<原 著>

随意動作に先行する Silent period の発現機構

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

(昭和48年4月3日受付)

The mechanism of "Silent period" preceding the act
in rapid voluntary movements.

M. Ikai, K. Yabe, T. Yamamoto, K. Kawahatsu, K. Watanabe and M. Tezuka
(School of Education, University of Tokyo)

主働筋に軽度の随意的な緊張を与えた状態から、急速に随意的な反応動作をおこすと、動作に先行して主働筋に筋放電の休止期 (Silent period) が出現する。この発現機構を明らかにするため、上肢の肘関節伸展動作、下肢の跳躍動作、スタート動作をおこなった。その結果、肘関節の伸展動作では、動作に先行する Silent period は、ピストル音、ネオン・ランプのそれぞれの刺激を与えてから、最も速い時で約40msec後に出現した。下肢の跳躍動作をおこなうことによつて、この Silent period を恒常的に観察することができた。しかも動作に先行する Silent period は拮抗両筋にもほぼ同時に出現することを見出した。スタート動作のような全身運動では、上・下肢ともほぼ同時期に動作に先行する Silent period の発現をみた。したがつて随意動作に先行する Silent period は、脳幹・脊髓全体の同時抑制によるものと思われる。

It has been observed that the tonic discharge disappears for some extent immediately preceding the act in rapid voluntary movements. To reveal the mechanism of this phenomenon, a series of experiment was conducted in healthy normal subjects. The action potentials were led-off by bipolar surface electrode, simultaneous mechanical response was recorded with resistance strain gauge transducer. While a subject made a slight voluntary contractions and maintained it steadily, he was asked to respond with a rapid voluntary movements as quick as possible to a visual or acoustic stimulus.

The latency of this silent period in elbow extension was found to be around 40 msec at minimum. It was also found that the most consistent results were obtained by using upward jumping movement. The silent period preceding the act usually occurred in the muscle synergist; however, antagonist showed the same silent period simultaneously. This finding suggested this phenomenon was not to be reciprocally innervated. The silent period in the triceps brachii and the rectus femoris were simultaneously found in the electromyogram of the whole body movements such as the starting in sprint running. It was supposed from

東京大学教育学部

* 昭和47年1月3日逝去

** 愛知県心身障害者コロニー発達障害研究所

*** 東邦大学医学部

these results that the center in the brain or brain stem sent some inhibitory discharge to the motoneurons in the ventral horn of the spinal cord.

(Ikai M., Yabe K., Yamamoto T., Kawahatsu K., Watanabe K., and Tezuka M.: The mechanism of "Silent period" preceding the act in rapid voluntary movements, *Research Journal of Physical Education*, Vol. 18, No. 3, December, 1973, pp. 127~133)

緒 言

あらかじめ主働筋に軽度の随意的な緊張を与えた状態から、急速に随意的な反応動作をおこすと、動作に先行して主働筋に筋放電の休止期 (Silent period, これを沈黙期ともいう) が出現する。この現象は、すでに R. H. Stetson & H. D. Bouman¹⁵⁾ の急速反復動作の筋電図記録にみることができる。しかし、その発現機構については何の考察も加えられてない。最近、猪飼は剣道の打ちこみ、陸上競技のスタート、反応時間の測定時に、この Silent period を観察し、反射機構の関与する一種の抑制現象であろうと考察している⁹⁾¹⁰⁾。しかもこの現象は、随意的な反応動作に先行して出現するという点において膝蓋腱叩打、体肢の電気刺激¹⁸⁾ の場合のよな反射動作に伴った Silent period とは大きな差異がある。すなわち、反射動作に伴う Silent period は動作中、あるいは筋収縮中にその発現をみるものであるのに対して、随意動作にみられる現象は動作に先行して発現するという点が特徴としてあげられる。

これまで随意動作に先行する Silent period の観察は、おもに上肢に関するものであり、しかもその発現を恒常的にとらえることは困難であった。しかし、跳躍動作をおこなう際に下肢の筋群から導出した筋電図にその Silent period が容易に出現することを見い出した。そこで本研究の目的は、これまでの肘関節の伸展動作に加えて、下肢の跳躍動作、およびスタート動作を対象として随意動作に先行する Silent period の発現機構を明らかにしようとするものである。

