

一流長距離選手における足関節等速性運動時の下腿三頭筋の活動様式

田巻弘之*, 前田 明**, 江橋 博***, 西藺秀嗣*, 芝山秀太郎*, 倉田 博*

Electromyogram patterns during ankle joint isokinetic movements in the triceps surae muscles in elite long distance runners.

Hiroyuki TAMAKI*, Akira MAEDA**, Hiroshi EBASHI***,
Hidetsugu NISHIZONO*, Hidetaro SHIBAYAMA* and Hiroshi KURATA*

Abstract

In order to examine muscle activities, surface electromyograms (EMGs) were recorded from the triceps surae muscles in elite long distance runners during concentric and eccentric ankle joint movements under constant load (5kgw). The results were summarized as follows;

- 1) At slow angular velocity (6deg/s) of ankle joint movement, EMG amplitude tended to increase at a larger ankle joint angle in the gastrocnemius muscle and a smaller angle in the soleus muscle.
- 2) Following an increase in angular velocities, peak values of integrated EMGs were significantly ($p < 0.01$) increased at 46% in the lateral gastrocnemius muscle in male runner. However, these peak values were significantly ($p < 0.05$) decreased at 25% in the soleus muscle. These results suggest selective recruitment of motor units depending on angular velocity. On the other hand, these peak values tended to increase in each muscle in female runners. It is suggested that the differences between male and female runners were caused by the difference in the type of motor units that compose the triceps surae muscle.
- 3) Ankle joint angle at the peak integrated EMGs were significantly ($p < 0.05$) increased following an increase in angular velocity in the soleus muscle in male runners. This suggests that the angle at the recruitment of motor units may be dependent on angular velocity in the soleus muscle.

KEY WORDS : *elite long distance runner, triceps surae muscle, electromyogram pattern*

* 鹿屋体育大学体力科学講座 Department of Physiology and Biomechanics, National Institute of Fitness and Sports, 1 Shiromizu, Kanoya, Kagoshima 891-23, Japan.

** 明治生命厚生事業団体力医学研究所 Physical Fitness Research Institute, Meiji, Life Foundation of Health and Welfare, 150 Tobuki, Hachioji, Tokyo 192, Japan.

*** スパ・フィットネス研究所 Spa Fitness Research Institute, Diamond Athletics Co., 1-1-18 Shiroganedai, Minatoku, Tokyo 108, Japan.

【摘 要】

一流長距離選手においてスポーツ活動に強く関与する足関節運動の基礎的知見を得るために、下腿三頭筋を構成する外側腓腹筋、内側腓腹筋およびヒラメ筋の3筋が、足関節角度および角速度の変化によりどのような活動様相を呈するのか、特に筋放電活動のピークにおける様相に注目し、表面筋電図によりその活動様式に検討を加えた。その結果；

- 1) 低速度 6 deg/s の足関節運動ではヒラメ筋は比較的足関節角度の小さいところで、腓腹筋は大きいところで振幅が増大する傾向にあった。
- 2) 角速度の増大により筋電図積分値のピーク値は男子において外側腓腹筋では46%有意に増大し、ヒラメ筋では25%有意に減少した。角速度に依存した運動単位の選択的動員が存在する可能性が推察された。女子においては各筋共に増大する傾向にあり、男子と様相を異にしたのは、下腿三頭筋を構成する運動単位のタイプの相違によることが推測された。
- 3) 男子のヒラメ筋については角速度の増大により筋電図積分値がピークに達するときの角度が有意に増大し、recruitment時の角度について速度依存性のあるユニットが多く存在する可能性が推察された。

【緒 言】

スポーツ活動の基本動作に足関節運動は強く関与している。特に、足関節運動の速度とその運動に関連した筋群の活動様相との関係は、スポーツ活動にとって重要な問題点である。下腿三頭筋は外側腓腹筋、内側腓腹筋およびヒラメ筋の3つの筋群から構成され、主に足関節底屈作用をなし、跳躍およびランニング時等に活動する。Smith et al¹⁸⁾はネコの paw shaking (急速な足の振動動作)において、ヒラメ筋の運動単位の活動を伴わない腓腹筋の運動単位の選択的な活動参加を認め、素

