

2009年度 修士論文

事前の筋活動の時間および強度が  
その後の単収縮トルクおよび最大随意短縮性トルクに与える影響

The influence of the duration and intensity of a preceding contraction  
on the subsequent twitch torque and maximal voluntary concentric torque

早稲田大学大学院スポーツ科学研究科  
スポーツ科学専攻 身体運動科学研究領域

5008A048-1

福谷 充輝  
Fukutani, Atsuki

研究指導教員: 矢内 利政 教授

## 目次

第1章	緒言	----- 1
	1-1. 序	
	1-2. 研究小史	
	1-2-1. PAP のメカニズム	
	1-2-2. PAP の程度を決める要因	
	1-2-3. コンディショニング収縮が最大随意収縮トルクに与える影響	
	1-2-4. コンディショニング収縮による筋疲労	
	1-3. 本論文の目的	
第2章	コンディショニング収縮の時間が 単収縮トルクおよび最大随意短縮性トルクに与える影響	----- 12
	2-1. 目的	
	2-2. 方法	
	2-3. 結果	
	2-4. 考察	
	2-5. 要約	
第3章	コンディショニング収縮の強度が 単収縮トルクおよび最大随意短縮性トルクに与える影響	----- 36
	3-1. 目的	
	3-2. 方法	
	3-3. 結果	
	3-4. 考察	
	3-5. 要約	
第4章	総括論議	----- 52
第5章	結論	----- 59
	参考文献	----- 60
	謝辞	----- 66



## 第1章 緒言

### 1-1. 序

高強度の筋活動後に、電気刺激で誘発した単収縮張力や単収縮トルクといった筋の力発揮能力が、筋活動前の力発揮能力と比べて増強する。この現象は postactivation potentiation (PAP) とよばれ (Sale 2002 ; Robbins 2005 ; Hodgson and Docherty 2005 ; Docherty and Hodgson 2007)、PAPを生じさせるために行う筋活動はコンディショニング収縮とよばれている (Tillin and Bishop 2009) (図1-1)。近年では、コンディショニング収縮を行うことによって、単収縮張力や単収縮トルクだけでなく、最大努力での短縮性収縮時の関節角速度や短縮性トルクも増加することが報告されている (Baudry and Duchateau 2007a ; 2007b ; Miyamoto et al. 2009)。さらに、ジャンプやスプリントも増強することが報告されていることから (Gourgoulis et al. 2003 ; Chatzopoulos et al. 2007)、コンディショニング収縮の利用はスポーツパフォーマンス増強の一手段となる可能性がある。

これまでのヒトを対象とした PAP に関する研究において、コンディショニング収縮の時間および強度が、その後の単収縮トルクの増加の程度に影響を与えることが明らかにされている (Vandervoort et al. 1983)。しかしながら、スポーツやトレーニングにおいては、単収縮ではなく随意収縮で力発揮を行うこと、且つ、最大努力での力発揮も含まれることから、単収縮トルクではなく最大随意収縮トルクに対するコンディショニング収縮の時間および強度の影響を明らかにすることが重要だと考えられる。

これまでに、コンディショニング収縮を行うことによって、その後の最大等尺性筋張力は増加しないこと (Vandenboom et al. 1993) および最大随意短縮性トルクは増加すること (Miyamoto et al. in press) が報告されている。しかし、一定負荷での最大随意短縮性収縮時の関節角速度は増加しないという報告もある (Gossen and Sale 2000)。増強の有無が報告間で一致していない理由として、報告間でコンディショニング収縮の条件が異なることが考えられる。そこで、本研究では、コンディショニング収縮の時間および強度の違いが、単収縮トルクおよび最大随意短縮性トルクに与える影響について検討することを目的とした。

## 1-2. 研究小史

### 1-2-1. PAP のメカニズム

コンディショニング収縮後に単収縮張力や単収縮トルクが増加するメカニズムとして、コンディショニング収縮を行うことによってミオシン軽鎖がリン酸化し、その後もリン酸化した状態が続くことから、アクトミオシンのカルシウムイオンへの感受性が増大することが考えられている (Manning and Stull 1979 ; Grange et al. 1993 ; Sweeney et al. 1993 ; MacIntosh 2003)。ミオシン分子は2つのミオシン重鎖と4つのミオシン軽鎖を持っており、ミオシン軽鎖はリン酸を取り込むことができる (Rayment et al. 1993)。筋活動を行うことによって、筋小胞体からカルシウムイオンが放出され、カルシウムイオンがカルモジュリンと結合する (Yazawa and Yagi 1978)。カルシウムイオンとの結合によって活性化されたカルモジュリンは、ミオシン軽鎖キナーゼを活性化させ (Blumenthal and Stull 1980)、活性化したミオシン軽鎖キナーゼは、ミオシン軽鎖をリン酸化させる (Yagi et al. 1978 ; Nairn and Perry 1979)。リン酸化したミオシン軽鎖は、アクチンと結合しやすい状態になり、アクトミオシンのカルシウムイオンに対する感受性が増加する。その結果、単収縮張力の増加が起こる。 (Manning and Stull 1979 ; 1982 ; Klug et al. 1982 ; Moore and Stull 1984) (図1-2)。

## 1-2-2. PAP の程度を決める要因

PAP の程度を決める要因として、まずは筋線維組成が挙げられる。Hamada et al. (2000) は、筋バイオプシーを行い、速筋線維を多く含む被験者と多く含まない被験者に分け、PAP の程度を比較したところ、PAP の程度は速筋線維を多く含む群が速筋線維を多く含まない群と比較して有意に大きかったと報告している。また、Miyamoto et al. (2009) は、速筋線維と遅筋線維の割合が同程度の腓腹筋と、遅筋線維をより多く含むヒラメ筋 (Johnson et al. 1973) のコンディショニング収縮前後の筋音図の振幅の変化を観察したところ、腓腹筋はヒラメ筋と比べて振幅の変化が有意に大きかったと報告している。この結果は、速筋線維を多く含む筋は PAP の程度が大きいことを示唆している。加えて、Requena et al. (2008) は、最大努力の25%の強度でのコンディショニング収縮を、電気刺激で行なった条件と随意収縮で行なった条件で比較したところ、電気刺激でコンディショニング収縮を行なった群は、随意収縮でコンディショニング収縮を行った群と比べて PAP の程度が有意に大きかったと報告している。この結果の理由として、電気刺激時と随意収縮時の運動単位の動員パターンの違いが挙げられている。通常の随意収縮では、サイズの原理 (Henneman et al. 1965) に従い、最大努力の25%の強度では、主に遅筋線維を支配する運動単位が活動する。しかし、電気刺激時においては、運動単位の動員パターンはサイズの原理には従わず、速筋線維を支配する運動単位から動員されるといわれている (Knaflitz et al. 1990 ;

Feiereisen et al. 1997)。つまり、随意で収縮した時には遅筋線維が多く活動する低い収縮強度であっても、電気刺激を用いた時には速筋線維が多く活動し、より大きな PAP が生じたことから、PAP を引き起こすためには、コンディショニング収縮時において、発揮トルクを大きくすることよりも速筋線維を活動させることが重要だと考えられている。

PAP の程度を決めるその他の要因として、PAP を引き起こすために行なうコンディショニング収縮の時間および強度が挙げられる。Vandervoort et al. (1983) は、足関節背屈筋群を対象に、コンディショニング収縮の時間が PAP の程度に及ぼす影響を検討した。その結果、PAP の程度は10秒間のコンディショニング収縮で最大になり、それ以上長い時間では、単収縮トルクがコンディショニング収縮前の値と比べて低下したと報告している。しかしながら、Vandervoort et al. (1983) の報告では、収縮時間を1秒間、3秒間、10秒間、30秒間および60秒間に設定しており、PAP の程度が最大であった10秒間前後の時間、すなわち5秒間や15秒間という、より細かい収縮時間設定での PAP の程度の違いは検討していない。それゆえ、何秒間のコンディショニング収縮で PAP の程度が最大になるかは明らかになっていない。また、Vandervoort et al. (1983) は、コンディショニング収縮の強度が PAP の程度に与える影響を検討したところ、高強度のコンディショニング収縮を行った時に PAP が生じたと報告している。しかしながら、被験者数が1人ということから、主観的に単収縮トルク増加の有無を判断しており、収縮強度の変化に伴い PAP の程度がどのように変化するかは明らかになっていない。

### 1-2-3. コンディショニング収縮が最大随意収縮トルクに与える影響

これまでの研究において、コンディショニング収縮はその後の最大等尺性筋張力を増加させないことが報告されている (Vandenboom et al. 1993)。また、コンディショニング収縮を行っても無負荷の最大短縮性収縮時の関節角速度は増加しないことが報告されている (Stuart et al. 1988)。しかしながら、コンディショニング収縮は、いかなる発火頻度での収縮であっても、最大筋力に達していない力の立ち上がり区間の筋力を増加させるため、力の立ち上がり勾配を増加させる (Vandenboom et al. 1993 ; 1995 ; 1997)。それゆえ、コンディショニング収縮は、最大短縮性収縮時の関節角速度を増加させ、力-速度曲線を右上にシフトさせる効果があると考えられている (Sale 2002)。Baudry et al. (2007b) は、母指内転筋を対象に、コンディショニング収縮として6秒間の最大随意等尺性収縮を行わせ、電気刺激で誘発した最大等尺性トルクの10%、20%、30%、40%および50%負荷において、最大随意短縮性収縮時の関節角速度が増加するかを検討した。その結果、全ての負荷条件において関節角速度は増加し、力-速度曲線が右上にシフトしたと報告している。加えて、Miyamoto et al. (in press) は、足関節底屈筋群を対象に、コンディショニング収縮として6秒間の最大随意等尺性収縮を行わせたところ、角速度180度/秒での最大随意短縮性トルクが増加したと報告している。一方、Gossen and Sale (2000) は、膝関節伸展筋群を対象に、コンディショニングとして10秒間の

最大随意等尺性収縮を行わせ、最大随意等尺性トルクの15%、30%、45%および60%負荷において、最大随意短縮性収縮時の関節角速度が増加するかを検討した。その結果、全ての負荷条件において、単収縮トルクは増加していたにも関わらず、関節角速度は増加しなかったと報告している。これらの研究の異なる点として、コンディショニング収縮の時間、コンディショニング収縮後に最大随意短縮性トルクを測定するタイミングおよび対象部位の違いがあげられる。

#### 1-2-4. コンディショニング収縮による筋疲労

コンディショニング収縮を行うことによって、その後の発揮張力や発揮トルクに対して増強効果を持つミオシン軽鎖のリン酸化 (Sweeney et al. 1993) と、減弱効果である筋疲労 (Garmer et al. 1989 ; Fowles and Green. 2003 ; Hamada et al. 2003) が同時に生じる。Vandervoort et al. (1983) は、前脛骨筋を対象に、1秒間、3秒間、10秒間、30秒間および60秒間のコンディショニング収縮を行わせたところ、10秒間条件において単収縮トルクの増加が最も大きく、60秒間条件では単収縮トルクがコンディショニング収縮前の値に対して低下したと報告している。この結果から、長時間にわたるコンディショニング収縮では、筋疲労により単収縮トルクが低下することが明らかになった。

また、筋疲労は、大きく末梢性疲労と中枢性疲労に分けられ (Bigland-Ritchie 1984 ; Gandevia 2001 ; Taylor et al. 2006 ; Taylor and Gandevia 2008) 、末梢性疲労は単収縮および随意収縮に影響を及ぼすが、中枢性疲労は随意収縮のみに影響を及ぼす。

Trinble and Harp (1998) は、足関節底屈筋群を対象に、弾性バンドを負荷とした10回の短縮性収縮と伸張性収縮を8セット行わせた前後の H 反射の振幅の変化を検討した。その結果、筋活動後に H 反射の振幅が減少したと報告している。H 反射は脊髄のモトニューロンプールの興奮性を表す指標 (Schieppati 1987) であることから、Trinble and Harp (1998) の結果は、コンディショニング収縮後にモトニューロンプールの興奮性が低下することを示唆している。

また、Kawakami et al. (2000) は、足関節底屈筋群を対象に、膝関節伸展位および膝関節屈曲位条件で、1秒間の最大随意等尺性収縮と1秒間の休息を100回繰り返し、10回ごとの最大随意等尺性収縮時の随意的動員度を算出した結果、徐々に随意的動員度が低下したと報告している。随意的動員度の低下は中枢性疲労を表す (Gandevia et al. 1996) ことから、筋活動により中枢性疲労が生じると考えられる。また、Behm et al. (2004) は、膝関節伸展筋群を対象に10秒間の最大随意等尺性収縮を行わせたところ、その後の最大随意等尺性収縮時の随意的動員度が低下し、中枢性疲労が生じたと報告している。これらのことから、コンディショニング収縮として10秒間前後の高強度収縮を行った時には、中枢性疲労が生じる可能性があり、単収縮と随意収縮では筋疲労の程度が異なる可能性がある。

### 1-3. 本論文の目的

これまでの研究において、コンディショニング収縮を行うことによって最大随意短縮性トルクが増加することが報告されている (Miyamoto et al. in press)。しかしながら、コンディショニング収縮を行ったにも関わらず、最大随意短縮性収縮時の関節角速度の増加がみられなかったという報告も存在する (Gossen and Sale 2000)。この結果の不一致の原因として、コンディショニング収縮の条件が異なっていることが挙げられる。コンディショニング収縮の時間および強度は、単収縮トルクの増加の程度に影響を与えることから (Vandervoort et al. 1983)、最大随意短縮性トルクの増加の程度にも影響を与えると考えられる。加えて、コンディショニング収縮を行うことによって生じる可能性がある中枢性疲労は随意収縮に影響を及ぼすことから、単収縮トルクと最大随意短縮性トルクは、コンディショニング収縮の時間および強度の影響が異なる可能性がある。そこで本研究では、コンディショニング収縮の時間および強度が単収縮トルクおよび最大随意短縮性トルクに与える影響を検討することを目的とした。この目的を達成するために以下の2つの実験を行った。第1の実験においては、足関節底屈筋群を対象に、コンディショニング収縮の時間が単収縮トルクおよび最大随意短縮性トルクに与える影響について検討した。第2の実験においては、第2章での実験の結果を踏まえて、コンディショニング収縮の時間を一定に設定し、コンディショニング収縮の強度が単収縮トルクおよび最大随意短縮性トルクに与える影響について検討した。

