

Key Words【非対称性:asymmetry、運動学:kinematic、運動力学:kinetic、成熟:maturation、スティフネス:stiffness、速度:velocity】

青少年の最大スプリントスピードの育成に関する新たな洞察

New Insights Into the Development of Maximal Sprint Speed in Male Youth

Robert W. Meyers,¹ Ph.D. Jon L. Oliver,^{1,2} Ph.D. Michael G. Hughes,¹ Ph.D.
Rhodri S. Lloyd,^{1,2} Ph.D. John B. Cronin,^{2,3} Ph.D.

¹Youth Physical Development Unit, Cardiff School of Sport, Cardiff Metropolitan University, Cardiff, United Kingdom

²Sports Performance Research Institute, New Zealand (SPRINZ), AUT University, Auckland, New Zealand

³School of Exercise, Biomedical and Health Science, Edith Cowan University, Perth, Australia

要約

スピードは、青少年の身体育成プログラムにおける重要な側面のひとつであり、才能発掘評価テストでも評価の対象となる。しかし、青少年期を通じて最大スピードの自然な発達を支える諸因子に関しては、ほとんど理解が進んでいない。本稿では、スプリントパフォーマンスに貢献する形態学的、運動学的、運動力学の変数、および非対称性に目を向けて、成長と成熟が青少年の最大スプリントパフォーマンスの形成に及ぼす影響を検討する。さらに、ストレングス&コンディショニングコーチが効果的なスピード育成プログラムを作成する助けとして、実用的で明快なガイドラインを提供する。

序論

スプリントは、スポーツでの成功を支える基本的な動作であると考えられている(27,36,46)。スプリントスピードは、青少年の身体育成プログラムを構成する主要な要素とみなされており(26)、ストレングス&コンディショニング(S&C)プログラムや才能発掘評価テストでも評価対象とされることが多い(36)。青少年期を通じたスピードの育成には以前から関心が寄せられていた(40)。しかし著者らのみとここでは、青少年の最大スプリントパフォーマンスの自然な発達を支える諸因子に関しては、ほとんど理解が進んでいない。以下では、青少年の最大スプリントパフォーマンスの発達をめぐる近年の研究の進展に基づいて(22,32-34,45,51,52)、青少年期を通じた最大スプリントスピードの発達を促すと考えられる主要な変数を検討する。

青少年における

最大スプリントスピードの発達

青少年の最大スプリントスピード

は、青少年期を通じて非直線的に発達することが知られている(28)。すなわち、思春期直前期(5～9歳)と思春期(12～14歳)にスパートを迎えてパフォーマンスが急激に向上すると考えられている(58)。スプリントパフォーマンスにおけるこれらのスパートは暦年齢に基づくものであるが、スプリントスピードの発達には成熟も影響を及ぼすとみられる(33,52)。成熟度の指標としてしばしば用いられるのはPHV(Peak Height Velocity)であり、これは、思春期のスパートにおける身長最大の成長速度を示している(28)。スプリントスピードの最大の向上は、PHVの8～18ヵ月前に生じるという報告がある(58,63)。逆に、スプリントスピードの最大の変化はPHVと機を同じくするという報告もある(43,56)。その一方で、PHVの12ヵ月前にスピードの低下がみられるともいわれており(43)、この点からも、スピードの発達は非直線的な性質を有するといえる。最近の横断的研究によると、最大スプリントスピードはPHV1年前の青少年と3年

前の青少年を比較すると変化がみられず、PHV期とPHV後の青少年を比較すると有意な向上が認められた(33)。

2年にわたる調査によると、13歳から15歳になった青少年(PHV期)は、15歳から17歳になった青少年(PHV後)に対して最大2倍のスプリントスピードの向上を示した(11)。また、PHVを経験した青少年は、PHV前に留まる青少年よりも最大スプリントスピードの向上が有意に大きかった(10.4%に対して5.6%)(45)。以上の研究結果を合わせて考えると、スピードの発達に対する成熟効果は確かに存在する(32,33,52)。しかし、青少年の最大スプリントスピードの育成に適したトレーニングを処方するには、これらの調査結果の根底を支える運動学的および運動力学的因子を理解して、自然な成長と発達がそれらの因子の発達にいかに関与を及ぼすかを知らることが重要である。

形態学と最大スプリントパフォーマンス

青少年は青少年期を通じて、ほぼすべての形態学的特質について非直線的な成長パターンを経験する(28)。身長、体幹長、脚長の急激な伸びを特徴とするのはPHV期である。しかし、脚長の最大の伸びは思春期のスパート前半で観察され、体幹長と合計身長は後半で急激に増加する(28)。形態学的変数が、青少年のスプリントパフォーマンスに占める役割を調査した研究はほとんど存在しない。11～15歳の青少年を対象とした355名の大規模調査では、体重と最大スピードおよびストライド長の間に負の相関関係が報告されている(33)。そして体重の増加は接地時間の増加と関係していた(33)。さらに、成熟度に分けて調査すると、思春期前の青少年

においては、体重はスピード、ストライド長、ストライド頻度、接地時間、および遊脚時間に負の影響を及ぼし、思春期後の青少年においてはスピードとストライド長に負の影響を及ぼしていた(32)。また、思春期前の青少年においては、身長はスピードとストライド長に正の影響を及ぼし、思春期後の青少年においては脚長がストライド長に正の影響を及ぼしていた(32)。加えて、脚長と接地時移動距離(接地中に重心が移動する距離)との間には非常に強い相関関係が存在することが報告されており(22)、これは脚長の増加に伴ってストライド長が増加する主要なメカニズムのひとつと考えられるかもしれない。

S&Cコーチのためのガイドライン

以上の研究結果から考えると、トレーニング専門職は、自然な成長と成熟の結果として生じる体重増加の負の影響を相殺することに努めるべきである。筋量の増加は、成熟がもたらすと予測されるプラスの成果であるが、その反面、脂肪量の増加は力の産生にマイナスの影響を及ぼす可能性がある。体重増加の負の影響を打ち消す最も有効な方法は、レジスタンストレーニングであると考えられる。レジスタンストレーニングは力発揮能力を向上させるだけでなく、身体組成に好ましい変化をもたらして、相対的な力発揮能力を最大化する(7)。Meylanら(37)は、成熟の進行に伴うスプリントタイムの違いを説明するものは垂直方向の筋力とパワーであると考え、PHV前の青少年とPHV中の青少年の差異の大部分は筋力とパワーによって説明されると報告した。このような研究結果は、青少年の身体育成モデルにおいて実際に行なわれているように、最大スピードの

