

令和 5 年 6 月 17 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K11923

研究課題名（和文）筋膜の張力伝播作用の身体表面への外化機構による運動機能の拡張方法の解明

研究課題名（英文）Approach to Extending Motor Function by Externalizing Tension Propagation of Fascia as Structures Outside the Body

研究代表者

上杉 繁（Wesugi, Shigeru）

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：80350461

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：全身の筋肉の協調により巧みな動作が可能となる。筋肉の協調には神経的な機序のみならず直接的な相互作用も関与しており、本研究では特に身体部位間をつなぐ張力の伝播機能に着目した。そこで身体内部において生じている筋や筋膜による張力作用、骨格による圧縮力に対する作用からなるテンセグリティの機能を、身体の外側に構築する方法とそれに基づいた構造体による身体動作への作用の調査に取り組んだ。使用者の身体サイズに対応して拡張可能な基本ユニット、それを組み合わせた装着型の構造体と剛性調整方法、張力を伝達させつつ身体に装着する方法を見出した。また、身体内部の張力伝播の効果を高める方法についても調査を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

筋緊張の伝達経路はアナトミー・トレインと呼ばれ、経路網内で張力変化が伝達することで、全身を使った連続的な動きや姿勢維持に寄与している。解剖学的知見も示され、運動療法において実践的に活用されている。経路上の筋が連動し、離れた部位が協調してより大きな力を発揮させたり、負荷を分散させたりなどの、知見の活用を範疇に含めた張力伝達機能のさらなる解明が期待される。

研究成果の概要（英文）：Humans are able to perform skillful movements by coordinating muscles throughout the entire body. Direct and dynamic interactions between body parts, as well as neural mechanisms, contribute to muscular coordination. We focused on tension propagation based on tensegrity structure, which consists of muscles and fascia for providing tension and skeleton for resisting compressive forces inside the body. Therefore, we conducted a study on design approach to constructing the tensegrity structure outside the body and effects of the tensegrity structure on body movements. A fundamental unit was devised that can expand to accommodate the user's body size. This unit can be used to create tensegrity structures consisting of multiple units. Additionally, a method was developed for wearing the tensegrity structures on the body while transmitting tension. Furthermore, approaches to improving the effectiveness of tension propagation within the body were investigated.

研究分野：ヒューマンインタフェース工学

キーワード：テンセグリティ 張力伝播 筋膜 アナトミー・トレイン 身体拡張 動作支援 剛性調整 触圧覚刺激

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、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

人間の全身には 600 を超える筋肉が存在するとも言われており、目的とする動作を実行するために超多自由度の筋肉をどのように制御するのかという問題は古くから考えられてきた。近年では、神経回路メカニズムに加えて、腕と脚との連動や、四肢の動きに伴う姿勢調整などにおいて、全身における張力の伝播による力学的な作用が関与していることも明らかになっている。筋緊張の伝達経路となる筋膜の結合経路はアトミー・トレインと呼ばれ、経路網内で張力変化が全身に伝達することで、全身を使った連続的な動きや姿勢維持を可能にしていると考えられている[1]。リハビリテーションの臨床領域で筋緊張伝播に関する知見は活用されてきており、筋膜の生理学的研究[2]、歩行への影響に関するバイオメカニクス研究[3]へと展開されている。

また、わが国の労働人口減少に伴い、製造業をはじめとする身体的負担が大きな作業を対象とした、省力化、自動化の技術は喫緊の課題である。道具を使い分けたり、作業対象物が変わったり、人の判断がその都度必要であったりなど、人が必要とされる作業場面は数多く存在している。身体装着型の支援ツールの重要性がますます高まる中、支援ツールのメカニズム、支援効果の向上の研究が展開され、実用化が進んでいる。

### 2. 研究の目的

身体のある部分と他の部分の小さな力を協調して大きな力を発揮したり、各部分を少しずつ動かすことで全身をより大きく動かしたり、局所的に加わった負荷を全体に分散させたりなど、全身にわたる張力伝播作用により、協調運動を拡張するための方法に関する研究に取り組む。身体内部の機構を調べる既存の方法として、解剖学的調査や超音波画像などの生体計測、計測したデータを用いた数値シミュレーションなどがあげられる。本研究では、身体内部で作動していると考えられるメカニズムに着目し、それに基づいた構造体を実体として構築し、その特性を調査する。すなわち、身体内部で生じている全身への張力伝播という力学的な機能を、実験的な構造体として具現化し、その構造自体や構造と身体との相互作用について調べる。これにより、身体内部の制約を受けずに構造自体の設計、構築が可能であり、さらには装着した構造体による動作への影響についての調査も可能とする。こうした着眼点に基づいた、張力を伝播する力学的なメカニズムを有する実験的構造体の設計方法を明らかにする。

