**M. IKAI & K. ISHII: An Electromyographic Study on
Physiological and Psychological Limits
of Human Strength.**

筋力の生理的限界と心理的限界の筋電図学的研究

東京大学 猪 飼 道 夫

東京大学 石 井 喜 八

I 緒 言

体力のうちで、筋力について考えてみると、人の最大筋力を決定するものは、筋の断面積という構造的要素と、筋を支配する運動単位の興奮状態という機能的要素とである。そして、構造的要素は個人に特有のものであるとともに、個人の発育段階に応じて一定の値を示すものである。これにたいして、機能的要素は、個人に特有ではあるが、一定の発育段階においても必ずしも一定したものではなく、一日の中でも、また継時的な測定の場合においても、つねに変動するものである。さきに、猪飼は A. H Steinhaus^{3) 4)} とともに、この二つの要素を考察し、ここにいう、構造的要素によつてきまる筋力の上限を筋力の生理的限界 (physiological limit) と名づけ、ここにいう機能的要素によつてきまる筋力の上限を心理的限界 (psychological limit) と名づけた。生理的といい、心理的といつても、あくまで便宜的な名称であり、前者が、より身体構造に支配されるものであり、後者がより神経活動に支配されるものであり、したがつて、いわゆる心理的条件をふくむという意味である。この点の細部の論議については別紙に述べた⁷⁾。

体力測定の意味で筋力を測定するとき、同一人でも、日により、時によりその最大筋力は多少の変動を示すものであり、その変動の原因の一部を占めるものは、上述の心理的限界の変動によると解することができる。いいかえれば、心理的限界が低下した状態では、

たとえ同じ断面積をもつ筋であつても低い筋力しか示すことはできない。

猪飼と A. H Steinhaus⁴⁾ は、ケーブル・テンシオメーターを用い、上腕屈筋の最大筋力を1分間に1回の割で測定し、30分に及んだが、一般的には次第に低下し、30分後には最初の値の約10%の低下を示した。この経過において、最大筋力発揮の時点よりも2~10秒先行してピストル音を与えるとき、最大筋力が増大することを認めた。また、同様にこの経過のうちに、自然な「かけ声」をかけさせるときも最大筋力が増大することを認めた。著者らは、このような最大筋力の増大の機構として心理的限界が上昇すると想定したわけである。それまで大脳に存在していた抑制が、音によつて抑制されたものであると考え、いわゆる条件反射における脱制止 (disinhibition) と解釈した。

さらに、Amphetamine sulphate を服用させたときの最大筋力をしらべたが、服用後30~40分で筋力の増大を認めた。この機構についても、同様にこの薬物による大脳の抑制の減退を考えた。

本実験においては、上述の想定された機構をたしかめるために、筋力を発揮する主働筋への運動単位の神経衝撃を記録し、それと諸種の実験条件による最大筋力の増減との関係を明らかにしようとした。

II 実験方法

実験を大きく二つに分けることができる。

その一つは、腕エルゴメーターを用いるものであり、これでは最大筋力以下の筋力を出しつづける場合の運動単位の神経衝撃を筋電図によつて見るものである。他の一つは、ストレーンゲージ筋力計を用いるものであり、これでは最大筋力を出しつづける場合の運動単位の神経衝撃を筋電図により見るものである。両者において、運動単位の神経衝撃を見るため、筋の上にはりつけた表面電極を介して、筋電図を記録した。

第1図 腕エルゴメーターの構造

(1) 腕エルゴメーターを用いる方法

腕エルゴメーターは、第1図に示すように、東大体育学研究室⁵⁾において設計作成されたものであり、肘関節がいかなる角度にあつても、常に荷重が前腕の長軸に直角に作用するようになっている。すなわち、筋にかかる力の能率が常に一定であるという長所をもっている。図において明らかな如く、被検者はエルゴメーターのアームのハンドルを握るのであるが、アームの長さは、被検者の前腕の長さにあわせるようになっている。滑車には鋼鉄線にさげた錘により荷重をかけることができる。円弧の上には10度毎にきざんだ小孔があけてあり、この小孔にさしこむ「とめ金」の位置により、前腕を何度まで屈曲させるかということが規定される。この実験では、肘関節が120度から90度まで屈曲するようにしたので、「とめ金」の位置は、図のようになる。また測定にさいしは肘や上腕や肩の動くのを止める必要がある。このために、第2

