、 w_0 および微小変化量を1次の微小量と考え、2次以上の微小量は無視する。図1に主な記号を示した。

つぎに、微小運動方程式を導くプロセスを示す。

(1) 基礎運動方程式 ((1) 式) の外力項 (X, Y, Z, L, M, N) を定常航走状態のまわりでテーラー展開する。

(2) 定常特性式を差し引いて、目的とする微小運動方程式を導く。ただし、設計および実験的検証の観点から、微小運動方程式と定常特性式は無次元化して表わす。

上記の仮定およびプロセスに沿って、微小運動方程式 ((2) 式) および定常特性式 ((3) 式) を得た。

$$\begin{aligned}
\bar{M}_x \ddot{u} &= C_{xu} \ddot{u} + C_{x\dot{u}} \dot{u} + C_{x\ddot{u}} \ddot{u} + C_{x\theta} \Delta\theta + C_{x\dot{\theta}} \dot{\theta} + C_{x\ddot{\theta}} \ddot{\theta} + C_{x\dot{p}} \dot{p} + C_{x\ddot{p}} \ddot{p} \\
\bar{M}_x \dot{\alpha} &= C_{x\alpha} \alpha + C_{x\dot{\alpha}} \dot{\alpha} + C_{x\ddot{\alpha}} \ddot{\alpha} + C_{x\theta} \Delta\theta + C_{x\dot{\theta}} \dot{\theta} + C_{x\ddot{\theta}} \ddot{\theta} + C_{x\delta_1} \delta_1 + C_{x\delta_2} \delta_2 + C_{x\dot{\delta}_1} \dot{\delta}_1 + C_{x\dot{\delta}_2} \dot{\delta}_2 \\
\bar{I}_m \ddot{q} &= C_{m\ddot{u}} \ddot{u} + C_{m\dot{u}} \dot{u} + C_{m\ddot{\alpha}} \ddot{\alpha} + C_{m\dot{\alpha}} \dot{\alpha} + C_{m\ddot{q}} \ddot{q} + C_{m\dot{q}} \dot{q} + C_{m\ddot{\theta}} \ddot{\theta} + C_{m\dot{\theta}} \dot{\theta} + C_{m\ddot{p}} \ddot{p} + C_{m\dot{p}} \dot{p} \\
&+ C_{m\ddot{r}} \ddot{r} + C_{m\dot{r}} \dot{r} + C_{m\ddot{\delta}_1} \ddot{\delta}_1 + C_{m\dot{\delta}_1} \dot{\delta}_1 + C_{m\ddot{\delta}_2} \ddot{\delta}_2 + C_{m\dot{\delta}_2} \dot{\delta}_2 + C_{m\ddot{\delta}_3} \ddot{\delta}_3 + C_{m\dot{\delta}_3} \dot{\delta}_3 + C_{m\ddot{\delta}_4} \ddot{\delta}_4 + C_{m\dot{\delta}_4} \dot{\delta}_4 \\
\bar{M}_y \ddot{\beta} &= C_{y\beta} \ddot{\beta} + C_{y\dot{\beta}} \dot{\beta} + C_{y\ddot{\beta}} \ddot{\beta} + C_{y\phi} \phi + C_{y\dot{\phi}} \dot{\phi} + C_{y\ddot{\phi}} \ddot{\phi} + C_{y\dot{\theta}} \dot{\theta} + C_{y\ddot{\theta}} \ddot{\theta} + C_{y\delta_3} \delta_3 + C_{y\delta_4} \delta_4 + C_{y\dot{\delta}_3} \dot{\delta}_3 + C_{y\dot{\delta}_4} \dot{\delta}_4 \\
\bar{I}_l \ddot{\dot{p}} &= C_{l\dot{p}} \dot{p} + C_{l\ddot{p}} \ddot{p} + C_{l\dot{\phi}} \dot{\phi} + C_{l\ddot{\phi}} \ddot{\phi} + C_{l\dot{\theta}} \dot{\theta} + C_{l\ddot{\theta}} \ddot{\theta} + C_{l\dot{\delta}_3} \dot{\delta}_3 + C_{l\dot{\delta}_4} \dot{\delta}_4 + C_{l\dot{\delta}_1} \dot{\delta}_1 + C_{l\dot{\delta}_2} \dot{\delta}_2 \\
\bar{I}_n \ddot{r} &= C_{n\dot{r}} \dot{r} + C_{n\ddot{r}} \ddot{r} + C_{n\dot{\phi}} \dot{\phi} + C_{n\ddot{\phi}} \ddot{\phi} + C_{n\dot{\theta}} \dot{\theta} + C_{n\ddot{\theta}} \ddot{\theta} + C_{n\dot{\delta}_3} \dot{\delta}_3 + C_{n\dot{\delta}_4} \dot{\delta}_4 + C_{n\dot{\delta}_1} \dot{\delta}_1 + C_{n\dot{\delta}_2} \dot{\delta}_2
\end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
C_R + (\bar{B} - \bar{G}) \sin \theta_0 + \bar{P}_{x0} &= 0, \quad C_{x\alpha} \alpha_0 + C_{x\delta_1} \delta_{10} + C_{x\delta_2} \delta_{20} - (\bar{B} - \bar{G}) \cos \theta_0 = 0 \\
C_{m\alpha} \alpha_0 + \bar{z}_R C_R + \bar{z}_P P_{x0} + C_{m\delta_1} \delta_{10} + C_{m\delta_2} \delta_{20} + \{ (\bar{x}_B \bar{B} - \bar{x}_G \bar{G}) \cos \theta_0 + (\bar{z}_B \bar{B} - \bar{z}_G \bar{G}) \sin \theta_0 \} &= 0 \\
C_{y\delta_3} \delta_{30} + C_{y\delta_4} \delta_{40} &= 0, \quad C_{l\delta_3} \delta_{30} + C_{l\delta_4} \delta_{40} + \bar{P}_{l0} = 0, \quad C_{n\delta_3} \delta_{30} + C_{n\delta_4} \delta_{40} = 0
\end{aligned} \quad (3)$$

