

バーチャルモアリング用円盤型海中ビークルの開発

兵頭孝司* 中村昌彦** 小寺山 亘***

Development of Underwater Vehicle for Virtual Mooring

Takashi HYODO, Masahiko NAKAMURA, Wataru KOTERAYAMA

In studying the environmental problem on a global scale, successive and extensive observation of the ocean, which has a great influence on the global environment, is required. As an observation tool, the disk type vehicle has been developed. This vehicle stays in a designated observation area in the ocean for a long period of time, repeating diving and surfacing (i.e. Virtual Mooring)

The feature of this vehicle is to perform a motion control (yawing, diving and surfacing) by buoyancy adjust equipment and weight shifter. Therefore, this vehicle has no rudder and no elevator. The motion characteristics of the vehicle were checked by tank test and simulation, and verified that vehicle would be available actually in the ocean. Ocean test conducted in near future will verify that disk type underwater vehicle for virtual mooring is an effective oceanographic survey tool.

地球規模での環境問題を検討する場合，地球環境に多大な影響を及ぼす海洋の時間的・空間的な観測データが必要である．この観測ツールとして，長期間海洋に留まり潜航・浮上を繰り返しながら，グライディングにより定められた海域内に留まる（バーチャルモアリング）円盤型海中ビークルを開発した．

本ビークルの最大の特徴は，潜航・浮上，針路変更などの運動制御をビークル内部の浮力調整装置及び重心移動装置で行うことである．したがって，ビークルは垂直尾翼，昇降舵などの付加物を有しない．本ビークルの運動特性は，水槽試験及びシミュレーションを行い，実海域での使用に耐えるものであることを確認した．今後は，実海域において実証試験を行い，本ビークルが海洋観測の有効なツールであることを検証していく予定である．

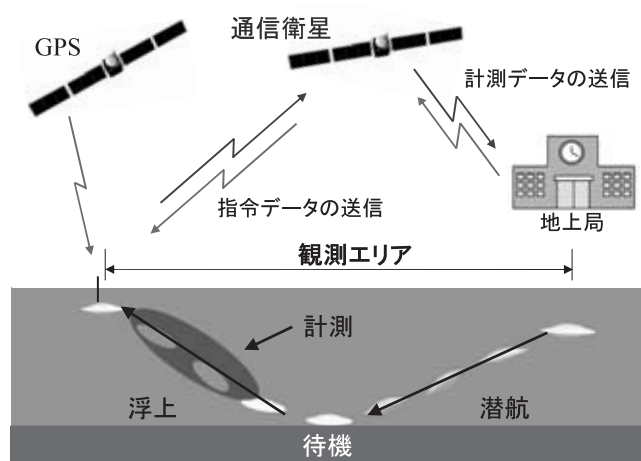


図1 バーチャルモアリングの概念
Concept of Virtual Mooring

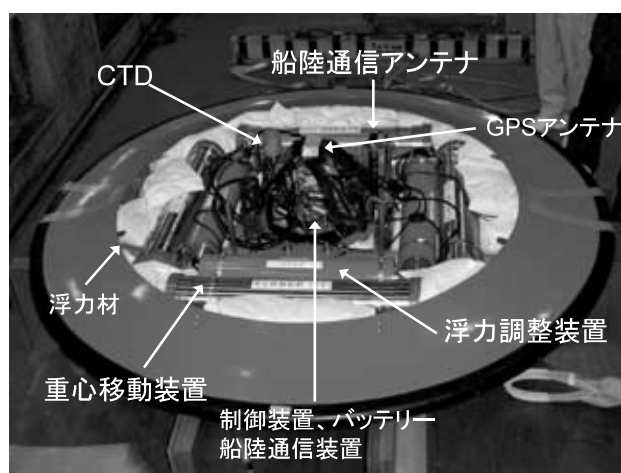


写真1 実証機
Underwater Vehicle

* 船舶・艦艇事業本部 事業開発部
(研究当時：九州大学 応用力学研究所 助教授)

** 九州大学 応用力学研究所

*** 九州大学

1. はじめに

近年、全地球規模における環境変化の予測、環境保全に関する研究がますます盛んになってきている。これらの研究を行うためには、地球環境に大きな影響を及ぼす海洋の時間的・空間的な観測データが必要である。従来からある係留系による観測システムでは、観測点を簡単に変更できない上に、水深方向の離散的なデータしか得られないばかりか、係留系の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である¹⁾。

