様々な強度での等尺性運動時における持続時間と疲労因子との関連について

木村直人^{1,2)} 勝村俊仁²⁾ 浜岡隆文²⁾ 下光輝一²⁾

THE RELATIONSHIP BETWEEN ENDURANCE TIME AND FATIGUE FACTORS AT VARYING INTENSITIES IN HANDGRIP ISOMETRIC EXERCISE

NAOTO KIMURA, TOSHIHITO KATSUMURA, TAKAFUMI HAMAOKA and TERUICHI SHIMOMITSU

Abstract

The purpose of the present study was to investigate the relationship between endurance time and fatigue factors at varying intensities of handgrip isometric exercise. Seven subjects performed isometric contractions at 10%, 30% and 50% of maximum voluntary contraction (MVC) sustained to exhaustion. Continuous changes in high-energy phosphates and muscle oxygen content (oxy-Hb/Mb) in the forearm flexor muscle were measured by ^{31}P magnetic resonance spectroscopy (^{31}P -MRS) and near infrared spectroscopy (NIRS), respectively. The endurance time to exhaustion was 963 ± 236 (mean $\pm$ S.D.), 209 ± 41.9 and 95.3 ± 13.6 s at 10%, 30% and 50%MVC, respectively. From the onset of exercise at each %MVC, both PCr and oxy-Hb/Mb fell and Pi (H_2PO_4^-) rose linearly with time, whereas intracellular pH remained relatively constant at resting values during the early phase. Thereafter, intracellular pH showed a linear decline. The rates of pH decline were 0.03 ± 0.02 , 0.22 ± 0.14 and 0.51 ± 0.17 pHunit/min, while the rates of H_2PO_4^- increase were 20.9 ± 19.3 , 118 ± 48.9 and 434 ± 242 (% of resting)/min at 10%, 30% and 50%MVC, respectively. There were correlations between the changes in endurance times to exhaustion and the rates of pH decline ($r = -0.58 \sim -0.87$) and H_2PO_4^- increase ($r = -0.37 \sim -0.74$, ($n=7$)) at each intensity of exercise. In particular, significant correlations ($p < 0.05$) between endurance time and the rate of pH decline were found at both 10% and 30%MVC. These results suggest that muscle fatigue (endurance time) at each intensity in handgrip isometric exercise is closely correlated with the rate of pH decline.

(Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med. 1998, 47: 549~560)

key words : endurance time, the rate of pH decline, the rate of H_2PO_4^- increase

緒 言

一般に、連続的に発揮される骨格筋の最大張力が回数を経るごとに徐々に低下してゆく現象はよく知られており、この張力低下の様相は疲労曲線 (fatigue curve) と呼ばれている。古くは Mosso がエルゴグラフを用い、最大努力での局所作業を行ったところ実施回数の経過に伴って筋作業量に低下が見られたことを報告している^{1,2)}。このような筋の作業量の低下は、作業(運動)の実施により「筋疲労」が生じたためその持続が困難となっ

た状態と考えられている。この筋疲労の発生機序に関しては、労働時や運動時など多方面から数多くの検討がなされており、大きく中枢性と末梢性因子とに分けられている^{3~6)}。しかしながら、例えば負荷様式(負荷の形態、強度、時間、頻度)や対象者(鍛錬者と非鍛錬者)等の違いによっても、それぞれの因子に及ぼす影響が多様となるため、筋疲労のメカニズムをより複雑なものとしている。従来より、この筋疲労の要因やパフォーマンス(筋力、筋持久力)との関連を含め、様々な状況下において測定・評価が行われているものの、人

¹⁾ 日本体育大学 衛生学公衆衛生学
〒158-8508 東京都世田谷区深沢7-1-1

²⁾ 東京医科大学 衛生学公衆衛生学
〒160-8402 東京都新宿区新宿6-1-1

Dept. of Public Health and Preventive Medicine, Nippon Sport Science
University 7-1-1 Fukasawa, Setagaya-ku, Tokyo, 158-8508 JAPAN

Dept. of Preventive Medicine and Public Health, Tokyo Medical
University 6-1-1 Shinnjyuku, Shinnjyuku-ku, Tokyo, 160-8402 JAPAN

