

# 成長期サッカー選手のアキレス腱弾性特性

江川 陽介

## 【要旨】

子どもの腱の特性に関して生物学的成熟度の観点から検討した研究はない。子どもの腱の特徴を明らかにすることは、発育に伴う生体組織の変化や、スポーツ選手に多い腱障害発生メカニズムを解明する上で非常に有用なものとなる。本研究では、ヒト生体における腱の力学的特性の発育に伴う変化を明らかにすることを目的として、発育期の子どもおよび大人を対象にアキレス腱の形態と力学的特性を比較・検討した。

対象は東京都内のサッカークラブに所属する下肢に重篤な既往歴のない男子中学1～2年生26名（平均年齢 $14.0 \pm 0.6$ 歳）であり、また健康な13名の男子大学生（平均年齢 $21.1 \pm 1.1$ 歳）を成長終了後の比較対象として設定した。形態として身長、体重、下腿長、腱長、腱厚を測定した。アキレス腱の力学的特性は、Bモード超音波断層装置（ALOKA社製SSD-1000）を用い、足関節最大筋力発揮中の腓腹筋内側頭筋腱移行部の移動距離を測定し、足関節底屈筋力と筋力発揮時のアキレス腱の伸張量からアキレス腱のスティフネスを算出した。

本研究では暦年齢に差がないにもかかわらず、骨年齢と暦年齢との差によって群分けされた早熟タイプ（EG群）と晩熟タイプ（YG群）の子どもの被験者には、腱の形態や力学的特性に差があった。従って、腱の成長は生物学的成熟度に依存すると考えられる。

【keywords】 生物学的成熟度、アキレス腱弾性特性、サッカー

## 【緒言】

腱の障害は小児ではほとんどみられず、一般に年長の若年や成人のスポーツ選手に多く発生している。しかし近年、競技スポーツに参加する子どもが増加し、高校生以降の成長したスポーツ選手に発生していた腱のオーバーユースが、10歳前後の子どもたちにも増加している<sup>6</sup>。腱の障害は難治性で慢性化しやすく、症状が軽減しても腱の肥厚を残すことが多い。十分に発達していない子どもの筋腱複合体のメカニカルストレスに対する抵抗能力は十分に解明されておらず、安全にスポーツを行うためにも発育期の運動器の特性を明らかにすることは重要である。

発育期の適度な運動が筋や骨の発育に影響を与えることは広く知られており、最近では運動が腱組織に与える影響についても議論されている。動物を用いて検討した先行研究では、腱が成長に伴って強く、より堅く、伸びなくなること、また発育期の腱への機械的刺激が、腱の断面積の増加を引き起こすことなどが報告されている<sup>19,20,23</sup>。ヒト生体における報告でも、腱が成長とともに堅くなることを報告した研究が多く<sup>3,7,22</sup>、腱組織の力学的特徴は発育に伴って変化すると考えてよい。また、腱は筋が収縮することで伸張される。腱に繰り返しの伸張負荷が加わることにより腱の力学的特性が変化することは多く報告されており<sup>13,16,17</sup>、成長期の骨の成長に伴う急激な筋腱複合体の長さ変化によって腱が一定期間常に伸張状態にあることもまた、腱の形態や力学的特性に影響を与えることが予想される。

江川らは小学校高学年で急激に腱の力学的特性値の分散や変動係数が大きくなることを示している<sup>2</sup>。この結果は腱の力学的特性の変化に、発育に伴う個人差があることを示唆している。従って、腱の力学的特性の変化は加齢と平行するものではなく、身体の発育の程度によって異なる可能性が高い。しかし、子どもの腱の特性に関して生物学的成熟度の観点から検討したものはない。サッカーやホッケーのような野外で行うスポーツでは、年齢に関わらず運動後のアキレス腱及びその周囲における痛みや違和感がよく観察されている。アキレス腱は人体で最も大きな腱であるが、血管に乏しく、一度痛みが出ると難治性であることが知られている。子どもの腱の特徴を明らかにすることは、発育に伴う生体組織の変化や、スポーツ選手に多い腱障害発生メカニズムを解明する上で非常に有用なものとなる。そこで本研究では、ヒト生体における腱の力学的特性の発育に伴う変化を明らかにすることを目的として、発育期の子どもおよび大人を対象にアキレス腱の形態と力学的特性を比較・検討した。

