

水中蛇型ロボットに脚をつけたら蛇足か？ ～古代の化石から生物を再現して実証する～

1. 要旨

海に囲まれた日本では、海洋研究は重要であり未知の事柄が多い。そのような様々な状況で活躍する水中探査ロボットは、人の立ち入ることが困難な環境での調査をする上で不可欠である。私達は、テトラポドフィスという 1 億 1 千万年前から 1 億 2 千万年前に生息していたと考えられている四肢のある蛇型生物の古代生物が存在したということを知り、従来の中蛇型ロボットに脚をつけることにより機能性を向上させることが可能になるのではないかという仮説を立てた。実験は、テトラポドフィスの化石を基に蛇型ロボットを製作し、脚の役割について検証を行った。その結果、水中蛇型ロボットに手脚をつけることによって機能性を上げることが可能であった事から、水中蛇型ロボットに脚をつけても蛇足とは限らないことがわかった。この研究は、テトラポドフィスが生息していたと思われる様なきびしい環境下でも手脚を活用してスムーズに動き回ることができる水中蛇型ロボットの開発が目的である。さらに、この研究は、環境の変化により絶滅に瀕している水中の生物の研究にも貢献すると考える。

キーワード：水中ロボット、蛇型ロボット、化石、テトラポドフィス、海中探査、絶滅危惧種

2. 研究のきっかけと目的

私達は水中ロボットコンベンション 2019 のジュニア部門に出場した際に、チーム「KUROSHIO」(www.jamstec.go.jp/team-kuroshio/index.html) の関係者の方の講演において海底資源開発の必要性と海底調査の難しさを知り、さらに AFK 研究所の近藤氏より紹介された、古代生物の復元図が正しいのかを検証し、その結果を新たな biomimetics のツールとして活用する「ロボ化石」(図 1) に興味を持ち、そのマニュアルをもとにロボ化石を作成した。例えば水中を泳ぐ古代生物をロボットで復元しても、本当の形と異なれば、うまく遊泳することはできない。しかし、理にかなった動きをするロボットとなれば、それが真の姿だと突き止めることができる「ロボ化石」(図 2) という水中ロボットの新たな分野の可能性に触れた。この研究に出会ったことで、biomimetics が重要性を帯びてきた現代で、過去から学ぶこの方法は可能性に溢れていると感じ、化石の形状をもとにした蛇型ロボットを製作し水中探査ロボットの新たな形に挑戦したいと考えた。また、蛇の生態を元に製作された東京工業大学の広瀬茂男名誉教授の水陸両用蛇型ロボット ACM-R5 (2006) (図 3) は、9 対の車輪モジュールと頭部モジュールを組み合わせて作られており全長 1.75m、頭部と尾部にカメラが搭載されたこのロボットは、水中蛇型ロボットの代表ともいえる。機体は、水陸両用で瓦礫の中に入って行くことも可能な設計で、福島第一原子力発電所内部の探査で大いに活躍している。

近年、外来種問題はさらに深刻化してきており、多くの地域で生物多様性を脅かし始めている。そもそも外来種問題とは、元々その地域に生息していた動植物が外来種の餌になり、動植物の生息環境を在来種から奪うことでその土地の生態系を崩してしまうことである。ここ数年で 発見された外来種は 2000 種を超える。このための調査には人間が実際に川に入り、網や虫眼鏡などを使い、目視で調査を行うことが多い。これは、調査が行える季節や調査チームの人手等の点に課題が残る。これらの課題に取り組むために私達は、主に2つの目的を持って研究を行った。第一に古代生物テトラポドフィスの化石を基にしたロボットを製作し、どのような生物だったのかを確認すること。第二に、この化石ロボットの動きを基に水中蛇型ロボットの新たな形状や動きを発見し、さらに水中探査ロボットの新たな形状を提案する事で、外来種問題で影響を受けている水中生物の探査などに貢献することである。

3. 研究方法

「ロボ化石」の手法と「水中蛇型ロボット」の動きを参考に蛇型ロボットを設計・製作し、ロボ化石としてテトラポドフィスを復活させ、様々な比較実験を行う。

私達は、水中生活をしていた古代生物のシンプルな動きは、水中で最も効率の良い動きをしていたと考えている。そのため、古代に生息されていたとされるこのテトラポドフィスをロボット化させた水中蛇型生物を製作することで、従来のものとは異なる特徴を持つ水中蛇型ロボットの開発をすることとした(図4)。この研究における水中蛇型ロボットの参考化石であるテトラポドフィスは、地上で生活していた脚のある爬虫類が、水中生活をするようになった過程の化石であるという説がある。私達は、テトラポドフィスが水辺や岸に近い場所を移動していた生き物であると予想した。私達が製作するロボットの性能をこの様な生き物に近づけることで、水底の泥の巻き上げ問題や生き物を機械的な物で驚かさずに調査することが可能になり、さらには生物の外来種問題等を解決するための糸口になると考える。

