

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実験用ビークルの開発－

正員 中村 昌彦* 正員 兵頭 孝司**
正員 小寺 山 亘*

Development of Disk Type Underwater Glider for Virtual Mooring
- Part 1, Study on Control System and Development of Testbed Vehicle -

by Masahiko Nakamura, *Member* Takashi Hyodo, *Member*
Wataru koterayama, *Member*

Summary

In recent years, predictions of changes in the environment on earth and studies on ecdevelopment have become important. For this research on going ocean data in time and space is required, and has been obtainable using by mooring systems. However, a conventional mooring system can observe only discrete data in perpendicular space and moreover, construction of such a system requires a manpower and great expense.

To solve this problem, an underwater vehicle for virtual mooring is developing at Research Institute for Applied Mechanics (RIAM). This paper describes the testbed vehicle “LUNA” that was designed to develop a virtual mooring system, and the control algorithm is discussed.

1. 緒 言

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り、係留系による観測が広く行われてきた。ところが、係留系では水深方向の離散的なデータしか得ることができない上(自動昇降機能付きセンサーもあるがセンサーのみの交換は困難)、(大水深海域での係留では海中ブイが使用されることが多く)係留系を回収するまで計測データを確認することが出来ず、係留終了までは観測の成否を確かめる手段が無い。さらに、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となる¹⁾上、観測点の変更は非常に困難である。このような問題点を解決し、観測対象定点において鉛直空間・時間連続データを取得するために、円盤型バーチャルモアリング用水中ビークルを

開発する。ビークルには、長期間連続観測のためにエネルギー消費量を極力抑え、機械的信頼性を確保し、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)ことが要求される。すでに製造販売されている海洋観測用水中グライダーはすべて航空機型^{2,3,4)}であって、日本海域のように漁網や延縄の切れ端、その他の廃棄物が多い海域では主翼・尾翼にこれらの浮遊物を引っかけて行動不能に陥る危険性が極めて高い。またバーチャルモアリングに用いる場合は漁労の影響を避けるために海底に待機する時間が長く、その場合でも低層網に引っ掛けられる確率が高い。円盤形はこれらの欠点を解決するものであり、さらに、円盤型ビークルは突起物がないため、投入・揚収時に破損する危険性も低い。

本論文では実機製作に先立って行われた、制御システムの検討、グライディング性能確認のためのシミュレーション計算・水槽試験、運動制御シミュレーション、及び、水槽試験用に開発された水中ビークル“LUNA”について述べられている。

2. バーチャルモアリングの概要

Fig.1 に水中ビークルを用いたバーチャルモアリングの概

*九州大学応用力学研究所

**三井造船(株)船舶・艦艇事業本部

(研究当時：九州大学応用力学研究所)

念図を示す。ビ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。この間に計測された各種観測データは、ビークル内のメモリーに保存されると同時に、ビークルが海面に浮上した際に通信衛星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、潮流等の影響によりバーチャルモアリングの対象海域から外れている場合には、潜航時にビークルの運動を制御して設定海域へと帰還する。ビ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、計測を行わない間は海底に機体を着底させて待機し、潮流等により機体が流されることを防ぐ。衛星通信は双方向通信可能なものを使用し、観測海域の海象が悪く、浮上が危険であると判断される場合は、基地局より海底待機時間を延長する等の指令をビークルに送り、観測スケジュールを変更する。ビークルからリアルタイムで逐次送られてくるデータを基に観測スケジュールを変更することができるため、送られてきたデータより発生が予測されるイベントの詳しい観測も可能となる。

ビークルは長期間連続観測のためにエネルギー消費量を極力抑える必要があるため、移動には推進機ではなく、グライディングを利用する。海洋は海流がない場所でも沿岸域では潮汐、ミッドオーシャンの場合は中規模渦などの外乱が存在する。ビークルは潜航・浮上動作中もこれらの外乱に抗して所定の位置を保つことが要求されるので、抵抗が少なく、水平運動を基本としたビークルが望ましい。また、海面上にて観測データ・動作指令を送受信中も外乱により流されるので、元の位置に帰還するには、やはり、水平運動性能に主眼を置いたシステムが優位である。このようにバーチャルモアリングのビークルに課せられた基本的な要件は外乱により流された位置を浮上・潜航中に補正することである。電池の性能が向上すれば、潜航・浮上を連続して行うグライディングにより長距離移動し、観測海域の変更も可能となる。

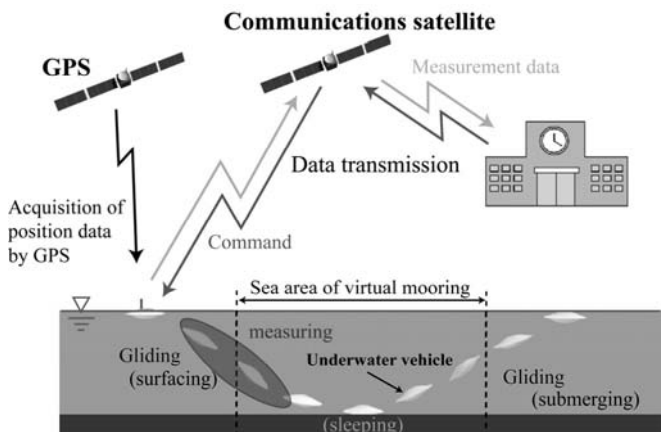


Fig. 1 Concept of virtual mooring

3. 機体形状とアクチュエーター

バーチャルモアリングを効率よく実現するためには、浮上または海底で待機中のビークルが位置を修正するために、どの方向に向かっても潜航・浮上可能であることが望ましい (Fig.2 ①、③、②、④)。航空機 (グライダー) のように前進方向が決まっている機体形状^{2,3,4)}は、方向転換に旋回が必要となり (Fig.2 ⑤)、望ましくない。そこで、ビークルは、船首方向を限定せずに、全周囲方向に対して移動可能な円盤型とした。方向転換に旋回を必要とせず、後進が可能であり、旋回する間に流れ等の影響で位置誤差が大きくなることもない。海上でGPSなどで位置確認を行い、位置誤差を算出すれば、潜航時は位置誤差を解消する方向に向けて (旋回することなく) グライディングするだけでよいので、制御も単純化できる。単純には航空機型に比べて揚抗比はよくないと考えられるが⁵⁾、全長・全幅・観測機器等の搭載容積を同じに設計すると航空機型もアスペクト比の大きな翼は使用できず、胴体直径も大きくなるので、揚抗比が劣化するはずである。一概に円盤型の流力特性が悪いとは言えないと思われる。曳網、延縄等の漁具に捕らえられにくくするためにも、突起物の無い円盤形状は有利である。また、船首方向を限定せずに、全周囲方向に対して移動可能なこと、漁具に捕らえられにくいことを実現するため垂直尾翼、昇降舵等も設けていない。実機においては衛星通信用のアンテナも伸縮式にする予定である。アンテナはある程度の長さが必要であり、円柱状 (ビークルの無指向性を考えるとアンテナのフェアリングは困難) の突起物は全機抵抗を大きく増大させるので、グライディング性能を劣化させないためにも伸縮式アンテナが必要と考えられる。

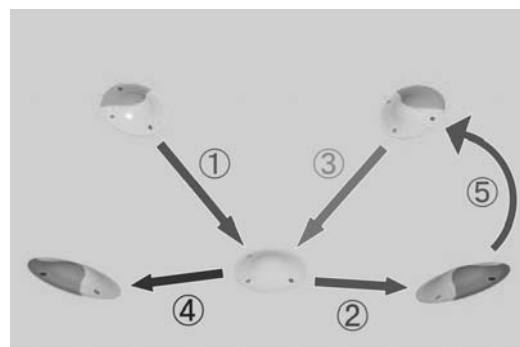
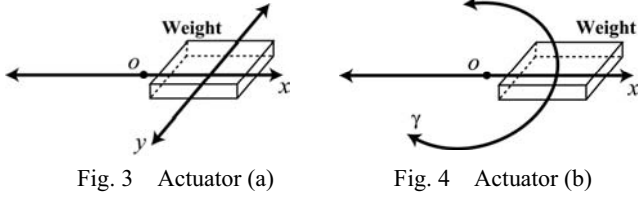


