

主翼独立制御型水中グライダーのフィジビリティ・スタディ(第1報)

— 水中グライダー実験機の設計と製作 —

正員 有馬正和* 学生員 住野亘**
 学生員 豊田篤史* 正員 勝井辰博*
 正員 奥野武俊*

Feasibility Study of an Underwater Glider with Independently Controllable Main Wings (1st report)
 — Development of an Experimental Underwater Glider —

by Masakazu Arima, *Member* Wataru Sumino, *Student Member*
 Atsushi Toyoda, *Student Member* Tokihiro Katsui, *Member*
 Taketoshi Okuno, *Member*

Summary

The authors are planning to develop an 'underwater glider with independently controllable main wings' for the use of oceanographic survey, monitoring of marine environment, fisheries, ocean exploration, and marine sports / leisure activities. Underwater glider has no propulsive machinery, and so this silent and safe vehicle can be maintained with relative ease and is easy on environment and many forms of life in the sea. The first report deals with development of an experimental underwater glider. The glider was designed for much of a high performance of motion. Main wings, upper rudder, diving rudder, movable balance weight, and vent-blow valves can be remotely operated by using the 6-ch-radio-controlled system. Three-component-force test has been conducted in a circulating flow channel so as to obtain hydrodynamic characteristics of the glider. Motion performance of the glider was also observed in a towing tank and a diving training pool. Various kinds of experiments leads to the conclusion that the 'underwater glider with independently controllable main wings' had an admirable motion capability as compared with conventional 'underwater gliders with fixed main wings', and therefore practicability of the proposed glider was demonstrated.

1. 緒言

近い将来に深刻化すると危惧されている食糧問題やエネルギー問題、地球環境問題を考えるとき、地球表面の約七割を占める海洋が果たす役割は大きく、これら諸問題の解決には、何よりも海洋の理解が必要不可欠であることは言うまでもない。従来の海洋調査船や海洋観測ブイによる直接計測や人工衛星による間接的なリモートセンシングに加えて、近年研究開発が急速に進展してきた自律型海中ロボットによる海洋観測・計測が実施されるようになり、大きな成果を上げている。なかでも比較的取り扱いやすい海中観測機器として水中グライダーが挙げられる。

水中グライダーは、浮力と重力の作用を交互に用いて前進することのできる推進効率の良い水中ビークルである。スクリュウなどの推進器を必要としないので、機体の構造や機構を単純化でき、低コストでの建造・運用が期待できる。また、推進器による騒音や雰囲気水の攪乱も少なく、スクリュウへの巻き込み事故もないので、海棲生物や海洋環境にやさしく、安全性の高い水中観測機器でもある。

グライダー型海中ロボットに関する研究は、この20年の間に急速に発達してきた。浦らは、目的地点に到達するまでの潜降および母船に復帰するための浮上にグライディング方式を採用したグライダー型潜水艇「PTEROA」を設計し、理論的・実験的アプローチによって詳細な解析結果を報告している¹⁻³⁾。川口らが開発した「ALBAC」は、海中300mまで潜って水温分布を計測することに成功しているが、バラストを投棄して浮上するため、シャトル型海中ロボットと位置づけられている⁴⁾。また、山口らは、グライダー型ビークルを試設計し、その運動を数値シミュレーションしている¹⁰⁾。

* 大阪府立大学大学院工学研究科
 ** 東京工業大学大学院総合理工学研究科
 (研究当時 大阪府立大学工学部)

原稿受理 平成18年9月19日

米国では、海洋環境調査用の自律型海中グライダーが相次いで開発され¹⁰⁾、現在では市販もされている。しかし、有人の水中グライダーについての研究開発例は見当たらない。

本研究では、左右の主翼の取付角度を独立に制御することによって運動性能の向上を図る「主翼独立制御型水中グライダー」を提案する。浅海域での海洋環境モニタリングや海洋牧場の監視等を目的とした有人水中グライダーや人工ダムなどの比較的狭い領域を細かく探査するための無人水中グライダーとしての実用化を目指している。特に、有人水中グライダーでは、パイロットの思い通りに機体を操縦できることが要求されるので、運動性能を重視した主翼独立制御型水中グライダーの開発・実用化が期待される。「PTEROA150」のように、一対の翼にエレベータとエルロン機能を持たせて横運動の動的安定性を補償する機体は存在した⁵⁾が、主翼独立制御型水中グライダーでは、大きな翼面積を持つ主翼を動かすことによって、さまざまなアクロバチックな運動をも実現できるようにしたいと考えている。