早い反復動作を遂行するのに不都合が生じると思われるヒラメ筋 (slow-type unit) が選択的に抑制されたためであると報告した。近年、著者ら²¹⁾は健康な成人男子について膝関節を伸展固定し、膝関節運動による下腿三頭筋の活動様相の変化を除き、足関節運動時の角速度、足関節角度および負荷強度といった諸条件の変化による下腿三頭筋の活動様式について、筋電図学的に検討を加えた。その結果、足関節の角速度の増大に伴い、腓腹筋の活動量は増大するが、ヒラメ筋では逆に活動量が顕著に減少し、活動量がピークに達するときの足関節角度が大なる方へ移行するという成績を得た。

そこで本研究では持久性のトレーニングを行っている男女一流長距離選手について、下腿三頭筋が足関節角度および角速度の変化によりどのような活動様相を呈するのか、特に筋放電活動のピークにおける様相に注目し、跳躍およびランニング等に関与する足関節運動についての基礎的知見を得るため、表面筋電図による各筋の活動様式に検討を加えた。

【実験方法】

被験者は平成3年度全日本実業団駅伝に優勝したチームの長距離選手男子21名、女子6名であった。被験者は長座姿勢で足関節角度を0°(基本肢位；下腿骨軸と足底のなす角が直角)に保ち、背屈方向への一定負荷に抗して0°~60°の範囲で右脚足関節の底屈背屈運動を実施した。

エレクトロゴニオメータにより求められた足関節角度から、6および60deg/sの角速度を設定し、ポリグラフ(MR-6000,日本光電)のオシロスコープ(VC-680G,日本光電)上に表示し、一定速度で移動するbeamをそれに追従させた。

負荷は5kgwを設定した。荷重方法は、まず直径15cmの木製の円盤の円周上にわたって作成した細い溝の一点と荷重とをステンレス製のワイヤーロープで連結した。そしてその円盤を足関節を軸にして回転させることによりワイヤーは円周上の溝を通り、常に一定の荷重がかかるようにした(写真1)。

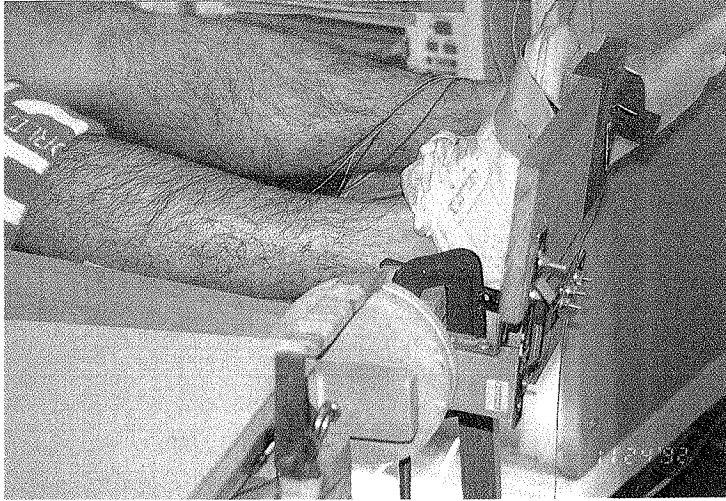


Photo.1. Experimental set up

足関節運動時の荷重に対する加速度変化を足関節角度曲線から算出したところ、変動幅は60deg/sの短縮性収縮時に約+0.4g (g:重力加速度)程度であり、その時間はスタート時約0.024秒、ストップ時約0.026秒であった²¹⁾。したがって変動幅は大きなものではなく、変動している時間も運動時間全体の約5%ほどであり、残りの約95%の時間はほぼ一定の負荷が課せられる実験条件であった。

これと同時に、表面電極導出法により短縮性および伸張性収縮時の下腿三頭筋(外側腓腹筋:GL, 内側腓腹筋:GM, ヒラメ筋:SOL)の筋電図を記録した。また導出されたこれらの筋電図を包絡線検波方式(TC:0.1s)により積分し記録した。電極は直径10mmでゴム枠銀板製のものを使用した。皮膚抵抗をできるだけ小さくするために、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。電極間距離は30mmで時定数は0.003sであった。

測定はそれぞれ充分な休息をはさみ、各々6回ずつ行った。

得られたデータの計測は、特に筋活動のピークにおける様相に検討を加えるために、各測定の積分筋電図曲線のピーク値およびその時の足関節角度を計測し、6回の平均値を算出し、男子、女子の平均値および標準偏差を求めた(図2, 4)。各筋の平均値の有意差検定はpaired t-testにより

