バーチャルモアリング用シャトル型水中グライダーの開発

— 旋回性能の検討 —

正会員 中 村 昌 彦^{*}
正会員 百 留 忠 洋^{**}
前 田 洋 作^{**}

正会員 浅 川 賢 一^{*}
石 原 靖 久^{**}

Development of Underwater Shuttle Glider for Virtual Mooring - Study on Turning Performance -

by Masahiko Nakamura, *Member* Kenichi Asakawa, *Member*
Tadahiro Hyakudome, *Member* Yasuhisa Ishihara
Yousaku Maeda

Summary

A prototype of a 3000m-class underwater glider for virtual mooring is being developed by JAMSTEC (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology) with RIAM (Research Institute for Applied Mechanics) of Kyushu University. The vehicle houses observation equipment and glides back and forth between the sea surface and the seabed collecting ocean data in a specific area (virtual mooring area). The motions of the vehicle are controlled by moving its center of gravity using mounted weight-shifters.

In the field experiments, although the vehicle is heeled by the weight-shifters, the phenomenon in which it did not turn was observed occasionally. Therefore, in this paper, its factor is examined by motion simulations. In the last part of the paper, the factor is verified by comparison of simulated results and field experimental results.

1. 緒 言

海洋環境の監視と海洋環境変動予測の高度化のためには、海洋環境変動全体を把握するための鍵となる海域で長期的な連続観測を行うことが必要である。しかし、国際プロジェクトであるアルゴ計画で使用されているアルゴフロート¹⁾は海の流れに乗って移動するために、定地点に留まって長期的な観測を行うことができず、ブイシステム^{2,3,4)}は定地点における長期観測を行っているが、設置にはその設計から投入まで多大な労力と費用が必要となる上、容易に観測点の変更ができない。このような問題を克服するためには水中グライダーを利用したバーチャルモアリング(長期間一定海域に留まることのできる水中ビークルを係留ラインに代わる仮想的な係留とみなすシステム)^{5,6)}が有利であり、海洋研究開発機構では九州大学応用力学研究所と長期間にわたり一定海域で観測が行えるシャトル型水中グライダーの開発を行

っている^{7,8,9,10)}。本研究で開発中のバーチャルモアリング用シャトルグライダーは浮力を変更し、Fig.1に示すように、海面と海底をグライディングにより往復することで海洋観測データを収集する。

Fig. 1 Concept of virtual mooring by underwater glider.

ところが、これまで数多く繰り返してきた実海域試験において、ビークルの旋回性能が劣化するという現象が生じることがあった。機体内部の重錘(バッテリー)の回転により重心を移動して機体をロールさせているにも関わらず旋回が困難になるのが本現象の特徴であった。本論文では、ビークルに様々な外乱を加えて運動シミュレーションを行うことにより要因の究明がなされている。さらに、シミュレーション結果と実海域試験結果を比較することにより要因の検証

* 九州大学応用力学研究所

** 海洋研究開発機構海洋工学センター

が行われている。

2. シャトル型水中グライダーの概要

シャトル型水中グライダーの詳細は参考文献⁷⁾に詳しく紹介されているが、ここに概要を記す。グライダーは浮力を変更し、海面と海底をグライディングにより往復することで、海洋観測データを収集する (Fig.1)。この間に計測された観測データは、ブイクル内のメモリーに保存されると同時に、ブイクルが海面に浮上した際にイリジウム通信を利用して基地局に逐次送信される。海面浮上時には GPS により自機の現在位置を確認し、パーチャルモアリングの対象海域から外れていた場合には次の潜航・浮上の際のグライディングにより位置修正を行い、定海域に留まる。ブイクルは定期的に潜航・浮上を繰り返しながら観測海域の計測を続けるが、計測を行わない間は海底に機体を着底または設定水深で浮遊させて待機し、タイマー以外の電源を切ることでバッテリーの消費を抑え長期間連続観測を目指す。ブイクルのグライディング・旋回はブイクル内で重錘 (バッテリー) を移動し、重心位置を変更することにより制御する。

Table 1 Specifications of underwater shuttle glider.

