

無脊椎生物ヒラムシの身体的特徴を模倣した 扁平で高い柔軟性を持つ 水中ソフトロボットの開発

Design and Development of a flat, highly flexible underwater soft robot
mimicking the invertebrate flatworm

早田 圭之介¹, 石上 玄也¹, 松久 直司², 高橋 英俊¹, 浅井 誠¹

Keinosuke SODA¹, Genya ISHIGAMI¹, Naoji MATSUHISA², Hidetoshi TAKAHASHI¹, Makoto ASAI¹

¹慶應義塾大学, ²東京大学生産技術研究所

¹Keio University, ²The University of Tokyo

【要約】

本論文は、無脊椎生物であるヒラムシの身体的特徴を模倣した水中ソフトロボットの開発について報告する。ヒラムシは、扁平かつ高い柔軟性を有するという身体的な特徴を用いて、体の外縁部にうねりを生じさせ、水中を縦横無尽かつ高速に移動できるという優れた遊泳能力を示す。本研究において開発したロボットは大きく分けて、身体駆動のための機能性アクチュエータである IPMC、同アクチュエータの駆動回路となる伸縮性電極、ボディを構成する高分子材料の PDMS から構成されており、長さ 90 mm、幅 50 mm、厚み 6 mm という、極めて扁平なロボットを実現している。本論文では、IPMC およびロボットの製作方法について詳述する。

キーワード: ヒラムシ, 水中ソフトロボット, 生体模倣, IPMC, 伸縮性電極

【Abstract】

This paper introduces the development of an underwater soft robot that mimics the physical characteristics of the invertebrate flatworm. The flatworm possesses highly flexible and undulating outer edge of its body enables it to swim freely at high speed in water. The robot developed in our work consists of IPMC as a smart actuator to drive the body, flexible electrodes as the driving circuit for the actuator, and PDMS made body. In this research, an extremely flat robot of 90 mm long, 50 mm wide, and 6 mm thick is realized. This paper details the fabrication method of IPMC and the robot.

Keywords: flatworm, underwater soft robot, biomimetics, IPMC, flexible electrode

1. 緒言

水中ソフトロボットは海洋生物の高い身体的柔軟性と環境順応性を模倣する形で開発が行われており、応用先として狭隘環境での探査や生態モニタリングへの活用が期待されている。これまで開発されてきた水中ソフトロボットは魚やイルカなどの有脊椎生物を模倣したものが多く、無脊椎生物を対象とした事例は少ない[1]。

本研究では、無脊椎生物のヒラムシに着目した。ヒラムシは柔軟で扁平な体を持つ点で他の水中生物にはない身体的特徴を有する。加えて、体の外縁部にうねりを生じさせ、任意の方向へ高速に遊泳できる優れた能力を示す。このような特徴に注目したこれまでの研究事例として、サーボモータによってヒラムシの遊泳を模倣したハードな構造を持つヒラムシ型ロボットの開発[2]や数値流体シミュレーションによるヒラムシの遊泳の評価[3]が行われてきた。しかし、ヒラムシの最大の特徴である扁平さと高い柔軟性を模倣したロボットの開発は未実施である。

そこで、本研究では、機能性アクチュエータである IPMC (Ionic Polymer Metal Composite)、駆動回路となる伸縮性電極、ロボットボディを構成する PDMS などを組み合わせることで、ヒラムシの身体的特徴を模倣した極めて扁平かつ柔軟な水中ソフトロボットを開発した。本稿では、IPMC をはじめロボットの製作手法について詳述する。