の運動時において直接筋組織内の情報を連続的に捉え検討した報告は数少ない⁷⁻¹⁰⁾。

運動時における筋組織内の情報を直接捉えて検討を行った研究には Wilson ら⁸⁾ や Laurent ら⁹⁾ の報告がある。Wilson ら⁸⁾ は ³¹P-MRS を用い、筋張力の低下と細胞内 pH や無機リン酸(Pi)との関連について検討している。また Laurent ら⁹⁾ は ³¹P-MRS と筋電図(EMG)の併用により、運動中のヒトの下肢筋群における細胞内の酸性化と平均周波数の変動を観察し、両者の関連について述べている。一方、Bertocci ら¹⁰⁾ は ³¹P-MRS を用い筋グリコーゲン枯渇後の筋疲労の発生機序について報告しており、いずれも筋疲労に伴う最大努力または最大下努力での筋力低下との関連について検討している。一方、体力を構成する因子の一つとされる筋持久力は、「一定強度の運動を持続する能力」と定義されており、この筋持久力の向上は筋活動中における「疲労」の発現を遅延させる能力とも言われている¹¹⁾。この筋持久力に関しては、発揮される力の持続に対して EMG や血流量の変化、血中レベルでの酸素飽和量、疲労物質(乳酸等)などの面から評価されているものの、負荷強度の違いによる筋持久力(持続時間)の差異について、筋組織内の酸素動態、エネルギー代謝や疲労因子などの変化を連続的に捉え、さらに運動中におけるこれらの変化と筋持久力(持続時間)との関連について検討した報告は見当たらない。

そこで本研究では、等尺性運動負荷時に見られる局所的な筋疲労、特に運動強度の違いが筋疲労の程度や筋持久力(持続時間)に及ぼす影響を細胞内のエネルギー代謝、酸素動態及び疲労因子の面から観察した。さらに各強度ごとに細胞内におけるこれらの因子(連続的な変化)と持続時間との関連についても検討を加えた。

方 法

① 対象

対象は年齢21～39歳の健常男子7名(身長171.7±3.5 cm, 体重71.5±16.8 kg)を選び被検者とした。被検者には、検査の実施前に実験の目的及び方法について詳細に説明し同意を得た。実

Table 1. Physical Characteristics of Subjects.

	subject(male) (n = 7)
age(years)	27.4 ± 6.29
height(cm)	171.7 ± 3.59
weight(kg)	71.7 ± 15.82
grip strength dominant(kg)	52.2 ± 6.92
non-dominant	50.8 ± 5.76

験における対象者の身体的特性を表1に示す。

② 運動負荷及び測定手順

検査前に各被検者は肩関節を90度程度外転させた姿勢で椅子に座り、電子握力計(ヤガミ社製)を用いて最大随意収縮力(Maximum Voluntary Contraction; MVC)を計測した。運動はこの MVC の10、30及び50%強度の力発揮を持続させる等尺性グリップ運動とした。運動負荷装置には、桑森ら¹²⁾が開発したハンドグリップエルゴメーターにストレンゲージを取り付け改良を加えたものを用いた。そして、このストレンゲージからの出力信号をプリアンプを介してペンレコーダー上に記録させた。被検者はこのペンレコーダーを見ることにより運動中、指示された一定の力を発揮した(図1)。そして、運動開始と共にこのモニターを見ながら、指示された力発揮を疲労困憊のためそれ以上維持できなくなった時点(all-out)まで持続させた。なお、all-out の判定には、指示された相対強度より連続して2回下回った場合とした。

筋エネルギー代謝及び酸素動態の測定部位は利き腕の前腕屈筋群(主に浅指屈筋群)とした。測定は2分間の安静時とそれぞれの相対強度(%MVC)で all-out に至る運動時に実施した。そして安静時及び運動中の筋組織中のエネルギー代謝及び酸素動態の連続的な変化をそれぞれリン³¹磁気共鳴分光法(³¹P-MRS)及び近赤外分光法(NIRS)を用いて測定した。なお、MRS マグネットの強い磁場内において、NIRS との同時測定は NIRS のプローブが一部磁性体であるため、³¹P-MRS の十分なシグナルを得ることができない点で困難となる。そこで NIRS の測定は ³¹P-MRS と同様の測定条件で別の日時に行った。実験は、1日1回を

Fig. 1. Schematic presentation of exercise test system.

