

原 著

中年男性におけるなわとび時の跳躍周期に依存した筋，腱-弾性系関与に関する筋電図学的研究

山口英峰^{*1} 宮川 健^{*2} 小野寺 昇^{*2}

要 約

本研究は，中年男性におけるなわとび時の跳躍周期に依存した筋，腱-弾性系関与の影響について明らかにすることを目的とした．12名の被験者が本研究に参加した．被験者は2つのグループ（Young age 群：YA 群，Middle age 群：MA 群）に分類された．YA 群と MA 群の平均年齢は，それぞれ 22 ± 0.4 歳（平均値 \pm 標準偏差）， 41.5 ± 5.2 歳であった．なわとびのテンポは100~170回/分であった．測定項目は床反力と表面筋電図であった．筋と腱の弾性系関与は，Residual time（RT：筋放電の消失から足が床から離れる地点までの時間間隔）と $RT_{integrate}$ （RT が観察される区間の床反力の積分値）で評価した．さらに $\%RT$ と $\%RT_{integrate}$ は，接地時間と床反力の全力積に対する RT の割合を求めた．接地時間と $\%RT$ ， $\%RT_{integrate}$ の関係について検討すると，接地時間と $\%RT$ ， $\%RT_{integrate}$ の間に有意な負の相関関係が観察された．MA 群の傾きは，YA 群と比較して低い値を示した．傾きが低いことは，跳躍周期が変化しても筋，腱-弾性系関与と割合はあまり変化しないことを示している．これらの結果は，下腿三頭筋群の弾性系は40歳代で低下し始めていることを示唆する．

緒 言

我々は，歩行や階段の下りなど様々な反動動作を日常生活において活用している．反動動作の特徴は，筋の短縮性収縮に先立って伸張性収縮が生じることである．このことによって弾性エネルギーが直列弾性要素に蓄えられ，次の短縮時にエネルギーの一部が放出されると考えられている¹⁻³⁾．Bosco and Komi⁴⁾ は，4歳~73歳までの計226名（男子113名，女子113名）の被験者を対象に，年齢と反動動作との関係について反動なしの垂直跳び（SJ）と反動を利用した垂直跳び（CMJ）を用いて検討し， Δh （CMJ-SJ）の結果からジャンプ時の弾性エネルギーの利用率が加齢に伴い低下することを報告した．つまり，反動動作の活用に加齢が影響するという興味深い知見である．秋谷と根本⁵⁾ は，ホッピング動作時の中高年者の伸長-短縮サイクルに関して，加齢に伴い筋，腱-弾性系の利用が低下することを報告した．Kuboら⁶⁾ は，20日間のベッドレスト時の不活動から，筋量及び筋機能の低下のみならず腱組織の機能も筋同様に低下することを明らかにした．これらの知見から，筋，腱-弾性系としての利用率は，

加齢や不活動に伴い低下すると推測される．

筋や腱組織の弾性については，測定機器の進歩に伴い様々な新しい方法が開発され，多くの研究が報告されてきた．Fukunagaら⁷⁾ は超音波法を用いて歩行時の筋と腱組織の動態を観察し，離地前に内側腓腹筋の筋放電はみられないものの，筋，腱複合体及び腱組織の長さは急激に短くなることを示した．一方，Fukashiroら⁸⁾ はヒトの腱にトランスデューサーを埋め込み，ホッピング中のアキレス腱張力を測定し，筋放電が消失しても腱はなお張力を発揮し続けていることを報告した．これらの報告は，速い周期において伸筋が張力を発揮すべき伸展相に筋放電が消失することを示している．これらの報告から，身体上昇期に筋放電が消失しても運動が遂行できる要因として，筋，腱-弾性系の関与が推測される．我々は，身体上昇期の外力と筋放電消失の時間間隔（RT）を筋，腱-弾性系関与の指標として表わし，なわとびにおける跳躍周期と筋，腱-弾性系関与の割合について検討し，跳躍周期が速くなるに従い弾性系関与の割合が高くなることを明らかにした⁹⁾．このことから，加齢に伴い筋，腱-弾性系関与の割合が低下するならば，RT も低下すると推測される．RT

