

「随意反応における収縮動作と弛緩動作 のちがいにともなう運動成果への影響」

水谷 四郎 (三重大大学教育学部)

脇田 裕久 (三重大大学教育学部)

矢部 京之助 (愛知県心身障害者コロニ

一発達障害研究所)

Differences of Physical Performance on Contracted Acts and Relaxed Acts.

Shiro Mizutani
Hirohisa Wakita
Kyonosuke Yabe

研究目的

すべての身体運動は、筋の収縮によって成立している。この身体運動を巧みに遂行するためには、中枢神経系からの促進性あるいは抑制性インパルスを制御し、筋緊張を自由にコントロールする必要がある。⁸⁾ Gatev は、²⁾乳幼児を対象として、筋緊張の抑制が動作の協調性を知る手掛りになり、動作前 Silent Period は、最も進んだ抑制現象であることを指摘している。この動作前 Silent Period は、主動筋に軽度の随意的な緊張を与えた状態から急速に反応動作をおこした場合に観察され、動作に先行して主動筋に出現する一過性の筋放電休止期である。動作前 Silent Period の発現 mechanism は、明確になされていないが、大脳皮質前頭葉、小脳、脳幹抑制領域の関与があり、一種の中枢性抑制現象であると考えられている。⁴⁾ そこで本研究は、①動作前 Silent Period の出現した試行と②随意的に準備姿勢時筋緊張状態から脱力させた場合および③準備姿勢時の脱力状態から急激な収縮動作をさせた場合を比較し、動作前 Silent Period の出現した試行と随意動作によってなされた試行における Performance にどのような差異があるのかを究明することをその目的とした。

実験方法

本実験は、準備姿勢時に一定の筋緊張の状態から、光刺激に応じてできるだけ素早く肘関節を伸展させる収縮反応動作と素早く筋を弛緩させる弛緩反応動作

を用いた。被検者は、椅座位姿勢をとり、肩関節を45度、肘関節を60度に屈曲し、前腕を回外位にして、前面の手首支持台にのせるように指示された。手首支持台の高さは、移動可能であり、被検者の体格にあわせて調節した。手首支持台には、strain gauge を貼布し、準備姿勢時と反応動作時の歪圧変化を記録した。準備姿勢時の筋力は、被検者の前方1 m に設置した strength indicator によって表示し、準備姿勢時に被検者自身が発揮する筋力を制御した。筋

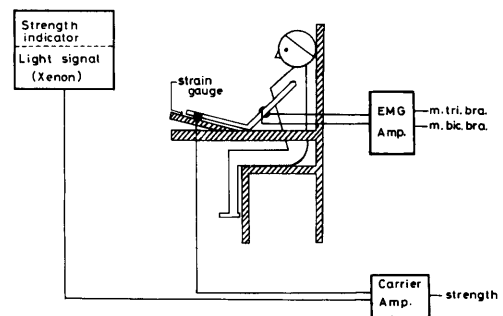


図1. 実験模式図

電図は、被検者の利き上肢の上腕三頭筋および上腕二頭筋より表面双極導出法を用いて導出した(図1)。

実験手順については、次のように実施した。まず、被検者の肘関節を最大努力で2回ずつ伸展動作をさせ、発揮された大きい方の値を最大筋力として採用した。検者の「用意」の合図とともに肘関節を伸展

し、strength indicator を見ながら、それぞれの準備姿勢時の筋力を持続的に発揮させ、その2-5秒後に光刺激が与えられ、この光刺激に応じて、できるだけ素早く肘関節を伸展あるいは弛緩させた。

