

## アキレス腱の形態的特性が ジャンプパフォーマンスに及ぼす影響

勝 田 茂・高 橋 英 幸・中 林 真知子\*・稲 木 光 晴\*\*  
福 原 祐 三・村 木 征 人・尾 縣 貢・新 津 守\*\*\*

### Morphological Characteristics of the Achilles Tendon and Jump Performance in Female Athletes and Untrained Women

KATSUTA Shigeru, TAKAHASHI Hideyuki, NAKABAYASHI Machiko\*,  
INAKI Mitsuharu\*\*, FUKUHARA Yuzo, MURAKI Yukito,  
OGATA Mitsugi and NIITSU Mamoru\*\*\*

The purpose of this study was to investigate the morphological differences in the Achilles tendon and triceps surae muscle among jumpers (long and high jumpers; group J) (n=6), volleyball players (group V) (n=6) and untrained volunteers (group C) (n=7) and to determine the effects of the morphological characteristics on jump performance. Magnetic resonance imaging was performed to measure the length and volume of the tendon and muscle. The subjects performed the ankle jump, ankle drop jump and hopping as jump tests. In addition, the expired gas was collected during 30sec of hopping. Although there was no differences in tendon length among the three groups, the ratio of the tendon volume to body weight was significantly higher in J than that in C ( $P < 0.01$ ). J and V possessed the larger muscle length and volume than C ( $P < 0.05$ ). The jumping height and power of all jump tests were higher in J and V than those in C ( $P < 0.05$ ). The jump performance correlated with the muscle length and volume ( $P < 0.05$ ), but not with those of the tendon. During 30sec of hopping, J and V developed the larger work than C ( $P < 0.01$ ). The ratio of the work to oxygen uptake tended to be higher in J than those in V and C, and correlated with the tendon volume ( $P < 0.01$ ). These results suggest that a long-term training increases the volume of the Achilles tendon as well as the triceps surae muscle, and that the developed tendon contributes to efficient continuous jumping. Moreover, jumpers appear to utilize the elastic energy of tendon more efficient than volleyball players and untrained women.

**Key words:** Achilles tendon, Triceps surae muscle, Jump, Magnetic resonance imaging, Athlete

\* ティップネス株式会社 TIPNESS Limited,

\*\* 久留米大学保健体育センター Institute of Health and Physical Education, Kurume University,

\*\*\* 筑波大学臨床医学系 Institute of Clinical Medicine, University of Tsukuba

## 1. 緒言

身体運動は、筋で発揮された力が腱を伝わり関節を動かすことにより生じるので、発揮される運動パフォーマンスには、筋の特性とともに腱の特性が関係することになる。特に、跳躍運動や走運動のように伸張-短縮サイクルを伴う運動では、弾性エネルギーの貯蔵と再利用に筋-腱複合体の働きがより重要となり<sup>2,11)</sup>、腱の弾性エネルギーがパフォーマンスに大きく影響することが示されている<sup>1,4,7-8,12)</sup>。したがって、跳躍パフォーマンスに優れた競技者は非鍛錬者よりも腱の弾性エネルギーを有効に用いているとともに、より発達した腱形態を有している可能性が考えられる。

しかしながら、測定方法上の制限から、運動競技種目の違いにより腱の形態が異なるかどうかについては明らかにされていない。運動に対する腱の適応に関して、これまで動物を用いていくつかの研究が行われてきている。その中では、運動トレーニングにより腱のサイズの増大<sup>24)</sup>、コラーゲンの合成速度の増加<sup>16)</sup>を伴うコラーゲンやプロテオグリカン濃度の上昇<sup>10,17,24)</sup>、そしてスティフネスや極限引張り張力の増加<sup>6,19-20,22-24)</sup>がもたらされることが示されている一方、トレーニングにより腱のサイズやコラーゲン濃度は変化しないとの報告もある<sup>22,25)</sup>。これらの不一致を導き出す原因としては、運動負荷法、動物の種および年齢の違いなどが考えられている<sup>21)</sup>。また最近では、超音波法や磁気共鳴映像法(magnetic resonance imaging: MRI)などを用いて非侵襲的にヒトの腱に及ぼす運動の効果を調査する試みも行われ始めているが<sup>13-14,16)</sup>、腱に対するトレーニングの影響を系統立てて調査した研究は非常に少なく、その結果も完全に一致しているわけではない。さらに、腱の弾性エネルギーがジャンプパフォーマンスに影響を及ぼすことが報告されているものの、そのパフォーマンスに対する腱の弾性エネルギーの貢献度に関しては一致した見解が得られていない<sup>2,3,9,11-12)</sup>。

そこで本研究では、MRIを用いて、競技において高いジャンプパフォーマンスが必要とされる女子陸上競技跳躍選手、女子バレーボール選手および定期的な運動を行っていない非鍛錬者における腱および筋の形態的特性の比較を行い、長期間に渡るトレーニングが腱の形態的特性に及ぼす影響を調べるとともに、これらの形態とジャンプパフォーマンスとの関係を明らかにすることを目的

とした。さらに本研究では、腱の弾性エネルギーの貢献に関して、ジャンプ中の仕事効率という点からアプローチを試みた。

## 2. 方法

### 1) 被検者

被検者には、筑波大学陸上競技部に所属している女子跳躍選手6名(跳躍選手4名、混成競技選手2名)(以下J群)、筑波大学女子バレーボール部に所属している選手7名(以下V群)、および、定期的な運動を行っていない非鍛錬者6名(以下C群)を用いた。跳躍選手およびバレーボール選手は、インカレ出場クラスの実力を有する者であり、競技歴はそれぞれ $8.8 \pm 1.3$ (SD)年、 $10.3 \pm 1.3$ 年であった。全ての被検者に実験の主旨、内容および危険性についてあらかじめ説明して参加の同意を得た。