*1 川崎医療福祉大学大学院 医療技術学研究科 健康科学専攻 *2 川崎医療福祉大学 医療技術学部 健康体育学科
（連絡先）山口英峰 〒980-8575 仙台市青葉区星陵町2番1号 東北大学

の有意な低下が認められれば，加齢による筋，腱-弾性系の低下を筋電図学的に明らかにすることができると考える。

そこで本研究は，なわとび時の跳躍周期に依存した筋，腱-弾性系関与の割合を指標にして，加齢が筋，腱-弾性系関与の割合低下に及ぼす影響について筋電図学的に明らかにすることを目的とした。

方 法

a . 対象

健康な成人男性12名を被験者とした。身体特性は，年齢 31.8 ± 10.8 歳（平均値 \pm 標準偏差），身長 172.4 ± 4.9 cm，体重 65.2 ± 7.5 kgであった。被験者の年齢分布は21歳から49歳であったため，若年男性（Young Age : YA 群）6名，及び中年男性（Middle Age : MA 群）6名に分類して検討した。YA 群の身体的特性は，年齢 22 ± 0.4 歳（平均値 \pm 標準偏差），身長 172.7 ± 5.6 cm，体重 60.0 ± 5.3 kgであった。MA 群の身体的特性は，年齢 41.5 ± 5.2 歳（平均値 \pm 標準偏差），身長 171.5 ± 3.9 cm，体重 70.3 ± 5.6 kgであった。全ての被験者に本研究の目的，方法を十分説明し，研究の趣旨を理解したうえで研究に参加することの同意を得た。

b . なわとびの測定条件

なわとびは，両足での一回旋一跳躍とした。なわとびの跳躍周期は，単相性波形である100, 110, 120, 130, 150, 170 回/分（skip per minutes : SPM）の6つを設定した^{9,10}。被験者は，実験に先立ちリズムに合わせたなわとび練習を行い，メトロノームのリズムとなわとびの跳躍周期が一致することを一人一人確認した後，6種類の跳躍周期をメトロノーム（SQ-77, 服部セイコー）のリズムに合わせて跳躍した。全ての跳躍周期で跳躍高が等しくなるように指示した。全被験者は同じなわ（asics 社製 jumping rope INF）を使用し，各個人が跳びやすいなわの長さに調節した。また，全ての被験者の靴（asics 社製 GELLIQUE）を統一した。

c . 測定項目

床反力はフォースプレート（Kistler, 9281C/CA, Switzerland）を用いて計測した。計測された床反力の信号から接地時間，滞空時間，垂直方向成分の床反力（以下，床反力とする）の最大値を求めた。膝関節及び足関節角度変化は，ゴニオメーター（電気計測販売 KK, GONIOMETER XM 180）を用いて記録した。関節角度は，立位姿勢を0度としてそれぞれの角度変位を評価した。筋電図は，表面電極

（5 mm ϕ , 白金電極）を用い，双極誘導にて右脚の腓腹筋（medial head of gastrocnemius : MG），ヒラメ筋（soleus : SOL）の筋電位をマルチテレメータシステム（日本光電, WEB-5000, 時定数 $\tau = 0.03$ sec）によって誘導した。電極間距離は20mmとした。電極間抵抗は10k以下であった。それぞれの信号は，1000HzでA/D変換（PowerLab/800, AD instruments）した後，パーソナルコンピュータに取り込んだ。全ての試技において，メトロノームのリズムと跳躍が合致した10跳躍を測定値とした。

d . RT と $\%RT_{integrate}$ の算出

先行研究⁹)に従い，筋放電の消失から足が床から離れる地点までの時間間隔（Residual Time : RT）を筋，腱-弾性系が外力発揮に寄与する時間的要素と推測して検討した（図1）。また，RTが観察される区間の床反力の積分値（ $RT_{integrate}$ ）を筋，腱-弾性系が外力発揮に寄与する量的要素と推測して検討した。 $\%RT$ は，接地時間に対するRTの割合