Length	2814 mm
Maximum breadth	1039 mm
Maximum height	511 mm
Body diameter	305 mm
Mass	150 kg
Maximum depth	1500 m
Battery	Nickel-metal hydride battery (24V×20AH)

ブイクルの外観と内部構造を Fig.2 に、主要目を Table 1 に示す。本体の耐圧容器はアルミ合金で、翼と前後のフェア

リングはそれぞれ FRP とポリエチレンで作られている。運動制御のためのセンサーは GPS、コンパス、ロールセンサー、ピッチセンサー、深度センサーである。海洋環境計測用には Seabird 社製の CTD センサーが搭載されている。パーチャルモアリング海域に留まるためのブイクル降下・上昇方向と距離 (滑空角度) は海面浮上時に得られる GPS による位置情報から計算され、重心移動装置・浮力エンジンを動かすことにより、ブイクルは計算された方向と滑空角度で滑空する。

3 章から 6 章において示す図はすべて運動シミュレーション結果であるが、シミュレーションで使用するシャトル型水中グライダーの運動方程式は参考文献^{8, 9, 10)}に詳しく述べられているので省略する。運動方程式中の各種流体力係数は小型模型を用いた水槽試験で得られた値を使用している。

3. 直進滑空時の重錘前後位置とピッチ角の関係

直進滑空時の重錘前後位置 x_m と機体ピッチ角 θ の関係を Fig.3 に示す。直進滑空とは機体が水中で方位を保持した状態で滑空する運動状態である。点線はオイルの移動量が 500cc、実線はオイルの移動量が 1000cc、一点鎖線はオイルの移動量が 1500cc の場合の結果で、ブラダからリザーバへのオイル移動をプラスとしている。なお、オイルの移動量はブイクルの水中重量がニュートラルの時を基準としている。降下・上昇時ともにピッチ角は重錘の移動距離に比例し、その比例乗数はオイルの移動量にほとんど依存せず一定であることがわかる。

参考文献¹⁰⁾においては水深に対する海水密度変化を考慮して運動シミュレーションを行っているが、ここでは運動性能比較を明確にするために海水密度は一定として計算を行っている。また、オイルの移動がない場合の水中重量をゼロとしている。以後に示す旋回シミュレーションにおいては、直進滑空時のピッチ角を ± 10 度、 ± 15 度、 ± 20 度、 ± 25 度、 ± 30 度に設定して旋回を行っている。

Fig. 3 Relationship between weight position and pitch angle.

4. 直進滑空時のピッチ角と降下・上昇速度、前進速度の関係

直進滑空時のピッチ角と降下・上昇速度の関係を Fig.4 に、ピッチ角と前進速度の関係を Fig.5 に示す。ピッチ角の絶対

値が大きくなると降下・上昇速度，前進速度ともに大きくなる。ただし，降下・上昇速度はピッチ角の絶対値が大きい領域で直線的に変化する（比例する）のに対し，前進速度は飽和する傾向が見られる。また，オイルの移動量が大きいと降下・上昇速度，前進速度ともに大きくなる。

Fig. 4 Relationship between pitch angle and descending-ascending speed.

Fig. 5 Relationship between pitch angle and forward speed.

5. 降下・上昇時の旋回性能

Fig.6～Fig.8に降下・上昇時の旋回性能を示す。Fig.6はオイルの移動量が 500cc の場合，Fig.7はオイルの移動量が 1000cc の場合，Fig.8はオイルの移動量が 1500cc の場合の性能である。図中， θ はピッチ角， ϕ はロール角， R は旋回半径， δ_z は1旋回あたりの降下・上昇量， ϕ_m は重錘の回転角であり，線種は重錘の前後位置（ピッチ角）の違いを示している。図より以下のことがわかる。

- (1) 重錘をプラス方向に回転（Fig.2 参照）すると，ビークルは降下時に右旋回，上昇時に左旋回する。
- (2) ピッチ角の絶対値が大きくなると，降下・上昇時ともに旋回半径や1旋回あたりの降下・上昇量が大きくなり，旋回性能が劣化する。
- (3) 重錘の回転角が大きくなるに従ってロール角の絶対値が大きくなり，旋回半径や1旋回あたりの降下・上昇量が小さくなる。また，回転角が 30 度以下ではそれらの変化が急で回転角が 30 度を超えると変化が穏やかになる。
- (4) 降下時と上昇時の旋回半径や1旋回あたりの降下・上昇量を比較すると，上昇時の方がそれらの値が小さく，上昇時の方が旋回性能が良い。
- (5) 降下・上昇時ともにロール角は重錘の回転角に比例し，ピッチ角による差はほとんどない。
- (6) 重錘の回転角が大きくなる（旋回半径が小さくなる）とピッチ角の絶対値が若干大きくなる。

- (7) オイル移動量はピッチ角が同じであれば旋回性能に大きな影響を与えない。

Fig. 6 Turning performance (amount of moved oil: ± 500 cc).

