

定域長期観測用水中グライダーの開発⁺

浅川 賢一*, 馬場 尚一郎*, 中村 昌彦**, 小林 大洋*, 渡邊 佳孝*, 百留 忠洋*, 伊藤 譲***, 小島 淳一****

Development of Underwater Gliders for Virtual Mooring⁺

Kenichi Asakawa*, Shoichiro Baba*, Masahiko Nakamura**, Taiyo Kobayashi*,
Yoshitaka Watanabe*, Tadahiro Hyakudome*, Yuzuru Ito***, and Junichi Kojima****

筆者らは数年間に亘って一定の海域に滞在し、海底から海面までの環境変動を準リアルタイムで観測するバーチャルモアリング用水中グライダーを提案し、開発を進めている。これまで、プロトタイプ「ツクヨミ」を製作し、水槽実験や海洋実験等でその基本的な動作を確認した。本稿ではその概要とその開発状況を紹介する。

1. はじめに

海水は大気の約1,000倍の熱容量を持っている。また、海水は人工的に排出される二酸化炭素のほぼ30%を吸収しており、大気中の二酸化炭素の増加を抑制している。そのため海洋にわずかな変動が生じて、地球の環境に大きな影響を及ぼすことになる。地球規模の気候変動を正確に把握し、その将来を予測し、適切な施策を立案・実行するためには、深海を含む海洋全体の水温・塩分変動などの環境変動を、長期間連続的にかつ精密に観測することが重要である。

海面下の海洋観測は、主にプロファイリングフロートやブイシステム、観測船、衛星を用いて行われている。このうち、アルゴフロートは現在約3,600台が全世界に展開され、水深2,000mまでのデータを準リアルタイムで配信している。しかし、アルゴフロートは海水とともに漂流するため、観測データが必要な海域に長期間留まることができない。また、2,000m以深の海洋でも環境変動が観測されており、地球環境に与える影響も無視できない。ブイシステムは定点での観測が可能であるが、設置と運用に大型の観測船を必要とするなどの制約があり、その数量は限定される。また、最大観測水深も数百

メートルである。海洋は広大であり、現状で十分なデータが得られているとは言い難い。

一方、近年Seaglider, Splay, Slocumなどの水中グライダー (Rudnick et al., 2004), が新しい観測プラットフォームとして注目されるようになってきた。これらの水中グライダーはプロファイリングフロートと同様に浮力エンジンを用いて、潜水と浮上を繰り返す。さらに、翼に生じる揚力を利用して海中を長時間滑走しながら、観測を行う。空中重量が約50kg と軽量であるが、大西洋横断の記録もある (Shapiro, 2010)。しかし、この水中グライダーは、主に沿岸の観測に焦点を当てられている上、最大水深は1,000mであり、数年間に亘って長期観測を行う機能もない。

このような現状技術の課題を克服するため、次世代の海洋観測システムでは、大量の観測機器を展開するという手法から脱却して、極域周辺海域など観測が重要なキーとなる海域において、長期間に亘り妥当なコストで、連続的な観測をリアルタイムで行えるようにすることが重要である。

そこで、筆者らは数年に渡って一定の海域に留まり、海底から海面までの環境変動を準リアルタイムで観測するバーチャルモアリング用水中グライダーを提案 (Asakawa et al., 2011) し、開発を開始した。これまで、プロトタイプ「ツクヨミ」を製作し、水槽実験や海洋実験等でその基本的な動作を確認した (Nakamura in press; Asakawa et al., 2012)。本稿ではその概要を紹介する。

+ 2012年11月9日 特別セッション
* 海洋研究開発機構 JAMSTEC
** 九州大学応用力学研究所
*** 海洋工学研究所
**** KDDI研究所 KDDI R&D Laboratories

