

筋力レベルの異なるアスリートに対する  
膝伸展運動の総収縮時間の違いが、  
引き続く最大膝伸展トルクに及ぼす急性効果

スポーツ科学研究科 スポーツ科学専攻

学籍番号 220M12

氏名 中田 開人

指導教員 三島 隆章 教授

# 論文内容の要旨

論文題目:筋力レベルの異なるアスリートに対する膝伸展運動の総収縮時間の  
違いが、引き続く最大膝伸展トルクに及ぼす急性効果  
学籍番号 220M12 氏 名 中田 開人  
指導教員 三島 隆章 教授

【目的】最大あるいは最大下の随意活動 (CA) は、電気刺激により誘発される単収縮トルク、および随意運動パフォーマンスを一時的に高めることが知られており、それぞれの増強は PAP, PAPE と表される。これまで PAPE を最大化させる観点において、アスリートの筋力レベルの差によって最適な CA の総収縮時間が異なるかについては十分に明らかにされていない。そこで本研究では、相対筋力が高い群 (SI) と低い群 (WI) との間で、PAPE を最大化させるのに最適な CA の総収縮時間が異なるか検討を行った。【方法】対象は 22 名の男子アメリカンフットボール部の大学生であった。最初に、最大随意等尺性膝伸展トルクを測定し、それを体重で割った相対筋力を基に上位 8 名を SI, 下位 8 名を WI に分類した。SI と WI は総収縮時間の異なる 3 種類の角速度 60°/s の等速性膝伸展運動 (6 秒間 [6-CA], 12 秒間 [12-CA], 18 秒間 [18-CA]) を行い、各 CA の前後に単収縮トルクの誘発と角速度 180°/s の等速性膝伸展運動を実施することで、PAP と PAPE の経時的変化を観察した。【結果】SI は 18-CA の 4 分後と 7 分後に PAPE を確認したが、いずれの時間帯においても既に PAP は消失していた。一方 WI は、いずれのプロトコルを実施した後においても PAP と PAPE の両方を確認することが出来なかった。【結論】本研究の結果、相対筋力が比較的高い人は、比較的長い収縮時間で実施される CA が PAPE を最大化させるのに最適だが、そのメカニズムには PAP は関与しないことが示された。一方で、本研究では収縮時間が長い、あるいは短い CA のいずれが相対筋力の低い人にとって最適であるかを結論付けることが出来なかった。

英文タイトル

The acute effects of knee extension exercises with different contraction durations on the subsequent maximal knee extension torque for athletes with different strength levels

英文氏名

Kaito Nakata

## Abstract

This study examined whether the optimal contraction duration of dynamic knee extension exercises to maximize subsequent voluntary performance varies depending on the strength level of an individual. Twenty-two male college American football players participated in this study. First, all subjects performed a 10-s maximal isometric knee extension exercise and were classified as stronger individuals (SI;  $n = 8$ ) and weaker individuals (WI;  $n = 8$ ) based on their relative muscle strength. Each group then performed three types of dynamic conditioning activity (CA) with different total contraction durations (6-s [6-CA], 12-s [12-CA], and 18-s [18-CA]) in random order. To observe the time-course changes in post-activation potentiation (PAP) and post-activation performance enhancement (PAPE), the twitch torques induced by electrical stimulation and isokinetic knee extension torques at  $180^\circ/\text{s}$  were recorded before and after each CA. The twitch torque increased at 10 s and 1 min after 6-CA for SI ( $p < 0.05$ ). In contrast, WI were unable to induce PAP in either protocol. Voluntary performance increased at 4 and 7 min after only 18-CA for SI ( $p < 0.05$ ), but PAP was not observed at that time. On the other hand, there was no PAPE in either protocol for WI. We concluded that the CA with relatively long contraction duration was optimal to maximize subsequently voluntary performance for SI, but PAP was not related to this mechanism. Conversely, we could not conclude whether the CAs performed with a relatively short or long contraction duration were optimal to maximize subsequent voluntary performance for WI. These results suggest that the strategy for demonstrating PAPE may be different depending on the strength level.

## 目次

第I章 緒言	1
第II章 文献検討	
II-1. PAP の概要	
II-1-1. PAP のメカニズム	5
II-1-2. PAP の経時的変化について	6
II-1-3. 速筋線維の含有率と PAP の関係性について	7
II-2. PAPE の概要	
II-2-1. PAPE という言葉が広まった背景	8
II-2-2. PAPE のメカニズム	
II-2-2-1. ミオシン調節軽鎖のリン酸化	9
II-2-2-2. 筋温の上昇	11
II-2-2-3. 神経伝達能力の向上	12
II-2-2-4. テスト動作に対する学習効果や慣れの影響	14
II-2-3. PAPE の経時的変化について	15
第III章 方法	
III-1. 実験概要	16
III-2. 被験者	18
III-3. SI と WI の分類	18
III-4. 電気刺激による単収縮トルクの誘発	19
III-5. 特異的ウォーミングアップセッション	20
III-6. テストプロトコル	20
III-7. CA プロトコル	22

III-8. 統計処理 . . . . . 22

第IV章 結果

IV-1. SI と WI の比較 . . . . . 23

IV-2. %PAP<sub>MVC</sub> と MVC トルクの関係性 . . . . . 24

IV-3. 特異的ウォーミングアップセッション . . . . . 24

IV-4. %PAP . . . . . 25

IV-5. %PAPE . . . . . 25

第V章 考察 . . . . . 26

第VI章 総括 . . . . . 32

謝辞 . . . . . 34

参考文献 . . . . . 35

図表

Table 1. Physical characteristics, MVC, twitch torque, and %PAP<sub>MVC</sub> in the whole group and SI and WI subgroups. . . . . 44

Figure 1. Post-activation potentiation (PAP) after conditioning activity (CA). . . . . 45

Figure 2. Phosphorylation of myosin regulatory light chain (P-MRLC) known as a major mechanism of PAP. . . . . 46

Figure 3. Structural changes in the actin-myosin complex associated with phosphorylation of MRLC. . . . . 47

Figure 4. Effect of PAP on the isometric force-frequency relationship. . . . . 48

Figure 5. Time course of PAP after CA with different contraction duration (revised based on reference 21). . . . .	49
Figure 6. Mechanism of H-wave and M-wave generation (revised based on reference 47). . . . .	50
Figure 7. A model of the hypothetical relationship between PAP and fatigue after CA (adapted from reference 47). . . . .	51
Figure 8. Experiment overview. . . . .	52
Figure 9. Correlation between %PAP <sub>MVC</sub> and absolute ( <i>A</i> ) and relative ( <i>B</i> ) muscle strength. Filled squares represent the weaker individual group, and open squares represent the stronger individual group. . . . .	53
Figure 10. Maximal voluntary knee extension torques produced during the last three knee extensions at the task-specific warm-up session (warm-up 1, warm-up 2, and warm-up 3) and the knee extension during the pretest for stronger individuals ( <i>A</i> ), and weaker individuals ( <i>B</i> ). . . . .	54
Figure 11. Time-course changes in %PAP after each CA for stronger individuals ( <i>A</i> ) and weaker individuals ( <i>B</i> ). . . . .	55
Figure 12. Time-course changes in %PAPE after each CA for stronger individuals ( <i>A</i> ) and weaker individuals ( <i>B</i> ). . . . .	56

## 第 I 章 緒言

単一の電気刺激によって誘発される単収縮トルクは、事前に行われる最大、あるいは最大下の随意的なコンディショニング活動 (conditioning activity: CA) によって一時的に増強することが知られている (Vandervoort et al., 1983; Hamada et al., 2000). CA 後に単収縮トルクが一時的に増強する現象は活動後増強 (post-activation potentiation: PAP) と呼ばれており, PAP の主要なメカニズムにはミオシン調節軽鎖のリン酸化 (phosphorylation of myosin regulatory light chains: P-MRLC) が関与していると考えられている (Moore and Stull., 1984; Sweeney et al., 1993). P-MRLC は, アクチン-ミオシン複合体の  $\text{Ca}^{2+}$  に対する感受性を高めることで, 筋の力産生能力を一時的に向上させる (Szczesna., 2003; Tillin and Bishop., 2009). いくつかの先行研究によって, CA は電気刺激による単収縮トルクのみならず, 比較的速い収縮速度で実施される随意運動パフォーマンスも一時的に向上させることが報告されている (Fukutani et al., 2014; Mitchell and Sale., 2011; Miyamoto et al., 2011; Baudry and Duchateau., 2007; Bergmann et al., 2013). CA 実施後に随意運動パフォーマンスが一時的に向上する現象は活動後パフォーマンス増強 (post-activation performance enhancements: PAPE) と呼ばれており (Cuenca-Fernández et al., 2017), Tillin and Bishop (2009) は, PAPE の主要なメカニズムの一つとして, PAP が関与していると述べている.

重要なことに, CA 実施に伴う増強効果と疲労は共存することが示されており (Rassier and MacIntosh., 2000), PAPE が観察されるか否かは, これら 2 つの要因の正味のバランスによって左右されると考えられている (Tillin and Bishop., 2009). 具体的には, もし CA 実

施に伴う疲労が増強効果を上回れば随意運動パフォーマンスは低下し、一方で、増強効果が疲労を上回れば随意運動パフォーマンスは向上すると考えられている。したがって、ストレンクス&コンディショニングコーチが随意運動パフォーマンスを一時的に向上させる目的でCAを実施する際には、増強効果を十分に発揮することのみならず、疲労の発生を最小限に抑えることも考慮する必要がある。

CAの総収縮時間を調整することはPAPEを最大化させるために考慮すべき重要な要素であると考えられている (Vandervoort et al., 1983; Seitz et al., 2015; Hamada et al., 2003)。例えば、CAの総収縮時間が短すぎる場合にはPAPを含む増強効果が誘発されない可能性がある。先行研究にて、等速性膝伸展運動を用いたCAの総収縮時間がPAPとPAPEに及ぼす効果が検証されている (Seitz et al., 2015)。彼らは、CAの収縮速度に関わらず (60°/s, 180°/s, そして 300°/s), 総収縮時間が6秒間に揃えられたプロトコルでは、CA実施直後から4分後までPAPが観察され、CA実施後に行われた角速度180°/sの膝伸展トルクは、CA実施から4分後と7分後にCA前に測定された基準値と比較して有意に高値を示すことを報告した。一方で、CAの総収縮時間が2秒間あるいは1.2秒間の場合では、全ての時間帯においてPAPとPAPEの両方が観察されなかった。彼らは以上の結果から、PAPEを誘起するためには、動的CAにおいて必要最低限の総収縮時間を確保する必要があると結論付けた。実際にこれまでの先行研究の多くは、PAPおよびPAPEが十分に発動されることが示されている5秒~10秒間のCAを採用している (Miyamoto et al., 2011; Miyamoto et al., 2013; Fukutani et al., 2012; Hamada et al., 2000)。一方で、長すぎる総収縮時間は著しい疲労を同時に誘発し、CA実施に伴い発動される増強効果が疲労により打ち消される可能性が



ある。Hamada et al. (2003) は、5 秒間の等尺性の最大随意収縮 (maximal voluntary contraction: MVC) を 16 セット実施し、各セット間で単収縮トルクを誘発することで PAP の経時的変化を観察した。彼らは、単収縮トルクは 3 回の MVC 後まで増加し続けたが、その後はセットを重ねるにつれて低下していき、16 セット終了後にはプロトコル実施前に測定された単収縮トルクを有意に下回ることを確認した。彼らはプロトコル終了後に PAP の程度が基準値を下回った要因について、連続して実施される MVC によって蓄積された疲労の影響が、P-MRLC による増強効果を上回ったことが原因であると述べている。したがって、長すぎる総収縮時間で実施される CA では著しい疲労が増強効果を打ち消すため、引き続いて実施される随意運動パフォーマンスを高めるのに適していないことが予想される。以上をまとめると、PAPE を効果的に引き出すためには、増強効果が十分に発動されながらも著しい疲労の発生が抑えられる最適な CA の総収縮時間を見極める必要がある。

興味深いことに、先行研究によって、集団内において筋力が高い人 (stronger individuals: SI) と低い人 (weaker individuals: WI) との間では、高強度 CA 実施後における PAP (Hamada et al., 2000) と疲労の程度 (Miyamoto et al., 2013; Jo et al., 2010; Seitz et al., 2014) が異なることが示唆されている。一般的に、SI は WI よりも速筋線維の含有率が高い傾向にあるが (Aagaard and Andersen., 1998; Maughan et al., 1983)、注目すべきことに、P-MRLC を誘発する酵素であるミオシン軽鎖キナーゼ (myosin light chain kinase: MLCK) は遅筋線維よりも速筋線維に多く含まれているため、P-MRLC は速筋線維で大きく発動されることが報告されている (Moore and Stull., 1984)。したがって、CA 実施後において SI は WI より

も高い P-MRLC を引き起こし、結果としてより高い PAP を発動する可能性がある (Tillin and Bishop., 2009). また、SI が高強度エクササイズに対する高い疲労耐性を備え持つことは注目に値する (Miyamoto et al., 2013; Jo et al., 2010; Seitz et al., 2014). Miyamoto et al.

