

反応時間に対する予備張力および筋線維組成の影響

琉子 友男

東京大学教養学部体育研究室

Influence of fiber composition and preliminary tension on reaction time

Tomoo Ryushi

Department of Sports Sciences, College of Arts
and Sciences, University of Tokyo

Abstract

Reaction time (TRT) with its premotor (PMT) and motor time (MT) components was studied at preliminary tension of 20% MVC or no preliminary tension in one leg isometric knee extension ($n=6$). These variables were intercorrelated together with muscle biopsy variables taken from m. vastus lateralis (left).

All of TRT, PMT, and MT at preliminary tension of 20% MVC were decreased significantly as compared with those at no preliminary tension. Significant negative correlation was observed between MT at preliminary tension of 20% MVC and the percent number of ST fibers ($p<0.05$).

These results suggest that reaction time is influenced by both enhanced muscle activity levels and excitability of motor units, including central nervous system, and that MT at preliminary tension of 20% MVC correlates negatively to the percent number of ST fibers.

Key words: Reaction time, Fiber composition, preliminary tension

緒言

反応時間 (Total reaction time; TRT) は、一般的には視覚 (光) あるいは聴覚 (音) の刺激に対して、手や足を用いて、できるだけ早く規定された動作を起こす方法によって測定される。この刺激から反応動作が開始されるまでの時間を反応時間と呼んでいる。反応時間は光や音の刺激後、筋放電開始までの時間 (Premotor time; PMT) と筋放電開始から動作開始までの時間 (Motor time; MT) とから構成されているが、PMT は大脳および神経系の伝導時間 (神経系因子)、MT は筋の収縮時間 (筋系因子) を意味することが知られている¹²⁾。

一方、ヒトの骨格筋は数十万本の筋線維で構成されているが、この筋線維は大きく2つの種類に大別できる。すなわち、速い筋の収縮を要する運動のときに主に動員される Fast twitch fibers (FT) と姿勢保持や長時間の筋収縮を要する運動のときに動員される Slow twitch fibers (ST) である。さらに、FT 線維は代謝特性の差から FTa (速い収縮もできるが、持久的能力もある)、FTb (速い収縮はできるが、持久的能力はない)、および FTc (その機能に関しては現在のところ明らかにされていない) 線維に分類される。現在のところ、この FT と ST 線維の占める比率には個人差があること、この比率はトレーニングや運動によって変化せず、遺伝的な影響を強く受けていることが明らかにされている⁸⁾¹²⁾。また、これらの筋線維は脊髄の前角細胞からくる運動神経線維によって支配されているが、FT 線維を支配する神経線維は ST 線維を支配する神経線維に比較して太く、しかも Impulse の伝導速度が速いことが知られている⁴⁾。

一般的に大きな力やパワーの要求される身体運動では、主動作の前に筋の活動水準や中枢を含む神経系の興奮性を高めるための予備動作が必要であり、等尺性最大筋力に対する予備張力の影響¹⁾ や反応時間に対する予備張力の影響³⁾¹³⁾ についても古くから研究されてきている。しかし、反応時間を PMT と MT とに分類して予備張力や筋線維比率との関係を調査した研究は少ない。

そこで、本研究では、比較的軽い予備張力 (等

尺性最大筋力の20%) を筋に負荷した場合と負荷しない場合の脚伸展筋の反応時間を測定し、TRT, PMT, および MT に予備張力がどのような影響を及ぼすかを検討すること、さらに、それらの TRT, PMT, および MT に対して脚伸展筋の筋線維比率がどのような影響を及ぼしているかを検討することを目的とした。

方法

1. 被験者

被験者は某大学体育学部 に所属する過去2年間、規則的なトレーニング経験のない健康成人男子6名である。彼らの平均年齢は 21.5 ± 1.6 歳、平均身長は 171 ± 3.9 cm、平均体重は 63 ± 6.3 kg であった。