行い、いずれの場合も危険率5%未満をもって有意とした。

【実験成績】

下腿三頭筋の活動パターンは被験者間で若干個人差がみられたが、その典型的な筋電図の記録例を図1に示した。図1Aは角速度6 deg/sの時のものであるが、短縮性収縮相において両腓腹筋は足関節角度が大きいところで活動が増大する傾向にあり、外側腓腹筋は足関節角度が約40°から活動し始め、50°~60°の間で振幅が最大となる傾向にあった。内側腓腹筋はほぼ終始活動がみられ、50°~60°の間で振幅が最大となる傾向がみられた。一方ヒラメ筋は足関節角度の小さいところで振幅が増大する傾向にあった。

図1Bは角速度60deg/sのときのものである。6 deg/sのときと比較して外側腓腹筋の筋電図振幅が顕著に増大し、逆にヒラメ筋では顕著に減少する様子が観察され、さらに最大振幅が得られるときの足関節角度が大きくなる傾向がみられた。

筋活動のピークにおける様相に検討を加えるために、積分筋電図のピーク値を計測した(図2A, B)。角速度6 deg/sおよび60deg/sのとき、外側腓腹筋の場合、男子ではそれぞれ 31.0 ± 15.2 , 45.4 ± 22.1 (μV)、女子では 30.3 ± 12.8 , 44.2 ± 17.8 (μV)であった。角速度の増大により男女と

