

グライダー型潜水艇の設計に関する研究 (その1)

Feasibility Study on Gliding Submersibles (1st Report)

浦 環*・大 坪 新一郎*

Tamaki URA and Shin'ichiro OTSUBO

1. はじめに

深海における資源の調査や海底地震の観測,あるいは浅海域の海洋構造物や施設の施工・保守などの人類の海中活動は近年ますます盛んになってきている。海面下で行動力を持つためには,何らかの形の潜水艇が必要であることは言うまでもない。深海の有人潜水艇による調査も,トリエステやバチスカーブに代表される初期の大型潜水艇をつかった冒険的な活動の時代から,今やフランスの Nautilie などの小型で実用的なものを利用する段階にきている¹⁾。これら有人艇の場合,搭乗者の安全性は極めて重要であり,そのため潜水活動は時間的にも空間的にも制限を受ける。また搭乗者の環境を維持するための装置は潜水艇の排水量の大きな部分を占めるため,潜水艇は大規模にならざるをえない。

これに対して,人命への配慮を必要としない無人潜水艇は小型軽量化することができ,改造・修理も比較的に簡単で,そのために安価なものとなりうる²⁾³⁾。無人艇は海中活動型と海底走行型に大別されるが,前者は 1)有索自航式 2)曳航式 3)無索自航式の3形式があり,ROV (Remotely Operated Vehicle) と略称されている。有索自航式は,アメリカの CURV III に代表され,海底石油の開発と共に発達してきた。この形式の艇は推進装置を持ち,テザーケーブルを通じて電力供給と情報伝達をおこなうことができる。行動範囲はテザーケーブルによって制限され,使用深度が深くなるとケーブルに作用する力が大きくなり,またケーブル内で散逸するエネルギーも無視できなくなることなどの欠点がある。このため,海流の影響の少ない海域での限られた領域内の海底の調査や,海中構築物の保守・点検などの軽作業に適している。曳航式は計測用小型機で,その搭載機器の動力供給とデータ通信の索で母船に結ばれて曳航される。ケーブルの繰り出し長さ,および曳航速度を調節することにより深度が保たれる。フランスの Epaulard⁴⁾に代表される無索自航式潜水艇は索に拘束されないので運動が自由なう

え,大きな甲板設備を必要としないという利点がある。艇の制御は水中音響通信やプレプログラム等で行われるが,有索自航式のように母船との間で緊密な情報交換ができないので,高度な活動のためにはより自律性の高い高級なアルゴリズムを持った自動制御システムが必要になる。また,動力源を艇内にのみたよらねばならないこともあり,深海あるいは長時間の活動を可能にするには工学的な多くの課題を乗り越えなければならない。しかし汎用性と安全性から今後の発展が期待され,その研究開発は極めて重要である。特に,日本近海に特有な海溝や海溝周縁において十分な運動性をもちつつ稼動しうる艇としては最も可能性の高い型式と考えられる。ここではこのような観点に立って,浅海域のみならず 6000 m 以上の深海でも活動の可能な新しいタイプの無索無人潜水艇の可能性を探る。

2. 潜水艇モデルと平衡条件

先に述べたように,無索自航式無人艇の場合,艇体の内部に動力源を搭載せねばならない。したがって,エネルギー密度の高い一次あるいは二次電池の研究開発が重要であるが,同時に少ないエネルギー量でできるだけ広い範囲の行動が可能であるような推進性能および艇体形状の研究が要求される。潜水艇は,1)目的の海底に到達するまでの潜降,2)海底面上での水平移動(若干の上下移動をふくむ),3)母船に復帰するための浮上,の3種類の運動をおこなう。このうち,潜降および浮上は浮力と重力の差を利用するが,水平方向には一般に推進機を使って移動する。ここでは,潜水・浮上時に単に鉛直にのみ移動するのではなく,艇体に作用する流体力を利用して,推進装置によらずに水平方向にも移動しうる潜水艇の設計を試みる。そのプロトタイプとして,図1のような形状の潜水艇を考える。ここで,潜水艇では航空機と異なり浮力と重力の差を比較的容易に制御することができるので,低速の場合でも翼面積を大きくとる必要はないことを注意しておく。艇体は種々の装置を搭載する

