

氏名	山次 俊介
学位の種類	博士(学術)
学位記番号	博甲第 686 号
学位授与の日付	平成 16 年 9 月 30 日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第 4 条第 1 項)
学位授与の題目	持続的な等尺性最大把握作業における筋力発揮値の低下と生理学的応答との関係
論文審査委員(主査)	出村 慎一(教育学部・教授)
論文審査委員(副査)	藤原 勝夫(医学系研究科・教授), 外山 寛(医学系研究科・助教授), 寺沢 なお子(教育学部・助教授), 増田 和実(教育学部・助教授)

学位論文要旨

Abstract

Muscle endurance has been evaluated from its definition, which is the ability to maintain a fixed force or work. However, the contribution of the physiological factors for muscle endurance differ by the measurement method, and they changes over time. Therefore, it is necessary that the evaluation phase of muscle endurance consider these factors. This paper established four examination issues using sustained maximal isometric grip.

In the results of this study, twelve parameters were selected as the useful parameter for muscle endurance from the nineteen force-decreasing parameters proposed by previous studies. It is suggested that for the 6 min measurement, the subjects unconsciously restrained the maximal gripping force, influenced by a psychological factor as the pain became greater. A 1 min measurement may evaluate only the marked decreasing phase of the decreasing force, and not evaluate the phase of an almost steady state. A gender difference for all parameters was found after 1 min or decreasing force after 40% maximal voluntary contraction, and females held it longer or higher as compared with males. However, the tendency was smaller in the latter phase of the steady state. The inflection point of the gripping force is related to the time at the highest Deoxy-Hb/Mb, and reflects the beginning of the resumption of the blood flow. The decrement for 2-3 min and the regression coefficient of the post-inflection point evaluate the steady state phase of force decreasing, in which oxygen is sufficiently supplied to active muscles.

論文要旨

体力の一要素として「筋持久力」を捉える試みは、古くから行われ、局所的な作業による仕事量や筋張力の低下から評価されてきた。数多くの研究者によって、持続的な筋力発揮に伴う力-低下曲線に関する報告がなされているが、各低下特性の性差、年代差などの基本的な見解が異なっている。この基本的な見解の相違は、筋持久力に関与する要因が複雑であること、および測定・評価方法が多岐にわたることによると考えられる。例えば、最大筋力を規定する生理学的要因として、筋横断面積が挙げられ、測定部位によって若干の違いはあるものの、上述のような見解の相違はあまりみられない。一方、筋持久力の場合、筋線維組成、筋への酸素運搬能力(筋血流量、筋組織酸素摂取量)、毛細血管密度、または、血中乳酸濃度などが作業強度や測定時間の違いが複雑に関与している。さらに、測定時間の延長によっ

て、筋温の上昇にともなうカリウムイオン恒常性の乱れの影響、筋の張力や代謝の求心性情報による自律神経系や内分泌系への影響や、苦痛に伴う心理的な影響が大きく関与する。このように、筋持久力は、生理学的要因を考慮したうえで測定・評価されるべきであるが、これまでの研究では、「一定の張力や仕事量を維持する能力」という漠然とした定義に台致する測定方法によって評価されてきたに過ぎない。

加賀谷(1994)は時間経過に伴う筋力発揮の低下曲線の観察から、筋力発揮開始直後の低下が著しい初期局面と低下がほとんど認められなくなる後半局面は生理学的意義から分けて評価すべきと考え、初期局面と後半局面の回帰直線を導出し、その交点を筋持久力の変曲時間として求めている。筋持久力を筋力発揮の低下率の点から2つの局面に分けて評価した点は注目されるが、筋持久力の評価方法を提示するまでには至っていない。

本研究では、持続性筋力発揮における力-低下曲線の特性を明らかにし、特性を捉える変数を提案すること、さらに、筋力低下に関わる生理学的要因の変動を明らかにし、力-低下曲線との関連性を検討することによって、力-低下曲線から生理学的要因の変化を推察することを目的とした。

本研究では、検討すべき問題として以下の4つを設定した。

1. 先行研究において数多く提案されている力-低下変数を異なる評価時間で算出し、変数相互の関係を検討する。(研究課題1)
2. 測定時間の違いにより力-低下曲線の低下特性は異なるか否かを検討する。(研究課題2)
3. 力-低下曲線において性差が認められるか否かを検討する。(研究課題3)
4. 力-低下曲線と筋酸素動態の対応関係を検討し、筋酸素動態の観点から評価局面を提案する。(研究課題4)

