

2008 年度 修士論文

高強度で間欠的な走運動が
膝蓋腱と外側広筋・腓腹筋内側頭筋の腱組織の
弾性特性に与える影響

The effect of high-intensity intermittent running
on the elastic properties of the patellar tendon
and tendons of the vastus lateralis and
gastrocnemius muscles

早稲田大学大学院スポーツ科学研究科

身体運動科学研究領域

5007A039-3

田村恵彦

Tamura Yoshihiko

研究指導教員： 矢内 利政 教授

目次

1. 緒論	
1-1. 序	1
1-2. 研究小史	2
1-2-1. 腱組織の弾性特性に関する研究	
1-2-2. 反復的,または持続的な力発揮が腱組織の弾性特性に与える 影響	
1-2-3. 多関節動作時の筋収縮様式と,下肢の腱組織にかかる腱張力	
1-2-4. 多関節動作が腱の弾性特性に与える影響	
1-3. 本研究の目的	8
2. 方法	9
2-1. 被験者	
2-2. プロトコル	
2-3. 測定項目および測定方法	
2-4. 分析方法	
3. 結果	22
4. 論議	33
5. 要約	42
参考文献	
謝辞	

高強度で間欠的な走運動が

膝蓋腱と外側広筋・腓腹筋内側頭筋の腱組織の弾性特性に与える影響

スポーツ科学研究科

5007A039-3 田村恵彦

研究指導教授： 矢内利政 教授

緒言

腱組織の弾性特性は、反復的、または持続的な等尺性単関節筋力発揮後に、一過的に変化することが報告されている (Kubo et al., 2001a, b, 2002,). しかし、これらの報告は、単関節で単一の筋収縮様式での力発揮を反復した作業課題前後で比較したものである。一方で、一般的なスポーツで用いられる走運動は、いくつかの筋収縮様式が複合的に組み合わせられて形成されている (Ishikawa et al., 2003). さらに、腱組織にかかる張力の大きさや、その時間は、これまで検討されてきた単関節動作時のそれと異なる (Komi et al., 1988). よって、腱組織の弾性特性の可塑性をスポーツと関連させるためには、走運動などの実際のスポーツで行われる運動を作業課題として検証する必要がある。

走運動が腱組織に及ぼす長期的な影響を検討した報告として、陸上短距離選手の外側広筋の腱組織は、一般人のそれと比べて伸展性が高く、一方で腓腹筋内側頭の腱組織の伸展性はその逆の傾向であることが報告されている (Kubo et al., 1999, Arampatzis et al., 2007). これらの結果は、高強度な走運動によって腱組織が一過的に変化し、その変化が長期的に繰り返されたことによって腱組織の弾性特性が変化したものとも考えられる。しかし、走運動が腱組織の弾性特性に及ぼす一過的な影響については明らかにされていない。さらに、大腿部と下腿部で腱組織の伸展性の特徴が逆の傾向になるという上記の報告は、高強度の走運動が大腿部と下腿部の腱組織に異なる影響を与える可能性があることを示唆している。しかし、反復的な走運動がそれぞれの腱組織に与える影響の差異についても、まだ明らかにされていない。そこで、本研究は、高強度で反復的な走運動が、膝蓋腱、外側広筋および腓腹筋内側頭の腱組織の弾性特性に与える影響を明らかにすることを目的とする。

方法

被検者は、健康な成人男性 11 名 (24.7 ± 3.2 歳, 174.2 ± 5.7 cm, 66.6 ± 5.4 kg, 平均値 ± 標準偏差) であった。本実験は、事前測定 (Pre 測定), 作業課題および事後測定 (Post 測定) の順で行った。Pre 測定として、膝伸展 (KE) と足関節底屈 (PF) の ramp 力発揮 (5 秒間かけて最大努力までトルク発揮し、1 秒間維持した後、5 秒間かけて安静状態に戻すランブ

状のトルク発揮) を測定した。その際、超音波装置 (SSD6500, SSD5500, ALOKA) の B モード法を用いて、KE ramp 力発揮時には、膝蓋腱、外側広筋の腱組織 (VL 腱) の縦断画像を、PF ramp 力発揮時には腓腹筋内側頭の腱組織 (MG 腱) の縦断画像をそれぞれ取得した。また、KE ramp 力発揮時に右脚大腿部 (外側広筋 (VL), 内側広筋 (VM), 大腿直筋 (RF), 大腿二頭筋 (BF)), PF ramp 力発揮時に右脚下腿部 (腓腹筋内側頭 (MG), 腓腹筋外側頭 (LG), ヒラメ筋 (SOL), 前脛骨筋 (TA)) の筋放電量 (EMG) を測定した。Pre 測定終了後、入念なウォーミングアップを実施し、十分な休息を取った後に、作業課題として 50m を最大努力で走る試行を計 20 本実施した。試行間の休息は 90 秒とした。作業課題終了後、16 分以内に Post 測定を完了させた。Post 測定は、Pre 測定で行った試行をすべて同様に行った。なお、Pre, Post 測定での膝関節および足関節トルク測定の順序は、被検者ごとランダムに実施した。本研究では、Pre, Post 測定で得られた超音波画像から、力発揮に伴う膝蓋腱、VL 腱、MG 腱の伸長を算出し、それぞれの伸長-トルク関係を導出した。また、Pre, Post 測定それぞれで、安静時の膝蓋腱長、VL・MG の筋厚、筋束長、羽状角を算出した。それぞれの腱組織の伸長-力関係において、50%MVC-70%MVC で最小乗法を用いて直線回帰 (図) を行い、これにより得られた直線の傾きを stiffness (N/mm) とした。

結果

膝蓋腱、VL 腱、MG 腱の伸長-トルク関係と stiffness は、いずれも Pre 測定と Post 測定との間に、有意な差は認められなかった。KE ramp 力発揮中の大腿筋群の EMG、PF ramp 力発揮中の下腿筋群の EMG は、いずれも Pre 測定と Post 測定で有意な差は認められなかった。安静時の膝蓋腱長、VL・MG の筋厚、筋束長、羽状角は、いずれの項目も Pre 測定と Post 測定で有意な差は認められなかった。

議論

本研究では、高強度で間欠的な走運動が膝蓋腱、VL および MG の腱組織の弾性特性に与える影響を検討した。その結果、いずれの腱組織でも、Pre 測定、Post 測定で伸長-トルク関係、stiffness (N/mm) に有意な差は認められなかった。この結果の要因について、a) 作業課題の負荷強度について、b) 腱

組織のクリープの有無について、c) 大腿部・下腿部の筋群の貢献度について、の3つの観点から考察する。

a) 作業課題の負荷強度について

Kubo et al. (2005, 2007)は、腱組織の弾性特性に影響を与える因子として、作業課題中に腱組織にかかる力の力積を挙げている。よって、本研究の作業課題の負荷強度を、作業課題中に下肢の腱組織にかかる力の力積として次の式を用いて算出した。腱組織にかかる力の力積=ランニング動作中の腱張力(N)×接地時間(s)×右足歩数×試行本数。

その結果、本研究の作業課題中に膝蓋腱とVL腱にかかる力の力積は、それぞれ72,080(N・s)、115,920(N・s)と推定した(それぞれの腱組織にかかる腱張力はScott et al., 1990より参照)。一方で、VL腱の弾性特性を変化させたKubo et al. (2001b)の作業課題が膝蓋腱とVL腱に加えた力の力積は、それぞれ約492,170(N・s)、830,188(N・s)と推定できる。また、MG腱において、本研究の作業課題がMG腱に加えた力の力積が144,000(N・s)(MG腱にかかる腱張力はKomi et al., 1988より参照)であるのに対して、MG腱の弾性特性を変化させたKubo et al. (2002)のそれは、約221,957(N・s)と推定できる。これらのことから、本研究の作業課題中が膝蓋腱、VL腱、MG腱に加えた力の力積は、Kubo et al. (2001b, 2005)の報告よりも小さいことが考えられる。つまり、本研究の作業課題は、下肢の腱組織の弾性特性を変化させる程度の負荷強度ではなかったことを示唆する。

b) 腱組織のクリープの有無について

腱組織にクリープが起こると、腱組織の初期長が変化する(Maganaris et al., 2002)ため、もし本研究の作業課題後において腱組織にクリープが生じていたとすると、作業課題前後の腱組織の弾性特性の変化を正しく検証できていない可能性がある。しかし、本研究では、作業課題前後で安静時の膝蓋腱、VL腱、MG腱の長さに有意な差がなかったため、クリープは起こっていないと考えられる。つまり、本研究において作業課題前後の腱組織の弾性特性の検証に当たり、腱組織のクリープによる影響は無視できると考えられる。

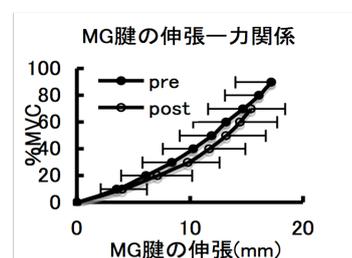
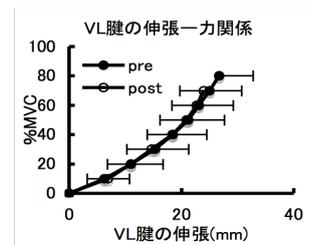
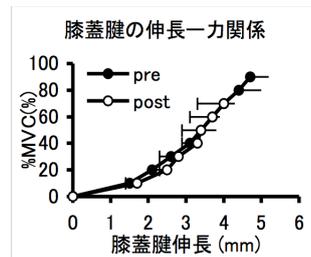
c) 大腿部・下腿部の筋群の貢献度について

本研究では、作業課題前後の膝関節伸展・足関節底屈 ramp 力発揮中の大腿・下腿部の各筋のEMGの変化に有意な差は認められなかった。この結果は、ramp 力発揮時の下肢筋群の筋活動レベルがPre測定とPost測定で変化しなかったことを示唆している。つまり、作業課題前後で下肢の協働筋群

の貢献度は変化していないことが考えられ、本研究における腱組織の弾性特性の検証に当たり、協働筋群の貢献度による影響は無視できると考えられる。

以上のことから、本研究の作業課題前後で膝蓋腱、VL腱、MG腱の弾性特性が変化しなかった主たる要因として、作業課題中に腱組織に与える力の力積が小さかったことが示唆された。これは、力が大きくとも腱組織にかかる力の力積が小さければ、腱組織の弾性特性に影響は与えないというKubo et al (2007)を支持する。また、本研究の作業課題が腱組織に加えた力の力積は、先行研究でのそれよりも低いことから、人間が実施可能な範囲の高強度で連続的なスプリント走が腱組織の弾性特性に与える影響は小さいと考えられる。よって、陸上短距離選手の腱組織の弾性特性が一般人と異なる(Kubo et al., 2001, Arampatzis et al., 2007)要因は、腱組織が一過性的な変化を繰り返しておこった適応ではなく、別の要因である可能性が高い。一方、陸上短距離選手の下肢の腱組織の伸展性が部位によって異なる点について、本研究の結果から、反復的な走運動がそれぞれの腱組織に与える影響の差異を明らかにすることはできなかった。

本研究では、50mを最大努力で走る試行を20回繰り返した作業課題前後で、膝蓋腱、外側広筋および腓腹筋内側頭の腱組織の弾性特性は変化しないことが明らかとなった。



目次

1. 緒論	
1-1. 序	1
1-2. 研究小史	2
1-2-1. 腱組織の弾性特性に関する研究	
1-2-2. 反復的,または持続的な力発揮が腱組織の弾性特性に与える 影響	
1-2-3. 多関節動作時の筋収縮様式と,下肢の腱組織にかかる腱張力	
1-2-4. 多関節動作が腱の弾性特性に与える影響	
1-3. 本研究の目的	8
2. 方法	9
2-1. 被験者	
2-2. プロトコル	
2-3. 測定項目および測定方法	
2-4. 分析方法	
3. 結果	22
4. 論議	33
5. 要約	42
参考文献	
謝辞	

緒言

1-1 序

腱組織は弾性体であり (Hoffer et al., 1989), 筋で発揮された張力を関節・骨に伝達する。また, 腱組織は伸長-短縮サイクル動作 (SSC 動作) を含む歩行や走運動において, 伸長, 短縮し, 弾性エネルギーの蓄積と解放 (Huijing, 1992) を担うことで筋腱複合体 (MTC) の機械的仕事やパワーの増加に貢献する (Kubo et al., 2000, Ishikawa et al., 2003). このことから, 腱組織の弾性特性は走運動のパフォーマンスに影響を与える (Kubo et al., 2000, Stafilidis and Arampatzis., 2007). よって, 連続的な走運動を実施するスポーツにおいて, 走運動によって腱組織の弾性特性が変化するか否かを明らかにすることは, 競技のパフォーマンスの向上やコンディショニングを考える面でも非常に重要である。

走運動が腱組織の弾性特性に及ぼす影響を検討した報告として, 陸上短距離選手の外側広筋の腱組織は, 一般人のそれと比べて伸展性が高く, 一方で腓腹筋内側頭の腱組織の伸展性はその逆であることが報告されている (Kubo et al., 1999, Arampatzis et al., 2007). これらの結果が, 高強度の走トレーニングによる腱組織の長期的な適応と推察した場合, 高強度な走運動によって腱組織の弾性特性が一過的に変化し, その変化が長期的に繰り返されたことによって腱組織の弾性特性が変化したものと考えられる。しかし, 走運動が腱組織の弾性特性に及ぼす一過的な影響については明らかにされていない。

腱組織の弾性特性の一過性の変化を検証したものとして, 腱組織の弾性特性は, 反復的, または持続的な等尺性単関節筋力発揮後に, 一過的に変化することが報告されている (Kubo et al., 2001a, b, 2002,). しかし, これらの報告は, 単関節で単一の筋収縮様式での力発揮を反復した作業課題前後で比較したものである。一方で, 走運動は, いくつかの筋収縮様式が複合的に組み合わせられて形成されている (馬場ら., 2000, Ishikawa et a., 2003). さらに, 腱組織にかかる張力の大きさや, その時間は, これま

で検討されてきた単関節動作時のそれと異なる(Komi et al., 1988, Mero et al., 1982).
よって, 上記の知見(Kubo et al., 2001a, b, 2002,)を走運動と関連させるためには, 実際の走運動を作業課題として検証する必要がある.

そこで, 本研究は, 高強度で反復的な走運動が, 膝蓋腱, 外側広筋および腓腹筋内側頭の腱組織の弾性特性に与える影響を明らかにすることを目的とする.

1-2 研究小史

1) 腱組織の弾性特性に関する研究

超音波法の確立により, ヒト生体内において身体運動中の腱組織の振る舞いを測定できるようになった. Fukunaga et al. (2001)は, 3Km/hの速さで歩行する被検者の腓腹筋内側頭の腱組織の動態を, 超音波法を用いて測定した. その結果, 腱組織は歩行中に伸長, 短縮を繰り返していることを示し, さらに, 腱組織は弾性エネルギーの蓄積と放出を担っていることが明らかになった. また, Ishikawa et al., (2003)は, 超音波法を用いて, 歩行と走運動中の腓腹筋内側頭の腱組織の動態を測定した. その結果, 走運動中の腱組織の方が, 歩行中と比較してより伸長されることを示し, 腱組織の役割としては Fukunaga et al. (2001)と同様の見解を示した. Kubo et al. (2000)は, 足関節の連続背底屈動作の底屈局面における腓腹筋 MTC の機械的仕事に対する腱組織の貢献を定量し, MTCの機械的仕事のうち42.5%を腱組織が担うことを報告している. これらの報告は, 伸長-短縮サイクル動作(SSC動作)を含む走・跳躍運動において, 腱組織が弾性体として振る舞い, MTCの機械的仕事やパワー発揮に大きく貢献することを示している. よって, 腱組織の弾性特性を検討することは, MTCの機械的仕事やパワー発揮を考える上で非常に重要である.

