

り下げ、重錘を移動し、傾斜試験を行って重心位置を求めた。ビークルの浮心Bを中心とする座標系 (Fig.5) を用いるとモーメントの釣り合いから次式が得られる。(x_G, z_G)は重心の座標, (x_p, z_p)はテグスによるビークル吊り下げ点, W はビークル空中重量, F_p はテグスにかかる張力, (x_{G0}, z_{G0})は重錘がニュートラル位置にある場合のビークル重心の位置座標, x_m は重錘の移動量, W_m は重錘の重量, x_{Gm} は重錘をニュートラル位置から移動したことによるビークルの重心の移動量, θ はビークルのトリム角である。

$$\begin{cases} x_G W \cos \theta + z_G W \sin \theta - x_p F_p \cos \theta - z_p F_p \sin \theta = 0 \\ x_G = x_{G0} + x_{Gm} \\ x_{Gm} = \frac{W_m}{W} x_m \end{cases} \quad (1)$$

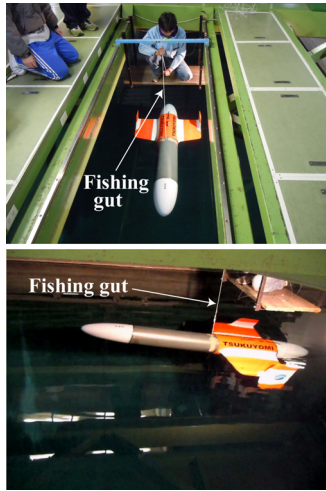


Fig. 4 Measurement of position of center of gravity

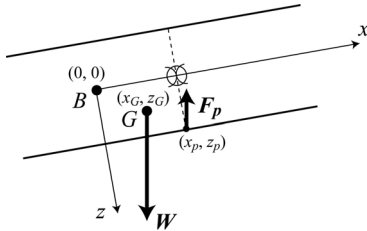


Fig. 5 Coordinate system for measurement of position of center of gravity

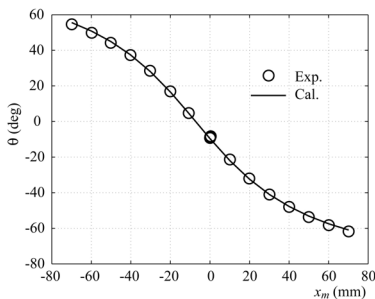


Fig. 6 Result of inclining experiment

ビークルの浮心位置は既知なので、重心の座標を未知数として傾斜試験結果に最小二乗法を適用すると重心位置を求めることができる。Fig.6に傾斜試験の結果と求めた重心位置を使用して計算した結果の比較を示す。重

錘の移動可能範囲内で良好な結果が得られていることが確認できる。なお、得られたBGの値は4.15mmであった。

4. 滑空試験結果

ビークル水中重量と重錘の位置をさまざまに変更し滑空試験を行った。水槽で滑空中のビークルを Fig.7 に示す。ビークルが水面に浮上している状態から浮力調整装置や重心移動装置を駆動して滑空を開始させると、水槽の水深の制約から定常滑空状態になる前に着底してしまう。そこで、Fig.4 に示すようにビークルをテグスで吊り下げた状態であらかじめこれらのアクチュエーターを駆動し、設定水中重量・設定重錘位置になった後ビークルを開放し、滑空を開始させた。

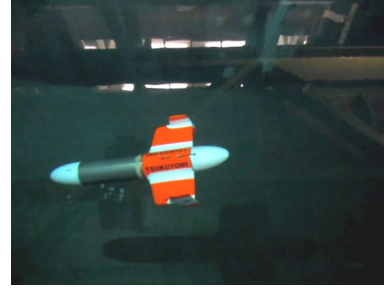


Fig. 7 “Tsukuyomi” gliding in Ocean & Underwater Engineering Tank

滑空試験結果とシミュレーション結果の比較 (潜航深度とトリム角の時系列) を Fig.8 から Fig.11 に示す。それぞれの図において上図が潜航深度の時系列, 下図がトリム角 (滑空角度) の時系列である。

