サッカー選手における膝関節伸展・屈曲トルクと 大腿部筋体積の年齢変化

星川 佳広 飯田 朝美 村松 正隆 中嶋 由晴

Yoshihiro Hoshikawa, Tomomi Iida, Masataka Muramatsu and Yoshiharu Nakajima : Age-related changes in knee extension and flexion torques and thigh muscle volume in soccer players. Japan. J. Phys. Educ. Hlth. Sport Sci. 52 : 431-442, November, 2007.

Abstract : The purpose of the study was to describe age-related changes in knee strength and thigh muscle volume on elite soccer players from late adolescence to adulthood. Totally 191 soccer player participated in the study and were divided into 5 age groups, i.e. under 16 (U15), 17 (U16), 19 (U18), and 22 (U21) yrs and over 22 (O22) yrs. All of U21 and O22 subjects were professional soccer players. Maximal knee extension (KE) and flexion (KF) concentric torque were measured using isokinetic dynamometer at velocities of 1.05, 3.14, and 7.85 rad/s in both of the dominant and non-dominant legs. Femur length and cross-sectional areas of the quadriceps femoris and hamstrings at the upper, middle, and lower range of the thigh were determined by magnetic resonance imaging, from which the volume of quadriceps femoris (esQF) and hamstrings (esHAM) were estimated. From U15 to U18 neither KE nor KF at 1.05 rad/s increased significantly, although those at the other faster velocities increased significantly regardless of whether the data were expressed as absolute or adjusted value to body weight. In addition, esQF and esHAM also did not increase significantly from U15 to U18. However, the largest increases were observed between U18 and U21 in KE and KF at all the velocities as well as esQF and esHAM. Furthermore, when KE and KF were divided to esQF and esHAM respectively, the values also increased significantly from U15 to U21, suggesting higher knee strength in the professional soccer players were attributed to the concomitant development of thigh muscle volume with the increased neural activation. The ratio of KF to KE and the ratio of esHam to esQF increased slightly from U15 to O22, indicating the predominant development of knee flexor muscles on soccer players after late adolescence. The data presented in this study implied that increasing knee strength with emphasis on both thigh muscle hypertrophy and adaptation of neuromuscular function was essential for younger players to achieve higher soccer playing standards.

Key words : Isokinetic knee strength, Muscle volume, MRI, Junior athletes, Growth and development

キーワード : 等速性筋力, 屈伸比, MRI, ジュニアスポーツ選手, 発育発達

Ⅰ 緒 言

膝関節筋力は、キック、ジャンプ、スプリントや方向転換など、サッカーの主動作における高いパフォーマンスに必要な不可欠な能力である。また

サッカー選手に多い膝関節や下肢筋群の傷害の1つのリスクファクターとして、膝関節筋力の低さが認識され (Fried and Lloyd, 1992), サッカー選手に対しては、膝関節まわりの筋力強化が積極的に指導されている。実際に欧州のプロサッカー選手においては、競技レベルが高い選手ほどより

浜松ホトニクス株式会社スポーツホトニクス研究所
〒438-0016 静岡県磐田市岩井 2150-1
連絡先 星川佳広

Sports Photonics Laboratory, Hamamatsu Photonics K.K.
2150-1 Iwai, Iwata, Shizuoka 438-0016
Corresponding author hoshi@hq.hpk.co.jp

高い膝関節筋力を保持することが、複数の国から報告されている (Ekblom 1986, Öberg et al., 1986, Commetti et al., 2000). さらに思春期のサッカー選手ですでに、競技力の高い選手ほどより高い膝関節筋力を示すことも報告されている (Hansen et al., 1999).

日本のサッカー選手に対しては、筋力トレーニングやハイパワー系のトレーニングの導入は、身長のスパート期が終了してからと指導されることが多い (日本サッカー協会, 2004). しかしながら、発育過程 (ジュニア) のサッカー選手と成人 (シニア) のサッカー選手の筋力を比較した研究 (Togari et al., 1988, 星川ほか, 2000), あるいはジュニア選手のみを対象とし筋力の年齢変化を検討した研究 (Leatt et al., 1987, Hansen et al., 1999) はあるものの、サッカー選手が筋力強化をはじめる思春期後期からより高いレベルに達するまで、いかに筋力を向上させるかを検討した研究は必ずしも多くない. 数少ない研究の中で Rochocongar et al. (1988) が、フランスの平均年齢 13.8 歳, 15.3 歳, 17.0 歳のジュニア選手と、平均年齢 24.0 歳のプロのシニア選手の等速性膝関節トルクを比較している. その中では、角速度、伸展・屈曲によらず、トルクの絶対値は年齢の上昇とともに増大するものの、体重割値においては、13.8 歳と 15.3 歳, 17.0 歳とシニア選手の間に差がないと報告されている. さらに、17.0 歳においては伸展側の筋力向上が著しいために、結果的に膝関節筋力の屈曲/伸展比は 17 歳において最低になったと報告されている.

