

研究終了報告書

「爆発的に速い集積型燃焼人工筋肉の具現化」

研究期間：2021年10月～2024年3月

研究者：奥井 学

1. 研究のねらい

製造分野を中心に人と機械が混在して働く環境構築が加速していく。また、医療介護分野での自動化・軽労化も解決すべき重要な課題である。今後もこのような流れは新型コロナウイルス感染症の影響や、SDGs 策定による目的の共有化によって加速していくと想定できる。これらに対して情報空間では様々な新技術が社会実装されているが、ヒトとの物理的インタラクションを伴うシステムの社会実装は進んでいない。

協働やアシストといった高度な物理的インタラクションの実用に向けては、アクチュエーション技術の進歩が不可欠である。代表的なアクチュエーションにモータと減速機によるアクチュエーションがある。この方法は精度やパワーにおいてはヒトよりも高いが、動作が高トルク・高剛性・大慣性モーメントとなり、速度の制限や柵によるヒトとの活動空間の分離が必要となる。この現状に対して、ソフトロボット技術によるアプローチが提案されており、接触時の安全性などにおいて多くの成果が報告されている。しかし、ヒトとの物理インタラクションのためにはヒトと同程度のスケールの発生力(>数十 N)、変位(>20%)、応答(≧数十 Hz)を満たすことが望ましいと考えられるが、そのようなソフトアクチュエータは実現しておらず、ヒトの労働を肩代わりするようなアクチュエーションには至っていない。

そこで申請者は、ジメチルエーテル(DME)の燃焼を利用した人工筋肉システム(燃焼人工筋肉)を提案してきた。燃焼人工筋肉はマッキベン型人工筋肉の内部に DME と酸素を充填し、スパークプラグを用いて着火・燃焼し動作する。この燃焼人工筋肉は、ヒトの筋肉を上回る応答速度と十分な発生力・変位が得られることが確認されている。また DME は燃焼時の発熱や騒音が少なく、燃焼後のスモーク発生が無い、貯蔵が容易(エアダスタとして市販)といった特性があり、屋内での利用も可能である。しかしながら、燃焼を利用するため現状では出力の制御が困難、燃料供給と排気プロセスが確立されておらず現状では連続的な駆動が難しい、といったアクチュエータとして利用するには技術的課題が存在した。

本研究では、DME の燃焼により駆動する人工筋肉の集積化によって、前述の出力制御と連続駆動の課題解決を目指した。まず出力制御を可能にするため、生体筋が多数の筋繊維から構成されているように、燃焼人工筋肉を集積化することを考えた。集積化により、各人工筋肉の駆動の精密な力制御ができなくとも、駆動本数の調節などにより力制御が可能になると考えた。連続駆動については、新たな制御要素を追加せずにチェックバルブやスピコンといった空気圧回路によって実現できると考えた。これらの解決策により出力制御と連続駆動が実現すれば「柔らかくて強く、軽く、速い」という、これまでにない特性のアクチュエータの社会実装が近づき、人と機械の協働が加速すると考える。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究は6つの研究項目を実施した。それぞれの項目の研究成果は以下の通りである。なお、研究項目の後ろに付した「○」は研究目標達成、「△」は一部未達成の意味である。

1-a. 確実な着火を実現する着火システム開発(○)

- 目的: 確実な着火を実現する着火システムを開発し、着火成功率を向上させること。
- 実施内容: 着火直前状態の安定的な再現を目指し、空燃比の管理や安定的なスパーク発生に注力した。これにより、着火率が目標の95%以上に向上した。

1-b. 燃焼人工筋肉の構成材料の検討(○)

- 目的: 燃焼人工筋肉に適したゴムと繊維の材料を選定し、性能を確保すること。
- 実施内容: 機械的特性に優れる天然ゴムとポリエステルを選定した。

1-c. 連続駆動のための空気圧回路検討(○)

- 目的: 連続(繰り返し)駆動のための空気圧回路を設計し、安定的な駆動を実現すること。
- 実施内容: パッシブな空気圧回路のみを用いて、最大20Hzでの燃焼人工筋肉の繰り返し駆動に成功した。

2-a. 燃焼人工筋肉のモジュール化(○)