Fig. 7 Turning performance (amount of moved oil: ± 1000 cc).

Fig. 8 Turning performance (amount of moved oil: ± 1500 cc).

オイル移動量を大きくすると降下・上昇速度が増大 (Fig.4 参照) するため, 旋回性能を変えなく設定水深に達するまでの時間を短縮できることになる. この特性はブーケルの運用計画を立てる上で有利であると考えられる.

以上より, 降下時は上昇時に比べて旋回半径が概ね 1.5 倍程度大きくなるが, 降下時に旋回が困難になる要因は見あたらない.

6. 降下時に旋回しない要因の検討

実海域動作試験において, 上昇時は旋回するが降下時は旋回が困難となる現象が生じることがあった. 重錘の回転により機体をロールさせているにも関わらず旋回が困難となるのが本現象の特徴であった. 試験開始当初は非常時にブーケルを回収するための長い安全索や投入・回収時に使用するための索をブーケルに取り付けていたのでこれらが原因であると考えていた. しかし, これらの索を外した状態でも同様の現象が生じる場合があり, ブーケル前後のフェアリングに開けられたセンサー用や空気抜き用の大きな開口を可能な限りテープで塞ぐと現象が改善される傾向にあった. そこで, 要因を検討するために色々な外乱をブーケルに与えて旋回シミュレーションを行った.

6.1 潮流を付加した旋回シミュレーション

まずはシミュレーション開始時においてブーケル右舷方

からの潮流がある場合のシミュレーションを行った. 潮流速度が 0.2 ノットの場合の降下時の結果を Fig.9 に, 上昇時の結果を Fig.10 に示す. 重錘の前後位置は直進滑空時のピッチ角が ± 15 度となる位置, 重錘の回転角は 40 度で, 実海域試験や海洋観測で通常使用される値に設定した. それぞれの上図よりヨー角 ψ が一定の割合で時間とともに単純増加・減少していることがわかる. これは潮流中においてもブーケルが一定角速度で旋回を続けていることを示している. 下図はブーケル軌跡の平面図であり, 座標 (0, 0) の位置から降下旋回・上昇旋回を開始している. 流れの影響で軌跡が円にはならず歪んでいるが, ブーケルは流れに乗って旋回をしていることがわかる. 潮流速度を大きくしても, ヨー角が一定の割合で時間とともに単純増加・減少することには変わりなかった. 潮流を付加した旋回シミュレーションにより, ブーケルが潮流に一旦乗ってしまえば潮流はもはや外乱ではなく, 潮流によって旋回が阻まれることはないことが確認された.

Fig. 9 Time series of yaw motion and trajectory of turning in current (descending).

Fig. 10 Time series of yaw motion and trajectory of turning in current (ascending).

6.2 ロールモーメントを付加した旋回シミュレーション

機体にロールモーメントを加えて、旋回シミュレーションを行った (Fig.11) . 横軸の δ_{Mx} が加えられたロールモーメントである. FRP 製の翼の歪みによりエルロンが発生するような流体力や開口部の影響による流体力が発生してしまったことを想定している. 重錘の前後位置は直進滑空時のピッチ角が ± 15 度となる位置, 重錘の回転角は 40 度で, 実海域試験や海洋観測で通常使用される値に設定した. 太い線は降下時, 細い線は上昇時の値であること, 実線は右旋回, 破線は左旋回であることを示している. 図中の丸は旋回しなくなった時のピッチ角とロール角である. -0.29Nm のロールモーメント δ_{Mx0} を付加するだけで降下時に旋回しなくなる現象を生じさせることは可能であるが, ロール角の絶対値がモーメントを付加しない場合よりも大きくなってしまい. また, 同モーメントを付加すると上昇時の旋回半径が大きくなってしまい, 上昇時も旋回性能が劣化してしまうことがわかる. これらの現象は実海域試験時に遭遇することのある現象とは異なることから, ロールモーメントの付加によってはロールしているにも関わらず降下時に旋回が困難となり上昇時には旋回しやすいという実海域試験で生じることのある現象の再現はできない.

Fig. 11 Turning performance (roll moment is added, amount of moved oil: $\pm 500\text{cc}$).

