

早稲田大学審査学位論文

博士（スポーツ科学）

バックスクワット中に生じる減速局面の特徴と弾性バンドが
減速局面に与える影響

The characteristics of the deceleration sub-phase during back
squat and influence of accommodating elastic band on
deceleration sub-phase.

2019年1月

早稲田大学大学院 スポーツ科学研究科

久保 孝史

KUBO, Takafumi

研究指導教員： 樋口 満 教授

目次

第1章 序論.....	1
1. レジスタンスエクササイズ中に生じる減速局面について	2
2. 減速局面に対するエクササイズについて	3
3. 本論文の目的と全体構成.....	4
第2章 異なる重量がバックスクワット中の減速局面に及ぼす影響(研究課題 1)	6
緒言.....	7
方法.....	8
結果.....	14
考察.....	17
第3章 弾性バンドを用いたバックスクワットがパワー発揮に与える影響 (研 究課題 2)	21
緒言.....	22
方法.....	23
結果.....	29
考察.....	33
第4章 総括.....	38
本研究の成果.....	39
本研究の考察および現場への応用	41
今後の展望.....	42
謝辞.....	44
引用文献.....	46

第 1 章 序論

1. レジスタンスエクササイズ中に生じる減速局面について

ジャンプやスプリントの記録を向上させるためには爆発的な筋力（爆発的力発揮能力）の向上が必要である。爆発的力発揮能力を向上させるためには、レジスタンスエクササイズ中に実際の速度に関わらず対象物を素早く挙上するか、もしくは動かそうとすることが重要である。しかし、レジスタンスエクササイズ中に素早く挙上しようとする、最終的にはバーベルを止める、つまり速度をゼロにする必要がある、そのために挙上動作中盤から終盤にかけてバーベルを減速する必要がある、これは減速局面と呼ばれている。通常、エクササイズ実施者の力発揮は挙上するものの質量とそのものが加速する加速度の積で定義されるため、挙上動作終盤でバーベルをストップするために減速している間は加速度がゼロを下回り、安静時にバーベルを支えている時よりも小さな力発揮しかしていないことになる。そのため、挙上動作中に減速局面が生じると全可動域にわたって筋に負荷をかけることが難しくなる。

Sanchez-Medina et al. (2010)、20%1RM のベンチプレス中には 30%、80%1RM では 11.7%の減速局面が挙上動作中盤から終盤にかけて生じることが報告されている。Elliot et al. (1989) は 81%1RM のベンチプレスを行った時

に約 52%の減速局面が生じることを報告している。さらに Lake et al. (2012) は、45%1RM のバックスクワットを行った時にも約 30%の減速局面が生じることを明らかにしている。しかし、これらは先に挙げたベンチプレス 2 試行とバックスクワットの 1 試行のみでしか確認されていない。さらに、先行研究では減速局面が生じる時間のみ焦点が当てられており、減速局面中にどのくらいの力発揮の低下が起きるのかについては明らかになっていない。

2. 減速局面に対するエクササイズについて

バーベルを用いたレジスタンスエクササイズ中には挙上動作中盤から終盤にかけて減速局面が生じる。例えば下肢の筋力、パワー発揮能力のために行われるバックスクワット中では、中重量（45%1RM）の時に挙上局面に対して約 30%を減速局面が占めることが明らかになっている。その減速局面の影響を小さくするためのエクササイズとして、ウエイト（オリンピック）リフティングとして知られるクリーンやスナッチ、ジャンプスクワットやスクワットジャンプのようなバリスティックエクササイズがある。さらに最近では、弾性バンドやチェーンをバーベルに取り付けて行うエクササイズ（Variable

resistance exercise: VRE) が行われている。弾性バンドはその特性上、挙上動作初盤ではその負荷は小さく、中盤から終盤にかけて負荷が増すため、減速局面による影響を小さくすることが期待されている。しかし、VRE は減速局面が生じる時間を短くするのか、減速局面によるその他の影響 (e.g., 力やパワー発揮の低下) を小さくするのかについては未だに明らかになっていない。さらに、バンドからどのくらいの負荷をかければ減速局面による影響が最小になるのかについてもわかっていない。

3. 本論文の目的と全体構成

本博士論文は、以下の 2 つの研究課題により構成する。

1. 異なる重量がバックスクワット中の減速局面に及ぼす影響

バックスクワットの最大挙上重量 (One repetition maximum: 1RM) の 0, 12, 27, 42, 56, 71, 85%を用いてそれぞれの減速局面の特徴 (減速局面が生じる時間の長さ、減速局面中に生じる力積の低下等) をバイオメカニクスの的に明らかにした。

2. 弾性バンドを用いたバックスクワットがパワー発揮に与える影響

バックスクワットのパワー発揮が最大になるとされている重量 (56%1RM) を用いて、そのうち 0, 20, 40, 60, 80%を弾性バンドが占める試行を行い、それぞれが減速局面、及びそれに至るまでの加速局面に対してどのような影響を及ぼすのかを明らかにした。

第2章 異なる重量がバックスクワット中の減速局面に及ぼす影響

(研究課題 1)

Kubo T, Hirayama K, Nakamura N, Higuchi M. Influence of different loads on force-time characteristics during back squats. *Journal of Sports Science and Medicine* (17), 617-622. 2018

1. 緒言

下肢の爆発的力発揮能力は様々なパフォーマンスと関連がある（ジャンプ等）。バックスクワットを用いて下肢の爆発的力発揮能力を向上させるためには、重量に関わらずエクササイズ中に素早くバーベルを挙上しようとする必要がある(2, 7)。しかし、パワーエクササイズ以外のフリーウエイトを用いたレジスタンスエクササイズ中にバーベルを素早く挙上すると挙上動作中盤から終盤にかけて減速局面が生じてしまう可能性がある(6, 17, 28)。減速局面においては加速度がゼロを下回るため、静的にバーベルの重さを支えている時よりも小さな力しか発揮していない。そのため、挙上動作中に減速局面が生じてしまうと全可動域にわたって筋に負荷をかけることが難しくなる。

そこで最近では、バックスクワットの減速局面を減少させるための手段として弾性バンドやチェーンを使用した可変負荷トレーニングが行なわれている(10, 11, 26, 30)。しかし、これらのトレーニング法の研究が拠り所になっている減速局面を検討した研究はバックスクワットにおいては1試行のみ（45%1RM）である(16)。そのため、他の重量の時にどれほどの減速局面が生じるかについては明らかになっていない。また、下肢の爆発的力発揮能力を向上させようと

して推奨されているスクワットの重量は 30-70%1RM と幅が広い(30)ため、軽重量から高重量までの減速局面の特徴を調べる必要がある。

バックスクワットでは挙上重量が軽くなるにつれて挙上速度が増加する(8)ため、大きな減速を伴う可能性がある。仮にバックスクワット中に有意な減速局面が生じるとすれば、重量が軽くなるにつれて挙上動作に占める減速局面の時間は長くなり、力積の損失も大きくなる可能性がある。そこで我々は 1) 重量が軽くなるにつれて減速局面が生じる絶対的な時間は長くなる 2) 挙上重量が軽くなるにつれて挙上動作に占める減速局面の割合は大きくなるという仮説を元に研究を行った。また、先行研究では減速局面の時間の長さしか検討しておらず、減速局面中にどの程度の力積の低下(3)が生じているのかについては明らかにしていないため、これについても観察をすることとした。

2. 方法

本研究の目的はバックスクワットの挙上重量が減速局面の生じる時間の長さと力発揮の低下の大きさへ及ぼす影響を検討することである。バックスクワットはエクササイズ中、下腿の質量（体重の 12%）を除くバーベル+体重の質

量 (Maximal dynamic strength : MDS) を挙上する(5)。そのため対象者はフォースプレート上にて 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90%MDS の 7 試行のバックスクワットをランダムな順序で行った。これらの重量は%1RM 換算すると 0, 12, 27, 42, 71, 85%1RM で表される。得られたデータから減速局面の時間を算出し、そこから減速局面の時間が挙上動作全体に占める割合を算出した。さらに、減速局面の地面反力を時間で積分した値を減速局面の力積の大きさとした。

2-1. 対象者

対象は1年以上継続的にレジスタンストレーニングを行っている健常男性 16 名 (パワーリフター : 6 名、ボディビルダー : 2 名、トレーニング愛好者 : 8 名) (年齢 : 25 ± 3 歳 [21-30]、身長 : 172.9 ± 6.5 cm [161.5-187.1]、体重 : 83.2 ± 16.1 kg [66-121]、スクワット 1RM : 163.8 ± 36.6 kg [117.5-235]、スクワット 1RM 体重比 : 2.0 ± 0.4 [1.3-2.9]) とした。対象者にはあらかじめ研究の内容とそれに伴うリスクを十分に説明し、参加の同意を書面にて得た。なお、本研究は早稲田大学における「人を対象とする研究に関する審査委員会」の承認を得た上で「人を対象とする研究に関する倫理規程」に沿って実施した。

