

Key Words【同時トレーニング：concurrent training、筋力：strength、持久力：endurance、パフォーマンス：performance、トライアスロン：triathlon、エコノミー：economy】

ロングディスタンストライアスリートのための筋力トレーニング：練習理論

Strength Training for Long-Distance Triathletes: Theory to Practice

Kate M. Baldwin,^{1,2} Ph.D. Claire E. Badenhorst,³ Ph.D. Ashley J. Cripps,¹ Ph.D.

Grant J. Landers,⁴ Ph.D. Robert J. Merrells,¹ Grad Dip Sc Max K. Bulsara,⁵ Ph.D.

Gerard F. Hoyne,¹ Ph.D.

¹School of Health Sciences, University of Notre Dame, Fremantle, Australia

²Discipline of Exercise Science, Murdoch University, Australia

³School of Sport, Exercise and Nutrition, College of Health, Massey University, Auckland, New Zealand

⁴School of Human Sciences, University of Western Australia, Crawley, Australia

⁵Institute for Health Research, University of Notre Dame, Fremantle, Australia

要約

同時(Concurrent)トレーニングは、筋力トレーニングと持久力トレーニングを相互補完的に実施するトレーニング方法と考えられており、運動エコノミーなどの成功を決定する生理学的因子の向上を目的として、持久系のサイクリストやランナーのトレーニングプログラムで実施されることが多い。同時トレーニングの方法や方策は、持久系のサイクリストやランナーを対象として広く検証されている。しかし、ロングディスタンス(LD)トライアスリートの生理学的変数の向上にとっての至適方法を調査した研究はごくわずかであり、至適なプログラムデザインの方法はよく知られていない。本稿は、LDトライアスリートのための同時トレーニングに関する現在の考え方や考察を取り上げ、パフォーマンス向上のメカ

ニズム、動員される筋や動作パターン、エクササイズの種類、負荷、動作速度、スケジューリング、頻度、持続時間などを明らかにする。同時トレーニングに関する一般的な誤解も指摘し、コーチ、アスリート、その他の専門職が、トライアスロンに含まれる3種類のパフォーマンスをすべて向上させられるように、同時トレーニング実施時の留意事項を示す。

はじめに

パフォーマンスの至適化と生理学的変数の向上の達成に、筋力と持久力の同時(concurrent)トレーニングを推奨する研究は数多く存在する。しかし、持久系アスリートへの筋力トレーニング(ST)の実施に反対するコーチは多い。ロングディスタンス(LD)トライアスリートのプログラムにSTを組み込むことは、この競技の成功にきわめて重要なサイクリングエコノミー(CE)とランニングエコノミー(RE)のどちらも向上させうる(58,62)。さらに、STは、サイクリングやランニングのような単一様式の持久系競技において、パフォーマンス変数(エコノミー、タイムトライアルのパフォーマンス、最大下強度における心拍数[HR]の減少、最大酸素摂取時における速度[$v\dot{V}O_2\max$]とパワー[$w\dot{V}O_2\max$])を有意に向上させることができる(10,11,25,61,71,72,79,80,83,90,91,98,100)。LDトライアスロンは、オリンピックデイス

タンス(スイム1,500 m、バイク40 km、ラン10 km)よりも長い距離を指し(59)、ハーフアイアンマンレース(スイム1.9 km、バイク90 km、ラン21.1 km)とアイアンマンレース(スイム3.8 km、バイク180 km、ラン42.2 km)の2つの形式が最もよく知られている。

LDトライアスリートにおけるSTの実施状況を調査した最近の研究によると、通常のトレーニング処方STを含むアスリートはわずか54.6%であり、実施を妨げる主な障壁として、時間的制約や、エクササイズの実行方法、漸進方法、テクニックなどに関する知識の不足が挙げられた(59)。STは、操作可能な多様な変数を含む幅広い用語と考えられているため(51)、コーチやアスリートにとって、目標を達成するための至適な処方の理解が容易ではない可能性がある。操作可能な変数としては、筋収縮のタイプ(等尺性、短縮性、伸張性)、エクササイズ選択(オープンチェーンかクローズドチェーンか)、量(レップ数、セット数、挙上負荷)、動作速度、休息时间、トレーニング頻度がある(52)。さらに、トレーニングプログラムを期分けすれば、全体構造に従って特異的なトレーニング刺激を与えることが可能になり、それに応じて適応と反応が決定される。筆者らは先行研究(58)において、LDトライアスリートのためのSTの至適な処方を理解する難しさを指摘した。まず、12週間の中程度の負荷によるSTは、REやスイムのタイムには何の影響も及ぼさなかったが、CEを有意に向上させた。続いて12週間の高負荷のSTを実施したところ、REは有意に向上したが、CEはそれ以上向上せず、スイムのタイムも向上しなかった(58)。持久力トレーニングでは、パドルによるスイミング、大きなギアによるサイクリング、坂を駆け上げるなどの「筋力-持久力」セッションが筋力向上のために処方されることがある。この「筋力-持久力」セッ

ションでは、これらの各動作を数百、ときには数千レップ実施することになる。つまり、1分当たり170ステップのリズムで2分間坂を駆け上がるとすると340レップを行ない、さらにセッション内でこれを何度も繰り返すことになる。このような「筋力」変数は、従来のSTの処方とは合致しないため(51)、「筋力向上」を目的としてセッションが実施されているにもかかわらず、STが含まれていないことになる。

持久系アスリートのパフォーマンスや生理学的変数を向上させるためにSTを実施することを支持する研究は、数多く存在する(10,11,25,61,71,72,79,80,83,90,91,98,100)。しかし、実際の応用に関する研究は、ランニング(8)や単一様式の競技(9)を対象としたものであるか、やや古いものである(20)。そこで本稿は、筋力と持久力の同時トレーニングが、LDトライアスリートのパフォーマンスに貢献する生理学的因子を向上させる可能性について示す。特に、単一様式の持久系競技と比較して、トライアスロンに含まれる3種目に関する多様な筋群や筋の収縮活動に注目する。また、STの実施をめぐって指摘されている知識の不足という障壁に取り組み、コーチやアスリートが自信をもって現在のトレーニング処方にSTを組み込むことを目指す。さらに、トライアスロンの3種目のそれぞれに対するSTプログラムのデザインの違いを概説して、STを実施する際に考慮する必要のあるその他の因子(持久系パフォーマンスの非至適化やSTのスケジューリングなど)を明らかにする。

LDトライアスリートのパフォーマンスに貢献する生理学的変数 運動エコノミー

運動エコノミーとは、最大下の絶対強度において必要とされるエネルギー要求であり、持久系アスリートの重要な尺度のひとつといわれる(7)。トラ

イアスロンは、長距離のスイム、バイク、ランをこの順序で連続して行なう競技であり、極度に高いエネルギー要求が課される。特に、エネルギーの貯蔵量が枯渇するレースの最終ステージでのエネルギー要求が高い(43,63,64)。バイクとランはLDトライアスロンレースの最長種目であり、総レース時間のそれぞれ55%と35%を占めるため(33)、総合的なパフォーマンスに大きな意味をもつ。CEとREは、LDトライアスロンの成功のカギを握っており、この2つの種目のパフォーマンスを向上させるには、エネルギー供給機構を効率良く利用できるように身体を鍛える必要がある(43,63,64)。CEとREは多因子的であり、形態学的、生理学的、バイオメカニクスの、神経筋系の因子の影響を受ける(82)。神経筋系パフォーマンスの効率は筋線維タイプ、神経信号、運動プログラム、力発揮、筋腱ステイフネスに影響される(7)。これらの因子は、様々なトレーニング方策の実施によって修正することが可能であり、STはREの向上に最も効果的な介入のひとつとみなされている(82,83)。

最大酸素摂取量と乳酸性作業閾値

LDトライアスロンで成功するにはハイレベルの有酸素性パワーが不可欠であり、優れたトライアスリートの最大酸素摂取量($\dot{V}O_2\max$)は、トレーニング非経験者の2倍近くに達する(13)。優れた持久系アスリートの $\dot{V}O_2\max$ もほぼ同じである。ただし、REはアスリートによって大きく異なり、トップアスリートとそうではない選手を区別する尺度になりうる(23,65)。事実、ハイレベルのランナーにおけるレースパフォーマンスのばらつきは65%までが、REの差によって説明される。つまり、REが最大のアスリートがレースで勝利する可能性が高い(23)。乳酸性作業閾値(LT)は、血中乳酸濃度が急速に上昇する作業負荷の

値であり、やはりトライアスロンのパフォーマンスと強い相関関係にある(92)。LTは、LDトライアスロンなどの持久系競技において長時間維持できる $\dot{V}O_2\max$ を決定する(92)。したがって、LTが高いアスリートは、動作のエネルギーコスト(EC)に貢献する無酸素性代謝量の急速な増加と関連する、血中乳酸濃度の持続的上昇を伴うことなく、より高い最大下強度を維持することができる。