3.1 テトラポドフィスの形態や生態に関する文献調査

文献調査から分かったことは、陸上での生活において、脚の短さから移動に使っていたとは考えられず、獲物や交尾相手をつかまえるために使われていたという説(図5)や、水中でも生活していたという説がある。また脚の役割については、テトラポドフィスの手足は著しく短く、パドルのような形で泳いだり舵を取ったりするのに適しているという説もある。化石の全長は20cm、小さいため子供であると考えられている(図6)。手足は約1.5cmと非常に小さく、また前脚は後ろ脚に比べて短い。後ろ脚が大き

いということは、後ろ脚のほうがよく使われていたと考えられる。また、四肢の骨格には指のようなものがあるが、現生の動物でもそうであるように、掌と同じかそれ以上の大きさの水掻きのようなものがついていた可能性があると考えられる。

3.2 生きている生物のホライモリの動きを調査

テトラポドフィスは化石なのでどのような動きをしていたか不明であるため、生きている生物のホライモリの動きを調査した。ホライモリ（図7）はヨーロッパの山脈の特定の洞窟に生息している。全長は20～30cmで、手脚は約2cmである。手脚の使い方は、主に水中で這って移動する時に体を支えるために使っている。泳ぐときは、主に胴体の3点を左右に動かし泳いでいることがわかった。私達は、これは蛇の波状運動と推定した。

3.3 ロボット製作について

製作したロボットは、メカのような動きではなく、生物らしい動きを再現するためにしなやかな素材を使用した。素材は、プラ板やクリアファイルのプラスチック素材である。このような素材を使うことで、機体の比重を生物に近づけることができ、水の流れにそった動きが実現可能となる。

3.3.1 ラジコン型水中蛇型ロボットの製作

最初に、脚なし水中ロボットで前進するロボットを製作した。最初に設計した1号機は、浮くこともできず移動すらできないものだった。2号機は、波動運動でなんとか前進するようになった。水中でのバランスが重要なことがわかり、3号機には中が空洞のゴムを比重が重い防水サーボモータ部分に貼り付けることで中性浮力を取り、少し前進できるようになった。さらに、水中での安定した姿勢と全体のバランスをとるために尾を長くした。これにより安定して前進できるようになった。防水サーボモータへの信号入力はラジコン操作で行った。

3.3.2 ラジコン型水中脚付き蛇型ロボットの設計と製作

テトラポドフィスの化石の計測を基に、ラジコン型水中脚付き蛇型ロボット（4号機）の設計と製作を行った（図8）。今回使用した市販の防水サーボモータは規格での大きさが決まっているので、化石と同じサイズでの設計が困難であったが、全長と手脚や頭のサイズ比を化石と統一し設計した。またテトラポドフィスの動き方は不明な点が多いため現存の生物の動きを参考にして製作した。参考にする生物を選ぶための要素はテトラポドフィスに体と手足のサイズ比や、体の大きさ、および水の中を泳ぐことが可能な点で候補の中から、す

で調査を進めており、最もテトラポドフィスに近かったホライモリを選んだ。機体は全長 143cm、手脚の長さは 8 cm で、手脚は 2 個の防水サーボモータで動くようにした。コントロールはラジコンによる無線操作で作動する。使用した RC 用コントローラー（以下プロポ）は、6 チャンネルの空中操作用のものである。頭部、骨の部分は厚さが 2 mm のプラ板を使用し、サーボモータでワイヤーを引っ張り、曲がるようにした。後ろ足から後の部分の尾にはプラ板ではなくクリアファイルを使いサーボモータで動かした。この結果、脚をつけて水を掻きながら前進できるようになった。手脚の部分には、テトラポドフィスの掌と同程度の大きさのクリアファイルを蝶番で細い棒につけて再現することで、泳ぐ時に自動で畳んだり水を掻いたりできるようにした。上半身分も製作し、テトラポドフィスの化石と同じ形になり泳ぐようにはなったが移動速度があまりにも遅かったため、どこかの部位が不適切なのではないかと考えた。そこで、尾の素材をさらに柔らかいクリアファイル素材に変えることで泳ぐ速さが大きく向上した。また、体全体を上下にくねらせようとしたが、動かなかつたため、背骨にあたる一部のプラ板をゴム製のホースへと変えてみた。しかし、ホースでは中に入っている繊維により動きが制限されてしまい上下に動かすことができなかった。そこで、その繊維を切ってあばらのような形にして作り直したが、今度は柔らかくなりすぎたため水中で姿勢を保つことができなかった。そのため実験では当初の 2 mm のプラ板を使用した。動力源は電池で、密封した電池ボックスとサーボモータを動かすための基盤を入れて密封したケースは背骨につけた。水中で体勢を保てるように体には浮力材をつけてバランスを調整した。電池ボックスと基盤ケースの水密作業は防水シガレットケースとカメラの防水ケースを加工した。運動は尾の先と脚を近づける動きとした。尾の先と脚を遠ざける動きの運動は、推進力がなかった。つまり、生物の泳ぐための動きとしてはあり得ない動きだったのだと確認できた。この実験結果は、生物の形状だけではなくその動きも検証することがロボ化石の役割であることがわかった。また、前進するための一連の動作は、ラジコンで操作している。このプロポの 6 チャンネルを駆使して操作を行い最善の動きを検証した。しかしながら、推進力を得るための動きを実現しようとするプロポの操作が複雑になり 1 台のプロポを二人がかりで操作する事態となってしまったため、連動する動作をするサーボモータはプロポの同じチャンネルの操作で作動するように工夫をする必要があることが分かった。

