律動的把握動作時の筋弛緩の経時変化と収縮残遺の検討

永 見 邦 篤

RELAXATION RATE AND CONTRACTION REMAINDER OF HUMAN FOREARM FLEXORS FOLLOWING FATIGUING REPETITIVE HANDGRIP

KUNIATSU NAGAMI

Abstract

Relaxation rate and contraction remainder of human forearm flexors following fatiguing repetitive handgrips were studied. These parameters were measured from the forearm girth and recorded by the use of a mercury-in-rubber gauge.

Subjects performed handgrips: Subjects lifted and lowered the load of 30% of the maximum grip strength at a distance of 2 cm with rhythm of 1 Hz.

1) During the muscle relaxations, the decrease rate of forearm girth in the falling period and/or the lowering stage of the load increased with repetition of handgrips.

2) The forearm girth at the onset of handgrip progressively increased.

3) Even after the handgrips, the resting forearm girth continued to increase for a few minutes, and then progressively decreased. But it did not completely recover its resting level even after 1 hr.

From these results, it is suggested that human muscles fatigued with repetitive contractions cause 'contraction remainder' in addition to the delay of muscle relaxation.

(Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med. 1987, 36: 252~259)

key words: Muscle fatigue, Repetitive handgrip, Muscle relaxation, Contraction remainder

I. 緒 言

一定のリズムで動作を反復すると、筋収縮強度や反復速度により時間的に長短があるものの、最終的に筋疲労を生じ、筋力低下やリズムの変調を来すことは周知の事実である。従来、この疲労発現過程の経時変化は、筋力や筋放電の推移を指標に検討することが多い^{6,9,12,14,15,19,21}。そしてヒト随意筋で最大筋力の低下^{9,12,14,19,21}や、筋収縮及び弛緩時間の延長^{3,21}が起こること、また筋弛緩時間の遅延は、摘出筋での実験から乳酸の蓄積及び CP や ATP の消費に関連することが指摘されてきた^{1,4,5,20}。同時に ATP の消費に伴伴し、いわゆる収縮残遺が発現することも示された。しかし、ヒト随意筋でこの現象を検討した報告はみ

られない。

一方、松本ら¹³)は、把握動作を対象に筋の硬度変化を検索し、動作終了後も筋の硬度が残存し、その回復も遅延するなどを報告した。この知見は、ヒト随意筋に収縮残遺が生じることを示唆している。ただ松本らの実験条件では、筋硬度測定用の振動子を皮膚に接触させる時、圧を一定にすることが必要で、筋の動きの少ない筋活動時や筋弛緩後を対象とせざるを得ない。

そこで本研究では、動的動作時の筋の動態を経時的に検索する目的で、ラバーゲージ法²²)を利用した。今回は、筋の短縮—伸展を伴う律動的把握動作時の前腕屈変化を検索した。そしてこの周径変化を基に、筋弛緩の遅延及び収縮残遺の発現を検討した。

II. 実験方法

被検者は、前報¹⁷⁾と同一の成人男子3名を用いた。また実験装置及び把握動作時の肢位条件は、前報¹⁷⁾と同様とした。

被検者は、随意的等尺性最大握力の30%の荷重をメトロノームに合わせ、1秒1回の頻度で2cm 挙上する律動的把握動作を、挙上不可能となるまで行なった。

前腕の周囲径及び血流量は、水銀入りのラバーゲージにて計測した。ラバーゲージの装着条件は、前報¹⁷⁾と同様であった。前腕血流量の測定方法及び算出は、Whitney の報告²²⁾に従った。また把握動作時の前腕囲の変化量は、安静値 (L) に対する変化率、すなわち $\Delta L/L \times 10^2$ の式から算出し表示した。ここで ΔL は、安静値に対する周囲径の変化量を示す。さらに浅指屈筋の表面筋電図とその積分波形、及び荷重の移動など、前報¹⁷⁾と同様な条件にて記録した。