なお、この時の準備姿勢時の筋力については、収縮反応動作の場合、最大筋力の0%、10%、20%、30%であり、弛緩反応動作の場合、最大筋力の10%、20%、30%である。収縮反応動作における準備姿勢時の筋力が最大筋力の10%、20%、30%の条件については、①筋電図の phasic discharge に先行して、一過性に筋放電が完全に休止するタイプ (Complete Premotion Silent Period 以下 Complete P. S. P. と略す)、②筋電図の phasic discharge に先行して、筋放電の減少傾向はみられるが、完全な休止には至らないタイプ (Incomplete Premotion Silent Period 以下 Incomplete P. S. P. と略す)、③筋電図の phasic discharge に先行して、筋放電の減少傾向のみられないタイプに分類した。なお、performance の比較にあたっては、Complete P. S. P. の出現した試行と収縮反応動作の0%および弛緩反応動作の10%、20%、30%についてのみ取り扱った。また、弛緩反応動作については、上腕三頭筋の弛緩時に上腕二頭筋の屈曲をとまなう相反神経支配による動作にならないように特に注意した。なお、各被検者の試行回数は、各準備姿勢時筋緊張度について、それ

ぞれ40試行実施した。

力曲線については、収縮反応動作の場合、①動作開始時間 (光刺激から力曲線の立ち上がりまでの時間)、②動作時間 (力曲線の立ち上がりからその頂点までの時間)、③筋力上昇率 (力曲線の立ち上がり最大角度を計測し、その $\tan \theta$ から単位時間当たりの筋力上昇率を算出したもの) を分析した (図2)。弛緩反応動作については、動作開始時間 (光刺激から力曲線の下降開始までの時間) についてのみ計測した (図2)。

なお、被検者は、18-33歳までの健康な男子9名である。

実験結果

1. 収縮反応動作における動作前 Silent Period 出現率について

Complete P. S. P. 出現率の平均値は、準備姿勢時筋緊張が最大筋力の10%で40.5% (S. D. 28.72%)、20%で31.3% (S. D. 27.20%)、30%で28.8% (S. D. 28.95%) であり、準備姿勢時筋緊張が増加するに従って、その出現率は減少した。

また、Incomplete P. S. P. 出現率の平均値は、準備姿勢時筋緊張が最大筋力の10%で8.6% (S. D. 5.74%)、20%で11.6% (S. D. 9.99%)、30%で11.4% (S. D. 4.86%) であり、準備姿勢時の筋緊張とその出現率の間には一定の傾向がみとめられなかった。

本実験における performance の比較については、Complete P. S. P. の出現した試行と収縮反応動作の0%および弛緩反応動作の10%、20%、30%についてのみ取り扱うことにした。

2. 動作開始時間

図3は、収縮反応動作の Complete P. S. P. 出現時と弛緩反応動作時における動作開始時間について、被検者別および準備姿勢時筋緊張別に示したものである。図中のマークは、それぞれの準備姿勢時筋緊張における各被検者の Complete P. S. P. 出現時と弛緩反応動作時の動作開始時間の交点を示している。各準備姿勢時筋緊張ごとの Complete P. S. P. 出現時と弛緩反応動作時の動作開始時間を被検者ごとに比較すると、Complete P. S. P. 出現時の遅い場合が19例 (6例に1%水準で有意な差が認められた)、弛緩反応動作時の遅い場合が8例 (2例に1%水準、1例に5%水準で有意な差が認められ

