研　究　速　報
UDC 629.127.011.1

グライダー型潜水艇の設計に関する研究（その3）

Feasibility Study on Gliding Submersibles (3rd Report)

浦　　環*・大　坪　新一郎*
Tamaki URA and Shin'ichiro OTSUBO

1. はじめに

潜降浮上において動力を使用しないグライダー型潜水艇の形状ならびに航行姿勢についてこれまで検討してきた[1,2]. 前報では，航行速度を大きく取れる艇体の形状としてNACA0030を縦断面の基本形状とし，楕円形の横断面を持った偏平な艇体形状と水平舵および垂直舵を艇尾に持つパイロットモデルPTEROA40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．ここでは，このモデルについて定常航行状態の動的な姿勢安定性，および運動のシミュレーションについて論じる[3].

2. 運動方程式の線形化

$V_c=\sqrt{V_x^2+V_y^2+V_z^2}$で定常運動をしている艇体について考え，図1に示すように浮心を座標の原点として艇体固定の座標系をとる．PTEROA40では艇体前縁から艇の長さの0.406の位置に浮心がある．運動がつり合い位置からの微小攪乱であると仮定し，攪乱運動を表す線形定数係数の微分方程式を導く．基準となる艇のつり合い状態としては，横すべりなしの直線定常航行（$\beta=0$）を考える．鉛直面内の2次元運動方程式は，外力のx方向成分をX，z方向成分をZ，y軸まわりのモーメントをMとすると，

$$(m+A_{11})\dot{V}_x+mz_G\dot{\omega}_y+(m+A_{33})V_z\omega_y-mx_G\omega_y^2+A_{35}\omega_y^2=-(m-\rho\nabla)g\sin\theta+X \quad (1.a)$$

$$(m+A_{33})\dot{V}_z+(-mx_G+A_{35})\dot{\omega}_y-(m+A_{11})V_x\omega_y-mz_G\omega_y^2=(m-\rho\nabla)g\cos\theta+Z \quad (1.b)$$

$$mz_G\dot{V}_x+(-mx_G+A_{53})\dot{V}_z+(I_{yy}+A_{55})\dot{\omega}_y+mz_GV_z\omega_y+mx_GV_x\omega_y-A_{53}V_x\omega_y=-(mz_G-\rho\nabla z_B)g\sin\theta-(mx_G-\rho\nabla x_B)g\cos\theta+M \quad (1.c)$$

m：質量　　I_{yy}：慣性モーメント
A_{ij}：付加質量　　∇：排水量
(x_G, z_G)：重心位置　　(x_B, z_B)：浮心位置
ρ：流体密度　　g：重力加速度
θ：姿勢角(ピッチ角)　　ω_y：ピッチ角速度

機体が何らかの攪乱を受けたり，あるいは操縦によってつりあい状態が乱されたとする．このときの運動変数の変化を次のようにV_x，V_z，ω_y，θ，η_1，T_1で表す．

$$V_x=V_{x0}+v_x \qquad \theta\to\theta_0+\theta$$
$$V_z=V_{z0}+v_z \qquad \eta\to\eta_0+\eta_1 \quad (2)$$
$$\omega_y\to\omega_y \qquad T\to T_0+T_1$$

ここでηは，図1に示すように水平舵の舵角であり，Tはプロペラ推力である．また，定常値を添字$_0$を付して表している．

次に(1)式の右辺に現れる外力項を線形化する．外力X, Z，モーメントMのうちの1つをAで代表する．Aは機体の速度，角速度，舵角および推力の関数であるとすると仮定し，これらの変数についてテイラー級数に展開してそれぞれの第2項以上を省略すると，

$$A\simeq A_0+\frac{\partial A}{\partial v_x}v_x+\frac{\partial A}{\partial v_z}v_z+\frac{\partial A}{\partial\omega_y}\omega_y+\frac{\partial A}{\partial\eta}\eta_1+\frac{\partial A}{\partial T}T_1 \quad (3)$$

