©NSCA JAPAN
Volume 26, Number 10, pages 57-70

Point/Counterpoint

筋肥大が筋力とスポーツパフォーマンスに及ぼす影響とは？

What is the Impact of Muscle Hypertrophy on Strength and Sport Performance?

William G. Hornsby, [1] Ph.D. **Jeremy A. Gentles,** [2,*] Ph.D. **G. Gregory Haff,** [3,*] Ph.D.
Michael H. Stone, [2,*] Ph.D. **Samuel L. Buckner,** [4,†] Ph.D. **Scott J. Dankel,** [5,†] M.S.
Zachary W. Bell, [5,†] M.S. **Takashi Abe,** [5,†] Ph.D. **Jeremy P. Loenneke,** [5,†] Ph.D.

[1]Department of Coaching and Teaching Studies, College of Physical Activity and Sport Sciences, West Virginia University, Morgantown, West Virginia
[2]School of Exercise, Biomedical and Health Sciences, Edith Cowan University, Joondalup, Western Australia, Australia
[3]Center of Excellence for Sport Science and Coach Education, East Tennessee State University, Johnson City, Tennesse
[4]Division of Exercise Science, USF Muscle Laboratory, University of South Florida, Tampa, Florida
[5]Department of Health, Exercise Science, and Recreation Management, Kevser Ermin Applied Physiology Laboratory, The University of Mississippi, University, Mississippi
*Point Authors
†Counterpoint Authors

要約

科学者と専門職は、筋肥大が筋力の向上を誘発すると数十年前から考えてきた。しかし近年、これに異を唱える研究が発表され、運動誘発性の筋サイズの増大が運動誘発性の筋力の向上（力の産生）に果たす機構的役割、および運動誘発性の筋力の向上がスポーツパフォーマンスに及ぼす影響が否定された（16）。このような見方は、ストレングス＆コンディショニングがスポーツにもつ重要性を減じるものである。つまり、筋力適応のメカニズムとして働かないのであれば、骨格筋の肥大にスポーツ関連の利益があるといえるだろうか。さらに、筋力がスポーツパフォーマンスにほとんど影響を及ぼさないのであれば、ストレングス＆コンディショニングプログラムは、実際の競技からの回復を遅らせているにすぎないとも考えられる。この主張に従うと、筋サイズの増大は望ましくない体重増加を招く可能性があるため、ほぼすべての場合において避けなければならない。本コラムの目的は実験的エビデンスに基づいて、運動誘発性の筋サイズの増加は、運動誘発性の筋力の向上やスポーツパフォーマンスにほとんど影響を及ぼさないというBucknerら（16）の主張に対する賛否を明らかにして、深い科学的議論を行なうことである。

PRO　賛成意見

見境のない筋肥大や機能しない筋肥大は、確かにパフォーマンスの減衰を招く可能性がある。しかし諸文献のエビデンスから判断すると、(a)筋肥大は間違いなく筋力向上に寄与し、(b)多くのスポーツにおいて筋肥大による筋力向上はパフォーマンスにプラスの影響を及ぼすと考えられる。これに異を唱えるBucknerらの論文「筋肥大の問題：再訪（The Problem of Muscle Hypertrophy: Revisited）」は、1955年に発表された「筋肥大の問題：レビュー（The Problem of Muscle Hypertrophy: A Review）」（70）と題するRaschらの論文の「再訪」である。第1段落は、1955年のRaschらの論文の結論からの引用である。「筋力と筋肥大に関する文献をレビューした結果、

筋肥大の増加と筋力の向上の関係はほとんど明らかにされず、単純かつ直接的な相関関係は存在しないように思われる」(70)。しかしRaschらの論文では、直接的な相関関係の確立が難しい理由として「筋肥大の原因として、毛細血管の数と運動する筋に含まれる水分量の増加が考えられるが、これらは筋力の向上に直接寄与しないこと」(70)が挙げられている。実際、筋サイズの増大は、筋の膨張、毛細血管数の増加、グリコーゲン含有量の増加、その他の非収縮要素(74)が、収縮要素と結びついてもたらされる。特にトレーニング経験のない被験者においては、新たな収縮要素による寄与はほとんどなく、非収縮要素が筋サイズの変化をもたらす(23)。

現在の文献(45)だけでなく1950年代と60年代の文献(39,70)も、レジスタンストレーニングがもたらす筋肥大において直接的に貢献する変数の多さを、慎重に考慮するべきだと呼びかけている。言い換えると、非収縮要素の変化は筋サイズの増減を引き起こすが、筋力に対してはほとんど影響を及ぼさない。Bucknerらのレビュー(16)では、筋力と筋サイズの乖離を示す複数の例が引用されているが、非収縮要素の変化に起因する筋サイズの変化は論じられていない。

筋肥大と筋力の間に完全な直線関係が存在しないことから、他の因子が筋力とスポーツパフォーマンスに影響を及ぼしていることはほぼ確実であろう。しかしだからといって、筋サイズの増大、とりわけ収縮要素の増大が筋力とパフォーマンスの向上に寄与しないとはいえない。現在手に入るエビデンスに従うと、筋力が影響因子であるスポーツパフォーマンス課題にとって筋肥大は特に重要である(82)。本稿では、筋肥大が筋力とスポーツパフォーマンスにプラスの影響を及ぼしうることと、長期的なトレーニング計画には、ある時点で筋肥大を目的とするレジスタンストレーニングを組み込むべきであることを主張する(63,92)。

筋サイズと筋力

トレーニング処方のある時点で、レジスタンストレーニングを介して筋サイズを増大させることは、筋力-パワー系のアスリートにとって長く共通の目標とされてきた。期分けプロトコルには、マクロサイクルの開始時に、筋持久力ブロック(3×10や5×5など)が含まれていることが多い(80)。その主要な目的は、その後の高強度トレーニングブロックのために、高い力発揮を繰り返す能力を高めることと、耐久力を高めることである。しかし筋持久力ブロックには、身体組成の向上と筋横断面積の増加も期待されている。

筋力とパワーの向上を実現するために筋肥大を目的とするトレーニングを組み込むことは、理論的考察と実験的考察を根拠としている(63,92)。特に重要であるのは、最大随意収縮を行なわせると、最大刺激を受けた筋(68)においてもそうでない筋においても、発揮される力が、解剖学的および生理学的な筋の横断面積と直接関係していることである(7,27,37,41,44,57,63,88,92)。特に、タイプⅡ筋線維の横断面積と、タイプⅡ筋線維とタイプⅠ筋線維の横断面積の比は、力／パワーの重要な調節因子であるとみられる(60,61,85)。レジスタンスエクササイズは筋横断面積の増大だけでなく、課題に有利な特異的な構造変化をもたらす。例えば、羽状角の増大による生理学的筋横断面積の増加や、解剖学的筋横断面積の増加(並列サルコメアの増加など)が生じうる(11,12,27,48)。さらに、その後の絶対的および相対的な力発揮能力(ピークフォース／横断面積)の増大(41,44,58)も示されている。また、筋横断面積の減少をもたらす不動化に対して、横断面積を増加させるテストステロンの投与が行なわれた症例では、筋サイズの変化がいかに筋力レベルを変化させうるかが示された(6)。レジスタンストレーニングが、筋横断面積や羽状角を変化させる以前に、筋束長(直列サルコメア)を増加させることも興味深い(75)。

おそらく、筋力との関係において筋サイズの重要性を最もよく説明するひとつの例は、筋力系の競技(ウエイトリフティングやパワーリフティングなど)や格闘技(レスリングや総合格闘技など)で体重制が設けられていることである。特に筋力系の競技では、軽量級の選手と比べて、体格の大きな選手ほど筋量が多く、結果として筋力が高くなる(79)。オリンピックレベルのウエイトリフティングでは、重量級になるほど挙上されるウェイトも大きくなる。さらに、ウエイトリフティングやパワーリフティングでエリートクラスの選手が階級を上下すると、それに伴って挙上重量の合計も上下する傾向にある。筋横断面積が筋力とパワーにほとんど影響を及ぼさないのであれば、こうした選手は身長などの因子にかかわりなく、できるだけ軽量級で闘うほうが有利になる。

レジスタンストレーニングは「十分な」筋肥大をもたらさないか？

トレーニングによる筋肥大は筋力やパフォーマンスの向上と関連しないという意見は、トレーニング誘発性の機能的な筋肥大は微々たるものであり、最大筋力の発揮に影響を及ぼすには不

十分であるという考えから生じているように思われる。トレーニング誘発性の筋横断面積と最大筋力の向上の関係についてBucknerら(16)は、「全身のホルモンの急性増加とレジスタンストレーニングへの適応との間にかつて想定されていた関連性」と同様であると述べている。しかし、この比較はおかしい。内分泌系の応答と筋肥大との関係を示すデータは存在するが(15,54)、レジスタンスエクササイズと内分泌系の応答との直線的関係は確立されていない。また、運動に対する急性のホルモン応答(91)と異なり、レジスタンストレーニングによる筋肥大は、運動を継続するならば、週、月、年単位で蓄積する可能性がある。ホルモンの急性変化によって適応的な変化が生じない理由の説明として、運動が誘発するホルモンの急性応答の時間が短いことが挙げられる。また、急性のホルモン応答と適応の欠如との関連は、被験者のトレーニング経験が相対的に少ないことと、研究が短期間であることによる「意味のある」筋肥大の蓄積の欠如に起因するとも考えられる(23)。実際、慢性的なホルモン濃度の上昇は、筋横断面積と筋力にプラスの影響を及ぼすことがすでに報告されている(40,77)。筋線維の横断面積がトレーニングによって最大どの程度増加するかは不明である(38)。とはいえ、トレーニング誘発性の筋肥大がかなりの量に上り、筋力とパフォーマンスの変化にプラスの影響を及ぼすことを示すエビデンスは多い。

