

2011 年度修士論文

スポーツ競技選手における
長年の専門的トレーニング継続による
アキレス腱の形態的・力学的な適応

指導教員
伊坂忠夫

立命館大学大学院
スポーツ健康科学研究科
スポーツ健康科学専攻修士課程 2 回生
6211100010-2
佐々木竜一

要旨

6211100010-2 佐々木竜一

「スポーツ競技選手における長年の専門的トレーニングによる アキレス腱の形態的・力学的な適応」

キーワード: アキレス腱, スポーツ競技選手, 左右差, MR 装置

【目的】

腱のトレーニング適応については不明な部分が多く, その原因として, 先行研究の見解が一致しないことが一つの要因となっているとともに, 筋と腱の関係性をみた研究や, 左右差を比較検討している研究がほとんど存在しないことが上げられる. そこで本研究では, 先行研究でみられた問題点を考慮し, 複数のスポーツ種目の競技選手群と対象群を被験者として, アキレス腱のトレーニング適応を明らかにし, さらに筋と腱の関係性を調査する. その際, 全ての項目において左右脚ともに調査することで, アキレス腱のトレーニング負荷に対する適応能力の新たな知見を見つけることを目的とする.

【方法】

被験者は, 長年の専門的トレーニング(8.5 ± 1.5 years)を行っている 23 名の大学陸上競技選手とした. 陸上競技選手の種目は, 短距離(〜400m, SP), 長距離(5000m〜, LD), 跳躍(走り幅跳び, 走り高跳び, JP) とした. そして, 大学水泳選手を対象群である水泳群(SW, N=7)とし, 過去に学校体育以外に定期的な運動習慣が全くない大学生・大学院生をコントロール群(CT, N=7)とした.

アキレス腱の形態的特性の測定は, 磁気共鳴診断装置(MR 装置, 1.5T SignaHDxt, GE ヘルスケアジャパン) を用いて, 安静時の両脚の腓腹筋起始部から遠位の踵骨付着部までを撮影した. MR 装置で得られた画像から, 画像分析ソフトウェア (Osiris v .4.19) を用いてアキレス腱の横断面積, アキレス腱長, 下腿三頭筋群の横断面積を測定した. また, 筋体積は横断面積にスライス厚を乗じ, それらを積分して求めた. さらに, 筋力計(Biodex system4, Biodex) と超音波装置(SSD3500, アロカ) を用いて等尺性足関節底屈の Ramp 試行を行い, 力発揮中の筋腱移行部の伸張量を測定し, 腱張力と腱横断面積を用いてアキレス腱の物質的特性を算出した.

統計は, 二元配置(群×左右脚) の分散分析(ANOVA) で, それぞれの群間の項目を分析した. 各項目の相関係数は, ピアソンの相関係数を用いて検定した.

【結果と考察】

アキレス腱の最大横断面積は、SP、LD、JP、SWはCTよりも有意に高値を示した。JPでは、踏切脚のアキレス腱最大横断面積が非踏切脚よりも有意に大きく、左右差が認められたことから、負荷が増大することで腱の肥大が促されることが確認できた。一方、LDの右脚のヒラメ筋腱が左脚よりも有意に長く、左右差が認められた。腓腹筋腱長は、被験者全体において左脚が右脚よりも有意に長く、腱長の左右差は筋の発達による左右差である可能性が考えられた。アキレス腱の張力は、SP、JP、SWにおいてCTとLDよりも有意に高値であった。アキレス腱の伸張量は、SP、JP、SWにおいてCTよりも有意に高値であり、JPとSWは、LDと比較した場合にも有意に高い値を示した。アキレス腱の歪みは、JPとSWがCTよりも有意に高値であった。アキレス腱の応力は、SP、JP、SWにおいてCTよりも有意に高値であり、JPとSWは、LDと比較した場合においても有意に高い値を示した。アキレス腱の stiffness とヤング率は、群間にも左右にも有意な差が認められなかったため、本研究の被験者のアキレス腱は同様の物質特性を持ち、各群が持つアキレス腱の物質的特性の傾向よりも個人差が大きいことが考えられた。

被験者全体において下腿三頭筋群横断面積とアキレス腱横断面積の関係をみると、左右脚ともに高い相関関係が認められることから、筋の肥大は腱の肥大に関係している可能性が示唆された。しかし、SWはトレーニング負荷様式の特異性から、筋と腱の横断面積の関係性は認められなかった。一方、SPとCTの結果から、筋の横断面積よりも筋の体積が、アキレス腱最大横断面積と高い関係性にあることが明らかになった。

事例研究により、跳躍選手の試合前におけるコンディショニングによって、アキレス腱の stiffness が変化することと、試合前にアキレス腱の stiffness が高まることが明らかになり、アキレス腱の stiffness は跳躍種目のパフォーマンスに影響を与える可能性が考えられた。さらに、アキレス腱断裂受傷者は、断裂部周辺に健常者ではみられない顕著な肥大が起きていることと、アキレス腱の stiffness とヤング率が健常脚よりも断裂脚で低いことが明らかとなり、それはアキレス腱断裂受傷脚では断裂部周辺のアキレス腱を保護しようとする適応が働いていることが原因として考えられた。

【結論】

長年のトレーニングによってアキレス腱の形態的な変化が引き起こされることが明らかとなり、筋肥大と腱の肥大には何らかの関係性があることが示唆された。また、競技負荷特性に応じて、筋や腱の特性にも左右差が生じることが明らかとなった。

Abstract

62111000110-2 RYUICHI Sasaki

Morphological and mechanical adaptation of Achilles tendon with long-term sports-specific training

Keyword: Achilles Tendon, sport athletes, bilateral difference, MR images

Purpose: The purpose of this study was to clarify whether the characteristics of Achilles tendon (AT) have adapted to a long-term training load. Additionally bilateral difference of AT in sports athletes and subjects who had fractured at AT were also analyzed in the present study.

Method: Eight sprinters (SP), seven long-distance runners (LD), eight jumpers (JP) and seven swimmers (SW), and seven novices (CT) of male collegiate students were participated in the study. The physical characteristics (body height, body weight, age, and years of training) were not significantly different among them. Measurements of morphological characteristics of AT and triceps surae muscles were performed with magnetic resonance images. Mechanical characteristics of AT were measured and estimated from the elongation of muscle tissue during exertion of the plantar flexion torque with B-mode ultrasound system.

Results: Maximum cross sectional area (CSA_{Max}) of AT of SP, LD, JP and SW were significantly larger than that of CT. CSA_{Max} of AT in jumping leg of JP was significantly larger than that in non-jumping leg. The length of soleus muscle tendon in left leg of LD was significantly shorter than that in right leg. The length of gastrocnemius muscle tendon of left leg of any groups was significantly longer than that of right leg. Elongation and stress in AT of SP, JP and SW were significantly larger than that of CT. Strain in AT of SP, JP and SW was significantly larger than that of CT. Elongation, stress and strain of AT of SP and JP were significantly larger than that of LD. No significant differences of stiffness and Young's modulus of AT were found among any groups and bilateral differences. In a regression analysis within all subjects, the CSA_{Max} of triceps surae muscles was positively correlated to CSA_{Max} of AT. In a regression analysis within SP and CT, the volume of triceps surae muscles was positively correlated to CSA_{Max} of AT. A longitudinal measurement revealed that stiffness in AT of JP could change during a short-time. The subjects who ruptured AT have hypertrophied the AT in injured leg. The stiffness and young's modulus of AT of injured leg were lower than those of healthy leg.

Conclusion: The findings of this study were as follows; 1) morphological characteristics of AT proposed changed by long-term specialized training; 2) muscle hypertrophy had introduced to tendon hypertrophy; 3) the bilateral difference of muscle and tendon could be influenced with the characteristics of the training.

目次

第 1 章 緒論	1
1.1 研究の背景	1
1.1.1 トレーニングによる腱の形態の適応	1
1.1.2 スポーツ競技選手の腱形態	3
1.1.3 腱の物理特性に関する研究	3
1.1.4 先行研究の問題点	4
1.2 研究目的	6
第 2 章 大学陸上競技選手のアキレス腱の形態的特性	7
2.1 目的	7
2.2 方法	7
2.2.1 被験者	7
2.2.2 測定方法	8
2.2.3 統計	10
2.3 結果	10
2.3.1 アキレス腱の横断面積	10
2.3.2 アキレス腱の長さ	11
2.4 考察	12
2.4.1 アキレス腱の横断面積	12
2.4.2 アキレス腱の長さ	13
第 3 章 大学陸上競技選手のアキレス腱の物質的特性	16
3.1 目的	16
3.2 方法	16
3.2.1 被験者	16
3.2.2 測定方法	17
3.2.3 統計	21
3.3 結果	21
3.3.1 アキレス腱の伸張量、歪み、応力	21
3.3.2 アキレス腱の stiffness, ヤング率	24

3.4 考察	24
3.4.1 アキレス腱の伸張量、歪み、応力	24
3.4.2 アキレス腱の stiffness, ヤング率	27
第 4 章 大学陸上競技選手の下腿三頭筋群とアキレス腱の関係	29
4.1 目的	29
4.2 方法	29
4.3 結果	30
4.3.1 下腿三頭筋群の横断面積	30
4.3.2 下腿三頭筋群の横断面積とアキレス腱の横断面積の関係	31
4.4 考察	34
4.4.1 下腿三頭筋群の横断面積	34
4.4.2 下腿三頭筋群の横断面積とアキレス腱の横断面積の関係	34
第 5 章 アキレス腱横断面積と下腿三頭筋群体積の関係	38
5.1 目的	38
5.2 方法	39
5.2.1 被験者	39
5.2.2 アキレス腱と下腿三頭筋の形態計測	39
5.2.3 統計	39
5.3 結果	40
5.3.1 下腿三頭筋群の体積	40
5.3.2 アキレス腱の横断面積と下腿三頭筋群の体積の関係	40
5.3.3 下腿三頭筋群の体積とアキレス腱の stiffness, ヤング率の関係	42
5.4 考察	42
5.4.1 下腿三頭筋の体積	42
5.4.2 アキレス腱の横断面積と下腿三頭筋の体積の関係	42
5.4.3 筋体積とアキレス腱の横断面積の関係性の左右差	44
5.5 結論	45
第 6 章 アキレス腱の形態的・物質的特性の解明のための事例研究	46
6.1 跳躍選手の試合前コンディショニング期の短期的変化	46
6.1.1 目的	47
6.1.2 方法	47

6.1.3 結果.....	49
6.1.4 考察.....	53
6.2 アキレス腱断裂受傷後のアキレス腱の形態的・物質的な変化.....	55
6.2.1 目的.....	55
6.2.2 方法.....	55
6.2.3 結果.....	56
6.2.4 考察.....	61
6.2.4.1 アキレス腱の形態的特性.....	61
6.2.4.2 アキレス腱の張力および物質的特性.....	63
6.2.4.3 下腿三頭筋の横断面積.....	64
第7章 総合討論.....	66
7.1 腱のトレーニング適応に関する先行研究のまとめ.....	66
7.2 腱のトレーニング適応に関する検討.....	68
7.2.1 競技種目ごとの腱の形態的・物質的な特性の特徴.....	68
7.2.2 腱特性の個人間差, 個人内差.....	69
7.2.3 トレーニングによって腱肥大を引き起こすためには.....	70
7.3 筋と腱の関係性, 協働筋に着目して.....	71
7.4 左右差および左右比についての検討.....	71
7.4.1 形態的特性と左右比.....	72
7.4.2 物質的特性の左右比.....	76
7.4.3 傷害の観点から.....	79
7.5 腱適応の役割.....	79
7.5.1 傷害予防.....	79
7.5.2 パフォーマンス向上.....	80
第8章 結論.....	82
文献.....	83

第1章 緒論

1.1 研究の背景

筋が発揮した力は関節をまたいだ骨へと伝わることで運動が行われるが、その筋と骨をつないでいる組織は腱であり、腱が筋の発揮した力を伝達することで実際の身体運動が行われている。腱には、バネ的な弾性要素が備わっており、この弾性要素が弾性エネルギーとして働くことで、日常生活からスポーツ活動にいたる多くの身体運動に貢献していることが明らかになっている。例えば、福永ほか(1996a: 1996b) は、歩行中の筋腱の伸張－短縮運動は、その大半が筋ではなく腱や腱膜によって起こっていると報告し、Bobbett et al. (1988) は、跳躍運動時に足関節により発揮された仕事の約 40%は筋腱複合体に蓄積された弾性エネルギーによるものであることを報告している。このような筋腱の弾性エネルギーの利用は、「反動動作を伴う運動や重力に抗して行う運動すべてに共通する能力である」ともいわれている(図子, 2005)。また、スポーツにおいて力やパワーの原動力となる筋の発達には重要であるが、過度の筋肥大は筋の羽状角の増加に伴って力の伝達能率の低下や(福永ほか, 1996a: 1996b; Kawakami et al, 1993; Kearns et al, 1998) , 単位体重あたりの筋力低下が考えられることから、特に疾走能力や跳躍能力の向上には筋腱の弾性エネルギーが重要になると考えられている。

筋に関する研究は古くから数多く行われてきており、筋力の向上には高強度低回数のトレーニング、筋持久力の向上には低強度高回数のトレーニング、筋肥大には中・高強度のトレーニングが現在では一般的にも広まっており、これをはじめとした筋のトレーニング負荷に対する適応能力の様々な知見が、トレーニング現場で活用されている。

以上のように、身体運動では自発的に活動する筋のみならず、筋と腱による伸張－短縮が行われ、受動的な組織である腱も身体運動の重要な要素を担っているが、腱に関する知見は乏しく、腱のトレーニングによる適応能力は未だに解明されていない。

1.1.1 トレーニングによる腱の形態の適応

先行研究における腱のトレーニングによる適応に関する研究は、ヒト生体の腱特性の計測が困難であったため、動物を用いた実験によって調査、研究がなされてきた。動物を用いた研究では、ラットに持久性トレーニングを行わせた結果、コントロール群よりも有意に腱のコラーゲン線維横断面積および直径が大きかったことが報告されている(中川ほか, 1988; Barone et al, 2009)。その他の研究においても、ラットを用いた持久性トレーニングによって腱そのものが肥大することが明らかとされている(Michna and

Hartmann, 1989; Sommer, 1987). 一方、ホロホロチョウというキジ科の鳥にランニングトレーニングを行わせた実験や(Buchanan, 1977)、ラットに SSC(Stretch shortening Cycle) トレーニングを行わせた実験(Almeida-Silveria et al, 1994)など、一部の研究では腱に形態的な変化がなかったと報告されている。しかし、これまでの動物実験の結果をまとめると、受動的な組織である腱もトレーニングにより肥大などの適応を起こすと考えられるが、その適応の仕方については必ずしも定まったものがあるわけではない。

ヒトの腱に関する研究は、主に屍体から摘出した腱を用いてきたためトレーニングによる適応は調査することができず、主に腱が持つ特徴について研究がなされてきた(Noyes et al, 1984; Rack and Ross, 1984; Loren and Lieber, 1995; Haut and Haut, 1997)。しかし近年になると、超音波診断装置や磁気共鳴診断装置などの医用画像機器の発展によってヒト生体内の腱特性が計測可能となり、スポーツ競技選手やトレーニング実験前後での腱特性を計測し、ヒト生体内における腱のトレーニング適応能力を解明しようとする研究が行われてきた。

腱の形態的特性に関する先行研究では、Arampatzis et al. (2007a) が、等尺性の足関節底屈運動で 3 秒間の力発揮と 3 秒間の休息を繰り返すトレーニングを、力発揮されたトルク値をフィードバックしながら 55%MVC で力発揮を行う低強度トレーニング群と同じくフィードバックしながら 90%MVC で力発揮を行う高強度トレーニング群の 2 群に分けてそれぞれ 14 週間行わせ、アキレス腱の特性とその変化を両群で比較している。その結果、彼らは 90%MVC で力発揮を行った高強度トレーニング群のみに、アキレス腱の横断面積に有意な肥大が認められたことを報告している。また Seynnes et al. (2009) は、高強度の膝伸展レジスタンストレーニングを一般成人男性に 9 週間行わせることにより、大腿四頭筋群と膝蓋腱の横断面積に有意な肥大が起きたと報告している。これらの結果から、動物実験と同様にヒトを対象とした研究においても、トレーニング負荷によって腱が肥大などの適応を起こすことが示唆されている。しかし、トレーニング負荷によって腱が肥大するという報告がある一方で、トレーニング実験によって腱の形態的な変化は起きなかったと報告する研究も少なくない。例えば、Kubo et al. (2001a: 2001b) は、一般成人男性に等尺性膝伸展トレーニングを 12 週間行わせたところ、有意な腱肥大が認められなかったことを報告している。さらに、Arampatzis et al. (2010) は、前述の腱肥大が認められた実験プロトコル(Arampatzis et al, 2007a)を発展させて、等尺性足関節底屈運動による力発揮と休息の繰り返しを、1 秒間に変更した場合には、ア

キレス腱に有意な肥大は認められなかったと報告している。このことから、トレーニングにおける腱の形態的な適応は、トレーニングを行うことで必ずしも起こるわけではなく、適応の有無はトレーニング強度や時間などのトレーニング特性に影響されていることがわかる。

1.1.2 スポーツ競技選手の腱形態

スポーツ競技選手における腱形態の研究では、ランナーと一般人のアキレス腱の横断面積を比較し、ランナーが一般人よりも有意に大きなアキレス腱の横断面積を持つことが報告されており(Rosager et al, 2001; Magnusson et al, 2003) , ジャンプを多用するバレーボール選手においても一般人よりもアキレス腱の横断面積が大きいことが報告されている(勝田ほか, 1997)。また, Muraoka et al. (2007) は競技特性上, 左右の脚で負荷が異なる剣道選手のアキレス腱を調査し, より高い負荷がかかる右脚のアキレス腱横断面積が逆脚の左脚よりも大きく, アキレス腱の横断面積に左右差があることを報告している。さらに, バドミントン選手やフェンシングの選手においては, 決まった一方の脚を前方に出してシャトルを打つ動作や武器を突き出す動作をすることから, 前方に出す脚側の膝蓋腱にかかる負荷が他方の脚よりも大きく, 負荷の左右差があることが考えられ, このバドミントンとフェンシングの選手を調査した Couppé et al. (2008) は, 高負荷がかかる前方に踏み出す脚側の膝蓋腱の断面積が逆脚よりも有意に大きいことを報告している。

以上のことから, スポーツ競技選手においては, トレーニング負荷によって腱の形態的な適応が引き起こされることが考えられ, それは個人内においても左右で腱に加わる負荷が異なる場合は, 負荷の大きさに応じた腱の形態を有すると考えられる。また, 腱が太くなるということは, 筋力が加わったときに断裂などを起こさないように強度を高めるという傷害予防の利点と, 弾性エネルギーを高め, パフォーマンスを向上させるという利点があると考えられる。

1.1.3 腱の物質的特性に関する研究

腱肥大による傷害予防とパフォーマンス向上における利点は, どちらの観点においても, 太くならなくとも腱が硬くなるという物質的特性の変化で適応すれば, 強度や弾性エネルギーの増加が起こり, 同じ効果があると考えられる。腱の物質的特性に関する先行研究では, スプリンターにおいて運動習慣がない者よりも膝蓋腱が軟らかいという報告や(Kubo et al, 2000; Stafilidis et al, 2007), 100m 走タイムと膝蓋腱の compliance

は負の相関があり、100m 走が早い者ほど膝蓋腱は軟かいという報告がある(Kubo et al, 2000; Stafilidis et al, 2007) . 一方で、スプリンターの腱弾性は運動習慣がない者やランナーよりも硬いという報告や(Arampatzis et al, 2007b), 膝蓋腱の compliance と 100m 走タイムに関係性はないという報告があることから(小林ほか, 2009), スプリンターが持つ腱の物質的特性については議論が分かれている. ランナーに関しても, ランナーと一般人では腱の compliance や stiffness に差がないと報告されているが (Kubo et al, 2000; Rosager et al, 2001; Karamanidis et al, 2005), パフォーマンスが高くエネルギーの経済性が高い選手は, そうでない選手よりも stiffness が高いという報告があり(Arampatzis et al, 2006), 一定の見解は得られていない.

一方で, トレーニングによりアキレス腱および膝蓋腱の stiffness が増加したという研究が数多く報告されており(Kubo et al, 2001a, 2001b, 2002, 2010; Hansen et al, 2003; Kongsgaard et al, 2007; Seynnes et al, 2009; Arampatzis et al, 2007, 2010), トレーニングによって腱の stiffness は増加することが考えられている. しかし, トレーニングを積んでいるはずのスプリンターの膝蓋腱が軟らかいと報告されていることから(Kubo, 1998; Stafilidis et al, 2007), トレーニングによる腱の物質的な適応は不明確である.

1.1.4 先行研究の問題点

以上のことから, トレーニングによる腱の形態的・物質的特性の変化については一様な見解がみられず議論がわかれているのが現状である. そのため, 腱はどのような負荷に対して適応を起こすのか, どのような負荷を与えることで腱が肥大や硬化などの適応を起こすのかは, はっきりと解明されていない. その理由として, 先ず, 上記のほとんどの先行研究では, ある 1 種類ないしは 2 種類の負荷様式やスポーツ競技においてしか比較しておらず, 包括的な研究が不足していることが挙げられる. また, これらの研究の詳細をみていると測定方法が一致しておらず, 腱の横断面積を計測する場合において腱長の何%の位置をその腱の横断面積として計測するのか, 腱 stiffness をどのように算出するのかなど, 研究によって多少の違いがある.

例えば, アキレス腱の横断面積は, 踵骨付近の最大横断面積や(Magnusson et al, 2003), 踵骨から 2-6cm の横断面積を用いる研究(Farris et al, 2011) などがあり, 膝蓋腱では腱の全長にわたって 10%毎の横断面積を計測する研究(Seynnes et al, 2009), 腱長の 25, 50, 75%の 3 箇所を平均する研究(Boer et al, 2007)や 3 箇所それぞれ比較する研究(Couppé et al, 2008)など様々である. Stiffness においても, stiffness は腱の張力と伸

張量の関係から算出するが、腱張力の 20N 以降で算出するもの(Eliasson et al, 2007), 腱張力の 50%以降で算出する研究(Arampatzis et al, 2007, 2010; Farris et al, 2011), 腱張力の 60%以降で算出(Reeves et al, 2005), 最後の 10%区間で算出する(Rosager et al, 2002; Kongsgaard et al, 2007)など, どの調査項目においても一つの計測方法が確立されているわけではない. そのため, 例えばスプリンターとランナーの腱横断面積を 2 つの論文から比較しようとしても, 計測方法が異なるため容易に比較することはできない.

次に, 筋と腱の関係をみた研究が少ないことも理由としてあげられる. 先行研究では, トレーニングによる腱の変化や, あるスポーツ競技選手が持つ腱特性など, 腱ばかりに注目してきた. いくつかの研究では, 筋を同時に調査している(Kongsgaard et al, 2007; Seynnes et al, 2009)が, トレーニングによる筋の形態的な変化を調査し, 腱と筋の変化それぞれを独立に報告している. しかし, 身体運動は筋腱複合体として活動し, 筋か腱のみが独立して活動することは起こり得ないため, 自発的に活動する筋のトレーニング適応による変化は, 筋に付随する受動的な組織である腱の適応に影響することが考えられる. そのため, 筋と腱の関係性を調査することで, 腱だけでは発見することができなかった腱のトレーニング適応能力が発見できると考えられる. 筋と腱の関係性を考慮した研究は, アキレス腱横断面積と下腿三頭筋群の体積の関係を, 一般人を被験者として調査した岩沼ほか (2007) の論文ただ一つである.

最後に, ほとんどの先行研究では, 腱の特性を片脚のみで調査していることも考えられる. その一つの理由として, トレーニング実験での研究ではトレーニングによる変化を調査することが主たる目的であり, スポーツ競技選手の腱特性の研究ではスポーツ競技選手とコントロール群となる一般人を比較検討することが主たる目的であることから, 腱特性を左右の脚で比較することに意味をなさないからである. しかし, 被験者特性によって筋の横断面積に左右差(村松ほか, 2010) があることや, 一般人においても身体の歪み(寺野ほか, 2003) や下肢の機能的左右差(藤井ほか, 2004) があることを考慮すれば, 腱においても両側で検討することで被験者の正確な特徴を把握できると考えられる. 左右脚で異なる動きををすると思われるスポーツ競技選手では, 先述したように高負荷がかかる脚側の腱横断面積がもう一方の脚の腱よりも有意に大きいことが報告されている(Muraoka et al, 2005; Couppé et al, 2008). しかし, 左右脚で同じ動きををすると思われるスポーツ競技選手あるいは一般人においてですら, 腱形態や腱特性に左右差が存在するのかは全く不明である.

1.2 研究目的

以上のように、筋腱の弾性エネルギーが、身体運動に重要な役割を持つことがわかっており、筋においてはトレーニング適応の理論が確立されているが、腱のトレーニングによる適応については不明な部分が多い。その原因として、先行研究の測定方法が一致しないことが一つの要因となっているとともに、筋と腱の関係性をみた研究や、左右差を比較検討している研究がほとんど存在しないことが上げられる。

そこで本研究では、先行研究でみられた問題点を考慮し、複数のスポーツ種目の競技選手群と対象群を被験者として、アキレス腱のトレーニング適応を明らかにし、さらに筋と腱の関係性を調査することを目的とする。その際、全ての項目において左右脚ともに調査する。また、長年にわたってある一つの負荷特性を持った専門トレーニングを行ってきたスポーツ競技選手であれば、その負荷特性に適応したアキレス腱の特性を有すると考えられる。そのために本研究では、長年の専門的トレーニングを行ってきたスポーツ競技選手と対象群を被験者として、その被験者が持つアキレス腱の形態的および物質的な特性を明らかにする。

第2章では、長年にわたって専門トレーニングを行ってきたスポーツ競技選手のアキレス腱の形態的特性を明らかにし、第3章においてアキレス腱の物質的な特性を明らかにする。さらに、第4章で筋横断面積と腱横断面積の関係性を、第5章では筋体積と腱横断面積の関係性を明らかにする。第6章では事例研究として、跳躍選手の試合前コンディショニング期において腱の *stiffness* 変化の可能性について、およびアキレス腱断裂受傷者のアキレス腱の特性についてまとめた。また、以上の調査内容全てにおいて、左右脚を対象とすることで、先行研究にはない新しい視点から考察し、第7章の総合討論において、腱のトレーニング適応に関する知見をまとめ、第8章で結論を述べる。

第2章 大学陸上競技選手のアキレス腱の形態的特性

本章では大学陸上競技選手を対象とし、アキレス腱の形態的特性を明らかにする。陸上競技の短距離走選手は、短時間で爆発的な運動を行い、アキレス腱には短時間で高い負荷がかかるようなトレーニングを日々行なっているため、高強度短時間の負荷を長年与え続けた場合のアキレス腱の特性を持ち合わせていると考えられる。また、長距離走選手は、低強度だが長時間の繰り返し運動を行なっているため、低強度長時間の刺激を長年与え続けた場合のアキレス腱の特性を持つことが考えられる。一方で、跳躍選手は、短距離走選手と同様に高強度短時間の負荷がかかっていることに加えて、踏切脚が一方に決まっているために踏切脚には非踏切脚よりも高い負荷がかかっていると考えられる。そのため跳躍選手は、アキレス腱に加わる負荷に左右差があり、アキレス腱の特性にも左右差が生じている可能性があると考えられる。また、これら陸上競技選手に対して、アキレス腱に負荷がほとんどかからない状態でトレーニングを行っている水泳選手は、陸上競技選手とは異なった筋腱の発達があることが考えられ、アキレス腱の特性や筋と腱の関係性が陸上競技選手とは異なる可能性がある。

2.1 目的

先行研究では、トレーニングによって腱は肥大することが示唆されている。しかし、方法の不一致や、競技レベルの違いが原因で複数のスポーツ競技種目での比較が難しい。また、左右差を含めて検討した研究もほとんど存在しない。そこで本章では、アキレス腱の形態的特徴について、複数の競技種目群とコントロール群を同一プロトコルで左右脚において測定することによって、陸上競技選手を対象とし、負荷特性の違いに伴うアキレス腱の形態的特性を左右脚差も含めて明らかにすることを目的とする。

2.2 方法

2.2.1 被験者

被験者は、長年の専門的トレーニング(8.5±1.5years)を行っている大学陸上競技選手とした。この被験者とした陸上競技選手は、第63回西日本学生陸上競技対校選手権大会の参加B標準記録または参加A標準記録を突破し、本大会に出場している選手を条件として、ある程度高い競技レベルを有する者とした。陸上競技選手はその種目特性から、短距離(400m以下を専門種目としている者)、長距離(5000m以上を専門種目としている

者), 跳躍(走り幅跳び, もしくは走り高跳びを専門種目としている者) の 3 群に分けた。跳躍群の踏切脚は全て左脚であった。また, 大学水泳選手(水泳群) および過去に学校体育以外に定期的な運動習慣が全くない大学生・大学院生(コントロール群)を対称群とした。これら 5 群の身体的特性を表 1 に示す。群間で被験者の身体的特性(身長, 体重, 年齢) に有意な差は認められなかった。また, 陸上競技者群のトレーニング歴において, 群間に有意な差は認められなかった。本研究は, 事前に立命館大学生命倫理審査委員会の承認(承認番号: BKC-IRB-2010-20) を得ている。なお, 被験者には実験前に十分な説明を行い, すべての被験者から実験参加の同意を得てから行なった。

表 1 被験者の特性

	短距離群	長距離群	跳躍群	水泳群	コントロール群
人数(人)	8	7	8	7	7
身長(cm)	175.9±7.4	172.6±6.3	180.6±6.1	173.0±5.3	172.8±5.6
体重(kg)	65.6±5.0	59.1±4.7	67.6±3.8	64.9±4.1	62.4±8.4
年齢(歳)	20.6±1.4	20.4±1.3	21.1±1.2	19.0±1.0	21.6±1.8
トレーニング歴(年)	8.8±1.8	8.6±1.6	8.6±1.4	18.0±0.6	—

2.2.2 測定方法

磁気共鳴診断装置(MR 装置, 1.5T SignaHDxt, GE ヘルスケアジャパン) を用いて, 安静時の両脚のアキレス腱の横断面を撮像した。被験者の姿勢は仰臥位安静, 膝関節完全伸展で, 両脚をガントリーの長軸方向となるべく平行となるように置き, 足関節は固定具を用いて 90 度固定とした(図 1)。アキレス腱の撮影条件は, 8ch ボディアレイコイル使用, Fast Spin Echo, TR/TE 1500/15ms, ET 16, FOV 380×380mm, Matrix 512 x 512, NEX 4, 腓腹筋停止部から遠位の踵骨付着部までをギャップなし 5mm 間隔とした。アキレス腱と下腿三頭筋の各停止部付近は正確な位置判断のために 1mm 間隔で行った。MR 装置で得られた画像から, 画像分析ソフトウェア (Osiris v .4.19) を用いてアキレス腱の横断面積, およびアキレス腱長を測定した。