腱組織の弾性特性を定量した研究がいくつか為されてきた(Kubo et al., 1999, 2002). Kubo et al. (1999)は, 膝伸展筋力発揮中の外側広筋の腱組織の弾性特性を検証した. その結果, 最大随意筋力発揮(MVC)に対して50%MVC以上でstiffness(N/mm)が一定

になることを示し、それを外側広筋の腱組織の stiffness とした。Kubo et al. (2002) は、足関節底屈筋力発揮中の腓腹筋内側頭の腱組織の弾性特性を検証し、腓腹筋内側頭の腱組織も外側広筋の腱組織 (Kubo et al., 1999) と同様の結果を得た事を明らかにした。さらに、腱組織の弾性特性と身体運動のパフォーマンスとの関連を検討した報告として、Kubo (1999) は、外側広筋の腱組織の stiffness の値が高い群と低い群に分け、それぞれの群で垂直跳びのパフォーマンス及び、その反動効果を比較した。その結果、両群のジャンプ高に差はないものの、stiffness が低い群の方は反動効果が高いことを示した。また、Stafilidis&Arampatzis (2007) は、短距離選手を 100m スプリントタイム(s)の速い fast グループと遅い slow グループに分け、外側広筋の腱組織の力学的特性を比較した。その結果、fast 群の腱組織は高い伸展性を示すと共に、腱組織の伸展性が高いほど 100m スプリントタイムが良いことを示した。

以上のように、身体運動の中で腱組織は弾性体として振る舞い、MTC の機械的工作やパワー発揮に大きく貢献することを示された。また、腱組織の弾性特性が個人間で異なり、それは身体運動のパフォーマンスに影響を及ぼすことが明らかになっている。これらのことから、腱組織の弾性特性を把握することの重要性が示されたと共に、2000 年以降、腱組織の弾性特性の可塑性に関する調査が数多くなされるようになった。

2) 走運動が腱の弾性特性に与える影響

Kubo et al. (1999) は、定期的に高強度の走トレーニングを実施している陸上短距離選手と一般人の外側広筋と腓腹筋内側頭の腱組織の伸展性を比較し、陸上短距離選手の外側広筋の腱組織は一般人のそれと比べて伸展性が高いことを示した。逆に、陸上長距離選手の外側広筋の腱組織は、一般人と比較して伸展性が低い傾向となることを報告している (Kubo et al., 2000a)。一方で、Arampatzis et al. (2007) は、スポーツ活動が腱組織の弾性特性に与える影響について検討し、陸上短距離選手の外側広筋の腱組織は、陸上長距離選手や一般人のそれと比べて stiffness が高いことを報告

している。

これらの結果は、高強度で反復的な走運動によって腱組織の弾性特性が一過的に変化し、それが長期的に繰り返されたことによる走トレーニングの適応とも推察できる。しかし、腱組織が高強度の走運動によって一過的に変化するかどうか明らかにされていない。また、一般人の腱組織と比較して、外側広筋と腓腹筋内側頭それぞれの腱組織の伸展性が逆の傾向になる上記の結果は、走運動が大腿部と下腿部の腱組織の弾性特性にそれぞれ異なる影響を与えている可能性がある。その原因として、走運動中にそれぞれの腱組織にかかる腱張力の大きさが異なること (Scott et al., 1990) が考えられる。しかし、反復的な走運動がそれぞれの腱組織に与える影響の差異についても、明らかにされていない。

3) 反復的、または持続的な力発揮が腱組織の弾性特性に与える影響

腱組織の弾性特性の一過性の変化を検証したものとして、腱組織に対して反復的に負荷を加え続けると、腱の弾性特性が一過的に変化したという報告がある (Kubo et al., 2001a, Kubo et al., 2001b)。例えば、Kubo et al. (2001a) は、最大努力での膝関節伸展筋力発揮を50回反復した前後に外側広筋の腱伸長-腱張力関係を測定し、腱組織の伸展性が筋力発揮後に増加することを報告した。

これに対して、最大下での筋力発揮では、腱組織の弾性特性は変化しないという報告がある (Mademli et al., 2006, Ullrich et al., 2007)。Ullrich et al. (2007) は、25%MVCで等尺性膝伸展筋力発揮を維持する試行と、MVCで等速性膝伸展筋力発揮を反復的に行わせる試行を実施し、それぞれの試行前後で外側広筋の腱組織の腱伸長-腱張力関係を測定した。その結果、いずれの試行前後でも腱伸長-腱張力関係は変化しないことを示唆した。Mademli et al. (2006) は、70%MVCで等速性の足関節底屈筋力発揮を反復的に行わせる試行と、40%MVCで等尺性足関節底屈筋力発揮を維持する試行を実施し、それぞれの試行前後で腓腹筋内側頭の腱組織の伸展性を検証した。その結果、いずれ

の試行前後でも腱組織の伸展性は変化しないことを示した。

Kubo et al. (2001b)は、4つの異なる作業課題(①MVCでの伸長性膝伸展力発揮を3秒間かけて行う試行×50回、②1秒間でMVCでの等尺性膝伸展力発揮を50回行う試行×3セット、③MVCでの等尺性膝伸展力発揮を3秒間維持する試行×50回、④50%MVCの強度で等尺性膝伸展力発揮を6秒間維持する試行×50回)前後で、腱の力-長さ関係とstiffness(N/mm)を比較した。その結果、力発揮レベルは大きいですが、発揮時間の短い①と②の作業課題前後では腱組織の伸展性とstiffnessに有意な差は認められなかった。しかし、力発揮時間の長い③と④の作業課題後では、腱組織の伸展性とstiffnessが有意に増加した。この結果からKubo et al. (2001b)は、腱組織の弾性特性に影響を与えるのは、筋の力発揮レベルや力発揮様式だけではなく、力発揮時間も重要であると述べている。

以上のように、ある程度の強度の持続的な力発揮は、腱組織の弾性特性に影響を与えるが、高強度であっても力発揮時間の短い力発揮は、腱組織の弾性特性に影響を与えないことが示唆されている。しかし、これらの報告はすべて、単関節で単一の筋収縮様式での力発揮を反復した作業課題前後に、腱組織の弾性特性を検証したものである。

4) 走運動時の筋収縮様式と、下肢の腱組織にかかる腱張力

走運動は、いくつかの筋収縮様式が複合的に組み合わさった多関節動作で構成されている(馬場ら., 2000, Ishikawa et al., 2003, 2007)。馬場ら(2000)は、被検者に全力疾走を行わせ、その時ビデオカメラで撮影した股関節・膝関節・足関節の関節角度変化から、走運動中の下肢筋群それぞれのMTC長変化を算出し、筋の活動様式を検証した。その結果、外側広筋、腓腹筋内側頭いずれも、走運動中に伸長性収縮と短縮性収縮を繰り返すことを明らかにした。Ishikawa(2003)は、約3m/sで走った時の腓腹筋内側頭の縦断画像を撮像し、筋束長の変化から筋の活動様式を検証した。その結果、接地期

の最初は等尺性収縮になるものの、すぐに短縮性収縮に変化することを明らかにした。さらに、腱組織の動態も検証し、ピーク時の腱組織の伸長は約 37mm に達することを示した。この値は、3m/s という遅い走速度であるにも関わらず、最大努力での単関節底屈力発揮時の腱組織の伸長(Kubo et al., 2007)より大きい。

また、走運動中の膝蓋腱およびアキレス腱の腱張力についても検討されてきた(Komi et al., 1990, Scott et al., 1990)。Komi et al. (1988)は、フォーストランスデューサーを被検者のアキレス腱に埋め込み、様々なスピードで走った時のアキレス腱の腱張力を算出した。その結果、走スピードが上がるに従ってアキレス腱の腱張力も増加し、ピーク値の腱張力は 9,000N に達することを示した。同時に、0m/s〜6m/s までは走スピードが増加するに従って腱張力も増加していくが、それ以上の走スピードでは腱張力は上がらないことを明らかにした。Scott et al. (1990)は、様々な速度で走らせた被検者の動作を 50Hz〜60Hz でビデオ撮影し、さらにフォースプレートの値から膝蓋腱、アキレス腱の腱張力の推定値を算出した。その結果、5.3m/s のスピードで走った場合、膝蓋腱には体重の 6.9 倍、アキレス腱には体重の 7.4 倍の負荷がかかることを報告した。さらに、接地期の腱張力の波形は、ピークの値を頂点とした二等辺三角形のような形になることを示唆した。Ishikawa et al. (2003)は、20.3° に傾けたスレッジを用いてドロップジャンプを実施し、その時膝蓋腱にかかる腱張力は約 7,000N と推定している。一方、単関節動作中に下肢の腱組織にかかる腱張力に関して、MVC での膝関節伸展力発揮中に膝蓋腱にかかる腱張力が 6,000〜7,000N(Coupe et al., 2008)、MVC での足関節底屈力発揮中にアキレス腱にかかる腱張力が 1,500N〜2,500N(Arampatzis et al., 2007)と報告されている。したがって、上記(Komi et al., 1990, Ishikawa et al., 2003)の報告は、競技スポーツに用いられるような走、跳躍動作中に腱組織にかかる張力が、MVC での単関節動作中のそれと同等、もしくはそれよりも大きいことを示唆している。

これらのことは、走動作中の筋の活動様式は、単一のものではなく、いくつかの筋収

縮様式が組み合わさっていることを示すと共に、走運動中に下肢の腱組織にかかる張力や腱組織の伸長は、単関節のそれよりも大きいことが示されている。よって、3)で挙げた知見を走運動と関連させるためには、走運動を作業課題として腱組織の弾性特性を検証する必要がある。

5) 多関節運動が腱の弾性特性に与える一過的な影響

多関節動作のうち、跳躍運動が腱組織の弾性特性に与える一過的な影響を検討した報告がある(Kubo et al., 2005, 2007)。Kubo et al. (2005)は、両足でのドロップジャンプを100回連続的に行う試行(DJ試行)と、MVCでの等尺性脚伸展力発揮を10秒間維持する試行×50回(LP試行)の前後で、腓腹筋内側頭の腱組織の弾性特性の一過性の変化を比較した。その結果、LP試行後では、腱組織の伸展性が有意に増加し、stiffnessが有意に低下した。しかし、DJ試行後で、腱組織の伸展性、stiffness共に有意な差は認められなかった。また、Kubo et al. (2007)は、1RMの40%の強度でドロップジャンプを連続的に行うトレーニング(PT)と、1RMの80%の強度で行う足関節底屈力発揮のウェイトトレーニング(WT)をそれぞれ12週間実施し、その前後で腓腹筋内側頭の腱組織の弾性特性を長期的に比較した。その結果、WT後で腱組織の伸展性に変化は見られなかったものの、stiffnessは増加した。一方、PT後は、腱組織の伸展性、stiffness共に有意な差は認められなかった。これらの報告から、Kubo et al. (2007)は、ドロップジャンプのようなバリスティックな動作は、単関節動作と比較して大きな力が発揮されるものの、力発揮時間が短いため、結果的に腱組織の弾性特性に影響を与えないことを示し、Kubo et al (2001a, b)の見解を支持した。さらに、腱組織の弾性特性に影響を与える因子として、発揮する力と時間の積である力積を挙げ、連続的にドロップジャンプをする作業課題前後で腱組織の弾性特性に変化がなかった理由の一つは、作業課題が腱組織に加える力の力積が小さかったためであると考察した。

上記の報告は、連続的な跳躍動作を作業課題に検討した報告である。しかし、走運動

を作業課題にして下肢の腱組織に与える一過性の影響を検証した報告はない。さらに、上記の報告で対象とした腱組織は下腿部の腱組織のみであり、大腿部の腱組織への影響を検討してはいない。

1-3 本研究の目的

高強度な走運動は、これまで検討されてきた単関節で単一の筋収縮様式を用いた作業課題(Kubo et al.,2001, Ullrich et al.,2007)と比較して、腱組織にかかる張力も大きく、異なる筋収縮様式が複合的に構成される。このことから、高強度な走運動が下肢の腱組織の弾性特性に与える一過的な影響について検討するには、実際の走運動を作業課題として、その前後で腱組織の弾性特性を比較する必要がある。しかし、高強度な走運動を作業課題として検証した報告はない。さらに、大腿部と下腿部で腱組織の伸展性の特徴が逆の傾向になることから(Kubo et al.,2000a.,Arampatzis et al, 2007)、高強度の走運動は大腿と下腿の腱組織に異なる影響を与える可能性がある。しかし、その点についても明らかにされていない。

よって本研究では、作業課題に走運動を用いて、高強度で間欠的な走運動が、膝蓋腱と外側広筋・腓腹筋内側頭の腱組織の弾性特性に与える一過的な影響を明らかにすることを目的とする。

方法

2-1 被検者

被検者は、運動習慣のない健常な成人男性11名（ 24.7 ± 3.2 歳, 174.2 ± 5.7 cm, 66.6 ± 5.4 kg, 平均値 ± 標準偏差）であった。本研究を実施するにあたり、被検者には本研究の目的、内容、安全性について説明し、書面上で実験参加の同意を得た。なお、本研究は早稲田大学スポーツ科学学術院倫理委員会の承認を得て実施した。

2-2 プロトコル(図1)

本実験は、事前測定(Pre測定)、作業課題および事後測定(Post測定)の順で行った(図1)。Pre測定として、被検者の最大随意等尺性膝関節伸展・屈曲トルク、最大随意等尺性足関節底屈・背屈トルクを測定した。また、膝伸展と足関節底屈の力の立ち上がり速度(RFD)、腱組織の伸長を算出するために、ramp力発揮(5秒間かけて最大努力までトルク発揮し、1秒間維持した後、5秒間かけて安静状態に戻すランプ状のトルク発揮)をそれぞれ測定した。入念なウォーミングアップを実施し、十分な休息を取った後、作業課題として、50mを最大努力で走る試行を計20本行った。試行間の休息は90秒とした。作業課題終了、16分以内にすべてのPost測定を完了した。Post測定は、Pre測定で行った試行をすべて同様に行った。なお、PreおよびPost測定での膝関節および足関節トルク測定の順序は、被検者ごとランダムに実施した。

2-3 測定項目および測定方法

a) 50m走タイム

20本すべての試行の走タイム(s)を、ストップウォッチ(ADME002, セイコースポーツライフ)を用いて手動で測定した。

b) 等尺性膝関節伸展・屈曲トルク, 等尺性足関節底屈・背屈トルク

右脚の膝関節伸展・屈曲トルク, 足関節底屈・背屈トルクを、それぞれ等尺性膝関節筋力計(VTF-002, VINE), 等尺性足関節筋力計(VTF-002, VINE)を用いて測定した。膝関節トルク発揮時の測定姿勢は、股関節 90° および膝関節 70° とし(図2), 足関節トルク発揮時の測定姿勢は、股関節 90° , 膝関節 0° (完全伸展)および足関節 90° (解剖学的正位)であった(図3)。上記のトルク発揮試行はすべて2回ずつ実施し、試行間には2分以上の休息を挟んだ。張力センサーから得られた信号は、ストレインアンプ(DPM-611B, 共和電業)で増幅し、A/D変換機(Power Lab 16SP, AD Instruments)を介してパーソナル

コンピュータ (Mac book, Apple)にサンプリング周波数 1 kHz で取り込んだ。

c) 等尺性膝関節RFD, 等尺性足関節底屈RFD

等尺性膝関節伸展RFDと等尺性足関節底屈RFDを, 2-3 b)と同様の機材と測定姿勢で測定した。それぞれのRFDを正確に測定するために, 被検者には練習を十分に行わせた。また, できるだけ速くMVCを発揮するように指示した。

d) 膝・足関節角度

本研究では等尺性での膝関節伸展動作, 足関節底屈動作を要求したが, 予備実験において回避不可能な膝関節, 足関節の動きが観察された。よって, それぞれの変化を定量するために, Pre測定, Post測定において足関節および膝関節の角度変化を測定した。膝関節角度および足関節角度は以下のように定義した。

