航行型無索無人潜水艇に関する研究

(その 1 グライディング航行の研究)

正員 浦

環* 正員 大坪 新 一 郎**

Design of Unmanned Untethered Submersible for Quick Swimming
(1st Report : Study on Gliding Performance)

by Tamaki Ura, *Member* Shin'ichiro Otsubo, *Member*

Summary

Unmanned vehicles have great advantage for survey of sea bed in the deep sea. Many models of tethered submersibles have been developed as devices for exploitation of subsea oil resources. In the deep sea, drag force acting on the umbilical cable prevents tethered submersible from swimming freely; therefore, the development of untethered submersibles is highly expected, which are free from restriction of the umbilical cable. But few researches relating to unmanned untethered submersibles have been performed because of their disadvantages such as slow rate of communication between the surface support ship and the vehicle, and limit of energy supply. It is essential for unmanned untethered submersibles to swim autonomously and with a small amount of battery energy consumption.

In this paper, a concept of gliding submersibles is proposed for inspection of the surface of sea bed along a long measurement line. The submersible glides, descends autonomously from the surface without consuming battery energy and comes to the target point. Then it swims above the surface keeping constant height. A pilot model named PTEROA 40 is designed and its characteristics of longitudinal behaviors are examined analytically and experimentally.

It is shown that a model of 1.5 m length swims over 7 knots when the weight is 5% larger than the buoyancy of the vehicle. Longitudinal stability and maneuverability are also acceptable as a vehicle which should climb when there is an obstacle along the line of measurement.

1 はじめに

海洋開発・海底石油開発などに伴って、海中・海底の調査研究を目的とした小型の潜水艇 (ROV: Remotely Operated Vehicle) の研究開発が行われている。通信あるいは電力の供給のためのアンビリカルケーブルを持つ有索潜水艇は、数百 m の深度を対象とした数 t から数十 kg まで各種のものが開発されている。アンビリカルケーブルや曳航索は潜水艇が移動したり、海流がある環境で使用したりすると、極めて扱いにくいものとなる。索のない無索潜水艇は自由に泳ぎ回られるものの、通信手段とエネルギー供給に難点があり、現状では実務に利用できるものはないといってよい。しかし、その航行性能や機動性を考えると、今後の発展が大いに期待され

る。

本研究では、海底の広い領域を撮影し調査することを目的とする無索無人潜水艇の設計諸元、特に艇体形状について論じ、艇体に作用する揚力を利用したグライディング航行について検討する。

2 潜水艇のミッション

海底における人類の活動は現在のところそれほど活発ではなく、むしろ、将来の様々な発展が考えられる。したがって、どのようなニーズが突然起こるかは予測がたい。無索無人潜水艇を考えるとき、目的として限定されたミッションを規定することは将来の研究の発展を妨げる恐れがあり、研究はシーズを志向することが望まれる。艇体形状は目的にかなった様々なものが考えられ、これを限定することは困難である。本論では、緩い設計条件のもとで艇体形状の試設計を行い、その艇の可能性

* 東京大学生産技術研究所

** 海上保安庁装備技術部船舶課

Fig.1 Free swimming submersible in deep sea

を検討する立場をとる。

6,000m の深度を海底面から 10m 程度の高度を保って地図平面上を直進し、その線上の図形情報などを獲得する艇について考える。10m は海中において光の透過性を考えると、画像情報を得るための一つの境界である。Fig.1 に示すように、支援船から解放された艇は自律的に海底面の特定の計測線に到達し、計測終了後ふたたび自律的に支援船に復帰する。潜降浮上には、推進機を使わずに、グライディング航行を行い、少ないエネルギーで遠方の海底面まで到達する。

このミッションを行える無索無人潜水艇を研究開発するには

- (1) 艇の航行性能に関する研究
潜水艇の形状
制御面の設計
- (2) アクチュエータに関する研究
- (3) 位置標定に関する研究
- (4) センサーに関する研究
- (5) 自律的航行および姿勢制御に関する研究^{5,6)}
- (6) 海中通信に関する研究
- (7) エネルギー源に関する研究

などの諸研究が必要であり、それらを総合して新しい無索無人潜水艇の開発が可能になる。

本報告では、その第一段階として、前記ミッションと 3 節に述べる設計条件を考慮した艇体形状の提案を行い、それが潜降浮上時にどのようなグライディング航行をするかについて検討する。