第1報では、主翼独立制御型水中グライダーの性能を評価するために設計・製作した実験機について述べる。本実験機は、6chのラジコン制御システムによって、左右の主翼と縦舵（垂直尾翼）、横舵（水平尾翼）、可動式バランスウェイトおよび圧搾ガスによる注排水機構を制御できるようになっている。ここでは、従来の固定翼型水中グライダーとの性能を比較して、主翼独立制御型水中グライダーの流体力学的特性を明らかにするために実施した三分力試験と潜水訓練プールにおける運動性能の観察について報告する。

2. 水中グライダーの潜航原理

水中グライダーの潜航原理は、通常のグライダーと同じで、翼にはたらく揚力の一部を水平方向の力に変換し、それを推力として進む。潜入時の力の平衡状態を Fig.1 に示す。水中グライダーがある一定の速度で潜入している状態において、重量 G と浮力 F との差による鉛直方向の力 $G-F$ を機体に対して水平成分と鉛直成分に分けると、これらの力が翼の発生させる揚力 L および機体の抗力 D とつりあうことによって、水平に対するグライディング角度

$$\theta = \tan^{-1}(D/L) \quad (1)$$

で、速度を維持したまま直線運動を行うことになる。

また、水中グライダーの推力は、浮力と重量の差で決まるため、浮力の調節を行うバラストタンクの容積を大きくして注排水するバラスト水の量を多くするほど、潜航速度を上げることができる。さらに、主翼の迎角の調整や重心移動等による機首の上げ下げによってグライディング角度 θ を変えることでも速度の調整が可能となる。

水中グライダーの潜入・浮上は、潜水艦のようにベント弁を開放して海水をバラストタンク内に導入して潜入し、高压気蓄器に封入した圧搾空気をバラストタンクへ送り込んで海水を追い出して浮上するものや、バラストタンク内の風船様の耐圧ゴム袋にオイルを注入／排出して海水の注排水をするものがある。水中グライダーのエネルギー効率、浮力調節装置の性能にも左右されるため、浮力調節装置の検討も重要な研究課題となっている。

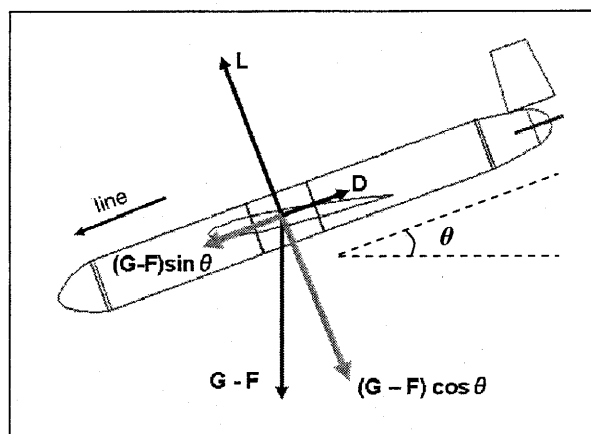


Fig.1 Equilibrium of forces acting on an underwater glider in diving.

3. 水中グライダー実験機の設計と製作

主翼独立制御型水中グライダーの諸性能を調べるために、水中グライダー実験機の設計と製作を行った。主翼の取付角度を 0° とすることで従来の固定翼型水中グライダーになり、同一機体形状で性能を比較することができる。試作した水中グライダー実験機の主要目を Table 1 に示す。

Table 1 Principal particulars of the experimental underwater glider.

Length	0.83 m
Breadth (wing span)	0.82 m
Height (including upper rudder)	0.18 m
Diameter of body	0.085 m
Mass	4.39 kg
Volume excluding ballast tank	4.66 ℓ
Volume of ballast tank	0.52 ℓ
Time to vent / blow gas	3.0 / 1.6 sec.
Wing section, profile	NACA 0009
Wing chord	0.12 m
Cruising speed	0.2 ~ 1.0 m/s
Operation depth	7.0 m

水中グライダーのグライディング角度は、揚抗比によって決まるため、主翼による揚力や胴体による抗力などを正しく見積もり、その運動性能を推定・評価することが極めて重要となる。そこで、理論計算やCFDによる数値解析が容易となるように、水中グライダー実験機は、風洞実験による流体力学的特性が公表されているNACA0009翼型の主翼や円柱形状の胴体など、できるだけ単純な形状とした。また、著者らの所属する大学の船舶試験水槽および回流水槽での実験ができるように、全長・全幅などの機体寸法を決定した。

