

平成 14 年度

順天堂大学大学院スポーツ健康科学研究科

修士論文

膝関節周囲筋の血流制限下筋力訓練の効果

—至適加圧量を中心に—

スポーツ科学領域：スポーツ医学

11004 角出 貴宏

論文指導教員 桜庭 景植 教授

合格年月日 平成15年2月28日

論文審査委員 主査 桜庭 景植

副査 南谷 和利

副査 金子 奈明秋

## 目次

	頁
第1章 緒言	1
第2章 関連文献の考証	4
第1節 膝関節周囲筋の役割および特徴	4
第2節 筋力訓練の方法	6
第3節 等尺性訓練の効果および特性	9
第4節 血流制限下持久的訓練	11
(1) 急性応答	11
(2) 効果と適応	14
第5節 血流制限下筋力訓練	17
(1) 急性応答	17
(2) 効果と適応	19
第3章 本研究の目的	25
第4章 実験方法	26
第1節 被験者	26
第2節 実験デザイン	26
(1) 負荷量の決定	27
(2) 筋力訓練	28
(3) 膝伸展筋筋力測定	28

(4) 膝伸展筋の筋疲労度測定	30
(5) 大腿部周囲径の測定	30
(6) MRI 検査と大腿部筋断面積の算出	30
(7) 主観的訓練強度	31
(8) 指尖脈波測定	31
第3節 実験期間および環境条件	32
第4節 統計処理	33
第5章 結果	34
第1節 膝伸展筋筋力	34
(1) 訓練前後の比較	34
(2) 訓練群間の変化率による比較	38
第2節 大腿部周囲径	40
(1) 訓練前後の比較	40
(2) 訓練群間の変化率による比較	41
第3節 大腿部筋断面積	41
(1) 訓練前後の比較	41
(2) 訓練群間の変化率による比較	42
第4節 主観的訓練強度	42
第5節 指尖脈波	42
第6章 考察	45

第1節 膝伸展筋筋力	46
第2節 大腿部周囲径および筋断面積	51
第3節 主観的訓練強度	53
第7章 結論	56
第8章 要約	57
謝辞	59
引用文献	60
欧文要約	65
表 1~2, 図 1~28	
資料 1	

## 第1章 緒言

膝関節周囲筋である大腿四頭筋は、膝の伸展作用以外にも、体重の支持や動的に膝関節の安定性に関わっており、さらに、運動時には歩・走・跳などの主動筋として働いている<sup>12) 36)</sup>。しかし、大腿四頭筋は膝関節の傷害や加齢によって萎縮しやすく、他の筋に比べて筋力の低下が大きいことも知られている<sup>25) 29) 36)</sup>。膝関節周囲筋筋力の低下は、スポーツ復帰の遅延や膝関節の不安定感、高齢者においては転倒などを招く原因となり、損傷後の早期スポーツ復帰<sup>13)</sup>や膝関節の安定性の獲得<sup>23)</sup>、転倒予防<sup>35)</sup>のためには、この筋力の増加が重要な課題とされている。

一般に、筋力訓練の種類には等尺性訓練・等張性訓練・等運動性訓練<sup>1)</sup>の3つがある。膝関節に障害を持つ者や加齢により筋の萎縮の進んだ高齢者においては、リハビリテーションにて運動療法としていたずらに筋力訓練を行うと、関節痛などの障害を引き起こす危険性がある<sup>22) 23)</sup>とされているが、3つの筋力訓練のうち等尺性訓練は、膝関節痛を悪化させることなく、膝関節の安定性を保ちながら膝関節周囲筋筋力を増加させることが可能であり、運動療法とし

---

1 等速性訓練と同義語である。本稿では、整形外科学辞典<sup>2)</sup>に準じた。

て広く適応されている 21)22) 23)27)43)44)45)49)62)64)。

これらの報告で用いられている等尺性訓練に属する下肢伸展挙上訓練などは、一人でも安全かつ簡単に行える、筋力が弱くても訓練を実施できる、運動指導の理解を得るのが容易、場所をとらず特殊な器械も必要としないなどの利点があり、自宅でも行える訓練として最適である 45)。

一方、血流制限下で低負荷の筋力訓練を行うことにより、高負荷の時と同様の筋肥大や筋力増加の効果が得られるという報告がされている 9)17)39)40)60)61)。血流制限下筋力訓練とは、四肢の基部を圧迫し、筋への血流を制限した条件下で行う筋力訓練である 57)。

Takarada ら 60) は、閉経後の女性を対象として、一方の腕は血流制限下で低負荷のダンベルアームカール訓練を、もう一方の腕は血流制限を行わずに高負荷のダンベルアームカール訓練を 16 週間行った結果、低負荷で行った腕も、高負荷で行った腕と同様に顕著な筋力増加と筋断面積の増大がもたらされたと報告している。太田ら 40) は、健常成人男性を対象に、低負荷の血流制限下下肢筋力訓練を 8 週間行った結果、血流制限を行った脚の方が、血流制限を行わずに訓練を行った脚に比べて、筋断面積の増大はみられないものの等尺性筋力で有意な増加がみられたと報告している。

血流制限下訓練は、筋力訓練以外に持久的訓練でも行われている。

篠原<sup>51)</sup>は、健常成人を対象に、一方は血流制限を行う脚、もう一方は血流制限を行わない脚として、低負荷の片足自転車運動を4週間行った結果、換気閾値が血流制限を行った脚において有意に増加し、また、最大筋力も血流制限を行った脚において有意に増加したと報告している。

これまでに、下肢の血流制限下持久的訓練では主に50mmHg、筋力訓練では180mmHgから280mmHgの加圧量が用いられている。持久的訓練で用いられている低い加圧量でも筋力の増加がみられていることから、筋力訓練で用いられている加圧量より低くても同様の効果を得られる可能性があると考えられるが、最適な加圧量、加圧方法については未だ一定の見解は得られていない。

また、過去に報告されている高い加圧量では、筋力訓練時に不快感や疼痛を訴える者がいたという報告<sup>39)40)</sup>もある。このことから、高齢者や膝関節に障害をもつ者に対して、運動療法として血流制限下の筋力訓練を適応するためには、不快感などを引き起こさずに訓練効果が得られる至適加圧量を求める必要があると考えられる。

## 第 2 章 関連文献の考証

関連文献の考証の前半では、膝関節周囲筋の特性およびそれを鍛えるための等尺性訓練について、後半では、血流制限下訓練についてそれぞれ考証を行う。特に血流制限下訓練については、加圧量の違いによる急性応答や訓練効果の相違を中心に述べる。

### 第 1 節 膝関節周囲筋の役割および特徴

膝関節周囲筋である大腿四頭筋は、膝の伸展作用以外にも体重の支持や動的に膝関節の安定性に関わっており、さらに、歩行・階段昇降などの日常生活動作から、ランニング・ジャンプなどのスポーツ動作まで下肢動作の主動筋として働いている<sup>1)23)36)69)70)</sup>。しかし、この大腿四頭筋は加齢に伴っての筋力低下が大きく、50 歳代からその低下の割合が高くなることが報告されている<sup>25)29)31)48)</sup>。Overend<sup>41)</sup>は、大腿四頭筋の静的筋力、動的筋力を高齢者と若年者で比較した結果、60 歳から 70 歳の静的筋力は若年者の 75%、動的筋力は 70%であり、動的筋力の低下率が大きいと報告している。また、Lexell<sup>29)</sup>は、15 歳から 83 歳の男性を対象に外側広筋の筋断面積を測定した結果、80 歳代の筋断面積は 20 歳代の 60%となっており、その面積の減少は、50 歳代から加速的に進んでいることを観察して



いる。さらに、久野ら<sup>25)</sup>は、20歳から80歳までの男性を対象に、MRI (magnetic resonance imaging) を用いて横断的に10歳刻みにして大腿部筋断面積の変化を検討した結果、男性では50歳代で初めて筋断面積の有意な減少を示したとしている。これら加齢に伴う筋の変化の主な要因としては、筋線維数の減少や速筋線維の選択的萎縮などが考えられており<sup>25)28)29)</sup>、特に、高齢者においてこのような下肢の筋力低下および筋萎縮は、活動範囲を狭め、転倒の危険性を高めると懸念されている<sup>35)</sup>。山崎ら<sup>69)</sup>は、運動器疾患をもたない65歳以上の高齢入院患者を対象に、膝伸展筋筋力が歩行速度に及ぼす影響について検討した結果、膝伸展筋筋力と歩行速度の間に有意な正の相関がみられ、筋力の低下にしたがって歩行速度も低下する傾向にあったと報告している。また、同様に、膝伸展筋筋力が歩行自立度に及ぼす影響についても検討した結果、膝伸展筋筋力の低下にしたがって高齢患者の歩行自立度も低下し、歩行自立度を独立して規定する要因としては、他の要因に比べ膝伸展筋筋力が重要なものと考えられたと報告している<sup>70)</sup>。Fiataroneら<sup>8)</sup>は、平均年齢が90歳以上の高齢者を対象に筋力訓練を行った結果、大腿四頭筋筋力の増加や歩行速度の増加がみられ、歩行能力の改善もみられたと報告している。

一方、加齢による影響以外にも、前十字靭帯損傷や変形性膝関節

症などの膝関節の傷害によって大腿四頭筋の筋力低下や筋萎縮が大きいことが知られている<sup>4)11)20)49)</sup>。清水ら<sup>49)</sup>は、変形性膝関節症患者を対象に等尺性筋力を測定した結果、大腿四頭筋筋力の患健比が約60%と顕著に低下していることを示している。また、Kariya<sup>20)</sup>らは、慢性の前十字靭帯損傷者を対象に、MRIを用いて大腿四頭筋の筋断面積を測定した結果、健側の88%まで減少していたと報告している。池田ら<sup>14)</sup>は、前十字靭帯再建術を行った者を対象に大腿四頭筋の筋力測定を行い、術前の患健比から、60%未満の者、70%未満の者、70%以上の者の3群に分けて術後の筋力回復について検討した結果、術前の患健比が60%未満の場合は術後の筋力回復が遅れる傾向にあり、70%以上の場合は筋力回復が良好であったと報告している。

これらのことから、高齢者においては自立歩行や転倒予防などのために、また、膝関節に障害をもつ者においては損傷後の早期筋力回復や膝関節の安定性の獲得のために、大腿四頭筋筋力の増加は重要な課題であるといえる。

## 第2節 筋力訓練の方法

筋力訓練の方法は、筋の収縮様式から大別して、等尺性訓練 (isometric exercise)、等張性訓練 (isotonic exercise)、等運動性

訓練 (isokinetic exercise) の 3 つに分類される。等尺性訓練は、関節を動かさないことで、筋の長さを変化させずに行う訓練である。等張性訓練は、一定の負荷に抗して筋がその長さを変え、関節を動かしながら張力を発揮して行う訓練である。そして、等運動性訓練は、関節が一定の速度にて動きながら筋を収縮させて行う訓練である<sup>46)</sup>。これら 3 つの筋力訓練の長所および短所をまとめると、等尺性訓練は、特別な器具を用いる必要が無く、随時実施可能であり、傷害の発生が少ないという利点をもっているが、動きを伴わない単調なものであり、訓練効果も収縮時の関節角度付近でしか得られないという欠点がある。等張性訓練は、既知の負荷を実際の運動に近い反復動作で繰り返すことにより筋力の増加を図れるが、発揮される力は関節角度によって異なるため、過度な負荷のために筋の傷害を引き起こすなどの危険性がある<sup>26)</sup>。

また、等運動性訓練は、これら 2 つの長所を活かし、短所を補う訓練方法であるが、特殊で高価な機器を必要とし、誰もが手軽に行える訓練であるとは言い難い。

ところで、等張性訓練や等運動性訓練は動的な訓練方法である。この動的な訓練方法では、大腿四頭筋収縮に伴う膝蓋・大腿関節の圧迫力が問題となる。腰野<sup>23)</sup>は、無負荷で膝伸展を行った時の膝蓋骨の圧迫力を計算し、青年男子では 45 度屈曲位付近で最大約 9kg、

伸展位で約 3kg 程度の圧迫力が加わると報告している。また、高齢者でも、その値はやや低いと同様の傾向であった。負荷を加えずに行った等張性収縮でも、体重の約 7 分の 1 が膝蓋・大腿関節に加わっており、もし負荷を加えて同様の収縮を行った場合、さらなる圧迫力が膝蓋・大腿関節に加わると考えられる。よって、膝関節に障害をもつ者や、加齢によって筋の萎縮の進んだ高齢者においては、両者のような動的な筋力訓練方法で、リハビリテーションにおける運動療法としていたずらに筋力訓練を行うと、関節痛などの障害を引き起こす危険性が高くなるといえる<sup>22)23)</sup>。

しかし、静的な訓練方法である等尺性訓練は、関節の安定性を保ちながら筋力を増加させることが可能である。損傷後および術後早期のリハビリテーションや、変形性膝関節症などの運動療法として広く適応されている下肢伸展挙上訓練 (straight leg raising exercise: 以下、SLR 訓練と記す)、股関節外転訓練 (abduction exercise: 以下、Abd 訓練と記す) などは、等尺性訓練に属し、膝関節痛を悪化させることなく、膝関節の安定性を保ちながら膝関節周囲筋筋力を増加させることが可能である<sup>21)22)23)27)43)44)45)49)62)64)</sup>。一人でも安全かつ簡単に行える、筋力が弱くても実施できる、場所をとらず特殊な器械も必要としないなどの利点もあり、自宅でも行える訓練として最適である<sup>45)</sup>。

### 第 3 節 等尺性訓練の効果及び特性

等尺性訓練である SLR 訓練などは、主に変形性膝関節症者の運動療法に用いられ、その成果が報告されている。この SLR 訓練の際に足関節に加える負荷は、膝関節伸展位での最大挙上重量 (repetition maximum: 以下、1RM と記す) の約 3 分の 1 が一般的に用いられており、高齢者では通常 3~4 kg、疼痛のある場合は 0~2 kg である<sup>15)27)43)45)49)62)64)</sup>。

鶴見ら<sup>64)</sup>は、変形性膝関節症の女性を対象に、SLR 訓練を 2 カ月間行い、大腿四頭筋の筋力変化をみた結果、膝関節伸展位では平均  $7.4 \pm 2.6$  kg から  $9.4 \pm 3.0$  kg に、膝関節 90 度屈曲位では平均  $17.9 \pm 8.2$  kg から  $26.5 \pm 10.2$  kg に有意に増加したと報告している。齋藤ら<sup>43)</sup>は、変形性膝関節症の女性を対象に、SLR 訓練を 6 週間行った結果、等運動性筋力は有意な増加はみられなかったが、等尺性筋力で有意な増加がみられたと報告している。

桜庭<sup>45)</sup>、池田ら<sup>15)</sup>は、変形性膝関節症の患者に SLR 訓練を 3 カ月間行った結果、訓練方法である等尺性筋力は有意な増加を示さなかったが、疼痛の軽減に伴って低速度の求心性筋力で有意な増加を示したと報告している。

また、筋電図を用いて、SLR 訓練などの等尺性訓練の特性や、効果的な訓練肢位についても検証されている。

池田ら<sup>15)</sup>は、SLR 訓練、大腿四頭筋のセッティング訓練（等尺性訓練）（以下、セッティング訓練と記す）、Abd 訓練、股関節内転訓練（adduction exercise: 以下、Add 訓練と記す）という 4 つの等尺性訓練の実施時に内側広筋、外側広筋、大腿直筋の筋放電量を計測し、比較検討した。その結果、内側広筋と外側広筋の比較では、SLR 訓練とセッティング訓練がともにやや外側広筋の優位な筋放電量を示し、Abd 訓練と Add 訓練は、内側広筋の優位な筋放電量を示したと報告している。さらに、無負荷時の SLR 訓練の筋放電量を 100% として比較した場合、重錘を負荷して SLR 訓練を行った時の筋放電量は、内側広筋、外側広筋ともに 1kg 負荷では有意差をみなかったが、2kg 負荷では有意な増加を示し、また、大腿直筋は、1kg 負荷で有意な増加を示し、2kg 負荷で最高値を示したとしている。

鶴見ら<sup>64)</sup>は、2kg 負荷での下肢伸展挙上（straight leg raising: 以下、SLR と記す）を 5 秒間保持した時の筋放電量を、内側広筋、外側広筋、大腿直筋の各筋から求め、大腿四頭筋の徒手抵抗による最大収縮時の筋放電量を 100% として比較検討した。その結果、2 kg の負荷を与えると筋放電量は大きくなり、各筋とも 40~50% の値になったと報告している。また、足関節背屈位で行った SLR が、底屈位で行った場合と比較して各筋とも大きな筋放電量を示したと報告している。

冬木ら<sup>10)</sup>は、SLR時に足関節を能動的に最大背屈した場合と、足関節の肢位を意識せずリラックスした場合（以下、コントロールと記す）の両者について、等尺性収縮下での最大筋力の値と表面筋電図所見を比較した。その結果、最大筋力の値は、コントロールに比べ足関節背屈位で有意な低下を示したが、内側広筋、外側広筋、大腿直筋の筋放電量は足関節背屈位で明らかな増加を示したとしている。そして、この現象のメカニズムについて、足関節の自動背屈は、腓腹筋の受動的伸張により膝屈曲トルクを生じ、膝伸展運動の作業効率を低下させるが、膝伸展筋の筋活動を増加し、膝関節の固定性をより高める作用があると考察している。

これらよって、等尺性訓練であるSLR訓練、Abd訓練、Add訓練は特別な器具を必要とせず、一人でも大腿四頭筋を効果的に鍛えることができるといえる。そして、SLR訓練時には、大腿四頭筋の筋活動を増加させるためにも、重錘による負荷をし、足関節を背屈させて行うことが重要であると考えられる。

#### 第4節 血流制限下持久的訓練

##### (1) 急性応答

血流制限下の持久的訓練には、圧制御チャンバーを用いて下肢全体に圧を付加する方法<sup>5)6)7)19)37)42)52)53)67)</sup>と、訓練肢の基部に駆血帯

を装着して圧を付加する方法<sup>38)51)</sup>の2つが用いられている。

Eiken ら<sup>5)</sup>は、下肢全体へ圧を付加する圧制御チャンバーを考案し、仰臥位での自転車運動中に 50mmHg の圧を付加して血流制限下の漸増負荷試験を行った。その結果、圧を付加せずに自転車運動を行った場合に比べ、同一負荷に対する酸素摂取量が高くなること、および、最大負荷が約 40% も低下することを報告している。また、運動負荷が高くなるにつれて血中乳酸濃度が急増し、疲労困憊に至るまでの運動時間が短くなることも報告している。

Sundberg ら<sup>52)53)</sup>も同様のチャンバーを利用して、下肢に 50mmHg の圧を付加して仰臥位での自転車運動中の変化を観察した結果、下肢への血流量の減少(約 16%)や、静脈の酸素飽和度の減少および動静脈酸素較差の増加に有意差がみられたと報告している。また、外側広筋の筋活動の増加や、type II 線維におけるグリコーゲン利用の増加も観察されている。

さらに、加圧量の違いによる変化も観察されている。Rowell ら<sup>42)</sup>は、仰臥位での自転車運動中に下肢に付加する圧を漸増的に増加(25~60mmHg)させた結果、加圧量の増加にしたがって静脈血の乳酸濃度やノルエピネフリン濃度の増加、静脈血 pH の低下が著しくなると報告している。

また、血流制限による内分泌系への影響についても報告されてい



る。Viru ら<sup>67)</sup>は、下肢に 50mmHg の圧を付加して仰臥位で自転車運動を行った時の内分泌の変化を観察した。その結果、成長ホルモンの分泌が、血流制限を行わずに運動した時の 2 倍になり、また、コルチゾールやトリヨードサイロニンも、運動強度が分泌を誘発する閾値以下だったにもかかわらず、血流制限を行うことによって増加したと報告している。

一方、圧制御チャンバー以外にも、駆血帯を用いて圧を付加した時の応答について報告されている。

Oelberg ら<sup>38)</sup>は、大腿基部に 45mmHg の圧を付加し、血流制限下でのレッグエクステンションを最大筋力の 40% の負荷で 3 分間行わせた結果、運動直後の換気量が約 40% 高くなったと報告している。また、血中乳酸濃度も増加し、骨格筋細胞内の pH が大きく低下したと報告している。篠原<sup>51)</sup>は、低負荷の一定自転車運動における多段階加圧 (0・30・50・70mmHg) の影響をみた結果、総酸素摂取量は 50mmHg まで増加し、0mmHg と 50mmHg の間に有意な差がみられたこと、また、筋電図積分値は付加した圧の高さにしたがって増加する傾向にあったことを報告している。

これらのことから、運動時に圧を付加して血流制限を行うことによって、血流制限を行わない場合に比べ運動量は減少するが、同一の物理的運動強度に対する生理的強度は大きくなり、より高いレベ

ルでの筋活動やエネルギー供給が要求されると示唆される。

## (2) 効果と適応

これまで、圧制御チャンバーを利用した持久的訓練の効果についていくつか検討されている<sup>6)7)19)37)</sup>。

圧制御チャンバーを利用した訓練は、一方の脚は血流制限を行う脚、もう一方の脚は血流制限を行わない脚として仰臥位での片脚自転車運動を被験者に行わせ、それぞれの脚における持久的訓練の効果を比較するという方法がとられており、その訓練時間や頻度は、1回45分で週4回、4週間行われている。この時、下肢に付加する圧は50mmHgが多く用いられている。

Kaiserら<sup>19)</sup>およびEsbjornssonら<sup>7)</sup>は、8人の健常人男性を対象に、上記の片脚自転車運動の訓練を行い、訓練前後に血流制限下および通常の状態下での漸増負荷試験を行った。その結果、両脚とも疲労困憊までの運動時間や最大酸素摂取量が増加したと報告している。さらに、疲労困憊までの運動時間は、血流制限を行った脚で、血流制限下で漸増負荷試験を行った時の方が、血流制限を行わずに訓練した脚に比べて有意な差があったと報告している。

Eikenら<sup>6)</sup>は、10人の健常人男性を対象に、Kaiserらと同様の片脚自転車運動の訓練を行った。訓練前後に連続60回の等運動性膝伸展運動の測定を行った結果、血流制限下で訓練を行った脚では、

最大筋力および測定開始最初 5 分の 1 までの平均筋力が有意に低下し、測定終了最後 5 分の 1 の平均筋力が増加したと報告している。つまり、血流制限下の訓練を行った脚では、疲労による筋力の低下率が減少し、筋持久力が向上したことが示されている。

また、Esbjornsson ら<sup>7)</sup>は、被験者の外側広筋から筋生検を行い、大腿四頭筋の酵素活性の変化についても検討している。血流制限下の訓練を行った脚で、酸化促進の指標である CS (citrate synthase) 活性の増加、乳酸の酸化促進の指標となる LDH (lactate dehydrogenase) 活性の低下が有意にみられ、さらに、筋グリコーゲンの含有量も増加する傾向にあったと報告している。そして、type I 線維の割合の増加および面積の増大や、毛細血管密度の増加も血流制限下の訓練を行った脚でみられたと報告している。

さらに、これら以外にも、血流制限下の持続的訓練による筋断面積および筋線維面積の増大について検討されている。

Nygren ら<sup>37)</sup>は、9 人の健常人男性を対象に片脚自転車運動の訓練を行い、訓練前後の筋断面積および筋線維面積について、MRI および筋生検の 2 種類の方法を用いて検討した。その結果、血流制限下の訓練を行った脚で筋断面積は有意に増大し、さらに、筋断面積に占める type II a 線維の割合の増加、平均の筋線維面積の有意な増大が観察されている。これら面積の増大の要因には、収縮タンパク

量の増加や、筋グリコーゲン含有量の増加およびミトコンドリアの数や大きさの増加が関わっていると考えられている。

従って、圧制御チャンバーを用いた血流制限下の持久的訓練には、最大筋力を低下させ、筋断面積に占める酸化能力の高い筋線維の割合を増加させる可能性があると考えられ、有酸素的な能力を改善させるとともに、筋の代謝を変化させると考えられている。

一方、駆血帯を用いた持久的訓練の効果についても検討されている。篠原は<sup>51)</sup>、健常成人7名を対象に、一方の脚は血流制限を行う脚、他脚は血流制限を行わない脚として、低負荷(換気閾値の70%)の片脚自転車運動の訓練を、1回30分で週4回、4週間行った結果、最大酸素摂取量はいずれの脚においても有意な変化はなかったが、換気閾値が血流制限を行った脚で有意に増加したと報告している。また、訓練前後で同強度の自転車運動を行った結果、血流制限を行った脚は、血流制限を行わなかった脚に比べ、より少ない酸素摂取量で自転車運動を行えるようになり、筋電図積分値も血流制限を行った脚でより大きく減少する傾向にあったと報告している。そして、等尺性の膝伸展筋筋力も血流制限を行った脚で有意に増加したと報告している。

これらの報告から、圧制御チャンバーを用いた場合と駆血帯を用いた場合の持久的訓練の効果を比較すると、圧制御チャンバーを用

いた訓練では、筋の有酸素的な能力を改善させるが、最大筋力は低下している。しかし、駆血帯を用いた訓練では、圧制御チャンバーと同じ加圧量でも最大筋力は増加している。よって駆血帯を用いることで、訓練肢に付加する圧は低くても筋力を増加させる可能性があると考えられる。

## 第 5 節 血流制限下筋力訓練

### (1) 急性応答

駆血帯を用いて四肢の血流を制限し、筋力訓練を行った時の筋活動の急性応答についていくつか検討されている<sup>34)57)58)60)</sup>。

Moritani ら<sup>34)</sup>は、上腕基部に圧を付加し、血流制限を行った状態で低負荷のハンドグリップ運動を断続的（収縮 2 秒、弛緩 2 秒）に繰り返して行わせた。その結果、前腕筋群から導出された筋電図から、血流制限によってより大きな運動単位が動員されることや、運動単位の発火頻度が増加することを観察している。また、血流制限解放直後に血中乳酸濃度が急増することも観察している。宝田ら<sup>57)60)</sup>は、血流制限下筋力訓練の基礎的知見を得るため、上腕に圧を付加した時の上腕の末梢血管抵抗、血中乳酸濃度、筋放電量について調べた結果、安静時においては、加圧量を増加させると、末梢血管抵抗と血中乳酸濃度が圧に比例して増加すること、筋が活動して

