

Key Words【筋力：strength、2点法：two-point method、速度を基準とするトレーニング：velocity-based training、スクワット：squat、ベンチプレス：bench press】

負荷-速度関係を用いた最大挙上重量の予測の利点と限界

The Benefits and Limitations of Predicting One Repetition Maximum Using the Load-Velocity Relationship

Alistair J. McBurnie, B.Sc.(Hons) Kieran P. Allen, B.Sc.(Hons) Maybanks Garry, M.Sc.*D.
 McDwyer Martin, B.Sc.(Hons) Dos' Santos Thomas, B.Sc.(Hons) Paul A. Jones, Ph.D.
 Paul Comfort, Ph.D. John J. McMahon, Ph.D.

Human Performance Laboratory, Sport, Exercise, and Physiotherapy, University of Salford, Greater Manchester, United Kingdom

要約

本レビューでは、負荷-速度(L-V)関係に基づく現行のアプローチと、それらが最大挙上重量(1RM)を推定する能力について概観する。このアプローチを適用した場合の妥当性と信頼性が最も高いエクササイズは、ベンチプレスであるとみられる。一方、L-V関係が下半身エクササイズの1RMを予測する能力には疑問が残る。また、この方法をベンチプレスに適用する際は、個別の回帰式を平均速度と併せて用いるべきである。2点法(複数の負荷ではなく2つのかけ離れた負荷を用いる方法)と速度の基準データ(1RMにおける最小速度閾値)は、アスリートにおける1RMを評価する新規かつ実用的な方法となる可能性がある。

序論

筋力トレーニングは、筋力、筋のサイズ、および外的な力学的パワー(16,18,46,64)、ならびに力の立ち上がり速度(1,2,20)の向上を促進するための最も重要な刺激のひとつと考えられる。また、スポーツ実践者の観点からおそらくより注目すべきは、筋力トレーニングと筋力向上の副産物として強化される幅広い競技特異的スキルおよびパフォーマンス特性への効果であり、これにはジャンプ(16,61)、スプリント(11,12,57,60,61)、および方向転換の能力(58,59,61)が含まれ、また同時に、そのような課題の実施時における傷害リスクは低下する(35,40,41,61)。したがって、アスリートが各自の競技においてピークパフォーマンスを達成しようとする場合、そのトレーニングプログラムに筋力トレーニングを組み込むことが不可欠であると考えられる。

最大挙上重量(1RM)は、あるエクササイズにおいて1回のみ挙上できる最大負荷と定義され(37)、動的筋力の最も妥当性の高い指標とされており(16,28)、レジスタンストレーニングの

基準点として、1RM測定後のウェイトルームにおけるトレーニング強度を決定する根拠に用いることができる。個人の1RMは通常、直接的な方法を用いて取得され、そのようにしてアスリートの1RMを決定することは、専門職が各トレーニングサイクルの強度(例： $\geq 85\%$ 1RM)を処方するにあたって非常に重要な役割を果たす。しかし現場において、このアプローチは複数の欠点を有する。例えば、1RMの評価には固有の傷害リスクが伴う(36)。また、専門職が多数の集団に実施するのは時間がかかるのに加えて(7,27)、事前に決められた1RM値を、しばしば長期にわたるトレーニングプログラムに対して適用することは、複数の交絡因子が「真の」長期的な1RMに最終的に影響を及ぼす可能性を無視することになる。アスリートが望ましい強度でトレーニングを実施する能力は、日々の「準備状態」の変動に影響される可能性があり、この準備状態は、睡眠、食事、およびトレーニングに伴う疲労などの生活要因に左右される(3,9,34)。加えて、経験の浅いアスリートは、ごく短期

間のトレーニングで1RMが急速に向上することが多く、そのためトレーニング強度がアスリートの真の筋力レベルを反映するには、初期値のテストからさほど間を置かずに1RMを再評価しなくてはならないと考えられる(27)。このような問題のいくつかを回避するために、最大下負荷を用いて複数レップを失敗するまで繰り返し、そこから数式を用いて1RMの推定値を導き出す方法(30,44,45)、あるいは、特定のセット数とレップ数の構成を基に相対的負荷強度を算出する方法(セット-レップベストに対するパーセンテージ)(22)が用いられている。しかし、これらの方法にも限界がある。例えば、1レップか複数レップかにかかわらず、失敗するまで行なうトレーニングは、特に大筋群を用いるエクササイズ(例：スクワット、デッドリフト)において大きな疲労をもたらすため、推定誤差がさらに増大し、間接的な方法による推定値が真の値とさらに乖離する原因となりうる(23)。したがって、アスリートの長期的管理においては、競技パフォーマンスを最適化し、かつオーバートレーニングと傷害のリスクを低減する手段として、専門職が個人の体力特性を明確に理解し、その上でトレーニングの量と強度を評価し、モニタリングすることがきわめて重要である(21)。

上に述べたような限界から、特に初心者レジスタンスエクササイズにおいてトレーニング負荷と強度を客観的にモニタリングするために、専門職が

より適切な手段を必要としていることは明白と考えられる(27)。この点において、1RMの評価に使用できる代替的アプローチとして近年大きな関心を集めているのが動作速度である(5,7,24,27,33,39)。その理由として考えられるのは、筋のパワー発揮能力における力と速度の関係である(15,65)。この関係を基にして、ある負荷に対する神経筋系の反応を定量化することが可能であり(15)、ひいては筋力トレーニングの処方の評価する力学的指標として用いることができる(31,54,55)。それに伴い、負荷-速度(L-V)関係を最大動的筋力の推定に用いることについて調査した研究が行なわれている。そこで本レビューでは、L-V関係を1RMの予測に用いる利点と限界を論じることを目的として、1RMの予測に用いられる諸手法を評価し、各種エクササイズにL-V関係を使用した場合の妥当性を見極め、また、その有用性に関する今後の方向性を示唆する。なお本レビューで用いる主要な用語(平均速度、平均推進速度[MPV]、ピーク速度[PV]、および最小速度閾値)については、表1にまとめた定義を参照されたい。一般的な定義が示されている一方で、別の閾値を用いてこれらの変数を決定している研究者もいるため、文献をレビューする際はその点を考慮する必要がある。

一般式

運動力学および運動学関連のテクノロジーが発達したことで、ようやく一般的な動的レジスタンストレーニング

における速度の測定がより身近なものとなった(27,55)。それ以前は、筋力トレーニングにおける動作速度の測定に基づく研究は、主に等速性ダイナモメータを用いて実施されていた(8,10,17)。しかし、そのような測定装置は高額かつ入手が容易でなく、またアスリートのトレーニングに対する一般的な特異性の問題として、単関節エクササイズが用いられるなどの理由から、この種の方法は理想的ではなかった。多関節レジスタンスエクササイズの各レップで発揮される実際の速度をいち早く検証したのがGonzález-Badillo&Sánchez-Medina(27)であり、彼らは等慣性のダイナモメータ(直線位置変換器[LPT])を使用し、スミマシーンベンチプレス(BP)エクササイズにおける1RMの推定を試みる方法として、動作速度と相対的負荷(1RMに対するパーセンテージ：%1RM)の関係を分析した。研究において得られた2つの一般予測式は、負荷と、用いられた2つの速度変数との間に、ほぼ完全に近い関係があることを示した(表1)(MPV： $R^2=0.981$ 、短縮性局面の平均速度[MV]： $R^2=0.979$)。この研究結果は、速度を用いてトレーニング負荷のパラメータを正確にモニタリングできることを示唆しており、ひいては速度を筋力トレーニングの指標として用いる価値を強調するものであった。同研究はまた、アスリートが行なっている努力の強度を(30～95%1RMの範囲で)定量化できることに加えて、レップが最大速度を意識して実施され