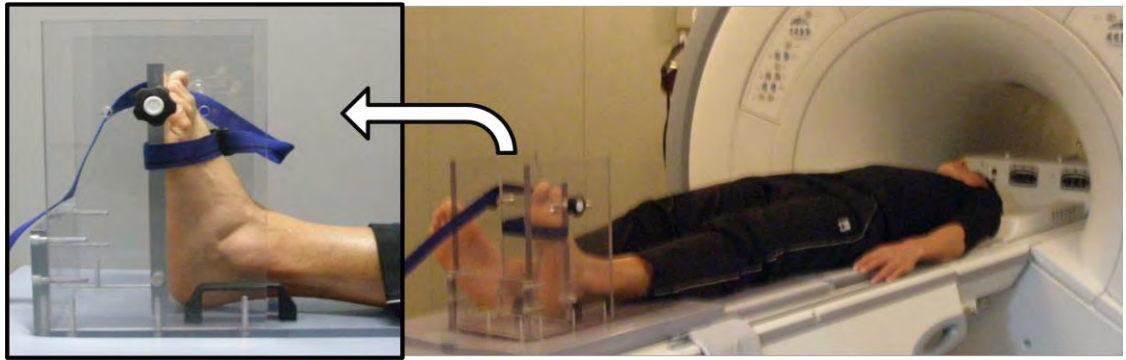


図1 MR撮影時の被験者の姿勢

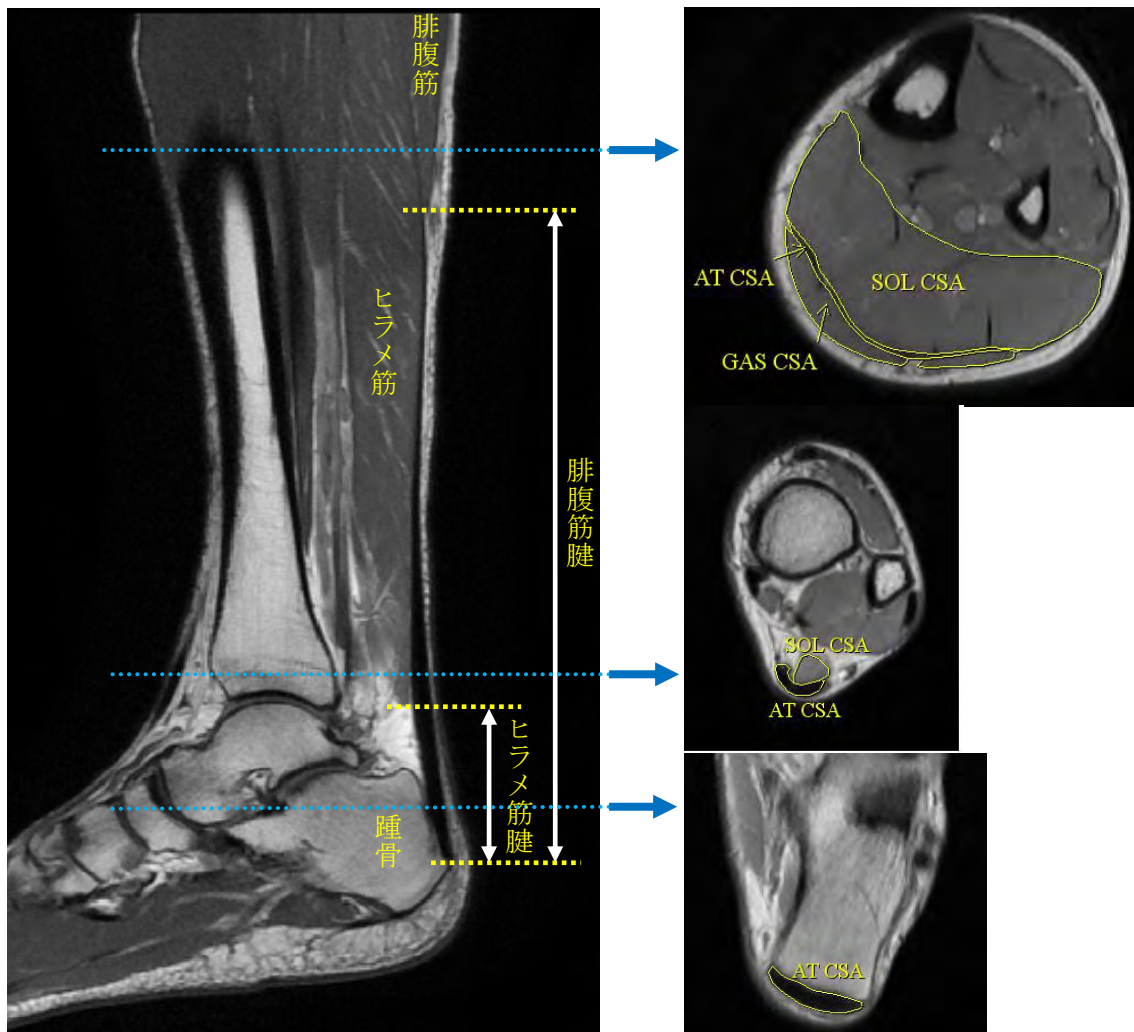


図2 アキレス腱と下腿三頭筋群のMR画像(矢状面と横断面)

アキレス腱の横断面積は、先行研究で Magnusson and Kjaer. (2003) により肥大などの変化が起きやすいと言われている、踵骨付近のアキレス腱横断面積の最大部をアキレス腱横断面積と定義して分析に用いた。アキレス腱長の計測は、MR 画像が正確に解剖学的横断面を撮影できていると仮定して MR 横断画像の座標から計算した。アキレス腱の停止部は、踵骨上でアキレス腱が見えなくなる位置とし、ヒラメ筋遠位端をヒラメ筋腱の起始部、腓腹筋遠位端を腓腹筋腱の起始部とした。Magnusson et al. (2003)に従い、アキレス腱停止部からヒラメ筋遠位端までの長さをヒラメ筋腱長、アキレス腱の停止部から腓腹筋遠位端までの長さを腓腹筋腱長と定義し(図 2)、MR 画像のスライス数からアキレス腱長を正確に 1mm 単位で計測した。また、アキレス腱最大横断面積をディメンションを考慮して体重の影響を除去するために、体重の 2/3 乗で除した値 ($\text{mm}^2/\text{kg}^{2/3}$)と、アキレス腱長が下腿長に占める割合(%)を算出した。

2.2.3 統計

データは、平均±標準偏差で示した。二元配置(左右脚×群)の分散分析(ANOVA)で、それぞれの群間の項目(アキレス腱の横断面積、アキレス腱長)の差を確認した。

2.3 結果

2.3.1 アキレス腱の横断面積

アキレス腱の最大横断面積は、左右脚とも短距離群、長距離群、跳躍群、水泳群においてコントロール群よりも有意に高値を示した。跳躍群においてのみ左右差が認められ、踏切脚のアキレス腱最大横断面積が非踏切脚よりも有意に大きかった(表 2)。

表 2 アキレス腱の最大横断面積

	短距離群	長距離群	跳躍群	水泳群	コントロール群
右脚 (mm^2)	120.0±9.5**	121.9±16.8**	122.2±14.8**†	111.1±10.7*	97.7±10.5
左脚 (mm^2)	119.1±9.8**	120.0±21.5**	129.1±14.8**	113.7±13.8*	98.1±9.5
右脚 ($\text{mm}^2/\text{kg}^{2/3}$)	7.4±0.4**	8.0±0.9***#	7.4±0.9**†	6.9±0.6	6.2±0.3
左脚 ($\text{mm}^2/\text{kg}^{2/3}$)	7.3±0.4**	7.9±1.2***#	7.8±0.9**	7.0±0.7	6.3±0.3

*: vs. コントロール群, **: $P<0.01$, *: $P<0.05$, #: vs. 水泳群, #: $P<0.01$, #: $P<0.05$

†: vs. 左脚, †: $P<0.05$

体重の 2/3 乗で除したアキレス腱の最大横断面積は、左右脚とも短距離群、長距離群、跳躍群においてコントロール群よりも有意に高値を示したが、水泳群とコントロール群には有意な群間差は認められなかった。そして、長距離群においてのみ左右脚とも水泳群よりも有意に高い値を示した。跳躍群の左右差は、体重の 2/3 乗で除した場合にも有意な左右差が認められた。

2.3.2 アキレス腱の長さ

ヒラメ筋腱長は、群間に有意な差は認められなかった。長距離群においてのみ左右差が認められ、右脚のヒラメ筋腱が左脚よりも有意に長かった(表 3)。

腓腹筋腱長は、群間にも左右間にも有意差が認められなかったが、被験者全体において左脚が右脚よりも有意に長かった(図 3)。

以上の結果は、アキレス腱長を下腿長で除した場合にも変わらなかった。

表 3 アキレス腱長

		短距離群	長距離群	跳躍群	水泳群	コントロール群
腓腹筋 腱長 (mm)	右脚	203.3±28.5	211.7±16.2	203.8±16.2	192.9±20.7	194.1±14.3
	左脚	211.4±22.4	222.6±15.7	208.1±13.4	205.6±23.7	203.3±12.2
ヒラメ筋 腱長 (mm)	右脚	69.8±11.9	82.9±20.4††	79.4±14.0	76.4±19.8	62.9±10.6
	左脚	72.6±16.0	71.9±14.1	74.1±16.0	76.3±13.8	66.9±15.9
腓腹筋 腱長 (%)	右脚	52.2±6.7	54.5±1.8	49.7±3.9	49.2±4.5	50.4±4.0
	左脚	54.2±4.1	57.9±2.2	50.7±2.8	52.8±4.8	52.8±4.4
ヒラメ筋 腱長 (%)	右脚	18.3±5.4	21.5±5.2††	19.3±3.8	19.6±5.4	16.3±2.5
	左脚	18.9±5.7	18.6±3.1	18.0±3.7	19.5±3.7	17.3±3.7

†: vs. 左脚, ††: $P<0.01$

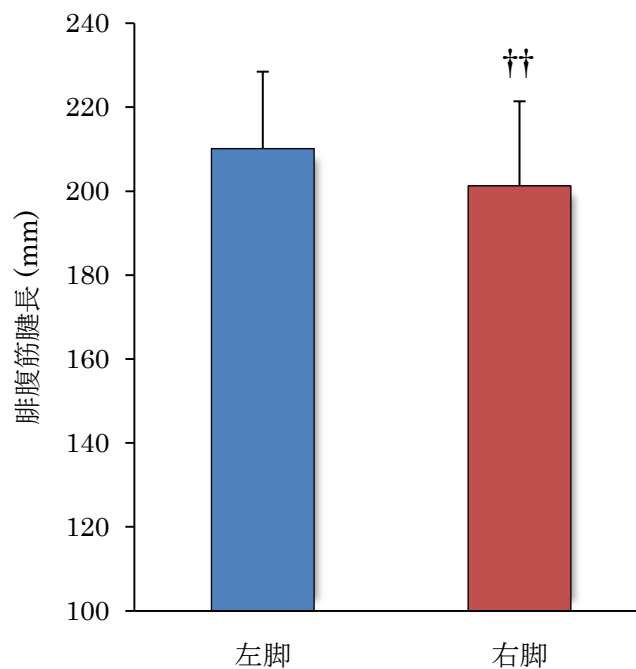


図3 全被験者を含めた腓腹筋腱長 (n = 37)

††: $P < 0.01$

2.4 考察

2.4.1 アキレス腱の横断面積

本研究では、アキレス腱の横断面積はスポーツ競技者群がコントロール群よりも有意に高い値であった。スポーツ選手を対象とした先行研究では、短距離走選手と同様にランニング動作を行う長距離走選手において一般人よりアキレス腱横断面積が大きく (Magnusson and Kjaer, 2003; Rosager et al, 2002), ジャンプ動作をよく行うバレーボール選手においても一般人よりも大きなアキレス腱横断面積を持つと報告されている (勝田ほか, 1997)。トレーニングによる腱肥大に関する先行研究では、等尺性足関節底屈トレーニングによるアキレス腱の肥大 (Arampatzis et al, 2007a) や、数週間の膝伸展レジスタンストレーニングによる膝蓋腱の肥大が報告されている (Kongsgaard et al, 2007; Seynnes et al, 2009)。これらのことから、本研究の結果は支持されたといえる。

Giddings et al.(2000) が、歩行中にアキレス腱にかかる負荷は体重の 3.7 倍であるが、ランニング中では体重の 7.7 倍であることを報告していることから、走運動を伴うトレーニングを行う陸上競技者群はコントロール群と比較して、アキレス腱にかかる負荷が高まると推察される。本研究の結果から、陸上競技者群のアキレス腱の横断面積はコン

コントロール群よりも有意に大きく、コントロール群との差は水泳群のものよりも大きかった。また、Arampatzis et al.(2010) は、腱の形態的な適応を引き起こす閾値の存在を示唆していることから、コントロール群よりも有意にアキレス腱横断面積が大きかったスポーツ競技者群は、トレーニングの負荷がこの閾値を越えるものであったと考えられる。また、水泳群においてもコントロール群よりも大きなアキレス腱横断面積であったが、体重の $2/3$ 乗で除した場合にはその差は有意ではなかった。水泳選手は走動作のようなアキレス腱に負荷が加わるトレーニングをあまり行わないため、アキレス腱の形態的な適応が引き起こされなかったと考えられ、アキレス腱横断面積の絶対値においてコントロール群と有意な差が認められたのは、体重の違いであることが考えられる。

一方、陸上競技者 3 群のアキレス腱横断面積は、絶対値でも体重で除した値においても群間に有意な差が認められなかった。先行研究において、低強度トレーニング群では腱の形態的な変化が認められなかったこと(Arampatzis et al, 2007a, 2010)、比較的高強度においても負荷量が少ない場合では、形態的な適応が認められなかったことが報告されている(Fouré et al, 2010)。これらのことから、トレーニング負荷の力積を高めることで腱の形態的な適応が起こると推察される。本研究の短距離群と跳躍群は高負荷のトレーニング、長距離群は長時間負荷が加わるトレーニングを行っており、負荷のかかり方は異なるが、陸上競技者群は負荷の力積を高めていたことが、陸上競技者群のアキレス腱横断面積に群間差がなかった原因である可能性が考えられる。

腱横断面積の左右差に関しては、Muraoka et al.(2007) は剣道選手で、高負荷がかかる左脚のアキレス腱最大横断面積が右脚と比較して大きいことを報告している。膝蓋腱においても、バドミントン選手とフェンシング選手で、高い負荷がかかる脚側の膝蓋腱横断面積がもう一方の脚と比較して大きいことが報告されている(Coupe et al, 2008)。本研究では、跳躍群のみに腱横断面積の左右差が認められた。跳躍選手はその競技特性から踏切脚が非踏切脚よりトレーニング負荷が大きいことが考えられ、アキレス腱最大横断面積も踏切脚が非踏切脚よりも大きかった。よって、踏切脚に高い負荷がかかっていたことが、アキレス腱横断面積の左右差に影響していたと考えられる。

2.4.2 アキレス腱の長さ

被験者全体において腓腹筋腱長は右脚よりも左脚が有意に長く、長距離群のヒラメ筋腱長は、左脚よりも右脚が有意に長かったという結果は、これまでの腱研究の報告からは説明ができない。しかし、腓腹筋腱長は腓腹筋遠位端よりも遠位のアキレス腱長、ヒ

ヒラメ筋腱長はヒラメ筋遠位端よりも遠位のアキレス腱長と定義しているため、各アキレス腱長は下腿に占める各筋長の割合に左右される。このことから本研究でみられた腓腹筋腱長とヒラメ筋腱長の左右差は、各筋長および筋の発達の左右差が各腱長の左右差として現れたことが原因の一つとして考えられる。

被験者全体では左脚の腓腹筋腱が右脚よりも有意に長かったが、先行研究において健康成人 291 名でのアンケート調査によるサンプルクラスター分析によって、89.3%が左脚を軸脚としており、右脚および両脚を軸脚としている者は 10.3%しかおらず下肢に機能的左右差があることが報告されている(藤井ほか, 2004)。さらに、立位姿勢による荷重の左右差を足圧によって調査し、左脚を支持脚とする者が多いことや(橋田と船橋, 1990; 深田ほか, 2010)、イスからの立ち上がりやバスの乗降などの日常生活動作を調査することで、左下肢支持性優位が認められており(加藤ほか, 1988)、加藤ほか(1988)は「ヒトは経験と学習によって、どのような動作にも対応できるが、無意識的に左下肢を支持脚として使っている」と考察している。これらのことから、本研究の被験者においても、多くの者が左脚を支持足としていることが考えられ、それによって左右不均等な筋の発達があったことが可能性として十分に考えられる。

一方、長距離群は左脚のヒラメ筋腱長が短いという現象がほぼ全ての長距離群の被験者でみられたことから、左回りの陸上競技場を距離・時間ともに長く走ることで曲走路の内側と外側の脚では筋腱の適応が異なり、内側となる左脚が逆脚よりもヒラメ筋が発達していたと考えられる。さらに、持久系種目である長距離群においてヒラメ筋腱長に左右差が認められたことから、ヒラメ筋は遅筋線維で持久系の運動にて活動が活発であるため、下腿三頭筋群で種目特性上最も利用される筋において左右不均等な発達が促されたのではないかと考えられる。

また、水泳群において、全被験者内で最も腓腹筋腱長に大きな左右差が確認できた。これは、通常の水泳時には足関節が底屈しており、水中では地面反力などの負荷も受けないが、ターン時において壁を蹴る動作がみられ、この動作が腓腹筋腱長の左右差に影響しているのではないかと考えられる。先行研究では、岡村ほか(1990) が 591 名の水泳選手を対象にターンの左右方向を観察し、89.8%が左ターンであることを報告している。その後の調査においても、ジュニア選手 156 名およびマスターズ選手 37 名でも調査を行い、90%以上が左ターンであることを報告している(岡村と前原, 1992)。また、本研究の被験者の水泳選手は、シーズン中で 1 週間当たり平均 27.9 ± 5.6 km、オフシーズン

中で 1 週間当たり平均 $27.0 \pm 11.4 \text{ km}$ を 25m プールで泳いでいるため，単純計算でシーズン中に 1 週間当たり 1116 ターン，オフシーズン中に 1 週間当たり 1080 ターンをしている計算になる．このターンの左右方向の違いが，腓腹筋の発達に左右差を生み，結果的に腓腹筋腱長において有意な左右差が生じたものと考えられる．

第3章 大学陸上競技選手のアキレス腱の物質的特性

前章では、アキレス腱の形態的特性について複数種目において左右差も含めて検討し、特にアキレス腱の横断面積と長さの左右差において新たな知見を発見することができた。本章では、先行研究で一様な見解がみられなかった腱の物質的特性について、大学陸上競技選手を対象として明らかにする。アキレス腱の物質的特性についても複数種目で左右差も含めて検討することで有益な結果が得られることが予想される。

3.1 目的

本章では、アキレス腱の物質的な特性について、同一プロトコルの測定によって複数種目のスポーツ競技選手(短距離群, 長距離群, 跳躍群, 水泳群)とコントロール群を対象とし、左右差も含めて明らかにすることを目的とする。

3.2 方法

3.2.1 被験者

被験者は、第2章でアキレス腱の形態的特性の計測を行った者と同じである。しかし、跳躍群の2名の被験者については超音波映像データが取得できていなかったため、本章では跳躍群の被験者数は6名で分析をおこなった。なお、被験者が減った場合においても、5群の身体特性(身長, 体重, 年齢)に有意な差はなく、陸上競技選手群の競技歴にも群間に有意な差はなかった。

本研究は、事前に立命館大学生命倫理審査委員会の承認(承認番号: BKC-IRB-2010-20)を得てから行なった。また、被験者には実験前に十分な説明を行い、すべての被験者から同意を得た。

表4 被験者の特性

	短距離群	長距離群	跳躍群	水泳群	コントロール群
人数(人)	8	7	6	7	7
身長(cm)	175.9±7.4	172.6±6.3	179.4±5.9	173.0±5.3	172.8±5.6
体重(kg)	65.6±5.0	59.1±4.7	67.1±4.1	64.9±4.1	62.4±8.4
年齢(歳)	20.6±1.4	20.4±1.3	20.8±1.3	19.0±1.0	21.6±1.8
トレーニング歴(年)	8.8±1.8	8.5±1.8	8.7±1.4	18.0±0.6	-

3.2.2 測定方法

Bモード超音波装置(SSD3500, アロカ)と筋力計(Biodex system4, BDX-4, Biodex)を用いて, 等尺性最大随意足関節底屈トルク発揮(PF MVC: plantar flexion maximum voluntary contraction)およびRamp試行で, 力発揮中の筋腱移行部の伸張量からアキレス腱の力学的・物質的特性を計算した. 測定姿勢は, 座位で膝関節伸展, 足関節は90度で行った(図4). 膝, 足関節は動かないようにベルトで固定した. Biodexの回転中心と足関節の関節中心は, 目視で確認してそれぞれの回転中心を合わせた.



図4 アキレス腱の伸張量測定実験風景

また, 被験者に十分なウォーミングアップを行わせた後に, 測定を開始した. PF-MVCの測定は2-3回行い, その時の最大値をMVCとみなした. このとき, 2回でMVCが発揮されていないと判断した場合に, 3回目の試行を行わせた. Ramp試行は, 0%MVC(安静)から5秒間かけて100%MVCまで力をなめらかに漸増させ, 約1秒間全力を維持さ

せた後 5 秒間かけて 100%MVC から 0%MVC まで力をなめらかに漸減させるようにした。このとき同時に、腓腹筋の遠位端の筋腱移行部を B モード超音波診断装置で撮像した(図 6)。Ramp 試行は最低 2 回行い、力発揮と超音波映像がともに有効なデータが取れるまで行った。筋力計と超音波による実験試技では、各試技の間に適度な時間を入れ、疲労の影響が出ないように注意した。測定は片脚ごとに MVC から Ramp 試行まで行い、被験者ごとに開始脚をランダムに左右に振り分けた。筋力計のデータは、AD コンバータ(Powerlab, AD Instruments)を介して、パーソナルコンピュータに取り込み、分析ソフトウェア(Chart v.5, AD Instruments)で記録したのち、処理した(図 5)。AD コンバータに入力したデータは、チャンネル 1 に筋力計で測定した筋力、チャンネル 2 に筋力計の角度変化、チャンネル 3 にタイマーのスタートボタンを押した瞬間の信号の計 3 つである。チャンネル 2 で、角度変化がない等尺性の力発揮であることを確認し、チャンネル 3 で、筋力計と超音波映像を同期させた。超音波診断装置で撮像した映像は、筋力計データと同期するためのタイマー時刻を超音波映像に組み込み、外部出力によってデジタルビデオカメラに入力してビデオテープで録画した。その映像をもとに、画像分析ソフトウェア(Image J, ver.1.44p)を用いて Ramp 試行中の筋腱移行部(図 6)の移動距離を計測し、この時の最大移動距離をアキレス腱の伸張量とした。本研究においてアキレス腱の伸張量とは、安静時のアキレス腱長から Ramp 試行時に最もアキレス腱が伸びた長さとし、そのアキレス腱が最大でどれほど伸張するかを示す指標とした。

アキレス腱の張力は、筋力計から得られた足関節トルク(TQ)とモーメントアーム(MA)を用いて $\text{Force} = \text{TQ} / \text{MA}$ の式から推定した(Nm / mm)。モーメントアームは、Rugg et al. (1990) を基準にして定めた。アキレス腱の歪み(Strain) は、アキレス腱の伸張量を第 2 章で求めた安静時の腓腹筋腱長で除すことで算出し($\Delta L / \text{mm}$)、安静時のアキレス腱長から何%の変形がアキレス腱に起きていたかを示す指標とした。アキレス腱の応力(Stress) は、Arampatzis et al. (2007a, 2010) と同様に、推定されたアキレス腱張力からアキレス腱(ヒラメ筋腱)の平均横断面積を除して算出した(N / mm^2)。この時に用いたアキレス腱の平均横断面積は、ヒラメ筋腱の全長にわたって 5mm 間隔で計測した横断面積の和を、ヒラメ筋腱長で除することによって算出した。また、アキレス腱の応力は、アキレス腱の横断面積あたりに最大でどれほどの力が加わっているかを示す指標とした。アキレス腱の Stiffness は、50%MVC 以降の腱張力の変化とアキレス腱伸張量の変化の傾きがほぼ直線回帰し、この傾きがアキレス腱の硬さ(stiffness)を表すことが報告されており

(Ker et al, 1981; Kubo et al, 1999), この方法による stiffness の算出が多くの先行研究で用いられている(Kubo et al, 1999,2002; Arampatzis et al, 2007a, 2010; Fouré et al, 2010). そこで, 本研究においても同様の方法を用いて stiffness を算出した($\Delta F / \Delta L$, N/mm, 図 7). Stiffness は, アキレス腱の硬さを示す指標であり, この値は高いほどアキレス腱が硬いことを表す. ヤング率は, 50%MVC 以降の応力-歪み(stress-strain) 関係を最小二乗法で近似した直線の傾きから算出した(応力/歪み, GPa). ヤング率は, アキレス腱の単位面積当たりの伸びにくさを示す指標であり, この値が高いほどアキレス腱が物質的に伸びにくい, つまり材質的に硬いということを表す.

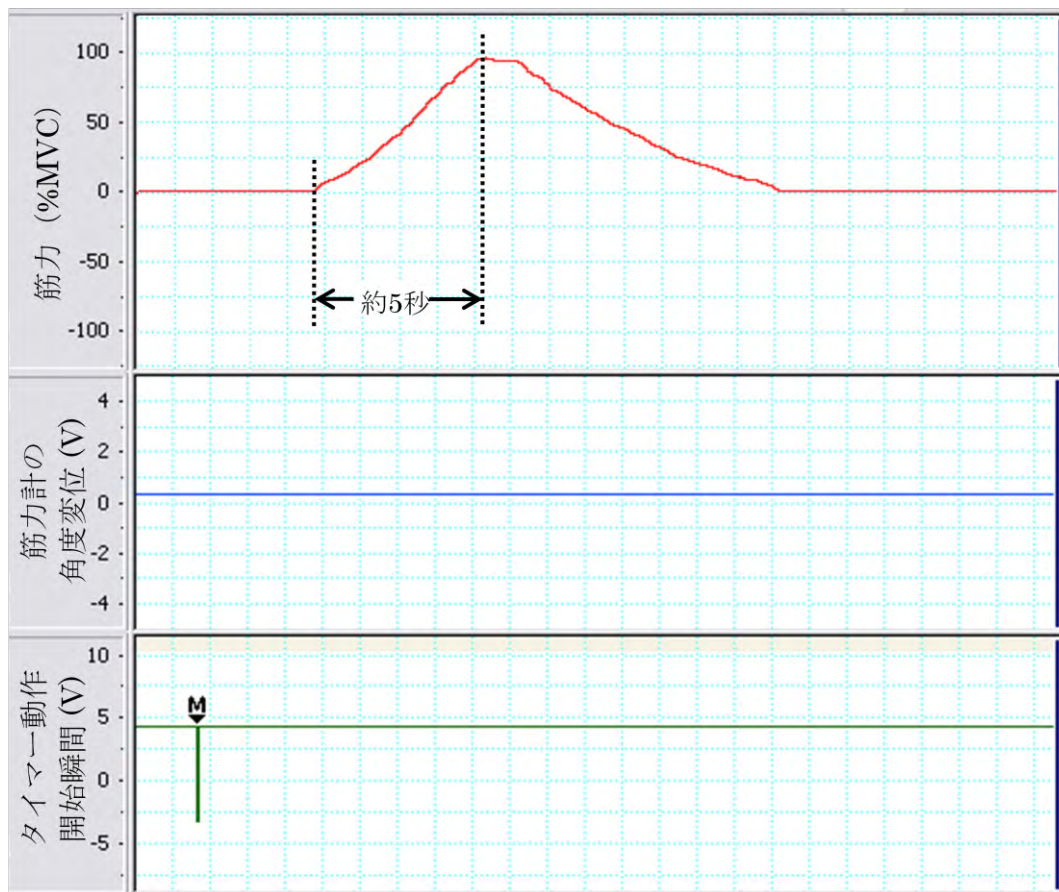


図 5 筋力計と超音波による実験データ(Chart の画面を加工)

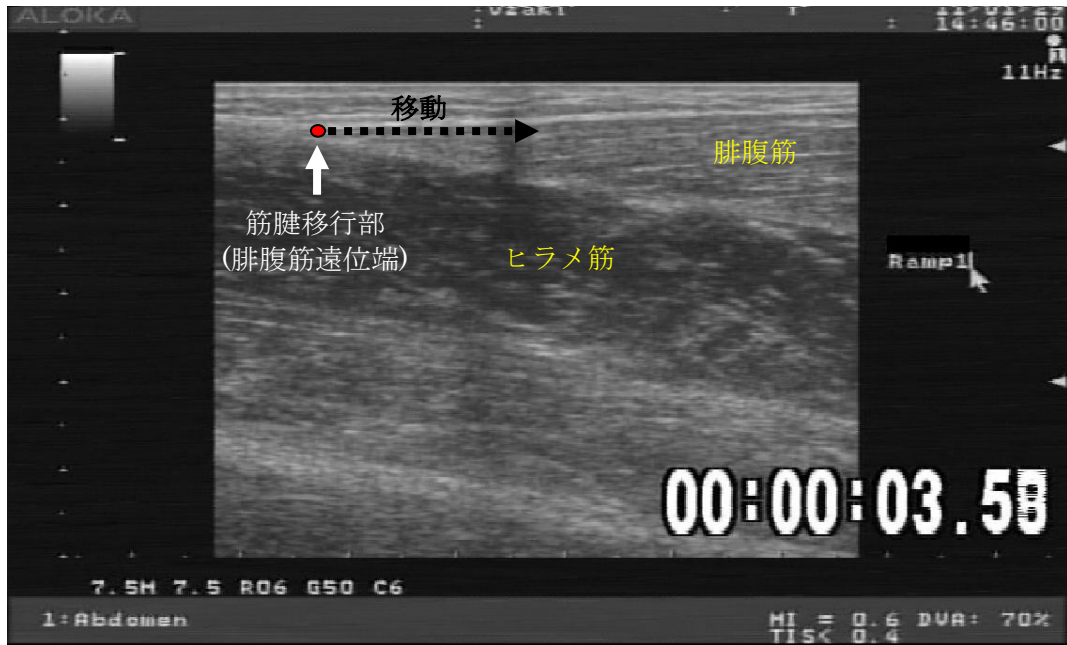


図6 超音波映像のアキレス腱伸張量の測定位置

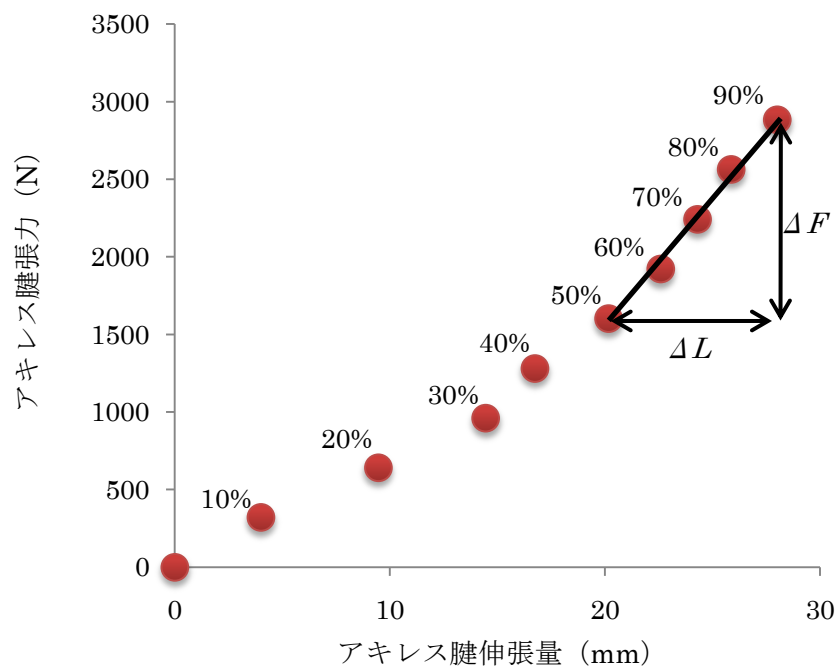


図7 stiffnessの算出に用いる50%MVC以降の直線回帰の例

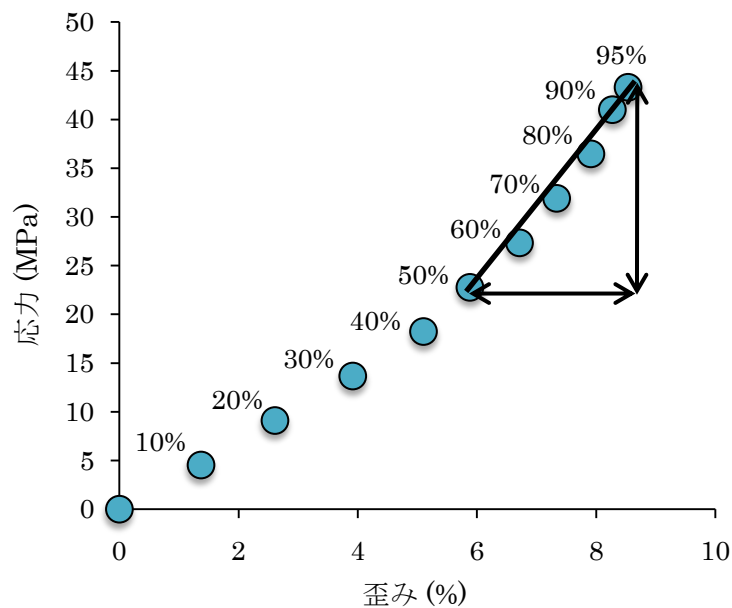


図8 ヤング率の算出に用いる応力-歪み関係の例
(図中の%は, %MVC)