(2013) は、CA として 5 秒間の膝伸展 MVC を実施した後に、最大等速性膝伸展トルクが 1 分後から 3 分後に向上した一方で、CA 実施直後では高まらないことを確認した。しかしながら、彼らは 12 週間の膝伸展トレーニング後では、CA 実施直後においても最大等速性膝伸展トルクが有意に向上することを確認した。彼らは長期間のレジスタンストレーニング後に最大等速性膝伸展トルクが CA 実施直後から高まるようになった要因について、長期間のレジスタンストレーニングによって高強度 CA に対する疲労耐性が身に付き、著しい疲労の発生が抑えられたことを挙げている。彼らが示した結果は、言い換えると、SI は WI よりも高強度 CA に対する高い疲労耐性を備え持つことを示唆している。我々はアスリートの筋力レベルの差によって高強度 CA 実施後の PAP と疲労の程度が異なることに着目し、PAPE を最大化させるのに最適な CA の総収縮時間が SI と WI の間で異なる可能性があると考えた。

もし、高強度 CA が 20 秒間程度の比較的長い総収縮時間で行われた場合、著しい疲労の発生により発動された増強効果が打ち消され、PAPE が顕在化しない可能性がある。しかしながら、SI は高強度 CA に対する高い疲労耐性を備え持つため (Miyamoto et al., 2013; Jo et al., 2010; Seitz et al., 2014)、比較的長い総収縮時間で行われる CA であっても著しい疲労の発生を抑え、随意運動パフォーマンスを高める可能性がある。加えて、比較的長い総収縮時間で行われる CA は、短い総収縮時間で行われる CA よりも PAP メカニズムを十分に

誘発する可能性があり、特に速筋線維の含有率が高い傾向にある SI は PAP を十分に発動し、結果として PAPE を大きく高める可能性がある。一方、高強度 CA が 5 秒間程度の比較的短い総収縮時間で行われる場合、長い総収縮時間で行われる CA よりも発動される PAP の程度は低いことが予想される。しかしながら、長い総収縮時間で行われる CA よりも疲労の発生が抑えられることで、高強度 CA に対する疲労耐性が比較的低い WI であっても PAPE を顕在化させる可能性がある。以上より、PAPE を最大化させるという点において、CA の最適な総収縮時間がアスリートの筋力レベルによって異なる可能性があるが、我々の知る限り、筋力レベルが異なるアスリート間で PAPE を最大化させるのに最適な CA の総収縮時間が異なるか否かを検証した研究は見当たらない。

したがって、本研究の目的は、PAPE を最大化させるのに最適な CA の総収縮時間がアスリートの筋力レベルによって異なるか否かを検証することである。我々は、SI は 20 秒間程度の比較的長い総収縮時間で実施される CA が PAPE を最大化させるのに最適であり、一方で、WI は 5 秒間程度の比較的短い総収縮時間で実施される CA が最適であると仮説を立てた。

## 第II章 文献検討

### II-1. PAP の概要

#### II-1-1. PAP のメカニズム

PAPは単一の電気刺激によって誘発される単収縮トルクが、事前に行われる最大、あるいは最大下のCAによって一時的に増強する現象を指し (Vandervoort et al., 1983; Hamada et al., 2000) (Figure 1), PAPの主要なメカニズムには、P-MRLCが関与していると考えられている (Moore and Stull., 1984; Sweeney et al., 1993). P-MRLCは、細胞質内に流入した $Ca^{2+}$ がカルモジュリンと結合し、生成された複合体がMLCKを活性化することで生じる (Manning and Stull., 1982; Szczesna et al., 2002) (Figure 2). MLCKによってリン酸化されたミオシン調節軽鎖はミオシンヘッドをアクチンの結合部位に近づけることで、アクチン-ミオシン複合体の $Ca^{2+}$ に対する感受性を高め、筋の力産生能力を向上させる (Szczesna., 2003; Tillin and Bishop., 2009) (Figure 3). 重要なことに、PAPは単収縮や低頻度刺激においては増強効果を示すが、高頻度刺激に対しては増強効果を示しにくいことが報告されている (Stull et al., 2011) (Figure 4). 高頻度刺激が与えられた状況下で増強効果が確認されにくい要因としては、細胞質内における $Ca^{2+}$ 濃度が高頻度刺激によって飽和レベルに達し、ほとんどのアクチンとミオシンがクロスブリッジを形成していることで、 $Ca^{2+}$ の感受性が高まることによる増強効果が得られにくいことが挙げられる (Sale., 2002). したがって、PAPは最大筋力に対しては増強効果をもたらさないが、力の立ち上がり率 (Rate of force development: RFD) に対しては増強効果を発揮し、比較的素早い動作で実施される運動の力発揮能力を高めることが可能であるとされている (Tillin and Bishop., 2009).

## II-1-2. PAPの経時的变化について

いくつかの先行研究によって、PAPはCAを実施した直後に最大値を示すことが報告されている (Hamada et al., 2000; Vandervoort et al., 1983; Miyamoto et al., 2011; Fukutani et al., 2013). しかしながら、PAPの程度はCA実施直後に最大値を示した後、ミオシンホスファターゼによってミオシン調節軽鎖のリン酸基が取り除かれることで、指数関数的な低下を示し、5分後には大部分のPAPが消失することが確認されている (Hamada et al., 2000; Vandervoort et al., 1983). 一方で、著しい疲労を誘発するだけの長い総収縮時間に渡ってCAが実施された場合、PAPの経時的変化は上記とは異なる経過をたどることが報告されている (Vandervoort et al., 1983; Hamada et al., 2003; Houston and Grange., 1990). Houston and Grange (1990) は、10秒間あるいは60秒間の膝伸展MVCをCAとして実施した後のPAPの経時的変化を観察した。彼らは、10秒間で実施されたCAでは、CA実施直後にPAPが最大値を示し、その後は指数関数的に低下することを確認したが、60秒間に渡って実施されたCAでは、CA実施直後ではCA実施前の値を下回り、1.5分後以降に初めてPAPが表面化することを確認した (Figure 5). Rassier and MacIntosh (2000) は、P-MRLCによる増強効果と疲労は骨格筋内にて共存することを報告しており、PAPの経時的変化とその程度はP-MRLCと疲労のバランスによって左右されると考えられている。したがって、60秒間のような総収縮時間が著しく長いCAでは、CA実施直後における増強効果が著しい疲労により打ち消されるため、PAPは一定の休息時間を設け疲労の影響が取り除かれた後に初めて表面化する。

### II-1-3. 速筋線維の含有率とPAPの関係性について

先行研究によって、CAによって発動される PAP の程度は、遅筋線維よりも速筋線維で高いことが示されている (Hamada et al., 2000). 単収縮トルクが誘発されてから単収縮トルクの最大値を示すまでの時間 (Time to peak torque: TPT) は対象筋の速筋線維の含有率を間接的に反映する指標であり、TPT が短い人ほど速筋線維の含有率が高いことが知られている (Moore and Stull., 1984). Hamada et al. (2000) は 10 秒間の MVC によって発動された PAP の程度と MVC の前に誘発された単収縮の TPT との間に有意な負の相関関係が存在することを示しており ( $r = -0.73, p < 0.001$ ), 速筋線維の含有率が高い人ほど発動される PAP の程度が高いことを間接的に確認した. なお、速筋線維にて比較的高い PAP が発動されるのは、P-MRLC を引き起こす MLCK の活性が、遅筋線維よりも速筋線維で高いことが原因であると考えられている (Moore and Stull., 1984). また重要なことに、相対筋力が高い人は低い人よりも速筋線維の含有率が高い傾向にあることが知られている (Aagaard and Andersen., 1998; Maughan et al., 1983). したがって、相対筋力の高い人は CA 実施に伴い、より多くの速筋線維が P-MRLC を引き起こし、結果としてより高い PAP を発動する可能性がある (Tillin and Bishop., 2009). これを裏付けるように、Hamada et al. (2000) は 10 秒間の MVC によって発動された PAP の程度と MVC 中に得られた最大トルクとの間に有意な正の相関関係が存在することを報告している ( $r = 0.48, p < 0.05$ ).

## II-2. PAPE の概要

### II-2-1. PAPE という言葉が広まった背景

PAPE は post-activation performance enhancement の略称で, Cuenca-Fernández et al. (2017) によって初めて, CA 実施後の随意運動パフォーマンスの一時的な増強効果を示す言葉として用いられるようになった. PAPE という言葉が用いられる前までは, PAP は電気刺激によって誘発される単収縮トルクの一時的な増強効果を表す言葉であるにも関わらず, 随意運動時に観察される増強効果も含めて PAP と表されることが多かった (Naclerio et al., 2015; Seitz et al., 2014; Batista et al., 2011; Baudry and Duchateau., 2007; Jo et al., 2010; Kilduff et al., 2007). 先述したように, PAP は CA 実施直後に最大値を記録した後, 急激に低下し, 5 分後にはほとんどの PAP が消失することがほとんどである (Hamada et al., 2000; Vandervoort et al., 1983). それにも関わらず, これまで PAP の効果が急激に低下している, あるいは既に消失している時間帯にて, 随意運動パフォーマンスの向上を確認した先行研究がいくつか存在し (Prieske et al., 2018; Seitz et al., 2015; Thomas et al., 2017), CA 実施後の随意運動パフォーマンスの向上が PAP によってのみ引き起こされているかどうかについては, 近年疑問の声が上がっていた (Blazevich and Babault., 2019; Prieske et al., 2020; Zimmermann et al., 2020). したがって今現在では, CA 実施後の単収縮トルクの向上と随意運動パフォーマンスの向上をそれぞれ, PAP と PAPE に区別して表現することが推奨されている (Blazevich and Babault., 2019; Prieske et al., 2020; Zimmermann et al., 2020).

## II-2-2. PAPE のメカニズム

### II-2-2-1. ミオシン調節軽鎖のリン酸化

CAに伴う P-MRLC は、PAPE の主要なメカニズムの一つとして考えられている (Fukutani et al., 2014; Mitchell and Sale., 2011; Miyamoto et al., 2011; Baudry and Duchateau., 2007; Bergmann et al., 2013). Miyamoto et al. (2011) は 6 秒間の最大等尺性足関節底屈運動の直後から 5 分後までの間で単収縮トルクが有意に増加することを確認し、角速度 180°/s での等速性足関節底屈トルクは、単収縮トルクの増加が確認されている 1 分後から 3 分後までの間で有意に増加することを確認した。また Baudry and Duchateau (2007) は、6 秒間の最大等尺性母指内転運動の 1 分後に、単収縮トルクの増加と同時に、最大下 (10%, 20%, 50%および 75%) 強度にて行われた等尺性母指内転運動の RFD が有意に向上することを観察した。さらに、Bergmann et al. (2013) は、CA としてホップエクササイズを 10 回実施した 30 秒後に、下腿三頭筋に対して誘発された単収縮トルクが 32%増加し、同じ休息時間後に実施されたドロップジャンプ高も 12%向上することを確認した。また彼らは、観察された PAP の程度とドロップジャンプ高の増加の程度との間に有意な正の相関関係が存在することを示した ( $r^2 = 0.26$ )。これらの報告などから、CA 実施に伴う PAP の発動は PAPE の主要なメカニズムの一つとして考えられてきた。しかしながら、最近になって、PAP が PAPE の主要なメカニズムではないことを主張する報告も現れてきている (Prieske et al., 2018; Thomas et al., 2017)。Prieske et al. (2018) は、CA 実施後に PAP が観察されなかった時間帯にてジャンプパフォーマンスが向上することを示し、CA 実施後のジャンプパフォーマンスの向上に PAP は直接的には結び付かないと結論付けた。また、Thomas et al. (2017) は、CA として 3 repetition maximum (RM) の 80%, 90%, そして 100%の重量でバックスクワットエクササイズをそれぞれ 3 レップ実施した 8 分後に CMJ 高が有意に増加



することを確認したが、その時点では既に PAP は消失しており、ジャンプパフォーマンスの向上に PAP が関与していると結論付けることが出来なかった。Zimmermann et al.

(2020) はこれらの結果を踏まえて、PAPE のメカニズムに必ずしも PAP が関わっているとは限らず、その他のメカニズムが PAPE に貢献している可能性を指摘しており、今現在においても、PAPE のメカニズムに PAP が関与しているか否かについては見解の一致が得られていない。

#### II-2-2-2. 筋温の上昇

PAPE のメカニズムの一つに、CA 実施に伴う筋温の上昇が挙げられている (Blazevich and Babault., 2019)。Davies and Young (1983) は、被験者を 46°C の温水に 30~45 分間浸潤させることで筋温を平均して 3.1°C 上昇させた後に、下腿三頭筋に誘発された単収縮トルクの TPT (1°C あたり 7.7%) と利用可能な  $\text{Ca}^{2+}$  が筋小胞体に再吸収される機能を表す 1/2 弛緩時間 (1°C あたり 7.2%) がそれぞれ低下することを確認し、筋温の上昇によって筋の収縮特性が向上することを明らかにした。また、de Ruiter and de Hann (2000) は、水温の異なる 4 種類の浴槽に前腕から遠位部を 20 分間浸潤させることで母指内転筋の筋温を変化させた。その結果、筋温が高まった母指内転筋ほど速度やパワーといった指標が高くなることが明らかになった。したがって、CA に伴う筋温の上昇が引き続いて実施される随意運動パフォーマンスを高めている可能性がある。筋温上昇に伴い随意運動パフォーマンスが向上するメカニズムについては、筋の粘性抵抗の減少 (Buchthal et al., 1944)、神経の伝導速度の向上 (Karvonen., 1992)、筋グリコーゲン、解糖および高エネルギーリン酸の分解

の促進 (Febbraio et al., 1996) など、様々な要因が関与していると考えられている。注目すべきことに、筋温上昇に伴う随意運動パフォーマンスの変化は、実施される随意運動の速度に依存していると考えられている。Sargeant et al. (1987) は、大腿部の筋温上昇が回転速度の異なる 2 種類のペダリングエクササイズ中のパワー発揮能力に与える効果を検証した。その結果、筋温が 1°C 上昇するにつき、54 回転/分のペダリングエクササイズ中のパワー出力は 2% 程度向上したのに対し、140 回転/分のペダリングエクササイズは 10% 程度までパワー出力が向上することが示された。重要なことに、CA 後に引き続いて実施される随意運動パフォーマンスの向上も同様に、比較的速い速度で実施される随意運動に対してより高い増強効果をもたらすことが報告されている (Fukutani et al., 2013)。以上を踏まえると、CA 実施に伴う筋温の上昇は、PAPE メカニズムの主要な要因の一つであると考えられるだろう。

### II-2-2-3. 神経伝達能力の向上

CA 実施に伴う神経伝達能力の向上も、現在まで PAPE メカニズムの一つとして考えられてきた (Blazevich and Babault., 2019; Gullich and Schmidtbleicher., 1996)。単一の電気刺激を誘発した際に筋線維で観察される H 波は、活動電位が Ia 求心性神経に沿って伝達され脊髄に到達したあと、隣接する  $\alpha$  運動ニューロンを介して筋に到達することで観察される波形である (Figure 6)。CA 実施後に H 波の増加が観察されることは、Ia 求心性神経末端と対象筋に繋がる  $\alpha$  運動ニューロンのシナプス後膜との間で神経伝達能力が向上していることを意味し、結果として高次の運動単位の動員数増加や発火頻度の増加を反映しているとい

