

31P-MRSのスポーツ科学への応用

メタデータ	言語: jpn 出版者: 明治大学人文科学研究所 公開日: 2012-05-16 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 桑森, 真介, 佐藤, 隆 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10291/11891

^{31}P -MRS のスポーツ科学への応用

桑 森 真 介 佐 藤 隆

Application of ^{31}P -MRS for Sports Science

Masasuke KUWAMORI Takashi SATO

The purposes of this paper were to give a brief explanation on nuclear magnetic resonance (NMR) in chapter 1, an interpretation of a new ergometer for magnetic resonance spectroscopy (MRS) measurement during exercise in chapter 2, and a rough review of a phosphorus 31 magnetic resonance spectroscopy (^{31}P -MRS) application for sports science in chapter 3.

In chapter 1, the principle of NMR, different kinds of NMR, and information obtained by ^{31}P -MRS measurement were described. The principle of NMR shown through some illustrations was made as understandable as possible. Different kinds of NMR such as MRS and magnetic resonance imaging (MRI) were introduced, as well as some nuclei suitable for NMR measurement. Chemical substance concentrations, intracellular pH, and others were described as the information obtained by ^{31}P -MRS measurement.

In chapter 2, some problems of ergometers used in previous ^{31}P -MRS studies were pointed out, and a new ergometer made of non-magnetic materials was introduced. This new ergometer can be used for either grip exercise or wrist flexion exercise. The weight loading method was adopted for this ergometer, and it was equipped with monitors for handle displacement and contraction speed, and a device for trigger pulse output.

Finally in chapter 3, muscle energy metabolism of male athletes was discussed on the basis of previous ^{31}P -MRS studies. It was suggested that the muscular mitochondrial function of an athlete was higher than that of a normal male, and that the progression of metabolic fatigue factors during exercise of an athlete was slower than that of a normal male. In addition, it was shown that the mitochondrial function of an endurance type athlete was higher than that of a strength type athlete, and that the progression of fatigue factors of an endurance type athlete was slower than that of a strength type athlete. It also seemed probable that the different type athletes in the same sports differed in both muscular mitochondrial function and progression of fatigue factors.

《共同研究》

^{31}P -MRSのスポーツ科学への応用

桑 森 真 介 佐 藤 隆

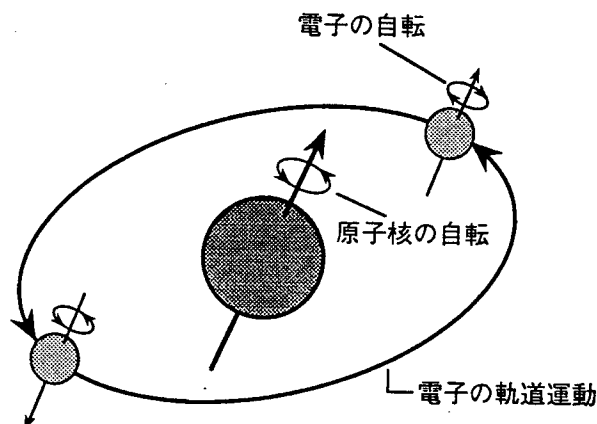
本研究では、1991年度に主として運動時の磁気共鳴分光法（MRS）測定のためのエルゴメーターを開発し、1992年度ではそのエルゴメーターを用いてMRSのスポーツ科学への応用を試みた。本論文では、現在のところMRSがスポーツ科学の分野で十分に知られていないと思われることから第I章でこのことに関して概説し、第II章ではMRS測定のためのエルゴメーターの開発について、また第III章においてはMRSのスポーツ科学への応用に関して論ずることとする。

なお、本研究は東京医科大学衛生学公衆衛生学教室、岩根久夫教授、藤波襄二教授、および同教室員の方々との共同で行なわれたものであるので、本文の第II章以後については、主として岩根・藤波両教授らとの共同で学会等で発表してきた内容をもとに総説することとする。

I. NMRについて

A. NMRの原理

NMRとはNuclear Magnetic Resonance（核磁気共鳴法）のイニシャルをとった略語である。NMR現象は、1940年代にBlochおよびPurcellにより発見され、その後彼らはこの業績を評価され1952年にノーベル物理学賞を受賞している¹⁰⁾。