3.3.3 制御方法について

制御に関する短期的な目標は、第一にプロポで受け取った信号を Arduino micro で処理し 1 チャンネルで複数のサーボモータを制御できるようにすること

である。この動きは、プロポの受信機の信号を Arduino micro で受け取り pulseIn 関数を用いて読み取り、胴部分の揺動運動を経過時間に依る sin 関数で制御することで実現した。第二に実験のための揺動運動の周期を制御できるようにすることである。こちらは、プロポの使っていないチャンネル 5 の ON, OFF の切り替えることとした。これにより、プロポからの信号は受け取ることができたが、安定せず、そのまま信号をサーボモータに送ると、実際の動作には影響しない程度にだがわずかに振動した。しかし、この点は今後の改良を必要とすると考える。水中では、水の密閉がうまくいかず、動作について確認できない点多々あったが、地上ではうまく動き、二つの目標が達成できている。以下に開発した四肢と揺動運動の制御プログラムを示す。

(1) 回路

図 10 において、右のピンヘッダでプロポの受信機からの信号を受け取り、左上のピンから 4 つのサーボモータへ信号を送ることとした。

(2) コード

開発したプログラムは図 11 を参照。試行錯誤を繰り返した実験中のプロポの操作を再現するものとなっている。

3.3.4 ラジコン型脚付き水中蛇型ロボットにおける各種比較実験

<測定の方法>

プールでロボットを 2m 進むのに要した時間を計測した。距離はメジャーで測ってスタート地点とゴールをあらかじめ決めておいた。計測時は、手足の有無や泳ぐ時に動かす部位の組み合わせを変えて行った。またプールの壁やロープに接触した場合のデータは無効とした。直進せずに回転して進行方向と逆に進んだ場合も無効とした。

計測のパターンは以下に示す通りである。

- A : 脚を取り付けずに波状運動で泳がせる
- B : 脚を動かさずに波状運動で泳がせる
- C : 前脚のみのパドル運動+波状運動なしで泳がせる
- D : 後脚のみをパドル運動+波状運動なしで泳がせる
- E : 前脚のみをパドル運動+波状運動で泳がせる
- F : 後脚のみをパドル運動+波状運動で泳がせる

4. 実験結果

実験の結果について、今回製作した水中蛇型ロボットの 2m の距離を泳ぐタイム

で特に速かったものに注目したところ、以下のことが分かった。

4.1 泳ぐ速度についての結果

泳ぐ速度についての結果を表1に示す。脚を取り付けずに波状運動で泳がせたところ、平均の速さで22.16秒と最も速かった(表1-A)。後脚のみをパドル運動+波状運動で泳がせた場合(表1-F)平均の速さ22.44秒とわずかな差で2番目に速いという結果となった。また、後脚のみをパドル運動+波状運動なしで泳がせた時(表1-D)は、AやFのパターンより3秒ほど遅く、平均の速さで25.14秒と3番目に速かった。

今回は、単純に“速さ”だけについて調べるのではない。テトラポドフィスという1つの“古代生物”として、「どのような動きが最も適していたと考えられるのか」「テトラポドフィスという生物にとって身体のどのパーツ(もしくはその組み合わせ)が重要な役割を果たしていたのか。」ということ調べるということが今回の研究の目的の一つでもある。

以下の3つパターンの泳ぐときの特徴についても注目した。それによって次のような事が分かった。脚を取り付けずに波状運動で泳がせたパターンAの場合、スピードは速かったが、泳ぐときに機体が左右に揺れてしまったために動きがとても不安定で、予期していない方向に泳いで行ってしまうことが多々あった。後脚のみをパドル運動+波状運動で泳がせたパターンFの場合、初速が速い上に泳ぎが比較的安定しており、Aと比べて安定して直進することができていた。後脚のみをパドル運動+波状運動なしで泳がせたパターンDの場合、機体が左右に回転してしまっており、Aと同じようにとても不安定な泳ぎをしていて、こちらも予期していない方向に泳ぐことが多かった。

