

(別添3)

水中ビークル・フリーミーティング

成果報告

平成20年2月1日

水中ロボコン推進会議

アクアモデラーズ・ミーティング

これまで水中ロボコン推進会議（旧名称：水中ロボコン推進委員会）及びアクアモデラーズ・ミーティングが開催してきた水中ビークル・フリーミーティング（旧名称：水中ロボットワークショップ）の成果を以下のとおり報告いたします。

1. 開催目的

子供の理工ばなれが懸念されているなか、さまざまなロボット教育が各方面で取り組まれているが、水中ロボットについては日ごろ手軽に利用可能なプール等が得られにくく、また水中ロボットの指導者も少ないため、高校等での取り組みはごく限られている。

これに対し、水中ロボコン推進会議（議長：浦 環）及び市民グループ「アクアモデラーズ・ミーティング」（AMM）は JAMSTEC の潜水訓練プールのほか、横浜プールセンター及び本牧市民プールのオフシーズンでの利用もあわせ、月1回の頻度で水中ビークル・フリーミーティングを開催するに至っている。

料金面では、水中ロボコン推進会議（別添1）から JAMSTEC に使用料金減免を申請して認めていただき、この料金を AMM の社会人メンバーが負担することによって、学生及び教師は無料参加できるようになっている。また(財)横浜市スポーツ振興財団からも特段の便宜を図っていただき、若干名までの学生の入場料を AMM で負担することとしている。

2. これまでの開催状況

本ミーティングは、当初、JAMSTEC 共済会サークル SF 倶楽部の主催による JAMSTEC 内部利用で始まり、その後、市民グループ「海洋 SF 研究会」（のちに AMM）による外部利用に変わり、平成18年度の料金改訂以降は、水中ロボコン推進委員会から JAMSTEC に減免措置願いを提出する形でこれまで44回開催している。

毎年5月の JAMSTEC 一般公開では14年度より水中デモンストレーションを実施し、これに加えて翌年度より毎年、子供向け体験操縦を実施している。この一般公開は18年度より JAMSTEC の安全・環境管理室及び応用技術部の企画として実施されるようになり、その事前調整と撤収については JAMSTEC 内部利用としている。

本ワークショップにおける潜水訓練プールの安全衛生責任者は、JAMSTEC より西村（安全・環

境管理室長)又は米倉(東京事務所長)が担当している。

年度	開催日	備考
平成13年度	#1:3月31日	
平成14年度	#2:5月11日(JAMSTEC一般公開)、#3:11月24日	
平成15年度	#4:4月6日、#5:5月10(JAMSTEC一般公開)-11日、#6:8月31日、#7:11月30日、#8:2月1日	
平成16年度	#9:4月25日、#10:5月15日(JAMSTEC一般公開)、16日、#11:9月11日、#12:12月4日、#13:2005年3月27日(船の科学館)	
平成17年度	#14:5月7日、#15:5月14日(JAMSTEC一般公開)-15日、#16:9月4日、#17:10月23日(本牧)、#18:11月20日(本牧)、#19:12月11日(追浜)、#20:1月15日(本牧)、#21:2月12日	海上技術安全研究所が参加
平成18年度	#22:4月30日(追浜)、#23:5月14日、#24:5月20-21日(JAMSTEC一般公開)、#25:7月2日(追浜)、#26:9月10日(追浜)、#27:10月15日(本牧)、#28:11月12日(横浜合同)、#29:12月2日、#30:12月17日(追浜)、#31:1月14日(追浜)、#32:2月11日(横浜)、#33:3月11日(追浜)、#34:3月24日(辰巳)	大阪府立大学が参加 JAMSTEC一般公開、その事前調整及び撤収については安環室・応用技術部が主催。
平成19年度	#35:4月15日(横浜)、#36:5月6日(追浜)、#37:5月12日(JAMSTEC一般公開)-13日、#38:7月1日(追浜)、#39:8月5日(追浜)、#40:9月9日(本牧)、#41:10月14日(追浜)、#42:11月18日(本牧)、#43:12月9日(追浜)、#44:1月13日(横浜)、#45:2月10日(追浜)	同上

