©NSCA JAPAN
Volume 29, Number 9, pages 55-63

Key Words【トレーナビリティ：trainability、長期的なアスリートの育成：long-term athletic development、トレーニング強調期：training emphasize periods、青少年のトレーニング：youth training、レジスタンストレーニング：resistance training、潜在変数：latent variables

子どもと思春期の若者における一般的な運動能力の強化に適した感受性期は存在するのか？：批判的吟味

Sensitive Periods to Train General Motor Abilities in Children and Adolescents: Do They Exist? A Critical Appraisal

Bas Van Hooren, [1、2] M.Sc.　**Mark De Ste Croix,** [3] Ph.D.
[1]Department of Nutrition and Movement Science, NUTRIM School of Nutrition and Translational Research in Metabolism, Maastricht University Medical Centre+, Maastricht, The Netherlands
[2]Fontys University of Applied Sciences, Institute of Sport Studies, Eindhoven, The Netherlands
[3]School of Sport and Exercise, University of Gloucestershire, Cheltenham, United Kingdom

要約

いくつかの長期的なアスリートの育成モデルは、小児期および思春期において、筋力やスピードといった一般的な運動能力を強化するのに最適な一般的な感受性期、すなわち「絶好の機会」が存在するとの説を唱えている。しかし、このような期間が実際に存在するかどうかは明らかになっていない。そこで本レビューでは、一般的な感受性期の理論的根拠を批判的に吟味する。一般的な感受性期に関するいくつかの問題点を議論し、その上で、一般的な運動能力とそれらに関連する感受性期は存在しないと主張する。特定された一般的な感受性期の問題点は、その妥当性に疑問を呈するものであり、したがって我々は、それらを青少年アスリートのトレーニングに用いるべきでないと提言する。

序論

子どもや思春期の若者は、成人へと至る発達の過程において、そのタイミングとテンポには個人差があるものの、成長と成熟に伴う多様な身体的変化を経験する。例えば、呼吸器系、骨格系、および中枢神経系が成熟し、ホルモン濃度が変化し、筋腱複合体が形態学的、代謝的、および力学的に変化する(2,4,28,35,36,48,50,63)。いくつかのアスリート育成モデルにおいては、関連するいくつかのサブシステムが非線形に発達し、筋力、スピード、および持久力の指標が加速的に向上する結果、それらに感受性期(「絶好の機会」「適応加速期」「トレーニング強調期」「最適期」とも呼ばれる)が存在し、その期間に集中的なフィジカルトレーニングを実施することが、子どもと思春期の若者における身体的特性の向上に特に効果的であるとの説を唱えている(5,65)。

感受性期を提唱しているアスリート育成モデルとしては、2005年のBalyiら(5)による長期的なアスリートの育成(LTAD)モデルが最も知られており、同モデルは2013年に書籍(6)、また2014年にリソースペーパー(資料集)(14)として更新されている。LTADモデルでは、スポーツの身体的特性を、しなやかさ(柔軟性)、スピード、スキル、スタミナ(持久力)、および筋力という5つの一般的な運動能力に単純化し、それぞれに男女の生物学的年齢と暦年齢に基づく感受性期を提唱している**(図1)**。例えば男子では、スピードの強化に適した感受性期は7～9歳および13～16歳とされており、一方、有酸素性能力の強化に適した感受性期は、身長の最大成長速度(PHV：成長が最も速くなる時期)の出現前とされている。これらの感受性期以外の時期にスピードや有酸素性能力のトレーニングを実施すると、得られる適応が小さくなり、結果としてパフォーマンスに及ぼす影響も低下すると考えられている。なおここで強調すべきは、感受性

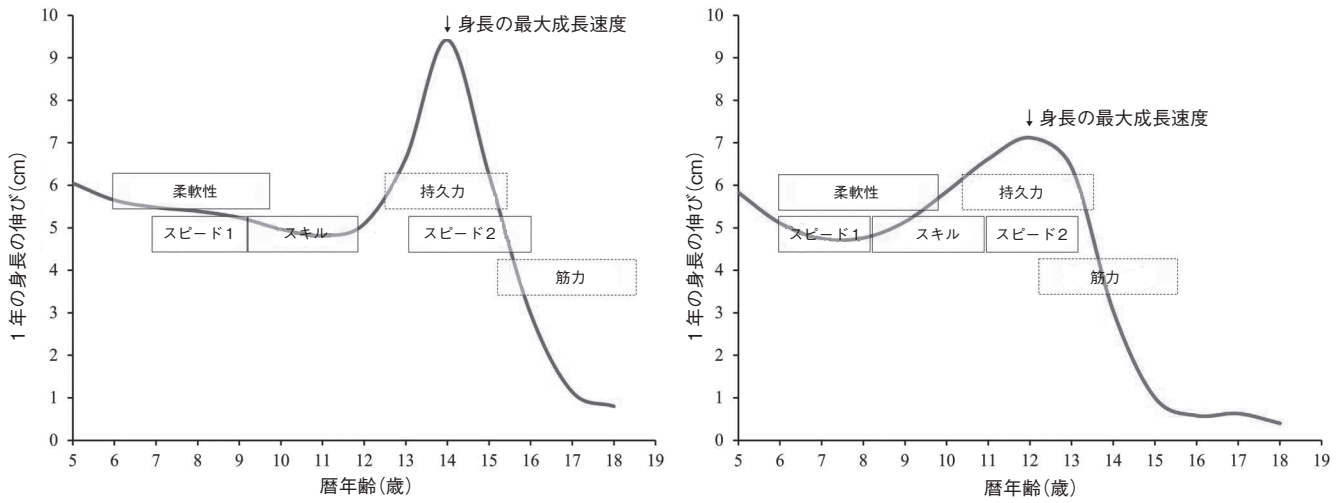

図1　LTADモデルにおける一般的な運動能力の強化に適した男子(左図)と女子(右図)の感受性期。実線で囲んだ枠は暦年齢に基づく感受性期で、点線で囲んだ枠は生物学的年齢に基づく感受性期。成長曲線は、Gerver & de Bruin(22)が報告したオランダの子どもと思春期の若者のデータに基づく。LTAD＝長期的なアスリートの育成