いない状態にも関わらず血中乳酸濃度は急増することを観察している。また、運動時においては、局所的に血流を制限することで、低負荷の運動でも筋放電量は高負荷の運動を行った時と同様になることを観察し、低負荷で血流制限を行わずに運動した場合と比較して、血中乳酸濃度は有意に増加したと報告している。

さらに、Takarada ら<sup>58)</sup>は、血流制限下の動的な膝伸展運動中の変化についても報告している。大腿基部に圧を付加し、血流制限を行った状態で膝伸展運動を行わせた際、外側広筋の筋電図積分値が、血流制限を行わずに運動を行った時の 1.8 倍に増加し、血中乳酸濃度も 2 倍に増加したと報告している。

以上のように、低負荷な運動でも、血流を制限することでより大きな運動単位が動員される、運動単位の発火頻度が増すといった筋活動の増加や、血中乳酸濃度の増加が報告されている。このメカニズムについて、宝田ら<sup>57)</sup>は、圧を付加することによる活動筋への血液供給量の減少が活動筋への酸素供給を阻害し、より多くの type I 線維の疲労をもたらし、その結果、同じ筋力を維持するために追加的に type II 線維の動員が余儀なくされ、圧を付加しない場合よりも筋の放電量が増加すると推察している。また、篠原<sup>30)</sup>は、動脈血流阻害に伴う酸素供給阻害によって無酸素的代謝が亢進し、それに伴う乳酸や水素イオンなどの代謝関連物質が静脈阻害によって蓄積し

て筋収縮性を低下させ、所定の力発揮を遂行するために運動単位の動員や発火頻度が補償的に増加されたと推察している。

## (2) 効果と適応

Shinohara ら<sup>50)</sup>は、健常人男性を対象に、断続的（収縮 2 秒、弛緩 3 秒）に繰り返す等尺性膝伸展運動を、一方の脚は 250mmHg の圧を付加して血流制限を行う脚、他脚は圧を付加せずに血流制限を行わない脚として、最大筋力の 40% の負荷で 1 回 3 分、週 3 回、4 週間行った。その結果、血流制限を行った脚の最大筋力は、訓練開始 2 週間で 9%、4 週間で 26% と訓練前と比較して有意に増加し、また、血流制限を行わなかった脚と比較しても有意に増加したと報告している。Takarada ら<sup>61)</sup>は、健常人男性を対象に、大腿基部に  $280 \pm 8.1 \text{mmHg}$  の圧を付加し、血流制限下での動的な膝伸展訓練を低負荷で週 2 回、8 週間行った。その結果、訓練後の膝伸展筋の筋力および筋断面積は、負荷が極めて低いにもかかわらず訓練前に比べて有意に増加したと報告している。

太田ら<sup>40)</sup>は、健常人男性を対象に、SLR 訓練、Abd 訓練、セッティング訓練という低負荷の下肢筋力訓練を、週 3 回、8 週間、一方の大腿基部を 180mmHg の圧で付加して血流制限下で行った。その結果、訓練前後の膝伸展筋の筋断面積に有意差はみられなかったが、膝伸展筋の等尺性筋力で有意な増加がみられたと報告している。

さらに、内側広筋の筋放電量も、血流制限を行った脚で有意な増加がみられたと報告している。

以上のような普段積極的に筋力訓練を行っていない健常人男性以外にも、習慣的に筋力訓練を行い、すでに大きな筋力を有し、筋肥大のトレーナビリティも小さいと思われるスポーツ競技選手にも血流制限下の筋力訓練を行って、その効果が検討されている。宝田ら<sup>57)</sup>は、一流ラグビー選手を対象に、大腿基部に  $186 \pm 5.7 \text{ mmHg}$  の圧を付加して、1RM の 50% 負荷でのレッグエクステンション訓練を 1 回 4 セット、週 2 回、8 週間行った。その結果、訓練前と比較して、等尺性および等運動性筋力は有意に増加し、膝伸展筋および内転筋群の筋断面積は平均でそれぞれ 12.3%、38.1% と、どちらも有意に増大したと報告している。

石川<sup>17)</sup>は、大学陸上競技選手を対象に、大腿基部に  $200 \text{ mmHg}$  の圧を付加し、血流制限下での等運動性筋力訓練を週 2 回、4 週間行った。その結果、低強度の訓練であっても、血流制限を行うことで求心性および遠心性筋力が有意に増加し、高強度の訓練を行った時と同様の効果が得られたと報告している。

また、筋力低下や筋萎縮によって筋機能が低下している中高齢者や、障害をもつ者への運動療法としての血流制限下筋力訓練についても検討されている。



宝田ら<sup>57)60)</sup>は、閉経後の女性を対象に、一方の腕は上腕基部に  $110 \pm 7.1 \text{ mmHg}$  の圧を付加して血流制限下で低負荷のダンベルアーム訓練を、他方の腕は圧を付加せず血流制限を行わずに高負荷のダンベルアーム訓練を 1日3セット、週2回、16週間行った。その結果、血流制限下で訓練を実施した腕は、訓練容量および強度が血流制限を行わない腕の約 60%であるにもかかわらず、高負荷で行った時と同様に顕著な筋断面積の増大と筋力増加がもたらされたと報告している。

藤野ら<sup>9)</sup>は、前十字靭帯再建術を施行した患者を、血流制限下で筋力訓練を行う群、血流制限を行わずに筋力訓練を行う群の2群に分け、3ヵ月間の筋力訓練を行った。その結果、血流制限下で訓練を行った群は膝伸展筋の筋断面積が有意に増大したが、筋力増加は起こらなかったと報告している。

太田ら<sup>39)</sup>は、前十字靭帯再建術後16週を経過した患者を対象に、手術側の大腿基部に約  $180 \text{ mmHg}$  の圧を付加し、血流制限下での低負荷の筋力訓練を行った。その結果、血流制限を行わなかった群に比べ、血流制限を行った群で等運動性収縮下における有意な筋力増加がみられ、膝伸展筋の筋断面積も有意な増大がみられたと報告している。

さらに、筋力訓練を行うことなく、血流制限を行うことで不活動

に伴う筋萎縮を抑制する効果があることも報告されている。

Takarada ら<sup>59)</sup>は、前十字靭帯再建術後の患者の大腿基部に圧を付加し、5 分間圧迫、3 分間除圧という刺激を 5 回繰り返すプロトコールを 2 週間、毎日行った。その結果、血流制限を行った群、血流制限を行わなかった群のどちらも膝伸展筋群、屈曲筋群ともに筋断面積が有意に減少したが、膝伸展筋群については血流制限を行った群でその減少率が有意に低かったと報告している。

ところで、血流制限下筋力訓練による筋肥大のメカニズムは、内分泌系の関与が考えられている。筋肥大は、筋線維の断面積が増大することによって起こり、この断面積の増大は、主に筋原線維数の増加、つまり、筋原線維を構成しているアクチンとミオシンの増加によって起こるとされている<sup>18)</sup>。そして、この筋原線維数の増加には、ホルモンや成長因子などの内分泌系の関与が考えられている。

Kraemer ら<sup>24)</sup>は、高負荷の筋力訓練後に、成長ホルモンの分泌が著しく増加したと報告している。また、Takarada ら<sup>58)</sup>は、低負荷の筋力訓練を血流制限下で行った結果、訓練直後における血漿中の成長ホルモン濃度の顕著な増加や、インスリン様成長因子-1

(insulin-like growth factor-1 : 以下、IGF-1 と記す) の増加を確認し、その関与を示唆している。血流制限下筋力訓練における内分泌系への影響に関して Takarada ら<sup>58)</sup>は、低酸素状態の影響か

ら血中の乳酸濃度が著しく増加したことによって、求心性神経の化学受容器が刺激され、交感神経が優位となり、下垂体からの成長ホルモンの分泌が高められたものと推察している。一方、圧を付加して虚血し、その後、圧を開放して再灌流させる虚血—再灌流の刺激が活性酸素を発生させるという報告もみられる<sup>47)55)</sup>。この活性酸素は、人体への悪影響も指摘されている<sup>54)56)</sup>が、IGF-1のような成長因子の分泌に欠かせない効果的な刺激要因であることも示されている<sup>47)</sup>。

このような血流制限下筋力訓練は低負荷で行うことができ、なおかつ高負荷の訓練と同様の効果が期待できる。しかし、圧を付加し、血流を制限して行うため、例え物理的な強度が低くても、訓練を遂行するための心理的な強度は高くなると考えられている<sup>30)</sup>。また、訓練部位の多少の不快感や疼痛を伴ったという報告もあり、その悪影響についても懸念されている<sup>39) 40)</sup>。森ら<sup>32)</sup>は、繰り返しの虚血—再灌流が大量の活性酸素の発生に関与すると報告している。また、内山ら<sup>66)</sup>は、ラットに血流制限下の筋力訓練を行わせ、訓練後に血中CPK (creatine phosphokinase) (以下、CPKと記す)の上昇率が大きいことや、浮腫が生じることを観察し、鈴木<sup>54)</sup>は、下肢の虚血—再灌流後に発生する活性酸素が、心臓と肺に障害を与える一因となると報告し、注意を促している。

一方、Takarada ら<sup>58)</sup>は、低負荷の両脚膝伸展運動を血流制限下で疲労困憊まで行わせた結果、酸化ストレスの指標である血漿中の過酸化脂質濃度および、筋損傷の指標となる CPK 活性に有意な増加がみられないことから、低酸素や再灌流の結果として発生する活性酸素による組織の損傷の影響はなかったとしている。しかし、これら血流制限下筋力訓練の悪影響についての研究は、今後も課題が残されており、訓練の適応には十分な検討が必要である。

訓練様式や対象者の違いもあるが、下肢の筋力訓練の場合、大腿基部に付加する圧は 180mmHg から 280mmHg と幅広く、最適な加圧量について未だ一定の見解は得られていない。持久的訓練で用いられている加圧量が主に 50mmHg であることを考えると、筋力訓練で用いられている加圧量は非常に高く、訓練時の心理的な負担は大きくなると考えられる。駆血帯を用いた低負荷の持久的訓練でも筋力の増加がみられていることから、これまで筋力訓練で用いられている加圧量より低くても訓練効果が得られる可能性があるとし唆されるが、加圧量を変えて筋力訓練の効果を検討した報告は少なく、検討する必要がある。

### 第 3 章 本研究の目的

血流制限下訓練における最適な加圧量については、未だ一定の見解は得られていない。一方、高齢者や膝関節に障害をもつ者に対しては、運動療法として、過去に報告されている高い加圧量を用いての血流制限下筋力訓練は安全性の問題もあり望ましくない。

そこで、本研究では、至適加圧量を求めて、加圧量を変えて低負荷の筋力訓練を行い、膝関節の血流制限下筋力訓練の有用性について検討することを目的とした。

## 第 4 章 実験方法

### 第 1 節 被験者

順天堂大学に在籍する学生で、膝関節疾患およびその他既往歴を有さない健常人男性 21 名を対象とし、大腿基部に圧を付加せず血流制限を行わずに筋力訓練を行う群（以下、A 群と記す）、50mmHg の圧を付加して血流制限下の筋力訓練を行う群（以下、B 群と記す）、150mmHg の圧を付加して血流制限下の筋力訓練を行う群（以下、C 群と記す）、250mmHg の圧を付加して血流制限下の筋力訓練を行う群（以下、D 群と記す）に、無作為に 4 群に分けた。被験者には、実験に先立って、本研究の目的、内容、手順等について口頭および文書による説明を行い、了解を得た上で被験者として同意を得た。

被験者全体の年齢および身長、体重の平均値および標準偏差は、それぞれ  $22.1 \pm 1.8$  歳、 $170.8 \pm 6.2$ cm、 $63.9 \pm 7.0$ kg であった。また、被験者の年齢、身長、体重の平均と標準偏差を訓練群ごとに表 1 に示した。

なお、本研究は順天堂大学大学院スポーツ健康科学研究科倫理委員会の承認を得た。

### 第 2 節 実験デザイン

## (1) 負荷量の決定

一般に、SLR 訓練の際、足関節に加える負荷は膝関節伸展位での 1RM の約 3 分の 1 が用いられている<sup>15)27)43)45)49)62)64)</sup>。そこで、訓練前に等運動性筋力測定装置 BIODEXsystem3 (BIODEX 社製、NEWYORK: 以下、BIODEX と記す) を用いて、被験者の仰臥位・膝関節伸展位での最大筋力を測定した。測定結果を訓練群ごとに表 2 に示した。1RM は最大筋力の約 85% とされており<sup>16)</sup>、測定結果をもとに 1RM を推定した結果、被験者全体の平均の筋力は 18.0kg ± 3.1 であった。これは、一般成人男性の膝関節伸展位での 1RM (15 ~ 19kg)<sup>23)</sup> とほぼ同様の値であったと考えられる。推定値から SLR 訓練時の負荷を求めると約 6kg と考えられるが、血流制限下筋力訓練では低負荷でも効果があると報告されているため、本研究での訓練初期の負荷は 4kg と設定した。また、訓練期間中に筋力が増加することを想定し、訓練期間を通して訓練強度を一定に保つため、訓練期間の 5 週目より負荷を 4.5kg に上げた。

被験者の仰臥位・膝関節伸展位での 1RM は、訓練前が 18.0kg ± 3.1、訓練開始 4 週後が 18.6kg ± 2.1 であり、本研究で訓練時に用いた負荷は、それぞれ 1RM の 22.8%、24.6% であった。これは、ヘッティンガーら<sup>13)</sup> のいう訓練効果が得られない無関区域の負荷であると考えられる。

## (2) 筋力訓練

本研究に用いた筋力訓練は、仰臥位で足関節自動背屈と同時に行う SLR 訓練、側臥位・膝関節伸展位での Abd 訓練、仰臥位・膝関節軽度屈曲位で両膝間にボールを挟む Add 訓練の 3 種類である。SLR 訓練および Abd 訓練は、足関節に 4kg (5 週目より 4.5kg) の砂袋を負荷し、下肢を挙上して 5 秒間保持させ、下肢を下ろして 3 秒間休息するという動作を連続 20 回行わせた。SLR 訓練は床面から約 10~15 度、Abd 訓練は床面から水平になるまで下肢を挙上するように指示した。また、Add 訓練は、両膝間にはさんだバレーボールを被験者本人の最大努力で 5 秒間締め付け、3 秒間休息するという動作を連続 20 回行わせた。これら 3 種目の訓練をそれぞれ両脚行って 1 セットとし、1 日 2 セット行わせた。なお、訓練中の時間はストップウォッチを用いて管理した。

訓練期間および頻度は、8 週間、週 3 回であり、1 回の訓練に要した時間は約 40 分であった。

また、訓練肢のみに圧を付加するようにし、訓練肢をかえる時や訓練終了後は、即座に除圧するように指示した。

## (3) 膝伸展筋筋力測定

訓練前後に、BIODEX を用いて、膝伸展筋筋力を等運動性収縮下および等尺性収縮下に定量的に測定した。



被験者の上半身および測定肢の大腿部は、動かないように4本のベルトにて固定した。

測定内容は、座位における求心性収縮<sup>1</sup> (concentric contraction: 以下、CC と記す) 角速度毎秒 60・180・300 度 (以下、60deg/sec・180deg/sec・300deg/sec と記す) の筋力、遠心性収縮<sup>2</sup> (eccentric contraction: 以下、EC と記す) 60deg/sec・180deg/sec の筋力、等尺性収縮 (isometric contraction: 以下、IM と記す) 膝関節角度 60 度 (最大伸展位 0deg とする) の筋力と、仰臥位における膝関節角度 0 度 (最大伸展位 0deg とする) の等尺性筋力であった。

求心性筋力および遠心性筋力の測定は、それぞれの角速度で 3~5 回の伸展屈曲を連続で行い、最もトルクの大きいものをピークトルク (peak torque: 以下、PT と記す) とした。等尺性筋力の測定は、座位では伸展屈曲を各 1 回測定し、仰臥位では伸展のみ 1 回の測定であった。

被験者の筋力は、個体差を考慮して、単位体重あたりの PT (peak torque/body weight: 以下、PT/BW と記す) を用い、両脚の平均値を採用した。測定時に用いた単位は、ft-lbs である。また、訓練群間の比較においては、各訓練群とも被験者ごとに訓練前後の膝伸展

---

<sup>1</sup> 短縮性収縮と同義語である。本稿では、整形外科学辞典<sup>2)</sup>に準じた。

<sup>2</sup> 伸張性収縮と同義語である。本稿では、整形外科学辞典<sup>2)</sup>に準じた。

筋の PT/BW から変化率を算出し、それを平均したものをを用いた。

#### (4) 膝伸展筋の筋疲労度測定

訓練前後に、BIODEX を用いて、膝伸展筋の筋疲労度を等運動性収縮下に定量的に測定した。

被験者の上半身および測定肢の大腿部は、動かないように 4 本のベルトにて固定した。

測定方法は、CC180deg/sec での膝伸展屈曲を連続して 50 回繰り返した。そして、50 回中の最初 3 分の 1 と仕事量と、最後 3 分の 1 の仕事量から低下率を算出し、筋疲労度の指標とした。単位は % である。また、訓練群間の比較においては、各訓練群とも被験者ごとに訓練前後の膝伸展筋の仕事量および筋疲労度から変化率を算出し、それを平均したものをを用いた。

#### (5) 大腿部周囲径の測定

大腿部の筋量の変化を簡便にみるため、大腿部周囲径をメジャーで測定した。被験者を両脚に体重が均等にかかるように注意して立たせ、膝蓋骨上端より 10cm および 16cm 中枢側にて、その周囲径をそれぞれ 3 回測定し、その平均を求めた。単位は cm である。

#### (6) MRI 検査と大腿部筋断面積の算出

訓練前後の筋断面積の変化をみるために、MRI による大腿部断面図撮像を血流制限群のみに行った。使用した MRI は超伝導 MRI 装

置 MRT-20Visart（東芝メディカル社製）であり、1.5T（テスラ）の条件で撮像し、脂肪抑制 T<sub>1</sub> 強調像横断面像を用いた。撮像した横断面像フィルムを、Scion Image（Scion 社製）を用いて膝伸展筋筋断面積を算出し、大腿骨断面積との比率にて示した。測定部位は、膝蓋骨上端より 16cm 中枢側とした。

#### （7）主観的訓練強度

血流制限下の筋力訓練は、物理的な強度が低くても、心理的な強度は高くなると考えられている。そこで、被験者本人の主観的な訓練強度について調べるため、毎回訓練直後に被験者自身に 0 から 10 の間で 12 段階に分かれた数字の尺度を用いて訓練強度を評価させた（資料 1）。

用いた尺度は、数字が下がるごとに主観的な強度も下がるように数字と言葉を対応させて表されたものであり、「これ以上できない、限界」という値が 10 点、「非常にきつい」が 9 点、「かなりきつい」が 7 点、「きつい」が 5 点、「ややきつい」が 4 点、「適度」が 3 点、「楽である」が 2 点、「かなり楽である」が 1 点、「非常に楽である」が 0.5 点、「全く何ともない」が 0 点というように点数化して用いた。この尺度は、Borg の報告<sup>3)</sup> に準じた。

#### （8）指尖脈波測定

血流制限状態の変化を簡便にみるために、脈波計（フクダ電子製）

を用いて、筋力訓練時の脈波の変化を測定した。被験者の中から無作為に選ばれた 5 名を対象に、右脚の母趾から脈波を記録し、仰臥位・膝関節伸展位で血流制限を行わない時、大腿基部に 50mmHg の圧を付加した時、150mmHg の圧を付加した時、250mmHg の圧を付加した時の脈波高をそれぞれ求めた。結果は、血流制限を行わない時の脈波高を 100% として、加圧量を変えた時の脈波高を相対的にパーセントにて示した。また、仰臥位・膝関節伸展位で加圧量を変えて下肢を挙上した時の脈波も同様に記録し、脈波高の変化を求めた。結果は、血流制限を行わずに下肢を挙上した時の脈波高を 100% として、それぞれ加圧量を変えた時の脈波高を相対的にパーセントにて示した。さらに、血流制限を行っていない安静時を基準に、加圧量を変えて下肢を挙上した時の脈波高の低下率も求めた。測定時に用いた単位は mV である。

### 第 3 節 実験期間および環境条件

筋力訓練および全ての測定は、2002 年 4 月から 11 月にかけて順天堂大学スポーツ健康科学部スポーツ医学研究室および体力測定室で行った。また、MRI 検査は、順天堂大学付属順天堂医院で行った。実験期間中の平均室温は  $23.2 \pm 2.9^{\circ}\text{C}$ 、および相対湿度は  $66.4 \pm 6.4\%$  であった。

#### 第 4 節 統計処理

訓練前後に測定した各項目における値は、平均±標準偏差 (Mean ±SD) で表した。訓練前後の訓練群内の実験結果における差の検定には、対応のある t-test を用いた。また、訓練群間の実験結果の比較は、一元配置分散分析を行った後、Sceffe の方法を用いて多重比較を行い、検定した。なお、統計処理の有意水準は危険率 5% 未満とした。

## 第 5 章 結果

### 第 1 節 膝伸展筋筋力

#### (1) 訓練前後の比較

a) 仰臥位・膝関節伸展位における等尺性筋力（以下、IM0deg と記す）：IM0deg の測定結果を図 1 に示した。膝伸展筋の PT/BW についてみると、A 群は、訓練前  $33.4 \pm 6.7$ 、訓練後  $35.8 \pm 5.3$  と変化率は 7.1% であり、B 群は、訓練前  $38.8 \pm 6.0$ 、訓練後  $39.5 \pm 2.8$  と変化率は 1.5% であった。また、C 群は、訓練前  $36.7 \pm 9.5$ 、訓練後  $43.1 \pm 6.8$  と変化率は 17.5% であり、D 群は、訓練前  $36.3 \pm 3.2$ 、訓練後  $39.1 \pm 4.1$  と変化率は 8.0% であった。C 群で統計的に有意差がみられた ( $p < 0.05$ )。

b) A 群（血流制限なし）：A 群の座位・膝関節屈曲 60 度における等尺性筋力（以下、IM60deg と記す）と、等運動性筋力の測定結果を図 2 に示した。膝伸展筋の PT/BW についてみると、IM60deg は、訓練前  $104.5 \pm 21.0$ 、訓練後  $105.0 \pm 21.3$  と変化率は 0.5% であった。等運動性筋力のそれぞれについてみると、CC60deg/sec は、訓練前  $101.7 \pm 19.7$ 、訓練後  $99.8 \pm 19.1$  と変化率は -2.2% であり、CC180deg/sec は、訓練前  $66.6 \pm 13.1$ 、訓練後  $67.0 \pm 14.2$  と変化率は 0.6% であり、CC300deg/sec は、訓練前  $49.8 \pm 10.6$ 、訓練後  $53.2$

±12.5 と変化率は 6.7%であった。また、EC60deg/sec は、訓練前 120.1±19.3、訓練後 127.6±25.4 と変化率は 6.3%であり、EC180deg/sec は、訓練前 122.6±17.3、訓練後 121.2±27.5 と変化率は -1.1%であった。CC300deg/sec で統計的に有意差がみられた ( $p < 0.05$ )。

c) B 群 (血流制限下、加圧量: 50mmHg): B 群の IM60deg と、等運動性筋力の測定結果を図 3 に示した。膝伸展筋の PT/BW についてみると、IM60deg は、訓練前 103.6±12.4、訓練後 102.8±8.1 と変化率は -0.8%であった。等運動性筋力のそれぞれについてみると、CC60deg/sec は、訓練前 94.6±10.6、訓練後 98.2±6.5 と変化率は 3.8%であり、CC180deg/sec は、訓練前 63.6±6.1、訓練後 72.0±5.1 と変化率は 13.1%であり、CC300deg/sec は、訓練前 48.4±5.1、訓練後 57.8±5.9 と変化率は 19.5%であった。また、EC60deg/sec は、訓練前 116.3±22.0、訓練後 130.5±19.5 と変化率は 12.2%であり、EC180deg/sec は、訓練前 110.4±18.4、訓練後 121.9±17.5 と変化率は 9.6%であった。CC180deg/sec および CC300deg/sec ( $p < 0.05$ ) と、EC60deg/sec ( $p < 0.01$ ) で統計的に有意差がみられた。

d) C 群 (血流制限下、加圧量: 150mmHg): C 群の IM60deg と、等運動性筋力の測定結果を図 4 に示した。膝伸展筋の PT/BW

についてみると、IM60deg は、訓練前  $106.4 \pm 15.4$ 、訓練後  $111.4 \pm 18.6$  と変化率は 4.8%であった。等運動性筋力のそれぞれについてみると、CC60deg/sec は、訓練前  $99.1 \pm 10.1$ 、訓練後  $104.6 \pm 11.6$  と変化率は 5.6%であり、CC180deg/sec は、訓練前  $64.6 \pm 7.4$ 、訓練後  $71.9 \pm 7.9$  と変化率は 11.3%であり、CC300deg/sec は、訓練前  $50.1 \pm 6.5$ 、訓練後  $56.9 \pm 7.9$  と変化率は 13.6%であった。また、EC60deg/sec は、訓練前  $124.9 \pm 30.8$ 、訓練後  $137.0 \pm 31.9$  と変化率は 9.7%であり、EC180deg/sec は、訓練前  $112.5 \pm 37.9$ 、訓練後  $119.2 \pm 33.6$  と変化率は 6.0%であった。CC180deg/sec ( $p < 0.01$ ) および CC300deg/sec ( $p < 0.05$ ) で統計的に有意差がみられた。

e) D 群 (血流制限下、加圧量 : 250mmHg) : D 群の IM60deg と、等運動性筋力の測定結果を図 5 に示した。膝伸展筋の PT/BW についてみると、IM60deg は、訓練前  $118.8 \pm 17.8$ 、訓練後  $140.8 \pm 28.9$  と変化率は 18.5%であった。等運動性筋力のそれぞれについてみると、CC60deg/sec は、訓練前  $101.6 \pm 8.2$ 、訓練後  $107.1 \pm 13.6$  と変化率は 5.4%であり、CC180deg/sec は、訓練前  $71.0 \pm 7.6$ 、訓練後  $75.0 \pm 9.2$  と変化率は 5.7%であり、CC300deg/sec は、訓練前  $53.9 \pm 6.3$ 、訓練後  $58.9 \pm 6.5$  と変化率は 9.3%であった。また、EC60deg/sec は、訓練前  $128.8 \pm 18.7$ 、訓練後  $145.7 \pm 10.8$  と変化率は 13.1%であり、EC180deg/sec は、訓練前  $115.1 \pm 23.9$ 、訓練後