2-2. 実施方法

対象者はウォーミングアップとして、60ワットの自転車エルゴメーター運動を5分間行った後、バックスクワットを50%1RMで10回×1セット、80%1RMで3回×1セット行った。その後、一軸フォースプレート（ストレインプレート、DKH, Tokyo, Japan）上で0, 12, 27, 42, 56, 71, 85%1RMのバックスクワットをランダムな順序で行った。下降局面は3秒とし、挙上局面はできるだけ早くバーベルを挙上するように指示をした。なお、バーベルの保持位置は肩（ハイバーポジション）とし、足幅は肩幅とした。挙上重量について、パワーリフターおよびボディビルダーは直近の試合およびトレーニング中のベスト記録、トレーニング愛好者はNational Strength and Conditioning Associationのガイドラインに従い1RMを測定した(10)。各試行は3回ずつ行い、ビデオカメラ（EX-100PRO, CASIO, Tokyo, Japan）に記録した。すべての試行において、大腿部と床が平行になるまで下降し、挙上局面で踵が地面から浮いたり、ジャンプをしたり、最下降点で停止しないように指示をした。ビデオカメラの映像を元に確認をし、指示が守れている試行をデータとして採用した。なお、試行間には5分間の休

憩を設けた。

フォースプレートからのシグナルは A/D 変換器 (Power Lab, AD Instruments, Australia) を経由し、デジタル変換した後、専用のソフトウェア (Chart 5.0 for Windows, AD Instruments, Australia) にサンプリング周波数 1000Hz で保存した。得られた地面反力データに 2 次バターワースフィルター処理をし、地面反力から挙上速度を算出した。その際の閾値は先行研究に従い安静時の 5 標準偏差を下回った点とした(21, 22, 25)。算出した挙上速度がマイナスからプラスに転じる時点を切り返しとし、安静時の質量 (バーベル+体重) に戻った時点を動作の終了とした。安静時の質量はバーベルを保持している 1 秒間の平均値とした。これらの切り返しから動作の終了時点までをバックスクワットにおける挙上局面とした。

さらに、安静時にバーベルを支える質量より挙上局面の地面反力が下回った時間を減速局面とし、挙上局面の開始から減速局面の開始までを加速局面とした。得られたデータから、挙上局面に占める減速局面の長さの割合と減速局面における力積の大きさを算出した。これらの解析は全て専用のソフトウェア (Matlab R2017a, Simulink, USA) 上で行った。

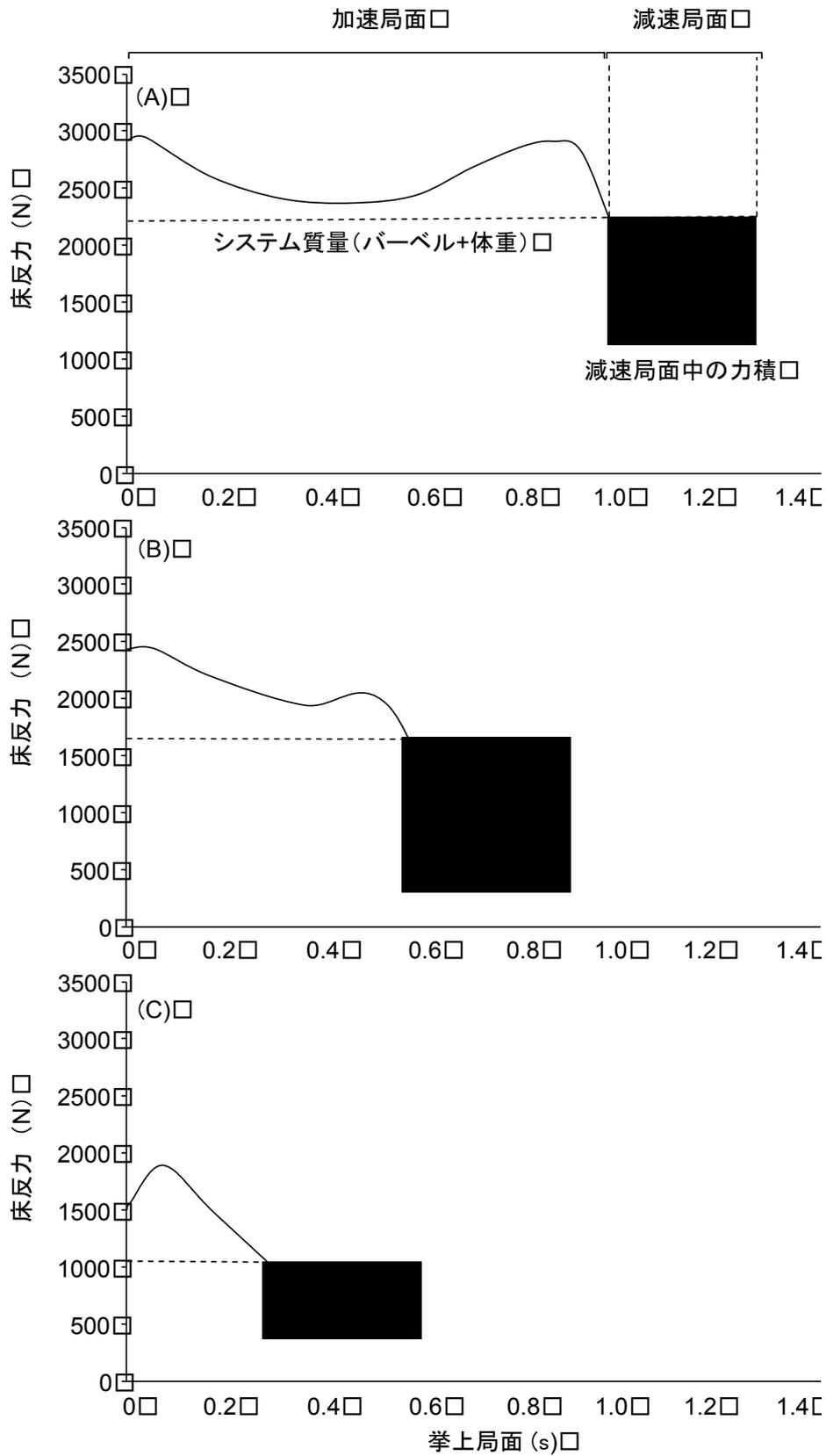


図1. 85%1RM (A)、42%1RM (B)、0%1RM (C) におけるバックスクワット中の床反力

3. 統計処理

データはすべて平均値±標準偏差で示した。減速局面の長さ、力積の損失共に反復のある一元配置分散分析を用いて事前比較をした後、主効果が有意であった場合には Bonferroni 法を用いて事後検定を行った。その際の効果量は η^2 で示し、 $p < 0.05$ を有意とした。また、統計解析はすべて専用のソフトウェア (SPSS Statistics version24, IBM, USA) を用いて行った。

4. 結果

挙上動作の時間の主効果に有意差が認められた ($p < 0.001, \eta^2 = 0.82$)。事後検定では全ての試行間に有意差が認められ、重量が重くなるにつれて挙上動作の時間は長くなっていた ($p < 0.05$)。減速局面の時間にも主効果が認められた ($p < 0.001, \eta^2 = 0.048$) が、事後検定では 27%1RM と 85%1RM との間にのみ有意差が認められ ($p = 0.01$)、他の重量間に有意差は認められなかった。

挙上動作に占める減速局面の時間の割合は主効果に有意差が認められた ($p < 0.001, \eta^2 = 0.856$)。事後検定では 0%1RM と 12%1RM との間を除くすべての重

量間で有意差が認められた ($p < 0.05$)。

力積の損失の大きさは主効果に有意差が認められた ($p < 0.001, \eta^2 = 0.39$)。事後検定では 0%1RM から 42%1RM にかけて有意に増加したが、それ以降は重量を上げてても増加しなかった ($p < 0.05$)。

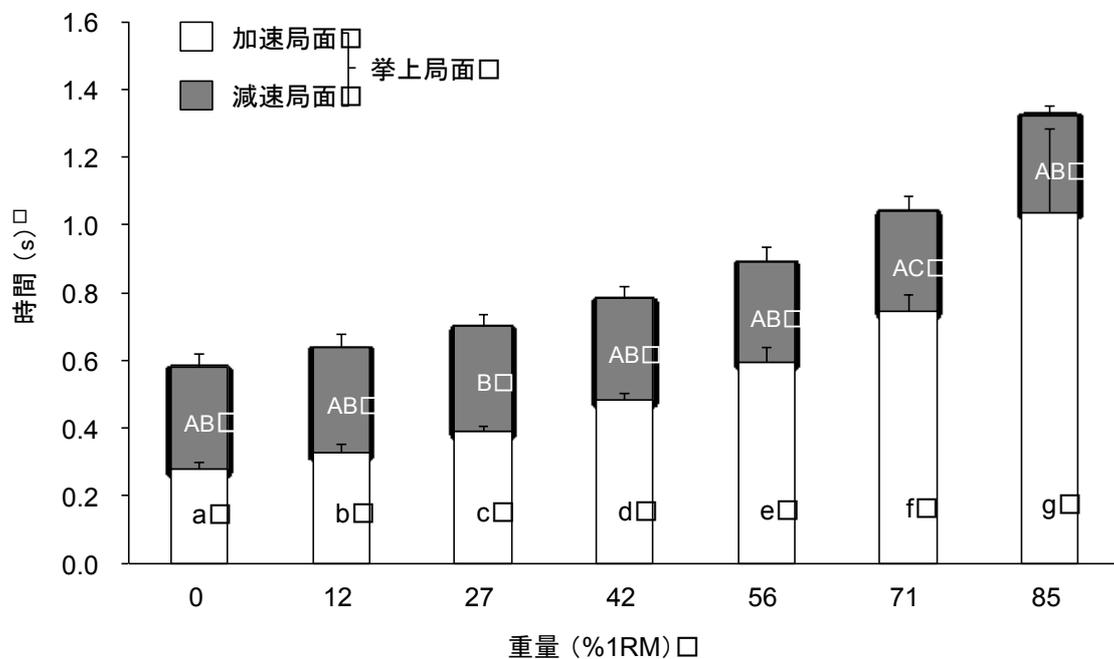


図 2. 挙上局面中の加速局面及び減速局面の長さの絶対値
異なる小文字のアルファベットは加速局面の長さが有意 ($post-hoc, p < 0.05$) であることを示し、異なる大文字のアルファベットは減速局面の長さが有意 ($post-hoc, p < 0.05$) であることを示す