3.2.3 統計

データは、平均±標準偏差で示した。二元配置(左右脚×群)の分散分析(ANOVA)を用いて、それぞれの群間の項目(アキレス腱の張力、伸張量、歪み、応力、stiffness、ヤング率)の差を確認した。さらに、跳躍群と水泳群の腱張力と伸張量を、10%毎に二元配置(左右脚×群)の分散分析(ANOVA)で分析した。アキレス腱の張力と伸張量および歪み、応力の相関関係は、ピアソンの相関係数を用いて検定した。

3.3 結果

3.3.1 アキレス腱の張力、伸張量、歪み、応力

アキレス腱の張力は、短距離群、跳躍群、水泳群においてコントロール群と長距離群よりも有意に高値であり、跳躍群と水泳群は、長距離群と比較した場合にも有意に高い値を示し、跳躍群は短距離群よりも高値であった(図 9)。アキレス腱の伸張量は、短距離群、跳躍群、水泳群においてコントロール群よりも有意に高値であり、跳躍群と水泳群は、長距離群と比較した場合にも有意に高い値を示した(図 10)。アキレス腱の歪みは、跳躍群と水泳群が長距離群およびコントロール群よりも有意に高値であった(図 11)。アキレス腱の応力は、短距離群、跳躍群、水泳群においてコントロール群よりも有意に高値であり、跳躍群と水泳群は、長距離群と比較した場合にも有意に高い値を示した(図 12)。

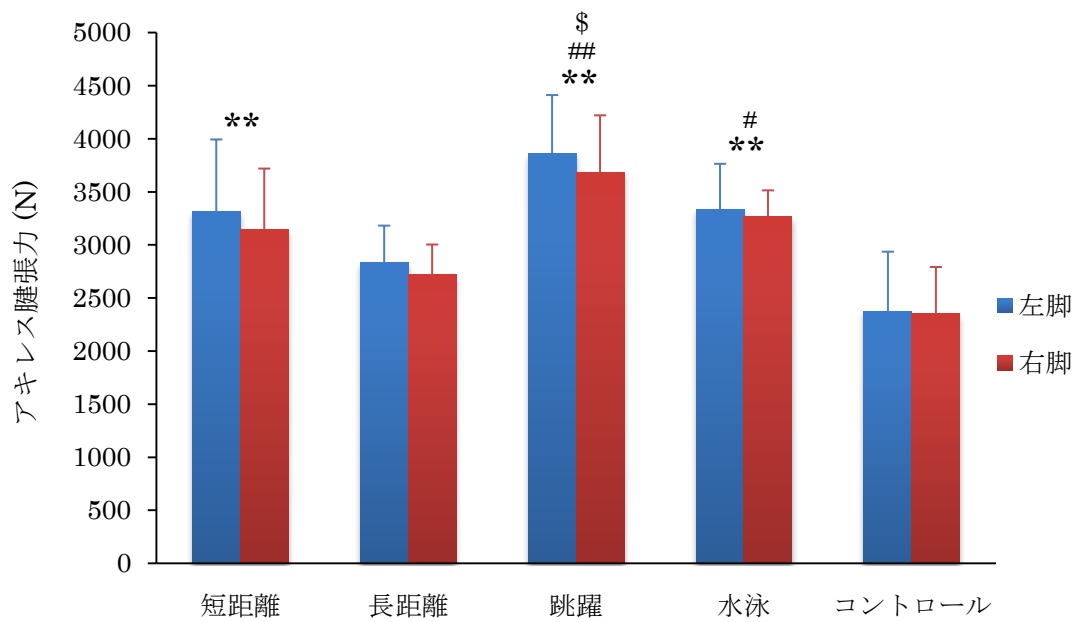


図9 アキレス腱の張力

*: vs. コントロール群, **: $P<0.01$, \$: vs. 短距離群, \$: $P<0.05$

#: vs. 長距離群, ##: $P<0.01$, #: $P<0.05$

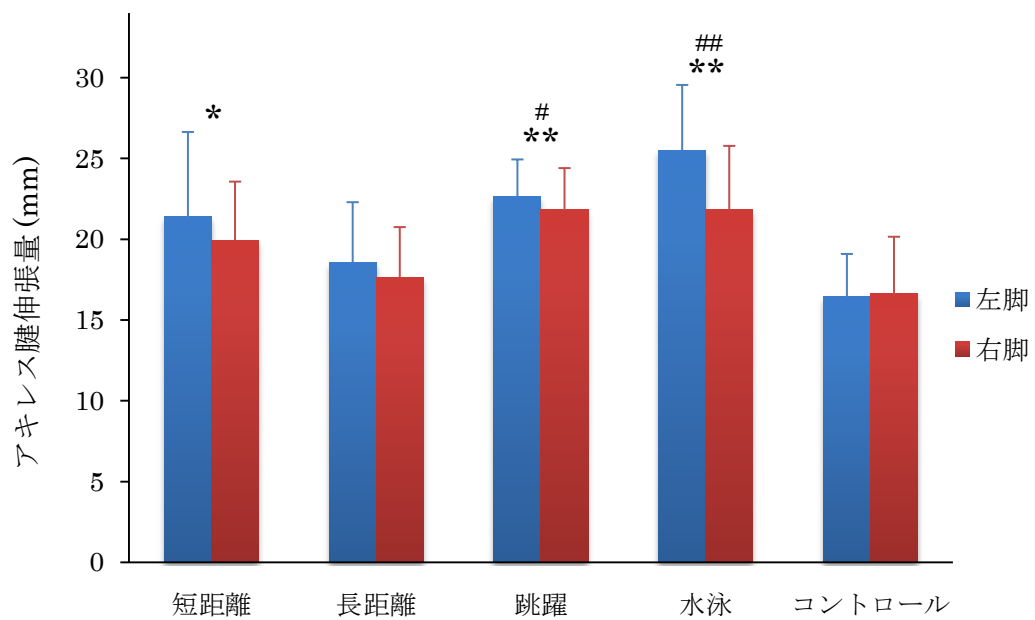


図10 アキレス腱の伸張量

*: vs. コントロール群, **: $P<0.01$, *: $P<0.05$

#: vs. 長距離群, ##: $P<0.01$, #: $P<0.05$

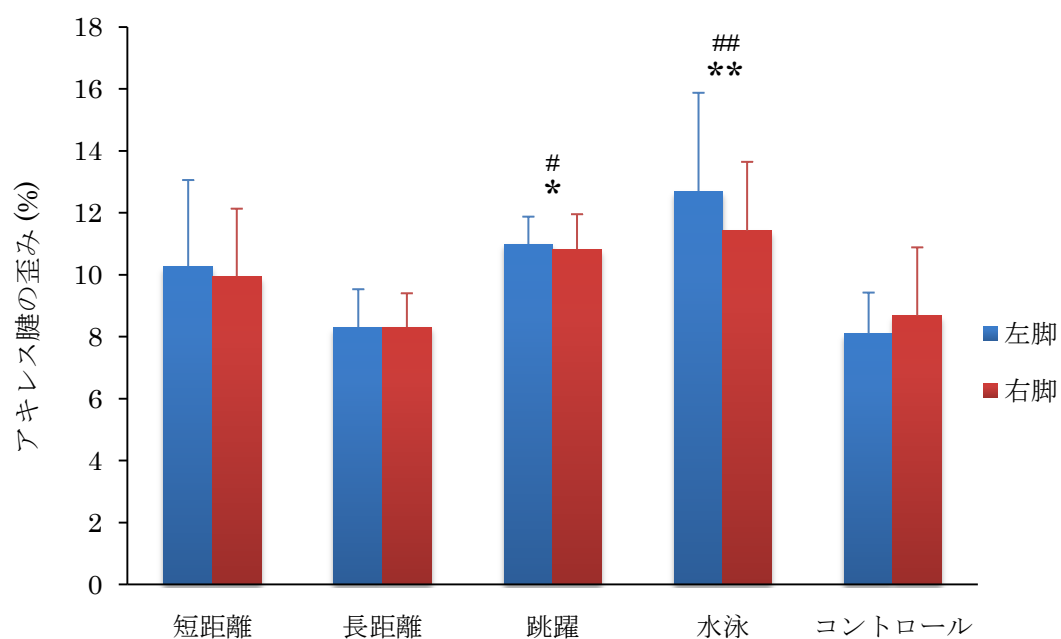


図11 アキレス腱の歪み

*: vs. コントロール群, **: $P < 0.01$, *: $P < 0.05$

#: vs. 長距離群, **: $P < 0.01$, #: $P < 0.05$

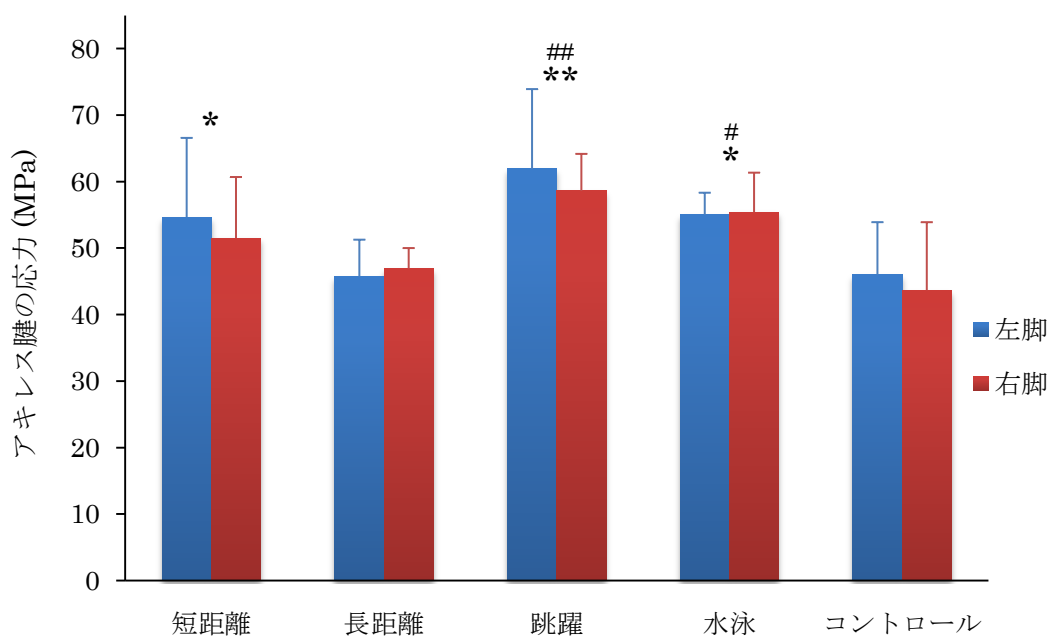


図12 アキレス腱の応力

*: vs. コントロール群, **: $P < 0.01$, *: $P < 0.05$

#: vs. 長距離群, **: $P < 0.01$, #: $P < 0.05$

3.3.2 アキレス腱の硬さ(stiffness, ヤング率)

アキレス腱の stiffness は, 短距離群をはじめとした陸上競技者群が高い傾向にあるが, 群間にも左右にも有意な差が認められなかった. また, ヤング率においても同様に, 群間にも左右にも有意な差が認められなかった.

表 5 アキレス腱の stiffness, ヤング率

		短距離群	長距離群	跳躍群	水泳群	コントロール群
Stiffness (N/mm)	右脚	248.4±75.8	233.2±46.5	220.5±55.6	211.0±44.2	220.5±110.5
	左脚	264.6±82.7	223.4±60.8	201.7±68.1	214.0±49.9	184.2±77.7
ヤング率 (GPa)	右脚	7.3±2.4	7.9±1.9	6.7±2.2	6.4±1.3	6.9±3.2
	左脚	8.1±2.5	7.7±2.7	6.2±2.5	6.8±1.5	6.3±2.3

3.4 考察

3.4.1 アキレス腱の張力, 伸張量, 歪み, 応力

伸張量と歪み, 応力に競技種目差が認められた原因の一つとして, 腱張力の大きさが考えられる. その証拠に伸張量と腱張力の間には左脚と右脚ともに高い正の相関関係が認められ($P<0.01$), 同様に歪みと腱張力, 応力と腱張力の間にも高い正の相関関係が認められた($P<0.01$). 伸張量は, フックの法則より弾性体の伸びは荷重に比例することから, 腱の張力と関係があることは推察できる. 歪みは, 伸張量を腓腹筋腱長で除することから, 腓腹筋腱長に群差がなかったことを考えると, 伸張量の結果から推察ができる. 応力は, 腱の張力をアキレス腱の平均横断面積で除することで算出し, アキレス腱の平均横断面積に群間差がなかったため, 応力と腱の張力が有意な相関関係にあることは当然であると考えられる. よって, 短距離群, 跳躍群, 水泳群において, アキレス腱の伸張量, 歪み, 応力がコントロール群や長距離群よりも大きかったことの主な原因は, 腱張力の大きさであると考えられる.

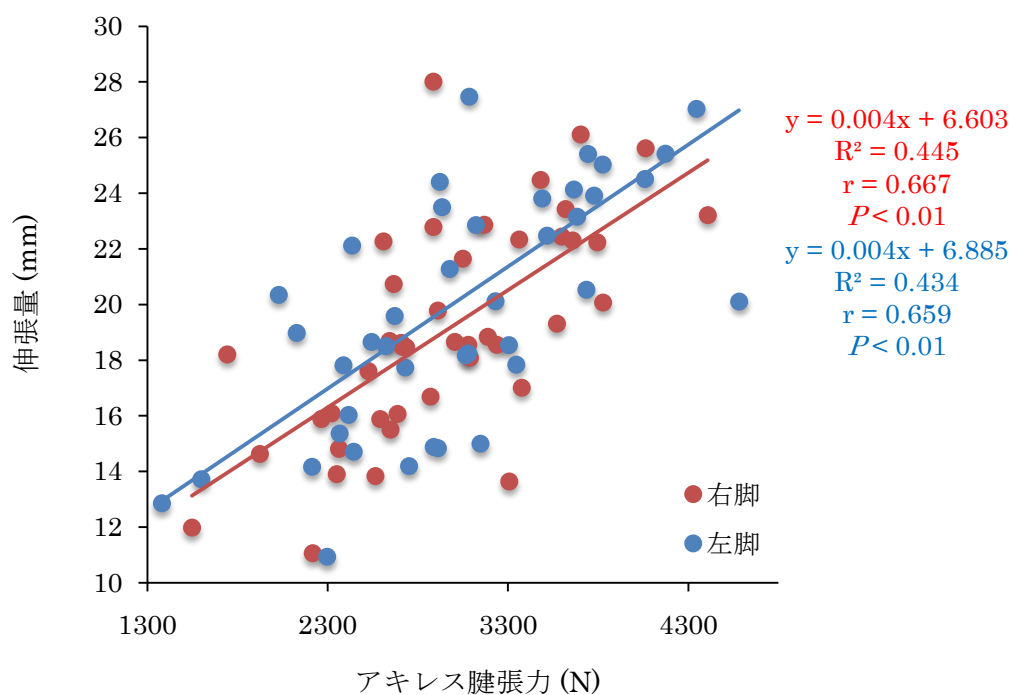


図13 アキレス腱張力と伸張量の関係 (n = 35)

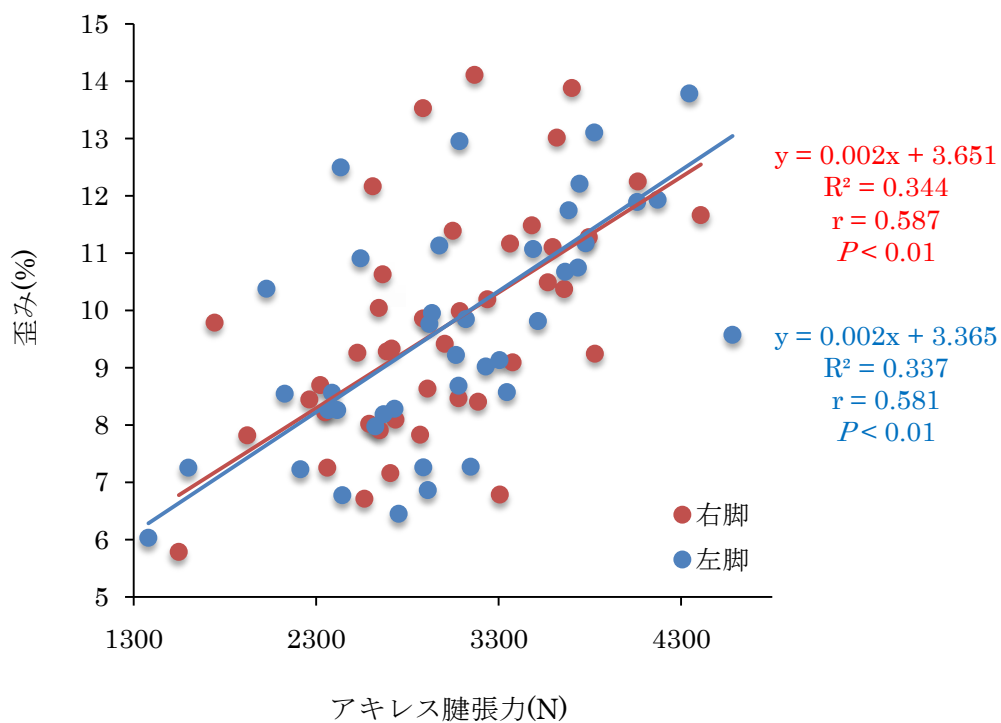


図14 アキレス腱張力と歪みの関係 (n = 35)

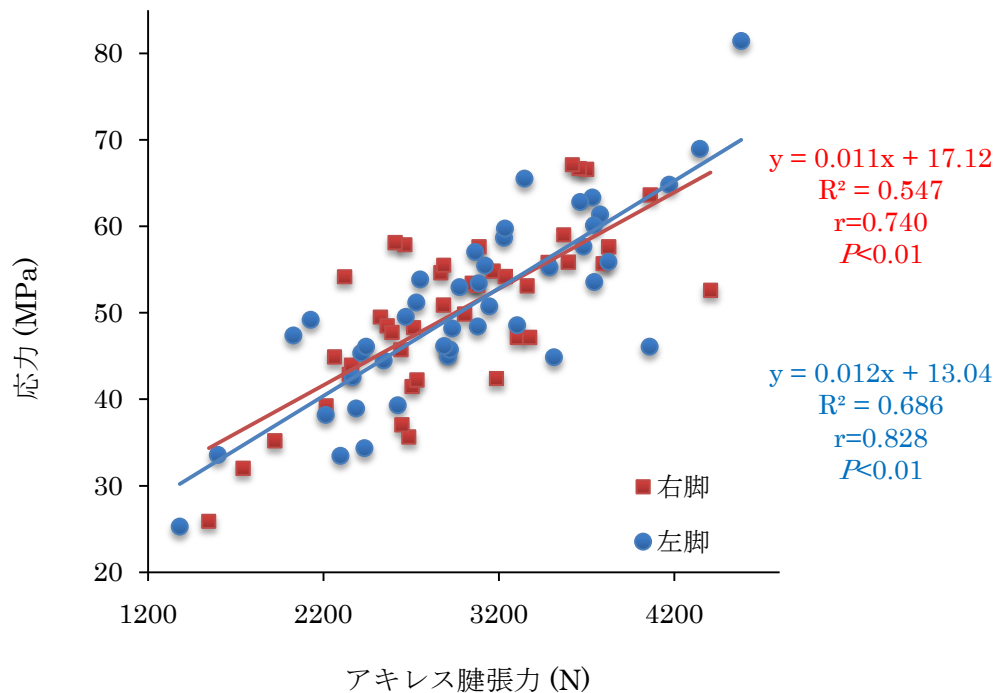


図15 アキレス腱張力と応力の関係 (n = 35)

しかしながら、アキレス腱の張力、伸張量、歪みにおける群間の大小関係をみると、アキレス腱の張力は跳躍群が最も高い値であったが、アキレス腱の伸張量と歪みは水泳群が最も高い値であることであり、同じ傾向ではないように見受けられる。すなわち、水泳群は跳躍群よりも小さい腱張力で大きくアキレス腱が伸びていることになる。アキレス腱の張力とアキレス腱の最大伸張量には高い相関関係があったが、それだけではアキレス腱の物質的特性を説明できないと考えられる。そこで、比較的硬いと思われる跳躍群と比較的軟らかいと思われる水泳群におけるアキレス腱張力とアキレス腱の伸張量の関係を10%毎にプロットしてみた(図16)。

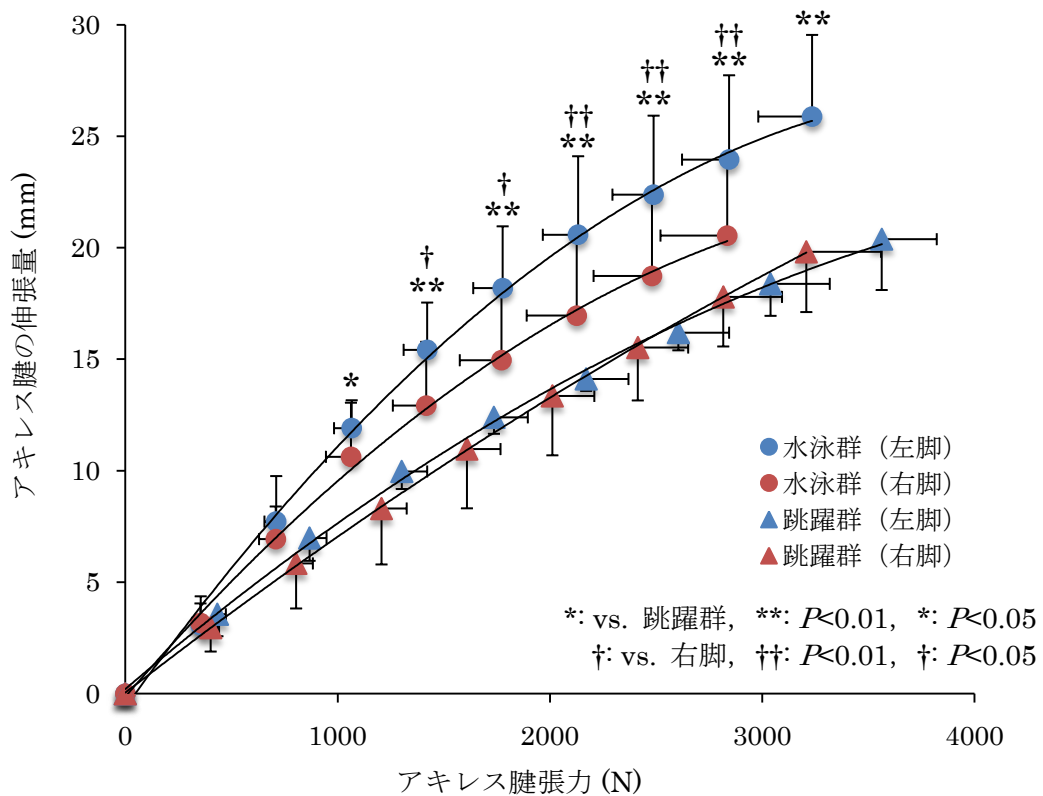


図16 アキレス腱の張力と伸張量

図 16 から、同じ張力がアキレス腱にかかっているにもかかわらず水泳群は跳躍群よりもアキレス腱の伸張量が大きくなることがわかる。先行研究では、腱に負荷がかかるレジスタンストレーニングを行うことで、腱の stiffness が増加したという報告がある (Kubo, 2002; Arampatzis et al, 2007a) 。一方、それとは反対に、脚懸垂やベッドレストによる腱の不使用によって、腱の stiffness は減少することが報告されている (Kubo et al, 2004; Boer et al, 2007) 。以上のことから、水泳選手はアキレス腱に大きな負荷がかからない状況に曝された状態でトレーニングを長年続けることになり、そのような状態でトレーニングを行うことによってアキレス腱が伸張しやすくなるような適応を起こしたのかもしれない。

3.4.2 アキレス腱の stiffness, ヤング率

本研究の被験者は、長年にわたって専門的なトレーニングを行なっていることから、それぞれの種目の負荷特性に応じた腱の物質的特性を有していると予想されたが、アキレス腱の硬さを示す指標である stiffness やヤング率に、群間および左右間に有意な差は

認められなかった。このことは、本研究における被験者のアキレス腱は、スポーツ競技者群やコントロール群に関わらずほぼ同様の物質的特性であったといえる。

10%毎のアキレス腱伸張量は、水泳群において跳躍群よりも有意に高値であったにも関わらず、*stiffness* とヤング率に差は認められなかった。その原因の一つとして、腱の *crimp* の存在が関係していると考えられる。腱の *crimp* とは、腱を構成するコラーゲン線維の縮れのことを言い、安静状態においてコラーゲンは縮れた状態にあり、筋収縮などの荷重によって *crimp* は引き伸ばされ消失し、荷重がなくなると再び元の縮れた状態に戻る(Rigby et al, 1959; Abrahams, 1967)。Stiffness とヤング率の算出には、50-100%MVC 域による腱張力と伸張量の関係を用いた。その理由にはこの *crimp* が関係している。すなわち、0-50%MVC 域では *crimp* の伸張により腱張力に対して大きな伸張量を得ることで、腱張力と伸張量の関係は曲線形に増加し(*toe region*)、50-100%MVC 域で腱張力と伸張量の関係は直線形に増加する(*linear region*)。この直線形に増加する *linear region* が腱組織の材料特性を反映する(Kubo et al, 1999)。また、0-50%MVC に *crimp* の伸張があることを考慮して、50%MVC からの伸張量の変移量を 10%MVC 毎に算出すると、50%MVC 以降の変移量では跳躍群と水泳群に伸張量の有意な差が認められなかった。以上のことから、腱の *crimp* の伸張が大きかったことが原因となり、10%MVC 毎の伸張量は水泳群が跳躍群よりも有意に大きかったが、腱組織の物質的特性を表す *stiffness* では群間に有意な差が認められなかったと考えられる。

一方、トレーニング実験で腱特性に変化が起きたと報告している先行研究(Kubo, 2002; Arampatzis et al, 2007a) と結果が異なった一つの理由として、個人差が大きいことがあげられる。本研究はトレーニング前後での比較を行なっておらず、長年のトレーニングによる変化が個人差のバラつきよりも小さい場合には、トレーニングによる変化が検出できない可能性がある。本研究の被験者が長年の専門的トレーニングによってアキレス腱の物質的特性が変わっている可能性はあるが、その変化は本研究の被験者群間の個人差よりも小さいといえる。先行研究と結果が異なったもう一つの理由として、様々な実験条件があるトレーニング実験と実際の動的で複雑な動作を伴うトレーニングによるアキレス腱の適応は、複合的な動作適応のために異なることも可能性として考えられる。

第4章 大学陸上競技選手の下腿三頭筋群とアキレス腱の関係

第2章と第3章では、アキレス腱が持つ特性について先行研究の問題点を改善できる研究プロトコルによって検討してきた。しかし、先行研究のもう一つの問題点は、トレーニングによって筋腱複合体である筋と腱の両方が適応を起こしているはずであるが、筋と腱の関係性を調査した研究は岩沼ほか(2007)のみであることであった。そして、岩沼ほか(2007)は、筋と腱の関係性を一般人でしか行なっておらず、一般人より筋腱が発達していると考えられるスポーツ競技者における筋と腱の関係性をみた研究は皆無である。

4.1. 目的

本章では、複数のスポーツ競技選手(短距離群, 長距離群, 跳躍群, 水泳群)において下腿三頭筋の横断面積とアキレス腱の横断面積の関係性を左右脚において調査し、その関係性を明らかにすることを目的とする。

4.2 方法

被験者は、第2章でアキレス腱の形態的な特性の計測を行った者と同じである。測定方法は、第2章のMR装置によるアキレス腱の形態計測内容に加えて、筋断面の測定を行うために、ボディコイル使用, Fast Spin Echo, TR/TE 600/8.0ms, ET 2, FOV 380mm, Matrix 256 x 256, NEX 2, ギャップなし 10mm 間隔で腓骨下部から大腿骨遠位端まで撮影をした。そして、MR装置で得られた画像からアキレス腱の形態計測と同様に、画像分析ソフトウェア(Osiris ver.4.19)を用いて下腿三頭筋群の横断面積を測定した。アキレス腱の横断面積は、第2章で使用した踵骨付近における最大横断面積を分析に用いた。筋横断面積の分析に用いた部位は、腓腹筋とヒラメ筋ともに各個人の最大横断面積部位とした。また、下腿三頭筋の最大横断面積は、腓腹筋とヒラメ筋の最大横断面積の和を用いた。

データは、平均±標準偏差で示した。二元配置(左右脚×群)の分散分析(ANOVA)を用いて、それぞれの群間の項目(ヒラメ筋横断面積, 腓腹筋横断面積, 下腿三頭筋横断面積)を分析した。アキレス腱最大横断面積と下腿三頭筋群横断面積の相関係数は、ピアソンの相関係数を用いて検定した。

4.3 結果

4.3.1 下腿三頭筋群の横断面積

ヒラメ筋の最大横断面積は、群間にも左右間にも有意な差はなかった(表 6)。腓腹筋の最大横断面積は、短距離群、長距離群、跳躍群がコントロール群よりも有意に高い値を示し、短距離群と跳躍群においては水泳群よりも高値であった。また、腓腹筋の最大横断面積にどの群でも左右差は認められなかった。下腿三頭筋の最大横断面積は、短距離群と跳躍群がコントロール群よりも有意に高値であった。ヒラメ筋と腓腹筋の最大横断面積部位は、下腿長を 0%が外踝、100%が膝関節中心とした場合に、ヒラメ筋は被験者全体で右脚 $63.1 \pm 4.0\%$ 、左脚 $63.1 \pm 3.6\%$ (右脚: 短距離群 $60.4 \pm 4.7\%$ 、長距離群 $66.7 \pm 3.1\%$ 、跳躍群 $62.4 \pm 2.1\%$ 、水泳群 $64.3 \pm 1.8\%$ 、コントロール群 $62.5 \pm 5.1\%$ 、左脚: 短距離群 $61.2 \pm 4.5\%$ 、長距離群 $65.5 \pm 2.6\%$ 、跳躍群 $62.5 \pm 1.7\%$ 、水泳群 $64.9 \pm 1.5\%$ 、コントロール群 $63.7 \pm 5.1\%$)、腓腹筋は右脚 $78.9 \pm 3.5\%$ 、左脚 $78.9 \pm 3.6\%$ (右脚: 短距離群 $78.5 \pm 2.2\%$ 、長距離群 $79.9 \pm 2.5\%$ 、跳躍群 $77.5 \pm 2.5\%$ 、水泳群 $79.8 \pm 5.7\%$ 、コントロール群 $79.3 \pm 5.7\%$ 、左脚: 短距離群 $77.6 \pm 5.3\%$ 、長距離群 $80.7 \pm 1.7\%$ 、跳躍群 $77.8 \pm 2.9\%$ 、水泳群 $79.9 \pm 3.8\%$ 、コントロール群 $79.3 \pm 2.9\%$)であり、群間や左右間に有意な差はなかった。この値は、下腿三頭筋サイズを調査した Albacht et al. (2008)とほぼ同様の値(ヒラメ筋 $66 \pm 4\%$ 、内側腓腹筋 $79 \pm 4\%$ 、外側腓腹筋 $81 \pm 3\%$)であった。

表 6 下腿三頭筋群の横断面積

		短距離群	長距離群	跳躍群	水泳群	コントロール群
ヒラメ筋	右脚	31.9 ± 2.6	29.4 ± 6.2	29.2 ± 7.0	26.8 ± 3.8	26.0 ± 6.4
	左脚	30.7 ± 4.1	28.3 ± 4.6	28.4 ± 6.1	25.7 ± 2.8	25.7 ± 6.6
腓腹筋	右脚	$30.7 \pm 3.8^{***\#}$	$27.3 \pm 4.2^*$	$28.2 \pm 4.7^{**\#}$	24.2 ± 1.6	21.6 ± 4.1
	左脚	$29.5 \pm 3.1^{***\#}$	$25.7 \pm 3.7^*$	$27.9 \pm 5.8^{**\#}$	23.7 ± 2.1	22.0 ± 4.5
下腿三頭筋	右脚	$62.5 \pm 5.3^{**}$	56.7 ± 9.3	$57.4 \pm 11.0^*$	51.0 ± 3.3	47.6 ± 10.1
	左脚	$60.2 \pm 6.6^{**}$	54.0 ± 7.3	$56.4 \pm 11.0^*$	49.4 ± 3.6	47.7 ± 10.5

*: vs. コントロール群, **: $P < 0.01$, *: $P < 0.05$

#: vs. 水泳群, #: $P < 0.01$, #: $P < 0.05$

4.3.2 下腿三頭筋群の横断面積とアキレス腱の横断面積の関係

下腿三頭筋群の横断面積とアキレス腱横断面積の間には、長距離群の左脚のヒラメ筋と下腿三頭筋、コントロール群の左脚のヒラメ筋・腓腹筋・下腿三頭筋と右脚のヒラメ筋においてアキレス腱横断面積と正の相関関係が認められた(表 7)。一方、被験者全体での関係性をみると、下腿三頭筋群(ヒラメ筋、腓腹筋、下腿三頭筋)の最大横断面積とアキレス腱最大横断面積の間には、それぞれ左右ともに正の相関関係が認められた(図 17)。