図に見られるように、120度の開きをもつた「腕当て」を作成した。

これを用いることにより、作業中の姿勢を一定に保つことができるばかりでなく、肘関節の回転軸をエルゴメーターの滑車の回転軸とつねに一致させることができる。

以上のような構造の腕エルゴメーターを用い、上腕屈曲筋の筋作業を行うにあつては次のような手順をとつた。

第2図 腕エルゴメーターによる筋作業。この写真で肘当てを見ることができる。

1) 第2図に示すような姿勢で、エルゴメーターに位置し、滑車にかけた鋼鉄線の下端の錘りを外して、床に固定したかぎに掛け、この鋼鉄線にケーブルテンシオメーター (Cable-tensiometer, California) を装着し、エルゴメーターのハンドルをもちあげるように努力して、上腕屈曲線の最大筋力を等尺性に測定した。

2) 最大筋力の1/3の重さの錘りをエルゴメーターにかける。最大筋力が30kgであるな

らば、10kg の錘りを用いる。

3) メトロノームにあわせて、1秒に1回のテンポで肘関節を屈曲し、エルゴメーターのアームが「とめ金」で停止するまで錘りを持ちあげ、これをできるだけ多く反復し、その反復回数をかぞえ、それをもつて筋持久力とする。リズムにあわなくなつたとき、または「とめ金」にふれなくなつたときに、ただちに作業を停止させ、それまでの作業回数を数える。このようにして筋持久力をあらわすことができるが、さらにその後5分の休息を挿入したのち、再び同様の作業を行い、反復回数を測定することにより、筋の疲労からの回復能力をしらべることができる。すなわち、第1回試行のときの回数を N_1 とし、第2回目の試行のときの回数を N_2 とするとき、 N_2/N_1 という比率は、回復率を示すといえる。また、 N_1+N_2 は総合した持久力を示すことになる。第1回試行だけで持久力を見る方法をここでは単純法 (one bout method) とよび、休息

をはさむ2回を試行による方法を重複法 (two bouts method) とよぶ。

以上のエルゴメーター作業において、上腕二頭筋、上腕三頭筋、撓側手根屈筋の皮膚の上に直径約 5mm の銀板電極を2個電気糊ではりつけ、これを介して筋にあらわれる活動電位を導出し、三栄ペン書き多元電気記録装置によつて記録した。電極は筋の中央部で筋線維の走行方向に沿い、約 2cm の間隔をおいてはりつけた。またその二つの電極の間にさらに一つの電極をはりつけ、これを接地した。この結果、記録はすべて普通の実験室で行うことができ、遮蔽室を使う必要がなかった。第3図はその記録の1例である。

(2) ストレインゲージ筋力計を用いる方法

上述の筋エルゴメーターでは、荷重は最大筋力以下の一定の値 (1/3) に固定されているが、これとは別に最大筋力をいかに出しつづけることができるかということを見る方法が

ある。この目的のためストレインゲージ筋力計を設計作成した。これは抵抗線の伸縮が抵抗値を変化させることを利用するものであり、ストレインゲージは新興通信工業製の S₂₁ 型を用いた。

筋力計は第4図に見られるように、4×2×50cm の木製の棒の両端を鉄製の枠で固定し、ストレインゲージを木製の棒の端から長さの 1/4 の位置に貼布した。また、貼布方向は棒の長軸の方向に平行にした。これがアクティブゲージとなる。棒の連続的な歪から生ずるゲージの熱変化による抵抗値の変化を補償するためアクティブゲージと直角に他のゲージを貼布した。こ

第3図 腕エルゴメーターによる筋作業の経過における主働筋その他の筋の筋電図。筋の収縮は1秒に1回。最上段の数字は反復回数、時間記録は0.1秒、BB、TB、FCはそれぞれ上腕二頭筋、上腕三頭筋、撓側手根屈筋の筋電図を示す。またHBは心電図による心搏の記録である。IST BOUT、2ND BOUTはそれぞれ第1回および第2回試行を意味し、この間に5分間の休息をはさんでいる。

第4図 ストレインゲージ筋力計による最大筋力の反復測定。前腕と直角にある水平の木の手にはストレインゲージが貼布されている。

れが補償ゲージとなる。ストレインゲージ4枚を第5図のようにホイストブリッジ回路に接続し、AとCとをアクティブゲージ、B、Dを補償ゲージとしたのは、2倍の感度を得るためである。電源には4Vの電池を用い、out putを三米多元電気記録装置に導き、インク書きオツシログラフで記録した。