ただし、(2), (3) 式の係数のうち、いくつかは煩雑さをさけるためにつぎのような記述をした。

$$\begin{aligned}
C_{x\dot{q}} &= -\bar{m} \bar{W}_z', \quad C_{x\dot{\theta}} = (\bar{B} - \bar{G}) \cos \theta_0, \quad C_{x\dot{r}} = \bar{m} \bar{W}_y', \quad C_{x\dot{\delta}_1} = C_{x\dot{\delta}_2} = C_{y\dot{\delta}_1} = C_{y\dot{\delta}_2} = -\bar{m}, \\
C_{x\dot{\delta}_3} &= (\bar{B} - \bar{G}) \sin \theta_0, \quad C_{x\dot{\delta}_4} = -\bar{m} \bar{W}_y', \quad C_{m\dot{\theta}} = \{ -(\bar{x}_B \bar{B} - \bar{x}_G \bar{G}) \sin \theta_0 + (\bar{z}_B \bar{B} - \bar{z}_G \bar{G}) \cos \theta_0 \}, \\
C_{m\dot{p}} &= \bar{m} \bar{x}_G \bar{W}_y', \quad C_{m\dot{r}} = \bar{m} \bar{z}_G \bar{W}_y', \quad C_{m\dot{\delta}_1} = -\bar{m} \bar{z}_G, \quad C_{m\dot{\delta}_2} = \bar{m} \bar{x}_G, \quad C_{y\dot{\phi}} = -(\bar{B} - \bar{G}) \cos \theta_0, \\
C_{l\dot{\phi}} &= (\bar{z}_B \bar{B} - \bar{z}_G \bar{G}) \cos \theta_0, \quad C_{l\dot{\delta}_1} = \bar{m} \bar{z}_G, \quad C_{n\dot{\phi}} = -(\bar{x}_B \bar{B} - \bar{x}_G \bar{G}) \cos \theta_0, \quad C_{n\dot{\delta}_1} = -\bar{m} \bar{x}_G
\end{aligned} \quad (4)$$

2.3 微小運動方程式の吟味

前節において、制御目的に充分と考えられる微小運動方程式を導いたが、これは海洋流速を考慮しない従来の

運動方程式と違って、つぎのような内容が加わっている。

(1) 潜水船は、海洋流速の時間的変化 ($\Delta \dot{W}_x, \Delta \dot{W}_y, \Delta \dot{W}_z$) によって力およびモーメントを受ける。

(2) 角速度 (p, q, r) に関するすべての運動係数は、海洋の定常流速の1次関数である ((4) 式および後述の(7) 式参照)。

(3) 微小運動方程式 ((2) 式) のうち、上の3式が縦運動を下の3式が横運動を表わすが、両者の運動は海洋の定常流速がゼロの場合は分離できるが、ゼロでない場合は角速度 (p, q, r) を通して干渉する。

以上のことは、潜水船が静止座標系に対して速度および加速度をもつ流れ場 (海洋空間) の中を運動することにより起因している。また、($\Delta W_x, \Delta W_y, \Delta W_z$) が微小運動方程式の中に現れないのは、両座標系の相対速度は潜水船に働く力およびモーメントに影響しないことによる。

3 船体設計パラメータによる運動係数の表現

潜水船の運動特性は運動係数によって左右される。したがって制御目的に合わせて潜水船を設計するためには、まず運動係数を形状などの船体設計パラメータによって表現することが必要になる。ただし、その表現は数多くの運動係数を取り扱う観点から、できるだけ簡単でかつ運動係数相互の関係が明らかになるようなものが望ましい。

一般に潜水船の運動係数を支配するパラメータを羅列すると、① 形状、② 質量、③ 質量分布、④ 体積、⑤ 推力装置である。そのうち、潜水船の流体力特性を決定する形状は、他に較べて設計の自由度も大きく、かつ全体への影響も大きいことから、最も重要なものと考えられるが運動係数と簡単かつ具体的に結びつけにくい傾向にある。したがって、筆者らは、次節に示す仮定のもとで流体力および流体モーメントを導き、少数の形状関連のパラメータを使って、流体力および流体モーメントに関する運動係数を表現する。他の設計パラメータに関しては、潜水船の大きさおよび形状が決まれば、技術的に見当がつくものなので、以下では、実質的に既知なものとして取り扱っている。

3.1 潜水船に働く流体力および流体モーメント

まず潜水船に働く流体力および流体モーメントを形状関連のパラメータによって表現する。ただし、それらは2.1 節の仮定 (1) を考慮して、(1) 船体形状が細長体であるとみなして導かれるもの、(2) これに3次元補正として x 軸方向の付加質量によるもの、そして、(3) 流体抵抗 (粘性抵抗) によるものの和によって表わせるものとする。

以下に流体力および流体モーメントを導くプロセスを示す。

潜水船の yz 断面における流体ポテンシャル ϕ を、細長体理論⁹⁾ によって、

$$\phi = (v+rx)\phi_1 + (w-qx)\phi_2 + p\phi_3$$

とおくと、その断面の流体エネルギー T_2 は

$$T_2 = -\frac{1}{2} \rho \oint \phi \frac{\partial \phi}{\partial n} ds = -\frac{1}{2} \rho \left\{ (v+rx)^2 \oint \phi_1 \frac{\partial \phi_1}{\partial n} ds + (w-qx)^2 \oint \phi_2 \frac{\partial \phi_2}{\partial n} ds \right. \\ \left. + p^2 \oint \phi_3 \frac{\partial \phi_3}{\partial n} ds + 2p(v+rx) \oint \phi_1 \frac{\partial \phi_1}{\partial n} ds \right\}$$

によって表わされる。 $\oint ds$ は断面の周囲に沿った線積分を、 n は断面に垂直にたてたベクトルの大きさを表わす。

T_2 を文献7) の運動方程式に代入する。ただし、潜水船は海流と相対速度 U をもつので $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} - U \frac{\partial}{\partial x}$ なる関係式を用いる。よって、断面に加わる力およびモーメントが求まるので、それらを潜水船の尾翼最後部 ($x=x_b$) から頭部 ($x=x_n$) まで積分することによって潜水船に働く力およびモーメントが求まる。ただし、本来、積分は尾部から行なわれなければならないが、潜水船の場合、尾翼より後方に突き出している胴体尾部が小さいので、無視できるものと考えている¹⁰⁾。

ついで3次元補正による流体力および流体モーメントを導くプロセスを示す。これは潜水船の細長比が有限なことから考えられるもので、筆者らは x 軸方向の付加質量 m_x を追加し、それによって生ずる流体力および流体モーメントを加えることにする。つまり、 m_x によって生ずる流体エネルギー $T_3 \left(= \frac{1}{2} m_x (U + q z_{vb})^2 \right)$ を慣性

エネルギー T_1 の場合と同様に、文献7) の運動方程式に代入することである。ただし、 z_{vx} は x 軸方向の付加質量 m_x の中心の z 座標を表わす。

粘性抵抗による流体力および流体モーメントは、2.2 節で述べた仮定すなわち迎角および横滑り角が小さいという仮定から、 x 軸方向の抵抗と y 軸まわりの抵抗によって生ずるモーメントとする。これらは理論的に得ることが困難なことから、実験的に求められる(図7参照)。