傷害予防

LDトライアスロンでは傷害がしばしば発生するが、これはトレーニング量の多さ(1週間当たり13.5～21.5時間)と関連している可能性がある(37,101)。Andersonら(2)は、26週間のトレーニング期間にわたってLDトライアスリートの傷害発生率を調査した。その結果、コホート全体の87%がオーバーユース障害を報告し、その傷害の半数以上が「重大」な問題に分類された(トレーニング量の中～大の減少、または競技パフォーマンスの中～大の減少、あるいは競技参加不能)。26週間を通じてコホートの半数以上が、膝関節、下腿部、腰部、肩関節のオーバーユース傷害を経験した(2)。トレーニングは持久系パフォーマンスの最も重要な修正因子のひとつであり(48)、LDトライアスリートは一般的に非常に多量のトレーニングを実施しているため、傷害によってトレーニングを離れる時間が増加すると、パフォーマンスの低下を招くと考えられる。トレーニングやレースで受傷することは、トレーニング機会の喪失やセッション内容の変更をもたらし、その結果、ハイレベルなパフォーマンスに到達するための必要な時間を長引かせる。逆に、傷害を回避して、LDトライアスロンのパフォーマンスに必要と考えられる多量のトレーニングを維持することができれば、レースで求められる至適パフォーマン

スレベルに達することができるであろう。近年のメタ分析によると、STは競技関連のオーバーユース障害をほぼ半減させ、最も効果的な傷害予防プロトコルであった(54)。STをトレーニングプログラムに含めると傷害発生率が低下するため、LDトライアスリートのパフォーマンスに有益であると考えられる。

LDトライアスリートに関する研究によって、傷害が最も多く発生する部位は足関節と膝関節であることが判明している。報告されたオーバーユース障害の約77.7%がアキレス腱の損傷、66.6%が膝関節の障害であった(30)。また、Vleckらによると、LDトライアスリートが最も頻繁に受傷する部位は膝関節(44%)、下腿部(20%)、ハムストリングス(20%)、腰部(20%)であり、ほとんどのオーバーユース障害はランニングに伴って発生し(60%)、サイクリングとスイミングはそれぞれ32%と16%であった。

トライアスロンで動員する筋群と動作パターン

ランニングでは、接地のたびにアスリートの体重の2～3倍の地面反力が、左右の下肢に伝わる。この力は、支持脚の筋腱系がバネのように振る舞うことによって減殺される(69,82)。力学的エネルギーは接地局面で筋と腱に貯蔵され、その後の踏み切り局面で消費される(34)。この貯蔵エネルギーの回復と消費は筋の収縮活動の必要性を減らし、エネルギー要求を減少させる(34)。下肢のバネのような振る舞いと弾性エネルギーの利用は、至適ランニングパフォーマンスとエコノミーを実現するには筋腱ステイフネスが重要であることを強調している。ランニング中の酸素消費量は、弾性エネルギーの貯蔵と回復の貢献がなければ30～40%増加すると見積もられている(21)。下腿三

頭筋(腓腹筋とヒラメ筋)は、レクリエーションレベルのランナーではランニングの総代謝コストの最大40%、ハイレベルのランナーでは25%を占めるため(36)、下腿三頭筋の筋力はREと関連する。下腿三頭筋はランニング中の前方推進力における最大の貢献者である。停止腱(アキレス腱)は踏み切り局面で力学的エネルギーの90%を回復し、腱が発揮する力はアスリートの体重の6～8倍と推定されている(70)。下腿三頭筋群に含まれるヒラメ筋は、身体の前方向推進の主要な貢献者である(41)。ランニング速度が増加すると、後期立脚局面においてヒラメ筋の筋線維はどの筋よりも速い速度で収縮する。これによって足関節の底屈を素早く行ない、接地時間を短縮する。これはランニングの速度とエコノミーに関連している(29,40)。

ハムストリングス、大腿四頭筋、前脛骨筋もランニングにおいて大きな役割を担う。ランニング周期の様々な局面で短縮性筋活動と伸張性筋活動の両方を行ない、制動局面／推進局面で協力して筋腱ステイフネスを増大させ、発揮筋力を増加させる(53)。大殿筋も股関節の伸展に重要な役割を果たし、ランニングでは主に短縮性筋活動を行なう。上肢はランニングの加速の1%未満にしか貢献せず、際立った役割を果たしていない(41)。

しかし、腕が下肢の運動量とのバランスをとり、下肢の筋活動に影響を及ぼすことを忘れてはならない。特に斜め後方への振りを介して、大殿筋の筋活動に大きな影響を及ぼす(広背筋と大殿筋は胸腰筋膜を介して脊柱の後方で繋がっている)(85)。

バイク

ランニングとは対照的に、ロードサイクリングでは短縮性筋活動のみが行なわれるため(16,31)、ランナーのように伸張性筋活動の間にエネルギー

を貯蔵して利用する能力が低下する。ペダルストロークの最初の1/4(ペダル0~90°)では、大腿四頭筋、殿筋群、大腿二頭筋、前脛骨筋が協働してパワーを生み出す(75,76,87)。その後、大腿四頭筋の活動が減少し、ペダル180°まではハムストリングス、腓腹筋、大殿筋の活動が増加して推進局面を完了する(75,76,87)。サイクリングでは股関節屈曲筋群(腸骨筋、大腰筋、大腿二頭筋短頭)も活動し、ペダル下方への推進ストロークに続く上方への効果的な移動を可能にする(75,76)。ペダルストロークの間、足関節は安定姿勢をとり、足関節からクランクへ力を確実に転移させる。これは、足関節底屈筋群(下腿三頭筋)と前脛骨筋の共収縮によってなされる(45,75,76)。

ランニングと同様に、体幹部と腕の筋はペダリング中の下肢の運動量とのバランスをとる。手、腕、肩関節、下腹部、背部が、体幹部と骨盤を支えて前後に動く筋のスリングを形成する(87)。ただし、LDトライアスロンでは主にタイムトライアル用バイクが利用されるため、ロード用バイクと比較すると、空気力学の向上に焦点を置く姿勢がとられる。バイクのタイプと姿勢のそのような変化は、筋の活動量にも変化をもたらす。タイムトライアル用バイクの空気力学を意識した姿勢は股関節の屈曲を増大させて、股関節屈曲筋の活動量を減少させる(17,50)。この股関節屈曲筋の筋力低下を補うために、タイムトライアル用バイクの姿勢では膝関節屈曲筋群(ハムストリングス)の筋活動が増加することが示唆されている。サイクリストにおけるハムストリングスの筋活動の増加は、ペダルストロークにおける力発揮の増加と関連づけられている(17,50)。

スイム

フロントクロールの推進で主に動員される筋は、大胸筋と広背筋である。

しかし研究によると、アスリートのストロークテクニックの差の大きさを反映して、筋の活動量には大きなばらつきがある(73,86)。クロールの成功を左右する重要な特性のひとつは、上肢が安定して水面下の力強い推進を可能にすることである。ストロークでは、大胸筋、小円筋、およびローテーターカフが協働して上肢を安定させる(73,86)。脚のキック動作は推進力としてではなく、全身を安定させて、腕によるストロークの運動学を向上させていると考えられる。キックはクロールの推進力の10%しか貢献していないことが、研究によって示されている(73,86)。オープンウォーター(OW)では、水の条件(うねり、水温、波、潮流)とウェットスーツの着用(効率、テクニック、ストロークのメカニクスに影響する可能性がある)によって、ストロークの運動学がプールと異なり、ストロークの効率、テクニック、力学に影響が生じる可能性がある。さらに、OWでは、パワー発揮ではなく、ストローク動作をできるだけ効率良く行なうことに重点が置かれる(5)。

LDアスリートのための 同時トレーニング

持久系競技において、有意な生理学的向上とパフォーマンスの向上を示したSTプログラムは、一般に「ヘビー」STあるいは「最大」STと呼ばれる高負荷低レップのエクササイズによって構成されていることが多い(80% 1RM以上で1~8レップ×3~5セット)。これはおそらく、持久系競技のコーチが実施する通常のトレーニング、つまり筋持久力を焦点とする低負荷多レップのプログラムの対極であるだろう。持久系競技のコーチは、持久系アスリートの代謝要求と筋への要求には後者のようなトレーニングが適していると考えている。確かに、心臓血管系の側面や筋持久力の側面に対処するには、

従来の持久力トレーニング(長時間の有酸素性運動による、サイクリングやランニングに特異的なインターバルトレーニングなど)を処方すべきである。しかし、最大筋力、動的な力の立ち上がり率(RFD)、筋パワー、神経活動の向上を焦点とする場合は、STプログラムを実施すべきであることが最近の研究によって指摘されている(12,18,81,90,91)。

