

低負荷でのスクワットにおける拳上速度および仕事量の違いが活動後増強に与える影響

Effects of different concentric velocity and mechanical work on post-activation potentiation with light load squat

砂川 力也 (琉球大学教育学部)

抄録

本研究は、低負荷を用いたスクワットエクササイズにおける拳上速度と仕事量の違いが活動後増強 (PAP) に与える影響について検討した。対象は運動習慣を有する健康な男子大学生9名であった。実験1では、30%1RM×3セット×6回に統一し、拳上速度をスクワットで低速、高速、スクワットジャンプで高速の3条件に設定した。スクワットの低速と高速条件は拳上の際に足底部と床面の離脱を制限し、スクワットジャンプ高速条件ではその制限を解除した。実験2は、反復回数を3回とし、それ以外のエクササイズ変数は実験1のスクワットジャンプ高速条件と同様とした。PAPの検証には、エクササイズ前後のCMJの変化を分析した。その結果、実験1で行ったスクワットジャンプ高速条件後にCMJの跳躍高 (ES = 0.57)、平均パワー (ES = 0.58)、ピークパワー (ES = 0.44)、平均速度 (ES = 0.51)、ピーク速度 (ES = 0.31) が有意に高い値を示した。一方、実験2のスクワットジャンプ高速条件ではCMJの変化は認められなかった。このことから低負荷を用いたPAPの誘発には、コンセントリック局面において減速することなく最大努力で拳上し、少なくとも6回の反復回数で複数セットの運動課題が必要であることが示唆された。

1. 緒言

筋機能の向上には、筋に適切な負荷抵抗を与えることが不可欠と言え、スポーツのパフォーマンス向上に大きく影響される重要な課題である。筋の発揮能力は、事前に強い筋収縮を行った後に増強されるとされ、これは活動後増強 (Post-activation potentiation: 以下, PAP) として知られており、筋力発揮前と比較して一時的に増強する理由にミオシン制御軽鎖のリン酸化反応、カルシウムイオン濃度の増加、フィラメントの感受性亢進などが考え

られている (Sale, 2002)。これらのメカニズムをトレーニングへ応用する際、爆発的パワーを要するエクササイズの事前に強い筋活動を行うことで高いトレーニング刺激になり得る可能性がある (Baker, 2003; Ebben et al., 2000)。さらに、一時的に筋力が増強することは、競技パフォーマンスを最大に高めるためのウォーミングアップ効果として期待される (DeRenn, 2010)。

PAPに関するこれまでの研究では、事前の筋収縮により筋力が増強するとの報告がある (Baker, 2003; Gourgoulis et al., 2003; Young et al., 1998) 一方、減少あるいは変化しない事例もしばしば見受けられる (Jensen and Ebben, 2003; Jones and Lees, 2003; Scott and Docherty, 2004)。PAPのポジティブな効果が確認された多くの研究では中～高負荷を用いた運動課題が採用されており、特に高強度での事前筋活動によってPAPが誘発される傾向にあり、強度の選択が極めて重要と言えよう。PAPの誘発には、筋の活性化レベルを最大化する上で強い筋収縮を要するが故に、大きな疲労を伴い実際には運動直後の筋出力が低下するため、事前エクササイズ後の休息时间や筋活動による疲労の影響が小さいエクササイズ変数の設定が重要であることが考えられる (砂川・下嶽, 2017)。さらに、PAPの効果には性差や筋線維タイプなどによる個人差の影響を考慮する必要があるとされている (Hamada et al., 2000; Tsolakis et al., 2011)。これまでの先行研究をレビューするとその多くは高負荷を用いているが、低負荷を用いた事前筋活動においても希少なながらPAP効果が認められている (島ほか, 2007; Smilios et al., 2005)。逆に中負荷や高負荷でもPAP効果が得られていない報告もある (Chiu et al., 2003; Hrysomallis and Kidgell, 2001)。このように、個々の筋機能特性を考慮すると、PAP誘発の「条件」には負荷、反復回数、セット数等の組み合わせは無限に存在しうるため、一概に比較しがたい。とりわけ、筋力発揮はサイズの原理 (Henneman, et al., 1965; Sale, 1987) に基づくことから、PAP効果の検証には強度設定が

注目され、必要とされる運動単位の動員数を増大させるための高強度が用いられてきた。一方で、レジスタンストレーニングの筋肥大効果に関連するメタ分析の結果、低強度でも総負荷量を高めることで高強度トレーニングと同等の効果が得られることが示されており (Schoenfeld et al., 2017), 扱う負荷が軽量の場合にも大きな筋活動になり得ることから、PAPの効果においても事前活動の総負荷量に影響されることが考えられる。つまり、PAPの普遍性を明らかにするには、総仕事量を統一した上でエクササイズ変数の組み合わせを検討し比較することが必要となる。

砂川・下嶽 (2017) は、上述の課題に対し、低負荷、中負荷および高負荷の3条件を用いて、総仕事量が統一されるように反復回数をコントロールし、スクワットエクササイズ前後におけるカウンタームーブメントジャンプ (Counter movement jump: 以下, CMJ) のパラメータを比較して、負荷の違いによるPAPの影響を検証した。その結果、事前活動の負荷が最大挙上重量 (One repetition maximum: 以下, 1RM) の60%と90%において、その後のCMJの跳躍高が5%~6%向上し、その際のピークパワーやピーク速度も有意な増大が認められたことを報告している。同研究では、30%1RMと60%1RMのスクワット時の発揮パワーが同等だったにも関わらず、中負荷でPAPが誘発され、低負荷ではその効果が得られなかったことは非常に興味深い知見であると述べている。エクササイズ中に発揮されるパワーは、力と速度の積によって決定されるため、出力されるパワーが同等であってもその内容は大きく異なる。このことは、PAPを目的に低負荷を扱う場合は、強度を高める上で仕事量に加え、挙上する速度が極めて重要であると考えられる。通常レジスタンストレーニングは、加速による慣性を最小限に止めるため可動域全般にわたって筋に負荷抵抗を与えるように、最大下の速度でコントロールされることが多い。しかし、PAPの誘発には高い筋活動が必要であることから、低負荷での事前筋活動の場合、最大速度で挙上し、より大きな加速度を得ることで強度を増大させる必要があると考えられる。とりわけ、仕事量を統一するためには、バーベルの変位を同じにする必要があるが低負荷の場合、慣性の影響から可動域後半において、減速局面が少なからず存在し (Kubo et al., 2018), 挙上方向逆向き大きな加速度を要するため、コンセントリック局面終盤まで十分に加速することが困難であると考えられる。