一般に筋力の増大は、筋の肥大と筋力発揮に参加する運動単位の増加という神経系因子の改善の両者によって説明される (福永, 1978). 思春期以降の男子に起こる著しい筋力の発達は、ホルモン変化による筋肥大がその直接的な要因である (Malina and Bouchard, 1991). しかし筋肥大を上回る筋力の増大が観察される場合が多く (Kanehisa et al., 1995, 2003b), 筋肥大と同時に神経系因子の改善が示唆されている. また筋力の発達を関節トルクから検討した場合、関節トルクがモメントアームの影響も受けるため、筋力の発達に

は身長の伸びそのものが最も影響するとする研究もある (De Ste Croix et al., 2003).

筋力増大の背景にあるこれらの要因は、筋力の変化とともに超音波法や磁気共鳴画像 (MRI) 法により主動筋となる筋群の形態変化を同時に観察することで分析されてきた. これまで成人を対象にしたトレーニング実験の報告は多い (Aagaard et al., 2001, Ahtiainen et al., 2003). しかし発育過程のスポーツ選手では、トレーニングによる筋力の向上と自然発達による筋力の発達が相乗すると考えられ、そのような場合、各要因がどのように関わるかについてはよく調べられていない.

筆者らの知る限り、発育過程のサッカー選手を対象に、筋力と筋形態の変化を同時に観察した研究は存在しない. また他の競技の発育過程の選手においても、わずかに、ウエイトリフティング (Kanehisa et al., 2003a), バレーボール (Hoshikawa et al., 2006), テニス (Kanehisa et al., 2006) で報告されているのみである. これらの先行研究ではいずれも、筋の肥大とともに筋肥大以上の筋力の増大が確認されている. しかし、筋力の向上、筋の肥大、筋肥大あたりの筋力の向上それぞれの程度は、競技種目ごとに、あるいは膝関節の伸展・屈曲側、角速度によって異なっている.

シニアのサッカー選手が、ジュニア選手よりも高い膝関節トルクを示すことはいずれの先行研究も一致している (Rochocongar et al., 1988, Togari et al., 1988, Gür et al., 1999, 星川ほか, 2000). その一方で星川ほか (2006) は、膝関節動作の主動筋となる大腿部の筋は、サッカー選手においてはいずれの筋群も思春期後期から 30 代の前半まで継続的に肥大すると報告している. したがって、発育過程のサッカー選手がより高い筋力を獲得するとき、その背景として筋の肥大をとまなうことが予測されるが、膝関節トルクの向上が筋肥大の程度を上回るか、あるいはその程度が、伸展・屈曲によって異なるかは、膝関節トルクと大腿部筋群の形態的な変化の同時観察が必要である.

Fukunaga et al. (2001) によれば、筋の発揮す

る張力自体は筋の生理学的断面積に比例するものの、関節を介して発揮されるトルクは、モーメントアームの影響も受けるため、筋体積により高く比例する。そこで本研究は、思春期後期から成人までの幅広い年齢層のサッカー選手を対象に、膝関節伸展・屈曲トルクとともに、大腿四頭筋、ハムストリングスの筋体積をMRI法により推測し、サッカー選手における膝関節筋力の向上を筋の形態変化とあわせて横断的にまとめることを目的とした。

II 方 法

被検者：本研究の被検者は、ある日本プロサッカーリーグに所属するクラブとその下部組織に在籍した191名の男子サッカー選手であった。年齢を被検者の生年月日と測定日から小数点第一位まで計算した。被検者の年齢は14.0～32.8歳であった。被検者のうち、146名は複数回の測定を受けており、各測定値の平均値をその被検者の代表値として扱った。平均的な観察期間は1.4年で測定回数3.9回であった。被検者を年齢により、16.0歳未満(U15)、16.0歳以上17.0歳未満(U16)、17.0歳以上19.0歳未満(U18)、19.0歳以上22.0歳未満(U21)、22.0歳以上(O22)のグループに分類した。各年齢グループの被検者数等をTable 1にまとめた。

膝関節トルクの測定：等速性の膝関節伸展トルク(KE)および膝関節屈曲トルク(KF)の測定は、Biodex-System3(Biodex Medical社)を用いて、椅座位姿勢で行われた。被検者は15分程度のウォームアップの後、Biodex-systems3備え付けの椅子に座り、背もたれに対して胴部、腰部、大腿部をベルトで固定された。被検者の膝関節をダイナモメータの回転軸に合わせ、膝関節用アタッチメントのパッドを足部の上で固定した。角速度は、1.05 rad/秒、3.14 rad/秒、7.85 rad/秒の3つであった。左右両脚の測定を行った。測定後、被検者が発揮したトルク曲線をすべて確認し、等速性運動中のピーク値を最大トルクとして後の分析に用いた。

