

令和 5 年度 防衛装備庁
安全保障技術研究推進制度

研究成果報告書

EHDポンプによる ヒレ推進魚ロボットの研究

令和 6 年 5 月

株式会社テムザック

本報告書は、防衛装備庁の安全保障技術研究推進制度による委託業務として、株式会社テムザックが実施した令和5年度「EHDポンプによるヒレ推進魚ロボットの研究」の成果を
取りまとめたものです。

目次

1. 委託業務の目的	1
2. 研究開始時に設定した研究目標の達成度	1
3. 委託業務における研究の方法及び成果	3
3.1. 初年度の研究開発	3
3.2 最終年の研究開発	18
3.2.1.3 「最終年」のヒレ推進魚ロボットの写真と寸法	20
3.3 静音型ヒレ推進魚ロボット向けのヒレ及び泳ぎの研究開発	22
3.3.1 開発物概要	22
3.3.2 評価調査方法	23
3.3.3 収集データ	24
3.3.3 解析及び評価	24
3.4 静音型ヒレ推進魚ロボットの研究開発	25
3.4.1 開発物概要	25
3.4.2 評価調査方法	26
3.4.3 収集データ	28
3.5 解析及び評価	40
4. 委託業務全体の成果	41
4.1. 計画時に想定していなかった成果（副次的成果）や、目標を超える成果	41
4.2. 研究課題の発展性（間接的成果を含む）	41
4.3. 研究成果の発表・発信に関する活動	41
5. プロジェクトの総合的推進	42
5.1. 研究実施体制とマネジメント	42
5.2. 経費の効率的執行	42
6. まとめ、今後の予定	42
7. 研究発表、知的財産権等の状況	42

1. 委託業務の目的

島国である日本は、古くから海洋ロボットに関して多種の研究がされてきた。

しかし海上・海中を問わず水中での推進装置の殆どがスクリー型推進機構を取っている。一方で、スクリー型推進機構は、高速推進時のスクリーキャビテーションや、スクリー独自の水中放射雑音等多くのデメリットも併せ持つ。それに対応して、日本をはじめ各国で、魚型の推進機構に対する注目も集まり、弊社でも2010年頃より魚型推進機構の研究を進めてきた。特に魚型推進機構ではスクリーに起因する放射音を削減できる事、高効率な推進エネルギーを取得できる事が分かっているが、機構にモーター等を使う事でそのメリットが少なくなる事も分かってきた。その中で、弊社は、協力会社と共に、EHD現象を用いたアクチュエータを用いて、魚型推進機構の特許も取得しておりその研究も進めてきた。(EHDポンプによる揺動型アクチュエータと関連の特許を取得している。[特許6072649号])

こうした背景から、本研究は既存の魚型ロボットの速度及び俊敏性を向上し、自然魚本来の動作に近づけることを長期的な研究目標としている。揺動型ヒレ推進魚ロボットが実用化されれば、海難事故対応、海洋資源探査、自然環境研究など多様で社会に貢献度の高い用途に応用可能と考える。

本研究課題では、ヒレ推進に適したEHDを利用したアクチュエータの開発と魚ロボット試作機の開発を進め、最終目標として「EHDポンプを利用した静音型アクチュエータを搭載した魚ロボットの実現可能性を確認できる試作機の開発」を目指す。

(1) EHDポンプを利用した静音型アクチュエータの開発

現時点(令和6年3月)で静音型アクチュエータは、実験レベルで1MPa程度の圧力を出せるポンプが完成している。

その中の課題として、1MPaの圧力が安定的に出ない事(複数製作した場合に、出力に大きなばらつきが出る事や、急激に圧力が下がる事がある。)や、ポンプ筐体が圧力に耐えられず液が漏れるという課題がある。その課題を達成する為に、電極の形状変更や、筐体の耐久性向上を達成、キャビテーション(EHDポンプ内での泡の発生)が起きないための液の注入手順の解明をする必要がある。それらの解明を行い、以下の項目の達成を目指す

- ① 安定的に1MPa程度の圧力をだせるポンプの構成の解明
- ② 1MPaに耐えるための筐体の問題点、解決策の解明
- ③ EHDポンプを通常の流体系アクチュエータ(蛇腹、シリンダー、ラバーアクチュエータなど)に取り付けアクチュエータ化

また、将来的なポンプの性能向上に向けた課題として、双方向流量ポンプ及び揺動型アクチュエータポンプの開発が必要である。

(2) 静音型アクチュエータを用いた魚型ロボットの開発

現在の魚ロボットは、推進のための尾びれをモーターで左右に振る機構になっているが、アクチュエータ自体が揺動する機構に変わる為、対応した構造・構成を開発する必要がある。

- ① 静音型アクチュエータを用いた魚型ロボットに適した構造・構成の解明
- ② その構造・構成による、基本動作のための動作方法の解決
- ③ 動作方法解決後、基本動作に対する魚型ロボットの個々の動作要素の解明

2. 研究開始時に設定した研究目標の達成度

(1) EHDポンプを利用した静音型アクチュエータの開発

- ① 安定的に1MPa程度の圧力をだせるポンプの構成の解明

1MPa程度の圧力を出せるポンプの製造は成功した。しかし、それより小さい出力タイプのポンプをロボットに組み込んで使用していると1日~2日で破損している。そして、研究により必要な構造の要件が明らかになってきた。

以上より、安定的な構成の解明という要件は未達だが多くの知見を得た。

- ② 1MPaに耐えるための筐体の問題点、解決策の解明

筐体の問題点は製造難易度による品質のばらつき、運用時の発熱の影響、シール範囲の細分化、等の対策検討により有益な知見を得ている。1MPaのサイズまでは構築出来ていないが小さいサイズの物では達成している。

- ③ EHD ポンプを通常の流体系アクチュエータ（蛇腹、シリンダー、ラバーアクチュエータなど）に取り付けアクチュエータ化
シリンダーとポンプを繋いだアクチュエータを作って魚型ロボットに組み込んで使用し、実際にアクチュエータとして運用して要件を達成した。

(2) 静音型アクチュエータを用いた魚型ロボットの開発

- ① 静音型アクチュエータを用いた魚型ロボットに適した構造・構成の解明
静音型アクチュエータを組み込んで動作する魚型ロボットの製作に成功した。しかし、まだ、周期的な機械音が発生する機構が内包されているので、引き続き研究開発の余地がある。
- ② その構造・構成による、基本動作のための動作方法の解決
本研究で開発した魚型ロボットに適した動作方法の傾向とパターンを見つけることが出来た。
- ③ 動作方法解決後、基本動作に対する魚型ロボットの個々の動作要素の解明
今回作製したポンプの故障により、ポンプ数が不足して推進動作のみ動作方法の解明を行うことが出来た。今回行えなかったその他旋回や浮沈に関する推進動作と動作方向の解明については未達。

3. 委託業務における研究の方法及び成果

3.1. 初年度の研究開発

(1) 静音型アクチュエータを用いたヒレ推進魚ロボットの鰭の開発

① EHDポンプアクチュエータ(静音型アクチュエータ)の開発

従来型のEHDポンプの電極構造を図1に示す。EHDポンプは、プラスの電圧を印加する平板の電極に、GNDとなる傾斜させた電極を一組対になるよう配置した構造である。プラス電極とGND電極の間隔が斜面に沿って徐々に狭くなるため、電圧の印加により電極間に不均一な電界が生じ、図1右上の様な強い流れを発生させることができる。

EHDポンプアクチュエータの基本構造を図2に示す、流路壁面に板状電極を配置し、流路中央に板状電極に対し 30° に傾斜させた平板電極を1対配置させる構造である。電極のスケールは電極高さ10mm平板電極長さ10mmとし、電極間隔は1mmに設定した。以上の電極構造・寸法の電極をアクリル製のハウジングに収め、EHDポンプアクチュエータとした。

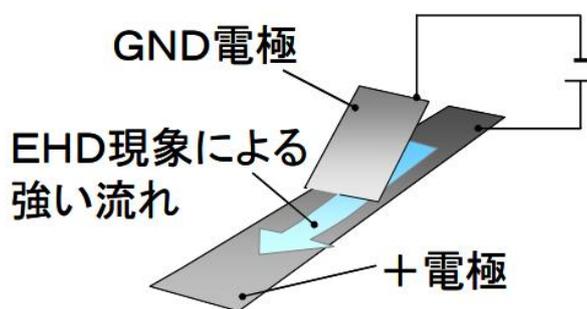


図1 EHDポンプアクチュエータ電極構造

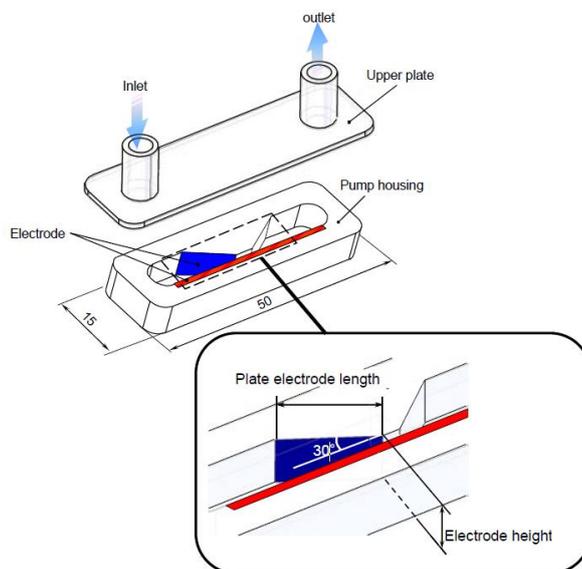


図2 EHDポンプアクチュエータ電極構造

本研究は、静音型アクチュエータに適用し、ヒレ推進魚ロボットの鰭駆動の動力に用いるEHDポンプアクチュエータの開発を行った。令和4年度は、EHDポンプアクチュエータが1MPaの圧力が安定的に出せる試作機を作製し、ハウジングの耐久性向上及びキャビテーション（EHDポンプアクチュエータ内で泡の発生）が起きないか強度試験を行った。ヒレ推進魚ロボットへの取り付けを考え最終的には、2種類の出力ポンプを製作でき短期的耐久性は実現できたが、長期的耐久性は課題が残った。



図3 製作したEHDポンプの例を示す。

ただし、ポンプとしては安定して作る事ができるようになった為、作製したEHDポンプアクチュエータを、図3に示すヒレ推進魚ロボットの尾鰭機構に取り付け、空中と水中で動作試験をした。EHDポンプアクチュエータと尾鰭の配管図を図5に示す。EHDポンプアクチュエータを2個作製し、尾鰭の駆動部のシリンダーに接続した。これにより、EHDポンプアクチュエータに高電圧を印加することで、EHDポンプアクチュエータ内で生じる流れと圧力をシリンダーに伝えて操作が可能となる。EHDポンプアクチュエータから2本のシリンダーへ交互に出力することで、図4のような尾鰭の機構が魚の尻尾の様な動作を行う。これを用いて、EHDポンプアクチュエータからの出力で尾鰭の動作が可能か確認した。図6に空中で跳ね上げ動作、図7に空中で左右動作、図8に水中で左右動作をさせた時の様子をそれぞれ示す。

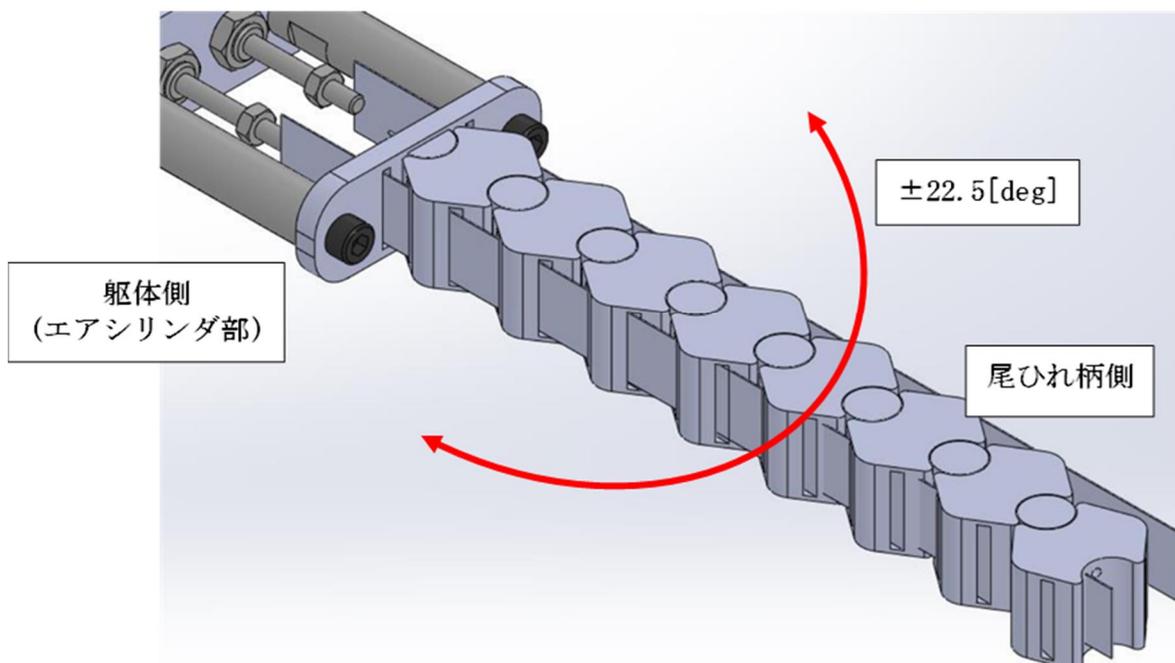


図4 尾鰭機構

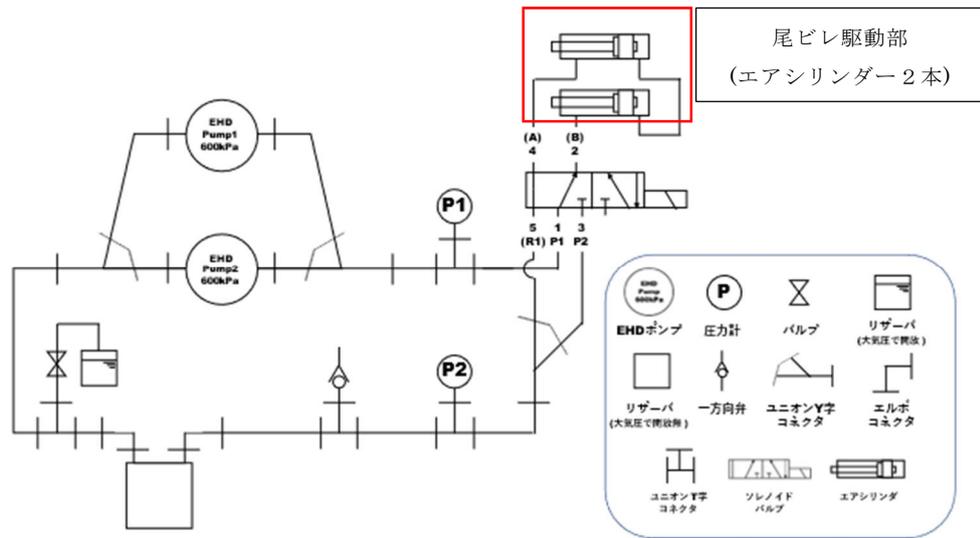


図5 EHDポンプアクチュエータ-尾緒配管図

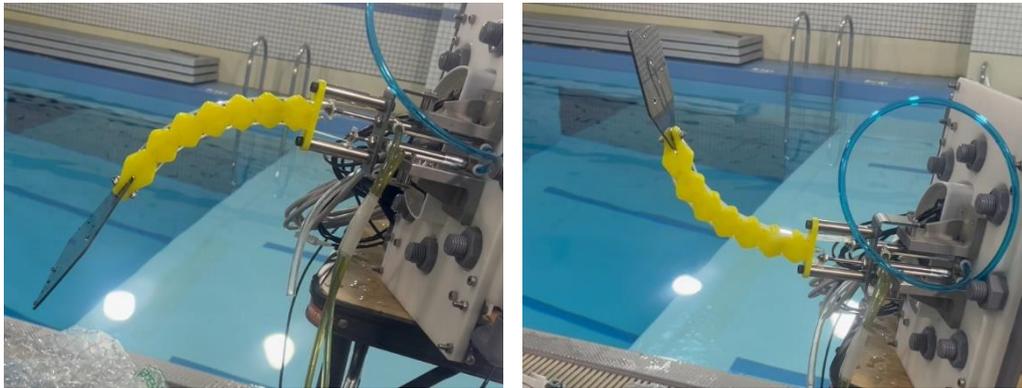


図6 空中で跳ね上げ動作試験

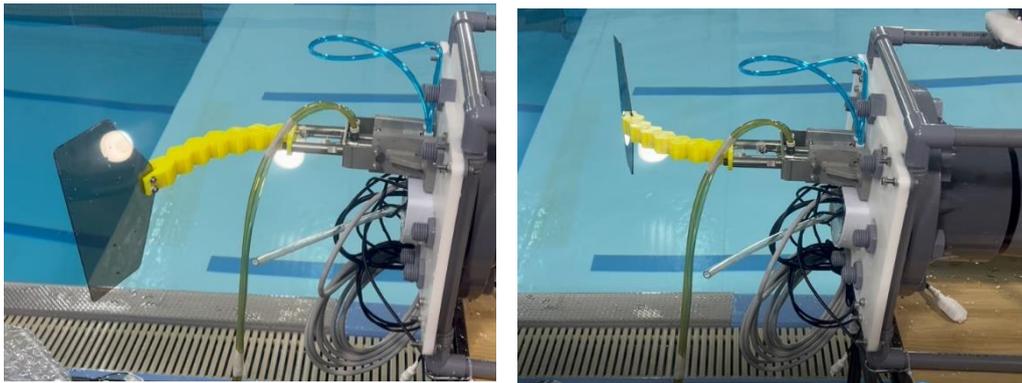


図7 空中で左右動作試験

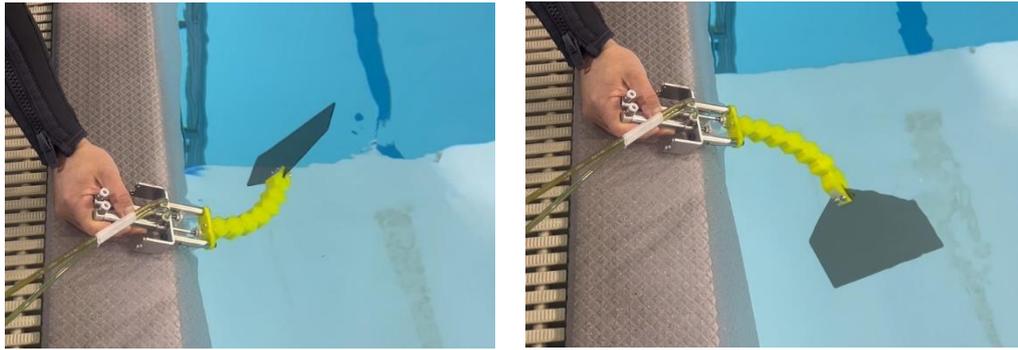


図8 水中で左右動作試験

図6、図7、図8の様子から、EHDポンプアクチュエータからの出力で尾鰭の動作が十分に可能であることがわかった。

④ EHDポンプ(静音型アクチュエータ)の開発結果

開発したEHDポンプに関しては、時間的安定性であるが、数百キロパスカル程度あれば、1時間圧をかけても液漏れが出なかったが、1.0 [MPa]を超えると、今回の筐体対策でも長時間使うと液漏れが発生する箇所が出てきた。今後は、液漏れが派生した場所を再度接着して、対処的に対応を行うことで液漏れが防げるか確認すると共に、製造段階での接着精度のさらなる向上を進める。