期と臨界期との違い、すなわち、臨界期以外のトレーニングは強化対象の能力に(実践的または臨床的に意義のある)影響を全く及ぼさない可能性があるのに対し、感受性期以外のトレーニングでは影響が低下するという違いである(27)。LTADモデルでは感受性期に言及することが多いのに対し、現場の専門職にはこれらを臨界期と解釈している人がいるため、この区別は重要である。

感受性期の存在を裏づけるエビデンス

LTADモデルの感受性期は、カナダで開発された特定競技のためのアスリート育成計画、コーチの実践的経験、および旧東側諸国において経験的にテストされたアスリート育成モデルを基にしている(5,6)。しかし、経験的観察は主観的バイアスの影響を受け、科学的妥当性を欠く(20)。しかし、2005年に発表された最初のLTADモデル(5)は、感受性期についての科学的エビデンスを示しておらず、またその後に更新されたモデル(6,14)や感受性期を採用する他のLTADモデル(65)が示したエビデンスは主に、成長と成熟に伴って身体的特性(例：スクワットの挙上重量)、ならびにそこから推定される一般的な運動能力(例：筋力)の向上が加速することで、トレーニングに対する感受性も高まるとの考えに基づいている。

感受性期とトレーナビリティに関するレビューにおいて、仮説的な感受性期に一般的な運動能力を特に強化しなければ、成人になってから遺伝的に決定された運動能力の上限、あるいは特定の習熟度に到達することはないとの説を裏づけるエビデンスは、現時点で不十分であるとされている(4,19,20)。それでもFordら(20)は、LTADモデルにおける感受性期の生理学的エビデンスに関するレビューにおいて、ほとんどのエビデンスが横断的研究や質の低い介入研究に基づいているため、LTADモデルが提唱する感受性期が実際に存在するかを判断するには、さらなる研究が必要であると結論づけている。しかし、感受性期の存在を前提にすべきでないとするレビューの結論は、質の高いエビデンスを欠いていることもあってか、LTADモデルの近年の更新版(6,14)、ならびに各国の(および国際的な)運営団体や競技連盟による他のいくつかのアスリート育成モデルでは無視され、引き続き一般的な感受性期が採用されている。例えば、アメリカ野球協会の2017年版LTADモデルが感受性期を採用していない一方で(60)、2012年のカナダのボート競技(56)や2016年のオランダのテニス(57)、およびその他多くの競技連盟やアスリート育成モデル(65)が、依然として一般的な感受性期をLTADモデルに取り入れている。このように一般的感受性期が広く採用されており、またレビューにおいて感受性期を肯定または否定する有力なエビデンスが得られていないことから、感受性期を改めて評価する必要がある。そこで本レビューでは、LTADモデルが提唱する一般的な感受性期について、最新の評価を行なうことを目的とする。そのために我々は、近年発表された研究を用いて、感受性期の理論的根拠に対する批判的吟味を行なう。このことは一般的な感受性期の妥当性に関して、より有力なエビデンスとさらなる知見をもたらし、そのような情報は、青少年のトレーニングに関する今後の研究、青少年アスリートを指導する専門職、およびアスリート育成モデルの開発に役立つことが考えられる。

方法

系統的レビューではなくナラティブレビュー(レビューした研究の結果を主に言語を用いてまとめる手法)のアプローチを採用したのは、トレーニングと成熟の影響を切り分けるため、異なる(生物学的)年齢のグループにトレーニングを実施させ、対照群と比較することで介入の効果を調査した研究が少ないためである(34,41,49,55)。したがって、このトピックで系統的レビューを行なうのは時期尚早である。加えて本レビューの目的は、このトピックに関するすべての先行研究の包括的概観を提供することではなく、アスリート育成モデルで提唱されている一般的な感受性期の理論的根拠を批判的に吟味することである。それでも検索プロセスは可能なかぎり系統的に実施し、電子データベースのGoogle ScholarおよびPubMedにおいて、以下のキーワードとブール演算子の組み合わせを用いて関連文献を検索した(youth OR children OR adolescents OR pediatric OR young)AND(sensitive periods OR windows of opportunity OR training emphasize periods OR optimum periods OR periods of accelerated adaptation OR critical periods)AND(resistance OR strength OR weight OR sprint OR speed OR endurance OR stamina OR flexibility OR suppleness OR plyometric)AND(training OR intervention)。発表年月日や論文タイプに制限は設けなかった。また、データベースや参考文献一覧から(発表予定を含む)論文を手作業で検索し、採用した研究の被引用検索を実施して、関連する論文をさらに特定した。