以上の流体力および流体モーメントをまとめた結果 $(\bar{X}', \bar{Y}', \bar{Z}', \bar{L}', \bar{M}', \bar{N}')$ を次式に示す。ただし、2次以上の微小量は、2.2 節の仮定にしたがって無視している。

$$\begin{aligned}
 \bar{X}' &= -\bar{m}_x \ddot{u} - \bar{m}_x \ddot{z}_{vx} \ddot{q} + 2C_R \ddot{u} \\
 \bar{Y}' &= -\bar{m}_y \ddot{\beta} - \bar{m}_{yb} \ddot{\beta} + \bar{m}_y \ddot{z}_{vy} \ddot{p} + \bar{m}_{yb} \ddot{z}_{vyb} \ddot{p} - \bar{m}_y \ddot{x}_{vy} \ddot{r} - (\bar{m}_x + \bar{m}_{yb} \ddot{x}_b) \ddot{r} \\
 \bar{Z}' &= -\bar{m}_z \ddot{\alpha} - \bar{m}_{zb} \ddot{\alpha} + \bar{m}_z \ddot{x}_{vz} \ddot{q} + (\bar{m}_x + \bar{m}_{zb} \ddot{x}_b) \ddot{q} \\
 \bar{L}' &= \bar{m}_y \ddot{z}_{vy} \ddot{\beta} + \bar{m}_{yb} \ddot{z}_{vyb} \ddot{\beta} - (\bar{J}_x + \bar{m}_y \ddot{z}_{vy}^2) \ddot{p} - (\bar{J}_{xb} + \bar{m}_{yb} \ddot{z}_{vyb}^2) \ddot{p} \\
 &\quad + (\bar{J}_{xz} + \bar{m}_y \ddot{x}_{vy} \ddot{z}_{vy}) \ddot{r} + (\bar{m}_x \ddot{z}_{vx} + \bar{m}_{yb} \ddot{z}_{vyb} \ddot{x}_b) \ddot{r} \\
 \bar{M}' &= -\bar{m}_x \ddot{z}_{vx} \ddot{u} + \bar{m}_z \ddot{x}_{vz} \ddot{\alpha} + (\bar{m}_z - \bar{m}_x + \bar{m}_{zb} \ddot{x}_b) \ddot{\alpha} - (\bar{J}_y + \bar{m}_z \ddot{x}_{vz}^2 + \bar{m}_x \ddot{z}_{vx}^2) \ddot{q} \\
 &\quad - (\bar{m}_z \ddot{x}_{vz} + \bar{m}_{zb} \ddot{x}_b^2) \ddot{q} + 2\bar{z}_R C_R \ddot{u} \\
 \bar{N}' &= -\bar{m}_y \ddot{x}_{vy} \ddot{\beta} - (\bar{m}_y - \bar{m}_x + \bar{m}_{yb} \ddot{x}_b) \ddot{\beta} + (\bar{J}_{xz} + \bar{m}_y \ddot{x}_{vy} \ddot{z}_{vy}) \ddot{p} \\
 &\quad + (\bar{m}_y \ddot{z}_{vy} - \bar{m}_x \ddot{z}_{vx} + \bar{m}_{yb} \ddot{z}_{vyb} \ddot{x}_b) \ddot{p} - (\bar{J}_z + \bar{m}_y \ddot{x}_{vy}^2) \ddot{r} - (\bar{m}_y \ddot{x}_{vy} + \bar{m}_{yb} \ddot{x}_b^2) \ddot{r}
 \end{aligned} \quad (5)$$

ただし、上式では潜水船の運動性と形状関連のパラメーターとの関係をより具体的に検討するためにつぎのような記号を用いている。

$$\begin{aligned}
 \bar{m}_y &= -\int_{x_b}^{x_n} \oint \phi_1 \frac{\partial \phi_1}{\partial n} ds dx \Big/ \frac{1}{2} l^3, & \bar{m}_z &= -\int_{x_b}^{x_n} \oint \phi_2 \frac{\partial \phi_2}{\partial n} ds dx \Big/ \frac{1}{2} l^3 \\
 \bar{m}_y \ddot{x}_{vy} &= -\int_{x_b}^{x_n} \oint x \phi_1 \frac{\partial \phi_1}{\partial n} ds dx \Big/ \frac{1}{2} l^4, & \bar{m}_z \ddot{x}_{vz} &= -\int_{x_b}^{x_n} \oint x \phi_2 \frac{\partial \phi_2}{\partial n} ds dx \Big/ \frac{1}{2} l^4 \\
 \bar{m}_{yb} &= -\oint \phi_1 \frac{\partial \phi_1}{\partial n} ds \Big/ \frac{1}{2} l^2 (x=x_b), & \bar{m}_{zb} &= -\oint \phi_2 \frac{\partial \phi_2}{\partial n} ds \Big/ \frac{1}{2} l^2 (x=x_b) \\
 \bar{J}_z + \bar{m}_y \ddot{x}_{vy}^2 &= -\int_{x_b}^{x_n} \oint x^2 \phi_1 \frac{\partial \phi_1}{\partial n} ds dx \Big/ \frac{1}{2} l^5, & \bar{J}_y + \bar{m}_z \ddot{x}_{vz}^2 &= -\int_{x_b}^{x_n} \oint x^2 \phi_2 \frac{\partial \phi_2}{\partial n} ds dx \Big/ \frac{1}{2} l^5 \\
 \bar{J}_x + \bar{m}_y \ddot{z}_{vy}^2 &= -\int_{x_b}^{x_n} \oint \phi_3 \frac{\partial \phi_3}{\partial n} ds dx \Big/ \frac{1}{2} l^5, & \bar{J}_{xb} + \bar{m}_{yb} \ddot{z}_{vyb}^2 &= -\oint \phi_3 \frac{\partial \phi_3}{\partial n} ds \Big/ \frac{1}{2} l^4 (x=x_b) \\
 \bar{J}_{xz} + \bar{m}_y \ddot{x}_{vy} \ddot{z}_{vy} &= \int_{x_b}^{x_n} \oint x \phi_1 \frac{\partial \phi_3}{\partial n} ds dx \Big/ \frac{1}{2} l^5, & \bar{m}_y \ddot{z}_{vy} &= \int_{x_b}^{x_n} \oint \phi_1 \frac{\partial \phi_3}{\partial n} ds dx \Big/ \frac{1}{2} l^4 \\
 \bar{m}_{yb} \ddot{z}_{vyb} &= \oint \phi_1 \frac{\partial \phi_3}{\partial n} ds \Big/ \frac{1}{2} l^3 (x=x_b).
 \end{aligned} \quad (6)$$

