

論文の内容の要旨

論文題目

伸張性収縮運動がヒト腱の血液循環、コラーゲン線維配向、および力学的特性に及ぼす影響

Effects of eccentric contraction exercise on blood circulation, collagen fiber orientation, and mechanical properties of human tendons *in vivo*

氏名 石垣 智恒

腱炎は、健康増進を目指すスポーツ愛好家からパフォーマンス向上を目指すアスリートに至るまで、安全に運動（トレーニング）を継続する上で解決すべき課題である。アキレス腱炎は、罹患率が高く治療に難渋することの多い疾患であるが、伸張性収縮運動による良好な治療成績が多数報告されている(e.g. Alfredson et al. 1998)。その治療メカニズムは依然不明であるが、腱の血液循環、コラーゲン線維配向、および力学的特性の変化が関係している可能性が考えられる。また、臨床で実施されるプロトコル（1日180回の伸張性収縮運動を毎日12週間実施）は、Alfredsonらの報告（1998）に基づくものであり、現象（治療効果）が先行している感が否めない。したがって、適切なプロトコルを確立するため、さまざまな条件（負荷・回数・実施頻度）の伸張性収縮運動が腱特性（力学的特性や血液循環など）に及ぼす影響を検討する必要がある。

これまで、腱炎患者では健常者に比べ、腱の形態、血液循環、および力学的特性に変化が生じていることが報告された（Ohberg et al., 2001; Wang et al., 2012）。さらに、組織学的研究は腱炎により腱コラーゲン線維配向（並び）にも変化が生じることを明らかにした（Khan et al., 1999）。しかし、ヒト生体の腱コラーゲン線維配向を非侵襲的に定量する方法はない。したがって、腱炎の特徴、および治療過程における腱特性の変化を多角的に検証するためには、ヒト生体における腱コラーゲン線維配向の定量方

法の確立が望まれる。

そこで本博士論文では、伸張性収縮運動がヒト生体における腱の血液循環、コラーゲン線維配向、および力学的特性に及ぼす影響を明らかにするとともに、異なる負荷、反復回数、および実施頻度による腱特性の変化を比較することで適切な伸張性収縮運動プロトコルの確立に寄与することを目指し、以下の3点を目的とした。

- (1) ヒト生体における腱コラーゲン線維配向の定量方法を確立する（研究1）
- (2) 負荷の異なる反復した伸張性収縮がアキレス腱の血液循環およびコラーゲン線維配向に及ぼす影響を比較する（研究2）
- (3) 異なる実施頻度による12週間の伸張性トレーニングが、アキレス腱の血液循環、コラーゲン線維配向、および力学的特性に及ぼす影響を比較する（研究3）

研究1：ヒト生体における腱コラーゲン線維配向の定量方法の確立

腱の超音波画像は、超音波ビームが腱に対して垂直に入射すると高輝度に描出され、超音波ビームの入射角が垂直ではなくなると低輝度化する（超音波異方性）。そのため、コラーゲン線維が腱の長軸方向へ整列（再配向）することで、腱の超音波画像における輝度のばらつきは減少すると考えられる。そこで研究1の目的は、足関節他動背屈または下腿三頭筋等尺性収縮によってアキレス腱が伸長された際の輝度変動係数の変化を調べることとした。健常男性14名を対象として、底屈20°から背屈20°まで10°毎（角度課題）、および最大随意収縮（MVC）の0%から70%まで10%毎（筋収縮課題）にアキレス腱の超音波横断画像を撮影した。腱超音波横断画像における各ピクセルの輝度から、輝度平均値および標準偏差を算出した。輝度変動係数は、標準偏差を輝度平均値で除した値をパーセント化することで算出した（輝度変動係数＝標準偏差／輝度平均値・100）。さらに、各課題における前半部分（角度課題：底屈20°から底背屈0°、筋収縮課題：0%MVCから30%MVC）と後半部分（角度課題：底背屈0°から背屈20°、筋収縮課題：40%MVCから70%MVC）との間で、輝度変動係数の変化率を比較した。輝度変動係数は、足関節が背屈されるにつれて、また筋収縮強度が増すにつれて減少した。さらに、輝度変動係数の変化率は角度課題の後半部分および筋収縮課題の前半部分で大きかった。角度課題におけるこの変化は、足関節他動背屈運動の初期には筋が主に伸長され、徐々に腱の伸長量が増すという結果を反映しているかもしれない。また、腱コラーゲン線維は張力-伸張量関係における低張力域（toe region）で再配向する。筋収縮課題の前半部分（低張力域）で輝度変動係数がより大きく減少した結果は、低張力域において生じた腱コラーゲン線維の再配向を捉えた結果であるだろう。これらの結果は、腱コラーゲン線維配向が、腱の超音波横断画像における輝度変動係数の計測によって推定できる可能性を示唆した。