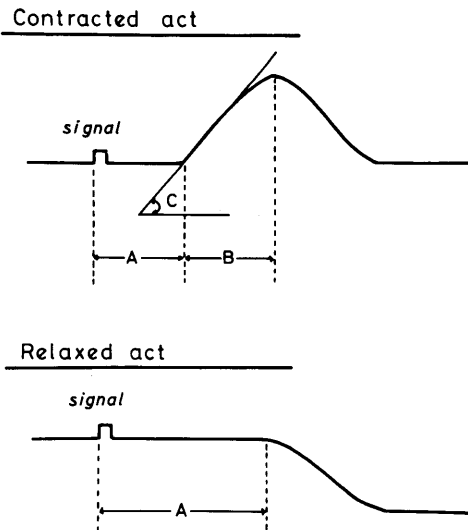


図2. 力曲線の分析方法
上段：収縮反応動作

下段：弛緩反

応動作
A：動作開始時間
B：動作時間
C：筋力上昇率

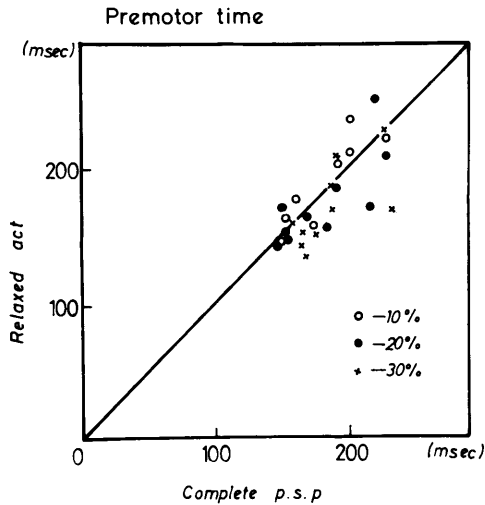


図3. Complete P. S. P. 出現時と弛緩反応動作時における動作開始時間の被検者別比較

た)であり、Complete P. S. P. 出現時の動作開始時間が弛緩反応動作時に比較して遅延する例が多くみられた。

各準備姿勢時筋緊張における動作開始時間の全被検者の平均値を図4に示した。収縮反応動作のComplete P. S. P. 出現時における動作開始時間

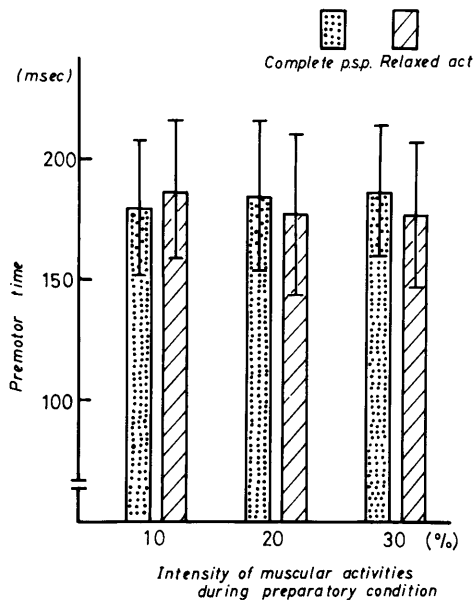


図4. Complete P. S. P. 出現時と弛緩反応動作時における動作開始時間の平均値

の平均値は、準備姿勢時筋緊張が10%の場合では180 msec (S. D. 28.1msec)、20%では186msec (S. D. 31.4msec)、30%では187msec (S. D. 27.3msec)であり、準備姿勢時の筋緊張が増加するにしたがって遅延した。弛緩反応動作時における動作開始時間の平均値は、準備姿勢時筋緊張が10%の場合では187msec (S. D. 29.5msec)、20%では178msec (S. D. 33.3msec)、30%では171msec (S. D. 30.1msec)であり、準備姿勢時筋緊張が増加するにともなう短縮した。各準備姿勢時筋緊張におけるComplete P. S. P. 出現時の動作開始時間の平均値は、弛緩反応動作時に比較して準備姿勢時筋緊張が10%で7 msec短縮し、20%で8 msec、30%で16msec遅延した。しかし、いずれの準備姿勢時筋緊張においても両条件の間には、有意な差が認められなかった。

