

筋伸張により生じる力を活用した低負荷等尺性トレーニングが 筋肥大および筋力増強に及ぼす影響

京都大学大学院	中 尾 彩 佳
(共同研究者) 同	市 橋 則 明
同	池 添 冬 芽
同	谷 口 匡 史
同	本 村 芳 樹

Effects of Low-load Isometric Training Utilizing Passive Torque Generated by Muscle Stretching on Muscle Strength and Hypertrophy

by

Sayaka Nakao, Noriaki Ichihashi,
Tome Ikezoe, Masashi Taniguchi, Yoshiki Motomura
Graduate School of Medicine, Kyoto University

ABSTRACT

The purpose of this study was to compare changes in muscle strength and hypertrophy after low-intensity torque-matched isometric training at long muscle length (LL) and short muscle length (SL). Thirty healthy young volunteers (16 men and 14 women; 25.2 ± 3.4 years) were assigned either to LL group or SL group, which performed isometric knee flexion training at 90° hip flexion and 30° knee flexion or 90° hip and knee flexion, respectively. The training program consisted of 30% of maximal voluntary contraction (MVC) with 5 sets of 20 repetitions of 5-s isometric contraction. Muscle cross-sectional area of the hamstrings and the MVC torque at 30° and 90° knee flexion were measured before and after 8-week training intervention. Passive torque was calculated from the knee flexion torque at rest. Active torque was

calculated by subtracting passive torque from the total torque generated during training. There was no between-group difference in the total torque during training (LL group, 22.2 ± 8.1 Nm; SL group, 28.2 ± 11.2 Nm) . However, the active torque generated by muscle contraction during training was significantly lower in the LL group than SL group (LL group, 10.1 ± 6.8 Nm; SL group, 28.2 ± 11.2 Nm) . The cross-sectional area and the MVC torque at 30° knee flexion significantly increased after intervention regardless of the groups. The MVC torque at 90° knee flexion significantly increased after intervention in both groups, and greater increase was observed in the SL group. These results suggest that low-intensity isometric training at LL can induce similar muscle hypertrophy and strengthening as that at SL, even in cases where active torque production is lower than that at SL.

緒 言

健康増進を図るうえで骨格筋量や筋力を維持・向上させることは重要である。一般的にトレーニングにより骨格筋量の増加（筋肥大）や筋力増強を得るには60～80%程度の高強度でのトレーニングが必要とされている¹⁻³⁾。しかし高齢者や患者、運動習慣のない者では血圧上昇や筋骨格系傷害等のリスクがあるため、高強度でのトレーニングが実施できないことが多い。そこで低強度でも効果的なトレーニング方法の開発が必要である。

よく実施されるトレーニング方法のひとつである等尺性トレーニングにおいて、筋肥大および筋力増強効果を検討した先行研究は散見される。そのほとんどが最大随意筋力の60%以上の高強度でのトレーニングを用いており、筋力増強や筋肥大が生じることを報告している⁴⁻⁷⁾。一方、最大筋力の50%未満の低強度等尺性トレーニングに関する介入研究は我々の知る限り2つしかない。いずれの研究も筋肥大効果については検討しておらず、また、筋力も有意な変化を認めていない^{8,9)}。このように、低強度での等尺性トレーニングにおいて筋肥大および筋力増強を得るのに有効なトレーニング方法は明らかになっていない。

筋力発揮時に関節に生じるトルクは、随意的な筋収縮により生じる能動的トルクと筋が伸張されることにより生じる受動的トルクの合計として発揮される。トレーニングを行う際、能動的トルクの発揮量に着目されることが多いが、持続的筋伸張により筋量やタンパク合成率が増加したとの先行研究があることから^{10,11)}、能動的トルクだけでなく、受動的トルクも筋肥大に寄与する可能性が考えられる。受動的トルクも能動的トルクと同様に筋肥大に寄与するとすれば、筋伸張位と筋短縮位において同程度の関節トルクを発揮する等尺性トレーニングを実施する場合、受動的トルクが大きい筋伸張位では能動的トルク発揮が少ないものの、筋短縮位と同程度の筋肥大や筋力増強を得られる可能性がある。筋伸張位と筋短縮位において等尺性トレーニングを実施し、筋肥大および筋力増強効果を調べた先行研究はいくつか存在するが⁴⁻⁶⁾、すべて高強度で実施された研究であり、低強度で検討した報告は見当たらない。高齢者や術後患者のように能動的なトルク発揮を十分に行えず低強度でトレーニングせざるを得ない場合、受動的トルクを利用した低強度トレーニング法は有用な手段となり得る可能性がある。