われている。Gullich and Schmidtbleicher (1996) は、5 秒間の等尺性足関節底屈運動を実施した後の H 波振幅と爆発的に行われた等尺性足関節底屈運動中に観察された最大トルクの経時的変化を観察し、CA 実施後の H 波振幅の経時的変化と最大足関節底屈トルクの経時的変化との間で有意に高い相関関係が存在することを報告した ( $r=0.90$ )。しかしながら彼らの研究では、H 波振幅が M 波の最大振幅で正規化されておらず、 $\text{Na}^+$ - $\text{K}^+$ ポンプの活性化などの末梢要因が H 波振幅に影響を及ぼしていた可能性がある。それにも関わらず、Folland et al. (2008) は、膝関節の等尺性膝伸展運動の 5~11 分後、Trimble and Harp (1998) は、足関節の動的 MVC の 3~10 分後に M 波の最大振幅で正規化された H 波振幅が増大することを確認している。したがって、CA は十分な休息時間を設けた後に脊髄レベルにおける神経伝達能力を向上させている可能性がある。しかしながら、Folland et al. (2008) の研究では、安静時での H 波振幅が計測されており、Trimble and Harp (1998) の研究においては H 波振幅が安静時、あるいは随意運動時に観察されたかどうかについては明記されておらず、H 波振幅の増大が随意運動時においても同様に観察されるかどうかについては明らかにされていない。また、中枢レベルでの神経伝達が活性化されると表面筋電図の EMG 振幅が増大するため、CA 実施後における EMG 振幅の変化を観察し、PAPE メカニズムに神経伝達能力の向上が関与しているか否かを調査した研究も存在する。

Sotiropoulos et al. (2010) は、1RM の 25%と 35%、あるいは 45%と 65%の負荷強度でそれぞれ 5 レップ、計 2 セット実施されたハーフスクワットの 3 分後に、CMJ 高の向上と膝関節伸展筋の EMG 振幅の増大が両プロトコルで観察されたことを報告し、CA 実施に伴う神経伝達能力の向上が随意運動パフォーマンスの向上に関与した可能性を示唆している。し

かしながら、EMG 振幅の変化というのは、中枢性機能の変化のみならず、細胞内活動電位プロファイルの延長 (Arabadzhev et al., 2010) や  $\text{Na}^+\text{-K}^+$ ポンプの活性化 (Thomas et al., 2006) などの末梢性機能の変化も反映するため、Sotiropoulos et al. (2010) の結果は注意を払って解釈する必要がある。EMG 振幅を M 波の最大振幅によって正規化された指標

(EMG:M) は、末梢性機能の影響を大方排除することができ、中枢性機能の変化を示す妥当な指標であると考えられている。しかしながら、Fukutani et al. (2013) は、6 秒間の等尺性足関節底屈運動の直後に角速度  $180^\circ/\text{s}$  で実施される等速性足関節底屈トルクが向上した一方で、EMG:M は変化しないことを明らかにした。同様に Seitz et al. (2015) は、膝関節による動的 CA を実施した後に PAPE が観察されたにも関わらず、EMG:M は変化しなかったことを報告している。以上の報告をまとめると、今現在 CA 実施後に神経伝達能力が向上し、それが引き続く随意運動パフォーマンスの向上、すなわち PAPE に寄与しているかについては未だ疑問の余地が残されている。

#### II-2-2-4. テスト動作に対する学習効果や慣れの影響

MacIntosh et al. (2012) は、PAPE メカニズムの一つにテスト動作に対する学習効果や慣れの影響を挙げている。つまり、特に不慣れなテスト動作であれば、その動作についての効果的なやり方を学習することでパフォーマンスが急激に向上する可能性がある。したがって、PAPE に影響を及ぼすメカニズムについてより詳細に検討する際には、事前にテスト動作に対して習熟してもらう必要があり、テスト動作の繰り返しによる学習効果や慣れの影響をできるだけ排除する必要がある。

### II-2-3. PAPE の経時的変化について

注目すべきことに、PAPE が CA 実施直後から観察されるケースというのは数少ない。Seitz and Haff (2016) によって行われたメタ分析によれば、比較的長い休息时间 (5-7 分,  $ES = 0.49$ ;  $\geq 8$  分,  $ES = 0.44$ ) を設けた後に PAPE は最大化する可能性が高く、比較的短い休息時間が設けられたプロトコルでは PAPE の程度は比較的低いことが示唆されている (0-4 分,  $ES = 0.17$ )。同様に Wilson et al. (2013) が行ったメタ分析においても、CA 実施後に比較的長い休息時間が設けられた場合の方が (3-7 分,  $ES = 0.54$ ; 7-10 分,  $ES = 0.74$ )、休息時間が短い場合 ( $\leq 2$  分;  $ES = 0.17$ ) よりも高い増強効果を示す可能性が示唆されている。CA 実施から比較的長い休息時間が設けたときにより高い PAPE が観察されやすい理由として、CA 実施に伴う疲労の影響が長い休息時間に伴い取り除かれることが挙げられる。それにも関わらず、Tillin and Bishop (2009) は、CA で生じる疲労の程度が低い場合には CA 実施直後から PAPE が観察される可能性があるとして述べている (Figure 7)。事実 French et al. (2003) は、CA の総収縮時間が直後に実施される爆発的随意運動パフォーマンスに及ぼす効果を調査し、3 秒間の等尺性膝関節伸展運動を 5 セット実施した直後では等速性膝伸展運動の最大トルクが基準値と比較して有意に低下した一方で、3 セット実施した際には CA 実施直後にも関わらず膝伸展トルクが有意に増加することを確認した。Tillin and Bishop (2009) は、CA を行うことで生じる疲労の程度が低い場合には、CA 実施直後であっても増強効果が疲労の影響を上回ることで随意運動パフォーマンスが向上する可能性があるとして述べている。また興味深いことに、PAPE を最大化させるのに求められる休息时间

というのは対象者の筋力レベルによって異なる可能性が指摘されている (Seitz et al., 2014; Seitz and Haff., 2016; Wilson et al., 2013; Miyamoto et al., 2013). Seitz et al. (2014) は, 90%1RM のバックスクワットを 3 レップ実施した後に引き続いて実施されるジャンプパフォーマンスの経時的変化が, アスリートの筋力レベルによって異なるか検証した. 彼らはバックスクワットの 1RM が体重の 2 倍未満の被験者は CA 実施から 9 分後に初めてジャンプパフォーマンスを高めることができたのに対し, バックスクワットの 1RM が体重の 2 倍以上の被験者は CA 実施から 6 分後にジャンプパフォーマンスを高めることを明らかにした. 個人の筋力レベルの差によって PAPE が表面化される時間帯が異なる要因として, 筋力レベルが比較的高い被験者は, 比較的低い被験者よりも高強度エクササイズに対する疲労耐性が高いことが挙げられる (Miyamoto et al., 2013; Jo et al., 2010; Seitz et al., 2014). 前述した通り, PAPE は CA 実施によって生じる増強効果が疲労の影響を上回ったときに初めて顕在化する. したがって, 疲労耐性の高い人は低い人よりも, 高強度 CA 実施に伴う疲労の発生が抑えられ, より早期から増強効果の恩恵を得ることができると今現在考えられている.

### 第Ⅲ章 方法

#### Ⅲ-1. 実験概要

本研究は各被験者 4 回のセッションに渡って実施された. 最初のセッションと以降 3 回のセッションの概要についてはそれぞれ, Figure 8A と Figure 8B に示した通りであった.

最初のセッションでは 10 秒間の膝伸展 MVC を実施し, 得られた最大膝伸展トルクを体重

で割った相対筋力を基に SI と WI の分類を行った。後半 3 回のセッションは最初のセッションで SI と WI のいずれかに分類された被験者に参加を依頼した。なお、各セッションは 24~72 時間以上の間隔を設けて行われた。実験セッションでは、PAPE を最大化させるのに最適な動的 CA の総収縮時間を明らかにするために SI と WI に分類された各被験者は、総収縮時間の異なる 3 種類の動的 CA (6 秒間 [6-CA], 12 秒間 [12-CA], および 18 秒間 [18-CA]) を実施した。動的 CA は角速度 60°/s で実施され、6-CA, 12-CA および 18-CA の膝伸展回数はそれぞれ 4, 8, および 12 回であった。また、動的 CA の前後に電気刺激による単収縮トルクを誘発することで PAP, さらには角速度 180°/s での等速性膝伸展運動を実施することで PAPE の経時的変化をそれぞれ観察した。なお、予備実験にて最大膝伸展トルクと最大単収縮トルクの試行間信頼性を検討した結果、級内相関係数はそれぞれ 0.962 (0.897-0.989) と 0.998 (0.995-1.000) となり非常に高かった。

全てのセッションにて、被験者は実験室に到着後、到着するまでに誘発された PAP の影響を取り除くために 10 分間の休息時間をとることが求められた。この休息時間は PAP の効果を消失させるのに十分な休息時間とされている (Hamada et al., 2000; Vandervoort et al., 1983)。休息後、被験者は等速性ダイナモメーター (Biodex System 4; Sakai Medical Instrument, Tokyo, Japan) に座り、利き脚の膝関節と股関節がそれぞれ 90°と 80°で固定された。胴体は 2 本の交差するシートベルトとウエストハーネスでダイナモメーターのシートに強く固定され、ダイナモメーターのレバーアームは外踝から 2~3 cm 上に取り付けられた。また、膝関節の回転軸はできるだけ大腿骨外側顆に合わせられた。また、MacIntosh et al. (2012) は、テスト動作に対する学習効果や慣れの影響が PAPE の値に影響をもたらす

可能性を示唆している。したがって本研究では、基準値の測定を行う前にテスト動作に特異的なウォームアップを実施し、学習効果や慣れによる増強効果の可能性をできるだけ排除した。

### III-2. 被験者

本研究の被験者は22名の男子アメリカンフットボール部の大学生であった（平均±標準偏差; 年齢,  $19.7 \pm 1.2$  歳; 身長,  $171.5 \pm 6.1$  cm; 体重,  $74.6 \pm 10.6$  kg）。本研究に参加する条件として、少なくとも6か月以上の下肢のレジスタンストレーニングの経験があることを設け、条件を満たす者が本研究に参加した。被験者は、実験期間中は普段の日常生活を継続し、身体活動レベルや食事・水分摂取量を変えないように指示を受けた。また、被験者は実験の24時間前から抑うつ物質（e.g., アルコール）およびエルゴジェニック物質（e.g., コーヒー）の摂取を控えるように指示された。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、同意を得た上で実験を実施した。また本研究は、大阪体育大学の研究倫理審査部会の承諾を受け、実施した（承認番号: 21-2）。

### III-3. SI と WI の分類

本研究では実験セッションに先立って、最大等尺性膝伸展筋力の測定を行いSIとWIの分類を行った。被験者は、開始の合図とともに出来るだけ速くかつ全力で膝を伸ばすように指示を受け、測定者は運動実施中に被験者を激励した。また、個人の筋力とPAPの関係



性を観察するために、10秒間の膝伸展運動の前と直後に電気刺激による単収縮トルクを誘発した。最大等尺性膝伸展運動によって誘発されたPAPの程度は、 $\%PAP_{MVC}$ として表され、以下の計算式で求められた。

$$\%PAP_{MVC} = \frac{(T_{twpost-MVC} - T_{twpre-MVC})}{T_{twpre-MVC}} \times 100$$

ここで、 $T_{twpre-MVC}$ と $T_{twpost-MVC}$ はそれぞれ、等尺性膝伸展運動の前と直後の最大単収縮トルクである。なお本研究では、10秒間の最大等尺性膝伸展運動中に得られた最大膝伸展トルクを体重で割った相対筋力を基に、上位8名をSI、下位8名をWIに分類した。

#### III-4. 電気刺激による単収縮トルクの誘発

大腿四頭筋の単収縮トルクを測定するために、粘着導子 (SR-4080; Minato Medical Science, Osaka, Japan) が貼られた  $10 \times 20$  cm のアルミホイルをキッチンペーパーで覆った電極パッドを作成した。作成された電極パッドは水で濡らされた後、利き脚の大腿四頭筋が全体的に覆われるように大腿前面上部と下部に2枚貼り付けられた。その後、被験者は等速性ダイナモメーターに座り固定された。電極パッドは出力ケーブル (D185-HB4; Digitimer Ltd, Hertfordshire, UK) を介して高電圧定電流刺激装置 (Model DS7AH; Digitimer Ltd, Hertfordshire, UK) と接続された。また、電気刺激の強度は100 mA から50 mA ずつ徐々に上げていき、単収縮トルクの最大値が得られた強度の120%に設定された (Hamada et al., 2003, Fukutani et al., 2013)。なお、刺激強度を決定する過程は毎回のセッションで行われた。ダイナモメーターの単収縮トルク信号は、Power Lab システム (Power Lab/8SP; ADInstruments, Bellaviata, NSW, Australia) によってアナログ-デジタル変換され、パーソナル

コンピューターのソフトウェア (Lab Chart 6 Japanese; ADInstruments) に記録された。また、ソフトウェア上に表示されたデジタルデータにはカットオフ周波数 12 Hz のデジタルフィルターをかけた。

### III-5. 特異的ウォーミングアップセッション

MacIntosh et al. (2012) は、テスト動作に対する学習効果や慣れが PAPE に影響を及ぼす可能性を指摘している。したがって本研究では、Seitz et al. (2015) の研究に基づき、Figure 8A で示したように角速度 180°/s の膝伸展運動に十分に習熟してもらった特異的ウォーミングアップセッションを事前に設けた。被験者は単収縮トルクの刺激強度決定後、角速度 180°/s の等速性膝伸展運動を主観的強度の 20%、40%、60%、そして 80% で各 2 回ずつ 45 秒間のセット間インターバルを設けて実施した。その後、主観的強度の 100% での等速性膝伸展運動を、連続した 3 回の最大トルクの差が 2% 未満になるまで 45 秒ごとに 1 回ずつ実施した。その際被験者は、出来るだけ速くかつ全力で膝を伸ばすように指示を受けた。

### III-6. テストプロトコル

特異的ウォーミングアップセッション終了後、10 分間の休息を設けた後に実験セッションへと移行した。実験セッションの概要は Figure 8B に示した通りである。実験セッションではまず、電気刺激による単収縮トルクを誘発し ( $Pr_{\text{before}}$ )、その後、角速度 180°/s での等速性膝伸展運動を 2 回実施した。2 回目の膝伸展運動終了直後に、単収縮トルクを再度

