

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月 17日現在

機関番号：12601  
 研究種目：若手研究（A）  
 研究期間：2009～2012  
 課題番号：21680047  
 研究課題名（和文）ヒト腱の力学的および代謝的因子の変化に基づいた運動プログラムの開発と応用  
 研究課題名（英文）Development and application of exercise program based on changes in the mechanical and metabolic factors of human 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

### 研究成果の概要（和文）：

ヒト生体における腱の力学的特性（超音波法）および血液循環（赤色分光法）に加えて、血液性状から1型コラーゲンの代謝動態を推定する手法を確立した。これらの手法を用いて、筋力トレーニングおよび脱トレーニングに伴う腱の力学的および代謝的因子の詳しい変化様相を明らかにした。さらに、これまで経験に基づいて行われてきた温熱療法、鍼治療および高気圧酸素療法による腱の血液循環の変化を明らかにした。

### 研究成果の概要（英文）：

Previously, we established the methodology of mechanical properties and blood circulation of human tendon. In addition, we developed to estimate changes in synthesis of type I collagen in human tendon. Using these techniques, we clarified the time course of changes in mechanical and metabolic properties of human tendon during training and detraining. Furthermore, we investigated the effects of heating, acupuncture, and hyperbaric oxygen therapies on blood circulation of human tendon.

### 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	9,800,000	2,940,000	12,740,000
2010年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2011年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2012年度	3,100,000	930,000	4,030,000
年度			
総計	20,800,000	6,240,000	27,040,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学・スポーツ科学

キーワード：トレーニング科学

#### 1. 研究開始当初の背景

腱は単に筋と骨を連結する役割だけでなく、さまざまなスポーツパフォーマンスと密接な関係があることが明らかにされつつある（e.g., Kubo et al. 1999 J Appl Physiol; Kubo et al. 2007 Eur J Appl Physiol）。さら

に、成長、加齢、トレーニングなどに伴い、ヒト腱の力学的特性（ステイフネス、ヒステリシス、など）が変化することが報告されている（e.g., Kubo et al. 2007 Med Sci Sports Exer）。我々は2006年から2008年に科学研究費・若手研究（A）の助成を受けて、

ヒト腱の血液循環の測定法を確立し (Kubo et al. 2008 Acta Physiol)、ヒト腱の力学的特性変化のメカニズム解明に着手している。さらに、非侵襲的な手法によるヒト腱のコラーゲン代謝の動態を把握する手法の開発がのぞまれている。これらの手法が確立されれば、ヒト生体における腱の可塑性を考慮した運動プログラムを提示でき、パフォーマンス向上および障害予防に貢献できる可能性が期待できる。

## 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) ヒト腱における1型コラーゲン代謝の測定法の確立

(2) トレーニングおよび脱トレーニングに伴うヒト腱の力学的および代謝的特性の変化

(3) ヒト腱の血液循環に及ぼすさまざまな治療法の影響

## 3. 研究の方法

(1) ヒト腱における1型コラーゲン代謝の測定法の確立

これまでの我々の研究結果より、腱ステイフネス増加の著しい等尺性運動と腱ステイフネス変化の少ない等張性運動をそれぞれ50回実施し、その前後、1、2、24、48、72時間後に採血を行い、1型コラーゲンの血中マーカの変動を測定した。分析に用いた血中マーカは、主に骨のコラーゲン合成を示す **bone-specific alkaline phosphatase (BAP)** と骨以外の組織 (腱や皮膚など) も含む組織由来のコラーゲン合成を示す **procollagen type 1 C-peptide (P1P)** であった。

(2) トレーニングおよび脱トレーニングに伴うヒト腱の力学的および代謝的特性の変化

9名の成人男性が、等尺性足底屈トレーニングを3ヶ月間実施し、その後3ヶ月間の脱トレーニングの影響を検証した。アキレス腱の腱ステイフネスおよびヒステリシス、上記の研究1で採用した血中P1Pを1ヶ月毎に測定した。

(3) ヒト腱の血液循環に及ぼすさまざまな治療法の影響

赤色分光法 (e.g., Kubo et al. 2008 Acta Physiol) を用いて、腱や靭帯の障害に効果があるとされている温熱療法、鍼治療、および高気圧酸素療法によるヒト腱の血液循環 (血液量および酸素飽和度) に及ぼす影響を検証した。