128.3±21.6 と変化率は 11.4%であった。IM60deg/sec ( $p < 0.05$ ) と、CC180deg/sec ( $p < 0.05$ ) および CC300deg/sec ( $p < 0.01$ ) で統計的に有意差がみられた。

f) 筋疲労度：CC180deg/sec で膝伸展屈曲を連続 50 回繰り返した時の筋疲労度の測定結果を図 6~8 に示した。まず、膝伸展筋の最初 3 分の 1 の仕事量についてみると(図 6)、A 群は、訓練前 1571.9 ±400.2、訓練後 1591.5 ±331.1 と変化率は 1.2%であり、B 群は、訓練前 1657.8 ±221.6、訓練後 1764.4 ±285.4 と変化率は 6.4%であった。また、C 群は、訓練前 1488.9 ±72.6、訓練後 1591.8 ±75.4 と変化率は 6.9%であり、D 群は、訓練前 1604.7 ±294.3、訓練後 1630.7 ±221.5 と変化率は 1.6%であった。次に、膝伸展筋の最後 3 分の 1 の仕事量についてみると(図 7)、A 群は、訓練前 768.2 ±46.6、訓練後 749.1 ±88.0 と変化率は -2.5%であり、B 群は、訓練前 780.2 ±68.1、訓練後 820.2 ±103.0 と変化率は 5.1%であった。また、C 群は、訓練前 655.1 ±38.8、訓練後 704.3 ±58.4 と変化率は 7.5%であり、D 群は、訓練前 730.4 ±127.6、訓練後 735.6 ±124.5 と変化率は 0.7%であった。訓練前後での仕事量の変化に注目すると、最初 3 分の 1 の仕事量は、C 群で有意に増加し ( $p < 0.0001$ )、B 群でも増加する傾向にあった。また、最後 3 分の 1 の仕事量は、全ての群で有意差はみられなかったが、B 群、C 群で増加する傾向にあっ

た。

膝伸展筋の筋疲労度の変化についてみると（図 8）、A 群は、訓練前  $48.3 \pm 14.1$ 、訓練後  $51.1 \pm 11.8$  と変化率は 5.7% であり、B 群は、訓練前  $51.9 \pm 9.7$ 、訓練後  $52.1 \pm 11.9$  と変化率は 0.4% であった。また、C 群は、訓練前  $55.9 \pm 1.5$ 、訓練後  $55.9 \pm 3.9$  と変化率は 0.1% であり、D 群は、訓練前  $53.4 \pm 9.3$ 、訓練後  $54.6 \pm 6.8$  と変化率は 2.3% であった。全ての群で統計的に有意差はみられなかった。

## （2）訓練群間の変化率による比較

a) 等尺性筋力および等運動性筋力の変化率：各測定項目における訓練群間の変化率を図 9～15 に示した。この変化率は、各訓練群とも被験者ごとに訓練前後の膝伸展筋の PT/BW から変化率を算出し、それを平均したものをを用いた。IM0deg の変化率は、A 群  $8.9 \pm 16.8\%$ 、B 群  $2.8 \pm 1.4\%$ 、C 群  $20.7 \pm 18.0\%$ 、D 群  $8.5 \pm 13.2\%$  であった（図 9）。IM60deg の変化率は、A 群  $0.7 \pm 8.9\%$ 、B 群  $0.0 \pm 9.6\%$ 、C 群  $5.2 \pm 13.2\%$ 、D 群  $18.1 \pm 10.6\%$  であった（図 10）。CC60deg/sec の変化率は、A 群  $-2.1 \pm 8.6\%$ 、B 群  $4.6 \pm 10.7\%$ 、C 群  $5.8 \pm 9.1\%$ 、D 群  $5.1 \pm 6.2\%$  であった（図 11）。CC180deg/sec の変化率は、A 群  $0.3 \pm 4.6\%$ 、B 群  $13.6 \pm 8.5\%$ 、C 群  $11.3 \pm 2.4\%$ 、D 群  $5.6 \pm 4.5\%$  であった（図 12）。CC300deg/sec の変化率は、A 群  $6.4 \pm 4.6\%$ 、B 群  $19.9 \pm 10.8\%$ 、C 群  $13.6 \pm 8.1\%$ 、D 群  $9.5 \pm 4.9\%$

であった (図 13)。EC60deg/sec の変化率は、A 群  $6.0 \pm 12.6\%$ 、B 群  $12.9 \pm 5.8\%$ 、C 群  $10.6 \pm 11.8\%$ 、D 群  $14.8 \pm 15.3\%$  であった (図 14)。EC180deg/sec の変化率は、A 群  $-1.3 \pm 17.5\%$ 、B 群  $10.2 \pm 9.4\%$ 、C 群  $8.6 \pm 15.3\%$ 、D 群  $13.5 \pm 17.1\%$  であった (図 15)。

等尺性筋力は、加圧量の高い C 群、D 群で増加する傾向にあったが、統計的に有意差はみられなかった。等運動性筋力は、CC180deg/sec で A 群と B 群、A 群と C 群の間で統計的に有意差がみられた ( $p < 0.05$ )。その他の項目でも、血流制限を行わない A 群より、血流制限を行った B・C・D 群の方が増加する傾向にあったが、統計的に有意差はみられなかった。

b) 筋疲労度の変化率：筋疲労度の訓練群間の変化率を図 16～18 に示した。変化率は、各訓練群とも被験者ごとに訓練前後の膝伸展筋の仕事量および筋疲労度から変化率を算出し、それを平均したものを用いた。最初 3 分の 1 の仕事量の変化率は、A 群  $2.5 \pm 9.9\%$ 、B 群  $6.2 \pm 5.7\%$ 、C 群  $6.9 \pm 1.0\%$ 、D 群  $2.6 \pm 7.3\%$  であった (図 16)。最後 3 分の 1 の仕事量の変化率は、A 群  $-2.4 \pm 10.4\%$ 、B 群  $5.0 \pm 8.0\%$ 、C 群  $7.6 \pm 7.6\%$ 、D 群  $1.9 \pm 14.7\%$  であった (図 17)。最初 3 分の 1 の仕事量、最後 3 分の 1 の仕事量ともに訓練群間で統計的に有意差はみられなかった。

また、筋疲労度の変化率は、A 群  $7.7 \pm 9.4\%$ 、B 群  $-0.2 \pm 5.0\%$ 、

C群  $0.2 \pm 8.0\%$ 、D群  $3.8 \pm 14.9\%$ であった（図 18）。A群で筋疲労度が大きくなる傾向にあったが、訓練群間で統計的に有意差はみられなかった。

## 第 2 節 大腿部周囲径

### （1）訓練前後の比較

各訓練群の大腿部周囲径の測定結果を図 19・20 に示した。膝蓋骨上端から 10cm 中枢側の周囲径についてみると（図 19）、A群は、訓練前  $46.9 \pm 1.8$ 、訓練後  $45.9 \pm 2.0$  と変化率は  $-2.0\%$  であり、B群は、訓練前  $45.9 \pm 2.0$ 、訓練後  $46.2 \pm 2.6$  と変化率は  $0.6\%$  であった。また、C群は、訓練前  $45.6 \pm 3.0$ 、訓練後  $45.5 \pm 3.1$  と変化率は  $-0.2\%$  であり、D群は、訓練前  $46.3 \pm 1.9$ 、訓練後  $45.7 \pm 1.9$  と変化率は  $-2.5\%$  であった。次に、膝蓋骨上端から 16cm 中枢側の周囲径についてみると（図 20）、A群は、訓練前  $51.3 \pm 2.4$ 、訓練後  $50.3 \pm 2.6$  と変化率は  $-1.9\%$  であり、B群は、訓練前  $45.9 \pm 2.0$ 、訓練後  $46.2 \pm 2.6$  と変化率は  $0.6\%$  であった。また、C群は、訓練前  $50.3 \pm 3.0$ 、訓練後  $50.3 \pm 3.0$  と変化率は  $0.0\%$  であり、D群は、訓練前  $51.7 \pm 2.2$ 、訓練後  $50.9 \pm 2.0$  と変化率は  $-1.6\%$  であった。全ての群で、膝蓋骨上端 10cm・16cm の周囲径ともに統計的に有意差はみられなかった。

## (2) 訓練群間の変化率による比較

大腿部周囲径の訓練群間の変化率を図 21・22 に示した。変化率は、各訓練群とも被験者ごとに訓練前後の大腿部周囲径から変化率を算出し、それを平均したものをを用いた。膝蓋骨上端から 10cm 中枢側の周囲径の変化率は、A 群  $-2.0 \pm 1.7\%$ 、B 群  $0.6 \pm 1.6\%$ 、C 群  $-0.1 \pm 2.4\%$ 、D 群  $-2.4 \pm 2.5\%$ であった(図 21)。また、膝蓋骨上端から 16cm 中枢側の周囲径の変化率は、A 群  $-1.9 \pm 1.6\%$ 、B 群  $0.4 \pm 1.4\%$ 、C 群  $0.0 \pm 2.2\%$ 、D 群  $-1.6 \pm 2.5\%$ であった(図 22)。膝蓋骨上端 10cm・16cm の周囲径ともに訓練群間で統計的に有意差はみられなかった。

## 第 3 節 大腿部筋断面積

### (1) 訓練前後の比較

各訓練群の膝伸展筋筋断面積の測定結果を図 23 に示した。測定部位は膝蓋骨上端 16cm 中枢側であり、測定値は筋断面積と大腿骨断面積の比率にて示した。B 群は、訓練前  $9.0 \pm 0.9$ 、訓練後  $9.1 \pm 0.8$  と変化率は  $0.6\%$  であり、C 群は、訓練前  $9.4 \pm 0.2$ 、訓練後  $9.4 \pm 0.4$  と変化率は  $0.2\%$  であった。また、D 群は、訓練前  $9.8 \pm 1.1$ 、訓練後  $9.8 \pm 0.8$  と変化率は  $0.4\%$  であった。全ての群で統計的に有意差はみられなかった。

## (2) 訓練群間の変化率による比較

膝伸展筋筋断面積の訓練群間の変化率を図 24 に示した。変化率は、各訓練群とも被験者ごとに訓練前後の筋断面積から変化率を算出し、それを平均したものをを用いた。筋断面積の変化率は、B 群  $0.7 \pm 3.4\%$ 、C 群  $0.2 \pm 2.9\%$ 、D 群  $0.8 \pm 7.2\%$ であった。訓練群間で統計的に有意差はみられなかった。

## 第 4 節 主観的訓練強度

主観的訓練強度の変化を図 25 に示した。訓練強度の値は、各訓練群とも 1 週ごとに各被験者の平均値を算出し、それを平均したものをを用いた。血流制限群は、血流制限を行わない群に比べて訓練強度が高くなる傾向があったが、訓練群間に有意差はみられなかった。8 週間全体の平均点およびグラフから各訓練群の訓練強度を推察すると、A 群が平均 3.7 点で「適度」と感じる強度、B 群、C 群がそれぞれ平均 4.5 点、3.9 点で「ややきつい」と感じる強度、D 群が平均 5.0 点で「きつい」と感じる強度であった。

## 第 5 節 指尖脈波

指尖脈波から求めた脈波高の変化を図 26～28 に示した。脈波は、仰臥位で安静時に加圧量を変えて圧を付加した時および、加圧量を

変えて下肢を挙上した時の2つの状態を記録した。そして、圧を付加した時の脈波高は、血流制限を行わなかった時の高さを100%として、それぞれ相対的にパーセントにて示した。まず、安静時に加圧量を変えて圧を付加した時の脈波高についてみると、50mmHgの圧を付加した時は83.0%、150mmHgの圧を付加した時は52.5%、250mmHgの圧を付加した時は25.3%となった(図26)。加圧量が高くなるほど脈波高は低くなり、血流制限を行わない時と150mmHgの圧を付加した時( $p < 0.05$ )、血流制限を行わない時と250mmHgの圧を付加した時( $p < 0.01$ )、50mmHgの圧を付加した時と250mmHgの圧を付加した時の間で脈波高に有意差がみられた( $p < 0.01$ )。次に、加圧量を変えて下肢を挙上した時の脈波高についてみると、血流制限を行わないで下肢を挙上した時の脈波高を100%とすると、50mmHgの圧を付加した時は52.4%、150mmHgの圧を付加した時は20.3%、250mmHgの圧を付加した時は8.5%であった(図27)。安静時と同様に、加圧量が高くなるほど脈波高は低くなり、血流制限を行わない時と50mmHgの圧を付加した時( $p < 0.05$ )、血流制限を行わない時と150mmHgの圧を付加した時( $p < 0.001$ )、血流制限を行わない時と250mmHgの圧を付加した時( $p < 0.001$ )、50mmHgの圧を付加した時と250mmHgの圧を付加した時( $p < 0.05$ )の間で脈波高に有意差がみられた。

さらに、血流制限を行っていない安静時から、加圧量を変えて下肢を挙上した時の脈波高の低下率についてみると、血流制限を行わずに下肢を挙上した時は 44.8%低下し、50mmHg の圧を付加して下肢を挙上した時は 71.2%低下した。また、150mmHg の圧を付加して下肢を挙上した時は 89.1%低下し、250mmHg の圧を付加して下肢を挙上した時は 95.5%低下した（図 28）。血流制限を行わずに下肢を挙上した時と、血流制限行って下肢を挙上した時の間で有意差がみられた ( $p < 0.05$ 、 $p < 0.001$ )。



## 第6章 考察

一般に、筋力増加および筋肥大の効果を得るためには、高負荷の筋力訓練が必要であるとされている。しかし、加齢によって筋の萎縮の進んだ高齢者や膝関節に障害をもつ者においては、関節痛などの障害を引き起こす危険性から、高負荷で動的な筋力訓練を行うわけにはいかず、運動療法において SLR 訓練や Abd 訓練といった静的な訓練方法が用いられている<sup>27)45)</sup>。一方、近年、四肢の筋力訓練の際に、四肢の基部に駆血帯を装着し低負荷の筋力訓練を行うと、高負荷の筋力訓練を行った時と同様の効果を得られるという血流制限下筋力訓練の研究が進められている<sup>40)60)</sup>。これまでの報告では、訓練様式や対象者の違いもあるが、下肢の血流制限下筋力訓練の場合、大腿基部に付加する圧は 180mmHg から 280mmHg と幅広く、最適な加圧量について未だ一定の見解は得られていない。また、加圧量を変えて筋力訓練の効果を検討した報告は少なく、今後、高齢者や膝関節に障害をもつ者に対しての運動療法に、血流制限下の筋力訓練を適応するためには、至適加圧量を求めて検討する必要があると考えた。

そこで、本研究では、高齢者や膝関節に障害のある者の運動療法として用いられる低負荷の筋力訓練を、加圧量を変えて血流制限

下で行い、膝関節の血流制限下筋力訓練の有用性について検討することを目的とした。

## 第1節 膝伸展筋筋力測定

ヘッティンガーら<sup>13)</sup>によると、等尺性訓練によって筋力増加などの訓練効果を得るためには、最大筋力の40~50%以上の負荷が必要である。しかし、本研究の等尺性訓練で用いた負荷は最大筋力の約20%であり、これは訓練効果の得られない無関区域の負荷であったといえる。

この非常に低い負荷で筋力訓練を行った結果、訓練前後の比較では、血流制限を行わずに筋力訓練を行ったA群は、CC300deg/secで有意な筋力の増加がみられたのみで、訓練効果は少なかった。しかし、50mmHgの圧を付加して血流制限下の訓練を行ったB群は、CC180deg/secおよびCC300deg/secと、EC60deg/secで有意な筋力の増加がみられ、150mmHgの圧を付加して血流制限下の訓練を行ったC群は、IM0degと、CC180deg/secおよびCC300deg/secで有意な筋力の増加がみられた。また、250mmHgの圧を付加して血流制限下の訓練を行ったD群は、IM60degと、CC180deg/secおよびCC300deg/secで有意な筋力の増加がみられた。加圧量の高いC群、D群においてIM0degとIM60degといった等尺性筋力で有意な筋力

の増加がみられたのは、本研究で用いた筋力訓練が等尺性の筋力訓練主体であったため、その効果が得られやすかったと考えられる。

また、筋力の変化率による訓練群間の比較では、CC180deg/secにおいて A 群と B 群、A 群と C 群の間で有意差がみられた。その他の等運動性筋力を比較しても、有意差はみられないものの、どの角速度でも血流制限下の訓練を行った群の方が筋力の増加率は大きかった。これまでの報告でも、血流制限下の筋力訓練を行った結果、血流制限を行わずに訓練を行った場合に比べ、より静的および動的な筋力増加が引き起こされる傾向にあり、その要因としては、筋肥大や神経系の改善が示されている<sup>40)60)</sup>。本研究における筋力増加は、大腿部周囲径や MRI による筋断面積の測定を行った結果、どちらも有意な増大がみられていないことから筋肥大の影響はなかったと考えられ、発火頻度の増加や参加する運動単位の増加といった神経系の改善が引き起こされたためではないかと考えられる。血流制限下の筋力訓練における動的な筋力増加には、type II 線維の優位な動員が関わっていると推測されている。Moritani ら<sup>34)</sup>は、血流制限を行った状態で低負荷のハンドグリップ運動を断続的に繰り返して行った結果、前腕筋群から導出された筋電図から、血流制限によってより大きな運動単位が動員されることや、運動単位の発火頻度が増加することを観察している。Takarada ら<sup>58)</sup>は、血流制限下の膝伸

展運動を行った際、外側広筋の筋電図積分値が、血流制限を行わずに運動を行った時の 1.8 倍に増加したと報告している。また、太田ら<sup>40)</sup>は、血流制限下の筋力訓練を行った脚と、血流制限を行わずに筋力訓練を行った脚の筋放電量を訓練前後で比較したところ、血流制限下の筋力訓練を行った脚の内側広筋で有意な筋放電量の増加がみられたと報告している。このメカニズムについて、宝田ら<sup>57)</sup>は、圧を付加することによる活動筋への血液供給量の減少が活動筋への酸素供給を阻害し、より多くの type I 線維の疲労をもたらし、その結果、同じ筋力を維持するために追加的に type II 線維の動員が余儀なくされ、圧を付加しない場合よりも筋の放電量が増加すると推察している。また、篠原<sup>30)</sup>は、動脈血流阻害に伴う酸素供給阻害によって無酸素的代謝が亢進し、それに伴う乳酸や水素イオンなどの代謝関連物質が静脈阻害によって蓄積して筋収縮性を低下させ、所定の力発揮を遂行するために運動単位の動員や発火頻度が補償的に増加されたと推察している。このような神経系の改善という血流制限の効果によって、静的な訓練であっても動的な筋力増加が引き起こされたのではないかと考えられる。

次に、加圧量を変えて訓練を行った時の急性応答に注目すると、加圧量の違いによって脈波高に有意差がみられ、このことから血流制限の程度に大きな差があると推察される。本研究では神経系や内

分泌系の測定を行っていないため詳しくはわからないが、血流制限の程度によって神経系や内分泌系の変化に相違がみられるかもしれない。しかし、加圧量の違いによる訓練効果は、加圧量の高い方が等尺性筋力は増加する傾向にあったものの、等運動性筋力の増加率に大きな差はみられなかった。従って、筋力増加の効果は、血流制限の程度に関わらずほぼ同等であったため、過去に報告されている加圧量より低い加圧量でも訓練効果を得られる可能性があるとし唆される。また、筋疲労度を測定するため、等運動性収縮下 (CC180deg/sec) での膝伸展屈曲を連続して繰り返す運動を行ったが、筋疲労度は全ての群で有意な変化はみられなかった。血流制限下の持続的訓練を行った脚では、訓練後に type I 線維の割合の増加および面積の増大や、毛細血管密度の増加がみられ<sup>7)52)</sup>、また、等運動性収縮下 (CC180deg/sec) での膝伸展を連続して繰り返す運動を行った結果、疲労による筋力の低下率が減少し、筋持久力の向上がみられている<sup>6)</sup>。本研究では、訓練前後の筋疲労度には全ての群で有意な変化はみられなかったが、B 群、C 群においては、最初 3 分の 1 の仕事量および最後 3 分の 1 の仕事量が、どちらも増加する傾向にあった。従って、筋の疲労度には差はないが、より大きな仕事を行える筋になっていると考えられる。酸化能力の高い筋線維の割合を増加させ、最大筋力が低下すると報告されている血流制限下

の持久的訓練<sup>6)7)52)</sup>と異なり、血流制限下の筋力訓練では、筋放電量の有意な増加<sup>34)40)58)</sup>から、type II 線維の優位な動員が引き起こされると推察されており<sup>57)</sup>、この効果によってより静的および動的な筋力が増加すると考えられている。本研究における B 群、C 群の仕事量の増加は、特に、CC180deg/sec で有意な筋力の増加を得られたことが一つの要因となっていると考えられる。

健常人男性を対象にし、運動療法で用いられる低負荷の等尺性筋力訓練を用いたにもかかわらず、これまで報告されてきた加圧量より低くても筋力を増加させる効果が得られた。150mmHg の加圧量では、等尺性筋力、等運動性筋力ともに増加し、50mmHg の加圧量では、最大筋力と考えられている等尺性筋力は増加しなかったものの、等運動性筋力で有意な増加がみられた。50mmHg という低い加圧量でも、最大下の動的筋力を増加させる可能性があると考えられる。Overend ら<sup>41)</sup>は、大腿四頭筋の静的筋力、動的筋力を高齢者と若年者と比較した結果、60 歳から 70 歳の静的筋力は若年者の 75%、動的筋力は 70% であり、動的筋力の低下率が大きいと報告している。また、膝関節の 180deg/sec は、歩行時の膝関節の最大伸展角速度と報告されており<sup>33)</sup>、50mmHg の加圧量でもこの角速度の有意な筋力の増加が得られたことは、歩行時に必要な筋力を増加させる可能性があると考えられる。山崎ら<sup>69)</sup>は、高齢者が自立して歩行するた

めには、膝伸展筋筋力が重要な要因であると述べている。健常人を対象にした低負荷の等尺性訓練でも、血流を制限することで動的な筋力の増加が得られたということは、筋力が低下している高齢者や膝関節に障害をもつ者でも、より安全に大きな訓練効果を得られる可能性があると考えられ、リハビリテーションにおける運動療法にも有用であると考えられる。

## 第2節 大腿部周囲径および筋断面積

本研究では、大腿部周囲径およびMRIで測定した筋断面積において、訓練前後で有意な増大は全ての群でみられなかった。また、筋断面積の変化率でみた訓練群間の比較でも有意差はみられなかった。これは、本研究の筋力訓練方法が、筋力低下や筋萎縮の進んだ高齢者および膝関節に障害をもつ者に対してリハビリテーションにおける運動療法として用いられる方法であったため、膝関節周囲筋群の萎縮がない健常人であり、さらに、ある程度発達した筋をもつと考えられる体育系の学生では筋肥大が生じづらかったのではないかと考えられる。

太田ら<sup>40)</sup>は、健常人男性を対象に、大腿基部に180mmHgの圧を付加して血流制限下での低負荷の等尺性筋力訓練を8週間行った結果、筋力の増加はみられたものの、筋断面積に有意な増大はみられ

なかったと報告している。また、石川<sup>17)</sup>は、陸上競技選手を対象に、大腿基部に 200mmHg の圧を付加して低負荷の等運動性筋力訓練を 4 週間行った結果、有意な筋断面積の増大はみられなかったと報告している。一方、宝田ら<sup>57)60)</sup>は、閉経後の女性を対象に、上腕基部に 110mmHg の圧を付加して血流制限下の等張性筋力訓練を 16 週間行った結果、有意な筋断面積の増大がみられたと報告している。さらに、健常人男性を対象に、大腿基部に 280mmHg の圧を付加して低負荷の等張性筋力訓練を 8 週間行った結果、有意な筋断面積の増大がみられたと報告している<sup>61)</sup>。また、前十字靭帯再建術後の患者に対して、筋力訓練を行わず、安静時に平均 238mmHg の圧を付加して血流制限 5 分間－除圧 3 分間の刺激を連続して 5 回繰り返すプロトコールを毎日大腿部に与えた結果、筋断面積の減少が有意に抑えられたとも報告している<sup>59)</sup>。これは、筋活動がなくとも、血流を制限することで不活動に伴う筋萎縮を抑える効果があることを示している。

これらの報告から、加圧量の違いによる筋肥大への影響は少ないと考えられ、これらの研究結果の違いは、対象者、筋力訓練方法、訓練期間の違いなどによると考えられる。

これまでの報告では、血流制限下の筋力訓練における筋肥大のメカニズムは、特に成長ホルモンの関与が考えられている<sup>58)</sup>。しかし、



成長ホルモンの関与のみで説明できるものではないと述べている報告<sup>39)40)</sup>もみられる。また、虚血—再灌流の刺激によって発生する活性酸素が、成長因子の分泌に欠かせない効果的な刺激要因であることも示されている<sup>47)</sup>。このことから、この訓練における筋肥大には、ホルモンのように血液を介して全身に放出されるものだけではなく、組織局所で分泌・作用する成長因子がより重要な働きをなしているのではないかと考えられる<sup>68)</sup>が、現在のところメカニズムは十分に解明されているわけではなく、今後の課題であるといえる。

### 第3節 主観的訓練強度

血流制限下筋力訓練は、物理的な強度が低くても、心理的な強度は高くなると考えられている<sup>30)</sup>。宝田ら<sup>57)60)</sup>は、安静時に、加圧量を変えて上腕基部に圧を付加した時の末梢血管抵抗値と血中乳酸濃度の変化を調べた結果、どちらも加圧量に比例して増加することを示している。これらから、筋収縮がなくとも、圧を付加することによる血液流入量の減少は酸素供給量を減少させ、結果的に筋を取り巻く内部環境の悪化をもたらすと述べている。また、低負荷の筋力訓練時に、血流制限を行った場合は筋放電量が有意に増加し、高負荷で筋力訓練を行った時の筋放電量と有意な差がみられず、さらに、血流制限を行わない場合に比べ、血中乳酸濃度も約2倍に増加

