

持久的および瞬発的に鍛練されたヒト骨格筋の 運動時エネルギー代謝

— リン 31 磁気共鳴分光法 (^{31}P -MRS) による評価 —

東京医科大学衛生学・公衆衛生学教室 (指導: 岩根久夫主任教授)

桑 森 真 介

【要旨と結論】 本研究の目的は、持久的鍛練筋と瞬発的鍛練筋のエネルギー代謝面での特徴を明らかにすることである。前腕筋の持久的鍛練群としてテニス選手 8 名および瞬発的鍛練群としてウエイトリフティング選手 8 名を選び、それら 2 群にコントロール群として一般男性 8 名を加え、安静時および漸増グリップ運動時におけるリン 31 磁気共鳴分光法 (^{31}P -MRS) による測定を実施した。 ^{31}P -MRS により評価された筋酸化能は、コントロール群に比べテニス選手群およびウエイトリフティング選手群ではそれぞれ 59% および 15% 高い値を示した。速筋線維の動員を示す Pi ピークの分離は、比較的高い強度の運動時において、コントロール群では 8 名中 6 名、ウエイトリフティング選手群では 8 名中 2 名において認められ、テニス選手群ではどの被験者においても認められなかった。筋疲労因子として知られる細胞内 pH 低下や H_2PO_4^- 増加は、テニス選手群で最も小さく、次いでウエイトリフティング選手群、コントロール群の順であった。これらの結果から、鍛練筋、中でも持久的鍛練筋では、優れた酸化能を有しており、運動にともなう疲労が起りにくいように適応しているものと考えられた。本研究はスポーツ医学の分野のみならず、臨床における診断・治療、リハビリテーション、ならびに運動処方作成などの面で重要な基礎的情報を与えるものである。

I. 序 論

従来より、定期的な身体運動に対する骨格筋の適応やスポーツ選手の骨格筋の先天的資質について明らかにするため、種々のスポーツ選手の骨格筋におけるエネルギー代謝能や酸素運搬能などが比較・検討されてきた²⁾²⁷⁾。通常このような場合、安静状態での筋生検標本の分析により得られる筋線維組成、酸化酵素活性、ミトコンドリア密度、毛細血管密度、などが評価の対象とされる。しかしながら、このような測定は被験者に対する侵襲が極めて強いことから、特に一流スポーツ選手や女性のスポーツ選手を対象とするような場合には困難であった。また、このような手法では、同一の組織から連続的に情報を得ることができないということ、あるいは生体を無傷のまま (*in vivo*) で測定することができないということなどの欠点を有し、自然な状態での運動時における活動筋からの情報を経時的かつ正確に得るこ

とが不可能であった。

近年、磁気共鳴分光法 (MRS) の進歩により、非侵襲的かつ経時的にヒトの骨格筋内のいくつかのエネルギー代謝物質や細胞内 pH を測定したり、その結果から筋のエネルギー代謝能を評価したりすることが可能となった³⁾¹⁶⁾²²⁾²⁹⁾³¹⁾。Chance ら³⁾ および McCully ら²²⁾ は、リン 31 MRS (^{31}P -MRS) によって測定された活動筋内の無機リン酸 (Pi) とクレアチンリン酸 (PCr) の比 (Pi/PCr 比) により骨格筋の酸化能 (ミトコンドリア呼吸の最大速度: V_{max}) を推定することが可能であることを報告している。彼らの研究を基礎として、McCully ら¹⁹⁾²⁰⁾²¹⁾、Park ら²⁵⁾、および Laurent ら¹⁷⁾¹⁸⁾ は、スポーツ選手を対象に運動時における活動筋の ^{31}P -MRS 測定を実施し、Pi/PCr 比により評価された筋酸化能がスポーツ選手では一般人に比べ優れることを明らかにした。しかしながら、異なるタイプのスポーツ選手について前腕筋の活動時における ^{31}P -MRS を測定し、

1996年3月16日受付, 1996年4月9日受理

キーワード: NMR, 身体運動, 骨格筋, エネルギー代謝, スポーツ.

(別刷請求先: 東京都新宿区新宿 6-1-1 東京医科大学衛生学・公衆衛生学教室 桑森真介)

それらの筋のエネルギー代謝能を比較・検討した研究はみられない。そこで筆者は、前腕筋が持久的に鍛練されたスポーツ選手と瞬発的に鍛練されたスポーツ選手の筋エネルギー代謝面での特徴を明らかにすることを目的として本研究を実施した。

II. 方法

1. 被験者

前腕筋の持久的鍛練群として男子学生硬式テニス選手8名、また瞬発的鍛練群として男子学生ウエイトリフティング選手8名を選び、これら2群に加えコントロール群としての一般健常男子学生8名を被験者として測定を実施した。なお、これらのスポーツ選手の競技力は全国ベスト4からベスト8クラスであり、両スポーツ選手群の競技力は同程度であった。また、年齢に関しては3群間で大差が認められないように各被験者を選出した。表1に、各群の年齢、身長、体重、利き側の前腕周径、および利き側の最大随意収縮力(MVC)を平均値と標準誤差で示した。

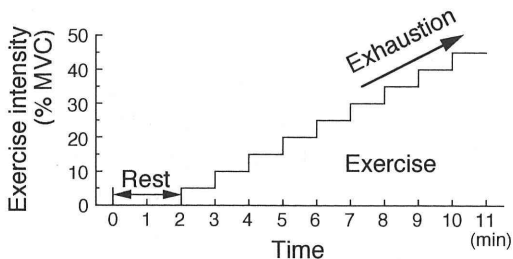


Fig. 1 Exercise protocol

Exercise:

Hand grip exercise (grip length: 2.5 cm)

Contraction frequency:

1 contraction every 3 seconds

MVC:

Maximum voluntary contraction force

2. 運動負荷プロトコール

運動は、椅座位にて利き側の腕を側方に挙上しマグネットボア内に挿入した姿勢で、反対側から挿入されたハンドエルゴメーターのハンドル部をメトロノームに合わせて3秒に1回のリズムでグリップするという方法を用いた。エルゴメーターには、筆者ら¹⁰⁾が開発した荷重負荷方式の非磁性ハンドエルゴメーターを使用した。運動強度は、MVCに対する割合(相対負荷)で与えた。すなわち、利き腕についてあらかじめMVCを測定し、その後図1に示すように2分の安静の後5% MVCからオールアウトに達するまで毎分5% MVCずつ運動強度を漸増させた。このような相対負荷法では、最大筋力が筋横断面積とほぼ比例関係にある¹⁰⁾ことから、どの被験者に対しても単位筋横断面積あたりにほぼ同一の強度が負荷されることとなる。

1回毎のグリップ距離については、あらかじめ数名の被験者に数種類の距離でグリップ運動を繰り返し行わせ、最も自然に運動することができた2.5 cmとした。なお、被験者が疲労によりグリップの距離が充分でなくなったり、指定された3秒に1回のリズムでグリップすることができなくなったような場合には、完全にグリップするように指示を与えた。また、グリップ運動ができなくなったり、不完全なグリップが3回以上続いたような場合には運動を中止させ、その時点をもってオールアウトとした。

3. ³¹P-MRS測定

³¹P-MRSの測定には大塚電子社製横型磁気共鳴分光装置(BEM 250/80型, 2テスラー, ボア径26 cm)を用い、共鳴周波数34.58 Hz, パルス幅60 msecとして測定を実施した。被験者の利き側前腕屈筋群を、測定台上に取り付けられた直径3 cmの表面コイル(送受信コイル)上に位置するように固定し、その状態でマグネットボア内に腕と測定台を挿入した。

Table 1 Characteristics of the subjects in each group.

	Tennis player	Weight lifter	Control
Age (yrs)	19.9±0.2	20.4±0.3	20.0±0.4
Body height (cm)	170.8±1.3	167.6±1.9	169.9±1.6
Body weight (kg)	64.1±1.5	78.6±6.0	63.0±2.4
Forearm circumference (cm)	26.6±0.4	28.6±0.7	24.8±0.4
MVC (kg)	54.6±1.9	58.5±2.3	49.0±2.0

MVC: Maximum voluntary contraction force

Values are average±SE.

安静時 (2 分間) については、2 秒毎に磁気共鳴シグナルを測定し、そのシグナルを Fourier 変換することにより 60 個のスペクトルを得た。これらのスペクトルを積算することにより得られた一つのスペクトルを安静時のデータとした。また、運動時に関しては、エルゴメーターから出力されたトリガー信号¹⁶⁾により筋収縮に同期 (3 秒毎) してシグナルを測定し、これらを Fourier 変換することにより 1 分間で 20 個のスペクトルを得た。これらの 20 スペクトルを積算することにより、1 分 (各運動強度) 毎に一つのスペクトルを得た。

得られたスペクトルを大塚電子社製フィットプログラムを用いて処理し、PCr、Pi、アデノシン 3 リン酸 (ATP) の各ピークの面積をもとめた。これらの面積を内部標準となる PCr と Pi の面積の和¹⁶⁾で除すことにより、それぞれの相対濃度を算出した。また、筋細胞内 pH については、PCr を基準とした Pi の化学シフト値 (α) から、次式³¹⁾に基づいて算出した。

$$pH = 6.75 + \log\{(\alpha - 3.27) / (5.69 - \alpha)\}$$

さらに、筋疲労の因子といわれている第一リン酸の相対濃度 ($[H_2PO_4^-]$)³⁴⁾ を、Pi の相対濃度 ($[Pi]$) および細胞内 pH から次式¹⁶⁾³⁴⁾によりもとめた。

$$[H_2PO_4^-] = [Pi] / (1 + 10^{pH - 6.75})$$

従来の研究により、比較的高強度の運動時において Pi のピークが二つあるいは三つに分離することがあると報告されている¹⁾²³⁾²⁴⁾²⁶⁾³²⁾。本研究においても、比較的高強度の運動時において Pi ピークの分離を示した例がいくつか認められた。このような場合には、Pi の各ピークについて上記の式にしたがい $[H_2PO_4^-]$ および第二リン酸の相対濃度 ($[HPO_4^{2-}] : [Pi] - [H_2PO_4^-]$) をもとめ、次式に示すように $H_2PO_4^-$ および HPO_4^{2-} のトータルの相

対濃度から Henderson-Hasselbalch の式 (ただし、解離定数 pK は $6.75^{16)31)}$ にしたがって、全測定領域中における細胞内 pH の代表値をもとめた¹⁵⁾。

$$pH = pK + \log\{[HPO_4^{2-}] / [H_2PO_4^-]\}$$

4. 統計処理

Pi/PCr 比、細胞内 pH、および $H_2PO_4^-$ のそれぞれについて、運動強度の増加にともなう変化、3 群間の差、および群と強度の交互作用 (運動強度の増加にともなう変化勾配の群間差) を重複測定-分散分析法により検定した。なお、有意水準は危険率 5% 未満 ($P < 0.05$) とした。

