

2012 年度 修士学位論文

インピーダンス可変装置を用いた粘性と
弾性を組み合わせた負荷による
トレーニング効果の検証

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
6211110016-6
中塚惇

要旨

6211110016-6

中塚惇

「インピーダンス可変装置を用いた粘性と弾性を組み合わせた負荷による トレーニング効果の検証」

キーワード：粘性と弾性の複合負荷，等粘性負荷，筋力，上腕二頭筋，上腕筋，

【目的】

本研究室では粘性と弾性と組み合わせた負荷を生み出すことが可能なインピーダンス可変装置を開発した。これにより従来では実現困難であった特定の関節角度に特化したトレーニングが可能となり、競技力向上に役立つことが期待されている。多くの先行研究ではトレーニング効果を筋力の最大値のみ評価しており、関節角度全域での筋力測定の検討は少なく、部分的な筋力向上が可能かは不明である。そこで本研究では、開発した装置を用いて粘性負荷に部分的に弾性負荷を組み合わせ、特定関節角度に特化した肘屈曲トレーニングを長期間行わせ、そのトレーニング効果を関節角度全域での筋力と筋全長にわたっての形態変化の観点から検討すること、また筋力や筋形態の変化に与える要因をトレーニング中のデータから検討することを目的とした。

【方法】

被験者は定期的な運動習慣の無い健康な 24 名の男子大学生を対象とし、粘性のみでトレーニングを行う群（粘性 TR 群：n=8）、粘性負荷に部分的に弾性負荷を組み合わせた複合負荷でトレーニングを行う群（複合 TR 群：n=8）のトレーニング群 2 群と運動を行わない群（Cont 群：n=8）の 3 群に分けてトレーニング効果を比較した。

トレーニングには研究室で開発した装置を用い、トレーニング群には可能な限り素早く肘屈曲動作を行わせるトレーニングを週 3 回の頻度で 8 週間行わせた。トレーニングは両トレーニング群ともに粘性抵抗 $8[\text{Nm}/(\text{rad}/\text{sec})]$ を用い、さらに複合 TR 群では関節角度 $0.5\sim 1.0[\text{rad}]$ の区間に弾性負荷 $(40[\text{Nm}/\text{rad}])$ を加えた負荷を用いた。回数は粘性 TR 群では 12 回 6 セット、複合 TR 群では 8~10 回を 6 セット、セット間休息は 1 分で行わせた。

筋力測定には筋力測定装置(Biodex system4, Biodex)での等尺性および等速性筋力と開発した装置を用いた等粘性負荷での関節角度区間毎の筋力測定をトレーニング前後に行った。筋形態の変化に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)を用い右側上腕部を撮影し、得られた画像を画像分析ソフトウェア(Osiris v. 4.1.1

32-bit, Pixmeo Sarl)にて上腕二頭筋および上腕筋を各筋の全長にわたって横断面積を計測し、上腕部位毎の筋横断面積および筋体積を算出した。またトレーニング中のパラメータとして最大負荷と動作中のトルクの時間積分値を算出した。

【結果と考察】

等尺性および等速性最大筋力はトレーニング後の有意な増加がみられ、トレーニング群間での差は認められなかった。同様に、等粘性負荷による関節角度毎の筋力も両トレーニング群で有意な増加が認められたが、トレーニング群間での差は認められず、複合負荷による特定関節角度区間での筋力向上は見られなかった。

上腕部位毎の筋横断面積変化では粘性 TR 群において上腕二頭筋では 70%、上腕筋では 60%部位での有意な増加が認められた。また、筋体積の変化で見ると、上腕屈筋群では時間による主効果が見られ、上腕筋体積の増加率では複合 TR 群が Cont 群と比較して有意な高値を示した。このことから、筋形態の変化はトレーニング方法によって操作可能であること、また協働筋間でも差があることが示唆された。

相関分析の結果、粘性 TR 群において負荷強度と動作前半部分での筋力向上、トルク時間積分値と筋体積増加との間に有意な正の相関関係が見られた。また、両トレーニング群において最大筋力の向上と筋体積増加との間に相関関係が見られており、目的に応じたトレーニングの設定が必要となることが明らかとなった。

【結論】

複合負荷によるトレーニングによって全関節角度域での筋力向上が見られたが、狙いとした特定関節角度区間での筋力向上は他の区間と同等であった。また、筋体積の変化は上腕筋のみ有意な増加が見られ、特定の筋だけを肥大させることの可能性が示唆された。

また、実施したトレーニング内容の解析により、動作前半での筋力向上にはトレーニング強度、筋肥大にはトルク時間積分値との関係性が示され、運動学や力学的観点からのトレーニングの検討の必要性が明らかとなった。

Abstract

62110016-6

Atsushi NAKATSUKA

The effect of combined viscous and elastic load training by a variable mechanical impedance device

Keyword: Combined viscous and elastic load, Isoviscous load, Muscular strength,
Biceps brachii, Brachialis.

Purpose: The purpose of this study was to investigate the effect of combined viscous and elastic load training to the changes in muscular strength and morphology.

Methods: In this study, a developed variable mechanical impedance device was used to yield isoviscous condition and combined viscous and elastic load condition. Twenty-four healthy men were randomly divided into three groups (isoviscous training group, combined load training group, and control group). The training was performed maximal concentric elbow flexion for 8 weeks. Before and after the training, muscular strength was evaluated in three types of contractions (i.e. isometric, isokinetic and isoviscous load). Moreover, muscle volumes of the biceps brachii and brachialis were measured by magnetic resonance images.

Results: Muscular strength in each contraction type was significantly increased after training (isometric: 15.6%, 10.1%, isokinetic slow: 13.2%, 16.7%, isokinetic fast: 25.7%, 26.2%, isoviscous: 34.2%, 36.2% for isoviscous and combined load training conditions, respectively). The changes of muscular strength were not significantly different between training conditions. The muscle volume of total elbow flexor significantly increased after training. However, brachialis muscle volume was increased only in the combined load training group.

Conclusion: Both of isoviscous and combined load training improved the muscular strength and muscle volume. There were no significant difference in muscle strength improvement by training methods. However, it is suggested that the combined load training has the possibility of muscle hypertrophy on specific site.

目次

第1章 緒論	1
1.1 研究の背景	1
1.1.1 トレーニングの種類と筋力向上	2
1.1.2 筋横断面積の変化	3
1.1.3 先行研究の問題点	6
1.1.4 新たなトレーニング装置の必要性	6
1.2 研究の目的	7
第2章 方法	8
2.1 被験者	8
2.2 トレーニング装置	8
2.3 トレーニングの設定	10
2.4 筋力測定	10
2.4.1 等速性および等尺性筋力の測定	10
2.4.2 等粘性負荷による測定	11
2.5 筋形態の測定	12
2.5.1 部位毎の筋横断面積	12
2.5.2 筋体積	12
2.6 トレーニング中のパラメータ	13
2.6.1 負荷強度	13
2.6.2 トルク時間積分値	13
2.6.3 主観的運動強度(RPE)	13
2.7 統計解析	13
第3章 結果	14
3.1 筋力変化	14
3.1.1 等尺性および等速性筋力	14
3.1.2 関節角度毎の筋力	17
3.2 筋の形態変化	19
3.2.1 部位毎の筋横断面積の変化	19
3.2.2 筋体積変化	20

3.3 トレーニング中のパラメータの変化	22
3.3.1 最大負荷強度の各週変化	22
3.3.2 トルク時間積分値の各週変化	23
3.3.3 主観的運動強度の各週変化	24
3.4 トレーニング効果に影響する要因の検討	25
3.4.1 筋力向上に影響を与える要因	25
3.4.1.1 負荷強度	25
3.4.1.2 トルク時間積分値	26
3.4.2 筋体積変化に影響を与える要因	26
3.4.2.1 負荷強度	26
3.4.2.2 トルク時間積分値	27
3.4.3 筋力向上と筋体積変化の関係性	28
第4章 考察	29
4.1 特定関節角度における筋力向上	29
4.2 部位毎の筋横断面積の変化	30
4.3 筋体積変化	31
4.4 トレーニング効果に影響する要因	32
4.4.1 筋力向上への影響	32
4.4.2 筋肥大への影響	33
4.5 総合討論	35
4.5.1 トレーニング効果の妥当性	35
4.5.2 現場への応用	36
4.5.3 今後の課題	37
第5章 結論	38
文献	39

第1章 緒論

1.1 研究の背景

近年、レジスタンストレーニングはスポーツ選手だけでなく、健康維持や増進のためなどの目的で一般人にも広く普及されるようになった。レジスタンストレーニングとは筋機能の向上に主眼を置いたトレーニングの総称であり、一般的には重量物や特殊な装置を用いて身体に負荷を与えたり、強い力発揮を必要とする。レジスタンストレーニングをテーマにした先行研究は数多く存在し、長期間のトレーニングによる筋力の向上、筋の形態変化といった適応を報告している。

トレーニングによる筋力の増加は神経的な要因と筋断面積の増加によると言われており、トレーニング初期の筋力向上は神経系の改善によって動員される筋線維が増加するからだと考えられている(Akima et al. 1999)。その後の筋力向上は筋断面積の増加によるものである。筋横断面積の増加はトレーニングを開始してすぐ起こる訳ではなく、ある程度の期間が経ってからの適応であるといわれている(福永 1996, 図 1-1)。これは年齢や性別により、適応にかかる時間に差はあるが、高齢者であっても筋肥大を生じることが報告されている(衣笠ら, 2003)。

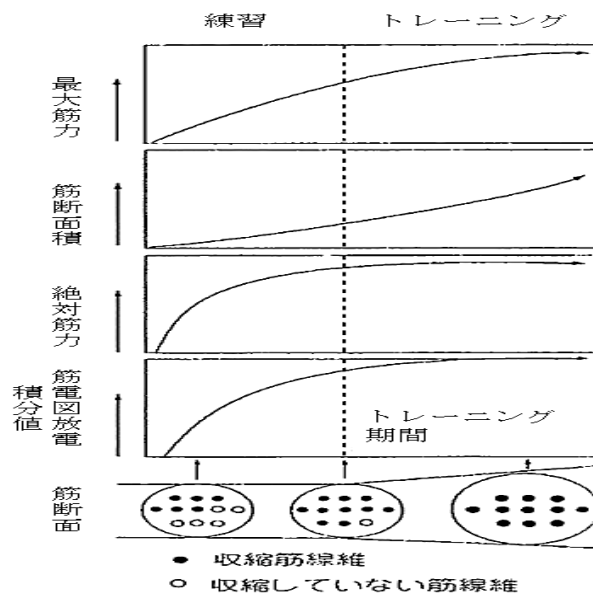


図 1-1. 筋力増加に関与する各要因の貢献度の経時変化

福永哲夫, 生化学,生理学からみた骨格筋に対するトレーニング効果, 山田 茂著

(有限会社 ナップ, 1996) より抜粋

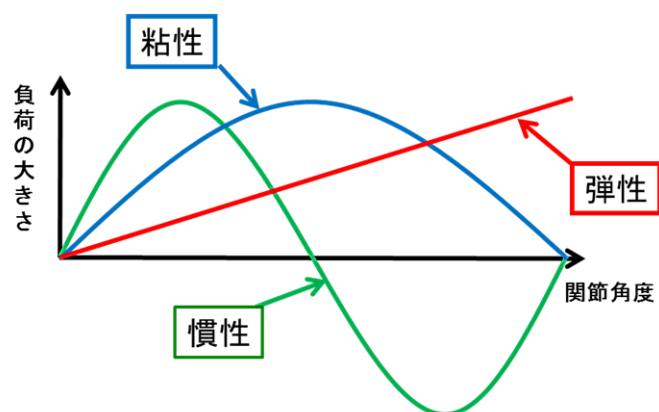
1.1.1 トレーニングの種類と筋力向上

従来のトレーニング実験には様々な種類が用いられており、多くの研究で筋力向上が報告されている。トレーニングの種類を考えるうえでまず考慮しなければならないのが、筋の収縮様式である。筋長の変化の分類は一般的に短縮性収縮(concentric:以下 CON 収縮)、伸張性収縮(eccentric:以下 ECC 収縮)の動的なものと、筋長の変化を伴わない等尺性収縮(isometric)の静的なものに大別される。さらに動的な筋活動の場合、筋に対する外的抵抗が一定であれば等張力性(isotonic)、動作速度が一定な場合は等速性(isokinetic)での筋収縮であると呼ばれる(金久 2006)。これら筋収縮様式の違いからトレーニングの種類は区別されるが、さらに用いる負荷様式の違いからもトレーニングの分類ができる。トレーニングに用いる負荷様式は大きく分けて 3 種類あり、負荷のかかり方に特徴がある(図 1-2)。

慣性負荷：物体の加速度に依存した負荷。この負荷は動作の前半部分で大きな負荷が発生するが動作後半では動作停止の為に逆方向への負荷がかかる。トレーニングに広く用いられるダンベルやバーベルはこの負荷様式である。

弾性負荷：距離に依存した負荷様式。動作の前半部分は負荷が小さいが、動作範囲の後半ほど負荷が大きくなる。ゴムやチューブでのトレーニングがこれにあたる。

粘性負荷：速度に比例して大きくなる負荷。動作前半部分は速度が小さいため、負荷も小さいが、動作の中盤では負荷が大きくなる。動作の終了とともに負荷も小さくなる。油圧や空気圧を用いたトレーニング装置やプールなどでのウォーキングは粘性負荷を利用したトレーニングである。



(重歳ら、2004,2007)

図 1-2. 動的な運動時の負荷特性

トレーニング研究の多くはダイナモメータを用いた等速性や等尺性、ダンベルやバーベルを用いたトレーニングによる報告であるが、弾性負荷や粘性負荷を用いたトレーニングの検討を行った研究でも、トレーニング効果があったことが報告されている。Colado and Triplett (2008)は高齢女性を対象にゴムチューブ群とマシンでのウェイトトレーニング群、運動を行わない群の3群に分け、10週間後の身体特性、筋力の変化を観察している。その結果、両トレーニング群で除脂肪体重の増加と脂肪量の減少、また筋力の増加が認められたと報告している。McGinley et al. (2007)は空気圧装置を用いたトレーニングを8週間行わせ、有意な筋力増加があったことを報告している。

また、異なる負荷様式を組み合わせたトレーニングの効果を検討しているものも存在する。Anderson et al. (2008)はバーベルの両端にゴムチューブを取り付け、ベンチプレスやスクワットトレーニングを行わせた結果、従来のバーベルのみのトレーニング方法よりも最大筋力の増加率が高かったことを報告している。一方で、負荷様式の違いによる効果の比較する研究はあまり存在しない。それはトレーニング方法と測定方法が一致していないと、トレーニング効果を過小評価してしまうという問題点があるからだと思う。その点を考慮してO'hagan et al.(1995)は油圧式のトレーニングマシンと両トレーニング方法では同等な効果があったことを報告している。他にもKovaleski et al. (1995)は同じ姿勢での等速性トレーニングと等張性トレーニングを6週間行わせ、筋力および筋パワーの変化を比較しているが、等張性でのトレーニングの方が効果は高かったという報告をしている。また、負荷様式の違いによる効果の比較で困難な点は、負荷量の統一である。前述のKovaleski et al.(1995)のトレーニング設定は、等張性トレーニングはトルク、等速性トレーニングは角速度を基準にしており、両トレーニング間の負荷が均等であったのかは不明である。こういった問題点があるため、トレーニングの研究は実験的に統制をしやすい等速性や等尺性、もしくは現場で使用されることの多いダンベルやバーベルを用いた研究が主となり、他の負荷様式でのトレーニング効果の検討は少ないと思われる。

1.1.2 筋横断面積の変化

最大筋力は筋の断面積に比例すると考えられており、多くの先行研究では筋の一部分の横断面積測定から筋肥大の程度を評価している。近年の研究では筋横断面積よりも筋体積の方が筋力との関係性が強いという指摘もあり(福永, 2002), MRI を用いて筋の全長にわたって筋横断面積を測定し、筋の体積を算出している研究もある(Holzbaur et al. 2007)。こ