筋横断面積の適応の機会は一様ではなく、遺伝的特徴とトレーニング過程によって大きな影響を受ける(38,66,78)。実験や事例研究のレビューによって、筋横断面積の長期的な増加は、体重の大幅増加や男性ホルモンの使用にかかわりなく、約20～35％に上ることが示されている(31,46,78)。さらに、エリートクラスの筋力-パワー系アスリートやボディビルダーの筋横断面積は、トレーニング経験のない被験者の3倍にも上る(4,34,69,83)。ただし、外因性の男性ホルモンがこれらの研究において果たした役割の程度は不明である。男性ホルモンの利用率が低く、被験者がほとんど、あるいは全くトレーニング経験がない研究をレビューしたところ、2.5ヵ月で1日当たりの平均筋肥大率は約0.12％であった(90)。

多くの長期的研究(一部はレジスタンストレーニングと無関係)は、人間は力発揮に影響を及ぼすだけの「十分な」筋肥大を蓄積できることを示している。まず、成熟期に、筋力とスポーツパフォーマンスを向上させるのに「十分な」筋肥大を蓄積できるかどうかに関しては議論の余地がないと思われる(14)。また、男性は女性よりも一般的に筋量が多く、筋量の差が男女の筋力の差の多くを説明することにも議論の余地はない(10)。さらに、過体重の人は標準体重の人と比べて大きな筋肥大を示すが、その多くは下肢への持続的な負荷に起因し、負荷すなわち肥満の程度と下肢の筋サイズや筋力との間には強い関係がみられる(50,53,86,87)。また数多くの横断的研究によって、鍛錬されたアスリートや年単位のレジスタンストレーニング経験のある被験者は、トレーニング未経験者、レクリエーションでトレーニングを行なう被験者、あるいは主として持久系トレーニングに参加している被験者と比べて、顕著に筋量が多いことが示されている(41,76,81)。すでに述べたように、レジスタンストレーニングから予測される筋横断面積の増加の程度は、男女間(62)、あるいは過体重者と非過体重者の間(53,87)で報告されている筋横断面積の差と同程度であり、どちらの場合も、横断面積の差が多大な筋力の差をもたらしている。成熟期の筋量の増大の結果として、あるいは男女間の筋量の差や、体重増加や肥満の結果として、筋力が明らかに増大する以上、レジスタンストレーニングによって誘発された筋肥大が、筋力やスポーツパフォーマンスに寄与するほど蓄積しないと想定することは理に適っていない(1,16,21,25,55)。付け加えれば、数えきれないほどのアスリート、コーチ、スポーツ科学者が、月単位や年単位のレジスタンストレーニングによってかなりの筋量が蓄積されることを個人的に経験している。

長期的なトレーニング研究の不足

トレーニングは長期的な過程である。諸研究の意味を検討するにはこれを忘れてはならない。遺伝的限界に近づくにつれて、パフォーマンスを向上させることは難しくなるかもしれない。しかし、トレーニングを長期にわたって(15～20年)実施する以上の方法はないように思われる(8)。一部の研究者は、筋力と筋肥大が乖離していると感じているが、その理由は、月単位、年単位のトレーニング過程で生じる筋肥大が評価されていないことにあるのかもしれない。

トレーニングによる筋肥大は筋力にほとんど影響を及ぼさないという主張がある(16,17,21,24)。しかしその主張は、短期的なトレーニング研究(2.5ヵ月未満)から得られたデータに依拠していることに注意が必要である。また、それらの研究は、筋サイズが筋力に影響しないことを示唆しているのではなく、トレーニングの継続期間にかかわ

らずレジスタンストレーニングによる筋肥大は、筋力を向上させるほど蓄積されないことを示唆しているように思われることにも注意が必要である。例えばCountsら(21)は、レジスタンストレーニング開始後12週間目で平衡状態に達する可能性があるとして次のように述べた。「平衡状態に達するまでに獲得される量を大幅に超えて筋量を増やすことはおそらく不可能である」。しかし、引用されている、下半身の筋横断面積の測定を行なった20の研究のうち、12週間を超えて測定した研究は2点のみである。実際、膨大な数の個人的レポートや横断的研究によって、レジスタンストレーニングプログラムへ継続的に参加すると、トレーニング経験が少ない場合と比べて、統計的に有意に大きな筋量の獲得を示すことが指摘されている。トレーニング研究を長期にわたって実施することは確かに難しいとはいえ、筋力-パワー系アスリートとしての成功を目指すトレーニング生活と比べると12週間はあまりにも短い。

多くのレジスタンストレーニング研究の期間が比較的短いことを考えると、その適用にも、そこから引き出せる結論にも限界がある。例えば、多くの筋力-パワー系アスリートは、まだ成熟しきらないうちに、すなわち身体的な発達過程の途中でレジスタンストレーニングを開始する。しかし、成熟期(13～18歳)の間中レジスタンストレーニングを実施せずとも、成熟過程を経ることによって男性も女性も筋量と筋力を獲得する(47)。では、高校に通う前またはその間にレジスタンストレーニングを開始した場合、成熟による筋肥大や筋力と、レジスタンストレーニングによる筋肥大や筋力を区別できるだろうか。短期間の研究によって捉えられないもうひとつの現象は、成功した筋力-パワー系アスリートが課題や部位に特異的な筋肥大を示すことである(2)。さらに、そのようなアスリートはタイプⅡ筋線維の量が多く、タイプⅡ筋線維とタイプⅠ筋線維の比が大きい。これは、パフォーマンスにとって有利に働く(58,59,84,85)。大多数のトレーニング研究は、筋肥大の適応の機会が多いアスリートを捉えられていない。したがって、12週間を超えて筋量が増えることはありえないという結論には価値がない。

相関データの価値

すでに示唆したように、一部の研究者は、レジスタンストレーニングによって誘発された筋肥大と筋力の関係を調査した、記述的／横断的および相関的調査を退けている(6,16,24)。相関データは原因と結果を意味するわけではないが、関連性の存在を意味していることは確かである。そして、仮説の「証明」には役立たないかもしれないが、仮説の除外には役立つ可能性がある。相関関係を利用した注意深い観察研究は、不確実性を縮小し、過程でのミスを減らして、どのような縦断的実験を行なうべきかを決定する貴重な第一歩となりうる(22)。この観点に従えば、同じ方向を示す相関的エビデンスが数多く存在することを無視するべきではない。相関関係は因果関係を示さない。しかしそれは相関データに価値がないということではない。「もっと知る必要がある」という姿勢は評価できるし、より多くの研究が必要であることには賛成である。しかしだからといって、相関関係の研究が軽視されることはいただけない。

筋サイズの短期的変化の問題

筋肥大は筋サイズの増大と定義される。筋肥大の反対である筋萎縮は筋サイズの減少と定義される。筋サイズには多くの因子が寄与しており、力の産生に直接的な影響を及ぼすものもあれば、そうでないものもある。例えば、並列あるいは直列サルコメアの増加や減少、筋の損傷による水分含有量の変化、貯蔵グリコーゲンの変動、様々な筋内構造の蓄積や減少がある(74)。したがって、すべての肥大や萎縮が同じ形でもたらされるわけではないことを理解する必要がある。筋サイズに影響する様々な因子は同時に反応するわけではなく、与えられたトレーニング刺激に応じてそれぞれの寄与因子が異なる反応を示しうる。筋サイズの変化を構造のない単一のプロセスとして扱うことは、筋肥大と筋力やスポーツパフォーマンスとの関係について誤った結論を導く可能性がある。したがって、筋サイズに寄与する個々の変化を取り上げて、考察する必要がある。

最新研究

すでに述べたように、力の産生能力には、練習課題に特異的な神経筋系の適応などの多くの因子が影響を及ぼす。バックスクワットなどのストレングス課題を(近)最大挙上重量で練習すると、幅広い負荷やセット数／レップ数でのトレーニングと同等またはそれ以上の筋力の向上を生み出すという主張がある(25,55)。実際、ストレングス課題の単独実施は、より高量のトレーニングの単独実施と同等の筋力増大を生じさせ(55)、両者を併用しても課題の単独実施以上に筋力が増加することはないとする調査もある(25)。しかし「課題の単独実施」を支持するために利用される研究には、多くの方法論的

懸念がある(25,55)。それらを詳細に議論することは本稿では行なわないものの、これらの研究では筋厚は超音波によって測定され、筋サイズは2次元測定されているが、筋量のMRI測定は行なわれていないことに注目する必要がある(3,29,30,67)。筋厚によって筋量の変化を正確に測定することは不可能である。そして、筋による力発揮能力の指標としては筋量のほうがはるかに優れている(3,30,67)。残念なことにこの欠点は多くの文献に共通であり、Dankelら(25)やMattocksら(55)の研究に特有の問題ではない。本稿の論題的には、これらの研究は不適切な解釈によって結論を下していると考えられる。