2. 研究手法

2.1 機能性アクチュエータ IPMC の概要と製作

熱や電気、磁気などの物理的な外部刺激、あるいはガスや溶剤などの化学的な外部刺激に対して能動的に応答する機能性材料をアクチュエータとして活用した機能性アクチュエータは、軽量かつ柔軟性に優れ、一般的な電磁モータ単体では実現できない屈曲や伸縮といった複雑な動きが可能である。そのため、水中生物のヒレの屈曲動作などの模倣に効果的であり、従来のモータの代替として水中ソフトロボットに活用されている[1]。代表的な機能性アクチュエータとしては、SMA (Shape Memory Alloy: 形状記憶合金)、DEA (Dielectric Elastomer Actuator: 誘電エラストマアクチュエータ)、IPMC (Ionic Polymer Metal Composite: イオン交換ポリマメタル複合体)が挙げられる。SMA は変形量が小さく駆動周波数が低いこと、DEA は駆動に数 kV ほどの高電圧が必要で実用化には向かないことを課題としてい

る。そこで、本研究では軽量で扁平かつ低電圧で高周波に大屈曲が可能な IPMC を製作し、ヒラムシ型ロボットのアクチュエータとして使用することとした。

IPMC は図 1 に示すように、イオン交換膜(本研究では Nafion117 を使用)の両面に貴金属がメッキされた構造で、厚み 180 μm 程度の膜状のアクチュエータである。貴金属電極に電圧を印加することでイオン交換膜内部の水和陽イオンが陰極側へ引き寄せられ、陰極側の膨潤と陽極側の収縮によって屈曲する原理である。矩形波などを印加することによって、屈曲量および屈曲方向の時間変化を制御可能である。

IPMC の製作には標準化された手法はなく、無電解メッキ法やホットプレス法、溶媒キャスト法など、高性能な IPMC 実現に向けて多くの手法が提案されている [4]。本研究では最もシンプルで容易な手法である無電解メッキ法による製作を採用し、電極用の貴金属は Pt とした。製作の手順や使用する試薬、反応時間などについては複数の先行研究[5][6][7]を参考に独自の方法を考案した。IPMC は以下に概説する 4 ステップで製作した。図 2 に使用した試薬の詳細や操作手順、反応時間を示す。

Step.1	Pretreatment	イオン交換膜の研磨による表面積の増加と洗浄	図 2a
Step.2	Impregnation-Reduction Plating	Pt イオンをイオン交換膜表面に含浸させ、強還元剤 NaBH_4 の還元作用によって Pt 電極を形成	図 2b
Step.3	Autocatalytic Plating	Step.2 で形成された Pt メッキを触媒として、強還元剤 N_2H_4 の還元作用で Pt 電極の厚みを増加	図 2c
Step.4	Ion Exchange	イオン交換膜内部の水和陽イオン(図 1)を Li^+ でイオン交換	図 2d

2.2 ヒラムシ型ロボット概要

2.2.1 ロボットの構造と駆動方法

本研究で開発したロボットは PDMS, 銀ペースト, IPMC, ポリオレフィンフィルム, フレキシブルケーブルから構成され、図 3 に示すような層構造を有する。ロボットのボディには柔軟性と引っ張り強度に優れる PDMS を使用しており、下側の PDMS ボディの方が上側の PDMS ボディよりも長さ方向に 8 mm, 幅方向に 4 mm だけ大きい。上下の PDMS ボディそれぞれの表面には IPMC 駆動用の伸縮性電極となる銀ペーストが塗布されている。伸縮性電極のうち IPMC に電圧を印加する電極部とフレキシブルケーブルが載る部分以外の PDMS ボディ表面には PDMS を成膜した。これにより上下の伸縮性電極の接触によるショートを防ぐことに加え、上下の PDMS ボディ同士の不可逆的な接着を実現している。ボディ全体には片側 4 つで合計 8 つの IPMC を配置し、同じ側面にある 4 つの IPMC には柔軟かつ高強度なポリオレフィンフィルムを貼り付け、ヒラムシの体の外縁部を再現している。