第5図 ストレインゲージ A, B, C, D, の貼布の様式

肘をベルトで固定し、上腕屈曲筋を一気に収縮させ、木製の棒の中央を前腕の手関節に近い部分で上方に押しあげ、最大筋力を記録する。被検者は第4図のように位置し、両脚をのぼして台の上にのせ、左手は楽にのぼして、膝の上にのせ、右腕の最大筋力をはかるときに、左手や両脚で台面その他の部分を支持しないようにする。被検者

は、始めの合図とともに、2秒に1回のテンポで最大筋力を発揮するようにし、300回～600回に及ぶ。テンポを保つには前と同様に、メトロノームを用いた。

最大筋力の消長と運動単位の神経衝撃との関係をみるためには、次の3種の方法を用いた。

(a) 持久作業の場合

2秒に1回のテンポで最大筋力を出していくとき、毎回最大努力が行われるわけであるにも拘らず、最大筋力は変動を示しながら、回数を重ねるにつれて減少してくる。しかし、このとき、上腕二頭筋、上腕三頭筋、撓側手根屈筋への神経衝撃は必ずしも筋力と平行せず、独自の消長を示す。その1例は第6図である。そして、ついに作業を連続することができなくなるまで努力をつづける。

(b) shot および shout の場合

2秒に1回のテンポで最大筋力を出していくとき、毎度が最大努力で行われるにも拘らず、最大筋力は減少を示している。このとき、前述のようにピストル音 (shot) を最大筋力発揮の直前 (約1秒前) に与えるとき、これにつづく最大筋力の増大がある場合に、主働筋の運動単位の神経衝撃が増加するかどうかをしらべた。

また、これとは別に被検者自身に「かけ声」(shout) をかけさせたとき、筋力の増大があ

第6図 ストレインゲージ筋力計による最大筋力の反復測定と同時に計った主働筋その他の筋の筋電図の記録。最上段の数字は反復の回数、時間記録は0.1秒である。STは最大筋力、BB、TB、FCはそれぞれ上腕二頭筋、上腕三頭筋、撓側手根屈筋の筋電図である。

る場合に、主働筋の運動単位の神経衝撃は増加するかどうかをしらべた。

(c) Amphetamine sulphate を投与した場合

健康な被検者に 10~16mg の Amphetamine sulphate の錠剤を服用させ、その後の最大筋力を逐次的に測定し、薬剤の効果を見た。また、その経過において最大筋力の消長と筋力への運動単位の神経衝撃の消長との関係をしらべた、さらに、筋力の減退のある時期に Shot, あるいは Shout を与え、そのときの最大筋力の変化と、主働筋の運動単位の神経衝撃の変化とをしらべた。

III 実験成績

以上の方法により得られた成績は次の通りである。これを腕エルゴメーターを用いた実験と、ストレインゲージ筋力計を用いた実験とにわけて記述する。

1. 腕エルゴメーターを用いた実験

腕エルゴメーターを用い、最大筋力の 1/3 の荷重をかけて、1 秒 1 回のテンポで肘関節を 120 度から 90 度まで、30 度だけ屈曲して錘をもちあげる作業を、できるだけ長時間くりかえす作業中の上腕二頭筋 (BB)、上腕三頭筋 (TB)、撓側手根屈筋 (FC) の筋電図は第 3 図に示したようなものである。この被検者は持久力が相当に高い方であり、第 1 回試行では 151 回行っている。記録は便宜上初期、中期の 2 期、終期のそれぞれ 4 回ずつのほかは割愛したものである。図の最上段は肘の反復回数を示したものである。図の最下段は心搏を示す心電図 (HB) である。本測定はエルゴメーターを用い重複法によつたものであり、151 回の屈曲を終了したあと、5 分間の休息をおき、再び第 1 回試行と同様に第二回試行を行い、95 回の屈曲を以て作業は不可能となつた。

