

バレーボール選手と非鍛練者におけるアキレス腱の 形態的特性とジャンプパフォーマンスとの関係

勝田 茂・秋間 広*・神原奈津紀**
高橋英幸・囀子浩二***・都澤凡夫

Relationship Between Morphological Characteristics of the Achilles Tendon and Jump Performance in Volleyball Players and Untrained Men

KATSUTA Shigeru, AKIMA Hiroshi*, KANBARA Natsuki**,
TAKAHASHI Hideyuki, ZUSHI Koji*** and MIYAKOZAWA Tadao

The purpose of the present study was to determine morphological characteristics of Achilles tendon in humans by using magnetic resonance imaging (MRI) and to investigate the relationships between morphological characteristics of Achilles tendon and jump performance in volleyball players and untrained men. Seven male volleyball players (Group V) and five healthy male volunteers (Group C) participated in the present study. Serial axial images of the lower right leg were obtained to measure length, cross-sectional area (CSA), and volume of Achilles tendon. All subjects performed squat jump, drop jump, and hopping and jumping height and power were calculated for each jump. Although Achilles tendon CSA in Group V were significantly greater than that of Group C, no differences were observed in other morphological features (length, volume, length/muscle length of triceps surae, CSA/body weight, and volume/body weight). Significant correlations were observed between tendon volume and squat jump height, drop jump height and drop jump power/body weight ($r = 0.686$; $p < 0.05$, $r = 0.628$; $p < 0.05$, and $r = 0.603$; $p < 0.05$, respectively). These results suggested that volleyball players have a larger Achilles tendon cross-sectional area than untrained men, and that jump performance would be associated with tendon volume.

Key words: Achilles tendon, Jump, In vivo, Morphology, Volleyball

1. 緒言

走運動や跳躍運動のような伸張—短縮サイクルをともなう筋活動では、伸張局面で引き伸ばされた腱の弾性エネルギーが短縮局面で再利用され、そのエネルギーがパフォーマンスに大きく貢献することが報告されている^{1,6,7,11}。したがってこのような運動では弾性エネルギーの貯蔵および

再利用などを行う筋—腱系の働きが重要であることが示唆されている^{3,5,10}。

Huijing¹⁰はカウンタームーブメントジャンプ時の全仕事量のうち約40%がアキレス腱の弾性エネルギーによってなされる仕事であることを示している。また、足関節を主に用いるホッピング中のアキレス腱の弾性エネルギーのジャンプバ

* 東京大学大学院総合文化研究科生命環境科学系 Department of Life Sciences, University of Tokyo

** 筑波大学体育専門学群 School of Health and Physical Education

*** 鹿屋体育大学 National Institute of Fitness and Sports

パフォーマンスへの貢献度は、伸張局面では約60%、また短縮局面では約50~80%であることが報告されている^{2,11)}。弾性エネルギーの貯蔵およびその再利用には腱の長さ、太さ(断面積)、あるいは量(容積)のような形態的な要因が密接に関係していることが予想される。しかしながら、生体の腱の形態的特性を調べた研究は非常に少なく¹³⁾、その形態とジャンプパフォーマンスとの関係について検討した研究はこれまでみられない。

そこで、本研究では磁気共鳴映像法(Magnetic Resonance Imaging; MRI)を用いて、アキレス腱の形態的特性について、ジャンプ能力に優れていると考えられるバレーボール選手と一般成人との比較を行い、さらにジャンプパフォーマンスとの関係について検討することを目的とした。

2. 方法

1) 被検者

被検者には筑波大学男子バレーボール部に所属し、大学トップレベルの選手を含む7名を用いた(年齢: 20.0 ± 1.2 歳, 身長: 190.1 ± 5.3 cm, 体重: 76.6 ± 5.9 kg; 以下, V群)。また、コントロールとして日常定期的に運動を行っていない男子大学生5名を用いた(年齢: 21.2 ± 0.5 歳, 身長: 172.6 ± 3.9 cm, 体重: 68.0 ± 3.6 kg; 以下, C群)。全ての被検者に実験の趣旨、内容および危険性についてあらかじめ説明し、参加の同意を得た。