表1 L-V関係を通じた1RMの決定に用いられることの多い速度変数

速度変数	定義
短縮性局面の平均速度(MV)	エクササイズの短縮性局面全体において記録されたすべての速度の平均(図2)。
平均推進速度(MPV)	エクササイズの短縮性局面のうち、測定された加速度が重力加速度を上回る($\geq -9.81 \text{ m/秒}^2$)時点から、測定された加速度が重力加速度を下回る($\leq -9.81 \text{ m/秒}^2$)時点までの平均速度。推進期のみを抜き出すことで、可動域の端付近で生じる減速が取り除かれる。そのためMVよりも大きな速度の値となる(図2)。
ピーク速度(PV)	エクササイズの短縮性局面において記録された速度の最高値。
最小速度閾値(MVT)	最大努力で失敗するまで行なうセットで最後に成功したレップにおける短縮性局面の平均速度。

ている場合、アスリートが挙上している% 1RMが何であるかを、最初のレップから決定できることを示唆した。さらに、レップ速度を定期的にモニタリングすれば、提示された挙上負荷がアスリートの意識する% 1RMを本当に反映しているかどうかを評価することが可能になる。とはいえ、一般予測式はL-V関係の個人差を説明することができず(24)、また、実施されるエクササイズの種類に著しく依存することが示唆されている(図1)。例えばGarcia-Ramosら(24)は近年、先の研究で提案された一般予測式(27)の妥当性を、新たな被験者群を用いて評価した。その結果、一般予測式は、使用したBPのプロトコル(短縮性局面のみ、または伸張性/短縮性局面)によって、1RMの値を有意に過小予測($p < 0.001$ 、エフェクトサイズ[効果量、ES]: 0.15 ~ 0.94)または過大予測($p < 0.001$ 、ES: 0.36 ~ 0.98)した。これらの研究結果におけるエビデンスは、1RMを群間で正確に予測できないとみられる一般予測式の交差妥当性について、研究者に疑問を抱かせうるものである。したがって、より精度の高い1RMの推定を可能とするために、個別の線形回帰式の使用を検討することが提案されている(34)。これに関する研究結果は、BP関連のエクササイズにおいては一見して高い予測精度を示しているのに対し(25,42,52)、スクワット(5)やデッドリフト(39,53)など、その他のエクササイズについては結果が一貫していない。これについては本稿の後段で論じる。

2点法

前述したとおり、1RMの予測精度の向上に利用できるのが、個別のL-V関係を用いた方法である。しかし、先行研究に示されている個別のL-V関係を用いた方法では、アスリートがレップを最大速度で実施し、様々なセット数で1RMに到達するまで繰り返さな

くてはならず、時間がかかる上に疲労を招きやすいことが多いため(51)、疲労を管理し、多人数の集団を定期的にテストしなくてはならないコーチにとって理想的ではない。そこで、代替的な個別アプローチとして提案されているのが2点法である(32)。このアプローチは、レジスタンスエクササイズにおけるL-V関係が概して安定している線形性が高いことを前提として(7,13,27,32)、強度の異なる複数の負荷を用いる代わりに、2つの互いに関係離れた負荷のみを用いてL-V関係を決定する。近年の研究では、2点法に最適な負荷として20% 1RMと70% 1RMが推奨されており、これらの負荷は1RMの直接測定と比較して最も高い妥当性を示している($r = 0.98$ 、変動係数[CV] = 5.5%) (51)。Pérez-Castillaら(51)は、低負荷と高負荷の2つを用いる方法は力軸と速度軸のそれぞれ反対側の端を最もよく表し、そのため類似した2つの負荷を用いるのとは異なり、これらの負荷がL-V関係の全体を表すことを示唆した。また2点法は最近、従来の1RMの決定方法である一般予測式、複数負荷を用いる方法、および1RMの直接測定と比較して、その妥当性が検証されている(24)。その結果、2点法は高い併存的妥当性と信頼性を有し

ていることが明らかになり(r の範囲: 0.956 ~ 0.977、バイアスの範囲: -2.3 ~ 0.5 kg)、これは1RMの直接測定と同等であると同時に、従来の複数負荷を用いる方法を上回っており(r の範囲: 0.847 ~ 0.968、バイアスの範囲: -11.3 ~ 7.4 kg)、そのため著者らは、自己申告の約50 ~ 80% 1RMに相当する2つの外的負荷を用いることを推奨している(24)。

2点法は、迅速で信頼性の高い1RMの予測方法であるが、なお研究で明らかになっていない点がある。根本的な問題として、どの2つの推奨負荷が1RMの予測に最も適しているかという疑問が残る(24,51)。上の2つの研究がともに(24,51)、互いに関係離れた2つの外的負荷を選択するよう推奨していることから、専門職は2点法の有用性をさらに高めるため、速度軸と力軸の端に一層近い負荷を用いることを検討するかもしれない。力軸の端として推奨されている負荷(70 ~ 80% 1RM)(24,51)が、より高い強度における筋力の変化を検証するのに十分な感受性を有するかどうかは明らかになっていない。これが特に関係してくるのは、アスリートの筋力レベル向上が優先課題であり、高い相対的負荷($\geq 85\%$ 1RM)を用いてトレーニングを実

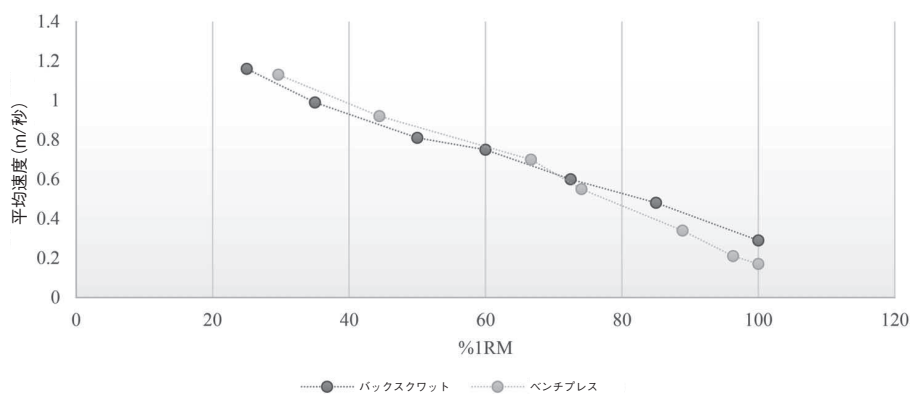


図1 同じ人によるベンチプレスおよびバックスクワットのL-V関係。1RMの予測式は、L-V関係は非常に安定していて線形性が高いため、いずれかの% 1RMの速度値を線形回帰分析を通じて1RMの予測に用いることができるとの前提に基づいている。RM=最大反復回数

施しなくてはならない場合である。負荷が高いほどよいというのが事実であれば、これは潜在的に、高い相対的負荷を挙上できる筋力の高いアスリートが、より精度と妥当性の高い1RMの推定値を得られる一方で、筋力の低い、または経験の浅いアスリートは、それほど高い相対的強度を達成できないため、妥当性と精度が落ちると知らなければならないという、トレードオフの関係に繋がる可能性がある。この問題はさらなる調査が必要であり、今後の研究ではさらに高い相対的負荷(≧85% 1RM)を用いた2点法を調査すべきである。これまでのところ2点法は、BPエクササイズのパリエーションにおいて妥当性が実証されているが(24,51)、他のレジスタンスエクササイズにおいても1RMの指標として妥当性を有するかは明らかになっていない。そのため、他のレジスタンスエクササイズにおける2点法の最適な負荷は、それらのエクササイズにおいて観察される力と速度のパラメータによって(7,14,47)、また、力発揮能力の個人差によって異なる可能性がある(13,24,39)。また2点法に関する先行研究はこれまでのところ、複数負荷を用いる方法を実施したのちに、2つの負荷から個別のL-V関係を導き出しているにすぎない。したがって、2点法は手法間の相互比較を通じて妥当性が実証されているとはいえ、複数負荷を用いる試験パラメータがなおも基準として用いられているのである(24,51)。この点に関しては、複数セット法によって蓄積する疲労が、続いて観察される速度の値に影響を及ぼす可能性を看過できないため、研究者は2点法を他と切り離して検証すべきである(24,51)。

