

Keywords【プライミングエクササイズ: priming exercise、短期的反応: short-term response、神経筋系パフォーマンス: neuromuscular performance、レジスタンストレーニング: resistance training、ストレッチ-ショートニングサイクル: stretch-shortening cycle】

レジスタンスエクササイズやストレッチ-ショートニングサイクルエクササイズ刺激に対するプライミング反応の調節因子

Factors Modulating the Priming Response to Resistance and Stretch-Shortening Cycle Exercise Stimuli

Patrick M. Holmberg,¹ Ed.D., Peter W. Harrison,² Ph.D. David G. Jenkins,^{2,3,4} Ph.D.
Vincent G. Kelly,^{1,2} Ph.D.

¹ School of Exercise and Nutrition Sciences, Queensland University of Technology, Brisbane, Queensland, Australia

² School of Human Movement and Nutrition Sciences, The University of Queensland, Saint Lucia, Queensland, Australia

³ School of Health and Sport Sciences, University of the Sunshine Coast, Sippy Downs, Queensland, Australia

⁴ Applied Sports Science Technology and Medicine Research Centre, Swansea University, Swansea, Wales

要約

パフォーマンスを向上させる競技会前の方策として「プライミングエクササイズ」が注目を集めている。プライミングエクササイズは、刺激後48時間以内に多様な神経筋系のパフォーマンス尺度を向上させることが示されている。しかし、プライミング介入後のパフォーマンスに変化がないことや、有意に低下することを見出した研究も数多く存在する。このような研究結果の齟齬は、諸研究で利用された数多くの変数の違いによる可能性がある。また、プライミング刺激後のパフォーマンス反応は、個人特性の影響を受けることを示すエビデンスもある。そこで本稿では、先行研究のエビデンスを検証して、レジスタンスエクササイズやストレッチ-ショートニングサイクルエクササイズを含むプライミング刺激が、刺激後48時間以内のパフォーマンスを向上させるかどうかを特に強く決定する因子の特定を試みる。これまでのエビデンスに基づいてトレーニングの指針を提供するだけでなく、今後の研究の方向性も示す。

はじめに

身体パフォーマンスの能力向上の基礎となる適応を誘発するには(77)、特異的なトレーニング要求に繰り返し曝すことが必要である(150)。しかし運動には、一時的にポジティブなパフォーマンス反応を引き出す力もある(130,132)。研究によると、少量の運動刺激は神経筋系のパフォーマンスを一時的

に向上させる(132,145)。これは一般に活動後パフォーマンス向上(PAPE)と呼ばれる。PAPEを検証した研究は多く(12)、神経筋系の質の急性向上が示されているが(33,46,147)、パフォーマンス成果がポジティブな影響を受ける時間枠(約20分)が比較的狭い(23,46,85,86,132,133)。そのため、現場環境で利用することは難しいかもしれない。しかしエビデンスによると、この方策は、もう少し長い休息時間後に神経筋系の遅発性増強効果を誘発する可能性がある。諸研究において「プライミングエクササイズ」と呼ばれるこの比較的少量の運動刺激は、多様な身体能力を最大48時間、向上させる可能性がある(27,38,53,148)。

現在、プライミングエクササイズは、現場では競技会前の方策として利用されているが(70)、先行研究の結果は一致していない(38,44,53,57,69,79,80,101)。プライミングエクササイズを支持する最も強いエビデンスは、刺激後24時間以内にパフォーマンス尺度を測定した研究から報告されている(27,38,57,69,101)。一方、プライミングエクササイズ後、24~48時間の間にパフォーマンスの向上を見出した研究はきわめて限られている(69,114,148)。そして、刺激後48時間以内の複数の時点でパフォーマンスを検証した研究はほとんど存在しない。そのため、刺激がもたらす利益の経時的な変化はまだよくわかっていない。

先行研究の結果の不一致は、複数の因子によって説明される可能性がある(図1)。プライミングに対する反応は、刺激

激への反応は、エクササイズ課題、負荷量(セット数×レップ数×%1RM [任意単位]) (64)、強度(レジスタンスエクササイズにおける外部負荷) (74)、動作意識、回復期間に影響されるとみられる。先行研究では、トレーニング状態、筋力レ

ベル、筋線維の分布などの個人特性も、レジスタンスプライミング後のパフォーマンス反応の経時的変化に影響することが示されている(表1) (22,23,51)。

表1 レジスタンスエクササイズによるプライミング後の神経筋系パフォーマンスの反応

研究	被験者特性		急性プログラム変数				評価 間隔	神経筋系のパフォーマンス成果
	男性 (名)、 女性 (名)	レジスタンス トレーニング歴 体重(kg) 筋力レベル(kg)	レジスタ ンスエクサ サイズ課題	量	負荷	動作 意識		
Bartolomei ら (9)	12、0	6.3±3.4年 82.3±8.4kg 173.4 ±31.7kg	バックスク ワット	8×3 2,160 AU	90% 1 RM	不明	24、48 時間	↔ CMJのPP、ISOK 60、ISOK 180、IMTP のPF、IMTPのRFD、ISQのPF、ISQの RFD (全測定時点で)
Cook ら (27)	18、0	≥3年 93.7±8.3kg 約181±不明 約150±不明	バックスク ワット、ベン チプレス	3×3 3×3 3×3 3×3 2,286 AU	50% 3 RM 80% 3 RM 90% 3 RM 100% 3 RM	最大	6時間	↑ CMJのPP、3RMバックスクワットと ベンチプレス ↓ 40mのスプリントタイム
de Villarreal ら (38)	12、0	2~4年 76.9±8.0kg 158.3 ±24.8kg	パラレル バックスク ワット、有 負荷ジャン プスクワッ ト、パラレ ルバックス クワット	2×4 2×3 1,150 AU 2×4 2×2 2×1 1,190 AU 3×5 3×5 450 AU	80% 1 RM 85% 1 RM 80% 1 RM 90% 1 RM 95% 1 RM 45.5% 1 RM 681 AU 30% 1 RM	最大	6時間	↑ DJ 高 ↔ CMJ 高 ↔ 有負荷 CMJ 高 ↑ DJ 高 ↔ CMJ 高 ↔ 有負荷 CMJ 高 ↑ DJ 高と有負荷 CMJ 高 ↔ CMJ 高 ↔ DJ 高、CMJ 高、有負荷 CMJ 高
Ekstrand ら (44)	8、6	≥1年 95.1±26.9kg 不明	バックスク ワット、パ ワークリー ン	1×6 1×6 (失 敗まで) セットは テクニッ クの失敗 まで(×4) 不明	85% 1 RM 85% 1 RM 不明	最大	4~6 時間	↑ BOST ↔ CMJのPP 男女差がありうるが不明(男女のBOST の使用重量が一致していない)
Fry ら (53)	19、0	不明 72.8±14.1kg 163.7±不明	クリーンブ ル、スナッ チブル	5×3 3×3 2,040 AU	85% 1 RM	最大	約4時 間	反応者(6名) ↑ CMJ 高 ↑ スナッチとクリーン&ジャークの1RM 非反応者(13名) ↔ CMJ 高 ↔ スナッチとクリーン&ジャークの1RM
Gonzalez- Garcia ら (57)	10、1	不明 77.0±8.9kg 139.8 ±22.4kg 60.9 ±5.8% 1 RM (至適負荷)	パラレル バックスク ワット(ス ミスマシー ン)	2セット ×不明 2セット ×不明	80% 1 RM (速度低下 20%) V ₁ 負荷(速度 低下20%)	制御	6時間	↑ CMJ 高 ↑ 80% 1 RMのMVとMP ↔ V ₁ 負荷とP ₁ 負荷 ↔ CMJ 高、MV、MP、V ₁ 負荷、P ₁ 負荷

表1 レジスタンスエクササイズによるプライミング後の神経筋系パフォーマンスの反応(つづき)

研究	被験者特性		急性プログラム変数				評価 間隔	神経筋系のパフォーマンス成果
	男性 (名)、 女性 (名)	レジスタンス トレーニング歴 体重(kg) 筋力レベル(kg)	レジスタン スエクサ サイズ課題	量	負荷	動作 意識		
Gonzalez- Badillo ら (59)	9、0	2~4年 75.3±9.2kg 108.7 ±15.5kg 88.4±21.6kg	バックスク ワット、ベン チプレス	3×4 1,920 AU	80% 1 RM	最大	6、24、 48時 間	↔CMJ高 ↔SQとBP、V ₁ 負荷(全測定時点で)
Harrison ら (69)	15、0	≥1年 83.9±10.2kg 139±24.8kg	パラレル バックスク ワット、パ ラレルバック スクワット	1×3 1×3 2×2 780 AU 4×3 780 AU	67% 1 RM 77% 1 RM 87% 1 RM 65% 1 RM	最大 最大	8、24、 32時 間	↔CMJ高、CMの変位、制動局面の時間、 推進局面の時間(全測定時点で) ↑CMJの平均推進力(8時間後) ↑平均制動力(32時間後) ↑SQJ高(8時間後) ↔SQJの平均フォースと合計時間(全測 定時点で) ↑SQJ高(32時間後) ↔CMJ高、平均推進力、平均制動力、CM の変位、制動局面の時間、推進局面の時 間(全測定時点で) ↔SQJの平均フォースと合計滞空時間 (全測定時点で)
Howatson ら(75)	6、4	不明 81.2±12.2kg 60.0±3.7kg、 190.0 ±38.0kg、 107.5 ±12.0kg	スピードス クワット、 スプリット スクワット ジャンプ、 プッシュブ レス	4×5 不明	Borgの スケール の16~ 17/20RPE の30%	制御	24時 間	↓MVIC ↔CMJ高とCAR 男女差がありうるが不明(男女の相対的 負荷が異なる)
Mason ら (101)	13、0	≥1年 98.2 ±16.59kg 不明	可変抵抗 (弾性)バック スクワット、ベンチ プレス	4×3 560.4 AU	46.7kg(膝 関節と肘関 節の最大伸 展における 抵抗)	制御	1時間 45分	↔CMJのPF、PV、PP ↑BPのPF、PV、PP
Nishioka& Okada (114)	20、0	4.3±2.4年 71.2±7.4kg 142±28.4kg 2.22±4.4kg/ BM(筋力が強 い) 1.76±0.16kg/ BM(筋力が弱 い)	有負荷ジャ ンプスク ワット	5×4 800 AU	40% 1 RM	最大	24時 間	↑CMJ高 ↑CONのMF、MV、MP(筋力の強い被 験者) ↑ECCのMV、MP、RFD(筋力の強い被 験者) ↔CMJの変数(筋力の弱い被験者) ↔SJの変数(筋力の強い被験者と弱い被 験者) ↔RSI(筋力の強い被験者と弱い被験者)
Raastad& Hallen (121)	10、0	不明 84.5±4.2kg 169kg(3RM)	バックスク ワット、フ ロントスク ワット、レッ グエクステ ンション	3×3 3×3 3×6 2,340 AU	70% 3RM 70% 3RM 70% 6RM	制御	3、11、 22、 26、 30、33 時間	↔CMJ高(3、11、22、26、30時間後) ↑CMJ高(33時間後)

表1 レジスタンスエクササイズによるプライミング後の神経筋系パフォーマンスの反応(つづき)

研究	被験者特性		急性プログラム変数				評価 間隔	神経筋系のパフォーマンス成果
	男性 (名)、 女性 (名)	レジスタンス トレーニング歴 体重(kg) 筋力レベル(kg)	レジスタ ンスエクサ サイズ課題	量	負荷	動作 意識		
Raeder ら (123)	15、0	≥1年 77.4±8.0kg ≥自重	パラレル バックスク ワット(ス ミスマシー ン)	4×6 (TS) 2,040 AU 1×6 + 1×6 (DS) 1,500 AU 4×6 (AEL) 不明	85%1 RM 85%1 RM + 70%1 RM + 55%1 RM + 40%1 RM 100%→ 70%1 RM	制御	24、48 時間	↓ CMJ 高と RSI (24、48 時間後) ↔ MVIC (24、48 時間後) ↓ CMJ 高と RSI (24、48 時間後) ↔ MVIC (24、48 時間後) ↓ CMJ 高と RSI (24、48 時間後) ↔ MVIC (24、48 時間後) ↓ RSI (他の条件と比較して AEL の 24 時 間後)
Rud ら (128)	8、0	不明 73±7 kg 不明	パラレル バックスク ワット(ス ミスマシー ン)	3×3 約783 AU	約87%1 RM	制御	5 時間	↔ CMJ 高
Tsoukos ら (148)	17、0	6.4±3.9 kg 80.7±8.6 kg 163±29 kg	有負荷ジャン プスク ワット	5×4 800 AU	40%1 RM	最大	24、48 時間	↑ CMJ 高 (24、48 時間後) ↑ RSI (24 時間後) ↑ LP の RFD (24、48 時間後) ↔ LP の PF (24、48 時間後) ↑ CMJ 高、RSI、RFD (48 時間後と比較 して 24 時間後)