III. 結 果

1. Pi/PCr 比

図 2 は、安静時および運動時 (20~30% MVC) における典型的なスペクトルを示したものである。どの被験者においても、運動にともない Pi は増加し PCr が減少するという明らかな傾向が認められ、このような傾向は従来の報告³⁾¹³⁾¹⁴⁾¹⁹⁾²²⁾²⁹⁾と一致していた。

図 3 に、テニス選手群、ウエイトリフティング選手群、およびコントロール群の 3 群における Pi/PCr 比と運動強度の関係を示した。なお、すべての被験者が運動を遂行することができたのは 35% MVC までであったが、Pi/PCr 比と運動強度の関係から筋酸化能を評価することができるのは Sepegra²⁹⁾、Chance³⁾、および垣平¹³⁾のいう定常状態の範囲内であるので、図 3 では安静時から 30% MVC までについて示してある。また、統計処理に関しても安静時から 30% MVC の範囲内で施行した。

安静時の Pi/PCr 比は 3 群間で顕著な差は認められず、各被験者の値は 0.100 から 0.277 の範囲にあった。運動時の Pi/PCr 比については、いずれの群に

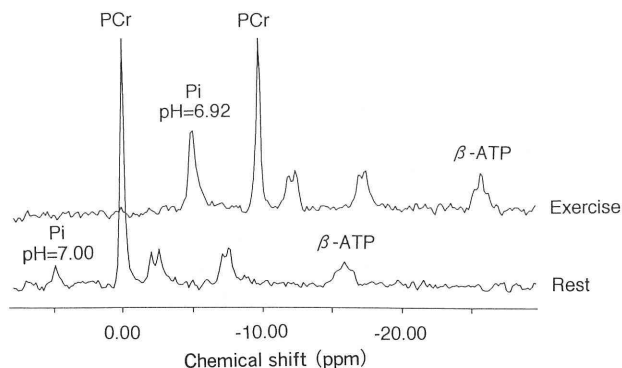


Fig. 2 ³¹P magnetic resonance spectra acquired during rest and hand grip exercise.
Pi: Inorganic phosphate
PCr: Phosphocreatine
 β -ATP: β -Adenosine triphosphate

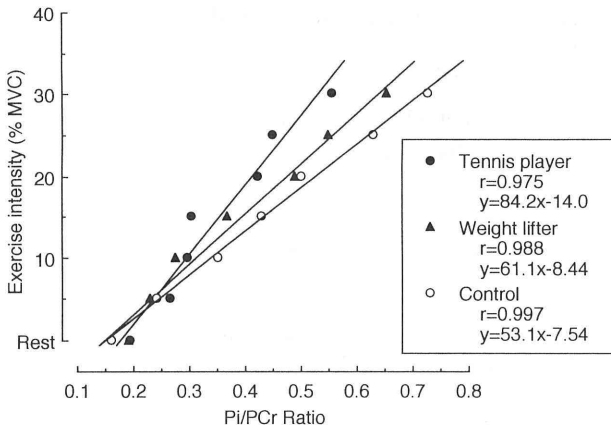


Fig. 3 Relationship between Pi/PCr ratio and exercise intensity.
 Pi: Inorganic phosphate
 PCr: Phosphocreatine
 MVC: Maximum voluntary contraction force

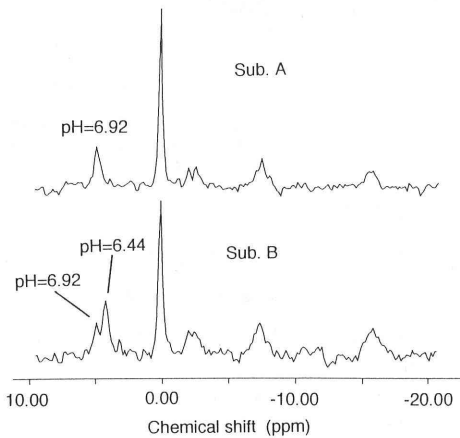


Fig 4 Single and double Pi peak spectra acquired from forearm muscles at 35% MVC (maximum voluntary contraction force).
 Sub.A: Tennis player
 Sub.B: Normal male

においても強度増加にしたがいほぼ直線的に上昇する傾向が認められた。分散分析の結果、運動強度の増加にともなう Pi/PCr 比の上昇は有意 ($P < 0.01$) であった。また、骨格筋の酸化能を示す Pi/PCr 比に対する運動強度 (% MVC) の勾配³⁾²²⁾については、テニス選手群が最も高く、次いでウエイトリフティング選手群、コントロール群の順であった。各群の回帰直線の勾配すなわち x 係数は、それぞれ 84.2, 61.1, 53.1 であり、一般男性群に比べてテニス選手群では 59%、ウエイトリフティング選手群では 15% 高い値を示した。分散分析の結果、Pi/PCr 比の群間差は有意ではなかったが、筋酸化能を示す Pi/PCr 比に対する運動強度の勾配の群間差、すなわち群と運

動強度の交互作用には有意性 ($P < 0.05$) が認められた。

2. Pi ピークの分離

コントロール群では、35% MVC の運動強度で 8 名中 6 名において Pi のピークが二つに分離することが確認された。それに対し、ウエイトリフティング選手群では、8 名中 2 名において二つの Pi ピークが観察され、テニス選手群では、Pi ピークの分離はどの被験者においてもまったく認められなかった。図 4 は、単一の Pi ピークしか認められなかったテニス選手の例 (Sub.A) と Pi ピークの分離が認められた一般男性 (Sub.B) の例をそれぞれ示したものである。また表 2 には、単一の Pi ピークあるいは二つに分離した Pi ピークの化学シフトから算出された細胞内 pH の値を示した。なお表 2 では、単一の Pi ピークしか認められなかったテニス選手 8 名とウエイトリフティング選手 6 名、および Pi ピークの分離が認められたコントロール 6 名については、平均値と標準誤差で示し、Pi ピークの分離が認められたウエイトリフティング選手 2 名 (被験者: W_A および W_B) と分離が認められなかったコントロール 2 名 (被験者: C_A および C_B) については各被験者の値を示した。