### 2) 身体特性

身長および下肢長はマルチンの身長計を用いて測定した。下肢長は、直立させたときの大転子から足の下端までの長さとした。体重、体脂肪率、除脂肪体重は体内脂肪計(BODYFAT ANALYZER, TBF-102, TANITA)を用いて測定した。

### 3) アキレス腱および下腿三頭筋の形態測定

アキレス腱と下腿三頭筋の形態測定のためのMRIには、1.5Tの超電導MR装置(Gyroscan ACS-II, Phillips社製)を用いた。まず、下腿の矢状断像を撮像し、得られた画像を基準にして膝蓋骨上端から踵骨までスライス厚9mm、スライス間隔1mmで連続的に横断像の撮影を行った(図1)。なお撮像時には、右脚膝関節を完全に伸展させるとともに、足部に特製の台を装着して足関節の角度を90度に固定した。用いたパルスシーケンスはスピンエコー法であり、撮像条件は繰り返し時間862ms、エコー時間16ms、関心領域 $20 \times 20$ cm、マトリックス $256 \times 256$ 、積算1回であった。得られた画像をフィルムに焼き付け、現像した後、コンピューター(Power Macintosh 9500/120, Apple社製)に接続したスキャナー(GT-9000, EPSON社製)を用いて画像を取り込み、NIH Imageにより腱の横断面積を算出した。腱断面積の測定は2回行い、その平均値を用いた。本研究で同定したアキレス腱は、腓腹筋とヒラメ筋からの腱を合わせたものであり、さらに、ヒラメ筋の間に入り込む筋間隔もこれに含め

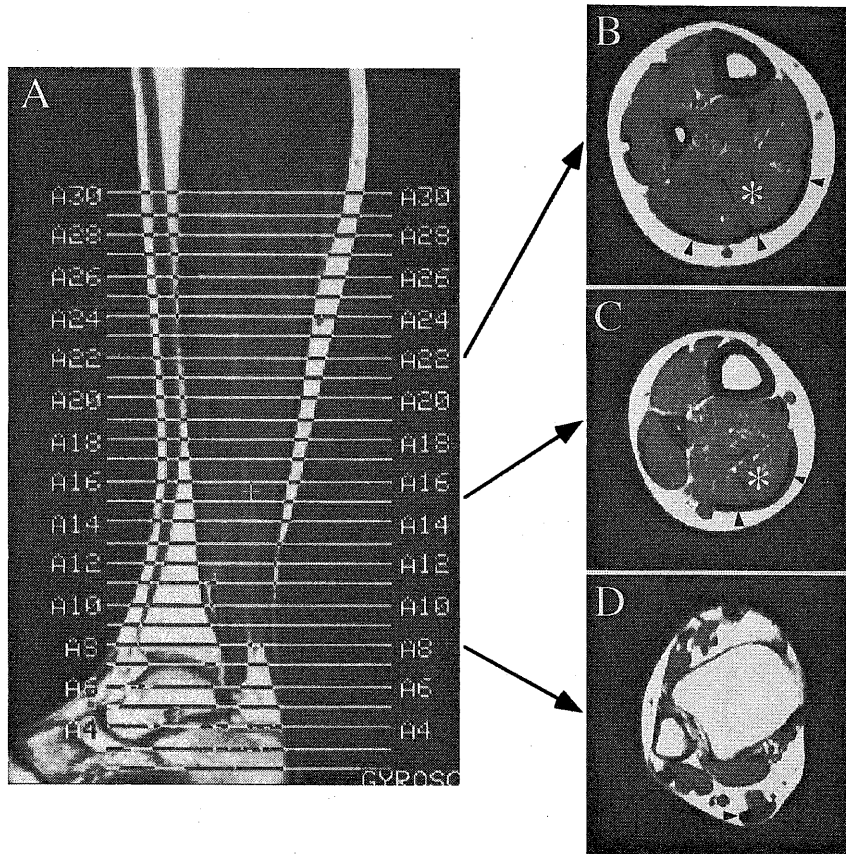


Fig. 1 Sagittal (A) and axial (B-D) T<sub>1</sub>-weight images of the lower leg\*. soleus muscle; arrowhead, Achilles tendon.

た。これまでアキレス腱の形態的指標としては、測定上の制限にも関係して、腱の厚さが最も頻繁に用いられてきた。しかしながら、それだけの測定では形態としての評価としても、また、機能との関連を評価するパラメーターとしても不十分である。そこで本研究では、アキレス腱を腓腹筋が消失した部位から踵骨との付着部位までとして、その長さと同容積を指標として検討を行った。得られた各横断像におけるアキレス腱の横断面積を測定し、撮像された枚数分だけ加算することにより腱容積を算出した。下腿三頭筋(ヒラメ筋および腓腹筋)については、フィルムからトレースを行い、それをスキャナーを用いてコンピューターに取り込み、腱と同様に筋容積を算出した。また、下腿三頭筋の横断面積は最大を示した部位の面積とした。