本実験機の潜航性能を検討するために、風洞実験データ¹²⁾とLanchester-Prandtlの揚力線理論¹³⁾によって主翼にはたらく力を算出し、3次元剛体表皮模型から得られた実験式¹⁴⁾から胴体の抗力を推定した。主翼独立制御型水中グライダーでは、主翼の取付角度を変化させることによって流れに対する迎角をつけて揚力を発生させるので、機体軸と流れの方向が一致するという仮定の下に、前後方向と上下方向の力のつりあいを解いたもので、水平尾翼・垂直尾翼を考慮していない簡易推定法である。計算で得られた主翼取付角度 α と前進速度、揚抗比の関係をFig.2に示す。図より、主翼の取付角度を変えることによって、グライディング角度すなわち機体の姿勢を変化させて前進速度を0.3~0.8 m/sの範囲で調節できるということがわかる。例えば、主翼の取付角度を1 deg.や8 deg.としたとき、揚抗比はそれぞれ2.49, 8.80となり、(1)式より、グライディング角度がそれぞれ21.9 deg., 6.5 deg.で前進することになる。

設計では、米国PTC社の3次元CADソフトウェア「Pro/ENGINEER」を用いて詳細なモデルを作成し、機構の干渉の有無や機体の重心・浮心の位置などの検討を行った。Pro/ENGINEERにはモデル解析機能があるので、慣性モーメントなど運動モデルの構築に必要な情報を得ることもできる。Fig.3にCADモデルおよび主な機器の配置図を示す。

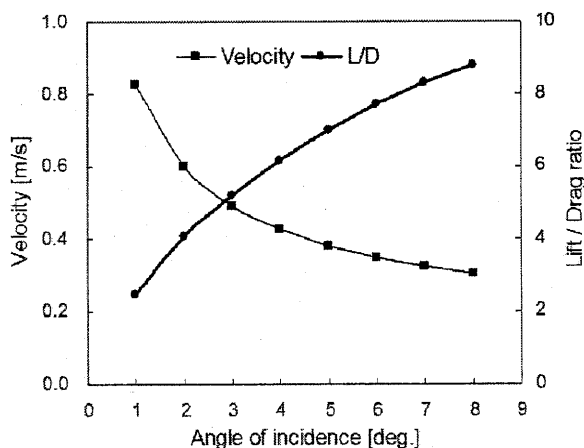


Fig.2 Relationship between angle of main-wings attachment and cruising speed, lift/drag ratio.

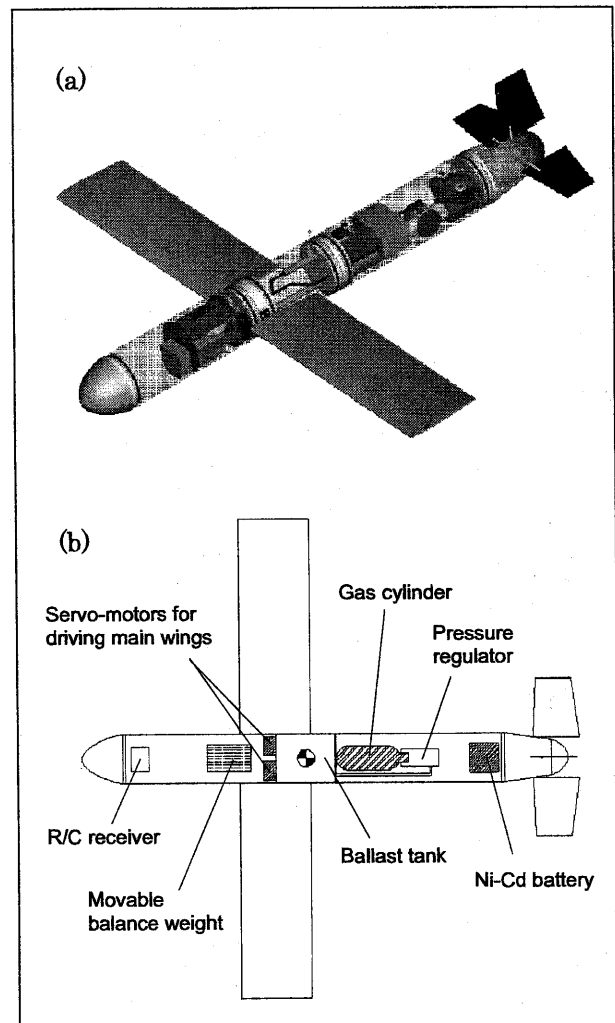


Fig.3 (a) CAD modelling and (b) arrangement of equipments.