- 1 電子（負電荷を持つ）の軌道運動
- 2 電子の自転
- 3 原子核（陽電荷を持つ）の自転

図1 原子内における荷電粒子の3つの運動

ここではまず、NMR現象について視覚的に概説することとする。すべての物質は原子により構成されているが、この原子内では、図1に示すように自転する原子核（陽電荷を持つ）の回りを電子（負電荷を持つ）が自転しながら軌道運動をしている。これらの回転運動の中でNMRで重要となるのは原子核の自転である。原子核は陽電荷を有するので、自転（スピン）により磁荷を形成する。通常の状態では原子核はランダムにスピンしているが、均一で一定方向の磁場（静磁場）の中に置かれるとその方向を軸としてちょうど倒れかかっているコマの“すりこぎ運動”に似た運動（ラーモアの歳差運動）を始める（図2）。

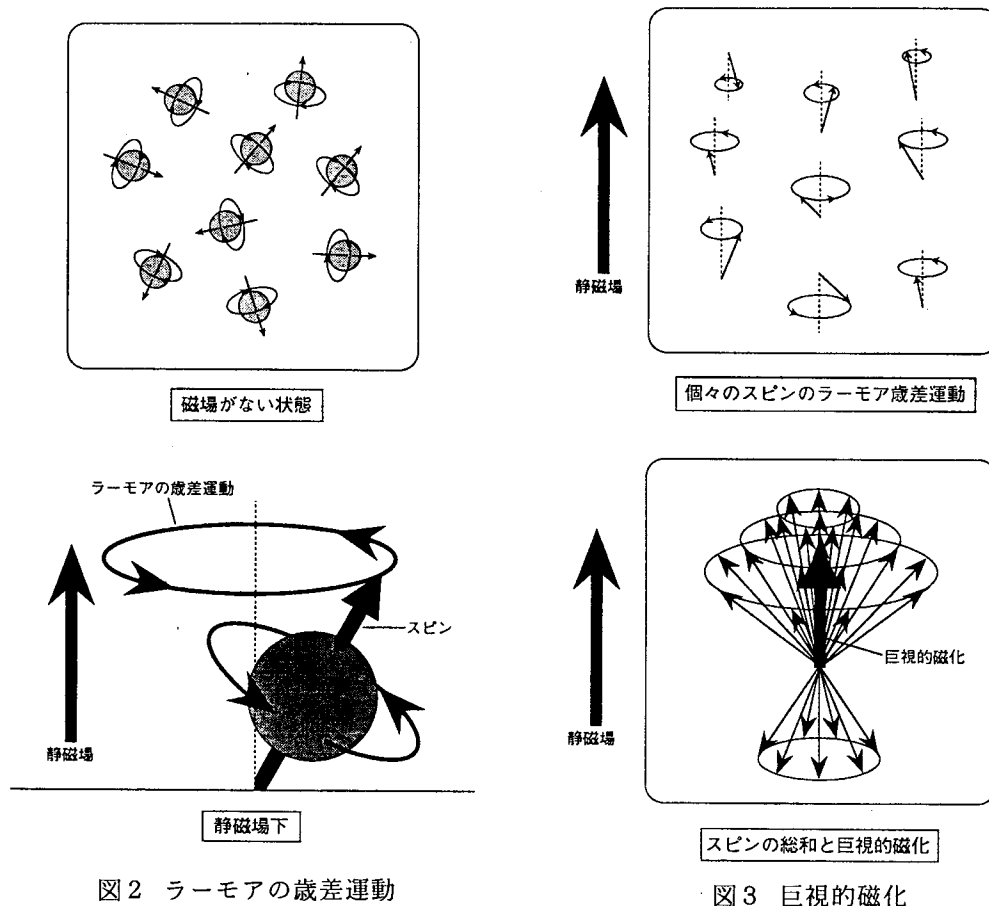
^{31}P -MRSのスポーツ科学への応用

図2 ラーモアの歳差運動

図3 巨視的磁化

図3に示すように、物質中の無数の原子核スピンの歳差運動はそれぞれ位相が異なるので、静磁場に対して垂直な方向の磁化成分は互いに打ち消し合うが、静磁場の方向については、その方向に向いて歳差運動を行なっている原子核スピンの逆方向に歳差運動しているスピンの比量的に多いためベクトル総和として巨視的磁化が生じる。この状態で特定の周波数（共鳴周波数）をもった電磁波（Radiofrequency Pulse; RFパルス）を印加すると、そのパルスと共通する周波数で歳差運動を行なっている原子核だけが選択的に共鳴してパルスのエネルギーを吸収しその後エネルギーを放出する。この時の巨視的磁化の動きを視覚的に表現すると、巨視的磁化はRFパルスを印加されるとパルス印加前の方向を軸として回転しながらその回転軸に垂直な面に倒れていく。図4は、この動きを理解しやすくするため巨視的磁化と同じ角速度で回転する回転座標系（ x' 、 y' 、 z' ）でRFパルス印加後の巨視的磁化の動きを示したものである。