Dankelら(25)は、5名の被験者に21日間連続でレジスタンストレーニングを実施させた。毎日冒頭に、ユニラテラルバイセップスカールの1RMテストを両腕について測定した。試行回数は3～5回であった。肘関節屈曲筋群の等尺性トルクも両腕について毎日評価した。さらに無作為な割当によって片腕を選び、ユニラテラルダンベルバイセップスカール3セット×10レップを毎日実施した。期間中複数回にわたって上腕筋前面の筋厚が測定された。筋力は両腕で向上したが、統計学的有意差は同一群内(腕)においてのみ見出された。また、トレーニング腕は事前事後テストで筋厚が統計学的に有意な増加を示し、その増加は対照腕よりも大きかった。研究者らは、1RMの向上はエクササイズ量や筋の成長ではなく特異性によるものであり、したがって、エクササイズ量を増やしても筋力は向上しないだろうと結論づけた。この結論には複数の疑問点がある。第1に、この研究には結果と統計処理に基づいて包括的な結論を出すだけの検出力、すなわち標本サイズが不足している(被験者5名)。第2に、21日間の連続トレーニングで複数セットの利用は、通常のレジスタンストレーニングプログラムで利用される頻度や量をはるかに超えている。したがってこの研究から、トレーニング量の追加が1RMを向上させないと結論づけることはできない。第3に、トレーニング腕には筋痛がみられなかったため、「いかなる累積疲労も存在せず、高頻度のトレーニングによって1RMの増大が制限されたとは考えられない」とされている。しかし、この研究の付属資料に含まれている等尺性トルクのデータは、疲労がトレーニング腕だけでなく、おそらく両腕の因子であったことを示している。**図1**と**図2**は、トレーニング腕と対照腕の等尺性ピークトルクの変化を被験者別に示したものである。**図1**を見ると、5名のトレーニング腕のうち、3名のトレーニング腕において、調査開始時と比べて、トレーニング期間中と後で等尺性ピークトルクが低下したことがわかる。**図2**を見ると、5名の対照腕のうち、1名の対照腕においてのみ、調査開始時よりも等尺性ピークトルクが低下したことがわかる。以前の研究(20)では等尺性トルクが疲労の指標として勧められ、実際に使用されていた。しかしこちらの研究(25)では、可能であるにもかかわらず利用されていない。

Mattocksら(55)はトレーニング経験のない被験者を対象とし、マシーンチェストプレスとニーエクステンションを利用して、8週間にわたる2つのレジスタンストレーニングプロトコルを比較した。筋肥大群(20名)は4セット×8～12レップを疲労困憊するまで行なった。一方、対照群(20名)は、1RMを3～5セット行なった。両群とも週に2セッション実施した。筋厚は複数の部位で評価し、1RMのテストはトレーニングに含まれているエクササイズについて実施した。また別のテストも実施した。その結果、筋肥大群にみられた複数の部位における筋厚の事前事後の変化とその程度は、対照群よりも統計学的に大きかったが、事前事後における筋力の変化の程度については、両群間に統計学的に有意な差は見出されなかった。研究者らは、トレーニング量も筋サイズの変化も筋力の増大に寄与しないため、レジスタンストレーニングプログラムの一環として、筋肥大局面や筋肥大日を設けても付加的な利益はないと結論づけた。しかし、この結論には多くの疑問点がある。第1に、筋厚における両群間の統計的な有意差には、筋肥大群における筋厚の増大だけでなく、対照群における筋厚の減少も反映されている可能性がある。事実、測定部位の半数において(18ヵ所のうち9ヵ所)、対照群における筋厚の減少の平均は、筋肥大群における筋厚の増加よりも大きかった。第2に、群内の差が報告されていない。そのため、筋肥大群が統計学的に有意な肥大(筋厚の増大)を示したかどうかを知ることができない。筋肥大が筋力に寄与しないと結論づけるには、筋肥大群に有意な筋肥大がみられることが必要である。さらに、筋肥大トレーニングの単独実施と1RMの単独実施における筋力変化を比較することを目的とした研究では、筋肥大局面や筋肥大日を設けることが付加的利益をもたらすかどうかを決定することができない。なぜなら、一般に実施される伝統的な期分けプログラムでは、他のトレーニングに加えて筋肥大トレーニングが実施されるのに対して、そのような研究では筋肥大トレーニングが単独

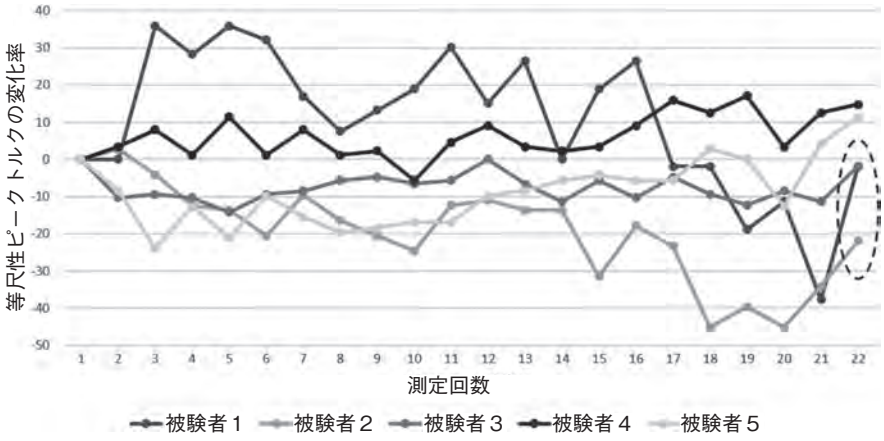

図１　トレーニング腕の等尺性ピークトルクの変化率

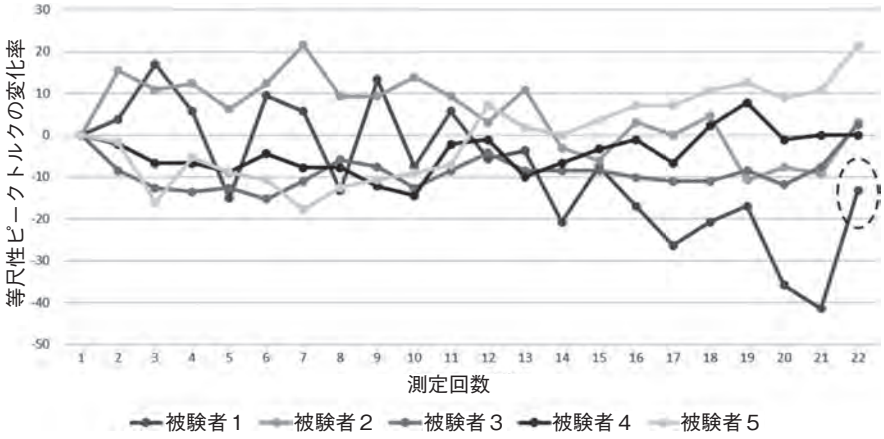

図２　対照腕の等尺性ピークトルクの変化率

で実施されるからである。

最後に、(近)最大挙上重量による大筋群のトレーニングを一貫したペースで行なう方法が、多くの先行研究において調査されている(32,33,35,36)。それらの研究によると、1RMのトレーニングが一貫して1RMの筋力を向上させるとは限らず、筋力その他のパフォーマンス尺度にマイナスの影響を及ぼす可能性がある。(近)最大挙上重量でのみトレーニングを行なうことは、他の単調なトレーニングと同様に、オーバートレーニング症候群をもたらす可能性がある(28)。これまで取り上げた研究者らの勧めに従って常に(近)最大挙上重量でトレーニングするパワーリフターやウエイトリフターが、成功するとは思いがたい。

まとめと結論

我々は、レジスタンストレーニングがかなりの筋肥大を生み出し、レジスタンストレーニングによって引き起こされた筋サイズの増加は筋力とスポーツパフォーマンスを向上させるという主張を支持する。多様な被験者を含む横断的研究も縦断的研究も含めて既存のエビデンスは、筋細胞を用いた研究(63,68,76,92)と並んで、圧倒的多数が我々の主張を支持している。レジスタンストレーニングによる筋肥大が筋力とパフォーマンスに寄与するかどうかを調査することを目的とした、長期的な真の意味での実験的研究は確かに欠けている。しかし、膨大なエビデンスが、レジスタンストレーニングはかなりの筋肥大を生み、パフォーマンスを向上させるという主張を支持している以上、このタイプの研究に内在する難しさを超えて、アスリート／競技者に対してこの種の長期的研究を実施しようとすることは浅慮であろう。

近年の研究は、レジスタンストレーニングによる筋肥大と筋力の乖離を主張するが、我々は断固としてこれを退け、それらの研究は自らの結論を支持する情報のみを選択する傾向にあることを懸念する。トレーニング誘発性であってもなくても筋肥大と筋力の間に強い関係が存在することは、数多くの文献によって示されている。確かに、相関関係は因果関係を示すものではないが、膨大なエビデンスが蓄積されれば、一時的関係以上のものを想定することが可能である。相関データを利用して、一時的な関係以上のものが想定されている例は多い。特に、真の実験的デザインが非倫理的、またはリソース的に実施可能でない場合においてはそうである。例えば、喫煙と様々なタイプの癌との間における関係は確立されているが(42,89)、人体から得られる真の実験的データは欠けている。しかし、被験者を「喫煙群」に割り当てて真の実験的研究を行なうことは倫理的ではないだろう。