6.3 ヨーモーメントを付加した旋回シミュレーション

次に, 機体にヨーモーメントを加えて旋回性能の検討を行った. FRP 製の翼の歪みによりラダーが発生するような流体力や開口部の影響による流体力が発生してしまったことを想定している. 重錘の回転角は実海域試験で常用される 40 度とした. オイル移動量を 500cc とした場合の降下時における計算結果を Fig.12 に示す. 横軸の δ_{My} が加えられたヨーモーメントであり, 実線が直進滑空時のピッチ角が -15 度の場合, 破線が -20 度の場合, 一点鎖線が -25 度の場合の結果である. わずか $-0.07 \sim -0.08\text{Nm}$ のヨーモーメント δ_{My0} を付加するだ

けで旋回できなくなってしまうことがわかる. さらに付加モーメントの絶対値を大きくしていくと機体は逆旋回 (右旋回 $\gg$ 左旋回) を始め, 付加するモーメントがプラスの場合は旋回半径が小さくなる. 図中の丸などの記号は旋回しなくなった時のピッチ角とロール角を示している. 付加ヨーモーメントの大きさに関わらずピッチ角やロール角はほぼ一定であり, 実験時の現象をよく再現している. ヨーモーメントを加えない場合の旋回性能 (Fig.6, Fig.7, Fig.8) ではピッチ角が大きくなると旋回性能が劣化したが, ヨーモーメントを付加した場合にも同様の現象が見られる. この現象も実海域試験の結果と矛盾しない.

Fig. 12 Turning performance (yaw moment is added, amount of moved oil: 500cc , descending).

旋回させないためのヨーモーメントを付加して旋回シミュレーションを行って得られた旋回性能を Fig.13, Fig.14 に示す. Fig.13 が降下時, Fig.14 が上昇時の性能で, 実線が直進滑空時のピッチ角が ± 15 度の場合, 破線が ± 20 度の場合, 一点鎖線が ± 25 度の場合, 細い線がヨーモーメントを付加しない場合の旋回性能, 太い線がヨーモーメントを付加した場合の旋回性能である. 付加ヨーモーメントはピッチ角やロール角にほとんど影響を与えず, 降下時に旋回困難となる領域で上昇時の旋回半径が小さくなり旋回性能が向上する特徴は実海域試験で生じることがある挙動を再現している. しかし, ヨーモーメントを付加した場合の降下時の旋回性能はオリジナルの旋回性能を右方向にシフトしたもので, 上昇時の旋回性能は左方向にシフトしたものになっている. つまり, オリジナルの旋回性能は重錘の回転角 0 度を中心に左右対称であるが, ヨーモーメントを付加すると重錘の回転角 ± 40 度を中心に左右対称となる. このため, 重錘の回転角が 0 度でもピークルは旋回してしまい, 旋回運動が重錘の回転角 0 度を中心に左右対称とならず, 実海域試験結果を運動シミュレーションで再現できない可能性が高い.

Fig. 13 Turning performance (a) (amount of moved oil: 500cc, descending).

Fig. 14 Turning performance (a) (amount of moved oil: -500cc, ascending).

そこで、旋回させないためのヨーモーメントは機体のロール角に依存すると考え、ロール角に比例するヨーモーメントを付加して旋回シミュレーションを行った。比例定数 (0.275Nm/rad: $x_m=18.70$ mm, 0.258Nm/rad: $x_m=24.84$ mm, 0.239Nm/rad: $x_m=31.42$ mm) は Fig.12 に示すヨーモーメント δ_{Mz0} とロール角の値から求めたが、この値を使用すると降下時にほとんど旋回しなくなってしまうため、以下に示すシミュレーションでは 80%の値を使用している。オイル移動量が 500cc でロール角に比例するヨーモーメントを付加した場合と付加しない場合の降下時の旋回性能を Fig.15 に、上昇時の旋回性能を Fig.16 に示す。実線が直進滑空時のピッチ角が ± 15 度の場合、破線が ± 20 度の場合、一点鎖線が ± 25 度の場合、細い線がヨーモーメントを付加しない場合の旋回性能、太い線がヨーモーメントを付加した場合の旋回性

能である。ヨーモーメントを付加した場合も、重錘回転角 0 度を中心に左右対称の旋回性能となり、降下時は旋回半径 R や 1 旋回あたりの降下量 δ_z がヨーモーメントを付加しない場合に比べて非常に大きくなる。上昇時はこれらの値が小さくなり、旋回性能がヨーモーメントを付加しない場合より格段に優れていることがわかる。また、付加ヨーモーメントはピッチ角やロール角にほとんど影響を与えず、実海域試験で生じることがある挙動がよく再現されている。

Fig. 15 Turning performance (b) (amount of moved oil: 500cc, descending).