- 目的: 燃焼人工筋肉のモジュール化を行い、集積化に向けた基盤を構築すること。
- 実施内容: 着火装置を内包した人工筋肉モジュールを開発し、安定したスパークの発生と着火率の向上を達成した。

2-b. モジュール燃焼人工筋肉の集積化(△)

- 目的: 筋骨格アームを用いて2本の人工筋肉の集積化駆動を評価すること。
- 実施内容: 2本の燃焼人工筋肉を集積化し、空気圧駆動との比較で優位性を示すことができた。しかし、多数の燃焼人工筋肉の集積化は実施できなかったため、一部未達成とした。

2-c. モデルの構築と位置づけの明確化(△)

- 目的: 燃焼人工筋肉のモデル化によって駆動原理を解明し、他のアクチュエータと比較を通して特性を明らかにすること。
- 実施内容: モデル化による発揮力と変位の算出を行ったが、外力負荷や外気温といった条件のモデリングに至らず、一部未達成とした。

(2) 詳細

本申請研究での研究項目、計画、最終的な目標達成状況を表1に示す。研究期間内の達成目標として燃焼人工筋肉の連続駆動方法の確立(目標①)、集積化燃焼駆動人工筋肉の具現化と評価(目標②)を設定した。それぞれの目標について3つの研究項目を設定し、2.5年間の計画に基づき研究を実施した。最右列に最終的な達成状況を記載しており、6つの研究項目について4つが達成(○)、2つが一部未達成(△)であった。以降に、それぞれの項目について記載する。

表1：研究期間で取り組んだ研究項目と達成状況

研究項目	2021 年度 (6ヶ月)	2022 年度	2023 年度	達成 状況
1. 燃焼人工筋肉の連続駆動方法の確立				
・a: 確実な着火を実現する着火システム開発	→			○
・b: 燃焼人工筋肉の構成材料の検討	→			○
・c: 連続駆動のための空気圧回路検討		→		○
2. 集積化人工筋肉の具現化と評価				
・a: 燃焼人工筋肉のモジュール化		→		○
・b: モジュール燃焼人工筋肉の集積化			→	△
・c: モデルの構築と位置づけの明確化			→	△

1-a. 確実な着火を実現する着火システム開発

集積化した燃焼人工筋肉の駆動は、各人工筋肉を任意のタイミングで駆動する必要がある、確実な着火が不可欠である。本研究期間前の着火成功率は50%程度であり、これを95%以上に向上することを目的とした。

燃焼人工筋肉は内部に滞留したジメチルエーテル(DME)をスパークで燃焼させ、駆動する。領域アドバイザーの平等先生から「着火直前状態の安定的な再現が重要」とアドバイスいただいたほか、着火に関する有用な書籍、論文なども情報をいただいた。これらの情報から、空燃比を始めとした着火作業の管理を行い、着火率が50%程度から90%程度まで大きく向上した。これに加えて、2-aで後述するモジュール化による安定的なスパーク発生により、95%以上の着火成功率を達成できた。

1-b. 燃焼人工筋肉の構成材料の検討

人工筋肉を構成するゴム、繊維などについて検討した。最終的には、ゴム材料には天然ゴム、繊維材料にはポリエステルを選定した。ゴム材料について、高温や繰り返し伸縮に強いシリコンゴムが適すると考えていたが、燃焼人工筋肉の瞬発的な圧力上昇を活かすために粘性などの機械的特性の適する天然ゴムを選定した。天然ゴムは高温に弱い、室温25℃での繰り返し駆動試験において1Hzの駆動頻度であれば80℃を超えないことを確認しており、長時間の高頻度駆動を避けることで、天然ゴムでも十分な寿命を得られると考えた。繊維については、ゴム材料より高温となることはないため、既存のマッキベン型人工筋肉で実績のあるポリエステル製を選定した。

1-c. 連続駆動のための空気圧回路検討

連続駆動(ここで連続駆動とは、繰り返し駆動を指す)のためには、着火前の適切な空燃比の実現と着火後のスムーズな排気が必要である。一方で、集積化を見据えて複雑な付随システムの採用は避けたいと考えた。