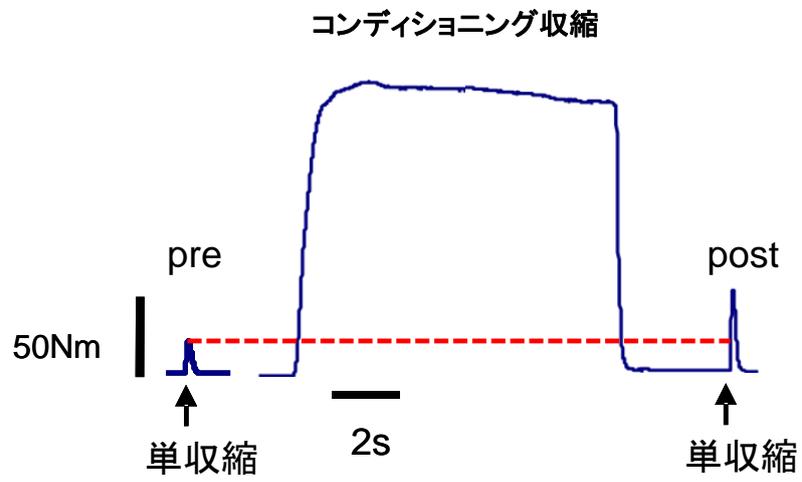


図1-1 PAP の模式図

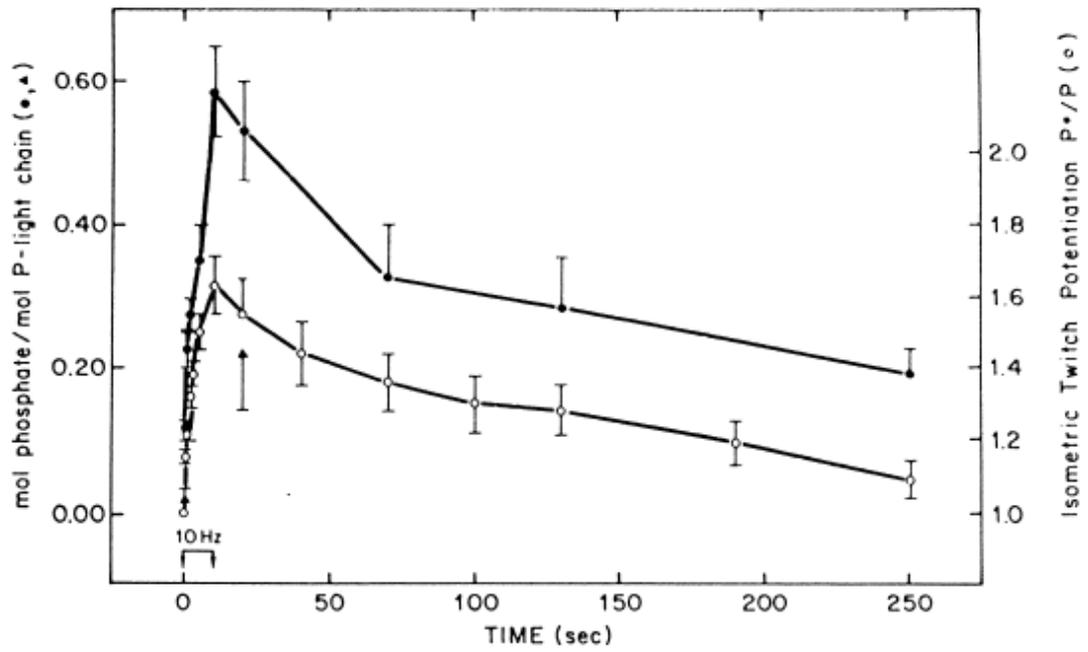


図1-2 コンディショニング収縮による単収縮張力とリン酸濃度の変化

●はリン酸濃度の変化、○は単収縮張力の変化を表す(Moore and Stull 1984)

## 第 2 章 コンディショニング収縮の時間が単収縮トルクおよび最大随意短縮性トルクに与える影響

### 2-1. 目的

PAP の程度はコンディショニング収縮の時間の影響を受けることから (Vandervoort et al. 1983)、コンディショニング収縮の時間は、最大随意短縮性トルクに影響を与える可能性がある。また、随意収縮は単収縮とは異なり、コンディショニング収縮による末梢性疲労だけでなく中枢性疲労も反映することから、単収縮と比べて減弱効果が大きい可能性がある。したがって、コンディショニング収縮の時間が増加すれば、コンディショニング収縮による筋疲労が大きくなることから、最大随意短縮性トルクの増加がみられない可能性がある。それゆえ本研究では、コンディショニング収縮の時間が、その後の単収縮トルクおよび最大随意短縮性トルクに与える影響を検討することを目的とした。

## 2-2. 方法

### 被験者

被験者は健常な成人男性9名とした。被験者の年齢、身長および体重はそれぞれ  $22.6 \pm 1.3$  歳、 $171.8 \pm 4.5$  cm、 $63.4 \pm 4.6$  kg (平均値  $\pm$  標準偏差) であった。実験に先立ち、被験者に本研究の目的、試行、危険性および被験者の権利について説明を行った上、書面で実験参加の同意を得た。また、実験実施に際して、早稲田大学の人を対象とする研究に関する倫理委員会により承認を得た。

### コンディショニング収縮時間の設定および最大随意短縮性トルク計測局面の設定

実験に先立ち、予備実験として、コンディショニング収縮の時間が PAP に及ぼす影響を検討した。被験者9名 ( $26.9 \pm 4.7$  歳、 $172.2 \pm 4.9$  cm、 $67.4 \pm 8.0$  kg (平均値  $\pm$  標準偏差)) に、足関節底屈筋群を対象に、1秒間、2秒間、4秒間、6秒間、10秒間、14秒間および20秒間のコンディショニング収縮を行わせ、コンディショニング収縮の前後に計測した単収縮トルクの変化から、PAP の程度を確認した。その結果、PAP の程度は、9名中7名が14秒間のコンディショニング収縮において最大であった (図2-1)。加えて、コンディショニング収縮後に

最大随意短縮性収縮が増強したと報告している Baudry and Duchateau (2007b) および Miyamoto et al. (in press) は6秒間のコンディショニング収縮を採用していることを踏まえ、本研究では6秒間と、予備実験において多くの被験者の PAP の程度が最大であった14秒間を採用した。また、どの時間条件においても、単収縮トルクの増加はコンディショニング収縮直後に最大になり、その後指数関数的に低下していることから、本研究では、単収縮トルクの増加が最大であったコンディショニング収縮直後を最大随意短縮性トルク計測の時間とした。

#### 実験手順

測定対象筋群は右足関節底屈筋群とした。被験者には、等速性筋力計 (CON-TREX、CMV AG、Switzerland) 上で、膝関節角度0度 (膝関節完全伸展位) で仰臥位をとらせた。非伸縮性ストラップを用いて大腿部を筋力計のシート部に固定し、足部を筋力計のアタッチメント部に固定した。足部の固定に際して、足関節の回転中心と筋力計の回転中心が一致するように留意した。測定の流れを図2-2に示す。足関節を固定した後、電気刺激により単収縮トルクを誘発し、得られた値を pre の単収縮トルクの値とした。その後、被験者には、筋力計のアタッチメント部に足部を固定した状態で、本実験の試行である最大随意短縮性収縮を含む十分なウォーミングアップを行わせた。その後、ウォーミングアップによる PAP の影響を取り除くため、10分間以上の休憩時間をとった (Klein et al. 2001)。休憩後、電気刺激を行い、pre

の単収縮トルクとの差が10%以内であることを確認した後に、被験者に最大随意短縮性収縮を3回行わせ、得られた値を pre の最大随意短縮性トルクとした。最大随意短縮性収縮を行う前に、「全力で、できるだけ速く」という指示を与えた。その後、3回の最大随意短縮性収縮による PAP の影響を取り除くため、5分間以上の休憩時間をとった。休憩後、電気刺激を行い、pre の単収縮トルクとの差が10%以内であることを確認した後に、コンディショニング収縮として最大努力での収縮 (maximal voluntary contraction : MVC) を、6秒間条件、14秒間条件およびコントロール条件 (コンディショニング収縮を行わない条件) で行わせた。コンディショニング収縮終了直後に電気刺激を行い、得られた値を post の単収縮トルク、また、3回の最大随意短縮性収縮を行わせ、得られた値を post の最大随意短縮性トルクとした。その後、試行によって生じた PAP の影響を取り除くため、10分間以上の休憩時間をとった。休憩後、電気刺激を行い、pre の単収縮トルクとの差が10%以内であることを確認して次の試行を行わせた。各条件の順番はランダムで行った。図2-3にトルクおよび筋電図波形の典型例を示す。

#### 足関節底屈トルクの測定

コンディショニング収縮として行う最大随意等尺性足関節底屈および単収縮は、足関節角度0度 (解剖学的正位) で行なわせた。最大随意短縮性収縮の角速度は、コンディショニング収縮の効果検証課題における筋の短縮速度が大きい条件において、電気刺激時の筋の短縮

量増加が大きかった報告 (MacIntosh et al. 2008) があることから、足関節の単関節動作において大きな角速度である180度/秒に設定した。また、可動域は足関節背屈15度から底屈30度に設定した。筋力計により得られた信号は、A/D 変換器 (PowerLab/16SP、ADInstruments 社製) を用いてサンプリング周波数4 kHz でデジタル変換した後、パーソナルコンピュータに記録した。

#### 筋電図の記録

表面筋電図法を用いて、腓腹筋内側頭 (MG)、腓腹筋外側頭 (LG)、ヒラメ筋 (SOL) および前脛骨筋 (TA) の筋電図信号を計測した。筋腹に直径11 mm のディスプレイ型電極 (Bluesensor、Ambu、A/S 社製) を電極間距離20 mm で貼付し、双曲誘導法を用いて測定を行った。電極貼付の際、皮膚抵抗値が5 k $\Omega$  以下であることを確認した。不関電極は左足外果に貼付した。筋電図信号は生体アンプ (gain : 1000、バンドパスフィルタ : 5 - 1000 Hz、MEG-6116-M、日本光電社製) を用いて増幅し、得られた信号は、A/D 変換器を用いてサンプリング周波数4 kHz でデジタル変換した後に、パーソナルコンピュータに記録した。モーションアーティファクトを除去するため、ソフトウェア上で20 Hz のローカットフィルタにより平滑化したデータを分析した。

## 電気刺激の記録

アイソレータ (SS2046、日本光電社製) に接続した電気刺激装置 (SEN-3301、日本光電社製) を用いて、脛骨神経の経皮刺激を行った。刺激電極の陽極 (4 cm×5 cm、VIASYS社製) は膝蓋骨上部に、陰極 (直径11 mm、Bluesensor、Ambu、A/S 社製) は膝窩表面に貼付した。刺激強度は足関節角度0度において、単収縮トルクが最大となる電圧の1.2倍の電圧を採用した。刺激持続時間は500マイクロ秒とした (Panizza et al. 1989)。

## 測定項目

単収縮中のピークトルクを単収縮トルク、MG、LG および SOL の筋電図振幅の最大値と最小値の差を、それぞれの筋の M 波の値として算出した。また、最大随意短縮性収縮中のピークトルクを最大随意短縮性トルク、ピークトルクの5%のトルクが出現した時点を力発揮開始点とし、力発揮開始点から0.25秒間の MG、LG、SOL および TA の筋電図信号の root mean square の値を、それぞれの筋における最大随意短縮性トルク発揮時の EMG-RMS とした。EMG-RMS の分析区間はピークトルク出現時間を含むことを確認した。コンディショニング収縮前とコンディショニング収縮終了直後の単収縮トルク、最大随意短縮性収縮時のトルクおよび EMG-RMS の変化率は以下の式を用いて算出した。

$$\text{変化率 (\%)} = (\text{post} - \text{pre}) / \text{pre} \times 100$$

pre はコンディショニング収縮前の単収縮トルク、M 波、最大随意短縮性トルクおよび最大随意短縮性収縮時の EMG-RMS の値を用いた。post はコンディショニング収縮後の単収縮トルク、M 波、最大随意短縮性トルクおよび最大随意短縮性収縮時の EMG-RMS の値を用いた。なお、最大随意短縮性収縮は、各測定時間で3回行わせ、その中で最もピークトルクが大きかった試行を最大随意短縮性トルクおよび EMG-RMS の分析対象とした。

コンディショニング収縮中の発揮トルクは、コンディショニング収縮開始直後の0.5秒間の平均値を採用した。コンディショニング収縮中の EMG-RMS は、発揮トルクを分析した同一の区間の EMG-RMS を採用した。

コンディショニング収縮中のトルクの変化率は、コンディショニング収縮開始直後の0.5秒間の平均値とコンディショニング収縮終了直前の0.5秒間の平均値を用いて算出した。コンディショニング収縮中の筋電図信号の中央周波数の変化率は、コンディショニング収縮開始直後の1秒間とコンディショニング収縮終了直前の1秒間の筋電図信号を、ハミング窓を用いてフーリエ変換し算出された値を用いて算出した。変化率は以下の式を用いて算出した。

$$\text{変化率 (\%)} = (\text{end} - \text{start}) / \text{start} \times 100$$

start はコンディショニング収縮開始直後のトルクの平均値および筋電図信号の中央周波数、end はコンディショニング収縮終了直前のトルクの平均値および筋電図信号の中央周波数を用いた。

