

等尺性収縮の持続による下腿三頭筋の活動交代

田 卷 弘 之 北 田 耕 司 倉 田 博

CHANGES IN ACTIVITY IN TRICEPS SURAE MUSCLES DURING PROLONGED ISOMETRIC CONTRACTIONS

HIROYUKI TAMAKI, KOJI KITADA and HIROSHI KURATA

Abstract

In order to examine muscle activities, surface electromyograms (EMGs) were recorded from the triceps surae muscles (lateral gastrocnemius: LG, medial gastrocnemius: MG, soleus: SOL) during prolonged isometric contractions at 20° of ankle joint angle under constant load (10% MVC). The results were summarized as follows;

- 1) EMG recordings were obtained which showed complementary activity in each muscle in the time course. Changes in activity was found between whole muscles in the synergist of triceps surae muscles.
- 2) Muscle activity most frequently took the form of MG+SOL, followed by MG acting alone and SOL acting alone. Ta/Ts value (the ratio of total activity period and total silent period on EMG activity) showed 4.0 in MG and SOL. In contrast, it showed 0.3 in the LG.
- 3) In the latter half of all exercise times, frequent changes in activity were shown, and Ta/Ts value increased in the gastrocnemius muscle and decreased in the soleus muscle. These results indicate that frequent changes in activity in the latter half were caused by the reduction in Ts in the gastrocnemius muscle, and the reduction in Ta in the soleus muscle.
- 4) Mean integrated EMGs increased significantly in the middle and latter phases in each burst activity, but those in the latter phase did not increase compared to those in the middle phase. These results suggest that the rotation of activity between muscles may have occurred before the remarkable increase of EMG activity with fatigue.

(Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med. 1995. 44 : 457-464)

key words : electromyogram, changes in activity, triceps surae muscles, prolonged isometric contraction

【結 言】

足関節の底屈を行う下腿三頭筋は外側腓腹筋、内側腓腹筋およびヒラメ筋から構成されている。各筋の起始、停止や筋線維タイプからも両者の解剖学的、生理学的特性は異なる¹¹⁾。また足関節角度の小さいところではヒラメ筋、内側腓腹筋が主として活動しているが、外側腓腹筋は活動参加の程度が小さい。さらに田巻ら¹⁸⁾は運動速度に依存して腓腹筋とヒラメ筋の活動量が相反するという成績も得ており、機能的にも同一の単位とし

て扱い難い。

持続的に等尺性の筋活動を行うとき、筋は負荷と等しい張力を発揮し続けている。発揮される筋力の調節は運動単位の recruitment と rate coding により行われている。最大以下負荷での運動では筋を構成する全ての運動単位が活動参加しているのではなく、負荷強度に見合った recruitment が行われている。これまで持続的筋活動時に同一筋内において運動単位の活動参加が互いに交代するという報告がある^{8,12,16,20)}。倉田¹³⁾は内側広筋において長時間の張力負荷によって閾値張力の変

化する運動単位が存在することを観察している。また山本²¹⁾は上腕二頭筋において早く活動停止する運動単位, 長く活動し続ける運動単位およびその中間の運動単位の存在を報告している。さらに Sjogaard et al.¹⁶⁾は低強度での膝伸展等尺性収縮を長時間行い, 大腿四頭筋の協働筋間における相補的な筋放電活動を観察している。

下腿三頭筋では, 協働筋における機能的差異が著しいため, 長時間の筋活動において各々その様相が異なることが考えられる。そこで本研究では, 10% MVC 程度の負荷条件での等尺性収縮の運動を3時間半にわたって長時間持続することにより, 下腿三頭筋の各筋がどのような活動様相を呈するかについて検討した。特に, 協働筋間での活動交代に着目して, 筋放電活動を観察することにより, その活動様式に検索を加えた。

【実験方法】

被験者は健康な成人男子4名であった。

被験者はまず長座姿勢で足関節角度を20°に保ち, 背屈方向への一定負荷に抗して右脚足関節を保持し続ける, 下腿三頭筋の等尺性収縮を約210分間にわたって実施した。