4.2 テトラポドフィスの化石ロボットとしての性能評価と生態予測

これらの結果をふまえて、私達はFが現段階で最もロボ化石としてふさわしいと判断した。判断の根拠は以下の通りである。

- ① 泳ぐ速度が速いパターンであるため、他のパターンと比べて自身が天敵に襲われた際にすぐに逃げる事ができ、生存できる可能性が高まる。
- ② 初速が速いため、①のような状況で天敵との距離を離すことができる。あるいは①のような状況で逃げ遅れてしまった場合でも多少のリカバリーをすることができ、生存できる可能性が高まる。
- ③ 特に速かった3つの泳ぎの中でも泳ぎが最も安定しており、自身の身体のコントロールがしやすいため、生物として生活するのに最適であったのではないかと考えることができる。

特に、後脚は生物として泳ぐ、天敵から逃げるなどという役割に大きく貢献していたと考えることができる。そして、テトラポドフィスにとっては他の身体の部位の組み合わせのパターンと比べて、後脚と尾が泳ぐのに最も重要な部位であ

ったということが言える。

5. 考察

この実験から分かったことは前脚があると方向転換しやすく、後脚があると泳ぎ方が安定するということである。前脚は小さく推進力向上の効果は少ないが後ろ脚はあると瞬発力が増えるので、後脚は大きな効果があったと考えられる。また、尾と後脚を同時に動かすFは、動きが安定するとともに推進力が増した。このことから水中蛇型ロボットに脚をつけることは現時点では意味があったと言える。

さらに生物としての動きに近づけるため行った背骨の材質の調査では、柔らかすぎると体が重力に逆らえず、ほぼ動けなくなってしまうことが分かった。上下左右によく曲がるように改良してもプラ板を使用した硬い部分の片方だけが浮いてしまうような現象が起き、体勢が安定しなかった。また、今までと同じ構造でプラ板を2 mmから1 mmに交換してみたが、体のそれぞれのパーツがじたばた動くのみで全く前進しなかった。

テトラポドフィスは一度陸に上がった生物が再び水中に戻って活動していたと私達は考える。つまり、水中に戻りたてでは泳ぎがあまり発達しておらず、脚が有効に使われていた。そして時間が経過し、水中生活が長くなると泳ぎが発達し、体のくねらせ方などが上達したと考えられることから、脚にかかる水の抵抗が大きくなり、徐々に退化していったと考えている(図9)。私達が製作したロボットは、水中に戻った生物当初の動きに相当するぎこちない動きなので、脚が大いに活躍していると考えられ、より蛇らしくすることで脚の利点が変わってくると思う。

6. 今後の展望

水中ロボットの大きな問題点は、電気的な部分の水密作業の難しさという点と水中環境下には電波が届かないという点の2つである。このうちの水中に電波が届かないという問題を解決するためには、マイコンによる自立型の水中ロボットのさらなる研究開発が必要だと考える。第一段階として、3.3.2のプロポの操作性の課題や、今後機体の可動部分を増やし、より生物の動きに近づけるために、サーボモータの制御をマイコンで行う技術をさらに進化させる。

本研究では脚のある蛇テトラポドフィスの生態をロボットとして再現し調べた。それにより、水中蛇型ロボットに脚をつけると蛇足ではない事がわかった。また、その脚は予想通りパドルのように水を掻く時に広げ、戻す時にたたむという動きをしていたと考えられる。

7. 結論

この成果は水中探査、古生物学などの分野においても応用する事ができる。水中探査においては、過去に存在した生物を模しているため他の生物に紛れながらの探査ができ、古生物学においては他の蛇型水中生物の祖先に足があったという主張の一助となる。この成果は今後の水中探査、古生物学などの分野における進展の一步となったことを確信する。

この蛇足の有用性が確認されたことで、海底調査にも使えると考えられる。また、ヒレで泳ぐことで泥を巻き上げないため、生物に驚かれないことを利用した海洋生物の群れなどの生態観察にも利用できると考えている。また、この技術が使えるようになれば、今まで探査できなかった場所に入ることができるようになり、さらに移動のための消費エネルギーが減るなど、新たな海底資源の発見や、今までに知られていない生態を持った生物を発見できる可能性も出てくる。このように、私達はこの技術が進歩すれば、多くの新たな発見を生んでくれると考える。

8. 参考文献

<ホライモリに関するもの>

- ・ 爬虫類図鑑：ホライモリ

<http://nakayasu.com/lecture/kinetic-sculpture/3052>

<テトラポドフィスに関するもの>

- ・ 学研の図鑑 古生物. 2017

- ・ ITmediaNEWS：「4本脚のヘビ」の化石が見つかる | Itmedia Inc.