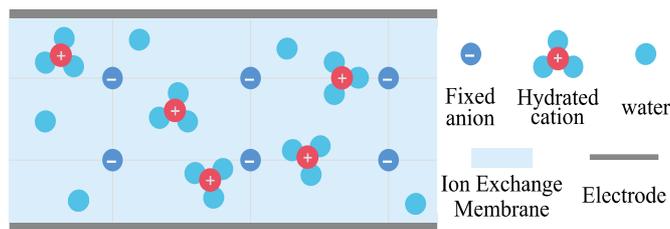


図 1. Internal structure of IPMC

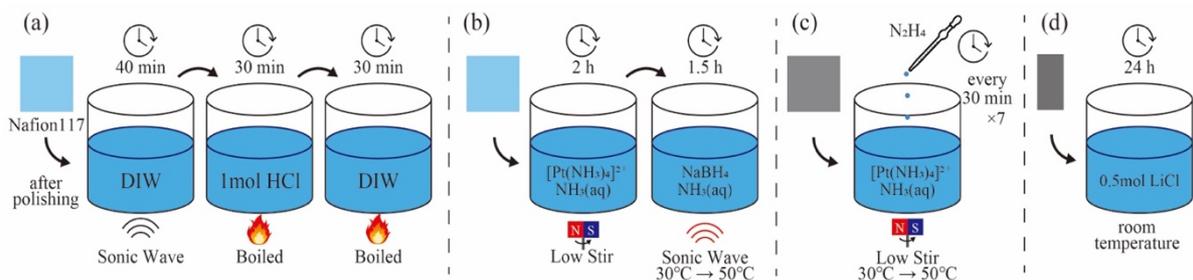


図 2. Fabrication process of IPMC :

(a) Pretreatment (b) Impregnation-Reduction Plating (c) Autocatalytic Plating (d) Ion Exchange

