

早稲田大学審査学位論文
博士（スポーツ科学）

成長期サッカー選手の成熟特徴と体格および運動能力の関係

Relationship among Biological Maturation,
Physical Characteristics and Motor Ability in Youth Soccer Players

2020年1月

早稲田大学大学院 スポーツ科学研究科

伊藤 亮輔

Ryosuke, Itoh

研究指導教員： 広瀬 統一 教授

目次

第1章：序論	
第1節 序.....	1
第2節 先行研究小史.....	2
第1項 成長期サッカー選手のタレント識別指標.....	2
第2項 体格、運動能力と成熟度の関係.....	4
第3項 骨年齢による成熟度評価.....	6
第4項 PHAによる成熟度評価.....	7
第5項 成長期選手に対するレジスタンストレーニング.....	10
第3節 本論文の目的と構成.....	13
第2章：研究1	
緒言.....	15
方法.....	16
結果.....	23
考察.....	26
第3章：研究2	
緒言.....	30
方法.....	31
結果.....	34
考察.....	38
第4章：研究3	
緒言.....	43
方法.....	44
結果.....	49
考察.....	54
第5章：総合考察.....	61
参考文献.....	64
謝辞.....	76

第1章 序論

第1節 序

1995年のボスマン判決以降、契約満了とともに自由契約となる権利を選手が獲得したという背景に伴い、サッカーの移籍市場は流動化した。ヨーロッパクラブが獲得する選手の国際化が加速し、クラブは選手の流出、流入に対応するために、長期的視野で才能ある選手を保持することに多額の資金をかけるようになった。そのため、各クラブが所有するアカデミーでの育成の重要性が認識され、成長期選手の選抜と育成の方法論について多くの議論が行われるようになった。研究の分野でもこれまでに、成長期サッカー選手に関して形態学、生理学、心理学、社会学、医学的な観点から数多くの研究が報告されている。

生理学の分野では、成長期エリートサッカー選手の運動能力が非エリート選手や一般的な男児よりも優れていることが明らかになっている[1][2][3][4][5]。これは「成長期時点において体格が大きく、運動能力が優れた選手がエリートチーム、ナショナルチームに選択されている」ことを示している。しかし、体格や運動能力をタレント識別指標として評価するためには、成熟の遅速を考慮しなければならない。成熟速度には個人差があり、同じ暦年齢や同じ学年でも異なる成熟度を示すことが多くある。暦年齢中心のグルーピングに伴う不適切な運動負荷設定が傷害を引き起こす可能性も指摘されている[6][7][8]。身長が最大成長速度を示す年齢の日本人男児平均は13.0歳であることから[9][10]、特に12-15歳のジュニアユース年代(中学生)は各個人の成熟度を考慮した上での選手評価やトレーニング負荷設定が必要である。しかし、これまでに成熟度を考慮して成長期エリートサッカー選手の体格と運動能力を評価し、トレーニング効果について検討した研究はない。

本研究は、成長期エリートサッカー選手の成熟度が体格と運動能力に対してどのように寄与しているのかを明らかにすることに加えて、成長期選手に対する筋力トレーニングの効果に影響を及ぼす要因を検討することで、指導者が成長期サッカー選手に対して安全で効果的なトレーニングプログラムを実践する一助となることを目的とする。

第2節 先行研究小史

第1項 成長期サッカー選手のタレント識別指標

サッカーは、男女合わせて世界に2億6,500万人以上の競技者がおり[11]、世界で最も人気があるスポーツと言える。サッカーは若年者にも人気があり、各国サッカー協会に登録している競技者3,800万人のうち、プロ選手やアマチュア選手よりも多い、2,100万人が18歳以下のサッカー選手とされている[11]。また、サッカー人気の増加に伴い選手市場も活発化され、各クラブは長期的視野で才能ある選手を選抜、育成し、選手の流出、流入に対応することが必要になった[12]。こうして成長期エリートサッカー選手の育成についての関心は高まり、タレントに関する研究は近年、更に大きく進展している。その根拠として、タレント識別に関する2016年までの全研究の半数(55.7%)が、2012年から2016年までの5年間に出版されていることが示されている[13]。

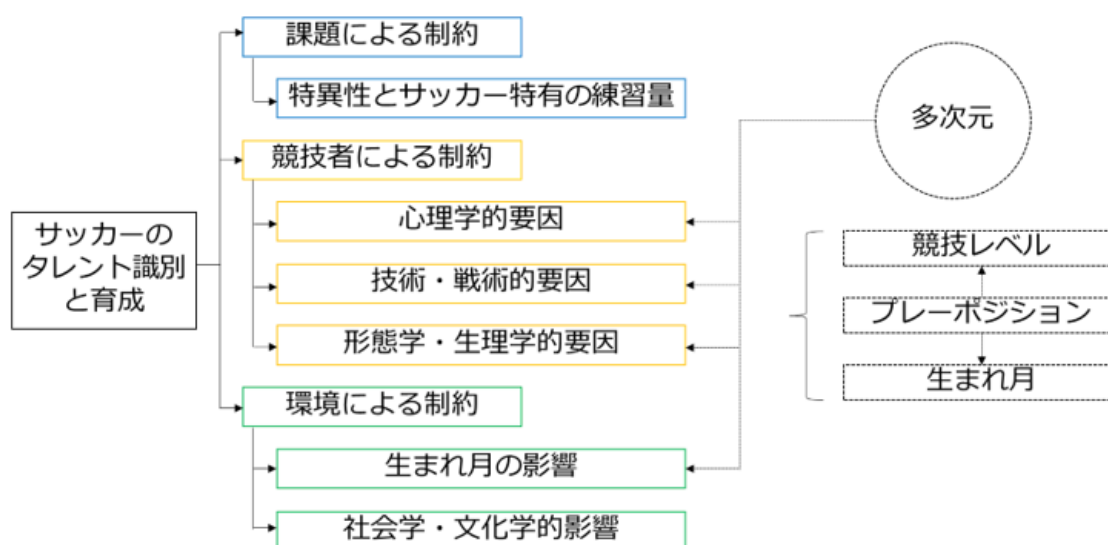


図1：サッカーのタレント識別と育成に関わる要因 ([13]より改変)

しかしながら、タレント識別指標としてどの要因が有用かは、現在までに統一された見解はない。Sarmiento らは70件のタレント識別に関わる論文のレビューから、サッカー選手

のタレントを”生活環境、社会環境、競技経験、そして選手が有する個人能力といった要因から形成される動的な関係性”と定義している[13]。このように、タレントを決定づける因子は多くある（図 1）。

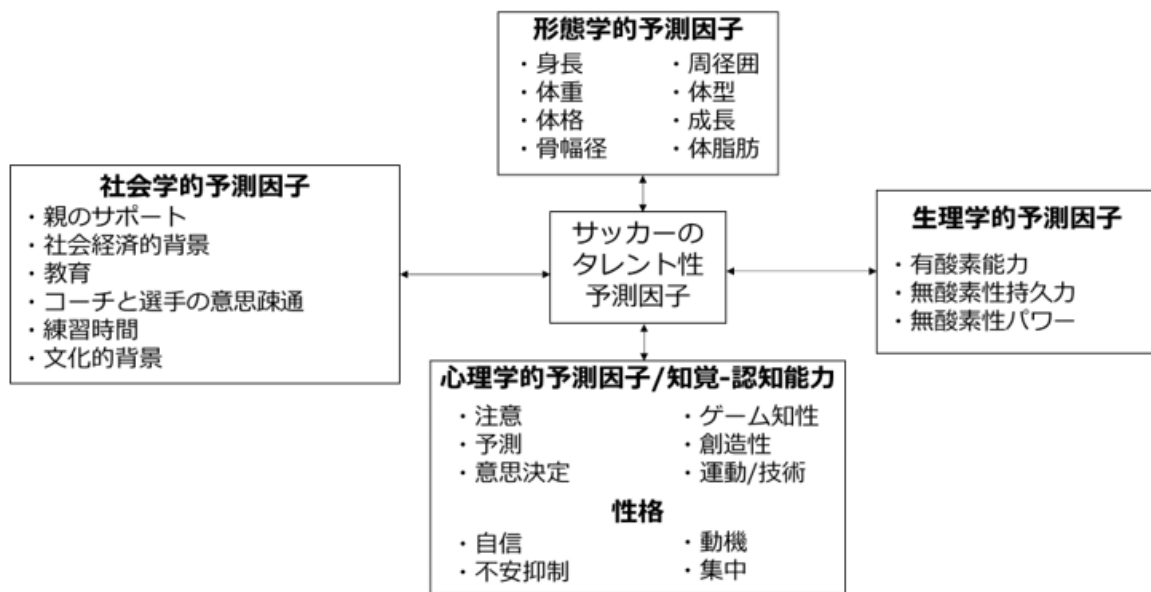


図 2：各科学的視点から見たサッカーのタレント性予測（[12]より改変）

Williams と Reilly が、2000 年に成長期サッカー選手のタレントを評価するためには形態学的、生理学的、心理学的、社会学的、医学的な視点が必要であることを報告してから（図 2） [12]、特に形態学的、生理学的視点から成長期サッカー選手のタレントを検討する研究が増加している[14]。形態学的評価には身長、体重、体組成、骨幅、周径囲など人体測定によって得られた”体格”の情報が含まれる。生理学的評価にはスプリント能力、ジャンプ能力、アジリティ能力、持久力などの運動能力測定によって得られた”運動能力”の情報が含まれる。

第2項 体格、運動能力と成熟度の関係

これまでの先行研究では、成長期サッカー選手のある時点で測定した体格と運動能力のデータを、エリート選手（技術が優れた選手）と非エリート選手で比較するもの、数年後に成功した選手（プロになる、ユースチームに昇格する選手）と成功しなかった選手で横断的に比較するものが多い。成長期においては、エリート選手の方が非エリート選手よりも形態（身長が大きい[1][2]、体重が重い[1]、柔軟性[3][4]）も、運動能力（筋力[3][4]、アジリティ[2]、スピード[1][2][4]、有酸素性持久力[2][3][4]、間欠的持久力[5]、無酸素性持久力[4]）も優れていることが報告されている。このことから分かるように、サッカーの育成カテゴリーでは、エリート選手と非エリート選手を決定する因子として、選手の体格と運動能力が大きく影響を及ぼしていることが明らかにされている。一方で、このように成長期選手の体格と運動能力を横断的に比較することが、その時点でのエリート選手としての評価に影響を及ぼすとしても、その選手の将来のタレント評価に影響を及ぼすとは言えない。そのことは、選手の体格と運動能力が成熟度に依存する可能性があることに関わっている[5][15][16][17][18]。

成熟の速度は個人によって異なり、そのことによって同じ学年であっても異なる成熟度の子供たちが存在する。例えば、同学年の2人の子供が同じ身体のサイズ（同じ発育状態）であったとしても、成人時の身体のサイズは異なる可能性がある。これは測定時点での2人が、成熟に達する過程のなかで異なる位置にいることが影響する[19]。現在、学校やクラブチームなど、世界中のあらゆる育成機関では、学年別にグループ分けを行っている。そのため、同じ暦年齢（Chronological Age：以下 CA）グループであっても、成熟度の異なる子供が存在するのが実情である。

これまで、成長期選手の評価において重要な要因である成熟度について、早生まれに関する議論がされてきた。多くの先行研究では、スポーツを行う上での早生まれによる様々な利点を、“Relative Age Effect（以下：RAE）”や“Birth Date Effect”と呼んでいる[13]。実際

に、同じ CA カテゴリーでも早く生まれた選手は、同じ年の最後に生まれた選手と比べて 1 年近く CA が離れていることもある。早い月に生まれた選手は、より質が高く、より多くのコーチングを享受する可能性が高く、その年の後半に生まれた選手は 12 歳までに競技からドロップアウトする確率が高いことが明らかにされている[20]。Fragoso らは、8 年間で計 133 名の U-15 年代の選手を対象に、誕生日（四半期:Q1,Q2,Q3,Q4）と生物学的成熟度である骨年齢と体格、運動能力の関係について調査を行った[21]。これによれば、早い四半期に生まれた選手の方が、遅い四半期に生まれた選手よりも身長、体重、大腿周径囲、スクワットジャンプ、スプリントタイムが優れていた。この研究の興味深い知見として、骨年齢を共変数、運動能力の各項目を独立変数として共分散分析を行ったところ、スクワットジャンプと 10m スプリントタイムを除き、他の運動能力において、各四半期グループ間の有意差が認められなかった点が挙げられる。このことは、身長、体重、周径囲といった体格因子とスプリント能力は成熟の遅速に依存する可能性を示している。

一方で、CA を用いた選手の比較が成長期選手のタレントを議論する上で適切であるかどうかについては考慮しなければならない。早生まれの選手がその時点での選手評価に有利であることは、すでに多くの研究で明らかにされているが[18][20][22][23][24]、Deprez らは身長、体重、立ち幅跳び、カウンタームーブメントジャンプ、5m / 30m スプリントを比較したところ四半期グループ間で有意差が認められなかったという、相反する結果を報告している[15]。

以上のことから、成長期選手にとって重要なタレント因子である体格と運動能力を評価する際には、成熟度の差異を考慮することが重要である。しかし、CA のみで体格と運動能力のパラメータの差異をすべて説明することは難しく、より適切な成熟度指標を用いた研究が必要とされている。

第3項 骨年齢による成熟度評価

生物学的成熟度の指標として、最も精度が高いとされている方法が、骨成熟度を用いた骨年齢 (Skeletal Age: 以下 SA) によるものである。SA の有用性は 1900 年代に示され、生物学的年齢と名付けられた。SA を推定するためにいくつかの方法が提唱されているが、そのなかのひとつに、Tanner-Whitehouse 法 (以下: TW 法) がある[25][26][27]。TW 法はいくつかの改訂を重ねている。初版 (TW 法) では、左手首の X 線画像を用いて橈骨、尺骨、第 1、第 3、第 5 指から成る 11 の指骨 (基節骨、中節骨、末節骨) と中手骨、豆状骨を除いた 7 つの手根骨の計 20 個の骨を 8~9 段階の発育段階に分け、各ステージに点数を与え、各スコアの合計点から SA を算出した。

最初の改訂版である TW2 法は、成熟度指標の基準は変更されない一方で、橈骨、尺骨、いくつかの手根骨の最終段階は、評価が困難であるため削除された。それに伴い、割り当てられたスコアが変更された。加えて、各骨のスコアは性別に応じて割り当てされるようになり、最終身長予測にも応用可能となった。この改訂版では 20 個の骨 (TW2 20Bone SA)、7 個の手根骨 (TW2 Carpal SA)、そして橈骨 (Radius)、尺骨 (Ulna)、短骨 (Short bone) から得られた RUS スコアに基づく TW2 RUS SA の 3 つの SA が提案された。

2 回目の改訂版である TW3 法は、RUS SA (TW3 RUS SA) と Carpal SA (TW3 Carpal SA) は継続したが、20Bone SA は削除された。各骨の成熟度指標と割り当てられたスコアの基準は TW3 では修正されなかった。7 つの手根骨の成熟度の合計を SA に変換するための表は修正されなかったが、TW3 法では RUS スコアの合計を SA に変換するための表が修正された。

TW 法の最初の 2 つのバージョンと TW3 Carpal SA は英国の子どもたちを参照としている。一方で、TW3 RUS SA は 1969 年と 1995 年の間に調査されたベルギー (フランデレン地域)、イタリア、スペイン、アルゼンチン、日本、そして”大部分”であるアメリカの子供と青少年から成る複合参照を行っている[28]。TW3 法による SA 評価は国際的に普及され

[29][30]、今後も生物学的成熟度の指標のスタンダードになるとされている[28]。

SA に関する研究では、早熟であるか、晩熟であるかは SA と CA を用いて定義される。SA が CA に比べて 1 年以上進んでいる子供は”早熟”に分類される。SA が CA よりも 1 年以上遅れている子供は”晩熟”に分類される。SA が CA の±1 年以内にある子供が”平均”的な成熟として分類される[19][31]。

SA と競技パフォーマンスとの関係について調査された研究は少ないが、いくつかの研究で、早熟な選手と晩熟な選手の体格と運動能力の差異について報告されている。SA と筋力の間、SA と垂直飛びや懸垂といった競技パフォーマンスの間には正の相関関係が示されているが[19]、これまでの研究では、SA と体格、運動能力の間の関係性は十分に明らかにされていない。さらに、成長期エリートサッカー選手の SA と方向転換動作やスピード持久力などのサッカー競技特性を考慮した運動能力に関する知見はほとんどない。

第 4 項 PHA による成熟度評価

SA は正確な成熟度を横断的に調査する上で非常に有用である一方で、実用に制限が生じる成熟度指標である。そのため、スポーツ現場で成長期選手の成熟度についての縦断的調査を実施するためには、スポーツ現場に適した成熟度指標を選択することが必要である。また、将来的に身体成熟の遅速に合わせたトレーニングプログラムを構築していくためには、一般化できる成熟度指標でなければならない。これまで思春期の小児を対象とした研究では、成熟度指標として骨成熟、歯牙成熟、性成熟、身体成熟などが多く用いられている。

第 3 項で説明した骨成熟や歯牙成熟は生物学的成熟度の指標として最も精度が高いが、X 線撮影を実施する際に 2 つの問題がある。X 線撮影は医師、歯科医師、診療放射線技師でなければ行えないことと、被験者に少量ではあるが放射線被曝があることである。そのため、縦断的調査のために小児に対して継続的に X 線撮影を実施することは、撮影環境の確保と被曝の問題から制限がある。性成熟は二次性徴の発達観察により評価を行う方法である。男

子では陰茎や睾丸（生殖器）、陰毛の発達度を評価されるため、使用は思春期に限定される。性成熟度の段階評価は臨床検査時に直接視察して行う。このことが、この評価法に制限を課す要因である。性成熟度調査の被験者の多くは思春期の小児であり、個人のプライバシーに大きく関わるため、実施するためには慎重な配慮が必要である[19]。

身体成熟の評価法としてパーセント成人身長と Age at Peak Height Velocity（以下：PHA）が用いられている。パーセント成人身長とは、ある年齢の身長を成人身長で除することで、成長段階をパーセントで評価する方法である。この評価法の欠点として、発育スパートのタイミングを考慮できていないことと、成人身長値が予測値であるため有効性に限界があることが挙げられている[19]。もうひとつの身体成熟の評価法である PHA は、身長が最大成長速度を示す時の年齢であり、縦断的調査における身体成熟の指標としてもっとも広範に使われている。PHA は個人の身長変化を継続して調査することで推測可能な成熟度指標であり、スポーツ現場でスクリーニングとして身長測定するだけで使用できるという長所がある。村田は、日本人小児の発育スパート時期の成長段階を、PHA を基準として4つの時期に分類している[32]。発育スパート開始年齢を Take Off Age（以下：TOA）、身長の成長速度が最大になる年齢を PHA、身長の成長速度が 1cm / 年以下となった年齢を Final Height Age（以下：FHA）とした上で、Phase I を TOA 以前、Phase II を TOA から PHA まで、Phase III を PHA から FHA まで、Phase IV を FHA 以降としている（図 3）。

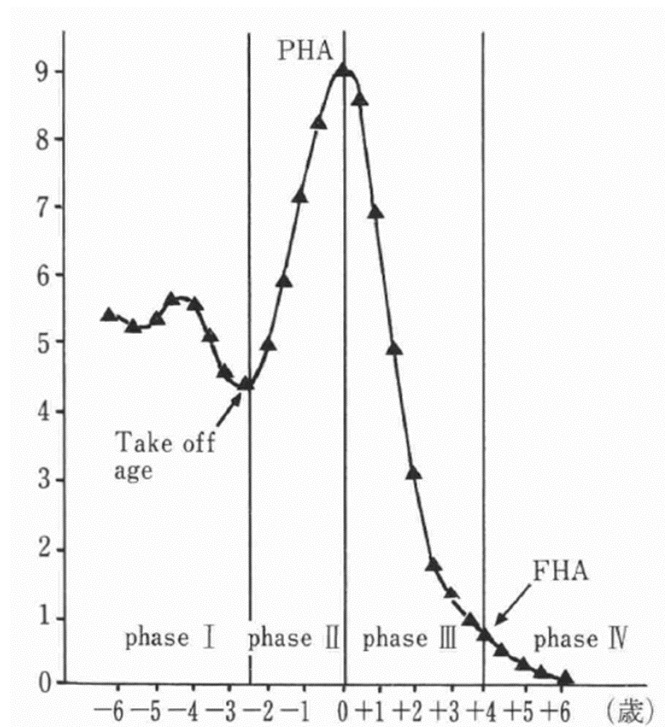


図3：標準化成長速度曲線のパターンによる成長期の区分[32]

PHA と成熟度指標として精度が高い SA の相互関連性についていくつかの研究が報告されている[9][33][34]。高井らは 127 名の日本人男児を対象とした調査から、骨成熟完了年齢と PHA は強く相関 ($r = 0.832$ 、 $p < 0.01$) していることを示しており[9]、PHA が早いほど骨成熟が完了する年齢も早く、身長成長と骨成熟のタイミングは互いに強く関係していることを明らかにしている。つまり、身長が成長する速度と、骨成熟が進む速度はある程度一致しており、PHA を用いて小児の成熟度を評価することの正確性は担保されていると言える。また、日本人男児 26 名を対象に身長変化と最終身長、SA に関して実施された縦断的調査の報告によると、男児では SA が 13 歳あたりで PHA に達することが示されている[34]。男児の PHA は女兒より 1 年から 2 年遅く訪れるが[10][35]、日本人男児の平均 PHA は 13.00 ± 0.96 歳[9]、 13.05 ± 0.94 歳[10]と報告されていることから、CA が 12~14 歳、SA が 13 歳前後の小学校高学年から中学生年代までが、PHA を日本人男児の成熟度指標とする有効な時期であると推測できる。