PAPの効果が得られた報告では、その多くが高負荷を用いていることから低負荷に比べ慣性が小さく、可動域全般にわたり高い筋活動が十分可能であったことが推察される。とりわけ、力は質量と加速度の積であるため、質量が同じでも加速度の増大によって発揮される力やパ

ワーが大きくなる (有賀ほか, 2014)。したがって、低負荷を用いたエクササイズの場合、動作速度を高めることでPAPに必要な大きな筋活動となる可能性がある。しかし、先述したように、低負荷では動作終盤の減速に伴い筋力発揮の低減が生じ、負荷の大小によって動作範囲内で発揮される力のフェーズの割合が異なると考えられる。このことは、低負荷において可動域全般にわたっての十分な短縮性筋活動が行えていない可能性を否定できず、逆に減速フェーズをより小さくすることで動作終盤までの短縮性筋活動を促進できると捉えることもできる。つまり、低負荷において、上記の条件を満たすためには、スクワット運動の場合、床面から足底部が離脱するようなジャンプ動作が必要ではないだろうか。これまで、低負荷を用いたPAP効果は希少であるが、動作様式と挙上速度の関連性について検証した報告はみられない。また、PAPの誘発には事前筋活動による筋の活性化と疲労の影響を考慮する必要がある。総仕事量の違いを検討することで、低負荷を扱った事前エクササイズの普遍性を明らかにすることが可能ではないかと考えられる。

そこで本研究は、低負荷での事前エクササイズにおける挙上速度と仕事量の違いが活動後増強に与える影響について検討することを目的とした。

II. 方法

1. 対象

本研究は、日常的に積極的な運動習慣を有し、定期健康診断により心身の異常が認められない健康な男子大学生9名 (年齢: 22.0 ± 1.7 歳, 身長: 1.69 ± 0.04 m, 体重: 67.5 ± 4.6 kg, BMI: 23.6 ± 2.3 kg/m², スクワット 1RM: 99.4 ± 13.3 kg, スクワット体重比: 1.50 ± 0.14) を対象とした。なお、対象者のレジスタンストレーニング経験年数は1年以上、3年未満であった。本研究はヘルシンキ宣言の趣旨を遵守して行われ、すべての参加者に同意書を配布し、研究計画の概要、個人情報の保護、侵襲および安全管理、インフォームドコンセントに関する十分な説明を口頭および書面にて行い、実験参加への同意を署名により得た。また、実験参加に同意した後であっても測定期間中であれば文書により同意を撤回できることを告知し、実験参加者が不利益を受けないように配慮した。実験中における安全性の確保には、研究機関に付置する健康管理センターの医師および保健師等と連携し、危機管理に対し十分に留意した上で、本人の意思を尊重しながら測定を実施した。

2. 測定項目および測定方法

本研究は、下肢のレジスタンストレーニングとして一般

的なスクワット運動を用いて、30%1RMの負荷を挙上する際の速度および仕事量の違いによるPAP効果の検証を行った。PAPの評価には、CMJを用いてエクササイズ前(以下、CMJ_{pre})とエクササイズ後(以下、CMJ_{post})のパラメータを分析した。以下にその測定項目と測定方法の詳細を示す。

1) スクワット1RM測定

スクワットの1RM測定は、NSCA (National strength and conditioning association) のガイドラインに従い、ハイパーポジションで肩幅程度のスタンスを開始姿勢とした(Baechle and Earle, 2002)。スクワット運動の際、大腿部後面と下腿部後面が触れる位置までを動作規定とし(砂川・下嶽, 2017)、試技の前には十分な動作練習を行った。なお、安全性を考慮し、スクワット専用ベルトの着用を義務付けた上で実施した。測定は直接法にて行い、1セット目に自己申告した重量(約60%~70%1RM)で6~8回、続いて2セット目に重量を付加(75%~85%1RM)して2~4回行った。3セット目以降は1回ずつ行い、5~10kgの範囲で負荷を漸増させ、挙上に失敗した直前の試技を1RMとし、最小単位は5kgとした。試技は7セット以内で終了するように負荷を調整し、セット間は疲労の影響を考慮して少なくとも3分以上の十分な休息を設けた。これらは、リニアポジショントランスデューサー(GymAware Power Tool, Kinetic Performance Technologies, Canberra, Australia)を用いて測定し、スクワットのスタートポジションから最下降点までのケーブルの変位から沈み幅を、最下降点から挙上後の最高点の変位より鉛直距離を求め、運動力学的変数(変位、速度、加速度)の関係より、平均フォース(Mean force: 以下、MF)、ピークフォース(Peak force: 以下、PF)、平均速度(Mean velocity: 以下、MV)、ピーク速度(Peak velocity: 以下、PV)、平均パワー(Mean power: 以下、MP)、ピークパワー(Peak Power: 以下、PP)を計測した。また、MPおよびPPについては、それぞれ体重(Body weight: 以下、BW)1kgあたりの値(以下、MP/BW、PP/BW)を算出した。得られたデータはすべてiOSアプリ(GymAware, Ver2.6)からCSV形式でPCにエクスポートし分析を行った。

2) CMJ測定

CMJの測定は、腕の振り込み動作を制限し、GymAwareのケーブルを装着したバー(650g)を肩に担いだ状態から反動を用いた最大努力での跳躍とした。その際、バーが肩から離れないように注意し、上体の過度な前傾を避け、可能な限り垂直に跳躍するように教示した。試技は3回行い、跳躍高が最大となる試技を分析対象と