機体の製作は、大阪府立大学工学部生産技術センターの協力を得て行った。胴体部分には肉厚が2 mmのアクリルパイプを用いた。主翼の駆動にはR/C用のサーボモーターを用いたが、機構的な制約のため、主翼取付角度の可動範囲は ± 25 deg.となっている。左右で独立して取付角度を制御できるので、航空機の補助翼(エルロン)のような使い方が可能である。バラストタンクへの注排水を行うためのコンビネーションバルブ(ベント弁/ブロー弁)は、模型潜水艦用に開発された機構を採用した。圧搾ガスには水草育成用の炭酸ガスボンベを用いた。このボンベには約12気圧で炭酸ガスが封入されており、これをレギュレータで5気圧まで減圧して使用する。ボンベが空になるまでに30回程のバラストタンクの注排水を行うことができる。

機体の前部には質量1.242 kgの真鍮製で、ストロークが3.2 cmの可動式バランスウェイトを搭載した。バランスウェイトを中立位置にしたとき、機体の重心と浮心の前後位置がバラストタンクの中央になるように設計・調整されている。

このバランスウェイトを移動させることによって重心の前後位置を 9.12 mm だけ変化させることができ、潜入/浮上時における機体姿勢のスムーズな動きを可能にしている。

また、加速度計やジャイロなどのセンサー類や運動計測と自動制御のためのマイコンを搭載できるように、機体の前部と後部上方にそれぞれ 300 cc 程度のペイロードスペースを確保している。

4. 水中グライダー実験機の性能評価

4.1 水中グライダー実験機の潜航試験

大阪府立大学・海洋システム大型実験水槽棟の船舶試験水槽（長さ×幅×水深： $70.0\text{m} \times 3.0\text{m} \times 1.6\text{m}$ ）において製作した水中グライダー実験機の潜航試験を行い、すべての機構が設計通りに正しく動作することを確認した。実験の様子を Fig.4 に示す。

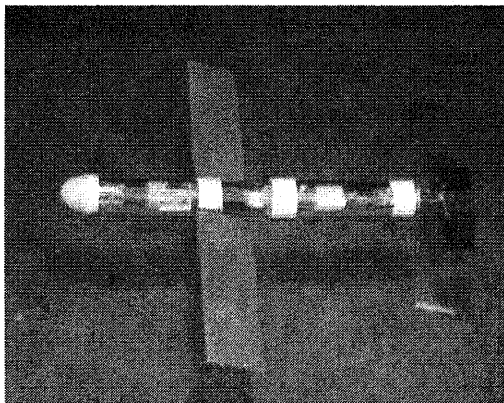


Fig.4 Cruising experiment in the towing tank of OPU.

4.2 水中グライダー実験機の三分力試験

大阪府立大学・海洋システム中型水槽実験室の回流水槽（観測部の長さ×幅×水深： $6.0\text{m} \times 1.5\text{m} \times 1.0\text{m}$ ）において三分力試験を実施した。従来の固定翼型水中グライダーと比較することによって主翼独立制御型水中グライダーの流体力学的特性を明らかにするために、(1) 主翼の取付角度を 0 として、水中グライダーに迎角をつけた場合（固定翼型水中グライダー）と、(2) 機体を水流に対して平行に保ち、主翼に迎角をつけた場合（主翼独立制御型水中グライダー）の揚力と抗力、縦揺れモーメントを 6 分力検出器（日章電機(株)製、LMC-6524-200N）を用いて計測した。また、流速は、プロペラ式流速計（(株)ケネック製、VRT-200-20）によって計測した。実験時の水中グライダーと計測装置の配置を Fig. 5 に、実験条件を Table 2 に示す。機体を支えるストラットは、翼弦長が 0.10 m の NACA0015 翼型のものを製作して用いた。流速を $0.5 \sim 0.8\text{ m/s}$ とし、機体に損傷がない範囲内で系統的に変化させた。

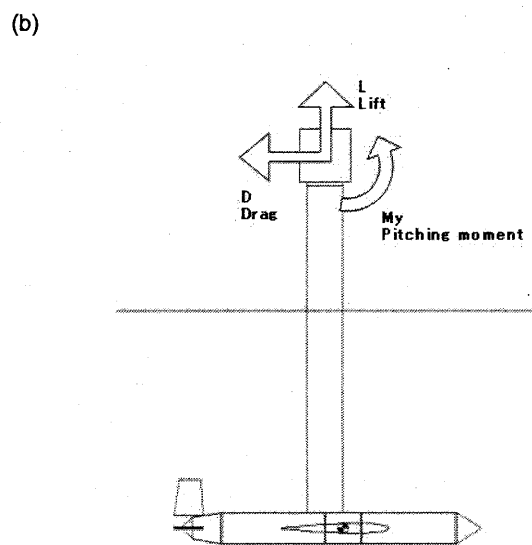
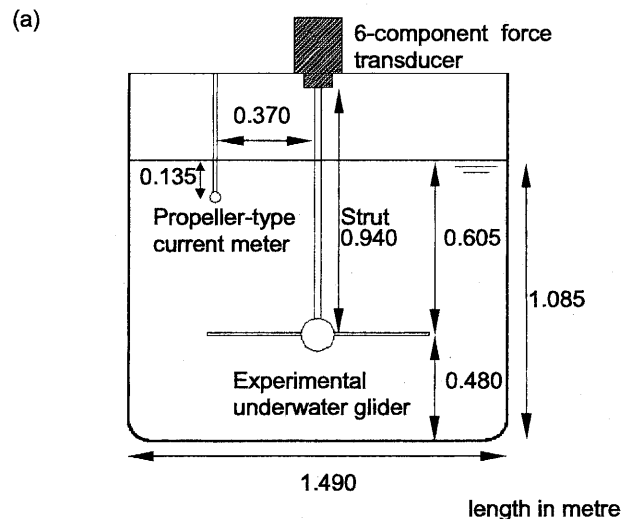


Fig.5 Arrangement of experiment in the circulating flow channel (a) and 3-component-force (b).