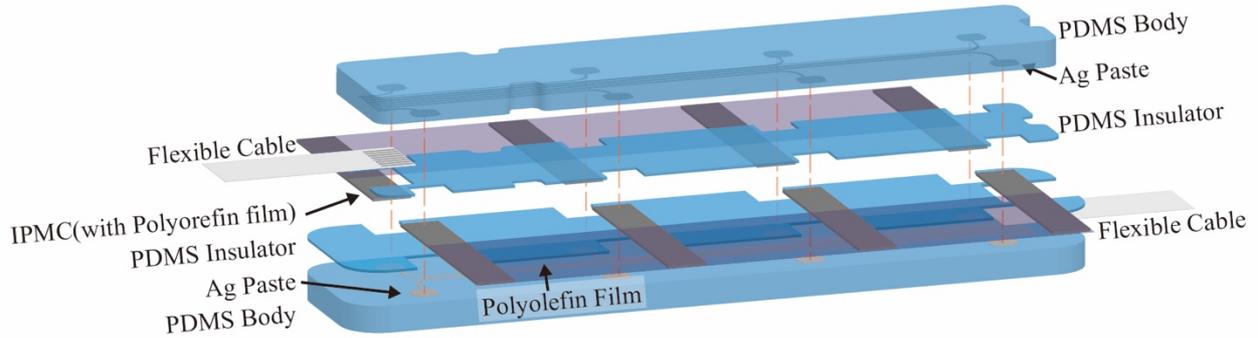


図 3. Structure of flatworm robot

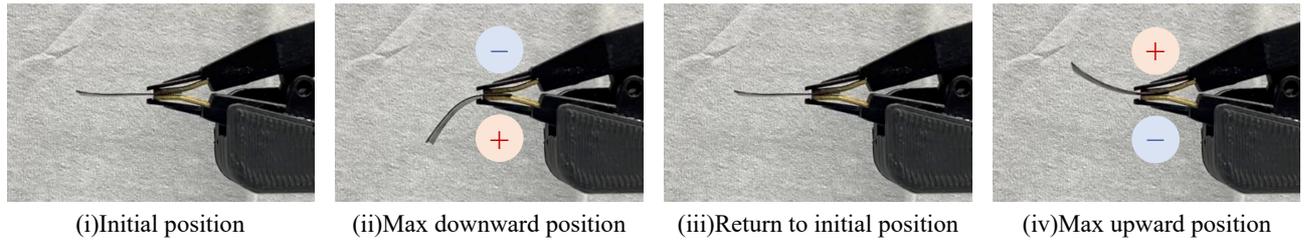
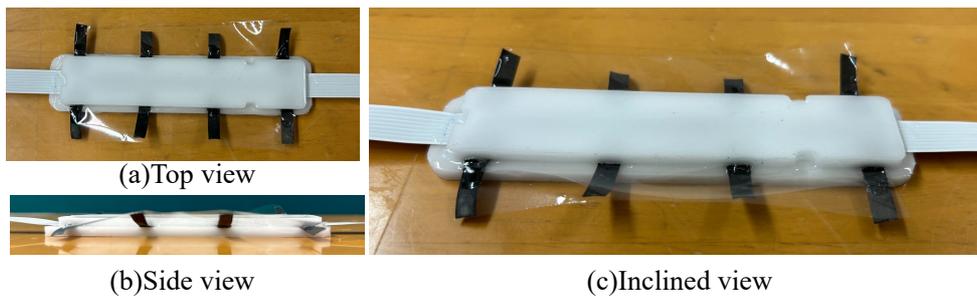
図 4. Successive photographs that show the bending of an IPMC sample ($-5\text{ V} \sim +5\text{ V}$, 0.5 Hz)

図 5. Picture of flatworm robot developed in our work

フレキシブルケーブルはボディに対抗する形で固定され、それぞれが上下の PDMS ボディ表面の伸縮性電極に電氣的に接続されている。電圧は外部電源からフレキシブルケーブルを通して伸縮性電極に印加される仕組みとなっており、伸縮性電極が塗布された PDMS ボディで上下から IPMC を挟み込むことで IPMC に電圧が印加される。

2.2.2 ロボットの製作手法

ロボットの製作は大きく分けて、以下に示した 4 つのプロセスに分けられる。

①PDMS ボディの製作

PDMS には入手性に優れ、ソフトロボット分野において一般的に使用される Dow Corning Sylgard 184 を使用した。PDMS の主剤と硬化剤は 10:1 の割合で配合し、そこに 3MTM のグラスバブルズを PDMS の 1/40 の質量分だけ混ぜ合わせることで、水と密度が等しくなるような未硬化の PDMS を用意した。次に、真空脱泡により内部に含まれる空気を抜いたのち、型に流し込み 75°C で 2 時間加熱し完全に硬化させた。使用した型は厚み 3 mm のアクリル板をレーザーカッターによりロボットの形状にカットしたものである。

②PDMS ボディ表面への伸縮性電極の塗布

まず銀ペーストの PDMS ボディへの接着強度を高めることを目的として、PDMS ボディ表面に出力が 50 W の酸素プラズマを 30 秒間照射するプロセスを 2 回施した。次に、回路形状が切り抜かれたマスクを使用し、①で製作した PDMS ボディ表面に銀ペーストを塗布した。最後に、銀ペーストが塗布された PDMS を 110°C で 30 分間加熱することで銀ペーストを焼結させ、PDMS 表面に伸縮性電極を形成した。

③PDMS ボディ表面上に絶縁および接着層の成膜

②で製作した PDMS ボディの伸縮性電極について、IPMC に電圧を印加するための電極部とフレキシブルケーブルが載る箇所を、テープを用いてマスクした。次に、マスクをしたボディ表面に未硬化の PDMS を滴下し、1000 rpm で 60 秒間スピコートを行なった。マスクを除去したのち、65°C で 35 分加熱することで PDMS の層を成膜した。このとき、

成膜された PDMS は完全には硬化されていない部分硬化の状態であり、これによって上下のボディを貼り合わせた際の接着力が大幅に向上する[8].