研究課題1~4に参加した被験者は年齢18歳~27歳の健常若年者であった。ただし、それぞれの研究課題の被験者は、すべてが同一ではなかった。

握力計は、ロードセル式握力解析装置(EG-290 SAKAI, Japan)を用いた。握力発揮値はサンプリング周波数20Hzでパーソナルコンピュータに取り込まれた。被験者の動機付けを高めるために、記録したデータは、握力発揮目標ライン(100%MV_C)とともに力-低下曲線に表示して、被験者にフィードバックを与えた。なお、全検討課題において、この握力計を利用した。腕は体幹と90度に伸ばし、軽く回内して、armrestにおいた。実験中に握力計を握り直しせずに、正しい姿勢で測定するように指示した。なお、握力発揮中には口頭での励まし等は行わなかった。

近赤外分光法測定装置(NIRS)(PSA-III N Biomedical science, Japan)により、持続性把握作業中の前腕の筋酸素動態を評価した。

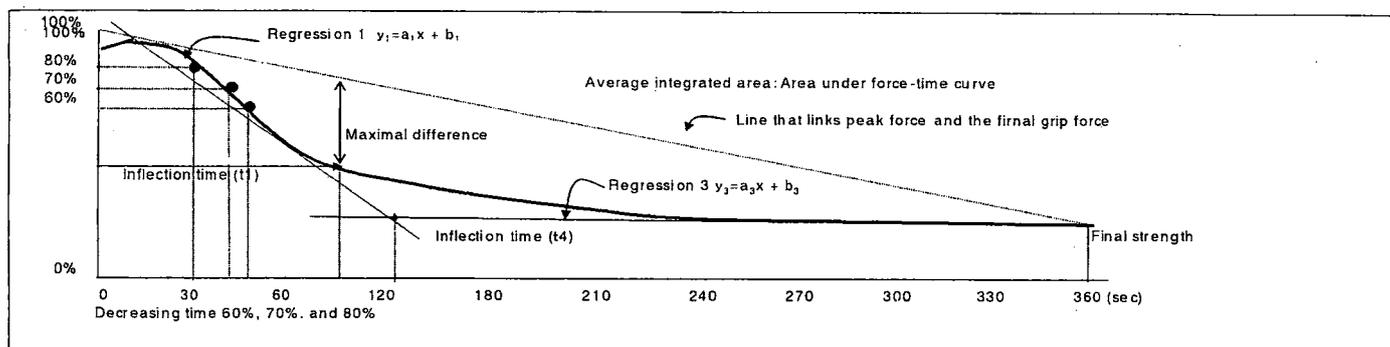
研究課題1において、先行研究において数多く提案されている筋持久力の評価変数である力-低下変数を算出観点別に19変数を算出し、変数相互間の関係を検討した(図1)。

各変数相互の関係は、同一の力-低下局面を捕らえる変数相互の関係が高い傾向にある。関係が高かった力-低下変数とそれらの変数が捉えている低下局面は次のようにまとめられる。

筋力低下が著しい初期局面：60%，70%，80%持続時間、一分間の低下量、変曲時間前の回帰係数
筋力低下が緩やかな局面：平均力積、終末筋力、低下率、変曲時間後の回帰係数
筋力低下の著しい局面から緩やかな局面に移行する局面：低下の最大差、指数関数

また、筋力低下が著しい局面から緩やかな局面に以降する局面を捉える、低下の最大差指数関数は他の変数との関係はおおむね低い。筋持久力の評価変数としては、これらすべてを選択する必要はなく、相互に関係の高い上記の変数群からいずれかを選択すればよいと考えられる。