膝関節角度：大腿骨大転子-膝関節中心-足関節中心のなす角度

足関節角度：膝関節中心-足関節中心-第5 中足骨遠位端のなす角度

膝関節角度は, ゴニオメータ (SG110/A, Miometrics, UK) を右足の大腿部と下腿部の皮膚上に長軸方向に沿って貼付し, その信号を A/D コンバータを介してパーソナルコンピュータに記録し, 計測した。足関節角度は, ゴニオメータを下腿の長軸方向と足部の水平方向に沿って貼付し, 上記と同様の方法で計測した。

e) 腱組織の伸長

超音波装置 (SSD6500, SSD5500, ALOKA) のBモード法を用いて, 膝蓋腱, 外側広筋の腱組織 (VL腱), 腓腹筋内側頭の腱組織 (MG腱) の縦断画像を36Hzにて取得した。それぞれの超音波画像を図 (4-6) に示した。

膝蓋腱に関して, 画像取得には, 膝蓋腱の長軸方向に沿った面にプローブ (UST-5712, 発信周波数 10M Hz, ALOKA, Japan) を当てた。プローブには, 皮膚との接着面に両面テープを貼り, プローブと皮膚を装着させ, さらに手でプローブを支えた。安静時から力発揮中にかけて, P1とP2の両方が画面上に入るよう, 留意した。

外側広筋の腱組織に関して, プローブの貼付位置は, 予め大腿部の横断面を撮像した画像から, 外側広筋 (VL) の浅部および深部腱膜が平行になり, かつ筋厚が最も厚く取得できる部位を用い, この部位で大腿の長軸方向に沿った面にプローブを当てた。プローブには, 上記と同様に両面テープを貼り, プローブと皮膚を装着させた。試行中にプローブが移動しないように, 上からサージカルテープを用いて大腿部に固定し, さらに手でプローブを支えた。

腓腹筋内側頭の腱組織に関して、プローブの貼付位置は、予め下腿部の横断面を撮像した画像から、腓腹筋内側頭(MG)の浅部および深部腱膜が平行になり、かつ筋厚が最も厚く取得できる部位を用い、この部位で下腿の長軸方向に沿った面にプローブを当てた。R (図6) の撮影方法は、VL腱の撮影時と同様に行った。

撮影した超音波画像は、トルクおよびそれぞれの関節角度の信号と同期させるためにビデオタイマー (VTG-33, 朋栄) を介し、30Hzでデジタルビデオテープに記録した。記録された超音波画像をコンピュータ (iBookG4) に取り込み、画像解析ソフトウェア (Image J, NIH) で分析した。

f) 筋電図 (EMG)

Pre および Post 測定中の右足大腿部と右足下腿部の筋放電量を測定した。測定筋を下記に記す。

大腿部：外側広筋 (VL), 内側広筋 (VM), 大腿直筋 (RF), 大腿二頭筋 (BF)

下腿部：腓腹筋内側頭 (MG), 腓腹筋外側頭 (LG), ヒラメ筋 (SOL), 前脛骨筋 (TA)

それぞれの筋の筋腹に、皮膚抵抗を軽減した後、ディスプレイ型電極 (Blue Sensor, P-00-s, AmbuA/S, Denmark, Sensor:Ag-AgCl, Measuring Area:154mm²) を電極間距離20mmで貼付した。不関電極は腸骨稜に貼付した。筋電図 (EMG) 信号は、マルチチャンネルシステム (WEB-5000, 日本光電, Japan) で増幅し、A/Dコンバータを介して、1kHzでパーソナルコンピュータのハードディスクに記録した。

g) 膝蓋腱長, 外側広筋・腓腹筋内側頭の筋厚, 筋束長, 羽状角の測定

作業課題前後に、安静時の膝蓋腱長, 外側広筋・腓腹筋内側頭の筋厚, 筋束長, 羽状角を測定した。d) で記した方法でそれぞれの超音波画像を取り込み、画像解析ソフトウェア (image J, NIH) で分析した。

2-4 分析方法

a) 等尺性膝関節伸展・屈曲トルク, 等尺性足関節底屈・背屈トルク

記録されたトルクの値から、筋力計のアタッチメント及び足部の重力によるトルクの値を減じて算出した。Pre MVC およびPost MVC の値には、それぞれ2回測定したトルクのうち、大きい値を最大値として採用した。

b) RFD

トルク波形の曲線的増加を考慮するため、de Ruyter et al. (2006)に習い、200msまでのトルクの時間積分値を算出した。

c) 膝蓋腱の伸長

膝蓋腱の長さ変化は、膝関節伸展ramp力発揮中のP1（膝蓋腱の近位端）からP2（膝蓋腱の遠位端）（図4）の長さ変化から算出した。

d) 外側広筋の腱組織(VL腱)の伸長

VL腱の長さ変化は、膝関節伸展ramp力発揮中のTの移動量から算出した(図5)。モニター上で鮮明に写るVLの筋束と深部腱膜との交点の移動を、Tの移動とした。

e) 腓腹筋内側頭の腱組織(MG腱)の伸長

MG腱の長さ変化は、足関節底屈ramp力発揮中のRの移動量から算出した(図6)。モニター上で鮮明に写るMGの筋束と深部腱膜との交点の移動を、Rの移動とした。

P, T, Rの移動量はすべて、被験者がPre測定時の膝関節伸展MVC, 足関節底屈MVCで発揮したトルク値を100%とした時に、膝関節伸展ramp力発揮, 足関節底屈ramp力発揮試行中の0%~100%MVCの間で10%ごとに画像を切り出し、それぞれの画像内におけるP, T, Rの座標の変化から算出した。本研究では等尺性での膝関節伸展動作, 足関節底屈動作を要求したが、予備実験において回避不可能な膝関節, 足関節の動き(等尺性膝関節伸展力発揮中には、膝関節が伸展方向に、等尺性足関節底屈力発揮中には足関節が底屈方向に動く様子)が観察された。よって、それぞれの関節角度変化による腱伸長の過大評価を排除するために、足関節角度変化に伴うP, T, Rの移動量の値を、力発揮中に生じた足関節角度の変化に対応させて差し引きし、補正した。足関節角度変化に伴うP, T, Rの移動量の値は、膝関節角度・足関節角度を受動的に変化させた時のP, T, Rの座標の変化から算出した。

f) 筋電図

記録した筋電図のデータは全波整流後、最大及び平均筋電位を算出した。MVC時の平均筋電位の算出は、最大トルクを発揮している時点の前後0.25秒間を分析の対象とした。Ramp力発揮時の平均筋電位の算出は、0%~100%MVC間で10%MVC毎の発揮時点前後0.25秒間を分析の対象とした。試行間の差の比較のために、MVC発揮中の平均筋電位を

100%で正規化した相対値を求めた。

g) 腱張力の算出

腱張力は発揮トルクをモーメントアームで除して算出した(以下の式)。

腱張力(N) = 発揮トルク(Nm) / モーメントアーム(m)

膝蓋腱の腱張力は, Lu and O'Connor. (1996) のモーメントアームを用いて算出した。外側広筋の腱組織の腱張力は, Visser et al. (1990) のモーメントアームを用いて算出した。アキレス腱の腱張力は, Rugg et al. (1990) のモーメントアームを用いて算出した。

h) stiffness (N/mm) (図 7)

ramp 力発揮中のトルク値を, 上記の方法で算出した腱張力に同期した。本研究の Pre 測定, Post 測定の ramp 力発揮において, 被検者全員が発揮できた力発揮レベル(%MVC) が 70%MVC であったため, 本研究の膝蓋腱, 外側広筋腱, 腓腹筋内側頭筋腱の stiffness (N/mm) は, 50%MVC-70%MVC について最小乗法を用いて直線回帰を行い, これにより得られた直線の傾きをそれぞれの stiffness とした。

i) 膝蓋腱長, 外側広筋・腓腹筋内側頭の筋束長, 羽状角

作業課題前後の安静時の膝蓋腱長, 外側広筋・腓腹筋内側頭の筋厚, 筋束長, 羽状角を, 以下の方法で算出した。

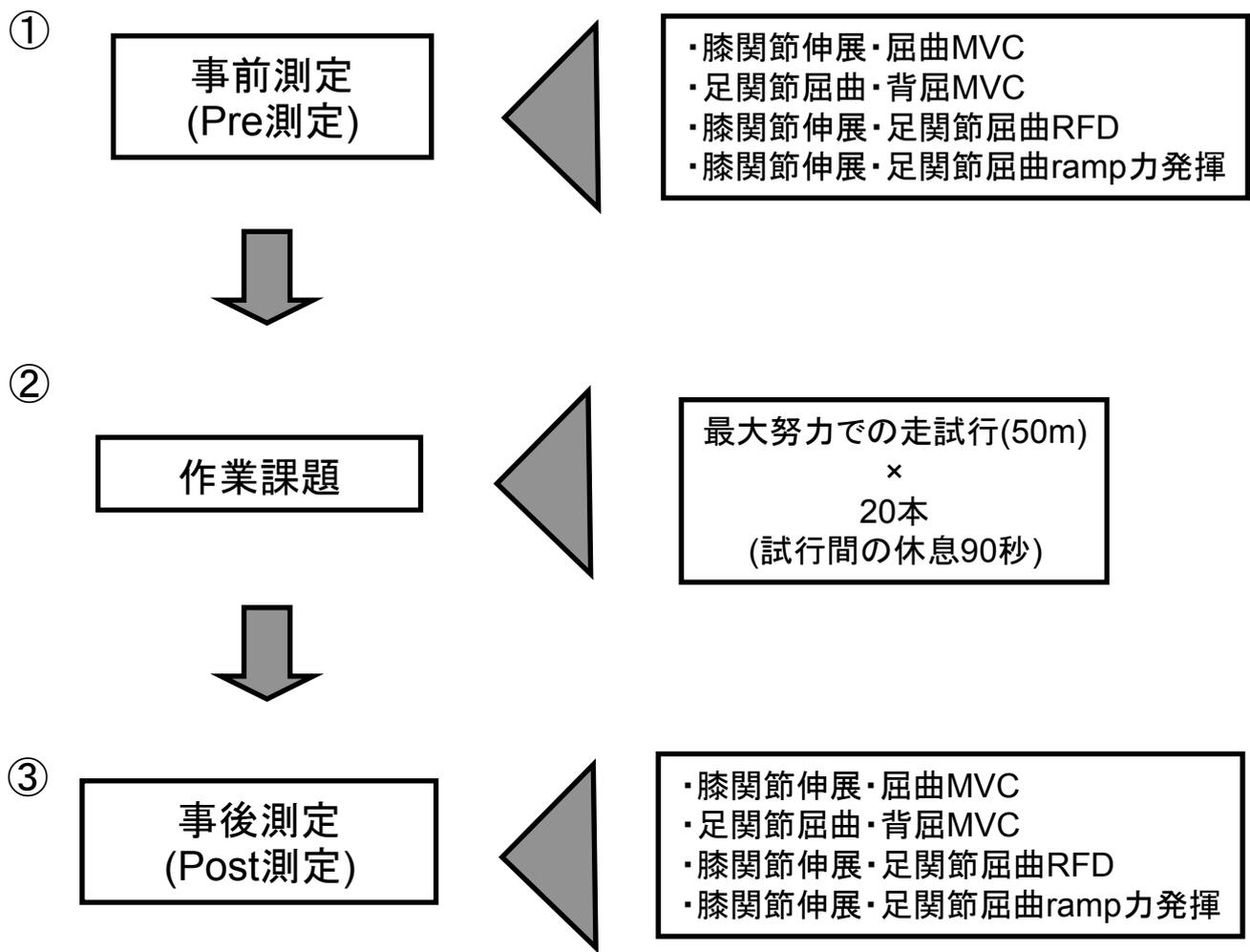
(膝蓋腱長): P1 (膝蓋腱の近位端) から P2 (膝蓋腱の遠位端) (図 4) の長さを算出。

(外側広筋の筋束長・羽状角): 図 7 の筋厚と羽状角(α) の値を算出し, 筋束長は, 筋束長 = 筋厚 / $\sin(\alpha)$ の式から算出した。

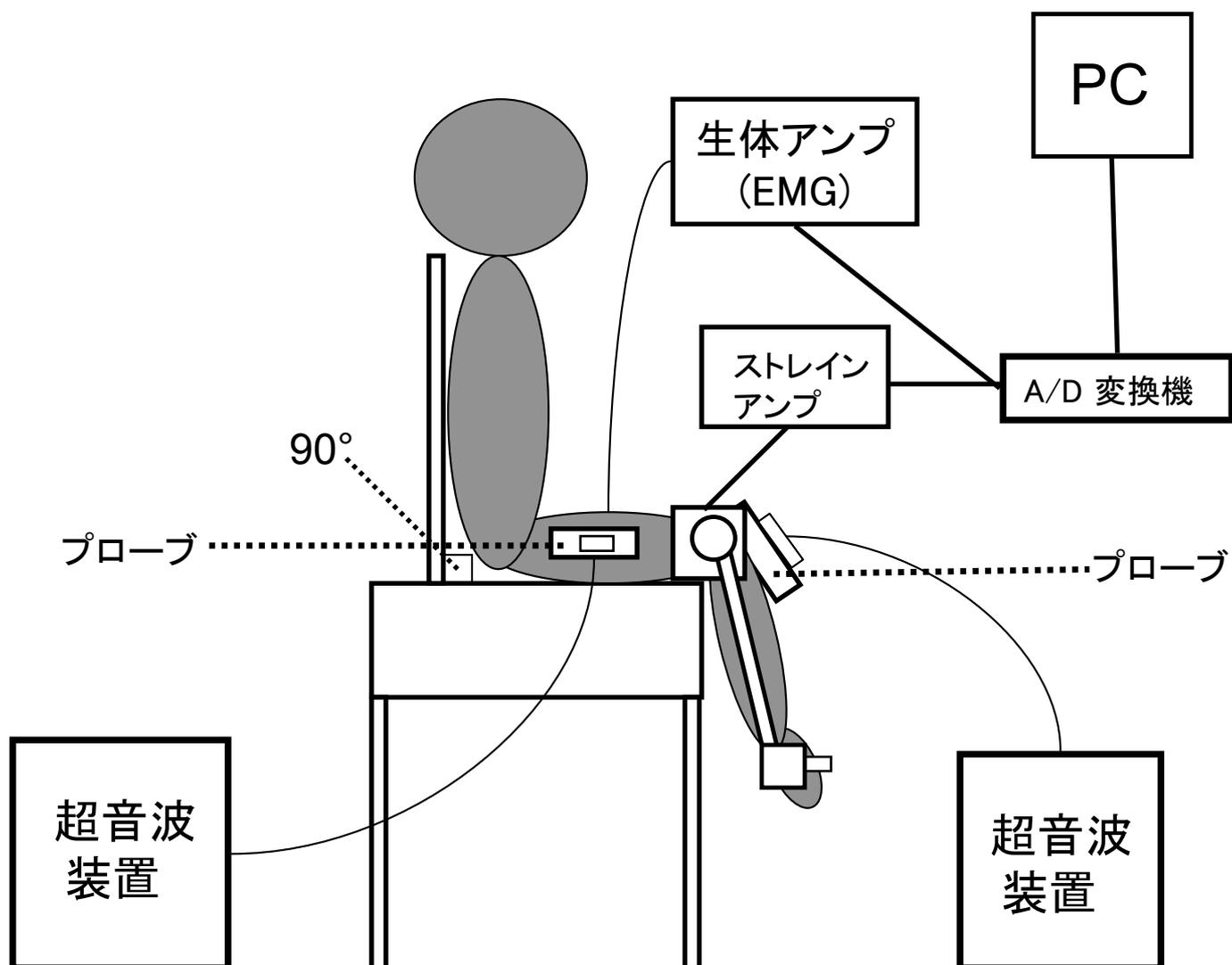
(腓腹筋内側頭の筋束長・羽状角): 図 8 の筋厚と羽状角(α) の値を算出し, 筋束長は, 筋束長 = 筋厚 / $\sin(\alpha)$ の式から算出した。