%1 RM の推計 (88)

↑=有意な増加の報告、↓=有意な減少の報告、↔=有意な変化なし(追加の統計値の報告なし)、AEL=伸張性過負荷の強調、AU=任意単位、BOST=バックワードオーバーヘッドショットスロー、BP=ベンチプレス、BM=自重、CAR=中枢活性化率、CON=短縮性、CM=カウンタームーブメント、CMJ=カウンタームーブメントジャンプ、DJ=ドロップジャンプ、DS=ドロップセット、ECC=伸張性、ISOK 60=等速性 60°/s、ISOK 180=等速性 180°/s、IMTP=等尺性ミッドサイル、ISQ=等尺性スクワット、LP=レッグプレス、MVIC=最大等尺性随意収縮、MF=平均フォース、MP=平均パワー、MV=平均速度、P₁=事前テスト条件で 1 m/s を誘発する負荷に対して達成される負荷パワー、PF=ピークフォース、PP=ピークパワー、PV=ピーク速度、RFD=力の立ち上がり率、RSI=反応筋力指数、RM=最大挙上重量、SQJ=スクワットジャンプ、TS=従来のセット、V₁=事前テスト条件で 1 m/s を誘発する負荷に対して達成される負荷速度

エクササイズ課題

先行研究によると、実施されるエクササイズ課題は、総合的なレジスタンスプライミングセッションの刺激に影響を及ぼす可能性がある。大多数の研究では、有負荷ジャンプスクワットも含めたスクワット動作が利用されていたが(27,57,101,148)、ウエイトリフティングエクササイズ(44,53)やベンチプレスのバリエーション(27,59,101)なども、レジスタンスプライミング刺激として利用されており、その後のパフォーマンスに影響を及ぼしうる。

刺激後の成果の向上を期待して最も広く利用されたレジスタンスプライミング課題は、スクワット動作であった(27,38,57,101,148)。しかし、それらの活動後に観察されたパフォーマンス反応は様々であった(38,59,69)。エクササイズの可動域の差は、力学的および生理学的要求に影響を及ぼす

ことが示されており(52)、スクワット課題後のパフォーマンス反応にも影響する可能性がある。強度が等しければ、浅いスクワットよりも深いスクワットのほうが力学的な仕事が多い(104)。しかし、スクワットエクササイズにおける可動域の差がプライミング反応にもたらす影響は、さほど大きくないかもしれない。例えば、同等の負荷量を用いたフルバックスクワットとパラレルバックスクワットはどちらも、同様のパフォーマンス反応を生み出した(59,69,128)。とはいえ、スクワットには多くのバリエーションがあり、現場環境でプライミング刺激として広く利用されていることを考えると(69)、代替となるスクワット動作(パーシャル、コンセントリック局面のみ、等尺性、シングルレッグなど)の効果を検証する必要がある。

スクワット動作ほど多くの研究が行なわれていないが、ス

ナッチ、クリーン&ジャーク、それぞれの派生形などのウエイトリフティングエクササイズも、その後のパフォーマンスを向上させることが示されている(44,53)。注目すべき点は、これらのエクササイズがバリストックであり、長い加速時間、運動単位動員数の多さ、高い筋の活性化を伴うことである(140)。Fryら(53)によると、高強度のウエイトリフティングの派生形は、カウンタームーブメントジャンプ(CMJ)高、および同日に行なわれた競技会のシミュレーションにおいて、スナッチとクリーン&ジャークのパフォーマンスを有意に向上させた。同様に、国内レベルの投擲競技の選手に高強度のワーククリーンを実施させると、4~6時間後にバックワードオーバーヘッドショットスローが有意な向上を示した(44)。これらの動作が多様な運動動作(スプリントやジャンプ)と類似していることを考えると(72)、効果的なプライミング刺激になりうるであろう。少数ではあるが、鍛錬されたアスリートにおいて、ウエイトリフティングエクササイズを実施した同日に増強反応がみられたことを示すエビデンスも存在する(44,53)。

上半身のレジスタンスプライミングエクササイズの影響を調査した研究は、現時点では限られている。しかしそれらの研究では、ベンチプレスのバリエーションによるプライミング後に、上半身の筋力とパワーが向上したことが報告されている(27,101)。Cookら(27)は、レジスタンストレーニング経験のあるラグビー選手に対してベンチプレスの高強度プロトコルを実施したところ、6時間後のベンチプレスの3RMが増加したことを報告した。また、州レベルのラグビー選手を対象として、低強度(最大伸展で46.7kg)の弾性抵抗を利用する可変抵抗プロトコル(108)を実施すると、2時間後のベンチスローエクササイズにおけるピークフォースとピークパワーの向上が観察された(101)。これと比べて、レクリエーションでレジスタンストレーニングを行なうアスリートに、ベンチプレスの高強度プロトコルを実施すると、複数の時点(6、24、48時間後)で被験者の至適負荷によるベンチプレス速度に小さな変化が観察されるに留まった(59)。以上の調査結果をまとめると、これらのレジスタンスプライミング方策は、鍛錬されたアスリートにおいて、同日内に上半身の筋力とパワーの尺度の向上を誘発する可能性がある(27,101)。しかし、これらの効果が、上半身の動作を伴う競技活動のパフォーマンスに転移するかどうかについては、さらに調査する必要がある。先行研究によると、エクササイズ課題はプライミングセッションの総合的な刺激を左右する可能性があり、レジスタンストレーニングで行なわれる仕事量は、課される生理学的要求(65)と遅発性増強反応に強い影響を及ぼす。

負荷量

「長期的」な筋力やパワーの向上を目的とするレジスタンス

トレーニングセッションは、一般に4,000 AU(任意単位)以上の負荷量を含む(157)。これに対して、48時間以内のパフォーマンスの向上をもたらしたレジスタンスプライミングトレーニングは、おおむね1,200 AU以下であった(38,69,101,148)。しかし、負荷量が同等であっても、レジスタンスプライミングエクササイズ後の反応は、エクササイズ刺激から神経筋系のパフォーマンステストまでの経過時間に強い影響を受けるとみられる。さらに先行研究によると、同様の負荷量であっても、トレーニング状態が、レジスタンスエクササイズ後の増強や疲労の表れに影響する(21,22,114)。レジスタンストレーニング経験のある被験者に対して、プライミングエクササイズで560~1,190 AUを含む負荷量を適用した研究では、8時間以内のパフォーマンスの有意な向上が報告されている(38,57,69,101)。トレーニング状態とプライミング後の神経筋系の尺度の関係に関するエビデンスは、まだ数が限られている。しかし、筋力の強い被験者は、比較的多い負荷量(2,040~2,286 AU)を利用しても、レジスタンスエクササイズ後の同じ時間枠でパフォーマンスの有意な向上を示した(27,53)。

比較的多量のレジスタンスエクササイズ後は、低頻度疲労(low-frequency fatigue)が発生して(11,22)、同日内のプライミング反応が隠される可能性がある。興味深いことに、データによると、レジスタンストレーニング経験のある被験者は、遅発性増強反応が誘発されることによって、疲労をもたらすエクササイズに耐えうると考えられる(22)。ミオシン重鎖(MHC)でII aの発現が大きい被験者は、動的なレジスタンスエクササイズの4~6時間後の等尺性の力の立ち上がり率(RFD)の回復が大きかった(22)。同日内の増強反応を誘発して疲労を相殺するには、運動後のアデノシン三リン酸(ATP)の回復における、MHCのタイプII a線維の酸化能が重要かもしれないと考えられている(22,62)。タイプII a線維の割合の多さは、タイプII a線維の相対的面積の大きさと強い相関関係にあり、筋力トレーニング歴の指標になる(51,52,54,142)。そのため、レジスタンスプライミングエクササイズ後の同日内の増強または疲労の程度は、トレーニング状態に影響される可能性がある(21,22)。しかし、このような筋の適応と、少量のレジスタンスプライミング方策に対する反応の関係をさらに調査することが必要である。少量のレジスタンスプライミングエクササイズは、この時間枠のパフォーマンスを効果的に向上させる可能性がある。

エクササイズ刺激の相対的な負荷量は、同日に完了したレジスタンスプライミングセッション後に(27,69)異なるホルモン応答を誘発して(87)、神経筋系のパフォーマンス尺度に影響を及ぼす可能性がある(26,32,34)。比較的多量の負荷(2,286 AU)によるレジスタンスプライミングエクササイズは、日内変動によるホルモン状態の低下を緩和して、同日の

パフォーマンス成果にポジティブな影響を及ぼすことが報告されている(27)。これに対して最近の研究では(69)、かなり少ない負荷量(780AU)を利用したレジスタンスプライミング刺激後、8時間以内のテストステロンとコルチゾールの濃度には変化がみられなかったが、神経筋系のパフォーマンスの向上はみられたことが報告されている。強度が一定であれば、概して負荷量が多いほど、急性テストステロン応答も大きい(15,61,125)。したがって、ホルモン応答の差は完了したセット数による可能性がある(27,69)。加えて、利用する筋量の多いエクササイズは、利用する筋量の少ないエクササイズよりも、高い急性テストステロン応答を刺激する(125,151)。Cookら(27)は全身のプライミング刺激を利用していたが、Harrisonら(69)のエクササイズプロトコルはスクワット動作だけであった。そのため、調査結果の不一致は、エクササイズ選択の違いによって説明される可能性がある。プライミング後のホルモン濃度の変化には差がみられたが、類似時間枠(5~8時間)における神経筋系のパフォーマンス反応はどちらの研究でも有意に向上した(27,69)。また、調査結果の違いは被験者のトレーニング状態の差とも関係している可能性がある。テストステロンは、鍛錬されたアスリートにおいて神経筋系のパフォーマンス尺度を予測することが示されている(26,27,31,33)。ただし、トレーニング経験の浅いアスリートの場合は、運動後のテストステロン濃度の急性上昇がパフォーマンス成果を予測しない可能性がある(69,154)。いずれにせよ、エクササイズ誘発性のホルモン変化が、レジスタンスプライミング刺激の同日のパフォーマンス反応に及ぼす影響をより良く理解するにはさらなる調査が必要である。

幅広い負荷量を利用するレジスタンスプライミングタイプのエクササイズの24~48時間後には、多様なプライミング後反応が報告されている(9,59,69,121,123,148)。この時間枠における、比較的多量のレジスタンスエクササイズ後のパフォーマンスの多様な変化を説明するものは、筋損傷による炎症反応であり、これが筋力とパワーの尺度に影響している可能性がある(9)。炎症反応はレジスタンスエクササイズの量によって異なり(9,121)、被験者の筋力レベルによっても

異なる(58)。これは、諸研究におけるプライミング後反応のばらつきを説明するかもしれない。等尺性と等張性のピークフォースと素早い力発揮の尺度は、レジスタンストレーニング経験のあるアスリートでは24時間で回復するが(9,121)、比較的经验の浅いアスリートでは、同様の負荷量(2,040 AU)で有意な低下が発生する(123)。しかしこれらの研究(9,121)では、プライミング後のパフォーマンスの向上はほぼ観察されなかった。これは、トレーニング経験が豊富な被験者にとっても、この時間枠でプライミング反応を誘発するには負荷量(2,160~2,340 AU)が適切ではなかった可能性を示唆している。対照的にTsoukosら(148)は同等のトレーニング経験を有する被験者を対象として、かなり少量(800 AU)の負荷によるレジスタンスプライミングエクササイズの24~48時間後に、同様のパフォーマンス尺度の有意な向上を報告した。これに対して、筋力の弱い被験者に同等の量(780~960 AU)の下半身のエクササイズを実施させると、48時間以内のパフォーマンス尺度がわずかに変化するに留まった(59,69)。入手可能なエビデンスに従うと、比較的多量の負荷を利用するプライミング方策を実施すると、48時間後の神経筋系のパフォーマンスが低下する可能性がある。

