

令和 5 年 4 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H04070

研究課題名（和文）筋腱の力学的および代謝的特性を踏まえたトレーニング法およびメンテナンス法の開発

研究課題名（英文）Development of training and maintenance methods based on the mechanical and metabolic properties of muscles and tendons

研究代表者

久保 啓太郎（Kubo, Keitaro）

東京大学・大学院総合文化研究科・教授

研究者番号：70323459

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：収縮条件下の筋スティッフネス（以下アクティブ筋スティッフネス）が、角速度条件の影響を受け、日頃実施するトレーニング速度と関連していることが示された。一方、中年群におけるパワーの加齢低下の要因を探るために、下腿三頭筋を対象にして筋腱の力学的特性および跳躍能を若年群と比較したが、両群間で有意な差はみられなかった。腱障害の治療として実施されている鍼治療による腱血液循環変化に膝蓋腱とアキレス腱で差異が認められたが、痛みを伴わない指圧刺激ではそのような部位差がみられず、さらに鍼治療と同等の変化が認められた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では新たにアクティブ筋スティッフネスが、測定時の角速度や日常のトレーニング時の速度に影響を受けることが示された。さらに、腱ヒステリシスが測定時の弛緩時間に大きく影響することも明らかになった。さらに、特別な資格や用具を必要としない指圧刺激が、腱障害の治療に効果がある鍼治療と同程度に腱血液循環を変化させることが明らかになり、手軽に実施可能な腱障害予防のメンテナンス法として指圧の有用性が示された。

研究成果の概要（英文）：It was shown that muscle stiffness under active conditions (i.e., active muscle stiffness) was influenced by angular velocity conditions and was related to the training velocity performed on a daily basis. On the other hand, in order to explore the factors contributing to the age-related decline in power in the middle-aged group, the mechanical properties of muscle-tendon and jumping ability were compared with those of the younger group in the plantar flexor muscles, but no significant differences were found between the two groups. Acupuncture, which is used to treat tendon disorders, showed differences in tendon blood circulation in the patellar and Achilles tendons, but acupressure stimulation, which does not cause pain, showed no such regional differences and showed changes comparable to those seen with acupuncture.

研究分野：運動生理学

キーワード：筋スティッフネス 伸張－短縮サイクル 超音波

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

さまざまなスポーツ競技におけるパフォーマンスを向上させるためには、多くの運動で多用される「伸張-短縮サイクル」(主動作の前に主働筋を伸張させてから短縮する)運動の反動効果やパワー出力を高める必要がある。しかし、筋力向上や筋肥大のための筋力トレーニングに比べて、反動効果やパワーを高めるトレーニング(プライオメトリックス)に関する適切なプロトコルの検討は十分に行われていない(Kaneko et al 1983 Scand J Sports Sci)。我々はこれまでに、伸張-短縮サイクル運動における腱の機能的役割や可塑性(加齢やトレーニングなどに伴う変化)に関する研究を実施してきた。さらに、最近では収縮条件下での筋の力学的特性(アクティブ筋スティッフネス)の定量法を考案し、腱特性と併せて伸張-短縮サイクル運動における「バネ」について総合的に検討を重ねている。これらの研究を通じて、さまざまなスポーツ競技におけるパフォーマンス向上のためのパワートレーニング(プライオメトリックス)の適切なプロトコルの確立を目指している。さらに、ジャンプやランニングなどの疲労課題により関節スティッフネス(いわゆるバネ)が低下することは知られているが(e.g., Kuitunen et al 2002 Eur J Appl Physiol) 申請者らの測定手法によりバネ持久性の規定因子を特定し、そのトレーニング法の検討も可能になる。一方、スポーツ競技におけるパフォーマンスを高めるためには、日々実践するトレーニングだけでなく、疲労回復や障害予防を念頭に置いたメンテナンスにも注目する必要がある。しかし、腱は使いすぎなどによる障害の発症頻度が高いにも関わらず、そのメンテナンス法に関しては主に経験に基づいた手法が採用されているのが現状である。我々はヒト生体で非侵襲的に腱の血液循環およびコラーゲン線維配向を定量する手法を考案し、健常者を対象にして各種療法の影響について上述の力学的特性も含めて検討を行っている(Kubo et al 2011 Int J Sports Med)。したがって、これらの測定手法を応用することにより、トレーニングからの回復や障害を予防するための腱のメンテナンス法を確立できるかもしれない。

## 2. 研究の目的

本研究では上記の背景を踏まえて、以下の3点を目的とした。

- (1) 負荷および速度を考慮した目的に応じたプライオメトリックスの確立と応用
- (2) 筋腱の力学的特性(バネ)の持久性を高めるトレーニング法の確立と応用
- (3) 使いすぎによる腱障害予防のためのメンテナンス法の確立と応用