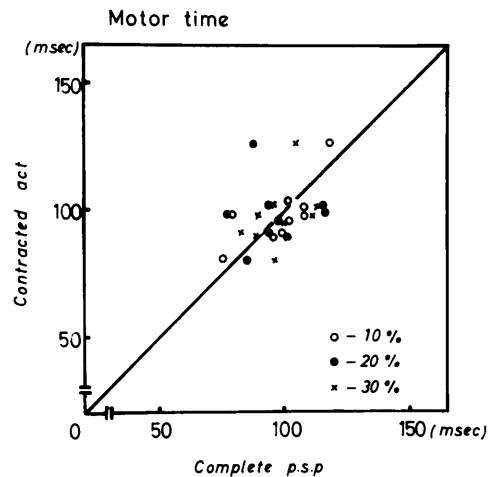


図5. Complete P. S. P. 出現時と準備姿勢時筋緊張が0%の収縮反応動作時における動作時間の被検者別比較

3. 動作時間

図5は、準備姿勢時筋緊張が10%、20%、30%における収縮反応動作のComplete P. S. P. 出現時と準備姿勢時筋緊張が0%における収縮反応動作時の動作時間の比較を被検者別に示したものである。図中のマークは、各被検者のそれぞれの準備姿勢時筋緊張におけるComplete P. S. P. 出現時と準備姿勢時筋緊張が0%における収縮反応動作時の動作時間の交点を示したものである。各準備姿勢時筋緊張ごとのComplete P. S. P. 出現時と準備姿勢時筋緊張が0%の収縮反応動作時の動作時間を被検者ごとに比較すると、Complete P. S. P. 出現時の遅

い場合が15例（5例に1%水準、2例に5%水準で有意な差が認められた）、Complete P. S. P. 出現時の速い場合が12例（5例に1%水準、1例に5%水準で有意な差が認められた）であり、両者の間には一定の傾向が観察されなかった。

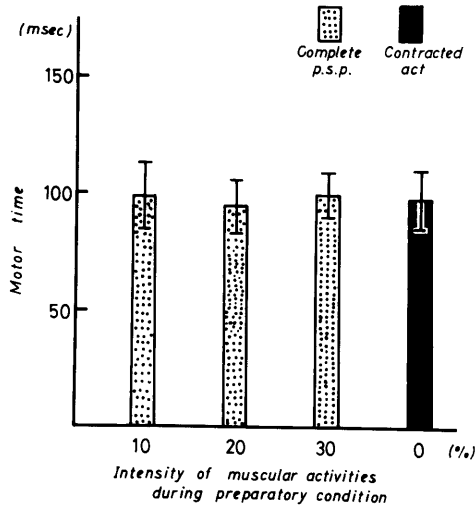


図6. Complete P. S. P. 出現時と準備姿勢時筋緊張が0%の収縮反応動作時における動作時間の平均値

各準備姿勢時筋緊張における動作時間の全被検者の平均値を図6に示した。Complete P. S. P. 出現時における動作時間の平均値は、準備姿勢時筋緊張が10%の場合では99msec (S. D. 14.4msec)、20%では95msec (S. D. 11.4msec)、30%では99msec (S. D. 9.2msec) であった。また、準備姿勢時筋緊張が0%の収縮反応動作時における動作時間の平均値は、98msec (S. D. 12.7msec) であった。各準備姿勢時筋緊張におけるComplete P. S. P. 出現時の動作時間の平均値は、準備姿勢時筋緊張が0%の収縮反応動作時に比較して準備姿勢時筋緊張が10%と30%で1 msec 遅延し、20%で3 msec、短縮し、両条件間にはいずれも有意な差が認められなかった。

4. 筋力上昇率

図7は、準備姿勢時筋緊張が10%、20%、30%における収縮反応動作のComplete P. S. P. 出現時と準備姿勢時筋緊張が0%における収縮反応動作時の筋力上昇率の比較を、被検者別に示したものである。図中のマークは、各被検者のそれぞれの準備姿勢時筋緊張におけるComplete P. S. P. 出現時と