これまで PHA を成熟度指標として用いて、成長期アスリートの体格や運動能力を検討した研究がいくつか報告されている。Meyers らは PHA を基準に、11-15 歳の一般小児を G1 = PHA < -2.5 歳、G2 = -2.49 歳 < PHA < -1.5 歳、G3 = -1.49 歳 < PHA < -0.5 歳、G4 = -0.49 歳 < PHA < 0.5 歳、G5 = 0.51 歳 < PHA < 1.5 歳の 5 群に分類し、疾走速度、ストライド、ピッチ、支持時間、滞空時間を横断的に比較検討している[36]。その結果、疾走速度は PHA から年数が経過した群 (G4、G5) の方が、PHA に達していない群 (G1、G2、G3) よりも、有意に速いことが明らかになっている。しかし、横断的な研究ではそれぞれの運動能力の向上 (変化量) が、どの身長変化の時期に起きていたかを明らかにすることはできない。一方で、Philippaerts らは 5 年間かけて 33 名の成長期ベルギー人サッカー選手 (CA 12.1±0.7 歳、PHA 13.8±0.8 歳) の身長、体重、運動能力の縦断的調査を実施し、ほぼすべての運動能力 (バランス、ステッピング、体幹、上肢筋力、垂直跳び、シャトルラン、30m 走、持久力) が PHA と同時期に変化率のピークを迎えたことを報告している[37]。

以上のことから、成長期選手の運動能力は PHA を境として大きく変化しており、特にスプリント能力やジャンプ能力が向上することが明らかになっている。つまり、スポーツ現場において各個人の成長段階に合わせたトレーニングプログラムを提供するためには、PHA を用いた評価が適切な方法の一つであると考えられる。しかし、これまでの研究では、縦断的研究であってもサンプル数が少なく、対象が海外の小児であることが多く、方向転換動作やスピード持久力などのサッカー競技特性と身長変化の関係性は明らかにできていない。また、PHA 前後の時期の成長期アスリートを対象にレジスタンストレーニング (以下:RT) を用いたトレーニング介入に対する成熟度の影響について調査した研究はない。

第 5 項 成長期選手に対するレジスタンストレーニング

成長期サッカー選手の運動能力には成熟度が影響を及ぼしていると考ええると、早熟な選手が早期に強い筋力を有することで、高い運動能力を有している可能性がある。筋力が高い

ことが競技パフォーマンスの発揮に重要であることは、多くの研究によって明らかにされている[19][38]。大臀筋、ハムストリングスなどの下肢後面の筋群は、股関節の伸展を通じて力の生成を助けながら、股関節と脊柱の安定化において中心的な役割を果たしており[39]、スプリント、ジャンプ、アジリティなどのスポーツ動作で高いパフォーマンスを発揮する際に、特に必要とされる。実際に、スプリントパフォーマンスと下肢後面の筋群の筋力との間には高い負の相関関係が示されている[40][41]。

このように運動能力に成熟差が寄与しているのであれば、その成熟差はトレーニング効果にも影響を及ぼすことが推察される。成長期サッカー選手に対するウェイトを用いた RT の効果について、これまでに多くの研究が報告されている。まず安全性に関して Malina は、思春期の子供が行う RT が身長や体重の成長を阻害するような悪影響を与えないことを報告している[42]。Faigenbaum と Myer は、小児や思春期の子供を対象とした RT に関する疫学調査のレビューを行い、RT に伴う傷害について報告している[43]。この報告によると、適切に管理・指導された小児や思春期の子供の RT 介入研究 27 本のうち 24 本の調査において傷害発生は 0 件であり、傷害発生した 3 本の介入研究でもそれぞれ 1 件のみの傷害件数で、発生率はそれぞれ 0.176、0.053、0.055 / 100 participant hour であったことが明らかになっている。また、専門的で適切な指導を受けている子供の RT では、成長軟骨に関わる傷害はこれまで報告されていないことも明らかにしている。以上のように、トレーニングを適切に管理できる指導者のもとで、成長期選手が RT を行うことの安全性に関する根拠が報告されている。

小児期から思春期は成長と成熟の結果として筋力レベルが高まるため[19][44]、RT の効果を明確に評価することが難しいとされている[45][46]。しかし、一般的に成長期選手に対する RT は、肥満の改善[47][48]などの健康維持効果、傷害予防効果[43][49]、ランニングスピード[50][51]や跳躍・投擲動作[51]などの運動能力を向上させる効果があると考えられている。Annesi らは 5 歳小児から RT による筋力向上が認められたことを報告している[52]。

Lloyd らは成長期アスリートに対する RT 効果についてのレビューを行い、管理された適切な RT は成長期アスリートの筋力を向上させ、最も効果的なプログラムは 8 週間以上、複数のセットから構成され、1 週間当たりのトレーニングセッション数が増加していくことであると主張している[45]。

数ある RT エクササイズの中なかでもバーベルヒップスラスト（以下：BHT）は、大臀筋（以下：GM）や大腿二頭筋（以下：BF）といった下肢後面の筋群の筋力向上を目的として処方されている RT である[53][54]。BHT を実施することの効果として 2 つ挙げられる。まず、目的筋群である GM と BF に対して、他の RT よりも大きな筋刺激を与える効果である。一般的にスポーツ現場で行われているスクワットでは、股関節がニュートラルポジションに達すると GM の張力が低下するが、BHT は股関節がニュートラルポジションに達すると GM の張力が最大となる[53]。また、可動域全体にわたって GM に張力が働くため、筋に対して肥大刺激を与え、筋力やパワーが向上すると考えられている[55]。BHT はバックスクワットやバーベルデッドリフトよりも 2 倍近く高い GM の EMG 活動（平均、ピーク）が発生することが報告されている[56][57]。次に、BHT 動作時の股関節伸展状態での GM と BF の大きな筋活動は、水平方向（前方方向）への力発揮を必要とする競技動作に近いいため、筋力向上が競技パフォーマンスの向上にポジティブな影響を及ぼすことが期待できる。実際に、BHT を行うことで水平方向の運動能力であるスプリント能力（10m、20m）とジャンプ能力（立ち幅跳び）が向上することが報告されている[58][59]。このことから BHT は GM と BF に対する筋力トレーニングとしてだけではなく、スプリント能力やジャンプ能力への変換トレーニングとしても効果を得られる可能性がある。このように BHT は水平方向の競技動作に対して作用する下肢筋群に対するトレーニングとして有効だが、BHT に関するトレーニング研究は近年増えてきたこともあり、その効果について一定した見解を得られていない。また、成長期選手に対するトレーニング研究は近年増えてきているが、成長期選手の BHT のトレーニング効果に関する研究は少ないことが現状である。

第 3 節 本論文の目的、構成

体格と運動能力は優れたサッカー選手を評価するための重要な因子であり、特に体格と運動能力が向上する成長期サッカー選手のパフォーマンス評価に大きな影響を与えることが分かっている。しかし、体格と運動能力は成熟の遅速に強く依存している可能性がある。そのため、成熟度がどのように成長期選手の体格と運動能力に影響を与えているのかを調査することが必要である。また、成長期選手の体格と運動能力を継続的に追跡する研究はまだ数が少なく、特に体格と運動能力の変化が生じるタイミングを調査する必要がある。さらに、成長期選手の成熟度が RT の効果に与える影響を検討した研究は少なく、明らかにする必要があるのである。

そこで本研究は、生物学的成熟度や身長変化が成長期エリートサッカー選手の体格と運動能力にどのように寄与しているのかを明らかにし、成長期サッカー選手に対する筋力トレーニングが体格と運動能力に及ぼす影響を検討することを目的とした。

本論文の構成として、まず第 2 章では、研究 1 として骨成熟度を用いて成長期エリートサッカー選手の体格と運動能力を検討した。成熟が進んでいる選手は、晩熟な選手よりも体格が大きく、筋力が優れていることから[16][18]、本研究の仮説は、早熟な選手は、晩熟な選手よりも身長、体重、周径囲、ジャンプ能力が高い値を示し、それらは正の相関関係を示すと設定した。さらに、身長とスプリント能力、アジリティ能力とは負の相関関係を示し、ジャンプ能力、持久力とは正の相関関係を示すと仮説を設定した。

第 3 章では、研究 2 として成熟度の指標として現場でも実用可能な PHA による評価法を用いて、成長期エリートサッカー選手を対象に、PHA 時期の選手の体格変化と運動能力変化が、どのようなタイミングで生じるのかを混合縦断的に検討した。身長変化が大きい時期に、大きな体格変化と運動能力の向上が生じるため[37]、本研究の仮説は、PHA 前後 1 年以内の選手はそれ以外の時期の選手より身長、体重、周径囲などの体格因子が大きな変化量を示し、スプリント能力とジャンプ能力もそれに伴い大きな変化量を示すと設定した。

第4章では、研究3として成長期サッカー選手に対してBHTを用いたトレーニング介入を実施して、それにより生じる体格と運動能力の変化がトレーニング要因と成長要因のどちらに依存するのか、もしくは両者に依存しているのかを明らかにすることを目的とした。研究2で大腿周径囲と5ステップバウンディングの変化量はPHA後の方がPHA前より大きかったことから、RTを行うことで筋厚の増大と挙上重量、スプリント能力、ジャンプ能力の向上が生じ、PHA後の選手がPHA前の選手と比較して、その変化量が大きくなるという仮説を設定した。

さらに第5章においては、第2章から第4章までの研究結果を踏まえて、総合考察として成長期サッカー選手の成長とトレーニング効果について検討を行った。

第2章

研究1

骨成熟が成長期サッカー選手の体格と運動能力に与える影響

緒言

成長期エリートサッカー選手は体格（身長、体重）も[1][2][3][4]、運動能力（筋力、アジリティ、スピード、持久力）も[1][2][3][4][5]、非エリート選手より優れていることが明らかになっている。したがって、成長期サッカー選手の体格と運動能力は、エリートサッカー選手のタレント決定因子と考えられている。しかし、成長期サッカー選手を評価し、育成するためには、成熟度について理解する必要がある。体格が大きく、スピードが速く、大きなジャンプ力を有する成長期選手は、成熟が進んでいる可能性を考慮しなければならない。

学校活動やクラブチームなどで行われている暦年齢を基準としたグルーピングでは、早熟な選手、すなわち身体的な成熟が早い選手がコーチに好まれる傾向があることが報告されている[12]。一方で、成長期に早熟であった小児は、その時点ではスピード、爆発的筋力などの運動課題において、晩熟な小児よりも優れた成績であるが、30歳までにすべての運動課題において晩熟な小児に追いつかれたことが報告されている[60]。以上の研究から、早熟な選手は晩熟な選手よりも成長期時点で優れた運動能力を有するが、それは成熟の遅速に起因すると推測できる。そのため、成長期に生じる成熟の遅速が、成長期サッカー選手の運動能力に対して、どのような影響を与えているかを明らかにしなければならない。

さらに、体格と運動能力に対する成熟度の影響を調査するためには、体格と運動能力の関係も調査する必要がある。これまでの多くの先行研究で、体格と運動能力は別々に考えられてきたが、成熟度が体格と運動能力に影響を及ぼすのであれば、両者の関係を明確にする必要がある。

そこで本研究は、生物学的成熟度の最も正確な指標である骨年齢（以下：SA）を用いて、

成長期エリートサッカー選手の体格と運動能力に対する成熟度の影響を明らかにすることを目的とした。成熟が進んでいる選手は、晩熟な選手よりも体格が大きく、筋力が優れていることから[19][21]、本研究の仮説は、早熟な選手は、晩熟な選手よりも身長、体重、周径囲、ジャンプ能力が高い値を示し、それらは正の相関関係を示すと設定した。さらに、身長とスプリント能力、アジリティ能力とは負の相関関係を示し、ジャンプ能力、持久力とは正の相関関係を示すと仮説を設定した。

方法

問題解決へのアプローチ

すべての被験者の SA の評価は、チームによるスクリーニングプログラムの一環として実施された。チームのトレーニングプログラムの一環として体格測定と運動能力測定を実施した。調査期間全体（2年間）の測定を標準化するために、骨成熟度調査は毎年3月21日の同時刻に、体格と運動能力の測定はシーズン開幕前の3月3週目の土日の同時刻に、同じ順序で、同じ機材を用いて実施した。研究期間全体にわたるすべての測定は、同一の測定者の指示に従って行われた。

被験者

国内プロリーグである J リーグアカデミークラブに所属する U-13 男子サッカー選手 57 名を対象とした。所属クラブは同年齢カテゴリーでは国内トップレベルである関東 1 部リーグに所属している。包括基準は、現病歴が無く、通常の競技活動が行えている者とした。除外基準として、ポジション特性を考慮してゴールキーパーである者、外国籍を有する者、2 週間以内に傷害や病気のために測定を正しく実施できなかった者は研究から除外した。何らかの理由で被験者が研究実施期間中にドロップアウトした場合、そのデータは破棄した。研究は 2 年間かけて、2017 年度に 25 名、2018 年度に 24 名の計 49 名（平均年齢 12.7 ±

0.2 歳[年齢範囲 12.06 歳～12.93 歳] を対象に実施した。

全被験者および、その法的保護者からインフォームドコンセントを受け、同意書への記入を得た。本研究はヘルシンキ宣言の趣旨に則り、早稲田大学「人を対象とする研究に関する倫理審査委員会」の承認を得て実施した（承認番号：2017-208）。

プロトコル

体格測定として身長、体重、体脂肪率、周径囲（大腿 / 下腿）、柔軟性を運動能力測定の前に測定した。すべての体格測定は、午前 8 時に行われた。身長、体重、体脂肪率は 1 回測定した。大腿、下腿の周径囲と柔軟性は 2 回測定した。運動能力の測定は、サッカーに必要なスピード、アジリティ、ジャンプ、持久力などの運動能力[61][62]を評価するために、日本サッカー協会のフィジカルガイドラインに従って行われた[63][64]。

運動能力の測定項目は 10m / 50m スプリント、10m×5 シャトルラン（以下：10×5S）、クランクテスト、5 ステップバウンディング、Yo-Yo Intermittent Recovery Test Level 2（以下：Yo-Yo IR2）、クーパー走であった。初めに被験者は 10m / 50m スプリント、10×5S、クランクテスト、5 ステップバウンディングの測定を行った。測定の順番による影響を除くために、ランダムな順番で測定を実施できるように被験者を 4 か所に振り分けた。測定による疲労の影響を除くために、Yo-Yo IR2 の測定は前述の項目の測定終了後に実施し、その 1 週間後にクーパー走の測定を行った。Yo-Yo IR2、クーパー走を除く運動能力測定は全て、各試行の間に 120 秒以上の休息期間を設けて 2 回の測定を実施した。Yo-Yo IR2 とクーパー走はそれぞれ 1 回ずつ測定を実施した。

各測定前には、動的ストレッチ、ジョギング、ランニング、アジリティを含む、10 分間のウォーミングアップを行った。運動能力の測定は、チームのトレーニングプログラムの一環として定期的に行われていたため、被験者にとって慣れている測定項目であるが、習熟のための練習をウォーミングアップのタイミングで実施した。被験者は、測定の前に少なく

とも 48 時間、激しい運動を控えるように指示された。

骨年齢による群分け

TW3 法に従って、RUS スコアを用いて被験者の左手首の X 線画像から SA を推定した。熟練した 1 名の評価者が X 線画像を 2 回評価し、その平均値を RUS スコアとして算出し、TW3 換算表[27]を用いて SA を決定した。本研究内の評価者の級内相関係数 (ICCs) は、先行研究に従って“almost perfect (ICC = 0.81) ”、“substantial (ICC = 0.61 - 0.80) ”、“moderate (ICC = 0.41 - 0.60) ”と評価した[65]。2 回 RUS スコアを評価した際の、評価者の検者内信頼性 ICC (3,1) は 0.86 であった。算出された SA と暦年齢 (以下 : CA) を用いて $SA - CA > +1$ 歳、 $SA - CA \leq \pm 1$ 歳、 $SA - CA < -1$ 歳を基準に、被験者をそれぞれ早熟群、平均群、晩熟群の 3 群に分類した。なお本研究の被験者には、完全に成熟したと評価された者 (RUS = 1000) はいなかった。各群の人数は、早熟群が 14 名、平均群が 22 名、晩熟群が 13 名であった (表 1)。また、被験者と測定者には、被験者がどの群に属しているのかが通知されておらず、すべての測定は二重盲検下で実施された。

表 1 : 被験者の群分け (SA)

生物学的成熟度	被験者数 n	骨年齢(SA) (歳)			暦年齢(CA) (歳)		
早熟群	14	14.10	±	0.69	12.67	±	0.24
平均群	22	12.45	±	1.13	12.30	±	0.62
晩熟群	13	10.44	±	0.82	12.18	±	0.55
計	49						

体格測定

全ての体格測定はインナーシャツを上下着用、裸足の状態で実施され、1 名の測定者が全被験者を測定した。身長は身長計 (Seca213、Seca 社製、千葉、日本) を用いて 0.1cm 単位で測定した。体重と体脂肪率は体組成計 (TANITA BC-756-WH、TANITA 社製、東京、

日本)を用いて、それぞれ0.1kg、0.1%単位で測定した。

両足の大腿部と下腿部の周径囲は、立位の状態で標準の巻尺を用いて0.1cm単位で測定した。巻き尺は、ねじれやたるみを防ぐために引っ張り、大腿と下腿の周囲にきつくなりすぎないように巻いた。解剖学的な位置はMathurら[66]とLohmanら[67]の方法に従って定められた。大腿部は膝蓋骨上端から5cm近位に位置する点から水平に測定した[66]。下腿部は、最大周径点から水平に測定した[68][69]。左右それぞれ2回ずつ測定して平均値を算出し、左右の最大値の平均を分析に使用した。評価者の検者内信頼性ICC(3,1)は大腿で0.92、下腿で0.94であった。

柔軟性は、立位体前屈で測定を行った。被験者は立位で膝関節を伸展させ、足幅は肩の幅にそろえて、立位体前屈計(T.K.K.5403、竹井機器工業株式会社製、新潟、日本)に載った状態で測定した。被験者は膝関節が屈曲しないように注意しながら、できるだけ遠くまで指で機材を押した。最終ポジションで少なくとも2秒間保持した。柔軟性は0.1cm単位で、足趾より遠くまで手を伸ばせた場合は正の値、足趾に届かない場合は負の値で示された。測定は2回繰り返され、より柔軟性を示す測定値を分析に用いた。評価者の検者内信頼性ICC(3,1)は0.94であった。

運動能力測定

10m/50mスプリントテストは、スピード能力を評価するために実施した。10×5Sとクランクテストはアジリティ能力を評価するために実施した。10×5Sは180°の方向転換動作を、クランクテストは90°の方向転換動作を評価している。サッカーの試合中の方向転換動作では、いずれの方向転換角度も頻回行われる[61]。10×5Sでは、10m先にある切り返し地点にて180°方向転換を行い、スタート地点にて再度180°方向転換を行った。方向転換は合計4回繰り返され、被験者は合計50m走った(図4)。被験者には、切り返す足が左右交互になるように指示した。クランクテストでは、被験者は前方へ5m走り、右方向(もしくは

は左方向) へと 90°方向転換し 5m 走り、左方向 (もしくは右方向) へと 90°方向転換し、5m 先のゲートを通過した (図 5)。被験者はスタート地点から 0.5m 離れた位置に立ち、自身のタイミングでスタートした。スピード能力とアジリティ能力の測定タイムを、地上 1.0m に配置された光電管 (Brower timing systems, Utah, USA) を用いて 0.01 秒単位で測定した。いずれの測定も被験者が最初のゲートを通過した時点から測定が開始され、目標地点までのタイムを測定し、2 回の測定のうち最も速い測定値を分析のために用いた。クランクテストでは、被験者は最初の方向転換方向が右の場合と左の場合それぞれ 2 回ずつ測定し、それぞれの方向の最も速い測定値を平均した値を分析のために用いた。10m / 50m スプリントテストの検者内信頼性 ICC(3,1)は、それぞれ 0.90、0.90 であった。10×5S とクランクテストの検者内信頼性 ICC(3,1)はそれぞれ 0.88、0.73 であった。

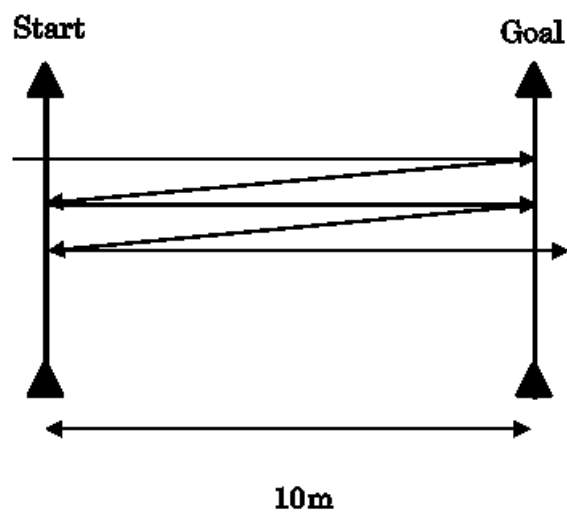


図 4 : 10m×5 シャトルラン ([64]より改変)