一般的な感受性期の批判的吟味

一般的な運動能力

LTADモデルは多くの場合、スポーツにおける身体能力を、柔軟性、スピード、コーディネーション(スキルとも呼ばれる)、持久力、および筋力という5つの一般的な運動能力に単純化／分割する。このような区分は、スクワットにおける挙上重量などの身体的特性を測定し、そこからその背後にある筋力などの一般的な運動能力を推定することによって形成される。心理学の分野では、このようなアプローチは潜在変数モデリングとして知られる(潜在変数は直接観察されないが、観察される変数に影響を及ぼすことで存在が確認される変数のこと)(23)。そしてこれらの一般的な運動能力すなわち潜在変数について、感受性期が存在することが提唱されているのである**(図1)**。このような還元主義は、スポーツの複雑性を5つの扱いやすい概念に還元するのに役立つ一方、個別に強化できる異なる運動能力が存在し、それぞれ個別の感受性期を有するという(誤った)解釈に繋がる。このような単純化は例えば、最大走速度(スピード)は、コーディネーションや筋力とは無関係に向上させられるとの解釈をもたらす。そしてそれはさらに、成熟してコーディネーションに関与するサブシステムは、スピードまたは筋力に関与するサブシステムとは(おおむね)別物であり、したがってこれらの一般的な運動能力には、それぞれ別個の感受性期が存在するとの解釈となる。しかし、いくつかの研究では、同じ一般的な運動能力を反映すると考えられている指標の間に、低～中程度の相関しかないことが明らかになっている。例えばEllisonら(17)は、いずれも目と手のコーディネーションを反映すると考えられている4つのテスト間の寄与率が低いことを観察した。同様に、健康な成人における握力と膝の筋力との間には弱い相関関係しかみられず(66)、また、ハムストリングスの伸張性筋力を反映すると考えられている2つの指標間の相関も弱いことが明らかになっている(62,64)。また、等尺性、等速性、および等慣性筋力の各テストにおいても、トレーニングプログラム実施後に観察された向上の程度はそれぞれ異なっていたが、いずれの指標も一般的な運動能力としての筋力を反映すると考えられている(13)。これらの研究結果を総合すると、一般的な運動能力というものは存在せず、個々の運動スキルは、ある程度の課題特異性を有する能力が複雑に組み合わさったものであることを示唆している。したがって、一般的な運動能力の感受性期が存在するのか、あるいはそれらが個々の運動スキルに特異的であるべきかという問題についても、疑問を投げかけることができる。

しかし、ほとんどのLTADモデルにおいては、そのモデルが提唱する感受性期がどの運動スキルを指しているのか明確でない。例えば、モデルにおけるスピードが、最大スプリント速度(下半身のスピード)を向上させるための感受性期を指しているのか、あるいはそれに加えて、一般的な運動能力としてのスピードの指標とされることの多い他の指標、例えば最大泳速度(下半身および上半身のスピード)、自転車走行、スケート滑走、および投動作の最大速度、さらには加速や方向転換のパフォーマンスまで指しているのかは不明である。しかし、これらのスキルはそれぞれ能力の組み合わせが異なるため、感受性期も異なると考えられる。実際、Radnorら(49)の研究では、レジスタンストレーニングによってPHV後の男子における加速力が有意に増加したが、一方で最大スプリント速度に有意な増加はみられなかった。同様に、スクワットジャンプや反応筋力指数は、しばしば筋パワーの指標とされるが、PHV後の男子において、レジスタンストレーニング後にスクワットジャンプのパフォーマンスが有意に向上した一方、反応筋力指数は有意に向上しなかった(49)。同様に相反する結果が、

青少年アスリートを対象とした他の研究でも報告されている(34)。さらに、年齢および成熟に伴う筋力の変化は、筋群および筋活動の両方に特異的であることが報告されている(15)。例えば、肘関節屈曲筋群の等尺性筋力の向上は、ハムストリングスの伸張性筋力の向上と比べて、成長と成熟の過程において異なる時点で最大に達する可能性がある。以上の研究結果を総合すると、LTADモデルで提唱されている一般的な運動能力の感受性期は、個々の運動スキル、個々の筋群、および個々の筋活動、あるいは少なくとも非常に似通った運動スキル群に特異的なものでなくてはならないと考えられる**(図2)**。

一般的な運動能力を向上させるためのトレーニング方法

次の問題点は、提唱されている感受性期に用いるべきトレーニング方法についての情報が不足していることである。例えば、LTADモデルのリソースペーパー(5,14)においては、提唱されている感受性期における(スプリント)スピードを、スプリントトレーニング、プライオメトリックトレーニング、およびレジスタンストレーニングのいずれを用いて強化すべきかが不明であるが、これらはそれぞれ効果が異なると考えられる。用いるトレーニング方法の効果によって、より大きな適応が感受性期に得られるかどうかが決定する。例えばRumpfら(58)のレビューでは、子どものスプリントスピードの向上には、プライオメトリックトレーニングが最も効果的であり、思春期の若者には、プライオメトリックス、レジスタンストレーニング、およびスプリントトレーニングの組み合わせが最も効果的であることが明らかになっている。より近年の研究でも同様の結果が報告されている(34,49)。興味深いことに、ユースサッカー選手を対象とした研究では、スプリントトレーニングをPHVの期間(LTADモデルではスピード強化に適した2つの感受性期の1つに相当)に実施した場合、PHVの出現前と比較して、スプリントおよび方向転換のパフォーマンスを向上させる効果がわずかに低いことが明らかになっている(39)。またリソースペーパーでは、提唱されている感受性期において持久力の強化に適用すべきトレーニング方法も明確でないが、LTADの書籍のほうでは、ほとんどの特化の遅いスポーツに関して、思春期の成長が加速する時期には、ロング・スロー・ディスタンス(LSD)による有酸素性インターバルトレーニング、およびファルトレクトレーニングを用いて有酸素性能力を向上させ、また成長が減速する時期には、有酸素性パワーのトレーニングを実施することを推奨している(6)。なお、低強度トレーニングがもたらす負荷は、子どもの活発で自然な活動がもたらす負荷に比べて低いため、低強度のトレーニングプログラムは効果が低いことが示唆されている(11)。さら

