

Keywords 【速度を基準とするトレーニング：velocity-based training、レジスタンスエクササイズ：resistance exercise、プログラム作成：programming】

速度を基準とするトレーニング： クリティカルレビュー

Velocity-Based Training-A Critical Review

Stuart N. Guppy,¹ PhD Kristina L. Kendall,¹ PhD G. Gregory Haff,^{1,2} PhD

¹School of Medical and Health Sciences, Edith Cowan University, Joondalup, Australia

²School of Health and Society, University of Salford, Salford, Greater Manchester, United Kingdom

要約

素早い力の発揮能力を向上させるプログラム作成方策として、速度を基準とするトレーニング(VBT)の利用が増加している。トレーニング処方に多様な形式のVBTを効果的に統合するには、これらの方策における長所と短所を理解する必要がある。例えば、負荷-速度関係を利用して1RMを予測すること、同じくトレーニング負荷を調整すること、さらに、速度低下の程度を利用してトレーニング量をコントロールすることなどがある。本稿は、これらの長所と短所を明らかにして、それぞれのプログラム作成方策を最も効果的に組み込むための実践例を提供する。

序論

アスレティックパフォーマンスの向上を目指して、期分けされたトレーニングプログラムを計画する場合、重要な点のひとつは、アスリートにおける力発揮能力の発達と至適化である(29,49,113)。力発揮能力は、一般にアスレティックパフォーマンスの重要な指標と関連している(109,110)。スプリント(114)、ジャンプ(67)、方向転換(114)、およびタックル(114)などの競技特異的スキルがその好例である。加えて、最大筋力は競技会レベルを分けるだけでなく、それらの競技会への選抜も左右することがよく知られている。つまり、筋力の高いアスリートほど、レベルの高い競技会に選抜される可能性が高い(5,6,48,121)。また、アスリートの最大筋力は、競技会中に蓄積する疲労に対する保護効果に影響を与え(60,90)、傷害リスクを緩和すると考えられる(25,73)。例えばMaloneら(73)は、下半身の相対筋力が大きいアスリートは、トレーニングにおいて高い運動負荷に耐えることが可能であり、総合的な傷害リスクが低いことを報告した。したがって、先行文献に従うと、期分けされたストレングストレーニングプロ

グラムをデザインする際は、最大筋力の発達を特に考える必要がある。

トレーニングプログラムのデザインにおいては、利用可能なトレーニング時間におけるかなりの部分が、最大筋力の発達と至適化に割り当てられる。一般的には、パワーリフティングとウエイトリフティングの動作に由来するレジスタンスエクササイズ(スクワット、デッドリフト、ベンチプレス、パワークリーン、その他のウエイトリフティングの派生形)が処方される(112)。それぞれのエクササイズについて、力発揮能力の向上とともに、アスレティックパフォーマンス指標の向上が一貫して報告されている(113)。例えばComfortら(26)によると、プレシーズンにおけるトレーニング期の終了後に、ラグビーリーグ選手におけるスクワットの相対1RM(体重比)が1.78から2.05へと向上し、それが5、10、20mスプリントパフォーマンスの向上に貢献したと考えられる。同様にMcBrideら(77)は、スクワットの相対1RMが>2.1のアスリートは、<1.9のアスリートよりも、40ヤード(約36.5m)のスプリントタイムが有意に速かったことを報告した。スプリントにおいて身体質量を急速に加速させるには、接地と同時に短時間で大きな正味の力を発揮しなければならない。したがって、バックスクワットなどのエクササイズにおける相対筋力が影響しても不思議ではない(43,136)。この点からも、トレーニングプログラムにおいて力発揮能力の発達を至適化することが重要である。

力発揮能力の向上を目指してレジスタンストレーニングプログラムをデザインする場合、通常、トレーニング負荷は、すでに判明している1RM(1回最大挙上重量)などのnRM(n回最大挙上重量)に対するパーセントとして処方される(69,111,117)。あるいは、nRM(3、5、10RM)の負荷やRMゾーン(8~12RM)の利用も多く報告されている

(22,24,54,91,103,105)。このような負荷の処方方法は頻繁に利用されているが、それぞれの方法について、いくつかの欠点が報告されている。例えば、挙上重量に対するパーセントに基づいてレジスタンストレーニング負荷を利用すると、生活面のストレス、トレーニング/競技会の総合的な負荷、与えられたトレーニング刺激への適応による筋力の変化を考慮に入れることができない(61,86,117)。同様に、失敗するまでのトレーニング(nRM負荷やRMゾーンを利用して)を習慣的に実施することは非効率的であり、トレーニングによる負担を増加させ、特にエネルギー系の発達を目指すトレーニング様式と併用すると、パフォーマンスと骨格筋線維の適応を抑制することが報告されている(23,24,57,58,91,92)。アスレティックパフォーマンスに必要な身体的特質は、一般に多因子的であるため、ストレングス&コンディショニング(S&C)専門職は、同時に2つのトレーニング目標の発達を目指す(57,58,84)。したがってこれは、アスリートにおいて特に重要な意味をもつ。

従来のプログラム作成方法には様々な限界があるため、アスリート自身にトレーニング負荷を“自己調節”させることが提案されている(52,111)。この考えは、当日におけるトレーニングステータスの測定値に応じて、トレーニングの量と強度をセッションごと、あるいはセットごとに変更することを意味している(69)。自己調節によるプログラム作成方策には、主観的運動強度、残り反復回数(RIR)、自己調節による漸増レジスタンスエクササイズ(APRE)などがある。いずれもトレーニング強度の調整に利用可能な方法として、アスリートの指導のための科学的文献において提案されたものである(52,68,75,122,124)。しかしこれらの方法は、トレーニングセット完了後の疲労状態に関するアスリートの主観的評価に基づいているか(122,137)、あるいはAPREの場合、失敗するまでのトレーニングに基づいてモデルを構成しているにすぎないか(75,123)のどちらかであることに注意する必要がある。さらにこれらの方法における効果の多くは、アスリートのトレーニング経験によって左右される可能性がある。例えば、RIRを見積もる精度は、トレーニング経験に依存する。経験の浅いアスリートは、経験豊富なアスリートよりも、実施できるレップ数を低く見積もる傾向にある(89,137)。これは、主観的な自己調節方法が一部のアスリートには適用できない可能性を示唆している。

最近、自己調節の主観的方法をめぐる問題に対処するために、客観的な方法が検討され始めている(61,106)。それらの研究では、アスリートにおける現在のトレーニングステータスに合わせてセッションの負荷を調整する方法として、レジスタンスエクササイズ中における動作速度の客観的な測定値を利用することが提案されている(40,61,117)。例えば、あ

る%1RMで生み出される速度が、以前のトレーニングセッションよりも小さければ、最大筋力の低下や総合的な疲労の蓄積の増加を示していると考えられる(61,74)。逆に、ある%1RMで生み出される速度が大きければ、最大筋力の向上や疲労の蓄積の減少を示していると考えられる(61,74)。したがって、レジスタンストレーニング中における速度を長期的にモニタリングすることによって、アスリートのパフォーマンスに関する日々の変動を考慮して、現在のトレーニングステータスに合わせてセッションを正確に調整することができる」と主張されている(41,61,74,127)。

レジスタンストレーニング中に処方する負荷の指針として速度を利用することは、力発揮能力とアスレティックパフォーマンス指標のどちらも向上させる有効な方法であると当初考えられた。このテーマについて、最近複数のレビューが行なわれたが(10,86,127)、S&C専門職の間には今も若干の混乱が残っている。例えば、どのようなプログラム作成方策が速度を基準とするトレーニング(VBT)に該当するのか、科学的文献ではどの方法が支持されているのかなどの疑問がある(115)。したがって本稿では、これらのプログラム作成方策を支持する最新の科学的エビデンスの概要を伝え、それらを効果的に実践に組み込む方法を提案する。重要なことは、VBTについては広範な研究が実施されているが、その大部分が、しばしば生態学的妥当性を欠く制御された条件でスミスマシーンを利用していることである。例えば、速度の測定値における信頼性を向上させるために、ベンチプレスなどのエクササイズで伸張性局面と短縮性局面の間で休止を挟んだり(9,28,97)、胸部から数cm離れた場所にセットしたセーフティバーから短縮性局面のみを実施させたりする(98)ことは珍しくない。しかしレジスタンストレーニングプログラムは、これらの制約を加えないフリーウェイトエクササイズを利用して構築され、実施されていることがほとんどである。そこで本稿では、フリーウェイトエクササイズに関する研究に焦点を当てる。このようにすることで、最終的に提案する指針を生態学的に妥当なものとし、S&C専門職が現場で利用できるものとするを目指す。

負荷—速度関係

速度を基準とするプログラム作成方策において中心になるのは、速度と挙上負荷の関係である。レジスタンスエクササイズにおける速度は以前から調査されている。例えばRichter(99)とMiller(82)は、タイミングデバイスを利用して、それぞれ1973年と1976年にウエイトリフティングエクササイズにおけるバーベルの速度を算定した。Gonzalez-Badillo&Sanchez-Medina(40)の研究では、相対負荷(%1RMや%3RMなど)と速度の関係を利用して、トレーニング負

荷におけるモニタリングと処方が行なわれた。その研究において、二次多項式関数を利用して速度と相対負荷の関係をプロットした結果、最大筋力が増大しても、各%1RMの速度は一定であることが判明した(40)。またその後の研究により、これは強い関係性を維持したまま同様の信頼性をもって、線形回帰によってモデル化されることが示され(14)、アスリートの負荷-速度プロフィールを向上させる数学的に単純な方法を提供した。しかし、さらなる研究によって、一般化された負荷-速度関係は、相対筋力が媒介する各負荷における速度の個人差(14)や生物学的性別(7,120)を考慮していないことが示された。そこで、S&C専門職がVBTを実施するには、各アスリートについて負荷-速度プロフィールを作成する必要がある。もうひとつ注意しなければならないことは、負荷-速度関係はエクササイズに特異的であり、エクササイズ間で転移しないことである(図1)(27)。したがって、速度を基準とするプログラム作成方策を利用するには、個々のアスリートだけでなく、レジスタンストレーニングプログラムで処方するエクササイズ別に特異的な負荷-速度関係を作成する必要がある。

