

早稲田大学審査学位論文

博士（スポーツ科学）

若年バスケットボール選手の筋形態，内分泌応答
および運動能力の変化に対する成熟度の影響

The effects of the maturity level on the changes of muscle,
endocrine responses, and athletic performances in youth
basketball players

2019年7月

早稲田大学大学院 スポーツ科学研究科

関根 悠太

SEKINE, Yuta

研究指導教員： 広瀬 統一 教授

目次

第1章 序論.....	1
1-1. はじめに.....	1
1-2. 研究小史.....	5
1-3. 本論文の目的および構成.....	12
第2章 バスケットボール選手における大腿四頭筋の発育に関する横断的検討.....	15
2-1. 緒言.....	15
2-2. 方法.....	16
2-3. 結果.....	23
2-4. 考察.....	31
2-5. 結論.....	34
第3章 若年バスケットボール選手の形態学および生理学的変化に関する縦断的検討.....	35
3-1. 緒言.....	35
3-2. 方法.....	37
3-3. 結果.....	41
3-4. 考察.....	45
3-5. 結論.....	49
第4章 異なる成熟度の若年アスリートにおける運動に対するホルモン応答の比較.....	50
4-1. 緒言.....	50
4-2. 方法.....	52
4-3. 結果.....	57
4-4. 考察.....	61
4-5. 結論.....	65

第5章 総合考察	67
5-1. 生物学的成熟度の個体差	67
5-2. 筋形態の成長に伴う変化	68
5-3. スプリントおよび跳躍能力の変化と向上率	70
5-4. 運動に対する内分泌応答	72
5-5. 現場への応用と展望	74
第6章 結論	76
参考文献	77
謝辞	89

本博士論文は以下の研究成果および研究助成を基に執筆された。

第 2 章

- ・ 原著論文

Sekine Y and Hirose N. Cross-sectional comparison of age-related changes in the quadriceps femoris in Japanese basketball players. *Int J Adolesc Med Health* Epub ahead of print, 2017.

- ・ 学会発表

Sekine Y and Hirose N. Cross-sectional comparison of age-related changes of the quadriceps femoris in basketball players. European College of Sport Science 22nd annual congress in Germany, 2017.

第 3 章

- ・ 学会発表

関根悠太, 広瀬統一. 成長期男子における大腿四頭筋形態の縦断変化. 第 72 回日本体力医学会大会. 愛媛, 2017.

Sekine Y and Hirose N. Longitudinal changes of the quadriceps muscle thickness and jump performance in Japanese adolescent boys. 23rd annual congress of the European College of Sport Science in Ireland, 2018.

第 4 章

- ・ 学会発表

関根悠太, 広瀬統一. 異なる年代および成熟度の男子アスリートにおけるホルモン濃度の比較. NSCA JAPAN Strength & Conditioning Conference, 2019

Sekine Y and Hirose N. Age-dependent variation of exercise-induced hormonal responses in young athletes. 24th annual congress of the European College of Sport Science in Czech, 2019.

・研究助成

2017 年度 NSCA ジャパン・ストレングス&コンディショニング研究助成

2018 年度公益財団法人成長科学協会研究助成（自由課題研究）

第1章

序論

1-1. はじめに

2020年に開催される東京オリンピック・パラリンピック競技大会に向けて、本邦におけるスポーツに対する注目度は非常に高いものとなっている。また、スポーツを通じてすべての人々が幸福で豊かな生活を営むことができる社会の創出を目指すスポーツ基本法の理念の実現に向け、スポーツに関連する施策を総合的に推進するため、2015年には文部科学省の外局としてスポーツ庁が創設された。現在、「こどもの体力向上」をはじめ、将来を有望視されたアスリートへの包括的なサポートとして、次世代アスリートの発掘・育成が政策として掲げられており、若年者を対象としたスポーツに関連する支援が行われている（第2期スポーツ基本計画）。世界に目を向けても、2015年には国際オリンピック委員会より若年アスリートの「科学的根拠に基づいた体力・運動能力向上プログラム」、「個々の成熟度を考慮したトレーニング」を確立する重要性が提言されており、若年アスリートの成熟度の把握および成長の段階に応じた運動プログラムの立案が世界規模で求められている(11)。また、身体的、心理的および社会的に顕著な個体差が存在する若年者の身体の発育・発達の促進、運動参加による傷害の予防、後の人生においても長く持続できる運動習慣を習得するために、適切に処方された運動プログラムへの参加が重要であることが全米ストレングス&コンディショニング協会（National Strength & Conditioning Association；NSCA）によってガイドラインとして発表されており(53)（表1）、成長の個体差が著しい若年者の特徴について、若年アスリートに携わる専門職（教師、コーチ、アスレティックトレーナーなど）の理解の必要性が述べられている。

近年、若年者の運動参加の推奨に伴い、医療、フィットネス業界、各種スポーツ組織において、若年者のトレーニング実施が広く一般的に受け入れられている(56, 92)。また、若年者のトレーニング効果に関する多くの報告がなされており、成熟度の特異的な運動処方に基づき、適切な監督下において実施されるトレーニングは、成人と同様に若年者に対しても様々な利益をもたらすことが明らかとされている(24, 25, 53)。若年アスリートにおける生理学的な運動能力のトレーニング効果に関するシステマティックレビューおよびメタ解析では、高強度トレーニング(最大挙上重量の80-89%)によって筋力や走速度といったスポーツに特異的な運動能力の改善が生じることが報告されており、若年者のトレーニング実施の有効性が強調されている(52)。一方で、若年者が安全に、効果的にトレーニングを行うための至適時期や方法、トレーニングの目標設定にすべき要素については未だ不明瞭な部分も多く、これらを明らかにすることは世界的な課題とされている(69)。したがって、成熟度に基づくトレーニングプログラムの構築にあたっては、若年者のトレーニングナビリティ(トレーニング刺激に対する応答)の成長に伴う変化に関するさらなる知見が求められている。

バスケットボールの競技者登録数は200カ国以上の国際バスケットボール連盟の加盟国において4億5千万人を超え、世界的にも非常に人気の高いスポーツである(23)。バスケットボール選手は1試合の全運動あたり10%の最大努力の走動作、46-70回の跳躍動作、約1000回の方向転換を行いながら4500-5000mを移動する(20, 23, 91)。このような競技特性から、身体的要素に加え、高い水準の生理学的運動能力が求められる。また、あらゆる年代において、形態学的特徴および生理学的能力はバスケットボール選手としての価値を決定づける重要な要因であることは明白である(88)。特に、若年者においては優れた

選手ほどバスケットボールに有利となる形態学的特徴および高い生理学的運動能力を有していたことが報告されている(87).

若年アスリートの成熟度と形態学的特徴および生理学的能力との関連については、欧米を中心に多くの調査が実施されている。暦年齢と生物学的年齢の不一致が一時的に認められる年代においては、形態学的な発育や生理学的な発達の個体差も著しい。身体組成や運動能力の個体差に対しては、誕生月の差異(16, 40)や生物学的成熟度を反映する最大身長発育年齢 (Age at Peak Height Velocity ; APHV) に対する暦年齢の到達度が大きな影響を及ぼすことが明らかとなっている(8, 14, 65-67, 74, 87, 88)。成長期において認められるこれらの現象から、特に若年アスリートを評価する際には長期的な視点をもって臨むことの重要性が示唆されている(87, 88)。また、身体の成長の速度が人種や生育環境によって異なる可能性については、日本人の男子における APHV (12.6 歳) (80)が、欧米人の APHV (13.8-14.4 歳) (13, 61)に比べて早い段階で到来するといった結果から推察され、日本人の若年者における筋骨格系の形態、内分泌応答および運動能力の発育・発達について幅広く検討する必要がある。

尚、本研究における以下の用語は NSCA のポジションステイトメント(53)および文部科学省の示す初等中等教育の役割に基づいて定義づけられた。

若年アスリート (若年者) : こども (男子では 13 歳まで) および思春期の若者の双方。

思春期 : 男子では 14-18 歳(53)。ただし、本研究においては文部科学省の示す初等中等教育の役割に基づき、小学校高学年から中学校の年代 (10-15 歳) とする。

表 1 長期的な運動能力開発を成功に導く 10 本の柱 (Lloyd et al. 2016 より)

No.	記述内容
1.	長期的な運動能力開発の過程では、若年者における発育・発達の非直線的で強い個別性を配慮する必要がある。
2.	年齢や能力、意欲に関わらず、すべての若年者は体力的・心理社会的幸福感を促進する長期的な運動プログラムに参加する必要がある。
3.	すべての若年者は幼少期から運動スキルや筋力の発達に焦点を当てた体力向上が奨励される必要がある。
4.	長期的な運動能力開発の過程において、幅広い運動能力の向上や促進を達成するため、成長過程の早期からの参加が推奨される。
5.	こどもの健康と幸福は、常に長期的な運動能力開発のプログラムの中心的原則である。
6.	長期的な運動能力開発プログラムへの参加を継続するために、傷害リスクの低下に貢献する身体コンディショニングを実施する必要がある。
7.	身体健康に関連する要素とスキルに関連する要素の双方を強化するため、長期的な運動能力開発プログラムは幅広いトレーニングの適応を有する若年者に対して提供されなければならない。
8.	専門職は、長期的な運動能力開発を達成する手段として、適切なモニタリングや評価法を用いる必要がある。
9.	若年者を指導する専門職においては、トレーニングプログラムについて個別性に則って体系的に発展させなければならない。
10.	有資格者の存在と適切な教育的アプローチは、長期的な運動能力開発プログラムを成功させる基盤となる。

1-2. 研究小史

1-2-1. 最大身長発育年齢 (Age at Peak Height Velocity ; APHV)

一般的に、APHVは思春期で生じる身長 of 急激な発育期間において、最大の成長率に達する推定年齢を指し(60)、暦年齢との相対値によって個体の成熟度を反映する。思春期における急激な成長は、個体間でタイミング、テンポ、継続時間が異なるため、思春期の身体サイズ、身体組成および運動能力の評価や判断には暦年齢ではなく APHV が用いられており(74)、若年者のトレーナビリティやタレント発掘・選抜における評価指標としても利用されている(8, 54, 66, 67, 74, 87, 88)。

多くの競技種目において、エリート若年アスリートは早い段階で APHV に到達し、早熟傾向を示すことが報告されている(60)。日本人の男子の APHV に関する調査によれば、多くの若年アスリートの APHV は一般的な男子と概ね一致するが、バスケットボールおよび陸上選手はより早く到達し (11.6 ± 0.9 歳) (26)、サッカー選手はより遅く到達していた (13.6 ± 1.1 歳) ことが報告されている(70)。若年アスリートの身体サイズ、身体組成および運動能力の程度は APHV の到達度で推測される生物学的成熟度に影響を受けるため、タレント発掘・選抜によるエリート若年アスリートが早熟者で構成される傾向にあると考えられる(87, 88)。しかしながら、晩熟傾向にある若年者の運動能力が将来的に早熟傾向にある若年者の運動能力に追いつく可能性についても報告されており(12)、エリートアスリートになる可能性を有する晩熟傾向の若年アスリートを排除する局所的なタレント発掘・選抜を避けるために、個々の生物学的成熟度を考慮する必要性が述べられている(40, 87, 88)。

APHV について人種別に分類した調査によれば、ヨーロッパの男子は 13.8-14.4 歳、コーカソイドの男子は 13.3-14.1 歳、アフリカ系アメリカンにおいては 14.3 歳であったことが

報告されている(13)。一方、日本の男子における APHV は 12.6 歳で生じることが報告されている(80)。また、球技系種目の若年アスリートにおける APHV についてヨーロッパと日本の男子を比較すると、日本の男子（11.6-13.7 歳）はヨーロッパの男子（12.8-14.5 歳）に比べ、早い段階で APHV に到達していたことが明らかとされている(10, 26, 55, 61, 70, 74, 83)（表 2）。

このように、身体の発育・発達のテンポやピークを迎えるタイミングには個体差が存在し、生育環境や遺伝学的な要因が影響を及ぼすことが明らかとされている。また、異なる成熟度の個体が混在する同暦年齢カテゴリー（運動部活動など）における競技活動やトレーニングの実施は、日本の若年アスリートを取り巻く環境の特徴である。したがって、日本人の若年者における APHV の把握は、若年アスリートのタレント発掘・選抜における判断材料のみならず、生物学的成熟度に則したトレーニングの実施のための基準となり得る。

表 2 日本とヨーロッパの若年アスリートにおける APHV に関する縦断研究 (Malina et al. 2015 より改変)

著者 (発表年)	国	競技種目	最大身長発育年齢 (APHV)			推定方法
			n	平均値	標準偏差	
Bell (1993)	ウェールズ	サッカー	32	14.2	0.9	Preece & Baines models
Philippaerts et al (2006)	ベルギー	サッカー	33	13.8	0.8	多項式
Maingourd et al (1994)	フランス	アイスホッケー	11	12.8	0.5	グラフ化による補間
Sprynarova (1987)	チェコ共和国	バスケットボール	8	14.1	0.9	
Fujii et al (1998)	日本	バスケットボール, 陸上	15	11.6	0.9	ウェーブレット補間法
		野球	126	13.1	1.0	
Nariyama et al (2001)	日本	バスケットボール	39	12.8	1.1	Preece & Baines モデル
		サッカー	83	13.7	1.1	
		バレーボール	53	13.2	0.8	

1-2-2. 筋形態の発育

男子の筋量は、13-17.5 歳の間には体重の約 46%から約 54%に増加する(57)。また、筋量を反映する除脂肪量に関する調査においては、10-11 歳から 18-19 歳にかけて男子の除脂肪量は 32.5kg 増加し、特に成長が顕著である 13-15 歳の間では年間に約 7.2kg の除脂肪量の増加が報告されていることから、筋量の増加と成長のスパートとの関連を示唆している(59)。7-18 歳の日本人男子を対象に、肘関節屈曲・伸展筋群、膝関節屈曲・伸展筋群における筋横断面積の超音波測定および等速性筋力測定を行った Kanehisa らの報告によれば、筋横断面積や筋力の増加には成長の要因が影響を及ぼす結果が示されている(43)。また、年齢の増加に伴って屈曲筋群横断面積/伸展筋群横断面積の比率が変化した結果から、筋の成長率が部位によって異なる可能性が示唆されている(43)。膝関節伸展筋および足関節底屈筋の形態や腱の機能について、日本人の思春期早期の男子（9.6-12.7 歳）と成人男性（19.8-26.2 歳）を比較した調査によると、成人の膝関節伸展筋および足関節底屈筋の筋厚および筋束長の絶対値は、思春期早期の男子に比べて有意な高値を認めたものの、足関節底屈筋の筋束長と下肢長の相対値においては年代間で有意差は認められなかった。また、膝蓋腱およびアキレス腱においても、成人の腱厚の絶対値は思春期早期の男子に比べて高値を示したが、体重での相対値においてはアキレス腱においてのみ有意差が認められ、膝蓋腱では認められなかったことが報告されている(50)。これらの結果に基づき、Kubo らは思春期早期から成人までの間でヒトの筋および腱の形態の成長が部位によって異なることを報告した(50)。同一筋群内の成長率について、Sekine らは 12-20 歳の若年バスケットボール選手を対象に大腿四頭筋を構成する筋頭の成長に伴う変化について横断的に調査した。その結果、内側広筋、大腿直筋および外側広筋は 16-17 歳、内側広筋斜頭および中間広筋は 18-20 歳において顕著な発育が認められた(82)。また、算出された各筋頭における

最大発育年齢の推定値（内側広筋斜頭；12.9 歳，内側広筋；15.7 歳，大腿直筋；17.7 歳，中間広筋；15.7 歳，外側広筋；15.2 歳）から，大腿四頭筋を構成する筋頭の固有の機能や役割が成長率に影響を及ぼす可能性があることを報告した(82)．一方，横断的検討であったことを研究の限界点として述べており，成熟度が筋形態の変化に及ぼす影響について明らかにするためには同一個体内における縦断的検討が必要であると考えられる．

Mersmann らは，大腿四頭筋や膝蓋腱の形態や機能の長期的な適応について明らかにするために若年バレーボール選手を対象とした 2 年間の縦断研究を行っており，青年期中期（16 歳）から青年期の後期（18 歳）にかけて，筋横断面積および筋量は約 6%，筋力は約 13%，腱横断面積は約 27% 増加したことを報告した．これらの結果から，青年期の後期における腱の機械的な強固さの増加は，筋肉の形態学および生体力学的な発育・発達に関連し，青年期の早期から中期にかけて生じる筋力と腱の負荷耐性の不均衡を補う可能性を示唆している(64)．しかしながら，若年者の筋形態の成長に伴う変化について縦断的に検討した研究報告は限られている．また，日本人の筋形態の発育と生物学的成熟度との関連について縦断的に調査した研究はみられない．

1-2-3. 運動能力と成熟度の関連

思春期の特徴として，身体的な発育と運動能力の発達が急激に生じることが挙げられる．また，成長期の男子において，生物学的成熟度は生理学的な運動能力に影響を及ぼす(14)．一般的に，成熟が進んだ男子は成熟の進行が遅い男子に比べ，優れた運動能力を有する(57, 74)．このことから，成長期や思春期の男子においては同暦年齢であった場合でも運動能力に個人差が存在する．ベルギーの若年男子サッカー選手（ 12.2 ± 0.7 歳）を対象とした 5 年間の縦断研究によると，30m スプリント，敏捷性，垂直跳びといったスポーツ

において重要となるパワー発揮能力は、APHVにおいて最も発達することが報告されている(74)。一方、パワー発揮能力はAPHV経過後2年ほどでピークを迎えるとの報告もされており(57)、競技パフォーマンスに関連する各種体力要素の発達様相について、欧米人に比べて早くAPHVを迎える日本人(80)を対象とした調査を行う必要がある。

生物学的成熟度と運動能力の関連は、若年アスリートの競技環境にも大きく影響を及ぼす。若年バスケットボール選手(13-14歳)を対象としたTorres-Undaらの調査では、同じ暦年齢であったにもかかわらず、エリート群は非エリート群に比べてAPHV経過年数が高く、早熟傾向にある選手で構成されていたことが報告されている。加えて、早熟傾向にある選手で構成されたエリート群は、非エリート群に比べて身長や体重、筋肉量といった身体サイズや身体組成、スプリント、跳躍、持久力などの運動能力において優れた値を示した。これらの結果から、思春期において一時的に認められる運動能力の優劣がタレント発掘・選抜に大きく影響を及ぼし、若年アスリートの競技環境を決定付ける可能性があることを述べている(87)。上記背景から、若年アスリートの活動に直接的に関わる多くの専門職(教師、コーチ、アスレティックトレーナーなど)は、成熟度の個体差およびそれに伴う運動能力の個体差が顕著である若年アスリートへのアプローチを慎重に行うことが重要である。また、安全かつ効果的なトレーニングや傷害予防プログラムの基盤を構築するために、日本人の若年アスリートにおける生物学的成熟度と運動能力の発達との関連についてさらなる知見が求められる。

1-2-4. 若年者の内分泌応答

内分泌系の機能は、身体の恒常性の維持やあらゆる種類の外的ストレスに対する身体の適応を促進する(48, 98)。筋線維の成長やリモデリングに関係する主要な同化ホルモン(テ

テストステロン、ヒト成長ホルモンなど)の分泌量は、適切にプログラムされたトレーニングの刺激(ストレス)によって増加する(71)。思春期および思春期経過後におけるトレーニングによる筋力の増加は、ホルモン分泌量が関連する筋量の増加に影響を受けるとされる。その一方、思春期前の若年アスリートは運動に対するホルモン分泌量が少ないため、トレーニングを通じた筋量の増加は困難とされている(71)。しかしながら、肘関節の等尺性運動を用いたトレーニングによって思春期前の男子における肘関節屈曲および伸展筋群の横断面積が増加したとの報告もなされている(27)。

遅発性筋痛の影響下における運動に対するホルモン応答について、成人男性(31±7歳)と男子(14±0歳, Tanner stage 5; n=2, Stage 4; n=2, Stage 3; n=4)を対象に比較検討した Pullinen らの報告によると、最大挙上重量の40%で行われた膝関節伸展トレーニング(最大反復回数×3セット)後におけるテストステロンの分泌量の増加は成人男性においてのみ認められ、男子に比べて高値であった一方、ヒト成長ホルモンは男子において高値を示した(77)。言及はされていないものの、これらの結果から、各ホルモンの分泌腺の成熟度が分泌量の多寡に関連した可能性が推察される。また、APHVに対して暦年齢が平均1.06年低い男子を対象とした研究報告では、下肢のトレーニング(片脚スクワット、ランジ、スモウスクワット、ステップアップ 各3セット×12回)後におけるテストステロン分泌量の有意な増加およびコルチゾール濃度の有意な減少が認められており、若年アスリートのトレーニングが身体における一過性の同化状態を引き起こす可能性を示唆している(45)。

若年者においては、同じ暦年齢カテゴリーであっても生物学的成熟度の個体差が顕著である。したがって、内分泌機能に関しても生物学的成熟度に関連した個体差が存在する可能性が考えられる。これまでに、若年者の運動に対する同化ホルモンの分泌量の増加に関

する報告はいくつかなされているが(35, 47, 76, 78), 成熟度を考慮した研究報告は限られている(45, 77). 同暦年齢カテゴリー内の異なる成熟度の若年者を対象とした運動に対する内分泌応答に関する調査は多くなされておらず, 今後の検討課題とされている.