Table 2 Experimental conditions for 3-component-force measurement.

	Angle of attack of the glider body against water flow (deg.)	Angle of incidence of the main wings to the body (deg.)
(1)	$\pm 2, \pm 4, \pm 6, \pm 8$	0
(2)	0	$\pm 2, \pm 4, \pm 6, \pm 8$

揚力、抗力および揚抗比をそれぞれ Figs.6-8 にプロットする。揚力および抗力の無次元化には、翼面積 S を用いた。図中の記号「B」は、(1) 主翼の取付角度を 0 とし、機体全体で迎角をつけた場合（固定翼型水中グライダー）で、「W」は、(2) 機体の迎角を 0 とし、主翼の取付角度を変化させた場合（主翼独立制御型水中グライダー）である。記号の後の数値は、流速（ m/s ）を表している。

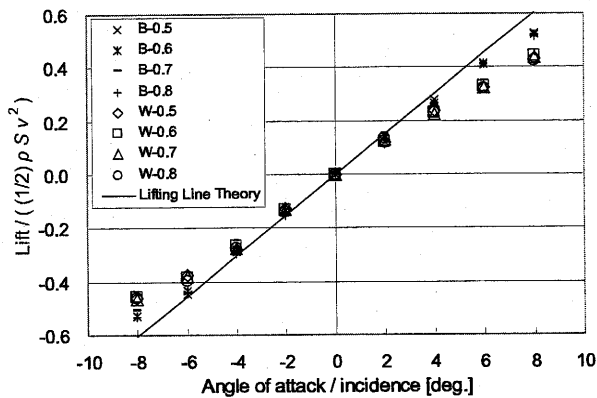


Fig.6 Non-dimensional lift.

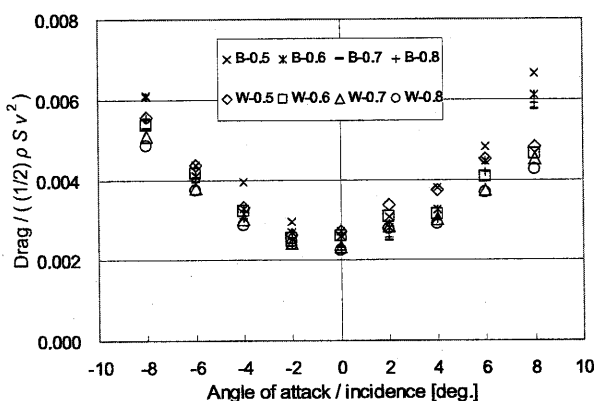


Fig.7 Non-dimensional drag.

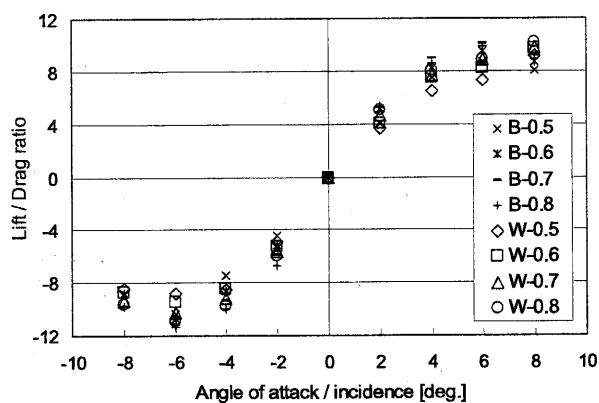


Fig.8 Lift / drag ratio.