## 4. 研究成果

(1) ヒト腱における1型コラーゲン代謝の測定法の確立

主に骨の1型コラーゲンの合成を示す BAP は、等尺性および等張性運動条件ともに運動終了72時間後まで有意な変動はみられなかった。一方、骨以外の組織も含む組織由来の1型コラーゲン合成を示す P1P は等張性運動条件では有意な変動はみられなかったが、等尺性運動条件では24時間後に安静時より有意に高い値を示した。これらの結果より、腱ステイフネス変化が著しい等尺性運動条件を実施すると、約1日後に腱の1型コラーゲンの合成が高まる可能性が示唆された。

(2) トレーニングおよび脱トレーニングに伴うヒト腱の力学的および代謝的特性の変化

腱体積は、実験期間中を通じて有意な変化は認められず、3ヶ月間の筋力トレーニングでは腱の肥大は生じないことが示された。腱ステイフネスは、トレーニング開始3ヶ月後に有意な増加が認められ、トレーニング中止1ヶ月後でトレーニング前のレベルに戻った。この結果は、トレーニングに対する腱特性の変化はおそく、逆に脱トレーニングに対する腱特性の変化ははやいことを示唆している。さらに、血中P1Pはトレーニング開始2ヶ月後に有意な増加を示し、その時点で腱内のコラーゲン合成が高まっていることがうかがえた。

(3) ヒト腱の血液循環に及ぼすさまざまな治療法の影響

①温熱時間が腱の血液循環に及ぼす影響

下腿部をホットパックで60分間覆い、その間のアキレス腱の血液量および酸素飽和度を測定したところ、それらの増加は温熱開始35分まで続き、それ以降はプラトーになった。したがって、損傷部位の治療を促進するために各組織の血液量や酸素濃度を高く保つためには、35分以上の温熱時間が必要である可能性が示唆された。

②鍼治療による腱の血液循環変化の機序

鍼治療前、治療中および終了後40分間に渡って、両側のアキレス腱の血液循環を測定した。血液量および酸素飽和度ともに、治療中に刺激側は増加し、非刺激側には変化がみられなかった。治療終了後には、刺激側は高い値を維持し、非刺激側は徐々に増加し、両側における血液量増加量の間に関連係数が時間経過とともに増加した。

③高気圧酸素療法が腱の血液循環に及ぼす影響

気圧および吸引する酸素濃度を変えた3条件 (1.3気圧+50%酸素条件、1.3気圧+常酸素条件、常気圧+50%酸素条件) を比較し (実験1)、60分間の療法後1~72時間後までの回復過程の変化 (実験2) を測定した。実験1では、療法終了時における安静時に対する血液量および酸素飽和度の変化率は、3条件間で有意な差は認められなかった。実験2で