の方法により、筋の一部分だけでなく筋全体の変化を観察することが可能となり、トレーニングによる筋形態変化に関する新たな知見が得られている。特に、Narici et al. (1989)らが報告した同一筋内であっても筋肥大には部位差が存在するという指摘はトレーニングによる筋形態の変化を観察する上で無視できないものである。彼らは 60 日間の等速性膝伸展トレーニングを行わせた結果、大腿四頭筋の近位部の肥大が大きかったと報告している。他にも筋全長にわたって筋横断面積を測定し、筋肥大に部位差があると報告している先行研究が数多く存在している(表 1-1)。この部位差が生じる原因についてはまだまだ不明な点が多いが、トレーニング中の筋活動の部位差が筋肥大の部位差を引き起こしていると考えられている(Narici et al. 1989, 崔ら 1998, Wakahara et al.2012)。Wakahara et al. (2012)はMRIの横緩和時間(T2)を用いて上腕三頭筋の筋活動量を部位毎に評価し、同じ動作で 12 週間トレーニングを行った後の筋の形態変化を観察すると、活動量と筋肥大が大きかった部位は一致していたと報告している。

このようなトレーニングによる筋肥大の部位差や身体特性の適応は、競技選手を対象とした身体特性の報告でも見られるようになってきており、今後のトレーニング現場への応用に注目されつつある。(勝田ら 1993, 北川 1996, 星川ら 2006, 池袋ら 2011)。例えば、池袋ら(2011)は重量挙げおよび陸上短距離選手の下肢筋群を超音波装置を用いて複数箇所測定し、一般人と比較している。それによると重量挙げ選手は一般人と比較して大腿四頭筋の近位から 30, 50, 70%と全域にわたって有意に大きいが、対して陸上短距離選手は 30, 50%部位と近位部での違いが認められたただけであった。同様に勝田ら(1993)はMRIを用いて様々な競技選手の身体特性を調査しているが、陸上選手や柔道選手は近位部が発達し、サッカー選手は大腿部全域にわたって筋が発達する傾向にあると報告している。このような結果から勝田らは身体特性の違いが明らかになれば、トレーニングする際の貴重な資料になると提案している。

表 1-1. 筋肥大の部位差を報告した先行研究一覧

測定筋	測定箇所	測定方法	運動頻度	運動形態	結果	著者	年
上腕伸筋群	1cm毎	MRI	16週/3回	ダンベル	中央部が高い	kawakami et al.	1995
上腕屈筋群	1cm毎	MRI	12週/2回	ダンベル+Isokinetic (60,180,240,300[deg/sec])	筋腹の部分が肥大	Roman et al.	1993
上腕屈筋群	3ヶ所	超音波	8週/3回	Isokinetic(ECC or CON, 180 or 30[deg/sec])	遠位が高い(ECCでのslow)	Farthing and Chilibeck	2003
上腕三頭筋	上腕部10%毎	MRI	10週/3回	Isom(90°)	中央部が高い	Kanehisa et al.	2002
上腕三頭筋	1cm毎	MRI	12週/3回	ダンベル	近位、中間部が高い	Wakahara et al.	2012
大腿四頭筋	6ヶ所	MRI	60日/4回	Isokinetic(CON, 120[deg/sec])	近位部が大さい	Narici et al.	1989
大腿四頭筋	2ヶ所	CT	20週/3回	マシン(3秒収縮, CON&ECC)	近位部が大さい	Smith and Rutherford	1995
大腿四頭筋	3ヶ所	MRI	8週/2回	バーベル	遠位、近位部が高い	崔ら	1998
大腿四頭筋	1cm毎	MRI	9週/3回	マシン	中央部が高い	Tracy et al.	1999
大腿四頭筋	15ヶ所	MRI	21週/2回	マシン	全域にわたって増加	Hakkinen et al.	2001
大腿四頭筋	2ヶ所	MRI	35日/3回	マシン	近位部が大さい	Seynnes et al.	2007
大腿四頭筋	2ヶ所	MRI	10週/3回	Isokinetic(CON&ECC,30[deg/sec])	遠位部の方が大さい	Blazevich et al.	2007
大腿四頭筋	3ヶ所	MRI	9週/3回	マシン	中央部が高い	Melnyk et al.	2009
上下肢屈伸筋	3ヶ所	MRI	8週/3回	Isokinetic(CON, 120[deg/sec])	VL, VI, BFは中央部のみ肥大	Housh et al.	1992

1.1.3 先行研究の問題点

先行研究では筋力や筋パワーの最大値のみで議論しているものが多い。しかし、競技選手の力発揮特性を考えると、必ずしも最大筋力や筋パワーが発揮される範囲だけが重要とは限らない。加藤ら(2006)は角度・角速度・トルクの関係から三次元局面を構築し、競技種目間で比較したところ、肘屈曲動作に種目特性が見られたと報告している。もし競技種目を考慮した特定の関節角度での筋力向上が可能となれば、さらなる競技力向上につながると思われる。しかし、従来のトレーニング方法では、特定の関節角度に特化したトレーニングは困難である。それに加えて、多くの先行研究のように筋力や筋パワーのみの測定では、動作範囲全域での評価が出来ず、部分的な筋力向上について検討が出来ない。したがって、関節角度全域に渡っての筋力を評価する必要がある。

また、トレーニング中の動作やパラメータからの検討を行った研究は少ない。トレーニングの負荷は動作によって大きく影響を受ける。慣性負荷を用いたトレーニングであれば動作速度や力の出し方によって筋への抵抗は大きく異なってくる(深代, 1997)。したがって、同じ強度でトレーニングを行ったとしてもトレーニング効果が異なるのは当然と考えられる。前述した筋肥大の部位差の変化についても、負荷の与え方の違いによる影響についての検討はまだまだ少ない。トレーニング中の運動学、力学的観点からトレーニングを検討することで新たな知見が得られると思われる。

1.1.4 新たなトレーニング装置の開発

そこで我々は、等粘性負荷に着目し、新たなトレーニング装置、筋力測定機器の開発を行ってきた(特許第 4956808, 筋力訓練装置及び筋力特性評価方法, 2012.)。等粘性負荷とは粘性負荷と同様、速度に依存した負荷様式を持ち、等速性負荷や等張性負荷と比較して、運動開始から終了まで負荷トルクが滑らかに増減する特徴を持つ(重歳ら, 2008)。この等粘性負荷を利用することで関節角度全域での筋力測定が可能である。

さらにこの装置はインピーダンス制御を用いて弾性負荷を組み合わせることができるといった特徴を持つ。このことにより、従来のトレーニング装置では実現困難であった動作中の負荷の大きさを自由に操作でき、新たなトレーニング方法を提案できるようになった。我々が開発した装置を用いることで特定関節角度に特化した新しいトレーニング方法が実現され、さらなる競技力向上が期待されている。

また、パーソナルコンピュータでの機械制御を行っており、動作中の角度変位やトルク

情報を取得可能となっており、この装置をトレーニングに用いることで運動学、力学的データからトレーニングの検討も可能となっており、筋にかかる負荷を定量的に測定可能である。このような観点からトレーニングを研究することによって新たな知見を得られる可能性がある。

1.2 研究の目的

我々が開発した装置では部分的に弾性負荷を加えた特定関節角度に特化したトレーニングを長期間行うことで、その区間での筋力向上が見られるのではないかと考えられる。同時に、従来 of 先行研究では筋活動の部位差が筋肥大の部位差を引き起こすと指摘されていることから、筋肥大する部位はトレーニング間で異なると予想される。また、我々が開発した装置を用いることによって関節角度全域にわたっての筋力評価とトレーニング中のデータが取得可能であり、新たな知見を得られると思われる。

したがって本研究では、動作中の負荷の大きさを自由に制御可能である研究室独自で開発した装置を用い、2つの目的を持って実験を行った。

1. 特定関節角度に特化したトレーニングが身体に与える影響を筋力と筋肥大の観点から検討すること
2. トレーニング中の負荷強度およびトルク時間積分値とトレーニング効果の関係性について検討をすること

第2章 方法

2.1 被験者

表 2-1. 被験者の身体的特性一覧

	人数 (人)	年齢 (歳)	身長 (cm)	体重 (kg)
粘性TR群	8	20.3 ± 1.8	172.8 ± 5.1	67.8 ± 7.5
複合TR群	8	21.4 ± 2.5	171.2 ± 3.9	65.2 ± 7.6
Cont群	8	22.4 ± 3.0	176.2 ± 4.0	66.3 ± 8.9

被験者は現在定期的な運動習慣のない健常な男子学生 24 名を対象とした。これらを粘性負荷に部分的に弾性負荷を加えてのトレーニング群(複合 TR 群), 粘性のみでのトレーニング群(粘性 TR 群), トレーニングを行わないコントロール群 (Cont 群) の 3 群に分けて実験を行った。これら 3 群の身体的特性を表 2-1 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。なお, 被験者には実験期間中の本実験以外でのトレーニングは制限をした。本研究は, 事前に立命館大学における人を対象とする研究倫理審査委員会の承認 (承認番号:BKC-人-2011-003) を得てから行なった。また, 被験者には実験に先立ち本研究の趣旨を十分に説明し, 内容の理解と参加の同意を得た。

2.2 トレーニング装置

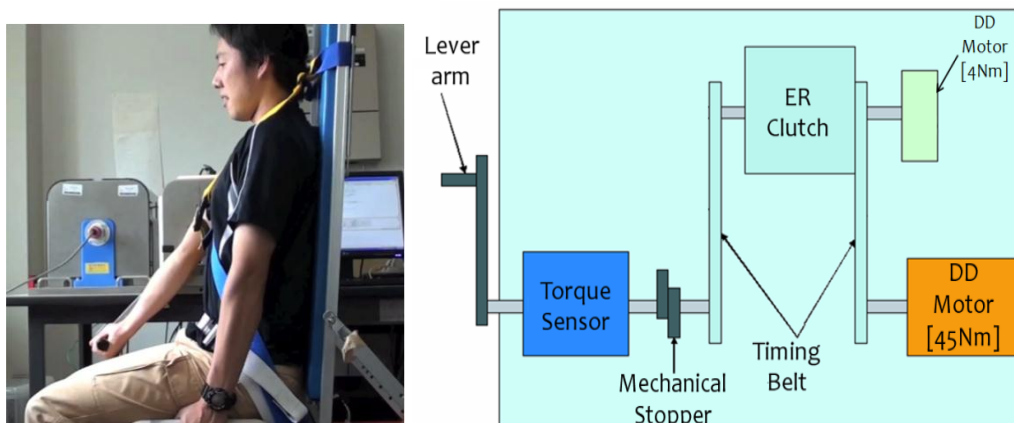


図 2-1. トレーニング装置の全体図および模式図

トレーニングには独自で開発した装置を用いた。本装置は肘の屈曲動作に対して負荷を

課す筋力トレーニング装置である（図 2-1）。レバーアームの初期位置は鉛直下方向から 45[deg]の位置になるようにベース部に金属ブロックを固定した。（以下、この位置を 0[rad]とする）。また、レバーアームはスライド可能なハンドルを取り付け、被験者ごとにレバーアームの長さを調節してから長さを固定し、被験者自身が最も屈曲しやすい状態になるようにした。ベース部には被験者の上腕を置くための支持台を取り付け、腰と胸部は椅子に取り付けたベルトで固定し、動作中の姿勢動揺を防いだ。

本研究では等粘性負荷と弾性負荷を組み合わせた負荷を呈示するためにトルクフィードバック制御を用いた。選択領域を強調するため、動作開始時は等粘性負荷のみを呈示し、選択領域では弾性負荷を重畳する。まず、式(1)よりセンサから取得する角度情報および角速度情報を元に目標トルクを算出する。

$$\tau_d = B \dot{\theta} + K \theta \quad (1)$$

ここで、 τ_d は目標トルク、 θ はレバーアームの回転角度、 $\dot{\theta}$ はレバーアームの回転速度、 B は粘性係数、 K は弾性係数を表す。本研究ではレバーアームの角度が選択領域内にある時のみ式(1)右辺第 2 項 K が値をもつ。また、式(2)より誤差トルクを算出する。

$$\tau_{err} = \tau_d - \tau \quad (2)$$

ここで、 τ_{err} は誤差トルク、 τ は現在の負荷トルクを表す。

制御入力は、ER クラッチと補助トルク用モータに分けて行った。式(3)が ER クラッチへの制御入力であり、式(4)が補助トルク用モータへの制御入力である。

$$\mu_{er} = \tau - \tau_{mgn} \quad (3)$$

$$\mu_{4d} = k_{p4d} \tau_{err} + k_{i4d} \int \tau_{err} \quad (4)$$

ここで、 μ_{er} は ER クラッチへの制御入力、 τ_{mgn} は任意の定数、 μ_{4d} は補助トルク用モータへの制御入力、 k_{p4d} k_{i4d} は比例定数を表す。

2.3 トレーニングの設定

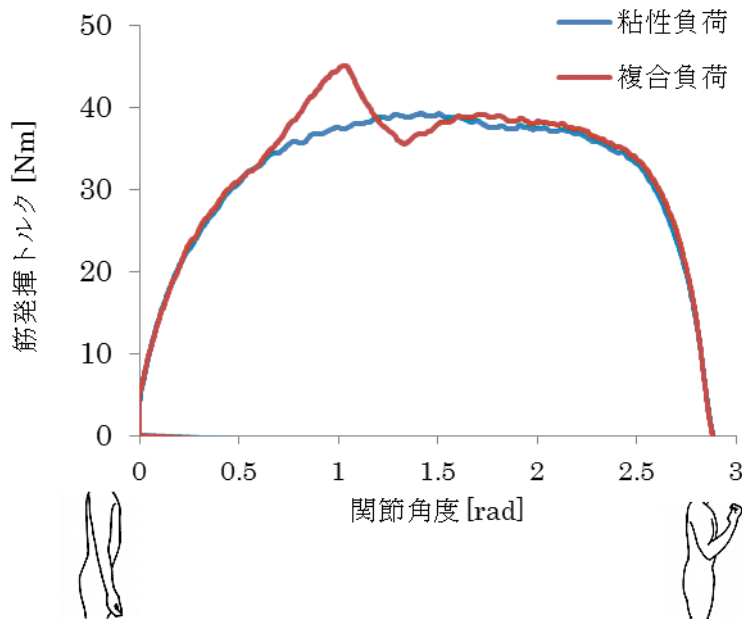


図 2-2. トレーニング負荷の結果例

赤い線は粘性負荷のみ、青い線は粘性と弾性を組み合わせた負荷の結果例を示す。

トレーニング群には両群ともに右肘関節屈曲動作を可能な限り素早く行わせるトレーニングを週 3 回、8 週間行わせた。強度は両群共に粘性負荷 $8[\text{Nm} \cdot \text{s}/\text{rad}]$ を用いた。また複合 TR 群には弾性負荷 $40[\text{Nm}/\text{rad}]$ を $0.5 \sim 1.0[\text{rad}]$ の区間にのみ重畳した (図 2-2)。反復回数は、粘性 TR 群では 12 回 6 セット、複合 TR 群はトレーニング開始 4 週目までは 8 回 6 セット、5 週目以降は 10 回 6 セット、両群ともにセット間休息は 1 分とした。一方、Cont 群には 8 週間トレーニングを一切行わせなかった。

2.4 筋力測定

筋力測定には等速性筋力および等尺性筋力の測定と実験装置を用いた等粘性負荷での測定を行った。以下にその手順を記す。

2.4.1 等速性および等尺性筋力の測定

肘関節屈曲動作の等速性および等尺性筋力の測定にはダイナモメータ (Biodex system4, BDX-4, Biodex 社製) を用いて行った。被験者に椅座位の状態体幹部ベルトで固定し、で右

側肩関節を鉛直下方向から 45 度屈曲させた位置になるよう上腕支持台を調整した。加えて肘関節中心が測定装置のアームの回転中心と一致するように留意しアーム長の調整をおこなった。また、運動範囲は完全伸展位から最大屈曲位までとし、全力で肘関節屈曲動作を行わせた。等尺性筋力は肘関節角度 60[deg]で行わせた。測定開始の合図の後、被験者は最大努力での屈曲動作を 3 秒間行わせ、その間の最大トルクを最大等尺性筋力とした。一方、等速性筋力の測定には低速(60[deg/sec])と高速(240[deg/sec])の 2 つの速度で行わせ、動作中に発揮された最大トルクをそれぞれの最大等速性筋力とした。各測定 2 試技ずつ行わせ、最大トルクが大きかった方を採用した。試技間の休息は 1 分で設定した。測定はトレーニング前(PRE)、トレーニング終了後(POST)の 2 回行った。なお、被験者には実験開始前に実験室に数回訪問させ、装置に十分慣れた状態で測定を行った。