Fig.6より、揚力は、揚力線理論によって算出された値とほぼ一致していることがわかる。また、揚力は、主翼の取付角度を変化させた場合(図中の「W」)、胴体部分で揚力を発生しないので、固定翼型で機体に迎角をつけた場合(B)に比べると若干小さくなっている。流れの方向と機体軸が一致する主翼独立制御型水中グライダー(W)の方が抗力は小さくなる(Fig.7)が、揚力も小さくなり(Fig.6)、揚抗比も小さくなっている(Fig.8)ことから、グライディング性能は固定翼型の方が良いということが明らかになった。

Fig.2に示される設計段階で見積もった前進速度と揚抗比を見ると、例えば、主翼の取付角度が2 deg.の場合、前進速度が0.6 m/sで、揚抗比が4と推定されているが、Fig.8の主翼独立制御型水中グライダーの主翼取付角度が2 deg.の流速が0.6 m/sの場合(□W-0.6)の揚抗比が4で、良く一致していることが確かめられた。したがって、設計段階におけるグライディング性能の簡易推定法が妥当なものであったと判断することができる。

最後に、機体の重心周りに換算した縦揺れモーメントをFig.9に示す。図より、主翼独立制御型水中グライダー(W)の縦揺れモーメントは、固定翼型水中グライダー(B)に比べると、主翼の取付角度が大きくなるにつれてより大きくなることがわかった。この実験では、水平尾翼は機体軸に平行となるように固定されているために、固定翼型水中グライダー(B)では、水平尾翼にはたらく揚力によって縦揺れモーメントが軽減されているのに対して、主翼独立制御型水中グライダー(W)では水平尾翼に揚力がはたらかないために縦揺れモーメントが大きくなったと考えられる。

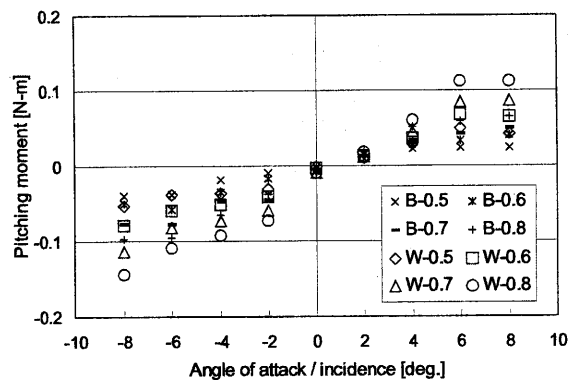


Fig.9 Pitching moment about the centre of mass.

実際的水中グライダー実験機では、バランスウェイトの前後位置を調整して、この縦揺れモーメントを打ち消すようになっている。

4.3 水中グライダー実験機の運動性能の観察

主翼独立制御型水中グライダーの運動性能を調べるために、独立行政法人 海洋研究開発機構(神奈川県横須賀市)の潜水訓練プール(長さ×幅×最大水深:21.0m×21.0m×3.3m)を賃借して潜航実験を行った。実験日時は平成18年2月21日(火)09.00~16.30で、実験時の水温は約26℃であった。手動操作によるラジコン制御によってさまざまな運動を試み、そのときの水中グライダー実験機の挙動を水中カメラで撮影・録画した。主翼独立制御型水中グライダーの特徴的な運動の例をFigs.10-11に示す。経過時間T(sec.)を図中に示した。

Fig.10 は、左右の主翼取付角度を正負逆にして主翼を捻り、バラストタンクに圧搾ガスを送り込んで排水をしたときの様子である。このとき、実験機は、旋回最大半径が約1m で後退しながらスパイラル状に回転をして浮上する。180 deg.だけ方向転換するのに要する時間は、10.8 秒であった。バランスウェイトを中立位置にしたとき、重心と浮心の前後位置がバラストタンクの中央になるように設計・調整されているので、バランスウェイトを中立位置にすると水平を保ったまま回転をしながら浮上・潜降させることができる。マイコン制御による実験では、左右の主翼取付角度を ± 21.0 deg.として捻り、バラストタンクを完全に排水すると、定常状態では0.13 m/s の浮上速度で、12.6 deg./s の回転をしながらゆっくりと浮上することが確かめられた。