さらに、重量物運搬を支援するスーツへの可能性についても検討する。一般的に、身体動作支援スーツは内骨格型と外骨格型の 2 種類に分類される。内骨格型スーツは身体外部にフレームを構築せず、人間の骨格構造を利用して、弾性体やアクチュエータによって動作を支援する。軽量で使用者の動作が制限されにくく、運搬する対象は比較的軽量(約 2 - 10 kg)である。外骨格型スーツは、高剛性のフレームに関節部を組み込んだ構造を身体に装着し、アクチュエータにより動作を支援する。重量物(約 15 - 90 kg)の運搬を可能とするが、スーツ自体の重量も大きく、動作の自由度が構造によって制限される。こうした既存のスーツの利点を両立するような装着型構造体の可能性についても検討する。

### 3. 研究の方法

全身への張力伝播を行う構造を検討する上で、はじめに、解剖学的な知見から筋膜の結合経路であるアトミー・トレインにおける代表的な配置に着目した。そして、線形ばねとワイヤによって身体の遠部位間を繋ぐ張力伝播ラインを、身体表面上に構成する実験的なスーツを構築した。両手によるボールの投擲や両手両足による梯子上りなどの動作を通して、張力伝播の作用について検討した。

さらに、張力を効果的に伝達するには、張力と拮抗する機能も必要であることから、筋や筋膜による張力作用、骨格による圧縮力へ対する作用からなる、テンセグリティ構造に注目した。テンセグリティ構造は、バックミンスター・フラーによって提唱され、不連続な圧縮材が引張材により統合されている構造である[4]。その研究や利用は特に建築分野において展開されてきたが、昨今では、テンセグリティ構造の特徴である軽量さと柔軟性の高さを活用し、ロボティクスの領域でも研究が進められている。

まずは、テンセグリティ構造体の一般的な特徴について調査し、Ingber らの分析をもとに[5]、4 つの機能に整理した。

(1)張力伝播：構造を構築する際に引張材へ初期張力を付与することにより、構造が安定状態となる。外力によって一部の引張材への張力が強まると、構造全体に張力が伝播し、張力が高まった状態で安定する。また、引張材、圧縮材の一部が機能しなくなった場合、少し緩んだ状態で均衡する。

(2)軽量性：圧縮材のみから構成される構造体と比較し、少ない材料で同程度の強度の安定構造を可能とする。これにより構造全体を軽量化できる。

(3)変形と硬化：外力を付与し続けると張力が全体に分散し、構造は破壊せず大規模に変形する。その際、張力材の向きが外力に対応して変わること、非線形的に変形しにくくなる。

(4)拡張性：テンセグリティ構造を互いに接続し、張力ネットワークを広げることができる。

本研究ではこうしたテンセグリティ構造の特徴に着目し、基本ユニット、それを組み合わせた構造体の設計方法、さらには構造体の剛性調整、身体への装着方法ならびに装着による動作への影響について検討することにした。また、身体内部における張力伝播のメカニズムに着目し、伝播の効果を直接高める方法についても調査を行う。

#### 4. 研究成果

歩行動作時の全身の動きに追従可能であること、重量物を保持した移動を支援することを目標として、装着型テンセグリティ構造体の設計に必要な条件をまとめた。

(1)十分な柔軟性：歩行動作や重量物を背負い運搬する動作では、体幹の回旋、屈曲、伸展などの全身動作が行われる。構造体を身体に装着した際に、これらの動きを阻害せず、追従する。

(2)十分な剛性：構造体自体の重量による身体への負荷を抑えつつ、身体の代わりに重量物を支持するために、十分な剛性を持ちながらも軽量であること、すなわち比強度を高める。

(3)身体への接続性：(1)、(2)の機能を実現するため、基本的に構造体が地面に接地し重量を支える構造とし、下端は足部において接続する。

(4)拡張性：様々な体格の人に合わせて装着可能となるように、身体サイズに合わせて構造体を拡張する。

以上の条件のもとに、身体そのものを維持し、全身運動の根幹となっている脊椎の働きに着目した。引張材と棒状の圧縮材のみで構成される純粋なテンセグリティ構造体は、身体動作に対して柔軟性が過剰で安定しない可能性もある。そこで、圧縮材が引張材の一部機能を代替しているハイブリッド構造に着目し、脊椎を基に考案された Tom Flemons によるモデルに基づいて構築することにした[6]。