2.4.2 等粘性負荷による測定

被験者に椅座位の状態ですべ肩関節を鉛直下方向から 45 度屈曲させた位置になるよう上腕支持台を調整した。加えて肘関節中心が測定装置のアームの回転中心と一致するように留意しアーム長の調整をおこなった。また、運動範囲は完全伸展位から最大屈曲位までとし、全力で肘関節屈曲動作を行わせた。等粘性負荷に用いた粘性係数は 8[Nm·s/rad]とし、動作中に発揮されるトルクをサンプリング周波数 1000Hz で取り付けたトルクセンサで測定した。測定は 2 試技行い、トルクの最大値が大きかった方を採用した。なお試技間の休息は 1 分間とし、2 試技の最大トルクの誤差が 10%以上であった場合は再測定を行った。得られたトルクおよびパワーのデータは 0.1~0.5[rad], 0.5~1.0[rad], 1.0~1.5[rad], 1.5~2.0[rad]の 4 区間に分け、それぞれの区間で平均値を求め、関節角度毎の筋力とした。測定はトレーニング前(PRE)、トレーニング終了後(POST)の 2 回行った。なお、被験者には実験開始前に実験室に数回訪問させ、装置に十分慣れた状態で測定を行った。

2.5 筋形態の測定

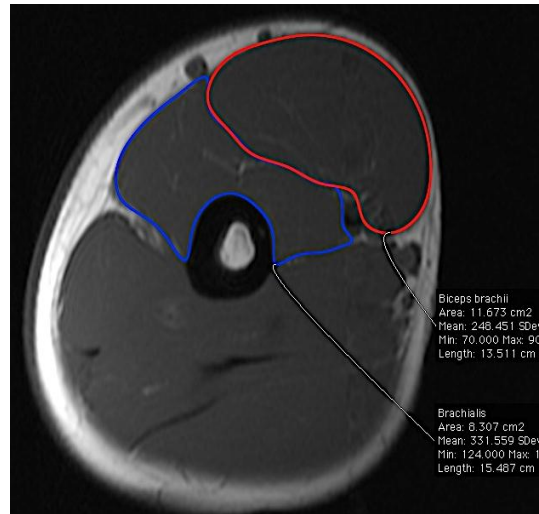


図 2-3. MR 画像解析の結果例. 赤線は上腕二頭筋, 青線は上腕筋を示している

筋形態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)を用いて右側上腕部を撮影した.被験者の姿勢は仰臥位安静にて解剖学的基本姿勢を取らせ, 身体をベルトで固定した. 撮影条件は echo times 16, repetition time 800, matrix 512 × 256, field of view 240mm, slice thickness 10mm で行った. 得られた画像は画像分析ソフトウェア(Osirix v. 4.1.1 32-bit, Pixmeo Sarl)にて上腕二頭筋および上腕筋を各筋の全長にわたって横断面積を計測し, 得られたデータから部位毎の上腕部位毎の筋横断面積および筋体積を算出した(図 2-3). 以下にその手順を記す. なお, 測定はトレーニング前(PRE), およびトレーニング終了後(POST)の 2 回行った.

2.5.1 部位毎の筋横断面積

得られた上腕部の筋横断面積を肩峰から肘関節中心の長さを 100%と規定し, 10%部位毎に筋横断面積を計測した. 適切な位置のデータが存在しない部分については, 前後のデータから線形補間処理を行い, 筋横断面積を算出した.

2.5.2 筋体積

専用ソフトウェアを用いて得られた各筋の横断面積のデータを積算することにより, 上腕二頭筋および上腕筋の体積を算出した. また, 上腕二頭筋と上腕筋の体積の和を上腕屈筋群の体積として計測した.

2.6 トレーニング中のパラメータ

トレーニング中に計測されるパラメータのデータの経時変化を観察した。なお、経時変化はトレーニングセッション各週の最終日（3日目、6日目、9日目、12日目、15日目、18日目、21日目、24日目）のデータを用いた。

2.6.1 負荷強度

トレーニング動作中に発揮されたトルクの最大値を抽出し、1セッション中の全試行の平均値をトレーニングの負荷強度として定義した。

2.6.2 トルク時間積分値

トレーニング動作中に発揮される屈曲トルクを式(6)を用いて積算し、トルクの時間積分値を算出した。

$$\tau_i = \int_0^T f(\tau) dt \quad (6)$$

ここで τ_i はトルクの時間積分値、 T は動作時間、 τ は発揮されたトルクを表す。また、1セッション中の全試行の総和をトレーニング中のトルク時間積分値と定義した。

2.6.3 主観的運動強度(RPE)

被験者にはトレーニング終了直後に右腕の疲労度を6から20の15段階で表される主観的運動強度(RPE)を用いて回答させた。

2.7 統計解析

すべての測定値は平均値±標準偏差（SD）で示した。筋力、パワーおよび各筋の体積の運動前後および両群間における平均値の差の検定には繰り返しのある二要因の分散分析を用い、有意な交互作用が認められたときはBonferroni法により多重比較検定を行った。筋力および筋体積のトレーニング前後の変化率はグループ間による一要因の分散分析を行い、グループ間による分散の違いが認められたときはTukeyによる多重比較検定を行った。相関分析には先ずK-S (Kolmogorov-Smirnov) 検定を用いて正規性の統計的検定を行い、ピアソンの積率相関分析を用いてデータの関係を評価した。なおいずれの検定にも、危険率5%水準で判定した。

第3章 結果

全期間を通じて実験に参加したトレーニング群の16名の内15名は全24セッションのトレーニングを完遂した。残りの1名は23セッションの実施であった。

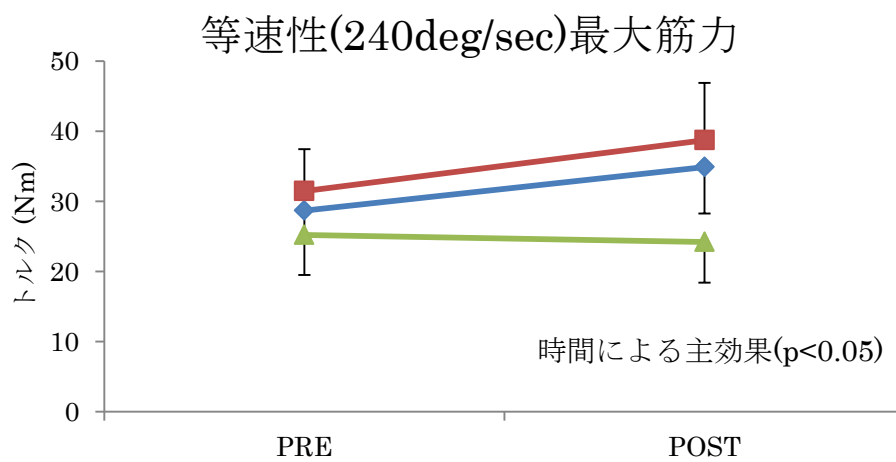
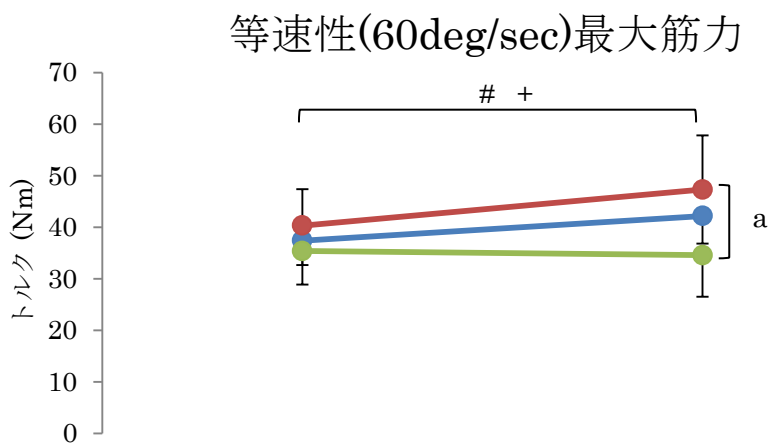
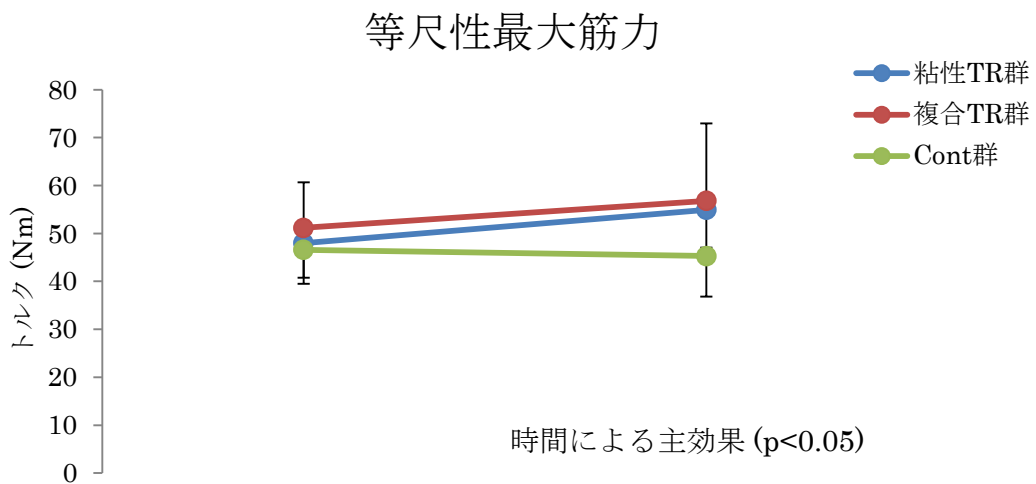
3.1 筋力変化

3.1.1 等尺性および等速性筋力

図3-1に等尺性および等速性最大筋力の測定結果を示す。等尺性最大筋力はトレーニング前が粘性TR群で 48.0 ± 8.5 [Nm]、複合TR群 51.2 ± 9.5 [Nm]、Cont群 46.6 ± 5.8 [Nm]、トレーニング後ではそれぞれ 54.9 ± 7.9 、 56.8 ± 16.1 、 45.3 ± 8.5 [Nm]であった。二元配置(グループ×時間)分散分析の結果、交互作用は認められず($p=0.07$)、時間による主効果が認められた。

次に、各群のトレーニング前の等速性(60deg/sec)最大筋力は 37.4 ± 4.8 、 40.3 ± 7.1 、 35.4 ± 6.5 [Nm]であり、トレーニング後では 42.2 ± 5.4 、 47.3 ± 10.5 、 34.6 ± 8.0 [Nm]であった。二元配置分散分析の結果、有意な交互作用が認められ($p<0.05$)、多重比較検定の結果、粘性TR群、複合TR群の両群においてトレーニング後の等速性筋力の増加が認められた。また、Cont群と比較すると、トレーニング終了後において、複合TR群は統計的に有意な高値を示した。

各群の等速性(240deg/sec)最大筋力は、トレーニング前では粘性TR群 28.7 ± 4.6 [Nm]、複合TR群 31.5 ± 5.9 [Nm]、Cont群 25.2 ± 5.7 [Nm]であった。そしてトレーニング後ではそれぞれ 34.9 ± 6.6 、 38.8 ± 8.2 、 24.2 ± 5.8 [Nm]であった。二元配置分散分析の結果交互作用は認められず($p=0.10$)、時間による主効果が認められた($p<0.05$)



+ : vs PRE(粘性 TR 群, p<0.05)

: vs PRE(複合 TR 群, p<0.05)

a : 複合 TR 群 vs Cont 群 (p<0.05)

図 3-1. 等速性および等尺性最大筋力のトレーニング前後の変化

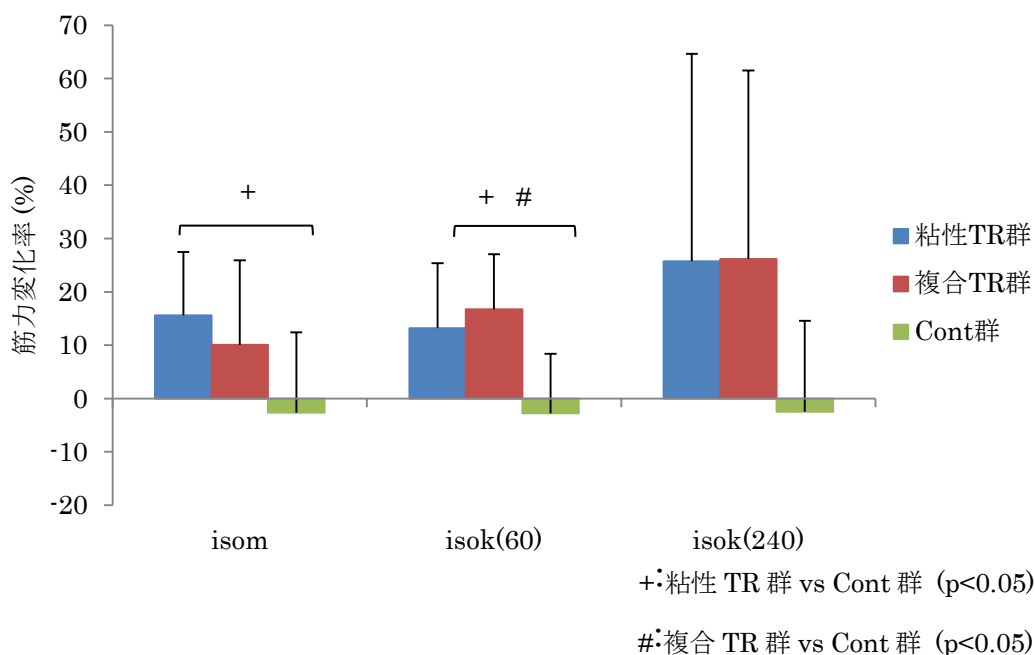


図 3-2. 等速性および等尺性最大筋力のトレーニング前後での変化率

図 3-2 にトレーニング前後の筋力変化率の結果を示す。筋力毎に 1 元配置 (グループ) 分散分析を行った結果, 等尺性最大筋力の筋力変化率は, Cont 群と比較した時に粘性 TR 群のみ統計的に有意な高値を示した(粘性 TR 群 15.6±11.9%, 複合 TR 群 10.1±15.9%, Cont 群-2.6±15.1%)。等速性筋力(60deg/sec)の筋力変化率は粘性 TR 群が 13.2±12.2%, 複合TR群 16.7±10.3%, Cont群-2.8±11.2%であり, トレーニング群での群間差は認められなかったが, Cont 群と比較した時ではトレーニング両群ともに有意な高値を示した。等速性筋力 (240deg/sec) の筋力変化率はトレーニング両群で増加傾向にあるものの, 統計的な違いは認められなかった(粘性 TR 群 25.7±38.9, 複合 TR 群 26.2±35.3%, Cont 群 -2.5±17.0%)。