アスリート、患者、コーチ、臨床医に、レジスタンストレーニングによる筋肥大は力発揮能力に寄与しないと伝えることは有益ではなく、科学的検証にも耐えられない。レジスタンストレーニングには筋サイズを増大させ、

パフォーマンスを向上させる能力がある。したがって、アスリートの発達に不可欠の構成要素であることはこれまでもこれからも変わらないだろう。◆

謝辞

本稿に対するDr. Jonathon Folland(Loughborough University)の有益なフィードバックとアドバイスに感謝を捧げる。

著者紹介

William G. Hornsby:
West Virginia UniversityのCollege of Physical Activity and Sport Sciencesのアスレティックコーチング教育の教育担当助教、ストレングス＆コンディショニング副専攻のコーディネーター。

Jeremy A. Gentles:
East Tennessee State Universityのスポーツ科学者であり助教。

G. Gregory Haff:
Edith Cowan Universityの運動科学部修士課程(ストレングス＆コンディショニング)の准教授、コースコーディネーター。

Michael H. Stone:
East Tennessee State Universityのスポーツ・エクササイズ・レクリエーション・身体運動学部／スポーツ科学＆コーチ教育センターの教授、エクササイズ＆スポーツ科学研究所の所長、大学院コーディネーター。

References

1. Abe T, Dankel SJ, Buckner SL, Jessee MB, Mattocks KT, Mouser JG, Bell ZW, and Loenneke JP. Differences in 100-m sprint performance and skeletal muscle mass between elite male and female sprinters. *J Sports Med Phys Fitness* 35(8):1419–1428, 2018.
2. Abe T, Kojima K, Kearns CF, Yohena H, and Fukuda J. Whole body muscle hypertrophy from resistance training: Distribution and total mass. *Br J Sports Med* 37: 543–545, 2003.
3. Akagi R, Takai Y, Ohta M, Kanehisa H, Kawakami Y, and Fukunaga T. Muscle volume compared to cross-sectional area is more appropriate for evaluating muscle strength in young and elderly individuals. *Age Ageing* 38: 564–569, 2009.
4. Alway SE, MacDougall JD, Sale DG, Sutton JR, and McComas AJ. Functional and structural adaptations in skeletal muscle of trained athletes. *J Appl Physiol* (1985) 64: 1114–1120, 1988.
5. Andersen JL, Schjerling P, Andersen LL, and Dela F. Resistance training and insulin action in humans: Effects of de-training. *J Physiol* 551: 1049–1058, 2003.
6. Balshaw TG, Massey GJ, Maden-Wilkinson TM, Morales-Artacho AJ, McKeown A, Appleby CL, and Folland JP. Changes in agonist neural drive, hypertrophy and pretraining strength all contribute to the individual strength gains after resistance training. *Eur J Appl Physio*l 117: 631–640, 2017.
7. Bamman MM, Newcomer BR, Larson-Meyer DE, Weinsier RL, and Hunter GR. Evaluation of the strength-size relationship in vivo using various muscle size indices. *Med Sci Sports Exerc* 32: 1307–1313, 2000.
8. Bannister R. The limits of human performance. In: *Run Swim Throw Cheat Sci Drugs Sport* (Vol. 31), Oxford, United Kingdom: Oxford University Press, 2013.
9. Bhutani S, Kahn E, Tasali E, and Schoeller DA. Composition of two-week change in body weight under unrestricted free-living conditions. *Physiol Rep* 5, 1–7, 2017.
10. Bishop P, Cureton K, and Collins M. Sex difference in muscular strength in equallytrained men and women. *Ergonomics* 30: 675–687, 1987.
11. Blazevich AJ, Cannavan D, Coleman DR, and Horne S. Influence of concentric and eccentric resistance training on architectural adaptation in human quadriceps muscles. *J Appl Physiol* 103: 1565–1575, 2007.
12. Blazevich AJ, Gill ND, Bronks R, and Newton RU. Training-specific muscle architecture adaptation after 5-wk training in athletes. *Med Sci Sports Exerc* 35: 2013–2022, 2003.
13. Bone JL, Ross ML, Tomcik KA, Jeacocke NA, Hopkins WG, and Burke LM. Manipulation of muscle creatine and glycogen changes dual X-ray absorptiometry estimates of body composition. *Med Sci Sports Exerc* 49: 1029–1035, 2017.
14. Bouchant A, Martin V, Maffiuletti NA, and Ratel S. Can muscle size fully account for strength differences between children and adults? *J Appl Physiol* (1985) 110: 1748–1749, 2011.
15. Brook MS, Wilkinson DJ, Mitchell WK, Lund JN, Phillips BE, Szewczyk NJ, Greenhaff PL, Smith K, and Atherton PJ. Synchronous deficits in cumulative muscle protein synthesis and ribosomal biogenesis underlie age-related anabolic resistance to exercise in humans. *J Physiol* 594: 7399–7417, 2016.
16. Buckner SL, Dankel SJ, Mattocks KT, Jessee MB, Mouser JG, Counts BR, and Loenneke JP. The problem of muscle hypertrophy: Revisited. *Muscle Nerve* 54: 1012–1014, 2016.
17. Buckner SL, Dankel SJ, Mattocks KT, Jessee MB, Mouser JG, Counts BR, Laurentino GC, and Loenneke JP. Differentiating swelling and hypertrophy through indirect assessment of muscle damage in untrained men following repeated bouts of resistance exercise. *Eur J Appl Physiol* 117: 213–224, 2017.
18. Burgomaster KA, Moore DR, Schofield LM, Phillips SM, Sale DG, and Gibala MJ. Resistance training with vascular occlusion: Metabolic adaptations in human muscle. *Med Sci Sports Exerc* 35: 1203–1208, 2003.
19. Costill DL, Fink WJ, Hargreaves M, King DS, Thomas R, and Fielding R. Metabolic characteristics of skeletal muscle during detraining from competitive swimming. *Med Sci Sports Exerc* 17: 339–343, 1985.
20. Counts BR, Buckner SL, Dankel SJ, Jessee MB, Mattocks KT, Mouser JG, Laurentino GC, and Loenneke JP. The acute and chronic effects of "NO LOAD" resistance training. *Physiol Behav* 164: 345–352, 2016.
21. Counts BR, Buckner SL, Mouser JG, Dankel SJ, Jessee MB, Mattocks KT, and Loenneke JP. Muscle growth: To infinity and beyond? *Muscle Nerve* 56: 1022–1030, 2017.
22. Curtis EA, Comiskey C, and Dempsey O. Importance and use of correlational research. *Nurse Res* 23: 20, 2016.
23. Damas F, Libardi CA, and Ugrinowitsch C. The development of skeletal muscle hypertrophy through resistance training: The role of muscle damage and muscle protein synthesis. *Eur J Appl Physiol* 118: 485–500, 2018.
24. Dankel SJ, Buckner SL, Jessee MB, Mouser JG, Mattocks KT, Abe T, and