浮力を調整 (水中重量を調整) するために压力容器内のオイルリザーバから Bladder にオイルを出し入れしても x -軸方向に重心位置が大きく変動しないようにオイルリザーバを重心位置付近に設置しているが、オイルの比重が水より小さいため完全に変動を無くすことはできない。そこで、シミュレーションにおいても浮力調整にもなる重心移動を考慮するようにした。最初はこの影響を無視してシミュレーションを行ったが、BGの値が小さいためかなり影響が大きく、良好な結果を得ることができなかった。さらに厳密にはオイルリザーバが Bladder より若干上方に設置されているため z -軸方向にも重心が移動するはずであるが、この影響は無視できるものとした。シミュレーションに使用した運動方程式や流体力係数の導出は参考文献(3)に詳しく述べられているので省略する。

図より過渡状態のピッチング運動は計算結果と一致しない場合が見られるが、定常滑空角度はよく一致している。潜航深度の時系列のずれは潜航開始直後のピッチング運動のずれが影響していると考えられる。滑空角度が安定してからの深度の変化率は実験と計算で非常によく一致している。「ツクヨミ」は3000m級の水中グライダーであり、深く潜行する場合の運動シミュレーションには過渡状態におけるピッチング運動の計算誤差による影響は無視できると考えられる。

Fig.12 に定常滑空角度の実験結果と計算結果の比較を示す。全般的に滑空角度が小さくなると誤差が大きくなる傾向があり、トリム角度がプラスの領域では、シミュレーションではビークルがバックしてしまい、実験との比較はできなかった。重心位置を0.1mm弱変更すると前

進するようになるので、精度の高い重心位置計算が求められていることがわかる。

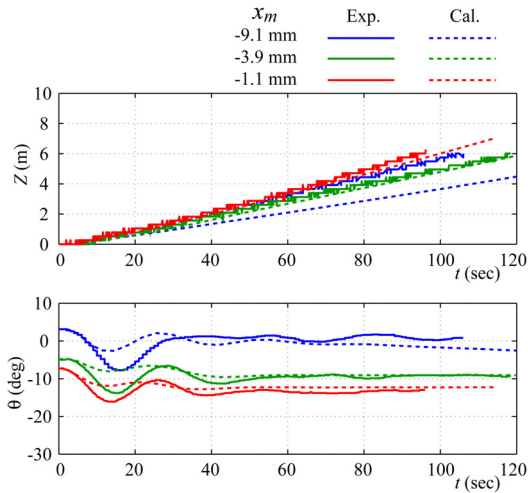


Fig. 8 Results of gliding tests
(Weight of vehicle in water : 4.12 N)

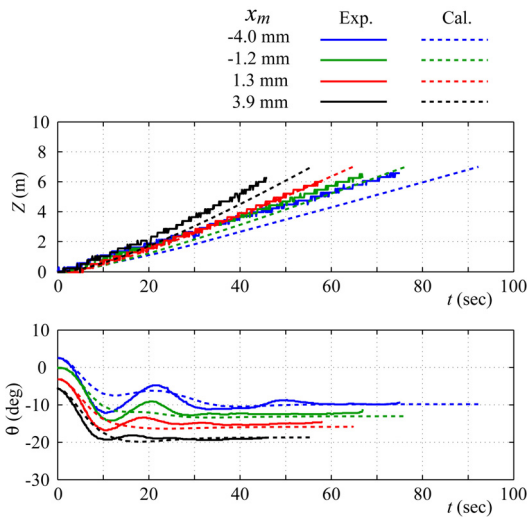


Fig. 9 Results of gliding tests
(Weight of vehicle in water : 8.82 N)

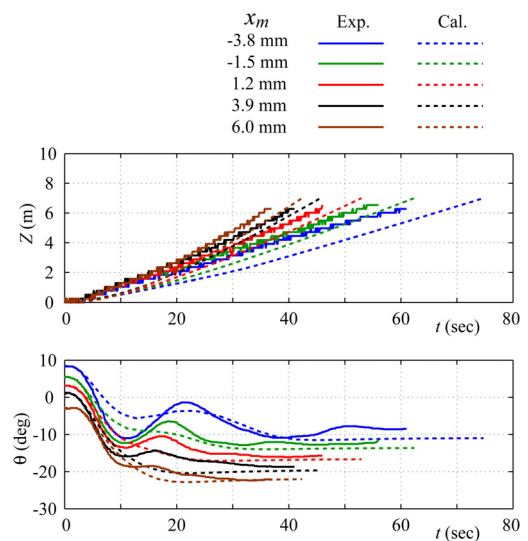


Fig. 10 Results of gliding tests
(Weight of vehicle in water : 13.67 N)