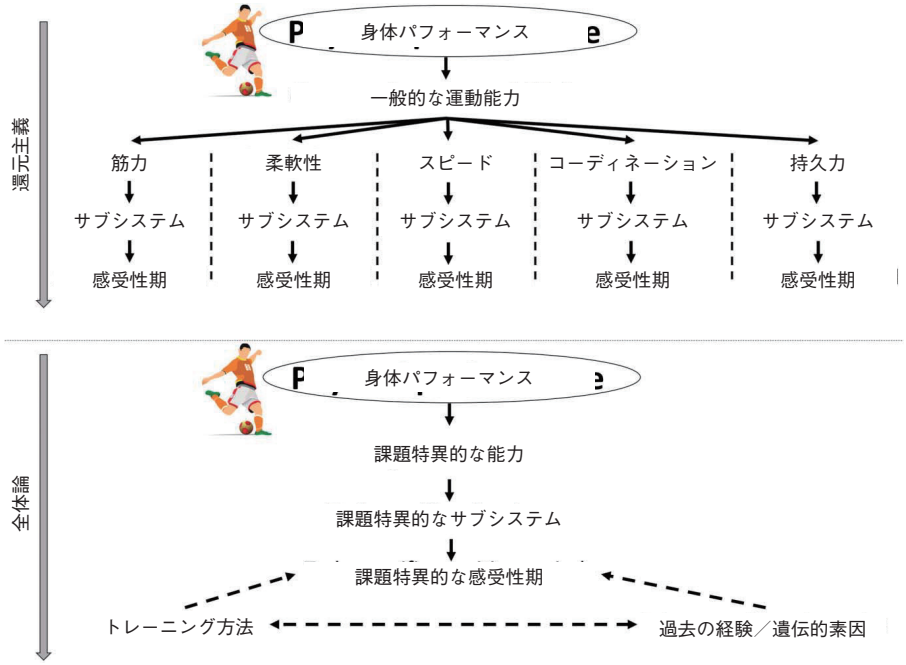

図2　感受性期に対する潜在変数を用いた還元主義的アプローチ(上図)と、ネットワーク分析に基づく全体論的アプローチ(下図)。多くのLTADモデルが採用する感受性期への還元主義的アプローチでは、スポーツ(例:サッカー)の身体的特性が、柔軟性、スピード、コーディネーション、持久力、および筋力という5つの一般的な運動能力(潜在変数)に単純化されている。そして、それぞれの一般的な運動能力に感受性期が存在するとされる。これは、一般的な運動能力ごとに成熟し、関与するサブシステムが異なっており、結果としてすべての一般的な運動能力に個別の感受性期が存在することを示唆している(上図)。一般的な運動能力の感受性期における第1の問題点は、それらが多くの異なる運動スキルを指しうることである。例えば、スピードの感受性期は、最大スプリントスピードの向上に適した感受性期を指すこともできれば、方向転換パフォーマンスや最大泳スピードの感受性期を指すこともできる。しかし、これらはある程度別個の運動スキルであり、異なるサブシステムが関与し、異なるタイミングの感受性期を有することから、スプリント、水泳、および方向転換パフォーマンスの最大スピードの強化に適した感受性期は、それぞれ異なると考えられる。したがって感受性期が存在するとすれば、それらはおそらくおおむね課題特異的であり、個々の運動スキルが複数の能力とサブシステムのネットワークからなることで、感受性期も課題特異的である可能性が考えられる(下図)。ただし、あるサブシステムが特定のトレーニング方法への感受性を有するかどうかは、破線の矢印で示すように、適用するトレーニング方法や過去の経験、および遺伝的素因にも左右される。
LTAD＝長期的なアスリートの育成

に、子どもは有酸素的代謝への依存度が高いといった生理学的メカニズムから、トレーニングをしていない成人に比べて運動後の疲労が少なく、回復も早い(52)。したがって、思春期の若者や成人と同等の適応を得るためには、子どもはより高強度(>85%最大心拍数)、かつ短い休息時間でエクササイズを実施する必要があると考えられている(1,7)。これを裏づけるように、Armstrong&Barker(1)のレビューでは、$\dot{V}O_2$max(最大酸素摂取量)を増加させるのに十分なトレーニング刺激を用いた研究のみを対象とした場合、$\dot{V}O_2$maxの増加は、11歳未満と11歳以上の子どもでほぼ同等(それぞれ7.7%と8.6%)であることが明らかになっている。

これらの研究結果を総合すると、特定の運動スキル、またはそこから推定される一般的な運動能力は、特定のトレーニング方法にのみ特に感受性が高く、運動スキルやそこから推定される一般的な運動能力の強化に適用されうるすべてのトレーニング方法に感受性を有するわけではない可能性が考えられる。これは、神経回路が特定の経験にのみ感受性を有することを示した動物実験の結果とも一致する(27)。アスリート育成モデルは通常、適用すべきトレーニング方法に関する情報を提供しておらず、このことは、一般的な運動能力の感受性期が、適用するトレーニング方法にかかわりなく存在することを示唆している。しかし、トレーニングの効果はトレーニング方法によって異なる可能性を示した研究結果を踏まえると、提唱されている一般的な感受性期の妥当性はさらに疑問視される。

感受性期におけるトレーニング方法の諸特性

アスリート育成モデルは、トレーニング方法の諸特性に関するガイドラインもほとんど示していないが、これもまたトレーニングの効果に影響を及ぼす可能性がある(29,43)。例えば感受性期には、週に1回の追加トレーニングで十分なのか、それとも毎回のトレーニングセッションにおいて、ウォームアップ中またはウォームアップ後に特異的なトレーニングを実施すべきなのかが明らかでない。実際、若年女子アスリートを対象としたメタ分析において、週のセッション数やセッションの継続時間といったプログラム変数が、プライオメトリックトレーニングが跳躍高にもたらす効果に影響を及ぼすことが明らかになっている(38)。また同様の結果が、筋力(29,44)、バランス(21)、持久力(1,7)、アジリティ(3)、およびスピード(40)のトレーニングに関する他のメタ分析やレビューでも報告されている。さらに、Rodriguez-Rosellら(54)は、プライオメトリックスとレジスタンスの複合トレーニングは、13歳以下(PHVの出現前ごろ)の男子に最も効果的であり、暦年齢が上がるにつれて効果が低下することを示したのに対し、Lloydら(34)は、複合トレーニングはPHV前よりもPHV後のほうが効果が高いと結論づけている。これらの相反する結果は、研究間の生物学的年齢の違いに関連している可能性もあるが、同時に、負荷、レップ数、セット数、および休息時間の長さといったトレーニングプログラムの特性の違いを反映している可能性もある。同様に、8～10歳の女子体操選手(柔軟性トレーニングに適しているとされる感受性期に該当する年代)を対象とした研究では、静的ストレッチングプロトコルの効果が、ストレッチングの持続時間(連続して90秒か間欠的な3×30秒か)によって異なることが明らかになっている(16)。もうひとつの例として、13歳のチームスポーツ選手を対象に、少人数ゲームと高強度インターバルトレーニングの組み合わせを処方した場合、少人数ゲームのみの場合と比較して、$\dot{V}O_2$peak(最高酸素摂取量)などの身体パフォーマンス変数を向上させる効果が高いことが明らかになっている(25)。