した。これらの項目はスクワット1RM測定と同様にリニアポジショントランスデューサーを用いて測定し、沈み幅、跳躍高、MP、PP、MV、PVを分析した。

3. 実験手順

1) 実験1

本実験は、事前に測定されたスクワットの1RM(99.4±13.3kg)から30%1RM(29.8±4.0kg)を算出し、最も近い重量を2.5kg毎に調整して実施した。事前エクササイズをスクワット低速条件(Squat low velocity: 以下、SL条件)、スクワット高速条件(Squat high velocity: 以下、SH条件)、スクワットジャンプ高速条件(Squat jump high velocity: 以下、SJH条件)と定義し、3条件とした。スクワットのエキセントリック局面はメトロノームに合わせ2秒に統一し、コンセントリック局面については、SL条件で2秒、SH条件では足底部が床面から離れない範囲にて最大努力で挙上するよう指示し、SJH条件では、SH条件で指示した可動範囲を解除し最大努力のスクワットジャンプとして行った。エクササイズ変数は、30%1RM×3セット×6回(セット間休息3分)であり、挙上速度以外の条件は統一した。これらの試技は、リニアポジショントランスデューサーを用いて、前述した1RM測定同様に、沈み幅、鉛直距離、MF、PF、MV、PV、MP、PP、MP/BW、PP/BWを計測した。スクワットの仕事量は、挙上ごとにバー質量×重力加速度(9.81m/s²)×鉛直距離で求め(深代ほか, 2015)、1セットの合計とした。PAPの効果を検証するために、CMJ_{pre}を測定し、4分間の休息を挟み各条件でスクワットエクササイズを開始した。CMJ_{post}については、PAPのリカバリー時間のメタ分析(Gouvêa et al., 2013)において4~12分の範囲で跳躍高が少なくとも増大する傾向にあることと、実際のワークアウトの経済性を踏まえ、本実験ではエクササイズ後のリカバリー時間を4分と設定し、エクササイズ前後におけるCMJの各パラメータの変化を分析した。これら3条件の実験はすべてランダムかつ別日にて行い、少なくとも実験の間隔を48時間以上とした(図1)。

2) 実験2

実験2は、実験1に参加したすべての被験者を対象とし、実験プロトコルは、実験1で示したSJH条件の総仕事量が約半分になるようにエクササイズ変数を30%1RM×3セット×3回とし(以下、SJH_{3reps}条件)、それ以外の条件はSJH条件と同様にエキセントリック局面は2秒で統一し、コンセントリック局面を最大努力でのスクワットジャンプとして実施した。PAPの検証は、実験1と同様にエクササイズ前後のCMJの変化を比較した。なお、実験2は実験1で行った最後のエクササイズ条件から少なく

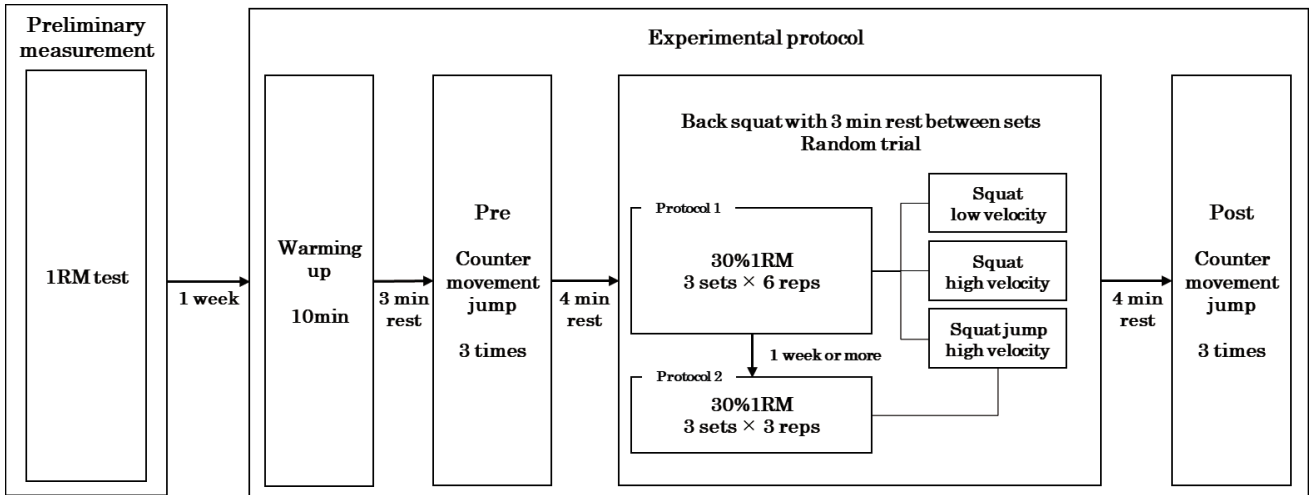


図1. 事前測定およびPAP効果検証の実験手順

とも1週間の間隔を設けた。

4. 統計処理

得られたデータはすべて平均値±標準偏差で示した。スクワットにおける沈み幅および疲労の影響を調べるために各条件のセット間の比較を行った。エクササイズ中の出力評価とエクササイズ直前のベースラインを検討するためにスクワット条件間の各パラメータ、条件間のCMJ_{pre}の跳躍高を比較し、CMJの事前動作の影響を検討するためにすべての試技の沈み幅を比較した。これらの平均値の差の検定には1要因分散分析を行い、F値が有意であった場合は、Bonferroni法による多重比較を行った。PAPの効果を検証するためにCMJの事前・事後テストの差については、エクササイズ条件ごとに対応のあるt検定を用いた。すべての有意水準は5%未満とした。また、PAP効果としてCMJにおけるパラメータの差の大きさを示すために効果量(Cohen' *d*)を算出した。

III. 結果

1. スクワットのパラメータ

表1に、エクササイズ時のパラメータを条件ごとに示した。実験1では、セット数および反復回数を固定し、挙上速度の条件を変えて行った。次いで実験2ではSJH条件の反復回数を半分にして実施した。各条件のセット間におけるパラメータの値に統計的な差は認められなかったため、すべての試技の平均値±標準偏差を求め比較した。事後検定の結果、スクワットの沈み幅に統計的な差は認められなかった。仕事量はSJH_{3reps}条件で最も小さく、次いでSL, SH, SJH条件の順で有意に大きい値を示した($p<0.01$)。MFは、SL条件よりSH, SJH, SJH_{3reps}条

件で有意に高い値を示した。鉛直距離、フォース(PF)、速度(MV, PV)、パワー(MP, PP, MP/BW, PP/BW)は、SL, SH, SJH条件の順に有意に高い値を示し($p<0.01$)、SJH条件とSJH_{3reps}条件の間に統計的な差は認められなかった。

2. CMJ_{pre}の跳躍高と事前動作

エクササイズの事前に行われたCMJ_{pre}の跳躍高は条件間に統計的な差は認められなかった。CMJの事前動作である沈み幅について比較した結果、すべての試技で統計的な差は認められなかった(表2)。

3. CMJのパラメータ

表2は、各スクワット条件の事前・事後におけるCMJの変化を示したものである。SL, SH, SJH_{3reps}条件は、いずれも統計的な変化は認められなかった。SJH条件では、CMJの跳躍高がエクササイズ後に有意に高い値を示した($p<0.01$, ES=0.57)。跳躍時のパワーについてMP($p<0.01$, ES=0.58)およびPP($p<0.05$, ES=0.44)ともに事前と比較し事後が有意に大きな値となった。跳躍時の速度では、MV($p<0.01$, ES=0.51)およびPV($p<0.01$, ES=0.31)が事前と比較して事後に有意に速い結果であった。