負荷は実験に先立ち, ロードセル(model 1269 F, 竹井機器)を使用して, 等尺性最大随意収縮時の足関節底屈張力を測定し, その10%を設定した。荷重方法は, 田巻ら¹⁸⁾の方法を用いた。本実験では円盤を足関節を軸にして20°まで回転させ, その状態で常に一定の荷重がかかるようにした。

エレクトロゴニオメータにより足関節角度を求め, それをポリグラフ(MR-6000, 日本光電)のオシロスコープ(VC-680 G, 日本光電)上に表示し, 一定速度で移動するbeamを所定の位置(20°)に合わせることにより足関節角度を保持した。

これと同時に, 表面電極導出法により等尺性収縮時の下腿三頭筋(外側腓腹筋: LG, 内側腓腹筋: MG, ヒラメ筋: SOL)の筋電図を記録した(TC: 0.003 s)。また導出されたこれらの筋電図を包絡線検波方式(TC: 0.3 s)により積分し記録した。電極はゴム枠銀板製(銀塩化銀電極)で直径 10

mm のものを使用し, 電極間距離を 30 mm とした。皮膚抵抗を極力小さくするために, 消毒用エタノールで脱脂し, さらにサンドペーパーで表皮を削った。

【実験成績】

A. 協働筋間における活動の交代

図1は全運動時間にわたって下腿三頭筋の筋放電活動の様相を示した記録例である。各筋とも大きな筋放電がみられる部分と放電活動が休止もしくは著しく低下する部分が交代して発現している(図1-A)。3筋間の関係を見ると, ある筋が活動を開始すると他の筋が活動を休止するという様相が観察され, ほぼ相補的に協働筋間で活動交代が行われていた。特に, MGの放電活動が休止した際にLGが補足的に活動を開始するというパターンが多く観察された。また活動交代の際, 被験者は活動筋に疼痛感覚を覚え, 活動交代の完了と共に痛みが消失することが多かった。等尺性の一定張力を3時間半という長時間保持し続けるということは, 活動筋に生じる疼痛以外に, 姿勢を固定し続け足関節角度の表示を視覚で追従しながら一定張力を保持し続けることに被験者の多大な忍耐力を要した。

運動開始直後はSOLとMGに放電がみられたが時間経過と共に様々な筋の組合せで筋活動が行われていた。その筋電図記録例を図1-Bに示し, 全運動時間中に筋放電が発現した回数を図2に示した。最も回数が多かったのはMG+SOLであり, LGとの組合せで運動が実施されているところは比較的少なかった。

B. 全運動時間の前半と後半の活動様相の比較
活動交代が生じて, 次に3筋の活動パターンが変化するまでの時間間隔を経時的に示したのが図3である。全運動時間の前半と後半とを比較すると後半の方がその間隔が短くなる傾向が見られた。交代回数は前半で30.3回, 後半で37.0回であり, 後半の方が交代頻度は有意に($P < 0.05$)高かった。