ここでA_0はつり合い状態の外力の値である．$\partial A/\partial v_x$，$\partial A/\partial v_z$などは艇体形状，航行条件が与えられれば定数であり，安定微係数 (stability derivatives) と呼ばれる．

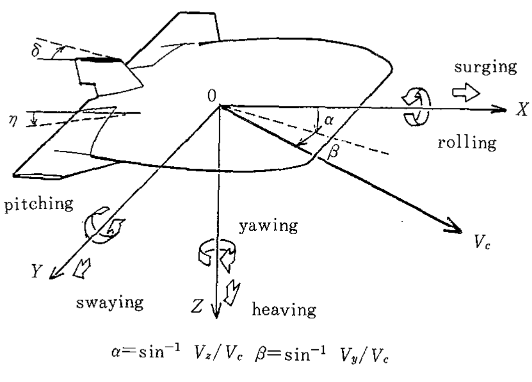

図1　艇体固定の座標系

*東京大学生産技術研究所　第2部

研　究　速　報

PTEROA40の運動を解析するにあたって航空機の例に従い，速度v_zに変えて迎角αを用いると，(1)式は，v_x, α, θに関する連立線形微分方程式として次のように表される.

$$\{(1+\frac{A_{11}}{m})\frac{d}{dt}-\frac{1}{m}\frac{\partial x}{\partial v_x}\}v_x-\frac{1}{m}\frac{\partial X}{\partial\alpha}\alpha$$
$$+[z_G\frac{d^2}{dt^2}+\{(1+\frac{A_{33}}{m})Vx_0\alpha_0-\frac{\partial M}{\partial\omega_y}\}\frac{d}{dt}$$
$$+(1-\frac{\rho\nabla}{m})g\cos\theta_0]\theta=\frac{1}{m}(\frac{\partial X}{\partial\eta})\eta_1 \tag{4.a}$$

$$(-\frac{1}{m}\frac{\partial Z}{\partial v_x})v_x+\{(1+\frac{A_{33}}{m})Vx_0\frac{d}{dt}-\frac{1}{m}\frac{\partial Z}{\partial\alpha}\}\alpha$$
$$+[(-xG+\frac{A_{35}}{m})\frac{d^2}{dt^2}+\{-\frac{\partial Z}{\partial\omega_y}-(1+\frac{A_{11}}{m})\}\frac{d}{dt}$$
$$+(1-\frac{\rho\nabla}{m})g\sin\theta_0]\theta=\frac{1}{m}(\frac{\partial Z}{\partial\eta})\eta_1 \tag{4.b}$$

$$(\frac{mz_G}{I_{yy}}\frac{d}{dt}-\frac{1}{I_{yy}}\frac{\partial M}{\partial v_x})v_x+\{\frac{1}{I_{yy}}(-mx_G+A_{35})Vx_0\frac{d}{dt}$$
$$-\frac{1}{I_{yy}}\frac{\partial M}{\partial\alpha}\}\alpha+\{(1+\frac{A_{55}}{m})\frac{d^2}{dt^2}+\frac{1}{I_{yy}}\{(mx_G-A_{35})Vx_0$$
$$-\frac{\partial M}{\partial\omega_y}\}\frac{d}{dt}+\frac{1}{I_{yy}}\{(mz_G-\rho\nabla z_B)g\cos\theta_0$$
$$-(mx_G-\rho\nabla x_B)g\sin\theta_0\}]\theta=\frac{1}{I_{yy}}(\frac{\partial M}{\partial\eta})\eta_1 \tag{4.c}$$

$$\dot{\theta}=\omega_y \tag{4.d}$$

3．PTEROA40の動的安定性

水平舵固定での縦体の動的安定性を調べるため，(4)式で$\eta_1=0$とおく．これは水平舵をつりあい状態のまま固定することを意味する．(4)式の特性多項式をΔとすると，Δは4次式となり，次のようなλに関する2つの2次式の積に因数分解される.

$$\Delta=(\lambda^2+2\zeta_1\omega_1\lambda+\omega_1^2)(\lambda^2+2\zeta_2\omega_2\lambda+\omega_2^2) \tag{5}$$

