

傾斜面でのリバウンドジャンプにおける腓腹筋の stiffness がアキレス腱張力に及ぼす影響

尹 聖 鎮¹⁾ 大山 卞 圭 吾³⁾
岡 田 英 孝²⁾ 高 松 薫³⁾

Effect of gastrocnemius muscle stiffness in rebound jumps under slanted contact surface conditions on achilles tendon force

Sungjin Yoon¹, Keigo Ohyama Byun³,
Hidetaka Okada² and Kaoru Takamatsu³

Abstract

A study was conducted to investigate the effect of gastrocnemius muscle stiffness on achilles tendon force in rebound jumps on slanted contact surfaces. Five trained college jumpers and throwers, and six active males executed five continuous repetition rebound jumps under three surface gradient conditions. The surface gradients were 8 degrees uphill type (U8), 8 degrees downhill type (D8), and level type (L) conditions. Force plate and limb position data were recorded simultaneously during all jumps. The changes in length of the achilles tendon (L_{AT}), m. gastrocnemius (L_{GAS}) and gastrocnemius muscle-achilles tendon complex (L_{MTC}) during the eccentric phase were calculated according to the model of Voigt et al. (1995) and Grieve et al. (1978).

The main results were as follows;

1. Jumping height in U8 and L was higher than in D8. There was also a tendency for a higher achilles tendon force at the midpoint (ATF_{MID}) in U8. On the other hand, in U8 and D8, L_{MTC} was lower, and L_{AT}/L_{GAS} was higher than in L.
2. There was significant positive correlations between the ground reaction force at the midpoint (GRF_{MID}) and jumping height, and ATF_{MID} and jumping height in U8, D8 and L.
3. There were significant positive correlations between GRF_{MID} and ATF_{MID} , and L_{AT}/L_{GAS} and ATF_{MID} in U8 and L. However, L_{MTC} and ATF_{MID} showed a significant negative correlation.

These results indicate that the stretch length of the gastrocnemius muscle-achilles tendon complex is lower, and ATF_{MID} higher under uphill-type conditions than under level conditions because L_{AT}/L_{GAS} becomes higher as gastrocnemius muscle stiffness increases.

Key words: stretch-shortening cycle exercises, muscle-tendon complex, stretch length
(Japan J. Phys. Educ. 44: 510-521, November, 1999)

1) 筑波大学大学院体育科学研究科
〒305-8574 茨城県つくば市天王台 1-1-1
2) 電気通信大学知能機械工学科
〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1
3) 筑波大学体育科学系
〒305-8574 茨城県つくば市天王台 1-1-1

1. Doctoral Program in Health and Sport Sciences, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574
2. Laboratory of Health and Sport Sciences, The University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585
3. Institute of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574

キーワード：伸張—短縮サイクル運動，筋—腱複合体，伸張量

I. 目 的

リバウンドジャンプのようなバリスティックな伸張—短縮サイクル (Stretch-Shortening Cycle; SSC) 運動は，伸張性収縮から短縮性収縮への移行が素早く行われるために，弾性エネルギーを有効に利用できる (Thys et al., 1975). 特に，弾性エネルギーの貯蔵・再利用には，腱の役割が重要であることから (Bobbert et al., 1986)，アキレス腱が付着している足関節は，リバウンドジャンプのパフォーマンスの向上に大きく貢献していると考えられる。また，リバウンドジャンプは，下肢の3関節の中でも，足関節に作用する腓腹筋—アキレス腱複合体 (Gastrocnemius Muscle-Achilles Tendon Complex; MTC) が発揮したトルクによる負の仕事が大きいことが認められている (図子・高松, 1995; Bobbert et al., 1987). これらのことから，リバウンドジャンプは，MTCの構造的および機能的な特徴を大きく反映する跳躍運動であると考えられる。

リバウンドジャンプは，代表的なプライオメトリックトレーニング手段の一つである。これをトレーニング手段として効果的に用いるためには，MTCの解剖学的な構造や機能を考慮に入れて，MTCのトルク発揮特性を理解しておくことが重要である。リバウンドジャンプは，接地時に主働筋である腓腹筋に伸張性収縮による負荷（伸張負荷）がかかるために stiffness を効果的に強化できる。stiffness は，発揮された力のレベルを反映するものであると考えられている (van Ingen Schenau, 1984). 実際のトレーニングでは，伸張反射機構を有効に機能させることによって，いかに合目的的に筋 stiffness の強化を図るかが重要な課題となる。伸張反射は，活動筋の伸張量や伸張速度に影響されることから (Aura and Komi, 1986)，傾斜面，特に上向き斜面でのリバウンドジャンプは，これらの課題を解決するのに適したトレーニング手段の一つになると考えられる。

著者らは，上述の知見を踏まえて，一般成人男

子 (尹ほか, 1997) および大学陸上競技跳躍および投てき競技者 (尹ほか, 1998) を対象として，傾斜面でのリバウンドジャンプにおける腓腹筋の stiffness レベルを，アキレス腱と腓腹筋の伸張比 (L_{AT}/L_{GAS}) を用いて検討してきた。この理由として，筋 stiffness は，外的な張力に抗して筋長の変化を小さくすることから (Morgan, 1977)，腱と筋の伸張比を用いることによって，筋 stiffness レベルを推定できることがあげられる (Lieber, 1992)。

一方，SSC 運動における活動筋の伸張は，筋 stiffness を高めることができ (Edman et al., 1982; Cavagna et al., 1975)，それは主運動局面である短縮局面の仕事量を大きくしていると考えられる。短縮局面の仕事量は，伸張局面から短縮局面に切り替わる時点の力に影響されている (van Ingen Schenau et al., 1997; 高松ほか, 1988)。したがって，足関節の貢献度が大きいリバウンドジャンプをより効果的に遂行するためには，伸張局面から短縮局面に切り替わる時点（踏切中点）のアキレス腱張力 (ATF_{MID}) を大きくすることが重要になると考えられる。

アキレス腱には，足底屈筋である腓腹筋およびヒラメ筋が付着している。しかし，これらの筋の組織化学的な特徴は大きく異なり，前者は後者と比較して速筋線維が多いことが報告されている (Gollnick et al., 1973)。また，ヒラメ筋は単関節筋であるのに対して，腓腹筋は足関節と膝関節にまたがっている二関節筋であり，大きな速度と力が要求される跳躍運動中には，腓腹筋が選択的に動員されるという報告がある (Moritani et al., 1990)。したがって，バリスティックな跳躍運動であるリバウンドジャンプでは，腓腹筋はヒラメ筋と比較して，アキレス腱張力に対する貢献が大きいものと考えられる。