各筋において活動と休止をくり返した回数を前半と後半で比較したところ, LGにおいては前半

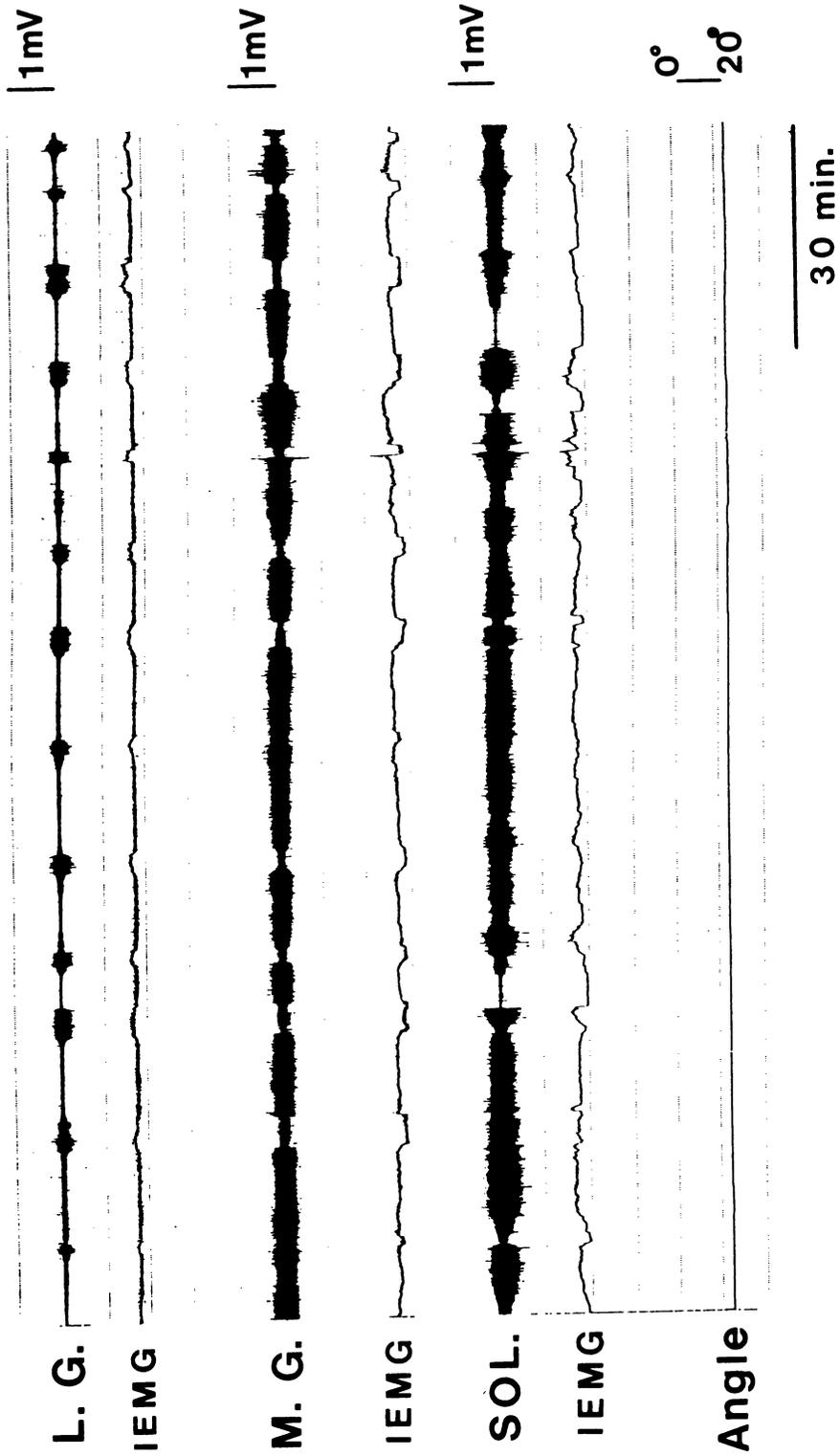


Fig. 1-A
Fig. 1. Examples of EMG records. EMGs and integrated EMGs (IEMG) in lateral gastrocnemius (LG), medial gastrocnemius (MG), and soleus (SOL) muscles are shown. Bottom line (Angle) indicates ankle joint angles.
A; an example of the records in whole exercise period.
B; examples of various changes in EMG activity.

