

グライダー型潜水艇の設計に関する研究 (その2)

Feasibility Study on Gliding Submersibles (2nd Report)

浦 環*・大坪 新一郎*

Tamaki URA and Shin'ichiro OTSUBO

1. はじめに

海面下の広い範囲の情報を短時間で獲得するためには、高速航行性能と操縦性に優れた無索無人潜水艇の開発が必要である。前報¹⁾では、海底に到達するまでの間、推進力を使わずに潜降するグライダー型潜水艇を提案した。そこでは、潜水艇の定常グライディング姿勢を制御するために重心位置を前後方向に変えることの可能性について検討した。その結果、具体的な実現性のある艇体の形状を設計できることが明らかになった。ここでは、航行速度を大きく取れる艇体の形状として NACA 0030 を基本形状とし、図 1 に示す楕円型の横断面を持った扁平な艇体形状と水平舵および垂直舵を持つパイロットモデル (ここでは PTEROA 40 とよぶ) を設計し、流体力試験および付加質量の解析をおこなったので報告する。また、その結果に基づいて、水平舵の舵角により定常航行姿勢がどのように変化するかを検討する。

2. 付加質量の算定

艇体が水中で運動すると、艇体表面には静水圧のほか流体を動かすことにより生じる圧力が働く。この周りの流体から反作用として受ける動的流体力をラディエーション流体力と呼び、加速度に比例する成分を付加質量力と呼ぶ。図 2 に示す艇体固定の座標系をとる。剛体 6 自由度の運動モードに対して添字 1~6 を表 1 のように定める。

m_{ij} を付加質量係数とすると、 $m_{ij}\ddot{X}_j$ は艇体が j 方向の規則的な運動をした時の i 方向のラディエーション流体力の加速度に比例する成分を表す。3次元形状をした艇体のラディエーション流体力を推定するのに、ストリップ法 (Ordinary Strip Method)²⁾を用いる。ストリップ法は艇長方向 X なる位置における断面のストリップ (幅を dx とする) に働く 2次元流体力を艇長方向に積分することによって 3次元艇体に働く流体力を算定するものである。ここで考える艇体は上下左右に対称な形状をしているので、ラディエーション流体力のうち無視できる項がある。

あるストリップにおける heaving, swaying, rolling に対する 2次元付加質量係数をそれぞれ $m_h(x)$, $m_s(x)$, $m_r(x)$ とすると、無視できない艇体の付加質量係数は次のように定まる。

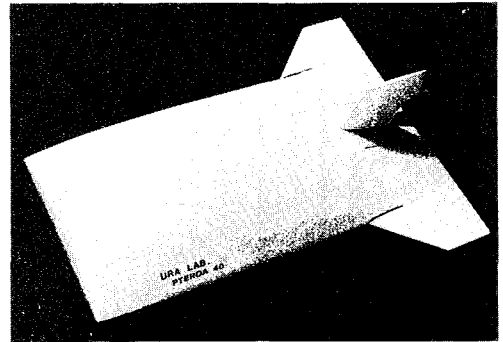


図 1 PTEROA 40 モデル

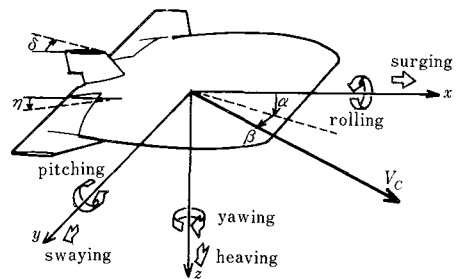


図 2 座標系

表 1 運動モード

1	x 軸方向併進運動	surging
2	y " "	swaying
3	z " "	heaving
4	x 軸方向回転運動	rolling
5	y " "	pitching
6	z " "	yawing

*東京大学生産技術研究所 第2部

研 究 速 報

表 2 PTEROA 40 の付加質量係数

$m_{22}/\rho V$	0.314
$m_{33}/\rho V$	1.47
$m_{35}/\rho V^{4/3}$	-0.402
$m_{26}/\rho V^{4/3}$	-0.0370
$m_{44}/\rho V^{5/3}$	0.0377
$m_{55}/\rho V^{5/3}$	0.569
$m_{66}/\rho V^{5/3}$	0.0767