3. 成果

参加者それぞれのレベルに応じて、以下の技術的知見が得られている。

(1) 無線

- ① 通常の汎用ラジコン送受信装置は、空中同志のみならず空中から淡水中への制御の伝送にも使え、水面直上近傍から送信すれば水深3m位までは十分制御情報が届く。
- ② 淡水では水深3.5mまでFMやAMの電波が届く。
- ③ 水中ではPPM(FM)よりPCMの方がより安定していることを実感した。
- ④ 受信機の差、アンテナの張り方の差で水中での受信感度が変わる。
- ⑤ 水中でのアンテナの処理は水上(地上)とは違い垂直に立てておく必要はない。

- ⑥ 水中では空中とは電波の挙動が違う？
- ⑦ 送受信機のメーカーを統一しないと、ノーコンが発生する。
- ⑧ 水深5メートルはメカによっては操縦可能。

(2) 運動性能

- ① ある程度のスピードはあった方が、普段はゆっくり走らせていても万が一の時回避しやすい。
- ② 舵は面積、切れ角度共に大きい方が効きが良いが、面積をスケール通りに作成しても切れ角を大きくすることで小回りは効く。ただし、スピードが上がると抵抗になるだけで、艦尾を横滑りさせるベクトルは小さい。

③ 下反角付き水中翼の効果

高速で走航する水中モデルでは旋回時に内側へ強く傾く（バンク）が、これは浮心点が重心点より上にある以上、重い船体下部が慣性により外側への力が働き、船体に回転モーメントを与えてしまうからで、この傾きを抑えるため航空機でも見られる下反角の付いた翼を取り付ける事で、横スライドしながら旋回する際に翼上面に受ける水圧で内側への傾きを、ある程度抑えることができるのを確認。

逆に、上反角を与えてしまうと旋回時に船体は大きく傾き、場合によっては背面状態になることもモデルで確認。

- ④ ダイナミカルダイブで正の浮力を持っているモデルでは、深く潜航した場合に浮力がバランス上強力となって、浮上する方向に運動開始するが、一旦船首が上を向いて浮上を始めてしまうと潜舵の効果だけでは浮上を制御できず水面から飛び出してしまう現象が経験された。
- ⑤ 深さのある水中では準無重力状態の再現が可能で、宇宙船や航空機等の3次元運動をシミュレートできる事が分かった。
- ⑥ 前方エルロン翼+推力偏向というシステムの水中機動をプールの中から見ることによって、船体の動きと翼や推力偏向システムの機動の相関関係を理解することができ、よって自由に操縦できるようになった。これに関しては深さがあり水中での操縦や水中窓画あったことによる恩恵大。

⑦ 水中グライダー：

- ・ 前傾姿勢・水平性を安定させるには浮心・重心間の距離をある程度確保しなければならないこと、また水圧で圧縮されにくい安価な浮力材として、アクリサンデー（株）のFOREXが適していることがわかった。
- ・ 非常に低速の平板翼グライダーでは、翼幅だけでなく、翼面積もある程度大きくなければ揚力が保てないことが分かった。
- ・ 翼を胴体の上面に付けると、下面に付けるより大幅に揚力が低下することが分かった。
- ・ 回収手段として、釣り糸とリールを用いる方法を見出した。釣り糸を操ることによって

方向及びトリム角を制御して飛距離を伸ばせることも分かった。

⑧ 可変翼

全開、全閉、中間位置、1/3 開とすべて操縦性が変わる。飛行機の主翼と同じ役目を果たすわけではないが、船体と翼面積/角度の組み合わせで上下方向での反応の早さが変わる。(トムキャットの可変翼の意味が操縦で実感できる。)