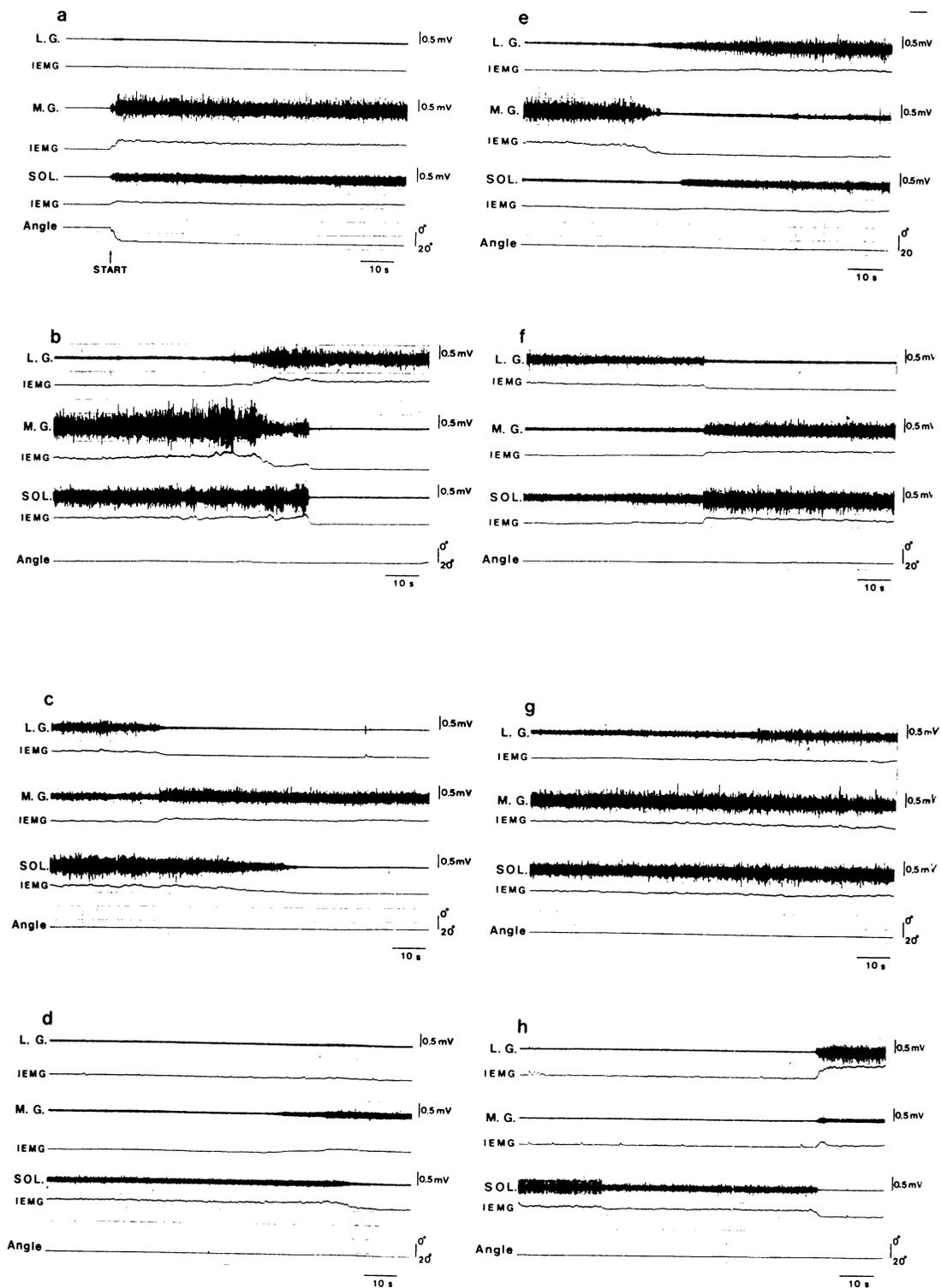


Fig. 1-B

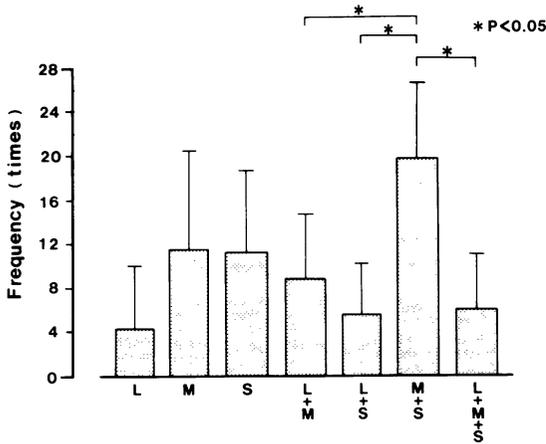


Fig. 2. The frequency of the combination of acting muscles in whole exercise period. *significance at 0.05 level.