Fig. 16 Turning performance (b) (amount of moved oil: -500cc, ascending).

機体のロール角に比例するヨーモーメントを付加することにより、降下時に旋回困難となった場合は上昇時に旋回が容易になり、その場合でもロール角・ピッチ角の値は通常に旋回する場合の値と変わらないという特徴が再現できた。ただし、機体のロール角に依存しない成分 (機体のわずかな非

対称性による成分)の存在も考えられるので検討を続けていきたい。

6.4 ピッチモーメントを付加した旋回シミュレーション

最後に、機体にピッチモーメントを加えて旋回性能の検討を行った。ヨーモーメントの場合はロール角に比例するヨーモーメントを付加しているが、ピッチモーメントに関しては単純にピッチモーメントを付加している。FRP製の翼の歪みによりエレベータが発生するような流体力や開口部の影響による流体力が発生してしまったことを想定している。重錘の回転角は実海域試験で常用される40度とした。オイル移動量を500ccとした場合の降下時における計算結果をFig.17に示す。横軸の δ_{My} が加えられたピッチモーメントであり、実線が直進滑空時のピッチ角が-15度の場合、破線が-20度の場合、一点鎖線が-25度の場合の結果である。わずか0.24~0.27Nmのピッチモーメント δ_{My0} を付加するだけで旋回できなくなってしまうことがわかる。さらに付加モーメントを大きくしていくと機体は逆旋回(右旋回>>左旋回)を始め、旋回半径が小さくなっていく。図中の丸などの記号は旋回しなくなった時のピッチ角とロール角を示している。付加ピッチモーメントの大きさに関わらずロール角はほぼ一定であり実験時の現象をよく再現している。ピッチ角は付加ピッチモーメントが大きくなるにしたがって若干増加する。ピッチモーメントを加えない場合の旋回性能(Fig.6, Fig.7, Fig.8)ではピッチ角が大きくなると旋回性能が劣化したが、ピッチモーメントを付加した場合にも同様の現象が見られる。この現象も実海域試験の結果と矛盾しない。

Fig. 17 Turning performance (pitch moment is added, amount of moved oil: 500cc, descending).

旋回させないためのピッチモーメントを付加して旋回シミュレーションを行って得られた旋回性能をFig.18, Fig.19に示す。Fig.18が降下時、Fig.19が上昇時の性能で、実線が

直進滑空時のピッチ角が±15度の場合、破線が±20度の場合、一点鎖線が±25度の場合、細い線がピッチモーメントを付加しない場合の旋回性能、太い線がピッチモーメントを付加した場合の旋回性能である。付加ピッチモーメントはロール角にほとんど影響を与えず、降下時に旋回困難となる領域で上昇時の旋回半径が小さくなり旋回性能が向上する特徴は実海域試験で生じることがある挙動を再現している。ピッチ角はピッチモーメントを付加すると若干大きくなることわかる。ピッチモーメントを付加した場合の旋回性能はヨーモーメントを付加した場合の旋回性能(Fig.13, Fig.14)と異なり、機体のロール角に比例するヨーモーメントを付加した場合の旋回性能(Fig.15, Fig.16)と同様に重錘の回転角0度を中心に左右対称となる。

Fig. 18 Turning performance (c) (amount of moved oil: 500cc, descending).

Fig. 19 Turning performance (c) (amount of moved oil: -500cc, ascending).

ピッチモーメントを付加することにより、降下時に旋回困

難となった場合は上昇時に旋回が容易になり, その場合でもロール角の値は通常に旋回する場合の値と変わらないという特徴が再現できた. 機体製作上のわずかな非対称性や翼の歪み, 機体の開けられた開口が悪影響を及ぼす可能性があることを示唆している. 今後, CFD テクニックを使用してどの程度の垂直尾翼・主翼の歪みや開口がこれらの流体力を発生する¹¹⁾のかの検証も行っていきたい.

7. 実海域試験結果とシミュレーション結果の比較

重錘をプラス方向に回転した場合降下時はロールしているにも関わらず右旋回が困難となり上昇時にはよく左旋回するという現象やその際のロール角やピッチ角は通常に旋回する場合の値とほとんど変わらないという実海域試験で生じることのある現象の要因が機体のロール角に比例する付加ヨーモーメントや付加ピッチモーメントである可能性が非常に高いことが運動シミュレーションによりわかった. 本章では実海域試験結果とシミュレーション結果を比較することにより要因の検証を行う.