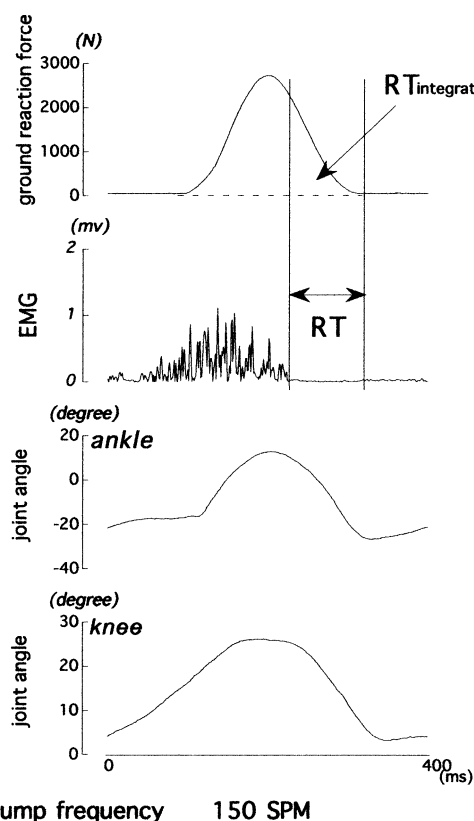


図1 The measurement methods of the ground reaction force, RT and $RT_{integrate}$. RT(Residual Time)=a time difference between the vanishing point of muscle discharge in lag from disappearance of rectified EMG and finish of ground reaction force wave. $RT_{integrate}$ =integration of ground reaction force while RT appear.

を求めた。 $\%RT_{integrate}$ は、床反力の全力積に対する $RT_{integrate}$ の割合を求めた。 $\%RT$, $\%RT_{integrate}$ は、MG, SOL についてそれぞれ算出した。筋放電の消失地点は、先行研究^{11,12)}を参考に、安静時筋放電の標準偏差に5を掛けた値を下回った点とした。

e. 統計処理

各測定値は、全て平均値±標準偏差で表した。跳躍周期の変化に対するそれぞれのパラメーターは、one-way ANOVA with repeated measurementsで検定し、有意性が認められた場合は、Student-Newen-Keuls 検定を用いて post hoc テストを行った。YA 群と MA 群の各測定値の変化の差は、two-way ANOVA with repeated measurementsで検定した。接地時間と $\%RT$, $\%RT_{integrate}$ の関係は単相関と単回帰分析で検討した。危険率 (p) 5%未満を有意な差とした。

結 果

a. 接地時間と $\%RT$, $\%RT_{integrate}$ の関連について
図2に YA 群 (21歳) と MA 群 (49歳) の典型

的な筋放電パターンを示した。同じ跳躍周期 (170 SPM) にも関わらず、MA 群では YA 群と比較して MG, SOL とともに筋放電消失点が遅くなった。つまり、RT は、YA 群より MA 群が短いことを示す。

図3に、接地時間と $\%RT$, $\%RT_{integrate}$ の関係について MG, SOL のそれぞれについて示した。全ての測定項目に対して有意な負の相関関係が観察された ($p < 0.05$)。表1は、接地時間と $\%RT$, $\%RT_{integrate}$ の関係について相関係数と傾きを個人別に検討したものである。年齢が40歳をこえる被験者 g, l の傾きについてみると、他の被験者と比較して小さな値を示した。

b. 跳躍周期と力学的な測定項目との関連について

図4に跳躍周期と力学的な測定項目の関係について示した。体重あたりの床反力の最大値 (a)、膝関節の最大屈曲角度 (b)、足関節の最大背屈角度 (c) と接地時間 (d) は、MA 群、YA 群ともに跳躍周期の違いに対して有意に変化した ($p < 0.01$)。一方、滞空時間 (e) は、MA 群において有意な