図において明らかなように、主働筋である上腕二頭筋の筋電図は、初期には小さいが、

中期、終期と進行するにつれて増大してくる。このような筋電図の振幅の増大は運動単位の神経衝撃の増大を示すものである。さらにくわしく見ると、1~6 回目の筋電図は振幅の小さい割合に、持続時間が長く、ほとんど、屈曲と屈曲との間において放電が断絶することがないほどである。これは、肘が屈曲して錘をもちあげる時期のみならず、錘をおろして肘を伸展するときも、上腕二頭筋が活動していることであり、動作の上からは、肘の伸展の場合に錘を放り出していないことであり、動作がなめらかである。これにたいして、60~65 回という中期になると、錘を持ちあげるという作業に努力が集中してくるとともに、その中間期に放電の減少が見られる。これは肘をのばすときに、錘を放り出す傾向が出ていることになる。しかし、小さい放電が見られることは、錘を放り出すことを阻止しようとする努力が残っていることを示す。90~95 回においても同様であるが、この傾向が強くなっている。さらに、終期の 146~151 回にいたると、錘を持ちあげるための努力の集中が極度となり、しかもその中間の放電が全くなくなる。これは完全な錘の放り出しを示す。しかも、錘をもちあげるときの放電は振幅においても、その持続においても増大していることは著明である。

上腕三頭筋 (TB) は、錘をもあげるときには主働筋の上腕二頭筋 (BB) の拮抗筋であるが、初期には、ほとんど放電が見られない。わずかに認められる放電は、上腕二頭筋のそれと時期的には一致し、錘をもちあげる時期に認められる。中期、終期になるにつれて、その放電は増加してくる。撓側手根屈筋 (FC) は、錘をもちあげるためには、上腕二頭筋と協働筋となるが、初期においては肘の屈曲と伸展の両期を通じて持続的に放電している。60~65 回では、この放電の振幅が増大するとともに、肘の屈曲の時期に放電が集中する傾向を示している。この傾向は 90~95 回、146

～151回となるにつれて著明になつてくる。このような変化は、上腕二頭筋に見られるものと共通である。

5分間の休息を挿入したあとの、第2回目の試行では、筋力の回復とともに、上記3種の筋の筋電図(放電)は減少し、その1～7回においては、第1回試行の1～6回のものに似てくる。また30～35回、60～65回のもはそれぞれ第一回試行における60～65、90～95回のものに近い。そして、終期90～95回のもは、第1回試行の146～151回のものにきわめてよく似ている。

この実験で最も注目すべきことは、腕にかかる荷重が、初期の最大筋力の1/3という固定したものであるにもかかわらず、筋電図、すなわち運動単位の神経衝撃(放電)が次第に増大するという事実である。さらに、休息により筋力が回復すると、放電が再び減少するということである。

2. ストレインゲージ筋力計を用いた実験

(a) 持久作業の場合の成績

ストレインゲージ筋力計により、上腕屈曲筋の最大筋力を1秒に1回のテンポで出していくとき、最大努力を重ねているにもかかわらず最大筋力は次第に減少してくる。第6図のいちばん上の記録(ST)はこの最大筋力を示すものであり、1～7回のものにくらべ、187～192回のもは明らかに減少している。その後320～326回では、同様の水準を保ち、587～595回では、最大筋力の水準の変動が目立つてくる。そして595回では力尽きている。

第6図において、それ以下順次に上腕二頭筋(BB)、上腕三頭筋(TB)、撓側手根屈筋(FC)の筋電図が示されている。上腕二頭筋の筋電

第7図 ストレインゲージ筋力計による最大筋力の反復測定中に、Shot, Shoutを行つたときの最大筋力と主働筋の筋電図。最上段の数字は反復回数、時間記録は0.1秒である。STは最大筋力、BB, TB, FCは上腕二頭筋、上腕三頭筋、および撓側手根屈筋の筋電図、最下段のSHOT, SHOUTはそれぞれピストル音と「かけ声」の時点を示す。

図は、最大筋力の発揮の時期に集中的にあらわれているが、その振幅は、320～326回の時期に著明な増大を示している。そして587回以後の終期には振幅が減少している。上腕三頭筋(TB)の筋電図はエルゴメーターの場合と異なり、上腕二頭筋の活動時期の終了後に著明となる。しかし、上腕二頭筋の活動時期にも上腕三頭筋に放電が見られることもたしかである。587回以後に至つて、上腕三頭筋の放電は上腕二頭筋の活動終了後、すなわち主働筋の脱力の時期に著明となつている。

撓側手根屈筋(FC)の放電は上腕二頭筋(BB)のそれと一致した時期にあらわれる。そして、320～326回にいくらか増大しているが、587回以後では不規則な変動を示している。

(b) shot および shout の場合の成績

ストレインゲージ筋力計において、上腕屈曲筋の最大筋力を2秒に1回のテンポで発揮していくとき、筋力がしだいに減少することは、上述した通りである。そこで筋力が減少しはじめた頃に、被検者に無警告でスタート用ピストルをその背後で発砲したときには、第7図に示す如く、一時的に最大筋力が増大