## 3. 研究の方法

- (1) アクティブ筋スティッフネスに及ぼす角速度の影響とトレーニングの影響

本研究のために新たに作成した足底屈トルク測定器を用いて、一般成人を対象にして、最大下の等尺性収縮中に100から600度/秒での急速伸張を課し、トルク変化と筋束長変化からアクティブ筋スティッフネスを定量した。さらに、日頃高速度でトレーニングを実施している陸上短距離選手を対象にして、上記と同様の測定を実施し一般成人と比較した。

- (2) 中年群と若年群の筋腱の力学的特性と跳躍能の比較

17名の中年群と21名の若年群を対象にして、下腿三頭筋のパッシブ筋スティッフネス(4種の角速度条件)、アクティブ筋スティッフネス(5種の角速度条件)、アキレス腱のスティッフネスおよびヒステリシス(2種の伸張速度条件)および足関節のみを用いた反動の有無による2種の跳躍を測定した。

- (3) 短潜時伸張反射と筋束動態との関係

5種の角速度で急速伸張(足背屈)を課した際のヒラメ筋の短潜時伸張反射(最大振幅)およびヒラメ筋の筋束長を測定した。併せて、角速度条件に伴うヒラメ筋のアクティブ筋スティッフネスの変化について、これまでの研究で得られている腓腹筋のデータと比較した。

#### (4) 指圧刺激と鍼刺激が腱の血液循環に及ぼす影響

我々の先行研究でアキレス腱に対する鍼刺激が腱血液循環を著しく高めることが明らかになっている。しかし、鍼治療は特別な資格を必要とし、手軽に実施できる療法とは言い難い。そこで同じように腱に対し力学刺激を与える指圧刺激が腱の血液循環に及ぼす影響を検討した。

#### (5) 指圧刺激が膝蓋腱とアキレス腱の血液循環に及ぼす影響

我々の先行研究で鍼刺激による腱血液循環変化が、アキレス腱に比べて膝蓋腱でほとんど見られず、その要因として膝蓋腱周辺の痛み閾値がアキレス腱周辺よりも低いことが挙げられた。それを実証するために、痛みを伴わない指圧刺激による血液循環変化を両腱で比較した。

### 4. 研究成果

#### (1) アクティブ筋スティッフネスに及ぼす角速度の影響とトレーニングの影響

一般成人では100から300度/秒までアクティブ筋スティッフネスは増加し、300度/秒を超える角速度条件ではアクティブ筋スティッフネスが低下した。一方、日頃から素早い動作でのトレーニングを実施している陸上短距離選手では、100から300度/秒までは一般成人と差が見られなかったが、500及び600度/秒条件で短距離選手が有意に高い値を示した。

#### (2) 中年群と若年群の筋腱の力学的特性と跳躍能の比較

幾つかの先行研究では中年群において筋力よりもパワーの加齢低下が顕著であることが示されている。しかし、本研究ではそれらの結果とは異なり、全ての筋腱の力学的特性および跳躍能に両群間で差が認められなかった。

#### (3) 短潜時伸張反射と筋束動態との関係

角速度が高い条件ほど、短潜時伸張反射は大きく、筋束伸張速度も大きくなった。しかし、全ての角速度条件において、短潜時伸張反射の最大振幅量と筋束伸張速度との間には有意な相関関係がみられなかった。従って、短潜時伸張反射の大きさは、筋束動態以外の要因が関連していることが示唆された。さらに、腓腹筋の場合と異なり、ヒラメ筋では最も低い100度/秒条件でのアクティブ筋スティッフネスが最も高く、角速度の増加に伴い低下する傾向が見られた。これらの筋間の違いは、筋線維組成の違いに起因していることが推察された。

#### (4) 指圧刺激と鍼刺激が腱の血液循環に及ぼす影響

腱に対して力学的刺激を与える指圧刺激により、鍼刺激の場合と同様な腱血液循環の増加が認められた。この結果は、鍼刺激における雀啄刺激(鍼先を小刻みに動かす手技)で顕著に腱血液循環に変化が見られることと同様に、腱に対する力学刺激が大きく関係していることが示唆された。

