

令和元年6月13日現在

機関番号：12201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K16337

研究課題名(和文) ユーグレナ運動による全弾性体型マイクロマシンの開発

研究課題名(英文) Development of All Elastic Type Micromachine Based on Euglenoid Movement

研究代表者

中林 正隆 (NAKABAYASHI, Masataka)

宇都宮大学・工学部・助教

研究者番号：50638799

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：生体組織の損傷を極力軽減するために必要な柔軟な形状変化機能をもつ医用マイクロロボットを実現するため、ユーグレナ運動の原動力の仮説の一つである収縮構造を規範とした基礎的な流体内推進機構を開発した。本機構は格子状に配列された複数の弾性伸縮機構と弾性フレームで構成されており伸縮機構の動作パターンを変更することによってその全体の運動形態を変化させることができた。この機構の推進特性として水中及び高粘性流体中における運動1周期あたりの推進力変化、平均推進力、流れ場を評価、自航に必要な推進力を発生させることが可能なことが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、原動力が不明とされるユーグレナ運動において表皮帯内部の収縮構造による変形という説に着目し、これを規範とした運動機構を実現したのは本研究以外になく、実験装置による流体中での推進特性まで評価した研究はこれまでに存在しない。本成果は伸縮機構の代わりとなる人工筋技術が発展し超小型化が可能になったときにマイクロロボットに適用できると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In order to realize the function of the flexible shape change necessary for the medical micro robot which minimizes the damage of the living tissue as much as possible, the basic propulsion mechanism in fluid based on the contraction structure which is one of the hypotheses of Euglena's motive force developed. This mechanism consists of multiple elastic telescopic mechanisms arranged in a grid and an elastic frame, and it was possible to change the movement form of the whole by changing the movement pattern of the telescopic mechanism. As the propulsion characteristics of this mechanism, the change of thrust force, average thrust force and flow field in one movement cycle in water and highly viscous fluid were evaluated, in addition it was shown that it is possible to generate the necessary propulsion force for self-propulsion.

研究分野：医用工学

キーワード：バイオミメティクス バイオメカニクス 医用工学 流体力学 流体内推進機構 流れの可視化 ユーグレナ運動

### 1. 研究開始当初の背景

研究代表者は一般に利用されるスクリュプロペラに代わる流体内推進器として、バイオミメティクスを利用した魚類の尾ビレの揺動運動を規範としたフィンによる流体内推進機構の研究を行ってきた。特に尾ビレの剛性に着目し任意の運動目的によって最適な推進性能を得る可変剛性フィンによる流体内推進機構の開発を行い、この研究において揺動運動中にフィンの剛性を動的に変化させることによって推進性能の向上させることが可能なことを実験的・数値解析的にも示した。これらの研究経験を活かし体内を遊泳する医用マイクロロボットの基礎的な技術開発を試みた。

現在、医用ロボット開発において血管や消化器官を移動し生体内部組織の情報取得、また体内深層部に薬剤を送り届けるなど生体内部で移動/遊泳する技術開発が行われている。特に生物を規範とした遊泳機能の応用を検討している研究は多いが、推進器に一定の剛性と先鋭部（繊毛、フィンなど）が存在し、これらが生体組織の損傷を引き起こす可能性が考えられる。本研究ではこの問題を解決する方法として、外装部全体が弾性体で構成された構造で且つそれ自体が推進機能を有する医用マイクロロボットを開発することを提案した。

原生生物であるユーグレナ類は高度な形状変化能力を有し、且つ、全体が弾性体で構成されている。この運動はユーグレナ運動（図1）と呼ばれ、光強度の変化、機械的刺激、X線、電流など物理的要因により引き起こされることが知られている。この原動力について多くの研究者が解明を試みているが未だ明らかにはなっていない。諸説ある内の一つが細胞膜直下にある表皮帯(Pellicular Strips)あるいはその深部にある組織の収縮運動が原動力とするものであり、この説は長く支持されてきた。本研究では、この説を規範とし複数の伸縮機構を疑似二次元的に配置した運動機構を採用することで外装部の全体を弾性的に変形させることが可能な流体内推進機構を開発することを提案した。

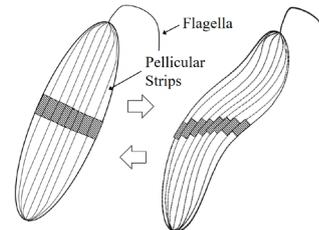


図1 ユーグレナ運動の概略図(右:初期状態、左:変形運動後)

### 2. 研究の目的

表皮帯の運動を規範とする医用マイクロロボットを開発するには、現状、十分に小型化、必要な収縮率と発生力を合わせもつアクチュエータは開発されていない。本研究はマイクロマシンに適用できるリニアソフトアクチュエータの技術が十分に進歩したときのための基礎技術を確立することを目的とした。