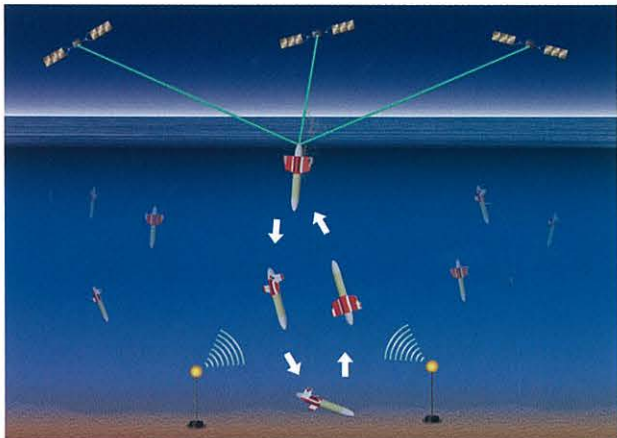


図1 バーチャルモアリング用水中グライダーのオペレーションイメージ

2. オペレーションのイメージ

図1はオペレーションのイメージを表したものである。バーチャルモアリング水中グライダーは浮力エンジンを搭載し、潜水・浮上する。通常的水中グライダーと同様に翼に働く揚力を利用して水中を滑走する。内蔵の電池を移動することにより、その重心位置を変えて、ピッチングと方位を制御する。高度計を搭載する予定で、海底に着底して一定期間スリープすることにより、観測時間を延長し、数年間に亘る長期観測を実現する。水面浮上時にGPSで測位し、イリジウム経由でデータを伝送する。目標の海域から離れた場合は、目標海域に向かって滑走する。水中では推測航法により滑走する。

3. 模型試験とシミュレーション

水中グライダーは翼に生じる小さい揚力を利用して最小限の電力で滑走を行うために、優れた流体力学的な形状を持つことが重要である。そこで、安定した滑走と回頭性能を同時に満たす形状を求めるために、1/2縮尺の模型を用いて強制動揺試験等の流体力学的実験を九州大学応用力学研究所内の深海機器力学実験水槽（L：65m，W：5m，D：7.5m）にて行った。実験では、3種類の水平尾翼と2種類の水平尾翼を取り付けたときの流体力学的特性を測定し、比較した（Nakamura in press）。その結果、図2に示す形状を採用した。

ツクヨミは一定海域に留まる必要がある。そのため、一般的水中グライダーと比較して水平尾翼の面積を広くして、俯角・仰角を大きく取れるようにした。また、垂直尾翼を水平尾翼の先端に配置したのは、船上でビークルを台座の上に設置しやすいようにするためである。

次に、この模型試験により得られたデータを用いて運動シミュレーションを行い、滑走性能を検証した。図3はシミュレーション結果の代表的な一例で、旋回しながら

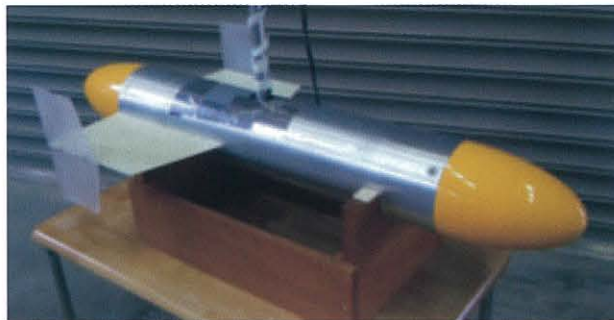


図2 1/2スケールの模型

BG：4 mm， x_G ：2 mm， δV ：-0.0005 m³

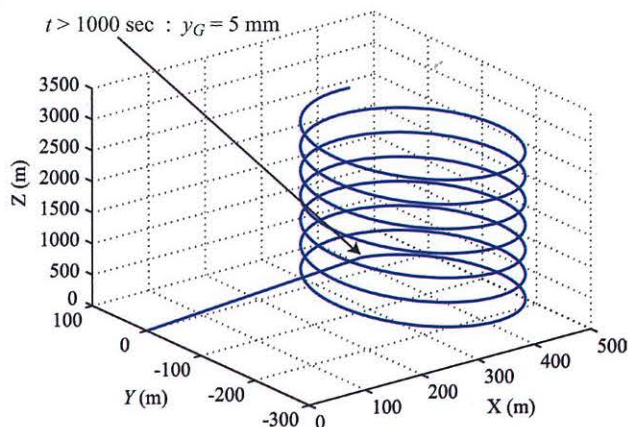


図3 旋回しながら下降するシミュレーション結果

下降する状態を模擬したものである。重心を右舷側に移動すると、ビークルは左旋回することがわかる。

4. 構造

ツクヨミの外観と内部構造をそれぞれ図4と図5に示す。適用可能海域を広げるため、最大水深は3,000mとした。全長と空中重量はそれぞれ約2.5m，150kgである。内蔵電池としてElectrochem社の大容量塩化スルフルリチウム1次電池3B0036を49個（5.7kVAH）搭載することにより、1年以上の長期観測を目指している。開発時はニッケル水素2次電池セル（0.48kVAH）を搭載している。この電池を重心移動装置（Gravity Center Controller（GCC））に載せ、前後方向への移動と、長軸回りの回転により、ビークルのピッチ角とロール角を制御する。