2. 反応時間の測定

聴覚の影響を除去するために耳栓をした座位姿勢の被験者を測定用イスに胸部と腹部をシートベルトを用いて固定した (図1)。予備張力を負荷しないときの反応時間の測定は、まず、被験者をリラックスさせ、その後、約3m前方の被験者の目の高さの位置にある反応時間測定用ランプの点灯と同時に、すばやく脚伸展の等尺性最大筋力を発揮するという方法で行なった。また、予備張力を負荷したときの反応時間の測定は、それぞれの被験者に等尺性最大筋力 (MVC) の約20%の筋力レベルをモニタースコープで確認させ、その筋力レベルを約8~10秒間維持した後にランプを点灯させ、それと同時にすばやく等尺性最大筋力を発揮するという方法で行なった (図1)。なお、そ

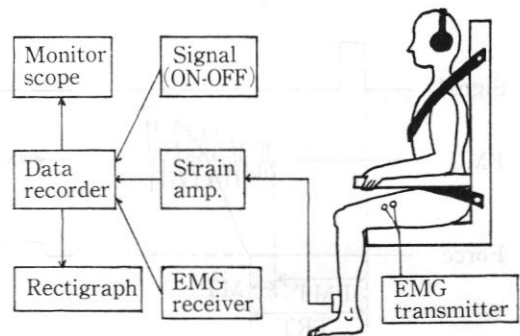


Fig. 1. Experimental set-up for measuring reaction time.

それぞれ十分な休息を入れながら5回ずつ測定し、最高値と最低値を除く3回の平均値を反応時間とした。また、筋電信号はテレメーターを用いて、左脚外側広筋から双極誘導法によって導出した(図1)。得られた結果から、TRT, PMT, およびMTを分類した(図2)。

3. 筋生検および組織化学的染色法

筋サンプルはEvansたちの方法³⁾に若干の改良を加えたsuctorial needleを用いて、脚伸展筋の外側部(外側広筋)から採取した。その採取法を下記に示す。

- 1) 採取部位を確認する。すなわち、腸骨棘と膝蓋骨上縁中央部とを結んだ線の遠位1/3の部位から外側へ1/2の部位(図3)、深さは筋膜から3~4cmである。
- 2) 採取部位を含む脚伸展筋をヒビテン・アルコールで消毒し、その上に穴布を置く。
- 3) 1%カルボカインを用いて、皮膚および筋膜を麻酔する。術中の不快感の出現や万一の場合に備えて、生食ないし5%ブドウ糖液を点滴できるような用意した。
- 4) メス(尖刃)を用いて皮膚、皮下組織および筋膜を約5mm切開する。
- 5) Suctorial needleを用いて筋肉を採取する。
- 6) 筋膜および皮膚を絹糸を用いて縫合する。
- 7) 必要と思われる被験者には、鎮痛剤、抗性物質を投与した。

次に、採取した筋サンプルの処理法および染色法を示すと次のようであった。

- 1) 採取した筋サンプルをガーゼの上に乗せ、血

液を取り除く。その後、筋線維の方向を整え、約 -160° の液体窒素で冷やしたイソペンタン中に入れ瞬間凍結する。

- 2) 凍結した筋サンプルをO.C.T.コンパウンドを用いて、ゼラチン台に固定、全体をコンパウンドで包み更に凍結する。
- 3) -20°C のクリオスタット内で 10μ の連続切片を作成する。切片を貼付したカバーガラスはシャーレに入れて -40°C の冷凍庫に保存した。
- 4) pH 4.3と4.6の酢酸ナトリウムバッファーでpreincubationした後、routineのmyosin ATPase染色を行なう。もう1枚の切片はpreincubationなしでroutineのmyosin ATPase染色(pH 9.4)を行なった。
- 5) 顕微鏡写真を撮影する。その結果から、ST, FTa, FTb および FTc 線維を同定する。すなわち、pH 4.3で安定の筋線維はSTとFTcである。また、pH 4.6で安定の筋線維はST, FTb, および FTcである。さらに、pH 9.4で安定の筋線維はFTa, FTb, FTcである。本研究の場合、FTc線維はその数がわずか(平均で2%)であったため考慮外とした。

結果

本研究で用いたsuctorial needleによって採取した筋サンプル量は、筋線維数にして 935 ± 137 本(平均値 \pm 標準偏差)であった。また、pH 4.3お