変曲時間として5つの観点から算出したが、変曲時間5が最も有効であることが示唆された。すなわ



Classification	Parameters	Overview of parameters
1) Decreasing time	(1) Time to 80% MVC (2) Time to 70% MVC (3) Time to 60% MVC	Decreasing time to 80% MVC. Decreasing time to 70% MVC. Decreasing time to 60% MVC.
2) Integrated area	(4) Average integrated area (5) Integrated area of fixed period (6) Strength for last 1 sec	Average of sum of all SSH G forces during measured period. Sum of SSH G forces from peak force to grip forces at 0 sec, 30 sec, 60 sec, ... and the final strength. Mean SSH G force for last 1 sec before finish.
3) Last strength	(7) Final strength (8) 1 min Decreasing force	Mean SSH G force at 60 sec, 30 sec, and 1 sec before finish. Sum of (Peak force - grip force (t)) for the initial 1 min.
4) Decreasing rate	(9) Decrement volume (10) Decreasing rate (11) Maximal difference form the linear line (12) Regression coefficient at pre-inflection (13) Regression coefficient at post-inflection (14) Exponential rate of decrement(k)	Sum of differences between each value at 0 sec, 30 sec, 60 sec, ... and the last time after peak force (7). Decreasing rate from peak force in the work to mean for 10 sec before finish. Maximal difference from the linear line peak force and final grip force. Regression coefficient ($y_1=a_1X+b_1$; a_1) until t_1 (15). Regression coefficient ($y_2=a_2X+b_2$; a_2) until t_2 (16). Rate of decrement constant (k) in the exponential function ($y=ae^{-kt}+b$).
5) Inflection time	(15) Inflection time 1 (t1) (16) Inflection time 2 (t2) (17) Inflection time 3 (t3) (18) Inflection time 4 (t4) (19) Inflection time 5 (t5)	Time until (t1) (maximal difference). Time of regression coefficient of later period ($y_3=a_3X+b_3$) being steady state statistically ($a_3=0$). Time of intersection of regression ($y_2=a_2X+b_2$) based on exertion values until t_2 and regression ($y_3=a_3X+b_3$; $a_3=0$) based on exertion ones after t_2 . Time of intersection of regression ($y_1=a_1X+b_1$) based on exertion values until t_1 and regression ($y_3=a_3X+b_3$; $a_3=0$) based on exertion after t_2 . The time corresponded to boundary point between former and latter time series data when combined the best fit regression lines.

Fig. 1 The sustained static hand gripping (SSH G) parameters selected in this study. Data sampling of SSH G was 20Hz. Parameters (4)-(9) were calculated using mean SSH G value for 1sec. Inflection time The time when decrement speed transits. Regression lines (y_1, y_2, y_3) were calculated from exertion values for the period. MVC: Maximal grip strength before SSH G.

ち、全時系列データを二つに分割し、それぞれのデータセットに回帰直線を適合させ、変曲点前の回帰係数(a_1)が有意で、かつ変曲点後の回帰係数(a_2)より大きいという条件を満たし、加えて、両回帰直線の決定係数の和が最も高い時のデータの分割点に変曲点として有効と判断された。

また、測定時間 12 分間のデータを利用して、12 分間と前半 6 分間でそれぞれ評価変数を算出し、両評価時間間の関係を検討した。変曲時間後の回帰係数を除く力 - 低下変数は、評価時間間の関係は高く、これらの変数は評価時間が変わったとしても同じ低下傾向を評価すると考えられる。また、変曲点は上記に示した変曲点 5 のみ、評価時間が変わっても同等の値であり、両時間間の関係も高い。

研究課題 2 において、測定時間 1 分、3 分、および 6 分間で測定を行った。各評価変数の試行間信頼性は測定時間 3 分が最も高い傾向にある。測定時間 3 分と 6 分における同一評価変数間の関係は比較的高かったが、測定時間 1 分は測定時間 3 分および 6 分との関係は低い。測定時間 6 分では、被験者の心理的要因の影響により、初期局面の最大発揮が抑えられる可能性が高い。また、測定時間 1 分では、低下の著しい局面しか捉えられず、低下の緩やかな局面は捉えられない。したがって、筋持久力評価の測定時間としては、3 分間が適当であろう。

研究課題 3 において、先行研究において見解の不一致が生じている性差について検討した。なお、研究課題 2 において測定時間 3 分が筋持久力の測定時間として適当であると考えられたが、性差の出現がいずれの局面で生じるかをより広範囲に検討するために測定時間は 6 分として検討した。持続的な最大把握作業 (SSHG) 開始から約 60 秒以降、筋力発揮値が約 40% MVC まで低下した以降に性差が出現し、女子の方が高かった。ただし、ほぼ定常状態に到達した局面では、性差は収束する傾向にある。性差が出現する局面は、血流の阻止や再還流に伴う筋酸素化レベルの変動が影響していると考えられる。

研究課題 4 において、NIRS より筋酸素動態を SSHG と同時に計測し、筋酸素動態の変動を検討した。Oxy-Hb/Mb は最大握力発揮開始から約 20 秒 (発揮値: 約 60% 低下局面) まで著しく低下し、Deoxy-Hb/Mb は発揮開始から約 40 秒 (発揮値: 約 50% 低下局面) まで著しく増加する。これらの局面は、酸素需要