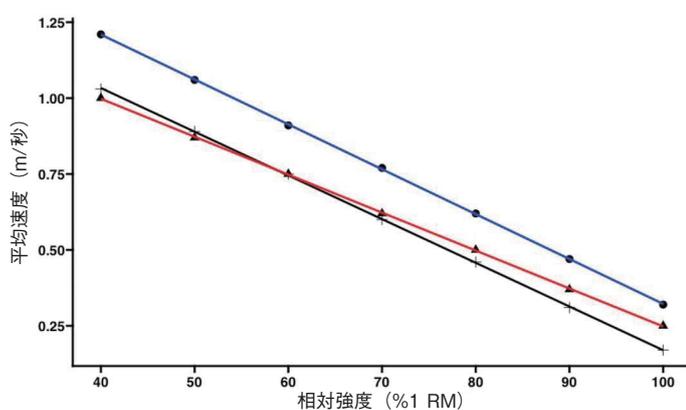
負荷-速度関係を利用する1RMの予測

VBTの人気を当初高めた重要な要素のひとつは、ウォーミングアップのセットを利用してその日の負荷-速度プロフィールを作成すれば、それに基づいて現在の1RMを推定して、負荷を正確に処方できるという主張であった(61)。さらに Gonzalez-Badillo&Sanchez-Medina (40) と Jovanovic&Flanagan (61)は、この方法を利用すれば、時間がかかり疲労をもたらす最大筋力のテストを、定期的実施する必要がなくなると主張した。1RMを推定する方法では、2~6個の最大下負荷を利用して負荷-速度プロフィールを作成すればよい(36,61)。以前に記録された1RMの速度を回帰方程式に入力すれば、その日の1RMを推定することが

できる(61)。

その後Greigら(44)は、これをレジスタンストレーニングの負荷を自己調節する客観的な方法とみなしているが、この方法の妥当性を裏づける実証的なエビデンスはほとんど存在しない(12,63,72,100)。例えばBanyardら(12)は、ウォーミングアップセットから得られた負荷-速度関係を利用すると、フリーウェイトによるバックスクワットの1RMを過大評価する(平均差19.67~29.83kg)ことを報告しており、さらに類似する結果がHughesら(55)からも報告されている。バックスクワットの1RMにおける予測値と実測値を比較すると、95%誤差許容範囲は±19.65kgからありえないほど大きな±395.43kgにまでわたる。重要なことは、Hughesら(55)による、負荷-速度関係を用いたバックスクワットの1RMにおける推定値と実測値の差が、アスリートの筋力に応じて拡大するという報告である。負荷-速度関係による1RMの推定値における精度は、1RMに近い最終最大下負荷(90%1RM)を含む関係を構築することによって若干向上するが(12,100)、フリーウェイトエクササイズでは、1RMの実測値と比べた時の推定値における精度はやはり受け入れられない(12,56,63,72,100)。これらの調査結果に従うと、下半身の最大筋力を向上させるレジスタンストレーニング介入を実施する際に、負荷-速度関係を利用して1RMを推定すると、最大筋力の評価が不正確になると考えられる。また、負荷-速度関係から予測される1RMは、一般に、実際の1RMと非常に密接に関連しているが(12,66,100)、相関係数は測定間のバイアスを評価しないため、2つの測定における一致を評価できないことにも注意を払うべきである。したがって、速度関係による1RMの推定方法に関する今後の比較研究においては利用すべきではない(18,71,76,79,135)。

フリーウェイトエクササイズの1RMの予測において負荷-速度関係の利用を取り上げた大多数の研究は、スクワットやデッドリフトなどの下半身エクササイズを焦点としている



%1 RM	ベンチプレス (m/秒)	スクワット (m/秒)	デッドリフト (m/秒)
40	1.03	1.21	1.00
50	0.89	1.06	0.87
60	0.75	0.91	0.75
70	0.60	0.77	0.62
80	0.46	0.62	0.50
90	0.31	0.47	0.37
100	0.17	0.32	0.25

図1 ベンチプレス(黒線+)、スクワット(青線●)、デッドリフト(赤線▲)における負荷-速度関係の例。データはBalsalobre-Fernandez&Torres-Ronda (10)による。

(78)。しかし同様の結果は、ベンチプレスなどの上半身エクササイズ用に作成された負荷-速度関係の検証においても報告されている(33,72)。例えばMacarillaら(72)は、負荷-速度関係を利用したベンチプレス1RMの予測値が、実際に記録されたフリーウェイトの1RMを大きく上回っていたことを報告した(平均差6.22~9.75kg)。興味深いことに、この過大評価は、完全な負荷-速度関係を利用しても、簡易化された2点法を利用しても同じように発生したが、2点法を利用するほうが、95%誤差許容範囲がより大きく広がった(72)。これらの結果は、Fernandesら(33)の研究結果と一致している。Fernandesら(33)も、負荷-速度関係の利用方法にかかわらず、実測値と比べて予測値はベンチプレスの1RMを8.2~20.4%過大評価することを報告した。さらに、フリーウェイトのベンチプレスにおける結果は、スミスマシーンで実施したベンチプレスの結果と矛盾している(97)。例えばPerez-Castillaら(97)は、1RMの予測に2点法を利用すると、1RMの実測値よりも、系統的バイアスとランダム誤差が低いことを報告した。運動容量の向上を目的とするプログラムでは、フリーウェイトでベンチプレスを実施させることが主流である。したがって、生態学的に妥当な環境で、負荷-速度関係に基づく予測モデルを評価することが重要である。

負荷-速度関係を利用する1RMの推定値は不正確であることが多いが、これは負荷-速度関係に含めるべき1RMの適切な速度($v1RM$)を選ぶ難しさが原因であると考えられている(127)。この制限を克服するために、Weakleyら(127)は、対象のエクササイズ用に一般化された $v1RM$ を利用することを提案した。ただし、発表された論文には、このアプローチの精度を $v1RM$ の直接評価と比較してテストした実験的研究は存在しないことが記されている。Weakleyら(127)の論文発表後、Fernandesら(33)は、バックスクワット、ベンチプレス、ベントオーバーロウにおける1RMの推定値と実測値を比較した。その結果、一般化された $v1RM$ を利用しても、個別の $v1RM$ に見出されるのと同様の予測誤差が生じたことが報告された。同じような結果は、Jukicら(63)の研究でも報告されている。これによると、一般化された $v1RM$ を負荷-速度関係の一部として利用すると、実測値と比べてデッドリフトの推定値には過大評価が認められたが、この過大評価は、個別の $v1RM$ を負荷-速度関係の一部として利用する際に起きるものと同程度であった(63)。さらに、個別の $v1RM$ の代わりに一般化された $v1RM$ を利用すると、負荷-速度関係の推定における標準誤差がほぼ2倍であった。これは精度の低さを示している。

1RMの不正確な予測をもたらす $v1RM$ に関する問題を解決するために、Balsalobre-Fernandez&Kipp(8)は、一般化された、あるいは個別の最小速度閾値(MVT)を利用する必要の

ない一連の機械学習モデルを提案した。これによれば、スミスマシーンベンチプレスの1RMにおける実測値と予測値の間に、非常に強い相関関係($r=0.97\sim0.98$)が見出され、両者間に有意差は認められなかった(8)。この結果は、今後の研究における興味深い指針となる。しかし、1RMに関するこれらの予測モデルと実測の互換性は不明のままである。なぜなら、相関係数はバイアスを評価しないこと(18,71,76,79,135)、また対応のあるt検定は両者における測定の違いの大きさを評価しないこと(2)、さらに同等性の相違に関するエビデンスが欠如していることが挙げられるからである(30)。さらに、各モデルに含まれるデータは、スミスマシーンベンチプレスから作成された負荷-速度関係に基づいているため(8)、フリーウェイトの利用におけるこのアプローチの妥当性も不明である。これに関しては、Thompsonら(118)によって代替アプローチも提案されている。この研究によると、二次モデル化アプローチを利用して、バリステックなエクササイズ(ジャンプスクワット)と非バリステックなエクササイズ(バックスクワット)を組み合わせた新しい負荷-速度関係を構築すると、バックスクワットにおける1RMの推定は比較的精度が高くなる。しかし、この結合テストプロトコルの調整と、二次モデル化の統計学的複雑さは、負荷-速度関係の構築に一般に利用されるシンプルな直線モデル化アプローチと比べると、多くのS&C専門職にとって、この予測方法を非実用的なものとする可能性がある。

最新の科学的文献をまとめると、日々における1RMの予測に負荷-速度関係を利用することは、理論的には有望なプログラム作成方策であるが、実践的にはまだ問題があり、トレーニング負荷のプログラムミスを引きかねないことが明らかであると思われる。S&C専門職がこのアプローチを採用すると、アスリートは現在の身体能力を超えた負荷に曝されて、諸研究で推奨されている自己調節プログラムを組み込む利益が損なわれかねない(44,61)。さらに、Thompsonら(118)が概説したアプローチは、速度を基準とするプログラム作成における一般的な方法よりも、1RMの推定値における精度を高める可能性があるが、これを利用するには、複数日にわたるテストで複数のエクササイズを実施する必要がある。大多数のS&C専門職は、利用できる時間が制限されているため、こうした方法で実施することは容易ではない。よってそのかわりに、最大筋力の評価には従来の方法を利用し、疲労のモニタリングと管理に負荷-速度関係を利用することが適切であろう(21,125,128)。