そこで本研究では，傾斜面でのリバウンドジャンプにおける腓腹筋の stiffness がアキレス腱張力に及ぼす影響を明らかにするために， L_{AT}/L_{GAS} と ATF_{MID} との関係を検討した。

II. 方 法

1. 被験者

被験者には、大学陸上競技跳躍および投てき競技者5名（年齢：22.2±0.4歳，身長：180.3±6.0 cm，体重：74.3±7.7 kg，下腿長：41.7±2.2 cm），および一般成人男子6名（年齢：27.0±3.8歳，身長：172.7±5.1 cm，体重：69.7±4.7 kg，下腿長：41.6±2.8 cm）の計11名を用いた。

跳躍競技者3名の種目は、走高跳，棒高跳，三段跳であり，自己記録は順に2 m 18, 5 m 45, 16 m 61であった。また，投てき競技者2名の種目は槍投げであり，自己記録は70 m 72, 73 m 97であった。

実験を開始するにあたり，全ての被験者に本研究の目的，方法および実験に伴う危険性などを十分に説明し，実験参加に対する同意を得た。なお，各被験者における傾斜面でのリバウンドジャンプのトレーニング経験および熟練度には，それぞれ個人差があったために，事前に十分な練習を行わせた。

2. 実験運動

被験者には，典型的な SSC 運動であるその場でのリバウンド型5回連続跳躍（5RJ）を，上向き斜面8度（U8），平地面（L），下向き斜面8度（D8）の傾斜ボックス（Angle-Box）上で行わせた。それぞれの傾斜条件での5RJを遂行する際には，できるだけ傾斜ボックスの中心部分に着地するように指示を与え，身体の前後移動が大きいことなど，実験条件を満たさなかった場合には再度行わせた。試技は，いずれも腕の振込の影響をなくすために手を腰に当てた姿勢で，踏切時間をできるだけ短くして，できるだけ高く跳ぶように指示して行わせた。いずれの着地面においても数回の試技を行わせ，そのなかで最も跳躍高の高かった試技のみを分析対象とした。なお，着地面の傾斜角度の試技順序は，全ての被験者においてランダムに行わせ，試技間には十分な休息をとらせた。

3. 分析項目および分析方法

本研究では，すべての跳躍試技を，被験者の左側方に設置した高速度ビデオカメラ（Nac 社製，HSV-400）を用いて，毎秒200コマで撮影した。それと同時に，地面反力をフォースプラットフォーム（Kistler 社製，9281 type）を用いて測定した。

地面反力のデータをもとにして，踏切時間および滞空時間を求めた。跳躍高（JH）は，式 $[JH=1/8 \cdot g \cdot FT^2]$ （Asmussen and Bonde-Petersen, 1974）に滞空時間（FT）および重力加速度（ $g=9.81 \text{ m/s}^2$ ）を代入することによって算出した。さらに，このデータをもとにして，鉛直方向における踏切中点の地面反力（ GRF_{MD} ）を求めた。

得られたビデオ画像をもとにして，まず，身体計測点および校正マークの2次元座標を1コマおきに読み取り，身体計測点の座標値を実長換算した。そして次に，実長換算した身体座標値の最適遮断周波数を Wells and Winter (1980) の方法にもとづいて決定し，Butterworth Low-Pass Digital Filter を用いて平滑化した。なお，決定された身体各分析点の最適遮断周波数は，1-7 Hz の範囲内であった。本研究では，この平滑化した身体座標値を用いて，股関節，膝関節および足関節の関節角度を算出した。関節トルクは，阿江ほか（1992）の身体部分係数を用いて求めた足，下腿，大腿の質量，質量中心位置および慣性モーメントを，それら4個の剛体からなるリンクセグメントモデルに入力して算出した（Winter, 1990）。なお，本研究では，傾斜面上での力の作用点は，以下のように求めた（図1）。

まず， O' を回転の中心と考え，身体がフォースプラットフォームに与えるモーメント $[F_z \cdot ay + F_y \cdot a'z]$ とセンサーがフォースプラットフォームに与えるモーメント $[b(F_{z3} + F_{z4} - F_{z1} - F_{z2})]$ のつり合い式から，以下のように $ay, a'z, az$ を求めた。なお， $\tan \theta = (ay - \beta) / a'z = -\alpha$ とし， β は三角形 abc と ade が相似であるために求めることができる。

$$ay = -a'z \cdot \alpha + \beta \quad (1)$$

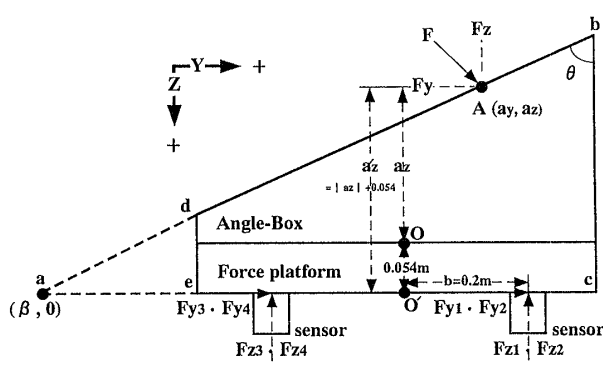


Fig. 1 Calculation method of the center of pressure.

F: The force that the body applies to the angle-box. Fy: The horizontal components of F. Fz: The vertical components of F. Fy₁, Fy₂, Fy₃, Fy₄: The horizontal force of sensor 1, 2, 3, 4 supporting the force platform. Fz₁, Fz₂, Fz₃, Fz₄: The vertical force of sensor 1, 2, 3, 4 supporting the force platform. β : The Y coordinate of point of intersection with the extension line of the oblique side of the angle-box and base of force platform. ay: The Y coordinate of the center of pressure A. az: The Z coordinate of the center of pressure A. b: Horizontal distance from O' to each sensor (0.2 m)

$$a'z = \{-b(Fz_1 + Fz_2 - Fz_3 - Fz_4) + \beta \cdot Fz\} / (\alpha \cdot Fz - Fy) \quad (2)$$

$$az = a'z - 0.054 \quad (3)$$

アキレス腱張力 (ATF) は、足関節トルクをモーメントアームで除することによって求めた (Fukashiro et al., 1993). モーメントアームは, Grieve et al. (1978) のモデルをもとにして求めた (Bobbert et al., 1986).