同時トレーニングの有効性を検証した研究は多様な結果を示しているが、その原因は主にSTプロトコルと方法論の差によると考えられる。26週間にわたって漸進的負荷を利用したSTプログラムは、同時トレーニング群のCE($p=0.001$, 7.53%, ES=0.97)とRE($p=0.004$, 4.86%, ES=-0.57)のどちらも有意に向上させたが、対照群には有意な変化が認められなかった(58)。この研究で実施された介入は12週間のSTブロック2つからなり、第1ブロックは中程度の負荷によるST(75% 1RM以下で8~12レップ×3~4セット)、続く第2ブロックは高負荷によるST(85% 1RM以上で1~6レップ×3~5セット)を実施した。REの有意な向上が観察されたのは高負荷を利用した第2ブロックだけであり、CEの有意な向上が観察されたのは中程度の負荷を利用した第1ブロック後であった。また、LDトライアスロンのシミュレーションを利用して、REとCEを調査した研究もある(60)。この研究では、先行種目の蓄積疲労を考慮して調整することによって、LDトライアスロンに特異的なレース要求と生理学的要求が模倣されている。さらに、REには、RE測定に伴う典型的誤差と最小有効変化のどちらよりも大きな向上(82)が見出されているため、有意な生理学的向上を示していると考えられる。15名の鍛錬されたトライアスリートを対象とした別の研究において、同時トレーニング群は、14週間の高負荷STプログラ

ム(3~5レップ×3~5セットを失敗するまで)によって、REと最大筋力が有意に向上した($p < 0.05$) (62)。

14名の鍛錬されたトライアスリートを対象としたもうひとつの研究では、5週間の高負荷STプログラム(90% 1RM以上で3~5レップ×3~5セットを失敗するまで)が実施された。その結果、同時トレーニング群は、最大筋力が有意に向上したが(6%)、体重は変化しなかった(42)。同時トレーニング群は外側広筋の筋電図活動も増加した。この増加は、神経活動の増加、運動単位の同期の効率化、 α 運動ニューロン活性の効率化、およびゴルジ臓器の抑制低下などの神経メカニズムによる可能性が最も高いと考えられた(42)。最大筋力の有意な増加(6%)は、持久系のサイクリストやランナーを対象とした他の類似研究(10,62,77,79,90,91,100)の結果(14~45%)よりも小さい。Hauswirthら(42)が見出した最大筋力と筋電図活動の比較的小さな向上は、CEの向上には転換されなかった。したがって、5週間の高負荷のSTトレーニングは、CEの有意な変化を誘発するにはトレーニング期間が十分ではなかった可能性がある。

トライアスリートにおけるプライオメトリックSTプログラムの評価も行なわれている(19)。中程度に鍛錬された8名のトライアスリートを対象として、1週間当たり3回、30分間のプライオメトリックセッションを8週間にわたって実施した。その結果、筋の動員パターンにおいて筋電図活動の変化が観察され、ランニング単独の場合に近づいた。しかし、このような好ましい神経運動の成果はREの有意な向上には転換しなかった(19)。

同様の結果は、デュアスリート(バイク、ラン)とサイクリストを対象とする同時トレーニングの検証においても見出されている。8~12週間にわたって週に2回高負荷STを実施した結果、

CEが有意に向上した(10,79,91,98,100)。そのうち2点の研究(79,100)では、長時間の最大下テストの後半まで酸素消費量とHRの低下が観察されなかったため、これは長時間運動による疲労時にCEを向上させるにはSTが重要であることを示していた。さらに、これらの研究における同時トレーニング群は、長時間(3時間)の最大下エクササイズ後における5分間の全力サイクリング(スプリントやLDトライアスロンレースのフィニッシュ直前における努力の増大を模倣)のパフォーマンスが有意に向上した(79,100)。長時間の最大下努力における酸素消費量とHRの低下は、生理学的負担、疲労、エネルギー消費を減らして、5分間の全力運動のために貯蔵グリコーゲンを保存することを可能にする(79,100)。さらに、16週間の最大STプログラムをエリートクラスのサイクリストに実施すると、同時トレーニング群では、45分間のタイムトライアルで発揮されるパワーが有意に向上した(8%)。これに対して対照群では有意な向上が観察されなかった(1)。トレーニング後の総距離、総仕事量、平均発揮パワーは、対照群よりも同時トレーニング群のほうが有意に大きかった(1)。類似の結果は、女子デュアスリートにも見出され、40分間の全力タイムトライアルにおける平均パワーが有意に向上した(98)。加えてRønnestadら(78,79)は、サイクリストに最大STを実施させた結果、 $w\dot{V}O_{2max}$ の有意な向上を見出した(それぞれの研究で $p < 0.05$ 、 $ES = 0.81$ と $ES = 0.84$)。

持久系ランナーにSTプロトコルを実施した研究でも、同様の結果が得られたことが最近の系統的レビューによって示された。被験者には、長距離ランナー、デュアスリート、トライアスリートが含まれ、高負荷のSTプログラム(80% 1RM超)実施後にREが2~8%向上した($ES = 0.14 \sim 3.22$) (18)。また、REの有意な向上はプライオメトリ

ック/爆発的STプログラム(83)や「コンビネーション」プログラム(プライオメトリックエクササイズと高負荷ストレングスエクササイズを含む)(10)でも観察された。ランナーに対してプライオメトリック/爆発的STプログラムを実施した結果、3,000~5,000mのタイムトライアルパフォーマンスと $\dot{V}O_{2max}$ の有意な向上もみられた(14,61,71,88)。

筆者らの知るかぎりでは、OWスイミングのパフォーマンス尺度に対して同時トレーニングが及ぼす影響を調査した研究は存在しない。しかし先行研究では、OWスイマーの日常のトレーニング処方にSTを含めることが推奨されている(97)。エリートクラススイマーのトレーニング負荷を検証した結果、一般にLDスイマーはトレーニング処方の共通要素として陸上STを含めていることが判明している(74)。このようなSTプログラムは、代謝系コンディショニングと最大筋力の両方に焦点を当てていると考えられる(74)。短距離のプールスイミング向け陸上STプログラムについては、高負荷STプログラム(80~90% 1RMで2~3レップ×3~5セット)の処方により、スイミングパフォーマンスが有意に向上することが示されている(4,38)。ただし、この調査結果の適用には注意が必要である。なぜなら、STプロトコルによってプールスイミングのスタートとターンが向上したとしても、OWでは生かされない可能性があるからである。

生理学的向上に貢献するメカニズム

同時トレーニングから得られる向上に貢献する要素として、様々な神経学および形態学的適応が提案されてきた。筋腱ステイフネスの向上は、持久系パフォーマンス、特にランニングのパフォーマンスを向上させ、STプログラムから得られる最も重要な適応のひとつに挙げられる(62,83,90)。筋腱ス

ティフネスの増大は、腱から得られる弾性エネルギーの利用を向上させ、ランニングで必要な筋の収縮活動を減らして筋のエネルギー要求を低下させることでランニングのECを向上させる(11)。

提案されているもうひとつのメカニズムは、筋線維における神経活性化の増大による動的RFDの有意な向上である。これによって、素早い踏み切りやペダルの踏み込みが可能になり、筋の収縮時間と血流の障害を減らすことができる。増加した血液が仕事をこなす筋へ流れ込み、酸素の供給と基質利用の増加を促す(90,91)。

STはまたタイプ I 筋線維の貢献を増大させて、タイプ II 筋線維の動員を遅らせる可能性がある(24,45)。さらに、タイプ II x筋線維を減らして、疲労しにくいタイプ II a筋線維の割合を増加させることによって、持久系アスリートのパフォーマンスの向上に貢献する可能性がある(1)。

LDトライアスリートの筋力トレーニングに関する障壁と誤解

持久系アスリートにおけるパフォーマンスの至適化のためにSTの実施を支持する研究は数多く存在する。しかし、LDトライアスリートがSTを実施するにはいくつかの障壁がある(59)。第一の障壁は筋肥大への懸念だろうと思われるかもしれない。しかし、これを障壁として挙げたLDトライアスリートはわずか5.1%であった(59)。持久系アスリートのプログラムに高負荷STを組み込んだ研究では、トライアスリート、サイクリスト、ランナーの体重にいかなる変化も観察されていない(62,90,91)。持久力エクササイズは、筋原線維のタンパク質合成にとって重要な細胞内経路に負の影響を及ぼして筋肥大を抑制する可能性がある。同時トレーニングの研究で筋肥大と体重の増加が報告されないことはこれに起因す