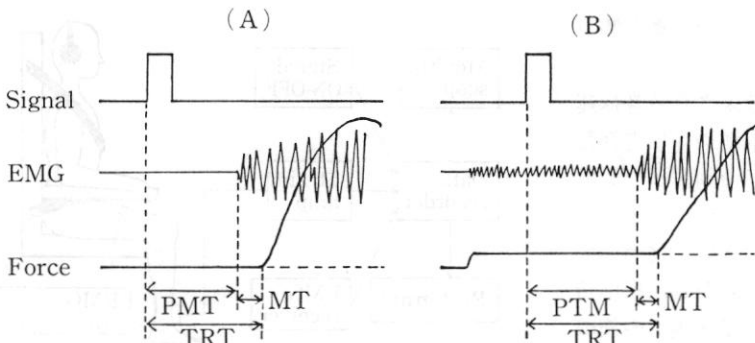


Fig. 2. Trace of a recording, (A) no preliminary tension, (B) preliminary tension of 20% MVC.

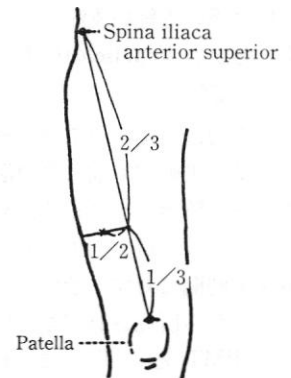


Fig. 3. A biopsy region.

よび pH 4.6 で preincubation した後, routine の myosin ATPase 染色をした切片 2 枚と preincubation なしで routine の myosin ATPase 染色をした切片と計 3 枚の連続切片から同定した各筋線維の占める数比率は, ST 線維が $42.6 \pm 6.5\%$, FTa 線維が $40.7 \pm 4.3\%$, FTb 線維が $14.5 \pm 9.0\%$, FT/ST 比が 1.39 ± 0.38 であった (表 1)。

予備張力を負荷したときの反応時間は, 負荷しないときの反応時間に比較して, TRT で約 13%,

Table 1. Fiber composition in m. vastus lateralis (n=6), N.F. denotes the total number of fibers.

	N.F.	%ST	%FTa	%FTb	FT/ST
mean	935	42.6	40.7	14.5	1.39
S.D.(±)	137	6.5	4.3	9.0	0.38

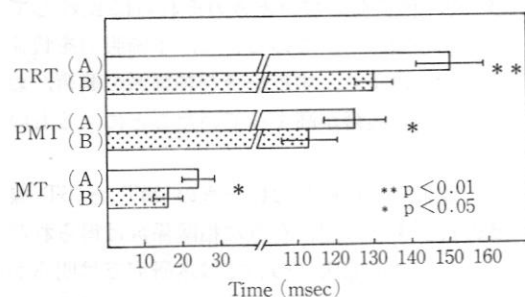


Fig. 4. Differences of reaction time at no preliminary tension (A) and preliminary tension of 20% MVC (B).

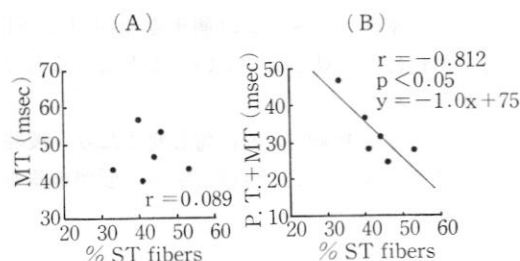


Fig. 5. The relationship between MT at no preliminary tension and the percent of ST fibers (A), the relationship between MT at preliminary tension of 20% MVC (P.T.+MT) and the percent of ST fibers (B).

PMT で約 10%, MT で約 32% 小さい値を示した。また, unpaired Data に対する student's T test を用いた統計処理によると, TRT は 1% 水準, PMT と MT は 5% 水準で両者に有意な差がみられた (図 4)。予備張力を負荷しないときの TRT, PMT および MT とそれぞれの筋線維 (ST, FTa および FTb) の占める数比率との間には, 統計的に有意な相関係数が得られなかった。しかし, 予備張力を負荷したときの MT と ST 線維の占める比率との間には, $r = -0.812$, $p < 0.05$ の有意な相関係数が得られた (図 5)。