ただし、今回の製造したEHDポンプとシステム系では、圧力自体は安定して繰り返し出すことが可能だったため、魚の尾びれの製作も行った。

結果として、空中だけではなく、水中の中でも、尾びれを動作させるほどの力を発生することは可能であった。

(2) 静音型アクチュエータを用いた魚型ロボットの開発

①ヒレ推進魚ロボット試験機の構成

本開発は、ヒレ推進魚ロボットのアクチュエータをEHDポンプアクチュエータに代替する為、対応した構造・構成を設計する。まずは、魚の構成すべてをモーターにて製造し、動作の確認を行った。

本開発で検討した、ヒレ推進魚ロボット試験機の全体構成を図9に示す。主な構成要素として、尾鰭、胸鰭、安定性を確保するためのバラストタンク、ヒレ推進魚ロボットの制御機器を内蔵した耐水筐体を兼ねた塩ビ製の円筒管、浮力調整用の金属重りから成る。ヒレ推進魚ロボット試験機の大きさは、全長約1,300 [mm]、全幅約834 [mm]、高さ約450 [mm]となる。

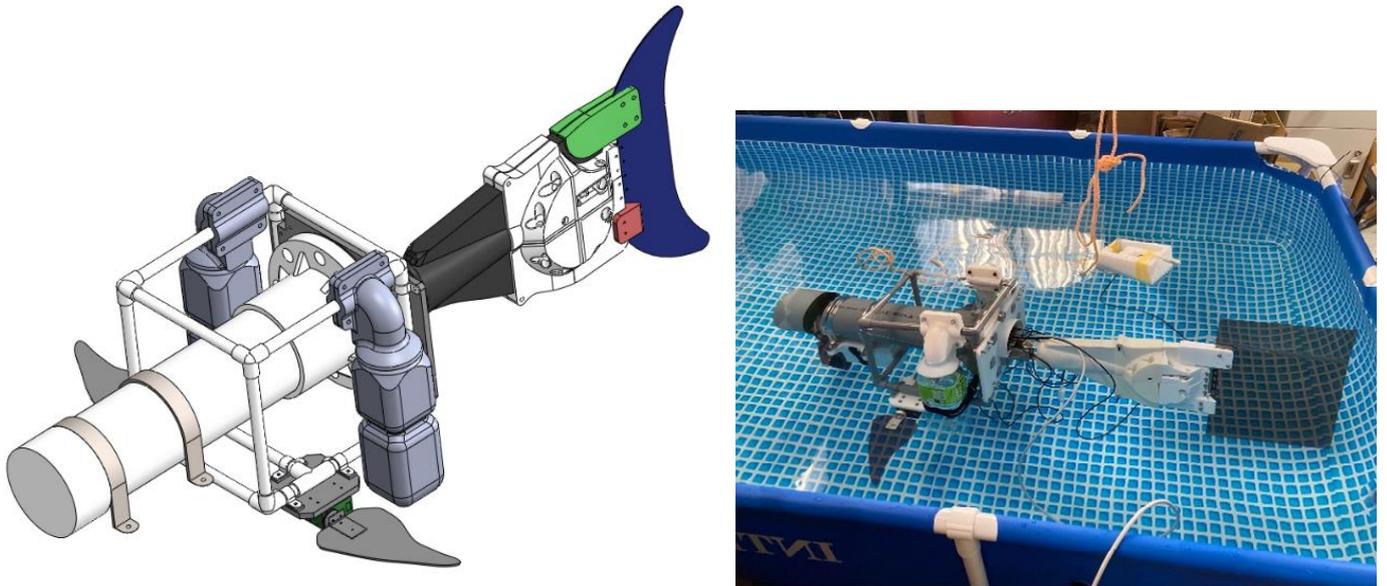


図9 ヒレ推進魚ロボット試験機構成及び実写

尾鰭の形状を図10に示す。左図のシリコン素材の尻尾と、右図の追加パーツの通り、金属ヒンジ（灰色）と尾鰭用の樹脂板（青色、ポリカーボネイト）、ほかは3Dプリンターで作製した。金属ヒンジの可動域はデフォルトで $-90 \sim +180 [^\circ]$ で作製し、赤色で示したストッパーで $\pm 45 [^\circ]$ に抑え込んだ。また緑色で示した部品は、どうさいすることでシリコン素材の弾性を活かして、青色板を戻す力を生みだす。

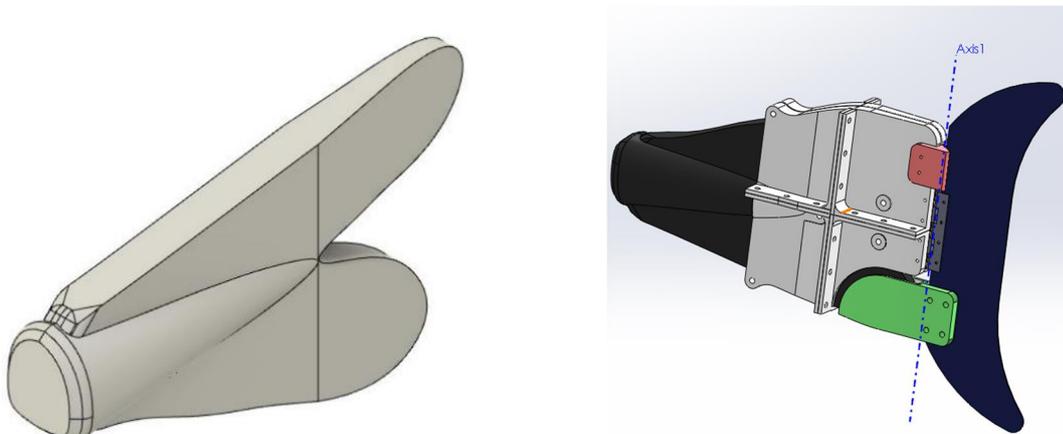


図10 尾鰭形状

今回ヒレ推進魚ロボットが前進する時の尾鰭の動作パターンを図11に、ヒレ推進魚ロボットが旋回する時の尾鰭の動作パターンを図12に示す。前進時の動作パターンは図11の通り、尾鰭は単純にヒレ推進魚ロボットの中心軸から $\pm 35 [^\circ]$ を左右に振り続けるスイムパターンAと、ヒレ推進魚ロボットの右側に高速で $+70 [^\circ]$ 振った後に反対方向に低速で $-90 [^\circ]$ 戻し、低速で $+20 [^\circ]$ 進めた後、ヒレ推進魚ロボットの左側に高速で $-90 [^\circ]$ 振る動作を左右交互に繰り返すパターン2を設定した。特にスイムパターンBは、実際の魚が前進する時の尾鰭の動作を再現した。

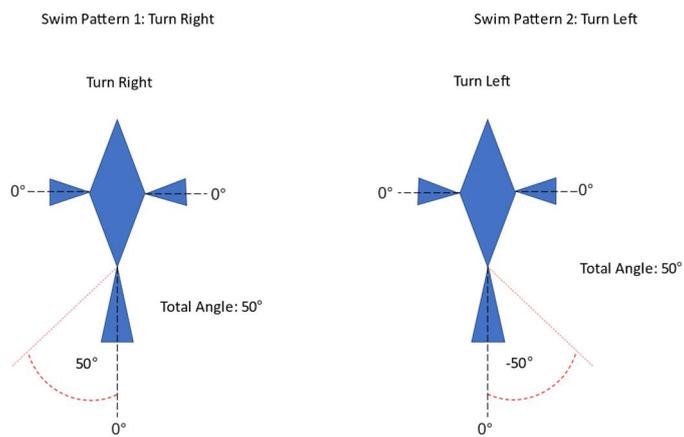


図 1 1 ヒレ推進魚ロボット前進/尾鰭動作パターン

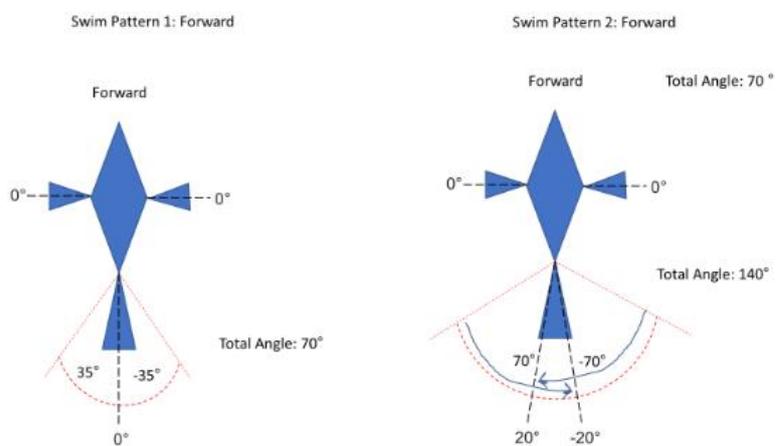


図 1 2 ヒレ推進魚ロボット旋回/尾鰭動作パターン

胸鰭はアクリル板で作製し、防水仕様のモーターを採用した。胸鰭とモーターを組立てた様子を図 1 3 に示す。また、胸鰭の基本動作パターンを図 1 4 に示す。胸鰭は前進、旋回ともに前後に±90°動作するように設定した。

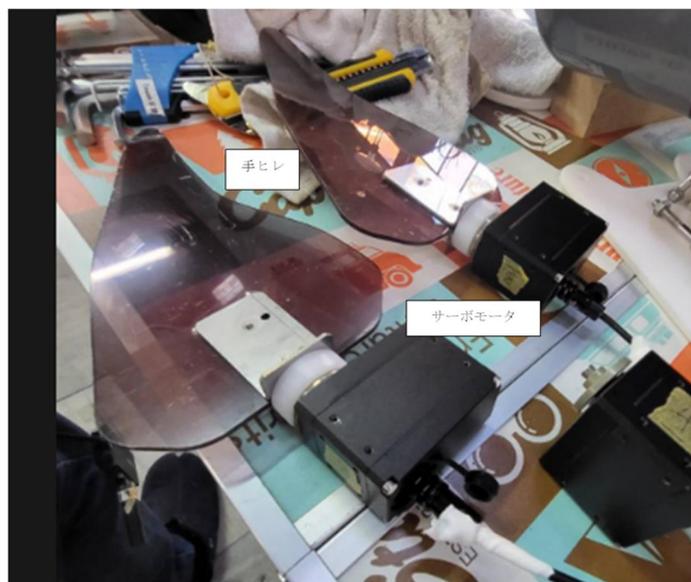


図 1 3 胸鰭とモーター

Swim Pattern 1: Hand Fins

Swim Pattern 2: Hand Fins

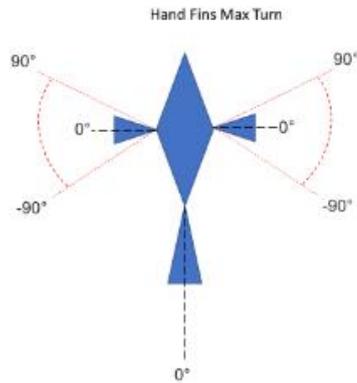


図 1 4 胸鰭動作パターン

今回使用したモーターは、侵入保護等級が I P 6 8 (1 m、2 4 時間)である D Y N A M I X E L 社製の X W 5 4 0 - T 2 6 0 - R を採用した。図 1 5 に仕様を示す。

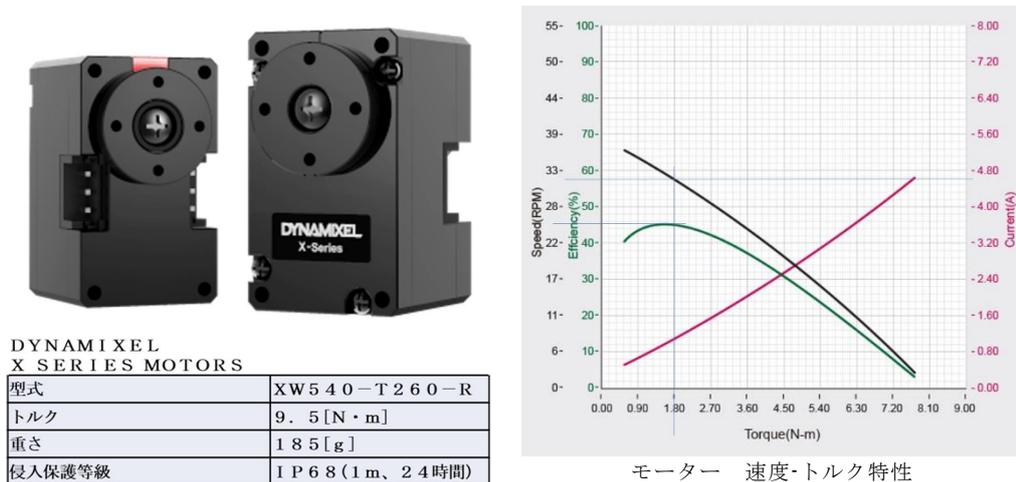


図 1 5 モータースペック

最終テストの前に水中で胸鰭の動作試験を行ったところ、胸鰭の駆動部であるモーターが動かなくなる事象が発生した。発生後、搭載していたモーター単体を確認するため一度機体から取り外し、P C と繋げて動作試験したが、これ以降動作しなかった。更に、1つのモーターが動かなくなった場合、他に接続しているモーターも併せて動かなくなった。結論として、動かないモーターを接続された状態では、すべてのモーターが動かなくなることが確認されたため、本年度のプール実験では左右の胸鰭及びモーターは接続しない事とした。来年度の研究は、全ての動力に E H D ポンプアクチュエータを採用する計画のため、モーターでの調査は中止とした。

電装部品を搭載した塩ビ製円筒管の全体図を図 1 6 に示す。これはヒレ推進魚ロボットの頭と胴体部に該当し、図 1 6 の上部はヒレ推進魚ロボット試作機の頭部分となる。塩ビ製円筒管の中に、ヒレ推進魚ロボットの各動作を制御するための基板と、ヒレ推進魚ロボットの浮き沈みを制御するためのバラストタンクシステムを搭載した。搭載した中身部分の実写を図 1 9 に示す。

今回バラストタンクシステムは、潜水艦模型（スタティックダイブ方式）に適用される電動ピストン方式を採用した。図17にバラストタンクシステムの全体図を示し、配線図を図18を示す。