7.1 旋回試験結果による検証

実海域試験は2014年11月に静岡県由比港沖でシラス漁の合間を縫って実施された¹⁰⁾. 実験海域を Fig.20 に示す. 運動シミュレーションは実験で得られたアクチュエータの時系列を入力として使用した. 6.3 節や 6.4 節で検討した要因の検証は, 実際に制御をかけた運動シミュレーションを行うよりも実験で得られたアクチュエータの時系列を入力して運動を計算する方がよいと考えられる. 制御をかけたシミュレーションを行うと, 運動方程式の誤差が大きい場合アクチュエータの動きに時間のずれが生じ, 検証がしづらくなる可能性がある. 実海域では水圧により海水が圧縮されるので, 水深が増すに従って海水密度が増加する. また, 塩分・水温によっても海水密度は変化する. さらに, 水圧により機体が圧縮され浮力が減少するので, 水深が増すに従って水中重量が増大する. 本来これらの影響を考慮してシミュレーションを行うべきであるが, 旋回試験時のビークル潜航深度変化がたかだか 100m 程度であったので, 影響は小さいとしてシミュレーションが行われている. 実海域試験や運動シミュレーション方法の詳細については参考文献¹⁰⁾を参照されたい.

Fig.21 から Fig.26 にピッチモーメントを付加した場合の運動シミュレーション結果と実海域試験結果との比較を示す. Fig.21, Fig.22 は浮力エンジンのブラダ・リザーバ間のオイルの移動量が 320cc で水中重量の絶対値が小さく重錘(バッテリー)の最大回転角が 40 度に制限された場合の降下時・上昇時の実験結果とシミュレーション結果の比較, Fig.23, Fig.24 は水中重量は Fig.21, Fig.22 の場合と同じであるが重錘の最大回転角を 60 度と大きくした場合の降下時・上昇時の試験結果とシミュレーション結果の比較, Fig.25,

Fig.26 は浮力エンジンのブラダ・リザーバ間のオイルの移動量が 640cc で水中重量の絶対値が大きく重錘の最大回転角も 60 度と大きい場合の降下時・上昇時の試験結果とシミュレーション結果の比較である. 図はそれぞれ上から順にビークル潜航深度 Z , ロール角 ϕ , ピッチ角 θ , ヨー角(方位角・旋回角) ψ , 重錘の回転角 ϕ_m , 重錘の前後方向移動量 x_m , 降下・上昇速度 V_z であり, 実線が実験結果, 点線がピッチモーメントを付加しない場合のシミュレーション結果¹⁰⁾, 破線がピッチモーメント (0.0588Nm) を付加した場合のシミュレーション結果を示している. ピッチモーメントを付加しない場合に比べてピッチモーメントを付加した場合はシミュレーション結果の実験結果との一致度が向上していることがわかる. 特にビークル降下時に一致度の向上が著しい. ビークル前進速度の違いや降下時, 上昇時で付加ピッチモーメントの大きさを調整すればさらに一致度は向上するはずである.

Fig.27, Fig.28 に機体のロール角に比例するヨーモーメント (0.069 ϕ Nm) を付加した場合の運動シミュレーション結果と実海域試験結果との比較を示す. ピッチモーメントを付加した場合と同程度に一致度が向上していることがわかる. 他の実験状態の場合も同様であった.

Fig. 20 Sea area of experiments in Suruga bay.

Fig. 21 Time series of motion during turning (a) (descending, weight in water: 0.4 kg, -40 deg < ϕ_m < 40 deg).

Fig. 22 Time series of motion during turning (ascending, weight in water : -0.3 kg, $-40 \text{ deg} < \phi_m < 40 \text{ deg}$).

Fig. 25 Time series of motion during turning (a) (descending, weight in water : 0.7 kg, $-60 \text{ deg} < \phi_m < 60 \text{ deg}$).

Fig. 23 Time series of motion turning (a) (descending, weight in water : 0.4 kg, $-60 \text{ deg} < \phi_m < 60 \text{ deg}$).

Fig. 26 Time series of motion during turning (a) (ascending, weight in water : -0.6 kg, $-60 \text{ deg} < \phi_m < 60 \text{ deg}$).

Fig. 24 Time series of motion during turning (a) (ascending, weight in water : -0.3 kg, $-60 \text{ deg} < \phi_m < 60 \text{ deg}$).