#### 4) ジャンプパフォーマンス

ジャンプパフォーマンステストとして、足関節伸展(足底屈)運動により行う跳躍を行わせた。すべての跳躍は、手を腰に当てた立位姿勢で行わせ、膝関節を曲げないようにしてできるだけ足関節のみを用いて行うように指示した。跳躍としては以下の3種類を行わせた。

##### A. アンクルジャンプ(AJ)

立位姿勢から足関節の足底屈運動を用いて全力で跳躍する。

##### B. アンクルドロップジャンプ(ADJ)

30cmの台から飛び降り両足で着地するとともに、足関節の足底屈運動を用いてすばやく全力で跳躍する。

##### C. 5回連続ホッピング(HOP)

足底屈運動により、連続的に5回すばやく全力で跳躍する。ここで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に続く5回のジャンプを試技とした。

#### D. 30秒間連続ホッピング

足底屈運動を用いて、30秒間連続的に跳躍する。

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、筋疲労の影響をできる限り少なくした。原則として試技回数は2~3回としたが、明かな膝関節の屈曲が認められた場合はその都度追加試技を行わせた。跳躍はすべてマットスイッチ(CPV1723, Tapeswitch of America)上で行わせ、それに接続されている記録装置(CT-916, SEIKO社製)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。得られた滞空時間から、以下の式を用いて跳躍高(Height; H)を算出した<sup>5)</sup>。

$$H(m) = 1/8 \times 9.81 \times ft(sec)^2$$

さらに、跳躍高、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。

$$Power(W) = H(m) \times BW(kg) / ct(sec)$$

#### 5) 酸素摂取量, 仕事量および仕事効率

上記Dの30秒間の連続ホッピング中に、自動呼吸ガス分析器(OXYCON-ガンマ, MIJHARDT社製)を用いて酸素摂取量の測定を行った。さらに、体重と測定された跳躍高を用いて総仕事量を

算出するとともに、酸素摂取量に対する仕事量の割合を用いて、腱の弾性エネルギーの貢献を仕事効率の面から評価した。

#### 6) 統計処理

すべての測定値は平均値±標準偏差で示した。跳躍選手, バレーボール選手および非鍛錬者間の差の検定には一元配置の分散分析を用いた。また、下腿の形態的特性とジャンプパフォーマンス, 酸素摂取量および仕事量などとの間の関係についてはピアソンの相関係数を用いて評価し、有意水準は $P < 0.05$ とした。

### 3. 結果

#### 1) 跳躍選手, バレーボール選手および非鍛錬者の比較

##### A. 身体的特性

表1に被検者の身体的特性および競技歴を示した。体脂肪率のみJ群とV群がC群より有意( $P < 0.01$ )に低値を示したが、その他の身体的特性には3群間において有意差は認められなかった。

##### B. アキレス腱の形態的特性

表2はC群, J群およびV群におけるアキレス腱の形態的特性を示した。腱長, および身長または下肢長に対する腱長の割合については、J群とV群がC群よりも高値を示す傾向が認められたが、その差は有意ではなかった。腱容積および体重に対する腱容積の割合も、J群とV群がC群より高値を示す傾向にあり、体重に対する相対値ではJ群とC群の間に有意差が認められた( $P < 0.01$ )。

Table 1 Comparison of physical characteristics and athletic career in controls, jumpers and volleyball players

	Controls (n=6)	Jumpers (n=6)	Volleyball players (n=7)
Age (yrs.)	21.2±1.3	20.2±1.5	21.1±0.7
Height (cm)	169.5±4.7	170.3±3.6	168.1±2.2
Body weight (kg)	65.0±8.5	58.3±2.4	62.4±5.0
Body fat (%)	31.6±5.2	24.6±1.8**	25.8±2.5**
Lean body mass (kg)	44.1±2.7	44.0±2.4	46.2±2.4
Lower limb length (cm)	85.5±3.3	87.5±3.8	86.4±2.1
Athletic career (yrs.)	—	8.8±1.3	10.3±1.3

Values are means±SD. \*\* $P < 0.01$  vs. control.

## C. 下腿三頭筋の形態的特性

表3にはC群, J群およびV群における下腿三頭筋の形態的特性の比較を示した。筋長および身長に対する筋長の割合については, J群がC群より有意に高値を示した( $P<0.05$ )。筋横断面積については, V群がC群より有意に高値を示した( $P<0.05$ )。筋容積および体重に対する筋容積の割合では, J群, V群ともにC群より有意に高値を示したが( $P<0.05$ ), J群とV群との間には差は認められなかった。

## D. アキレス腱と下腿三頭筋との関係

アキレス腱の長さとは下腿三頭筋の長さとの間には, 有意な相関関係は認められなかった。一方, アキレス腱の容積と下腿三頭筋の容積の間には,

絶対値, 相対値ともに有意な相関関係が認められた( $P<0.05$ , 図2)。

## E. ジャンプパフォーマンス

表4には本研究で行ったジャンプパフォーマンスにおける跳躍高(AJ, ADJおよびHOP)およびジャンプパワー(ADJおよびHOP)を示した。AJの跳躍高については, J群はC群より有意に高値を示したが( $P<0.05$ ), V群とC群との間には有意差は認められなかった。ADJおよびHOPの跳躍高については, J群, V群ともにC群より有意に高値を示した( $P<0.01$ )。ADJおよびHOPのジャンプパワーについては, J群, V群ともにC群より有意に高値を示した( $P<0.01$ )。しかしながら, J群とV群の間には差は認められなかった。

Table 2 Comparison of morphological characteristics of the Achilles tendon in controls, jumpers and volleyball players

	Controls (n=6)	Jumpers (n=6)	Volleyball players (n=7)
Tendon length (cm)	18.3±2.5	20.2±1.0	19.0±1.6
Tendon length/Height	0.108±0.012	0.118±0.006	0.113±0.010
Tendon length/ Lower limb length	0.214±0.023	0.231±0.017	0.220±0.019
Tendon volume (cm <sup>3</sup> )	13.3±3.1	15.5±1.3	15.1±3.5
Tendon volume/BW (cm <sup>3</sup> /kg)	0.204±0.030	0.267±0.025**	0.243±0.043

Values are means±SD. \*\* $P<0.01$  vs. control. BW, body weight.

