

平成 31 年 4 月 26 日現在

機関番号：24506

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2018

課題番号：15K13342

研究課題名(和文)スーパー釣り糸人工筋肉の開発

研究課題名(英文)Development of Super Fishing-line artificial muscle

研究代表者

多田 和也 (Kazuya, Tada)

兵庫県立大学・工学研究科・准教授

研究者番号：90305681

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、釣り糸人工筋肉に及ぼす作製条件の影響を検討した。50℃までの範囲においてより高い作製温度は成功率を高め、20℃における成功率は重量にかかわらず50%より低いことが分かった。より高い温度およびより高い重量での作製はより長い人工筋肉をもたらす、より長い筋肉はより大きく作動するが、収縮比はほぼ一定に保たれる。また、導電糸で作られた人工筋肉では、研究者によって受け入れられている従来の仮定とは対照的に、ジュール加熱による作動中に電気抵抗が非線形に大幅に減少することが見出された。この現象は、加熱による人工筋肉の変形に伴う伝導経路の変化を反映していると説明することができる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究ではパワースーツなどへの応用が期待される自己コイル化現象を用いた釣り糸人工筋肉について検討を行った。作製温度や荷重により、作製成功率や出来上がる人工筋肉の長さが変化することを明らかとした。また、導電糸人工筋肉の電気抵抗が動作中に変化する現象について見出し、物理的な説明を加えた。これらの結果は釣り糸人工筋肉の実用化に向けて、重要な知見となると考える。

研究成果の概要(英文)：In this study, the effect of the preparation conditions on the fishing-line artificial muscles made of nylon 66 monofilament fishing-line is examined. It is found that higher preparation temperature yields higher success rate up to 50℃ and the success rate at 20℃ is lower than 50% regardless of the weight. Although preparation at higher temperature and higher weight yields longer artificial muscle and the longer muscle shows larger actuation, the contraction ratio is kept almost constant. On the other hand, in an artificial muscle made from conductive thread, a non-linear considerable reduction of electrical resistance was observed during actuation by Joule heating, in contrast to the conventional assumptions accepted by the researchers. The phenomenon can be explained as reflecting the change in the conduction path accompanying deformation of the artificial muscle due to heating

研究分野：有機エレクトロニクス

キーワード：人工筋肉 釣り糸 人工樹脂 熱収縮 電気抵抗

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

人体の動作をアシストするための装着型ロボットが近年注目を集めている。装着型ロボットは、単に人間が行う力仕事をアシストするためだけでなく、高齢化により失われる筋力を補い、自律的な生活をなるべく長く行うことで生活品質 (QoL) を維持することや、けが人のリハビリテーションのアシストを行うことなど、安価に普及すれば様々な面で役立つ存在となる。このようなロボットに使用するアクチュエータ (人工筋肉) としては、安価であることはもちろん、異常な動作をした場合や使用者が転倒した場合などでも人体を傷つけることの無いよう、ある程度柔軟性を持った素材で、かつ最小及び最大サイズが物理的に規定されたものが望ましい。

2014年に米国テキサス大学ダラス校の Baughman らによって発表された、釣り糸をねじり上げた形の熱収縮型人工筋肉 (以下「釣り糸人工筋肉」と呼ぶ。) はまさにこのような用途に適していると考えられる。(C. S. Haines & R.H. Baughman et al., “Artificial Muscles from Fishing Line and Sewing Thread,” Science, Vol. 343 (2014) 868.) 釣り糸人工筋肉は、重量負荷をかけながら釣り糸をねじり上げることで自発的にコイル状としたものである。このコイルに重量負荷をかけて伸長した状態にしたものを加熱・冷却すると、コイルの全長が可逆的に収縮・伸長する。これは長さ方向に大きな負の線膨張をするということであり、基礎科学的にも興味深い現象と考えられる。

申請者は、いち早くこの釣り糸人工筋肉の再現実験に取り組み、基礎的な検討を行ってきた。釣り糸人工筋肉は、これまで申請者も研究を行ってきた導電性高分子を利用した人工筋肉 (K. Tada et al., Synthetic Metals, Vol. 135-136 (2003) 101 など) に比して、強靱性に優れ、乾式動作で数%に及ぶ線収縮性を示し、オーダーメイドが極めて容易であるなど、数多くの優れた特徴を示す。また、市販の釣り糸や裁縫糸を加工して作ることができるため、材料は極めて安価であるなど、発展の余地が大きいと考えられる。