第 8 図 最大筋力に及ぼす SHOUT (かけ声) の効果

する。この効果は4秒くらいつづくことが多いが、時には10秒まれには1~2分に及ぶことがあることは、別に報告した⁴⁾。本研究の目的の一つは、この場合の最大筋力の増大に伴って、筋電図の増大が見られるかどうかということであつた。その結果は、第7図の例で見られるように、Shotに伴う最大筋力の増大は、放電の増大を伴っていることがわかつた。すなわち、548回のあとでピストル音 (shot) が与えられたが、約1秒後の最大筋力 (549回目の ST) とそれつづ最大筋力 (550回目の ST) は増大し、上腕二頭筋 (BB) の放電はその前のものに比べて大きい。

さらにその後の経過において、被検者が自発的な「かけ声」(shout) をかけながら、最大筋力を発揮することを試みた。その結果は、第7図の673回、674回に見られるように、最大筋力 (ST) は増大し、しかも上腕二頭筋 (BB) と撓側手根屈筋 (FC) の筋電図は増大している。

第8図は、最大筋力をストレインゲージ筋力計で測定しながら、shout を与えたときの最大筋力の消長をグラフにあらわしたものであり、ストレインゲージの振れの大きさが換算表により、kg にかきかえられている。9個の白丸は shout と共に出した筋力で、相当に

筋力が低下してきたときでも、shout の効果は著明である。しかも、200回、および300回ころでも shout による最大筋力の上昇した水準は、作業の初期の水準を上回るという著しい増大を示していることは注目さるべきである。

(c) Amphetamine sulphate を投与した場合

健康成人10名に10~16mgの Amphetamine sulphate (Zedrin 武田) を投与したとき、一般に最大筋力の変異が減少することが認められたが、中には投与後30~40分で明らかな最大筋力の増大を示すものがあつた。それらのなかの1例を示すと第9図のようである。すなわち、この被検者は Amphetamine sulphate を10mg 経口的に服用したあと、5分毎に最大筋力を発揮したが、50分後からは2秒に1回のテンポで行つた。最大筋力は約50分後から増大しているが、約80回目ころから減少しはじめている。そして、100回目くらいのところで被検者の自発的な3回の「かけ声」とともに、最大筋力は増大し、Amphetamine 服用後の最大筋力が最高水準を示した時期の値に近づいている。さらに、時間の経過とともに最大筋力は低下していくが、200回をこえたところで、再び3回の「かけ声」をかけたところ、最大筋力は最高水準に近く回復した。さ

第9図 最大筋力に及ぼす Amphetamine, SHOUT, SHOT の効果

らに、ピストル音 (shot) を与えたが、このときも最大筋力は最高水準に近く回復した。

この実験においては、Amphetamine 服用後の最大筋力増大の時期には、主働筋の筋電図には認めるほどの増大はなかつた。しかし shot, shout の場合には、前記の実験の場合と同様に筋電図の増大がある。

IV 論 議

さきに、猪飼と Arthur H Steinhaus⁴⁾ とは、最大筋力の生理的限界と、心理的限界を、量的に取扱う試みをし、その可能性を示した。本研究は、それにつづき、筋電図を用い、筋への運動単位の神経衝撃を記録し、量的な取扱いの他の分野を開拓しようとしたものである。

筋が収縮して発生する力というものは、終局的には筋の横断面積の函数であり、且つまたその組織の生理的状態の函数である。しかし、実際に発揮される力は生理的因子の変動以上に大きい範囲の変動を示すものである。また、筋やこれを支配する神経組織のうちで、筋と末梢神経とは比較的安定な状態を保持するものであると考えられるので、通常見られるような筋力の変動、ならびに本実験において見られるような広汎な変動は中枢神経系統

によるものであるといえよう。したがって、最大筋力を規定する生理的限界というのは、筋の横断面積、およびその組織の生理的状态によつて一義的にきまるものを指す。これにたいして、心理的限界というものは、中枢神経系統の活動状態は元来、生理的として取扱うことができるので、あえて「心理的」という用語を用いる必要はないともいえるが、最大努力で体力を発揮するという人間の行動に関しては、民族の歴史や個人の体験などの生活的な因子により、影響を受けると考えられるので、あえて心理的という用語を用いたわけである⁷⁾。