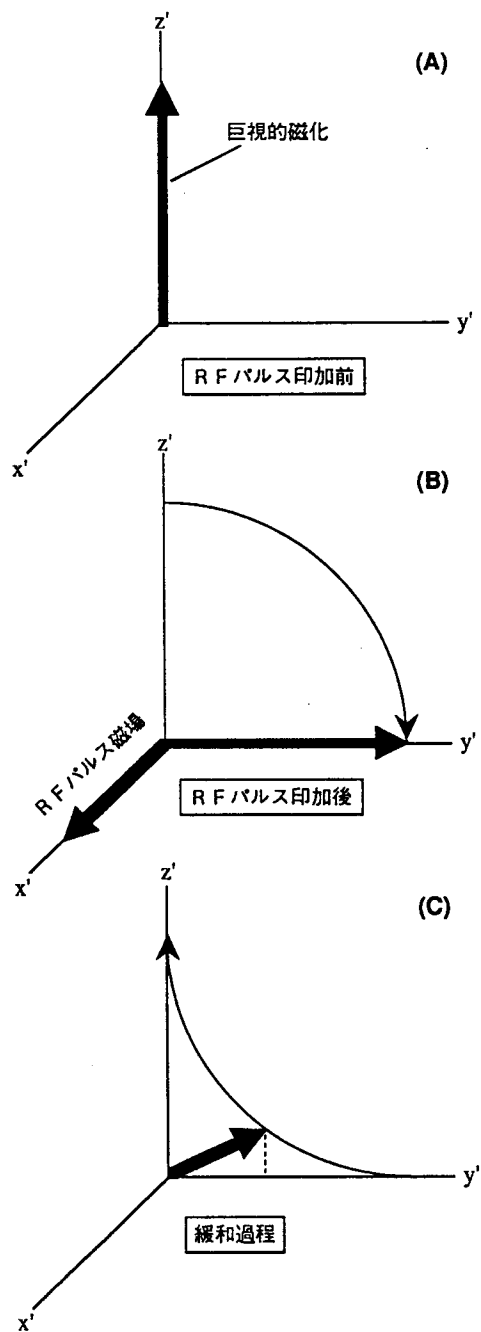


図4 回転座標系におけるRFパルス印加後の巨視的磁化の動きと緩和過程

^{31}P -MRSのスポーツ科学への応用

図4に示すように、回転座標系では巨視的磁化は y' 軸の方向に倒れていくことになる。通常パルスの時間幅を巨視的磁化がちょうど y' 軸上に倒れるまでに設定する（このようなパルスを 90° パルスと呼ぶ）ので、巨視的磁化が y' 軸上にまで倒れたところでRFパルスが切られることになり、その後巨視的磁化はパルス印加前の状態に戻る（この現象を緩和と呼ぶ）。図4は回転座標系で示したものであるため巨視的磁化は指数関数的に元の状態に戻るように見えるが、実際には巨視的磁化は z 軸の回りを回転しながら緩和する。