Table 3 Comparison of morphological characteristics of the triceps surae muscle in controls, jumpers and volleyball players

	Controls (n=6)	Jumpers (n=6)	Volleyball players (n=7)
Muscle length (cm)	36.0±2.0	38.8±2.3*	37.9±2.0
Muscle length/Height	0.213±0.016	0.228±0.010*	0.225±0.010
Muscle length/ Lower limb length	0.422±0.031	0.444±0.016	0.438±0.017
Muscle cross-sectional area (cm <sup>2</sup> )	34.6±2.6	40.0±4.3	42.0±6.4*
Muscle volume (cm <sup>3</sup> )	539.9±65.7	645.4±72.0*	659.8±101.1*
Muscle volume/BW (cm <sup>3</sup> /kg)	8.4±1.0	11.1±1.2**	10.6±1.2**

Values are means±SD. \* $P<0.05$ , \*\* $P<0.01$  vs. control. BW, body weight.

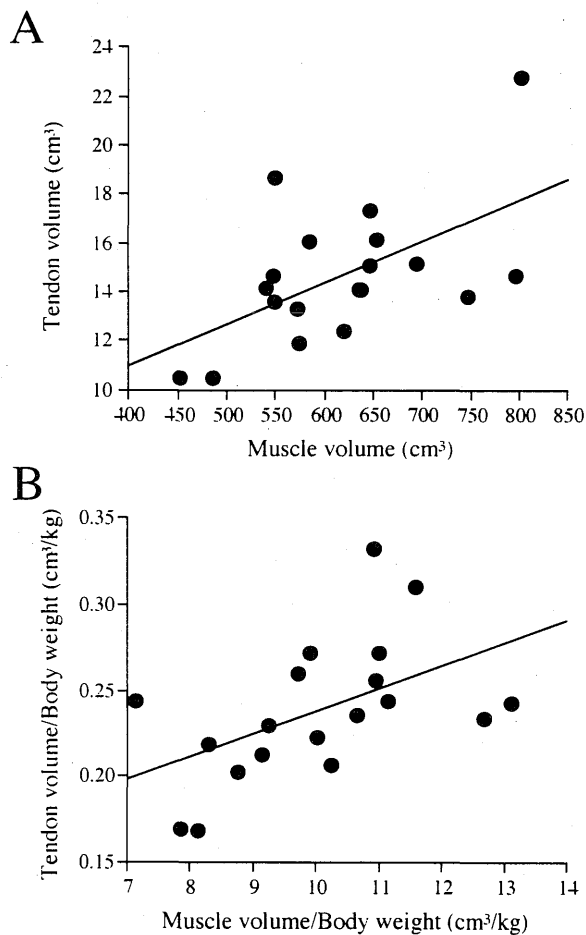


Fig. 2 Relationships between the Achilles tendon volume and triceps surae muscle volume (A) and between the ratio of tendon volume to body weight and ratio of triceps surae muscle volume to body weight (B). There were significant correlation between them ( $r=0.564$ ,  $P<0.05$  and  $r=0.513$ ,  $P<0.05$ , respectively).

Table 4 Comparison of jumping height and jump power in controls, jumpers and volleyball players

	Controls (n=6)	Jumpers (n=6)	Volleyball players (n=7)
Jumping height (cm)			
AJ	6.9±3.3	13.1±6.9*	8.4±2.7
ADJ	13.6±2.8	22.7±3.5**	23.9±7.6**
HOP	11.5±3.9	23.9±6.4**	25.0±8.7**
Jumping power (W/kg)			
ADJ/BW	0.72±0.19	1.43±0.33**	1.62±0.50**
HOP/BW	0.68±0.32	1.47±0.43**	1.48±0.51**

Values are means±SD. \* $P<0.05$ , \*\* $P<0.01$  vs. control. AJ, ankle jump; ADJ, ankle drop jump; HOP, hopping; BW, body weight.

