律動的ジャンプ動作における伸張反射

山 崎 良 比 古 (名古屋工業大学)

鬼 頭 伸 和 (愛知教育大学)

三 井 淳 蔵 (名古屋工業大学)

穂 丸 武 臣 (名古屋市立保育短期大学)

(昭和54年9月25日 受付)

Stretch Reflex in Rhythmic Hopping Movements

Yoshihiko Yamazaki ¹

Nobukazu Kito ²

Junzo Mitsui ¹

Takeomi Akimura ³

Abstract

During rhythmic hopping in man with both knees extended, electromyograms (EMGs) of the soleus (SOL), medial gastrocnemius (MG), and tibialis anterior (TA) muscles and the ankle joint angle were recorded.

In landing phase where triceps surae are stretched, synchronized EMGs were observed in SOL, while MG did not show a clear synchronization. The synchronized EMGs in soleus were apparent at a latency of the segmental spinal stretch reflex.

While the subjects were hopping on a plate, which was removed unexpectedly, the synchronized SOL EMGs which have been observed before removing the plate did not appear at the time estimated from the hop immediately preceding. The finding seems to indicate that the synchronized EMGs were not the pre-programmed but the stretch evoked.

H-reflex of the soleus was recorded in a standing posture with the same recording condition as applied to the hopping movements. The wave form of H-reflex was almost identical with the synchronized EMGs of soleus.

These results indicate that the synchronized EMGs in SOL are the spinal monosynaptic stretch reflex.

While SOL and MG showed activities before the contact of the feet with the floor in landing, the activities of MG were more conspicuous than those of SOL. EMGs of SOL and MG ended about 100msec after the stretch. It seems that in rhythmic hopping movements the pre-programmed and the spinal stretch reflex of the triceps surae play an important role.

¹ Nagoya Institute of Technology, Department of physical Education, Nagoya (466)

² Aichi University of Education, Faculty of Education, Department of Gymnastics, Kariya (448)

³ Nagoya City College of Child Education, Nagoya (488)

(Yoshihiko Yamazaki, Nobukazu Kito, Junzo Mitsui and Takeomi Akimaru : Stretch Reflex in Rhythmic Hopping Movements. *Jap. J. Phys. Educ.*, Vol. 25, No. 2, Sept., pp. 113—18)

緒 言

ヒトにおける伸張反射の存在は諸種の筋で報告されている^{5),10),11),12),17)}。一般に、伸張反射は機械的負荷に対して筋長の変化を補償すると考えられているが、この負荷補償機能には短経路の反射より長経路の伸張反射がより重要な役割をはたすことが示唆されている^{5),11),13),17)}。

G. Melvill-Jones と D.G.D. Watt^{13),14)} は、律動的なジャンプ動作中に腓腹筋の筋放電を観察し、着地時の減速は前もってプログラムされた筋活動によって行われ、次のジャンプへの加速には長経路の伸張反射と考えられた Functional Stretch Reflex が働くことを報告している。一方、V. Dietz と J. Noth⁴⁾ は、ジャンプ動作で着地後下腿三頭筋が伸張される時に短潜時で出現する筋放電を観察し、脊髄反射性の伸張反射がジャンプ動作に何らかの役割を担うことを示唆した。しかし、この筋放電が短潜時の脊髄反射であるか否かについての検討は十分にはなされていないと思われる。

律動的なジャンプ動作（特に膝関節を伸展してジャンプする動作）において、その動作の主働筋の下腿三頭筋は解剖学上ヒラメ筋と腓腹筋に分けられ、両筋には生理学上の性質の相違が報告されている^{2),6),21)}。しかし、ジャンプ動作を含め、ヒトの動作では両筋の機能的相違を示す報告は少ないように思われる。

本研究は、律動的なジャンプ動作がどのようになされているかを明らかにすることを目的とし、

特に以下の二点に注目して実験を行った。①着地後の下腿三頭筋の伸張に伴い伸張反射活動が認められるか否か。認められるとすれば、その反射活動が髄節性の伸張反射によるのか、又は、長経路の伸張反射によるのか。②ヒラメ筋と腓腹筋の活動に何らかの相違が存在するか否か。