2) MRIの測定(アキレス腱の断面積の測定)

MRIの撮影には筑波大学付属病院に設置されている1.5Tの超電導MR装置(GE社製, Signa Advantage)を用いた。測定の際には、あらかじめ下肢の縦断像を撮影し、得られた縦断像より膝蓋骨上端から踵骨までスライス厚10mm, スライス間隔0mmで連続的に横断像の撮影を行った。なお、撮影時、被検者には右脚膝関節を完全に伸展させ、さらに膝および足部に特製の台を用いて、足関節の関節角度を90°に固定した。得られた横断像をフィルムに現像した後、アキレス腱の部分をトレースし、コンピューター(Apple社製, Power Macintosh 9500/120)に接続されたスキャナー(EPSON社製, GT-9000)でそれを取り込み、画像分析用ソフトウェアのNIH imageを用いて腱の断面積(cross-sectional area, CSA)を算出した。

アキレス腱の形態を評価する方法は現在のところ

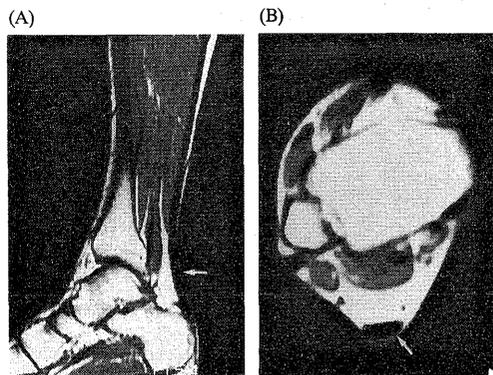


Fig. 1 Sagittal (A) and axial (B) plane images of right leg using magnetic resonance imaging.

確立されていない。図1にはMRIから得られた下腿部の縦断像(A)および横断像(B)について示し、図2には下腿部の解剖図について模式的に示した。図1の矢印で示したように、アキレス腱は視覚的に識別することは容易である。本研究においてアキレス腱はヒラメ筋が消失した横断像から腓骨の遠位端の横断像について分析した。その間の横断像(1人につき2~9枚)から、アキレス腱の平均の断面積(tendon cross-sectional area, CSA)を求め、それとスライス厚(10mm)を用いて以下の式より腱容積(tendon volume, TV)を求めた。

$$TV = 10 \cdot \sum_{k=1}^n CSA_k$$

(CSA_k: ヒラメ筋消失部よりk番目のCSA,
n: スライス枚数)

3) ジャンプパフォーマンステスト

ジャンプパフォーマンステストには、足関節の伸展(足底屈)のみで行う跳躍(アングルジャンプ)を行わせた。この跳躍は、手を腰に当てた立位姿勢から、膝関節をできるだけ固定したまま足関節だけによって行うように指示し、各被検者に次の3条件で行わせた。

- A アンクルスクワットジャンプ(Ankle squat jump, aSJ)
立位姿勢より足関節のみを使って全力で跳躍する。
- B アンクルドロップジャンプ(Ankle drop jump, aDJ)
30cmの台高から飛び降り、両足で着地し、

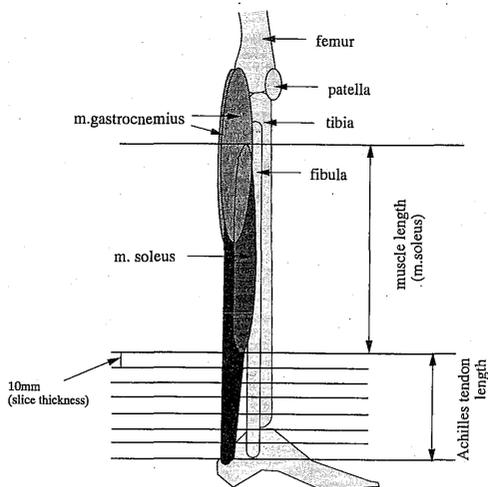


Fig. 2 Schematic illustration of the m. triceps surae and Achilles tendon in human.