したと報告している。つまり、低負荷の筋力訓練でも、血流制限を行うことによって、筋活動レベルを高負荷の筋力訓練の筋活動レベルまで引き上げることになるといえる。これらによって、物理的な強度は低くても、生理的な強度は高くなり、それに伴って心理的な強度も高くなると推察される。

本研究における主観的訓練強度は、血流制限を行わない A 群が平均 3.7 点で「適度」と感じる強度、50mmHg の圧を付加した B 群、150mmHg の圧を付加した C 群がそれぞれ平均 4.5 点、3.9 点で「ややきつい」と感じる強度、250mmHg の圧を付加した D 群が平均 5.0 点で「きつい」と感じる強度であった。これは、加圧量が高くなるにつれて、心理的な強度も高くなったと考えられる。

B 群と C 群に注目すると、B 群の方が主観的訓練強度は高かった。これは、B 群の筋力が、有意ではないものの、他の群に比べて少し低い傾向にあったことが一つの要因ではないかと考えられる。また、脈波高の変化から考えると、50mmHg の圧を付加した時の脈波高は、安静時において血流を制限していない時と有意差はみられないが、下肢を挙上することで有意に低下していた。また、下肢を挙上した時の脈波高の低下率は、150mmHg や 250mmHg の圧を付加した時と同様に大きかった。これらのことから、B 群では、安静時は多少血流が減少してもそれ程辛さを感じないが、下肢を挙上した時に他

の加圧量の高い 2 群とほぼ同等の血流が制限された状態になると推測され、この差が心理的な強度に影響したのではないかと考えられる。

次に、訓練期間を通して最も主観的訓練強度の高かった D 群に注目すると、250mmHg の加圧量は血流遮断に近い状態になると考えられており<sup>30)</sup>、脈波高の変化からみても、低下率が最も大きかった。D 群では、他の群に比べて酸素供給量の減少から無氣的代謝が大きく、乳酸が蓄積し、筋の疲労も早かったのではないかと考えられる。また、D 群には不快感や脚のしびれを訴える者もいた。これらが、心理的な強度が最も高くなった理由と推察される。

本研究において、250mmHg の加圧量が被験者の主観的訓練強度を高め、また、不快感や脚のしびれを訴える者がいたことを考えると、今後このような高い加圧量を用いて筋萎縮や筋力低下の進んだ者に血流制限下の筋力訓練を行うことは、安全性の問題から望ましくないと考えられる。

血流制限下の筋力訓練による悪影響はなかったとしている報告<sup>58)</sup>もあるが、繰り返しの虚血-再灌流に伴う悪影響を指摘し、注意を促している報告<sup>54) 66)</sup>もあり、今後も研究課題が残されている。従って、訓練の適応には十分な検討が必要であり、実際に行う時には十分な安全への配慮が不可欠である。

## 第 7 章 結論

本研究では、低負荷の等尺性訓練を血流制限下で行った結果、血流制限を行わずに訓練を行った群と比較して、有意な筋力増加がみられた。また、加圧量の違いによる効果を比較した結果、筋力増加の効果は、加圧量の高さに関わらずほぼ同等であった。過去に報告されている加圧量より低い加圧量の訓練では、下肢の不快感やしびれを引き起こさず、被験者自身の心理的な強度も低く抑えられた。以上のことから、過去に報告されている加圧量より低い加圧量による血流制限下の筋力訓練でも有効な筋力の増加がみられ、訓練効果が得られる可能性が示唆された。筋萎縮や筋力低下のない健常人を対象に、運動療法として用いられる低負荷の筋力訓練を行ったにも関わらず、血流を制限することで有効な筋力の増加がみられたことは、筋萎縮や筋力低下が大きいと考えられる高齢者や膝関節に障害をもつ者でも、より安全に大きな訓練効果を得られる可能性があると考えられ、この低い加圧量での血流制限下筋力訓練は、リハビリテーションにおける運動療法にも有用であると考えられる。

## 第8章 要約

(1) 至適加圧量を求めて、加圧量を変えて運動療法として用いられる低負荷の筋力訓練を行い、膝関節の血流制限下筋力訓練の有用性について検討することを目的とした。

(2) 被験者は J 大学に在籍する健常人男性 21 名で、筋力訓練群を、大腿基部に圧を付加せずに行う群 (A 群)、50mmHg の圧を付加して行う群 (B 群)、150mmHg の圧を付加して行う群 (C 群)、250mmHg の圧を付加して行う群 (D 群) の 4 群に分けた。

(3) 筋力訓練は、下肢伸展挙上訓練を中心とした 3 種類の等尺性訓練を 8 週間、週 3 回行った。

(4) 訓練前後に、等尺性収縮下および等運動性収縮下における膝伸展筋筋力、等運動性収縮下における筋疲労度を測定した。また、大腿部周囲径の計測および MRI による筋断面積測定を行った。さらに、主観的訓練強度の調査も行った。

(5) 訓練前後の膝伸展筋筋力を比較すると、A 群はほとんど訓練効果がみられなかった。しかし、B 群では、求心性収縮角速度毎秒 180 度 (180deg/sec、以下、同様に記す) および 300deg/sec ( $p < 0.05$ ) と、遠心性収縮 60deg/sec ( $p < 0.01$ ) で有意な筋力の増加がみられ、C 群では、求心性収縮 180deg/sec ( $p < 0.01$ ) および 300deg/sec ( $p$

<0.05) と、膝関節伸展位における等尺性収縮 ( $p < 0.05$ ) で有意な筋力の増加がみられた。また、D 群では、求心性収縮 180deg/sec ( $p < 0.05$ ) および 300deg/sec ( $p < 0.01$ ) と、膝関節 60 度屈曲位における等尺性収縮 ( $p < 0.05$ ) で有意な筋力の増加がみられた。筋疲労度の比較では、全ての群で有意差はみられなかったが、B 群、C 群において、仕事量が増加する傾向にあった。

(6) 訓練群間における変化率の比較では、求心性収縮 180deg/sec において、A 群と B 群、A 群と C 群の間で有意差がみられた ( $p < 0.05$ )。

(7) 大腿部周囲径および筋断面積は、全ての群で有意な増大はみられなかった。訓練群間の比較においても有意差はみられなかった。また、過去に報告されている加圧量より低い加圧量の訓練では、主観的訓練強度は低く抑えられた。

(8) 以上より、過去に報告されている加圧量より低い加圧量による筋力訓練でも有効な筋力の増加がみられ、訓練効果が得られる可能性が示唆された。また、この低い加圧量での血流制限下筋力訓練は、高齢者を含めリハビリテーションにおける運動療法にも有用であると考えられた。

## 謝辞

本論文作成にあたり、実験に際し御協力を賜った順天堂医院放射線科の京極伸介先生に深く感謝いたします。

また、本実験の被験者として御協力いただいた順天堂大学スポーツ健康科学部の学生および大学院生の皆様に、心からお礼申し上げます。

## 引用文献

- 1) 青木詩子, 山崎裕司, 横山仁志, 大森圭貢, 笠原美千子, 平木幸治: 昇段能力と膝伸展筋力の関係, 理学療法ジャーナル, 35, 12, 907-910, (2001)
- 2) 東博彦, 桜井実, 柴田大法, 鳥巢岳彦, 林浩一郎, 廣島和夫, 三浦隆行, 山本吉蔵: 整形外科学辞典, 22-253, 南江堂: 東京, (1994)
- 3) Borg, G.V.: Psychophysical bases of perceived exertion, Med.Sci.Sports.Exerc, 14, 5, 377-381, (1982)
- 4) Edstrom, L.: Selective atrophy of red muscle fibers in the quadriceps in long-standing knee-joint dysfunction injuries to the anterior cruciate ligament, J.Neuro.Sci, 11, 551-558, (1970)
- 5) Eiken, O., Bjurstedt, H.: Dynamic exercise in man as influence by experimental restriction of blood flow in the working muscles, Acta.Physiol.Scand, 131, 339-346, (1987)
- 6) Eiken, O., Sundberg, C.J., Esbjornsson, M., Nygren, A., Kaijser, L.: Effects of ischaemia training on force development and fibre-type composition in human skeletal muscle, Clin Physiol, 11, 1, 41-49, (1991)
- 7) Esbjornsson, M., Jansson, E., Sundberg, C.J., Sylven, C., Eiken, O., Nygren, A., Kaijser, L.: Muscle fiber type and enzyme activities after training with local leg ischaemia in man, Acta.Physiol.Scand, 148, 233-242, (1993)
- 8) Fiatarone, M.A., Marks, E.C., Ryan, N.D., Meredith, C.N., Lipsitz, L.A., Evans, W.J.: High-Intensity Strength Training in Nonagenarians, JAMA, 263, 22, 3029-3034, (1990)
- 9) 藤野英明, 佐田正二郎, 佐田正樹: ACL 再建術後早期における血流制限下での筋力訓練の効果, 日本臨床スポーツ医学会誌, 7, 4, 91, (1999)
- 10) 冬木寛義, 三浦幸雄, 今給黎篤弘, 田中恵, 原田英志, 大友通明: 足関節自動背屈の膝伸展トルクと大腿四頭筋に及ぼす影響, 理学診療, 5, 2, 102-106, (1994)
- 11) 林秀俊: 変形性膝関節症患者の等速性筋力の評価, 厚生年金病院年報, 21, 387-392, (1994)
- 12) 平野清隆, 村永信吾, 山本利春: 下肢筋力からみたウォーキングの適応, 臨床スポーツ医学, 19, 4, 367-373, (2002)
- 13) 猪飼道夫, 松井秀治: アイソメトリックトレーニング - 筋力トレーニングの理論と実際 -, 103-107, 大修館書店: 東京, (1982)
- 14) 池田浩, 黒澤尚, 桜庭景植, 太田晴康, 森永晋, 佐藤尚弘, 金勝乾: 前十字靭帯再建術の術前と術後の膝伸展筋力の関係について, 日本膝関節学会, 25, 32-35, (2001)
- 15) 池田浩, 黒澤尚, 桜庭景植, 太田晴康: 変形性膝関節症に対する大腿四頭筋訓練による



- 治療に関する研究, 第 15 回健康医科学研究助成論文集, 3,1-8, (2000)
- 16) 石井直方: レジスタンス・トレーニング その生理学と機能解剖学からトレーニング処方まで, 74, ブックハウス・エイチディ: 東京, (1999)
  - 17) 石川拓次: 血流制限下における等運動性レジスタンストレーニングの効果, 順天堂大学大学院修士論文, 1-52, (2000)
  - 18) 石河利寛, 杉浦正輝: 運動生理学, 40-42, 建帛社: 東京, (1989)
  - 19) Kaijser,L., Sundberg,C.J., Eiken,O., Nygren,A., Esbjornsson,M., Sylven,C., Jansson,E.: Muscle oxidative capacity and work performance after training under local leg ischemia, *J.Appl.Physiol*, 69, 785-787, (1990)
  - 20) Kariya,Y., Itoh,M., Nakamura,T., Yagi,K., Kurosawa,H.: Magnetic resonance imaging and spectroscopy of thigh muscles in cruciate ligament insufficiency, *Acta.Orthop.Scand*, 60, 3, 322-325, (1989)
  - 21) 加藤知生, 星川吉光, 小柳磨毅, 川野哲英: 前十字靭帯再建術後の早期膝伸筋力のトレーニング効果について, *理学療法学*, 17, 256, (1990)
  - 22) 腰野富久: 大腿四頭筋増強のための膝伸展位下肢挙上訓練, *整形外科MOOK増刊 1-B*, 123-128, (1983)
  - 23) 腰野富久: 膝障害に対する機能訓練 - 特に大腿四頭筋増強について -, *総合リハビリテーション*, 6, 1, 31-39, (1978)
  - 24) Kraemer,W.J., Marchitelli,L., Gordon,S.E., Harman,E., Dziados,J.E., Mello,R., Fryman,P., Mccurry,D., Freck,S.J.: Hormonal and growth factor responses to heavy resistance exercise protocols, *J.Appl.Physiol*, 69, 4, 1442-1450, (1990)
  - 25) 久野譜也, 勝田茂, 石津政雄, 秋間広: 高齢者における筋量と筋力の低下は加齢によるものか不活動によるものか?, *デサントスポーツ科学*, 19, 175-182, (1998)
  - 26) 栗山節郎, 山田保: *アスレチック・リハビリテーションの実際*, 42-46, 南江堂: 東京, (1997)
  - 27) 黒澤尚: 変形性膝関節症に対する運動療法 - われわれの方法と文献的考察 -, *臨床スポーツ医学*, 14, 8, 861-866, (1997)
  - 28) Larsson,L., Grimby,G., Karlsson,J.: Muscle strength and speed of movement in relation to age and muscle morphology, *J.Appl.Physiol*, 46, 451-456, (1979)
  - 29) Lexell,J., Taylor,C.C., Sjostrom,M.: What is the cause of the ageing atrophy? Total number, size and proportion of different fiber types studied in whole vastus lateralis muscle from 15-to83-year-old men, *J.Neuro.Sci*, 84, 275-294, (1988)
  - 30) 宮村実晴: 高所 運動生理学的基礎と応用, 12-24, ナップ: 東京, (2000)
  - 31) 宮下充正: 老人の体力, *老年医学*, 20, 54-60, (1981)
  - 32) 森和裕, 玉井和哉, 早乙女紘一: 虚血再灌流による骨格筋内の活性酸素, *日整会誌*, 74, 8, s 1503, (2000)

- 33) 森本允裕: 正常歩行における股関節・膝関節の角変位・角速度・角加速度の研究, 日整会誌, 52, 7, 849-86, (1978)
- 34) Moritani, T., Michael-sherman, W., Shibata, M., Matsumoto, T., Shinohara, M.: Oxygen availability and motor unit activity in humans, *Eur.J.Appl.Physiol*, 64, 552-556, (1992)
- 35) 根本勇, 青山正恵, 岩岡研典: 健康運動の立場からみた筋のトレーニング, 保健の科学, 36, 7, 424-432, (1994)
- 36) 日本体力医学会学術委員会: スポーツ医学 - 基礎と臨床 -, 120, 浅倉書店: 東京, (1998)
- 37) Nygren, A.T., Sundberg, C.J., Goransson, H., Esbjornsson, M., Jansson, E., Kaijser, L.: Effect of dynamic ischaemic training on human skeletal muscle dimensions, *Eur.J.Appl.Physiol*, 82, 137-141, (2000)
- 38) Oelberg, D.A., Evans, A.B., Hrovat, M.I., Pappagianopoulos, P.P., Patz, S., Systorom, M.: Skeletal muscle chemoreflex and pHi in exercise ventilatory control, *J.Appl.Physiol*, 82, 4, 676-682, (1998)
- 39) 太田晴康, 黒澤尚, 桜庭景植, 池田浩, 岩瀬嘉志, 佐藤尚弘, 高澤俊治, 江端済: 萎縮筋に対する血流制限下での低負荷筋力訓練の有効性について - 前十字靭帯再建術後のトレーニングでの検討 -, 日本臨床スポーツ医学会誌, 10, 2, 282-289, (2002)
- 40) 太田晴康, 黒澤尚, 桜庭景植, 池田浩, 岩瀬嘉志, 佐藤尚弘: 健常人における血流制限下での低負荷筋力訓練の有効性について, 日本臨床スポーツ医学会誌, 10, 2, 290-294, (2002)
- 41) Overend, T.J., Cunningham, D.A., Kramer, J.F., Lefcoe, M.S., Paterson, D.H.: Knee extensor and flexor strength: Cross-sectional area ratios in young and elderly men, *J.Gerontol*, 47, M204-M210, (1992)
- 42) Rowell, L.B., Savage, M.V., Chambers, J., Blackmon, J.R.: Cardiovascular responses to graded reductions in leg perfusion in exercising humans, *Am.J.Physiol*, 261, 1545-1553, (1991)
- 43) 齋藤知行, 腰野富久, 高橋晃, 山田広志, 酒井直隆, 高木敏貴, 竹内良平, 坂野裕昭, 葉梨雪子, 長田信人: 変形性膝関節症に対する大腿四頭筋訓練 - 筋力の増強様式と臨床評価との相関 -, 膝, 21, 37-40, (1995)
- 44) 酒井直隆, 腰野富久, 岡本連三, 森井孝通, 野沢隆人, 三橋成行, 兵頭晃: 膝関節手術後の大腿四頭筋筋力の回復過程, *リハビリテーション医学*, 28, 8, 601-606, (1991)
- 45) 桜庭景植, 黒澤尚, 太田晴康, 池田浩: 変形性膝関節症に対する運動療法の効果 - 特にSLR訓練について -, *臨床スポーツ医学*, 17, 2, 143-150, (2000)
- 46) 桜庭景植: 筋力評価 - 等運動性筋力の定量評価を中心として -, *Monthly Book Orthopaedics*, 12, 9, 41-49, (1999)

- 47) 佐藤義昭: 加圧筋力トレーニング, *fizi:k*, 11, 10, 42-45, (2000)
- 48) 沢井史穂: 加齢にともなう筋機能の低下とその予防のための運動, *体育の科学*, 46, 2, 112-122, (1996)
- 49) 清水直史, 黒澤尚, 星川吉光: 伸脚下肢挙上訓練による変形性膝関節症の治療, *整形外科*, 42, 5, 646-654, (1991)
- 50) Shinohara,M., Kouzaki,M., Yoshihisa,T., Fukunaga,T.: Efficacy of tourniquet ischemia for strength training with low resistance, *Eur.J.Appl.Physiol*, 77, 189-191, (1998)
- 51) 篠原稔: 持久的運動に局所加圧による血流制限を組み合わせた新しい体力トレーニング法の考案, *上原記念生命科学財団研究報告集*, 14, 68-69, (2000)
- 52) Sundberg,C.J., Kaijser,L.: Effect of graded restriction of perfusion on circulation and metabolism in the working leg: quantification of a human ischaemia-model, *Acta.Physiol.Scand*, 146, 1-9, (1992)
- 53) Sundberg,C.J.: Exercise and training during graded leg ischaemia in healthy man with special reference to effects on skeletal muscle, *Acta.Physiol.Scand.Suppl*, 615, 1-50, (1994)
- 54) 鈴木克行: 下肢虚血再灌流後の心臓と肺の障害 - 超微形態的研究 -, *日心外会誌*, 26, 3, 150-157, (1997)
- 55) 高橋輝一, 薄井正道, 石井清一, 吉田勉, 谷口直之: 虚血再灌流障害における活性酸素の産生, *日手会誌*, 12, 4, 640-643, (1995)
- 56) 高岡郁夫: スポーツと血中過酸化脂質 - スポーツにおけるフリーラジカル産生と防御系の変化について -, *日常診療と血液*, 6, 4, 415-419, (1996)
- 57) 宝田雄大, 石井直方: 血流制限下でのレジスタンストレーニング~新しいトレーニングの方法~, *体育の科学*, 48, 1, 36-42, (1998)
- 58) Takarada,Y., Nakamura,Y., Aruga,S., Onoda,T., Miyazaki,S., Ishii,N.: Rapid increase in plasma growth hormone after low-intensity resistance exercise with vascular occlusion, *J.Appl.Physiol*, 88, 61-65, (2000)
- 59) Takarada,Y., Takazawa,H., Ishii,N.: Application of vascular occlusion diminish disuse atrophy of knee extensor muscle, *Med.Sci.Sports.Exerc*, 32, 12, 2035-2039, (2000)
- 60) Takarada,Y., Takazawa,H., Sato,Y., Takebayashi,S., Tanaka,Y., Ishii,N.: Effects of resistance exercise combined with moderate vascular occlusion on muscular function in human, *J.Appl.Physiol*, 88, 2097-2016, (2000)
- 61) Takarada,Y., Tsuruta,T., Ishii,N.: Extremely low-intensity resistance exercise induced functional muscular hypertrophy, *Advances in Exercise and Sports Physiology*, 5, 4, 126, (1999)

- 62) 鳥巢岳彦, 津村弘: 変形性膝関節症の運動療法, 整形外科, 39, 2, 217-223, (1988)
- 63) 鶴見隆正, 辻下守弘, 菅原憲一, 越智淳子, 沖田一彦, 清水ミシェル・アイズマン, 大塚彰, 塩川満久, 川村博文, 伊藤健一, 山本昌樹, 山本博司: S L R (straight leg raising) による大腿四頭筋の筋力増強効果と運動強度について, 運動・物理療法, 8, 1, 58-62, (1997)
- 64) 鶴見隆正, 福田光祐, 鈴木洋子: 膝関節痛を持つ高齢者の大腿四頭筋強化訓練について, 理学療法と作業療法, 9, 4, 229-232, (1975)
- 65) 堤俊彦: アメリカにおける「高齢者の筋力トレーニング」, 体育の科学, 4, 46, 345-348, (1996)
- 66) 内山秀一, 玉木哲朗: 血流制限下の筋力トレーニングにおける筋損傷と酸化ストレスの関係, 体力科学, 50, 6, 768, (2001)
- 67) Viru,M., Jansson,E., Viru,A, Sundberg,C.J.: Effect of restricted blood flow on exercise-induced hormone changes in healthy men, Eur.J.Appl.Physiol, 77, 517-522, (1998)
- 68) 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, 51-54, ナップ: 東京, (1996)
- 69) 山崎裕司, 横山仁志, 青木詩子, 笠原美千代, 大森圭貢, 平木幸治: 膝伸展筋力と自立歩行度の関連 - 運動器疾患のない高齢患者を対象として, 総合リハビリテーション, 30, 1, 60-65, (2002)
- 70) 山崎裕司, 横山仁志, 青木詩子, 黒澤保壽, 山田純生, 青木治人, 田辺一彦, 長田尚彦: 高齢患者の膝伸展筋力と歩行速度、独歩自立との関連, 総合リハビリテーション, 26, 7, 689-692, (1998)

# Effect of Low-Load Muscular Training on Quadriceps

## under Restriction of Blood Flow

~ From a View of Optimum Blood Pressure Flow ~

Takahiro Sumide

### Summary

(1) The purpose of the study was to examine the effect of low-load muscular training on the quadriceps under restriction of blood flow to various pressure levels.

(2) The subjects were 21 healthy men. They were classified into four groups called Group A (no pressure), Group B (the pressure level was 50mmHg), Group C (the pressure level was 150mmHg), Group D (the pressure level was 250mmHg).

(3) Three kinds of low-load isometric training were conducted three times a week for eight weeks.

(4) The knee extensor torque under isometric and isokinetic contraction and the knee extensor fatigue under isokinetic contraction were measured before and after training for eight weeks. Also, the thigh diameters of all subjects and cross sectional areas (CSA) of the quadriceps of the pressure groups

were measured. Moreover, ratings of perceived exertion (RPE) were investigated.

(5) The knee extensor torque was significantly higher in Group B after the training. These results showed concentric contractions (CC) at 180 and 300 degrees per second (deg/sec) and eccentric contractions at 60 deg/sec ( $p < 0.01, p < 0.05$ ). Group C increased significantly at CCs of 180 and 300 deg/sec and isometric contractions (IM) at the maximal knee extension ( $p < 0.01, p < 0.05$ ). Group D increased significantly in the cases of CCs of 180 and 300 deg/sec and IMs of 60 degree knee flexion ( $p < 0.01, p < 0.05$ ). Group A, however, did not show any differences. In the knee extensor fatigue tests there were no significant differences. Both Groups B and C tended to show increases in muscle work.

(6) Groups B and C showed significantly greater increases than Group A in the rate of increasing knee extensor torque (CC 180 deg/sec) ( $p < 0.05$ ).

(7) No significant changes were observed in both thigh diameters and CSAs of quadriceps after training. RPE scores of Groups B and C were lower than that of Group D.

(8) These results showed that it is possible to improve muscular strength effectively even if the pressure level was lower than that shown in recent studies. Low-load muscular training under restriction of blood flow is one of the most effective trainings for elderly men or patients after traumatic lesions of the knee and immobilization with quadriceps atrophy.