3 設 計 条 件

前節で述べたミッションに、設計条件として以下の事項を念頭に置いて考える。

- (1) 艇体は特に大規模な支援装置を必要としない程度の排水量とする。
- (2) 海底面上を海底面に沿って航行するときの速度は、4 ノット以上とし、油漬モーターを推進装置と考える。
- (3) 海底面にある障害物は鉛直方向に（上下に）回避する。

(4) 低速航行の時の鉛直面内の旋回性を十分良好なものとする。

(5) 潜降浮上時の最大速度を 6 ノット以上とする。

(6) エネルギーの節約のため潜降浮上時には、推進器は使用しないものとする。

(7) ペイロードを排水量の 10% 以上とする。

4 艇 体 形 状

高速航行ができる水中航行体の形状として、いわゆる翼を持つ涙滴型の形状がある。この場合、次のような欠点を持つ。(1) 低速での引き起こしおよび旋回性能が悪い。(2) 翼厚比が小さいために失速し易い。(3) 衝突などで翼を失うと機能を喪失する。(4) 低速での制御性を向上させるには制御面面積を十分に大きく取る必要がある。

水平に航行する機能と、引き起こし性能とを考慮し、艇体形状を単純化したものとして、Figs. 2, 3, Table 1 に示す上下左右対称で、偏平な艇体形状と水平舵、垂直舵を持つモデル (PTEROA 40^{1),4),12)} と呼ぶ) を考え、これについて性能を検討する。航行中の揚力は艇体自身から発生させ、艇後部の左右 1 対の水平舵と垂直舵およびプロペラ推力で航行を制御する。搭載する機器の量と失速角を考慮して、艇体中心縦断面は NACA 0030 翼型とした。したがって、胴体の最大高さ D は艇の長さを L として $0.3L$ である。胴体横断面は楕円形とし、幅 $B=0.5L$ とした。艇の後方 $0.8L$ から $1.0L$ までを $0.8L$ を中心にして回転可能にし、さらに左右に 0.075

Fig.2 Model of PTEROA 40 submersible fitted in test basin

Table 1 Dimensions of PTEROA 40 submersible

Breadth of body : B/L	0.50
Breadth over all : Bo_A/L	0.65
Depth of body : T/L	0.30
Displacement : ∇/L^3	0.0808
Leading edge of body : X/L	0.406

Fig. 3 Body plan and profile of PTEROA 40 submersible

Fig. 4 Submersible orientation

L の張出部を設け、水平舵とした。

張出し部分の大きさについては $0.05L$ 、 $0.1L$ について検討したが、 $0.075L$ で満足できる効果があることが確かめられたのでこれを採用した。垂直舵は水平舵とほぼ同形とし、艇の上下に飛び出ないものとした。最終的には艇の長さ L が $1.5m$ 程度のモデルを想定する。

艇の3次元運動を Fig. 4 に示す艇体固定の機体軸座標系で考え、 X 軸を艇の長手軸前方へ、 Y 軸を横方向、 Z 軸を下方に取る。座標の原点は、艇体胴体部の図心である艇体前縁より $0.406L$ の対称軸上に置く。

5 定常航行運動

Fig. 5 に示す左右対称な定常航行を考える。艇体は左右対称なので、力の釣り合いより次の平衡方程式を得る。

$$F_D + (\nabla \rho - m)g \sin \gamma - T \cos \alpha = 0 \quad (1.1)$$

Fig. 5 Forces acting on submersible in steady gliding state

$$F_L + (\nabla \rho - m)g \cos \gamma + T \sin \alpha = 0 \quad (1.2)$$

$$M - mg \{X_G \cos(\gamma - \alpha) - Z_G \sin(\gamma - \alpha)\} + \nabla \rho g \{X_B \cos(\gamma - \alpha) - Z_B \sin(\gamma - \alpha)\} = 0 \quad (1.3)$$