## 【方法】

### i) 対象

東京都内のサッカークラブに所属する下肢に重篤な既往歴（骨折、筋・腱断裂など）のない男子中学1～2年生26名（平均年齢 $14.0 \pm 0.6$ 歳）とした。また健康な13名の男子大学生（平均年齢 $21.1 \pm 1.1$ 歳）を成長終了後の比較対象として設定した。全対象者は日常から一定の運動に参加しており、中学生は全員が1日3時間、週4日程度のサッカーの練習を行っていた。いずれの被験者に対しても事前に研究の目的と方法、および測定に伴う危険性と被験者の権利について十分に説明し、すべての被験者から書面にて測定に参加する同意を得た。なお本研究は早稲田大学スポーツ科学部「人を対象とした研究」倫理指針に基づき、早稲田大学スポーツ科学部倫理委員会の承認を受けた。

### ii) 形態

身長、体重、下腿長、アキレス腱長・腱厚を測定した。下腿長は膝関節裂隙と外果との距離とした。本研究のアキレス腱長は、右腓腹筋内側頭の筋腱移行部からアキレス腱の踵骨付着部までの距離と定義し、超音波断層装置（ALOKA社製SSD-1000、10MHz）にて下腿の矢状面断層構造を観察しながら測定した。アキレス腱厚は同様の方法でアキレス腱実質部の矢状面像を測定した。なお超音波断層画像の解像度の限界は $0.7 \times 0.4$ （mm）であるため、本研究におけるすべての超音波断層像の読み取りは1mm単位とした。

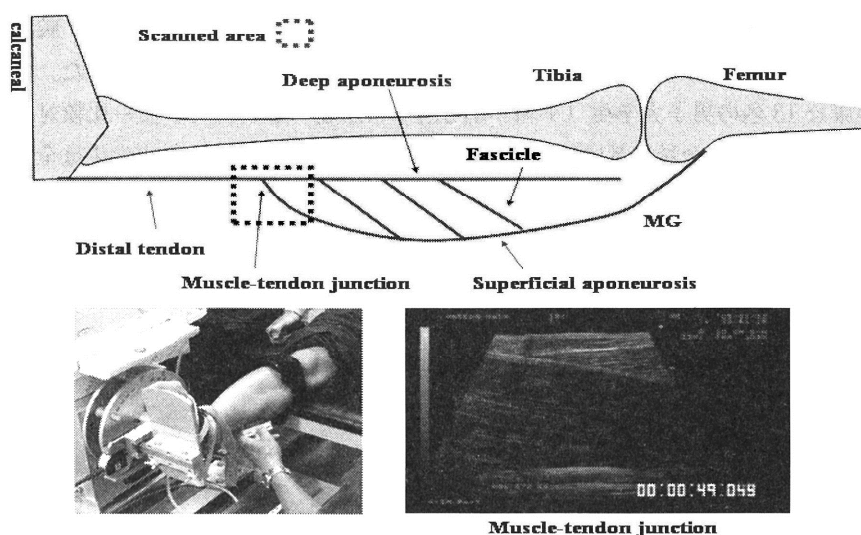
### iii) アキレス腱の力学的特性の算出

#### 足関節底屈筋群の筋力の測定

足関節底屈筋群の筋力は、外果を回転中心としたトルクが記録されるように設計された筋力計（VINE社製）を用いて測定した。被験者は筋力計の座席に右膝関節最大伸展位で座り、筋力計のフットプレートに右足部をストラップ固定した（図1）。

フットプレートの角度は足関節が解剖学的に0度になる位置に設定され、等尺性随意収縮による約5秒間の最大足関節底屈トルクを測定した。十分な休息後、約3秒間かけて、測定した最大トルクに達するよう被験者自身に調整させ、続いて2秒間の最大トルク保持の後、3秒間かけて力を抜くよう指示をした。本研究では、筋収縮の時間が腱組織の力学的特性の変化に大きな影響を与えること<sup>13</sup>を考慮して筋収縮の時間を一定にした。またMademliら<sup>18</sup>は等尺性筋力発揮時の足関節回転軸の移動が測定結果に影響を与えることに言及している。従って本研究では先行研究を踏まえ、力発揮中、踵がフットプレートから浮かないように、膝や体幹の動作が測定に影響しないように十分注意し足関節の固定を行った。