すばやく足関節のみを使って全力で跳躍する。

C ホッピング(Hopping, Hop)

足関節のみを使って、連続的に5回すばやく全力で跳躍する。

ホッピングはリバウンド効果を上げるため、初回のみ反動跳躍を行わせ、初回はカウントせず、続く5回のジャンプを分析対象試技とした。

被検者にはウォーミングアップ後、それぞれ数回の練習を行わせた。各試技間には十分な休息を設け、疲労の影響をできる限り少なくさせた。なお、試技回数は2～5回とした。跳躍は全て、マットスイッチ(Tapeswitch of America, CPV1723)上で行わせ、それに接続されている記録装置(スポーツプリンター; SEIKO社製, CT-916)を用いてジャンプ動作における滞空時間(flight time, ft)と接地時間(contact time, ct)を記録した。得られた滞空時間(ft)から、以下の式を用いて跳躍高(height, H)を算出した⁴⁾。

$$H(m) = ft(sec)^2 \times 1.226$$

さらに、跳躍高と被検者の体重(body weight, BW)および接地時間(ct)から、ジャンプパワーを以下の式により算出した¹²⁾。

$$Power(w) = H(m) \times BW(kg) / ct(sec.) \times 9.807$$

4) 統計処理

すべての値は平均および標準偏差で示した。V群とC群間の比較にはunpaired Student's t-testを用いた。また腱の断面積および腱の容積と各種のジャンプパフォーマンスとの関係についてはピアソンの相関係数を用い、有意水準は $p < 0.05$ とした。

3. 結果

1) バレーボール選手と一般成人のアキレス腱の形態的特性およびジャンプパフォーマンス

A アキレス腱の形態的特性

表1にはV群とC群におけるアキレス腱の形態的特性について示した。腱長、腱断面積および腱容積では、腱断面積にのみ両群間に有意な差がみられた。腱長/筋長、腱断面積/体重および腱容積/体重においてV群とC群間で有意な差は認められなかった。

B 3種類のジャンプの跳躍高

図3には本研究で用いた3種類のジャンプの跳躍高の比較について示した。測定に用いた全てのジャンプの跳躍高において、V群はC群に対して有意に高値を示した($p < 0.01$)。

2) アキレス腱の形態的特性とジャンプパフォーマンス(跳躍高とジャンプパワー)との関係

A 跳躍高

a) アンクルスクワットジャンプ(aSJ)

Table 1 Morphological characteristics of Achilles tendon in volleyball players and control.

	Volleyball players (n=7)	Control (n=5)
Tendon length (cm)	6.6 (2.4)	5.6 (1.5)
Tendon CSA (cm ²)	27.5* (5.6)	21.4 (1.6)
Tendon volume (cm ³)	1673 (499)	1194 (316)
Tendon length/muscle length	0.19 (0.08)	0.19 (0.06)
Tendon CSA/BW (cm ² /kg)	0.31 (0.13)	0.32 (0.04)
Tendon volume/BW (mm ³ /kg)	22.1 (7.0)	17.6 (4.4)

Values are means and SD. * : $p < 0.05$. CSA: cross-sectional area, BW: body weight. Muscle length represents the distance between the most proximal and most distal MR images of the triceps surae which are visible.

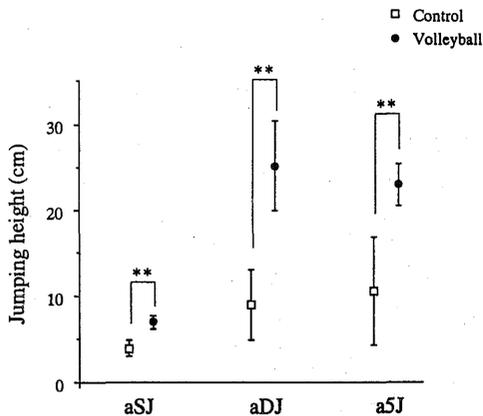


Fig. 3 Jump height during ankle squat jump, ankle drop jump, and hopping in volleyball player and control.