原則とし少なくとも3日以上の間隔をあけて実施した。

③ ^{31}P -MRS による筋エネルギー代謝の測定

筋エネルギー代謝の測定は、2.0テスラ、ボア径 26cm の NMR スペクトロスコピー (BEM 250/80 大塚電子社製) を使用した。対象者の利き腕側の前腕屈筋群を直径 3cm のサーフェイスコイルを組み込んだ測定台上にストラップを用いて固定した。なお、ストラップによる固定は運動中動くことなくかつ血流に影響を及ぼさないように注意した。その後、ボア内の磁場の均一性を高めるために筋組織内のプロトンシグナルを用いて均一磁場の調整(シミング)を行った(均一磁場の調整はプロトンシグナルの半値幅を 0.3ppm 以下になるように行った)。シミングの後、 ^{31}P の十分なシグナルが得られていることを確認して ^{31}P -MRS 測定を実施した。なお、 ^{31}P -MRS 測定の設定条件は、プロトンの共鳴周波数 85.44 MHz、リンの共鳴周波数 34.58 MHz、パルス幅を 60

μsec とし、2秒毎に1シグナルをコンピュータ上に記録した。そして2秒毎に採取されたシグナルを15回積算し、30秒間毎のスペクトルを算出して評価した。得られた各積算スペクトルより、筋細胞内のクレアチンリン酸(PCr)、無機リン酸(Pi)及びアデノシン3リン酸(ATP)の相対濃度を算出した。これらのパラメーターに関しては、各ピークの基線からの面積を最小二乗法を用いて計算し、さらに各ピーク値を PCr と Pi との和で除することによる標準化の後、それぞれの相対濃度を求めた。細胞内 pH は積算されたスペクトルの PCr に対する Pi の化学シフトから Taylor ら¹³⁾ が示した式により、以下の如く算出した。

$$\text{細胞内 pH} = 6.75 + \log(\delta - 3.27) / (5.69 - \delta)$$

δ = PCr に対する Pi の化学シフト値

また、Pi の構成要素である第1リン酸(H_2PO_4^-)及び第2リン酸(HPO_4^{2-})は、Pi と細胞内 pH を用いて Henderson-Hasselbalch の式¹⁴⁾ を応用し、それぞれの濃度を安静時に対する相対変化として算出した。

$$\text{H}_2\text{PO}_4^- = \text{Pi} / (1 + 10^{\text{pH} - 6.75})$$

(解離定数(pK)=6.75)

そして、運動中の細胞内 pH 及び H_2PO_4^- の 30秒毎の値と経過時間との関係式(回帰式)を各負荷強度及び被検者毎にそれぞれ求め、その傾き(slope)をもって単位時間(1分間)当たりの細胞内 pH 及び H_2PO_4^- の変化率(pHunit/min, %/min)とした。pH の低下率の算出に関して、各個人及び負荷強度の相異により pH の連続的な低下の開始時点が異なる。そこで本実験では pH が連続的に低下を開始する時点(pH の低下開始時点)以降から、pH の値と時間との回帰式を求めた。なお、本研究における pH の低下開始時点は、各負荷強度における安静時の平均値より 2 標準偏差を差し引いた値(本研究では pH=6.95)よりも低下した時点と規定した。そこで、運動開始から pH の低下開始時点(pH=6.95)に至るまでの時間(sec)についても各負荷強度毎に求めた。

④ NIRS による筋酸素動態の測定

本実験に用いた NIRS (HEO-100, オムロン社製) は 2 つの波長(760 nm, 840 nm)を持つ光源(LED)と受光器からなるプローブ、本体、それらを制御するコンピューターの 3 つより構成されて

いる。NIRS による筋酸素動態の測定は ^{31}P -MRS による筋エネルギー代謝と同様の実施条件(それぞれの負荷強度における ^{31}P -MRS 測定と同じ持続時間)にて実施した。

NIRS を用いて酸素化ヘモグロビン及びミオグロビン(酸素化レベル)の変動を評価するにあたり、各個人における酸素化レベルの相対的变化を動脈血流遮断法を用いて較正した¹⁵⁾。酸素化レベルの較正は、対象者が all-out に至った直後より、あらかじめ上腕部に装着しておいたカフに 260 mmHg 以上の圧を加え、測定部位を含む前腕全体の血流を遮断した。なお、酸素化レベルの最低値をより早く得るために、血流遮断中は最大努力によるグリップ運動も同時に付加した。血流遮断直後より酸素化レベルはさらに低下を示し、定常状態に至ったことを確認した後、カフを開放した。本研究では安静時を 100% レベル、また血流遮断中最も低下したレベルを 0 % レベルと定義して、各運動中における % 酸素化レベルを評価した。そして、運動中の酸素化レベルの変化を運動開始から 5 秒毎に、また all-out 時のみ 10 秒間の平均値をそれぞれ算出して検討を加えた。

Fig. 2. The endurance time at each intensity.