直線位置変換器

レジスタンスエクササイズにおける運動学的変数を測定または算出する方法にはいくつかあり、これには加速

度計(PUSH Band:カナダ、トロント、PUSH Inc.社製)、直線位置変換器(LPT)(Tendodyne:スロバキア共和国、トレンチーン、Tendo Sports Machines社製、Plyometric Power System:オーストラリア、リズモー、Plyopower Technologies社製、およびGymaware:オーストラリア、キャンベラ、Kinetic Performance Technologies社製)、およびフォースプレート(FP)(4,19,48,49)が含まれる。これらのうちFPを使用することが、運動学的および運動学的データの収集に最善の方法と広く認められているが、この装置は高額であり、必ずしも現場での使用に適さない。そこで代わりにバーベル速度の測定に広く用いられているのが、実用的なフィールドベースのツールで、妥当性と信頼性が証明されているLPTである(19,26,29)。ただし注意点として、LPTはシステム重心の速度を過大予測することが明らかになっている。このことは、バーベルが水平方向または左右非対称にも変位するのを、LPTが説明できないことが原因となっている可能性がある(14,39,49)。LPTが運動学的変数を算出するには、中央処理装置に接続されたケーブルをアスリートまたはアスリートの使用器具に取り付ける。ケーブルが一定時間にどれだけ変位するかによって速度(変位を時間で除した量)を決定し、そこから加速度(速度の変化量)を決定する(29)。LPTを用いたテストを実施する際は、挙上する負荷の大きさにかかわらず、毎レップを最大努力で行なうようアスリートに指導するとよい。それによって、テクニクの違いが速度の測定値に及ぼす影響を低減できる(34)。

LPTは、L-V関係を用いた1RMの予測において最も広く用いられる運動学的測定システムであり(5,7,13,24,27,33,39,43)、1RM評価の基礎となるバーベル速度のより適切な測定方法と考えられる。しかし有用である

一方、潜在的な限界も有する。第一に、前述したとおり、LPTはデッドリフトのようなフリーウェイトエクササイズにおいて、負荷にかかわらず水平方向の変位は少なく一貫しているとの前提に立っているが、これは事実ではない。そのため、高負荷において観察されているように、バーベルが大きな水平方向の変位を示した場合、LPTは速度と変位の値をともに過大評価してしまう(64)。LPTを用いた速度の測定が一貫性に欠けることを報告したLakeら(39)は、デッドリフトを用いた研究において、それがフリーウェイトエクササイズであったことから、速度変数の測定値にある程度のバイアスが生じた可能性を示唆している。先行研究には、スミスマシーンを用いて水平方向の変位を制御し(7,24)、それによってバーベル軌道の鉛直方向への変位を分離しようと試みたものもある。しかしコーチは、競技特異的なフリーウェイトを用いたパリエーションのエクササイズでアスリートをテストすることを好むため、スミスマシーンをテストに用いるのは必ずしも適切ではない(21)。したがって、現場への示唆をより多くもたらそうとするならば、動的な競技動作への応用性がより高いフリーウェイトエクササイズを用いてL-V関係を決定する方法の調査に力を入れるべきである。

速度の指標

プロスポーツの現場において加速度計やLPTが入手しやすくなったことから、等慣性のレジスタンスエクササイズにおける速度の測定が、近年コーチの新たな選択肢となっている(6,14,32)。用いる手法やパラメータによって、いくつかの異なる速度を測定できるが、L-V関係の決定に最も広く用いられている速度の指標は、MVとMPVであり、PVはそれらより使用頻度が下がる(表1)。これらの速度指標は、BP(25)、スクワット(6)、デッドリ

フト(39)、およびプルアップ(47)の各種エクササイズの研究に用いられている。

González-Badillo&Sánchez-Medina(27)は、スミスマシーンBPの1RMを予測する速度指標としてMPVを使用した。その結果、MPVは相対的負荷と非常に強く関係していることが明らかになり($R^2=0.98$)、優れた1RMの予測因子であることが示唆された。著者らはMPVを選択することについて、エクササイズの制動期が除外されるため(図2)、バーベルにおける負の加速度が低負荷における平均速度の値に悪影響を及ぼすことがなく、結果として、神経筋系の真の潜在能力を決定することが可能になるとして推奨している(14,25,47)。またBP、スクワット、およびプルアップエクササイズにおけるL-V関係を調査した他の研究も、やはりMPVと負荷との間に強い関係が存在すると報告している(6,14,33)。これに対してJidovtseff(33)は、MVをBPにおける指標として選択し、その理由として、MVは短縮性局面全体にわたる負荷の動きをよりよく表すものであり、競技パフォーマンスへの応用性が高いとしている。また負荷の増加に伴い直線的に低下するため、数学的分析が容易であるとの理由からMVが選択された。もうひとつの考察として、負荷の増加に伴い速度が低下することで制動期が短くなり、その結果、約76% 1RMより高い強度では、エクササイズの短縮性局面をほぼ推進期が占めると考えられることから、MVとMPVの差がなくなる可能性がある(56)。

いくつかの先行研究が、負荷を予測するための速度の分析方法としていずれかひとつを選択している一方、1件の研究のみが、異なる速度の分析方法を直接比較している。Garcia-Ramosら(25)は、スミスマシーンを用いたBPスローエクササイズにおいて、MV、MPV、およびPVのいずれが負荷を予

測する最適な方法であるかを調査した。その結果、MVが負荷と速度の間の線形性が最も高く(短縮性局面のみ： $R^2=0.99$ 、短縮性/伸張性局面： $R^2=0.99$)、また負荷の予測精度が最も高かった(SEE[推定値の標準誤差]=3.80~4.76% 1RM)。その他、PVは概して負荷間での変動が小さかったが(CV=3.87±2.36%)、次いでMV(CV=4.93±3.06%)がMPV(CV=6.03±3.65%)を下回り、すなわちMVがMPVをセッション間の信頼性において上回った。これら3つの速度指標のうち、BPの負荷を予測する速度指標として最も一貫性と信頼性が高かったのはMVである。この研究では、MVが最も効果的な速度指標であるとの結果が出たが、デッドリフトやスクワットなど、L-V関係の特性が異なる他の様々なエクササイズでは同じ結果にならない可能性がある(6,32)。しかも上に挙げた研究はすべて、これら速度指標の評価に男性被験者のみを用いていることに注意すべきである。BPエクササイズにおけるL-V関係には、男女で大きな差異が存在することが明らかになっているため(63)、それぞれ性別が使用する速度指標の妥当性と信頼性に影響を及ぼす可能性を除外してはならない。レジスタンスエクササイズでのL-V関係に関連する測定誤差を低減