Fig. 27 Time series of motion during turning (b) (descending, weight in water : 0.4 kg, $-40 \text{ deg} < \phi_m < 40 \text{ deg}$).

Fig. 28 Time series of motion during turning (b) (ascending, weight in water : -0.3 kg, -40 deg < ϕ_m < 40 deg).

7.2 スパイラル試験結果による検証

実海域試験は 2017 年 9 月に駿河湾沖で実施された¹²⁾. 実験海域を Fig.29 に示す. ビークルは管制プログラムどおりに動作し, 水深 1000m における浮遊スリプ¹³⁾の後水深 1500m まで降下してから浮上し, CTD による海洋観測にも成功した. ところが, 重錘を回転して機体をロールさせているにもかかわらず降下時はほとんど旋回せず上昇時にはよく旋回するという現象が現れてしまった. このため本実験結果を要因検証のために使用することにする.

運動シミュレーションは 7.1 節と同様に実験で得られたアクチュエータの時系列を入力として使用した. 実海域では水圧により海水が圧縮されるので, 水深が増すに従って海水密度が増加する. また, 塩分・水温によっても海水密度は変化する. さらに, 水圧により機体が圧縮され浮力が減少するので, 水深が増すに従って水中重量が増大する. 大深度へのビークル潜航シミュレーションではこれらの影響を無視することはできない^{10,13)} ので, ビークル搭載の CTD による計測結果より海水密度を計算¹⁴⁾して使用した. 計算に使用した海水密度を Fig.30 に示す.

Fig. 29 Sea area of experiments of spiral-gliding.

Fig. 30 Sea water density used in motion simulation.

Fig.31 に実海域試験結果とピッチモーメント (0.216Nm) を付加した運動シミュレーション結果の比較を示す. 付加ピッチモーメントはビークル機体が発生する流体力に起因するので浮遊スリプ中のようにビークルの前進速度がゼロの場合はモーメントも発生しないはずである. そこで, 前進速度が 0.2m/sec 以下の場合は正弦波の形状を利用して急速に付加モーメントの値がゼロになるようにしている. SSBL によるビークル位置検出によりビークルが浮上直前に 20 分間で 60 度方向に約 600m 移動している (移動速度: 約 1 ノット) ことがわかった. ビークルの水中重量からビークルの前進速度は 0.5 ノット程度と推定されるので, 表層で 60 度方向に 0.5 ノットの流れがあったと考えられる. また, 水深 1500m から上昇を開始したときのビークル軌跡より深海域では 240 度方向に 0.05 ノットの流れが存在していたと推測される. よって, 運動シミュレーションでは, 水深が 100m 以浅では 60 度方向に 0.5 ノットの流れ, 水深が 150m 以深では 240 度方向に 0.05 ノットの流れがあり, 水深が 100m から 150m までは直線状に流速が変化すると計算を行っている. 図は上から順にビークル潜航深度 Z, ロール角 ϕ , ピッチ角 θ , ヨー角 (方位角・旋回角) ψ , 重錘の回転角 ϕ_m , 重錘の前後方向移動量 x_m , オイルのブラダからリザーバへの移動量 Oil であり, 実線が実験結果, 点線がシミュレーション結果を示している. 運動シミュレーション結果は実海域試験結果と非常によく一致している.

Fig.32 はスパイラル試験中のビークル軌跡の平面図である. 太い線が実験結果, 細い線が計算結果, 点線が降下中の軌跡, 実線が上昇中の軌跡を示している. ピッチモーメントを付加しない場合, 計算されるビークル軌跡が実験結果とまったく異なってしまうことがわかる. 一方, ピッチモーメントを付加すると計算される軌跡が実験結果に近づく.

Fig.33, Fig.34 は機体のロール角に比例するヨーモーメント ($0.189\phi Nm$) を付加した場合のシミュレーション結果と実海域試験結果の比較である. ピッチモーメントを付加した場合と同様に運動シミュレーション結果は実海域試験結果とよく一致している. 要因の検証がなされたと言える.

Fig. 31 Time series of motion of spiral-gliding (a).

Fig. 32 Trajectory of underwater shuttle glider (a).