向上を望む青少年には早期にレジスタンストレーニングを導入することの重要性を示している可能性がある(26)。ただし、ここで取り上げた形態学的変数は、最大スピードを支える運動学的特質の全分散のごく一部(11～57%)を説明するに留まり(32)、残りの分散の大部分は他の因子によって説明されるはずであることに留意する必要がある。成熟の進行に伴うスプリントパフォーマンスの分散の大部分は、形態学的変数に筋力とパワーが組み合わさって説明されると考えられるため(37)、これらの特質が青少年のスプリントパフォーマンスにおいて果たす役割の重要性を改めて考える必要がある。近年の縦断的研究によると、21ヵ月間の形態学的変数の変化とその時期の最大スプリントスピードの変化との間には相関関係が見出されず、形態学的変化は最大スプリントスピードの重要な予測因子としても働いていなかった(45)。この結果からも、形態学的変数以外の変数が青少年の最大スプリントパフォーマンスに大きな影響を及ぼしていると考えられる。

青少年を対象とするトレーニング専門職にとっては、自然な成長と成熟の結果もたらされるこれらの変数の変化を定期的に監視して、プログラムデザインに組み込むことが不可欠である。各アスリートの形態学的変数(身長、体幹長、脚長、体重)の変化を定期的(3ヵ月に1回程度)に監視することで(19)、成長と成熟が急速に進行する時期を知り、成長と成熟の結果が最大スプリントスピードやその他の側面に及ぼす影響に気を配ることが可能になる。

最大スプリントパフォーマンスの運動学

基本的に、スピードはストライド長

とストライド頻度の積によって決定される。したがって理論的には、スプリントパフォーマンスを向上させるにはその2つの特質を同時に向上させるとよい。ところが成人においては、ストライド長とストライド頻度の間には負の相互作用が存在すると主張されており(12)、エリートクラスの成人スプリンターは、2つの特質のどちらかに大きく依存して100mのベストパフォーマンスを引き出している可能性があるともいわれている(54)。したがって青少年においては、スピードを表す式から想像されるほど、ストライド長とストライド頻度の相互作用が明確に定義されていないことは言うまでもない。さらに、青少年期を通じての成長と成熟などの因子も存在するため、青少年におけるスプリントスピードの育成は複雑になるばかりである。

ストライド長は青少年期を通じて増加することが報告されており(33,55)、この増加は脚長の変化と比例している可能性があるとし唆されている(55)。また、思春期前には接地時間の増加とそれに付随してストライド頻度の低下が発生し、そのため、この時期には最大スプリントスピードが変化しないという主張もある(33)。逆に、ストライド頻度は青少年期を通じて変化せず(55)、成熟の進行に伴う差異は認められないと指摘する研究も多い(32,45,52)。さらに、成熟の進行に伴って遊脚時間に有意差が認められないことも一貫して報告されている(32,33,52)。これらの調査結果から、ストライド頻度の向上は成長や成熟によって自然に発生するものではなく、これを向上させるには、接地時間に注目することが重要であると考えられる。

ただし、Rumpfら(52)の研究では自

走式のトレッドミルが使用されていることに留意する必要がある。自走式トレッドミルは付随する抵抗のために、地上でのスプリントと比べて最大スピードの獲得が小さいことが知られている(16,38)。したがって、自走式トレッドミルと地上のスプリントとは、スプリントパフォーマンスにかかわる運動力学および運動学的パラメータも異なる可能性がある。この2つの条件を比較した諸研究の結果を概括すると、例えば青少年の最大スピード、ストライド長、およびストライド頻度は自走式トレッドミルのほうが約27～60%小さく、接地時間は約48～80%長かった(32,33,52)。したがって、トレーニング専門職は、自走式トレッドミルから得たデータの解釈には注意が必要である。なぜなら、最大スプリントパフォーマンスに関連する運動学と運動力学を正しく反映していない可能性があるからである。

青少年のスプリントパフォーマンスの運動学的変化に関する縦断的データは、ほとんど存在しない。最近の21ヵ月にわたる調査によると、PHV前はストライド頻度がわずかに低下し(-2.4%)、接地時間がやや増加した(2.3%)。しかし、PHV前とPHV後で比較すると、ストライド頻度がやや増加し(2.7%)、接地時間が減少した(-3.6%)(45)。さらに、PHV前に留まる青少年と、PHV前からPHV後に移行した青少年においては、どちらもストライド長の増加(それぞれ7.8%と8.0%)が認められた(45)。ただし、ストライド頻度と接地時間の変化は、各変数の測定誤差の閾値(変動係数がそれぞれ4.3%と4.9%)(34)を下回っていることに注意が必要である。つまり、この研究で利用された光学的測定システムの信頼性は不十分であり、ストラ

イド頻度と接地時間の長期的変化が、データ収集の誤差を超えた実際のパフォーマンスの変化を示しているとは言い切れない。しかし、ストライド長の変化は、測定誤差の閾値よりもかなり大きい(変動係数が3.9%)(34)、測定誤差を超えた真の変化が観察されたと考えてよい。以上のことから、青少年のストライド頻度と接地時間はPHV前後で比較的安定しているが、ストライド長はPHVを経て増加するとみることができる。

11～16歳の青少年の全体分析と、PHVの前後で分けた個別分析によると、スピードとストライド長の間には、スピードとストライド頻度の間よりも強い関係が存在するといえる(33,34)。さらに重回帰分析によると、PHV前の青少年は最大スプリントスピードを引き出すためにストライド頻度に依存することが多く(最大スピードの説明される全分散への寄与率約58%)、PHV後の青少年はストライド長に依存することが多い(最大スピードの説明される全分散への寄与率は約54%)(32)。これは、成熟がスプリントパフォーマンスに対して異なる影響を及ぼすことを示している。最大スピードを発揮する際に依存する因子が、ストライド頻度からストライド長に移行することは、PHV中の筋量の増加(39,56)とその結果もたらされる筋力(31,47)やパワー(1,24)の増加によってもある程度説明されるかもしれない。