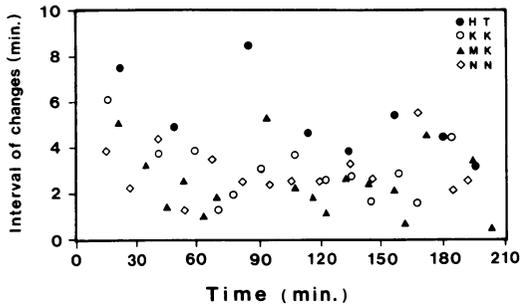


Fig. 3. The interval of rotation in the time course. ●; sub. H. T. ○; sub. K. K. ▲; sub. M. K. ◇; sub. N. N.

7.5回, 後半12.0回, MG では同様に9.5回, 11.8回で後半の方が有意に ($P < 0.05$) 増加し, SOL においても8.8回, 11.8回と後半の方が多かった(図4).

図5は各3筋について放電活動が見られている期間の総時間(Ta)と著しく放電が減少するか休止している期間の総時間(Ts)の比 Ta/Ts を示した. その比はLG では0.34, MG で3.76, SOL では3.78であり, LG では休止時間の方が3程度度長く, MG およびSOL では活動時間の方が約4倍長いことが示された. この Ta/Ts 比を全運動時間の前半と後半で比較すると, LG では前半0.27, 後半0.42, MG では3.73, 3.99と後半に増

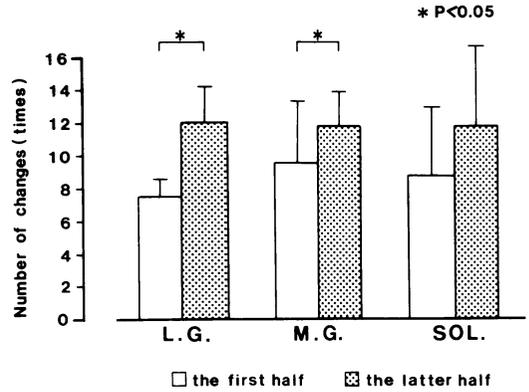


Fig. 4. The number of changes in whole exercise period in each muscle. □; the first half. ▨; the latter half. *significance at 0.05 level.

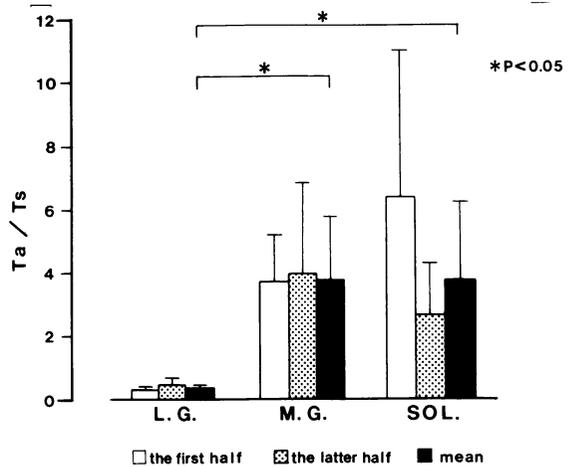


Fig. 5. Ta/Ts value (the ratio of total activity period and total silent period on EMG activity) in each muscle. □; the first half. ▨; the latter half. ■; mean. *significance at 0.05 level.

大する傾向を示し, SOL では6.39, 2.65と後半減少する傾向を示した. LG および MG ではそれぞれ59.3%, 6.9%の増大を示し, SOL では58.5%の減少を示した.

C. 放電活動中の筋電図積分値の変化

下腿三頭筋の各筋は持続的な等尺性収縮中に活動と休止をくり返していることが筋電図記録から観察された. その放電開始時点から放電休止までの時間を100%とし, 10, 50, 90%の各時点において前後10%の区間(各々全体の1/5の区間とな

る)で筋電図積分値の平均値を計測し, 1回の放電活動中の積分筋電図の変化について検討した. 10, 50および90%の各時点をそれぞれ前半, 中盤, 後半とすると前半から後半にかけて筋電図積分値は 1) 山型の曲線的増加, 2) 対数曲線的増加, 3) 指数関数的増加, 4) 直線的増加, 5) 不変, 6) 減少を呈するものと, 種々のパターンが観察された. その中でも 1) および 2) のパターンが最も多く, それぞれ全パターンの34.4%, 33.3%を占めた. 各筋とも前半より中・後半に筋電図積分値が増大する傾向にあり, そのパターンが全体の90%を占めた. 平均値においても同様に前半から中・後半にかけて各筋とも筋電図積分値は有意に($P < 0.01$)増大した(図6).