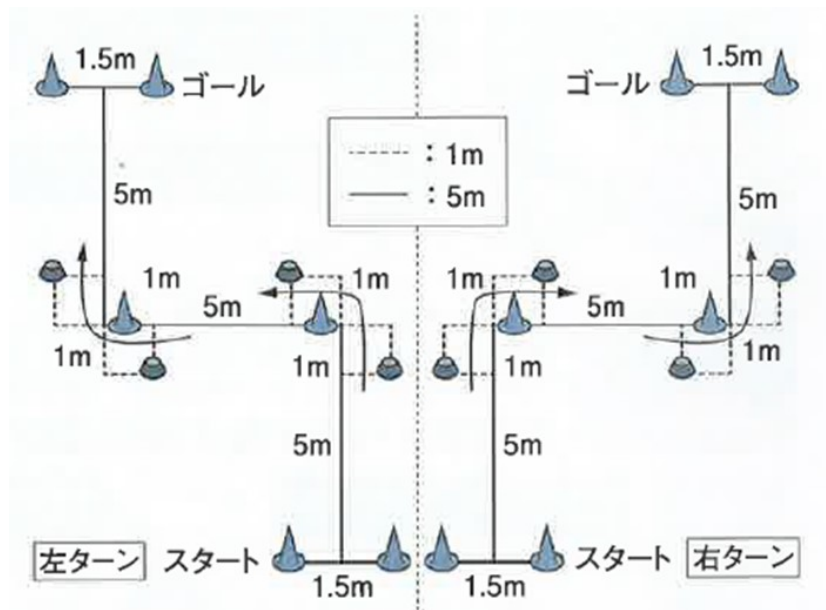


図 5 : クランクテスト[63]

5 ステップバウンディングはジャンプ能力を評価するために実施した。被験者は両脚で前方へ跳躍を行い、左右交互に片脚で跳躍し、最後に両脚で着地した。跳躍距離はスタート地点を起点として、着地時のシューズ最後方部分までをメジャーを用いて 0.1m 単位で測定した。2 回の測定のうち最も跳躍距離が長い測定値を分析のために用いた。5 ステップバウンディングの検者内信頼性 ICC(3,1)は 0.85 であった。

Yo-Yo IR2 はスピード持久力を、クーパー走は有酸素性持久力を評価するために実施した。Yo-Yo IR2 では、スタート音に従って 20m 先にある切り返し地点にて 180°方向転換を行い、規定の音になる前にスタート地点を通過した。通過後にはジョギング、または歩いて 5m 先にあるコーンを回り、スタート地点へと戻った後、次のスタート音で再び走り始めた(図 6)。レベルがあがると規定音の間隔が短くなった。失敗の定義として、規定の音が鳴った瞬間、被験者がスタート地点を”踏んでいなければ失敗”と伝えた。被験者には、1 回の失敗が許され、2 回目に失敗した場合、測定を終了した。切り返す足は被験者の任意であった。測定は 1 回のみで、総走行距離 (m) を分析のために用いた。

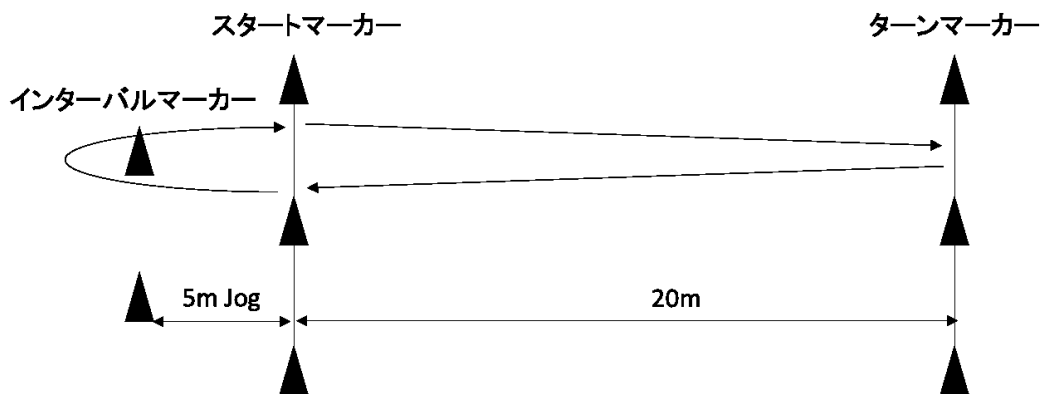


図 6 : Yo-Yo Intermittent Recovery Test Level 2 ([64]より改変)

クーパー走では、被験者はスタートの合図で 400m トラックを 12 分間走り続けた。400m トラックには 10m ずつにマーカーが置かれ、12 分後の合図で最後に通過したマーカーを走行距離として、10m 単位で測定した。測定は 1 回のみで、総走行距離 (m) を分析のために用いた。

統計処理

測定結果は平均値±標準偏差 (SD) で表示した。体格測定項目 (身長、体重、体脂肪率、周径囲、柔軟性) と運動能力測定項目 (10m/50m スプリント、10×5S、クランクテスト、5 ステップバウンディング、Yo-Yo IR2、クーパー走) について、Kolmogorov-Smirnov 検定と Levene 検定を用いて、正規性と等分散性を検討した。正規分布かつ等分散であるデータに関しては、早熟群、平均群、晩熟群間の各測定項目の差異を、一元配置分散分析 (One-way ANOVA) を用いて分析した。どの測定値に有意差が認められているのかを決定するために、Tukey の事後検定を実行した。効果量の大きさ (η^2) は Cohen's d を用いて 0.01、0.06、0.14 をそれぞれ小、中、大の効果と示した[70]。さらに、各体格測定項目と各運動能力測定項目との間の相関関係を検討するために、ピアソンの積率相関係数を用いて相関係数を算出し、 $r > 0.5$ を強い相関とした[71]。統計学的有意水準はすべて危険率 5%未満とし

た。全ての統計分析には SPSS ソフトウェア Version24 (IBM, New York, USA) を用いた。

結果

体格測定項目の身長 (ES = 0.42)、体重 (ES = 0.33)、大腿周径围 (ES = 0.19)、下腿周径围 (ES = 0.34) の測定値において、晩熟群が早熟群、平均群よりも有意に小さい値を示した ($p < 0.05$) (図 7、図 8、表 2)。その他の体格測定項目について群間で有意差は認められなかった (図 7、図 8)。

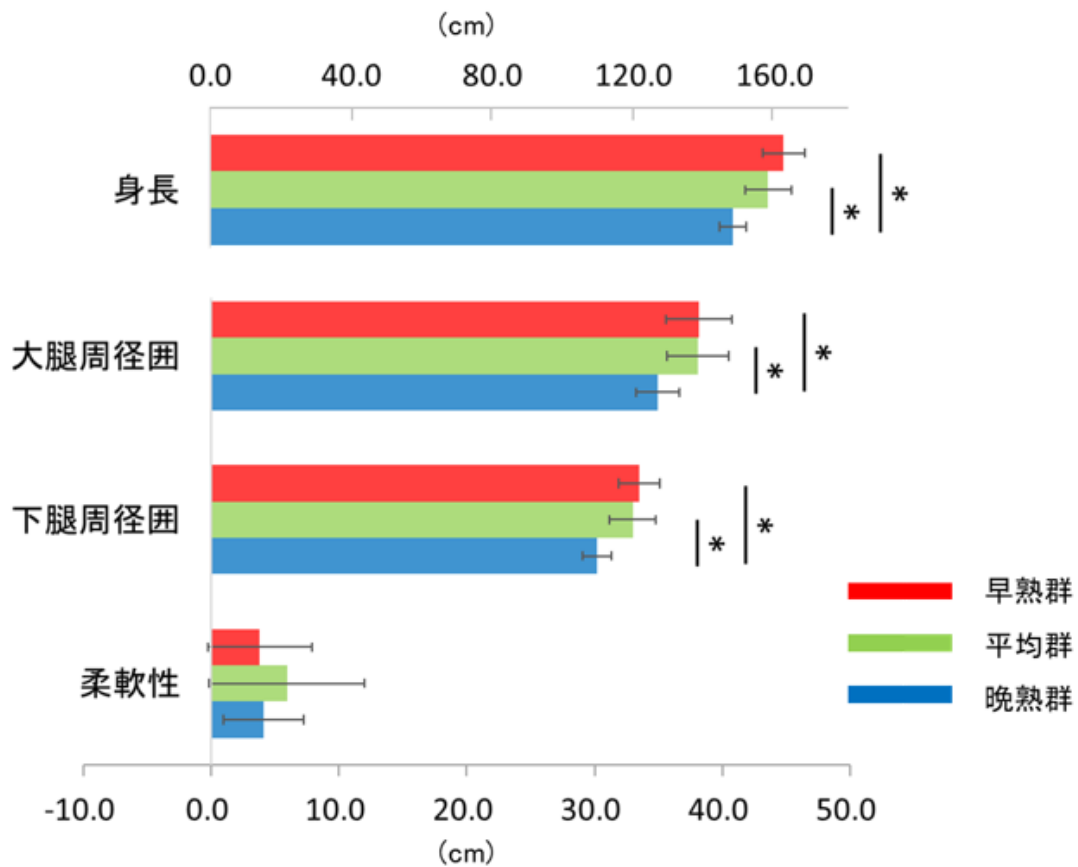


図 7 : 身長、周径围、柔軟性測定の群別比較 (* : $p < 0.05$)

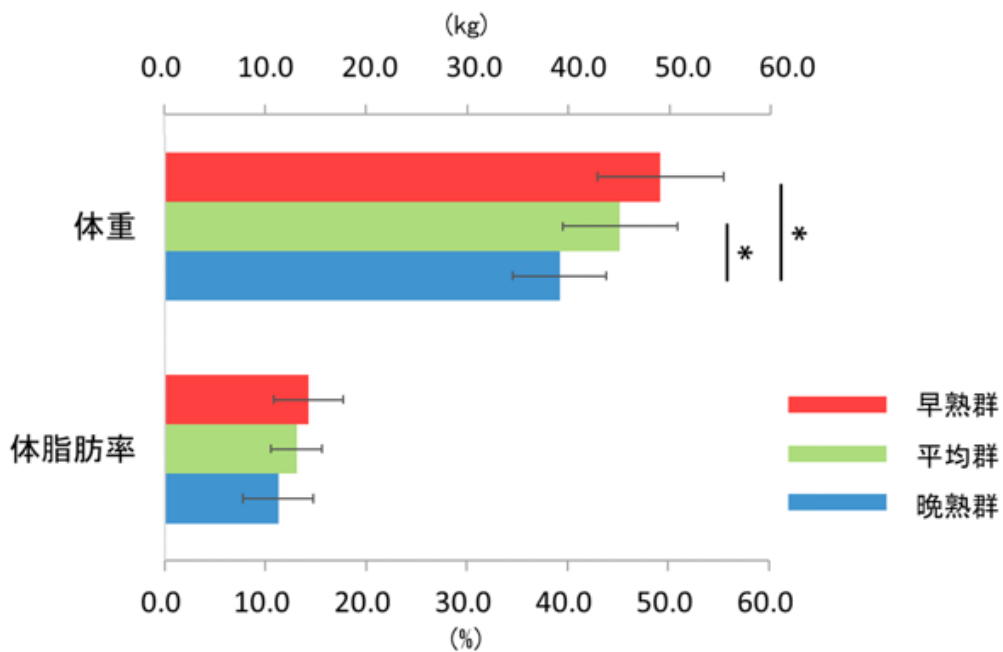


図 8 : 体重、体脂肪率の群別比較 (* : $p < 0.05$)

運動能力測定項目の 50m スプリント (ES = 0.18) と 5 ステップバウンディング (ES = 0.24) において、晩熟群が早熟群、平均群よりも 50m スプリントの測定値は有意に遅く、5 ステップバウンディングの測定値は有意に小さい値を示した ($p < 0.05$) (図 9、図 10、表 2)。その他の運動能力測定項目について群間で有意差は認められなかった(図 9、図 11)。

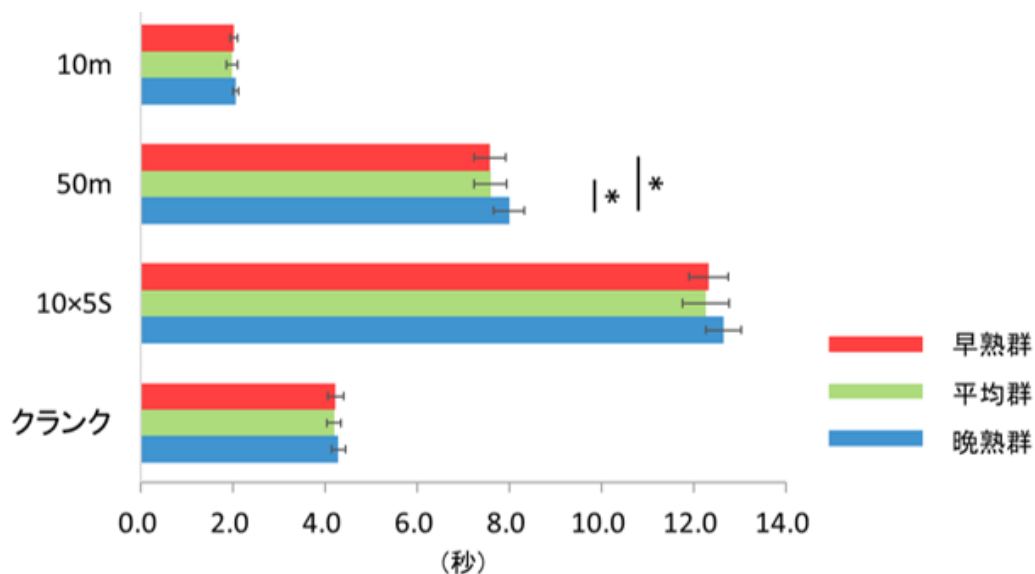


図 9 : スプリント、アジリティ能力の群別比較 (* : $p < 0.05$)

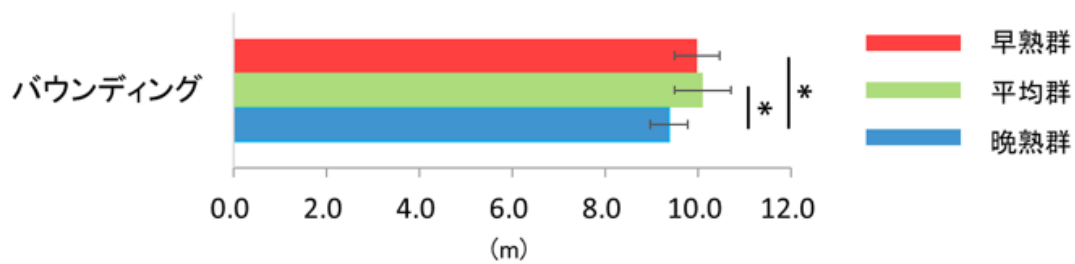


図 10 : ジャンプ能力の群別比較 (* : p < 0.05)

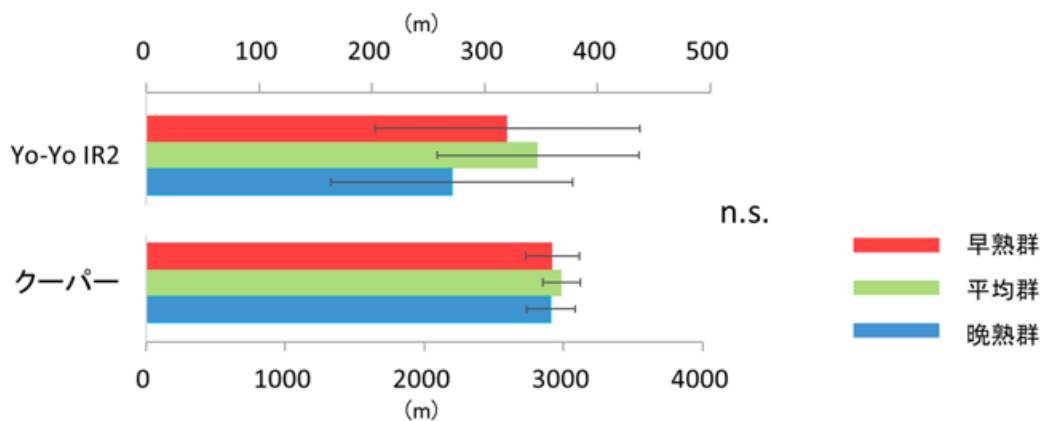


図 11 : 持久力の群別比較

表 2 : 各測定項目の効果量

	早熟群 (n = 14)	平均群 (n = 22)	晩熟群 (n = 13)	F	p	効果量 η^2	
体格測定							
身長 (cm)	162.7±6.0 *	158.2±6.5 †	148.2±3.8	24.53	< 0.01	0.42	大
体重 (kg)	49.2±6.3 *	45.2±5.7 †	39.2±4.6	17.16	< 0.01	0.33	大
体脂肪率 (%)	14.3±3.5	13.1±2.6	11.3±3.5	2.78	—	0.08	中
大腿周径 (cm)	38.1±2.6 *	38.1±2.4 †	35.0±1.7	8.11	< 0.01	0.19	大
下腿周径 (cm)	33.5±1.6 *	33.0±1.8 †	30.2±1.2	17.67	< 0.01	0.34	大
柔軟性 (cm)	3.8±4.1	5.9±6.1	4.1±3.1	1.12	—	0.03	小
運動能力測定							
10mスプリント (秒)	2.02±0.08	1.97±0.12	2.05±0.06	3.15	—	0.08	中
50mスプリント (秒)	7.58±0.34 *	7.59±0.36 †	7.99±0.34	7.79	< 0.01	0.18	大
10×5 シャトルラン (秒)	12.32±0.42	12.26±0.50	12.65±0.39	4.27	—	0.11	中
クランクテスト (秒)	4.22±0.17	4.19±0.14	4.29±0.15	1.76	—	0.05	小
5ステップバウンディング (m)	9.98±0.48 *	10.09±0.60 †	9.37±0.40	10.96	< 0.01	0.24	大
YYIR2 (m)	320±117	347±89	271±107	2.62	—	0.07	中
クーパー走 (m)	2918±192	2985±132	2906±174	1.23	—	0.03	小

* 早熟群と晩熟群の間に有意差が認められた : p < 0.05

† 平均群と晩熟群の間に有意差が認められた : p < 0.05

各体格測定項目と各運動能力測定項目との相関関係を表 3 に示した。身長は 50m スプリント、5 ステップバウンディングの測定値との間に有意な相関関係を示した（それぞれ $r = -0.564$ 、 $p < 0.001$ / $r = 0.627$ 、 $p < 0.001$ ）。大腿周径囲、下腿周径囲は 5 ステップバウンディングの測定値との間に有意な相関関係を示した（それぞれ $r = 0.547$ 、 $p = 0.001$ / $r = 0.604$ 、 $p < 0.001$ ）。

表 3：体格と運動能力の測定項目間の相関係数 (r)

	10m	50m	10×5S	クランク	バウンディング	Yo-Yo IR2	クーパー
身長	-0.368	-0.564 *	-0.360	-0.262	0.627 *	0.120	0.016
体重	-0.309	-0.444	-0.380	-0.275	0.499	0.195	0.015
体脂肪率	0.097	-0.044	-0.050	0.006	0.095	0.124	-0.055
大腿周径囲	-0.298	-0.361	-0.323	-0.182	0.547 *	0.195	-0.013
下腿周径囲	-0.354	-0.453	-0.406	-0.270	0.604 *	0.115	-0.062
柔軟性	-0.050	-0.071	0.020	-0.131	0.341	0.033	0.280

* $p < 0.05$

考察

本研究は、生物学的成熟度の評価法として最も精度が高い骨年齢 (TW3 RUS SA) を用いて、U-13 成長期エリートサッカー選手 49 名を対象に、生物学的成熟度が選手の体格と運動能力に、どのような影響を及ぼしているのかを明らかにすることを目的とした。主要な結果として、生物学的に晩熟な選手は、早熟あるいは平均的な選手よりも体格測定値 (身長、体重、周径囲) が有意に小さく、運動能力測定値でも 50m スプリントタイムは有意に遅く、5 ステップバウンディングの測定値は有意に小さいことが明らかになった。さらに、身長は 50m スプリントタイムと有意に高い負の相関を示し、身長、周径囲 (大腿 / 下腿) と 5 ステップバウンディングの測定値は有意に高い正の相関を示した。

生物学的に早熟な選手は、晩熟な選手よりも有意に身長が高く、体重が重いことが明らかになった。生物学的に早熟な小児の方が、晩熟な小児よりも身長が高いことは先行研究から報告されている [8][19]。また、身長、体重に関しては生物学的に早熟な小児は、平均的あるいは晩熟な小児よりも身長が高く、体重は絶対値でも、身長当たりの相対的体重値でも重い

ことも明らかにされている[19]。本研究によって示された身長、体重の群間差は、これまでの先行研究を支持している。

本研究では、周径囲（大腿 / 下腿）においても生物学的に早熟あるいは平均的な選手の方が、晩熟な選手よりも有意に大きい値を示した。Tanner らはイギリス人男児を対象とした調査において、下腿筋厚は 12・13 歳時に年間約 3.0・4.0mm、脛骨幅は年間約 1.4mm の最大成長を示したことを報告している[19]。したがって、12・13 歳の早熟な小児は、晩熟な小児よりも進んで筋厚や骨幅が増大したため、本研究において大きい周径囲を示したと推測できる。

また、生物学的に早熟あるいは平均的な選手は、晩熟な選手よりも有意に 50m スプリントタイムが速く、5 ステップバウンディングの測定値が大きいという結果を示した。これらの結果について議論するためには、体格の影響を慎重に考慮しなければならない。すなわち身長、体重、周径囲で成熟による群間差を有していたことが、運動能力（50m スプリント、5 ステップバウンディング）に影響を及ぼしていたことを検討する必要がある。スプリント能力（50m スプリント）とジャンプ能力（5 ステップバウンディング）は身長、体重、周径囲といった体格特性と有意に高い相関関係を示している（表 3）。