以上から、本研究の目的は、筋伸張位と筋短縮

位で同等の関節トルクを発揮する低強度等尺性トレーニングを8週間実施し、筋肥大および筋力増強効果を比較することとした。仮説は、同等の関節トルクを発揮するトレーニングを実施した場合、筋伸張位では筋短縮位に比べて能動的なトルク発揮が少なくても、同程度の筋肥大および筋力増強が得られるとした。

1. 方 法

1. 1 研究デザイン

筋伸張位と筋短縮位における低強度等尺性トレーニングの効果を比較するため、ランダム化並行群間比較試験を用いた。対象筋はハムストリングス、対象側は利き脚（ボールを蹴る脚）側とした。対象者を、筋が伸張位となる肢位でトレーニングを実施する伸張群と筋が短縮位となる肢位でトレーニングを行う短縮群にランダムに割り付けた。筋伸張位または筋短縮位において、低強度等尺性膝関節屈曲トレーニングを週3回8週間実施した。8週間のトレーニング前後に、筋肥大の指標としてハムストリングスの筋断面積、筋力の指標として最大等尺性膝関節屈曲トルク（最大関節トルク）を測定し、群間で変化が異なるかを検討した。

なお、割り付けには置換ブロック法を用い、各群で総人数および男女の割合が同等となるよう割り付けた。具体的には、リクルート担当者に対して研究参加希望の申し出があった順に、各対象者に男女別のID番号を割り当てた。別の共同研究者が事前にExcel (Microsoft Japan Co., Ltd, Tokyo, Japan) のRAND関数を用いて乱数を発生させ、各ID番号と群の対応表を作成した。リクルート担当者はその表から、各対象者がいずれの群に割り付けられるかを決定した。

1. 2 対 象

健康若年者30名を対象とした（男性16名、女

性14名； 25.2 ± 3.4 歳， 164.5 ± 8.0 cm， 56.2 ± 9.8 kg）。選択基準は20歳以上40歳未満の健康若年成人，除外基準は、測定下肢に整形外科的および神経学的疾患を有する者、日常的に下肢に対する筋力トレーニングを実施している者とした。対象者には研究の目的や内容について事前に十分に説明し、同意と署名を得た。なお、本研究は事前に所属機関の研究倫理委員会である京都大学大学院医学研究科・医学部及び医学部附属病院医の倫理委員会の承認を得て（承認番号：C1436-1）、UMIN臨床試験登録システムに登録した上で実施した（登録番号：UMIN000036729，試験登録名：受動的張力に着目した低負荷等尺性トレーニングが筋機能に与える影響）。

サンプルサイズの計算にはG*power 3.1 (Heinrich Heine University, Düsseldorf, Germany)を用いた。群（伸張群と短縮群）と時期（トレーニング前後）を要因とする分割プロット分散分析に必要なサンプルサイズを α error = 0.05, power = 0.8, effect size partial η^2 = 0.27として計算し各群14名となったため、測定の不備によるデータの欠損や対象者の脱落を考慮して各群15名（計30名）をリクルートした。effect sizeは同等の関節トルクを発揮する低強度等尺性トレーニングを筋伸張位と筋短縮位で行い、即時的な筋断面積の変化を検討した事前実験をもとに設定した。

1. 3 実験手順

予め練習セッションを設け、トルク発揮や測定に慣れるための練習を15分程度実施した。別日に筋伸張位と筋短縮位における最大関節トルクと受動的トルクを測定した。最大関節トルク発揮による一過性の筋断面積増加（筋腫脹）の影響を除外するため、トルク測定から3～7日後に介入前の測定としてハムストリングスの筋断面積を測定し、初回のトレーニングを実施した。その後、週3回8週間のトレーニングを実施した。トレーニング