今回、九州大学応用力学研究所では、このような問題を解決するためのツールとして、長期間海洋に留まり、潜航・浮上を繰り返しながらグライディングにより、定められた海域内に留まる水中ロボット（バーチャルモアリング用海中ピークル）を開発した^{2),3)}。

本報では、開発目標とする海中ピークルのコンセプト、実証機の製作、運動制御シミュレーションに必要な流体力係数を求めるための水槽試験結果とシミュレーション結果について示す。

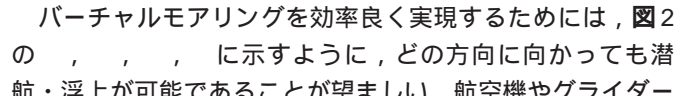
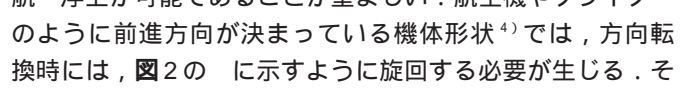
2. バーチャルモアリングの概要

海中ピークル（以後、ピークルと略す）を用いたバーチャルモアリングの概念を図1に示す。バーチャルモアリングによる海洋観測とは、観測定点保持のためにチェーンなど係留索を用いた機械的な係留は行わず、ピークルが浮力調整と重心移動により、浮沈とグライディングを繰り返して、設定された海域内に長期間留まり、観測を行うシステムである。バーチャルモアリングは、係留システムのように設置された位置に固定されず、任意に観測海域を変更できる利点を持っている。

ピークルは、機体内部に各種観測機器を搭載し、バーチャルモアリングを実施する海域の海面と海底とを往復する。ピークルは、この往復の間に各種海洋観測を行い、計測されたデータは、ピークルが海面に浮上した際に衛星通信システムを使い、基地局に逐次送信される。また、衛星通信システムは双

方向通信可能であり、基地局からはピークルに次回以降の観測海域、浮上時間などの指示情報を送信することが可能である。ピー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、計測と計測の間では海底に機体を着底させて待機し、潮流などにより機体が流されることを防ぐ。

3. 円盤型ピークルの特徴

バーチャルモアリングを効率良く実現するためには、図2の、に示すように、どの方向に向かっても潜航・浮上が可能であることが望ましい。航空機やグライダーのように前進方向が決まっている機体形状⁴⁾では、方向転換時には、図2のに示すように旋回する必要が生じる。そこで、開発したピークルは、船首方向を限定せずに、全周囲方向に移動可能な円盤型ピークルとした。また、輸送及び投入・回収作業を容易にし、海中では漁網などの漁具にかかりにくい実海域で運用し易いピークルであることも同時に目指し、潜航・浮上時の針路及び深度制御を行う垂直尾翼、昇降舵などをピークルに設けていない。このため、これらの制御は、排水容積の増減による浮力調整及びピークル内部のウエイト移動による重心移動⁵⁾によって行う。

4. 実証試験用ピークル

以上のコンセプトに基づき、実海域での実証試験用ピークルとして、九州大学応用力学研究所において、バーチャルモアリング用海中ピークルを製作した。ピークルの内部構造を図3、主要目を表1、上部カウルを外した状態を写真1に示す。

本ピークルは、FRP製の外殻に、制御装置（PC/104コンピュータ）、航海計器（GPS、磁気方位計、傾斜計、圧力計）、運動制御装置（浮力調整装置、重心移動装置）、バッテリー