するために提案されている手法のひとつが、動作の伸張性局面と短縮性局面の間に一瞬の静止を挟むことで、伸張-短縮サイクル(SSC)の関与を除外するというものである(50)。Pallarésら(50)は、2秒間の静止を挟んだところ、CVの値がBP(2.9%および4.1%)とスクワット(2.9%および3.9%)において下がったことを明らかにしている。さらにBland-Altman分析を行なったところ、BPとスクワットの標準テクニク(SSCを用いる)は、静止テクニクに比べてそれぞれ誤差が37.9%および57.5%増加していた。これらの研究結果は、個人がSSCを利用する能力が達成速度に大きく影響している可能性があり、そのため静止を挟むことでこの影響が低減され、等慣性の測定の信頼性が高まることを示唆している。

以上をまとめると、しばしば限られた時間で多人数のアスリートのデータを分析しなくてはならないコーチや専門職にとって、MVは妥当性と信頼性を有し、かつ実用的であることから、LPTや加速度計といった装置を使用する際に記録すべき速度指標として推奨されるものと考えられる(6)。また、これら速度指標の信頼性を高める方法として、動作の伸張性局面と短縮性局面の間に2秒間の静止を挟むことを検討できる。ただし、この方法は、SSCを用い

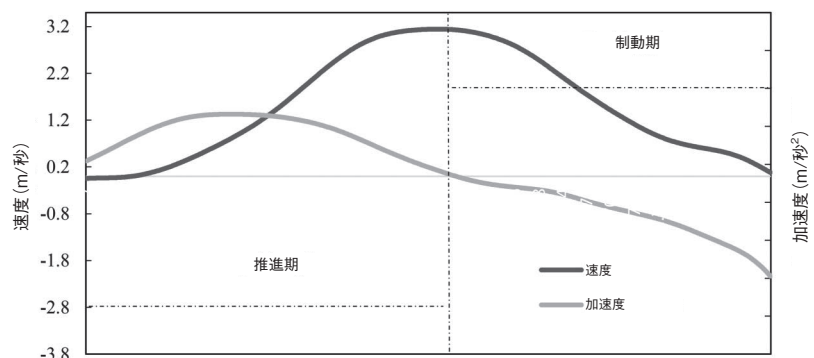


図2 スクワットにおけるMVとMPVを表した速度-時間曲線の例。MVは動作局面全体で生じるのに対し、MPVは正味の加速度が正となる局面を抜き出したものである。破線は動作の推進期が終わり、制動期が始まった時点を示す。MPV=平均推進速度、MV=短縮性局面の平均速度

るエクササイズを導入することで得られるトレーニング効果を犠牲にする可能性がある(24)。

先行研究の結果

ベンチプレス

近年、L-V関係を用いた1RMの予測の妥当性を、様々なエクササイズにおいて検証した研究が増えている。表2に、BPに関する先行研究の概要を示した。BPの1RMを決定するL-V関係の予測能力については、研究間でおおむね見解が一致しているとみられる。Jidovtseffら(33)は、3件の先行研究を分析してL-V関係を検証し、そこからBPにおける1RMの予測式を決定した。この研究において、著者らはMVの測定値と、それらに対応する漸増%1RM負荷を用いて算出した回帰式から、速度0における理論負荷(LD0)を推定した。その上で、LD0と実際の1RMの関係が評価され、1RMの予

測に用いられた。その結果、LD0と実際の1RMは事実上完全に相関していることが示され($r=0.98$)、L-V関係を用いたBPの1RMの予測は可能であることを示唆するエビデンスとなり、それに用いられた予測式のSEEは4kg(7%)であった。またこの予測精度は、「失敗するまでレップを繰り返す」方法を上回らないまでも、それと同等であることが明らかになっている。なお前述したように、方法論に関してしばしば取り上げられる批判は、スミスマシンを1RMの予測に用いることである。このような批判の前提には、競技パフォーマンスに特異的な神経筋系の転移効果が低下するとの懸念があり、これはトレーニングにフリーウェイトでなくスミスマシンを用いた場合にみられる可能性のある現象である。これまでに1件の研究(42)のみが2つのエクササイズ様式について調査し、実際にはスミスマシンとフ

リーウェイトいずれのBPエクササイズも高い予測精度を示すことが明らかになっている(表2)。したがって、L-V関係をBPの1RMの予測に用いる効果の裏づけを増やす一方で、さらなる研究により、特にフリーウェイトのバリエーションについてこの見解を強化する必要がある。

下半身のエクササイズ

本稿ではさらに、他の伝統的なコンパウンドエクササイズについても、L-V関係を1RMの推定に用いた研究を調査したが、BPほど説得力のある結果は得られていない(表3)。Bazuelo-Ruizら(7)は、被験者105名を対象に、スミスマシンを用いたハーフスクワットエクササイズにおける1RMの予測にL-V関係を用いる効果を評価した。同研究では、ハーフスクワットの短縮性局面を用いて、MVと被験者の体重に相当する最大下負荷(各被験者の1RM

表2 BPエクササイズにおけるL-V関係を用いた1RMの予測の妥当性を検証した研究結果の概要

研究	手法	使用機材	予測式	統計的結果
González-Badillo & Sanchez-Medina (27)	ベンチプレス MV ($r=0.27$) MPV ($R^2=0.98$) 一般式	スミスマシン LPT	$y=7.5786(MV^2) - 75.865$ MV+113.02 $y=8.4326(MPV^2) - 73.501$ MPV+112.33	MV : $R^2=0.98$; SEE=3.77%1 RM MPV : $R^2=0.98$; SEE=3.56%1 RM
Jidovtseffら(33)	ベンチプレス MV 一般式	スミスマシン LPT	$y=-0.0146\%1RM+1.7035$	$r=0.98$; SEE=7%1 RM
Garcia-Ramosら(24)	ベンチプレス MV MPV 一般式($R^2>0.97$) 個別式(2点法)	スミスマシン LPT	短縮性局面のみ MV : 一般: $y=-0.01732x+1.62$ 2点法: $y=-0.01713x+1.59$ MPV : 一般: $y=-0.01808x+1.66$ 2点法: $y=-0.01835x+1.66$ 伸張性/短縮性局面 MV : 一般: $y=-0.01995x+1.93$ 2点法: $y=-0.01828x+1.81$ MPV : 一般: $y=-0.02153x+2.19$ 2点法: $y=-0.02153x+2.03$	短縮性局面のみ MV : $r=0.996$ MPV : $r=0.997$ 伸張性/短縮性局面 MV : $r=0.995$ MPV : $r=0.988$
Loturcoら(42)	ベンチプレスMPV 個別式	スミスマシン オリンピックバーでのフリーウェイト LPT	スミスマシン: $y=-59.022x+108.21$ フリーウェイト: $y=-62.539x+110.18$	スミスマシン: $R^2=0.97, CV=1.12\%$ フリーウェイト: $R^2=0.96, CV=1.15\%$

表2 BPエクササイズにおけるL-V関係を用いた1RMの予測の妥当性を検証した研究結果の概要(つづき)