誘発した (Pre<sub>after</sub>)。ここでの2回目の単収縮トルクの誘発は、等速性膝伸展運動による PAP の程度を調査するために行われた。Pre<sub>after</sub>での電気刺激が与えられ、90秒間の休息が設けられた後に総収縮時間の異なる3種類の動的 CA (6-CA, 12-CA, あるいは18-CA) のいずれかが実施された。そして、動的 CA を終えてから10秒後 (Post-10 s), 1分後 (Post-1 min), 4分後 (Post-4 min), 7分後 (Post-7 min) そして10分後 (Post-10 min) にそれぞれ電気刺激による単収縮トルクの測定と角速度 180°/s での等速性膝伸展運動を実施した。等速性膝伸展運動は休息間隔を15秒間設け、各時間帯にて2回ずつ実施され、得られた最大値をその後の分析に供した。被験者はダイナモメーターの機械的ストップが起こるまで可動域全体に渡って最大等速性膝伸展運動を行い、1度目の膝伸展運動終了後、受動的にスタートポジションへと戻され2回目の膝伸展運動へと移行した。180°/s での角速度は、CA 実施後に等速性膝伸展パフォーマンスが向上することを観察している研究に基づいて決定された (Seitz et al., 2015)。なお、膝伸展運動の動作角度は Miyamoto et al. (2013) の研究に基づき、20°から110° (0° = 完全伸展) に設定された。各時間帯での PAPE の程度 (以下, %PAPE) は次の式で計算された。

$$\%PAPE = \{(T_{vol.post-CA} - T_{vol.pre-CA}) / T_{vol.pre-CA}\} \times 100$$

ここで、 $T_{vol.pre-CA}$  と  $T_{vol.post-CA}$  は、それぞれ CA を実施する前と各休息時間後の最大等速性膝伸展トルクを表している。また、実験セッションで測定した PAP の程度は %PAP として表され、その中でも、2回の最大等速性膝伸展運動で観察される %PAP は次の式で計算された。

$$\%PAP = \{(T_{tw.preafter-CA} - T_{tw.prebefore-CA}) / T_{tw.prebefore-CA}\} \times 100$$

ここで、 $T_{tw.prebefore-CA}$ と $T_{tw.preafter-CA}$ は、それぞれ Pre 測定で実施される 2 回の最大等速性膝伸展運動の前と後に誘発された最大単収縮トルクを表している。最後に CA 後の各休息時間後に観察される %PAP は次の式で計算された。

$$\%PAP = \{(T_{tw.post-CA} - T_{tw.prebefore-CA}) / T_{tw.prebefore-CA}\} \times 100$$

ここで、 $T_{tw.post-CA}$ は CA 後の各休息時間後の最大単収縮トルクを表している。

### III-7. CA プロトコル

本研究で用いられた動的 CA は、以前の Seitz et al. (2015) の研究に基づいて角速度 60°/s の等速性膝伸展運動が採用された。各プロトコルの動的 CA の収縮回数は 4, 8, そして 12 回に設定され、それぞれの総収縮時間は次の計算式で求められた。

$$\text{総収縮時間} = ROM / V_{CA} \times n$$

ここで、 $ROM$ は膝伸展運動の動作角度 (i.e., 90°) で、 $V_{CA}$ は角速度 (i.e., 60°/s), そして、 $n$ は収縮回数を表している。6-CA, 12-CA そして 18-CA の収縮回数はそれぞれ 4, 8, 12 回であったため、上記の計算式より動的 CA の総収縮時間は、それぞれ 6, 12, 18 秒間であった。

### III-8. 統計処理

本研究の結果は全て、平均値 ± 標準偏差 (Mean ± SD) で示した。SI と WI の比較には対応のない  $t$  検定を用いた。また、%PAP<sub>MVC</sub> と MVC および MVC/weight の関係性については、ピアソンの積率相関係数を用いて検討し、相関の強さは  $0.1 \leq r < 0.3$  を小,  $0.3 \leq r < 0.5$

を中、そして  $r \geq 0.5$  を大と分類した。さらに本研究では、テスト動作に特異的なウォーミングアップが十分に達成されていたかどうかを確認するために、一元配置分散分析を用いて、特異的ウォーミングアップセッションにおける最後3回の膝伸展トルクと Pre 測定時の膝伸展トルク間の比較を行った。各エクササイズプロトコルにおける %PAP の経時的変化に関しては、二元配置分散分析（時間 [Pre<sub>before</sub>, Pre<sub>after</sub>, Post-10 s, Post-1 min, Post-4 min, Post-7 min, Post-10 min] ×エクササイズ [6-CA, 12-CA, 18-CA]）を用いて検討した。また、%PAPE の経時的変化に関しても同様に、二元配置分散分析（時間 [Pre, Post-10 s, Post-1 min, Post-4 min, Post-7 min, Post-10 min] ×エクササイズ [6-CA, 12-CA, 18-CA]）を用いて検討した。交互作用が認められた場合は、事後検定として Bonferroni 法を用いて多重比較検定を行った。交互作用の効果量については偏イータ 2 乗 (partial  $\eta^2$ ) を用いて検討し（小: 0.01-0.059, 中: 0.06-0.137, 大: > 0.138）、一対比較に関する効果量は Cohen's  $d$  によって決定された（小: > 0.2, 中: > 0.5, 大: > 0.8）。なお分析には、SPSS Statistics ver.27.0（IBM 社）を用い、統計学的有意水準は 5%未満とした。

## 第IV章 結果

### IV-1. SI と WI の比較

被験者の身体的特性、MVC、MVC/weight、MVC 前後で誘発された単収縮トルク、および %PAP<sub>MVC</sub> については Table 1. に示す通りである。対応のない  $t$  検定の結果、絶対筋力である MVC ( $p < 0.001, d = 2.427$ ) と相対筋力である MVC/weight ( $p < 0.001, d = 3.434$ ) につい

て、SI と WI 間で有意な差が認められた。また、 $\%PAP_{MVC}$ においても SI と WI 間で有意な差が認められた ( $p = 0.004$ ,  $d = 1.806$ )。

#### IV-2. $\%PAP_{MVC}$ と MVC トルクの関係性

参加した全ての被験者を対象に、 $\%PAP_{MVC}$  と MVC および MVC/weight の関連性をそれぞれ検討した結果、MVC ( $r = 0.550$ ,  $p = 0.008$ ) と MVC/weight ( $r = 0.570$ ,  $p = 0.006$ ) のいずれにおいても有意な正の相関関係が認められた (Figure 9)。

#### IV-3. 特異的ウォーミングアップセッション

各エクササイズの特異的ウォーミングアップセッションで、等速性膝伸展運動を連続した3回の最大トルクの差が2%未満になるまでに実施した回数は、SIが6-CAプロトコルで $4.4 \pm 1.7$ 回、12-CAプロトコルで $4.9 \pm 2.7$ 回、そして18-CAプロトコルで $8.6 \pm 4.8$ 回、一方でWIは、6-CAプロトコルで $7.0 \pm 4.6$ 回、12-CAプロトコルで $7.3 \pm 4.8$ 回、そして18-CAプロトコルで $7.8 \pm 1.4$ 回であった。また、全てのエクササイズプロトコルにおける特異的ウォーミングアップセッションで行われた最後3回の膝伸展トルクとPre測定時の膝伸展トルクに関して一元配置分散分析を実施した結果、いずれのエクササイズプロトコルにおいても有意な主効果が認められなかった (Figure 10) ( $p > 0.05$ )。十分な練習が実施された段階における最大膝伸展トルクとPre測定時の最大膝伸展トルクとの間に有意な差が確認されなかったことから、CAを実施する前にテスト動作の練習が十分に行われ、学習効果や慣れがPAPEに及ぼす効果を最小限にすることができたと考えられる。

#### IV-4. %PAP

SI と WI の各エクササイズプロトコルでの%PAP については Figure 11. に示す通りである。SI について二元配置分散分析を実施した結果、有意な交互作用が確認された ( $p < 0.001, \eta^2 = 0.404$ )。続いて多重比較検定を行った結果、6-CA ( $15.7 \pm 6.3\%, p = 0.004, d = 1.068, 95\% \text{ 信頼区間 [CI] } 10.4-21.0$ )、12-CA ( $14.1 \pm 8.4\%, p = 0.045, d = 0.417, 95\% \text{ CI } 7.0-21.2$ ) および 18-CA ( $11.7 \pm 3.6\%, p = 0.001, d = 1.263, 95\% \text{ CI } 8.7-14.7$ ) の全てのエクササイズプロトコルにおいて  $\text{Pre}_{\text{after}}$  は  $\text{Pre}_{\text{before}}$  よりも有意に高い値が確認された。したがって、SI においては角速度  $180^\circ/\text{s}$  で実施される 2 回の等速性膝伸展運動によって PAP が誘発されることが確認された。また、6-CA においてのみ Post-10 s ( $29.5\% \pm 9.3\%, p = 0.001, d = 1.714, 95\% \text{ CI } 21.7-37.3$ ) と Post-1 min ( $18.5\% \pm 6.8\%, p = 0.003, d = 1.101, 95\% \text{ CI } 14.8-24.2$ ) は  $\text{Pre}_{\text{before}}$  よりも有意に高い値を示した。次に WI について二元配置分散分析を実施した結果、有意な交互作用が確認された ( $p < 0.001, \eta^2 = 0.369$ )。続いて多重比較検定を行った結果、いずれのエクササイズプロトコルにおいても  $\text{Pre}_{\text{before}}$  とその他の時間帯との間に有意な差は確認されなかった。

#### IV-5. %PAPE

SI と WI の各エクササイズプロトコルでの%PAPE の結果については Figure 12. に示した通りである。SI について二元配置分散分析を実施した結果、有意な交互作用が確認された ( $p < 0.001, \eta^2 = 0.377$ )。続いて多重比較検定を行った結果、18-CA について、Pre と比較し

て Post-4 min ( $7.0\% \pm 4.5\%$ ,  $p = 0.047$ ,  $d = 0.494$ , 95% CI 3.2-10.7) および Post-7 min ( $8.2\% \pm 4.3\%$ ,  $p = 0.016$ ,  $d = 0.568$ , 95% CI 4.6-11.8) で有意に高い値が確認された。次に WI について二元配置分散分析を実施した結果、有意な交互作用が確認されなかった ( $p = 0.057$ ,  $\eta^2 = 0.215$ )。

## 第V章 考察

本研究の目的は、相対筋力の異なるアスリート間で、PAPE を最大化させるのに最適な CA の総収縮時間が異なるか否かを検証することであった。本研究の結果、SI は最大随意膝伸展トルクを 18-CA のプロトコルでのみ CA 実施から 4 分後および 7 分後に向上させたことから (Figure 12A)、比較的長い総収縮時間で実施される CA が SI にとっては最適であるという我々の仮説が支持された。一方、WI においては全てのプロトコルにて PAPE を確認することができず (Figure 12B)、WI にとって比較的長い、あるいは短い総収縮時間で実施される CA のいずれが PAPE を最大化させるのに最適であるかを結論づけることが出来なかった。

本研究にて、SI は 18-CA プロトコルでのみ PAPE を示したことから (Figure 12A)、SI にとっては 20 秒程度の比較的長い総収縮時間で実施される CA が PAPE を最大化させるのに最適であることが示唆された。しかしながら、注意すべきことに、18-CA プロトコルで PAPE が観察された時間帯では既に PAP は消失しており (Figure 11A)、18-CA プロトコルの Post-4 min および Post-7 min で観察された PAPE のメカニズムに PAP が関与していないことが示された。本研究のように、PAP が既に消失している時間帯にて PAPE が観察され



ることは他の先行研究においても確認されている (Prieske et al., 2018; Thomas et al., 2017). Prieske et al. (2018) は, CA 後に PAP が観察されなかった時間帯にてジャンプパフォーマンスが向上することを示し, CA 実施後のジャンプパフォーマンスの向上に PAP は直接的には結び付かないと結論付けた. また, Thomas et al. (2017) は, CA として 3RM の 80%, 90%, そして 100%の重量でバックスクワットエクササイズをそれぞれ 3 レップ実施した 8 分後に CMJ 高が有意に増加することを確認したが, その時点では既に PAP は消失しており, ジャンプパフォーマンスの向上に PAP が関与していると結論付けることが出来なかった. Blazevich and Babault (2019) は, PAP 以外にも, CA 実施に伴う筋温の上昇, 神経伝達能力の向上, そして学習効果や慣れなどの影響が PAPE に関係していると指摘している. 例えば, de Ruyter and de Hann (2000) は筋温の上昇に伴い, 速度やパワーといった指標が増加することを報告しており, CA 実施に伴う筋温の上昇が比較的速い動作で実施される随意運動パフォーマンスを高める可能性がある. さらに González-Alonso et al. (2000) は, 3 分間の随意膝伸展運動の実施に伴い大腿四頭筋の筋温がエクササイズを通して上昇することを示しており, 本研究の 18-CA プロトコルは他の 2 つのプロトコルと比較して CA の総収縮時間が長いことから, 他の 2 つのプロトコルよりも筋温が上昇していたと考えられる. したがって, 18-CA プロトコルでのみ PAPE が確認された点については, 各プロトコルの CA 実施に伴う筋温上昇の程度の差が関係していた可能性が挙げられる. また, Folland et al. (2008) は, 膝関節の等尺性膝伸展運動の 5~11 分後に, M 波の最大振幅で正規化された H 波振幅が増大することを確認しており, この結果は, 事前に行われる CA が運動神経プールの興奮性を高めた可能性を示している. したがって本研究にお

いても、18-CAは脊髄レベルにおける神経伝達能力の向上をもたらし、結果として運動単位の動員数増加や発火頻度の増加を促進した可能性がある。さらに MacIntosh et al.

(2012)は、テスト運動に対する学習効果や慣れの影響が PAPE に関与している可能性を指摘している。しかしながら本研究では、以前行われた Seitz et al. (2015) の研究に基づいて Pre 測定を行う前に特異的ウォーミングアップセッションが設けられ、テスト運動に対する練習が十分に行われた状態で Pre 測定が実施されている (Figure 10)。したがって、テスト動作に対する学習効果や慣れの影響が今回観察された PAPE に影響を与えているとは考えにくい。以上の知見をまとめると、SIが18-CAプロトコル実施から4~7分後に示した PAPE には、筋温の上昇や神経伝達能力の向上など、PAP やテスト運動に対する学習効果や慣れ以外の要因が関与していると考えられる。しかしながら、本研究では、CA 実施に伴い筋温の上昇や神経伝達能力の向上が生じていたか否かについての調査がされていないため推測の域を出ることはできない。

PAP について、SIは6-CAプロトコルにて Post-10 s と Post-1 min の時間帯で  $Pre_{before}$  と比較して有意に高値を示した (Figure 11A)。しかしながら、同じ時間帯にて SIは6-CAプロトコルで PAPE を確認することが出来なかった (Figure 12A)。本研究と同様に、PAP が存在する時間帯にて随意運動パフォーマンスが向上しない現象は他の先行研究でも報告されている (Fukutani et al., 2013; Seitz et al., 2015; Zimmermann et al., 2021)。Fukutani et al.