浮力エンジンは深海用フロートDeep NINJA（Kobayashi et al., 2012）用に開発したものを搭載した。往復ピストン式のもので、シリンダの容量は50cm³，最大40MPaの押し出し力がある。30MPa出力時で40%以上の電力効率を実現している。耐圧容器内のオイルリザーバには、SeaGlider（Eriksen et al., 2001）と同様にローリングダイアフラムを用いた。このオイルリザーバ内の油量はリニアポテンシオメータで測定する。全オイル容量は2500cm³とした。この浮力エンジンによりビークルの耐

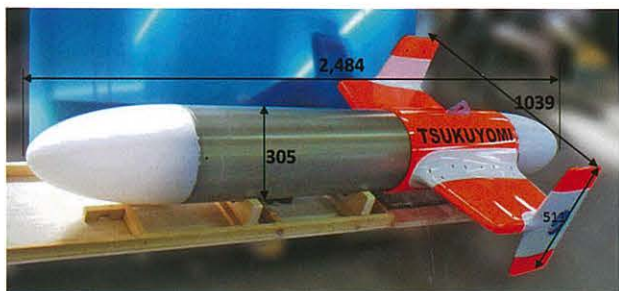


図4 ツクヨミの外観 (単位: mm)

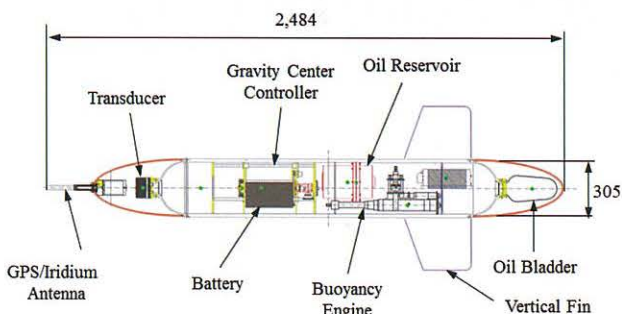


図5 ツクヨミの内部構造

圧容器外にあるオイルブラダの容積を変化させ、浮力を制御する。

図6 (a), (b) はピークルを静止させて、重心を吊り下げた状態で電池を移動したときの静的なピッチ角とロール角の移動量を測定した結果 (Asakawa et al., 2012) である。それぞれ、 $\pm 40^\circ$ と $\pm 50^\circ$ 程度制御できることが確認できる。滑走しているときは水平翼に揚力が働くため、ピッチ角はさらに大きく制御できる。

初期の海洋実験で母船からピークルの位置を監視できるように、超音波トランスポンダを搭載している。この超音波トランスポンダには独立した電源を用意した。送受波器はピークルの船首に搭載している。この超音波トランスポンダは、超音波高度計と置換する予定である。

制御ソフトウェアは、開発の容易さを考慮して、LinuxをOSとして採用した (Asakawa et al., 2011)。CPUボードにはArmadillo-440 を用いている。このCPUボードを中心に、A/Dなどのインターフェイス基板と電源制御基板を搭載している。

5. 水槽試験 (Asakawa et al., 2012)

平成23年12月には、製造したピークル本体を用いて、前述の深海機器力学実験水槽で滑走試験を行った。試験では、まずツクヨミをテグスで吊り下げて静止させ、テグスを開放して滑走を開始した。深度、姿勢等は内蔵の圧力計 (MP402D-5000A) とコンパス (OS5000) および姿勢センサ (AMU Light) で測定し、内蔵のフラッシュメモリに記録した。曳航装置をピークルと同じ速度で走行させることにより、ピークルの滑走速度を推定した。