ここにおいて、本実験において行つた、腕エルゴメーターの場合を考察しよう。第3図に見られるように、上腕二頭筋 (BB) の放電は回を重ねるにつれて増大している。これは明らかに、筋活動に参加する運動単位の数、および運動単位の神経衝撃の頻度が増加することを示している。このことは、さらに大脳皮質運動領の興奮水準の上昇を意味するものである。しかも、この場合に注意すべきことは、もちあげる荷重の重さは、初めも終りもつねに一定であるということである。すなわち、上腕屈曲筋、とくに上腕二頭筋は初め

も終りもつねに同一の物理的な仕事をしているにもかかわらず、終りに近づくにつれて、運動単位、ないし大脳皮質運動領の興奮状態が高まってくるということである。これは、回を重ねるにつれて、筋線維の張力発生が減退するので、一定の筋力を出すためには、より多くの運動単位の参加、衝撃の増加を必要とするといえる。そして、このためには大脳皮質運動領の運動細胞の数あるいは、その興奮水準をあげなくてはならない。これは、いかえれば、心理的限界を上昇させることになる。エルゴメーター作業をつづけるうちに、内省的には非常に努力感を伴うようになるが、これが筋電図の増大にはほぼ比例している。この場合に、筋紡錘を中心として知覚神経を介しての感覚、および、Gamma 線維を介しての反射系を考慮の外におくことはできないであろう。筋にかかる荷重はつねに同一であるという点では、筋紡錘の興奮は同一であるともいえるが、錘りをもちあげるための筋線維の収縮が短時間に完全におきにくくなるために、包内線維のひきのばされ方が強くなるということが考えられる。この結果は、筋紡錘の興奮を増加させ、知覚神経を介して間脳、ないし大脳皮質知覚領における興奮水準をたかめるとともに、Gamma⁹⁾系の興奮水準をたかめることになる。

間脳における興奮水準の上昇は、新たな神経衝撃を大脳皮質運動領へ追加することになるが、これは Penfield¹⁰⁾のいう随意運動への中枢脳系からの調整である。別の表現を用いれば、「がんばり」のあらわれであり、ここにいう「心理的限界」の上昇である。このような機構により、主働筋への神経衝撃の増大を理解することができる。152 回目は完全な錘のもちあげができないわけで、ここで作業を中断したわけであるが、5 分の休息ののち、筋の収縮力が回復して、再び作業をつづけることができるになるとともに、主働筋の神経衝撃が再び減少していることは筋線維の張

力が回復し、収縮が短時間に完全に行われるようになるため、筋紡錘からの神経衝撃、ひいては、大脳皮質運動領からの神経衝撃の減少がおこると考えられる。そして終りに近づくにつれて、第 1 回試行のときと同様に神経衝撃の増大が見られるわけであるが、この機構については、第 1 回試行のときと同様と考えられる。

この場合に、共働筋 (FC)、のみならず拮抗筋 (TB) にも放電の増加が伴うことは、大脳皮質運動領の興奮が、必ずしも厳密な局所性をもつたものでないことを意味しているとともに、主働筋への Gamma 系を介しての反射的調整よりも、視床下をふくむ上位中枢を介しての調整を考えさせるものである²⁾。

ここで注意すべきことは、このような実験条件では筋力と筋電図の放電量とは比例しないということである。さらに、テストの実施上からいえば、主働筋の筋電図にこのような放電量の増加がなければ、ほんとうに「がんばった」とはいえないことになる。このように筋電図は「がんばり」の指標となる。

つぎに、ストレインゲージ筋力計による上腕屈曲筋の最大筋力測定の場合について考察する。これは、上記のエルゴメーターの場合と異なり、つねに最大筋力を出していることであり、したがってその筋力はつねに毎回変動するものである。この場合の主働筋の放電を見ると、はじめのうちは最大筋力の低下にも拘らず、筋の放電の大きさはかわらないが、300 回の反復の時期にいたると、筋力の減少にもかかわらず、筋の放電は増加してくる。

この筋の放電の増加は、前記のエルゴメーターの場合と同様に、大脳皮質運動領の活動水準の上昇と考えられるが、これをひきおこす知覚系の機構には多少のちがいはあるはずである。すなわち、エルゴメーターの場合には、荷重が一定に与えられているので、知覚系はこれにしたがつて作動するはずであるが、ストレインゲージ筋力計では知覚系を作動させるも