(2013)は、6秒間の等尺性足関節底屈運動を実施した直後に PAP が基準値と比較して 62.7%有意に高値を示し、それと同時に角速度 180°/s で実施された等速性足関節底屈運動の最大トルクも基準値と比較して有意に高値を示すことを確認した。しかしながら、CA

実施から1分後では基準値と比較して有意に高い値が保たれていたとはいえ、PAPは30.3%まで低下し、随意運動パフォーマンスに至っては、基準値との間で有意差は観察されなくなっていた。重要なことに、CA実施に伴う増強効果に対する感受性は単収縮トルクと最大随意トルクの間では異なることが知られている (Sweeney et al., 1993)。細胞質内における $\text{Ca}^{2+}$ 濃度は単収縮と比較して最大随意収縮で高く、また、CA実施に伴うトルクの増加の程度は、細胞質内における $\text{Ca}^{2+}$ 濃度が高くなるにつれて小さくなると考えられている (Persechini et al., 1985)。その要因には、 $\text{Ca}^{2+}$ 濃度が高い状況というのは既に多くのクロスブリッジが形成されており、P-MRLCが生じミオシンのヘッドがアクチンに近づくことで生じる増強効果が確認されにくいことが関係している。このような背景から、Zimmermann et al. (2020) は、PAPがPAPEの発生に貢献するためには、PAPの程度は非常に大きくなければならないと述べている。本研究の6-CAプロトコルにおいて、SIがPost-10 sとPost-1 minで示したPAPの程度はそれぞれ $29.5\% \pm 9.3\%$ と $18.5\% \pm 6.8\%$ であり、ここでのPAPの程度は、統計学的な差が観察されるまで随意運動パフォーマンスを高めるには不十分であった可能性がある。

本研究にて、SIは18-CAプロトコルを実施した4~7分後に随意運動パフォーマンスを高めることができた一方で、WIはいずれの時間帯においても随意運動パフォーマンスを高めることが出来なかった。我々は、18-CAプロトコル後にPAPEがSIで確認され、WIでは確認されなかった要因として、高強度エクササイズに対する疲労耐性の差が関係していると考えた。Miyamoto et al. (2013) は、12週間の高強度レジスタンストレーニングの前後で、5秒間の等尺性膝関節伸展運動が引き続いて実施される等速性膝伸展運動の最大ト

ルクに及ぼす効果を調査した。その結果、介入前では CA を実施した 1 分後に初めて随意運動パフォーマンスが向上することを確認したが、介入後では CA を実施した直後から随意運動パフォーマンスが向上することを明らかにした。彼らは、介入後に随意運動パフォーマンスが向上する時間帯が早まった要因として、12 週間の高強度レジスタンストレーニングによって高強度 CA に対する疲労耐性が身に付き、CA 実施に伴う著しい疲労の発生が抑えられたことを挙げた。彼らが示した結果は、言い換えると、相対筋力の高い被験者が高強度 CA に対する高い疲労耐性を有していることを意味しており、本研究においても SI は高強度 CA に対する比較的高い疲労耐性を備えていた可能性がある。その一方で、WI は高強度 CA に対する疲労耐性が比較的低かった可能性があり、18-CA によって生じた著しい疲労が増強効果を打ち消し、結果として引き続いて実施される随意運動パフォーマンスを高めることができなかつた可能性がある。また、WI がいずれのプロトコルを実施した後においても PAP を有意に高めることが出来なかつた点についても言及しておく必要がある。Hamada et al. (2000) は、PAP の程度は筋線維タイプによって異なり、速筋線維の含有率の高い被験者ほど高い PAP を発動することを示した。相対筋力の高い人が低い人よりも速筋線維の含有率が高い傾向にあることを踏まえると (Aagaard and Andersen., 1998; Maughan et al., 1983), 相対筋力の高い人は CA 実施によって高い PAP を発動する可能性がある。実際に本研究においても、被験者の相対筋力と PAP との間に有意な正の相関関係 ( $r = 0.570, p = 0.006$ ) が存在することが確認されており (Figure 9), 相対筋力の低い被験者で構成された WI は、速筋線維の含有率が低いことで PAP を有意に高めることが出来なかつた可能性がある。

本研究の研究限界として、以下の点が挙げられる。一つ目に、SI と WI の各群のサンプルサイズが小さかったことが挙げられる。本研究では、被験者間の筋力レベルの差を明確に分けるために相対筋力が中間層の被験者は SI 群と WI 群に含めなかったが、今回の知見をより明らかにするためには、より大きなサンプルサイズで行われた研究が必要であると考える。二つ目に、本研究に参加した被験者の全員がアメリカンフットボールの選手であったため、その競技特性が今回の結果に影響を及ぼした可能性がある。具体的には、アメリカンフットボールは試合の大半が、間欠的な短時間高強度運動で行われる種目であり、本研究の参加者は、PAP の程度に関わる速筋線維の含有率が比較的高い被験者で構成された可能性がある。そのため、競技中における持久的要素の重要性が比較的高い種目（e.g., 陸上競技の長距離選手）では、速筋線維の含有率が低い選手が多くなり、本研究とは異なる結果が得られる可能性がある。三つ目に、本研究で行われた CA は、実際のトレーニング現場にて PAPE を活用する際に一般的に用いられるレジスタンスエクササイズとは異なり、等速性運動装置を用いて実施されたエクササイズである。したがって、本研究で得られた結果がより一般的な等張性運動を用いた場合でも同様に観察されるかどうかは不明であり、検討の余地がある。四つ目に、本研究では PAPE のメカニズムとして考えられており、18-CA 後の随意運動パフォーマンス向上メカニズムを説明する可能性のある筋温の上昇、神経伝達能力の向上、さらには水分含有量の変化（Blazevich and Babault., 2019）に関する指標が測定されていない。したがって、今後は収縮時間の長い CA 実施後にこれらの指標も測定されるべきである。最後に、本研究の結果からは、WI にとって比較的短いあるいは長い総収縮時間で実施される CA のいずれが PAPE を最大化させるのに最適であるか

を決定づけることが出来なかった。したがって、将来的には、今回用いた実験条件が修正された研究が実施されることが望まれる。

まとめると、本研究の結果から、SIは比較的長い総収縮時間で実施されるCAがPAPEを最大化させるという観点において最適であることが示唆された。また、そのメカニズムには、PAPやテスト運動に対する学習効果や慣れの影響以外の要因が関与している可能性が示唆された。一方でWIは、いずれのプロトコルを実施した後においてもPAPEを示すことができず、本研究で用いたプロトコルからは比較的長い、あるいは短い総収縮時間で実施されるCAのいずれがWIにとって最適であるかを結論付けることができなかった。

## 第VI章 総括

本研究では、アスリートの筋力レベルの差によってPAPEを最大化させるのに最適なCAの総収縮時間が異なるか否かを検討することを目的とした。22名の男性アメリカンフットボール選手は10秒間の最大等尺性膝伸展運動を行い、そこで得られた最大膝伸展トルクを体重で割った相対筋力を基に上位8名をSI、下位8名をWIに分類した。また、最大等尺性膝伸展運動の前後には電気刺激による単収縮トルクの誘発を行い、絶対筋力および相対筋力とPAPの程度の関係性についても検討を行った。SIとWIのいずれかに分類された被験者は、総収縮時間の異なる3種類の動的CA（6-CA [6秒間]、12-CA [12秒間]、18-CA [18秒間]）を別日にランダムで行った。動的CAの前後には単収縮トルクの誘発、および角速度180°/sの等速性膝伸展運動を行いPAPとPAPEの経時的変化を観察した。本研究で得られた結果は以下の通りである。

1. 10秒間の最大等尺性膝伸展運動によって誘発された PAP の程度は, SI と WI との間で有意差が認められた ( $p = 0.004, d = 1.806$ ) .
2. 絶対筋力 ( $r = 0.550, p = 0.008$ ) および相対筋力 ( $r = 0.570, p = 0.006$ ) と PAP の程度との間に有意に高い相関関係が認められた.
3. 総収縮時間が比較的長い 18-CA を用いた CA 条件で, SI は最大膝伸展トルクを Pre と比べ 4 分後 ( $7.0\% \pm 4.5\%, p = 0.047, d = 0.494, 95\% \text{ CI } 3.2-10.7$ ) と 7 分後 ( $8.2\% \pm 4.3\%, p = 0.016, d = 0.568, 95\% \text{ CI } 4.6-11.8$ ) に有意な高値を示したが, 同じ時間帯で PAP は観察されなかった.
4. 総収縮時間が比較的短い 6-CA を用いた CA 条件で, SI は単収縮トルクを Pre と比べ 10 秒後 ( $29.5\% \pm 9.3\%, p = 0.001, d = 1.714, 95\% \text{ CI } 21.7-37.3$ ) と 1 分後 ( $18.5\% \pm 6.8\%, p = 0.003, d = 1.101, 95\% \text{ CI } 14.8-24.2$ ) に有意に高い値を示したが, 同じ時間帯で PAPE は観察されなかった.
5. WI は全ての CA 条件で PAP と PAPE の両方を確認することができなかった.

以上の結果から、SIは20秒程度の比較的長い総収縮時間で実施されるCAがPAPEを最大化させるのに最適だが、そのメカニズムにはPAPが関与していないことが示された。一方で、WIは総収縮時間が長い、あるいは短いCAのいずれがPAPEを最大化させるのに最適であるかを本研究では結論付けることができなかった。本研究の結果に基づくと、指導者はアスリートの筋力レベルを考慮しながらPAPEを最大化させるための戦略を立てる必要があると言える。具体的には、筋力レベル高いアスリートはPAPEを最大化させるために比較的総収縮時間が長いCAを選択するのが望ましいだろう。一方で、筋力レベルの低いアスリートはPAPEを示すための最初の段階として、長期間の高強度レジスタンストレーニングを実施する必要があるかもしれない。長期間の高強度レジスタンストレーニングは高強度CAに対する疲労耐性を高めることで、結果としてPAPEの顕在化に繋がる可能性がある。本研究の実用性を高めるために、今後の研究では、本研究で観察された結果が等張性運動を採用した場合にも観察されるかどうかを検証する必要がある。

## 謝辞

本研究の実験デザインの考案、論文作成に至るまで、懇切丁寧なご指導・ご助言を賜りました大阪体育大学スポーツ科学研究科の三島隆章教授に深甚なる謝意を表します。論文作成に留まらず、部活動指導のご助言ならびに進路に関するご相談など、様々な場面で頂いた言葉によってここまで前進することが出来ました。また、論文作成に際して、貴重なお時間を割いてご校閲ならびにご助言頂きました大阪体育大学スポーツ科学研究科の浜田拓教授、梅林薫教授に厚く感謝の意を表します。さらに、本実験にご協力頂いた大阪体育



大学アメリカンフットボール部の学生，そして被験者の呼びかけから実験の手伝いにかけて，多くの時間を費やしてご協力頂いた大阪体育大学三島研究室3年の横田右京さんにはこの場を借りて深く感謝致します。最後に，地元札幌を離れて進学することに対して，背中を押して応援し，そして支えてくれた父母および祖父母に心から感謝申し上げます。

### 参考文献

- 1) Aagaard, P., and Andersen, J. L. (1998) Correlation between contractile strength and myosin heavy chain isoform composition in human skeletal muscle. *Med. Sci. Sports. Exerc.*, 30(8): 1217-1222. doi:10.1097/00005768-199808000-00006
- 2) Arabadzhev, T. I., Dimitrov, V. G., Dimitrova, N. A., and Dimitrov, G. V. (2010) Influence of motor unit synchronization on amplitude characteristics of surface and intramuscularly recorded EMG signals. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 108(2): 227-237. doi:10.1007/s00421-009-1206-3
- 3) Batista, M. A., Roschel, H., Barroso, R., Ugrinowitsch, C., and Tricoli, V. (2011) Influence of strength training background on postactivation potentiation response. *J. Strength. Cond. Res.*, 25(9): 2496-2502. doi:10.1519/JSC.0b013e318200181b
- 4) Baudry, S., and Duchateau, J. (2007) Postactivation potentiation in a human muscle: effect on the load-velocity relation of tetanic and voluntary shortening contractions. *J. Appl. Physiol.*, 103(4): 1318-1325. doi:10.1152/jappphysiol.00403.2007

- 5) Bergmann, J., Kramer, A., and Gruber, M. (2013) Repetitive hops induce postactivation potentiation in triceps surae as well as an increase in the jump height of subsequent maximal drop jumps. *PLoS. One.*, 8(10): e77705. doi:10.1371/journal.pone.0077705
- 6) Blazeovich, A. J., and Babault, N. (2019) Post-activation potentiation versus post-activation performance enhancement in humans: historical perspective, underlying mechanisms, and current issues. *Front. Physiol.*, 10: 1359. doi:10.3389/fphys.2019.01359
- 7) Buchthal, F., Kaiser, E., and Knappeis, G. G. (1944) Elasticity, viscosity and plasticity in the cross striated muscle fibre. *Acta Physiol Scand.*, 8(1): 16-37.
- 8) Cuenca-Fernández, F., Smith, I. C., Jordan, M. J., MacIntosh, B. R., López-Contreras, G., Arellano, R., and Herzog, W. (2017) Nonlocalized postactivation performance enhancement (PAPE) effects in trained athletes: a pilot study. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.*, 42(10): 1122-1125. doi:10.1139/apnm-2017-0217.
- 9) Davies, C. T., and Young, K. (1983) Effect of temperature on the contractile properties and muscle power of triceps surae in humans. *J. Appl. Physiol. Respir. Environ. Exerc. Physiol.*, 55(1 Pt 1): 191-195. doi:10.1152/jappl.1983.55.1.191
- 10) De Ruyter, C. J., De Haan, A. (2000) Temperature effect on the force/velocity relationship of the fresh and fatigued human adductor pollicis muscle. *Pflugers. Arch.*, 440(1): 163-170. doi:10.1007/s004240000284