1-3. 本論文の目的および構成

多くの先行研究において, 若年者のトレーニングの有効性や価値が報告されている(11, 24, 25, 52, 53, 56, 92)一方, スポーツ現場の現状として未だに若年者のトレーニング実施に消極的な部分も散見される. その理由として, 適切な科学的知見や根拠の不足が考えられる.

本論文では, 成熟度に則したトレーニングプログラム構築のための知見を得ることを目的に形態学的, 生理学および内分泌学的側面から以下の検討を行った.

- ① バスケットボール選手における大腿四頭筋の発育に関する横断的検討
- ② 若年バスケットボール選手における形態学的および生理学的変化に関する縦断的検討
- ③ 異なる成熟度の若年アスリートにおける運動に対するホルモン応答の比較

本論文は第2章, 第3章, 第4章の3つの研究, それらの総合考察(第5章)および結論で構成されている. 第2章, 第3章および第4章の研究内容の概略について以下に示す.

第2章：バスケットボール選手における大腿四頭筋の発育に関する横断的検討

若年バスケットボール選手（12-20歳）を対象に、大腿四頭筋を構成する筋頭（内側広筋斜頭、内側広筋、大腿直筋、中間広筋および外側広筋）の形態の発育について横断的に検討した。超音波による筋厚、羽状角の測定を行い、それらの測定値から筋束長を算出した。また、最小二乗法によって筋厚と月齢から三次近似式を求め、各筋頭の最大発育年齢を推定した。

第3章：若年バスケットボール選手の形態学および生理学的変化に関する縦断的検討

中学生のバスケットボール選手（12-15歳）における筋形態およびスプリント、跳躍能力の年間変化量について縦断的に検討した。対象者は推定された最大身長発育年齢（Age at Peak Height Velocity；APHV）に対する暦年齢から pre PHV 群、APHV 群および post PHV 群に分類され、上肢（上腕二頭筋、上腕三頭筋）、下肢（内側広筋、大腿直筋、中間広筋、外側広筋）の筋厚の変化に対して成熟度が及ぼす影響を調査した。また、走速度、垂直跳躍高の変化についても縦断的に検討し、スプリントおよび跳躍能力と成熟度の関連について検討した。

第4章：異なる成熟度の若年アスリートにおける運動に対するホルモン応答の比較

異なる成熟度のアスリートにおける運動に対するホルモン（テストステロン、コルチゾール、ヒト成長ホルモン）応答について調査した。対象者を①APHV に達する前の中学生（pre PHV 群）、②APHV 経過後の中学生（post PHV 群）、③生殖器成熟度分類(13, 86)において第5段階（adult）に分類される大学生の各群に分類し、基本的な自体重トレーニングで構成された運動課題の直前、直後、15分後において唾液サンプルを採取した。採取され

た唾液サンプルから同化ホルモンであるテストステロン，ヒト成長ホルモンおよび異化ホルモンであるコルチゾールを測定し，成熟度が運動に対するホルモン応答に及ぼす影響について比較検討した。

第 2 章

バスケットボール選手における大腿四頭筋の発育に関する横断的検討

2-1. 緒言

大腿四頭筋は歩行や走行などに代表されるヒトの活動において非常に重要な役割を有する(2,3,93). 解剖学的には, 大腿四頭筋は内側広筋 (Vastus Medialis ; VM), 大腿直筋 (Rectus Femoris ; RF), 中間広筋 (Vastus Intermedius ; VI) および外側広筋 (Vastus Lateralis ; VL) に分類される(31, 32). さらに, 大腿四頭筋の解剖学的調査によれば, 内側広筋の遠位部に位置する内側広筋斜頭 (Vastus Medialis Oblique ; VMO) は独立した神経支配を受け, ヒトの身体活動に寄与する可能性が報告されている(89). これまでに, 大腿四頭筋を構成する筋頭と跳躍やスプリントなどの運動能力との関係性についての報告(49, 51, 62)や選択的な萎縮に関する報告がされている(30,32). 跳躍動作中における VMO, VM, VL の筋活動を報告した先行研究によれば, 各筋頭の筋活動は荷重時における膝関節角度によって異なる結果が認められており, 膝関節角度に依存した筋活動が生じる可能性が報告されている(89). このように, 今日までの多くの先行研究から, 大腿四頭筋を構成する筋頭は固有の機能や役割を有することが結論付けられている.

日本人の男子における最大身長発育年齢 (Age at Peak Height Velocity ; APHV) は 12.6-13.4 歳と報告されている(80). また, 男子の筋量は, 13-17.5 歳の間には体重の約 46%から約 54% に増加することも報告されており(57), 身体サイズは暦年齢や成熟レベルが進むにつれて顕著に変化する. 特に, 思春期の男子においては, 身体サイズの変化に伴って筋量や筋力が明確に増加する(28). Kanehisa らは, 膝関節伸展筋である大腿四頭筋の筋横断面積が青年期間に増加することを報告した(43). また, 大腿四頭筋の成長に伴う形態変化についてはいく

つかの調査によって示されている(28, 43, 64, 75). しかしながら, 大腿四頭筋を構成する各筋頭の成長について個別に検討した報告はなされていない.

今日, 若年者の発育・発達段階に基づいた運動プログラムへの参加が推奨されている(11). 特に, アスリートの競技力向上を目的としたトレーニングに従事するコーチやトレーナーは, 異なる年代における身体の生物学的成熟度の差異について考慮する必要がある. これらの背景から, 本研究は大腿四頭筋を構成する筋頭の成長に伴う変化を明らかにすることを目的に行われた.

2-2. 方法

2-2-1. 対象者

全国大会および国際大会出場経験を有する男子バスケットボール選手 70 名 (12-20 歳) を本研究の対象とした. 日本人男子の APHV(80), 性ホルモンなどに影響を受ける性成熟(24, 73)および生殖器成熟度分類における段階(13, 85)に基づいて, 対象者を 12-13 歳群 ($n = 18$, 12.7 ± 0.5 歳), 14-15 歳群 ($n = 13$, 14.5 ± 0.5 歳), 16-17 歳群 ($n = 19$, 16.5 ± 0.5 歳) および 18-20 歳群 ($n = 20$, 19.0 ± 1.0 歳) の各年齢群に分類した (表 3). 下肢の手術歴を本研究参加の除外条件とした. 実験開始時点において, すべての対象者は傷害を有しておらず, バスケットボールに関連する動作 (跳躍の踏切や着地, スプリントなど) を全力で実施することが可能であった. 研究に先立ち, すべての対象者に対して本研究の詳細や安全性について説明が行われた. 20 歳未満の対象者に対しては, 保護者および所属組織の責任者に対しても同様の説明が行われ, すべての対象者から同意を得た. 本研究は日本体育大学倫理審査委員会の承認を得て行われた (No. 016-H79).

表 3 対象者の身体的特徴

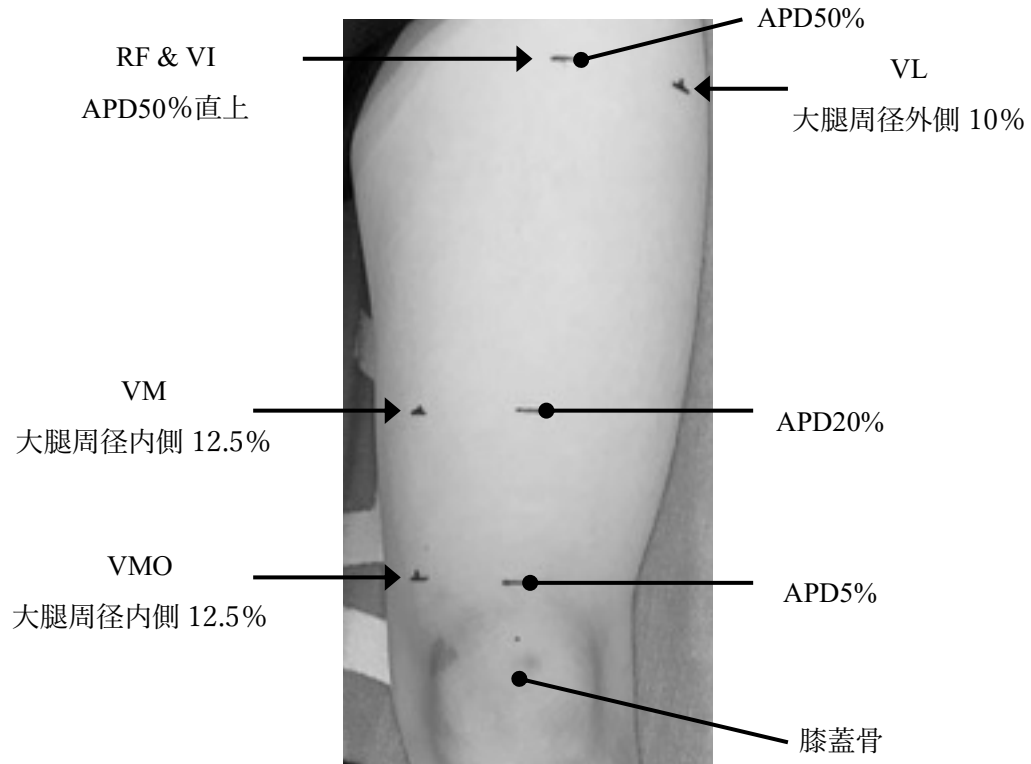
群	年齢 (歳)	n	月齢 (月)	身長 (cm)	体重 (kg)
12-13 歳	12	5	150.8 ± 3.9	163.4 ± 11.3	50.4 ± 6.3
	13	13	159.0 ± 2.4	164.7 ± 9.6	53.1 ± 9.2
14-15 歳	14	7	170.6 ± 2.8	167.5 ± 14.7	54.1 ± 14.2
	15	6	182.5 ± 2.1	176.3 ± 9.5	66.2 ± 17.4
16-17 歳	16	9	201.1 ± 2.5	175.4 ± 7.4	69.3 ± 6.1
	17	10	210.6 ± 4.4	181.3 ± 6.0	76.7 ± 6.8
18-20 歳	18	7	222.7 ± 2.6	184.6 ± 4.9	81.3 ± 4.9
	19	7	234.4 ± 2.8	191.1 ± 4.4	86.7 ± 7.9
	20	6	243.3 ± 2.6	187.0 ± 7.6	80.9 ± 6.8
Total		70	198.9 ± 32.7	177.5 ± 12.9	71.1 ± 15.9

平均値 ± 標準偏差.

2-2-2. 超音波測定

大腿四頭筋を構成する各筋頭の超音波画像を撮像するため、先行研究に基づいて対象者の利き脚における大腿周径位の測定を行った(31, 32)。スチール製のメジャーを用いて上前腸骨棘-膝蓋骨上端距離 (Anterior Superior Iliac Spine - Superior Tip of the Patella Distance; APD) を計測した。APD の値より、膝蓋骨上端から近位方向に 5% (APD5%)、20% (APD20%) および 50% (APD50%) の位置における大腿周径位を測定した。内側広筋斜頭 (VMO) の

測定箇所は APD5%位大腿周径の内側方向 12.5%において、内側広筋 (VM) の測定箇所は APD20%位大腿周径の内側方向 12.5%において、外側広筋 (VL) の測定箇所は APD50%位大腿周径の外側方向 10%において各々算出された部位とした。大腿直筋 (RF) および中間広筋 (VI) の測定箇所は APD50%の直上とした。すべての測定部位はフェルトペンによってマーキングされた (図 1)。



APD；上前腸骨棘-膝蓋骨上端距離，VMO；內側廣筋斜頭，VM；內側廣筋，RF；大腿直筋，VI；中間廣筋，VL；外側廣筋

VMO, VM, RF, VI, VL の横断像の撮像は超音波診断装置 (Prosound2, Hitachi Aloka Medical, Tokyo, Japan) を用いて行われた。また, RF, VL における羽状角の測定を行うため, 縦断像を撮像した。皮膚に接触する超音波探触子面 (幅 5cm, 7.5MHz) には超音波用のゼリーを塗布し, 皮膚を圧迫することによる筋の変形が生じないように配慮した。測定における対象者の肢位は安静仰臥位, 股関節中間位とし, リラックスした状態を保ち下肢に力を入れないように指示をした。

各測定部位において得られた超音波画像はポータブル HDD に取り込まれ, オフラインのパーソナルコンピュータ上で画像解析ソフトウェア (Image J, National Institutes of Health, Bethesda, MD, USA) を用いた解析が行われた (図 2)。VM, VI における筋厚は, 皮下脂肪組織と筋組織の境界面から筋組織と骨組織までの境界とした (図 2 b, c)。VMO, RF, VL における筋厚は, 皮下脂肪組織と筋組織の境界面から中間広筋との境界面までの距離とした (図 2 a, c, d)。

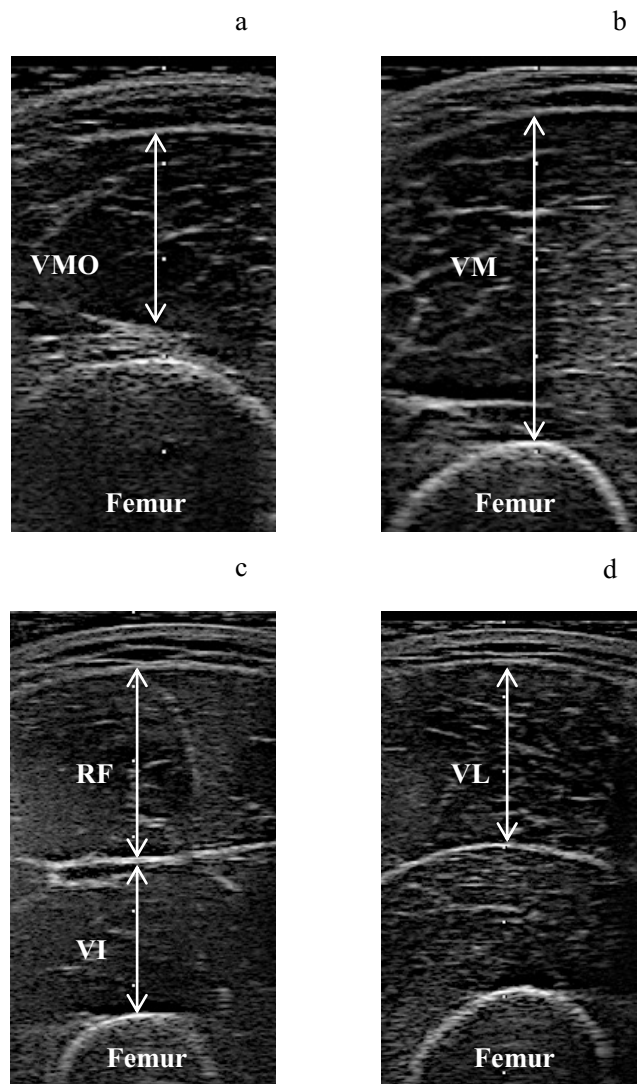


図 2 各筋頭における超音波横断像

VMO；内側広筋斜頭，VM；内側広筋，RF；大腿直筋，VI；中間広筋，VL；外側広筋，
Femur；大腿骨

RF, VL における羽状角は, 各筋頭の深部腱膜と筋束のなす角として分析した(51, 62) (図

3). RF と VL の羽状角と筋厚の値から, 以下の式を用いて筋束長を推定した(51).

$$\text{筋束長} = \text{筋厚} \cdot \sin(\text{羽状角})^{-1}$$

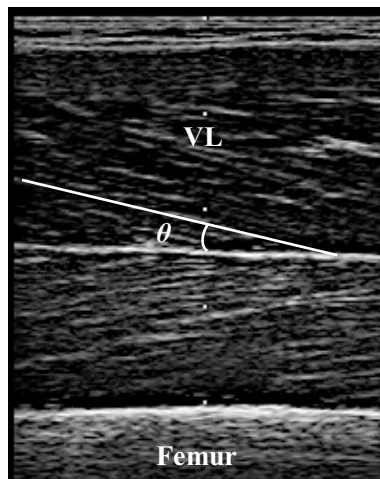


図 3 縦断像による羽状角の測定 (外側広筋)

VL ; 外側広筋, Femur ; 大腿骨, θ ; 羽状角

各測定部位における筋厚の値は, 3 回測定された画像データの平均値とした. 24 時間以上の間隔を空けて実施された再試験の結果から, 再試験信頼性について検討した (n=11, 筋厚 VMO:0.91, VM:0.86, RF:0.92, VI:0.89, VL:0.94 羽状角 RF:0.93, VL:0.95).

2-2-3. 統計処理

各測定項目の値は平均値±標準偏差で示され, Shapiro-Wilk test により正規性の検定を行った. 正規分布が認められた VMO, VM, RF, VL の筋厚および RF と VL の羽状角, 筋束長は一元配置分散分析の後に下位検定 (Tukey's post hoc test) を実施することにより, 年齢群

間の比較を行った。非正規分布が認められた VI の筋厚は、Kruskal-Wallis test を行った後に Mann-Whitney U test を実施し、年齢群間の比較を行った。Mann-Whitney U test によって得られた p 値は Bonferroni 法により補正された。

各筋頭の最大発育年齢を推定するために、最小二乗法によって筋厚と月齢から三次近似式の計算を行った。

$$f(x)=k_3x^3+k_2x^2+k_1x+k_0$$

さらに二階微分を行い、得られた変曲点を各筋頭の最大発育年齢とした。

$$\frac{d(f(x))}{dx} = 3k_3x^2 + 2k_2x + k_1$$

$$\frac{d^2(f(x))}{dx^2} = 6k_3x + 2k_2$$

交互作用に関する効果量は偏イータ 2 乗 ($p\eta^2$)、多重比較においては d を用いて検討した。効果量の大きさは小 ($p\eta^2 < 0.01, d < 0.2$)、中 ($0.01 < p\eta^2 < 0.14, 0.2 < d < 0.8$)、大 ($p\eta^2 > 0.14, d > 0.8$) とした(17)。統計解析は統計分析ソフト (IBM SPSS statistics version 22.0 IBM, Tokyo, Japan) を用いて実施された。統計学的有意水準は危険率 5%未満とした。

2-3. 結果

大腿四頭筋の筋厚を表 4 に示す。すべての筋頭において有意な交互作用が認められた (VMO : $p=0.001, p\eta^2 = 0.21$; VM : $p < 0.001, p\eta^2 = 0.37$; RF : $p < 0.001, p\eta^2 = 0.37$; VI :

$p < 0.001$, $p\eta^2 = 0.30$; VL: $p = 0.002$, $p\eta^2 = 0.21$). 12-13 歳群におけるすべての筋頭は 18-20 歳群に比べ有意な低値を示した (VMO: $p < 0.001$, $d = 1.45$; VM: $p < 0.001$, $d = 1.84$; RF: $p < 0.001$, $d = 1.62$; VI: $p < 0.001$, $d = 1.47$; VL: $p = 0.003$, $d = 1.21$). また, 12-13 歳群における VM, RF および VL の筋厚は, 16-17 歳群に比べ有意な低値を示した (VM: $p < 0.001$, $d = 1.37$; RF: $p < 0.001$, $d = 2.43$; VL: $p = 0.007$, $d = 1.15$). 14-15 歳群においては, 16-17 歳群の VM ($p = 0.007$, $d = 1.12$), RF ($p = 0.026$, $d = 1.10$) および 18-20 歳群の VM ($p < 0.001$, $d = 1.54$), RF ($p = 0.036$, $d = 0.79$), VI ($p < 0.001$, $d = 1.47$) の筋厚との間に有意差が認められた.