④IPMC およびフレキシブルケーブルの配置と上下ボディの貼り付け

③までのプロセスによって完成した上下の PDMS ボディの間に IPMC とフレキシブルケーブルを配置したのち、上下のボディを貼り合わせた。次に、150°Cで15分間加熱することで、部分硬化状態であった PDMS の薄膜を完全に硬化させ、上下のボディを接着した。また上記の作業の際に、上下 PDMS ボディの接合部の周囲にシリンジを用いて若干量の PDMS を載せ、同時に硬化させることでロボットを水中に入れた際の接合部からの水の侵入を防ぐようにした。最後に、ヒラムシの外縁部を再現するためのポリオレフィンフィルムを IPMC に貼り付けて、ロボットの製作が完了する。

3. 結果

第 2 節に示した手法で製作した IPMC について、表面画像をマイクロスコップで確認したところ、全面にわたって Pt による金属光沢が確認できた。さらに、メッキ作業を行う前後での表面抵抗を比較すると、メッキ前には $1.0 \times 10^{-7} \Omega/\text{sq.}$ であった表面抵抗がメッキ後には $7 \Omega/\text{sq.}$ 程度まで減少した。また、 $-5 \text{ V} \sim +5 \text{ V}$ の範囲の矩形波を IPMC に印加することで、上下合わせて 80° 程度の連続的な屈曲動作が実現した(図 4)。以上のことから、Nafion 膜表面に Pt 電極が形成され、IPMC の製作に成功したと言える。

2.2.2 に示した手法で製作したロボットの寸法は長さ 98 mm、幅 50 mm、厚み 6 mm となり、質量はおよそ 11 g 程度となった。極めて扁平で軽量のロボットが実現した。また、PDMS のボディと銀ペーストによる伸縮性電極を使用しているため、柔軟性にも優れる。図 5 に製作したロボットの概観を示す。

4. まとめと今後の展望

本研究では、IPMC の製作に成功するとともに、ヒラムシのように極めて扁平かつ柔軟なロボットの製作手法を確立させることができた。短期的な目標としては、本研究で開発したロボットのそれぞれの IPMC を外部電源および制御システムを用いて制御することで、ヒラムシのようなうねりを伴う遊泳動作の実現を目指す。さらに、それぞれの IPMC に印加する電圧の大きさや位相差をパラメータとして変化させた上でロボットの遊泳力を計測することで、ロボットの遊泳の速度および方向制御に資するデータの取得を目指す。また、ロボットの寸法や IPMC の数を変化させながら、それらのパラメータがロボットの遊泳にどのような影響を及ぼすか評価することも有益なデータとなりうる。長期的な目標としては、極小なバッテリーおよび制御システムをロボット本体に搭載することで、独立で水中環境を遊泳できるロボットの実現を目指す。また、小型センサの搭載によるロボット単体での水中環境下でのモニタリングや超小型化による体内でのドラッグデリバリーといった展望も考えられる。

参考文献

1. S.Youssef et al., "Underwater Soft Robotics: A Review of Bioinspiration in Design, Actuation, Modeling, and Control," *micromachines*, Vol. 13, Issue 1, 2022.
2. T.Kazama et al., "Locomotion diversity in an underwater soft robot inspired by the polyclad flatworm," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 13, Issue 7, pp. 2083, 2013.
3. Z. Zhou et al., "Computational modeling of swimming in marine invertebrates with implications for soft swimming robots," *Bioinspiration & Biomimetics*, Vol. 15, Issue 4, 2020.
4. L. Yang et al., "Recent progress in preparation process of ionic polymer-metal composites," *Results in Physics*, Vol. 29, 2021.
5. L. Chang et al., "Manufacturing process and electrode properties of palladium-electroded ionic polymer-metal composite," *Smart Material and Structures*, Vol. 21, Issue 6, 2012.
6. J.Ru et al., "Preparation and characterization of water-soluble carbon nanotube reinforced Nafion membranes and so-based ionic polymer metal composite actuators," *Smart Materials and Structures*, Vol. 25, Issue 9, 2016.
7. M. Saccardo et al., "Counter-ion and humidity effects on electrochemical properties of Nafion®/Pt composites," *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 244, 2020.
8. M.Eddings et al., "Determining the optimal PDMS-PDMS bonding technique for microfluidic devices," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 18, Issue 6, 2008.