S&Cコーチのためのガイドライン

トレーニング専門職は、加齢と成熟の結果として予測されるストライド長の増加と、ストライド頻度の限られた変化、すなわちおそらくはわずかな低下を意識する必要がある。近年の研究によると、思春期前の青少年のスプリ

ントパフォーマンスを向上させるにはプライオメトリックトレーニングが最も効果的である(21,53)。トレーニング専門職は、青少年への処方についてすでに発表されているガイドラインを参照して、プライオメトリックトレーニングを安全かつ効果的に実施すべきである(2,23)。思春期前の青少年にプライオメトリックトレーニングを適用するのは、筋腱スティフネスと、運動単位の発火頻度、予備緊張、および伸張反射など、この時期に自然に発達することが知られている神経系の因子にプラスの適応をもたらすことが狙いである(9,15,17,25,41)。さらに、思春期前にみられるストライド頻度への依存は、神経系の諸特質の自然な発達と、神経系に高い刺激を与えるトレーニングへの感受性によっても説明される可能性がある。また思春期後の青少年はストライド長への依存が大きいことも観察されているため、思春期後の青少年のスプリントパフォーマンスを向上させるには、ストレンジストレーニングとプライオメトリックトレーニングの複合トレーニングが最も効果的なアプローチであるといえるかもしれない(21,53)。このようなアプローチは、神経系の諸特質をバランスよく継続的に発達させるだけでなく(42)、青少年期を通じて観察される筋横断面積(39,56)と羽状角(3)の自然な発達と足並みを揃えて、力発揮能力も向上させると考えられる。さらに、PHV期のテストステロンの有意な増加(58)は、この時期にみられる筋力(31,47)とパワー(1,24)の増加を支える同化環境を向上させる。自然な成長と成熟を通して発達することが知られている生理学的特質をトレーニングによって向上させるアプローチは、「相乗的適応(synergistic adaptations)」(7)と名付けられており、

青少年の身体育成プログラムをデザインする際に考慮に入れる必要のある事柄のひとつである。

最大スプリントパフォーマンスの運動力学

青少年の最大スプリントパフォーマンスを決定する運動力学の因子に関する調査は数少ない。しかしながら、自走式トレッドミルを用いた研究によると、思春期前、中、後の青少年においては最大筋力とパワーが重要な予測因子であると考えられる(37,52)。なかでも重要な決定因子は、水平方向のパワーの発揮能力(短縮性筋活動)とパワーの吸収能力(伸張性筋活動)である(48)。さらに、標本数は少ない(11名)ものの、思春期後の青少年(約16歳)においては、両脚でのホッピングにおける垂直方向のスティフネスが地上での最大スプリントスピード、および自走式トレッドミルによるスプリントの水平方向のパワーと強い相関関係にあった(4)。地上でのスプリントに関する近年の横断的(22)および縦断的(45)研究の結果も、相対的な垂直方向のスティフネス、相対的な最大筋力および相対的な脚スティフネスは、青少年の最大スプリントスピードの重要な決定因子であることを示しており、3つの因子を合計すると全分散への寄与率は79～98%となった。

成人を対象とした調査に基づいて考えると、自重に対する力の適用能力(相対的な力発揮能力)(61)が青少年のスプリントパフォーマンスの重要な決定因子であっても驚くべきことではないだろう。しかし、横断的なデータの分析においても縦断的なデータの分析においても、青少年の成熟の進行に伴う差異を比較すると相対的な力発揮能力は成熟途上で自然に増大せず、むしろ

低下する可能性があることに注意が必要である(22,45)。加えて、相対的な最大筋力はストライド長と遊脚時移動距離(つま先離地期から接地期までに重心が移動する距離)と非常に強い相関関係にあり、青少年において相対的な力発揮能力を育成することの重要性が示されている(22)。注目すべきことは、スプリント中の絶対的な最大筋力は成熟の進行に伴って増大するため(22,48,52)、同じく成長や成熟に伴って観察される体重の増加(28)は相対的な力発揮能力の増大を妨げる可能性があることである。興味深いことに、自走式トレッドミルを用いた研究では、PHV前とPHV後の青少年においては、水平方向の力とパワーが最大スプリント速度の最善の予測因子になりうるが(決定係数0.98～0.99)、PHV中の青少年においては、垂直方向の力のほうが体重増加の克服において重要であることが示されている(52)。

垂直方向のパワーは青少年、特にPHV前とPHV中の青少年のスプリントパフォーマンスに大きな影響を及ぼすことが示されている(37)。また自走式トレッドミルを用いた研究では、水平方向のパワーは成熟の進行に伴って大きく増加するが、相対的な水平方向のパワーはPHV前とPHV中は増加するものの、思春期後には減少する可能性のあることが示されている(52)。さらに、伸張性および短縮性のパワー発揮能力は、青少年のスプリントスピードの最も強い予測因子であると報告されている(48,52)。パワーの吸収(伸張性パワー)とパワーの産生(短縮性パワー)は弾性エネルギーの貯蔵と利用を示すものであり、したがって、伸張-短縮サイクル(SSC)機能の指標となる。重要なことは、成熟の進行とともに、短い伸張性と短縮性局面でより大

きなパワーの産生が観察されることであり(48)、これは加齢や成熟とともにSSC機能が向上することを示している(25,28)。

また、青少年のスプリントパフォーマンスにおける垂直方向のスティフネスの役割を調査した文献も若干存在する(4,10,22,45,48,55)。垂直方向のスティフネスは、重力に耐えて克服する能力を反映しているため、スプリントパフォーマンスとは特に関係が深いと考えられる。垂直方向のスティフネスの大きさは、重心の垂直方向における変位の小ささを反映している。そして重心の垂直方向における変位の小ささは、接地時間の短縮とストライド頻度の増加を可能にすると考えられる。青少年の分析を行なう際は、形態学的な分散を考慮に入れて、両脚の長さや自重に対してスティフネスの標準化を行わない(30)、相対的な測定値を用いることが特に重要である。自走式トレッドミルを用いた研究によると、成熟は相対的な垂直方向のスティフネスに影響を及ぼし、成熟の進行に伴って約17～30%の増加が観察された(48)。逆に、垂直方向のホッピングと地上でのスプリントを利用した横断的データによると、相対的な垂直方向のスティフネスは11～16歳の間で変化しなかった(22,24)。一方、縦断的データによると、成長期のスパートにわずかに増大する可能性がある(45)。青少年の地上でのスプリントパフォーマンスにおいては、ストライド頻度の増加と接地時間の減少が、相対的な垂直方向のスティフネスの大きさと関連していた(22)。これらの調査結果は、最大スプリントにおいて相対的な垂直方向のスティフネスが果たす役割を説明することに役立つ。加えて、青少年のスプリントパフォーマンスを向上させるには、相対