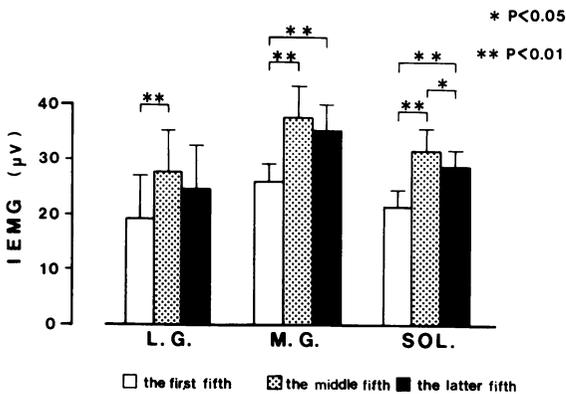


Fig. 6. Mean integrated EMGs at each phase in each burst activity. □; the first fifth. ▨; the middle fifth. ■; the latter fifth. * significance at 0.05 level. ** significance at 0.01 level.

【実験成績に対する考察】

緊張性の筋活動を持続していくに従い, 筋放電活動が増大することについて多くの報告がある^{6, 7, 15, 19}). また筋に疲労現象が生じると, 同一の筋内において各筋を構成している運動単位が互いに活動を交代する現象がみられるという報告がある^{8, 12, 16, 21}). 倉田¹³)は内側広筋において長時間にわたって張力を負荷することによって, 閾値張力の変化する運動単位の存在を観察し, 運動単位の相対的閾値変動により活動交代が発現するもの

と考えた. また山本²¹)は活動停止時期について3種類の運動単位の存在を報告した. 同一筋内において運動単位レベルで活動交代が発現していても, 筋全体の総活動量は等しいはずであるから, 表面筋電図にて観察した筋放電量に大きな変化はみられないものと考えられる. しかし, 図1に示されたように, 下腿三頭筋の各筋は筋放電活動と休止とをくり返し, 3筋間で互いに活動交代する現象が多く観察された. このことは本実験条件においては, 3筋すべてが同時に活動し疲労に至るまで筋放電活動を漸増させるというステレオタイプの活動様式ではなく, 同一筋内の運動単位レベルでの活動交代のみならず, 協働筋間の whole muscle レベルでも活動交代が発現することを示すものである.

図1にみられるように運動開始時にはMGとSOLに活動がみられLGにはみられなかった. また図2に示されたように主として活動参加している筋の組合せの回数を検討するとMG+SOLが最も多かった. さらに各筋のTa/Ts比をみるとMGとSOLはLGよりも有意に($P < 0.05$)大きく, 活動時間の方が顕著に長く, 逆にLGは休止時間の方が顕著に長いことを示した. したがって足関節角度20°において, 10% MVCの負荷を持続的に保持する運動ではMGおよびSOLが主として働き, LGはそれら2つの筋が疲労した際の補足的活動様式を呈するものと考えられた.

全運動時間の前半と後半について, 図3に示されたように後半の方が活動交代が発現する間隔は短くなる傾向にあり, 交代回数は多い. また図4に示されたように各筋別にみても活動と休止をくり返す回数は後半の方が多かった. 運動の後半の方が頻繁に活動と休止をくり返すということは, 1回あたりの活動時間および, もしくは休止時間が短くなるということになる. 図5では前半と後半のTa/Tsを示したが, LGおよびMGではその比は増大する傾向を示し, SOLでは減少する傾向を示した. すなわち後半では前半よりも腓腹筋は総活動時間が長く, 総休止時間が短くなり, SOLはその逆になる傾向を示しているものと考えられる.