当然全開が一番反応が早くなるが、操縦しやすいのは1/3 開状態が走行のイメージとしてベストとなっている。レーザーも可変翼にすれば操縦性自体を船体側でコントロールすることも可能だと思われる。

ちなみに、レーザー1の羽根に関しても旋回方向に合わせて左右の角度を変えたセッティングを行うことによって、旋回時の小回りと安定性が増す。直線走行時には船体が見妙に傾くため速度に影響はするとは思うが、今のところ一定方向に回るレギュレーションのため、旋回時優先のセッティングとしてはありだと思う。

たまたまぶつけたときに羽の角度が微妙に変わっていたため気がつかなかったが、サーボを一個追加してエルロンミキシングをかけるより手軽で実用的。

⑨ 空中と海中との比較

水中機動は同じ3次元航行する空中モノ(飛行機)とは若干動き方が違う。前に進み続けることにより揚力を発生する飛行機とは違い、停止状態でも浮力を発生する水中モデルは停止状態と推進状態両方のバランスをとる必要がある。常に浮力中心と重心を合わせなければ水中でバランスを崩してしまう。

姿勢の制御は飛行機等と同じでありロール・ループは可能。ロール制御については船尾に設置した水中舵で制御可能。しかし飛行機のように背面を続けることは浮力と重心が逆転しているのが難しい。また飛行機のアクロ系でナイフエッジ、コブラは水中抵抗が大きいので姿勢を持続するのが難しい。

飛行機と違い水中では抵抗が大きいので水中舵に掛かる力が大きくなるのでサーボのトルクには注意が必要!!

(3) 推進

① モーター2ローターの遠心ポンプ式ウォータージェット

モーターの回転をギアで2軸に振り分け2基の遠心ポンプを駆動した。これだと2個のモーターを使った時に比べ左右の噴射量に大きな差が出ない。噴射口が左右に大きく離れたモデルには有効な方法。

② 噴射ノズルへのVテールミキシングの応用。

リンケージを複雑にすることなくラダー、エレベーターのコントロールが出来る。

③ ヒレ推進のテスト

ヒレだけで推進と方向の制御が出来る様にタミヤのメカ・フグを改造。ひれの形状を色々変えてテストの予定。

ヒレ推進の研究のために、簡単なバタ足ロボットの走行実験を行った。大型のモデル製作はこれからの課題である。

④ 遠心軸流推進の効果

通常のスクリュープロペラにダクトを被せただけの軸流推進では効率が悪く、ノーマルプロペラほどの推力が望めないが、スクリュープロペラの回転による遠心力が加わった水流がぶつかるダクト内面に円錐状の斜面を設置することで、その水流は後方へ押し出されて推力低下を防ぎ、ダクト噴射口に発生する水圧に対して適切な整流、口径の絞込みによって水流速度を上げる事で推力を上げることができる。

⑤ 通常のもーターによる推進方法を比較すると、船外に装備したプロペラの推進力が最も大きい。

⑥ 推力偏向ノズルでの航行方式を確立。ノズル自体も進化させてきた。

⑦ ポンプモーターは、定期的に整備・交換しないと故障が発生する。

⑧ ポンプジェット式の潜水艇の速度は、水流の確保とモーターのKV値及びバッテリーの性能の組み合わせによる。

⑨ ウォータージェット推進

ウォータージェット推進のスクリュープロペラをRC飛行機用のモノを流用してみた。水中と空中ではレイノルズ数が違うため流れの剥離・乱流が懸念されたが、特に使用上の不具合は見られず。

フルスロットル時に船体の傾きが見られるが、これは反トルクの影響でありセッティングで回避は可能。

水と空気の違い＝流体の密度が異なるため飛行機用のペラでは効率が悪い or トルクが必要と懸念したが、バッテリーの持ち、推進力ともに満足できるレベルであり特に問題の発生はない。模型レベルのペラであれば差が発生しないと推測される。