- 11) Febbraio, M. A., Carey, M. F., Snow, R. J., Stathis, C. G., and Hargreaves, M. (1996) Influence of elevated muscle temperature on metabolism during intense, dynamic exercise. *Am J Physiol.*, 271(5 Pt 2): R1251-R1255. doi:10.1152/ajpregu.1996.271.5.R1251
- 12) Folland, J. P., Wakamatsu, T., and Fimland, M. S. (2008) The influence of maximal isometric activity on twitch and H-reflex potentiation, and quadriceps femoris performance. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 104(4): 739-748. doi:10.1007/s00421-008-0823-6
- 13) French, D. N., Kraemer, W. J., and Cooke, C. B. (2003) Changes in dynamic exercise performance following a sequence of preconditioning isometric muscle actions. *J. Strength. Cond. Res.*, 17(4): 678-685. doi:10.1519/1533-4287(2003)017<0678:cidepf>2.0.co;2
- 14) Fukutani, A., Miyamoto, N., Kanehisa, H., Yanai, T., and Kawakami Y. (2013) Potentiation of isokinetic torque is velocity-dependent following an isometric conditioning contraction. *Springerplus.*, 2(1): 554. doi:10.1186/2193-1801-2-554
- 15) Fukutani, A., Miyamoto, N., Kanehisa, H., Yanai, T., and Kawakami, Y. (2013) Potentiation of isokinetic torque is velocity-dependent following an isometric conditioning contraction. *Springerplus.*, 2(1): 554. doi:10.1186/2193-1801-2-554
- 16) Fukutani, A., Takei, S., Hirata, K., Miyamoto, N., Kanehisa, H., and Kawakami, Y. (2014) Influence of the intensity of squat exercises on the subsequent jump performance. *J. Strength. Cond. Res.*, 28(8): 2236-2243. doi:10.1519/JSC.0000000000000409

- 17) González-Alonso, J., Quistorff, B., Krstrup, P., Bangsbo, J., and Saltin, B. (2000) Heat production in human skeletal muscle at the onset of intense dynamic exercise. *J. Physiol.*, 524 Pt 2 (Pt 2): 603-615. doi:10.1111/j.1469-7793.2000.00603.x
- 18) Güllich, A., and Schmidtbleicher, D. (1996). MVC-induced short-term potentiation of explosive force. *New. Stud. Athletics.*, 11(4): 67-84.
- 19) Hamada, T., Sale, D. G., MacDougall, J. D., and Tarnopolsky, M. A. (2000) Postactivation potentiation, fiber type, and twitch contraction time in human knee extensor muscles. *J. Appl. Physiol.*, 88(6): 2131-2137. doi:10.1152/jappl.2000.88.6.2131
- 20) Hamada, T., Sale, D. G., MacDougall, J. D., and Tarnopolsky, M. A. (2003) Interaction of fibre type, potentiation and fatigue in human knee extensor muscles. *Acta. Physiol. Scand.*, 178(2): 165-173. doi:10.1046/j.1365-201X.2003.01121.x
- 21) Houston, M. E., and Grange, R. W. (1990) Myosin phosphorylation, twitch potentiation, and fatigue in human skeletal muscle. *Can. J. Physiol. Pharmacol.*, 68(7): 908-913.  
doi:10.1139/y90-139
- 22) Jo, E., Judelson, D. A., Brown, L. E., Coburn, J. W., and Dabbs, N. C. (2010) Influence of recovery duration after a potentiating stimulus on muscular power in recreationally trained individuals. *J. Strength. Cond. Res.*, 24(2): 343-347. doi:10.1519/JSC.0b013e3181cc22a4
- 23) Karvonen, J. (1992) Importance of warm up and cool down on exercise performance. In: Karvonen J, Lemon PWR, Iliev I, editors. *Medicine and sports training and coaching*. Basel: Karger, 190–213.

- 24) Kilduff, L. P., Bevan, H. R., Kingsley, M. I., Owen, N. J., Bennett, M. A., Bunce, P. J., Hore, A. M., Maw, J. R., and Cunningham, D. J. (2007) Postactivation potentiation in professional rugby players: optimal recovery. *J. Strength. Cond. Res.*, 21(4): 1134-1138. doi:10.1519/R-20996.1
- 25) MacIntosh, B. R., Robillard, M. E., and Tomaras, E. K. (2012) Should postactivation potentiation be the goal of your warm-up? *Appl Physiol. Nutr. Metab.*, 37(3): 546-550. doi:10.1139/h2012-016
- 26) Manning, D. R., and Stull, J. T. (1982) Myosin light chain phosphorylation-dephosphorylation in mammalian skeletal muscle. *Am. J. Physiol.*, 242(3): C234-C241. doi:10.1152/ajpcell.1982.242.3.C234
- 27) Maughan, R. J., Watson, J. S., and Weir, J. (1983) Relationships between muscle strength and muscle cross-sectional area in male sprinters and endurance runners. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, 50(3): 309-318. doi:10.1007/BF00423237
- 28) Mitchell, C. J., and Sale, D. G. (2011) Enhancement of jump performance after a 5-RM squat is associated with postactivation potentiation. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 111(8): 1957-1963. doi:10.1007/s00421-010-1823-x
- 29) Miyamoto, N., Kanehisa, H., Fukunaga, T., and Kawakami, Y. (2011) Effect of postactivation potentiation on the maximal voluntary isokinetic concentric torque in humans. *J. Strength. Cond. Res.*, 25(1): 186-192. doi:10.1519/JSC.0b013e3181b62c1d

- 30) Miyamoto, N., Wakahara, T., Ema, R., and Kawakami, Y. (2013) Further potentiation of dynamic muscle strength after resistance training. *Med. Sci. Sports. Exerc.*, 45(7): 1323-1330.  
doi:10.1249/MSS.0b013e3182874c0e
- 31) Moore, R. L., and Stull, J. T. (1984) Myosin light chain phosphorylation in fast and slow skeletal muscles in situ. *Am. J. Physiol.*, 247(5 Pt 1): C462-C471.  
doi:10.1152/ajpcell.1984.247.5.C462
- 32) Naclerio, F., Chapman, M., Larumbe-Zabala, E., Massey, B., Neil, A., and Triplett, T. N. (2015) Effects of three different conditioning activity volumes on the optimal recovery time for potentiation in college athletes. *J. Strength. Cond. Res.*, 29(9): 2579-2585.  
doi:10.1519/JSC.0000000000000915
- 33) Persechini, A., Stull, J. T., Cooke, R. (1985) The effect of myosin phosphorylation on the contractile properties of skinned rabbit skeletal muscle fibers. *J Biol Chem.*, 260(13): 7951-7954.  
doi.org/10.1016/S0021-9258(17)39544-3
- 34) Prieske, O., Behrens, M., Chaabene, H., Granacher, U., and Maffiuletti, N. A. (2020) Time to differentiate postactivation "potentiation" from "performance enhancement" in the strength and conditioning community. *Sports. Med.*, 50(9): 1559-1565. doi:10.1007/s40279-020-01300-0
- 35) Prieske, O., Maffiuletti, N. A., and Granacher, U. (2018) Postactivation potentiation of the plantar flexors does not directly translate to jump performance in female elite young soccer players. *Front. Physiol.*, 9: 276. doi:10.3389/fphys.2018.00276
- 36) Rassier, D. E., and MacIntosh, B. R. (2000) Coexistence of potentiation and fatigue in skeletal muscle. *Braz. J. Med. Biol. Res.*, 33(5): 499-508. doi:10.1590/s0100-879x2000000500003

- 37) Sargeant, A. J. (1987) Effect of muscle temperature on leg extension force and short-term power output in humans. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, 56(6): 693-698.  
doi:10.1007/BF00424812
- 38) Seitz, L. B., Trajano, G. S., Dal Maso, F., Haff, G. G., and Blazevich, A. J. (2015) Postactivation potentiation during voluntary contractions after continued knee extensor task-specific practice. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.*, 40(3): 230-237. doi:10.1139/apnm-2014-0377
- 39) Seitz, L. B., and Haff, G. G. (2016) Factors modulating post-activation potentiation of jump, sprint, throw, and upper-body ballistic performances: A systematic review with meta-analysis. *Sports. Med.*, 46(2): 231-240. doi:10.1007/s40279-015-0415-7
- 40) Seitz, L. B., de Villarreal, E. S., and Haff, G. G. (2014) The temporal profile of postactivation potentiation is related to strength level. *J. Strength. Cond. Res.*, 28(3): 706-715.  
doi:10.1519/JSC.0b013e3182a73ea3
- 41) Seitz, L. B., de Villarreal, E. S., and Haff, G. G. (2014) The temporal profile of postactivation potentiation is related to strength level. *J. Strength. Cond. Res.*, 28(3): 706-715.  
doi:10.1519/JSC.0b013e3182a73ea3
- 42) Sotiropoulos, K., Smilios, I., Christou, M., Barzouka, K., Spaias, A., Douda, H., and Tokmakidis, S. P. (2010) Effects of warm-up on vertical jump performance and muscle electrical activity using half-squats at low and moderate intensity. *J. Sports. Sci. Med.*, 9(2): 326-331.

- 43) Sweeney, H. L., Bowman, B. F., Stull, J. T. (1993) Myosin light chain phosphorylation in vertebrate striated muscle: regulation and function. *Am. J. Physiol.*, 264(5 Pt 1): C1085-C1095.  
doi:10.1152/ajpcell.1993.264.5.C1085
- 44) Szczesna, D. (2003) Regulatory light chains of striated muscle myosin. Structure, function and malfunction. *Curr. Drug. Targets. Cardiovasc. Haematol. Disord.*, 3(2): 187-197.  
doi:10.2174/1568006033481474
- 45) Szczesna, D., Zhao, J., Jones, M., Zhi, G., Stull, J., and Potter, J. D. (2002) Phosphorylation of the regulatory light chains of myosin affects Ca<sup>2+</sup> sensitivity of skeletal muscle contraction. *J. Appl. Physiol.*, 92(4): 1661-1670. doi:10.1152/jappphysiol.00858.2001
- 46) Thomas, C. K., Johansson, R. S., and Bigland-Ritchie, B. (2006) EMG changes in human thenar motor units with force potentiation and fatigue. *J. Neurophysiol.*, 95(3): 1518-1526.  
doi:10.1152/jn.00924.2005
- 47) Thomas, K., Toward, A., West, D. J., Howatson, G., and Goodall, S. (2017) Heavy-resistance exercise-induced increases in jump performance are not explained by changes in neuromuscular function. *Scand. J. Med. Sci. Sports.*, 27(1): 35-44. doi:10.1111/sms.12626
- 48) Tillin, N. A., and Bishop, D. (2009) Factors modulating post-activation potentiation and its effect on performance of subsequent explosive activities. *Sports. Med.*, 39(2): 147-166.  
doi:10.2165/00007256-200939020-00004
- 49) Trimble, M. H., and Harp, S. S. (1998) Postexercise potentiation of the H-reflex in humans. *Med Sci Sports Exerc.*, 30(6): 933-941. doi:10.1097/00005768-199806000-00024

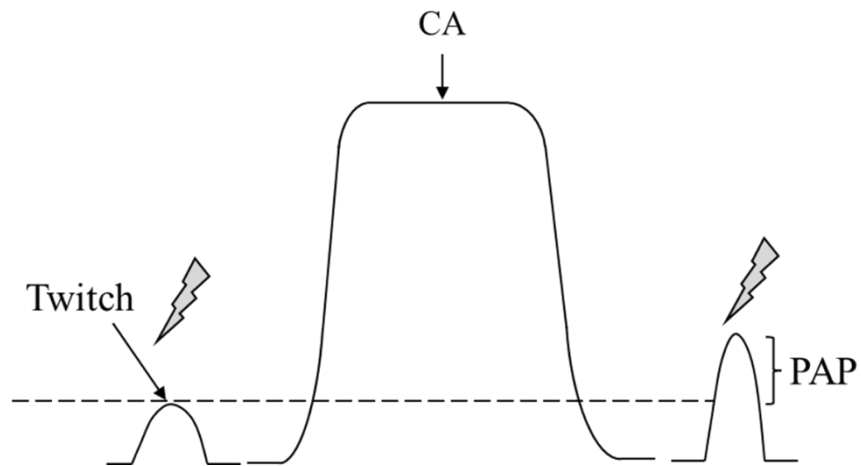


- 50) Vandervoort, A. A., Quinlan, J., and McComas, A. J. (1983) Twitch potentiation after voluntary contraction. *Experimental Neurology*, 81: 141-152.
- 51) Wilson, J. M., Duncan, N. M., Marin, P. J., Brown, L. E., Loenneke, J. P., Wilson, Stephanie. M. C., Jo, E., Lowery, R. P., and Ugrinowitsch C. (2013) Meta-analysis of postactivation potentiation and power: effects of conditioning activity, volume, gender, rest periods, and training status. *J. Strength. Cond. Res.* 27(3):854-859. doi:10.1519/JSC.0b013e31825c2bdb
- 52) Zimmermann, H. B., MacIntosh, B. R., and Dal Pupo, J. (2020) Does postactivation potentiation (PAP) increase voluntary performance? *Appl. Physiol. Nutr. Metab.*, 45(4): 349-356. doi:10.1139/apnm-2019-0406
- 53) Zimmermann, H. B., Costa, F. E., Sakugawa, R., MacIntosh, B. R., Diefenthaler, F., and Dal Pupo, J. (2021) Plyometric exercise enhances twitch contractile properties but fails to improve voluntary rate of torque development in highly trained sprint athletes. *Eur. J. Sport. Sci.*, 1-10. doi:10.1080/17461391.2021.1916083