Fig. 2 Feature of motion of vehicle

運動制御は、垂直尾翼・昇降舵等を設けない方針であるので、ビークル内に搭載された重錘を移動し、ビークルの重心を移動することにより行う^{6,7,8)}。重心移動用アクチュエーターは圧力容器内に搭載可能で、圧力容器を貫通する翼駆動用軸を必要としないので、長期間海中で運用するための機械的信頼性が確保しやすい。アクチュエーターとしては、重錘をx-y台車に搭載し前後・左右に動かす重心移動装置 (Fig.3)、重錘を一方方向に往復移動可能に保持したスライ

ド部と、該スライド部を旋回可能に支持した部分から成る重心移動装置 (Fig.4) の 2 種類を検討し、性能比較を行う予定であるが、本論文では x-y 台車方式のみについて論じられている。後者のアクチュエーターを使用した場合、重錘を旋回軸中心にスライドした後、回転し、再び所定位置にスライドすることで、重錘回転による反動トルクの影響を防止し、かつ、重錘移動中にビークルが目標外の方に移動するのを防止できる。



潜航・浮上のための浮力調節は、压力容器に設置されたピストンをボールネジにより出し入れし、压力容器の体積を変更して行う。袋に液体を注排水して体積を変更する方法も考えられるが、安定したグライディングを実現するためにはかなりの体積を速やかに増減する必要があり、液体注排水用ポンプの容積、制御を含む機械的信頼性を考慮し、前述の方式とした。ピストンを機体中心に対して点対象に配置することにより、ピストンの出し入れ (浮力調節) による浮心の移動を防ぐことができる。浮心移動はビークルの運動に大きく影響し、重錘による運動制御を複雑にするため好ましくない。重錘による重心移動装置を廃し、浮力調節装置による浮心移動を積極的に利用し、運動制御を行う方法も考えられるが、(水圧に対抗してピストンを駆動しなければならないため) 浮力調節装置は重錘移動装置に比べて動特性が悪く、本ビークルの運動制御には適さないと判断した。

4. ビークルの数学モデル

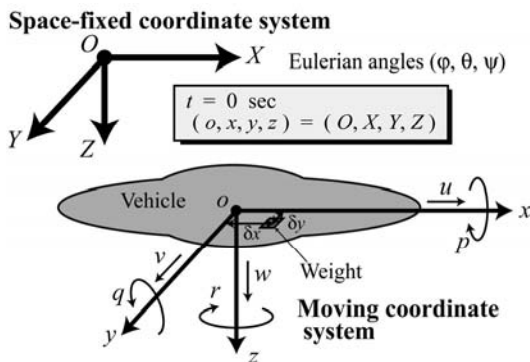


Fig. 5 Coordinate system

ビ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、空間位置等は空間固定座標系で記述する^{9,10)}。座標系と計算に使用する記号を Fig.5 に示す。計算においては、

時刻 $t = 0$ の時、機体固定座標系と空間固定座標系は一致しているものとする。

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

$$F_x = -(m + A_{33})q w + (m + A_{22})r v + m x_G q^2 + m x_G r^2 - m z_G p r - m y_G p q - (m - \rho \nabla) g \sin \theta + X_{uu} u^2 + X_{ww} w^2 \quad (2)$$

$$F_y = -(m + A_{11})r u + (m + A_{33})p w + m y_G p^2 + m y_G r^2 - m x_G p q + m z_G q r + (m - \rho \nabla) g \cos \varphi \cos \theta + Y_v v + Y_w |v|v \quad (3)$$

$$F_z = -(m + A_{22})p v + (m + A_{11})q u + m z_G p^2 + m z_G q^2 - m x_G p r + m y_G q r + (m - \rho \nabla) g \sin \varphi \cos \theta + Z_w w \quad (4)$$

$$M_x = m z_G r u - m z_G p w - (I_{zz} - I_{yy} - A_{55} + A_{66})q r - (A_{33} - A_{22})v w - m y_G p v + m y_G q u - (m y_G - \rho \nabla y_B) g \cos \varphi \cos \theta - (m z_G - \rho \nabla z_B) g \sin \varphi \cos \theta + K_p p + K_{pp} |p|p \quad (5)$$

$$M_y = -m z_G q w + m z_G r v - (I_{xx} - I_{zz} + A_{44} - A_{66})p r - (A_{11} - A_{33})u w + m x_G p v - m x_G q u - (m x_G - \rho \nabla x_B) g \cos \varphi \cos \theta - (m z_G - \rho \nabla z_B) g \sin \theta + M_w w + M_q q + M_{qq} |q|q \quad (6)$$

$$M_z = -m x_G r u + m x_G p w - (I_{yy} - I_{xx} - A_{44} + A_{55})p q - (A_{22} - A_{11})u v + m y_G p w - m y_G r v + (m x_G - \rho \nabla x_B) g \sin \varphi \cos \theta + (m y_G - \rho \nabla y_B) g \sin \theta + N_r r + K_{rr} |r|r \quad (7)$$

ここで

- A_{ii} : 付加質量及び付加慣性モーメント
- D : ビークル直径
- g : 重力加速度
- 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 : ビークルの質量
- $M_w, X_{uu}, X_{ww}, Y_v, Y_{vv}, Z_w$: 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
- (x_B, y_B, z_B) : 浮心位置座標
- (x_G, y_G, z_G) : 重心位置座標
- ρ : 水の密度
- $(\delta x, \delta y, \delta z)$: 重錘の位置座標
- ∇ : 排水容積

ただし、重心位置、慣性モーメントは重錘位置座標の関数

であり、慣性相乗積 $I_{xz}, I_{zx}, I_{yz}, I_{zy}$ はゼロと近似した。また、揚力(4)式の Z_w に比べて z -軸方向抗力 ($Z_{ww}|w|w$) は小さく、無視できるものとした。なお、重錘の動きはアクチュエーターの動特性が一次遅れシステムで表されるとして計算することとする。

5. 流体力係数を求める実験

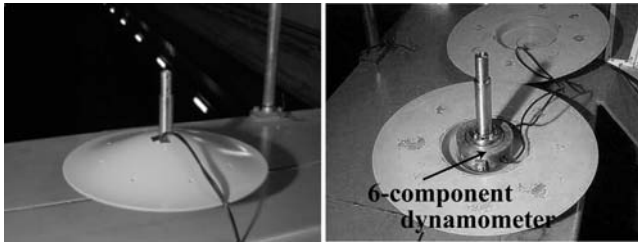


Fig. 6 φ400mm model

翼制御型曳航体のように大きな矩形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事がよく知られている¹⁰⁾。しかし、今回開発する円盤型ピークルの流体力係数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(φ400mm)を製作し(Fig.6)、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実験水槽(長さ65m、幅5m、深さ7m)で行われた。実験は定常流中でトリム角を変化させてピークル模型に加わ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、上下揺等の強制動揺を行う、いわゆる“動的試験”の2種類を行った。静的試験、動的試験から円盤型ピークルの運動シミュレーションに必要な多くの流体力係数が求められる^{7,10)}。実験結果の一部を次に示す。

5.1 静的試験結果

速度に関する流体力係数 X_w, X_{ww}, Z_w, M_w 等は定常流中で行われる静的試験より得られる(Fig.7)。試験は $U=0.3$ m/sec, 0.5 m/sec の2種類の速度について行われた。