2-5 統計処理

各測定項目の値は平均値±標準偏差で表した。Pre 測定と Post 測定のトルク値, RFD 値, Stiffness の差の検定には, 反復測定の一元配置分散分析法を用いた。Pre 測定と Post 測定の P, T, R の移動量の差と ramp 力発揮中の下肢筋群の EMG の検定には, 対応のある二元配置分散分析法と対応のある t 検定を用いた。いずれにおいても, 危険率 5%をもって統計的に有意とした。

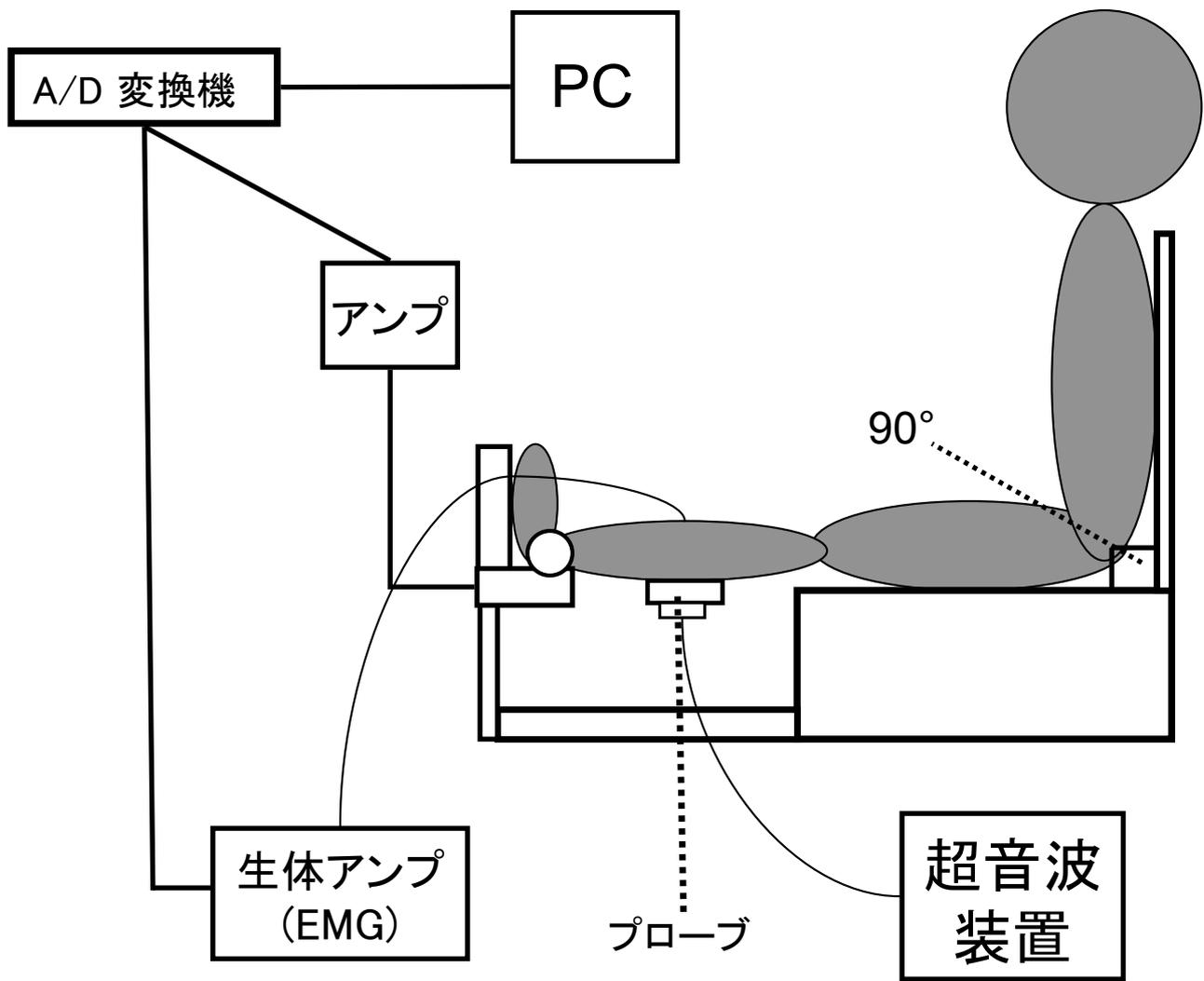


<図1> 測定項目およびプロトコル



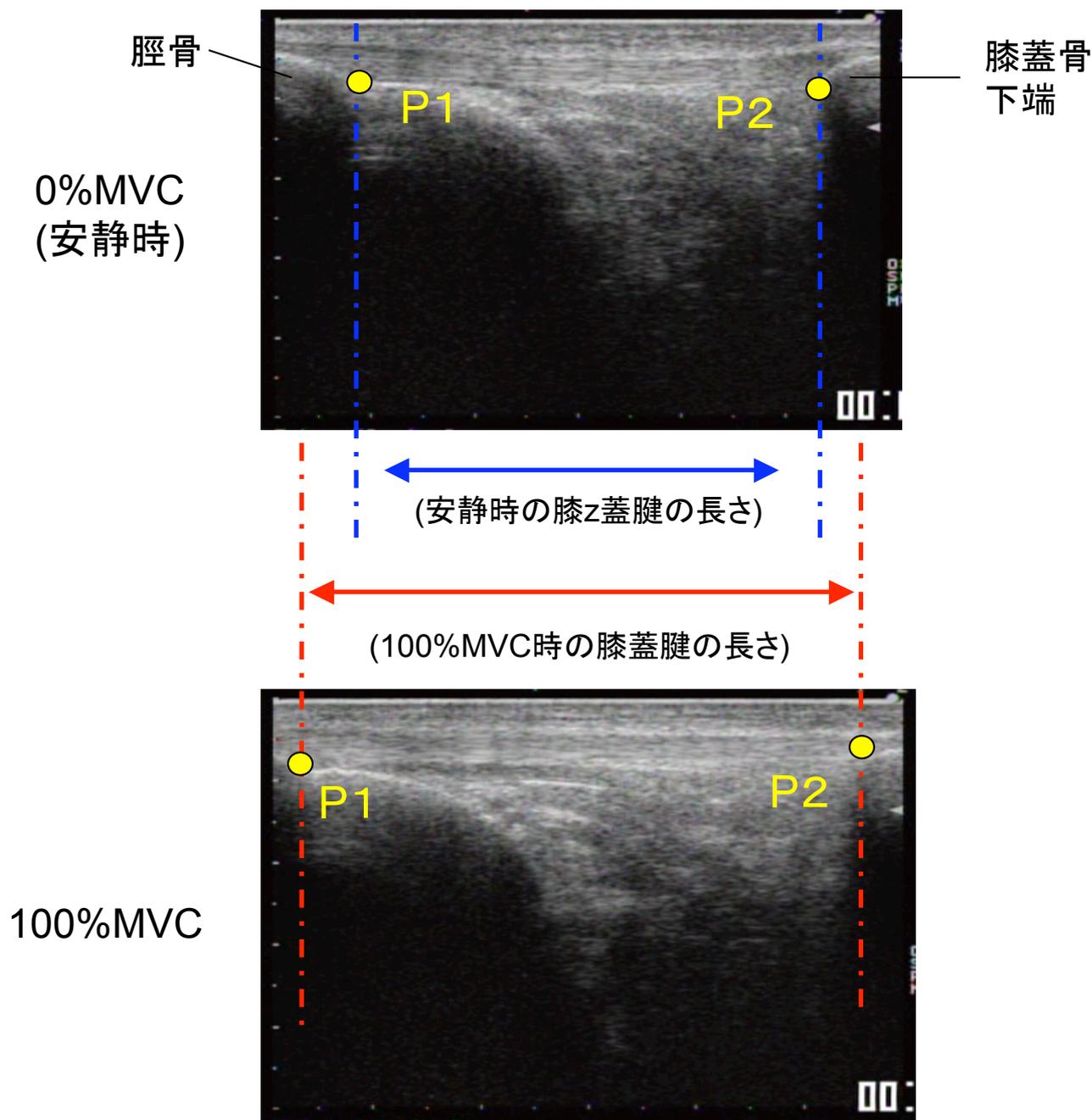
<図2> 膝関節伸展・屈曲力発揮時の測定姿勢と測定機器

膝関節伸展・屈曲力発揮時の測定姿勢は、股関節90° および膝関節70° とした。
 等尺性膝関節筋力計 (VTF-002, VINE)の回転中心と被検者の膝関節回転中心を一致させ、
 足首をアタッチメントに非伸縮性のストラップで固定した。



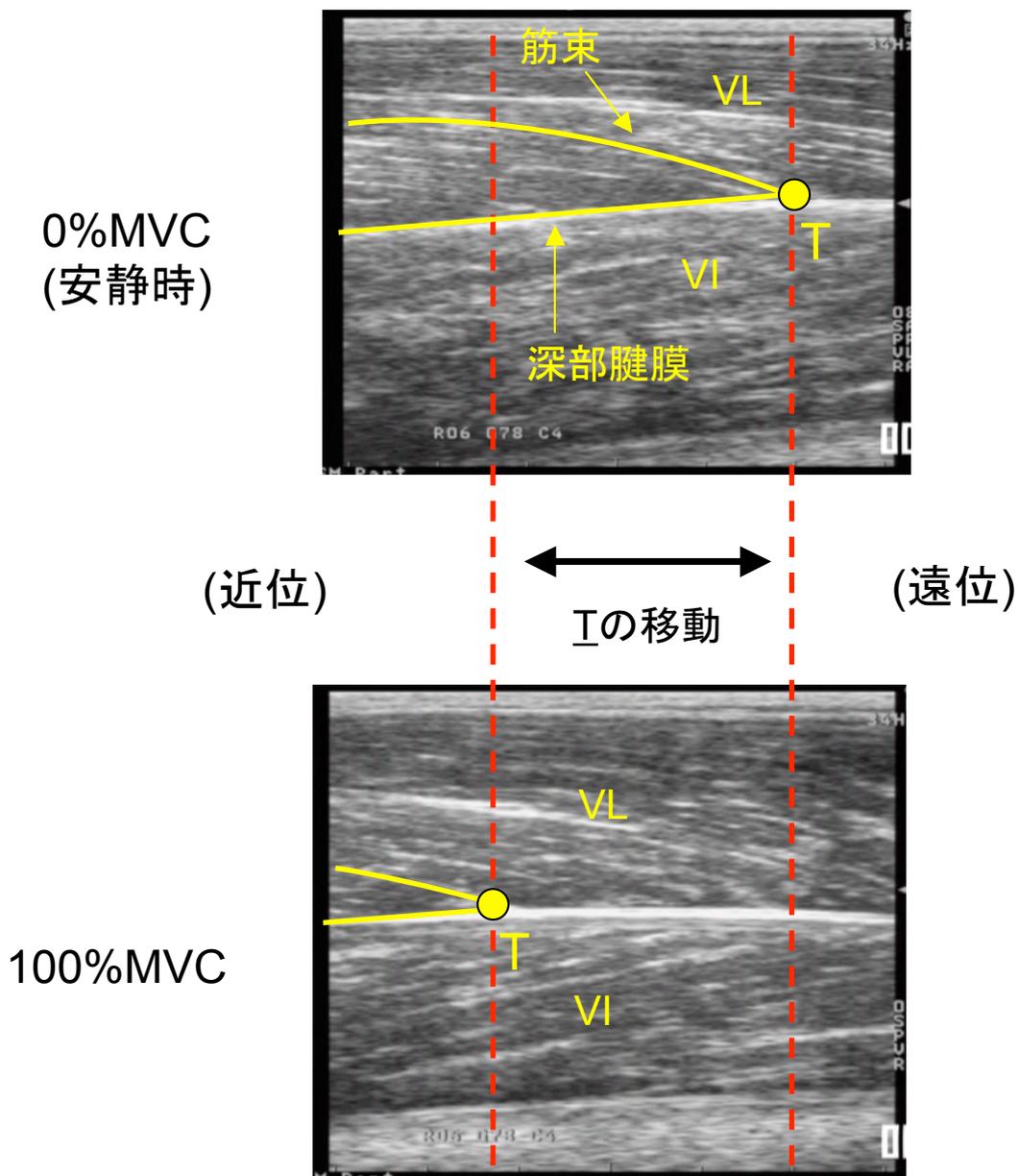
＜図3＞ 足関節底屈・背屈力発揮時の測定姿勢と測定機器

足関節底屈・背屈力発揮時の測定姿勢は、股関節90° および膝関節0°（完全伸展）とした。等尺性足関節筋力計（VTF-002, VINE）の回転中心と被検者の足関節回転中心を一致させ、足首をアタッチメントに非伸縮性のストラップで固定した。



<図4> 膝蓋腱の伸長の測定

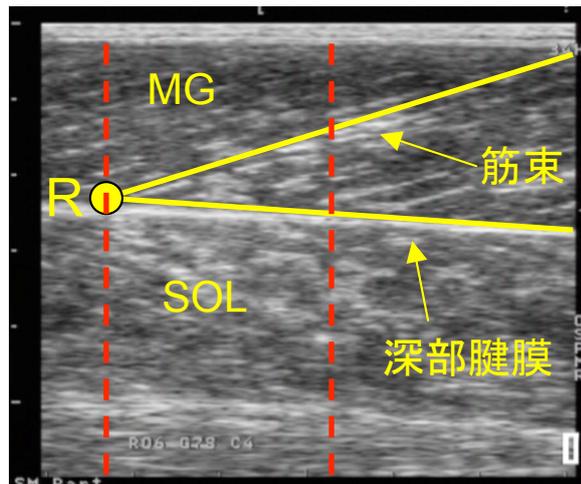
〔 膝蓋腱の伸張を、  と、  の長さの差分から腱伸長を算出。 〕



<図5> 外側広筋の腱組織の伸長

〔 力発揮をすると、外側広筋の筋束と深部腱膜の交点であるTが近位の移動する。そのTの移動(mm)を、外側広筋の腱組織の伸長とした。 〕

0%MVC
(安静時)

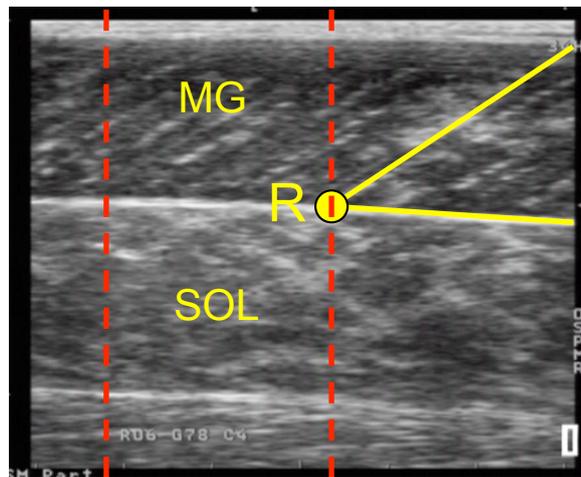


(遠位)