単一の Pi ピークのみを示したテニス選手 8 名、ウエイトリフティング選手 6 名、およびコントロール 2 名においては、その細胞内 pH はいずれの場合も 6.7 以上というように比較的高い値を示した (表 2)。また、Pi ピークが二つに分離したウエイトリフティング選手 2 名およびコントロール 6 名については、高 pH の値は 7.0 前後というように安静時の pH とほぼ同じ値を示し、低 pH の値は 6.5 以下というよ

Table 2 Intracellular pH value calculated from chemical shift of single Pi peak and double split Pi peaks.
Values are either average±SE or actual values.

	Pi peak type	High pH	Low pH
Tennis player	Single (n=8)	6.95±0.03	—
	Single (n=6)	6.85±0.05	—
Weight lifter	Double (Sub.: W _A)	7.11	6.30
	Double (Sub.: W _B)	7.09	6.22
Control	Single (Sub.: C _A)	6.73	—
	Single (Sub.: C _B)	6.88	—
	Double (n=6)	6.95±0.05	6.40±0.06

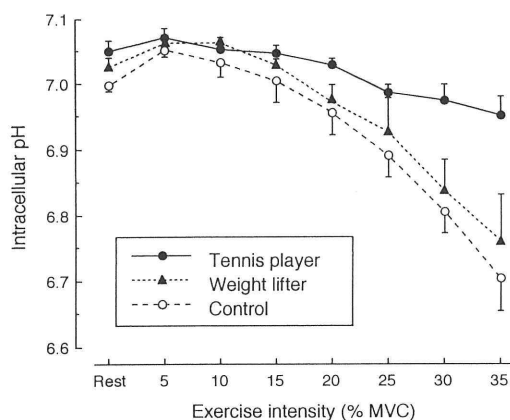


Fig. 5 Changes in intracellular pH during graded grip exercise.
Values are average±SE.
MVC: Maximum voluntary contraction force

うにかなり低い値を示した。

3. 細胞内 pH

図5に、各群における運動強度の増加にともなう細胞内 pH の変化を示した。なお図5は、すべての被験者が運動を遂行することが可能であった安静時から35% MVCまでについて平均値と標準誤差で示したものである。また、統計処理についても安静時から35% MVCの範囲で施行した。

安静時の細胞内 pH はいずれの被験者においても6.96から7.11の範囲にあり、各群間で大きな差異は認められなかった。運動時については、ウエイトリフティング選手群とコントロール群では20% MVC以後運動強度の増加にともない低下し、35% MVCにおいてそれぞれ6.76±0.07および6.70±0.05(平均値±標準誤差)に達した。しかしながら、テニス選手群に関しては上記の2群のような明らかな低下傾向を示さず、35% MVCにおいても pH は

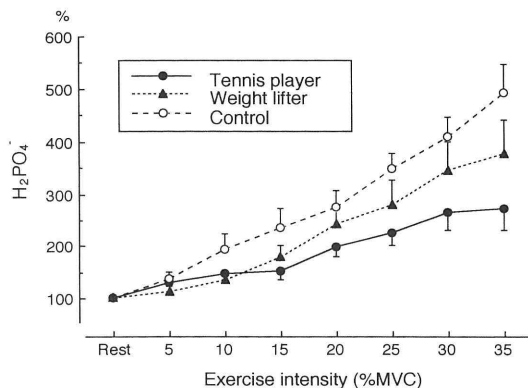


Fig. 6 Changes in $H_2PO_4^-$ during graded grip exercise.
Values are average±SE.
 $H_2PO_4^-$: Diprotonated phosphate
MVC: Maximum voluntary contraction force

6.95±0.03 というように安静値とほとんど差異が認められなかった。分散分析の結果、運動強度の増加にともなう pH の低下、群間差、および運動強度と群の交互作用のそれぞれについて有意性 ($P < 0.01$, $P < 0.05$, および $P < 0.05$) が認められた。

4. $H_2PO_4^-$ 濃度

図6は、運動強度の増加にともなう $H_2PO_4^-$ 濃度の変化を示したものである。なお図6は、35% MVCまでについての安静値に対する割合を平均値と標準誤差で示してある。また、統計処理に関しても安静時から35% MVCまでの範囲で施行した。

各群とも $H_2PO_4^-$ は運動強度の上昇にしたがい増加した。分散分析の結果、これらの変化は有意 ($P < 0.01$) であった。 $H_2PO_4^-$ 増加の勾配は、一般男性群が最も大きく、次いでウエイトリフティング選手群、テニス選手群の順であった。35% MVCでの各群の値は、一般男性群 493±52.2%、ウエイトリ

フティング選手群 $377 \pm 64.6\%$ 、テニス選手群 $273 \pm 43.3\%$ であった。分散分析の結果、 $H_2PO_4^-$ 濃度の群間には有意差が認められなかったが、その増加勾配の群間差、すなわち群と運動強度の交互作用は有意 ($P < 0.05$) であった。