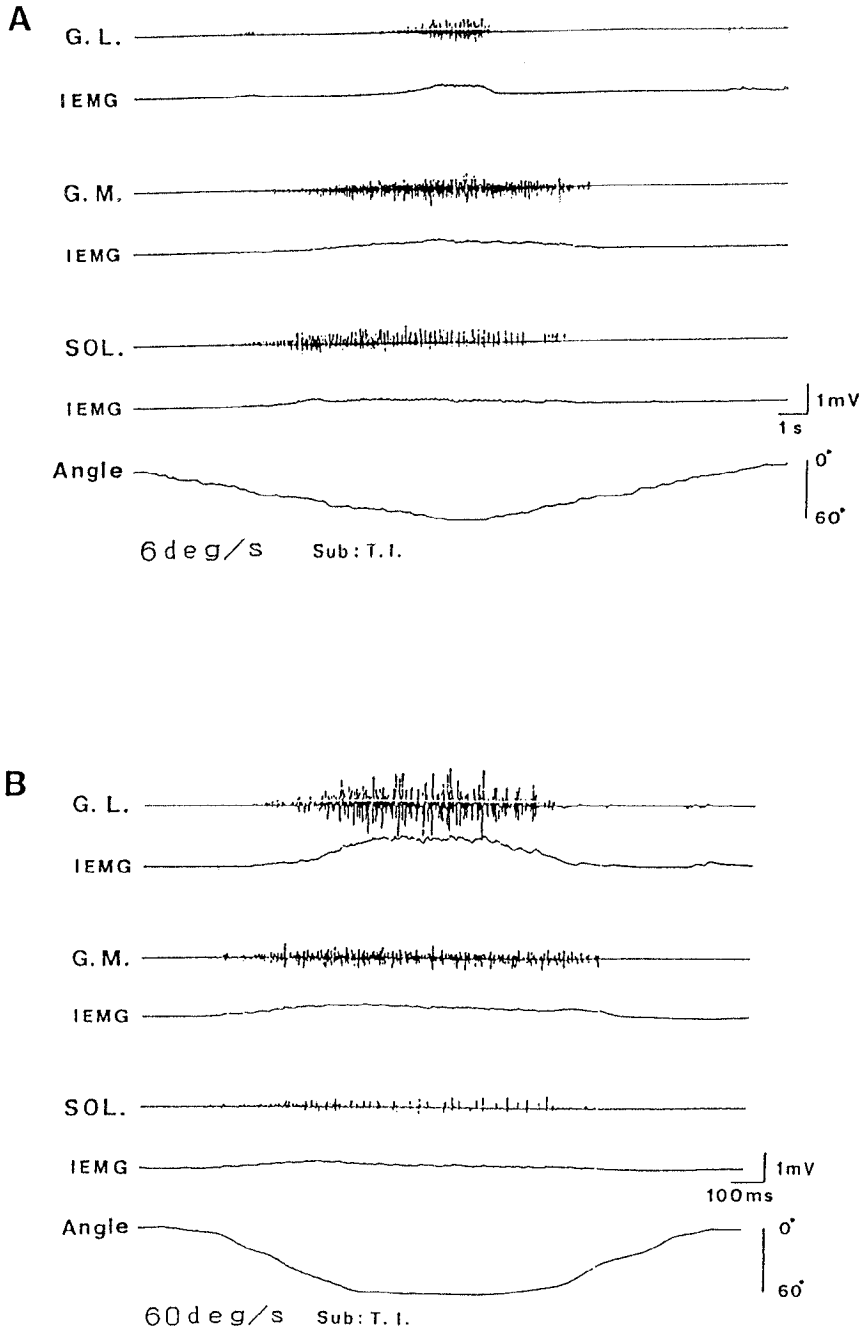


Fig.1. Examples of EMG records. EMGs and integrated EMGs (IEMG) in lateral gastrocnemius (GL), medial gastrocnemius (GM), and soleus (SOL) muscles are shown. Bottom line (Angle) indicates ankle joint angles. A; 6 deg/s, B; 60 deg/s.

も積分筋電図のピーク値は増大する傾向にあり, 特に男子では46%有意に増大した。内側腓腹筋の場合では男子でそれぞれ 40.6 ± 16.3 , 48.0 ± 20.3 (μV), 女子で 45.6 ± 15.3 , 62.1 ± 23.2 (μV)であった。男女とも角速度の増大により18~36%増大する傾向にあったが有意な増大は認められなかった。ヒラメ筋の場合では男子でそれぞれ 18.3 ± 5.6 , 13.7 ± 7.3 (μV), 女子で 9.4 ± 4.4 , 16.3 ± 9.6 (μV)であった。男子では外側腓腹筋の場合とは逆に角速度の増大により25%有意に減少したが, 一方女子では両腓腹筋同様に有意ではないが増大する傾向にあった。

図3では筋活動のピークにおける様相について被験者個々に観察するため, 各被験者について, 角速度の増大による筋電図積分値のピーク値の変化率(6 deg/sのときのものに対する60deg/sのときのもの)を示した。外側腓腹筋の場合, 男子

では21名中16名が増大を示し, うち14名が有意に増大した。女子では6名中5名が増大し, うち4名が有意に増大した(図3A)。内側腓腹筋の場合, 男子では15名が増大を示し, うち10名が有意に増大した。女子では外側腓腹筋同様5名が増大し, うち4名が有意に増大した(図3B)。一方, ヒラメ筋の場合, 男子では17名が減少を示し, うち14名が有意に減少したが, 女子では1名が減少し, 5名が減少するという傾向をみせ, 男子とは様相を異にした(図3C)。

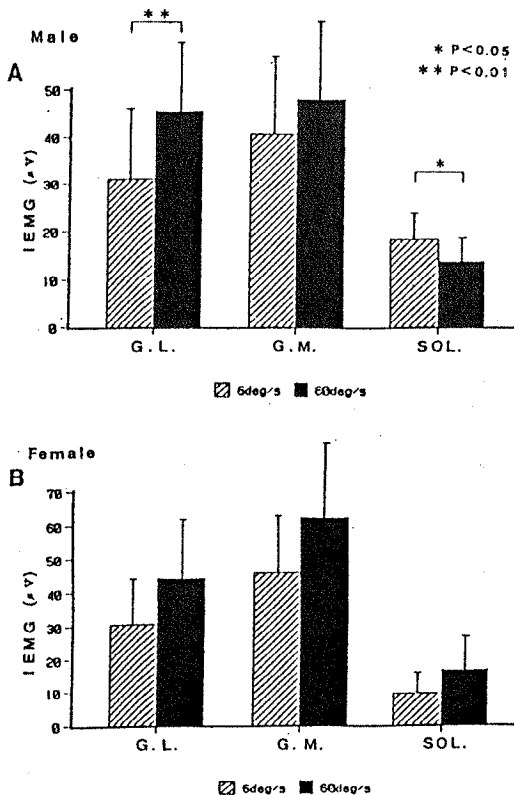


Fig. 2. Mean peak amplitudes in each muscle. A; Male, B; Female. □; 6 deg/s, ■; 60 deg/s. *, significance at 0.05 level, **, significance at 0.01 level.