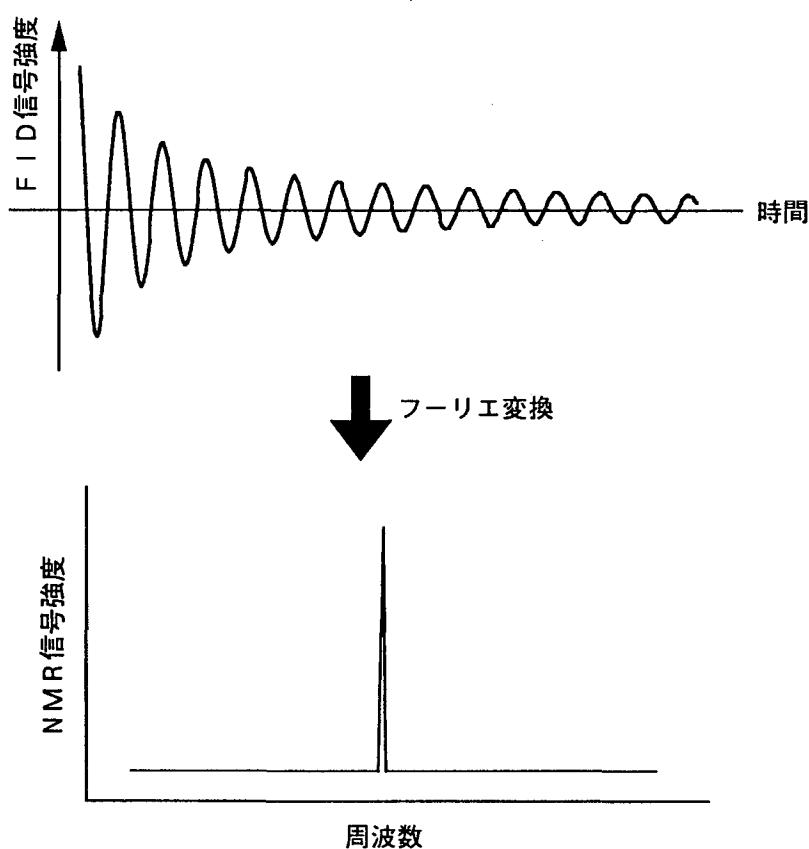


図5 自由誘導減衰 (FID) 信号とフーリエ変換スペクトル

その緩和時の巨視的磁化の y 成分（回転座標系ではなく静止している座標系の y 成分）を検出コイルにより測定すると、図5の上図に示すような自由誘導減衰（free induction decay; FID）信号が測定され、それをコンピューターにオンライン入力しフーリエ変換することによりNMRスペクトル（図5下図）が得られる。前述のようにRFパルスのもつ共鳴周波数と同じ周波数で歳差運動する原子核スピンのみが選択的に共鳴現象を起こす訳だが、原子は化学的に結合している他の原子の影響を受け、同じ原子であっても化学的結合状態の違いにより歳差運動

の周波数がわずかずつ異なる。RFパルスが印加されると、化学的結合状態の異なる（歳差運動の周波数がわずかずつ異なる）いくつかの原子が同時に共鳴し、実際に測定されたNMRスペクトル上には異なる周波数でいくつかのピークが認められる。

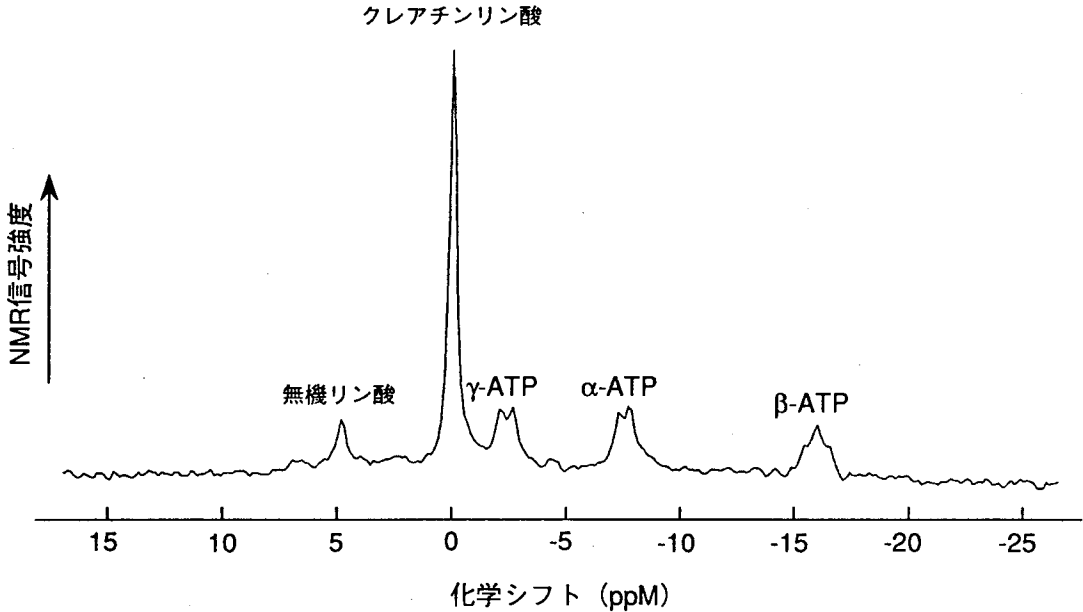


図6 ヒトの前腕における安静時の ^{31}P -MRSスペクトル

図6はリン31を測定対象としたヒト前腕屈筋群の安静時スペクトル例であるが、腕をNMRボア内に挿入し前腕屈筋群にリン31の共鳴周波数をもったRFパルスを印加することにより得られる。通常NMRスペクトルの横軸は、基準物質との周波数の差を共鳴周波数で除した値を 10^6 倍しppm (parts per million) の単位で表わした相対的周波数(化学シフトと呼ばれる)とする。図6のようにリン31を測定対象とした場合には、通常クレアチンリン酸(PCr)を基準物質として表す^{15, 19)}。