#### (5) 指圧刺激が膝蓋腱とアキレス腱の血液循環に及ぼす影響

痛みを伴わない指圧刺激による腱血液循環変化は、膝蓋腱とアキレス腱で同程度観察され、鍼刺激の場合とは全く異なる結果が得られ、我々の仮説(鍼刺激による部位差は、痛み閾値の差に起因)を支持するものとなった。さらに、アキレス腱における血液循環変化は、心拍数変化と正の相関関係が見られ、代謝亢進によるものである可能性が示唆された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Kubo K, Ikebukuro T, Yata H	4. 巻 12
2. 論文標題 Mechanical properties of muscles and tendon structures in middle-aged and young men	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-05795-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kubo K	4. 巻 122
2. 論文標題 Effect of short latency stretch reflex on passive and active muscle stiffness in the soleus muscle in vivo	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Eur J Appl Physiol	6. 最初と最後の頁 1303-1312
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00421-022-04930-6	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 -
1. 著者名 Kubo K	4. 巻 22
2. 論文標題 Relationship between short latency stretch reflex and fascicle behavior in the soleus muscle in vivo	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 J Musculoskelet Neuronal Interact	6. 最初と最後の頁 364-368
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -
1. 著者名 Yasuda A, Sasajima S, Kosaka T, Kubo K	4. 巻 97
2. 論文標題 Changes in tendon blood circulation and heart rate variability after intermittent compression to patellar and Achilles tendons	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Clin Biomech	6. 最初と最後の頁 105690
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.clinbiomech.2022.105690	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 -

1. 著者名 Sasajima S, Yasuda A, Kosaka T, Kubo K	4. 巻 23
2. 論文標題 Effect of relaxation time on hysteresis of human tendon in vivo	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 J Musculoskelet Neuronal Interact	6. 最初と最後の頁 84-89
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 Kubo K	4. 巻 11
2. 論文標題 Maximal fascicle shortening velocity measurements in human medial gastrocnemius muscle in vivo	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physiol Rep	6. 最初と最後の頁 e15541
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14814/phy2.15541	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kouno M, Ishigaki T, Ikebukuro T, Yata H, Kubo K.	4. 巻 20
2. 論文標題 Effects of strain rate on mechanical properties of tendon structures in knee extensors and plantar flexors in vivo	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sports Biomech	6. 最初と最後の頁 887-900
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/14763141.2019.1615541	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kubo K, Ikebukuro T, Yata H.	4. 巻 35
2. 論文標題 Effects of 4, 8, and 12 repetition maximum resistance training protocols on muscle volume and strength	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J Strength Cond Res	6. 最初と最後の頁 879-885
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1519/JSC.0000000000003575	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kubo K, Ikebukuro T, Yata H.	4. 巻 9
2. 論文標題 Effects of plyometric training on muscle-tendon mechanical properties and behavior of fascicles during jumping	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physiol Rep	6. 最初と最後の頁 e15073
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14814/phy2.15073	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kubo K, Miyazaki D, Yata H, Tsunoda N.	4. 巻 8
2. 論文標題 Mechanical properties of muscle and tendon at high strain rate in sprinters	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physiological Reports	6. 最初と最後の頁 e14583
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14814/phy2.14583.	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kubo K, Ikebukuro T, Yata H.	4. 巻 111
2. 論文標題 Effect of angular velocity on active muscle stiffness in vivo	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Biomechanics	6. 最初と最後の頁 110007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jbiomech.2020.110007.	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 -

1. 著者名 Kubo K, Iizuka Y, Yajima H, Takayama M, Takakura N.	4. 巻 26
2. 論文標題 Acupuncture- and intermittent compression-induced changes in blood circulation of tendon	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J Alter Comp Med	6. 最初と最後の頁 231-238
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1089/acm.2019.0345.	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 -

1. 著者名 Ishigaki T, Kubo K	4. 巻 71
2. 論文標題 Mechanical properties and collagen fiber orientation of tendon in young and elderly	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Clinical Biomechanics	6. 最初と最後の頁 5-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.clinbiomech.2019.10.003.	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 -

1. 著者名 Kubo K, Yajima H, Takayama M, Takakura N.	4. 巻 3
2. 論文標題 Comparison of changes in blood circulation of patellar and Achilles tendons during and after acupuncture	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transl Sports Med	6. 最初と最後の頁 581-588
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 Kubo K, Iizuka Y, Yajima H, Takayama M, Takakura N.	4. 巻 32
2. 論文標題 Changes in blood circulation of the tendon and heart rate variability during and after acupuncture	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Medical Acupuncture	6. 最初と最後の頁 99-107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1089/acu.2019.1397.	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 -

1. 著者名 Suzuki T, Sugawara K, Iizuka Y, Kubo K.	4. 巻 9
2. 論文標題 Effects of static stretching on active muscle stiffness with and without the stretch reflex	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J Phys Fitness Sports Med	6. 最初と最後の頁 37-41
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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2件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 久保啓太郎
2. 発表標題 ジャンプパフォーマンスと腱弾性エネルギーとの関係
3. 学会等名 日本体力医学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 久保啓太郎
2. 発表標題 鍼刺激がヒト腱の血液循環に及ぼす影響
3. 学会等名 全日本鍼灸学会大会東京大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

久保研究室 <a href="http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/kubokeitaro/">http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/kubokeitaro/</a>
--

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
---------	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------