るのかもしれない(22)。しかしこれとは対照的に、同時トレーニングを調査したいくつかの研究では、ランナーにおいてもサイクリストにおいても、ST介入後に筋横断面積(CSA)の有意な増加が報告されている。ただし、体重の増加は報告されていない(77,98,99)。したがって、STを実施した結果、体脂肪が筋に置き換わり、トータルの体重が変化しなかったと考えられる(77)。大腿四頭筋のCSAとCEの向上は関係することが見だされており($r = -0.54$)(98)、パフォーマンスの向上にはCSAのわずかな増加が重要である可能性が示唆されている。そのため、筋サイズの増加は、トライアスリートによる同時トレーニングの実施を妨げる要素にはなりえない。

LDトライアスリートが第一の障壁として挙げたものは時間的制約(53.1%)である。LDトライアスリートがすでに多量の持久力トレーニングを実施していることによると考えられる(59)。しかし、REとCEの向上をもたらしたSTプログラムは、トレーニングの中心となる持久力セッション(サイクリングやランニング)と比べると、実施時間が短い(30~60分)。さらに、大多数の同時トレーニング研究に含まれる対照群には、持久系パフォーマンスの有意な向上が認められなかった。そこで、持久力セッションを減らしてSTを含めることは、持久力トレーニングだけを実施するよりも時間効率が良く、パフォーマンスを向上させる可能性があると考えられる(10,11,61,71,72,79,80,83,90,91,98,100)。LDトライアスリートにSTの実施をためらわせるもうひとつの大きな障壁は、エクササイズを選択、テクニック、漸進方法に自信がないことであり、52.5%のアスリートがこれを障壁として挙げた。したがって、至適STプログラムの適切なデザイン方法についてアスリートやコーチに伝える必要がある(59)。

LDトライアスリート用のSTプログラムのデザインエクササイズ選択

持久系競技で至適パフォーマンスを達成するには、股関節、膝関節、足関節の筋腱系が同時に働いて、地面やペダルに対する力を生み出さなければならない(11,12)。STプログラムには、単関節の単独エクササイズよりも大きなパフォーマンスの向上をもたらす多関節のクローズドチェーン(四肢遠位部が固定されている)複合エクササイズを含める必要がある(89)。さらに、STの実施を妨げる要因として最も多く報告されているものは時間的制約であるが(59)、複合エクササイズは時間効率が良く、一度に複数の筋群や動作に焦点を合わせることができる。STトレーニングで実施するエクササイズを選択する際は、トレーニング効果が転移してパフォーマンス適応をもたらすかどうかを考慮する必要がある。

つまり、競技に類似する動作パターンを模倣し、競技と同じ筋群を動員して、総合的なパフォーマンスへの転移を促すエクササイズを選択すべきである。競技と同じ筋群を動員して動作を模倣することによって、しかるべき筋群の神経と構造の適応を促進することができる(81)。しかし、前述のように3つの種目で動員される筋群とその動作パターンが異なるトライアスロンでは、この条件を満たすことは容易ではない。加えて、スイムとバイクには地面反力が含まれないため、弾性エネルギーの貯蔵が利用されない。つまり、種目によって筋の収縮活動も異なることになる。

サイクリストやランナーを対象とする同時トレーニングの研究で最も多く実施されたエクササイズは次のとおりである。バックスクワットやレッグプレス(1,10,11,25,62,72,77,80,84,90,91,98,100)、デッドリフトのバリエーションやハムストリングスカー

ル(1,10,11,62,84)、足関節底屈エクササイズ(1,25,32,62,79,80,84,98-100)、股関節屈曲やランジのバリエーション(10,11,72,79,80,98-100)。同時トレーニングで上半身や体幹部のエクササイズを実施した研究は、ごく少数であった(32,49,72)。デッドリフトやバックスクワットなどの複合的なエクササイズは、下肢を鍛えながら、上半身や体幹部の筋にも大きな負荷を与えることに留意する必要がある。

スクワットのバリエーションと比べると、デッドリフトのバリエーションを実施した研究は稀である。しかし、デッドリフトのバリエーションをプログラムに含めることは、傷害予防の点からも、ポステリアチェーンの筋力とパワーの向上の点からも有効である(8)。STプログラムでバックスクワットを実施するだけで、同時トレーニング群のCEと疲労までの時間が有意に向上したことを示す研究もある(91)。したがって、サイクリングのパフォーマンスを向上させるにはスクワットが有効であると考えられる。

シングルレッグシーテッドカーフレイズなど、下腿三頭筋、特にヒラメ筋に焦点を合わせたベントニー・アングルプランターフレクションエクササイズは常にプログラムに含める必要がある。なぜなら、REが最も大きなランナーは下腿三頭筋の筋力が大きく、腱-腱膜のスティフネスが大きいからである(3,34,35)。REの向上を目的として下腿三頭筋を適切に鍛えるには、膝関節を曲げて実施する必要がある。下腿三頭筋群の中でも、ヒラメ筋は身体の前方推進に最も貢献する筋であり(41)、ランニング速度が増加すると、後期立脚局面においてヒラメ筋の筋線維はどの筋よりも速い速度で収縮する。これはランニングの速度とエコノミーに関連する(29,40)。ヒラメ筋は足関節とのみ交差しているため、膝関節を曲げて足関節を底屈させる動作は、膝を伸ばし

た動作(膝関節と足関節の両方に交差する腓腹筋を強調する)以上にヒラメ筋を強調する。

同時トレーニングに関する研究では、ワーククリーンやハングクリーンは一般に実施されていない。しかし、最近の2件の実用的レビューでは、これら2つのエクササイズは持久系競技で動員されるポステリアチェーンに焦点を合わせており、トレーニング効果の大きな転移が期待されるため、プログラムに含めるように勧められている(8,9)。さらに、この2つのエクササイズは股関節伸展によるRFDを向上させるだけでなく、上半身の筋力も増大させる可能性がある(8,9)。エクササイズの動作が複雑に感じられる場合は、下肢によるトリプルエクステンション動作に後退させ、負荷の適切な管理に気を配るとよい。

伝統的な高負荷STだけでなく、一般的なプライオメトリックエクササイズを利用するプライオメトリック/爆発的トレーニングもREの向上には有効である。カウンタームーブメントジャンプ、ジャンプスクワット、ハードルジャンプ、ホップ、ポゴジャンプ、ドロップジャンプなどを含めるとよい(14,71,83,88)。持久系ランナーを対象として、高負荷STの成果とプライオメトリック/爆発的トレーニングの成果を比較した研究が6件存在する(6,14,39,84,93,94)。そのうちの4件(6,39,93,94)で、プライオメトリックプロトコルよりも高負荷STのほうがREの向上が大きいことが示されており、REの向上には高負荷STのほうが効果的である可能性を示唆している。興味深いことに、プライオメトリックプロトコルと軽負荷STプロトコルは、持久系サイクリストのCEには影響を及ぼさないようである(19,55)。プライオメトリックトレーニングがCEを向上させないのは、ベダルストロークでは短縮性筋活動しか行なわれず、弾性エネ

ルギーの貯蔵と回復の必要性がないからであろう(16,31)。

筆者らの知るかぎりでは、LDトライアスリートの傷害予防に対するSTプログラムの効果を調査した研究は存在しない。しかし、他の様々な競技において、STプログラムは競技関連のオーバーユース障害をほぼ半減させることが示されている(54)。傷害リスク低減のために、STはマスターズのアスリート(40歳以上)と女子トライアスリートに対して推奨されているが(57)、LDトライアスリートの高い傷害発生率を抑制する助けとして、STプログラムには特異的な傷害予防エクササイズを含めるべきである。LDトライアスロンでは、傷害発生リスクの高い部位として膝関節、下腿部、アキレス腱、肩関節、腰部が一貫して指摘されていることを考えると(30,101)、特にこれらの部位に焦点を合わせたエクササイズを実施するべきであろう。

加えて、STはバイオメカニクスや地面反力の吸収を向上させて、トライアスリートに多い疲労骨折の発生率を下げることに役立つ(57,68)。これらの傷害予防のためのエクササイズは「活性化」エクササイズや「補助」エクササイズとして、高負荷STの前に動的ウォーミングアップとして実施するとよい。股関節と膝関節周辺の筋の強化プログラムは、ランナーも含めて様々なアスリートの膝蓋大腿関節痛を最小限に留めることに役立つであろう(95)。膝関節痛の軽減のために、股関節外転筋群と外旋筋群の強化エクササイズを実施することには正のバイアスが存在し、ウォールスライド、シングルレッグデッドリフト、ペルビックドロップ、ステップアップ&ステップダウンなどのエクササイズが実施されている(95)。股関節周辺筋の強化エクササイズ(補助エクササイズ)は、ランニングメカニクスを向上させる可能性がある。高負荷STと同時に処方すると、REと

vVO₂maxが有意に向上した(11)。アキレス腱と下腿の傷害の両方に対処するには、STによって下腿三頭筋を強化してアキレス腱に負荷を与えることが、疼痛を軽減して機能を向上させることに効果的であろう(67)。