的な垂直方向のスティフネスにかかわる諸特質を発達させることの重要性を示している可能性がある。

脚スティフネスとは接地中の脚の圧縮力を示すものであり、この点において、重心の変位の程度を示す垂直方向のスティフネスとは異なる。この2つの変数は、ジャンプなどの垂直方向の動作においては同一のものであるが、スプリントなどの水平方向の動作においては異なっている(29)。脚の最大圧縮力と相対的な脚スティフネスは、横断的研究(22)によっても縦断的研究(45)によっても、重回帰モデルにおいて青少年のスプリントパフォーマンスの向上に貢献することが示されている。この2つの変数が貢献するメカニズムに関しては、接地時移動距離が関連しているとみられる(60)。脚の最大圧縮力と接地時移動距離の間にはほぼ完全な負の相関関係が報告されているが、一方、脚長と接地時移動距離の間にはきわめて大きな正の相関関係が報告されている(22)。これらの研究結果は、脚の圧縮力が大きく、脚長が長い青少年はより大きな接地時移動距離を生み出して、結果としてストライド長を増大させる可能性があることを示している。脚の長さがストライド長を増大させるという主張は直感的にわかりやすく思われるが、すでに述べたように、脚の圧縮力の増大(すなわち脚スティフネスの減少)が垂直方向の脚スティフネスの増大と同時に発生することはありそうには思われない。興味深いことに、接地時の脚の角度と、それによって生じる接地中の脚さき(leg sweep)を検証することによって、この現象に対する説明が得られるかもしれない。脚スティフネスは、接地時の脚の角度が水平に近いほど(すなわち垂直方向に対する角度が大きいほど)

低下すると主張されている(30)。したがって理論的には、接地時の脚の角度が水平に近くても垂直方向のスティフネスは保持され、脚の圧縮力は増加して、接地時移動距離とストライド長が長くなると考えられる。

相対的な垂直方向のスティフネスと脚スティフネスは、関節周囲で測定する相対的な筋腱スティフネスとは異なるものである。単独の筋収縮の場合は、筋腱スティフネスが加齢とともに増加することが示されている(9,17,59)。しかし、青少年を対象としてスプリント時の相対的な筋腱スティフネスを直接測定した研究は存在しない。加齢に伴って観察される相対的な筋腱スティフネスの大きな増加がスピードの向上に貢献するならば、それはストライド頻度よりもストライド長の増加の促進を介してであろうと考えられる。なぜなら、ストライド頻度は加齢とともに増加しないが、ストライド長は増加するからである。ただし、青少年を対象として、これらの変数のすべてを同時に測定した研究は存在せず、この主張の正しさは確認されていない。また、この分野の過去の研究結果を分析して成熟を説明した研究も存在しない。したがって、この主張の価値を決定するには今後の調査を必要とする。

S&Cコーチのためのガイドライン

相対的な最大筋力は最大スピードの決定因子であるが、トレーニング専門職は、この特質の向上を11歳以降の成長と成熟だけに頼るべきではない。レジスタンストレーニングを積極的に利用すべきである。研究によると、力の産生の増大は青少年のスプリントパフォーマンスの向上と関連しているが(5,37)、特に複合レジスタンストレーニングを利用すると効果的

である(7,13,18,50,53)。加えて、回帰モデルによると、青少年において力の産生が10%増大するとスプリントパフォーマンスが1.6～4.2%向上して(22,37)、青少年アスリートの筋力が適度に向上することによるプラスの影響が示されている。興味深いことは、レジスティッドスレッドトレーニングを利用した6週間にわたる最近のトレーニング研究によると、PHV前の青少年においては最大スプリントパフォーマンスの向上は全く誘発されなかったが、PHV中と後の結合群ではスプリント速度、ストライド長、ストライド頻度、脚および垂直方向のスティフネス、水平方向と垂直方向の力発揮能力とパワーの向上が認められた(50)。この研究では、スレッドの抵抗は群ごとに自重比で決定されているが(2.5～10%)、以前の研究では、相対的負荷を同じにすると、PHV前の青少年のスプリントスピードはPHV後の青少年と比べて50%も低下する可能性のあることが示されている(49)。これらのデータは、思春期中と思春期後の青少年に対するレジスティッドスレッドトレーニングの利益を示すだけでなく、成熟段階に応じて適切な負荷を決定することの重要性を示している。

パワーの発達も青少年の最大スプリントスピードの重要な決定因子である(37)。そのため、パワー発揮能力とSSC機能は成熟の進行に伴って自然に発達するとはいうものの、トレーニングを介して育成するべきであると考えられる。6週間のトレーニング期間では、水平方向と垂直方向のプライオメトリックエクササイズを組み合わせが、11歳のサッカー選手(PHV前)のスプリントパフォーマンスを最も向上させた(44)。したがってこれは、青少年においてスプリントパフォーマンス

中のパワー発揮能力を向上させるのに適した刺激であると考えられる。さらに回帰モデルによると、ジャンプ中のパワーが10%増加すると、青少年のスプリントパフォーマンスが2%向上する可能性があり(37)、これもまたS&Cコーチが青少年のスプリントパフォーマンスに及ぼしうるプラスの影響を示している。

相対的な垂直方向のスティフネスを向上させるには、垂直方向の変位と相対的な最大筋力を至適化することが重要である。12歳(PHV前)と15歳(PHV後)の青少年においては、わずか4週間のプライオメトリックトレーニング後に、相対的な垂直方向のスティフネスが向上した(20)。したがってこれは、青少年の最大スプリントスピードを向上させるのに適した方策であると考えられる。さらに、この研究で報告された相対的な垂直方向のスティフネスの増加(約8%)(20)は、回帰モデルを用いると最大スプリントスピードに約1.3%の向上をもたらしていた(22)。これもまた、このアプローチが青少年のトレーニングにプラスの影響を及ぼすことを示していると考えられる。