図6に示されたように、1回活動中の前半、中盤、後半の筋電図積分値の変化のパターンは各筋とも全パターンの約90%が中・後半にかけて増大するパターンを示した。しかし、中盤から後半にかけて大きな変化はみられなかった。下腿三頭筋では1回活動中の後半に筋放電活動が増大する前に他の筋が活動に参加するため、活動の交代により放電が増大せず、活動停止に至るものと推察された。

同一筋内での運動単位の活動交代は各運動単位の相対的閾値張力の変動により発現することが考えられている¹³⁾。一般にネコでは同一の筋においても、運動単位を構成する脊髄 α 運動ニューロンに対してタイプによるシナプス入力の違いが存在することが報告されている。皮膚神経³⁾、赤核²⁾、網様体¹⁾およびfast-typeのPTN¹⁾からの入力はfast-type unitにはEPSPを、slow-type unitにはIPSPを発生させると言われる。Ia群からの入力はfast-type unitにより小さいEPSPを発生させる⁴⁾。Renshaw細胞からの入力はslow-typeの方により大きいIPSPを発生させる⁹⁾。また橋網様体は γ 運動ニューロンに対しても単シナプス性の結合により興奮性の伝達を行う¹⁰⁾。さらに痛み刺激を伝達する感覚情報は脊髄上行路を通り、網様体に投射される¹⁷⁾。本実験において協働筋間で活動交代が発現する際に疼痛感覚が生じることがあったが、その多くは外側腓腹筋が新たに活動参加する場合であった。疼痛刺激が何らかのかたちで網様体を介して、各筋の α および γ 運動ニューロンに対して促通、または抑制性的影響を及ぼすことも考えられた。さらに協働筋間で活動交代が発現するためには、各筋を構成する多くの運動単位が同時に活動参加もしくは活動休止を起こさねばならない。腓腹筋とヒラメ筋を支配する運動神経細胞核はcross-sectionではほぼ同じcolumnに位置するが、rostral shiftを伴っている^{5,14)}。それゆえ入力の上・下位レベルの違いによっては、特定の運動ニューロン核に興奮性もしくは抑制性的入力をもたらす可能性もある。しかしながら、これらのどの要因が如何に作用するか等についての解明には今後の詳細な検討が待た

れる。

【摘 要】

足関節角度を20°に保持し続ける下腿三頭筋の持続的等尺性収縮において外側腓腹筋、内側腓腹筋およびヒラメ筋が時間経過とともにどのような活動様相を呈するのか、筋放電活動を観察することによりその活動様式に検討を加えた。その結果、10% MVCの軽い負荷において、

- 1) 各筋とも時間経過とともに大きな筋放電活動がみられるところと、休止もしくは大きく低下するところが観察され、これが3筋間で相補的に交代する様相を呈した。下腿三頭筋における協働筋間のwhole muscleレベルにおいても、活動交代が発現することが見出された。
- 2) 運動中に活動参加している筋の組合せの回数はMG+SOLが最も多く、Ta/Ts比はMG及びSOLはLGより有意に($p < 0.05$)高い値を示した。本実験の運動においてはMGとSOLが主たる働きを担い、LGはそれらの補足的活動を担うものと推察された。
- 3) 全運動時間の前半と後半では下腿三頭筋の活動様相が異なった。後半では活動交代回数は有意に($P < 0.05$)増大し、腓腹筋ではTa/Ts比は増大し、総活動時間が長くなり、ヒラメ筋ではTa/Ts比が低下し、総活動時間が短くなる傾向が示された。
- 4) 1回の筋放電活動中の筋電図積分値は前半から中・後半にかけて有意に($P < 0.01$)増大したが、中盤から後半にかけては大きな変化はなかった。疲労に伴う筋放電量の増大を示す前に他の筋と活動交代するものと考えられた。

(受付 平成7年2月16日)

