動的筋収縮前の一過性の張力低下について

永 見 邦 篤

SIGNIFICANCE OF TRANSIENT DECREASE IN SUSTAINED TENSION PRECEDING RAPID MUSCLE CONTRACTION IN MAN

KUNIATSU NAGAMI

Abstract

The purpose of this study is to investigate significance of transient decrease in sustained tension preceding rapid muscle contraction in elbow flexor muscles.

Before rapid voluntary contraction, steady forces below 20% of the maximum contraction were maintained, and each transient decrease was detected by using high sensitive strain gauge (FD pick-up) with EMG of brachial biceps and triceps muscles. And girth and length changes of the biceps brachii muscle with the tension decrease were detected by using rubber strain-gauge method and X-ray technique, respectively.

The following results were obtained :

1) The transient decrease of steady forces were observed during the premotion silent period. Amount and duration of the transient tension decrease were below 20% of each steady force and 100 ms, respectively.

2) Amount of the transient tension decrease inversely correlated to time to half Pmax on the rapid tension development. ($p < 0.001$)

3) Amount of the transient tension decrease was significantly coefficient with decrement of girth of upper arm. ($p < 0.001$)

4) A distance between two Cu wire apices inserted into biceps brachii muscle shortened with increment of muscle force.

These results suggest that before rapid muscle contraction stretch of biceps brachii muscle transiently occurs, and that the stretch accelerates the following shortening velocity of the muscle via a stretch reflex.

(Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med. 1987, 36 : 116-127)

key words : Premotion silent period, Transient tension decrease, Muscle length, Stretch reflex

I. 緒 言

猪飼ら¹¹⁾は、垂直跳や肘関節の伸展動作を敏速に行なわせると、動作前に主働筋と拮抗筋の持続性放電が同時に消失するという現象を報告した。この筋放電消失現象、いわゆる動作前 silent period¹⁸⁾は、筋活動が緊張性のものから相動性のものへと変化するときを発現し、同時に動的動作時の筋収縮速度を速めるものとして注目されてきた。しかし、この動作前 silent period がいかなる機序で筋収縮速度を促進するかは、いまだ明ら

かでない。そこで本研究では、筋の弾性要素や伸張反射の関与に着目し、この立場からその機序の解明を試みた。

まず、動作前 silent period 発現時に筋力が低下するかどうかを検索した。そして、この張力低下量と筋収縮速度との関連を検討した。つぎに、動作前 silent period 発現時の筋の動態をラバーストレンゲージ¹⁷⁾を用いて検索した。さらにこの変動が筋長の変化によるかどうかを明らかにする目的で、X線の手法を利用した。そして、このレ線像にて筋力発揮時の筋の動きを検討した。

II. 実験方法

A. 反応動作時の張力と筋電図の記録

被検者には、健康な成人男子4名(25~33才)

を用いた。

反応動作は、つぎの条件で実施した。被検者は椅座位をとり、上肢を既に報告¹⁵⁾した実験装置に肘関節を90度にして固定した。動的筋収縮前の持

Fig. 1. X-ray photographs of biceps brachii muscle inserted Cu wire of a diameter of 100 μ m into peripheral (left side) and proximal ends (right side), and midpoint of its muscle, respectively. Subject performed to sustain the loads of 1, 2, 3, 4 and 5 kg at elbow angle of 90 degrees. Lower plate : at rest, Middle and upper plates : at tension exertion of 3 and 5 kg.

統筋力値は、随意的最大屈腕力（以下、MVC と略す）の 5, 10, 15 および 20% とした。各筋力値はブラウン管面上に示した。被検者は各筋力値を数秒間持続発揮し、ついで光刺激に反応して、最大努力で等尺性に肘関節の屈曲動作を行なった。この動作は、各筋力値について 20 回ずつ実施した。

張力の記録は、2 つの歪計を用いて行なった。ひとつはロードセル（昭和, RCB-200 K）によるもの、他のひとつは実験装置のレバーに連結した FD pick-up（日本光電, SB-1 T）によるものである。そしてロードセルで記録した張力曲線から、最大筋力 (Pmax) や、その筋力値に至るまでの時間 (Time to Pmax), また 1/2 の筋力値に至るまでの時間 (Time to half Pmax) を求めた。一方、FD pick-up による記録から、一過性の張力低下