強度

高強度(≥80%1RM)(27,38,44,57,69,123)、中強度(約65%1RM)(69,121)、低強度(≤45%1RM)(38,75,101,114,148)のレジスタンスプライミングエクササイズに関する研究結果は一致していない(表2)。

高強度

プライミングエクササイズの量が比較的小さい場合、鍛錬されたアスリートにおいて、高強度レジスタンスエクササイズ後に短期的な神経筋系パフォーマンスの増大が一般に報告されている(27,38,44,53)。Cookら(27)とde Villarrealら(38)は、同等の強度で少量のベンチプレスとバックスクワット(80~95%1RMで2~3セット×3~4レップ)を実施した結果、トレーニングの6時間後に上半身と下半身の最大筋力

表2 48時間以内の神経筋系のパフォーマンス尺度を有意に向上させることが示されているレジスタンスエクササイズ強度 (27,38,44,53,57,69,101,114,121,148)			
強度	エクササイズ課題	負荷量の範囲(AU)	遅発性増強反応の時間枠
高強度(≥80%1RM)	バックスクワット、ベンチプレス、クリーン&スナッチプル、パワークリーン	780~2,286 AU	4~8時間
中強度(約65%1RM)	バックスクワット、フロントスクワット、レッグエクステンション	780~2,340 AU	8、33時間
低強度(≤45%1RM)	ジャンプスクワット、可変抵抗(弾性)ベンチプレス	560~800 AU	2~6、24、48時間

AU=任意単位、RM=最大挙上重量

とCMJ高の有意な増加を見出した。Fryら(53)も、スナッチ(85%1RMで5セット×3レップ)とクリーン&ジャーク(85%1RMで3セット×3レップ)のバリエーションを実施した結果、被験者の約70%において、CMJ高と午後の競技会におけるパフォーマンスの向上を見出した。さらに新しい研究では(69)、高強度の平行バックスクワットプロトコル(87%1RMで2セット×2レップ)を実施した8時間後に、スクワットジャンプ高の有意な増加が報告されている。また、最大筋力が同等の被験者において、高強度の平行スクワット(80%1RMで2セット、速度低下約20%)の6時間後に、CMJ高と速度とパワーの発揮能力が有意に向上したことが報告されている(57)。Fryら(53)やHarrisonら(69)の調査結果と同様に、被験者間には大きなパフォーマンスの差が存在した(57)。刺激に対する反応者と考えられる被験者群は、高強度レジスタンスエクササイズ後にパフォーマンス尺度が優れた向上を示した(57)。この結果もまたプライミング反応の相対的な性質を裏付けており、パフォーマンス成果を個人別に報告する必要性を示している(53,57,69)。国内レベルのクロスカントリースキー選手に対して、上半身と下半身の高強度プロトコル(85~90%1RMで3セット×3レップ)を実施した5時間後、午後に測定したCMJ高には変化がみられなかった(128)。このような結果に至ったのは、被験者が持久系アスリートであり、利用されたストレングスエクササイズにもパフォーマンステストにも慣れていなかったせいかもしれない(128)。さらに、5時間後には低頻度疲労を示すエビデンスが報告されている。これが増強効果を隠した、あるいは遅延させた可能性がある(128)。一般に持久力トレーニングは、筋線維タイプを酸化表現型へ移行させ(120)、MHCのタイプI線維は疲労耐性が高いが、解糖能力と酸化能力はどちらもタイプII a線維のほうが高いと考えられる(62)。タイプII a線維の運動後のATP回復能力は、同日にプライミングエクササイズを実施する方策にとって重要な意味をもつ可能性がある(22,62)。加えて、タイプII a線維の発現と筋力の関係はすでによく知られている(1,102,144)。そのため、一般にタイプI線維の割合が高く(142)、レジスタンストレーニングを控えがちな持久系アスリートは(82)、筋力レベルが低い傾向にある。先行研究によると、高強度のレジスタンスエクササイズ後は疲労が残存する可能性が高く(94)、筋力の弱い被験者の場合、同日内の増強効果が相殺されるかもしれない(59,69,114,128)。したがって持久系アスリートは、同日に実施された高強度のレジスタンスプライミングエクササイズから利益を得られない可能性がある(128)。これに対して、入手可能なエビデンスによると、鍛錬された筋力-パワー系アスリートは、高強度のレジスタンスエクササイズ刺激を与えた同日に、神経筋系のパフォーマンスの向上を示すと考えら

れる(27,38,44,53)。

高強度のレジスタンスエクササイズは、レップの持続時間の長さ、力積の大きさや合計仕事量の多さ(16)をもたらし、筋のピーク活性化と活性化率の高さ(66,131)を誘発する。したがって、残存疲労の可能性も高く、運動後の力発揮能力を低下させる可能性がある(94)。しかし、レジスタンストレーニングは疲労耐性を高め(22,23)、トレーニング状態が、同日に実施したレジスタンスエクササイズ後の増強または疲労の程度に影響することを示唆するエビデンスが存在する(21,22)。レジスタンストレーニング経験が豊富な被験者においては、疲労をもたらすレジスタンスエクササイズの4~6時間後の等尺性RFDの回復が大きかった(22)。鍛錬されたアスリートは遅発性増強反応を示して、低頻度疲労を相殺する可能性がある(22)。注目すべき点は、高強度レジスタンスエクササイズ刺激後の6時間以内に下半身のパフォーマンスの向上が観察された被験者は、バックスクワットの相対1RMが自重の2倍であったことである(27,38,44,53)。これに対して、筋力の弱い被験者は、高強度のレジスタンスプライミングエクササイズから8時間以内のパフォーマンスに、わずかな変化しか認められなかった(59,69,128)。したがって、高強度のレジスタンスエクササイズを含むレジスタンスプライミング方策は、鍛錬されたアスリートにとっては効果的かもしれないが、トレーニング経験の浅いアスリートに対しては強い疲労を招いて、同日の増強効果を隠すか遅延させる可能性がある。

レジスタンストレーニングは、急性の力学的負荷に伴う筋の負担と損傷、および神経筋系の機能の低下を最小化することが示されている(5,43,55,60,117-119,149)。運動後の筋の修復と再生の過程は、レジスタンストレーニングに適応するにつれて効率が向上する(41,60,76,119,155,156)。Gordonら(60)によると、トレーニング状態は、レジスタンスエクササイズの4時間以内の炎症反応にポジティブな影響を及ぼす。また、筋の適応は抗炎症反応を促進して、筋損傷を悪化させる最初の炎症反応を抑制し(56,112)、運動後の組織の迅速なリモデリングを促す(95,119)。運動後の筋の急性負担と損傷に対して、レジスタンストレーニングは保護的な役割を果たす。したがってこれらの調査結果は、鍛錬された筋力-パワー系アスリートは、鍛錬されていないアスリートと比べて、レジスタンスプライミングエクササイズ後の、同日の増強反応が優れているとする仮説を裏づける可能性がある。

高強度のレジスタンストレーニングは、8時間以内に有益なプライミング後反応を誘発しうるのは先行研究によって示されているが(27,38,44,53,57,69)、24~48時間のパフォーマンスの向上を示す研究は数が限られている(69,121)。多様なトレーニング経験を有する被験者に対して、上半身と下半身の高強度レジスタンスプライミングエクササイズを実施し

た研究によると、等尺性と等張性のピークフォースと素早い力発揮の尺度は、その後の数日間にわたっておおむね変化がなかったか、あるいは低下した(9,59,69,123)。先行研究によると、高強度レジスタンストレーニング後のパフォーマンスの回復は二相性を示す。すなわち、神経筋系の機能は運動直後に低下し、その後、3~7時間は回復するが、11~22時間で再び低下する(121)。神経筋系の機能の2回目の低下は、最初の回復期にはまだ始まっておらず11~22時間の間で進行する筋損傷に対する、運動後炎症反応に起因する可能性が高い(6)。この結果と、筋損傷の受けやすさにトレーニング状態が影響することを考え合わせると(60,106)、鍛錬されたアスリートは、鍛錬されていないアスリートよりも、高強度レジスタンスエクササイズ後の24~48時間のプライミング後反応が優れていると考えることができるであろう。しかし、トレーニング状態が、高強度レジスタンスエクササイズ刺激の48時間後のプライミング後反応にどのように影響するかを理解するには今後の調査が必要である。

中強度

中強度のレジスタンスエクササイズを含むレジスタンストレーニングは、高強度レジスタンスエクササイズよりも長い期間にわたって神経筋系のパフォーマンスを向上させる可能性がある(69,121)。Raastad&Hallen (121)によると、鍛錬されたアスリートを対象として、レジスタンスエクササイズプロトコルの中強度(70%3RM)と高強度(100%3RM)を比較すると、後者のほうが、CMJ高の低下が大きく、パフォーマンスの回復が遅かった。高強度では、33時間後までパフォーマンスが回復しなかったが、中強度(~65%1RM)では、3時間後にはすべての変数が基準値まで回復していた(121)。Harrisonら(69)は同様の強度(65%1RM)を利用して、鍛錬されていないアスリートにおいて、32時間後にCMJとスクワットジャンプ高の向上を見出した。ただし、高強度プロトコルではスクワットジャンプ高の有意な向上が認められたが、中強度プロトコル後8時間以内にはこれらの尺度の向上が認められなかった(69)。この結果はRaastad&Hallen(121)と一致している。これは、中強度のレジスタンスプライミング方策を利用すると、翌日のパフォーマンスを向上させる可能性があるが(69,121)、高強度レジスタンスエクササイズは同日のパフォーマンスを向上させる可能性があることを示唆している(27,38,44,53)。

低強度

高強度および中強度のレジスタンスエクササイズとは対照的に、低強度を利用した研究では、48時間以内のパフォーマンスの向上は概して見出されなかった(38,57,75,101)。レジ

スタンストレーニング経験のある被験者において、低強度(約45%1RM)のジャンプスクワットの6時間後、ドロップジャンプ(DJ)高と有負荷のCMJ高は増加したが、CMJ高は変化しなかった(38)。さらに、同様の強度(30%1RM)の平行バックスクワットの6時間後には、DJ高と有負荷と無負荷のCMJ高がわずかに変化した(38)。これらの結果は、低強度のレジスタンスエクササイズをバリスティックに実施することによって、神経筋系のパフォーマンスが向上する可能性を示唆している。低強度の可変抵抗ベンチプレスプロトコルを実施したところ、2時間後に、上半身の筋力とパワーの尺度が向上したが、バックスクワットで同じプロトコルを利用すると、鍛錬されていないアスリートのCMJパフォーマンスには影響が生じなかった(101)。また、レジスタンストレーニング経験のある被験者において、低強度のバックスクワットプロトコルの6時間後、被験者の至適負荷による下半身の速度とパワーが変化しなかった(57)。これに対して、低強度(40%1RM)のジャンプスクワットプロトコルの24時間後と48時間後には、レジスタンストレーニング経験のある被験者のCMJ高、反応筋力指数、等尺性RFDが増加した(114,148)。しかし、低強度(約30%1RM)プロトコル(スクワット、スプリットスクワット、プッシュプレス)の24時間後、同等のレジスタンストレーニング経験のある被験者の等尺性ピークフォースは低下し、CMJ高と中枢活性化率はわずかな変化に留まった(75)。低強度レジスタンスエクササイズと比べて、高強度レジスタンスエクササイズが大きな筋の活性化を誘発することを考慮すると(66,131)、プライミングエクササイズの影響は、運動単位の動員の程度と関連している可能性があると考えてよいであろう。

動作意識

素早い力発揮の意識を伴うレジスタンスプライミング刺激は(27,38,44,114,148)、その意識を伴わない運動と比べると、神経筋系のパフォーマンスの短期的向上の誘発に優れているとみられる(57,101,121,123,128)。測定時点は異なるものの(6時間に対して24時間と48時間後)、同等の量で対照的な強度(80~95%1RMと0~45%1RM)を利用して、最大の動作意識で実施するように指示すると(27,38,114,148)、力の発揮能力の増大が観察された。一方、Raastad&Hallen (121)は、中強度のスクワットプロトコルをゆっくりと制御した方法で実施させると、30時間以内に筋の収縮性とCMJ高の向上を見出さなかった。これに一致して、3つの異なる高強度バックスクワットプロトコルを、鍛錬されていないアスリートに動作スピードを意図的に低下させて実施した24時間後と48時間後に、等尺性ピークフォース、CMJ高、反応筋力指数の有意な低下が観察された(123)。エリートレベルのアスリート