図 1 腓腹筋内側部の測定方法の模式図



得られたデータはサンプリングレート 1kHz で A/D 変換され (MacLab/8, type ML780, ADInstruments)、パーソナルコンピュータ (VAIO-PCG-Z1V, SONY) で処理した。最大足関節底屈トルクの測定は 2 回実施し、データ間に 10% 以上の差がある場合は再測定し、最小値を棄却して平均値を最大足関節底屈トルクとした。得られたトルクは以下の式を用いて腓腹筋内側頭で発揮する筋力に変換した。

$$F_m = k \times TQ \times MA^{-1}$$

ただし  $F_m$  (N) はアキレス腱にかかる足関節底屈筋力発揮時の負荷、 $TQ$  (Nm) は測定で得られたトルク、 $k$  は足関節底屈筋群の生理学的筋横断面積 (PCSA: Physiological Cross-sectional Area) のうち、腓腹筋内側頭の PCSA の占める割合 (約 18%) を表す<sup>5</sup>。また  $MA$  はそれぞれの被験者の下腿長から推定される、足関節 0 度における下腿三頭筋のモーメントアームの長さとした。 $MA$  は Visseretal.<sup>25</sup> および Bobbertetal.<sup>1</sup> の推定式を用いて算出した。なお、筋力発揮中の微量な足関節の回転に伴うモーメントアームの変化を考慮し、測定に伴う足関節の回転角度量の最大値と足関節 90 度におけるモーメントアームの平均値を、被験者それぞれで採用した。

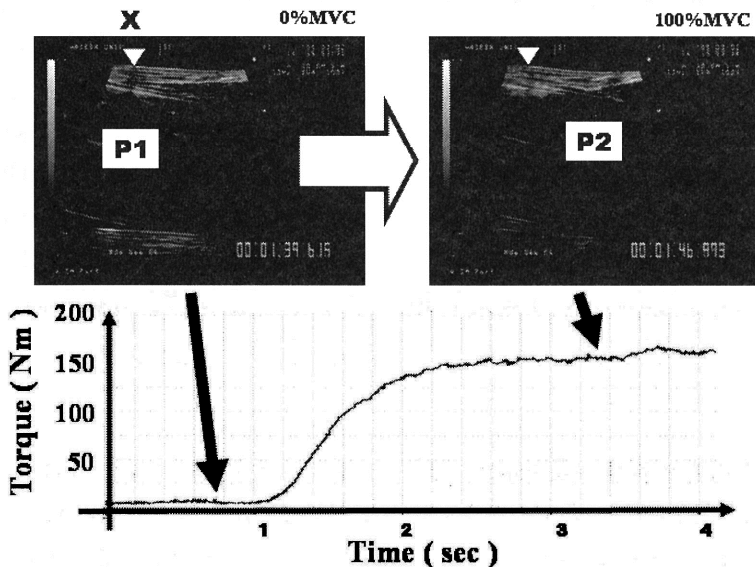
### 足関節底屈トルク発揮時のアキレス腱の伸張量の測定

Kawakami et al.<sup>11</sup> の方法に基づき B モード超音波断層装置 (ALOKA 社製 SSD-1000、10MHz) を用いて足関節 0 度における足関節底屈トルク発揮中の腓腹筋内側筋腱移行部の移動量を測定した。超音波断層画像はタイマーを介して 30Hz で記録され、画像解析ソフト (ImageJ1.36) を用いて 10%MVC ごとの筋力レベルで解析された。図 2 に典型的なトルク発揮と超音波画像を示す。足関節底屈トルクの上昇に伴って腓腹筋内側頭の筋腱移行部 (P) は近位方向に移動する (P1 → P2)。Fukashiro et al.<sup>4</sup> および Ito et al.<sup>9</sup> の方法より、皮膚上にあてた超音波プローブおよび皮膚上のマーカー (X) の移動がないことから、この筋腱移行部の移動を下腿三頭筋の収縮によるアキレス腱遠位部および深部腱膜の伸張とみなし、P の移動距離 ( $\Delta L$ ) とした。 $\Delta L$  を最大筋力の 10% ごとに記録した。なお、測定には十分に実験慣れた被験者と験者を使用した。