IV. 考 察

1. Pi/PCr 比

^{31}P -MRS では、運動時における Pi や PCr などのいくつかのリン酸代謝物質の相対濃度を非侵襲的かつ経時的に測定することが可能である。Chance ら³⁾ および McCully ら²²⁾ は、アデノシン 2 リン酸 (ADP) が Michaelis-Menten の式にしたがいミトコンドリア呼吸を調節するという、および比較的低い運動強度で pH が大きく低下しないような定常状態運動時において Pi/PCr 比は ADP と比例して変化するということから、Pi/PCr 比とミトコンドリアにおける呼吸速度 (V) の関係を次式であらわすことができるとしている。

$$V = V_{\max} / \{1 + K_M / (\text{Pi/PCr})\}$$

ここで、 V_{\max} はミトコンドリア呼吸の最大速度、 K_M は Michaelis 定数である。彼らは、上記の式にもとづき定常状態運動時の Pi/PCr 比に対する運動強度の勾配により筋酸化能 (V_{\max}) を間接的に評価し得ると述べている。

本研究では、上記の理論にしたがい 2 種類のスポーツ選手群およびコントロール群の筋酸化能を評価し、それらを比較・検討した。なお、定常状態運動の特徴として、

- 1) アシドーシスの進行が認められないこと、
- 2) ATP 濃度が正常に維持されること、
- 3) 有酸素的な範囲内であり、Pi/PCr 比が運動強度の増加とともに直線的に変化すること、

が報告されている²⁹⁾。また、このような定常状態運動では細胞内 pH は 6.8 以上を示すことが知られている³¹⁾³²⁾。本研究においては、安静から 30% MVC の運動強度の間で、これらの定常状態の特徴と一致する結果が得られた (図 3 および図 5)。したがって、この間における Pi/PCr 比に対する運動強度の勾配から筋酸化能を評価することが可能なものと判断した。

筋酸化能を示す Pi/PCr 比に対する運動強度の勾配は、3 群間で有意 ($P < 0.05$) に異なっており、その値は、コントロール群に比べテニス選手群では

59%、またウエイトリフティング選手群では 15% 高値を示した (図 3)。

従来の研究¹⁷⁾¹⁸⁾²⁰⁾²¹⁾では、異なるタイプのスポーツ選手を対象として脚筋の運動時における ^{31}P -MRS が測定されている。その結果、持久的スポーツ選手の脚筋では、瞬発的スポーツ選手や一般人の脚筋に比べ、酸化能がより高いことが確認された。このように、従来の研究では脚筋について検討されているが、本研究では前腕筋を対象として検討を加えた。その結果、持久的に鍛練されたテニス選手では、瞬発的に鍛練されたウエイトリフティング選手や一般人に比べ、Pi/PCr 比により評価された筋酸化能は高値を示した (図 3)。このように本研究では、従来の報告とは異なる部位の筋においても、持久的スポーツ選手では瞬発的スポーツ選手や一般人に比べ酸化能が優れることが示唆された。

^{31}P -MRS より測定された筋酸化能に影響を及ぼす因子として、従来、活動筋への酸素運搬⁸⁾⁹⁾、酸化酵素活性⁴⁾、および筋線維組成²³⁾の三つが報告されている。

活動筋への酸素運搬と筋酸化能の関連については、Hogan ら⁸⁾⁹⁾により報告されている。彼らは、活動筋への酸素運搬を低下させると Pi/PCr 比が上昇することを観察し、酸素運搬が筋酸化能に影響を及ぼす可能性を示した。従来より、活動筋への酸素運搬に筋血流量が重要な役割を果すことが知られている¹²⁾。筋血流量は、従来の研究¹¹⁾³³⁾から、今回 Pi/PCr 比の評価に用いた 30% MVC (収縮頻度: 3 秒に 1 回) までの範囲では最大のレベルに達していないものと考えられる。また、最大下の筋血流量はトレーニングを実施しても変化しないかあるいは減少することが知られている⁶⁾。したがって、今回 Pi/PCr 比の評価に用いた 30% MVC 以下の範囲では、筋血流量はスポーツ選手では一般男性に比べ同等かあるいは低値であったものと推測される。これらのことから、スポーツ選手では一般男性に比べ筋酸化能が高値を示すという本研究の結果 (図 3) は、酸素運搬に関連したものではないと考えられる。

酸化酵素活性に関しては、Coggan ら⁴⁾のヒトを対象とした MRS 研究により、筋のクエン酸合成酵素 (CS) 活性が筋酸化能と正の相関を示すことが報告されている。また従来、CS 活性などの酸化酵素活性は、持久的なトレーニングにより顕著な上昇を示すだけでなく、筋力トレーニングでもある程度上昇

する可能性があることが報告されている²⁷⁾。本研究においては、スポーツ選手では一般男性に比べ筋酸化能が高いという結果(図3)が得られたが、このような筋酸化能の群間差は酸化酵素活性の差異に影響を受けていた可能性がある。

筋線維組成と³¹P-MRSの測定結果との関係については、Mizunoら²³⁾により検討されている。彼らは、同一の相対的運動強度でのPi/PCr比と遅筋線維数の割合とが有意な負の相関を示すことを報告している。このことは、Pi/PCr比により評価された酸化能が優れる筋では遅筋線維数の割合が高いことを示している。持久的スポーツ選手では瞬発的スポーツ選手や一般人に比べ筋の遅筋線維数の割合が高値を示すことが知られている²⁷⁾。本研究では前腕が持久的に鍛練されたテニス選手では他の2群に比べ前腕筋の酸化能が高いという結果(図3)が得られたが、このような筋酸化能の差異は筋線維組成の差にも影響を受けていた可能性が示唆される。