$$m_{33} = \int m_h(x) dx \quad (1. a)$$

$$m_{53} = m_{35} = - \int (x - x_c) m_h(x) dx \quad (1. b)$$

$$m_{55} = \int (x - x_c)^2 m_h(x) dx \quad (1. c)$$

$$m_{22} = \int m_s(x) dx \quad (1. d)$$

$$m_{62} = m_{26} = \int (x - x_c) m_s(x) dx \quad (1. e)$$

$$m_{44} = \int m_r(x) dx \quad (1. f)$$

$$m_{66} = \int (x - x_c)^2 m_s(x) dx \quad (1. g)$$

2次元断面での付加質量係数は特異点分布法⁹⁾により求める。単位振幅速度に対する速度ポテンシャルを ϕ 、艇体表面の外向き単位法線ベクトルを $\vec{n}(\partial y/\partial n, \partial z/\partial n)$ とすると各運動に対する境界条件は

$$\text{heaving} \quad \partial\phi/\partial n = -\partial z/\partial n \quad (2. a)$$

$$\text{swaying} \quad \partial\phi/\partial n = -\partial y/\partial n \quad (2. b)$$

$$\text{rolling} \quad \partial\phi/\partial n = -(y\partial z/\partial n - z\partial y/\partial n) \quad (2. c)$$

艇体表面上の (y', z') 点に σ なる強さの source を分布したときの (y, z) 点における速度ポテンシャルを $\phi(y, z)$ とすると

$$\phi(y, z) = \int_c \sigma \log r ds \quad (3)$$

$$r^2 = (y - y')^2 + (z - z')^2$$

$\int_c ds$ は艇体表面上での積分を表す

(3)式を(2)式の境界条件に代入して、source 分布 σ が得られる。ある運動モード i での2次元付加質量を m_i とすれば、2次元断面に作用する圧力の和として

$$m_i = -\rho \int_c \phi_i \partial\phi_i/\partial n ds \quad (4)$$

ρ : 流体密度

表 2 に PTEROA 40 についての計算例を示す。以後 V : 排水量, L : 艇長, B : 胴体部最大幅, D : 胴体部最大高さであり, ρ は海水の密度とする。

3. 流体力の評価

図 2 に示すように座標系は右手系⁴⁾とし、原点は艇体の浮力中心にとり、 x 軸は艇の中心線に一致している。 x ,

y, z 軸方向の速度成分をそれぞれ U, V, W とすると、迎角 α , 横すべり角 β は前進速度 $V_c (= U^2 + V^2 + W^2)$ を用いて次のように定義される。

$$\alpha = \sin^{-1}(W/V_c) \quad (5. a)$$

$$\beta = \sin^{-1}(V/V_c) \quad (5. b)$$

運動モード i に対応する流体力 F_i は水平舵角 η , 垂直舵角 δ の効果を加えて、無次元流体力係数 C_i, C_i^E, C_i^R, C_i^N を用いて次のように表す。ここで、 C_i^E, C_i^R はそれぞれ流体力のうち、水平舵、垂直舵による成分に対応し、 C_i^N は回転運動に対する抵抗を示す係数であり、 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ は x, y, z 軸に関する回転角速度である。

$$[F_i] = \frac{1}{2} \rho V_c^2 L B \begin{bmatrix} C_1(\alpha, \beta) + C_1^E(\eta) \\ C_2(\alpha, \beta) + C_2^R(\delta) \\ C_3(\alpha, \beta) + C_3^E(\eta) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \rho V_c^2 L B D \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ C_4(\alpha, \beta) + C_4^E(\eta) \\ C_5(\alpha, \beta) + C_5^E(\eta) \\ C_6(\alpha, \beta) + C_6^E(\eta) + C_6^R(\delta) \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \rho (L B D)^{5/3} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ C_4^N \omega_x |\omega_x| \\ C_5^N \omega_y |\omega_y| \\ C_6^N \omega_z |\omega_z| \end{bmatrix} \quad (6)$$

x 軸方向を前進速度方向に一致させた場合 (安定軸と呼ぶ)、その x 軸, z 軸方向の流体力係数は、それぞれ迎角 α に関する 2 次式と 1 次式で近似的に表せることが知られている。 x, y, z 軸方向の力に関しては、安定軸における

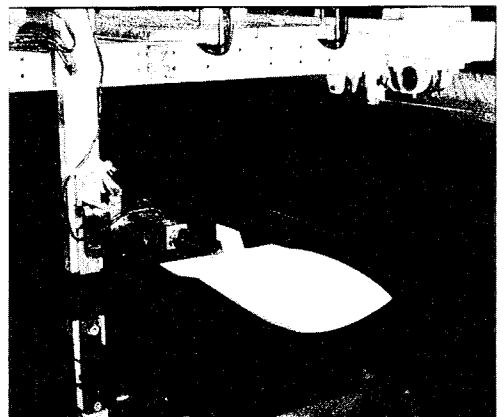


図 3 回流水槽中にセットされた模型

研究速報
 流体力係数 C_1' , C_2' , C_3' を導入し,

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha \cos\beta & \sin\beta & -\sin\alpha \cos\beta \\ -\cos\alpha \cos\beta & \cos\beta & \sin\alpha \sin\beta \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1' \\ C_2' \\ C_3' \end{bmatrix} \quad (7)$$