表 4 各年齢群における大腿四頭筋の筋厚

	12-13 歳群	14-15 歳群	16-17 歳群	18-20 歳群	効果量 ($p\eta^2$)
VMO (mm)	22.3 ± 3.3	26.1 ± 4.3	25.8 ± 4.8	28.0 ± 4.4**	0.21
VM (mm)	35.2 ± 4.2	35.9 ± 5.0	40.9 ± 4.1**†	42.2 ± 3.3***‡	0.37
RF (mm)	23.0 ± 2.6	25.2 ± 4.2	28.5 ± 1.9**§	29.2 ± 4.1**§	0.37
VI (mm)	19.2 ± 2.5	19.1 ± 3.2	22.0 ± 3.4	25.0 ± 4.5***‡	0.30
VL (mm)	24.5 ± 3.2	26.2 ± 3.6	28.3 ± 3.4*	29.3 ± 3.0*	0.21

VMO；内側広筋斜頭, VM；内側広筋, RF；大腿直筋, VI；中間広筋, VL；外側広筋

平均値 ± 標準偏差.

* $p < 0.01$, ** $p < 0.001$; vs 12-13 歳群. § $p < 0.05$, † $p < 0.01$, ‡ $p < 0.001$; vs 14-15 歳群.

RF, VL における羽状角および筋束長を表 5 に示す。RF の筋束長において有意な交互作用が認められ ($p=0.02$, $p\eta^2=0.15$), 16-17 歳群は 12-13 歳群に比べ, 有意な高値を示した ($p=0.017$, $d=0.99$)。羽状角および VL の筋束長において統計学的な有意差は認められなかった。

表 5 各年齢群における大腿直筋, 外側広筋の羽状角および筋束長

		12-13 歳群	14-15 歳群	16-17 歳群	18-20 歳群	効果量 ($p\eta^2$)
羽状角 (deg.)	RF	11.6 ± 3.4	10.6 ± 2.7	10.8 ± 2.3	10.4 ± 2.5	0.01
	VL	16.2 ± 3.1	15.4 ± 3.9	15.6 ± 3.1	18.2 ± 3.8	0.04
筋束長 (mm)	RF	123.5 ± 37.3	145.0 ± 47.3	158.5 ± 33.0*	153.5 ± 40.0	0.15
	VL	90.5 ± 18.0	105.5 ± 35.1	108.4 ± 21.0	100.7 ± 19.9	0.09

RF ; 大腿直筋, VL ; 外側広筋

平均値 ± 標準偏差.

* $p < 0.05$; vs 12-13 歳群.

大腿四頭筋の筋厚と月齢の散布図を図 4, 5, 6, 7, 8 に示す。すべての筋頭の三次近似式において有意な相関関係が認められた (VMO : adjusted $R^2 = 0.14$, $p = 0.004$; VM : adjusted $R^2 = 0.35$, $p < 0.001$; RF : adjusted $R^2 = 0.38$, $p < 0.001$; VI : adjusted $R^2 = 0.30$, $p < 0.001$; VL : adjusted $R^2 = 0.18$, $p = 0.001$)。各筋頭における最大発育年齢は二階微分によって推定された (VMO : 12.2 歳 ; 155.0 ヶ月, VM : 15.7 歳, 187.8 ヶ月 ; RF : 17.7 歳, 212.2 ヶ月 ; VI : 15.7 歳, 188.9 ヶ月 ; VL : 15.2 歳, 181.1 ヶ月)。

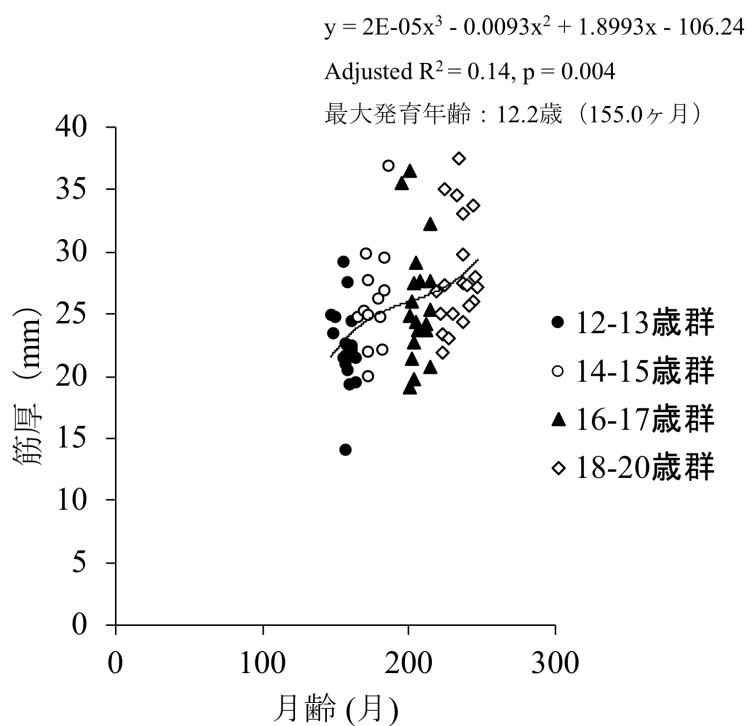


図 4 内側広筋斜頭の筋厚と月齢の散布図および最大発育年齢の推定値

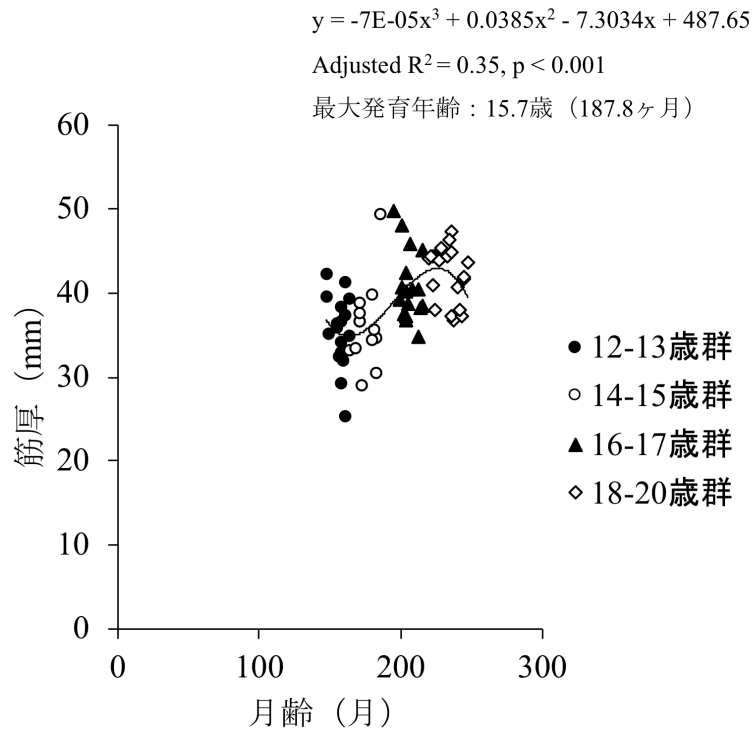


図 5 内側広筋の筋厚と月齢の散布図および最大発育年齢の推定値

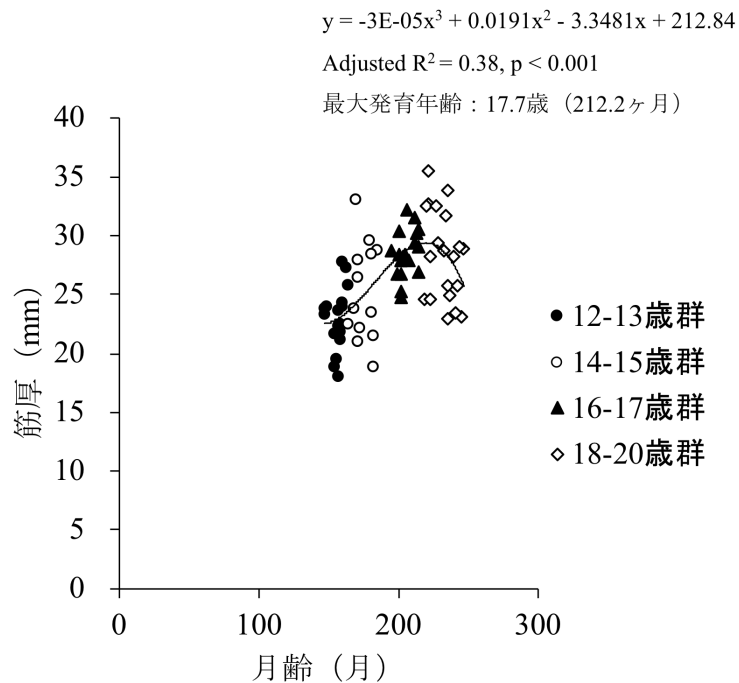


図 6 大腿直筋の筋厚と月齢の散布図および最大発育年齢の推定値

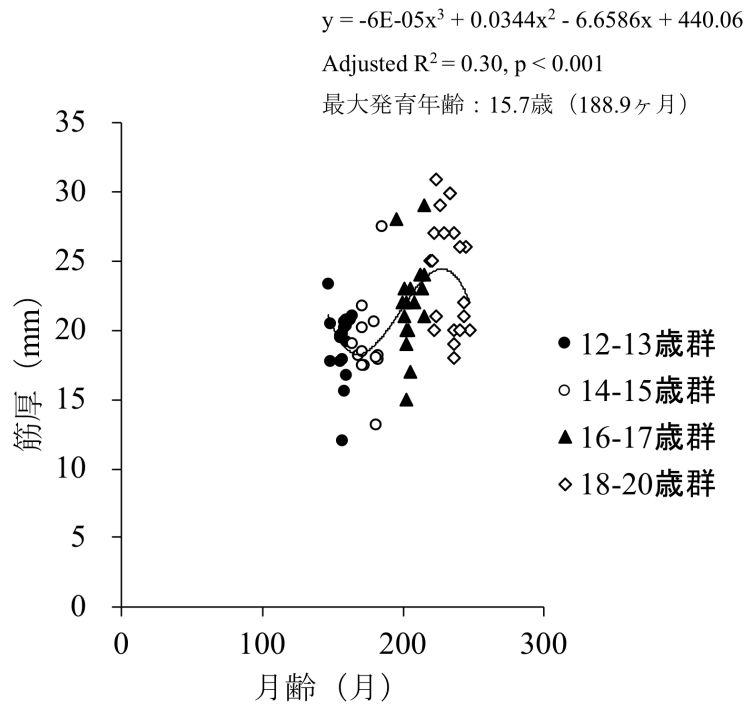


図 7 中間広筋の筋厚と月齢の散布図および最大発育年齢の推定値

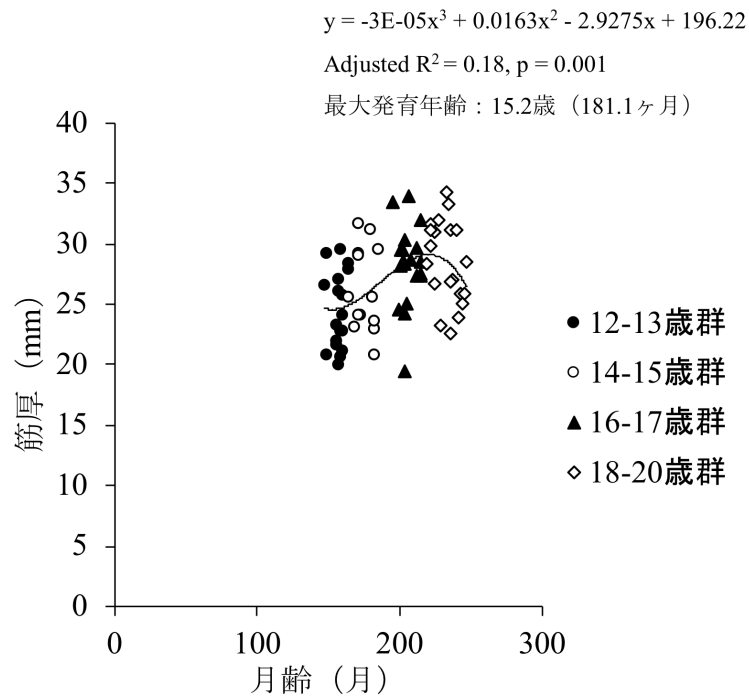


図 8 外側広筋の筋厚と月齢の散布図および最大発育年齢の推定値

2-4. 考察

本研究は大腿四頭筋を構成する筋頭（内側広筋斜頭；VMO，内側広筋；VM，大腿直筋；RF，中間広筋；VI，外側広筋；VL）に細分化し，その筋形態の成長に伴う変化について横断的に調査した．その結果，VM，RF，VLの発育は16-17歳群において，VMOとVIは18-20歳群において顕著な成長が認められた．また，最大発育年齢を最も早く迎える筋頭はVMO（12.2歳；155.0ヶ月）であり，最も遅く迎える筋頭はRF（17.7歳；212.2ヶ月）であった．これらの結果から，大腿四頭筋の成長率は筋頭によって異なること，成長率の差異は各筋頭の異なる機能が影響を及ぼしたことが示唆された．

筋の最大発育速度は体重の最大発育速度に伴い，13歳から17.5歳にかけて，体重あたりの筋量は46%から54%に増加する(57)．本研究では，大腿四頭筋の顕著な発育は16歳から17歳の間を生じ，筋の発育に関する先行研究の結果と一致するものであった．また，大腿四頭筋を構成する各筋頭の推定最大発育年齢の平均値は 15.4 ± 1.7 歳（ 185.0 ± 20.5 ヶ月）であり，日本人の最大身長発育年齢（APHV）から2-2.8年遅れて生じていた(80)．このことから，大腿四頭筋の最大発育は生殖器成熟度分類の第5段階（adult）において生じることが示された．

VM（15.7歳；187.8ヶ月），VI（15.7歳；188.9ヶ月），VL（15.2歳；181.8ヶ月）における最大発育年齢は類似した結果を示した．大腿四頭筋を構成する筋頭の相対的な貢献度を調査した Toumi らの研究によれば，VMの筋活動は片脚スクワットジャンプなどの荷重時において認められたことが報告されている(89)．VMの筋活動に関するその他の先行研究において，VMの筋活動は反復的な片脚での着地（スプリントなど）動作に影響を受けることが報告されている(49)．また，成人（21.9-24.7歳）におけるVIの筋活動について表面筋電図を用いて調査した報告によれば，VIは動的な膝関節伸展筋力の発揮に貢献する筋頭であ

り、膝関節伸展筋力の予測因子となることが示されている(3, 6, 93). さらに、若年者 (12.3 ± 3.9 歳) における膝関節伸展筋力と大腿四頭筋の構造の関係について調査した研究は、膝関節伸展筋力の予測因子として VL の形態を挙げている(68). これらの先行研究から、VM, VI および VL は荷重位での膝関節の動的な機能を発揮することが示唆されている. プレー中に跳躍の着地動作を頻繁に行うバスケットボール選手は、着地時の荷重に対して膝関節伸展筋力を反復的に発揮することが要求される. バスケットボールの練習強度や頻度は高校生年代 (15-18 歳) から増加することが予想されるため、身体活動量の増加、バスケットボールにおける特異的な運動刺激が VM, VI および VL の最大発育年齢に影響を及ぼした可能性が考えられた.

RF の筋厚は、12-13 歳群、14-15 歳群に比べ、16-17 歳群で高値を示した. このことから、RF の顕著な成長は 16 歳頃から始まることが推察された. さらに、RF の最大発育年齢は、他の筋頭に比べて遅く推定された (17.7 歳; 212.2 ヶ月). 股関節、膝関節の機能に影響を及ぼす大腿四頭筋の中で唯一の多関節筋である RF は、歩行(79, 95)、走行、跳躍(62)といった下肢の運動において重要な役割を有する(94). 本研究で認められた RF の最大発育年齢が他の筋頭に比べて遅く発現した結果から、RF の機能が他の筋頭との成長率の差異に影響を及ぼした可能性が考えられた. また、筋束長においても、16-17 歳において有意に長かったことが示されており、RF の顕著な成長が 16 歳頃から生じることを強調する結果であった. 羽状角の年齢群間差は認められなかったことから、筋束長の増加は筋厚の増加に影響を受けた可能性が考えられた. 一方、不明瞭な点として、発育の進行が予想された 18-20 歳群における RF の筋束長が 16-17 歳群よりも低値を示したことが挙げられた. 本研究で行われた横断的な比較検討による影響が考えられたため、今後、同一個体内における筋束長の発育について検討する必要がある.

VMOの筋厚の増加は18-20歳群において認められ、最大発育年齢の推定値は12.9歳(155.0ヶ月)であったことから、VMOの発育のピークは他の筋頭に比べて早いタイミングで生じ、緩やかに増加することが示された。VMの遠位部に位置するVMOは、固有の神経支配を受け、膝蓋骨の内側支持に貢献する(42)。先行研究において、VMOの筋活動は跳躍の着地動作などの荷重位で生じ、VMの近位部とは異なる機能を有することが報告されている(89)。VMOは膝蓋骨の安定性に寄与する重要な働きを有する一方で、膝関節の伸展運動における筋力発揮に関しては、動的に力を発揮する機能を有するVM、RF、VI、VLに比べて貢献度が低い可能性が考えられる。これらのことから、大腿四頭筋を構成する筋頭は固有の働きを有し、その機能によって筋頭の発育がピークを迎えるタイミングは異なる可能性が示唆された。

身体の荷重を支える筋に係る機械的な負荷は、体重や身長に関連する(73)。高強度のトレーニングや運動による筋線維の損傷は、筋の成長の刺激となる(71)。バスケットボール選手の下肢に対しては、短距離のスプリント動作、方向転換動作、跳躍動作などの特異的な活動(23, 91)により、機械的な負荷に係ることが予想される。バスケットボールに特徴的なこれらの機械的な負荷は、一般的な生活レベルでの負荷よりも高く、日常的に係ることによって大腿四頭筋の成長の刺激となることが予想される。したがって、本研究における大腿四頭筋の筋形態の発育は、バスケットボール選手に特異的なものであった可能性が考えられた。年齢の増加や競技特異的な負荷が大腿四頭筋の発育に及ぼす影響について明らかにするために、様々な競技種目を対象とした縦断的な調査を行う必要がある。

本研究は大腿四頭筋の発育について横断的に調査したものであり、同一個体内の成長に伴う変化についての検討はなされていない。Mersmannらは、大腿四頭筋の発育に関する2年間の縦断研究を行い、青年期中期から後期にかけての顕著な発育を報告している(64)。

成熟度が筋形態に及ぼす影響について検討するためには、長期的な縦断研究を実施する必要がある。また、アスリートに対する研究においては、筋の発育に伴って生じる競技パフォーマンスに関連する体力要素（走速度、跳躍高、持久力など）の発達についても明らかにする必要がある。これらのことから、若年アスリートの筋形態、運動能力の成長に伴う変化について縦断的に調査することを今後の検討課題とする。

2-5. 結論

本研究の結果から、大腿四頭筋の筋厚は16歳頃から顕著に増加することが示された。また、大腿四頭筋を構成する筋頭は異なる成長率を有し、これらの差異は各筋頭における固有の機能に関連する可能性が考えられた。

第3章

若年バスケットボール選手の形態学および生理学的変化に関する

縦断的検討

3-1. 緒言

バスケットボール選手は1試合の全運動あたり10%の最大努力の走動作、46回から70回の跳躍動作、約1000回の方向転換を行いながら4500-5000mを移動する(20, 23, 91)。このような競技特性から、身体的な要素に加え、高い水準の生理学的な運動能力が要求される。また、思春期前後においては、バスケットボールのパフォーマンスに関連する身体的、生理学的な要素は個々の成熟度や暦年齢に関連することが報告されている(87)。

成長期の過程において、個体間に形態学的、生理学的な発育・発達の差異が存在することは明らかとされているものの(57, 74, 87)、臨床においては異なる成熟度の若年アスリートが同暦年齢カテゴリーに分類されることが多く、若年アスリートに対する個別性を重視したトレーニングの実施やタレント発掘・選抜に関する慎重な配慮が必要とされている。筋の顕著な成長は13歳から17.5歳にかけて生じ、この期間における体重に対する筋量の割合は46%から54%に増加する(57)。日本人の男子を対象とした横断調査によれば、大腿四頭筋の最大発育年齢の推定値は15.4歳であり、日本人の最大身長発育年齢(Age at Peak Height Velocity; APHV)から2-2.8年遅れて生じたことが報告されている(80, 82)。しかしながら、日本人の若年アスリートにおける筋形態や運動能力を長期的に検討した報告は少なく、暦年齢および生物学的成熟度と筋の発育および運動能力の発達との関連について縦断的に調査する必要がある。

パワー発揮能力を反映するスプリントや跳躍のパフォーマンスは、神経筋機能の指標と

してタレント発掘・選抜の際に利用される(8). パワー発揮能力は APHV から 2 年ほど遅れてピークを迎える(57). 一方で, いくつかの調査において, パワー発揮能力は APHV の時点でスパートを迎えるとも報告されている(74). 若年バスケットボール選手に関する報告では, 暦年齢が生物学的年齢を上回る早熟者は高いスプリントおよび跳躍能力を有し, タレント発掘・選抜における対象となりやすい背景から, これらを考慮する予測因子として APHV と暦年齢の差が提示されている(88). 今日までの研究報告から, 生理学的な運動能力と生物学的成熟度の間に関係があることは明白である. しかしながら, 生物学的成熟度の指標である APHV に到達するまでの時間的な個体差は人種や環境などに影響を受ける可能性が考えられるため(13, 80), 日本人を対象とした調査が求められている.