2. Piピークの分離

前述したように、³¹P-MRSではPCrを基準としたPiの化学シフトにより細胞内pHを算出することが可能である。このことは、細胞内でpHが低下するとスペクトル上でPiピークがPCr側に移行するというPiの性質を利用したものである。したがって、スペクトル上のPiピークが分離するという現象は、測定領域中にpHの異なる部分が存在することを示している⁷⁾。従来のヒトの骨格筋を用いたMRS研究¹⁾²³⁾²⁶⁾³²⁾では、低強度運動時においてはPiのピークは一つしか観察されないが、高強度運動時では低pHのPiピークが出現し、Piピークが二つあるいは三つに分離することがあると報告されている。このような低pHのPiピークの出現によるPiピークの分離は、活動筋内のpH低下が主として筋内での乳酸蓄積に起因する²⁸⁾ということから、高強度運動時において、無酸素的代謝の活性が高く乳酸蓄積が起りやすい遅筋線維が動員されたことを示すものと解釈されている¹⁾²³⁾²⁴⁾²⁶⁾³²⁾。しかしながら、Piピークの分離はすべての被験者で認められるわけではなく、被験者によっては高強度運動時であっても単一のPiピークしか観察されないということもある²³⁾²⁴⁾³²⁾。このようなPiピークの分離の有無について、筋群や筋線維の動員パターンを差を反映しているという考え²⁶⁾³¹⁾と、筋線維組成の差に起因するという考え²³⁾²⁴⁾²⁶⁾とが提示されている。

本研究では、高強度運動時におけるPiピークの分離は、コントロール群では8名中6名において認められたのに対し、テニス選手群では比較的高いpHのPiピークが一つ認められるだけであった(図4および表2)。Mizunoら²³⁾は、運動時において高pHのPiピークのみが観察された被験者では、Piピークの分離が認められた被験者に比べ、遅筋線維数の割合が高値を示すことを報告している。このようなことから、本研究におけるテニス選手群ではコントロール群に比べ遅筋線維数の割合が高かった可能性が示唆される。本研究では前腕が持久的に鍛練されたスポーツ選手としてテニス選手を選んだが、上記のような結果は、持久的スポーツ選手では一般人に比べ遅筋線維数の割合が高いという従来の報告²⁷⁾と一致する。

ウエイトリフティング選手に関しては、運動時におけるPiピークの分離は8名中2名において認められたが、これら2名を除く6名については、比較的高いpHを示すPiピークが一つ認められるだけであった。この結果をMizunoらの報告²³⁾をもとに解釈すると、ウエイトリフティング選手においても、一般男性に比べ遅筋線維数の割合はいくらか高いということになる。しかしながら、従来の組織化学的研究²⁾²⁷⁾においては、ウエイトリフティング選手では一般人に比べ遅筋線維数の割合は同程度あるいは低値を示すことが報告されている。このように、ウエイトリフティング選手の筋線維組成を本研究の結果からMizunoら²³⁾の報告をもとに評価すると、従来の組織化学的手法による結果と矛盾することになる。Mizunoらの研究²³⁾では、トレーニングを実施していない被験者を対象としているが、本研究では、定期的にトレーニングを実施しているスポーツ選手を対象として測定を実施した。本研究の結果は、定期的に鍛練されたスポーツ選手の筋では、Piピークの分離の有無は筋線維組成²³⁾²⁴⁾²⁶⁾だけでなく、遅筋線維の動員パターンの違い²⁶⁾³¹⁾にもかなりの影響を受けている可能性を示唆するものである。

3. 細胞内pHおよびH₂PO₄⁻

従来の筋疲労研究¹⁴⁾³⁴⁾により、細胞内pH低下やH₂PO₄⁻増加は局所筋の疲労因子として認められている。本研究においては、³¹P-MRSにより得られた結果から筋酸化能を評価するため被験者に比較的低強度の漸増負荷を与えた³⁾¹³⁾²⁹⁾。そのため本研究では、pHやH₂PO₄⁻の変化について検討した従来の

研究²³⁾³¹⁾³²⁾³⁴⁾に比べ、それらの変化は比較的小さかった。しかしながら、このような条件下においても、pH および H_2PO_4^- の変化勾配は3群間で有意な差が認められ、それらの変化勾配はテニス選手群で最も小さく、次いでウエイトリフティング選手群、コントロール群の順であった(図5および図6)。

上記のpHに関する結果は、活動筋内におけるpH低下が主として乳酸蓄積に起因する²⁸⁾ことから、スポーツ選手群ではコントロール群に比べ運動時の無酸素的解糖系への依存度がより低かったことによるものと思われる。

一方、 H_2PO_4^- の濃度はpHとPi濃度により決定づけられる¹⁶⁾³⁴⁾。これらの内pHについては、前述したように無酸素的解糖系の関与の程度に依存するものと思われる。また、Pi濃度に関しては、本研究においてはスポーツ選手群ではコントロール群に比べ増加の程度は小さかった。Chanceらの報告³⁾から、この結果はスポーツ選手群では筋酸化能が比較的優れていたことによるものと考えられる。本研究において、 H_2PO_4^- の増加勾配はスポーツ選手群ではコントロール群に比べ低かったが(図6)、この結果は、スポーツ選手では一般人に比べ、運動時において無酸素的解糖系への依存度がより低くかつ筋酸化能がより優れることによるものと考えられる。

筋疲労は、本研究で評価したようなpH低下および H_2PO_4^- 増加などの代謝性の因子のほかにも末梢・中枢神経系の因子や収縮機構に関する因子などの多くの因子によりもたらされることが知られている³⁾。一般に、持久タイプのスポーツ選手では筋力・瞬発力タイプのスポーツ選手や一般人に比べ、同強度で運動を行っても筋疲労が起りにくく、運動の持続能力が高いことが知られている。本研究の結果は、このような事実のメカニズムの一端を明示するものである。