<https://www.itmedia.co.jp/news/articles/1507/24/news145.html>

Source : Science 2015年7月24日 : Vol. 349、Issue 6246、pp. 374-375

DOI : 10.1126 / science.aac5672

- ・ GIZMODO：古代のヘビには4本足があった。ただし、陸地を歩くためじゃありません | mediagene Inc.

https://www.gizmodo.jp/2016/06/post_664759.html

原文：ブラジルの白亜紀前期からのヘビのような爬虫類 Tetrapodophis の四肢における水生適応

白亜紀の研究、66巻、2016年11月、194～199ページ 2016年11月、194～199ページ

<蛇型ロボット>

- ・ Old Lecture：水陸両用ヘビ型ロボット ACM-R5 | nakayasu.com

<http://nakayasu.com/lecture/kinetic-sculpture/3052>

水陸両用へび型ロボット「ACM-R5」の機構と制御の研究. 2005. 広瀬 茂男, 森 淳, 山田 浩也, 千木崎 俊太郎 (2005)

・ Matsuno Lab Kyoto University - 蛇のページ

<http://www.mechatronics.me.kyoto->

[u.ac.jp/modules/kenkyu/index.php?content_id=27#content_tmp_2_3](http://www.mechatronics.me.kyoto-u.ac.jp/modules/kenkyu/index.php?content_id=27#content_tmp_2_3)

<ロボ化石>

文と写真 AFK 研究所(同) 近藤敏康 イラスト よ志

http://uwr.sakura.ne.jp/oppama/tech-info/UmisasoriRobot_r2.pdf

NPO 日本水中ロボネット 水中ビークル・フリーミーティングの技術報告

9.7 ロボ化石工作マニュアル

「生体模倣(Biomimetic)水中ロボットの検討 ウミサソリ ロボ化石を作る」

(2018)

9. 謝辞

本研究にあたりチャンスを与えて頂いたこと、終始適切なお助言を賜り、丁寧にご指導頂いた方々に感謝いたします。

- ・ 日本財団 海と日本 PROJECT
- ・ Leave a Nest 秋山 佳央氏
- ・ AFK 研究所合同会社 代表社員 近藤 敏康氏
- ・ 山形大学 大学院 荒井 博貴氏
- ・ 東京工業大学附属科学技術高等学校 岩城 純教諭

10. 図と表



図1 近藤氏のマニュアルを元にメンバーが作成したロボ化石
 <シンダーハーネスを再現>

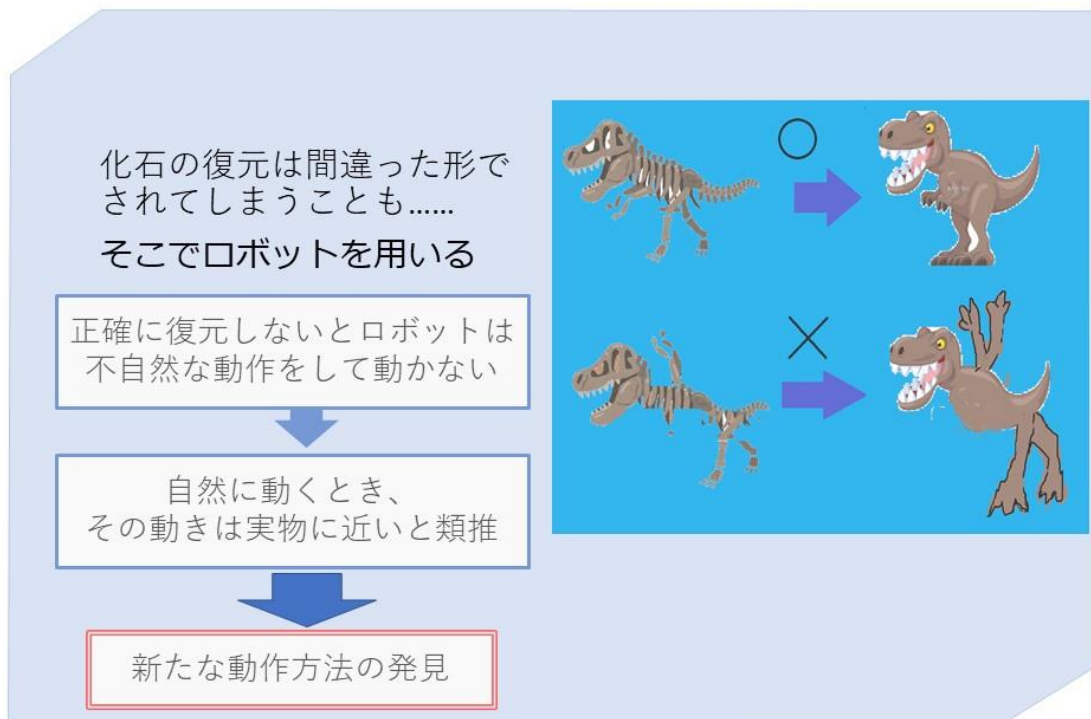
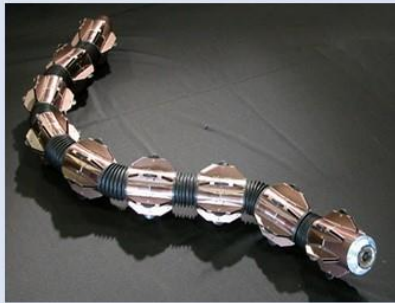