負荷-速度関係を利用する負荷の調整

レジスタンストレーニングプログラムに速度を基準とするプログラムを組み込む方法としてしばしば記述されるもうひ

とつやり方は、負荷-速度関係を利用して、セットごとに挙上するバーベルの負荷を調整することである(61,127)。すでに概説したように、一連の最大下相対強度における速度のデータセットに線形回帰を当てはめることによって、負荷-速度プロフィールを作成することができる(127)。トレーニングセッションでは、ウォーミングアップとターゲットセットの両方で発揮された速度を、当の相対強度で予測された速度と比較する(127)。一般に、実際に測定された速度が予測された速度よりも $\pm 0.06\text{ m/s}$ 以上ずれると、外的負荷を $\pm 5\%$ 1RM変更する(11,14)。この方法によって個々のトレーニング負荷を調整すれば、伝統的なパーセントベースの方法を利用するよりも、アスリートの疲労状態や身体能力の変化を考慮に入れることができる(44,127)。

このプログラム作成方策を利用すると、比較的短期間のトレーニングでも効果を発揮することが示されている。例えばDorrellら(32)は、このアプローチに加えて速度低下閾値とRIRを併用した群は、カウンタームーブメントジャンプ(CMJ)の跳躍高が有意に増加したが、波状型のパーセントベースによるプログラムを利用した群はそうではなかったことを報告した。6週間にわたるトレーニングにおいて、自己調節群はトレーニング量が有意に少なかったにもかかわらず、上半身と下半身の筋力向上は同等以上であった(32)。これを踏まえると、自己調節群の跳躍高向上は、疲労管理の向上による可能性が高い。同様の結果はOrangeら(88)によっても報告されている。シーズン中に7週間にわたって、負荷-速度関係を利用して各セッションのトレーニング負荷を変更すると、固定の $\%1\text{RM}$ (1日目: $80\%1\text{RM}$ 、2日目: $60\%1\text{RM}$)を利用する場合と同等の筋力向上がもたらされた。しかし、VBT群の知覚的ストレスとタイムアンダーテンション(筋の緊張持続時間)は、パーセントベース群よりも低かった(88)。したがってこれらのデータは、年間計画においてトレーニング負荷の調整に負荷-速度関係を利用する至適タイミングは、第一目標が蓄積疲労の緩和と競技力の至適化にあるシーズン中あるいは試合期かもしれないことを示している(47)。しかし、負荷-速度関係に基づくプログラムの実施が、従来の方策よりも優れたパフォーマンス成果をもたらすかどうかに関しては、現在は限られたエビデンスしか存在しない(87)。さらに、長い試合期にわたってトレーニング負荷の調整に負荷-速度関係を利用することが、重要なパフォーマンス指標にどのような影響を及ぼすかについて、長期的な調査を行なう必要がある。

これらの結果は有望であり、ピーキングあるいはリアライゼーションブロックにおいて疲労の蓄積を緩和する目的で、トレーニング負荷の調整に負荷-速度関係を利用することを支持するかもしれないが、S&C専門職がこのアプローチを採

用するには考慮する必要がある制限がある。しばしば認識されていないひとつの制限は、負荷-速度プロフィールの作成に要する時間である。例えば、最近のレビュー(10,127)で概説されているプロトコルに従うには、まず、アスリートの1RMを評価して、負荷-速度関係に含められる相対強度に応じた絶対負荷を確実に知る必要がある。次に、1RMのテストと負荷-速度関係のテスト間に十分な休息を挟んだのち(約48時間)、 $90\%1\text{RM}$ を含めて負荷を漸増させて(10,14,127)一連のレップを実施させる必要がある。エクササイズ間(27,102)とアスリート間(14)で負荷-速度関係の互換性が欠けていると考えられる場合は、負荷-速度関係に基づくプログラムを実施したいトレーニングに含まれる1つのエクササイズについて、1人のアスリートにつき2回のテストセッションをスケジューリングする必要がある。したがって、この方法で負荷-速度プロフィールを構築してモニタリングすることは調整を要するため、多くのS&C専門職にとっては実行が困難である。1RMのテストセッションを実施するか、通常のトレーニングに3RMテストを組み込むだけでよい従来のパーセントベースの方法よりも時間がかかることになるだろう。

速度低下とトレーニング量の管理

客観的な測定値に基づいてトレーニングを自己調節するもうひとつの方法は、速度低下率($\%$)を利用してセット内で実施するトレーニング量をコントロールすることである(42,101)。この方法では、通常、初回レップ(131)またはセットの最速レップ(普通は初回レップ)(42,101)の速度から予め決定された速度低下閾値に達した時点で、レジスタンスエクササイズのセットを終了する。速度低下の程度は、期分けされた年間計画の目標として選択した身体特質(トレーニング目標)に従って処方する(127)。例えば、一般的準備期には、総合的な運動容量と骨格筋における横断面積の向上が目標とされる(46)。そこで、1セット当たりの合計量、つまり運動量を多く処方するために、大きな速度低下($30\sim 40\%$)を処方する(127)。逆に、プレシーズンやインシーズンには、力発揮能力の至適化、競技力の向上、疲労の管理が主な目的とされる(46)。そこで、1セットあたりの合計量を減少させるために、小さな速度低下($10\sim 20\%$)を処方する(127)。

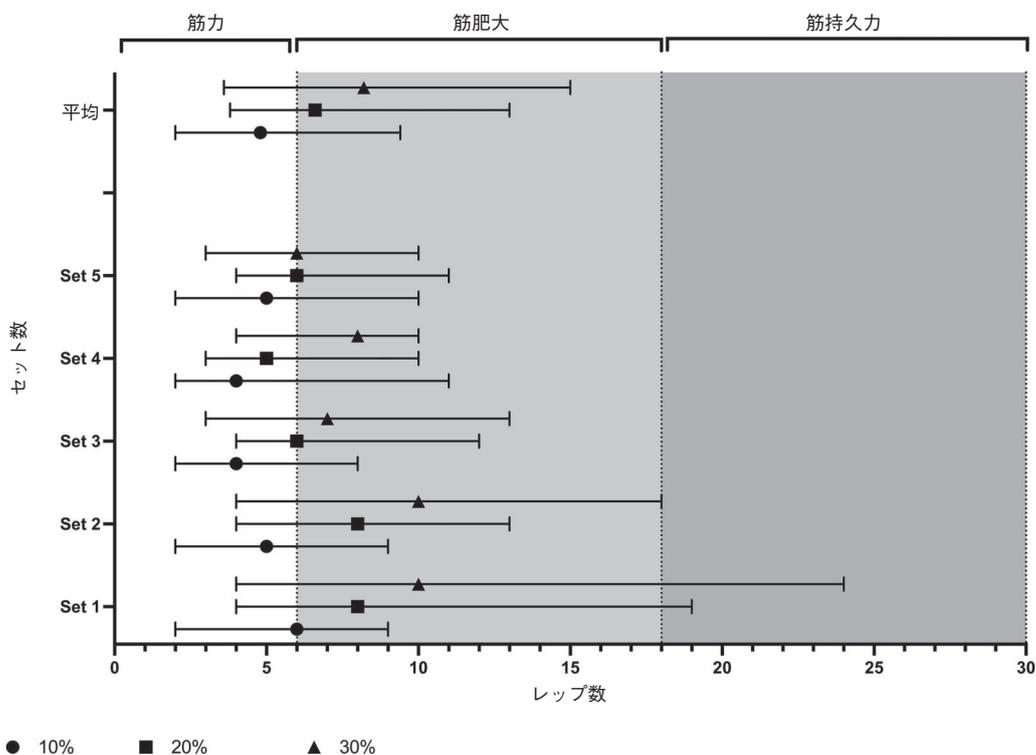
筋力とパフォーマンス指標を向上させる方法として、速度低下閾値を利用することを支持する科学的エビデンスが出始めている。例えばHeldら(50)は、8週間のトレーニングで 10% の速度低下閾値を利用したところ、負荷の処方に $\%1\text{RM}$ を利用して失敗するまで挙上させるよりも筋力の増加が大きかったことを報告した。同様にPareja-Blancoら(95)によると、 20% の速度低下閾値を利用する場合と 40% の速度低下閾値を利用する場合を比べると、筋力の増加は同様であった。し

しかし、CMJ跳躍高は、トレーニング量がかなり少なかったにもかかわらず、前者のほうが大きく増加した。逆に40%の速度低下閾値を利用すると、外側広筋と中間広筋の横断面積が大きく増加した(95)。これは、トレーニング量と筋肥大の間には用量-反応関係が存在することを考えると驚くべきことではない(104)。Dorrellら(32)は、試合期に速度ゾーンに基づく強度の処方と20%の速度低下閾値による量のコントロールを組み合わせると、パーセントベースの波状型プログラムよりも(4)、ベンチプレスの1RMとCMJ跳躍高の向上が大きいことを報告した。さらにVBT群は、合計トレーニング量が有意に少なかったにもかかわらず、バックスクワット、デッドリフト、オーバーヘッドプレスの1RMが、伝統的なプログラムと同程度に向上した(32)。

これらの研究結果を考え合わせると、特に疲労管理が優先される場合、速度低下閾値はプログラム作成方策として有望である。しかし若干の制限があり、例えば、速度低下閾値を量のコントロール方策として利用する方法として、固定のセット数を処方して、処方された閾値(10、20、30%など)に達してセットを終了するまでにできるだけ多くのレップを実施させるやり方が提案されている(41,127)。Gonzalez-Badilloら(41)はこの方法を支持して、1セット当たり予め計画されたレップ数を実施させる従来のプログラム方法の代わりに、無制約のセットと速度低下閾値を組み合わせる方法によって、レジスタンストレーニング介入の効果を最大化することを提