図16 塩ビ製円筒管



図16 塩ビ製円筒管の中身

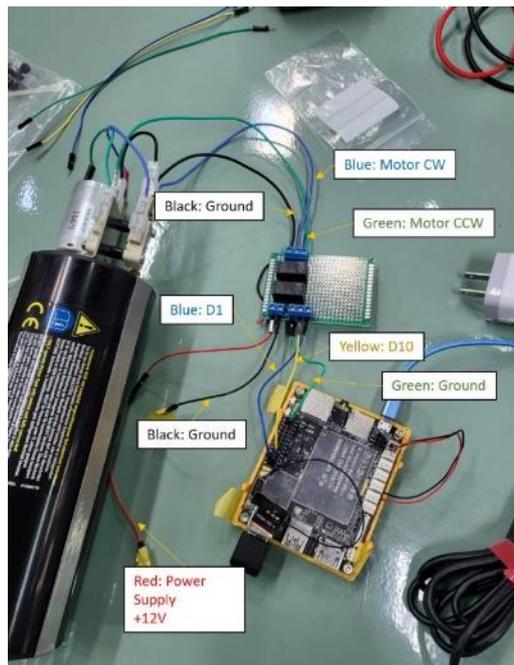


図17 バラストタンクシステム全体図

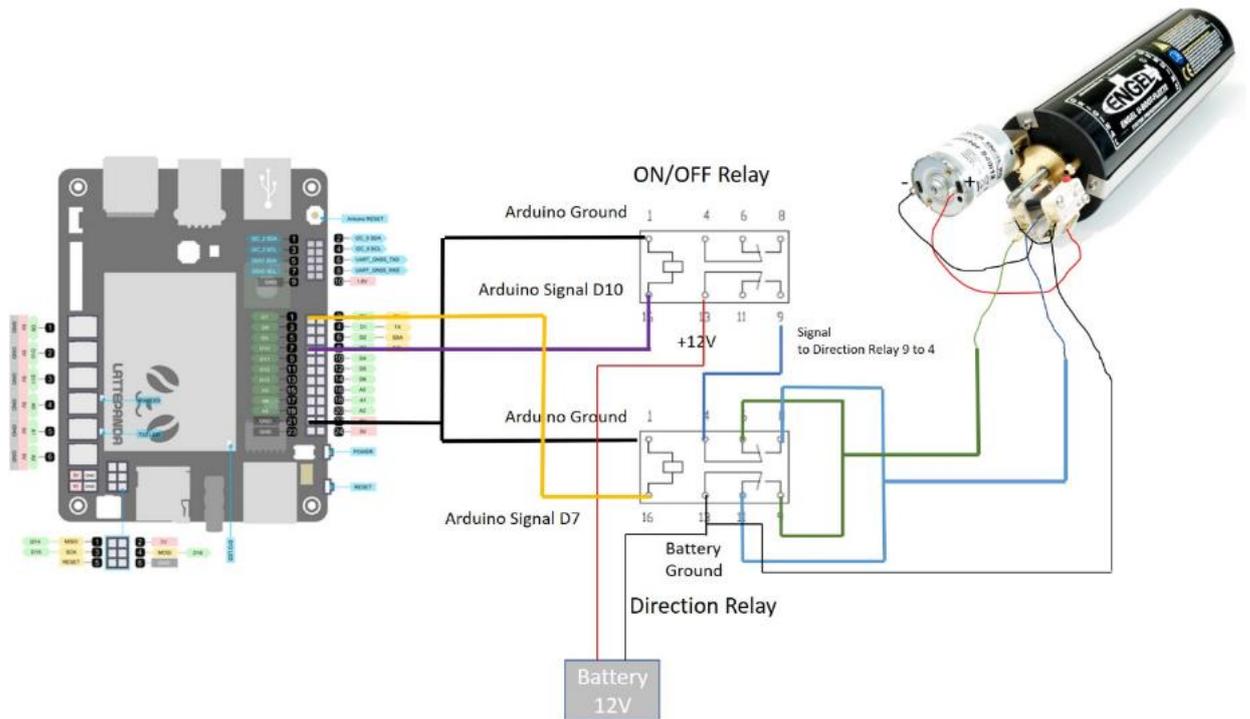


図 1 8 バラストタンクシステム配線図

ヒレ推進魚ロボットが水中で効率よく泳ぐためには、進行方向から受ける水の抵抗を「最も小さい範囲にできる」水平姿勢を維持する必要がある。今回試作したヒレ推進魚ロボットは図 1 9 左の通り、重りが無い状態では頭が浮き上がった。頭に金属重り（地上で 4.5 [kg]）を搭載し、外付けでサドルバンド（図 2 0）に金属重り（地上で 1.8 [kg]）を追加で付け、この条件でバラストタンク内の水を空にするとヒレ推進魚ロボットは浮き、水を詰めるとヒレ推進魚ロボットが沈む状態となった（図 1 9 右）。この状態からバラストタンクを制御することで、ヒレ推進魚ロボットの水平姿勢が制御できることが分かる。



図 1 9 ヒレ推進魚ロボット水平姿勢調査の様子

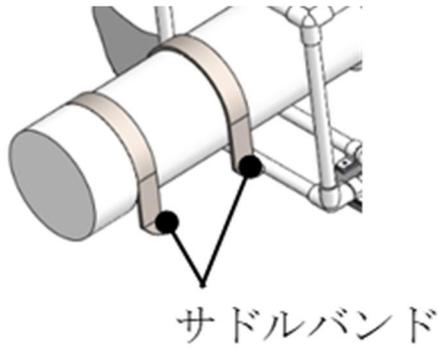


図 2 0 サドルバンドに搭載した追加の金属重り

②ヒレ推進魚ロボット試験機の試験方法及び試験結果

今回作製したヒレ推進魚ロボット試作機で実施した、試験条件を表 1 に示す。試験条件として、尾ビレ形状、泳ぎ方、浮力、尾びれの片側振り幅をそれぞれ設定した。尾びれ形状は通常尻尾と追加尻尾の 2 条件とした。スイムパターンはスイムパターン A (等速揺動) とスイムパターン B (押し出し高速、引き低速) に弾性の有無を付け加えた計 4 条件とした。浮力は基本水平姿勢が取れる中性の状態を若干浮く時 (+ 中性) と沈む時 (- 中性) と、水底に腹付きで沈んだ状態と水面に浮かんだ状態の 4 条件とした。尾びれの片側振り幅は 35 [°] と 70 [°] の 2 条件とした。以上の条件を組み合わせ、13 パラメーターで試験を実施した。

例えば条件名①は、尾鰭形状は通常尻尾、泳ぎ方はスイムパターン A、浮力は中性 (水泳時に浮く)、尾びれの片側振り幅は 35 [°] である。

表 1 ヒレ推進魚ロボット試作機試験条件

条件	条件名	①	②	③	④	⑤	⑤-2	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	
条件	尾びれ形状			通常尻尾		追加尻尾									
	スイムパターン	スイムパターン A (等速揺動)		スイムパターン B (押し出し高速、引き低速)		スイムパターン A		スイムパターン B							
								弾性あり		弾性なし		弾性あり		弾性なし	
	浮力			+ 中性 (浮く)		- 中性 (沈む)		best → + 中性 (浮く)		- 水底腹付き (沈む)		浮く			
片側振り幅 [°]	35		70		best → 35		35		70		35		70		

今回の試験の様子を図 2 1 と図 2 2 に示す。また、作製したヒレ推進魚ロボット試作機で実施した試験結果を表 2 に示す。



図 2 1 ヒレ推進魚ロボット試作機の試験の様子



図 2 2 ヒレ推進魚ロボット 水泳の様子

表2 ヒレ推進魚ロボット試作機試験結果

条件	条件名	①	②	③	④	⑤	⑤-2	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	
		通常尻尾				追加尻尾									
	尾びれ形状														
	スイムパターン	スイムパターンA (等速揺動)	スイムパターンB (押し高速、引き低速)	スイムパターンA	スイムパターンB	弾性あり	弾性なし	弾性あり	弾性なし						
	浮力	+中性(浮く)		-中性(沈む)	best→+中性(浮く)		-水底腹付き(沈む)			浮く					
	片側振幅[°]	35	70	best→35	35	70	35	70	35	70	35	70	35	70	

試験結果														
推進	推進力(N) ※測定値	0	0	動きが変で泳ぎを再現できず	5	計測機不調で計測不可			27.7	28.3	20.4	22.4	7.6	11.4
		推進速度(sec/3m)	30		×直進せず	(30)(水底腹付き)	35	35	70	25	27	×直進せず		
↑単位変換(m/sec)	0.100	0.100	0.086	0.086		0.043	0.120	0.111						
↑単位変換(cm/sec)	10.000	10.000	8.571	8.571		4.286	12.000	11.111						
旋回	進路変更ふり幅60度	右○ 左○	右○ 左×	×										
潜水	手ビレ	×	×											
	パラスト	○	○											
ロール	(複合)	手ビレ潜水不可により実行不可	手ビレ潜水不可により実行不可											
	手ビレ(±45度(仮))	手ビレ潜水不可により実行不可	手ビレ潜水不可により実行不可											
		沈降に対抗できず確認不可												

各条件の結果を以下にまとめる。なお、いずれの条件も胸鰭の動作は行わなかったため、潜水とロールの試験は確認が不可能となった。

- ① (通常尻尾、スイムパターンA、+中性、35[°])
推進力0[N]。進路変更のための旋回は左右どちらも出来た。
- ② (通常尻尾、スイムパターンA、+中性、70[°])
推進力0[N]。魚の泳ぎを再現できたが、直進するまでに至らなかった。
- ③ (通常尻尾、スイムパターンB、+中性、70[°])
推進力0[N]。動きが変で、魚の泳ぎを再現できなかった。
- ④ (通常尻尾、スイムパターンA、-中性、35[°])
水底に腹が付いた状態で推進力が5[N]を計測した。
- ⑤ (追加尻尾、スイムパターンB弾性あり、+中性、35[°])
推進力計測出来ず。推進速度8.57[cm/sec]。
進路変更のための旋回は左右どちらも出来た。
- ⑤-2 (追加尻尾、スイムパターンB弾性あり、+中性、70[°])
推進力計測出来ず。推進速度8.57[cm/sec]。
- ⑥ (追加尻尾、スイムパターンB弾性なし、+中性、70[°])
推進力計測出来ず。推進速度4.29[cm/sec]。
- ⑦ (追加尻尾、スイムパターンB弾性あり、-水底腹付き、35[°])

推進力 27.7 [N]。推進速度 12.0 [cm/sec]。
旋回は右方向が出来たが、左方向は出来なかった。

- ⑧ (追加尻尾、スイムパターンB 弾性あり、一水底腹付き、70 [°])
推進力 28.3 [N]。推進速度 11.11 [cm/sec]。
- ⑨ (追加尻尾、スイムパターンB 弾性無し、一水底腹付き、35 [°])
推進力 20.4 [N]。直進せず。
- ⑩ (追加尻尾、スイムパターンB 弾性無し、一水底腹付き、70 [°])
推進力 22.4 [N]。直進せず。
- ⑪ (追加尻尾、スイムパターンB 弾性無し、浮く、35 [°])
推進力 7.6 [N]。直進せず。
- ⑫ (追加尻尾、スイムパターンB 弾性無し、浮く、70 [°])
推進力 11.4 [N]。直進せず。

結果、条件⑦と条件⑧で推進力 25 [N] 以上、推進速度 12.0 [cm/sec] を確認することができた。また、今回作製したヒレ推進魚ロボット試作機は、最後まで水漏れが発生せず試験を終えることができた。

④ 静音型アクチュエータを用いたヒレ推進魚ロボットの開発のまとめ

今回作製したモーター型ヒレ推進魚ロボット試作機は、モーター不調により胸鰭動作を中止した試験となったが、動作試験で水漏れを発生することなく、推進力は条件次第で最大 12.0 [cm/sec] を確認した。

その後、本項における開発の目標である今回作製したモーター型ヒレ推進魚ロボット試作機に、EHD ポンプアクチュエータ尾びれを搭載した様子を図 2.3 に示す。

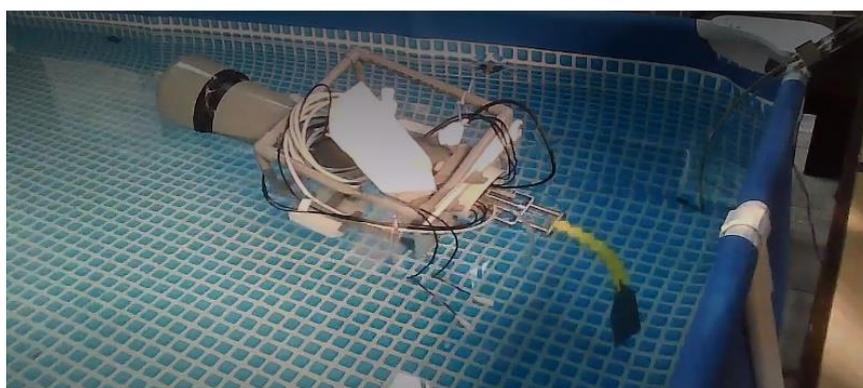


図 2.3 EHD ポンプアクチュエータを搭載した魚ロボット試作機

当初想定よりモーターの入手性の問題もあり、事前の設計から筐体が大きくなった為、全体の寸法に対してバランスの悪い寸法となってしまった。

ただし、動作としては、これだけの筐体にもかかわらず、尾びれを水中で動作させることは可能であった。しかし、推力的な問題が発生したためその対策を次年度に行う。

また、今回の開発において、推力の尾びれに関しては、形状やふり幅等により変化することが分かったが、向きを変える動きとしては、胸鰭だけでは不十分な事がわかった。同様に浮沈に関しても、ヒレ部分のみでは推力が足りてないこともわかり、今年度は、浮沈、左右旋回に対する動きも検討した。

初年度の成果として、作製したEHDアクチュエータ試作機は、強度試験により圧力特性が1.0 [MPa]を備えたEHDアクチュエータが製作可能であることを確認した。また、尾鰭に接続して動作が可能であることも確認できた。次年度の課題としては、試作機から大きくせず、今回実現した圧力特性について定常的に成功でき、電気絶縁性液体の充填が簡単かつ液漏れを発生しないハウジングを検討及び作製することが課題である。

また初年度も次年度でのヒレ推進魚ロボット実験の為、追加でEHDアクチュエータ尾びれ搭載の小型のヒレ推進魚ロボット（図24）も作製して水中での動作確認を行った。動作試験の様子を図25に示す。EHDポンプアクチュエータから一方のシリンダーへ動力を送り、次に反対のもう一方のシリンダーへ動力を送ることを繰り返して、尾鰭の基本的な動きが確認できた。

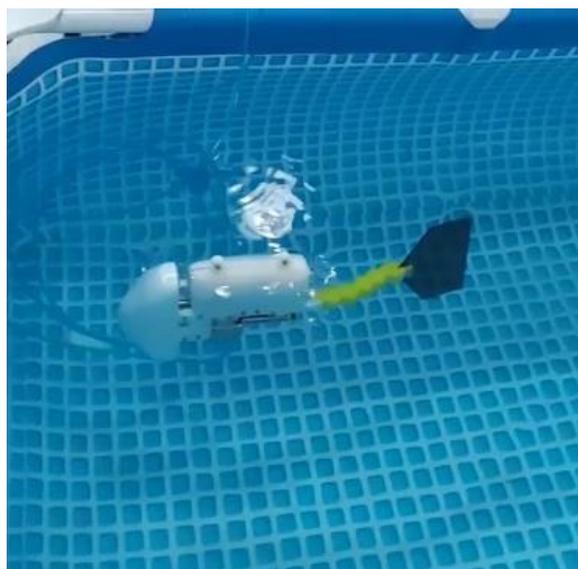


図24 EHDポンプアクチュエータ動作試験 試作モデル

今回、図24の試作モデルを作製し、EHDポンプアクチュエータを外部から接続して動作が可能であることまで確認できた。

今回各種開発実験により、尾鰭にEHDポンプアクチュエータを接続したヒレ推進魚ロボット試作モデルが、EHDポンプアクチュエータで尾鰭の駆動が可能であることが確認できた。