←→
Rの移動

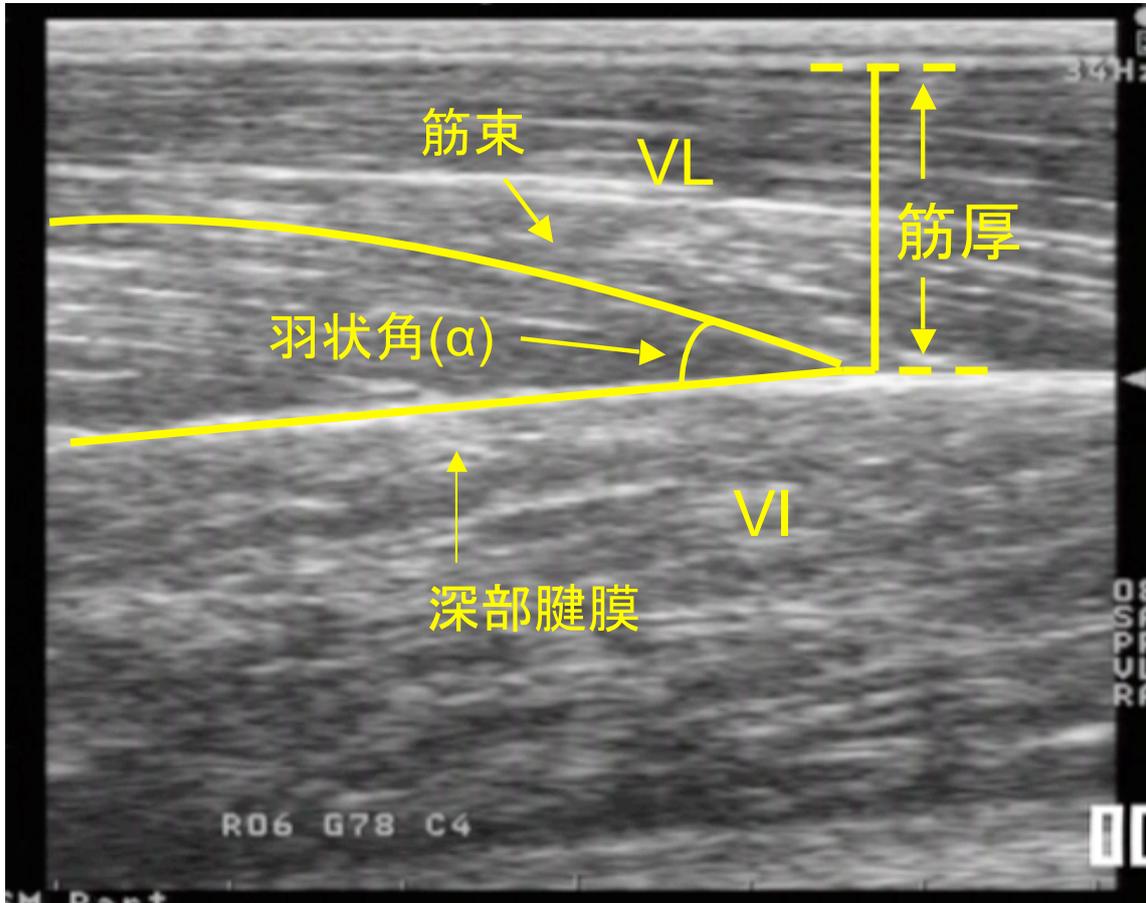
(近位)

100%MVC



<図6> 腓腹筋内側頭の腱組織(MG腱)の伸長

足関節底屈力発揮をすると、
腓腹筋内側頭の筋束と深部腱膜の交点であるRが近位の移動する。
そのRの移動(mm)を、腓腹筋内側頭の腱組織の伸長とした。

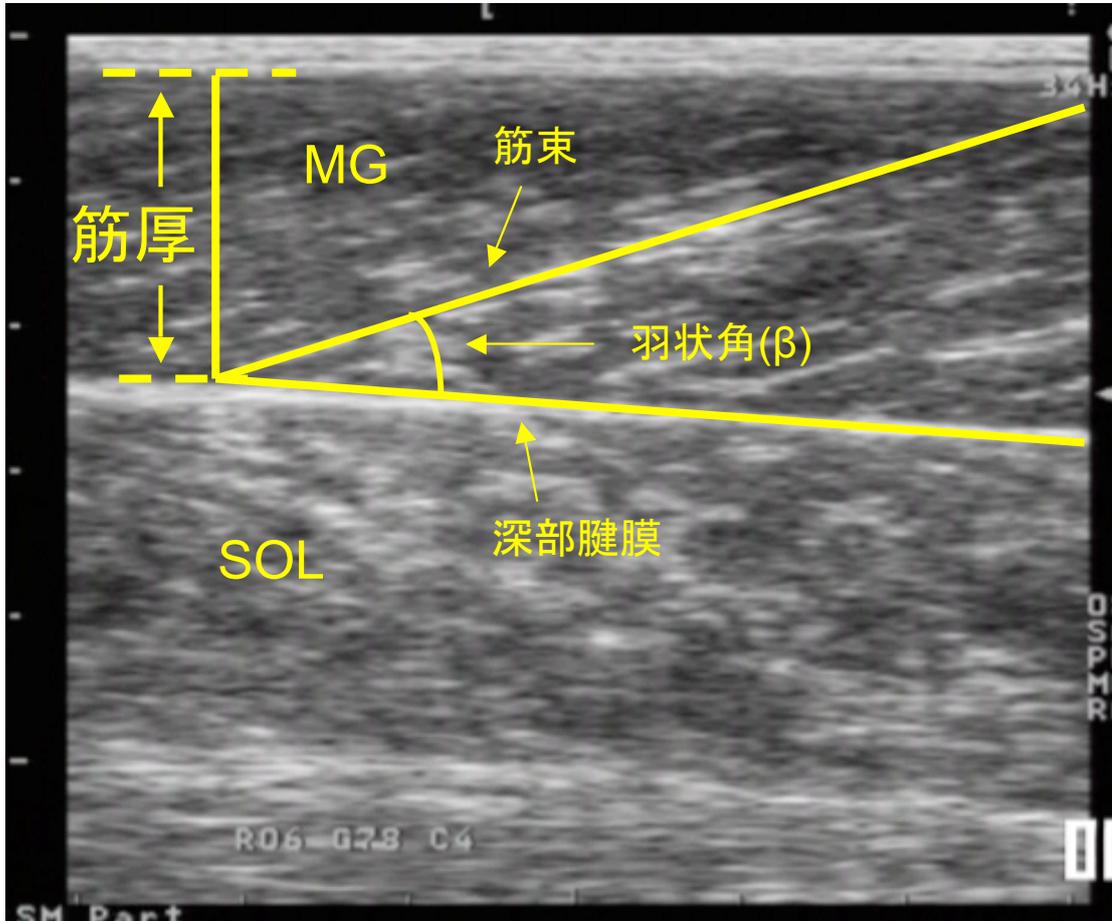


<図7> 外側広筋の縦断画像

VLの筋厚(cm)::深部腱膜と皮下脂肪の距離

羽状角(α)::筋束と深部腱膜のなす角度

外側広筋の筋束長(cm) = 筋厚(cm) / sin(α)



<図8> 腓腹筋内側頭の超音波画像

MGの筋厚(cm)::深部腱膜と皮下脂肪の距離

羽状角(β)::筋束と深部腱膜のなす角度

腓腹筋内側頭の筋束長(cm) = 筋厚(cm) / sin(β)

結果

1) 試行本数-走タイム(s)の関係(図 9)

作業課題である走試行の本数と被験者全員分の走タイム(s)の平均値を図 9 に示した. 第 20 試行目の走タイム($7.39 \pm 0.34s$)は, 第 1 試行目の走タイム($6.94 \pm 0.66s$)と比較して, 有意に増加した ($p < 0.05$).

2) 膝関節伸展・屈曲トルク, 足関節底屈・背屈トルク(図 10)

図 10 に Pre 測定と Post 測定の膝関節伸展・屈曲トルク, 足関節底屈・背屈トルクを示した. Post 測定での膝関節伸展トルク, 膝関節屈曲トルク, 足関節底屈トルクは, Pre 測定に比べて有意に低下した ($p < 0.05$). 足関節背屈トルクは, Pre 測定, Post 測定で有意な差は認められなかった.

3) RFD

膝関節伸展力の RFD と足関節底屈力の RFD を図 11 に示した. 膝関節伸展力の RFD に関して, Post 測定($544 \pm 186Nm/s$)は Pre 測定($825 \pm 158Nm/s$)に比べて有意に低下した. 足関節底屈力の RFD に関して, Post 測定($548 \pm 154Nm/s$)は Pre 測定($647 \pm 209Nm/s$)に比べて低下する傾向がみられた. ($P > 0.05$)

3) 膝蓋腱の伸長量-トルク関係(図 12)

膝蓋腱の伸長量-トルク関係を図 12 に示す. 膝蓋腱の伸長量-トルク関係において, Pre 測定と Post 測定との間に, 有意な差は認められなかった.

4) 外側広筋腱の伸長量-トルク関係(図 13)

外側広筋腱の伸長量-トルク関係を図 13 に示す. 外側広筋腱の伸長量-トルク関係において, Pre 測定と Post 測定との間に, 有意な差は認められなかった.

5) 腓腹筋内側頭筋腱の伸長量-トルク関係(図 14)

腓腹筋内側頭筋腱の伸長量-トルク関係を図 14 に示す. 腓腹筋内側頭筋腱の伸長量-トルク関係において, Pre 測定と Post 測定との間に, 有意な差は認められなかった.

6) 膝関節伸展 ramp 力発揮中の大腿筋群の EMG (図 15)

足関節伸展 ramp 力発揮中の大腿筋群 (VL, RF, VM, BF) の %EMG を図 15 に示す。VL および RF に関して、二元配置分散分析では Pre 測定と Post 測定で交互作用が認められたが、その後の多重比較の検定では、各強度において有意な差は認められなかった。また、VM, BF においては、Pre 測定と Post 測定で有意な差は認められなかった。

7) 足関節底屈 ramp 力発揮中の下腿筋群の EMG (図 16)

足関節底屈 ramp 力発揮中の下腿筋群 (MG, LG, SOL, TA) の %EMG を図 16 に示す。いずれの筋も Pre 測定と Post 測定で有意な差は認められなかった。

8) Stiffness (N/mm)

膝蓋腱, 外側広筋腱, 腓腹筋内側頭筋腱の Stiffness (N/mm) を下記に示す。

膝蓋腱 : (Pre 測定) 2770 ± 1914 (N/mm), (Post 測定) 3661 ± 4432 (N/mm)

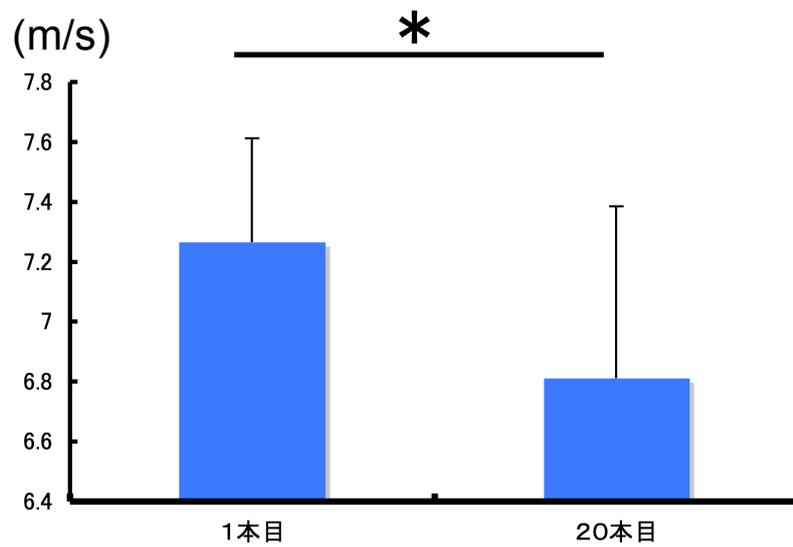
外側広筋腱 : (Pre 測定) 371 ± 166 (N/mm), (Post 測定) 402 ± 149 (N/mm)

腓腹筋内側頭筋腱 : (Pre 測定) 340 ± 179 (N/mm), (Post 測定) 380 ± 206 (N/mm)

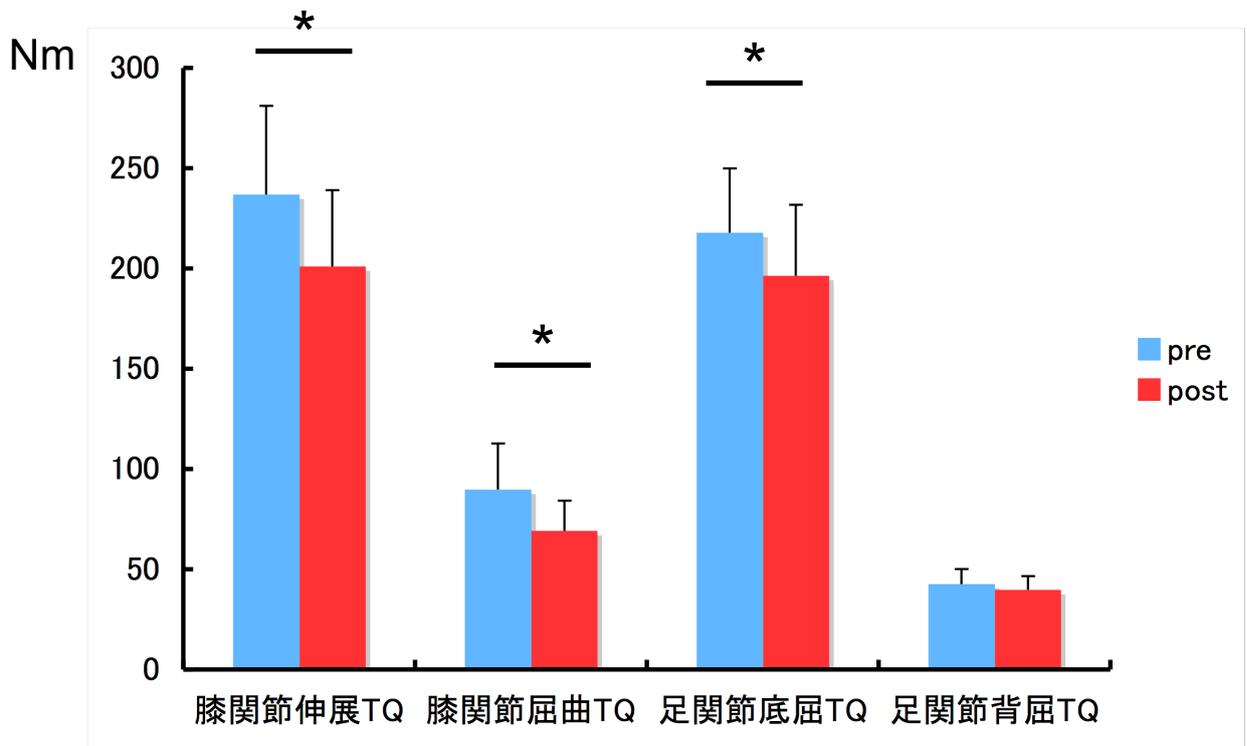
膝蓋腱, 外側広筋腱, 腓腹筋内側頭筋腱いずれの stiffness も, Pre 測定と Post 測定で有意な差は認められなかった。