Values are mean ± SD

**p<0.01; significant difference between each intensity.

⑤ 統計処理

得られた数値は全て平均値±標準偏差で示した。各負荷強度間における持続時間、all-out 時の細胞内 pH, PCr, H_2PO_4^- 及び pH 低下率や H_2PO_4^- 上昇率などの比較は分散分析(ANOVA)

を用い、さらに有意であった場合、各強度間の差を scheffe 法を用いて検定を行った。また、各強度毎の持続時間(endurance time)と疲労因子との関係については単相関分析を行った。そして、いずれの検定においても 5% 水準をもって統計的有

Fig. 3. Averaged kinetics of intracellular pH, H_2PO_4^- and PCr for every 30 sec at difference exercise intensities. Values are mean±SD

意とした。

結 果

図 2 に各負荷強度での持続時間を示す。10%MVC では 963 ± 236 秒と最も長く, 30%MVC で 209 ± 41.9 秒であるのに対し, 50%MVC では 95.3 ± 13.6 秒と運動強度の上昇に伴い持続時間は短縮を示した。10%MVC と50%MVC では負荷強度の増大が5倍であるのに対し, 持続時間は約1/10まで短縮した。また, この各負荷強度間の値にはそれぞれ有意差($p < 0.01$)が認められた。

図 3 に安静時及び運動中の30秒毎の細胞内 pH, H_2PO_4^- 及び PCr の変動を示す。なお, all-out 時の値は運動終了30秒前から終了時までの30秒間の平均値を用いた。いずれの負荷強度とも運動開始時において PCr の低下及び Pi (H_2PO_4^-) の上昇が見られた。一方, 各負荷強度での細胞内 pH は運動開始後わずかな変動を示した後, 直線的に低下した。また負荷強度の上昇に伴う PCr 及び細胞内 pH の低下, H_2PO_4^- の上昇の程度は大であった。各項目ごとの変化では, 安静時の細

胞内 pH は6.99~7.01の範囲であり, 3強度間に差は見られなかった。一方, all-out 時の細胞内 pH は10%MVC で 6.65 ± 0.15 pHunit であるのに対し, 30%及び50%MVC ではそれぞれ 6.50 ± 0.09 pHunit, 6.46 ± 0.15 pHunit と10%MVC の値に比べて低値であった。all-out 時の %PCr では50%MVC が $61.2 \pm 16.8\%$ と最も低く, 30%MVC ($71.0 \pm 13.2\%$) 及び10%MVC ($70.5 \pm 14.5\%$) は同程度の値を示していた。また, H_2PO_4^- について運動強度の上昇に伴ってその値は増大し, all-out 時には10%MVC で $410 \pm 173\%$ と最も低く, 強度の高い50%MVC では $649 \pm 283\%$ と最も高い値が見られた。しかしながら, all-out 時におけるいずれの値にも各強度間での統計的な差は認められなかった。また本研究で示された細胞内 pH が連続的に低下を開始する時間は運動開始40秒(50%MVC)~347.1秒(10%MVC)の範囲にあり, 負荷強度の低下に伴って延長を示していた。

各負荷強度での運動中における筋組織内の酸素化レベルの変動を図 4 に示す。全ての負荷強度に

Fig. 4. Averaged kinetics of muscle deoxygenation at each intensity. The values (open) were averaged for every 5 sec. The all-out values (closed) at each intensity were averaged for 10 sec. ** $p < 0.01$; significant difference between each intensity

において酸素化レベルは運動開始と同時に直線的に低下した。しかしながら、その後の変化は各強度間で異なり、特に 50%MVC ではさらに低下を示し、その後平均値において 20% レベルを下回っていた。一方、10% 及び 30%MVC の酸素化レベルは逆に上昇を示し、それ以降 all-out に至るまで 10%MVC では 70~80% レベル、また 30%MVC では 30~50% レベルの範囲にそれぞれあった。all-out 時における % 酸素化レベルでは、

全ての強度間において有意差 ($p < 0.01$) が認められ、10%MVC が $80.1 \pm 14.9\%$ と最も高く、次いで 30%MVC では $44.8 \pm 16.4\%$ であるのに対し、50%MVC では $9.7 \pm 10.1\%$ と最低値を示していた。

図 5 に各負荷強度における pH 低下率及び H_2PO_4^- 増加率を示した。各強度毎の H_2PO_4^- 増加率は 10%MVC が 20.9 ± 19.3 , 30%MVC で 117 ± 48.9 , 50%MVC では $434 \pm 242\%/\text{min}$ であっ

Fig. 5. The pH decline rate and H_2PO_4^- increase rate at each intensity.
* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$; significant difference between each intensity

た. また pH 低下率は 0.03 ± 0.02 (10% MVC), 0.22 ± 0.14 (30% MVC) 及び 0.51 ± 0.17 (50% MVC) pHunit/min であり, いずれも運動強度の上昇に伴いそれらの変化率も増大を示した. また, これらの値は全ての強度間において有意差 ($p < 0.05 \sim p < 0.01$) が認められた.