大腿部筋体積の推定：大腿四頭筋およびハムストリングスの筋体積を推定するために、0.2 Tの磁気共鳴装置(Signa Profile, GE 横河メディカルシステム社)を用い大腿部の横断画像を得た。左右両脚を別々に撮像した。まず、被検者の大腿骨大転子が撮像されるように前額面画像を取得した後、水平横断面にて大腿骨上端から下端までのT1強調画像(スピンエコー法、繰り返し時間350 ms, エコー時間21 ms, FOV 40 cm×40 cm, マトリクス256×256ピクセル, 2NEX)を、20 mm間隔ごとに10 mm厚にて取得した。大腿骨上端から下端までの距離を大腿骨長とし、その下部(30%)、中央部(50%)、上部(70%)に相当する位置にある画像を抽出し、以下の筋断面積の算出を行った。この方法によれば、抽出された画像は、大腿骨長の真の30%、50%、70%位置から最大で±1 cmずれた位置にある可能性がある。実際に本研究で用いた抽出位置は、大腿骨長の下部、中央部、上部それぞれにおいて、27.6～32.4%、47.6～52.2%、67.7～72.3%の範囲内であり、年齢グループ間に有意差はなかった。

抽出した画像において、一人の訓練された検者が、大腿四頭筋(大腿直筋、内側広筋、中間広筋、外側広筋の領域)、ハムストリングス(大腿二頭筋、半腱様筋、半膜様筋の領域)の領域を区分けした。区分けされたそれぞれの領域のピクセル数をカウントし、撮像条件から決定される1ピクセル $= (1.56 \text{ mm})^2$ を用い、生体内での実際の断面積値に換算した。大腿下部、中央部、上部それぞれの大腿四頭筋、ハムストリングスの筋断面積を平均し、大腿骨長をかけたものを、それぞれの推定筋体積とした(esQF, esHAM)(Figure 1)。

事前に筋断面積測定の再現性を調べるために、3名の被検者を対象に、それぞれ10回の撮影を同一日に行い、得られた画像に対して筋断面積を求め変動係数を算出した。その結果、すべての被検者において、大腿四頭筋、ハムストリングスの筋断面積の変動係数は1%以下であった。

データ処理：膝関節の伸展側と屈曲側の相対的变化を知るために、KFとKEの比(KF/KE)とesHAMとesQFの比(HAM/QF)を計算した。

Fig. 1 Thigh MR images and calculations of estimated quadriceps femoris volume (esQF) and hamstrings volume (esHAM)

また、KE, KF それぞれを esQF, esHAM で除し、推定筋体積あたりの膝関節トルクをもとめた。被検者がサッカーのキック動作において、ボールを蹴る際に優位に用いる側を利き足（逆を非利き足）とし、膝関節トルク、推定筋体積、推定筋体積あたりの膝関節トルク、HAM/QF, KF/KE それぞれの項目について、二元配置の分散分析（利き足・非利き足×年齢グループ間）を行った。結果的に、角速度 1.05, 7.85 rad/s の膝伸展トルクを除き、すべての項目において利き足・非利き足間に有意な差異がみられたので、利き足・非利き足それぞれにおいて一元配置の分散分析を行い、年齢グループ間の比較を行った。一元配置分散分析において有意な年齢効果が確認された場合、Scheffe の方法により各年齢グループ間の比較を行った。すべてにおいて危険率 1% 未満の水準をもって有意と判定した。

III 結 果

身長、体重、大腿骨長はすべて、U15～U18 間に有意差がなく、U21, O22 がそれらの群より有意に大きかった（Table 1）。

膝関節トルク：Figure 2 は、KE, KF の絶対値と体重割値の年齢変化をまとめたものである。KE（絶対値）は、2 元配置分散分析の結果、角速度 3.14 rad/s においてのみ利き足が非利き足より有意に高い値を示した。利き足・非利き足と年齢グループ間とに有意に交互作用の効果はなかった。また KE（絶対値）は、いずれの角速度、利き足・非利き足にかかわらず U15 から U21 にかけて年齢とともに増大し、U21 と O22 は、U15～U18 と比較して有意に高い値を示した。また非利き足では、角速度 3.14 rad/s で U16 と U18 が、角速度

Table 1 Subjects characteristics in age group

	n	Age (yrs)	Height (cm)	Weight (kg)	Femur (cm)
U15	36	15.4 (0.4)	172.4 (6.3)	63.1 (6.9)	43.6 (1.8)
U16	54	16.6 (0.3)	171.9 (5.8)	64.4 (5.5)	43.4 (1.9)
U18	27	17.5 (0.6)	172.4 (6.7)	64.8 (6.9)	42.8 (2.0)
U21	34	20.1 (0.9)	178.6 (4.1) ^a	71.2 (5.9) ^a	45.2 (1.4) ^a
O22	40	26.2 (3.3)	178.2 (5.0) ^b	74.1 (6.2) ^b	45.1 (1.8) ^b

mean (standard deviation)

^aindicating significantly higher than the younger age-group by one rank

^bindicating significantly higher than the younger age-group by two ranks

7.85 rad/s で U18 が、それぞれ U15 と比較して有意に高い値を示した。それら以外においては U15～U18 間に有意差はみられなかった。

KE (体重割値) は、KE (絶対値) と同様に U15 から U21 にかけて年齢とともに増大したが、KE (絶対値) と比較し標準偏差が大きく、いずれの角速度、利き足・非利き足においても、U21 と O22 が有意に大きな値を示したのは、U15 もしくは U16 に対してのみであった。また非利き足では、角速度 3.14, 7.25 rad/s で U16 と U18 が、U15 と比較して有意に高い値を示した。しかしそれら以外においては U15～U18 間に有意差はみられなかった。