ングの最終日から3～7日後に、介入前の測定と同様（±2時間）の時間帯に筋断面積とトルクの測定をおこなった。測定やトレーニング介入は全て京都大学医学部人間健康科学科棟内の実験室にて実施した。

1. 4 トルクの測定

多用途筋機能評価運動装置 Biodex system 4.0 (Biodex Medical Systems Inc., Shirley, New York, USA) を用いて、利き脚側の受動的トルクと最大関節トルクを測定した。測定肢位は、背臥位、測定側股関節90°屈曲位とし、測定側の下腿を装置のアタッチメントに固定した。装置の回転軸と膝関節軸がずれないように大腿部をベルトで固定した。また、体幹や反対側の下肢が動かないように、骨盤および反対側の大腿部をベルトで固定した（図1）。まず、安静時に膝関節屈曲方向にかかるトルクを、膝関節30°と90°屈曲位の2肢位で測定した（ $T_{\text{rest}30^\circ}$ 、 $T_{\text{rest}90^\circ}$ ）。この安静時のトルクは、下腿の重量に起因するトルクと筋が伸張されることで生じる受動的トルクの両方の影響を含むが、筋短縮位である膝関節90°屈曲位では受動的トルクはほとんど生じないと考えられるため、 $T_{\text{rest}90^\circ}$ を下腿重量に起因するトルクとみなした。膝関節30°屈曲位における下腿重量に起因するトルクは $T_{\text{rest}90^\circ} \sin 30^\circ$ と計算できるため、 $T_{\text{rest}30^\circ}$ か

ら $T_{\text{rest}90^\circ} \sin 30^\circ$ を引いた値を、筋伸張位である膝関節30°屈曲位における受動的トルクとして算出した。最大関節トルクも同様の2肢位、同様の固定方法にて測定した。膝関節30°および90°屈曲位それぞれで、3秒間の最大等尺性膝関節屈曲トルクを2回ずつ測定し、それぞれ3秒間の平均値を記録した。測定間には1分以上の休息を設けた。2回の値が10%以上異なった場合には3回目を測定し⁵⁾、トルクの大きい2回の平均値を統計に用いた。なお統計やトレーニング時に発揮する関節トルクの算出には、前述の方法で算出した下腿重量に起因するトルクを減じた値を用いた。

1. 5 筋断面積の測定

超音波診断装置 Aixplorer (version 12.2.0; SuperSonic Imagine, Aix-en-Provence, France) の panoramic mode を用い、両側のハムストリングスの横断面画像を撮像した。プローブはリニアプローブ SL10-2 (Supersonic Imagine, Aix-en-Provence, France) を用いた。測定肢位は腹臥位とした。体位変換に伴う水分移動の影響を最小限とするため、臥位にて20分以上経過してから撮像をおこなった¹²⁾。撮像位置は、坐骨結節と外側上顆および内側上顆を結ぶ線の近位1/3、1/2、2/3の3つの高位（近位、中間位、遠位）とした。まず坐骨結節と外側上顆を結ぶ線の1/2の点と坐骨結節と