において、下降局面を制御して実施する上半身と下半身の高強度プロトコルの5時間後、CMJ高は変化しなかった(128)。さらにMasonら(101)は、Raastad&Hallen(121)、Raederら(123)、Rudら(128)よりも大幅に低い強度を利用した結果、少量の可変抵抗トレーニングプロトコル(バックスクワットの伸張性局面をゆっくりと制御して実施する)の2時間後に、CMJのピークフォース、ピーク速度、ピークパワーの低下を報告した。同様にGonzalez-Garciaら(57)は、被験者の至適負荷を利用する最大下の動作意識によるスクワット介入の6時間後に、CMJ高と低強度スクワットの平均速度とパワーが向上しなかったことを見出した。これらの結果は、プライミング反応を誘発するには、様々な強度の変数にかかわりなく、エクササイズのROMの全範囲で動作を最大化しようとする意識が必要であることを示している可能性がある。素早い力発揮を意識しない動作と比べると、素早い力発揮を意識する動作はより多くの運動単位の動員を刺激して、運動力学的出力を高める可能性がある(10,13)。動作速度の最大化意識を伴う長期的トレーニングは、素早い力発揮の最大の向上を招く(13)。そのため、プライミング課題における素早い力発揮の意識もまた、遅発性増強反応に同様の影響を及ぼすと考えられる。

バリスティックな意図(最大努力で負荷を加速させる)(63)をもってレジスタンスエクササイズを行なうことは、神経筋系の活性化を変化させて(45,111)、プライミング後のパフォーマンスにポジティブな影響を及ぼしうる。諸研究によると、鍛錬された被験者にバリスティックなスクワットのバリエーションを実施させた6時間後(38)、24時間後と48時間後(114,148)に神経筋系の尺度の向上がみられた。これに対して、接地状態を保ちながらできるだけ速く負荷を動かすように指示すると、動的なスクワットは、これらの時間枠において、類似のパフォーマンス尺度の小さな向上(38)と有意な減少(75)を誘発した。このような結果の齟齬は、非バリスティックな方法で実施されたレジスタンスエクササイズでは、(特に低強度の場合)短縮性局面の最終端で必然的に負荷の減速が発生して、速度、発揮筋力、筋の活性化の低下を伴うことによって説明される可能性がある(45)。非バリスティックなエクササイズと比べると、バリスティックな課題は加速局面が長く、運動単位の動員数が多くなる(45,111)。これは、パフォーマンスの優れた短期的向上を誘発する可能性がある。プライミング運動によって遅発性増強反応を最大化するには、その後のパフォーマンスの神経筋系経路に特異的でなければならないことを示唆するエビデンスが存在する(27,38,148)。そのため、非バリスティックな方法で実施されるエクササイズは、重要な競技動作(スプリントやジャンプなど)との動的一致が制限され、プライミング刺激が抑制される

可能性がある(28,29)。

ストレッチ-ショートニングサイクル課題

最大スプリントと無負荷ジャンプエクササイズは、力発揮の素早い増加を伴い、高いパワー発揮の達成を可能にする課題である(122,141)。これは、プライミング後のパフォーマンスにポジティブな影響を及ぼす可能性がある。しかし、先行研究が報告するこれらのプライミング方策による結果は一致していない(表3)(27,38,79,80,105,143)。スプリントプライミングに関する調査結果の不一致は、スプリント刺激、セッションの合計量、レップ間の回復時間、個人特性、スプリント刺激と神経筋系のパフォーマンステストまでの時間の違いに起因する可能性がある。実施方法がばらついているため、ジャンプエクササイズの強度を定量化することは難しい。しかし、これらの課題後のプライミング後反応は、やはり、アスリートの身体特性(トレーニング状態、課題への慣れ、形態測定値など)に対するレップ数に影響されるとみられる(17)。

最大スプリント

研究数は限られているものの、最大スプリントトレーニング後に、鍛錬されたアスリートにおける短期的なパフォーマンスの向上が示されている(27,129)。Cookら(27)は、鍛錬されたラグビーユニオンの選手に合計距離200m(5×40m)のスプリントを実施させた。その結果、6時間以内の40mのスプリントタイムが向上した。同様の被験者に対して、合計スプリント量を20%増加させて実施しても(240m)、5時間後の40mのスプリントタイムが短縮し、CMJ高が向上した(129)。しかし、スプリントパフォーマンスの向上が観察されたのは、6×40mのスプリントプロトコルの最初の2レップだけであった(129)。このプロトコルではスプリント量を増加させただけでなく、各レップの途中に180°の方向転換を含めており、そのせいで、直線スプリントと比べて作業負荷が増加したとみられる(2)。この2点の研究では、レップ間の回復時間20秒(129)と60秒(27)が利用されていた。これに対してJohnstonら(79,80)は、最大努力によるスプリントを6×50m、レップ間の休息5分で行なわせた(エリートクラスのコーチが推奨する最大スプリントトレーニングにおけるレップ間の休息時間と一致)(49)。それにもかかわらず、この最大スプリントセッションは、セッション直後に乳酸濃度の有意な上昇をもたらした(79,80)。これらの研究(27,79,80,129)では、被験者のトレーニング状態に対するスプリント距離はほぼ同等である。この点を考慮に入れると、おそらくCookら(27)とRussellら(129)が処方したレップ間の休息インターバルの短さが、セッション後にJohnstonら(79,80)と同等以上の乳酸濃度をもたらしたといえるだろう。また、事後テストの

時点で乳酸濃度は基準値に戻っており、神経筋系の特質が回復したと考えられる(27,129)。これはJohnstonら(79,80)の結果と一致している。そのため、先の2点の研究(27,129)で報告されている神経筋系のパフォーマンス尺度の最初の回復は、

主として代謝副産物の除去によるものであるだろう(42)。しかしこれでは、6時間以内の最大スプリント能力の向上が説明できない(27,129)。鍛錬されたアスリートでは同日の増強反応が誘発されるため、疲労をもたらすレジスタンスエクササ

表3 ストレッチ-ショートニングサイクル課題に対するプライミング後の神経筋パフォーマンスの反応を調査した研究のまとめ

研究	被験者特性		急性プログラム変数		評価間隔	神経筋系のパフォーマンス成果
	男性(名)、女性(名)	レジスタンストレーニング歴 体重(kg) 筋力レベル(kg)	ストレッチ-ショートニング サイクル課題	量		
Bachero-Mena (8)	15、0	不明 71.9±5.9kg 不明	レジスティッドスレッド トローイング(0、20、40、60、80%BM)	8×20m 160 AU	24時間	↔CMJ高、T10m、T20m、T1020m ↓ISOKの膝関節屈曲のMP(20%BMで)
Cookら(27)	18、0	≥3年 93.7±8.3kg 約181±不明 約150±不明	スプリント	5×40m 200 AU	6時間	↓40mスプリントタイム ↔3RMバックスクワットとベンチプレス ↔CMJのPP
de Villarrealら(38)	12、0	2~4年 76.9±8.0kg 158.3± 24.8kg	DJ(至適高)	3×5 15 AU	6時間	↔DJ高、CMJ高、有負荷CMJ高
Johnstonら(79)	18、0	≥2年 99.4±8.6kg 不明	最大スプリント	6×50m 300 AU	2、24時間	↔CMJ高、PP、相対的PP、RFD(2時間後) ↓CMJ高、RFD(24時間後)
Johnstonら(80)	15、0	≥2年 100.5± 10.5kg 170±20kg	最大スプリント	6×50m 300 AU	2、24時間	↔CMJ高、PP、相対的PP、RFD(2時間後) ↓CMJ高、PP、相対的PP(24時間後)
McCaulleyら(105)	10、0	≥2年 92.4±9.5kg 170.8± 24.9kg	無負荷ジャンプスクワット	8×6 48 AU	1、24、48時間	↔ISQのPF、ISQのRFD(全測定時点で)
Raederら(123)	15、0	≥1年 77.4±8.0kg ≥1.0×自重	DJ(60cm)	4×15 60 AU	24、48時間	↓RSI(24、48時間後) ↔ISQのPF(24、48時間後)
Russellら(129)	15、0	不明 98.2±8.3kg 不明	最大スプリント	6×40m(180°方向転換) 240 AU	5時間	↑CMJ高 ↓6×40mの反復スプリントプロトコル(180°方向転換)の最初の2レップのスプリントタイム
Thomasら(143)	10、0	>3年 85±12.0kg 126.0± 14.0kg	無負荷ジャンプスクワット	10×5 50 AU	24、48時間	↓MVIC(全測定時点で) ↓VA(24時間後) ↓VA _{TMS} (24時間後)

%1RMの推計(88)

↑=有意な増加の報告、↓=有意な減少の報告、↔=有意な変化なし(追加の統計値の報告なし)、AU=任意単位、BM=自重、CMJ=カウンターストップジャンプ、DJ=ドロップジャンプ、ISOK=等速性、ISQ=等尺性スクワット、MP=平均パワー、MVIC=最大随意等尺性収縮、PF=ピークフォース、PP=ピークパワー、RFD=力の立ち上がり率、RSI=反応筋力指数、T10m=10mスプリントタイム、T20m=20mスプリントタイム、T1020m=10~20mのスプリントタイム、VA=随意的な筋の活性化、VA_{TMS}=経頭蓋磁気刺激による随意的な筋の活性化

イズに耐えることができるとするデータが存在する(22)。しかし、最大スプリントセッション後のこの反応については今後の調査が必要である。

先行研究によると、神経筋系の機能は、スプリントプライミング方策後の筋損傷の影響を受ける(50,79,80,89,122,127)。広いROMで大きな力と速い角速度を伴う運動は、一般に筋損傷をもたらすことが示されている(19,115,137)。そのため、スプリントプライミングセッション後は筋損傷の可能性が高まる。しかし筋損傷反応は、激しいトレーニング後の24~48時間でピークに達し、約4日で消散することが示されている(37)。したがって、スプリントプライミング刺激の同日の増強反応には影響を及ぼさない可能性がある。しかしエビデンスによると、筋損傷そのものではなく、筋損傷による炎症反応が最終的に神経筋系のパフォーマンスに影響を及ぼすと考えられる(42,79)。炎症反応は運動の2~6時間後に始まり(6)、最大スプリントトレーニング後の2~24時間で関連マーカー(クレアチンキナーゼなど)が上昇する(79,80)。そのため、この時間枠では神経筋系の機能が低下する可能性がある。加えて、最大スプリント後の回復は二相性であることが示されている。すなわち、神経筋系のパフォーマンスはトレーニング直後に低下し、その後、2時間で回復するが、24時間後には再び低下する(79,80)。しかし、最大スプリントの2時間以上後、および同日の炎症反応と神経筋系の反応を調査した研究は存在しない。そのため、スプリントプライミング運動後の炎症反応が疲労の可能性を高めて、同日の増強効果を隠す、あるいは遅延させるかどうかは今のところ不明である。この方策の効果を調査した研究は数少ないが、少量(≤ 240 m)の最大スプリントが、鍛錬されたアスリートにおいて、6時間以内に有益なプライミング後反応を誘発することを示すエビデンスが存在する(27,129)。ただし、至適トレーニング変数はまだ不明である。

レジスティッドスプリント

最も多く利用されているスプリントトレーニング様式のひとつは、水平面の動作によって、負荷をプッシュまたはプルするレジスティッドスプリントである(18)。レジスティッドスプリントは、急性の身体的出力と出力効率のどちらも、外部負荷無しのスプリントよりも大きく向上させる可能性がある(35,83,99,100,103,116)。Kawamoriら(83)によると、レジスティッドスプリントにおける全身の大きな前傾は、アンレジスティッドスプリントよりも大きな力の適用を可能にする。さらに、レジスティッドスプリントは、鍛錬されたアスリートにおいて、高いピークフォースと力の立ち上がり率を誘発することが示されている(99,100)。最大動作意識で行なう高強度のレジスタンスエクササイズのパライミング刺激は、短