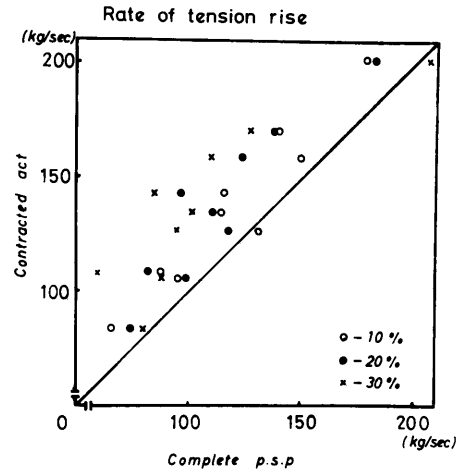


図7. Complete P. S. P. 出現時と準備姿勢時筋緊張が0%の収縮反応動作時における筋力上昇率の被検者別比較

準備姿勢時筋緊張が0%における収縮反応動作時の筋力上昇率の交点を示したものである。各準備姿勢時筋緊張ごとのComplete P. S. P. 出現時と準備姿勢時筋緊張が0%の収縮反応動作時の筋力上昇率を被検者ごとに比較すると、Complete P. S. P. 出現時の小さい場合が26例（16例に1%水準、1例に5%水準で有意な差が認められた）、Complete P. S. P. 出現時の大きい場合が2例であり、Complete P. S. P. 出現時の筋力上昇率が準備姿勢時筋緊張が0%の収縮反応動作時に比較して小さくなる例が多く

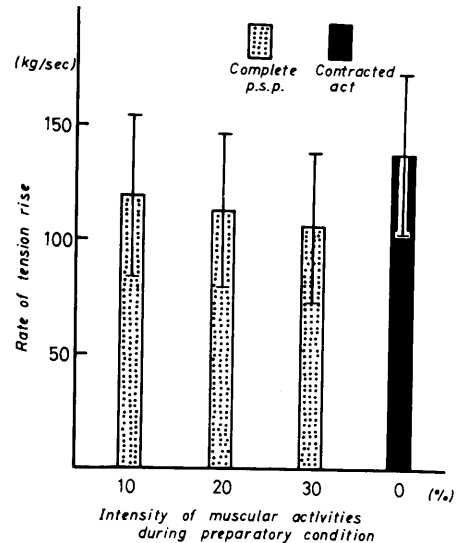


図8. Complete P. S. P. 出現時と準備姿勢時筋緊張が0%の収縮反応動作時における筋力上昇率の平均値

みられた。

各準備姿勢時筋緊張における筋力上昇率の全被検者の平均値を図8に示した。Complete P. S. P. 出現時における筋力上昇率の平均値は、準備姿勢時筋緊張が10%の場合では206kg/sec (S. D. 30.3kg/sec)、20%では200kg/sec (S. D. 28.6kg/sec)、30%では180kg/sec (S. D. 35.4kg/sec)であった。また、準備姿勢時筋緊張が0%の収縮反応動作時における筋力上昇率の平均値は258kg/sec (S. D. 25.2kg/sec)であった。各準備姿勢時筋緊張におけるComplete P. S. P. 出現時の筋力上昇率の平均値は、準備姿勢時筋緊張が0%の収縮反応動作時に比較して準備姿勢時筋緊張が10%で52kg/sec、20%で58kg/sec、30%で78kg/sec小さく、準備姿勢時筋緊張が30%の時両条件間に5%水準で有意な差が認められた。

論 議

主動筋に軽度の随意的な緊張を与えた状態から、急速に反応動作をおこすと、動作に先行して主動筋に一過性^{2) 4) 7) 9) 11) 12) 13) 14) 15) 16)}の筋放電休止期が出現する。この動作前 Silent Period の発現メカニズムは、一種の中枢性抑制現象であると考えられている⁴⁾。三田らは、この現象の出現機構を明らかにするため、準備状態における持続性収縮の程度と動作前 Silent Period の出現頻度との関係に検討を加えた結果、最大筋力の30%以下の比較的持続性収縮の弱い時に出現しやすいことを報告している。

本実験においても最大筋力の10%、20%、30%の準備姿勢時筋緊張における動作前 Silent Period 出現率を観察した。その結果、準備姿勢時筋緊張が10%の時に最も出現率が高く、準備姿勢時筋緊張が増加するにしたがって、出現率が低下し、先の報告と同様の結果を得た。これに関して、三田らは、随意収縮を制御しやすいのは比較的小さい持続性収縮の時であり、この時には、alpha-gamma 連合活動が gamma 運動系優性であることから考えると、動作前 Silent Period の出現と alpha-gamma の連合活動とは何らかの関係が存在することを推察している。