(4) 水密性・耐圧性

① モーター、バッテリー、サーボ、受信機+アンプの個別防水モジュール化

これによりモーター、バッテリー、サーボが故障やモデルの変更時簡単に交換ができるようになった。

モーター：出力軸をOリングそれ以外はバスコークで防水。

バッテリー：熱収縮する塩化ビニールチューブで被い端面をバスコークで防水し、充電時に発生するガスを逃がす為ピンホールを開ける。この穴は走行時防水テープでふさぐ。

サーボ：出力軸をG4シールそれ以外はバスコークで防水。

WAYPOINT W-060

GWS PICO STD の2種類のサーボが改造可能。

以上3点共通：電源コードをセンターに穴を開けた6mmポリカねじに通し、バスコークで固定。

受信機+アンプ：これだけ防水ボックスを作りこの中に収めた。これに6mmナットを接着しここにモーター、バッテリー、サーボを接続する。

受信機のアンテナを40mmほど残して切断し、残りのアンテナ線はボックス側に接着固定、これにコネクターを半田付けして再接続。これで長いアンテナの取り回しが楽になり浸水の可能性のある穴を一つ確実につぶせる。

- ② 防水ケースの製作とメンテナンスを容易にするために、締め付けボルトの数を減らした(4本のみ)構造のテストを実施。しかし蓋をアルミアングル、黒檀等で強化したものの、20センチを超えるネジ間においてはたわみを生じ、計画通りの防水性能は得られず改良中。現在の实用時間は10分程度である。
- ③ 食品用レンジパックを防水ケースにした場合、潜航は1メートル前後なら問題なく行えたが、それ以上になると浸水が見られた。
- ④ 浸水対策のひとつとして、前後バランスの崩れを防ぐために重心位置に吸水シートを敷いてみたが、有効であった。
- ⑤ サーボモーターの水密改造を実施。信頼性については検証中である。
- ⑥ 水密サーボをやめてサーボを自作防水ケースに入れることで信頼性が上がり、3.3m及び5mの水圧でも十分信頼性のある防水サーボの製作技術が確立できた。
- ⑦ 防水の対策は3メートルと5メートルでは格段に違ってくる
- ⑧ 密閉された空間ではたとえ水の中でも熱に関する対策が必要である

(5) 浮力調整

① ローラーポンプ(チューブポンプ)を用いたバラストシステムの完成

これまでバラストタンクへの注排水はベント弁とガス、ギアポンプ、ピストンを用いた例があったが、ガス式では微調整が難しく、またガスの容量により潜行浮上の回数の制限がある。ギアポンプでは回数制限は無いが、ギアポンプを停止するとポンプの隙間から徐々に排水してしまう。ピストンはトルクの関係からあまり容量が確保できない

これらに対しローラーポンプを用いたものは微調整が可能で、回数の制限も無く、ポンプを停止してもタンク内の水量は保持される。

容量に関しては200cc程度のタンクで100cc以上の注排水が行えるので船体に気泡が付いて浮力バランスが崩れたような場合でも潜水することができる。

欠点としては注排水速度があまり大きくない事があげられる。完全浮上状態から潜水するのに数十秒から1分程度かかる。しかし潜水艇など急速潜行、急速浮上を行わない船種であれば理想的なバラストシステムと考えられる。

② 水温による浮力変化

自宅において水道水を貯めた水槽で浮力調整を行ったモデルは、潜水訓練プールでの水温の温度差による水密空間内の空気膨張、収縮で浮力が変化する。また、走航中に発生するモーター、バッテリーの発熱で水密空間内の空気が膨張して浮力が変化するが、いずれにして

も水密区画容器の強度によって浮力変化の影響は左右される。

③ 水圧による浮力変化

水面下で浮力がわずかにプラスの設定であっても、水深 3 m では水圧による水密区画容器の収縮により浮力はマイナスになる。その浮力変化は水密区画容器の耐水圧強度で左右される。