垂直方向のスティフネスの向上はスピードの向上と関連している。しかし、垂直方向のスティフネスとは異なる特質である脚スティフネスには、これがあてはまらない可能性がある。脚スティフネスと脚の圧縮力は、自然な成長と成熟に伴って低下が観察され、この低下が接地時移動距離の伸びを生み出してスプリントパフォーマンスの向上をもたらすとされている。そのため、この2つの変数に関してガイドラインを示すことは難しい。技術的なトレーニングが脚の圧縮力と脚スティフネスに影響を及ぼすことはありうる。ただし、このような主張はまだ推測の域を

出していないため、実用的なガイドラインを作成するには今後の調査が必要である。

非対称性と最大スプリントパフォーマンス

青少年の非対称性を調査した文献は数少なく、スプリントパフォーマンスにおける青少年の非対称性を調査したものは2点だけである。Rumpfら(51)は、既往歴のない青少年を対象として、自走式トレッドミルを用いてスプリント中の運動力学的な非対称性を検証した結果、力とパワーと仕事において平均17%の非対称性を見出したが、成熟による群間比較において差異が有意であったのは仕事においてのみであった。ただし、この研究では優位な脚の評価が行なわれず、両脚間の非対称率に基づいて非対称性が算出されていることに注意が必要である。歩行中は片脚が「推進脚(propulsive leg)」として機能し(より多く正の仕事をする)、対脚が「支持脚(stick leg)」として機能する(スティフネスが大きい)(6)。その結果、群間比較を行なうと脚の優位性によってそれぞれの非対称性が隠されたり、過大評価されたりする可能性があることを考えると、この研究の結果は重要かもしれない。より最近の研究では、既往歴のない青少年の大規模コホート(標本数344名)を対象として、地上でのランニング中の運動学および運動力学的変数の非対称性の評価が行なわれた(35)。その結果、すべての変数にわたって2.3～12.6%の非対称性が報告されたが、年齢および成熟による群間比較では非対称性の程度はほとんど変わらなかった。さらに、運動学および運動力学的変数の非対称性の程度と、最大スプリントパフォーマンスとの間には強い相関関係が一切見

出されなかった。

S&Cコーチのためのガイドライン

既存のデータから判断すると、青少年を対象とするトレーニング専門職は非対称性について懸念する必要はない。しかし、青少年期を通じて非対称性を監視する過程で、非対称性の程度の変化が見出されれば、調査が必要かもしれない。なぜなら、正常な成長と発達の過程には非対称性の程度の変化は含まれないからである(35)。現在のところ、青少年における障害リスクを示すような、非対称性の変化や閾値のデータはほとんど存在しない。したがって、トレーニング専門職がデータに基づいて判断を下すには、この分野の縦断的研究が必要である。興味深いことに、成長期のスパートにみられるパフォーマンスの減衰を示す言葉として以前から使われている「思春期のぎこちなさ(adolescent awkwardness)」(24,43)という概念は、本稿で取り上げた非対称性のデータによっては支持されないようである。ただし、非対称性と思春期のぎこちなさの関連性は十分に検証されていないため、定式化するには今後の調査が必要である。

かつては非対称性の監視は、バイオメカニクス研究室で高価な床反力計や光学的測定システムを用いて行なうしかなかった。しかし、新たなソフトウェアの登場によって、トレーニング専門職はこの情報を現場で収集できるようになった。一部のシステムについては妥当性と信頼性に問題が残るものの(8)、スマートフォンベースの新たなアプリケーション(RunmaticやMy Sprintなど)の登場が、指導に必要な知識をトレーニング環境において獲得することを可能にするとともに、スプリントパフォーマンスの定期的な監視を

容易にすることは間違いない。

現場への応用

青少年を対象とするS&C専門職が、アスリートの最大スプリントパフォーマンスを向上させるには、年齢と成熟の進行とともに生じる成長と発達を念頭に置くべきであり、青少年のスプリントパフォーマンスの予測因子に注目して、それをトレーニングの焦点とするべきである。先行研究の結果に基づいて、成熟の進行とともにみられるスプリントパフォーマンスの重要な変数の変化を一覧にした(表)。これは、青少年のスピードの向上が、効果的なトレーニングプログラムの結果であるのか、あるいは成長と成熟による影響が大きいのかを見分けるために不可欠な情報である。ユースのサッカーアカデミーを対象として長期的な体系的ト

レーニングを行なったところ、3年間では、対照群と比較して、アカデミー群のほうスピードの向上が大きかった(それぞれ約9%と4%)(62)。しかし6年間では、対照群とアカデミー群の向上(約19%)はほぼ同等であった(56)。この結果からも、青少年におけるスプリントパフォーマンスの変化を解釈するには、成長と成熟の影響に関する知識が重要であるといえる。

現在の研究に基づいて、青少年の最大スプリントスピードの重要な予測因子、およびトレーニング刺激の提案とそれが最大スプリントパフォーマンスにもたらすと考えられる成果を示した(図)。青少年のスプリントパフォーマンスの決定因子の中でも、相対的な力、相対的な垂直方向のスティフネス、垂直および水平方向のパワーが、年齢や成熟の進行とはかかわりなく、特に重

表 成熟の進行に伴う、最大スプリントパフォーマンスの諸特質の変化

	PHV前	PHV中	PHV後
スピード	～もしくは↑	↑↑	↑
ストライド長	↑	↑	↑
ストライド頻度	～	～	～もしくは↑
接地時間	～	～	～もしくは↓
遊脚時間	～	～	～
接地時移動距離	↑	↑	↑
遊脚時移動距離	↑	↑	～もしくは↑
依存する因子	ストライド頻度	ストライド長	ストライド長
絶対的な垂直方向の力発揮能力	↑	↑↑	↑↑
相対的な垂直方向の力発揮能力	～もしくは↓	～もしくは↓	～もしくは↓
水平方向の力発揮能力	↑	↑	↑
絶対的な水平方向のパワー	↑	↑↑	↑
相対的な水平方向のパワー	↑	↑	↓
絶対的な垂直方向のスティフネス	↑	↑	↑
相対的な垂直方向のスティフネス	～	～もしくは↑	～
絶対的な脚スティフネス	～	～	～
相対的な脚スティフネス	～	～	～もしくは↓