## 統計処理

6秒間条件と14秒間条件のコンディショニング収縮の発揮トルクおよび EMG-RMS を比較するため、それぞれ対応のある t 検定を行った。また、コンディショニング収縮が単収縮トルク、M 波、最大随意短縮性トルクおよび EMG-RMS に与える影響を比較するため、反復測定の実験設計の分散分析 ( $3 \times 2$ : コンディショニング収縮の時間 (6秒、14秒、control)  $\times$  計測局面 (pre、post)) を行った。交互作用が確認された場合には、コンディショニング収縮の時間条件間比較にはボンフェローニの方法による多重比較を、コンディショニング収縮前後での比較には対応のある t 検定を行った。また、6秒間条件と14秒間条件のコンディショニング収縮中のトルクの変化率および筋電図信号の中央周波数の変化率を比較するため、それぞれ対応のある t 検定を行った。有意水準はいずれも  $p < 0.05$  とした。統計量の算出は SPSS (12.0 J for Windows) を用いて行った。なお、測定結果はいずれの項目も平均値  $\pm$  標準偏差で表した。

### 2-3. 結果

6秒間条件および14秒間条件の、コンディショニング収縮開始直後の0.5秒間の発揮トルクおよび EMG-RMS を表2-1に示す。いずれの項目も、6秒間条件と14秒間条件の間で有意差はみられなかった。

6秒間条件、14秒間条件およびコントロール条件における単収縮トルクの変化を図2-4に示す。交互作用がみられたため、pre の値に対して post の値が変化していたかを確認したところ、6秒間条件および14秒間条件で有意な増加がみられた（変化率 6秒間条件：57.5 ± 24.2%、14秒間条件：91.7 ± 15.4%、コントロール条件：-3.2 ± 5.9%）。また、post の値は、14秒間条件は、6秒間条件およびコントロール条件に比べて有意に大きかった。

6秒間条件、14秒間条件およびコントロール条件の M 波の変化を図2-5に示す。MG および SOL においては交互作用、主効果ともにみられなかったが、LG のみ交互作用がみられたため、pre の値に対して post の値が変化していたかを確認したところ、14秒間条件において有意な増加がみられた（変化率 6秒間条件：4.8 ± 23.8%、14秒間条件：13.8 ± 18.2%、コントロール条件：-5.5 ± 17.0%）。また、post の値は、14秒間条件はコントロール条件と比べて有意に大きかった。

6秒間条件、14秒間条件およびコントロール条件における最大随意短縮性トルクの変化を図2-6に示す。交互作用がみられたため、pre の値に対して post の値が変化していたかを確認

認したところ、6秒間条件において有意な増加がみられた(変化率 6秒間条件：11.4 ± 7.1%、14秒間条件：5.1 ± 10.0%、コントロール条件：2.5 ± 6.0%)。また、post の値は、6秒間条件は14秒間条件およびコントロール条件と比べて有意に大きかった。

6秒間条件、14秒間条件およびコントロール条件における EMG-RMS の変化を図2-7に示す。いずれの筋においても交互作用はみられなかった。MG においては、6秒間条件および14秒間条件において pre の値に対して post の値が有意に小さかった(変化率 6秒間条件：-9.6 ± 6.3%、14秒間条件：-14.1 ± 10.2%、コントロール条件：-3.4 ± 7.9%)。SOL においては、14秒間条件において、pre の値に対して post の値が有意に小さかった(変化率 6秒間条件：-10.1 ± 11.0%、14秒間条件：-20.2 ± 16.8%、コントロール条件：-9.7 ± 10.9%)。

6秒間条件および14秒間条件のコンディショニング収縮中におけるトルクの変化率および筋電図信号の中央周波数の変化率を図2-8に示す。トルクの変化率は、14秒間条件は6秒間条件と比べて有意に大きかった(6秒間条件：-3.9 ± 6.8%、14秒間条件：-9.2 ± 10.1%)。筋電図信号の中央周波数の変化率は、MG において、14秒間条件が6秒間条件と比べて有意に大きかった(6秒間条件：-11.5 ± 12.3%、14秒間条件：-24.9 ± 13.2%)。

## 2-4. 考察

本研究では、異なる収縮時間のコンディショニング収縮がその後の単収縮トルクおよび最大随意短縮性トルクに及ぼす影響を検討した。その結果、単収縮トルクにおいては、14秒間条件および6秒間条件ともに有意に増加し、14秒間条件は6秒間条件と比べて増加が有意に大きかった。一方、最大随意短縮性トルクにおいては、14秒間条件では増加がみられず、6秒間条件のみ有意に増加した。コントロール条件においては、単収縮トルクおよび最大随意短縮性トルクの増加がみられなかったことから、この増加はコンディショニング収縮によるものだけといえる。また、6秒間条件および14秒間条件においては、コンディショニング収縮開始直後の平均トルクおよび EMG-RMS には差がみられなかったことから、コンディショニング収縮の強度は両条件で同程度であり、6秒間条件と14秒間条件の単収縮トルクおよび最大随意短縮性トルクに与える影響の違いは、両条件のコンディショニング収縮の時間の違いによるものだけといえる。

14秒間条件は、6秒間条件と比べて単収縮トルクの増加が大きかったが、最大随意短縮性トルクの増加はみられなかった。単収縮トルクと最大随意短縮性トルクでは変化が一致しなかった理由として、コンディショニング収縮の増強効果であるミオシン軽鎖のリン酸化と減弱効果である筋疲労のバランスの影響が考えられる。コンディショニング収縮の時間の増加に伴いリン酸濃度の増加は大きくなるが (Moore et al. 1984)、同時に筋疲労も生じる (Rassier and

MacIntosh 2000 ; Hamada et al. 2003)。単収縮は、最大随意短縮性収縮と比べて増強効果であるリン酸濃度増加の効果が非常に大きいといわれている (Abbate et al. 2000 ; Baudry et al. 2004 ; 2005 ; 2008)。実際、本研究の6秒間条件においては、最大随意短縮性トルクの増加は11.4%であり、一方、単収縮トルクの増加は57.5%であった。また、14秒間条件においては、単収縮トルクの増加は91.7%であった。したがって、単収縮トルクにおいては、増強効果が大きくコンディショニング収縮の時間増加による減弱効果増大の影響が小さかったため、14秒間条件は6秒間条件と比べて増加が大きかったと考えられる。一方、最大随意短縮性トルクは高発火頻度での収縮であり、高発火頻度での収縮は増強効果が非常に小さいため (Abbate et al. 2000)、減弱効果の影響が相対的に大きいと考えられる。それゆえ、14秒間条件は減弱効果が増強効果を相殺してしまい、発揮トルクの増加がみられなかったと考えられる。本研究では、コンディショニング収縮開始直後とコンディショニング収縮終了直前のトルクおよびMGの筋電図信号の中央周波数は、14秒間条件が6秒間条件に比べて低下が有意に大きかった。筋電図信号の中央周波数の低下は筋疲労が生じていることを表している (Viitasalo and Komi 1977 ; Hägg 1992 ; Farina 2004)。これらの結果から、14秒間条件は6秒間条件と比べてコンディショニング収縮による筋疲労が大きかったといえる。この筋疲労の程度の差が、最大随意短縮性トルクにおいてはより強く反映され、14秒間条件の増強効果を相殺したと考えられる。

加えて、単収縮と最大随意短縮性収縮の間には、トルク発揮の過程において中枢神経系を

介すか介さないかの違いが存在する。本研究では、コンディショニング収縮後に、MG および SOL の M 波は変化せず、LG の M 波が増加した。また、6秒間条件と14秒間条件の MG および14秒間条件の SOL において、EMG-RMS の有意な低下がみられた。M 波は運動神経の軸索を刺激した時に計測される活動電位のことであり、M 波の増加は、神経筋接合部から末梢のいずれかで活動電位伝播促進が起こっていると考えられる (Calder et al. 2005)。

MG および SOL においては M 波の変化がみられず EMG-RMS の有意な低下がみられたことから、コンディショニング収縮によって神経筋接合部より中枢側での疲労、つまり中枢性疲労 (Gandevia 1996) が生じたと考えられる。LG においては、14秒間条件の M 波が有意に増加しているにもかかわらず EMG-RMS が増加していなかった。EMG-RMS は神経筋接合部の近位と遠位のインパルスを反映しており、神経筋接合部より遠位の活動電位伝播促進を表す M 波の増加がみられたにもかかわらず EMG-RMS が変化していないことから、神経筋接合部より近位での何らかの機能低下、つまり14秒間の条件の LG においても中枢性疲労が生じていた可能性がある。単収縮は  $\alpha$  運動神経の軸索を人工的に電気刺激することで誘発されるため、中枢性疲労は単収縮には影響を与えないが、随意収縮には影響を与える。したがって、最大随意収縮においては、コンディショニング収縮の時間が増加し中枢性疲労が生じた時には増強効果が打ち消されてしまうと考えられる。

これらのことから、最大随意短縮性トルクは単収縮トルクの増加が大きくなる条件で増加するわけではないことが明らかになった。その理由として、最大随意短縮性トルクにおいては増

強効果が小さいことおよび中枢性疲労を反映してしまうことが考えられた。したがって、最大随意短縮性トルクを増加させるためには、単収縮トルクの増加が最大になる時間より短い時間でコンディショニング収縮を行う必要があることが示唆された。

## 2-5. 要約

本章では、6秒間条件および14秒間条件でコンディショニング収縮を行わせたところ、14秒間条件は単収縮トルクの増加が大きかったにも関わらず、最大随意短縮性トルクは増加しなかった。一方、6秒間条件は14秒間条件と比べて単収縮トルクの増加が小さかったにも関わらず、最大随意短縮性トルクが有意に増加した。これは、最大随意短縮性トルクは単収縮トルクと比べて筋疲労の影響が相対的に大きく、且つ、中枢性疲労も生じることから、14秒間条件では減弱効果が増強効果を相殺したためだと考えられる。これらのことから、最大随意短縮性トルクを増加させるためには、単収縮トルクの増加が最大になる時間より短い時間でコンディショニング収縮を行う必要があることが示唆された。