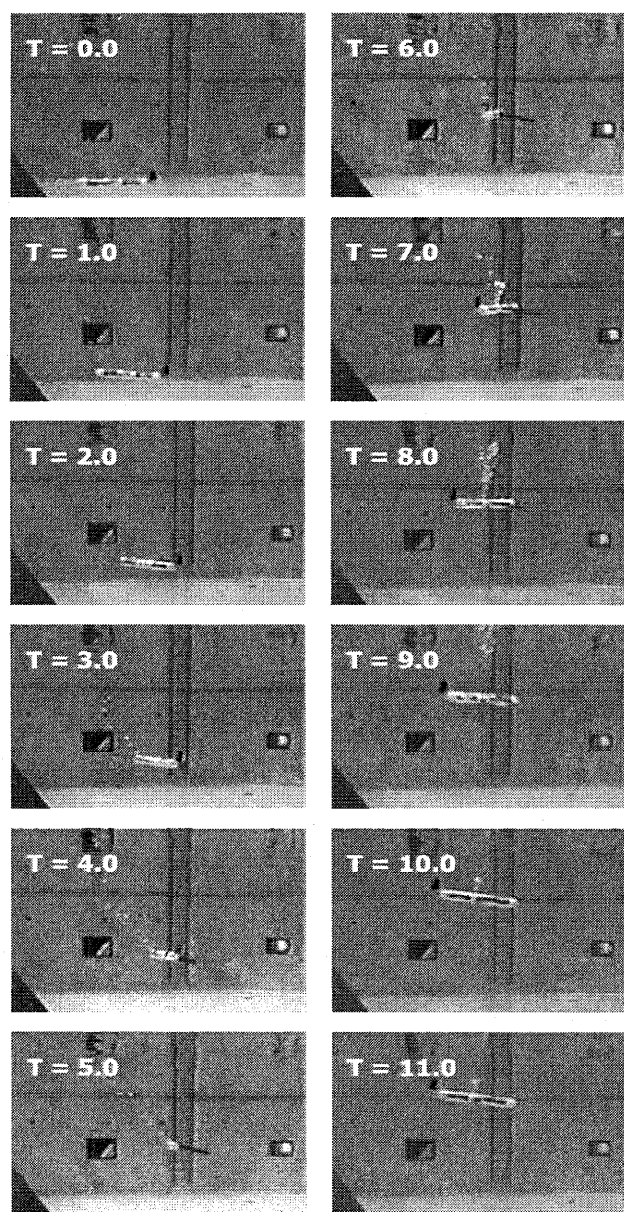


Fig.10 Spiral vertical surfacing (Time in second).

また、左右の主翼の取付角度をともに0 とすれば、回転をせずにそのままの姿勢を保ったまま浮上・潜降を行うことができる。バラストタンクを完全に排水すると、0.11 m/s の定常速度でゆっくりと浮上させることができる。そして、中性浮量状態でバランスウェイトの位置を調整して水平を保てば、水中で静止し続けることも可能である。

Fig.11 は、定常速度で潜入時に左右の主翼取付角度を ± 25 deg.に逆位相で動かしてロール運動をさせている様子である。このときの前進速度は得られていないが、大きなロールレート(約25 deg./s)で機体を横揺れさせることができ、高い機動性が期待できることがわかった。

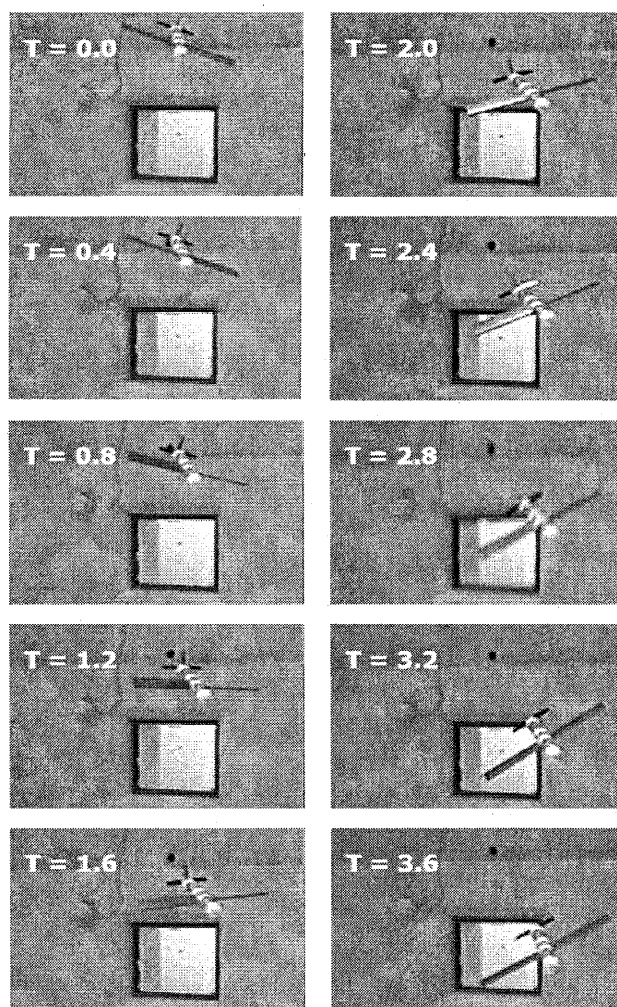


Fig.11 Circuitous motion by controlling main wings as aileron (Time in second).