各相対強度における pH 下率及び H_2PO_4^- 増加率と持続時間との関係を図 6 に示す. いずれも負の相関関係が見られ, pH 低下率及び H_2PO_4^- 増加率が大きいものほど持続時間は短縮する傾向

を示していた. pH 低下率と持続時間との相関係数は $r = -0.578 \sim -0.871$ であり, 特に 10% MVC 及び 30% MVC においてはそれぞれ有意な関係 ($p < 0.05$) が得られた. 一方, H_2PO_4^- 増加率との間には $r = -0.370 \sim -0.740$ の相関係数が得られたものの, いずれも統計的に有意ではなかった.

考 察

筋持久力を規定する重要な因子の一つとして,

Fig. 6. A ; Relationship between pH decline rate and endurance time at each intensity. B ; Relationship between H_2PO_4^- increase rate and endurance time at each intensity.

筋における有酸素的なエネルギー産生を持続する能力があげられる。そしてより効果的に有酸素的なエネルギー産生を行うためには、筋への酸素供給が十分になされなければならない。したがって、筋への血流の良否がエネルギー産生やさらには筋持久力に関与してくる。先行研究において、活動筋への血流量の多いもの、すなわち筋への酸素供給能が高いものほど筋持久力も優れていると報告されている¹¹⁾。本研究では NIRS を用い、運動中における筋の酸素動態を測定し検討した。いずれの負荷強度とも運動開始直後より筋酸素化レベルは直線的に低下した。このことは各強度毎にその程度は異なるものの、筋収縮に伴う機械的な圧迫 (mechanical compression) による血流量の低下やミトコンドリア内における酸素消費の増大により、需要が供給を上回ったことが考えられる。しかしながら酸素化レベルの変化の様式は各強度毎に異なり、10% 及び 30% MVC は初期の低下から上昇に転じ、その後一定レベルを維持したのに対し、50% MVC では常に低下傾向を示した。

Petersen, F. B. ら¹⁶⁾ は、等尺性運動を用い、異なる運動強度における血流の変動と運動の持続時間について検討している。最大筋力の 15~20% MVC の負荷では筋への血流が十分確保され、運動も長時間 (15分以上) にわたって継続が可能となる。しかしながら、それ以上の強度では筋への血流量の減少が始まり、運動の持続時間も指数関数的に短縮する。特に 60% MVC 以上において筋への血流量は著しく減少し、血流遮断時に近い状態となり、さらに運動の持続時間も急激に短縮することを報告している。本研究において、10% 及び 30% MVC では筋収縮による動静脈に対する機械的な圧迫が筋への血流を完全に停止させるまでに至らなかったため、血流が維持され、結果として酸素の供給と消費とのバランスが保たれたものと考えられる。一方、50% MVC では血管への機械的な圧迫が強いため筋への血流が著しく制限されたと思われる。この状況では運動中筋への酸素供給が強く阻害されるため、運動後半 (平均 50 秒以降) は平均 10% 程度で変動 (低下) も見られず、特に all-out 時では平均 9.7% と最低値を示して

いたことから、筋組織中の利用できる酸素は少ない状態であったと思われる。したがって、50% MVC では運動前半 (平均 50 秒前後まで) は有酸素的代謝に必要な酸素は十分に供給されていたものの、それ以降は筋組織中の利用可能な酸素が著しく制限されたため、有酸素的なエネルギー供給は漸減したものと推測される。