3.1.2 関節角度毎の筋力

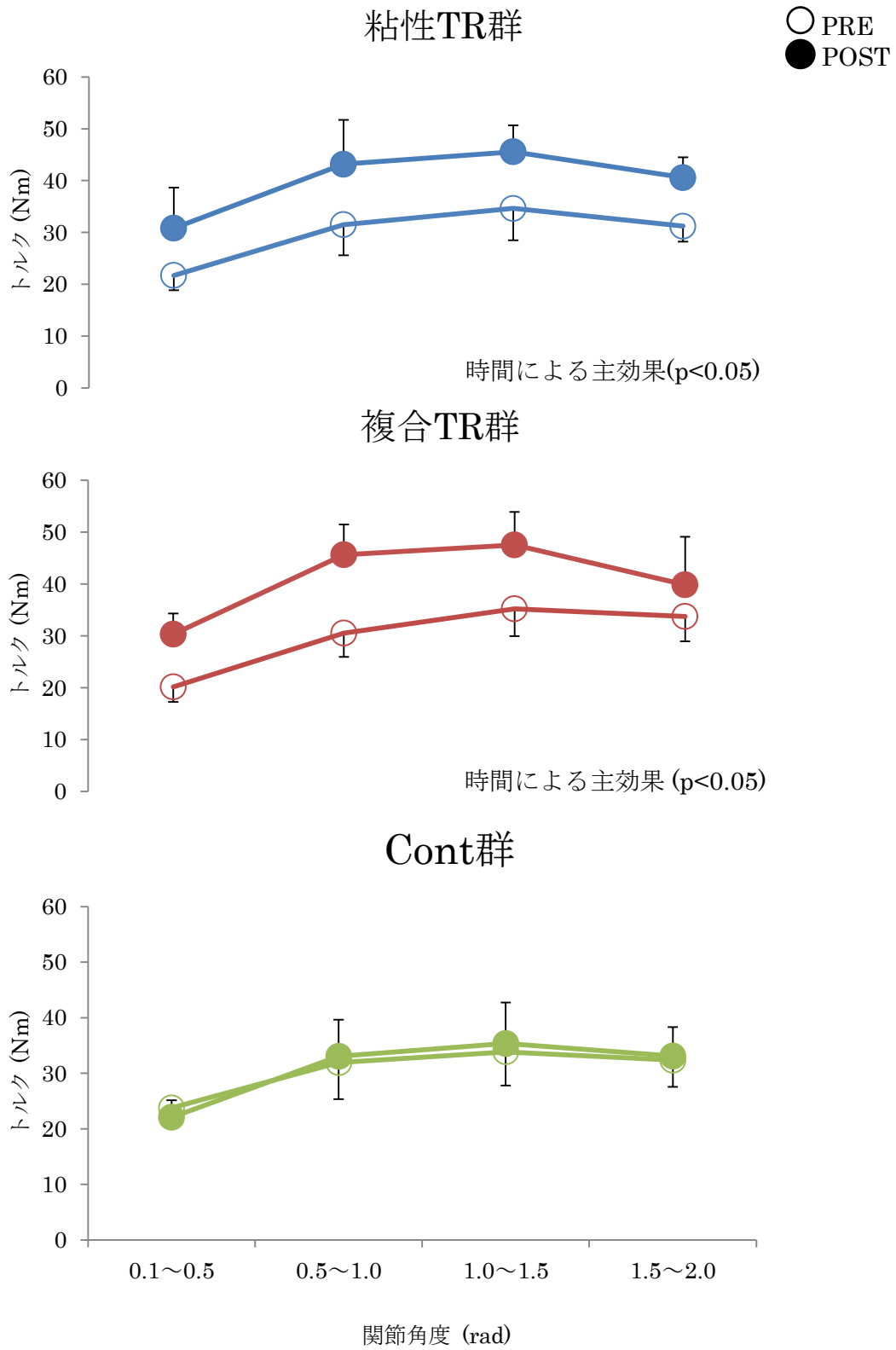
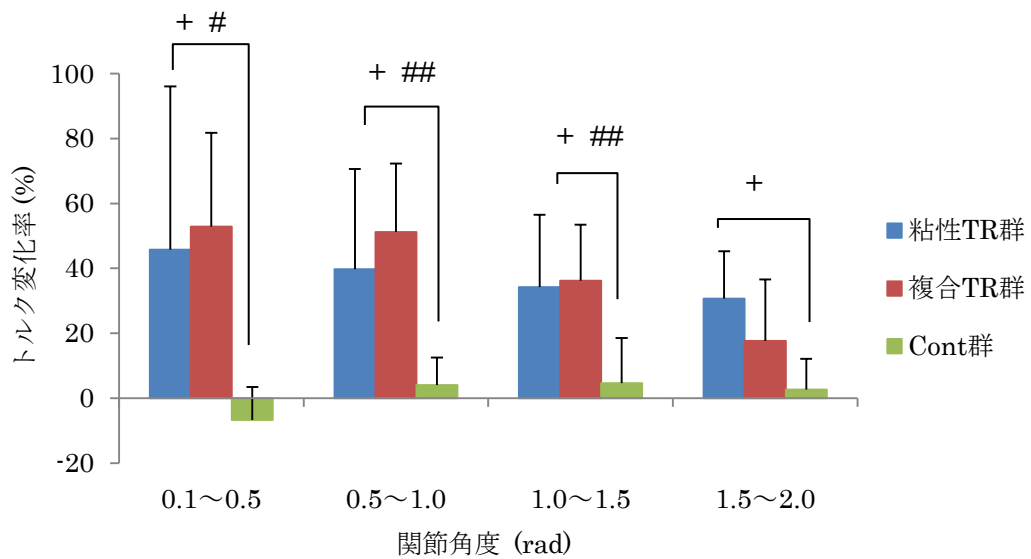


図 3-3. 等粘性負荷による関節角度毎の筋力測定の結果



+・粘性 TR 群 vs Cont 群, +・ p<0.05

#・複合 TR 群 vs Cont 群, #・ p<0.05, ##・ p<0.01

図 3-4. 等粘性負荷での関節角度毎のトレーニング前後での筋力率

図 3-3 に等粘性負荷での筋力発揮を 4 区間に分けた時の結果を示した。群毎での筋力による二元配置（角度×時間）分散分析の結果、トレーニング両群において時間による有意な主効果が認められた(p<0.05)。また、Cont 群においては交互作用が認められたが多重比較検定の結果、どの関節角度区間においても筋力の変化は認められなかった。

図 3-4 に関節角度区間毎のトレーニング前後での筋発揮トルク変化率を示す。区間毎に一元配置（グループ）分散分析を行った結果、0.1~0.5[rad], 0.5~1.0[rad], 1.0~1.5[rad]区間においては両トレーニング群と Cont 群の間に、1.5~2.0[rad]区間では粘性 TR 群と Cont 群の間に有意差が認められた。また、両トレーニング群間にはどの関節角度区間でも違いは認められなかった。

3.2 筋の形態変化

3.2.1 部位毎の筋横断面積の変化

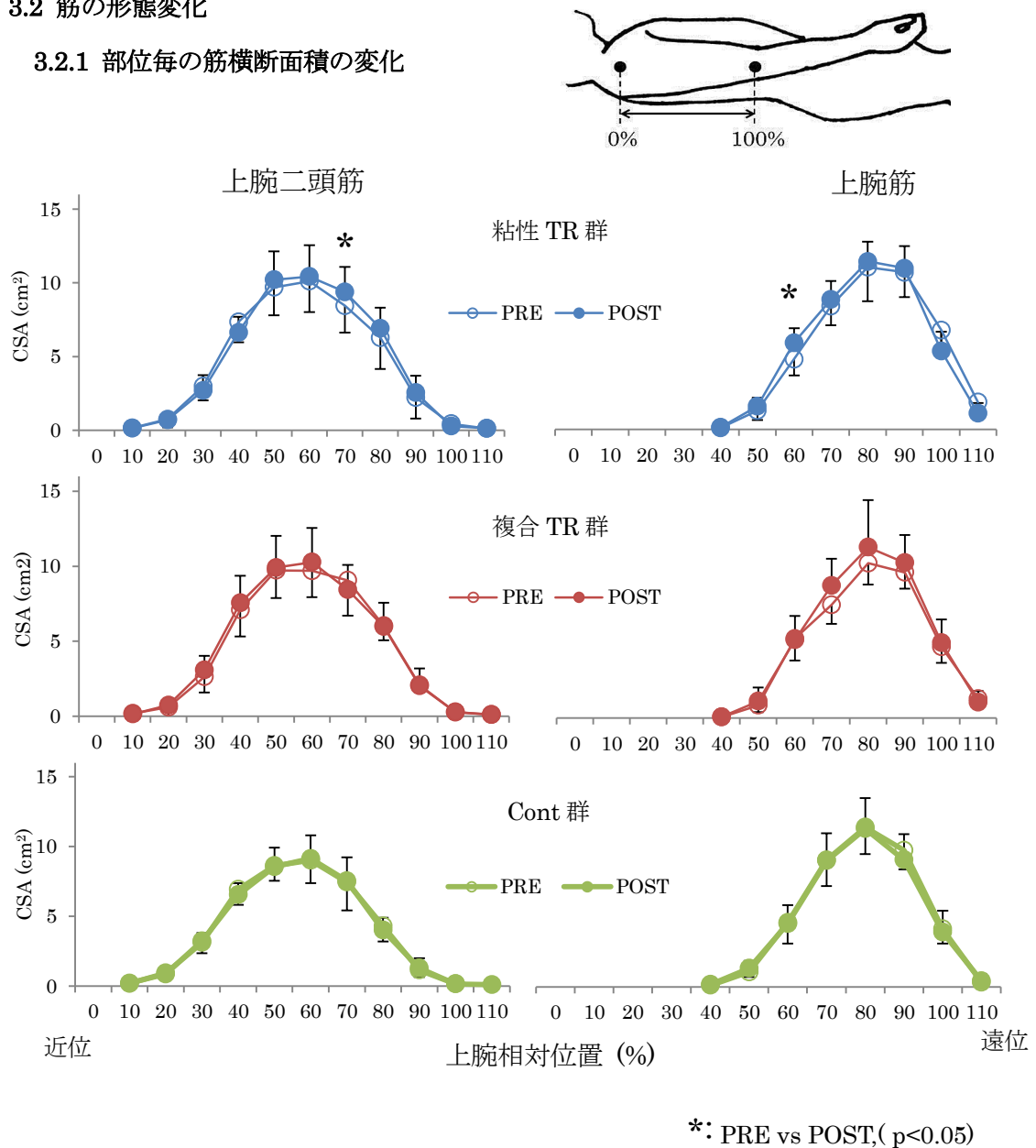


図 3-5. 上腕位置毎の各筋における横断面積トレーニング前後での変化

図 3-5 はトレーニング前後の上腕二頭筋および上腕筋の横断面積を群別に 10%部位毎に表したものである。二元配置 (時間×グループ) 分散分析の結果, 交互作用が認められた部位は上腕二頭筋 70%部位, 上腕筋 60%部位であった。多重比較検定の結果, どちらの部位も粘性 TR 群のみ, トレーニング後の有意な筋横断面積の増加が認められた(p<0.05)。一方で群間差の見られた部位はなかった。また, 上腕二頭筋 60%部位, 上腕筋 40, 50%部位において時間による主効果が認められた。

3.2.2 筋体積変化

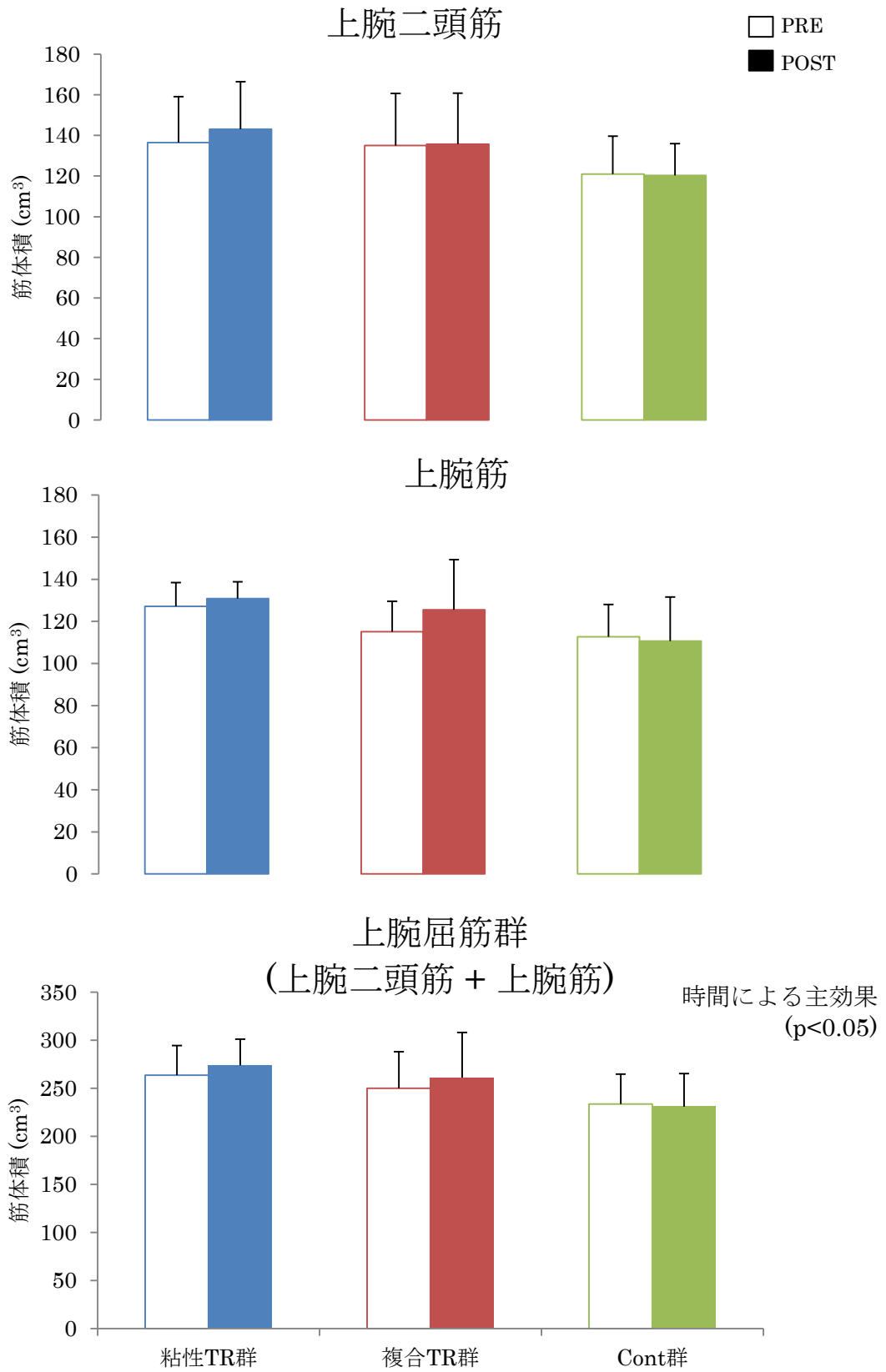
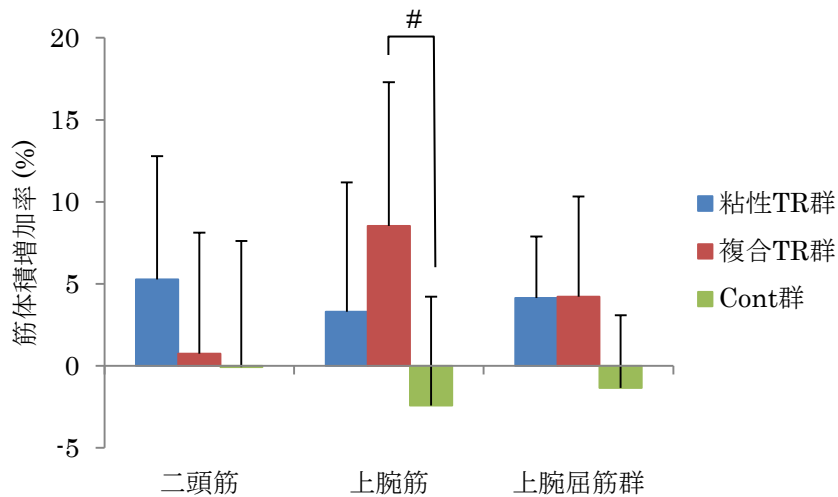


図 3-6. 各筋体積のトレーニング前後での変化



#: 複合 TR 群 vs Cont 群 (p<0.05)

図 3-7. 各筋体積のトレーニングによる変化率

図 3-6 にトレーニング前後における各筋の体積変化を示す。各群のトレーニング前の上腕二頭筋体積は粘性 TR 群が $136.5 \pm 22.6[\text{cm}^3]$ 、複合 TR 群 $135.1 \pm 25.5[\text{cm}^3]$ 、Cont 群では $121.0 \pm 18.6[\text{cm}^3]$ であった。一方、上腕筋では 127.2 ± 11.2 、 115.0 ± 14.5 、 $110.6 \pm 21.0[\text{cm}^3]$ であった。したがって、上腕二頭筋と上腕筋の総和である上腕屈筋群は粘性 TR 群では $263.6 \pm 27.4[\text{cm}^3]$ 、複合 TR 群では $250.1 \pm 38.1[\text{cm}^3]$ 、Cont 群では $233.8 \pm 31.0[\text{cm}^3]$ であった。トレーニング後の各群の筋体積は上腕二頭筋では 143.2 ± 23.4 、 135.7 ± 25.1 、 $120.3 \pm 15.6[\text{cm}^3]$ であり、上腕筋は 130.8 ± 8.0 、 125.5 ± 23.8 、 $110.6 \pm 21.0[\text{cm}^3]$ であった。また、上腕屈筋群の体積は粘性 TR 群では $273.8 \pm 27.4[\text{cm}^3]$ 、複合 TR 群で $261.2 \pm 47.0[\text{cm}^3]$ 、Cont 群では $231.0 \pm 34.5[\text{cm}^3]$ となった。二元配置 (時間×グループ) 分散分析の結果、上腕二頭筋では主効果、交互作用ともに認められず、上腕筋では有意傾向が見られた(時間による主効果: $p=0.06$ 、交互作用: $p=0.05$)。一方、上腕屈筋群では、時間による有意な主効果が認められ($p<0.05$)、交互作用は認められなかった($p=0.06$)。

図 3-7 に各筋のトレーニング前後での筋体積増加率を示した。上腕二頭筋の筋体積増加率は粘性 TR 群が $4.7 \pm 7.5\%$ 、複合 TR 群 $0.7 \pm 7.4\%$ 、Cont 群では $-0.1 \pm 7.7\%$ であった。また、上腕筋の体積増加は各群 2.9 ± 7.9 、 7.6 ± 8.8 、 $-2.4 \pm 6.6\%$ であった。一方、上腕屈筋群の筋体積増加率を見ると、粘性 TR 群では $4.1 \pm 3.7\%$ 、複合 TR 群では $4.2 \pm 6.1\%$ 、Cont 群では $-1.3 \pm 4.4\%$ であった。各筋毎に一元配置 (グループ) 分散分析を行ったところ、上腕筋体積増加率は Cont 群と比較して有意に高値であった($p<0.05$)。また上腕屈筋群につ

いては、両トレーニング群ともに Cont 群と比較した時、増加率が高値を示す傾向がみられたが、統計的有意差は認められなかった(粘性 TR 群 : $p=0.09$, 複合 TR 群 : $p=0.08$).