表1. 被験者全体の身体特性

訓練群	被験者数 (人)	年齢 (歳)	身長		体重	
			(cm)	(ft)	(kg)	(lbs)
A群(血流制限なし)	5	23.6±1.0	174.6±4.8	5.7±0.2	67.0±4.8	147.7±10.5
B群(血流制限あり:加圧量50mmHg)	5	22.1±1.8	171.8±3.8	5.6±0.1	66.4±7.1	146.4±15.7
C群(血流制限あり:加圧量150mmHg)	5	21.3±2.2	168.0±8.7	5.5±0.3	60.0±8.6	132.3±19.0
D群(血流制限あり:加圧量250mmHg)	6	21.6±1.3	169.1±6.1	5.5±0.2	62.3±6.8	137.5±14.9
平均		22.1±1.8	170.8±6.2	5.6±0.2	63.9±7.0	140.8±15.5

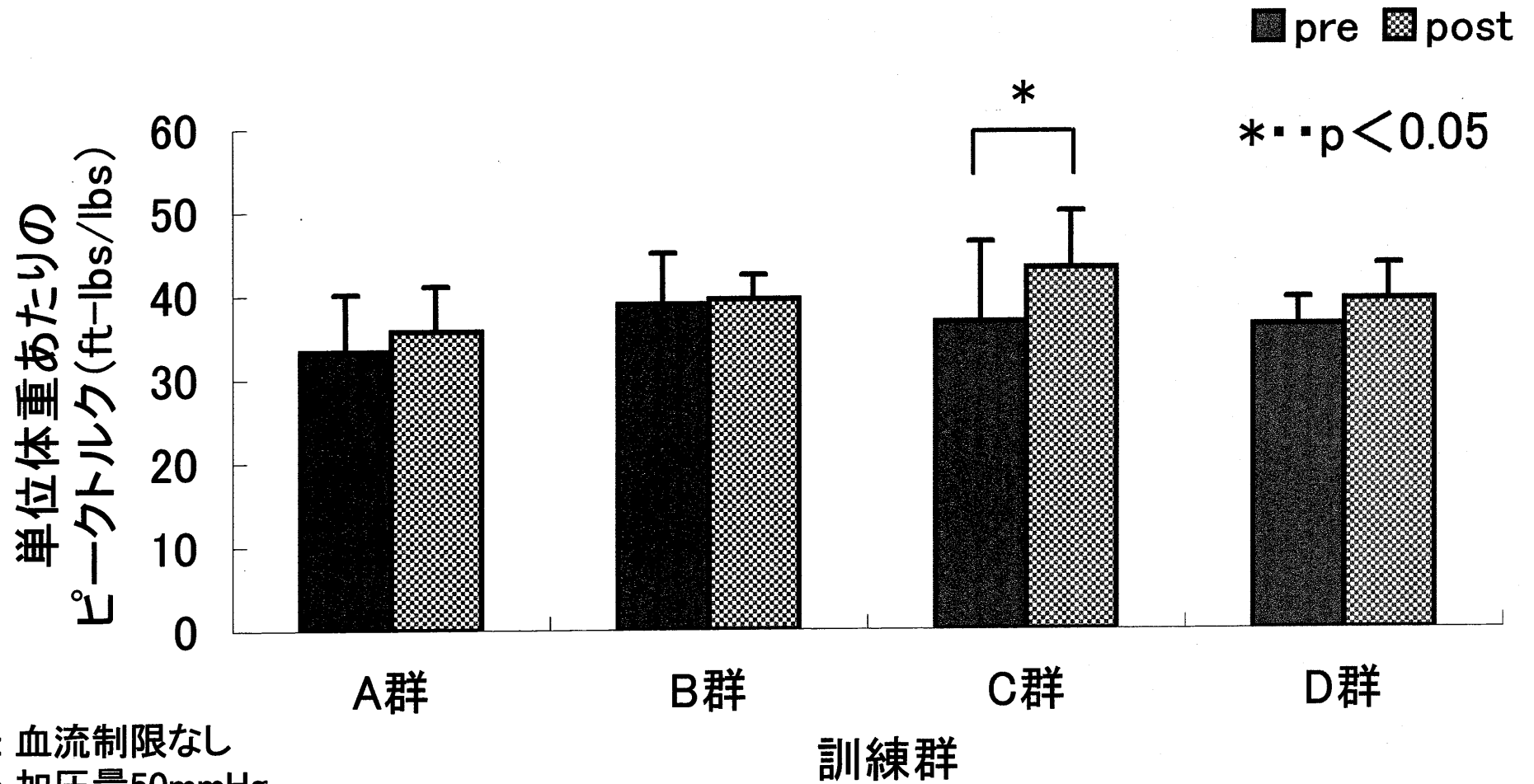
平均±標準偏差



表2. 訓練前の仰臥位・膝伸展位での等尺性筋力(IM0deg)

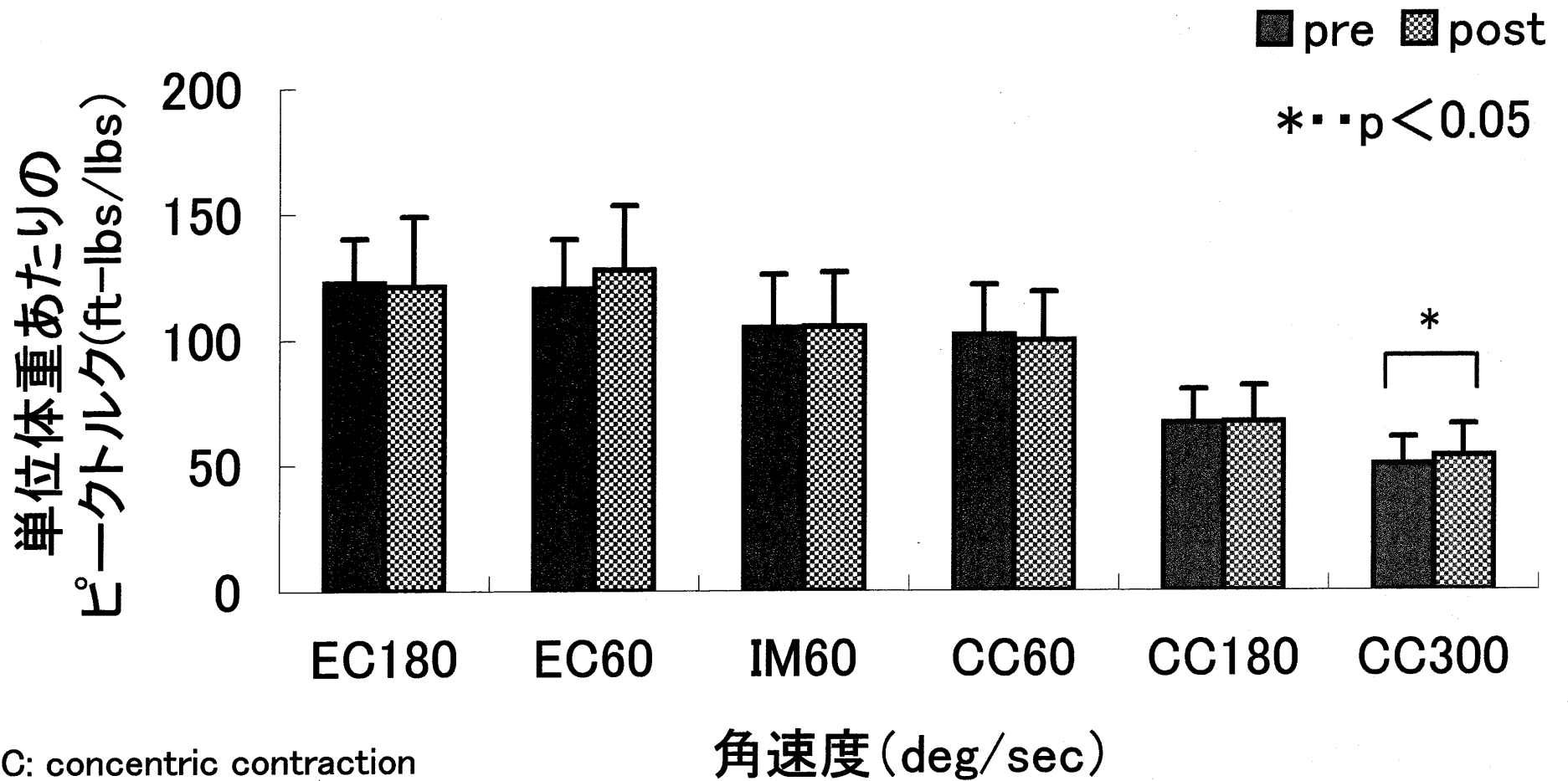
訓練群	最大トルク		1RM(推定値) (kg)
	(ft-lbs)	(kg)	
A群(血流制限なし)	49.5±11.9	20.7±5.0	17.6±4.2
B群(血流制限あり:加圧量50mmHg)	56.4±9.3	23.6±3.9	20.1±3.3
C群(血流制限あり:加圧量150mmHg)	46.7±6.1	19.6±2.6	16.6±2.2
D群(血流制限あり:加圧量250mmHg)	49.6±6.8	20.8±2.9	17.7±2.4
平均	50.5±8.8	21.2±3.7	18.0±3.1

平均±標準偏差



- A: 血流制限なし
- B: 加圧量50mmHg
- C: 加圧量150mmHg
- D: 加圧量250mmHg

図1. 膝伸展筋筋力 (IM0deg)

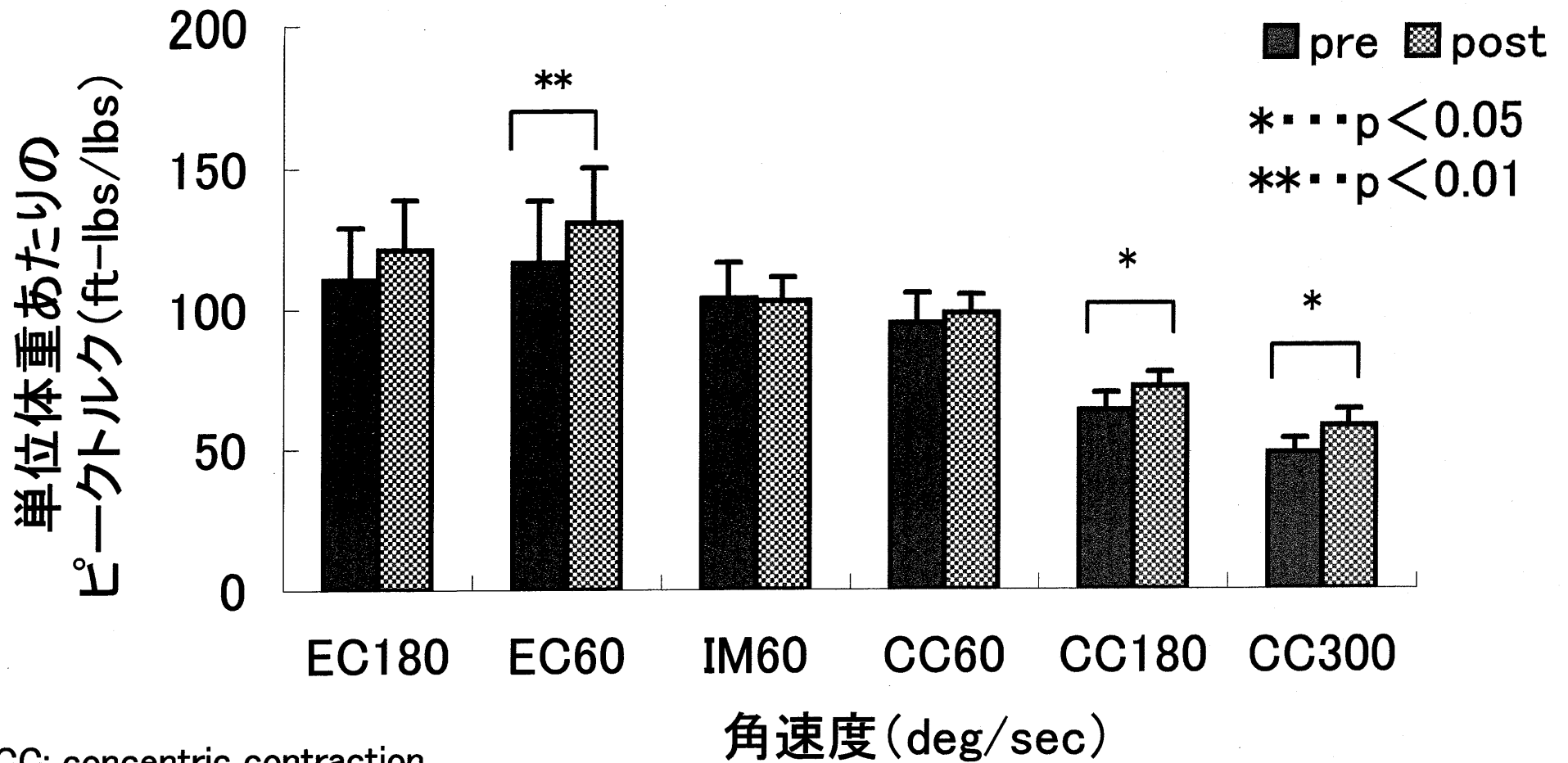


CC: concentric contraction

IM: isometric contraction

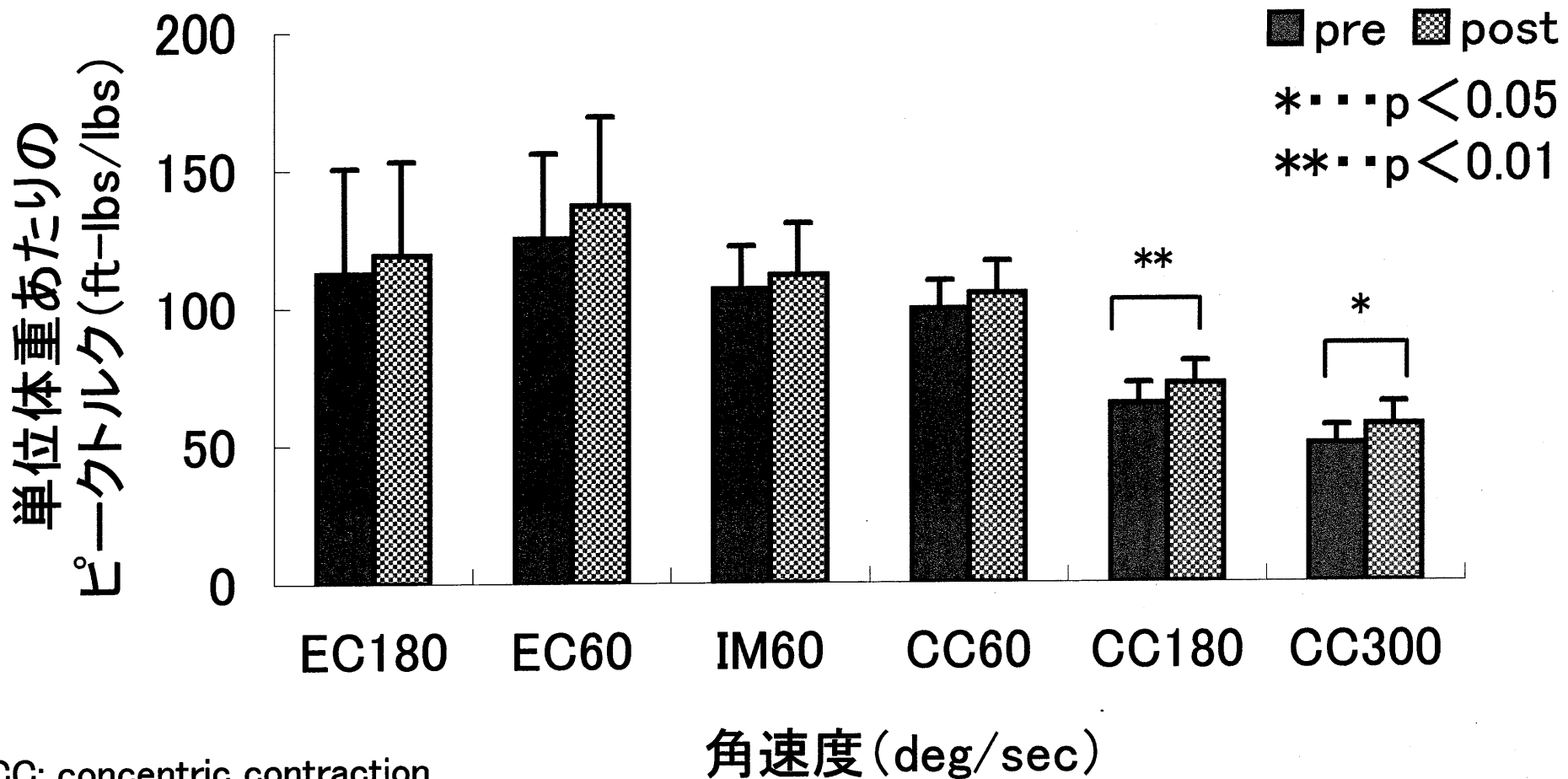
EC: eccentric contraction

図2. 膝伸展筋筋力(A群: 血流制限なし)



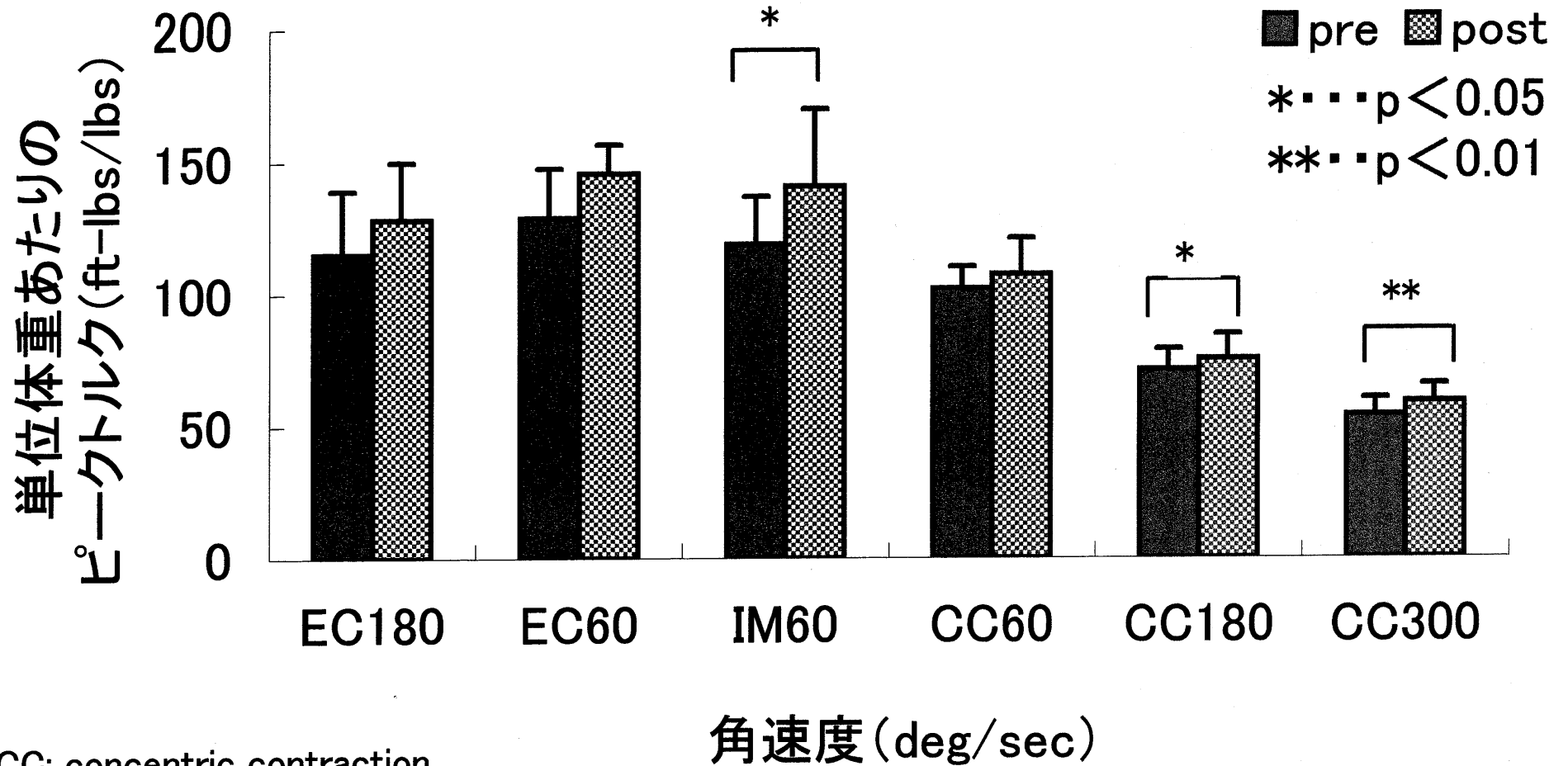
CC: concentric contraction  
 IM: isometric contraction  
 EC: eccentric contraction

図3. 膝伸展筋筋力 (B群: 加圧量50mmHg)



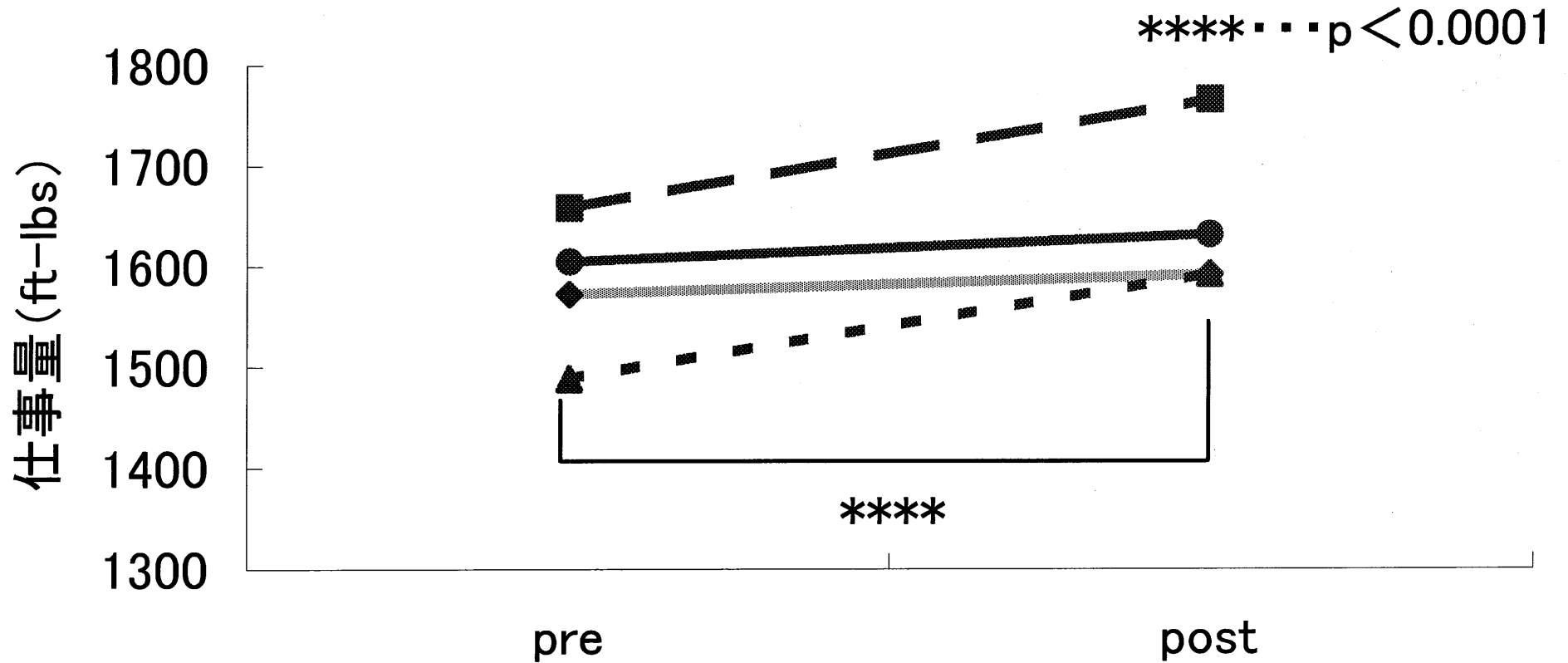
CC: concentric contraction  
 IM: isometric contraction  
 EC: eccentric contraction

図4. 膝伸展筋筋力 (C群: 加圧量150mmHg)



CC: concentric contraction  
 IM: isometric contraction  
 EC: eccentric contraction

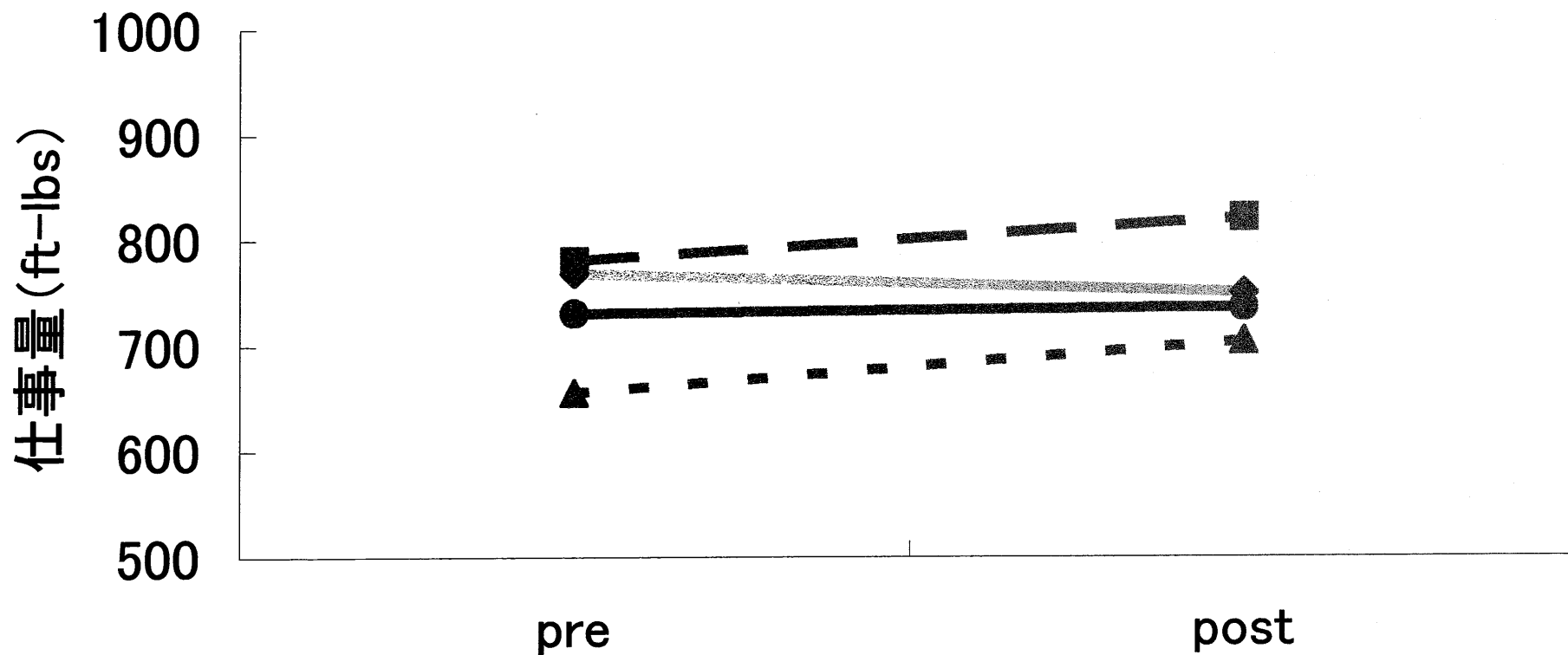
図5. 膝伸展筋筋力 (D群: 加圧量250mmHg)