基本ユニットは、四面体の重心に位置する球から4つの頂点に支柱が伸びた樹脂製の構造において、支柱の先端同士を張力材で接続している。そして、剛性を高めるために、張力材を変えることに加えて、ユニットの支柱の数を6本に変更した八面体ユニットも考案した。四面体ユニットおよび八面体ユニットの各5つを連結して構築した構造体と、圧縮方向に荷重したときの変位との関係を図1、2に示す。これにより、構造として剛性を調整する方法も確認した。

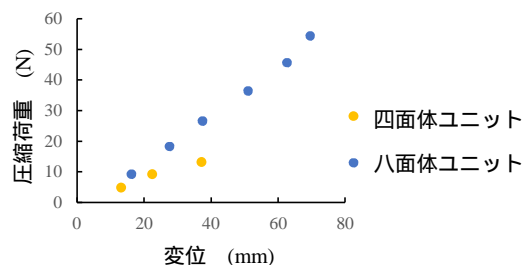
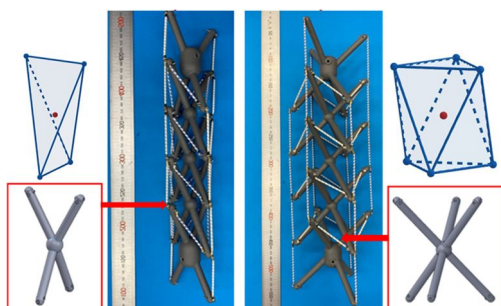


図1. 四面体ユニット(左)と八面体ユニット(右) 図2. 各ユニットの圧縮荷重と変位の関係

また、ユニット間の距離をアクチュエータにより変更することにより、剛性を動的に調整する方法についても検討した。

基本ユニットを組み合わせて構築した身体装着型テンセグリティ構造体を図3に示す。ユニット数の調整により使用者の身体サイズに合わせた構築が可能であり、図内の構造体の全長は長手方向に約1250 mm、重量は合計で約7.2 kgとなった。構造体が全身動作に追従しつつ、構造体の張力が伝達可能な状態で身体に装着するため、膝関節部、股関節部においてスライドしながら接合する方法も考案した。

図4に示すように、構造体を装着し、立位状態から体幹の屈曲、伸展、回旋動作および下肢関節の屈曲、伸展動作に追従可能であることを確認した。

さらに、構造体を装着した際の身体動作への影響を調査するため、重量物を保持した姿勢維持、歩行動作を対象に、関節角度、筋電図、構造体の張力を計測した。装置開発者において、約16 kgのおもりを背部の肩付近に載せ、左右にずれないように手で支えながら、指定した速さですり足、通常歩行により移動した。歩行における股関節の伸展に寄与する大殿筋、膝関節の伸展に寄与する内側広筋の筋活動の例を図5に示す。すり足歩行に比べて通常歩行での筋活動が減少する様子が見られ、関節角度を比較すると、すり足歩行と比較して通常歩行時に股関節と膝関節が伸展傾向にあることも確認された。

以上より、テンセグリティ構造体を装着し、関節が伸展した状態で利用することで、動作における筋負担を軽減する事例も観察され、身体動作支援スーツへの展開可能性も示唆された。

さらに、身体内部の張力伝播の効果を高める方法についても調査を行った。関節の屈伸に合わせて皮膚へ触刺激を付与する運動療法に着目し、実験的に調査する方法についても検討した。