表 7 下腿三頭筋群の横断面積とアキレス腱横断面積の相関係数

	短距離群		長距離群		跳躍群		水泳群		コントロール群	
	左脚	右脚	左脚	右脚	左脚	右脚	左脚	右脚	左脚	右脚
ヒラメ筋	n.s	n.s	0.82*	0.62 ⁺	n.s	n.s	n.s	n.s	0.81*	0.77*
腓腹筋	n.s	n.s	0.74 ⁺	0.74 ⁺	n.s	n.s	n.s	0.67 ⁺	0.75*	n.s
下腿三頭筋	n.s	n.s	0.90**	0.74 ⁺	n.s	n.s	n.s	n.s	0.83*	0.74 ⁺

**： $P < 0.01$, *： $P < 0.05$, +： $P < 0.1$

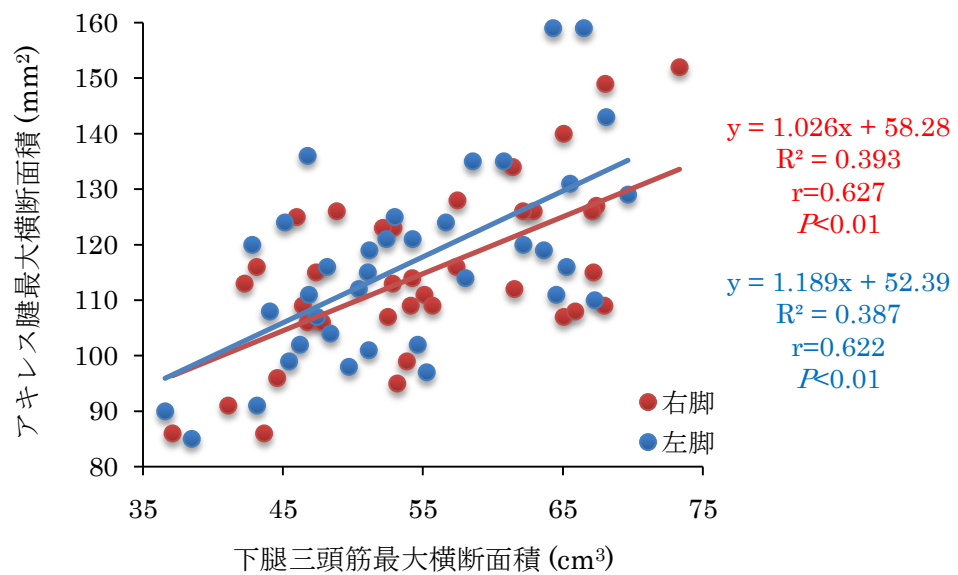
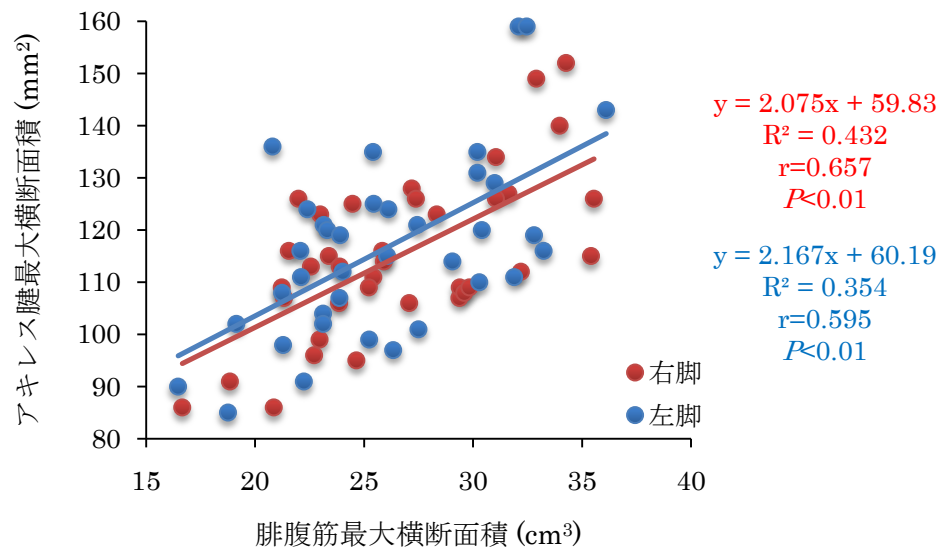
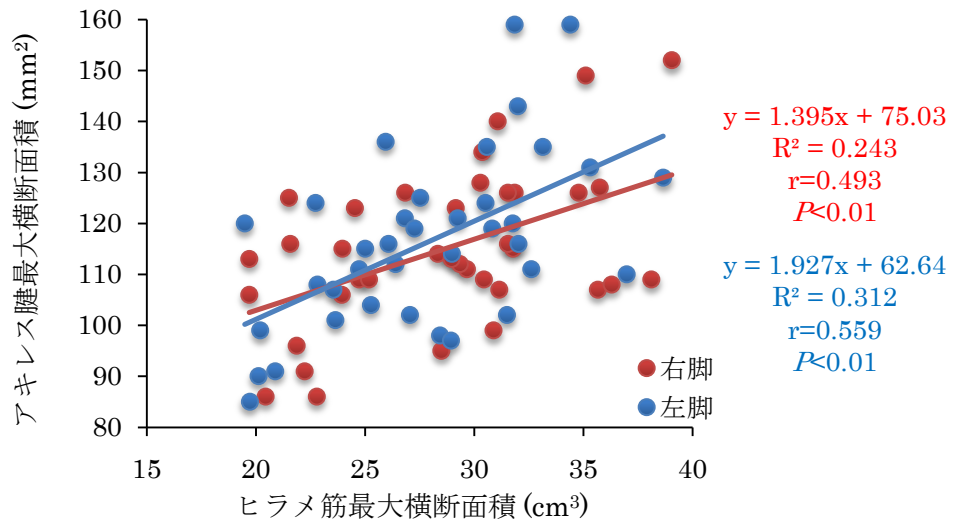


図 17 全被験者の下腿三頭筋群の最大横断面積とアキレス腱の最大横断面積

筋と腱の関係性は左右それぞれが独立しているという考え方を前提条件として、左右脚データを混合させて下腿三頭筋群の横断面積とアキレス腱横断面積の関係をプロットしたものが図 18 である。この結果から、水泳群のみにおいて、下腿三頭筋群の横断面積とアキレス腱横断面積の間には相関関係が認められないことが明らかとなった。

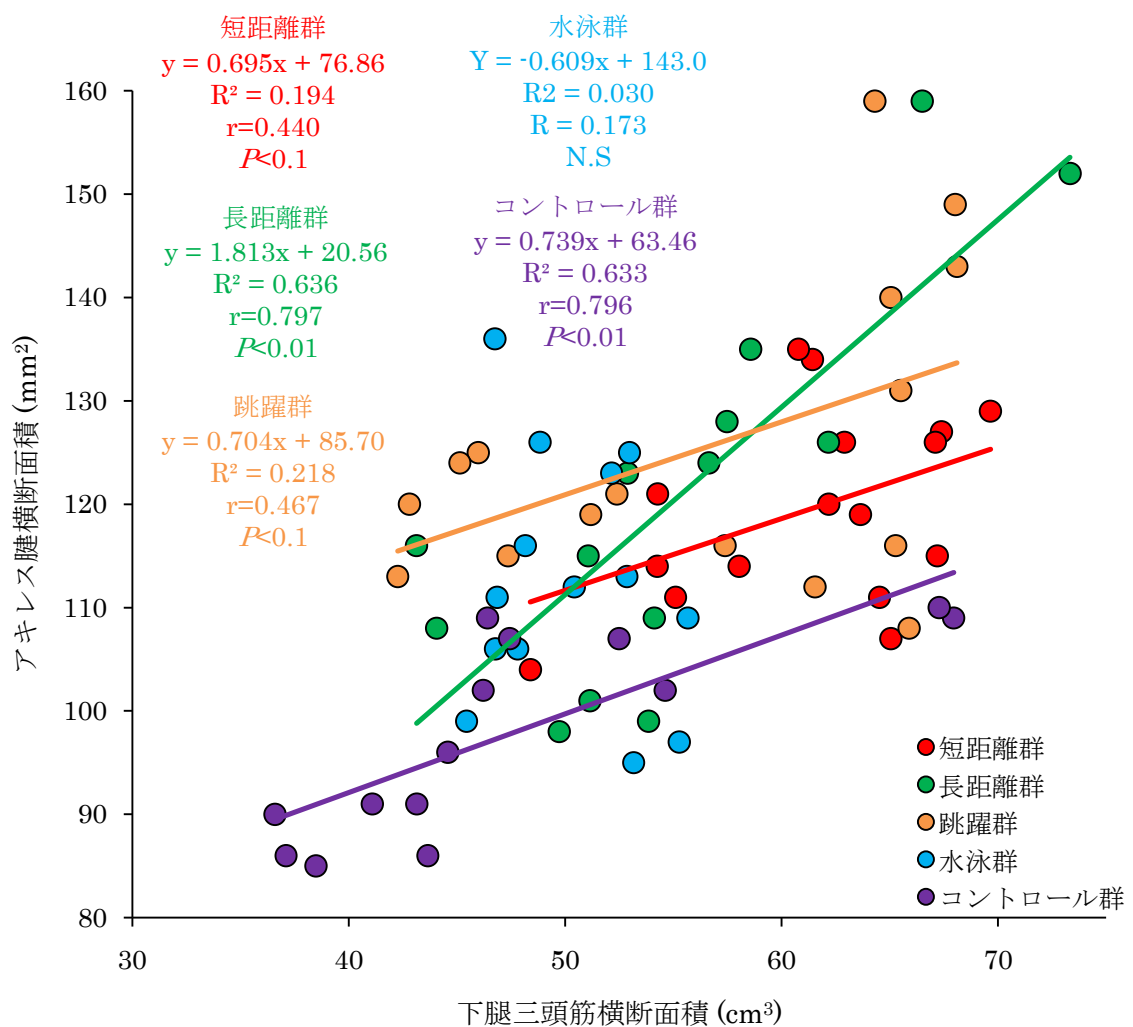


図 18 下腿三頭筋の横断面積とアキレス腱横断面積の関係

4.4 考察

4.4.1 下腿三頭筋群の横断面積

腓腹筋の横断面積が、陸上競技者群においてコントロール群と水泳群よりも有意に高値であり、下腿三頭筋横断面積が短距離群と跳躍群で有意に高値であったことは、走運動のトレーニングが筋の肥大に影響していることが考えられる。先行研究によると、短距離走選手と長距離走選手の足底屈筋群の筋厚(ヒラメ筋、内側腓腹筋、外側腓腹筋、下腿三頭筋)は、一般人よりも高い値であると報告されている(池袋ほか, 2009, 2011)。跳躍選手における下腿三頭筋の大きさに関する文献は見受けられないが、跳躍選手においても短距離走選手と類似した走運動を伴うトレーニングを行うことから、短距離走選手と比較的近い下腿三頭筋横断面積を持ち合わせていたと考えられる。さらに、シミュレーション研究において最大筋活動に対する筋活動レベルは、ランニングは歩行よりもヒラメ筋で 10%、腓腹筋で 27%高い筋活動レベルであるが、張力にするとランニングで歩行の 2 倍近くになるとの報告があり(Neptune and Sasaki, 2005)、最大疾走中の腓腹筋における接地期の筋活動では、最大随意収縮(MVC: Maximum voluntary contraction)の 2 倍以上にもなるという報告(Kyröläinen et al, 2005)もある。以上のことから、走運動を行う陸上競技者群は腓腹筋に高い負荷がかかり、その適応として腓腹筋に特異的な筋肥大が起きたと考えられる。

ヒラメ筋の最大横断面積に群間で有意な差がなかった原因として、筋線維組成があげられる。ヒラメ筋は遅筋線維が多く運動単位の閾値が低い(Hanneman et al, 1965; Walmsly et al, 1978) ために日常生活でも筋活動が多く(沢井ほか, 2006)、コントロール群においても日常生活中に筋適応を起こす刺激があったと考えられる。一方、腓腹筋は速筋線維が多く(Hanneman et al, 1965; Walmsly et al, 1978)、運動単位の閾値は高く、筋肥大も起きやすいために走運動トレーニングを行なっている陸上競技者群とコントロール群および水泳群との間に有意な群間差が認められたと考えられる。

4.4.2 下腿三頭筋群の横断面積とアキレス腱の横断面積の関係

前述のように、張力がランニング時に歩行時の 2 倍近くになると推定され(Neptune and Sasaki, 2005)、筋活動レベルは疾走速度の増加とともに高まり、最大疾走中($8.50 \pm 0.57 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)の腓腹筋における接地期の筋活動は約 230%MVC にもなる(Kyröläinen et al, 2005)。そのため、最大疾走中は非常に高い筋活動レベルで活動しており、歩行やランニングよりも大きな筋腱の張力を持つ運動であると推察され、同じ筋

サイズであっても最大疾走運動を伴うトレーニングを日々行なっている短距離群と跳躍群は、長距離群やコントロール群よりもアキレス腱に高負荷がかかっていると考えられる。そのことが原因となり、短距離群と跳躍群の筋横断面積とアキレス腱横断面積の関係は、長距離群とコントロール群における筋横断面積とアキレス腱横断面積の関係の傾向と異なった結果であったのではないかと考えられる。また、コントロール群は日常生活以外に運動を行うことがないことから、100%MVC以上の筋活動レベルが行われることはほとんどないことが考えられる。以上のことから、筋活動レベルが低い者ほど筋横断面積とアキレス腱横断面積に有意な相関関係がみられる傾向があることが考えられ、高い筋活動レベルのトレーニング負荷によるアキレス腱の適応は、低い筋活動レベルの負荷に対する適応よりも複雑で、筋肥大と腱肥大の関係性は単純ではない可能性がある。

一方、左右脚を混合して下腿三頭筋群の横断面積とアキレス腱横断面積の関係をみると被験者数が増えることもあって、相関関係が認められる項目が増える。陸上競技選手では、爆発的な筋力発揮を行う短距離群と跳躍群において、ヒラメ筋横断面積ではアキレス腱横断面積との間に相関関係は認められないが、腓腹筋と下腿三頭筋の横断面積においてアキレス腱横断面積と正の相関関係が認められる、または正の相関関係がある傾向にあった。Arampatzis et al. (2010) は、腱には適応を起こす閾値が存在するだろうと述べている。短距離群と跳躍群は、爆発的な筋力発揮を行う運動において速筋線維である腓腹筋が活動することが多いことから、その腓腹筋の筋活動がアキレス腱に適応を促す刺激となり、ヒラメ筋の横断面積より腓腹筋の横断面積において関係性が認められたと考えられる。長距離群やコントロール群は、下腿三頭筋群の全ての筋でアキレス腱横断面積と有意な相関関係が認められたと考えられる。

水泳群では、腓腹筋横断面積とアキレス腱横断面積の間に負の相関傾向が認められたが、このことは水泳群のトレーニング中における下腿三頭筋の筋活動は、アキレス腱が形態的な適応を引き起こす閾値にまで達していないことが考えられる。先行研究では、足関節底屈角度が高いとキック泳パワーも高いことが報告されており(大城ほか, 2001), ドルフィンキック泳中の足関節底屈角度増加の結果、泳速度が増加することが報告されている(杉本ほか, 2007)。そのため、キック泳速度が速い選手においても、水泳中は足関節が底屈状態にありアキレス腱はたるんだ状態であることが考えられる。一方、水泳選手が遊泳を行うプールは25・50mでターン動作を行うが、競泳は100分の1秒を争うためにターンの技術や能力も重要であるといわれている。そして、ターンはジャンプに近

いような動作を水中で行い, Vanrenterghem et al. (2004) が垂直跳びを最大努力で行なった時に足関節のトルクが下肢三関節の合計値の約 23%, 最大跳躍高の 50% 高の垂直跳びでは約 47% を占めることを報告していることから, ジャンプ動作での足関節の貢献は決して小さくなく, 下腿三頭筋で発揮する筋力や筋パワーはターン能力に影響を与えていると考えられる. 以上のことから, ターン時の下腿三頭筋群の活動によってアキレス腱が適応を起こすことも考えられるが, 下腿三頭筋群とアキレス腱横断面積の間に正の相関関係は認められず, 腓腹筋にいたっては負の相関関係が認められた. このことは, 腱が適応を起こす閾値の存在や(Arampatzis et al, 2010), 低強度や短時間・短期間ではアキレス腱の形態的な適応が起きない(Kubo et al, 2002; Arampatzis, 2007a; Farris et al, 2011)ことが影響していると考えられる. 水中では浮力により身体の重さが減少することから, 水泳中のターンでは地上で走運動やジャンプ運動を行なっているよりも負荷が軽減されることが考えられる. 加えて, 走運動は連続的で持続的であるが, 水泳のターンは非常に単発的で断続的である. これらのことから, 水泳のターン動作によるアキレス腱への荷重は, アキレス腱が形態的な適応を起こす閾値に達しないことが考えられ, 結果的に下腿三頭筋群とアキレス腱横断面積との間に相関関係は認められず, 他の群とも異なった筋と腱の関係性になったと考えられる.

本研究では, 各群では下腿三頭筋群の横断面積とアキレス腱の横断面積の間に関係が認められない部分もあるが, 被験者全体において下腿三頭筋群の横断面積とアキレス腱横断面積の間に左右脚ともに高い相関関係が認められた. Barone et al. (2009) は, ラットを用いたトレーニング実験によって膝蓋腱のコラーゲン線維の有意な肥大と, 大腿四頭筋の有意な肥大を確認した. その結果, 大腿四頭筋の力学的負荷が膝蓋腱の緊張を引き起こし, その緊張が膝蓋腱の適応を促した結果が膝蓋腱の肥大であると考察している. 本研究では, アキレス腱の横断面積と下腿三頭筋群がコントロール群よりもトレーニングを積んでいるスポーツ競技者で高いことから, 筋の肥大は腱の肥大に関係している可能性が示唆される. また, 水泳群のみにおいては, そのトレーニング負荷様式の特異性から, 筋肥大と腱の肥大の関係性が通常の陸上での身体運動での適応とは異なる可能性が考えられた.

一方, 岩沼ほか(2007) は, 一般成人において下腿三頭筋群の体積とアキレス腱の断面積を測定しており, ヒラメ筋体積とアキレス腱横断面積の間に有意な正の相関関係があるが, 協働筋である腓腹筋体積にはアキレス腱横断面積との間に有意な相関関係が認め

られなかったと報告している。彼らは、ヒラメ筋は運動単位の閾値が低く(Hanneman et al, 1965; Walmsly et al, 1978), 日常生活動作のような低強度でも持続的に活動しており, 一般人はそのヒラメ筋の活動がアキレス腱の適応を引き起こすような刺激を与えていると考察しているが, トレーニングを積んでいるスポーツ競技選手の場合, 筋と腱の大きさの関係性が異なるものと推察される。また, Gadeberg et al. (1999)や Fukunaga et al. (2001)は, 筋力や筋パワーは筋の体積と高い相関関係にあることを報告していることから, 筋が発揮できる筋力や筋パワーがアキレス腱横断面積に影響を与えているとするならば, 本章で比較した筋の横断面積よりも筋の体積においてアキレス腱の横断面積との間に高い関係性がある可能性が考えられる。

第5章 アキレス腱横断面積と下腿三頭筋群体積の関係

筋肥大によってアキレス腱にかかる力が増大した場合には、その負荷に耐えるために、筋肥大に伴ったアキレス腱の肥大が引き起こされるものと考えられるため、第4章では、アキレス腱の横断面積と下腿三頭筋群の横断面積の関係性の検討を行った。その結果、各競技種目では筋と腱の関係があまり認められず、被験者全体で調査した場合には全ての筋横断面積においてアキレス腱横断面積と高い相関関係があることがわかった。一方、Gadeberg et al, (1999) や Fukunaga et al, (2001) は、筋力や筋パワーは筋の体積と高い相関関係にあることを報告していることから、アキレス腱が筋力や筋パワーの増大に伴った負荷の増加に耐えるために肥大などの適応を起こしているとすれば、アキレス腱の横断面積は筋の横断面積よりも筋体積と高い関係にある可能性が考えられる。そこで本章では、アキレス腱の横断面積と下腿三頭筋群の体積の関係性を調査することによって、筋体積が腱肥大に関連しているのかを明らかにする。

第4章までの結果から、跳躍群のアキレス腱横断面積に左右差がみられたこと、被験者全体で腓腹筋腱長において左右差が認められたことから、利き足の存在や下肢の機能的左右差があることが考えられた。さらに、アキレス腱横断面積と下腿三頭筋群の横断面積の関係は長距離群とコントロール群において認められたが、関係性が認められる項目は左右で異なっていたことから、長距離群や一般人においても左右差があることが考えられる。さらに長距離選手においては、ヒラメ筋腱長にも左右差があったことが明らかになっている。短距離群においては、他の群にみられない特別な左右差が存在していなかったために、比較的両脚を同時に均等に鍛えていると考えられる。さらに短距離群は第4章の結果から、下腿三頭筋横断面積が被験者群の中で最も大きく、その競技特性からトレーニング負荷が筋肥大を引き起こしていたことが考えられるため、本章では短距離群を被験者として過去に定期的な運動が全くなく下腿三頭筋群の横断面積が最も小さいコントロール群との比較により調査を行う。

5.1 目的

本研究は、トレーニングによって下腿三頭筋群の発達が最も大きい陸上競技の短距離走選手および定期的な運動習慣を有しない一般人を対象として、下腿三頭筋群とアキレス腱の形態の関係を左右の脚で検討し、筋肥大に伴う腱肥大がトレーニング適応として生じているのかを明らかにすることを目的とした。

5.2 方法

5.2.1 被験者

被験者は、第 4 章と同じ被験者であり、長年継続してスプリントトレーニング (8.6 ± 1.8 years) を行っている大学の陸上競技部に所属する短距離走選手 8 名 (第 63 回西日本学生陸上競技対校選手権大会の参加 B 標準記録または参加 A 標準記録を突破し、本大会に出場) および、過去に学校体育授業以外に定期的な運動を全く行なったことがない大学生 7 名のコントロール群であった。両群間の身長、体重、年齢には有意な差は認められなかった (表 8)。

表 8 被験者の身体特性

	短距離群	コントロール群
被験者数	8	7
身長 (cm)	175.9 ± 8	172.8 ± 5.6
体重 (kg)	65.9 ± 5.3	62.4 ± 8.4
年齢 (歳)	20.6 ± 1.5	21.6 ± 1.8
トレーニング歴 (年)	8.6 ± 1.8	—

5.2.2 アキレス腱と下腿三頭筋群の形態計測

第 4 章の計測に加えて、腓腹筋とヒラメ筋の筋体積を、各筋の全長にわたって測定して横断面積にスライス厚を乗じ、それらを積分して求めた。下腿三頭筋の体積は、腓腹筋とヒラメ筋の体積の和を用いた。

5.2.3 統計

データは、平均 $\pm$ 標準偏差で示した。二元配置 (左右脚 $\times$ 群) の分散分析 (ANOVA) で、それぞれの群間の項目 (ヒラメ筋、腓腹筋、下腿三頭筋の体積) を分析した。アキレス腱最大横断面積と下腿三頭筋体積の相関係数は、ピアソンの相関係数を用いて検定した。さらに、筋体積とアキレス腱最大横断面積の関係については、共分散分析を行い、回帰直線の傾きと切片の群間差を検定した。

5.3 結果

5.3.1 下腿三頭筋群の体積

腓腹筋の体積は、短距離群がコントロール群よりも有意に高値であった。しかし、ヒラメ筋の体積は群間に有意な差は認められなかった。下腿三頭筋の体積は、短距離群がコントロール群よりも有意に高値であった(表 9)。

表 9 下腿三頭筋群の体積

		短距離		コントロール	
		左脚	右脚	左脚	右脚
体積 (cm ³)	ヒラメ筋	492 ± 70	510 ± 56	402 ± 105	405 ± 102
	腓腹筋	417 ± 52**	447 ± 60**	310 ± 82	308 ± 72
	下腿三頭筋	909 ± 114*	957 ± 91*	712 ± 182	713 ± 167

*: vs. コントロール群, **: $P < 0.01$, *: $P < 0.05$

5.3.2 アキレス腱の横断面積と下腿三頭筋群の体積の関係

アキレス腱の最大横断面積と下腿三頭筋群の体積の間で得られた相関係数を表に示す(表 10)。

表 10 アキレス腱横断面積と筋体積の相関係数

		短距離		コントロール	
		左脚	右脚	左脚	右脚
体積	ヒラメ筋	0.81*	n.s	0.79*	0.76*
	腓腹筋	0.89**	0.83*	0.92**	0.74+
	下腿三頭筋	0.91**	0.95**	0.87*	0.78*

** $: P < 0.01$, * $: P < 0.05$, + $: P < 0.1$

短距離群の左脚のヒラメ筋・腓腹筋・下腿三頭筋、右脚の腓腹筋・下腿三頭筋の筋体積においてアキレス腱横断面積との間に有意な相関関係が認められた(表 10)。特に、ヒ

ヒラメ筋と腓腹筋を合計した下腿三頭筋において高い相関関係であった($P<0.01$, 表 10) .
 コントロール群は左脚のヒラメ筋・腓腹筋・下腿三頭筋, 右脚のヒラメ筋・腓腹筋・下
 腿三頭筋の筋体積においてアキレス腱横断面積との間に有意な相関関係が認められた
 ($P<0.05$, 表 10) .

下腿三頭筋体積とアキレス腱横断面積の回帰直線の傾きは, 群間で有意な差が認めら
 れなかったが, 共変量で調節した下腿三頭筋体積に対するアキレス腱横断面積の平均値
 は, 短距離群がコントロール群よりも有意に高値を示した($P<0.01$, 図 19) . 左右脚を含
 めて検定した場合には, 下腿三頭筋体積とアキレス腱横断面積の回帰直線の傾きに有意
 な群間差が認められた(各群 $n=14$, $P<0.05$) .

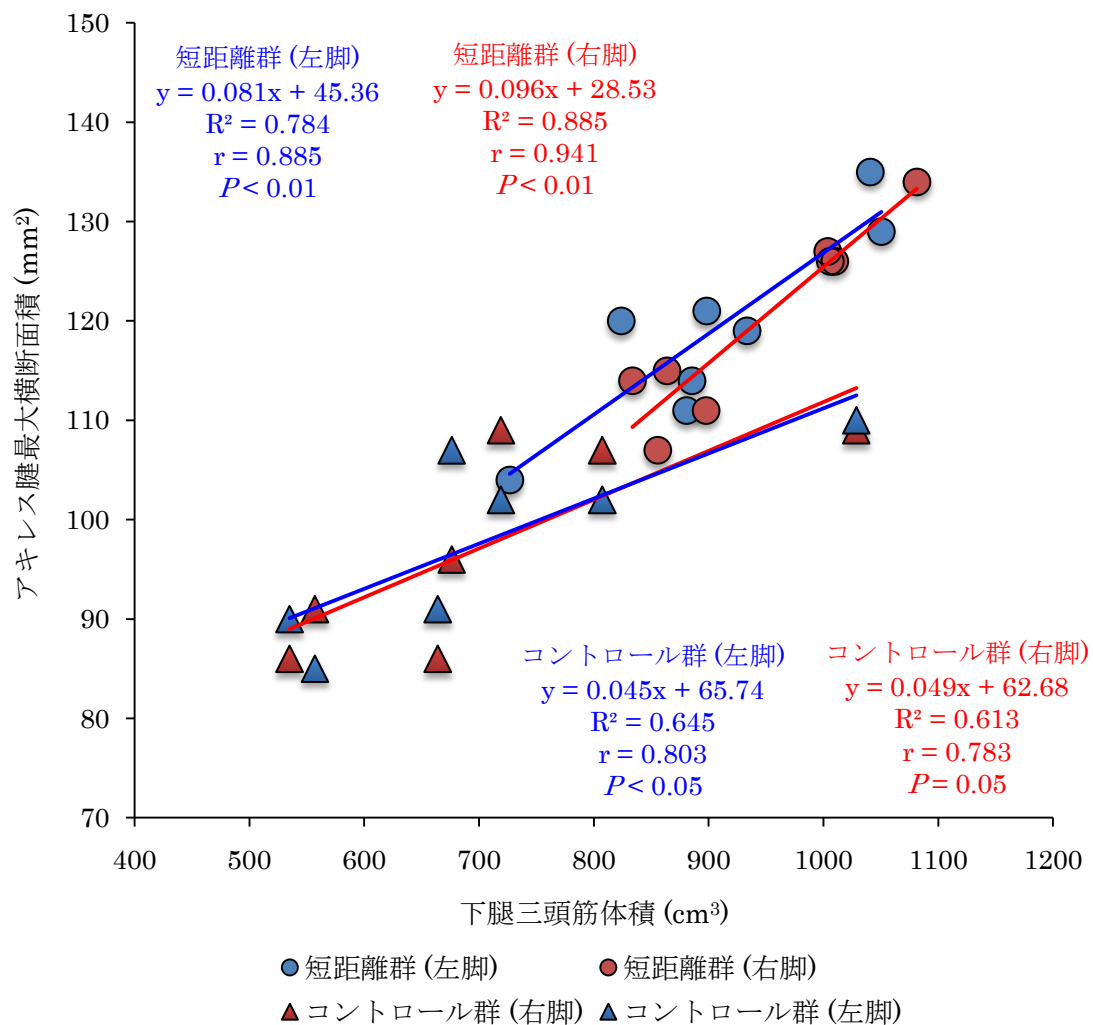


図19 下腿三頭筋体積とアキレス腱横断面積の関係

5.3.3 下腿三頭筋群の体積とアキレス腱の stiffness, ヤング率の関係

第3章で算出したアキレス腱の stiffness とヤング率を用いて、下腿三頭筋群の体積とアキレス腱の stiffness, ヤング率の関係をみた(表 11). 下腿三頭筋群の体積とアキレス腱の stiffness, ヤング率の間には、群間にも左右にも差が認められなかった.