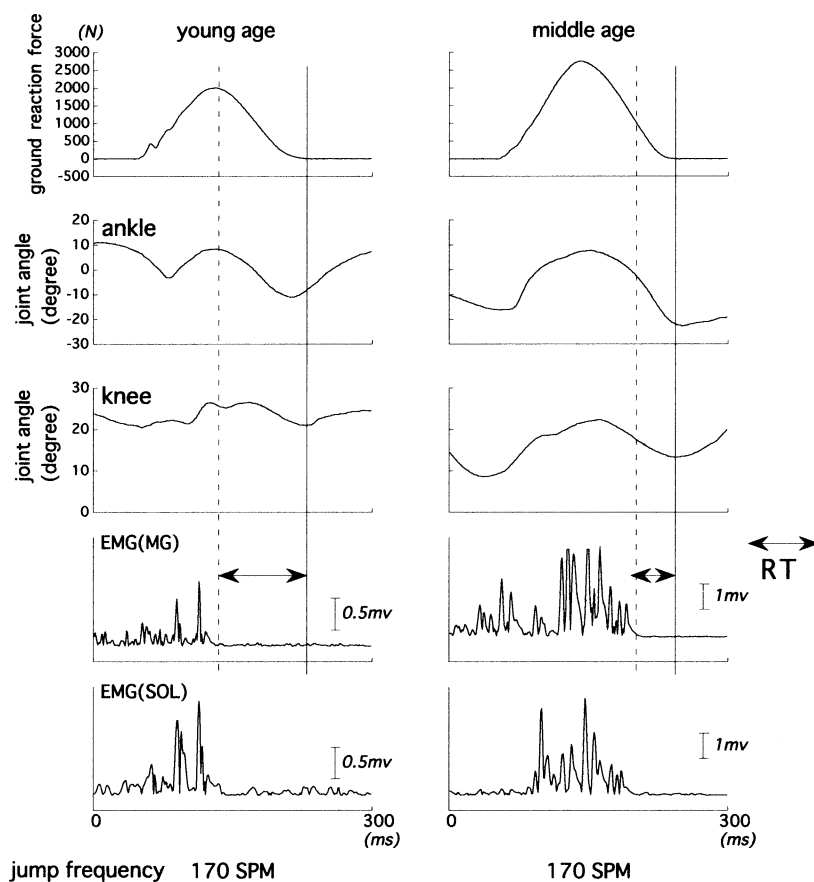


図2 A typical record for ground reaction force, electrogoniogram of ankle joint and knee joint, EMG of adult and middle age at 170 SPM.

表1 A correlation coefficient and the slop of %RT and %RT_{integrate} on the each subjects.

condition subject	age (yrs)	%RT (MG)		%RT (SOL)		%RT _{int} (MG)		%RT _{int} (SOL)	
		r	slop	r	slop	r	slop	r	slop
Young age	a	0.937	0.117	0.934	0.121	0.866	0.105	0.877	0.111
	b	0.978	0.096	0.965	0.112	0.958	0.082	0.917	0.109
	c	0.959	0.070	0.919	0.090	0.886	0.047	0.749	0.071
	d	0.937	0.117	0.934	0.121	0.866	0.105	0.877	0.111
	e	0.866	0.085	0.888	0.097	0.749	0.064	0.813	0.083
	f	0.851	0.110	0.906	0.100	0.764	0.109	0.842	0.093
Middle age	g	0.984	0.045	0.995	0.066	0.971	0.028	0.946	0.054
	h	0.901	0.090	0.901	0.062	0.814	0.085	0.853	0.057
	i	0.856	0.084	0.930	0.118	0.965	0.127	0.927	0.112
	j	0.979	0.128	0.972	0.097	0.961	0.106	0.890	0.114
	k	0.941	0.142	0.956	0.135	0.772	0.092	0.841	0.117
	l	0.852	0.024	0.967	0.064	0.895	0.009	0.865	0.056