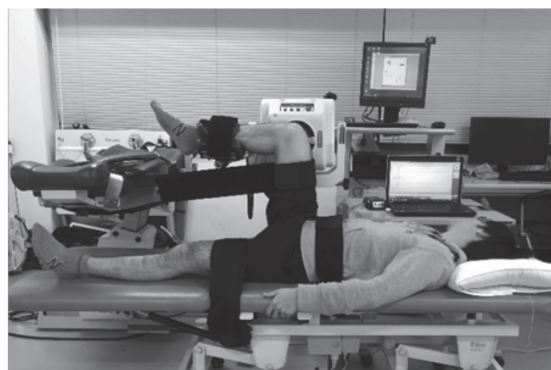


図1 トルクの測定およびトレーニング肢位（左：筋伸張位、右：筋短縮位）

内側上顆を結んだ線の1/2の点を結んだ線上に高さ5mmのテープを貼付した。このテープに沿って、超音波ゲルを付けたプローブを移動させることで、ハムストリングスの横断画像を撮像した。同様の試行を3回実施した。遠位、近位でも同様に測定を実施した。筋断面積の算出には、画像解析ソフトOsiriX (version 12.0.0; Pixmeo SARL, Bernex, Switzerland) を用いた。大腿二頭筋長頭、半腱様筋、半膜様筋の筋膜の内側を3筋まとめて囲い、各画像で断面積を算出した(図2)。なお、大腿二頭筋短頭は隣接する外側広筋との境界が不明瞭な対象者がいたため解析対象から除外した。各高位における3枚の画像から算出した断面積の平均値を各高位で算出し、3高位(近位、中間位、遠位)の平均値を統計解析に用いた。

1. 6 トレーニング介入

多用途筋機能評価運動装置Biodex system 4.0を用いて、等尺性膝関節屈曲トレーニングを週3回8週間実施した。トレーニングを行う肢位は、背臥位、股関節90°屈曲位で、伸張群は膝関節30°

屈曲位、短縮群は膝関節90°屈曲位とした(図1)。この肢位がずれないように、前述したトルク測定と同様の方法で、利き脚の下腿をアタッチメントに着け、大腿、骨盤をベルトで固定した。トレーニング時に発揮する関節トルクは、各肢位における最大関節トルクの30%とした。1セッションあたり、この目標トルクを5秒間発揮するトレーニングを20回5セット実施した。回数間の休息は2秒、セット間の休息は1分とした。2、4、6週終了時に各肢位で安静時に生じるトルクおよび最大関節トルクを測定し、最大関節トルクが前回測定値と比べて増加していた場合には、トレーニングの目標トルクを再設定した。前回値と同様または減少していた場合には、前の目標トルクを継続とした。トレーニングは、目標値と実際に発揮しているトルクをモニターにリアルタイムで表示し、フィードバックしながら行った。設定したトレーニング時の関節トルクから、受動的トルクを減じた値を、トレーニング時の能動的トルクとして算出した。トレーニング時の関節トルクと能動的トルクについて、介入期間中の平均値を算出し、統計に用い