B. NMRの種類

1950年に原子核の存在する環境(化合物の化学的結合状態)によって測定されたFIDの周波数にわずかな差異(化学シフト)が生じることが発見されて以来、NMR spectroscopy(核磁気共鳴分光法)を化合物の分析に応用した研究は急激に進展した。また、1960年代初期には臓器の特定部位からNMR信号を測定し、その強度をコンピューターにより映像化するという生体画像法の基礎が築かれ、NMR imaging(核磁気共鳴映像法)は1980年代に大きく進歩し今日の発展をみるに至った。現在では、一般にNMR spectroscopyおよびNMR imagingはそれぞれMRS(磁気共鳴分光法)、MRI(磁気共鳴映像法)と呼ばれている。

NMRでは、どのような原子核でも測定対象となり得る訳ではなく、NMR現象を生ずる原子核は、陽子数および中性子数の両者、またはそのどちらかが奇数であるものに限られる。その他、原子核のスピン量子数、NMR感度比、自然存在比、測定領域中の存在量などにより測

^{31}P -MRSのスポーツ科学への応用

定に適する原子核がほぼ決まってくる。一般に、MRIではプロトン (^1H) が、また、MRSではリン 31 (^{31}P)、 ^1H 、炭素 13 (^{13}C) などが測定の対象とされている^{15, 19)}。

運動やスポーツに関連した研究分野においてNMRの応用を試みたこれまでの研究報告では、 ^{31}P を測定対象としたMRS (^{31}P -MRS) あるいは ^1H を測定対象としたMRI (^1H -MRI) を利用したものがほとんどである。筆者らの研究では、主として ^{31}P -MRSを用いているので以下に ^{31}P -MRSに関して述べることにする。

C. ^{31}P -MRSから得られる情報

1. スペクトルのピークからもとめる物質の濃度

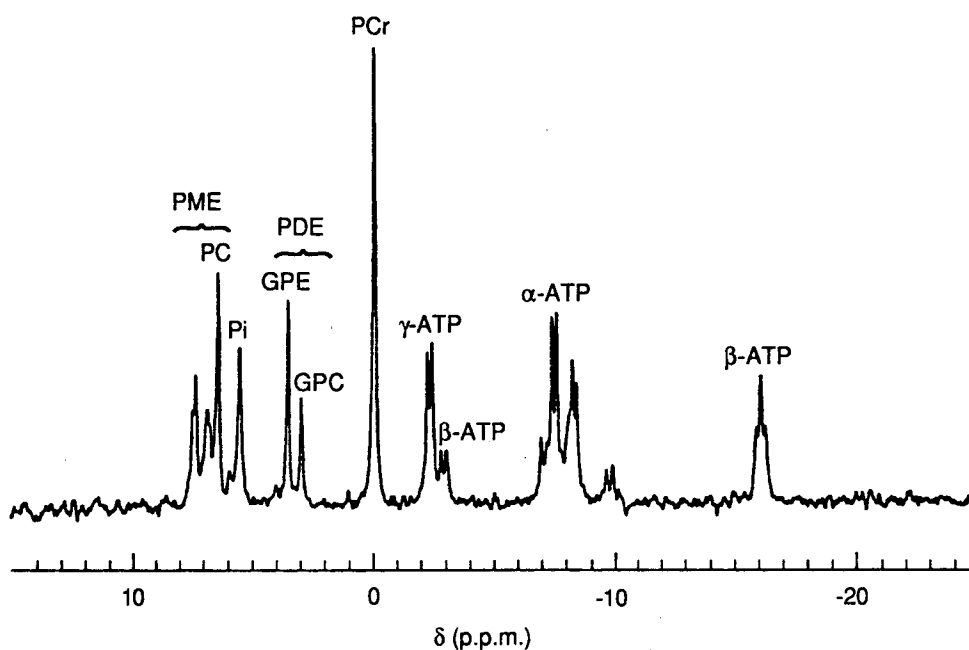


図7 ラットの肝臓の抽出液から得られた ^{31}P -MRSスペクトル
(Ilesらの資料⁴⁾より引用)