ζとωはそれぞれ減衰率と固有振動数を表す．第1の因数はλの1次および0次の係数が第2の因数に比べ共に大きく，短周期モード(short-period mode)と呼ばれる運動を表す．一方，第2の因数は1次，0次の係数が共に小さく，長周期モード(long-period mode)と呼ばれる運動を表す．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動で，周期が短く，減衰が大きい．長周期モードは迎角静安定の大きい機体が速度とピッチ角をゆっくり変化させる運動で，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．以後，第2報で扱った艇長40cmのモデル(主要目は表1参照)について具体的

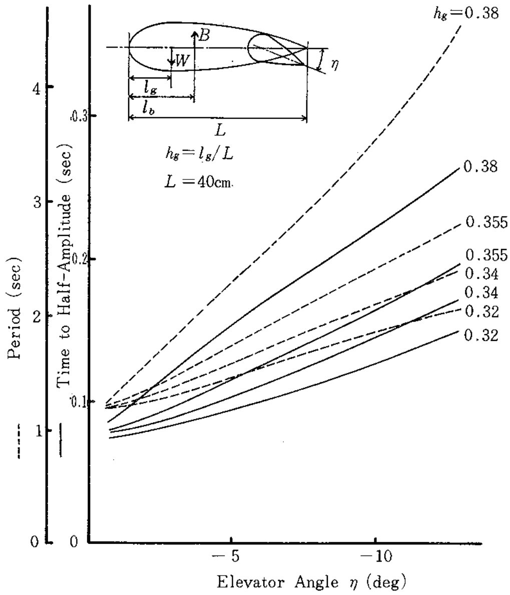

図2　40cmモデルの固有周期と半減期（短周期モード）

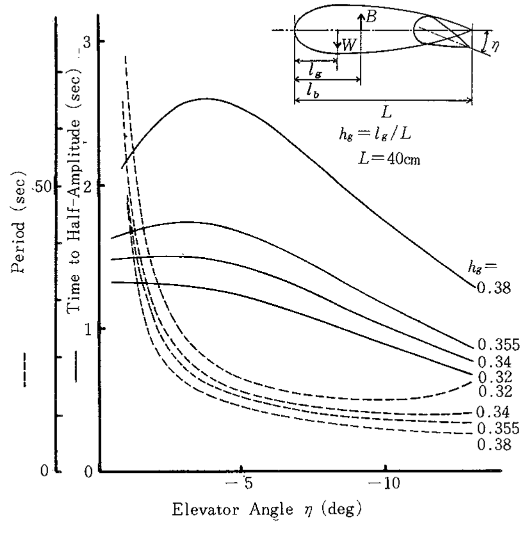

図3　40cmモデルの固有周期と半減期（長周期モード）

表1　実験に使用したPTEROA40の主要目

艇　長　L	0.40m
胴体幅　B	0.20m
全　幅　B_{0A}	0.25m
胴体高　D	0.12m
排水量　∇	5.16×10^{-3}m³
浮心位置 (x_B, z_B)	(0, 0)m
重心位置 (x_G, z_G)	(0.0204, 0.0038) m