LDトライアスリートによって報告された時間的制約を考慮しつつ、前述のすべての因子に対処するには、全種目に対処できる高負荷エクササイズ(80% 1RM以上で1~8レップ×3~5セット)を主体とするSTプログラムを実施するとよい。REの向上が第一の目的である場合は、爆発的エクササイズも1つか2つ含めるとよい。傷害を予防し、またパフォーマンスを向上させるために、動的ウォーミングアップや活性化方法として補助エクササイズを実施することも勧められる。**表1**に、先行研究で実施され推奨されているSTエクササイズと、そのエクササイズが焦点とするトライアスロンの種目を示した。**表2~5**には、LDトライアスロンの種目ごとの特異的プログラムや含めることのできるSTセッションの例を示した。

負荷、速度、休息

同時トレーニングを検証した先行研究によると、パフォーマンスが最も向上したのは中程度の負荷から高負荷へ漸進するSTエクササイズであり、80% 1RM以上でセット間の休息時間は2~3分であった(10,11,39,62,71,72,77-79,83,84,88,90,91,96,99,100)。適切な負荷を用いてトレーニングを完了するには、主要エクササイズの1RMテストを定期的実施する必要がある。Baldwinら(58)によると、各エクササイズの伸張性局面を制御しつつ3秒かけて行ない、短縮性局面をできるだけ素早く実施することによって、LDトライアスリートのCEとREが有意に向上した。最近の研究では、伸張性筋力とREの間に強い相関関係が見出されて

おり、伸張性局面を焦点としてSTを処方することの重要性が示されている(56)。

RFDの向上を促すには、各エクササイズの短縮性局面における動作速度(実際の速度ではなくアスリートが意

図する速度)に焦点を合わせてエクササイズを処方する必要がある(44,81)。しかしRFDの向上は、速度に焦点を合わせずとも高負荷STによって実現する可能性がある(1)。ただし、伸張性局面を強調して重い負荷を挙上する際

表1 トライアスロンと各種目のためのストレングスエクササイズ

エクササイズ	スイム	バイク	ラン
傷害予防			
ウォールスライド、SLデッドリフト、ステップアップ/ステップダウン、ペルビックドロップ、ヒップアブダクション		X	X
スクワラプッシュアップ、ショルダーインターナル/エクスターナルローテーション、シーティッドロウ	X		
爆発的/プライオメトリックス			
ポゴジャンプ、デプスジャンプ、カウンタームーブメントジャンプ			X
高負荷ストレングス			
ハーフ/90°スクワット		X	X
デッドリフト	X	X	X
SLレッグプレス		X	X
SLシーティッドカーフレイズ	X	X	X
ラットプルダウン	X	X	X
スタンディングヒップフレクションケーブルマシーン		X	X
ランジ/スプリットスクワット		X	X
グルートハムレイズ		X	X
パワー/ハングクリーン	X	X	X
ベントオーバーロウ	X	X	X
ウェイトッドヒップスラスト		X	X

90°=膝関節90°、ハーフ=大腿部が床と平行、SL=シングルレッグ

表2 LDトライアスロン全種目のためのストレングスエクササイズ

エクササイズ	セット数	レップ数	負荷
傷害予防			
スクワラプッシュアップ	3	12	自重
ウォールスライド	3	6(片脚につき)	自重
ペルビックドロップ	3	12(片脚につき)	自重
パフォーマンス/ストレングス^a			
デッドリフト	3	6	85% 1RM
バックスクワット	3	6	85% 1RM
SLシーティッドカーフレイズ	3	6	85% 1RM
ラットプルダウン	3	6	85% 1RM

^aパフォーマンス/ストレングスエクササイズは、伸張性の下降局面を3秒かけて行ない、短縮性局面はできるだけ素早く行なう。ストレングスエクササイズの経験がない、または過度の疲労が蓄積している場合は、高負荷ストレングスエクササイズのレップ数を適切に減らす。RM=最大挙上重量、SL=シングルレッグ

は、基本エクササイズのためのテクニックに習熟してから伸張性動作へと漸進することを勧める(56)。また、軽い負荷から始めて重い負荷へ漸進することによって、その後の持久力セッションに影響する可能性のある疲労と遅発性筋痛を最小限に留めるべきである(81)。

頻度と持続時間

最近のメタ分析によると、トレーニングの持続時間とエクササイズのEC向上の間には有意な関係が存在し、わずか6～8週間のSTによってECを減少させることができる。合計24回以上のストレングスセッションからなるプロトコルは、24回以下のセッションよりもECの向上が大きかった(15)。また、漸進的過負荷を利用するSTセッションを12週間にわたって週に2回実施すると、LDトライアスリートの最大筋力、CE、REが有意に向上した(58)。レースシーズンの最中や、持久力トレーニングの他の側面を焦点としている場合も、同時トレーニングから得られた利益を維持するためにSTを中断しないことが重要である。筋力の向上を維持するには、セッション当たりの強度と負荷を維持した状態で、1週間に1回のSTセッションを20週間継続すれば十分であるとみられる(10,11,78)。表6に、トレーニング期に合わせたSTのピリオダイゼーションプログラムの例を示す。

スケジューリング

STは確かにトライアスリートのパフォーマンスを有意に向上させるが、トレーニング負荷の追加はその後の持久力セッションの質に負の影響を及ぼして、レジスタンストレーニング誘発性の持久系パフォーマンスの非至適化(RT-SEP)を招く可能性がある(26-28)。RT-SEPを最小限に留めるには、持久力セッションを軸としてSTを戦略的に配置するとともに、持久力セッ

表3 LDトライアスロンのスイムのためのストレングスエクササイズ

エクササイズ	セット数	レップ数	負荷
傷害予防			
スキャプラプッシュアップ	3	12	自重
ショルダーインターナル/エクスターナルローテーション	3	12	中程度の負荷
パフォーマンス/ストレングス ^a			
ハンククリーン	3	6	85% 1 RM
ラットプルダウン	3	6	85% 1 RM
ベントオーバーロウ	3	6	85% 1 RM

^aパフォーマンス/ストレングスエクササイズは、伸張性の下降局面を3秒かけて行ない、短縮性局面はできるだけ素早く行なう。ただし、ハンククリーンは短縮性局面をできるだけ素早く行なった後、適切なテクニックで実施できるようにレップ間に時間を設ける。

RM=最大挙上重量

表4 LDトライアスロンのバイクのためのストレングスエクササイズ

エクササイズ	セット数	レップ数	負荷
傷害予防			
ステップアップ/ダウン	3	8	自重
ウォーキングランジ	3	8(片脚につき)	5～10kgのダンベル2つ
SLデッドリフト	3	8(片脚につき)	5～10kgのダンベル2つ
パフォーマンス/ストレングス ^a			
デッドリフト	3	6	85% 1 RM
バックスクワット	3	6	85% 1 RM
スプリットスクワット	3	6	85% 1 RM
SLシーティッドカーフレイズ	3	6	85% 1 RM

^aパフォーマンス/ストレングスエクササイズは、伸張性の下降局面を3秒かけて行ない、短縮性局面はできるだけ素早く行なう。ストレングスエクササイズの経験がない、または過度の疲労が蓄積している場合は、高負荷ストレングスエクササイズのレップ数を適切に減らす。

RM=最大挙上重量、SL=シングルレップ

表5 LDトライアスロンのランのためのストレングスエクササイズ

エクササイズ	セット数	レップ数	負荷
傷害予防			
SLデッドリフト	3	8(片脚につき)	5～10kgのダンベル2つ
ベルビッドドロップ	3	12(片脚につき)	自重
ウォールスライド	3	6(片脚につき)	自重
パフォーマンス/ストレングス ^a			
カウンタームーブメントジャンプ	3	4～8	自重
パワークリーン	3	6	85% 1 RM
バックスクワット	3	6	85% 1 RM
SLシーティッドカーフレイズ	3	6	85% 1 RM

^aパフォーマンス/ストレングスエクササイズは、伸張性の下降局面を3秒かけて行ない、短縮性局面はできるだけ素早く行なう。ただし、パワークリーンは短縮性局面をできるだけ素早く行なった後、適切なテクニックで実施できるようにレップ間に時間を設ける。ストレングスエクササイズの経験がない、または過度の疲労が蓄積している場合は、高負荷ストレングスエクササイズのレップ数を適切に減らす。RM=最大挙上重量、SL=シングルレップ

セッションの様式、強度、持続時間に合わせて処方する必要がある。サイクリングやスイミングではなくランニング後にSTセッションを実施する場合は、回復時間を長めにとる必要があるかもしれない。ランニングの伸張性筋活動と地面反力は身体にとって大きな負担となるからである。最近の研究において、RT-SEPを最小限に留めることに役立つ留意点が表示されている(28)。

