

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26282173

研究課題名(和文)筋および腱の力学的特性からみた「バネ」の機能的役割と可塑性

研究課題名(英文)Functional role and plasticity of mechanical properties of muscle and tendon

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・准教授

研究者番号：70323459

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：最大下の等尺性足底屈筋力発揮中に、急速に足背屈させた際のトルクおよび筋線維長変化から、収縮条件下での筋ステイフネス(Active筋ステイフネス)を定量した。この手法を応用して、陸上短距離選手のActive筋ステイフネスは一般成人と差がみられなかったが、長距離選手は有意に高い値を示した。さらに、12週間のプライオメトリックトレーニングにより、Active筋ステイフネスが有意に増加し、急速な筋収縮中における腱伸張量が有意に高まった。これらの結果より、プライオメトリックトレーニングにより、筋および腱の力学的特性が伸張-短縮サイクル運動に適したものに変わることが示された。

研究成果の概要(英文)：We directly assessed active muscle stiffness according to actual length changes in muscle fibers during short range stretching. Using this technique, we found that active muscle stiffness of long distance runners was significantly higher than that of untrained subjects, whereas that of sprinters was not. Furthermore, active muscle stiffness and the tendon elongation during ballistic contractions significantly increased after 12 weeks of plyometric training, and these changes may be related to improved performances during stretch-shortening cycle exercises.

研究分野：運動生理学

キーワード：腱組織 筋ステイフネス 超音波

1. 研究開始当初の背景

この 10 数年でヒト生体における腱の力学的特性(腱ステイフネスなど)が測定可能になり、スポーツパフォーマンスに及ぼす腱特性の影響やその可塑性(加齢やトレーニングによる変化)が明らかになりつつある(e.g., Kubo et al. 2007 Med Sci Sports Exer)。しかし、実際の身体運動は筋が主な動力源であり、筋の力学的特性(筋ステイフネス)も考慮する必要がある。ヒト生体で筋ステイフネスを定量する方法としては、受動的に伸張させた際の受動張力と関節角度から求めるに留まっているが(e.g., Morse et al. 2008 J Physiol)、この手法はあくまでも「受動的(passive)条件」の筋ステイフネスである。実際のパフォーマンスとの関連を検証するためには、「能動的(active)条件」の筋ステイフネスが必要である。

2. 研究の目的

本研究では、上記の背景をもとにして、以下の 3 点を目的とした。

(1) Active 条件での筋の力学的特性(Active 筋ステイフネス)の測定法の確立

(2) 陸上短距離選手および長距離選手における Active 筋ステイフネス(Active 筋ステイフネスのトレーニングによる変化に関する横断的研究)

(3) プライオメトリックトレーニングが Active 筋ステイフネスに及ぼす影響(Active 筋ステイフネスのトレーニングによる変化に関する縦断的研究)

3. 研究の方法

(1) Active 条件での筋の力学的特性(Active 筋ステイフネス)の測定法の確立

我々が最近試作した足関節トルク測定器は、非常に短い時間での筋の伸張を実現するモータを装備している。この装置を用いて、僅かな急速伸張中の張力応答から Short range stiffness を求める法による筋ステイフネス、および超音波法から実測される筋線維長変化から求められた筋ステイフネスを比較した。等尺性最大筋力の 10~90% を維持させている間に急速に足関節を背屈させた際の足底屈トルクおよび腓腹筋内側頭の筋線維長変化から、Active 筋ステイフネスを算出した。

(2) 陸上短距離選手および長距離選手における Active 筋ステイフネス

陸上短距離選手(100m の公式記録 11.37±0.41 秒) 14 名、長距離選手(5000m の公式記録 14.43±0.16 分) 20 名、および一般成人 24 名を対象にして、Active 筋ステイフネスおよび腱ステイフネスを測定した。

(3) プライオメトリックトレーニングが Active 筋ステイフネスに及ぼす影響

11 名の被検者が、週に 3 回の足関節のみによるプライオメトリックトレーニングを 12 週

間実施した。その前後で、Active 筋ステイフネス、腱ステイフネス、関節ステイフネス(ドロップジャンプ中のトルクおよび角度変化から算出) および跳躍高を測定した。

4. 研究成果

(1) Active 条件での筋の力学的特性(Active 筋ステイフネス)の測定法の確立

発揮筋力が増加するにつれて、法および超音波法(実測法)ともに筋ステイフネスは増加した。しかし、各筋力発揮レベル毎における筋ステイフネスは、10%MVC を除いて法と実測法との間に有意な相関関係は認められなかった。したがって、関節角度変化から推定される法よりも、筋線維長変化を実測する超音波法は正しく Active 筋ステイフネスを評価できることが示唆された。さらに、この手法はヒト生体で伸張反射などの神経系の影響を含まないで筋の力学的特性を定量することを可能とし、これまでの腱特性の測定法と組み合わせることで、スポーツ現場での「バネ」の機能的役割の解明に貢献できる可能性がある。