は、療法終了3時間後には安静時レベルまで戻った。

#### 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19件)

- (1) **Kubo K**, Ikebukuro T. Acute and chronic effects of hyperbaric oxygen therapy on blood circulation of human muscle and tendon *in vivo*. *J Strength Cond Res* 26: 2765-2770, 2012. (査読有) <http://journals.lww.com/nsca-jscr/abstract/2012/10000>
- (2) **Kubo K**, Ikebukuro T. Effects of duration of heating on blood circulation of human muscle and tendon *in vivo*. *Gazzetta Medica Italiana* 171: 731-737, 2012. (査読有) <http://www.minervamedica.it/en/journals/gazzetta-medica-italiana/issue.php?cod=R22Y2012N06>
- (3) **Kubo K**, Ikebukuro T, Maki A, Yata H, Tsunoda N. Time course of changes in the human Achilles tendon properties and metabolism during training and detraining *in vivo*. *Eur J Appl Physiol* 112: 2679-2691, 2012. (査読有) DOI: 10.1007/s00421-011-2248-x
- (4) **Kubo K**, Yuki K, Ikebukuro T. Changes in bone alkaline phosphatase and procollagen type-1 C-peptide after static and dynamic exercises. *Res Quart Exer Sport* 83: 49-54, 2012. (査読有) [http://www.aahperd.org/rc/publications/rqes/upload/RQES-TOC\\_Abstacts-Mar-2012.pdf](http://www.aahperd.org/rc/publications/rqes/upload/RQES-TOC_Abstacts-Mar-2012.pdf)
- (5) **Kubo K**, Yajima H, Takayama M, Ikebukuro T, Mizoguchi H, Takakura N. Changes in blood circulation of the contralateral Achilles tendon during and after acupuncture and heating. *Int J Sports Med* 32: 807-813, 2011. (査読有) DOI: 10.1055/s-0031-1277213
- (6) **Kubo K**, Ikebukuro T. Effects of heating on blood volume and oxygen saturation of human Achilles tendon *in vivo*. *Gazzetta Medica Italiana* 170: 53-57, 2011. (査読有) <http://www.minervamedica.it/en/journals/gazzetta-medica-italiana/issue.php?cod=R22Y2011N01>
- (7) **Kubo K**, Tabata T, Ikebukuro T, Igarashi K, Yata H, Tsunoda N. Effects of mechanical properties of muscle and tendon on performance in long distance runners. *Eur J Appl Physiol* 110: 507-514, 2010. (査読有) DOI: 10.1007/s00421-010-1528-1
- (8) **Kubo K**, Tabata T, Ikebukuro T, Igarashi K, Tsunoda N. A longitudinal assessment of running economy and tendon properties in long distance runners. *J Strength Cond Res* 24: 1724-1731, 2010. (査読有) <http://journals.lww.com/nsca-jscr/abstract/2010/07000>
- (9) **Kubo K**, Ikebukuro T. Relationship between muscle fiber type and tendon properties in young males. *Muscle & Nerve* 42: 127-129, 2010. (査読有) DOI: 10.1002/mus.21695
- (10) **Kubo K**, Yajima H, Takayama M, Ikebukuro T, Mizoguchi H, Takakura N. Effects of acupuncture and heating on blood volume and oxygen saturation of human Achilles tendon *in vivo*. *Eur J Appl Physiol* 109: 545-550, 2010. (査読有) DOI: 10.1007/s00421-010-1368-z
- (11) **Kubo K**, Ikebukuro T, Yata H, Tsunoda N, Kanehisa H. Effects of training on muscle and tendon in knee extensors and plantar flexors *in vivo*. *J Appl Biomech* 26: 316-323, 2010. (査読有) <http://journals.humankinetics.com/jab-back-issues/jab-volume-26-issue-3-august>
- (12) **Kubo K**, Ikebukuro T, Yata H, Tsunoda N, Kanehisa H. Time course of changes in muscle and tendon properties during strength training and detraining. *J Strength Cond Res* 24: 322-331, 2010. (査読有) <http://journals.lww.com/nsca-jscr/abstract/2010/02000>
- (13) **Kubo K**, Ikebukuro T, Yaeshima K, Kanehisa H. Effects of different duration contractions on elasticity, blood volume, and oxygen saturation of human tendon *in vivo*. *Eur J Appl Physiol* 106: 445-455, 2009. (査読有) DOI:

10.1007/s00421-009-1037-2

- (14) **Kubo K**, Ikebukuro T, Yaeshima K, Yata H, Tsunoda N, Kanehisa H. Effects of static and dynamic training on the stiffness and blood volume of tendon *in vivo*. *J Appl Physiol* 106: 412-417, 2009. (査読有) DOI: 10.1152/jappphysiol.91381.2008.
- (15) **Kubo K**, Miyamoto M, Tanaka S, Maki A, Tsunoda N, Kanehisa H. Muscle and tendon properties during menstrual cycle. *Int J Sports Med* 30: 139-143, 2009. (査読有) DOI: 10.1055/s-0028-1104573
- (16) 池袋敏博, **久保啓太郎**, 小室輝明, 矢田秀昭, 金久博昭, 角田直也. 膝伸筋群および足底屈筋群の協働筋における発育に伴う筋厚変化. 発育発達研究 44: 8-15, 2009. (査読有) <http://www.hatsuhatsu.com/>
- (17) 八重嶋克俊, **久保啓太郎**, 池袋敏博, 金久博昭. 収縮および弛緩時間がヒト腱の力学的特性に及ぼす影響. バイオメカニクス研究 13: 114-123, 2009. (査読有) [http://biomechanics.jp/journal/journal2/back\\_number/2009/vol\\_13\\_3\\_2009\\_j.html](http://biomechanics.jp/journal/journal2/back_number/2009/vol_13_3_2009_j.html)
- (18) 池袋敏博, **久保啓太郎**, 八重嶋克俊, 五十嵐克三, 矢田秀昭, 金久博昭, 角田直也. 陸上長距離選手の下肢筋群における筋厚発達の部位差. トレーニング科学 21: 311-318, 2009. (査読有) <http://trainings.jp/ronbun.cgi?kid=1068&rid=7>
- (19) **久保啓太郎** セラピューティック・ストレッチングによる筋腱複合体の粘弾性の変化 理学療法 27: 967-972, 2010. (査読無・総説) <http://www.medicalpress.co.jp/backno.html>