図2 ロボットによる化石復元の意義

○ ACM-R5

—東京工業大学 広瀬茂男名誉教授ら



体をくねらせるヘビの
ほふく推進を取り入れた
水陸両用のロボット

水中に瓦礫が散乱する
福島第一原子力発電所内
部の探査において、高い
適正を発揮した

図3 蛇型ロボット



図4 作業仮説

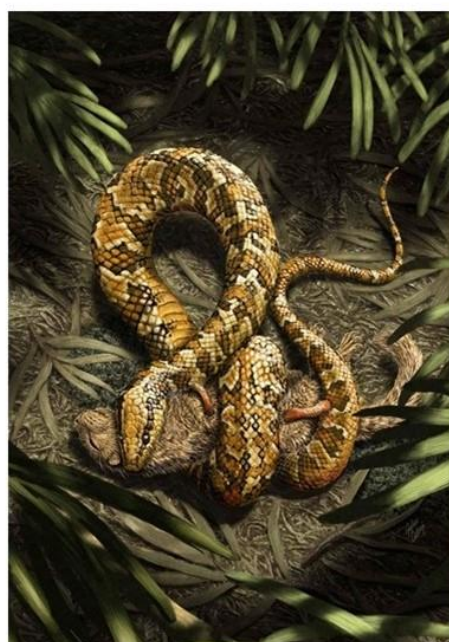


図5 テトラポドフィスのイメージ図 Julius T. Cstony



図6 テトラポドフィスの化石
(Image: : Michael Caldwell - University of Alberta & Alessandro Palci - Flinders University)