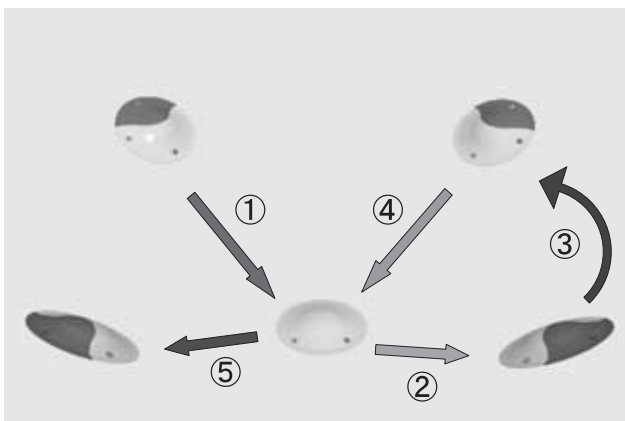


図2 円盤型ピークルの特徴
Motion of Disk Shaped Vehicle

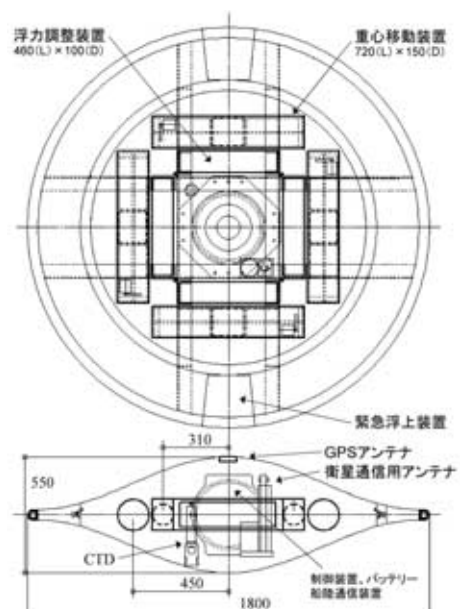


図3 実証機
Underwater Vehicle

表1 主要目
Principal Dimensions

直径	1 900 mm
高さ	550 mm
質量	280 kg
設計耐圧深度	100 m
最大浮力発生量	39.72 N
最大傾斜モーメント	34.87 Nm
バッテリー	ニッケル水素電池

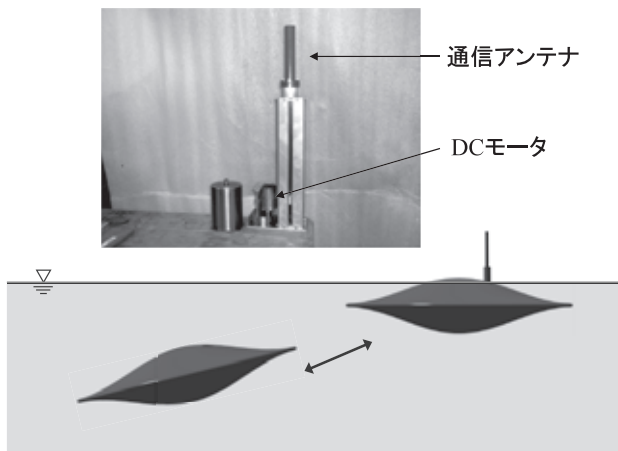


図4 衛星通信用アンテナ
Antenna for Satellite Communication

などの機体駆動用の装置に加え，環境計測装置としてCTD (Conductivity Temperature Depth profiler)，船陸間通信装置として低軌道衛星データ通信システム“ORBCOMM”を搭載している．本ブイクルの設計耐圧深度は100 mであり，高性能バッテリーを満載搭載した場合には3ヶ月の運用可能を目標としている．

4.1 システム構成

ブイクルの運動制御は，航海計器によって計測された各種情報をもとに，運動制御装置を駆動することにより行う．更に，制御装置は，ブイクルの運動データ及び海洋観測装置の計測データを常にロギングし，ブイクル内部の記録媒体に保存している．海面に浮上したブイクルは，衛星通信システムを用いて陸上局と双方向通信を行う．ブイクルからは計測されたデータの一部(ダイジェスト)が陸上局に送信され，陸上局からは次回の計測海域(海底待機位置)，浮上時間などの動作指令が送信される．また，ブイクルは，ブイクルの制御装置と完全に独立した緊急浮上装置を搭載している．

4.2 浮力調整装置

浮力調整は，図3に示したようにブイクル内の4箇所に設置した浮力調整装置内のピストンを移動させることにより，排水容積を増減して行う．ピストンは，DCモータ・減速機・ボールネジで構成された機構により，浮力調整装置内を