のは、自発的に出した筋力、ないし筋の張力である。最大筋力を出したときの知覚は、ストレインゲージを貼布した木の棒からうける圧によつて生ずるものであり、筋力が低下したときには、圧の知覚の低下がおこるであろう。圧の知覚の低下は自己の筋力の低下を意識させる結果となり、更に強い力を出そうとする努力を誘起するはずである。したがつて、この場合の筋放電の増大は、Gamma系を介しての反射的のものというより、上位中枢を介する調整と考えられる。これはまた、中枢脳系からの随意運動の調整の機構をふくみ、いわゆる「心理的限界」を上昇させるということの生理学的内容である。さらにすすんで、587回以後、力尽きる頃には、筋の放電は減少してくる。これは「心理的限界」の低下する状態である。

この実験でも、筋力と筋電図、ないし筋の放電量との間には、簡単な比例関係はないことが注目される。

第三に考察すべきことは、ShotおよびShout実験のことである。ストレインゲージ筋力計で最大筋力を2秒に1回のテンポで出していくとき回を重ねるにつれて筋力は低下してくるが、ピストル音につづく試行では最大筋力が増大し、第7図において見るように、このとき筋の放電量の増加がある。これは音の刺激が内耳から大脳へはいり、大脳皮質運動領の活動水準をたかめるようにはたらきかけるものであろう。しかし、Shotと同時に放電がおきるのではないので、いわゆる「びつくり反射」によるものではない。音により大脳内に生じた旧皮質の賦活作用が、間接的に大脳新皮質の運動系の活動水準をたかめるものと推定される¹²⁾。猪飼とSteinhaus⁴⁾⁷⁾とは、さきに、Shotによる筋力増大は、「大脳に存在する内制止を、音という刺激による外制止により脱制止すること」であると推測したが、筋電図の記録だけではこの推測を検討するまでには至らない。ただ、明らかになつ

たことは、Shotにつぐ筋収縮が、運動単位により高い水準の興奮によつて行われるようになるということであり、この意味で心理的水準の上昇をきたしたものであることはできる。

Shoutにより筋の放電の増大とともに最大筋力が増大することと、Shotと同様に解することができよう。Shotは他動的のものであり、Shoutは自発的なものであるが、その作用機構については同様のものと考えられる。

最後に考察すべきものは、Amphetamine Sulphate投与の場合である。Amphetamineを用いて、筋力や作業能力をしらべた業績はいくらかある。AllesとFeigen¹¹⁾はAmphetamineを20~40mg使用し、作業能力の増大することをみとめ、これを中枢のシナプスに作用するものとしている。SpenglerはAmphetamineを用い、自転車エルゴメーターで持久力をしらべ、持久力の向上を認めている。SmithとBeecher¹⁰⁾は体重70kgにたいし、14mgのAmphetamineを服用させ、重量挙げ選手の85%に成績の向上を見たとしているが、被検者がすでに競争意識を高揚させているときには、薬物の効果は少いと述べているのは注目すべきものである。

Karpovich⁸⁾は54人の被検者について、Amphetamineの効果をしらべ、水泳、トラック走、トレッドミル走などの成績には一義的な成績は得られないことを述べている。

猪飼とSteinhaus⁴⁾とは、30mgのAmphetamineを服用させ、25分間経過したところで最大筋力が増大しはじめ、その後30分に及んで測定した範囲内では、対照にたいし1.35%の増大を示すことを認め、その増大は5%の危険率で有意なことを報告した。そして、AlcoholやAdrenalineの効果と同様に、この薬物によつて解発された大脳の脱制止が筋力増大の原因であると考察した。

本研究においては、Amphetamineの服用後に、第9図にその1例を示す如く、最大筋力の増大を認めたが、主働筋の筋放電には著し

い増大は認められなかつたので、Amphetamine による筋力の増大と運動単位の活動水準、ないし大脳皮質運動領の活動水準との関連については、今直ちに立入った論議をすることはできない。

ただ、これにつづく反復作業において、筋力が低下してきたときにおける、Shout, Shot では筋放電の増大と共に最大筋力の増大が認められることは、上述の場合と同様である。ここで注目したいのは、Amphetamine 服用後に上昇した最大筋力の水準が、Shot や Shout によつて上昇した最大筋力の水準とほとんど同一の水準であるということである。これは、いかなる方法によつてたかめられても、最大筋力の最高水準は同一であるということを示唆するものである。これは心理的限界の上限を示すものともいえよう。