④ バラストタンク排水後の浮力変化

バラストタンク搭載モデルで水深 3 m において完全排水した後、浮上の際の水深変化と共に水圧が弱くなり、水圧の掛かったバラストタンク内の空気（空間）が膨張し浮力が増して浮上速度が加速される。

⑤ ピストンバラストの有効性

ガス式バラストタンクでは完全な注・排水が前提で、微妙な浮力調整はできない。それに対し、潜航するモデルが受ける水圧による浮力変化をトリムタンクとして小型のピストン式バラストを搭載することで、変化する浮力の調整ができ、低速でもスムーズな水中走航が行える。

⑥ 浮力体を使って浮上姿勢を調整してある船は水温でその姿勢が変わってしまう。また、ある程度の水深を超えてしまうと、浮上してこなくなる。

⑦ 定期的に水密の確認をし、FRP とゴムパッキンの接着はがれの補修をしないと、水漏れが発生する。

⑧ 精密な WTC では、水深 1.2m であれば 3 ヶ月以上沈していても水漏れがない。

⑨ ピストン式のバラストタンクには、かなりの水圧が発生し、バラストタンクの径とサーボのトルクやリンケージが極めて重要。

⑩ ダイナミカルダイブの潜水艦は、浮力調整をうまくやると、故障の発生しない信頼性のある船となる。

⑪ 浮力調整機能を持たない艦は今までは水温の温度変化で浮力材の増減を調整していたが、今年は船体全体が気泡に包まれるという現象が起り潜らなくなってしまった。これに関しては現在対処法不明。

⑫ 浮力バランス

浮力バランスは船体重量の 1% 前後のウェイト増減だけで変化があった。つまり 1500g の船体に 10g のウェイトでガラリと変わった。

特にガス式の場合はガスが気化することにより重量が減る＝バランスが変わることとなり、重量バランスで艦の性能が決定され、事前の微調整が不可欠。浮力と重力の関係を理科?物理?の観点から良く理解していないと性能のいい艦は作れない。

ダイナミカルダイブについてはスクリューの推力で潜行するためそれほどバランス取りに神経質になる必要はないため、入門モデルとするには最適なシステムである。

(6) その他

- ① 深海潜水艇の歴史上欠かすことのできないバチスカーフ トリエステ号をスケールモデルとしても通用するレベルで再現した。
- ② 空気中で大音量の音源（ソナー音）であっても水中で鳴らすと殆ど聞こえず、水中用発音体が必要な事が分かった。
- ③ 高校生向け工作事例として、2個のモーターで左右のペラの回転をコントロールして自転し、回転した船体に取り付けたフィンの働きで推力を発生して潜航浮上する構造を開発した。
- ④ 特定のメーカーのサーボの発熱が原因でトラブルが多発。検証の結果サーボ自体の特性と判明。以降このメーカーは使用しないこととした。
- ⑤ ニッケル水素のバッテリーでも、メモリー効果がでることが分かった。

5. ものづくりについて（設計者から思うこと）

まず自分でモノを作れ!! 自分が設計したモノの製造工程を知れ!!

これは樹脂にしる金属にしる自分で加工を行なうことにより素材の硬さ・曲げなどの素性がよく理解できる。モノを良く知らない人が図面を書いてもイイモノはつukれない。

またモノづくりは完成までのプロセスが大事で、ナニを・どのようにして作るか・いかに安く・精度よく作るか、これらを考えねばならない。ものづくりの現場では

Quality(品質), Cost(コスト), Delivery(調達), Development(開発), Management(管理)

