

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：32689

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2020

課題番号：19K22981

研究課題名（和文）磁気弾性ゴムファイバーの創製および出力可変式持ち上げ補助スーツへの生体応用

研究課題名（英文）Creation of a magnetic elastic rubber fiber and application for the output adjustable type of a lift up suit

研究代表者

田中 英一郎（Tanaka, Eiichiro）

早稲田大学・理工学術院（情報生産システム研究科・センター）・教授

研究者番号：10369952

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：シリコンに鉄粉を混入し、磁気を与えることにより硬度変化させることが可能な磁気弾性ゴムファイバーを創製した。シリコンの硬度やシリコンに対する鉄粉の割合、鉄粉の形状およびその大きさなどを組み合わせて数種類のゴムファイバーを作製し、磁気を与えたときに硬度変化の高い組み合わせを確認した。そのゴムファイバーを持ち上げ動作補助スーツに導入し、持ち上げ動作試験を行い、あらかじめスーツに張力を与えずとも磁気を与えることにより脊柱起立筋に補助効果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、磁気を与えたときに硬度変化の高い組み合わせを得られたこと、特にランダムな形状の鉄粉が有効であることは、学術的にも意義があると考えられる。また、従来パンプ式持ち上げ動作補助スーツ共通の課題として、強い補助力を得るためにはより拘束感の増す予張力を与えなければならなかったが、この磁気弾性ゴムファイバーを補助スーツに導入することにより、予張力を与えずに補助可能となり、拘束感を軽減することにより社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：We created a magnetic elastic gum fiber, which was mixed iron powder in silicone, and was adjustable stiffness by magnetizing. Various combinations were made by changing the stiffness of silicone, the ratio, shape and size of iron powder. The most changeable type while magnetizing could be selected, and installed into a lift up assistance suit. Then the effectiveness of the back muscle assistance was confirmed by magnetizing without pre-tension.

研究分野：福祉工学，機構学，機械要素学，機械設計

キーワード：磁気弾性ゴムファイバー 硬度可変 持ち上げ動作補助 予張力回避

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

少子高齢化により、高齢であっても作業をせざるを得ない状況が増加し、また建設現場、物流、組立工場、介護等、様々な現場での作業者の職業疾病の6割が腰痛であり、持ち上げ動作の補助が求められている。そこで腰部負担を軽減するため、様々な持ち上げ動作補助装置が開発されてきた。モータ等のアクチュエータを用いたアクティブ式は補助力が強く、重量物を持ち上げる際には有効だが、高価で、数キロ単位の重量があり、また金属等のフレームが必要となる。一方、ゴムやばねなどを用いたパッシブ式は、着衣内に装着可能で数百グラム程度と軽量、かつ安価で洗濯も可能であるが、補助力が弱い。さらにいずれのタイプもほとんどが腰のみの補助である。腰部の負担を軽減するには、膝を曲げ腰を落としてから持ち上げることが推奨されているが、この場合、腕を前に出して持ち上げることになり、腕に対するモーメントが増加する。特に女性スタッフの多い介護現場では、腰だけでなく腕に対する補助の要望があった。そこで申請者らは、腕と腰を肩越しにゴムベルトで連結し、腕と腰の両方を連動して補助可能なパッシブ式の持ち上げ動作補助スーツを開発した。しかし、補助力をより強く得たいとき、持ち上げ動作前から予め張力を与えるようゴムベルトを引っ張るが、これにより拘束感が発生し、持ち上げ以外の動作も抑制し、腰部以外の部位への負担を増加させるといったパッシブ式共通の問題があった。

### 2. 研究の目的

持ち上げ以外の動作を抑制せず、拘束感を軽減するには、予張力を与えずにゴムもしくはばねのばね定数を可変とし、目的に応じて反力の強さを調整可能とすることを提案する。これを実現するため、本研究では磁気弾性ゴムファイバーを創製し、磁気を与えることによりゴムのばね定数を変化させることを検討する。その際、様々なシリコンと鉄粉の種類の組み合わせの中から変化率の高いものを抽出し、これを持ち上げ動作補助スーツに導入し、持ち上げ動作時の筋活動評価により予張力を与えずに補助効果を確認することを目的とする。