のように座標変換を行い, C_1' , C_2' , C_3' を α , β の関数

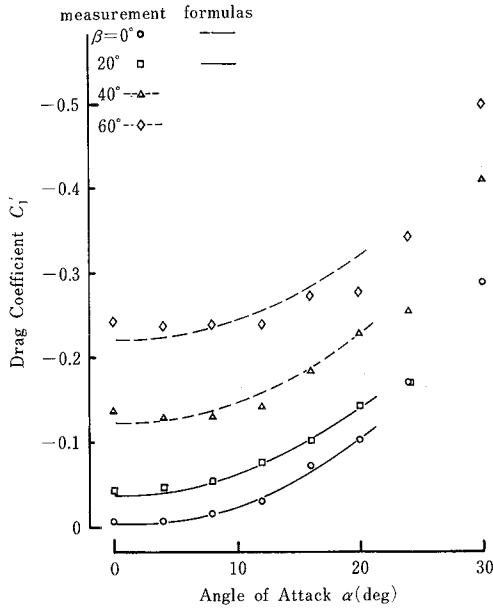


図 4 PTEROA 40 の抗力係数

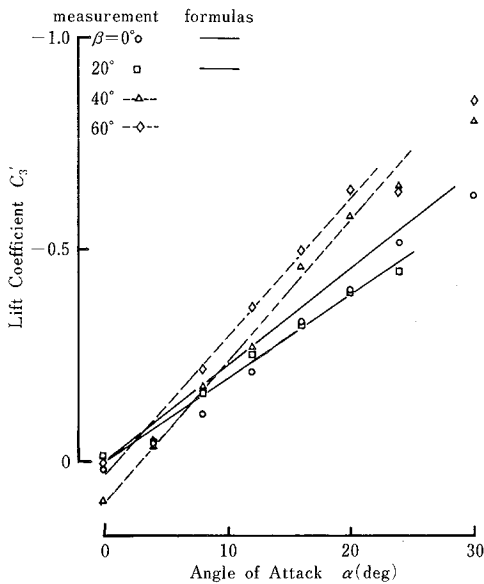


図 5 PTEROA 40 の揚力係数

として表した. この C_1' , C_3' は航空機力学における抗力係数 C_D , 揚力係数 C_L に等しい.

回流水槽を使用して各流体力係数を計測した (図 3 参照). 実験に用いた模型は木製で, 艇長 0.4 m である. 流速は約 0.65 m/s であり, α , β を $0 \sim 90^\circ$ の範囲で変化させ, さらに η および δ をそれぞれ変えて測定した. 図 4 ~ 6 は結果の一例で C_1' , C_3' , C_5 を α , β に関してプロットしたものである. 回転に対する抵抗は, 模型を強制的に回転させ, 計測した. 図 7 は各運動モードにおいて回転角速度を与えたときの Moment を示す. 各係数を以下にまとめて示す.

$$\begin{aligned} C_1' &= -(0.0138 + 0.221\beta^2 + 0.601\alpha^2) \\ C_2' &= -(0.159 - 0.070\alpha^2)\beta \\ C_3' &= -(1.36 - 2.98\beta^2 + 14.8\beta^4 - 12.55\beta^6)\alpha \\ C_4 &= 1.033\alpha\beta \\ C_5 &= (0.225 - 0.271\beta^2 + 1.74\beta^4 - 0.612\beta^6)\alpha \\ C_6 &= -(0.0417 - 0.1417\alpha^2)\beta \\ C_1^E &= -0.104(\eta_R^2 + \eta_L^2) \\ C_3^E &= -0.276(\eta_R + \eta_L) \\ C_4^E &= -0.141(\eta_R - \eta_L) \\ C_5^E &= -0.357(\eta_R + \eta_L) \\ C_6^E &= 0.053(\eta_R^2 - \eta_L^2) \\ C_2^R &= 0.544\delta \\ C_6^R &= -0.469\delta \end{aligned} \quad (8)$$

ここで舵角 η は水平尾翼を下げたときを正としており, η_R , η_L はそれぞれ右舷, 左舷の舵角である. δ は正の横力を生じる向きを正としている. ただし, α , β があ