図7 ホライモリ

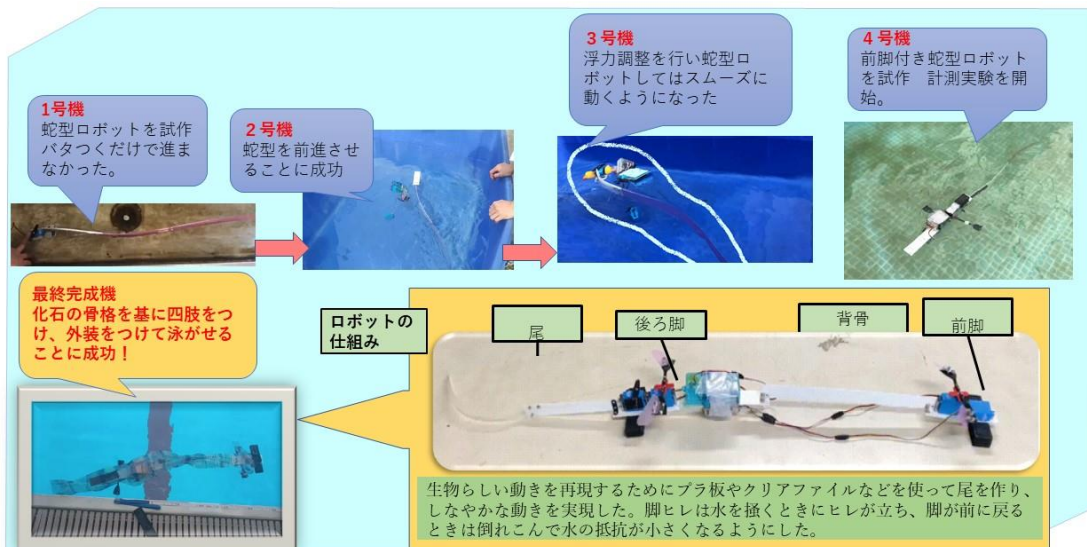


図8 ロボットの製作過程

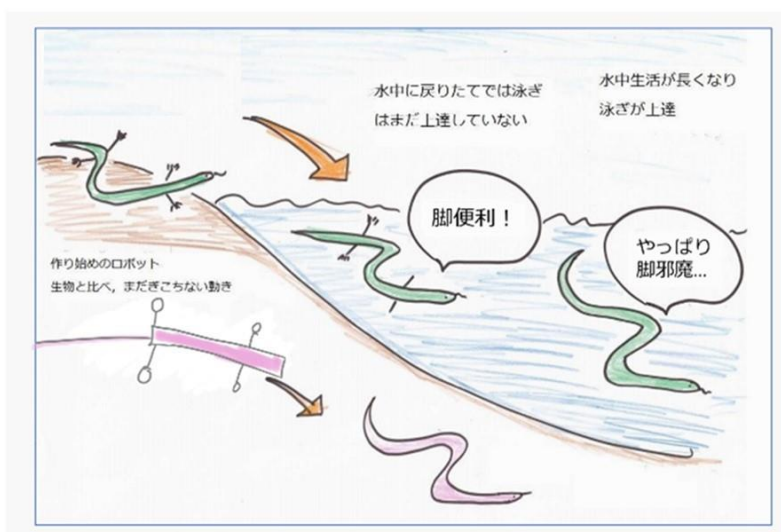


図9 水中でスムーズに動く機体の開発イメージ

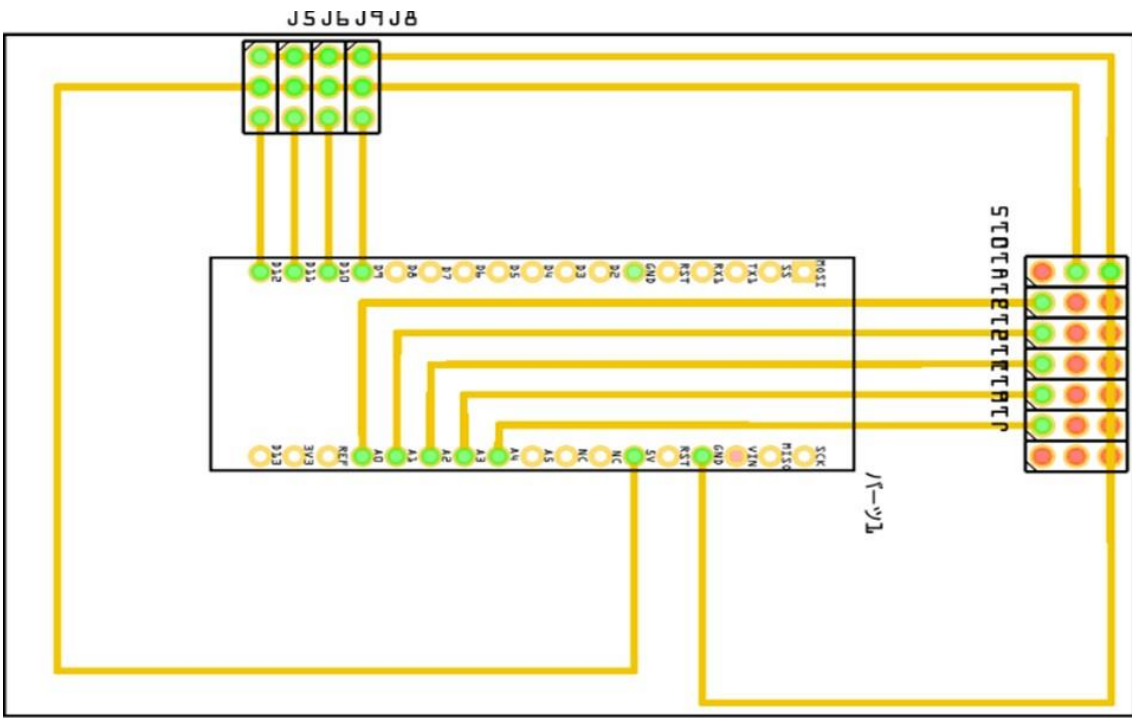


图 10 回路图

```
#include <VarSpeedServo.h>
#include <math.h>

//それぞれの部位の制御をそれぞれのデジタルピンに割り当てる
#define headPIN 8
#define frontLegPIN 9
#define bodyPIN 10
#define backLegPIN 11
#define tailPIN 12

//それぞれのチャンネルからの信号をそれぞれのアナログピンで受け取る
#define CH1PIN A0
#define CH2PIN A1
#define CH3PIN A2
#define CH4PIN A3
#define CH5PIN A4

//PWM信号を読み取る時の定数
#define pulseMin 1000
#define pulseMax 2000

//各部位の動作強度の変数宣言
int forwardValue = 0;
int wingValue = 0;
int upDownValue = 0;

float frequency = 1000.0; //揺動運動の周期の変数宣言

//各部位のふり幅の変数宣言
float forwardDegree = 70;
float windDegree = 20;
float upDownDegree = 30;
bool modechange = false;

bool modechange = false; //更新モードの変数宣言
```



```

#include <VarSpeedServo.h>
#include <math.h>

//それぞれの部位の制御をそれぞれのデジタルピンに割り当てる
#define headPIN 8
#define frontLegPIN 9
#define bodyPIN 10
#define backLegPIN 11
#define tailPIN 12

//それぞれのチャンネルからの信号をそれぞれのアナログピンで受け取る
#define CH1PIN A0
#define CH2PIN A1
#define CH3PIN A2
#define CH4PIN A3
#define CH5PIN A4

//PWM信号を読み取る時の定数
#define pulseMin 1000
#define pulseMax 2000

//各部位の動作強度の変数宣言
int forwardValue = 0;
int wingValue = 0;
int upDownValue = 0;

float frequency = 1000.0; //揺動運動の周期の変数宣言

//各部位のふり幅の変数宣言
float forwardDegree = 70;
float windDegree = 20;
float upDownDegree = 30;
bool modechange = false;

bool modechange = false; //更新モードの変数宣言