～＝ほぼ同じまたは変化なし、↑＝増大傾向、↑↑＝大きく増大傾向、↓＝減少傾向、PHV＝身長最大の成長速度

要な予測因子であるとみられる。したがって、若年スプリンターにおいては常にこれらをトレーニングの焦点とすべきである。重要なことは、スプリントパフォーマンス向上の主な手段として主要なスプリントトレーニングを含めることである(14,57)。しかし、主要なスプリントトレーニングは、スプリントパフォーマンスのトレーニングにおいて最も特異的なトレーニング形式であるにもかかわらず、それが青少年のスプリントパフォーマンスに及ぼす影響を実際に調査した研究はきわめて少ない(53)。さらに、すべての身体パラメータは成長のあらゆる段階でトレーニングすることが可能であるにせよ(26)、自然に生じる成長過程との「相乗的適応(synergistic adaptations)」を図ろうとすると、ある特質を発達させる機会、ある特定の時期に存在するのかもしれない(7)。思春期前の青少年におけるトレーニングは、プライオメトリックトレーニングや伝統的なレジスタンストレーニングを介した、神経筋系の特質の育成を焦点とすべきである。思春期前の青少年には男性ホル

モンの分泌が認められない。したがって、このようなトレーニング方法は、神経系の適応による力の産生とスティフネスの向上を促すはずである。これに、技術的なトレーニングと主要なスピードトレーニングを重点的に組み合わせれば、スプリントパフォーマンスの動作効率の堅固な基礎を築くことが可能であろう。

PHV中には最大スプリントスピードの大きな向上が期待されるが、特に重要であるのは、相対的な筋力と相対的な垂直方向のスティフネスに関連する特質に対処することである。なぜなら、PHV中とその直後に観察される身長と体重の急速な変化がそれらの特質にマイナスの影響を及ぼしうるからである。思春期後の青少年は、相対的な垂直および水平方向の力とパワーの発揮能力を最大限に増大させることにも注意を払うべきである。なぜなら、この時期には成長に伴ってテストステロンと筋量の増大が生じるからである。複合的なトレーニング様式は成長のどの段階においても推奨される。しかし、青少年の長期的な身体育成プログラム

の開発に取り組む専門職は、思春期前は神経系に重点を置くトレーニング方法が効果的であり、思春期後は力発揮に重点を置くトレーニング方法が効果的である(21)ことを心得ておくべきである。◆

References

1. Armstrong N, Welsman JR, Williams CA, Kirby BJ. Longitudinal changes in young people's short-term power output. *Med Sci Sport Exerc* 32: 1140-1145, 2000.
2. Bedoya A, Miltenberger M, Lopez R. Plyometric training effects on athletic performance in youth soccer athletes: A systematic review. *J Strength Cond Res* 29: 2351-2360, 2015.
3. Binzoni T, Bianchi S, Hanquinet S, Kaelin A, Sayegh Y, Dumont M, Jéquier S. Human gastrocnemius medialis pennation angle as a function of age: From newborn to the elderly. *J Physiol Anthropol Appl Hum Sci* 20: 293-298, 2001.
4. Chelly SM, Denis C. Leg power and hopping stiffness: Relationship with sprint running performance. *Med Sci Sports Exerc* 33: 326-333, 2001.
5. Christou M, Smilios I, Sotiropoulos K, Volaklis K, Pilianidis T, Tokmakidis SP. Effects of resistance training on the physical capacities of adolescent soccer players. *J Strength Cond Res* 20: 783-791, 2006.
6. Dalleau G, Belli A, Bourdin M, Lacour JR. The spring-mass model and the energy cost of treadmill running. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 77: 257-263, 1998.
7. Faigenbaum AD, Lloyd RS, MacDonald J, Myer GD. Citius, altius, fortius: Beneficial effects of resistance training for young athletes. *Br J Sports Med* 50: 3-7, 2016.
8. Gindre C, Lussiana T, Hebert-Losier K, Morin JB. Reliability and validity of the Myotest for measuring running stride kinematics. *J Sports Sci* 34: 664-670, 2016.
9. Grosset JF, Mora I, Lambert D, Pérot C. Changes in stretch reflexes and muscle stiffness with age in prepubescent children. *J Appl Physiol* 102: 2352-2360, 2007.
10. Heise GD, Bachman G. Leg spring model properties of children. In: Proceedings of the 24th Annual Meeting of the American Society of Biomechanics, Illinois. University