論議

予備張力を負荷しないときの TRT, PMT, MT はそれぞれ 150 ± 8.8 , 125 ± 8.3 , 24 ± 3.3 msec であり, これらの値は Viitasalo & Komi (1981) の結果¹³⁾と同様の値であった。予備張力を負荷したときの TRT, PMT, MT は予備張力を負荷しないときのそれらに比較して, それぞれ 13%, 10%, 32% も小さく, 統計的にも有意な差が認められた (図 4)。この TRT, PMT, MT の短縮する傾向は, Clarke (1968) の結果³⁾と符合するものである。彼らは, TRT を PMT と MT に分けて測定していないが, 予備張力の増大 (0 から 25 kg) に伴ない TRT が短縮する原因は, 予備張力を保持することによって, 中枢を含む神経系の興奮性が高まったことによると報告している。本研究の結果から, 神経系の活動状態を反映している PMT が約 10% 短縮していることから, 予備張力を負荷することにより, 神経系 (大脳, 脊髄前角細胞, 運動神経など) の興奮性が高まり TRT が短縮されることが明らかになった。また, MT に関しても, 予備張力を負荷することにより, そうでないときに比較して約 32% も短縮することから神経系と共に筋系, すなわち, 筋の stiffness が増すなど, 筋の活動水準が高まっていたことも TRT の短縮に貢献していることが明らかである。このような結果から, 予備張力を負荷することによる反応時間 (TRT) の短縮は, 神経系因子 (PMT) と筋系因子 (MT) の両方によるものであることが明らかになった。

MT は, 別名 EMD (Electromechanical delay)

とも呼ばれているが、これは、運動神経細胞から運動終板へ Impulse が伝導されて、その後、実際に筋が収縮を開始するまでの時間を意味している。Larsson (1978)⁹⁾は、EMD と筋線維組成との関係をみる場合、筋線維に沿って伝播する Impulse、T 管系への入り込み、筋小胞体の Ca^{2+} の放出、Cross-bridge の形成など筋収縮のメカニズムにおける ST 線維と FT 線維の差異を考慮に入れなければならないと報告している。また、Cavanagh & Komi (1979)²⁾は、EMD は主に収縮要素が直列弾性要素を引き伸ばすのに要する時間によって決定されることを報告している。また、筋線維組成と EMD との関係のみた研究では、外側広筋に FT 線維を多く有している被験者は、そうでない被験者に比較して EMD が短いという報告¹⁰⁾や FT 線維を多く有している上腕三頭筋の方が ST 線維を多く有している上腕二頭筋に比較して EMD が短いという報告¹¹⁾がある。さらに、本研究と同様の方法を用いて測定した EMD と ST 線維の数比率との間に正の相関関係があったとする報告¹²⁾がある。このように、先行研究の多くが、FT 線維の多い筋は FT 線維の少ない筋に比較して EMD が短いことを報告している。しかし、本研究においては、予備張力を負荷しないときの MT と ST 線維の数比率との間に有意な正の相関係数を得ることはできなかった(図5)。この点に関しては、さらに被験者を増やすなどして再検討することが必要と思われる。また、予備張力を負荷したときの MT と ST 線維の数比率との間には、負の相関関係が得られたが(図5)、この結果は、約 20% MVC の予備張力を負荷したときは、ST 線維の多い筋は ST 線維の少ない筋に比較して MT が短いことを意味している。等尺性最大筋力(MVC)の20%の負荷を持続して持ち上げる場合には、組織化学的結果から主に ST 線維が動員されるという報告⁶⁾や、上腕二頭筋の slow motor units を活動させる閾値は 0~50% MVC であるという報告⁷⁾からして、本研究での約 20%の予備張力発揮時には、おそらく ST 線維が主に動員されていたものと考えられる。このことから、予備張力を負荷したときの MT と ST 線維の数比率との間に負の相関関係が得られ

た原因の1つは、低い予備張力を発揮することにより、ST 線維を支配するアルファ運動ニューロンの興奮が高まり、ST 線維が動員され易くなっていたことによるものと考えられる。