形態の発育と運動能力の発達という観点から考えると、思春期におけるストライド長の増大はスピードにおける群間差を説明する要因であると考えられる。加藤らは 12・15 歳のジュニアスプリンターを対象に、縦断的に 100m スプリントタイムとピッチ、ストライド、ピッチ / 身長、ストライド / 身長の関係を調査した。この報告によると、12・14 歳までのジュニアスプリンターのスプリントタイムは、ピッチよりもストライドの増大によるものであったことが明らかにされている[72]。これは、本研究において 50m スプリントタイムが身長と有意な負の相関関係を示していたことと一致している（表 3）。ジャンプ能力が身長と高い正の相関関係を示すことも先行研究で報告されている。Sharma らによると、国内トップレベルのホッケー選手とサイクリング選手を対象に、体格特性が垂直跳びに及ぼす

影響を調査したところ、男性では身長と垂直跳びの測定値が最も高い正の相関関係 ($r = 0.739$, $p < 0.001$) を示したことを報告している[73]。以上のことから、身長が大きいことは 50m スプリントが速く、跳躍距離が長いことに影響を及ぼしている可能性がある。

身長と運動能力の関係に加えて、早熟な選手が晩熟な選手よりも有意に大きい周径囲を示したことも、ジャンプ能力の群間差に影響を及ぼしていた可能性が考えられる。筋横断面積と筋力[74][75]、または筋パワー[76]の間には正の相関関係があり、筋力の改善は筋肥大に関連していることが報告されている[77]。5 ステップバウンディングは周径囲(大腿 / 下腿)と有意に高い正の相関関係があることが本研究でも明らかにされている(表 3)。

一方で 10m スプリント、アジリティ、持久力などの運動能力において、成熟による群間差は認められなかった。さらに、これらの運動能力の測定値は、体格の測定値との相関が低いことが示されている ($r < 0.5$) (表 3)。アジリティ能力が成熟度に依存していないことは、アジリティを決定するための重要な因子のひとつが”知覚と判断”であることに起因することが推察される[78]。Mathisen と Pettersen も、13-16 歳のサッカー選手の身長とアジリティ能力の相関係数 ($r = 0.28$) は、身長とスプリント能力の相関係数 ($r > 0.50$) ほど大きくないことを報告している[79]。また、本研究において持久力が成熟度に依存していないことが示された。Roescher らの報告から、身長などの体格特性よりも、CA とトレーニング経験が間欠的持久力の向上に寄与していることが示唆されている[80]。以上のことから 10m スプリント、アジリティ、持久力は身長や筋力といった体格特性ではなく、テクニク[78]、神経系[79]、トレーニング経験[80]の影響を大きく受ける可能性が考えられる。

本研究にはいくつかの限界がある。まず、ジャンプ能力とスプリント能力は成熟度に依存していることが明らかになったが、この研究では相関関係しか示せなかったため、どの体格因子が運動能力に影響を与えたかという因果関係を示すことができなかった。この点を明らかにするために、例えば身長変化を継続的に追いつき、それに伴う運動能力の変化を評価するような縦断的研究が必要である。本研究で用いたような侵襲性が伴うレントゲン撮影によ

る評価は縦断的に調査することが困難であり、スポーツ現場では簡易的に評価できる成熟度指標が望ましい。また、早熟な選手のスプリント能力とジャンプ能力が優れていたことは、身長や筋力といった体格要因に加え、神経系や技術、トレーニング経験といった要因が複合的に影響を与えていた可能性があるが、本研究でそのことを明らかにすることはできなかった。

結論

本研究から、成長期エリートサッカー選手で生物学的に晩熟な選手は、早熟あるいは平均的な選手よりも体格（身長、体重、周径囲）の測定値が有意に小さく、運動能力では 50m スプリントタイムが有意に遅く、5 ステップバウンディングの測定値は有意に小さいことが示された。スプリント能力、ジャンプ能力といった運動能力の群間差には成熟度に加えて、それぞれ身長と周径囲が影響を及ぼしていることが示唆された。今後は、現場で簡易的に使用できる成熟度指標を用いて、縦断的に体格と運動能力の変化を調査する必要がある。

第3章

研究2

成長期サッカー選手の PHA 時期の体格変化と運動能力変化

緒言

身長最大の成長速度を示す Age at Peak Height Velocity (以下: PHA) の日本人男児の平均値は 13.0 歳前後を示す報告が多く [9][10]、ジュニアユース年代 (中学生) は大きな体格変化を迎える時期である。加えて PHA 時にバランス、アジリティ、上肢筋力、爆発的筋力発揮、持久力といった運動能力の変化率のピークが訪れることも報告されている [37]。このように、中学生年代の身長増加と一般的な運動能力向上のタイミングはほぼ同時であることが認められている。しかし、成長期エリートサッカー選手を対象とし、90°の方向転換動作やスピード持久力などの競技特性を取り入れた測定項目に対して、PHA 時期が与える影響を検討した調査はない。

PHA を成熟度の指標とすることのメリットは簡便性である。まず、PHA 推定に必要な情報は“身長”という最も簡便な体格測定項目である。そのため、選手の体格と運動能力の縦断的評価が可能である。横断的研究では個人間の体格と運動能力の関係性を比較検討することしかできず、個人内の発育発達変化の連続性を明らかにすることはできない。そのため、体格の変動が各運動能力にどのような影響を与えているのかをより詳細に明らかにするためには、個人内変化を検討する縦断もしくは混合縦断的な調査が不可欠である。

本研究は、成熟度の指標として現場でも実用可能な成熟度指標である PHA を用いて、成長期エリートサッカー選手を対象に、PHA 時期の選手の体格変化と運動能力変化が、どのようなタイミングで生じるのかを混合縦断的に検討した。身長変化が大きい時期に大きな体格変化と運動能力の向上が生じるため [37]、本研究の仮説は PHA 前後 1 年以内の選手はそれ以外の時期の選手より身長、体重、周径囲などの体格因子が大きな変化量を示し、スプ

リント能力とジャンプ能力もそれに伴い大きな変化量を示すと設定した。

方法

問題解決へのアプローチ

すべての被験者の PHA の評価は、チームによるスクリーニングプログラムの一環として実施された。チームのトレーニングプログラムの一環として体格測定と運動能力測定を実施した。調査期間全体（2年間）の測定を標準化するために、体格測定と運動能力測定は毎年2月1週目の土曜日と、毎年8月の1週目の土曜日同時刻に、同じ順序で、同じ機材を用いて実施した。体格と運動能力の縦断的变化を調査するために、プレ測定とポスト測定の変化量（以下： Δ ）を分析に用いた（図12）。研究期間全体にわたるすべての測定は、同一の測定者の指示に従って行われた。

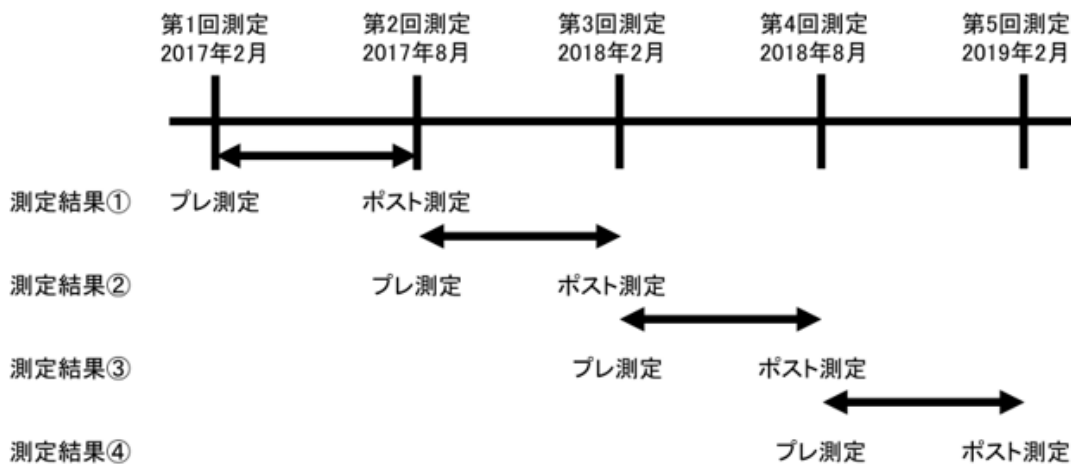


図 12：測定時期

被験者

国内プロリーグである J リーグアカデミークラブに、2017 年から 2019 年までの期間所属していた U-10 から U-15 までの 6 カテゴリーに所属する男子サッカー選手を対象とした。所属クラブは同年齢カテゴリーでは国内トップレベルである関東 1 部リーグに所属している。包括基準は、現病歴が無く、通常の競技活動が行えている者とした。除外基準とし

て、ポジション特性を考慮してゴールキーパーである者、外国籍を有する者、2週間以内に傷害や病気のために測定を正しく実施できなかった者、プレ測定時の CA が PHA から±2年以上離れている者は研究から除外した。何らかの理由で被験者が研究実施期間中にドロップアウトした場合、そのデータは破棄した。

研究は2年間かけて混合縦断的に調査を実施した。まず、2017年度に138名（U-15:35名、U-14:37名、U-13:34名、U-12:12名、U-11:12名、U-10:8名）、2018年度に160名（U-15:37名、U-14:35名、U-13:35名、U-12:23名、U-11:19名、U-10:11名）、2019年に52名（U-15:13名、U-14:18名、U-13:9名、U-12:12名）を対象に測定を実施した。その中から、包括基準を満たし、除外基準を満たさない被験者137名を調査対象とした。混合縦断調査であるため、繰り返し測定を実施した被験者も含まれており、延べ289名分のデータ（平均年齢 13.24 ± 0.91 歳[年齢範囲 9.91 歳～14.85 歳]）を解析に用いた。

全被験者および、その法的保護者からインフォームドコンセントを受け、同意書への記入を得た。本研究はヘルシンキ宣言の趣旨に則り、早稲田大学「人を対象とする研究に関する倫理審査委員会」の承認を得て実施した（承認番号：2017-208）。

プロトコル

体格測定として身長、体重、周径囲（大腿 / 下腿）を運動能力測定の前に測定した。すべての体格測定は、午前8時に行われた。身長、体重は1回測定した。大腿、下腿の周径囲は2回測定した。体格測定と運動能力測定の手順、順番、方法は研究1に準じて行った。

PHAによる群分け

本研究では学校で毎年実施される”健康診断結果”あるいは”成長の記録”を基に、毎年4月に測定されている小学1年生から小学6年生までの身長発育の記録を調査し(図13)、Auxal

3.0 (Scientific Software International, Skokie, USA) を用いて BTT 法で全被験者の PHA を推定した。PHA を基準として、プレ測定時に $-2.0 \text{ 歳} < CA - PHA < -1.0 \text{ 歳}$ に該当していた被験者は A 群、 $-1.0 \text{ 歳} < CA - PHA < 0 \text{ 歳}$ に該当していた被験者は B 群、 $0 \text{ 歳} < CA - PHA < 1.0 \text{ 歳}$ に該当していた被験者は C 群、 $1.0 \text{ 歳} < CA - PHA < 2.0 \text{ 歳}$ に該当していた被験者は D 群の 4 群に分類した。各群の人数は、A 群が 52 名、B 群が 89 名、C 群が 89 名、D 群が 59 名であった (表 4)。また、被験者と測定者には、被験者がどの群に属しているのかが通知されておらず、すべての測定は二重盲検下で実施された。

身体調査票

氏名 _____ 記載日 2018年 月 日

生年月日 年 月 日 性別 男・女 (いずれかに○)

※測定日は日にちまで、出来るだけ正確な記入をお願い致します

現在の身長 _____ cm	測定日	年 月 日
(※現在の身長は X 線撮影時にあわせて計測しますので、記入しなくて結構です。)		
小学1年時の身長 _____ cm	測定日	年 月 日
2年時の身長 _____ cm	測定日	年 月 日
3年時の身長 _____ cm	測定日	年 月 日
4年時の身長 _____ cm	測定日	年 月 日
5年時の身長 _____ cm	測定日	年 月 日
6年時の身長 _____ cm	測定日	年 月 日
中学1年時の身長 _____ cm	測定日	年 月 日

(小学校の健康手帳から写してください)

お父さんの身長 _____ cm	(才)
お母さんの身長 _____ cm	(才)
お兄さんの身長 _____ cm	(才)
お姉さんの身長 _____ cm	(才)
弟さんの身長 _____ cm	(才)
妹さんの身長 _____ cm	(才)

家族のスポーツ歴

※上記の項目はいずれも記入漏れのないよう、また出来るだけ正確な記入をお願い致します。

図 13 : 身体調査票

表 4：被験者の群分け（PHA）

	被験者数 n	暦年齢(CA) (歳)	最大成長速度年齢(PHA) (歳)
A群	52	12.0±0.7	13.6±0.6
B群	89	13.0±0.6	13.6±0.5
C群	89	13.7±0.6	13.2±0.6
D群	59	14.0±0.6	12.5±0.6
計	289		

統計処理

測定結果は平均値±標準偏差（SD）で表示した。体格測定項目（身長、体重、周径囲）と運動能力測定項目（10m / 50m スプリント、10×5S、クランクテスト、5 ステップバウンディング、Yo-Yo IR2、クーパー走）について、Kolmogorov-Smirnov 検定と Levene 検定を用いて、正規性と等分散性を検討した。正規分布かつ等分散しているデータに関しては A 群、B 群、C 群、D 群間の各測定項目の△の差異を、一元配置分散分析 (One-way ANOVA) を用いて分析した。どの群間に有意差が認められているのかを決定するために、Tukey の事後検定を実行した。効果量の大きさ (η^2) は Cohen's d を用いて 0.01、0.06、0.14 をそれぞれ小、中、大の効果と示した[70]。また、運動能力に対する体格特性の相対的な寄与率を推定するために、一元配置分散分析にて群間の有意差が認められた運動能力測定項目の△を従属変数、身長、体重、大腿周径囲、下腿周径囲の△を独立変数としてステップワイズ法による重回帰分析を行った。統計学的有意水準はすべて危険率 5%未満とした。全ての統計分析は SPSS ソフトウェア Version24 (IBM, New York, USA) を用いた。

結果

体格測定項目では、身長は A 群が C、D 群よりも、B 群が C、D 群よりも、C 群が D 群よりも有意に△が大きく ($p < 0.01$: ES = 0.34)、体重は D 群が他の 3 群よりも有意に△が小さいことが示された ($p < 0.01$: ES = 0.08) (図 14、表 5)。大腿周径囲は D 群が A 群よりも有意に△が大きいことが示された ($p = 0.02$: ES = 0.03) (図 15、表 5)。その他の体

格測定項目について群間で有意差は認められなかった（図 15）。

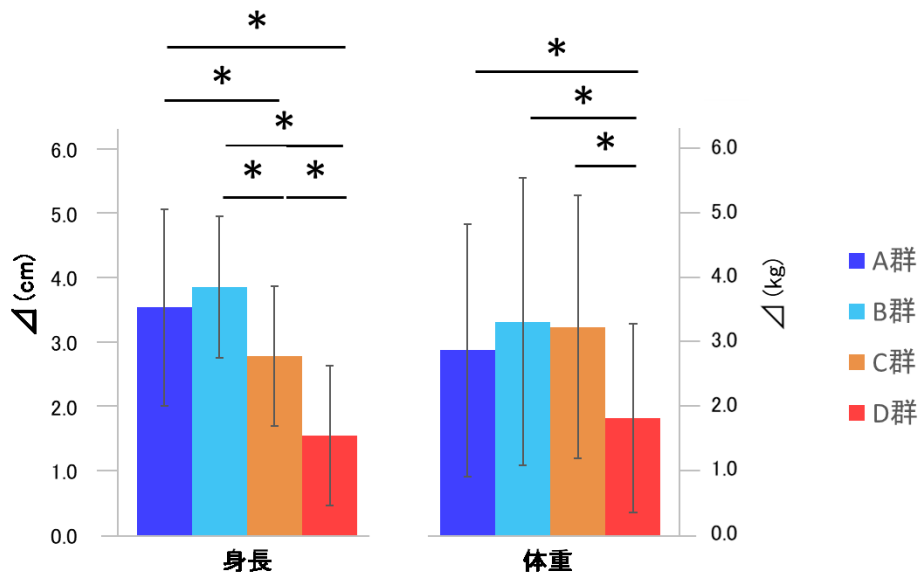


図 14：身長、体重の群別比較 (* : $p < 0.05$)

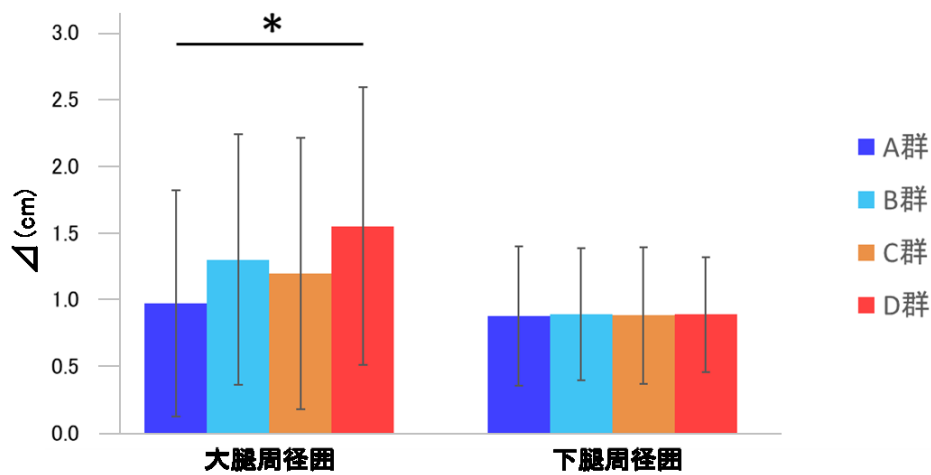


図 15：周径の群別比較 (* : $p < 0.05$)

運動能力では 50m スプリントは、B 群が D 群よりも有意にタイムが向上していることが示された ($p = 0.01$: $ES = 0.04$) (図 16、表 5)。5 ステップバウンディングは、D 群が A 群よりも有意に跳躍距離が向上していることが示された ($p = 0.04$: $ES = 0.03$) (図

17、表 5)。10m スプリント、アジリティ能力、持久力測定項目については、群間で有意差は認められなかった (図 16、図 18)。

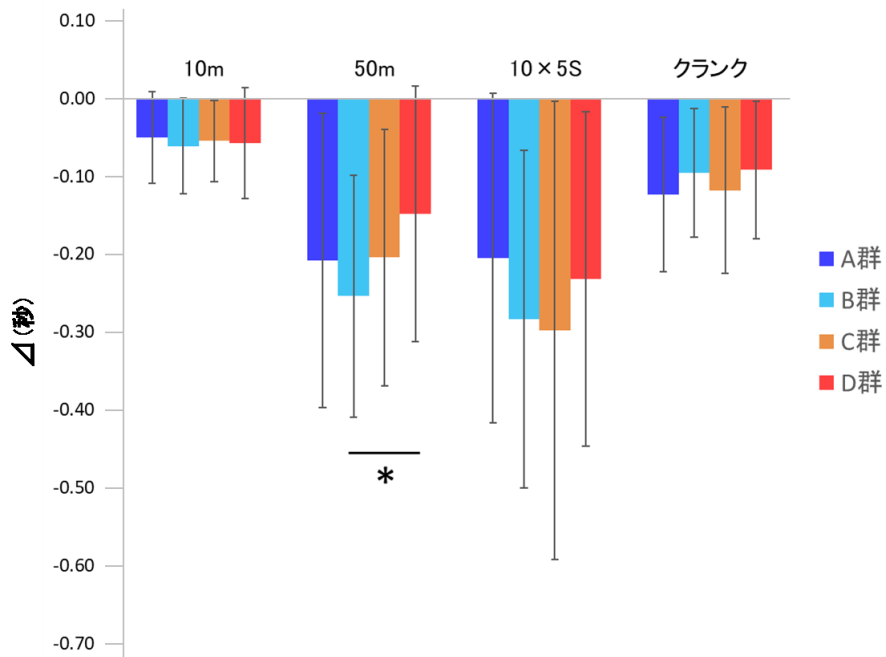


図 16 : スピード、アジリティ能力の群別比較 (* : $p < 0.05$)

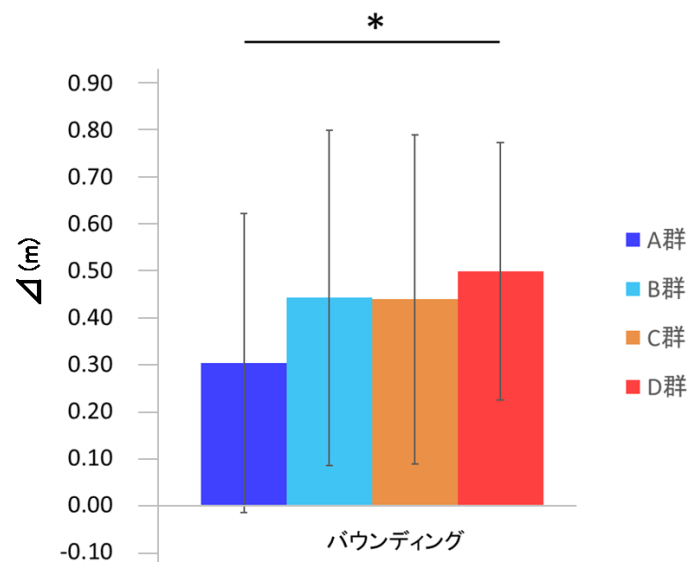


図 17 : ジャンプ能力の群別比較 (* : $p < 0.05$)