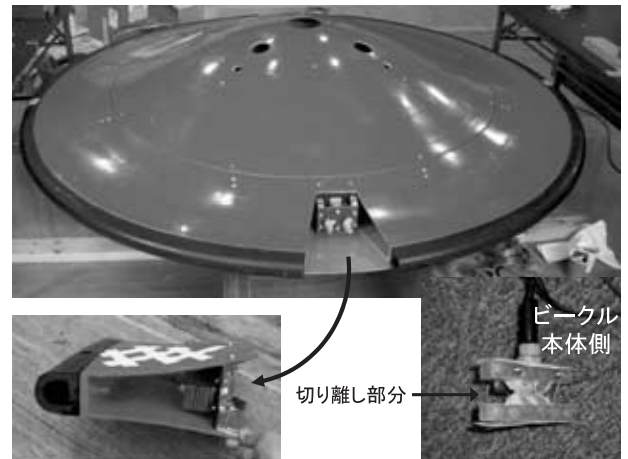


写真2 緊急浮上装置
Emergency Surfacing Equipment

移動する．本装置は軽量化を図るため，本体は塩化ビニール製である．また，浮力調整装置は，浮力制御を行っても浮心の平面位置が変動することがないように，ブイクルの機体中央に配置した．本浮力調整装置の浮力調整量は約40 Nである．動特性については，最大浮力から最小浮力にするまで約40秒である．なお，浮力の制御は最大浮力・最小浮力位置のみ設定可能である．

4.3 重心移動装置

重心移動は，浮力調整装置と同様にブイクル内の4箇所に設置した重心移動装置内のウエイト(1基あたり質量12 kg)を移動させることにより行う．本装置では最大約30 Nmの傾斜モーメントを発生することが可能である．重心移動装置本体のパイプ部分はステンレス製であるが，鏡板部分は重量軽減のため塩化ビニール製である．

実証試験では調整を兼ねて機体の復原力を発生させる重心と浮心間の距離[$BG (=z_G - z_B)$]を変更する可能性が高い．したがって，本重心移動装置が発生する最大傾斜モーメントは余裕を持って設計した．

4.4 衛星通信用アンテナ及びGPSアンテナ

ブイクルは衛星通信用アンテナとGPSアンテナを搭載している．衛星通信用アンテナは2段伸縮式とし，通信時以外はブイクル内部に格納されている．また，GPSアンテナはブイクル頂部に埋め込まれている．ブイクルは海面に浮上した際に，図4に示すように，ブイクル内部より通信アンテナを伸張し衛星通信を実行する．ブイクルに搭載した2種類のアンテナは共に樹脂で耐圧コーティングしてある．

4.5 緊急浮上装置

写真2に緊急浮上装置を示す．実海域で運用中のブイクルに，漏水や搭載バッテリーの電圧低下などのトラブルが発生した際には，ブイクルは機体端部の一部を切り離して緊急浮上する．緊急浮上装置はブイクルの姿勢によらず，確実に端部を切り離す必要があるため，ブイクルの左右2箇所に搭載した．切り離し機構は，最近の海底地震計に広く使用されて

いる強制電蝕タイプである．事前のテストでは，通電後約12分で切り離しが完了した．

5. ピークルの運動制御

5.1 数学モデル

ピークルの運動は円盤中心を原点とする機体固定座標系で記述し，空間位置などは空間固定座標系で記述するものとする^{6),7)}．シミュレーション計算に用いた座標系を図5に，運動方程式を次式(1)～(7)に示す．

$$\begin{bmatrix} m + A_{11} & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m + A_{22} & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m + A_{33} & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_{xx} + A_{44} & 0 & 0 \\ mz_G & 0 & -mx_G & 0 & I_{yy} + A_{55} & 0 \\ -my_G & mx_G & 0 & 0 & 0 & I_{zz} + A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$F_x = -(m + A_{33})\dot{w} + (m + A_{22})\dot{v} + mx_G q^2 + mx_G r^2 - mz_G pr - my_G pq - (m -)g \sin \cos + X_{uu}u^2 + X_{ww}w^2 \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$F_y = -(m + A_{11})\dot{u} + (m + A_{33})\dot{w} + my_G p^2 + my_G r^2 - mx_G pq + mz_G qr + (m -)g \cos \cos + Y_v v + Y_v |v| \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$F_z = -(m + A_{22})\dot{v} + (m + A_{11})\dot{u} + mz_G p^2 + mz_G r^2 - mx_G pr + my_G qr + (m -)g \sin \cos + Z_w w \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$M_x = mz_G ru - mz_G pw - (I_{zz} - I_{yy} - A_{55} + A_{66})qr - (A_{33} - A_{22})\dot{w} - my_G pv + my_G qu - (my_G - y_B)g \cos \cos - (mz_G - z_B)g \sin \cos + K_p p + K_{pp} |p| p \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$M_y = -mz_G qw + mz_G rv - (I_{xx} - I_{zz} + A_{44} - A_{66})pr - (A_{11} - A_{33})\dot{w} + mx_G pv - mx_G qu - (mx_G - x_B)g \cos \cos - (mz_G - z_B)g \sin \cos + M_w w + M_q q + M_{qq} |q| q \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$M_z = -mx_G ru + mx_G pw - (I_{yy} - I_{xx} - A_{44} - A_{55})pq - (A_{22} - A_{11})\dot{w} + my_G pw - my_G rv + (mx_G - x_B)g \sin \cos + (my_G - y_B)g \sin \cos + N_r r + K_r |r| r \quad \dots\dots\dots(7)$$