ここで、

$\nabla \rho g$: 排水量 (外殻の内側の体積を ∇ とする)

mg : 重量, $-(\nabla \rho - m)g$: 水中重量

$F_D = (1/2)C_D \rho V_C^2 LB$: 抗力

$F_L = (1/2)C_L \rho V_C^2 LB$: 揚力

$M = (1/2)C_M \rho V_C^2 LBD$: 原点周りの定常流体モーメント

T : X 軸上の推力

(X_G, Z_G) : 重心の座標

(X_B, Z_B) : 浮心の座標

ρ : 海水の密度

g : 重力加速度

α : 迎角

$\gamma = \alpha - \theta$: グライディング角

θ : ピッチ角

流体力は、定常航行速度 $V_c = (V_x^2 + V_y^2 + V_z^2)^{1/2}$ と艇体形状および流体密度 ρ で無次元化する。ここでは、舵の効果は艇体全体に作用する力の中に入れてしまい、単独に取出しては考えない。本論ではグライディング航行について扱うので、潮流のない環境を仮定し、対地速度と対水速度とは同じとする。

PTEROA 40 の各係数は艇の形状を考えると、迎角と水平舵角 η (下げを正) を用いて次式で表わされる。(PTEROA 40 に作用する外力の一般式については付録参照)。

$$\left. \begin{aligned} C_D &= a_1 + a_2 \alpha^2 + a_3 \eta^2 \cos \alpha + b_2 \eta \sin \alpha \\ C_L &= b_1 \alpha + b_2 \eta \cos \alpha - a_3 \eta^2 \sin \alpha \\ C_M &= c_1 + c_2 \alpha + c_3 \eta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

回流水槽での実験²⁾により、各係数は

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= 0.0137, \quad a_2 = 0.601, \quad a_3 = 0.208 \\ b_1 &= 1.36, \quad b_2 = 0.552 \\ c_1 &= 0, \quad c_2 = -0.225, \quad c_3 = -0.714 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

(α, η in rad)

定常航行状態の α, V, γ は $Z_G = Z_B = 0$, $\eta \ll 1$ として近似的に、

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \{-K_1 D c_1 - (K_2 b_2 + K_1 D c_3) \eta\} / \{K_2 (a_1 + a_3 \eta^2 + b_1) + K_1 D c_2\} \\ V_c &= [\{T_1 K_4 + (T_1^2 K_4^2 - K_3 T_2)^{1/2}\} / K_3]^{1/2} \\ \tan \gamma &= (C_D - T_1 \cos \alpha) / (C_L + T_1 \sin \alpha) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで

$$\begin{aligned} K_1 &= \rho g - mg \\ K_2 &= X_B \rho g - X_G mg \\ K_3 &= C_D^2 + C_L^2 \end{aligned}$$

Fig. 6 Incidence of PTEROA 40 submersible in steady gliding state

Fig. 7 Velocity of PTEROA 40 submersible in steady gliding state

$$K_4 = C_D \cos \alpha - C_L \sin \alpha$$

$$T_1 = T / (1/2) \rho L B$$

$$T_2 = T_1^2 - \{K_1 / (1/2) \rho L B\}^2$$

(1) 式を

$$L = 1.5 \text{ m}$$

$$W = 1.05 \rho g$$

$$X_G / L = 0.026$$

$$Z_G = X_B = Z_B = 0$$

のモデルで舵角 η をパラメータにして解くと、Figs. 6, 7 に示す定常航行姿勢および速度が得られる。

舵角 -15° 推力ゼロの状態では、水平方向より斜め下方約 15° に 3.3 ノットでグライディングする。すなわち、6,000 m の水深では半径約 22 km の内側にグライディングにより到達できることになる。重心を後ろに下げることにより、あるいは浮力と重力の差を小さくすることにより、到達範囲を広げ定常航行速度を変えることが可能である。舵角を -1° 程度にすれば 69° 方向に約 7.8 ノットで降下する。

6 運動方程式

左右対称の空中航行体や水中航行体では、 XZ 面内の 3 自由度の 2 次元運動と、他の 3 自由度の運動 yawing, rolling, swaying とは分離して扱うことができる。ここではグライディング航行を考えるので、 XZ 面内の運動のみを取扱う。非定常状態の運動方程式は次式で与えられる⁷⁾。ただし、艇体形状を考え、小さいとして無視できる項は除いてある³⁾。

$$\begin{aligned} (m + A_{11}) \dot{V}_x + m Z_G \dot{\omega}_y + (m + A_{33}) V_z \omega_y \\ - (m X_G - A_{35}) \omega_y^2 = -(m - \rho g) g \sin \theta + X \end{aligned} \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned} (m + A_{33}) \dot{V}_z + (-m X_G + A_{35}) \dot{\omega}_y \\ - (m + A_{11}) V_x \omega_y - m Z_G \omega_y^2 = (m - \rho g) g \cos \theta + Z \end{aligned} \quad (5.2)$$

