疲労による誘発筋電図 (M波) の変化

川 初 清 典* 矢 部 京 之 助** 山 本 高 司***

(昭和49年6月1日受付)

Change of M-wave accompanied with fatigue on human muscle

Kiyonori KAWAHATSU (Kyoto University)

Kyonosuke YABE (Institute For Developmental Research,
Aichi Prefectural Colony)

Takashi YAMAMOTO (Institute For Work Science)

母指内転筋を主働筋とした随意努力による筋作業を負荷し、経皮的に神経に与えられた一定条件の電気刺激によって、主働筋から得られる筋活動電位と疲労との関係を調べた。

その結果表面双極導出法によって母指内転筋から得られる誘発筋電図は、作業時間の経過に伴って減少し、回復期には時間の経過に伴って安静時の電位へと回復した。このような筋作業による誘発電位の減少は、動的な筋作業および静的な持続性筋作業の場合にも認められた。このことは、疲労によって誘発電位が減少すると報告した Naess and Storm-Mathisen (1955) および Stephens and Taylor (1972) の結果と一致するものであり、Merton (1954) の結果とは一致しない。また、誘発電位の減少は、神経筋接合部に伝達遮断が生じたためとする Naess and Storm-Mathisen による解釈を支持するものである。

The mechanism behind the process of muscular fatigue in maximum voluntary contractions was studied. Maximum strength in thumb adduction was recorded by use of a resistance strain gauge transducer, and action potential was recorded using 10mm diameter silver disk electrode.

The following results were obtained :

1. The amplitude of action potential evoked by ulnar nerve stimulation (M-wave) during rhythmic voluntary contractions was reduced. During recovery process after fatigue, the size of evoked action potential was returned to resting level before exercise.
2. The reduction in the size of evoked action potential was found to have been obtained by sustained voluntary contractions.
3. These findings differ from those based on the work of Merton (1954) who stated that evoked action potentials were not reduced during sustained voluntary contractions.
4. The current results, mentioned above, support the views of Naess and Storm-Mathisen (1955) and Stephens and Taylor (1972) that the reduction in evoked action potentials indicated the neuromuscular junction failure (neuromuscular block).

(Kiyonori Kawahatsu, Kyonosuke Yabe, Takashi Yamamoto: "Change of M-wave accompanied with fatigue on human muscle," *Research Journal of Physical Education*, Vol. 19, No. 1, March, 1974, pp. 261~68)

* 京都大学

** 愛知県心身障害者コロニー発達障害研究所

*** 労働科学研究所

緒 言

従来から疲労の原因を中枢に求める立場⁵⁾⁷⁾⁸⁾と末梢に求める立場⁴⁾⁶⁾があって、種々の論議がなされている。また猪飼と矢部(1967)²⁾は、筋作業における中枢性疲労と末梢性疲労との分離を試み、疲労が中枢性因子と末梢性因子の重なり合いによって生じることを報告している。

末梢性疲労を支持する報告のなかでも、Brown, G.L. & Burns, B. D. (1949)¹⁾が神経筋標本で明らかにした神経筋接合部の伝達遮断(neuromuscular block)に関しては必ずしも一致した結果は得られてない。Merten, P. A. (1954)⁴⁾は、最大筋力を持続的に発揮しているときに単一の電気刺激を加えても誘発電位のスパイク高が減少しないと述べている。他方、Naess, K. & Storm-Mathisen (1955)⁶⁾は持続性収縮を行なったときに誘発電位が減少することを認め、生体においても筋作業によって神経筋接合部に伝達遮断が生ずると報告している。そこで本研究では、誘発筋電図(M波)を手がかりとして筋作業によって神経筋接合部に伝達遮断が生ずるかどうかを明らかにすることを目的とした。