案した。同様にBanyardら(15)は、トレーニング時間が制限されている場合は、1エクササイズにつき実施する合計レップ数を処方する方法を提案した。すなわち、予め定められた速度低下閾値に達するまでにアスリートが実施できるレップ数によって、合計セット数と各セットのレップ数を規定する方法である。しかし、プレシーズンやインシーズンにこのような方法を取ろうとすると、アスリートを、過度の疲労をもたらすトレーニング量に曝して、このプログラムの実施目的(疲労を制限あるいはコントロールすること)に反するリスクがある。実際、Pareja-Blancoら(95)は、40%の速度低下閾値を利用したトレーニング群が、セットの56%で失敗に至ったことを報告している。失敗するまでのトレーニングを習慣的に実施すると疲労が蓄積することを考えると(24,57)、これは、20%の速度低下閾値群と比べて40%の速度低下閾値群のほうが、CMJ跳躍高の向上が劣っていることを説明する可能性がある(95)。

さらにWeakleyら(131)は、バックスクワットの無制約セットにおいて、10、20、30%速度低下閾値で実施できるレップ数には、個人間にかかなりの差が存在することを報告した(図2)。例えば10%の速度低下閾値を課すと、セット内で実施されるレップ数の範囲は2~11にわたった(131)。この範囲は速度低下が大きくなるにつれて広がり、20%の閾値では4~19レップ、30%の閾値では4~24レップにわたった(131)。筋力やパワーの向上には10~20%の閾値を利用することが一般



● 10% ■ 20% ▲ 30%
 図2 バックスクワットで10、20、30%の速度低下閾値を利用する場合に実施される、レップ数の平均値、最低値、最大値。データはWeakleyら(131)による。

に推奨されていることを考えると(53,127)、1セットで実施するレップ数を制約しなければ、アスリートは意図せずして、向上目的である身体特質からトレーニングセッションの焦点をずらし、結果的に、セッションによって蓄積する疲労レベルも変化する可能性がある。さらにこのアプローチは、レジスタンストレーニングプログラムと、期分けされた年間計画に含まれる局面や期における総合的な目標の間に齟齬を生むだろう。したがって、年間計画の適切なタイミングで身体特性を発達させるには、速度低下閾値によるプログラムを、トレーニングの合計量を単独でコントロールする方策とするよりも、従来の固定されたプログラム作成方策を補完して、激しい疲労をもたらすトレーニング(疲労困憊までのトレーニングなど)への過度の曝露を避けるツールとして利用することが最良である。

負荷-速度関係を利用した疲労のモニタリング

スポーツのチームや組織は、神経筋系における疲労のモニタリングを行なうが、アスリートのトレーニングステータスにおける変化の判断には、CMJテストから得られた変数(跳躍高やピーク速度など)がしばしば利用される(38)。しかし、これを実施するにはフォースプレートを利用する必要がある(37)、環境によっては実用的ではなかったり、予算的に難しかったりすることがある。最近では、神経筋系における疲労の評価とモニタリングの代替方法として、バックスクワットなど通常のレジスタンストレーニングエクササイズから作成した負荷-速度関係を利用することが提案されている(21,125,127)。例えばVernonら(125)は、疲労をもたらすレジスタンストレーニングの24時間後と48時間後に最大筋力が変化しなかったが、最大下バックスクワットの平均速度(MV)が低下し、72時間後に基準値に回復したことを報告した。これは、刺激-疲労-回復曲線に従っている。しかし、バックスクワットの速度および負荷-速度関係におけるこのような変化は、直線位置変換器(LPT)によって測定したCMJのピーク速度(PV)の変化と一致していなかった。

さらに研究を進めたCallaghanら(21)も、Vernonら(125)と同様の結果を報告している。それによると、疲労をもたらす筋力向上を目的としたレジスタンストレーニング後に、神経筋系の疲労増大に応じてバックスクワットのMVが低下した。しかしVernonら(125)の結果とは対照的に、バックスクワットのMVの低下は、CMJにおけるPVの低下に一致していた。Callaghanら(21)はこれらの結果に基づいて、通常のレジスタンストレーニングセッションで速度を観察すれば、通常のCMJテストと合わせて神経筋系における疲労のモニタリングに利用できると主張した。

しかし、負荷-速度関係を疲労のモニタリングに利用する

には、トレーニング負荷の調整に利用する場合と同様の制限が存在する。負荷と速度の関係を正確に評価するには、帰帰方程式が正しく適合するだけの十分なデータが必要であり、実施前に詳細なテストプロトコルが必要になる(10,127)。加えて、負荷-速度関係はエクササイズ間の互換性がない(27)。したがって、疲労レベルのモニタリングにこの方法を利用する意図のあるエクササイズのそれぞれについて、負荷-速度関係を構築する必要がある。疲労のモニタリングに関するおそらく最大の制限は、速度の測定値における精度であろう。速度の測定値は、テストで利用されるデバイスに大きく依存する(129)。精度の低いデバイスを利用すると、誤った決定が下されることになる。

速度の測定デバイスとその制限

本稿で概要を述べた速度を基準とするプログラム作成方策におけるほとんどには、一定レベルの科学的裏づけがある。しかしそれらはいずれも、各エクササイズにおけるレップ速度の正確な測定に依存する(127,129)。これが特に問題になるのは、速度の急性変化に基づいて負荷を調整したり、速度低下を利用して1セットの量をコントロールしたりする場合である。不正確な測定値は不正確な決定を招くおそれがある。市場で現在入手可能なデバイスの多くは、外的負荷の調整方法として一般に利用されている閾値よりも大きな測定誤差を示すことに注意する必要がある(図3)。また、3Dモーションキャプチャーなどのゴールドスタンダードとなる測定方法と比べると、妥当性をもって速度を測定することが不可能である。例えばLakeら(70)は、PUSH Band 2.0加速度計は、3Dモーションキャプチャーと比べて、ベンチプレスの60%推定1RMと90%推定1RMにおけるPVを、妥当性をもって測定することができたが、両方の負荷におけるMVを比較すると比例バイアスが見出されたことを報告した。同様の結果はJovanovic&Jukic(62)でも見出されている。その研究によると、ヘックスバー・デッドリフトにおいてGymAware(LPT)と比べたところ、PUSH Band 2.0加速度計は固定バイアスと比例バイアスの両方を示した。さらに、かなりの測定誤差と感度の低さを示したことも報告されている。これは、セットごとの速度変化に基づいて外的負荷を調整したい場合、このデバイスを利用しないほうがよいことを示唆している。Callaghanら(20)によると、バックスクワットにおいて3Dモーションキャプチャーと比べると、PUSH Band 2.0加速度計は、高速(>1.00 m/秒)では妥当性が認められなかったが、中速(0.65~1.00 m/秒)と低速(<0.65 m/秒)では妥当性が認められた。しかしフロントスクワットとベンチプレスでは、低速(<0.65 m/秒)でのみ妥当性が認められた。BarSensei、BEAST、Output Sportsなど、他の加速度計ベースのデバイスや慣性計測ユニットも、スク

バックスクワットの負荷-速度関係と最小検出可能差

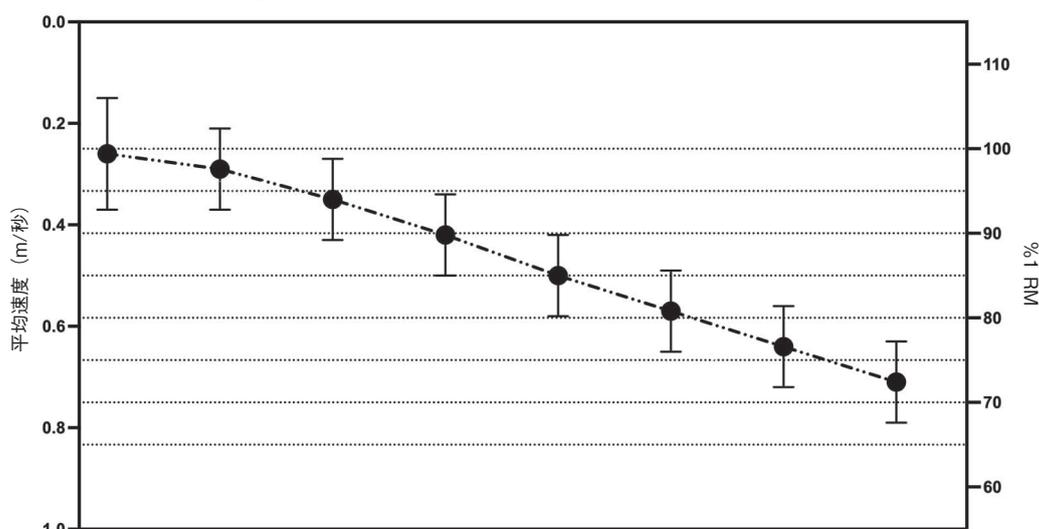


図3 バックスクワットの負荷-速度関係の例。各負荷について最小検出可能差を示す。エラーバーは、Banyardら(14)によって報告された最小検出可能差を表す。横線は、Weakleyら(127)によって提案された、個々の速度に応じた相対強度の幅を表す。

ワット、ベンチプレス、パワークリーンなどのレジスタンスエクササイズにおける速度を測定すると、やはり妥当性が低く、測定誤差が認められた(1,16,81,98,116)。速度の測定精度に関する問題は、積分ドリフト(誤差の蓄積)に起因する可能性がある。積分ドリフトは、修正に実質的な信号処理が必要であり、レジスタンスエクササイズにおける短縮性局面の開始時および終了時を特定しようとする問題が生じる。現時点のデータに基づく、現在入手可能な加速度計ベースのデバイスと慣性計測ユニットは、一般に実施されている速度を基準とするプログラム作成方策における多くで利用に適していない可能性がある。

逆に、携帯LPT(GymAware、T-Force、Speed4Lifts、Tendo)などの、バーベルの位置測定に頼るデバイスは、妥当性が高く測定誤差が低いようである(表)(129)。例えばBanyardら(13)は、GymAwareによって定量化したフリーウェイトのスクワットにおけるMVとPVは、実験室のフォースプレートおよび4-LPTシステムと比べて妥当であることを報告した。同じくDorrellら(31)によると、GymAwareによって定量化したフリーウェイトのスクワット、ベンチプレス、デッドリフトにおけるMVは、3Dモーションキャプチャーと比べて妥当であった。しかし、このデバイスは妥当であっても、購入費用が高いため(約2,000米ドル)、特に、一定数以上のアスリートを対象に複数のデバイスを必要とする場合には、現場へ組み込むことが難しいであろう。代替となるSpeed4Lifts(現在の商品名Vitrue)などの低コストの選択肢は、低~中速(<1.00m/秒)のバーベル速度については(20)、GymAware(98)や3Dモーションキャプチャーと類似の妥当性と測定誤差を