2. 研究の目的

釣り糸人工筋肉はまだ研究の歴史が浅く、研究開始当初は特に作製環境がコントロールされていないようであった。しかしながら、特に作製温度は高分子主鎖の延伸・配向の度合いに大きな影響を与えると考えられる。そこで本研究では、作製条件を詳細に規定して釣り糸人工筋肉を作製することに加え、熱収縮型の人工筋肉であるということから、そのままでは電気信号による直接の制御は難しい。そこで、ヒータと一体化した扱いやすい形の釣り糸人工筋肉を作製し、その動作特性のモデリングと制御方法の開発までも視野に含めた基礎的な検討を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

本研究で用いる釣り糸人工筋肉は図1に示すようにナイロンなどでできた糸にねじりを加えることで誘発される自己コイル化現象により作製される。この人工筋肉は加熱により収縮するが、その原理はナイロン繊維に存在するゴム状組織が加熱により収縮するゴム弾性が幾何学的に増幅されたものであるとされている。市販の導電糸を材料とすることで、通電によって発生したジュール熱によって収縮する人工筋肉が簡単に作製できる。

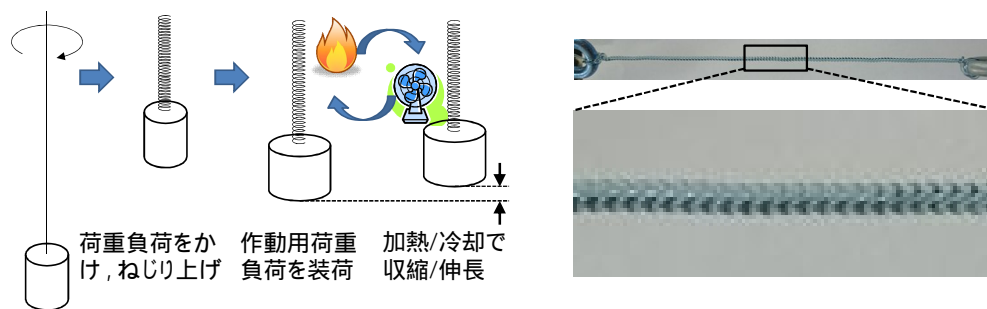


図1 (左) 自己コイル化現象による人工筋肉の作製と動作の模式図 (右) 人工筋肉の写真

(1) 釣り糸人工筋肉における作製条件の影響

図2(a)に示すように材料となる直径0.84mmのナイロン製の釣り糸に、下端が回転しないようにスライドレールに固定した状態で所望の荷重を吊り下げ、上端をステッピングモータでねじり上げることで人工筋肉を作製した。作製温度を制御するために、図2(b)に示すようにオープン中に人工筋肉作製装置を構築し、荷重と温度をパラメータとして、作製条件が人工筋肉作製の成功率と動作特性にどのような影響を与えるかを実験的に調べた。

適当な動作荷重を吊り下げ、ヒートガンを用いることで動作させた。レーザー変位計で測定した人工筋肉の下端の変位と人工筋肉中央部に設置した熱電対で測定した温度をデータロガーにより記録した。

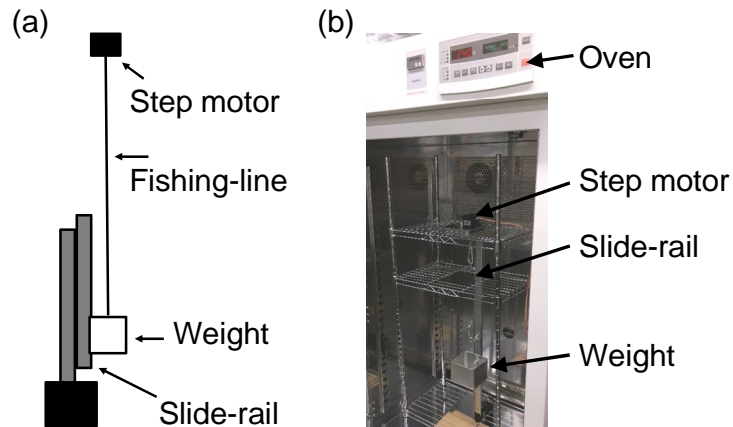


図2 本研究で使用した作製装置の(a)概要と(b)写真

(2)動作中の導電系人工筋肉の電気抵抗の変化に関する変形の寄与

直径 0.5 mm の銀メッキされたナイロン製の裁縫用導電糸を用いることで人工筋肉を作製した。16 cm の導電糸全体を自己コイル化することで、全長 4 cm の 70 回巻きの人工筋肉を作製することができた。形状を固定するために 140°C のオーブンで 1 時間アニーリングを行い、測定に供した。