一方、脇田ら¹²⁾は、動作前 Silent Period の出現した試行と出現のみとめられない試行を比較し、動作前 Silent Period の出現は、動作開始時間を遅延させ、動作時間を短縮し、筋収縮速度を増大させる作用のあることを報告している。動作前 Silent Period の出現は、準備姿勢時の持続性放電が相動性放電に先行して消失することから、本実験では、準備姿勢

時に持続的な筋緊張を与え、随意的に筋を弛緩させた場合および筋の弛緩状態から相動性の筋収縮へ随意的に行なわせた場合と動作前 Silent Period 出現時との performance を比較し、動作前 Silent Period の出現が、随意動作とどのようなかわりがあるのかを究明しようとした。その結果、動作開始時間および動作時間の時間軸には差がみとめられなかったが、Complete P. S. P. 出現時の筋力上昇率は、筋の弛緩状態からの収縮反応動作に比較して有意に小さくなった。

まず、筋弛緩現象については、相反性神経支配にもとづいて拮抗筋を活動させて行う場合と収縮している筋のみを弛緩する場合とがある。永見ら¹⁰⁾は、脱力のように拮抗する両筋をともに弛緩する動作では、筋弛緩が必要とされる時点と動作前 Silent Period の発現する時点とは動的筋収縮に対する時間関係が近似的であると報告している。本実験における動作開始時間は、収縮反応動作の Complete P. S. P. 出現時と弛緩反応動作の間に有意な差が認められず先の報告と一致した結果を得た。

しかし、Complete P. S. P. 出現時における動作開始時間は、刺激から力曲線の立ち上がりまでの時間を計測し、弛緩反応動作時は、力曲線の下降開始時を計測している。従って、Complete P. S. P. 出現時においては、筋弛緩にともなう一過性の筋力低下開始時との比較がなされなければならない。Complete P. S. P. 出現時の力曲線の立ち上がりの直前にみられる一過性の筋力低下現象については、脇田ら¹²⁾によって報告されている。このような現象は、本実験では1名の被検者のみについて比較的多く観察された。この被検者について各準備姿勢時筋緊張における Complete P. S. P. 出現時と弛緩反応動作時の光刺激から力曲線の下降時までの時間を比較した。その結果、Complete P. S. P. 出現時における刺激から力曲線の下降時までの時間は、準備姿勢時筋緊張が10%で139msec (S. D. 14.3msec)、20%で138.4msec (S. D. 21.2msec)、30%で125msec (S. D. 26.4msec)であり、弛緩反応動作時のそれは、それぞれ157msec (S. D. 16.5msec)、157msec (S. D. 29.9msec)、151msec (S. D. 32.8msec)であり、いずれの準備姿勢時筋緊張においても1%水準で Complete P. S. P. 出現時の方が有意に速くなった。このことは、Complete P. S. P. 出現時では、随意的な弛緩反応動作時よりも筋の弛緩現象が速くなされていることになり、Complete P. S. P. 出現の抑制性インパルスが、随意的な筋収縮のイ

ンパルス停止よりも速く発射されていることを示唆している。この点に関しては、被検者数を増して検討する必要があると考えられる。

準備姿勢時の筋緊張と動作時間の関係について、Freund¹⁾らは、右手人さし指の伸展動作を用いて検討し、準備姿勢時の tonic な筋緊張は、その後の contraction time に関係しないことを報告している。本実験結果は、各準備姿勢時筋緊張における Complete P. S. P. 出現時と準備姿勢時筋緊張が 0% の収縮反応動作時間との間に有意な差が認められず、先の報告と一致した結果を得た。これらの結果は、Complete P. S. P. 出現時および筋弛緩時のように相動性収縮の直前がともに筋活動を停止している条件でも、また、準備姿勢時に持続性の筋活動が存在している条件でも筋の収縮時間には差の生じないことを示唆している。