ユーグレナの複合表皮帯の線状構造を既存のアクチュエータで表現する場合、その収縮率の可制御性が重要な要素となる。そこで本研究では空気圧アクチュエータやSMAアクチュエータなど制御が困難なものではなく、制御性に優れたサーボ機能付ステッピングモータで駆動する弾性伸縮機構を用いることにした。本研究は初めの試みとして、表皮帯を規範とした弾性伸縮機構をコイルバネと複合金属ワイヤで構築（図2）、これを疑似二次元的な格子状に弾性フレーム内部に配置することで全体の変形を可能にすることを提案した（図3）。

本研究期間では変形運動を実現する機構設計を行い、単純な屈曲運動やS字屈曲運動を実現する伸縮機構の収縮率、収縮パターンを明らかにすると共にその運動中に発生する推進特性、流れ場について検討することを目的とした。

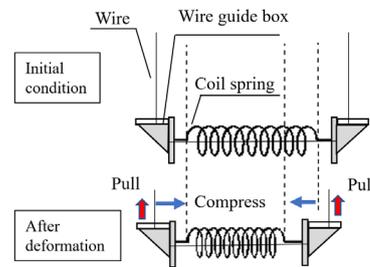


図2 コイルバネとワイヤによる弾性伸縮機構

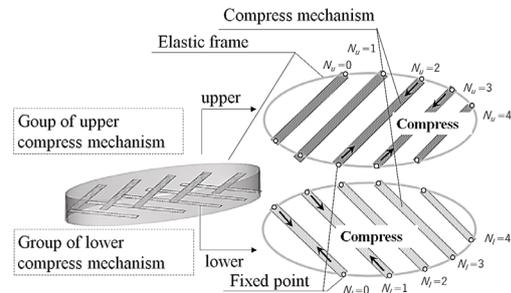


図3 弾性伸縮機構を備えた全弾性型変形機構

### 3. 研究の方法

(1)表皮帯を規範とする弾性伸縮機構を用いた変形機構の基礎実験

提案した機構が十分な変形能力を有するか検証するため無動力で静的に伸縮機構を駆動させ、そのときの変形の挙動を観測した(図3: 全長9mm, 全幅3.3mm)。弾性伸縮機構を変形させる複合金属ワイヤを機構外部に配置したプーリ列に固定、収縮パターンに合わせて任意の角度に固定することを繰り返し、疑似的に運動を再現した。変形形状の計測には推進機構の外周に配置し

たマーカをデジタルビデオカメラで撮影し、三次元動作解析を行うことで評価を行った。

(2) ユーグレナ運動を規範とする流体内推進機構

前節 3. (1) の静的な変形挙動の観測データを元に推進機構外部に配置したプーリ列をステッピングモータで駆動させることで流体力の検出を試みたが、ガイドチューブの変形によって生じる機械的な外力がその推進力を打ち消す現象が発生した。この現象を回避するため外部に設置していた駆動機構を全て内装し、発生力を増大させるために推進機構のサイズの拡張を行った。

図4に内装するための新型弾性伸縮機構を、図5に改良した流体内推進機構の概略図を示す。この機構はポリカーボネート製の弾性フレームと、この上下に配置された5対の弾性伸縮機構及びレジン製の中央プレートで構成されており、弾性伸縮機構の駆動パターンによって機構の変形は制御される。本実験装置においては複合金属ワイヤをギアボックス内のプーリに固定し、その配列の位置関係を変えることで、その駆動パターンを変更した。この変形の例として後側の伸縮機構を収縮させたときの屈曲運動を図5Bに示した。制御系および計測系は開発システムLabVIEW, Real Time OSを用いることで構成し(図6)、流れの可視化にはPIV計測を用いた。

4. 研究成果

(1) 静的な弾性伸縮機構の動作による運動パターンの評価

図7に後部屈曲運動時、図8にS字屈曲運動時の動作解析結果を示した。後部屈曲運動時の弾性伸縮機構の動作パターンは後部上下1 pairの伸縮機構( $N_u, N_l = 0$ )に位相0-180°分の正弦波を位相差180°で収縮率振幅  $A_{Rc} = 40\%$  を与えたときに実現が可能になり、魚類のような後部の揺動運動が見られた。S字屈曲動作は前部( $N_u, N_l = 4$ )、中央( $N_u, N_l = 1, 2, 3$ )、後部( $N_u, N_l = 0$ )で各収縮に一定の位相差を設けて正弦波状に動作させることで可能になった。最大収縮率時に前後先端部の運動振幅は最大となった。