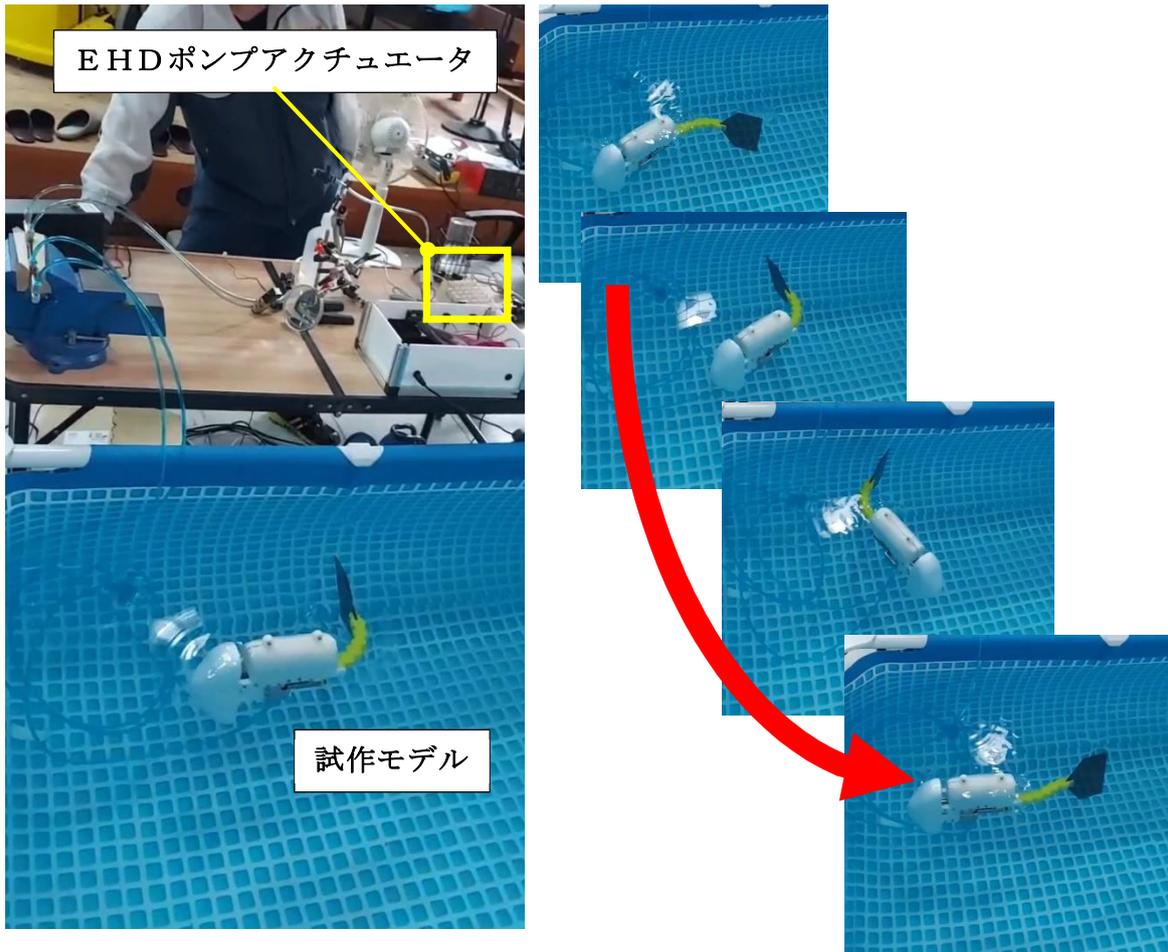


図 2 5 EHDポンプアクチュエータ動作試験の様子

それらの結果および、初年度の開発の課題から、EHDポンプアクチュエータを搭載した魚ロボットの次期構想案を図 2 6 に示す。

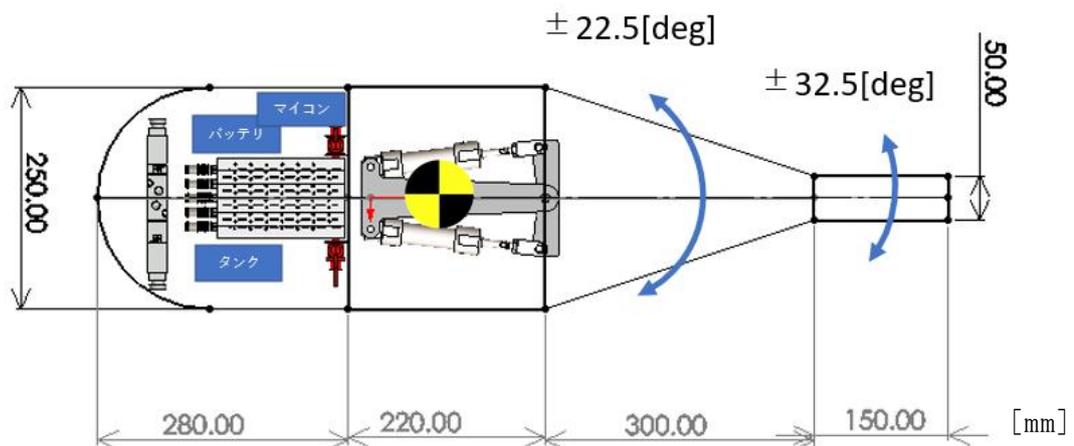


図 2 6 ヒレ推進魚ロボットの次期構想

現状の $\Phi 10$ [mm]シリンダーでは、EHDポンプアクチュエータから出力された動力を伝達するための容積が不足していると捉え、 $\Phi 20$ [mm]シリンダーを検討する。これにより、試験機から推進力が8倍になると考えられる。また、今回の試験ではヒレ推進魚ロボットの浮き沈みの調整が難しく、推進力の確認に時間を費やした。これの対策として、次期構想に背ビレを取り付け水面に出す仕様を検討している。これにより、ヒレ推進魚ロボットが水中

で姿勢を水平で維持できないか確認を行い、結果が良ければ採用する。加えて図 2 7 の様な、より魚の動きに近く、推進力に直結する尾鰭及び尾鰭柄の機構を設計した。



図 2 7 尾鰭柄の次期構想

初年度の開発の試作機において、モーター型ヒレ推進魚ロボット試作機が水中で動作する際には、モーター音が水中内に放射されるが、EHDポンプでは、尾びれのフレームのきしみ音が多少発生するのと、今回のシステム系で使った、ソレノイドの音が多少発生する程度で、相当な静粛化が実現できた。今後は、静粛性についても検証を検討する。

参考文献

第51回自動制御連合講演会 2008年11月22日, 23日 山形大学工学部EHD現象を応用した液圧駆動機器の開発

3.2 最終年の研究開発

最終年は、性能を向上したEHDポンプアクチュエータシステムすべてヒレ推進魚ロボット内部に搭載し、静粛化の検証を主眼としておこなった。

3.2.1 製作ヒレ推進魚ロボットの比較

3.2.1.1 初年度ヒレ推進魚ロボットの写真と寸法図

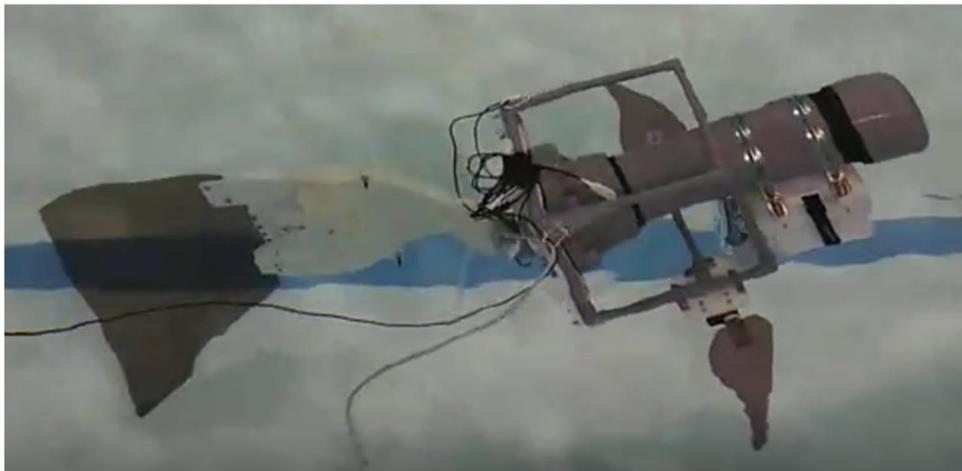


図 28 泳いでいる様子（初年度）

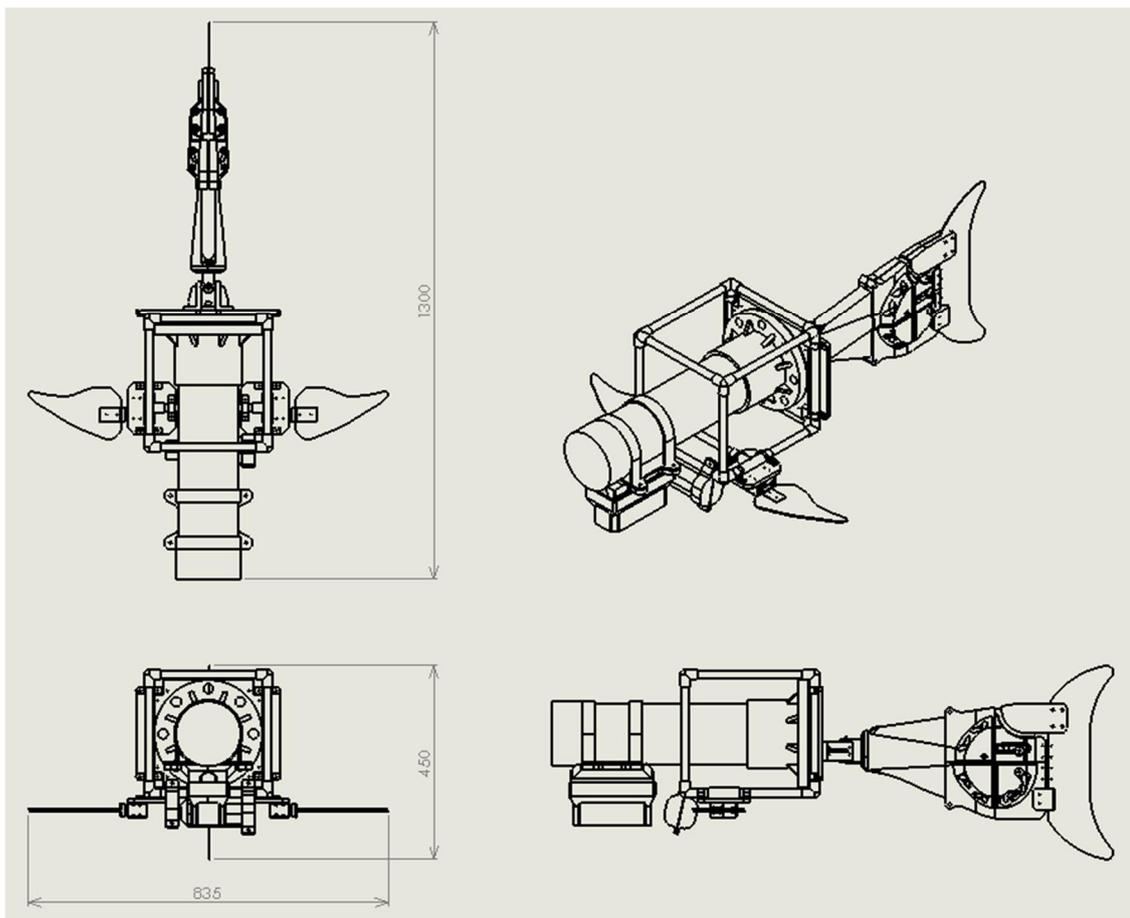


図 29 寸法図（初年度）

縦 × 横 × 長さ = 450 × 835 × 1300 [mm]

3.2.1.2 構成要素の説明

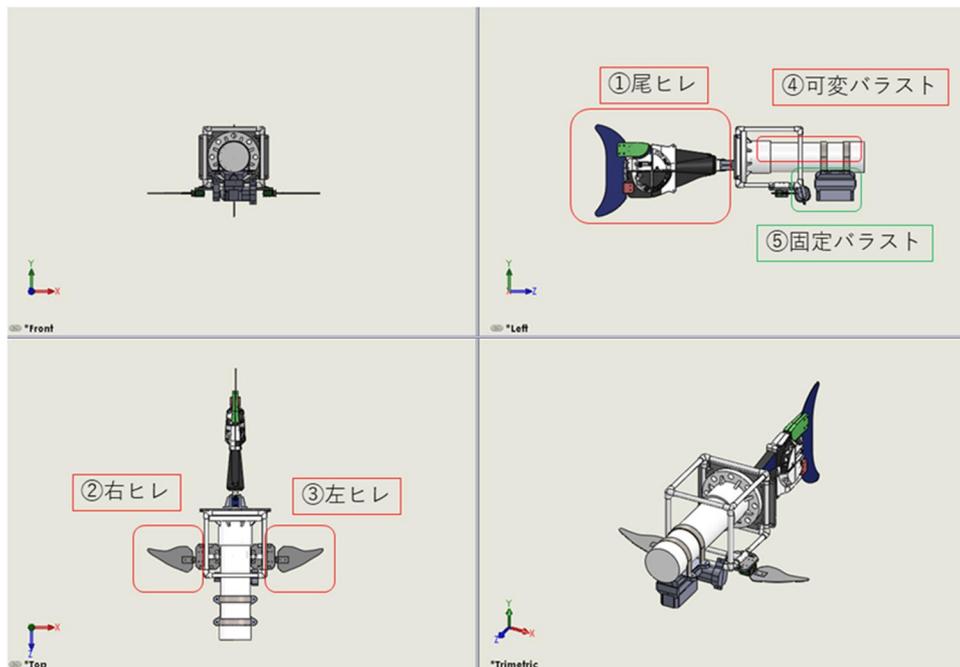


図 30 CAD における三面図とアイソメトリック図（初年度）

- ①尾鰭：防水モーターを用いた尾鰭
 - ②右ヒレ：防水モーターを用いた右ヒレ
 - ③左ヒレ：防水モーターを用いた左ヒレ
 - ④可変バラスト：モーター駆動により金属タンクに注水/排水する可変バラスト
 - ⑤固定バラスト：樹脂タンクに鉄製おもりを入れることで姿勢調整する固定バラスト
- ※電源：長尺ケーブルによる外部給電
※通信：Wi-Fi 受信機のみ水面に浮かすことで常時通信

3.2.1.3 「最終年」のヒレ推進魚ロボットの写真と寸法

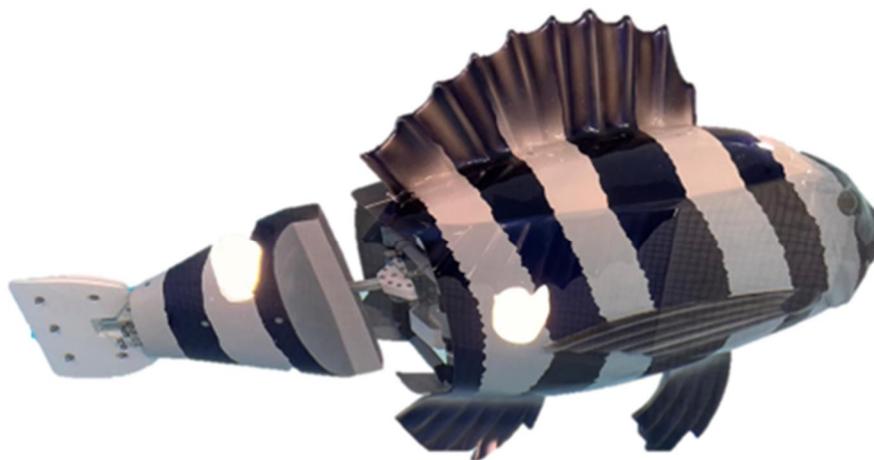


図 31 泳いでいる様子（最終年）

外装

内装

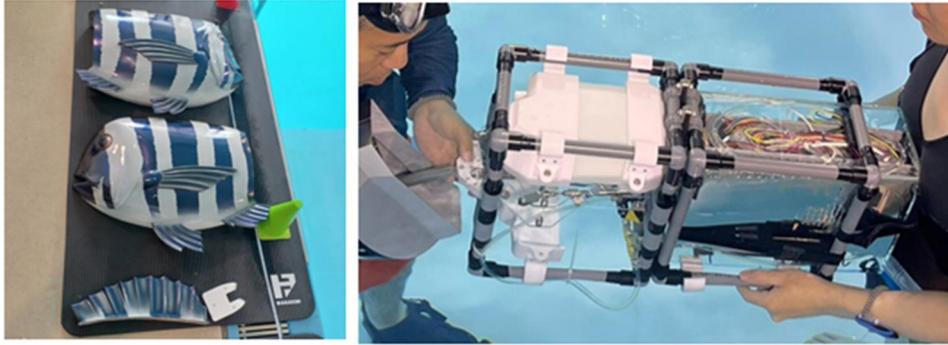


図 3 2 内装及び外装の様子

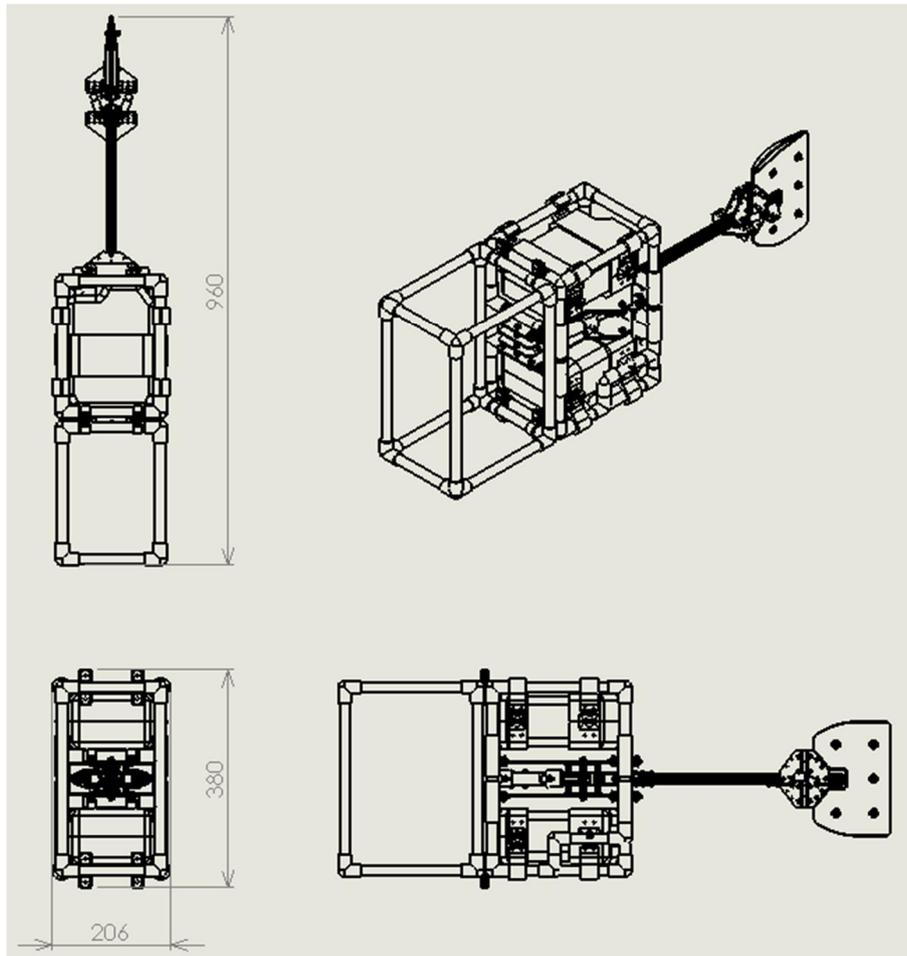


図 3 3 内装の寸法図 (2代目)

縦 × 横 × 長さ = 380 × 206 × 960 [mm]