期間の神経筋系パフォーマンスを向上させる(27,38,44,53)。同じく、レジスティッドスプリントはバリストックに行なわれ、加速局面が長く、運動単位の動員数が多く、筋の活性化が高い(99,100,116)。そのため、レジスティッドスプリントを含むプライミング方策も、短期的な神経筋系パフォーマンスを向上させると考えることができる。

重い負荷によるレジスティッドスプリントは力学的仕事を増やすため、残存疲労の可能性があり(8)、遅発性増強効果の表れに影響すると考えられる。アンレジスティッドスプリントと比較すると、多様な負荷(20、40、60、80%自重)を利用するレジスティッドスプリント(8×20m)は、鍛錬された被験者において、セッション直後の乳酸濃度を大きく上昇させ、CMJ高を低下させ、高い疲労指数([100×合計スプリント時間/理想のスプリント時間]-100)をもたらした(8)。しかし、負荷の大きさと関連して、これらの尺度にはかなりの差異がみられた(8)。つまり、負荷が増大するにつれて、パフォーマンスの低下が有意に大きくなった(8)。これらの結果をみると、重い負荷を利用するレジスティッドスプリントは、より大きな代謝摂動と身体パフォーマンスの低下をもたらす(8)。Johnstonら(79,80)の研究と同様に、すべての負荷条件で24時間後に炎症マーカーの有意な上昇が観察された。条件間に差異はなかった(8)。しかし、スプリント完了後、同日内のこれらの尺度の変化は調査されていない。したがって、レジスティッドスプリントプライミング方策がもたらす利益の経時的変化は不明である。しかし、少量の最大スプリントトレーニング後、神経筋系パフォーマンスは主に代謝副産物の除去によって最初の回復を示す(42,79,80)。興味深いことに、Johnstonら(79,80)が報告したセッション後の乳酸濃度の上昇(約10mmol/L)は、レップ間の休息時間が異なるにもかかわらず(5分と2分)、Bachero-Menaら(8)において最も重い2つの負荷条件で観察されたものと同等であった。そのため、これらの研究における代謝反応の類似は、Johnstonら(79,80)とBachero-Menaら(8)の1回のスプリント距離の差(50mと20m)も含めて、セッション量の差(300mと160m)によって説明されるかもしれない。とはいえ、Johnstonら(79,80)の調査結果と同じく、同様の時間枠で乳酸濃度が基準値に戻って、神経筋系の特質が回復したと考えられる(8)。また、神経筋系パフォーマンスの2回目の低下(24時間後)(8,79,80)は、筋損傷に対する運動後炎症反応に起因するとみられる(6)。しかし、アンレジスティッドスプリントプライミング刺激を含む諸研究で示されているのと同じく(27,129)、レジスティッドスプリントが同日の増強反応を誘発するかどうかを検証するには、さらなる調査が必要である。

ジャンプエクササイズ

数少ない調査結果によると、無負荷のジャンプエクササイズを含むプライミング方策後、48時間以内にパフォーマンス尺度がわずかに上昇したケースと(38,105)、大きく低下したケースがある(123,143)。この不一致はジャンプエクササイズ刺激、セッションの合計量、個人特性、ジャンプ課題からパフォーマンス測定までの時間の違いによると考えられる。de Villarrealら(38)は、事前条件で被験者のパワー出力を最大化した高さからのDJ(3×5:15 AU)を、プライミング刺激として利用した。その結果、鍛錬された被験者において6時間後のCMJのパフォーマンスがわずかに向上した。CMJのパフォーマンスは、無負荷時と制動時の力の発揮率の大きさと、無負荷局面と短縮性局面の時間の短さに関連している(84,90,93)。力を素早く発揮する能力は、筋の性質(タイプII線維の筋サイズ、相対面積、割合)に依存するだけではない(66,68)。特に運動単位放電率の増加の結果としての(39,96)、収縮開始時の筋の活性化の増大に主に依存する(4,96)。さらに、力発揮の経時的変化は、おそらく収縮組織から骨への効果的な力の伝達のために、筋腱スティフネスの影響を受けると考えられる(14,67,91,126)。注目すべき点は、素早い筋の伸張運動を伴うエクササイズ後の最初の筋損傷反応は、筋の腫脹とスティフネスの増加を特徴とすることである(6,24,25,42)。力の伝達率は組織のスティフネスの影響を受けるため(14,91,126)、活動する筋のスティフネスの変化はRFDに影響を及ぼすと考えられる(96)。タイプIV求心性線維は、SSCタイプの運動後の短期的回復における筋圧の増加と炎症細胞の放出によって再活性化されることを示すエビデンスが存在する(20,42,71)。そのため、抑制反応を誘発する炎症過程による、エクササイズ誘発性の筋のスティフネスの増加が、高速動作における筋の伸張活動を一時的に低減して、筋損傷の悪化を防ぐことはありうる。これは筋束-腱関係を至適化して、ジャンプ課題において、大きな関節角速度におけるパワー出力を向上させる可能性がある(92)。この仮説は、レジスタンスプライミングエクササイズ後にCMJの力-時間特性の向上を報告する先行研究によってある程度裏づけられるかもしれない(27,69,114)。鍛錬されたアスリートの場合、遅発性増強反応がプライミング刺激に伴う疲労反応を相殺して、同日のパフォーマンス成果が向上すると考えられる(22)。これは、プロのバレーボール選手を対象として、少量のDJを実施した同日にジャンプパフォーマンスの向上を報告したde Villarealら(38)の研究結果を説明するかもしれない。ただし、この時間枠におけるジャンプエクササイズに対するプライミング後反応を検証することが必要である。

先行研究によると、ジャンプエクササイズは、筋損傷とそれに伴う炎症のために(6,20,42,47)、24~48時間でプライミン

グ反応を誘発するには、効果的なエクササイズ刺激ではない可能性がある(105,123,143)。レジスタンストレーニング経験のあるアスリートにおいて、ボックス高60cmのDJ(4×15:60 AU)は、24時間後と48時間後に動的発揮筋力を低下させた(123)。DJよりも強度は低いものの(17)、同様の量の無負荷ジャンプスクワットは、多様なプライミング後反応をもたらした(105,143)。筋力の強い被験者においては、このプライミング刺激(8×6:48 AU)は、24時間後と48時間後に等尺性ピークフォースとRFDにわずかな変化をもたらした(105)。対照的に筋力の弱い被験者においては、類似した介入(10×5:50 AU)が同じ時間枠において、同様の尺度を有意に低下させた(143)。SSCタイプの多量のエクササイズ課題の24時間後には、循環白血球の遅発性増加が報告されている(20,42)。この免疫反応は、IL-6が媒介する(97,139)コルチゾール濃度の上昇にある程度起因する(48)。興味深いことに、SSCタイプの高強度エクササイズの24時間以内に、IL-6がタイプIII/IV求心性線維を活性化させて、神経筋系の活性化を抑制するデータが存在する(3,42,71,134)。同様の運動の24時間後に、神経筋系のパフォーマンスと足並みを揃えてクレアチンキナーゼの活性の増大が示されているため(7,20,42,47,73)、同じ時間枠に観察されたジャンプエクササイズ課題後のパフォーマンスの低下は(123,143)、筋損傷に対する遅発性炎症反応と関係しているかもしれない。加えて、筋内圧などの力学的因子やサブスタンスPは、激しいジャンプトレーニング後の48時間以内に、抑制反応を促す求心性線維を活性化させることが示されている(36,42)。そのため、これは類似のプライミングエクササイズ刺激の24時間後と48時間後の神経筋のパフォーマンス反応にも影響すると考えられる(3,78,123,134,143)。先行研究のエビデンスによると、ジャンプエクササイズ刺激後の24~48時間の遅発性増強効果の表れは、炎症誘発過程によるタイプIII/IV求心性線維の活性化と、平行する筋損傷や力学的因子の多様な組み合わせの影響を受ける可能性がある(3,20,42,71,113)。

筋損傷に対する遅発性反応の抑制は、鍛錬されていない被験者よりも鍛錬された被験者における、ジャンプトレーニング後の数日の回復の速さを説明することが見出されている(81,110)。エクササイズの量の多さと60cmというDJ高に比して、被験者の筋力レベルが低いことを考えると、Raederら(123)が、24時間後と48時間後にパフォーマンスの有意な低下を報告したことは驚くべきことではない。また、McCaulleyら(105)とThomasら(143)は同様のジャンププロトコルを利用したが、神経筋系のパフォーマンス反応が食い違っていた。この差も、被験者のトレーニング状態によって説明される可能性がある。SSCタイプのエクササイズ課題を実施した48時間後に、テストステロン濃度の上昇が見出されている(20)。

テストステロン濃度のこの遅発性上昇は運動誘発性の白血球増加と関連づけられており(97,98)、筋損傷による異化効果を相殺する試みとして説明されるかもしれない(20)。プライミング方策の24時間後と48時間後には、神経筋系パフォーマンスのわずかな向上だけでなく、テストステロン濃度の低下も観察されている(105)。これは、そのプライミング介入が筋損傷反応を誘発しない可能性を示唆している。対照的にThomasら(143)は、同じ時点で神経筋系パフォーマンスの低下と主観的な筋痛の高まりを報告した。これは、運動誘発性の筋損傷を示唆している可能性がある(146)。先行研究に従うと、ジャンプエクササイズは、特に鍛錬されていないアスリートにおいては、48時間以内のプライミング反応を誘発する効果的な運動刺激ではないかもしれない。しかし、これらの研究で一般に利用されているエクササイズ変数が、遅発性増強の発生にとって至適ではない可能性もある。そのため、多様なジャンプエクササイズを少量で実施することによるプライミング反応をさらに調査する必要がある。

結論と現場への応用

プライミングエクササイズは、48時間以内に多様な筋力とパワーの尺度を向上させることが示されている(図2)(27,38,57,69,101,114,148)。しかし、同じ時間枠内でプライミング後パフォーマンスが変化しなかったこと、あるいは有意に低下したことを報告する研究も多い(38,59,75,79,80,123,128)。研究結果の齟齬は、諸研究で利用されている様々な変数の違いによると考えられる。プライミングエクササイズを支持する最も強いエビデンスは、鍛錬されたアスリートを対象として、少量高強度のレジスタンスエクササイズ刺激を最大の動

作意識によって実施させ、6時間以内にパフォーマンス尺度を測定した研究から報告されている(27,38,44,53)。また、最大スプリントが、鍛錬されたアスリートにおいて、同日内に有益なプライミング反応を誘発する可能性を示唆する研究も少数ながら存在する(27,129)。さらに、バリストックに実施する中強度と低強度のスクワットのバリエーションは、24～48時間の間、遅発性増強反応を誘発することが示されている(69,114,148)。しかし、特にSSC課題を含む場合、プライミングタイプのエクササイズセッション後、数日間パフォーマンスが低下することが多くの研究によって報告されている(8,9,75,79,80,123,143)。この結果は、プライミングエクササイズ後に同日の増強反応を隠す可能性のある残存疲労の高さを示唆している。そのため、専門職は、相対的なプライミング刺激の大きさと、エクササイズ刺激および競技会の時間差に注意を払う必要がある(表4)。

一般にプライミングエクササイズ方策は、競技パフォーマンスの向上を目的として競技会当日に処方される(70)。そこで、このような活動を実施する場合は、競技関連課題の累積効果に注意を払う必要がある。練習と試合の高密度スケジュールがもたらす疲労反応が合わさると(109,136,152,153)、発揮される筋力とパワーを低下させる可能性がある(40,135,138)。パフォーマンス成果との明らかな関係を考えてみると、力発揮能力の低下は遅発性増強を発生させる上で望ましいものとはいえない。注目すべき点は、競技系アスリートを対象としてプライミングタイプのエクササイズを利用したほとんどの研究は、プレシーズンかレギュラーシーズンの最中に行なわれていることである(27,38,79,80,101,128)。つまり、この時期に回復期間を減らし、トレーニングの量と強度を