Loenneke JP. Correlations do not show cause and effect: Not even for changes in muscle size and strength. *Sports Med* 48: 1–6, 2018.
25. Dankel SJ, Counts BR, Barnett BE, Buckner SL, Abe T, and Loenneke JP. Muscle adaptations following 21 consecutive days of strength test familiarization compared with traditional training. *Muscle Nerve* 56: 307–314, 2017.
26. Fernández-Elías VE, Ortega JF, Nelson RK, and Mora-Rodriguez R. Relationship between muscle water and glycogen recovery after prolonged exercise in the heat in humans. *Eur J Appl Physiol* 115: 1919–1926, 2015.
27. Folland JP and Williams AG. Morphological and neurological contributions to increased strength. *Sports Med* 37: 145–168, 2007.
28. Foster C. Monitoring training in athletes with reference to overtraining syndrome. *Med Sci Sports Exerc* 30: 1164–1168, 1998.
29. Franchi MV, Greenhaff PL, and Narici MV. Response to the letter to editor by Dankel et al. 2017 "Changes in muscle size via MRI and ultrasound: Are they equivalent?" *Scand J Med Sci Sports* 28: 1469, 2018.
30. Franchi MV, Longo S, Mallinson J, Quinlan JI, Taylor T, Greenhaff PL, and Narici MV. Muscle thickness correlates to muscle crosssectional area in the assessment of strength training-induced hypertrophy. *Scand J Med Sci Sports* 28: 846–853, 2018.
31. Fry AC. The role of resistance exercise intensity on muscle fibre adaptations. *Sports Med* 34: 663–679, 2004.
32. Fry AC, Kraemer WJ, van Borselen F, Lynch JM, Marsit JL, Roy EP, Triplett NT, and Knuttgen HG. Performance decrements with high-intensity resistance exercise overtraining. *Med Sci Sports Exerc* 26: 1165–1173, 1994.
33. Fry AC, Kraemer WJ, Lynch JM, Triplett NT, and Koziris LP. Does short-term nearmaximal intensity machine resistance training induce overtraining? *J Strength Cond Res* 8: 188, 1994.
34. Fry AC, Schilling BK, Staron RS, Hagerman FC, Hikida RS, and Thrush JT. Muscle fiber characteristics and performance correlates of male Olympicstyle weightlifters. *J Strength Cond Res* 17: 746–754, 2003.
35. Fry AC, Schilling BK, Weiss LW, and Chiu LZF. beta2-Adrenergic receptor downregulation and performance decrements during high-intensity resistance exercise overtraining. *J Appl Physiol* (1985) 101: 1664–1672, 2006.
36. Fry AC, Webber JM, Weiss LW, Fry MD, and Li Y. Impaired performances with excessive high-intensity free-weight training. *J Strength Cond Res* 14: 54–61, 2000.
37. Fukunaga T, Miyatani M, Tachi M, Kouzaki M, Kawakami Y, and Kanehisa H. Muscle volume is a major determinant of joint torque in humans. *Acta Physiol* 172: 249–255, 2001.
38. Gardiner PF. *Neuromuscular Aspects of Physical Activity*. Chicagoo, IL: Human Kinetics, 2001.
39. Gordon EE. Anatomical and biochemical adaptations of muscle to different exercises. *JAMA* 201: 755–758, 1967.
40. Griggs RC, Kingston W, Jozefowicz RF, Herr BE, Forbes G, and Halliday D. Effect of testosterone on muscle mass and muscle protein synthesis. *J Appl Physiol* 66: 498–503, 1989.
41. Haäkkinen K and Keskinen KL. Muscle cross-sectional area and voluntary force production characteristics in elite strengthand endurance-trained athletes and sprinters. *Eur J Appl Physiol* 59: 215–220, 1989.
42. Hecht SS. Tobacco carcinogens, their biomarkers and tobacco-induced cancer. *Nat Rev Cancer* 3: 733, 2003.
43. Hill JC and Millan IS. Validation of musculoskeletal ultrasound to assess and quantify muscle glycogen content. A novel approach. *Phys Sportsmed* 42: 45–52, 2014.
44. Ikai M and Fukunaga T. A study on training effect on strength per unit cross-sectional area of muscle by means of ultrasonic measurement. *Int Z Angew Physiol* 28: 173–180, 1970.
45. Jenkins NDM. Are resistance trainingmediated decreases in ultrasound echo intensity caused by changes in muscle composition, or is there an alternative explanation? *Ultrasound Med Biol* 42: 3050–3051, 2016.
46. Kadi F, Schjerling P, Andersen LL, Charifi N, Madsen JL, Christensen LR, and Andersen JL. The effects of heavy resistance training and detraining on satellite cells in human skeletal muscles. *J Physiol* 558: 1005–1012, 2004.
47. Kanehisa H, Ikegawa S, Tsunoda N, and Fukunaga T. Strength and cross-sectional areas of reciprocal muscle groups in the upper arm and thigh during adolescence. *Int J Sports Med* 16: 54–60, 1995.
48. Kawakami Y, Abe T, Kuno SY, and Fukunaga T. Training-induced changes in muscle architecture and specific tension. *Eur J Appl Physiol* 72: 37–43, 1995.
49. Kreitzman SN, Coxon AY, and Szaz KF. Glycogen storage: Illusions of easy weight loss, excessive weight regain, and distortions in estimates of body composition. *Am J Clin Nutr* 56: 292S–293S, 1992.
50. Lafortuna CL, Tresoldi D, and Rizzo G. Influence of body adiposity on structural characteristics of skeletal muscle in men and women. *Clin Physiol Funct Imaging* 34: 47–55, 2014.
51. MacDougall JD, Sale DG, Elder GCB, and Sutton JR. Muscle ultrastructural characteristics of elite powerlifters and bodybuilders. *Eur J Appl Physiol* 48: 117–126, 1982.
52. MacDougall JD, Ward GR, Sale DG, and Sutton JR. Biochemical adaptation of human skeletal muscle to heavy resistance training and immobilization. *J Appl Physiol* 43: 700–703, 1977.
53. Maffiuletti NA, Jubeau M, Munzinger U, Bizzini M, Agosti F, De Col A, Lafortuna CL, and Sartorio A. Differences in quadriceps muscle strength and fatigue between lean and obese subjects. *Eur J Appl Physiol* 101: 51–59, 2007.
54. Mangine GT, Hoffman JR, Gonzalez AM, Townsend JR, Wells AJ, Jajtner AR, Beyer KS, Boone CH, Wang R, Miramonti AA, LaMonica MB, Fukuda DH, Witta EL, Ratamess NA, and Stout JR. Exerciseinduced hormone elevations are related to muscle growth. *J Strength Cond Res* 31: 45–53, 2017.
55. Mattocks KT, Buckner SL, Jessee MB, Dankel SJ, Mouser JG, and Loenneke JP. Practicing the test produces strength equivalent to higher volume training. *Med Sci Sports Exerc* 49: 1945–1954, 2017.
56. Maughan RJ, Shirreffs SM, and Leiper JB. Errors in the estimation of hydration status from changes in body mass. *J Sports Sci* 25: 797–804, 2007.

57. Maughan RJ, Watson JS, and Weir J. Relationships between muscle strength and muscle cross-sectional area in male sprinters and endurance runners. *Eur J Appl Physiol* 50: 309–318, 1983.
58. Maughan RJ, Watson JS, and Weir J. Muscle strength and cross-sectional area in man: A comparison of strength-trained and untrained subjects. *Br J Sports Med* 18: 149–157, 1984.
59. Meijer JP, Jaspers RT, Rittweger J, Seynnes OR, Kamandulis S, Brazaitis M, Skurvydas A, Pisot R, Simunic B, Narici MV, and Degens H. Single muscle fibre contractile properties differ between bodybuilders, power athletes and control subjects. *Exp Physiol* 100: 1331–1341, 2015.
60. Methenitis S, Karandreas N, Spengos K, Zaras N, Stasinaki AN, and Terzis G. Muscle fiber conduction velocity, muscle fiber composition, and power performance. *Med Sci Sports Exerc* 48: 1761–1771, 2016.
61. Methenitis S, Spengos K, Zaras N, Stasinaki AN, Papadimas G, Karampatsos G, Arnaoutis G, and Terzis G. Fiber type composition and rate of force development in endurance and resistance trained individuals. *J Strength Cond Res*, 2017 [Epub ahead of print].
62. Miller AE, MacDougall JD, Tarnopolsky MA, and Sale DG. Gender differences in strength and muscle fiber characteristics. *Eur J Appl Physiol* 66: 254–262, 1993.
63. Minetti AE. On the mechanical power of joint extensions as affected by the change in muscle force (or cross-sectional area), ceteris paribus. *Eur J Appl Physiol* 86: 363–369, 2002.
64. Nieman DC, Shanely RA, Zwetsloot KA, Meaney MP, and Farris GE. Ultrasonic assessment of exercise-induced change in skeletal muscle glycogen content. *BMC Sports Sci Med Rehabil* 7: 9, 2015.
65. Nygren AT, Karlsson M, Norman B, and Kaijser L. Effect of glycogen loading on skeletal muscle cross-sectional area and T2 relaxation time. *Acta Physiol Scand* 173: 385–390, 2001.
66. Pickering C and Kiely J. ACTN3: More than just a gene for speed. *Front Physiol* 8: 1080, 2017.
67. Pitcher CA, Elliott CM, Williams SA, Licari MK, Kuenzel A, Shipman PJ, Valentine JP, and Reid SL. Childhood muscle morphology and strength: Alterations over six months of growth. *Muscle Nerve* 46: 360–366, 2012.
68. Powell PL, Roy RR, Kanim P, Bello MA, and Edgerton VR. Predictability of skeletal muscle tension from architectural determinations in Guinea pig hindlimbs. *J Appl Physiol* 57: 1715–1721, 1984.
69. Prince FP, Hikida RS, and Hagerman FC. Human muscle fiber types in power lifters, distance runners and untrained subjects. *Pflugers Arch* 363: 19–26, 1976.
70. Rasch PJ. The problem of muscle hypertrophy: A review. *J Am Osteopath Assoc* 54: 525–528, 1955.
71. Ribeiro AS, Avelar A, Schoenfeld BJ, Ritti Dias RM, Altimari LR, and Cyrino ES. Resistance training promotes increase in intracellular hydration in men and women. *Eur J Sport Sci* 14: 578–585, 2014.
72. Ribeiro AS, Schoenfeld BJ, Souza MF, Tomeleri CM, Silva AM, Teixeira DC, Sardinha LB, and Cyrino ES. Resistance training prescription with different loadmanagement methods improves phase angle in older women. *Eur J Sport Sci* 17: 913–921, 2017.
73. Rodas G, Ventura JL, Cadefau JA, Cussó R, and Parra J. A short training programme for the rapid improvement of both aerobic and anaerobic metabolism. *Eur J Appl Physiol* 82: 480–486, 2000.
74. Schoenfeld B. *Science and Development of Muscle Hypertrophy* (1st ed). Champaign, IL: Human Kinetics, 2016.
75. Seynnes OR, de Boer M, and Narici MV. Early skeletal muscle hypertrophy and architectural changes in response to highintensity resistance training. *J Appl Physiol* 102: 368–373, 2007.
76. Shoepe TC, Stelzer JE, Garner DP, and Widrick JJ. Functional adaptability of muscle fibers to long-term resistance exercise. *Med Sci Sports Exerc* 35: 944–951, 2003.
77. Sinha-Hikim I, Artaza J, Woodhouse L, Gonzalez-Cadavid N, Singh AB, Lee MI, Storer TW, Casaburi R, Shen R, and Bhasin S. Testosterone-induced increase in muscle size in healthy young men is associated with muscle fiber hypertrophy. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 283: E154–E164, 2002.
78. Stone MH, Cormie P, Lamont H, and Stone M. Developing strength and power. In: *Strength and Conditioning for Sports Performance*. Jeffreys I andMoody J, eds, Abingdon, United Kingdom: Routledge, 2016.
79. Stone MH and Kirksey KB. Physiology of weight lifting. In: *Exercise and Sport Science*. Garrett WE and Kirkendall DT, eds. Philadelphia, PA: Lippincott Williams & Wilkins, 2000. pp. 955–964.
80. Stone MH, O'Bryant H, and Garhammer J. A hypothetical model for strength training. *J Sports Med Phys Fitness* 21: 342, 1981.
81. Storey A and Smith HK. Unique aspects of competitive weightlifting. *Sports Med* 42: 769–790, 2012.
82. Suchomel TJ, Nimphius S, and Stone MH. The importance of muscular strength in athletic performance. *Sports Med* 46: 1419–1449, 2016.
83. Tesch PA and Karlsson J. Muscle fiber types and size in trained and untrained muscles of elite athletes. *J Appl Physiol* (1985) 59: 1716–1720, 1985.
84. Thorstensson A. Observations on strength training and detraining. *Acta Physiol Scand* 100: 491–493, 1977.
85. Thorstensson A, Sjo ¨ din B, and Karlsson J. Enzyme activities and muscle strength after "sprint training" in man. *Acta Physiol Scand* 94: 313–318, 1975.
86. Tomlinson DJ, Erskine RM, Morse CI, Winwood K, and Onambe ´ le ´ -Pearson GL. Combined effects of body composition and ageing on joint torque, muscle activation and co-contraction in sedentary women. *Age (Dordr)* 36: 9652, 2014.
87. Tomlinson DJ, Erskine RM, Winwood K, Morse CI, and Onambe ´ le ´ GL. The impact of obesity on skeletal muscle architecture in untrained young vs. old women. *J Anat* 225: 675–684, 2014.
88. Trezise J, Collier N, and Blazevich AJ. Anatomical and neuromuscular variables strongly predict maximum knee extension torque in healthy men. *Eur J Appl Physiol* 116: 1159–1177, 2016.
89. Vineis P, Alavanja M, Buffler P, Fontham E, Franceschi S, Gao YT, Gupta PC, Hackshaw A, Matos E, Samet J, Sitas F, Smith J, Stayner L, Straif K, Thun MJ, Wichmann HE, Wu AH, Zaridze D, Peto R, and Doll R. Tobacco and cancer: Recent epidemiological evidence. *J Natl Cancer Inst* 96: 99–106, 2004.
90. Wernbom M, Augustsson J, and Thomeé R. The influence of frequency, intensity,