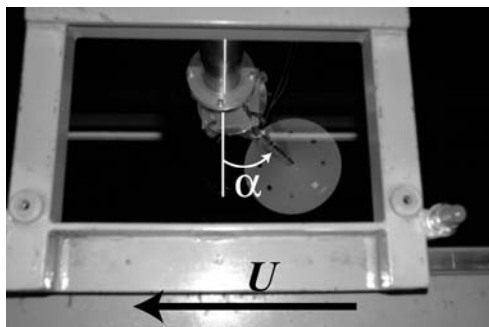


Fig. 7 Measurement of hydrodynamic force (a)

Fig.8 に揚力係数を示す。横軸はトリム角 α である。定常流

中でピークルがトリム角を持つことは、物体固定座標系においては、ピークルが z -軸方向速度 w を持つことと等価であるので、グラフの傾きから z -軸方向速度 w に関する流体力係数 Z_w' が求まる。“'”は係数が無次元化されていることを表す。本論文では力を $0.5\rho U^2 D^2$ で、モーメントを $0.5\rho U^2 D^3$ で無次元化した。図より係数に対する速度影響はほとんど無く、失速角が25度程度であることがわかる。

モーメント係数、誘導抵抗係数を Fig.9, Fig.10 に示す。Fig.9 に示すグラフの傾きより流体力係数 M_w' が、Fig.10 に示す(最少自乗法により得られた)2次式の微係数から X_{ww}' が得られる。どちらの係数にも速度影響は認められない。

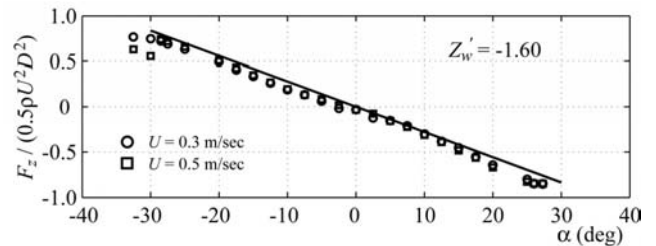


Fig. 8 Lift coefficient measured by static experiment

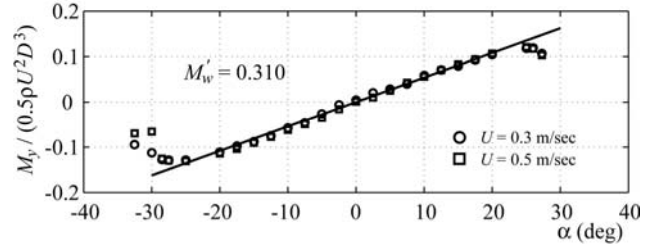


Fig. 9 Induced moment coefficient measured by static experiment

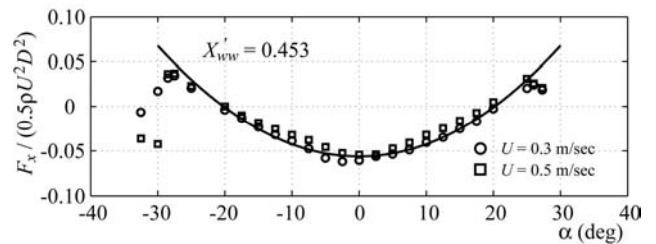


Fig. 10 Induced drag coefficient measured by static experiment

5.2 動的試験結果

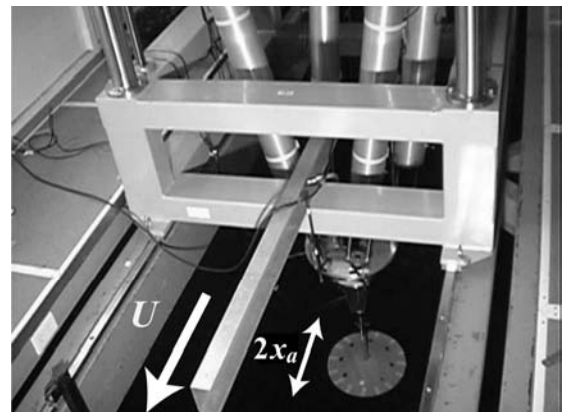


Fig. 11 Measurement of hydrodynamic force (b)

定常流中で行われる強制前後揺 (Fig.11)、左右揺、上下揺、横揺、縦揺試験より A_{11}' , A_{33}' , X_{uu}' , Z_w' , M_w' 等の流体力係数が得られる (Fig.12 ~ Fig.16)。付加質量は $0.5\rho D^3$ で無次元化されている。

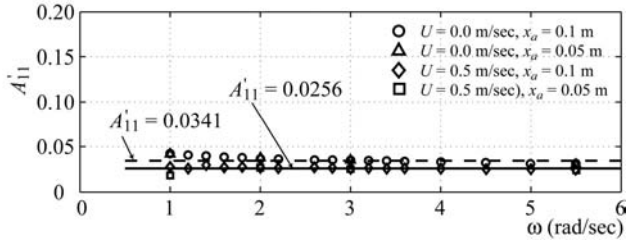


Fig. 12 Added mass coefficient of surge

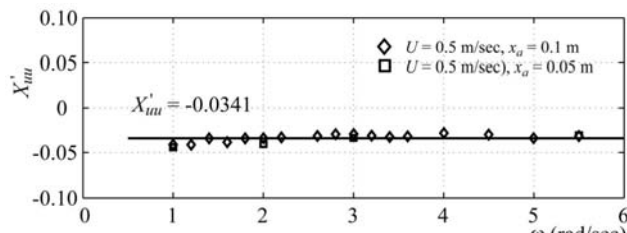


Fig. 13 Drag coefficient measured by forced oscillation test

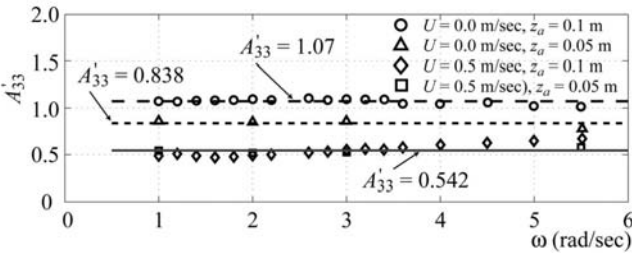


Fig. 14 Added mass coefficient of heave

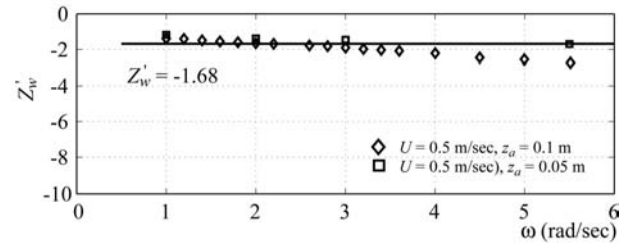


Fig. 15 Lift coefficient measured by forced oscillation test

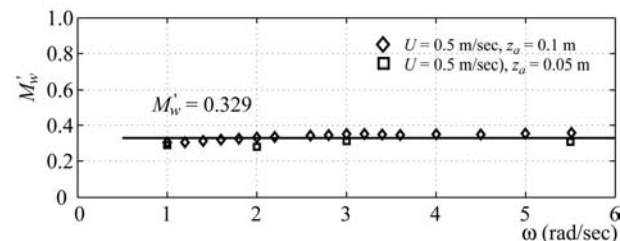


Fig. 16 Induced moment coefficient measured by forced oscillation test

定常流中試験より得られた付加質量係数、抗力係数は運動振幅の影響を受けないことがわかる。また、動的試験により得られた係数 Z_w' , M_w' の値は静的試験により得られた値とよく一致している。

紙面の制約から実験結果の図を記載できなかった流体力係数については、Table 1 に値がまとめられている。

Table 1 Hydrodynamic coefficients

A_{11}'	0.0256	M_{qq}'	0.0
A_{22}'	0.0274	N_r'	0.0
A_{33}'	0.542	N_{rr}'	0.0
A_{44}'	0.0224	M_w'	0.329
A_{55}'	0.0144	X_{uu}'	-0.0341
A_{66}'	0.0	X_{ww}'	-0.453
K_p'	-0.0687	Y_v'	-0.0282
K_{pp}'	0.0	Y_{vv}'	0.0
M_q'	-0.110	Z_w'	-1.68