### 腱の力学的特性の算出

筋力 ( $F_m$ ) に対する腱伸張量 ( $\Delta L$ ) は 10 ~ 50%MVC までは曲線様に増加し (Toe region)、50 ~ 100%MVC (maximum voluntary contraction) まではおおむね直線回帰できる (Linear region)<sup>12</sup>。先行研究<sup>15</sup> より、この  $F_m - \Delta L$  関係のうち、50~100%MVC 範囲の  $F_m$  と  $\Delta L$  との回帰直線の傾きを腱組織の stiffness とした。

図 2 等尺性筋力発揮中のアキレス腱の筋腱移行部および深部腱膜の超音波断層像



#### iv) 生物学的骨成熟度の測定

##### i) 左手部レントゲン撮影

成長段階における形態、腱形態、腱の弾性特性の変化を考慮するために手部レントゲン写真より、被験者の骨年齢を測定した。レントゲン撮影には左手部を用いた。左手の手掌面を下に向けフィルムカセット上に左第三指と左前腕の長軸が同一線上、左上腕と左前腕は同一平面上になるように肢位をとるよう指示し、左第二～五指は互いにわずかに離れる程度、左拇指の長軸と左第二指の長軸間が約30度となるよう自然な肢位になるように手を置いた。管球の中心を中指の中手骨の骨頭上、管球とフィルムの距離を76cmに合わせ臨床検査技師が撮影した。

##### ii) 骨年齢の算出

撮影された左手部レントゲン写真をコンピューターに取り込み、日本人小児を対象としたコンピューター骨成熟評価システム(CASMASversion1.0)を用いて、A,Bモードの骨年齢を算出した。Aモードでは中指の基節骨、中節骨、末節骨の骨端骨最大幅と骨幹端最大幅および両者の画像の重なりを計測パラメーターにとるため8箇所定点を自動的に抽出した。その自動設定が困難な場合には手動操作を併用した。BモードではAモードの定点に橈骨の定点を計測パラメーターに加えた。これら計測パラメーターを用いて、正常小児から作成した重回帰式により自動的に骨年齢が算出された。

##### v) 統計

中学生の暦年齢と測定された骨年齢(共に月単位まで算出)を比較し、各個人において暦年齢よりも骨年齢が低い被験者をYG群(youngerboysgroup:18名)、暦年齢よりも骨年齢が高い被験者をEG群(elderboysgroup:8名)とし、比較対象である大学生をAG群(adultgroup:13名)とし、3群で検討をした。各項目の群間比較には一元配置の分散分析を行い、多重比較検定にはFisherのPLSDを用いた。張力-腱伸長量関係が10%MVC程度ごとの範囲では直線的に増加することから、10%MVCごとの腱伸長量の群間の比較にはYG群を基準として、同程度の筋力発揮範囲における腱伸長量(例えばYG群MVC時はAG群70%MVC)を対応のないT検定を使用して検討した。いずれも有意水準を5%とした。

#### 【結果】

被験者の身体特性の表を示す(表1)。暦年齢はAG群が高く、EG群とYG群には差がなかった。体重は3群間ともに有意な差があり、AG群が最も高く、YG群が最も低かった。身長および下腿長はAG群とEG群に差がなく、YG群

が他の2群に比べて有意に低かった。腱長の実測長には3群間で差はなかったが、下腿長あたりの腱長では、AG群およびEG群には差がなく、YG群が最も大きかった。腱厚に関しても YG 群が最も大きかった。

被験者の足関節最大底屈筋力および足関節底屈筋力発揮中の腱伸長量、力学的特性値を表2に、また図3に3群の張力-腱伸長量関係 ( $F_m - \Delta L$  関係)を示す。MVCはAG群、EG群で大きく、YG群が他の2群と比較して有意に小さかった。また最大筋力発揮中のアキレス腱最大伸長量は3群間に差はなかった。しかしYG群を基準とした10%MVCごとの腱伸長量は、YG群の30%MVC付近からAG群と比較してYG群が有意に大きい値となった。しかしEG群はAG群とは差はなく、YG群とはYG群の90%MVC付近から有意に差がひらいた。ステイフネスはAG群、EG群で大きく、YG群が他の2群と比較して有意に小さかった。