の大きさやその持続時間を計測した。

また、上腕二頭筋と上腕三頭筋とから表面誘導法にて筋電図を導出し、動作前 silent period の検討に供した。全ての記録は、ペン書きオシログラフ（三栄, レクチグラフ-8 S）を用いて、 $250\text{mm} \cdot \text{sec}^{-1}$ の紙送り速度で行なった。

B. 反応動作時の上腕筋の変動

被検者には、実験 A の被検者 1 名と新たに 1 名を用いた。持続筋力値は 2 kg のみとし、実験 A と同様な反応動作を 25 回行なわせた。前述した張力と筋電図の記録に加えて、上腕筋の変動をみるために、新たにラバーストレンゲージ¹⁷⁾を用いた。水銀入りのラバーゲージは、上腕二頭筋の筋腹中央部を横断させて装着した。そして伸筋群の影響を避けるため、ゲージの両端をアクリル板に固定し、これを上腕の屈筋と伸筋の境界部の皮膚

Fig. 2. EMG patterns and tension records in reactive action. Transient decrease in sustained tension detected by using FD pick-up named in here "the transient tension decrease".

上にそれぞれ貼布した。ラバーゲージの長さは、実験後、マイクロメーターにて校正した。これらの諸現象は、電磁オシログラフ（三栄、ビシグラフ-5L 30）を用いて記録した。

C. 上腕二頭筋の長さ変化の計測

張力低下時の筋伸展量の算出、また筋の周径変化が筋長の変化を反映するかどうかを検討する目的で、実験Bの被検者2名について、さらにつぎの実験を行なった。

図1に示すごとく、直径100 μ mの銅線を筋内埋入電極の手法にて、上腕二頭筋の起始、中央および遠位部にそれぞれ刺入した。ついで上腕を台上に水平に保ち、肘関節角度を90度にした条件下で、1, 2, 3, 4および5 kgの荷重を上腕屈筋群に負荷した。そして安静時及び各負荷条件ごとに、上腕部が実物大となる撮影条件にて、水平方向からレントゲン像をえた。上腕二頭筋の長さ

変化は、起始及び遠位部に刺入した銅線先端の直線距離をレ線像にて実測し、これによって概算した。

III. 実験成績

A. 動的筋収縮前の一過性の張力低下

図2は、実験Aでえた反応動作の記録例である。上腕二頭筋と上腕三頭筋の放電消失、及びそれと同期した張力低下の発現が観察された。これら両者の発現率を被検者ごとに示したのが図3である。被検者K. N.の5% MVCを除いて、張力低下の発現率は、動作前 silent period のそれより大となった。

図4は、張力低下について分析した結果である。光刺激から張力低下開始までの時間は、ほとんど100~150 msecの範囲にあった（図4A）。これらの値は、動作前 silent period をみるまでの

Fig. 3. Frequency of appearance of the transient tension decrease and premotion silent period in each subject.

Fig. 4. Characteristics of the transient tension decrease. Reaction time (A) is a time difference between light signal and onset of tension decrease. Amount of tension decrease (B) indicate as a rate to sustained tension, and its duration (C) is a time difference between starting point of tension decrease and the lowest point of it. Each vertical bar are standard deviation.

反応時間¹¹⁾とはほぼ一致していた。張力低下量は、持続筋力値に対する変化率、すなわち $4g \times 10^2 / \%MVC$ の式から算出した。この値は、20%以下を示すものが大半を占めた(図4B)。また張力低下期間は、ほぼ 100 msec 以下であった(図4C)。

また張力低下量を動作前 silent period 発現の有無から比較すると、図5のように、この値は動作前 silent period 発現時程、大なる傾向にあった。

B. 張力低下量と動的筋収縮との関連

つぎに張力低下量と動的動作時の最大筋力及び

筋収縮速度との関係を検討した。その結果、この低下量と最大筋力との間に有意な相関はなかった。しかし、筋収縮速度の指標とされる Time to Pmax 及び Time to half Pmax の場合、図6に示すごとく、とくに Time to half Pmax と張力低下量との間で有意な相関を認めた。

C. 張力低下と上腕屈変化との関連

図7は、実験Bの反応動作の記録例である。

上腕二頭筋と上腕三頭筋の放電消失時に張力は低下し、これとはほぼ同期して上腕屈が減少した。そこで動作前 silent period 発現の有無を基に反

Fig. 5. Comparison between amounts of the transient tension decrease with and without pre-motion silent period. Each vertical bar are standard deviation.