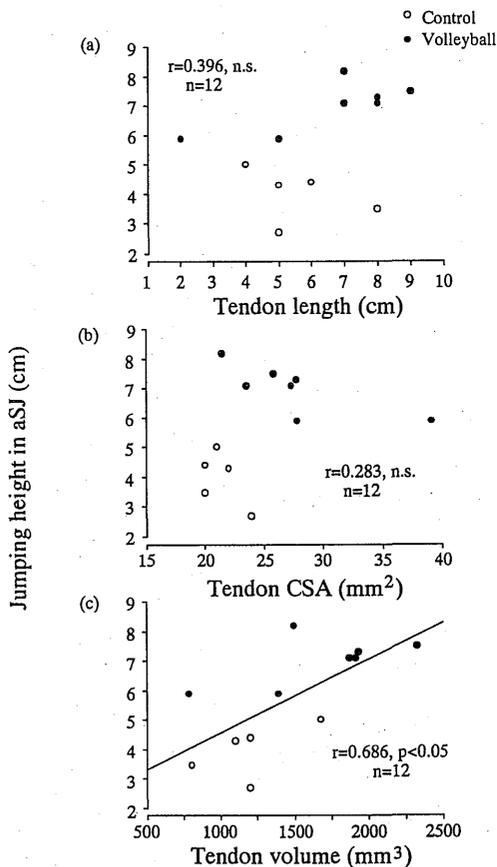


Fig. 4 Relationships between the length (a), mean cross-sectional area (b), and volume (c) of the Achilles tendon and jump height during ankle squat jump (aSJ).

図4はaSJの跳躍高とアキレス腱の形態的特性(腱長, 腱断面積および腱容積)との関係について示した。aSJの跳躍高と腱容積との間にのみ有意な相関関係が認められ($r=0.686$, $p<0.05$), 跳躍高と他のパラメーターとの間には有意な相関関係は認められなかった。

b) アンクルドロップジャンプ(aDJ)

図5はaDJの跳躍高とアキレス腱の形態的特性(腱長, 腱断面積および腱容積)との関係について示した。aDJの跳躍高と腱容積との間にのみ有意な相関関係が認められ($r=0.628$, $p<0.05$), 跳躍高と他のパラメーターとの間には有意な相関関係は認められなかった。

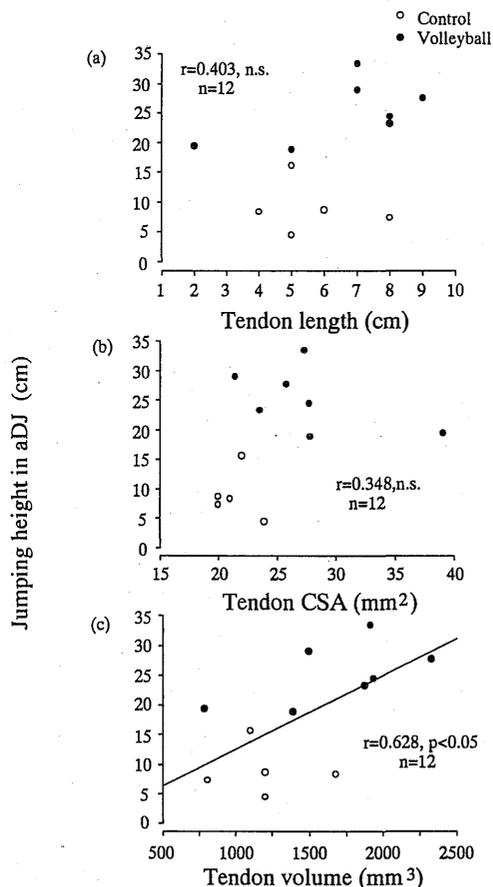


Fig. 5 Relationships between the length (a), mean cross-sectional area (b), and volume (c) of the Achilles tendon and jump height during ankle drop jump (aDJ).