表1 被爆者の身体特性

	Adult(n=13)	Elder boys(n=8)	Younger boys(n=18)	
age ( y )	21.2 ± 1.1	14.3 ± 0.4	13.8 ± 0.6	b,c
height ( cm )	171.9 ± 5.3	170.2 ± 4.0	153.9 ± 7.4	a
weight ( kg )	65.1 ± 5.9	58.4 ± 7.4	45.6 ± 10.7	a,b
tibial length ( cm )	40.5 ± 2.2	39.2 ± 1.8	36.4 ± 2.7	a
tendon length ( mm )	18.0 ± 2.1	18.6 ± 1.7	18.9 ± 1.7	N.S.
tendon length/tibial length	0.45 ± 0.04	0.48 ± 0.05	0.52 ± 0.05	a
tendon thickness ( mm )	4.71 ± 0.27	4.97 ± 0.44	5.27 ± 0.55	c

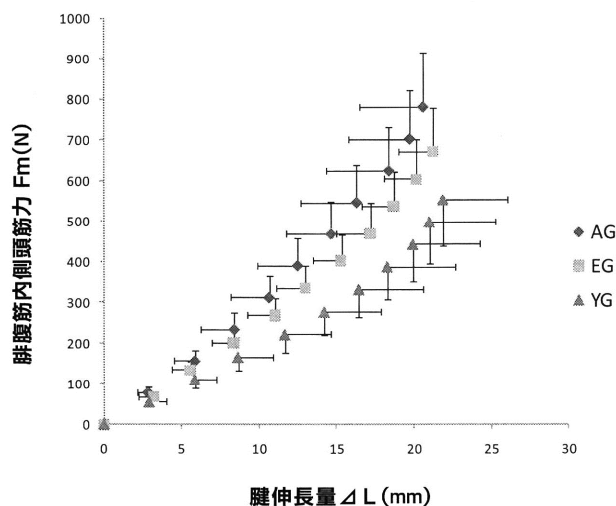
a : significant differences between YG and other two groups  
b : significant differences between EG and AG  
c : significant differences between YG and AG

表2 腓腹筋内側頭最大筋力とアキレス腱の力学的特性

	Adult(n=13)	Elder boys(n=8)	Younger boys(n=18)	
MVC ( N )	769.8 ± 130.7	673.0 ± 107.5	543.2 ± 120.1	a
dLmax at MVC ( mm )	23.0 ± 5.3	21.3 ± 2.2	21.9 ± 4.4	N.S.
stiffness ( N/mm )	42.5 ± 10.4	42.2 ± 9.5	34.4 ± 8.3	a

a : significant differences between YG and other two groups  
b : significant differences between EG and AG  
c : significant differences between YG and AG

図3 アキレス腱の筋力-腱伸長量関係



### 【考察】

運動器の成長変化の研究は、骨や筋については行われているのに対して、腱は少ない。本研究は、腱の成長が他の運動器と同様に生物学的成熟度に依存するものであることを示した最初の報告である。本研究では暦年齢に差がないにもかかわらず、骨年齢と暦年齢との差によって早熟タイプ（EG群）と晩熟タイプ（YG群）に群分けされた子どもの被験者には、腱の形態や力学的特性に差があった。

腱組織は思春期に、腱厚も tensile strength も成熟形態へと至る。横断的研究では、ヒトの腱の断面積（cross-sectional area : CSA）は思春期後も僅かながら増加するが、20歳以降はほとんど変化しないと報告されている<sup>10</sup>。本研究ではYG群で腱厚が大きく、AG群とEG群では腱厚に差がなくYG群と比較して小さかった。これは、先行研究のとおり腱厚の成長が思春期の早期に終了しており、続く下腿骨の長軸方向への成長に伴い筋が発達し、筋に連続して付着する腱組織に張力がかかってくるために、見かけ上、腱厚が小さくなっているものと予想しているが、詳細は縦断的研究にて追跡する必要がある。

本研究において、腱長に各群間の差はないが、YG群のみ下腿長あたりの腱長が大きかったことは、腱の長軸方向の成長が身長最大増加（peak height velocity : PHV）時期に脛骨の成長に先行して起こっており、次いで脛骨の成長のピークが出現するというような、組織間の成長のピークのズレを示唆するものである。そして早熟タイプの場合、暦年齢で14歳頃には、下肢の腱の形態は大人とほぼ同じ程度まで成長しているものと考えられる。すなわち、腱長の成長は、筋長よ