図 1 に示す空気圧回路を用いて連続駆動に成功した。なお、図中の流量センサ、温度センサ、圧力センサは特性計測用であり、繰り返し駆動自体はこれらがなくても可能である。回路では常に上流から DME と空気の混合気体が供給されており、任意のタイミングでスパークプラグから着火する。これより、燃料供給や排気を制御するためのバルブが不要となる。燃焼時には急激に気体の体積膨張により人工筋肉が収縮し、その後スピコンを通して反応後の気体が排気される。10Hz の繰り返し駆動時の 2 秒間の内圧応答について図 3 に示す。内部圧力の上昇から、10Hz で安定して駆動することを確認した。排気孔が常に大気解放されるため燃焼時の内部圧力の低下が懸念されたが、圧力上昇が瞬間的に起こるため、本方式でも 150 kPa 以上の十分な圧力が得られることを確認した。

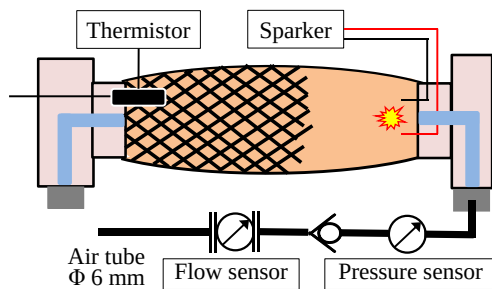


図 1 繰り返し駆動のための空気圧回路

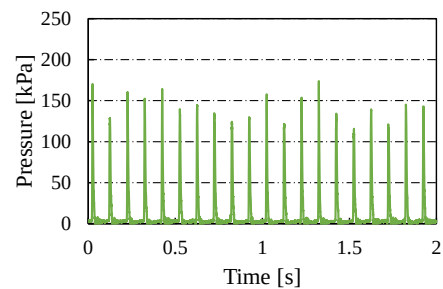


図 2 繰り返し駆動時の内圧

2-a. 燃焼人工筋肉のモジュール化

集積化を見据えて着火装置を内包した人工筋肉モジュール(図 3)を開発した。モジュールは McKibben 型人工筋肉 (長さ 120mm, 内径 12mm 網角 35°) をベースとし、内部に火花発生のためのスパークを有する。スパークはタングステン電極を陽極、アルミ筐体を陰極とし、間隙 2mm である(図 4)。本モジュールによる安定したスパークの発生および 1-a で述べた空燃比の管理などによって着火率が目標である 95%以上を達成した。



図 3 人工筋肉モジュールの外観

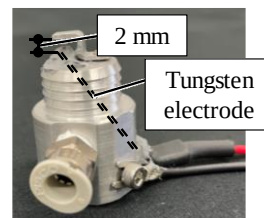


図 4 着火機能を有するターミナル

2-b. モジュール燃焼人工筋肉の集積化

本研究項目に関して、多数の人工筋肉の集積化ではなく筋骨格アームを用いた 2 本の人工筋肉の集積化駆動を評価した。理由は、多数の人工筋肉を集積化すれば発揮力の制御と

いった狙いの機能が得られることは基礎実験結果から明らかであったため、燃焼人工筋肉の応用先として期待できる筋骨格アームへの適用を行った。これより、達成状況は一部未達成とした。

図 5 に試作した筋骨格アーム CAD 図を示す。アームは拮抗させた 2 本の燃焼人工筋肉を備える。図 6 に拮抗配置した燃焼人工筋肉を交互に駆動させたときのロボットアームの角度を示す。なお、比較のためにバルブで駆動した場合の結果を点線で示した。結果から、瞬間的な応答は燃焼人工筋肉駆動の方が著しく速いが、人工筋肉が駆動した直後の角度は空気圧駆動の方がより安定した値を維持している。したがって、人工筋肉内部での燃焼と人工筋肉への給気のタイミングを制御することで応答性が速く、より安定したシステムが構築できると考える。