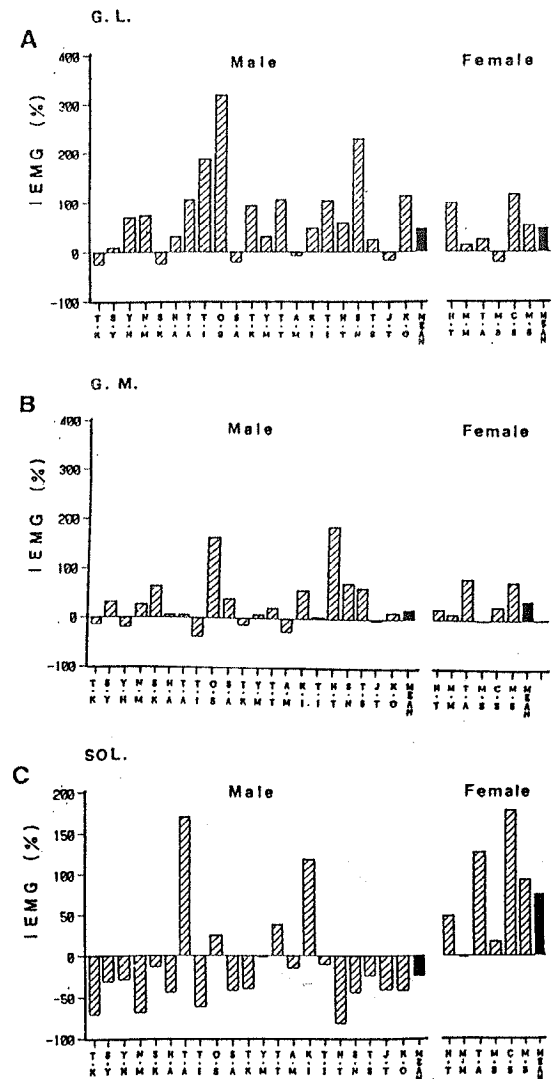


Fig. 3. % differences of the peak integrated EMG at 60 deg/s compared to the peak at 6 deg/s in each subject. A; GL, B; GM, C; SOL.

図4では各筋について、角速度6および60deg/sでの筋電図積分値がピークに達するときの足関節角度について、男女の平均を示した。外側腓腹筋の場合、男子ではそれぞれ52.6±2.4, 55.7±3.1(deg), 女子では48.6±2.9, 50.0±4.6(deg)であった。内側腓腹筋の場合、男子では51.7±3.2, 53.4±3.9(deg), 女子では46.7±5.0, 45.2±6.1(deg)であった。ヒラメ筋の場合、男子では45.3±5.1, 52.5±6.0(deg), 女子では44.3±7.4, 44.7±4.9(deg)であった。男子のヒラメ筋については筋電図積分値がピークに達するときの足関節角度が角速度の増大により有意に増大, すなわち大なる方へ移行するという特徴的な傾向を示した。

【実験成績に対する考察】

下腿三頭筋を構成する腓腹筋とヒラメ筋は協同筋ではあるがその解剖学的, 生理学的特性は異なる。ヒト外側腓腹筋は大腿骨上顆に起始をもつ二関節筋であり, type I線維の占める割合は平均値約50% (45.6~56.0)⁸⁾である。一方ヒラメ筋は腓骨頭に起始をもつ単関節筋であり, type I線維の占める割合は平均値約90% (74.5~98.4)⁸⁾である。そしてこれらの筋が足関節を足底側に屈し, 踵を挙げる作用を行う。すなわち, 直立時には地面を蹴るように働く¹⁴⁾。

図1で観察されたように, 角速度6 deg/sの低速度運動では, 腓腹筋は足関節角度の大きいところで, ヒラメ筋は小さいところで筋電図の振幅が増大する傾向にあった。特に外側腓腹筋は足底屈運動の前半約30°までは silentであり, 後半の約30°以降から活動がみられた。また角速度60deg/sでは外側腓腹筋の振幅が顕著に増大し, ヒラメ筋では振幅が減少した。このことは下腿三頭筋の各筋は足関節を底屈する協同筋でありながらその活動様式は異なり, 機能的にも同一の単位として扱えないものと考えられた。