volume and mode of strength training on whole muscle cross-sectional area in humans. *Sports Med* 37: 225–264, 2007.
91. West DW, Kujbida GW, Moore DR, Atherton P, Burd NA, Padzik JP, De Lisio M, Tang JE, Parise G, Rennie MJ, Baker SK, and Phillips SM. Resistance exerciseinduced increases in putative anabolic hormones do not enhance muscle protein synthesis or intracellular signalling in young men. *J Physiol* 587: 5239–5247, 2009.
92. Zamparo P, Minetti A, and Di Prampero P. Interplay among the changes of muscle strength, cross-sectional area and maximal explosive power: Theory and facts. *Eur J Appl Physiol* 88: 193–202, 2002.

CON　反対意見

骨格筋の成長が筋力適応をもたらす機構的役割を果たしているという仮説は、筋電図の変化が筋力の増加を直線的に追っていないことを示す実験データから主に生じたものである(24)。これらの発見は、筋横断面積と筋力の尺度との間に観察される基本的関係に関する知識と結びついて(16,27)、いわゆる筋力適応の時系列の基礎をなしている。さらに、筋サイズと筋力は通常どちらもレジスタンストレーニング後に増加する。以上のことから、筋力の増大を説明するメカニズムとして、筋の成長が想定されるようになった(2,12,13)。Ikai＆Fukunaga(17)の初期の研究では、筋横断面積と様々な筋力尺度との間に観察される基本的関係(すなわち相関関係)に基づいて、筋力の変化に対する筋肥大の機構的役割が想定された。しかし、これを不朽の学説としたのはMoritani＆deVries(24)である。彼らによると、レジスタンストレーニングの初期段階では神経系の適応によって筋力が説明され、その後(3～5週間後)は筋肥大のメカニズムが主な働きをする。この8週間の研究において、筋電図に対してプロットされる力の関係が右方向へ移行することから、骨格筋の肥大が想定された(参考文献24の図1を参照)。つまり、筋力の変化はそれに釣り合う筋電図活動の増加を伴わなかったため、筋肥大が筋力適応に寄与するメカニズムであると結論づけられた。この論文は、筋肥大が筋力変化のメカニズムであることを示すエビデンスとして頻繁に引用されるが、彼らによって使用された数学的モデルがこの説の裏付けとなっていることに注意が必要である。つまり、彼らの2構成要素モデルに従うと、力／筋電図関係にみられるあらゆる不釣り合いな変化は、筋力変化を説明するメカニズムが筋肥大であることを示している(彼らは筋サイズの変化を測定していないにもかかわらず)。

この画期的な研究の発表以来、筋力の変化を推進するものは神経系と筋肥大のメカニズムであるという説が一般に受け入れられてきた。興味深いことにそれ以前は、筋肥大は筋力適応のメカニズムとして受け入れられていなかった。例えばMorehouse＆Millerは運動生理学のテキストを重ねて出版しているが、「筋肥大が確実に望ましい反応であることは証明されていない」として、骨格筋の筋肥大は「トレーニングの副産物にすぎないかもしれず、ひょっとしたら有害かもしれない」と論じている(23)。1955年にRasch＆Morehouse(29)は論文「筋肥大の問題」を発表し、筋力適応に対する筋肥大の重要性は不明であることを指摘した。そのような否定的推測の存在にもかかわらず、Moritani＆deVriesによる力／筋電図関係の変化を検証した8週間のレジスタンストレーニング研究(24)は、レジスタンストレーニングプログラム後の筋力増大を説明するメカニズムとして筋肥大を確立させることとなった。以前に論じたように(4,5,9)、筋サイズにおける運動誘発性の増加が筋力における運動誘発性の増加に寄与することを示す実験的なエビデンスは欠けている。しかし以下では、このエビデンスを簡単に検証し、スポーツに対するその意味について論じる。

筋サイズの増加が筋力の増大を招くことは直感的に正しく、理に適っていると考えられるかもしれない。例えば、レジスタンスエクササイズは収縮性タンパク質の数を増加させるため(11,14,25,32)、その筋の力発揮能力の増大が見込まれると信じられてきた。しかし、筋全体のレベルでみれば、この増加は筋力の変化に意味のある影響を及ぼさないかもしれない。Bickelら(3)はこれを説明するために、若齢者(20～35歳)と高齢者(60～75歳)を対象として、12週間のレジスタンストレーニング後に、筋線維サイズと随意筋力(1RM)を測定したところ増大が確認された。しかし、その後のディトレーニング期間にトレーニング量を1/3(週に3セット)や1/9(週に1セット)に減らすと、高齢者において筋線維の横断面積の増加分は完全に失われたが、増加した随意筋力は十分に維持された。さらに若齢者の場合は、32週間の完全なディトレーニング期間に筋線維の横断面積は基準値に戻ったが、筋力は維持された(筋力は、定期的な測定そのものを介して維持されたと考えられる)。

筋の成長が筋力の変化を生み出すためにそれほど重要であるならば、トレーニングによって誘発された脚の除脂肪体重と筋線維の横断面積の喪失が、トレーニングによって誘発された筋力の増加に影響を及ぼさなかったのはなぜだろう。これは、筋線維の横断

面積の増加が、筋全体のレベルで測定される随意筋力の尺度に大きな意味をもたないことを示している可能性がある。あるいは、筋量が失われても筋力が維持されることには別のメカニズムが関与しているのかもしれない。筋肥大が筋力適応のメカニズムではないかもしれないという考えは、トレーニング後の筋サイズの変化と筋力の変化に一貫した関係がみられないことによっても示される(筋の成長を誘発するために研究者が選ぶトレーニング方法によるとみられる)。例えば、従来のレジスタンストレーニングエクササイズで低負荷を利用すると、従来の高負荷トレーニングと同様の骨格筋の成長がみられたが、筋力の変化は多様であった(19,22,26)。加えて、Kacin&Strazarは健康な若齢成人男性を対象として、4週間にわたり血流制限を加えて最大随意収縮の15%でトレーニングを実施したところ、筋サイズの変化は最大随意筋力の変化を伴わなかった(18)。同様にMartinsら(20)によると、2型糖尿病のリスクのある閉経後の女性を対象として、12週間の高強度自重トレーニングを実施したところ、筋量の指標は向上したが、筋力は変化しなかった。これらの多くの研究は、筋の成長と筋力が互いに無関係に生じることを示しており、たとえ筋肥大が筋力向上のメカニズムであるとしても、それは筋力の適応にとってきわめて弱いメカニズムであり、筋力の最大化を目的とするトレーニングプログラムでは優先するべきではないと考えられる。