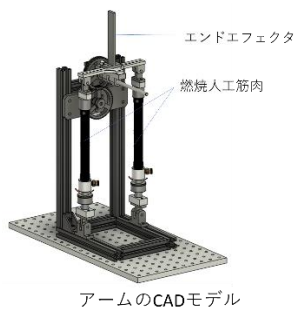


図 5 筋骨格アームの CAD 図

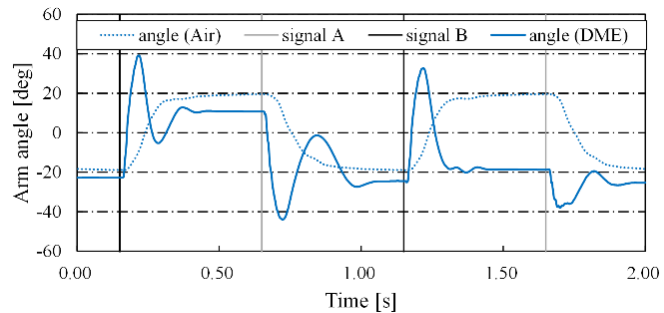


図 6 既存手法とのアーム角度応答の比較

2-c. モデルの構築と位置づけの明確化

モデル化によって駆動原理の解明およびアクチュエータ性能の一般化を行い、アクチュエータの位置づけを明らかにすることを目的として研究を実施した。研究期間では、燃焼人工筋肉単体の内部燃焼についてモデル化を行い、燃焼により発生する熱エネルギーおよび気体組成の変化が圧力変化に与える影響から、燃焼人工筋肉の発揮力と変位を算出した。実験データとの比較結果を図 7 に示す。このように発揮力や変位についてはモデル化を行い整合性を確認できた。しかし、アクチュエータへの外力負荷や、空燃比を変更した際の挙動、外気温の影響などのモデリングには至らなかった。これより、達成状況は一部未達成とした。

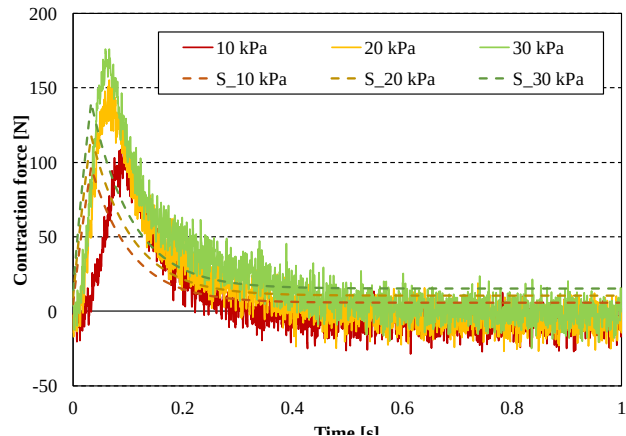


図 7 モデルと実験結果の発揮力の比較

その他：レーザー着火の試み

燃焼人工筋肉を小型化する場合、着火にスパークを用いることが難しい。そこで燃焼人工筋肉の MEMS 分野での利用を目指して、マイクロチップレーザーによる駆動を試みた。実験の結果、着火に成功した。

3. 今後の展開

本研究はソフトアクチュエータの最大の課題の一つであった「応答性」について正面から取り組むものである。本研究期間で確実な着火および繰り返し駆動を安定的に実現できたことは、燃焼人工筋肉の汎用アクチュエータとしての利用に大きく近づいたと自負している。そのため、人工筋肉形状に限らず近年盛んに研究されているシリコン整形による流体駆動ソフトロボット等も含めて、既存アクチュエータとの置き換えや併用といった無数の応用が期待できる。

さらに、繰り返し駆動手法の研究から、単一バルブで多数の燃焼人工筋肉を駆動する手法について着想し、実験的にも実現可能性を確認している。その概念図を図 8 に示す。図 8 右に示すように DME と空気の混合気体を単一のバルブから複数の燃焼人工筋肉へと供給し、スパーカの駆動で駆動制御する。これより、従来の流体駆動アクチュエータの課題であった、バルブ数の増大という課題の解決が期待できる。