## F. 仕事量と酸素摂取量

図3には、30秒間連続ホッピング中に遂行された仕事量、酸素摂取量および酸素摂取量に対する仕事量の割合について示した。仕事量については、J群、V群ともにC群より有意に高値を示した( $P < 0.01$ )。また、酸素摂取量についてはV群がC群、J群と比較して高値を示す傾向にあったが有意差は認められなかった。酸素摂取量に対す

る仕事量の割合では、J群がC群、V群より高値を示す傾向にあったが有意な差異ではなかった。

## 2) 形態的特性とジャンプパフォーマンスとの関係

表5には、アキレス腱および下腿三頭筋の形態的特性とジャンプパフォーマンスとの間の相関係数を示した。すべてのアキレス腱形態のパラメーターとジャンプパフォーマンスの間には有意な

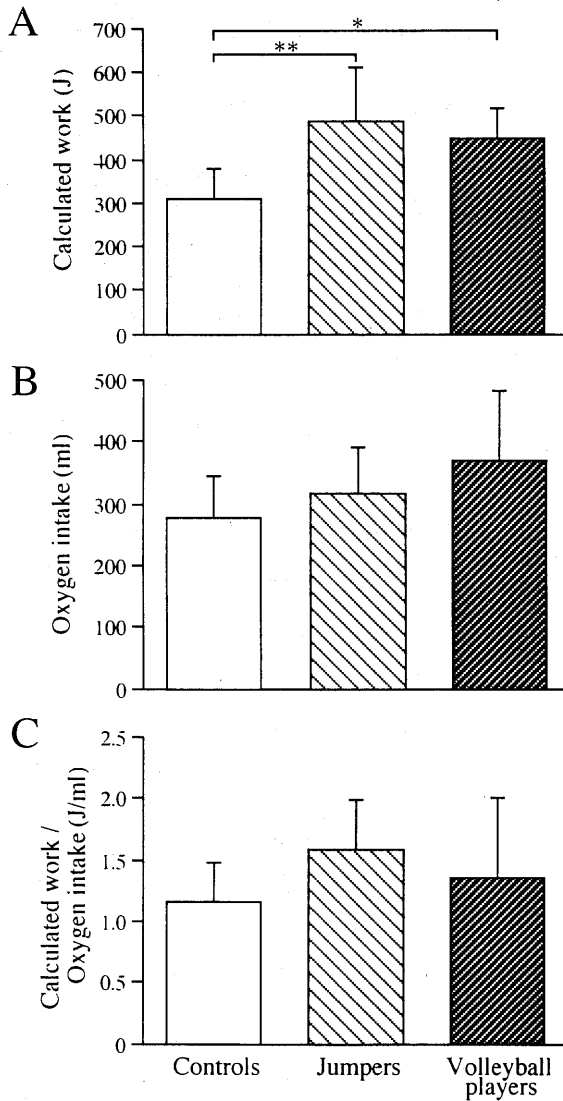


Fig. 3 Comparison of calculated work (top), oxygen intake and the ratio of calculated work to oxygen intake during 30sec hopping among controls, jumpers and volleyball players. Jumpers and volleyball players showed the larger work than that of controls. Although no significant difference was found in oxygen intake and work/oxygen intake among the three groups, jumpers tended to have the larger value of work/oxygen intake. \* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$

相関関係は認められなかった。筋長および筋容積と跳躍高との関係では、AJでは有意な相関関係が認められたのは筋長のみであったが、ADJおよびHOPの跳躍高と筋長および筋容積の間には有意な相関関係が認められた。さらに、筋長・筋容積とジャンプパワーの間にも有意な相関関係が認められた( $P<0.05$ )。一方、筋横断面積とすべてのジャンプパフォーマンスの間には相関関係はみられなかった。

### 3) 形態的特性と仕事効率との関係

表6には、下腿の形態的特性と酸素摂取量、仕事量および酸素摂取量に対する仕事量の割合との関係について示した。酸素摂取量との間には腱・筋どちらの形態の間にも有意な相関関係は認められなかったが、仕事量と下腿三頭筋の長さおよび容積の間には有意な相関関係が認められた( $P<0.05$ )。酸素摂取量に対する仕事量の割合と形態的特性との関係では、アキレス腱の容積および体重に対する腱容積の割合と酸素摂取量に対する仕事量の割合との間にのみ有意な相関関係が認められた( $P<0.01$ )。

## 4. 考察

### 1) 競技者と非鍛錬者の比較

一般的にアキレス腱は、ヒラメ筋腱と腓腹筋腱が合わさって構成されている。我々<sup>14)</sup>の先行研究では、男子バレーボール選手と一般人のアキレス腱形態の比較を行う際に、アキレス腱をヒラメ筋が消失した部位から踵骨の付着部位までとして評価を行った。しかしながら、下腿全体で行われるジャンプを考えた場合、腓腹筋腱を除いて評価を行うことには問題があると考えられる。事実、本研究のアキレス腱容積の絶対値は先行研究<sup>14)</sup>の約8倍もの値を示しており、このことから考えても弾性体としての腓腹筋腱の関与を無視することはできないであろう。そこで本研究では、アキレス腱を腓腹筋が消失した部位から踵骨との付着部位までとして評価を行った。

本研究の第一の目的は、陸上跳躍選手、バレーボール選手および非鍛錬者のアキレス腱と下腿三頭筋の形態的特性を比較検討するとともに、運動に対する腱の適応に関する知見を得ることであった。本研究の結果、腱容積、および体重に対する腱容積の割合はJ群とV群がC群より高値を示

Table 5 Correlation coefficient between the morphological characteristics of the Achilles tendon and triceps surae muscle and jump performance

	Jumping height			Jumping power	
	AJ	ADJ	HOP	ADJ	HOP
Tendon length	0.28	-0.01	-0.14	-0.01	-0.15
Tendon length/Height	0.22	-0.03	-0.17	-0.04	-0.16
Tendon length/ Lower limb length	0.09	-0.14	-0.31	-0.18	-0.28
Tendon volume	0.15	0.10	0.04	0.11	-0.04
Tendon volume/BW	0.27	0.23	0.19	0.24	0.17
Muscle length	0.51*	0.75**	0.73**	0.79**	0.74**
Muscle length/Height	0.38	0.71**	0.71**	0.75**	0.75**
Muscle length/ Lower limb length	0.21	0.60**	0.55*	0.60**	0.63**
Muscle CSA	-0.04	0.18	0.27	0.27	0.24
Muscle volume	0.18	0.41	0.47*	0.51*	0.42
Muscle volume/BW	0.30	0.51*	0.58**	0.59**	0.60**

\* $P<0.05$ , \*\* $P<0.01$  AJ, ankle jump; ADJ, ankle drop jump; HOP, hopping; BW, body weight; CSA, cross-sectional area.