全ての記録は、ペン書きオシログラフ (日本光電, メディカルコーダ PMP-3004) を用い、紙送り速度を $50\text{mm} \cdot \text{sec}^{-1}$ として行なった。

III. 実験成績

被検者は、荷重の挙上が数回連続して不完全となった時、直ちに動作を停止した。なおこの不完全な挙上例は、検討の対象から除外した。その結果、反復回数は44~49回の範囲にあった。この値は、Ikai & Taguchi の報告⁸⁾した成績とはほぼ一致した。

図1は、被検者 T. T. の動作初期と終了直前の記録例である。この被検者の反復回数は、44回であった。浅指屈筋の放電量を両時点で比べると、荷重挙上時の放電量は、動作終了直前増大となった。同時に荷重落下時の筋放電の出現が著明となった。この所見は、猪飼と石井⁶⁾が上腕二頭筋について得た結果と同様であった。

図2Aに、荷重の上昇時間、挙上持続時間、及

Fig. 1. A typical record of fatiguing repetitive handgrip: lift and lower load of 30% of the maximum grip strength (MVC) at a distance of 2cm by rhythm of 1 Hz. Number of contraction in the subject are forty-four times. Number on each handgrip indicate order of contraction.

Fig. 2. Changes of rising, sustaining and falling periods of the load in each handgrip (A). During the lowering stage of load, both periods of muscle contraction and relaxation are distinguished from the onset of the increase of forearm girth following handgrip. Changes of each time indicate in B.

び下降時間の推移を示した。荷重の上昇及び拳上持続時間は、漸次延長した。しかし、下降時間は、ほぼ一定値を維持した。次に荷重の落下時から上昇開始までの期間を検討した。この期間は、前腕囲増加の開始時を基準に、収縮期及び弛緩期に各々区別した。図2Bに示すごとく、収縮期は漸次延長し、弛緩期が逆に短縮した。

図3に、荷重拳上時の前腕囲の増加量を示した。なお荷重落下時も拳上時と同様な成績であった。反復回数の増加に従い前腕囲の変化量が漸次増大する者（被検者 T. T.）、逆に低下する者（被検者 M. M., S. K.）など、被検者間に差異を認めた。

そこで前腕囲変化と荷重移動との関連を詳細に

Fig. 3. Changes of each forearm girth in muscle contraction phase. Rate of increase of forearm girth (ordinate) calculated from equation ; $\Delta l/L \times 10^2$ (the extension of rubber gauge following muscle contraction ; Δl , and resting forearm girth ; L).

Fig. 4. Three components into the forearm girth during repetitive handgrips. On muscle contraction phase, indices of column consist of the increase of forearm girth in the period corresponding before (close), during (open), and after (dot) the load rising, and also on relaxation phase with the decrease of that in the period corresponding before (dot), during (open), and after (close) the load falling. Values of the forearm girth in each period expressed as a ratio to the its total value of each handgrip.

Fig. 5. Changes of forearm girth at the onset of muscle contraction in each handgrip and recovery. Dashed line indicate precontraction level of forearm girth. Each value obtained by equation as same as legend in Fig. 3.

みる目的で、荷重の挙上時及び落下時を各々3つの期間に区別した。すなわち挙上時では、荷重の挙上前、上昇期間、及び挙上後、また落下時の場合、その落下前、下降期間、及び落下後の各期間である。そして各期間の周径変化量を求め、各動作時の全変化量を100%とし、各々の割合を算出した。図4に示すごとく、荷重挙上時の各期間の周径変化率は、一定の経時変化を示さなかった。一方、荷重落下時では、落下前の周径変化率が反復回数の増加とともに減少し、逆に下降期間や落下後の割合が増大する傾向にあった。

図5は、筋収縮開始時と動作終了後の前腕囲の経時変化をみたものである。全被検者とも筋収縮開始時の前腕囲は、反復回数の増加に従い増大した。また動作終了後、安静状態で前腕囲は数分間さらに増大し、その後漸次減少した。しかし40～60分経過後も動作前値に回復しなかった。