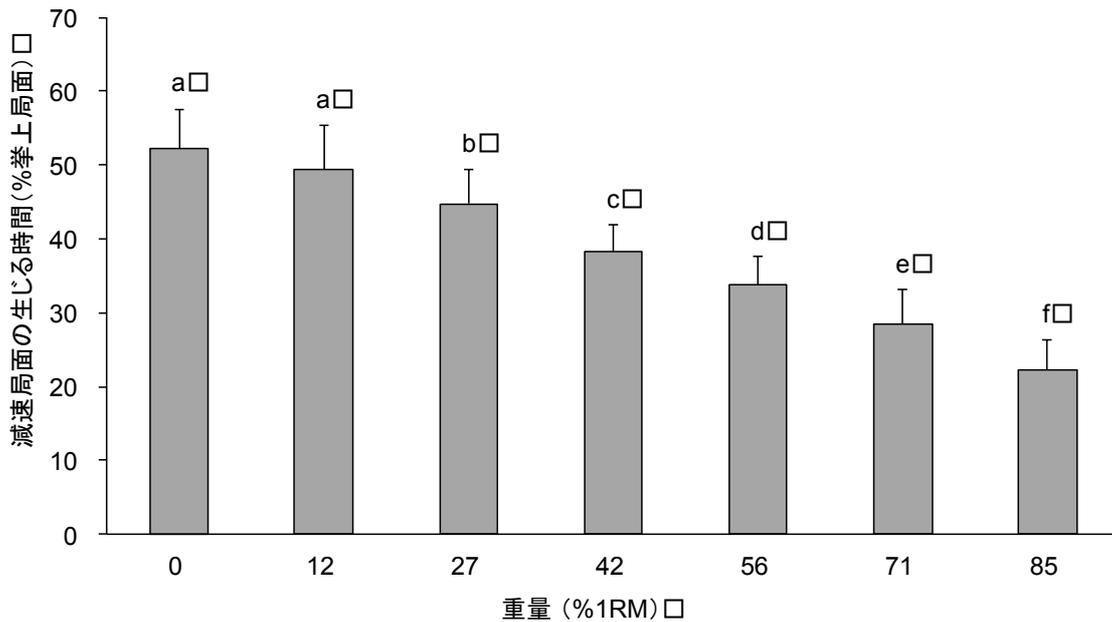


図 3. 挙上局面中に対する減速局面の長さの相対値
異なるアルファベットは挙上局面中に対する減速局面の長さの相対値が有意 (*post-hoc*, $p < 0.05$) であることを示す

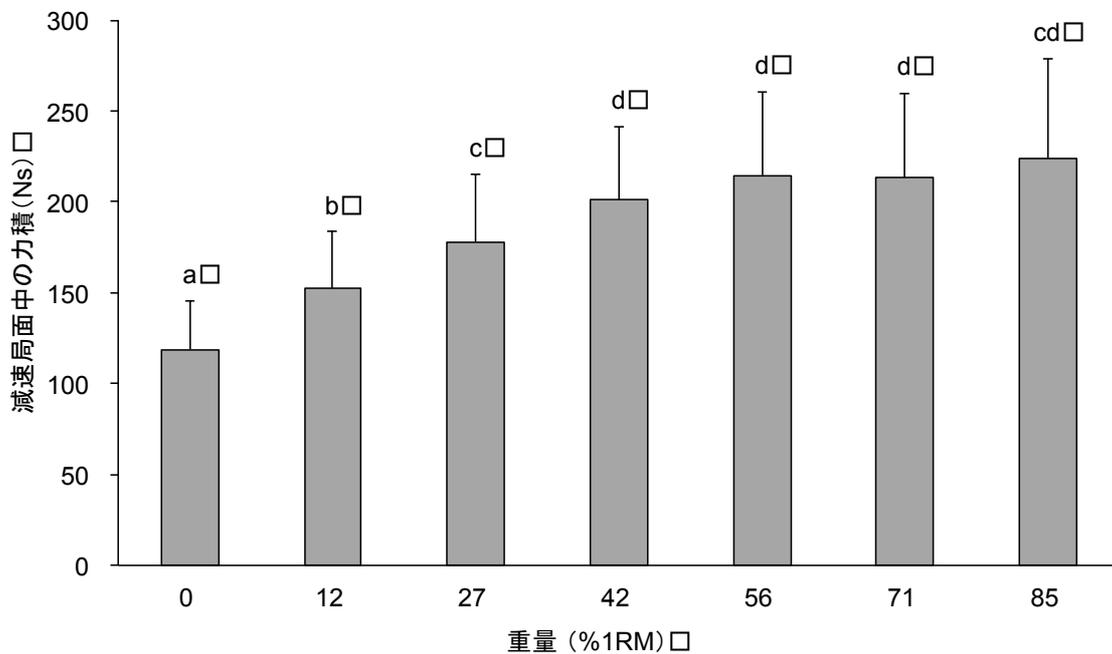


図 4. 減速局面中の力積の大きさ
異なるアルファベットは減速局面中の力積の大きさが有意 (*post-hoc*, $p < 0.05$) であることを示す

5. 考察

本研究ではバックスクワットでは挙上動作の 22-52%を占める減速局面が生じ、減速局面の生じる時間の割合は 12%1RM から 85%1RM まで重量が重くなるにつれて短くなることが明らかとなった。これらの結果は 2) 重量が軽くなるほど減速局面が挙上動作に占める割合が長くなるという我々の仮説を支持したが 1) 重量が軽くなるにつれて減速局面が生じる絶対的な時間は長くなるという仮説は支持しなかった。ただし、減速局面の生じる割合が重量によって変化したのは、減速局面の生じる時間の絶対的な長さの変化によるものではなく、挙上動作の時間が重量によって変化したことが要因であることがわかった。また、減速局面中の力積の低下は 0%1RM から 42%1RM まで増加したが、それ以上の重量では変化がみられなかった。これは、時間とは異なり、力積の低下で見ると高重量でも減速局面による影響が無視できないことを示唆するものである。これらの結果を踏まえると、爆発的力発揮能力向上に最適とされる 30-70%1RM のスクワットを素早く挙上すると、動作の後半に減速局面が生じ、全可動域にわたって筋に負荷をかけることができないということが明らかとなった。また、減速局面の特徴をまとめると、比較的軽-中重量では挙上局面に

対して長い減速局面が生じ、比較的高重量では挙上局面に対する減速局面は短い。その中でも大きな力積の低下が生じていることが明らかになった。

実際にバーベルを挙上する速度が重要であるため、速度を意識した軽-中重量でのフリーウエイトエクササイズが行われる(14)。しかし、比較的低-中重量で BSQ を素早く行うと挙上動作の大半を減速局面が占め、加速局面が短くなるため、より加速局面が長いエクササイズを行う必要がある。Lake et al. (2012) では、45%1RM で行うジャンプスクワットは通常の BSQ よりも加速局面が 8.6%長いことが報告されている(17)。さらに Moir et al. (2012)では、ジャンプスクワットの時の 0%1RM で身体重心の速度から算出した発揮パワー及び膝関節パワーが最大になり、42%1RM で股関節パワーが最大になることが報告されている(23)。しかし、比較的重い重量 (56-85%1RM) では各関節のパワーと発揮パワーは重量が増加するにつれて低下してしまう。ウエイトリフティングにおける最大パワーの増加は比較的高重量で生じるため、軽-中重量での爆発的力発揮能力向上を目的とする場合には、軽-中重量のバリスティックエクササイズが減速局面による影響を最小限に抑えるエクササイズである事が示唆された。