一流長距離選手の男子において, 図2 A, 3に示されたごとく, 角速度の増大により筋電図積分値のピーク値が外側腓腹筋では平均46%有意に増大し, 逆にヒラメ筋では平均25%有意に減少した。Smith et al¹⁸⁾は, ネコの paw shaking (急速な足振り動作) 時にヒラメ筋の活動を伴わずに腓腹筋の運動単位が選択的に活動参加することを観察し, ヒラメ筋 (slow-type unit) の動員がこの動作を遂行するのに不適であるために選択的抑制が作用したためと報告した。Capady and Stein⁵⁾は高速度のトレッドミル走では, 歩行時に比べてヒラメ筋の運動ニューロンの興奮性が有意に低下することを報告している。田巻ら²¹⁾は健康成人男子において角速度の増大に伴い筋電図積分値のピーク値が内側腓腹筋で7~15%有意に増大し, ヒラメ筋では22~49%有意に減少することを報告した。本実験の成績を考慮すると, 一流長距離選手の男子についても足関節の角速度の増大によって

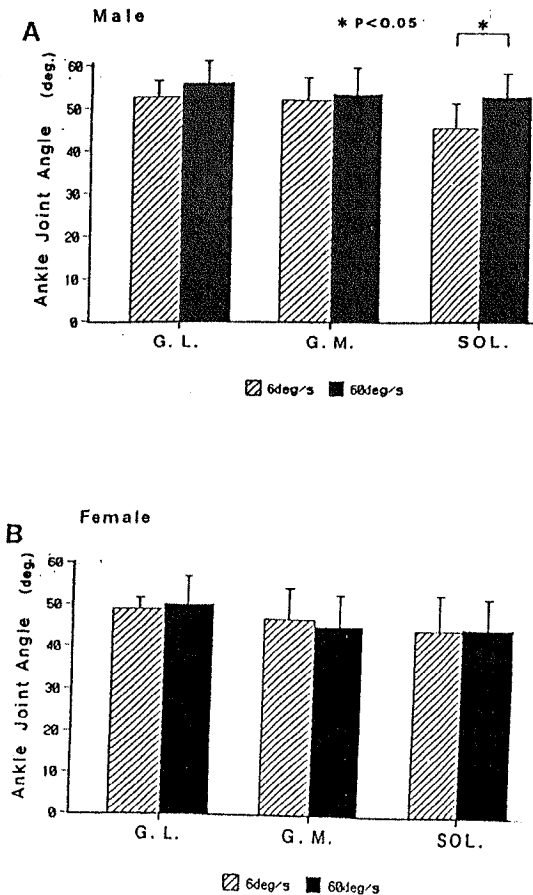


Fig. 4. Mean ankle joint angles at the peak integrated EMGs in each muscle. A; Male, B; Female. ▨: 6 deg/s, ■: 60 deg/s. *: significance at 0.05 level.