* 東京大学生産技術研究所 第2部

研究速報
 胴体部と補助翼としての水平尾翼と垂直尾翼からなる。胴体の断面形状は翼形であり、水平移動に必要な流体力は主としてここに作用する。水平尾翼の取り付け角 η を操作することにより、潜水艇の潜降・浮上姿勢と速度を制御しつつ、グライダーのように海中を「グライディング」することを可能とするシステムを考える。このような機能を持つ潜水艇を今後、グライダー型潜水艇と呼ぶ。

速度 V で潜降および浮上中の艇体に作用する力は図 2 に示される⁹⁾。艇の胴体には揚力 F_L 、抗力 F_D およびモーメント M_0 が空力中心に働き、図 2 に示される方向を正とする。 L, B を艇長および胴体部の幅とし、 $h_0L, h_TL, hL, h_bL, h'L$ はおのおの、胴体部の空力中心、水平尾翼の空力中心、重心、浮心および浮上するために投棄するバラストの重心位置の艇前端からの距離とする。ここでは艇は上下および左右に対称な形状をもつものとし、上記 5 点は簡単のために対称軸上にあるものとする。 α を迎角、 γ を水平方向と運動方向とのなす角とする。 $W, \Delta W, F$ はおのおの投棄するバラスト重量をのぞいた艇の空中重量、投棄するバラストの空中重量、およびそれに対応する浮力(排水量)である。潜降の際には $W + \Delta W > F$ であり、浮上の際はバラスト ΔW を投棄し、 $W < F$ となって浮上する。潜降・浮上の際の対称な 2 次元運動の平衡条件は水平方向、垂直方向、重心回りのモーメントのつり合いから、

$$(F_L + F_L^T) \sin \gamma - (F_D + F_D^T) \cos \gamma + T \cos(\gamma - \alpha) = 0 \quad (1)$$

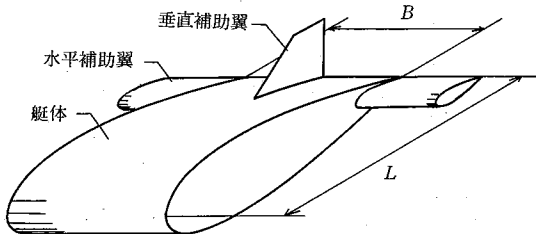


図 1 潜水艇の形状

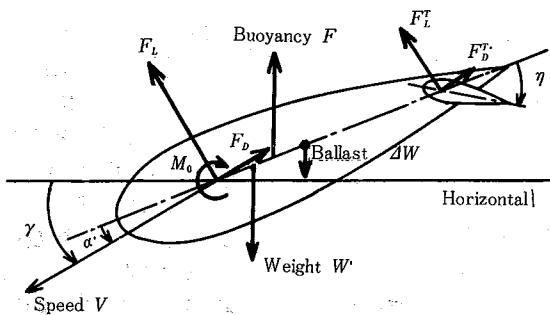


図 2 潜水艇に働く力とモーメント

$$(F_L + F_L^T) \cos \gamma + (F_D + F_D^T) \sin \gamma - T \sin(\gamma - \alpha) = \begin{cases} -F + W + \Delta W & (\text{潜降時}) \\ -F + W & (\text{浮上時}) \end{cases} \quad (2) \quad (3)$$

$$(F_L \cos \alpha + F_D \sin \alpha)(h - h_0)L + M_0 - (h_b - h)LF \cos(\gamma - \alpha) - (F_L^T \cos \alpha + F_D^T \sin \alpha)(h_T - h)L = \begin{cases} (h - h')L\Delta W \cos(\gamma - \alpha) & (\text{潜降時}) \\ 0 & (\text{浮上時}) \end{cases} \quad (4) \quad (5)$$

ここでは尾翼に働くモーメントは無視しており、 T はプロペラ推力で艇の軸方向に作用する。

3. バラスト投棄による潜降と浮上の等価性

潜水艇は舵角 η をとることにより、姿勢と速度を制御して海底の目的地点に到達する。その後には浮上する方法としては 1) バラストを投棄する 2) 推進力を用いるの 2 通りの方法が考えられる。本論で検討している艇体は断面が翼形をしているため、飛行機と同様に推進力により上昇(浮上)することが可能であるが、先に述べたように動力源を軽量化するために、ここでは前者のバラストを投棄する方法について考える。また、潜降の際と対称な姿勢と等しい速度を保ち、同じ軌道をたどって浮上するための条件を導く。