KF (絶対値) は、2 元配置分散分析の結果、いずれの角速度においても利き足が非利き足より有意に高い値を示した。利き足・非利き足と年齢グループ間とに有意な交互作用の効果はなかった。KF (絶対値) は、KE (絶対値) と同様に、U15 から U21 にかけて年齢とともに増大し、いずれの角速度、利き足・非利き足にかかわらず U21 と O22 が U15～U18 と比較して有意に大きかった。また角速度 3.14 rad/s、利き足において U18 が U15 よりも有意に大きな値を示し、角速度 7.85 rad/s では、利き足では U16 と U18 が、非利き足では U18 がそれぞれ U15 と比較して有意に大きな値を示した。それら以外においては U15～U18 間に有意差はみられなかった。

KF (体重割値) は、U15 から U21 にかけては、KF (絶対値) と同様に年齢とともに増大したが、角速度 1.05, 3.14 rad/s においては U21 から O22 にかけて低下傾向が観察され、O22 が有意に大き

かったのは U15 と U16 に対してのみであった。また U21 が U15～U18 と比較して有意に大きかったが、角速度 3.14 rad/s の利き足を除いて U15～U18 間に有意差はなかった。角速度 7.85 rad/s では、U15 から U16 にかけて大きく伸び、U16 から O22 にかけて漸増する傾向を示し、利き足・非利き足ともに、U18～O22 が U15 と比較して有意に大きく、また利き足では U16 も U15 と比較して有意に大きかった。

推定筋体積 : Figure 3 は、esQF および esHAM の年齢変化をまとめたものである。2 元配置分散分析の結果、esQF は非利き足で利き足より有意に大きく、esHAM は利き足で非利き足より有意に大きかった。利き足・非利き足と年齢グループ間とに有意な交互作用の効果はなかった。esQF, esHAM とともに、利き足・非利き足にかかわらず、U15～U18 間に有意差はなく、U21 と O22 がそれらの群より有意に大きい値を示した。

膝関節トルクの推定筋体積割値 : Figure 4 は、推定筋体積あたりの膝関節トルクの年齢変化をまとめたものである。2 元配置分散分析の結果、伸展側・屈曲側ともに、角速度にかかわらず、利き足が非利き足より有意に大きかった。利き足・非利き足と年齢グループ間とに有意な交互作用の効果はなかった。伸展側においては、いずれの角速度においても U15 から U21 にかけて年齢とともに増大し、U21 と O22 で一定となる傾向を示したが、標準偏差が大きいために角速度 1.05 rad/s では年齢グループ間に有意な差異はみられず、また角速度 3.14 rad/s においても U21 が U15 と比較して有意に大きいのみであった。角速度 7.85

Fig. 2 Age-group differences in KE (upper left) and KF (upper right) and the respective relative values to body weight (lower)
L.D.; lateral dominance, I.E.; interaction effect, D; dominant leg, ND; non-dominant leg
a, b, c and d indicating significantly higher than the younger age-group by one, two, three and four ranks, respectively.

Fig. 3 Age-group differences in the estimated QF and HAM volumes
L.D.; lateral dominance, I.E.; interaction effect, D; dominant leg, ND; non-dominant leg
a and b indicating significantly higher than the younger age-group by one and two ranks, respectively.

rad/s では、O22 が U15 と比較し、U21 が U16 以下と比較し有意に大きく、また非利き足では U18 が U15 と比較して有意に大きかった。

屈曲側においては、角速度 1.05, 3.14 rad/s では、KF (体重割値) と同様に、U15 から U21 にかけて増大し、U21 から O22 にかけて低下する傾向を示したが、標準偏差が大きく、O22 は U15～U18 間と有意差なく、また U21 が有意に大きかったのは、利き足で U15、非利き足で U16 以下と比較した場合のみであった。また U15～U18 間に有意差はなかった。角速度 7.85 rad/s では、U15 から U16 にかけて大きく伸び、U16 から O22 にかけて漸増する傾向を示し、利き足・非利き足ともに、U18～O22 が U15 と比較して有意に大きく、また利き足では U16 も U15 と比較して有意に大きかった。

HAM/QF 比および KF/KE 比: Table 2 は、推定筋体積とトルクの伸展側に対する屈曲側の比率をまとめたものである。2 元配置の分散分析の結果、いずれにおいても利き足が非利き足より有意に高かった。また KF/KE の角速度 7.85 rad/s においてのみ、利き足・非利き足と年齢グループ間とに有意な交互作用の効果がみられ、すなわち、U16 以上では利き足が非利き足より高かったのに対し、U15 では非利き足のほうが利き足よりも高かった。HAM/QF は、U15～U18 には大きな差はなく、U21 と O22 で高い傾向にあったが、有意な差異が見られたのは利き足の O22 と U15 との間のみであった。KF/KE は、角速度 1.05, 3.14 rad/s では、U15 から U21 にかけて増大し O22 でやや低下傾向を示し、U21 が U15 と U16 より有意に高く、角速度 1.05 rad/s の利き足では O22 も U15 より有意に高かった。角速度 7.85 rad/s では、年齢が高くなるほど高くなる傾向を示し、利き足では O22 と U16 が U15 よりも有意に高かった。