り早く終了することが示唆される。先行研究では腱の長軸方向への成長は、胎生期から成人までのすべての期間に渡って起こると考えられている。しかし、腱の成長には付着する筋と密接な関連があることが報告されており<sup>8</sup>、また動物実験で骨延長術を施した際の腱の成長の変化を検討した研究では、骨延長に伴う腱の成長は単に機械的に伸張されるのではなく、細胞の増殖応答であることが報告されている<sup>24,10</sup>。ことから、成長期の運動により筋が収縮を繰り返し、腱組織に伸長ストレス（メカニカルストレス）がかかる場合、下肢の腱の成長のピークが下腿骨よりも早く出現することは十分に考えられる。

本研究で特に興味深いのは、MVC 時のアキレス腱総伸長量に群間の差がないにもかかわらず、アキレス腱の力学的特性が YG 群のみ小さい、すなわち AG 群、EG 群と比較して YG 群の腱が柔らかいこと、そして EG 群の腱の力学的特性が AG 群と変わらないことである。YG 群の MVC は他の 2 群と比較して小さいが、張力 - 腱伸長量関係からわかるように、YG 群の 30%MVC あたりから腱伸長量に AG 群と有意な差が出現している。もしも YG 群の筋力が AG 群と同程度まで発揮できるとしたら、MVC 時の腱伸長量も YG 群が他群に比べて大きくなると予想できる。一方、EG 群の腱伸長量の推移は AG 群と差がないため、早熟群はすでに大人と同様の腱の組成を持つことが示唆される。YG 群のような成長過程にある腱ではコラーゲンが未成熟であるために、腱を構成する成熟したコラーゲン線維の含有比率が低く<sup>21</sup>、大人と比較して腱が軟らかいことは十分に予想される。大人と子どもの腱の力学的特性を単純に比較した先行研究<sup>14</sup>でも、成長期の子どもの腱は柔らかく、成長のスパートを超えると大人の腱の堅さと変わらなくなる。

生物学的成熟度との関連性を検討した本研究の結果から、腱長の成長は筋長より早く終了すること、腱の成長が生物学的成熟度に依存していることが示唆され、より明確に腱の成長の時期が示唆されることとなった。本研究では、腱の成長に伴う変化は生物学的成熟度に依存することが示されたが、生化学的にも分子生物学的にもどのような過程を経て腱組織の構造や組成が変化するのは明らかになっていない。これに関してはメカニカルストレスだけではなく、発育速度など成長の要素や遺伝的な要素も考えられるため、メカニカルストレスに対する感受性など腱の成長を左右する遺伝子の解明が期待される。今後は被験者数を増やし、さらに安定的な傾向が得られるように継続的に調査を進めていきたい。

## 【結語】

1. 成長期サッカー選手のアキレス腱の形態と弾性特性を評価した。
2. 暦年齢に差がないにもかかわらず早熟タイプの子どもの腱は固く、晩熟タイプの子どもの腱は柔らかかった。

3. 筋長よりも腱長の成長が早く終了する。
4. 腱の成長は生物学的成熟度に依存する。

#### 【謝辞】

本調査にあたり、ご協力いただいた早稲田大学スポーツ科学学院の鳥居俊教授、FCGONA サッカー部員ならびに篠田直氏、コーチを始め関係者各位にこの機会を借りまして心から感謝いたします。