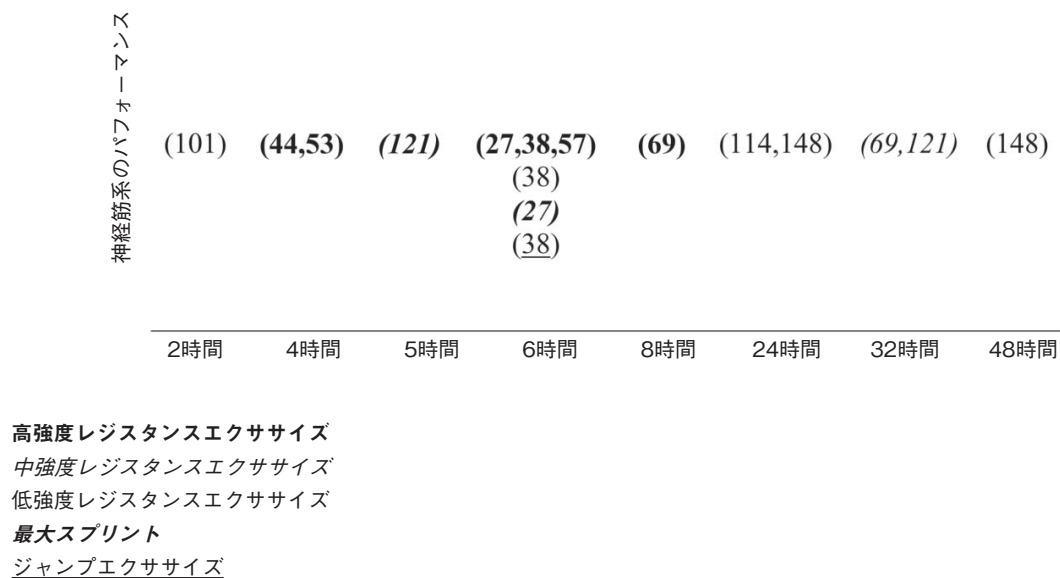


図2 プライミングタイプのエクササイズセッション後の特定の時間枠における神経筋系のパフォーマンスの有意な向上

表4 全米大学体育協会女子サッカー & 女子アメリカンフットボールチームのための
プライミングエクササイズセッションを含むトレーニング週の例

		日曜	月曜	火曜	水曜	木曜	金曜	土曜
女子サッカー	先発	治療+回復	PM: スプリント トレーニング	AM: サッカー PM: 低強度レジ スタンスエクサ サイズによるプ ライミングセッ ション	PM: 競技会	AM: 治療+回復 PM: RT	AM: サッカー	AM: 高強度レジ スタンスエクサ サイズによるプ ライミングセッ ション PM: 競技会
	控え	AM: スプリント トレーニング+ サッカー PM: RT	OFF	AM: サッカー PM: RT	PM: 競技会	AM: スプリント トレーニング+ サッカー PM: RT	AM: サッカー	PM: 競技会
女子アメリカンフットボール	先発	治療+回復	OFF	AM: スプリント トレーニング+ アメリカンフッ トボール PM: RT	PM: アメリカン フットボール	AM: アメリカン フットボール PM: RT	AM: アメリカン フットボール	AM: 高強度レジ スタンスエクサ サイズによるプ ライミングセッ ション PM: 競技会
	控え	AM: スプリント トレーニング+ RT	OFF	AM: スプリント トレーニング+ アメリカンフッ トボール PM: RT	PM: アメリカン フットボール	AM: アメリカン フットボール PM: RT	AM: アメリカン フットボール	PM: 競技会

RT=レジスタンストレーニング

大幅に増加させていることになる(109,135,136,152,153)。そのため、蓄積した疲労がプライミングエクササイズ刺激への短期的反応に影響を及ぼした可能性がある。トレーニング過程にモニタリングシステムが組み込まれていれば、アスリートの心身の状態に関する重要な情報が得られる(40)。競技会シーズンには、個人別のプライミング方策を実施する参考になるであろう。ただし専門職は、プライミングセッションの利益と、競技パフォーマンスの低下を招きかねない累積疲労の影響の大きさを天秤にかけなければならない。

今後の研究

プライミング後の尺度に影響を及ぼす急性トレーニング変数がいくつか特定されている。しかし、研究を進めて、これらの変数が特定の個人特性(トレーニング状態、トレーニング局面、筋力レベル、筋線維の分布、性別、課題への慣れなど)とどのように相互作用して、幅広い身体パフォーマンス成果(加速、最大スプリント能力、競技特異的課題など)などの、プライミング反応の経時的変化に影響を及ぼすのかを知る必要がある。さらに、SSCプライミング方策は多くの競技環境に存在する障壁(利用できる時間、移動、施設の利用可能性)(70)を回避する力をもつため、SSC課題後のプライミング後反応を検証することが役に立つであろう。これらのプライミ

ング方策は、6時間以内の神経筋系パフォーマンスの多様な尺度を向上させることが示されている(27,129)。しかし、スプリントのバリエーション(レジスティッドスプリントなど)や、セッションの合計量を減らした無負荷ジャンプ課題がもたらすプライミング反応を検証した研究は数少ない。そのため、今後は幅広い研究が考えられる。プライミングエクササイズ刺激に対する心身の反応が、プライミング後のパフォーマンス尺度に影響するかどうか調査する必要がある。主観的運動要求は、トレーニングへの生理学的反応に影響することが示されている(107)。したがって、プライミング刺激に対する主観的反応も、遅発性増強反応に影響すると考えられる。最後に、競技会前のプライミングエクササイズを含む、競技特異的な筋力-パワートレーニング期後の競技会のパフォーマンス反応を調査した研究は存在しない。この情報は、専門職が、プライミングエクササイズ方策をトレーニング計画に含めるかべきかどうかを決定する際に特に役に立つであろう。



REFERENCES

1. Aagaard P, Andersen JL. Correlation between contractile strength and myosin heavy chain isoform composition in human skeletal muscle. *Med Sci Sports Exerc* 30: 1217-1222, 1998.

2. Akenhead R, French D, Thompson KG, Hayes PR. The physiological consequences of acceleration during shuttle running. *Int J Sports Med* 36: 302–307, 2015.
3. Amann M. Significance of Group III and IV muscle afferents for the endurance exercising human. *Clin Exp Pharmacol Physiol* 39: 831–835, 2012.
4. Andersen LL, Aagaard P. Influence of maximal muscle strength and intrinsic muscle contractile properties on contractile rate of force development. *Eur J Appl Physiol* 96: 46–52, 2006.
5. Appell HJ, Soares JM, Duarte JA. Exercise, muscle damage and fatigue. *Sports Med* 13: 108–115, 1992.
6. Armstrong RB. Initial events in exercise-induced muscular injury. *Med Sci Sports Exerc* 22: 429–435, 1990.
7. Avela J, Kyrolainen H, Komi PV, Rama D. Reduced reflex sensitivity persists several days after long-lasting stretch-shortening cycle exercise. *J Appl Physiol* 86: 1292–1300, 1999.
8. Bachero-Mena B, Sanchez-Morena M, Pareja-Blanco F, Sanudo B. Acute and short-term response to different loading conditions during resisted sprint training. *Int J Sports Physiol Perform* 15: 997–1004, 2020.
9. Bartolomei S, Sadres E, Church DD, et al. Comparison of the recovery response from high-intensity and high-volume resistance exercise in trained men. *Eur J Appl Physiol* 117: 1287–1298, 2017.
10. Behm DG, Sale DG. Velocity specificity of resistance training. *Sports Med* 15: 374–388, 1993.
11. Bigland-Ritchie B. EMG and fatigue of human voluntary and stimulated contractions. In: *Human Muscle Fatigue: Physiological Mechanisms*. Porter R, Whelan J, eds. London, United Kingdom: Pitman Medical, 1981. pp. 130–156.
12. Blazevich AJ, Babault N. Post-activation potentiation versus post-activation performance enhancement in humans: Historical perspective, underlying mechanisms, and current issues. *Front Physiol* 10: 1359, 2019.
13. Blazevich AJ, Wilson CJ, Alcaraz PE, Rubio-Arias JA. Effects of resistance training movement pattern and velocity on isometric muscular rate of force development: A systematic review with meta-analysis and meta-regression. *Sports Med* 50: 943–963, 2020.
14. Bojsen-Møller J, Magnusson SP, Rasmussen LR, Kjaer M, Aagaard P. Muscle performance during maximal isometric and dynamic contractions is influenced by the stiffness of the tendinous structures. *J Appl Physiol*: 986–994, 2005.
15. Bosco C, Colli RO, Bonomi RO, von Duvillard SP, Viru AT. Monitoring strength training: Neuromuscular and hormonal profile. *Med Sci Sports Exerc* 32: 202–208, 2000.
16. Brandon R, Howatson G, Strachan F, Hunter AM. Neuromuscular response differences to power vs strength back squat exercise in elite athletes. *Scand J Med Sci Sports* 25: 630–639, 2015.
17. Brearley S, Wild J, Agar-Newman D, Cizmic H. How to monitor net plyometric training stress: Guidelines for the coach. *Prof Strength Cond* 47: 15–24, 2017.
18. Cahill MJ, Oliver JL, Cronin JB, et al. Influence of resisted sled-push training on the sprint force-velocity profile of male high school athletes. *Scand J Med Sci Sports* 30: 442–449, 2020.
19. Chapman D, Newton M, Sacco P, Nosaka K. Greater muscle damage induced by fast versus slow velocity eccentric exercise. *Int J Sports Med* 27: 591–598, 2006.
20. Chatzinikolaou A, Fatouros IG, Gourgoulis V, et al. Time course of changes in performance and inflammatory responses after acute plyometric exercise. *J Strength Cond Res* 24: 1389–1398, 2010.
21. Chiu LZ, Barnes JL. The fitness-fatigue model revisited: Implications for planning short- and long-term training. *Strength Cond J* 25: 42–51, 2003.
22. Chiu LZ, Fry AC, Schilling BK, Johnson EJ, Weiss LW. Neuromuscular fatigue and potentiation following two successive high intensity resistance exercise sessions. *Eur J Appl Physiol* 92: 385–392, 2004.
23. Chiu LZ, Fry AC, Weiss LW, et al. Postactivation potentiation response in athletic and recreationally trained individuals. *J Strength Cond Res* 17: 671–677, 2003.
24. Chleboun GS, Howell JN, Conatser RR, Giesey JJ. Relationship between muscle swelling and stiffness after eccentric exercise. *Med Sci Sports Exerc* 30: 529–535, 1998.
25. Clarkson PM, Nosaka K, Braun B. Muscle function after exercise-induced muscle damage and rapid adaptation. *Med Sci Sports Exerc* 24: 512–520, 1992.
26. Cook CJ, Crewther BT. Changes in salivary testosterone concentrations and subsequent voluntary squat performance following the presentation of short video clips. *Horm Behav* 61: 17–22, 2012.
27. Cook CJ, Kilduff LP, Crewther BT, Beaven M, West DJ. Morning based strength training improves afternoon physical performance in rugby union players. *J Sci Med Sport* 17: 317–321, 2013.
28. Cormie P, McCaulley GO, Triplett NT, McBride JM. Optimal loading for maximal power output during lower-body resistance exercises. *Med Sci Sports Exerc* 39: 340–349, 2007.
29. Cormie P, McGuigan MR, Newton RU. Developing maximal neuromuscular power—Part 2. *Sports Med* 41: 17–38, 2011.
30. Cormie P, McGuigan MR, Newton RU. Influence of strength on magnitude and mechanisms of adaptation to power training. *Med Sci Sports Exerc* 42: 1566–1581, 2010.
31. Crewther BT, Cook CJ, Gaviglio CM, Kilduff LP, Drawer S. Baseline strength can influence the ability of salivary free testosterone to predict squat and sprinting performance. *J Strength Cond Res* 26: 261–268, 2012.
32. Crewther BT, Kilduff LP, Cook CJ, et al. Relationships between salivary free testosterone and the expression of force and power in elite athletes. *J Sports Med Phys Fitness* 52: 221–227, 2012.
33. Crewther BT, Kilduff LP, Cook CJ, et al. The acute potentiating effects of back squats on athlete performance. *J Strength Cond Res* 25: 3319–3325, 2011.
34. Crewther BT, Lowe TI, Weatherby RP, Gill N, Keogh J. Neuromuscular performance of elite rugby union players and relationships with salivary hormones. *J Strength Cond Res* 23: 2046–2053, 2009.
35. Cronin J, Hansen K, Kawamori N, McNair P. Effects of weighted vests and sled towing on sprint kinematics. *Sport Biomech* 7: 160–172, 2008.
36. Cuesta MC, Arcaya JL, Cano G, et al. Opposite modulation of capsaicin-evoked substance P release by glutamate receptors. *Neurochem Int* 35: 471–478, 1999.
37. Damas F, Nosaka K, Libardi CA, Chen TC, Ugrinowitsch C. Susceptibility to exercise-induced muscle damage: A cluster analysis with a large sample. *Int J Sports Med* 37: 633–640, 2016.
38. de Villarreal ESS, Gonzalez-Badillo JJ, Izquierdo M. Optimal warm-up stimuli of muscle activation to enhance short and long-term acute jumping performance. *Eur J Appl Physiol* 100: 393–401, 2007.
39. Del Vecchio A, Negro F, Holobar A, et al. You are as fast as your motor neurons: Speed of recruitment and maximal discharge of motor neurons determine the maximal rate of force development in humans.