示しているため、場合によっては予算面でもより現実的な選択肢かもしれない。LPTは、バーベルに搭載する加速度計デバイスよりも概して精度が高いが(129)、バーベルに引き込み式テザーを取り付ける必要がある。取り付け点を変更すると、測定される変位に影響する可能性があり(3)、ひいては、測定された変位を微分して算出する速度にも影響する。さらに、ウエイトリフティング動作などのエクササイズでは、引き込み式のコードをバーベルに取り付けると扱いにくくなる、あるいはデバイスが与える引き込み張力のせいで、動作を行なうアスリートのテクニックが変わる可能性がある。

LPTの代替となりうるもうひとつのデバイスは、最近設計されたレーザー光デバイス(FLEX; Kinetic Performance, Canberra, Australia)である。このデバイスは、バーベルの端に直接取り付け、バーベルの位置変化を測定して速度を定量化する。Weakleyら(126)は、このデバイスが、一般に利用される相対強度(60~90%1RM)を用いたフリーウェイトのバックスクワットとベンチプレスにおいて、3Dモーションキャプチャーと一致し、標準誤差がきわめて低いことを報告した。またFritschira(35)は、このデバイスが、3Dモーションキャプチャーと比べると、MVとPVについて固定バイアスを示したことを報告した。しかし、テストされたエクササイズ(バックスクワット、ハングパワースナッチ、有負荷CMJ、有負荷スクワットジャンプ)の全レップをプールして統計学的分析を行なったため、これらのデータから個々のエクササイズにおけるデバイスの妥当性を確認することは不可能である。このデバイスの妥当性を調査した研究は数が限られているため、S&C専門職が現場で利用する際は注意を払う必要が

表 一般に利用される速度測定デバイスの比較

デバイスのタイプ	算出方法	商品名	妥当性	信頼性	参考文献	注記
直線位置変換器	変位を時間で微分	GymAware	あり	あり	(13,31,83,116)	平均速度はバーベル上のテザーの位置に依存する。
		Vitruve (Speed4Lifts)	データなし	あり	(66)	
		Tendo	あり	あり	(39)	
加速度計	加速度を時間で積分	Push Band	なし	なし	(70,80,116)	バーベルのどこにでも取り付け可能。アスリートに直接取り付けてもよい。
		BarSensei	なし	なし	(1,16)	
		Beast	なし	なし	(116)	
慣性計測ユニット	加速度を時間で積分して速度を算出	OUTPUT sports	なし	データなし	(81)	バーベルのどこにでも取り付け可能。
		Enode (Vmax pro)	あり	あり	(34,51,80)	
レーザー光デバイス	変位を時間で微分	FLEX	あり	あり	(35,126)	バーベルの端にしか取り付けられない。反射面を必要とする。
直線速度変換器	変位の変化を瞬間速度に変換	T-force	あり	あり	(28)	フリーウェイトエクササイズについては情報が限られている。
モーションキャプチャー	変位を時間で微分	Perch	あり	あり	(130)	携帯不可。
		EliteForm	あり	あり	(119)	
ビデオ撮影	変位を時間で微分	Iron path	なし	なし	(65)	一般に低コストで携帯可能。スマートフォンを利用する必要がある。
		My lift (power lift)	なし	なし	(28)	

ある。

これまでの科学的エビデンスを考え合わせると、S&C専門職が速度を基準とするプログラム作成方策の利用を望むなら、可能な場合には、最も信頼性と精度の高い速度の測定値を生むLPTを利用するべきであろう。加速度計ベースのデバイスと慣性計測ユニットは、LPTよりも低コストかもしれないが、測定誤差が大きく、妥当性を欠く可能性が高い(129)。誤った速度の測定値に基づいて、正しくない決定を行なう可能性を考えると、S&C専門職はどのような種類のデバイスも、現場に組み込む前に精度を考慮するべきである。

速度を基準とするプログラム作成方策を年間計画に組み込む

すべてのレジスタンストレーニングテクニックと同じく、S&C専門職は、年間計画全体のどこで速度を基準とするプログラムを利用することが最も効果的であるかを考える必要がある。一般にオフシーズンはトレーニング量が多く、強度は中程度である。第一目標は総合的な運動容量の向上にあり、競技会がないため、競技パフォーマンスを至適化する必要性は低い(47)。そのため、年間計画のこの時期には、準備状態を高める必要がほとんどない。蓄積疲労の緩和を促すプログラムを強調する必要もない。しかし、プレシーズンやインシーズンには、競技パフォーマンスの至適化が第一目標になる。そのため、疲労の緩和を介して準備状態の向上を促すトレー

ニング方策が実施される(46)。これは、トレーニング量を減らす一方で、総合的なトレーニング強度を維持または増加させることを伴う(19,45)。レジスタンストレーニングでは、失敗するまでのトレーニングを避けなければならない。なぜなら、それによる蓄積疲労の増加はパフォーマンスの大幅な低下をもたらす(24)、最終的には、体力特性の向上が可能になるかもしれないパフォーマンスの向上をみえなくするからである。

速度を基準とするプログラムの実施は、プレシーズンまたはインシーズンにこそ最適であるだろう。すでに述べたように、トレーニングプログラムに速度低下閾値を組み込む目的は、失敗するまでのトレーニングを日常的に実施させないことにある(96)。しかし、Pareja-Blancoらの研究(95)では、40%の速度低下閾値群が56%のセットで失敗に至り、Weakleyらの研究(131)では、10、20、30%の速度低下閾値で実行可能であったレップ数は幅広く(図2)、Jukicらの研究(64)では、最大限可能なレップ数に対してアスリートが実施したレップ数の割合にばらつきがあった。これらを考えると、速度低下閾値を、失敗までの近さとトレーニング量をコントロールする唯一の方策として利用できないことは明らかである。その代わりに、速度低下閾値を、伝統的な量と強度の処方方法と併用するべきである。例えば、筋力の向上を目的とするメゾサイクルブロックでは、3~5セット×4~6レップが一般に処

方される(108)。このような伝統的な量の処方モデルを利用すれば、各セットで実施するレップ数を抑制するものとして機能するはずである。ここに20~25%の速度低下閾値を適用して、自己調節による量のコントロールを行なう(53,93,94)。速度低下閾値に達するか、レップ数の上限に達したら、その時点でセットを終了する。最終的に、速度低下閾値を伝統的なプログラム作成方策と併用すれば、トレーニングセッションの焦点を、目指す身体特質から意図せずして逸らすこともなく、また、年間計画上の不適切な時点で過度の疲労を招くこともなくなるであろう。

VBTを効果的に実施するもうひとつの方策は、トレーニング過程におけるアスリートの意欲向上である。トレーニング負荷が非常に重く動作速度が低速であっても、アスリートができるだけ素早く動こうと意図している場合には、筋力の向上が見出されている(17)。アスリートの意図に影響する因子はいくつか存在する。例えば本人の意欲があるが、これはトレーニング環境の影響を受ける。かつてWeakleyら(134)とWeakleyら(133)は、1レップを終えるたびに運動学的フィードバック(つまり動作速度)を与えることが、レジスタンストレーニングセッションにおける青少年アスリート(男女)の競争心と意欲を向上させたことを報告した。またWeakleyら(132)によると、重要なレジスタンスエクササイズにおいて、レップごとに運動学的フィードバックを与えた群は、与えなかった群と比べて筋力パフォーマンスが大きく向上した。

同様にNagataら(85)によると、レップごとに運動学的フィードバックを与えた群は、視覚的なフィードバックだけを与えた群、セット後に運動学的フィードバックを与えた群、フィードバックを与えなかった群よりも、ジャンプスクワットのパフォーマンスが向上した。またShattock&Tee(107)は、主観的なRIRベースの自己調節トレーニングプログラムと比較して、速度の客観的指標を利用して負荷を自己調節することは、バックスクワットとベンチプレスの1RM、CMJ跳躍高、10mと40mのスプリントタイムを向上させたことを報告した。どちらの群も同様の量負荷を実施したことを考えると、後者のパフォーマンス結果が優れていたことは、後者に与えられた運動学的フィードバックが意欲に影響を及ぼしたことによると考えられる(107)。これらを考え合わせると、レジスタンスエクササイズのセット中に運動学的フィードバックを与えることが、適応結果を向上させることはほぼ明らかである。しかしS&C専門職は、セット中にフィードバックを与えるトレーニングのタイプを考慮すべきである。一部のエビデンスによると、従来のストレングストレーニングと比較すると、パワートレーニングにおいて、運動学的フィードバックの提供が適応に及ぼす影響は限定的である(59)。さ

らに、過去のレップ速度を超えようとするあまり、至適ではない動作方策に陥って、傷害リスクを高めないようにすることが重要である。要するに、VBTはトレーニング過程を増強するために利用すべきであり、S&C専門職は、デバイスが表示する速度をただ見守るのでなく、目の前にいるアスリートの指導に携わるべきである(115)。

結論と現場への応用

速度を基準とするプログラム作成方策は、現在の科学的文献において様々なレベルのエビデンスによって支持されている。しかしこの方法は、多くのシナリオにおいて保証されない可能性があることを忘れてはならない。当初は有望に思われたが、負荷-速度関係を利用してアスリートのその日の1RMを推定することは、実際の身体能力をかなり過大評価する可能性がある。したがって、予め計画された時点における1RMの直接測定を優先するべきである。速度の急性変化に応じてセットごとに負荷を調整するなどの方策は、疲労管理の改善を促し、動的パフォーマンスの向上を促進する。しかしそれは、レジスタンスエクササイズ中に発揮される速度の定量化に利用するデバイスの精度に依存し、また、従来の方法を上回る筋力の向上を誘発するとは思われない。S&C専門職は、速度を基準とするプログラムの実施が、年間計画のそれぞれにおける期や時期の目標に一致しているかどうかとも考慮する必要がある。◆

From *Strength and Conditioning Journal*
Volume 46, Number 3, pages 295-307.