表 11 下腿三頭筋群の体積とアキレス腱の stiffness, ヤング率の相関関係

	Stiffness				ヤング率			
	短距離群		コントロール群		短距離群		コントロール群	
	左脚	右脚	左脚	右脚	左脚	右脚	左脚	右脚
ヒラメ筋	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s
腓腹筋	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s
下腿三頭筋	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s

5.4 考察

5.4.1 下腿三頭筋群の体積

本研究において、腓腹筋と下腿三頭筋の体積は、短距離群がコントロール群よりも有意に高値であった。一方で、ヒラメ筋の体積は、短距離群とコントロール群で有意な差が認められなかった。これは、下腿三頭筋群の横断面積の結果と同様に、高い強度での走運動を行う短距離走選手は、腓腹筋に特異的な筋肥大が起きていたと考えられる。ヒラメ筋の体積に有意な群間差がなかった理由においても、ヒラメ筋の横断面積と同様に、運動単位の閾値の違いにより(Hanneman et al., 1965; Walmsly et al., 1978), コントロール群でもヒラメ筋には十分に筋適応を起こす刺激があり、群間に差が生じなかったと考えられる。

5.4.2 アキレス腱の横断面積と下腿三頭筋群の体積の関係

短距離群では左脚の全ての筋、右脚の腓腹筋・下腿三頭筋の筋体積とアキレス腱横断面積との間に有意な相関関係が認められた。コントロール群では、左脚の全ての筋、右

脚のヒラメ筋・下腿三頭筋の筋体積においてアキレス腱横断面積との間に有意な相関関係が認められた。

トレーニングによる腱肥大は、動物において Barone et al, (2009) , 中川ほか(1988) , Michna and Hartmann (1989) , Sommer (1987) が、ヒトにおいて Arampatzis et al, (2007a) , Kongsgaard et al, (2007) , Seynnes et al, (2009) が報告しており、Barone et al, (2009) は実際にコラーゲン線維の肥大をラットで確認し、大腿四頭筋の力学的負荷が膝蓋腱の緊張を引き起こした結果であると考察している。本研究においては、第4章で認められなかった下腿三頭筋群の横断面積とアキレス腱の横断面積の間の相関が、本章において認められた。その理由として、Fukunaga et al, (2001) や Gadeberg et al, (1999) は筋力や筋パワーは筋の体積と高い相関関係にあることを報告しており、アキレス腱の断面積の大きさや肥大は、下腿三頭筋群の体積によって評価されるものであると考えられる。

岩沼ほか(2007) は、一般人においてアキレス腱横断面積とヒラメ筋体積との間には有意な正の相関関係を認め、腓腹筋体積では相関関係は認められなかったと報告している。先行研究(岩沼ほか, 2007) の被験者は一般人であり、日常生活でもよく活動するヒラメ筋体積がアキレス腱と相関関係が高かったが、本研究で用いた腓腹筋の活動量が多い短距離群ではヒラメ筋に加え腓腹筋体積とも高い相関関係にあった。このことから、腱の適応は協働筋の各筋活動レベルに影響されていることが考えられ、短距離走選手はアキレス腱の適応に必要な刺激が腓腹筋体積によるものが大きかったと推察される。また、腓腹筋とヒラメ筋の張力はどちらもアキレス腱に加わるため、下腿三頭筋の体積が最もアキレス腱に加わる負荷との関係が強いと予想され、アキレス腱横断面積と下腿三頭筋体積の間にも高い相関関係がみられたと考えられる。

さらに、同じ下腿三頭筋体積の大きさに対するアキレス腱横断面積は短距離群がコントロール群よりも高値であったことは、両群が同じ筋体積でも短距離群は全力走などによる高い興奮レベルでの筋活動量がコントロール群よりも多く、速筋優位である腓腹筋が肥大し、アキレス腱をけん引する負荷量がコントロール群よりも多いことが原因であると考えられる。一方、数週間のトレーニング実験によって腱の張力が高まったが腱横断面積は変化しなかったという報告(Arampatzis et al, 2010; Kubo et al, 2001a, 2001b, 2002) もあるが、その場合には腱の応力が増大することにより腱傷害のリスクが高まるとされている(Fouré et al, 2010) 。したがって、筋体積の増加に伴い腱の張力が増大し

た場合には、腱の断面積を増大させることで腱傷害のリスクが高まらないようにする必要があると考えられる。また、腱が太くなるということは腱傷害リスク減少と、弾性エネルギーを高めてパフォーマンスを向上させることも考えられるが、stiffness やヤング率を増加させて腱を硬くすることで、強度や弾性エネルギーの増加が起こり、腱肥大と同様の効果が得られると考えられる。先程の腱横断面積は変化しなかったという先行研究(Arampatzis et al, 2010; Kubo et al, 2001a, 2001b, 2002)では、stiffness の増加が認められていることから、腱の硬化と肥大には同様の効果があると考えられる。一方、長年のトレーニングを行なっている本研究の被験者において、下腿三頭筋群の体積とアキレス腱の stiffness, ヤング率の間に関係性は認められなかったことから、腱における傷害予防の適応と弾性エネルギーを高めるには、短期間のトレーニング適応では腱の硬化、長期間にわたるトレーニングでは肥大という形態的な適応によって傷害予防およびパフォーマンス向上に貢献している可能性が考えられる。

5.4.3 筋体積とアキレス腱の横断面積の関係性の左右差

本研究では、筋体積の値に左右差は認められなかったが、アキレス腱の横断面積との関係において、短距離群はヒラメ筋の体積、コントロール群は腓腹筋体積において、左脚のみにアキレス腱横断面積と有意な相関が認められた。この左右の筋と腱の関係性の違いは、ほぼ全ての先行研究が右脚のみを対象としており、左脚を対象としてなかったためにこれまでに発見されなかったのかもしれない。しかし、被験者特性によって筋や腱の横断面積に左右差(Couppé et al, 2008; 村松ほか, 2010; Muraoka et al, 2005) があることや、一般人においても身体の歪み(寺野ほか, 2003) や下肢の機能的左右差(藤井ほか, 2004) があることを考慮すれば、両側で検討することで被験者の正確な特徴を把握できると考えられる。陸上競技選手であれば、陸上競技場が左周りであることで一定方向の曲走路を走行することによって、左右の下腿三頭筋およびアキレス腱の適応が左右で異なったことが原因の一つとして考えられる。また藤井ほか(2004) は、健常若年者において左脚が軸脚となっている者が被験者全体の 66.2%を占め有意に左脚を軸にする者が多いことを報告していることから、本研究においても左脚を軸脚とする被験者が多く、その適応の結果として左右で有意差のある項目が生まれたのかもしれない。

5.5 結論

本研究の第 5 章では、短距離走選手を対象として下腿三頭筋群の体積とアキレス腱の横断面積の関係を調査することによって、先行研究の一般人では相関が認められなかった腓腹筋体積とアキレス腱横断面積の関係を探り、筋腱のトレーニング適応を明らかにすることを目的とした。その結果を以下に要約する。

- 1) 短距離群は、コントロール群よりもアキレス腱の最大横断面積、腓腹筋と下腿三頭筋の体積が有意に大きかった。
- 2) 短距離群の左脚の全ての筋と右脚の腓腹筋および下腿三頭筋の体積、コントロール群の左脚の全ての筋と右脚のヒラメ筋および下腿三頭筋の体積が、アキレス腱最大横断面積との間に正の相関関係が認められた。
- 3) 筋の横断面積よりも筋の体積が、アキレス腱最大横断面積と高い相関係数であった。
- 4) 下腿三頭筋体積に対するアキレス腱の横断面積は、短距離群がコントロール群よりも高値であった。
- 5) 両群において、筋体積とアキレス腱最大横断面積に相関がある項目は左右で異なる。
以上のことから、アキレス腱の横断面積の大きさは筋体積と筋活動量、筋活動レベルが影響しており、筋肥大に伴う腱肥大がトレーニング適応として生じる可能性が示唆された。

第 6 章 アキレス腱の形態的・物質的特性解明のための事例研究

第 5 章までは、長期トレーニングによる腱の適応をみるために、同一競技を長年続けてきた競技者群の比較を行なってきた。

腱の物質的特性は、一過性の実験によってもその変化が確認されており(江川ほか, 2008; Farris, 2011), トレーニング実験による先行研究では、腱の形態的特性の変化よりも物質的特性の変化が認められている報告が多い(Arampatzis et al, 2010; Kubo et al, 2001a, 2001b, 2002). また、トレーニングとは逆に身体の発達にとってマイナス要素となると考えられる不活動においては、腱の断面積に変化はなく、腱 stiffness の減少が起きた報告されている(Kubo et al, 2004; Boer et al, 2007). これらのことから、腱の stiffness は縦断的研究において、それも短期的に変化しうると考えられる。

そこで、本研究の第 5 章まででは認められなかった腱の物質的な変化が実際に起こるのか明らかにするために、本章の前半では、腱の弾性エネルギーの恩恵を多大に受けていると考えられる跳躍選手において、跳躍力を高めるために行う試合前のコンディショニング期の間にアキレス腱の stiffness が変化するのかを調査する。また、アキレス腱断裂受傷を受けた場合にも腱が肥大することが知られているが、断裂受傷後の腱特性を調査した研究が皆無である。断裂受傷後にアキレス腱に負荷のかからない状態にさらされるにも関わらず腱が肥大するという報告は、本研究で考えるトレーニング適応とは異なる。そこで本章の後半では、アキレス腱断裂受傷後の腱特性を測定し、腱適応に対して検討を加える。

6.1 跳躍選手の試合前コンディショニング期の短期的変化

第 3 章において、アキレス腱の物質的特性は群間に有意な差がないことが明らかとなった。また、アキレス腱の stiffness に変化があった可能性はあるが、それは個人差よりも小さいと考えられた。先行研究では、腱の形態的特性の変化は筋よりも遅いことが示唆されているが(Almeida-Silveira et al, 2000; Boer et al, 2007), 腱の物質的特性は一過性の実験によってもその変化が確認されている(江川ほか, 2008; Farris et al, 2011). このことから、腱 stiffness の値が短期的なトレーニングの適応によって個人差の範囲内において stiffness が変化する可能性が十分に考えられる。実際に、その他の先行研究においても、レジスタンストレーニングによるアキレス腱の stiffness の増加や(Kubo et al, 2002), 競技特性上、左右の脚で負荷が異なる競技において、負荷が高い側の脚が逆脚よ

りも腱 stiffness が有意に高いと報告されている(Couppé et al, 2008) .

一方、アキレス腱の弾性要素が最も利用される運動がジャンプ動作といわれており(図子, 2005, 2006), リバウンドジャンプ高およびカウタームーブメントジャンプ高は、膝蓋腱の stiffness と正の相関関係があると報告されている(Bojsen-Møller et al, 2005) ことから、アキレス腱の弾性要素がパフォーマンスに与える影響が最も大きいと考えられる種目は、ジャンプ距離を競う陸上競技の跳躍選手であると考えられる。そして一般的に陸上競技選手の間では、トレーニングを行なっている途中で休息日を置くことで、通常のトレーニングを行なっている時よりも跳躍力が増すと言われている。現場では、このことを“バネを貯める”と言い、多くの跳躍選手が実際に試合前の 1 週間ほど前から練習量を減少させるとともに跳躍練習を行わないようにして身体のコンディショニングを行ない、試合当日を向かえる。しかし、この“バネを貯める”ことが筋をはじめとした身体のコンディションが高まった結果であるのか、腱の弾性が変化することで腱の弾性要素が跳躍動作にとってより良い状態になったのかは全く不明であり、理論的な裏付けは全く存在しない。

6.1.1 目的

陸上競技跳躍選手の“バネを貯める”という種目特異的なコンディショニング方法によって、アキレス腱の stiffness に変化が起きているのかを明らかにすることを目的とした。

6.1.2 方法

被験者は大学陸上競技跳躍選手 2 名であり、長年にわたって専門的なトレーニングを行い、バネ貯めを伴う試合に向けたコンディショニングを日頃から行なっている者とした。被験者 T は 2011 年 10 月 22 日に「2011 年日本ジュニア・ユース選手権」に参加し、被験者 H は 2011 年 10 月 26 日に「第 48 回関西学生陸上競技学年別選手権大会兼第 33 回関西学生混成選手権大会」に参加した。被験者の特性は以下に示す通りである。

本研究は、事前に立命館大学生命倫理審査委員会の承認(承認番号: BKC-IRB-2010-20)を得てから行なった。また、被験者には実験前に十分な説明を行い、すべての被験者から同意を得た。

表 12 被験者の特性

	被験者 T	被験者 H
身長 (cm)	173.5	182
体重 (kg)	66	74
年齢 (歳)	18	23
競技種目	三段跳	走高跳
踏切脚	左-左-右	左
競技歴 (年)	7	11

被験者 2 名の試合前における練習量と跳躍練習は、図 20 のようになっており、試合 2 週間前、試合 1 週間前、試合 2 日前、試合後 1-2 日以内においてアキレス腱の stiffness を測定する実験を行なった。試合 2 週間前は、通常のトレーニングを行なっている期間、試合 1 週間前はトレーニング量を少なくして跳躍練習を行わなくなる直前、試合前はトレーニング量を少なくして跳躍練習を行わなくなり試合に向けて身体に何らかの変化が生じていると考えられる時である。また、アキレス腱の stiffness を測定する実験については、第 3 章と同様の方法を用いて測定を行なった。

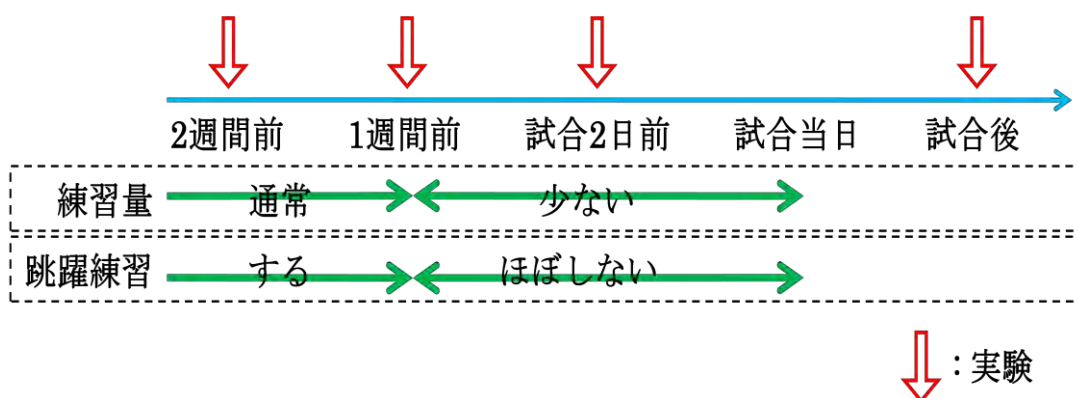


図 20 陸上競技跳躍選手の試合前のトレーニングと実験日

6.1.3 結果

等尺性足関節底屈 MVC は、被験者 T において試合 2 週間前の通常練習期の測定時と比較して試合 1 週間前で増加している。しかし、試合 2 日前の測定において左右差がみられたが左右ともに試合 1 週間よりも減少し、試合 2 週間前の時点と同等かそれ以下となっている。試合後の測定では、測定全体を通して最も低い値となっている(表 13, 図 21)。被験者 H においては、試合 2 週間前から試合 1 週間前、試合 2 日前にかけて徐々に等尺性足関節底屈 MVC が増加している。そして試合後は、試合前よりも等尺性足関節底屈 MVC が減少している(表 13, 図 21)。

アキレス腱の stiffness は、被験者 T にはアキレス腱 stiffness に左右差がみられ、コンディショニング期における stiffness の増減率は右脚と比較して左脚が大きかった。また、被験者 T の右脚におけるアキレス腱の stiffness は、試合 2 週間前と比較して試合 1 週間前に増加を示し、その後、試合前まで同等の値を維持し、試合後には試合 2 週間前と同等か、その以下の値にまで減少していた。一方の左脚では、右脚と同様に試合 2 週間前と比較して試合 1 週間前に増加を示したが、試合 2 日前に試合 2 週間前と同等の値にまで減少し、試合後にはほぼ変化がなかった(表 13, 図 22)。被験者 H においては、試合 2 週間前から 1 週間前であまり変化がなく、試合前 1 週間で練習量が減少し跳躍練習がなくなってから増加を示し、試合後に試合 2 週間前から 1 週間前の値にまで減少していた(表 13, 図 22)。また、被験者 H には被験者 T にみられたような左右の差はみられなかった。

表 13 コンディショニング期における足関節底屈筋力とアキレス腱 stiffness の変化

		被験者 T		被験者 H	
		左脚	右脚	左脚	右脚
等尺性足関節 底屈 MVC (Nm)	2 週間前	203.8	204.2	217.6	216.2
	1 週間前	221.1	222.3	220.7	217.2
	試合 2 日前	197.6	210.0	230.2	220.7
	試合後	197.4	195.8	225.0	214.4
アキレス腱 stiffness (N/mm)	2 週間前	252.4	366.1	217.8	198.3
	1 週間前	322.7	393.2	220.8	203.2
	試合 2 日前	251.9	390.9	242.0	256.2
	試合後	247.9	341.9	211.5	209.7

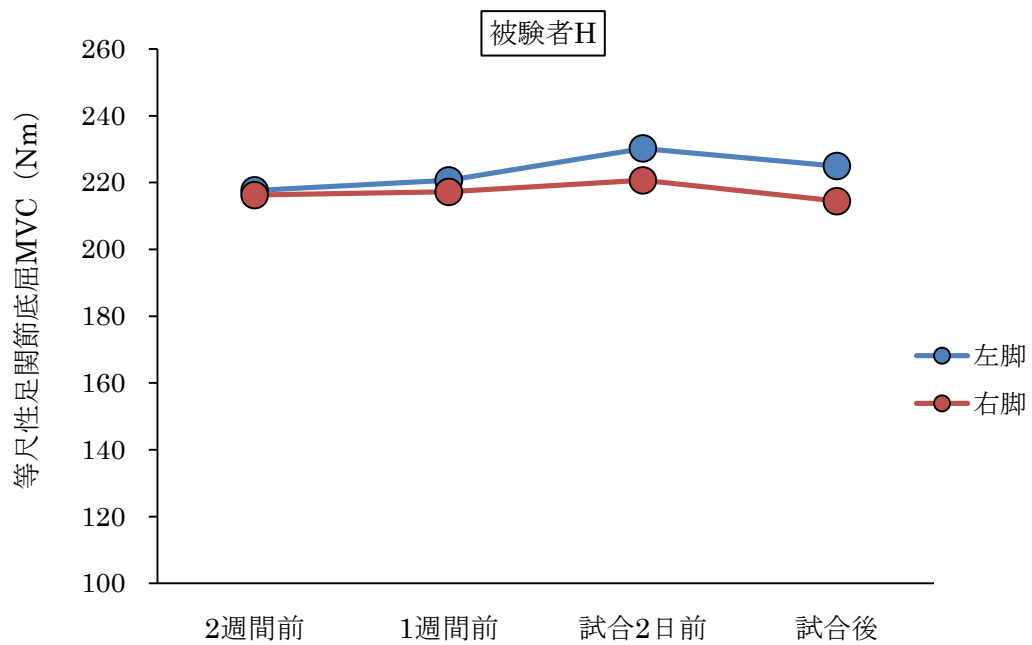
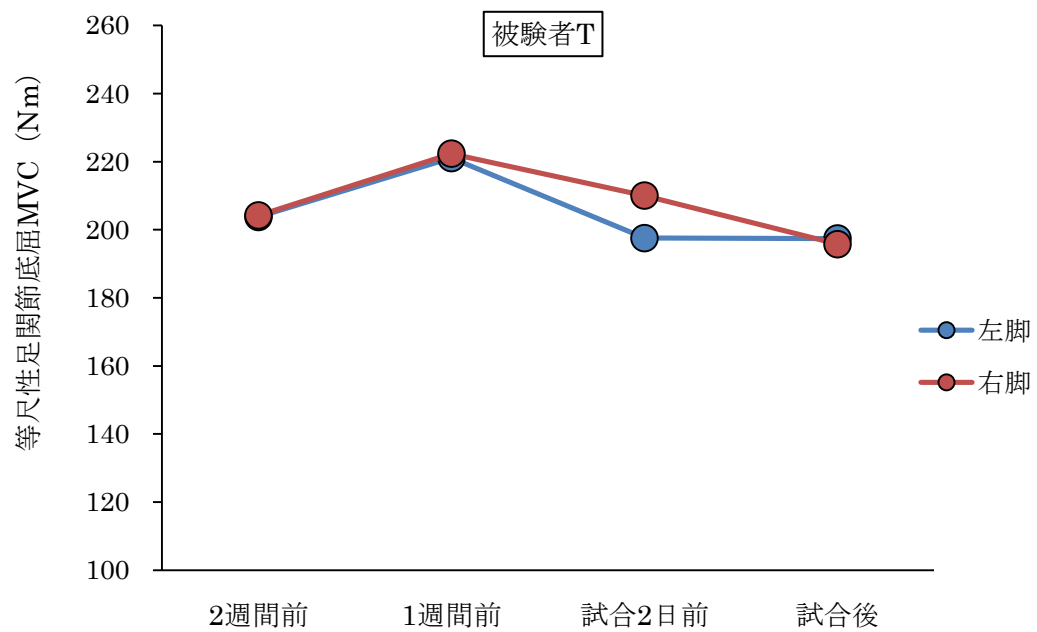


図 21 コンディショニング期における足関節底屈筋力の変化

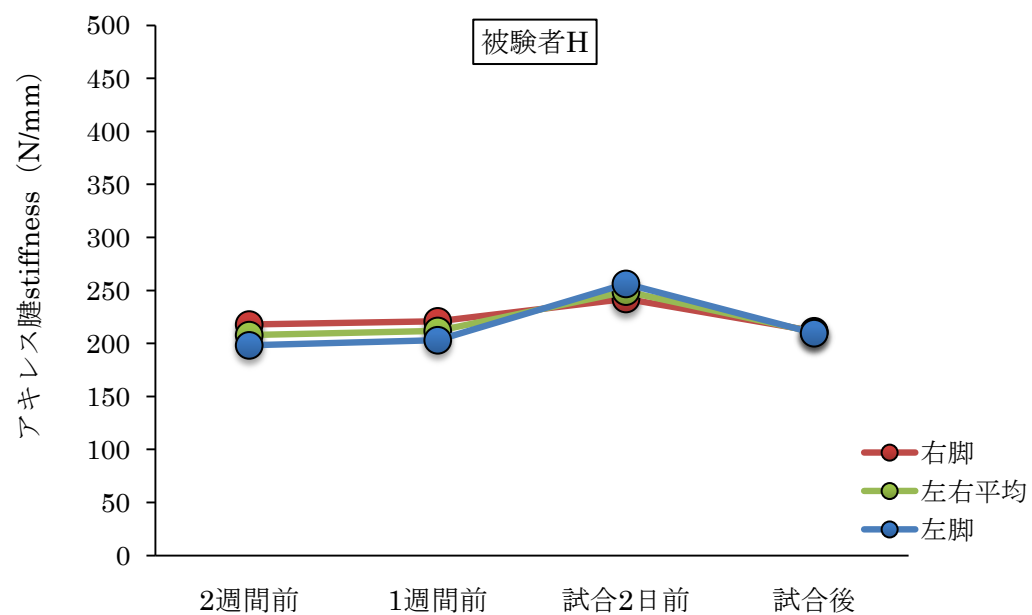
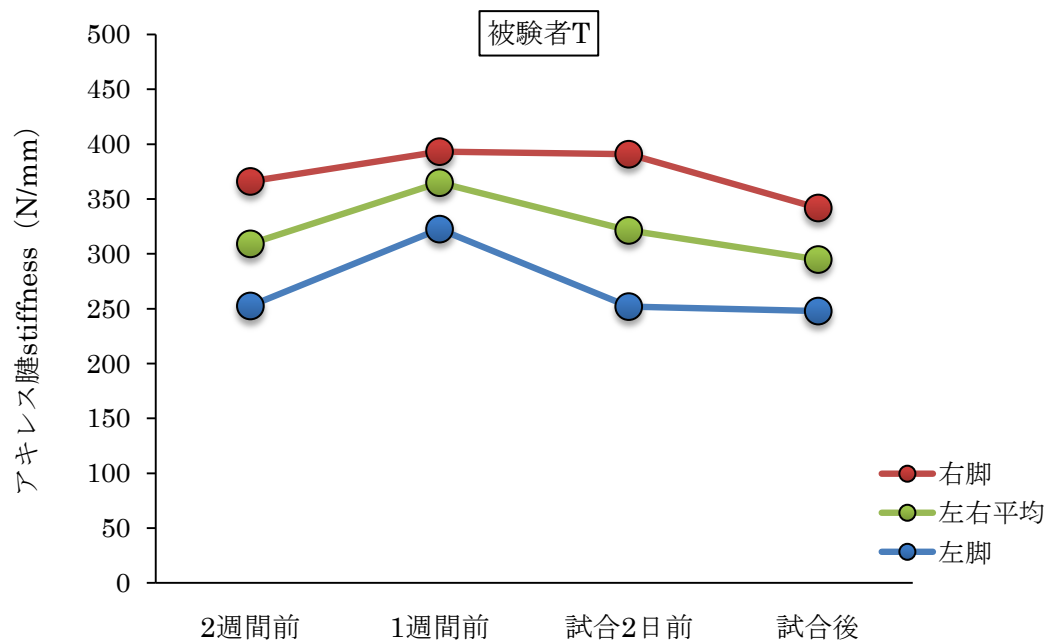


図 22 コンディショニング期におけるアキレス腱の stiffness の変化

6.1.4 考察

跳躍選手 2 名において、試合に向けたコンディショニング期において、アキレス腱の stiffness が試合前に増加する傾向が確認できた。このことから、跳躍選手のコンディショニング期においてアキレス腱の stiffness が変化することと、アキレス腱の stiffness の値が通常トレーニング期よりも高まることが陸上競技の跳躍種目のパフォーマンス向上に関係している可能性が考えられる。また、コンディショニング期における計 4 回の計測において、アキレス腱張力の変化と同じようにアキレス腱の stiffness の値が変化していることから、アキレス腱の張力と stiffness の間には何らかの関係性があることが考えられる。

被験者 H は、足関節底屈 MVC が試合 2 週間前の測定から徐々に試合 2 日前の測定時まで増加しており、順調なコンディショニングを行えていることが予想でき、足関節底屈 MVC と同じようにアキレス腱の stiffness も変化していた。被験者 H 自身も「大会にうまくコンディショニングを合わせることができた」とコメントしている。被験者 T においては、足関節底屈 MVC とアキレス腱の stiffness は、試合 1 週間前において最も高い値を示した。そして、被験者 T は「試合 1 週間前の測定において最も身体のコンディションがよかった」とコメントしており、足底屈 MVC の値で確認を行なっても、本人の感覚通り、試合 1 週間前が最も高い筋力であった。このことから、選手自身が感じる身体の様子と足関節底屈筋力およびアキレス腱の stiffness の高さが同じ傾向を示すことがわかった。

一方、筋の出力が高まったことに伴って腱の伸張量が増加した場合には、同じ関節角度であっても筋出力が高い時の方が筋はより収縮が大きくなることが考えられる(図 23c)。そして、通常のトレーニング期間中の走運動および跳躍運動時の力発揮時における筋の力-長さ関係が筋の至適長にあるとすれば、筋の力発揮が通常時よりも高まった場合には力-長さ関係が筋の力発揮における至適長から外れてしまう可能性がある。さらに、硬さが異なり形態が同じ物質において同量の伸張量を獲得すると、硬い物質は軟かい物質よりも貯蓄される弾性エネルギーは大きくなる。このことから、筋力が高まった場合に腱 stiffness が増加することは、筋の力発揮が高まった場合においても筋の至適長を維持し、さらに腱の弾性エネルギーを大きくすることができると考えられる(図 23d)。

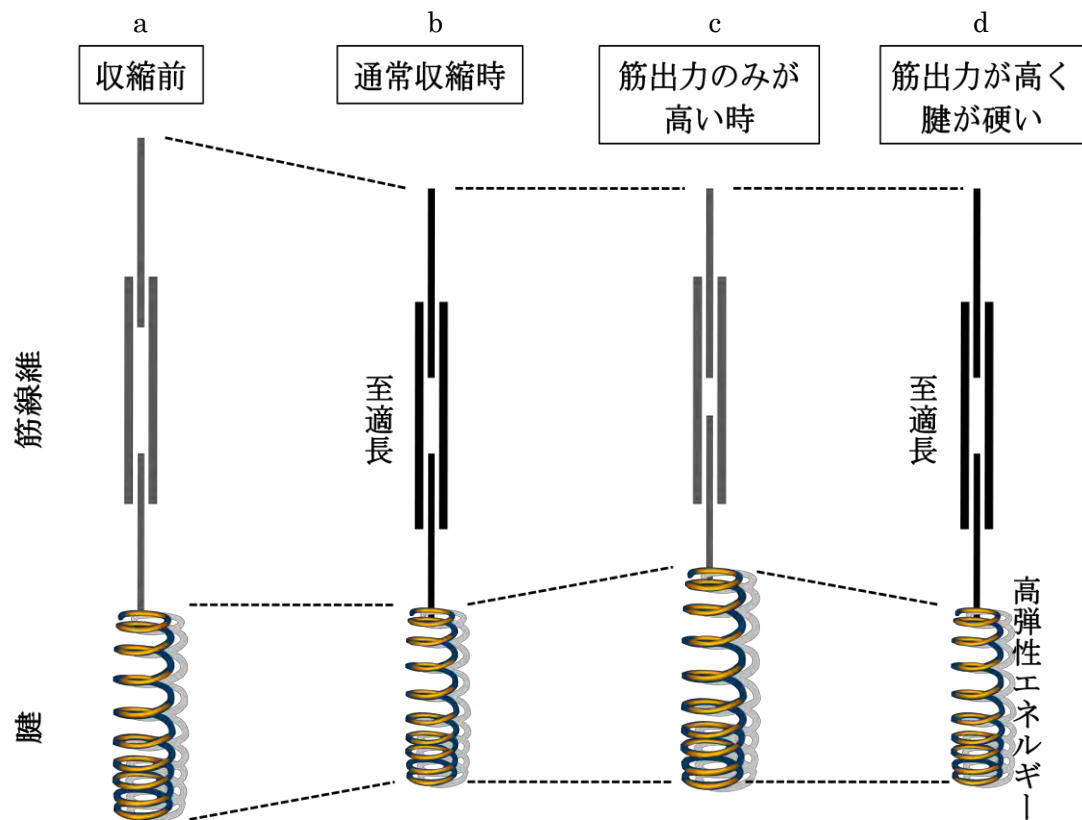


図 23 筋腱複合体の模式図

さらに、被験者 T と H が感じる試合当日の調子の良さとは、「適度な張りが筋に残っている状態であり、完全に疲れが抜けきって筋がゆるんでいるような状態ではない」とコメントしている。実際に先行研究では、静的なストレッチをウォーミングアップで行い過ぎると、爆発的な筋力発揮を行う動作のパフォーマンスは低下してしまうことが報告されていることから(Fowles et al, 2000; Power et al, 2004; 山口ほか, 2004), 筋腱複合体は適度に緊張状態にあることがパフォーマンスを高めるために重要であると考えられる。さらに、レジスタンストレーニングを行うことで腱の *stiffness* が向上したと報告する研究は多く(Kubo et al, 2001a, 2001b, 2002, 2010; Reeves et al, 2003a, 2003b; Arampatzis et al, 2007, 2010), 腱がトレーニングに適応することで、そのトレーニング動作に適した状態に変化を起こしたのであれば、レジスタンストレーニングなどの大きな力を発揮する運動や爆発的に筋力発揮を行う場合には、腱の *stiffness* が高まることでより高いパフォーマンスを発揮できる可能性が考えられる。

6.2 アキレス腱断裂受傷後のアキレス腱の形態的・物質的な変化

トレーニングによる腱の形態的・物質的な変化や、トレーニングを行なっている者の腱の特性を調査した研究は複数存在するが、腱断裂受傷後の腱適応に関する研究はほとんど見当たらない。また、トレーニングによる負荷が刺激となり適応が起こるのであれば、断裂という刺激は健常者ではありえない刺激であり、健常者とは全く異なる適応が起こる可能性がある。断裂したアキレス腱の縫合手術に関する論文では、術後にアキレス腱は相当な肥大をすることが報告されている(Fujikawa et al, 2007; Boer et al, 2009)。しかし、それがどれほどの肥大であるか計測した報告はなく、アキレス腱断裂者の筋と腱の関係性をみた報告や、断裂受傷後のアキレス腱の物質的特性を調査した研究は皆無である。そのため、健常者とは異なる腱の適応能力を調査することによって、未だ発見されていない腱の新たな適応能力を解明できるかもしれない。

6.2.1 目的

アキレス腱断裂受傷後の被験者を用いて、アキレス腱の形態的・物質的な特性を調査することによって健常者では発見できなかったアキレス腱の適応能力を明らかにすることを目的とする。

6.2.2 方法

被験者は、一方の脚のアキレス腱を断裂受傷した成人男性 2 名である。身体的特性、断裂した側の脚、受傷後の経過期間、運動歴などは被験者で異なる。また、本研究は事前に立命館大学生命倫理審査委員会の承認(承認番号: BKC-IRB-2010-20) を得てから行なった。また、被験者には実験前に十分な説明を行い、すべての被験者から同意を得た。

アキレス腱の形態的・物質的な特性の計測は、第 2 章と第 3 章でのアキレス腱の形態測定および第 3 章での物質的特性の計測と同様の方法を用いて計測を行なった。また、被験者はアキレス腱断裂受傷した患側においても、最大筋力発揮やダッシュ等が行える状態にあることから、等尺性足関節底屈の筋力発揮で特別な配慮はせず、通常通りのウォーミングアップと測定試技間の休息を取らせて測定を行った。

下腿三頭筋群の横断面積は、第 4 章と同様の方法を用いて計測を行なった。また、健常脚の各筋最大横断面積を 100%として、断裂脚が持つ下腿三頭筋群の各最大横断面積の大きさを算出した(断裂脚の各筋最大横断面積/健常脚の各筋最大横断面積)。

表 14 被験者の特性

	被験者 A	被験者 B
身長 (cm)	173.5	173.9
体重 (kg)	65.0	98.2
年齢 (歳)	24	20
断裂脚	左脚	右脚
受傷後の経過期間	2 年	9 ヶ月
運動歴	過去にバレーボール, 野球	現役アメフト選手

6.2.3 結果

第2章と同じ踵骨付近におけるアキレス腱横断面積が最大となる位置(アキレス腱停止部から約 2cm) のアキレス腱最大横断面積は、健常脚と断裂脚に違いは見受けられなかった。ヒラメ筋腱長は、アキレス腱断裂受傷脚において健常脚よりも長かった。腓腹筋腱長は、被験者間に統一した傾向はみられず、被験者 A は健常脚がアキレス腱断裂受傷脚よりも長く、被験者 B はアキレス腱断裂受傷脚が健常脚よりも長かった(表 15)。