以上のように、本研究期間以降も活発に研究活動を展開する予定である。

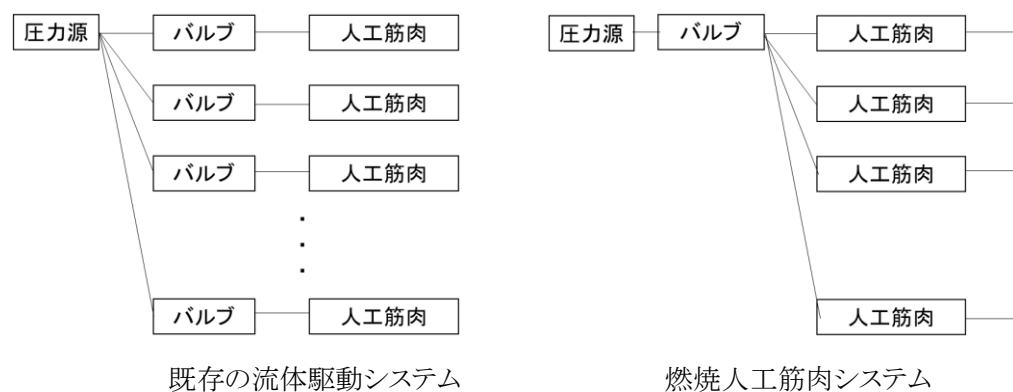


図 8 多数のアクチュエータを駆動する際のシステム構成

4. 自己評価

研究目的の達成状況

研究項目 6 項目のうち 4 項目達成 2 項目一部未達成という結果であった。研究遂行において重視していた燃焼人工筋肉の確実な着火および繰り返し駆動を達成できた点は、今後の研究発展に鑑みると高く評価できると考えている。一方で、一部未達成項目が 2 つあったことに加えて、期間中にインパクトのある論文を執筆できなかった点は反省したい。これらについては、本研究期間終了後にも取り組みを継続する予定である。

研究の進め方（研究実施体制及び研究費執行状況）

まず研究費について、RA を 1 名雇用でき、研究資金も研究規模に対して十分な金額であったため、円滑に研究を実施できる環境であった。研究実施体制について、研究期間の開始から 1 年半は大学に所属していたため良好な実施環境であったが、最終年度は本務先を企業の研究所に異動しての実施であったため、研究時間の捻出が課題となった。大学所属時と比較するとやや研究時間は減少したと同時に、RA との連携も取りにくくなってしまった。

研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果

本研究はソフトアクチュエータの社会実装課題の一つである応答性を解決しうるものである。そのため、ヒトと機械の協調・協働する社会へ貢献するものだと考えている。また、燃焼を利用したアクチュエータの代表例として自動車のエンジンなどの内燃機関があるが、本研究のように小型軽量で人が持ち運べる構成のものは社会実装していない。燃焼の活用は、瞬発的、高エネルギー密度といった電動アクチュエータにはない魅力があり、協働ロボットの他にも動作アシストや携帯工具など、多くの応用先が存在すると考えている。

その他領域独自の項目（研究者としての個の確立）

私自身のキャリア構築において、今回取り組んだ燃焼型人工筋肉に関する研究は非常に有意義なものであった。このような突飛なアイデアから創出される研究は時に研究の分野では軽視されがちであるが、2年半というまとまった期間の支援を受けることで基礎的な検討を進められ、学会などでも興味を持たれることが増えた。最終年度には解説論文の執筆依頼もあり、本研究の認知度が高まっていると感じた。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 0件

(2) 特許出願

研究期間全出願件数: 1 件(特許公開前のものも含む)

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

- 奥井学, 中村太郎, "DME の燃焼により駆動する人工筋肉アクチュエータ", 日本フルードパワー学会誌, Vol. 54, No. 5, pp.211-214, (2023.9) (解説論文)
- 澤橋龍之介, 奥井学, 中村太郎, "ジメチルエーテルの燃焼を利用した小型ソフトアクチュエータの開発—DME 燃焼駆動型人工筋肉を用いたロボットアームの繰り返し瞬発動作—", 第 41 回日本ロボット学会学術講演会, 1C1-04, (2023.9)
- 澤橋龍之介, 奥井学, 中村太郎, "ジメチルエーテルの燃焼を利用した小型ソフトアクチュエータの開発—DME 燃焼駆動人工筋肉の連続駆動—", 2023 年春季フルードパワーシステム講演会, (2023.5)
- 澤橋龍之介, 圓城竜斗, 奥井学, 中村太郎, "ジメチルエーテルの燃焼を利用した小型ソフトアクチュエータの開発—DME 燃焼駆動人工筋肉の基礎特性—", 2022 年秋季フルードパワーシステム講演会, (2022.11)
- 奥井学, , 圓城竜斗, 中村太郎, "ジメチルエーテルの燃焼により駆動する人工筋肉アクチュエータの筋骨格系への応用", ロボティクス・メカトロニクス講演会 2022, 2A1-L09, (2022.6)