- ・可能であれば、持久力トレーニングを実施しない日にSTを実施する。
- ・それが難しい場合は先に持久力トレーニングを実施し、その後に2番目のセッションとしてSTを実施する。先に持久力トレーニングを実施できない場合は、最初にSTを実施し、続いてスイミングかサイクリングセッションをできれば無酸素性作業閾値(AT)以下で実施する。STと同じ日にランニングセッションが予定されており、計画の都合上、ST後にランニングを実施しなければならない場合は、ランニングの強度をAT以下に抑える。

・STと持久力トレーニングの両方の至適回復と適応を図るには、トレーニング間に6～9時間の休息時間を設ける。

- ・ランニングのインターバルセッション(AT以上の強度)は、高負荷STセッションの48～72時間後に組み込む。
- ・STと持久力トレーニングセッションの間の疲労レベルをモニタリングする(HRや主観的運動強度を利用する)。

アスリートとコーチは、特にレースシーズン中でなければ「優先順位の概念」も考慮する必要がある。優先順位の概念に従うと、トレーニングで「最も弱い要素」を優先する。筋力が不足している場合はそれをトレーニングで最優先し、レースシーズンが近づいてくれば、他の側面に優先的に焦点を合わせるとよいだろう(47,66)。ただし、ST介入によって生理学的変数が有意に向上するには最低でも8週間を要する。そのため、ST開始初期は持久力トレーニングに負の影響が生じると考えて、

レース直前はSTを開始せず、同時トレーニングの開始を次のシーズンに持ち越すケースもあるだろう。

まとめ

LDトライアスリートの総合的パフォーマンスに貢献する生理学的変数を向上させるには、筋力と持久力の同時トレーニングを実施するとよい。LDトライアスリート用にSTを至適化することは容易ではない。異なる動作パターンと筋群を動員する3つの種目に合わせて処方する必要があるからである。CEとREをともに向上させるには高負荷STを実施し、REを焦点とする場合はプライオメトリック/爆発的エクササイズを追加するとよい。コーチは個々のアスリートに合わせて注意深くSTプログラムをデザインする必要がある。その際、トレーニング歴と既往歴、強い種目と弱い種目、疲労、持久力トレーニングの処方を考慮する。STのスケジューリングと頻度を操作することによって、持久力セッションや総

表6 LDトライアスロンのための38週間のSTピリオダイゼーションプログラム例

	総合的体力育成期		レース特異期	レース期	テーパリング期
	0～6週	6～12週	12～24週	24～36週	36～38週
1週当たりの頻度	2～3回	2～3回	2回	1～2回	1回
エクササイズ選択 ^a	傷害予防：2～3 ストレンクス：3～4(ランにフォーカスする場合はプライオメトリックス1を含む)	傷害予防：2～3 ストレンクス：3～4(ランにフォーカスする場合はプライオメトリックス1を含む)	傷害予防：2～3 ストレンクス：3～4(ランにフォーカスする場合はプライオメトリックス1を含む)	傷害予防：2～3 ストレンクス：3～4(ランにフォーカスする場合はプライオメトリックス1を含む)	傷害予防：1～2 ストレンクス：2～3(ランにフォーカスする場合はプライオメトリックス1を含む)
傷害予防処方	2～3セット×8～12レップ	2～3セット×8～12レップ	2～3セット×8～12レップ	2～3セット×8～12レップ	2セット×8～12レップ
ストレンクスエクササイズの処方(伸張性局面を制御しつつ3秒かけて行ない、短縮性局面をできるだけ素早く行なう)	75% 1RM以下で3～4セット×8～12レップ、休息90秒～3分	75% 1RM以下で3～4セット×8～12レップ、休息90秒～3分	80% 1RM以上で3～5セット×1～6レップ、休息3～5分	80% 1RM以上で3～5セット×1～6レップ、休息3～5分	70% 1RM以下で1～3セット×1～6レップ、休息3～5分
プライオメトリックエクササイズの処方	2～3セット(各セット4～8回接地)、休息90秒～3分	2～3セット(各セット4～8回接地)、休息90秒～3分	2～3セット(各セット4～8回接地)、休息90秒～3分	2～3セット(各セット4～8回接地)、休息90秒～3分	1～2セット(各セット4～8回接地)、休息90秒～3分

^aトライアスロン初心者とストレンクスエクササイズ未経験者は、選択するエクササイズの数処方例よりも減らす。疲労が強い場合は、必要に応じて1セッション当たりのエクササイズ数を1～2減らすとよい。

RM=最大挙上重量

合的パフォーマンスへの負の作用を最小化するとよい。しかし、LDトライアスリートへのSTを検証した研究数は少なく、課題を表すようなテストデザインによって生理学的パフォーマンスの向上を評価した研究も少ない。

現場への応用

- ・スイム、バイク、ランの各種目におけるアスリートの長所と短所を見極め、特定の種目を焦点としてSTエクササイズを処方する。
- ・アスリートのパフォーマンスだけでなく、既往歴も考慮して、STプログラムの一環として傷害に対処する特定のストレングスエクササイズを実施する。
- ・3種目すべてのパフォーマンスを向上させるには高負荷STを実施するとよい。ランニングパフォーマンスを向上させるには、プライオメトリック／爆発的エクササイズが有効であるとみられる。
- ・3種目すべてに対処するSTプログラムを処方するには、高負荷STを処方する。ランニングパフォーマンスが優先される場合は、プライオメトリックエクササイズを1つか2つ含めるとよい。
- ・STプログラムを期分けし、その際、レーススケジュールを考慮する。パフォーマンスの至適向上を促すには24回以上のSTセッションが必要であり、レースシーズンに入るまでに完了しておくことが理想である。筋力の向上を維持するには、最大20週間、STの負荷を1週間当たり1セッションにまで減らして継続する。
- ・同じ日に同時トレーニングを実施する場合は、先に持久力セッションを終える。できれば、高負荷STセッション後9～24時間はランニングのインターバルセッションを避ける。
- ・LDトライアスリート用のSTプログラムのデザインにおいて最も重要な

因子は、各アスリートの目標、既往歴、トレーニングの好み、長所と短所などに合わせてプログラムを個別化することである。◆

References

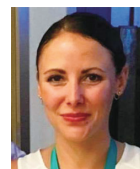
1. Aagaard P, Andersen JL, Bennekou M, et al. Effects of resistance training on endurance capacity and muscle fiber composition in young top-level cyclists. *Scand J Med Sci Sports* 21: e298-e307, 2011.
2. Andersen CA, Clarsen B, Johansen TV, Engebretsen L. High prevalence of overuse injury among iron-distance triathletes. *Br J Sports Med* 47: 857-861, 2013.
3. Arampatzis A, De Monte G, Karamanidis K, et al. Influence of the muscle-tendon unit's mechanical and morphological properties on running economy. *J Exp Biol* 209: 3345-3357, 2006.
4. Aspenes S, Kjendlie PL, Hoff J, Helgerud J. Combined strength and endurance training in competitive swimmers. *J Sports Sci Med* 8: 357-365, 2009.
5. Baldassarre R, Bonifazi M, Zamparo P, Piacentini MF. Characteristics and challenges of open-water swimming performance: A review. *Int J Sports Physiol Perform* 12: 1275-1284, 2017.
6. Barnes KR, Hopkins WG, McGuigan MR, Northuis ME, Kilding AE. Effects of resistance training on running economy and cross-country performance. *Med Sci Sports Exerc* 45: 2322-2331, 2013.
7. Barnes KR, Kilding AE. Running economy: Measurement, norms, and determining factors. *Sports Med Open* 1: 8, 2015.
8. Barrie B. Concurrent resistance training enhances performance in competitive distance runners: A review and programming implementation. *Strength Cond J* 42: 97-106, 2020.
9. Bazyler C, Abbott H, Bellon C, Taber C, Stone M. Strength training for endurance athletes: Theory to practice. *Strength Cond J* 37: 1-12, 2015.
10. Beattie K, Carson BP, Lyons M, Kenny IC. The effect of maximal- and explosivestrength training on performance indicators in cyclists. *Int J Sports Physiol Perform* 12: 470-480, 2017.
11. Beattie K, Carson BP, Lyons M, Rossiter A, Kenny IC. The effect of strength training on performance indicators in distance runners. *J Strength Cond Res* 31: 9-23, 2017.
12. Beattie K, Kenny IC, Lyons M, Carson BP. The effect of strength training on performance in endurance athletes. *Sports Med* 44: 845-865, 2014.
13. Bentley DJ, Wilson GJ, Davie AJ, Zhou S. Correlations between peak power output, muscular strength and cycle time trial performance in triathletes. *J Sports Med Phys Fitness* 38: 201-207, 1998.
14. Berryman N, Maurel DB, Bosquet L. Effect of plyometric vs. dynamic weight training on the energy cost of running. *J Strength Cond Res* 24: 1818-1825, 2010.
15. Berryman N, Mujika I, Arvisais D, et al. Strength training for middle- and longdistance performance: A meta-analysis. *Int J Sports Physiol Perform* 13: 57-63, 2018.
16. Bijker KE, de Groot G, Hollander AP. Differences in leg muscle activity during running and cycling in humans. *Eur J Appl Physiol* 87: 556-561, 2002.
17. Bini RR, Hume P, Croft J, Kilding A. Pedal force effectiveness in cycling: A review of constraints and training effects. *J Sci Cycling* 2: 11-24, 2013.
18. Blagrove RC, Howatson G, Hayes PR. Effects of strength training on the physiological determinants of middle- and long-distance running performance: A systematic review. *Sports Med* 48: 1117-1149, 2018.
19. Bonacci J, Green D, Saunders PU, et al. Plyometric training as an intervention to correct altered neuromotor control during running after cycling in triathletes: A preliminary randomised controlled trial. *Phys Ther Sport* 12: 15-21, 2011.
20. Britton A. Strength training periodization for triathletes. *Strength Cond J* 30: 65-66, 2008.
21. Cavagna GA, Saibene FP, Margaria R. Mechanical work in running. *J Appl Physiol* 19: 249-256, 1964.
22. Coffey VG, Pilegaard H, Garnham AP, O'Brien BJ, Hawley JA. Consecutive bouts of diverse contractile activity alter acute responses in human skeletal muscle. *J Appl Physiol* 106: 1187-1197, 2009.
23. Conley DL, Krahenbuhl GS. Running economy and distance running performance of highly trained athletes. *Med Sci Sports Exerc* 12: 357-360, 1980.
24. Coyle EF, Sidossis LS, Horowitz JF, Beltz JD. Cycling efficiency is related to the percentage of type I muscle fibers. *Med Sci Sports Exerc* 24: 782-788, 1992.
25. Damasceno MV, Lima-Silva AE, Pasqua LA, et al. Effects of resistance training on neuromuscular characteristics and pacing during 10-km running time trial. *Eur J Appl Physiol* 115: 1513-1522, 2015.
26. Doma K, Deakin GB. The effects of strength training and endurance training order on running economy and performance. *Appl Physiol Nutr Metab* 38: 651-656, 2013.
27. Doma K, Deakin GB, Bentley DJ. Implications of impaired endurance performance following single bouts of resistance training: An alternate concurrent