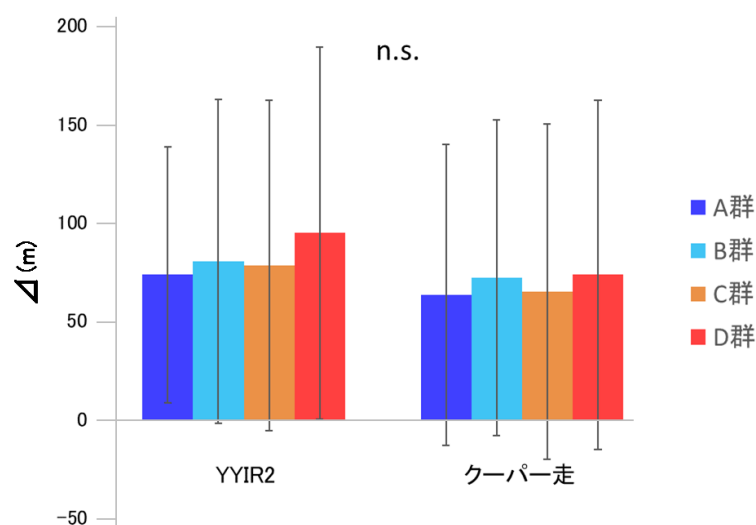


図 18 : 持久力の群別比較

表 5 : 各測定項目の効果量

	A群 (n = 52)	B群 (n = 89)	C群 (n = 89)	D群 (n = 59)	F	p	効果量 η^2	
体格測定項目								
身長 Δ (cm)	3.6 \pm 1.5 †*	3.9 \pm 1.1 †	2.8 \pm 1.1 †*	1.6 \pm 1.1 ††§	49.82	< 0.05	0.34	大
体重 Δ (kg)	2.9 \pm 2.0 †	3.3 \pm 2.2 †	3.3 \pm 2.0 §	1.9 \pm 1.5 ††§	7.93	< 0.05	0.08	中
大腿周径 Δ (cm)	1.0 \pm 0.8 †	1.3 \pm 0.9	1.2 \pm 1.0	1.6 \pm 1.0 †	3.37	< 0.05	0.03	小
下腿周径 Δ (cm)	0.9 \pm 0.5	0.9 \pm 0.5	0.9 \pm 0.5	0.9 \pm 0.4	0.02	—	0.00	—
運動能力測定項目								
10mスプリント Δ (秒)	-0.05 \pm 0.06	-0.06 \pm 0.06	-0.05 \pm 0.05	-0.06 \pm 0.07	0.42	—	0.01	—
50mスプリント Δ (秒)	-0.21 \pm 0.19	-0.25 \pm 0.15 †	-0.20 \pm 0.16	-0.15 \pm 0.16 †	4.11	< 0.05	0.04	小
10 \times 5 S Δ (秒)	-0.20 \pm 0.21	-0.28 \pm 0.22	-0.30 \pm 0.29	-0.23 \pm 0.21	2.18	—	0.02	小
クランクテスト Δ (秒)	-0.12 \pm 0.10	-0.10 \pm 0.08	-0.12 \pm 0.11	-0.09 \pm 0.09	1.78	—	0.02	小
5ステップバウンディング Δ (m)	0.30 \pm 0.32 †	0.44 \pm 0.36	0.44 \pm 0.35	0.50 \pm 0.28 †	2.84	< 0.05	0.03	小
YYIR2 Δ (m)	74 \pm 65	80 \pm 82	78 \pm 84	95 \pm 95	0.71	—	0.01	—
クーパー走 Δ (m)	64 \pm 76	72 \pm 80	65 \pm 85	74 \pm 89	0.25	—	0.00	—

† : A群とD群で有意差が認められた : $p < 0.05$
 ‡ : B群とD群で有意差が認められた : $p < 0.05$
 § : C群とD群で有意差が認められた : $p < 0.05$
 * : A群とC群で有意差が認められた : $p < 0.05$
 || : B群とC群で有意差が認められた : $p < 0.05$

ステップワイズ法を用いた重回帰分析では、50m スプリントに関係する体格測定項目として身長 Δ の1項目 ($p < 0.01$)、5 ステップバウンディングに関係する体格測定項目として大腿周径 Δ の1項目 ($p < 0.01$) の標準偏回帰係数 (β) に有意性が認められた (表 6)。重回帰分析から作成される重回帰式は 50m スプリント = - 0.027 \times 身長 - 0.124 ($R^2 = 0.054$, $p < 0.01$)、5 ステップバウンディング = 0.067 \times 大腿周径 Δ + 0.344 ($R^2 = 0.040$, $p < 0.01$)であった。

表 6 : 重回帰分析結果

従属変数: 50mスプリント ($R^2 = 0.054$)					
	偏回帰係数	標準偏回帰係数		共線性の統計量	
	B	β	p	許容度	VIF
ステップ1					
定数	-0.124		0.000		
身長	-0.027	-0.233	0.000	1.000	1.000

R^2 = 自由度調整済決定係数

従属変数: 5ステップバウンディング ($R^2 = 0.040$)					
	偏回帰係数	標準偏回帰係数		共線性の統計量	
	B	β	p	許容度	VIF
ステップ1					
定数	0.344		0.000		
大腿周径囲	0.067	0.200	0.001	1.000	1.000

R^2 = 自由度調整済決定係数

考察

本研究は、スポーツ現場でも簡易的に行うことができる PHA を成熟度指標として用いて、成長期エリートサッカー選手 289 名分のデータを用いて、PHA を基準に運動能力がどのように向上していくのかを明らかにすることを目的とした。主要な結果は表 7 に示す。一元配置分散分析の結果から、身長の Δ は PHA 前 (A、B 群) が、PHA 後 (C、D 群) よりも大きく、PHA 後でも PHA から 1 年以内 (C 群) に大きく増加する傾向が得られた。体重の Δ は PHA から 1 年～2 年後の時期 (D 群) が他の時期 (A、B、C 群) よりも小さかった。大腿周径囲の Δ は PHA から 1 年以上経過した時期の方が (D 群) が PHA より 1 年以上前の時期 (A 群) よりも増大していた。50m スプリントタイムは PHA 直前の時期 (B 群) に PHA から 1 年以上経過した時期 (D 群) よりも向上していた。5 ステップバウンディングは PHA から 1 年以上経過した時期 (D 群) に PHA から 1 年以上前の時期 (A 群) よりも跳躍距離が増加していた。また、重回帰分析の結果から、50m スプリントタイムの向上には身長の増加が、5 ステップバウンディングの跳躍距離の向上には大腿周径囲の増大がそれぞれ寄与していることが示された。

表 7：主要な結果

測定項目(△)	△の群間比較	p
身長 (cm)	A, B 群 > C 群 > D 群	< 0.05
体重 (kg)	A, B, C 群 > D群	< 0.05
50mスプリント(秒)	B 群 > D 群	< 0.05
50mスプリントタイムの向上に身長増加は有意な影響を与えている (p < 0.01)		
測定項目(△)	△の群間比較	p
大腿周径圍 (cm)	D 群 > A 群	< 0.05
5ステップバウンディング (m)	D 群 > A 群	< 0.05
5ステップバウンディングの向上に大腿周径圍の増大は有意な影響を与えている (p < 0.01)		

身長、体重は PHA を過ぎてから時間が経過するほど、有意に半年間（6 か月）の増加量が小さくなることが明らかになった。この結果は、村田による標準化成長速度曲線の報告と一致している[32]。身長変化については、PHA 直前直後の 2 群（B 群、C 群）がそれ以外の 2 群（A 群、D 群）よりも増加すると仮説を立てていたが、C 群は A 群、B 群よりも有意に身長増加量が小さかった。諏訪らは 439 名の日本人男児（6 歳～18 歳）を対象に毎年の身長測定結果を調査し、PHA の平均は 13.05±0.94 歳であり、身長変化速度は PHA から 2 年前が平均 5.1 cm / 年、1 年前が平均 6.7 cm / 年、PHA 時が 9.9cm / 年、1 年後が 6.3 cm / 年、2 年後が 3.3 cm / 年であったことを報告している[10]。つまり、身長増加量は PHA まで緩やかなカーブとともに身長増加していき、PHA を迎えた後急激に減少していくことになる。本研究において PHA の 2 年前から PHA が訪れるまでの増加量が大きかったことは、この結果を支持している。

大腿周径圍と 5 ステップバウンディングの跳躍距離は、どちらも PHA 後の時期（PHA から 2 年後）の△が大きく、PHA 前の時期（PHA から 2 年前）の△が小さかった。これまで PHA 時期を指標として、体格特性である周径圍の変化を検討した研究はない。本研究で PHA の 2 年後に大腿周径圍の増大とともに 5 ステップバウンディングの向上が示されたことは、成長期サッカー選手の体格変化が運動能力変化と関連する根拠となり、非常に意義深

い。この結果は、研究 1 においてジャンプ能力が優れていた選手の大腿周径囲が大きかった結果も支持している。先行研究においても、筋横断面積の増大が筋力[74][75]、筋パワー[76]の増大と正の相関関係にあることから、成長期のジャンプ能力の向上は、ある程度形態的变化に影響を受けることを示唆するものと考えられる。さらに成長期の筋形態変化は成熟度と強く関連することも先行研究にて報告されている。Fukunaga らは、13.00 - 13.99 歳の日本人小児 210 名を対象に、性成熟度 (PH) を用いて 5 つの成熟度グループを作り、大腿前面筋、下腿後面筋、腹直筋の筋厚を比較検討している[81]。その結果、大腿前面筋、下腿後面筋、腹直筋すべての筋厚の絶対値は、成熟が進むほど有意に大きいことを示しており、下肢筋厚差は成熟度に依存すると考察されている。周径囲の増大は筋組織、骨組織、脂肪組織の成長によって生じるが[19]、今後は特に筋厚など成長期選手の筋形態から運動能力の向上を検討する必要がある。

一方で、ジャンプ能力が向上する時期に関しては、これまで一致した見解が得られていない。筋力、爆発的筋力、筋持久力の向上する時期が PHA の 1 年後とする研究もあれば[82]、筋力と爆発的筋力が最も向上する時期は PHA と同時であるとする研究もある[37]。ジャンプ能力が向上する時期について PHA を基準として知見を得るためには、さらなる調査が必要である。

50m スプリントタイムは PHA 直前の時期 (B 群) の方が、PHA から 1 年～2 年後の時期 (D 群) よりも有意に△が大きかった。これは、最も身長が増加した B 群と最も身長が増加しなかった D 群を示した身長の変動傾向と一致している。50m スプリントが PHA 前に向上することは他の研究でも報告されている[83][84]。本研究の結果で注目すべき点は、身長増加時期とスプリント能力の向上時期が一致していたことである。これは 50m スプリントが速かった選手の身長が大きかった研究 1 の結果を支持している。

縦断的な調査の結果 50m スプリントの向上時期が身長増加時期と、5 ステップバウンディングの向上する時期が大腿周径囲の増大する時期と同時であり、重回帰分析の結果 50m

スプリントタイム△と身長△の、5 ステップバウンディング△と大腿周径△の標準偏回帰係数に有意性が認められたことは（表 6）、”スプリント能力の向上には身長の増加が、5 ステップバウンディングの向上には大腿周径の増大が影響を及ぼす”ことを説明するものと考えられる。しかし、運動能力の向上が”トレーニング要因”によって生じたのか、体格の変化という”成長要因”によって生じたのか、あるいは相互作用によって生じたのかを、本研究から明らかにすることはできなかった。

本研究にはいくつかの限界がある。まず、大腿周径の増大が解剖学的に何を示しているのかを明らかにできなかった点である。5 ステップバウンディングが向上していたことが、筋力の向上に依存しているかどうかは、超音波計や Magnetic Resonance Imaging (MRI) を用いて周径を構成する筋厚・筋横断面積を調査しなければ明らかにすることはできない。次に本研究の重回帰分析から得られた 50m スプリントと 5 ステップバウンディングの決定係数は、それぞれ $R^2 = 0.054$ と $R^2 = 0.040$ であり、予測力としては非常に低いモデルであった点である。決定係数が低かった要因は△を変数として扱っているため、標準誤差が大きかったことであると考えられる。本研究では独立変数が従属変数に与える影響を検討するために重回帰分析を使用しているため、決定係数が低いことは大きな問題ではないが、運動能力の向上を予測するための体格因子を検討していく場合には、本研究よりもさらに体格と運動能力を構成する因子を細分化した上で、個人を縦断的に調査する必要がある。最後に、成長期選手のスプリント能力とジャンプ能力の向上が、トレーニング要因と成長要因のどちらに依存するのかを明らかにすることはできなかった。PHA 時[37]、あるいは PHA 後[82]に筋力が向上するという報告があるが、それはトレーニング刺激によって運動能力が向上しているのか、発育発達や成長による体格変化に伴い向上しているのかは不明である。今後は成長期選手に対するトレーニング介入実験を行い、運動能力の向上がトレーニング要因と成長要因のどちらに依存しているのかを検討していく必要がある。

結論

本研究から、成長期エリートサッカー選手の大腿周径囲と 5 ステップバウンディングの跳躍距離は、どちらも PHA 後の時期 (PHA から 2 年後) の方が、PHA 前の時期 (PHA から 2 年前) よりも有意に変化量が大きいことが明らかにされた。さらに、5 ステップバウンディングの向上には大腿周径囲の増大が影響を及ぼすことが示唆された。身長と 50m スプリントタイムは PHA 直前の時期 (B 群) の方が、PHA から 1 年～2 年後の時期 (D 群) よりも有意に変化量が大きいことが明らかにされた。さらに、50m スプリントタイムの向上には身長の増加が影響を及ぼすことが示唆された。PHA 指標は成熟度指標として最も信頼性が高い骨年齢指標と相関関係がある (身長の前量値と骨成熟は高い相関を示す) ことに加え[9][34]、本研究の結果が研究 1 の結果を支持していることから、現場で成熟度指標として PHA を用いることは、十分に信頼性が担保された方法だと考えられる。

第4章

研究3

成長期サッカー選手へのレジスタンストレーニング介入が 体格と運動能力に与える影響

緒言

これまでの研究から、成長期サッカー選手の運動能力には成熟度の遅速が影響しており、成熟に伴う体格（身長や周径囲）の変化が運動能力（スプリント能力やジャンプ能力）の向上に寄与していることが示された。しかし、運動能力の向上がトレーニング刺激に起因するのか、発育発達や成長による体格変化に起因するのかは明らかにできていない。この点を明らかにするためには、様々な成熟状態にある成長期選手に対するトレーニング効果を検証する必要がある。

成長期選手のトレーニング、特に筋力トレーニングに関する知見は近年増加している。レジスタンストレーニング（以下：RT）の安全性に関する議論は、トレーニング負荷を適切に管理できる指導者のもとであれば、成長期選手は安全にRTを実施できることで一致している[42][43]。RTの効果について、運動能力の発揮に重要な筋力の向上が認められることから[19][38][50][51]、成長期選手のRTは意義があると考えられている。しかし、RTが成長期選手の筋厚などの体格特性に及ぼす影響を検討した先行研究は少なく、さらに成熟度がRTの効果に与える影響について調査した研究はほとんどない。

サッカーはスプリント、方向転換、ジャンプといった動作が必要であるが、これらの運動能力を向上させるためには、特に下肢後面の筋群のトレーニングが重要である[40][41]。下肢後面の筋群、特に大臀筋の強化を目的としたRTのひとつに、バーベルヒップスラスト（以下：BHT）がある。BHTはトレーニング経験の浅い選手でも、安全に実施することができるRTであることが報告されているため[54]、身体が成長・成熟途中である成長期選手

にも BHT は比較的安全に行える RT であると考えられる。

これらの先行研究結果を背景として、本研究は成長期サッカー選手に対して BHT を用いたトレーニング介入を実施して、それにより生じる体格と運動能力の変化がトレーニング要因と成長要因のどちらに依存するのか、もしくは両者に依存しているのかを明らかにすることを目的とした。研究 2 で大腿周径囲と 5 ステップバウンディングの変化量は PHA 後の方が PHA 前より大きかったことから、本研究では RT を行うことで筋厚の増大と挙上重量、スプリント能力、ジャンプ能力の向上が生じ、PHA 後の選手が PHA 前の選手と比較して、その変化量が大きくなるという仮説を設定した。

方法

問題解決へのアプローチ

症例対照研究デザインを使用して、体格測定項目（身長、筋厚）の変化量（以下： Δ ）と運動能力測定項目（3RM BHT、5 ステップバウンディング、10m / 50m スプリント）の Δ に対する 8 週間の BHT トレーニング介入の効果を調査した。各測定項目について、ベースライン測定（1 週目）と、8 週間の BHT トレーニング期間の後に、トレーニング群とコントロール群ともにエンドライン測定を実施した。 Δ はベースライン測定とエンドライン測定の差から算出した。被験者をトレーニング群、コントロール群それぞれの群内で PHA を指標として、さらに Pre PHA と Post PHA に分類した。本研究は、トレーニング要因（トレーニング介入の有無）と成長要因（Pre PHA と Post PHA）の 2 要因から分析を行った。

被験者

国内プロリーグである J リーグアカデミークラブに所属する U-13 男子サッカー選手を対象とした。所属クラブは同年齢カテゴリーでは国内トップレベルである関東 (U-13) 1 部リーグに所属している。包括基準は、現病歴が無く、通常の競技活動が行えている者とした。

除外基準として、ポジション特性を考慮してゴールキーパーである者、外国籍を有する者、2週間以内に傷害や病気のために測定を正しく実施できなかった者は研究から除外した。何らかの理由で被験者が研究実施期間中にドロップアウトした場合、そのデータは破棄した。研究は2年間かけて、2018年度に25名、2019年度に17名の計42名（平均年齢12.82±0.24歳[年齢範囲12.16歳～13.16歳]）を対象に実施した。全被験者はこれまでにRTの経験の有さなかった。

全被験者および、その法的保護者からインフォームドコンセントを受け、同意書への記入を得た。本研究はヘルシンキ宣言の趣旨に則り、早稲田大学「人を対象とする研究に関する倫理審査委員会」の承認を得て実施した（承認番号：2017-208）。

プロトコル

ベースライン、エンドライン測定では、全被験者が体格測定として身長、大臀筋（以下：GM）筋厚、大腿二頭筋（以下：BF）筋厚を測定した後に、運動能力測定として3RM BHT、5ステップバウンディング、スプリントタイム（10m/50m）の測定を行った。エンドライン測定（8週目）では運動能力測定を行ったが、トレーニング群のRTによる筋腫脹の影響を除外するために、最後のRT後1日以上空けてから体格測定を実施した。全被験者は、日ごろから通常の活動レベルを継続するように指示された。

体格測定

全被験者を1名の測定者が測定した。身長は身長計（Seca213、Seca社製、千葉、日本）を用いて0.1cm単位で1回測定した。50Hz周波数を備えた超音波計（SNiBLE、コニカミノルタ社製、東京、日本）を用いて筋厚（GM/BF）の測定を行った。超音波計を用いた筋量評価の妥当性については、これまでも多く示されている[85][86][87][88]。熟練した1人の測定者がGMとBFの筋厚をそれぞれ2回ずつ測定した。左右の最大値の平均を算出し、

分析のために用いた。被験者はベッドの上で、腹臥位（股関節外転 0°、股関節伸展 0°）の状態
で測定された。測定に先立ち、各被験者の GM と BF の筋厚測定点の基準となるランド
マーク位置を触診し、基準点および測定点をマーキングした。測定点についてはベースラ
イン測定でプローブを置いた位置にプローブに沿った長方形を描き、エンドライン測定で
の再現性を高めるためにエンドライン測定日まで繰り返し重ねてマーキングを行い、測定
点が消えないように配慮した。測定点は、GM と BF の筋厚測定として多くの先行研究で用
いられている方法を参考に決定した[89][90][91]。GM は”上後腸骨棘から大転子の間、近位
30%の位置”（図 19）、BF は”坐骨結節から脛骨外側顆の中央（50%）位置”（図 20）にマー
キングした。測定中、被験者の測定点とプローブの正確な位置を維持するように注意を払っ
た。また、正確なデータを得るために水溶性ジェルを用いた。筋厚測定に関する評価者の検
者内信頼性 ICC (3,1) は GM で 0.95、BF で 0.98 であった。

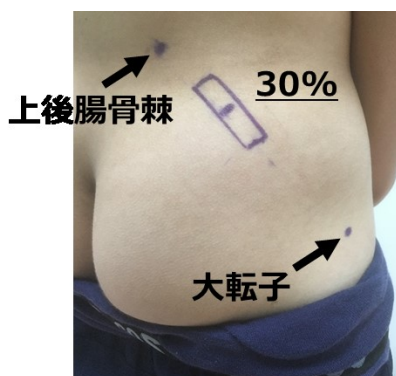


図 19 : GM 測定点

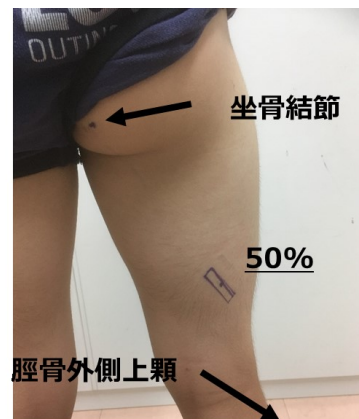


図 20 : BF 測定点

運動能力測定

被験者はこれまで RT の経験がないため、傷害リスクを考慮し 3RM 測定を実施した。ま
た、ベースライン測定の前に 1 ヶ月間かけて軽量のバーを用いて、BHT の方法を習得した。
被験者はまず、10 分間の下肢の動的なストレッチを行った後、3 セットのウォーミン