図6に、動作前後の前腕血流量を示した。動作終了後、約20分で血流量は動作前値に回復した。この結果は、本実験と同条件でえた成績⁷⁾と一致した。

IV. 考 察

従来、筋疲労の指標に筋弛緩時間がよく用いられる。この時間は、通常、等尺性筋収縮条件でえた張力曲線から測定されている^{1,3,4,20,21)}。しかし等尺性条件での摘出筋の実験で、張力低下後も筋肉節に動きがあると Edman & Flitney²⁾は報告した。勿論、この知見が直ちにヒト随意筋に適用し得るとは言い難いが、張力変化と筋の動態との関係は、まだ検討の余地があると思われる。とくにヒト随意筋を対象に等尺性条件で張力曲線をえる場合、先の報告¹⁶⁾で指摘したごとく各種のコンプライアンスが考えられ、時間的に両者の関係が不

Fig. 6. Forearm blood flow after fatiguing repetitive handgrip.

一致となる可能性もある。

また Jewell & Wilkie¹⁰⁾ は、摘出筋を等尺性及び短縮性条件下で同一刺激強度にて収縮させ、張力あるいは筋長の変化を記録し、両者の関連を検討した。しかし各々の経時変化の対応が困難であると報告した。従って短縮性筋収縮について筋疲労を検討する場合、筋長の変化などの検索が必要となろう。しかし、ヒト随意筋で動的筋活動時の筋長を直接検索することは容易でない。そこで本研究では、ラバーゲージにて筋の周径変化を記録し、この変動から筋の動態を検討した。

まず筋収縮時の前腕囲の全変化量をみると、反復回数の増加に従い漸次増大する者、逆に減少する者など被検者間で異なった (図3)。前腕囲が漸増した被検者 T.T. の場合、動作初期では負荷抵

抗に応じて運動単位を動員し、筋疲労の発現に従いその放電頻度や新たな動員を増したと推察される。一方、前腕囲が漸次減少した被検者では、動作開始直後から負荷抵抗に対し過大な筋活動を行い、以降、漸次筋短縮が不十分となったとも考えられる。そしてこの知見は、荷重挙上を伴う短縮性筋収縮では、同一負荷量に対し筋短縮が必ずしも同じではないこと、また被検者により負荷抵抗に対する応答が異なることを伺わせる。

次に荷重落下時の前腕囲変化を検討した。周囲径の全変化量は、挙上時と差異がなかった。しかし周径変化の勾配は、落下時の方が急であった (図1)。この現象は、後荷重法で摘出筋の筋長変化をみた Jewell & Wilkie の所見¹⁰⁾ と類似した。また荷重落下時の各期間で前腕囲の減少勾配を比

較すると、下降期間でとくに大となった（図1）。これは荷重の落下が筋伸展を促進したためと思われる。一方、荷重の落下前や落下後では、前腕囲の減少が緩慢であった（図1）。また反復回数の増加に従い、各期間の周径変化率は、荷重落下前では減少し、下降期間あるいは落下後の場合、漸増傾向にあった（図4）。この知見は、最大筋力の反復発揮で筋弛緩の遅延を検討した Viitasalo & Komi²¹⁾ の成績—筋疲労発現過程で張力低下速度が漸次延長し、とくに張力曲線の後期程、その遅延が著明となることと一致した。

また荷重の下降期間は、ほぼ一定値を維持した（図2A）。一方、荷重落下後の期間のうち、弛緩期は漸次短縮した（図2B）。すなわち荷重落下後の周径変化率の増大及び弛緩期の短縮を考慮すると、荷重落下後程、筋伸展が著明に遅延するものと思われる。