6. グライディング性能確認試験

円盤型ビ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 ($\Phi 700\text{mm}$) を製作しグライディング性能確認試験を実施した。本試験では事前に中性浮力になるように調整したビークル内のウェイト配置を調整することにより BG を変更し、ビークル端部 (ビークル中心位置より 325 mm) にウェイト w を追加搭載することにより頭下げモーメントと潜航力を発生させた。模型を Fig.17 に試験中の写真を Fig.18 に示す。模型は内部に圧力計 (深度計測用)、傾斜計、データ計測用ノート PC を搭載している。データ計測 (サンプリング周期 10 Hz) は電磁スイッチでビークル外部より開始・終了させることが可能である。

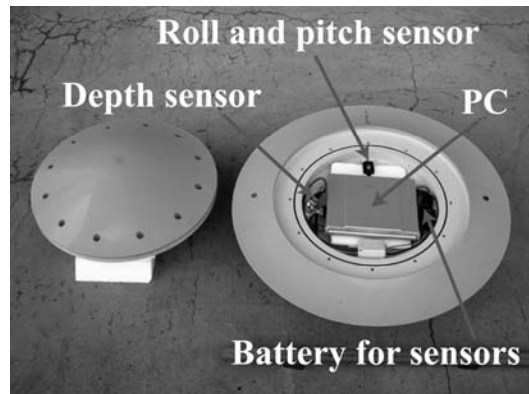


Fig. 17 $\phi 700\text{mm}$ model



Fig. 18 Vehicle ($\phi 700\text{mm}$ model) during gliding

2種類のBG(=| $z_B - z_G$ |) に対して頭下げモーメント(搭載ウエイト重量 w) 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 および縦揺角 θ) を Fig.19, Fig.20 に示す。いずれの場合もグライディング開始後すみやかに縦揺角が定常値に達し、安定したグライディング特性を有することがわかる。 w が小さい場合、前進速度が小さく、安定したグライディングに達するまでの時間も長く、外乱の影響を受けやすい状態にある。実験に使用した模型は浮力調整装置を持たないため、水槽底に達したビークル回収用にロープを模型に取り付けて実験を行っている。このロープの影響が過渡応答に強く出てしまったものと思われる。他の実験状態においてもロープの影響は皆無とは言えず、定常状態の θ に影響を及ぼしていると考えられる。しかしながら、概略シミュレーション結果は試験結果と合致し、縦方向運動方程式及び流体力係数の精度はよいといえる。今後、後述の浮力調整装置を持ったビークルを使用し、無索状態で実験を行い、検証を続けていきたい。

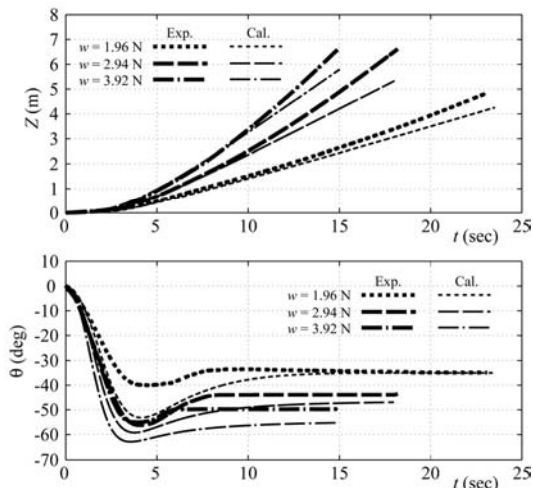


Fig. 19 Depth and pitch angle of vehicle during gliding (BG=2.1mm)

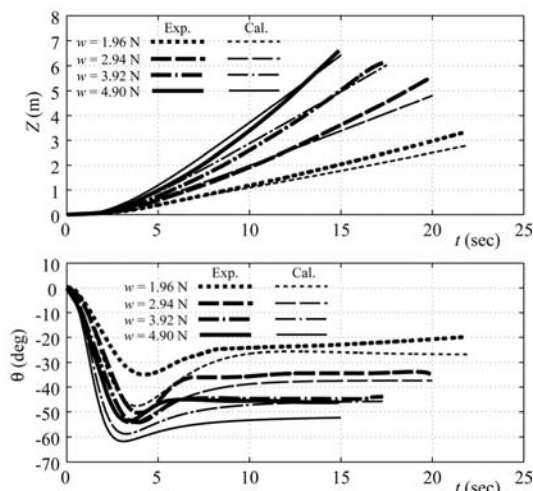


Fig. 20 Depth and pitch angle of vehicle during gliding (BG=2.9mm)

7. ビークルの針路制御シミュレーション

円盤型ビークルについて、重心移動により安定したグライディングが可能であることがシミュレーション及び模型実験により確認されたので、次に、重心移動によるビークルの針路制御を試みた。制御方法としてはPID制御、LQI制御を採用し^{7,11)}、シミュレーションにより性能比較を行った。なお、シミュレーションはΦ700mmビークルを対象とした。

Fig.21 (PID制御)、Fig.22 (LQI制御) に MATLAB、Simulink¹²⁾ を用いて構築したシミュレーターを示す。シミュレーターで使用されている要素の機能は次のとおりである。

Clock	: 計算時刻を出力する
Constant	: 設定した定数値を出力する
Demux	: ベクトル化された信号を分解する
Derivative	: 微分を行う
Enban700	: ビークルの運動方程式が記述されているサブシステム
Gain	: 設定した定数値をかける
LP Filter	: ローパスフィルター機能
Mux	: 複数の信号をまとめてベクトル化する
PID Controller	: PID コントローラー (P, I, D ゲインを設定)
Saturation	: 設定した値で信号を飽和させる
Scope	: 計算結果を時々刻々図にして表示する
S-Function	: ビークルの運動方程式が記述されている
State-Space	: LQI コントローラーが格納されている
Step	: ステップ状の信号を出力する
Sum	: 入力信号の和を出力する
To Workspace	: 信号 (計算結果) をメモリーに格納する

数値積分方法、時間間隔等を選択・指定し、シミュレーションをスタートすると計算が始まり、結果がメモリーに保存される。プログラム言語を使用して数値積分等のプログラムを組み合わせる必要は無く、ライブラリーに用意された各種 (計算) 要素を計算の流れに従って結線するだけでシミュレーションが可能となる。また、ソフトウェアにはビジュアル化の機能も付加されているので、計算結果を図にすることも容易である。

PID制御では、針路 (方位 ψ) 出力のみにコントローラーを接続すると、針路変更時の針路変化率が大きく、振動的な応答となり、良好な制御性能が得られなかった。このため、針路変化率に対しても PID コントローラーを接続し、針路変化率が過大にならないようにした。針路指令は針路出力に接続した PID コントローラーに入力し、針路変化率に接続した PID コントローラーへの指令は 0 である。針路変化率を抑制する制御が強力であれば針路変更はできないわけであるが、2つのコントローラーのゲインを調節し、針路変化