%RT_{int} = %RT_{integrate}

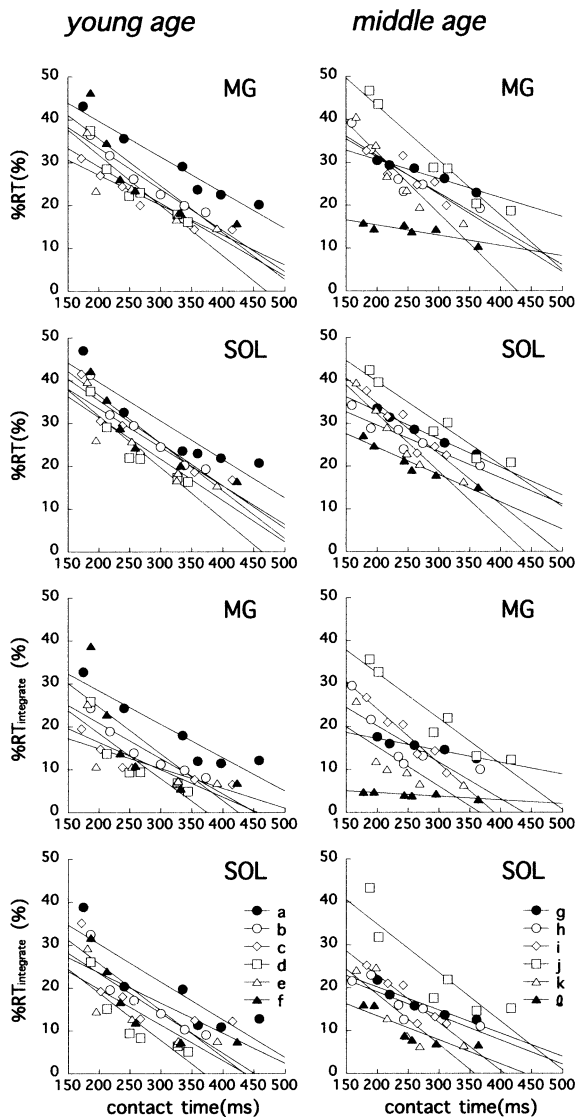


図3 Change of %RT and %RT_{integrate} at different contact time.

変化が観察された。膝関節角度と足関節角度において MA 群と YA 群の群間に有意な差が観察された ($p < 0.05$)。その他の測定項目に関しては MA

群と YA 群との間に有意な差はみられなかった。

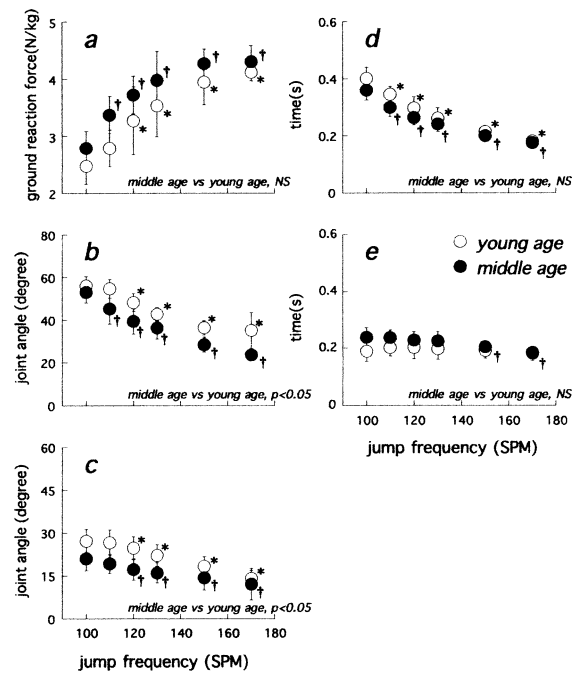


図4 Group data for mechanical parameters at various jump frequencies during hopping.

a: ground reaction force, b: angle of knee joint, c: angle of ankle joint, d: contact time, e: flight time. Values are mean \pm SD. * shows significant difference to the 100 SPM ($p < 0.05$).