特に初心者が高重量でのフリーウエイトエクササイズを行う場合には、実際の速度にかかわらずバーベルを素早く挙上しよう意識することが重要である(2, 7)。高重量の BSQ を素早く挙上しよう意識すると、挙上動作の殆どを加速局面が占めているため、一見すると減速局面による影響は少ないようにみえる。しかし、減速局面が生じる短い時間の中に大きな力積の低下を引き起こしていることが新たに本研究で明らかになった。そのため、高重量においてもやはり減速局面による影響を最小限に抑える工夫が必要である。オリンピックリフティング（パワークリーン、ハングクリーン等）は 60%1RM からパワーが増加し始め、80%1RM でバーベルと身体を含めたシステムのパワー（System power）が最大になり、90%1RM で身体重心におけるパワー（Body power）が最大になることが報告されている(20)。また、ハングクリーンは 70%1RM から 80%1RM でパワーが最大になるとされている(13, 15)。また、パワークリーンの加速局面はジャンプスクワットよりも長い可能性がある(32, 35)。さらに他のウエイトリフティングの派生種目について、Comfort et al. (2012)では 140%1RM で行うミッドサイククリーンプルは力発揮の向上として効果的であることが明らかになっている(4)。そのため、高重量での爆発的力発揮能力向上を

目的とする場合には、オリンピックリフティング、もしくはその派生エクササイズ(33, 34, 36)が減速局面による影響を最小限に抑えるエクササイズである事が示唆された。

本研究は横断研究であり、縦断研究ではないため、長期的なトレーニングにおいて減速局面がパフォーマンスにどのような影響を及ぼすのかについては不明である。また、本研究に参加した対象者は全てスクワットの熟練者であるため、本研究の結果が初心者に対して当てはまるとは限らないと考えられる。

6. 結論

結論として、バックスクワットでは軽-高重量で有意な減速局面が生じることが明らかとなった。さらに、その減速局面が挙上動作に占める割合は重量が軽くなるにつれて大きくなり、減速局面中に生じる力積の低下は中重量まで重量が増えるにしたがって有意に大きくなるということが明らかとなった。

第3章 弾性バンドを用いたバックスクワットがパワー発揮に与える影響

(研究課題2)

Kubo T, Hirayama K, Nakamura N, Higuchi M. Effect of accommodating elastic bands on mechanical power output during back squats. *Sports*. 2018, 6, 151.

1. 緒言

アスリートの競技力向上のためにパワーエクササイズが行なわれている(9, 19)。通常、バーベルを用いたバックスクワットでは中重量(56%最大挙上重量[One repetition maximum: 1RM])を素早く挙上した際にパワー発揮が最大になることが報告されている(5)。しかし、中重量の負荷でバーベルを素早く挙上しようとする場合、挙上動作前半では素早く加速することができるが、挙上局面の中盤から終盤の約30%を減速局面が占めることが明らかになっている(17)。減速局面中は加速度がゼロを下回るため、質量と加速度の積として定義される減速局面中の力発揮は安静時にバーベルを保持しているよりも小さくなってしまふ。つまり、挙上局面中に減速局面が生じてしまうと全可動域にわたって筋に負荷をかけることが難しくなる。そのため、素早い動きをしている場合でも出来る限り減速局面の影響を小さくすることが重要である。

減速局面の影響が少ないエクササイズとして、スクワットジャンプやジャンプスクワットに代表されるバリスティックエクササイズ、ウェイトリフティング、バーベルにチェーンや弾性バンドを取り付けて行う可変負荷エクササイズ(Variable Resistance Exercise: VRE)が行われている(11, 12, 27, 31-35, 37)。

しかし、パリストティックエクササイズは着地時に脊柱や膝に大きな負荷がかかることが考えられ、ウエイトリフティングは技術習得が他の種目に比べて比較的難しいことが指摘されている。一方、VRE は安全に、かつ特別な技術を必要とせずにパワーエクササイズを行うことができると考えられる。

しかし、VRE が減速局面に対して効果的であるのかについての先行研究はない。さらに、どれくらいの負荷を弾性バンドからかければよいのかについてもわかっていない。そのため、VRE は本当に減速局面の影響を小さくするのか、もしするのであれば、どのくらいの負荷を弾性バンドからかければいいのかを明らかにする必要がある。そこで本研究では、弾性バンドは動作初期では負荷が小さく、終盤になるにつれて負荷が大きくなるという特徴を踏まえて、バンドの負荷が大きくなるにつれて減速局面による影響は小さくなるという仮説を元に研究を行った。

2. 方法

1 年以上継続的にレジスタンストレーニングを行なっている健常男性を対象とした。対象者はフォースプレート上にてバックスクワット 1RM の 56%に相当

する 5 試行のバックスクワットを異なる弾性バンド負荷 (0%, 20%, 40%, 60%, 80%) で行った。挙上動作におけるバーベルの速度は変位計測ポテンショメーターを用いて計測し、2 つのデバイスから得られたデータより減速局面が挙上局面に占める割合、加速局面、減速局面中の平均力発揮、挙上速度、パワーを算出した。

2-1. 対象者

対象はレジスタンストレーニングを 1 年以上継続的に行っている健常男性 10 名 (年齢 : 23 ± 2 歳、身長 : 170.5 ± 3.7 cm、体重 : 66.7 ± 5.4 kg、スクワット 1RM : 105 ± 23.1 kg、スクワット 1RM 体重比 : 1.6 ± 0.3) とした。対象者にはあらかじめ研究の内容とそれに伴うリスクを十分に説明し、参加の同意を書面にて得た。なお、本研究は早稲田大学における「人を対象とする研究に関する審査委員会」の承認を得た上で「人を対象とする研究に関する倫理規程」に沿って実施した。

2-2. 実施方法

対象者は全 2 日間測定に参加した。1 日目はバックスクワットの 1RM 測定お

よび形態計測、2日目は本測定とした。1日目と2日目は48時間以上開け、1日目のバックスクワット1RMの測定はNSCAのガイドラインに従い行った(10)。また、形態計測では体重と身長の外にバーベルを担いだ際のトップポジション（バーベルを担いで立っている状態）およびボトムポジション（大腿部と地面が平行の状態）の距離を計測した。

2日目の本測定ではウォーミングアップとして、60ワットの自転車エルゴメーター運動を5分間行った後、バックスクワットをバーベル(20kg)で10回×1セット、50%1RMで10回×1セット、バーベルに20%1RMのバンドを追加して5回×1セット行った。その後、一軸フォースプレート(ストレインプレート, DKH, Tokyo, Japan)上で変位計測ポテンシオメーター(PT101, Celesco, Chatsworth, England)を取り付けたバーベルにてバックスクワットの56%1RMに相当する5試行を異なるバンド負荷でランダムな順序で行った。試行は、プレートとバンドを合わせた負荷を56%とし、そのうちバンドの負荷は0%で、プレートのみを試行(B0)、弾性バンドが全体の20%(B20)、40%(B40)60%(B60)、80%(B80)を占める試行を行った。弾性バンドの負荷はShoepe et al. (2010)に従い、バンドの全長が約200cmになるまで5kg刻みにダンベルを追加し、その際のバンドの

長さダンベルの重さを元に回帰式を算出した(29) (表 1)。バンドの負荷は 1 日に計測した各ポジションの距離を元に、挙上動作の中間位で規定の負荷がかかるように調整を行った。National Strength and Conditioning Association のガイドラインに従い、バーベルを担ぐ位置はハイバーポジション、足幅は肩幅とした。大腿部と床が平行になるまで下降し、下降局面は約 3 秒、挙上局面ではできるだけ速く挙上し、踵が地面から浮いたり、ジャンプをしたりしないように指示をした。指示が全て守れており、最大速度が一番高かった試行をデータとして採用した。各試行は 3 回ずつ行い、試行間には 5 分間の休憩を設けた。

フォースプレートおよび変異計測ポテンシオメーターからのアナログ信号は A/D 変換器 (Power Lab, ADInstruments, Castle Hill, Australia) を経由し、デジタル変換した後、専用のソフトウェア (Chart 5.0 for Windows, ADInstruments, Castle Hill, Australia) を介してサンプリング周波数 1000Hz でパーソナルコンピュータへ保存した。得られた変異データに 10Hz のローパスフィルター (zero-phase-lag Finite Impulse Response filter) 処理をし、挙上速度を算出した。算出した挙上速度がマイナスからプラスに転じる時点を切り返しとし、挙上速度がゼロに戻るまでを動作の終了とした。この切り返しから動作の終了時点ま

でをバックスクワットにおける挙上局面とした。さらに、加速度がマイナスに
 転じた時点から動作終了までを減速局面とし、挙上局面に占める減速局面の割
 合を算出した（図 1）。また、フォープレートから得られた床反力と速度を元に
 挙上局面、加速局面および減速局面の平均パワーを算出した。これらの解析は
 全て専用のプログラミングソフト（Matlab R2017a, Simulink, USA）上で行った。

表 1. 弾性バンドの負荷決定に用いた回帰式

バンドの色	回帰式	R ²
パープル	$y = 20.802\ln(x) - 90.809$	0.945
レッド	$y = 39.03\ln(x) - 171.9$	0.983
ブルー	$y = 51.831\ln(x) - 227.85$	0.989
グリーン	$y = 90.823\ln(x) - 395.29$	0.991

x = バンドの長さ (cm); y = バンドの負荷 (kg); ln = 自然対数.