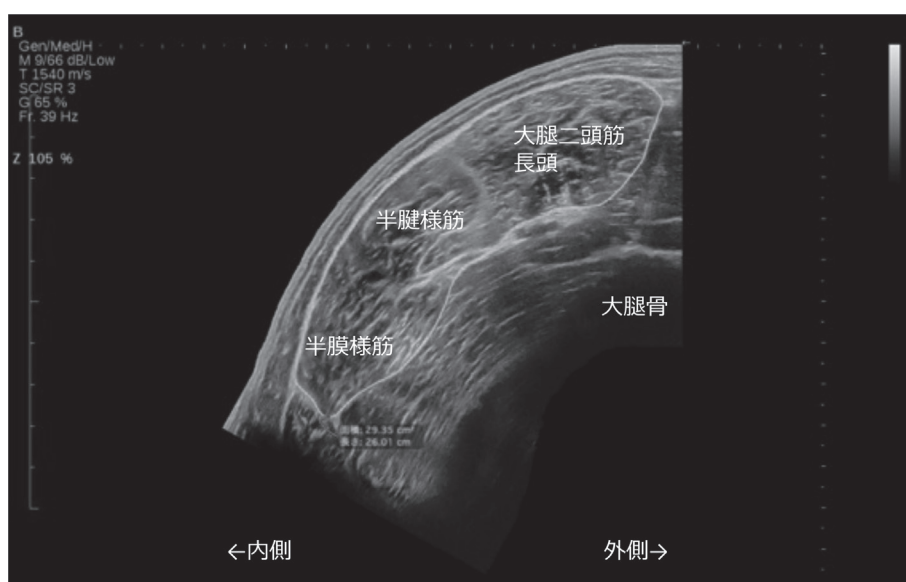


図2 ハムストリングスの超音波画像

た。

1. 7 統計的手法

各群の対象者特性を比較するため、年齢、身長、体重、介入前の最大関節トルク、受動的トルクを対応のないt検定にて群間比較した。また、トレーニング時の関節トルクおよび能動的トルクの群間比較を対応のないt検定にて実施した。筋伸張位、筋短縮位それぞれにおける最大関節トルクの変化を調べるため、群（伸張群、短縮群）と時期（介入前後）を要因とする分割プロット分散分析を用いた。筋断面積の比較には、脚（介入脚、非介入脚）と時期（介入前後）を要因とする反復測定二元配置分散分析、および介入脚における群（伸張群、短縮群）と時期（介入前後）を要因とする分割プロット分散分析を用いた。また、最大関節トルクと筋断面積について、各群の介入前後の変化

量Cohen's dを算出した。統計にはR version 2.8.1を用いた。有意水準は5%とした。

2. 結 果

研究参加者のフローチャートを図3に示す。研究とは無関係に発生した腰痛により脱落の申し出があった1名、機器の不具合により計画通りの介入後の測定が実施できなかった1名を除く28名のデータを最終的な解析対象とした。

解析対象の28名の対象者特性を表1に示す。対応のないt検定の結果、年齢、身長、体重、介入前の最大関節トルク、受動的トルクに有意な群間差はなかった。また、対応のないt検定の結果、トレーニング時の関節トルクには群間に有意差はなく（ $p = 0.12$ ；伸張群 22.2 ± 8.1 Nm, 短縮群 28.2 ± 11.2 Nm）、トレーニング時に発揮された能動的トルクは短縮群に比べて伸張群で有意に小さ

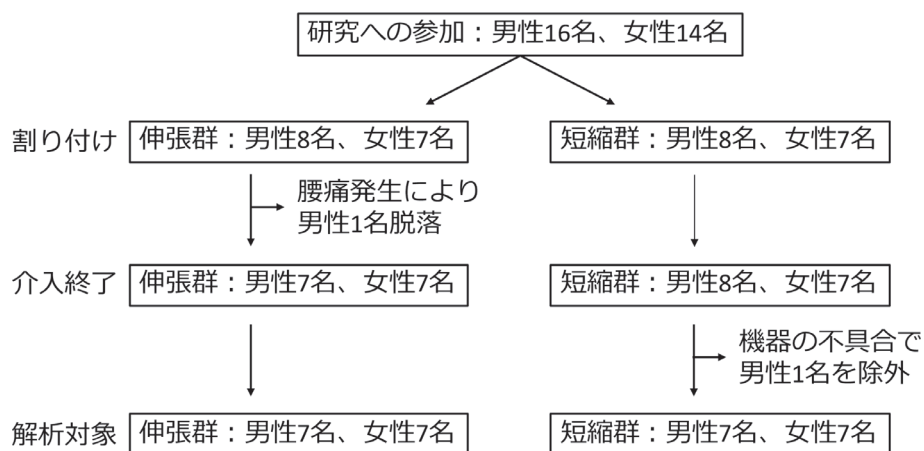


図3 参加者のフローチャート

表1 対象者特性

	伸張群	短縮群	P value
性別	男性7名 / 女性7名	男性7名 / 女性7名	-
年齢 (歳)	24.8 ± 3.3	25.6 ± 3.6	0.52
身長 (cm)	165.3 ± 7.4	163.8 ± 8.8	0.64
体重 (kg)	55.1 ± 9.6	57.2 ± 10.3	0.58
膝関節90°屈曲位における最大関節トルク (Nm)	75.3 ± 20.6	81.1 ± 26.4	0.50
膝関節30°屈曲位における最大関節トルク (Nm)	68.6 ± 23.0	67.3 ± 29.0	0.90
膝関節30°屈曲位における受動的トルク (Nm)	11.5 ± 4.3	14.1 ± 5.3	0.16