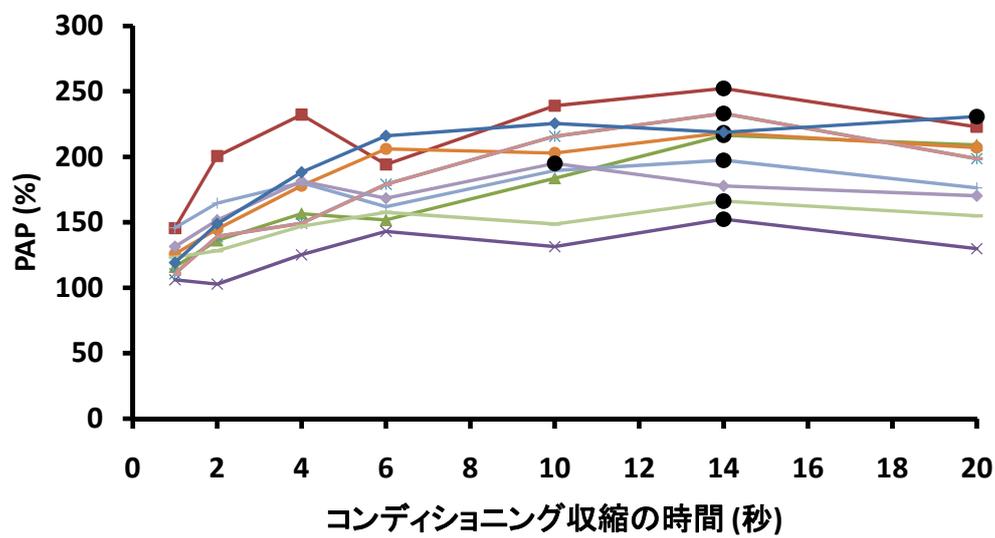


図2-1 各被験者のコンディショニング収縮の時間と PAP の程度の関係  
 ●は各被験者の PAP の程度が最大になった時間を示す

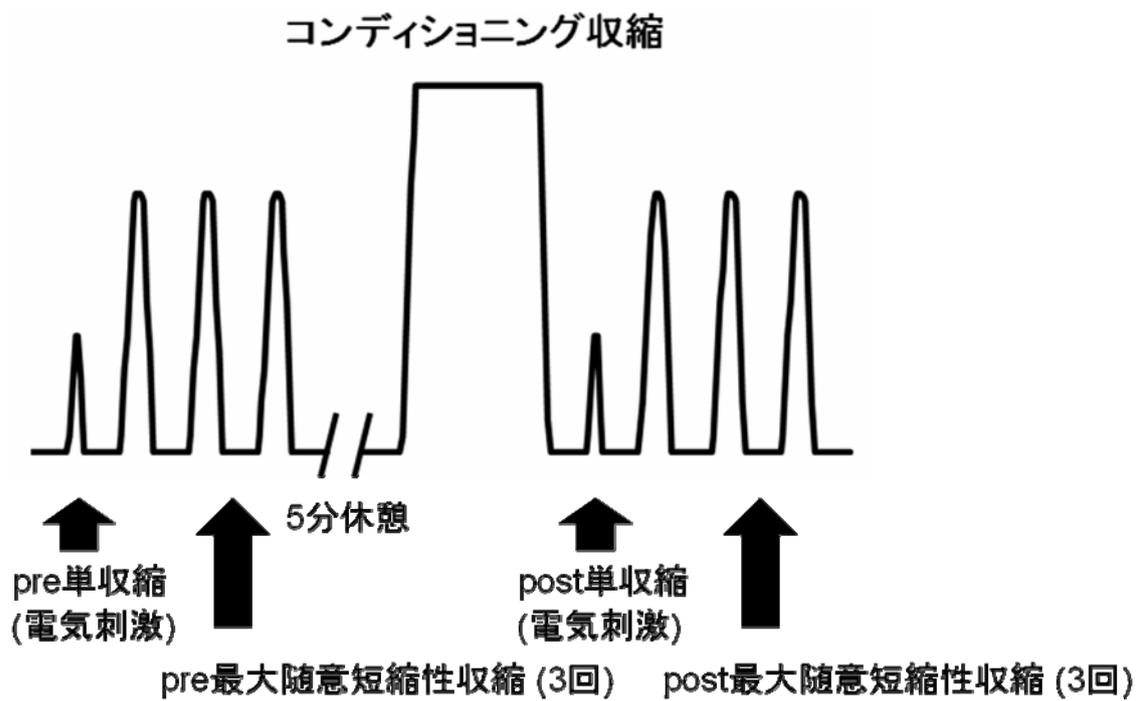


図2-2 コンディショニング収縮前後の  
単収縮および最大随意短縮性収縮のトルク測定の流れ

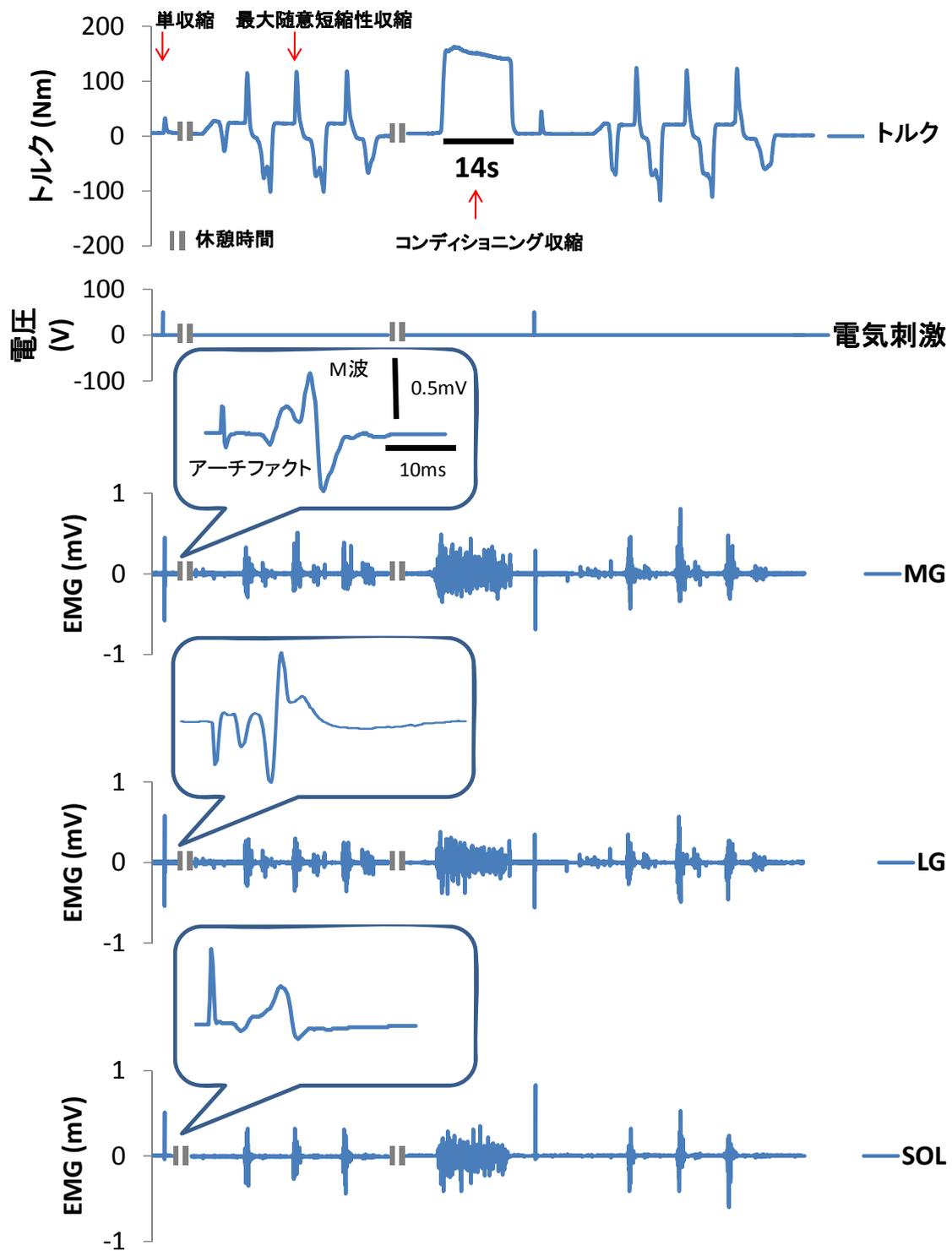


図2-3 トルクおよび筋電図波形の典型例

表2-1 コンディショニング収縮中の発揮トルクおよび EMG-RMS の比較

	トルク (Nm)	MG (mV)	LG (mV)	SOL (mV)	TA (mV)
6秒間	155.7 ± 21.6	0.27 ± 0.12	0.29 ± 0.17	0.21 ± 0.10	0.04 ± 0.02
14秒間	152.2 ± 19.1	0.29 ± 0.09	0.29 ± 0.13	0.21 ± 0.06	0.04 ± 0.01