IV. 考察

1. スクワット条件のパラメータ比較

本研究は、低負荷のスクワットを用いた事前エクササイズにおける挙上速度をスクワット低速、高速、スクワットジャンプ高速の3条件と設定し、加えてスクワットジャンプ高速条件の反復回数を半減させた2種類のプロトコルにて実施した。GymAwareで示されるパラメータは、力学

表1. 各条件におけるスクワットのパラメーター

Velocity Condition	Set Number	Dip(m)	Vertical Distance(m)	Work loads(Nm)	Mean Force(N)	Mean Power(W)	Mean Velocity(m/s)	Mean Power/BW(W/Kg)	Peak Force(N)	Peak Power(W)	Peak Velocity(m/s)	Peak Power/BW(W/Kg)	
SL	1	0.60 ± 0.06	0.58 ± 0.05	1015.3 ± 108.0	944.1 ± 74.7	415.8 ± 44.1	0.45 ± 0.07	6.3 ± 0.8	1174.5 ± 91.2	686.2 ± 74.3	0.69 ± 0.10	10.4 ± 1.9	
	2	0.63 ± 0.06	0.60 ± 0.06	1051.1 ± 143.6	943.5 ± 74.5	410.2 ± 42.8	0.44 ± 0.07	6.2 ± 0.8	1180.9 ± 94.0	658.0 ± 62.2	0.67 ± 0.09	10.0 ± 1.1	
	3	0.62 ± 0.06	0.60 ± 0.06	1045.4 ± 146.2	943.5 ± 74.8	406.0 ± 34.8	0.43 ± 0.06	6.2 ± 0.7	1165.9 ± 86.0	637.9 ± 46.1	0.65 ± 0.08	9.7 ± 1.1	
Total average		0.62 ± 0.06	0.60 ± 0.05	1037.3 ± 129.5	943.7 ± 71.8	410.6 ± 39.4	0.44 ± 0.06	6.2 ± 0.8	1173.7 ± 87.1	653.3 ± 60.6	0.67 ± 0.08	10.0 ± 1.4	
SH	1	0.63 ± 0.06	0.66 ± 0.07	1157.5 ± 179.1	976.0 ± 80.5	1017.0 ± 123.5	1.05 ± 0.06	15.3 ± 1.2	1551.3 ± 223.7	2196.4 ± 355.0	1.76 ± 0.14	33.1 ± 4.5	
	2	0.62 ± 0.06	0.66 ± 0.07	1145.0 ± 163.6	976.4 ± 86.4	1023.8 ± 144.9	1.05 ± 0.08	15.4 ± 1.6	1600.4 ± 258.3	2110.6 ± 352.2	1.72 ± 0.17	31.8 ± 4.5	
	3	0.64 ± 0.05	0.66 ± 0.07	1155.1 ± 165.9	973.7 ± 80.7	1030.9 ± 163.2	1.06 ± 0.09	15.5 ± 1.9	1592.6 ± 257.2	2123.3 ± 412.2	1.73 ± 0.18	32.0 ± 5.4	
Total average		0.63 ± 0.06	0.66 ± 0.07	1152.5 ± 163.1	975.4 ± 79.4	1023.9 ± 139.2	1.05 ± 0.07	15.4 ± 1.5	1581.5 ± 238.2	2143.4 ± 361.5	1.74 ± 0.16	32.3 ± 4.6	
SJH	1	0.66 ± 0.06	0.92 ± 0.06	1615.5 ± 228.5	981.6 ± 78.7	1419.1 ± 171.6	1.31 ± 0.06	21.0 ± 2.1	1749.3 ± 213.7	3552.0 ± 493.2	2.44 ± 0.14	52.6 ± 6.2	
	2	0.65 ± 0.06	0.94 ± 0.05	1639.8 ± 237.2	981.6 ± 78.5	1444.5 ± 173.9	1.33 ± 0.07	21.4 ± 2.1	1792.8 ± 260.5	3556.9 ± 469.3	2.46 ± 0.16	52.7 ± 6.0	
	3	0.64 ± 0.05	0.93 ± 0.04	1631.3 ± 210.3	979.8 ± 79.7	1432.1 ± 127.7	1.32 ± 0.05	21.2 ± 1.5	1790.8 ± 223.7	3527.1 ± 460.8	2.45 ± 0.16	52.3 ± 6.1	
Total average		0.65 ± 0.05	0.93 ± 0.05	1628.9 ± 217.0	981.0 ± 75.9	1431.9 ± 153.3	1.32 ± 0.06	21.2 ± 1.9	1777.6 ± 225.2	3545.4 ± 456.2	2.45 ± 0.15	52.5 ± 5.8	
SJH _{3reps}	1	0.63 ± 0.04	0.92 ± 0.05	806.3 ± 118.6	982.3 ± 82.2	1451.9 ± 146.5	1.33 ± 0.06	21.5 ± 1.8	1763.2 ± 257.5	3640.7 ± 376.2	2.48 ± 0.14	54.0 ± 5.2	
	2	0.62 ± 0.06	0.92 ± 0.05	807.2 ± 125.2	981.4 ± 79.0	1444.0 ± 160.7	1.34 ± 0.08	21.4 ± 1.9	1813.0 ± 288.2	3554.5 ± 364.4	2.46 ± 0.14	52.8 ± 5.6	
	3	0.63 ± 0.06	0.92 ± 0.06	801.9 ± 113.9	981.8 ± 73.2	1417.1 ± 146.8	1.32 ± 0.08	21.0 ± 1.9	1871.0 ± 291.1	3587.6 ± 358.7	2.46 ± 0.16	53.3 ± 5.4	
Total average		0.63 ± 0.05	0.92 ± 0.05	805.1 ± 114.7	981.8 ± 75.1	1437.7 ± 146.3	1.33 ± 0.07	21.3 ± 1.8	1815.7 ± 272.1	3594.4 ± 354.0	2.47 ± 0.14	53.4 ± 5.2	
ANOVA				F(3,24)=355.1**	F(3,24)=253.9**	F(3,24)=26.3**	F(3,24)=243.9**	F(3,24)=412.3**	F(3,24)=291.1**	F(3,24)=69.1**	F(3,24)=292.3**	F(3,24)=508.1**	F(3,24)=317.1**
Multiple comparison test			n.s.	SL<SH<SJH-SJH _{3reps}	SJH _{3reps} <SL<SH<SJH	SL<SH<SJH-SJH _{3reps}	SL<SH<SJH-SJH _{3reps}	SL<SH<SJH-SJH _{3reps}	SL<SH<SJH-SJH _{3reps}	SL<SH<SJH-SJH _{3reps}	SL<SH<SJH-SJH _{3reps}	SL<SH<SJH-SJH _{3reps}	SL<SH<SJH-SJH _{3reps}