実 験 方 法

1) 肘関節の伸展動作の場合

肘関節の伸展動作の実験方法は、猪飼⁹⁾ と同じ方法を用いた。すなわち、被検者は木製のひじか

け椅子に安静座位の姿勢をとりながら、右肘関節を直角に屈曲させたまま右前腕全体をひじかけ椅子のアームにのせる。右手首の下に strain gauge を貼布した横木を置いて、右肘関節の伸展動作を記録した。検者の「用意」の合図とともにかるく肘関節を伸展して軽度の筋緊張を与え、光刺激 (ネオンランプ)、音刺激 (ピストル音) の合図に対してできるだけすばやく肘関節を伸展させる。被検者には注意を集中させるために「用意」の合図を与えてから 2~3 秒後に刺激を与えた。

筋電図は、上腕三頭筋と上腕二頭筋から導出した。導出には直径 10mm の銀盤製電極を使用し、2 個の電極を筋腹上に筋線維の走行にそって約 3 cm 離して接着する表面双極導出法によった。筋電図と動作曲線は、ブラウン管オシログラフ (三栄測器 UB-203) によって記録した。反応時間の測定は刺激が与えられた時点から動作曲線にふれの生じる時点までを計測することによって得た。

2) 跳躍動作の場合

strain gauge を貼布した台上に被検者をたた

図 1 跳躍動作の準備姿勢

せ、検者の「用意」の合図とともに膝関節をかるく屈曲させる。音刺激（ブザー）が与えられたならば、そのままの姿勢からすばやく垂直方向に跳躍動作をおこなう（図1）。筋電図は大腿直筋と大腿二頭筋から表面双極導出法によって得た。なお、本実験に用いた被検者は健康成人であり、各試行ともシールドルーム内で行なった。

結 果

1) 肘関節の伸展動作による動作前の Silent period

図2は、動作に先行して出現する Silent period の一例をしめしたものである。この結果は、すでに猪飼たちが⁸⁾⁹⁾報告している現象と一致する。刺激が与えられてから筋放電の休止、つまり Silent period が出現するまでの時間を X, 同期性放電のあらわれる時間を T_1 , 同期性放電から反応動作があらわれるまでの時間を T_2 として、それらの時間関係をみると表1のようになる。表1は同一被検者について750試行におこなった値である。 $T_1 + T_2$ は、いわゆる肘関節伸展動作の反応時間に相当するものである。

Silent period 発現の潜伏時間の X についてみると、その最頻値はピストル音 (shot) では 50 msec, ネオン・ランプでは 100msec であり、その分布巾は前者が 40-90msec, 後者が 40-150msec であった。また、X の最小時間は、いずれの刺激

図2 肘関節伸展動作による silent period

表1 Mode and Range of the Onset of Silent Period (X) and Reaction time ($T_1 + T_2$) in Elbow Extension

	X (msec) MODE (RANGE)	$T_1 + T_2$ (msec) MODE (RANGE)
SHOT	50 (40—90)	100 (70—190)
NEON LAMP	100 (40—150)	180 (130—270)

でも 40msec であった。つぎに、反応時間 ($T_1 + T_2$) の最頻値についてみると、ピストル音では 100msec, ネオン・ランプでは 180msec であり、それぞれ 70-190msec と、130-270msec に分布している。つまり、反応時間の最小値には刺激による差異がみられた。

2) 跳躍動作による動作前の Silent period

図3は、音刺激（ブザー）に対してできるだけすばやく垂直方向に跳躍動作をおこなった際の筋電図記録の一例である。大腿直筋から筋放電を導出し、被検者が直立姿勢をとり、台に貼布した strain gauge から動作曲線を得たものである。膝関節をかるく屈曲している間、持続的な筋放電がつづき、音刺激（矢印）が与えられてから約 80 msec 後に、それまで出現していた筋放電が消失している。この放電の休止が約 100msec 持続した後に、同期性放電が出現し、それについて跳躍動作が開始されている。図4は、跳躍動作における筋電図について11回の連続記録を重ね合わせ

図3 跳躍動作による動作前の silent period

図4 11回の連続諸録による跳躍動作による動作前の silent period

図5 筋の収縮速度と動作前の silent period の関係：上段の記録より i) ゆっくり, ii) 中位のはやさ, iii) できるだけすばやく跳躍動作を行なった。記録は10回連続による。

図6 拮抗両筋にみられる動作前の silent period (跳躍動作)

図7 拮抗両筋にみられる動作前の silent period (肘関節伸展動作)