(2) 陸上短距離選手および長距離選手における Active 筋ステイフネス

短距離選手と一般成人の間には、Active 筋ステイフネスに有意な差は認められなかった。跳躍中における関節トルクおよび関節角度変化から算出される関節ステイフネスは短距離選手が一般成人よりも高いことが知られているが、今回の結果は両群における関節ステイフネスの差は Active 筋ステイフネスでは説明できないことが示された。一方、長距離選手の Active 筋ステイフネスは、一般成人と比べて有意に高い値を示した。摘出筋を用いた研究より、遅筋線維は速筋線維よりもステイフであることが示されており、本研究の結果は長距離選手において遅筋線維を多く有していることと関連があるかもしれない。

(3) プライオメトリックトレーニングが Active 筋ステイフネスに及ぼす影響

12 週間のトレーニング後に、関節ステイフネスおよび Active 筋ステイフネスは有意な増加を示し、腱ステイフネスには変化が認められなかった。しかし、急速収縮中における腱伸張量は、トレーニング後に有意な増加が見られた。さらに、3 種の跳躍によるパフォーマンスは、いずれも有意な増加が認められた。これらの結果より、プライオメトリックトレーニングにより、筋および腱の力学的特性が伸張-短縮サイクル運動に適したものに変わることが示された。しかし、関節ステイフネスの増加率と Active 筋ステイフネスの増加率との間には有意な相関関係がみられなかったことから、プライオメトリックトレーニングにより伸張反射も含んだ筋ステイフネスの変化が関節ステイフネス変化に関連している可能性が示唆された。現在は、伸張反射を含めた Active

筋ステイフネスの定量法の開発を進めているところである。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計13件)

- (1) Kubo K, Yata H. Effects of concentric and eccentric training on the stiffness and blood circulation of patellar tendon. Sports Med Int Open 1: E43-E49, 2017. (査読有) DOI: 10.1055/s-0042-121000
- (2) Kubo K, Miyazaki D, Ikebukuro T, Yata H, Okada M, Tsunoda N. Active muscle and tendon stiffness of plantar flexors in sprinters. J Sports Sci 35: 742-748, 2017. (査読有) <http://dx.doi.org/10.1080/02640414.2016.1186814>
- (3) Ishigaki T, Kouno M, Ikebukuro T, Kubo K. Quantification of collagen fiber orientation in human tendons with the coefficient of variation of echogenicity. J Biomech 49: 3923-3927, 2016. (査読有) <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2016.11.004>
- (4) Kubo K, Miyazaki D, Yamada K, Shimoju S, Tsunoda N. Are the knee and ankle angles at contact related to the tendon properties of lower limbs in long distance runners?. SpringerPlus 5: 151, 2016. (査読有) DOI: 10.1186/s40064-016-1797-1
- (5) Kubo K, Miyazaki D, Yamada K, Yata H, Shimoju S, Tsunoda N. Passive and active muscle stiffness in plantar flexors of long distance runners. J Biomech 48: 1937-1943, 2015. (査読有) <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2015.04.012>
- (6) Kubo K, Miyazaki D, Shimoju S, Tsunoda N. Relationship between elastic properties of tendon structures and performance in long distance runners. Eur J Appl Physiol 115: 1725-1733, 2015. (査読有) DOI: 10.1007/s00421-015-3156-2
- (7) Kubo K. Effects of repeated concentric and eccentric contractions on blood circulation of tendon. Int J Sports Med 36: 481-484, 2015. (査読有) DOI: 10.1055/s-0034-1398649
- (8) Kubo K, Miyazaki D, Tanaka S,

Shimoju S, Tsunoda N. Relationship between Achilles tendon properties and footstrike patterns in long distance runners. J Sports Sci 33: 665-669 2015. (査読有) <http://dx.doi.org/10.1080/02640414.2014.962576>