グアップ（それぞれ体重の 30%×10 回、40%×5 回、50%×5 回の重量）を実施した。3RM BHT 測定は Contreras らが提案したプロトコルガイドラインに従って実施した [53][56][58]。バーベルには厚いバーパッドを巻き、被験者の股関節の上に置いた。被験者の足幅はわずかに肩幅よりも広く、前足部が前方またはわずかに外方を指し、脊柱から大腿部が一直線になるまでバーベルを上昇させた（図 21）。持ち上げのコンセントリック局面は 1 秒間通して最大努力させて、バーベルを地面に戻すエキセントリック局面では 3 秒間かけてバーベルを地面近くまで戻させた。最大挙上時に 1 秒カウントで股関節完全伸展位を保持させた。秒数はタイマーを用いて管理した。各被験者は 5kg ずつ増量しながら、4 回以上繰り返すことができない挙上重量を決定した。3RM の最大負荷が達成されるまで、各試行間に最低 5 分間の休息期間を設けた。



図 21 : 3RM BHT 測定

5 ステップバウンディングと 10m / 50m スプリントの測定手順、方法は研究 1 に準じて行った。

群分け

まず、42名の被験者を無作為にトレーニング群（27名）、コントロール群（15名）に分類した。また、身長発育の記録から、Auxal 3.0（Scientific Software International, Skokie, USA）を用いてBTT法で、全被験者のPHAを推定した。PHAを基準としてベースライン測定時に $-2.0 \text{ 歳} < CA - PHA < 0 \text{ 歳}$ に該当していた被験者をPre PHA、 $2.0 \text{ 歳} > CA - PHA > 0 \text{ 歳}$ に該当していた被験者をPost PHAに分類した。各群の人数は、トレーニング群のPre PHAが13名、Post PHAが14名、コントロール群のPre PHAが7名、Post PHAが8名であった（表8）。被験者と測定者には、被験者がPre PHAとPost PHAのどちらに属しているのかが通知されておらず、すべての測定は二重盲検下で実施された。

表8：被験者の群分け（トレーニング要因と成長要因）

要因1 (トレーニング介入)	要因2 (成長)	被験者数 (n)	暦年齢(CA) (歳)	最大成長速度年齢(PHA) (歳)
トレーニング群	Pre PHA	13	12.9 ± 0.2	13.6 ± 0.4
	Post PHA	14	12.8 ± 0.3	12.3 ± 0.5
コントロール群	Pre PHA	7	12.6 ± 0.3	13.5 ± 0.3
	Post PHA	8	12.9 ± 0.1	12.6 ± 0.3
	計	42		

トレーニング介入

トレーニング群のみに対して8週間のBHTトレーニング介入を実施した。コントロール群は調査期間中BHTを含め、すべてのRTを実施しなかった。各被験者の3RM測定結果から、1RMの75%に対応する10RMを推定した[92]。

10RM（75% 1RM）のBHTを1週間に2回実施した。10回1セットとして、2分間のセット間インターバルを設けながら毎トレーニングセッションで計3セットを行った。被験者には48時間以上RTの間隔を空けるように指示した。すべてのトレーニングセッションは、週内の同じ日、同時刻に行われた。2週間に1度、3RM BHTの再測定を実施し、負

荷が漸進するように配慮した。追加の RT を実施することで、筋力の向上が促進されることが報告されているため[93]、トレーニング群の被験者には BHT 以外の RT は行わないように指示した。3RM 測定と同じ要領（バーベルを動かす速度、適切なフォームでの実施など）で BHT が実施できるように、すべてのトレーニングセッションはチームのストレングス&コンディショニングを担当するフィジカルコーチの監視下で行われた。負荷の漸進状況を分析するために、8 週間のトレーニング記録を保持した。

統計処理

測定結果は平均値±標準偏差（SD）で表示した。体格測定項目（身長、GM 筋厚、BF 筋厚）と運動能力測定項目（3RM BHT、5 ステップバウンディング、10m / 50m スプリントタイム）について、Kolmogorov-Smirnov 検定と Levene 検定を用いて、正規性と等分散性を検討した。正規分布かつ等分散であるデータに関して、それぞれの測定項目の△は、対応のない二元配置分散分析（Two-way ANOVA）を用いて分析した（トレーニング介入の有無（要因 1）、Pre PHA と Post PHA（要因 2））。効果量の大きさは偏 η^2 として示した。また、先行研究に従い筋厚△（GM / BF）と 3RM BHT△に対する CA-PHA を多項式による回帰分析を用いて 2 次曲線で回帰させ、△がピークとなる極大値を算出した[94][95]。同様に、3RM BHT△に対する筋厚△（GM / BF）を、回帰分析を用いて線形回帰させた。これらの項目間の相関係数をピアソンの積率相関係数を用いて算出し、 $r > 0.5$ を強い相関とした[71]。統計学的有意水準はすべて危険率 5%未満とした。全ての統計分析は SPSS ソフトウェア Version24（IBM, New York, USA）を用いた。

結果

体格測定項目では、身長は成長要因にのみ主効果が認められ、Pre PHA が Post PHA よりも有意に増加していた（ $p < 0.01$: ES = 0.33）（図 22、表 10）。

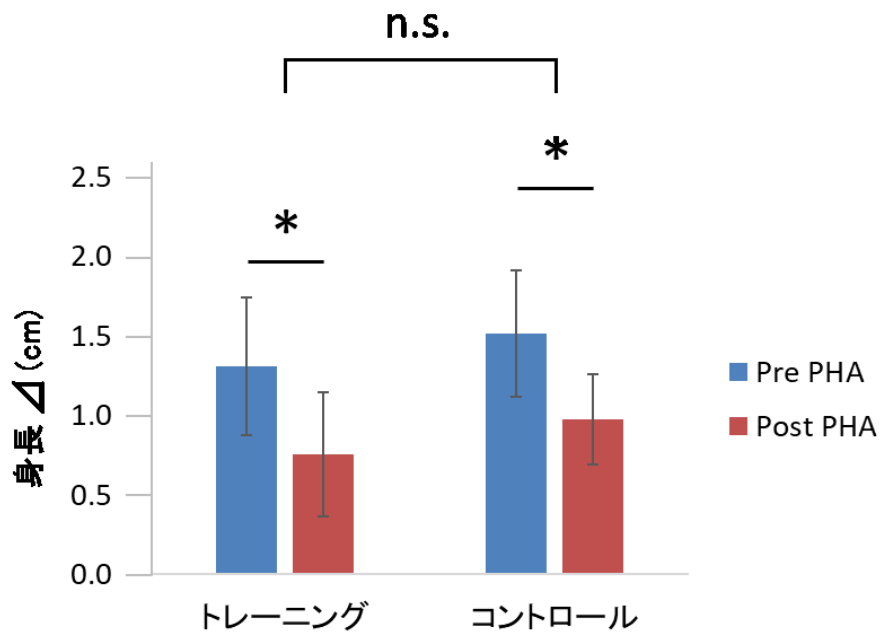


図 22 : 身長Δに対する主効果 (* : $p < 0.05$)

GM 筋厚 ($p < 0.01$: $ES = 0.19$) と BF 筋厚 ($p = 0.04$ 、 $ES = 0.10$) はトレーニング要因にのみ主効果が認められ、トレーニング群がコントロール群よりも有意に増大していた (図 23、表 9)。

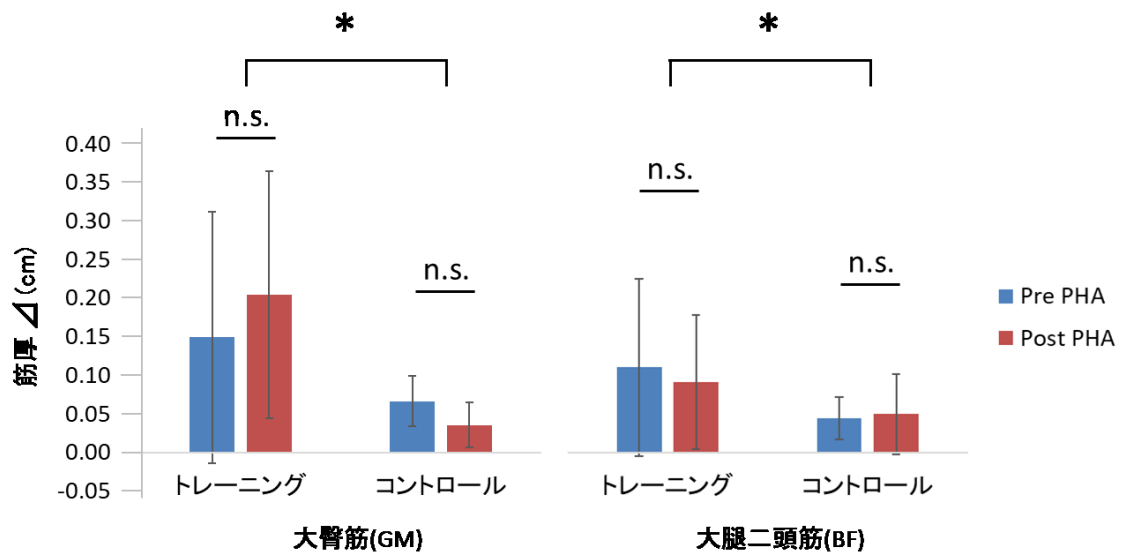


図 23 : 筋厚Δに対する主効果 (* : $p < 0.05$)

運動能力では、3RM BHT はトレーニング要因にのみ主効果が認められ、トレーニング群がコントロール群よりも有意に向上していた ($p < 0.01$: ES = 0.54) (図 24、表 9)。その他の体格測定項目について群間で有意差は認められなかった (図 22-図 26)。

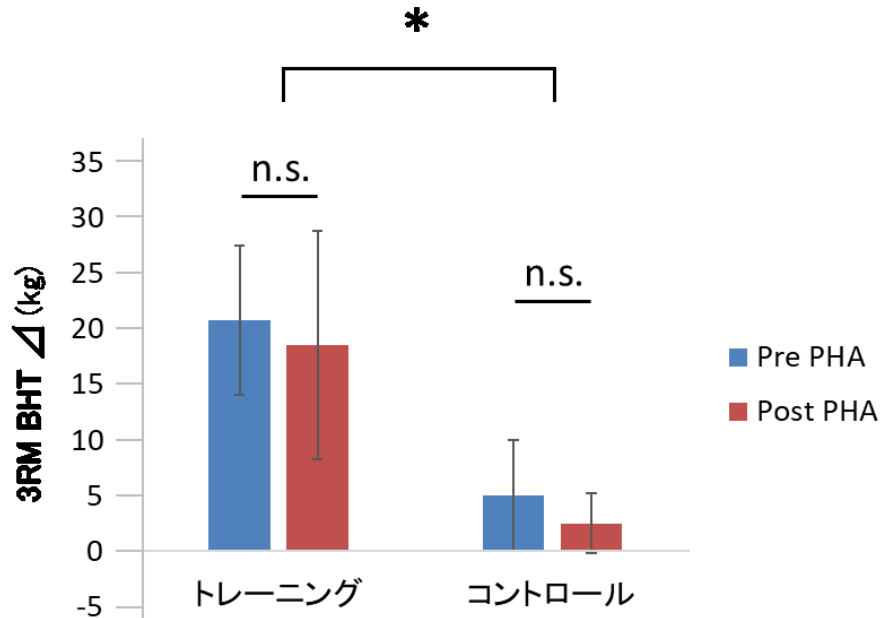


図 24 : 3RM Δ に対する主効果 (* : $p < 0.05$)

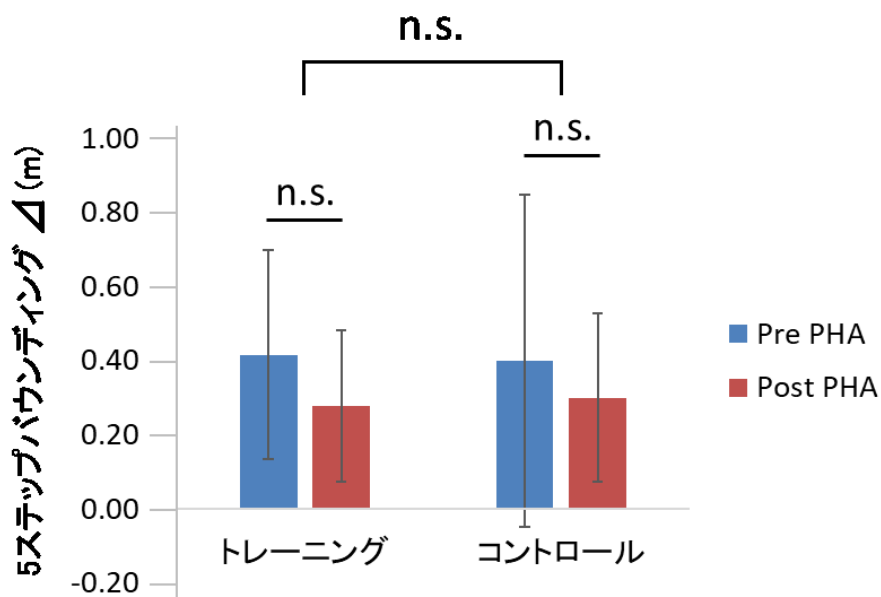


図 25 : 5 ステップバウンディング Δ に対する主効果

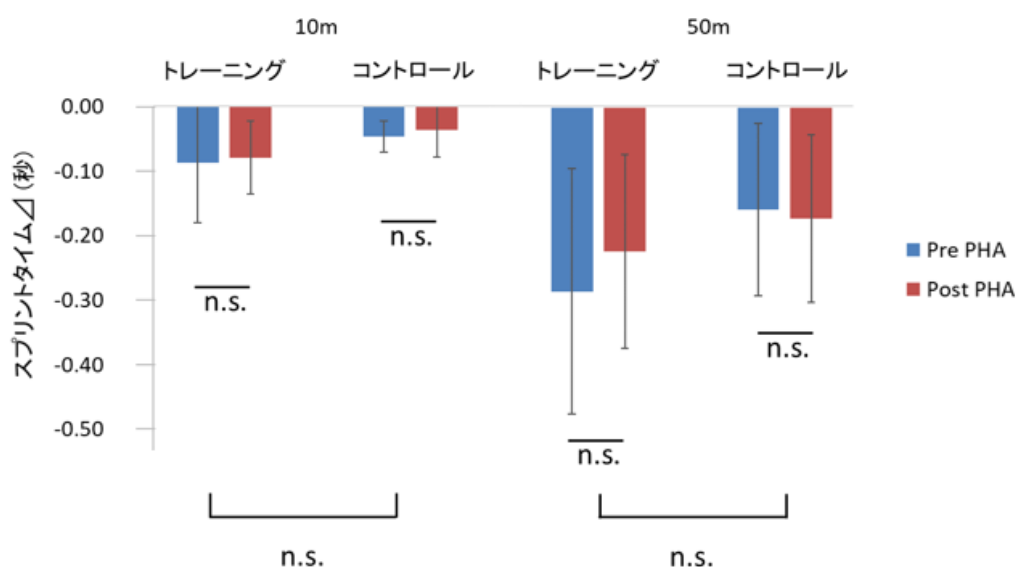


図 26 : スプリントタイム Δ に対する主効果

トレーニング要因 (表 9) と成長要因 (表 10) の間に交互作用は認められなかった。

表 9 : 各測定項目の効果量 (トレーニング要因)

体格測定項目	トレーニング	コントロール	F	p	偏 η^2
身長 Δ (cm)	1.0 \pm 0.5	1.2 \pm 0.4	2.87	—	0.07
GM筋厚 Δ (cm)	0.18 \pm 0.16	0.05 \pm 0.03	8.84	< 0.01	0.19
BF筋厚 Δ (cm)	0.10 \pm 0.10	0.05 \pm 0.04	4.16	0.04	0.10
運動能力測定項目	トレーニング	コントロール	F	p	偏 η^2
3RM BHT Δ (kg)	20 \pm 9	4 \pm 4	43.79	< 0.01	0.54
5ステップバウンディング Δ (m)	0.34 \pm 0.25	0.35 \pm 0.34	0.00	—	0.00
10m スプリント Δ (秒)	-0.08 \pm 0.07	-0.04 \pm 0.03	3.98	—	0.10
50m スプリント Δ (秒)	-0.25 \pm 0.17	-0.16 \pm 0.13	3.03	—	0.07

表 10 : 各測定項目の効果量 (成長要因)

体格測定項目	Pre PHA	Post PHA	F	p	偏 η^2
身長 Δ (cm)	1.4 \pm 0.4	0.8 \pm 0.4	18.94	< 0.01	0.33
GM筋厚 Δ (cm)	0.12 \pm 0.14	0.14 \pm 0.15	0.09	—	0.00
BF筋厚 Δ (cm)	0.09 \pm 0.10	0.08 \pm 0.08	0.06	—	0.00
運動能力測定項目	Pre PHA	Post PHA	F	p	偏 η^2
3RM BHT Δ (kg)	15 \pm 10	13 \pm 11	0.95	—	0.02
5ステップバウンディング Δ (m)	0.41 \pm 0.34	0.29 \pm 0.21	1.67	—	0.04
10m スプリント Δ (秒)	-0.07 \pm 0.08	-0.06 \pm 0.05	0.21	—	0.01
50m スプリント Δ (秒)	-0.24 \pm 0.18	-0.20 \pm 0.14	0.22	—	0.01

筋厚△ (GM / BF) と 3RM BHT△に対する CA-PHA を 2 次曲線で回帰させたところ (図 27)、BF 筋厚△の極大値は-1.72 年を示したが、GM 筋厚△と 3RM BHT△に関しては x^2 の係数がプラスを示したため、極大値を算出できなかった。CA-PHA と GM 筋厚△、BF 筋厚△、3RM BHT△との間に有意な相関関係は認められなかった (それぞれ $r = -0.190$ 、 $p = 0.228$ / $r = 0.104$ 、 $p = 0.514$ / $r = -0.070$ 、 $p = 0.658$)。

3RM BHT△に対する筋厚△ (GM / BF) を線形回帰させたところ (図 28)、3RM BHT△は GM 筋厚△、BF 筋厚△との間に有意な相関関係を示した (それぞれ $r = 0.363$ 、 $p = 0.018$ / $r = 0.332$ 、 $p = 0.032$)。

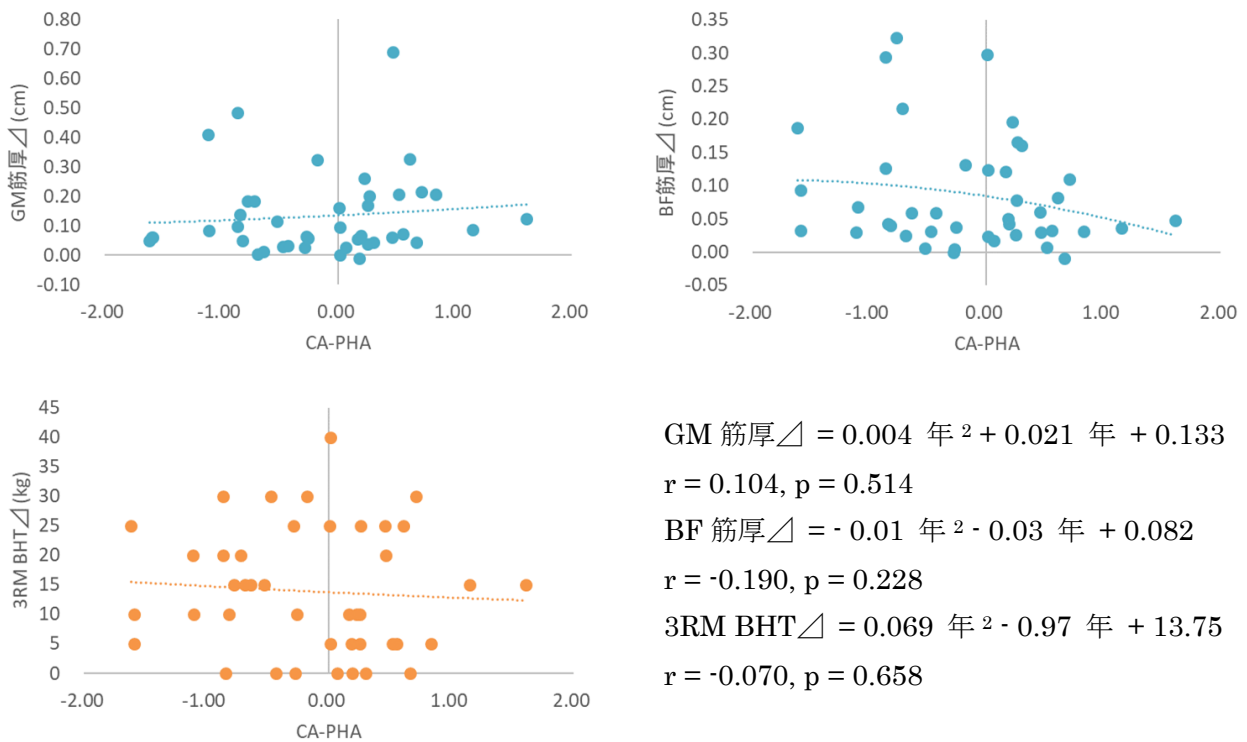


図 27 : CA-PHA と GM 筋厚△、BF 筋厚△、3RM BHT△との関係

$$3\text{RM BHT}\Delta = 28.57 \text{ GM 筋厚}\Delta + 10.11$$

$$r = 0.363, p = 0.018$$

$$3\text{RM BHT}\Delta = 45.52 \text{ BF 筋厚}\Delta + 10.09$$

$$r = 0.332, p = 0.032$$

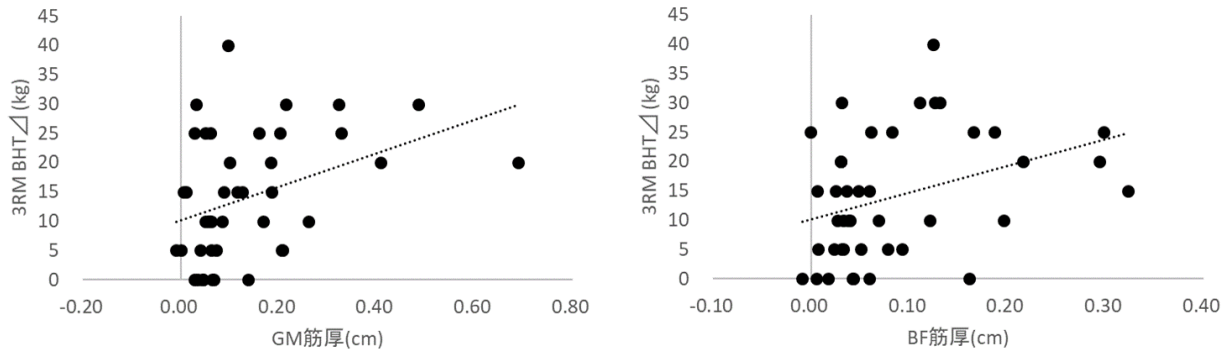


図 28 : 筋厚 Δ (GM / BF) と 3RM BHT Δ との関係

考察

本研究は、U-13 成長期サッカー選手 49 名に対して BHT を用いたトレーニング介入を実施して、それにより生じる体格と運動能力の変化がトレーニング要因と成長要因のどちらに依存するのか、もしくは両者に依存しているのかを明らかにすることを目的とした。主要な結果として、すべての Δ において交互作用は認められず、成長要因による主効果が認められたのは身長 Δ のみで、Pre PHA が Post PHA よりも有意に増加していた。トレーニング要因による主効果が認められたのは筋厚 Δ (GM / BF) と 3RM BHT Δ であり、どちらもトレーニング群がコントロール群よりも有意に増大、向上していた。これらの結果から、成長期サッカー選手に対する 8 週間の BHT を用いた RT は、PHA 時期 (成長要因) に関わらず、トレーニング要因によって筋厚の増大、挙上重量の向上というトレーニング効果が得られることが明らかになった。また、筋厚 Δ と 3RM BHT Δ の間には高くはない ($r < 0.5$) が、有意な相関関係が示された。