実験方法

本実験では母指内転筋(m. adductor pollicis)を主働筋とする母指の内転運動を対象とした。誘発電位(M波)は、肘部の尺骨神経に経皮的に単一電気刺激を加えることによって得た。図1は実験装置の模式図をしめしたものであり、上腕部に無関電極、肘部に関電極(刺激電極)が装着されていることをあらわしている。母指の内転筋力の測定は、皮革と金属によってつくられた輪状のベルトを母指にかけ、その一端に取り付けたワイヤーをstrain gaugeの貼布した鋼鉄棒に接続して記録した。なお、strain gaugeが貼布されている鋼鉄棒は、力の作用する方向と直角になるように設置した。

また、最大努力によって運動を行なうときに、手頭や肘の動きおよび母指内転筋以外の筋の動きを固定して、母指内転筋の筋力だけを出来るだけ正確に測定するために、図2に示すような石膏を

図1 実験装置と筋電図(M波)

図2 母指内転筋活動のための腕の固定と電極装着の様子

被検者ごとにつくった。

誘発筋電図は表面電極法によって導出し(図2)、ブラウン管オシロスコープ(三栄測器製、UB-203型)をトリガーし、写真撮影法によって記録した。

図3は刺激電圧と刺激巾を変化させて得られた記録である。上の段はパルス巾を1msecに固定したままで、刺激電圧を10Vから60Vまで変化させ

図3 刺激電圧と筋活動電位の関係（上段）および刺激パルス幅と筋活動電位の関係（下段）

図4 筋作業による誘発電位の変化（記録は上段の左より，作業開始前の対照例，筋作業中，下段の左より，筋作業中，作業放棄直後，回復初期）。

たときの誘発筋電図（M波）である。この図から明らかなように，低い刺激電圧では誘発電位はあられず，30V以上では，刺激電圧の増加につれて誘発電位が高くなり，50Vと60Vでは殆んど同じ電位になっていることがわかる。しかしながら，誘発電位が出現する際の最小刺激電圧，あるいは誘発電位が融合する際の最大刺激電圧には，それぞれ被検者間による差異はみられても，その傾向は各被検者に共通してみられた。

図3の下段は，刺激電圧を一定（50V）とし，パルス巾を0.5 msecから5 msecまで変化させたときに得られた誘発電位である。この図から，1 msec以上のパルス巾では，殆んど誘発電位の高さが同じであることがわかる。以上の結果をもとにして，本実験では，刺激条件をパルス巾1 msec，

刺激電圧50～60Vの矩形波を用いることにした。なお，刺激装置は三栄測器製ES-103型電子管刺激装置を用いた。

本実験で用いた被検者は健康な成人男子3名である。

結果と論議

1秒に1回のテンポで随意による最大筋力を30回発揮させ，31回目に1回だけの作業を休止し，被検者に脱力させる。この休止期に単一の電気刺激を経皮的に尺骨神経に加え，母指内転筋から誘発筋電図を記録した。休止期に加える電気刺激の刺激はつねに一定にしたままである。この30回の随意収縮と31回目の誘発筋電図記録による組合せの筋作業を被検者が，作業放棄するまで行なった。図4に記録の一例をしめした。図から明かなように，筋作業に伴って誘発電位の減少していることが認められた。

筋作業によって減少した誘発電位は作業放棄後に回復する傾向がみられた（図5）。図上段の左端の記録は筋作業前のものであり，順に収縮回数31回目毎に得られた誘発電位をしめしている。右端は，作業放棄した直後の記録である。下段の記録は作業後の回復経過時のものであり，その記録の下にある数字は回復経過時間をしめしている。図5から明かなように，収縮回数が増加するにつれて最大努力によって発揮された筋力が低下して

図5 張力曲線と筋活動電位の関係（上段は作業中であり下段は回復中である）。
《筋電図は作業回数31回目毎に得られた》

図6 筋作業による誘発電位の変化
横軸：筋作業回数，回復時間
縦軸：誘発電位

くると、一定の刺激強度によって得られた誘発電位が減少してくることが観察された。さらに随意的な筋作業によって減少した誘発電位は作業放棄後の回復時間の経過とともに安静時の電位に回復していることがわかる。このように誘発電位が筋作業によって減少し、作業放棄後に回復するといったような傾向は、各被検者に共通してみられたものである。その一例を図6に示した。縦軸