運動中及び all-out 時における筋疲労に関わる因子 (細胞内 pH, H_2PO_4^-) の変動を、各強度間で先に示した酸素動態と併せて検討した結果、50% MVC の後半は主に無酸素性代謝 (解糖系及び ATP-PCr 系) によってエネルギー産生が行われたと考えられる。解糖系の亢進は筋内の乳酸産生に伴う H^+ の産生 (細胞内 pH の低下) を促し、負荷強度の上昇は H^+ の産生を高めるとされている。一方、筋細胞には H^+ に対する重炭酸イオン、リン酸イオン及びタンパクによる緩衝作用や細胞内から細胞外 (血液中) への移動により産生された H^+ を除去し緩衝する働きがある^{3,4)}。本研究では運動開始から細胞内 pH が 6.95 に至るまでの時間は負荷強度の上昇に伴って早くなり、さらに pH 低下率や H_2PO_4^- 上昇率も強度の上昇により、その変化も増大を示していた。したがって、最も強度の高い 50% MVC では、解糖系の亢進に伴う H^+ 産生が多いことに加え、発揮する張力が高いために血管に対する機械的圧迫が強く、血流が著しく阻害されることが予想される。このことは、細胞外 (血液中) への H^+ の除去を制限し、細胞内をより早く酸性に導くものと思われる。さらにより早い細胞内 pH の低下は産生された Pi も H_2PO_4^- の型のまま蓄積するため^{14, 17)}、結果として筋疲労がより早く生じたものと推察された。それに対して、10% 及び 30% MVC では運動中、酸素化レベルが一定に保たれていた。このことは酸素の供給と消費のバランスが保たれたことを示しているため、有酸素的なエネルギー供給は運動中を通して十分に行われていたと思われる。この有酸素的なエネルギー供給の持続は、運動中における無酸素的なエネルギー供給の動員を少なくする点で有用であり、50% MVC に比べて H^+ 産生をより少なくしているのかもしれない。

れない。さらに、運動中における酸素動態から筋収縮に伴う血流障害の影響は 50%MVC に比べて小さいと思われる。このことは血液中への H^+ 除去をより効果的に行うことができ、結果として細胞内における酸性化の遅延に寄与したものと思われる。

運動中における PCr について見ると、50%MVC の低下の割合が大きく、逆に 10%MVC では最も小さい傾向にあった。さらに all-out 時の値も 50%MVC が最低値を示していた。この一因として、負荷強度の上昇に伴う PCr 分解の亢進が挙げられる。一方、運動中に産生された Pi や PCr の分解により生成されたクレアチンなどは、有酸素的に PCr へ再合成される。10% 及び 30%MVC においては、筋におけるこの有酸素的なエネルギーが筋収縮に必要とされるエネルギーのみならず、運動中、この有酸素的なエネルギーを用いて PCr への再合成がなされたことも考えられ、このことも 10% 及び 30%MVC の運動中及び all-out 時における PCr の減少を 50%MVC よりも小さくとどめたのであろう。

all-out 時における細胞内 pH、 $H_2PO_4^-$ 、PCr や酸素化レベルと各強度における持続時間との関連について検討した結果、両者間に一定の関係を見いだす事は出来なかった。また、持続時間と pH の低下開始時間(本研究では運動開始から細胞内 pH が 6.95 に至るまでの時間)との間には、有意ではないものの $r=0.539\sim0.616$ といずれも正の相関関係が見られ、細胞内 pH の低下開始時間が遅いものほど運動の持続時間も延長する傾向が認められた。一方、運動中の pH 低下率及び $H_2PO_4^-$ 上昇率と持続時間との間にはいずれの場合においても負の相関関係が見られ、特に、pH 低下率と持続時間との間には、10% 及び 30%MVC においてそれぞれ有意な相関関係 ($p<0.05$) が認めれた。

筋疲労に関する先行研究では、この細胞内 pH 及び $H_2PO_4^-$ とパフォーマンスとの関連について検討した報告がある。Weininger, M. H. ら¹⁸⁾ は、持続的及び間欠的な運動負荷時における MVC の低下と細胞内 pH の低下及び $H_2PO_4^-$ の上昇と