まず、8 週間の BHT を用いた RT によって筋厚 (GM / BF) が増大することが明らかになった。筋横断面積の増大は 16 回を超えるワークアウトで生じると報告されており [96]、

本研究においても 8 週間（16 セッション）の RT によって筋厚（GM / BF）が増大したことから、本研究で採用したトレーニングは筋横断面積の増大に十分な刺激であったと考えられる。鳥居らは、全身除脂肪量の増加速度は PHA の 0.734 年後にピークが訪れることを明らかにしており[95]、筋厚は成熟が進んだ小児の方が、成熟が遅れた小児よりも有意に大きい[81]、本研究にあたりトレーニングを実施した Post PHA の方がトレーニングを実施した Pre PHA よりも筋厚が増大すると仮説を設定していた。しかし、本研究において成長要因による主効果は認められず、トレーニング要因との交互作用も認められなかった。また、本研究において PHA を基準として筋厚が増大する時期に差は認められなかったことから（図 27）、少なくとも PHA 前後 2 年間の時期は Post PHA が Pre PHA よりも RT による筋厚の増大というトレーニング効果が得られる訳ではないことが示された。

本研究では、筋厚増大が生じた機序を明らかにすることができなかった。先行研究では、思春期以降の小児に起こる筋横断面積の増大は[97]、タンパク同化ホルモン濃度（テストステロン、成長ホルモン、インスリン様成長因子（IGF-1）など）の増加が要因であることが指摘されている[19]。しかし、ホルモンは特定の受容体にのみ相互作用する（鍵と鍵穴理論）ことが基本原理であり[92]、その受容体はトレーニングにより最大数は増加するが、結合感受性については影響を与えないことも明らかにされている[98]。このように成長期選手に対するホルモン応答に関しては不確定な部分が多いため、今後は成長期選手の RT による筋厚増大の要因を解明するためには、ホルモン応答などの内分泌応答を含めた調査が必要である。

次に、8 週間の BHT を用いた RT によって 3RM BHT、つまり挙上重量が向上することが明らかになった。この結果を議論するためには、まず成長要因が筋力の向上に及ぼす影響を考える必要がある。この研究期間で成長要因（PHA）が影響を及ぼしていた体格特性は、身長増加の 1 点のみである。つまり、身長の増加が筋力向上に影響を及ぼしていた可能性がある。先行研究でも、身長の増加に伴い、モーメントアームが増大することで関節トルク

が増大して、最大筋力の向上が生じることが報告されている[99]。しかし、本研究では Pre PHA が Post PHA よりも有意に身長が増加していたが、3RM BHT の向上について Pre PHA が Post PHA よりも向上するという PHA 要因の主効果は認められなかった。また、トレーニング要因との交互作用も認められなかったことから、身長の増加によるモーメントアームの増大は、挙上重量の向上に影響を及ぼすほど大きなものではなかったと考えられる。また、本研究において PHA を基準として筋力が向上する時期に差は認められなかったことから(図 27)、成長要因が挙上重量の向上に寄与していた可能性は低いと考えられる。以上のことから、筋力の向上に影響を及ぼした他の要因を検討する必要がある。

成長要因以外に 3RM の向上に影響を及ぼした要因について考察すると、まずトレーニング要因で有意な主効果が認められた筋厚の増大に起因して、3RM の向上が生じた可能性がある。筋横断面積と筋力[74][75]の間には正の相関関係があり、筋力の向上は筋肥大に関連していることが報告されており[77]、本研究において 3RM BHT Δ と筋厚 Δ (GM / BF)の間には有意な相関関係が認められたことから(図 28)、筋厚の増大が挙上重量の向上に寄与していた可能性はある。しかし、本研究で生じたトレーニング群とコントロール群の筋厚変化量は、GM で $0.18 \pm 0.16\text{cm}$ と $0.05 \pm 0.03\text{cm}$ (ES = 0.19)、BF で $0.10 \pm 0.10\text{cm}$ と $0.05 \pm 0.04\text{cm}$ (ES = 0.10) と小さく、挙上重量 Δ との相関係数も $r < 0.5$ と高くないことから、本研究の筋厚の増大が筋力の向上に、どの程度の影響を及ぼしていたかは不明である。これまでも、筋厚だけを筋活動量の指標として用いることは妥当ではなく[100]、思春期前または思春期初期の小児は筋横断面積に比例して筋力が発達しないことなどが明らかにされている[101]。つまり、必ずしも筋厚の増大が筋力の向上をすべて説明するわけではないことに注意しなければならない。

次に考えられるのは RT に対する神経系の適応である。神経系の適応とは、運動単位の①動員増加、②発火頻度の増加、③協調化を指す[102]。筋力の増大は、筋肥大と筋力発揮に動員される運動単位の増加という神経系の適応によって生じるが[103]、RT 未経験者や小

児のトレーニング開始直後の筋力の増大は、筋肥大よりも神経系の適応によって発生することが指摘されている[104][105][106]。Hoshikawa らは、U-15-U-18 サッカー選手の間の大腿四頭筋とハムストリングスの筋体積に有意な増大が認められなかったが、速い角速度における膝関節トルクは年齢とともに徐々に増大したことを報告している。この結果はつまり、筋厚の自然発達ではなく、ボールキックやスプリントなどの速い動作に神経適応したことで筋力の向上が生じたことを示唆している[107]。以上のことから、本研究で 8 週間の BHT を用いた RT により 3RM が向上したことは、筋厚の増大と BHT に対する神経系の適応の相互作用に起因したと推測される。今後は挙上重量が向上する要因を明らかにするために、筋厚の増大と神経系の適応の両事象が生じる条件下（長期間の RT 介入など）での調査が必要である。

3RM BHT 以外の運動能力（5 ステップバウンディング、10m/50m スプリント）の変化量にトレーニング、成長要因いずれも影響を及ぼさなかった理由として 2 つの要因が考えられる。まず、本研究のトレーニング介入（8 週間）が、ジャンプ能力やスプリント能力の向上に影響を及ぼすには期間が短かったことが考えられる。長期間の RT 介入で運動能力が向上する根拠として、本研究で筋厚の増大というトレーニング効果が得られたことが挙げられる。8 週間の RT で筋厚が向上したことは、長期間の RT であれば更なる筋厚の増大が得られることを示唆している。筋厚の増大により、筋力が向上することで運動能力が向上する可能性は十分あると考えられる。BHT を用いた短期間のトレーニング介入が運動能力に及ぼす影響については統一した見解がない。例えば Contreras らは 14 歳から 17 歳のアスリートに対して 6 週間の BHT トレーニング介入を実施した結果、10m と 20m スプリントタイムが向上したことを報告している[58]。一方で、Jarvis らは平均年齢 27 歳のアスリートに対して 8 週間の BHT トレーニング介入を実施した結果、40m スプリントのすべての区間（10m、20m、30m、40m）で有意な向上が認められなかったことを報告している[39]。しかし、Sander らは U-19、U-17、U-15 の選手を対象に 2 年間のバックスクワットを含む

RT 介入を行い、フロントスクワットとバックスクワットの 1RM とスプリントタイムが大幅に向上したことを報告している[108]。今後は、筋厚の増大に伴う運動能力の向上を明らかにするためにも、更なる長期的なトレーニング介入調査が必要である。

次に考えられる要因は、RT によって得られた筋力の向上を実際の競技動作へと変換させることができなかったことである。Bangsbo は、サッカーの競技パフォーマンス（スプリント、加速、減速など）に必要なパワー発揮能力を、基礎パワートレーニング（筋量、筋力、パワーの向上を目的とした RT）から、変換パワートレーニング（サッカーに関連した動きを最大に近い状態で発揮する能力の向上を目的としたトレーニング）を通じて向上させる必要があることを提言している[109]。最近では、RT とパワートレーニングを組み合わせることが、成長期選手のスプリント能力やジャンプ能力といった運動能力に対して最も効果的なトレーニングであることも多くの研究で明らかにされている[110][111][112]。筋力トレーニングへの神経適応には、筋の協調性がスポーツスキルへの変換を達成するために重要な要素であり、一般的な RT に加えて、最適な変換のために特異的（収縮速度や運動パターンなど）なエクササイズが必要であることが示唆されている[113]。以上のことから、5 ステップバウンディングと 10m / 50m スプリントを向上させるためには、本研究での BHT を用いた RT のみでは大きな影響が認められず、運動能力を向上させるためには変換トレーニング（例えば、ジャンプ動作へ変換するためのプライオメトリクストレーニングなど）が重要であり、今後の研究が必要であると考えられる。

本研究にはいくつかの限界がある。まず、本研究では筋厚測定の方法として超音波計を用いたが、測定時にトレーニングによる筋腫脹の影響を完全に除外することはできなかった可能性がある。最後のトレーニングセッション後 1 日以上空けてから測定を実施しただけで、測定の信頼性に関するバイアスを除くことができなかったとは言えない。今後は、超音波計を用いた測定での筋腫脹の管理が課題である。次に、8 週間の RT によって筋厚の増大と 3RM BHT の向上が認められたが、3RM BHT が向上することに筋厚の増大がどの程度影響を及

ぼしていたのかを明らかにすることはできなかった。筋力の増大が、筋肥大と筋力発揮に動員される運動単位の増加によって生じることが明らかにされているため[103]、長期的な RT によって筋厚の増大が進めば、3RM BHT の向上に寄与する可能性は十分にあると考えられる。また、長期的な RT によってスプリントやジャンプといった運動能力が向上することも明らかにされており[108]、今後は成長期サッカー選手に対する長期的な RT の効果を検討する研究が必要である。最後に、筋厚の増大と 3RM BHT の向上が 5 ステップバウンディングと 10m / 50m スプリントの向上に対して影響を及ぼさなかった要因を明らかにすることができなかった。BHT は GM や BF といった水平方向（前方方向）への力発揮を行う運動動作に有効なトレーニングである[58][59]。しかし、筋厚が増大し、3RM BHT が向上しただけでは、スプリントやジャンプといった前方方向への運動能力の向上は認められなかった。今後は、RT に加えて変換トレーニングに関する知見を収集し、成長期選手の運動能力の向上に及ぼす影響について検討する必要がある。

結論

本研究では、U-13 成長期エリートサッカー選手に対して 8 週間の BHT トレーニング介入を実施し、そのトレーニング効果がトレーニング要因と成長要因のどちらに依存するかを調査した。その結果、身長は Pre PHA が Post PHA よりも有意に増加しており、筋厚（GM / BF）と 3RM BHT はトレーニング群がコントロール群よりもそれぞれ有意に増大、向上していた。3RM BHT はトレーニング介入により向上したが、この要因が筋厚（GM / BF）の増大によって生じる根拠を示すことはできなかった。本研究の BHT によるトレーニング介入では、PHA 時期に関わらず、挙上重量（3RM）が増大することが明らかになった。このことは、BHT に対する神経系の適応が生じたことが要因であると考えられる。ジャンプ能力（5 ステップバウンディング）とスプリント能力（10m / 50m スプリント）に主効果が認められなかったことは、トレーニング期間が短いことと、変換トレーニングを実施

しなかったことが要因であると考えられる。本研究によって 8 週間の RT を実施することで、成長時期に関わらず、筋厚の増大と挙上重量の向上というトレーニング効果を得られることが明らかになった。

第 5 章

総合考察

本研究は、生物学的成熟度や身長変化、トレーニング介入が成長期エリートサッカー選手の体格と運動能力の変化にどのように寄与しているのかを明らかにすることを目的とした。研究 1 の結果から成長期エリートサッカー選手は骨成熟が進むほど身長、体重、周径囲といった体格因子が大きく、スピード、ジャンプ能力といった運動能力が優れていることが明らかになった。研究 2 の結果から成長期エリートサッカー選手は PHA の 1 年前の時期に身長、体重といった体格因子が増加し、50m スプリントが向上し、PHA から 1 年から 2 年後の時期に大腿周径囲が増大し、5 ステップバウンディングが向上することが明らかになった。このことから PHA 前後で向上する運動能力が異なることが示された。また、50m スプリントの向上には身長の増加が寄与し、5 ステップバウンディングの向上には大腿周径囲の増大が寄与していることが示された。研究 3 では、成長期選手のレジスタンストレーニング効果が獲得される機序を明らかにすることはできなかったが、PHA 前後の成長期選手にとってレジスタンストレーニングは筋厚の増大と挙上重量の向上という意味で有益であることが明らかになった。すべての研究結果から、成長期エリートサッカー選手には成熟の遅速に影響を受ける体格因子と運動能力があり、運動能力の向上するタイミングは PHA 時期によって異なることが明らかになった。また、レジスタンストレーニングによる筋厚増大と筋力向上はトレーニング要因に起因することが明らかになった。

本研究で成熟度指標によって成長期選手の体格と運動能力の特徴を明らかにすることができたことで、成熟度指標をスポーツ現場で用いることが有用であることが示された。このことから、成熟度を用いて指導者、スポーツ現場に提言できることが 3 つある。

まず、成熟の遅速に影響を受ける体格因子と運動能力があることを理解すべき点である。成長期時点の運動能力差は成長に伴い消失することが指摘されていることから[60]、成

熟度を考慮しない体格と運動能力の評価は選手の将来性を見誤る可能性がある。また、同じ暦年齢グループでトレーニングすることで、晩熟な選手には 2 つの傷害発生リスクが考えられる。ひとつは異なる体格、運動能力を有する選手同士の接触による外傷発生と、早熟な選手と同じ強度のトレーニングを実施することによって、晩熟な選手にオーバーロードが生じて発生する障害である。つまり、傷害予防の観点から言えば、早熟な選手はひとつ上のカテゴリ、晩熟な選手はひとつ下のカテゴリで個人内にかかる強度を統一化することが、傷害発生を抑制する方法だと考えられる。

次に、骨年齢を用いた研究 1 の結果を、PHA を用いた研究 2 の結果を指示していたことから、PHA を成熟度指標として用いることの信頼性が担保された点である。PHA はスポーツ現場でも実用性が高い成熟度指標であることから、今後は成長期選手の身長変化を継続的に追うことが、選手の成熟状態を把握する効果的な方法である可能性がある。

最後に PHA 時期に関わらず、筋厚増大と筋力向上というレジスタンストレーニング効果を得られる点である。本研究では PHA の 1 年前の時期からトレーニング効果を得られたことから、傷害発生につながらないような適切な負荷設定と、トレーニングを実施する上での安全性を確保すれば、PHA 前後の成長期選手の筋力トレーニングは筋力向上のために有用であると考えられる。

今後の研究課題は 3 つある。まず、本研究の被験者が成長期エリートサッカー選手であり、一般的な成長期サッカー選手とは異なる発育様式である可能性があるため、一般的な選手に対する知見は改めて検討する必要がある。本研究の U-13 選手の平均身長は研究 1 で $156.8 \pm 7.9\text{cm}$ 、研究 2 で $158.5 \pm 8.0\text{cm}$ 、研究 3 で $159.9 \pm 8.2\text{cm}$ であり、一般的な中学 1 年生サッカー選手の平均身長 $154.8 \pm 7.6\text{cm}$ と比べても大きい[114]。

次に、今後は成長期サッカー選手に対する長期的なトレーニング介入調査の必要性である。研究 3 において 8 週間の BHT トレーニングで筋厚の増大と筋力の向上が生じていたものの、筋力の向上に筋厚の増大がどの程度寄与していたのかを明らかにすることはできな

かった。短期間のトレーニング介入では筋形態の変化も小さく、神経系の適応以外の筋力向上の要因を推定することができなかった。先行研究においても、短期間の BHT トレーニング介入が運動能力の向上に及ぼす影響について統一された見解はない。スポーツ現場において長期間の介入研究を行うことは、年間を通して試合を行うチームにおいて容易ではないが、トレーニング効果が獲得されるまでの機序を明らかにしていくためには、非常に重要であることは間違いない。研究 3 では 2 か月間 (8 週間) の変化量を調査して運動能力の向上が認められなかった一方で、研究 2 では 6 か月間の変化量を調査して 5 ステップバウンディングの大きな向上が示されたことから、最低でも 6 か月間の観察期間を設けることが勧められる。

最後に、研究対象とする成長期選手の年齢幅をより広げる必要がある。本研究ではレジスタンストレーニングによって PHA 前後 1 年間の時期の選手の筋厚が増大し、筋力が向上することが明らかになったが、その機序までを明らかにすることはできなかった。PHA 前後の時期は大きな体格と運動能力の変化が生じる時期であることは間違いないが、全身除脂肪量の増加速度は PHA 後にピークが訪れることを考えると[95]、PHA から 3 年から 4 年経過した選手までを対象にする必要があると考えられる。成長期選手の発育過程、特に運動能力が獲得される機序については、まだまだ明らかにできていない部分が多く、今後も研究を継続して行っていくことが必要である。

参考文献

- 1 Gravina L, Gil SM, Ruiz F, *et al.* Anthropometric and Physiological Differences Between First Team and Reserve Soccer Players Aged 10-14 Years at the Beginning and End of the Season. *J Strength Cond Res* 2008;**22**:1308–14.
- 2 Gil S, Ruiz F, Irazusta A, *et al.* Selection of young soccer players in terms of anthropometric and physiological factors. *J Sports Med Phys Fitness* 2007;**47**:25–32.
- 3 Rosch D, Hodgson R, Peterson L, *et al.* Assessment and Evaluation of Football Performance. *Am J Sports Med* 2000;**28**:29–39.
- 4 Vaeyens R, Malina RM, Janssens M, *et al.* A multidisciplinary selection model for youth soccer: The Ghent Youth Soccer Project. *Br J Sports Med* 2006;**40**:928–34.
- 5 Malina RM, Ribeiro B, Aroso J, *et al.* Characteristics of youth soccer players aged 13-15 years classified by skill level. *Br. J. Sports Med.* 2007;**41**:290–5.
- 6 Costa e Silva L, Fragoso MI, Teles J. Physical Activity–Related Injury Profile in Children and Adolescents According to Their Age, Maturation, and Level of Sports Participation. *Sport Heal A Multidiscip Approach* 2017;**9**:118–25.
- 7 Maffulli N, Caine D. The Epidemiology of Children’s Team Sports Injuries. *Epidemiol Pediatr Sport Inj* 2005;**49**:1–8.
- 8 Malina RM, Peñareyes ME, Eisenmann JC, *et al.* Height, mass and skeletal maturity of elite portuguese soccer players aged 11-16 years. *J Sports Sci* 2000;**18**:685–93.
- 9 高井省三. 骨成熟が早熟な子の成人身長は小さいか?. 体育科学系紀要 1996;**19**:91–7.
- 10 Suwa S, Tachibana K, Maesaka H, *et al.* Longitudinal Standards for Height and Height Velocity for Japanese Children from Birth to Maturity. *Clin Pediatr Endocrinol* 1992;**1**:5–13.