は誘発電位の振幅、横軸は収縮回数と回復時間である。筋収縮開始後の第31回目の電位は安静時よりもわずかに高い値をしめしているが、それ以後は収縮回数の増加とともに減少し、作業放棄後では最少値をしめしている。そして回復の1分後には、ほぼ作業前の水準に回復している。

以上の結果は1秒に1回のテンポで筋収縮を行なったものであるが、つぎに等尺性収縮による持続性収縮 (Sustained voluntary contraction) を行なって、同様に誘発電位の変化を調べた。いわば1秒に1回のテンポで筋収縮を行なう作業を動的収縮とするならば、後者は持続性収縮といえる。この持続性収縮を続けている際に単一の電気刺激を加えても、得られた誘発筋電図には、随意的収縮による筋活動電位と電気刺激による誘発筋電図とが同期してくることになるので、誘発電位を比較することができなくなる。そこで、作業開始前と作業放棄直後の筋活動電位を比較することにした(図7)。

図7から、持続性収縮によって得られた筋力曲線は、作業時間の経過に伴って低下をしめし、誘発電位も動的収縮の場合と同様に、作業終了時の

図 7 等尺性持続性収縮と筋活動電位（下段は回復時の筋活動電位を示す）
作業放棄時に誘発電位は減少する。

図 8 筋作業と筋活動電位およびその誘発電位による筋力（同時記録）《上段は作業中，下段は回復時》

振幅は作業前に比較して低い値であった。そして回復時間の経過に伴って作業前の水準へ回復することが認められた。

これまで述べてきたように尺骨神経への経皮的な電気刺激によって、その神経の支配する筋から誘発電位が得られるが、同時に筋の収縮に伴って生ずる筋力が得られる。この筋力は経皮的に与えられた下行性インパルスによって生ずるものであり、中枢の関与しないものであるから、これまで述べてきたインパルスと同様に末梢性疲労について調べることができる。そこでこれまで述べてきたのと全く同一の方法によって、その筋力をインパルスと同時に記録して、筋作業の経過と共に図8に示した。図の上段左端の記録は、作業開始前の筋活動電位と、それによって得られた筋力であり、以下右へ順次、作業の進展に伴って得られたものがしめされている。そして上段右端の記録は作業放棄直後の結果をしめしている。また下段の記録は、作業終了後の回復時間の経過に伴って得られた結果である。図8に示される結果から、作業の経過の中で、一定条件のもとで与えられた電気刺激によって得られる筋活動電位が減少すると、それによって生ずる筋力もまた減少していることが観察された。そして、誘発電位と同様に、その筋力は作業終了後の回復時間の経過に伴って増高していることがわかる。

本実験から明らかになったことは、筋作業中に肘部の尺骨神経に経皮的に加えられた単一電気刺激によって得られた誘発電位が、作業時間の経過とともに減少をしめしたということである。このように筋作業によって誘発電位のスパイク高が減少するという報告は、Naess & Storm-Mathisen (1955)⁹⁾, Kadefors, Kaiser & Pefersen (1968)³⁾, Slomic, Rosenfalk & Buchthal (1968)⁹⁾, Stephens & Taylor (1972)¹⁰⁾ によって確かめられている。そしてこの誘発電位のスパイク高が減少するのは神経筋接合部に伝達遮断が生じたからであると彼らは結論している。特に Stephens らは筋作業による最大筋力の低下速度を、二期相に分離し、初期では特に神経筋の伝達遮断が疲労の主因子であると述べている。