【文 献】

- 1) Araki, T., Endo, K., Kawai, Y., Ito, K. & Shigenaga, Y. Supraspinal control of slow and fast spinal motoneurons of the cat. *Prog. Brain Res.*, (1976), **44**, 413-432.
- 2) Burke, R. E., Jankouska, E. & Ten Bruggencate, G. A comparison of peripheral and rubrospinal synaptic input to slow and fast twitch motor units of triceps

- surae. *J. Physiol.*, (1970), **207**, 709-732.
- 3) Burke, R. E., Rymer, W.Z. & Walsh, J. V. Functional specialization in the motor unit population of cat medial gastrocnemius muscle. In., Stain, R. B. Pearson, K. G., Smith, R.S. & Redford, J. B., *Control of Posture and Locomotion*, Plenum, New York, (1973), 29-44.
 - 4) Burke, R. E., Rymer, W. Z. & Walsh, J. V. Relative strength of synaptic input from short-latency pathways to motor units of defined type in cat medial gastrocnemius. *J. Neurophysiol.*, (1976), **39**, 447-458.
 - 5) Burke, R. E., Strick, P. L., Kanda, K., Kim, C. C. & Walmsley, B. Anatomy of medial gastrocnemius and soleus motor nuclei in cat spinal cord. *J. Neurophysiol.*, (1977), **40**, 667-680.
 - 6) Eason, R. G. Electromyographic study of local and generalized muscular impairment. *J. Appl. Physiol.*, (1960), **15**, 479-482.
 - 7) Edwards, R. G. & Lippold, O. C. J. The relation between force and integrated electrical activity in fatigued muscle. *J. Physiol.*, (1956), **132**, 677- 681.
 - 8) Forbes, A. The interpretation of spinal reflexes in terms of present knowledge of nerve conduction. *Physiol. Rev.*, (1922), **2**, 361-414.
 - 9) Friedman, W. A., Sybert, G. W., Munson, J. B. & Fleshman, J. W. Recurrent inhibition in type-identified motoneuron. *J. Neurophysiol.*, (1981), **64**, 1349-1359.
 - 10) Grillner, S., Hongo, T. & Lund, S. Decending monosynaptic and reflex control of γ -motoneurons. *Acta Physiol. Scand.*, (1969), **75**, 592-613.
 - 11) Johnson, M. A., Polgar, J., Weightman, D. & Appleton, D. Data on the distribution of fiber types in thirtysix human muscles. *J. Neurol. Sci.*, (1972), **18**, 111-129.
 - 12) Karpovich, P. V. Physiological and psychological dynamogenic factors in exercise. *Arbeitsphysiol.*, (1937), **9**, 626-629.
 - 13) 倉田 博. 単一運動単位の興奮の相対的閾値変動について, *体力科学*, (1972), **21**, 176-182.
 - 14) Romanes, G. J. The motor cell columns of the lumbo-sacral spinal cord of the cat. *J. Comp. Neurol.*, (1951), **94**, 313-363.
 - 15) Scherrer, J. & Bourguignon, A. Changes in the electromyogram produced by fatigue in man. *Amer. J. Phys. Med.*, (1959), **38**, 170-180.
 - 16) Sjogaard, G., Kiens, B., Jorgensen, K. & Saltin, B. Intramuscular pressure, EMG and blood flow during low-level prolonged static contraction in man, *Acta Physiol. Scand.*, (1986), **128**, 475-484.
 - 17) 武重千冬. 痛覚, 新生理学, 動物の機能編, 問田直幹, 内菌耕二, 伊藤正男, 富田忠雄編, 医学書院, (1982), 775-776.
 - 18) 田巻弘之, 北田耕司, 倉田 博. 足関節運動における角速度の変化と下腿三頭筋の活動パターン, *体力科学*, (1993), **42**, 292-300.
 - 19) Thach, W. T. Discharge of Purkinje and cerebellar nuclear neurons during rapidly alternating arm movements in the monkey. *J. Neurophysiol.*, (1968), **31**, 785-797.
 - 20) 時実利彦, 津山直一. 筋電図の臨床協同医書出版, (1952).
 - 21) 山本高司. 持続性筋収縮の調整機構—発射間隔法による—, *体力科学*, (1979), **28**, 95-103.