腓腹筋—アキレス腱複合体の長さ変化 (ΔL_{MTC}) は、画像データから得られた膝関節および足関節の角度変位を, Grieve et al. (1978) のモデルに入力して求めた. ΔL_{MTC} のうち, アキレス腱の長さ変化 (ΔL_{AT}) はアキレス腱の応力—ひずみ関係を示す式 [$ATF = k(\Delta L_{AT})^2$] を用いて求め (van Ingen Schenau, 1984), 腓腹筋の長さ変化 (ΔL_{GAS}) は ΔL_{MTC} から ΔL_{AT} を差し引くことによって求めた (Fukashiro et al.,

1995). なお, 式の弾性定数を示す k は, Voigt et al. (1995a, 1995b) による推定方法 [$k = \{YA_T(\epsilon_{max} - \epsilon_T)10^2\} / (\epsilon_{max}l_0)^2$] に従って求めた. 推定するにあたって, アキレス腱の長さ (l_0) および横断面積 (A_T) は, Yamaguchi et al. (1990) によって報告されたヒトの屍体の平均値を用いた. それらの値は, それぞれ 0.364 m および $0.625 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ であった. なお, Y はヤング率 (1.2 GPa) を, ϵ_{max} は腱の断裂直前の長さ変化 (アキレス腱長の 6 % に相当) を, ϵ_T は腱の応力—ひずみ関係における非線形局面の長さ変化 (アキレス腱長の 2 % に相当) を示す. このように本研究では, 全ての被験者において一定の弾性定数を用いているので, 方法論上に課題を残している.

伸張局面における MTC (L_{MTC}), アキレス腱 (L_{AT}) および腓腹筋 (L_{GAS}) の伸張量は, 踏切中点の長さ変化量から接地時の長さ変化量を差し引くことによって求めた.

4. 統計処理

各測定項目における平均値の有意差検定を行った. 被験者全員における傾斜面間の有意差検定には一元配置の分散分析を用い, F 値が有意であった項目についてはさらに多重比較を行った. また, 相関係数は, ピアソンの方法を用いて算出した. なお, 統計処理の有意性は危険率 5 % および 1 % 水準で判定した.

Ⅲ. 結 果

図 2 に, 典型的な 1 名の被験者における ΔL_{MTC} , ΔL_{AT} および ΔL_{GAS} の曲線を示した. U8, L および D8 のいずれの試技においても ΔL_{MTC} , ΔL_{AT} および ΔL_{GAS} は, 接地後伸張し, 短縮していた. また, U8 は L と比較して, 腓腹筋の伸張量が小さい傾向にあった.

表 1 に, 跳躍高, 踏切時間, ATF_{MID} , L_{MTC} および L_{AT}/L_{GAS} を示した. これらの分析項目には, 傾斜面間に統計的な有意差は認められなかった. しかし, 被験者全員の平均値でみた場合には, U8 および L は D8 と比較して, 跳躍高は高く, 踏切時間は長い傾向を示した. ATF_{MID} は,

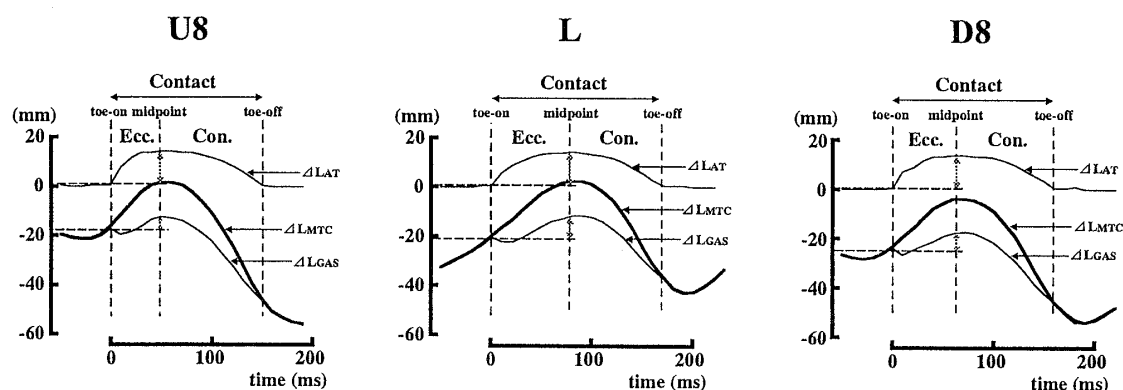


Fig. 2 Typical examples of length change of muscle-tendon complex (ΔL_{MTC}), m. gastrocnemius (ΔL_{GAS}), and achilles tendon (ΔL_{AT}) in 5RJ. ΔL_{MTC} is ΔL_{GAS} plus ΔL_{AT} .

Table 1 Jumping height, total contact time, achilles tendon force at midpoint (ATF_{MID}), muscle-tendon complex length change (L_{MTC}) and ratio of achilles tendon length change to m.gastrocnemius length change (L_{AT}/L_{GAS}) during eccentric phase in 5RJ

	Inclination	n	Jumping height (m)	Total contact time (s)	ATF_{MID} (N/kg)	L_{MTC} (mm)	L_{AT}/L_{GAS}
trained athletes	U8	5	0.419 ± 0.078	0.151 ± 0.010	89.3 ± 12.2	20.6 ± 6.2	4.29 ± 1.37
	L	5	0.438 ± 0.070	0.152 ± 0.018	85.8 ± 17.9	20.4 ± 7.7	3.04 ± 1.12
	D8	5	0.390 ± 0.065	0.144 ± 0.020	67.2 ± 14.7	18.3 ± 6.0	3.37 ± 1.56
active males	U8	6	0.348 ± 0.020	0.172 ± 0.015	71.5 ± 12.7	23.7 ± 5.9	2.31 ± 0.72
	L	6	0.332 ± 0.023	0.175 ± 0.017	68.9 ± 11.2	29.2 ± 5.4	1.38 ± 0.45
	D8	6	0.329 ± 0.035	0.165 ± 0.012	70.1 ± 4.4	22.7 ± 6.0	1.98 ± 0.70
Total	U8	11	0.380 ± 0.063	0.161 ± 0.018	79.6 ± 15.1	22.3 ± 6.0	3.21 ± 1.44
	L	11	0.380 ± 0.073	0.165 ± 0.021	76.6 ± 16.4	24.8 ± 8.0	2.13 ± 1.17
	D8	11	0.356 ± 0.058	0.156 ± 0.019	68.8 ± 9.9	20.7 ± 6.2	2.62 ± 1.32
F-value			0.496	0.624	1.716	1.004	1.844
Difference			ns	ns	ns	ns	ns