成熟度の発達レベルに基づいた様々な運動プログラムに若年アスリートが参加することは広く推奨されている(11, 24). 国際オリンピック委員会は, 若年アスリートへのスポーツ環境や臨床実践の改善のために, 若年アスリートの発育・発達に関するさらなる研究の必要性を述べている(11). 若年アスリートに関わるすべての人は, 安全かつ効果的にトレーニングや運動が行われるために, 若年者の形態学的な発育や生理学的な発達がどのように生じるかについて理解して携わらなければならない. 年齢の増加に伴う形態学的な発育や生理学的な発達を明らかにすることは, 若年アスリートに適したトレーニングプログラムを構築するための知見となり得る. そこで本研究は, 若年男子バスケットボール選手を対象に, 筋形態およびスプリント, 跳躍能力について縦断的に検討し, 暦年齢, 生物学的成熟度との関連を明らかにすることを目的とした.

3-2. 方法

3-2-1. 研究デザイン

全国大会優勝経験を有する 41 名の中学生男子バスケットボール選手を対象に、成長に伴う筋形態およびスプリント、跳躍能力の変化について縦断的に調査を行った。測定は 2015 年から 2018 までの 6 月、12 月に定期的に行われ、同一個体の継続した 1 年間の測定値が用いられた。本研究のすべての対象者は同一チーム（クラブ活動）に所属しており、平日は午前 9：00 から午後 3：30 まで授業、8～9 時間/週のバスケットボールの練習を実施、4 時間/週のストレングス&コンディショニングプログラム（自体重トレーニング、スプリントトレーニング、レジスタンストレーニング、スタビリティエクササイズなど）を行っていた。試合期には、週末に 1～2 試合に参加していた。これらのことから、すべて対象者の生活習慣は研究期間を通してほぼ同様であったと考えられた。

3-2-2. 対象者

対象者は測定開始時点の暦年齢と APHV の推定値に基づいて、pre PHV 群 (n = 12, 暦年齢 < APHV - 6 ヶ月), APHV 群 (n = 12, 暦年齢 = APHV ± 6 ヶ月), post PHV 群 (n = 17, 暦年齢 > APHV + 6 ヶ月) の 3 群に分類された (表 6)。APHV は、過去 6 回以上測定された対象者の身長値に基づいて推定された (AUXAL, version 3.0; Scientific Software International Inc., Skokie, IL, USA)。上肢の筋厚とスプリントの縦断的な測定に関しては 24 名 (pre PHV 群 : n = 8, APHV 群 : n = 10, post PHV 群 : n = 6) の対象者が参加した。下肢の手術歴を本研究参加の除外条件とし、測定時点において傷害を有しておらず、バスケットボールに関連する動作 (跳躍の踏切や着地、スプリントなど) を全力で実施することが可能であることを参加条件とした。研究に先立ち、すべての対象者に対して本研究の詳細

や安全性について説明が行われた。20歳未満の対象者であったため、保護者および所属組織の責任者に対しても同様の説明が行われ、すべての対象者から同意を得た。本研究は帝京平成大学倫理審査委員会の承認を得て行われた (No. 29-034-1)。

表 6 初回測定時における対象者の身体的特徴

	pre PHV 群 n = 12	APHV 群 n = 12	post PHV 群 n = 17
年齢 (歳)	13.1 ± 0.5	12.8 ± 0.4	13.3 ± 0.6
推定 APHV (歳)	14.2 ± 0.6	12.7 ± 0.4	11.9 ± 0.8
身長 (cm)	149.8 ± 7.2	165.2 ± 7.5	167.9 ± 7.4
体重 (kg)	50.5 ± 5.3	56.1 ± 4.1	55.6 ± 6.7
	n = 8	n = 10	n = 6
年齢 (歳)	12.9 ± 0.5	12.9 ± 0.5	13.2 ± 0.4
推定 APHV (歳)	14.1 ± 0.6	12.9 ± 0.6	12.2 ± 0.8
身長 (cm)	151.9 ± 6.1	158.7 ± 3.8	173.7 ± 5.9
体重 (kg)	51.2 ± 6.3	55.2 ± 5.6	61.7 ± 4.7

平均値 ± 標準偏差. APHV: 最大身長発育年齢.

3-2-3. 超音波測定

先行研究の方法に基づき、内側広筋 (Vastus Medialis ; VM)、大腿直筋 (Rectus Femoris ; RF)、中間広筋 (Vastus Intermedius ; VI)、外側広筋 (Vastus Lateralis ; VL) の撮像部位を求めた(82)。また、上肢の筋群については、上腕骨外側上顆と肩峰の距離の遠位 60%における

周径の内側 25%を上腕二頭筋 (Biceps Brachii; BB), 内側 75%を上腕三頭筋 (Triceps Brachii; TB) の撮像部位とした(72). 各測定部位の横断像は超音波診断装置 (SNiBLE, Konica Minolta, Inc., Tokyo, Japan) を用いて行われた. 皮膚に接触する超音波探触子面 (幅 5cm, 7.5MHz) には超音波用のゼリーを塗布し, 皮膚を圧迫することによる筋の変形が生じないように配慮した. 下肢の超音波測定における対象者の肢位は安静仰臥位, 股関節中間位とし, リラックスした状態を保ち下肢に力を入れないように指示をした. また, 上肢の超音波測定における対象者の肢位は, 端座位, 肘関節伸展位とした.

各測定部位において得られた超音波画像はポータブル HDD に取り込まれ, オフラインのパーソナルコンピュータ上で画像解析ソフトウェア (Image J, National Institutes of Health, Bethesda, MD, USA) を用いた解析が行われた (図 2, 9). VM, VI, BB および TB における筋厚は, 皮下脂肪組織と筋組織の境界面から筋組織と骨組織までの境界とした (図 2 b, c, 図 9). RF, VL における筋厚は, 皮下脂肪組織と筋組織の境界面から VI との境界面までの距離とした (図 2 c, d).

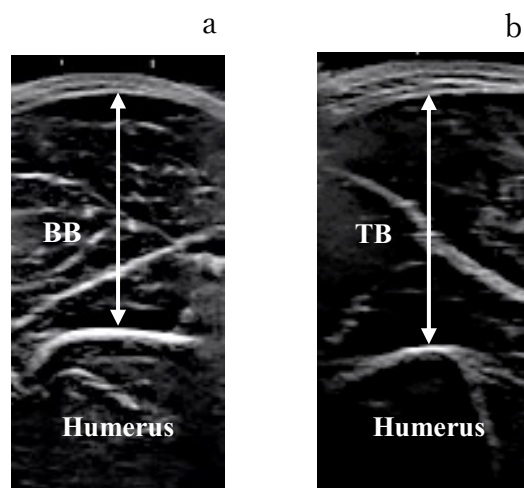


図 9 上腕二頭筋 (a) および上腕三頭筋 (b) における横断像

BB ; 上腕二頭筋, TB ; 上腕三頭筋, Humerus ; 上腕骨

3-2-4. 運動能力の測定

運動能力の指標として、腕振りを伴うカウンタームーブメントジャンプ (CMJ)、走速度の測定を行った。測定に先立ち、すべての対象者は約 10 分間のウォーミングアップを実施した。測定は木製のバスケットボールコートにおいて 2 回ずつ行われ、高値が採用された。

CMJ の測定は自立式跳躍高測定器 (Yardstick, Swift Performance, LLC, Gresham, OR, USA) を用いて測定された。測定に先立ち、対象者に対して踏切前に足底が床面から離れないように注意し、上肢を用いた反動動作を伴う最大努力の跳躍を行うよう指示した。また、立位、肩関節最大屈曲位での指高 (中指-床間距離) を計測し、測定された最高到達点と指高の差を跳躍高として算出した。

走速度は赤外線装置 (TC Timing System, Brower Timing Systems, Utah, USA) によって 10m および 20m 地点において測定された。赤外線ゲートはスタート地点、10m 地点および 20m 地点の地上 1m に設置された。スタートの方法は立位とし、タイミングは対象者の任意とした。10m および 20m の走速度は、対象者がスタート地点のゲートを通過した時点から各地点のゲートを通過した時点までに計測された走タイムから算出された。

3-2-5. 統計解析

統計解析は統計分析ソフト (IBM SPSS statistics version 24.0 IBM, Tokyo, Japan) を用いて実施された。二元配置分散分析 (群 × 時間) および多重比較検定 (Bonferroni's post hoc test) を行い、各測定項目の群間および群内の変化について検討した。統計学的有意水準は危険率 5%未満とした。交互作用および主効果に関する効果量は偏イータ 2 乗 ($p\eta^2$)、多重

比較においては d を用いて検討した。効果量の大きさは小 ($p\eta^2 < 0.01, d < 0.2$), 中 ($0.01 < p\eta^2 < 0.14, 0.2 < d < 0.8$), 大 ($p\eta^2 > 0.14, d > 0.8$) とした(17).

3-3. 結果

表 6 に各年齢群における筋厚の変化について示す。VM ($p = 0.04, p\eta^2 = 0.15$), RF ($p = 0.004, p\eta^2 = 0.25$), VL ($p = 0.003, p\eta^2 = 0.27$), BB ($p = 0.05, p\eta^2 = 0.25$) において有意な交互作用が認められた。TB を除くすべての筋厚において、有意な主効果 (時間) が認められた (VM : $p < 0.001, p\eta^2 = 0.61$; RF : $p < 0.001, p\eta^2 = 0.58$; VI : $p = 0.001, p\eta^2 = 0.26$; VL : $p < 0.001, p\eta^2 = 0.58$; BB : $p < 0.001, p\eta^2 = 0.76$)。VM および BB は、すべての群において 1 年後の有意な増加が認められた (VM : $p < 0.01, d = 0.49-0.97$; BB : $p < 0.05-0.01, d = 1.07-1.43$)。RF, VI, VL の有意な増加は pre PHV 群 (RF : $p < 0.001, d = 0.80$; VI : $p = 0.04, d = 0.42$; VL : $p < 0.001, d = 0.86$) および APHV 群 (RF : $p < 0.001, d = 0.75$; VI : $p = 0.001, d = 0.97$; VL : $p < 0.001, d = 0.90$) において認められたが、post PHV 群においては認められなかった。

表 7 上腕および大腿部筋厚の縦断変化

		pre PHV 群 <i>n</i> = 12	APHV 群 <i>n</i> = 12	post PHV 群 <i>n</i> = 17	<i>F</i> 値	
					交互作用	主効果 (時間)
VM (mm)	初回測定	32.5 ± 3.9	33.4 ± 4.6	35.9 ± 4.5	3.42 ^b	59.97 [§]
	12 ヶ月後	36.8 ± 4.8 ^{**}	37.9 ± 3.5 ^{**}	37.9 ± 3.5 ^{**}		
RF (mm)	初回測定	21.1 ± 2.9 [‡]	22.0 ± 3.2 [‡]	25.1 ± 3.3	6.36 ^a	51.62 [§]
	12 ヶ月後	23.2 ± 2.4 ^{**}	24.2 ± 2.6 ^{**}	25.7 ± 3.1		
VI (mm)	初回測定	18.0 ± 3.9	17.7 ± 2.5	19.8 ± 2.9	2.91	13.35 [§]
	12 ヶ月後	19.5 ± 3.5 [*]	20.3 ± 2.9 ^{**}	20.2 ± 3.7		
VL (mm)	初回測定	22.8 ± 3.5	22.8 ± 3.3	25.7 ± 3.5	6.98 ^a	52.39 [§]
	12 ヶ月後	25.6 ± 2.9 ^{**}	25.6 ± 2.8 ^{**}	26.4 ± 3.3		
		<i>n</i> = 8	<i>n</i> = 10	<i>n</i> = 6		
BB (mm)	初回測定	23.4 ± 3.1 [‡]	24.9 ± 2.6 [‡]	29.6 ± 2.3	3.56 ^b	65.09 [§]
	12 ヶ月後	29.0 ± 4.6 ^{**}	28.6 ± 2.9 ^{**}	31.9 ± 2.1 [*]		
TB (mm)	初回測定	22.6 ± 2.7 [‡]	25.0 ± 2.6	28.2 ± 4.5	0.33	3.61
	12 ヶ月後	24.2 ± 2.3 ^b	25.8 ± 3.3 [#]	30.5 ± 4.3		

平均値 ± 標準偏差. VM；内側広筋, RF；大腿直筋, VI；中間広筋, VL；外側広筋,

BB；上腕二頭筋, TB；上腕三頭筋

^a *p* < 0.01, ^b *p* < 0.05；有意な交互作用. [§] *p* < 0.01；有意な主効果（時間）.

^{*} *p* < 0.05, ^{**} *p* < 0.01；vs 初回測定値. [†] *p* < 0.05, [‡] *p* < 0.01；vs post PHV 群（初回測定）.

[#] *p* < 0.05, ^b *p* < 0.01；vs post PHV 群（12 ヶ月後）.

垂直跳躍高および走速度の変化について、図 10, 11, 12 に示す。CMJ ($p < 0.001$, $p\eta^2 = 0.49$), 10m 走速度 ($p = 0.05$, $p\eta^2 = 0.17$), 20m 走速度 ($p < 0.001$, $p\eta^2 = 0.65$) において、有意な主効果（時間）が認められた。すべての群において、CMJ および 20m 走速度は有意に増加した（CMJ : $p < 0.01-0.001$, $d = 0.76-1.07$; 20 走速度 : $p < 0.01-0.001$, $d = 0.84-1.72$ ）。10m 走速度の有意な増加は post PHV 群においてのみ認められた ($p = 0.03$, $d = 1.19$)。

群間の横断比較について、初回測定時点において、post PHV 群の RF, BB, TB の筋厚および CMJ, 20m 走速度の値は pre PHV 群（RF : $p = 0.004$, $d = 1.31$; BB : $p = 0.001$, $d = 2.34$; TB : $p = 0.01$, $d = 1.60$; CMJ : $p < 0.001$, $d = 2.32$; 20m 走速度 : $p = 0.003$, $d = 2.32$ ）および APHV 群（RF : $p = 0.04$, $d = 0.97$; BB : $p = 0.01$, $d = 1.91$; CMJ : $p = 0.001$, $d = 1.40$; 20m 走速度 : $p = 0.03$, $d = 1.60$ ）に比べて有意に高値を示した。1 年後の測定においては、post PHV 群の TB の筋厚および CMJ, 10m 走速度, 20m 走速度は pre PHV 群（TB : $p = 0.005$, $d = 1.94$; CMJ : $p < 0.001$, $d = 2.77$; 10m 走速度 : $p = 0.007$, $d = 1.89$; 20 走速度 : $p = 0.014$, $d = 1.72$ ）および APHV 群（TB : $p = 0.03$, $d = 1.30$; CMJ : $p = 0.015$, $d = 1.06$; 10m 走速度 : $p = 0.024$, $d = 1.5$; 20m 走速度 : $p = 0.025$, $d = 1.68$ ）に比べて有意に高値を示した。

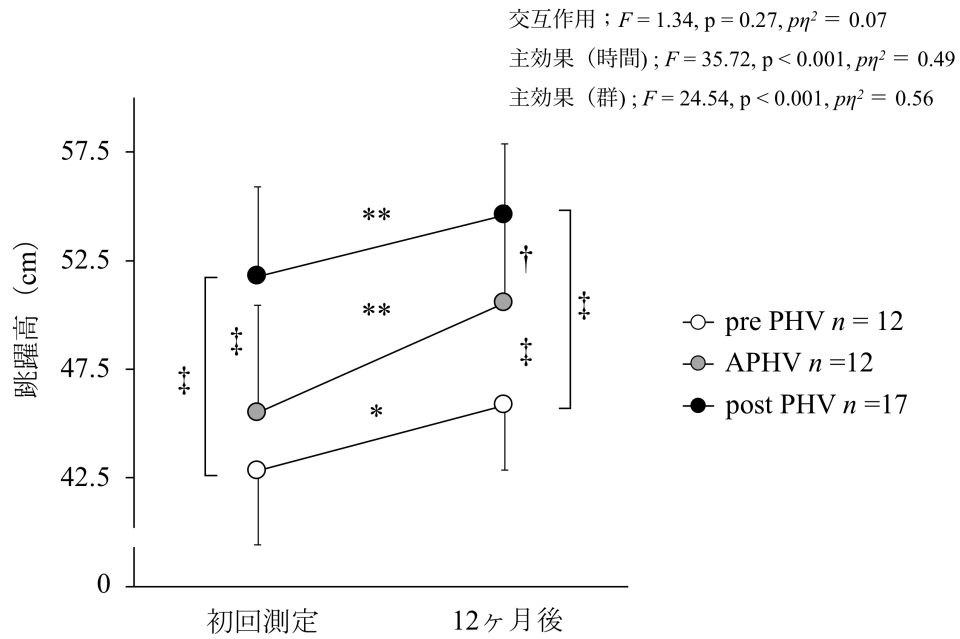


図 10 垂直跳躍高の変化

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$; 群内の縦断比較. † $p < 0.05$, ‡ $p < 0.01$; 群間の横断比較.

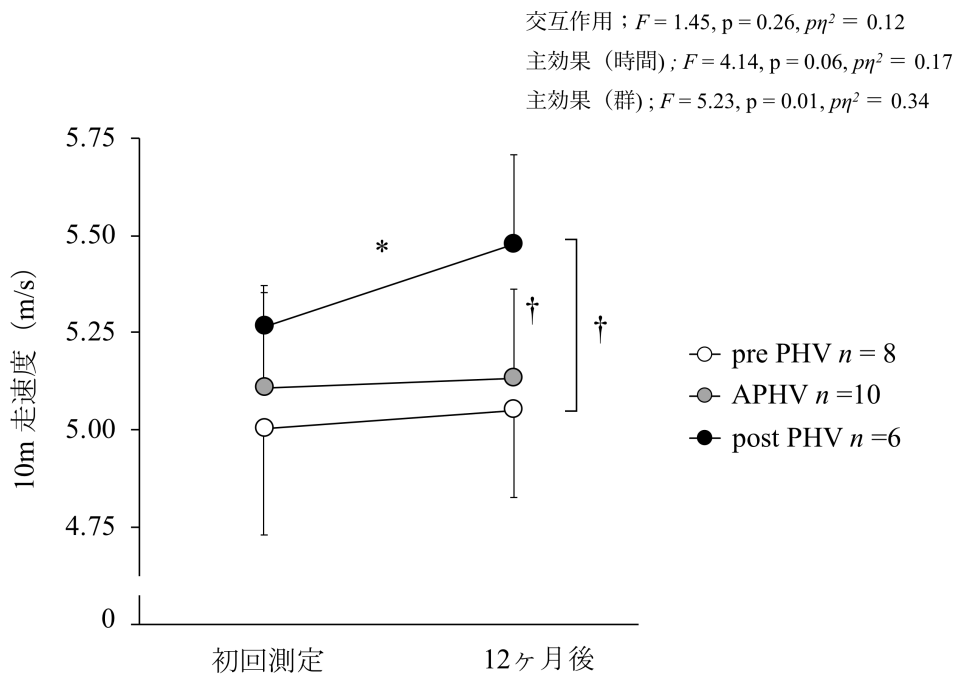


図 11 走速度 (10m) の変化

* $p < 0.05$; 群内の縦断比較. † $p < 0.05$; 群間の横断比較.