3.2.1.4 構成要素の説明

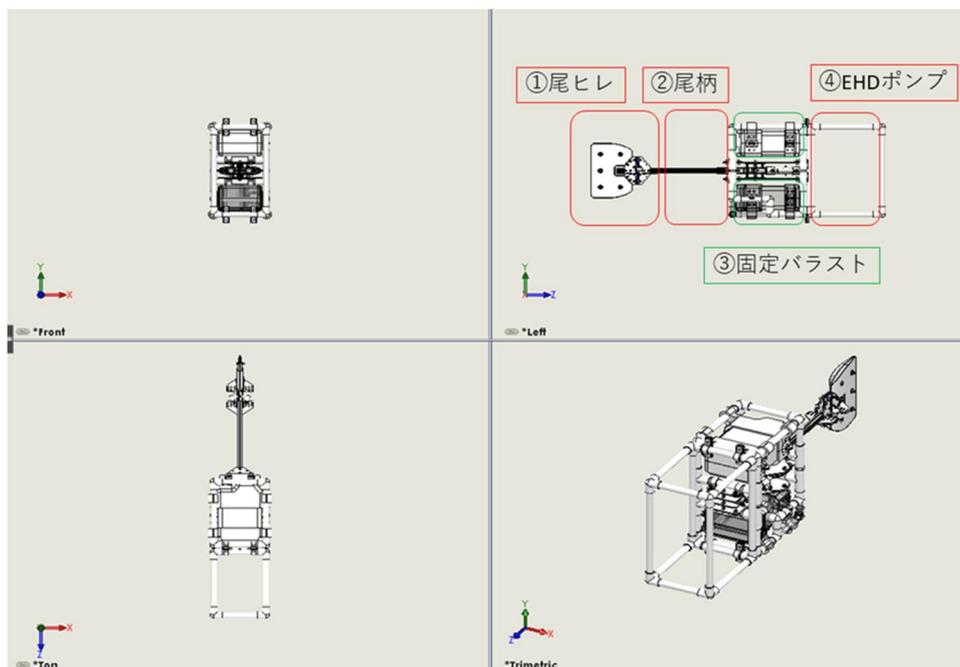


図 3 4 CAD における三面図とアイソメトリック図 (2 代目)

- ①尾鰭：液圧駆動シリンダーを用いた尾鰭
- ②尾柄：長さの調整が容易な尾柄
- ③固定バラスト：樹脂タンクに鉄製おもりを入れることで姿勢調整する固定バラスト
- ④EHDポンプ：EHD現象を用いたポンプ
- ※電源：バッテリー内蔵 (連続 6 時間駆動)
- ※通信：Wi-Fi 受信機を本体に内蔵、浮上時のみ通信

3.3 ヒレ推進魚ロボット向けのヒレ及び泳ぎの研究開発

3.3.1 開発物概要

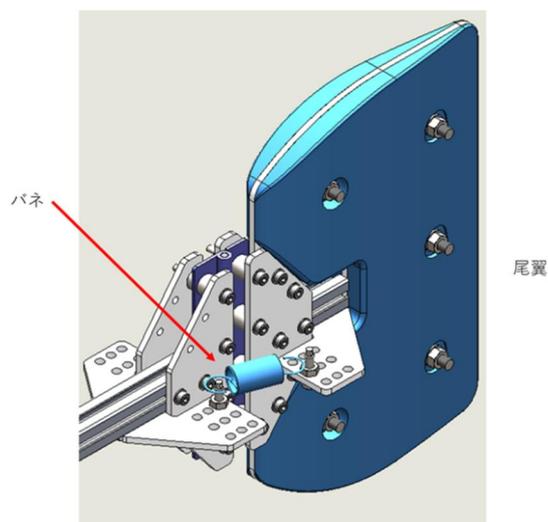


図 3 5 尾鰭の構成

バネと尾鰭が交換可能となっており、組み合わせ変更することで振る舞いの調整が可能



図 3 6 4 通りの尾鰭

- (A) 基準となる形状。断面形状を NACA0015 としている。素材は PLA。
 (B) 断面形状と長さを A と同等とし、面積が半分となるように細めた形状。素材は PLA。
 (C) ゴム素材で A に近い面積。板状であり断面形状は単純な矩形。
 (D) 軟質樹脂で A に近い面積。板状であり断面形状は単純な矩形。

3.3.2 評価調査方法

実際に泳がせることで遊泳速度を評価した。遊泳の様子を録画して体長分の遊泳にかかる時間を用いて平均速度を算出する。なお、体長は 1.0[m] である。

変動させる要素として以下 3 点がある。

- 1) 尾鰭形状
- 2) バネ個数
- 3) 周波数 (1 秒間に尾鰭を振る回数)

これら要素を変動させ、より遊泳速度が速い組み合わせを探った。

3.3.3 収集データ

表 3 バネと尾鰭と周波数の組み合わせと遊泳速度

実験番号	尾鰭形状	バネ	周波数	遊泳速度	
		個	Hz	sec/m	m/min
1	A	2	0.4	18	3.3
2	A	4	0.4	20	3.0
3	B	2	0.5	22	2.7
4	B	2	0.7	23	2.6
5	B	4	0.5	22	2.7
6	C	4	0.5	28	2.1
7	D	4	0.5	18	3.3

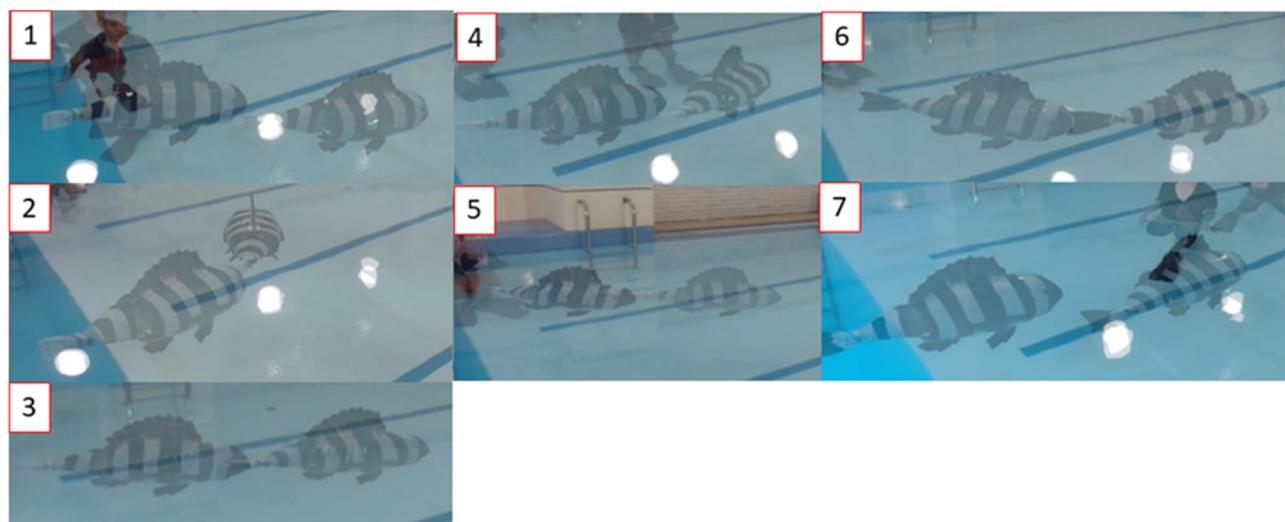


図 37 体長分を泳ぐのにかかる時間の測定の様子

3.3.3 解析及び評価

実験番号 1 および 7 において最も速い遊泳速度 3.3[m/min]を得られた。

3.4 静音型ヒレ推進魚ロボットの研究開発

3.4.1 開発物概要

構成は図38 のようになる。



図 38 構成概略

電源は、バッテリーと、EHDポンプ駆動のための昇圧器と、マイコン駆動のための降圧器からなる。この時、EHDポンプは電力を液圧に変換する役割を果たす。

バッテリーは24V, 10000mAh, Ni-MHの物を使用した。6時間駆動を想定している。

昇圧器は24V入力を0kV~15kV出力出来るものを使用した。昇圧原理はスイッチングであり仕様上は約50kHz~80kHzの発振が存在する。また、駆動量が限界に達し、EHDポンプに流量が発生せず液体が高圧状態になった時、15kHz付近の音が発生することがあった。

マイコンは、昇圧電源及び図39に示すソレノイドバルブを制御しており、それによって泳ぎの振る舞いを制御する。また、ヒレ推進魚ロボットが水面に出たときに無線通信することで、泳ぎの振る舞いを変更する。

ソレノイドバルブは、電気信号によって流路を開閉することができ、いわば蛇口の役割を果たす。構成上の役割としては、泳ぎの振る舞いを任意に変更するために用いられる。ソレノイドを用いたバルブであり、駆動時には機械的な接触が生じるので音が発生する。

図40に示すシリンダーは、液圧を力に変換する役割を果たす。シリンダー内を駆動するロッドが機械的に接触することで音が発生する。



図 39 使用しているソレノイドバルブ VX252AA



図 40 使用しているシリンダー CJ2D10-30Z

シリンダーのロッドエンドと尾鰭を繋ぐ尾柄があり、そこへ外装を取り付ける構造となっている。外装は大きく分けて頭側と尾鰭側の2構成となっており、頭側の外装は、機構フレームにネジによる締結が施されており、遊泳動作を行ってもズレが発生することは無い。一方で、尾鰭側の外装はネジによる締結などを行っておらず、遊泳動作をすると長手方向へ動く。これは外装がFRP製の硬質材であることに由来している。また遊泳動作のたびに外装同士が接触するため、音が発生する。

3.4.2 評価調査方法

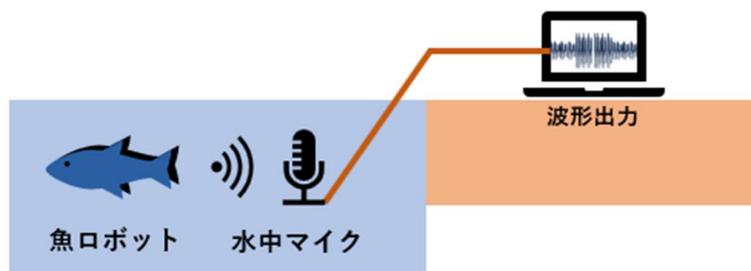


図 4 1 水中での駆動音測定のご概念図



図 4 2 実際に使った水中マイク

ヒレ推進魚ロボット本体を人間が水中で保持しながら、推進時と同様の尾鰭の揺動運動を行う。その際に尾鰭側で筐体から 1.0[m]離れた位置にマイクを固定して、常に一定の距離を保持しながら水中音を測定する。ただし水中ドローンに関しては、遠距離かつ距離可変での測定となる。測定データは以下の通りである。

大阪市ダイビングショップマリンのプールで行った試験での測定データ

- (A) 環境音 (青)
- (B) モーター (緑)
- (C) EHD (赤)

艦艇装備研究所岩国海洋環境評価サテライト(以下、IMETS)の音響計測水槽で行った試験での測定データ

- (D) 環境音 (青)
- (E) 水中ドローンのモーター、ファンなど (緑)
- (F) EHD (赤)

なお、サンプリング周波数は大阪で取得したデータは 48,160Hz であり、艦艇装備研究所岩国海洋環境評価サテライトで取得したデータは 81,920Hz である。また、それぞれ用いたマイクは異なる。

IMETS の音響計測水槽で行った試験では水中マイクを 2 種類用意し、それぞれ 2 パターンの結果が得られた。それぞれ低周波寄りの音を拾いやすいマイクと、高周波寄りの音を拾いやすいマ

イクとに分かれている。

サンプリング周波数がどのデータも 2^N から離れた値を取っているので離散型フーリエ変換 DFT にて周波数帯への変換を行う。その後、絶対値を適用することで振幅スペクトルを得ている。グラフにおいて、見やすさのために周波数を示す横軸は対数表記としている。

また、今回は IMETS にて 6 機のプロペラを搭載した水中ドローンを借用できたため、ヒレ推進魚ロボットとの比較のために使用した。借用した水中ドローンのイメージ画像を図 4 3 に、カタログスペックを表 4 に示す。



図 4 3 水中ドローン MOGOOL イメージ画像

表 4 水中ドローン MOGOOL カタログスペック

仕様	サイズ	425x330x220 [mm]	モニターシステム	解像度	1920 x 1080	
	重量	3.8 [kg]		カメラ	焦点距離	2.8[mm]
	ケーブル長	100 [m]		最低照度	カラー 0.01[lux] @ F1.2	
動力性能	最大深度	100 [m]	動作範囲	垂直 ±90°		
	最大速度 (停止水中)	1.8 [kn]	照明 (高輝度 LED)	4 (前方:2、下方:2) [個]		
	前後	2[機]		800[lm/個]		
	垂直	3[機]	センサー精度	針路	±2 v	
	プロペラ (計:6機)	左右		1[機]	姿勢・ロール・ピッチ	±2[°]
	推進力	0.7[kgf/機]	外部温度	±0.8[°C]	本体内部搭載センサー	温度、圧力、湿度、浸水監視
前進推進力	1.4[kgf]	Ctrl ボックス	制御方式	プロ用ディスプレイ付き		
		操作インターフェース	解像度	1080 [P]		
			コントローラー	プロ用コントローラ		

3.4.3 収集データ

3.4.3.1 大阪市ダイビングショップマリンのプールでの測定データ

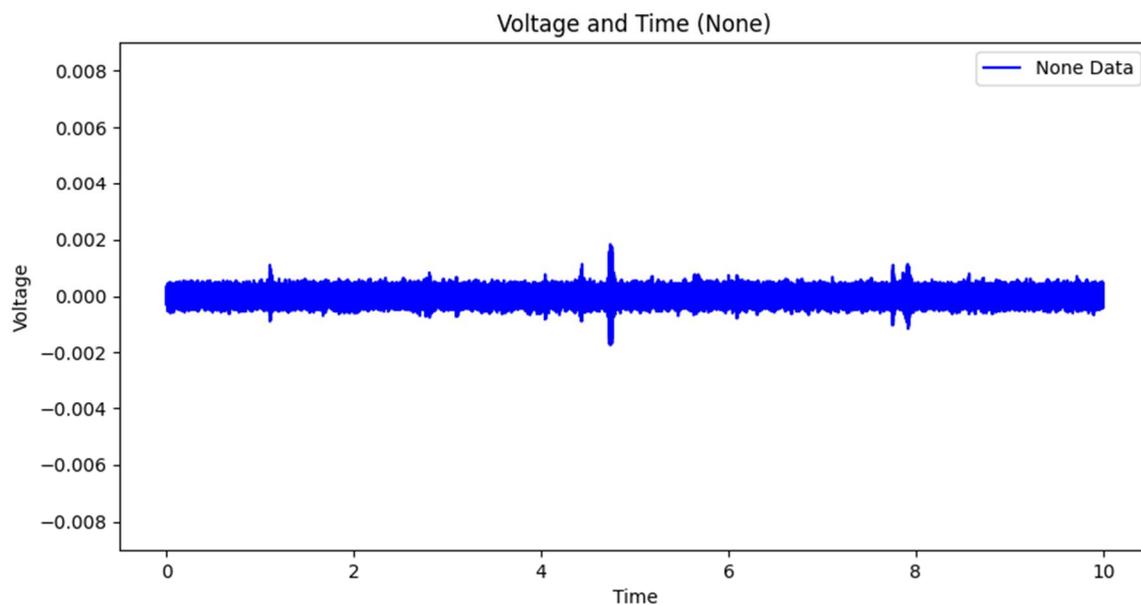


図 4 4 背景雑音 (時間)

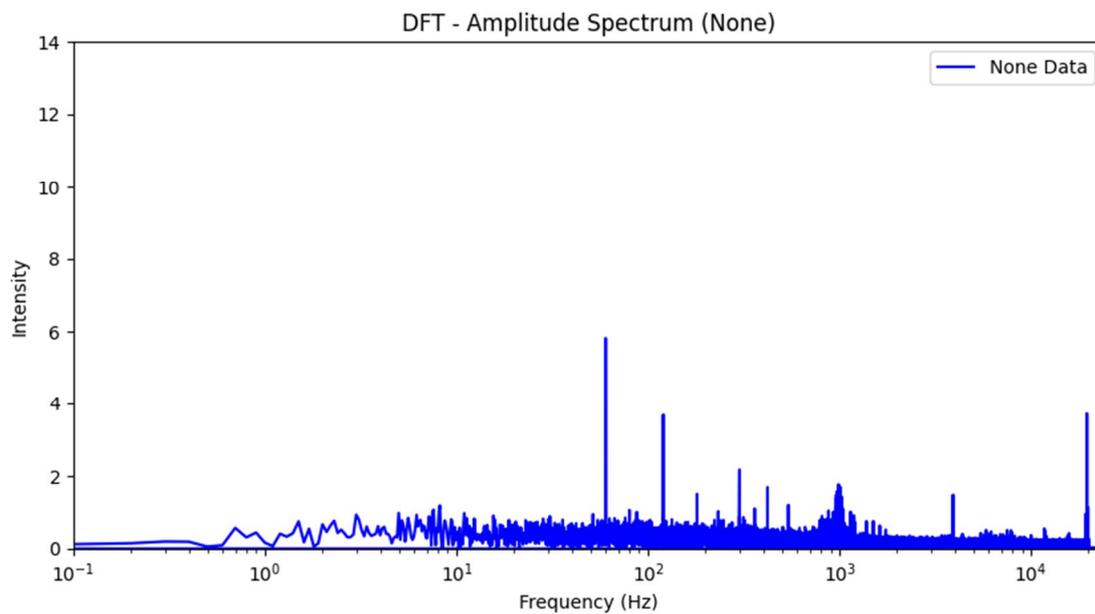


図 4 5 背景雑音 (周波数)