IV 考 察

本研究は、サッカー選手の等速性膝関節トルクの年齢変化を、大腿部筋群の体積変化とあわせて分析したものである。以下便宜上、U18 以下をジュニア、U21 以上をシニアと呼ぶ。これまでサッカー選手の筋力の年齢変化に関しては、ジュニアとシニアを比較するかたちで数多く報告されてきている (Rochcongar et al., 1988, Togari et al., 1988, Gür et al., 1999, 星川ほか, 2000)。どの先行研究においても、年齢が高いほど、あるいはより競技レベルが高くなるほど、伸展・屈曲にかかわらず、高い膝関節筋力を示すことが報告されている。本研究も先行研究と同様に、伸展・屈曲、角速度に関わらず、トルクの絶対値は U15 から U21 にかけて年齢の上昇とともに直線的に増大し、シニア間 (U21 と O22) には有意差がないという傾向を示した。またトルクの体重割値も絶対値とほぼ同様の年齢変化を示した。しかし、絶対値においては伸展・屈曲のいずれの角速度におい

Fig. 4 Age-group differences in torques to estimated muscle volume : KE/esQF (left) and KF/esHAM (right)
L.D. ; lateral dominance, I.E. ; interaction effect, D ; dominant leg, ND ; non-dominant leg
a, b, c and d indicating significantly higher than the younger age-group by one, two, three and four ranks, respectively.

Table 2 HAM/QF ratio and KF/KE ratios at three angular velocities

	HAM/QF (%)		KF/KE (%)					
			1.05 rad/s		3.14 rad/s		7.85 rad/s	
	D	ND	D	ND	D	ND	D	ND
U15	43.8 (3.9)	43.7 (3.2)	51.1 (8.4)	50.2 (5.5)	59.3 (11.0)	59.8 (8.0)	58.4 (16.0)	60.9 (14.5)
U16	44.6 (3.6)	43.4 (3.5)	54.4 (5.3)	51.1 (5.2)	63.2 (6.5)	59.6 (6.1)	68.6 (8.8) ^a	63.0 (9.7)
U18	44.4 (3.3)	43.1 (2.8)	54.8 (4.3)	52.8 (5.4)	63.4 (6.8)	61.6 (7.2)	67.3 (13.9)	64.1 (9.8)
U21	46.5 (3.5)	45.4 (3.0)	59.7 (7.6) ^c	56.3 (5.7) ^b	69.3 (11.5) ^c	65.7 (8.2) ^b	69.6 (13.7)	65.3 (12.8)
O22	47.2 (4.1) ^d	45.9 (4.2)	57.1 (6.4) ^d	54.4 (5.4)	65.2 (7.4)	64.0 (6.5)	72.5 (12.2) ^b	70.6 (12.6)
Lateral Dominance	P<0.001 (D>ND)		P<0.001 (D>ND)		P<0.001 (D>ND)		P<0.001 (D>ND)	
Interaction Effect	P=0.22 (NS)		P=0.33 (NS)		P=0.043 (NS)		P=0.002	

mean (standard deviation) NS ; non significant

D ; dominant leg, ND ; non-dominant leg

a, b, c and d indicating significantly higher than the younger age-group by one, two, three and four ranks, respectively.

でも、シニアとジュニアに有意差があったものの、体重割値においては、伸展（すべての角速度）・屈曲（角速度 7.85 rad/s）にシニアと U18 に

は有意差はなく、シニアと有意差がみられたのは U16 以下のみとであった。

また U15 から U18 にかけては、伸展・屈曲と

もに膝関節トルク（絶対値、体重割値いずれも）は、速い角速度（3.14 rad/s, 7.85 rad/s）では年齢とともに有意に増大したものの、遅い角速度（1.05 rad/s）では統計的に有意な増大がみられなかった。一般に筋力の向上は、トレーニングに用いた速度近辺において顕著になる（Behm and Sale, 1993）。また競技スポーツを行わない発育期の一般男子の膝関節トルクを縦断的に調べた Kanehisa et al. (2003b) は、自然発達による筋力の向上が遅い角速度（1.05 rad/s）においてみられた場合にも、日常生活で使うことが少ない速い角速度（3.14, 5.24 rad/s）の筋力は必ずしも増大するわけではないことを示している。これらの先行研究と、U15～U18 に推定筋体積に有意な増大がなかったことをあわせて考えると、本研究の U15～U18 にみられた速い角速度における膝関節トルクの増大は、自然発達によるものではなく、サッカーのトレーニングにてボールのキック動作やスプリント、ジャンプ等の速い動作を行うことによって獲得されたものと考えられる。