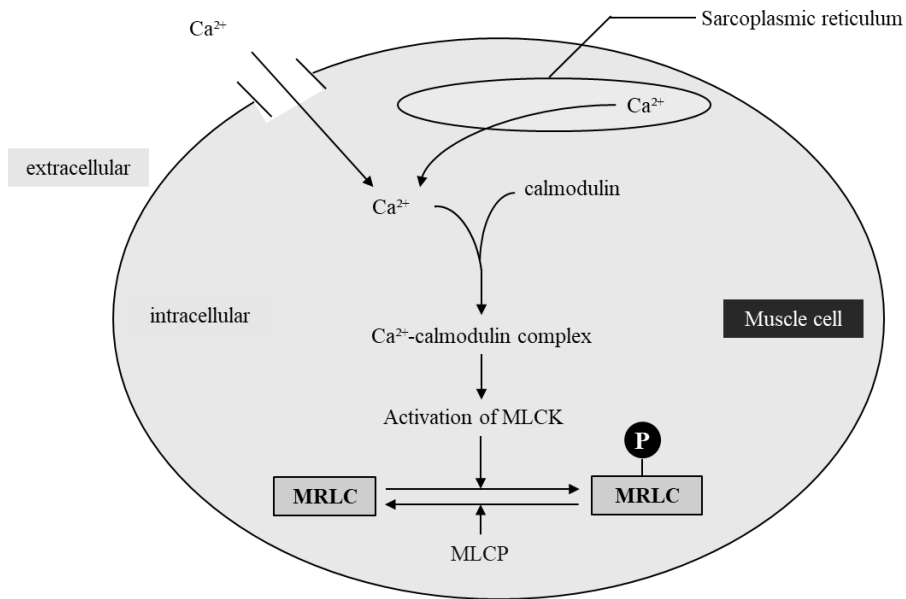
**Table 1. Physical characteristics, MVC, twitch torque, and %PAP<sub>MVC</sub> in the whole group and SI and WI subgroups.**

	Whole (n = 22)	SI (n = 8)	WI (n = 8)
Age (year)	19.7 ± 1.2	19.9 ± 1.6	19.9 ± 1.0
Height (m)	171.5 ± 6.1	172.5 ± 6.5	169.1 ± 5.7
Weight (kg)	74.6 ± 10.6	72.3 ± 10.4	77.5 ± 12.5
MVC (N·m)	274.7 ± 68.2	337.6 ± 41.6*	227.3 ± 49.0
MVC/Weight (N·m·kg <sup>-1</sup> )	3.7 ± 0.9	4.7 ± 0.5*	3.0 ± 0.5
pre-MVC (N·m)	44.6 ± 8.9	43.7 ± 6.0	48.0 ± 11.0
post-MVC (N·m)	71.3 ± 10.6	75.3 ± 8.1	67.5 ± 12.4
%PAP <sub>MVC</sub> (%)	63.2 ± 29.1	73.5 ± 11.2*	43.0 ± 21.1

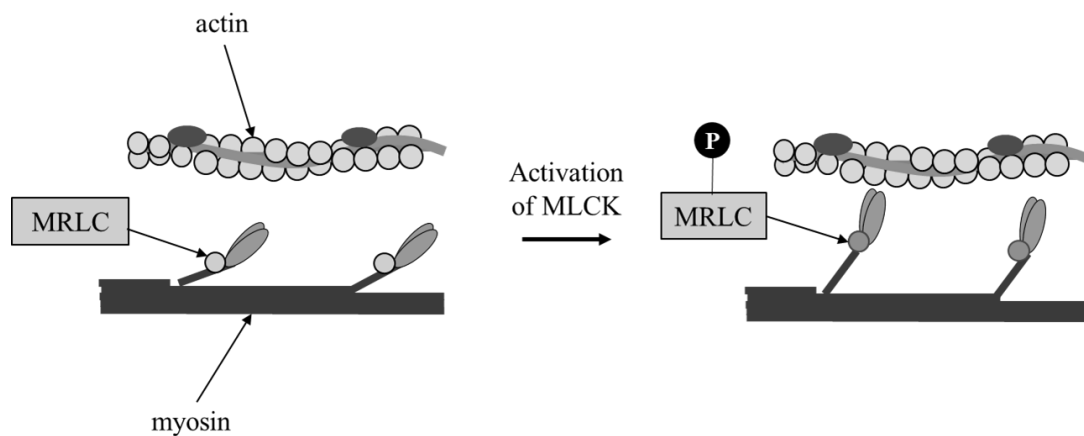
Values are means ± standard deviation. MVC, maximum voluntary contraction; pre-MVC, twitch torque before MVC; post-MVC, twitch torque after MVC; SI, stronger individuals; WI, weaker individuals. The statistical difference is set at  $p < 0.05$ : difference versus WI\*.



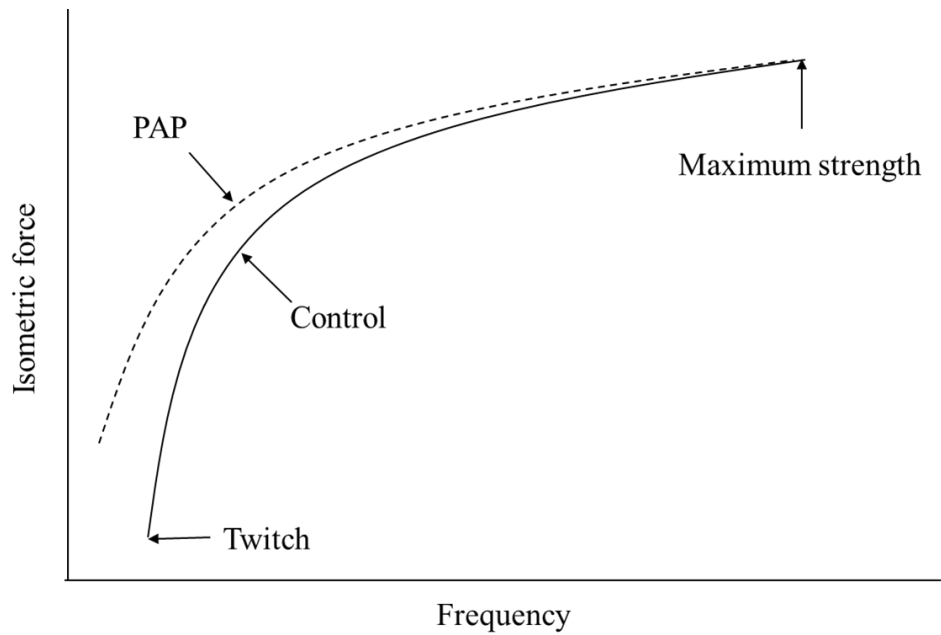
**Figure 1. Post-activation potentiation (PAP) after conditioning activity (CA).** Maximal or submaximal voluntary contraction temporarily enhances the twitch torque. This phenomenon is referred to as PAP.



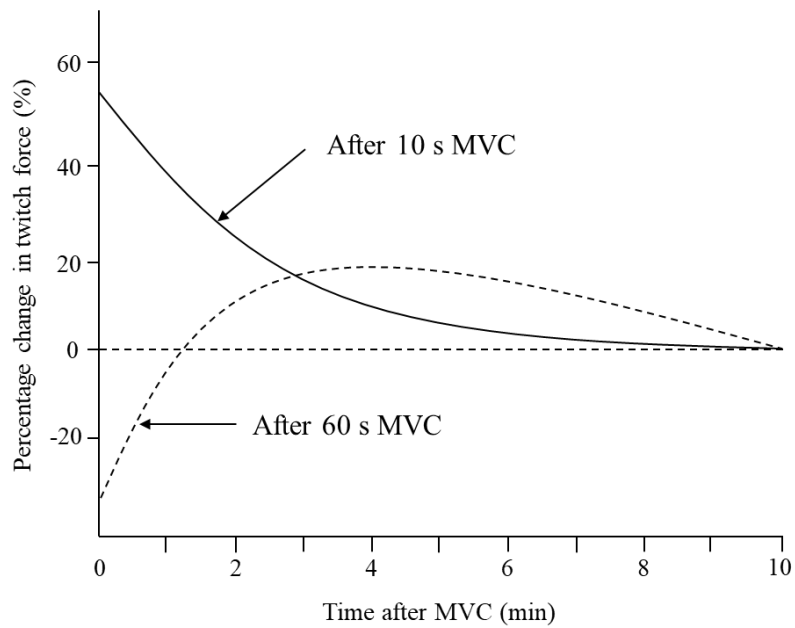
**Figure 2. Phosphorylation of myosin regulatory light chain (P-MRLC) known as a major mechanism of PAP.** Calcium ions ( $\text{Ca}^{2+}$ ) flowing into the intracellular from the extracellular and sarcoplasmic reticulum form complex with calmodulin.  $\text{Ca}^{2+}$ -calmodulin complex activate the myosin light chain kinase (MLCK). MLCK then phosphorylates the myosin regulatory light chain (MRLC), which is believed to the major mechanisms of PAP. Dephosphorylation of MRLC is completed by myosin light chain phosphatase (MLCP).



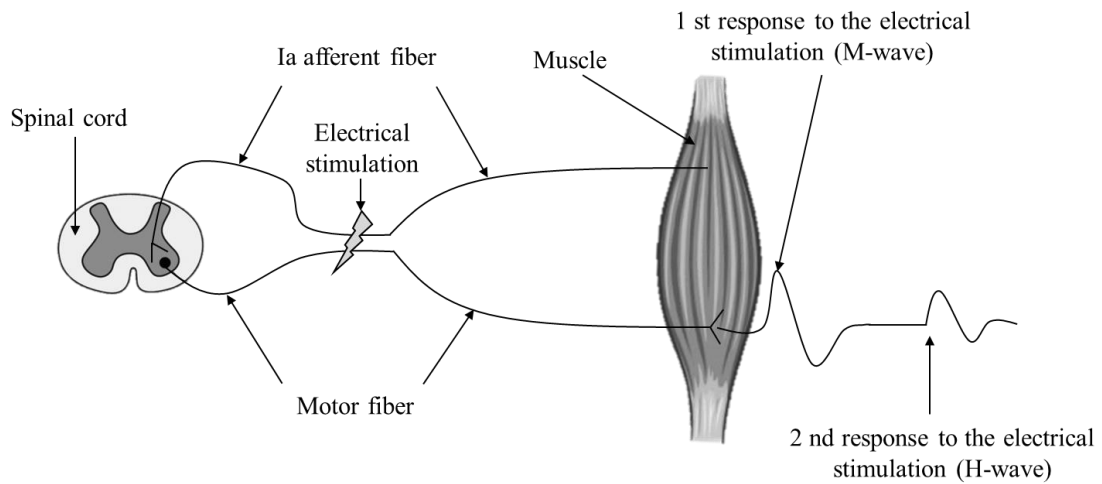
**Figure 3. The structural changes in the actin-myosin complex associated with phosphorylation of MRLC.** MRLC is attached to the neck of myosin filament, and phosphorylation of MRLC by MLCK activation brings the head of myosin filament close to the actin filament. Such a structural change in the actin-myosin complex increases the probability of cross-bridge cycling to a given amount of  $\text{Ca}^{2+}$  released.



**Figure 4. The effect of PAP on the isometric force-frequency relationship.** Since frequency determines the amount of  $\text{Ca}^{2+}$  released and therefore its concentration ( $[\text{Ca}^{2+}]$ ), low and high frequencies correspond to low and high  $[\text{Ca}^{2+}]$ . Therefore, by increasing sensitivity to  $\text{Ca}^{2+}$ , PAP increases twitch and low-frequency force. On the other hand, in the region of high-frequency where  $[\text{Ca}^{2+}]$  is saturated, most actin and myosin already form cross-bridge, and therefore, increasing sensitivity to  $\text{Ca}^{2+}$  (i.e., PAP) has no effect on the maximal strength.



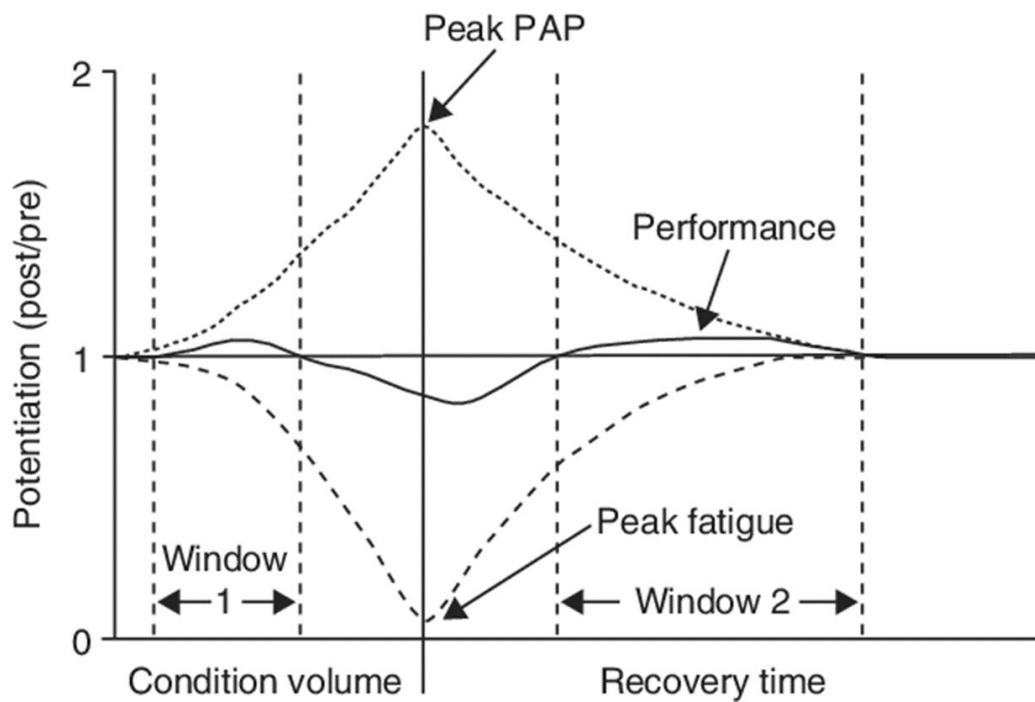
**Figure 5. Time-course of PAP after CA with different contraction duration (revised based on reference 21).** Peak PAP is achieved immediately after the 10 second MVC, but then decreases in an exponential fashion. In contrast, twitch peak torque is depressed immediately after the 60 second MVC due to fatigue but become potentiated after 1.5 minutes.