以上の研究結果を総合すると、トレーニング方法の諸特性は、潜在的な感受性期におけるトレーニングの効果に影響を及ぼし、望ましくない特性を用いた場合にトレーニング方法の効果を低下させる可能性があると考えられる。しかし、アスリート育成モデルは、感受性期におけるトレーニングの特性について十分な情報を提供しておらず、ここでもやはり感受性期が、適用するトレーニング方法の特性にかかわりなく存在することを示唆している。アスリート育成モデルがトレーニング方法の特性について常に詳細な情報を提供できるわけでないことは我々も認めるが、ここで取り上げた研究結果は、そのような情報が、仮説的な感受性期に効果的にトレーニング適応を引き起こし、競技パフォーマンスを向上させる上で重要であることを示唆している。さらに、青少年は成長のスパート期前後に特に受傷しやすいことが報告されており(61)、将来の可能性を狭めかねない傷害を予防するためには、このような時期におけるトレーニングプログラム(トレーニングの方法および特性)の慎重な処方が特に重要である。近年の研究結果から、この時期に効果的にパフォーマンスを向上させつつ、傷害リスクを低減するのに役立つトレーニングプログラムのガイドラインが得られる可能性がある(46,47)。成長と成熟の過程にある子どもにおいて、トレーニング適応を促進し、ひいては競技パフォーマンスを向上させるためのトレーニング／試合の負荷の管理は複雑であるのに加え、急性および慢性の傷害が発生しやすいことは、感受性期を推奨するLTADモデルにおいては考慮されていないことが多い。

過去のトレーニング経験と個人差が及ぼす影響

またアスリート育成モデル(5,65)は、様々な経験レベルを有し、トレーニング歴の異なる個人間で、感受性期やその内容に違いがあるのか否かも明らかにしていないが、一般的に、構造的なトレーニングプログラムの経験が浅く、技術的な熟練度が低いアスリートは、たとえ年齢が若くても技術的な熟練度の高いアスリートに比べて、低難度のエクササイズを実施すべきであることは広く認識されている(30)。このことは、潜在的な感受性期を利用できるか否かに影響を及ぼしうる。例えば、17歳のアスリートで過去にレジスタンストレーニングの経験がない場合、おそらく最初は低重量のレジスタンスエクササイズを実施し、その後により高重量のエクササイズに進むことになるため、レジスタンストレーニングに関して提唱されている感受性期を(効果的に)利用できない可能性がある。実際、動物を用いた研究でも、過去の経験が将来の経験に対する一部の神経回路の反応に影響を及ぼすことが示されており(27)、感受性期が存在するかどうかは、過去のトレーニング経験(の欠如)にも左右されることを示唆している。

青少年アスリートのパワー、筋力、およびスピードの向上を目的としたストレングスおよびパワートレーニングに関するメタ分析においては、一般的にトレーニング経験者よりも未経験者のほうが得られる適応が大きいことが明らかになっている(10)。また、成人の場合、トレーニングの最適な量と強度は、トレーニング経験によって異なることが示されている(53)。これは青少年アスリートにおいても同様であると考えられ、したがって、トレーニングを積んだ青少年アスリートが仮説的な感受性期において最適な適応を得るためには、トレーニングの強度や量を増大させる必要があると考えられる。さらに成人を対象とした他の研究では、遺伝的因子とトレーニング適応の関連性も明らかになっている(12,45)。同様に青少年アスリートも、遺伝的素因によって特定のトレーニング方法への反応が増減する可能性があり、このことは一般的な感受性期の一般化の可能性をさらに制限するものである。実際、近年のいくつかの研究結果は、青少年アスリートの様々なトレーニング方法に対する反応には個人によって幅があることを示唆しており(37,49,51)、これは過去のトレーニング経験や遺伝的素因の違いによる可能性がある。以上の研究結果を総合すると、仮説的な感受性期に最も適したトレーニング方法は、それまでのトレーニング経験や遺伝的素因に応じて、個人間で異なることが考えられる。

感受性期に応じたトレーニングを実施しないことがもたらす結果

最後の問題点として、アスリート育成モデル(5,65)は、提唱されている感受性期に、一般的な運動能力を強化するトレーニングを実施しなかった場合の結果について情報を提供していない。トレーニングを実施しなかった人は、受傷しやすくなるのか、パフォーマンスが最大レベルに達する年齢が遅くなるのか、あるいはその後、遺伝的素因によって決定された最大のパフォーマンスレベルに到達できなくなるのかが明らかでない(4,19)。ここで重要なのは、定期的にスポーツに参加している人の場合、一般的な運動能力を強化しないでいることが、どの程度可能なのか疑わしいという点である。例えば、サッカーではスプリントを実施するが、これはスピードトレーニングとみなすことができる。また、サッカーでは反復スプリントも実施するが、これは高強度インターバル(持久系)トレーニングとみなすことができる。実際、少人数ゲームにおいては、$\dot{V}O_2max$などの持久力指標、20mスプリントパフォーマンスなどのスピード指標、および垂直跳びの跳躍高などの筋パワー指標が向上することが報告されている(18,24,51)。同様に、レジスタンス(ストレングス)トレーニングは、ランニングエコノミー(8)などの持久系パフォーマンスの指標、ならびにスピード(59)および方向転換パフォーマンス(26)の指標を向上させることが報告されている。