Values are mean \pm SD

U8 が最も大きい傾向にあった。また、U8 および D8 は L と比較して、 L_{MTC} は小さく、 L_{AT}/L_{GAS} は大きい傾向にあった。

図 3 に、踏切中点における地面反力 (GRF_{MID}) と跳躍高および踏切時間との関係を示した。 GRF_{MID} と跳躍高との間には、U8 ($r=0.792$, $p<0.01$), L ($r=0.769$, $p<0.01$) および D8 ($r=0.602$, $p<0.05$) とともに有意な正の相関関係が認められた。また、 GRF_{MID} と踏切時間との間には、U8 ($r=-0.841$, $p<0.01$), L ($r=-0.911$, $p<0.01$) および D8 ($r=-0.817$, $p<0.01$) と

に有意な負の相関関係が認められた。

図 4 に、 ATF_{MID} と跳躍高および踏切時間との関係を示した。 ATF_{MID} と跳躍高との間には、U8 ($r=0.638$, $p<0.05$), L ($r=0.839$, $p<0.01$) および D8 ($r=0.611$, $p<0.05$) とともに有意な正の相関関係が認められた。しかし、 ATF_{MID} と踏切時間との間には、U8 ($r=-0.873$, $p<0.01$) および L ($r=-0.917$, $p<0.01$) において有意な負の相関関係が認められたが、D8 では有意な相関関係が認められなかった。

図 5 に、 GRF_{MID} と ATF_{MID} との関係を示し

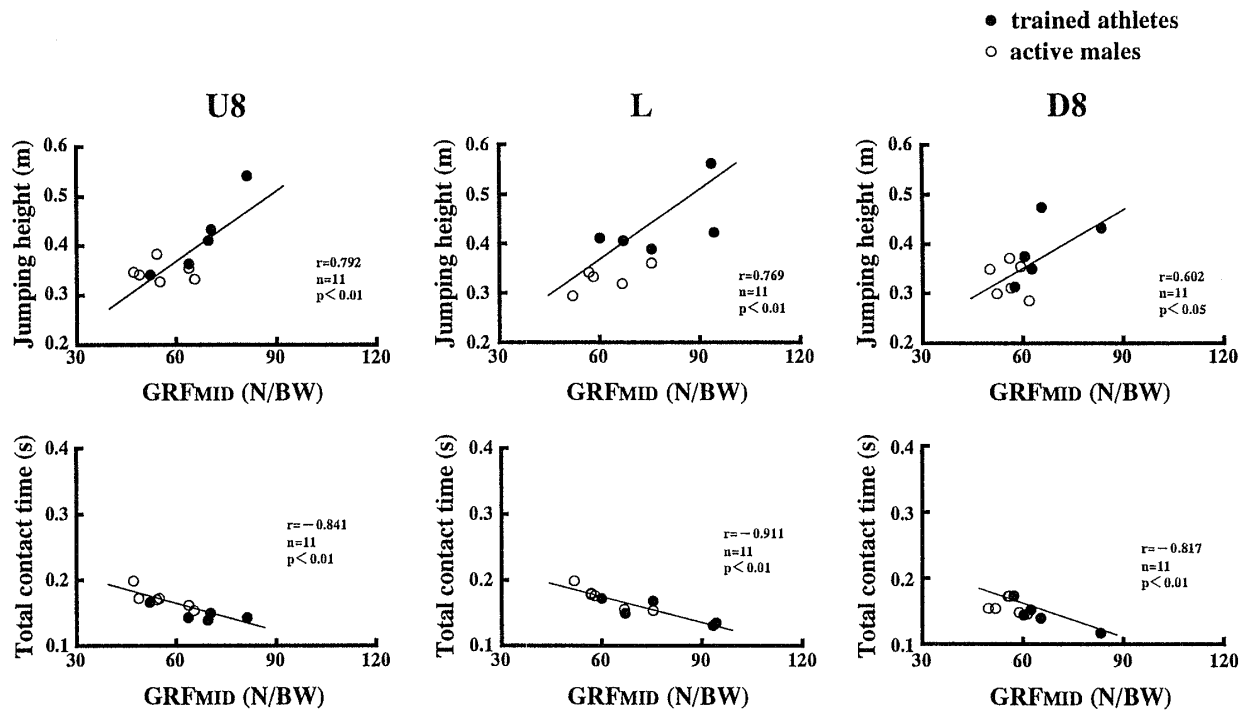


Fig. 3 Relationship of ground reaction force at midpoint (GRF_{MID}) with jumping height and with total contact time in 5RJ.

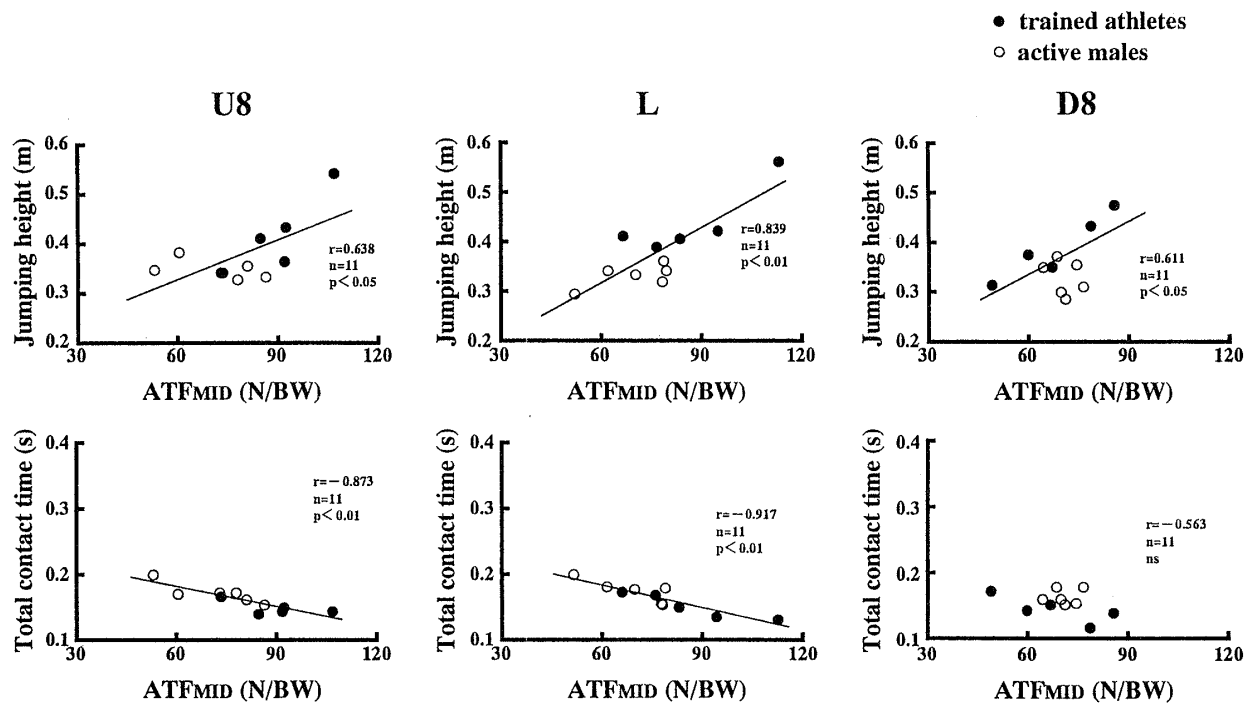


Fig. 4 Relationship of achilles tendon force at midpoint (ATF_{MID}) with jumping height and with total contact time in 5RJ.