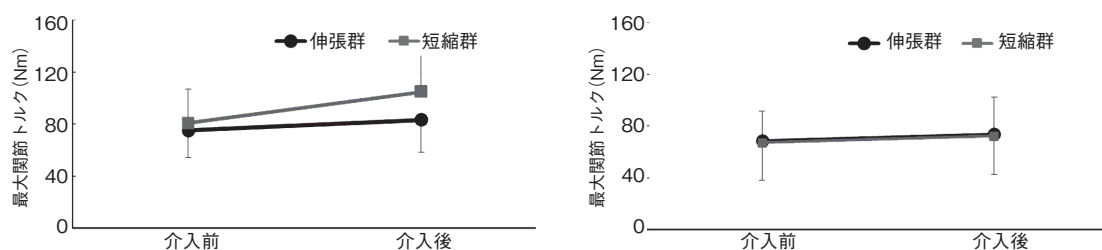


図4 膝関節90°屈曲位(筋短縮位, 左図)および膝関節30°屈曲位(筋伸張位, 右図)における最大関節トルク (Nm) の変化

表2 筋断面積 (cm²) の変化

	伸張群		短縮群	
	介入前	介入後	介入前	介入後
介入脚 (利き脚)	22.1 ± 4.7	23.2 ± 5.0	22.9 ± 5.1	24.2 ± 5.6
非介入脚 (非利き脚)	21.6 ± 4.9	21.7 ± 5.1	22.2 ± 5.0	22.2 ± 5.1

かった ($p < 0.01$; 伸張群 10.1 ± 6.8 Nm, 短縮群 28.2 ± 11.2 Nm)。

最大関節トルクについての結果を図4に示す。群と時期を要因とする分割プロット分散分析の結果、膝関節90°屈曲位(筋短縮位)における最大関節トルクは有意な交互作用を認め ($p = 0.049$)、伸張群、短縮群とも介入前に比べて介入後に有意に増加した ($p < 0.01$)。変化量Cohen's dは伸張群0.36、短縮群0.64であった。つまり、筋短縮位における最大関節トルクは両群ともに増加するが、その増加は短縮群でより大きかった。一方、膝関節30°屈曲位(筋伸張位)における最大関節トルクは有意な交互作用はなく ($p = 0.965$)、時期の主効果を認め ($p = 0.014$)、群に関わらず介入後に増加した。変化量Cohen's dは伸張群0.20、短縮群0.17であった。

筋断面積についての結果を表2に示す。脚と時期の二要因による反復測定二元配置分散分析の結果、交互作用を認め ($p < 0.01$)、介入脚のみ介入前に比べて介入後に有意に増加し ($p < 0.01$)、非介入脚では介入前後に有意な変化を認めなかった ($p = 0.573$)。介入脚における群と時期を要因とする分割プロット分散分析の結果、交互作用はなく ($p = 0.753$)、時期の主効果を認め ($p < 0.01$)、群

に関わらず介入後に増加した。

3. 考 察

本研究では、筋伸張位と筋短縮位において同等の関節トルクを発揮する低強度等尺性膝関節屈曲トレーニングを8週間実施し、筋断面積や最大関節トルクの変化を検討した。トレーニング時の関節トルクに群間差はなく、能動的なトルク発揮は短縮群に比べて伸張群で有意に小さかったが、筋断面積は両群ともにトレーニング介入前に比べて介入後に有意に増加した。この結果から、受動的トルクと能動的トルクの合計として発揮される関節トルクを同等として低強度等尺性トレーニングを実施する場合、受動的トルクが生じる筋伸張位では筋短縮位と比べて能動的なトルク発揮量が少なくても、同等の筋肥大が生じることが示された。また、筋伸張位および筋短縮位における最大関節トルクは両群ともに介入前に比べて介入後に有意に増加し、筋短縮位における最大関節トルクは伸張群に比べて短縮群で増加が大きかった。このことから、最大筋力は両群ともに増加するが、筋短縮位における筋力増加には能動的なトルク発揮量が影響する可能性が示唆された。以上の結果は仮説を一部支持するものであった。

我々の知る限り, 本研究は, 低強度等尺性トレーニングにより筋肥大や筋力増強が生じることを示した初めての研究である. 等張性トレーニングを低強度および高強度で実施した先行研究では, 低強度であっても反復回数を増やすことで, 高強度・低回数の従来のトレーニングと同様に筋肥大や筋力増強が得られたことが報告されている¹³⁾. また, Burd ら¹⁴⁾ は, 等張性トレーニングにおける筋収縮時間が長い条件において, トレーニング後の筋タンパク合成率の増加がより大きかったと報告している. 低強度での等尺性トレーニングを実施した本研究では, 高強度で実施された先行研究に比べて回数を多く実施し, 筋収縮時間を長く設定した. そのため, 低強度であっても筋タンパク合成が促進され, 筋肥大および筋力増強効果が得られたと考えられる.