3.2 運動係数の表現と 2, 3 の吟味

(2) 式の係数のうち、前節で求めた流体力および流体モーメントを含む運動係数に (5) 式の右辺の諸係数を代入し、整理すると、つぎの運動係数と $\bar{m}_x, \bar{m}_y$ などの形状関連のパラメーターとの関係を導くことができる。

$$\begin{aligned}
 \bar{M}_x &= \bar{m} + \bar{m}_x, & C_{x\ddot{u}} &= 2C_R, & C_{x\ddot{q}} &= C_{m\ddot{u}} = -(\bar{m} \ddot{z}_G + \bar{m}_x \ddot{z}_{vx}), & \bar{M}_z &= \bar{m} + \bar{m}_z, & C_{z\ddot{\alpha}} &= -\bar{m}_{zb}, \\
 C_{z\ddot{q}} &= C_{m\ddot{\alpha}} = \bar{m} \ddot{x}_G + \bar{m}_z \ddot{x}_{vz}, & C_{z\ddot{q}} &= (\bar{m} + \bar{m}_x + \bar{m}_{zb} \ddot{x}_b) + \bar{m} \ddot{W}_x', \\
 \bar{I}_m &= \bar{I}_y + \bar{J}_y + \bar{m} \ddot{x}_G^2 + \bar{m}_z \ddot{x}_{vz}^2 + \bar{m}_z \ddot{z}_G^2 + \bar{m}_x \ddot{z}_{vx}^2, & C_{m\ddot{u}} &= 2\bar{z}_R C_R, & C_{m\ddot{\alpha}} &= \bar{m}_z - \bar{m}_x + \bar{m}_{zb} \ddot{x}_b, \\
 C_{m\ddot{q}} &= -\{(\bar{m} \ddot{x}_G + \bar{m}_z \ddot{x}_{vz} + \bar{m}_{zb} \ddot{x}_b^2) + (\bar{m} \ddot{x}_G \ddot{W}_x' + \bar{m}_z \ddot{z}_G \ddot{W}_z')\}, & \bar{M}_y &= \bar{m} + \bar{m}_y, & C_{y\ddot{\beta}} &= -\bar{m}_{yb}, \\
 C_{y\ddot{p}} &= C_{l\ddot{\beta}} = \bar{m} \ddot{z}_G + \bar{m}_y \ddot{z}_{vy}, & C_{y\ddot{p}} &= \bar{m}_{yb} \ddot{z}_{vyb} + \bar{m} \ddot{W}_z', & C_{y\ddot{r}} &= C_{n\ddot{\beta}} = -(\bar{m} \ddot{x}_G + \bar{m}_y \ddot{x}_{vy}), \\
 C_{y\ddot{r}} &= -\{(\bar{m} + \bar{m}_x + \bar{m}_{yb} \ddot{x}_b) + \bar{m} \ddot{W}_x'\}, & \bar{I}_l &= \bar{I}_x + \bar{J}_x + \bar{m} \ddot{z}_G^2 + \bar{m}_y \ddot{z}_{vy}^2, & C_{l\ddot{\beta}} &= \bar{m}_{yb} \ddot{z}_{vyb}, \\
 C_{l\ddot{p}} &= -\{(\bar{J}_{xb} + \bar{m}_{yb} \ddot{z}_{vyb}^2) + \bar{m} \ddot{z}_G \ddot{W}_z'\}, & C_{l\ddot{r}} &= C_{n\ddot{p}} = \bar{I}_{xz} + \bar{J}_{xz} + \bar{m} \ddot{x}_G \ddot{z}_G + \bar{m}_y \ddot{x}_{vy} \ddot{z}_{vy} \equiv \bar{I}_{ln}, \\
 C_{l\ddot{r}} &= (\bar{m} \ddot{z}_G + \bar{m}_x \ddot{z}_{vx} + \bar{m}_{yb} \ddot{z}_{vyb} \ddot{x}_b) + \bar{m} \ddot{z}_G \ddot{W}_x', & \bar{I}_n &= (\bar{I}_z + \bar{J}_z + \bar{m} \ddot{x}_G^2 + \bar{m}_y \ddot{x}_{vy}^2), \\
 C_{n\ddot{\beta}} &= -(\bar{m}_y - \bar{m}_x + \bar{m}_{yb} \ddot{x}_b), & C_{n\ddot{p}} &= (\bar{m}_y \ddot{z}_{vy} - \bar{m}_x \ddot{z}_{vx} + \bar{m}_{yb} \ddot{z}_{vyb} \ddot{x}_b) + \bar{m} \ddot{x}_G \ddot{W}_z', \\
 C_{n\ddot{r}} &= -\{(\bar{m} \ddot{x}_G + \bar{m}_y \ddot{x}_{vy} + \bar{m}_{yb} \ddot{x}_b^2) + \bar{m} \ddot{x}_G \ddot{W}_x'\}
 \end{aligned} \quad (7)$$

以上より、運動係数は (6) 式および (7) 式の関係式によって直接、形状に結びつけられており、かつこれらの関係式は必要最少限の形状関連のパラメーターによって表現されているものと思われる。したがって、形状関連の

パラメータに関して、運動係数相互の関係が把握できるので、制御目的に沿った潜水船の運動性を実現するための船体設計に関する定性的な検討が可能になる。

運動係数の形状関連のパラメータによる表現につづいて、筆者らは、つぎのような検討および決定を行なった。

(1) 潜水船の制御目的のためには、運動方程式ができるだけ簡化することが望ましい。ゆえに、未決定であった座標中心を $\bar{m}\bar{x}_G + \bar{m}_y\bar{x}_{vy} = 0$ ($\because C_{y\dot{p}} = C_{l\dot{\beta}} = 0$), $\bar{m}\bar{z}_G + \bar{m}_y\bar{z}_{vy} = 0$ ($\because C_{y\dot{r}} = C_{n\dot{\beta}} = 0$) を満足する点、すなわち潜水船の質量と y 軸方向の付加質量との合成中心をとることにした。この決定は、これ以外の座標中心のとり方に較べて微小運動方程式 (2) 式) が最も簡単になり、かつ設計パラメータによる潜水船の運動特性に関する検討をさらに容易にするからである。

(2) 運動方程式 (1), (2) 式) における角速度 (p, q, r) は、 x, y, z 軸回りに関するものであった。しかし、このような角度の独立なとり方は無限小回転を除いてできない。かつ、浮力および重力による力およびモーメントも簡単に表現できなくなる。ゆえに、本研究では角度、角速度および角加速度は、以後オイラー角によって表現することとする。この結果、 $C_{x\dot{\phi}} = C_{xq}$, $C_{y\dot{\phi}} = C_{y\dot{p}} - C_{y\dot{r}} \sin \theta_0$, $C_{y\dot{\phi}} = C_{y\dot{r}} \cos \theta_0$ などの新しい運動係数の表現が導入されることとなる。