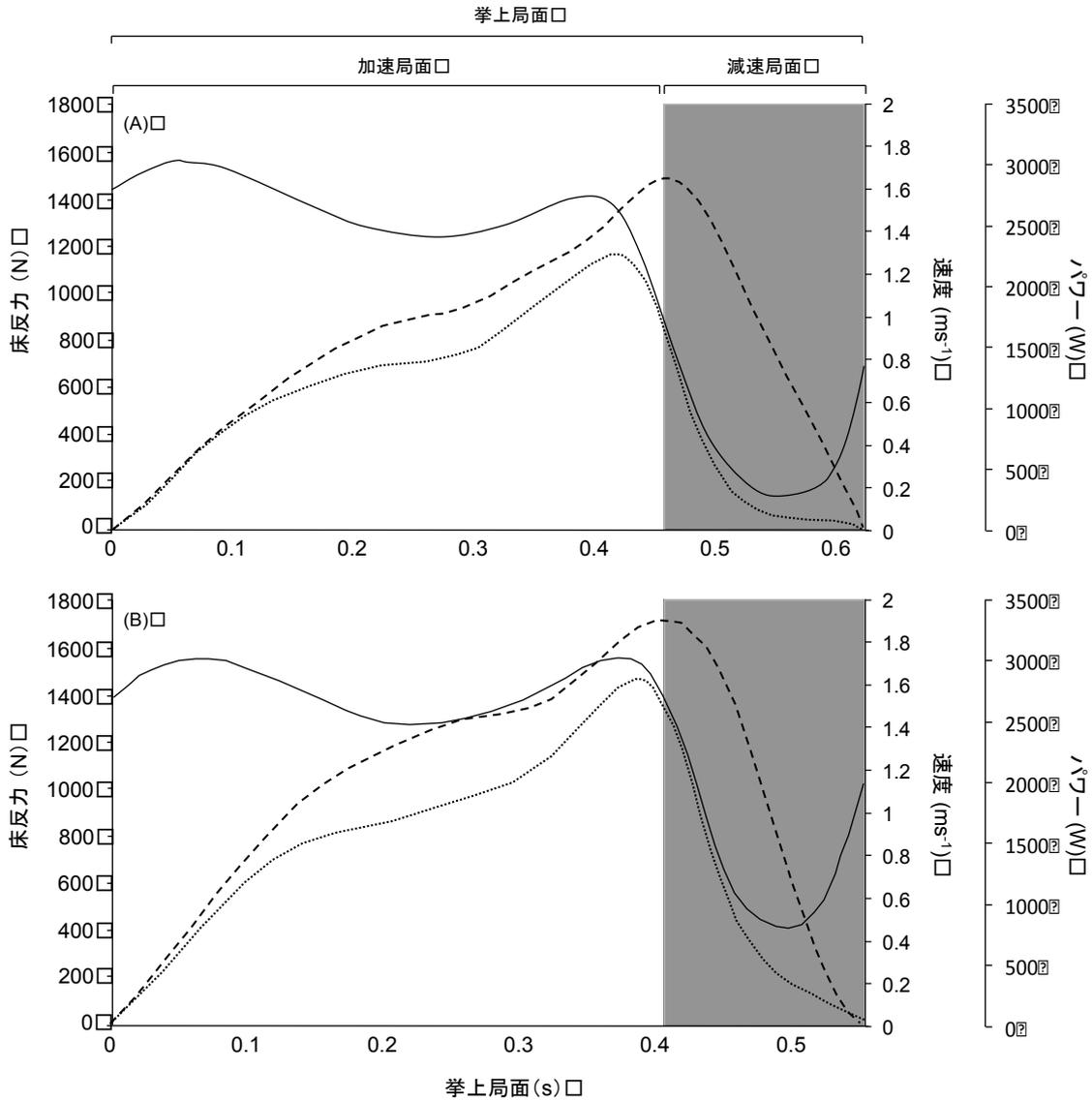


図 1. B0 と B80 中の挙上局面における加速局面と減速局面
 実線は床反力、破線は速度、点線はパワーをそれぞれ示し、グレー
 で示す部分は減速局面、白で示す部分は加速局面を表している

3. 統計処理

データはすべて平均値±標準偏差で示し、反復のある二元配置分散分析を用いて事前比較をした後、主効果が有意であった場合には Bonferroni 法を用いて事後検定を行った。その際、 $p < 0.05$ を有意とした。さらに、Cohen (1988)に従いバンド無し (B0) とバンド有り (B20, B40, B60, B80) の間の効果量 d (<0.20 ; small, $0.20-0.50$; medium, $0.50-0.80$; large, $0.80-1.30$; or very large. >1.30) を算出した。統計解析はすべて専用のソフトウェア (SPSS Statistics version24, IBM, USA) を用いて行った。

4. 結果

4-1. 減速局面の時間の長さ

反復のある二元配置分散分析と事後検定の結果、挙上局面の長さは B0 と比較して B20, B40, B60, B80 が有意に短く、B20 と B40 では B40 が、B40 と B60 では B60 がそれぞれ有意に短かった ($p < 0.05$)。減速局面の時間は B0 と比較して B40, B60 が有意に短く、B20 と比較すると B60 が有意に短かった ($p < 0.05$)。概して、減速局面の時間はバンドの負荷が大きくなるにつれて減っていたが、

同時に挙上局面の時間も短くなっていたため、挙上局面に占める減速局面の時間の割合は全ての群間で有意差は認められなかった（図2）。

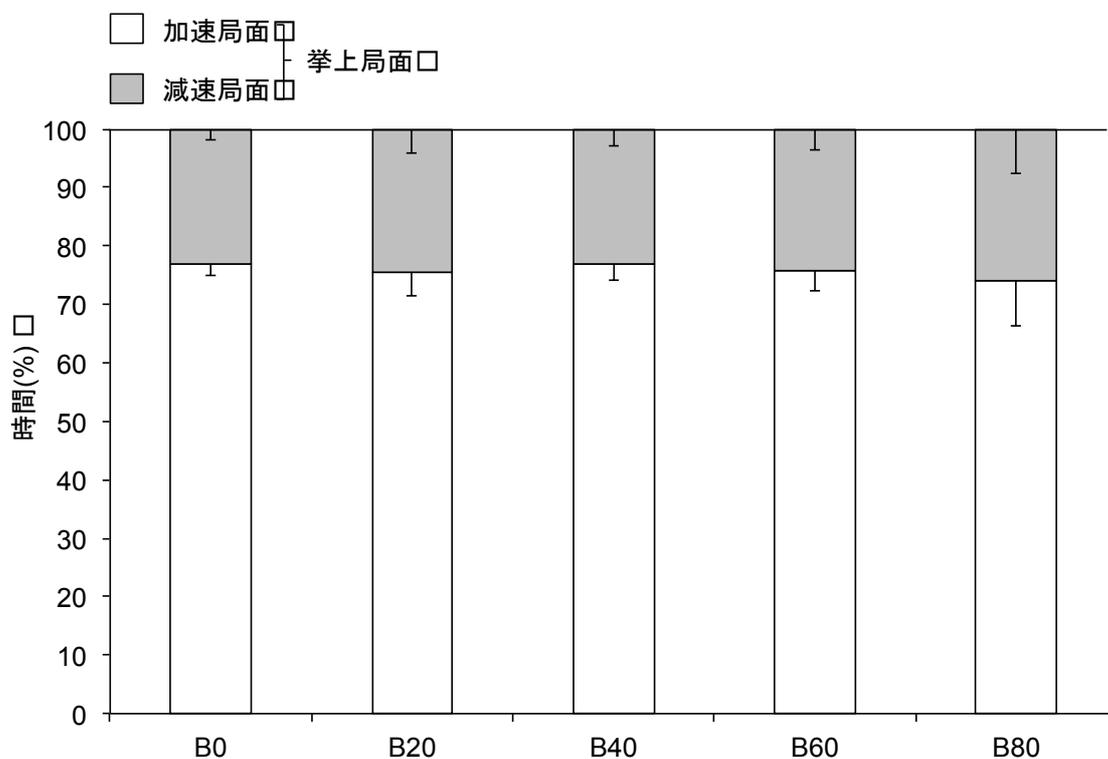


図2. 各重量における挙上局面中の加速局面と減速局面の割合

4-2. 減速局面の平均パワー

加速局面中のパワーは B0 と比較して B80 が有意に大きかった ($p < 0.05$)。減速局面中のパワーは B0 と比較して B20, B40, B60, B80 が有意に大きかった ($p < 0.05$)。B20 および B40 と比較すると B60, B80 が有意に大きかった。概して、加速局面 (B20[$d = 0.48$], B40[$d = 0.65$], B60[$d = 0.82$], B80[$d = 1.02$]) および減速局面中 (B20[$d = 1.12$], B40[$d = 1.83$], B60[$d = 2.77$], B80[$d = 2.72$]) のパワーはバン