法によってしめたものである。この記録から明らかなように、跳躍動作の場合には動作に先行する Silent period が恒常的に出現した。

図5は、筋の収縮速度と Silent period との関係をしめた記録例であり、i) ゆっくり, ii) 中位の速さ, iii) できるだけすばやく行なったものである。記録は連続した10回の重ね合わせによるが、ゆっくり跳躍動作を行なった場合には動作に先行する Silent period の出現はみとめられない。これに対してできるだけすばやく跳躍動作を行なった場合には、この Silent period を観察することができた。

図6は、跳躍動作の際の主働筋である大腿直筋と、拮抗筋である大腿二頭筋から同時導出した記録である。膝関節をかるく屈曲した準備動作では、拮抗両筋に持続性放電がみられ、音刺激（矢印）から約 80msec 後に拮抗両筋に Silent period が出現した、この現象は、肘関節の伸展動作にも見い出された。

図7は、肘関節伸展動作の主働筋である上腕三頭筋と拮抗筋である上腕二頭筋の記録であるが、跳躍動作と同じように動作に先行する Silent period が拮抗両筋にもみとめられた。

3) スタート動作による動作前の Silent period

スタート動作の準備姿勢として左足を前方に、右足を後方にひき、両手を前方に着いた姿勢からスタート動作を行なった。記録の一例を図8、図9にしめた。検者の「用意」の合図で腰を持ちあげてスタート準備姿勢をとると、大腿直筋と上腕三頭筋に持続性の筋放電が出現する。そして音刺激に反応してできるだけすばやくスタート動作をおこすと、動作に先行する Silent period は、両方の筋に出現した。

考 察

動作に伴う筋放電の休止は、一般に抑制現象と考えられている。反射動作の場合には求心性インパルスの減少にもとづく遠心性インパルスの減少、あるいは消失と解されている¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾。これに対して随意動作の場合には大脳皮質前頭葉、小脳、脳幹抑制領域からの遠性インパルスの関与が考えられる¹²⁾。したがって光、音刺激に対する急

図 8 スタート動作による上肢と下肢に出現した silent period

図 9 スタート動作による上肢と下肢に出現した silent period

速な反応動作の場合に、同期性放電に先行して Silent period 出現することは、動作をおこすための遠心性インパルスが主働筋に到達する以前に大脳、小脳、脳幹から下行する別の遠心性インパルスが脊髄前角の運動ニューロンに達しているものと思われる⁹⁾。

本実験結果から明らかになったことは、これまでの報告に加えて、下肢の筋群から導出した筋電図にも動作に先行する Silent period が出現するということである。しかもその出現率は上肢のそれよりもきわめて高く、ほとんどの被検者にみとめられた。しかしながら、その出現には至適条件がある。一つには準備姿勢時の筋緊張 (back-ground tonus) であり、他には筋の収縮速度である。準備姿勢時では 11cps 前後の持続性筋放電が必要であると報告されている⁹⁾。本実験で用いたような準備姿勢では、しゃがみ姿勢を保持することから

back-ground tonus を一定に維持するための gamma 系の関与があるものと思われる。さらに随意動作を円滑に行なうためには gamma 系を介した筋紡錘からの求心性インパルスも重要な役割を果たしているとする。最近、Hagbarth & Valbo⁶⁾ の開発によって、人間の筋紡錘の活動様式が記録されるようになった。その報告によると、随意収縮中にも筋紡錘からの求心性インパルスは持続的に発射しているということが見いだされたのである。さらに、彼らは何の考察を加えてないが、随意的な筋収縮を開始する直前の神経電図 (neurogram) にはインパルス発射の減少がみられているのである。この現象は、とくに等張力性の随意収縮の場合に顕著である。つまり、筋収縮開始直前に筋放電の減少がみられるということであり、本実験の随意動作に先行する Silent period との関連性を示唆するものである。

つぎに筋の収縮速度と動作に先行する Silent period との関連性である (図 5)。ここでいう筋の収縮速度というのは筋の収縮速度を物理的に測定したものではなく、同期性放電の発射に集中性があるかどうかということを目やすにしたものにすぎない。すなわち、筋の収縮速度が比較的小さい場合には、動作をおこすための同期性放電に集中性を欠き、比較的小さい場合には集中性があるということである。このことは動作曲線のふれの角度 (たちあがり角) をもって知ることができる。同期性放電に集中性の比較的小さい場合 (図 5 の中) よりも、放電に集中性のある場合 (図 5 の下) の方が、その動作曲線のふれの角度が大きいということになる。図 5 にしめたように、筋の収縮速度の大きい場合の方が、そうでない場合よりも Silent period の出現は容易であるといえる。