筋収縮速度のめやすとして、Freund¹⁾らは、R. R. T. ($\text{Rate of Rise of Tension} = f/t$ f: 力曲線の peak 時の isometric force. t: 力曲線の立ち上がりからその peak 時まで要した時間)を用いて単位時間当たりの筋力上昇率を表示している。また、猪飼⁵⁾らは、動作曲線の立ち上がり角度を用いて、同期性放電に集中性のある方が動作曲線の立ち上がり角度が大きいと報告している。動作前 Silent Period と筋収縮速度の関係について、猪飼⁷⁾らは、筋収縮速度の比較的遅い場合には相動性放電に集中性を欠き、比較的速い場合には集中性があり、筋収縮速度の速い場合の方が動作前 Silent Period の出現が容易であることを報告している。また、脇田¹²⁾らは、動作前 Silent Period の出現した試行では、出現の認められない試行に比較して筋力上昇率が大きく、筋収縮速度の大きいことを報告している。この動作前 Silent Period の出現した試行がそうでない試行に比較して筋収縮速度の大きいことについては、動作前抑制現象が alpha-gamma linkage で行なわれている静的な筋収縮にひきつづいておこる alpha 運動経路のみの筋収縮へ移行する神経系の切り換えに関与していることから、この切り換え機構は、alpha 運動経路のみの筋収縮を集中的にする条件整備の役割があると考えられている^{3) 12)}。本実験では、Complete P. S. P. 出現時と随意的な筋の弛緩状態から収縮反応動作をさせた場合における筋力上昇率を比較した。その結果、Complete P. S. P. 出現時の筋力上昇率は、筋の弛緩状態からの収縮反応動作時に比較して、有意に小さくなった。このことは、Complete P. S. P. の発現にみられるような alpha-gamma linkage で

おこなわれている静的準備姿勢から、alpha 運動経路へ切り換えるよりは、筋を弛緩させた状態から直接 alpha 運動経路のみの筋収縮をおこなう方がより大きな筋収縮速度を生み出すことを示唆している。

要 約

主動筋に軽度の随意的な緊張を与えた状態から、急速に反応動作をおこすと、動作に先行して主動筋に動作前 Silent Period が出現する。本実験は、Complete P. S. P. 出現時と準備姿勢時筋緊張状態から随意的に弛緩反応動作をさせた時および筋の弛緩状態から随意的に収縮反応動作をさせた時の performance を比較し、動作前 Silent Period 出現時と随意反応動作時との関係を明らかにしようとした。被検者は、健康な 18~33 歳までの男子 9 名である。本実験結果は、次のようである。

1) Complete P. S. P. 出現率の平均値は、準備姿勢時筋緊張が 10% で 40.5% (S. D. 28.72%)、20% で 31.3% (S. D. 27.20%)、30% で 28.8% (S. D. 28.95%) であり、Incomplete P. S. P. 出現率は、それぞれの準備姿勢時筋緊張で 8.6% (S. D. 5.74%)、11.6% (S. D. 9.99%)、11.4% (S. D. 4.86%) であった。

2) Complete P. S. P. 出現時における動作開始時間の平均値は、準備姿勢時筋緊張が 10% で 180 msec (S. D. 28.1msec)、20% で 186 msec (S. D. 31.4msec)、30% で 187 msec (S. D. 27.3msec) であり、弛緩反応動作時における動作開始時間の平均値は、それぞれの準備姿勢時筋緊張で 187 msec (S. D. 29.5msec)、178 msec (S. D. 33.3msec)、171 msec (S. D. 30.1msec) であり、いずれの準備姿勢時筋緊張においても両者の間に有意な差が認められなかった。

3) Complete P. S. P. 出現時における動作時間の平均値は、準備姿勢時筋緊張が 10% で 99 msec (S. D. 14.4msec)、20% で 95 msec (S. D. 11.4 msec)、30% で 99 msec (S. D. 9.2msec) であり、準備姿勢時筋緊張が 0% の収縮反応動作時におけるそれは、98 msec (S. D. 12.7msec) であった。Complete P. S. P. 出現時と準備姿勢時筋緊張が 0% の収縮反応動作時の動作時間の比較では、いずれの準備姿勢時筋緊張においても有意な差が認められなかった。

4) Complete P. S. P. 出現時における筋力上昇率の平均値は、準備姿勢時筋緊張が 10% で 206 kg/sec (S. D. 30.3kg/sec)、20% で 200 kg/sec (S.