しかしながら、同様な実験を行なった Merton

(1954)⁴⁾ の結果では、筋作業によって筋力は低下をしめしても、誘発電位は減少をしめないと報告している。このことから彼は生体内では神経筋の伝達遮断は起こらず、筋疲労は C-M (Chemo-Mechanical coupling) の変調によるものとしている。しかしながら Merton と Naess らとは誘発電位の導出法に相違がある。Merton は表面電極法を、Naess らは針電極法を用いていることである。Merton によれば導出法の違いによっても結果は変わらないと述べている。表面電極による導出法は、いわば筋線維の活動電位の総和を記録するものである。個々の筋線維自体あるいは、局所的にみるには針電極による導出法が適しているといえよう。しかしながら表面電極導出法を用いた本実験結果は、Merton の結果とは異なり、明らかに筋作業の経過とともに誘発電位の減少が認められている。従ってこの結果は、筋作業によって神経筋接合部に伝達遮断が生じたとする Naess & Storm-Mathisen (1955)⁹⁾ と Stephens & Taylor (1972)¹⁰⁾ の結果を支持するものである。また、Stephens & Taylor は、筋作業によって誘発電位が徐々に減少することから、Merton (1954)⁴⁾ の実験方法に誤りがあるであろうと推察している。これに対して本実験では、前腕全体をギプスで固定していることで Stephens らのいう手の動きによる影響を最少にしているという効果があり、さらに双極導出法による電極の接着部位も彼らと同じ部位であった。

要 約

随意努力による作業を負荷し、一定条件の電気刺激を経皮的に神経に与え、作業を行なう筋から得られる筋活動電位と疲労との関係を調べ、次に示す結果が得られた。

1. 筋作業中に肘部の尺骨神経から単一の電気刺激を加え、表面双極導出法によって母指内転筋より誘発筋電図 (M波) を導出した。
2. 誘発電位は作業時間の経過とともに減少し、回復期には時間経過とともに安静時の電位まで回復した。
3. 誘発電位が筋作業によって減少する傾向は、

動的な筋収縮による作業の場合にも、静的な持続性筋収縮の場合にも認められた。このことは Merton (1954) の結果とは一致しない。

4. 筋作業によって誘発電位が減少するのは、神経筋接合部に伝達遮断が生じたからであるという Naess & Storm-Mathisen (1955) と Stephens & Taylor (1972) の報告を支持するものである。

本研究を行なうにあたって、東京大学教育学部体育学研究室諸氏の御助力を得た。記して謝意を表する。

引用文献

- 1) Brown G. L. and B. D. Burns; Fatigue and neuromuscular block in mammalian skeletal muscle. *Proc. Roy. Soc. L.B.* 136:182~195, 1949
- 2) 猪飼道夫・矢部京之助; 筋力と疲労の研究 (Ⅱ). *体育の科学* 17 (3): 166~172, 1967.
- 3) Kadehors, R., E. Kaiser and F. Pefersen; Dynamic spectral analysis of myopotentials with special reference to muscle fatigue. *Electromyography* 8: 39~74, 1968
- 4) Merton, P. A.; Voluntary strength and fatigue. *J. physiol* 123: 553~564, 1954
- 5) Mosso, A.; Les lois de la fatigue étudiées dans les muscles de l'homme. *Travaux de laboratoire de physiologie de Turin*: 149~212, 1889
- 6) Naess, K. and A. Ström-Mathisen; Fatigue of sustained tetanic contractions. *Acta. Physiol. Skand.* 34: 351-366, 1955
- 7) Reid, C.; The mechanism of voluntary muscular fatigue. *Quart. J. Exp. physiol* 19: 17~42, 1928
- 8) Schwab, R. S.; Motivation in measurements of fatigue. On "Symposium on fatigue", (Ed.) Floyd and welford Lewis, London, 1953
- 9) Slomic, A., A. Rosenfalk and F. Buchthal; Electrical and mechanical responses of normal and myasthenic muscle, with particular reference to the staircase phenomenon. *Brain Res.* 10: 1~78, 1968
- 10) Stephens, J. and A. Taylor; Fatigue of maintained voluntary muscle contraction in man. *J. physiol* 220: 1~18, 1972