$$m Z_G \dot{V}_x + (-m X_G + A_{35}) \dot{V}_z + (I_{yy} + A_{55}) \dot{\omega}_y$$

$$+m(Z_G V_Z + X_G V_X) \omega_y - A_{35} V_X \omega_y = -(m Z_G - \Gamma \rho Z_B) \times g \sin \theta - (m X_G - \Gamma \rho X_B) g \cos \theta + M \quad (5.3)$$

ただし,

A_{11}, A_{33}, A_{35} : 付加質量

I_{yy} : Y軸まわりの慣性モーメント

$\omega_y = \dot{\theta}$: ピッチング角速度

PTEROA 40 に作用する流体力減衰力 X, Z, M は回流水槽で求めた。諸係数は小さいとして無視できる項もあり、以下で考慮する各項は Table 2 に与えられる。 A_{33}, A_{35}, A_{35} はストリップ法で、 A_{11} は楕円体の値を用いた。回転運動に関する減衰力の項は定常回転試験により求めた。

7 安 定 性

艇の左右対称面内の運動で、鉛直面内に限られた横滑りのない ($\beta=0$) 運動の安定性について考える。定常状態の静的な安定性は重心周りのモーメント M_G が、

$$M_G = M - \Gamma \rho g \{ (X_G - X_B) \cos \theta - (Z_G - Z_B) \sin \theta \} - F_D \{ X_G \sin \alpha - Z_G \cos \alpha \} - F_L \{ X_G \cos \alpha + Z_G \sin \alpha \} \quad (6)$$

と書けることより、

$$\partial M_G / \partial \alpha < 0 \quad (7)$$

で与えられる。(2) 式を代入すれば、PTEROA 40 の静安定のための条件として重心位置に関する条件式

$$\partial M / \partial \alpha - X_G \partial F_L / \partial \alpha = c_2 - (X_G / L) (L / D) (b_1 - a_3 \eta^2) < 0 \quad (8)$$

を得る。(3) 式を代入し、 $\eta \ll 1$ として PTEROA 40 の縦安定中正点の X 座標 X_N は

$$X_N / L = (c_2 / b_1) (D / L) = -0.050$$

を得る。

次に、運動が釣り合い状態から微少じょう乱であると、じょう乱運動を表す線形の数値係数の微分方程式を導く^{(7-9), (13), (14)}。じょう乱は、 $V_X, \alpha, \omega_y, \theta, \eta$ について考え、定常状態を 0 を付けて表わし、じょう乱量を改めて $V_X, \alpha, \omega_y, \theta, \eta$ と書く。

(5) 式は $V_X, \alpha, \omega_y, \theta, \eta$ に関する連立微分方程式として次のように表わされる。

$$\left\{ \left(1 + \frac{A_{11}}{m} \right) \frac{d}{dt} - \frac{1}{m} \frac{\partial X}{\partial V_X} \right\} V_X - \frac{1}{m} \frac{\partial X}{\partial \alpha} \alpha + \left[Z_G \frac{d^2}{dt^2} + \left\{ \left(1 + \frac{A_{33}}{m} \right) V_{X0} \alpha_0 - \frac{\partial X}{\partial \omega_y} \right\} \frac{d}{dt} + \left(1 - \frac{\Gamma \rho}{m} \right) g \cos \theta_0 \right] \theta = \frac{1}{m} \left(\frac{\partial X}{\partial \eta} \right) \eta \quad (9.1)$$

$$\left(-\frac{1}{m} \frac{\partial Z}{\partial V_X} \right) V_X + \left\{ \left(1 + \frac{A_{33}}{m} \right) V_{X0} \frac{d}{dt} - \frac{1}{m} \frac{\partial Z}{\partial \alpha} \right\} \alpha + \left[\left(-X_G + \frac{A_{35}}{m} \right) \frac{d^2}{dt^2} + \left\{ -\frac{\partial Z}{\partial \omega_y} - \left(1 + \frac{A_{11}}{m} \right) \right\} \frac{d}{dt} + \left(1 - \frac{\Gamma \rho}{m} \right) g \sin \theta_0 \right] \theta = \frac{1}{m} \left(\frac{\partial Z}{\partial \eta} \right) \eta \quad (9.2)$$