研究	手法	使用機材	予測式	統計的結果
Sanchez-Medinaら(55)	ベンチプレス プローンベンチプル MV MPV 一般式	スミスマシーン LPT	ベンチプレス $y=11.4196(MV^2) - 81.904(MV) + 114.03$ プローンベンチプル $y=11.2988(MPV^2) - 78.05(MPV) + 113.04$ MPV $y=18.5797(MV^2) - 104.182(MV) + 147.94$ MV $y=13.2596(MPV^2) - 93.867(MPV) + 144.38$	ベンチプレス MV: $R^2=0.97$ MPV: $R^2=0.97$ プローンベンチプル MV: $R^2=0.96$ MPV: $R^2=0.95$
Garcia-Ramosら(25)	ベンチプレス ベンチプレースロー MV 一般式	スミスマシーン LPT	ベンチプレス 短縮性局面のみ $y=-69.62 \times MV + 110.3$ 伸張性/短縮性局面 $y=-55.92 \times MV + 108.8$ ベンチプレースロー 短縮性局面のみ $y=-65.00 \times MV + 108.6$ 伸張性/短縮性局面 $y=-55.9 \times MV + 109.6$	ベンチプレス 短縮性局面のみ: $R^2=0.97$ 伸張性/短縮性局面: $R^2=0.97$ ベンチプレースロー 短縮性局面のみ: $R^2=0.99$ 伸張性/短縮性局面: $R^2=0.99$
Pestana-Meleroら(52)	ベンチプレス 短縮性局面のみ MV(線形: $R^2=0.988$ 、 多項式: $R^2=0.995$) 伸張性/短縮性局面 MV(線形: $R^2=0.990$ 、 多項式: $R^2=0.995$) 個別式	スミスマシーン LPT	N/A	短縮性局面 線形: $r=0.78, CV=4.39\%$ 多項式: $r=0.76, CV=4.68\%$ 伸張性/短縮性局面 線形: $r=0.73, CV=4.70\%$ 多項式: $r=0.73, CV=5.04\%$

速度指標の信頼性は報告がある場合のみ記入。

% 1RM=最大挙上重量(1RM)に対するパーセンテージ、BP=ベンチプレス、CV=変動係数、LPT=直線位置変換器、MPV=平均推進速度、MV=平均速度、N/A=記載なし、SEE=推定値の標準誤差

の約 $51.52 \pm 8.7\%$)から1RMの予測を導き出した。その結果、回帰分析において中等度の1RMの予測精度(58%)が示され、被験者の体重相当の負荷を用いたハーフスクワットの短縮性局面におけるMVは、導き出された予測式を用いて個人の1RMを推定することが可能であると結論づけられた。これとは対照的に、Banyardら(5)の研究では、L-V関係はフリーウェイトのバックスクワットにおける1RMの予測因子として不十分であることが示され、その妥当性と信頼性に疑問が呈された(表3)。負荷の増加につれて予測精度も向上したものの、それらの予測は依然として実際に報告された1RMとの間に有意差がみられた($p \leq 0.05$ 、ES

=0.71~1.04)。この研究結果を部分的に説明しうるものとして、1RMの予測に用いられた速度にセッション間で大きな変動がみられ($CV=22.5\%$)、それが予測式の精度の信頼性に悪影響を及ぼした可能性が考えられる。前述したように、スミスマシーンを使用するのは、バーベルの変位における鉛直成分を分離し、より精度の高いLPTの測定値を得ることを目的としている。この研究において伝統的なフリーウェイトのバックスクワットを使用し、左右非対称な前後左右における水平方向のバーベル変位が加わったことが結果に影響を及ぼし、それがバーベル速度の過大評価に繋がっている可能性を除外すべきではない。それでもBanyardら

(5)は、追加の変位の説明を試みており、4台のLPTを上前方と上後方に設置し、得られたデータを平均化することで、より中央寄りのバーベル位置を得ようとしている。この方法はバーベル速度の左右差を制限することが目的であったが、LPTが測定した非鉛直方向の変位を除去してはならず、そのためバーベル速度の過大評価を軽減するには至っていない可能性がある。

Lakeら(39)は近年、コンベンショナルデッドリフト(CDL)エクササイズの1RMの推定にL-V関係を用いるべきではないと提言している。この研究では、L-V関係を用いて予測した1RM値すべてが、実際の1RMに比べて1RMを有意に過小評価し、その差は最大

で15%に上った。この研究においても、測定された速度変数すべてが概して低い相対的および絶対的信頼性を示し(MV: ICC[級内相関係数]=0.528~0.935, CV=5~14%、MPV: ICC=0.450~0.880, CV=7~14%)、それが用いられた予測式の精度に影響を及ぼした可能性がある。この結果は、バーベルを固定せずに行なうCDLにおいて、速度の測定にLPTを用いたことが原因となった可能性がある。そのため今後の研究では、CDLにおける

L-V関係の使用を、水平方向へのバーベル変位を低減することが明らかになっているヘックスバーデッドリフト(HDL)と比較すべきである(62)。さらにはパフォーマンスの観点からも、HDLは有益なエクササイズである可能性があり、発揮される速度(15%、 $p=0.012$)、力(6%、 $p<0.001$)、およびパワー(28%、 $p<0.001$)がCDLを上回る(38)。

速度の基準データ

1RMの予測手段としてのL-V関係を検証した実験的研究のほとんどは、その妥当性を明らかにするために何らかの比較の方法を必要としている。この比較には通常、事前の直接測定によって個人の1RMを決定し、その%1RMを基にした予測式を用いるという方法がとられる。比較のために必要とはいえ、この方法では従来の評価方法にみられる諸問題が発生することとなり、速度を間接的な1RM評価に用いる本

表3 下半身エクササイズにおけるL-V関係を用いた1RMの予測の妥当性を検証した研究結果の概要

研究	手法	使用機材	式	統計的結果
Bazuelo-Ruizら(7)	ハーフスクワット MV MPV 一般式	スミスマシーン LPT	MV: 1RM = $-61.93 + (121.92 \times MV) + 1.74$ (負荷)	MV: $R^2=0.58$
Conceicaoら(13)	レッグプレス フルスクワット ハーフスクワット MPV PV 一般式	オリンピックバーでのフリーウェイト LPT	フルスクワット $y = -71.684(MPV) + 121.03$ $y = -68.581(PV) + 2.512$ ハーフスクワット $y = -80.372(MPV) + 125.19$ $y = -68.581(PV) + 2.512$ レッグプレス $y = -55.509(MPV) + 109.29$	フルスクワット MPV: $R^2=0.95$ PV: $R^2=0.96$ ハーフスクワット MPV: $R^2=0.96$ PV: $R^2=0.96$ レッグプレス MPV: $R^2=0.96$
Loturcoら(43)	ハーフスクワット MPV 一般式	スミスマシーン LPT	$y = -105.05(MPV) + 131.75$	MPV: $R^2=0.96$
Sanchez-Medinaら(56)	フルスクワット MV MPV PV 一般式	スミスマシーン LPT	$y = -12.87(MV^2) - 46.31(MV) + 116.3$ $y = -5.961(MPV^2) - 50.71(MPV) + 117.0$ $y = -10.85(PV^2) - 25.10(PV) + 130.3$	MV: $R^2=0.955$ MPV: $R^2=0.958$ PV: $R^2=0.794$
Banyardら(5)	フルスクワット MPV 個別式	オリンピックバーでのフリーウェイト LPT	N/A	60%1RM: $r=0.78$; SEE=17.2kg MPV 80%1RM: $r=0.87$; SEE=12.9kg MPV 90%1RM: $r=0.93$; SEE=10.6kg
Ruf, Chéry & Taylor(53)	デッドリフト MV 個別式	オリンピックバーでのフリーウェイト LPT	$y = -1.245$ (負荷) $+ 1.503$	MV: $r=0.986$
Lakeら(39)	デッドリフト MV MPV 個別式	オリンピックバーでのフリーウェイト LPT	N/A	MV: 70%1RM: $r=0.60$ 80%1RM: $r=0.91$ MPV: 70%1RM: $r=0.73$ 80%1RM: $r=0.84$

%1RM=最大挙上重量(1RM)に対するパーセンテージ、フルスクワット=報告されている下降局面のスクワットの深さが膝屈曲90°以上、ハーフスクワット=報告されている下降局面のスクワットの深さが膝屈曲90°、LPT=直線位置変換器、MPV=平均推進速度、MV=平均速度、N/A=記載なし、PV=ピーク速度、SEE=推定値の標準誤差