SL: Squat low velocity, SH: Squat high velocity, SJH: Squat jump high velocity, SJH_{3reps}: Squat jump high velocity with 3repetitions
 **: p<0.01, *: p<0.05

表2. スクワット前後におけるCMJの変化

Velocity Condition		Dip (m)	Jump Height (m)	Mean Power (W)	Mean Velocity (m/s)	Peak Power (W)	Peak Velocity (m/s)
SL	Pre	0.656 ± 0.050	0.474 ± 0.039	2419.6 ± 320.9	2.12 ± 0.12	3988.8 ± 1069.6	3.35 ± 0.32
	Post	0.653 ± 0.044	0.471 ± 0.046	2375.9 ± 375.0	2.07 ± 0.13	4021.5 ± 1107.7	3.36 ± 0.32
	ES(d)	—	-0.09	-0.14	-0.41	0.03	0.03
SH	Pre	0.650 ± 0.054	0.472 ± 0.042	2359.6 ± 272.7	2.09 ± 0.15	4275.6 ± 1107.7	3.37 ± 0.38
	Post	0.642 ± 0.062	0.480 ± 0.048	2338.7 ± 363.7	2.09 ± 0.13	4293.8 ± 1047.5	3.41 ± 0.36
	ES(d)	—	0.18	-0.08	-0.04	0.02	0.09
SJH	Pre	0.651 ± 0.048	0.471 ± 0.049	2479.0 ± 310.8	2.17 ± 0.15	4174.5 ± 846.0	3.42 ± 0.37
	Post	0.661 ± 0.059	0.499 ± 0.047**	2657.5 ± 326.3**	2.25 ± 0.15**	4548.3 ± 929.1*	3.53 ± 0.39**
	ES(d)	—	0.57	0.58	0.51	0.44	0.31
SJH _{3reps}	Pre	0.660 ± 0.053	0.471 ± 0.050	2447.4 ± 318.9	2.16 ± 0.12	4198.3 ± 919.1	3.42 ± 0.41
	Post	0.658 ± 0.051	0.472 ± 0.052	2455.7 ± 268.8	2.17 ± 0.16	4246.2 ± 957.8	3.41 ± 0.29
	ES(d)	—	0.03	0.03	0.08	0.05	-0.04

SL: Squat low velocity, SH: Squat high velocity, SJH: Squat jump high velocity, SJH_{3reps}: Squat jump high velocity with 3repetitions
 ES: Effect size ** : p<0.01, * : p<0.05

的変数を基に算出されるが、スクワットにおいて高い信頼性が確認されており (Banyard et al., 2017; Orange et al., 2019; Orange et al., 2020), 本実験プロトコルにより得られたデータの再現性も高いことから、パラメータ評価の妥当性は十分保証されるであろう。本研究結果では、パワー、力、速度においてSL条件、SH条件、SJH条件の順で有意に高い値を示し、SJH条件とSJH_{3reps}条件の間に統計的有意差は認められなかった。通常、エクササイズ中に発揮されるパワーは、力と速度が互いに相反する関係上にあるため扱う負荷によって力と速度の優位性が異なる (深代ほか, 2015; 若山・平野, 2014)。本研究では、負荷を固定した上で挙上する速度を変化させている。つまり、同質量に対し挙上速度を意図的に高めることは、大きな加速度が生じる結果として発揮される力が増大す

ることが示唆された。これは当然の結果であるが、扱う重量が同じでも挙上速度をコントロールすることで発揮されるパラメータに変化が生じる。つまり、本研究はPAP効果を検証する上で妥当なモデルであると言える。さらに、すべての条件でセット間のパラメータに統計的な差は認められなかった。PAPは事前に強い筋収縮を行うことでその効果が誘発されるが、疲労の影響を常に考慮しなければならない。Sanchez and Median (2011) は、レジスタンストレーニングにおける異なるセットと反復回数との組み合わせについて、3セット間の速度低下率および筋疲労の影響を調べた結果、6RM - 12RMの負荷で高回数行くと速度低下率が顕著であり、疲労が多く蓄積されることを示唆している。本研究は、20RM以上の負荷 (有賀ほか, 2014) に対し、1セット当たりの反復回数は実験1で6回、

実験2では3回であり、挙上時の慣性制御の有無に関わらず、セット間のパラメータに差がなかったことは、すべてのセットで同等の筋力発揮を有し、かつ前セットの筋活動による疲労の影響は少ないと考えられ、PAPの条件の一つであるマイナスの要因は考慮されたプロトコルであったと言えよう(砂川・下嶽, 2017)。また、スクワット時の沈み幅に統計的な差は認められなかったことで、すべての条件においてエキセントリック局面の動作範囲は高い再現性であると判断でき、本研究におけるPAPの検証結果は、コンセントリック局面での運動が影響していたと考えられる。ところで、スクワット中の鉛直距離は最下降点からのバーベル変位で評価しており、床面と足底部が離脱しない条件下にあるSL条件およびSH条件では沈み幅が同じであれば、挙上する距離も同じとなる。しかし、両条件で差が生じた理由として、SH条件では足底部の離地が制限されているものの、被験者はその可動範囲内において最大努力で挙上を行っている。その際、SL条件と比べ慣性が多少大きくなるため、意図せずして若干の底屈運動が生じていた可能性が考えられるが、後述するSL条件とSH条件のPAP効果はいずれも確認できなかったため、それらの影響はないと考える。他方、2つのジャンプ動作を伴う高速条件を比較すると反復回数が半分になることで当然のことながら、仕事量は約50%程度となっている。仕事量以外では統計的な差は認められず鉛直距離をはじめとするパラメータが同値を示したことは、両条件共にスクワットジャンプが最大努力で再現されたと考えられる。つまり、ジャンプ動作を伴った高速条件下におけるその後のCMJの変化は仕事量の違いによる影響が考えられる。

2. CMJの変化

本研究は、PAPの効果を検証するために、スクワットエクササイズ前後のCMJの変化を分析した。CMJ_{pre}ではすべての条件間で統計的な差は認められなかった。このことはCMJ_{post}の変化は、その直前の運動課題の影響を受けるものとして評価することは妥当であると考えられる。さらに、跳躍高の増減には跳躍前の予備動作の可動範囲に影響されることが知られているが(Bobbert et al., 1996; Fukashiro and Komi, 1987)、CMJの沈み幅について比較した結果、すべての条件で統計的な差は認められなかった。よって、本研究におけるCMJの予備動作の再現性が確認され、パラメータの変化は沈み幅に影響されないことが示唆された。