従来、摘出筋の実験から筋伸展の遅延の成因に、筋疲労時の乳酸の蓄積、筋内 pH の低下、また CP や ATP の消費などが指摘されてきた^{1,4,5,20)}。しかしヒト随意筋の場合、両者の関連は今後の検討課題かと思われる。一方、筋弛緩過程で浅指屈筋の放電量が漸次増大するのを認めた（図1）。同様な所見を既に猪飼と石井⁶⁾ が報告した。しかし筋疲労発現時の筋弛緩過程に筋放電をみる理由は、まだ明らかでない。ヒト随意筋の弛緩の検討に際し、留意すべき現象かもしれない。

次に収縮残遺の発現を検討した。筋収縮開始時の前腕囲は、反復回数の増加に従い増大した（図5）。ただ動作初期の動作前値以下への一時的な低下は、拮抗筋を積極的に収縮させ、主動筋の伸展を促進したためと推測される。そしてこの動作時の前腕囲の変動は、荷重落下後の周径変化率の経時的増大（図4）や弛緩期の短縮（図2B）などから、ひとつには筋伸展が漸次不完全となるためと思われた。一方、本実験と同様な荷重の挙上動作を1回実施し、この時被検筋の周径変化を検索した結果、筋弛緩後、周径が一過性に増大する現象を観察した¹⁸⁾。これは、いわゆる筋収縮後充血と思われ、本実験で認めた前腕囲増大が、この発現に因ることは充分考えられる。しかし今回

は、各々の要因がどのように関与するかを明らかに出来なかった。

また動作終了後、前腕囲は数分間増大し、ついで漸次減少した。しかし40～60分経過後も動作前値に回復しなかった（図5）。北村¹¹⁾は本実験と同様な律動的把握動作時の前腕血流量を測定し、30% MVC の負荷条件では、動作時に比べ動作終了直後の増加が著明であると報告した。また筋収縮の反復後、被検部に腫脹感を生じることは、日常よく経験する。従って動作終了後の周径変化は、主に筋組織の充血に因るかもしれない。

しかし前腕血流量は、動作終了後約20分で動作前値に回復した（図6）。また松本ら¹³⁾は、律動的把握動作時の筋硬度を検索し、動作終了後の筋硬度が動作前値を超えること、その回復も遅延するなどを報告した。この知見から、本実験でえた前腕囲の増大が、筋収縮後充血に加えて筋伸展の不完全さ、いわゆる収縮残遺をその成因に含むことが示唆された。

V. 摘 要

本研究は、筋疲労時の筋伸展の遅延及び収縮残遺の発現を検討する目的で行なった。被検者は、最大筋力の30%の荷重を1秒1回の頻度で2cm 挙上する把握動作を挙上不可能になるまで実施した。この時、前腕囲の変動をラバーゲージにて検索し、筋の動態を経時的に検討した。

(1) 筋弛緩過程の前腕囲は、反復回数の増加に従い、荷重下降期間や落下後の周径変化率が増大した。

(2) 筋収縮開始時の前腕囲は、反復回数の増加に従い増大した。

(3) 動作終了後、前腕囲は数分間増大し、ついで漸次減少した。しかし、40～60分経過後も動作前値に回復しなかった。

以上の成績から、筋疲労発現時に筋伸展が遅延し、同時に収縮残遺が発現することも示唆された。

<謝 辞>

欄筆に当たり、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員各位に感謝致します。

尚、本論文の要旨は、第37回日本体力医学会に於いて発表した。

(受付 昭和61年10月18日)