#### 【文献】

- 1 Bobbert, M.F., P.A. Huijing, and G.J. van Ingen Schenau. A model of the human triceps surae muscle-tendon complex applied to jumping. *J Biomech.* 19:887-898, 1986.
- 2 Egawa, Y., S. Nakai, M. Ishikawa, and S. Torii. Evaluation of elastic properties of achilles tendon as a factor of apophysitis in elementary school soccer club members. *Jpn J Phys Fitness Sports Med.* 54:107-112, 2005.
- 3 Elliott, D.H. The Growth of Tendon after Denervation or Excision of Its Muscle. *Proc R Soc Lond B Biol Sci.* 162:203-209, 1965.
- 4 Fukashiro, S., M. Itoh, Y. Ichinose, Y. Kawakami, and T. Fukunaga. Ultrasonography gives directly but noninvasively elastic characteristic of human tendon in vivo. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 71:555-557, 1995.
- 5 Fukunaga, T., R. R. Roy, F. G. Shellock, J. A. Hodgson, and V. R. Edgerton. Specific tension of human plantar flexors and dorsiflexors. *J Appl Physiol.* 80:158-165, 1996.
- 6 Gerrard, D. F. Overuse injury and growing bones: the young athlete at risk. *Br J Sports Med.* 27:14-18, 1993.
- 7 Griffin, L. Y. Common sports injuries of the foot and ankle seen in children and adolescents. *Orthop Clin North Am.* 25:83-93, 1994.
- 8 Ippolito, E. *Embryology, anatomy, and congenital malformations.* Milano: Editrice Kurtis, 1986, 1-106.
- 9 Ito, M., Y. Kawakami, Y. Ichinose, S. Fukashiro, and T. Fukunaga. Nonisometric behavior of fascicles during isometric contractions of a human muscle. *J Appl Physiol.* 85:1230-1235, 1998.
- 10 Jozsa, L. and P. Kannus. *Tendons: Anatomy, Physiology and Pathology.* Champaign : Human Kinetics, 1997, 1-573.
- 11 Kawakami, Y., Y. Ichinose, and T. Fukunaga. Architectural and functional features of human triceps surae muscles during contraction. *J Appl Physiol.* 85:398-404, 1998.

- 12 Ker, R. F. Dynamic tensile properties of the plantaris tendon of sheep(Ovisaries). *J Exp Biol.* 93:283-302, 1981.
- 13 Kubo, K., H. Kanehisa, M. Ito, and T. Fukunaga. Effects of isometric training on the elasticity of human tendon structures in vivo. *J Appl Physiol.* 91:26-32, 2001.
- 14 Kubo, K., H. Kanehisa, Y. Kawakami, and T. Fukunaga. Growth changes in the elastic properties of human tendon structures. *Int J Sports Med.* 22:138-143, 2001.
- 15 Kubo, K., Y. Kawakami, and T. Fukunaga. Influence of elastic properties of tendon structures on jump performance in humans. *J Appl Physiol.* 87:2090-2096, 1999.
- 16 Legerlotz, K., P. Schjerling, H. Langberg, G. P. Bruggemann, and A. Niehoff. The effect of running, strength and vibration strength training on the mechanical, morphological and biochemical properties of the Achilles tendon in rats. *J Appl Physiol.* 2006.
- 17 Legerlotz, K., P. Schjerling, H. Langberg, G. P. Bruggemann, and A. Niehoff. The effect of running, strength, and vibration strength training on the mechanical, morphological, and biochemical properties of the Achilles tendon in rats. *J Appl Physiol.* 102:564-572, 2007.
- 18 Mademli, L., A. Arampatzis, and M. Walsh. Effect of muscle fatigue on the compliance of the gastrocnemius medialis tendon and aponeurosis. *J Biomech.* 39:426-434, 2006.
- 19 Nakagawa, Y., K. Hayashi, N. Yamamoto, and K. Nagashima. Age-related changes in biomechanical properties of the Achilles tendon in rabbits. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 73:7-10, 1996.
- 20 Shadwick, R. E. Elastic energy storage in tendons: mechanical differences related to function and age. *J Appl Physiol.* 68:1033-1040, 1990.
- 21 Silver, F. H., J. W. Freeman, and G. P. Seehra. Collagen self-assembly and the development of tendon mechanical properties. *J Biomech.* 36:1529-1553, 2003.
- 22 Simonsen, E. B., H. Klitgaard, and F. Bojsen-Moller. The influence of strength training, swim training and ageing on the Achilles tendon and m. soleus of the rat. *J Sports Sci.* 13:291-295, 1995.
- 23 Stanley, R. L., A. E. Goodship, B. Edwards, E. C. Firth, and J. C. Patterson-Kane. Effects of exercise on tenocyte cellularity and tenocyte nuclear morphology in immature and mature equine digital tendons. *Equine Vet J.* 40:141-146, 2008.
- 24 Szoke, G., S. H. Lee, A. H. Simpson, and J. Prescott. Response of the tendon during limb lengthening. *J Bone Joint Surg Br.* 87:583-587, 2005.
- 25 Visser, J. J., J. E. Hoogkamer, M. F. Bobbert, and P. A. Huijting. Length and moment arm of human leg muscles as a function of knee and hip-joint angles. *Eur J Appl*

*Physiol Occup Physiol.* 61:453-460, 1990.