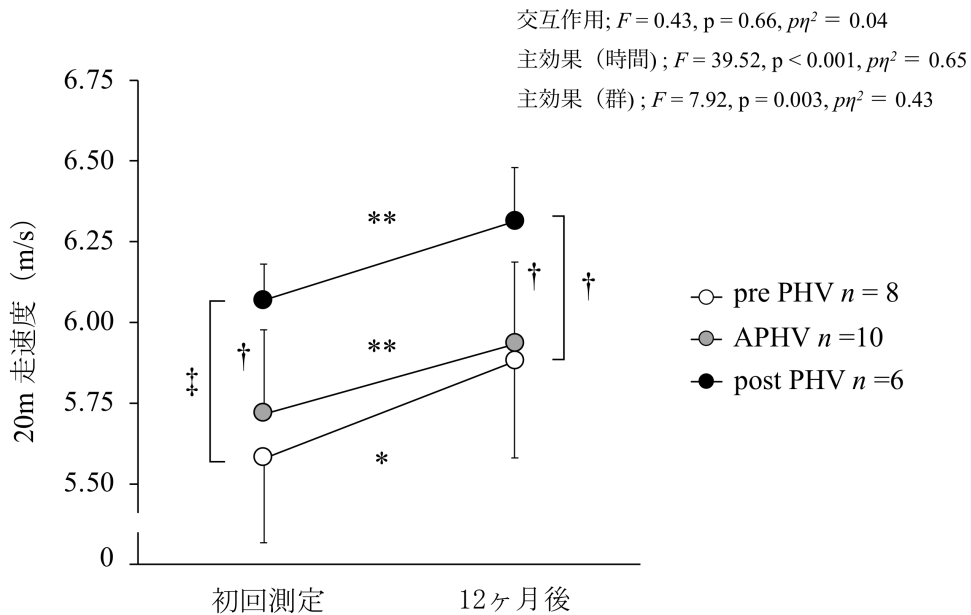


図 12 走速度 (20m) の変化

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$; 群内の縦断比較. † $p < 0.05$, ‡ $p < 0.01$; 群間の横断比較.

3-4. 考察

本研究は、日本人の若年男子バスケットボール選手を対象に形態学的な発育および生理学的な運動能力の発達について縦断的に調査した。その結果、筋の顕著な成長は最大身長発育年齢 (Age at Peak Height Velocity; APHV) に到達する以前から生じた可能性が示された。本研究の対象者は類似した暦年齢カテゴリー (13.2 ± 0.6 歳) に分類されていたにもかかわらず、早熟者のスプリント、跳躍能力は暦年齢に対する成熟度が標準的な者や晩熟傾向にある者に比べて有意に高く、中学生年代 (12-15 歳) においてスプリント、跳躍能力の差が縮小する可能性は低いと考えられた。これらのことから、身体の形態学的発育および生理学的な運動能力の発達における速度やテンポは、生物学的成熟度に依存する可能性が示唆された。

ヒトの活動において、大腿四頭筋の機能は重要である(2, 3, 93). 解剖学的には、大腿四頭筋を構成する各筋頭は固有の機能を持ち(32, 62, 89), 異なる成長率を有する(82). 本研究では、pre PHV 群および APHV 群における大腿四頭筋の筋厚の増加が認められ、post PHV 群は内側広筋 (Vastus Medialis ; VM) を除くすべての筋頭で増加が認められなかった。このことから、大腿四頭筋の形態学的な成長率は APHV 経過後に比べ、APHV に達するまでの期間で高いことが示された。

すべての年齢群において VM は有意に増加したが、これは 13 歳から 17.5 歳の間を生じるとされる筋の発育のピークに関連している可能性が考えられた(57). VM は荷重位の運動中において顕著に活動し、重要な役割を担う(49, 89). 成長期における成熟の進行および身体活動の強度や頻度の増加は、VM の発育を特異的に刺激する可能性がある。

上腕二頭筋 (Biceps Brachii ; BB) の筋厚は、すべての年齢群において有意に増加した。上肢の筋量の増加は、思春期の第二性徴において認められる成長に関連するホルモン分泌量の急速な増加およびその影響による身体の男性化を示すと考えられる。1 歳から 20 歳までの米国人 32,952 名を対象に上腕の形態について調査した研究によれば、上腕の筋横断面積は 12 歳から 15 歳にかけて 54.7%の増加が認められたと報告されている(1). さらに、14 歳で身長最大の発育を迎えた男子においては、13 歳から 15 歳の間約 14kg の除脂肪量の増加が認められたことも報告されている(63). 日本人の APHV は 12.8 ± 1.2 歳と報告されており(80), 本研究の対象者における APHV の推定値についても 12.6 ± 1.4 歳であった。これらのことから、日本人の APHV は先行研究で報告されている欧州の男子の APHV(13) に比べて数年早く生じることが考えられ、筋量の増加に代表される身体の形態学的な発育は、日本の中学生年代 (12-15 歳) の間に生じることが示された。

パワー発揮能力の発達には APHV から約 2 年後にピークを迎え(57), 男子の最大パワーは 12 歳から 17 歳の間で約 121% 増加することが報告されている(7). Lloyd らは, 運動パフォーマンス発揮時における伸長-短縮サイクルの急速な適応は APHV の到達前 (10-11 歳) および経過後 (14-16 歳) において生じ, APHV 到達前の 12-18 ヶ月の期間において,

「Adolescent awkwardness」に関連する運動パフォーマンスの低下が認められたことを報告した(54). 一方, ベルギーの若年サッカー選手を対象とした APHV と運動パフォーマンスとの関連に関する調査では, 走速度および垂直跳躍高の発達のピークは APHV の時点で生じたことが報告されている(74). 本研究では, すべての年齢群において垂直跳躍高および 20m 走速度の有意な増加が認められた. この結果から, 日本人男子の思春期は跳躍やスプリントのパフォーマンス向上において重要な期間であり, スプリントおよび跳躍能力の改善を目的としたトレーニングの実施に適したタイミングである可能性が考えられた.

10m 走速度は, post PHV 群においてのみ約 4% の向上が認められた. Meyers らは, APHV を経過した男子における走速度の向上は, スプリント時におけるピッチの安定化および下肢長に依存するストライド長の持続的な増加に関連していたことを報告した(65). また, 日本人ジュニアスプリンターを対象とした縦断研究によれば, 12 歳から 14 歳の年齢の増加に伴う走速度の発達は, ピッチの増大によるものではなくストライドの増大によるものであったことが報告されており, 形態の発育がスプリント能力に影響を及ぼしたことが示唆されている(44). 近年の報告によると, 思春期 (13-15.99 歳) および思春期後のアスリート (16-18 歳) は, 思春期前のアスリート (10-12.99 歳) に比べ, スプリントに対するトレーニング能力が高いことが示されている(67). post PHV 群においてのみ認められた 10m 走速度の向上は, 成熟度や発育に伴う下肢長の増加によって起こったことが推察された.

初回測定時における横断的な比較において、暦年齢に対して早熟傾向にあるバスケットボール選手（post PHV 群）におけるスプリント、跳躍能力は、暦年齢に対して順当あるいは晩熟傾向にあるバスケットボール選手（APHV 群、pre PHV 群）に比べて有意に高値を示した。同様に、大腿四頭筋の中で股関節と膝関節を跨ぐ唯一の多関節筋であり、下肢の動作において重要な役割を有する大腿直筋（Rectus Femoris；RF）の筋厚においても(62, 94)、post PHV 群で有意に高値を示した。また、1年後に再度測定された走速度や跳躍高の横断的な比較においても、post PHV 群は APHV 群および pre PHV 群に比べ有意に高値を示した。これらの横断的な比較による結果から、晩熟者や暦年齢に対して順当に成熟したバスケットボール選手のスプリント、跳躍能力の発達には認められるものの、日本人の中学生の年代において早熟傾向のバスケットボール選手のスプリント、跳躍能力に追いつく可能性が低いことが示唆された。本研究の対象者は、暦年齢ではなく推定された APHV に基づいて分類されたため、運動習慣や経験がこれらの結果に及ぼした影響は少ないものと考えられる。エリートバスケットボール選手と非エリートバスケットボール選手における生まれ月や成熟度に関連する人体計測学的、生理学的な差について検討した調査によると、同暦年齢カテゴリーにもかかわらず、エリートバスケットボール選手の成熟度は非エリートバスケットボール選手に比べて進行していたことが報告されている(87, 88)。また、早熟傾向のアスリートのタレント発掘・選抜における評価の有利さが、成長期に顕著に生じる成熟度の個体差による一時的なものかどうかを判断する必要がある、長期的な戦略をもってタレント発掘・選抜に臨むことの重要性が述べられている(87)。本研究の結果はこれらの先行研究の結果との一致が認められた。若年アスリートのタレント発掘・選抜の機会において、早熟傾向にあるアスリートは暦年齢に順当、あるいは晩熟傾向にあるアスリートに比べ、高い評価を受けやすい可能性があることが考えられた。

本研究のデータは、若年バスケットボール選手の成長の結果として、1年間の形態学的および生理学的な変化を示した。研究の限界点として、運動課題の介入を行わなかったため、成熟度がトレーニング効果に及ぼす影響について検討しなかったことが挙げられる。また、すべての対象者はバスケットボール選手であり、本研究の結果は多くの競技種目に一般化することができない可能性がある。若年アスリートに対する安全かつ効果的なトレーニングプログラムを発展させるためには、多くの種目の若年アスリートを対象とした介入研究により、生物学的成熟度とトレーナビリティとの関係について検討する必要がある。また、身体の発育や運動能力の発達に関して、晩熟傾向にあるアスリートが早熟傾向にあるアスリートに追いつくことができるタイミングについて明らかにするために、幅広い年代を対象とした縦断的な検討を行う必要がある。

3-5. 結論

日本人の中学生バスケットボール選手における顕著な筋の発育は、APHVに到達する以前から生じる可能性が考えられた。また、思春期は、スプリントおよび跳躍能力の向上を目的としたトレーニング実施において重要な時期であることが示唆された。横断的な比較から、晩熟者のスプリントおよび跳躍能力は、日本の中学生年代（12-15歳）の間に早熟者に追いつく可能性が低いことが示された。同暦年齢カテゴリーにおける形態学的発育および生理学的発達のスピードやテンポが生物学的成熟度に依存することを理解することは、若年アスリートに携わる多くの専門職（教師、コーチ、アスレティックトレーナーなど）が安全かつ効果的なトレーニングを実施させる上で必要となる。

第4章

異なる成熟度の若年アスリートにおける運動に対するホルモン応答の比較

4-1. 緒言

今日、若年者のトレーニング実施は運動能力の向上において効果的な方法であることが明らかとされている。いくつかのシステマティックレビューおよびメタ解析において、トレーニングは若年者のパワー発揮能力や運動スキル、筋力を改善する可能性があることが報告されている(37, 52)。このような背景から、若年アスリートが様々なトレーニングプログラムに参加することは世界的に推奨されており、実行にあたって若年者の成熟度や個性を考慮することの重要性が提言されている(11, 24)。特に、成熟度が若年者の運動能力やトレーニング効果に影響を及ぼすことを示唆した報告は多くなされており(7, 8, 14, 21, 54, 65-67, 74, 87, 88)、適切なトレーニングプログラムを作成する上で、対象となる若年アスリートの生物学的成熟度を把握することは最も基礎的な要因となる。

筋線維の成長やリモデリングに関連する主要な同化ホルモン（テストステロン、ヒト成長ホルモンなど）の分泌量は、適切なトレーニングの刺激（ストレス）によって増加する(71)。トレーニングによる筋力の向上は思春期および思春期経過後において顕著に認められるが、この向上はホルモンの分泌量に関連する筋量の増加に影響を受けるとされている。一方、思春期前の若年アスリートにおいては運動に対するホルモン分泌量が少ないといった理由から、トレーニングを通じた筋量の増加は困難である可能性が示されている(71)。しかしながら、思春期前の男子を対象に肘関節等尺性運動によるトレーニングを実施した研究によれば、トレーニング後に肘関節屈曲および伸展筋群の横断面積が有意に増加したことが報告されており(27)、若年アスリートを対象としたいくつかの先行研究にお

いて、トレーニングに対する同化ホルモン分泌量の増加が認められたことが報告されていることから(45, 76, 77, 98), 若年アスリートを対象としたトレーニングに対する内分泌応答について今後のさらなる調査が必要とされている。

若年アスリートにおいては、同じ暦年齢のカテゴリーに所属する場合であっても生物学的成熟度の個体差が顕著である。一般的に、成熟が進行した男子は進行の遅い男子に比べて優れた運動能力を有することが報告されており(58, 74), 13-14歳のバスケットボール選手を対象とした研究によれば、同じ暦年齢カテゴリーであったにもかかわらず、エリート群は非エリート群に比べ、生物学的成熟度を反映する最大身長発育年齢 (Age at Peak Height Velocity ; APHV) の経過年数が高く、早熟傾向の選手で構成されていたことが報告されている(87)。また、筆者らは日本人の中学生男子バスケットボール選手のスプリントおよび跳躍能力が暦年齢だけではなく生物学的成熟度に影響を受ける可能性を示した(図10, 11, 12)。このように、成熟の遅速は運動能力に影響を及ぼすことが明らかとされている。一方で、生物学的成熟度と内分泌応答の関連について報告した研究は限られている。

若年アスリートの競技活動に携わるすべての人は、トレーニングや運動が安全かつ効果的に実施されるために、若年者の発育・発達過程の特徴について理解しなければならない。今日、若年アスリートへのスポーツ環境や臨床における実践的な知見を充実させることを目的とした発育・発達に関する研究の必要性が示されている(11)。これまでに報告された若年アスリートの形態学的な発育や運動能力の発達に加え、内分泌応答の成長に伴う変化について明らかにすることは、成熟度に則したトレーニングプログラム構築の一助となり得ると考えられる。そこで本研究は、異なる成熟度の若年アスリートにおける運動に対するホルモン応答について明らかにすることを目的とした。

4-2. 方法

4-2-1. 対象者

全国大会出場および優勝経験を有する大学生 ($n = 12$, 年齢; 18.0 ± 0 歳, 身長; 187.1 ± 5.9 cm, 体重; 81.3 ± 8.6 kg) および中学生 ($n = 19$, 年齢; 13.2 ± 0.8 歳, 身長; 164.9 ± 8.5 cm, 体重; 54.0 ± 9.4 kg) の男子バスケットボール選手を本研究の対象とした。整形外科的, 内科的疾患がなく, 競技活動が問題なく行えることを本研究の参加条件とした。中学生の対象者は, 最大身長発育年齢 (Age at Peak Height Velocity; APHV) の推定値と暦年齢の差に基づいて, pre PHV 群 (暦年齢 < APHV $n = 7$, 年齢; 12.9 ± 0.6 歳, 身長; 158.3 ± 5.4 cm, 体重; 47.5 ± 6.6 kg) および post PHV 群 (暦年齢 > APHV $n = 12$, 年齢; 13.4 ± 0.8 歳, 身長; 168.8 ± 7.6 cm, 体重; 57.8 ± 8.6 kg) に分類された。APHV の推定は対象者の過去 6 回以上測定された身長の数に基づいて行われた (AUXAL, version 3.0; Scientific Software International Inc., Skokie, IL, USA)。研究に先立ち, すべての対象者に対して本研究の詳細や安全性について説明が行われた。20 歳未満の対象者であったため, 保護者および所属組織の責任者に対しても同様の説明が行われ, すべての対象者から同意を得た。本研究は帝京平成大学倫理審査委員会の承認を得て行われた (No. 29-034-1)。

4-2-2. 唾液サンプル採取・分析

実験に先立ち, すべての対象者は, 午後 2:00 以降の歯磨き, 午後 12:00 以降の水以外の飲食および当日の高強度運動の禁止について事前に説明を受けた。実験の説明は午後 3:45 から実施され, 唾液サンプルの採取は午後 4:00 から開始された。本研究の実験プロトコルを図 13 に示す。唾液サンプルは, 運動課題の直前 (pre), 直後 (post) および 15 分の安静後 (15 min) の各時点において, 5 分間の passive drooling 法により採取された (2ml) (9,

18, 19, 29). 採取された唾液サンプルは、60分間の冷凍と15分間の遠心分離(3000rpm)を二度反復した後、分析時まで -80°C 環境下で保管された。酵素免疫測定法(ELISA)により、唾液中のテストステロン、コルチゾールおよびヒト成長ホルモンの分析を行った(テストステロン、コルチゾール; DiaMetra s. r. l., Italy, ヒト成長ホルモン; Enzo Life Sciences Inc., U.S.)。測定されたテストステロンとコルチゾールの値から、体内の同化状態を反映する指標として用いられるテストステロン・コルチゾール比(T/C比)を算出した(29)。各種ホルモンの分析は製造元の指示に従い実施され、分光光度計(Multiskan JX, Thermo LabSystems Inc., MA, U.S)によって吸光度測定(450nm)が行われた。唾液中ホルモンの検出下限は、 $3.28\text{ pg}\cdot\text{ml}^{-1}$ (テストステロン), $0.12\text{ ng}\cdot\text{ml}^{-1}$ (コルチゾール), $0.93\text{ pg}\cdot\text{ml}^{-1}$ (ヒト成長ホルモン)であった。また、測定内・測定間の精度(Intra- and Inter-assay coefficients of variation)は、 $10.7\% \cdot 13.2\%$ (テストステロン), $10\% \cdot 8.3\%$ (コルチゾール), $4.0\text{-}4.2\% \cdot 1.9\text{-}6.2\%$ (ヒト成長ホルモン)であった。

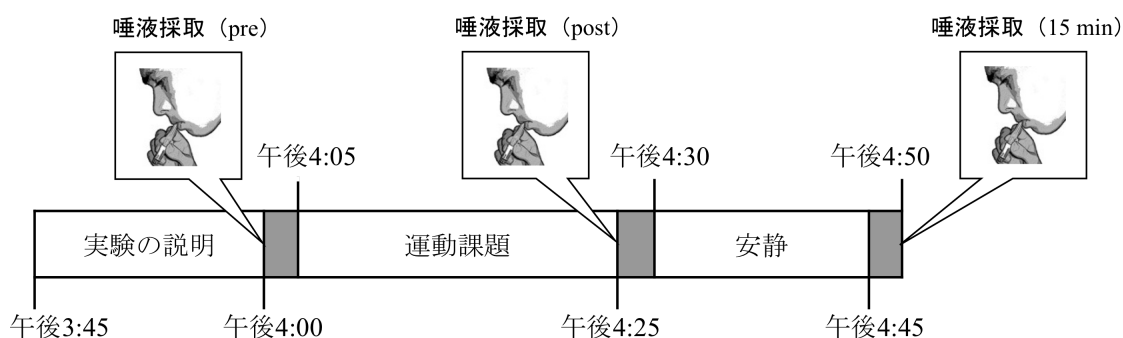


図 13 実験のプロトコル

4-2-3. 運動課題

測定日の1週間前より、すべての対象者に対して運動課題の説明が行われた。運動課題には5つの基本的な自体重のトレーニング種目が採用された（腕立て伏せ、スクワット、アブドミナル・クランチ、ドロップワイドスクワット、カーフレイズ）（図14）。腕立て伏せにおいて、対象者が正確な姿勢を保持できなかった場合、膝立ちもしくは補助者による補助によって負荷が調節された。トレーニングの負荷は、20秒間の運動を60秒間の休息を挟み、3セットとして設定された（運動休息比1：3）。運動のテンポは1秒間に1回の完全動作とし、メトロノームの音に合わせて反復するよう指示された。運動種目間の休息時間は2分間とした（表8）。

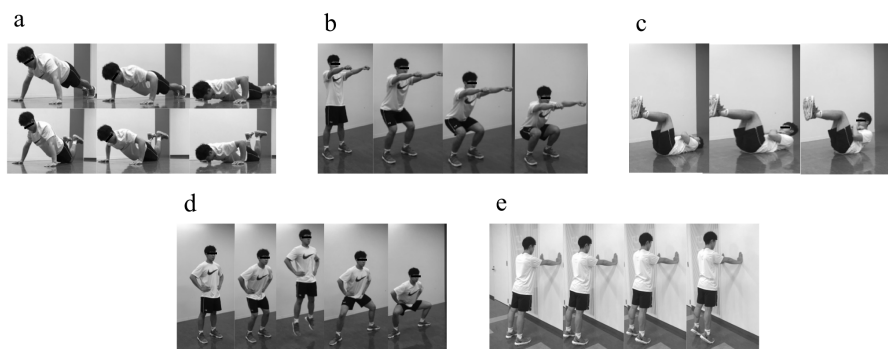


図 14 自体重トレーニング

- a. 腕立て伏せ b. スクワット c. アブドミナル・クランチ
d. ドロップワイドスクワット e. カーフレイズ

表 8 運動課題の詳細

種目	運動時間	セット数	休息时间	テンポ	備考
腕立て伏せ	20 秒	3	60 秒	1 回/1 秒	20 秒間での最大回数実施
スクワット	20 秒	3	60 秒	1 回/1 秒	最下降時に大腿部前面と床を平行
アブドミナル・クランチ	20 秒	3	60 秒	1 回/1 秒	股関節・膝関節 90° 屈曲位
ドロップワイドスクワット	20 秒	3	60 秒	1 回/1 秒	最下降時に股関節最大外旋位
カーフレイズ	20 秒	3	60 秒	1 回/1 秒	最大底屈位まで実施

4-2-4. 統計処理

データはすべて平均値および標準誤差で示された。統計解析は統計分析ソフト（IBM SPSS statistics version 24.0 IBM, Tokyo, Japan）を用いて実施された。二元配置分散分析（群 × 時間）および多重比較（Bonferroni's post hoc test）を行い、各測定項目の群間および群内の変化について検討した。統計学的有意水準は危険率 5%未満とした。交互作用および主効果に関する効果量は偏イータ 2 乗 ($p\eta^2$)、多重比較においては d を用いて検討した。効果量の大きさは小 ($p\eta^2 < 0.01, d < 0.2$)、中 ($0.01 < p\eta^2 < 0.14, 0.2 < d < 0.8$)、大 ($p\eta^2 > 0.14, d > 0.8$) とした(17)。

4-3. 結果

4-3-1. テストステロン

テストステロンにおいて、有意な群の主効果が認められた ($p < 0.001$, $p\eta^2 = 0.42$). すべての測定時点において、大学生群の濃度は pre PHV 群 (pre : $p = 0.01$, $d = 1.28$; post : $p = 0.003$, $d = 1.45$; 15 min : $p = 0.001$, $d = 1.8$), post PHV 群 (pre : $p = 0.05$, $d = 0.92$; post : $p = 0.04$, $d = 0.96$; 15 min : $p = 0.02$, $d = 1.12$) に比べ有意に高値を示した. また, 大学生群においてのみ, トレーニング 15 分後の有意な増加が認められた ($p = 0.03$, $d = 0.61$). post PHV 群のテストステロン濃度は pre PHV 群に比べ, すべての測定時点において高い効果量を示した ($p > 0.05$, $d = 0.90-1.35$) (図 15).