応動作を区別し、それぞれの張力低下量とその持続時間、及び上腕屈の減少量の平均値を算出し表1に表示した。被検者 K. N. の場合、動作前 silent period 発現時で、いずれの値も大となった。また図8に示すごとく、張力低下量と上腕屈減少量との間に有意な相関を認めた。

D. 張力発揮時の上腕二頭筋の動態

図1に示すごとく、筋力レベルの増加に従い、上腕二頭筋の近位及び遠位部の銅線先端は、筋腹中央部へと移動した。同時に筋腹中央部が隆起するのを観察した。図9は、この近位及び遠位部の銅線先端の位置を上腕骨を基準にプロットしたものである。図で明らかなように、この先端は、安静時及び1, 2, 3, 4, 5 kg と筋力の増加(矢印方向)に伴い、漸次、上腕骨の上方ならびに筋腹中央部へと移動した。そこで、上腕二頭筋の長さ変化を次式から算出した。

$$L_0 - L_1 / L_0 \times 10^2$$

(但し、 L_0 は安静時の近位及び遠位部の銅線先端の直線距離、 L_1 は各筋力値におけるその直線距離

を示す)

図10に示すごとく、上腕二頭筋は、筋力の増加に従い短縮した。一方、その短縮の度合いは、筋力の増加により減少した。

IV. 考 察

ヒトの随意動作において、静的姿勢から動的なものへと動作が変換されることは極めて多い。とくにこの動作変換を敏速に行なうと、いわゆる動作前 silent period が発現することはよく知られている。そして今日まで、主としてその発現機序の検討がなされてきた¹⁰⁾¹¹⁾¹⁸⁾¹⁹⁾。

一方、この現象の発現時に動的動作の速度が速まることが報告された¹¹⁾。しかし、この理由はいまだ明らかにされていない。そこで本研究において、動作前 silent period がいかなる機序を介して筋収縮速度を促進するかを検討した。今回は、とくに筋の弾性要素や伸張反射との関連に着目して実験を行なった。

そこで、まず動作前 silent period 発現時の張

Fig. 6. Relation between amount of the transient tension decrease and time to half Pmax. Time to half Pmax is a time difference between onset of tension exertion and half point of peak tension obtained by use of the load cell.

力変化を検索した。その結果、この時張力が一過性に低下するのを認めた(図2, 7)。しかし、この張力低下は、動作前 silent period が発現しない時でも出現した(図3)。この理由につぎの点があげられる。反応動作時の筋電図をみると、筋放電が完全に消失しないまでも、一過性にその振幅が低下する例をよく観察した。これは、動的動作前の筋力レベル維持に關与する運動単位の一部が、その発射頻度を減少したり、あるいは、活動を停止したとすれば一応の理解ができる。従って、持続的筋活動時に活動参加していた運動単位が、ほぼ同期して活動を停止したとき動作前 silent period として現われ、また張力低下量も増すと思われる(図5, 表1)。

つぎにこの張力低下量と動的筋収縮との関連を

みると、とくに Time to half Pmax との間に有意な相関が示された(図6)。従って、動作変換時の動作前 silent period と張力低下、及びその後の筋収縮速度とは密接に關連することが示唆された。すなわち動作前 silent period の発現は、張力低下量を増加させ、その増加に従い動的筋収縮の初期速度が速められると思われる。

つぎに、この張力低下が筋収縮速度を促進する機序の検討を試みた。そこで、張力低下時の筋長の変化を検索した。その結果、張力低下時に筋の周囲径が減少し(図7)、その減少量は張力低下量に比例するのを認めた(図8)。さらに筋力発揮時の上腕二頭筋の移動方向は、筋腹中央部を示し、同時にこの部位が隆起するのを認めた(図1, 9)。従って、こゝでえた周囲径変化は、筋の長軸方向

Fig. 7. Typical record of the transient tension decrease in sustained tension and girth of upper arm, and premonition silent period in reactive action. Girth of upper arm recorded by using two strands mercury-in-rubber gauge. Both ends of the gauge connected to acryl plate, and each plate rigidly pasted on the skin between brachial biceps and triceps muscles, respectively.