率を抑制する制御の重みを下げることにより、針路変化率が 穏やかな、比較的良好な針路変更を行うことができた。

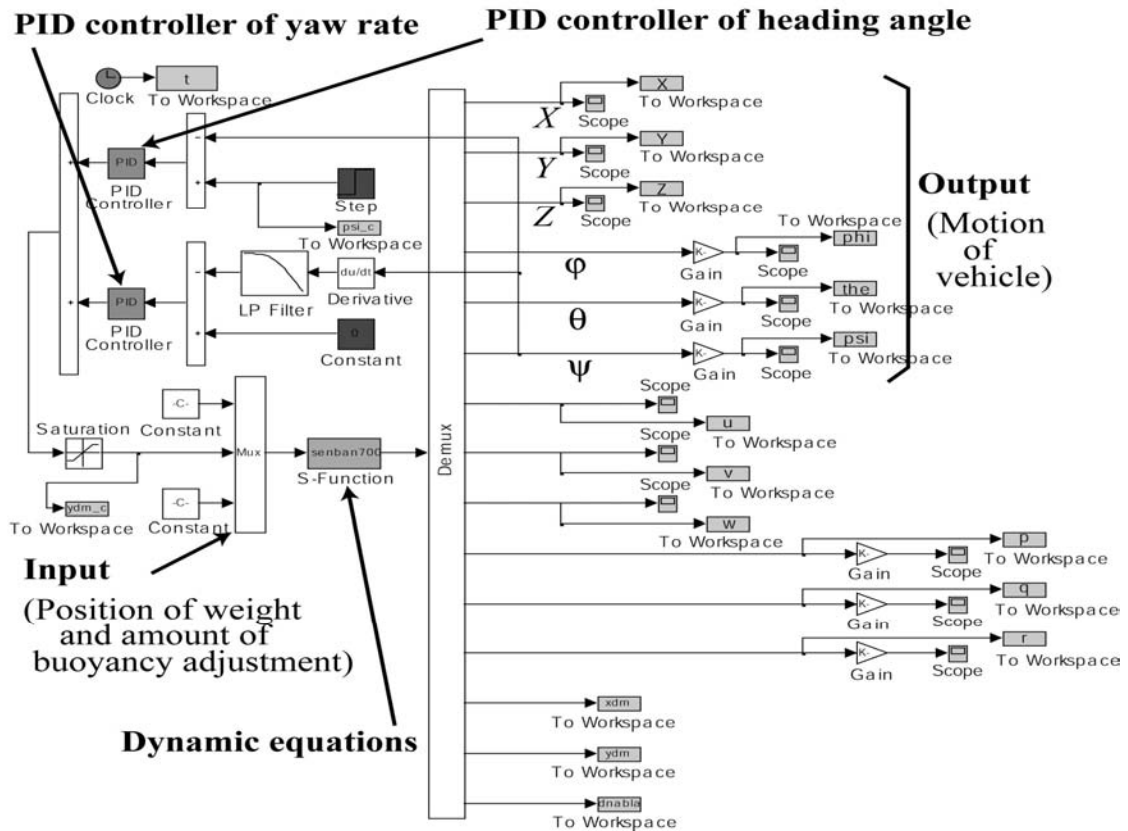


Fig. 21 Motion simulator by MATLAB and simulink (PID Control)

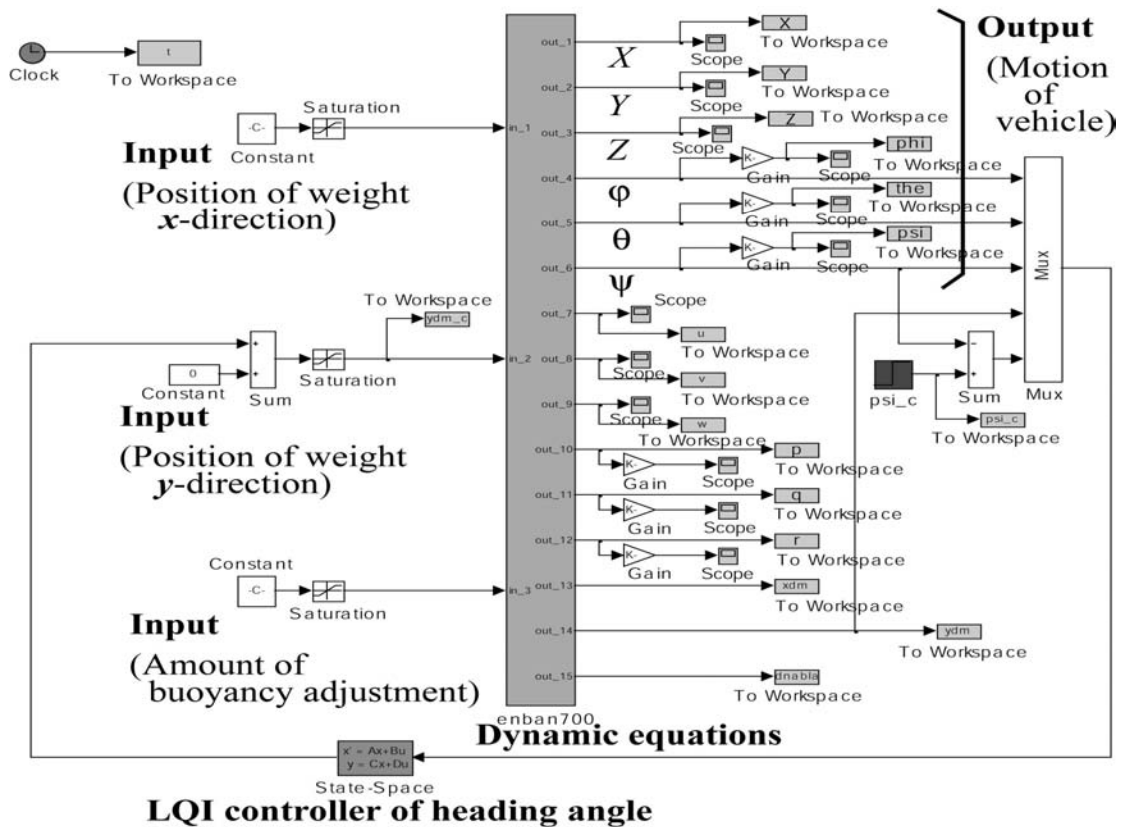


Fig. 22 Motion simulator by MATLAB and simulink (LQI Control)

LQI 制御では ψ のみならず $\varphi, \theta, u, v, w, p, q, r$ の情報も制御に使用している。 u, v, w, p, q, r についてはセンサーがないため、全状態オブザーバーにより推定される値を使用するものとする。Fig.23 に LQI 制御の概要を示す¹¹⁾。線形モデルは第 4 章に示した非線形モデルを平衡状態のまわりで線形化して得られたもので、 ζ は操作入力、 η_M は観測出力、 η は制御を行う対象とする運動、 η_c は指令値、 H_M は η_M から η を取り出すためのマトリクスである。系を安定化するゲイン F, F' を求める方法、オブザーバーの設計方法については参考文献 (11) を参照されたい。

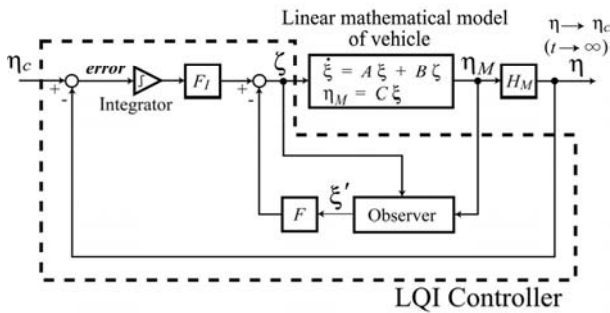


Fig. 23 Configuration of LQI control system

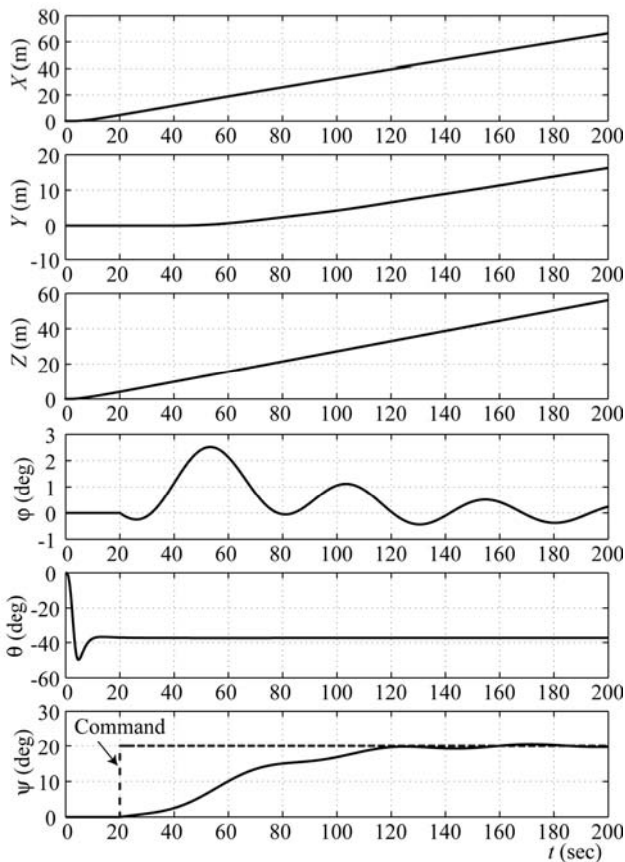


Fig. 24 Simulation result (PID Control)