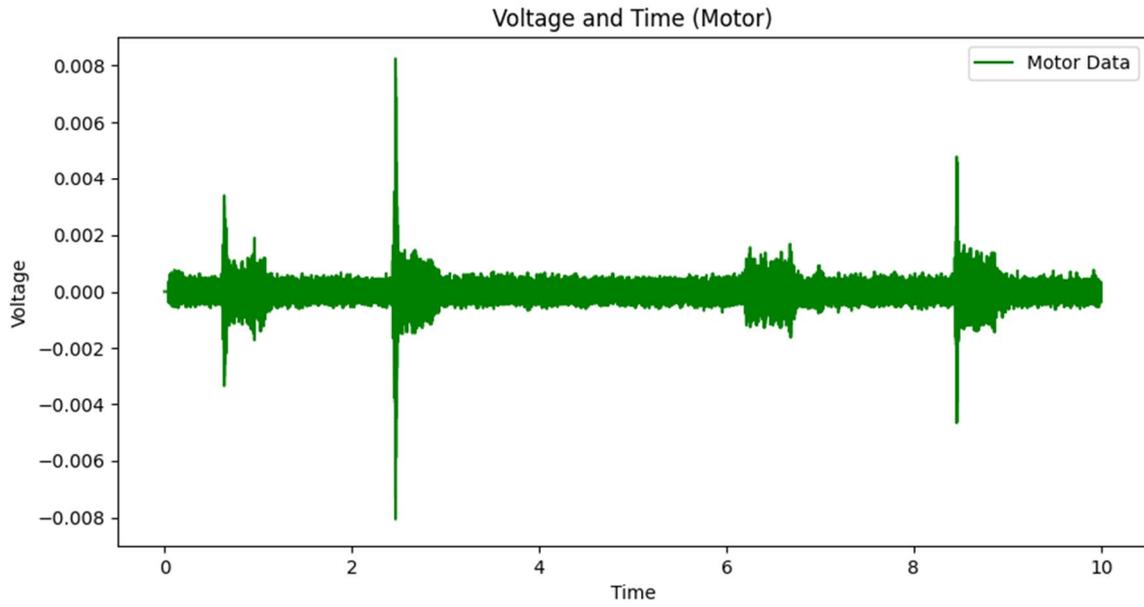


図 4 6 推進機構（モータ）の発する音（時間）

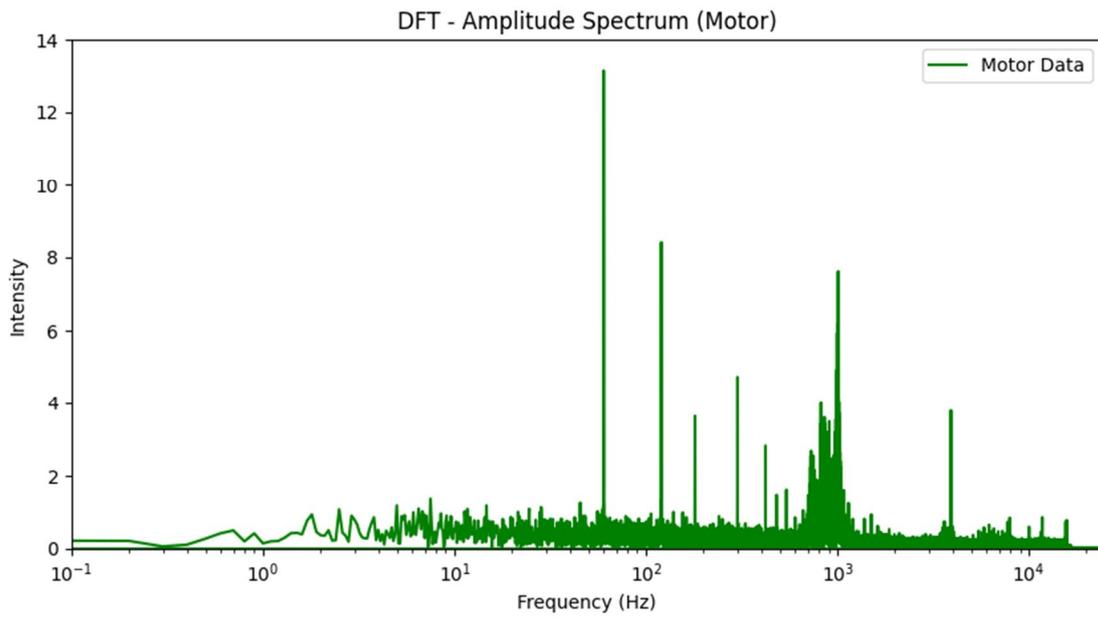


図 4 7 推進機構（モータ）の発する音（周波数）

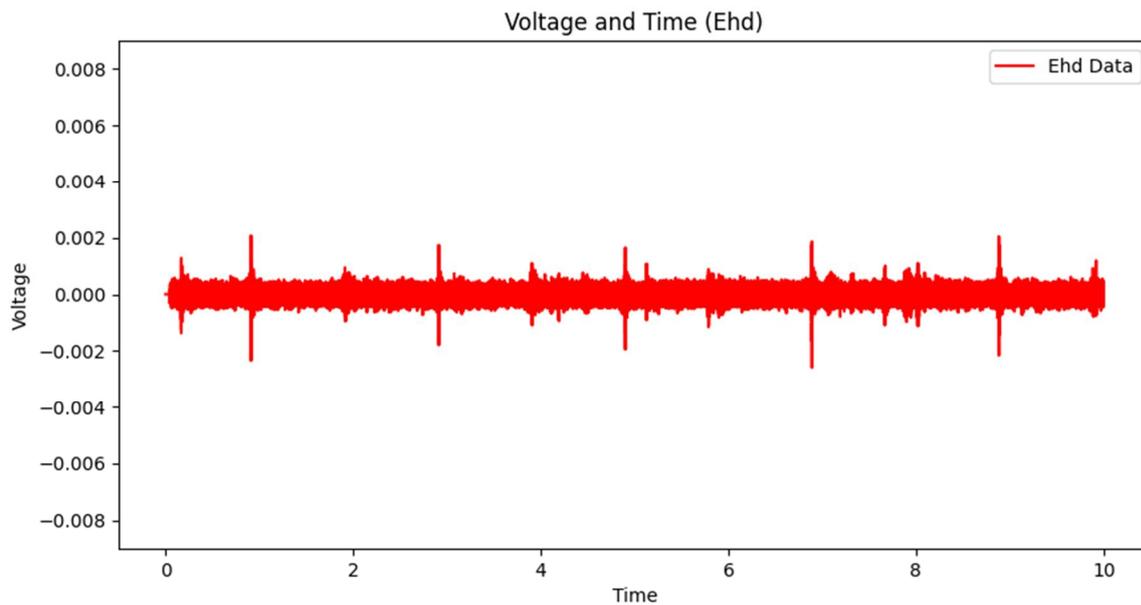


図 4 8 推進機構 (EHD) の発する音 (時間)

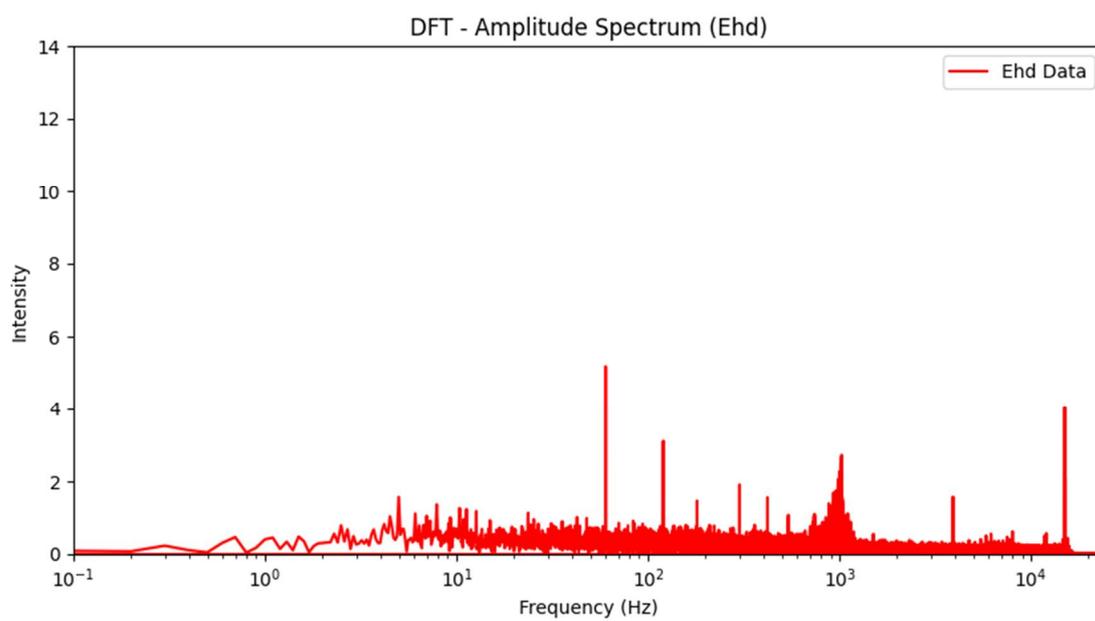


図 4 9 推進機構 (EHD) の発する音 (周波数)

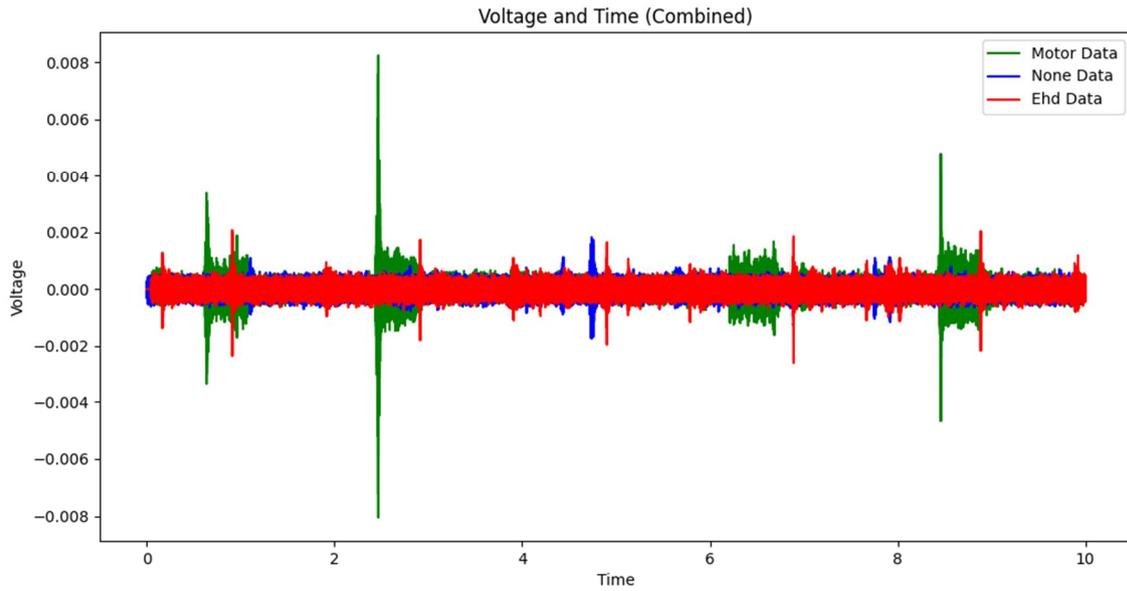


図 5 0 大阪市ダイビングショップマリンのプールでの測定データまとめ (時間)

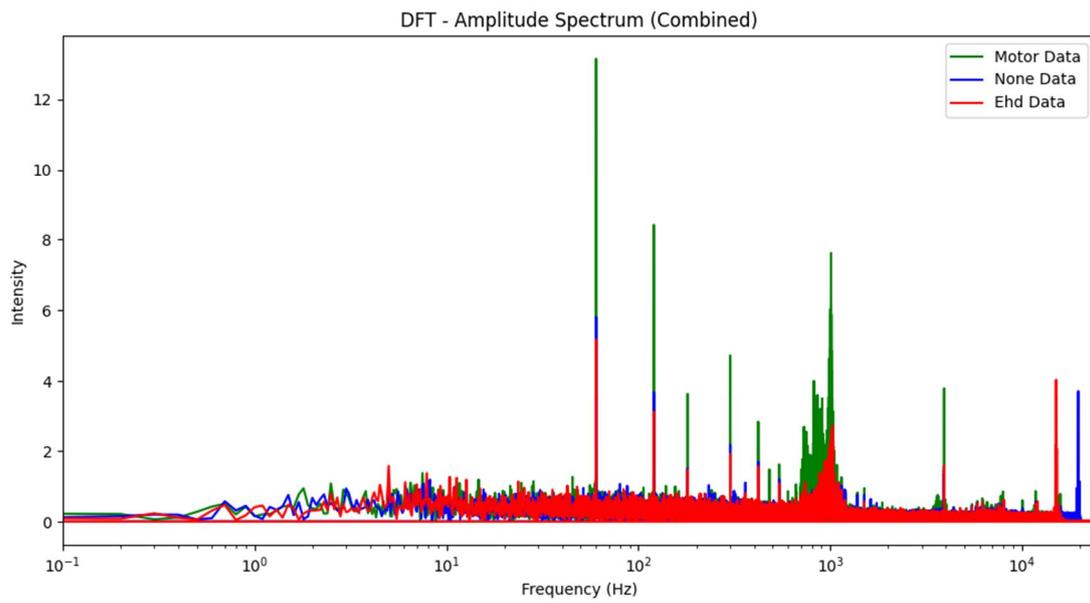


図 5 1 大阪市ダイビングショップマリンのプールでの測定データまとめ (周波数)