(2) ユーグレナ運動を規範とする流体内推進機構の推進特性の評価

後部上下1 pair ( $N_u, N_l = 0$ )の伸縮機構を交互に位相0-180°分の正弦波を運動周波数  $f = 0.5\text{Hz}$ 、位相差180°で与えたとき各収縮率  $R_c$  の変化と推進力波形を図9に示した。前節 4. (1) でも示したように、収縮率が最大になったときに推進機構の運動振幅は最大、つまり中央から最も外側の位置にある。ここから推進機構後端は内側(中央)に運動し流体を後方に押し出す(図10)。この運動はフィンの揺動運動における Instroke (発表論文①参照) に類似しており、コイやサバのような反力型の推進原理を基に正の推進力を得ているのだと考えられる。また推進力変動の振幅をみると、その変動量は収縮率振幅  $A_{Rc}$  の増加に伴い増大する傾向が見られた。

各運動パターンにおける平均推進力の変化を図11に示す。本図(a)は後部上下1 pair ( $N_u, N_l = 0$ )、(b)は中央部から後方1 pair ( $N_u, N_l = 1$ )、(c)には中央部から後方2 pair ( $N_u, N_l = 0, 1$ )の位置にある上下の弾性伸縮機構を前述と同様に駆動させたときの結果である。また本図において実線で示したものは作動流体が水、破線で示したものは胃粘液とレイノルズ数を同定したグリセリン水溶液(High Viscosity: HV)内での結果を示している。破線で示されていない実験条件は粘性に耐えられずワイヤが運動中に破断し駆動が不可能になったものである。

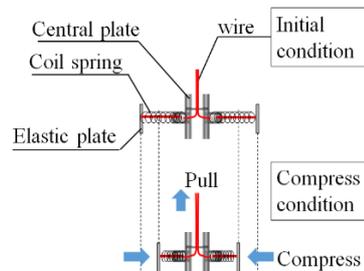


図4 流体内推進機に採用した新型弾性伸縮機構

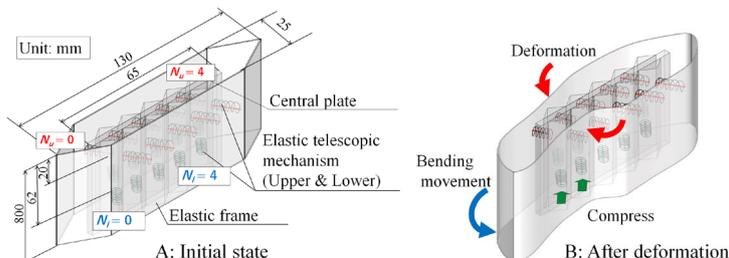


図5 ユーグレナ運動を規範とする流体内推進機構

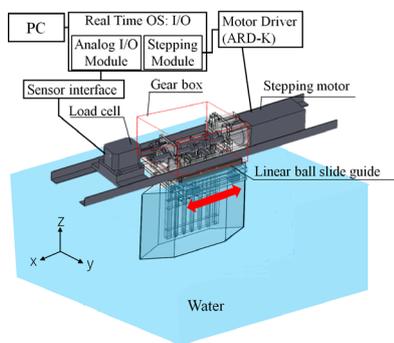


図6 実験機の制御系及び計測系

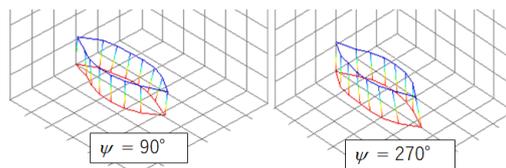


図7 後部屈曲運動時の動作解析結果(後部1pair)

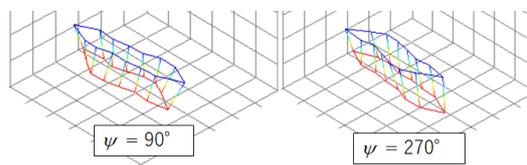


図8

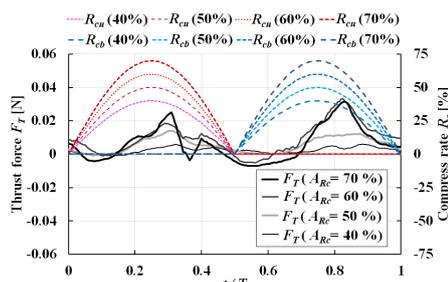


図9 運動1周期中の推進力と収縮率の変化

より詳細にデータを解析するには十分に細径で且つ強度の強い構造を用いた複合金属ワイヤを独自に開発する必要があると考えられる。

水中において最も推進力が得られた運動パターンは後方上下 1 pair ( $N_u, N_l=0$ ) の弾性伸縮機構を収縮率振幅  $A_{Rc}=70\%$ 、運動周波数  $f=0.5\text{Hz}$  で駆動させたときであった。魚類が遊泳する環境のレイノルズ数から考えても、その動きに最も類似する挙動を行う条件が、高い平均推進力を示すのは妥当だと思われる。この動きが高粘性流体中になると収縮率振幅が大きくなるほど負の推進力を示し、小さい方が高い正の推進力を示した。反力型推進とは別の抵抗力理論で流体力が働いているのだと推察できるが、その詳細な考察には三次元的な流体力の変化を含めて更なるデータの検証が必要だと考えられる。