- ここで，
 D：ピークル直径
 m：ピークル質量
 V：排水容積
 (x_B, y_B, z_B)：浮心位置座標
 (x_G, y_G, z_G)：重心位置座標
 (x, y, z)：ウエイトの位置座標
 A_{ij}：付加質量及び付加慣性モーメント
 I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}：慣性モーメント
 K_p, K_{pp}, M_q, M_{qq}, N_r, N_{rr}：角速度に関する流体力係数
 M_w, X_{uu}, X_{ww}, Y_v, Y_{vv}, Z_w：速度に関する流体力係数
 p, q, r：x, y, z軸周りの角速度
 u, v, w：x, y, z軸方向速度
 φ, θ, ψ：ロール，ピッチ，ヨー角
 g：重力加速度
 ρ：水の密度

であり，慣性相乗積 I_{xz}, I_{zx}, I_{yz}, I_{zy} は，ゼロと近似した．

5.2 流体力試験

翼制御型航空体のように大きな翼をもつピークルでは，翼に働く流体力が支配的なため，翼理論に基づく流体力係数の推定が良好な結果をもたらすことはよく知られている．しかし，今回開発した円盤型ピークルに作用する流体力を数値計算によって推定することは困難であると考えられたので，防水型6分力計を内蔵した縮尺模型（直径400mm，写真3）を製作し，流体力計測試験を実施した．試験は九州大学応用力学研究所深海機器力学試験水槽（長さ65m×幅5m×深

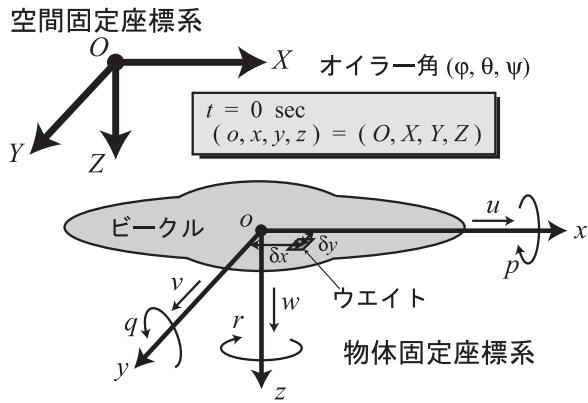


図5 座標系 Coordinate System



写真3 流体力計測試験用模型 400 mm Model

さ7m)において、定常流中で迎角 α を変化させてピークル模型に作用する流体力を計測する“静的試験”と定常流中で模型の前後揺、上下揺などの強制動揺を行う、いわゆる“動的試験”の2種類を実施した。静的試験及び動的試験の結果から、円盤型ピークルの運動シミュレーションに必要な流体力係数を求めた。

5.3 グライディング性能確認試験

円盤型ピークルのグライディング特性を確認するために縮尺模型(直径700mm)を製作し、グライディング性能確認試験を実施した。グライディング性能確認用縮尺模型を写真4に、試験中の風景を写真5に示す。本模型は内部に水深計測用圧力計、傾斜計及びデータ計測用としてノートPCを搭載している。

試験はBG及び頭下げモーメント(及び潜航力)をパラメータとして実施した。BGは、あらかじめ中性浮力としたピークルの内部ウエイトの配置を調整することにより変更した。頭下げモーメント及び潜航力はピークル端部(ピークル中心位置より325mm)にウエイトを追加搭載することにより発生させた。

5.4 グライディングシミュレーション

頭下げモーメント(及び潜航力)を変化させた場合のグライディング試験結果(潜航深度Z及びピッチ角 θ)及び、5.1及び5.2で得られた各種流体力係数を組み込んだグライディングシミュレーションの結果を図6に示す。グライディング性能確認試験結果より、いずれの場合もグライディング開始後すみやかにピッチ角が定常値に達し、安定したグライディング特性を有することが分かる。ただし、頭下げモーメントが小さい(追加ウエイトが小さい)場合、ピッチ角が定常値となって安定したグライディングに達するまでに時間がかかり、外乱の影響を受けやすい状態にある。