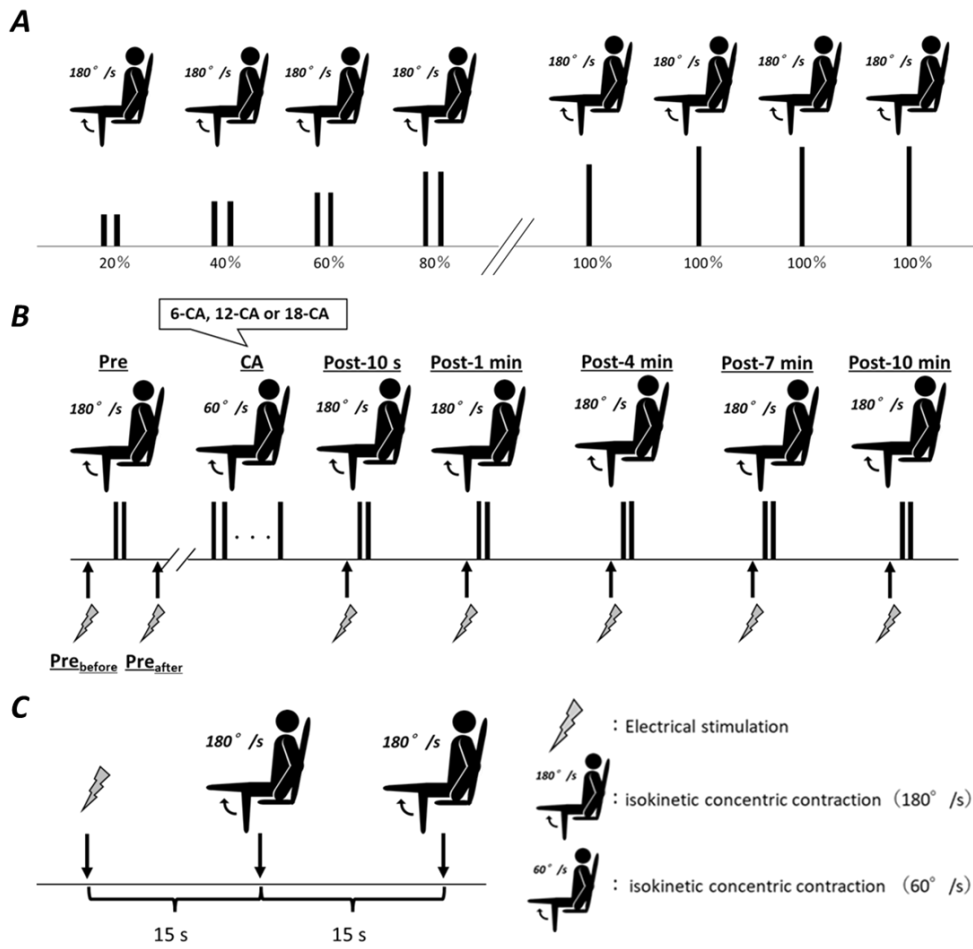
**Figure 6. Mechanism of H-wave and M-wave generation (revised based on reference 47).**

Electrical stimulation of a nerve evokes two electrical responses at the muscle. The first response (M-wave) is the result of an action potential travelling directly down the  $\alpha$ -motor neurons. The second response (H-wave) is the result of an action potential travelling along the Ia afferent neural fibres to the spinal cord, where it is transmitted to adjacent  $\alpha$ -motor neurons, and down to the muscle.

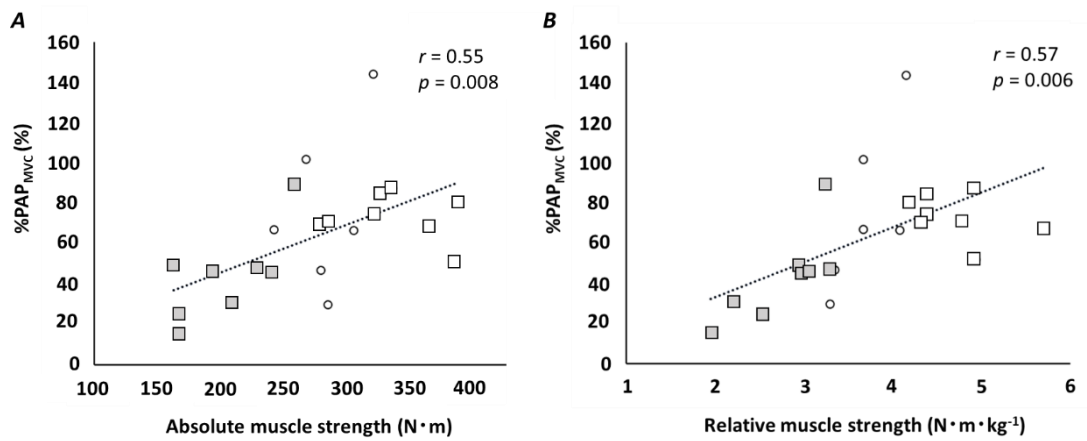




**Figure 7. A model of the hypothetical relationship between PAP and fatigue after CA (adapted from reference 47).** When the volume of the CA is low, PAP become more dominant than fatigue, and a potentiation of voluntary performance can be realized immediately after CA (window 1). As the volume of the CA increases, fatigue become dominant, negatively affect the subsequent voluntary performance. Following the CA, fatigue dissipates at a faster rate than PAP, and a potentiation of subsequent voluntary performance can be realized at some point during the recovery period (window 2).

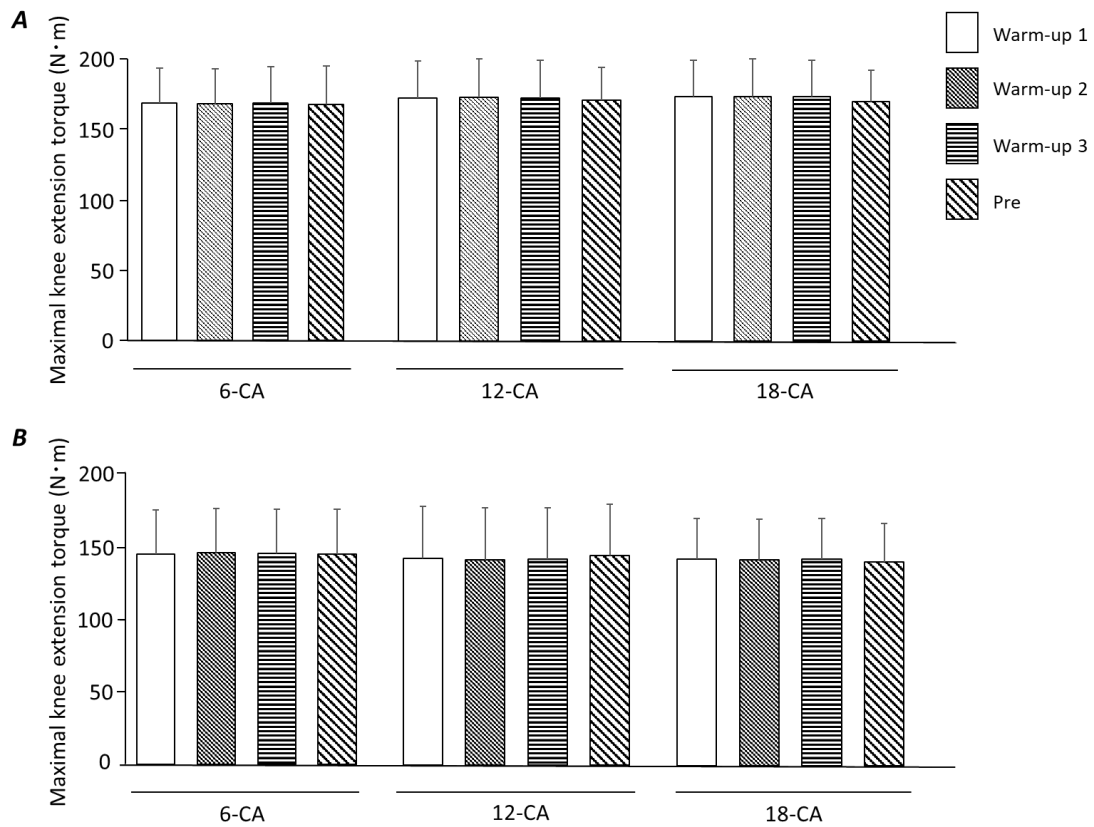


**Figure 8. Experiment overview.** Task-specific warm-up procedure (A). Experimental procedure for the 6-CA, 12-CA, and 18-CA protocols (B). The details of the test protocol after each conditioning activity (C).



**Figure 9. Correlation between %PAP<sub>MVC</sub> and absolute (A) and relative (B) muscle strength.**

Filled squares represent the weaker individual group, and open squares represent the stronger individual group.



**Figure 10. Maximal voluntary knee extension torques produced during the last three knee extensions at the task-specific warm-up session (warm-up 1, warm-up 2, and warm-up 3) and the knee extension during the pretest for stronger individuals (A), and weaker individuals (B). CA, conditioning activity.**

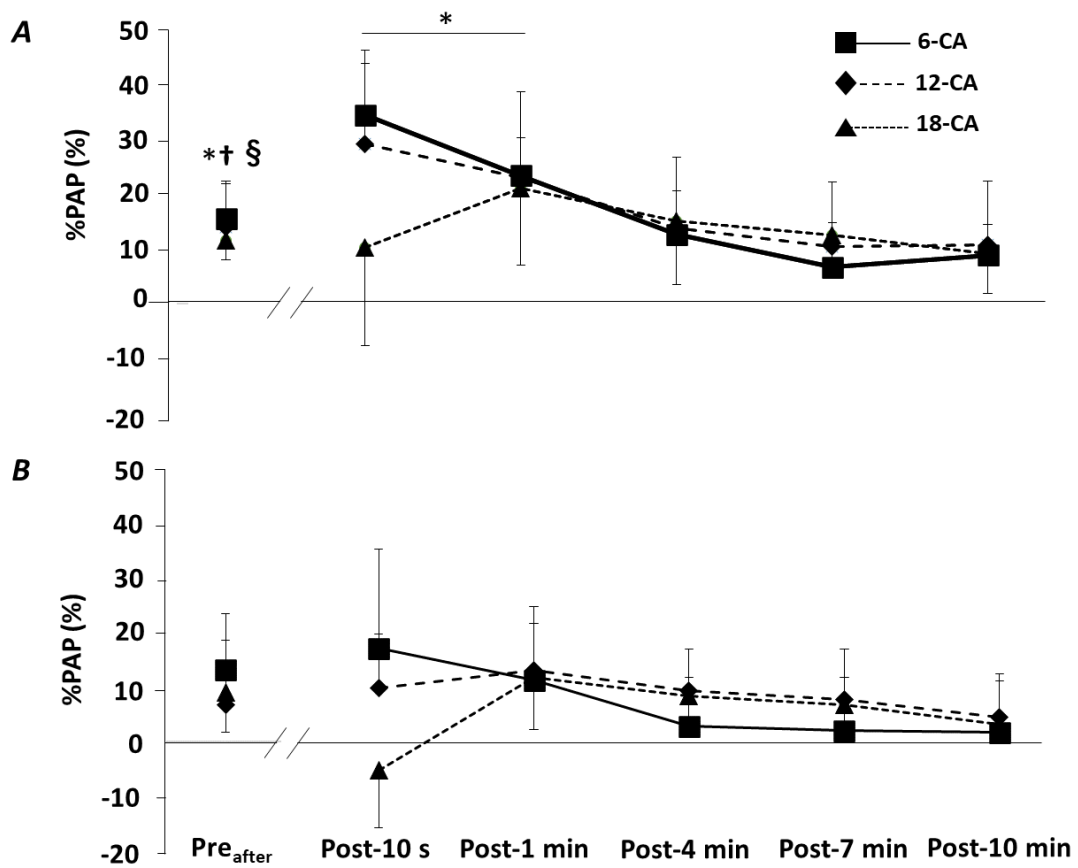
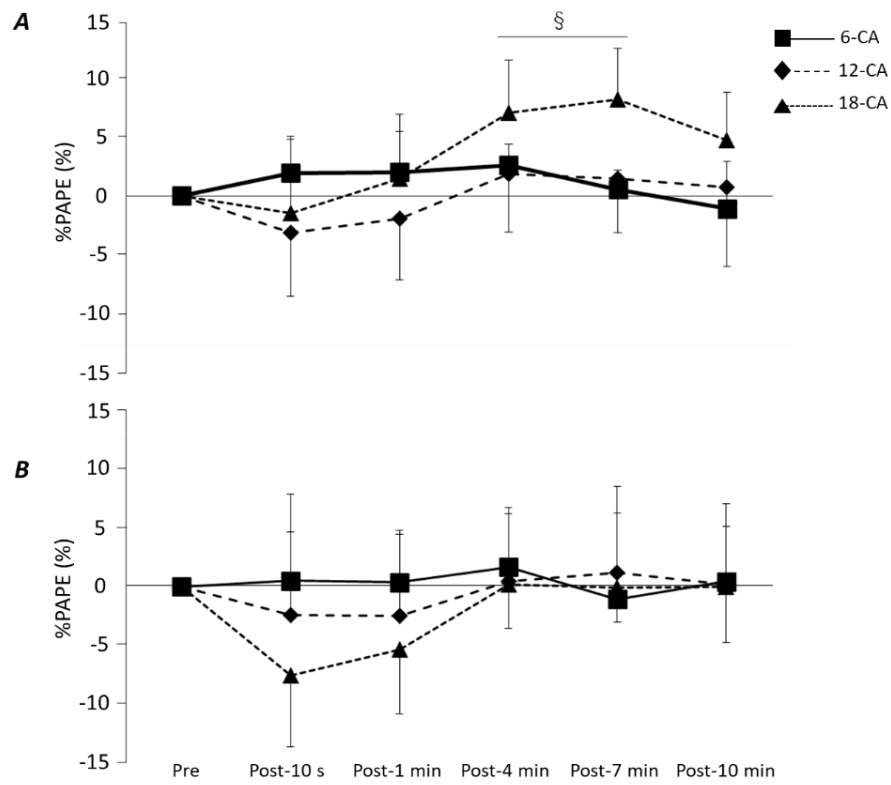


Figure 11. Time-course changes in %PAP after each CA for stronger individuals (*A*) and weaker individuals (*B*). Values are means  $\pm$  standard deviation. The statistical difference is set at  $p < 0.05$ : difference from Pre<sub>before</sub> in 6-CA \*, 12-CA<sup>†</sup>, and 18-CA<sup>§</sup>. CA, conditioning activity.



**Figure 12. Time-course changes in %PAPe after each CA for stronger individuals (A) and weaker individuals (B).** Values are means  $\pm$  standard deviation. The statistical difference is set at  $p < 0.05$ : difference from Pre in 18-CA<sup>§</sup>. CA, conditioning activity.