への伸縮に因ると思われる。

ところで、ヒトの随意的筋力発揮において、関節角度を規定した条件下、いわゆる等尺性筋収縮時に筋長の変化を検討した報告はほとんどみられない。肘関節角度を90度、前腕を回外位に固定した条件の本実験で、上腕二頭筋の長さ変化をみた理由として、つぎのことがあげられる。まず上腕二頭筋の遠位端は、解剖学的に橈骨粗面に付着している。またこの部位は、前腕の回内回外運動で回転する。そこで、もし前腕を回外位にしても、無負荷状態では、肘関節部位の外旋が必ずしも最大位にならないとすると、筋収縮時に外旋度がさらに増すであろう。また、腱の伸展も考慮する必要がある。しかし釣り針型電極の先端は、筋力発揮時でも通常、同一部位にあるとされている。従って、関節角度を規定した条件といえども、ヒト

Table 1. Mean value and $\pm$ S.D. of each factors in cases with and without premonition silent period. These data obtained in series of the experiment showed in Fig. 7.

	silent period			
	with		without	
	Y. M. (n=0)	K. N. (n=11)	Y. M. (n=22)	K. N. (n=6)
amount of tension decrease (g)				
M		554	46.8	336
$\pm$ S. D.		154	20.5	129
duration of tension decrease (ms)				
M		72.5	30.6	65.0
$\pm$ S. D.		12.6	14.8	15.9
decrease of upper arm girth (mm)				
M		0.117	0.0417	0.0728
$\pm$ S. D.		0.049	0.0194	0.044

Fig. 8. Relation between amounts of the transient tension decrease and of decrease of the upper arm girth.

の筋力発揮の際、筋長の変化が起こりうると思われる。

そこで、表1の張力低下量の平均値について、このときの筋長の変化量を図10から推定してみた。被検者 K. N. の場合、554 g の減少時で 1.5 mm, 336 g では 1.1 mm, 被検者 Y. M. については、46 g で 0.055 mm の値をえた。つぎに、表1

の張力低下期間が筋の伸展時間には対応すると仮定して、筋の伸展速度を算出すると、被検者 K. N. では、動作前 silent period 発現時で $21.1 \text{ mm} \cdot \text{sec}^{-1}$, ないときには $16.9 \text{ mm} \cdot \text{sec}^{-1}$, 被検者 Y. M. の場合、 $1.8 \text{ mm} \cdot \text{sec}^{-1}$ の値となった。これらのうち被検者 K. N. の成績は、筋紡錘の一次終末を興奮させるのに有効な筋の伸展速度の範囲にあって

Fig. 9. Transpositions of apices of Cu wire inserted into peripheral (left side) and proximal ends (right side) of brachial biceps muscle showing in Fig. 1. Apex in X-ray photographs superimposed on the base of Humerus. The arrows indicate to increase tension exertion from 0 to 5 kg.

た⁴⁾¹⁴⁾。さらに本実験でえた張力低下量及びその期間は、ヒトの筋知覚系活動、とくに Ia 発射の出現を検索した実験条件と近以していた⁸⁾⁹⁾。

また Matthews¹⁴⁾は、筋伸展の速度を増すと Ia 発射が増大すると報告した。丹治と谷口¹⁶⁾は、橈骨手根伸筋について筋伸展効果を検討し、その伸展後、運動単位の放電頻度が増すのを認めた。さらにヒト運動単位の活動参加閾値は、張力発揮勾配が増すと低下することなど Desmedt & Godaux⁵⁾や Kurata¹³⁾が指適し、高閾値運動単位の活動参加閾値が、動的筋収縮時に低下することを示唆した。従って、これらの知見から動的動作後の筋収縮速度の促進が、ひとつには伸張反射を介してなされる可能性が考えられた。