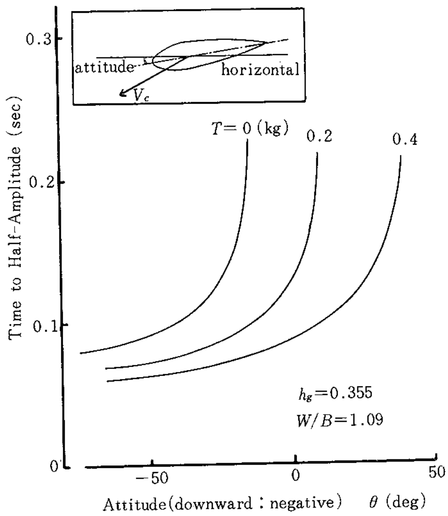

図4　推力がある場合の40cmモデルの半減期（短周期モード）

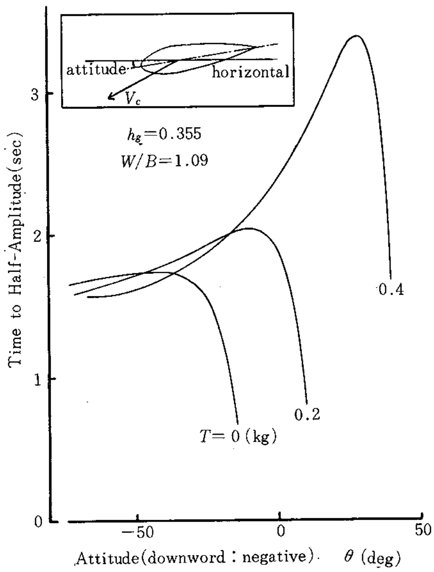

図5　推力がある場合の40cmモデルの半減期（長周期モード）

に検討する．短周期モードと長周期モードの周期と振幅半減時間を図2～5に示す．図2，3は推力を0として水平舵角ηを横軸にとり，重心位置をパラメーターとしている．図4，5は重心位置を艇前縁より$0.355L$として推力と舵角を変えて姿勢角θを変化させたときの減衰の変化を表している．図2，4は短周期モードで，図3，5は長周期モードである．図2，3からわかるように重心位置は前にあるほど減衰時間は短くなり，安定化する．しかし重心位置を前方に移すと，艇の頭下げ傾向が強くなり，艇の姿勢を水平に維持するのに必要な舵角が増大することに注意しなければならない．図4，5はPTEROA40が広い姿勢角の範囲で，動的な安定性を確保していることを示している．

4．運動シミュレーションと実験結果

運動方程式（(1)式）は艇体に固定された座標軸系によって定義されているが，シミュレーションにより潜水艇の運動を論じるには艇体に固定されて共に動く機体軸系よりも空間に固定された静止軸系で表現されていなくてはならない．このため，機体軸系で各運動パラメーターを求めた後に静止軸系に変換して，艇の挙動を追跡すればよい．

ある初速と姿勢角，迎角をもって先に述べた艇体モデルを水中に射出し，艇の動きをテレビカメラで追跡した．図6，8は初期条件を変えて実験を行った結果とそれぞれに対応するシミュレーション結果を示している．丸印はある時刻における艇体固定座標の原点（ここでは艇の浮力中心）の座標である．図7，9は艇の姿勢角θ，角速度ωと速度V_cの時間履歴を示している．図6，7は初期条件として，姿勢角を頭下げに4°，迎角を4°，初速を1.5 m/sec，舵角を$\eta=-2.5°$とした場合の結果である．艇は