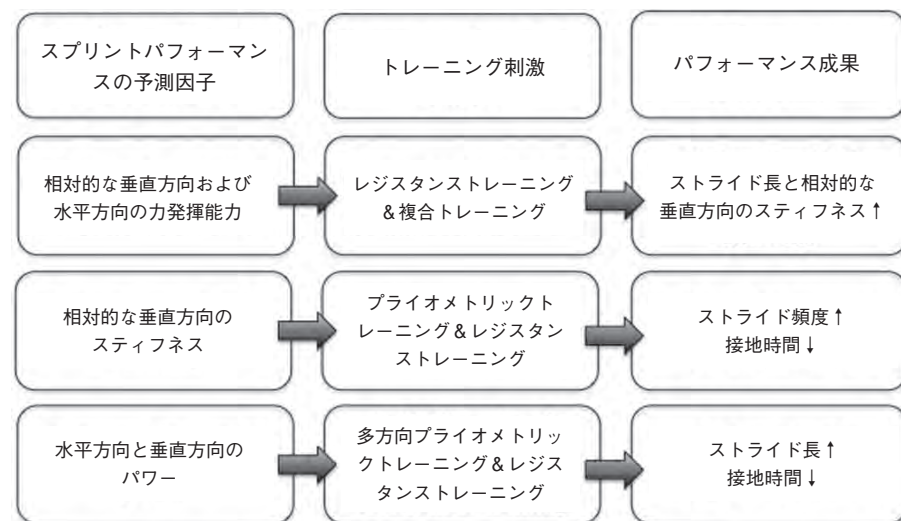


図 青少年の最大スプリントパフォーマンスの予測因子、トレーニング刺激の提案および獲得されるパフォーマンス成果

- of Illinois at Chicago, 2000. <http://www.asbweb.org/conferences/2000/pdf/034.pdf>. Accessed December 7, 2015.
11. Hirose N, Seki T. Two-year changes in anthropometric and motor ability values as talent identification indexes in youth soccer players. *J Sci Med Sport* 19: 1–5, 2015.
 12. Hunter JP, Marshall RN, McNair PJ. Interaction of step length and step rate during sprint running. *Med Sci Sports Exerc* 36: 261–271, 2004.
 13. Kotzamanidis C, Chatzopoulos D, Michailidis C, Papaiakevou G, Patikas D. The effect of a combined high-intensity strength and speed training program on the running and jumping ability of soccer players. *J Strength Cond Res* 19: 369–375, 2005.
 14. Kotzamanidis C. The effect of sprint training on running performance and vertical jumping in pre-adolescent boys. *J Hum Mov Stud* 44: 225–240, 2003.
 15. Kubo K, Kanehisa H, Kawakami Y, Fukunaga T. Growth changes in the elastic properties of human tendon structures. *Int J Sports Med* 22: 138–143, 2001.
 16. Lakomy H. The use of a non-motorised treadmill for analysing sprint performance. *Ergonomics* 30: 627–637, 1987.
 17. Lambertz D, Mora I, Grosset JF, Perot C. Evaluation of musculotendinous stiffness in prepubertal children and adults, taking into account muscle activity. *J Appl Physiol* 95: 64–72, 2003.
 18. Lesinski M, Prieske O, Granacher U. Effects and dose-response relationships of resistance training on physical performance in youth athletes: A systematic review and meta-analysis. *Br J Sports Med* 1–17, 2016. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26851290>. Accessed July 24, 2015.
 19. Lloyd R, Oliver J, Faigenbaum A, Myer G, De Ste Croix M. Chronological age vs. biological maturation: Implications for exercise programming in youth. *J Strength Cond Res* 28: 1454–1464, 2014.
 20. Lloyd R, Oliver J, Hughes MG, Williams CA. The effects of 4-weeks of plyometric training on reactive strength index and leg stiffness in male youths. *J Strength Cond Res* 26: 2812–2819, 2012.
 21. Lloyd R, Radnor J, De Ste Croix M, Cronin J, Oliver J. Changes in sprint and jump performances after traditional, plyometric, and combined resistance training in male youth pre- and post-peak height velocity. *J Strength Cond Res* 30: 1239–1247, 2016.
 22. Lloyd RS, Meyers RW, Hughes MG, Cronin JB, Oliver JL. The relationship between vertical and horizontal stiffness and maximal running speed in 11–15 year old boys. *J Strength Cond Res* 30: S99, 2016.
 23. Lloyd RS, Meyers RW, Oliver JL. The natural development and trainability of plyometric ability during childhood. *Strength Cond J* 33: 23–32, 2011.
 24. Lloyd RS, Oliver JL, Hughes MG, Williams CA. The influence of chronological age on periods of accelerated adaptation of stretch-shortening cycle performance in pre and postpubescent boys. *J Strength Cond Res* 25: 1889–1897, 2011.
 25. Lloyd RS, Oliver JL, Hughes MG, Williams CA. Age-related differences in the neural regulation of stretch-shortening cycle activities in male youths during maximal and sub-maximal hopping. *J Electromyogr Kinesiol* 22: 37–43, 2012.
 26. Lloyd RS, Oliver JL. The youth physical development model: A new approach to long-term athletic development. *Strength Cond J* 34: 61–72, 2012.
 27. Lubans DR, Morgan PJ, Cliff DP, Barnett LM, Okely AD. Fundamental movement skills in children and adolescents: Review of associated health benefits. *Sport Med* 40: 1019–1035, 2010.
 28. Malina RM, Bouchard C, Bar-Or O. *Growth, Maturation, and Physical Activity* (2nd ed.). Champaign, Illinois: Human Kinetics, 2004.
 29. McMahon JJ, Comfort P, Pearson S. Lower limb stiffness: Effect on performance and training considerations. *Strength Cond J* 34: 94–101, 2012.
 30. McMahon TA, Cheng GC. The mechanics of running: How does stiffness couple with speed? *J Biomech* 23: 65–78, 1990.
 31. Mero A, Kauhanen H, Peltola E, Vuorimaa T, Komi PV. Physiological performance capacity in different prepubescent athletic groups. *J Sports Med Phys Fitness* 30: 57–66, 1990.
 32. Meyers R, Oliver J, Hughes M, Lloyd R, Cronin J. Influence of age, maturity, and body size on the spatiotemporal determinants of maximal sprint speed in boys. *J Strength Cond Res* 2016. http://journals.lww.com/nsca-jscr/Abstract/publishahead/The_influence_of_age,_maturity_and_body_size_on.96630.aspx. Accessed November 13, 2016.
 33. Meyers RW, Oliver J, Hughes M, Cronin J, Lloyd RS. Maximal sprint speed in boys of increasing maturity. *Pediatr Exerc Sci* 27: 85–94, 2015.
 34. Meyers RW, Oliver JL, Hughes MG, Lloyd RS, Cronin JB. Reliability of the spatiotemporal determinants of maximal sprint speed in adolescent boys over single and multiple steps. *Pediatr Exerc Sci* 27: 419–426, 2015.
 35. Meyers RW, Oliver JL, Lloyd RS, Hughes MG, Cronin JB. Asymmetry during maximal sprint performance in 11–16 year old boys. *Pediatr Exerc Sci* 2016. <http://journals.humankinetics.com/pes-in-press/pes-in-press/asymmetry-during-maximal-sprint-performance-in-11-16-year-old-boys>. In press in 2016. Accessed March 29, 2016.
 36. Meylan C, Cronin J, Oliver J, Hughes M. Talent identification in soccer: The role of maturity status on physical, physiological and technical characteristics. *Int J Sport Sci Coach* 5: 571–592, 2010.
 37. Meylan CMP, Cronin J, Oliver JL, Hopkins WG, Pinder S. Contribution of vertical strength and power in sprint performance in young male athletes. *Int J Sports Med* 35: 749–754, 2014.
 38. Morin JB, Sève P. Sprint running performance: Comparison between treadmill and field conditions. *Eur J Appl Physiol* 111: 1695–1703, 2011.
 39. O'Brien TD, Reeves ND, Baltzopoulos V, Jones DA, Maganaris CN. Muscle-tendon structure and dimensions in adults and children. *J Anat* 216: 631–642, 2010.
 40. Oliver JL, Lloyd RS, Rumpf MC. Developing speed throughout childhood and adolescence: The role of growth, maturation and training. *Strength Cond J* 35: 42–48, 2013.
 41. Ozmun JC, Mikesky AE, Surburg PR. Neuromuscular adaptations following prepubescent strength training. *Med Sci Sports Exerc* 26: 510–514, 1994.
 42. Paus T, Zijdenbos A, Worsley K, Collins DL, Blumenthal J, Giedd JN, Rapoport JL, Evans AC. Structural maturation of neural pathways in children and adolescents: In vivo study. *Science* 283: 1908–1911, 1999.
 43. Philippaerts RM, Vaeyens R, Janssens M, Van Renterghem B, Matthys D, Craen