考 察

被験者に全ての跳躍周期で跳躍高をそろえることを指示したため、滞空時間と接地時間において、MA 群と YA 群の間に有意差は観察されなかった。これらのことから MA 群と YA 群は、ほぼ同じ跳躍高でなわとびが行われたと考えられた。さらに、滞空時間において MA 群では 100 SPM に対して 150 SPM と 170 SPM で有意に低値を示した。これらのことから、MA 群は速いリズムにおいて他の周期と同じ高さで跳躍することが困難になったと推測された。

接地時間と%RT, %RT_{integrate} の関係については, 全ての測定項目に対して有意な負の相関関係が観察された. MA 群と YA 群の接地時間に対する %RT と %RT_{integrate} の変化を比較すると, MA 群の傾きは YA 群の傾きよりも低い値を示した. そこで, さらに詳細に検討するために, 接地時間と %RT, %RT_{integrate} の関係について個人の相関係数と傾きについてに検討した. 特に年齢が45歳をこえる被験者 g, l の傾きが他の被験者と比較して小さな値を示した. 傾きが低いことは, 跳躍周期が変化しても筋, 腱-弾性系関与割合はあまり変化しないことを示している. これらの結果は, 加齢による下腿三頭筋の筋, 腱-弾性系関与割合の質的变化, さらに弾性系の利用率にも個人差が存在することを推測させる. これまで, 加齢と筋力の関係については数多くの研究が行われており, 加齢に伴い脚筋力¹³⁻¹⁵⁾, 握力¹⁶⁾などの筋力減少が報告されている. 一方, 腱の張力やスティフネス(硬さ, あるいは剛性)も年齢の影響を受け, 加齢に伴い低下することが報告されている¹⁷⁾. 筋や腱の質的な変化により筋, 腱-弾性系の指標とした RT が低下し, MA 群は速い跳躍周期での跳躍が困難になったと推測される. このことから, 個人の傾きが異なることは, 加齢と個人差の影響によるものであることを示唆し, 40歳代においてすでに下腿三頭筋の RT が選択的に低下しはじめていることを示唆する. これらのことから, 下腿三頭筋群が加齢の影響を受け低下し, このことが筋, 腱-弾性系関与の割合低下に結び付いたと推測された.

小野寺と森本¹⁸⁾ は, 成長にともなう肘関節屈曲張力の筋弛緩様式について筋電図及び張力曲線を指標に検討し, 成人では筋放電の消失が張力低下に先行すること, 児童では筋放電が残存することを報告し, 筋放電が残存する要因として最終共通路に対する抑制系未発達の影響を示唆した. 山口ら¹⁹⁾ は, 習慣性の捻挫をもった被験者を対象に, 同様の手法を用いて下腿三頭筋の筋弛緩様式について検討し, 捻挫

をもった被験者は児童と同様に筋放電が残存することを明らかにした. つまり, 筋放電の残存は筋や関節などにかかる負荷を減少させようとする保護作用が働いている可能性が考えられる. これらのことから, 本研究においても加齢にともなう筋, 腱-弾性系関与の割合低下には, あえて速い跳躍周期には対応しないことで筋や関節などの保護作用として働き, このことが RT の制御として筋電図学的に観察されたものと考えられる. 今後, 上位中枢と筋, 腱-弾性系の関わりについて検討する必要があると考えられた.