ドの負荷が大きくなるにつれて増加した (図 3)。

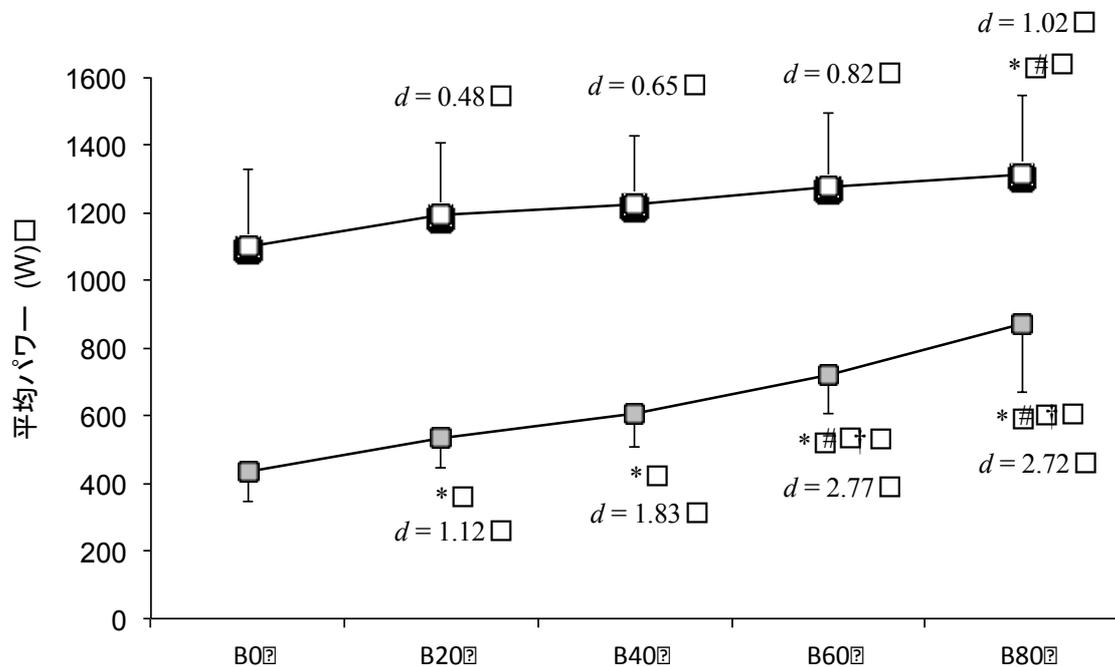


図 3. 各重量における平均パワー

白は加速局面、グレーは減速局面を表す

*は B0、#は B20、†は B40 に対する有意差をそれぞれ示している

4-3. 減速局面の平均速度

加速局面の平均速度は B0 と比較して B20, B40, B60, B80 が有意に速く、B20、B40 比較すると B80 が有意に速かった ($p < 0.05$)。減速局面の平均速度は B0 と比較して B40, B60, B80 が有意に速く、B20、B40 比較すると B80 が有意に速かった ($p < 0.05$)。概して、加速局面 (B20[$d = 0.57$], B40[$d = 0.95$], B60[$d = 0.96$], B80[$d = 1.81$]) および減速局面中 (B20[$d = 1.46$], B40[$d = 1.74$], B60[$d = 2.04$],

B80[$d = 3.43$]の平均速度はバンドの負荷が大きくなるにつれて増加した(図4)。

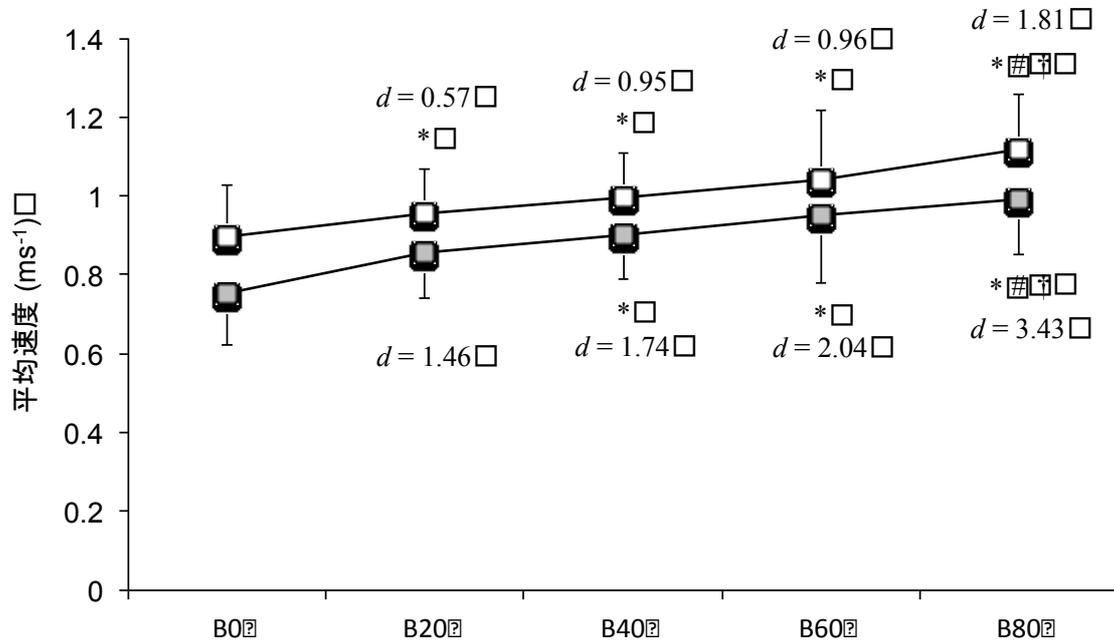


図4. 各重量における平均速度

白は加速局面、グレーは減速局面を表す

*は B0、#は B20、†は B40 に対する有意差をそれぞれ示している

4-4. 減速局面の平均力発揮

加速局面中の平均力発揮は B0 と比較して B20, B40, B60, B80 が有意に小さく、

B20 と比較すると B60, B80 が有意に小さかった ($p < 0.05$)。減速局面中の平均

力発揮は B0 と比較して B40, B60, B80 が有意に大きく、B20 および B40 と比較

すると B80 が有意に大きかった ($p < 0.05$)。概して、加速局面中の平均力発揮

はバンドの負荷が大きくなるにつれて減少し (B20[$d = 0.28$], B40[$d = 0.49$], B60[d

= 0.65], B80[$d = 0.71$])、減速局面中の平均力発揮は増加した (B20[$d = 0.70$], B40[$d = 1.03$], B60[$d = 1.43$], B80[$d = 2.40$]) (図 5)。

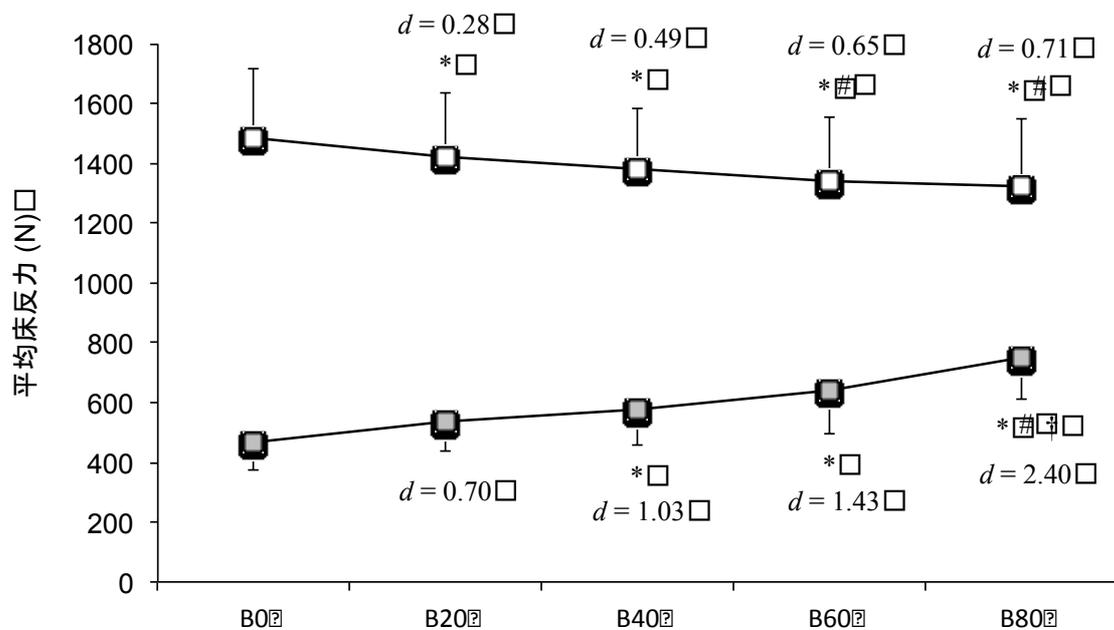


図 5. 各重量における平均床反力

白は加速局面、グレーは減速局面を表す

*は B0、#は B20、†は B40 に対する有意差をそれぞれ示している

5. 考察

本研究では異なるバンド負荷が中重量のバックスクワット中に生じる減速局面へ与える影響を検討した。その結果、減速局面の時間を挙上局面に対して相対化すると弾性バンド負荷による影響は認められなかった。しかし、減速局面中の平均力床反力、挙上速度、パワー発揮ともに弾性バンドの負荷が大きくな

るにつれて増加していた。これは我々の仮説を支持するものであった。しかし、バンドの負荷が大きくなるにつれて加速局面中の床反力は低下してしまうことが明らかになった。以上を踏まえると、弾性バンド負荷をした中重量のバックスクワットはバーベルのみを用いたバックスクワットに比べて加速局面中の力発揮を低下させるが、減速局面の悪影響はある程度抑制することが示唆されたと言えよう。