スポーツにおいて筋肥大を目指してトレーニングする目的は何か

エクササイズによる筋サイズの増加が筋力にほとんど影響を及ぼさないのであれば、次の点が問題となる。すなわち、「スポーツにおける筋肥大の目的は何か?」を問わねばならない。前述のようにMorehouse&Miller(23)は、骨格筋の肥大は「望ましい反応」ではない可能性があり、「トレーニングの副産物であり、有害なものかもしれない」と主張している。つまり、大多数のアスリートにとって、筋サイズの増大には利益がないとみられる。骨格筋の肥大が絶対に「有害」というわけではないにせよ、この適応にのみ焦点を置くことは、スポーツパフォーマンスを向上させる時間(実際の競技を練習する時間)を奪う可能性がある。筋力変化のメカニズムとして筋肥大を支持する研究者は、筋サイズの増加が筋の力発揮能力を向上させる可能性があると主張するかもしれない(30)。しかしこの仮説は、これらの変化の重要性を検証する実験的調査ではなく、筋サイズと筋力の基本的関係に基づいている(16,27)ように思われる。

筋力とスポーツパフォーマンス

スポーツパフォーマンスにおける筋力増大の重要性の主張は、横断的データに大きく依存している(6)。本コラムの目的に沿って、我々はそれらを簡単に検証し、「筋力の汎用性」と「筋力の適応における汎用性」に関する詳細な議論を行なう。

スポーツにとって筋力トレーニングの重要性は、筋力と多様なスポーツ関連成果や能力の間にプラスの関係を示す横断的データに大きく依存している(6)。例えばSuchomelら(31)のレビューによると、様々な筋力尺度とスポーツ関連課題は統計的に相関している。彼らは、「一般的および競技特異的スキルのパフォーマンスを幅広く向上させるには、筋力向上にとって代わるものはない」と主張した。この主張に対して我々は、このような競技関連スキルを向上させるには、筋力の様々な尺度を向上させるよりも、競技関連スキルそのものを練習することのほうがはるかに有効であると考える。さらに、ウェイトの挙上から得られるパフォーマンスへの付加的利益はいずれもきわめて小さく、挙上そのものに類似した動作/スキルに限定されると考える。これを示す競技特異的研究は行なわれていないものの、特異性の重要性はレジスタンストレーニング分野において広く認められている(8,21,22)。またSuchomelら(31)は「スポーツ科学者や専門職は、各競技/イベントで要求される状況において最大の筋力を発揮できるような、長期的なトレーニング方策を実施するべきである」とも主張する。しかし、このような結論を横断的研究から引き出すことは不可能である。

横断的データと様々な健康の生体指標に基づいて、我々はかつて同様の結論を引き出していた。すなわち、健康の生体指標(C反応性タンパク質など)が高水準の筋力と関連していることが観察されたため、健康を増進するためのレジスタンスエクササイズを介して筋力は増大するはずであるという結論に至った(7)。しかし興味深いことにその後の分析によると、これらの関連性の多くは筋力によってのみ推進されたものであり、行動(筋力強化活動への実際の取り組み)によって推進されたものではなかった(10)。同じことは筋力とスポーツにもあてはまるかもしれない。スポーツについても、厳密な無作為対照化試験の実施が困難である。横断的データからは、筋力の強いアスリートはスポーツにおいて秀でているとみえる。しかしこの関係は、高いレベルのアスリートと才能に恵まれない

アスリートとの間に内在する差異を反映しているにすぎない可能性がある。つまりこれらのテストは、これらのアスリートが、トレーニングによって筋力を高めてそれによって高いレベルのアスリートとなったことを示しているのではなく、遺伝的な潜在能力／内在的生理学的差異を検出していると考えられる。横断的研究に依存するのは、個別の長期的介入の実施が難しいからであることは理解できる。とはいえ、そのようなデータの限界を認識して、そういった研究に基づく解釈や推論には注意を払うことが大切である。我々の主張にも批判はあるだろう。しかし、スポーツにとって筋力増大が重要であることを示すには、横断的な相関分析に頼るだけでなく直接的なエビデンスが必要であり、その不足もまた批判されるべきである。付言すれば、多様な筋力尺度と競技関連能力の間の横断的関係は「筋力の汎用性」を示しているだけかもしれない。筋力の汎用性とは、力の強い人は複数の評価において筋力が大きいことを指している(15)。しかし、スポーツのためにレジスタンストレーニングを実施する根拠は、「筋力の汎用性」ではなく、「筋力の適応における汎用性」に置かれている。

筋力の汎用性と筋力の適応おける汎用性

スポーツのためのストレングス＆コンディショニングプログラムの実施は、「筋力の適応における汎用性」に依拠している。すなわち、ウェイトルームにおける挙上重量の増加は、競技関連能力も変化させることが期待されている。しかし、一般に用いられる概念は「筋力の汎用性」であり、これは1989年にHortobagyiら(15)によって主張された。この仮説は、「筋力が様々な収縮様式と速度によって測定される時、様々なテストにおける個人のパフォーマンスは相対的にみて同じランキングである」ことを示唆している。筋力には汎用性が存在する。すなわち、「力の強い」人は複数の評価において筋力が大きい(これが相関関係を推進する)。しかし、スポーツのためのストレングス＆コンディショニングが根拠とするのは、「筋力の適応における汎用性」である。つまり、ある筋によるある動作における筋力の増加は、同じ筋を用いた他の動作における筋力の増加を反映していると考える。問題は、レジスタンスエクササイズ後の筋力変化を検証すると、筋力の適応に強い汎用性が存在するとは思われないことである。

Bakerら(1)は、筋の等尺性尺度と動的尺度の関係を検証して、「特異性と汎用性」のどちらが存在するかを決定しようとした。その結果、レジスタンストレーニングプログラムの基準値においては、動的筋力と等尺性筋力の間に中程度の相関関係が存在したが、高重量による等張性レジスタンストレーニングプログラム後はそれぞれ程度の異なる変化を示すことが見出された(1)。彼らによると、「筋機能の汎用性はテスト条件が異なると観察されず、ある形式のテストの結果を別の形式のテストにあてはめることは賢明ではないかもしれない」。具体的に言えば、等尺性筋力にも変化がみられたが、それは動的筋力にみられた変化とは釣り合っていなかった(1RMスクワットの筋力は27.2％の増加であったが、脚の等尺性筋力は8.7％の増加であった)。これらの結果は、トレーニング課題における筋力が変化しても、その筋力の変化が他の課題に転移する可能性は低いかもしれないことを示している。これは、その動作／スキルがトレーニングにおけるものとどの程度違っているかとある程度関係している。

この主張の根拠を示す例としてRasch＆Morehouse(29)の研究を取り上げる。彼らは、トレーニングに近い姿勢と方法でテストを実施するほうが、肘関節屈曲筋群の筋力増加が大きいことを見出し、筋力の適応はスキルの獲得を反映しているのかもしれないと結論づけた。筋力の汎用性は、レジスタンストレーニングに関する文献であまねく取り上げられている。例えば、低負荷のレジスタンストレーニングプログラムは、高負荷トレーニングと同程度に等尺性筋力も等張性筋力も増大させた(19,22)。ただし、1RMには小さな変化しかみられなかった。さらに、従来の高負荷トレーニングプログラムは、トレーニング方法とは異なる様式(等尺性か等張性か、立位か仰臥位か)で測定すると一貫した筋力の増加を示さなかった(1,29)。レジスタンストレーニングに対する一貫した「汎用的な」筋力適応の欠如は、期待する筋力成果を目指してトレーニングする特異性の重要性を示していると考えられる。加えて、様式限定の非常に類似した筋力テストにおいて、筋力の適応における汎用性がそれほど弱いものであるならば、ある筋力テストにおける適応が、競技特異的動作／スキルに汎用される可能性はきわめて低いと考えられる。

このように「筋力の適応における汎用性」が欠如していることは、スポーツに対するエビデンスになると考えられるが、そのような結論は非競技関連の文献から引き出されたものであるという批判があろう。しかし、実際の競技関連成果を検証した文献の少なさを考えると、複数のパフォーマンス尺度を利用したレジスタンストレーニング研

究は、この非常に重要な基本的概念に関する最良のエビデンスとなる可能性がある。さらに、動作限定のきわめて類似した課題において汎用的な筋力の適応がみられないということは、「筋力の適応における汎用性」の弱さを示す強力なエビデンスである。実際の競技は(大抵の場合)、レジスタンストレーニングプログラムで実施する課題とはかなり異なっている(等張性の肘関節屈曲から等尺性の肘関節屈曲へというレベルではない)。そのため、レジスタンスエクササイズとスポーツパフォーマンス間に関する筋力の適応における汎用性は、あるとしてもごくわずかであろうと考えられる。