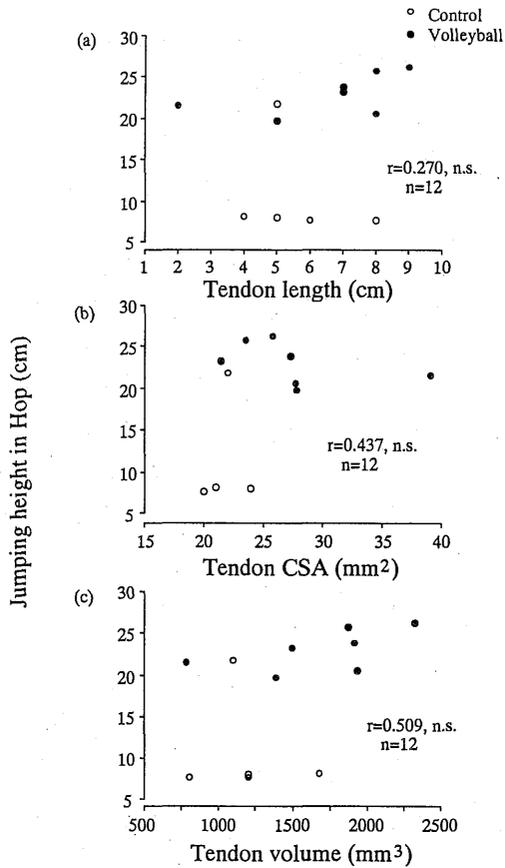


Fig. 6 Relationships between the length (a), mean cross-sectional area (b), and volume (c) of the Achilles tendon and jump height during hopping (Hop).

c) ホッピング(Hop)

図6には5回連続ホッピングの平均跳躍高とアキレス腱の形態的特性(腱長, 腱断面積および腱容積)との関係について示した。いずれのパラメーターにおいても跳躍高との間に有意な相関関係は認められなかった。

B ジャンプパワー

a) アンクルドロップジャンプ(aDJ)

図7にはaDJのジャンプパワーとアキレス腱の形態的特性(腱長, 腱断面積および腱容積)との関係について示した。aDJのジャンプパワーとの間に有意な正の相関関係が認められたのは、跳躍高の場合と同様に腱容積のみであり($r=0.603$, $p<0.05$), その他のパラメーターにおいては有意な

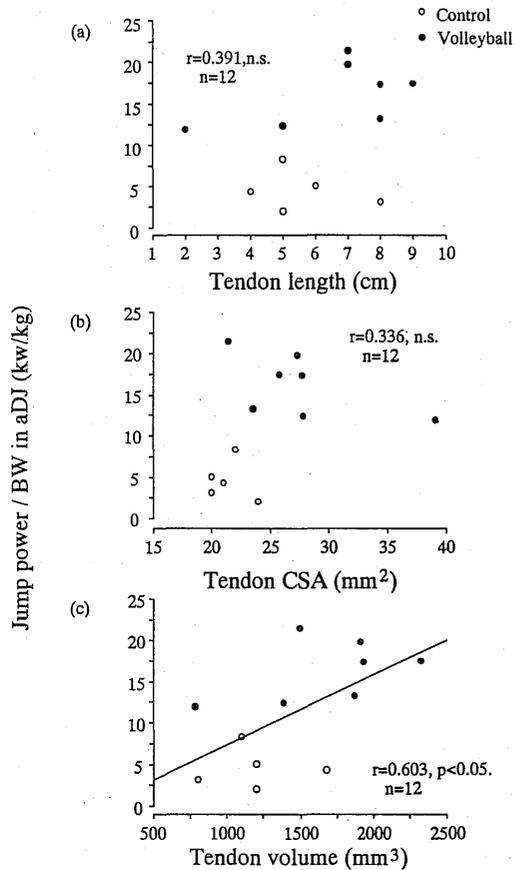


Fig. 7 Relationships between the length (a), mean cross-sectional area (b), and volume (c) of the Achilles tendon and jump power per unit of body weight during ankle drop jump (aDJ).