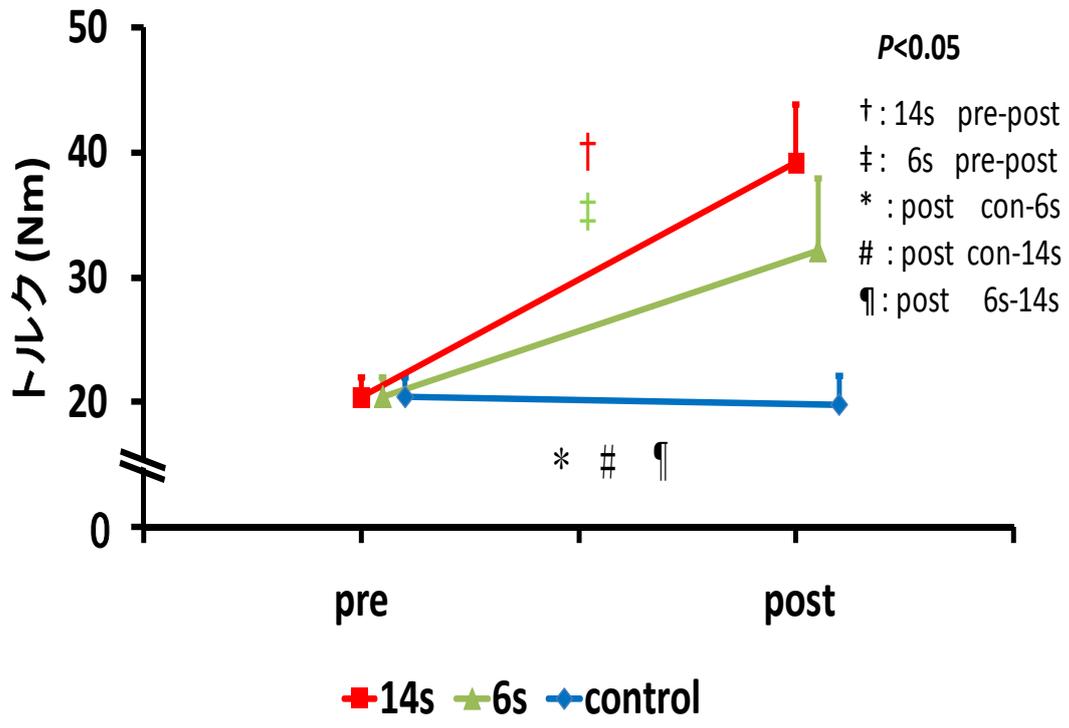


図2-4 コンディショニング収縮前後の単収縮トルクの変化

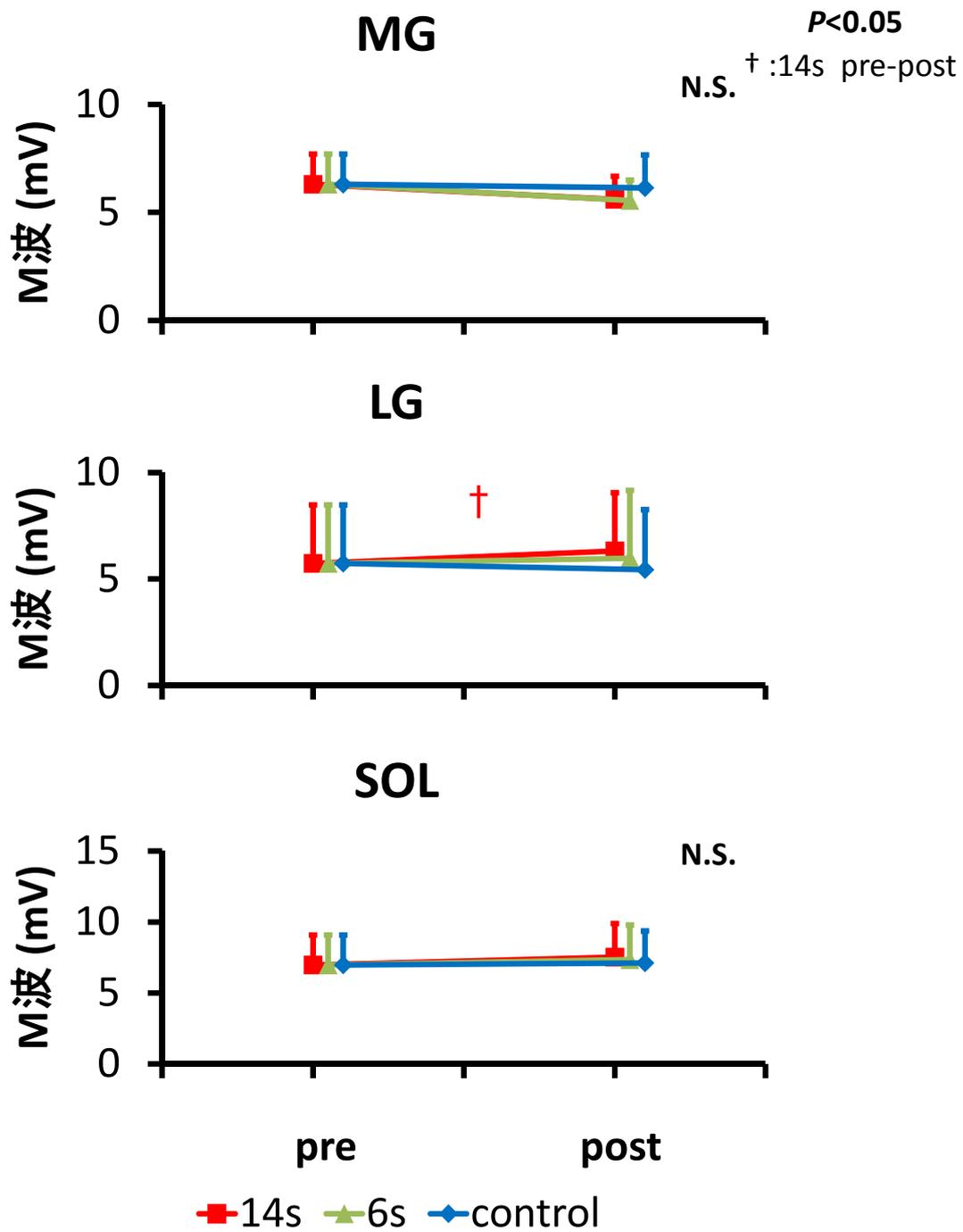


図2-5 コンディショニング収縮前後の M 波の変化

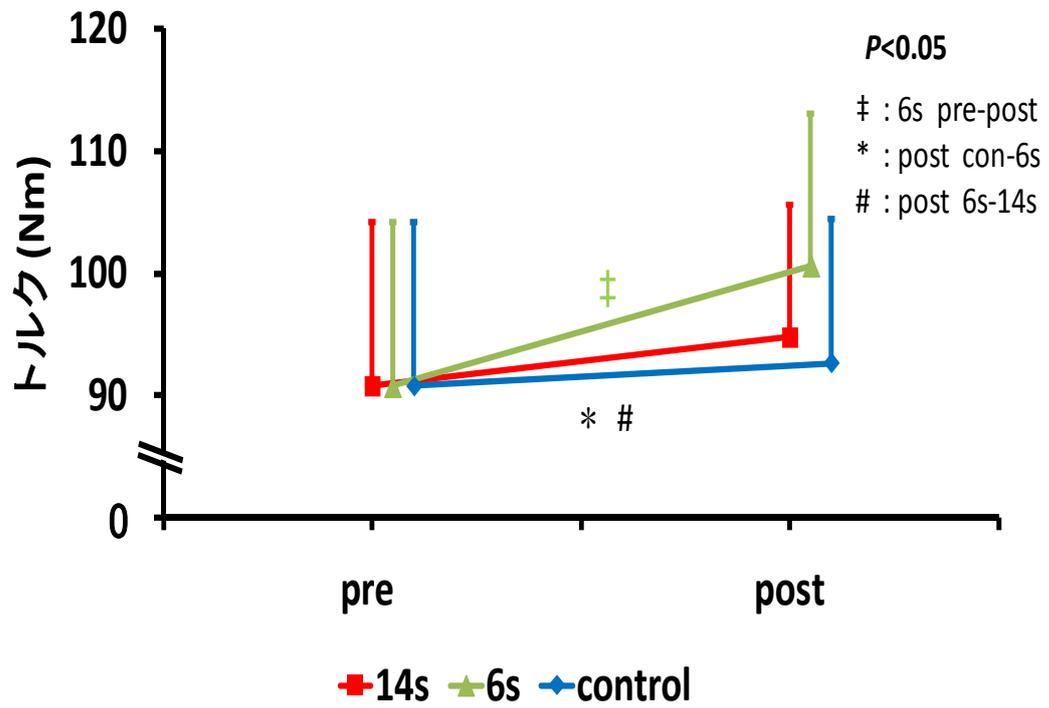


図2-6 コンディショニング収縮前後の最大随意短縮性トルクの変化

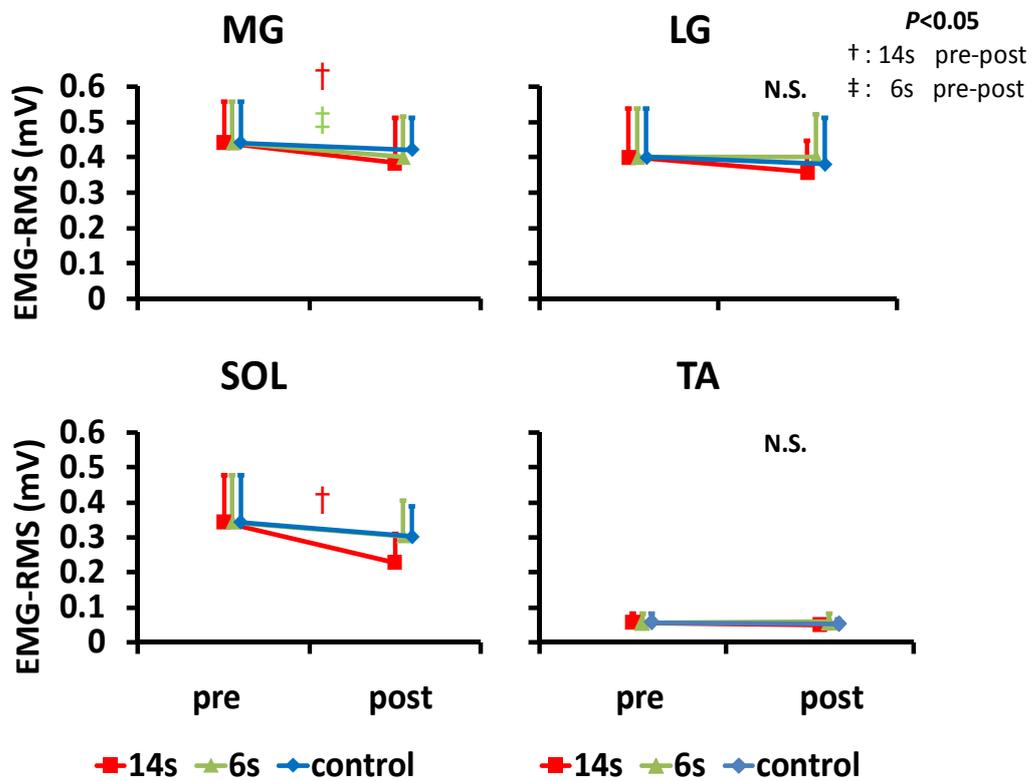


図2-7 コンディショニング収縮前後の EMG-RMS の変化

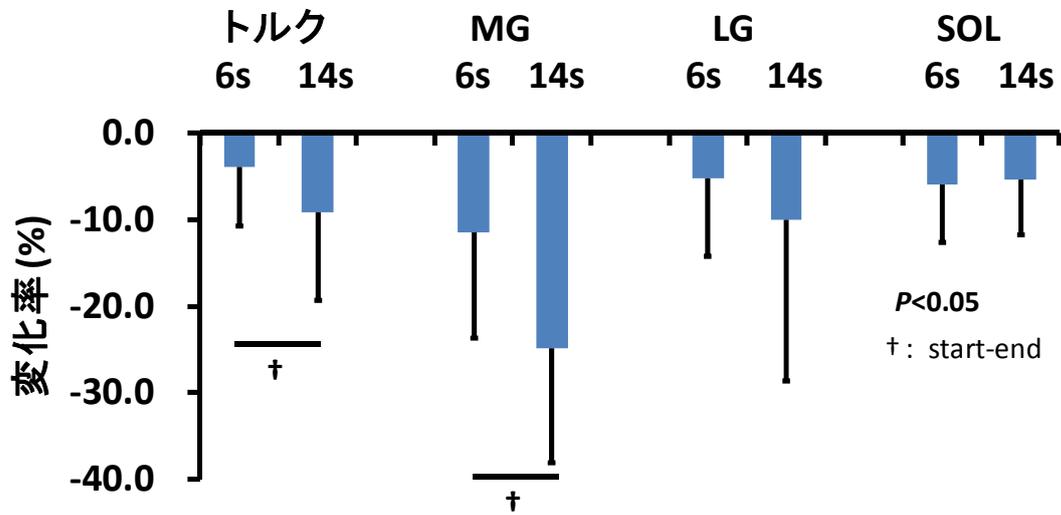


図2-8 コンディショニング収縮中の発揮トルクおよび筋電図の中央周波数の変化率

## 第 3 章 コンディショニング収縮の強度が単収縮トルクおよび最大随意短縮性トルクに与える影響

### 3-1. 目的

Vandervoort et al. (1983) は、コンディショニング収縮の強度が単収縮トルクに与える影響を検討し、収縮強度の増加に伴い単収縮トルクが増加したと報告している。また、最大随意短縮性トルクを増加させるためには筋疲労を抑制することが重要であると考えられる。このことから考えると、最大下の収縮強度においては筋疲労が抑えられるため、最大下の収縮強度条件においても最大随意短縮性トルクの増加が生じる可能性がある。そこで本研究では、コンディショニング収縮の強度が、その後の単収縮トルクおよび最大随意短縮性トルクに与える影響を検討することを目的とした。

### 3-2. 方法

#### 被験者

被験者は健常な成人男性10名とした。被験者の年齢、身長および体重はそれぞれ  $23.6 \pm 2.5$  歳、 $171.9 \pm 4.1$  cm、 $64.0 \pm 6.1$  kg (平均値  $\pm$  標準偏差) であった。実験に先立ち、被験者に本研究の目的、試行、危険性および被験者の権利について説明を行った上、書面で実験参加の同意を得た。また、実験実施に際して、早稲田大学の人を対象とする研究に関する倫理委員会により承認を得た。

#### 実験手順

測定対象筋群は右足関節底屈筋群とした。被験者には、等速性筋力計 (CON-TREX、CMV AG、Switzerland) 上で、膝関節角度0度 (膝関節完全伸展位) で仰臥位をとらせた。非伸縮性ストラップを用いて大腿部を筋力計のシート部に固定し、足部を筋力計のアタッチメント部に固定した。足部の固定に際して、足関節の回転中心と筋力計の回転中心が一致するように留意した。足関節を固定した後、電気刺激により単収縮トルクを誘発し、得られた値を pre の単収縮トルクの値とした。その後、被験者には、筋力計のアタッチメント部に足部を固定

した状態で、本実験の試行である最大随意短縮性収縮を含む十分なウォーミングアップを行  
わせた。その後、ウォーミングアップによる PAP の影響を取り除くため、10分以上の休憩時  
間をとった。休憩後、電気刺激を行い、pre の単収縮トルクとの差が10%以内であることを確  
認した後に、被験者に最大随意短縮性収縮を3回行わせ、得られた値を pre の最大随意短  
縮性トルクとした。最大随意短縮性収縮を行う前に、「全力で、できるだけ速く」という指示を与  
えた。その後、3回の最大随意短縮性収縮による PAP の影響を取り除くため、5分以上の休  
憩時間をとった。休憩後、電気刺激を行い、pre の単収縮トルクとの差が10%以内であること  
を確認した後に、40%、60%、80%および100%MVC 条件のコンディショニング収縮を行わせ  
た。コンディショニング収縮の収縮時間はいずれの条件も6秒間とした。コンディショニング収  
縮終了直後に電気刺激を行い、得られた値を post の単収縮トルク、また、3回の最大随意短  
縮性収縮を行わせ、得られた値を post の最大随意短縮性トルクとした。その後、試行によっ  
て生じた PAP の影響を取り除くため、10分以上の休憩時間をとった。休憩後、電気刺激を  
行い、pre の単収縮トルクとの差が10%以内であることを確認して次の試行を行わせた。各条  
件の順番はランダムで行った。

#### 足関節底屈トルクの測定

コンディショニング収縮として行う最大随意等尺性足関節底屈および単収縮は、足関節角

度0度（解剖学的正位）で行なわせた。最大随意短縮性収縮は、可動域を足関節背屈15度から底屈30度に設定し、180度/秒の角速度で行わせた。筋力計により得られた信号は、A/D変換器（PowerLab/16SP、ADInstruments 社製）を用いてサンプリング周波数4 kHz でデジタル変換した後、パーソナルコンピュータに記録した。

#### 筋電図の記録

表面筋電図法を用いて、MG、LG、SOL および TA から筋電図信号を計測した。筋腹にブリアンプを内蔵した縦10 mm、横1 mm、電極間距離10 mm の Ag 電極（gain：1000、バンドパスフィルタ：20 - 450 Hz DE-2.3、Delsys 社、USA）を貼付し、双曲誘導法を用いて測定を行った。不関電極は左足外果に貼付した。筋電図計（The Bagnoli 8 EMG EMG Systems, Delsys 社製、Boston Massachusetts, U.S.A）により得られた信号は A/D 変換器を用いてサンプリング周波数4 kHz でデジタル変換した後に、パーソナルコンピュータに記録した。モーションアーティファクトを除去するため、ソフトウェア上で20 Hz のローカットフィルタにより平滑化したデータを分析した。

#### 電気刺激の記録

アイソレータ (SS2046、日本光電社製) に接続した電気刺激装置 (SEN-3301、日本光電社製) を用いて脛骨神経の経皮刺激を行った。刺激電極の陽極 (4 cm×5 cm、VIASYS 社製) は膝蓋骨上部に、陰極 (直径11 mm、Bluesensor、Ambu、A/S 社製) は膝窩表面に貼付した。刺激強度は足関節角度0度において、単収縮トルクが最大となる電圧の1.2倍の電圧を採用した。刺激持続時間は500マイクロ秒とした。

#### 測定項目

単収縮中のピークトルクを単収縮トルク、MG、LG および SOL の筋電図振幅の最大値と最小値の差を、それぞれの筋の M 波の値として算出した。また、最大随意短縮性収縮中のピークトルクを最大随意短縮性トルク、ピークトルクの5%のトルクが出現した時点を力発揮開始点とし、力発揮開始点から0.25秒間の MG、LG、SOL および TA の筋電図信号の root mean square の値を、それぞれの筋における最大随意短縮性トルク発揮時の EMG-RMS とした。EMG-RMS の分析区間はピークトルク出現時間を含むことを確認した。コンディショニング収縮前とコンディショニング収縮終了直後の単収縮トルク、最大随意短縮性収縮時のトルクおよび EMG-RMS の変化率は以下の式を用いて算出した。

$$\text{変化率 (\%)} = (\text{post} - \text{pre}) / \text{pre} \times 100$$

pre はコンディショニング収縮前の単収縮トルク、M 波、最大随意短縮性トルクおよび最大随

意短縮性収縮時の EMG-RMS の値を用いた。post はコンディショニング収縮後の単収縮トルク、M 波、最大随意短縮性トルクおよび最大随意短縮性収縮時の EMG-RMS の値を用いた。なお、最大随意短縮性収縮は、各測定時間で3回行わせ、その中で最もピークトルクが大きかった試行を最大随意短縮性トルクおよび EMG-RMS の分析対象とした。

#### 統計処理

40%、60%、80%および100%MVC 条件のコンディショニング収縮が単収縮トルク、M 波、最大随意短縮性トルクおよび EMG-RMS に与える影響を比較するため、反復測定の実験設計の分散分析 (4 × 2 : コンディショニング収縮の強度 (40%、60%、80%、100%MVC) × 計測局面 (pre、post)) を行った。交互作用が確認された場合には、コンディショニング収縮の強度条件間比較にはボンフェローニの方法による多重比較を、コンディショニング収縮前後での比較には対応のある t 検定を行った。有意水準はいずれも  $p < 0.05$  とした。統計量の算出は SPSS (12.0 J for Windows) を用いて行った。なお、測定結果はいずれの項目も平均値 ± 標準偏差で表した。

### 3-3. 結果

40%、60%、80%および100%MVC 条件における単収縮トルクの変化を図3-1に示す。交互作用がみられたため、pre の値に対して post の値が変化していたかを確認したところ、全ての条件において有意な増加がみられた (変化率 40%MVC 条件： $13.5 \pm 7.3\%$ 、60%MVC 条件： $31.9 \pm 14.2\%$ 、80%MVC 条件： $61.8 \pm 17.6\%$ 、100%MVC 条件： $72.8 \pm 14.5\%$ )。また、post の単収縮トルクは、40%MVC 条件と60%MVC 条件および60%MVC 条件と80%MVC 条件それぞれにおいて有意な差がみられたが、80%MVC 条件と100%MVC 条件においては差がみられなかった。

40%、60%、80%および100%MVC 条件における M 波の変化を図3-2に示す。いずれの筋においても交互作用はみられなかった。SOL のみ主効果がみられたため、pre の値に対して post の値が変化していたかを確認したところ、全ての条件において有意な増加がみられた (変化率 40%MVC 条件： $10.0 \pm 7.5\%$ 、60%MVC 条件： $17.7 \pm 17.8\%$ 、80%MVC 条件： $9.1 \pm 8.1\%$ 、100%MVC 条件： $4.5 \pm 1.8\%$ )。

40%、60%、80%および100%MVC 条件における最大随意短縮性トルクの変化を図3-3に示す。交互作用がみられたため、pre の値に対して post の値が変化していたかを確認したところ、80%MVC 条件と100%MVC 条件において有意な増加がみられた (変化率 40%MVC 条件： $-1.8 \pm 8.0\%$ 、60%MVC 条件： $1.3 \pm 4.8\%$ 、80%MVC 条件： $6.9 \pm 5.5\%$ 、

100%MVC 条件：5.2 ± 6.8%)。また、post の80%MVC 条件と100%MVC 条件の値には差がみられなかった。

40%、60%、80%および100%MVC 条件における EMG-RMS の変化を図3-4に示す。

MG において、交互作用がみられたため、pre の値に対して post の値が変化していたかを確認したところ、100%MVC 条件のみ、有意に低下していた (変化率 40%MVC 条件：2.6 ± 11.0%、60%MVC 条件：0.4 ± 11.3%、80%MVC 条件：-2.3 ± 16.1%、100%MVC 条件：-7.6 ± 7.7%)。LG および SOL については交互作用および主効果はみられなかった。