さらに本研究においては、KF/KE（すべての角速度）および HAM/QF は年齢とともに緩やかに上昇し、いずれも U21 もしくは O22 において最大値を示した。Kanehisa et al. (1995) は、一般男子の発育過程においては、膝関節の屈曲・伸展比に関わる筋力、筋断面積の指標は、いずれも 13 歳以降において一定であることを示し、屈曲・伸展の両者は並行的に発育発達することを示唆している。したがって、本研究のサッカーの被検者でみられた屈曲側がより大きく向上する傾向は、サッカーのトレーニングを介して獲得されたものと考えられる。この傾向は、サッカー選手の傷害予防の観点からは有利に働くものと考えられる（Fried and Lloyd, 1992）。

Rochcongar et al. (1988) は、フランスの平均年齢 13.8 歳（JC）、15.3 歳（JB）、17 歳（JA）の発育過程のサッカー選手とプロサッカー選手（A）を比較し、膝関節トルクは年齢とともに大きく増大するが、最も大きく変化するのは JA においてであったと報告している。しかし体重割値では、JA と A 間に差がなく、またサッカー選手はより

伸展側の筋力が発達するため、屈曲と伸展の比は JC から JA にかけて低下すると報告している。

Leatt et al. (1987) は、カナダの 16 歳以下と 18 歳以下の代表チームを比較し、伸展トルクの絶対値は年齢とともに増大するが、屈曲トルクは絶対値、体重割値にかかわらず両群に差がなく、屈曲と伸展の比も両群で変わらないとしている。これら先行研究の結果は、必ずしも本研究の結果と一致していない。その理由としては国ごとのトレーニング方法や選手の選抜方法の違いが反映していると考えられる。本研究では U18 と O21 間に、膝関節トルクのみならず、身長、体重、推定筋体積にも大きな差異がみられた。本研究のジュニアの被検者は、プロサッカー選手を目指すような高い競技レベルの被検者群であるものの、必ずしも全員がプロサッカー選手になれるわけではない。その一方で、シニアの被検者は全員がプロサッカー選手であり、被検者層の違いが結果に反映した可能性は高い。JA（17 歳）で膝関節トルクが最も伸びると報告した Rochcongar et al. (1988) の研究においても、本研究同様、JB から JA にかけて被検者の体重に大きな増加があり、被検者層が異なることが伺われる。これらは横断的研究の限界であり、純粋に年齢の変化を見る場合には縦断的分析が必要と思われる。

本研究の特徴は、膝関節トルクのみならず同時に MRI 法により筋体積の変化を観察したことにある。その結果、推定筋体積においても、推定筋体積あたりの膝関節トルクにおいても、ジュニアとシニアでは傾向が異なることが示された。本研究の U15～U18 にかけては、角速度 1.05 rad/s の膝関節トルク（伸展・屈曲とも）のみならず、推定筋体積においても U15～U18 では大腿四頭筋、ハムストリングスいずれも有意に増えていなかった。先行研究によれば、発育過程の一般男子の膝関節筋力（等尺性）は、伸展側は 17 歳まで、屈曲側は 16 歳まで顕著に増大する（金久ほか, 1985）。また大腿部筋断面積も、男子の場合 17 歳までは漸増しそれ以降 20～30 代まではほぼ一定値を示す（金久ほか, 1985, Kanehisa et al., 1994）。本研究の U15 から U18 にかけて、角速度 1.05 rad/s の

膝関節トルクおよび推定筋体積に有意な増大が見られなかった理由としては、U15～U18間に身長の違いがみられないことから、本研究のU15には早熟傾向の被検者が多く、すでに15歳の段階で高い筋力、筋体積を保持していた可能性が考えられる。ポルトガルのエリートサッカー選手の骨年齢を調べたMalina et al. (2000)は、15歳以降の選手の65%が1年以上の早熟であることを報告しており、本研究のU15にも同様の傾向があったものと考えられる。

U15～U18の変化に対して、U18からU21にかけての膝関節トルク、推定筋体積の増大は伸展・屈曲側によらず顕著であった。推定筋体積におけるジュニアとシニアの差異は、大腿四頭筋で約14% (U15～U18の平均とU21とO22の平均から計算)、ハムストリングスで約20%であった。同様にして計算したジュニアとシニアの大腿骨長の差異が約5%程度であることを考慮すると、シニアにおける推定筋体積の発達、長軸方向の発達よりも筋が肥大することの効果が大きいと考えられる。

また膝関節トルクのジュニアとシニアの差異は、角速度により伸展側で約23～29%、屈曲側で約32～39%であった。この値は上述の大腿四頭筋、ハムストリングスの推定筋体積の増大率を大きく上回っており、その結果、膝関節トルクの推定筋体積割値においても、ジュニアとシニアでは、伸展側で約8～13%、屈曲側で約10～16%の差異がみられ、より速い角速度ほど、年齢グループ間に有意差が見られる傾向にあった。これらの結果と、本研究のKEとesQF、KFとesHAMの関係は、それぞれ相関係数0.69、0.59以上の高い相関関係がみられたことをあわせて考えると、シニアで観察されるジュニアより20～40%高い膝関節トルクは、伸展・屈曲ともにその約3分の2は筋体積の増大により、残りの3分の1が筋体積あたりの発揮トルクの増大によって獲得されていると概算される。この結果は、思春期後期のサッカー選手が本研究のシニアのようなより高い競技レベルに達するためには、筋肥大をともなった筋力の獲得が不可欠であることを示唆するもので