本研究の結果から、弾性バンド負荷は減速局面の時間的な影響を減少させるのではなく、減速局面中に生じるパワー、挙上速度、床反力の低下をある程度抑制するということが明らかになった。減速局面の絶対的な時間はバンド負荷が大きくなるにつれて短くなるものの、同様に挙上動作時間も短くなるため、挙上動作に占める減速局面の割合はバンド負荷による変化がみられなかった。対して、パワーは増加していた。それは、挙上動作前半ではバンドによる負荷が小さく、終盤では大きくなるためである。本研究では挙上動作の中間でバンドの負荷がかかるようにセッティングをしており、中間以前では全体の負荷が56%1RMを下回り、減速局面が生じる地点まで素早くバーベルを挙上することが可能になる。一方で挙上動作終盤では全体の負荷が56%を上回るため、減速

局面中の床反力が増加する。その結果、減速局面中のパワー発揮はバンドの負荷が大きくなるにつれて増加していたと考えられる。特に B20 より大きな負荷では効果量が 0.8 (large) を上回っているため、バンドを負荷しない場合と比べて大きなトレーニング効果を得ることができると予想される。

弾性バンド負荷をしたバックスクワットでは、挙上動作前半で負荷が小さくなるという特性上、挙上速度が増加するため、それに伴って加速局面中のパワー発揮は増加していた。一方で、床反力はわずかに低下させてしまうことが明らかになった（効果量：small-medium）。エクササイズサイズのトレーニング効果（関節トルクの向上等）は関節角度に特異的であることが先行研究にて報告されている(1, 16, 24, 26)。そのため、バンド負荷をしたバックスクワットでは長期的なトレーニングにおいても加速局面が生じる関節角度周辺での力やパワー発揮の向上が難しくなる可能性がある。つまり、中重量を用いてパワー発揮を目的とした場合にはバンド負荷は有効であるが、加速局面中に力発揮をすることを目的とした場合、弾性バンド負荷は必ずしも有効とは限らないことが示唆された。

バックスクワット中に弾性バンドを使用する目的は、減速局面中に生じるパワーや力の低下を抑制し、加速局面の時間の延長を目指すものである。しかし、

バーベルに弾性バンドを追加で負荷しても減速局面中の時間は減らず、加速局面の延長は観察されなかった。また、減速局面中のパワー、床反力、挙上速度は加速局面中に生じるものよりも小さい。そのため、弾性バンドによるトレーニング効果は加速局面よりは小さく、あくまでもバンドを負荷しない場合と比較して大きいものであると考えられる。

本研究はサンプルサイズが 10 名と少なかったため、いくつかの試行間で統計的有意差が出なかった可能性があると考えられる。しかし、いずれの結果についても試行間ごとに効果量 d を算出しているため、本研究の結果がサンプルサイズに左右されることは考え難い。また、Lake et al. (2012)は、バーベルの速度を用いてパワーを算出すると、身体重心からパワーを算出した時よりも値を過大評価してしまうことを報告している(17)。しかしながらバーベルの速度を用いてパワーを算出したとしても本研究の試行間の傾向は変わらないと考えられる。そのため本研究ではパワーを算出するために変位計測ポテンシオメーターから得られたバーベルの速度を用いた。

6. 結論

結論として、弾性バンドを負荷した中重量のバックスクワットは挙上動作中盤から終盤にかけて生じる減速局面によるパワー、挙上速度、力発揮の低下をある程度抑制することが明らかになった。しかし、バンドの負荷が大きいほど加速局面中の力発揮を低下させてしまうことも明らかになった。さらに、バンドを負荷した場合でもパワー、力、速度は加速局面の値を超えることはない。そのため、VRE はあくまでも様々な理由（施設やテクニック等）で減速局面の影響を小さくするパワーエクササイズ（バリスティックエクササイズ、ウエイトリフティング等）ができないアスリートにとっての代替種目とするのが適切であろう。

第4章 総括論議

1. 本研究の成果

本博士論文では、バーベルを使用したエクササイズ中に生じる減速局面と、その減速局面の影響を小さくするためのエクササイズについて 2 つの研究課題を検討した。

1-1. 研究課題 1 (第 2 章) : 異なる重量がバックスクワット中の減速局面に及ぼす影響

16 名の健常男性を対象とし、0, 12, 27, 42, 56, 71, 85%のバックスクワットを用いて 1) 重量の異なるバックスクワット中にどのくらいの時間減速局面が生じるのか 2) 生じた減速局面中にどのくらいの力積の低下が生じているかをバイオメカニクス的手法を用いて検討した。その結果、バックスクワットでは有意な減速局面が生じることが明らかとなった。さらに、その減速局面が挙上動作に占める割合は重量が増える (12%-85%1RM) につれて小さくなり (50%-20%)、減速局面中に生じる力積の低下は 0%RM から 42%1RM まで重量が増えるにしたがって有意に大きくなるということが明らかとなった。

1-2. 研究課題 2 (第 3 章) : 弾性バンドを用いたバックスクワットがパワー発揮に与える影響

10名の健常男性を対象とし、全体の負荷は56%だが弾性バンド負荷の異なるバックスクワットは1) 減速局面中のパワー、力、速度にどのような影響を及ぼすのか2) 加速局面中のパワー、力、速度にどのような影響を及ぼすのかをバイオメカニクスの指標を用いて明らかにした。弾性バンドの負荷は56%1RMのうち0, 20, 40, 60, 80%とし、弾性バンドの負荷は挙上局面の中間位で負荷がかかるように設定をした。その結果、弾性バンド負荷をした56%1RMのバックスクワットは挙上動作中盤から終盤にかけて生じる減速局面による平均パワー、挙上速度、力発揮の低下をある程度抑制することが明らかになった。特にパワー発揮はバンドの負荷が全体の20%を超えるとそうでない場合に比べて効果量が0.8 (large) を超えていた。しかし、弾性バンドの負荷は加速局面中の力発揮をわずかに低下させてしまう(効果量: small-medium) 可能性もあることも明らかになった。さらに、バンドを負荷した場合でも減速局面中のパワー、力、速度は加速局面の値を超えることはなかった。

2. 本研究の考察および現場への応用

本研究では、バックスクワット中に生じる減速局面の特徴と、弾性バンド負荷をしたバックスクワットが減速局面に対する影響を検討した。その結果、バックスクワット中にはいかなる重量であっても挙上局面の中盤から終盤にかけて減速局面が生じることが明らかになった。さらにその減速局面は比較的軽-中重量では時間的に減速局面が長くなり、比較的高重量では時間的な減速局面は短い、その短い間に大きな力積の低下が生じているという異なる特徴を持っていた。多くの先行研究において、エクササイズトレーニング効果は関節角度に特異性があることが報告されている。つまり、床反力の低下が生じる減速局面周辺の関節可動域では、加速局面ほどのトレーニング効果は見込めないと予想される。そのため、軽-中重量を用いて爆発的な筋力を向上させる場合にはジャンプスクワットのようなバリスティックエクササイズ、高重量を用いる場合にはウエイトリフティング（クリーン等）やその派生種目（クリーンプル等）が効果的であると予想される。

しかし、上に挙げたバリスティックエクササイズやウエイトリフティングがテクニック（関節の可動域等）や施設の（専用の床、バーベル、プレートがな

い等) 問題で実施できないアスリートに対しては弾性バンドを用いたバックスクワットが有効であると考えられる。弾性バンドを用いたバックスクワットは弾性バンドの負荷が大きくなるにつれてパワー、力、挙上速度の向上に対して効果的であると考えられるが、特にパワーに関しては 20%以上、力発揮に対しては 40%が効果的であると考えられる (そうでない場合と比較して効果量が large 以上)。しかし、弾性バンドの負荷が大きくなるにつれて加速局面中の力発揮が低下するため、トレーニングを行うアスリートの目的に応じて弾性バンドを使用するのがいいであろう。さらに、弾性バンドの負荷が大きい試行では、対象者が弾性バンドの負荷に慣れておらず、転倒など重大な事故を引き起こす可能性がある。そのため、普段のトレーニングで弾性バンドを導入する場合にはあらかじめ小さな負荷から行い、弾性バンドの負荷に慣れてから大きな負荷を行うことが推奨される。

4. 今後の展望

本博士論文で検討した減速局面は、長期間のトレーニング期間を設けた際に実際の競技パフォーマンスやそれに対応した測定項目にどのような影響を及ぼ

すのかについては不明である。そのため、今後の研究では実際に減速局面が生じることによる長期的な検討が必要であると考えられる。また、減速局面の影響を抑制するためのエクササイズとして弾性バンドを用いたエクササイズが有効であると考えられる。また、弾性バンドを用いたエクササイズは様々なパフォーマンスを向上させることが報告されている。しかし、それは果たしてバンドを用いたバックスクワットが減速局面による影響を抑制したためなのか、または単に実施者にとって新しいトレーニング刺激となったために起こったものであるかどうかは不明である。そのため、今後は減速局面が生じるとされる関節角度に特異的な項目（ジャンプ、スプリント、膝角度ごとの床反力等）を長期的なトレーニングを用いて測定する必要がある。