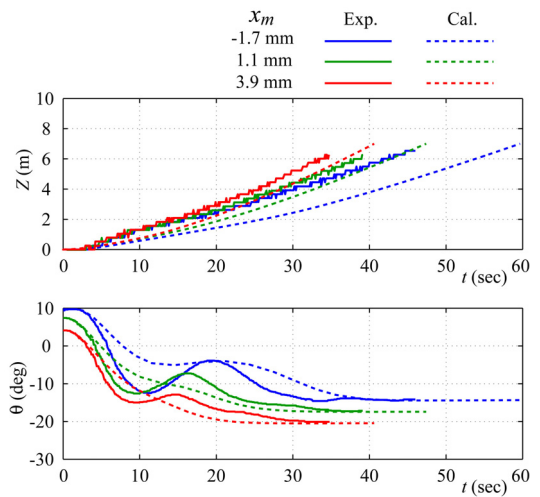


Fig. 11 Results of gliding tests
(Weight of vehicle in water : 18.52 N)

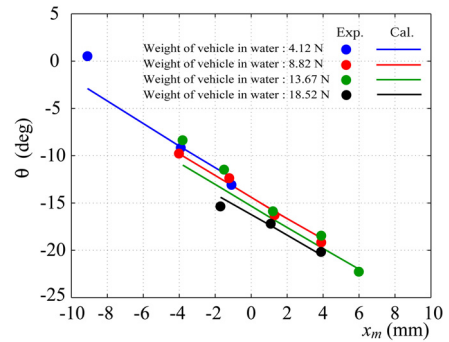


Fig. 12 Steady gliding angle corresponding to shifting of battery

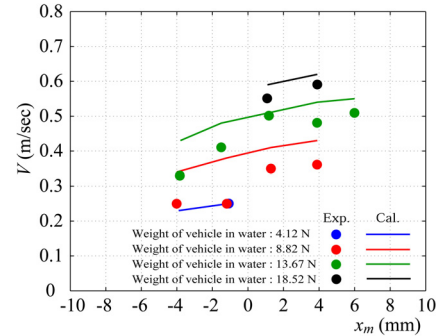


Fig. 13 Steady speed corresponding to shifting of battery

Fig.13 にビークル前進速度を示す。ビークルに追従するように曳航電車を走行させ、曳航電車の速度をビークル前進速度としている。手動操作で電車をビークルに追従させているので動作が遅れ、計測値は低めの値となっている可能性が大きいことを考慮すると、計算結果は比較的良好であるといえる。

5. 旋回試験結果

水槽で旋回中のビークルを Fig.14 に示す。実験では、水槽水深の制約から滑空試験の場合と同様、あらかじめ重錘（バッテリー）を x-軸まわりに回転し、横方向にも重心を移動した後ビークルを開放し運動を計測した。重錘を回転し、横方向に重心を移動すると、上方向にも重

心が若干移動するので、シミュレーションでは BG が減少する影響を考慮している。

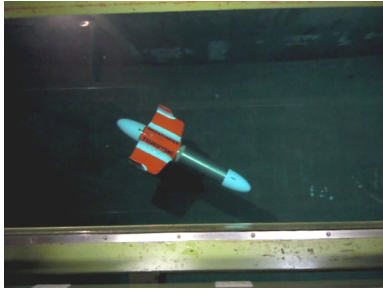


Fig. 14 “Tsukuyomi” turning in Ocean & Underwater Engineering Tank

実験結果と計算結果の比較をFig.15, Fig.16 に示す。図は上から順にピークル潜航深度、ロール角、ピッチ角、ヨー角を示している。 ϕ_m は重錘の回転角である。左舷側に重心を移動するとピークルは右旋回し、シミュレーション結果はこの挙動をよく再現している。しかし、旋回中の滑空角度が直進滑空時の値と異なるほど、回頭角のシミュレーション結果は実験結果から外れてしまう（旋回中の横方向速度は非常に小さいと考えられるので、流体力係数 N_V' は速度が小さい場合の模型試験結果³⁾を使用してシミュレーションを行っている。）。旋回の影響と考えるには差が大きすぎるため、失速状態におちいつていることが考えられる。水中重量が最大（18.52 N）で重心移動装置を 61.5 度回転した場合は滑空角度が直進滑空時の値と大きく異なる 0 度近くの値となり、挙動はあきらかに失速状態であった。航空機の場合は失速すると急激に落下するが、水中ピークルの場合は中性浮力に近い急激に深度を増すことは無い。