PME: Phosphomonoesters

Pi: Inorganic phosphate

PDE: Phosphodiesters

PCr: Phosphocreatine

α -ATP }
 β -ATP } ATP
 γ -ATP }

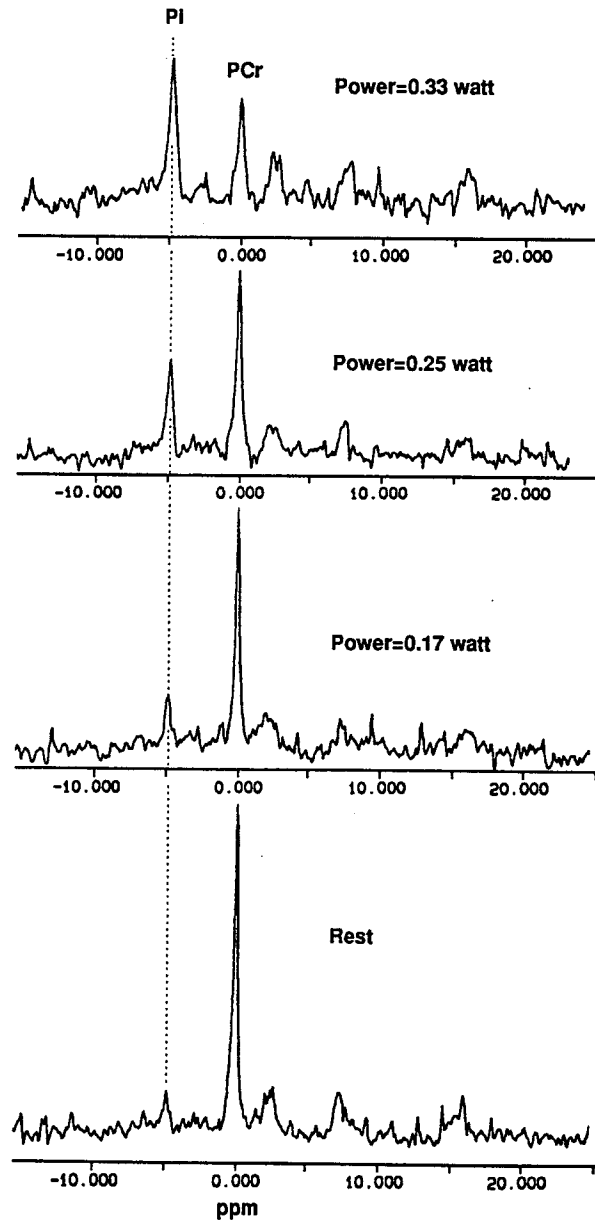


図8 手関節屈曲運動時の ^{31}P -MRS測定例
(垣平の資料⁵⁾より引用)

³¹P-MRSのスポーツ科学への応用

図7はラットの摘出肝臓の抽出液から得られた³¹P-MRSスペクトルである⁹⁾。また、図8にはヒトの前腕屈筋群の運動時における³¹P-MRSスペクトルを示した⁹⁾。³¹P-MRSで検出可能な物質としては、ATP中の3つのリン酸(α、β、γ)、PCr、Pi、PME (Phosphomonoesters)、およびPDE (Phosphodiester) などがある(図7)。ATPについては、α-ATPやγ-ATPのピークにはアデノシン2リン酸(ADP)、ニコチン酸アデニンジヌクレオチド(NAD)、および還元型NAD(NADH)などが含まれることがあるためβ-ATPによりその変化を評価する。通常、ヒトの活動筋を対象としたin vivoでの³¹P-MRS測定においては、主としてPCr、Pi、およびATPが評価の対象とされている。

³¹P-MRSスペクトルからPCrやPiの濃度変化を評価しようとする場合、図8に示すように得られたスペクトルそのものによりそれらの濃度変化を視覚的にとらえることが可能であるが、濃度変化をより客観的に評価するためにはスペクトル上のPCrやPiを定量化する必要がある。測定組織中における特定の物質の濃度は³¹P-MRSで測定されたスペクトルのピークの面積により評価できる。³¹P-MRSスペクトル上のピーク的面積をもとめるためには、それをローレンツ曲線にフィットし面積を算出するという方法が妥当であるといわれている⁹⁾。これまで、測定組織中における物質の実際の濃度と³¹P-MRSスペクトルの面積から評価された推定濃度がほぼ一致することが確認されている⁹⁾。

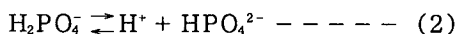
運動時における活動筋の³¹P-MRSスペクトルは、筋収縮に伴う筋の動きやアーティファクトなどが原因となりスペクトルの縦軸(NMR信号強度)のスケールが変化することがある。スペクトル上のピーク的面積変化から測定組織内の物質の濃度変化をより高い精度で推定するためには、³¹P-MRSスペクトル上で検出することが可能でありかつ運動中において一定濃度を維持する標準物質を用い、その面積に対する測定対象物質の面積の比を評価する必要がある。これまでの³¹P-MRSを用いた研究では、標準物質としてMDP(methylene diphosphonate)を用いたものもある⁹⁾が、運動に関連した³¹P-MRS研究ではこの方法を採用したものは比較的少ない。通常、運動に関する³¹P-MRS研究では、運動時においてPCrとPiの濃度を加えた値がほぼ一定であるということ、あるいは運動中ATP濃度が大きく変化しないということから、評価したい物質のスペクトル上の面積をPCrとPiの面積の和やATPの面積で割ることによりその物質の運動時における相対濃度の変化を評価することが多い。