- (9) Kubo K. Muscle oxygenation of superficial and deep regions in knee extensor and plantar flexor muscles during repeated isometric contractions. J Sports Med Phys Fitness 55: 251-257, 2015. (査読有) <http://www.minervamedica.it/en/journals/sports-med-physical-fitness/article.php?cod=R40Y2015N04A0251>
- (10) Kubo K. Active muscle stiffness in the human medial gastrocnemius muscle *in vivo*. J Appl Physiol 117: 1020-1026, 2014. (査読有) DOI: 10.1152/jappphysiol.00510.2014
- (11) Kubo K, Teshima T, Ikebukuro T, Hirose N, Tsunoda N. Tendon properties and muscle architecture for knee extensors and plantar flexors in boys and men. Clin Biomech 29: 506-511, 2014. (査読有) <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2014.04.001>
- (12) Kubo K, Teshima T, Hirose N, Tsunoda N. Growth changes in morphological and mechanical properties of human patellar tendon *in vivo*. J Appl Biomech 30: 415-422, 2014. (査読有) <http://dx.doi.org/10.1123/jab.2013-0220>
- (13) Kubo K, Teshima T, Hirose N, Tsunoda N. A cross-sectional study of the plantar flexor muscle and tendon during growth. Int J Sports Med 35: 828-834, 2014. (査読有) DOI: 10.1055/s-0034-1367011

[学会発表](計10件)

- (1) 久保啓太郎 ヒト生体における筋および腱の力学的特性の機能的役割と可塑性. 第43回日本臨床バイオメカニクス学会. 北海道立道民活動センターかでの(北海道・札幌市) 2016年10月8日
- (2) 久保啓太郎, 矢田秀昭 短縮性および伸張性トレーニングが腱の力学的特性および血液循環に及ぼす影響 第71回日本体力医学会. いわて県民情報交流センター(岩手県・盛岡市) 2016年9月23日

- (3) 久保啓太郎, 角田直也 筋および腱の力学的特性と筋線維組成との関係 第 67 回日本体育学会. 大阪体育大学 (大阪府・熊取町) 2016 年 8 月 24 日
- (4) 池袋敏博, 矢田秀明, 石垣智恒, 河野眞大, 久保啓太郎 抗重力筋である下肢筋群の筋体積と体重との関係 第 71 回日本体力医学会. いわて県民情報交流センター(岩手県・盛岡市) 2016 年 9 月 24 日
- (5) 石垣智恒, 河野眞大, 池袋敏博, 久保啓太郎 ヒト生体における腱の超音波輝度変動係数による腱コラーゲン線維配向の定量化 第 71 回日本体力医学会. いわて県民情報交流センター(岩手県・盛岡市) 2016 年 9 月 24 日
- (6) 河野眞大, 石垣智恒, 池袋敏博, 矢田秀明, 久保啓太郎 伸張速度が腱組織の力学的特性に及ぼす影響 第 71 回日本体力医学会. いわて県民情報交流センター(岩手県・盛岡市) 2016 年 9 月 24 日
- (7) 久保啓太郎, 矢田秀昭, 角田直也 陸上長距離選手の足底屈筋群における筋および腱の力学的特性 第 70 回日本体力医学会. 和歌山県民文化会館 (和歌山県・和歌山市) 2015 年 9 月 20 日
- (8) 久保啓太郎, 角田直也 陸上長距離競技成績に及ぼす下肢筋群の腱組織の力学的特性の影響 第 66 回日本体育学会. 国土館大学(東京都・世田谷区) 2015 年 8 月 25 日
- (9) 池袋敏博, 岡田純一, 久保啓太郎 男女重量挙げエリート高校生および全日本選手における大腿部の筋厚発達の相違 第 70 回日本体力医学会. 和歌山県民文化会館(和歌山県・和歌山市) 2015 年 9 月 20 日
- (10) 久保啓太郎 腱の機能的役割と可塑性 第 22 回日本運動生理学会. 川崎医療福祉大学(岡山県・高梁市) 2014 年 7 月 19 日

〔図書〕(計 3 件)

- (1) Kubo K. (分担) Blood Supply. In Metabolic Influences on Risk for Tendon Disorders (Drs. Ackermann PW & Hart DA 編集) pp 27-33, Springer International Publishing, 2016.
- (2) 久保啓太郎 (共訳) エンデュランストレーニングの科学(長谷川博 監訳) pp49-56, pp143-147, pp149-155, NAP, 2015 年
- (3) 久保啓太郎 (分担) 運動と筋腱」ニュー運動生理学 (宮村実晴 編) pp245-250, 真興交易(株)医書出版部, 2014 年

〔その他〕

ホームページ等

<http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/kubokeitaro/>

6. 研究組織

(1) 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・准教授

研究者番号: 70323459

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

手島 貴範 (TESHIMA, Takanori)

日本女子体育大学・附属基礎体力研究所・研究員

研究者番号: 10622988

(4) 研究協力者

池袋 敏博 (IKEBUKURO, Toshihiro)

石垣 智恒 (ISHIGAKI, Tomonobu)