来の目的が意味を失う。そこでこれに代わり、そのエクササイズにおける速度の基準データを用いる方法が、速度の使用に関する今後のひとつの方向性となりうる。この方法が検討できるのは、あるエクササイズの1RM試行には、特異的なMV、すなわち「最小速度閾値」(MVT) (表1)が存在すると考えられるためである(表4)。例えば先行研究は、そのエクササイズに特異的な1RM試行のMVを、BP(0.15m/秒)およびバックスクワット(0.2m/秒)エクササイズについて明らかにしている(5,27)。専門職は、速度の基準データを用いることで、あるエクササイズにおける個人のL-V関係を、同様の線形回帰分析を通じて推定することが可能になると考えられる。さらにはこれらの基準データを基に、任意の負荷(例: 40kg、70kg)を用いた2点法を適用し、それらの負荷が概して個人のL-V関係のどの位置に相当するのを見極め、そこから1RMを予測することが可能になると考えられる(図1)。

速度の基準データを方法として用いることの潜在的な限界は、基準データの範囲に収まらない集団が存在しうることである。例えばパワーリフティング選手は、最大負荷においてレップを「粘る」ことで知られるため、1RMにおけるMVが低い可能性がある。反対にエクササイズ初心者、経験が浅く、速

度が低下するような最大に近い負荷を挙上できないため、1RM試行におけるMVが高く出る可能性がある。この手法の適用性を高めるためには、専門職が自身の指導する集団に特異的なデータを収集し、先行研究で報告されている一般的な速度の基準データの代わりに、そのデータを用いて個々人のL-V関係を推定するのが適切であると考えられる(表4)。

今後の研究

本レビューは、主要なコンパウンドエクササイズ(BP、スクワット、およびデッドリフト)の1RM予測における、L-V関係の有用性を評価してきた。しかし、例えばオリンピックスタイルリフティングなどは、爆発的に実施すると高い動作速度が発揮でき、モニタリングすることが特に有益となるため、そのような他の種類のエクササイズについてもさらなる調査を検討する必要がある。それによって、速度における適応を定量化し、またセットにおける疲労をより正確に評価したいコーチに役立つ情報もたらされるだろう。動作速度の現場への応用性を高めるためには、さらなる研究を通じて、フリーウェイトの下半身エクササイズ向けに、競技特異性に欠け、そのため最適な競技への転移効果に欠ける測定プロトコル(例: スミスマシーンの使用やSSC

の除去)に縛られることのない、妥当性を有する1RMの決定手法を開発する必要がある。その方法として考えられるのが、LPTに三次元動作分析を組み合わせた交差検証法によって、LPTのみを用いた場合にみられる多平面の測定誤差を低減するやり方である。これを用いれば、動作の複雑さを問わず幅広いエクササイズに適用できる、より堅牢な予測式の開発が可能になると考えられる。

現場への応用

エクササイズ間で研究結果が一貫しないため、L-V関係が1RMの予測において妥当性のある選択肢か否かを判断するのは困難である。専門職がそのためにLPTを購入し、現行の手法のいずれかを現場に取り入れることは、そのような装置の高額さと、下半身エクササイズにおける妥当性の欠如から、適切ではないと考えられる。それでも読者の検討の参考として、L-V関係を用いる利点と限界を表5にまとめた。L-V関係を用いることに関して、BPエクササイズが最も説得力のある結果を出しているとみられるが、これはおそらく、動作の完了に必要な可動域が小さいため、LPTに関連するとみられる速度の測定誤差の範囲が低減する可能性によって説明される。1RM推定の下半身エクササイズへの適用性は、BPに比べると説得力が低いようである。またLPTを用いた速度データの取得は誤差を生じやすいが、それ以外にも、速度の評価方法とは無関係の要因が存在する可能性がある(表5)。したがって、アスリートの筋力を誤って予測すると、トレーニング強度の処方誤差だけでなく、傷害にも繋がりがかねないため、これらのエクササイズにおける1RMの予測を試みる際には注意が必要である。スミスマシーンの使用は、速度の測定に伴う誤差を取り除くための実行可能な選択肢かもしれないが、本稿著

表4 コンパウンドエクササイズ各種の速度の基準データ

エクササイズ	1 RMにおける速度 (m/秒)		出典
	フリーウェイト	スミスマシーン	
ベンチプレス	0.15 ~ 0.17	0.17 ~ 0.19	González-Badillo & Sánchez-Medina (27) Sánchez-Medina & González-Badillo (56) Loturcoら (42) Sánchez-Medinaら (55)
スクワット	0.20 ~ 0.24	0.31 ~ 0.39	Banyardら (5) Conceiçãoら (13) Sanchez-Medinaら (55) Loturcoら (43)
デッドリフト	0.14 ~ 0.16	N/A	Lakeら (39)

1 RM=最大挙上重量、N/A=記載なし

表5 L-V関係を1RMの予測に用いる利点と限界

利点	限界
軽い負荷を用いて1RMを決定できる可能性がある(傷害リスクの低減)。 少ないレップ数で1RMの値を得られる可能性がある(疲労の低減)。	LPT： フリーウェイトのエクササイズ実施中は鉛直方向の変位のみ生じることを前提とするが、実際はそうではない。 速度の値を過大評価することが多い。 この問題への対策としてスミスマシーンを使用すると、トレーニング目的に不利益となる可能性がある。
ある負荷における神経筋系の能力を定量化できる。 定期的なモニタリングによって、提案された挙上負荷が意識された%1RM負荷と一致しているか確認できる可能性がある。	速度の指標とは無関係な交絡因子： 被験者の身体的コンディション エクササイズテクニック トレーニング歴 性別
MVは、より単純で時間効率に優れ、なおかつ妥当性と信頼性を有する手法となる可能性がある。	速度変数(MV、MPV、およびPV)はすべてのエクササイズで一貫しているとは限らない。
2点法は、個別的で時間効率に優れ、なおかつ妥当性と信頼性を有するアプローチとなる可能性がある。	個別式がエクササイズプログラムに広く適用されるには、エクササイズの特異性、アスリートの筋力レベル、および性差を説明する個別式をさらに開発する必要がある。
速度の基準データは、努力レベル(%1RM負荷)を決定し、ひいては1RMを予測する新規の方法となる可能性がある。	ある負荷に対する速度データは、テクニック、トレーニングの経験、および競技によって異なる可能性がある。

1RM=最大挙上重量、LPT=直線位置変換器、MV=平均速度、MPV=平均推進速度、PV=ピーク速度、%1RM=最大挙上重量(1RM)に対するパーセンテージ

者らの見解では、「機能的な」運動能力を最大限に高めることを目指す専門職にとって最も有益な選択肢とは必ずしも考えられない。また候補となる速度変数の中では、妥当性を有していて、専門職が用いるのに時間効率の良い指標であることから、MVを用いることが推奨される。近年、個別に1RMを推定する方法として提案されている2点法は、実用的でありながら、妥当性と信頼性を得られる方法となる可能性がある。ただしその場合、力-速度曲線の反対側の端に位置する2つの負荷を用いて、最適な精度と妥当性を確保することが推奨される。また専門職は、最初に従来の1RMの評価方法を実施せずに1RMを推定できるよう、2点法と併せて速度の基準データを取り入れることもできる。◆

From *Strength and Conditioning Journal*
Volume 41, Number 6, pages 28-40.