高負荷を用いた運動課題によってPAPが誘発されることは、多くの研究で明らかにされている(Baker, 2003; DeRenn, 2010; Ebben et al., 2000; Sale, 2002)。Young et al. (1998)の報告では、5RMの負荷を用いたハーフ

スクワット後にCMJの跳躍高が2.8%有意に増加していた。また、ラグビー選手を対象に87%1RMの負荷で3セット×3回のハーフスクワットを行った後、エクササイズ前と比較して跳躍高が4.9%有意に増加した報告がみられる(Kilduff et al., 2008)。砂川・下嶽(2017)は、事前筋活動の総仕事量を統一したプロトコルにて、スクワットの負荷の違いによるPAP効果の検証を行っている。その結果、中負荷および高負荷においてその後のCMJのパラメータに有意な増大が認められ、低負荷(30%1RM×3セット×6回)では、CMJの変化は確認されていない。本研究では、実験1において砂川・下嶽(2017)と同様の負荷、セット数および反復回数を採用しており、SL条件およびSH条件においてCMJのパラメータに変化は見られなかった。彼らの研究結果(PP:2452W, MP:1120W, PV:1.82m/s, MV:1.07m/s, PF:1709N, MF:1073N)と比較すると本研究のSH条件(PP:2143W, MP:1023W, PV:1.74m/s, MV:1.05m/s, PF:1581N, MF:975N)と近似する値となっている。低負荷を最大努力で挙上する場合、足底部が床面から離脱しない条件下では、結果的にコンセントリック局面終盤で起こる減速によって十分な事前筋活動が行えていなかった可能性が考えられる(Kubo et al., 2018)。よって、低負荷を扱う場合、平均挙上速度がおよそ0.4~1.0m/sの範囲においてPAPは誘発されないことが示唆された。

PAPの事前筋活動には、その多くが高負荷を用い、少なくとも中負荷以上の高い筋活動が必要とされることから、低負荷を用いた事前筋活動でPAPの効果が得られた事例は希少である。Sotiropoulos et al. (2010)は、事前エクササイズにハーフスクワットを用い、最大速度の挙上で2セット×5回のプロトコルにて低強度群(25%~35%1RM)と中強度群(45%~65%1RM)のCMJの変化を検証している。その結果、両群ともに跳躍高がそれぞれ3.9%と3.0%向上し、発揮パワーや膝伸筋群の筋電図活動においても有意な増大が認められたことを示している。さらに、Smilios et al. (2005)の研究では、30%1RMと60%1RMの負荷を用いて、それぞれハーフスクワット(HS)およびジャンプスクワット(JS)のエクササイズ(3セット×5回、セット間休息时间3分)前後の鉛直跳躍の変化を検証した結果、スクワットジャンプ(反動なし)は60%1RMの負荷でHSを行った条件でのみ有意に向上した(4.9%)。一方、CMJ(反動あり)では、JSにおいて30%1RMプロトコルで3.8~3.9%、60%1RMプロトコルで3.4~3.9%の有意な向上が認められている。本研究において、SL条件およびSH条件でPAPの効果は確認できずSJH条件のみCMJの跳躍高が5.9%有意に向上し、他のパラメータも同様に増大した。前述の2つの研究と本研究を比較するとエクササイズ変数や挙上の際に最大努

力あるいはジャンプ動作を有する点で類似している。本研究のSL・SH条件とSJH条件の違いはコンセントリック局面の慣性制御の有無にあり、SJH条件ではジャンプ動作に伴い、ピーク速度、ピークフォースおよびピークパワーがSL・SH条件よりも有意に高かった。このことは、減速フェーズが最小になり大きな加速度が得られた結果、PAPの条件である高い筋活動に達していた可能性が推察される。Lum and Chen (2020) は、男性アスリートを対象に強度の異なる3種類の可変性抵抗（弾性抵抗）を用いて、3回×2セットのジャンプエクササイズ後のCMJの変化を検証した結果、すべての条件で跳躍高が大幅に増大し、条件間で統計的な差は認められなかったと報告している。これは、後述する仕事量と関連するが、彼らの研究では非常に少ない仕事量でありながらPAPの所見が確認されたことは、ジャンプエクササイズにおいてエクササイズバンドなどの弾性抵抗を用いることで動作終盤の発揮筋力を増大させることに成功した可能性が考えられる。そのため、事前筋活動で扱う負荷抵抗の種類と仕事量の関係について、今後さらに検討をする必要があると言えよう。通常レジスタンストレーニングでは、加速による慣性を最小限に止め可動域全般にわたって筋に負荷抵抗を与える関係上、最大下の速度でコントロールされることが多い。この方法は筋肥大効果に有用性があると言えるが（中谷ほか，2019）、パワーや短時間に大きな力を発揮する能力（Rate of force development：以下、RFD）の向上を妨げ、さらに反動動作の機械的な能力を低下させてしまう可能性がある（有賀ほか，2014）。一方、短縮性筋活動において高速で挙上動作を行うトレーニングでは、RFDの増加や筋活動の機能的な改善効果が期待できるとされている（Cormie et al., 2011; Haff et al., 2001）。つまり、最大努力で挙上する際、高負荷では慣性が小さいため挙上逆向きの加速度は小さく、反対に低負荷では挙上速度が増大することで、減速のための大きな加速度を要することとなる。本研究のプロトコルにおいてSL条件およびSH条件は、足底部と接地面が離脱しないことを規定しているため、PAPを誘発する上で十分な短縮性筋活動にならなかった可能性が考えられる。SJH条件では、これらの慣性制御が解除されたことで、PAPが生じ、CMJ_{post}においてピーク速度の増大がピークフォースおよびピークパワーに影響していたものと考えられ、その要因の一つにRFDの関与（Andersen and Aagaard, 2006; Comfort et al., 2011; Gruber and Gollhofer, 2004）を否定することはできないであろう。このことは、これまで圧倒的多数の研究で支持されてきた高負荷での筋活動がPAP誘発の条件とされてきたが、本研究結果より、負荷に対する挙上条件が存在する可能性が考えられ、先行研究で議論されてきたPAP条件の強度に加え、パワー、力、速度等の力学的変