4 形状決定因子と運動係数に関する 2, 3 の考察

前章で述べた運動係数に関する関係式 (7) 式) を充分活用するためには、 $\bar{m}_x$ などの記号で表わされた形状関連の設計パラメータをより具体的なパラメータによって表現することが望ましい。すなわち、潜水船の設計指針を探索する場合、具体的パラメータと運動特性の定性的な関係が明らかになれば、広い立場からの検討を容易にするからである。形状決定因子はこの意味から採択されるもので、いわば潜水船の運動特性に関する具体的な指標を意味する。よって、以後、運動性はおもに形状決定因子によって議論されることとなる。

以下では、まず $\bar{m}_x$ などの記号で表わされた形状関連のパラメータの内容を分析し、形状決定因子を採択する。つぎに形状決定因子を使って運動係数などの考察を行なう。

4.1 形状決定因子の採択

(7) 式) において、形状に関係するパラメータは、無次元化質量 $\bar{m}$ を除いてすべてである。以下では、形状関連のおもなパラメータの幾何学的意味を検討する。他のパラメータは同様な議論ができることから述べていない。

(1) $C_{y\dot{\beta}}$ および $C_{z\dot{\alpha}}$ の大きさを表わす m_{yb}, m_{zb} は潜水船の尾翼幅の最後部の形状によって決まる。潜水船の尾翼についてはアスペクト比 ($= (2s)^2/S$, $2s$: 翼幅, S : 翼面積) が一般に小さく、細長体理論の適用範囲内にあることは充分考えられる。ゆえに、細長体理論によって $\bar{m}_{yb}, \bar{m}_{zb}$ は尾翼幅によって決まるといえる。

(2) m_y, m_z は y および z 軸方向の付加質量を表わす。したがって、潜水船の質量 m を一定と考えれば、 m_y, m_z は運動係数 M_y, M_z を決定するもので、一般に尾翼の存在によって質量 m よりも大きい。 m_z は、潜水船の左右対称性によって、胴体部において $\oint \phi_2 \frac{\partial \phi_2}{\partial n} ds = \pi a^2$, 尾翼部において $\oint \phi_2 \frac{\partial \phi_2}{\partial n} ds = \pi s^2 \{1 - (a/s)^2 + (a/s)^4\}$ なる関係式を用い、 x について尾翼最後部から頭部まで積分することにより計算できる ((6) 式の $\bar{m}_z$ 参照)。ただし、 a は胴体半径、 $2s$ は尾翼幅を表わし両者とも x の関数である。 m_y は、一般に上下対称性がないので少し複雑になるが、定性的には m_z と同様に考えられる。したがって $\bar{m}_y, \bar{m}_z$ は、胴体の投影形状、尾翼幅、尾翼の形状および尾翼の取付位置によって決まるといえる。

(3) m_x は細長体という仮定のもとではゼロとなってしまうので、定量的な検討は極めて困難であるが、回転楕円体に関する計算値によって推定がつく。したがって多少の修正係数と細長比によって決めることができる。

(4) (6) 式) に示した $(x_{vy}, 0, z_{vy})$ は y 軸方向の付加質量中心を表わすので、本節 (2) で示した y 軸方向の付加質量の場合と同じ結果を得る。しかしながら、質量と質量中心の関係と同じように、船体形状を変えることによって y 軸方向の付加質量 m_y を変えずに、その中心 $(x_{vy}, 0, z_{vy})$ を移すことができる。たとえば、胴体の投影形状の面積中心を前方に移すような修正を行なえば、 m_y を変えずに x_{vy} を前方に移すことができる。

(5) x_b は尾翼最後部の x 座標を表わすものである。ただし、座標中心は 3.2 節で決定したものである。し

たがって重心の位置が決まれば、胴体の細長比および投影形状と尾翼の幅、形状および取付位置によって決まると考えられる。

(6) J_x は x 軸回りの付加慣性モーメントで、尾翼がなければ、一般に I_x に較べて非常に小さい。ゆえに尾翼幅および尾翼の形状によるところが極めて多い。

(7) 抵抗係数 C_R は、魚電の抵抗と形状に関する実験的研究の結果から、ほぼ、細長比、胴体の投影形状、尾翼幅および表面粗度によって決まるといわれている¹¹⁾。

以上の議論より、筆者らは形状決定因子として

① 胴体の細長比, ② 胴体の投影形状, ③ 尾翼幅, ④ 尾翼の形状, ⑤ 尾翼の取付位置

を取り上げるのが妥当と考える。

ただし、細長比は胴体の投影形状を表わす一要素であるが、具体的に設計を行なう場合、細長比による定性的な検討で、運動特性に関する大体の傾向はつかめるように思える。投影形状の検討はそれ以後に位置するものと考えて、あえて細長比を加えた。

4.2 運動係数に関する 2, 3 の考察

さきに採択した形状決定因子を使って3種類の代表的な運動係数およびその組み合わせなどについて検討した。その要点を以下に示す。

(1) 潜水船の運動制御性能を向上させるためには、3.3 節でも述べたように、潜水船の運動ができるだけ簡単な数学モデル(運動方程式)で記述できることが望ましい。この観点から、もっとも望ましい形状の1つとして、幅、形状および取付位置の等しい4枚の尾翼をもつロケットのような潜水船があげられる。すなわち、このような潜水船は、重心を対称軸上にすれば、 $\bar{m}\bar{x}_G + \bar{m}_x\bar{x}_{vz} = 0$, $\bar{m}\bar{z}_G + \bar{m}_x\bar{z}_{vz} = 0$ ($\because C_{z\dot{q}} = C_{m\dot{a}} = C_{x\dot{q}} = C_{m\dot{u}} = 0$) を満足し、かつ $C_{m\dot{u}} = C_{m\dot{a}} = C_{l\dot{\beta}} = C_{l\dot{\gamma}} = C_{l\dot{\gamma}} = C_{n\dot{\beta}} = C_{n\dot{\gamma}} = C_{n\dot{\gamma}} = 0$ なる関係式を満足できるからである。これらの関係式を満足するもしくはできるのは形状の軸対称性によるのは明らかである¹²⁾。