潜航中に針路を 20 度変更する場合のシミュレーション結果を Fig.24 (PID 制御)、Fig.25 (LQI 制御) に示す。LQI 制

御の方が整定時間も短く、横揺も振動的にならず安定していることがわかる。ビークル形状が円盤型であるため、船首揺の抗力はほとんど摩擦抵抗のみで、非常に小さいと考えられる。コントローラーは最悪状態について設計を行うと良好な結果が得られることがわかっているため¹³⁾、抗力を 0 としてコントローラー設計を行った。実機機体は水抜き穴、海洋観測センサー用穴などにより機体表面が滑らかでなく、船首揺に対してある程度の抵抗が期待できるため、実際にはさらに安定した制御が可能であると思われる。

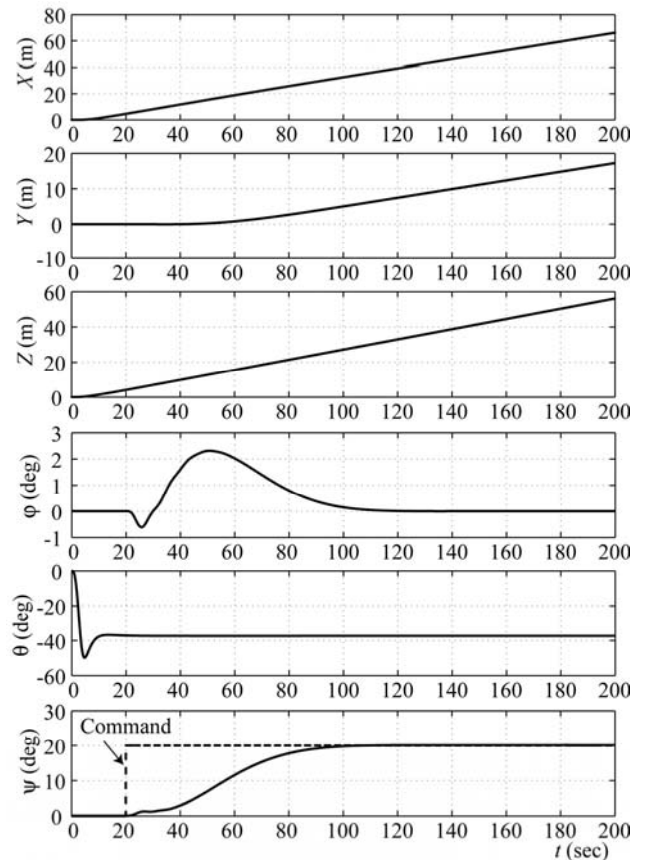


Fig. 25 Simulation result (LQI Control)

8. 潮流中における潜航シミュレーション

実機ビークルは対馬東水道で観測を行う予定である。東水道における対馬暖流は季節により鉛直分布が異なり、Fig.26 に示すように、冬は表層から下層まで 0.5 m/sec 程度の一様流れ、夏は表層で 1.0 m/sec 程度、下層で 0 m/sec となる。このような流れの中で重心の機体中心からの距離を変えて潜航シミュレーションを行った。

Fig.27 より、重心の機体中心からの距離を小さくすると、冬季は流れに逆らってグライディングすることができないことがわかる。重心の機体中心からの距離を大きくすると冬季においても流れに逆らってグライディング可能である

(Fig.28)。潮汐流が加わると、流れに逆らうグライディングはさらに厳しくなると思われる。実際には潮汐流が止まる時間帯に浮上・潜航を行い、データ収集・データ送信を行うのが得策であると考えられる。また、潮汐流は双方向の流れであるので、これを利用してバーチャルモアリングのためのビークル位置制御を行うことも検討していきたい。

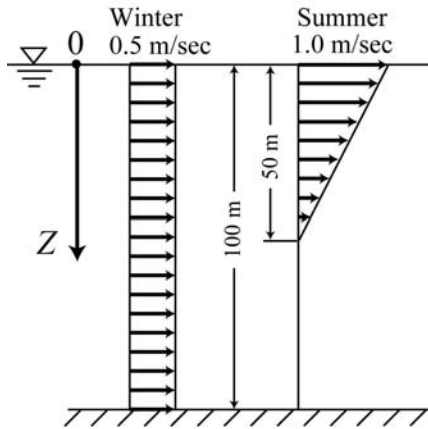


Fig. 26 Current distribution

Current	x_G / D (see Fig.5, Eq.1)
Non	0.0037
Winter	0.0037
Winter	-0.0037
Summer	0.0037
Summer	-0.0037

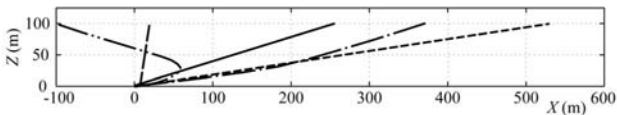


Fig. 27 Simulation result in current ($x_G/D=0.0037$)

Current	x_G / D (see Fig.5, Eq.1)
Non	0.0055
Winter	0.0055
Winter	-0.0055
Summer	0.0055
Summer	-0.0055

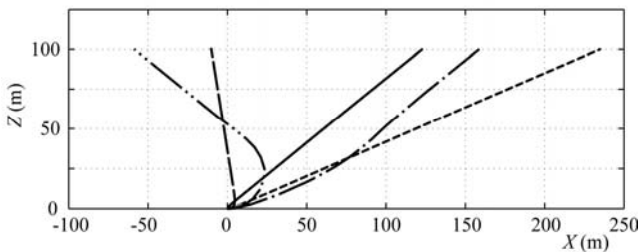


Fig. 28 Simulation result in current ($x_G/D=0.0055$)

9. 制御実験用水中ビークル模型 “LUNA” の設計・製作

これまでの検討結果より、グライディングにより移動し、重心位置を変更することで運動を制御する、バーチャルモアリング用円盤型水中グライダーが実現可能であることが確

認できた。そこで、次に、運動制御実験用に、深海機器力学実験水槽(長さ 65m、幅 5m、深さ 7m)で使用可能な $\Phi 900$ mm 円盤型水中グライダー “LUNA” を製作し、動作確認試験 (Fig.29) を行った。