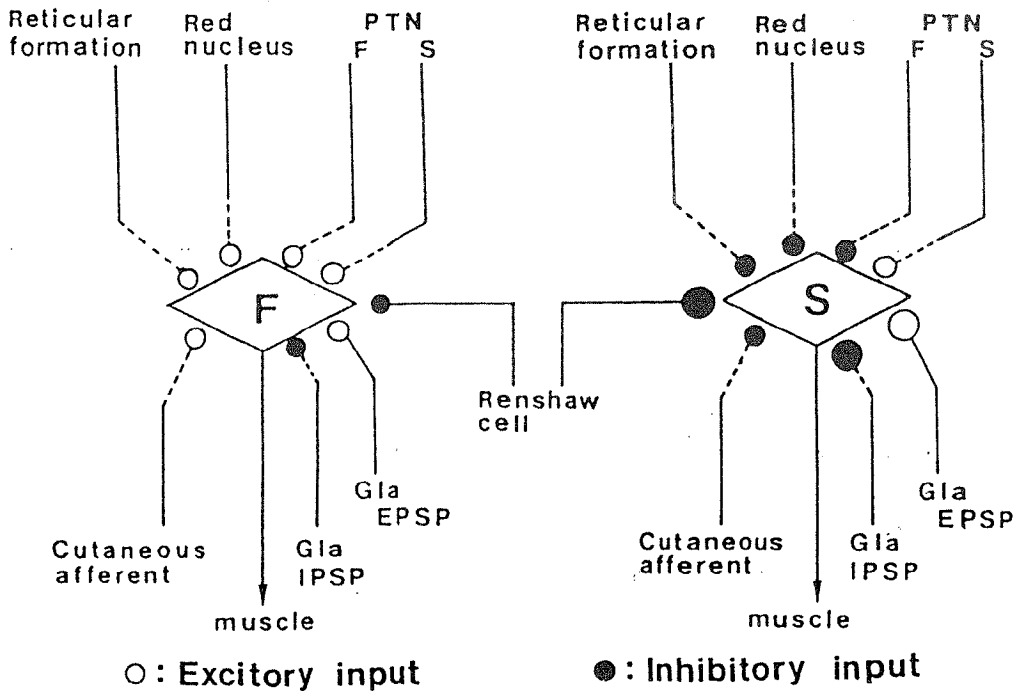


Fig. 5 . Illustrations of the composition of synaptic input to α motoneurons.

素早い運動を遂行するのに不都合な slow-type の運動単位の活動が抑制され, 逆に fast-type の運動単位が促進されるという, 角速度に依存して運動単位を選択的に動員する合目的機構が存在する可能性が推察された。

またヒラメ筋については, 図4に示すように, 角速度の増大により筋電図積分値がピークに達するときの角度が有意に増大した。田巻ら²⁰⁾および小川ら¹⁶⁾は, 角速度の増大に伴い運動単位の発火開始角度が大きく変化する傾向のユニットを観察している。ヒラメ筋においては recruitment 時の角度について, 角速度依存性のあるユニットが多く存在するのではないかと推察された。

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 (図5)。皮膚神経³⁾, 赤核²⁾および fast-type の PTN¹⁾からの入力は fast-type unit では EPSP を, slow-type unit では IPSP を発生すると言われる。I a 群から

の入力は fast-type では小さい EPSP を発生させ, slow-type では大きい EPSP を発生させる⁴⁾。また Renshaw 細胞からの入力は fast-type より slow-type の方が大きい IPSP を発生させると言われている⁶⁾。角速度の増大に伴って I a 群からの入力の減少, 皮膚神経, 赤核脊髄路, fast-type の PTN 等からの入力の増大, および Renshaw 抑制によりシナプス入力の構成に変化を来たし, その結果, 観察されたような現象が発現したことも考えられる。

女子においては, 図2 B, 3, 4 B に示されたように, 男子とは筋活動のピークにおける様相を異にした。特に筋電図積分値のピーク値に関して, 角速度の増大により男子のヒラメ筋は有意に減少したのに対し, 女子では腓腹筋と同様に増大する傾向にあった。この相違は下腿三頭筋を構成する運動単位のタイプの相違によるものと考えられた。Kawakami⁸⁾, 川上ら⁹⁾および古沢⁷⁾は, 性ホルモンが骨格筋の活動に影響を与えること, すな

わち progesterone は筋活動を抑制し, estradiol, testosterone は増強することを報告した。また高野¹⁹⁾および川上¹¹⁾は性ホルモンが $\bar{F}-s$ 関係に及ぼす影響を調べ, progesterone 投与により kinetic NMU の出現が抑制されることを観察し, さらに男子が相動的筋収縮に適した機能分化に対し, 女子は tonic な筋緊張の機能分化を示したことを報告した。さらに越川¹²⁾は性ホルモンによるカエル筋細胞内電位の変化を観察したところ, progesterone は活動電位を減少させ閾値を上昇させることを報告し, 運動系における性ホルモンの作用は神経系だけではなく, 筋自体の興奮性にも影響を及ぼしているとした。

Krotkiewski et al¹³⁾は雄 rat の去勢により type II 線維の比率およびその酵素活性が低下し, testosterone 投与で去勢前の状態に回復することを報告した。Simoneau and Bouchard¹⁷⁾は mixed である外側広筋について fiber type の比率を男女共に観察した結果, type I については女子が有意に大きく, type II については男子が有意に大きかったことを報告した。本実験の女子において見られたごとく, 協同筋間での明確な選択的動員が認められない要因に, 筋線維組成の分布差異が大きくないということが挙げられる¹⁵⁾。腓腹筋においては slow-type unit と fast-type unit が50/50にあると言われるが, 腓腹筋も性ホルモンの影響を受けるとすれば, 女子の場合 slow-type unit の方が多く存在し, 男子より筋線維組成の比率がヒラメ筋に近いものとなり, ヒラメ筋の抑制された分を腓腹筋の fast-type unit が担うことができず, 選択的動員が困難になることが考えられた。しかしながら下腿三頭筋が性ホルモンの影響をどの程度受けるかについての説明は今後の詳細な検討が待たれる。