8. 結 言

ピッチモーメントや機体のロール角に比例するヨーモーメントを付加した運動シミュレーション結果を旋回試験やスパイラル試験と比較することにより、重心を移動して機体をロールさせているにも関わらず降下時は旋回が困難となり上昇時には容易になるという現象の要因がピークルに加わるピッチモーメントやヨーモーメントであることがわか

った。この予期しないピッチモーメントやヨーモーメントの発生は機体への付加物や機体の製造誤差による非対称性、機体フェアリング部分に開けられた開口、翼の歪みや取り付け時の角度誤差が原因であると考えられる。今後、どの発生源が支配的であるか CFD テクニックを使用してさらに究明していきたい。

Fig. 33 Time series of motion of spiral-gliding (b).

Fig. 34 Trajectory of underwater shuttle glider (b).

参 考 文 献

- 1) D. Roemmich, G.C. Johnson, S. Riser, R. Davis, J. Gilson,

- W.B. Owens, S.L. Garzoli, C. Schmid and M. Ignaszewski : The Argo Program : Observing the Global Ocean with Profiling Floats, *Oceanography*, Vol.22, pp.34-43, 2009.
- 2) W.S. Richardson, P.B. Stimson and C.H. Wilkins : Current Measurements from moored Buoys, *Deep-Sea Research*, Vol.10, pp.369-388, 1963.
- 3) M. Takematsu, K. Kawatate, w. Koterayama T. Suhara and H. Mitsuyasu : Moored Instrument Observations in the Kuroshio South of Kyushu, *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, Vol.42, pp.201-211, 1986.
- 4) Y. Kawai, H. Kawamura, S. Tanabe, K. Ando, K. Yoneyama and N. Nagahama : Validity of Sea Surface Temperature Observed with the TRITON Buoy under Diurnal Heating Conditions, *Journal of Oceanography*, Vol.62, pp.825-838, 2006.
- 5) 中村昌彦, 兵頭孝司, 小寺山亘 : パーチャルモアリング用円盤型水中グライダーの開発 (その 1 制御システムと模型実験用ビークルの開発), 日本船舶海洋工学会論文集, 第 5 号, pp.35-46, 2007.
- 6) 中村昌彦, 小寺山亘, 兵頭孝司, 稲田勝, 丸林賢次, 吉村浩, 森井康宏 : パーチャルモアリング用円盤型水中グライダーの開発 (その 2 実証機の建造と実海域試験), 日本船舶海洋工学会論文集, 第 13 号, pp.205-218, 2011.
- 7) K. Asakawa, M. Nakamura, T. Kobayashi, Y. Watanabe, T. Hyakudome, Y. Ito and J. Kojima : Design Concept of Tsukuyomi - Underwater Glider Prototype for Virtual Mooring -, *Proc. of OCEANS'2011 Europe*, 2011.
- 8) 中村昌彦, 浅川賢一, 百留忠洋, 川谷哲也 : パーチャルモアリング用シャトルグライダー「ツクヨミ」の開発 - 水槽滑空試験 -, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 18 号, pp.143-156, 2013.
- 9) 中村 昌彦, 浅川 賢一, 渡 健介, 百留 忠洋, 川谷 哲也 : パーチャルモアリング用シャトルグライダー「ツクヨミ」の開発 - 一定加速度試験と滑空角制御 -, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 19 号, pp.213-226, 2014.
- 10) 中村 昌彦, 浅川 賢一, 百留 忠洋, 石原 靖久 : パーチャルモアリング用シャトル型水中グライダーの開発 - 実海域試験データを使用した運動シミュレーション -, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 22 号, pp.217-228, 2015.
- 11) 鈴木 博善, 鋒 幸徳, 長井 伊岐, 友辺 裕人, 井関 俊夫, 山中 進太郎, 大田 豊, 渡邊 佳孝, 石橋 正二郎 : 水中探査機「おとひめ」の CFD を用いた流体力推定について, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 22 号, pp.115-120, 2016.
- 12) 浅川 賢一, 百留 忠洋, 前田 洋作, 石原 靖久, 中村 昌彦 : 長期定域観測用水中グライダーの大水深潜水・浮遊スリーブ実験, *ブルーアースサイエンス・テク 2018 要旨集*, pp.15-16, 2017.
- 13) 中村 昌彦, 浅川 賢一, 前田 洋作, 百留 忠洋, 石原 靖久 : シャトル型水中グライダーの着底・浮遊スリーブ運動シミュレーション, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 23 号, pp.207-211, 2016.
- 14) N. P. Fofonoff and R. C. Millard Jr. : Algorithms for Computation of Fundamental Properties of Seawater, *Unesco technical papers in marine science* 44, pp.1-53, 1983.