$$\left(\frac{m Z_G}{I_{yy}} \frac{d}{dt} - \frac{1}{I_{yy}} \frac{\partial M}{\partial V_X} \right) V_X + \left\{ \frac{1}{I_{yy}} (-m X_G + A_{35}) \times V_{X0} \frac{d}{dt} - \frac{1}{I_{yy}} \frac{\partial M}{\partial \alpha} \right\} \alpha + \left[\left(1 + \frac{A_{55}}{m} \right) \frac{d^2}{dt^2} + \frac{1}{I_{yy}} \left\{ (m X_G - A_{35}) V_{X0} - \frac{\partial M}{\partial \omega_y} \right\} \frac{d}{dt} + \frac{1}{I_{yy}} \times \{ (m Z_G - \Gamma \rho Z_B) g \cos \theta_0 - (m X_G - \Gamma \rho X_B) \times g \sin \theta_0 \} \right] \theta = \frac{1}{I_{yy}} \left(\frac{\partial M}{\partial \eta} \right) \eta \quad (9.3)$$

$$-\frac{d}{dt} \theta = \omega_y \quad (9.4)$$

水平舵を釣り合い状態のまま固定した条件で、定常航行状態の動的安定性を調べるために、(9) 式で舵角の変化量をゼロとおく。

$$\eta = 0 \quad (10)$$

(9) 式の特性多項式 A は

$$A = (\lambda^2 + 2 \zeta_1 \omega_1 \lambda + \omega_1^2) (\lambda^2 + 2 \zeta_2 \omega_2 \lambda + \omega_2^2) \quad (11)$$

と書ける。第 1 の因数は固有値 λ の 1 次および 0 次の係数が第 2 の因数に比べてともに大きく、短周期モードと呼ばれる運動を表わす。一方、第 2 の因数は 1 次、0 次の係数がともに小さく長周期モードと呼ばれる運動を表わす。短周期モードは艇の運動のうち、 X 軸方向の速度変化が小さく、迎角とピッチ角の変化が主に関与する運

Fig. 8 Period and damping of long period oscillation of PTEROA 40 submersible

Fig. 9 Period and damping of short period oscillation of PTEROA 40 submersible

 Fig. 10 Trajectory of a small model of PTEROA 40 submersible ($\eta = -2.5^\circ$)

 Fig. 11 Trajectory of a small model of PTEROA 40 submersible ($\eta = -7.5^\circ$)

Table 2 Mass and added mass of PTEROA 40 submersible

$m/V\rho$	1.05
$I_{yy}/V^{5/3}\rho$	0.323
$A_{11}/V\rho$	0.168
$A_{33}/V\rho$	2.734
$A_{55}/V^{5/3}\rho$	0.0160
$A_{35}/V^{4/3}\rho$	-0.0918

動で、減衰が大きい。長周期モードは迎角静安定の大きい艇体が速度とピッチ角をゆっくりと変化させる運動で、速度やピッチ角の変化に比べて迎角変化の小さいことが特徴である。

5節で解析した PTEROA 40 の 1.5m モデルについて固有値を解析した結果、Fig. 8 に示す長周期モード、Fig. 9 に示す短周期モードを得た。横軸を水平舵角にとって解析結果を示す。

8 実験とシミュレーション

艇長 0.4m の木製モデルを制作し、これを水中に定速度、定角度、定迎角で射出し、その運動軌跡を計測し、(5) 式を時間積分した結果と比較する。艇の空中重量 W は浮力の 1.10 倍とし、重心位置は艇の前端より $0.355 L (X_G = 0.051 L)$, $Z_G = 0.0095 L$ である。Fig. 10

 Fig. 12 Trajectory of PTEROA 40 submersible ($L=1.5\text{m}$) dropped vertically from the surface. Initially elevator angle is $\eta = -2.5^\circ$. After 30 sec, elevator is rotated to $\eta = -15^\circ$.