数を考慮する必要があると考えられる。

一方、SJH条件の反復回数以外は同様のプロトコルである実験2ではPAPが確認されなかった。本研究において挙上速度が同等でありながら、仕事量が約半減することでPAPの効果が消失したことは興味深い知見となった。PAPが誘発されなかった理由として、SJH条件では、3セット×6回の仕事量であってもセット間の出力に差は認められず、SJH_{3reps}条件では、その半分の仕事量であるため疲労の影響は考えにくい。すなわち、低負荷運動でのPAPには反復刺激として一定の仕事量が必要となる可能性が考えられる。鳥ほか（2007）は、過去にレジスタンストレーニングの経験があり、ハーフスクワットの1RMが体重の1.5倍以上の健康な成人男性を対象に40% 1RMおよび80% 1RMの負荷を事前運動として実施した結果、両条件共にその後のロードジャンプの跳躍高や動作中の筋パワー、身体重心の速度が有意に向上したことを報告している。彼らの実験プロトコルには明確な反復回数が示されていないが、80%1RMのハーフスクワットを2秒間のしゃがみ込み動作と2秒間の立ち上がり動作のテンポを維持できなくなるまで反復しており、40%1RMでは、その倍の反復回数とされている。このことから低負荷での持続運動を少なくとも20回程度反復していたことが推察される。Sotiropoulos et al. (2010) や Smilios et al. (2005) の反復回数はトータルで10回および15回となっている。本研究は低負荷に対し、合計18回の挙上を行っている。先行研究では、ハーフスクワットを採用しており、本研究と移動距離が大きく異なるため、仕事量を一概に比較するのは難しいが、本研究のSJH_{3reps}条件でPAPの効果が認められなかったことから、低負荷を扱う場合には、合計で10回～20回程度の反復刺激が必要となる可能性がある。サイズの原理に基づく低強度運動では、小さな運動単位が動員されるため筋収縮に要する疲労の影響は少ないが、フィラメントの感受性亢進やカルシウムイオン放出量の増大には十分でないことが考えられる（Henneman et al., 1965; Sale, 1987）。しかし、近年、運動スピードや総負荷量を高めることで高強度エクササイズ同等の効果が得られることが指摘されており（Burd et al., 2010; Michell et al., 2012; Morton, et al., 2016; Schoenfeld et al., 2017）、PAPにおいても挙上する速度や総仕事量が筋活動を活性化する上で重要である可能性が考えられる。よって、本研究の成果として、PAPの誘発に低負荷を用いる場合、コンセントリック局面において減速することなく最大努力で挙上し、少なくとも6回の反復回数で複数セットの運動課題が必要であることが示唆された。

V. 結論

本研究は、低負荷を用いて低速・高速挙上のスクワット、高速挙上のスクワットジャンプの3条件に加え、スクワットジャンプの反復回数を半減させたプロトコルを実施し、スクワットエクササイズにおける挙上速度および仕事量の違いがPAPに与える影響について検証した。その結果、ジャンプ動作を伴う高速条件において、その後のCMJのパラメータが有意に高まり、同挙上速度条件下で総仕事量が半減することでその効果が消失することが明らかとなった。よって事前運動として低負荷を用いる場合、少なくとも挙上の際の慣性制御を除外することでPAPが誘発される可能性が示唆された。また、低負荷運動でのPAPには総仕事量の影響を考慮する必要性が考えられる。

謝辞

本研究の一部は、JSPS科研費(20K19571)の助成を受けて行われたものです。また、実験に参加していただいた被験者の皆様、測定に御協力いただいた関係者の皆様には、ここに記して感謝申し上げます。

文献

- Andersen, L.L. and Aagaard, P. (2006) Influence of maximal muscle strength and intrinsic muscle contractile properties on contractile rate of force development. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 96: 46-52.
- 有賀誠司・菅野昌明・山内武・伊藤良彦 (2014) 2章, 2節, 3節, 4節, 5節, 各種トレーニングプログラム法の理論とプログラム, NPO法人日本トレーニング指導者協会, トレーニング指導者テキスト実践編改訂版, 大修館書店, 東京, pp.38-85.
- Baechle, T.R., Earle, R.W. (2002) NSCA決定版ストレングストレーニング&コンディショニング第2版. ブックハウス・エイチディ, 東京, pp.404-405.
- Baker, D. (2003) Acute Effect of Alternating Heavy and Light Resistances on Power Output During Upper-Body Complex Power Training. *J. Strength Cond. Res.*, 17(3): 493-497.
- Banyard, H.G., Nosaka, k., Sato, K. and Haff, G.G. (2017) Validity of Various Methods for Determining Velocity, Force, and Power in the Back Squat. *Int. J. Sports Physiol. Perform.*, 12(9): 1170-1176.
- Bobbert, M.F., Gerritsen, K.G.M., Litjens, M.C.A. and Van Soest, A.J. (1996) Why is countermovement jump height greater than squat jump height?. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 28: 1402-1412.
- Burd, N.A., West, D.W.D., Staples, A.W., Atherton, P.J., Baker, J.M., Moore, D.R., Holwerda, A.M., Parise, G., Rennie, M.J., Baker, S.K. and Phillips, S.M. (2010) Low-load high volume resistance exercise stimulates muscle protein synthesis more than high-load low volume resistance exercise in young men. *PLoS One*, 5(8): e12033.
- Chiu, L.Z.F., Fry, A.C., Weiss, L.W., Schilling, B.K., Brown, L.E. and Smith, S.L. (2003) Post activation potentiation response in athletic and recreationally trained individuals. *J. Strength Cond. Res.*, 17(4): 671-677.
- Comfort, P., Allen, M. and Graham-Smith, P. (2011) Comparisons of peak ground reaction force and rate of force development during variations of the power clean. *J. Strength Cond. Res.*, 25(5): 1235-1239.
- Cormie, P., McGuigan, M.R. and Newton, R.U. (2011) Developing maximal neuromuscular power: part2-training considerations for improving maximal power production. *Sports Med.*, 41(2): 125-146.
- DeRenne, C. (2010) Effects of post activation potentiation warm-up in male and female sport performances: A brief review. *Strength Cond. J.*, 32(6): 58-64.
- Ebben, W.P., Jensen, R.L. and Blackard, D.O. (2000) Electromyographic and kinetic analysis of complex training variables. *J. Strength Cond. Res.*, 14(4): 451-456.
- 深代千之・川本竜史・石毛勇介・若山章信 (2015) バイオメカニクスで読み解くスポーツ動作の科学, 一般財団法人東京大学出版会, 東京, pp.42-43, 51-52.
- Fukashiro, S. and Komi, P.V. (1987) Joint moment and mechanical power flow of the lower limb during vertical jump. *Int. J. Sports Med.*, 8: 15-21.
- Gourgoulis, V., Aggeloussis, N., Kasimatis, P., Mavromatis, G. and Garas, A. (2003) Effect of submaximal half-squats warm-up program on vertical jumping ability. *J. Strength Cond. Res.*, 17(2): 342-344.
- Grouber, M. and Gollhofer, A. (2004) Impact of sensorimotor training on the rate of force development and neural activation. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 92: 98-105.
- Gouvêa, A.L., Fernandes, L.A., César, E.P., Silva, W.A.B. and Gomes, P.S.C. (2013) The effects of rest intervals on jumping performance: A meta-analysis on post-activation potentiation studies. *J. Sports Sci.*, 31(5):