- J Physiol* 597: 2445–2456, 2019.
40. 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.
 41. Deyhle MR, Gier AM, Evans KC, et al. Skeletal muscle inflammation following repeated bouts of lengthening contractions in humans. *Front Physiol* 6: 424, 2016.
 42. Dousset E, Avela J, Ishikawa M, et al. Bimodal recovery pattern in human skeletal muscle induced by exhaustive stretch-shortening cycle exercise. *Med Sci Sports Exerc* 39: 453–460, 2007.
 43. Ebbeling CB, Clarkson PM. Exercise-induced muscle damage and adaptation. *Sports Med* 7: 207–234, 1989.
 44. Ekstrand LG, Battaglini CL, McMurray RG, Shields EW. Assessing explosive power production using the backward overhead shot throw and the effects of morning resistance exercise on afternoon performance. *J Strength Cond Res* 27: 101–106, 2013.
 45. Elliott BC, Wilson GJ, Kerr GK. A biomechanical analysis of the sticking region in the bench press. *Med Sci Sports Exerc* 21: 450–462, 1989.
 46. Esformes JJ, Bampouras TM. Effect of back squat depth on lower-body postactivation potentiation. *J Strength Cond Res* 27: 2997–3000, 2013.
 47. Faulkner JA, Brooks SV, Opitck JA. Injury to skeletal muscle fibers during contractions: Conditions of occurrence and prevention. *Phys Ther* 73: 911–921, 1993.
 48. Fielding RA, Manfredi TJ, Ding WE, et al. Acute phase response in exercise. III. Neutrophil and IL-1 beta accumulation in skeletal muscle. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 265: R166–R172, 1993.
 49. Francis C. *The Structure of Training for Speed*. 2008. Available at: www.Charliefrancis.com. Accessed October 10, 2021.
 50. Friden J, Sfakianos PN, Hargens AR, Akeson WH. Residual muscular swelling after repetitive eccentric contractions. *J Orthop Res* 6: 493–498, 1988.
 51. Fry AC, Schilling BK, Staron RS, et al. Muscle fiber characteristics and performance correlates of male Olympic-style weightlifters. *J Strength Cond Res* 17: 746–754, 2003.
 52. Fry AC, Smith JC, Schilling BK. Effect of knee position on hip and knee torques during the barbell squat. *J Strength Cond Res* 17: 629–633, 2003.
 53. Fry AC, Stone MH, Thrush JT, Fleck SJ. Pre-competition training sessions enhance competitive performance of high anxiety junior weightlifters. *J Strength Cond Res* 9: 37–42, 1995.
 54. Fry AC, Webber JM, Weiss LW, et al. Muscle fiber characteristics of competitive power lifters. *J Strength Cond Res* 17: 402–410, 2003.
 55. Gibala MJ, Interisano SA, Tarnopolsky MA, et al. Myofibrillar disruption following acute concentric and eccentric resistance exercise in strength-trained men. *Can J Physiol Pharmacol* 78: 656–661, 2000.
 56. Gissel H, Clausen T. Excitation-induced Ca^{2+} influx and skeletal muscle cell damage. *Acta Physiol Scand* 171: 327–334, 2001.
 57. Gonzalez-Garcia J, Giraldez-Costas V, Ruiz-Moreno C, Gutierrez-Hellin J, Romero-Moraleda B. Delayed potentiation effects on neuromuscular performance after optimal load and high load resistance priming session using velocity loss. *Eur J Sport Sci* 21: 1617–1627, 2021.
 58. Gonzalez AM, Hoffman JR, Townsend JR, et al. Intramuscular anabolic signaling and endocrine response following high volume and high intensity resistance exercise protocols in trained men. *Physiol Rep* 3: 1–15, 2015.
 59. Gonzalez-Badillo JJ, Rodriguez-Rosell D, Sanchez-Medina L, et al. Short-term recovery following resistance exercise leading or not to failure. *Int J Sports Med* 37: 295–304, 2016.
 60. Gordon PM, Liu D, Sartor MA, et al. Resistance exercise training influences skeletal muscle immune activation: A microarray analysis. *J Appl Physiol* 112: 443–453, 2012.
 61. Gotshalk LA, Loebel CC, Nindl BC, et al. Hormonal responses of multiset versus single-set heavy-resistance exercise protocols. *Can J Appl Physiol* 22: 244–255, 1997.
 62. Green HJ. Muscle power: Fiber type recruitment, metabolism and fatigue. In: *Human Muscle Power*. Jones NL, McCartney N, McComas AJ, eds. Champaign, IL: Human Kinetics, 1986. pp: 65–79.
 63. Gruber M, Gruber SB, Taube W, et al. Differential effects of ballistic versus sensorimotor training on rate of force development and neural activation in humans. *J Strength Cond Res* 21: 274–282, 2007.
 64. Haff GG. Quantifying workloads in resistance training: A brief review. *Strength Cond J* 10: 31–40, 2010.
 65. Häkkinen K. Neuromuscular fatigue and recovery in male and female athletes during heavy resistance exercise. *Int J Sports Med* 14: 53–59, 1993.
 66. Häkkinen K, Allen M, Komi PV. Changes in isometric force- and relaxation-time, electromyographic and muscle fiber characteristics of human skeletal muscle during strength training and detraining. *Acta Physiol Scand* 125: 573–585, 1985.
 67. Hannah R, Folland JP. Muscle-tendon unit stiffness does not independently affect voluntary explosive force production or muscle intrinsic contractile properties. *Appl Physiol Nutr Metab* 40: 87–95, 2015.
 68. Harridge SD, Bottinelli R, Canepari M, et al. Whole-muscle and single-fibre contractile properties and myosin heavy chain isoforms in humans. *Pflügers Archiv* 432: 913–920, 1996.
 69. Harrison PW, James LP, Jenkins DG, et al. Time-course of neuromuscular, hormonal, and perceptual responses following moderate- and high-load resistance priming exercise. *Int J Sports Physiol Perform* 16: 1472–1482, 2021.
 70. Harrison PW, James LP, McGuigan MR, Jenkins DG, Kelly VG. Prevalence and application of priming exercise in high performance sport. *J Sci Med Sport* 23: 297–303, 2020.
 71. Hoheisel U, Unger T, Mense S. Excitatory and modulatory effects of inflammatory cytokines and neurotrophins on mechanosensitive group IV muscle afferents in the rat. *Pain* 114: 168–176, 2005.
 72. Hori N, Newton RU, Nosaka K, Stone MH. Weightlifting exercises enhance athletic performance that requires high-load speed strength. *Strength Cond J* 27: 50–55, 2000.
 73. Horita T, Komi PV, Nicol C, Kyrolainen H. Stretch shortening cycle fatigue: Interactions among joint stiffness, reflex, and muscle mechanical performance in the drop jump. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 73: 393–403, 1996.
 74. Hornsby WG, Gentles JA, Comfort P, et al. Resistance training volume load with and without exercise displacement. *Sports* 6: 1–10, 2018.
 75. Howatson G, Brandon R, Hunter AM. The response to, and recovery from, maximum strength and power training in elite track and field athletes. *Int J Sports Physiol Perform* 11: 356–362, 2016.
 76. Hubal MJ, Chen TC, Thompson PD, Clarkson PM. Inflammatory gene changes associated with the repeated-bout effect. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 294: R1628–R1637, 2008.
 77. Impellizzeri FM, Marcora SM, Coutts AJ. Internal and external training load: 15 Years on. *Int J Sports Physiol Perform* 14: 270–273,

- 2019.
78. Inoue M, Tokuyama S, Nakayamada H, Ueda H. In vivo signal transduction of tetrodotoxin-sensitive nociceptive responses by substance P given into the planta of the mouse hind limb. *Cell Mol Neurobiol* 18: 555–561, 1998.
79. Johnston M, Cook CJ, Crewther BT, Drake D, Kilduff LP. Neuromuscular, physiological and endocrine responses to a maximal speed training session in elite games players. *Eur J Sport Sci* 15: 550–556, 2015.
80. Johnston MJ, Cook CJ, Drake D, et al. The neuromuscular, biochemical, and endocrine responses to a single session versus double session training day in elite athletes. *J Strength Cond Res* 30: 3098–3106, 2016.
81. Kamandulis S, Muanjai P, Skurvydas A, et al. The contribution of low-frequency fatigue to the loss of quadriceps contractile function following repeated drop jumps. *Exp Physiol* 104: 1701–1710, 2019.
82. Karp JR. Training characteristics of qualifiers for the US Olympic Marathon Trials. *Int J Sports Physiol Perform* 2: 72–92, 2007.
83. Kawamori N, Newton R, Nosaka K. Effects of weighted sled towing on ground reaction force during the acceleration phase of sprint running. *J Sports Sci* 32: 1139–1145, 2014.
84. Kijowski KN, Capps CR, Goodman CL, et al. Short-term resistance and plyometric training improves eccentric phase kinetics in jumping. *J Strength Cond Res* 29: 2186–2196, 2015.
85. Kilduff LP, Bevan HR, Kingsley MI, et al. Postactivation potentiation in professional rugby players: Optimal recovery. *J Strength Cond Res* 21: 1134, 2007.
86. Kilduff LP, Owen N, Bevan H, et al. Influence of recovery time on post-activation potentiation in professional rugby players. *J Sports Sci* 26: 795–802, 2008.
87. Kraemer WJ, Ratamess NA. Hormonal responses and adaptations to resistance exercise and training. *Sports Med* 35: 339–361, 2005.
88. Kravitz L, Akalan C, Nowicki K, Kinzey SJ. Prediction of 1 repetition maximum in high-school power lifters. *J Strength Cond Res* 17: 167–172, 2003.
89. Kroon GW, Naeije M. Recovery of the human biceps electromyogram after heavy eccentric, concentric or isometric exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 63: 444–448, 1991.
90. Krzyszkowski J, Chowning LD, Harry JR. Phase-specific predictors of countermovement jump performance that distinguish good from poor jumpers. *J Strength Cond Res*, 2020.
91. Kubo K, Kanehisa H, Fukunaga T. Is passive stiffness in human muscles related to the elasticity of tendon structures?. *Eur J Appl Physiol* 85: 226–232, 2001.
92. Kurokawa S, Fukunaga T, Fukushima S. Behavior of fascicles and tendinous structures of human gastrocnemius during vertical jumping. *J Appl Physiol*, 2001.
93. Laffaye G, Wagner P. Eccentric rate of force development determines jumping performance. *Comput Methods Biomech Biomed Engin* 16: 82–83, 2013.
94. Latella C, Teo WP, Harris D, et al. Effects of acute resistance training modality on corticospinal excitability, intra-cortical and neuromuscular responses. *Eur J Appl Physiol* 117: 2211–2224, 2017.
95. Lemos DR, Babaeijandaghi F, Low M, et al. Nilotinib reduces muscle fibrosis in chronic muscle injury by promoting TNF-mediated apoptosis of fibro/adipogenic progenitors. *Nat Med* 21: 786–794, 2015.
96. Maffiuletti NA, Aagaard P, Blazevich AJ, et al. Rate of force development: Physiological and methodological considerations. *Eur J Appl Physiol* 6: 1091–1116, 2016.
97. Malm C, Nyberg P, Engstrom M, et al. Immunological changes in human skeletal muscle and blood after eccentric exercise and multiple biopsies. *J Physiol* 529: 243, 2000.
98. Malm C, Sjodin B, Sjoberg B, et al. Leukocytes, cytokines, growth factors and hormones in human skeletal muscle and blood after uphill or downhill running. *J Physiol* 556: 983–1000, 2004.
99. Mangine GT, Huet K, Williamson C, et al. A resisted sprint improves rate of force development during a 20-m sprint in athletes. *J Strength Cond Res* 32: 1531–1537, 2018.
100. Martinez-Valencia MA, Romero-Arenas S, Elvira JL, et al. Effects of sled towing on peak force, the rate of force development and sprint performance during the acceleration phase. *J Hum Kinet* 46: 139–148, 2015.
101. Mason BRJ, Argus CK, Norcott B, Ball NB. Resistance training priming activity improves upper-body power output in rugby players: Implications for game day performance. *J Strength Cond Res* 31: 913–920, 2016.
102. Maughan RJ, Watson JS, Weir J. Strength and cross-sectional area of human skeletal muscle. *J Physiol* 338: 37–49, 1983.
103. Maulder PS, Bradshaw EJ, Keogh JW. Kinematic alterations due to different loading schemes in early acceleration sprint performance from starting blocks. *J Strength Cond Res* 22: 1992–2002, 2008.
104. McBride JM, McCaulley GO, Cormie P, et al. Comparison of methods to quantify volume during resistance exercise. *J Strength Cond Res* 23: 106–110, 2009.
105. McCaulley GO, McBride JM, Cormie P, et al. Acute hormonal and neuromuscular responses to hypertrophy, strength, and power type resistance exercise. *Eur J Appl Physiol* 105: 695–704, 2009.
106. McHugh MP, Connolly DAJ, Eston RG, Gleim GW. Exercise-induced muscle damage and potential mechanisms for the repeated bout effect. *Sports Med* 27: 157–170, 1999.
107. McLaren SJ, Macpherson TW, Coutts AJ, et al. The relationships between internal and external measures of training load and intensity in team sports. A meta-analysis. *Sports Med* 48: 641–658, 2018.
108. McMaster T, Cronin J, McGuigan M. Forms of variable resistance training. *Strength Cond J* 31: 50–64, 2009.
109. Miloski B, de Freitas VH, Nakamura FY, de A Nogueira FC, Bara-Filho MG. Seasonal training load distribution of professional futsal players: Effects on physical fitness, muscle damage and hormonal status. *J Strength Cond Res* 30: 1525–1533, 2016.
110. Muanjai P, Mickevicius M, Snieckus A, et al. Slow torque recovery after eccentric exercise and the repeated bout effect: The role of primary and secondary muscle damage. *J Musculoskelet Neuronal Interact* 19: 207–214, 2019.
111. Newton RU, Kraemer WJ, Häkkinen K, Humphries BJ, Murphy AJ. Kinematics, kinetics, and muscle activation during explosive upper body movements. *J Appl Biomech* 12: 31–43, 1996.
112. Nguyen HX, Tidball JG. Interactions between neutrophils and macrophages promote macrophage killing of rat muscle cells in vitro. *J Physiol* 547: 125–132, 2003.
113. Nicol C, Komi PV. Stretch-shortening cycle fatigue and its influence on force and power production. The Encyclopedia of Sports Medicine. In: *Strength and Power in Sport*. Komi PV, ed. Oxford, United Kingdom: Blackwell Science, 2002, pp: 203–228.
114. Nishioka T, Okada J. Influence of strength level on performance enhancement using resistance priming. *J Strength Cond Res* 36: 37–46, 2022.
115. Nosaka K, Sakamoto K, Newton M, Sacco P. How long does the protective effect on eccentric exercise-induced muscle damage last?