- D. 28.6kg/sec)、30%で180kg/sec (S. D. 35.4 kg/sec)であり、準備姿勢時筋緊張が0%の収縮反応動作時におけるそれは、258kg/sec (S. D. 25.2kg/sec)であった。Complete P. S. P. 出現時と準備姿勢時筋緊張が0%の収縮反応動作時の筋力上昇率の比較では、準備姿勢時筋緊張が30%の時に5%水準で有意な差が認められた。
- これらの結果から、随意反応動作時とComplete P. S. P. 出現時とは、動作開始時間や動作時間の時間条件には差が認められないが、筋の弛緩状態からの収縮反応動作時の筋力上昇率は、Complete P. S. P. 出現時のそれよりも増大することが明らかとなった。
- 引用・参考文献
- 1) Freund, H. -J. and Büdingen, H. J., "The relationship between speed and amplitude of the fastest voluntary contractions of human arm muscles", *Exp. Brain Res.*, **31**: 1-12, 1978.
 - 2) Gatev, V., "Role of inhibition in the development of motor co-ordination in early childhood", *Med. Child Neurol.*, **14**: 336-41, 1972.
 - 3) Granit, R., *The basis of motor control*, Academic Press: London, 1970. Pp. 346.
 - 4) 猪飼道夫「動作に先行する抑制機構」*日本生理誌*, **17**: 292-98, 1955.
 - 5) 猪飼道夫・金子公有「パワー（瞬発力）の研究（I）」*体育の科学*, **15**: 571-76, 1965.
 - 6) 猪飼道夫・金子公有「パワー（瞬発力）の研究（II）」*体育の科学*, **15**: 634-39, 1965.
 - 7) 猪飼道夫・矢部京之助・山本高志・川初清典・渡辺和彦・手塚政孝「随意動作に先行する Silent period の発現機構」*体育学研究*, **18**: 127-33, 1974.
 - 8) 猪飼道夫・山川純子「腕の部分的弛緩の筋電図学的研究」*お茶の水大学自然科学報告*, **3**: 92-96, 1952.
 - 9) 三田勝己・青木久・矢部京之助「随意動作に先行する Silent period の出現と静的準備状態との関係」*医用電子と生体工学*, **16**: 390-95, 1978.
 - 10) 永見邦篤・中野昭一「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, 1979.
 - 11) 脇田裕久・水谷四郎・東海政義・三田勝己・青木久・矢部京之助「随意動作に先行する Silent period の出現率について」*体育学研究*, **24**: 227-36, 1979.
 - 12) 脇田裕久・長井健二・八木規夫・矢部京之助「反応動作におよぼす動作前 Silent period の影響」*体育学研究*, **26**: 120-128, 1981.
 - 13) 脇田裕久・水谷四郎・矢部京之助「動作前 Silent period の出現率について—第1報運動種目間の比較—」*三重大学教育学部研究紀要（自然科学）*, **33**: 117-123, 1982.
 - 14) Yabe, K., "Premotion silent period in rapid voluntary movement", *J. Appl. Physiol.*, **41**: 470-73, 1976.
 - 15) Yabe, K., "Electromyographic silent period preceding a rapid voluntary movement," in Komi, P. V. (Ed.), *Biomechanics V-A*, Univ. Park Press: Baltimore, 1976. pp. 75-81.
 - 16) 矢部京之助・村地俊二「随意動作に先行する Silent period の役割」*日本生理誌*, **37**: 91-98, 1975.