参 考 文 献

- 1) Dawson, M. J., Gadian, D. G. and Wilkie, D. R. (1980) : Mechanical relaxation rate and metabolism studied in fatiguing muscle by phosphorus nuclear magnetic resonance. *J. Physiol.*, **299**, 465-484.
- 2) Edman, K. A. P. and Flitney, F. W. (1982) : Laser diffraction studies of sarcomere dynamics during 'isometric' relaxation in isolated muscle fibres of the frog. *J. Physiol.*, **329**, 1-20.
- 3) Edwards, R. H. T., Hill, D. K. and Jones, D. A. (1972) : Effect of fatigue on the time course of relaxation from isometric contractions of skeletal muscle in man. *J. Physiol.*, **227**, 26-27p.
- 4) Edwards, R. H. T., Hill, D. K. and Jones, D. A. (1975) : Metabolic changes associated with the slowing of relaxation in fatigued mouse muscle. *J. Physiol.*, **251**, 287-301.
- 5) Fitts, R. H. and Holloszy, J. O. (1976) : Lactate and contraction force in frog muscle during development of fatigue and recovery. *Am. J. Physiol.*, **231**, 430-433.
- 6) 猪飼道夫, 石井喜八(1961) : 筋力の生理的限界と心理的限界の筋電図学的研究, *体育学研究*, **5** (4), 154-165.
- 7) 猪飼道夫, 石井喜八, 中村淳子(1965) : 血流量から見た筋持久力Ⅲ, *体育の科学*, **15** (6), 334-340.
- 8) Ikai, M. and Taguchi, S. (1969) : A study on muscle oxygen intake following exhaustive exercise in the human forearm. *Res. J. Phys. Educ.*, **13** (4), 251-259.
- 9) 猪飼道夫, 矢部京之助(1967) : 筋力と疲労の研究(2) 最大筋力と疲労, *体育の科学*, **17** (3), 166-172.
- 10) Jewell, B. R. and Wilkie, D. R. (1960) : The mechanical properties of relaxing muscle. *J. Physiol.*, **152**, 30-47.
- 11) 北村潔和(1983) : 各種負荷強度の律動的作業中にみられる前腕血流量の変動, *体力科学*, **32**, 66-75.
- 12) Komi, P. V. and Tesch, P. (1979) : EMG frequency spectrum, muscle structure and fatigue during dynamic contraction in man. *Europ. J. Appl. Physiol.*, **42**, 41-50.
- 13) 松本伍良, 土田義和, 加藤正道(1975) : 人の筋肉活動状態における粘弾性の動的測定法, 文部省特定研究「生体の制御情報システム」研究論文, 1976-11-19
- 14) 宮崎幹也, 山岡誠一(1977) : 筋疲労に関する研究(第1報)エルゴメーター作業による疲労曲線と筋電図, *京都教育大学紀要*, Ser B, No. **52**, 21-31.
- 15) Mosso, A. (1980) : Ueber die gesetze der ermüdung. *Arch. f. Anat. Physiol.*, 89-168.
(猪飼道夫, 矢部京之助 : 筋力と疲労の研究 (1), *体育の科学*, **17**, 108-113, 1967より)
- 16) 永見邦篤(1987) : 動的筋収縮前の一過性の張力低下について, *体力科学*, **36** (3), 116-127.
- 17) 永見邦篤(1987) : 把握動作時の前腕囲変化について一周径変化からみた筋の動態とその利用一, *体力科学*, **36** (5), 243-251.
- 18) 永見邦篤, 藤瀬武彦, 吉岡利忠, 中野昭一(1985) : 筋収縮後の充血について, *体力科学*, **34** (6), 436.
- 19) Nilsson, J., Tesch, P. and Thorstensson, A. (1977) : Fatigue and EMG of repeated fast voluntary contraction in man. *Acta Physiol. Scand.*, **101**, 194-198.
- 20) Sahlin, K., Edström, L., Sjöholm, H. and Hultman, E. (1981) : Effect of lactic acid accumulation and ATP decrease on muscle tension and relaxation. *Am. J. Physiol.*, **240**, C 121-C 126.
- 21) Viitasalo, J. T. and Komi, P. V. (1981) : Effect of fatigue on isokinetic force- and relaxation-time characteristic in human muscle. *Acta Physiol. Scand.*, **111**, 87-95.
- 22) Whitney, R. J. (1953) : The measurement of volume changes in human limbs. *J. Physiol.*, **121**, 1-27.