さらに、主翼を同位相で小刻みに動かすことによる翼動推進をさせることもできる。マイコン制御によって片振幅20 deg., 周期256 ms (周波数約4 Hz) で正弦的に動かすと、0.424 m/s の前進速度が得られることが確かめられた。

5. 結 言

本研究では、海洋環境にやさしく安全性の高い水中機器として水中グライダーに着目し、その運動性能の向上を目指した「主翼独立制御型水中グライダー」を提案した。

第1報では、その流体力学的特性や運動性能を明らかにするために設計・製作した小型の水中グライダー実験機について述べた。三分力試験によって主翼独立制御型水中グライダーの流体力学的特性を調べた結果、設計段階における前進速度と揚抗比の推定手法が妥当なものであったことが確認された。一方、揚抗比すなわちグライディング性能は、主翼独立制御型水中グライダーよりも従来の固定翼型水中グライダーの方が優れていることが明らかとなった。

また、潜水訓練プールにおける潜航実験の結果、主翼独立制御型水中グライダーは、水中での静止や後退、姿勢を保ったままの浮上・沈降の外、主翼独立制御の特長を活かして、スパイラル状に回転しながらの浮上・沈降や急旋回、主翼による翼動推進など非常に優れた運動性能があることが確かめられた。

したがって、主翼独立制御型水中グライダーは、定常状態では主翼の取付角度を0とすることによってグライディング性能を向上させることができ、しかも機動性にも優れていて、大いに実用化の可能性があるかと判断することができる。

本報では、6ch ラジコン制御システムによってさまざまな運動をさせて主翼独立制御型水中グライダーの基本的な運動性能を調べたが、無人水中グライダーの制御モデルを構築するためには、主翼取付角度などの制御変数を変化させたときの動的な応答特性を定量的に計測して主翼独立制御型水中グライダーの詳細な運動性能を明らかにする必要がある。現在、主翼独立制御型水中グライダーの運動制御モデルの構築を進め、そのパラメータを同定するために加速度計とジャイロなどのセンサーを搭載してマイコン制御を試みている。

今後は、さらに主翼独立制御型水中グライダーの実用可能性を明らかにするために、有人/無人水中グライダーの需要や具体的な運用方法についての調査・検討、経済性評価などを行っていく予定である。

謝 辞

水中グライダー実験機の設計・製作および性能評価試験にあたり、有益なご助言と積極的なご協力をいただいた大阪府立大学工学部生産技術センター主任 北浦堅一講師をはじめ、職員の皆様に厚く御礼を申し上げます。

また、水中グライダー実験機の性能評価のための水槽実験にご協力いただいた神戸大学・海事科学部 西尾茂教授、

独立行政法人 海洋研究開発機構・安全管理室 西村一室長に深く感謝申し上げます。

最後に、本研究は、科学技術振興機構研究成果活用ブラザ大阪の平成18年度「実用化のための可能性試験」および九州大学応用力学研究所の共同利用研究の補助を受けて実施したことを附記し、関係各位に厚く御礼申し上げます。

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, Vol.37, No.12, (1985), pp.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, Vol.39, No.4, (1987), pp.149-152.
- 3) 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3), 生産研究, Vol.39, No.5, (1987), pp.183-186.
- 4) 浦環: グライダー型潜水艇の設計に関する研究(その4), 生産研究, Vol.40, No.2, (1988), pp.29-32.
- 5) 浦環, 藤井輝夫: グライダー型潜水艇の設計に関する研究(その5) —横運動の安定性—, 生産研究, Vol.40, No.12, (1988), pp.622-625.
- 6) 浦環, 藤井輝夫: グライダー型潜水艇の設計に関する研究(その6) —回流水槽における自航試験—, 生産研究, Vol.41, No.9, (1989), pp.717-720.
- 7) 浦環, 能勢義昭, 坂巻隆: グライダー型潜水艇の設計に関する研究(その7) —PTEROA150の建造と実海域試験—, 生産研究, Vol.43, No.2, (1991), pp.133-136.
- 8) 浦環, 能勢義昭, 坂巻隆: グライダー型潜水艇の設計に関する研究(その8) —実用機PTEROA250の設計—, 生産研究, Vol.43, No.3, (1991), pp.165-167.
- 9) 川口勝義, 浦環, 折出光宏, 坂巻隆: シャトル型海中ロボットの開発と実海域試験, 日本造船学会論文集, 第178号 (1995), pp.657-665.
- 10) 山口悟, 境小牧, 山下勇一: グライダー型海洋観測ビークルの試設計, 西部造船学会会報, 第109号 (2004), pp.143-149.
- 11) Rudnick, DL, Eriksen, CC, Fratantoni, DM, Perry, MJ: Underwater Gliders for Ocean Research, Marine Technology Society Journal, Vol. 38, No. 1 (2004), pp.48-59.
- 12) 日本大学理工学部航空研究会: 翼型データベース, URL <http://www.nasg.com/afdb>
- 13) 牧野光雄: 航空力学の基礎(第2版), 産業図書 (1989).
- 14) 永井實: イルカに学ぶ流体力学, オーム社 (1999).