3.4.3.2 IMETS の音響計測水槽での測定データ（低周波マイクを使用）

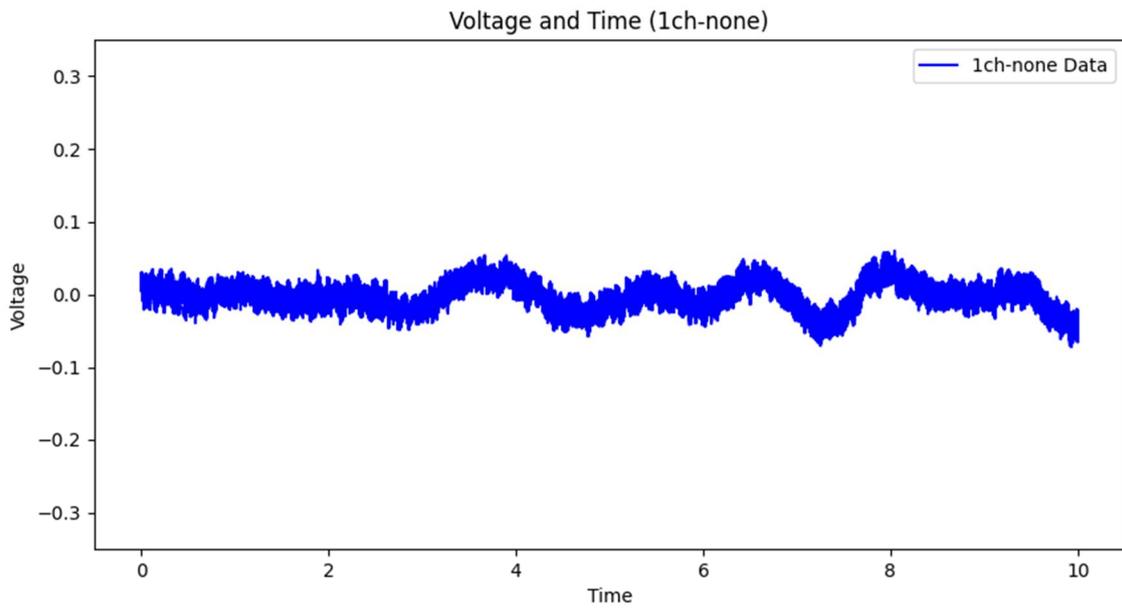


図 5 2 背景雑音（時間）

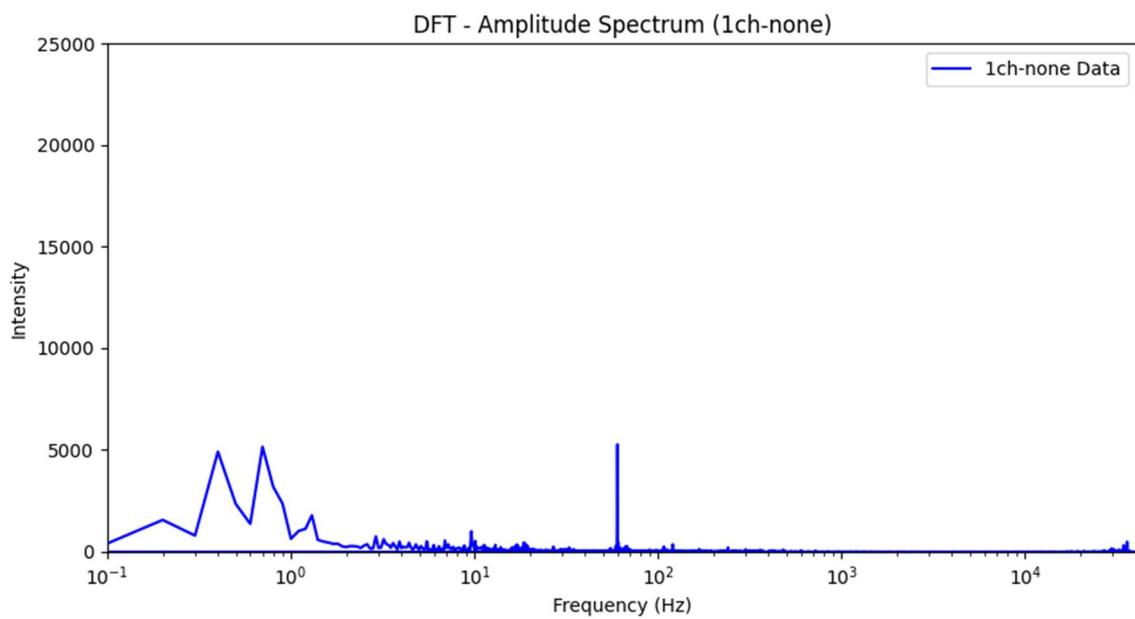


図 5 3 背景雑音（周波数）

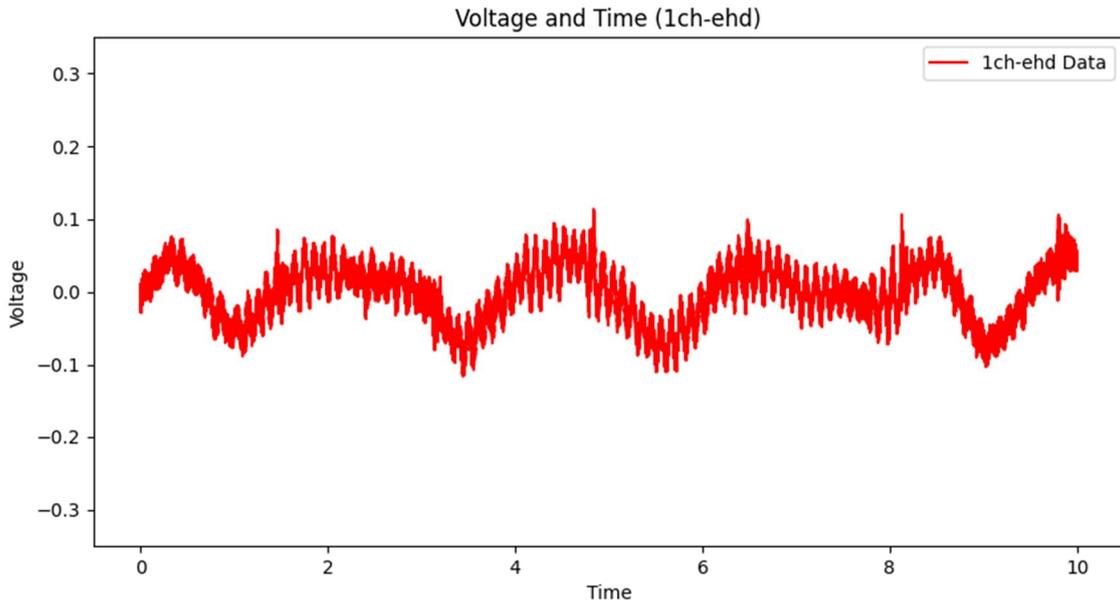


図 5 4 推進機構 (EHD) の発する音 (時間)

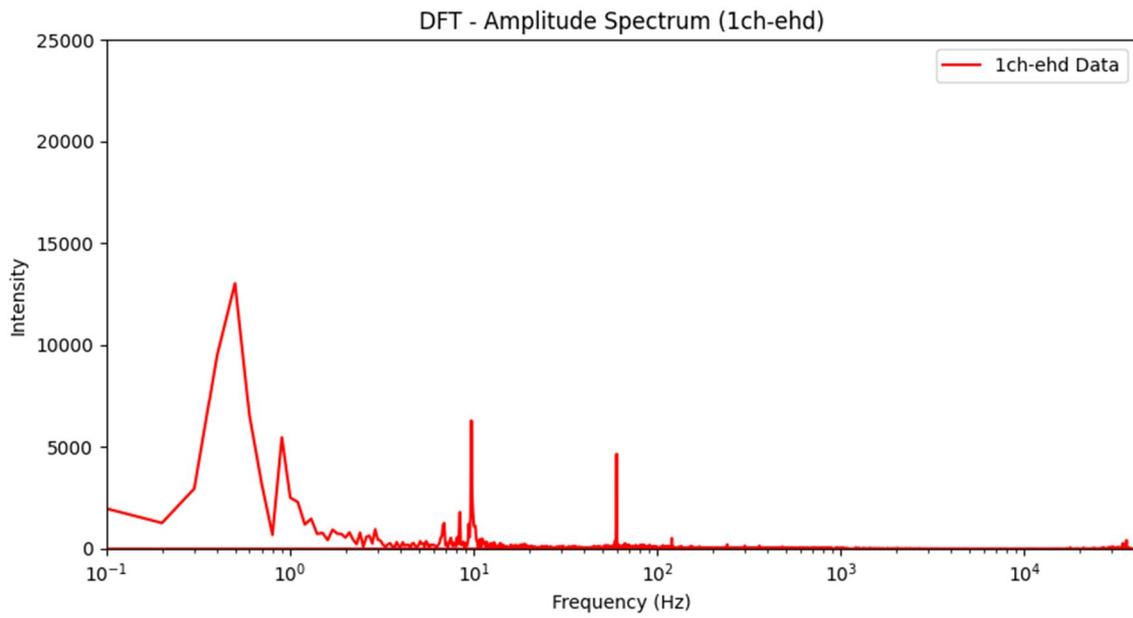


図 5 5 推進機構 (EHD) の発する音 (周波数)