Med Sci Sports Exerc 33: 1490–1495, 2001.

116. Okkonen O, Häkkinen K. Biomechanical comparison between sprint start, sled pulling, and selected squat-type exercises. *J Strength Cond Res* 27: 2662–2673, 2013.
117. Paulsen G, Cramer R, Benestad HB, et al. Time course of leukocyte accumulation in human muscle after eccentric exercise. *Med Sci Sports Exerc* 42: 75–85, 2010.
118. Paulsen G, Mikkelsen UR, Raastad T, Peake JM. Leucocytes, cytokines and satellite cells: What role do they play in muscle damage and regeneration following eccentric exercise? *Exerc Immunol Rev* 18: 42–97, 2012.
119. Peake JM, Neubauer O, Della Gatta PA, Nosaka K. Muscle damage and inflammation during recovery from exercise. *J Appl Physiol* 122: 559–570, 2017.
120. Plotkin DL, Roberts MD, Haun CT, Schoenfeld BJ. Muscle fiber type transitions with exercise training: Shifting perspectives. *Sports* 9: 127, 2021.
121. Raastad T, Hallen J. Recovery of skeletal muscle contractility after high- and moderate-intensity strength exercise. *Eur J Appl Physiol* 82: 206–214, 2000.
122. Rabita G, Dorel S, Slawinski J, et al. Sprint mechanics in world-class athletes: A new insight into the limits of human locomotion. *Scand J Med Sci Sports* 25: 583–594, 2015.
123. Raeder C, Wiewelhove T, Westphal-Martinez MP, et al. Neuromuscular fatigue and physiological responses after five dynamic squat exercise protocols. *J Strength Cond Res* 30: 953–965, 2016.
124. Rassier DE, MacIntosh BR. Co-existence of potentiation and fatigue in skeletal muscle. *Braz J Med Biol Res* 33: 499–508, 2000.
125. Ratamess NA, Kraemer WJ, Volek JS, et al. Androgen receptor content following heavy resistance exercise in men. *J Steroid Biochem Mol* 93: 35–42, 2005.
126. Reeves ND, Narici MV. Behavior of human muscle fascicles during shortening and lengthening contractions in vivo. *J Appl Physiol* 1090–1096, 2003.
127. Ross A, Leveritt M, Riek S. Neural influences on sprint running: Training adaptations and acute responses. *Sports Med* 31: 409–425, 2001.
128. Rud B, Oygard E, Dahl EB, Paulsen G, Losnegard T. The effect of resistance exercise priming in the morning on afternoon sprint cross- country skiing performance. *Int J Sports Physiol Perform* 16: 1786–1793, 2021.
129. Russell M, King A, Bracken RM, et al. A comparison of different modes of morning priming exercise on afternoon performance. *Int J Sports Physiol Perform* 11: 763–767, 2016.
130. Russell M, Williams N, Kilduff LP. Priming match- day performance: Strategies for team sports players. In: *Advanced Strength and Conditioning: An Evidence-Based Approach*. Turner AN, Comfort P, eds. New York, NY: Routledge, 2017. pp: 151–167.
131. Schoenfeld BJ, Contreras B, Willardson JM, Fontana F, Tiriyaki-Sonmez G. Muscle activation during low-versus high-load resistance training in well-trained men. *Eur J Appl Physiol* 114: 2491–2497, 2014.
132. Seitz LB, Haff GG. Factors modulating post-activation potentiation of jump, sprint, throw, and upper-body ballistic performances: A systematic review with meta-analysis. *Sports Med* 46: 231–240, 2016.
133. 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. *Sports Med* 44: 1693–1702, 2014.
134. Sidhu SK, Weavil JC, Thurston TS, et al. Fatigue-related group III/IV muscle afferent feedback facilitates intracortical inhibition during locomotor exercise. *J Physiol* 596: 4789–4801, 2018.
135. Silva JR, Magalhaes JF, Ascensao AA, et al. Individual match playing time during the season affects fitness-related parameters of male professional soccer players. *J Strength Cond Res* 25: 2729–2739, 2011.
136. Silva JR, Rebelo A, Marques F, et al. Biochemical impact of soccer: An analysis of hormonal, muscle damage, and redox markers during the season. *Appl Physiol Nutr Metab* 39: 432–438, 2014.
137. Soares S, Ferreira-Junior JB, Pereira MC, et al. Dissociated time course of muscle damage recovery between single- and multi-joint exercises in highly resistance-trained men. *J Strength Cond Res* 29: 2594–2599, 2015.
138. Sporis G, Jovanovic M, Omrcen D, Matkovic B. Can the official soccer game be considered the most important contribution to player's physical fitness level? *J Sports Med Phys Fitness* 51: 374–380, 2011.
139. Steensberg A, Fischer CP, Keller C, Møller K, Pedersen BK. IL-6 enhances plasma IL-1ra, IL-10, and cortisol in humans. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 285: E433–E437, 2003.
140. Suchomel T, Comfort P. Weightlifting for sports performance. In: *Advanced Strength and Conditioning: Evidence-Based Practice*. Turner A, Comfort P, eds. London, United Kingdom: Routledge, 2017. pp: 249–273.
141. Suchomel TJ, Nimphius S, Bellon CR, Stone MH. The importance of muscular strength: Training considerations. *Sports Med* 48: 765–785, 2018.
142. Tesch PA, Karlsson J. Muscle fiber types and size in trained and untrained muscles of elite athletes. *J Appl Physiol* 59: 1716–1720, 1985.
143. Thomas K, Brownstein CG, Dent J, et al. Neuromuscular fatigue and recovery after heavy resistance, jump, and sprint training. *Med Sci Sports Exerc* 50: 2526–2535, 2018.
144. Thorstensson AL, Grimby G, Karlsson J. Force- velocity relations and fiber composition in human knee extensor muscles. *J Appl Physiol* 40: 12–16, 1976.
145. Tillin NA, Bishop D. Factors modulating post- activation potentiation and its effect on performance of subsequent explosive activities. *Sports Med* 39: 147–166, 2009.
146. Tokinoya K, Ishikura K, Ra SG, et al. Relationship between early-onset muscle soreness and indirect muscle damage markers and their dynamics after a full marathon. *J Sports Exerc Fit* 18: 115–121, 2020.
147. Tsimachidis C, Patikas D, Galazoulas C, Bassa E, Kotzamanidis C. The post-activation potentiation effect on sprint performance after combined resistance/sprint training in junior basketball players. *J Sports Sci* 31: 1117–1124, 2013.
148. Tsoukos A, Veligekas P, Brown LE, Terzis G, Bogdanis GC. Delayed effects of a low-volume, power-type resistance exercise session on explosive performance. *J Strength Cond Res* 32: 643–650, 2017.
149. Vincent HK, Vincent KR. The effect of training status on the serum creatine kinase response, soreness and muscle function following resistance exercise. *Int J Sports Med* 18: 431–437, 1997.
150. Viru A, Viru M. Nature of training effects. In: *Exercise and Sport Science*. Garrett W, Kirkendall D, eds. Philadelphia, PA: Lippincott Williams & Williams, 2000. pp: 67–95.
151. Volek JS, Kraemer WJ, Bush JA, Incledon T, Boetes M. Testosterone and cortisol in relationship to dietary nutrients and

著者紹介

- resistance exercise. *J Appl Physiol* 8: 49-54, 1997.
152. Walker AJ, McFadden BA, Sanders DJ, et al. Early season hormonal and biochemical changes in division I field hockey players: Is fitness protective?. *J Strength Res* 34: 975-981, 2020.
153. Walker AJ, McFadden BA, Sanders DJ, et al. Biomarker response to a competitive season in division I female soccer players. *J Strength Res* 33: 2622-2628, 2019.
154. West DW, Phillips SM. Anabolic processes in human skeletal muscle: Restoring the identities of growth hormone and testosterone. *Physician Sportsmed* 38: 97-104, 2010.
155. Xin L, Hyldahl RD, Chipkin SR, Clarkson PM. A contralateral repeated bout effect attenuates induction of NF- κ B DNA binding following eccentric exercise. *J Appl Physiol* 116: 1473-1480, 2014.
156. Yahiaoui L, Gvozdic D, Danialou G, Mack M, Petrof BJ. CC family chemokines directly regulate myoblast responses to skeletal muscle injury. *J Physiol* 586: 3991-4004, 2008.
157. Zatsiorsky VM, Kraemer WJ. Training intensity. In: *Science and Practice of Strength Training*. Champaign, IL: Human Kinetics, 2006. pp: 69-87.

From Strength and Conditioning Journal
Volume 46, Number 2, pages 188-206.



Patrick Holmberg :
Queensland University of Technology のエクササイズ
& 栄養学部の博士課程に在籍。



Peter Harrison :
University of Queensland の博士課程卒業生であり、臨時学術スタッフ。



David Jenkins :
University of the Sunshine Coast のスポーツ & エクササイズ学の教授。



Vincent Kelly :
Queensland University of Technology のエクササイズ
& 栄養学部のスポーツ科学とストレングス & コンディショニングの准教授。