3.3 トレーニング中のパラメータの変化

3.3.1 最大負荷強度の各週変化

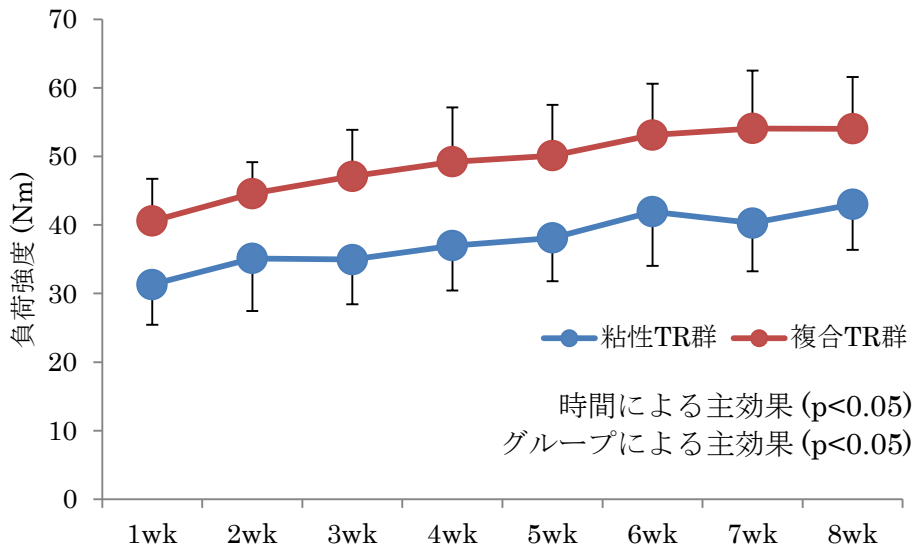


図 3-8. トレーニング負荷強度の経時変化

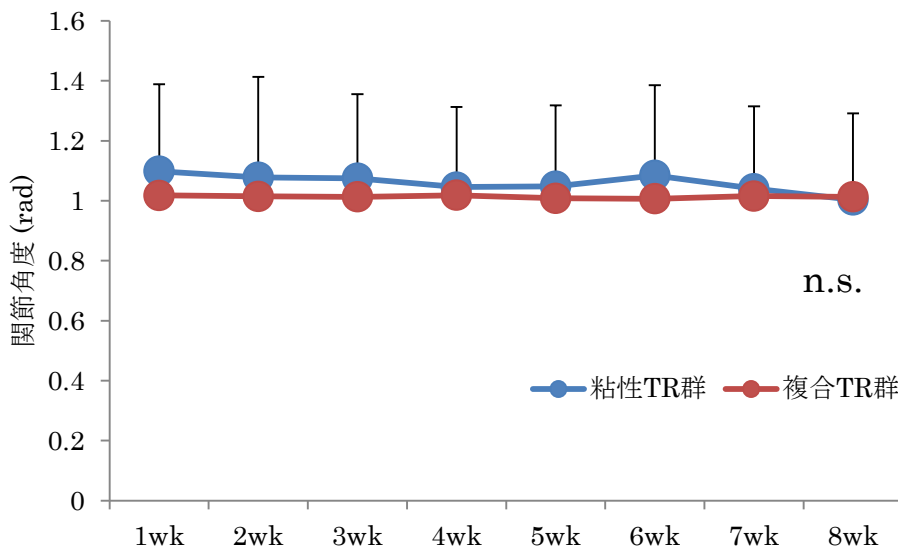
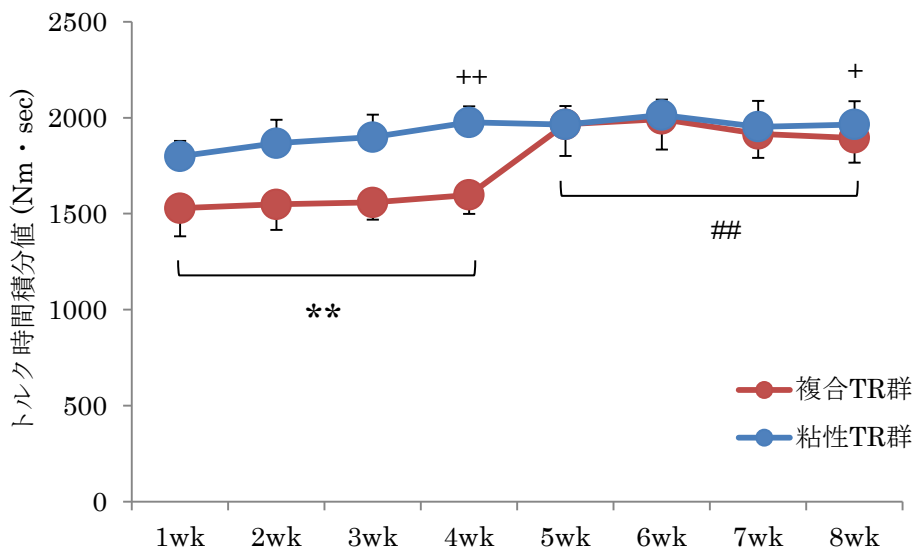


図 3-9. 最大トルクが発揮される関節角度の経時変化

図 3-8 はトレーニング負荷強度の各週変化である。両群ともにトレーニングを重ねるにつれて負荷強度が増加しており、また複合負荷 TR 群は途中で弾性負荷を加えたことによる影響によりトレーニング中の負荷強度が高いことが見てとれる。二元配置（グループ×時間）分散分析の結果、時間とグループによる有意な主効果が認められた($p<0.05$)。

また、図 3-9 はトレーニング中の最大トルクが発揮された関節角度の各週変化を示したものである。二元配置（グループ×時間）分散分析の結果、統計的な違いは認められなかった。しかしながら、粘性負荷 TR 群の最大トルク発揮位置はトレーニング 1 週目では関節角度 $1.10\pm 0.29[\text{rad}]$ であったが、トレーニング 8 週目では $0.95\pm 0.32[\text{rad}]$ の位置へと変化した傾向を示した。一方で複合 TR 群では弾性負荷を $0.5\sim 1.0[\text{rad}]$ 区間で重畳しており、最大トルク発揮位置はトレーニング全期間を通じて $1.0[\text{rad}]$ で一定であった。

3.3.2 トルク時間積分値の各週変化



+ : vs 1wk(粘性 TR 群), + : $p<0.05$, ++ : $p<0.01$

: vs 1wk(複合 TR 群), ## : $p<0.01$

* : 粘性 TR 群 vs 複合 TR 群, ** : $p<0.01$

図 3-10. トレーニング中のトルク時間積分値の経時変化

図 3-10 にトレーニング中のトルク時間積分値の各週変化を示した。二元配置(時間×グループ)分散分析の結果、有意な交互作用が認められた($p<0.01$)。多重比較検定の結果、粘性 TR 群では 1 週目と比較して 4 週目と 8 週目のトルク時間積分値が有意に高い傾向を示

し、複合TR群では5週目以降の有意な増加が認められた。これは複合負荷TR群が5週目以降で1セット当たりの試行数を8回から10回に増加した影響である。それに伴い、最初の4週まではトルク時間積分値に両トレーニング群間で差が認められたのに対し、後半の5週目以降では両群間に差は認められなかった。

3.3.3 主観的運動強度の各週変化

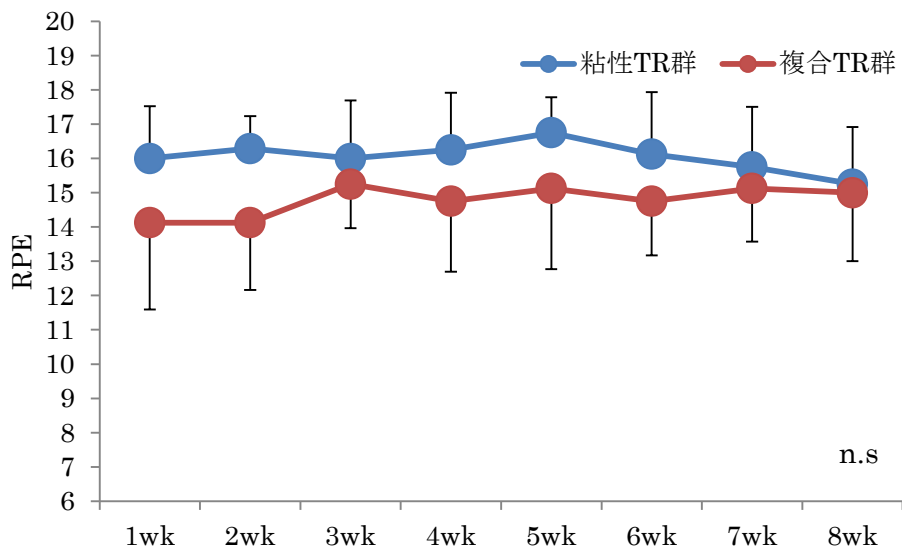


図 3-11. 主観的運動強度の経時変化

図 3-11 に主観的運動強度の各週変化を示した。二元配置(グループ×時間)分散分析の結果、時間による主効果、交互作用ともに認められなかった。また、両群の RPE には有意傾向がみられた。(p = 0.056)

3.4 トレーニング効果に影響する要因の検討

筋力向上および筋体積増加に与える要因を検討するため、相関分析を行った。相関分析に先立ち、K-S (Kolmogorov-Smirnov) 検定を用いて正規性の統計的検定を行ったところ、正規分布が仮定された為、相関分析にはピアソンの積率相関係数を用いてデータの関係性を検討した。なお、筋力向上には等粘性負荷による筋力測定の関節角度区間毎での向上率、筋体積変化には上腕屈筋群の増加率を用いた。また、トレーニングパラメータの負荷強度は8週間の平均値、トルク時間積分値は8週間の総和を用いて分析を行った。

3.4.1 筋力向上に影響を与える要因

3.4.1.1 負荷強度

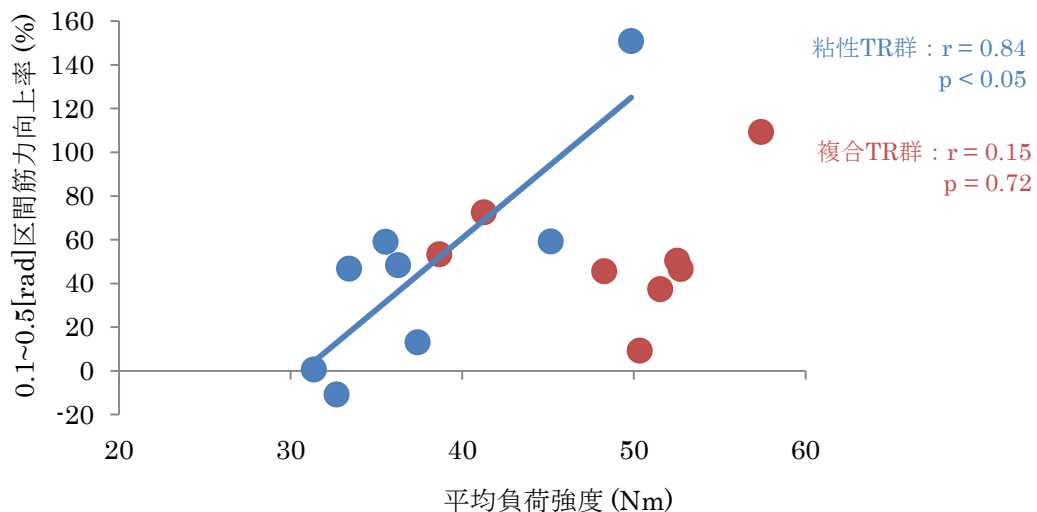


図 3-12. 筋力向上とトレーニング期間中の平均負荷強度の関係

図 3-12 に 8 週間のトレーニング負荷強度が筋力向上に与える影響についての結果を示す。筋力向上率とトレーニング負荷強度の間には粘性 TR 群における 0.1~0.5[rad]区間の筋力向上率のみ、有意な相関関係が認められ($r = 0.84$, $p < 0.05$)、その他の区間では認められなかった。一方、複合 TR 群では有意な相関関係が認められた区間は無かった。

3.4.1.2 トルク時間積分値

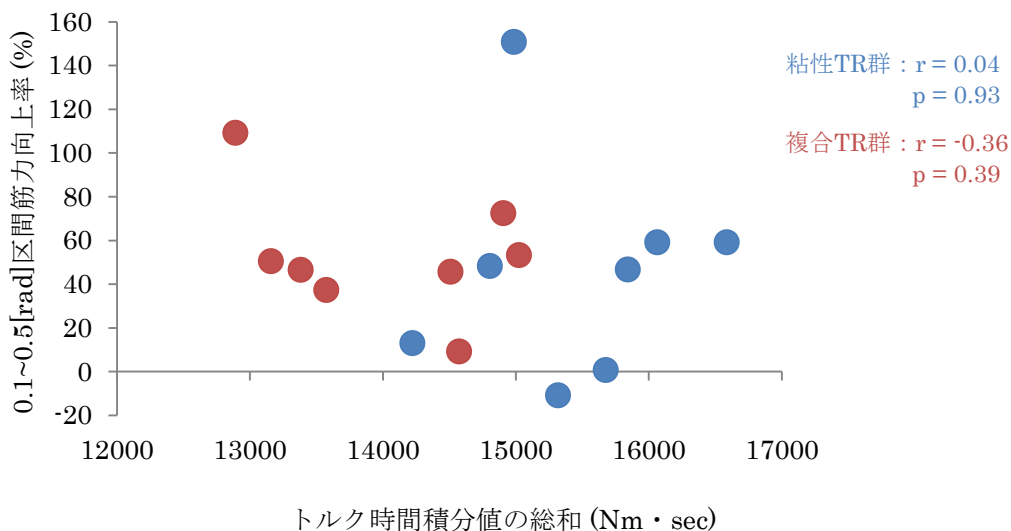


図 3-13. 筋力向上とトレーニング期間中のトルク時間積分値の関係

図 3-13 に 8 週間のトレーニングによるトルク時間積分値が筋力向上に与える影響についての結果を示す。筋力向上率とトルク時間積分値の間には両群の、全区間において有意な相関関係は認められなかった。