(2) 運動特性に重大な影響をもつと考えられる運動係数およびその組み合わせについて計算した結果を図3, 図4, 図5に示す。ただし、潜水船の胴体の頭部および尾部の形状は図2のモデルと同じで、かつ細長比は中央部の同筒部分の長さによって変化させた。また、尾翼および取付位置もモデルと同様にした(図2, 表1参照)。また、計算にあたって、胴体部は密度一様で、その密度は流体の密度と等しいとし、尾翼の厚さは無視した。また m_x の値は以下同様、同一細長比の回転楕円体の計算値を用いた。これらの図の意味するところはつぎのとおりである。

① $C_{n\beta}$ は航空機工学における方向静安定性を表わすもので、潜水船においても重要な運動係数と考えられる。(7) 式から $C_{n\beta} = -(\bar{m}_y - \bar{m}_x) - \bar{m}_{yb}\bar{x}_b$ であるが、このうち明らかに $\bar{m}_y - \bar{m}_x$ は不安定モーメントを無次元化したものである¹³⁾。また、この関係式は $-m_{yb}$ が横滑り角に関する横力微分係数 $C_{y\beta}$ を表わすことから、横力作用点は尾翼最後部の x 座標によって決まることを意味している。図3からわかるように、 $\bar{m}_{yb}$ を大きくするために尾翼幅を増しても、単純に $C_{n\beta}$ を正の方向にシフトすることにならないのは、尾翼幅の増加によって尾翼面積が増加すれば、それだけ $\bar{m}_y$ すなわち不安定モーメントが大きくなり、かつ y 軸方向の付加質量中心が後方に移動し $\bar{x}_b$ の値が小さくなることから説明できる。細長比に関しても同様で、 x_b の大きさを増すことが、 $C_{n\beta}$ をより正の方向にするとは限らないことも図3から明らかである。また、尾翼幅の等しい尾翼、たとえば No.2 と No.6 の尾翼について検討してみると、翼幅が同じなので横力(揚力)は等しい。よって $C_{n\beta}$ は、翼面積すなわち不安定モーメントの小さい No.6 の3角翼の場合の方が No.2 の矩形翼の場合よりも大きな値となることがわかる(図3)。

② 図4に示す $C_{y\beta}/\bar{M}_y$ は、つぎに述べる $C_{n\gamma}/I_n$ 同様、潜水船の横運動に関する応答性を支配するものである。なぜならば微小運動方程式(2)式)をラプラス変換したのちに整理し、かつ潜水船の形状を考えてその諸運動係数の大きさを検討すれば、極(特性方程式の根)の位置が上の2つの運動係数に著しく依存することがわかるからである。

図4から、 $C_{y\beta}/\bar{M}_y$ と形状決定因子との関係はつかみ易く、その大きさは、細長比が小さくなるか翼幅が大きくなることによって増加する。しかし、3角翼と矩形翼との形状による変化は、 $C_{n\beta}$ の場合に較べて非常に少ない。とくに小さな幅の尾翼(No.2 と No.6)の形状による違いはほとんどない(図4)。

③ $C_{n\gamma}/I_n (= -(\bar{m}_{yb}\bar{x}_b^2 + \bar{m}_x\bar{z}_G\bar{W}_x')/(\bar{I}_z + \bar{J}_z + \bar{m}_x\bar{z}_G^2 + \bar{m}_x\bar{x}_{vy}^2))$ と細長比の関係は一定の傾向をもち、細長比

を増せば $C_{n\bar{I}}/\bar{I}_n$ の大きさは小さくなる (図5)。一方, $C_{n\bar{I}}/\bar{I}_n$ と翼幅の関係が一定の傾向を示さないことが, 図5からわかる。これは, 翼幅を増すことによって $C_{n\bar{I}}$ も $\bar{I}_n$ も大きくなり, 場合によっては $\bar{I}_n$ の増加は $C_{n\bar{I}}$ のそれを上まわるからである。すなわち, 慣性モーメントの一般的な計算式から明らかなように, 座標中心から離れた尾翼の大きさが増せば, $\bar{I}_n$ の増加が大きいと考えることは妥当である。よって3角翼の場合の方が矩形翼の場合よりも, $C_{n\bar{I}}/\bar{I}_n$ の大きさが大きくなるのは, おもに $\bar{I}_n$ の違いによって解釈できる(図5)。

5 実験および考察

6分力天秤を用いた動特性実験においては, 合計6種類の実験項目を遂行することにより, (7)式に示した31個の運動係数のすべてが決定し得る。しかし, 本論文では理論の実験的検証を目的としており, かつ静特性実験のみに限定したので, $C_{y\beta}$ と $C_{n\beta}$ の2項目についての実験が可能となった。動特性実験の結果については, 別の機会に述べたいと思う。

5.1 モデルおよび実験装置

実験はモデルと支持装置の干渉による悪影響を考慮して, 支持方法は Sting 法(後部支持法), 天秤は内挿型を使って実施した。その概要は図6に示してある。

モデル形状は表1および図2に示した。このモデルの寸法は天秤の感度および水槽の寸法⁴⁾から長さ1m, 胴体径0.2mとした。その他, 胴体の頭部および尾部の投影形状は翼型 NACA 0035 とし, 少なくとも ± 20 deg の迎角および横滑り角でストール現象が起らぬよう尾翼の縦横比 (Geometric Aspect Ratio) を2に統一した¹⁴⁾。

測定流速とフェアリング形状を決定するために, No.3の尾翼をつけたモデルについて行った予備実験の結果をつぎに述べる。

5.2 予備実験

測定流速を決めるため, 予備的に抵抗係数とレイノルズ数の関係を調べる実験を行った。結果を図7に示す。ただし, モデルの状態は, A:モデルのみ, B:モデルにトリップワイヤー装着, C:Bに加えてフェアリング整形(油粘土)の3種である。Cのフェアリングの形状はつぎに示す実験で決めたものである。実験結果(図7)から, レイノルズ数が 2.0×10^5 以上では抵抗係数はほぼ一定と考えられる。

ついで $C_{y\beta}(=C_{za})$ および $C_{n\beta}'(=-C_{ma}')$ とレイノルズ数の関係を調べる実験を, 上記のBとCの状態のモデルについて行った。ただし, $C_{n\beta}'$ は天秤中心に関するものである。これらの迎角および横滑り角に関する諸係数は, 以下に述べる実験の場合と同様に, 9種の横滑り角あるいは迎角 $0.0, \pm 2.5, \pm 5.0, \pm 7.5, \pm 10.0$ deg のデータを直線近似(最小自乗法)して求めたものである。

実験結果(図7)より, $C_{y\beta}, C_{n\beta}'$ はレイノルズ数を大きくするにつれて小さくなる傾向にあるが, 測定における精度を考慮すれば, 一定とみなせる範囲と考えられる。したがって, 測定流速は, 中間のレイノルズ数(図7)に対応する 1.2 m/sec 程度が妥当であることがわかった。