近年、健康の維持・増進、体力の増強、生活の質の改善、などの目的で種々のスポーツが実践されるようになってきた。しかしながら、スポーツ活動はしばしば疲労を生じさせる原因となる。本研究の結果は、定期的な身体運動は運動誘発性の筋疲労を抑制する効果を有しており、特に持久的運動ではその効果が高い可能性を示している。従来より、比較的低強度の持久的運動は健康の維持・増進のために有効であることが知られている³⁰⁾が、運動誘発性の筋疲労を抑制するという観点からも比較的低強度の持

久的運動が好ましいものと考えられる。

本研究はスポーツ医学の分野のみならず、広く臨床における診断・治療、リハビリテーション、さらには運動処方作成などの面においても重要な基礎的情報を与えるものである。

謝辞: 稿を終えるにあたり、終始ご指導、ご校閲を賜りました東京医科大学衛生学・公衆衛生学教室、岩根久夫教授に心より感謝いたしますとともに、多大なご協力をいただいた藤波襄二教授ならびに同教室員の皆様に深謝いたします。

(本論文の主旨は、1993年度第48回日本体力医学会大会において発表した。)

文 献

- 1) Achten E, Cauteren MV, Willen R, Luypaert R, Malaisse WJ, Bosch GV, Delanghe G, Meirleir KD, Osteaux M: ³¹P-NMR spectroscopy and the metabolic properties of different muscle fibers. *J Appl Physiol* **68**(2): 644~649, 1990
- 2) Bergh U: Maximal oxygen uptake and muscle fiber types in trained and untrained humans. *Med Sci Sports* **10**(3): 151~154, 1978
- 3) Chance B, Leigh JS, Clark BJ, Maris J, Kent J, Nioka S, Smith D: Control of oxidative metabolism and oxygen delivery in human skeletal muscle: A steady-state analysis of the work/energy cost transfer function. *Pro Natl Acad Sci USA* **82**: 8384~8388, 1985
- 4) Coggan AW, Abduljalil AM, Swanson SC, Earle MS, Farris JW, Mendenhall LA, Robitaille P-M: Muscle metabolism during exercise in young and older untrained and endurance-trained men. *J Appl Physiol* **75**: 2125~2133, 1993
- 5) Fitts RH: Cellular mechanisms of muscle fatigue. *Physiol Reviews* **74**(1): 49~94, 1994
- 6) Fox EL: スプリントと持久性トレーニング: 方法と効果。選手とコーチのためのスポーツ生理学(渡辺和彦訳), 217~219, 大修館書店(東京), 1991
- 7) Gardian DG: NMRによるpH測定。医学・生物学のためのNMR—生体系への応用(今井昭一訳), 31~36, 西村書店(新潟), 1985
- 8) Hogan MC, Nioka S, Brechue WF, Chance B: A ³¹P-NMR study of tissue respiration in working dog muscle during reduced O₂ delivery conditions. *J Appl Physiol* **73**: 1662~1670, 1992
- 9) Hogan MC, Arthur PG, Bebout DE, Hochachka PW, Wagner PD: Role of O₂ in regulating tissue