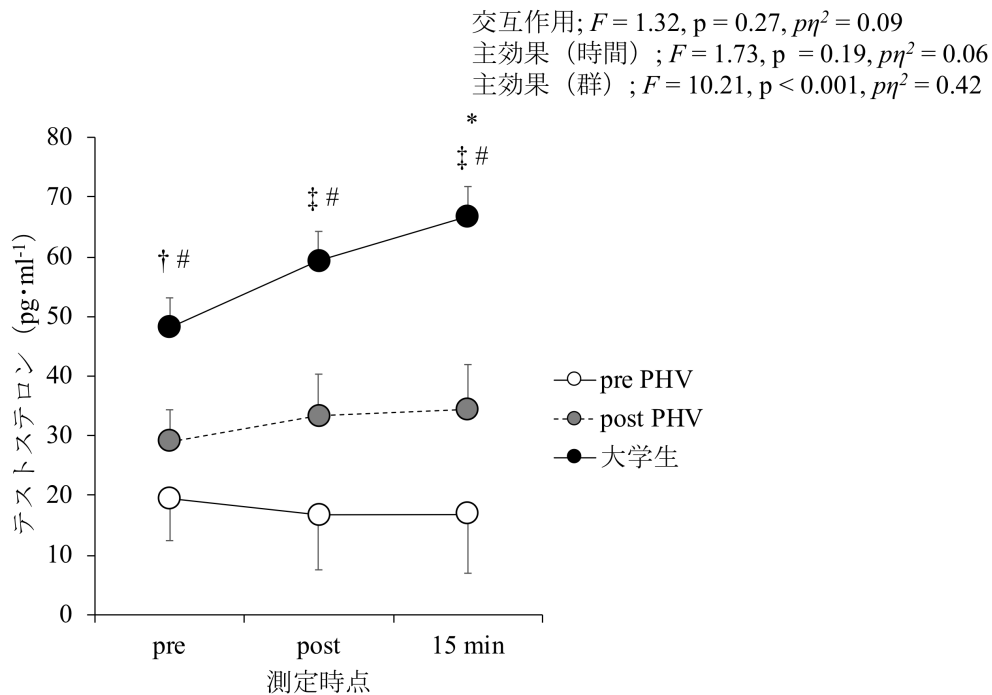


図 15 テストステロンの変化

† $p < 0.05$, ‡ $p < 0.01$; 大学生群 vs pre PHV 群. # $p < 0.05$; 大学生群 vs post PHV 群.

* $p = 0.03$; vs pre (大学生群).

4-3-2. コルチゾール

コルチゾールにおいては、有意な時間の主効果が認められた ($p = 0.003$, $p\eta^2 = 0.19$). 各測定時点における濃度の群間差は認められなかった. post PHV 群においてのみ、運動後の有意な減少が認められた ($p = 0.01$, $d = 0.52$) (図 16).

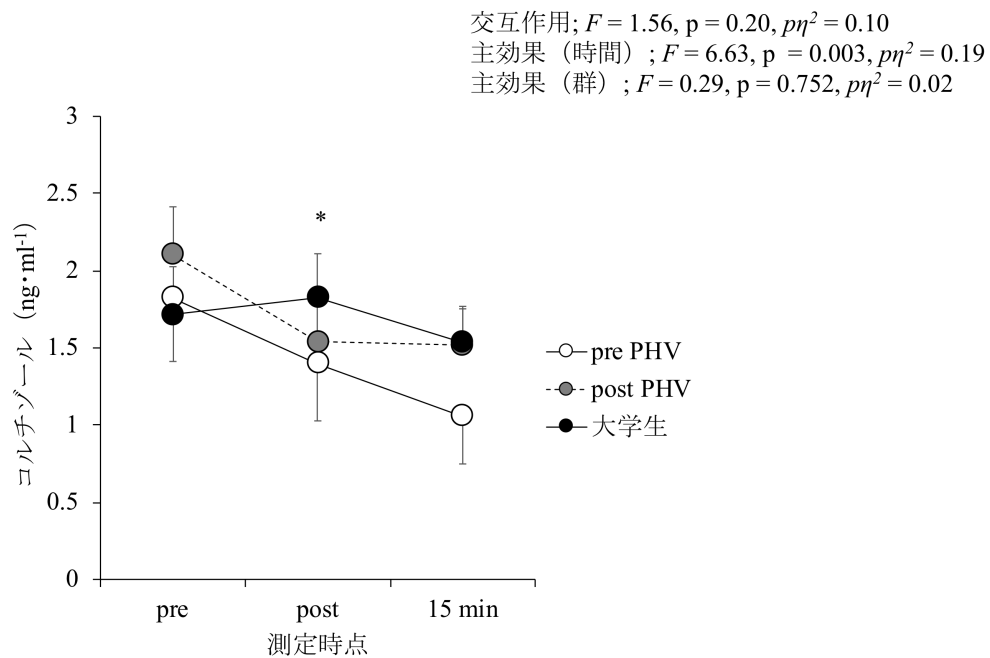


図 16 コルチゾールの変化

* $p = 0.01$; vs pre (post PHV 群).

4-3-3. ヒト成長ホルモン

post PHV 群においてのみ、運動 15 分後の有意な増加が認められた ($p = 0.001$, $d = 0.42$)。大学生群および pre PHV 群において有意な変化は認められなかった (図 17)。

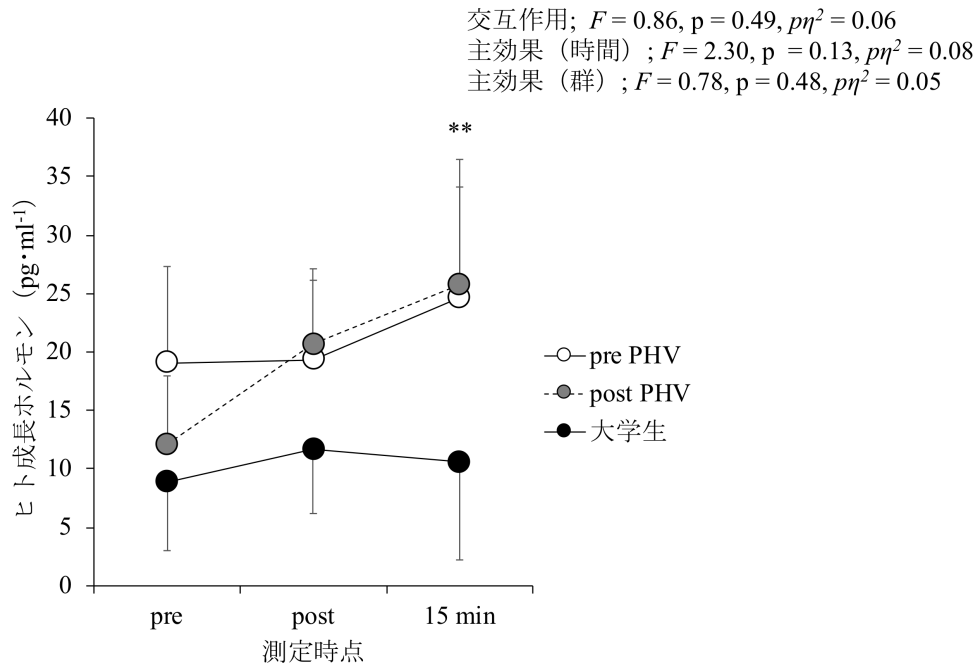


図 17 ヒト成長ホルモンの変化

** $p = 0.001$; vs pre (post PHV 群).

4-3-4. T/C 比

時間および群の有意な主効果が認められた（時間： $p < 0.001$, $p\eta^2 = 0.26$ ；群： $p = 0.001$, $p\eta^2 = 0.39$ ）。大学生群および post PHV 群において、T/C 比の値は運動直後（post PHV 群： $p = 0.03$, $d = 0.77$ ）および運動 15 分後（post PHV 群： $p = 0.02$, $d = 0.797$ ；大学生群： $p < 0.001$, $d = 1.12$ ）の有意な増加が認められた。post PHV 群の運動前（ $p = 0.02$, $d = 1.17$ ）、運動 15 分後（ $p = 0.02$, $d = 1.11$ ）および pre PHV 群のすべての時点（運動前： $p = 0.003$, $d = 1.66$ ；運動直後： $p = 0.02$, $d = 1.48$ ；運動 15 分後： $p = 0.002$, $d = 1.89$ ）における T/C 比は、大学生群に比べ有意に低値を示した（図 18）。

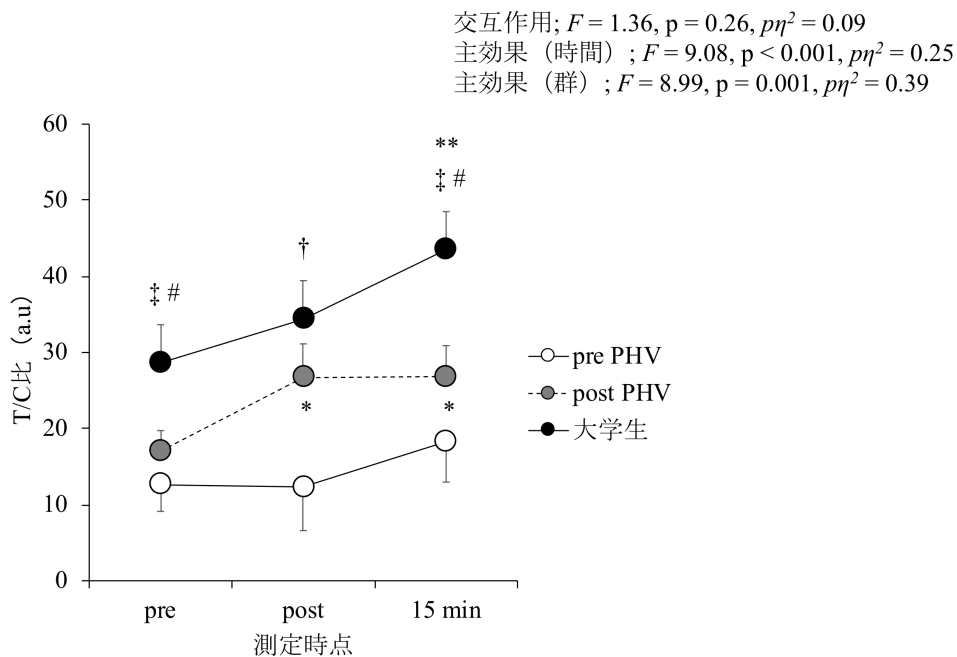


図 18 テストステロン・コルチゾール比の変化

† $p < 0.05$, ‡ $p < 0.01$ ；大学生群 vs pre PHV 群. # $p < 0.05$ ；大学生群 vs post PHV 群.

* $p < 0.05$ ；vs pre (post PHV 群). ** $p < 0.001$ ；vs pre (大学生群)

4-4. 考察

本研究は、自体重トレーニングが異なる成熟度の若年アスリートにおけるホルモン応答に及ぼす影響について調査した。その結果、テストステロン濃度は成熟度が成人のレベルに達していた大学生群において最も高い値を示した。また、同暦年齢カテゴリーであったにもかかわらず (13.2 ± 0.8 歳)、最大身長発育年齢 (Age at Peak Height Velocity ; APHV) を基準として暦年齢が上回る post PHV 群のテストステロン濃度は、暦年齢が下回る pre PHV 群に比べて高い傾向を示した。一方、運動後のヒト成長ホルモン分泌量の増加は post PHV 群においてのみ認められた。これらの結果から、身体のタンパク同化作用において重要な役割を担うホルモンのトレーニングに対する応答の多寡は、分泌腺の成熟度に依存する可能性が考えられた。

主要なアンドロゲン (男性ホルモン) の一つであるテストステロンの大部分は精巣より分泌される。生殖器の状態で評価される性成熟段階によれば(86)、本研究の大学生の対象者は第5段階 (adult) に該当する(13)。大学生群における運動によるテストステロン分泌量の有意な増加 (+38%) は、性成熟度が高いほどトレーニングに対するテストステロンの応答が高くなることを示唆している。一方で、中学生の対象者における運動後のテストステロンの有意な変化は認められなかった。Pullinen らは、最大挙上重量の 40% の負荷で膝関節伸展動作を最大反復するトレーニングによる若年者 (14.0 ± 0 歳) のテストステロン分泌量増加は認められなかったことを報告し、思春期においては、運動に対するテストステロンの応答が低いことを結論づけた(77)。本研究の結果はこれらの先行研究とともに、性成熟が運動に対するテストステロン分泌量の変化に影響を及ぼす可能性を強調するものであると推察された。

興味深いことに、有意ではなかったものの、post PHV 群のテストステロン濃度は、晩熟傾向にある pre PHV 群に比べて高い傾向を示した ($p > 0.05$, $d = 0.90-1.35$)。若年アスリートに関するいくつかの先行研究において、形態学的（身長、体重、筋量など）および生理学的（スプリント、跳躍、全身持久力など）なパラメータの差異、優劣は生物学的成熟度に関連することが報告されている(58, 87)。これらのことから、生物学的成熟度に関連する性腺発育の個体差は、内分泌応答の個体差に影響を及ぼす可能性が示唆された。

ヒト成長ホルモンは、身体の多くの生理学的要素（糖、酸素の輸送量、筋力発揮、除脂肪量）の増加に影響を及ぼし(96)、若年者が最大身長に到達した後も筋の発育や維持に貢献する(5, 41)。成人において、中強度運動やレジスタンストレーニングによるヒト成長ホルモン分泌量の一過性の増加は報告されている(34, 77)。一方、本研究の大学生の対象者における自体重トレーニング後のヒト成長ホルモンの応答について、有意な変化は認められなかった。この結果から、成人の場合、運動後の身体の同化状態におけるヒト成長ホルモンの貢献度は、性ホルモンに比べて低い可能性が考えられた。

先行研究によれば、運動に対するヒト成長ホルモンの応答の多寡は年齢に影響を受けることが報告されている(77, 97)。本研究では、運動後のヒト成長ホルモン分泌量の増加は、暦年齢が APHV を上回る post PHV 群においてのみ認められた。成長期において、ヒト成長ホルモンが担う役割は多岐にわたる。特に、ヒト成長ホルモンの最も明白な効果は、骨芽細胞を強く刺激することによる活性化および長管骨の伸長の促進といったメカニズムによる骨の増加である。Pullinen らは、若年者 (14 ± 0 歳) における運動後のヒト成長ホルモンの応答は、成人 (31 ± 7 歳) に比べ高かったことを報告し(77)、成熟度が運動に対するヒト成長ホルモンの応答に関連する可能性について、本研究の結果と類似した結果を示している。その他、若年トライアスロン選手 (15.8 ± 1.8 歳) における高強度インターバルトレ

ーニングに対する一過性のホルモン応答を調査した研究においても、本研究の結果と同様に、ヒト成長ホルモン分泌量の増加は認められたものの、テストステロン分泌量の変化は認められなかったことが報告されている(98)。長管骨の骨化の活性が高く、発育が著しい APHV の前後において、ヒト成長ホルモンはテストステロンと比較して運動後の身体と同化状態に及ぼす影響が大きい可能性が考えられた。

骨格筋におけるタンパク分解は、身体の異化作用に関するコルチゾールの主要な働きである(39)。コルチゾールの一過性の応答は、トレーニングによる身体的ストレスが最大となった際に最も高値を示すことが報告されており、運動強度に関連することが示唆されている(33, 38)。運動後におけるコルチゾール分泌量の増加が報告された多くの先行研究とは対照的に、本研究の大学生群および pre PHV 群におけるコルチゾール分泌量は変化が認められず、post PHV 群においては運動後の減少が認められた。これらの結果から、本研究で行われた自体重トレーニングの負荷量および運動強度がコルチゾールの分泌量を増加させる刺激として不足していた可能性が推察された。

身体の同化作用に影響を及ぼす筋力トレーニングであっても、全体の負荷量が過多の場合、身体的なストレスが原因となって異化作用が優位となり得る。一方で、適切な負荷量でのトレーニングの実施により、身体の同化状態を促進することが可能となる(36)。そのため、T/C 比は身体の同化および異化の均衡を反映する指標として用いられている(15, 46)。本研究の T/C 比の結果から、大学生は同化ホルモンであるテストステロン分泌量の増加に伴う T/C 比の増加が認められた。一方、post PHV 群において認められた T/C 比の増加は、異化ホルモンであるコルチゾール分泌量の減少によるものであった。このことから、運動後における身体の同化状態に影響を及ぼす機序は、成熟度によって異なる可能性が考えられた。

若年アスリートの運動能力の発達には、APHVなどの生物学的年齢に対する暦年齢の到達度に影響を受ける(65, 66, 74, 87, 88)。しかしながら、生物学的成熟度と運動後の内分泌応答との関連について検討した研究は多くなく、明らかとされていない。本研究では、post PHV 群におけるヒト成長ホルモン、T/C 比の運動後の変化が認められた一方、pre PHV 群においては、すべてのホルモンにおいて有意な応答は認められなかった。これらの結果は、同暦年齢カテゴリーにおいても、個体の生物学的成熟度によってトレーニングに対する内分泌応答が異なる可能性を示唆するものである。このことから、中学生年代を対象としたトレーニング指導において、暦年齢のみならず、生物学的成熟度を考慮した個別的なプログラムの作成および実施が重要であると考えられた。また、大学生群において認められた運動後のテストステロン分泌量の増加は、中学生の群においては認められなかった。この結果から、若年アスリートを対象にトレーニングを行わせる場合は、個体の成熟度を考慮し、慎重に目標設定（筋力・パワー発揮の増加、筋肥大など）を行う必要性が示唆された。

自体重を用いたトレーニングは、特別で高価な機器を必要とせず、どのような環境でも簡便に行えるといった特徴がある(90)。自体重トレーニングおよび低強度トレーニングによる筋量の増加促進は、今日までに多く報告されている(84, 90)。Tsuzukuらは、高齢者を対象に12週間の自体重トレーニング（スクワット、台上腕立て伏せ、シットアップ）を行わせた結果、対照群に比べて大腿部の筋量が増加したことを報告した(90)。また、低強度（最大挙上重量の55-60%）で行われたトレーニング（スクワット、チェストプレス、ラットプルダウン、腹筋運動および背筋運動；3セット × 最大反復）による筋量および筋力の増加は、高強度（最大挙上重量の80-90%）で行われたトレーニングと同等であったことから、低強度トレーニングが筋肥大や筋力増強に効果的な方法の一つであることが示唆

されている(84). 一方で, 最大酸素摂取量の90%および最大心拍数の90-95%の状態で行われる高強度インターバルトレーニング(自転車:4分間全力ペダリング×4セット, 3分間インターバル;スプリント:40秒間×10セット×2セット, 20秒間インターバル;水泳:200m×6セット, 2分間インターバル)が内分泌応答に及ぼす影響を調査した研究によると, 運動後のテストステロンの応答に変化が認められず, コルチゾールの一過性の応答については70.3%~89.7%の分泌量の増加が認められたことが報告されている(98). また, Kraemerらは, 高強度トレーニングによる同化ホルモンの分泌量の増加は筋力やパワー発揮といった運動パフォーマンスに関連する一方, テストステロン分泌量の減少およびコルチゾール分泌量の増加を促進する可能性があり, パフォーマンス低下やオーバートレーニングを引き起こす原因となることを示した(46). 本研究のコルチゾールおよびT/C比の結果から, 自体重トレーニング(腕立て伏せ, スクワット, ドロップワイドスクワット, カーフレイズ, アブドミナルクランチ;20秒間×3セット)は若年アスリートの身体の同化状態を優位にする手段として適切な負荷であった可能性が考えられた. 自体重トレーニングが内分泌応答およびそれに伴う筋量の増加に及ぼす影響について明らかにするため, 長期的なトレーニングによる適応の検討や, 様々な種類のトレーニング効果(プライオメトリック, スプリント, 持久力など)の比較が今後の課題となる.