9) 膝蓋腱長, 外側広筋・腓腹筋内側頭の筋厚, 筋束長, 羽状角

膝蓋腱長, 外側広筋・腓腹筋内側頭の筋厚, 筋束長, 羽状角の値を表 3 に示す。いずれの項目も, Pre 測定と Post 測定で有意な差は認められなかった。

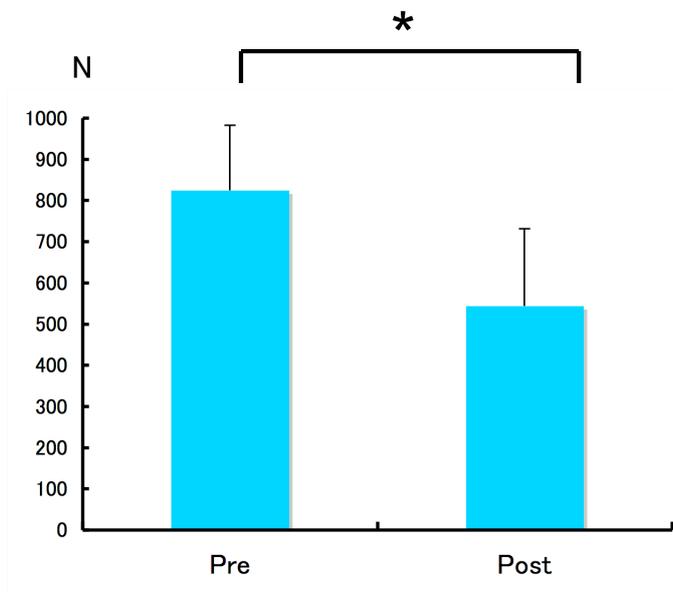


<図9> 作業課題中の1本目と20本目の走速度

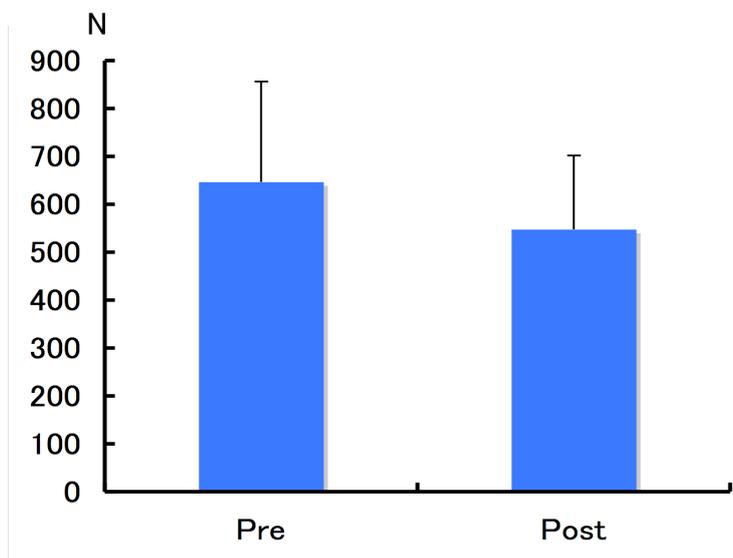


<図10> Pre測定, Post測定時の
膝関節伸展・屈曲トルク, 足関節底屈・背屈トルクの値

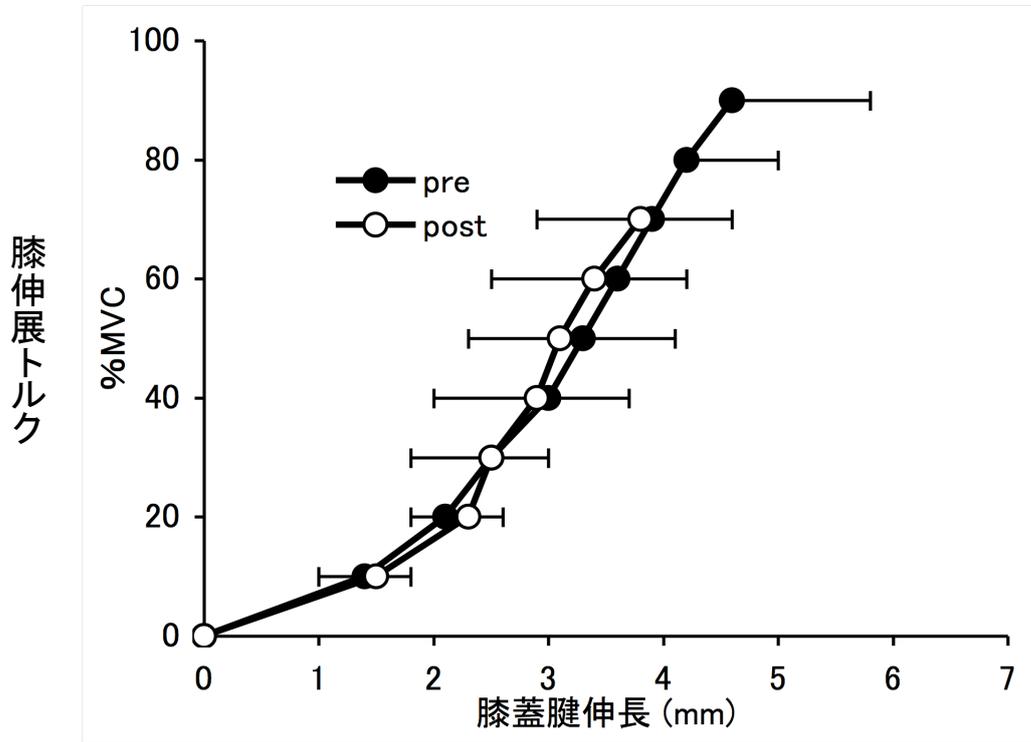
<膝関節伸展力RFD>



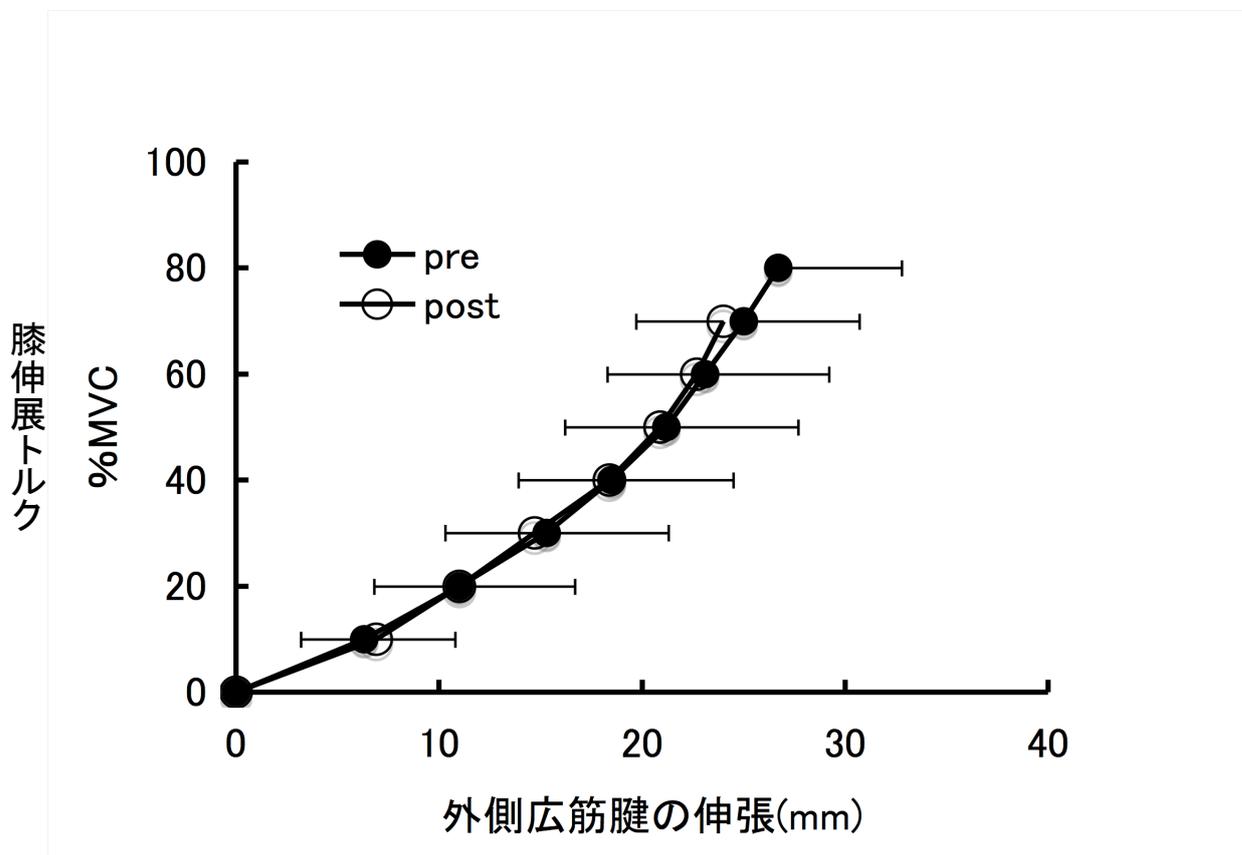
<足関節底屈力RFD>



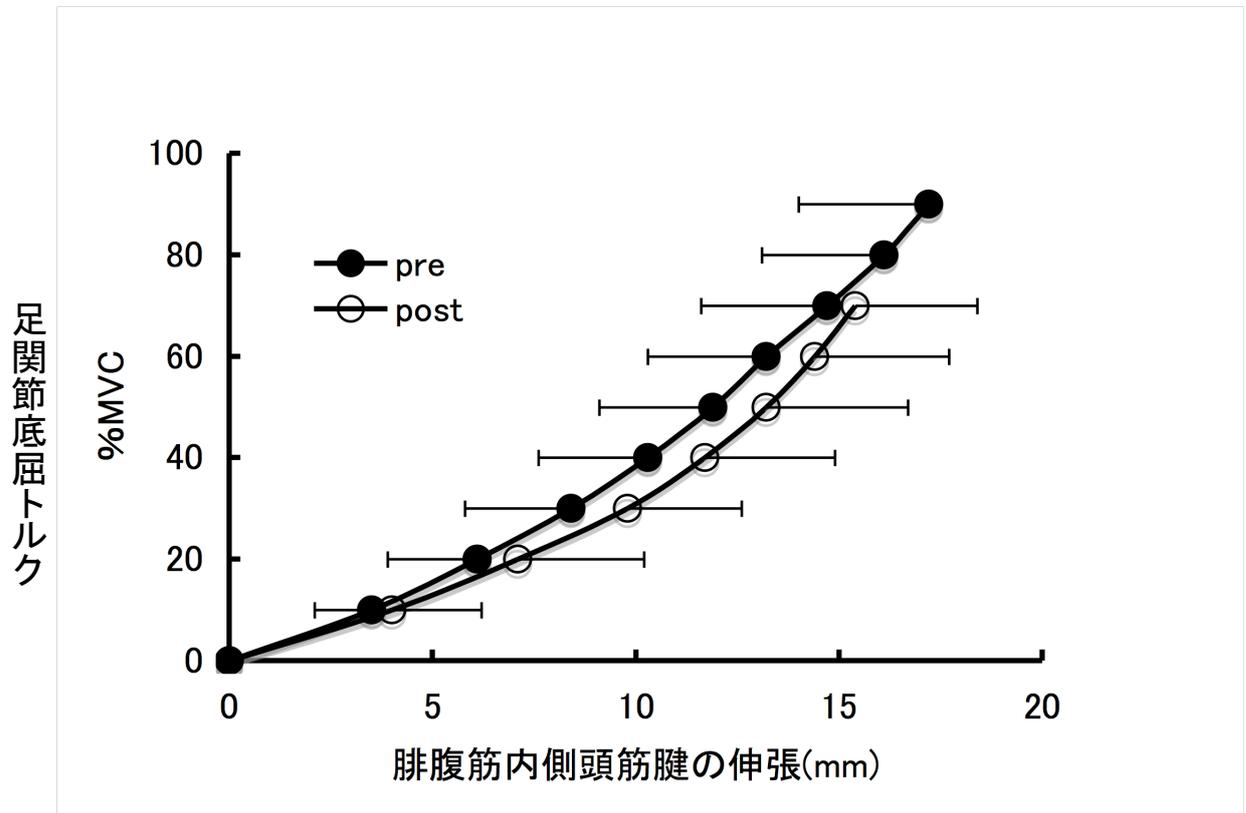
<図11>Pre測定,Post測定の
膝関節伸展・足関節底屈RFDの値



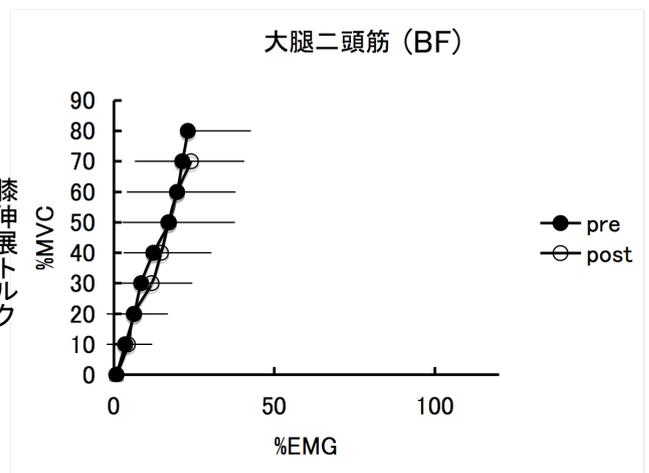
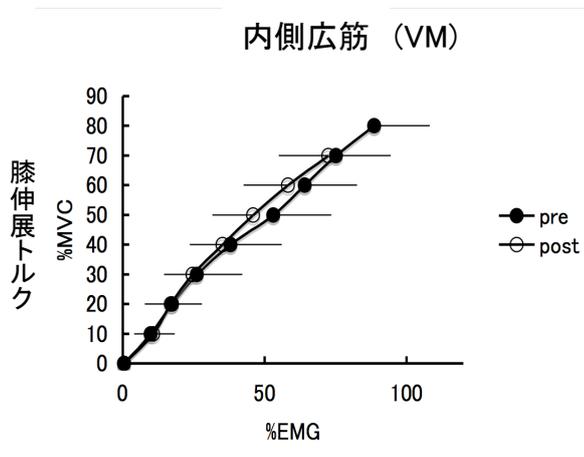
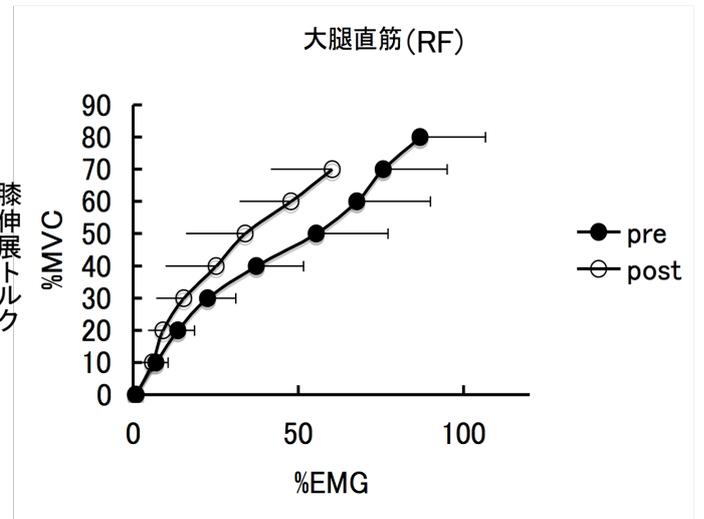
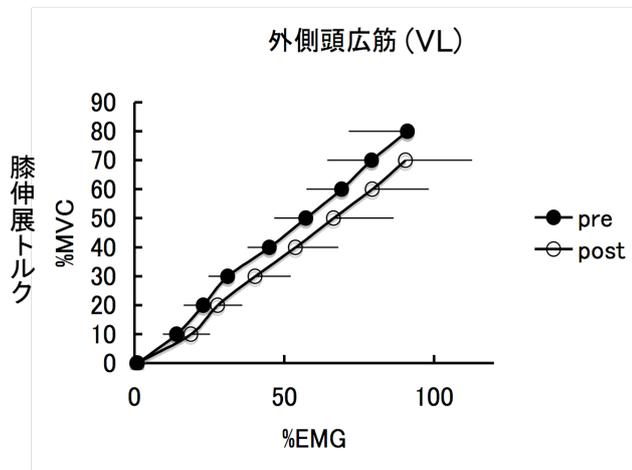
<図12> Pre測定,Post測定の
膝蓋腱伸張(mm)ー膝伸展トルク(%MVC)