表 15 アキレス腱の形態的特性

	被験者 A		被験者 B	
	左脚 (断裂脚)	右脚 (健常脚)	左脚 (健常脚)	右脚 (断裂脚)
踵骨付近における アキレス腱最大横断面積(mm ²)	94	93	147	152
停止部から 16cm 間の アキレス腱平均横断面積(mm ²)	146	52	65	282
ヒラメ筋腱長(mm)	95	75	105	120
腓腹筋腱長(mm)	195	210	200	210

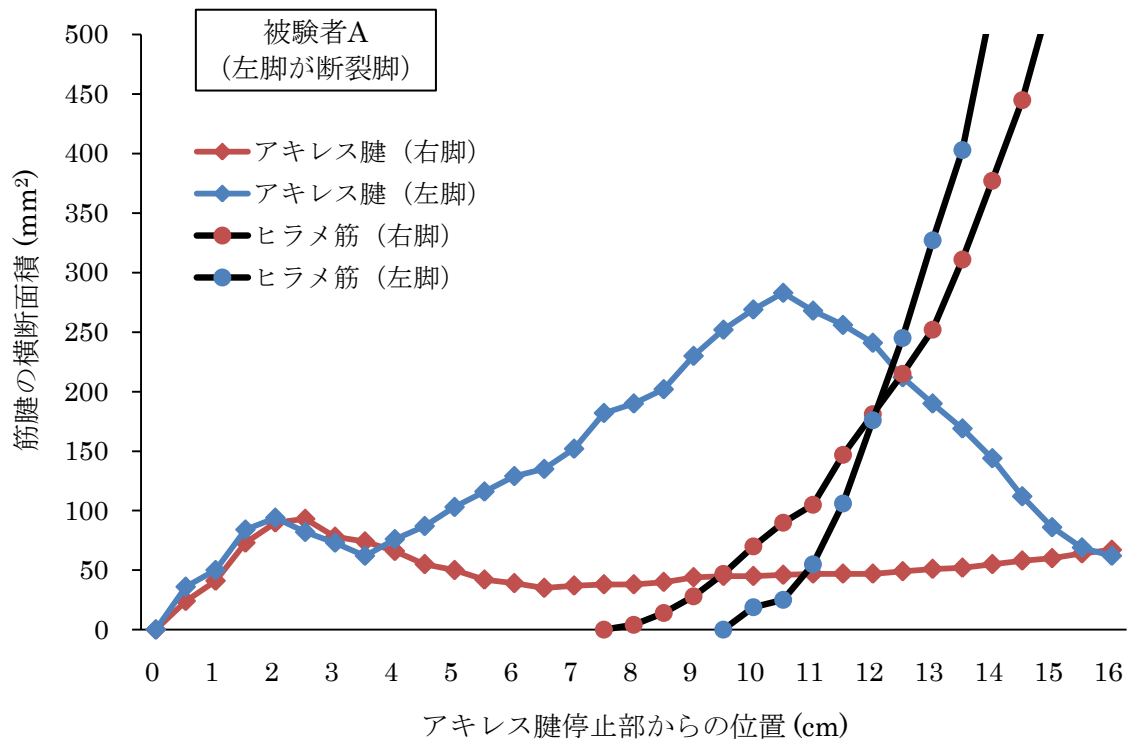


図 24 アキレス腱断裂受傷者のアキレス腱の横断面積

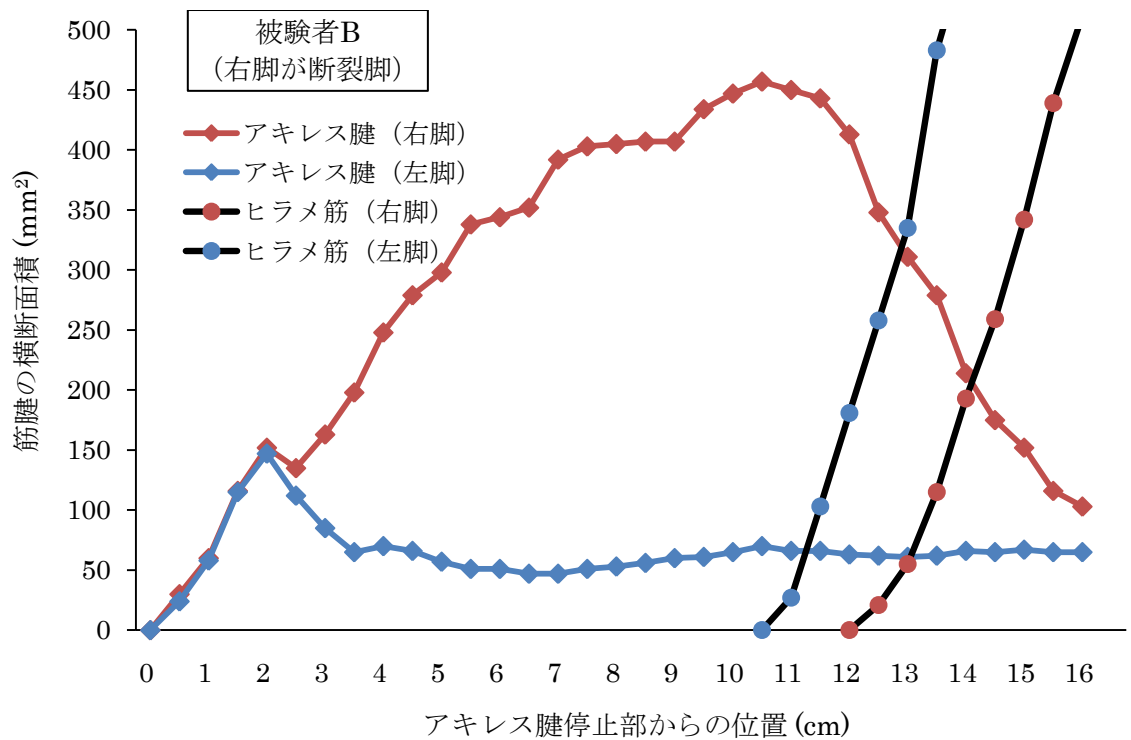


図 25 アキレス腱断裂受傷者のアキレス腱の横断面積

さらに、アキレス腱横断面積について、アキレス腱の停止部から断裂受傷部の周辺を含む範囲を分析したところ、断裂部のみではなく、その周辺を含む約 13cm にわたって顕著に健常脚よりも大きなアキレス腱横断面積を持つことがわかった(表 15, 図 24, 25). アキレス腱断裂受傷した脚では健常脚よりも、被験者 A で最大 6.2 倍、被験者 B では最大 6.5 倍のアキレス腱横断面積であった。また、アキレス腱断裂受傷によって、アキレス腱の肥大が起きていると考えられる範囲である、アキレス腱停止部から 16cm のアキレス腱体積と平均横断面積を算出した結果、被験者 A は健常脚の体積 8283mm³に対して断裂脚で 23325mm³であり、アキレス腱平均横断面積は断裂脚が健常脚よりも大きく、その差は 2.8 倍、被験者 B は健常脚の体積 10433mm³に対して断裂脚で 45088mm³であり、アキレス腱平均横断面積は断裂脚が健常脚よりも大きく、その差は 4.3 倍であった。

表 16 アキレス腱断裂受傷者のアキレス腱の特性

	被験者 A		被験者 B	
	左脚 (断裂脚)	右脚 (健常脚)	左脚 (健常脚)	右脚 (断裂脚)
腱張力 (N)	3426	3370	2983	2360
伸長量 (mm)	26.1	25.0	21.1	14.6
歪み (%)	13.4	11.9	10.6	6.9
応力 (MPa)	31.6	67.7	52.4	8.7
Stiffness (N/mm)	186.0	527.9	226.3	205.1
ヤング率 (GPa)	3.1	20.4	6.9	1.4

表 16 は、アキレス腱の物質的特性に関係する項目の結果である。アキレス腱断裂受傷者のアキレス腱の張力は、受傷後 2 年が経過している被験者 A は左右でほぼ同等の値であり、受傷後 9 ヶ月の被験者 B は断裂脚が健常脚よりも低い値であった。アキレス腱の伸張量は、被験者 A で断裂脚が健常脚よりも少し高い値であるが左右ほぼ同等の値であ

り、被験者 B は断裂脚が健常脚よりも低い値であった。アキレス腱の歪みは、被験者 A で断裂脚と健常脚でほぼ同等の値を示し、被験者 B では断裂脚が健常脚よりも低い値であった。アキレス腱の応力は、被験者 A と B がともに断裂脚が低い値を示し、特に受傷後 9 ヶ月の被験者 B ではその傾向が顕著に現れた。アキレス腱の *stiffness* は、両被験者ともに断裂脚が健常脚よりも低い値であったが、被験者 A の健常脚は断裂脚、被験者 B、および前章での被験者群と比較しても顕著に高い値を示している。アキレス腱のヤング率は、両被験者ともに断裂脚が健常脚よりも低い値であり、健常脚は前章の被験者群と同等の値であるが、断裂脚は健常脚と比較して 50%に満たない値であった。

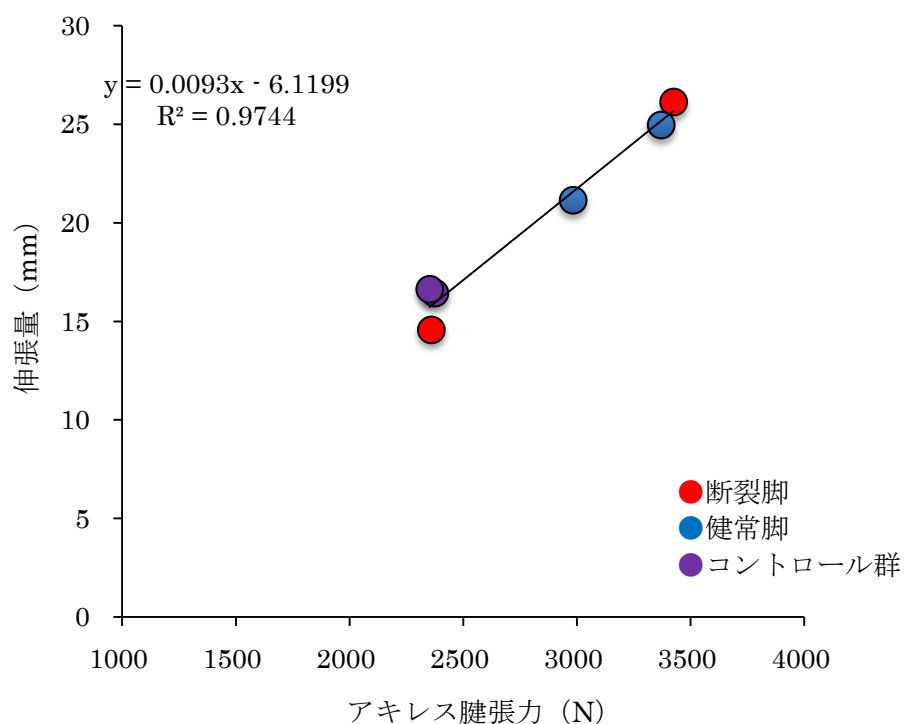


図 26 アキレス腱断裂受傷者におけるアキレス腱の張力と伸張量の関係

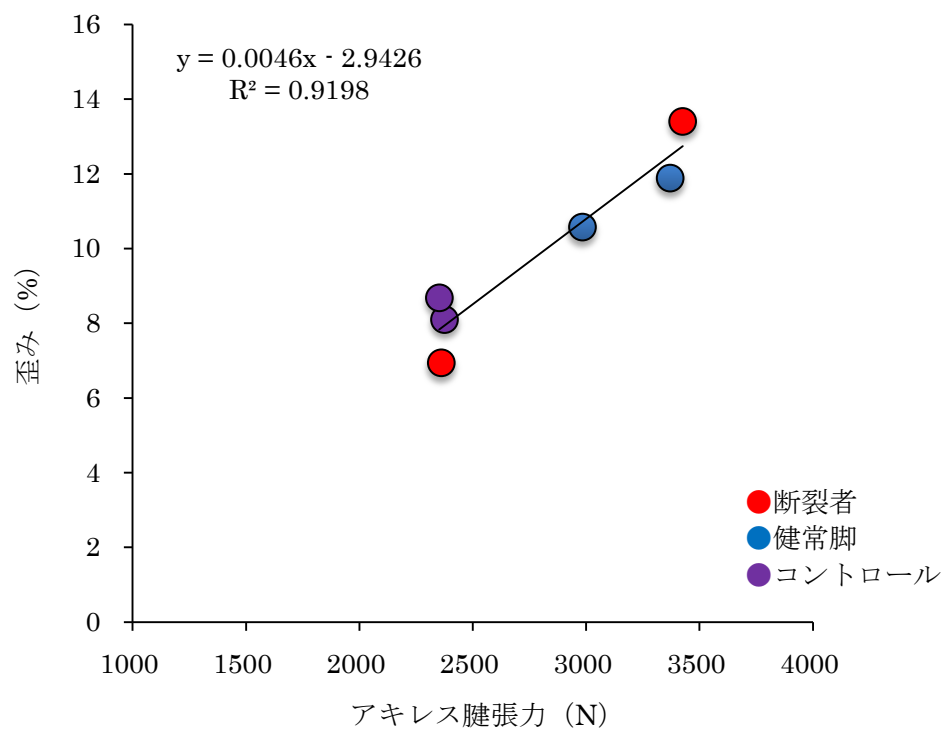


図 27 アキレス腱断裂受傷者におけるアキレス腱の歪みと伸張量の関係

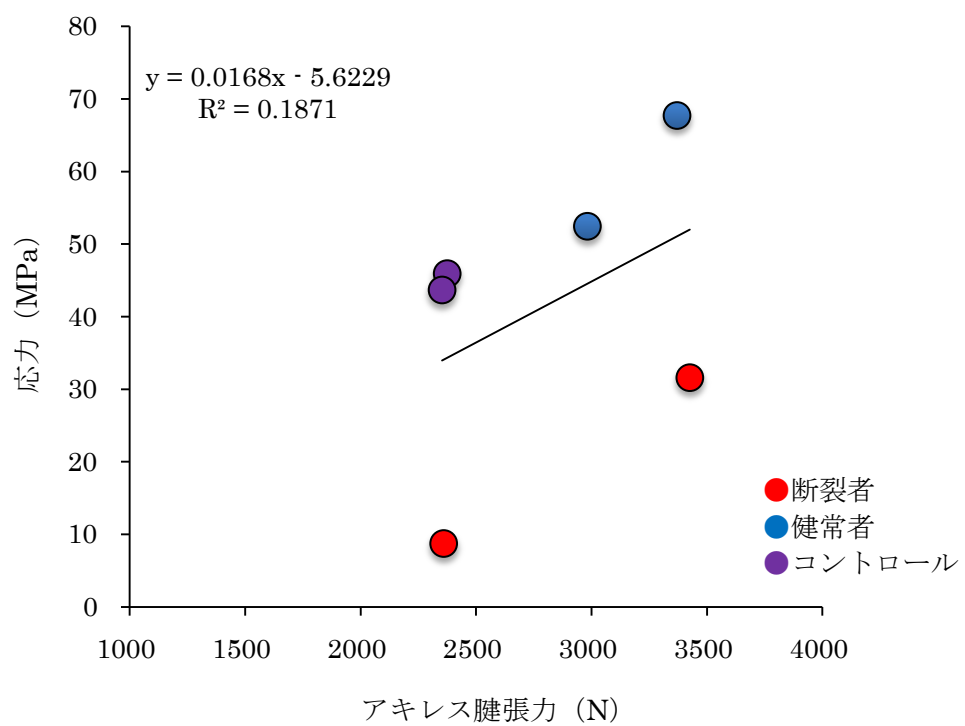


図 28 アキレス腱断裂受傷者におけるアキレス腱の応力と伸張量の関係

下腿三頭筋群の大きさは、ヒラメ筋、腓腹筋、下腿三頭筋の全てにおいて被験者 A と被験者 B がともに、断裂脚が健常脚よりも低い値を示した。また、健常脚を 100%とした断裂脚の下腿三頭筋群の各最大横断面積の大きさを表した値は、被験者 A では下腿三頭筋群の中でヒラメ筋が最も高い値を示し、腓腹筋が最も低い値であった。それに対して被験者 B では逆の傾向を示し、ヒラメ筋が最も低い値を示し、腓腹筋が最も高い値であった(表 17)。

表 17 アキレス腱断裂受傷者の下腿三頭筋群の横断面積

	被験者 A			被験者 B		
	左脚 (断裂脚)	右脚 (健常脚)	断裂脚/ 健常脚	左脚 (健常脚)	右脚 (断裂脚)	断裂脚/ 健常脚
ヒラメ筋 最大横断面積 (cm ²)	27.3	28.3	0.96	31.8	25.7	0.81
腓腹筋 最大横断面積 (cm ²)	21.4	24.9	0.86	25.0	23.5	0.94
下腿三頭筋 最大横断面積 (cm ²)	48.7	53.2	0.92	56.9	49.2	0.86

6.2.4 考察

6.2.4.1 アキレス腱の形態的特性

踵骨付近におけるアキレス腱の最大横断面積は、被験者内に左右差はないが、被験者 A よりも被験者 B が大きい値である。これは被験者 B がアメリカンフットボールの選手であり、体重も重いことが原因として考えられる。陸上競技選手群や水泳選手がトレーニング群よりも大きなアキレス腱の横断面積を有していたように、被験者 B においても高い負荷がかかると考えられるトレーニングと競技様式を持ち合わせたスポーツ競技であるアメリカンフットボールを行なっていることから、被験者 B はその負荷に適応して

被験者 A よりも大きなアキレス腱の横断面積を有していたことが考えられる。また、中川ほか(1988) によるラットの実験で、トレーニングをさせていないコントロール群のラットにおいてアキレス腱のコラーゲン繊維が肥大していたことが報告されている。これは、トレーニングをさせていないため肥満という形で体重が増加し、体重負荷によるコラーゲン繊維の肥大が確認されたと考察されている。したがって、被験者 B は被験者 A よりも大きな体型と体重を持つことから、スポーツ競技のトレーニングとしての負荷以外に元々持ち合わせている体重という負荷が大きく、アキレス腱の横断面積は被験者間 A よりも被験者 B が大きかったと考えられる。また、踵骨付近におけるアキレス腱横断面積に左右差がほとんどなかったことは、腱の不活動に伴う横断面の萎縮が起きにくいことが原因であると考えられる。先行研究では、3 週間程度の下肢不使用によって腱の横断面積に変化がなかったことを報告している(Almeida-Silveira et al, 2000; Boer et al, 2007)。このことから、腱は筋よりも下肢不使用に伴う横断面積の減少が遅いことが考えられ、本研究の被験者においてもアキレス腱断裂受傷に伴う下肢の不使用であった期間では、踵骨付近におけるアキレス腱の横断面積の減少が起きず、断裂脚と健常脚で差がなかったと考えられる。

アキレス腱停止部から 16cm 間のアキレス腱平均横断面積は、断裂脚が健常脚よりも大きく、特に断裂部周辺に健常者ではみられない顕著な肥大が起きていることから、断裂部周辺を保護しようとする適応が起きていると考えられる。ある物体が持つ応力(Stress) の大きさは、応力の算出方法上、物体の横断面積が大きい方が小さくなり、物体にかかる負荷も小さくなる。すなわち、アキレス腱の断裂によって断裂部周辺の腱横断面積を増加させることは、アキレス腱の単位断面当たりに加わる負荷を減少させる効果があるといえる。また、腱の肥大は、断裂部とその周辺にわたって生じていたが、局所的に肥大すると形態の不連続性による急激な形状変化によって箇所に応力が発生することで応力集中が発生し、肥大したにも関わらず急激な形状変化部位において強度が落ちる可能性がある。このことから、断裂部のみを保護する適応が起きるのではなく、その周辺にわたって肥大が起き、アキレス腱全体を保護する適応が起きたのではないかと考えられる。

アキレス腱長は、断裂脚が健常脚と比較して長かった。先行研究では、ウサギの後肢を 14 日間固定し、ヒラメ筋の筋腱複合体長と筋束長の有意な減少を確認している(Herbert et al, 1997)。ラットを用いた実験においても、固定具を用いての後肢を 6 週間

不使用にしたポスト測定において、安静時のアキレス腱の長さが固定前よりも有意に長くなったことを報告している(Eliasson et al, 2007)．ヒトにおいては、成人男性の片脚を23日間の懸垂状態にすることによって、懸垂前と懸垂後の安静時の膝蓋腱の長さに有意な変化は認められなかったが、外側広筋の筋萎縮に伴い懸垂後の外側広筋の筋束長が懸垂前よりも有意に短くなったことが確認されている(Boer et al, 2007)．また、本研究の被験者B本人とアスレチックトレーナーは、自身の観察と感覚において「断裂脚のアキレス腱は断裂後に長くなった」とコメントをしている．以上のことから本研究の被験者は、アキレス腱断裂受傷後の断裂脚不使用による筋萎縮や筋束長の短縮に伴って筋長が短くなったことが考えられ、アキレス腱長は筋遠位端よりも遠位のアキレス腱長と定義していることから、結果的にアキレス腱長は健常脚よりも長かったと考えられる．

6.2.4.2 アキレス腱の張力および物質的特性

アキレス腱の張力は、被験者Aではアキレス腱断裂受傷後から約2年が経過しており、受傷前と変わらない力にまで回復したことが考えられる．一方、被験者Bではアキレス腱断裂受傷後9ヶ月では完全に受傷前まで力が回復しないことが考えられる．先行研究においても、ヒト成人男性の23日間の片脚懸垂によって懸垂後の懸垂脚では、足関節底屈による最大筋力が約20%減少し(Boer et al, 2007)、20日間のベッドレスト実験では、膝伸展の最大筋力が約23%減少したことを報告している(Kubo et al, 2004)．以上のことから、アキレス腱断裂受傷による筋力低下が考えられ、さらにその回復にはリハビリ後に走運動やレジスタンス運動を伴う競技スポーツを行なっていたとしても、受傷後約9ヶ月では足関節底屈筋力は元の状態まで回復しないことが考えられる．また、被験者Aは左右の筋力に差がないことから、受傷後約2年では競技スポーツを行なっていない場合でも足関節底屈筋力は元の状態に戻ると考えられ、アキレス腱断裂受傷後の足関節底屈筋力の完全な回復には、受傷後約9-24ヶ月の期間がかかるものと考えられる．

アキレス腱の伸張量と歪みについて、アキレス腱張力と同様の傾向を示すことから、アキレス腱張力と伸張量、アキレス腱張力と歪みの関係性を分析したところ、それぞれの両項目の間には正の相関関係が認められた(図26, 27)．このことから、第3章での被験者らの結果とほぼ同様に、アキレス腱の伸張量と歪みはアキレス腱の張力に影響されていることが考えられる．しかし、アキレス腱の応力は、断裂脚においてこの関係性から外れる値となっている(図28)．応力は、アキレス腱の張力をヒラメ筋腱の平均横断面積で除することによって求めていることから、ヒラメ筋腱の平均横断面積が断裂脚にお

いて健常脚よりも大きいことが、腱張力と応力の関係性が相関関係にならなかった原因であると考えられる。実際に応力の値は、被験者 A の断裂脚で健常脚の約 47%、被験者 B にいたっては断裂脚で健常脚の約 13%しかないという結果が出ている。前述のように、応力が減少することは、アキレス腱の単位断面積当たりの負荷が減少することを意味することから、断裂受傷したアキレス腱は破断に抗する腱特性を持つ形態へと適応したのだと考えられる。

Stiffness とヤング率は、断裂脚が健常脚よりも低い値であり、特にヤング率の左右差は大きなものであった。ヤング率の値が低いということは、単位面積当たりでみて断裂脚は健常脚よりもアキレス腱が軟らかいと考えられ、断裂脚のアキレス腱は物質的に健常脚よりも軟らかいことが明らかとなった。この原因の一つとして断裂受傷による不使用が考えられる。先行研究では、23 日間の脚懸垂(Boer et al, 2007) や 20 日間のベッドレスト(Kubo et al, 2004) によって腱 stiffness が有意に減少したことを報告している。また、Reeves et al. (2005) は 90 日間のベッドレストによる実験を行い、3 日毎にカーフレイズとレッグプレスエクササイズを行うベッドレストエクササイズ群(BREx 群) と、ベッドレストのみの群(BR 群) を比較している。そして、ベッドレスト終了時には、Pre 測定と比較してアキレス腱の stiffness は BREx 群が 37%、BR 群が 58%の減少を示し、ヤング率は BREx 群が 38%、BR 群が 57%減少したことを報告している。本研究の被験者は、アキレス腱を断裂したことによって、受傷後に約 1 ヶ月間の患部の固定を有し、固定がなくなってからも断裂脚に十分に加重ができるようになるまで約 2 ヶ月を有している。そのため、先行研究(Kubo et al, 2004; Boer et al, 2007) において 20 日間程度のアキレス腱不使用によって腱 stiffness が有意に減少したことを考えると、断裂受傷者では約 3 ヶ月もの間アキレス腱は不使用に近い状態にさらされたことになり、この間にアキレス腱の stiffness が減少したことが十分に考えられる。また、ヤング率でも同じ原因が考えられ、物質的に断裂脚のアキレス腱は軟らかくなっていることが示唆される。また、筋が収縮した時に、軟かい腱の方が硬い腱よりも緊張がゆるく再断裂や受傷の可能性が減少することが考えられ、腱の stiffness とヤング率の低下は、患部への負荷を減少させる働きを持つことが考えられる。

6.2.4.3 下腿三頭筋の横断面積

下腿三頭筋群の横断面積は、断裂脚が健常脚よりも低い値であったが、これはアキレス腱断裂受傷による断裂脚の不使用によって筋萎縮が起きたことが考えられる。また、

下腿三頭筋群の横断面積は、被験者 A ではヒラメ筋が最も高い値で、被験者 B では腓腹筋が最も高く、健常脚に対する断裂脚が持つ大きさは被験者間で傾向が異なっていた。この原因として、被験者の身体活動と、筋の発達様式が関連していると考えられる。被験者 A は、過去にバレーボールや野球を行っていたが、アキレス腱断裂受傷時には定期的な活動はしておらず、受傷後においても定期的な運動を行っていなかった。一方、被験者 B は現役のアメリカンフットボール選手であり、受傷後も競技を続行している。そして被験者 B は、受傷後約 5 ヶ月後にはランニングを行うようになり、受傷後 6.5 ヶ月で全力疾走を行うまで回復している。そして、筋の発達様式については第 4 章および第 5 章でも説明したように、ヒラメ筋と腓腹筋では運動単位の閾値や筋肥大の起きやすさが異なる。ヒラメ筋は、遅筋線維が多く運動単位の閾値が低く (Hanneman et al, 1965; Walmsly et al, 1978)、日常生活でも筋活動が多いことが報告されており (沢井ほか, 2006)、運動習慣がない被験者 A においても十分に筋適応を起こす刺激があったと考えられる。一方、腓腹筋は速筋線維が多く運動単位の閾値は高く、被験者 A はアキレス腱断裂受傷後に腓腹筋の閾値を越えるような筋活動が少なかったと考えられ、健常脚に対する断裂脚が持つ腓腹筋の大きさはヒラメ筋よりも低かったと考えられる。それに対して被験者 B は、被験者 A よりもアキレス腱断裂受傷後の経過時間が短く、また、ヒラメ筋は遅筋線維が多く腓腹筋に対して筋肥大が起きにくいことから、アキレス腱断裂受傷後 9 ヶ月では十分にヒラメ筋の横断面積が回復しなかったと考えられる。一方、腓腹筋は速筋線維が多く筋肥大が起きやすいために、断裂受傷後もアメリカンフットボールを続けていた被験者 B は、健常脚に対する断裂脚が持つ腓腹筋の大きさはヒラメ筋よりも高かったと考えられる。

第7章 総合討論

本研究は、陸上競技の短距離走選手・長距離走選手・跳躍選手と水泳選手およびコントロール群を対象として、トレーニングによるアキレス腱の適応能力について左右差を含めて明らかにすることが目的であった。また本研究は、腱の適応は筋のそれよりも遅く、遅延性であり、継続的なトレーニングが必要だと示唆されている(Almeida-Silveira et al, 2000; Boer et al, 2007) ことから、トレーニング実験を行うのではなく種目特異的な負荷様式のトレーニングを長年行なっている者を被験者として用いることで、ある負荷様式を長年行うことで得られたと考えられるアキレス腱の特性を調査した。

これまでの各章では、腱特性に関する先行研究の問題点を改善して複数の被験者を同一プロトコルで測定し、さらに、これまで行われてこなかった左右脚での検討や、筋と腱の関係性についての検討を行ってきた。その結果、形態的特性では、アキレス腱の最大横断面積においてスポーツ競技者群がコントロール群よりも有意に大きく、中でも走運動を行う陸上競技者群の値が高かった。また、長距離群でヒラメ筋腱長、被験者全体において腓腹筋腱長に左右差が認められた。アキレス腱の物質的特性では、腱張力の大きさの違いからアキレス腱の伸張量、歪み、応力が短距離群と跳躍群においてコントロール群や長距離群よりも大きい値を示した。しかし、アキレス腱の硬さを示す指標である *stiffness* とヤング率は、群間にも左右にも有意な差が認められず、各群が持つ *stiffness* とヤング率の値の傾向よりも個人差が大きく、アキレス腱の物質的特性はどの群も同様であることが明らかになった。さらに、筋と腱の関係では、各群で下腿三頭筋群の横断面積とアキレス腱横断面積の間には長距離群とコントロール群でしか関係が認められなかったが、被験者全体では下腿三頭筋群の全ての筋横断面積とアキレス腱横断面積の間に高い相関関係が認められた。一方、下腿三頭筋群の体積とアキレス腱横断面積の間では短距離群においても相関関係が認められ、筋横断面積よりも筋体積がアキレス腱横断面積と関係性が高いことが明らかとなった。以上のことから本研究において、長年のトレーニングで物質的特性の変化はあまり起きないことが考えられるが、筋のトレーニング適応に関連して、アキレス腱においても形態的特性の変化がトレーニングの適応として起こることが考えられる。

7.1 腱のトレーニング適応に関する先行研究のまとめ

腱の適応や特性を調査する研究において最も多いトレーニング方法は、ランニングト

レーニングとレジスタンストレーニングの 2 種類である。レジスタンストレーニングにおいては、動物実験で腱の肥大が認められないとする報告(Legerlotz et al, 2007) があるが、コラーゲン線維の直径が増加したという報告は比較的多い(Michna and Hartmann, 1989; Barone et al, 2009)。一方、ヒトの実験では、腱の肥大が認められなかった研究の方が多く傾向にあるが(Kubo et al, 2001a: 2001b; Arampatzis et al, 2010)、幾つかの研究においては腱の部分的な肥大が認められている (Arampatzis et al, 2007a; Seynnes et al, 2009)。また、物質的な特性では、レジスタンストレーニングで stiffness が増加したという研究はとて多い(Kubo et al, 2001a, 2001b, 2002, 2010; Hansen et al, 2003; Kongsgaard et al, 2007; Seynnes et al, 2009; Arampatzis et al, 2007, 2010)。このことから、レジスタンストレーニングでは、形態的な変化を起こしにくい傾向にあるが、stiffness の増加を起こしやすいことが考えられる。しかし、レジスタンストレーニングと同じように高強度短時間のトレーニング負荷特性を持つスプリンターの腱横断面積に関する研究はほとんどなく、さらに競技能力が高い者ほど膝蓋腱は軟かいことが報告されている(Kubo et al, 2000; Stafilidis et al, 2007)。一方、ランニングトレーニングでは、ラットを用いた研究においてアキレス腱の肥大が確認されており (Michna and Hartmann, 1989; Sommer, 1987)、腱の肥大が起こる可能性が示唆されるが、ヒトを用いたトレーニング実験では腱の形態的な変化が起きなかったことが報告されている (Hansen et al, 2003)。しかし、ランナーにおいては一般人よりも腱の横断面積が大きいことが報告されている(Rosager et al, 2001; Magnusson et al, 2003)。物質的な特性では、ランニングトレーニングにおいても、ランナーと一般人の比較においても stiffness は変わらないという報告が多い(Kubo et al, 2000; Rosager et al, 2001; Hansen et al, 2003; Karamanidis et al, 2005)。このことから、ヒトのランニングトレーニングでは、ラットと比較して形態的な適応は簡単には生じないことが考えられ、腱の物質的な特性も変化しないことが考えられる。また、競技特性上、左右の脚で負荷が異なるスポーツ選手では、高負荷がかかる脚側の腱が逆脚よりも大きな横断面積を有することが報告されている (Muraoka et al, 2007; Couppé et al, 2008)。さらに Couppé et al. (2008) は、高負荷がかかり横断面積が大きかった脚側の腱が逆脚と比較して stiffness が有意に大きいことを報告していることから、腱は負荷が高まることで横断面積や stiffness を増加させることが考えられ、腱の横断面積や stiffness の左右差も生じることがあるといえる。以上のことを踏まえて、以下に本研究の結果を総合的に考察する。