- 459-467.
- Haff, G.G., Whitley, A. and Potteiger, J. (2001) A brief review: Explosive exercises and sports performance. National Strength & Conditioning Association. 23(3): 13-20.
- 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.
- Henneman, E., Somjen, G. and Carpenter, D.O. (1965) Excitability and inhibitability of motoneurons of different sizes. *J. Neurophysiol.*, 28(3): 599-620.
- Hrysomallis, C. and Kidgell, D. (2001) Effect of heavy dynamic resistive exercise on acute upper-body power. *J. Strength Cond. Res.*, 15(4): 426-430.
- Jensen, R.L. and Ebben, W.P. (2003) Kinetic analysis of complex training rest interval effect on vertical jump performance. *J. Strength Cond. Res.*, 17(2): 345-349.
- Jones, P. and Lees, A. (2003) A biomechanical analysis of the acute effects of complex training using lower limb exercises. *J. Strength Cond. Res.*, 17(4): 694-700.
- Kilduff, L.P., Owen, N., Bevan, H., Bennett, M., Kingsley, M.T. and Cunningham, D. (2008) Influence of recovery time on post-activation potentiation in professional rugby players. *J. Sports Sci.*, 28(6): 795-802.
- Kubo, T., Hirayama, K., Nakamura, N. and Higuchi, M. (2018) Influence of Different Loads on Force-Time Characteristics during Back Squats. *J. Sports Sci. Med.*, 17(4): 617-622.
- Lum, D. and Chen, S.E. (2020) Comparison of Loaded Countermovement Jump with Different Variable Resistance Intensities on Inducing Post-Activation Potentiation. *J. Sci. Sport Exerc.*, 2: 167-172.
- Michell, C.J., Churchward-Venne, T.A., West, D.W.D., Burd, N.A., Breen, L., Baker, S.K. and Phillips, S.M. (2012) Resistance exercise load dose not determine training-mediated hypertrophic gains in young men. *J. Appl. Physiol.*, 113(1): 71-77.
- Morton, R.W., Oikawa, S.Y., Wavell, C.G., Mazara, N., McGlory, C., Quadriatero, J., Baechler, B.L., Baker, S.K. and Phillips, S.M. (2016) Neither load nor systemic hormones determine resistance training-mediated hypertrophy or strength gains in resistance-trained young men. *J. Appl. Physiol.*, 121(1): 129-138.
- 中谷友哉・福田真知子・北川祐樹・宮本俊朗 (2019) 低速度レジスタンス運動時の筋内活動分布の解析——高密度表面筋電図を用いて——. *理学療法学*, 46(1): 30-37.
- Orange, S.T., Metcalfe, J.W., Liefieith, A., Marshall, P., Madden, L.A., Fewster, C.R. and Vince, R.V. (2019) Validity and Reliability of a Wearable Inertial Sensor to Measure Velocity and Power in the Back Squat and Bench Press. *J. Strength Cond. Res.*, 33(9): 2398-2408.
- Orange, S.T., Metcalfe, J.W., Marshall, P., Vince, R.V., Madden, L.A., and Liefieith, A. (2020) Test-Retest Reliability of a Commercial Linear Position Transducer (GymAware PowerTool) to Measure Velocity and Power in the Back Squat and Bench Press. *J. Strength Cond. Res.*, 34(3): 728-737.
- Sale, D.G. (1987) Influence of exercise and training on motor unit activation. *Exerc. Sport Sci. Rev.*, 15: 95-151.
- Sale, D. G. (2002) Post activation potentiation: Role in human performance. *Exerc. Sport Sci. Rev.*, 30(3): 138-143.
- Sanchez-Median, L., Gonzalez-Badillo, J.J. (2011) Velocity loss as an indicator of neuromuscular fatigue during resistance training. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 43(9): 1725-1734.
- Schoenfeld, B.J., Grigc, J., Ogborn, D. and Krieger, J.W. (2017) Strength and hypertrophy adaptations between low- vs. high-load resistance training: A systematic review and meta-analysis. *J. Strength Cond. Res.*, 31(12): 3508-3523.
- Scott, S. and Docherty, D. (2004) Acute effect of heavy pre-loading on vertical and horizontal jump performance. *J. Strength Cond. Res.*, 18(2): 201-205.
- 島典広・島田明・西菌秀嗣 (2007) 活動後増強における筋力および筋パワー向上効果. *デサントスポーツ科学*, 7: 217-223.
- Similios, I., Pilianidis, T., Sotiropoulos, K., Antonakis, M. and Tokmakidis, S.P. (2005) Short-term effects of selected exercise and load in contrast training on vertical jump performance. *J. Strength Cond. Res.*, 19(1): 135-139.
- Sotiropoulos, K., Smilios, I., Christou, M., Barzouka, K., Spaias, A., Douda, H. and Tokmakidis, S.P. (2010) Effect of warm-up vertical jump performance and muscle electrical activity using half-squat at low and

moderate intensity, *J. Sports Sci. Med.* 9(2) : 326-331.

砂川力也・下嶽進一郎 (2017) 異なるスクワット条件を用いた等張性筋収縮が活動後増強に与える影響. *トレーニング指導*, 2(1): 18-24.

Tsolakis, C., Bogdanis, G.C., Nikolaou, A. and Zacharogiannis, E. (2011) Influence of type of muscle contraction and gender on postactivation potentiation of lower limb explosive performance in elite fencers. *J. Sports Sci. Med.*, 10(3): 577-583.

若山章信・平野裕一 (2014) 3章, 1節, バイオメカニクスの基礎理論, *トレーニング指導者テキスト理論編改訂版*, 日本トレーニング指導者協会, 大修館書店, 東京, pp.64-73.

Young, W.B., Jenner, A. and Griffiths, K. (1998) Acute enhancement of power performance from heavy load squats. *J. Strength Cond. Res.*, 12(2): 82-84.

連絡責任者

住所：〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原一番地

氏名：砂川力也

電話番号：098-895-8929

Mail：sunakawa@edu.u-ryukyu.ac.jp