```

```
//サーボモータ制御の変数宣言
VarSpeedServo head, frontLeg, body, backLeg, tail;

//初期化
void setup() {
  Serial.begin(9600); //シリアル通信を開始

  //PC側の準備のためしばらく待ち、プログラムの開始を通知
  delay(8000);
  Serial.println("---START PROGRAM");

  //各部位を初期位置にセット
  pinMode(headPIN, OUTPUT);
  pinMode(frontLegPIN, OUTPUT);
  pinMode(bodyPIN, OUTPUT);
  pinMode(backLegPIN, OUTPUT);
  pinMode(tailPIN, OUTPUT);

  head.attach(headPIN);
  frontLeg.attach(frontLegPIN);
  body.attach(bodyPIN);
  backLeg.attach(backLegPIN);
  tail.attach(tailPIN);

  head.write(90);
  frontLeg.write(90);
  body.write(90);
  backLeg.write(90);
  tail.write(90);
}
```

```

//ループ開始
void loop() {
//チャンネル 5 が ON なら揺動運動を開始
if(50<map(pulseIn(CH5PIN,HIGH), pulseMin, pulseMax, 0, 100)){

//プロポの状態を読み取る
forwardValue= map(pulseIn(CH3PIN,HIGH), pulseMin, pulseMax, 0,
100);
wingValue= map(pulseIn(CH1PIN,HIGH), pulseMin, pulseMax, 0, 100);
upDownValue= map(pulseIn(CH2PIN,HIGH), pulseMin, pulseMax, 0, 100);

//プロポの状態を通知
Serial.print("forwardValue:");Serial.print(forwardValue);
Serial.print(" wingValue:"); Serial.print(wingValue);
Serial.print(" upDownValue:");Serial.print(upDownValue);
Serial.print("\n");

//前に行く命令があるか確認
if(forwardValue<20){
/*
経過時間に応じてサーボモータを動かす
その際、sin を通すことにより、揺動運動をさせる
*/
body.write(forwardDegree*sin(6.2832*millis()/frequency)+90);

tail.write(forwardDegree*sin(6.2832*(millis()/frequency+0.25))+90
);
}
}

```

```

//プロポの信号をそのまま流す
frontLeg.write(windDegree*(wingValue/100.0-0.5)+90.0);
backLeg.write(windDegree*(0.5-wingValue/100.0)+90.0);

delay(100); //チャタリング防止

modechange = true; //更新モードを OFF にする

}else if(2750.0 <= frequency){
//チャンネル 5 が OFF で周期が 2750[ms] 以上なら 750 に戻す
    frequency = 750.0;
}else if(modechange == true){
//チャンネル 5 が OFF で更新モードが ON なら"OFF MODE"に入る

//"OFF MODE"に入ったことと現在の周期を通知
Serial.println("---THIS IS OFF MODE");
Serial.print("---NEXT frequency = ");
frequency += 250.0;
Serial.println(frequency);

modechange = false; //更新モードを OFF にする

//各部位を初期位置にセット
head.write(90);
frontLeg.write(90);
body.write(90);
backLeg.write(90);
tail.write(90);
}}

```

図 1 1 コード全体

表1 動かす部位ごとのデータ

	動かす部位	タイム [秒]	ヒレの面積 [cm ²]	漕ぎ方	特徴
A	脚を取り付けずに波状運動	22.16	—	左右	揺れで不安定
B	脚を動かさずに波状運動	54.15	—	左右	安定するが遅い
C	前脚のみのパドル運動+波状運動なし	31.73	11.25	前後	方向転換に効果
D	後脚のみのパドル運動+波状運動なし	25.14	14.73	前後	左右にロールする
E	前脚のみのパドル運動+波状運動	27.14	11.25	前後+左右	不安定で遅い
F	後脚のみのパドル運動+波状運動	22.44	14.73	前後+左右	初速が速い