ま と め

加齢に伴い筋, 腱-弾性系が衰えることから, なわとびにおける筋, 腱-弾性系の関与も加齢に伴い低下すると考えられる. このことから, なわとび時の跳躍周期に依存した筋, 腱-弾性系関与の割合を指標にして, 若年成人と中年男性の RT を比較し, 加齢が筋, 腱-弾性系関与の割合低下に及ぼす影響について筋電図学的に明らかにした.

接地時間と%RT, %RT_{integrate} の傾きは, 40歳をこえる被験者 g, l の傾きが他の被験者と比較して小さな値を示した. このことは, 40歳代においてすでに下腿三頭筋の RT が選択的に低下しはじめていることを示唆する. これらのことから, 下腿三頭筋群が加齢の影響を受け低下し, このことが筋, 腱-弾性系関与の割合低下に結び付いたと推測された.

本研究に快く御協力して頂いた被験者の皆様方に感謝申し上げます. 本研究を遂行するにあたり, 御協力頂きました川崎医療福祉大学枝松千尋先生, 国立循環器病センター山元健太先生, 川崎医療福祉大学8期生木村純一氏, 石丸幸次氏, 木葉智広氏, 木村純一氏, 小牧功憲氏, 森夕夏氏に深謝致します. 本研究は平成14年度川崎医療福祉大学プロジェクト研究助成(代表者 小野寺昇)によって実施された.

文 献

- 1) Asmussen E, Bonde-Petersen F: Storage of elastic energy in skeletal muscles in man. *Acta Physiologica Scandinavica*, **91**, 385-392, 1974.
- 2) Komi PV and Bosco C: Utilization of stored elastic energy in leg extensor muscles by men and women. *Medicine and Science in Sports*, **10**, 261-265, 1978.
- 3) Bosco C and Komi PV: Potentiation of the mechanical behavior of the human skeletal muscle through prestretching. *Acta Physiologica Scandinavica*, **106**, 467-472, 1979.
- 4) Bosco C and Komi PV: Influence of aging on the mechanical behavior of leg extensor muscles. *European Journal Applied Physiology and Occupational Physiology*, **45**, 209-219, 1980.
- 5) 秋谷一平, 根本勇: 中高年者における Stretch-Shortening Cycle の筋放電パターン. 身体運動のバイオメカニクス,