3.4.2 筋体積変化に影響を与える要因

3.4.2.1 負荷強度

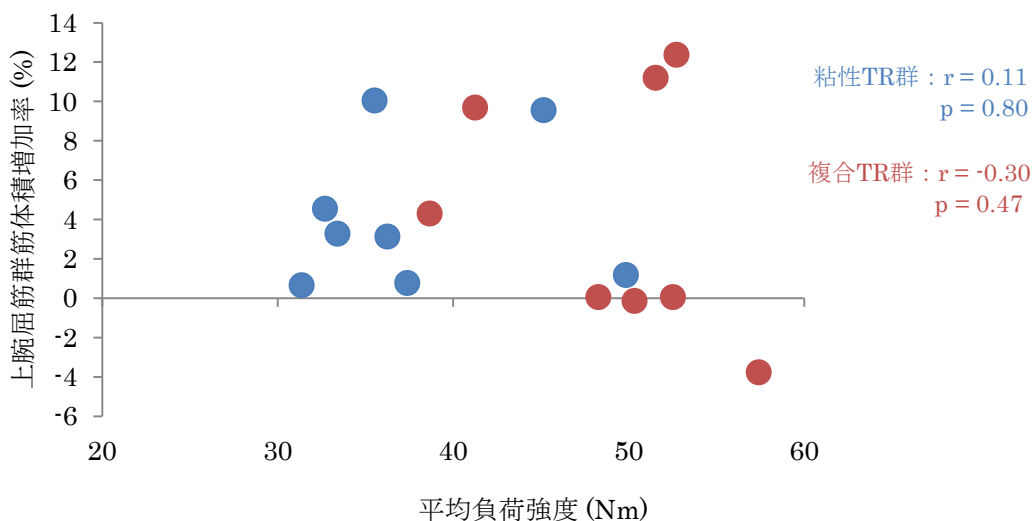


図 3-14. 上腕屈筋群増加とトレーニング期間中の平均負荷強度の関係

図 3-14 に 8 週間のトレーニング負荷強度が筋体積増加に与える影響についての結果を

示す。筋体積増加率とトレーニング負荷強度の間には両群ともに有意な相関関係は認められなかった。

3.4.2.2 トルク時間積分値

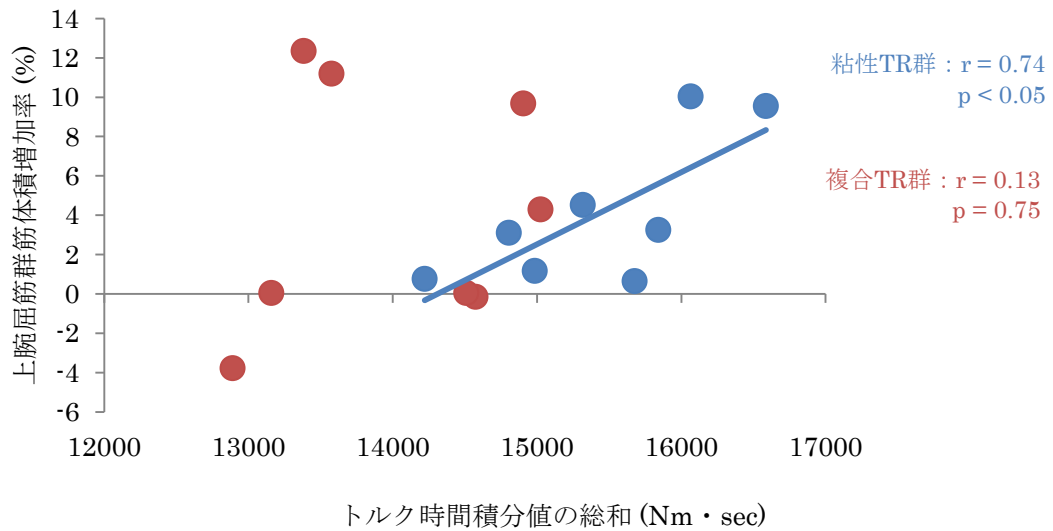


図 3-15. 上腕屈筋群増加率とトレーニング期間中のトルク時間積分値の関係

図 3-15 に 8 週間のトレーニング負荷強度が筋体積増加に与える影響についての結果を示す。筋体積増加率とトレーニング負荷強度の間には粘性 TR 群にのみ、有意な相関関係が認められた($r = 0.74$, $p < 0.05$)。

3.4.3 筋力向上と筋体積変化の関係性

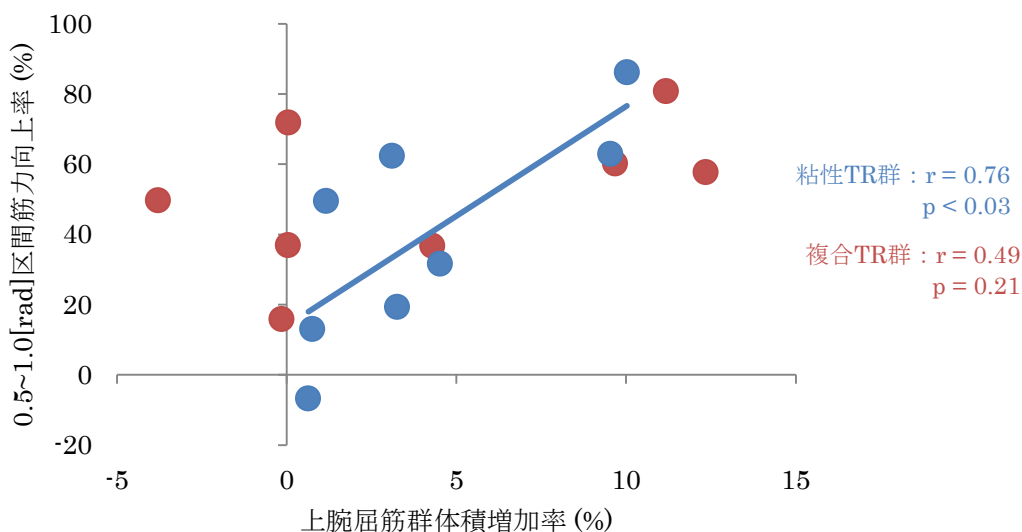


図 3-16. 筋力向上と上腕屈筋群体積増加の関係

図 3-18 に筋力向上率と筋体積変化の関係性についての結果を示す。粘性 TR 群では 0.5~1.0[rad]および 1.0~1.5[rad]区間の筋力向上率と上腕屈筋群の間には有意な相関関係が認められた(0.5~1.0[rad]区間 : $r = 0.76$, $p < 0.05$, 1.0~1.5[rad]区間 : $r = 0.77$, $p < 0.05$)。一方、複合 TR 群では 1.0~1.5[rad]区間と上腕屈筋群の増加率にのみ有意な相関関係が認められた($r = 0.74$, $p < 0.05$)。なお、両群ともに他の関節角度区間の筋力向上率と筋体積増加率では有意な相関関係は見られなかった。

表 3-1. 筋力向上および筋体積増加に影響する要因の相関係数一覧

		筋力向上				筋体積増加
		0.1~0.5区間	0.5~1.0区間	1.0~1.5区間	1.5~2.0区間	
粘性TR群	負荷強度	0.84**	0.42	0.07	0.26	0.11
	トルク時間積分値	0.04	0.31	0.21	-0.60	0.74*
	筋体積増加	0.07	0.76*	0.77*	-0.17	
複合TR群	負荷強度	0.15	0.22	0.20	-0.07	-0.30
	トルク時間積分値	-0.36	-0.54	-0.47	0.00	0.13
	筋体積増加	-0.22	0.49	0.74*	0.52	

*: $p < 0.05$

** : $p < 0.01$

第4章 考察

本研究では粘性負荷に部分的に弾性負荷を重畳することで、動作中の負荷の大きさを自由に制御可能である研究室独自で開発した装置を用いて最大トルク発揮角度が異なる肘屈曲トレーニングを8週間行わせ、そのトレーニング効果を筋力、筋形態の変化の観点から検討し、またトレーニング効果に与える影響についての相関分析を行い、次のような結果が得られた。

1. 両トレーニング群で関節角度全域での筋力向上が認められたが、複合負荷トレーニングでの狙いとした関節角度区間での筋力向上は他の区間と同程度であった。
2. 粘性TR群では上腕二頭筋70%、上腕筋60%部位での有意な横断面積増加が認められた。
3. 上腕二頭筋、上腕筋体積の変化に統計的な違いは認められなかったが、上腕筋の体積増加率では複合TR群とCont群に有意な違いが認められた。
4. 粘性TR群において、トレーニング中の負荷強度と筋力向上、トレーニングのトルク時間積分値と筋体積増加との間に有意な相関関係が認められた。

以下にその考察について述べていく。

4.1 特定関節角度における筋力向上について

本研究では複合TR群は弾性負荷を重畳している区間である0.5~1.0[rad]は強度が高くなっている。図3-8に示した負荷強度を見ると、全期間を通じて複合TR群は粘性TR群より有意に高い強度でトレーニングをしていた。それにも関わらず、等尺性最大筋力、および関節角度毎の筋力に群間差は見られなかった。これには、動作の特異性が考えられる。宮崎ら(2010)は膝関節を対象に9週間の異なる関節角度2種類での等尺性筋力トレーニングが等速性筋力に及ぼす影響を検討し、影響は少なかったと報告している。本研究の場合、複合TR群の最大負荷がかかる関節角度は約60[deg]であるが、その関節角度での等尺性最大筋力はトレーニング終了後に両トレーニング群で増加していたが、その変化にトレーニング群での差は見られなかった。トレーニングは動的な収縮で、測定は静的な収縮のため、両トレーニング群での効果が同等となった可能性がある。また用いた負荷特性の影響も考えられる。図3-9に示したトレーニング中の最大負荷がかかる関節角度の変化を見

ると、複合トレーニングでは弾性負荷を重畳するように機械制御しており、トレーニング期間全域にわたり 1.0[rad]の関節角度で最大トルクが発揮されていた。一方、粘性 TR 群の最大トルクが発揮される位置は 8 週間のトレーニング期間中に浅い角度で発揮されるように変化している。その為、動作前半でかかる負荷が高くなるように設定していた複合負荷と同様な負荷のかかり方に変化し、その結果、筋力変化に群間差が見られなかったのではないかと考えられる。

4.2 部位毎の筋横断面積の変化

筋横断面積の変化を複数ヶ所測定し、筋肥大の部位差を検討した先行研究では一致した見解が得られておらず、まだまだ不明な部分が多い。例えば、Kawakami et al. (1995)は 16 週間のダンベルトレーニングを行わせ、上腕伸筋群の筋横断面積変化を 1cm 毎に検討しており、中央部での肥大あったと報告している。また、等速性とダンベルでトレーニングを行わせた Roman et al. (1993)は上腕屈筋群の横断面積が最大となる箇所での肥大を報告しており、筋肥大は筋腹の部分から生じるのではないかと推察している。同様に、大腿四頭筋を協働筋毎に検討した Hakinen et al. (2001)では外側広筋では近位部、内側広筋では遠位部とそれぞれ筋横断面積が最大となる位置での肥大が確認されている。一方、Narici et al. (1989)は等速性膝伸展でのトレーニングを行わせた結果、大腿四頭筋の近位部が肥大したと報告した一方、同様なプロトコルを用いた Housh et al.(1992)では外側広筋、中間広筋、大腿二頭筋の中央部のみが有意に肥大していた。このように、同一筋群であっても一致した見解は得られておらず、多くの先行研究では筋活動量の違いが筋肥大の部位差を生み出すと考えられている。そこで、Wakahara et al. (2012)は MRI の横緩和時間(T2)を用いた筋活動量の定量化とトレーニング後の上腕三頭筋形態変化を観察し、筋活動量と筋肥大が大きかった部位は一致していたと報告したが、その後の報告では矛盾した結果もあり、今後の検討が必要である(若原ら, 2012)。

本研究の場合、筋横断面積の増加が認められたのは粘性 TR 群の上腕二頭筋 70%部位、上腕筋 60%部位であった。それぞれの筋で考えると上腕二頭筋は筋の中央部、上腕筋では近位部の肥大があったと考えられる(図 3-5)。全長にわたって筋横断面積変化を観察した先行研究を見ると(表 1-1)、上肢については中央部での肥大を報告しているものが多い。Roman et al. (1993)は筋肥大は筋腹から生じるという指摘をしており、本研究の上腕二頭筋の変化もこの指摘を支持した結果と言える。しかしながら、上腕筋についてはそれと一

致した結果とは言えない。これらのことから、筋によって肥大が生じる部位に違いがある可能性がある。これについては、トレーニング動作の影響や負荷強度の影響も考えられる。うえ、上腕二頭筋と上腕筋を個別にして筋肥大を検証した先行研究は存在せず、今後の検討が必要である。

4.3 筋体積変化

本研究では上腕二頭筋と上腕筋のトレーニング前後での体積に統計的な変化は認められなかったが、上腕筋の変化率では、複合 TR 群と Cont 群で差が認められた。(図 3-7) これは上腕筋が上腕二頭筋よりも動員されやすいということが考えられる。Bouillard et al. (2012)は肘関節屈曲時の協働筋の筋活動量を超音波診断装置を用いて測定している。その結果、上腕筋の筋活動は運動初期で多く動員され、その後は頭打ちになると報告している。それに対して、上腕二頭筋は運動中盤から動員が行われ、その後は上腕筋よりも筋活動が大きかった。彼らは筋のモーメントアームの違いにより、筋活動や筋の役割に差があるのではないかと考察している。Murray et al. (2002)は肘屈曲動作中の各筋のモーメントアームの変化を計測しているが、上腕二頭筋は上腕筋の約 2 倍の長さがある。モーメントアームが大きいと、関節の回転力を引き起こすために必要な筋張力は小さくてすみ、一方、モーメントアームが小さいと、わずかな短縮で関節角度を大きく変化させることが可能である(福永, 2002)。上腕二頭筋は長いモーメントアームを持っているため、大きな力の生成に有利であり、上腕筋の様にモーメントアームの短い筋は筋の立ち上がりに貢献していると考えられる。つまり、肘関節屈曲動作というのはまず上腕筋の収縮によって起こり、その後は上腕二頭筋の働きによってより大きなトルクが生産される。したがって、上腕筋は初期動作に関わるため筋活動が多くなり、筋形態の変化が起こりやすいのではないかと考えられる。

先行研究の中には、本研究とは一致しない結果を述べたものもある。McCall et al. (1996)は 12 週間のマシントレーニングの結果、上腕二頭筋の横断面積では有意な肥大が見られたのに対し、上腕筋では統計的な変化は認められていなかった。しかしながら、これには MRI での解析位置の違いによる影響がある。McCall et al. (1996)では上腕骨の 1/3 の位置い 1 箇所だけでの横断面積変化を観察していた。この位置は本研究では上腕の約 70%に相当する部位である。本研究の結果でも、上腕二頭筋では粘性 TR 群の筋横断面積に有意な肥大が確認されたが、上腕筋では有意な変化は認められていない。しかし体積で

の変化を見ると、上腕筋の体積変化は増加傾向が見られており、先行研究では上腕筋の形態変化を見落としていた可能性がある。

本研究の複合、TR 群は運動初期の負荷が高くなるように制御されているため、複合 TR 群での上腕筋に与えられるメカニカルストレスが大きくなり、結果として変化率が大きくなり、Cont 群と比較して有意な高値を示したと思われる。つまり動作中の負荷を操作することによって、特定の筋だけを肥大させることの可能性が示唆された。

4.4 トレーニング効果に影響する要因

4.4.1 筋力向上への影響

本研究では等粘性負荷の状況下での筋力向上に与える影響を検討したところ、粘性 TR 群では関節角度 0.1~0.5[rad]区間とトレーニング期間中の平均負荷強度、0.5~1.0[rad]区間では上腕屈筋群の体積増加率、また両トレーニング群ともに 1.0~1.5 [rad]区間では上腕屈筋群の変化率との間に相関関係が見られた(図 4-1)。