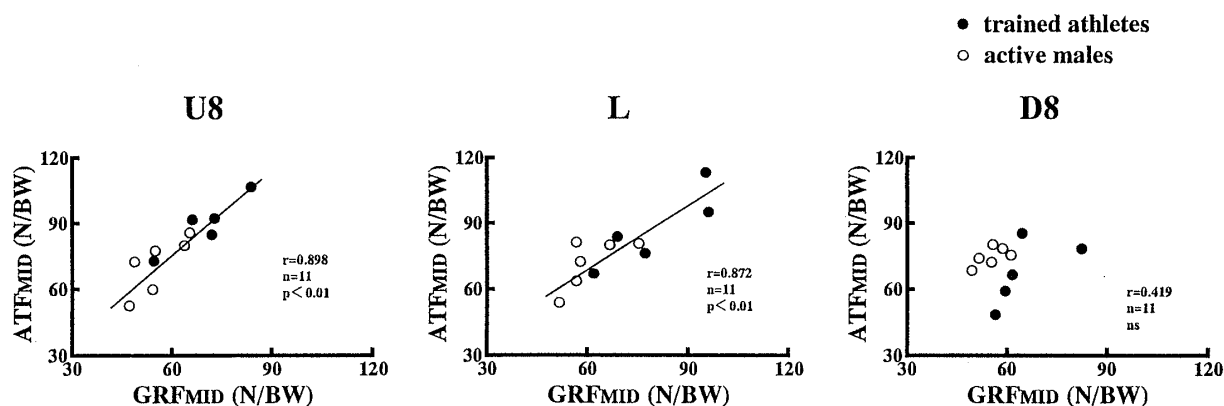


Fig. 5 Relationships between ground reaction force at midpoint (GRF_{MID}) and achilles tendon force at midpoint (ATF_{MID}) in 5RJ.

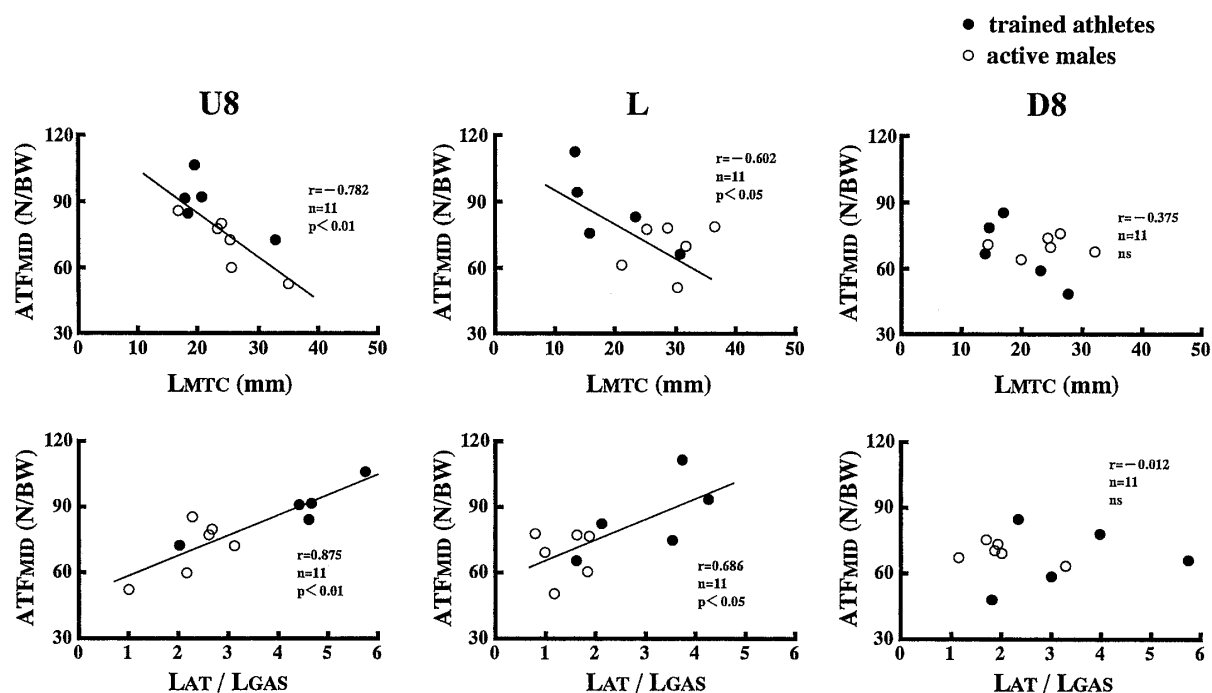


Fig. 6 Relationships of muscle-tendon complex length change (L_{MTC}) and ratio of achilles tendon length change to m. gastrocnemius length change (L_{AT}/L_{GAS}) during eccentric phase with achilles tendon force at midpoint (ATF_{MID}) in 5RJ.

た. GRF_{MID} と ATF_{MID} との間には, U8 ($r=0.898$, $p<0.01$) および L ($r=0.872$, $p<0.01$) において有意な正の相関関係が認められたが, D8 では有意な相関関係が認められなかった.

図 6 に, L_{MTC} および L_{AT}/L_{GAS} と ATF_{MID} との関係を示した. L_{MTC} と ATF_{MID} との間には, U8 ($r=-0.782$, $p<0.01$) および L ($r=-0.602$,

$p<0.05$) において有意な負の相関関係が認められたが, D8 では有意な相関関係が認められなかった. また, L_{AT}/L_{GAS} と ATF_{MID} との間には, U8 ($r=0.875$, $p<0.01$) および L ($r=0.686$, $p<0.05$) において有意な正の相関関係が認められたが, D8 では有意な相関関係が認められなかった.