7.2 腱のトレーニング適応に関する検討

7.2.1 競技種目ごとの腱の形態的・物質的な特性の特徴

陸上競技の短距離走選手のトレーニングは、無酸素運動で走りきれのような短い距離を全速力で走りきるため、短時間で爆発的な筋力発揮を行うようなトレーニングが基本となる。そのため、短距離走選手のアキレス腱には高負荷短時間という特徴の負荷が加わっていることからレジスタンストレーニングと似たような効果があると考えられる。レジスタンストレーニングによる腱の形態的变化が認められた研究は少ない傾向にあったが、本研究はその少数派を支持する結果となった。また、多くのレジスタンストレーニング実験を行なった先行研究で *stiffness* が増加しており、それとは反対にスプリンターでは腱が軟らかいとも報告されていたが、本研究の結果はコントロール群と有意な差が認められず、どちらの結果も支持されなかった。

一方、長距離走選手のトレーニングは短距離走選手とは異なり、長い距離を走るために短距離走選手よりも低強度長時間の筋力発揮を行うような持続的なトレーニングが基本となり、アキレス腱にも低強度で長時間の負荷が加わるという特徴を持つ。そして、長距離群の結果は、先行研究のランニングトレーニングによる実験と同じ結果が出ることが予想された。ランニングトレーニングによる実験では、ヒトにおいて腱の肥大が確認されていなかったが、本研究の結果は、ランナーが一般人よりも大きな腱横断面積を持つという動物をもとにした先行研究の結果を支持するものであった。また、腱の形態について、アキレス腱長さの左右差を調査した研究は見受けられず、本研究において長距離選手はヒラメ筋腱長に左右差があることが明らかになった。腱の物質的特性においては先行研究と同じく、物質的な特性に群間差は認められなかった。

跳躍選手は、短距離走選手と類似したトレーニングの他に、一方の決まった脚で踏切動作を行うため、高強度短時間の負荷様式に加えて、アキレス腱に加わる負荷に左右差が生じるという特徴を持つことから、アキレス腱の横断面積は短距離群と差はないが、左右差が生じることが予想された。本研究の結果、予想された通り短距離群と同等のアキレス腱横断面積を持ち、アキレス腱の横断面積に左右差が認められた。しかし、跳躍選手と同じ高負荷短時間という負荷様式を持つレジスタンストレーニングを行わせた先行研究で腱の *stiffness* が増加したのに対して、跳躍選手のアキレス腱の *stiffness* は、どの群とも差が認められなかった。

水泳選手における腱特性の先行研究は見受けられないが、水泳中は足関節が常に底屈

状態にあることから、トレーニング中においてアキレス腱に負荷はほとんど生じていないことが考えられる。また、水泳中に足関節底屈状態を保つために下腿の筋群による筋力発揮は行われているかもしれないが、その筋力発揮は陸上競技選手のものよりも極めて小さいことが考えられる。このことから水泳群は、下肢の不使用やベッドレストの実験と同じくアキレス腱の **stiffness** は陸上競技者群やコントロール群よりも低い値であることが考えられ、下腿三頭筋の横断面積は陸上競技者群よりも小さく、筋と腱の関係性は陸上競技者群やコントロール群と異なることが予想された。本研究の結果は、水泳群のアキレス腱の **stiffness** はどの群とも差が認められず仮説とは異なっていたが、下腿三頭筋群の横断面積は短距離群と跳躍群よりも有意に低く、下腿三頭筋横断面積とアキレス腱横断面積は水泳群のみが相関関係が認められず、これらの結果は仮説通りであった。また、水泳群のアキレス腱の **stiffness** はどの群とも差が認められず仮説とは異なっていたが、腱張力 10%毎のアキレス腱伸張量を算出して、被験者群の中で比較的アキレス腱が硬いと思われる跳躍群と比較した場合では、跳躍選手よりも有意に伸張量が大きく、水泳群のアキレス腱は軟らかいことが考えられ、この結果は仮説と合致するものであった。

7.2.2 腱特性の個人間差、個人内差

先行研究から考えられた仮説と本研究の結果は、アキレス腱の形態的な特性については予想通りとなる結果が多くみられたが、腱の物質的特性には個人間のばらつきが大きく、物質的な特性は全ての群において有意な差が認められず、どの群も同様のアキレス腱の物質的特性を持つことが考えられた。しかし、アキレス腱の物質的特性に群間で有意な差が認められなかったことは、個人差の大きさに加えて、アキレス腱の物質的特性が短期的に変化しやすいために、個人内の変化が結果に影響したことも考えられる。先行研究の結果に記載した通り、トレーニング実験では形態的な変化はあまり認められず、腱の **stiffness** の変化が起きた研究が多くみられた。また、腱は一過性の実験によっても **stiffness** が変化することが報告されており(江川ほか, 2008; Farris et al, 2011)、本研究の第 6 章においても跳躍選手の試合に向けたコンディショニング期間でアキレス腱の **stiffness** が変化したことを確認している。これらのことから、特にトレーニングを積んでいるスポーツ競技者群は、本研究のアキレス腱の物質的特性の測定前におけるトレーニングがどの程度の量で、測定の何時間前までトレーニングをしていたかなどがアキレス腱の **stiffness** の値に影響していることが考えられる。

7.2.3 トレーニングによって腓肥大を引き起こすためには

ヒトの腓肥大に関する先行研究において、トレーニング実験で腓肥大が認められた報告は少ないが、スポーツ競技者は一般人よりも腓断面面積が有意に大きいと報告している研究は多い。本研究においてもアキレス腱の最大横断面面積は、スポーツ競技者群がコントロール群よりも有意に大きかった。また、筋活動はみられるもののアキレス腱に負荷がほとんどかかっていないと考えられる水泳群は、アキレス腱の最大横断面面積を体重の $2/3$ 乗で除した場合にコントロール群と差が認められず、陸上競技者群においてはトレーニング負荷特性が異なるにも関わらず、群間に有意な差は認められなかった。これらの結果から、腓の肥大は短期的に起きない可能性があることと、トレーニング負荷の力積が影響していることが考えられる。

先行研究のトレーニング実験では、ランニングやレジスタンストレーニングよりも一回の負荷が高いと考えられるジャンプトレーニングにおいて、腓の肥大は認められていない(中川ほか, 1988; Almeida-Silveira et al, 1994)。ジャンプトレーニングの実験では、ジャンプの回数をトレーニング量として設定しており、例えば 20cm の高さからのボックスジャンプ接地時には床反力が $3421 \pm 624\text{N}$ 、60cm の高さでは $4993 \pm 991\text{N}$ になることが報告されている(Makaruk and Sacewicz, 2011)。また、 $4.0\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ のランニング時の床反力は $2012 \pm 991\text{N}$ であると報告されている(Kyröläinen et al, 2005)。このことから、リバウンドジャンプはランニングの約 1.7 倍から 2.5 倍程度の負荷がかかっていることが推察されるが、ランニングはトレーニング時間内に数限りない接地を繰り返しており、ジャンプトレーニングで与えられる負荷の力積はランニングよりもかなり劣ることが考えられる。同様に、動物実験においてレジスタンストレーニングよりもランニングトレーニングによる腓肥大が多く、先行研究で報告されていたことも、負荷の力積の大きさが原因であることが考えられる。先行研究のレジスタンストレーニングと同様に高負荷であるトレーニングを行なっている本研究の短距離群と跳躍群において、コントロール群よりもアキレス腱最大横断面面積が有意に大きかったことは、短距離群と跳躍群はトレーニング実験のレジスタンストレーニングとは異なり、走運動を伴う高負荷トレーニングを行なっていることから腓肥大が引き起こされる負荷の力積が得られていたことが考えられる。また、腓の肥大は短期的に起きない可能性があると考えられることから、先行研究のトレーニング実験で負荷の力積が腓肥大を引き起こす閾値に達していたとしても、形態的な変化が確認できなかった可能性がある。その点、本研究の被験者において

は長年のトレーニングを行なっていることから、十分に腱の形態的变化が起こる期間を有していたと考えられる。

7.3 筋と腱の関係性、協働筋に着目して

短距離群とコントロール群の下腿三頭筋体積とアキレス腱の横断面積の回帰直線の傾きが2群で異なっており、短距離群は全力走などによる高い興奮レベルでの筋活動量が多く、アキレス腱をけん引する負荷量がコントロール群よりも多いことが原因であるとの考察を第5章で行なったが、短距離群とコントロール群の間には、ヒラメ筋体積に有意な差はなく、腓腹筋体積に有意な差があったこともそれを支持する結果である。このことは、すなわち、下腿三頭筋体積に占める腓腹筋の割合が、コントロール群よりも短距離群において高いことを意味し、腓腹筋は速筋線維であることから遅筋線維であるヒラメ筋よりも同じ体積でも大きな力を出せることができ、この大きな力が出せる速筋線維である腓腹筋が下腿三頭筋に占める割合が多いことで、同じ下腿三頭筋体積でも短距離群の方が大きな力を発揮できることが考えられる。このことから、両群が同じ下腿三頭筋体積であっても、短距離群がアキレス腱に与える全体の負荷量が多いことに加え、単発的な一回の負荷においても短距離群はコントロール群よりも大きいことが考えられ、そのことが起因して、短距離群とコントロール群の下腿三頭筋体積とアキレス腱の横断面積の回帰直線の傾きが異なっていたと考えられる。以上のことから、下腿三頭筋の大きさとアキレス腱の横断面積に有意な正の相関関係が認められるが、筋の適応と腱の適応には微妙な違いがあることが考えられ、与えられた負荷の強度や量がアキレス腱の肥大の程度を決定していると考えられる。

7.4 左右差および左右比についての検討

本研究では、全ての調査項目で左右脚について検討を行なってきたことによって、腱の形態的・物質的な特性で左右差が起りやすい項目、左右差の大きさの程度を明らかにすることができた。本研究で認められた主な左右差は、跳躍群のアキレス腱最大横断面積、長距離群のヒラメ筋腱長、被験者全体での腓腹筋最大横断面積、アキレス腱断裂受傷者のアキレス腱の横断面積・応力・stiffness・ヤング率である。一方、群内や被験者全体で左右差が認められた項目や群において、左右差のバラつきが大きいとは限らず、左右差が認められる項目と左右比のバラつきの大きさは必ずしも一致しない。

7.4.1 形態的特性の左右比

踵骨付近におけるアキレス腱最大横断面積は跳躍群で左右差が認められたが、図 29 の跳躍群の各被験者をみると、左右比 1:1 上のラインから他の群以上に離れているわけではなく、個人差と思われる範囲内で一定の傾向を示すことから、跳躍群では左右差が認められたことがわかる。ここでアキレス腱断裂受傷者のプロットをみると、踵骨付近のアキレス腱最大横断面積に左右差がないことがわかるが、断裂による肥大箇所を含むヒラメ筋腱の平均横断面積でみると、明らかに健常者とは異なった左右差の大きさをアキレス腱断裂受傷者は有することがわかる。一方、長距離群において左右差が認められたヒラメ筋腱長をみると、先程のアキレス腱横断面積よりも比較的左右比 1:1 上のラインから離れた所に長距離群のプロットがあることがわかるが、その他の群においても左右比のバラつきが大きいことがわかる。そのため長距離群のヒラメ筋腱長の左右差は大きいかもしれないが、それは他の群のバラつきに収まる程度の範囲であることがわかる。腓腹筋腱長は、被験者全体において左脚が長いことが図 32 から読み取れ、バラつきはヒラメ筋腱長と同じ程度である。そして、下腿三頭筋群の横断面積の各左右比をみると、腱長と比較して左右差のバラつきがとても小さいことがわかり、下腿三頭筋群の各筋横断面積の回帰直線は左右比 1:1 上のラインにかなり類似した直線を描いている。このことから形態的な左右差は、断裂による肥大箇所を除いたアキレス腱横断面積、下腿三頭筋群の各筋横断面積といった筋腱の太さを示す指標である横断面積については左右比のバラつきが比較的小さく、反対にアキレス腱長という長さの指標である項目については、横断面積の左右比と比較して比較的バラつきが大きいことが確認でき、筋腱の横断面積の左右比よりも腱長の左右比の方がバラつき大きい可能性があることがわかった。

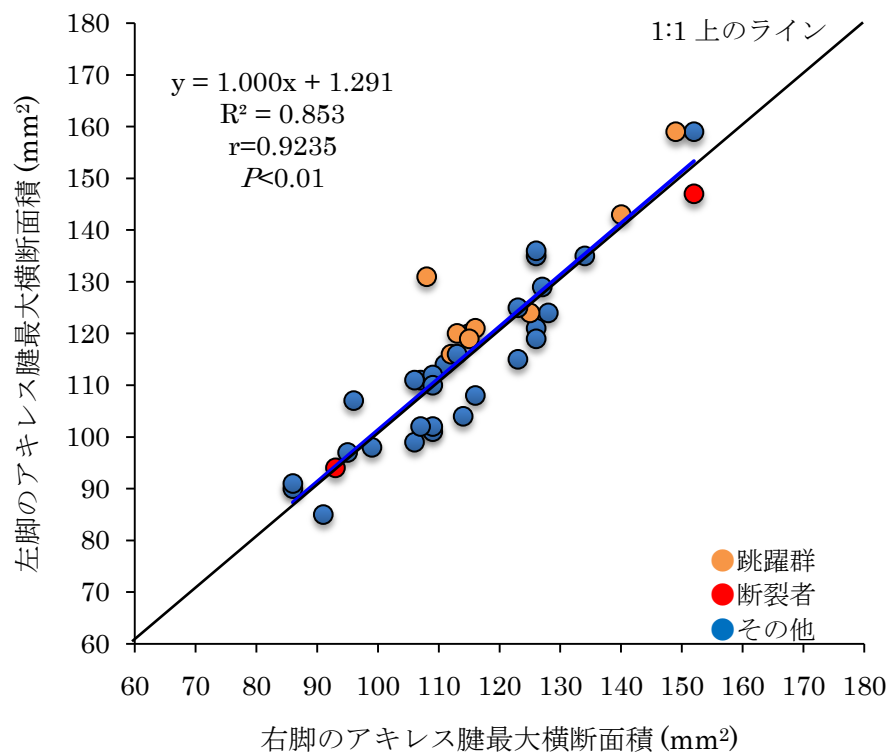


図29 アキレス腱最大横断面積の左右比

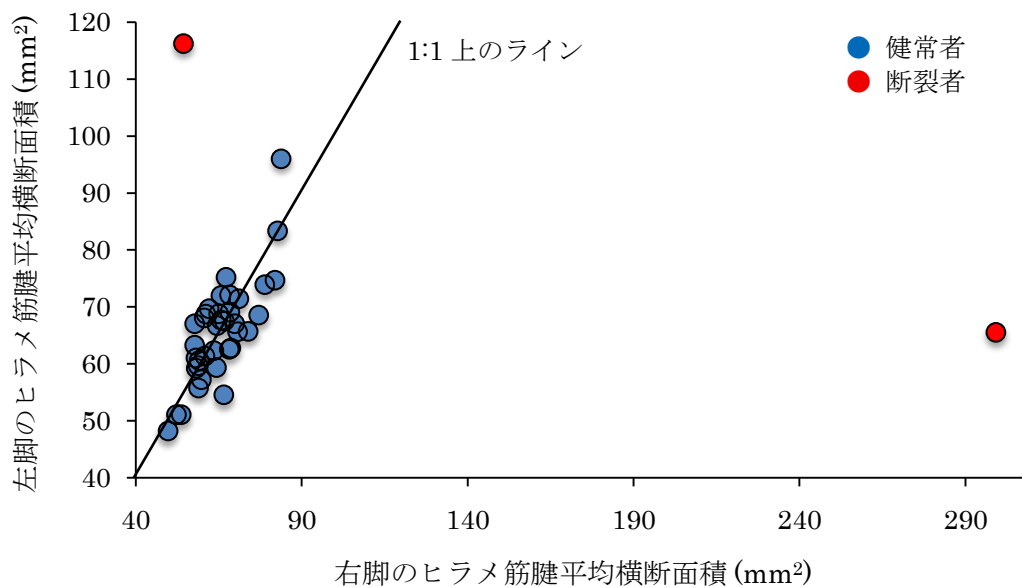


図30 ヒラメ筋腱の平均横断面積の左右比

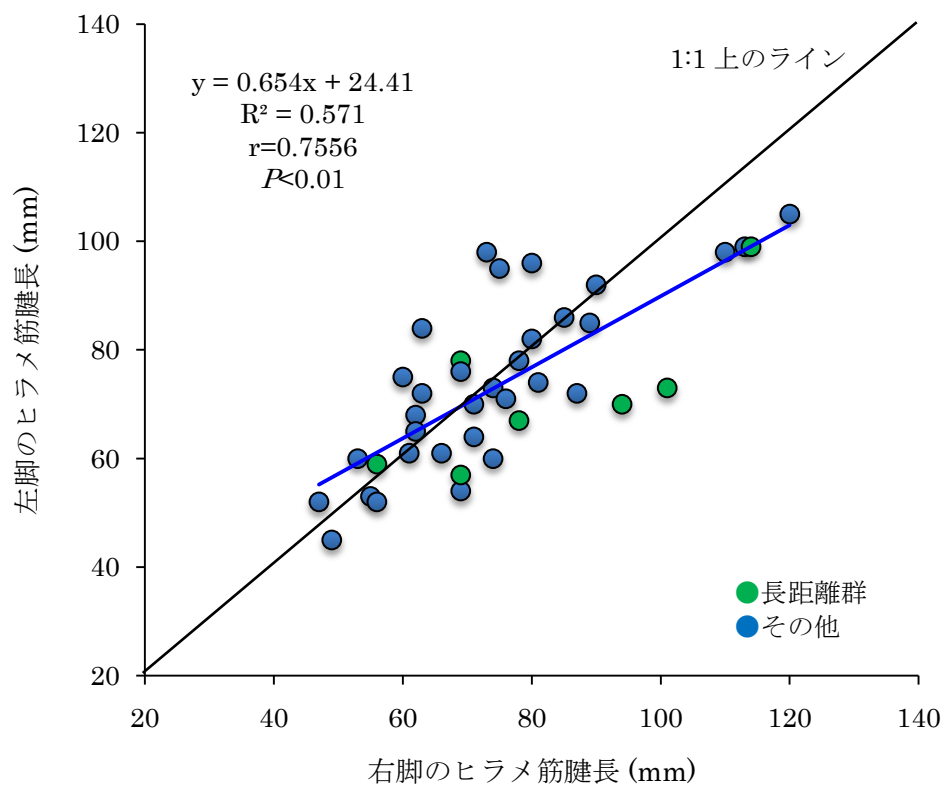


図31 ヒラメ筋腱長の左右比

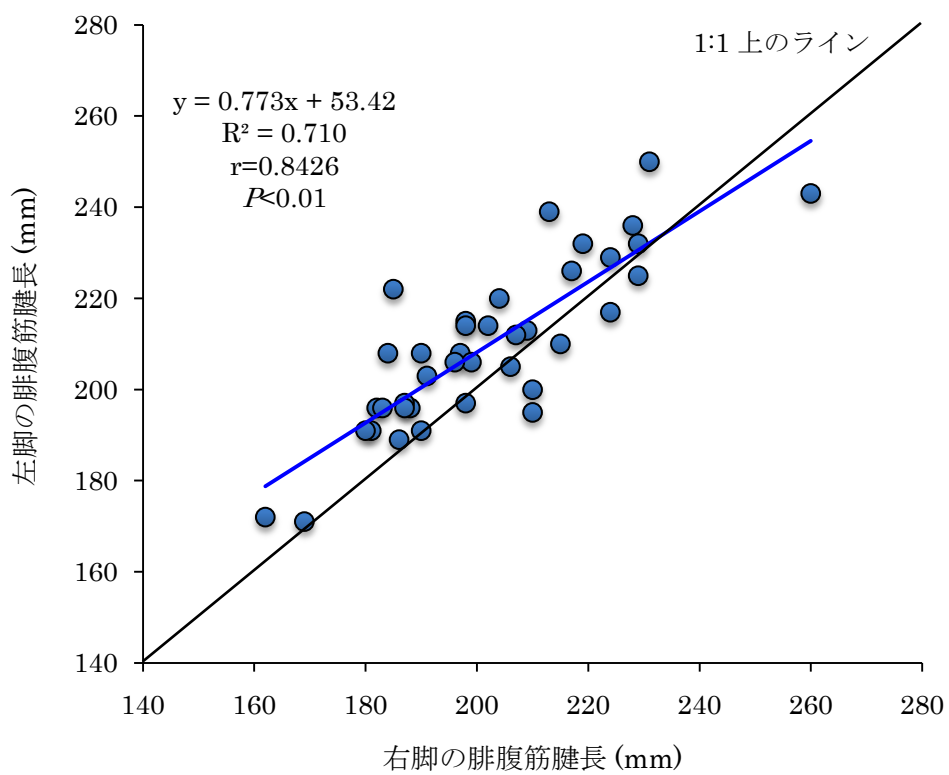


図32 腓腹筋腱長の左右比

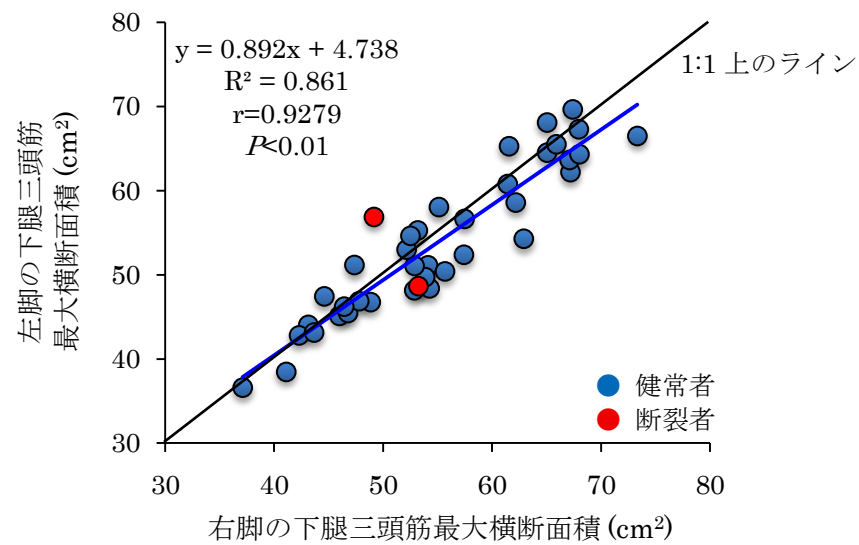
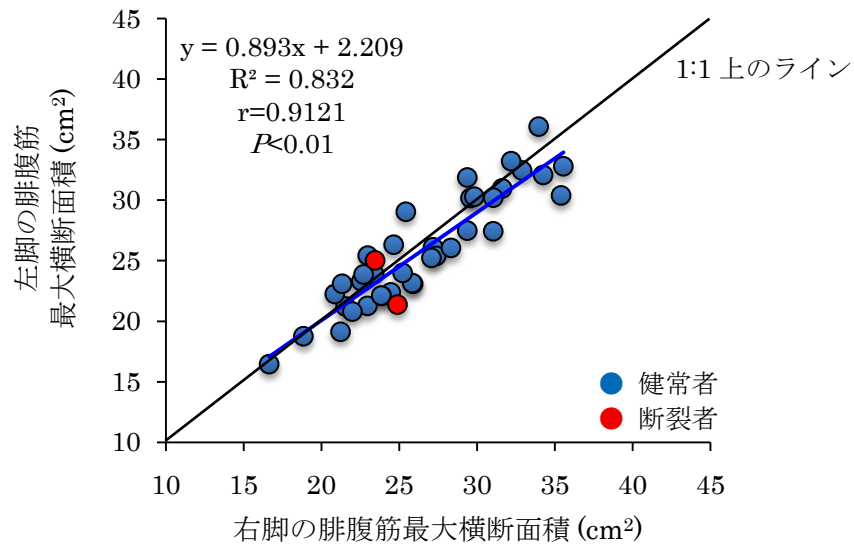
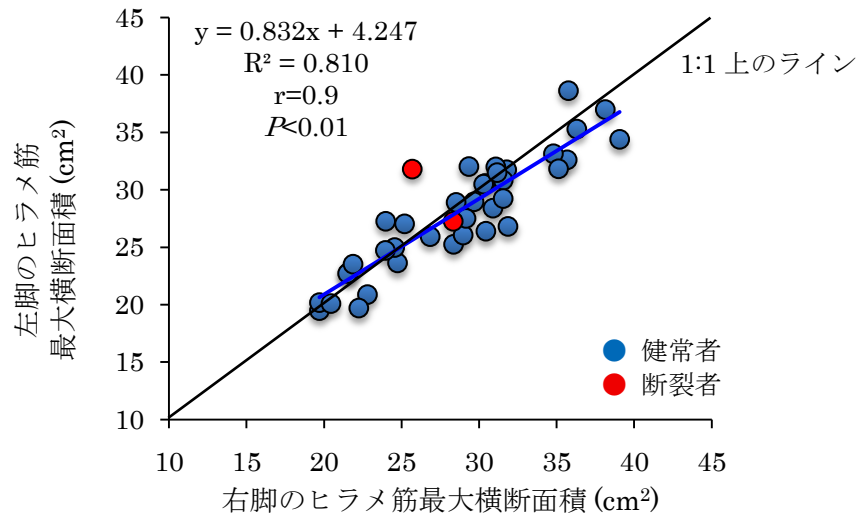


図33 下腿三頭筋群の最大横断面積の左右比

7.4.2 物質的特性の左右比

アキレス腱の物質的特性に関連する項目に注目してみると、アキレス腱の張力、伸張量、歪みはアキレス腱断裂受傷者を含め比較的左右比のバラつきは小さいことがわかる。一方、アキレス腱の応力、**stiffness**、ヤング率において、断裂受傷者は左右比が健常者と比較して飛び抜けて大きいことが確認できる(図 35)。また、アキレス腱の応力、**stiffness**、ヤング率は、回帰直線を描く方向に分散するのではなく、応力では 50MPa、**stiffness** では 200N/mm 強、ヤング率では 7GPa 前後に集中するような分散であることが見てとれる。これは、アキレス腱の応力、**stiffness**、ヤング率が断裂受傷者を除いた 5 群間にも左右にも有意な差が認められなかった結果を反映していることが理由の一つとして考えられる。これは、応力がアキレス腱張力をアキレス腱横断面積で除することによって算出するため、アキレス腱にかかる応力を一定に保とうとする適応が、腱の肥大によって行われた結果であると考えられる。また、第 3 章において本研究の被験者は同様のアキレス腱の物質的特性を持つことが示唆されたことから、アキレス腱の **stiffness** とヤング率は上記の **stiffness** では 200N/mm 強、ヤング率では 7GPa に集束することが考えられ、本研究の測定方法であれば、この値がヒトのアキレス腱の特性であると考えられる。一方、応力と **stiffness** およびヤング率に、断裂受傷者の左右比が 1:1 上のラインや健常者のバラつきから大きく離れ、張力や伸張量および歪みにはそのような傾向がなかった理由として以下の点が考えられる。アキレス腱の張力は、足底屈筋力が受傷後 9 ヶ月および 2 年を経過すると、被験者全体の左右比のバラつき内に収まる程度にまで回復することが理由として考えられる。また、応力が左右比 1:1 から大きく離れることは、断裂による患部の保護を目的とした受傷部周辺の腱肥大が起こっていることが影響しており、この肥大が同じ物質的特性を持って肥大すれば、アキレス腱は非常に硬化することになり、伸張量や歪みも減少することが考えられる。しかし、そのようなアキレス腱が非常に硬い状態になれば、健常時よりもアキレス腱の緊張が起こりやすくなり、ストレスが大きくなってしまうと考えられ、アキレス腱が硬化したことによるアキレス腱伸張量の低下は、筋収縮にも大きな影響を及ぼすと考えられる。つまり、断裂脚におけるアキレス腱の **stiffness** とヤング率の減少は、断裂受傷したアキレス腱にかかるストレスの減少の目的と、健常時と同等のアキレス腱張力に対するアキレス腱伸張量を確保することで、アキレス腱断裂受傷後において筋収縮が健常状態と同様に遂行できるように適応した結果であると考えられる。

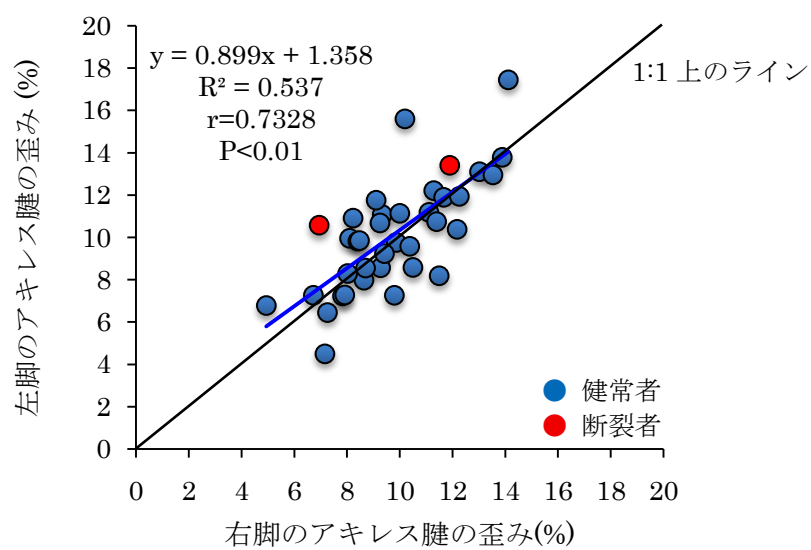
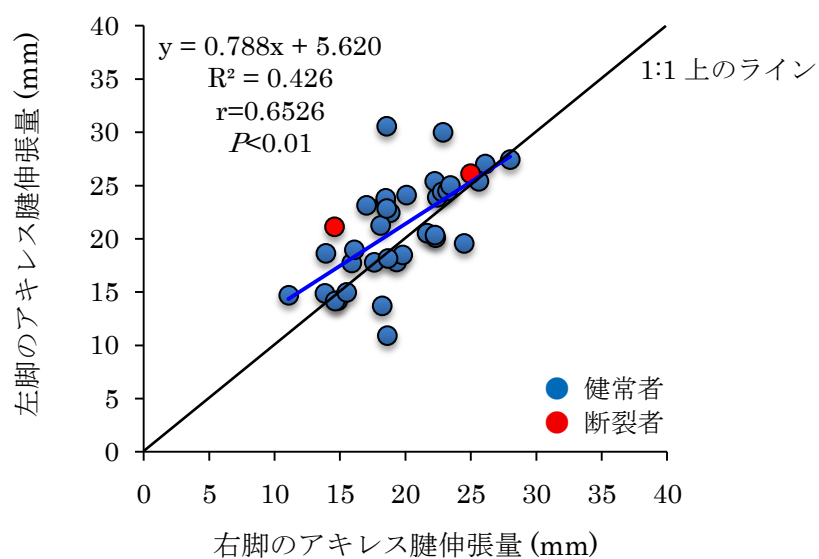
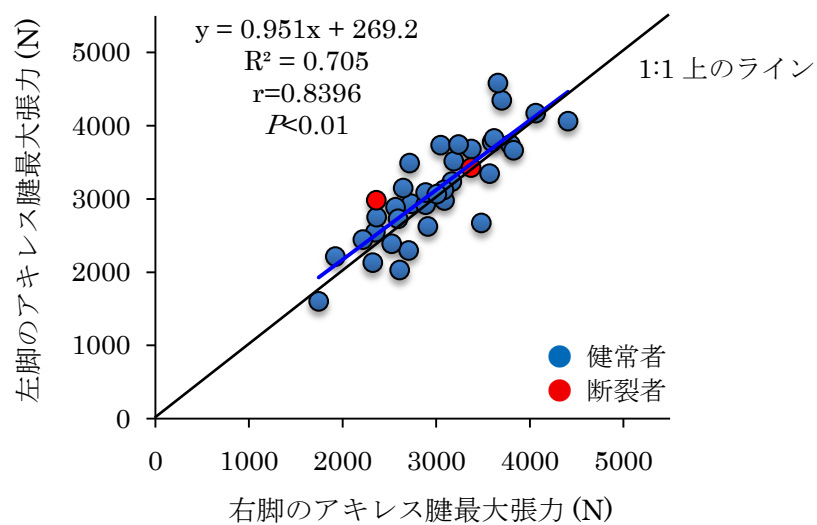