現場への応用

以上の研究結果において、個々の運動スキル、およびそこから推定される一般的な運動能力は、多様なトレーニング方法を用いて強化することが可能であり、また個々のトレーニング方法は、それぞれ異なる発達段階において最も効果的となる可能性があることを示しているが、それを確認するには、生物学的成熟度を考慮に入れたさらなる研究が必要である。またトレーニング方法の効果は、トレーニング(および競技)の諸特性によっても異なり、これには負荷、セット数、およびレップ数、インターバルの運動時間と休息時間の長さ、ならびに学校や他の競技、および地域や国際レベルのチームで実施される活動の総負荷が含まれる。さらにトレーニングの効果は、生物学的年齢の近い個人間でも、それまでのトレーニング経験や遺伝的素因によって異なる。したがって、これらの研究結果は、多くのアスリート育成モデルが提唱する一般的な感受性期の妥当性に疑問を呈し、青少年を指導するトレーナー、小児エクササイズ学の研究者、およびアスリート育成モデルの開発者に重要な影響を及ぼすものである。

青少年を指導するトレーナーにとって、これらの研究結果は、LTADモデルが提唱する一般的な感受性期の存在を前提とせず、すべての身体的特性をすべての発達段階において強化す

べきであることを示しており、これは他の研究においても示唆されている(1,4,19,31)。ただしこれらの研究結果は、特定の時期に特定のトレーニング方法を優先したり、削減したりしてはならないことを意味しない(例えば、運動コーディネーションが低下するPHVの時期には、傷害予防のために運動コーディネーションのトレーニングに重点を置くなど)。さらにLTADモデルでは、新たな情報が得られた際にはモデルを継続的に更新するとしており、また感受性期については、存在が否定されるまでは採用を継続するとしている(6)。我々は、本レビューにおける感受性期の批判的吟味ならびにレビューによって、一般的な感受性期の妥当性を強く疑問視し、またLTADモデルへの採用を停止するのに十分な情報が得られたと考える。Balyiら(6)によるLTADモデルが、早期特化のリスクに対する意識や、暦年齢ではなく生物学的年齢に対する意識を促し、また短期的成功ではなく長期的成功に焦点を当てるなど、スポーツの実践に多くの好ましい影響を及ぼしていることは我々も認めるが、その一方で、感受性期の妥当性が確認されていない点が、コーチがこのモデルを実施する際の障壁となっていることが報告されている(9)。そのため、この疑問視される要素を最新のLTADモデルや他のアスリート育成モデル(65)から取り除くことが、実践に繋がると考えられる。実際、何人かの研究者が、感受性期を用いずに青少年アスリート向けのトレーニングを構築する他の方法を議論しており、これらの論文が提示するガイドラインを代わりに用いて青少年のトレーニングを構築することが可能である(30–33,42)。それでも、このトピックには依然として、より質の高い研究が必要である。そのような研究は、異なる(生物学的)年齢の介入群を対象にし、対照群と比較することで、トレーニングと成熟の影響を切り分けるものでなくてはならない。個々の介入群に異なるトレーニング方法を適用し、その上で複数の運動スキルを評価することで、一般的な感受性期の存在、あるいは課題およびトレーニング方法に特異的な感受性期の存在に関する知見を得ることが可能となる。なおこのような研究においては、十分なサンプルサイズを確保し、過去の経験などの交絡因子をコントロールすることが大きな課題となる。

結論

本研究は、青少年のトレーニングに広く採用されている一般的な感受性期の理論的根拠を批判的に吟味した初めての研究である。特定された一般的な感受性期の理論上の問題点は、先行研究の批判よりも有力なエビデンスを提示し、その妥当性をさらに疑問視するものである**(図2)**。したがって、アスリート育成モデルや現場の専門職は、一般的な感受性期を青少年アスリートのトレーニングに取り入れるべきではない。◆

謝辞

本稿の作成過程で校正とコメントを提供してくれたCraig Ranson氏とAnika Schumacher氏に感謝の意を表する。オープンアクセス費はMaastricht Universityによって支払われた。