Table 2 Ankle joint angle at toe-on, midpoint and displacement during eccentric phase in 5RJ

	Inclination	n	toe-on (deg)	midpoint (deg)	displacement (deg)
trained athletes	U8	5	132.8± 7.1	107.7±7.6	25.1± 9.7
	L	5	134.1±12.1	109.1±7.0	24.9±10.5
	D8	5	136.4±11.0	115.0±5.8	21.4±10.1
active males	U8	6	133.1± 4.9	102.6±6.9	30.5± 9.4
	L	6	136.4± 3.8	99.5±9.1	36.9± 7.0
	D8	6	137.9± 8.5	108.5±4.8	29.3± 6.9
Total	U8	11	133.0± 5.7	104.9±7.4	28.1± 9.4
	L	11	135.4± 8.2	103.9±9.3	31.4±10.4
	D8	11	137.2± 9.2	111.5±6.0	25.8± 9.0
F-value			0.806	3.164	0.970
Difference			ns	ns	ns

Values are mean±SD

表2に、接地時点 (toe-on) および踏切中点 (midpoint) における足関節角度および伸張局面における足関節角度変位を示した。これらの分析項目には、傾斜面間に統計的な有意差は認められなかった。しかし、被験者全員の平均値でみた場合には、接地時点の足関節角度は U8 から D8 へ変わるにつれて大きくなり、踏切中点の足関節角度は D8 が最も大きく、U8 および L はほぼ同じ値を示す傾向にあった。また、伸張局面における足関節角度変位は D8 が最も小さく、L は U8 と比較して若干大きい値を示す傾向にあった。

N. 考 察

一般に、筋のパワー出力は SSC 運動によって高まる。このように高いパワーが発揮できる理由として、跳躍運動では、反動動作中に直列弾性要素である腱に貯蔵された弾性エネルギーが短縮局面で再利用されることがあげられる (Farley, 1997)。伸張局面に貯蔵された弾性エネルギーは、踏切中点、すなわち伸張性収縮から短縮性収縮に切り替わる時点の地面反力 (GRF_{MID}) によって決まる (Bobbert et al., 1996)。このことは、U8, L および D8 のいずれの試技においても、GRF_{MID} と跳躍高との間に有意な正の相関関係が認められたことから推察できる (図3)。したがって、足関節の貢献度が大きいリバウンドジャンプにおいても、弾性エネルギーを再利用し、跳躍高を高めるためには、着地面の傾斜に関係なく、GRF_{MID} を大きくすることは極めて重要な要因の一つであると考えられる。

ところで、このような足関節の貢献度が大きいリバウンドジャンプでは、ATF_{MID} がどのような役割を果たしているのかについては興味のあるところである。そこで本研究では、最初に U8, L および D8 における ATF_{MID} と跳躍高を比較し、ついで ATF_{MID} と跳躍高との関係、および ATF_{MID} と GRF_{MID} との関係について検討した。その結果、被験者全員の平均値でみた場合には、D8 は U8 および L に比較して、ATF_{MID} は小さく、跳躍高は低い傾向が認められた (表1)。また、ATF_{MID} と跳躍高との間には、U8, L および D8 のいずれの試技においても有意な正の相関関係が認められたが (図4)、ATF_{MID} と GRF_{MID} との間には、D8 においてのみ有意な正の相関関係は認められなかった (図5)。これらの結果は、着地面の傾斜に関係なく、ATF_{MID} はリバウンドジャンプの跳躍高を高めるための重要な要因の一つになることを示すものである。しかし、下向き斜面のように、ATF_{MID} を大きくできなかったり、あるいは ATF_{MID} と GRF_{MID} との間に有意な相関関係が認められなかったことを考慮すれば、着地面の傾斜によってアキレス腱にかかる負

荷は異なることが推察される。この原因の一つとして、傾斜面に沿って上向きに作用する摩擦力が、上向き斜面および下向き斜面の相違によって生じる足関節トルクの差に影響を及ぼした可能性が考えられるが、このことについては今後さらに検討する必要がある。

一方、リバウンドジャンプでは、接地時に身体の落下による運動エネルギーを受け止めるために足関節は背屈し、膝関節は屈曲する。そのことによって、MTCは素早く伸張する。しかし、MTCが伸張されたとしても、腓腹筋のstiffnessの大きさによって、MTCを構成する腓腹筋およびアキレス腱の伸張量は異なるものと考えられる。Kurokawa et al. (1997)は、垂直跳におけるMTCの動態を超音波断層法を用いて検討した。その結果、動作の前半局面において筋は短縮性の収縮を行い、この時の張力によって腱は引き伸ばされ(MTC全長は一定)、また後半局面において筋は等尺性に張力を発揮し、この間に引き伸ばされていた腱が短縮するときのエネルギーを利用して垂直跳が行われると報告した。本研究において腓腹筋は典型的なSSC収縮を行っていたが(図2)、Kurokawa et al. (1997)の研究結果を基にすると、リバウンドジャンプにおけるSSC運動の有効性を十分に引き出すためには、伸張局面において腓腹筋のstiffnessを高めることによってアキレス腱を伸張させ、弾性エネルギーの貯蔵・再利用機構を効果的に機能させることが重要であると考えられる。

そこで本研究では、傾斜面でのリバウンドジャンプにおける腓腹筋のstiffnessレベルを、 L_{AT}/L_{GAS} を用いて検討した(Lieber, 1992)。その結果、被験者全員の平均値でみた場合には、U8およびD8はLと比較して、 L_{AT}/L_{GAS} が大きい傾向にあった(表1)。このことは、傾斜面での試技は平地と比較して、腓腹筋のstiffnessが高まる可能性のあることを示唆するものと考えられる。しかし前述したように、 ATF_{MID} は、U8が大きく、D8は小さい傾向を示した(表1)。したがって、着地面が上向き斜面か下向き斜面かによって、 L_{AT}/L_{GAS} が大きくなってもアキレス腱に

かかる張力は異なる可能性のあることが推測される。本研究ではこの可能性を検討するために、 L_{AT}/L_{GAS} と ATF_{MID} との関係について検討した。その結果、両者の間には、U8およびLでは有意な正の相関関係が認められたが、D8では認められなかった(図6)。このことは、上向き斜面や平地では、 L_{AT}/L_{GAS} を大きくすることが ATF_{MID} を大きくするための重要な条件になることを示唆するものである。なお下向き斜面では、 L_{AT}/L_{GAS} を大きくしても ATF_{MID} は必ずしも大きくならないことが認められた。この原因として、下向き斜面では上向き斜面および平地と比較して、接地後足関節の背屈動作が制限されるために、MTC全長に大きな伸張負荷がかからなかったこと、および腓腹筋が足関節の底屈よりも膝関節の屈曲に優先的に作用していること(尹ほか, 1997)などの可能性が考えられるが、これらについては今後さらに検討する必要がある。