図34 アキレス腱の張力，伸張量，歪みの左右比

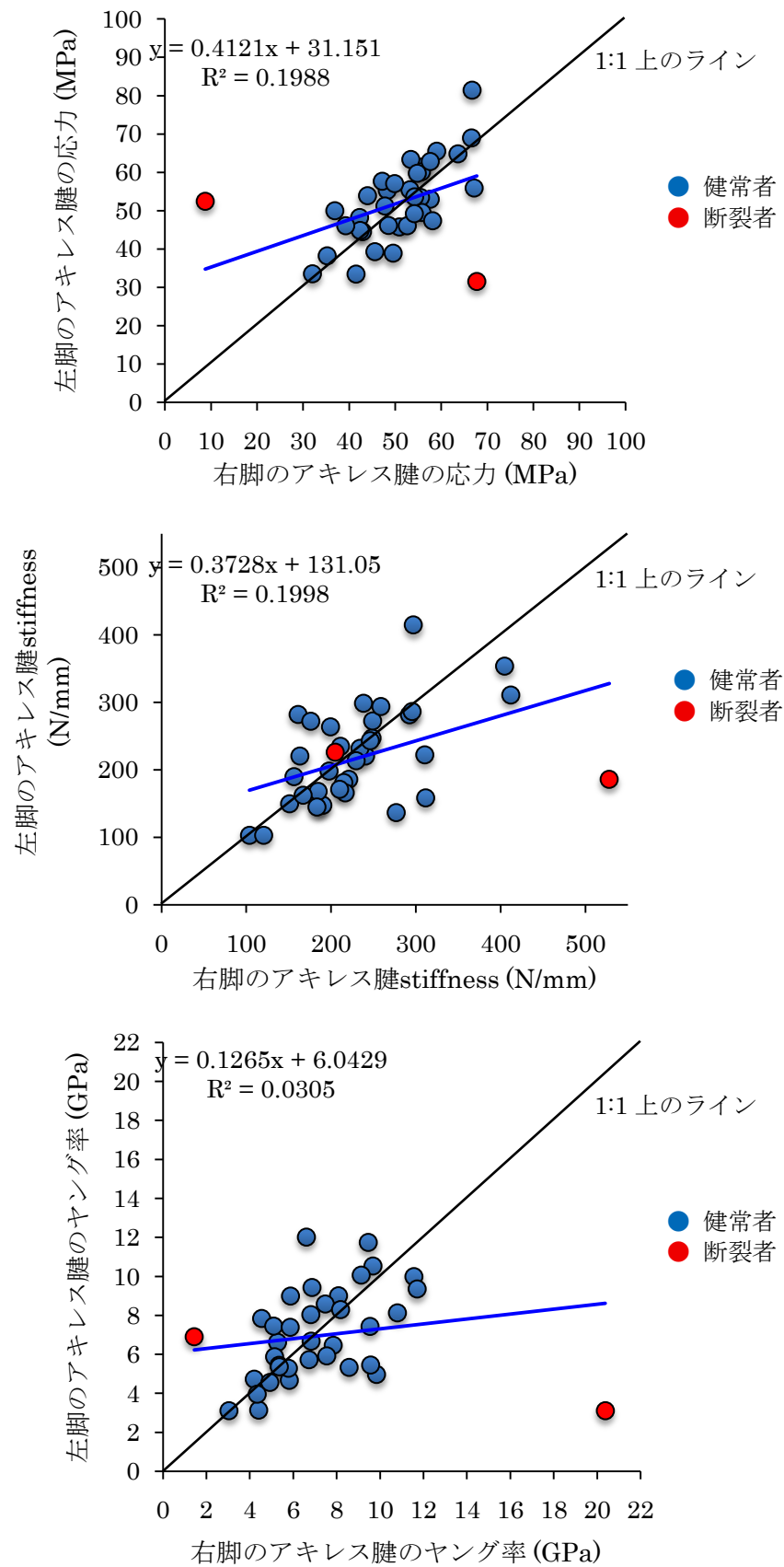


図35 アキレス腱の応力, stiffness, ヤング率の左右非

7.4.3 傷害の観点から

アキレス腱の *stiffness* に関して、アキレス腱断裂受傷者の被験者 A は右脚の *stiffness* が全体のバラつきよりもかなり離れていることがわかるが、この右脚は断裂脚ではなく健常脚だということに注目したい。これまでに左右差が認められた項目は、個人差のバラつきの範囲か、アキレス腱を断裂した脚のみにみられていた。ここから考えられることは、アキレス腱断裂受傷をした被験者 A は、個人差のバラつきや被験者全体で集束する値から逸脱した *stiffness* の値を持っていたことから、アキレス腱にかかるストレスが通常の個人差で収まる範囲の値以上に大きかったことが考えられ、そのことが原因となってアキレス腱を断裂した可能性が考えられる。

以上の結果から、左右差は横断面積よりも長さにおいて大きくバラつくことと、群内で左右差が認められた項目も個人差のバラつきの範囲であり、左右差は個人差に収まる程度でしか起きないことが考えられ、この個人差よりも大きい左右差を起こすためには外部からの刺激や、断裂等の劇的な刺激が必要であると考えられる。また、個人差よりも大きな左右差が生じた時に傷害のリスクが高まるのかもしれない。

7.5 腱適応の役割

7.5.1 傷害予防

トレーニングによって筋力が増加した場合には、筋に付随する腱のストレスが増加すると考えられるが、増加したストレスに対して腱の強度に変化がない場合には腱損傷などの傷害が生じることが考えられるため、筋力の増加に伴って腱は強度を増すことが必要になると考えられる。また腱の強度を増すためには、太くなる適応と硬くなる適応の二つが考えられ、多くのトレーニング実験では *stiffness* が増加していたことから、腱が硬くなることによって強度を増すような適応を起こしていたことが考えられる。一方、本研究ではアキレス腱の *stiffness* に群間差がなく、アキレス腱の横断面積がスポーツ競技者群で大きかったことから、腱を太くさせることで腱傷害を予防するような適応が生じていたと考えられる。また先行研究では、腱の張力と *stiffness* の値は相関関係にあることが報告されており (Arampatzis et al, 2007b)、短期的には腱の形態が変化しないことも示唆されている (Almeida-Silveira et al, 2000; Boer et al, 2007)。さらに、*stiffness* が高まることによって腱の歪みは小さくなり、腱にかかる負担が減少することが報告されている (Wren et al, 2003)。このことからトレーニングに伴う短期的なトルク向上にお

いては、**stiffness** を増加させることで腱傷害の発生を予防する適応が生じていたと考えられる。

しかし、腱を硬くしたり太くしたりすることで腱傷害を予防する適応が起こるとしても、実際には断裂などを起こすことがある。その場合には、アキレス腱横断面積が飛躍的に大きくなり、アキレス腱の横断面積を増加させることで腱にかかるストレスを減少させる適応が起こる。また、断裂受傷後に歩行やランニングなどを行えるまで回復したとしてもアキレス腱の横断面積はほとんど減少しない。このことは、断裂に伴って腱のヤング率が低下し物質的に腱は軟らかくなるが、腱が太くなることで健常脚に近い程度の **stiffness** を保っていることが原因として考えられる。筋腱複合体の緊張の程度は、身体運動のパフォーマンスにも影響するほど重要であることが報告されている(Fowles et al, 2000; Power et al, 2004; 山口ほか, 2004)。このことから、筋腱の緊張具合は身体運動に大きく関与していることが考えられ、ヤング率が低下したアキレス腱のままで歩行やランニングを行う場合には、健常脚との左右差が大きくなることも関与して断裂前と同じようには運動ができないことが考えられる。そのため、断裂受傷後にヤング率が低下した場合には、肥大した腱を維持することで健常脚と同様の **stiffness** の値を維持することができる。このことから、アキレス腱の断裂受傷後にアキレス腱横断面積が維持されることは、筋腱複合体の緊張具合を健常時と同等に保ち、身体運動の正常化に貢献していることが考えられる。

7.5.2 パフォーマンス向上

本研究の第 6 章「跳躍選手の試合前コンディショニング期の短期的変化」において、跳躍選手は試合に向けたコンディショニングによって、試合前に足関節底屈トルクの向上とそれに伴う **stiffness** の増加が確認できた。トルクの向上は直接的にパフォーマンスの向上に貢献していることが明らかであり、**stiffness** の増加はトルク向上と同様に上昇することから、パフォーマンスの向上にはトルクと **stiffness** の増加が貢献していることが考えられる。

荷重により伸張された弾性体の弾性エネルギーの大きさは、荷重の大きさと弾性体の硬さ、伸張量によって決定される。すなわち、同じ硬さの弾性体であれば荷重が大きい方がより物体の伸張量が大きくなり貯蓄される弾性エネルギーも大きくなる。また、伸張量が同じであれば、物体が硬く大きな荷重で同等の伸張量を確保された方が弾性エネルギーは高まる。また、物体が太くなることによっても硬さが増すため、物質的に硬く

なることがなくとも、太くなることで同じ効果が得られる。

そのため、筋力の向上に伴って **stiffness** が増加することは、腱の太さを増す必要がなく弾性エネルギーの向上に貢献することができる。つまり、短期的に筋力が向上した場合、それに伴って **stiffness** を増加させることは腱の弾性エネルギーの増加を引き起こし、パフォーマンスの向上に貢献すると考えられる。一方、筋力の向上を長期的に考えた場合、腱の **stiffness** が硬くなり続けることは腱のストレス増加を引き起こし、腱傷害が発生する可能性が高まると考えられることから、長期的に筋力が大きく向上する際には、**stiffness** を変更することなく腱の横断面積を大きくする必要があると考えられる。それによって、結果的に筋力向上に伴った腱の肥大が弾性エネルギーの増加を引き起こし、パフォーマンス向上に貢献すると考えられる。

第8章 結論

本研究では、陸上競技の短距離走選手・長距離走選手・跳躍選手と水泳選手およびコントロール群を対象として、トレーニングによるアキレス腱の適応能力について左右差を含めて検討することで以下の点が明らかになった。

- 1) アキレス腱の最大横断面積は、陸上競技者群と水泳群がコントロール群よりも有意に大きく、跳躍群は踏切脚が逆脚よりも有意に大きく左右差が認められた。しかし、この値を体重で除した場合は、水泳群とコントロール群に有意な差は認められなかった。
- 2) アキレス腱長は群間に有意な差が認められなかったが、長距離群のヒラメ筋腱長において、被験者全体での腓腹筋腱長には左右差が認められた。
- 3) アキレス腱の張力・伸張量・応力の値は、短距離群・跳躍群・水泳群がコントロール群よりも有意に高く、跳躍群と水泳群は長距離群よりも有意に大きな値であった。また、アキレス腱の歪みは、跳躍群と水泳群が長距離群とコントロール群よりも有意に大きな値であった。しかし、アキレス腱の硬さを示す *stiffness* とヤング率は群間にも左右にも有意な差は認められなかった。
- 4) 下腿三頭筋群の横断面積とアキレス腱最大横断面積の間には正の相関関係が認められた。しかし、水泳群のみはこの関係性が認められず、筋と腱の関係性が陸上競技者群やコントロール群と異なることが明らかとなった。また、下腿三頭筋群の横断面積とアキレス腱最大横断面積の関係性が左右で異なることがあり、筋と腱の関係性にも左右差があることが明らかとなった。
- 5) アキレス腱の横断面積は、筋の横断面積よりも体積との間において高い相関関係にあることが明らかとなった。また、筋体積の大きさに対するアキレス腱の横断面積は、短距離群がコントロール群よりも大きいことが明らかとなった。
- 6) 事例研究から、跳躍選手の試合に向けたコンディショニングによって *stiffness* が変化することが確認できた。さらに、断裂受傷したアキレス腱では、健常時では起こり得ないほど大きな腱の肥大や、応力・ヤング率の低下が顕著であることが確認できた。

以上のことから、アキレス腱はトレーニング負荷に応じて形態的・力学的に適応することが考えられ、短期的には力学的に、長期的には形態的な適応を起こし、筋肥大と腱肥大が関係していることや、負荷特性によって左右差が生じることが明らかとなった。

文献

- Abrahams, M. (1967) Mechanical behavior of tendon in vitro A preliminary report. *Med & boil Engng*, 5: 433-443.
- Albertus-Kajee, Y., Tucker, R., Derman, W., Lamberts, R. P., and Lambert, M. I. (2011) Alternative methods of normalising EMG during running. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 21(4): 579-586.
- Almeida-Silveira, M. I., Pérot, C., Pousson, M., and Goubel, F. (1994) Effects of stretch shortening cycle training on mechanical properties and fibre type transition in the rat soleus muscle. *Pflugers Arch*, 427: 289-294.
- Almeida-Silveira, M. I., Lambertz, D., Pérot, C., and Goubel, F. (2000) Changes in stiffness induced by hindlimb suspension in rat Achilles tendon. *Eur J Appl Physiol*, 81: 252-257.
- Arampatzis, A., Monte, G. D., Karamanidis, K., Morey-Klapsing, G., Stafilidis, S., and Brüggemann, G. P. (2006) Influence of the muscle-tendon unit's mechanical and morphological properties on running economy. *The Journal of Experimental Biology*, 209: 3345-3357.
- Arampatzis, A., Karamanidis, K., and Albracht, K. (2007a) Adaptational responses of the human Achilles tendon by modulation of the applied cyclic strain magnitude. *The Journal of Experimental Biology*, 210: 2743-2753.
- Arampatzis, A., Karamanidis, K., Morey-Klapsing, G., Monte, G. D., and Stafilidis, S. (2007b) Mechanical properties of the triceps surae tendon and aponeurosis in relation to intensity of sport activity. *Journal of Biomechanics*, 40: 1946-1952.
- Arampatzis, A., Peper, A., Bierbaum, S., and Albracht, K. (2010) Plasticity of human Achilles tendon mechanical and morphological properties in response to cyclic strain. *Journal of Biomechanics*, 43: 3073-3079.
- Barone, R., Bellafiore, M., Leonardi, V., and Zummo, G. (2009) Structural analysis of rat patellar tendon in response to resistance and endurance training. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 19: 782-789.
- Bobbert, M. F., Huijing, P. A., and Ingen Schenau, G. J. V. (1986) An estimation power output and work done by the human triceps surae muscle-tendon complex in jumping. *J. Biomechanics*, 19(11): 899-906.

- Boer, M. D., Maganaris, C. N., Seynnes, O. R., Rennie, M. J., and Narici, M. V. (2007) Time course of muscular, neural and tendinous adaptations to 23 day unilateral lower-limb suspension in young men. *J Physiol*, 583(3): 1079-1091.
- Boer, B., Swiestra, B. A., and Verheyen, C. C. P. M. (2009) Neglected Achilles tendon rupture with central insertional plantaris tendon hypertrophy, two cases. *Strat Traum Limb Recon*, 4: 41-43.
- Bojsen-Møller, J., Magnusson, S. P., Rasmussen, L. R., Kjaer, M., and Aagaard, P. (2005) Muscle performance during maximal isometric and dynamic contractions is influenced by the stiffness of the tendinous structures. *J Appl Physiol*, 99: 986-994.
- Cavagna, G. A., and Citterio, G. (1974) Effect of stretching on the elastic characteristics and contractile component of the frog striated muscle. *J. Physiol*, 239: 1-14.
- Couppé, C., Kongsgaard, M., Aagaard, P., Hansen, P., Bojsen-Møller, J., Kjaer, M., and Magnusson, S. P. (2008) Habitual loading results in tendon hypertrophy and increased stiffness of the human patellar tendon. *Journal of Applied Physiology*, 105: 805-810.
- 江川陽介・鳥居 俊・中野由梨・中西拓慎・久保田潤・中村千秋・福林 徹 (2008) 伸長・短縮サイクルを利用した高強度運動直後のアキレス腱組織の力学的特性. *臨床スポーツ医学*, 25(2): 181-187.
- Eliasson, P., Fahlgren, A., Pasternak, B., and Aspenberg, P. (2007) Unloaded rat Achilles tendons continue to grow, but lose viscoelasticity. *J Appl Physiol*, 103: 459-463.
- Ellenbecker, T. S., Roetert, E.P., and Riewald, S. (2006) Isokinetic profile of wrist and forearm strength in elite female junior tennis players. *British Journal of Sports Medicine*, 40(5): 411-414.
- Farris, D. J., Trewartha, G., and McGuigan, M. P. (2011) The effects of a 30-min run on the mechanics of the human Achilles tendon. *Eur J Appl Physiol*, 4.
- Fouré, A., Nordez, A., and Cornu, C. (2010) Plyometric training effects on Achilles tendon stiffness and dissipative properties. *Journal of Applied Physiology*, 109: 549-554.

- Fowles, J. R., Sale, D.G., and MacDougall, J. D. (2000) Reduced strength after passive stretch of the human planterflexors. *J Appl Physiol*, 89: 1179-1188.
- 深田智紀・南條 峻・中川博文 (2010) 利き手利き足の違いによる立位時の足底圧分布解析. 年次大会講演論文集: JSME annual meeting, 1: 273-274.
- Fukunaga, T., Miyatani, M., Tachi, M., Kouzaki, M., Kawakami, Y., and Kanehisa, H. (2001) Muscle volume is a major determinant of joint torque in humans. *Acta Physiol Scand*, 172: 249-255.
- 藤井菜穂子・浦川陽順・大藪誠士・滝田有香・並木洋之・勝平純司・谷 浩明 (2004) 健康若年者における下肢の機能的左右差に関する研究. *The Journal of Japanese Physical Therapy Association*, 31(2): 399.
- Fujikawa, A., Kyoto, Y., Kawaguchi, M., Naoi, Y., and Uegawa, Y. (2007) Achilles tendon after percutaneous surgical repair, serial MRI observation of uncomplicated healing. *AJR Am J Roentgenol*, 185(5): 1169-1174.
- Gadeberg, P., Andersen, H., and Jakobsen, J. (1999) Volume of ankle dorsiflexors and plantar flexors determined with stereological techniques. *Journal of Applied Physiology*, 86(5): 1670-1675.
- Giddings, V. L., Beaupré, G. S., Whalen, R. T., and Carter, D. R. (2000) Calcaneal loading during walking and running. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 32(3): 627-634.
- Hansen, P., Aagaard, P., Kjaer, M., Larsson, B., and Magnusson, S. P. (2003) Effect of habitual running on human Achilles tendon load-deformation properties and cross-sectional area. *J Appl Physiol*, 95: 2375-2380.
- Haut, T. L., and Haut, R. C. (1997) The state of tissue hydration determines the strain-rate-sensitive stiffness of human patellar tendon. *J Biomechanics*, 30(1): 79-81.
- Henneman, E., Somjen, G., and Carpenter, D. O. (1965) Functional significance of cell size in spinal motoneurons. *Journal of Neurophysiol*, 28: 560-580.
- Herbert, R. D., and Crosbie, J. (1997) Rest length and compliance of non-immobilised and immobilised rabbit soleus muscle and tendon. *Eur J Appl Physiol*, 76: 472-479.

- 池袋敏博・久保啓太郎・岡田純一・矢田秀昭・角田直也 (2011) 重量挙げ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. 体力科学, 60(4): 401-411.
- 尹 聖鎮・田内健二・船渡和男・松尾彰文 (2003) 30m ダッシュにおける疾走速度と各種体力要因との関係. 体力科学, 52(6): 738.
- Ishikawa, M., and Komi, P. V. (2007) The role of the stretch reflex in the gastrocnemius muscle during human locomotion at various speeds. Journal of Applied Physiology, 103(12): 1030-1036.
- 岩竹 淳・鈴木朋美・中村夏実・小田宏行・永澤 健・岩壁達男 (2002) 陸上競技選手のリバウンドジャンプにおける発揮パワーとスプリントパフォーマンスとの関係. 体育学研究, 47: 253-261.
- 岩沼聡一郎・福永哲夫・川上泰雄 (2007) 下腿三頭筋の体積とアキレス腱の横断面積の関係. 東京体育学研究, 2007 年度報告: 23-25.
- 勝田 茂・秋間 広・神原奈津紀・高橋英幸・図子浩二・都澤凡夫 (1997) バレーボール選手と非鍛錬者におけるアキレス腱の形態的特性とジャンプパフォーマンスとの関係. 筑波大学体育科学系紀要, 20: 159-166.
- Karamanidis, K., and Arampatzis, A. (2005) Mechanical and morphological properties of different muscle-tendon units in the lower extremity and running mechanics - effect of ageing and physical activity. The Journal of Experimental Biology, 208, 3907-3923.
- 加藤忠幸・加藤栄一・岩越康真・日比野妙子 (1988) 左下肢支持性優位について. 理学療法学, 15(Supplement): 90.
- Kawakami, Y., and Fukunaga, T. (1993) Muscle-fiber pennation angles are greater in hypertrophied than in normal muscles. J Appl Physiol, 74(6): 2740-2744.
- Kearns, C. F., Brechue, W. F., and Abe, T. (1998) Training-induced changes in fascicle length: a brief review. Advances in exercise and sports physiology, 4(3):77-81.
- Ker, R. F. (1981) Dynamic tensile properties of the plantaris tendon of sheep (Ovisaries). J Exp Biol, 93: 283-302.
- 橘田正人・船橋建司 (1999) 静的立位姿勢と利き足の関係について: 健常者における重心動揺からの考察. 理学療法学, 26(spple1): 2.
- 小林 海・光川眞壽・矢内利政・福永哲夫・金久博昭・川上泰雄 (2009) 陸上短距離選

- 手の100-mスプリントタイムと外側広筋腱の力学的特性との関係. 東京体育学研究, 1: 87-91.
- Kongsgaard, M., Reitelseder, S., Pedersen, T. G., Holm, L., Aagaard, P., Kjaer, M., and Magnusson, S. P. (2007) Region specific patellar tendon hypertrophy in humans following resistance training. *Acta Physiologica*, 191(2): 111–121.
- 久保啓太郎・川上泰雄・福永哲夫 (1998) 短距離選手における腱の弾性特性. 日本体育学会号, 46: 261.
- Kubo, K., Kawakami Y., and Fukunaga T. (1999) Influence of elastic properties of tendon structures on jump performance in human. *Journal of Applied Physiology*, 87: 2090-2096.
- Kubo, K., Kanehisa, H., Kawakami, Y., and Fukunaga T. (2000) Elasticity of tendon structures of the lower limbs in sprinters. *Acta Physiol Scand*, 168: 327-335.
- Kubo, K., Kanehisa, K., Ito, M., and Fukunaga, T. (2001a) Effects of isometric training on the elasticity of human tendon structures in vivo. *J Appl Physiol*, 91: 26-32.
- Kubo, K., Kanehisa, H., and Fukunaga, T. (2001b) Effects of different duration isometric contractions on tendon elasticity in human quadriceps muscles. *Journal of Physiology*, 536(2): 649-655.
- Kubo, K., Kanehisa, H., and Fukunaga, T. (2002) Effects of resistance and stretching training programmes on the viscoelastic properties of human tendon structures in vivo. *Journal of Physiology*, 538(1): 219-226.
- Kubo, K., Akima, H., Ushiyama, J., Tabata I., Fukuoka, H., Kanehisa, H., and Fukunaga, T. (2004) Effects of resistance training during bed rest on the viscoelastic properties of tendon structures in the lower limb. *Scand J Med Sci Sports*, 14: 296-302.
- Kubo, K., Ikebukuro, T., Yata, H., Tsunoda, N., and Kanehisa, H. (2010) Effects of Training on Muscle and Tendon in Knee Extensors and Plantar Flexors in Vivo. *Journal of Applied Biomechanics*, 26: 316-323.
- Kyröläinen, H., Avela, J., and Komi, P. V. (2005) Changes in muscle activity with increasing running speed. *Journal of Sports Sciences*, 23(10): 1101-1109.

- Legerlotz, K., Schjerling, P., Langbreg, H., Brüggemann, G. P., and Niehff, A. (2007) The effect running, strength, and vibration strength training on the mechanical, morphological, and biochemical properties of the Achilles tendon in rats. *J Appl Physiol*, 102: 564-572.
- Loren, G. J., and Lieber, R. L. (1995) Tendon biomechanical properties enhance human wrist muscle specialization. *J Biomechanics*. 28(7): 791-799.
- Magnusson, S. P., and Kjaer, M. (2003) Region-specific differences in Achilles tendon cross-sectional area in runners and non-runners. *European Journal of Applied Physiology*, 90(5-6): 549-553.
- Makaruk, H., and Sacewicz, T. (2011) The effect of drop height and body mass on drop jump intensity. *Biology of Sport*, 28(1): 63-67.
- Michna, H., and Hartmann, G. (1989) Adaptation of tendon collagen to exercise. *International Orthopaedics*, 13(3): 161-165.
- Muraoka, T., Muramatsu, T., Kanosue, K., Fukunaga, T., and Kanehisa, H. (2005) Influence of long-term kendo training on the geometric and mechanical properties of the Achilles tendon. *Journal of Sport and Health Science*, 3: 303-310.
- 中川喜直・佐藤智明・福田芳郎・広田公一 (1988) 有氣的，無氣的トレーニングがラット腱のコラーゲン線維に与える影響. *体力科学*, 37: 100-106.
- Neptune, R. R., and Sasaki, K. (2005) Ankle plantar flexor force production is an important determinant of the preferred walk-to-run transition speed. *The Journal of Experimental Biology*, 208: 799-808.
- Noyes, F. R., Butler, D. L., Grood, E. S., Zernicke, R. F., Hefzy, M. S. (1984) Biomechanical analysis of human ligament grafts used in knee-ligament repairs and reconstructions. *The Journal of Bone and Joint Surgery. American volume*, 66(3): 344-52.
- 大城敏裕・田口正公・田場昭一郎・長井 健・平沼隆士 (2001) 水泳選手における下肢筋力と足底屈が泳パワー・泳速度に及ぼす影響. *日本体育学会大会号*, (52): 534.
- 岡村 茂・前原勝矢・星野公夫・岩淵忠敬・中島宣行・飯島正博 (1990) ラテラテリイからみた水泳ターンの分析(1): 競泳ターンの左右方向と利き手・利き足との関連性について. *日本体育学会大会号*, (41A): 202.

- 岡村 茂・前原勝矢 (1992) ラテラテリィからみた水泳ターンの分析(1): 競泳ターンの左右方向と利き手・利き足の関係. 日本体育学会大会号, (43A): 196.
- Paavolainen, L., Häkkinen, K., Härmäläinen, I., Nummela, A., and Rusko, H. (1999) Explosive-strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power. *J Appl Physiol*, 86: 1527-1533.
- Power, K., Behm, D., Cahili, F., Carroll, M., and Young, W. (2004) An acute bout of static stretching: effects on force and jumping performance. *Med Sci Sports Exerc*, 36(8): 1389-1396.
- 村松正隆・星川佳広・飯田朝美・井伊希美・中嶋由晴 (2010) 高校生スポーツ選手の体幹筋群の筋サイズー性差と競技種目差の検討一. *体育学研究*, 55(2): 577-590.
- Rack, P. M. H., and Ross, H. F. (1984) The tendon of flexor pollicis longus, its effects on the muscular control of force and position at the human thumb. *J Physiol*, 351: 99-110.
- Reeves, N. D., Maganaris, C. N., and Narici, M. V. (2003a) Effect of strength training on human patella tendon mechanical properties of older individuals. *J Physiol*, 548(3): 971-981.
- Reeves, N. D., Narici, M. V., and Maganaris, C. N. (2003b) Strength training alters the viscoelastic properties of tendons in elderly humans. *Muscle Nerve*, 28(1): 74-81.
- Reeves, N. D., Maganaris, C. N., Ferretti, G., Narici, M. V. (2005) Influence of 90-day simulated microgravity on human tendon mechanical properties and the effect of resistive. *J Appl Physiol*, 98: 2278-2286.
- Rigby, B. J., Hirai, N., Spikes, J. D., and Eyring, H. (1959) The mechanical properties of rat tail tendon. *J Gen Physiol*, 43(2): 265-283.
- Rosager, S., Aagaard, P., Dyhre-Poulsen, P., Neergaard, K., Kjaer, M., and Magnusson, S. P. (2002) Load-displacement properties of the human triceps surae aponeurosis and tendon in runners and non-runners. *Scandinavian Journal of Medicine & Science Sports*, 12(2): 90-98.
- Rugg, S. G., Gregor, R. J., Mandelbaum, B. R., and Chiu, L. (1990) In vivo moment arm calculations at the ankle using magnetic resonance imaging (MRI). *J Biomech*,

23(5): 495-501.

沢井史穂・実松寛之・金久博昭・角田直也・福永哲夫 (2006) 基本的日常生活動作中の体幹および下肢の筋活動水準の男女差. 体力科学, 55(2): 247-258.

Seynnes, O. R., Erskine, R. M., Maganaris, C. N., Longo, S., Simoneau, E. M., Grosset, J. F., and Narici, M.V. (2009) Training-induced changes in structural and mechanical properties of the patellar tendon are related to muscle hypertrophy but not to strength gains. Journal of Applied Physiology, 107(2): 523-530.

Silva, R. T., Gracitelli, G. C., Saccol, M. F., Souza Laurio, C. F., Silva, A. C., and Braga-Silva, J. L. (2006) Shoulder strength profile in elite junior tennis players: horizontal adduction and abduction isokinetic evaluation. British Journal of Sports Medicine, 40(6): 513-517.

Sommer, H. M. (1987) The biomechanical and metabolic effects of a running regime on the Achilles tendon in the rat. International Orthopaedics, 11(1): 71-75.

Stafilidis, S., and Arampatzis, A. (2007) Muscle-tendon unit mechanical and morphological properties and sprint performance. Journal of Sports Science, 25(9): 1035-1046.

杉本誠二・中島 求・野村武男 (2007) シミュレーション解析による足関節底屈角度増加が水中ドルフィンキックのパフォーマンスに与える影響. ジョイント・シンポジウム講演論文集: symposium on sports engineering: symposium on human dynamics 2007: 194-199.

武田誠司・石井泰光・山本正嘉・図子浩二 (2010) 長距離ランナーにおけるランニングと連続跳躍による経済性の関係. 体力科学, 59: 107-118.

寺野真明・中務亜紀・岩川幹生・下川敏雄・後藤昌司 (2003) 身体の骨格歪み状態の分類に関する検討. The Behaviormetric Society of Japan, 31: 424-425.

Vanrenterghem, J., Lees, A., Lenoir, M., Aerts, P., and Clercq, D. D. (2004) Performing the vertical jump, movement adaptations for submaximal jumping. Human Movement Science, 22: 713-727.

Walmsley, B., Hodgson, J. A., and Burke, R. E. (1978) Forces produced by medial gastrocnemius and soleus muscles during locomotion in freely moving cats. Journal of Neurophysiology, 41(5): 1203-1216.

Wren, T. A.L., Lindsey, D. P., Beaupre, G. S., and Carter, D. R. (2003) Effects of creep and cyclic loading on the mechanical properties and failure of human Achilles tendons. *Annals Biomedical Engineering*, 31: 710-717.

山口太一・石井好二郎・山中正紀・安田和則 (2004) 静的ストレッチングは等張性筋活動時の発揮パワーを低下させるか？. *体力科学*, 53(6): 819.

図子浩二・平田文夫 (1997) 下腿の神経・筋・腱系の機能からみた長距離競技者のコンディショニング. *体力科学* 46(6): 743.

図子浩二 (2005) スポーツアスリートにおけるばねに関する理論とその可能性: 総説. *陸上競技研究*, 60(1): 2-17.

図子浩二 (2006) 跳躍動作とその指導・トレーニングープライオメトリックトレーニングに注目して. *トレーニング科学*, 18(4): 297-305.

謝辞

本研究及び本論文の作成を進めるにあたり，多大なご指導を頂きました伊坂忠夫教授，栗原俊之助手に心より感謝致します．また本研究に対し，多くのご助言を頂きました立命館大学スポーツ健康科学部の吉岡伸輔助教，大塚光雄助手，大阪体育大学(学術振興会所属)の國部雅大氏，さらには日々の研究活動や事務処理などにおいて多くのお世話を頂いた秘書の奥村悦子氏，ご多忙にも関わらず快く実験を引き受けてくださった被験者の皆様，ならびにスポーツ健康科学部の伊坂研究室の方々に深く感謝いたします．