方 法

被験者は健康な成人男子4名（年齢22～30才）で、いずれも過去数年間にわたってスポーツ活動をした経歴をもつ者であった。被験者は床上又は台上で両足ジャンプ動作を律動的に実施したが、特に膝関節の伸展を保つように指示された。ジャンプ動作時に次の項目の測定を行った。①筋電図：右下肢のヒラメ筋・内側腓腹筋・前脛骨筋。②右下肢の足関節角度。③足底の母指球部と床が接した時点。④立位時のH波。筋放電は表面電極（直径1cmの円形、電極間距離3cm）により導出し（一例で針電極を用いた）、差動増幅した。ヒラメ筋では腓腹筋のアキレス腱移行部より3cm遠位部より導出した。足関節角度の測定にはポテンシオメーターを用いた。膝窩部を電気刺激（持続1msecの矩形波）してH波を誘発したが、導出電極はジャンプ動作時の装着位置とした。得られた記録をデータレコーダーに収録し、再生時には約 $1/15$ にテープ速度をおとしてペンレコーダーで記録した。H波はブラウン管オシロスコープで観察し、これを写真撮影した。測定された動作は、①平坦な床上で自分の一番動作しやすいリズムで被験者が動作する場合、②高さ16cm、縦40cm、横

表1. 律動的ジャンプ動作の周波数、ヒラメ筋の伸張時に認められた同期性筋放電の性質（出現率・振幅・潜時）、及びH波の潜時

被験者	ジャンプ動作の周波数 (Hz)	同期性筋放電の出現率 (%)	同期性筋放電の振幅 (mV) Mean±SD	同期性筋放電の潜時 (msec) Mean±SD	H波の潜時 (msec) Mean±SD
A	3.3	95	4.5±0.91	35.9±1.56	30.7±0.46
B	2.4	70	3.4±0.80	33.9±1.32	29.2±0.38
C	3.2	66	3.2±0.74	35.6±2.12	30.1±0.47
D	3.1	34	3.7±0.94	35.0±1.45	30.2±0.25

図1. 律動的ジャンプ動作中の筋電図及び足関節角度の記録の一例(被験者A)

SOL EMG: ヒラメ筋の表面筋電図

ANKLE JOINT ANGLE: 足関節角度

MG EMG: 腓腹筋の表面筋電図

TA EMG: 前脛骨筋の表面筋電図

矢印: 足底の母指球部が接地した時点

52cmの台上で①の動作を持続し、被験者が予期しない時にこの台を取り去る場合であった。

結 果

平坦な床上で律動的なジャンプ動作を各被験者の実施しやすいリズムで行った時、その動作の周波数は2.4—3.3Hzであった(表1)。図1に動作中の筋放電及び足関節角度の記録の一例を示した。図中の矢印は床と足底の母指球部が接触する時点である。一連の動作中、ヒラメ筋と腓腹筋は母指球部が接地する以前から筋放電を開始し、その筋放電量はヒラメ筋より腓腹筋に多く認められた。着地後、下腿三頭筋は受動的に伸張されるが、ヒラメ筋及び腓腹筋の筋放電は伸張開始後約100msecの間持続した。ジャンプ動作中のヒラメ筋と腓腹筋の筋放電の様式は他の被験者もほぼ同様の成績であった。針電極で得られた筋放電のパターンも表面電極の結果とはほぼ一致した。

図1で注目されるのは、足関節角度が減少する時、すなわち、下腿三頭筋が受動的に伸張される時、足底の接地後はほぼ一定の潜時で同期性の筋放電がヒラメ筋に現れたこと、そしてこの筋放電がヒラメ筋の全筋放電量に対してかなりの割合を占めたことである。表1に、各被験者の同期性筋放電の出現率と振幅を示した。同期性筋放電が各ジャンプですべて出現すると仮定した場合を100%

とすると、その出現率は被験者によって異なり34%—95%の範囲であった。同期性筋放電の波形のピークからピークまでの振幅は3.2mV—4.5mVの範囲で、振幅の平均値に被験者による相違が認められた。一方、腓腹筋には顕著な同期性筋放電は認められなかった(図1)。

図2-Aは、足底部の母指球部の接地をトリガーとしたヒラメ筋(A-上)と腓腹筋(A-下)の筋電図を示し、図2-Bはヒラメ筋の筋電図と足関節角度を記録した結果である。各ジャンプ動作で、ヒラメ筋の伸張時にトリガーによく同期し、ほぼ同じ波形の筋放電が認められた。この同期性筋放電の潜時は足関節の受動的背屈開始後33.9msec—35.9msecの範囲にあった(表1)。

図2. 律動的ジャンプ動作中に出現した同期性筋放電と立位時のH波の記録の一例(被験者A)