REFERENCES

1. Abbott JC, Wagle JP, Sato K, Painter K, Light TJ, Stone MH. Validation of inertial sensor to measure barbell kinematics across a spectrum of loading conditions. *Sports* 8: 93, 2020.
2. Altman DG, Bland JM. Measurement in medicine: The analysis of method comparison studies. *The Statistician* 32: 307-317, 1983.
3. Appleby BB, Banyard H, Cormack SJ, Newton RU. Validity and reliability of methods to determine barbell displacement in heavy back squats: Implications for velocity-based training. *J Strength Cond Res* 34: 3118-3123, 2020.
4. Baker D. Applying the in-season periodization of strength and power training to football. *Strength Cond J* 20: 18-27, 1998.
5. Baker DG. Comparison of strength levels between players from within the same club who were selected vs not selected to play in the grand final of the National Rugby League competition. *J Strength Cond Res* 31: 1461-1467, 2017.
6. Baker DG, Newton RU. Discriminative analyses of various upper body tests in professional rugby-league players. *Int J Sports Physiol Perform* 1: 347-360, 2006.
7. Balsalobre-Fernandez C, Garcia-Ramos A, Jimenez-Reyes P. Load-velocity profiling in the military press exercise: Effects of gender and training. *Int J Sports Sci Coaching* 13: 743-750, 2018.
8. Balsalobre-Fernandez C, Kipp K. Use of machine-learning and

- load-velocity profiling to estimate 1-repetition maximums for two variations of the bench-press exercise. *Sports* 9: 39, 2021.
9. Balsalobre-Fernandez C, Munoz-Lopez M, Marchante D, Garcia-Ramos A. Repetitions in reserve and rate of perceived exertion increase the prediction capabilities of the load-velocity relationship. *J Strength Cond Res* 35: 724-730, 2021.
 10. Balsalobre-Fernandez C, Torres-Ronda L. The implementation of velocity-based training paradigm for team sports: Framework, technologies, practical recommendations and challenges. *Sports* 9: 47, 2021.
 11. Banyard H, Tufano J, Weakley J, Wu S, Jukic I, Nosaka K. Superior changes in jump, sprint, and change-of-direction performance but not maximal strength following 6 Weeks of velocity-based training compared with 1-repetition-maximum percentage-based training. *Int J Sports Physiol Perform* 16: 232-242, 2021.
 12. 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.
 13. 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.
 14. Banyard HG, Nosaka K, Vernon AD, Haff GG. The reliability of individualized load-velocity profiles. *Int J Sports Physiol Perform* 13: 763-769, 2018.
 15. Banyard HG, Tufano JJ, Delgado J, Thompson SW, Nosaka K. Comparison of the effects of velocity-based training methods and traditional 1RM-percent-based training prescription on acute kinetic and kinematic variables. *Int J Sports Physiol Perform* 14: 246-255, 2019.
 16. Beckham GK, Layne DK, Kim SB, Martin EA, Perez BG, Adams KJ. Reliability and criterion validity of the Assess2Perform bar sensei. *Sports* 7: 230, 2019.
 17. Behm DG, Sale DG. Intended rather than actual movement velocity determines velocity-specific training response. *J Appl Physiol* 74: 359-368, 1993.
 18. Bland JM, Altman DG. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet* 327: 307-310, 1986.
 19. Bosquet L, Montpetit J, Arvisais D, Mujika I. Effects of tapering on performance: A meta-analysis. *Med Sci Sports Exerc* 39: 1358-1365, 2007.
 20. Callaghan DE, Guy JH, Elsworthy N, Kean C. Validity of the PUSH Band 2.0 and Speed4Lifts to measure velocity during upper and lower body free-weight resistance exercises. *J Sports Sci* 40: 968-975, 2022.
 21. Callaghan DE, Guy JH, Kean CO, Scanlan AT, Kertesz AH, Elsworthy N. Back squat velocity to assess neuromuscular status of rugby league players following a match. *J Sci Med Sport* 24: 36-40, 2021.
 22. Campos GE, Luecke TJ, Wendeln HK, et al. Muscular adaptations in response to three different resistance-training regimens: Specificity of repetition maximum training zones. *Eur J Appl Physiol* 88: 50-60, 2002.
 23. Carroll KM, Bazylar CD, Bernards JR, et al. Skeletal muscle fiber adaptations following resistance training using repetition maximums or relative intensity. *Sports* 7: 169, 2019.
 24. Carroll KM, Bernards JR, Bazylar CD, et al. Divergent performance outcomes following resistance training using repetition maximums or relative intensity. *Int J Sports Physiol Perform* 14: 46-54, 2019.
 25. Case MJ, Knudson DV, Downey DL. Barbell squat relative strength as an identifier for lower extremity injury in collegiate athletes. *J Strength Cond Res* 34: 1249-1253, 2020.
 26. 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.
 27. Conceicao F, Fernandes J, Lewis M, González-Badillo JJ, Jimenez-Reyes P. Movement velocity as a measure of exercise intensity in three lower limb exercises. *J Sports Sci* 34: 1099-1106, 2016.
 28. Courel-Ibáñez J, Martinez-Cava A, Moran-Navarro R, et al. Reproducibility and repeatability of five different technologies for bar velocity measurement in resistance training. *Ann Biomed Eng* 47: 1523-1538, 2019.
 29. 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 Health Sci* 4: 308-317, 2015.
 30. Dixon PM, Saint-Maurice PF, Kim Y, Hibbing P, Bai Y, Welk GJ. A primer on the use of equivalence testing for evaluating measurement agreement. *Med Sci Sports Exerc* 50: 837-845, 2018.
 31. Dorrell HF, Moore JM, Smith MF, Gee TI. Validity and reliability of a linear positional transducer across commonly practised resistance training exercises. *J Sports Sci* 37: 67-73, 2019.
 32. Dorrell HF, Smith MF, Gee TI. Comparison of velocity-based and traditional percentage-based loading methods on maximal strength and power adaptations. *J Strength Cond Res* 34: 46-53, 2020.
 33. Fernandes JFT, Dingley AF, Garcia-Ramos A, Perez-Castilla A, Tufano JJ, Twist C. Prediction of one repetition maximum using reference minimum velocity threshold values in young and middle-aged resistance-trained males. *Behav Sci* 11: 71, 2021.
 34. Feuerbacher JF, Jacobs MW, Dragutinovic B, Goldmann JP, Cheng S, Schumann M. Validity and test-retest reliability of the Vmaxpro sensor for evaluation of movement velocity in the deep squat. *J Strength Cond Res* 37: 35-40, 2023.
 35. Fritschi R, Seiler J, Gross M. Validity and effects of placement of velocity-based training devices. *Sports* 9: 123, 2021.
 36. Garcia-Ramos A, Jaric S. Two-point method: A quick and fatigue-free procedure for assessment of muscle mechanical capacities and the 1 repetition maximum. *Strength Cond J* 40: 54-66, 2018.
 37. Gathercole R, Sporer B, Stellingwerff T, Sleivert G. Alternative countermevent-jump analysis to quantify acute neuromuscular fatigue. *Int J Sports Physiol Perform* 10: 84-92, 2015.
 38. Gathercole RJ, Sporer BC, Stellingwerff T, Sleivert GG. Comparison of the capacity of different jump and sprint field tests to detect neuromuscular fatigue. *J Strength Cond Res* 29: 2522-2531, 2015.
 39. Goldsmith JA, Trepeck C, Halle JL, et al. Validity of the open barbell and Tendo weightlifting analyzer systems versus the optotrak certus 3D motion-capture system for barbell velocity. *Int J Sports Physiol Perform* 14: 540-543, 2019.
 40. Gonzalez-Badillo JJ, Sanchez-Medina L. Movement velocity as a measure of loading intensity in resistance training. *Int J Sports Med* 31: 347-352, 2010.
 41. Gonzalez-Badillo JJ, Sanchez-Medina L, Ribas-Serna J, Rodriguez-Rosell D. Toward a new paradigm in resistance training by means of velocity monitoring: A critical and challenging narrative. *Sports Med Open* 8: 118, 2022.
 42. Gonzalez-Badillo JJ, Yanez-Garcia JM, Mora-Custodio R, Rodriguez-Rosell D. Velocity loss as a variable for monitoring resistance exercise. *Int J Sports Med* 38: 217-225, 2017.
 43. Goodwin JE, Cleather DJ. The biomechanical principles