そこで、伸張反射の関与について、さらにその時間関係から検討を加えた。張力低下時間は、約 50~100 msec (図 4 C)、一方、動的動作時の筋放電開始、あるいは振幅の増加は、張力上昇開始に約 30~50 msec 先行した。これら両者の時間差は、伸張反射と類同の機序で誘発される H 反射の潜時と近以している。すなわち、張力低下に同期して筋の伸展が生じ、同時にこれが Ia 発射を誘発したとすれば、まず脊髄の運動神経細胞の興奮や活動水準の上昇をきたし、ついで、運動単位の放電頻度の増加やその活動参加を促進することになる。従って、動作前 silent period 発現時の筋収縮速度の促進は、ひとつにはこの末梢性の機序の動因によることが示唆された。

一方、従来、筋伸展による筋収縮速度の促進と、筋の弾性要素との関連が指適されている。一般にこの要素を介する筋収縮の増強作用は、収縮状態の筋を強制的に伸展した時発現するとされている¹⁾²⁾³⁾⁷⁾。また金子¹²⁾は、急速解放法と後荷重法とで弾性要素の作用を比較し、急速解放法では筋収縮の初期速度を速め、後荷重法の場合、筋短縮の後半にその効果が発現すると報告した。

そこでまず本実験と筋収縮速度の促進時点が一致した急速解放法について、両者で動的動作前の筋収縮状態を比較した。急速解放法では、荷重挙上前の筋活動は強い強縮状態にある。一方、本実験の場合、持続筋力値は 20% MVC 以下であった。従って、弾性要素に及ぼす作用も本実験では著しく低いと思われ、このとき弾性エネルギーの蓄積が充分なされとは考え難い。仮にこのエネルギーが蓄積されその効果が発現したとすると、一度張力低下を生じることなく、直ちに筋収縮を開始してもよいと思われる。

つぎに、張力低下時の筋伸展が弾性エネルギーを蓄積する可能性を考察した。しかし本実験の場合、筋伸展が強制的に行なわれたものではないこと、またその変化量も少ないことなど、弾性エネルギーの蓄積を検討した実験条件¹⁾²⁾³⁾⁷⁾に比べ、筋伸展の強度は著しく低いものと思われる。従って今回は、本実験で認めた筋収縮速度の促進が、弾性要素を介する機序の発動により生じるとする

Fig. 10. Length changes of brachial biceps muscle following various tension exertion. Amount of muscle shortening calculated from following equation; $L_0 - L_1 / L_0 \times 10^2$. L_0 and L_1 are distance between apexes of Cu wire of peripheral and proximal ends in brachial biceps muscle at rest and each tension exertion, respectively.

充分な根拠は得られなかった。

筋収縮力の増強やその速度の促進にとって、筋伸展を介する作用が重要であるとの指適は多い。いわゆる動作前 silent period は、この発現時に筋伸展を生じ、これが主として伸張反射を誘発し、ついで、筋収縮速度を加速するという一連の機序を発動させる誘因となることが示唆された。

V. 摘 要

本研究は、いわゆる動作前 silent period が筋収縮速度を促進する理由を明らかにする目的で行なった。そこで上腕屈筋群について、まず動作前 silent period 発現時の張力低下の有無を検索し、これと動的筋収縮との関連を検討した。つぎに張力低下時の筋の周径変化をラバーゲージにて検索し、これと筋力発揮時のレ線像の筋の動態とを対比した。そして筋伸展による筋収縮増強作用の関与を検討した。

(1) 動作前 silent period 発現時に張力は低下した。その大きさは持続筋力値の約20%以下で、また張力低下期間は 100 msec 以下と、短時間に起こる張力変化であった。

(2) 張力低下の発現率は、動作前 silent period のものより高く、また動作前 silent period が発現しない時にも張力低下を認めた。しかし張力低下量は、動作前 silent period 発現時程、大となった。

(3) 張力低下量と動的筋収縮との関連をみると、とくに筋収縮の初期速度の指標される、Time to half Pmax との間で有意な相関が示された。

(4) 張力低下量と上腕屈減少量との間に、正の相関が認められた。

(5) レ線像で上腕二頭筋をみると、その近位及び遠位部に刺入した銅線先端の移動から、筋力増加に従い筋腹中央部ならびに上腕骨上方へと、筋が短縮する所見を示した。同時に、筋腹中央部が