- A: 血流制限なし
- B: 加圧量50mmHg
- C: 加圧量150mmHg
- D: 加圧量250mmHg

◆ A群 ■ B群 ▲ C群 ● D群

図6. 最初3分の1の仕事量

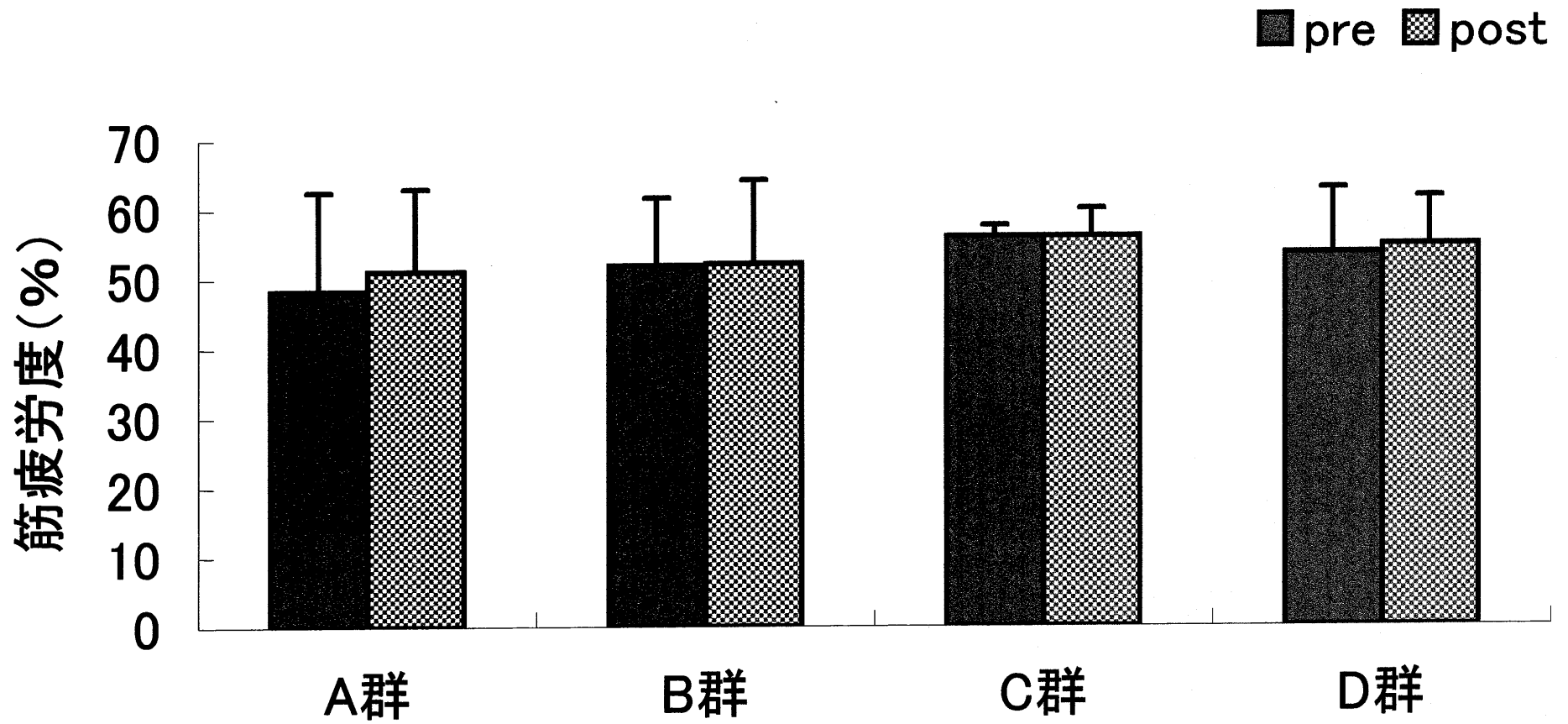


- A: 血流制限なし
- B: 加圧量50mmHg
- C: 加圧量150mmHg
- D: 加圧量250mmHg

◆ A群    ■ B群    ▲ C群    ● D群

図7. 最後3分の1の仕事量

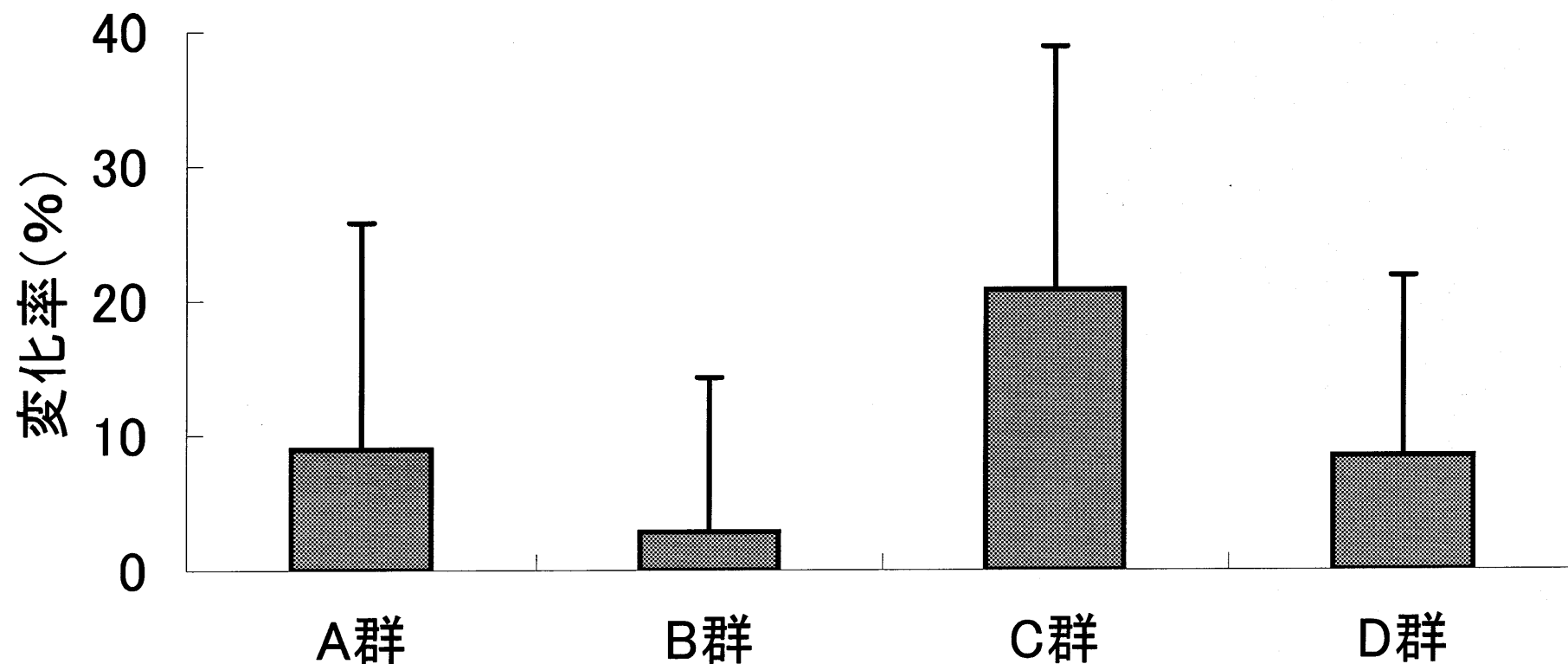




- A: 血流制限なし
- B: 加圧量50mmHg
- C: 加圧量150mmHg
- D: 加圧量250mmHg

訓練群

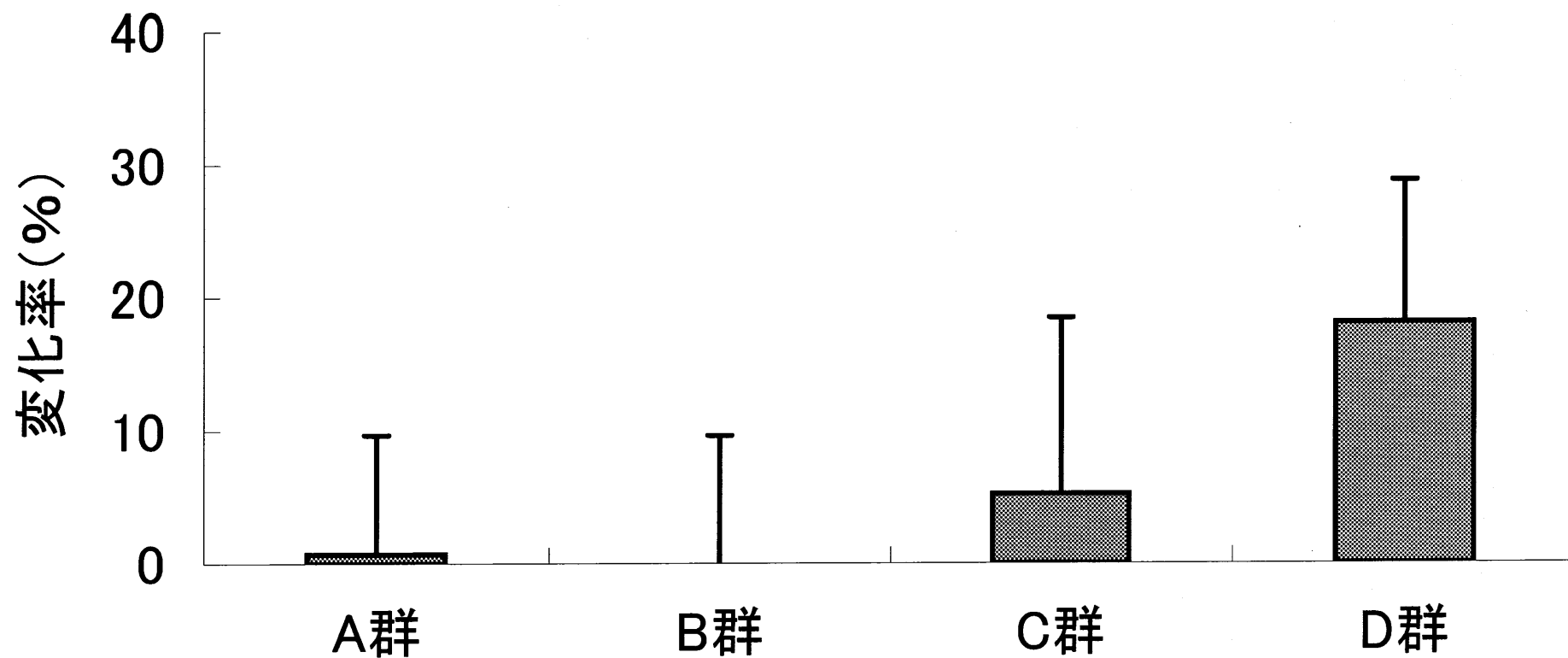
図8. 筋疲労度



- A: 血流制限なし
- B: 加圧量50mmHg
- C: 加圧量150mmHg
- D: 加圧量250mmHg

訓練群

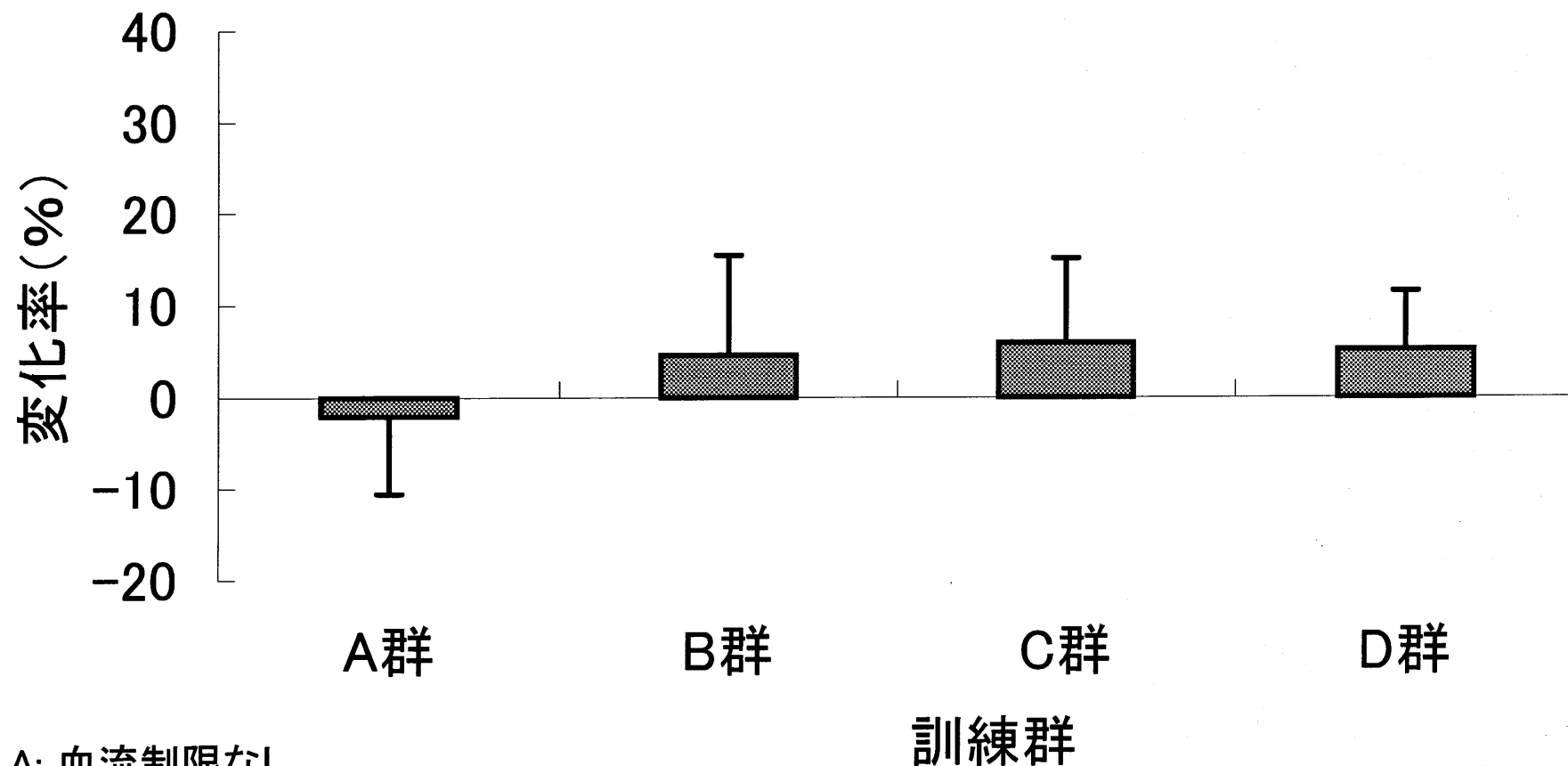
図9. 膝伸展筋筋力の変化率(IM0deg)



- A: 血流制限なし
- B: 加圧量50mmHg
- C: 加圧量150mmHg
- D: 加圧量250mmHg

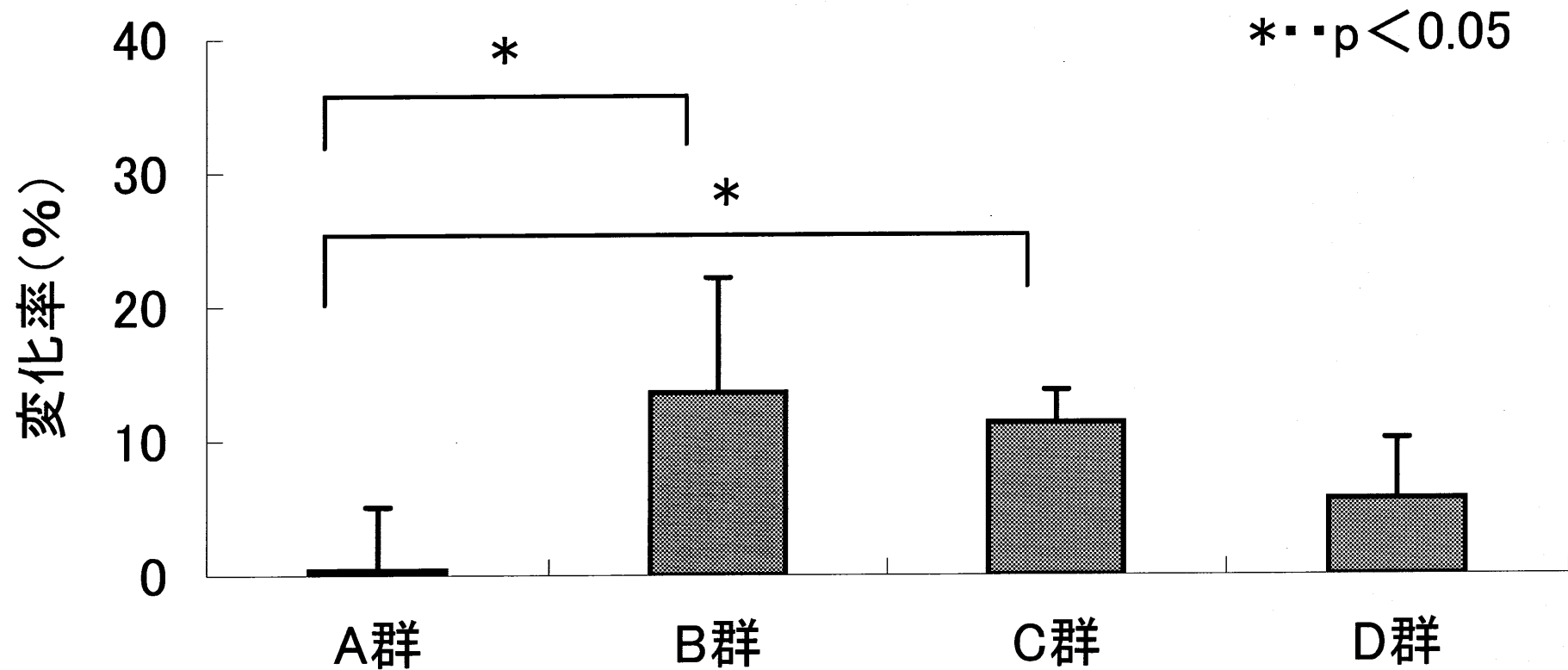
訓練群

図10. 膝伸展筋筋力の変化率(IM60deg)



- A: 血流制限なし
- B: 加圧量50mmHg
- C: 加圧量150mmHg
- D: 加圧量250mmHg

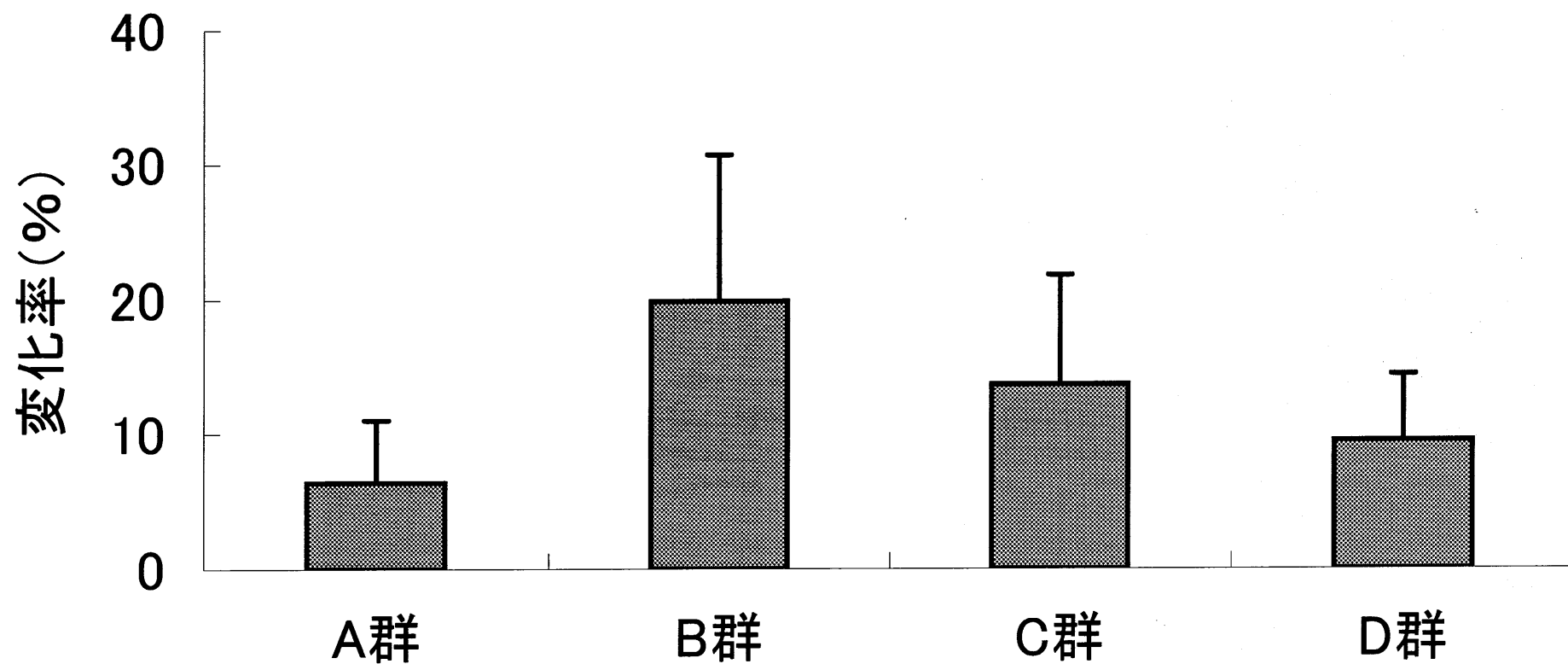
図11. 膝伸展筋筋力の変化率(CC60deg/sec)



- A: 血流制限なし
- B: 加圧量50mmHg
- C: 加圧量150mmHg
- D: 加圧量250mmHg

訓練群

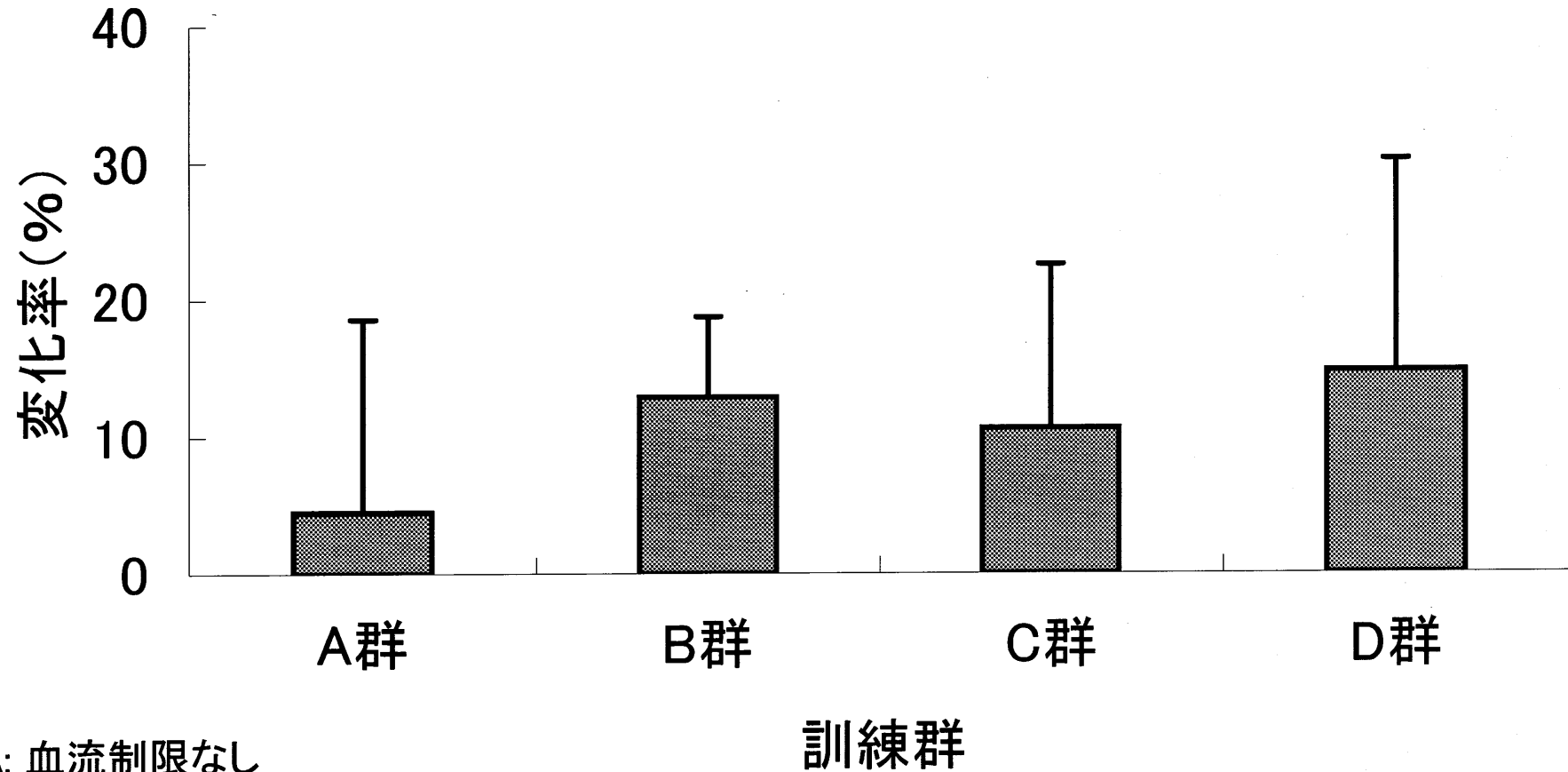
図12. 膝伸展筋筋力の変化率(CC180deg/sec)