また, 本研究は, 筋伸張位と筋短縮位における低強度等尺性トレーニングの介入効果を比較した初めての研究である. 筋伸張位と筋短縮位で同等のトルクを発揮する等尺性トレーニングの効果を比較した先行研究は, 高強度で実施された報告しか見当たらない. これらの先行研究において, 筋伸張位, 筋短縮位ともに長期的なトレーニング介入により筋肥大が生じたという報告^{4, 5)} もあれば, 筋伸張位でのトレーニングによってのみ筋肥大が生じたという報告もあり⁶⁾, 見解が一致していない. このような高強度トレーニングの場合, トレーニングトルクのうち受動的トルクが占める割合は非常に小さいため, 上記のような先行研究の結果が筋伸張位と筋短縮位における受動的・能動的トルクの発揮量の違いを反映した結果であるかは不明である. そこで本研究ではトレーニングトルクのうち受動的トルクが占める割合が大きい低強度にて, 筋伸張位と筋短縮位でのトレーニングの効果を比較し, 受動的トルクを活かしたトレーニングの有用性についての基礎的検討を行った. その結果, 筋伸張位および筋短縮位でのトレ

ニング後に同程度の筋肥大が生じた. このことから, 能動的なトルク発揮だけでなく筋が伸張されることで生じる受動的トルクも, 筋肥大を引き起こす筋へのストレスとなる可能性が示唆された.

筋短縮位, 筋伸張位の2肢位で測定した最大関節トルクは両群ともに増加し, 筋短縮位においては, 介入前後の変化が伸張群に比べて短縮群で大きかった. つまり, 筋伸張位に比べて能動的トルクの発揮量が大きかった筋短縮位トレーニングにおいて, トレーニングを実施した肢位における最大筋力増加が大きかった. よって, 最大筋力増加には能動的なトルク発揮量が影響する可能性がある. 本研究においては筋活動などの神経学的要因を検討できていないため, 筋収縮による能動的な力発揮量が筋力増加に影響するかに関しては今後検討していく必要がある.

本研究の限界として, 盲検化が不十分であることが挙げられる. 介入および一連の測定は同一検者が実施したため, 各対象者がいずれの群に割り付けられていたか盲検化できておらず, 測定バイアスの影響が否定できない.

本研究結果から得られる臨床的示唆としては, 随意的な筋収縮による能動的トルクを十分に発揮できない対象者に対して筋肥大や筋力増強を目的とした筋力トレーニングを処方する際の一助となることである. 術後患者や高齢者などにおいて, 能動的トルクを十分に発揮できない場合, トレーニングを行う肢位を対象筋が伸張位となる肢位とし, 受動的トルクを大きくすることによって, 関節トルクの発揮量をある一定以上にできれば, 対象筋に対して筋肥大に必要なだけのストレスを与えることができるかもしれない.

4. 結 論

筋伸張位と筋短縮位において同等の関節トルクを発揮する低強度等尺性トレーニングを実施し, 筋断面積および最大関節トルクの変化を比較し

た。その結果、筋伸張位、筋短縮位、いずれの肢位におけるトレーニングによっても、筋肥大や最大筋力増加が得られた。このことから、受動的トルクが生じる筋伸張位では、筋短縮位に比べて筋収縮による能動的なトルク発揮が少なくても、筋肥大や筋力増強効果を得られる可能性が示された。筋短縮位における最大筋力増加は筋伸張位と比べて筋短縮位でトレーニングを実施した群で大きかったことから、筋短縮位における筋力増加には能動的なトルク発揮量が影響する可能性がある。本研究結果は、随意的な筋収縮による能動的なトルク発揮が十分にできない対象者に等尺性トレーニングを処方する際の有益な情報となり得ると考えられる。