#### 3-4. 考察

本研究では、コンディショニング収縮の収縮強度がその後の単収縮トルクおよび最大随意短縮性トルクに及ぼす影響を検討した。その結果、80%MVC 条件および100%MVC 条件において最大随意短縮性トルクが増加したことから、最大下の収縮強度を用いたコンディショニング収縮条件においても最大随意短縮性トルクが増加することが明らかになった。

80%MVC 条件で最大随意短縮性トルクが増加した理由として、コンディショニング収縮による筋疲労を抑えられたことが挙げられる。本研究において、80%MVC 条件では、コンディショニング収縮の前後で MG の M 波および EMG-RMS は変化しなかった。一方、100%MVC 条件では、MG の M 波が低下せず EMG-RMS が低下したことから、中枢性疲労が生じていたと考えられる。中枢性疲労は随意収縮に対しては減弱効果を持っている。これらのことから、80%MVC 条件では、コンディショニング収縮による減弱効果を抑えることができたため、最大随意短縮性トルクの増加が起こったと考えられる。また、SOL においては全ての収縮強度条件で M 波の有意な増加がみられたが、本研究においては最大随意短縮性収縮時の EMG-RMS の値には変化がなかったため、SOL の M 波の増加が単収縮トルクの増加に貢献した可能性はあるが、最大随意短縮性トルクに与えた影響は小さかったと考えられる。

加えて、80%MVC 条件で最大随意短縮性トルクが増加した理由として、増強効果が100%MVC 条件と同程度であったことが挙げられる。本研究では、収縮強度の増加に伴い単

収縮トルクの増加が大きくなったが、100%MVC は80%MVC と比較して増加の傾向がみられたものの ( $p = 0.07$ )、増加の程度に有意な差はみられなかった。これは、コンディショニング収縮による増強効果は、ある収縮強度から鈍化していくことを示唆している。PAP の程度を大きくするには、PAP のメカニズム (Sweeney et al. 1993) から、速筋線維を含む全ての筋線維を活動させることが重要だと考えられる。また、筋線維の動員は、第一背側骨間筋のような小さな筋では約50%MVC、三角筋のような大きな筋では約80%MVC でほぼ全ての筋線維を動員させ、それ以上の収縮強度は主に発火頻度で調節されると報告されている (De Luca et al. 1982)。足関節においては、前脛骨筋で約90%MVC (Van Cutsem et al. 1997)、ヒラメ筋では約95%MVC (Oya et al. 2009) まで動員が続くと報告されている。これらの報告から、本研究の対象筋群である足関節底屈筋群において、コンディショニング収縮中の筋線維の動員は、80%MVC では最大ではないと考えられる。しかし、80%MVC のコンディショニング収縮においても、多くの筋線維が動員されており、100%MVC のコンディショニング収縮に近い増強効果を引き出すことができたことから、80%MVC 条件でも最大随意短縮性トルクが増加したと考えられる。

最大随意短縮性トルクを増加させるためには、コンディショニング収縮による増強効果を生じさせるため高強度の収縮が必要だと考えられる。しかしながら、最大下の収縮強度であっても、筋疲労が抑えられることおよび増強効果はある収縮強度で鈍化する可能性があることから、80%MVC 以上であれば、最大下の収縮強度であっても最大随意短縮性トルクの増加が生じ

る可能性がある。

### 3-5. 要約

本研究では、40%、60%、80%および100%MVC 条件の4条件でコンディショニング収縮を行わせたところ、収縮強度の増加に伴い単収縮トルクの増加の程度も大きくなった。しかし、80%MVC 条件と100%MVC 条件の間では、増加の傾向がみられたものの、増加の程度に有意な差はみられなかった。一方、最大随意短縮性トルクにおいては、80%MVC 条件と100%MVC 条件において増加がみられた。これは、80%MVC 条件はコンディショニング収縮による減弱効果を抑えられたこと、且つ、増強効果が100%MVC 条件と同程度であったことが理由として考えられる。これらのことから、80%MVC 以上の収縮強度であれば、最大下の収縮強度であっても、最大随意短縮性トルクの増加が生じる可能性があることが示唆された。

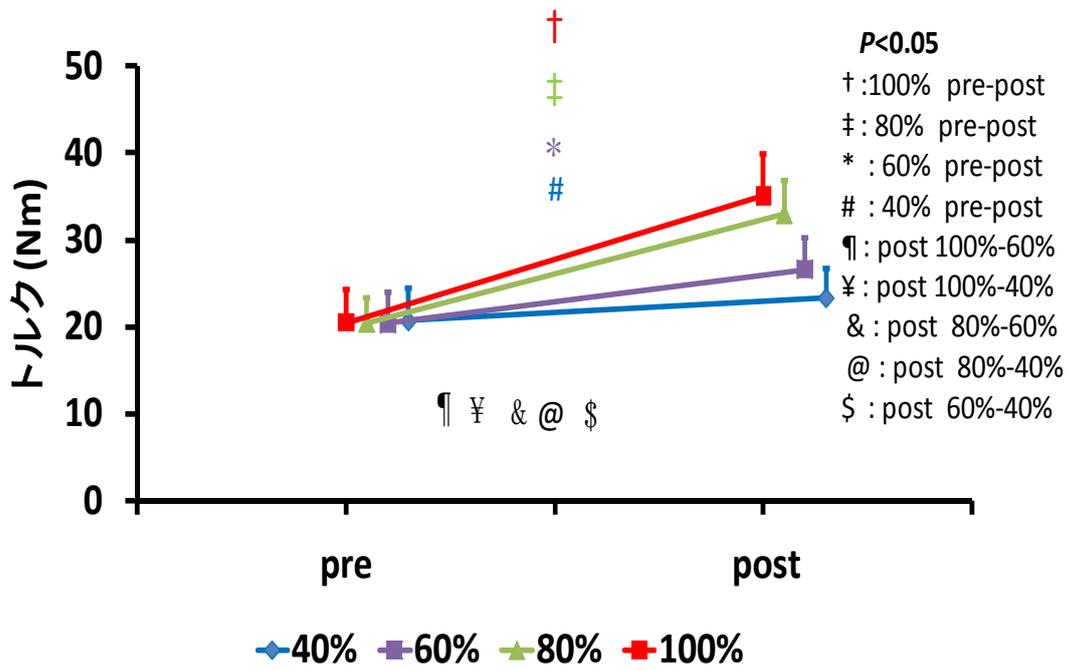


図3-1 コンディショニング収縮前後の単収縮トルクの変化

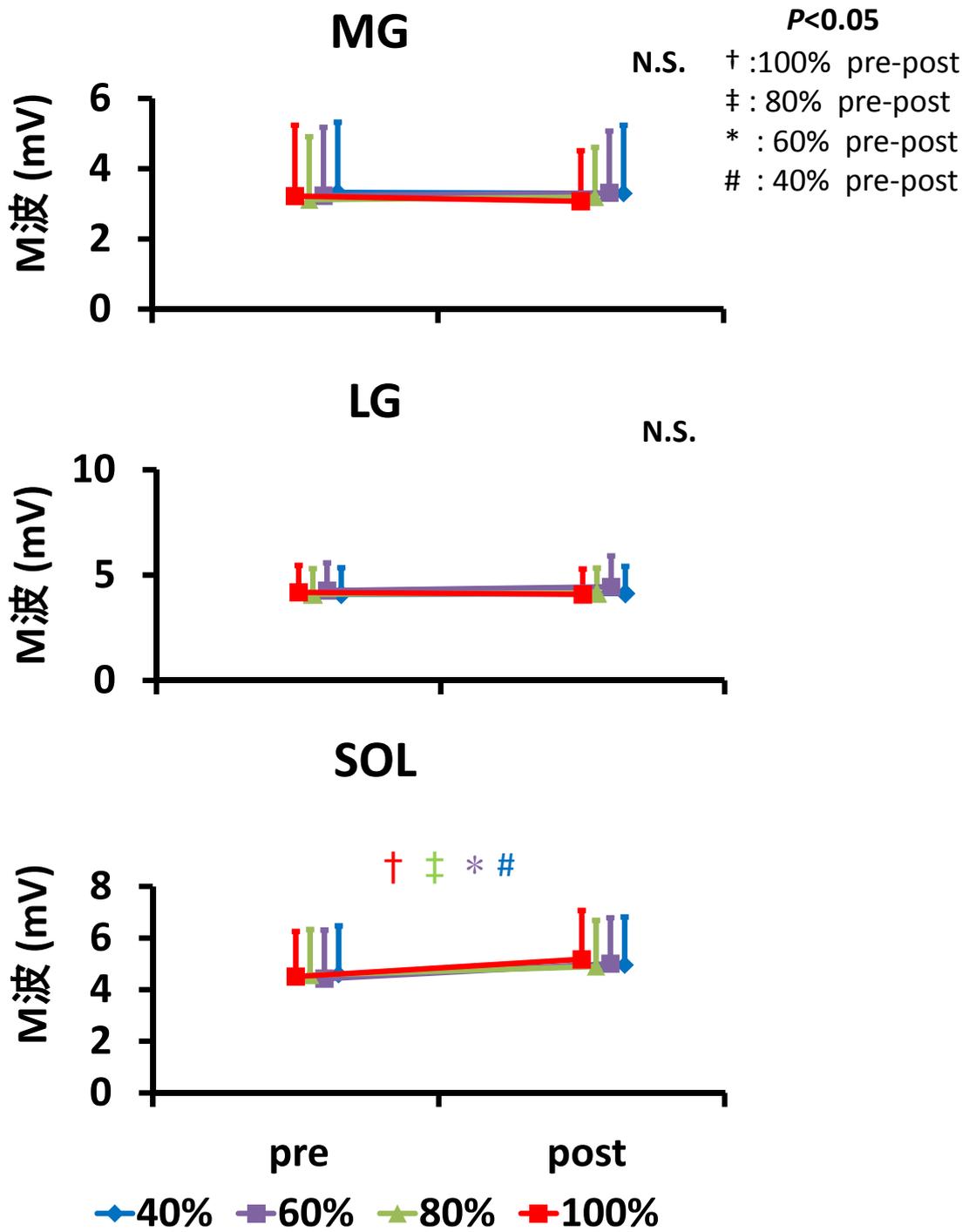


図3-2 コンディショニング収縮前後の M 波の変化

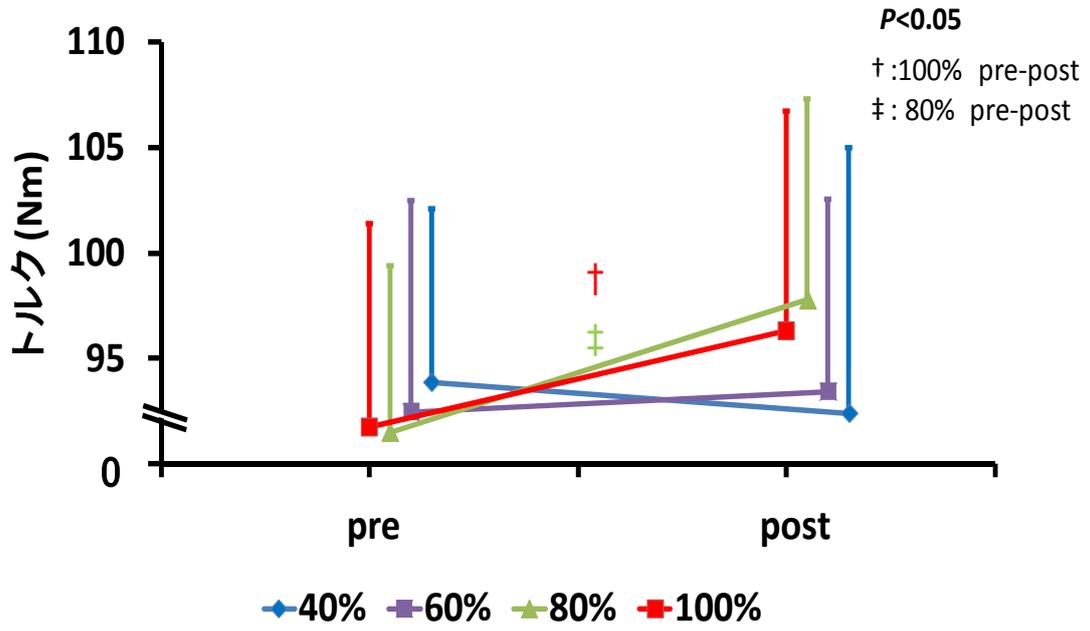


図3-3 コンディショニング収縮前後の最大随意短縮性トルクの変化

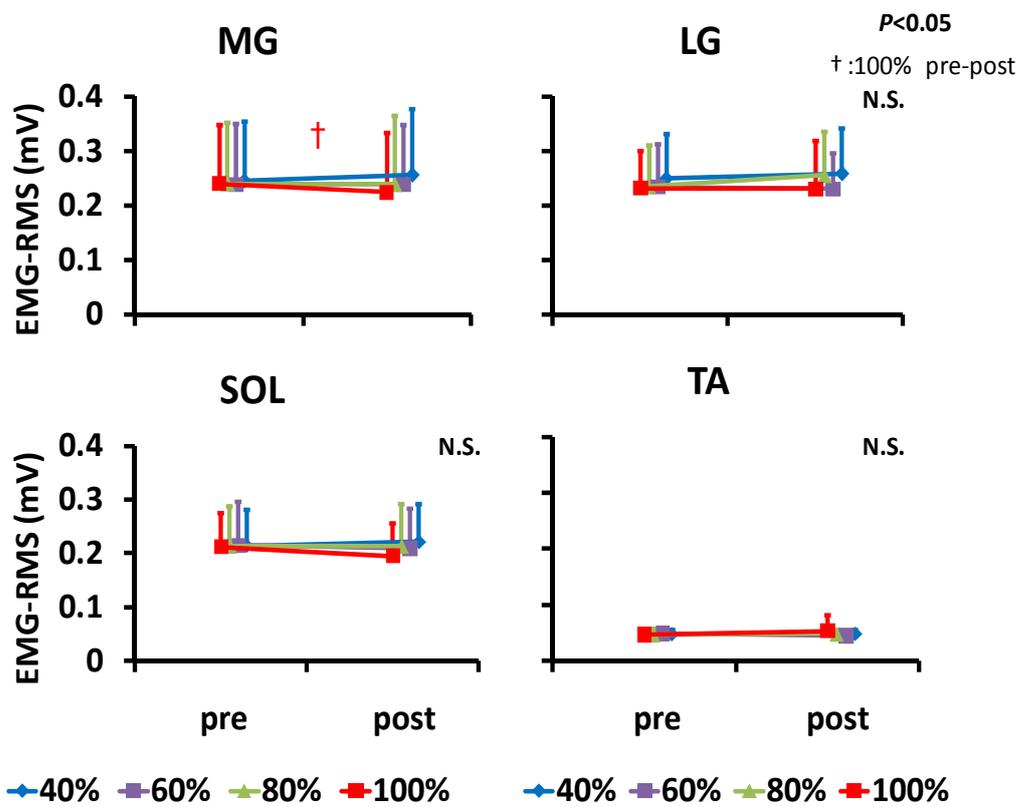


図3-4 コンディショニング収縮前後の EMG-RMS の変化

## 第4章 総括論議

本研究では、コンディショニング収縮の時間および強度がその後の単収縮トルクおよび最大随意短縮性トルクに与える影響を検討した。その結果、単収縮トルクと最大随意短縮性トルクはコンディショニング収縮に対して異なる変化を示し、最大随意短縮性トルクは単収縮トルクが最大になる条件で必ずしも増加するわけではないことが明らかになった。また、最大随意短縮性トルクを増加させるためには、コンディショニング収縮によって生じる筋疲労を抑えることが重要であることが示唆された。