導電系人工筋肉の下端に 100 g の荷重を吊り下げ、振幅 0.5 A、周期 2 分、デューティ比 50% の矩形波を印加することで動作させた。レーザー変位計で測定した人工筋肉の下端の変位と印加電圧をデータロガーにより記録した。人工筋肉中央部に取り付けた K 熱電対による温度の測定も試みたところ、熱電対の熱容量が相対的に大きいため変位に比べてかなり遅い応答しか得られなかったが、電流の ON 時と OFF 時にはそれぞれ 70 °C と 20 °C に概ね飽和していることが確認できた。

また図 3 に示すサーモグラフィ画像から、人工筋肉全体にわたって比較的均一な加熱が行われていることがわかる。

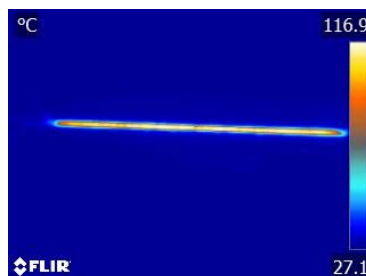


図3 通电中の導電系人工筋肉のサーモグラフィ画像

4. 研究成果

(1)釣糸系人工筋肉における作製条件の影響

上記のように釣糸系人工筋肉は単純な工程で作製されるが、図 4 に示すようにしばしば作製

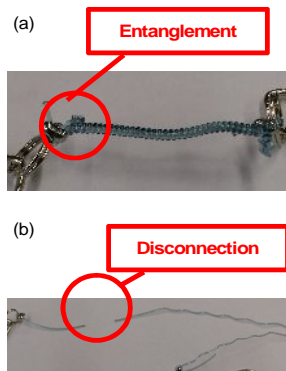


図4 作製失敗の様子: (a)もつれ(b)切断

に失敗することが経験された。失敗の形態には、図4(a)のようにもつれてしまう場合と、(b)のように切断してしまう場合の二種類があった。表1に特定の温度及び荷重における釣り糸人工筋肉の作製成功率を示す。表から分かるように、50℃までの範囲においてより高い作製温度は成功率を高め、20℃における成功率は重量にかかわらず50%より低いことが分かった。高温になるほど作製に使用できる荷重の範囲と成功率が増加する。また、荷重が軽すぎる場合にもつれによる失敗が起きやすく、荷重が重すぎると切断する傾向がある。

同じ長さの釣り糸から作製した場合、一般的には、作製時の温度が高く、荷重が重いほど出来上がった人工筋肉は長くなった。しかしながら、表2に示すように加熱した際の収縮率は長く作製されたものほど低い傾向があるようであったが、顕著な違いは見出されなかった。

表1 特定の温度及び荷重における釣り糸人工筋肉の作製成功率

Weight(g)	20℃ (%)	30℃ (%)	40℃ (%)	50℃ (%)
300			0(1)	0(1)
400		0(1)	30(1)	20(1)
500	0(1)	20(1)	60(1)	50(1)
600	40(2)	50(2)	80(1)	70(2)
700	40(2)	70(2)	100	60(2)
800	20(2)	50(2)	40(2)	30(2)
900	30(2)	50(2)	30(2)	30(2)
1000	10(2)	50(2)	50(2)	20(2)
1100	10(2)	0(2)	10(2)	10(2)
1200	0(2)		0(2)	10(2)
1300				20(2)
1400				0(2)

*各条件で10回試行 **カッコ内は失敗した場合の形態(1:もつれ 2:切断)を示す。

表2 異なった作製条件での釣り糸人工筋肉の動作の特性
(動作荷重 600 g, 温度 30 から 120℃)

Temperature/Weight at Preparation	Length (cm)	Stroke (mm)	Contraction ratio (%)
30℃ /600 g	4.0	2.46	5.37
50℃ /1100 g	4.7	2.72	5.16

(2)動作中の導電系人工筋肉の電気抵抗の変化に関する変形の寄与

導電系を用いた釣り糸人工筋肉の熱—力学的特性については詳細な定式化が行われている一方で、電気的特性についてはほとんど検討されていない。電気抵抗については殆ど一定であり、温度や収縮量に対して線形に微小な変化をするものと仮定されてきたが、本研究において、導電系で作製した人工筋肉の定電流駆動を行った際に、従来の仮定とは全く異なり、電気抵抗が収縮量に対して非線形に大きく低下することが見出された。

図5に1サイクル分の導電系人工筋肉の長さとの印加電圧の波形を示す。収縮に伴い、人工筋肉へ印加される電圧も変化することが観測された。すなわち、電流印加当初は2.6Vの電圧を示すが、時間とともに急速に減少し、約1.6Vで飽和する。導電系人工筋肉はコイル状ではあるが強磁性体が含まれないためインダクタンスは極めて小さく、また抵抗も $10^0 \Omega$ のオーダーであることから、 10^0 s オーダーの時定数を持つこのスパイク状の波形はインダクタンス成分によって生じたものではないことがわかる。すなわち、何らかの原因で導電系人工筋肉の電気抵抗が 5.2Ω から 3.2Ω へ変化したと考えられる。