し、下腿三頭筋の容積に関しても、絶対値、相対値ともにJ群とV群がC群より有意に高値を示した。また、アキレス腱と下腿三頭筋の形態的特性との関係では、両方の容積との間に有意な相関関係が認められた。これらのことは、長期に渡る日常的なトレーニングが筋の肥大をもたらすとともに、腱の発達にも貢献している可能性を示唆するものである。腱に及ぼす運動トレーニングの効果に関するこれまでの研究は、腱形態測定方法上の制限から、主に、動物を対象として行われてきた。その中には、トレーニングにより腱が肥大するとの報告もあれば<sup>20)</sup>、変化しないとの報告もあり<sup>22,25)</sup>、必ずしも一致した見解が得られていない。一方、ヒトの腱に関しては、Kainberger et al.<sup>19)</sup>が超音波法を用いてアキレス腱の厚さを測定した結果、高強度のトレーニングを行ってきた競技者は非鍛錬者よりも厚い腱を有していたことを報告している。バレーボール選手と非鍛錬者の腱(ここでは、ヒラメ筋が消失した部位から踵骨の付着部位までをアキレス腱としている)をMRIを用いて評価した我々の先行研究<sup>10)</sup>では、バレーボール選手の方が腱長、腱横断面積、腱容積の絶対値において高値を示す傾向が認められたが、身長あたり、または、体重あたりの相対値では群間

で有意差は認められず、運動トレーニングとの関係について明確な答えを出すことができなかった。腱の同定を腓腹筋まで広げた本研究では、筋形態の違いほど明かな差は認められなかったものの、腱容積および体重に対する腱容積の相対値はJ群とV群がC群より高値を示しており、これは長期間のトレーニングによって腱も発達し得る可能性を示唆している。

腱の特性を考える場合、容積といった量的な評価のみではなく、質的な面も考慮する必要があるであろう。動物を用いた先行研究では、トレーニングが腱のコラーゲン濃度を上昇させるとともに<sup>10,17,24)</sup>、強度も増加させることが示されている<sup>6,19,20,22,24)</sup>。本研究でもそのような変化が生じている可能性は十分に考えられるが、本研究の結果だけからではそこまで言及することはできず、今後の検討課題となるであろう。

## 2) 下腿の形態的特性とジャンプパフォーマンスの関係

本研究で測定したAJの跳躍高は、渋川ら<sup>18)</sup>によって報告された2.4cmと比較するとかなり大きい。この原因の一つとしては、跳躍高の測定方法の違いが考えられる。本研究では滞空時間から跳躍高を算出しているのに対し、渋川らの研究では

Table 6 Correlation coefficient between the morphological characteristics of the Achilles tendon and triceps surae muscle and oxygen intake and calculated work during 30sec hopping

	Oxygen intake	Calculated work	Calculated work/ Oxygen intake
Tendon length	-0.16	0.05	0.24
Tendon length/Height	-0.14	-0.03	0.17
Tendon length/ Lower limb length	-0.23	-0.17	0.11
Tendon volume	-0.33	0.31	0.70**
Tendon volume/BW	-0.23	0.33	0.61**
Muscle length	0.33	0.62**	0.12
Muscle length/Height	0.37	0.50*	0.01
Muscle length/ Lower limb length	0.25	0.30	-0.10
Muscle CSA	-0.05	0.33	0.42
Muscle volume	0.10	0.56*	0.45
Muscle volume/BW	0.25	0.47*	0.20

\*P<0.05, \*\*P<0.01, BW, body weight; CSA, cross-sectional area.

地面反力から重心の移動距離を算出しており、この違いが影響しているのかもしれない。二つ目の原因としては、厳密に足関節だけを用いてジャンプができなかった可能性が挙げられる。被検者に対して足関節のみを用いてジャンプを行うようには指示したが、若干、膝関節の影響が関与した可能性は捨てきれない。しかし、検者の監視下で繰り返し練習させるとともに、測定試技において明らかに膝の屈曲動作が入っていると判断した試技は除外している。このように、すべての被検者で試技方法は統一しているため、本研究における被検者間の比較は可能であると考えられる。

ヒトの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非常に少ない。中川と服部<sup>10)</sup>は、スキージャンプ選手のアキレス腱をMRIを用いて評価し、腱量(腱容積)とジャンプパフォーマンスとの関係について調べた結果、その間には明かな関係は認められなかったことを報告している。一方、我々の先行研究<sup>11)</sup>は、腱容積とジャンプパフォーマンス(跳躍高およびジャンプパワー)との間に有意な相関関係を認めており、一致した結果が得られていない。本研究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では、腱長および腱容積の絶対値、相対値ともにAJ、ADJ、HOPのジャンプパフォーマンスと有意な相関関係を見出すことはできず、これは、中川と服部<sup>10)</sup>の研究結果を支持するものである。しかしながら、これらの結果を解釈する場合、研究間で腱の評価方法に違いがある点には注意しなければならない。また、本研究における下腿三頭筋の形態的特性とジャンプパフォーマンスとの関係では、筋長および筋容積がジャンプパフォーマンスに大きく影響するという結果が得られた。このことは、本研究で用いた単発的なジャンプには、腱で蓄えられた弾性エネルギーというよりも下腿三頭筋で発揮された張力自身が大きく貢献していることを示している。