2. 細胞内pH

pHとは、

$$\text{pH} = \log(1 / [\text{H}^+]) \text{ --- (1)}$$

で示されるように、 H^+ イオン濃度の逆数の常用対数値である([]はその中の物質の濃度を意味する)。細胞内のいくつかの緩衝剤と呼ばれる物質は、 H^+ イオンが増加するとそれと化学的に結合しpH低下(酸性化)を緩和する。いくつかの緩衝剤の一つにPiがあるが、通常Piは第1リン酸(H_2PO_4^-)または第2リン酸(HPO_4^{2-})として存在し、両者の間には、



という化学的平衡関係が成立し、平衡定数 K は、

$$K = ([H^+][HPO_4^{2-}]) / [H_2PO_4^-] \text{ ----- (3)}$$

として表わされる。この式を変形し、常用対数で表すと、

$$\log (1/[H^+]) = \log \{(1/K) ([HPO_4^{2-}] / [H_2PO_4^-])\} \text{ ----- (3)'}$$

となるが、ここで左辺は (1) 式より pH であり、また右辺の $\log (1/K)$ は

$$\log (1/K) = pK \text{ ----- (4)}$$

として表される。したがって、(3)' 式は、

$$pH = pK + \log ([HPO_4^{2-}] / [H_2PO_4^-]) \text{ ----- (5)}$$

と表され、この式はヘンダーソン・ハッセルバルヒの式として一般に知られている。

$H_2PO_4^-$ および HPO_4^{2-} の 2 つの Pi は、 ^{31}P -MRS スペクトル上において $37^\circ C$ では 2 つのピークとして認められそれらのピークは 2.4 ppm の差を有するが、実際には両者間の変換が極めて高速であるため 1 つのピークとして観察される。 $H_2PO_4^-$ および HPO_4^{2-} の本来の化学シフト値ならびに ^{31}P -MRS スペクトル上で実際に観察される Pi の化学シフト値をそれぞれ v_1 、 v_2 、および v_m とすると、

$$v_m = v_1 \times [H_2PO_4^-] / [Pi] + v_2 \times [HPO_4^{2-}] / [Pi] \text{ ----- (6)}$$

と表すことができる。この式を変形すると、

$$(v_m - v_1) / (v_2 - v_m) = [HPO_4^{2-}] / [H_2PO_4^-] \text{ ----- (6)'}$$

となり、(5) 式および (6)' 式より、

$$pH = pK + \log \{(v_m - v_1) / (v_2 - v_m)\} \text{ ----- (7)}$$

という式が導き出される^{15, 20}。Taylor ら²⁰ は、この式の pK 値を 6.75、 v_1 を 3.27、 v_2 を 5.69 として、 ^{31}P -MRS スペクトルから得られた Pi の化学シフト値 (v_m) より細胞内 pH を算出している。また、岩根の研究グループ (筆者らもこのグループの一員である)^{5, 6, 10, 11, 12} も、Taylor らと同様の方法で細胞内 pH をもとめている。

3. その他

これまでいくつかの研究により、前述の方法でもとめた物質の相対濃度や細胞内 pH から、ミトコンドリアの有酸素的代謝能を評価したり、 ^{31}P -MRS スペクトルでは検出できない物質の濃度を推定したりする方法が試みられている。

Chance ら^{2, 5} は、定常状態において Pi と PCr の比 (Pi/PCr 比) は ADP 濃度と比例して変化すると論じている。ADP は組織呼吸の速度 (v) を調節する物質として知られているが、ADP 濃度と v の関係は次式で表される。

$$v = V_{max} / (1 + K_m / [ADP]) \text{ ----- (8)}$$

ここで、 V_{max} は最大呼吸速度、 K_m はミカエリス定数である。この式は ADP が Pi/PCr 比と比例関係にあることから、

$$v = V_{max} / \{1 + K_m / (Pi/PCr)\} \text{ ----- (8)'}$$

と表すことができる。無酸素的代謝があまり関与しないような比較的低強度の運動負荷条件

³¹P-MRSのスポーツ科学への応用

下では、どのような被験者でも v の値はほぼ同等であり、この時の Pi/PCr 比が低値を示す被験者では V_{max} の値がより高いということになる。これまでのいくつかの³¹P-MRS研究^{5, 8, 10, 11, 14, 17}では、同じ運動負荷条件下における Pi/PCr 比によりスポーツ選手の有酸素的代謝能 (V_{max}) が評価されている。