の関連について検討したところ、それぞれの間に有意な相関関係を認めている。一方、Wilson, J. R. ら⁸⁾ は最大努力による手関節屈曲運動中の MVC の低下に対して、細胞内 pH の低下よりもむしろ $H_2PO_4^-$ の上昇が強く関与すると述べており、上述したいずれの報告とも MVC の低下に関しては、細胞内 pH よりもむしろ $H_2PO_4^-$ の影響が強いことを示唆している。本研究と先行研究とは運動負荷条件、評価方法及び対象とする筋群等がそれぞれ異なるものの、本研究で示された最大下における筋持久力(持続時間)との関係を個々の相関関係(係数)で見ると、 $H_2PO_4^-$ 上昇率に比べて pH 低下率がより強くパフォーマンスと関連していた。先行研究では、筋組織内における $H_2PO_4^-$ の形成はミオシン ATPase 活性を抑制し、特に筋力の低下に関与するとされている^{14, 17)}。したがって、本研究のような最大下での筋力発揮を持続することに対して、 $H_2PO_4^-$ の関与の程度が小さいとも考えられる。それに対して、運動中、細胞内の酸性化を遅らせることはフォスフォフルクトキナーゼ活性の働きを長く維持するため、解糖系からのエネルギー産生・供給を持続することが可能となる。さらに筋組織内において二次的に生じる $H_2PO_4^-$ 産生の抑制や筋細胞の脱分極や興奮収縮連関の障害を遅延することなどが知られている^{3~5)}。これらの理由から、運動中細胞内 pH の低下開始時間を遅らせかつ pH 低下率を抑制することは、筋収縮力の発揮の維持や運動に必要とされる ATP の産生・供給を長時間にわたって維持することが可能となる。加えて筋内における疲労因子($H_2PO_4^-$)の蓄積も遅延させることから、負荷強度の低い 10% 及び 30%MVC においては持続時間の延長につながるものと推察した。したがって、負荷強度が低い場合での筋持久力(持続時間)の良否を評価するうえで、単に all-out 時の細胞内 pH の値や、安静時からの差及び変化率などを用いるよりも単位時間(1 分間)当たりの pH 低下率が有用な指標となることが示唆された。それに対して、最も負荷の高い 50%MVC においては、pH 低下率と持続時間との間に有意な関係は見られなかった。この理由として

筋疲労に関しては、本研究で示したような pH 低下率や H_2PO_4^- 上昇率だけでなく、例えば中核系や末梢系などの様々な因子が相互に関与することが知られている。したがって、負荷強度が上昇した場合には pH 低下率も含めた、数多くの様々な疲労因子がより複雑に関与したためと思われる。一方、同じ負荷強度においても、pH 低下率や H_2PO_4^- 上昇率の変動にそれぞれ個人差が認められた。この理由として、運動中におけるエネルギー供給の面からは、筋組織における酸化能力が高くより持続できること、あるいは解糖系への依存度がより少ないこと、また組織内においては、産生した H^+ の緩衝能力や細胞内から細胞外への H^+ の除去の差などが考えられるものの、本研究の結果だけでは明らかとは成り得ず今後検討する必要がある。

筋疲労の発現に関わる因子は様々であり、これらが相互的に関与している。本研究では代謝産物、特に細胞内 pH 及び H_2PO_4^- の 2 つの因子から検討を行ったところ、最大下の筋持久力に関しては、筋興奮・収縮連関やエネルギー供給系に対して直接あるいは間接的に関与するとされる細胞内 pH の低下率が重要な因子であることが示唆された。

要 約

本研究の目的は、磁気共鳴分光法 (^3P -MRS) と近赤外分光法 (NIRS) とを用いて、等尺性運動負荷時に見られる局所的な筋疲労、特に運動強度の違いが筋疲労の程度や筋持久力 (持続時間) に及ぼす影響を細胞内の代謝および酸素動態の面から観察し、さらに各負荷強度の持続時間との関連について検討を加え、以下の結果を得た。

- 1) 各相対強度での持続時間は 50% MVC で 95.3 ± 13.6 秒、30% MVC で 209 ± 41.9 秒であり、また低強度の 10% MVC では 963 ± 236 秒と、50% MVC 時の 10 倍であった。
- 2) 運動中の各測定項目の変動をみると、運動開始時において PCr の低下及び $\text{Pi}(\text{H}_2\text{PO}_4^-)$ の上昇が見られた。細胞内 pH は運動開始 40 秒 (50% MVC) ~ 347 秒 (10% MVC) まで安静時レベ

ル (-6.95 pHunit) 維持したものの、それ以降低下を示した。また各測定項目 (pH 低下率及び H_2PO_4^- 増加率) とも強度の上昇に伴いその変化の程度は増大を示した。

- 3) 筋内の酸素化レベルは、全ての強度において運動開始時直後から直線的に低下を示した。しかしながらその後の変化は各強度間で異なり、10%、30% MVC ではその後上昇し一定レベルを維持した。一方 50% MVC ではさらに低下し、平均値において 10% を下回っていた。
- 4) 各相対強度における pH 低下率及び H_2PO_4^- 増加率と持続時間との間には、いずれも負の相関関係が認められた。pH 低下率と持続時間との間には $r = -0.578 \sim -0.871$ の相関係数が得られ、10%、30% MVC ではそれぞれ有意 ($p < 0.05$) であった。また、 H_2PO_4^- 増加率との間には $r = -0.370 \sim -0.740$ の相関係数が得られた。