- training perspective. *Sports Med* 47: 2187–2200, 2017.
28. Doma K, Deakin GB, Schumann M, Bentley DJ. Training considerations for optimising endurance development: An alternate concurrent training perspective. *Sports Med* 49: 669–682, 2019.
 29. Dorn TW, Schache AG, Pandy MG. Muscular strategy shift in human running: Dependence of running speed on hip and ankle muscle performance. *J Exp Biol* 215: 1944–1956, 2012.
 30. Egermann M, Brocai D, Lill CA, Schmitt H. Analysis of injuries in long-distance triathletes. *Int J Sports Med* 24: 271–276, 2003.
 31. Ericson MO, Nisell R, Arborelius UP, Ekholm J. Muscular activity during ergometer cycling. *Scand J Rehabil Med* 17: 53–61, 1985.
 32. Ferrauti A, Bergermann M, Fernandez-Fernandez J. Effects of a concurrent strength and endurance training on running performance and running economy in recreational marathon runners. *J Strength Cond Res* 24: 2770–2778, 2010.
 33. Figueiredo P, Marques EA, Lepers R. Changes in contributions of swimming, cycling, and running performances on overall triathlon performance over a 26-year period. *J Strength Cond Res* 30: 2406–2415, 2016.
 34. Fletcher JR, Esau SP, Macintosh BR. Economy of running: Beyond the measurement of oxygen uptake. *J Appl Physiol* 107: 1918–1922, 2009.
 35. Fletcher JR, Esau SP, MacIntosh BR. Changes in tendon stiffness and running economy in highly trained distance runners. *Eur J Appl Physiol* 110: 1037–1046, 2010.
 36. Fletcher JR, MacIntosh BR. Achilles tendon strain energy in distance running: Consider the muscle energy cost. *J Appl Physiol* 118: 193–199, 2015.
 37. Gilinsky N, Hawkins KR, Tokar TN, Cooper JA. Predictive variables for half-Ironman triathlon performance. *J Sci Med Sport* 17: 300–305, 2014.
 38. Girold S, Jalab C, Bernard O, et al. Dryland strength training vs. electrical stimulation in sprint swimming performance. *J Strength Cond Res* 26: 497–505, 2012.
 39. Guglielmo LG, Greco CC, Denadai BS. Effects of strength training on running economy. *Int J Sports Med* 30: 27–32, 2009.
 40. Hamner SR, Delp SL. Muscle contributions to fore-aft and vertical body mass center accelerations over a range of running speeds. *J Biomech* 46: 780–787, 2013.
 41. Hamner SR, Seth A, Delp SL. Muscle contributions to propulsion and support during running. *J Biomech* 43: 2709–2716, 2010.
 42. Hausswirth C, Argentin S, Bieuzen F, et al. Endurance and strength training effects on physiological and muscular parameters during prolonged cycling. *J Electromyogr Kinesiol* 20: 330–339, 2010.
 43. Hausswirth C, Bigard AX, Berthelot M, Thomaidis M, Guezennec CY. Variability in energy cost of running at the end of a triathlon and a marathon. *Int J Sports Med* 17: 572–579, 1996.
 44. Heggelund J, Fimland MS, Helgerud J, Hoff J. Maximal strength training improves work economy, rate of force development and maximal strength more than conventional strength training. *Eur J Appl Physiol* 113: 1565–1573, 2013.
 45. Horowitz JF, Sidossis LS, Coyle EF. High efficiency of type I muscle fibers improves performance. *Int J Sports Med* 15: 152–157, 1994.
 46. Hug F, Dorel S. Electromyographic analysis of pedaling: A review. *J Electromyogr Kinesiol* 19: 182–198, 2009.
 47. Issurin VB. New horizons for the methodology and physiology of training periodization. *Sports Med* 40: 189–206, 2010.
 48. Jeukendrup AE, Martin J. Improving cycling performance: How should we spend our time and money. *Sports Med* 31: 559–569, 2001.
 49. Johnston R, Quinn T, Kertzer R, Vroman N. Strength training in female distance runners: Impact on running economy. *J Strength Cond Res* 11: 224–229, 1997.
 50. Jongerius N, Walker J, Wainwright B, Bissas A. Differences in strength and power profiles between road and time trial cyclists. *J Sci Cycling* 7: 38–39, 2018.
 51. Kraemer WJ, Adams K, Cafarelli E, et al. American College of Sports Medicine position stand. Progression models in resistance training for healthy adults. *Med Sci Sports Exerc* 34: 364–380, 2002.
 52. Kraemer WJ, Ratamess NA. Fundamentals of resistance training: Progression and exercise prescription. *Med Sci Sports Exerc* 36: 674–688, 2004.
 53. Kyrolainen H, Avela J, Komi PV. Changes in muscle activity with increasing running speed. *J Sports Sci* 23: 1101–1109, 2005.
 54. Lauersen JB, Bertelsen DM, Andersen LB. The effectiveness of exercise interventions to prevent sports injuries: A systematic review and meta-analysis of randomised controlled trials. *Br J Sports Med* 48: 871–877, 2014.
 55. Levin GT, McGuigan MR, Laursen PB. Effect of concurrent resistance and endurance training on physiologic and performance parameters of well-trained endurance cyclists. *J Strength Cond Res* 23: 2280–2286, 2009.
 56. Li F, Newton RU, Shi Y, Sutton D, Ding H. Correlation of eccentric strength, reactive strength, and leg stiffness with running economy in well-trained distance runners. *J Strength Cond Res* 35: 1491–1499, 2019.
 57. Loudon JK. The master female triathlete. *Phys Ther Sport* 22: 123–128, 2016.
 58. Luckin-Baldwin KM, Badenhorst CE, Cripps AJ, et al. Strength training improves exercise economy in triathletes during a simulated triathlon. *Int J Sports Physiol Perform* 16: 663–673, 2021.
 59. Luckin KM, Badenhorst CE, Cripps AJ, et al. Strength training in long-distance triathletes: Barriers and characteristics. *J Strength Cond Res* 35: 495–502, 2018.
 60. Luckin KM, Badenhorst CE, Cripps AJ, et al. The reliability of physiological responses obtained during a simulated long distance triathlon laboratory test. *J Sci Cycling* 8: 25–32, 2019.
 61. Mikkola JS, Rusko HK, Nummela AT, Paavolainen LM, Häkkinen K. Concurrent endurance and explosive type strength training increases activation and fast force production of leg extensor muscles in endurance athletes. *J Strength Cond Res* 21: 613–620, 2007.
 62. Millet GP, Jaouen B, Borrani F, Candau R. Effects of concurrent endurance and strength training on running economy and VO(2) kinetics. *Med Sci Sports Exerc* 34: 1351–1359, 2002.
 63. Millet GP, Vleck VE. Physiological and biomechanical adaptations to the cycle to run transition in olympic triathlon: Review and practical recommendations for training. *Br J Sports Med* 34: 384–390, 2000.
 64. Millet GP, Vleck VE, Bentley DJ. Physiological requirements in triathlon. *J Hum Sport Exerc* 6: 184–204, 2011.
 65. Morgan DW, Craib M. Physiological aspects of running economy. *Med Sci Sports Exerc* 24: 456–461, 1992.
 66. Mujika I, Halson S, Burke LM, Balague G, Farrow D. An integrated, multifactorial approach to periodization for optimal performance in individual and team sports. *Int J Sports Physiol Perform* 13: 538–561, 2018.
 67. Murphy MC, Travers MJ, Chivers P, et al. Efficacy of heavy eccentric calf training for treating mid-portion Achilles tendinopathy: A systematic review and meta-analysis. *Br J Sports Med* 53: 1070–1077, 2019.
 68. Neidel P, Wolfram P, Hotfiel T, et al. Cross-sectional investigation of stress fractures in German elite triathletes. *Sports (Basel)* 7: 88, 2019.
 69. Nilsson J, Thorstensson A. Ground reaction forces at different speeds of human walking and running. *Acta Physiol Scand* 136: 217–227, 1989.
 70. Novacheck TF. The biomechanics of running. *Gait Posture* 7: 77–95, 1998.
 71. Paavolainen L, Häkkinen K, Hamalainen I, Nummela A, Rusko H. Explosive-strength