あった。

しかしその一方、筋体積あたりの膝関節トルクにおいて、シニアがジュニアよりも有意に高い傾向を示したことは、本研究で得られた興味深い結果のひとつである。金久ほか(1985)の一般男子の発育過程のデータでは、膝関節の単位筋断面積あたりの筋力は、15歳以降では伸展・屈曲いずれも増加傾向を認めない。したがって本研究でみられたより高い筋体積あたりの膝関節トルクは、シニアの競技力の高いサッカー選手の特徴と考えられる。その生理的な背景は本研究からは不明であるが、サッカーのトレーニングが継続されることで、筋出力発揮における神経系因子の改善が生じていること、あるいは、シニアには筋線維組成においてより速筋線維の割合が高い選手が多いこと等が理由として考えられる。

最後に、本研究ではほぼすべての項目において利き足と非利き足の差異がみられた。推定筋体積は、esQFは非利き足が利き足よりも、esHAMは利き足が非利き足よりも大きい傾向を示した。しかし両者の差異は統計的に有意であったものの、esQF、esHAMそれぞれ、利き足に対して非利き足が100.7%、98.7%であり、1%程度のわずかな差であった。大学サッカー選手を観察したMasuda et al. (2003)も、本研究と同様にハムストリングスは利き足の方が有意に非利き足より大きい、その程度は小さく無視できると論議している。また本研究の膝関節トルクは、伸展・屈曲ともに非利き足が利き足よりも小さく、その差異は屈曲側で顕著であった(伸展98.6～99.0%・屈曲94.0～95.5%)。先行研究では、サッカー選手の筋力に利き足・非利き足の差異があるとする研究(Leatt et al., 1987, Gür et al., 1999, Masuda et al., 2003)とないとする研究(Öberg et al., 1986, Rochongar et al., 1988, Zakas, 2006)が混在する。先行研究結果の相違の理由は、被検者の競技レベルや測定プロトコルの違い、被検者数が少ないことによる検定力の低さなどが考えられる。本研究からは、サッカー選手の膝関節筋力に利き足と非利き足の差異がある場合にも、筋体積には大きな差異があるわけではなく、それ以外の要因による

影響が大きいことが示唆される。

V ま と め

本研究では、思春期後期からプロサッカー選手までの膝関節トルクと推定筋体積を観察した結果、

1. U15 から U18 までは、膝関節トルクの増大は速い角速度においてのみ観察された。また筋体積の増大はみられなかった。

2. U21 以降では、U18 以下と比較し伸展・屈曲ともに膝関節トルクが大きく増大していた。同時に筋体積も大きく増大し、筋体積あたりのトルクも増大傾向を示した。さらにトルクの増大、推定筋体積の増大はより屈曲側で大きかった。

3. サッカー選手の筋体積の利き足、非利き足の差異はわずかであり、膝関節トルクに左右差がある場合も、筋体積以外の要因によると考えられた。

謝 辞

本研究には長年にわたる(株)ヤマハフットボールクラブおよびその所属コーチ、選手のご協力がありました。特にチーム内でフィジカル強化を担当するコーチ(菅野淳様、生駒武志様、山口英裕様、菊池忍様、澁川賢一様、中馬健太郎様)には、選手へのフィードバック、スケジュール管理等において多大なご貢献がありました。ここに御礼申し上げます。

文 献

Aagaard, P., Anderson, J.L., Dyhre-Poulsen, P., Leffers, A.-M. Wagner, A. Magnusson, S.P., Halkær-Kristensen, J. and Simonsen, E.B. (2001) A mechanism for increased contractile strength of human pennate muscle in response to strength training: changes in muscle architecture. *J. Physiol.*, 534 : 613-623.

Ahtiainen, J.P., Pakarinen A., Alen, M., Kraemer, W.J. and Häkkinen, K. (2003) Muscle hypertrophy, hormonal adaptations and strength development during strength training in strength-

trained and untrained men. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 89 : 555-563.

Behm, D.G. and Sale, D.G. (1993) Velocity specificity of resistance training. *Sports Med.*, 15 : 374-388.

Cometti, G., Maffiuletti, N.A., Pousson, M., Chatard, J.-C. and Maffulli, N. (2000) Isokinetic strength and anaerobic power of elite, subelite, and amateur French soccer players. *Int. J. Sports Med.*, 22 : 45-51.

De Ste Croix, M.B.A., Deighan, M.A. and Armstrong, N. (2003) Assessment and interpretation of isokinetic muscle strength during growth and maturation. *Sports Med.*, 33 : 727-743.

Eklom, B. (1986) Applied physiology of soccer. *Sports Med.*, 8 : 50-60.

Fried, T. and Lloyd, G.J. (1992) An overview of common soccer injuries. *Sports Med.*, 14 : 269-275.