5.1及び5.2で得られた流体力係数を使ったシミュレーションの結果はグライディング性能確認試験結果と良く合致しており、運動方程式及び流体力係数の精度は良いと言える。

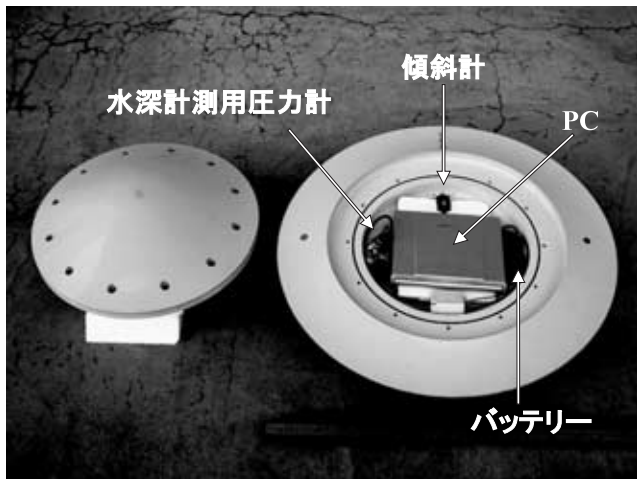


写真4 グライディング性能確認用模型
700 mm Model

5.5 潮流中におけるグライディングシミュレーション

本ピークルは実証試験の場所として、対馬東水道を予定している。そこで、対馬東水道の潮流を想定したグライディングシミュレーションを実施した。対馬東水道は季節により鉛直分布が異なり、冬は表層から下層まで0.5 m/s程度の一様流れ、夏は表層で1.0 m/s程度、下層で0 m/sと想定した。モデル化した潮流分布を図7に示す。

潜行力を16.1 Nとし、ピークルの重心位置(頭下げモーメント)を変化させた場合のグライディングシミュレーションの結果を図8($x_G/D=0.0037$)及び図9($x_G/D=0.0055$)に示す。

重心の移動距離が少ないシミュレーション(図8)では、冬季は潮流に逆らってグライディングすることができないこ



写真5 グライディング試験風景
Vehicle under Gliding Experiment

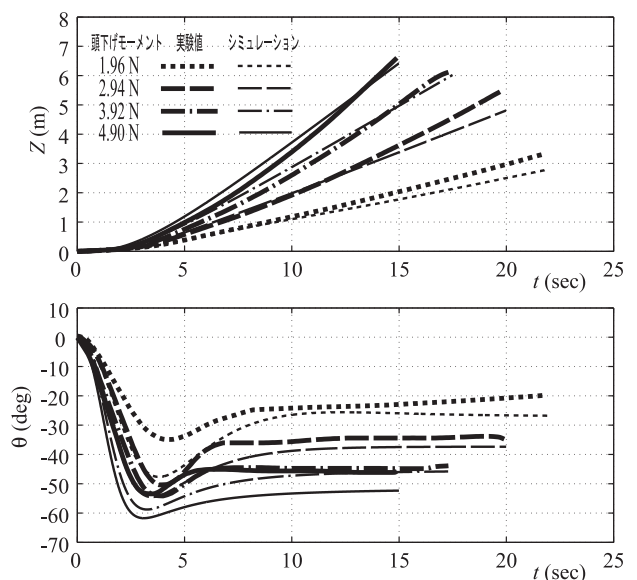


図6 グライディングシミュレーション結果 (BG = 2.9 mm)
Simulation Result of Depth and Pitch Angle
of Vehicle under Gliding (BG = 2.9 mm)