量に対する酸素供給量の不足が生じ、活動筋は主に無酸素性の代謝に依存すると考えられる。Deoxy-Hb/Mbは最高値到達後、約180秒(発揮値:約20%低下局面)まで低下する。この局面より活動筋の酸素動態は酸素需要量に対する酸素供給量が不足する局面から酸素供給量が十分となる局面に移行すると推測される。

さらに、NIRSより筋酸素動態をSSHGと同時に計測し、筋酸素動態の各変数の時系列変化の変化点と変曲点(時間)との関係と検討した。変曲時間は、Oxy-Hb/Mbが最小値に到達する時間やDeoxy-Hb/Mbが最高値に到達する時間と関係が認められる。つまり、本研究の変曲時間は作業開始初期の血流阻止と再還流が開始される時点と対応している。したがって、力-低下曲線の低下速度の変化点から生理学的メカニズムの変化をある程度推定することが可能であると考えられる。さらに、この変曲点(時間)を利用して力-低下曲線を筋酸素動態の観点から2つの局面に分類できる可能性が示唆される。

また、NIRSより筋酸素動態をSSHGと同時に計測し、筋酸素動態の各変数と力-低下変数との関係を検討した。血流が阻止されていると考えられる局面は、発揮値の80~40%低下時間、1分間低下量、力積、変曲時間、および低下局面の回帰係数によって捉えることが可能である。また、血流が再還流する局面は、60%~40%低下時間、1分間低下量、1~2分間低下量、力積、および変曲点前の回帰係数によって捉えることが可能である。

以上に示したように博士論文においては、従来、「一定強度の運動を持続する筋の能力」という広義な定義にのみ従って測定、評価されてきた筋持久力の評価方法について、持続的な筋力発揮の経過時間に伴い、刻々と変化する生理学的メカニズムの貢献度を考慮した評価局面の提示、および有効な評価変数の分類をすることができた。特に、力-低下曲線を統計的に算出した変曲点によって、筋酸素動態の変化について二つの局面に分類できることは非常に興味深い知見である。また、筋酸素動態と力-低下曲線の変曲点が対応していることが明らかにされたことから、力-低下曲線の特性によって背後にある生理学的メカニズムの変化について、推測できる可能性が示唆された。数多く提案されている力-低下変数がこれらの観点により、効率的な変数の選択で評価することが可能となり、また、筋持久力に関する性差などの見解の不一致についての議論にも結論を導き出せるものと考えられる。

今後、測定方法として残された、異なる負荷強度、発揮様式、測定部位について検討することで、筋持久力評価についてより、詳細な知見が得られると考えられる。

学位論文審査結果の要旨

本論文は、持続的な筋力発揮による力-低下曲線について、生理学的メカニズムを考慮して筋持久力の評価局面の分類を行い、下記に示す成果を得ている。

まず、先行研究の力-低下曲線の評価変数の整理とともに、筋力発揮値の低下速度の変化を捉える変数（変曲点）を提案した。次に、測定時間が力-低下曲線に及ぼす影響を検討し、測定時間6分間では苦痛度などの心理的影響が筋力発揮を抑制する可能性を示唆した。また、測定時間1分間では変曲点が現れず、発揮値の著しい低下局面のみを評価し、後半の緩やかな局面は捉えられないことを示唆した。したがって、筋持久力の測定時間としては3分間が適当であるとした。また、これまで見解の不一致がみられた筋持久力の性差について、持続性最大把握作業の場合、変曲点付近から性差が認められることを明らかにした。さらに、血流動態と関連が高い筋酸素動態と力-低下曲線との関連を検討し、初期の著しい筋力低下局面と緩やかな低下局面は筋酸素動態の観点から異なることを明らかにし、力-低下曲線の変曲点から両局面を分類できることを示唆した。つまり、変曲点は作業開始初期の血流阻止と再還流が開始される時点と対応しており、生理学的メカニズムの変化をある程度推定できると結論づけた。

以上のように、本論文は、これまで包括的に捉えられてきた筋持久力の評価局面について、力-低下曲線の変曲点を基準として評価局面を分類し、より詳細な筋持久力評価の可能性を提示した。したがって、審査委員会は本論文が博士論文（学術）に値すると判定した。