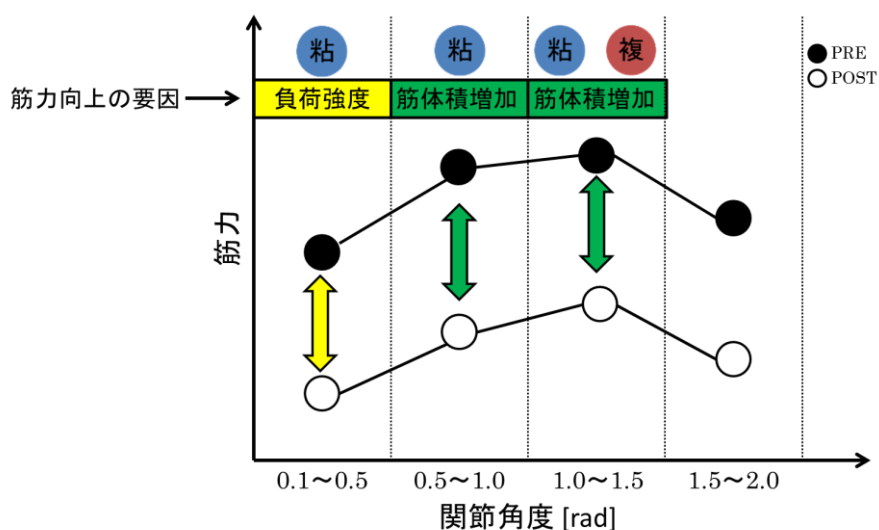


図 4-1. 関節角度毎の筋力向上に影響する要因

筋力向上には筋の形態変化と神経-筋の機能的変化の2つの主要因が挙げられ、トレーニング初期段階の筋力増加の主要因は筋の動員、トレーニング後期の筋力増加は筋肥大の影響が指摘されている(衣笠ら, 2003)。本研究の結果では、最大筋力発揮区間である 1.0~1.5[rad]での筋力向上は筋体積増加率との間に有意な正の相関関係が両トレーニング群で認められた。それだけでなく、粘性 TR 群においては 0.1~0.5[rad]区間、つまり筋の収縮初期の段階での筋力向上はトレーニング期間中の平均負荷強度との間での関係性が示唆

された。粘性負荷は速度に依存した負荷であるため、筋力や負荷強度の向上は動作速度の向上でもありと考えられる。被験者は可能な限り素早く肘関節屈曲動作を行わせるように指示しており、負荷強度が初期動作の改善につながったと考えられる。つまり、一口に筋力向上と言っても、関節角度の局面毎に分けて考えると求められる役割が異なり、必要となる要因が異なってくると考えられる。筋体積の増加は最大筋力の向上に有効ではあるが、一方で動作初期での筋力向上にはつながらない可能性があり、トレーニングをする際は、筋力向上の中でもこういった種類の筋力向上が必要なのか（例えば動作開始初期での筋力向上など）によってトレーニングの方法を工夫することが必要である。

一方、複合負荷 TR 群では筋力向上と関係性が見られたのは 1.0~1.5[rad] 区間と上腕屈筋群の体積変化率のみであった。1.0~1.5[rad] 区間は最大筋力発揮区間であり、筋力向上が筋体積向上によって生じたことは明らかである。しかしながら粘性 TR 群では 0.5~1.0[rad] 区間の筋力向上も相関関係が認められたのに対し、複合 TR 群では認められなかった。このことは、肥大した筋の違いの影響が考えられる。前節に述べたように複合 TR 群の上腕屈筋群体積の増加は上腕筋の変化による影響であることが考えられる。Kawakami et al. (1994) は肘関節屈曲時の上腕二頭筋、上腕筋、腕橈骨筋による筋張力の貢献度を算出しており、肘屈曲時における上腕筋の貢献度は上腕二頭筋よりも低いことを報告している。本研究の結果では上腕屈筋群の体積増加率は粘性 TR 群、複合 TR 群で同程度であった(粘性 TR 群 $4.1 \pm 3.7\%$ 、複合 TR 群 $4.2 \pm 6.1\%$)。しかしながら、複合 TR 群では上腕筋の増加率は上腕二頭筋と比較して大きかった(上腕二頭筋: $0.7 \pm 7.4\%$ 、上腕筋: $7.6 \pm 8.8\%$)。したがって、肘関節屈曲に貢献度の低い上腕筋体積が増加しても筋力向上にはつながりにくく、結果として複合 TR 群では相関関係が認められなかったのではと考えられる。

4.4.2 筋肥大への影響

トレーニング様式に着目した研究では負荷重量や筋の収縮形態の観点から筋肥大への影響を調査したものが多く、崔ら(1998)は高強度なトレーニングを行わせる「パワーアップ型」と中高強度の負荷を用いた「バルクアップ型」を比較したところ、前者は筋力向上、後者は筋肥大に有効なトレーニングであったと述べている。また収縮様式については ECC 収縮が筋肥大には効果的であるという報告がある(Farthing and Chilibeck, 2003, Hignie et al, 1996)。しかし一方で筋収縮様式によるトレーニング効果の差は無いとする報告もある(Blazevich et al, 2007)。また、CON 収縮と ECC 収縮を比較する時の問題点として、ト

レーニング中の動作時間や仕事量が明らかにされていないことが多い点である(金久, 2006). トレーニング中の仕事量を統一して CON 収縮と ECC 収縮を比較した Moore et al. (2012)では筋力向上, 筋肥大どちらも差が無かった. 収縮時間, 休息時間の違う膝関節等尺性トレーニングをトルクの積分値を揃えて行わせると筋肥大に差が無いといった先行研究もある. (Kubo et al, 2001). また Mitchell et al. (2012)は筋の肥大はトレーニングの強度によって決まる訳ではないと主張しており, この様なトレーニング中の運動力学的観点からの検討も必要と考えられる.

Tanimoto and Ishi (2006)は低強度の負荷を時間をかけて動作するスロートレーニング群 (LST : 50%1RM, 3 秒短縮, 1 秒静止, 3 秒伸張), 低強度でのトレーニング群 (LN : 50%1RM, 1 秒短縮, 1 秒伸張) と従来の高強度でのトレーニング群 (HN : 80%1RM, 1 秒収縮, 1 秒伸張) の 3 群で比較し, トレーニング中の力積は LST が LN の 3 倍であり, トレーニング後の膝伸筋群横断面積の増加が見られたのは LST と HN であった. Goto et al. (2008)によると, 同様なプロトコルでの運動直後のカテコラミン, 成長ホルモン, フリーテストステロンの分泌量が SLOW 動作では多かったと報告している. また, 仕事量より力積の方が筋肥大には重要な要因であると考えられる. その理由は等尺性トレーニングにも筋肥大が確認されているからである. 等尺性収縮は関節角度の変異を伴わないため, 仕事量は計算上ゼロである. しかしながら, Kanehisa et al. (2002)は 10 週間の等尺性肘伸展トレーニングの結果, 上腕三頭筋中央部での有意な筋肥大を確認している. Mohamad et al. (2012)はスクワットトレーニングの動作を解析し, 高速動作 (35%1RM) と低速動作 (70%1RM)をトレーニングボリューム (強度×回数) を統一して様々な運動学及び力学的データから比較している. それによると, 低速動作が高値を示したのは力積のみであった. 一般的に 70%1RM は筋肥大型のトレーニングと言われており, 筋肥大にはトレーニング中の力積が重要だと示唆された. 以上のことから筋肥大とトレーニング中の力積は関係性が強いことが考えられ, 本研究の粘性 TR 群における筋体積の変化とトレーニング期間中のトルク時間積分値との間に有意な相関関係が認められたことはこの見解を支持した結果だと言える. しかしながら, 前述の Tanimoto and Ishii (2006)は考察の中で等尺性収縮中の血中乳酸や成長ホルモンの分泌が少なかったという自らのデータから, 力積は筋肥大の最大決定要因ではないと指摘もあり, まだ統一した見解には至っていない.

4.5 総合討論

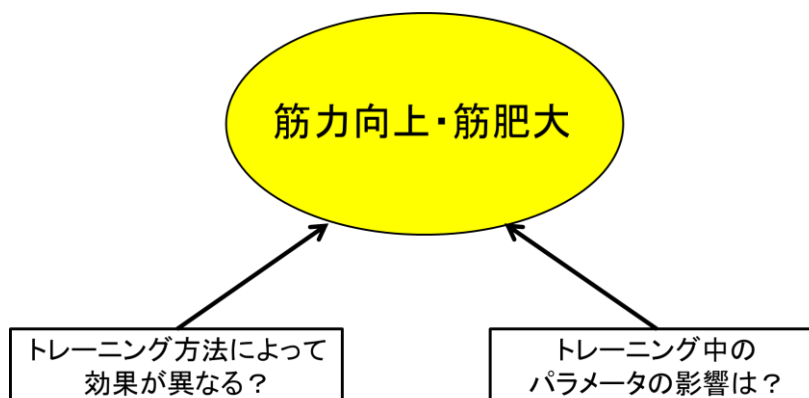


図 4-2, 本研究の目的とそれに対するアプローチ

本研究の目的は筋力向上や筋肥大というトレーニング効果の検証を最大負荷がかかる関節角度を操作することで異なるのか、そしてトレーニング中の負荷(負荷強度とトルク時間積分値)の影響というアプローチから検討した(図 4-2).

4.5.1 トレーニング効果の妥当性

本研究の筋力向上の効果は等速性最大筋力では低速(60[deg/sec])では粘性 TR 群で 13.2%, 複合 TR 群では 16.7% 高速(240[deg/sec])では粘性 TR 群 25.7%, 複合 TR 群 26.2% の向上が見られた。(図 3-2). 本研究と同様, 筋力測定装置(Biodex)を用いて筋力測定をしている先行研究では, 等速性肘屈曲トレーニングを高速(180[deg/sec])と低速(30[deg/sec])の 2 条件に分けて 8 週間行わせた Farthing and chilibeck(2003)がある. 彼らは短縮性収縮でのトレーニングでは高速群は約 2%, 低速群は約 7.5%の筋力増加があったと報告している. また, 9 週間の等速性肘屈曲トレーニングを 45[deg/sec]で行わせた Moore et al. (2012)ではトレーニング後の等速性筋力は低速(45[deg/sec])の条件で約 13%の向上, 高速(300[deg/sec])の測定では 17%の向上があった. これらの先行研究と比較すると, 本研究の筋力向上率は高値を示しており, 大きな筋力向上が見られたのかもしれない.

また, 肘屈曲トレーニングによる筋肥大の効果进行调查した Wornbom et al. (2007)はトレーニング後の上腕 50%部位での CSA 変化率をトレーニング日数で除した%CSA/day という指標を用いて, 先行研究を整理している. 彼らによると, 等速性肘屈曲トレーニングの先行研究での%CSA/day は平均 0.16 であった. 本研究の結果では, 各トレーニング群の上腕 50%部位での CSA 変化は粘性 TR 群では 8.01%, 複合 TR 群は 3.98%となっており, 同様の手法で%CSA/day を算出すると, 粘性 TR 群で 0.14, 複合 TR 群では 0.07 であった.

したがって、%CSA/day は先行研究で報告のあった平均値より小さい傾向を示しており、筋肥大には効果が低かった可能性がある。

以上のことから、本研究のトレーニング効果は先行研究と比較して筋力向上には大きな効果があったが、筋肥大には効果が小さかったと考えられる。これにはトレーニングの期間や負荷様式の違いによる影響がある。特に筋肥大の効果については、8週間のトレーニング期間では短い可能性がある。前述の筋肥大の効果を調査した Wornbom et al. (2007)は筋肥大の影響をトレーニング期間や頻度、トレーニング強度などから検討しているが、トレーニング期間の長い研究では筋肥大の効果も大きかったことを報告している。筋肥大の適応はある程度トレーニングを行った後の適応であることが考えられるため(図 1-1)、より長期間のトレーニングでは%CSA/day の値は大きくなることが予想される。したがって本研究の場合でも、より長期間のトレーニングでの検討を行えば、大きな筋肥大の効果が見られる可能性がある。

4.5.2 現場への応用

従来のトレーニングでは最大筋力の変化を評価しており、関節角度全域での筋力変化については不透明であった。本研究の結果から、同じ筋力向上であっても、動作前半の部分の筋力向上か、それとも最大筋力の向上なのかで用いるトレーニングの種類を工夫する必要があることが示唆されている。このことにより、より個人の目的に合わせたトレーニングが実現可能になると考えられる。

また形態的な観点からは、競技特性に合わせた身体づくりの可能性を示唆している。池袋ら(2011)、勝田ら(1993)は陸上短距離選手の大腿部は近位部から中央部が発達していることを報告している。力学的観点では、大腿部の近位部が発達することで相対的に末端部が軽くなり、したがって速度の増加に役立つと考えられる。一方、サッカー選手は大腿部全体が発達していると報告しており、切り替えし動作やキックの瞬間などで関節を安定させるのに貢献していると考えられる。このように競技特性によって、アスリートの形態的特徴は異なっており、競技特性に合わせた身体づくりが必要であると思われる。本研究の結果では、動作中の負荷を操作することによって特定の筋を肥大させることが可能であることが示唆されている。トレーニングによって競技特性に合わせた身体づくりが実現可能となれば、さらなる競技力向上につながることを期待される。

最後に、これまでの単回でのレジスタンストレーニングは強度や回数が重要視されてきたが、それだけでなく動作などの運動学や力学的な観点からもトレーニングを検討する必要がある。今後、より安全で効率的なトレーニング方法の確立につながる可能性がある。

4.5.3 今後の課題

本研究では、弾性負荷の重畳区間を前半部分とし、特定関節角度区間での筋力向上が見られるかを粘性のみでトレーニングする群と比較することで明らかにしようとした。しかし、粘性負荷は速度依存の負荷であり、トレーニング効果として最大トルクがより浅い角度で発揮されるように変化していた。このことにより、粘性負荷でのトレーニングも動作前半部分での負荷が高なり、結果的に複合負荷同様、前半部分の強度が高いトレーニングになった可能性がある。したがって、弾性負荷を重畳する区間を後半に設定してトレーニングを行わせれば、効果の違いが見られる可能性がある。

また、ベースとなる粘性抵抗の強度設定の再考も必要である。本研究を実施する前に 6 段階での粘性抵抗を用いた予備実験を行い、ベースとなる粘性抵抗を大きくすると弾性負荷を組み合わせた効果が小さくなるという結果を得た。本研究では粘性負荷と複合負荷でのトレーニング効果を比較することが目的であり、両トレーニング間の違いを明確にするため、粘性抵抗の小さい、高速でのトレーニングを実施した。その為、筋にかかるメカニカルストレスは小さくなってしまい、筋肥大への影響が小さいという点が考えられる。

また、トレーニングのトルク時間積分値に群間差があったことも課題である。予備実験の際に同一被験者を用いて粘性負荷と複合負荷の両条件間でのトルク時間積分値を比較し、回数を調整することで均一になるよう設定した。しかしながら、実際のトレーニング行わせた結果を見てみると、複合負荷 TR 群の方が小さいという問題点があった。5 週目以降は複合 TR 群の試行数を増やすことで両群の差はなくなったが、それでも 8 週間の期間全体でのトルク時間積分値は粘性 TR 群の方が大きいという結果を招いた。今後のトレーニング実験の際は定期的なモニタリングとフィードバックによるトレーニング強度と量の調整が必要である。

第5章 結論

本研究は開発した装置を用いて粘性負荷でのトレーニングと粘性負荷と弾性負荷を組み合わせた複合負荷による肘屈曲トレーニングを8週間行わせ、その効果を筋力と筋形態変化の観点から検証し、またトレーニング効果に与える要因をトレーニング中のデータから検討し、以下の結果が得られた。

1. 両トレーニング群で関節角度全域での筋力向上が認められたが、複合負荷トレーニングでの狙いとした関節角度区間での筋力向上は他の区間と同程度であった。
2. 部分的な筋横断面積の増加は粘性 TR 群でのみ見られた。
3. 上腕屈筋群の体積は両トレーニング群ともに増加が見られた。しかしながら、上腕筋の増加は複合 TR 群でのみ有意であった。
4. 前半部分の筋力向上は負荷強度、最大筋力の向上には筋体積の増加率との間に相関関係が見られ、筋力向上は区間によって要因が異なる可能性がある。
5. 筋体積の増加にはトルク時間積分値との間に相関関係が見られた。

以上のことから、複合負荷によるトレーニングでは全角度域での筋力向上が見られたが、狙いとした関節角度での筋力向上は他の区間と同程度であった。一方、筋体積の変化では上腕筋のみが増加しており、特定の筋だけを肥大させることの可能性が示唆された。

また実施したトレーニング内容の解析により、動作前半での筋力向上にはトレーニング強度、筋肥大にはトルク時間積分値との関係性が示され、運動学および力学の観点からトレーニングを検討する必要性が明らかとなった。

文献

Akima, H., H. Takahashi, S. Y. Kuno, K. Masuda, T. Masuda, H. Shimojo, I. Anno, Y. Itai and S. Katsuta. "Early Phase Adaptations of Muscle Use and Strength to Isokinetic Training." *Medicine and Science in Sports and Exercise* 31, no. 4 (1999): 588-594.