反応動作に先行する Silent period が出現するまでの潜伏時間の最小値 (X) は、ネオン・ランプ、ピストル音を刺激としたときにも、ともに約 40 msec であった。この値は、さきの猪飼、芝山⁹⁾ の報告と一致するものであり、随意では普通におこらない程に短い時間である。このことは、神経系に効果をおよぼす薬剤を投与しても (X) の値に変化がないということからも意志の関与するものではないといえる。すなわち、猪飼、芝山⁹⁾ の報告に

よると、興奮剤 (amphetamine sulphate) を10mg 投与しても、睡眠剤 (bromvalerylurea) を 1g 投与しても、ともに (X) の値は平常とかわらず 40msec であったという。これに対して反応時間 ($T_1 + T_2$) は変化することからみて、動作に先行してあらわれる Silent period は、反射的機構の関与する抑制現象といえよう。

随意動作を発動させる場合には筋の活動電位に変化があらわれる以前に、中心前回附近から導出した脳波に何らかの電位変化なり、周波数変化なりがおりうるのではないかと考えられる。いわば、随意動作に先行して導出される準備電位 (readiness potential, RP)¹⁰⁾ と、加算脳波の変動である運動電位 (motor potential, MP)⁵⁾ である。さらに、Deecke たち²⁾によれば、随意動作に先行する脳の電位変化を三つに分類することを提唱している。すなわち、i) 動作に 850msec 先行しておこる準備電位、ii) 筋放電の開始に約 86msec 先行する運動前陽性電位、iii) 動作前約 56msec に始まる表面陰性電位、つまり狭義の運動電位である。随意動作時の脳波を平均加算した山本たち¹⁶⁾の報告によると、筋放電の開始前の約 780 msec に脳の電位変化をみとめているが、本実験で得た Silent period の潜伏時間である約 40msec 前には脳の電位変化をみとめてない。

他方、随意動作の中枢機序を明らかにするために、サルの脳内活動電位を記録する慢性実験の方法がEvarts³⁾⁴⁾により開発された。その報告によると、サルの腕関節の屈伸運動を行なったときの運動野錐体路ニューロン (pyramidal tract neurons) の発射時期は、前腕から導出した筋放電開始より最小値で約 50msec 先行するという。しかしながら、本実験で得られた Silent period と同じ現象が慢性サルの前腕屈伸動作に出現したかどうかについては、筋放電開始前に back-ground としての持続性放電を記録してないので明らかではない。

動作に先行する Silent period で相反的神経支配によるものでないことはすでに報告されている⁸⁾。もし、この現象が相反的神経支配によるものならば主働筋に筋放電の休止があらわれた場合には、拮抗筋に筋放電の出現がみとめられる筈で

ある⁸⁾。しかしながら、図2にしめしたように主働筋に筋放電の休止が出現したときに、拮抗筋には放電がみられてない。これらの報告は、いわば相反的神経支配に対する消極的な証明にすぎない。これに対して図6, 7にしめした主働筋に Silent period が出現する時期に、拮抗筋にも Silent period が同時に出現したというこは、動作に先行する Silent period が相反的神経支配によるものではないという積極的な証明になろう。この拮抗筋に、同時に Silent period が出現することからみて、この随意動作に先行する Silent period は相反的神経支配の関与する現象ではないという先き⁹⁾の報告を支持するものである。

さらに本実験から明らかになったことは、全身的な動作としてのスタート動作を行なった際に、上肢と下肢の筋群から動作に先行する Silent period がほぼ同時に出現するということである。つまり、上肢の筋と下肢の筋を支配する運動神経は、それぞれ脊髄の異なった分節から出発しているにもかかわらず、時期をほぼ同じくして Silent period が出現したということである。しかも Silent period が出現するまでの潜伏時間の最小値は約 40msec であって、随意ではおこらない程に短い時間である⁸⁾。したがって、この現象は、反射機構の関与する一種の抑制現象と考えられることから、大脳皮質、あるいは脳幹の抑制領域が関与しているものと推察される。このことは、随意動作に先行する Silent period が脳幹・脊髄全体の同時抑制を示唆するものと解される。