- R, Bourgois J, Vrijens J, Beunen G, Malina RM. The relationship between peak height velocity and physical performance in youth soccer players. *J Sports Sci* 24: 221-230, 2006.
44. Ramirez-Campillo R, Gallardo F, Henriquez-Olguin C, Meylan C, Martinez C, Alvarez C, Caniunqueo A, Cadore E, Izquierdo M. Effect of vertical, horizontal, and combined plyometric training on explosive, balance, and endurance performance of young soccer players. *J Strength Cond Res* 29: 1784-1795, 2015.
45. Read P, Meyers RW, Lloyd RS, Hughes MG, Cronin JB, Oliver JL. The impact of peak height velocity on changes in sprint kinetics and kinematics in boys. In: National Strength and Conditioning Association (NSCA) 39th National Conference. New Orleans, LA, July 6th-9th, 2016.
46. Reilly T, Bangsbo J, Franks A. Anthropometric and physiological predispositions for elite soccer. *J Sports Sci* 18: 669-683, 2000.
47. Round JM, Jones DA, Honour JW, Nevill AM. Hormonal factors in the development of differences in strength between boys and girls during adolescence: A longitudinal study. *Ann Hum Biol* 26: 49-62, 1999.
48. Rumpf M, Cronin J, Oliver J, Hughes M. Vertical and leg stiffness and stretch-shortening cycle changes across maturation during maximal sprint running. *Hum Mov Sci* 32: 668-676, 2013.
49. Rumpf MC, Cronin JB, Mohamad IN, Mohamad S, Oliver J, Hughes M. Acute effects of sled towing on sprint time in male youth of different maturity status. *Pediatr Exerc Sci* 26: 71-75, 2014.
50. Rumpf MC, Cronin JB, Mohamad IN, Mohamad S, Oliver J, Hughes MG. The effect of resisted sprint training on maximum sprint kinetics and kinematics in youth. *Eur J Sport Sci* 15: 374-381, 2015.
51. Rumpf MC, Cronin JB, Mohamad IN, Mohamad S, Oliver JL, Hughes MG. Kinetic asymmetries during running in male youth. *Phys Ther Sport* 15: 53-57, 2014.
52. Rumpf MC, Cronin JB, Oliver JL, Hughes MG. Kinematics and kinetics of maximum running speed in youth across maturity. *Pediatr Exerc Sci* 27: 277-284, 2015.
53. Rumpf MC, Cronin JB, Pinder SD, Oliver J, Hughes M. Effect of different training methods on running sprint times in male youth. *Pediatr Exerc Sci* 24: 170-186, 2012.
54. Salo A, Bezodis I, Batterham A, Kerwin D. Elite sprinting: Are athletes individually step-frequency or step-length reliant? *Med Sci Sports Exerc* 1: 1055-1062, 2011.
55. Schepens B, Willems P, Cavagna G. The mechanics of running in children. *J Physiol* 509: 927-940, 1998.
56. Vantinen T, Blomqvist M, Nyman K, Hakkinen K. Changes in body composition, hormonal status, and physical fitness in 11-, 13-, and 15-year-old Finnish regional youth soccer players during a two-year follow-up. *J Strength Cond Res* 25: 3342-3351, 2011.
57. Venturelli M, Bishop D, Pettene L. Sprint training in preadolescent soccer players. *Int J Sports Physiol Perform* 3: 558-562, 2008.
58. Viru A, Loko J, Harro M, Volver A, Laaneots L, Viru M. Critical periods in the development of performance capacity during childhood and adolescence. *Eur J Phys Educ* 4: 75-119, 1999.
59. Waugh CM, Blazeovich AJ, Fath F, Korff T. Age-related changes in mechanical properties of the Achilles tendon. *J Anat* 220: 144-155, 2012.
60. Weyand PG, Sandell RF, Prime DNL, Bundle MW. The biological limits to running speed are imposed from the ground up. *J Appl Physiol* 108: 950-961, 2010.
61. Weyand PG, Sternlight DB, Bellizzi MJ, Wright S. Faster top running speeds are achieved with greater ground forces not more rapid leg movements. *J Appl Physiol* 89: 1991-1999, 2000.
62. Wrigley RD, Drust B, Stratton G, Atkinson G, Gregson W. Long-term soccer-specific training enhances the rate of physical development of academy soccer players independent of maturation status. *Int J Sports Med* 35: 1090-1094, 2014.
63. Yague PH, De La Fuente JM. Changes in height and motor performance relative to peak height velocity: A mixed-longitudinal study of Spanish boys and girls. *Am J Hum Biol* 10: 647-660, 1998.

From *Strength and Conditioning Journal*
Volume 39, Number 2, pages 2-10.

著者紹介



Robert W. Meyers:
Cardiff Metropolitan UniversityのCardiff School of Sportでストレンクス&コンディショニングの主任講師とプログラム責任者を務め、ユース身体育成ユニットのヘッドコーチを務める。



Jon L. Oliver:
Cardiff Metropolitan UniversityのCardiff School of Sportで応用小児運動学のリーダーを務め、ユース身体育成ユニットの共同創設者として研究主任を務める。



Michael G. Hughes:
Cardiff Metropolitan UniversityのCardiff School of Sportで生理学と健康科学の上級講師を務める。



Rhodri S. Lloyd:
Cardiff Metropolitan UniversityのCardiff School of Sportでストレンクス&コンディショニングの上級講師を務め、ユース身体育成ユニットの共同創設者として責任者を務める。



John B. Cronin:
Auckland University of Technologyのストレンクス&コンディショニングの教授であり、Edith Cowan Universityの非常勤教授とSports Performance Research Institute New Zealandの共同責任者を務める。