潜降時の姿勢、速度および潜降方向は補助翼の舵角 η を与えると(1), (2), (4)式を解くことによって得られる。浮上時には絶対値が等しく符号の異なる取り付け角を与えるものとすれば $\eta \rightarrow -\eta, F_D \rightarrow F_D, F_D^T \rightarrow F_D^T, F_L \rightarrow -F_L, F_L^T \rightarrow -F_L^T, M_0 \rightarrow -M_0$ と変えて、バラスト重

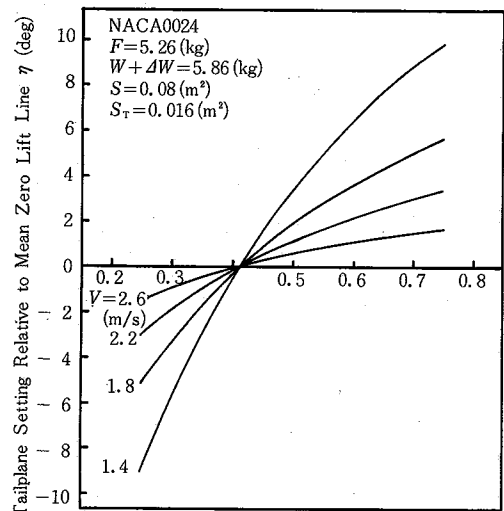


図 3 補助翼の舵角 η と重心位置との関係

量を

$$\Delta W = 2(F - W) \quad (6)$$

と設定すれば、(1), (3), (5)式が満たされる。(4), (5)式よりパラストを投棄すべき位置 h' は

$$h' = h(1 + 2F/\Delta W) - 2h_b F/\Delta W \quad (7)$$

であたえられる。また $0 < h' < 1$ でなければならないので、 h の条件として、

$$2h_b F/(\Delta W + 2F) < h < 1 - 2F(1 - h_b)/(\Delta W + 2F) \quad (8)$$

が与えられる。パラスト投棄が可能である重心位置の範囲は ΔW が大であるほど広がる。

4. 計算例

ここで想定した艇は、胴体・水平尾翼共にその断面が NACA 0024 の翼形であり、 $B = \frac{1}{2}L, S_T = 0.2LB$ とする。ここで次の無次元量を導入する。

$$\begin{aligned} F_L &= \frac{1}{2}\rho V^2 S C_L(\alpha), & F_L^T &= \frac{1}{2}\rho V^2 S C_L^T(\alpha + \eta) \\ F_D &= \frac{1}{2}\rho V^2 S C_D(\alpha), & F_D^T &= \frac{1}{2}\rho V^2 S C_D^T(\alpha + \eta) \\ M_o &= \frac{1}{2}\rho V^2 S L C_{M_o}(\alpha) \end{aligned} \quad (9)$$

S_T : 尾翼面積 ρ : 海水密度
 S : 艇の胴体部の水平投影面積

海水を非圧縮性流体と考え、干渉を無視すれば、 C_L, C_D は迎角 $x = \alpha$ のみの関数であり、近似的に

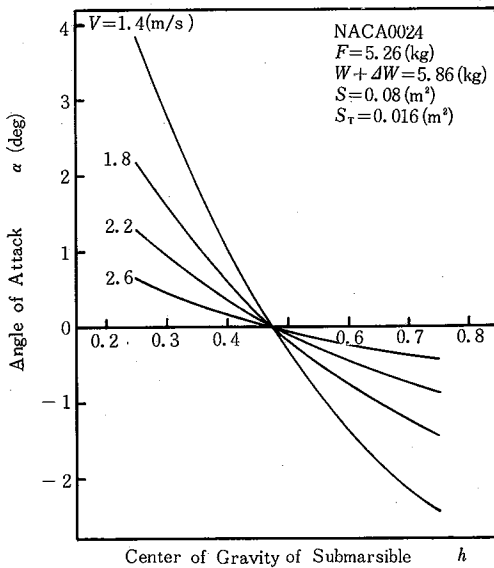


図4 迎角 α と重心位置との関係

$$\begin{aligned} C_L(x) &= 3.28x \quad (10) & C_D(x) &= 0.012 + 1.05x^2 \quad (11) \\ C_{M_o} &= 0 \quad (12) \end{aligned} \quad (x: \text{deg})$$