結論と考察

レジスタンスエクササイズがスポーツパフォーマンスに及ぼす影響を調査することは確かに困難である。なぜなら、そのような研究を行なうには、一部のアスリートに対してレジスタンストレーニングを実施し、他のアスリートには実施しないようにデザインしなければならないからである。さらに、筋を大きく、力強くすることによって、スポーツパフォーマンスをめぐるプラスの適応が生じるだろうという考えは、直感的に正しく、理に適っていると思われがちである。しかし、筋力の適応に関する理解が深まりつつある今、様々な筋力スキルの向上がもたらす利益は、その動作やパフォーマンス課題から遠ざかるにつれて衰退し、「筋力の適応における汎用性」はきわめて類似した動作と強度に限定されるとみられる。実際の競技成果を検証した文献は少なく、複数のパフォーマンス尺度を利用したレジスタンストレーニング研究から結論を引き出さざるをえない。しかしそれらのデータによると、筋力が最も増大するのは、筋力テストが実際のトレーニングを模倣している場合であり、同様の動作に対しては若干の交差もみられる。諸文献によると筋力の汎用性は存在する。しかし、「筋力の適応における汎用性」ははるかに少ないと考えられる。我々が言いたいのは、筋力がスポーツにとって重要ではないということではなく、様々な筋力尺度の変化が競技に関連する利益をもたらさない可能性があるということである。また、筋力の適応において骨格筋の肥大が果たす機構的役割にも疑問が残る。以上のことから、我々は、筋肥大トレーニング(筋力の適応を目的とする)は、スポーツにおいて最小限に留めるべきであると考える。◆

著者紹介

Samuel Buckner:
University of South Floridaの運動科学の助教で、USF Muscle Laboratoryのディレクター。

Scott Dankel:
University of Mississippiの博士課程の学生。

Zachary Bell:
University of Mississippiの博士課程の学生。

Takashi Abe:
University of Mississippiの運動科学の客員教授。

Jeremy Loenneke:
University of Mississippiの運動科学の助教。

References

1. Baker D, Wilson G, and Carlyon B.Generality versus specificity: A comparison of dynamic and isometric measures of strength and speed-strength. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 68: 350–355, 1994.
2. Balshaw TG, Massey GJ, Maden-Wilkinson TM, Morales-Artacho AJ, McKeown A, Appleby C, and Folland JP. Changes in agonist neural drive, hypertrophy and pretraining all contribute to the individual strength gains after resistance training. *Eur J Appl Physiol* 117: 631–640, 2017.
3. Bickel CS, Cross JM, and Bamman MM. Exercise dosing to retain resistance training adaptations in young and older adults. *Med Sci Sports Exerc* 43: 1177–1187, 2011.
4. Buckner SL, Dankel SJ, Mattocks KT, Jessee MB, Grant Mouser J, and Loenneke JP. Muscle size and strength: Another study not designed to answer the question. *Eur J Appl Physiol* 117: 1273–1274, 2017.
5. Buckner SL, Dankel SJ, Mattocks KT, Jessee MB, Mouser JG, Counts BR, and Loenneke JP. The problem of muscle hypertrophy: Revisited. *Muscle Nerve* 54: 1012–1014, 2016.
6. Buckner SL, Jessee MB, Dankel SJ, Mattocks KT, Abe T, and Loenneke JP. Resistance exercise and sports performance: The minority report. *Med Hypotheses* 113: 1–5, 2018.
7. Buckner SL, Loenneke JP, and Loprinzi PD. Lower extremity strength, systemic inflammation and all-cause mortality: Application to the "fat but fit" paradigm using cross-sectional and longitudinal designs. *Physiol Behav* 149: 199–202, 2015.
8. Campos GE, Luecke TJ,Wendeln HK, Toma K, Hagerman FC, Murray TF, Ragg KE, Ratamess NA, Kraemer WJ, and Staron RS. Muscular adaptations in response to three different resistance-training regimens: Specificity of repetition maximum training zones. *Eur J Appl Physiol* 88: 50–60, 2002.
9. Dankel SJ, Buckner SL, Jessee MB, Mouser JG, Mattocks KT, Abe T, and Loenneke JP. Correlations do not show cause and effect: Not even for changes in muscle size and strength. *Sports Med* 48: 1–6, 2018.
10. Dankel SJ, Loenneke JP, and Loprinzi PD. Determining the importance of meeting muscle-strengthening activity guidelines: Is the behavior or the outcome of the behavior (strength) a more important determinant of all-cause mortality? *Mayo Clin Proc* 91: 166–174, 2016.
11. Dix DJ and Eisenberg BR. Myosin mRNA accumulation and myofibrillogenesis at the myotendinous junction of stretched muscle fibers. J Cell Biol 111: 1885–1894, 1990. 12. Folland JP and Williams AG. The adaptations to strength training: Morphological and neurological

contributions to increased strength. *Sports Med* 37: 145–168, 2007.
13. Hakkinen K, Newton RU, Gordon SE, McCormick M, Volek JS, Nindl BC, Gotshalk LA, Campbell WW, Evans WJ, Hakkinen A, Humphries BJ, and Kraemer WJ. Changes in muscle morphology, electromyographic activity, and force production characteristics during progressive strength training in young and older men. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 53: B415–B423, 1998.
14. Hasten DL, Pak-Loduca J, Obert KA, and Yarasheski KE. Resistance exercise acutely increases MHC and mixed muscle protein synthesis rates in 78–84 and 23–32 yr olds. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 278: E620–E626, 2000.
15. Hortobagyi T, Katch FI, and LaChance PF. Interrelationships among various measures of upper body strength assessed by different contraction modes. *Eur J Appl Phys Occup Phys* 58: 749–755, 1989.
16. Ikai M and Fukunaga T. Calculation of muscle strength per unit cross-sectional area of human muscle by means of ultrasonic measurement. *Int Z Angew Physiol* 26: 26–32, 1968.
17. Ikai M and Fukunaga T. A study on training effect on strength per unit cross-sectional area of muscle by means of ultrasonic measurement. *Int Z Angew Physiol* 28: 173–180, 1970.
18. Kacin A and Strazar K. Frequent low-load ischemic resistance exercise to failure enhances muscle oxygen delivery and endurance capacity. *Scand J Med Sci Sports* 21: e231–241, 2011.
19. Martin-Hernandez J, Marin PJ, Menendez H, Ferrero C, Loenneke JP, and Herrero AJ. Muscular adaptations after two different volumes of blood flow-restricted training. *Scand J Med Sci Sports* 23: e114–120, 2013.
20. Martins FM, de Paula Souza A, Nunes PRP, Michelin MA, Murta EFC, Resende EAMR, de Oliveira EP, and Orsatti FL. Highintensity body weight training is comparable to combined training in changes in muscle mass, physical performance, inflammatory markers and metabolic health in postmenopausal women at high risk for type 2 diabetes mellitus: A randomized controlled clinical trial. *Exp Gerontol* 107: 108–115, 2018.
21. Mattocks KT, Buckner SL, Jessee MB, Dankel SJ, Mouser JG, and Loenneke JP. Practicing the test produces strength equivalent to higher volume training. *Med Sci Sports Exerc* 49: 1945–1954, 2017.
22. Mitchell CJ, Churchward-Venne TA, West DW, Burd NA, Breen L, Baker SK, and Phillips SM. Resistance exercise load does not determine training-mediated hypertrophic gains in young men. *J Appl Physiol* 113: 71–77, 2012.
23. Morehouse LE and Miller AT. *Physiology of Exercise*. St. Louis, MO: Mosby, 1976.
24. Moritani T and deVries HA. Neural factors versus hypertrophy in the time course of muscle strength gain. *Am J Phys Med* 58: 115–130, 1979.
25. Narici MV and Maganaris CN. Adaptability of elderly human muscles and tendons to increased loading. *J Anat* 208: 433–443, 2006.
26. Ogasawara R, Loenneke JP, Thiebaud RS, and Abe T. Low-load bench press training to fatigue results in muscle hypertrophy similar to high-load bench press training. *Int J Clin Med* 4: 114, 2013.
27. Powell PL, Roy RR, Kanim P, Bello MA, and Edgerton VR. Predictability of skeletal muscle tension from architectural determinations in Guinea pig hindlimbs. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol* 57: 1715–1721, 1984.
28. Rasch PJ. The problem of muscle hypertrophy: A review. *J Am Osteopath Assoc* 54: 525–528, 1955.
29. Rasch PJ and Morehouse LE. Effect of static and dynamic exercises on muscular strength and hypertrophy. *J Appl Physiol* 11: 29–34, 1957.
30. Stone MH, O' Bryant H, and Garhammer J. A hypothetical model for strength training. *J Sports Med Phys Fitness* 21: 342–351, 1981.
31. Suchomel TJ, Nimphius S, and Stone MH. The importance of muscular strength in athletic performance. *Sports Med* 46: 1419–1449, 2016.
32. Trappe S, Williamson D, Godard M, Porter D, Rowden G, and Costill D. Effect of resistance training on single muscle fiber contractile function in older men. *J Appl Physiol* (1985) 89: 143–152, 2000.

From *Strength and Conditioning Journal*
Volume 40, Number 6, pages 99-111.