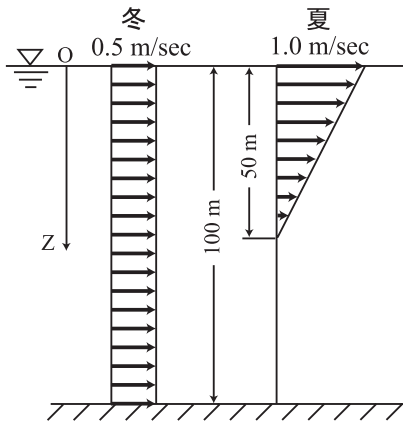


図7 潮流の鉛直方向分布
Current Distribution

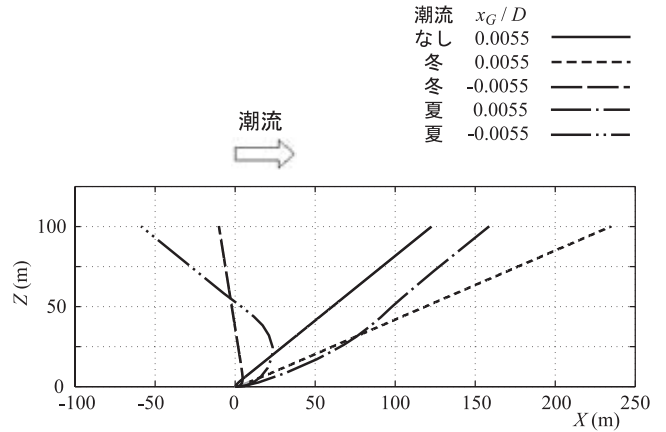


図9 潮流中におけるグライディングシミュレーション結果
($x_G/D = 0.0055$)
Simulation Result in Current ($x_G/D = 0.0055$)

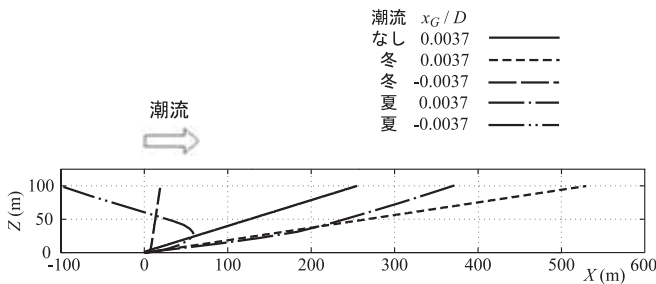


図8 潮流中におけるグライディングシミュレーション結果
($x_G/D = 0.0037$)
Simulation Result in Current ($x_G/D = 0.0037$)

とが分かる。しかし、重心の移動距離を大きくしたシミュレーション(図9)では、夏及び冬の状態でも流れに逆らってグライディングすることが可能であることが分かる。実海域においては、潮流に加えて潮汐流が付加されるため、グライディングに際しては運用のタイミングに注意する必要があることが分かった。

6. おわりに

地球規模での環境問題を検討する場合に必要な海洋の時間的・空間的な観測データ取得のツールとして、機械的な係留を用いないバーチャルモアリングによる海洋観測を検証し、実証試験用ピークルを製作した。今後は実海域において本ピークルを使用した各種実証試験を行い、バーチャルモアリングによる海洋観測の有効性を検証していく予定である。

本研究は、第一著者が2006年度に(株)三井造船昭島研究所から九州大学応用力学研究所へ助教授として出向し、本研究プロジェクトのエンジニアリングを担当した際のものである。

本研究の内、主として、ピークル形状、アクチュエータ、運動制御方法、模型試験などの基礎研究は科学研究費補助金(基盤研究B)で行われた。また、本実証機の開発は九州大

学応用力学研究所のプロジェクト研究「東アジア海洋・大気環境激変の監視と予測システムの開発」の一環として行われた。実海域実証試験に際しては、長崎大学水産学部付属練習船長崎丸の協力を得た。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 田才・ほか：総合ブイシステムによる海洋観測法の開発研究，九州大学応用力学研究所所報，52(1980)，p.29
- 2) 中村：バーチャルモアリングによる海洋環境計測システムの開発研究，平成17年度～平成19年度科学研究費補助金(基盤研究(B))研究成果報告書，(2007)
- 3) 中村・ほか：バ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試験用ピークルの開発 - ，日本船舶海洋工学会論文集，5(2007)，p.35
- 4) C.C. Eriksen et al.: Seaglider: A Long-range Autonomous Underwater Vehicle for Oceanographic Research, IEEE Journal of Oceanic Engineering, 26, 4 (2001) p.424
- 5) 川口・ほか：シャトル型海中ロボットを用いた海洋計測，日本造船学第12回海洋工学シンポジウム，(1994)，p.233
- 6) 村上：円盤型没水体の流体力学的性質に関する研究(第1報)，日本造船学会論文集，133(1973)，p.23
- 7) 小寺山・ほか：海洋観測用曳航体の開発研究(第1報)，日本造船学会論文集，163(1988)，p.139

〔問い合わせ先〕

船舶・艦艇事業本部 事業開発部
TEL 03 - 3544 - 3345 兵頭 孝司