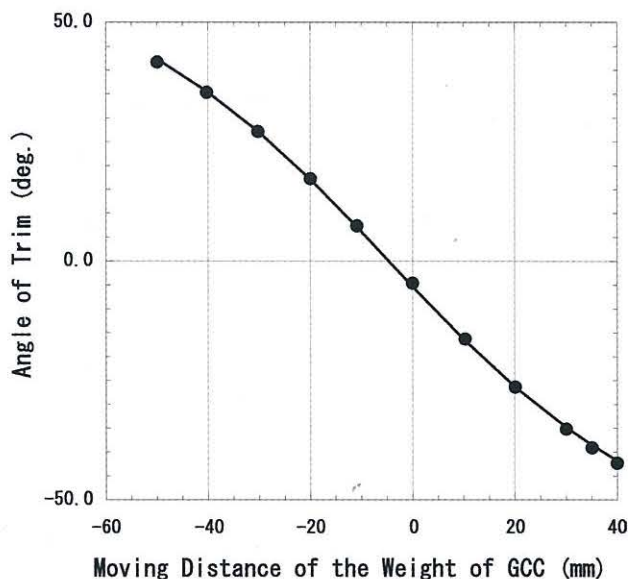


図6 (a) 重心移動装置の移動量と静的なピッチ角

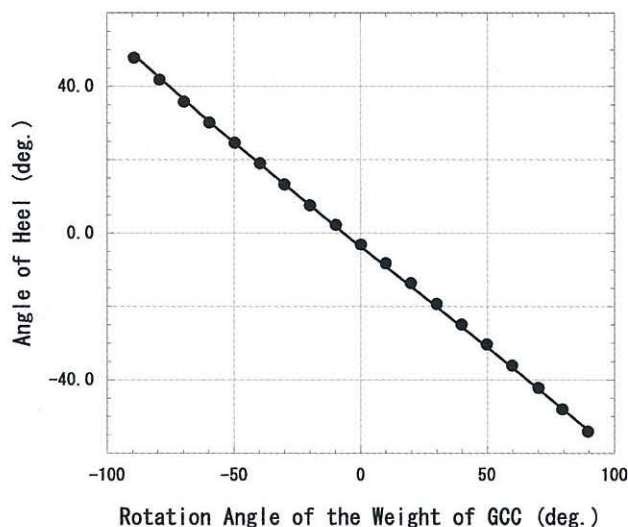


図6 (b) 重心移動装置の回転角度と静的なロール角

図7 (a) と (b) はそれぞれ直線的滑走と旋回の一例である。水槽の深さ制限のため、浅いピッチ角での滑走実験に限定されたが、安定した直線的滑走と旋回が確認できる。図7の試験時の水中重量は0.09kg, 最大水平速度は0.59m/sであった。

6. 第1次海洋実験 (Asakawa et al., 2012)

平成24年3月にはJAMSTEC所有の研究船「かいよう」により、第1次海洋実験を行った。実験は、安全のため、長さ500mの細径ロープ (直径1.9mm, 破断強度252kgf) をピークルに接続した (図8)。予想したことはあるが、この細径ロープはピークルの運動に大きな影響を与えた。