- underpinning strength and conditioning. In: *Strength and Conditioning for Sports Performance*. Jeffreys I, Moody J, eds. Oxon, United Kingdom: Routledge, 2016. pp. 36-66.
44. Greig L, Stephens Hemingway BH, Aspe RR, Cooper K, Comfort P, Swinton PA. Autoregulation in resistance training: Addressing the inconsistencies. *Sports Med* 50: 1873-1887, 2020.
 45. Haff GG. Peaking for competition in individual sports. In: *High-Performance Training for Sports*. Joyce D, Lewindon D, eds. Champaign, IL: Human Kinetics, 2014. pp. 291-300.
 46. Haff GG. The essentials of periodisation. In: *Strength and Conditioning for Sports Performance*. Jeffreys I, Moody J, eds. Oxon, United Kingdom: Routledge, 2016. pp. 404-448.
 47. Haff GG, Haff EE. Training integration and periodization. In: *NSCA's Guide to Program Design*. Hoffman R, ed. Champaign, IL: Human Kinetics, 2012. pp. 209-254.
 48. Hansen KT, Cronin JB, Pickering SL, Douglas L. Do force-time and power-time measures in a loaded jump squat differentiate between speed performance and playing level in elite and elite junior rugby union players? *J Strength Cond Res* 25: 2382-2391, 2011.
 49. Hartmann H, Wirth K, Keiner M, Mickel C, Sander A, Szilvas E. Short-term periodization models: Effects on strength and speed-strength performance. *Sports Med* 45: 1373-1386, 2015.
 50. Held S, Hecksteden A, Meyer T, Donath L. Improved strength and recovery after velocity-based training: A randomized controlled trial. *Int J Sports Physiol Perform* 16: 1185-1193, 2021.
 51. Held S, Rappelt L, Deutsch J-P, Donath L. Valid and reliable barbell velocity estimation using an inertial measurement unit. *Int J Environ Res Public Health* 18: 9170, 2021.
 52. Helms ER, Cronin J, Storey A, Zourdos MC. Application of the repetitions in reserve-based rating of perceived exertion scale for resistance training. *Strength Cond J* 38: 42-49, 2016.
 53. Hickmott LM, Chilibeck PD, Shaw KA, Butcher SJ. The effect of load and volume autoregulation on muscular strength and hypertrophy: A systematic review and meta-analysis. *Sports Med Open* 8: 9, 2022.
 54. Hoffman JR, Ratamess NA, Klatt M, et al. Comparison between different off-season resistance training programs in Division III American college football players. *J Strength Cond Res* 23: 11-19, 2009.
 55. Hughes LJ, Banyard HG, Dempsey AR, Peiffer JJ, Scott BR. Using load-velocity relationships to quantify training-induced fatigue. *J Strength Cond Res* 33: 762-773, 2019.
 56. Hughes LJ, Banyard HG, Dempsey AR, Scott BR. Using a load-velocity relationship to predict one repetition maximum in free-weight exercise: A comparison of the different methods. *J Strength Cond Res* 33: 2409-2419, 2019.
 57. Izquierdo M, Ibanez J, Gonzalez-Badillo JJ, et al. Differential effects of strength training leading to failure versus not to failure on hormonal responses, strength, and muscle power gains. *J Appl Physiol* 100: 1647-1656, 2006.
 58. Izquierdo-Gabarren M, González De Txabarri Expósito R, Garcia-Pallares J, Sánchez-Medina L, De Villarreal ESS, Izquierdo M. Concurrent endurance and strength training not to failure optimizes performance gains. *Med Sci Sports Exerc* 42: 1191-1199, 2010.
 59. Jimenez-Alonso A, Garcia-Ramos A, Cepero M, Miras-Moreno S, Rojas FJ, Pérez-Castilla A. Effect of augmented feedback on velocity performance during strength-oriented and power-oriented resistance training sessions. *J Strength Cond Res* 36: 1511-1517, 2022.
 60. Johnston RD, Gabbett TJ, Jenkins DG, Hulin BT. Influence of physical qualities on post-match fatigue in rugby league players. *J Sci Med Sport* 18: 209-213, 2015.
 61. Jovanovic M, Flanagan EP. Researched applications of velocity based strength training. *J Aust Strength Cond* 22: 58-69, 2014.
 62. Jovanovic M, Jukic I. Within-unit reliability and between-units agreement for the commercially available linear position transducer and barbell-mounted inertial sensor to measure movement velocity. *J Strength Cond Res*. 2020 [Epub ahead of print] .
 63. Jukic I, Garcia-Ramos A, Malecek J, Omcirk D, Tufano JJ. Validity of load-velocity relationship to predict 1 repetition maximum during deadlifts performed with and without lifting straps: The accuracy of six prediction models. *J Strength Cond Res* 36: 902-910, 2022.
 64. Jukic I, Prnjak K, King A, McGuigan MR, Helms ER. Velocity loss is a flawed method for monitoring and prescribing resistance training volume with a free-weight back squat exercise. *Eur J Appl Physiol* 123: 1343-1357, 2023.
 65. Kasovic J, Martin B, Carzoli JP, Zourdos MC, Fahs CA. Agreement between the iron path app and a linear position transducer for measuring average concentric velocity and range of motion of barbell exercises. *J Strength Cond Res* 35: S95-S101, 2021.
 66. Kilgallon J, Cushion E, Joffe S, Tallent J. Reliability and validity of velocity-measures and regression methods to predict maximal strength ability in the back-squat using a novel linear position transducer. *Proc Inst Mech Eng P J Sports Eng Technol* 175433712210931, 2022 [Epub ahead of print] .
 67. Kirby TJ, McBride JM, Haines TL, Dayne AM. Relative net vertical impulse determines jumping performance. *J Appl Biomech* 27: 207-214, 2011.
 68. Knight KL. Quadriceps strengthening with the DAPRE technique: Case studies with neurological implications. *Med Sci Sports Exerc* 17: 646-650, 1985.
 69. Kraemer WJ, Fleck SJ. *Optimizing Strength Training: Designing Nonlinear Periodization Workouts*. Champaign, IL: Human Kinetics, 2007.
 70. Lake J, Augustus S, Austin K, et al. The reliability and validity of the bar-mounted PUSH Band 2.0 during bench press with moderate and heavy loads. *J Sports Sci* 37: 2685-2690, 2019.
 71. Ludbrook J. Statistical techniques for comparing measurers and methods of measurement: A critical review. *Clin Exp Pharmacol Physiol* 29: 527-536, 2002.
 72. Macarilla CT, Sautter NM, Robinson ZP, et al. Accuracy of predicting one-repetition maximum from submaximal velocity in the barbell back squat and bench press. *J Hum Kinetics* 82: 201-212, 2022.
 73. Malone S, Hughes B, Doran DA, Collins K, Gabbett TJ. Can the workload-injury relationship be moderated by improved strength, speed and repeated-sprint qualities. *J Sci Med Sport* 22: 29-34, 2019.
 74. Mann JB, Ivey PA, Sayers SP. Velocity-based training in football. *Strength Cond J* 37: 52-57, 2015.
 75. Mann JB, Thyfault JP, Ivey PA, Sayers SP. The effect of autoregulatory progressive resistance exercise vs. linear periodization on strength improvement in college athletes. *J Strength Cond Res* 24: 1718-1723, 2010.
 76. Mansournia MA, Waters R, Nazemipour M, Bland M, Altman DG. Bland-Altman methods for comparing methods of measurement and response to criticisms. *Glob Epidemiol* 3: 100045, 2021.
 77. McBride JM, Blow D, Kirby TJ, Haines TL, Dayne AM, Triplett NT. Relationship between maximal squat strength and five, ten, and forty yard sprint times. *J Strength Cond Res* 23: 1633-1636, 2009.
 78. McBurnie AJ, Allen KP, Garry M, et al. The benefits and limitations of predicting one repetition maximum using the load-velocity