しかし、今後、さらに予備張力の負荷を変えたり、被験者を増やすなどして再検討することが必要と思われる。

要 約

6名の健康成人男子の脚伸展筋を用いて、20% MVC の予備張力を負荷したときと負荷しないときの反応時間 (TRT) を測定し、神経系因子 (PMT) と筋系因子 (MT) の差について検討した。さらに、それらの TRT, PMT および MT と外側広筋の筋線維組成との関係について検討した結果、次のことが明らかになった。

1. 予備張力を負荷したときの TRT, PMT および MT は負荷しないときのそれらに比較して有意に短縮した。このことは、予備張力を負荷することにより、中枢を含む神経系の興奮、および筋系の興奮が高まっていたことによるものである。
2. 予備張力を負荷しないときの MT と ST 線維の数比率との間に有意な相関係数は得られなかった。この原因については本研究では明らかにすることができなかった。しかし、予備張力を負荷したときの MT と ST 線維の数比率との間には $r = -0.812$, $p < 0.05$ の有意な相関係数が得られた。このことは、低い負荷の予備張力を発揮することにより、ST 線維を支配するアルファ運動ニューロンの興奮が高まり、ST 線維が動員され易くなっていたことによるものと考えられる。

今後、さらに予備張力の負荷を変えたり、被験者数を増やすなどして、再検討する必要があるものと考えられる。

文 献

- 1) 阿江通良, 渋川侃二, 金原 勇, “大きな力やパワーの要求される身体運動の生力学的基礎要因に関する研究”, 体育学研究, 23 (4) : 321-331, 1979.
- 2) Cavanagh, P. R., Komi, P. V., “Electromechanical delay in human skeletal muscle under concentric

- and eccentric contractions," *Eur. J. Appl. Physiol.* 42: 159-163, 1979.
- 3) Clarke, D. H., "Effect of preliminary muscular tension of reaction latency," *Research Quarterly* 39(1): 60-66, 1968.
 - 4) Cullheim, S., "Relations between cell body size, axon diameter and axon conduction velocity of cat sciatic α -motoneurons stained with horseradish peroxidase," *Neuroscience Letters*, 8: 17-20, 1978.
 - 5) Evans, W. T., Phinney, S. D., Young, V. R., "Suction applied to a muscle biopsy maximizes sample size," *Med. Sci. Sports*, 14: 101-102, 1982.
 - 6) Gollnick, P. D., Karlsson, J., Piehl, K., Saltin, B., "Selective glycogen depletion in skeletal muscle fibers of man following sustained contractions," *J. Physiol* 241: 59-67, 1974.
 - 7) Gydikov, A. & Kosarov, D., "Physiological characteristics of the tonic and phasic motor units in human muscles, Motor control," edited by A. A. Gydikov and D. S. Kosarov. Plenum Press. New York. pp. 75-94, 1973. [Komi, P. V. & Viitasalo, J. T., "Signal characteristics of EMG at different levels of muscle tension," *Acta Physiol. Scand.* 96: 267-276, 1976. より引用]
 - 8) Komi, P. V., Viitasalo, J. T., Havu, M., Thorstensson, A., Sjödin, B., Karlsson, J., "Skeletal muscle fibers and muscle enzyme activities in monozygous and dizygous twins of both sexes," *Acta Physiol. Scand.* 100: 385-392, 1977.
 - 9) Larsson, L., "Morphological and functional characteristics of the ageing skeletal muscle in man, A cross-sectional study," *Acta Physiol. Scand.*, Suppl. 457, 1978.
 - 10) Nilsson, J., Tesch, P. & Thorstensson, A., "Fatigue and EMG of repeated fast voluntary contractions in man," *Acta physiol. Scand.* 101: 194-198, 1977.
 - 11) Norman, R. W. & Komi, P. V., "Electromechanical delay in skeletal muscle under normal movement conditions," *Acta Physiol. Scand.* 106: 241-248, 1979.
 - 12) Saltin, B., Henriksson, J., Nygaard, E., Andersen, P., Jansson, E. "Fiber types and metabolic potentials of skeletal muscles in sedentary man and endurance runners," *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 301: 3-29, 1977.
 - 13) Viitasalo, J. T. & Komi, P. V., "Interrelationships between electromyographic, mechanical, muscle structure and reflex time measurements in man," *Acta Physiol. Scand.* 111: 97-103, 1981.