### 3. 研究の方法

磁気弾性ゴムファイバーは、シリコンと鉄粉を混ぜて作製した。シリコン内の鉄粉濃度は予備実験および文献より30%とした。シリコンは硬さの異なる2種類(A35, A10)を用意し、鉄粉は比較的均一な球状の粒で直径3.8-5.3 $\mu\text{m}$ のものと、ランダムな形状で粒の直径が5-9 $\mu\text{m}$ のもの2種類を用意した。これらを組み合わせて4種類のゴムファイバーを作製した。

まず、非磁界内における引張実験を行い、比例限度と破断点を4種類で比較した。ゴムファイバーはダンベル上8号型試験片の形状とし、張力と変化量を計測した。結果を表1に示す。A35のシリコンを用いたもののばね定数は、A10を用いたものよりも明らかに硬かった。しかし破断点を見ると、A35, A10どちらもランダム形状の鉄粉の方が高かった。ランダム形状の方がシリコンと分離しにくいことが確認できた。

表1 非磁界内での引張試験結果

	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
シリコン	A35	A35	A10	A10
鉄粉	均一	ランダム	均一	ランダム
第1段階のばね定数 [N/mm]	0.40	0.40	0.09	0.07
第2段階のばね定数 [N/mm]	1.00	1.20	0.27	0.23
比例限度 [%]	34	39	73	92
破断点 [%]	93	117	179	202

次に、磁界内において引張試験を実施し、コイルに電流を流してばね定数の変化率を確認した。ゴムファイバーの形状は円柱型とし、ソレノイドアクチュエータのコイルを用いてその中にゴムファイバーを通して実験を行った。その結果、ばね定数の変化率は、Type 1は11.6%、Type 2は16.7%、Type 3は28.9%、Type 4は36.2%となった。これより、A10を用いた方がばね定数の変化率が高く、またランダム形状の鉄粉を用いた方が高くなることが確認できた。これより、持ち上げ動作補助スーツに導入する磁気弾性ゴムファイバーはType 4とすることとした。

持ち上げ動作補助スーツは、すでに製品化されている e. z. UP®を用いることとした。腕から肩越しに背中を通り、膝の裏まで到達しているベルトの中にゴムベルトが腕と足の2箇所で使用されており、それらゴムベルトと同程度のばね定数になるよう計算した。また、これらのばねが補助スーツを使用して物を持ち上げた際、平均で約80mm伸ばされることを確認した。また、Type4

の破断点 202%の 70%である 141%を限界値として計算し、直径 20mm、長さ 81mm (ただしクランプ部含まず) のゴムファイバーを作製した。また、コイルはゴムファイバーの内径占有率を 60%、になるよう設計し、また長さ 81mm に限界変形量 114.3mm を加えて 195.3mm を有効コイル長とした。コイルは、内部磁界を 22.4mT となるよう巻き数、エナメル線の直径、電流値等を計算して決定した。以上のゴムファイバーおよびコイルを図 1 のように持ち上げ動作補助スーツへ実装した。