要 約

主働筋に軽度の随意的な緊張を与えた状態から、急速に随意的な反応動作をおこすと、動作に先行して主働筋に筋放電の休止期 (Silent period) が出現する。この現象については、これまで主として上肢を対象とした肘関節の伸展動作についてみたものであったが、本実験では上肢に加えて下肢の跳躍動作、および上・下肢の同時動作を対象にして、その発現機構を明らかにしようとした。その結果、つぎのことが明らかになった。

1) 肘関節の伸展動作による動作前の Silent period 出現の最小時間は、ピストル音、ネオン・

ランプ刺激とも約 40msec であった。これに対して反応時間には刺激の差異によるちがいがみられた。

2) 下肢の跳躍動作では、動作に先行する Silent period を恒常的に観察できた。また Silent period 発現の至適条件を考察した。

3) 動作に先行する Silent period が主働筋ばかりでなく拮抗筋にも、同時に出現するとをみとめた。

4) スタート動作をおこなうことによって、上肢・下肢ともほど同時期に動作前の Silent period が発現した。

5) 以上の結果から、随意動作に先行する Silent period は、脳幹・脊髄全体の同時抑制によることを示唆するものである。

本論文の要旨の一部は、第21回日本体力医学会総会(1967)、第49回日本生理学会大会(1972)で報告した。

文 献

- 1) Alston, W., R.W. Angel, F.S. Fink and W.W. Hofmann. Motor activity following the silent period in human muscle. *J. Physiol.* **190**: 189-202, 1967.
- 2) Deecke, L., P. Scheid, and C.H.H. Kornhuber. Distribution readiness potential, premotion positive, and motor potential of the human cerebral cortex preceding voluntary finger movement. *Exp. Brain Res.* **7**: 158-168, 1969.
- 3) Evarts, E.V., Pyramidal tract activity associated with a conditioned hand movement in the monkey, *J. Neurophysiol.* **29**: 1011-1027, 1966.
- 4) Evarts, E.V., Relation of pyramidal tract activity to force exerted during voluntary movement. *J. Neurophysiol.* **31**: 14-27, 1968.
- 5) Gilden, L., H.G. Vaughan Jr. and L.D. Costa. Summated human EEG potentials with voluntary movement, *EEG Clin. Neurophysiol.* **20**: 433-438, 1966.
- 6) Hagbarth, K.-E. and Å.B. Vallbo. Discharge characteristics of human muscular afferent during muscle stretch and contraction. *Exp. Neurol.* **22**: 674-694, 1968.
- 7) Hammond, P.H., P.A. Merton and G.G. Sutton. Nervous gradation of muscular contraction. *Brit. med. Bull.* **12**: 214-218, 1956.
- 8) 猪飼道夫, 動作に先行する抑制機構, *日本生理誌*, **17**: 292-298, 1955.
- 9) 猪飼道夫, 芝山秀太郎, 動作の敏捷性, 一その生理学的背景一, *体育の科学*, **15**: 149-156, 1965.
- 10) 伊藤正男, 神経中枢の運動制御, 真島, 猪飼編, 生体の運動機構とその制御, 杏林書院, 1972.
- 11) Kornhuber, H.H. u. L. Deecke, Hirnpotential-änderungun bei Willkürbewegungen und passiven Bewegungen des Menschen: Bereitschaftspotential und reaferente Potentiale. *Pflüg. Arch. ges. Physiol.* **284**: 1-17, 1965.
- 12) Lindsley, D.B., J. Bowden. and H.W. Magoun. Effect upon the EEG of acute injury to the brain stem activating. *EEG Clin. Neurophysiol.* **1**: 475-486, 1949.
- 13) Merton, P.A. The silent period in a muscle of human hand. *J. Physiol.* **114**: 183-198, 1951.
- 14) 小野三嗣, 大谷真, 尾谷良行, 坪田修三, 倉田博, 岩垣丞恒, 高橋泰光, 動的収縮中に発現する Silent period について, *日本生理誌*, **30**: 86-95, 1968.
- 15) Stetson, R.H. and H.D. Bouman. The cordination of simple skilled movement. *Arch. Neerl. de Physiol.* **20**: 177-254, 1935.
- 16) 山本高司, 矢部京之助, 猪飼道夫, 調整力の中樞機構(Ⅱ)―随意運動に先行する脳の電位変化―, *体育の科学*, **22**: 127-133, 1972.