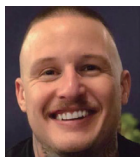
著者紹介



Alistair J. McBurnie :
マンチェスター・ユナイテッド・フットボール・クラブのパフォーマンスコーチ。



Kieran P. Allen :
ストレングス&コンディショニング科学の修士課程に在籍し、プロラグビーのストレングス&コンディショニングコーチを務める。



Garry Maybanks :
ストレングス&コンディショニング科学の修士課程に在籍し、プロラグビーのストレングス&コンディショニングコーチを務める。



Martin McDwyer :
ストレングス&コンディショニング科学の修士課程に在籍し、プロラグビーのストレングス&コンディショニングコーチを務める。



Thomas Dos'Santos :
University of Salfordでバイオメカニクスおよびストレングス&コンディショニング科学の博士課程に在籍。



Paul A. Jones :
University of Salfordでバイオメカニクスおよびストレングス&コンディショニング科学の講師を務める。



Paul Comfort :
University of Salfordストレングス&コンディショニング科学准教授でストレングス&コンディショニング科学修士課程のプログラムリーダーであり、Leeds Beckett Universityの名誉リサーチフェローを務める。



John J. McMahon :
University of Salfordでスポーツバイオメカニクスの講師を務める。

負荷－速度関係を用いた最大挙上重量の予測の利点と限界

The Benefits and Limitations of Predicting One Repetition Maximum Using the Load-Velocity Relationship

References

1. Aagaard P, Simonsen EB, Andersen JL, Magnusson P, Dyhre-Poulsen P. Increased rate of force development and neural drive of human skeletal muscle following resistance training. *J Appl Physiol* 93: 1318–1326, 2002.
2. Andersen LL, Andersen JL, Zebis MK, Aagaard P. Early and late rate of force development: Differential adaptive responses to resistance training? *Scand J Med Sci Sports* 20: 162–169, 2010.
3. Atkinson G, Reilly T. Circadian variation in sports performance. *Sports Med* 21: 292–312, 1996.
4. Balsalobre-Fernández C, Kuzdub M, Poveda-Ortiz P, Campo-Vecino JD. Validity and reliability of the PUSH wearable device to measure movement velocity during the back squat exercise. *J Strength Cond Res* 30: 1968–1974, 2016.
5. Banyard HG, Nosaka K, Haff GG. Reliability and validity of the load–velocity relationship to predict the 1RM back squat. *J Strength Cond Res* 31: 1897–1904, 2017.
6. Banyard HG, Nosaka K, Sato K, Haff GG. Validity of various methods for determining velocity, force, and power in the back squat. *Int J Sports Physiol Perform* 12: 1170–1176, 2017.
7. Bazuelo-Ruiz B, Padial P, García-Ramos A, Morales-Artacho AJ, Miranda MT, Ferliche B. Predicting maximal dynamic strength from the load-velocity relationship in squat exercise. *J Strength Cond Res* 29: 1999–2005, 2015.
8. Behm DG, Sale DG. Intended rather than actual movement velocity determines velocity-specific training response. *J Appl Physiol* 74: 359–368, 1993.
9. Bilsborough JC, Greenway K, Livingston S, Cordy J, Coutts AJ. Changes in anthropometry, upper-body strength, and nutrient intake in professional Australian football players during a season. *Int J Sports Physiol Perform* 11: 290–300, 2016.
10. Caiozzo VJ, Perrine JJ, Edgerton VR. Training-induced alterations of the in vivo force-velocity relationship of human muscle. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol* 51: 750–754, 1981.
11. Chelly MS, Fathloun M, Cherif N, Amar MB, Tabka Z, Van Praagh E. Effects of a back squat training program on leg power, jump, and sprint performances in junior soccer players. *J Strength Cond Res* 23: 2241–2249, 2009.
12. Comfort P, Haigh A, Matthews MJ. Are changes in maximal squat strength during preseason training reflected in changes in sprint performance in rugby league players? *J Strength Cond Res* 26: 772–776, 2012.
13. Conceição F, Fernandes J, Lewis M, González-Badillo JJ, Jiménez-Reyes P. Movement velocity as a measure of exercise intensity in three lower limb exercises. *J Sports Sci* 34: 1099–1106, 2016.
14. Cormie P, McBride JM, McCaulley GO. Validation of power measurement techniques in dynamic lower body resistance exercises. *J Appl Biomech* 23: 103–118, 2007.
15. Cormie P, McGuigan MR, Newton RU. Developing maximal neuromuscular power: Part 1- biological basis of maximal power production. *Sports Med* 41: 17–38, 2011.

16. Cormie P, McGuigan MR, Newton RU. Adaptations in athletic performance after ballistic power versus strength training. *Med Sci Sports Exerc* 42: 1582–1598, 2010.
17. Coyle EF, Feiring DC, Rotkis TC, Cote RW, Roby FB, Lee W, Wilmore JH. Specificity of power improvements through slow and fast isokinetic training. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol* 51: 1437–1442, 1981.
18. Crewther B, Keogh J, Cronin J, Cook C. Possible stimuli for strength and power adaptation: Acute hormonal responses. *Sports Med* 36: 215–238, 2006.
19. Cronin JB, Hing RD, McNair PJ. Reliability and validity of a linear position transducer for measuring jump performance. *J Strength Cond Res* 18: 590–593, 2004.
20. Cutsem MV, Duchateau J, Hainaut K. Changes in single motor unit behaviour contribute to the increase in contraction speed after dynamic training in humans. *J Physiol* 513: 295–305, 1998.
21. DeWeese BH, Hornsby G, Stone M, Stone MH. The training process: Planning for strength-power training in track and field. Part 1: Theoretical aspects. *J Sport Heal Sci* 4: 308–317, 2015.
22. DeWeese BH, Hornsby G, Stone M, Stone MH. The training process: Planning for strength-power training in track and field. Part 2: Practical and applied aspects. *J Sport Heal Sci* 4: 318–324, 2015.
23. Dohoney P, Chromiak J, Lemire D, BR A, Kovacs C. Prediction of one repetition maximum (1-RM) strength from a 4-6 RM and a 7-10 RM submaximal strength test in healthy young adult males. *J Exerc Physiol* 5: 54–59, 2002.
24. García-Ramos A, Haff GG, Pestaña-Melero FL, Pérez-Castilla A, Rojas FJ, Balsalobre-Fernández C, Jaric S. Feasibility of the two-point method for determining the one-repetition maximum in the bench press exercise. *Int J Sports Physiol Perform* 13: 1–23, 2017.
25. García-Ramos A, Pestaña-Melero FL, Pérez-Castilla A, Rojas FJ, Haff GG. Mean velocity vs. mean propulsive velocity vs. peak velocity: Which variable determines bench press relative load with higher reliability? *J Strength Cond Res* 32: 1273–1279, 2018.
26. Garnacho-Castaño MV, López-Lastra S, Maté-Muñoz JL. Reliability and validity assessment of a linear position transducer. *J Sport Sci Med* 14: 128–136, 2014.
27. González-Badillo JJ, Sánchez-Medina L. Movement velocity as a measure of loading intensity in resistance training. *Int J Sports Med* 31: 347–352, 2010.
28. Häkkinen A, Sokka T, Kotaniemi A, Hannonen P. A randomized two-year study of the effects of dynamic strength training on muscle strength, disease activity, functional capacity, and bone mineral density in early rheumatoid arthritis. *Arthritis Rheum* 44: 515–522, 2001.
29. Harris NK, Cronin J, Taylor KL, Boris J, Sheppard J. Understanding position transducer technology for strength and conditioning practitioners. *Strength Cond J* 32: 66–79, 2010.
30. Hoeger W, Hopkins D, Barette SL, Hale DF. Relationship between repetitions and selected percentages of one repetitions maximum: A comparison between untrained and trained males and females. *J Strength Cond Res* 4: 47–54, 1990.
31. Izquierdo M, González-Badillo JJ, Häkkinen K, Ibáñez J, Kraemer WJ, Altadill A, Eslava J, Gorostiaga EM. Effect of loading on unintentional lifting velocity declines during single sets of repetitions to failure during upper and lower extremity muscle actions. *Int J Sports Med* 27: 718–724, 2006.
32. Jaric S. Two-load method for distinguishing between muscle force, velocity, and power-producing capacities. *Sports Med* 46: 1585–1589, 2016.
33. Jidovtseff B, Harris NK, Crielaard JM, Cronin JB. Using the load-velocity relationship for 1RM prediction. *J Strength Cond Res* 25: 267–270, 2011.