本研究では、14秒間条件は、6秒間条件と比べて単収縮トルクの増加が大きかったにもかかわらず、最大随意短縮性トルクの増加はみられなかった。これは、コンディショニング収縮による筋疲労の影響が大きいことが原因として考えられる。コンディショニング収縮により最大随意短縮性収縮時の関節角速度が増加したと報告している研究 (Baudry and Duchateau 2007b) は、コンディショニング収縮として6秒間の最大随意等尺性収縮を採用している。一方、関節角速度の増加が起らなかったと報告している研究 (Gossen and Sale 2000) では、10秒間の最大随意等尺性収縮を採用している。これらのことを考慮すると、Gossen and Sale (2000) の報告ではコンディショニング収縮の時間が長く、筋疲労が増強効果を相殺してしまったことから、最大随意短縮性収縮時の関節角速度が増加しなかったと考えられる。

また、これらの研究間の異なる点として対象部位が挙げられる。増強がみられた報告では、

Baudry and Duchateau (2007a ; 2007b) は母指内転筋、Miyamoto et al. (in press) および本研究 は足関節底屈筋群を対象としている。一方、増強がみられなかった Gossen and Sale (2000) の報告では、膝関節伸展筋群を対象としている。これらの部位の違いとして筋線維組成が挙げられる。各筋の遅筋線維の割合はそれぞれ、母指内転筋は約80%、足関節底屈筋群は腓腹筋が約50%、ヒラメ筋が約90%、膝関節伸展筋群は大腿直筋が約30%、外側広筋が約40%、内側広筋が約50%となっている (Johnson et al. 1973)。それゆえ、母指内転筋と足関節底屈筋群は速筋線維に比べて遅筋線維が多い筋、一方、膝関節伸展筋群は遅筋線維と速筋線維が同程度含まれている筋といえる。速筋線維は遅筋線維と比べて増強効果が大きく (Hamada et al. 2000)、速筋線維は遅筋線維に比べて筋疲労、すなわち減弱効果が生じやすい (Burke 1975)。増強効果が大きい速筋線維が遅筋線維と同程度含まれている筋を対象とした報告 (Gossen and Sale 2000) では、最大随意短縮性収縮時の関節角速度が増加せず、増強効果が小さい遅筋線維の割合が多い筋を対象とした本研究では最大随意短縮性トルクの増加がみられたことから、最大随意短縮性収縮に関しては、筋線維組成の違いによる増強効果の違いよりも、筋疲労耐性の違いによる減弱効果の違いが強く反映される可能性がある。

加えて、最大随意短縮性トルクの増加は、コンディショニング収縮の効果検証課題である最大随意短縮性収縮を行うタイミングの影響を受けると考えられる。コンディショニング収縮によるミオシン軽鎖のリン酸化、すなわち増強効果は、コンディショニング収縮直後に最大になり、

その後指数関数的に低下していく (Vandervoort et al. 1983 ; Klein et al. 2001)。本研究では単収縮トルクの増加が最大と報告されているコンディショニング収縮の直後に最大随意短縮性トルクを計測し、その結果、増加がみられた。一方、コンディショニング収縮の一分後において、最大随意短縮性トルクの増加がみられた報告も存在する (Baudry and Duchateau 2007b ; Miyamoto et al. in press)。筋疲労はコンディショニング収縮直後が最大であり、その後徐々に低下していく (Hamada et al. 2003)。それゆえ、筋疲労が生じないような短時間、且つ、低強度のコンディショニング収縮を行えば、増強効果が最大であるコンディショニング収縮直後に最大随意短縮性トルクの増加がみられる。一方、筋疲労が生じるが増強効果も大きくなる高強度、且つ、長時間のコンディショニング収縮を行えば増強効果は減少するが、筋疲労も低下する数分後に残存した増強効果により最大随意短縮性トルクが増加する可能性がある。それゆえ今後は、コンディショニング収縮の条件を変えた時の、最大随意短縮性トルクの経時変化を観察する必要がある。

さらに、本研究では、コンディショニング収縮前後で最大随意短縮性収縮時の筋電図振幅の低下や単収縮時の M 波の増加といった神経系の変化もみられた。本研究においては、第2章では14秒間の最大努力条件の LG、第3章では6秒間の全ての収縮強度条件の SOL において M 波の有意な増加がみられた。これまでは、筋活動後には M 波が増加するという報告 (Hicks et al. 1989 ; Hamada et al. 2000 ; 2003) と、筋活動を行っても M 波は変化しないという報告 (Baudry et al. 2004 ; Shima et al. 2006) があり、一致した見解がえられて

いない。それゆえ、コンディショニング収縮による M 波の増加の筋間差については現時点では不明である。

また、本研究では、コンディショニング収縮後に最大随意短縮性収縮時の筋電図振幅の低下がみられた。過去の研究においても、筋電図振幅が低下したという報告 (Miyamoto et al. in press) が存在することから、コンディショニング収縮を行うことによって、PAP のメカニズムであるミオシン軽鎖のリン酸化のような筋中に生じる変化だけでなく、大脳皮質運動野や脊髄のモトニューロンプールの興奮性の低下、すなわち中枢性疲労が生じる可能性がある。中枢性疲労は、単収縮には影響を及ぼさないが随意収縮には影響を及ぼすことから、本研究の結果である単収縮トルクと最大随意短縮性トルクの変化が一致しなかった原因の一つとして考えられる。筋活動の時間の増加に伴い中枢性疲労は増加することから、最大随意収縮の場合は、中枢性疲労が大きくなるように、時間や強度がある一定の値を超えないように制御する必要がある。一方、単収縮の場合は、中枢性疲労の影響を受けないため、最大随意短縮性収縮の場合と比べて長い時間および高い強度でコンディショニング収縮を行うことが出来ると考えられる。これらの結果から、動的な足関節底屈動作のパフォーマンスを高めるためには、コンディショニング収縮として6秒間程度、且つ、80%MVC 相当の強度で等尺性足関節底屈を行うことが望ましいことが明らかになった。

また、これまでの研究において、コンディショニング収縮は最大随意等尺性収縮のトルクの立ち上がり勾配を増加させることが報告されていることから (Baudry and Duchateau

2007a)、2章と3章の実験結果を用いて、コンディショニング収縮前後の最大随意短縮性収縮中のトルク波形を微分することにより、トルクの立ち上がり勾配の変化を検討したが、有意な変化はみられなかった(変化率 14秒間条件:  $96.1 \pm 16.6\%$ 、6秒間条件:  $97.4 \pm 12.2\%$ 、コントロール条件:  $91.0 \pm 9.2\%$ 、40%MVC 条件:  $95.3 \pm 20.9\%$ 、60%MVC 条件:  $121.1 \pm 55.1\%$ 、80%MVC 条件:  $100.5 \pm 19.9\%$ 、100%MVC 条件:  $95.3 \pm 21.9\%$ )。その理由として、トルクの立ち上がり勾配には個人内でのばらつきが大きかったこと、また、測定に使用した筋力計の設定により、足部アタッチメントと足部の動きにずれが生じる可能性があることから、トルクの立ち上がり勾配を正確に測定できていなかった可能性が考えられる。コンディショニング収縮により単収縮張力の立ち上がり勾配が増加すること (Vandenboom et al. 1993 ; 1995 ; 1997) を考慮すると、コンディショニング収縮前後に最大随意短縮性トルクの立ち上がり勾配が増加する可能性が考えられるため、今後はばらつきを考慮して被験者数を設定し、より詳細に検討する必要がある。

今後、コンディショニング収縮がスポーツパフォーマンスに与える影響を明らかにするために検討すべき要因として、コンディショニング収縮の時間および強度以外に、被験者の特徴やコンディショニング収縮の効果検証課題の内容が挙げられる。PAP は筋線維組成が異なる被験者間では増加の程度が異なることが報告されていることから (Hamada et al. 2000)、速筋線維が多いと考えられる短距離系の選手と遅筋線維が多いと考えられる長距離系選手を用いたコンディショニング収縮による最大随意短縮性トルクの増加の程度の比較のように、筋線維

組成の異なる群での比較を行う必要がある。また、コンディショニング収縮による増強効果の恩恵を受けやすい動作を明らかにする必要がある。コンディショニング収縮は最大等尺性トルクに対しては増強効果がみられないが (Vandenboom et al. 1993)、最大随意短縮性トルクに対しては増強効果がみられる (Miyamoto et al. in press) ことから、コンディショニング収縮の効果検証課題によって効果の有無が異なる。また、MacIntosh et al. (2008) は、ラットの MG を対象とした実験において、効果検証課題における筋の短縮速度が大きい条件ではコンディショニング収縮による増強効果が大きかったと報告していることから、効果検証課題の関節角速度が最大随意短縮性トルクの増加の程度に影響を与える可能性がある。そこで、今後はコンディショニング収縮の効果検証課題である最大随意短縮性収縮の関節角速度の影響を検討する必要がある。

本研究の結果から、コンディショニング収縮によって最大随意短縮性トルクを増加させるためには、筋中に生じる変化である増強効果だけでなく、神経系に生じる変化も考慮する必要があることが示唆された。現時点では、コンディショニング収縮がスポーツパフォーマンスに及ぼす影響については一致した見解が得られていない (Chiu et al. 2003 ; Weber et al. 2008 ; Kilduff et al. 2008 ; Till and Cooke 2009)。これらの研究はコンディショニング収縮の強度や時間が異なっており、且つ、コンディショニング収縮による増強効果を確認するための単収縮トルク、また、中枢性の変化を確認するための筋電図を計測していないことから、コンディショニング収縮による増強効果や減弱効果の有無および程度が検討されていない。本研

究により、6秒間程度、且つ、80%MVC 相当の等尺性収縮で最大随意短縮性トルクが増加することが明らかになった。それゆえ、今後コンディショニング収縮がスポーツパフォーマンスに与える影響を明らかにするために、単収縮トルクの計測による増強効果の有無および筋電図の計測による神経系変化の有無を合わせて計測し、異なる収縮様式もしくは異なる運動の種類というような、異なるコンディショニング収縮がもたらす効果を基礎データとして集積していくことが重要だと考えられる。

## 第5章 結論

本研究では事前の筋活動の時間および強度に着目し、事前の筋活動がその後の単収縮トルクおよび最大随意短縮性トルクに及ぼす影響を検討することを目的とした。その結果、最大随意短縮性トルクは単収縮トルクと比べてコンディショニング収縮に対しての変化が異なり、単収縮トルクの増加が大きい条件の時に必ずしも最大随意短縮性トルクが増加するわけではないことが明らかになった。その理由として、最大随意短縮性トルクは単収縮トルクと比べて増強効果が小さいことから減弱効果の影響が相対的に大きいこと、且つ、中枢性疲労の影響を受けることが考えられた。これらのことから、コンディショニング収縮により最大随意短縮性トルクを増強させるためには、単収縮トルクの増加が最大になる時間よりも短時間のコンディショニング収縮を行うことが重要だと考えられた。また、増強効果を引き起こすには速筋線維を含む全ての運動単位を動員させるような高強度のコンディショニング収縮が必要であるが、増強効果はある収縮強度で鈍化すること、且つ、最大下の収縮強度であれば筋疲労を抑えることが出来ることから、最大下である80%MVCのコンディショニング収縮でも最大随意短縮性トルクの増加がみられる可能性が示唆された。