図6に連続する5サイクル分の駆動中の導電系人工筋肉の長さとの印加電圧の関係を示す。人工筋肉が冷却されて伸び切っている46mmから通電加熱により収縮するが、41mm付近までは

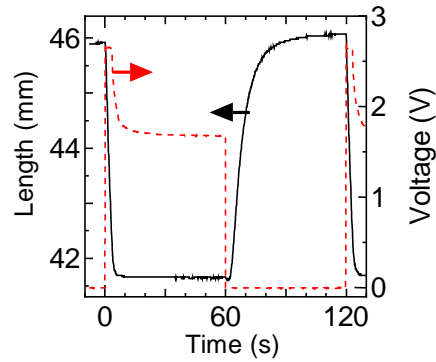


図5 導電系人工筋肉の長さと同加電圧の波形

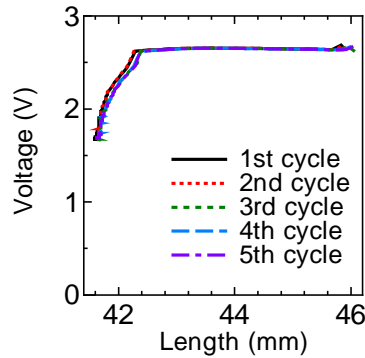


図6 導電系人工筋肉の長さと同加電圧の関係

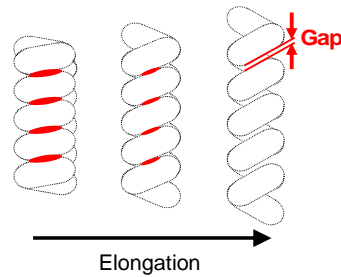


図7 変位に伴う隣接コイル間の接触の変化の模式図

ほとんど電圧に変化がなく、41 mm 付近まで収縮すると急に電圧が低下していることがわかる。この結果は、導電系人工筋肉の電気抵抗が収縮量に対して線形に微小な変化をする、という従来の仮定が適当でないことを明確に示すものである。

図7に示す概念図を用いて、観測された変位と電気抵抗の関係の説明を試みる。導電系人工筋肉は基本的にはらせん状の線抵抗である。しかしながら、導電系は有限の太さを持つため、収縮した状態では隣接するコイル間が大きく接触しており、これが上述のらせん状の導電経路に加えて円筒状の導電経路をもたらし、全体として電気抵抗が低下する。引き延ばされるにつれ、コイル間の接触面積が減少するため円筒状の導電経路の電気抵抗が増加し、コイル間に間隙が開くほど引き延ばされると、らせん状の線抵抗のみとなる。

以上のように、導電系を用いた自己コイル化人工筋肉において、ジュール加熱による駆動中における変形によって電気抵抗が非線形的に大きく低下することが実験的に見出された。これは動作中の導電系人工筋肉がほとんど定抵抗であるという従来なされてきた仮定が妥当でないことを示す重要な結果であると考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

1. 多田和也, 郭誠起「導電系人工筋肉の電気抵抗における変形の寄与」電子情報通信学会和文論文誌C, 印刷中(査読あり)
2. K. Tada, "Effects of Preparation Conditions on Fishing Line Artificial Muscle," Journal of the Society of Electrical Materials Engineering, Vol. 26, pp. 88-91 (2017)

〔学会発表〕(計6件)

1. 多田和也, 郭誠起「銀メッキ導電系で作った人工筋肉の作製と電気駆動 電気抵抗への変形の寄与」電子情報通信学会有機エレクトロニクス研究会(2019)
2. 吉田幸史, 多田和也「釣り糸人工筋肉における銀ペーストを用いた電気駆動」(電子情報通信学会関西支部優秀論文発表賞受賞)平成30年電気関係学会関西連合大会 (2018)
3. 野村啓斗, 多田和也「釣り糸人工筋肉の収縮率測定方法の改善」平成30年電気関係学会関西連合大会 (2018)
4. 吉田幸史, 多田和也「釣り糸人工筋肉の収縮率測定時における温度分布の影響」平成30年電気学会 基礎・材料・共通部門大会 (2018)
5. K. Tada, “Effects of Preparation Conditions on Fishing Line Artificial Muscle,” 7th International Conference on Electrical Materials Engineering (ICEME2017) (2017)
6. 多田和也「釣り糸人工筋肉における作製温度と熱アニーリングの効果」第78回応用物理学会秋季学術講演会 (2016)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.eng.u-hyogo.ac.jp/eecs/tada/tada.htm>

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。