Fig. 29 “LUNA” under tank tests

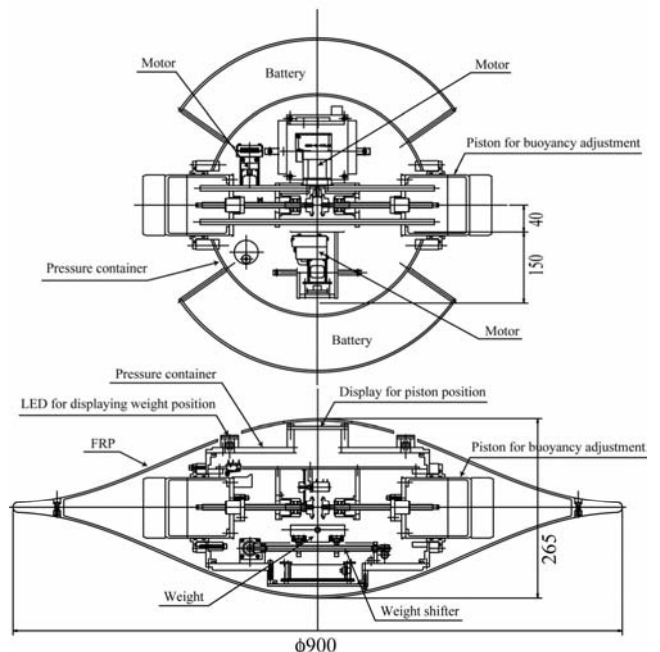


Fig. 30 Underwater vehicle “LUNA ($\phi 900$ mm)”

“LUNA”の外観・構造、主要目を Fig.30, Table 1 に示す。“LUNA”の構造上の特長は、メンテナンス性を考えて、アクチュエーター等の機構を収めた一つの耐圧容器と FRP 製外殻に簡単に分解できることである。耐圧容器はアルミ製（浮力調整用ピストンのみステンレス製）であり耐圧 10 m 構造となっている。

Table 2 Principal dimensions of “LUNA”

LUNA	
Diameter	900mm
Height	265mm
Weight in air	355N
Maximum depth	10m
Battery	Lead storage battery

9.1 浮力調整装置

ビークルの浮力は、耐圧容器に設置された左右 2 本のピストンを伸縮させることにより、排水容積を増減して調節する (Fig.31)。性能を Table 3 に示す。左右のピストンは 1 個のモーターと 1 対のシャフトからなるボールネジ機構で構成されており左右対称に動作する。従って、浮力制御を行っても浮心位置が変動することはない。なお、浮力調整量は 6 章に示したグライディング試験結果より検討し、中立モードより±0.42 リットルとした。

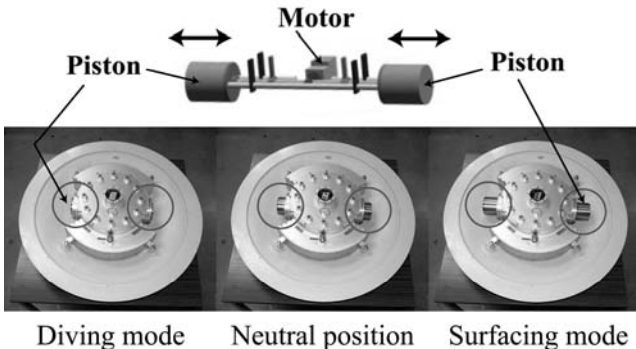


Fig. 31 Buoyancy adjustment equipment

Table 3 Performance of buoyancy adjustment equipment

Diameter of piston	90 mm
Stroke	62.7 mm
Time constant	1.8 sec

9.2 重心移動装置

ビークルの重心移動は耐圧容器内の x-y 台車に搭載したウェイトを移動させることにより行う (Fig.32)。性能を Table 4 に示す。従来の技術を応用でき、設計が簡単であると考えられたので、まず、x-y 台車方式の重心移動装置を製作した。Fig.30, Fig.32 に示した、ウェイト移動機構が組みつけられて

いる圧力容器下部鏡板部分を交換することで、回転型の重心移動装置に簡単に変更可能であり、現在回転型の機構を製作中である。今後、制御実験により性能比較を行っていきたい。

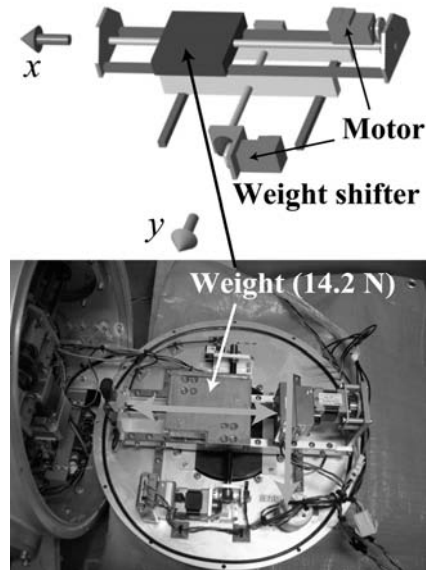


Fig. 32 Weight shifter

Table 4 Performance of weight shifter

	x-direction	y-direction	
Weight	14.2 N	Weight (including x-direction weight)	21.1 N
Stroke	130 mm	Stroke	80 mm
Time constant	1.8 sec	Time constant	1.8 sec

9.3 センサー及びその他の構成要素

ビークルは運動制御用として磁気方位計、傾斜（ロール、ピッチ）計、ヨーレートセンサー、深度計を搭載している。また、データ管理用 CPU、通信装置、電池なども圧力容器内に搭載されている。全体構成の概略をイラストにして Fig.33 に示す。

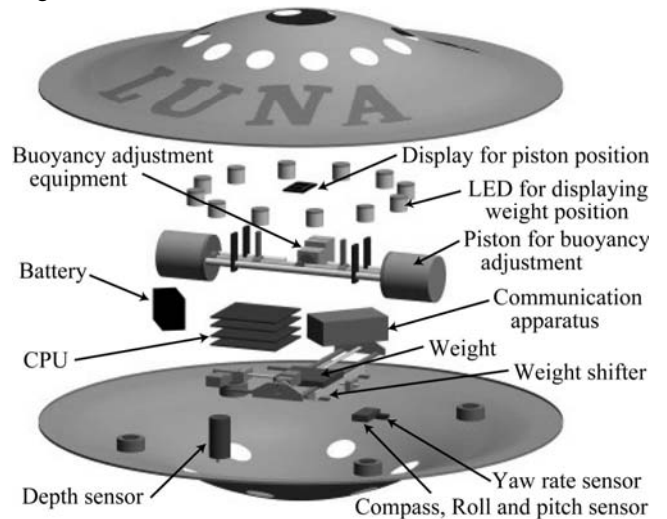


Fig. 33 Components of “LUNA”

その他の機材として漏水センサー、アクチュエーター動作状況表示装置が搭載されている。浮力調整装置（ピストン）の位置は1～8の数字で（1：最大浮力、4：中立位置、8：最少浮力）、重心移動装置のウェイト位置はビークル上面の12個のLEDにより表示される。設計時にはあまり重要視していなかった装置ではあるが、水槽でビークルを実際に動作させてみると、アクチュエーター動作状況が視認できるので、非常に有用であった。

9.4 制御システム

“LUNA”の制御システムを Fig.34 に示す。“LUNA”は自律型のビークル（AUV）ではあるが、運動制御を統括するCPUは搭載されていない。“LUNA”は水槽のみで使用される試験用ビークルであるため、ビークルと陸上に設置されたPCがリアルタイムでリンクされていればビークルに運動制御を統括するCPUを搭載する必要はない。本システムは機体の軽量化を実現し、日々進化するCPU及び制御用ソフトの更新を容易にする。ビークルと陸上のPC間通信には、市販のラジコン装置が使用されている。ビークルは各種センサーが計測したデータを通信装置を介して陸上PCに送信する。陸上PCは受信データより制御則にのっとり浮力調整装置および重心移動装置に対する指令を演算し、通信装置を介してビークルに送信することにより、ビークルを制御する。また、PCの代わりにコントロールスティックを接続すれば、マニュアルモード（ROVモード）でビークルを操作することも可能である。