[学会発表] (計14件)

- (1) **久保啓太郎**, 池袋敏博. ヒト生体におけるアキレス腱の血液循環に対する高気圧酸素療法の影響. 第62回日本体育学会 (鹿児島) 2011年9月25日
- (2) **久保啓太郎**, 池袋敏博, 矢田秀昭, 角田直也. 筋力トレーニングおよび脱トレーニングに伴うヒト生体における腱のコラーゲン合成およびコラーゲン線維配列の変化. 第66回日本体力医学会 (山口) 2011年9月16日
- (3) **久保啓太郎**, 矢野裕義, 高山美歩, 池袋敏博, 溝口秀雪, 高倉伸有. 温

熱および鍼刺激によるアキレス腱の血液循環変化の機序. 第65回日本体力医学会 (千葉) 2010年9月18日

- (4) **久保啓太郎**, 池袋敏博. 腱特性は筋線維組成と関連するか? 第61回日本体育学会 (愛知) 2010年9月8日
- (5) **久保啓太郎**, 池袋敏博, 矢田秀昭, 角田直也. 陸上長距離走パフォーマンスにおける腱特性の影響に関する横断的および縦断的検証. 第21回日本バイオメカニクス学会 (東京) 2010年8月28日
- (6) 池袋敏博, **久保啓太郎**, 矢田秀昭, 角田直也. 超音波法による下腿三頭筋における筋量の定量化. 第65回日本体力医学会 (千葉) 2010年9月18日
- (7) 池袋敏博, **久保啓太郎**, 矢田秀昭, 角田直也. 陸上短・長距離選手の内転筋・ハムストリング筋群の筋厚と競技成績. 第61回日本体育学会 (愛知) 2010年9月9日
- (8) **久保啓太郎**, 池袋敏博, 八重嶋克俊, 金久博昭. 静的および動的運動によるヒト腱のタイプ1コラーゲンの合成マーカの変動. 第64回日本体力医学会 (新潟) 2009年9月18日
- (9) **久保啓太郎**, 池袋敏博, 八重嶋克俊, 金久博昭. 筋収縮の繰り返しに伴う膝蓋腱およびアキレス腱における血液循環の部位差. 第60回日本体育学会 (広島) 2009年8月27日
- (10) **久保啓太郎**, 池袋敏博, 八重嶋克俊, 金久博昭. 温熱および鍼刺激がヒト生体におけるアキレス腱の血液量および酸素飽和度に及ぼす影響. 第17回日本運動生理学会 (東京) 2009年7月25日
- (11) 池袋敏博, **久保啓太郎**, 八重嶋克俊, 岡田純一, 岡田雅次, 矢田秀昭, 金久博昭, 角田直也. 重量挙げ選手および陸上短距離選手における下肢筋群の筋厚と競技成績との関係. 第60回日本体育学会 (広島) 2009年8月27日
- (12) 八重嶋克俊, **久保啓太郎**, 池袋敏博, 金久博昭. 静的および動的ストレッチングによる筋力変化の要因. 第64回日本体力医学会 (新潟) 2009年9月18日
- (13) 八重嶋克俊, **久保啓太郎**, 池袋敏博, 金久博昭. 静的ストレッチングが腱の力学的特性に及ぼす影響の回復過程. 第60回日本体育学会 (広島) 2009年8月27日
- (14) 八重嶋克俊, **久保啓太郎**, 池袋敏

博, 金久博昭. 静的ストレッチング  
が異なる収縮速度により評価した腱  
特性に及ぼす影響 第 17 回日本運動  
生理学会 (東京) 2009 年 7 月 26 日

[図書] (計 1 件)

(1) 久保啓太郎 (分担) 運動と筋「4」  
腱 運動生理学最新知識 (宮村実晴 編) 真  
興交易 (株) 医書出版部 pp130-135, 2010.

## 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

なし