- training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power. *J Appl Physiol* 86: 1527-1533, 1999.
72. Piacentini MF, De Ioannon G, Comotto S, et al. Concurrent strength and endurance training effects on running economy in master endurance runners. *J Strength Cond Res* 27: 2295-2303, 2013.
73. Pink M, Perry J, Browne A, Scovazzo ML, Kerrigan J. The normal shoulder during freestyle swimming. An electromyographic and cinematographic analysis of twelve muscles. *Am J Sports Med* 19: 569-576, 1991.
74. Pollock S, Gaoua N, Johnston MJ, et al. Training regimes and recovery monitoring practices of elite British swimmers. *J Sports Sci Med* 18: 577-585, 2019.
75. Raasch CC, Zajac FE. Locomotor strategy for pedaling: Muscle groups and biomechanical functions. *J Neurophysiol* 82: 515-525, 1999.
76. Raasch CC, Zajac FE, Ma B, Levine WS. Muscle coordination of maximum-speed pedaling. *J Biomech* 30: 595-602, 1997.
77. Ronnestad BR, Hansen EA, Raastad T. Effect of heavy strength training on thigh muscle cross-sectional area, performance determinants, and performance in welltrained cyclists. *Eur J Appl Physiol* 108: 965-975, 2010.
78. Ronnestad BR, Hansen EA, Raastad T. Inseason strength maintenance training increases well-trained cyclists' performance. *Eur J Appl Physiol* 110: 1269-1282, 2010.
79. Ronnestad BR, Hansen EA, Raastad T. Strength training improves 5-min all-out performance following 185 min of cycling. *Scand J Med Sci Sports* 21: 250-259, 2011.
80. Ronnestad BR, Hansen J, Hollan I, Ellefsen S. Strength training improves performance and pedaling characteristics in elite cyclists. *Scand J Med Sci Sports* 25: e89-e98, 2015.
81. Ronnestad BR, Mujika I. Optimizing strength training for running and cycling endurance performance: A review. *Scand J Med Sci Sports* 24: 603-612, 2014.
82. Saunders PU, Pyne DB, Telford RD, Hawley JA. Factors affecting running economy in trained distance runners. *Sports Med* 34: 465-485, 2004.
83. Saunders PU, Telford RD, Pyne DB, et al. Short-term plyometric training improves running economy in highly trained middle and long distance runners. *J Strength Cond Res* 20: 947-954, 2006.
84. Sedano S, Marin PJ, Cuadrado G, Redondo JC. Concurrent training in elite male runners: The influence of strength versus muscular endurance training on performance outcomes. *J Strength Cond Res* 27: 2433-2443, 2013.
85. Shin SJ, Kim TY, Yoo WG. Effects of various gait speeds on the latissimus dorsi and gluteus maximus muscles associated with the posterior oblique sling system. *J Phys Ther Sci* 25: 1391-1392, 2013.
86. Silveira RP, de Souza Castro FA, Figueiredo P, Vilas-Boas JP, Zamparo P. The effects of leg kick on swimming speed and arm-stroke efficiency in the front crawl. *Int J Sports Physiol Perform* 12: 728-735, 2017.
87. So RC, Ng JK, Ng GY. Muscle recruitment pattern in cycling: A review. *Phys Ther Sport* 6: 89-96, 2005.
88. Spurrs RW, Murphy AJ, Watsford ML. The effect of plyometric training on distance running performance. *Eur J Appl Physiol* 89: 1-7, 2003.
89. Stone M, Plisk S, Collins D. Training principles: Evaluation of modes and methods of resistance training—A coaching perspective. *Sports Biomech* 1: 79-103, 2002.
90. Storen O, Helgerud J, Stoa EM, Hoff J. Maximal strength training improves running economy in distance runners. *Med Sci Sports Exerc* 40: 1087-1092, 2008.
91. Sunde A, Storen O, Bjerkaas M, et al. Maximal strength training improves cycling economy in competitive cyclists. *J Strength Cond Res* 24: 2157-2165, 2010.
92. Suriano R, Bishop D. Physiological attributes of triathletes. *J Sci Med Sport* 13: 340-347, 2010.
93. Taipale RS, Mikkola J, Nummela A, et al. Strength training in endurance runners. *Int J Sports Med* 31: 468-476, 2010.
94. Taipale RS, Mikkola J, Vesterinen V, Nummela A, Häkkinen K. Neuromuscular adaptations during combined strength and endurance training in endurance runners: Maximal versus explosive strength training or a mix of both. *Eur J Appl Physiol* 113: 325-335, 2013.
95. Thomson C, Krouwel O, Kuisma R, Hebron C. The outcome of hip exercise in patellofemoral pain: A systematic review. *Man Ther* 26: 1-30, 2016.
96. Turner AM, Owings M, Schwane JA. Improvement in running economy after 6 weeks of plyometric training. *J Strength Cond Res* 17: 60-67, 2003.
97. VanHeest JL, Mahoney CE, Herr L. Characteristics of elite open-water swimmers. *J Strength Cond Res* 18: 302-305, 2004.
98. Vikmoen O, Ellefsen S, Troen O, et al. Strength training improves cycling performance, fractional utilization of VO₂max and cycling economy in female cyclists. *Scand J Med Sci Sports* 26: 384-396, 2016.
99. Vikmoen O, Raastad T, Seynnes O, et al. Effects of heavy strength training on running performance and determinants of running performance in female endurance athletes. *PLoS One* 11: e0150799, 2016.
100. Vikmoen O, Ronnestad BR, Ellefsen S, Raastad T. Heavy strength training improves running and cycling performance following prolonged submaximal work in well-trained female athletes. *Physiol Rep* 5: e13149, 2017.
101. Vleck VE, Bentley DJ, Millet GP, Cochrane T. Triathlon event distance specialization: Training and injury effects. *J Strength Cond Res* 24: 30-36, 2010.

From Strength and Conditioning Journal
Volume 44, Number 1, pages 1-14.

著者紹介



Kate M. Baldwin :
University of Notre Dame
Australiaの健康科学部と
Murdoch Universityのエクサ
サイズ学の講師。



Claire E. Badenhorst :
オークランドのMassey
Universityの理学部(スポーツ
& エクササイズ学)の講師で
あり責任者。



Ashley J. Cripps :
University of Notre Dame
Australiaの健康科学部の講師
であり、スポーツコーチング
& リーダーシップ学のプログ
ラムコーディネーター。



Grant J. Landers :
University of Western
Australiaの人間科学部(ス
ポーツ&エクササイズ学)の
講師。



Robert J. Merrells :
University of Notre Dame
Australiaのエクササイズ生理
学の主任講師。



Prof. Max K. Bulsara :
1979年にUniversity of Kent
で数学の学士号(統計学の
優等学位)、1981年に同じ
く統計学の修士号、2008年
にUniversity of Western
Australiaで生物統計学/疫学
の博士号(優等賞)を取得。



Gerard F. Hoyne :
University of Notre Dame
Australiaの健康科学部の教授
であり副研究科長。