相関関係は認められなかった。

b) ホッピング(Hop)

図8にはHopの平均ジャンプパワーとアキレス腱の形態的特性(腱長, 腱断面積および腱容積)との関係について示した。いずれのパラメーターにおいてもHopの跳躍高との間に有意な相関関係は認められなかった。

4. 考察

1) アキレス腱の形態的特性

本研究の第一の目的はアキレス腱の長さ, 断面積および容積といった形態的特性について, バレーボール選手群(V群)と一般成人(C群)とを比較することであった。その結果, V群はC群と比

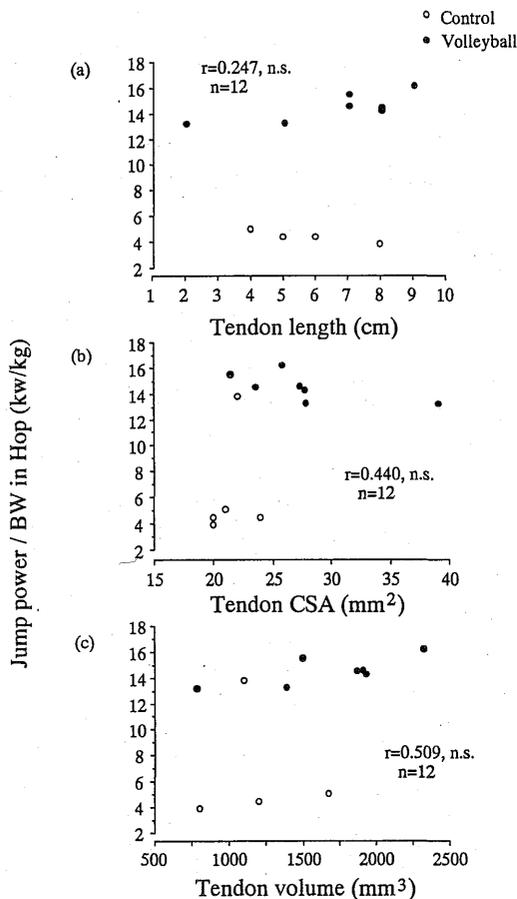


Fig. 8 Relationships between the length (a), mean cross-sectional area (b), and volume (c) of the Achilles tendon and jump power per unit of body weight during hopping (Hop).

較して腱断面積の絶対値にのみ有意に高値を示し、他のパラメーターでは両群間に有意な差は認められなかった。これらの結果は、V群とC群において腱の長さおよび腱容積に絶対的にも相対的にも差がないことを示している。本研究で用いたV群およびC群の大きな違いとして身体の活動レベルが挙げられる。前者は過去数年間にわたって専門的なバレーボールのトレーニングを行っており、一方、後者は日頃から定期的なトレーニングは行っていなかった。以上のことはV群がこれまで行ってきたトレーニングがアキレス腱の断面積にのみ有意差をもたらしたが、他の形態項目にはほとんど影響を及ぼさないことを示唆して

いる。

しかしながら、本研究のアキレス腱の形態に関する結果を解釈する上で、注意すべき点がいくつか挙げられる。第一として、本研究で評価した腱はヒラメ筋が消失した部分から腓骨の遠位端としたことが挙げられる。実際には図2で示したように、腓腹筋はヒラメ筋の消失部位よりさらに近位において消失しているため、その部分も腱としての働きを持っていると思われる。したがって、本研究で測定したアキレス腱は腓腹筋に接続する近位の腱、すなわちヒラメ筋によって隠された部分の腱は無視しているということを考慮する必要がある。第二として、V群の被検者の一人にヒラメ筋の筋長が他の被検者と比較して遠位方向へ非常に長かったため、アキレス腱の腱長がわずか2 cmであった者がいた。このような被検者は少なくとも本研究で用いた12人の被検者の中では特殊であった。腱長が短いことは腱長の絶対値、相対値および腱容積に大きく影響する。仮にこの被検者を除き、両群間で腱長を比較してみると、V群はC群より有意に高値($p < 0.05$)を示すことになる。このような被検者の腱特性が特殊であるのか否かについては、さらに被検者数を増やして検討する必要があると思われる。

これらの結果から、バレーボール選手群および一般成人のアキレス腱の形態的特性には腱断面積の絶対値においてのみ有意な差が認められたが、この差は身体特性の絶対値の差に起因するものであることが示唆された。