の頭文字をとってQCDDMのこれらのバランスをとることが大事。

模型づくりにも同様にQCDDMのバランスが大事であって、これらのプロセスを通じて完成したときの喜びはなんとも言えないものがある。

ぜひとも中学生・高校生の人にこそ模型作りという趣味を通して「ものづくり」の喜びと楽しさを理解してもらいたいと思う。

6. 今後の課題

神奈川県において、水中ロボット試験のためのプールの利用機会が毎月開催されるようになったこと、社会人グループによる費用負担によって高校等の無料参加が可能となったことは大きな成果であり、これは貴機構及び横浜市に使用料金の減免を認めていただいた結果、社会人の参加人数が少なくても計画的に開催できるようになったのが大きい。

同時に、社会人の参加者数が常時十数人確保されるようになり、技術交流の場としても有意義な場になったと考えられ、高校等が参加するうえで環境が整ってきたといえる。

しかしながら、当初の狙いである高校等の参加については、少人数に留まっており、これはひとつは広報力の問題が大きいと考えられる。今後、主催者を有識者委員会である水中ロボコン推進委員会から、組織代表から構成される水中ロボコン推進会議（議長：浦環）に移行し、

また JAMSTEC の共催により JAMSTEC 公式サイトで案内するなどの方策が必要と考えられる。

もちろん、JAMSTEC 横須賀本部は土日に路線バスがないという問題があり、いずれ横浜研究所のように横須賀本部の休日公開とその時の路線バス運行が実現することも期待したい。

(参考) 水中電波について (鹿児島大学 竹内康人教授)

市販のラジコン用の送受信システム (回路とアンテナ) はいわゆる電界プローブ型のハイインピーダンスアンテナになっている。これは、 $1/4$ 波長 (40MHz で 8m の $1/4$ で 2m, 27MHz で 11m の $1/4$ で 3m 弱) に比べて極端に短い長さ (数十 cm) のアンテナを使う以上、基本設計としてこのようにせざるを得ないので当然のことである。しかし、それ故にこれをそのまま波動インピーダンスが 1 桁も違う水中に沈めたのでは非常に mismatching な伝送系になってしまい、却ってうまく行かない可能性がある。

現在の水中受信系は空中用の物をそのまま持ち込んだだけなので、アンテナと伝送媒質の結合に関してはこの状態になっている訳である。言い換えると、形式 (方式)、寸法ともに水中用に正しく設計したアンテナを送受信の双方に使わないことにはまともな伝送系にならないという点に注意したい。

ちなみに、水の誘電率は空気や真空の 80 倍、透磁率は同じなので、波動インピーダンスは $1/9$ 、伝播速度も $1/9$ 、で、30MHz の水中電磁波の波長 (もちろん水中での波長) は大略 1m である。そこで、この伝送空間にマッチするローインピーダンスのアンテナは、磁界結合のループアンテナになるはず。まとめると以下の通り。

- (1) 受信系 (マッチ箱) の初段同調回路を作り直して電界プローブ型ハイインピーダンスアンテナ対応から磁界プローブ型 (ループアンテナ) 対応に変える。アンテナもループアンテナにする。このループアンテナは水中での “その” プラットフォーム (玩具潜水艦とか) の浮沈旋回の行動パターンを考慮して正しい設置方法で設置される。
- (2) 送信系は同じくコントローラーの出力段の同調回路を作り直して電界プローブ型ハイインピーダンスアンテナ対応から磁界プローブ型 (ループアンテナ) 対応に変える。アンテナもループアンテナにする。このアンテナとコントローラーの出力段とは長い同軸ケーブルで接続し、コントローラーをプールサイドの空中に置き (当然)、水中アンテナは正しい設置法で水中に置く。
- (3) 以上における正しい設置方法とは、ループが水平面内にあり、磁界の向きが垂直になる方向以外にない。さもなくば (磁界を水平方向に向けたら最後) 最適角度から 90 度回転するとループと磁界が平行になって受からなくなるという現象を呈し、受信系に 2 システム直交並列動作が必須となってしまう。

前提条件として、プラットフォームのロール、ピッチ、ヨーはある程度の範囲内に留まり、イルカのように垂直ダイビング (ないし垂直カウンターダイビング) とかはしないと想定している。