本研究では、当初、U8はLおよびD8と比較して、MTC全長の伸張量を大きくすることによって、伸張反射機構を有効に機能させ、腓腹筋のstiffnessおよびアキレス腱張力を高めることができるのではないかと考えていた。しかし、U8はLおよびD8と比較して、 L_{AT}/L_{GAS} および ATF_{MID} は大きい傾向にあったが、MTCの伸張量はLよりも小さい傾向を示した(表1)。また、U8およびLにおいては、 L_{MTC} と ATF_{MID} との間に有意な負の相関関係が認められた(図6)。これらのことは、上向き斜面および平地においては、腓腹筋のstiffnessが高まることによって筋長の変化が小さくなり、その結果、MTC全長の伸張量を小さくして、 ATF_{MID} を大きくできたことを示すものである。また、上向き斜面のようにMTCが伸張されるような条件下でリバウンドジャンプを行ったとしても、腓腹筋のstiffnessを平地より大きくできることによって筋長の変化をさらに小さくし、それがMTC全長の伸張量を小さくして、 ATF_{MID} を大きくするのに有効に作用していることを示すものである。

上述のように、U8はLに比較してMTCの伸張量が小さい傾向にあることが認められた。本研

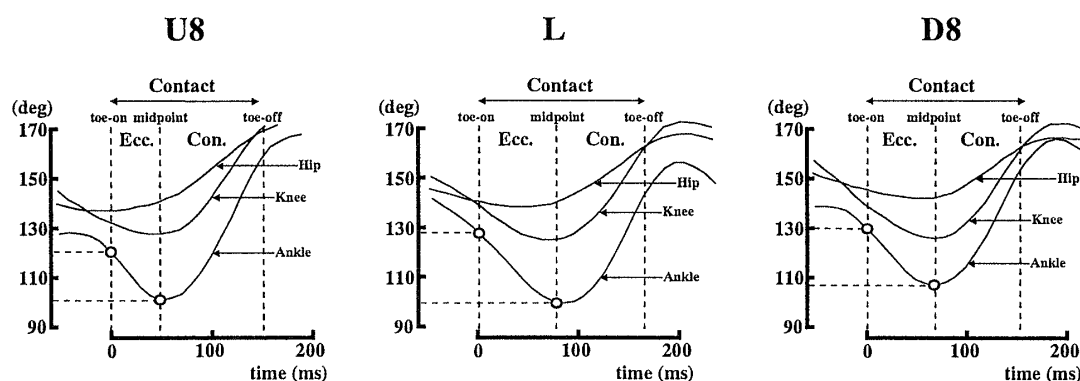


Fig. 7 Typical examples of angular displacement of hip, knee and ankle joints in 5RJ.

究では、これを間接的に証明するために、接地時点および踏切中点における足関節角度および伸張局面における足関節角度変位を比較した。その結果、被験者全員の平均値でみた場合には、U8はLと比較して、足関節角度が同じか若干背屈した状態で接地する傾向のあること、および足関節角度変位も若干小さい傾向のあることが認められた(表2)。ドロップジャンプでは、接地時に大きな衝撃が加わるので、この衝撃を受け止め吸収するためには、足関節まわりの筋群の予備緊張を高め、できるだけ背屈した状態で接地することが望ましいと言われている(図子・高松, 1996)。したがって、これらのことを基にすると、上向き斜面では、足関節がより背屈した状態で接地できるので、大きな衝撃に対応できる可能性のあること、および素早く底屈動作に移ることができるので、MTCが過度に伸張されない可能性のあることなどが推察される。また、このことは、図7に示した典型的な1名の被験者における足関節の角度変位曲線からも推察される。すなわち、U8はLに比較して、接地してから底屈動作を開始するまでに要する時間が短いことが認められる。

上述の結果は、リバウンドジャンプでのMTCを構成する筋および腱の伸張量は、着地面の傾斜角度によって異なることを示すものである。本研究の結果を基にすると、上向き斜面は平地と同じかそれ以上に、 L_{AT}/L_{GAS} を大きくして L_{MTC} を小さくすることによって、 ATF_{MID} を大きく

できる可能性が認められた。 ATF_{MID} は GRF_{MID} と有意な正の相関関係があり、それらは跳躍高と有意な正の相関関係があることを考慮すると、プライオメトリックトレーニング手段の一つとしてリバウンドジャンプを用いる際には、平地に加えて上向き斜面で行うことも推奨される。しかし、そのためには、上向き斜面および平地でのリバウンドジャンプを用いたトレーニング実験を通して、 L_{AT}/L_{GAS} や L_{MTC} などにどのような差異が生じるのかについてさらに検討することが必要である。また、本研究では、全ての被験者において一定の弾性定数を用いてアキレス腱の長さ変化を推定していることから、今後MRI(核磁気共鳴画像法)を用いてアキレス腱の長さおよび横断面積を個人ごとに測定することも必要である。

V. 要 約

本研究では、傾斜面でのリバウンドジャンプにおける腓腹筋のstiffnessがアキレス腱張力に及ぼす影響を明らかにするために、 L_{AT}/L_{GAS} (アキレス腱と腓腹筋の伸張比)と ATF_{MID} (踏切中点におけるアキレス腱張力)との関係について検討した。5名の大学陸上競技跳躍および投てき競技者、および6名の一般成人男子に、その場でのリバウンド型5回連続跳躍をU8(上向き斜面)、L(平地)およびD8(下向き斜面)の3つの着地面で行わせた。

本研究のおもな結果は以下の通りである。

- ① 跳躍高はU8およびLがD8と比較して高

い傾向にあった。ATF_{MID}はU8が大きい傾向にあった。また、U8およびD8はLと比較して、L_{MTC}（腓腹筋—アキレス腱複合体の長さ変化）は小さく、L_{AT}/L_{GAS}は大きい傾向にあった。

② U8, L, D8のいずれにおいても、GRF_{MID}（踏切中点における地面反力）およびATF_{MID}と跳躍高との間に有意な正の相関関係が認められた。

③ U8およびLにおいては、GRF_{MID}とATF_{MID}の間およびL_{AT}/L_{GAS}とATF_{MID}の間に有意な正の相関関係が認められた。また、L_{MTC}とATF_{MID}の間に有意な負の相関関係が認められた。

上述の結果は、上向き斜面および平地面においては、腓腹筋のstiffnessを高めることによって、アキレス腱張力を大きくできることを示唆するものである。また、上向き斜面は平地面と同じかそれ以上に、L_{AT}/L_{GAS}を大きくでき、その結果、MTCの伸張量を小さくしても、ATF_{MID}を大きくできる可能性も示唆するものである。