- A: 血流制限なし
- B: 加圧量50mmHg
- C: 加圧量150mmHg
- D: 加圧量250mmHg

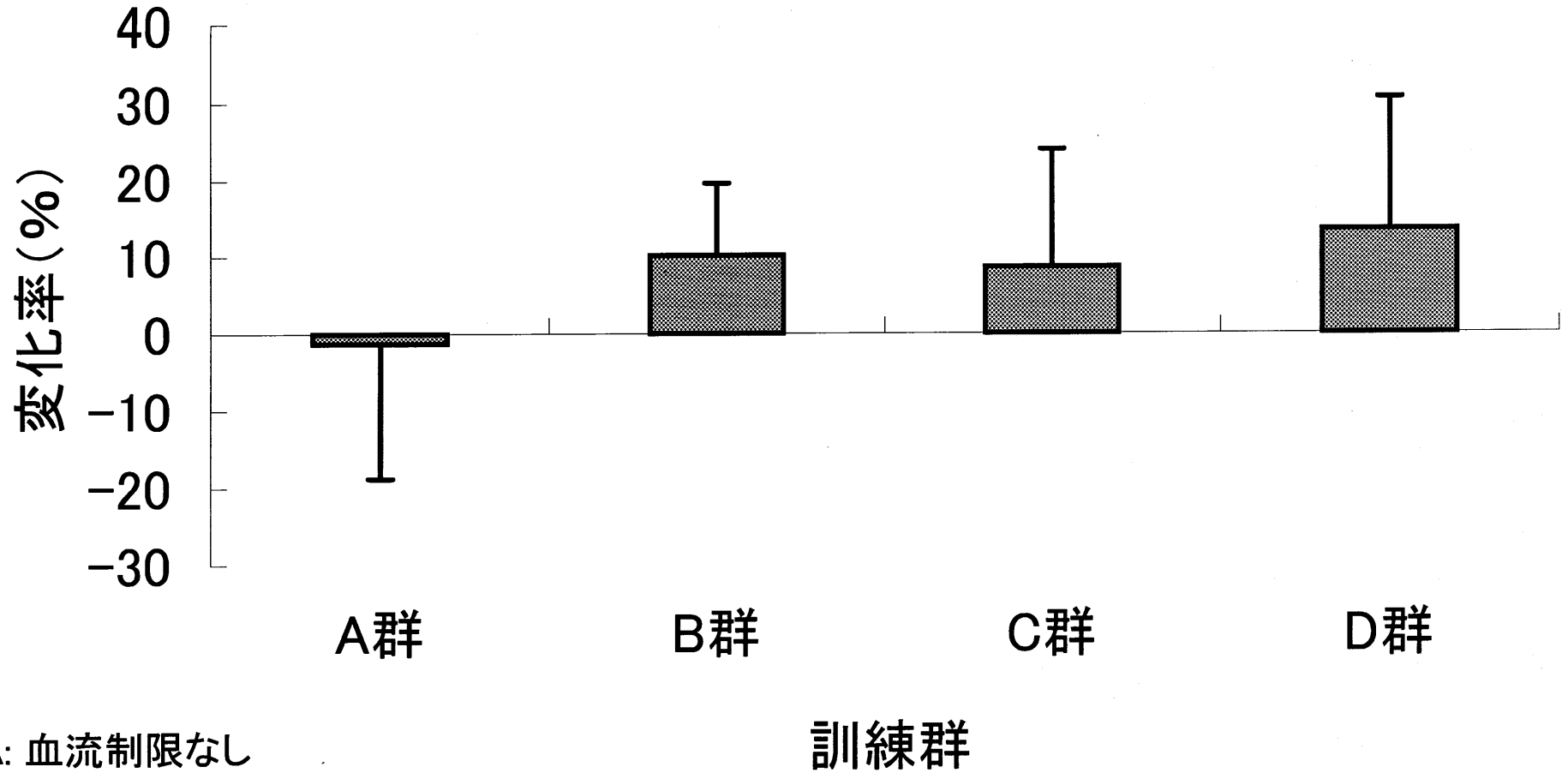
訓練群

図13. 膝伸展筋筋力の変化率(CC300deg/sec)



- A: 血流制限なし
- B: 加圧量50mmHg
- C: 加圧量150mmHg
- D: 加圧量250mmHg

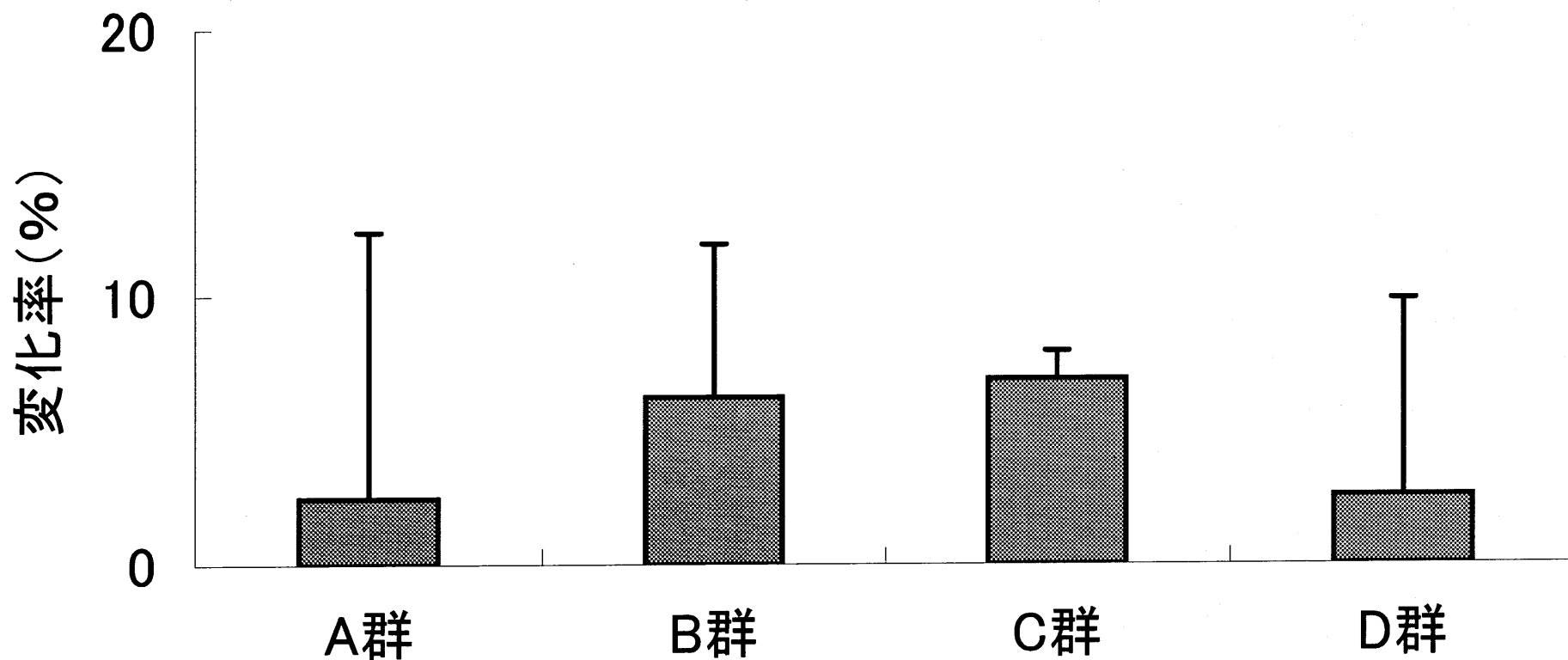
図14. 膝伸展筋筋力の変化率 (EC60deg/sec)



- A: 血流制限なし
- B: 加圧量50mmHg
- C: 加圧量150mmHg
- D: 加圧量250mmHg

図15. 膝伸展筋筋力の変化率(EC180deg/sec)

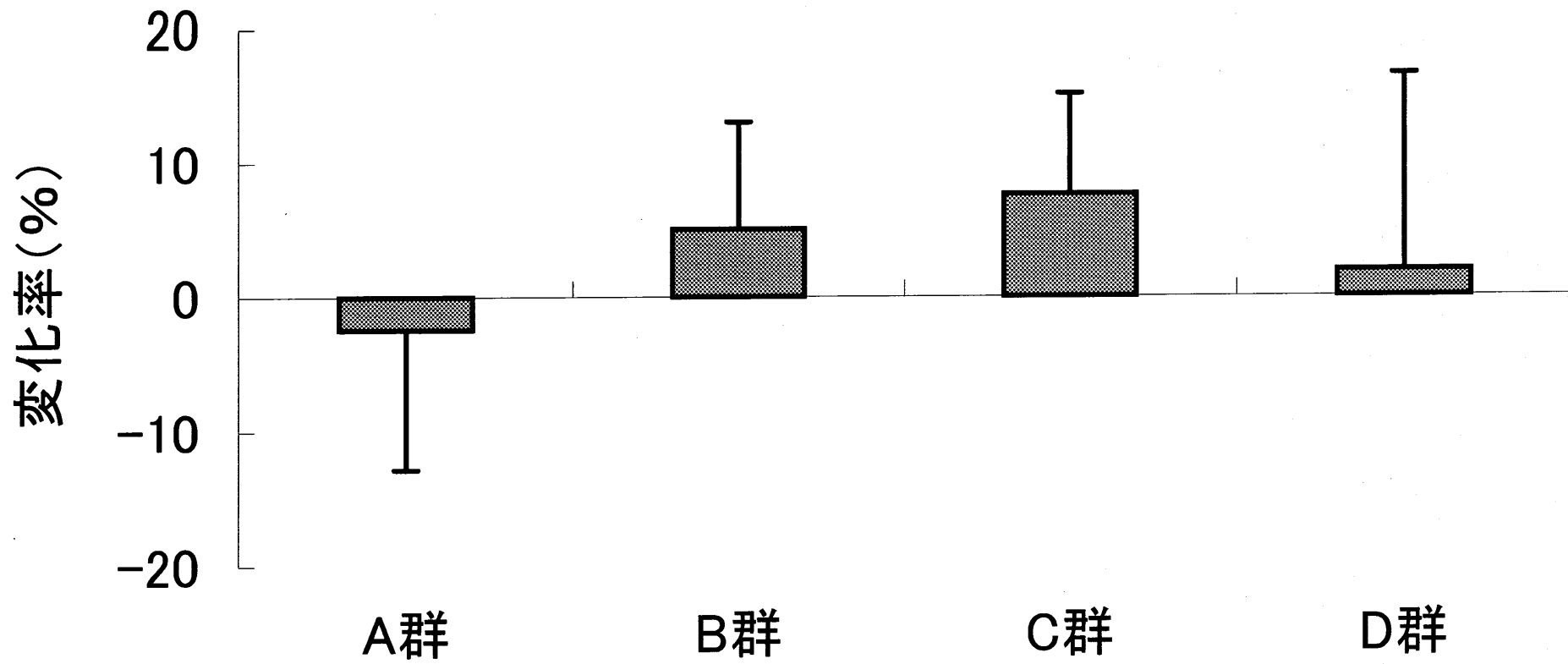




- A: 血流制限なし
- B: 加圧量50mmHg
- C: 加圧量150mmHg
- D: 加圧量250mmHg

訓練群

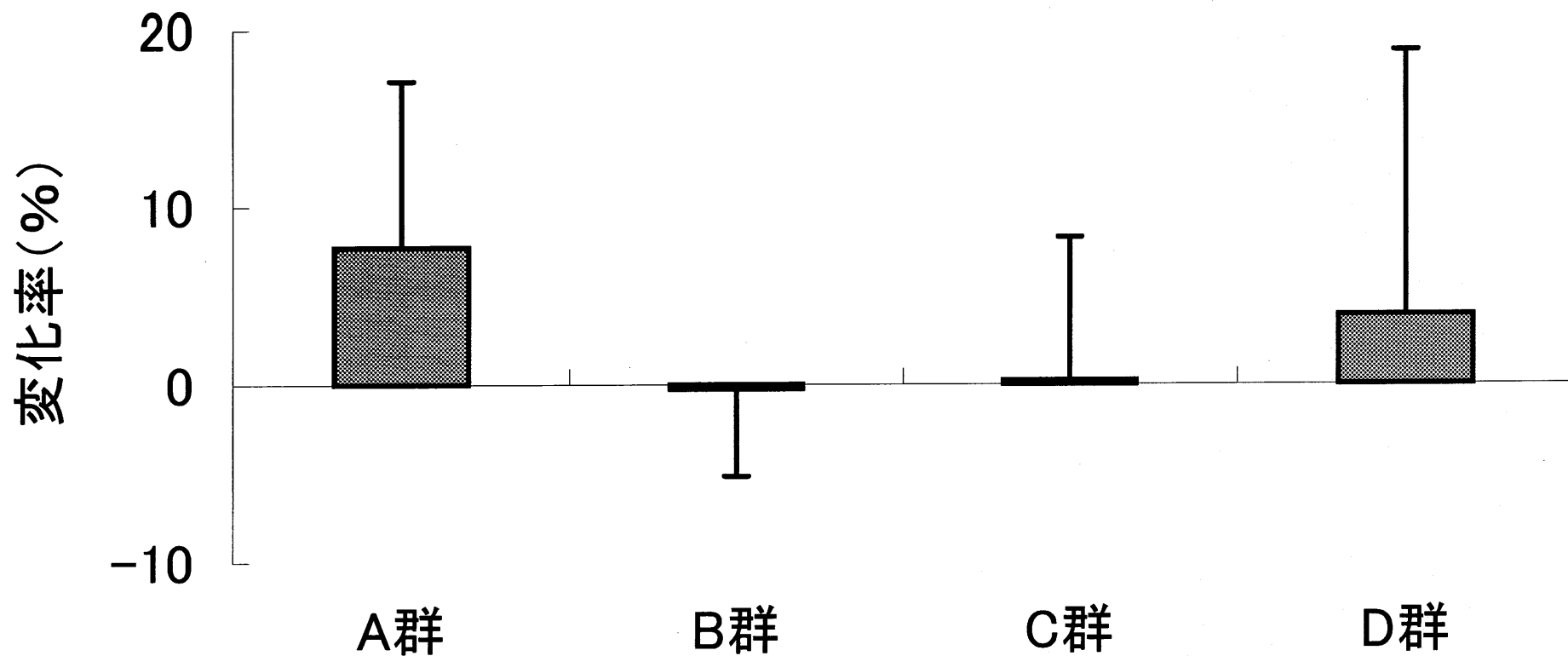
図16. 最初3分の1の仕事量の変化率



- A: 血流制限なし
- B: 加圧量50mmHg
- C: 加圧量150mmHg
- D: 加圧量250mmHg

訓練群

図17. 最後3分の1の仕事量の変化率



- A: 血流制限なし
- B: 加圧量50mmHg
- C: 加圧量150mmHg
- D: 加圧量250mmHg

訓練群

図18. 筋疲労度の変化率

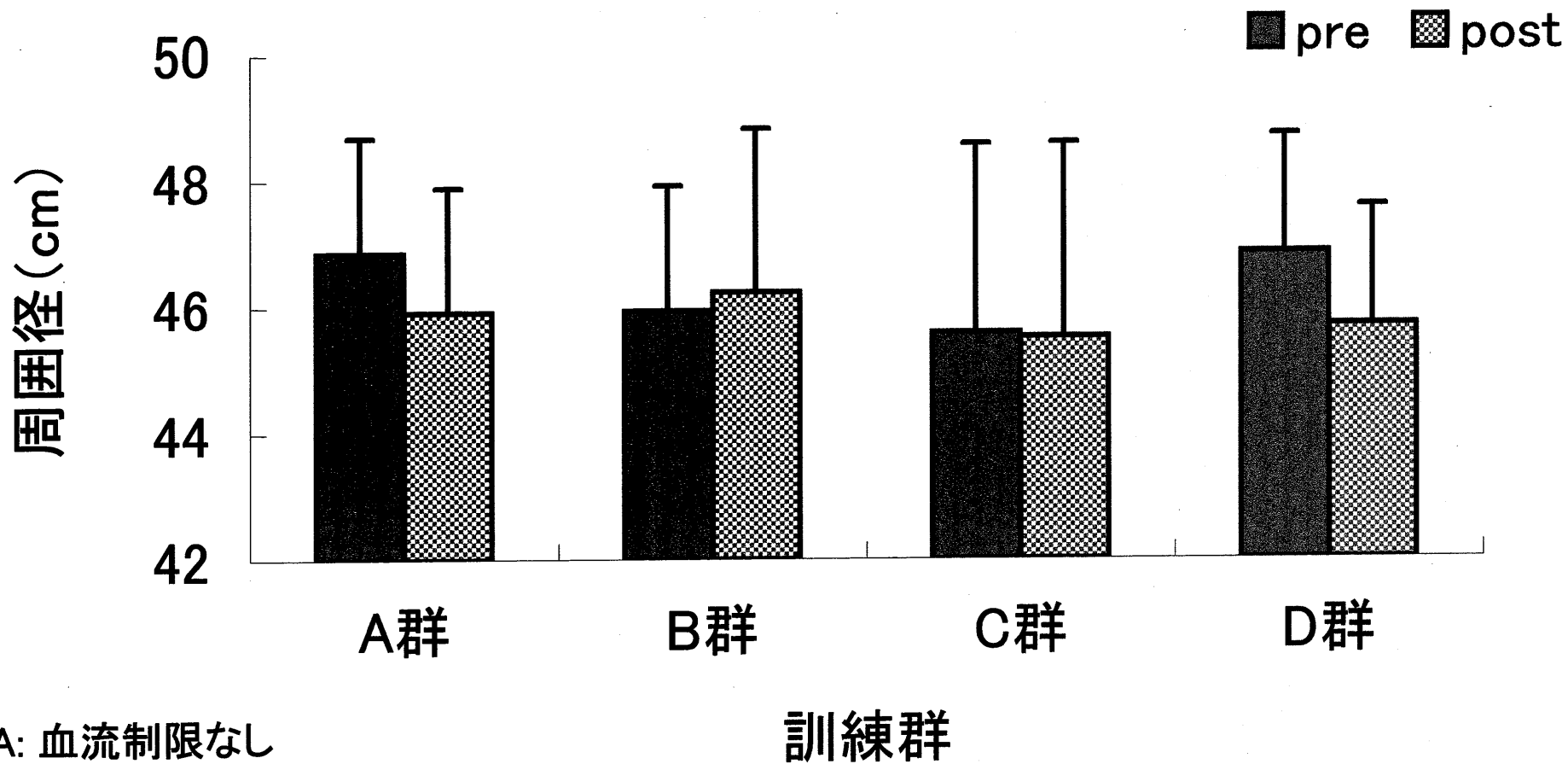
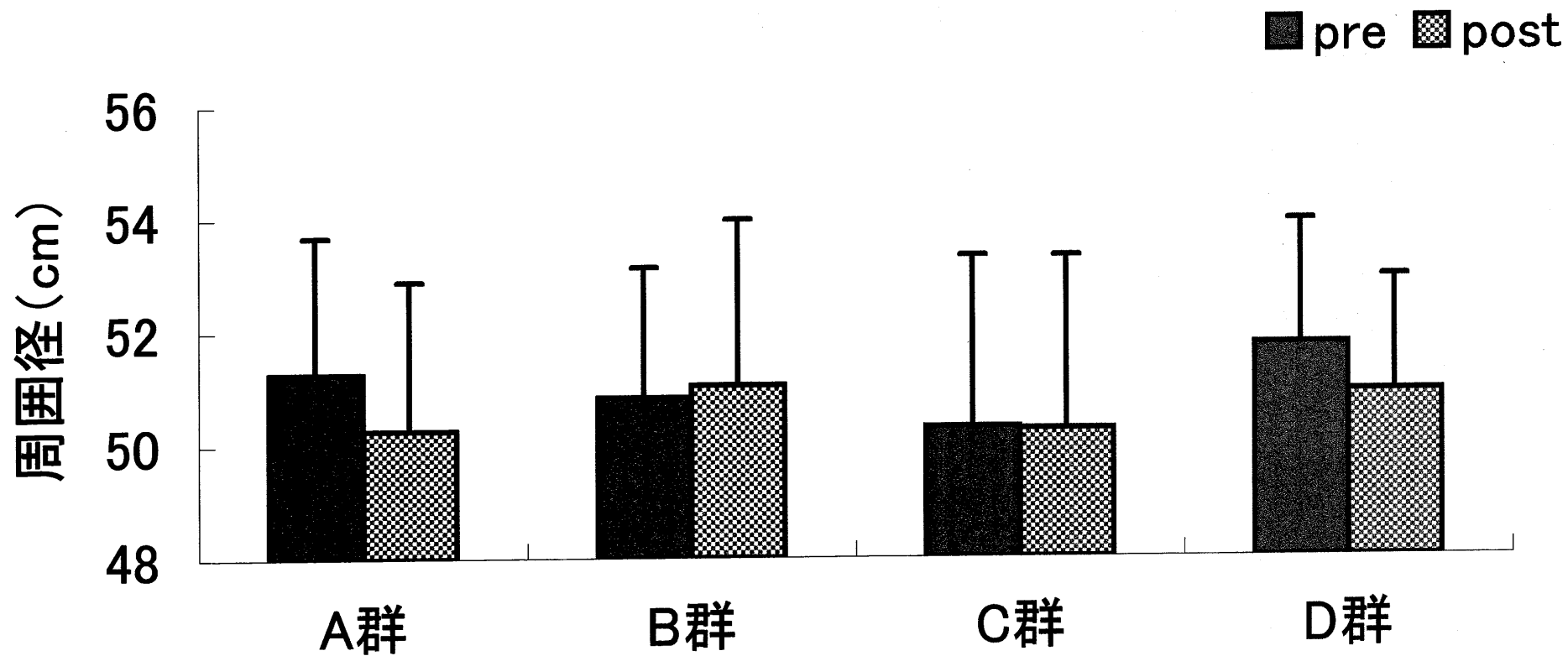


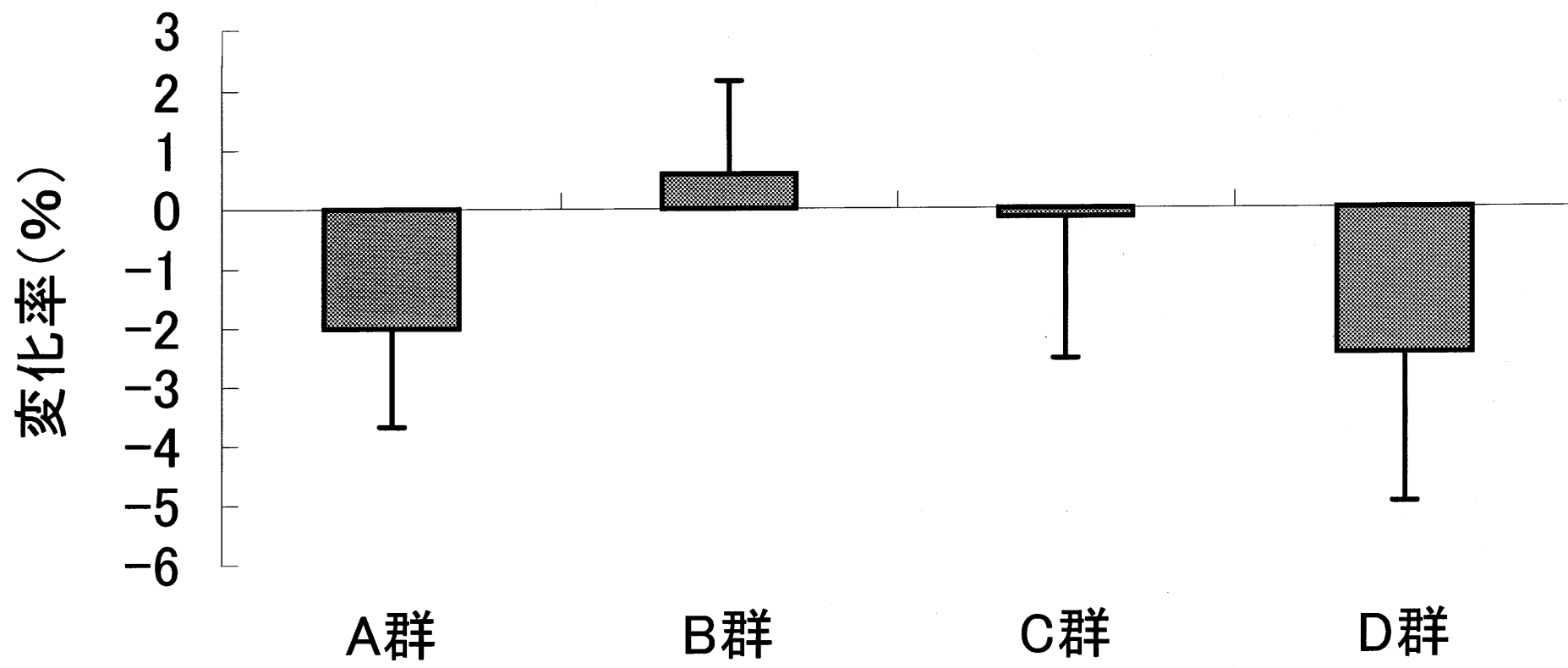
図19. 大腿部周囲径(膝蓋骨上端10cm)



- A: 血流制限なし
- B: 加圧量50mmHg
- C: 加圧量150mmHg
- D: 加圧量250mmHg

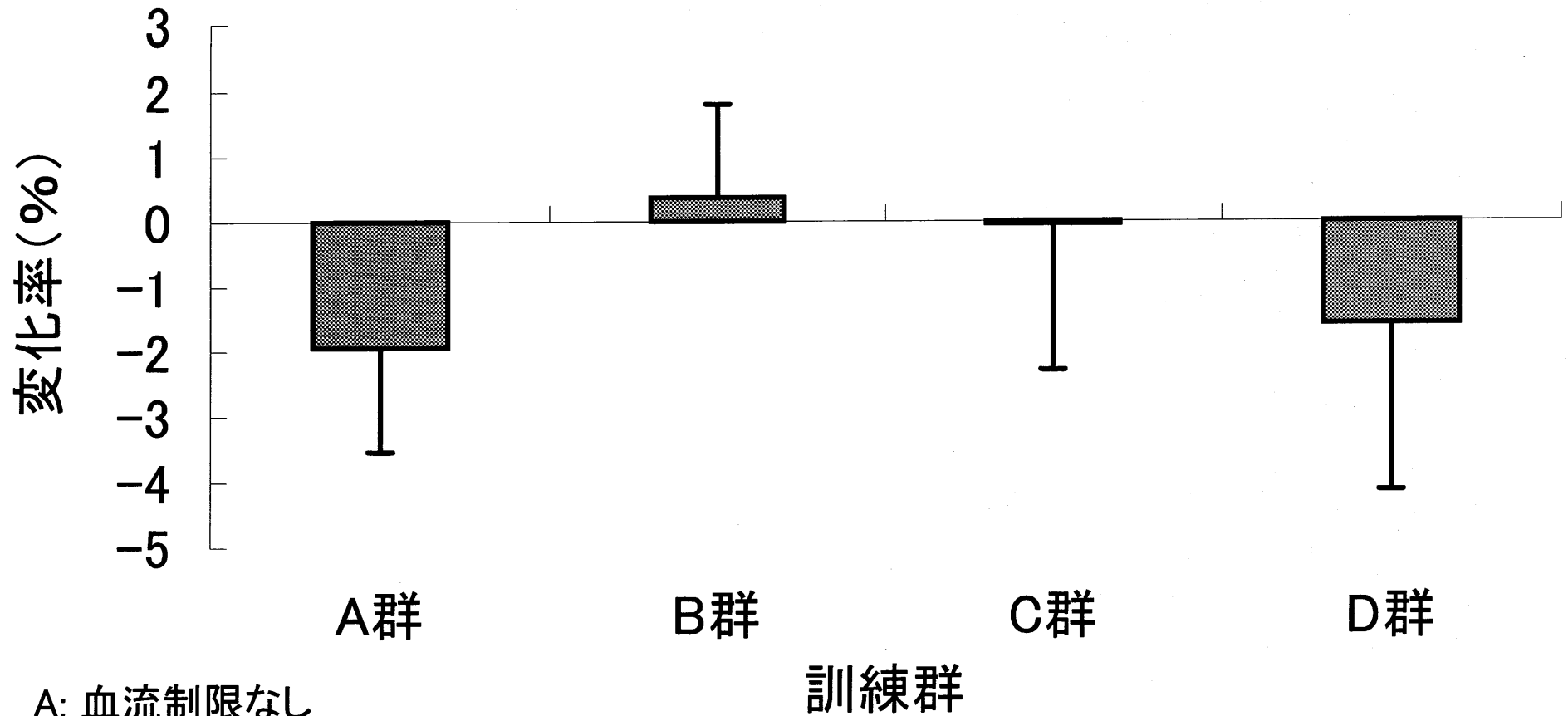
訓練群

図20. 大腿部周囲径(膝蓋骨上端16cm)