V 結 論

腕エルゴメーター、およびストレインゲージ筋力計を用い、持久力および最大筋力を以下の諸種の条件のもとに測定する経過において、主働筋および拮抗筋からの筋電図を記録し、諸種の結果を、体力の生理的限界および心理的限界という観点から考察した。

1. 腕エルメーター実験。腕エルゴメーターには腕屈曲筋の最大筋力の 1/3 の荷重をかけ、1 秒に 1 回のテンポで錘をもちあげ、疲労困憊にいたつて終了した。主働筋、とくに上腕二頭筋の筋電図は反復を重ねるにつれて、その電圧及び頻度を増す。これは心理的限界の上昇により筋線維の疲労を代償するものと考えられる。

2. ストレインゲージ筋力計による実験。ストレインゲージ筋力計を用い、1 秒に 1 回のテンポで、上腕屈曲筋の最大筋力をくりかえし発揮して疲労困憊にいたる経過において、主働筋の筋電図を記録した。主働筋、とくに上腕二頭筋の筋電図は作業の終りの時期に著明な増大を示した。これは筋線維の疲労に伴

い、心理的限界が上昇したことを示すものと考えられる。

3. Shot および shout 実験。ストレインゲージ筋力計を用い、2 秒に 1 回のテンポで最大筋力をくりかえし発揮し、筋力が低下を示しはじめた時期に Shot, および Shout を与えると最大筋力は増大するが、このときに主働筋の筋電図は電圧及び頻度の増大が見られる。これらも音の刺激により心理的限界の上昇したことを示す。

4. Amphetamine 実験。Amphetamine sulphate を服用したときの最大筋力の増大時期には、主働筋の筋電図の増大は著明でない。Amphetamine 服用後の最大筋力の増大の水準はその後の Shot および Shout によつて増大した最大筋力の水準とほぼ同一となる。これらは、異なる方法によつてあげられたものであつても、心理的水準の上限は一定であることを示す。

本研究の実施にさいし、瀬畑昇、寺岡暉、矢部京之助の諸君が与えられた助力を謝す。またエルゴメーター等の試作は、文部省科学研究費（班長、白井伊三郎教授）の援助により、また筋電図学的測定に関しては、体力医学会を介して野球博物館の援助によつて行われた。ここに感謝の意を表する次第である。

なお、本研究は、1961 年 7 月 New Delhi, India において開催された ICHPER, WCOTP において報告されたものである。

文 献

- 1) Alles, G. A. and G. A. Feigen: The Influence of Benzedrine on Work-Decrement and Patellar Reflex. Amer. J. Physiol. **136**, 392~400, 1942.
- 2) Gellhorn, E.: The Physiology of the Supraspinal Mechanisms. Science and Medicine of Exercise and Sports. edited by W. R. Johnson. 108~122, Harper & Brothers, N. Y. 1960.
- 3) IKAI, Michio and Arthur H STEINHIL.

- US: Some Psychological Factors modifyng the Expression of Human Strergh.** PAN AMERICAN Congress of Sports Medicine, Chicago, Sep. 1. 1959.
- 4) **IKAI, Michio and Arthur H STEINHAUS: Some Factors Modifyingthe Expression of Human Strength.** J. Appl. Physiol. **16**(1): 157~163., 1961.
- 5) 猪飼道夫, 石井喜八: 筋持久力の測定とそのトレーニングについて, 第11回日本体育学会, 1960.
- 6) 猪飼道夫: 最大筋力発現の中枢機構, 日本教育学会総会(大阪), 1960.
- 7) 猪飼道夫: 体力の生理的限界と心理的限界に関する実験的研究, 東京大学教育学部紀要, 1960. 1—18.
- 8) **Karpovich, P.V.: Effect of Amphetamine Sulfate on Athletic Performance.** J.A.M.A. **170**, 558~561, May, 30, 1959.
- 9) **Magoun, H.W.: The Waking Brain,** Charles C. Thomas, 1958.
- 10) **Penfield, W.: The Excitable Cortex in Conscious Man.** Charles Thomas, 14~20, 1958.
- 11) **Smith, G. M. and H. K. Beecher: Amphetamine Sulfate and Athletic Performance. I. Objective Effects.** J. A. M. A. **170**, 542~557, May 30, 1959., **Amphetamine, Secobarbital and Athletic Performance, II. Quantitative Effects on Judgements.** J. A. M. A. **172**, 1623~1629. April, 9, 1960.
- 12) 時実利彦: 「新しい皮質」と「古い皮質」—大脳辺縁系の生理を中心に—科学, No. 7 345~351, 1960.