は水平舵角が -2.5° の場合で初期の迎角 α と姿勢角 θ をそれぞれ $4^\circ, -4^\circ$ とし、初速 1.5 m/sec で射出したときの浮心の軌跡と艇の姿勢の時間変化を示している。Fig. 11 は舵角を -7.5° とした場合の結果である。これより、解析結果と実験結果とはおおむね良好な一致を示している。したがって、(2), (5) 式および Table 2 はここで考えている PTEROA 40 の運動をほぼ正確に記述していることが示された。

9 考 察

Fig. 12 は艇長 1.5 m モデルで $X_G/L=0.026$, $Z_G=X_B=Z_B=0$ を垂直下向きに初速ゼロ, 舵角 -2.5° で落下させた場合の軌跡である。約 20 秒後にはほぼ定常的なグライディング姿勢になる。30 秒後に舵角を -15° に取ると揚力が増加し, いったん浮上するが, 舵を切ってから約 30 秒後には速度が低下して定常的なグライディング姿勢になる。縦運動に関する減衰は大きく, 舵角を変えたことによる運動の乱れはほとんど 1 周期で終わっている。ここで, 定常グライディング角 γ は重心位置に大きく依存することに注意する。重心位置を前方に出せば, γ は大きくなり, 速度が増す。また, 静的および動的安定性も改良されるが, 水平航行させるための推力を多く要する。

10 お わ り に

本論文では

(1) 潜水艇に作用する流体力を利用した, グライディング航行型の無索無人潜水艇のコンセプトを示した。そのモデルの一例として PTEROA 40 と呼ばれる艇体形状を開発した。その結果として, このような形状の艇体が航行型の無索無人潜水艇として利用可能であることを示した。

(2) 潜水艇が流れのない場で運動するとき, 縦運動の運動方程式の定式化を行い, 静的および動的安定性についての検討を行った。

(3) PTEROA 40 について作用する定常流体力を水槽試験により求め, PTEROA 40 の縦運動の解析を行い, 静的および動的な面において満足でき, 操縦可能な結果を得た。

(4) 重心位置がグライディング航行に及ぼす影響について検討した。

(5) 0.4 m 模型をグライディングさせ, その軌跡と数値シミュレーションとの比較を行い, 良い一致をみた。

また, 次の問題点として

- (1) 横運動と横安定
- (2) 自律航行
- (3) 海流のある環境での航行
- (4) 位置標定に関する計測システム

などがある。これらについては次報以降に報告する。

本研究を行うに当たり, (財)日本自動車研究所石原智男所長, 東海大学開発研究所浅田敏教授, 東海大学海洋学部友田好文教授, 東京大学梶浦欣二郎名誉教授より貴重なご助言ご協力を賜った。また, 東京大学生産技術研究

所前田久明教授, 同工学部石谷久助教授, 同河内啓二助教授, 同海洋研究所藤本博已助教授, 電気通信大学電気通信学部竹内俱佳助教授より種々ご教示いただいた。ここに篤く感謝の意を表します。

付 録 PTEROA 40 に作用する流体力の推定式

艇体に作用する流体力は, 小さくて無視できる項もあり艇体固定の座標軸 (Fig. 4 参照) について次のように書ける。

$$\begin{aligned} F_x &= (1/2)\rho V_c^2 LB \{C_1(\alpha, \beta) + C_1^E(\eta)\} \\ F_y &= (1/2)\rho V_c^2 LB \{C_2(\alpha, \beta) + C_2^E(\delta)\} \\ F_z &= (1/2)\rho V_c^2 LB \{C_3(\alpha, \beta) + C_3^E(\eta)\} \\ M_x &= (1/2)\rho V_c^2 LBD \{C_4(\alpha, \beta) + C_4^E(\eta) \\ &\quad + (1/2)\rho(LBD)^{5/3} \{C_4^N \omega_x |\omega_x|\} \\ M_y &= (1/2)\rho V_c^2 LBD \{C_5(\alpha, \beta) + C_5^E(\eta) \\ &\quad + (1/2)\rho(LBD)^{5/3} \{C_5^N \omega_y |\omega_y|\} \\ M_z &= (1/2)\rho V_c^2 LBD \{C_6(\alpha, \beta) + C_6^E(\eta) \\ &\quad + C_6^E(\delta)\} + (1/2)\rho(LBD)^{5/3} \{C_6^N \omega_z |\omega_z|\} \end{aligned}$$