## 先行研究

1. Abbate F, Sargeant AJ, Verdijk PW, de Haan A. Effects of high-frequency initial pulses and posttetanic potentiation on power output of skeletal muscle. *J Appl Physiol.* 88(1):35-40, 2000.
2. Baudry S, Duchateau J. Postactivation potentiation in human muscle is not related to the type of maximal conditioning contraction. *Muscle Nerve.* 30(3):328-36, 2004.
3. Baudry S, Klass M, Duchateau J. Postactivation potentiation influences differently the nonlinear summation of contractions in young and elderly adults. *J Appl Physiol.* 98(4):1243-50, 2005.
4. Baudry S, Duchateau J. Postactivation potentiation in a human muscle: effect on the rate of torque development of tetanic and voluntary isometric contractions. *J Appl Physiol.* 102(4):1394-401, 2007a.
5. Baudry S, Duchateau J. Postactivation potentiation in a human muscle: effect on the load-velocity relation of tetanic and voluntary shortening contractions. *J Appl Physiol.* 103(4):1318-25, 2007b.
6. Baudry S, Klass M, Duchateau J. Postactivation potentiation of short tetanic contractions is differently influenced by stimulation frequency in young and elderly adults. *Eur J Appl Physiol.* 103(4):449-59, 2008.
7. Behm DG, Button DC, Barbour G, Butt JC, Young WB. Conflicting effects of fatigue and potentiation on voluntary force. *J Strength Cond Res.* 18(2):365-72, 2004.
8. Bigland-Ritchie B. Muscle fatigue and the influence of changing neural drive. *Clin Chest Med.* 5(1):21-34, 1984.
9. Blumenthal DK, Stull JT. Activation of skeletal muscle myosin light chain kinase by calcium(2+) and calmodulin. *Biochemistry.* 25;19(24):5608-14, 1980.
10. Burke RE. Motor unit properties and selective involvement in movement. *Exerc Sport Sci Rev.* 3:31-81, 1975.
11. Calder KM, Hall LA, Lester SM, Inglis JG, Gabriel DA. Reliability of the biceps brachii M-wave. *J Neuroeng Rehabil.* 6;2:33, 2005.
12. Chatzopoulos DE, Michailidis CJ, Giannakos AK, Alexiou KC, Patikas DA, Antonopoulos CB, Kotzamanidis CM. Postactivation potentiation effects after heavy resistance exercise on running speed. *J Strength Cond Res.*

- 21(4):1278-81, 2007.
13. Chiu LZ, Fry AC, Weiss LW, Schilling BK, Brown LE, Smith SL. Postactivation potentiation response in athletic and recreationally trained individuals. *J Strength Cond Res.* 17(4):671-7, 2003.
  14. De Luca CJ, LeFever RS, McCue MP, Xenakis AP. Behaviour of human motor units in different muscles during linearly varying contractions. *J Physiol.* 329:113-28, 1982.
  15. Docherty D, Hodgson MJ. The application of postactivation potentiation to elite sport. *Int J Sports Physiol Perform.* 2(4):439-44, 2007.
  16. Farina D, Merletti R, Enoka RM. The extraction of neural strategies from the surface EMG. *J Appl Physiol.* 96(4):1486-95, 2004.
  17. Feiereisen P, Duchateau J, Hainaut K. Motor unit recruitment order during voluntary and electrically induced contractions in the tibialis anterior. *Exp Brain Res.* 114(1):117-23, 1997.
  18. Fowles JR, Green HJ. Coexistence of potentiation and low-frequency fatigue during voluntary exercise in human skeletal muscle. *Can J Physiol Pharmacol.* 81(12):1092-100, 2003.
  19. Gandevia SC, Allen GM, Butler JE, Taylor JL. Supraspinal factors in human muscle fatigue: evidence for suboptimal output from the motor cortex. *J Physiol.* 15:490 ( Pt 2):529-36, 1996.
  20. Gandevia SC. Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiol Rev.* 81(4):1725-89, 2001.
  21. Garner SH, Hicks AL, McComas AJ. Prolongation of twitch potentiating mechanism throughout muscle fatigue and recovery. *Exp Neurol.* 103(3):277-81, 1989.
  22. Gossen ER, Sale DG. Effect of postactivation potentiation on dynamic knee extension performance. *Eur J Appl Physiol.* 83(6):524-30, 2000.
  23. Gourgoulis V, Aggeloussis N, Kasimatis P, Mavromatis G, Garas A. Effect of a submaximal half-squats warm-up program on vertical jumping ability. *J Strength Cond Res.* 17(2):342-4, 2003.
  24. Grange RW, Vandenboom R, Houston ME. Physiological significance of myosin phosphorylation in skeletal muscle. *Can J Appl Physiol.* 18(3):229-42, 1993.
  25. Hägg GM. Interpretation of EMG spectral alterations and alteration indexes at sustained contraction. *J Appl Physiol.* 73(4):1211-7. 1992.
  26. Hamada T, Sale DG, MacDougall JD, Tarnopolsky MA. Postactivation potentiation, fiber type, and twitch contraction time in human knee extensor

- muscles. *J Appl Physiol.* 88(6):2131-7, 2000.
27. Hamada T, Sale DG, MacDougall JD, Tarnopolsky MA. Interaction of fibre type, potentiation and fatigue in human knee extensor muscles. *Acta Physiol Scand.* 178(2):165-73, 2003.
  28. Henneman E, Somjen G, Carpenter DO. Functional significance of cell size in spinal motoneurons. *J Neurophysiol.* 28:560-80, 1965.
  29. Hicks A, Fenton J, Garner S, McComas AJ. M wave potentiation during and after muscle activity. *J Appl Physiol.* 66(6):2606-10, 1989.
  30. Hodgson M, Docherty D, Robbins D. Post-activation potentiation: underlying physiology and implications for motor performance. *Sports Med.* 35(7):585-95, 2005.
  31. Johnson MA, Polgar J, Weightman D, Appleton D. Data on the distribution of fibre types in thirty-six human muscles. An autopsy study. *J Neurol Sci.* 18(1):111-29, 1973.
  32. Kawakami Y, Amemiya K, Kanehisa H, Ikegawa S, Fukunaga T. Fatigue responses of human triceps surae muscles during repetitive maximal isometric contractions. *J Appl Physiol.* 88(6):1969-75, 2000.
  33. Kilduff LP, Owen N, Bevan H, Bennett M, Kingsley MI, Cunningham D. Influence of recovery time on post-activation potentiation in professional rugby players. *J Sports Sci.* 26(8):795-802, 2008.
  34. Klein CS, Ivanova TD, Rice CL, Garland SJ. Motor unit discharge rate following twitch potentiation in human triceps brachii muscle. *Neurosci Lett.* 28:316(3):153-6, 2001.
  35. Klug GA, Botterman BR, Stull JT. The effect of low frequency stimulation on myosin light chain phosphorylation in skeletal muscle. *J Biol Chem.* 10:257(9):4688-90, 1982.
  36. Knaflitz M, Merletti R, De Luca CJ. Inference of motor unit recruitment order in voluntary and electrically elicited contractions. *J Appl Physiol.* 68(4):1657-67, 1990.
  37. MacIntosh BR. Role of calcium sensitivity modulation in skeletal muscle performance. *News Physiol Sci.* 18:222-5, 2003.
  38. MacIntosh BR, Taub EC, Dormer GN, Tomaras EK. Potentiation of isometric and isotonic contractions during high-frequency stimulation. *Pflugers Arch.* 456(2):449-58, 2008.
  39. Manning DR, Stull JT. Myosin light chain phosphorylation and phosphorylase A activity in rat extensor digitorum longus muscle. *Biochem Biophys Res*

- Commun.* 12:90(1):164-70, 1979.
40. Manning DR, Stull JT. Myosin light chain phosphorylation-dephosphorylation in mammalian skeletal muscle. *Am J Physiol.* 242(3):C234-41, 1982.
  41. Miyamoto N, Fukunaga T, Kawakami Y. Evidence for intermuscle difference in postactivation potentiation in the human triceps surae: a mechanomyographic study. *Muscle Nerve.* 39(5):703-6, 2009.
  42. Miyamoto N, Kanehisa H, Fukunaga T, Kawakami Y. Effect of postactivation potentiation on the maximal voluntary isokinetic concentric torque in humans. *J Strength Cond Res.* In press.
  43. Moore RL, Stull JT. Myosin light chain phosphorylation in fast and slow skeletal muscles in situ. *Am J Physiol.* 247(5 Pt 1):C462-71, 1984.
  44. Nairn AC, Perry SV. Calmodulin and myosin light-chain kinase of rabbit fast skeletal muscle. *Biochem J.* 1;179(1):89-97, 1979.
  45. Oya T, Riek S, Cresswell AG. Recruitment and rate coding organisation for soleus motor units across entire range of voluntary isometric plantar flexions. *J Physiol.* 1;587(Pt 19):4737-48, 2009.
  46. Panizza M, Nilsson J, Hallett M. Optimal stimulus duration for the H reflex. *Muscle Nerve.* 12(7):576-9, 1989.
  47. Rayment I, Rypniewski WR, Schmidt-Bäse K, Smith R, Tomchick DR, Benning MM, Winkelmann DA, Wesenberg G, Holden HM. Three-dimensional structure of myosin subfragment-1: a molecular motor. *Science.* 2;261(5117):50-8, 1993.
  48. Rassier DE, Macintosh BR. Coexistence of potentiation and fatigue in skeletal muscle. *Braz J Med Biol Res.* 33(5):499-508, 2000
  49. Requena B, Gapeyeva H, García I, Erelina J, Pääsuke M. Twitch potentiation after voluntary versus electrically induced isometric contractions in human knee extensor muscles. *Eur J Appl Physiol.* 104(3):463-72, 2008.
  50. Robbins DW. Postactivation potentiation and its practical applicability: a brief review. *J Strength Cond Res.* 19(2):453-8, 2005.
  51. Sale DG. Postactivation potentiation: role in human performance. *Exerc Sport Sci Rev.* 30(3):138-43, 2002.
  52. Schieppati M. The Hoffmann reflex: a means of assessing spinal reflex excitability and its descending control in man. *Prog Neurobiol.* 28(4):345-76, 1987.
  53. Shima N, Rice CL, Ota Y, Yabe K. The effect of postactivation potentiation on the mechanomyogram. *Eur J Appl Physiol.* 96(1):17-23, 2006.
  54. Stuart DS, Lingley MD, Grange RW, Houston ME. Myosin light chain

- phosphorylation and contractile performance of human skeletal muscle. *Can J Physiol Pharmacol.* 66(1):49-54, 1988.
55. Sweeney HL, Bowman BF, Stull JT. Myosin light chain phosphorylation in vertebrate striated muscle: regulation and function. *Am J Physiol.* 264(5 Pt 1):C1085-95, 1993.
  56. Taylor JL, Todd G, Gandevia SC. Evidence for a supraspinal contribution to human muscle fatigue. *Clin Exp Pharmacol Physiol.* 33(4):400-5, 2006.
  57. Taylor JL, Gandevia SC. A comparison of central aspects of fatigue in submaximal and maximal voluntary contractions. *J Appl Physiol.* 104(2):542-50, 2008.
  58. Till KA, Cooke C. The effects of postactivation potentiation on sprint and jump performance of male academy soccer players. *J Strength Cond Res.* 23(7):1960-7, 2009.
  59. Tillin NA, Bishop D. Factors modulating post-activation potentiation and its effect on performance of subsequent explosive activities. *Sports Med.* 39(2):147-66, 2009.
  60. Trimble MH, Harp SS. Postexercise potentiation of the H-reflex in humans. *Med Sci Sports Exerc.* 30(6):933-41, 1998.
  61. Van Cutsem M, Feiereisen P, Duchateau J, Hainaut K. Mechanical properties and behaviour of motor units in the tibialis anterior during voluntary contractions. *Can J Appl Physiol.* 22(6):585-97, 1997.
  62. Vandenberg R, Grange RW, Houston ME. Threshold for force potentiation associated with skeletal myosin phosphorylation. *Am J Physiol.* 265(6 Pt 1):C1456-62, 1993.
  63. Vandenberg R, Grange RW, Houston ME. Myosin phosphorylation enhances rate of force development in fast-twitch skeletal muscle. *Am J Physiol.* 268(3 Pt 1):C596-603, 1995.
  64. Vandenberg R, Xenii J, Bestic NM, Houston ME. Increased force development rates of fatigued mouse skeletal muscle are graded to myosin light chain phosphate content. *Am J Physiol.* 272(6 Pt 2):R1980-4, 1997.
  65. Vandervoort AA, Quinlan J, McComas AJ. Twitch potentiation after voluntary contraction. *Exp Neurol.* 81(1):141-52, 1983.
  66. Viitasalo JH, Komi PV. Signal characteristics of EMG during fatigue. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 37(2):111-21, 1977.
  67. Weber KR, Brown LE, Coburn JW, Zinder SM. Acute effects of heavy-load squats on consecutive squat jump performance. *J Strength Cond Res.*

22(3):726-30, 2008.

68. Yagi K, Yazawa M, Kakiuchi S, Ohshima M, Uenishi K. Identification of an activator protein for myosin light chain kinase as the Ca<sup>2+</sup>-dependent modulator protein. *J Biol Chem.* 10;253(5):1338-40, 1978.
69. Yazawa M, Yagi K. Purification of modulator-deficient myosin light-chain kinase by modulator protein-Sepharose affinity chromatography. *J Biochem.* 84(5):1259-65, 1978.

## 謝辞

本研究は、矢内利政教授の指導のもと行われました。研究面のみならず、日常生活面においても情熱的な指導をしていただいた矢内利政教授に心より感謝いたします。

川上泰雄教授には、実験データの解釈や論文の構成について、たくさんの貴重なご意見をいただきました。心より感謝いたします。来年度からは川上研究室の博士課程に進学します。今後もよろしく願いいたします。

金久博昭教授（東京大学）には、ご多忙の中、実験データの解釈や論文の構成について、厳しくも心のこもった、助言をいただきました。心より感謝いたします。

福永哲夫教授（鹿屋体育大学）は、私が大学院に入学し、研究者を目指すきっかけを与えていただきました。心より感謝いたします。

宮本直和助手には実験が円滑に行えるように全面的にサポートしていただきました。また、実験データの解釈について貴重なご意見をいただきました。心より感謝いたします。

また、矢内研究室、川上研究室の大学院生の方には、被験者として実験に参加していただきました。皆様のおかげで、なんとか修士論文を書き上げることが出来ました。心より感謝いたします。

最後に、私の夢を応援して頂いている母に感謝いたします。