Anderson, C. E., G. A. Sforzo and J. A. Sigg. "The Effects of Combining Elastic and Free Weight Resistance on Strength and Power in Athletes." *Journal of Strength and Conditioning Research* 22, no. 2 (2008): 567-574.

Blazevich, A. J., D. Cannavan, D. R. Coleman and S. Horne. "Influence of Concentric and Eccentric Resistance Training on Architectural Adaptation in Human Quadriceps Muscles." *Journal of Applied Physiology* 103, no. 5 (2007): 1565-1575.

Bouillard, K., A. Nordez, P. W. Hodges, C. Cornu and F. Hug. "Evidence of Changes in Load Sharing During Isometric Elbow Flexion with Ramped Torque." *Journal of Biomechanics* 45, no. 8 (2012): 1424-1429.

崔鳥淵, 高橋英幸, 坂井悠二, 高松薫. "パワーアップ型とバルクアップ型筋力トレーニング手段のトレーニング効果の相違." *体力医学* 47, (1998): 119~130.

Colado, J. C. and N. T. Triplett. "Effects of a Short-Term Resistance Program Using Elastic Bands Versus Weight Machines for Sedentary Middle-Aged Women." *Journal of Strength and Conditioning Research* 22, no. 5 (2008): 1441-1448.

出村 慎一. "健康・スポーツ科学のための統計学入門" 不昧堂出版, (2001)

出村 慎一, 佐藤 進, 山次 俊介, 長澤 吉則. "健康・スポーツ科学のための SPSS による統

計解析入門” 株式会社杏林書院, (2007).

Farthing, J. P. and P. D. Chilibeck. "The Effects of Eccentric and Concentric Training at Different Velocities on Muscle Hypertrophy." *European Journal of Applied Physiology* 89, no. 6 (2003): 578-586.

深代 千之. "バイオメカニクスからみた理学療法評価—身体運動時の筋・腱連合組織の動態." *理学療法学* 24, no. 3 (1997): 158-163

福永 哲夫. “筋の科学辞典—構造・機能・運動—” 朝倉書店, (2002).

Gacesa, J. P., N. R. Dragnic, N. M. Prvulovic, O. F. Barak and N. Grujic. "The Validity of Estimating Triceps Brachii Volume from Single Mri Cross-Sectional Area before and after Resistance Training." *Journal of Sports Sciences* 29, no. 6 (2011): 635-641.

Goto, K., K. Takahashi, M. Yamamoto and K. Takamatsu. "Hormone and Recovery Responses to Resistance Exercise with Slow Movement." *Journal of Physiological Sciences* 58, no. 1 (2008): 7-14.

Hakkinen, K., A. Pakarinen, W. J. Kraemer, A. Hakkinen, H. Valkeinen and M. Alen. "Selective Muscle Hypertrophy, Changes in Emg and Force, and Serum Hormones During Strength Training in Older Women." *Journal of Applied Physiology* 91, no. 2 (2001): 569-580.

Higbie, E. J., K. J. Cureton, G. L. Warren and B. M. Prior. "Effects of Concentric and Eccentric Training on Muscle Strength, Cross-Sectional Area, and Neural Activation." *Journal of Applied Physiology* 81, no. 5 (1996): 2173-2181.

Holzbaun, K. R. S., W. M. Murray, G. E. Gold and S. L. Delp. "Upper Limb Muscle

Volumes in Adult Subjects." *Journal of Biomechanics* 40, no. 4 (2007): 742-749.

星川 佳広, 飯田 朝美, 村松 正隆, 内山 亜希子, 中島 由晴. "高校生スポーツ選手の競技種目別の大腰筋断面積." *体力科学* 55, (2006): 217-238.

Housh, D. J., T. J. Housh, G. O. Johnson and W. K. Chu. "Hypertrophic Response to Unilateral Concentric Isokinetic Resistance Training." *Journal of Applied Physiology* 73, no. 1 (1992): 65-70.

池袋 敏博, 久保 啓太郎, 岡田 純一, 矢田 英昭, 角田 直也. "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, no. 4 (2011): 401-411.

伊藤 晋彦, 三田 勝己, 赤滝 久美, 渡壁 誠, 添田 敏視, 野中 壽子, 加藤 厚生. "粘性負荷に対する筋運動(等粘性収縮)の力学的特性 -等張性および等速性収縮との比較-." *体力科学* 46, (1997): 211-220.

Jay Hoffman, 福林 徹[監訳], 小西 優, 佐藤 真葵[訳]. "スポーツ生理学からみたスポーツトレーニング" 大修館書店, (2011).

Kanehisa, H., H. Nagareda, Y. Kawakami, H. Akima, K. Masani, M. Kouzaki and T. Fukunaga. "Effects of Equivolume Isometric Training Programs Comprising Medium or High Resistance on Muscle Size and Strength." *European Journal of Applied Physiology* 87, no. 2 (2002): 112-119.

金久 博昭. "レジスタンストレーニングに伴う筋の肥大." *トレーニング科学* 18, no. 1 (2006): 39-48.

金久 博昭. "レジスタンストレーニングによる筋の収縮特性の変化：最大筋力における効果." *トレーニング科学* 18, no. 2 (2006): 161-170.

金子 公宥. "パワーアップの科学" 朝倉書店, (1988).

加藤 高志, 小澤 隆太, 重歳 憲治, 伊坂 忠夫. "三次元曲面 (角度・加速度・トルク) から計算した筋出力特性指標を用いた競技種目間比較." 日本機械学会シンポジウム講演論文集, (2006): 280-285.

勝田 茂, 久野 譜也, 板井 悠二. "MRI による一流アスリートの大腿部筋組成." 筑波大学体育科学系紀要 16, (1993): 107-119.

勝田 茂. "運動生理学 20 講" 朝倉書店, (1993).

Kawakami, Y., T. Abe, S. Y. Kuno and T. Fukunaga. "Training-Induced Changes in Muscle Architecture and Specific Tension." *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 72, no. 1-2 (1995): 37-43.

Kawakami, Y., K. Nakazawa, T. Fujimoto, D. Nozaki, M. Miyashita and T. Fukunaga. "Specific Tension of Elbow Flexor and Extensor Muscles Based on Magnetic-Resonance-Imaging." *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 68, no. 2 (1994): 139-147.

衣笠 竜太, 川島 紫乃, 増田 和実, 鱒坂 隆一, 松田 光生, 久野 譜也. "筋力トレーニングによる中高年女性の筋力増加とその要因としての筋の動員と筋肥大の経時的変化." *体力科学* 52, (2003): 105-118.

Kovaleski, J. E., R. H. Heitman, T. L. Trundle and W. F. Gilley. "Isotonic Preload Versus Isokinetic Knee Extension Resistance Training." *Medicine and Science in Sports and Exercise* 27, no. 6 (1995): 895-899.

- 北川 七也. "スピードスケート競技におけるスポーツ障害 とくに腰部障害と身体特性について." 東方医学会雑誌 42, no. 5 (1996): 544-555
- Kubo, K., H. Kanehisa and T. Fukunaga. "Effects of Different Duration Isometric Contractions on Tendon Elasticity in Human Quadriceps Muscles." *Journal of Physiology-London* 536, no. 2 (2001): 649-655.
- McCall, G. E., W. C. Byrnes, A. Dickinson, P. M. Pattany and S. J. Fleck. "Muscle Fiber Hypertrophy: Hyperplasia, and Capillary Density in College Men after Resistance Training." *Journal of Applied Physiology* 81, no. 5 (1996): 2004-2012.
- McGinley, C., R. L. Jensen, C. A. Byrne and A. Shafat. "Early-Phase Strength Gains During Traditional Resistance Training Compared with an Upper-Body Air-Resistance Training Device." *Journal of Strength and Conditioning Research* 21, no. 2 (2007): 621-627.
- Melnyk, J. A., M. A. Rogers and B. F. Hurley. "Effects of Strength Training and Detraining on Regional Muscle in Young and Older Men and Women." *European Journal of Applied Physiology* 105, no. 6 (2009): 929-938.
- Mitchell, C. J., T. A. Churchward-Venne, D. W. D. West, N. A. Burd, L. Breen, S. K. Baker and S. M. Phillips. "Resistance Exercise Load Does Not Determine Training-Mediated Hypertrophic Gains in Young Men." *Journal of Applied Physiology* 113, no. 1 (2012): 71-77.
- 宮崎純弥, 新井武志, 兵藤甲子太郎. "等尺性筋力トレーニングが等速性筋力に及ぼす影響." 目白大学 健康科学研究 3, (2010): 1~5.
- Mohamad, N. I., J. B. Cronin and K. K. Nosaka. "Difference in Kinematics and

Kinetics between High- and Low-Velocity Resistance Loading Equated by Volume: Implications for Hypertrophy Training." *Journal of Strength and Conditioning Research* 26, no. 1 (2012): 269-275.

Moore, D. R., M. Young and S. M. Phillips. "Similar Increases in Muscle Size and Strength in Young Men after Training with Maximal Shortening or Lengthening Contractions When Matched for Total Work." *European Journal of Applied Physiology* 112, no. 4 (2012): 1587-1592.

Murray, W. M., T. S. Buchanan and S. L. Delp. "Scaling of Peak Moment Arms of Elbow Muscles with Upper Extremity Bone Dimensions." *Journal of Biomechanics* 35, no. 1 (2002): 19-26.

Narici, M. V., G. S. Roi, L. Landoni, A. E. Minetti and P. Cerretelli. "Changes in Force, Cross-Sectional Area and Neural Activation During Strength Training and Detraining of the Human Quadriceps." *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 59, no. 4 (1989): 310-319.

Ohagan, F. T., D. G. Sale, J. D. Macdougall and S. H. Garner. "Comparative Effectiveness of Accommodating and Weight Resistance Training Modes." *Medicine and Science in Sports and Exercise* 27, no. 8 (1995): 1210-1219.

Roman, W. J., J. Fleckenstein, J. Straygundersen, S. E. Alway, R. Peshock and W. J. Gonyea. "Adaptations in the Elbow Flexors of Elderly Males after Heavy-Resistance Training." *Journal of Applied Physiology* 74, no. 2 (1993): 750-754.

Seynnes, O. R., M. de Boer and M. V. Narici. "Early Skeletal Muscle Hypertrophy and Architectural Changes in Response to High-Intensity Resistance Training." *Journal of Applied Physiology* 102, no. 1 (2007): 368-373.

. 重歳 憲治, 伊坂 忠夫, 小澤 隆太 川村 貞夫. "機械的インピーダンス呈示を活用した筋力トレーニング装置の開発." 日本機械学会 (2004).

重歳 憲治, 小澤 隆太, 森園 哲也, 伊坂 忠夫, 川村 貞夫. "機械的インピーダンス負荷を用いた選択的筋力強化トレーニング法の開発." 日本機械学会 2007 年度年次大会講演論文集, (2007): 43-44.

重歳 憲治, 伊坂 忠夫, 小澤 隆太, 森園 哲也, 川村 貞夫. "ER クラッチを用いた高速・高出力・高精度な上肢筋力トレーニング装置の開発." 日本機械学会シンポジウム講演論文集, (2006): 286-289.

重歳 憲治, 伊坂 忠夫, 小澤 隆太, 川村 貞夫. "従来にないトレーニング負荷を用いた新しい筋力トレーニング法の提案." 日本機械学会シンポジウム講演論文集, (2007): 205-208.

重歳 憲治, 川村 貞夫, 伊坂 忠夫. "機械的インピーダンス可変装置を用いた高速運動トレーニングシステムの開発." 日本機械学会論文集(C編) 75, no. 760 (2009): 102-108.

重歳 憲治, 伊坂 忠夫, 小澤 隆太, 森園 哲也, 川村 貞夫. "等粘性負荷を用いた人間のトルク-角速度-角度特性の計測と解析." 日本機械学会論文集(C編) 75, no. 750 (2009): 95-100.

Smith, R. C. and O. M. Rutherford. "The Role of Metabolites in Strength Training .1. A Comparison of Eccentric and Concentric Contractions." *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 71, no. 4 (1995): 332-336.

鈴木 克明, 伊坂 忠夫, 小澤 隆太, 重歳 憲治, 川村 貞夫. "特異性の原則に基づく筋力トレーニング装置の開発." 日本機械学会シンポジウム講演論文集, (2004): 219-224.

Tanimoto, M. and N. Ishii. "Effects of Low-Intensity Resistance Exercise with Slow Movement and Tonic Force Generation on Muscular Function in Young Men." *Journal of Applied Physiology* 100, no. 4 (2006): 1150-1157.

Thompson Floyd, 中村 千秋, 竹内真希 翻訳. "身体運動の機能解剖" 医道の日本社, (1997).

Tracy, B. L., F. M. Ivey, D. Hurlbut, G. F. Martel, J. T. Lemmer, E. L. Siegel, E. J. Metter, J. L. Fozard, J. L. Fleg and B. F. Hurley. "Muscle Quality. Ii. Effects of Strength Training in 65- to 75-Yr-Old Men and Women." *Journal of Applied Physiology* 86, no. 1 (1999): 195-201.

Wakahara, T., N. Miyamoto, N. Sugisaki, K. Murata, H. Kanehisa, Y. Kawakami, T. Fukunaga and T. Yanai. "Association between Regional Differences in Muscle Activation in One Session of Resistance Exercise and in Muscle Hypertrophy after Resistance Training." *European Journal of Applied Physiology* 112, no. 4 (2012): 1569-1576.

若原 卓, 江間 諒一, 宮本 直和, 川上 泰雄. "レジスタンストレーニングによる MR-T2 の変化と筋肥大の関連: 協働筋間差および筋内部位差に着目して." 第 25 回日本トレーニング科学会大会抄録集, (2012): 74

Wernbom, M., J. Augustsson and R. Thomee. "The Influence of Frequency, Intensity, Volume and Mode of Strength Training on Whole Muscle Cross-Sectional Area in Humans." *Sports Medicine* 37, no. 3 (2007): 225-264.

山田 茂, 福永 哲夫. "生化学, 生理学からみた骨格筋に対するトレーニング効果" 有限会社ナップ, (1996).

謝辞

本研究及び本論文の作成を進めるにあたり，立命館大学スポーツ健康科学部の伊坂忠夫教授には実験計画の段階から実験手法，分析方法及び論文作成に至るあらゆる面でご指導を頂きました。ここに深く感謝いたします。立命館大学スポーツ健康科学部の栗原俊之助手には測定の実施及び解析方法や実験結果の解釈，論文の構成など多大なご協力を頂きました。心より感謝申し上げます。滋賀医科大学の重歳憲治助教には装置の原理についてご指導頂き，また装置の不具合が発生した時には相談に乗っていただきました。お陰様で，最後まで実験を全うすることが出来ました。そしてスポーツ健康科学部の吉岡伸輔助教，大塚光雄助手ならびに大阪体育大学(学術振興会所属)の國部雅大氏には幾度となく貴重なご意見を頂きました。秘書の奥村悦子氏には日々の研究活動や事務処理など，多くのお世話をして頂きました。本当にありがとうございました。

また，口頭試問の際には真田樹義教授ならびに後藤一成准教授に修士論文についてのご指導を頂きました。心より御礼申し上げます。

そして被験者の皆様にはご多忙の中，合間を縫って実験に協力して頂きました。不手際等があり，ご迷惑も多々お掛けしたかと思いますが，最後までやり遂げて下さいました。心より感謝申し上げます。

最後にこの大学院生活2年間を支えてくれた家族，立命館大学スポーツ健康科学研究科の仲間，全ての方々に感謝の意を表します。