図9は実験データの一例で、ピッチ角を最大にして水深470mまで下降したのち浮上した。安定した滑走が確認できる。浮力エンジンと重心移動装置の動作は、事前

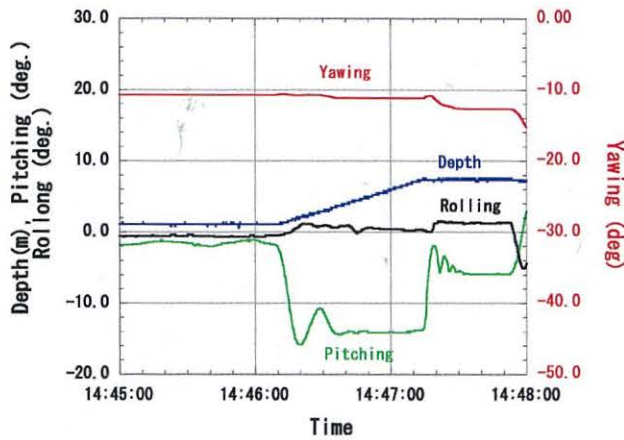


図7 (a) 水槽実験結果の一例：直線的滑走
推定した水平速度は0.25m/secであった。

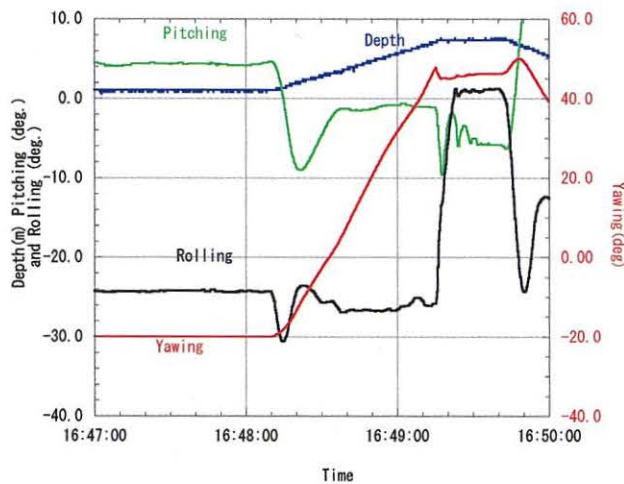


図7 (b) 水槽実験結果の一例：旋回試験

にそのシーケンスを規定した。下降時のピッチ角はおよそ60°、下降速度は0.28m/sec、推定水中重量はおよそ0.43kgであった。

7. 最後に

一定海域長期観測用水中グライダー「ツクヨミ」の概念と、開発状況を記述した。ツクヨミの開発はまだ初期段階である。現在、方位とピッチ角を目標値に制御するためのプログラムの開発を終了したところである。平成23年1月には第2次海洋実験でその評価を行う予定である。また、プログラムのデバッグと制御パラメータ選定などに用いるためのシミュレータを開発した。浮力エンジンなどの搭載機器をシミュレーションする機能と、実際の機器をシミュレーションに組み込む機能、および運動をシミュレーションする機能を持っている。さらに、これらの機能を用いて、一定の海域に長期滞在する機能、スリーブ機能、海底着底機能を実現するためのプログラムを開発し、一定海域での長期観測が実現できることを実証する予定である。

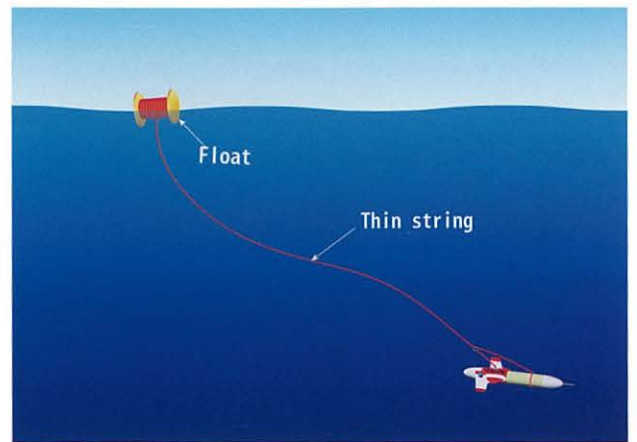
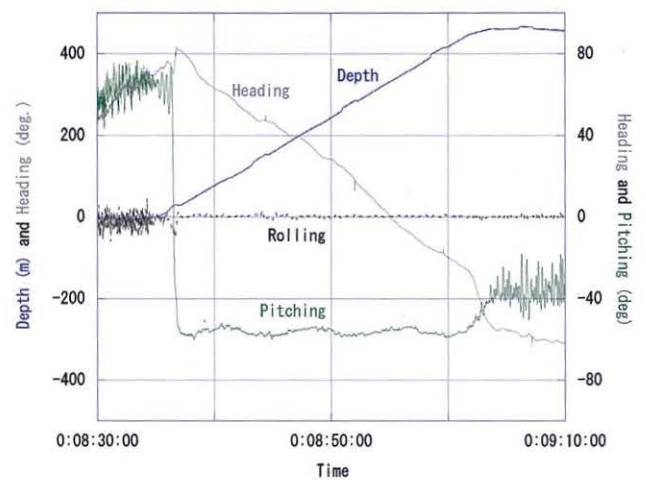


図8 第1次海洋実験のイメージ



TData_120302_075454r3 12:52:18 2012/03/27

図9 第1次海洋実験結果の一例

参考文献

- Asakawa, K. et al., "Design Concept of Tsukuyomi - Underwater Glider Prototype for Virtual Mooring -", in Proc. of OCEANS 2011 Santander, (2011)
- Asakawa, K. et al., "Results of the First Sea-test of Tsukuyomi; a Prototype of Underwater Gliders for Virtual Mooring," Proc. of OCEANS' 12 MTS/IEEE Hampton Roads, in CD ROM, (2012)
- Eriksen, C. et al., "Seaglider: A Long-Range Autonomous Underwater Vehicle for Oceanographic Research," IEEE J. of OCEANIC ENG., 26, 4, p.424-436, (2001)
- Kobayashi, T. et al., "Deep NINJA: A new profiling float for deep ocean observation," in Proc. of The Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference, p.454-461, (2012)
- Nakamura, M. et al., "Hydrodynamic Coefficients and

Motion Simulations of Underwater Glider for Virtual Mooring," IEEE J. of Oceanic Eng., to be published.

Rudnick, D. L. et al., "Underwater Gliders for Ocean Research," Marine Technology Society J., 38, 2, p. 73-84, (2004)

Shapiro, A., "Remotely Piloted Underwater Glider Crossing the Atlantic," IEEE Spectrum, March (2010)