謝 辞

本研究に対して研究助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。また、本研究を遂行するにあたり多大なご協力をいただいた廣野哲也氏、野尻周佑氏、林玲美氏、田中浩基氏をはじめとする京都大学大学院医学研究科人間健康科学系専攻臨床バイオメカニクス研究室の皆様、ならびに、本研究にご参加くださった被験者の皆様に深謝いたします。

文 献

- 1) McDonagh M.J.N., Davies C.T.M., Adaptive response of mammalian skeletal-muscle to exercise with high loads, *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, **52**: 139-155, (1984)
- 2) Wernbom M., Augustsson J., Thomee R., The influence of frequency, intensity, volume and mode of strength training on whole muscle cross-sectional area in humans, *Sports Med.*, **37**: 225-264, (2007)
- 3) Ratamess N.A., Alvar B.A., Evetoch T.E. et al., Progression models in resistance training for healthy adults, *Med. Sci. Sports Exerc.*, **41**: 687-708, (2009)
- 4) Alegre L.M., Ferri-Morales A., Rodriguez-Casares R., Aguado X., Effects of isometric training on the knee extensor moment-angle relationship and vastus lateralis muscle architecture, *Eur. J. Appl. Physiol.*, **114**: 2437-2446, (2014)
- 5) Kubo K., Ohgo K., Takeishi R., Yoshinaga K., Tsunoda N., Kanehisa H., Fukunaga T., Effects of isometric training at different knee angles on the muscle-tendon complex in vivo, *Scand. J. Med. Sci. Sports*, **16**: 159-167, (2006)
- 6) Noorkõiv M., Nosaka K., Blazevich A.J., Neuromuscular adaptations associated with knee joint angle-specific force change, *Med. Sci. Sports Exerc.*, **46**: 1525-1537, (2014)
- 7) Ullrich B., Kleinöder H., Brüggemann G.P., Influence of length-restricted strength training on athlete's power-load curves of knee extensors and flexors, *J. Strength Cond. Res.*, **24**: 668-678, (2010)
- 8) Szeto G., Strauss G., Domenico G., Lai H., The effect of training intensity on voluntary isometric strength improvement, *Aust. J. Physiother.*, **35**: 210-217, (1989)
- 9) Young K., McDonagh M.J., Davies C.T., The effects of two forms of isometric training on the mechanical properties of the triceps surae in man, *Pflugers. Arch.*, **405**: 384-388, (1985)
- 10) Goldspink D.F., Cox V.M., Smith S.K., Eaves L.A., Osbaldeston N.J., Lee D.M., Mantle D., Muscle growth in response to mechanical stimuli, *Am. J. Physiol.*, **268**: E288-E297, (1995)
- 11) Yang S.Y., Alnaqeeb M., Simpson H., Goldspink G., Changes in muscle fibre type, muscle mass and IGF-I gene expression in rabbit skeletal muscle subjected to stretch, *J. Anat.*, **190**: 613-622, (1997)
- 12) Berg H.E., Tedner B., Tesch P.A., Changes in lower limb muscle cross-sectional area and tissue fluid volume after transition from standing to supine, *Acta. physiol. Scand.*, **148**: 379-385, (1993)
- 13) Ikezoe T., Kobayashi T., Nakamura M., Ichihashi N., Effects of low-load, higher-repetition vs. high-load, lower-repetition resistance training not performed to failure on muscle strength, mass, and echo intensity in healthy young men: A time-course study, *J. Strength Cond. Res.*, **34**: 3439-3445, (2020)
- 14) Burd N.A., Andrews R.J., West D.W., Little J.P., Cochran A.J., Hector A.J., Cashaback J.G., Gibala M.J., Potvin J.R., Baker S.K., Phillips S.M., Muscle time under tension during resistance exercise

stimulates differential muscle protein sub-fractional synthetic responses in men, *J. Physiol.*, **590**: 351–62. (2012)