2) 腱の形態的特性とジャンプパフォーマンスとの関係

生体のアキレス腱の形態的特性を非侵襲的に捉え、ジャンプパフォーマンスとの関係について検討した研究はこれまでのところ非常に少ない¹³⁾。その原因の一つとして、これまでに非侵襲的にヒトのアキレス腱の形態的特性を測定するのが非常に困難であったことが考えられる。中川と服部¹³⁾はスキージャンパーについて、アキレス腱の腱容積およびジャンプパフォーマンス(滞空時間、床反力、足関節の最大角速度)との関係について検討している。その結果、アキレス腱の腱容積とジャンプパフォーマンスとの間にはいずれも有意な相関関係は認められなかったことを報告している。

本研究では腱長、腱断面積および腱容積の三つのパラメーターとジャンプパフォーマンスとの関

係について検討した結果、Hopの場合を除き腱容積と跳躍高あるいは体重当りのジャンプパワーとの間に有意な相関関係が認められた。これは中川と服部¹³⁾の報告と異なる結果であった。Huijing¹⁰⁾は足関節だけでなく股関節および膝関節が用いられるようなカウンタームーブメントジャンプの時点でさえ、アキレス腱の仕事量は全体の仕事量の約40%を占めることを報告している。FukashiroとKomi⁸⁾は1名の男性被検者を用いて、ホッピング動作中の全仕事量に対して足関節において行われた仕事量は71%であることを報告している。しかしながら、実際にアキレス腱に加わる張力を測定した彼らの最近の研究では異なった結果が得られている⁹⁾。その研究では1名の被検者に対して外科的手術を施して、実際にアキレス腱にトランスデューサーを装着する方法が用いられている。その状態でスクワットジャンプ、カウンタームーブメントジャンプおよびホッピング動作中にアキレス腱にかかった張力や動作解析から求めた膝および足関節の関節角度などのパラメーターからアキレス腱の弾性エネルギーの貢献度を算出している。その結果、足関節でなされた仕事に占めるアキレス腱で生じた弾性エネルギーの仕事量の割合は、スクワットジャンプ、カウンタームーブメントジャンプおよびホッピング時のそれぞれ23, 17, 34%であった。これらの結果の不一致の原因として、彼らはリンクセグメントモデルによる動作分析に限界があるのではないかと示唆しているが、いずれの研究においても被検者が1名であるため、これらの結果を解釈するには注意が必要であると思われる。このようにアキレス腱のジャンプパフォーマンスへの貢献度は研究により様々であるが、先行研究および本研究の結果を考慮すると、アキレス腱とジャンプパフォーマンスとの間には密接な関係があると考えることができる。

本研究で用いたジャンプパフォーマンスに影響を及ぼすものとしてアキレス腱の形態的特性の他にいくつかの因子が考えられる。その一つとして、筋で発揮されたパワーが挙げられる。本研究で用いたジャンプは主に足関節が使われるような動作であった。したがって、下腿三頭筋で発揮されたパワーがジャンプパフォーマンスに及ぼす影響は大きいと思われる。しかしながら、本研究ではこの点については検討していないため、このような観点からも検討する必要があると思われる。

他の要因としてアキレス腱に及ぼすトレーニングの影響が考えられる。これまでにトレーニングが腱組織の力学的特性に及ぼす影響については動物を用いた研究がほとんどであり^{14,15)}、ヒトについては十分に明らかになっていない。Tiptonら¹⁵⁾はラットを用いて靭帯の力学的特性について検討したところ、膝の内側側副靭帯の外的負荷に対する破断点(破断荷重)は持久性トレーニングによって増大するが、スプリントトレーニングでは変化しないことを示している。また、Simonsenら¹⁴⁾も水泳トレーニングおよび筋力トレーニングを行かせたラットヒラメ筋のアキレス腱を用いて腱の特性について検討している。その結果、水泳トレーニングを課したラットのアキレス腱の破断荷重は、筋力トレーニングを課したラットおよびコントロールのそれと比較して有意に高値を示したことを報告している。本研究の結果では数年間の専門なトレーニングがアキレス腱の形態的特性に及ぼす影響は少ないという結果が示された。このように研究間で結果が様々であるのは種の違いによるものか、あるいは2足歩行と4足歩行の違いによるものか、さらにはトレーニングの方法、期間、強度などが異なっていたことによるものかは明らかではないが、今後、ヒトのアキレス腱の形態的・力学的特性がスポーツパフォーマンスに及ぼす影響について検討することは、スポーツ科学の重要な検討課題の一つと思われる。