フェアリングを行わない場合, 横滑り角(迎角)ゼロの付近で不安定な方向のモーメントを生じることが実験的に確認され, かつ図7においては, 横滑り角に対する無次元化横力微係数 $C_{y\beta}$ および無次元化ヨーイングモーメント微係数 $C_{n\beta}'$ の値が, フェアリングを行った場合と行わない場合(状態CおよびB)によって, それぞれ, フェアリングを行わない場合の方が, 約 $4/5$ および $1/2$ 程度に小さくなっている。この現象は航空機の場合と同様に, 尾翼と胴体部の接着部から生ずる剝離によるものと思われる。以上より適当なフェアリングをする必要がわかったので, つぎに示すフェアリング形状決定実験を実施した。

フェアリング形状は同じようなモデルで行われた風洞実験¹⁵⁾に従っており, ここでは図2のようなものとした。フェアリングの大きさを変えるにあたっては, パラメーターを同図の c とし, 実験は4種類の c ($=0, 20, 34, 40$ mm)で行った。フェアリングの曲率は, 尾翼最後部において, 結果的に c の4倍程度であった。他の部分は尾翼最後部の曲率にあわせて滑らかに整形した。実験結果を表2に示す。

実験結果から, c を大きくするにつれて, $C_{y\beta}(C_{za}), C_{n\beta}'(C_{ma}')$ の絶対値は大きくなるが, 増加の割合は小さくなり, $c=34$ mm 以上では, その増加は頭打ちになるようである。よって, 以下の実験では $c=34$ mm とした。この決定の妥当性はつぎの理由により確かめ得た。すなわち, 7種の尾翼に対するフェアリング有無の2つのタイプで行った実験の結果によると, 不安定な方向のモーメントがフェアリングをつけることによって消去

し、また横滑り角（迎角）に対する横力（揚力）およびヨーイングモーメント（ピッチングモーメント）の関係が直線的になったからである。

以上より、① 測定流速 1.2 m/sec, ② $c=34$ mm のフェアリング整形を決定して、つぎの6分力試験を遂行した。

5.3 実験結果

6分力実験の結果を図8と図9に理論値とあわせて示す。また同図および図10にはフェアリングの効果を示すために状態Bのデータも含めてある。この実験より、以下のことが明らかとなった。

① $C_{y\alpha}$, $C_{z\beta}$, $C_{m\beta}$, C_{na} は理論的にはゼロであり、実験的にも測定された値が小さく、無視できる範囲内であった。

② No.3の尾翼をつけたモデルの実験によって、 $C_{za}=C_{y\beta}$, $C_{n\beta}=-C_{ma}$ と理論的に考えられる結果が支持された。よって以後は、 $C_{y\beta}$ と $C_{n\beta}$ を代表として示してある。ただし、この理論計算値は、重心を、モデル胴体の体積中心に一応考え、モーメント中心は前に述べた座標中心（理論値）にとって計算された。尾翼より後方にある胴体尾部、フェアリング部分および翼厚は、理論計算値の大きさに影響を与えないと考えられるので無視し、かつ m_x の値は細長比5の回転楕円体の計算値を用いた。

5.4 実験結果の吟味

(1) $C_{y\beta}(=C_{za})$ について検討した結果をつぎに示す。

表1の翼番号の順に、図8の実験値 $C_{y\beta}$ は理論値に対して 4, 16, 18, 22, 21, 24, 31% 小さい。この差異は、多少実験誤差によると思われるが、おもに船体形状を細長体と仮定して理論値を求めた場合に予想されるものと考えられる。

以下に、この理由などについて述べる。

① 3角翼 (No.6, No.7) の場合と矩形翼の場合 (No.1~No.5) と較べてみると、前者は細長体理論の仮定をより満足する形状であるにもかかわらず、後者よりも理論値との差が大きくなった。よって横力（揚力）は尾翼幅によって一概には決まらないことがわかった。しかし、航空機モデル（アスペクト比2の3角翼、翼幅は胴体の7倍）の実験値¹⁰⁾が細長体を仮定した計算値と 36.8% 違い、修正係数として 0.632 を導入していることと較べると本実験の場合（31% 以内）の方が理論値との差が小さい。

② 実験モデルが細長体モデルともっとも異なるところは尾翼部分と考えられる。横力（揚力）が尾翼幅のみによって決まるという細長体理論の結論を考慮して、潜水船の尾翼部分（図2の点線まで含む）にのみ注目すると、そのアスペクト比は 2~3 なので、細長体理論が非常によく適合する範囲（0~1）ではない。よって図8の理論値との差は許容しうと思われる。なお、文献10)によれば、その範囲のアスペクト比では、細長体を仮定して求めた理論値と 20~40% の相違が予想される。

(2) $C_{n\beta}$ については、実験値は理論値に対して、符号が逆であるかあるいはその値が 1/2 以下にもなり（図9）、その差が大きく、 $C_{y\beta}$ の場合と同様な検討はあまり意味がないと考えられる。したがって、 $C_{y\beta}$ との関連において $C_{n\beta}$ の検討を行った。その結果をつぎに示す。

$C_{n\beta}$ において、理論的に関係式

$$C_{n\beta} = -(\bar{m}_y - \bar{m}_x) - \bar{m}_{yb}\bar{x}_b \equiv -\bar{M} + C_{y\beta}\bar{x}_b \quad (8)$$

が成立する。同じ関係式が実験的にも成立すると仮定すると、記号の上部に“^”をつけて

$$\hat{C}_{n\beta} = -\hat{M} + \hat{C}_{y\beta}\hat{x}_b \quad (9)$$

となる。(8)式については m_x を除く各記号の値がわかっており、 m_x も回転楕円体の計算値によって推定がつく。一方、(9)式については、 $\hat{C}_{n\beta}$ と $\hat{C}_{y\beta}$ のみがわかっているにすぎない。よって、(9)式には2つの未知のもののすなわち $\hat{M}$ と $\hat{x}_b$ があるために、本来厳密な吟味は不可能である。しかし $C_{n\beta}$ と $\hat{C}_{n\beta}$ の差 $\Delta C_{n\beta}$ と、 $C_{y\beta}$ と $\hat{C}_{y\beta}$ の差 $\Delta C_{y\beta}$ が翼幅に従って大きくなるという同じ傾向をもつことから、 $\gamma \equiv \Delta C_{n\beta} / \Delta C_{y\beta}$ と $\bar{x}_b$ を比較してみると、図10のように 20% の程度の差におさまることがわかった（図10）。このことは、 $\Delta C_{n\beta}$ がほぼ $\Delta C_{y\beta}$ と $\bar{x}_b$ の積に等しいことを意味している。実際、 $\gamma = \bar{x}_b$ と仮定して、 $C_{n\beta}'' \equiv \hat{C}_{n\beta} + \bar{x}_b \Delta C_{y\beta}$ を計算してみると、図10からわかるように $C_{n\beta}$ と $C_{n\beta}''$ はよく一致している。ただし、 $C_{n\beta}$ の値を求める過程において、 m_x の値は細長比5の回転楕円体に関する計算値を用いた。以上のことは、 $\hat{C}_{n\beta}$ と $\hat{C}_{y\beta}$ の間に、(9)式、 $\hat{M} = \bar{M}$ 、お