このように筋とジャンプパフォーマンスとの間に一定の関係が認められたものの、筋横断面積とジャンプパフォーマンスとの間には相関関係が認められなかった。このことは、本研究で行ったジャンプパフォーマンスを決定する上では、筋横断面積よりも筋の長さ、そして筋容積がより大きく関与する可能性を示している。しかし、下腿三

頭筋は羽状筋であるので、本研究で用いたような解剖学的横断面積ではなく、生理学的横断面積で評価を行えば、異なる結果が導き出される可能性も十分考えられる。この点に関してはさらなる検討が必要になるであろう。

30秒間の連続ホッピング中の関係では、単発的なジャンプ同様に、発揮された絶対的な仕事量は筋長・筋容積といった筋形態と相関が認められた。一方、仕事効率を表す指標と考えられる酸素摂取量に対する仕事量の割合は、腱容積および体重に対する腱容積の割合と関係しており、腱の影響が大きくなることを示している。このような比較的長時間継続するような連続ジャンプでは、伸張-短縮サイクルが繰り返されることにより腱の弾性エネルギーの貢献が大きくなるため、このような結果が得られたのであろうと考えられる。

これまで、本研究で行ったような30秒連続ジャンプ中の酸素摂取量と仕事量を用いて仕事効率の評価を行った研究はみられず、新しい評価法の可能性を提起するものと考えられる。しかしながら、この方法にはいくつかの問題点が含まれていることも否定できない。本研究は、連続ジャンプにおける筋の関与が大きいほど、すなわち、腱の関与が小さいほど酸素摂取量が大きくなるという仮定の基に成り立っている。だが、この連続ジャンプは比較的強度が高いので、有酸素的エネルギー供給とともに無酸素的なエネルギー供給が大きく関与していると考えられる。さらにこれと関係して、酸素不足量や酸素負債量を無視することもできない。これらの問題点を解決し、最適な評価方法を見出すためには、さらなる詳細な検討が必要になると思われる。

### 3) 競技種目間の比較

本研究の結果は、さらに、競技種目間、すなわちJ群とV群との間のジャンプパフォーマンスに対する腱と筋の関与の違いに関する知見を与える。J群はC群よりも大きな筋容積を有するとともに、アキレス腱の容積もC群より有意に大きく、さらに、V群よりも高値を示す傾向にあった。30秒間連続ジャンプ中の酸素摂取量に対する仕事量の割合も、J群において最も高値が示されている。このことは、相対的に腱のエネルギーの貢献度が大きいいため、筋での張力発揮をより少なくしてより大きな仕事を遂行できたことを表している。一方、V群はC群より有意に大きな筋横断

面積・筋容積を有するとともに、30秒間の連続ジャンプでは最も高い酸素摂取量を示した。以上のことから、J群とV群はC群より発達した筋により高いジャンプパフォーマンスを発揮するとともに、相対的にJ群はV群よりも腱の弾性エネルギーをより有効に利用していることが推察される。両競技者群間でこのような違いは、競技特性の違いを表しているとともに、日常的なトレーニング内容の違いによってもたらされた結果であると考えられる。

## 5. 総括

本研究では、陸上競技跳躍選手、バレーボール選手および非鍛錬者のアキレス腱および下腿三頭筋の形態的特性を比較検討し、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。磁気共鳴映像法を用いて非侵襲的にアキレス腱および下腿三頭筋の長さ・容積を測定した。ジャンプパフォーマンスとしてアンクルジャンプ(AJ)、アンクルドロップジャンプ(ADJ)および5回連続ホッピング(HOP)を測定した。さらに、30秒間連続的にホッピングを行わせ、ジャンプ中の酸素摂取量および仕事量を測定した。得られた結果を以下に示す。

- 1) アキレス腱の形態的特性では、跳躍選手が非鍛錬者と比較して体重に対する腱容積の割合においてのみ有意に高値を示し、他のパラメーター(腱長、腱長/身長、腱容積)では3群間に有意差は認められなかった。
- 2) 下腿三頭筋の形態的特性では、跳躍選手およびバレーボール選手が非鍛錬者と比較して筋長、筋容積ともに有意に高値を示した。筋横断面積については、バレーボール選手のみ非鍛錬者より有意に高値を示した。
- 3) アキレス腱と下腿三頭筋の形態的特性との関係では、腱容積と筋容積、体重に対する腱容積の割合と体重に対する筋容積の割合との間に有意な相関関係が認められた。
- 4) すべてのジャンプの跳躍高とジャンプパワーにおいて、陸上跳躍選手、バレーボール選手は非鍛錬者より有意に高値を示した。
- 5) アキレス腱の長さ・容積とAJ、ADJ、HOPのパフォーマンスとの間には有意な相関関係は認められなかったが、筋の長さ・容積とジャンプパフォーマンスとの間には有意な相関関係が