研究 2：負荷の異なる伸張性収縮運動が腱の血液循環およびコラーゲン線維配向に及ぼす影響

下腿三頭筋伸張性収縮運動はアキレス腱炎の効果的な治療方法であるが、その治療メカニズムは不明である。腱への血液供給は損傷した腱組織の治癒に重要である (Zantop et al., 2003)。また、摘出腱に対して反復した伸張負荷を加えることで、そのコラーゲン線維は再配向した (Miller et al., 2012)。そのため、伸張性収縮運動での反復した腱の伸張により腱コラーゲン線維が再配向すると考えられる。そこで研究 2 の目的は、異なる負荷での反復した伸張性収縮によるアキレス腱の血液循環およびコラーゲン線維配向の変化を比較することとした。健常男性 13 名を対象に、一側下肢で低負荷・高回数 (50%1RM*180 回)、他方で高負荷・低回数 (120%1RM*75 回) での反復した伸張性収縮を行った。運動前後および回復過程 (40 分間) での腱の血液循環 (血液量、酸素飽和度) およびコラーゲン線維配向を計測した。運動終了後、増加した酸素飽和度は 20 分後までに安静時レベルに戻った一方で、血液量は 40 分間に渡って安静時よりも増加していた。輝度変動係数は、運動後 40 分間に渡って安静時よりも減少していた。しかし、すべての測定項目において異なるプロトコル間での差は認められなかった。本研究結果から、伸張性収縮運動は仕事量が等しければ、負荷強度に関わらず同程度に腱の血液循環およびコラーゲン線維配向を変化させることが明らかになった。さらに、腱障害を有する患者に適用する場合には、安全面を考慮して低負荷・高回数プロトコルが適していることが示唆された。

研究 3：実施頻度の異なる伸張性トレーニングが腱の血液循環、コラーゲン線維配向、および力学的特性に及ぼす影響

研究 2 の結果より、低負荷・高回数での伸張性収縮運動が推奨された。良好な臨床成績を報告した研究では、低負荷・高回数での伸張性収縮運動を毎日実施してきたが、伸張性トレーニングの実施頻度が腱炎の治療効果に及ぼす影響はほとんど検討されていない。筋に対する高頻度の抵抗運動ではトレーニング効果が得られにくいことが報告されており、腱のリハビリテーションとしても毎日運動を実施するよりも運動実施後の回復期間を設けるために実施頻度を減らした方が、腱特性の変化が顕著であるかもしれない。そこで研究 3 の目的は、実施頻度の異なる (週に 3 回と 6 回) 12 週間の低負荷・高回数での伸張性トレーニングが、アキレス腱の血液循環、コラーゲン線維配向、および力学的特性に及ぼす影響を比較することとした。健常男性 10 名を対象とし、一側下肢で週 3 回、他方で週 6 回の伸張性トレーニングを 12 週間に渡って実施した。研究 2 と同様に、腱の血液循環 (血液量、酸素飽和度) の測定にはレーザー組織血液酸素モニターを使用し、腱コラーゲン線維配向の測定には腱超音波横断画像における輝度変動係数を算出した。加えて、超音波法を用いて腱の力学的特性が測定された。12 週間の伸張性トレーニング後、腱の血液量は増加し、コラーゲン線維は再配向しつつ、腱スティッフネスは変化しなかった。また、全ての測定項目において実施頻度の差異による影響はみられなかった。本研究結果から、腱スティッフネスを著しく高めることなく、腱の血液量を増加させ、コラーゲン線維を再配向させることが伸張性トレーニングによる治療メカニズムである可能性が示唆された。さらに、実施頻度の違いは腱

の血液量、コラーゲン線維配向、および力学的特性の変化に影響を与えず、週に 3 回の実施頻度でも十分にトレーニング効果が得られる可能性が示された。それゆえ、患者への負担軽減やリハビリテーションの効率化という点から週 3 回の頻度で実施する伸張性トレーニングが推奨される。

まとめ

研究 1 により、腱超音波横断画像における輝度変動係数を測定することでヒト生体の腱コラーゲン線維配向を定量できる可能性が示された。新たに確立した超音波輝度変動係数による腱コラーゲン線維配向の評価に加え、これまで用いられてきた腱の血液循環や力学的特性の測定法を用いて伸張性収縮運動の一過性および慢性効果を検討した。反復した伸張性収縮は腱の血液循環を増加させ、コラーゲン線維を再配向させた。また、12 週間に渡る低負荷・高回数での伸張性トレーニングは、腱の血液量を増加させ、コラーゲン線維を再配向させたが、腱スティッフネスは変化しなかった。本研究結果から、腱スティッフネスを著しく高めることなく、腱の血液量を増加させ、腱コラーゲン線維を再配向させることが伸張性収縮運動による腱炎の治療メカニズムであることが示唆された。また、一過性効果に負荷の違いは影響せず、週 3 回の実施であっても週 6 回実施した場合と同等の効果が得られた。それゆえ、患者の安全面や負担の軽減、リハビリテーションの効率化という点から、適切な伸張性収縮運動プロトコルとして低負荷・高回数で週 3 回実施する伸張性収縮運動プロトコルが推奨された。