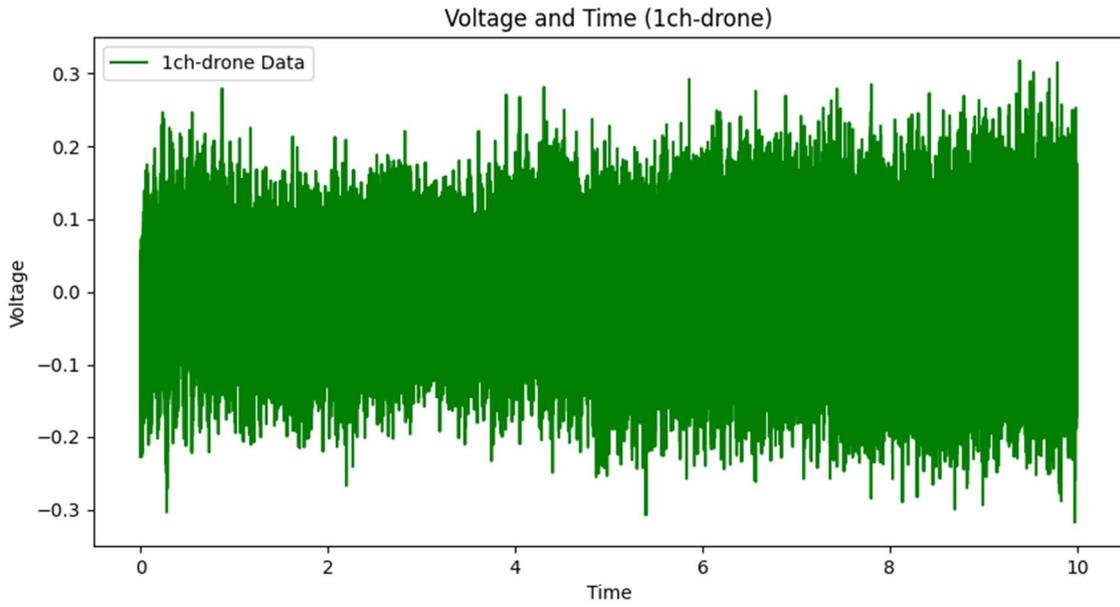


図 5 6 水中ドローン（モータ）の発する音（時間）

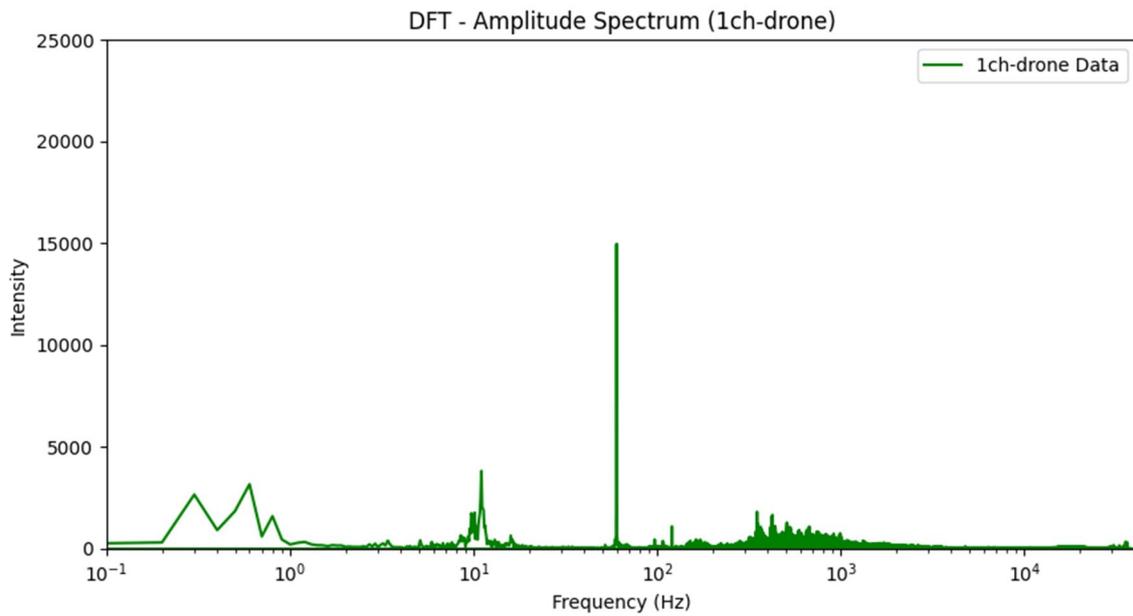


図 5 7 水中ドローン（モータ）の発する音（周波数）

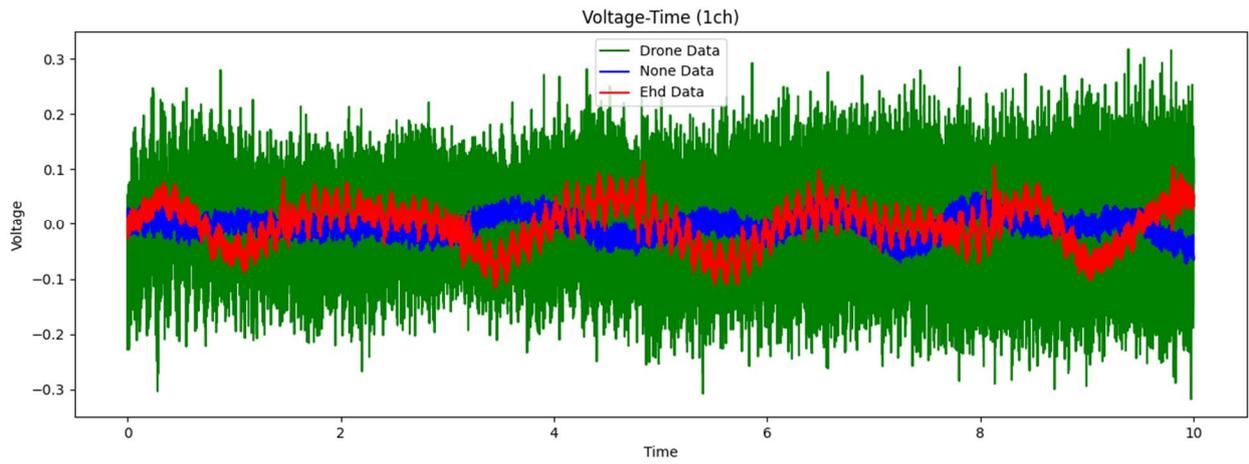


図 5 8 IMETS の音響計測水槽（低周波）での測定データ
まとめ（時間）

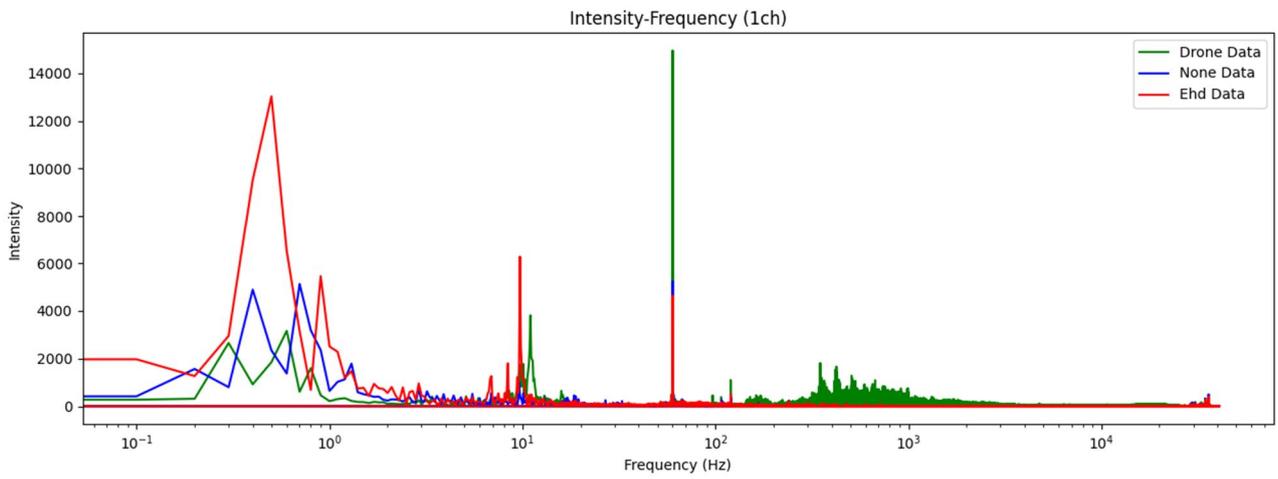


図 5 9 IMETS の音響計測水槽（低周波）での測定データ
まとめ（周波数）

3.4.3.3 IMETS の音響計測水槽での測定データ（高周波マイクを使用）

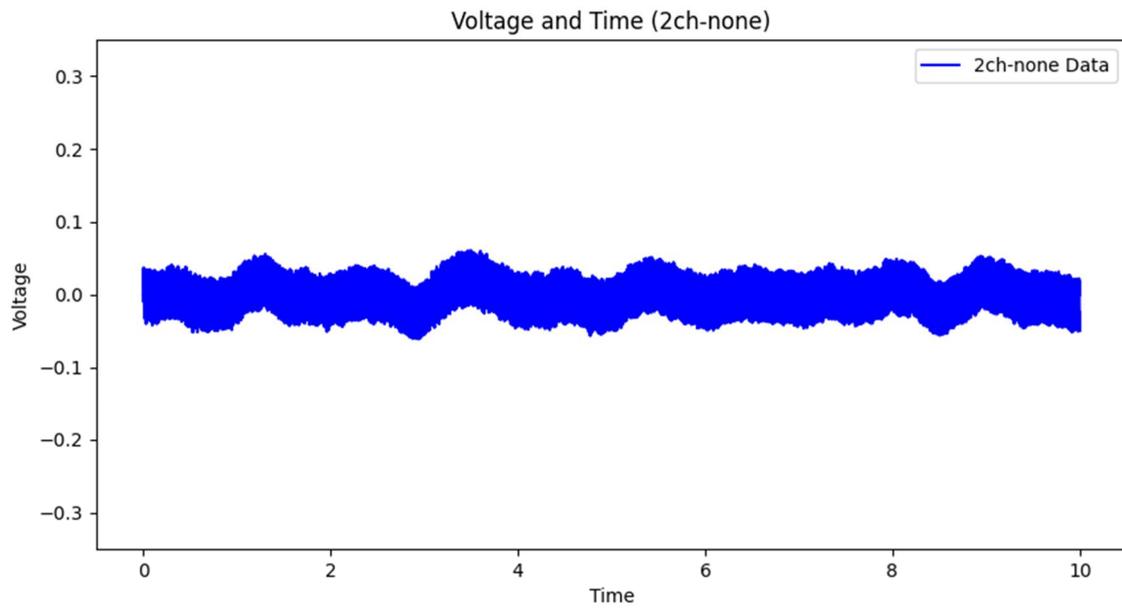


図 6 0 背景雑音（時間）

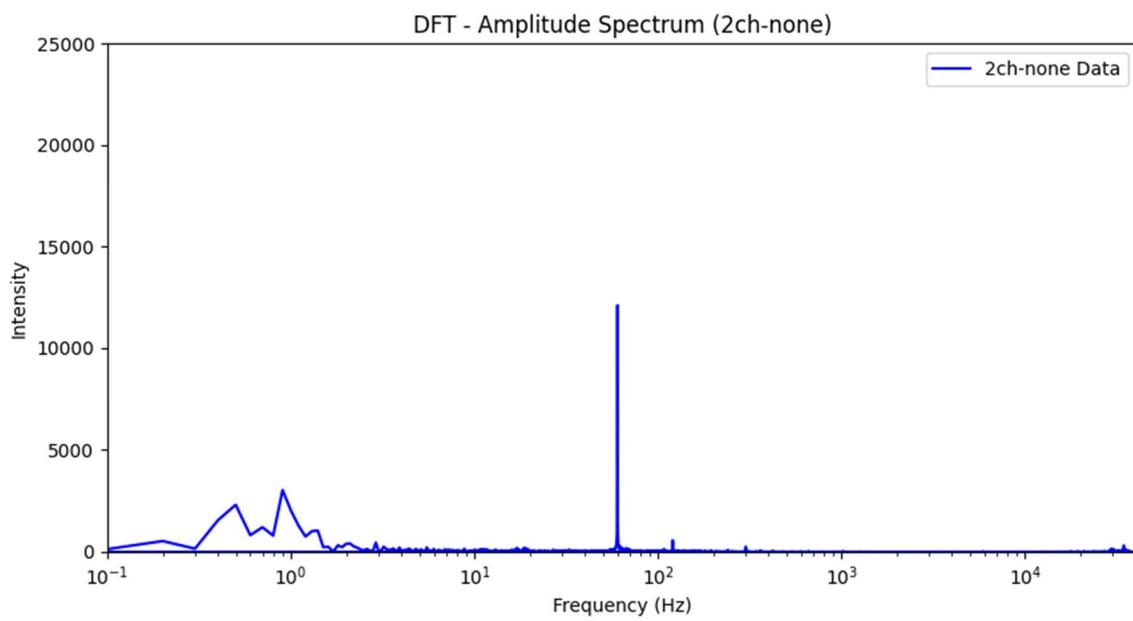


図 6 1 背景雑音（周波数）

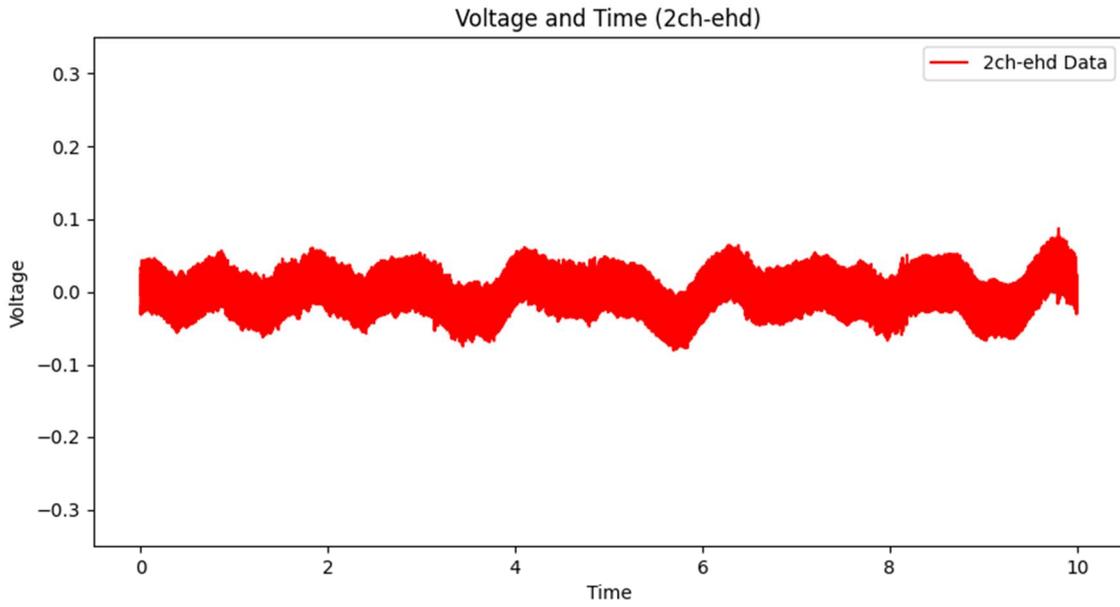


図 6 2 推進機構 (EHD) の発する音 (時間)

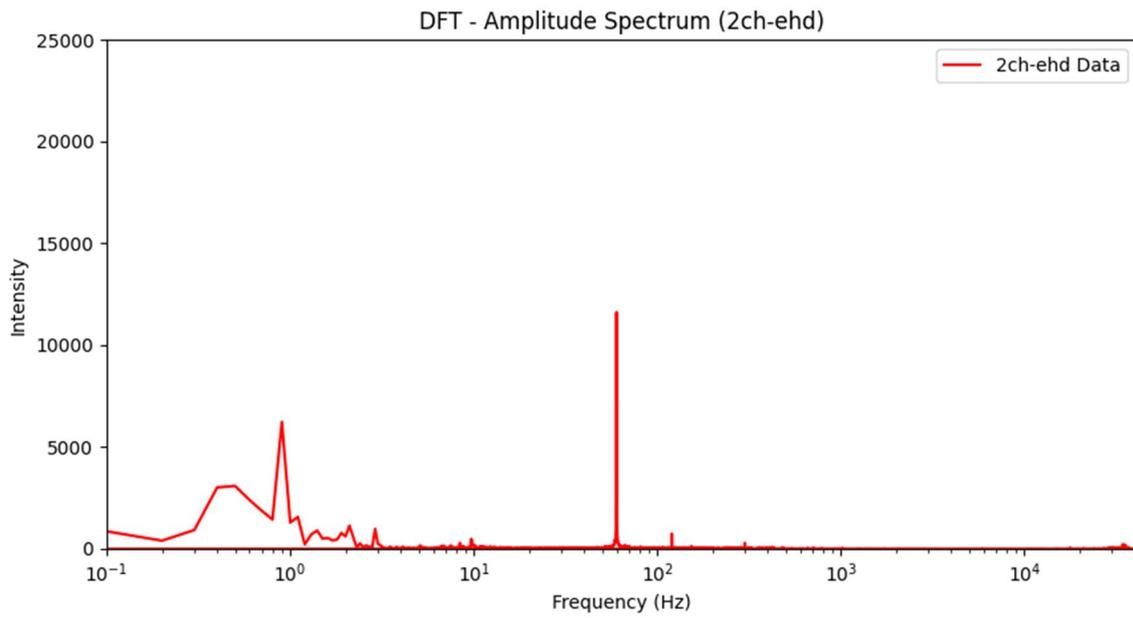


図 6 3 推進機構 (EHD) の発する音 (周波数)

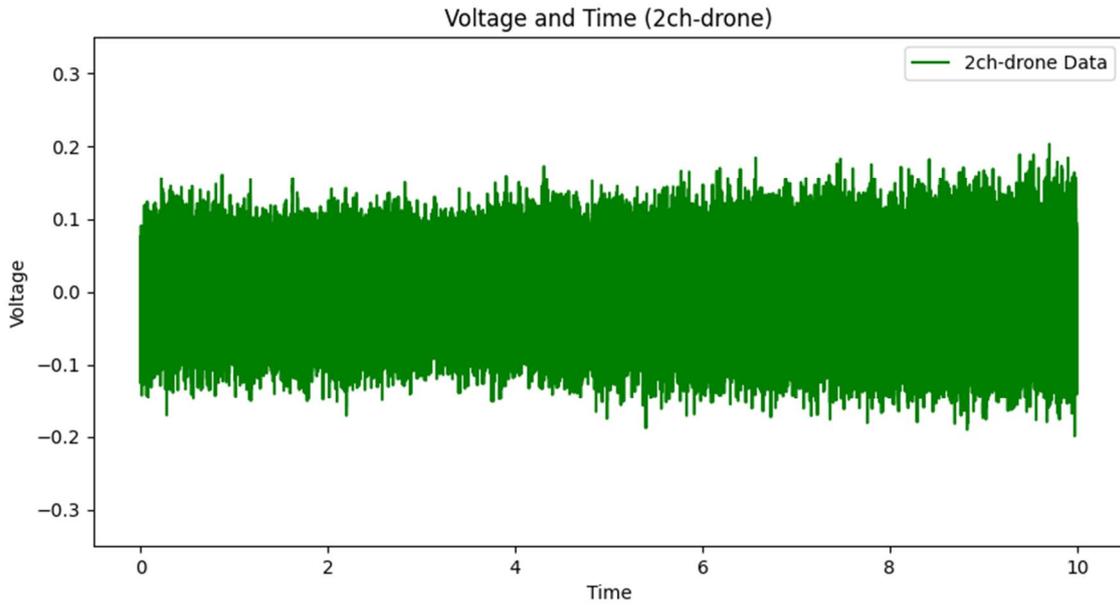


図 6 4 水中ドローン（モータ）の発する音（時間）

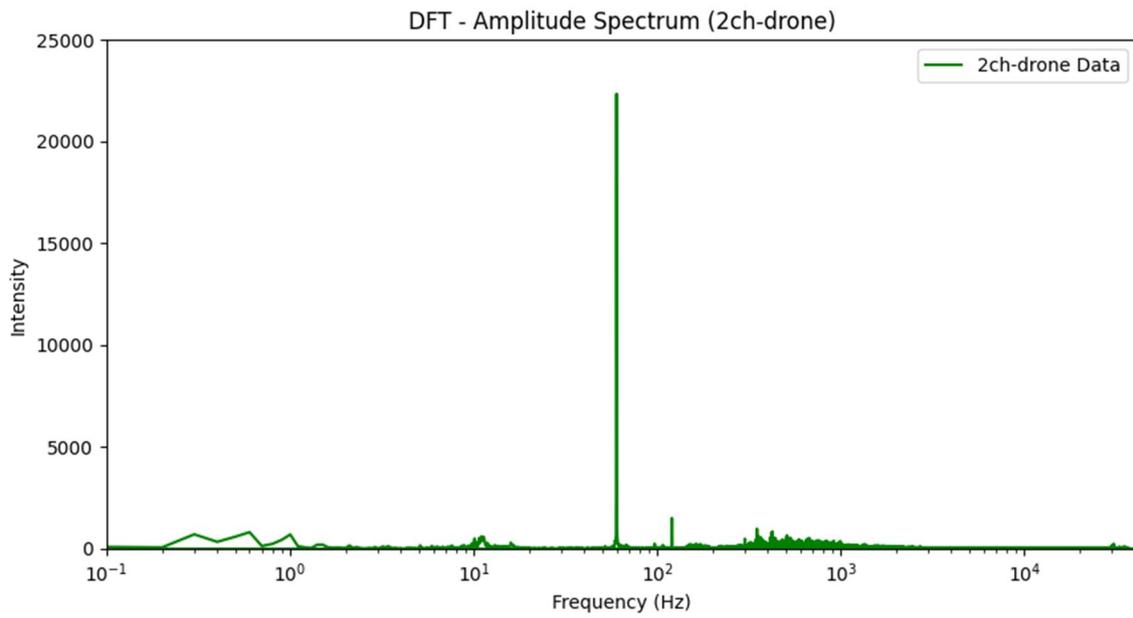


図 6 5 水中ドローン（モータ）の発する音（周波数）

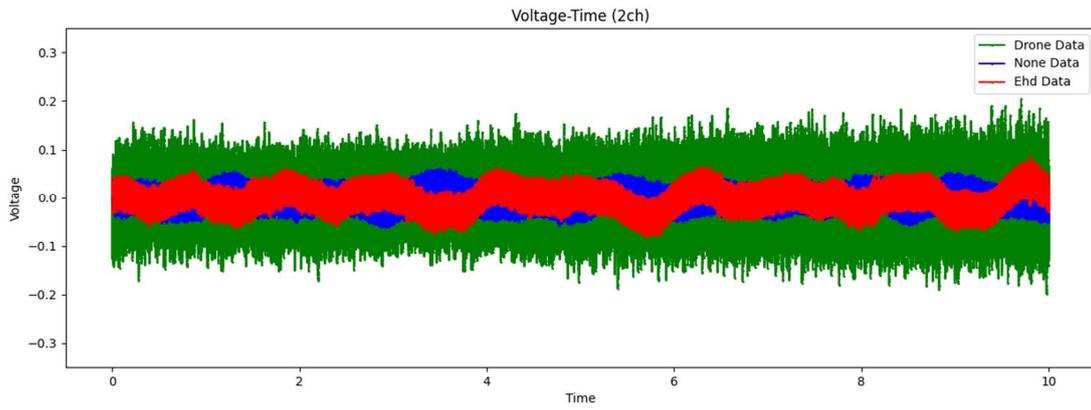


図 6 6 IMETS の音響計測水槽（高周波）での測定データ
まとめ（時間）

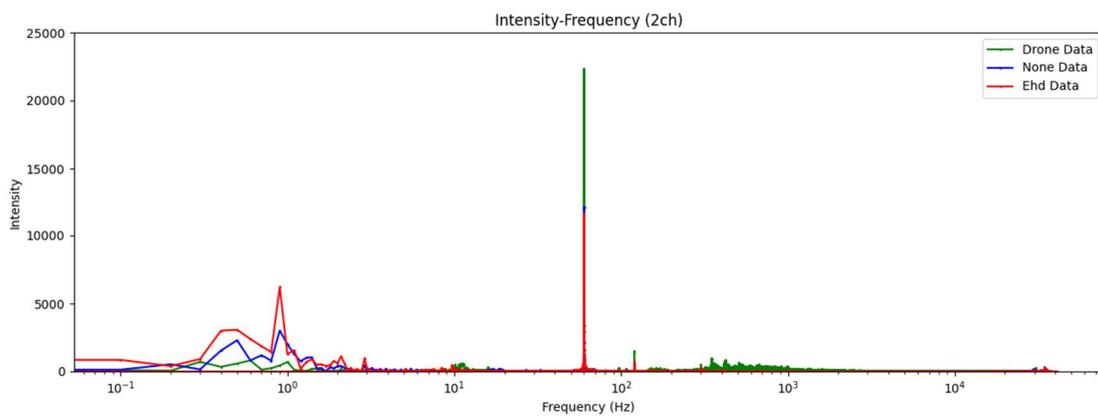


図 6 7 IMETS の音響計測水槽（高周波）での測定データ
まとめ（周波数）

3.5 解析及び評価

図 5 0 大阪市ダイビングショップマリンのプールでの測定データまとめ（時間）

図 5 1 大阪市ダイビングショップマリンのプールでの測定データまとめ（周波数）

以上 2 つのグラフを見ると、モーター式よりも EHD 式の方が、駆動音が小さく短い事が分かる。周波数特性を見ても、EHD のグラフと環境音のグラフは同程度である一方で、モーターは 10^3Hz 近くで様々な音を発している。

図 5 8 IMETS の音響計測水槽（低周波）での測定データまとめ（時間）

図 5 9 IMETS の音響計測水槽（低周波）での測定データまとめ（周波数）

図 6 6 IMETS の音響計測水槽（高周波）での測定データまとめ（時間）

図 6 7 IMETS の音響計測水槽（高周波）での測定データまとめ（周波数）

以上 4 つのグラフを見ると、低周波の領域 10^0Hz 近くで EHD の駆動による音が発生している。これは 0.3Hz で尾を振ることに起因する機械的な音が多く含まれると類推する。一方で、ドローンは 10^3Hz 近くで様々な音を発しているが、EHD は高周波帯での音はあまり発していない。

これらの結果から、EHD を用いた推進機構は静粛性に優れている。

4. 委託業務全体の成果

- 4.1. 計画時に想定していなかった成果（副次的成果）や、目標を超える成果
魚の泳ぎ方、とりわけ直進と旋回に関しては1自由度のみで達成できた。



図68 尾びれのみで遊泳している様子

推進、旋回に首を振る自由度は不要で、尾ビレの振り幅と振りの中心の位置で制御可能である。ただし、小回りなど旋回などの機能を検証する際に、必要になる可能性がある。

ヒレ推進魚ロボットを検討する際に、駆動自由度が少ない事は、コストや、耐久性にとって良い事となるので、本結果は別途記しておく。ただし、同じ機能を持つ複数自由度があるのかという観点もあり得るので、どちらが唯一の正解というわけではない。

4.2. 研究課題の発展性（間接的成果を含む）

ヒレ推進魚ロボットの形状についても今回のプロジェクト規模と過去の経験の関係から魚形状の決め打ちで行ったが、他の生き物の形状や動作をトレースすることや、自然界に存在しないが最適な形状や動作がある可能性が十分に残っている。

4.3. 研究成果の発表・発信に関する活動

知的財産の関係上、発表や発信はしていない。但し、岩国海洋環境試験評価サテライト（IMETS[※]）にて、本事業のテストをさせていただいた際に、防衛関係者に説明デモンストレーションを行う機会を設けさせていただいた。

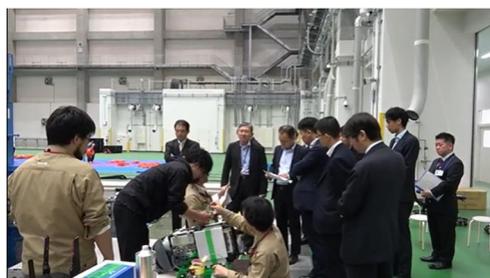


図69 見学学会の様子

一方で、ここまでの研究成果を秘密保護とするために関連資料に対して、公証人役場で確定日付印をいただいている。

5. プロジェクトの総合的推進

5.1. 研究実施体制とマネジメント

一般的な工夫は随時行っていたが、特筆するほど新規的なことは行っていない。

5.2. 経費の効率的執行

開発の細分項目の可否を明確に分けて無駄を減らしたが、特筆するほどのことは行っていない。

6. まとめ、今後の予定

本研究によって、ヒレ推進魚ロボットとして必要な機能は、EHD現象を用いた静音アクチュエータで駆動させることが出来るということが実証でき、その静音性も従来のモーター利用のアクチュエータと比較して大幅に静粛性が高いということも実証できた。

ヒレ推進魚ロボットに関しても駆動機構を油圧、空圧等流体系アクチュエータを参考にしながら今後、もっと効率の良い形状を追求する。

7. 研究発表、知的財産権等の状況

(1) 研究発表等の状況

種別	件数
学術論文	該当なし
学会発表	該当なし
展示・講演	該当なし
雑誌・図書	該当なし
プレス	該当なし
その他	該当なし

(2) 知的財産権等の状況

該当なし

(3) その他特記事項

該当なし

社内での開発会議は議題事項が発生次第随時行っていた。
立会い実証実験やサイトビジットは該当しないものとしている。