文 献

- 阿江通良・湯海鵬・横井孝志（1992）日本人アスリートの身体部分慣性特性の推定。バイオメカニズム。11: 23-33.
- Asmussen, E. and Bonde-Petersen, F. (1974) Storage of elastic energy in skeletal muscles in man. *Acta Physiol. Scand.* 91 : 385-392.
- Aura, O. and Komi, P. V. (1986) Effects of prestretch intensity on mechanical efficiency of positive work and on elastic behavior of skeletal muscle in stretch-shortening cycle exercises. *Int. J. Sports Med.* 7: 137-143.
- Bobbert, M. F., Gerritsen, K. G. M., Litjens, M. C. M., and van Soest, A. J. (1996) Why is countermovement jump height greater than squat jump height? *Med. Sci. Sports Exerc.* 28: 1402-1412.
- Bobbert, M. F., Huijing, P. A., and van Ingen Schenau, G. J. (1987) Drop jumping I. The influence of jumping technique on the biomechanics of jumping. *Med. Sci. Sports Exerc.* 19: 332-338.
- Bobbert, M. F., Huijing, P. A., and van Ingen Schenau, G. J. (1986) A model of the human triceps surae muscle-tendon complex applied to jumping. *J. Biomechanics*. 19: 887-898.
- Cavagna, G. A., Citterio, G., and Jacini, P. (1975) The additional mechanical energy delivered by the contractile component of the previously stretched muscle. *J. Physiol.* 251: 65P-66P.
- Edman, K. A. P., Elzinga, G., and Noble, M. I. M. (1982) Residual force enhancement after stretch of contracting frog single muscle fibres. *J. Gen. Physiol.* 80: 769-784.
- Farley, C. T. (1997) Role of the stretch-shortening cycle in jumping. *J. Appl. Biomech.* 13: 436-438.
- Fukashiro, S., Komi, P. V., Järvinen, M., and Miyashita, M. (1995) In vivo achilles tendon loading during jumping in humans. *Eur. J. Appl. Physiol.* 71: 453-458.
- Fukashiro, S., Komi, P. V., Järvinen, M., and Miyashita, M. (1993) Comparison between the directly measured achilles tendon force and the tendon force calculated from the ankle joint moment during vertical jumps. *Clin. Biomech.* 8: 25-30.
- Gollnick, P. D., Armstrong, R. B., Saubert IV, C. W., Piehl, K., and Saltin, B. (1973) Effect of training on enzyme activity and fiber composition of human skeletal muscle. *J. Appl. Physiol.* 34: 107-111.
- Grieve, D. W., Pheasant, S., and Cavanagh, P. R. (1978) Prediction of gastrocnemius length from knee and ankle joint posture. In: Asmussen, E. and Jorgensen, K., *Biomechanics VI-A*, University Park Press, Baltimore, pp. 405-412.
- Kurokawa, S., Honglinang, Y., Nagareda, H., Funato, K., and Fukunaga, T. (1997) Muscle fiber behavior of gastrocnemius during vertical jumping. XVIth ISB Congress, Abstract pp. 233.
- Lieber, R. (1992) *Skeletal muscle structure and function*. Williams and Wilkins, Baltimore, Maryland, pp. 112-139.
- Morgan, D. L. (1977) Separation of active and passive components of short range stiffness of muscle. *Am. J. Physiol.* 232: 45-49.
- Moritani, T., Oddsson, L., and Thorstensson, A. (1990) Differences in modulation of the gastrocnemius and soleus H-reflexes during hopping in man. *Acta Physiol. Scand.* 138: 575-576.
- 高松 薫・宮坂雅昭・関子浩二・石島 繁（1988）各種台高からのデプスジャンプにおける跳躍高と踏切各局面の力学量。昭和62年度日本体育協会スポーツ科学研究報告 NO. VIII プライオメトリックリアクティフ筋力トレーニングに関する研究—第1報—,

- 56-62.
- Thys, H., Cavagna, G. A., and Margaria, R. (1975) The role played by elasticity in an exercise involving movements of small amplitude. *Pflugers Arch.* 354: 281-286.
- van Ingen Schenau, G. J., Bobbert, M. F., and Haan, A. de. (1997) Does elastic energy enhance work and efficiency in the stretch-shortening cycle? *J. Appl. Biomech.* 13: 389-415.
- van Ingen Schenau, G. J. (1984) An alternative view to the concept of utilization of elastic energy in human movement. *Human Movement Sciences.* 3: 301-336.
- Voigt, M., Bojsen-Møller, F., Simonsen, E. B., and Dyhre-Poulsen, P. (1995a) The influence of tendon young's modulus, dimensions and instantaneous moment arms on the efficiency of human movement. *J. Biomechanics.* 28: 281-291.
- Voigt, M., Simonsen, E. B., Dyhre-Poulsen, P., and Klausen, K. (1995b) Mechanical and muscular factors influencing the performance in maximal vertical jumping after different prestretch loads. *J. Biomechanics.* 28: 293-307.
- Wells, R. P. and Winter, D. A. (1980) Assessment of signal and noise in the kinematics of normal, pathological and sporting gaits. In: *Human Locomotion I* (Proceedings of the first biannual conference of the Canadian Society of Biomechanics), pp. 92-93.
- Winter, D. A. (1990) *Biomechanics and motor control of human movement.* 2nd edition, A Wiley-Interscience Publication, New York, pp. 75-102.
- Yamaguchi, G. T., Sawa, A. G. U., Moran, D. W., Fessler, M. J., and Winters, M. (1990) A survey of human musculotendon actuator parameters. In: *Winters and Woo, Multiple muscle systems*, Springer, New York, pp. 717-773.
- 尹 聖鎮・岡田英孝・藤井範久・高松 薫 (1998) 傾斜面での伸張-短縮サイクル運動における腓腹筋の stiffness 特性: パワー系競技者と一般健常者の比較. *体力科学.* 47: 703.
- 尹 聖鎮・岡田英孝・藤井範久・高松 薫 (1997) 傾斜面での各種跳躍運動における下肢関節の貢献度およびアキレス腱の発揮張力. *体力科学.* 46: 784.
- 図子浩二・高松 薫 (1996) リバウンドドロップジャンプにおける着地動作の違いが踏切中のパワーに及ぼす影響-膝関節に着目して-. *体力科学.* 45: 209-218.
- 図子浩二・高松 薫 (1995) リバウンドドロップジャンプにおける踏切時間を短縮する要因-下肢の各関節の仕事と着地に対する予測に着目して-. *体育学研究.* 40: 29-39.

(平成10年12月4日受付)
(平成11年7月17日受理)