と表せる。また、

$$C_L^T(x) = C_L(x) \quad (13) \quad C_D^T(x) = C_D(x) \quad (14)$$

と仮定し、

$$\begin{aligned} h_o &= 0.25, & h^T &= 0.85, & h_b &= 0.406, \\ F/L^2 B \rho g &= 0.159, & W/L^2 B \rho g &= 0.141, \\ \Delta W/L^2 B \rho g &= 0.036 \end{aligned} \quad (15)$$

とする。以上の数値を用い、重心位置 h と速度 V をパラメータにして、(1), (2), (4)式を解き、得られた補助翼の舵角 η 、艇体の迎角 α 、艇の進行方向 γ を図3, 4, 5に示す。ただし、実験室内で挙動を検討するためのモデルを考えて、

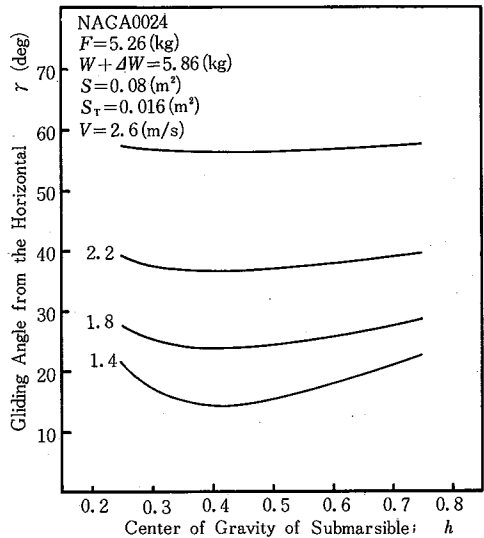


図5 艇の進行方向 γ と重心位置との関係

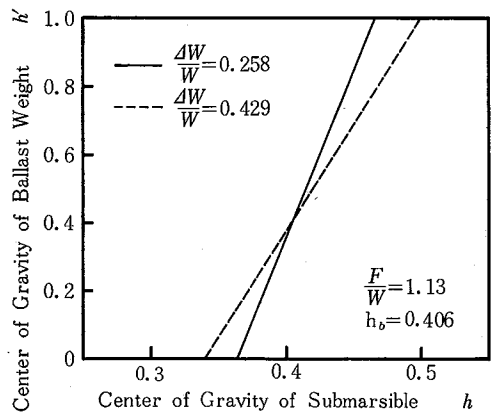


図6 パラスト投棄位置

研 究 速 報

$$S=0.08\text{m}^2, S_T=0.016\text{m}^2, L=0.4\text{m} \quad (16)$$

参 考 文 献

とした。

パラスト ΔW を投棄し、その後の浮上運動が対称になる条件を(7)式より求めると、パラストの重心 h' は、艇体の重心 h と図 6 に示される関係になる。ここでは ΔW を 2 通りに変えてある。

5. ま と め

ここではグライダー型潜水艇が舵角を変化させることにより、海中の適当な地点に到着しうるシステムを示した。このように推進力なくして水平方向の速度成分を得ることができるため、エネルギーの大幅な節約が可能である。また、パラストを投棄することにより潜降と対称な姿勢で海面上のもとの地点に復帰できることも明らかになった。

(1985 年 9 月 3 日受理)

- 1) R. A. Geyer: "Submersibles and Their Use in Oceanography and Ocean Engineering", Elsevier Scientific Publishing Company (1977)
- 2) R. Frank Busby Associates, Inc.: "Remotely Operated Vehicles", U.S. Department of Commerce (1979)
- 3) 海洋科学技術センター, "海中活動新技術の動向調査報告書" (1984)
- 4) J. L. Michel, P. Borot, and H. Le. Roux: "Epaulard Operational Utilisation Development of the Unmanned Untethered Submersible Systems", Third International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology (1983)
- 5) A. W. Babister: "Aircraft Stability and Control", Pergamon Press (1961)