認められた。

- 6) 30秒間連続ジャンプ中の酸素摂取量に対する仕事量の割合は、3群間に有意差は認められなかった。また、アキレス腱の腱容積と酸素摂取量に対する仕事量の割合との間には有意な相関関係が認められたが、筋の形態的特性との間には有意な相関関係が認められなかった。

これらのことから、陸上競技跳躍選手、バレーボール選手は非鍛錬者より大きな腱容積、筋容積、ジャンプパフォーマンスを有し、より高いジャンプパフォーマンスには腱よりも筋容積がより大きく関与していることが示された。また、比較的長時間継続するようなジャンプでは、腱の弾性エネルギーの貢献が大きくなることが示された。さらに、陸上競技跳躍選手はバレーボール選手よりも腱の弾性エネルギーをより有効に利用している可能性が示された。

## 謝辞

本研究を終えるに当たり、MRI撮像に御協力頂きました臨床医学系板井悠二教授に心から感謝いたします。

## 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) Bobbert MF, Huijing PA, and van Ingen Schenau GJ (1986): A model of the human triceps surae muscle-tendon complex applied to jumping. *J Biomech* 19: 887-898.
- 3) Bosco C, Ito A, Komi PV, Luhtanen P, Rahlkila P, Rusko H, and Viitasalo JT (1982): Neuromuscular function and mechanical efficiency of human leg extensor muscles during jumping exercises. *Acta Physiol Scand* 114: 543-550.
- 4) Bosco C, and Komi PV (1982): Muscle elasticity in athletes. (In) *Exercise and Sport Biology*. Human Kinetics Publishers, Illinois, pp.109-117.
- 5) Bosco C, Mognoni P, and Luhtanen P (1983): Relationship between isokinetic performance and ballistic movement. *Eur J Appl Physiol* 51: 357-364.
- 6) Butler DL, Grood ES, Noyes FR, and Zernicke RF (1978): Biomechanics of ligaments and tendons. *Exercise and Sport Sciences Reviews* 6: 125-182.
- 7) 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.
- 8) Cavagna GA, Dusman B, and Margaria R (1968): Positive work done by a previously stretched muscle. *J Appl Physiol* 24: 21-32.
  - 9) Fukashiro S, Komi PV, Järvinen M, and Miyashita M (1995) In vivo achilles tendon loading during jumping in humans. *Eur J Appl Physiol* 71: 453-458.
  - 10) Heikkinen E, and Vuori I (1970): Effect of physical activity on the connective tissue metabolism in mice. *Scand J Clin Lab Invest, Suppl*, 113: 36-41.
  - 11) Huijing PA (1991): Elastic potential of muscle. (Ed.) Komi PV (In) *Strength and power in sport*. Blackwell Scientific publications, Oxford, pp. 151-168.
  - 12) 伊藤 章, 斉藤昌久, 金子公宥(1987): 跳躍運動における反動効果—下腿三頭筋の筋放電量と弾性エネルギーの利用—. *Jpn J Sports Sci* 6: 232-238.
  - 13) Kainberger FM, Engel A, Barton P, Huebsch P, Neuhold A, and Salomonowitz E (1990): Injury of the Achilles tendon: Diagnosis with sonography. *Am J Roentgenology* 155: 1031-1036.
  - 14) 勝田 茂, 秋間 広, 神原奈津紀, 高橋英幸, 関子浩二, 都澤凡夫(1997): バレーボール選手と非鍛錬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. *筑波大学体育科学系紀要* 20: 159-166.
  - 15) Michna H, and Hartmann G (1989): Adaptation of tendon collagen to exercise. *Int Orthop* 13: 161-165.
  - 16) 中川喜直, 服部正明(1995): スキージャンパーの下腿三頭筋一腱量とジャンプパフォーマンス. *体力科学* 44: 817.
  - 17) Opshal WP, and Ehrhart LA (1987): Compartmentalization of proline pools and apparent rates of collagen and noncollagen protein synthesis in arterial smooth muscle cells in culture. *Biochem J* 243: 137-144.
  - 18) 渋谷侃二, 吉本 修(1965): 垂直跳の力学(第二報). *東京教育大学スポーツ研究所報* 3: 47-54.
  - 19) Simonsen EB, Klitgaard H, and Bojsen-Møller 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.
  - 20) Tipton CM, Schild RJ, and Tomanek RJ (1967): Influence of physical activity on the strength of knee ligaments in rats. *J Appl Physiol* 212: 783-787.
  - 21) Tipton CM, Vailas AC, and Matthes RD (1986): Experimental studies on the influences of physical activity on ligaments, tendons and joints: a brief review. *Acta Med Scand (Suppl)* 711: 157-168.
  - 22) Viidik A (1967): The effect of training on the tensile strength of isolated rabbit tendons. *Scand J Plast Reconstr Surg* 1: 141-147.
  - 23) Viidik A (1979): Connective tissue: possible implications of the temporal changes for the aging process. *Mech Ageing Dev* 9: 267-285.
  - 24) Woo SL-Y, Ritter MA, Amiel D, Sanders TM, Gomez MA, Kuel SC, Garfin SR, and Akeson WH (1980): The biomechanical and biochemical properties of swine tendons: long-term effects of exercise on the digital extensors. *Connect Tissue Res* 7: 177-183.
  - 25) Woo SL-Y, Gomez MA, Amiel D, Ritter MA, Gelberman RH, and Akeson WH (1981): The effects of exercise on the biomechanical and biochemical properties of swine digital flexor tendons. *J Biomech Eng* 103: 51-56.