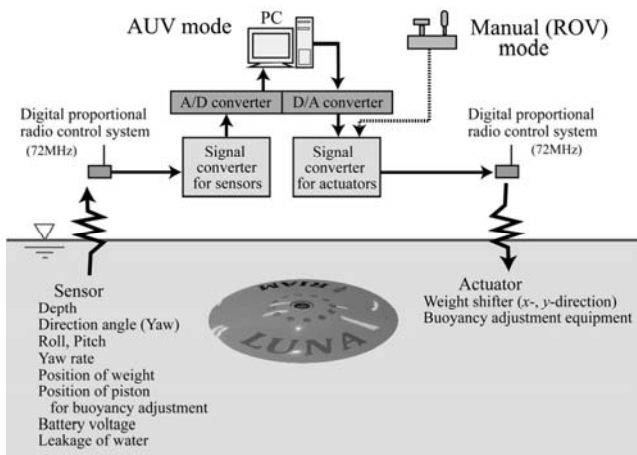


Fig. 34 Conceptual view of control system of “LUNA”

10. 建造中のバーチャルモアリング実証用実機の概略

建造中のバーチャルモアリング実証用実機の概略を Fig.35 に示す。対馬東水道で試験・観測を行う計画であり、設計最大潜航深度は100mである。搭載機器の容量、整備性

（ビークルの中心まで容易に手が届く）、運送手段（特殊な機材を必要としない）等を考慮し、ビークルの直径は1800mmとした。重心移動装置、浮力調整装置、電子機器を一つの耐圧容器に収めるのは実機の場合得策でないので分散配置とした。衛星通信用のアンテナは抵抗軽減のため潜航中は格納する。観測用センサーは必要に応じて各種搭載可能とするが、まずはCTDセンサーの搭載を予定している。バッテリーについては機能試験中は試験コストをおさえるため安価な2次電池を予定しているが、最終的には高性能の1次電池を使用し、長期間の運用を目指したい（消費電力を考慮した詳細な検討は現在進行中である。）。

11. 結 言

円盤型水中グライダーを使用したバーチャルモアリングによる海洋観測方法を提案し、その可能性をシミュレーションにより検討し、水槽試験用水中ビークルを製作した。

- (1) バーチャルモアリング用水中ビークルの形状、アクチュエーターについて検討し、方向性を持たない円盤型ビークルをグライディングにより移動させ、重心移動により運動制御することとした。
- (2) 円盤型ビークルのグライディング性能を検討する模型実験を行った結果、安定したグライディングが可能であることがわかった。
- (3) 流体力係数を求める模型実験を行い、シミュレーターを構築し、計算結果をグライディング試験と比較することにより、シミュレーターの精度が良好であることを確認した。
- (4) 構築したシミュレーターを使用し、重心移動による運動制御計算、潮流中でのグライディング計算を行い、水中ビークルを使用したバーチャルモアリングによる海洋観測が実現可能であることを示した。
- (5) 運動制御試験用水中ビークル“LUNA”を製作し、動作確認試験を行った。

今後は“LUNA”の水槽試験を通して最適制御アルゴリズムの開発を進めると同時に実機を建造する予定である。

謝 辞

本研究の大部は科学研究費補助金（基盤研究 B）によって行われました。また、水槽試験の実施に際しては市川幸生氏（研究当時：九州大学大学院総合理工学府）の協力を得ました。ここに深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 田才福造, 栖原寿郎, 光易恒, ほか9名: 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, 第52号, 1980, pp.29-98.
- 2) Eriksen C.C., Osse T.J., Light R.D., Wen T., Lehman T.W., Sabin P.L., Ballard J.W., Chiodi A.M. : Seaglider: A Long-range Autonomous Underwater Vehicle for Oceanographic Research, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol.26, No.4, 2001, pp.424-436.
- 3) Sherman J., Davis R.E., Owens W.B., Valdes J. : The autonomous underwater glider "Spray", IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol.26, No.4, 2001, pp.437-446.
- 4) Webb D.C., Simonetti P.J., Jones C.P. : SLOCUM: An Underwater Glider Propelled by Environmental Energy, IEEE Journal of Oceanic Engineering, IEEE Journal of ol.26, No.4, 2002, pp.447-452.
- 5) 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, 西部造船会会報, 第109号, 2005, pp.143-149.
- 6) 川口勝義, 浦 環, 友田好文, 小林平八郎: 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, pp.233-239.
- 7) 小寺山 亘, 中村昌彦, 梶原宏之, 佐藤一身: 広域海底探査用 ROV の開発研究, 日本造船学会論文集, 第175号, 1994, pp.205-218.
- 8) Woolsey C.A., Leonard N.E. : Moving mass control for underwater vehicles, Proceedings of American Control Conference 2002, Vol.4, 2002, pp. 2824- 2829.
- 9) 村上俊一: 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第, 133号, 1973, pp.23-31.
- 10) 小寺山亘, 経塚雄策, 中村昌彦, 大楠丹, 柏木正: 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第, 163号, 1988, pp.139-149.
- 11) H. Kajiwara, W. Koterayama, M. Nakamura, H. Terada, T. Morita : Control System Design of an ROV Operated Both as Towed and Self-Propulsive Vehicle, Prc. Of the Third International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol. 2, 1993, pp.451-454.
- 12) 野波健蔵, 西村秀和: MATLAB による制御理論の基礎, 東京電気大学出版局
- 13) M. Nakamura, H. Kajiwara, W. Koterayama : Development of an ROV Operated Both as Towed and Self-propulsive vehicle, Ocean Engineering, Vol. 28, pp.1-43.

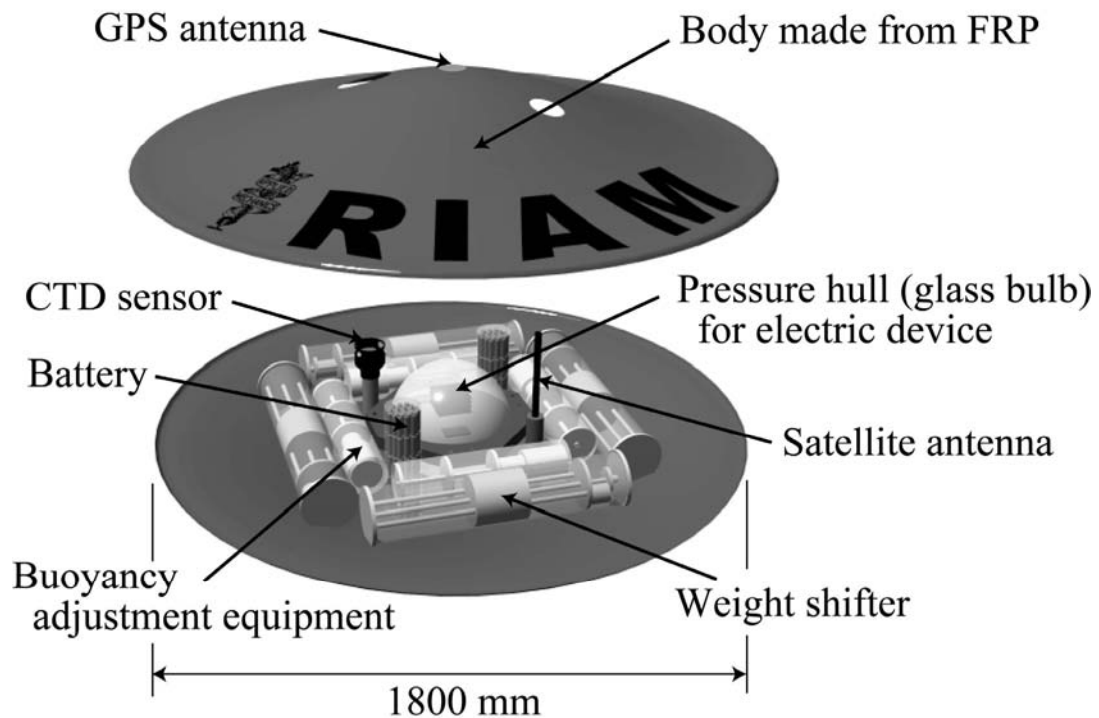


Fig. 35 Conceptual view of full-scale vehicle