A・B・Cとも導出用電極を同じ位置で記録

A: 足底部の接地をトリガーとしたヒラメ筋(上)と腓腹筋(下)の表面筋電図

B: 足底部の接地をトリガーとしたヒラメ筋の表面筋電図(上)と足関節角度(下)

C: H波を誘発するための電気刺激をトリガーとしたヒラメ筋(上)と腓腹筋(下)の筋電図

上記の同期性筋放電が前もってプログラムされた放電であるか否かを知るために、以下の実験を実施した。被験者に台上で律動的なジャンプ動作を実施するように指示し、この動作中予告なしに台を取り去った。この成績を図3に示したが、台を取り除いた時、それまで一定して出現していた同期性筋放電が前のジャンプから予測された時点(図3、矢印a)に認められなかった。一方、着地に先行する腓腹筋の筋放電は、前のジャンプ動

図3. 台上での律動的ジャンプ動作中に、予告なしに台を取り去った時の筋電図及び足関節角度の記録の一例(被験者A)

SOL EMG: ヒラメ筋の表面筋電図

ANKLE JOINT ANGLE: 足関節角度

MG EMG: 腓腹筋の表面筋電図

TA EMG: 前脛骨筋の表面筋電図

矢印: a: 前のジャンプから予測された同期性筋放電の出現時点

b: 前のジャンプから予測された腓腹筋の筋放電の開始時点

破線: 台が取り去られなかったことを仮定した時の足関節角度の変化

作から予測された時点(図3, 矢印b)より筋放電を開始した。

図2-Cは、ジャンプ動作時と同じ導出電極位置で、立位で誘発されたH波の記録である(被験者A)。この被験者のH波の潜時は $30.7\text{msec} \pm 0.46\text{SD}$ で、ジャンプ動作中の同期性筋放電の潜時より有意に短い値であった。他の被験者においても、H波の潜時と同期性筋放電の潜時に差が認められた(表1)。図2-A, Bと図2-Cを対照させると、ヒラメ筋のH波の波形と同期性筋放電の波形がほぼ一致することが認められた。被験者B, C, DのH波及び同期性筋放電の記録を図4に示した。各被験者で両波形がほぼ一致した。

考 察

律動的なジャンプ動作において、着地後下腿三頭筋が伸張される時に観察されたヒラメ筋の同期性筋放電は、その潜時から随節性の伸張反射と考えられる。H波の潜時と同期性筋放電の潜時には有意な差が認められたが、機械的伸張が筋紡錘の発射に変換されるに要する時間、及び筋紡錘から膝窩部に至るまでの伝導時間を考慮すると、両者

図4. 律動的ジャンプ動作中に出現した同期性筋放電(右)と立位時のH波(左)の記録(被験者B, C, D)

各被験者とも導出用電極を同じ位置で記録

A: 被験者Bの記録

B: 被験者Cの記録

C: 被験者Dの記録

は同一の経路を介していると考えられる。又、台上でのジャンプ動作中予告なく台を取り去った実験で、もしヒラメ筋の同期性筋放電がすでにプログラムされたものならば、台を取り去っても観察されるはずである。しかし、同期性筋放電が前のジャンプから予測される時点に認められなかったことから、同期性筋放電は前もってプログラムされた放電ではなく、筋が伸張されることによって出現すると思われる。さらに、ヒラメ筋のH波とその波形がよく似ているので、着地時に出現する同期性筋放電はH波と発現機序を同じくする単シナプス性脊髄反射と考えられる¹³⁾。すなわち、ヒラメ筋の伸張によって筋紡錘の神経発射が生じ、これがGIa線維を介して単シナプス性に脊髄α運動ニューロンを興奮させ、その興奮が筋放電として観察されたと推定される。

G. Melvill-Jones と D.G.D. Watt¹³⁾ は腓腹筋の Functional Stretch Reflex の潜時が約 120 msecであることを示し、ジャンプ動作中にこの長経路反射の潜時に一致した筋活動を認めた。本実験ではヒラメ筋と腓腹筋が伸張開始後約 100 msecで筋放電を停止したため、両膝関節を伸展して行うジャンプ動作では長経路の反射活動より随節性の伸張反射活動がより重要と思われる¹³⁾。