4-5. 結論

本研究は, 自体重トレーニングによる一過性のホルモン応答について, 異なる成熟度のアスリートを対象とした調査を行った. その結果, 同様のトレーニング内容であっても成熟度によって分泌されるホルモンの種類や応答が異なることが明らかとなった. これらの

結果から、身体タンパク同化作用において重要な役割を担うホルモンのトレーニングに対する応答の多寡は、分泌腺の成熟度に依存する可能性が考えられた。

第5章 総合考察

5-1. 生物学的成熟度の個体差

対象者の生物学的成熟度を推定するにあたり、本論文においては最大身長発育年齢（Age at Peak Height Velocity；APHV）を用いた。日本人の APHV は 12.6 歳で生じることが報告されている(80)一方で、人種別の調査によると、ヨーロッパの男子は 13.3-14.4 歳、コーカソイドの男子は 13.3-14.1 歳、アフリカ系アメリカ人においては 14.3 歳であったことが報告されている(13)。若年アスリートを対象とした調査によれば、日本人男子（11.6-13.7 歳）はヨーロッパの男子（12.8-14.5 歳）に比べ、早い段階で APHV に到達していたことが示されている(10, 26, 55, 61, 70, 74, 83)。本論文の第3章、第4章における中学生バスケットボール選手の APHV は、過去の身長データを3重ロジスティック成長曲線に当てはめることで推定され（BTT モデル）(4)、その結果はそれぞれ 12.8 ± 1.2 歳および 12.7 ± 1.0 歳であり、先行研究で報告された日本人の男子における APHV との差異は少なかった。これらの結果から、生物学的成熟度は生育環境や遺伝学的な要因に大きく影響を受けることが考えられ、海外の研究報告を若年アスリートの運動プログラム構築の知見として用いる際には、対象者の人種、年齢を注視する必要性が示唆される。また、同暦年齢カテゴリー内（第3章： 13.2 ± 0.6 歳、第4章： 13.2 ± 0.8 歳）において認められた約4年の APHV の幅（第3章：10.4-15.2 歳、第4章：10.7-14.7 歳）は、中学生の年代（12-15 歳）における発育・発達の個体差の存在を強調するものである。

5-2. 筋形態の成長に伴う変化

第2章では、12歳から20歳までのバスケットボール選手を対象に大腿四頭筋を構成する筋頭（内側広筋斜頭；VMO，内側広筋；VM，大腿直筋；RF，中間広筋；VI，外側広筋；VL）の変化について横断的に検討し，VMOとVIは18歳から，VM，RF，VLは16歳から有意に増加していたことが認められ，先行研究と同様に生殖器成熟度分類の第5段階（adult）において筋量が顕著に増加することが明らかとなった(13, 58, 86)．また，三次近似式による最大発育年齢の推定の結果（VMO：12.2歳；155.0ヶ月，VM：15.7歳，187.8ヶ月；RF：17.7歳，212.2ヶ月；VI：15.7歳，188.9ヶ月；VL：15.2歳，181.1ヶ月）により，大腿四頭筋を構成する筋頭は固有の機能や役割に依存した異なる成長率を有することが明らかとなった．

第2章の調査では同一個体内の筋形態の成長に伴う変化については検討されておらず，これらを縦断的に検討することが課題として挙げられている，そこで，第3章においては成熟度の個体差が多い中学生（ 13.2 ± 0.6 歳）を対象に，APHVの推定値に対する暦年齢の経過年数に基づいて群分類し，縦断的に検討を行った．その結果，post PHV群においてVMを除く大腿部の筋厚（RF，VI，VL）の変化は認められず，APHV群およびpre PHV群においてのみ増加が認められた．この結果は，第2章で示された約16歳以降における筋厚の顕著な増加とは異なっていた．一方，第4章ではAPHV以降の対象者において同化ホルモン濃度が高値を示した．これらのデータから，pre PHV群において認められた筋量の増加は身体の長軸方向への発育に依存し，post PHV群において認められた筋量の増加は同化ホルモン応答に影響を受けたことが推察され，成長の過程における筋量の増加の機序は身体の成熟度によって異なる可能性が考えられた．

第2章の調査において、VMは15.7歳で最大の発育が生じると推定され、第3章の縦断的な比較においてもVMの筋厚はすべての群で1年後に有意な増加が認められている。荷重位における顕著な筋活動によって運動中において体重支持などの重要な役割を担うVM(49, 89)は、体重増加のピークを迎えるタイミングに伴って増加した可能性が考えられた。また、身体の成長といった内的な要因に加え、競技時間や身体活動量が増加することによって生じる下肢への特異的な刺激に対する適応が生じた可能性についても推察された。しかしながら、第2章の調査において17.7歳で最大の発育が生じると推定されたRFに関しては、第3章の初回測定時点の横断的な比較において早熟傾向にあるpost PHV群が有意に高値を示していたにも関わらず、同群において縦断的な変化は認められなかった。これらの結果の相違については、中学生年代以降に更に増加する身体活動の強度や頻度といった競技環境などの要因が変化した可能性が考えられるが、本論文においては明らかとされていない。股関節・膝関節の運動に作用し、運動能力に影響を及ぼす多関節筋であるRFが、身体の発育や競技環境（活動量、頻度、強度、トレーニングの有無など）によってどのように変化していくかについては、年代の幅を広げた縦断的な検討が必要となる。

第2章の結果から結論付けられた筋の固有の機能や役割に依存した異なる成長率について、第3章では上肢の筋（上腕二頭筋：Biceps Brachii；BB，上腕三頭筋：Triceps Brachii；TB）も含めて検討した。各測定時点における横断比較の結果から、上肢の筋は生物学的な成熟の進行した男子においてより発育のレベルが高くなる可能性が考えられる。また、上肢の筋量の増加は思春期における身体の男性化を反映し、第二性徴において認められる成長に関連するホルモン濃度の急激な増加に影響を受ける。第4章の調査において、暦年齢がAPHVを上回っていた男子は暦年齢がAPHVに到達する前の男子に比べ、筋の成長に

関連する同化ホルモンであるテストステロン濃度が高い傾向を示したことから、同暦年齢カテゴリーにおける体格の差は生物学的成熟度に影響を受けることが推察された。

5-3. スプリントおよび跳躍能力の変化と向上率

若年アスリートを対象とした先行研究において、生物学的成熟度が運動能力の発達やトレーニングに影響を及ぼすことは明らかとされている(7, 8, 14, 21, 54, 65-67, 74, 87)が、日本人を対象とした調査は多くない。第3章では、日本人の若年アスリートの筋形態に加え、生理学的な運動能力の同一個体内の成長に伴う変化について調査を行った。その結果、各測定時点の跳躍およびスプリント能力を横断的に比較した場合において、post PHV 群が有意に高値を示した。日本人ジュニアスプリンターのスプリント能力に関する調査においても、優れたスプリント能力を有するジュニアスプリンターは12歳の時点での骨年齢が約15歳であり、生物学的に約3年早熟であったことが報告されている(44)。これらのことから、中学生年代においては早熟傾向の選手が優れたスプリント、跳躍能力を有する可能性が考えられた。一方、変化率について着目すると、晩熟傾向あるいは暦年齢に対する成熟度が標準的な選手の大腿四頭筋の成長率やスプリント、跳躍能力の向上率は高いものであった(図19)。日本人の体力標準値に関する大規模な調査においても、12歳から15歳にかけて走速度(50m)は約12%、垂直跳躍高は約35%の増加が認められている(99)。これらの結果から、日本の中学生の年代はスプリントおよび跳躍能力の改善において重要な時期であることが示された。

大腿四頭筋の筋厚の1年間の変化に関する結果では、pre PHV 群、APHV 群においてはVMを除く大腿四頭筋の筋頭はいずれも有意に増加しており、post PHV 群は変化が認められなかった。したがって、大腿四頭筋の成長率は早熟傾向にある選手に比べ、晩熟傾向あ

るいは暦年齢に対する成熟度が標準的な選手において高かった可能性が考えられた。特に、大腿四頭筋の中で唯一の多関節筋として股関節・膝関節の機能に影響を及ぼし、ヒトの運動において重要な役割を有する RF に関しては、初回測定時点において認められていた post PHV 群と pre PHV, APHV 群の間における筋厚の有意な差が 1 年後の測定時点においては認められなかったにも関わらず、すべての群においてスプリントおよび跳躍能力の向上が認められた。これらの結果から、pre PHV, APHV 群は筋量の増加に伴うスプリント、跳躍能力の向上が生じたことに対し、post PHV 群におけるスプリント、跳躍能力の向上は筋形態の発育に伴わない可能性が考えられた。筋力および筋パワー発揮の向上は、筋横断面積の増加や筋線維の肥大などによる筋の適応と中枢神経や運動単位の発火頻度および動員に関連する神経系の適応が大きく関連する(71)。思春期においては、生物学的成熟度によってスプリントおよび跳躍能力向上の機序が異なる可能性が示唆された。

本論文の調査では、筋形態およびスプリント、跳躍能力の 1 年間の自然な成長について検討した。現段階においては、トレーニングの介入によってスプリント、跳躍能力の向上率に群間差が生じるか否かについては明らかではない。結果から示唆された生物学的成熟度に関連した異なる機序（筋および神経の適応）によるスプリント、跳躍能力の向上の可能性についてさらに明らかにし、成熟度に則したトレーニング、運動プログラム構築の知見とするためには、長期的なトレーニングの介入による変化率について、異なる成熟度の群間で比較する必要がある。

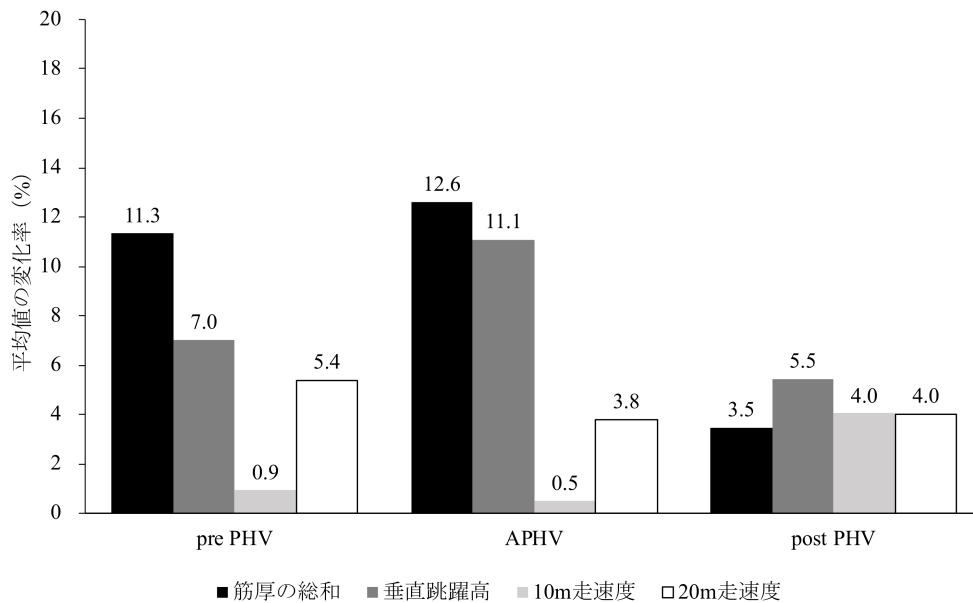


図 19 各測定項目における平均値の年間変化率

5-4. 運動に対する内分泌応答

第4章において、テストステロン濃度は暦年齢が APHV に到達する前の群に比べ、APHV を経過した群において高い傾向を示した。また、自体重トレーニングによる一過性の内分泌応答に関しては、APHV を経過した群においてヒト成長ホルモン分泌量の増加が認められた。これらの結果から、トレーニングに対する内分泌応答に生物学成熟度が関連することが示され、筋線維の成長およびリモデリングに関連する内分泌応答の適応は、APHV 経過後において優位になる可能性が考えられた。その一方で、第3章の結果では、pre PHV 群（暦年齢 < APHV - 6 ヶ月）、APHV 群（暦年齢 = APHV ± 6 ヶ月）において1年間を通して筋厚の増加が認められ、post PHV 群（暦年齢 > APHV + 6 ヶ月）に比べてその変化率は高い値であった。このように、筋の合成に貢献するこれらの同化ホルモン濃度の増加は APHV 経過後に認められたものの、筋量の増加は APHV に到達する前の方が高い

といった結果が示されており、この不一致に関しては現段階では不明瞭である。第3章において群分類の基準となった APHV は、いずれも初回測定時点において推定されたものであり、研究期間に APHV に到達、経過した対象者も存在していた可能性がある。したがって、内分泌器官の発育が1年間の研究期間において生じたことが考えられた。これらを明らかにするためには、同一個体内における内分泌応答の成長に伴う変化についても検討する必要がある。また、第4章の中学生の対象者は、対象者数の関係で APHV に到達する前の群（pre PHV 群；暦年齢 < APHV）と APHV を経過した群（post PHV 群；暦年齢 > APHV）に分類され、第3章の群分類の条件とは異なっていた。今後は対象者数を増加し、APHV に対する暦年齢の到達度を細分化した上で、内分泌応答の変化率についても検討することが必要となる。

近年、テストステロンやヒト成長ホルモンといった同化ホルモン分泌量の運動後における一過性の増加が、骨格筋の同化作用および筋線維の肥大において必要ではない可能性について報告されている(81)。また、ヒト成長ホルモンの14日間の投与により、腱におけるI型コラーゲンのタンパク合成、mRNA 発現量は各々1.3倍および3.9倍増加し、筋におけるI型コラーゲンのタンパク合成、mRNA 発現量は各々5.8倍および2.3倍増加した一方で、筋原線維のタンパク合成は認められなかったことが報告されており、ヒト成長ホルモンは筋肥大を生じさせることなく細胞外マトリックスであるコラーゲンの合成を促進することが明らかとされている(22)。これらの先行研究の結果から、第4章における内分泌応答と第3章における筋の成長率に関する不一致は、運動に対するヒト成長ホルモンの応答が筋ではなく腱の組成に影響を及ぼした可能性を示唆するものであると考えられた。したがって、若年者へのトレーニングに対する内分泌応答が筋のみならず、腱などの結合組織の強化に対して利益をもたらすか否かについての調査が今後の課題となる。

5-5. 現場への応用と展望

若年アスリートに携わる専門職（教師，コーチ，アスレティックトレーナーなど）において理解が求められている若年者の発育・発達の個別性について，本論文からいくつかの基礎的な知見が得られた．スプリント，跳躍能力に関しては成熟の進行した者が有意に高く，中学生の年代（12-15歳）において晩熟傾向にある者のスプリント，跳躍能力との差が縮小する可能性は低いと考えられる．一方，跳躍，スプリント能力の向上率に関しては晩熟傾向にある者において高いものであったことから，横断的な運動能力の差に基づく局所的なタレント発掘・選抜について慎重に考慮する必要がある．また，生物学的年齢に対して順当あるいは晩熟傾向にある者が筋量の増加に伴ってスプリント，跳躍能力が向上したことに對し，早熟傾向にある者は筋量の増加とスプリント，跳躍能力の向上は大きく一致しなかった．この結果から，運動能力向上の機序が異なる可能性が考えられ，生物学的成熟度に基づいて細分化したトレーニングが必要になることが推察された．

若年者の内分泌応答に関しては，トレーニングに対する一過性の同化ホルモン分泌量は分泌腺の成熟度に影響を受けることが明らかとされたことから，筋肥大を目的としたトレーニング実施の際には対象の生物学的成熟度を考慮する必要性が示唆された．また，暦年齢が APHV を経過していた若年アスリートにおいては，運動後のヒト成長ホルモン分泌量が増加したことに對し，筋量の1年間の増加量が少なかったという不一致が認められた．本論文および先行研究の結果から，思春期におけるトレーニング実施の利益として，筋のみならず，腱などの細胞外マトリックスに対する影響が考えられた．

本論文で得られた結果は縦断データおよび一過性のトレーニング応答によるものであり，目的を達成するための一端である．成熟度に則した運動プログラムを構築する知見を

得るために、①年代の幅の拡大、②継続的な縦断調査、③様々な種類のトレーニングの長期介入による適応の多寡を今後の検討課題とし、調査を継続する。

第6章

結論

本論文は、若年者の筋形態、内分泌応答およびスプリント、跳躍能力の個体差について幅広く検討し、成熟度に則した運動プログラムを構築する一助とすることを目的に執筆された。その結果、以下の結論が得られた。

- ヒトの運動において重要な役割を發揮する大腿四頭筋は、構成する筋頭の固有の機能によって異なる成長率を有する。
- 中学生の年代において、晩熟傾向にある者のスプリント、跳躍能力は早熟傾向にある者に追いつく可能性は低いが、向上率に関しては同程度であり、APHVの到達レベルによってスプリント、跳躍能力向上の機序（筋の成長、神経系の適応など）が異なる可能性がある。
- 運動後に優位に分泌されるホルモンの種類やトレーニングに対するホルモン応答の多寡は分泌腺の成熟度に依存する。

以上の結論から、若年者の発育・発達は形態学的、生理学的および内分泌学的に顕著な個体差が存在し、そのスピードやテンポは生物学的成熟度に依存することが強調された。

参考文献

1. Addo OY, Himes JH, and Zemel BS. Reference ranges for midupper arm circumference, upper arm muscle area, and upper arm fat area in US children and adolescents aged 1-20 y. *Am J Clin Nutr* 105: 111-120, 2017.
2. Akima H and Saito A. Activation of quadriceps femoris including vastus intermedius during fatiguing dynamic knee extensions. *Eur J Appl Physiol* 113: 2829-2840, 2013.
3. Akima H and Saito A. Inverse activation between the deeper vastus intermedius and superficial muscles in the quadriceps during dynamic knee extensions. *Muscle Nerve* 47: 682-690, 2013.
4. Ali MA, Ashizawa K, Kato S, Kouchi M, Koyama C, and Hoshi H. Biological variables in height growth of Japanese twins: a comparison with those of singletons. *Ann Hum Biol* 34: 283-295, 2007.
5. Amer NM, Modesto MJ, Dos Santos CD, Erichsen O, Mascarenhas LPG, Nesi-Franca S, Marques-Pereira R, and De Lacerda L. Resistance exercise alone improves muscle strength in growth hormone deficient males in the transition phase. *J Pediatr Endocrinol Metab* 31: 887-894, 2018.
6. Ando R, Saito A, Umemura Y, and Akima H. Local architecture of the vastus intermedius is a better predictor of knee extension force than that of the other quadriceps femoris muscle heads. *Clin Physiol Funct Imaging* 35: 376-382, 2015.
7. Armstrong N, Welsman JR, and Chia MY. Short term power output in relation to growth and maturation. *Br J Sports Med* 35: 118-124, 2001.