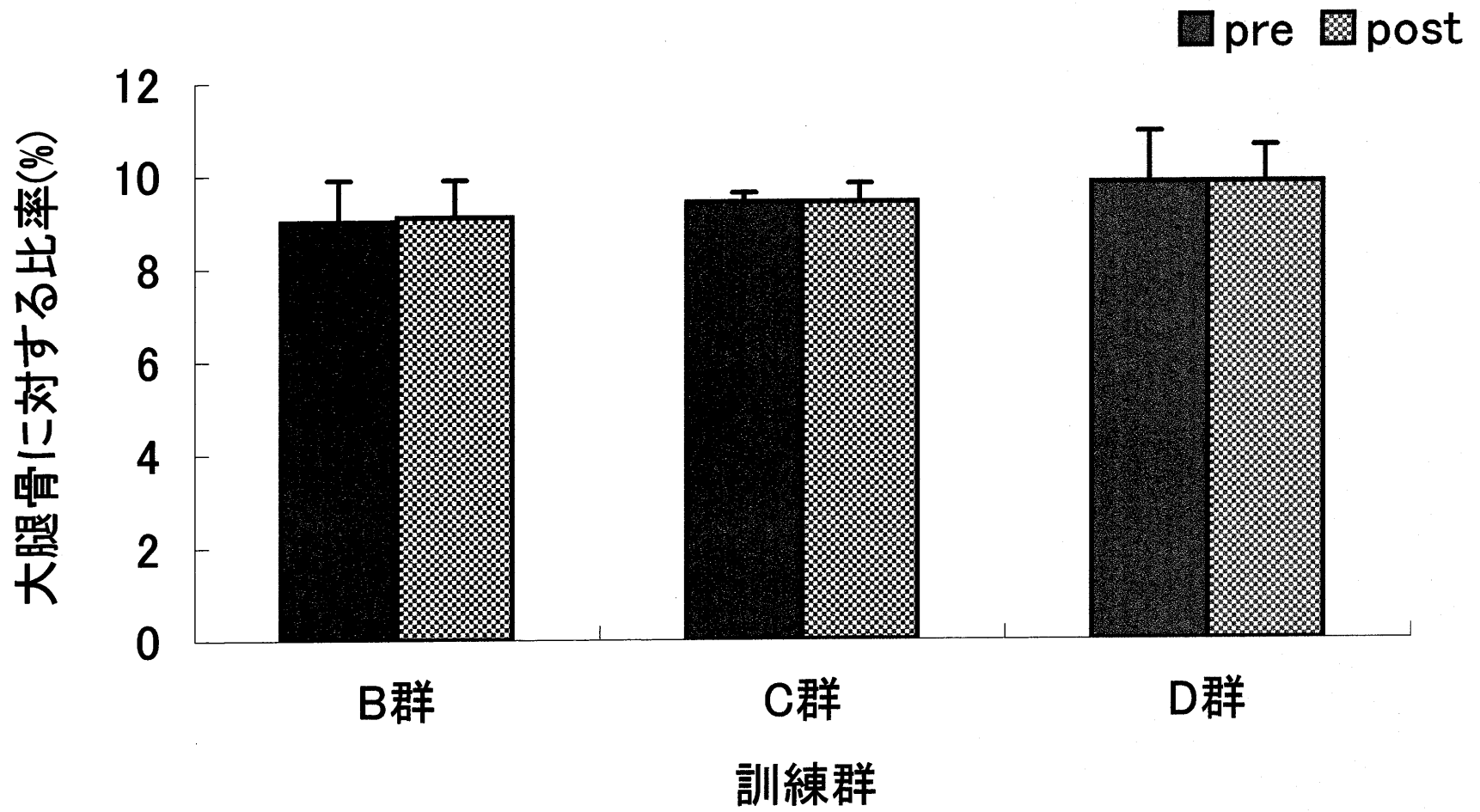
- A: 血流制限なし
- B: 加圧量50mmHg
- C: 加圧量150mmHg
- D: 加圧量250mmHg

図21. 大腿部周囲径の変化率  
(膝蓋骨上端10cm)



- A: 血流制限なし
- B: 加圧量50mmHg
- C: 加圧量150mmHg
- D: 加圧量250mmHg

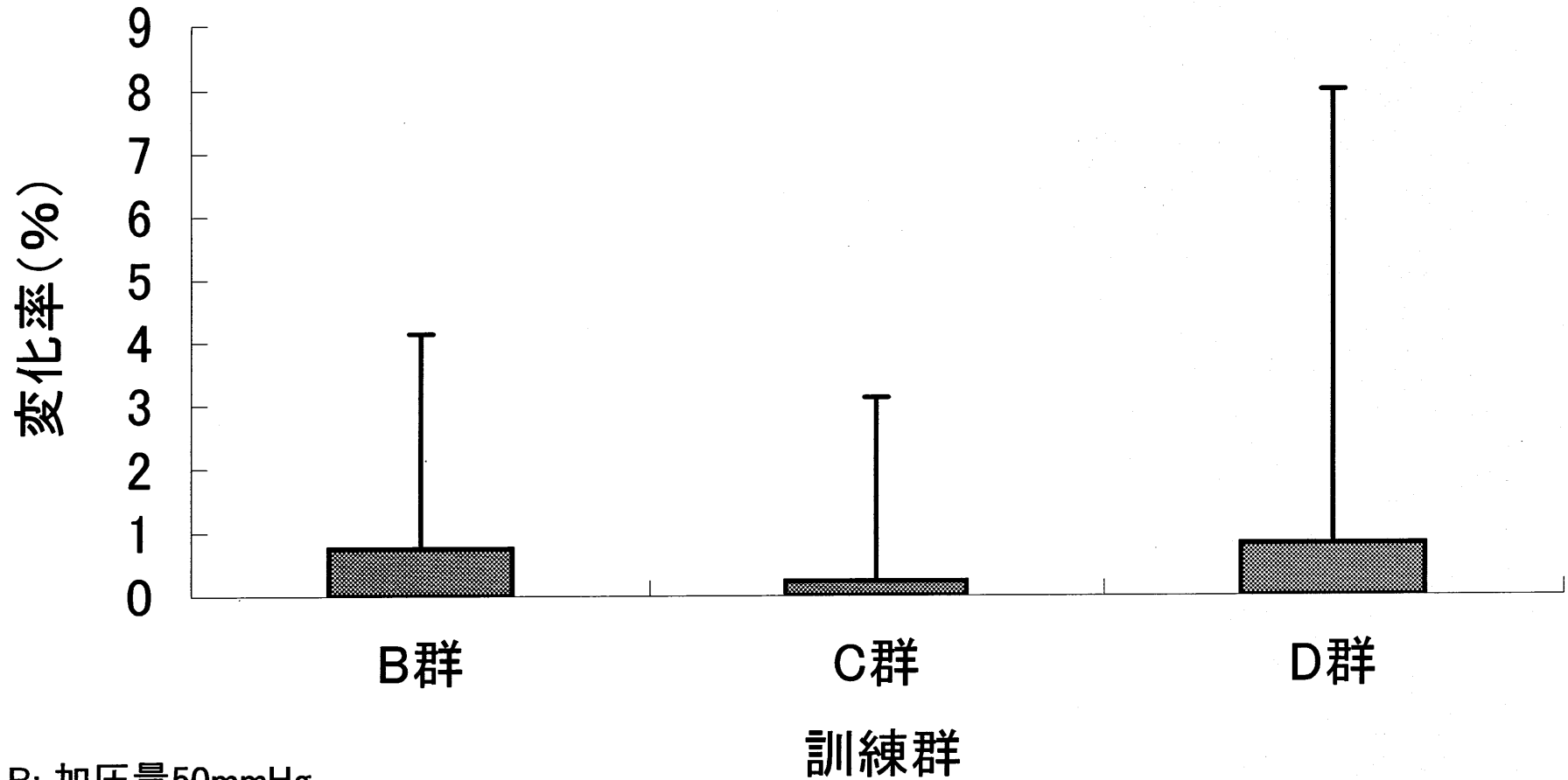
図22. 大腿部周囲径の変化率  
(膝蓋骨上端16cm)



B: 加圧量50mmHg  
 C: 加圧量150mmHg  
 D: 加圧量250mmHg

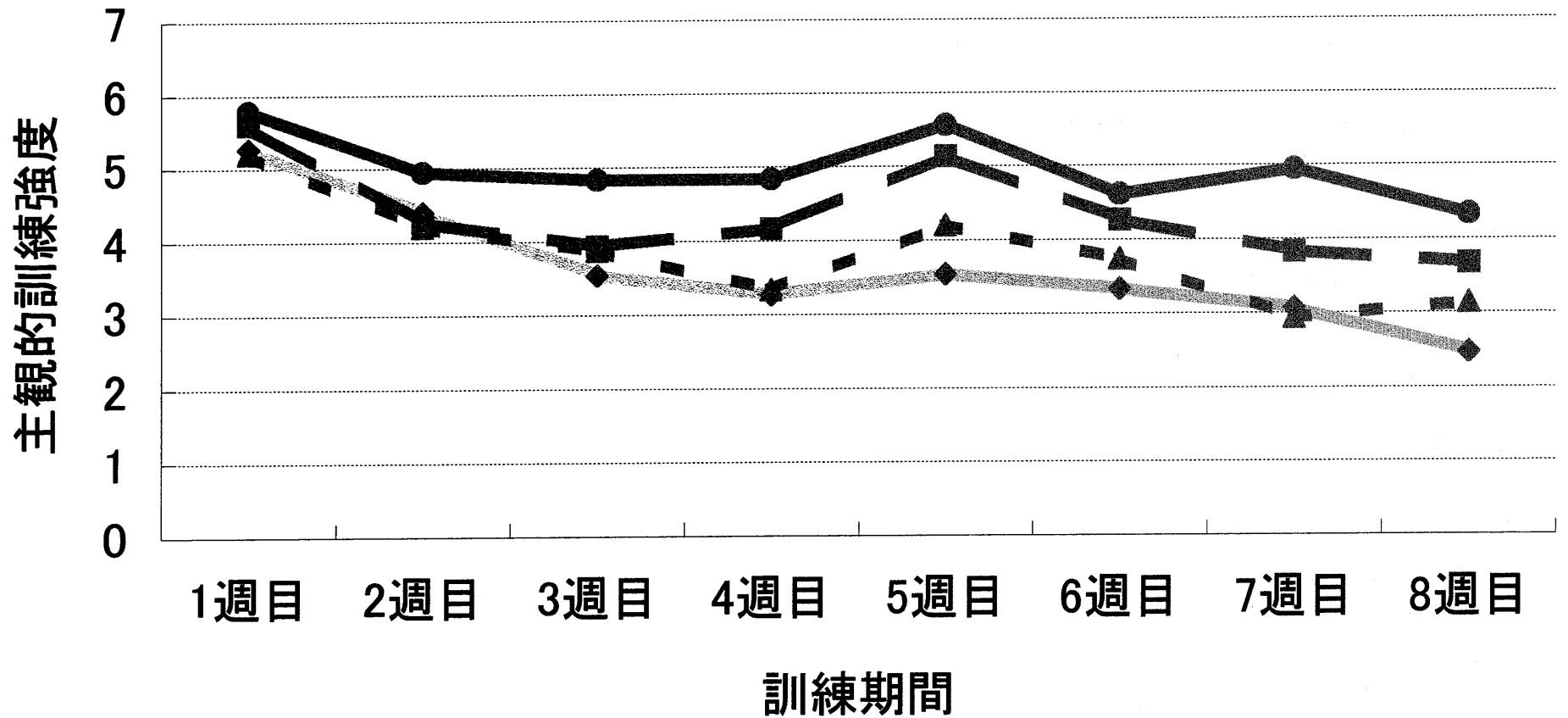
図23. 膝伸展筋の筋断面積  
 (膝蓋骨上端16cm)





B: 加圧量50mmHg  
 C: 加圧量150mmHg  
 D: 加圧量250mmHg

図24. 膝伸展筋の筋断面積の変化率  
 (膝蓋骨上端16cm)



A: 血流制限なし  
 B: 加圧量50mmHg  
 C: 加圧量150mmHg  
 D: 加圧量250mmHg

◆ A群 ■ B群 ▲ C群 ● D群

図25. 主観的訓練強度の変化

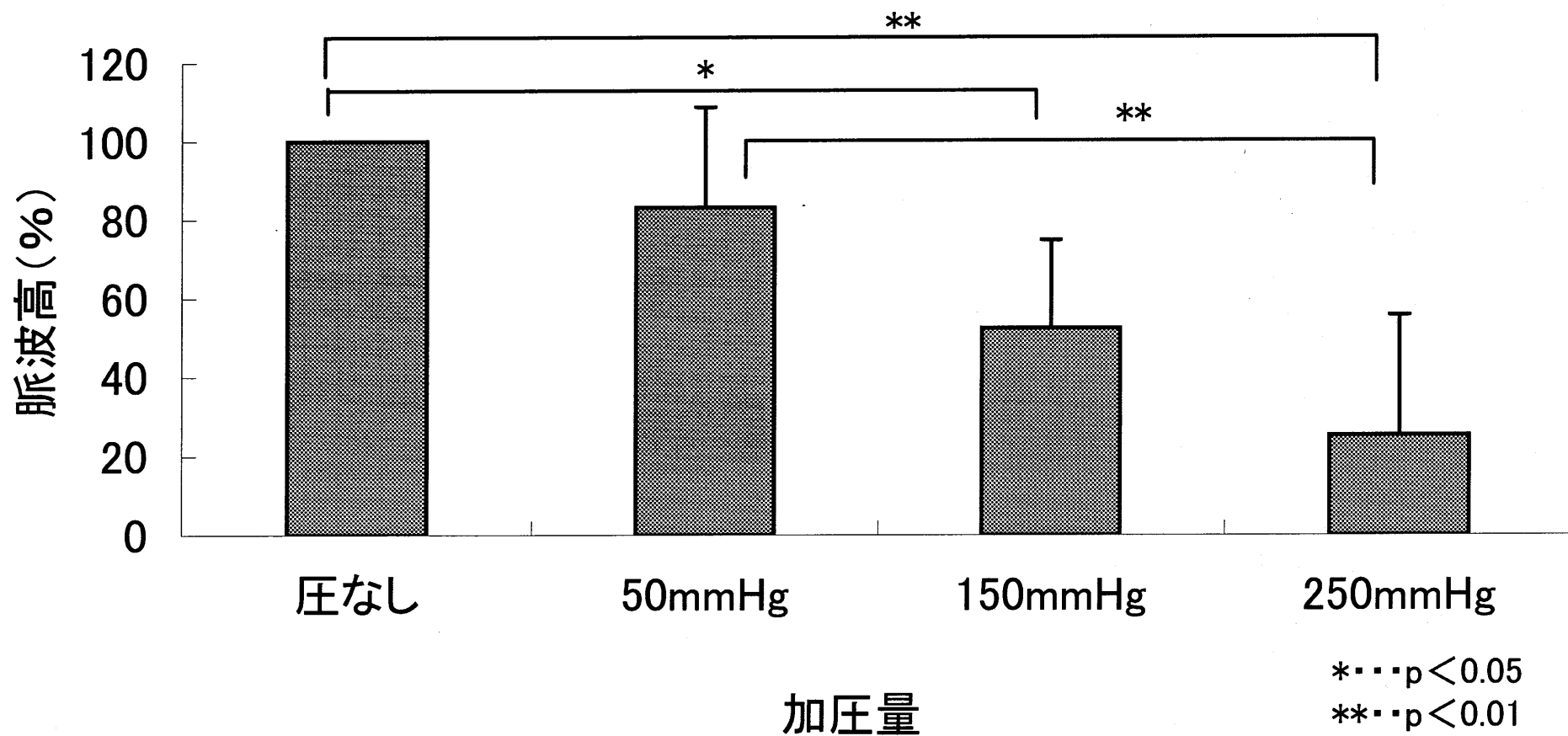


図26. 安静時に加圧量を変えて圧を付加したときの脈波高

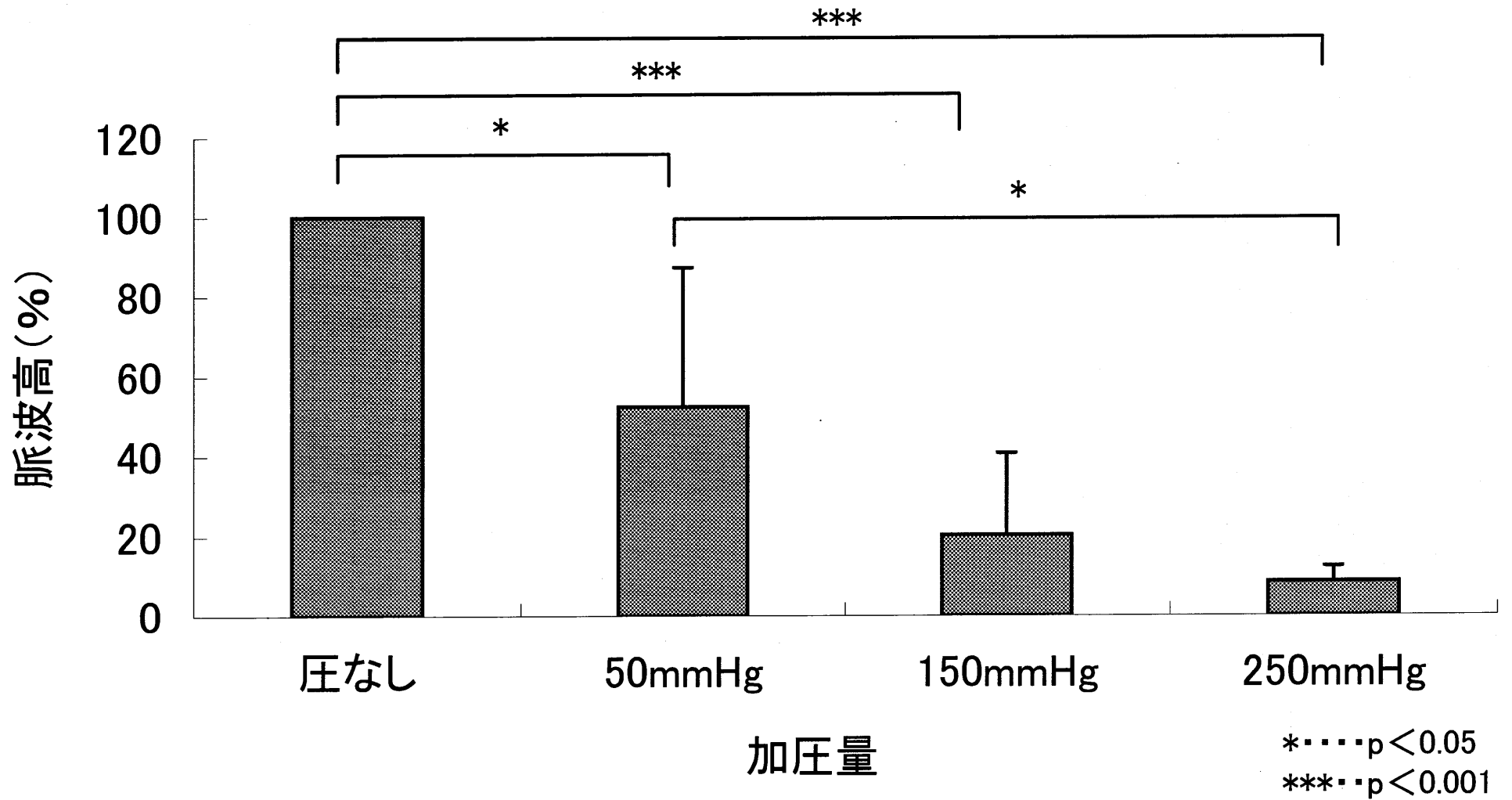


図27. 加圧量を変えて下肢を挙上したときの脈波高

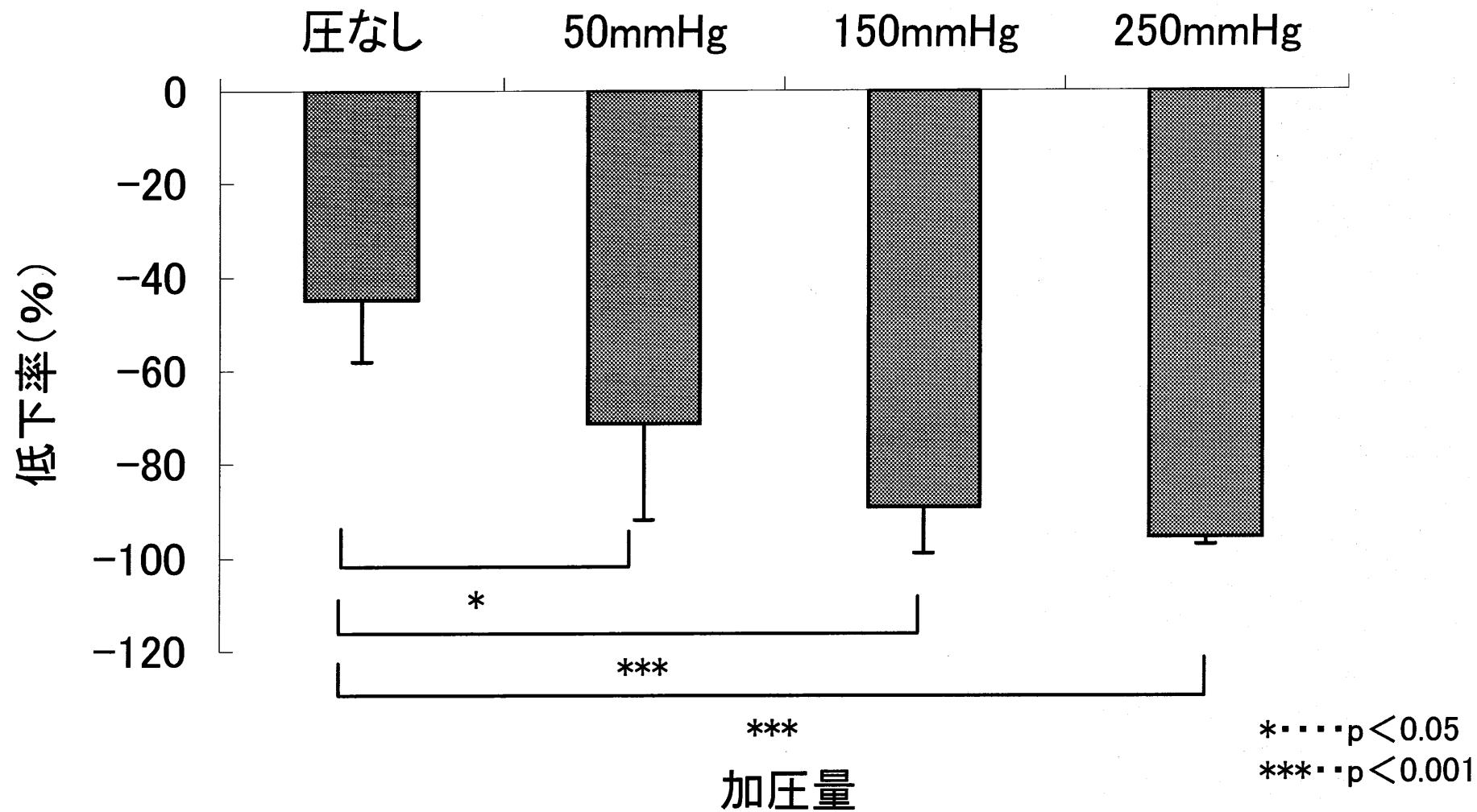


図28. 加圧量を変えて下肢を挙上した時の脈波高の低下率

資料 1

Name: \_\_\_\_\_

ID: \_\_\_\_\_

非常に楽である	かなり楽である	楽である	適度	ややきつい	きつい	かなりきつい	非常にきつい
---------	---------	------	----	-------	-----	--------	--------

01 回目	0	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
02 回目	0	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
03 回目	0	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
04 回目	0	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
05 回目	0	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
06 回目	0	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
07 回目	0	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
08 回目	0	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
09 回目	0	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10 回目	0	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11 回目	0	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
12 回目	0	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
13 回目	0	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
14 回目	0	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
15 回目	0	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
16 回目	0	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
17 回目	0	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
18 回目	0	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
19 回目	0	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20 回目	0	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
21 回目	0	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
22 回目	0	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
23 回目	0	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
24 回目	0	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10