G. Melvill-Jones と D.G.D. Watt^{13), 14)}, V.

Dietz と J. Noth⁴⁾ らは顕著な同期性筋放電を報告していない。この成績の相違は、被験者に指示した動作が異なっていること及び彼等がヒラメ筋の筋放電を記録していないことによると思われる。H.S. Milner-Brown ら¹⁵⁾ は、重量あげの選手が筋放電が同期しやすいことを報告しており、本実験では過去数年間スポーツ活動に参加していた被験者を煩したため同期性筋放電が認められたと思われる。

同期性筋放電が単シナプス性反射のH波とほぼ同じ波形を示すこと、及び数mVの振幅をもつことから、かなり同期して筋紡錘が発射していると推定される¹⁾。このような発射の背景には dynamic γ 運動ニューロンによる筋紡錘の活動性の増大が関与すると思われる¹⁶⁾。

同期性筋放電によるヒラメ筋の張力がジャンプ動作にどの程度の役割をはたすかは本実験から検討できないが、ヒラメ筋の全筋放電量に占める同期性筋放電の割合が大きいことから、ヒラメ筋の発生する張力が相当単シナプス性の同期性放電に依存していることが推定される。

ヒラメ筋の活動と腓腹筋の活動を比較すると、①腓腹筋には単シナプス性の同期性放電が顕著ではなく、②着地前から開始する筋放電がヒラメ筋に比べて多いという相違が認められた。腓腹筋に同期性放電が顕著でないのは、前もってプログラムされた筋放電に覆われたことが考えられるが、腓腹筋より発する G Ia 線維の脊髄内でのシナプス接続の相違、 α 運動ニューロンの特性の相違⁷⁾等の生理的要因の関与も考えられる。最近 B. Walsley ら²⁰⁾ は、ネコの内側腓腹筋とヒラメ筋の筋電図及び両筋の発生する張力を、歩行・ジャンプ等の動作で記録し、両筋には動作によって機能的役割の分担があることを示した。本研究のヒラメ筋と腓腹筋の活動様式の相違も、この役割分担機能から説明されると思われる。

腓腹筋は着地前よりかなりの放電を示したが、G. Melvill-Jones と D.G.D. Watt¹⁸⁾ は、この筋放電の成分が前もってプログラムされたものであることを示唆した。この筋放電の機能的役割は筋の長さ-張力曲線から解釈されると思われる。G.C. Joyce ら⁹⁾ は収縮中の筋を伸張してその張力

変化を記録し、筋の長さが短い場合は長さ-張力曲線の傾斜が緩徐であるが、筋の長さが長くなるとその曲線の傾斜が急峻になることを示した。ジャンプ動作では着地直前に下腿三頭筋が短縮しているため、筋のステフネス (stiffness: 筋伸張に対する張力の変化) は大きくない。そのため、着地後、筋は受動的に伸張されるであろう。筋がさらに伸張されると、長さ-張力曲線の傾斜が急になること、及び伸張反射に由来する筋活動が増大することによって、筋のステフネスは急激に増大し、降下する体重を支えるであろう。この機構は衝撃の緩衝に貢献すると思われる。発揮された張力の一部は筋⁹⁾ 及び腱¹⁹⁾ の直列弾性要素に蓄積され、次のジャンプに利用されると思われる。このような位置エネルギーの再利用はジャンプ動作の効率を良くしていることに関与するであろう²⁰⁾。

要 約

ヒトが両膝関節を伸展して律動的ジャンプ動作を実施する時のヒラメ筋・内側腓腹筋・前脛骨筋の筋電図及び足関節角度を記録し、以下の結果を得た。

①ジャンプ動作の着地相で下腿三頭筋が伸張されるが、この時ヒラメ筋に同期性の筋放電が観察された。筋伸張開始より同期性筋放電の出現するまでの時間とH波の潜時との比較から、同期性筋放電の潜時は随節性の伸張反射の潜時に一致すると考えられた。一方、腓腹筋は顕著な同期性筋放電を示さなかった。

②被験者が台上でジャンプ動作を実施している時、予告なく台が取り去られた。それまで出現していたヒラメ筋の同期性筋放電は、台を取り去る直前のジャンプから予測された時点に認められなかった。この結果は同期性筋放電が前もってプログラムされた筋放電ではなく、伸張によって誘発された放電であることを示すと思われる。