ピークル水中重量が 13.67 N, 18.52 N の場合は失速状態であったと考えられるので、実験結果とシミュレーション結果の比較（滑空角度と回頭角速度が大きく異なる）は記載しなかった。十分な水深が確保できれば（実海域での試験では）、最初は直進滑空をさせ、前進スピードが十分に大きくなり定常に達した後に横方向に重心を移動し旋回を開始すると、失速が回避できると思われる。

6. 結 言

水槽において、バーチャルモアリング用 3000m 級シャトルピークル「ツクヨミ」の滑空試験、旋回試験を行い、挙動を確認すると共にシミュレーション結果との比較を行った結果、次の結論を得た。

- (1) 滑空はきわめて安定しており、シミュレーション結果は実験結果とよく一致する。
- (2) 重心を左舷側に移動すると右旋回し、シミュレーション結果はこの挙動をよく再現できる。
- (3) 失速しないで滑空する領域では旋回に対するシミュレーション結果は実験結果と一致する。
- (4) 旋回を行うには、直進滑空で前進スピードを十分に大きくした後に横方向に重心を移動するのが望ましい。

参 考 文 献

- 1) 中村昌彦, 兵頭孝司, 小寺山直: 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ピークルの開発), 日本船舶

海洋工学会論文集, 第 5 号, 2007, pp.35-46.

- 2) M.Nakamura, W.Koterayama, M.Inada, K.Marubayashi, T.Hyodo, H.Yoshimura and Y.Morii : Disk Type Underwater Glider for Virtual Mooring and Field Experiment, Int. Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol.19, No.1, 2009, pp.66-70.
- 3) 中村昌彦, 浅川賢一, 百留忠洋, 杵嶋暁, 松岡宏樹, 南匠弥: バーチャルモアリング用シャトルピークル「ツクヨミ」の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 12 号, 2011, pp.123-126.

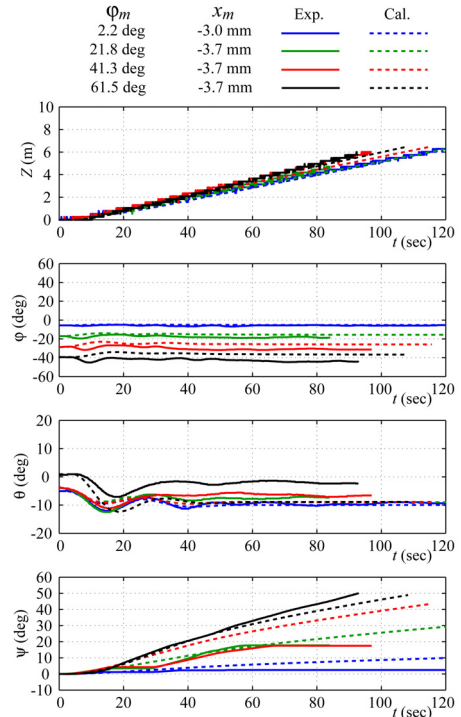


Fig. 15 Results of turning tests
(Weight of vehicle in water : 4.12 N)

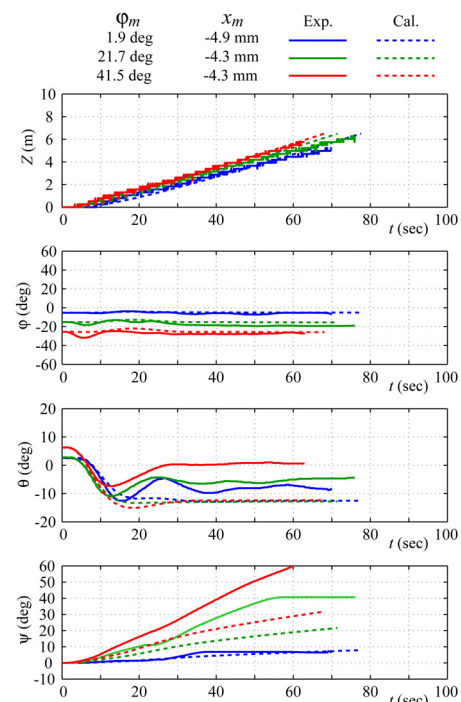


Fig. 16 Results of turning tests
(Weight of vehicle in water : 8.82 N)