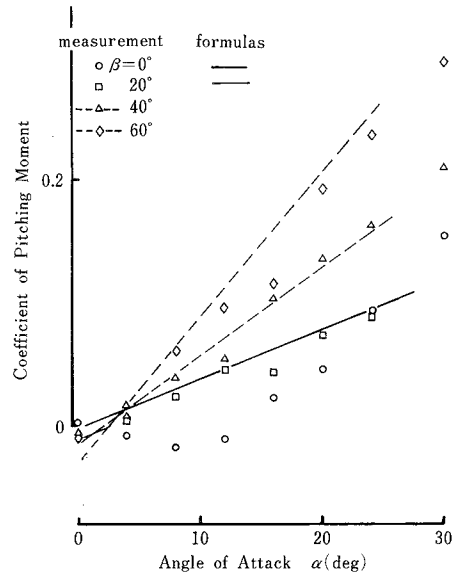


図 6 PTEROA 40 のピッチング・モーメント係数

研究速報

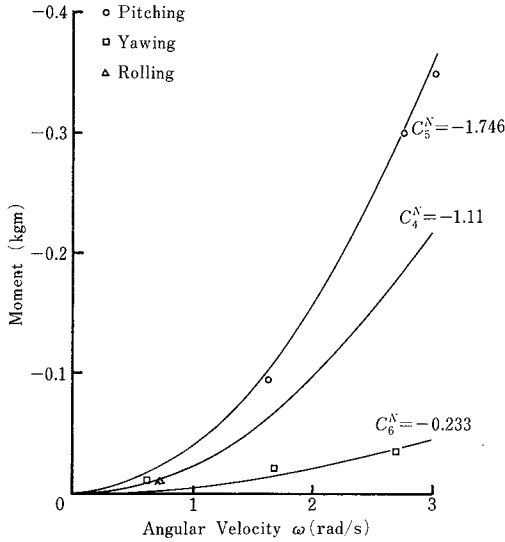


図7 回転運動に対する抵抗モーメント

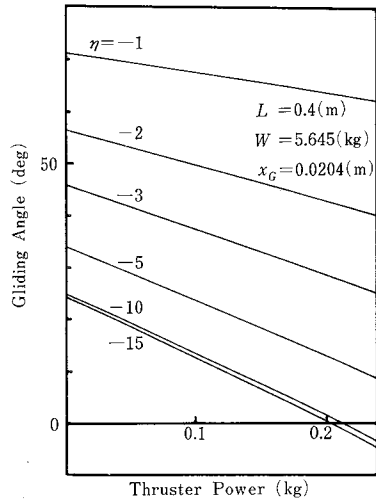


図8 定常航行状態の艇の進行方向

まり大きくなると線形性を失うため、以下にあげる係数の適用範囲は、おおむね $|\alpha| < 20^\circ$, $|\beta| < 20^\circ$ 程度である。

4. 定常航行姿勢

上記の結果に基づき、 x 軸方向に推力を持つ PTER-OA 40 艇を考え、舵角と推力 T を変化させたとき、艇の定常航行姿勢がどのように変化するかを前報に従って解析した。図8は進行方向と水平方向とがなす角で図9は速度である。計算にあたっては

- 排水量 $\nabla = 5.16 \text{ kg}$
- 空中重量 $W = 5.645 \text{ kg}$
- 重心位置 $x_c = 0.0204 \text{ m}$, $z_c = 0.0 \text{ m}$

とした。

5. ま と め

設計したパイロットモデルに関して流体力試験をおこない、それに基づいて定常航行姿勢を示した。以後はさらに大型でかつ推進力を持ち、自航可能な模型を用いてグライダー型潜水艇の可能性を検討する。

(1987年2月2日受理)

参 考 文 献

- 1) 浦環, 大坪新一郎: “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, 37, 12 (1985), 25~28
- 2) 小山健夫, 藤野正隆, 前田久明: “船体と海洋構造物の運動学”, 成山堂 (1982)
- 3) 前田久明: “任意船型におよぼす波の強制力について”, 日本造船学会論文集, 126 (1969), 55~83
- 4) 石寺博ほか: “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, 158 (1985), 157~168

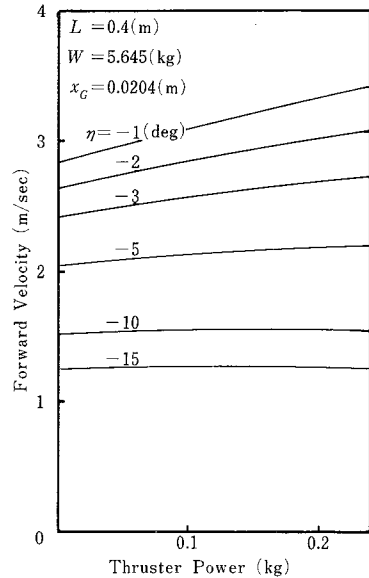


図9 艇の定常航行速度