Fukunaga, T., Miyatani, M., Tachi, M., Kouzaki, M., Kawakami, Y. and Kanehisa, H. (2001) Muscle volume is a major determinant of joint torque in humans. *Acta Physiol. Scand.* 172 : 249-255.

福永哲夫 (1978) ヒトの絶対筋力. 杏林書院 : 東京.

Gür, H., Akova, B., Pündük, Z. and Küçükoglu, S. (1999) Effects of age on the reciprocal peak torque ratios during knee muscle contractions in elite soccer players. *Scand. J. Med. Sci. Sports*, 9 : 81-87.

Hansen, L., Bangsbo, J., Twisk, J. and Klausen, K. (1999) Development of muscle strength in relation to training level and testosterone in young male soccer players. *J. Appl. Physiol.*, 87 : 1141-1147.

星川佳広・中嶋由晴・村松正隆・菅野 淳・生駒武志・田辺 解・宮崎りか・久野譜也 (2000) ジュビロ磐田における形態・体力測定 I トップチームと下部チームの比較一. *サッカー医・科学研究*, 20 : 78-82.

Hoshikawa, Y., Muramatsu, M., Iida, T., Uchiyama, A., Nakajima, Y., Kanehisa, H. and Fukunaga, T. (2006) Gender differences in yearly changes in the cross-sectional areas and dynamic torques of thigh muscles in high school volleyball play-

- ers. *Int. J. Sport Health Sci.*, 4 : 29-35.
- 星川佳広・飯田朝美・村松正隆・内山亜希子・中嶋由晴 (2006) サッカー選手の大腿部筋断面積の横断的, 縦断的变化. *トレーニング科学*, 18 : 115-127.
- 金久博昭・福永哲夫・角田直也・池川繁樹 (1985) 発育期青少年の単位筋断面積当たりの筋力. *体力科学*, 34 suppl. : 71-78.
- Kanehisa, H., Ikegawa, S., Tsunoda, N. and Fukunaga, T. (1994) Cross-sectional areas of fat and muscle in limbs during growth and middle age. *Int. J. Sports Med.*, 15 : 420-425.
- Kanehisa, H., Ikegawa, S., Tsunoda, N. and Fukunaga, T. (1995) Strength and cross-sectional areas of reciprocal muscle groups in the upper arm and thigh during adolescence. *Int. J. Sports Med.* 16 : 54-60.
- Kanehisa, H., Funato, K., Kuno, S., Fukunaga, T. and Katsuta, S. (2003a) Growth trend of the quadriceps femoris muscle in junior Olympic weight lifters : an 18-month follow-up survey. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 89 : 238-242.
- Kanehisa, H., Abe, T. and Fukunaga, T. (2003b) Growth trends of dynamic strength in adolescent boys A 2-year follow-up survey. *J. Sports Med. Physical Fit.*, 43 : 459-464.
- Kanehisa, H., Kuno, S., Katsuta, S. and Fukunaga, T. (2006) A 2-year follow-up study on muscle size and dynamic strength in teenage tennis players. *Scand. J. Med. Sci. Sports*, 16 : 93-101.
- Leatt, P., Shephard, R.J. and Plyley, M.J. (1987) Specific muscular development in under-18 soccer players. *J. Sports Sci.*, 5 : 165-175.
- Malina, R.M. and Bouchard, C. (1991) Growth, maturation, and physical activity. *Human Kinetics : Champaign*.
- Malina, R.M., Peña Reyes, M.E., Eisenmann, J.C., Horta, L., Rodrigues, J. and Miller, R. (2000) Height, mass and skeletal maturity of elite Portuguese soccer players aged 11-16 years. *J. Sports Sci.*, 18 : 685-693.
- Masuda, K., Kikuhara, N., Takahashi, H. and Yamanaka, K. (2003). The relationship between muscle cross-sectional area and strength in various isokinetic movements among soccer players. *J. Sports Sci.*, 21 : 851-858.
- 日本サッカー協会技術委員会 (2004) 財団法人日本サッカー協会 2004 U-16 指導指針.
- Öberg, B., Möller, M., Gillquist, J. and Ekstrand, J. (1986) Isokinetic torque levels for knee extensors and knee flexors in soccer players. *Int. J. Sports. Med.*, 7 : 50-53.
- Rochcongar, P., Morvan, R., Jan, J., Dassonville, J. and Beillot, J. (1988) Isokinetic investigation of knee extensors and knee flexors in young French soccer players. *Int. J. Sports Med.*, 9 : 448-450.
- Togari, H., Ohashi, J. and Ohgushi, T. (1988) Isokinetic muscle strength of soccer players. In : Reilly, T., Lees, A., Davids, K. and Murphy, W.J. (Eds) *Science and Football*. E. & F.N. Spon : London, pp. 181-185.
- Zakas, A. (2006) Bilateral isokinetic peak torque of quadriceps and hamstring muscles in professional soccer players with dominance on one or both two sides. *J. Sports Med. Phys. Fitness*, 46 : 28-35.

(平成 19 年 1 月 9 日受付)
(平成 19 年 7 月 21 日受理)