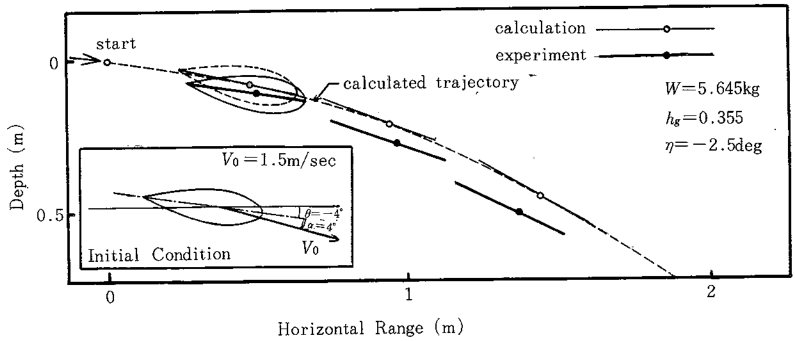

図6　舵角−2.5°で射出したときの艇の軌跡と姿勢

研　究　速　報

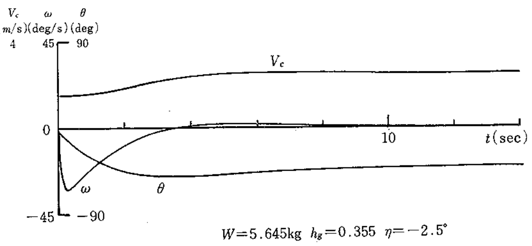

図7　舵角−2.5°で射出したときの艇の運動

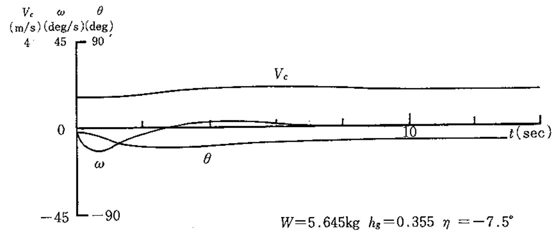

図9　舵角−7.5°で射出したときの艇の運動

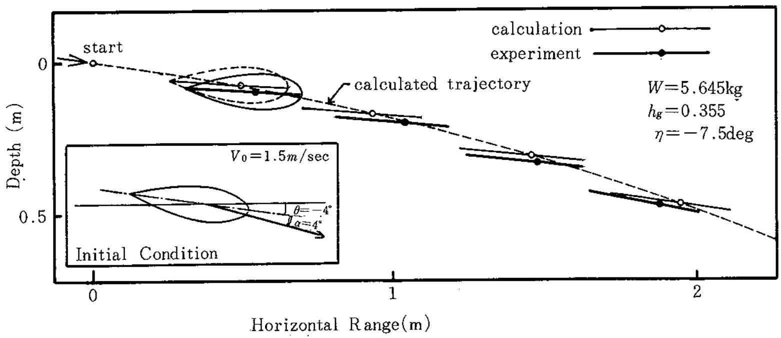

図8　舵角−7.5°で射出したときの艇の軌跡と姿勢

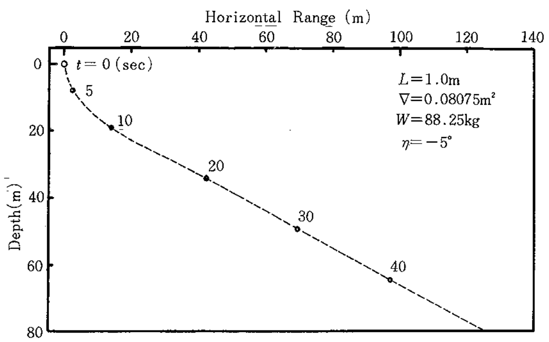

図10　1mモデルを垂直の姿勢で静かに放した場合の軌跡

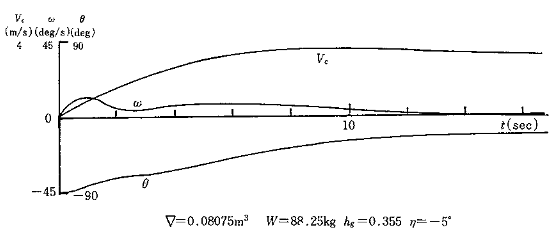

図11　1mモデルを垂直の姿勢で静かに放した場合の運動

射出後，頭下げの姿勢になった後に回復し，定常状態に収束していくことがわかる．

図7，9は舵角を$\eta=-7.5°$とし，その他の条件を変えない場合で，頭上げモーメントが大きいために水平到達距離が伸びている．図10，11は実機を想定し，PTEROA40と同形状で艇長が1mのモデルで$\eta=-5.0°$についての計算結果である．初期条件として，艇を垂直下向きに初速0で解放している．この条件のもとで，艇は20～30m潜航したのちに下向きに25°の方向に定常に航行をはじめる．

5．ま　と　め

前報における流体力試験結果をもとに艇の安定性を検討し，舵角と推力とを変化させない条件のもとで，PTEROA40が動的な安定性を確保していることを示した．また運動シミュレーションにより艇の挙動を追跡し，実験によりその妥当性を証明した．以後は通信装置と推進力を持ち自航可能な模型を用いて，検討を加える予定である．

(1987年3月9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), 539～542
2) 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2)", 生産研究, 39, 4 (1987), 149～152
3) 大坪新一郎："グライダー型潜水艇の可能性に関する研究", 東京大学大学院修士論文 (1987)