References

1. Armstrong N, Barker AR. Endurance training and elite young athletes. In: *The Elite Young Athlete*. Armstrong N, McManus AM, eds. Basel, Switzerland: Karger, 2011. pp. 59–83.
2. Armstrong N, Barker AR, McManus AM. Muscle metabolism changes with age and maturation: How do they relate to youth sport performance? *Br J Sports Med* 49: 860–864, 2015.
3. Asadi A, Arazi H, Ramirez-Campillo R, Moran J, Izquierdo M. Influence of maturation stage on agility performance gains after plyometric training: A systematic review and meta-analysis. *J Strength Cond Res* 31: 2609–2617, 2017.
4. Bailey R, Collins D, Ford P, et al. Participant development in sport: An academic review. *Sports Coach UK* 4: 1–134, 2010.
5. Balyi I, Cardinal C, Higgs C, Norris S, Way R. *Long Term Athlete Development Resource Paper V2*. Vancouver, BC: Canadian Sport Centres, 2005.
6. Balyi I, Way R, Higgs C. *Long-Term Athlete Development*. Champaign, IL: Human Kinetics, 2013.
7. Baquet G, van Praagh E, Berthoin S. Endurance training and aerobic fitness in young people. *Sports Med* 33: 1127–1143, 2003.
8. Barnes KR, Kilding AE. Strategies to improve running economy. *Sports Med* 45: 37–56, 2014.
9. Beaudoin C, Callary B, Trudeau F. Coaches' adoption and implementation of sport Canada's long-term athlete development model. *SAGE Open* 5: 2158244015595269, 2015.
10. Behm DG, Young JD, Whitten JHD, et al. Effectiveness of traditional strength vs. Power training on muscle strength, power and speed with youth: A systematic review and meta-analysis. *Front Physiol* 8: 423, 2017.
11. Borms J. The child and exercise: An overview. *J Sports Sci* 4: 3–20, 1986.
12. Bouchard C, Sarzynski MA, Rice TK, et al. Genomic predictors of the maximal O2 uptake response to standardized exercise training programs. *J Appl Physiol* 110: 1160–1170, 2011.
13. Buckner SL, Kuehne TE, Yitzchaki N, et al. The generality of strength adaptation. *J Trainology* 8: 5–8, 2019.
14. Canadian Sport Institute. *Canadian Sport for Life—Long-Term Athlete Development Resource Paper 2.0*. British Columbia, Canada: Sport for Life, 2014.
15. Croix MBDS, Deighan MA, Armstrong N. Assessment and interpretation of isokinetic muscle strength during growth and maturation. *Sports Med* 33: 727–743, 2003.
16. Donti O, Papia K, Toubekis A, et al. Flexibility training in preadolescent female athletes: Acute and long-term effects of intermittent and continuous static stretching. *J Sports Sci* 36: 1453–1460, 2018.
17. Ellison PH, Kearney PE, Sparks SA, Murphy PN, Marchant DC. Further evidence against eye–hand coordination as a general ability. *Int J Sports Sci Coach* 13: 687–693, 2018.

18. Engel FA, Ackermann A, Chtourou H, Sperlich B. High-intensity interval training performed by young athletes: A systematic review and meta-analysis. *Front Physiol* 9: 1012, 2018.
19. Ford P, Collins D, Bailey R, et al. Participant development in sport and physical activity: The impact of biological maturation. *Eur J Sport Sci* 12: 515–526, 2012.
20. Ford P, De Ste Croix M, Lloyd R, et al. The long-term athlete development model: Physiological evidence and application. *J Sports Sci* 29: 389–402, 2011.
21. Gebel A, Lesinski M, Behm DG, Granacher U. Effects and dose–response relationship of balance training on balance performance in youth: A systematic review and meta-analysis. *Sports Med* 48: 2067–2089, 2018.
22. Gerver WJ, de Bruin R. Growth velocity: A presentation of reference values in Dutch children. *Horm Res* 60: 181–184, 2003.
23. Guyon H, Falissard B, Kop JL. Modeling psychological attributes in psychology–an epistemological discussion: Network analysis vs. latent variables. *Front Psychol* 8: 798, 2017.
24. Hammami A, Gabbett TJ, Slimani M, Bouhlel E. Does small-sided games training improve physical-fitness and specific skills for team sports? A systematic review with meta-analysis. *J Sports Med Phys Fitness* 58: 1446–1455, 2017.
25. Harrison CB, Kinugasa T, Gill N, Kilding AE. Aerobic fitness for young athletes: Combining game-based and high-intensity interval training. *Int J Sports Med* 36: 929–934, 2015.
26. Keiner M, Sander A, Wirth K, Schmidtbleicher D. Long-term strength training effects on change-of-direction sprint performance. *J Strength Cond Res* 28: 223–231, 2014.
27. Knudsen EI. Sensitive periods in the development of the brain and behavior. *J Cogn Neurosci* 16: 1412–1425, 2004.
28. Legerlotz K, Marzilger R, Bohm S, Arampatzis A. Physiological adaptations following resistance training in youth athletes-A narrative review. *Pediatr Exerc Sci* 28: 501–520, 2016.
29. 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* 50: 781–795, 2016.
30. Lloyd RS, Cronin JB, Faigenbaum AD, et al. National strength and conditioning association position statement on long-term athletic development. *J Strength Cond Res* 30: 1491–1509, 2016.
31. Lloyd RS, Oliver JL. The youth physical development model: A new approach to long-term athletic development. *Strength Cond J* 34: 61–72, 2012.
32. Lloyd RS, Oliver JL, Faigenbaum AD, et al. Long-term athletic development- part 1: A pathway for all youth. *J Strength Cond Res* 29: 1439–1450, 2015.
33. Lloyd RS, Oliver JL, Faigenbaum AD, Myer GD, De Ste Croix MB. Chronological age vs. biological maturation: Implications for exercise programming in youth. *J Strength Cond Res* 28: 1454–1464, 2014.
34. Lloyd RS, Radnor JM, De Ste Croix MB, Cronin JB, Oliver JL. 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.
35. Low LK, Cheng HJ. Axon pruning: An essential step underlying the developmental plasticity of neuronal connections. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 361: 1531–1544, 2006.
36. Mersmann F, Bohm S, Schroll A, et al. Evidence of imbalanced adaptation between muscle and tendon in adolescent athletes. *Scand J Med Sci Sports* 24: E283–E289, 2014.
37. Moeskops S, Read PJ, Oliver JL, Lloyd RS. Individual responses to an 8-week neuromuscular training intervention in trained pre-pubescent female artistic gymnasts. *Sports (Basel)* 6: 128, 2018.
38. Moran J, Clark CCT, Ramirez-Campillo R, Davies MJ, Drury B. A meta-analysis of plyometric training in female youth: Its efficacy and shortcomings in the literature. *J Strength Cond Res* 33: 1996–2008, 2018.
39. Moran J, Parry DA, Lewis I, et al. Maturation-related adaptations in running speed in response to sprint training in youth soccer players. *J Sci Med Sport* 21: 538–542, 2018.
40. Moran J, Sandercock G, Rumpf MC, Parry DA. Variation in responses to sprint training in male youth athletes: A meta-analysis. *Int J Sports Med* 38: 1–11, 2017.
41. Moran J, Sandercock GRH, Ramirez-Campillo R, et al. Maturation-related differences in adaptations to resistance training in young male swimmers. *J Strength Cond Res* 32: 139–149, 2018.
42. Myer GD, Faigenbaum AD, Ford KR, et al. When to initiate integrative neuromuscular training to reduce sports-related injuries in youth? *Curr Sports Med Rep* 10: 155, 2011.
43. Otero-Esquina C, de Hoyo Lora M, Gonzalo-Skok O, Dominguez-Cobo S, Sanchez H. Is strength-training frequency a key factor to develop performance adaptations in young elite soccer players? *Eur J Sport Sci* 17: 1241–1251, 2017.
44. Peitz M, Behringer M, Granacher U. A systematic review on the effects of resistance and plyometric training on physical fitness in youth-What do comparative studies tell us? *PLoS One* 13: e0205525, 2018.
45. Pereira A, Costa AM, Izquierdo M, et al. ACE I/D and ACTN3 R/X polymorphisms as potential factors in modulating exercise-related phenotypes in older women in response to a muscle power training stimuli. *Age* 35: 1949–1959, 2013.
46. Pichardo AW, Oliver JL, Harrison CB, et al. Effects of combined resistance training and weightlifting on injury risk factors and resistance training skill of adolescent males. *J Strength Cond Res*, 2019 [Epub ahead of print].
47. Pichardo AW, Oliver JL, Harrison CB, et al. Effects of combined resistance training and weightlifting on motor skill performance of adolescent male athletes. *J Strength Cond Res* 33: 3226–3235, 2019.
48. Quatman-Yates CC, Quatman CE, Meszaros AJ, Paterno MV, Hewett TE. A systematic review of sensorimotor function during adolescence: A developmental stage of increased motor awkwardness? *Br J Sports Med* 46: 649–655, 2012.
49. Radnor JM, Lloyd RS, Oliver JL. Individual response to different forms of resistance training in school-aged boys. *J Strength Cond Res* 31: 787–797, 2017.
50. Radnor JM, Oliver JL, Waugh CM, et al. The influence of growth and maturation on stretch-shortening cycle function in youth. *Sports Med* 48: 57–71, 2018.
51. Ramirez-Campillo R, Alvarez C, Gentil P, et al. Inter-individual variability in responses to 7 Weeks of plyometric jump training in male youth soccer players. *Front Physiol* 9: 1156, 2018.
52. Ratel S, Blazevich AJ. Are prepubertal children metabolically comparable to well-trained adult endurance athletes? *Sports Med* 47: 1477–1485, 2017.
53. Rhea MR, Alvar BA, Burkett LN, Ball SD. A meta-analysis to determine the dose response for strength development. *Med Sci Sports Exerc* 35: 456–464, 2003.
54. Rodriguez-Rosell D, Franco-Marquez F,