C_1, C_2, C_3 は次の座標変換を行って, 抗力係数, 横力係数, および揚力係数 C_1', C_2', C_3' に書き換えて記述したほうが理解しやすい。

$$\begin{Bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos \alpha \cos \beta & \sin \beta & -\sin \alpha \cos \beta \\ -\cos \alpha \sin \beta & -\cos \beta & -\sin \alpha \sin \beta \\ \sin \alpha & 0 & -\cos \alpha \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} C_1' \\ C_2' \\ C_3' \end{Bmatrix}$$

各係数は回流水槽などで実験的に次のように求められた。

$$\begin{aligned} C_1' &= 0.0138 + 0.221 \beta^2 + 0.601 \alpha^2 \\ C_2' &= (0.159 - 0.070 \alpha^2) \beta \\ C_3' &= (1.36 - 2.98 \beta^2 + 14.8 \beta^4 - 12.55 \beta^6) \alpha \\ C_4 &= 1.033 \alpha \beta \\ C_5 &= -(0.225 - 0.271 \beta^2 + 1.74 \beta^4 - 0.612 \beta^6) \alpha \\ C_6 &= -(0.0417 - 0.271 \alpha^2) \beta \\ C_1^E &= -0.104(\eta^2 + \eta_L^2) \\ C_3^E &= -0.276(\eta_R + \eta_L) \\ C_4^E &= -0.141(\eta_R - \eta_L) \\ C_5^E &= -0.357(\eta_R + \eta_L) \\ C_6^E &= 0.053(\eta_R^2 - \eta_L^2) \\ C_2^R &= 0.544 \delta \\ C_6^R &= -0.469 \delta \\ C_4^N &= -1.11 \\ C_5^N &= -1.746 \\ C_6^N &= -0.233 \end{aligned}$$

ただし, 流力模型は $L=0.4$ m で, $C_1' \sim C_6^R$ を計測した流速は約 0.65 m/sec である。 $C_4^N \sim C_6^N$ は模型を 0.5~3 rad/sec で回転させて求めた。実験式の適用範囲は

$$|\alpha| < 20^\circ, |\beta| < 30^\circ$$

である。ここで水平舵角 η は舵を下げたときを正にする。 R と L との添え字はそれぞれ右舷, 左舷を表す。垂直舵角 δ は正の横力が発生する方向を正に取る。

参 考 文 献

- 1) 浦, 大坪: グライダー型潜水艇の設計に関する研究 (その 1), 生産研究, Vol.37.12 (1985), pp.

- 25-28.
- 2) 浦, 大坪: グライダー型潜水艇の設計に関する研究 (その 2), 生産研究, Vol.39. 4 (1987), pp. 149-152.
 - 3) 浦, 大坪: グライダー型潜水艇の設計に関する研究 (その 3), 生産研究, Vol.39. 5 (1987), pp. 183-186.
 - 4) 大坪: グライダー型潜水艇の可能性に関する研究, 東京大学工学系大学院修士論文 (1987).
 - 5) 石谷: 無人潜水艇の高度維持制御に関する考察 (その 1), 日本造船学会論文集, Vol.160 (1986), pp. 111-119.
 - 6) 石谷: 無人潜水艇の高度維持制御に関する考察 (その 2), 日本造船学会論文集, Vol.161 (1987), pp. 215-224.
 - 7) 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), 日本造船学会論文集, Vol.138 (1975), pp. 210-221.
 - 8) 飯高: 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), 日本造船学会論文集, Vol.150 (1981), pp. 254-265.
 - 9) 飯高: 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 5 報), 日本造船学会論文集, Vol.151 (1982), pp. 115-125.
 - 10) 前田: 任意船形におよぼす波の強制力について, 日本造船学会論文集, Vol.126 (1969), pp. 55-83.
 - 11) 石寺ほか: 遠隔操作式無人潜水艇の運動シミュレーション, 日本造船学会論文集, Vol.158 (1985), pp. 157-168.
 - 12) 浦: 無人潜水艇技術の研究, 生産研究, Vol.39. 8 (1987), 317-326.
 - 13) 重満: 没水体の縦安定に関する研究, 造船協会論文集, Vol.111 (1962), pp. 39-50.
 - 14) 土田ほか: 潜水船の縦安定性能, 造船協会論文集, Vol.107 (1960), pp. 17-26.
 - 15) Babister, A. W.: Aircraft Stability and Control, Pergamon Press (1961), London.
 - 16) Etkin, B.: Dynamics of Flight, John Wiley & Sons (1982), New York.