34. Jovanonic M, Flanagan EP. Researched applications of velocity based strength training. *J Aust Strength Cond* 22: 58–69, 2014.
35. Kennedy MD, Fischer R, Fairbanks K, Lefavre L, Vickery L, Molzan J, Parent E. Can pre-season fitness measures predict time to injury in varsity athletes?: A retrospective case control study. *Sport Med Arthrosc Rehabil Ther Technol* 4: 26, 2012.
36. Kraemer WJ, Fleck SJ. *Strength Training for Young Athletes*, Champaign, IL: Human Kinetics, 2005.
37. Kraemer WJ, Ratamess NA. Fundamentals of resistance training: Progression and exercise prescription. *Med Sci Sport Exerc* 36: 674–688, 2004.
38. Lake J, Duncan F, Jackson M, Naworynsky D. Effect of a hexagonal barbell on the mechanical demand of deadlift performance. *Sports* 5: 82, 2017.
39. Lake J, Naworynsky D, Duncan F, Jackson M. Comparison of different minimal velocity thresholds to establish deadlift one repetition maximum. *Sports (Basel)* 5: 70, 2017.
40. Lehance C, Binet J, Bury T, Croisier JL. Muscular strength, functional performances and injury risk in professional and junior elite soccer players. *Scand J Med Sci Sports* 19: 243–251, 2008.
41. Lehnhard RA, Lehnhard HR, Young R, Butterfield SA. Monitoring injuries on a college soccer team: The effect of strength training. *J Strength Cond Res* 10: 115–119, 1996.
42. Loturco I, Kobal R, Moraes JE, Kitamura K, Cal Abad CC, Pereira LA, Nakamura FY. Predicting the maximum dynamic strength in bench press: The high precision of the bar velocity approach. *J Strength Cond Res* 31: 1127–1131, 2017.
43. Loturco I, Pereira LA, Abad CC, Gil S, Kitamura K, Kobal R, Nakamura FY. Using bar velocity to predict maximum dynamic strength in the half-squat exercise. *Int J Sports Physiol Perform* 11: 697–700, 2016.
44. Mayhew JL, Prinster JL, Ware JS, Zimmer DL, Arabas JR, Bembem MG. Muscular endurance repetitions to predict bench press strength in men of different training levels. *J Sports Med Phys Fitness* 35: 108–113, 1995.
45. Morales J, Sobonya S. Use of submaximal repetition tests for predicting 1-RM strength in class athletes. *J Strength Cond Res* 10: 186–189, 1996.
46. Moss BM, Refsnes PE, Abildgaard A, Nicolaysen K, Jensen J. Effects of maximal effort strength training with different loads on dynamic strength, cross-sectional area, load-power and load-velocity relationships. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 75: 193–199, 1997.
47. Muñoz-López M, Marchante D, Cano-Ruiz MA, Chicharro JL, Balsalobre-Fernández C. Load-, force-, and power-velocity relationships in the prone pull-up exercise. *Int J Sports Physiol Perform* 12: 1249–1255, 2017.
48. Muyor JM, Granero-Gil P, Pino-Ortega J. Reliability and validity of a new accelerometer (Wimu) system for measuring velocity during resistance exercises. *Proc Inst Mech Eng P J Sport Eng Technol* 232: 218–224, 2017.
49. O'Donnell S, Tavares F, McMaster D, Chambers S, Driller M. The validity and reliability of the GymAware linear position transducer for measuring counter-movement jump performance in female athletes. *Meas Phys Educ Exerc Sci* 22: 101–107, 2018.
50. Pallarés JG, Sánchez-Medina L, Pérez CE, De La Cruz-Sánchez E, Mora-Rodríguez R. Imposing a pause between the eccentric and concentric phases increases the reliability of isoinertial strength assessments. *J Sports Sci* 32: 1165–1175, 2014.
51. Pérez-Castilla A, Jaric S, Ferliche B, Padial P, García-Ramos A. Evaluation of muscle mechanical

- capacities through the two-load method. *J Strength Cond Res* 32: 1245–1253, 2018.
52. Pestaña-Melero FL, Haff GG, Rojas FJ, Pérez-Castilla A, García-Ramos A. Reliability of the load-velocity relationship obtained through linear and polynomial regression models to predict the one-repetition maximum load. *J Appl Biomech* 34: 184–190, 2017.
53. Ruf L, Chéry C, Taylor KL. Validity and reliability of the load-velocity relationship to predict the 1rm in deadlift. *J Strength Cond Res* 32: 681–689, 2018.
54. Sakamoto A, Sinclair PJ. Effect of movement velocity on the relationship between training load and the number of repetitions of bench press. *J Strength Cond Res* 20: 523, 2006.
55. Sánchez-Medina L, González-Badillo JJ, Pérez CE, Pallarés JG. Velocity- and power-load relationships of the bench pull vs bench press exercises. *Int J Sports Med* 35: 209–216, 2014.
56. Sánchez-Medina L, González-Badillo JJ. Velocity loss as an indicator of neuromuscular fatigue during resistance training. *Med Sci Sport Exerc* 43: 1725–1734, 2011.
57. Seitz LB, Reyes A, Tran TT, de Villarreal ES, Haff GG. Increases in lower-body strength transfer positively to sprint performance: A systematic review with meta-analysis. *Sport Med* 44: 1693–1702, 2014.
58. Spiteri T, Newton RU, Binetti M, Hart NH, Sheppard JM, Nimphius S. Mechanical determinants of faster change of direction and agility performance in female basketball athletes. *J Strength Cond Res* 29: 2205–2214, 2015.
59. Spiteri T, Nimphius S, Hart NH, Specos C, Sheppard JM, Newton RU. Contribution of strength characteristics to change of direction and agility performance in female basketball athletes. *J Strength Cond Res* 28: 2415–2423, 2014.
60. Styles WJ, Matthews MJ, Comfort P. Effects of strength training on squat and sprint performance in soccer players. *J Strength Cond Res* 30: 1534–1539, 2016.
61. Suchomel TJ, Nimphius S, Bellon CR, Stone MH. The importance of muscular strength: Training considerations. *Sports Med* 48: 765–785, 2018.
62. Swinton PA, Stewart A, Agouris I, Keogh JW, Lloyd R. A biomechanical analysis of straight and hexagonal barbell deadlifts using submaximal loads. *J Strength Cond Res* 25: 2000–2009: 2011–2009.
63. Torrejón A, Balsalobre-Fernández C, Haff GG, García-Ramos A. The load-velocity profile differs more between men and women than between individuals with different strength levels. *Sport Biomech* 18: 1–11, 2018.
64. Wilson GJ, Newton RU, Murphy AJ, Humphries BJ. The optimal training load for the development of dynamic athletic performance. *Med Sci Sports Exerc* 25: 1279–1286, 1993.
65. Zink AJ, Perry AC, Robertson BL, Roach KE, Signorile JF. Peak power, ground reaction forces, and velocity during the squat exercise performed at different loads. *J Strength Cond Res* 20: 658–664, 2006.