5. 総括

本研究はバレーボール選手および一般成人のアキレス腱の形態的特性(長さ、断面積および容積)を比較するとともに、様々なジャンプパフォーマンスとの関係について検討することを目的とした。結果の要約を以下に示す。

- 1) バレーボール選手のアキレス腱は一般成人のそれと比較して、腱断面積においてのみ有意に高値を示し、他のパラメーター(腱長、腱容積、腱長/筋長比、腱断面積/体重、腱容積/体重)との間には有意な差は認められなかった。
- 2) バレーボール選手はスクワットジャンプ、ドロップジャンプおよびホッピングの跳躍高において、一般成人より有意に高値を示した。
- 3) スクワットジャンプおよびドロップジャンプの跳躍高およびジャンプパワーと腱容積との間にそれぞれ有意な相関関係が認められた。

これらのことから、バレーボール選手のアキレス腱の形態的特性として、腱断面積のより大きな絶対値が認められた。また、ジャンプパフォーマンスには腱容積が大きく関係していることが示唆された。

引用文献

- 1) Asmussen E, and Bonde-Petersen F (1974): Storage of elastic energy in skeletal muscles in man. *Acta Physiol Scand* 91 : 385-392.
- 2) Bosco C, Ito A, Komi PV, Luhtanen P, Rakkila P, Rusko H, and Vittasal JT (1982): Neuromuscular function and mechanical efficiency of extensor muscle during jumping exercise. *Acta Physiol Scand* 114 : 543-550.
- 3) Bosco C, and Komi PV (1982): Muscle elasticity in athletes. (Ed.) Komi PV. (In) *Exercise and Sport Biology*. Human Kinetics Publishers, Illinois, pp.109-117.
- 4) Bosco C, Komi PV, Tihanyi J, Fekete G, and Apor P (1983): Mechanical power test and fiber composition of human leg extensor muscles. *Eur J Appl Physiol* 51 : 129-135.
- 5) Bobbert MF, Huijing PA, and van Ingen Schenau GJ (1986): A model of human triceps surae muscle-tendon complex applied to jumping. *J Biomech* 19 : 887-898.
- 6) Cavagna GA, Saibene FP, and Margaria R (1965): Effect of negative work on the amount of positive work performed by an isolated muscle. *J Appl Physiol* 20 : 157-158.
- 7) Cavagna GA, Dusman B, and Margaria R (1968): Positive work done by a previously stretched muscle. *J Appl Physiol* 24 : 21-32.
- 8) Fukashiro S, and Komi PV (1987): Joint moment and mechanical power flow of the lower limb during vertical jump. *Int J Sports Med (Suppl.)* 8 : 15-21.
- 9) Fukashiro S, Komi PV, Javinen M, and Miyashita M (1995): In vivo achilles tendon loading during jumping in humans. *Eur J Appl Physiol* 71 : 453-458.
- 10) Huijing PA (1991): Elastic potential of muscle. In Komi PV (ed) *Strength and power in sport*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, pp.151-168.
- 11) 伊藤 章(1987) : 下腿三頭筋のリバウンド効果. 昭和62年度日本体育協会スポーツ科学研究報告No. VII, プリオメトリック・リアクティブ筋力トレーニングに関する研究—第1報— : 22-28.
- 12) Mathews DK, and Fox EL (1971): The physiological basis of physical education and athletics. W.B. Saunders Company, Philadelphia, pp.619-625.
- 13) 中川喜直, 服部正明(1995) : スキージャンパーの下腿三頭筋—腱量とジャンプパフォーマンス. *体力科学* 44 : 817.
- 14) Simonsen EB, Klitgaard H, and Bojsen-Moller F (1995): 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.
- 15) Tipton CM, Matthes RD, Maynard JA, and Carey RA (1975): The influence of physical activity on ligaments and tendons. *Med Sci Sports* 7 : 165-175.