Mora-Custodio R, Gonzalez-Badillo JJ. Effect of high-speed strength training on physical performance in young soccer players of different ages. *J Strength Cond Res* 31: 2498–2508, 2017.
55. Romero C, Ramirez-Campillo R, Alvarez C, et al. Effects of maturation on physical fitness adaptations to plyometric jump training in youth females. *J Strength Cond Res*, 2019 [Epub ahead of print].
56. Rowing Canada. *Long-term Athlete Development Plan for Rowing*. Rowing Canada Aviron, 2012.
57. Royal Dutch Lawn Tennis Association. *Meerjaren opleidingsplan tennis*. Route naar de top. Amersfoort, the Neterlands: Drukkerij De Gans B.V., 2016.
58. 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.
59. Sander A, Keiner M, Wirth K, Schmidtbleicher D. Influence of a 2-year strength training programme on power performance in elite youth soccer players. *Eur J Sport Sci* 13: 445–451, 2013.
60. USA baseball. *USA Baseball Long-Term Athlete Development Plan*. 2017. Available at: https://www.usabaseball.com/news/usa-baseball-releases-long-term-athlete-development-plan/c-255218542?tid=216639934.
61. Van der Sluis A, Elferink-Gemser MT, Brink MS, Visscher C. Importance of peak height velocity timing in terms of injuries in talented soccer players. *Int J Sports Med* 36: 327–332, 2015.
62. van Dyk N, Witvrouw E, Bahr R. Interseason variability in isokinetic strength and poor correlation with Nordic hamstring eccentric strength in football players. *Scand J Med Sci Sports* 28: 1878–1887, 2018.
63. Viru A, Loko J, Harro M, et al. Critical periods in the development of performance capacity during childhood and adolescence. *Eur J Phys Educ* 4: 75–119, 1999.
64. Wiesinger HP, Gressenbauer C, Kösters A, Scharinger M, Müller E. Device and method matter: A critical evaluation of eccentric hamstring muscle strength assessments. *Scand J Med Sci Sports* 30: 217–226, 2020.
65. Wormhoudt R, Savelsbergh G, Teunissen JW, Davids K. *The Athletic Skills Model: Optimizing Talent Development through Movement Education*. Abingdon, United Kingdom: Routledge, 2018.
66. Yeung SS, Reijnierse EM, Trappenburg MC, et al. Handgrip strength cannot be assumed a proxy for overall muscle strength. *J Am Med Dir Assoc* 19: 703–709, 2018.

From Strength and Conditioning Journal
Volume 42, Number 6, pages 7-14.

著者紹介

Bas Van Hooren：
スポーツ科学コンサルタントおよびストレングス＆コンディショニングスペシャリストで、Maastricht University博士課程に在籍。

Mark B.A. De Ste Croix：
University of Gloucestershireの小児運動生理学教授。