本研究の結果から、最大下の等尺性運動時における筋持久力 (持続時間) には、筋興奮・収縮連関やエネルギー供給系に対して直接あるいは間接的に関与する細胞内 pH の低下率が重要な因子であることが示唆された。

謝 辞

本稿を終えるにあたり、多大なるご理解とご指導をいただきました東京医科大学 衛生学公衆衛生学教室 故岩根久夫名誉教授に心から感謝すると共に、適切な助言をいただいた明治大学保健体育 桑森真介教授に深謝いたします。

(受理日 平成10年7月27日)

参 考 文 献

- 1) 松岡脩吉: A. モツソ: 疲労(9) 労働の科学(1988) **43**(6), 42-45
- 2) 松岡脩吉: A. モツソ: 疲労(10) 労働の科学(1988) **43**(7), 44-46
- 3) Fitts R. H.: Cellular mechanisms of muscle fatigue Physiol Reviews (1994) **74**, 49-94
- 4) MacIaven, D. P., Gibson, H., Parry-Billings, M. and Edwards, R. H. T.: A review of metabolic and physiological factors in fatigue. Med. Sci. Sport. Rev (1989) **17**, 29-66
- 5) 森谷敏夫: 筋肉と疲労 体育の科学(1992) **42**, 335-341

- 6) Sahlin, K. A. Katz and J. Henriksson: Redox state and lactate accumulation in human skeletal muscle during dynamic exercise. *Biochem. J.* (1987) **245**, 551-556
- 7) Miller, R. G. Boska, M. D. Moussavi, R. S. Carson, P. J. and Weiner, M. W.: ^{31}P -NMR studies of high energy phosphates and pH in human muscle fatigue: Comparison of aerobic and anaerobic exercise *J. Clin. Invest.* (1988) **81**, 1190-1196
- 8) Wilson, J. R., K. K. McCully, D. M. Mancini, B. Boden and B. Chance: Relationship of muscular fatigue to pH and diprotonated Pi in humans: ^{31}P -NMR study *J. Appl. Physiol.* (1988) **64**, 2333-2339
- 9) Laurent, D. P., Portero, F., Goubel, A. and Rossi: Electromyogram spectrum changes during sustained contraction related to proton and diprotonated inorganic phosphate accumulation: a ^{31}P nuclear magnetic resonance study on human calf muscles *Eur. J. Appl. Physiol.* (1993) **66**, 263-268
- 10) Bertocci, L. A. J. L. Fleckenstein and J. Antonio: Human muscle fatigue after glycogen depletion: a ^{31}P magnetic resonance study *J. Appl. Physiol.* (1992) **73**, 75-81
- 11) 加賀谷淳子: 筋持久力—体力を捉える—過去から未来へ—*J. Sports Sci.* (1994) **13**, 233-240
- 12) 桑森真介、佐藤隆: ^{31}P -MRS のスポーツ科学への応用明治大学人文科学研究所紀要 (1994) **35**, 39-59
- 13) Taylor, D. J. Bore, P. J. Styles, P. Gadian, D. G. and Radda, G. K.: Bioenergetics of intact human muscle: A ^{31}P nuclear magnetic resonance study *Mol. Biol. Med.* (1983) **1**, 77-94
- 14) Wilkie, D. R.: Muscular fatigue: effects of hydrogen ions and inorganic phosphate *Federation Proc.* (1986) **45**, 2921-2923
- 15) Hamaoka, T., H. Iwane, T. Shimomitsu, T. Katsumura, N. Murase, S. Nishio, T. Osada, Y. Kurosawa, and B. Chance: Noninvasive measures of oxidative metabolism on working human muscles by near infrared spectroscopy. *J. Appl. Physiol.* (1996) **81**, 1410-1417
- 16) Bonde-Petersen, F. A. L. Mork, and E. Nielsen: Local muscle blood flow and sustained contractions of human arm and back muscles. *Eur. J. Appl. Physiol.* (1975) **34**, 43-50
- 17) Nosec, T. M. Fender, Y. K. and Godt, E. R.: It is diprotonated inorganic phosphate that depresses force in skinned skeletal muscle fibers *Science* (1987) **236**, 191-192
- 18) Weiner, M. W. Moussavi, R. S. Baker, M. D. Boska, M. D. and Miller, R. G.: Constant relationships between force, phosphate concentration, and pH in muscles with differential fatigability *Neurology* (1990) **40**, 1888-1893