本実験機はフレーム状の構造であることから内部構造を防水することは困難であり、機構の内部流体の流出、伸縮機構の引張力の安定化など精度的な限界があった。しかし平均推進力が正を示した殆どの条件において無固定状態での微小な自航が確認できたため推進機構としての有効性が示唆された。

また推進機構全体を任意の形状に変化させるための運動パターンを明らかにすることができたことから、これらの成果は高分子・SMA アクチュエータなどの人工筋が十分に小型・高出力化できたときに医用マイクロマシン開発に応用できると考えられる。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① [Masataka Nakabayashi](#), Yusuke Yamaguchi, Wataru Yamazaki, Numerical Optimization of Thrust Efficiency of Propulsion in Fluid using a Fin with Variable Stiffness, Journal of Aero Aqua Bio-mechanisms, No. 5, Vol. 1, pp. 1 - 9, 2016, 査読有

[学会発表] (計 4 件)

- ① [中林正隆](#), 吉田潤平, 嶋脇聡: ユーグレナの表皮帯を規範とした弾性伸縮機構を備えた弾性流体内推進機構の動作解析, 第 31 回バイオエンジニアリング講演会講演論文集 (CD-ROM), 1D14, 2018.
- ② [M. Nakabayashi](#), N. Ito, S. Shimawaki, Flexible propulsion mechanism in fluid using elastic telescopic mechanism based on pellicular of Euglena - Evaluation of fluid force and flow field. Proceedings of the Seventh International Symposium on Aero Aqua Bio-Mechanisms (ISABMEC2018), 36 (USB-Memory), (2018, 9), Tokyo, Japan.
- ③ [中林正隆](#), 伊藤伸宏, 嶋脇聡, ユーグレナのペリクルを規範とした可変形状格子構造をもつ流体内推進機構, 第 30 回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, p. 192, 2017, 12
- ④ [中林正隆](#), 伊藤伸宏, 嶋脇聡, ユーグレナの表皮帯を規範とした弾性伸縮機構を備えた弾性流体内推進機構, 第 29 回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, No. 2F34, 2017.

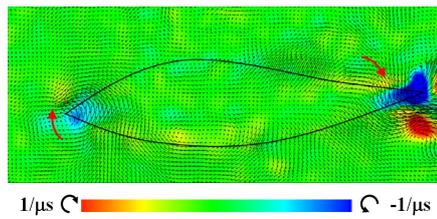
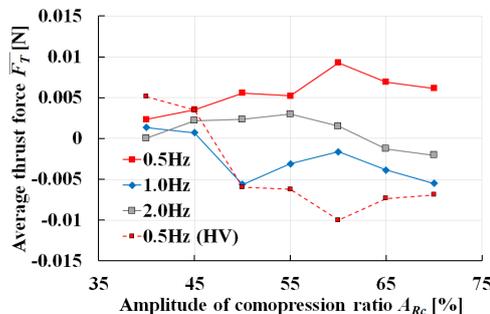
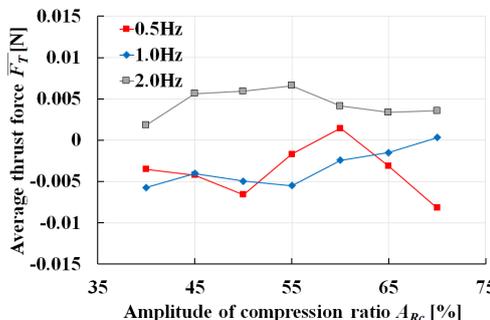


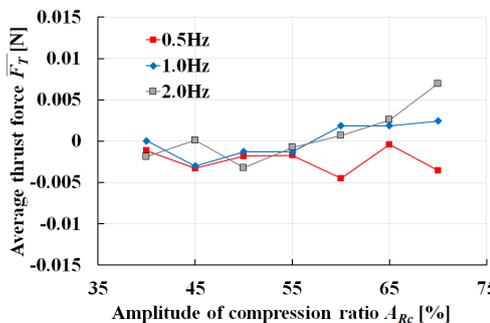
図 10 PIV 計測による推進機構周りの流れの可視化 (温度分布,  $t/T = 0.75$ )



(a)  $N_u, N_l = 0$



(b)  $N_u, N_l = 1$



(c)  $N_u, N_l = 0, 1$

図 11 弾性伸縮機構の収縮率振幅  $A_{Rc}$  と平均推進力  $F_T$  の関係