8. Asadi A, Ramirez-Campillo R, Arazi H, and Saez de Villarreal E. The effects of maturation on jumping ability and sprint adaptations to plyometric training in youth soccer players. *J Sports Sci* 36: 2405-2411, 2018.
9. Beaven CM, Gill ND, and Cook CJ. Salivary testosterone and cortisol responses in professional rugby players after four resistance exercise protocols. *J Strength Cond Res* 22: 426-432, 2008.
10. Bell W. Body size and shape: a longitudinal investigation of active and sedentary boys during adolescence. *J Sports Sci* 11: 127-138, 1993.
11. Bergeron MF, Mountjoy M, Armstrong N, Chia M, Cote J, Emery CA, Faigenbaum A, Hall G, Jr., Kriemler S, Leglise M, Malina RM, Pensgaard AM, Sanchez A, Soligard T, Sundgot-Borgen J, van Mechelen W, Weissensteiner JR, and Engebretsen L. International Olympic Committee consensus statement on youth athletic development. *Br J Sports Med* 49: 843-851, 2015.
12. Beunen G, Ostyn M, Simons J, Renson R, Claessens AL, Vanden Eynde B, Lefevre J, Vanreusel B, Malina RM, and van't Hof MA. Development and tracking in fitness components: Leuven longitudinal study on lifestyle, fitness and health. *Int J Sports Med* 18 Suppl 3: S171-178, 1997.
13. Beunen GP, Rogol AD, and Malina RM. Indicators of biological maturation and secular changes in biological maturation. *Food Nutr Bull* 27: 244-256, 2006.
14. Brown KA, Patel DR, and Darmawan D. Participation in sports in relation to adolescent growth and development. *Transl Pediatr* 6: 150-159, 2017.
15. Busso T, Hakkinen K, Pakarinen A, Carasso C, Lacour JR, Komi PV, and Kauhanen H. A

- systems model of training responses and its relationship to hormonal responses in elite weight-lifters. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 61: 48-54, 1990.
16. Carling C, le Gall F, Reilly T, and Williams AM. Do anthropometric and fitness characteristics vary according to birth date distribution in elite youth academy soccer players? *Scand J Med Sci Sports* 19: 3-9, 2009.
 17. Cohen J. *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum, 1988.
 18. Crewther BT, Hamilton D, Kilduff LP, Drawer S, and Cook CJ. The effect of oral contraceptive use on salivary testosterone concentrations and athlete performance during international field hockey matches. *J Sci Med Sport* 21: 453-456, 2018.
 19. Crewther BT, Obminski Z, Orysiak J, and Al-Dujaili EA. The utility of salivary testosterone and cortisol concentration measures for assessing the stress responses of junior athletes during a sporting competition. *J Clin Lab Anal* Epub ahead of print, 2017.
 20. Crisafulli A, Melis F, Tocco F, Laconi P, Lai C, and Concu A. External mechanical work versus oxidative energy consumption ratio during a basketball field test. *J Sports Med Phys Fitness* 42: 409-417, 2002.
 21. Deprez D, Coutts AJ, Fransen J, Deconinck F, Lenoir M, Vaeyens R, and Philippaerts R. Relative age, biological maturation and anaerobic characteristics in elite youth soccer players. *Int J Sports Med* 34: 897-903, 2013.
 22. Doessing S, Heinemeier KM, Holm L, Mackey AL, Schjerling P, Rennie M, Smith K, Reitelseder S, Kappelgaard AM, Rasmussen MH, Flyvbjerg A, and Kjaer M. Growth hormone stimulates the collagen synthesis in human tendon and skeletal muscle without

- affecting myofibrillar protein synthesis. *J Physiol* 588: 341-351, 2010.
23. Drinkwater EJ, Pyne DB, and McKenna MJ. Design and interpretation of anthropometric and fitness testing of basketball players. *Sports Med* 38: 565-578, 2008.
 24. Faigenbaum AD, Kraemer WJ, Blimkie CJ, Jeffreys I, Micheli LJ, Nitka M, and Rowland TW. Youth resistance training: updated position statement paper from the national strength and conditioning association. *J Strength Cond Res* 23: S60-79, 2009.
 25. Faigenbaum AD and Myer GD. Resistance training among young athletes: safety, efficacy and injury prevention effects. *Br J Sports Med* 44: 56-63, 2010.
 26. Fujii K. An investigation regarding sequence of age at MPV in physique growth of male athletes. *Jpn J Hum Growth Dev Res* 26: 26-32, 1998.
 27. Fukunaga T, Funato K, and Ikegawa S. The effects of resistance training on muscle area and strength in prepubescent age. *Ann Physiol Anthropol* 11: 357-364, 1992.
 28. Fukunaga Y, Takai Y, Yoshimoto T, Fujita E, Yamamoto M, and Kanehisa H. Effect of maturation on muscle quality of the lower limb muscles in adolescent boys. *J Physiol Anthropol* 33: 30, 2014.
 29. Gaviglio CM, Osborne M, Kelly VG, Kilduff LP, and Cook CJ. Salivary testosterone and cortisol responses to four different rugby training exercise protocols. *Eur J Sport Sci* 15: 497-504, 2015.
 30. Giles LS, Webster KE, McClelland JA, and Cook J. Does quadriceps atrophy exist in individuals with patellofemoral pain? A systematic literature review with meta-analysis. *J Orthop Sports Phys Ther* 43: 766-776, 2013.
 31. Giles LS, Webster KE, McClelland JA, and Cook J. Atrophy of the quadriceps is not isolated

- to vastus medialis oblique in individuals with patellofemoral pain. *J Orthop Sports Phys Ther* 45: 613-619, 2015.
32. Giles LS, Webster KE, McClelland JA, and Cook J. Can ultrasound measurements of muscle thickness be used to measure the size of individual quadriceps muscles in people with patellofemoral pain? *Phys Ther Sport* 16: 45-52, 2015.
 33. Gotshalk LA, Loebel CC, Nindl BC, Putukian M, Sebastianelli WJ, Newton RU, Hakkinen K, and Kraemer WJ. Hormonal responses of multiset versus single-set heavy-resistance exercise protocols. *Can J Appl Physiol* 22: 244-255, 1997.
 34. Gough L, Castell LM, Gatti R, and Godfrey RJ. Growth hormone concentrations in different body fluids before and after moderate exercise. *Sports Med Open* 30: 1-6, 2015.
 35. Hakkinen K and Pakarinen A. Acute hormonal responses to heavy resistance exercise in men and women at different ages. *Int J Sports Med* 16: 507-513, 1995.
 36. Hakkinen K, Pakarinen A, Alen M, Kauhanen H, and Komi PV. Relationships between training volume, physical performance capacity, and serum hormone concentrations during prolonged training in elite weight lifters. *Int J Sports Med* 8: 61-65, 1987.
 37. Harries SK, Lubans DR, and Callister R. Resistance training to improve power and sports performance in adolescent athletes: a systematic review and meta-analysis. *J Sci Med Sport* 15: 532-540, 2012.
 38. Hayes LD, Bickerstaff GF, and Baker JS. Interactions of cortisol, testosterone, and resistance training: influence of circadian rhythms. *Chronobiol Int* 27: 675-705, 2010.
 39. Hayes LD, Grace FM, Baker JS, and Sculthorpe N. Exercise-induced responses in salivary testosterone, cortisol, and their ratios in men: a meta-analysis. *Sports Med* 45: 713-726, 2015.

40. Hirose N. Relationships among birth-month distribution, skeletal age and anthropometric characteristics in adolescent elite soccer players. *J Sports Sci* 27: 1159-1166, 2009.
41. Hulthen L, Bengtsson BA, Sunnerhagen KS, Hallberg L, Grimby G, and Johannsson G. GH is needed for the maturation of muscle mass and strength in adolescents. *J Clin Endocrinol Metab* 86: 4765-4770, 2001.
42. Hwangbo PN. The effects of squatting with visual feedback on the muscle activation of the vastus medialis oblique and the vastus lateralis in young adults with an increased quadriceps angle. *J Phys Ther Sci* 27: 1507-1510, 2015.
43. Kanehisa H, Ikegawa S, Tsunoda N, and Fukunaga T. Strength and cross-sectional areas of reciprocal muscle groups in the upper arm and thigh during adolescence. *Int J Sports Med* 16: 54-60, 1995.
44. Katoh K, Miyamaru M, Matsumoto T, and Akima H. A longitudinal study on the development of sprint performance in junior sprinters. *Taiikugaku kenkyu (Japan J Phys Educ Hlth Sport Sci)* 44: 360-371, 1999.
45. Klentrou P, Giannopoulou A, McKinlay BJ, Wallace P, Muir C, Falk B, and Mack D. Salivary cortisol and testosterone responses to resistance and plyometric exercise in 12- to 14-year-old boys. *Appl Physiol Nutr Metab* 41: 714-718, 2016.
46. Kraemer WJ, French DN, Paxton NJ, Hakkinen K, Volek JS, Sebastianelli WJ, Putukian M, Newton RU, Rubin MR, Gomez AL, Vescovi JD, Ratamess NA, Fleck SJ, Lynch JM, and Knuttgen HG. Changes in exercise performance and hormonal concentrations over a big ten soccer season in starters and nonstarters. *J Strength Cond Res* 18: 121-128, 2004.
47. Kraemer WJ, Fry AC, Warren BJ, Stone MH, Fleck SJ, Kearney JT, Conroy BP, Maresh CM,

- Weseman CA, Triplett NT, and et al. Acute hormonal responses in elite junior weightlifters. *Int J Sports Med* 13: 103-109, 1992.
48. Kraemer WJ and Ratamess NA. Hormonal responses and adaptations to resistance exercise and training. *Sports Med* 35: 339-361, 2005.
 49. Kubo K, Ikebukuro T, Yata H, and Tomita M. Morphological and mechanical properties of muscle and tendon in highly trained sprinters. *J Appl Biomech* 27: 336-344, 2011.
 50. Kubo K, Teshima T, Ikebukuro T, Hirose N, and Tsunoda N. Tendon properties and muscle architecture for knee extensors and plantar flexors in boys and men. *Clin Biomech* 29: 506-511, 2014.
 51. Kumagai K, Abe T, Brechue WF, Ryushi T, Takano S, and Mizuno M. Sprint performance is related to muscle fascicle length in male 100-m sprinters. *J Appl Physiol* 88: 811-816, 2000.
 52. Lesinski M, Prieske O, and 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.
 53. Lloyd RS, Cronin JB, Faigenbaum AD, Haff GG, Howard R, Kraemer WJ, Micheli LJ, Myer GD, and Oliver JL. National Strength and Conditioning Association position statement on long-term athletic development. *J Strength Cond Res* 30: 1491-1509, 2016.
 54. Lloyd RS, Oliver JL, Hughes MG, and Williams CA. The influence of chronological age on periods of accelerated adaptation of stretch-shortening cycle performance in pre and postpubescent boys. *J Strength Cond Res* 25: 1889-1897, 2011.
 55. Maingourd Y, Libert JP, Bach V, Jullien H, Tanguy C, and Freville M. Aerobic capacity of competitive ice hockey players 10-15 years old. *Jpn J Physiol* 44: 255-270, 1994.

56. Malina RM. Weight training in youth-growth, maturation, and safety: an evidence-based review. *Clin J Sport Med* 16: 478-487, 2006.
57. Malina RM, Bouchard C, and Bar-Or O. *Growth, maturation, and physical activity*. Champaign, IL: Human Kinetics, 2004.
58. Malina RM, Eisenmann JC, Cumming SP, Ribeiro B, and Aroso J. Maturity-associated variation in the growth and functional capacities of youth football (soccer) players 13-15 years. *Eur J Appl Physiol* 91: 555-562, 2004.
59. Malina RM and Geithner CA. Body composition of young athletes. *Am J Lifestyle Med* 5: 262-278, 2011.
60. Malina RM, Rogol AD, Cumming SP, Coelho e Silva MJ, and Figueiredo AJ. Biological maturation of youth athletes: assessment and implications. *Br J Sports Med* 49: 852-859, 2015.
61. Malina RM, Bouchard C, and Beunen, G. Human growth: Selected aspects of current research on well-nourished children. *Annu Rev Anthropol* 17: 187-219, 1988.
62. Mangine GT, Fukuda DH, LaMonica MB, and Gonzalez AM. Influence of gender and muscle architecture asymmetry on jump and sprint performance. *J Sport Sci Med* 13: 904-911, 2014.
63. Malina RM and Rogol AD. Sport training and the growth and pubertal maturation of young athletes. *Pediatr Endocrinol Rev* 9: 441-455, 2011.
64. Mersmann F, Bohm S, Schroll A, Boeth H, Duda GN, and Arampatzis A. Muscle and tendon adaptation in adolescent athletes: A longitudinal study. *Scand J Med Sci Sports* 27: 75-82, 2017.
65. Meyers RW, Oliver JL, Hughes MG, Cronin JB, and Lloyd RS. Maximal sprint speed in boys of increasing maturity. *Pediatr Exerc Sci* 27: 85-94, 2015.

66. Moran J, Parry DA, Lewis I, Collison J, Rumpf MC, and Sandercock GRH. Maturation-related adaptations in running speed in response to sprint training in youth soccer players. *J Sci Med Sport* 21: 538-542, 2018.
67. Moran J, Sandercock G, Rumpf MC, and Parry DA. Variation in responses to sprint training in male youth athletes: A meta-analysis. *Int J Sport Med* 38: 1-11, 2017.
68. Moreau NG, Simpson KN, Teefey SA, and Damiano DL. Muscle architecture predicts maximum strength and is related to activity levels in cerebral palsy. *Phys Ther* 90: 1619-1630, 2010.
69. Myer GD, Lloyd RS, Brent JL, and Faigenbaum AD. How young is "Too young" to start training? *ACSM's Health Fit J* 7: 14-23, 2013.
70. Nariyama K, Hauspie RC, and Mino T. Longitudinal growth study of male Japanese junior high school athletes. *Am J Hum Biol* 13: 356-364, 2001.
71. National Strength Conditioning Association. *Essentials of strength training and conditioning*. Champaign, IL: Human Kinetics, 2016.
72. Ogasawara R, Thiebaud RS, Loenneke JP, Loftin M, and Abe T. Time course for arm and chest muscle thickness changes following bench press training. *Interv Med Appl Sci* 4: 217-220, 2012.
73. Parker DF, Round JM, Sacco P, and Jones DA. A cross-sectional survey of upper and lower limb strength in boys and girls during childhood and adolescence. *Ann Hum Biol* 17: 199-211, 1990.
74. Philippaerts RM, Vaeyens R, Janssens M, Van Renterghem B, Matthys D, Craen R, Bourgois J, Vrijens J, Beunen G, and Malina RM. The relationship between peak height velocity and

- physical performance in youth soccer players. *J Sports Sci* 24: 221-230, 2006.
75. Pitcher CA, Elliott CM, Williams SA, Licari MK, Kuenzel A, Shipman PJ, Valentine JP, and Reid SL. Childhood muscle morphology and strength: alterations over six months of growth. *Muscle Nerve* 46: 360-366, 2012.
 76. Pullinen T, Mero A, Huttunen P, Pakarinen A, and Komi PV. Resistance exercise-induced hormonal responses in men, women, and pubescent boys. *Med Sci Sports Exerc* 34: 806-813, 2002.
 77. Pullinen T, Mero A, Huttunen P, Pakarinen A, and Komi PV. Resistance exercise-induced hormonal response under the influence of delayed onset muscle soreness in men and boys. *Scand J Med Sci Sports* 21: e184-194, 2011.
 78. Pullinen T, Mero A, MacDonald E, Pakarinen A, and Komi PV. Plasma catecholamine and serum testosterone responses to four units of resistance exercise in young and adult male athletes. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 77: 413-420, 1998.
 79. Reinbolt JA, Fox MD, Arnold AS, Ounpuu S, and Delp SL. Importance of preswing rectus femoris activity in stiff-knee gait. *J Biomech* 41: 2362-2369, 2008.
 80. Satake T, Kikuta F, and Ozaki T. Ages at peak velocity and peak velocities for seven body dimensions in Japanese children. *Ann Hum Biol* 20: 67-70, 1993.
 81. Schroeder ET, Villanueva M, West DD, and Phillips SM. Are acute post-resistance exercise increases in testosterone, growth hormone, and IGF-1 necessary to stimulate skeletal muscle anabolism and hypertrophy? *Med Sci Sports Exerc* 45: 2044-2051, 2013.
 82. Sekine Y and Hirose N. Cross-sectional comparison of age-related changes in the quadriceps femoris in Japanese basketball players. *Int J Adolesc Med Health* Epub ahead of print, 2017.

83. Sprynarova S. The influence of training on physical and functional growth before, during and after puberty. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 56: 719-724, 1987.
84. Tanimoto M, Sanada K, Yamamoto K, Kawano H, Gando Y, Tabata I, Ishii N, and Miyachi M. Effects of whole-body low-intensity resistance training with slow movement and tonic force generation on muscular size and strength in young men. *J Strength Cond Res* 22: 1926-1938, 2008.
85. Tanner JM. *Growth at adolescence; with a general consideration of the effects of hereditary and environmental factors upon growth and maturation from birth to maturity*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1973.
86. Tanner JM and Whitehouse RH. Clinical longitudinal standards for height, weight, height velocity, weight velocity, and stages of puberty. *Arch Dis Child* 51: 170-179, 1976.
87. Torres-Unda J, Zarrazquin I, Gil J, Ruiz F, Irazusta A, Kortajarena M, Seco J, and Irazusta J. Anthropometric, physiological and maturational characteristics in selected elite and non-elite male adolescent basketball players. *J Sports Sci* 31: 196-203, 2013.
88. Torres-Unda J, Zarrazquin I, Gravina L, Zubero J, Seco J, Gil SM, Gil J, and Irazusta J. Basketball performance is related to maturity and relative age in elite adolescent players. *J Strength Cond Res* 30: 1325-1332, 2016.
89. Toumi H, Poumarat G, Benjamin M, and Best T. New insights into the function of the vastus medialis with clinical implications. *Med Sci Sports Exerc* 39: 1153-1159, 2007.
90. Tsuzuku S, Kajioka T, Sakakibara H, and Shimaoka K. Slow movement resistance training using body weight improves muscle mass in the elderly: A randomized controlled trial. *Scand J Med Sci Sports* 28: 1339-1344, 2018.

91. van der Does HT, Brink MS, Benjaminse A, Visscher C, and Lemmink KA. Jump landing characteristics predict lower extremity injuries in indoor team sports. *Int J Sports Med* 37: 251-256, 2016.
92. Vaughn JM and Micheli L. Strength training recommendations for the young athlete. *Phys Med Rehabil Clin N Am* 19: 235-245, 2008.
93. Watanabe K and Akima H. Neuromuscular activation of vastus intermedius muscle during fatiguing exercise. *J Electromyogr Kinesiol* 20: 661-666, 2010.
94. Watanabe K, Kouzaki M, and Moritani T. Task-dependent spatial distribution of neural activation pattern in human rectus femoris muscle. *J Electromyogr Kinesiol* 22: 251-258, 2012.
95. Watanabe K, Kouzaki M, and Moritani T. Regional neuromuscular regulation within human rectus femoris muscle during gait in young and elderly men. *J Biomech* 49: 19-25, 2016.
96. Widdowson WM, Healy ML, Sonksen PH, and Gibney J. The physiology of growth hormone and sport. *Growth Horm IGF Res* 19: 308-319, 2009.
97. Zaccaria M, Varnier M, Piazza P, Noventa D, and Ermolao A. Blunted growth hormone response to maximal exercise in middle-aged versus young subjects and no effect of endurance training. *J Clin Endocrinol Metab* 84: 2303-2307, 1999.
98. Zinner C, Wahl P, Achtzehn S, Reed JL, and Mester J. Acute hormonal responses before and after 2 weeks of HIT in well trained junior triathletes. *Int J Sports Med* 35: 316-322, 2014.
99. 東京都立大学体力標準値研究会, 首都大学東京体力標準値研究会. *新・日本人の体力標準値II*. 不味堂出版, 2007.

謝辞

本論文は早稲田大学大学院スポーツ科学研究科博士後期課程における研究成果をまとめたものであり、作成および提出にあたってご指導、お力添えを賜ったすべての皆様に心より御礼申し上げます。

指導教員であられる早稲田大学スポーツ科学学術院の広瀬統一教授には、ご多忙の中、私の研究活動に対してご指導いただきましたこと、心より感謝申し上げます。広瀬先生の大学教員としての教育、研究およびスポーツを通じた社会への貢献に対する考え方や姿勢は、スポーツに携わる者として学ぶことが多く、大きな励みとなりました。

また、岡田純一教授、熊井司教授、平山邦明准教授におかれましては、ご多忙の中、快く本論文の副査を引き受けてくださり心より感謝申し上げます。

研究を推進するにあたり、江戸川大学の星川精豪さんには本論文の測定において多大なるご協力を賜りました。また、実践学園中学校男子バスケットボール部、大東文化大学男子バスケットボール部ほか、研究対象者としてご協力いただいた選手および保護者の皆様にはこの場をお借りして心より感謝申し上げます。実践学園中学校の森圭司教諭、大東文化大学男子バスケットボール部の西尾吉弘ヘッドコーチにおかれましては、私の研究活動のためにチームの貴重な活動時間を割いてくださり、厚く御礼申し上げます。

勤務先である帝京平成大学現代ライフ学部の先生方には、研究活動にご理解とご支援をいただきましたこと心より感謝申し上げます。特に、砂川憲彦教授には、私の研究活動の中で常に励ましの言葉をかけていただいたこと、深く御礼申し上げます。

研究室の皆様によるご指摘のおかげで、私の研究をより良いものに発展させることができました。また、なかなか研究室に滞在する時間がなかった中で、質問や疑問に対して速やかかつ的確に、快く答えてくださったのおかげで、私の大学院生としての生活は幾度も救われました。ありがとうございました。

最後に、これまでの長い学生生活を常に温かくサポートしてくださった家族に、この場を借りて感謝の意を表します。

2019年7月

関根 悠太