③ジャンプ動作中と同じ記録条件で、立位時のヒラメ筋のH波が記録された。ヒラメ筋のH波の波形と同期性筋放電の波形がほぼ一致した。

④上記の成績から、ジャンプ動作の着地相で認められたヒラメ筋の同期性筋放電は、脊髄を経由

する単シナプス性の伸張反射と思われる。

⑤ヒラメ筋と腓腹筋はジャンプ動作中着地前より筋放電を開始したが、この筋放電は腓腹筋により顕著であった。

⑥ヒラメ筋と腓腹筋の筋放電は、受動的伸張開始後約 100msec 持続した。

⑦律動的ジャンプ動作では、前もってプログラムされた筋活動及び随節性の伸張反射活動が重要な役割をはたすと思われる。

引用・参考文献

- 1) Burke, D., K.E. Hagbarth and L. Löfstedt, "Muscle spindle activity in man during shortening and lengthening contractions," *J. Physiol.*, 277 : 131—42, 1978.
- 2) Burke, R.E., "Motor unit types of cat Triceps Surae Muscle," *J. Physiol.*, 193 : 141—60, 1967.
- 3) Cavagna, G.A., F.P. Saibene and R. Margaria, "Mechanical work in running," *J. Appl. Physiol.*, 19 : 249—56, 1964.
- 4) Dietz, V. and J. Noth, "Spinal stretch reflexes of triceps surae in active and passive movements," *J. Physiol.*, 284 : 180—81, 1978.
- 5) Hammond, P.H., "An experimental study of servo action in human muscular control," *Proc. 3rd Int. Conf. med. Electron.*, 190—99, London : Institution of Electrical Engineers., 1960.
- 6) Henneman, E. and C.B. Olson, "Relations between structure and function in the design of skeletal muscles," *J. Neurophysiol.*, 28 : 581—98, 1965.
- 7) Henneman, E., G. Somjen and D.O. Carpenter, "Excitability and inhibability of motoneurons of different sizes," *J. Neurophysiol.*, 28 : 599—620, 1965b.
- 8) Houke, J.C., "Regulations of Stiffness by skeletal motor reflexes," *Ann. Rev. Physiol.*, 41 : 99—114, 1979.
- 9) Joyce, G.C., P.M.H. Rack and D.R. Westbury, "The mechanical properties of cat soleus muscle during controlled lengthening and shortening movements," *J. Physiol.*, 204 : 461—74, 1969.
- 10) Lamarre, Y. and J.P. Lund, "Load, compensation in human masseter muscles," *J. Physiol.*, 253 : 21—35, 1975.
- 11) Marsden, C.D., P.A. Merton and H.B. Morton, "Servo action in human voluntary movement," *Nature, Lond.*, 128 : 140—43, 1972.
- 12) Marsden, C.D., P.A., Marton and H.B. Morton, "Stretch reflex and servo action in human muscle," *J. Physiol.*, 259 : 531—60, 1976.
- 13) Melvill-Jones, G. and D.G.D. Watt, "Observation on the control of stepping and hopping movements in man," *J. Physiol.*, 219 : 709—27, 1971.
- 14) Melvill-Jones, G. and D.G.D. Watt, "Muscular control of landing from unexpected falls in man," *J. Physiol.*, 219 : 729—37, 1971.
- 15) Milner-Brown, H.S., R.B. Stein and R.G. Lee, "Synchronization of human motor units: possible roles of exercise and supraspinal reflexes," *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 38 : 245—54, 1975.
- 16) Morgan, D.L., U. Proske and Dianne Warren, "Measurements of muscle stiffness and the mechanism of elastic storage of energy in hopping kangaroos," *J. Physiol.*, 282 : 253—61, 1978.
- 17) Newson Davis, J. and T.A. Sears, "The proprioceptive reflex control of the intercostal muscles during their voluntary activation," *J. Physiol.*, 209 : 711—38, 1970.
- 18) Paillard, J., "Réflexes et Régulations d'Origine Proprioceptive chez l'Homme," *Librairie Arnette*, Paris, 1955.
- 19) Prochazka, A., R.A. Westermann and S.P. Ziccone, "Ia afferent activity during a variety of voluntary movements in the cat," *J. Physiol.*, 268 : 423—48, 1977.
- 20) Thys, H., T. Faraggiana and R. Margaria, "Utilization of muscle elasticity in exercise," *J. Appl. Physiol.*, 32 : 491—94, 1972.
- 21) Walmsley, B., J.A. Hodgson and R.E. Burke, "Forces produced by medial gastrocnemius and soleus muscles during locomotion in freely moving cats," *J. Neurophysiol.*, 41 : 1203—16, 1978.