- 136-139, 1996 .
- 6) Kubo K , Akima H , Kouzaki M , Ito M , Kawakami Y , Kanehisa H and Fukunaga T : Changes in the elastic properties of tendon structures following 20 days bed-rest in humans . *European Journal of Applied Physiology* , **83** , 463-468 , 2000 .
- 7) Fukunaga T , Kubo K , Kawakami Y , Fukushima S , Kanehisa H and Maganaris CN : In vivo behaviour of human muscle tendon during walking . *Proceedings of the Royal Society of Lond . Series B , Biological Science* , **268** , 229-233 , 2001 .
- 8) Fukushima S , Itoh M , Ichinose Y , Kawakami Y and Fukunaga T : Ultrasonography gives directly but noninvasively elastic characteristic of human tendon in vivo . *European Journal Applied Physiologica Occupationnal Physiol* , **71** , 555-557 , 1995 .
- 9) 山口英峰 , 山元健太 , 枝松千尋 , 早田剛 , 宮川健 , 小野寺昇 : なわとびにおける跳躍周期の差異がヒト下腿三頭筋の筋・腱-弾性系に及ぼす影響 . *体力科学* , **51** , 185-192 , 2002 .
- 10) 山口英峰 , 山元健太 , 宮川健 , 宮地元彦 , 小野寺昇 : なわとびにおける跳躍周期の違いが床反力に及ぼす影響 . *川崎医療福祉学会誌* , **10** , 1-5 , 2000 .
- 11) Di Fabio RP : Reliability of computerized surface electromyography for determining the onset of muscle activity . *Physical Therapy* , **67** , 43-48 , 1987 .
- 12) Ferris-Hood K , Threlkeld AJ , Horn TS and Shapiro R : Relaxation electromechanical delay of the quadriceps during selected movement velocities . *Electromyography and Clinical Neurophysiology* , **36** , 157-170 , 1996 .
- 13) Akima H , Kano Y , Enomoto Y , Ishizu M , Okada M , Oishi Y , Katsuta S and Kuno S : Muscle function in 164 men and women aged 20-84 yr . *Medicine Science in Sports Exercise* , **33** , 220-226 , 2001 .
- 14) Larsson L , Grimby G and Karlsson J : Muscle strength and speed of movement in relation to age and muscle morphology . *Journal of Applied Physiology* , **46** , 451-456 , 1979 .
- 15) Lindle RS , Metter EJ , Lynch NA , Fleg JL , Fozard JL , Tobin J , Roy TA and Hurley BF : Age and gender comparisons of muscle strength in 654 women and men aged 20-93 yr . *Journal of Applied Physiology* , **83** , 1581-1587 , 1997 .
- 16) 早田剛 : 高齢者における歩行中の中足趾節関節モーメントに関する研究 . 川崎医療福祉大学大学院修士論文 , 2000 .
- 17) Tuite DJ , Renstrom PA and O'Brien M : The aging tendon . *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports* , **7** , 72-77 , 1997 .
- 18) 小野寺昇 , 森本茂 : 成長段階における筋弛緩様式について . *体力科学* , **33** , 105-109 , 1984 .
- 19) 山口英峰 , 枝松千尋 , 高橋康輝 , 山元健太 , 宮川健 , 小野寺昇 : 下腿三頭筋における筋弛緩様式について . *体力科学* , **49** , 529 , 2001 .

(平成15年5月30日受理)

Electromyographical Study of Elastic Components of Muscle and Tendon Depending on Jump Frequency during Rope Skipping in Middle Age.

Hidetaka YAMAGUCHI, Takeshi MIYAKAWA and Sho ONODERA

(Accepted May 30, 2003)

Key words : ROPE SKIPPING, JUMP FREQUENCY, EMG, ELASTIC COMPONENT, AGING

Abstract

The purpose of this study was to clarify the effect of elastic components of muscle and tendon depending on jump frequency during skipping rope in middle age. Twelve healthy males volunteered for this study. The subjects were classed into two groups (Young age group: YA group, Middle age group: MA group). The mean ages of the YA group and the MA group were 22 ± 0.4 (mean \pm SD) years and 41.5 ± 5.2 years, respectively. Skipping tempos were within a range of 100~170 skips per minute (SPM). The vertical ground reaction force and the surface EMG of triceps surae muscles were recorded during each skipping round. Elastic components of muscle and tendon were estimated by Residual Time (RT: lag time difference between the vanishing point of muscle discharge and disappearance of EMG, and the end of the ground reaction force wave) and $RT_{integrate}$ (integration of ground reaction force while RT still appears). And furthermore by using %RT and % $RT_{integrate}$ (integration of ground reaction force while RT still appears). Also, %RT was calculated by ratio to total contact time and total impulse of each hop. We examined the relationship between %RT and contact time, and also % $RT_{integrate}$ and contact time. A significant negative correlation was found between %RT and contact time, and between % $RT_{integrate}$ and contact time. However, the slope of the straight line at %RT and % $RT_{integrate}$ of the MA group showed low value when compared with the YA group. It shows that rate of utilization of elastic components on the muscle and tendon have little change to increase in jump frequency. These results suggest that the elastic components of triceps surae muscle group would be low for those subjects 40 yrs old and over.

Correspondence to : Hidetaka YAMAGUCHI Department of Medicine and Science in Sports and Exercise,
School of Medicine, Tohoku University
Sendai, 980-8575, JAPAN
(Kawasaki Medical Welfare Journal Vol.13, No.1, 2003 95-101)