漸次隆起するのを観察した。

以上の成績から、動作前 silent period は張力低下を増加させ、その増加に従い筋収縮の初期速度が速まるものと考えた。そしてこの筋収縮速度の促進は、張力低下時の筋伸展と、その後の筋知覚系を介する機序の発動に帰因することが推察された。

<謝 辞>

拙稿に当たり、御指導戴いた中野昭一教授に謝意を表します。また実験に御協力戴いた教室員各位に感謝致します。

尚、本論文の要旨は、第34回日本体力医学会及び第5回国内バイオメカニクスセミナーに於いて発表した。

(受付 昭和61年5月10日)

参 考 文 献

- 1) Asmussen, E. and Bonde-Peterson, F. (1974) : Storage of elastic energy in skeletal muscles in man. *Acta physiol. scand.*, **91**, 385-392.
- 2) Cavagna, G. A., Dusman, B. and Margaria, R. (1968) : Positive work done by a previously stretched muscle. *J. Appl. Physiol.*, **24**, 21-32.
- 3) Cavagna, G. A. and Citterio, G. (1974) : Effect of stretching on the elastic characteristics and the contractile component of frog striated muscle. *J. Physiol.*, **239**, 1-14.
- 4) Crowe, A. and Matthews, P. B. C. (1964) : The effects of stimulation of static and dynamic fusimotor fibres on the response to stretching of the primary endings of muscle spindles. *J. Physiol.*, **174**, 109-131.
- 5) Desmedt, J. E. and Godaux, E. (1977) : Ballistic contractions in man : Characteristic recruitment pattern of single motor units of the tibialis anterior muscle. *J. Physiol.*, **264**, 673-693.
- 6) Desmedt, J. E. and Godaux, E. (1978) : Ballistic contractions in fast or slow human muscles : Discharge patterns of single motor units. *J. Physiol.*, **285**, 185-196.
- 7) Edman, K. A. P., Elzinga, G. and Noble, M. I. M. (1978) : Enhancement of mechanical performance by stretch during tetanic contractions of vertebrate skeletal muscle fibres. *J. Physiol.*, **281**, 139-155.
- 8) Hagbarth, K.-E. and Vallbo, Å. B. (1968) : Discharge characteristics of human muscle afferents during muscle stretch and contraction. *Exp. Neurol.*, **22**, 674-694.
- 9) Hagbarth, K.-E., Wallin, G. and Löfstedt, L. (1975) : Muscle spindle activity in man during voluntary fast alternating movements. *J. Neurol. Neurosurg. Psychiat.*, **38**, 625-635.
- 10) 猪飼道夫(1955) : 動作に先行する抑制機構, 日生誌, **17**, 292-298.
- 11) 猪飼道夫, 矢部京之助, 山本高司, 川初清典, 渡部和彦, 手塚政孝(1973) : 随意動作に先行する Silent period の発現機構, 体育学研究, **18**(3), 127-133.
- 12) 金子公有(1978) : 人体筋の力・速度関係に及ぼす短縮前状態の影響, 体育学研究, **22**(5), 295-299.
- 13) Kurata, H. (1974) : Characterization of motor units in voluntary contraction —A relationship between recruitment order and the gradient of tension increase. *J. Phys. Fitness Japan*, **23**, 125-133.
- 14) Matthews, P. B. C. (1963) : The response of deafferented muscle spindle receptors to stretching at different velocities. *J. Physiol.*, **168**, 660-678.
- 15) 永見邦篤, 中野昭一(1979) : 筋弛緩動作の遅速とその要因について—脱力時及び拮抗筋活動をともなう抑制現象の比較—, 体力科学, **28**, 112-121.
- 16) 丹治 順, 谷口光太郎(1978) : 筋電図を応用した伸張反射の定量的検査, 臨床脳波, **20**(2), 104-108.
- 17) Whitney, R. J. (1953) : The measurement of volume changes in human limbs. *J. Physiol.*, **121**, 1-27.
- 18) Yabe, K. (1976) : Premotion silent period in rapid voluntary movement. *J. Appl. Physiol.*, **41**, 470-473.
- 19) 矢部京之助, 村地俊二(1975) : 随意動作に先行する silent period の役割, 日生誌, **37**, 91-98.