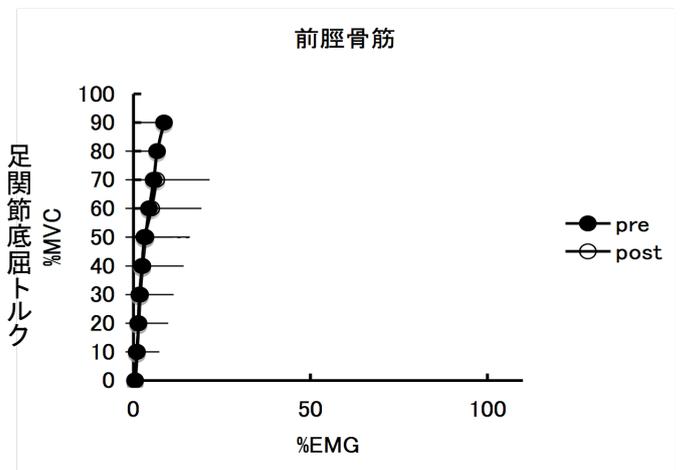
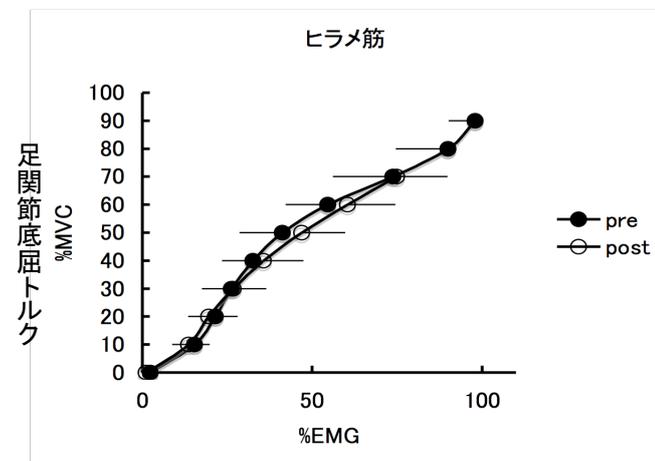
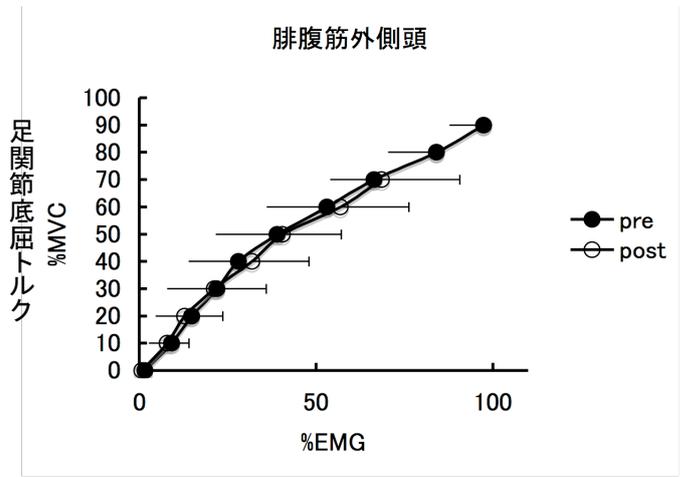
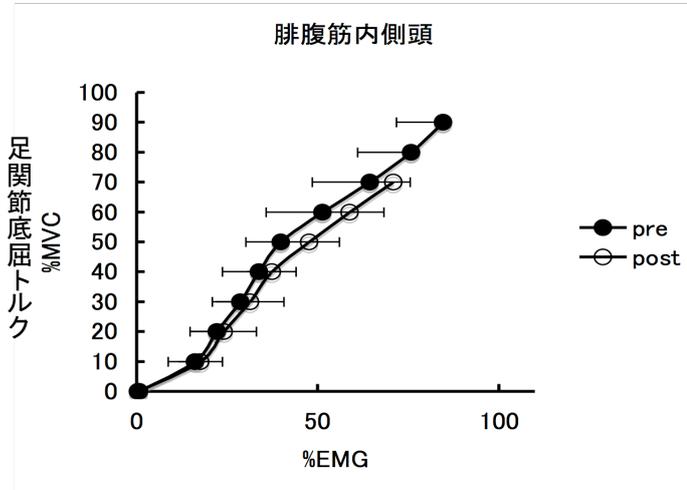
<図13> Pre測定, Post測定の
外側広筋腱伸張(mm)ー膝伸展トルク(%MVC)



<図14> Pre測定, Post測定の
 腓腹筋内側頭筋腱伸張(mm)一足関節底屈トルク(%MVC)



<図15> 膝関節伸展ramp力発揮中の大腿筋群のEMG



<図16> 足関節底屈ramp力発揮中の下腿筋群のEMG

〈表3〉 膝蓋腱長,外側広筋・腓腹筋内側頭の筋厚,筋束長,羽状角

〈Pre測定,Post測定における膝蓋腱長(cm)〉

	膝蓋腱長(cm)	
	average	SD
pre	47.5	2.1
post	47.1	2.1

〈Pre測定,Post測定における,
外側広筋(VL),腓腹筋内側頭(MG)の筋厚(cm),羽状角(°),筋束長(cm)〉

		VL腱組織		MG腱組織	
		average	SD	average	SD
筋厚(cm)	pre	2.4	0.3	1.9	0.2
	post	2.4	0.3	2.0	0.3
羽状角(°)	pre	13.9	3.7	19.0	3.3
	post	13.7	3.8	19.3	3.1
筋束長(cm)	pre	10.6	3.7	6.1	1.1
	post	10.9	3.9	6.0	1.0

議論

本研究では、高強度で間欠的な走運動が膝蓋腱、外側広筋および腓腹筋内側頭の腱組織の弾性特性に与える影響を検討した。その結果、いずれの腱組織でも、Pre測定、Post測定での伸長—トルク関係、stiffness(N/mm)に有意な差は認められなかった。この結果から、最大努力での50m走を20本繰り返す作業課題は、下肢の腱組織に影響を与えないことが明らかになった。

本研究の結果を正しく検証するためには、作業課題前後で、以下の2つの項目が前提条件として成り立たなくてはならない。

a) 作業課題前後で、腱組織にクリープは起こっていない

b) 作業課題前後で、力発揮中の筋の貢献度が変化していない

よって、上記の2つの項目が本研究で成り立っているかを検証する。

a) 腱組織のクリープについて

クリープは、腱組織に一定の負荷を加える事で、時間と共に塑性変形が増加する現象を指す(筋の科学事典、福永哲夫 編)。腱組織にクリープが起これば、腱組織の初期長が変化する(Maganaris et al., 2002)。Maganaris et al. (2002)は、最大努力の80%の強度で足関節底屈筋力を反復した際の腓腹筋内側頭の腱伸長を測定し、筋収縮5回目までクリープが生じ、腱の初期長が変化したと報告している。もし、本研究の作業課題後において腱組織にクリープが生じていたとすると、腱組織の初期長が変化し、作業課題前後の腱組織の弾性特性の変化を正しく検証できていない可能性がある。そこで、本研究の作業課題後のそれぞれの腱組織でクリープが起きているか、Pre測定とPost測定の安静時の腱組織の腱長を比較することで検証した。なお、外側広筋および腓腹筋内側頭の腱組織は腱長を実測できなかったため、筋束長と羽状角の変

化から腱長の変化を検討した。

膝蓋腱

作業課題前後の安静時のP1-P2の長さを比較した。その結果、Pre測定とPost測定でのP1-P2の長さに有意な差は得られなかった(表3)。よって、Pre測定、Post測定で安静時の膝蓋腱の腱長は変化していないことが示された。つまり、作業課題後の膝蓋腱にクリープは起こっていなかったと考えられる。

外側広筋の腱組織

作業課題前後の安静時の外側広筋の筋束長と羽状角の値を比較した。その結果、Pre測定とPost測定での筋束長と羽状角の値に有意な差は得られなかった(表3)。もし外側広筋の腱組織(膝蓋腱+腱膜)にクリープが起こると、腱組織が伸長するため、深部腱膜に付着している筋束も伸長され、また、羽状角も小さくなり、結果的に安静時の筋束長と羽状角が変化する。しかし、本研究の場合は、Pre測定、Post測定でそれらの項目に有意な差がなかったことから、作業課題後の外側広筋の腱組織にクリープは起こっていなかったと考えられる。

腓腹筋内側頭の腱組織

作業課題前後の安静時の腓腹筋内側頭の筋束長と羽状角の値を比較した。その結果、Pre測定とPost測定での筋束長と羽状角の値に有意な差は認められなかった(表3)。よって、外側広筋の腱組織と同様に、作業課題後の腓腹筋内側頭の腱組織(アキレス腱+腱膜)にクリープは起こっていなかったと考えられる。

以上のことから、いずれの腱組織においても、作業課題後にクリープは起

こっていなかったことが明らかになった。つまり、本研究における作業課題前後の腱組織の弾性特性の検証に当たり、腱組織のクリープによる影響は無視できると考えられる。

b) 発揮されたトルクに対する協働筋群の貢献度について

膝蓋腱

膝蓋腱は純粋な外部腱であるため、仮に作業課題で同じ腱張力に対する大腿部の協働筋群の貢献度が変化したとしても、膝蓋腱にかかる腱張力は変化しない。よって、作業課題前後での膝蓋腱の腱伸長を測定する上で、協働筋群の貢献度の変化による影響は排除できる。

外側広筋・腓腹筋内側頭の腱組織

作業課題前後で作業課題前後の ramp 力発揮時で、大腿、下腿のそれぞれの筋の貢献度が変化していないかを確認するため、作業課題前後の膝関節伸展・足関節底屈 ramp 力発揮中の大腿・下腿の筋群の EMG を検証した。その結果、作業課題前後の膝関節伸展・足関節底屈 ramp 力発揮中の大腿・下腿部の各筋の EMG の変化に有意な差は認められなかった(図 13・14)。Ullrich et al. (2007) は、作業課題中前後で力発揮した際の大腿協働筋群の平均筋電位を比較し、作業課題前後で各筋の平均筋電位に有意な差がなかったため、作業課題前後で大腿協働筋群の筋活動レベルが変化していないことを示した。そのことは、協働筋群の貢献度が変化していないことを表すと考察している。本研究では 10%MVC ごとの %EMG (図 13・14) は、平均筋電位の値より算出していることから、作業課題前後の各筋の EMG の変化に有意な差は認められなかったという本研究の結果は、ramp 力発揮時の下肢筋群の筋活動レベルが Pre 測定と Post 測定で変化しなかったことを示している。つまり、作業課題前後で下

肢の協働筋群の貢献度は変化していないと示唆される。このことから、本研究における作業課題前後の腱組織の弾性特性の検証に当たり、協働筋群の貢献度による影響は無視できると考えられる。

以上のことから、最大努力での 50m 走を 20 本繰り返す作業課題は、膝蓋腱、外側広筋・腓腹筋内側頭の腱組織の弾性特性に影響を与えないという本研究の結果を正しく検証できると考えられる。

本研究の作業課題は、下肢の腱組織の弾性特性を変化させた作業課題 (Kubo et al., 2001b, 2007) と比較して、腱組織に加わる張力は大きいですが、走運動中に腱組織に加わる張力の時間は短い課題と考えられる (Komi et al., 1990, Scott et al., 1990)。さらに、上記の先行研究の作業課題が単一の筋収縮様式であるのに対して、本研究は異なる筋収縮様式が複合的に組み合わった課題である (Ishikawa et al., 2003, 2007)。よって、本研究の結果と、単関節動作を作業課題に用いて腱組織の一過性の変化を検討した先行研究 (Kubo et al., 2001a, 2001b, Mademli et al., 2006, Ullrich et al., 2007) の結果とを、作業課題の強度や筋収縮様式などの面から単純に比較できない。しかし、本研究では、Post 測定の最大随意等尺性膝関節伸展トルク、最大随意等尺性足関節底屈トルクそれぞれ値が Pre 測定時のそれと比較して、それぞれ 26%、11%有意に低下している。先行研究 (Kubo et al., 2000, Mademli et al., 2007) でも同程度低下していることを考慮すると、本研究の作業課題の強度は先行研究と同様に、少なくとも下肢筋群の力発揮能力に影響を与える程度の強度であったことがいえる。つまり、最大努力での 50m 走を 20 本繰り返す作業課題は、下肢筋群の力発揮能力に影響を与えるものの、膝蓋腱、外側広筋・腓腹筋内側頭の腱組織の弾性特性に影響を与えないことが明らかとなった。

Kubo et al. (2007)は、ドロップジャンプのようなバリスティックな動作は、単関節動作と比較して大きな力が発揮されるものの、力発揮時間が短いため、結果的に腱組織の弾性特性に影響を与えないことを示した。また、腱組織の弾性特性に影響を与える因子として、発揮する力と時間の積である力積を挙げ、連続的にドロップジャンプをする作業課題前後で腱組織の弾性特性に変化がなかった理由の一つは、作業課題が腱組織に加える力の力積が小さかったためであると考察した。このことから、本研究の結果の要因について、腱組織に加えた力の力積の面から分析する。

本研究の作業課題の負荷強度を、作業課題中に下肢の腱組織に加えた力の力積として算出した。本研究では、以下の式より推定する。

腱組織に加えた力の力積

$$= \text{走運動中の腱張力(N)} \times \text{接地時間(s)} \times \text{右足歩数} \times \text{試行本数}$$

高強度の走運動中の膝蓋腱および外側広筋の腱組織の腱張力を実測した報告はない。唯一、床反力から膝蓋腱の腱張力を推定した Scott et al. (1990)によると、5.3m/s の速度で走った時の膝蓋腱のピークの腱張力は 6.9BW (BW=自重(kg))、膝蓋大腿張力(Patellofemoral force)は 11.1BW であるとしている。Scott et al. (1990)の研究から本研究のランニング動作中の膝蓋腱、外側広筋の腱組織に加わるピーク腱張力を推定すると、膝蓋腱にかかる腱張力(N)=66.6(kg) × 9.8 × 6.9=4,505(N)、外側広筋の腱組織に加わる腱張力(N)=66.6(kg) × 9.8 × 11.1=7,245(N)となる。Mero et al. (1982)は、スプリント走の脚の接地時間は 0.08 秒～0.1 秒と示している。しかし、接地時間すべてに上記のピークの腱張力がかかっているわけではない。Scott et al. (1990)は走動作中の接地時間-腱張力関係を検証し、接地時間中に腱張力は二等辺三角形のような軌跡を描くことを明らかにしている。上記の報告から、一回分の片足接地時に膝蓋腱、外側広筋の腱組織に加わる張力は、それぞれ

$4,505(N) \times 0.1(s) \times \frac{1}{2} = 225(N)$, $7,245(N) \times 0.1(s) \times \frac{1}{2} = 362(N)$ と推定できる.