【文 献】

- 1) Araki, T., Endo, K., Kawai, Y., Ito, K. and Shigenaga, Y.: Supraspinal control of slow and fast spinal motoneurons of the cat. *Prog. Brain Res.* 44, 413-432, 1976.
- 2) Burke, R. E., Jankouska, E. and Ten Bruggencate, G.: A comparison of peripheral and rubrospinal synaptic input to slow and fast twitch motor units of triceps surae. *J. Physiol.*, 207, 709-732, 1970.
- 3) Burke, R. E., Rymer, W. Z. and Walsh, J. V.: Functional specialization in the motor unit population of cat medial gastrocnemius muscle. In: *Control of Posture and Locomotion*. R. B. Stain, K. G. Pearson, R. S. Smith and J. B. Redford (Eds), Plenum, New York, pp. 29-44, 1973.
- 4) Burke, R. E., Rymer, W. Z. and Walsh, J. V.: Relative strength of synaptic input from short-latency pathways to motor units of defined type in cat medial gastrocnemius. *J. Neurophysiol.* 39, 447-458, 1976.
- 5) Capady, C. and Stein, R. B.: Difference in the amplitude of human soleus H-reflex during walking and running. *J. Physiol.*, 392, 513-522, 1987.
- 6) Friedman, W. A., Sybert, G. W., Munson, J. B. and Fleshman, J. W.: Recurrent inhibition in type-identified motoneuron. *J. Neurophysiol.*, 64, 1349-1359, 1981.
- 7) 古沢一夫: 性 Hormon と骨格筋の活動, 医学のあゆみ, 26, 236, 1958.
- 8) Johnson, M. A., Polgar, J., Weightman, D. and Appleton, D.: Data on the distribution of fiber types in thirty-six human muscles. *J. Neurol. Sci.*, 18, 111-129, 1972.
- 9) Kawakami M.: Electro-myographic study of sexual and other hormones on skeletal muscle. *J. J. Physiol.*, 5, 251-273, 1954.
- 10) 川上正澄, 高野秀勝, 越久公雄, 福田茂樹: ホルモンと骨格筋緊張, ホルモンと臨床, 4, 17-33, 1956.
- 11) 川上正澄, 高野秀勝, 中村秀人: 男女筋機能の筋電図的考察, 体力科学, 9, 445, 1960.
- 12) 越川裕正: 蛙筋細胞内に及ぼす性ホルモンの影響について, 日本生理誌, 19, 754, 1957.
- 13) Krotkiewski, M., Kral, J. G. and Karlsson, J.: Effects of castration and testosterone on substitution on body composition and muscle metabolism in rats. *Acta Physiol. Scand.*, 109, 233-237, 1980.
- 14) 三井但夫, 嶋井和世, 安田健次郎, 加藤信一, 久保田くら, 井上芳郎: 新版岡嶋解剖学, 杏林書院, 東京, 291, 1980.
- 15) 森谷敏夫: 運動単位の増強とインパルス発射様式, *J. J. S. S.*, 8, 668-676, 1989.

- 16) 小川芳徳, 米本恭三: 等張性収縮におけるヒト外側広筋単一運動単位の活動様式-発火開始角度との関係-, 第18回運動療法研究会講演論文集, 74-75, 1993.
- 17) Simoneau, J. and Bouchard, C.: Human variation in skeletal muscle fibertype proportion and enzyme activities. *Am. J. Physiol.*, 257, E567-E572, 1989.
- 18) Smith, J. L. , Betts, B. , Edgerton, V. R. and Zernicke, F. : Rapid ankle extension during paw shakes : Selective recruitment of fast ankle extensors. *J. Neurophysiol.* , 43, 612-620, 1980.
- 19) 高野秀勝, 石川敬次, 中村秀人: 性 Hormon の呼吸筋活動に及ぼす影響の筋電図的考察, 日本生理誌, 19, 754, 1957.
- 20) 田卷弘之, 前田 明, 江橋 博, 芝山秀太郎, 倉田 博: 足関節運動における角速度変化とヒト外側腓腹筋の単一運動単位の活動様式, 体力研究, 82: 59-66, 1993.
- 21) 田卷弘之, 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, 42: 292-300, 1993.