- relationship. *Strength Cond J* 41: 28-40, 2019.
79. McLaughlin P. Testing agreement between a new method and the gold standard - how do we test? *J Biomech* 46: 2757-2760, 2013.
 80. Menrad T, Edelmann-Nusser J. Validation of velocity measuring devices in velocity based strength training. *Int J Comp Sci Sport* 20: 106-118, 2021.
 81. Merrigan JJ, Martin JR. Is the OUTPUT Sports unit reliable and valid when estimating back squat and bench press concentric velocity? *J Strength Cond Res* 36: 2069-2076, 2022.
 82. Miller C. Timing the speed of the bar. In: *Olympic Lifting: A Training Manual*. Santa Fe, NM: Sunstone Press, 2018. pp. 108-109.
 83. Mitter B, Holbling D, Bauer P, Stöckl M, Baca A, Tschan H. Concurrent validity of field-based diagnostic technology monitoring movement velocity in powerlifting exercises. *J Strength Cond Res* 35: 2170-2178, 2021.
 84. Mujika I, Halson S, Burke LM, Balagué G, Farrow D. An integrated, multifactorial approach to periodization for optimal performance in individual and team sports. *Int J Sports Physiol Perform* 13: 538-561, 2018.
 85. Nagata A, Doma K, Yamashita D, Hasegawa H, Mori S. The effect of augmented feedback type and frequency on velocity-based training-induced adaptation and retention. *J Strength Cond Res* 34: 3110-3117, 2020.
 86. Nevin J. Autoregulated resistance training: Does velocity-based training represent the future? *Strength Cond J* 41: 34-39, 2019.
 87. Orange ST, Hritz A, Pearson L, Jeffries O, Jones TW, Steele J. Comparison of the effects of velocity-based vs. traditional resistance training methods on adaptations in strength, power, and sprint speed: A systematic review, meta-analysis, and quality of evidence appraisal. *J Sports Sci* 40: 1220-1234, 2022.
 88. Orange ST, Metcalfe JW, Robinson A, Applegarth MJ, Liefieith A. Effects of in-season velocity- versus percentage-based training in academy rugby league players. *Int J Sports Physiol Perform* 15: 554-561, 2020.
 89. Ormsbee MJ, Carzoli JP, Klemp A, et al. Efficacy of the repetitions in reserve-based rating of perceived exertion for the bench press in experienced and novice benchers. *J Strength Cond Res* 33: 337-345, 2019.
 90. Owen A, Dunlop G, Rouissi M, et al. The relationship between lower-limb strength and match-related muscle damage in elite level professional European soccer players. *J Sports Sci* 33: 2100-2105, 2015.
 91. Painter KB, Haff GG, Ramsey MW, et al. Strength gains: Block versus daily undulating periodization weight training among track and field athletes. *Int J Sports Physiol Perform* 7: 161-169, 2012.
 92. Painter KB, Haff GG, Triplett NT, et al. Resting hormone alterations and injuries: Block vs. DUP weight-training among D-1 track and field athletes. *Sports* 6: 3, 2018.
 93. Pareja-Blanco F, Alcazar J, Cornejo-Daza PJ, et al. Effects of velocity loss in the bench press exercise on strength gains, neuromuscular adaptations and muscle hypertrophy. *Scand J Med Sci Sports* 30: 2154-2166, 2020.
 94. Pareja-Blanco F, Alcazar J, Sanchez-Valdepenas J, et al. Velocity loss as a critical variable determining the adaptations to strength training. *Med Sci Sports Exerc* 52: 1752-1762, 2020.
 95. Pareja-Blanco F, Rodriguez-Rosell D, Sanchez- Medina L, et al. Effects of velocity loss during resistance training on athletic performance, strength gains and muscle adaptations. *Scand J Med Sci Sports* 27: 724-735, 2017.
 96. Pelland JC, Robinson ZP, Rimmert JF, et al. Methods for controlling and reporting resistance training proximity to failure: Current issues and future directions. *Sports Med* 52: 1461-1472, 2022.
 97. Perez-Castilla A, Jerez-Mayorga D, Martinez-Garcia D, Rodriguez-Perea A, Chiroso-Rios LJ, Garcia-Ramos A. Comparison of the bench press one-repetition maximum obtained by different procedures: Direct assessment vs. lifts-to-failure equations vs. two-point method. *Int J Sports Sci Coaching* 15: 337-346, 2020.
 98. Perez-Castilla A, Piepoli A, Delgado-Garcia G, Garrido-Blanca G, Garcia-Ramos A. Reliability and concurrent validity of seven commercially available devices for the assessment of movement velocity at different intensities during the bench press. *J Strength Cond Res* 33: 1258-1265, 2019.
 99. Richter G. Ein Trainergerät zur Objektivierung der sportartspezifischen Schnellkraftfähigkeit und zur Trainingssteuerung im Gewichtheben. *Theorie und Praxis des Leistungssports* 11: 241-263, 1973.
 100. Ruf L, Chery C, Taylor K-L. Validity and reliability of the load-velocity relationship to predict the one-repetition maximum in deadlift. *J Strength Cond Res* 32: 681-689, 2018.
 101. Sanchez-Medina L, Gonzalez-Badillo JJ. Velocity loss as an indicator of neuromuscular fatigue during resistance training. *Med Sci Sports Exerc* 43: 1725-1734, 2011.
 102. Sanchez-Medina L, Gonzalez-Badillo JJ, Perez CE, Pallarés J. Velocity- and power-load relationships of the bench pull vs. Bench press exercises. *Int J Sports Med* 35: 209-216, 2013.
 103. Schoenfeld BJ, Contreras B, Krieger J, et al. Resistance training volume enhances muscle hypertrophy but not strength in trained men. *Med Sci Sports Exerc* 51: 94-103, 2019.
 104. Schoenfeld BJ, Ogborn D, Krieger JW. Dose-response relationship between weekly resistance training volume and increases in muscle mass: A systematic review and meta-analysis. *J Sports Sci* 35: 1073-1082, 2017.
 105. Schoenfeld BJ, Ratamess NA, Peterson MD, Contreras B, Sonmez GT, Alvar BA. Effects of different volume-equated resistance training loading strategies on muscular adaptations in well-trained men. *J Strength Cond Res* 28: 2909-2918, 2014.
 106. Scott BR, Duthie GM, Thornton HR, Dascombe BJ. Training monitoring for resistance exercise: Theory and applications. *Sports Med* 46: 687- 698, 2016.
 107. Shattock K, Tee JC. Autoregulation in resistance training: A comparison of subjective versus objective methods. *J Strength Cond Res* 36: 641-648, 2022.
 108. Sheppard JM, Triplett NT. Program design for resistance training. In: *Essentials of Strength Training and Conditioning*. Haff GG, Triplett NT, eds. Champaign, IL: Human Kinetics, 2016. pp. 439-470.
 109. Speranza MJ, Gabbett TJ, Johnston RD, Sheppard JM. Effect of strength and power training on tackling ability in semiprofessional rugby league players. *J Strength Cond Res* 30: 336-343, 2016.
 110. Speranza MJA, Gabbett TJ, Johnston RD, Sheppard JM. Muscular strength and power correlates of tackling ability in semi-professional rugby league players. *J Strength Cond Res* 29: 2071-2078, 2015.
 111. Suchomel TJ, Nimphius S, Bellon CR, Hornsby WG, Stone MH. Training for muscular strength: Methods for monitoring and adjusting training intensity. *Sports Med* 51: 2051-2066, 2021.
 112. Suchomel TJ, Nimphius S, Bellon CR, Stone MH. The importance of muscular strength: Training considerations. *Sports Med* 48: 765-785, 2018.
 113. Suchomel TJ, Nimphius S, Stone MH. The importance of muscular

- strength in athletic performance. *Sports Med* 46: 1419-1449, 2016.
114. Thomas C, Comfort P, Chiang C-Y, A Jones P. Relationship between isometric mid-thigh pull variables and sprint and change of direction performance in collegiate athletes. *J Trainology* 4: 6-10, 2015.
115. Thompson SW, Olusoga P, Rogerson D, Ruddock A, Barnes A. Is it a slow day or a go day?: The perceptions and applications of velocity-based training within elite strength and conditioning. *Int J Sports Sci Coaching* 18: 1217-1228, 2022.
116. Thompson SW, Rogerson D, Dorrell HF, Ruddock A, Barnes A. The reliability and validity of current technologies for measuring barbell velocity in the free-weight back squat and power clean. *Sports* 8: 94, 2020.
117. Thompson SW, Rogerson D, Ruddock A, Barnes A. The effectiveness of two methods of prescribing load on maximal strength development: A systematic review. *Sports Med* 50: 919-938, 2020.
118. Thompson SW, Rogerson D, Ruddock A et al. A novel approach to 1RM prediction using the load-velocity profile: A comparison of methods. *Sports* 9: 88, 2021.
119. Tomasevicz CL, Hasenkamp RM, Ridenour DT, Bach CW. Validity and reliability assessment of 3-D camera-based capture barbell velocity tracking device. *J Sci Med Sport* 23: 7-14, 2020.
120. Torrejon A, Balsalobre-Fernandez C, Haff GG, Garcia-Ramos A. The load-velocity profile differs more between men and women than between individuals with different strength levels. *Sports Biomech* 18: 245-255, 2019.
121. Tran TT, Lundgren L, Secomb J, et al. Comparison of physical capacities between nonselected and selected elite male competitive surfers for the National Junior Team. *Int J Sports Physiol Perform* 10: 178-182, 2015.
122. Tuchscherer M. *The Reactive Training Manual: Developing Your Own Custom Training Program for Powerlifting*. United States: Reactive Training Systems, 2008.
123. Verkhoshansky Y, Siff M. Autoregulating progressive resistance exercise. In: *Supertraining*. Rome, Italy: Verkhoshansky SSTM, 2009. pp. 261-264.
124. Verkhoshansky Y, Siff M. *Supertraining*. Rome, Italy: Verkhoshansky SSTM, 2009.
125. Vernon A, Joyce C, Banyard HG. Readiness to train: Return to baseline strength and velocity following strength or power training. *Int J Sports Sci Coaching* 15: 204-211, 2020.
126. Weakley J, Chalkley D, Johnston R, et al. Criterion validity, and interunit and between-day reliability of the FLEX for measuring barbell velocity during commonly used resistance training exercises. *J Strength Cond Res* 34: 1519-1524, 2020.
127. Weakley J, Mann B, Banyard H, McLaren S, Scott T, Garcia-Ramos A. Velocity-based training: From theory to application. *Strength Cond J* 43: 31-49, 2021.
128. Weakley J, McLaren S, Ramirez-Lopez C, et al. Application of velocity loss thresholds during free-weight resistance training: Responses and reproducibility of perceptual, metabolic, and neuromuscular outcomes. *J Sports Sci* 38: 477-485, 2020.
129. Weakley J, Morrison M, Garcia-Ramos A, Johnston R, James L, Cole MH. The validity and reliability of commercially available resistance training monitoring devices: A systematic review. *Sports Med* 51: 443-502, 2021.
130. Weakley J, Munteanu G, Cowley N, et al. The criterion validity and between-day reliability of the Perch for measuring barbell velocity during commonly used resistance training exercises. *J Strength Cond Res* 37: 787-792, 2023.
131. Weakley J, Ramirez-Lopez C, McLaren S, et al. The effects of 10%, 20%, and 30% velocity loss thresholds on kinetic, kinematic, and repetition characteristics during the barbell back squat. *Int J Sports Physiol Perform* 15: 180-188, 2020.
132. Weakley J, Till K, Sampson J, et al. The effects of augmented feedback on sprint, jump, and strength adaptations in rugby union players after a 4-week training program. *Int J Sports Physiol Perform* 14: 1205-1211, 2019.
133. Weakley J, Wilson K, Till K, et al. Visual kinematic feedback enhances velocity, power, motivation and competitiveness in adolescent female athletes. *J Aust Strength Cond* 27: 16-22, 2019.
134. Weakley JJS, Wilson KM, Till K, et al. Visual feedback attenuates mean concentric barbell velocity loss and improves motivation, competitiveness, and perceived workload in male adolescent athletes. *J Strength Cond Res* 33: 2420-2425, 2019.
135. Westgard JO, Hunt MR. Use and interpretation of common statistical tests in method-comparison studies. *Clin Chem* 19: 49-57, 1973.
136. Weyand PG, Sternlight DB, Bellizzi MJ, Wright S. Faster top running speeds are achieved with greater ground forces not more rapid leg movements. *J Appl Physiol* 89: 1991-1999, 2000.
137. Zourdos MC, Klemp A, Dolan C, et al. Novel resistance training-specific rating of perceived exertion scale measuring repetitions in reserve. *J Strength Cond Res* 30: 267-275, 2016.

著者紹介



Stuart Guppy :
Edith Cowan University の医療 & 健康科学部における講師。



Kristina Kendall :
Edith Cowan University の医療 & 健康科学部における講師。



G. Gregory Haff :
Edith Cowan University のストレングス & コンディショニングにおける教授。