加藤(1998)は,成人男性が7m/s前後のスピードで走った際の平均のピッチ(Hz)は約4.3Hzになると示していることから,本研究での50m走の右足の平均歩数は,約16歩と推定する.これらのことを考慮した上で,本研究の作業課題中の膝蓋腱にかかる力の力積を推定すると,

膝蓋腱に加わる力の力積

$$=4,505(N) \times 0.1(s) \times \frac{1}{2} \times 16(\text{歩}) \times 20(\text{試行}) = 72,080(N \cdot s)$$

外側広筋の腱組織に加わる力の力積

$$=7,245(N) \times 0.1(s) \times \frac{1}{2} \times 16(\text{歩}) \times 20(\text{試行}) = 115,920(N \cdot s)$$

となる. Kubo et al. (2001b)の報告で,外側広筋の腱組織の弾性特性を変化させた2つの等尺性膝伸展筋力発揮課題が大腿部の腱組織に加える力の力積を推定すると,膝蓋腱に加わる力の力積はそれぞれ約492,170(N·s),約536,913(N·s),外側広筋の腱組織に加わる力の力積はそれぞれ約830,188(N·s),約905,660(N·s)と考えられる(Kubo et al., 2001b .Fig. 4より,発揮されたトルク(Nm)と発揮時間(s)の積のから求めたET3とET4の値を,膝蓋腱に加わる力の力積はLu and O'Connor et al. (1996),外側広筋の腱組織に加わる力の力積はVisser et al. (1993)が算出したモーメントアーム(m)で除して推定). また,連続ドロップジャンプ前後で外側広筋の腱組織の弾性特性が変化しなかったKubo et al. (2005)が膝蓋腱の腱組織に加えた力の力積は,約140,000(N·s)と考えられる(Ishikawa et al., 2003)は,1回のドロップジャンプ中には,膝蓋腱に対して約7,000Nの腱張力が200msかかるとしているので,1回のドロップジャンプに膝蓋腱にかかる腱張力(=7,000(N)×0.2(s))をKubo et al. (2005)の試行回数(=100回)と掛け合わせて推定). 本研究では,作業課題中の11人の被検者の平均速度は7.3±0.19(m/s)であり,Scott et al. (1990)の走速度より速いため,彼らが推定し

た腱張力より大きな値となると考えられる。しかし、その差を見積もったとしても、本研究の作業課題中に膝蓋腱にかかる力の力積は、Kubo et al. (2001b)の報告よりも小さいことは明らかである。さらに、本研究ではドロップジャンプを対象にした Kubo et al. (2005)が腱組織に加えた力の力積の約半分の量しか膝蓋腱に与えていなかった。以上のことから、本研究において、膝蓋腱と外側広筋の腱組織の弾性特性が変化しなかったのは、作業課題が大腿部の腱組織に加えた力の力積が小さかったためである可能性がある。

Komi et al. (1988)は、6m/s 以上のスピードで走るスプリント走でアキレス腱にかかるピークの腱張力は、9,000N と報告している。よって、本研究の作業課題中にアキレス腱にかかる力の力積を、Komi et al. (1988)の値を用いて膝蓋腱にかかる力の力積と同様の方法で推定すると、

アキレス腱にかかる力の力積

$$=9,000(\text{N}) \times \frac{1}{2} \times 0.1(\text{s}) \times 16(\text{歩}) \times 20(\text{試行})=144,000(\text{N} \cdot \text{s})$$

となる。一方、腓腹筋内側頭の腱組織の弾性特性を変化させた Kubo et al. (2002)の作業課題中に腱組織にかかった力の力積を推定すると、約221,957(N・s)と考えられる(Kubo et al. (2002)の Fig. 2から得た力発揮10回ごとの平均発揮トルク(Nm)を、Visser et al. (1993)が算出したモーメントアームで除し、それらの値を合計して推定)。よって、本研究の作業課題中に腱組織にかかった力の力積の方が、Kubo et al. (2002)の作業課題中のそれよりも小さい。

以上のことから、本研究で得られた、作業課題前後で腱組織の弾性特性に変化はなかったという結果の一つの要因として、作業課題が腱組織に加えた力の力積が小さかったためであることが示唆される。つまり、50mを最大努力で20本走る本研究の作業課題は、瞬間的に発揮される力は大きいものの、力

の発揮時間が短いため、単関節動作で等尺性の力発揮を維持する先行研究の作業課題と比較して、腱組織に加わる力の力積が小さかったことが考えられる。上記の知見は、腱組織に加わる力の力積が小さければ腱組織の弾性特性は変化しないという点で Kubo et al(2007)を支持するものである。本研究の作業課題が腱組織に加えた力の力積と先行研究のそれを比較すると、膝蓋腱、外側広筋の腱組織に関して弾性特性を変化させるには、本研究で腱組織に加えた力の力積の約 7 倍の量が必要になると推定される。つまり、膝蓋腱・外側広筋の腱組織の弾性特性を変化させるには、最大努力での 50m 走を 140 本以上走らなければならないことになる。このことから、一般的な競技における高強度の走運動が膝蓋腱・外側広筋の腱組織の弾性特性に及ぼす影響は小さいと考えられる。一方で、腓腹筋内側頭の腱組織の場合は、弾性特性を変化させるには本研究で腱組織に加えた力の力積の約 1.6 倍の量が必要になると推定される。つまり、被検者に最大努力での 50m 走を 32 本以上走らせれば、腓腹筋内側頭の腱組織の弾性特性は変化する可能性があると考えられる。しかし、20 本目の走速度が 1 本目の走速度よりも有意に低下していることを考慮する限り、被検者に対して最大努力での 50m 走を 20 本以上実施させるのは厳しい。これらのことから、人間が実施可能な範囲の高強度で連続的な走運動が、腱組織の弾性特性に与える影響は小さいことが考えられる。

Kubo et al. (2001)や Arampatzis et al. (2007)は、陸上短距離選手の外側広筋の腱組織は、一般人のそれと比べて伸展性が高く、一方で腓腹筋内側頭の腱組織の伸展性はその逆であると報告している。これらの報告は、腱組織の一過的な変化が繰り返されたことによる腱の長期的な適応とも推察された。しかし、本研究の結果より、上記の報告は、走運動によって腱組織の一過的な変化が繰り返されて起こった適応ではないことが考えられる。他の要因として、遺伝的な要因や、一過性の変化ではなく、中・長期的な変化も考えられる

が、その点について本研究の結果から明らかにすることはできない。

また、一般人と比較した陸上短距離選手の大腿と下腿の腱組織の伸展性の特徴が異なる点から、走運動は大腿部と下腿部の腱組織の弾性特性に対して異なる影響を与えると推測された。しかし、本研究の作業課題は、大腿部、下腿部いずれの腱組織の弾性特性も変化させなかったことから、反復的な走運動がそれぞれの腱組織に与える影響の差異について明らかにすることはできない。しかし、走運動中に下腿部の腱組織に加わる張力は大腿部にかかるそれよりも大きいことから (Scott et al. 1990)、中・長期的に検証した際に、腱組織の弾性特性に対して異なる影響を与える可能性はある。陸上短距離選手の腓腹筋内側頭の腱組織は一般人と比較して伸展性が低いという知見は、高強度の走運動中、常に大きな張力がかかることに対する腱組織の中・長期的な適応の可能性を示唆した。以上のことは、今後の検討課題である。

本研究では、最大努力での 50m 走を 20 試行行う作業課題は、下肢筋群の力発揮能力には影響を与えるものの、膝蓋腱、外側広筋・腓腹筋内側頭の腱組織の弾性特性には影響を与えないことを明らかにした。このことから、高強度の走運動が下肢の腱組織に与える一過性の影響は小さいことが示唆された。

要約

本研究は、高強度で間欠的な走運動が、膝蓋腱と外側広筋・腓腹筋内側頭の腱組織の弾性特性に与える影響を明らかにすることを目的とした。本研究の結果、最大努力での50m走を20本実施した前後で、膝蓋腱、外側広筋および腓腹筋内側頭の腱組織の弾性特性は変化しなかった。しかし、Post測定でのMVC膝伸展トルク、足関節底屈トルクは、Post測定と比較して有意に低下していることから、本研究の作業課題は、筋の力発揮能力には影響を与えるものの腱組織の弾性特性に一過性の影響を与えなかったことが明らかになった。また、本研究の作業課題が腱組織に加えた力の力積は、先行研究でのそれよりも低いことから、人間が実施可能な範囲の高強度で連続的な走運動が腱組織の弾性特性に与える影響は小さいと考えられる。よって、陸上短距離選手の腱組織の弾性特性が一般人と異なる(Kubo et al., 2001, Arampatzis et al., 2007)要因は、腱組織が一過性の変化を繰り返しておこった適応ではなく、別の要因である可能性が高い。

本研究の結果から、高強度の走運動が下肢の腱組織に与える一過性の影響は小さいことが示唆された。

参考文献

Adamantios Arampatzis, Kiros Karamanidis, Gaspar Morey-Klapsing, Gianpiero De Monte, Savvas Stafilidis. Mechanical properties of the triceps surae tendon and aponeurosis in relation to intensity of sport activity *Journal of Biomechanics* 40 (2007) 1946-1952.

Coupe C, Kongsgaard M, Aagaard P, Hansen P, Bojsen-Moller J, Kjaer M, Magnusson SP. Habitual loading results in tendon hypertrophy and increased stiffness of the human patellar tendon. *J Appl Physiol* 105:805-810, 2008.

Fukashiro S, Itoh M, Ichinose Y, Kawakami Y, Fukunaga T. Ultrasonography gives directly but noninvasively elastic characteristic of human tendon in vivo. *Eur J Appl Physiol* 71: 555-557, 1995.

Ishikawa M, Finni T, Komi PV. Behaviour of vastus lateralis muscle-tendon during high intensity SSC exercises in vivo. *Acta Physiol Scand* 2003, 178, 205-213.

Ito M, Kawakami Y, Ichinose Y, Fukashiro S, Fukunaga T. Nonisometric behavior of fascicles during isometric contractions of a human muscle. *J Appl Physiol* 85: 1230-1235, 1998.

Komi PV. Relevance of in vivo force measurements to human biomechanics. *J Biomechanics* Vol. 23, Suppl. 1, pp. 23-34, 1990.

Kubo K, Kanehisa H, Kawakami Y, Fukunaga T. Elasticity of tendon structures of the lower limbs in sprinters. *Acta Physiol Scand* 2000, 168, 327-335.

Kubo K, Kanehisa H, Kawakami Y, Fukunaga T. Elastic properties of muscle-tendon complex in long-distance runners. *Eur J Appl Physiol* (2000) 81: 181-187.

Kubo K, Kanehisa H, Kawakami Y, Fukunaga T. Effect of repeated muscle contractions on the tendon structures in humans. *Eur J Appl Physiol*(2001)84:162-166. (a)

Kubo K, Kanehisa H, Kawakami Y, Fukunaga T. Influences of repetitive muscle contractions with different modes on tendon elasticity in vivo. *J Appl Physiol* 91:277-282, 2001. (b)

Kubo K, Kanehisa H, Kawakami Y, Fukunaga T. Effects of resistance and stretching training programmes on. *Journal of Physiology* (2002), 538.1, pp. 219-226.

Kubo K, Kanehisa H, Fukunaga T. Influences of repetitive drop jump and isometric leg press exercises on tendon properties in knee extensors. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2005, 19(4), 864-870.

Kubo K, Morimoto M, Komuro T, Yata H, Tsunoda N, Kanehisa H, Fukunaga T.

Effects of Plyometric and Weight Training on Muscle-Tendon Complex and Jump Performance. *Medicine & Science In Sports & Exercise* 2007 Oct;39(10):1801-10.

Mademli, L., Arampatzis, A., Walsh, M. Effect of muscle fatigue on the compliance of the gastrocnemius medialis tendon and aponeurosis. *J Biomech* 39: 426-434, 2006.

Maganaris CN, Baltzopoulos V, Sargeant AJ. Repeated contractions alter the geometry of human skeletal muscle. *J Appl Physiol* 93: 2089-2094, 2002.

Maganaris CN. Tendon conditioning: artefact or property? *Proc. R. Soc. Lond. B (suppl)* 270, S39-S42 (2003).

Mero A, Luhtanen P, Komi PV. Zum Einfluss von Kontaktphasenmerkmalen auf die Schrittfrequenz beim Maximzl-sprint. *Leistungssport* 12(4):308-313, 1982.

Mero A, Komi PV, Gregor RJ. Biomechanics of sprint running a review. *Sports Medicine* 13(6):376-392, 1992.

Rugg SG, Gregor RJ, Mandelbaum BR, Chiu L. In vivo moment arm calculations at the ankle using magnetic resonance imaging (MRI). *J Biomech* 23:495-501, 1990.

Scott SH, Winter DA. Internal forces at chronic running injury sites. *Medicine and science in sports and exercise*, Vol. 22, No. 3:357-369, 1990.

Stafilidis S and Arampatzis A. Muscle-tendon unit mechanical and morphological properties and sprint performance. *Journal of sports sciences*, July 2007;25(9):1035-1046

Stephen J. Pearson a, Katherine Burgess, Gladys N.L. Onambele. Creep and the in vivo assessment of human patellar tendon mechanical properties. *Clinical Biomechanics* 22 (2007) 712-717.

Ullrich AC, Mademli L, Arampatzis A. Effect of submaximal and maximal long-lasting contractions on the compliance of vastus lateralis tendon and aponeurosis in vivo. *Journal of Electromyography and Kinesiology* 2007 Dec 13.

Viser JJ, Hoogkamer JE, Bobbert MF, Huijing PA. Length and moment arm of human leg muscles as a function of knee and hip-joint angles. *Eur J Appl Physiol* (1990) 61:453-460.

加藤謙一 (1998). 発育期における走運動の発達. *バイオメカニクス研究* 2(2)1998, 99-108.

謝辞

本研究は、早稲田大学スポーツ科学学術院 川上泰雄教授の御指導のもと行われました。川上教授には実験計画の段階から実験手法の習得、分析方法および論文作成に至るあらゆる面において御指導いただきました。ここに深く感謝いたします。鹿屋体育大学 福永哲夫学長には、私が大学2年時から5年間に渡り、研究に対する姿勢、実験結果の解釈および論文構成等について多くの御助言をいただきました。また、研究以外の面でも多くの助言をくださり、私の大学生活を支えてくださいました。心より感謝いたします。早稲田大学スポーツ科学学術院 矢内利政教授、東京大学大学院総合文化研究科 金久博昭教授には、論文構成等幾度となく貴重な御意見をいただきました。本当にありがとうございました。

川上研究室、福永研究室、矢内研究室の皆様には、研究の全般にわたりご指導、ご協力頂きました。また、被検者としても、7月の灼熱の炎天下で、最大努力での50m走を20本行うという過酷すぎる作業課題にも関わらず、快く参加していただきました。本当にありがとうございました。光川眞壽さんには、本研究の構想段階から実験、分析、論文執筆にいたるまで、すべての過程で全面的に協力していただきました。また、挫けそうになる私を幾度となく元気づけてくださり、精神的にも支えてくださいました。光川眞壽さんのご協力がなければ、本研究は到底完遂することができませんでした。心から感謝申し上げます。栗原俊之助手には、実験から論文執筆にかけて貴重なご意見を多くいただきました。ありがとうございました。また、福井俊太郎君、清水美奈さん、阪口正律君、倉持江弥君には、同期の仲間としていつも私を支えてくださいました。楽しく、そして充実した学生生活を送れたのも、同期の皆様がいてくださったおかげです。本当にありがとうございました。

最後に、大学6年間で心身共に支えてくれた家族に、心から感謝いたします。
祖父母はいつも笑顔で温かな言葉をかけてくださり、私を励ましてくれました。
その言葉に私は幾度となく救われました。父母はどんな時でも私の意志
を尊重してくれ、私をいつも支えてくれました。現在の私があるのは、温か
な家族がいてくれたおかげです。心から感謝の言葉を述べたいと思います。
本当にありがとうございました。