- 11 FIFA Big Count 2006: 270 million people active in football. 2007.
- 12 Williams A, Reilly T. Talent identification and development in soccer. *J. Sports Sci.* 2000;**18**:657–67.
- 13 Sarmiento H, Anguera MT, Pereira A, *et al.* Talent Identification and Development in Male Football: A Systematic Review. *Sport Med* 2018;**48**:907–31.
- 14 Skorski S, Skorski S, Faude O, *et al.* The relative age effect in German elite youth soccer: Implications for a successful career. *Int J Sports Physiol Perform* 2016;**11**:370–6.
- 15 Deprez D, Coutts AJ, Franssen J, *et al.* Relative Age, Biological Maturation and Anaerobic Characteristics in Elite Youth Soccer Players. *Int J Sports Med* 2013;**34**:897–903.
- 16 Figueiredo AJ, Gonçalves CE, Coelho E Silva MJ, *et al.* Youth soccer players, 11-14 years: Maturity, size, function, skill and goal orientation. *Ann Hum Biol* 2009;**36**:60–73.
- 17 Figueiredo AJ, e Silva MJC, Cumming SP, *et al.* Size and Maturity Mismatch in Youth Soccer Players 11- to 14-Years-Old. *Pediatr Exerc Sci* 2010;**22**:596–612.
- 18 Hirose N. Relationships among birth-month distribution, skeletal age and anthropometric characteristics in adolescent elite soccer players. *J Sports Sci* 2009;**27**:1159–66.
- 19 Malina RM, Bouchard C, 高石昌弘, *et al.* 事典発育・成熟・運動. 大修館書店 1995.
- 20 Helsen WF, Starkes JL, Van Winckel J. The Influence of Relative Age on Success and Dropout in Male Soccer Players. *Am J Hum Biol* 1998;**10**:791–8.
- 21 Fragoso I, Massuca LM, Ferreira J. Effect of Birth Month on Physical Fitness of Soccer Players (Under-15) According to Biological Maturity E ff ect of Birth Month

- on Physical Fitness of Soccer Players (Under-15) According to Biological Maturity. 2015;**36**:16–21.
- 22 Vaeyens R, Philippaerts RM, Malina RM. The relative age effect in soccer: A match-related perspective. *J Sports Sci* 2005;**23**:747–56.
- 23 González-Villora S, Pastor-Vicedo JC, Cordente D. Relative Age Effect in UEFA Championship Soccer Players. *J Hum Kinet* 2015;**47**:237–48.
- 24 Lovell R, Towlson C, Parkin G, *et al.* Soccer player characteristics in English lower-league development programmes: The relationships between relative age, maturation, anthropometry and physical fitness. *PLoS One* 2015;**10**:1–14.
- 25 Tanner JM, R.H. W, Healy M. *A new system for estimating skeletal maturity from the hand and wrist, with standards derived from a study of 2,600 healthy British children.* Paris: : International Children’s Centre 1962.
- 26 Tanner JM, Whitehouse RH, Camer N, *et al.* *Assessment of skeletal maturity and prediction of adult height (TW2 method).* New York: : Academic Press 1975.
- 27 Tanner JM, Healy M, H G, *et al.* *Assessment of skeletal maturity and prediction of adult height (TW3 method).* 3rd ed. London ;;New York: : W.B. Saunders 2001.
- 28 Malina RM, Coelho-e-Silva MJ, Figueiredo AJ, *et al.* Tanner–Whitehouse Skeletal Ages in Male Youth Soccer Players: TW2 or TW3? *Sport Med* 2018;**48**:991–1008.
- 29 Eveleth PB, Tanner JM. *Worldwide variation in human growth.* Cambridge University Press 1990.
- 30 Hsieh CW, Liu TC, Jong TL, *et al.* Long-term secular trend of skeletal maturation of Taiwanese children between agricultural (1960s) and contemporary (after 2000s) generations using the Tanner–Whitehouse 3 (TW3) method. *J Pediatr Endocrinol Metab* 2013;**26**:231–7.

- 31 Malina RM. Skeletal age and age verification in youthsport. *Sport Med* 2011;**41**:925–47.
- 32 村田光範. 身長の成長速度曲線の意義と問題点. 産婦人科治療 1996;**72**:401–6.
- 33 Satoh M. Bone age: assessment methods and clinical applications. *Clin Pediatr Endocrinol case reports Clin Investig Off J Japanese Soc Pediatr Endocrinol* 2015;**24**:143–52.
- 34 Satoh M, Tanaka T. Bone Age at Onset of Pubertal Growth Spurt and Final Height in Normal Children. *Clin Pediatr Endocrinol* 1995;**4**:129–36.
- 35 Yoshii K, Tanaka T. Establishment of a longitudinal growth chart corresponding to pubertal timing. *Clin Pediatr Endocrinol* 2018;**27**:215–24.
- 36 Meyers RW, Oliver JL, Hughes MG, *et al.* Maximal Sprint Speed in Boys of Increasing Maturity. *Pediatr Exerc Sci* 2015;**27**:85–94.
- 37 Philippaerts RM, Vaeyens R, Janssens M, *et al.* The relationship between peak height velocity and physical performance in youth soccer players. *J Sports Sci* 2006;**24**:221–30.
- 38 Tveter AT, Holm I. Influence of thigh muscle strength and balance on hop length in one-legged hopping in children aged 7–12 years. *Gait Posture* 2010;**32**:259–62.
- 39 Jarvis P, Cassone N, Turner A, *et al.* Heavy Barbell Hip Thrusts Do Not Effect Sprint Performance: An 8-Week Randomized Controlled Study. *J Strength Cond Res* 2019;**33**:S78–84.
- 40 Hori N, Newton RU, Andrews WA, *et al.* Does Performance of Hang Power Clean Differentiate Performance of Jumping, Sprinting, and Changing of Direction? *J Strength Cond Res* 2008;**22**:412–8.
- 41 Seitz LB, Reyes A, Tran TT, *et al.* Increases in Lower-Body Strength Transfer

- Positively to Sprint Performance: A Systematic Review with Meta-Analysis. *Sport Med* 2014;**44**:1693–702.
- 42 Malina RM. Weight Training in Youth-Growth, Maturation, and Safety: An Evidence-Based Review. *Clin J Sport Med* 2006;**16**:478–87.
- 43 Faigenbaum AD, Myer GD. Resistance training among young athletes: safety, efficacy and injury prevention effects. *Br J Sports Med* 2010;**44**:56–63.
- 44 Beunen G, Malina RM. Growth and physical performance relative to the timing of the adolescent spurt. *Exerc Sport Sci Rev* 1988;**16**:503–40.
- 45 Lloyd RS, Faigenbaum AD, Stone MH, *et al.* Position statement on youth resistance training: the 2014 International Consensus. *Br J Sports Med* 2014;**48**:498–505.
- 46 Matos N, Winsley RJ. Trainability of young athletes and overtraining. *J Sports Sci Med* 2007;**6**:353–67.
- 47 Schwingshandl J, Sudi K, Eibl B, *et al.* Effect of an individualised training programme during weight reduction on body composition: a randomised trial. *Arch Dis Child* 1999;**81**:426–8.
- 48 Benson AC, Torode ME, Singh MAF. The effect of high-intensity progressive resistance training on adiposity in children: a randomized controlled trial. *Int J Obes* 2008;**32**:1016–28.
- 49 Myer G, Faigenbaum A, Chu D, *et al.* Integrative Training for Children and Adolescents: Techniques and Practices for Reducing Sports-Related Injuries and Enhancing Athletic Performance. *Phys Sportsmed* 2011;**39**:74–84.
- 50 Mikkola J, Rusko H, Nummela A, *et al.* Concurrent Endurance and Explosive Type Strength Training Improves Neuromuscular and Anaerobic Characteristics in Young Distance Runners. *Int J Sports Med* 2007;**28**:602–11.

- 51 Behringer M, Vom Heede A, Matthews M, *et al.* Effects of strength training on motor performance skills in children and adolescents: a meta-analysis. *Pediatr Exerc Sci* 2011;**23**:186–206.
- 52 Annesi JJ, Westcott WL, Faigenbaum AD, *et al.* Effects of a 12-week physical activity protocol delivered by ymca after-school counselors (youth fit for life) on fitness and self-efficacy changes in 5–12-year-old boys and girls. *Res Q Exerc Sport* 2005;**76**:468–76.
- 53 Contreras B, Cronin J, Schoenfeld B. Barbell Hip Thrust. *Strength Cond J* 2011;**33**:58–61.
- 54 國友亮佑, 森億, 田中淳. ヒップスラストとプライオメトリクスを組み合わせたコンプレックス トレーニングがトレーニング経験の浅い大学男子バスケットボール 選手の筋力及びジャンプ力に与える影響. 環太平洋大学研究紀要 2018;**12**:283–8.
- 55 Brad J. Schoenfeld. The mechanisms of muscle hypertrophy and their application to resistance training. *J Strength Cond Res _ 2010 Natl Strength Cond Assoc* 2010;**24**:2857–72.
- 56 Contreras B, Vigotsky AD, Schoenfeld BJ, *et al.* A Comparison of Gluteus Maximus, Biceps Femoris, and Vastus Lateralis Electromyographic Activity in the Back Squat and Barbell Hip Thrust Exercises. *J Appl Biomech* 2015;**31**:452–8.
- 57 Andersen V, Fimland MS, Mo D-A, *et al.* Electromyographic Comparison of Barbell Deadlift, Hex Bar Deadlift, and Hip Thrust Exercises: A Cross-Over Study. *J strength Cond Res* 2018;**32**:587–93.
- 58 Contreras B, Vigotsky AD, Schoenfeld BJ, *et al.* Effects of a Six-Week Hip Thrust vs. Front Squat Resistance Training Program on Performance in Adolescent Males: A Randomized Controlled Trial. *J Strength Cond Res* 2017;**31**:999–1008.

- 59 Abade E, Silva N, Ferreira R, *et al.* (in press) Effects of Adding Vertical or Horizontal Force-Vector Exercises to In-season General Strength Training on Jumping and Sprinting Performance of Youth Football Players. *J Strength Cond Res* 2019.
- 60 Lefevre J, Beunen G, Steens G, *et al.* Motor performance during adolescence and age thirty as related to age at peak height velocity. *Ann Hum Biol* 1990;**17**:423–35.
- 61 Bloomfield J, Polman R, O'Donoghue P. Physical demands of different positions in FA Premier League soccer. *J Sport Sci Med* 2007;**6**:63–71.
- 62 Dragijsky M, Maly T, Zahalka F, *et al.* Seasonal Variation of Agility, Speed and Endurance Performance in Young Elite Soccer Players. *Sports* 2017;**5**:1–8.
- 63 早川直樹, 小粥智浩, 中條智志. *Technical News*. 東京: : 公益財団法人日本サッカー協会 2015.
- 64 公益財団法人日本サッカー協会. *JFAフィジカル測定ガイドライン 2006年版*. 東京: : 日本サッカー協会技術委員会テクニカルハウス 2006.
- 65 Landis JR, Koch GG. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics* 1977;**33**:159–74.
- 66 Mathur S, Takai KP, MacIntyre DL, *et al.* Estimation of Thigh Muscle Mass With Magnetic Resonance Imaging in Older Adults and People With Chronic Obstructive Pulmonary Disease. *Phys Ther* 2008;**88**:219–30.
- 67 Lohman TG, Roche AF, Martorell R. *Anthropometric standardization reference manual*. Champaign: : Human Kinetics Books 1988.
- 68 Bamman MM, Newcomer BR, Larson-Meyer DE, *et al.* Evaluation of the strength-size relationship in vivo using various muscle size indices. *Med Sci Sports Exerc* 2000;**32**:1307–13.

- 69 Lee RC, Wang Z, Heo M, *et al.* Total-body skeletal muscle mass: development and cross-validation of anthropometric prediction models. *Am J Clin Nutr* 2000;**72**:796–803.
- 70 Cohen J. *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. 2nd ed. Hillsdale N.J.: : L. Erlbaum Associates 1988.
- 71 Thomas JR, Nelson JK, Silverman SJ. *Research methods in physical activity*. Champaign: : Human Kinetics 2015.
- 72 Katoh K, Miyamaru M, Matsumoto T, *et al.* A longitudinal study on the development of sprint performance in junior sprinters. *Taiikugaku kenkyu* 1999;**44**:360–71.
- 73 Sharma HB, Gandhi S, Meitei KK, *et al.* Anthropometric Basis of Vertical Jump Performance: A Study in Young Indian National Players. *J Clin DIAGNOSTIC Res* 2017;**11**:CC01–5.
- 74 Homma D, Minato I, Imai N, *et al.* Investigation on the measurement sites of the cross-sectional areas of the gluteus maximus and gluteus medius. *Surg Radiol Anat* 2019;**41**:109–15.
- 75 Schlaeger S, Inhuber S, Rohrmeier A, *et al.* Association of paraspinal muscle water–fat MRI-based measurements with isometric strength measurements. *Eur Radiol* 2019;**29**:599–608.
- 76 O’Brien TD, Reeves ND, Baltzopoulos V, *et al.* Strong relationships exist between muscle volume, joint power and whole-body external mechanical power in adults and children. *Exp Physiol* 2009;**94**:731–8.
- 77 Frontera WR, Meredith CN, O’Reilly KP, *et al.* Strength conditioning in older men: skeletal muscle hypertrophy and improved function. *J Appl Physiol* 1988;**64**:1038–44.

- 78 Young WB, James R, Montgomery I. Is muscle power related to running speed with changes of direction? *J Sports Med Phys Fitness* 2002;**42**:282–8.
- 79 Mathisen G, Pettersen SA. Anthropometric factors related to sprint and agility performance in young male soccer players. *Open Access J Sport Med* 2015;**6**:337–42.
- 80 Roescher C, Elferink-Gemser M, Huijgen B, *et al.* Soccer Endurance Development in Professionals. *Int J Sports Med* 2010;**31**:174–9.
- 81 Fukunaga Y, Takai Y, Yoshimoto T, *et al.* Influence of maturation on anthropometry and body composition in Japanese junior high school students. *J Physiol Anthropol* 2013;**32**:1–8.
- 82 Beunen G, Ostyn M, Simons J, *et al.* Development and Tracking in Fitness Components: Leuven Longitudinal Study on Lifestyle, Fitness and Health. *Int J Sports Med* 1997;**18**:S171–8.
- 83 Yagüe 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* 1998;**10**:647–60.
- 84 Meyers RW, Oliver JL, Hughes MG, *et al.* Influence of Age, Maturity, and Body Size on the Spatiotemporal Determinants of Maximal Sprint Speed in Boys. *J strength Cond Res* 2017;**31**:1009–16.
- 85 山田陽介. 骨格筋量・筋力の評価法. In: 医学のあゆみ. 医歯薬出版株式会社 2014. 670–8.
- 86 福元喜啓, 池添冬芽, 山田陽介, 市橋則明. 超音波画像診断装置を用いた骨格筋の量的、質的評価. *Japanese Phys Ther Assoc* 2013;**42**:65–71.
- 87 Thoirs K, English C. Ultrasound measures of muscle thickness: Intra-examiner reliability and influence of body position. *Clin Physiol Funct Imaging* 2009;**29**:440–6.

- 88 Jeong J, Lee S, Lee W. Reliability of rehabilitative ultrasound imaging for measuring the gluteus maximus muscle at rest and during contraction. *Phys Ther Rehabil Sci* 2017;**6**:7–13.
- 89 Ikezoe T, Mori N, Nakamura M, *et al.* Age-related muscle atrophy in the lower extremities and daily physical activity in elderly women. *Arch Gerontol Geriatr* 2011;**53**:153–7.
- 90 Ikezoe T, Mori N, Nakamura M, *et al.* Atrophy of the lower limbs in elderly women: Is it related to walking ability? *Eur J Appl Physiol* 2011;**111**:989–95.
- 91 Ikezoe T, Nakamura M, Shima H, *et al.* Association between walking ability and trunk and lower-limb muscle atrophy in institutionalized elderly women: A longitudinal pilot study. *J Physiol Anthropol* 2015;**34**:1–6.
- 92 Baechle TR, Earle RW, Kanehisa H, *et al.* NSCA決定版 ストレングス&コンディショニング 第4版. 東京: Book House HD 2018.
- 93 Fonseca RM, Roschel H, Tricoli V, *et al.* Changes in exercises are more effective than in loading schemes to improve muscle strength. *J strength Cond Res* 2014;**28**:3085–92.
- 94 村田祐樹, 鳥居俊, 飯田悠佳子, *et al.* 中学生サッカー選手における下肢の発育発達変化—各部位の発育発達変化の違いに着目して. *発育発達研究* 2012;**10**:9.
- 95 鳥居俊, 岩沼聡一郎, 飯塚哲司. 日本人健康男子中学生における身長、除脂肪量、骨量の最大増加時期. *発育発達研究* 2016;**3**:11–6.
- 96 Stone MH, Keith RE, Kearney JT, *et al.* Overtraining: A Review of the Signs, Symptoms and Possible Causes. *J Appl Sport Sci Res* 1991;**5**:35–50.
- 97 金子公宥, 福永哲夫. バイオメカニクス—身体運動の科学的基礎. 東京: 杏林書院 2004.

- 98 Deschenes MR, Maresh CM, Armstrong LE, *et al.* Endurance and resistance exercise induce muscle fiber type specific responses in androgen binding capacity. *J Steroid Biochem Mol Biol* 1994;**50**:175–9.
- 99 De Ste Croix M, Deighan M, Armstrong N. Assessment and interpretation of isokinetic muscle strength during growth and maturation. *Sports Med* 2003;**33**:727–43.
- 100 Whittaker JL, Stokes M. Ultrasound imaging and muscle function. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.* 2011;**41**:572–80.
- 101 Kanehisa H, Ikegawa S, Tsunoda N, *et al.* Strength and cross-sectional areas of reciprocal muscle groups in the upper arm and thigh during adolescence. *Int J Sports Med* 1995;**16**:54–60.
- 102 市橋則明. 筋を科学する—筋の基礎知識とトレーニング—. 理学療法学 2014;**41**:217–21.
- 103 福永哲夫. ヒトの絶対筋力：超音波による体肢組成・筋力の分析. 東京：杏林書院 1978.
- 104 Kumagawa D, Tsunoda N. Biological growth and development in skating performance, muscle structure and anaerobic power output capacity in male and female Japanese speed skaters. *Japanese J Phys Fit Sport Med* 2008;**57**:119–30.
- 105 Gabriel DA, Kamen G, Frost G. Neural adaptations to resistive exercise: mechanisms and recommendations for training practices. *Sports Med* 2006;**36**:133–49.
- 106 Faigenbaum, AD, Kraemer, WJ, Blimkie, CJR, Jeffreys, I, Micheli, LJ, Nitka, M, and Rowland T. Risks and Concerns Related to Youth Resistance Training. *J Strength Con Res* 2009;**23**:60–79.
- 107 Hoshikawa Y, Iida T, Muramatsu M, *et al.* Age-related changes in knee extension

- and flexion torques and thigh muscle volume in soccer players. *J Phys Educ Heal Sport Sci* 2007;**52**:431–42.
- 108 Sander A, Keiner M, Wirth K, *et al.* Influence of a 2-year strength training programme on power performance in elite youth soccer players. *Eur J Sport Sci* 2013;**13**:445–51.
- 109 Bangsbo J, Andersen JL. パフォーマンス向上に役立つサッカー選手のパワートレーニング. 東京:大修館書店 2018.
- 110 Lloyd RS, Oliver JL, Faigenbaum AD, *et al.* Effects of a short-term plyometric and resistance training program on fitness performance in boys age 12 to 15 years. *J Sport Sci Med* 2007;**6**:519–25.
- 111 Grill E, Ewert T, Lipp B, *et al.* Neuromuscular Training Improves Performance and Lower-Extremity Biomechanics in Female Athletes. *Eur J Neurol* 2007;**14**:1256–65.
- 112 Santos EJAM, Janeira MAAS. The effects of plyometric training followed by detraining and reduced training periods on explosive strength in adolescent male basketball players. *J Strength Cond Res* 2011;**25**:441–52.
- 113 Young WB. Transfer of strength and power training to sports performance. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 2006;**1**:74–83.
- 114 鳥居俊, 飯田悠佳子, 村田祐樹, *et al.* 男子中学生サッカー選手における超音波法による脛骨粗面発育段階と身長変化に基づく発育年齢との関連性. 日本成長学会雑誌 2011;**17**:64–8.

謝辞

本論文は、早稲田大学スポーツ科学学術院広瀬統一教授のご指導のもと行われたものであり、的確で常に温かいご指導をいただきました先生には、心より感謝申し上げます。広瀬先生には学士、修士課程、博士後期課程と9年間に渡りご指導賜りながら、フィジカルコーチとして仕事をしながら疑問点を研究で明らかにしていくという、現在の私の土台を作っていただきました。また、同学術院鳥居俊教授、岡田純一教授にはご多忙の中、審査を快諾していただきました。非常に丁寧なご指摘やご指導を賜り、心より感謝申し上げます。

東京有明医療大学の福林徹特任教授には学士から長年に渡り、ご指導賜りました。本論文第2章の骨年齢を用いた研究では、特に多くのアドバイスを賜りましたこと、心より感謝申し上げます。慶應義塾大学体育研究所の東原綾子先生と早稲田大学助教の秋山圭先生には、実験方法から結果解釈に至るまで、多くのアドバイスをして頂きました。また、3年間の博士後期課程のなかで、早稲田大学大学院スポーツ科学研究科アスレティックトレーニング研究室の皆様には大変お世話になりました。研究室の仲間、同期の大西史晃氏、岡田研究室の山口翔太氏、そして友人である小黒喬史氏と棒田英明氏からの励ましがなければ、学位論文を書き上げることはできなかったと思います。本当にありがとうございました。

本研究の実施にあたり、小児の成熟に関する解釈を基礎から導いてくださった筑波大学の高井省三名誉教授と、データ収集を快諾してくださった株式会社鹿島アントラーズFCのファミリーの皆様、被験者として研究協力をしてくださった鹿島アントラーズつくば、ノルテ選手、保護者の皆様には深く感謝申し上げます。

最後に、これまでの人生を支えてくれた父と母に感謝を伝えさせて頂きたいと思います。ありがとうございました。

2020年1月 伊藤亮輔