- respiration in dog muscle working in situ. *J Appl Physiol* **73**: 728~736, 1992
- 10) 福永哲夫: ヒトの絶対筋力, 75~105, 杏林書院 (東京), 1978
 - 11) 加賀谷淳子: 筋持久力—体力を捉える—過去から未来へ—. *Jap J Sports Sci* **13**(2): 233~240, 1994
 - 12) 加賀谷勲彦, 加賀谷淳子: トレーニングによる筋持久力向上のメカニズム. 運動処方—その生理学的基礎—, 40~55, 杏林書院 (東京), 1986
 - 13) 垣平博臣: 骨格筋の有酸素的代謝能の評価—³¹P-MRSと近赤外分光法 (NRS) を用いて—. *Jap J Sports Sci* **12**(2): 89~96, 1993
 - 14) Kent-Braun JA, Miller RG, Weiner M: Human skeletal muscle metabolism in health and disease: Utility of magnetic resonance spectroscopy. *Exercise and Sport Sciences Reviews* 23. (Ed) Holloszy JO, Williams & Wilkins, Baltimore, 305~347, 1995
 - 15) 桑森真介, 岩根久夫, 浜岡隆文, 村瀬訓生, 黒澤裕子: 前腕の運動時における活動筋の酸素化ヘモグロビン・ミオグロビン濃度およびリン酸化合物濃度と細胞内 pH との関係. *体力科学* **44**(4): 465~474, 1995
 - 16) 桑森真介, 佐藤 隆: ³¹P-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* **35**: 39~59, 1994
 - 17) Laurent D, Reutenauer H, Payen J-F, Favre-Juvin A, Etteradossi J, Lebas J-F, Rossi A: Discrimination between cross-country and downhill skiers by pulmonary and local ³¹P-NMR evaluations. *Med Sci Sports Exerc* **25**(1): 29~36, 1993
 - 18) Laurent D, Reutenauer H, Payen J-F, Favre-Juvin A, Etteradossi J, Lebas J-F, Rossi A: Muscle bioenergetics in skiers: Studies using NMR spectroscopy. *Int J Sports Med* **13**: S150~S152, 1992
 - 19) McCully KK, Boden BP, Tuchler M, Fountain MR, Chance B: Wrist flexor muscles of elite rowers measured with magnetic resonance spectroscopy. *J Appl Physiol* **67**: 926~932, 1989
 - 20) McCully KK, Vandborne K, Meirleir KD, Posner JD, Leigh Jr JS: Muscle metabolism in track athletes, using ³¹P magnetic resonance spectroscopy. *Can J Physiol Pharmacol* **70**: 1353~1359, 1992
 - 21) McCully KK, Posner JD: Measuring exercise-induced adaptations and injury with magnetic resonance spectroscopy. *Int J Sports Med* **13**: S147~S149, 1992
 - 22) McCully KK, Kent JA, Chance B: Application of ³¹P magnetic resonance spectroscopy to the study of athletic performance. *Sports Med* **5**: 312~321, 1988
 - 23) Mizuno M, Secher NH, Quistorff B: ³¹P-NMR spectroscopy, rsEMG, and histochemical fiber types of human wrist flexor muscles. *J Appl Physiol* **76**(2): 531~538, 1994
 - 24) Mizuno M, Justesen LO, Bedolla J, Friendman DB, Secher NH, Quistorff B: Partial curarization abolishes splitting of the inorganic phosphate peak in ³¹P-NMR spectroscopy during intense forearm exercise in man. *Acta Physiol Scand* **139**: 611~612, 1990
 - 25) Park JH, Brown RL, Park CR, Cohn M, Chance B: Energy metabolism of the untrained muscle of elite runners as observed by ³¹P magnetic resonance spectroscopy: Evidence suggesting a genetic endowment for endurance exercise. *Proc Natl Acad Sci USA* **85**: 8780~8784, 1988
 - 26) Park JH, Brown RL, Park CR, McCully K, Cohn M, Haselgrove J, Chance B: Functional pools of oxidative and glycolytic fibers in human muscle observed by ³¹P magnetic resonance spectroscopy during exercise. *Proc Natl Acad Sci USA* **84**: 8976~8980, 1987
 - 27) Saltin B, Gollnick PD: Skeletal muscle adaptability significance for metabolism and performance. *Handbook of Physiology—skeletal muscle*, American Physiological Society, Baltimore, 555~621, 1983
 - 28) Sahlin K: Effect of acidosis on energy metabolism and force generation in skeletal muscle. *Biochemistry of exercise*. International Series Sport Science 13. (Eds) Knuttgen HG, Vogel JA, Poortmans J, Human Kinetics, Illinois, 151~160, 1983
 - 29) Sepega AA, Sokolow DP, Graham TJ, Chance B: Phosphorus nuclear magnetic resonance: A non-invasive technique for the study of muscle bioenergetics during exercise. *Med Sci Sports Exerc* **19**(4): 410~420, 1987
 - 30) 進藤宗洋, 小笠原正志, 田中宏暁: 運動生理学的效果. 有酸素運動の健康科学 (村山正博, 太田壽城, 小田清一編集), 31~53, 朝倉書店 (東京), 1991
 - 31) Taylor DJ, Bore PJ, Styles P, Gadian DG, Radda GK: Bioenergetics of intact human muscle: A ³¹P nuclear magnetic resonance study. *Mol Biol Med* **1**: 77~94, 1983
 - 32) Vandborne K, McCully KK, Kakihira H, Prammer M, Bolinger L, Detre LA, Meirleir KD, Walter G, Chance B, Leigh JS: Metabolic heterogeneity in human calf muscle during maximal exercise. *Proc Natl Acad Sci USA* **88**: 5714~5718, 1991
 - 33) Wharen J: Quantitative aspects of blood flow

and oxygen uptake in the human forearm during rhythmic exercise. *Acta Physiol Scand* **67** (Suppl 269) : 1~93, 1966

34) Wilkie DR: Muscular fatigue: Effects of hydrogen ions and inorganic phosphate. *Federation Proc* **45** : 2921~2923, 1986

Energy Metabolism of Endurance- and Strength-Trained Human Skeletal Muscles during Exercise Evaluated by Phosphorus 31 Magnetic Resonance Spectroscopy (³¹P-MRS)

Masasuke KUWAMORI

Department of Preventive Medicine and Public Health, Tokyo Medical College
Department of Health and Physical Education, School of Commerce, Meiji University

The purpose of this study was to clarify the characteristics of energy metabolism in endurance- and strength-trained muscles. The subjects consisted of a group of 8 tennis players with endurance-trained forearm muscles, a group of 8 weight lifters with strength-trained forearm muscles, and a group of 8 normal males who acted as the control group. Phosphorus 31 magnetic resonance spectroscopy (³¹P-MRS) was used to measure intracellular pH and energy metabolites in forearm muscles during rest and graded grip exercises. The slope of exercise intensity versus Pi/PCr ratio, the indicator of muscle oxidative capacity, was 59% and 15% higher in the tennis player group and weight lifter group respectively when compared to the control group. At high exercise intensity, 6 of the 8 controls and 2 of the 8 weight lifters showed double split Pi peaks, relating to recruitment of fatigable fast twitch fibers, while all of the tennis players showed a single Pi peak. The pH drop and H₂PO₄⁻ increase, the muscle fatigue factors, were the lowest in the tennis player group and were lower in the weight lifter group compared to the control group. These results suggested that trained muscles, especially endurance-trained muscles, possess higher oxidative capacity and less fatigue characteristics. In addition, the above mentioned fatigue-related results explain why the endurance of athletes is higher than in normal individuals. In conclusion, these results do not only contribute to the development of sports science but should also be useful to develop adequate rehabilitation and exercise guidance during and after clinical treatment as well as indirectly contribute to the diagnosis and treatment of patients with muscle diseases.

〈Key words〉 Nuclear magnetic resonance, Exertion, Skeletal muscles, Energy metabolism, Sports.