よび $\hat{x}_b = \bar{x}_b$ の関係式が成立していることを示唆しているように思われる。

6 結 言

本報の結論をつぎに示す。

(1) 海洋流速を考慮に入れた微小運動方程式を導いた。そして、海洋流速がゼロの場合を除いて縦運動と横運動が分離できないことなどが明らかになった。

(2) 潜水船に働く流体力および流体モーメントを船体形状が細長体という仮定のもとに導き、運動係数を形状関連のパラメーターによって表わした。その結果、運動係数の相互関係が明らかになるとともに、各運動係数は簡単な関係式によって表わされるので、設計に関する検討は容易になると思われる。

(3) 形状関連のパラメーターの幾何学的意味について検討することによって、形状決定因子として、① 胴体の細長比、② 胴体の投影形状、③ 尾翼幅、④ 尾翼の形状、⑤ 尾翼の取付け位置の5つを採択した。

(4) 形状決定因子を使って、潜水船の運動に重大な影響をおよぼす2, 3の運動係数およびその組み合わせなどを吟味した。

(5) 7種の尾翼と細長比5の胴体から構成される軸対象モデルについて実験を行い、実質的につぎの運動係数、すなわち、横滑り角に対する無次元化横力微係数 $C_{y\beta}$ および無次元化ヨーイングモーメント微係数 $C_{n\beta}$ に関する理論値の実験的検証を行った。その結果、① 両者の実験値は理論値より小さく、翼幅が増すにつれてその差は大きくなる傾向にある。② 3角翼の場合よりも矩形翼の場合の方が理論値に近い。③ $C_{y\beta}$ に関する理論値と実験値の差は、矩形翼の場合 22% 以内、3角翼の場合 31% 以内である。④ $C_{n\beta}$ に関する理論値と実験値の差 $\Delta C_{n\beta}$ は、 $C_{y\beta}$ に関するその差 $\Delta C_{y\beta}$ と横力作用点の x 座標 (理論値) の積にほぼ等しい。 ($\because \Delta C_{n\beta} \doteq \Delta C_{y\beta} \hat{x}_b$) となった。

動特性実験は、さらに詳細な検討を加えることができる。現在、動特性実験は現在実施中である。動特性実験および本報であまり考慮しなかった粘性については、別の機会に述べたいと思う。また本報で述べた静特性実験結果の信頼性についても、十分な検討を行いたいと考えている。

この研究における実験は、三井造船千葉研究所で行ったもので、終始多くのご援助を受けた三井造船の山内部長、岸本研究員、および久宝研究員に深く感謝の意を表します。さらに実験にあたり、数多くのご助言をいただいた東教授 (東京大学宇宙航空研究所) に対し、ここに深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 海域工学研究会編：海洋工学入門，講談社（1969）
- 2) Gertler, M. and Hagen, G.R.: Standard Equation of Motion for Submarine Simulation, Naval Ship R. & D. Rept. 2510 (1967).
- 3) 重満：没水体の縦安定に関する研究，造船協会論文集，第111号（1962）。
- 4) 土田，平野他：潜水船の縦安定性能，造船協会論文集，第107号（1960）。
- 5) 亘理，遠藤，横田：潜水船の水中操縦性試験について，造船協会論文梗概（1965）。
- 6) SNAME: Nomenclature for Treating the Motion of a Submerged Body through a Fluid, SNAME Technical and Research Bulletin, No.1—5 (1964).
- 7) Lamb, S.H.: Hydrodynamics, Sixth Edition, Dover Publications (1945), p. 160~169.
- 8) 飯高：運動制御，自走ロボットの開発指針（その1），機械振興協会資料（1974），p. 59~71.
- 9) Nielsen, J.N.: Missile Aerodynamics, McGraw-Hill Book Company (1960), p. 349~374.
- 10) Jones, R.T.: Properties of Low-aspect-ratio Wings at Speeds Below and above the speeds of Sound, NACA Tech. Rept. 835 (1946).
- 11) Greiner: Under Water Missile Propulsion, Compass Publication (1967), p. 117~146.
- 12) 元良：見掛質量に就て，造船協会論文集，第87号（1955）。
- 13) Munk, M.M.: The Aerodynamic Forces on Airship Hulls, NACA Rept. 184 (1924).
- 14) Whicker, L.F. and Fehler, L.F.: Free Stream Characteristics of a Family of Low Aspect Ratio Control Surface, DTMB Rept. 933 (1958).
- 15) 東，井内，渡部：OSR-V ロボット模型の風洞実験について，機械振興協会報告書（1973）。
- 16) 河崎，河本：自動飛行模型 FFM-10 の動安定微係数の推定について，航空宇宙技術研究所資料，TM-205 (1971)。

図1 潜水船の座標系

(x_0, y_0, z_0) : 静止座標系, (x, y, z) : 運動座標系
 (U, V, W) : 対流速度
 (u, v, w) : 対流速度の微小変化量

図2 モデル
(単位: mm) 図3 C_{np} と形状決定因子の関係 図4 C_{yb}/M_y と形状決定因子の関係 図5 C_{nI}/I_n と形状決定因子の関係

図6 実験装置概形図

図7 C_R, C_{yb}, C_{np} とレイノルズ数の関係 図8 C_{yb} と翼幅(2S)の関係

図9 C_{np} と翼幅の関係

図10 C_{np} の検討

表1 尾翼主要目

翼番号	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7
翼型	NACA 0015	NACA 0015	NACA 0015	NACA 0015	NACA 0015	NACA 0015	NACA 0015
縦横比	2	2	2	2	2	2	2
S (mm)	125	150	175	200	225	150	200
b ₁ (mm)	50	64	78	92	106	0	0
b ₂ (mm)	134	165	196	226	257	300	400
備考	矩形翼					3角翼	

表2 フェアリングの効果

C (mm)	0	20	34	40
C_R	0.0417	0.0488	0.0490	0.0507
C_{yp}	-1.56	-1.74	-1.86	-1.83
C'_{np}	0.414	0.667	0.772	0.784
備考	フェアリング しない		本実験に 採用	