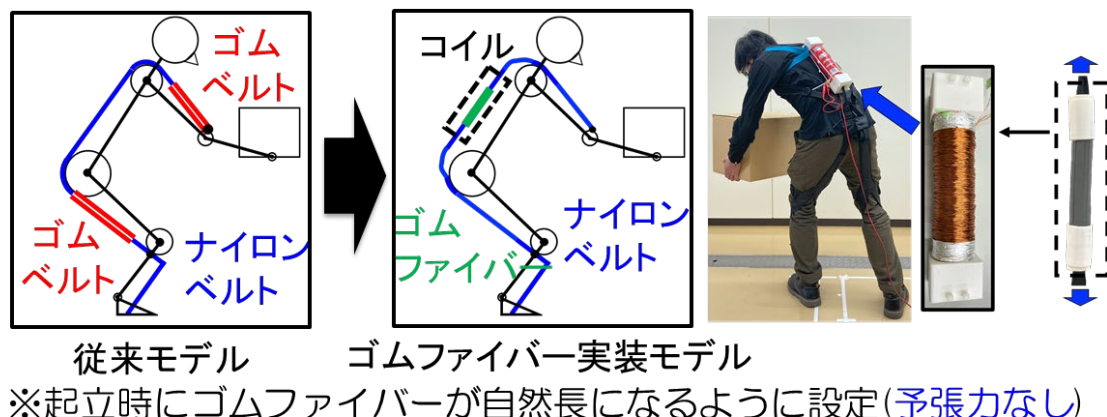


図 1 磁気弾性ゴムファイバーの持ち上げ動作補助スーツへの実装

本スーツを用いて、質量 10kg の箱を床から腰の高さまで 5 秒かけて持ち上げる動作を 24-25 歳健康常男性 3 名で実施した。動作中の脊柱起立筋および上腕二頭筋の筋電を計測し、スーツ非装着状態を基準として、従来モデル装着、ゴムファイバー実装モデル装着のときの筋活動を %MVC にて比較した。その際、ゴムファイバー実装モデルおよび従来モデル共に、被験者が起立姿勢時にゴムファイバーおよびゴムベルトが自然長である、つまり予張力がゼロであるようにベルト長を設定した。被験者 3 名の結果を平均したところ、脊柱起立筋については、従来モデルでは有意差が得られなかったが、ゴムファイバー実装モデル装着時に有意差 ( $p < 0.05$ ) があり、電流 0A の時点で 6%、1A で 13%、1.2A で 18% の筋活動軽減が確認できた。一方、上腕二頭筋は、全ての結果に有意差が得られなかった。その理由として、ゴムファイバーは補助すべき脊柱起立筋の直上に存在し、その変化が直接筋肉に影響を与えることができたが、ゴムベルトを集約したため上腕二頭筋の位置には伸縮しないナイロンベルトがあり、また肩越しに通る部分での摩擦が存在するため、上腕二頭筋に至るまでにゴムファイバーの反力を使い果たした可能性が考えられる。

#### 4. 研究成果

本研究により、磁気弾性ゴムファイバーを創製し、比較的柔らかいシリコンとランダム形状の鉄粉を混ぜることによりばね定数の変化率の高い結果を得られることを確認した。また、本ゴムファイバーおよびコイルを持ち上げ動作補助スーツ用に設計および実装し、持ち上げ動作時の筋活動を評価した。その結果、磁気弾性ゴムファイバーは電流によってその硬度を変化させることができ、ゴムファイバー直下にある脊柱起立筋への筋活動低減効果を確認することができた。しかし上腕二頭筋には効果が得られず、今後上腕二頭筋の直上にもゴムファイバーおよびコイルを設置することにより、効果が得られると考える。

新型コロナウイルスの拡大により大学が一時期閉鎖され、入構制限が続いている中での実験であったため、実験回数および被験者数が当初の予定より大幅に縮小せざるを得なかったが、本実験により、パッシブ式アシストスーツ共通の問題である予張力を入力せずとも、自由にばね定数を変化させることにより必要な補助力を適宜調整できることを確認し、今後拘束感のない、装着感の良い補助スーツの開発に貢献すると考える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yun-Ting Liao, Toshifumi Ishioka, Kazuko Mishima, Chiaki Kanda, Kenji Kodama, Eiichiro Tanaka	4. 巻 32 巻1号
2. 論文標題 Development and Evaluation of a Close-Fitting Assistive Suit for Back and Arm Muscle -e.z.UP(R)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 157-172
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jrm.2020.p0157	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 3件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 田中英一郎, 伊藤開, 石岡利文, 上原利恵, 神田千秋, 三宅文雄, 児玉賢士
2. 発表標題 磁気粘弾性エラストマを用いた補助力可変式持ち上げ動作補助スーツの開発
3. 学会等名 日本機械学会2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yun-Ting Liao, Toshifumi Ishioka, Kazuko Mishima, Chiaki Kanda, Kenji Kodama, Eiichiro Tanaka
2. 発表標題 Development of a Close-Fitting Assistive Suit with Adjustable Structure for Arm and Back as Needed - e.z.UP(R)
3. 学会等名 The 6th IFToMM International Symposium on Robotics and Mechatronics (ISRM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中英一郎
2. 発表標題 医工・産学連携によるライフサポート機器の開発
3. 学会等名 日本設計工学会中国支部2019年度研究発表講演会特別講演会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中英一郎
2. 発表標題 インクルーシブデザインによるライフサポート機器の開発
3. 学会等名 制振工学研究会技術交流会 基調講演（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中英一郎
2. 発表標題 医工・産学連携によるライフサポート機器の開発
3. 学会等名 呉高専 特別講演（招待講演）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	三宅 丈雄  (Miyake Takeo)  (50551529)	早稲田大学・理工学術院（情報生産システム研究科・センター）・准教授   (32689)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------