謝辞

本博士論文の遂行にあたり、ご懇篤なる指導を賜りました、早稲田大学スポーツ科学学術院教授、樋口満先生に厚く御礼申し上げます。博士後期課程における研究活動を支えていただき、公私共に支えてくださいましたことをここに深く感謝申し上げます。また、樋口研究室の皆様にも多大なるご指導、ご支援を賜りました。重ねて御礼申し上げます。

早稲田大学スポーツ科学学術院准教授、平山邦明先生には研究におけるプロトコルやデータの収集や解析方法、論文の執筆方法の多岐にわたり先生がお忙しい中大変ご丁寧に指導いただきました。深く感謝申し上げます。また、村岡研究室博士後期課程、中村宣博君には研究課題1, 2にわたって実験の補助をしていただきました。また、本研究に対象者としてご協力いただいた皆様にも厚く感謝申し上げます。

本研究の副査を快く引き受けてくださいました、早稲田大学スポーツ科学学術院教授、彼末一之先生に深く感謝の意を表します。

最後に、博士課程という身分を理解し、常に応援し続けてくれた姉、母親に深

く感謝申し上げます。ありがとうございました。

引用文献

1. Bandy WD and Hanten WP. Changes in Torque and Electromyographic Activity of the Quadriceps Femoris Muscles Following Isometric Training. *Physical Therapy* 73: 455-465, 1993.
2. Behm DG and Sale DG. Intended rather than actual movement velocity determines velocity-specific training response. *J Appl Physiol* 74: 359-368, 1993.
3. Brady C, Comyns T, Harrison A, and Warrington G. Focus of Attention for Diagnostic Testing of the Force-Velocity Curve. *Strength Cond J* 39: 57-70, 2017.
4. Comfort P, Udall R, and Jones PA. The effect of loading on kinematic and kinetic variables during the midhigh clean pull. *J Strength Cond Res* 26: 1208-1214, 2012.
5. Cormie P, McCaulley GO, Triplett NT, and McBride JM. Optimal loading for maximal power output during lower-body resistance exercises. *Med Sci Sports Exerc* 39: 340-349, 2007.

6. Elliott BC, Wilson GJ, and Kerr GK. A biomechanical analysis of the sticking region in the bench press. *Med Sci Sports Exerc* 21: 450-462, 1989.
7. Fielding RA, LeBrasseur NK, Cuoco A, Bean J, Mizer K, and Fiatarone Singh MA. High-velocity resistance training increases skeletal muscle peak power in older women. *Journal of American Geriatrics Society* 50: 655-662, 2002.
8. Gonzalez-Badillo JJ and Sanchez-Medina L. Movement velocity as a measure of loading intensity in resistance training. *Int J Sports Med* 31: 347-352, 2010.
9. Haff GG and Nimphius S. Training Principles for Power. *Strength Cond J* 34: 2-12, 2012.
10. Haff GG and Triplett NT. Essentials of Strength Training and Conditioning 4th Edition. Champaign IL: Human Kinetics, National Strength and Conditioning Association.
11. Israetel MA, McBride JM, Nuzzo JL, Skinner JW, and Dayne AM. Kinetic and kinematic differences between squats performed with and without elastic bands. *J Strength Cond Res* 24: 190-194, 2010.
12. Joy JM, Lowery RP, Oliveira de Souza E, and Wilson JM. Elastic Bands as a

- Component of Periodized Resistance Training. *J Strength Cond Res* 30: 2100-2106, 2016.
13. Kawamori N, Crum AJ, Blumert PA, Kulik JR, Childers JT, Wood JA, Stone MH, and Haff GG. Influence of different relative intensities on power output during the hang power clean: identification of the optimal load. *J Strength Cond Res* 19: 698-708, 2005.
 14. Kawamori N and Newton RU. Velocity Specificity of Resistance Training: Actual Movement Velocity Versus Intention to Move Explosively. *Strength Cond J* 28: 86, 2006.
 15. Kilduff LP, Bevan H, Owen N, I.C. Kingsley M, Bunce P, Bennett M, and Cunningham D. Optimal Loading for Peak Power Output during the Hang Power Clean in Professional Rugby Players. *Int J Sports Physiol Perform* 2: 260-269, 2007.
 16. Kubo K, Ohgo K, Takeishi R, Yoshinaga K, Tsunoda N, Kanehisa H, and Fukunaga T. Effects of isometric training at different knee angles on the muscle-tendon complex in vivo. *Scand J Med Sci Sports* 16: 159-167, 2006.

17. Lake J, Lauder M, Smith N, and Shorter K. A Comparison of Ballistic and Nonballistic Lower-Body Resistance Exercise and the Methods Used to Identify Their Positive Lifting Phases. *J Appl Biomech* 28: 431-437, 2012.
18. Lake JP, Lauder MA, and Smith NA. Barbell kinematics should not be used to estimate power output applied to the Barbell-and-body system center of mass during lower-body resistance exercise. *J Strength Cond Res* 26: 1302-1307, 2012.
19. Loturco I, Kobal R, Kitamura K, Fernandes V, Moura N, Siqueira F, Cal Abad CC, and Pereira LA. Predictive Factors Of Elite Sprint Performance. *J Strength Cond Res*: 1, 2017.
20. McBride JM, Haines TL, and Kirby TJ. Effect of loading on peak power of the bar, body, and system during power cleans, squats, and jump squats. *Journal of Sports Science* 29: 1215-1221, 2011.
21. McMahon JJ, Suchomel TJ, Lake JP, and Comfort P. Relationship Between Reactive Strength Index Variants in Rugby League Players. *J Strength Cond Res*, 2018.

22. Meylan CM, Nosaka K, Green J, and Cronin JB. The effect of three different start thresholds on the kinematics and kinetics of a countermovement jump. *J Strength Cond Res* 25: 1164-1167, 2011.
23. Moir GL, Gollie JM, Davis SE, Guers JJ, and Witmer CA. The effects of load on system and lower-body joint kinetics during jump squats. *Sports Biomech* 11: 492-506, 2012.
24. Noorkoiv M, Nosaka K, and Blazevich AJ. Neuromuscular adaptations associated with knee joint angle-specific force change. *Med Sci Sports Exerc* 46: 1525-1537, 2014.
25. Owen NJ, Watkins J, Kilduff LP, Bevan HR, and Bennett MA. Development of a criterion method to determine peak mechanical power output in a countermovement jump. *J Strength Cond Res* 28: 1552-1558, 2014.
26. Rhea MR, Kenn JG, Peterson MD, Massey D, Simão R, Marin PJ, Favero M, Cardozo D, and Krein D. Joint-Angle Specific Strength Adaptations Influence Improvements in Power in Highly Trained Athletes. *Human Movement* 17, 2016.
27. Riviere M, Louit L, Strokosch A, and Seitz LB. Variable Resistance Training

- Promotes Greater Strength and Power Adaptations Than Traditional Resistance Training in Elite Youth Rugby League Players. *J Strength Cond Res* 31: 947-955, 2017.
28. Sanchez-Medina L, Perez CE, and Gonzalez-Badillo JJ. Importance of the propulsive phase in strength assessment. *Int J Sports Med* 31: 123-129, 2010.
29. Shoepe TC, Ramirez DA, and Almstedt HC. Elastic band prediction equations for combined free-weight and elastic band bench presses and squats. *J Strength Cond Res* 24: 195-200, 2010.
30. Soriano MA, Jimenez-Reyes P, Rhea MR, and Marin PJ. The Optimal Load for Maximal Power Production During Lower-Body Resistance Exercises: A Meta-Analysis. *Sports Med* 45: 1191-1205, 2015.
31. Stevenson MW, Warpeha JM, Dietz CC, Giveans RM, and Erdman AG. Acute effects of elastic bands during the free-weight barbell back squat exercise on velocity, power, and force production. *J Strength Cond Res* 24: 2944-2954, 2010.
32. Suchomel TJ, Beckham GK, and Wright GA. Effect of various loads on the

- force-time characteristics of the hang high pull. *J Strength Cond Res* 29: 1295-1301, 2015.
33. Suchomel TJ, DeWeese BH, Beckham GK, Serrano AJ, and Sole CJ. The Jump Shrug: A Progressive Exercise Into Weightlifting Derivatives. *Strength Cond J* 36: 43-47, 2014.
34. Suchomel TJ, Lake JP, and Comfort P. Load Absorption Force-Time Characteristics Following the Second Pull of Weightlifting Derivatives. *J Strength Cond Res* 31: 1644-1652, 2017.
35. Suchomel TJ and Sole CJ. Force-Time-Curve Comparison Between Weight-Lifting Derivatives. *Int J Sports Physiol Perform* 12: 431-439, 2017.
36. Suchomel TJ, Wright GA, Kernozek TW, and Kline DE. Kinetic comparison of the power development between power clean variations. *J Strength Cond Res* 28: 350-360, 2014.
37. Wallace BJ, Winchester JB, and McGuigan MR. Effects of elastic bands on force and power characteristics during the back squat exercise. *J Strength Cond Res* 20: 268-272, 2006.