図3 . 装着型テンセグリティ構造体

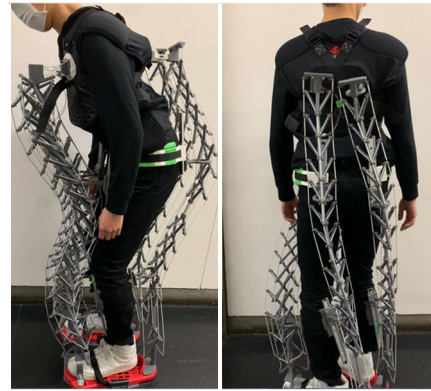
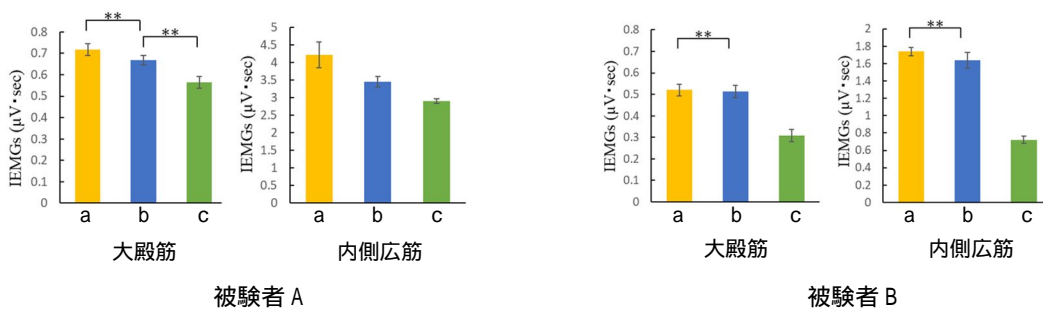


図4 . 体幹の動作に追従する様子



- a. すり足歩行, 構造なし, 重りあり
- b. すり足歩行, 構造あり, 重りあり \*\*p<0.01
- c. 通常歩行, 構造あり, 重りあり

図5 . 歩行実験における積分筋電図

<引用文献>

[1] Myers, T.W., (板場英行, 石井慎一郎 訳), アナトミー・トレイン 徒手運動療法のための筋筋膜経線, 医学書院, 第3版, 2017

[2] Huijing, P.A., Epimuscular myofascial force transmission: A historical review and implications for new research. International society of biomechanics Muybridge award lecture, Taipei, 2007, Journal of Biomechanics, 42(1), 2009, pp.9-21.

[3] Zorn,A., Schmitt,F.J., Hodeck,K.F., Schleip,R., Klingler,W., The Elastic Function of the Lumbar Fascia in Human Gait, Conference: European Workshop on Movement Science, 2007

[4] Fuller,R.B., Applewhite,E.J., Tensegrity, Synergetics:explorations in the geometry of thinking, Macmillan, New York, 1975

[5] Ingber,D.E., Landau,M., Tensegrity, Scholarpedia, <http://www.scholarpedia.org/article/Tensegrity>, 2012 (2023.6.14 アクセス)

[6] Flemons,T., Geometry of Anatomy, Intension Design, <http://intensiondesigns.ca/geometry-of-anatomy>, 2007 (2023.6.14 アクセス)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Hiroki Wakashima, Kodai Kishino, Shinpei Iizuka, Masahiro Tamachi, Shigeru Wesugi
2. 発表標題 Design of Wearable Tensegrity Structures Focusing on the Tension Propagation Function throughout the Body
3. 学会等名 24th International Conference on Engineering Design (ICED23) (国際学会)
4. 発表年 2023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	玉地 雅浩  (MASAHIRO Masahiro)  (70388700)	藍野大学・医療保健学部・准教授    (34441)	

	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
研究協力者	林 守  (HAYASHI Mamoru)	早稲田大学大学院・創造理工学研究科 総合機械工学専攻   (32689)	
研究協力者	芳賀 豪  (HAGA Go)	早稲田大学大学院・創造理工学研究科 総合機械工学専攻   (32689)	
研究協力者	青木 芳樹  (AOKI Yoshiki)	早稲田大学大学院・創造理工学研究科 総合機械工学専攻   (32689)	

## 6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	梅本 拓也  (UMEMOTO Takuya)	早稲田大学・創造理工学部 総合機械工学科  (32689)	
研究協力者	若島 拓輝  (WAKASHIMA Hiroki)	早稲田大学大学院・創造理工学研究科 総合機械工学専攻  (32689)	
研究協力者	玉木 岳  (TAMAKI Gaku)	早稲田大学大学院・創造理工学研究科 総合機械工学専攻  (32689)	
研究協力者	飯塚 信平  (IIZUKA Shinpei)	早稲田大学大学院・創造理工学研究科 総合機械工学専攻  (32689)	
研究協力者	岸野 航大  (KISHINO Kodai)	早稲田大学大学院・創造理工学研究科 総合機械工学専攻  (32689)	
研究協力者	青山 凌太  (AOYAMA Ryota)	早稲田大学・創造理工学部 総合機械工学科  (32689)	
研究協力者	井上 寛介  (INOUE Kansuke)	早稲田大学・創造理工学部 総合機械工学科  (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
---------	---------