その他、³¹P-MRS測定により得られた結果から間接的に評価されるものとして $H_2PO_4^-$ をあげることができる。Wilkieら²⁵ や岩根ら^{8, 10, 11} は、³¹P-MRSスペクトルから得られた Pi の相対濃度と細胞内 pH から $H_2PO_4^-$ の濃度を算出しているが、ここではその方法について説明することとする。

Pi は $H_2PO_4^-$ あるいは HPO_4^{2-} のいずれかのかたちで存在しているので、その濃度は、

$$[Pi] = [H_2PO_4^-] + [HPO_4^{2-}] \text{ ----- (9)}$$

として表すことができる。この式を、

$$[HPO_4^{2-}] = [Pi] - [H_2PO_4^-] \text{ ----- (9)'}$$

と変形し、(5)式に代入すると、

$$pH = pK + \log \left\{ \frac{([Pi] - [H_2PO_4^-])}{[H_2PO_4^-]} \right\} \text{ ----- (10)}$$

となる。(10)式を変形することにより次式が得られる。

$$[H_2PO_4^-] = [Pi] \times (1 + 10^{pH-pK})^{-1} \text{ ----- (10)'}$$

ここで、 pK を Tailorら²⁴ に従い 6.75 とすれば、³¹P-MRSスペクトルから Pi の相対濃度および細胞内 pH をもとめることができるので、 $H_2PO_4^-$ の相対濃度を算出することが可能となる。Wilkieら²⁵ は、この方法と同様の方法により運動時における $H_2PO_4^-$ の濃度変化を観察し、その増加と筋力低下とが直線的関係にあるという結果を得、 $H_2PO_4^-$ 増加が筋疲労の要因の一つであると論じている。

II. 運動時 MRS 測定のためのエルゴメーターの開発

A. 従来のエルゴメーターの問題点

運動時の活動筋における MRS スペクトルを測定するためには適当なエルゴメーターにより運動を負荷する必要があるが、NMRはその装置本体が強力な磁石であるため非磁性のエルゴメーターが不可欠となる。ヒトを対象として運動時に MRS を測定したこれまでの研究では、サイベックス (手関節屈曲運動)¹⁷、荷重負荷方式によるエルゴメーター (グリップ運動)⁷、ゴム球 (グリップ運動)²⁴、圧制御方式エルゴメーター (足低屈運動)²⁰ などが使用されている。これらの内、サイベックスでは負荷が正確に定量できることなどの点で優れているが、この装置を使用する場合には装置自体が磁性を有するので NMR 本体からかなり離れた所に設置し非磁性のクランクを介して運動を行なわなければならないということが測定上大きな問題となる。また、ゴム球を用いエルゴメーターとするという方法は、簡易性や経済性の点で優れているものの正確な定量負荷を与えることや負荷を漸増することが困難である。その他、従来の非磁性体で作製された荷重負荷方式あるいは圧制御方式のエルゴメーターでは、被験者

が発揮する力を定量的にとらえることは可能であるが動作スピードを一定にすることができないなどの欠点をもっている。

B. エルゴメーターの開発

上述のように、これまでの研究で使用されてきたMRS用のエルゴメーターにはいくつかの問題点があり、筆者らはこれらを参考として岩根らのグループとの共同研究により新たなエルゴメーターの開発を試みた⁹⁾。エルゴメーターの開発にあたり筆者らが重要視した内容は以下のとおりである。

- (1) リン青銅、硬質プラスチック、ステンレス、木などの非磁性体を材料とすること。
- (2) グリップ運動および手関節屈曲運動の両方の運動が可能であること。
- (3) 負荷の定量化が可能であること。
- (4) NMR ボア内での運動を検者が外から視覚的に確認できること。
- (5) 運動に同期させてスペクトルを測定するためにトリガー出力装置を装備すること。
- (6) 1回毎の運動のスピードを検者および被験者が確認できること。
- (7) 構造ができるだけシンプルであり、故障が少なく、また故障しても特別な場合を除き簡単に修理できること。
- (8) 電気的な部分がMRSスペクトルのノイズの原因とならないこと。
- (9) できるだけ安価であること。

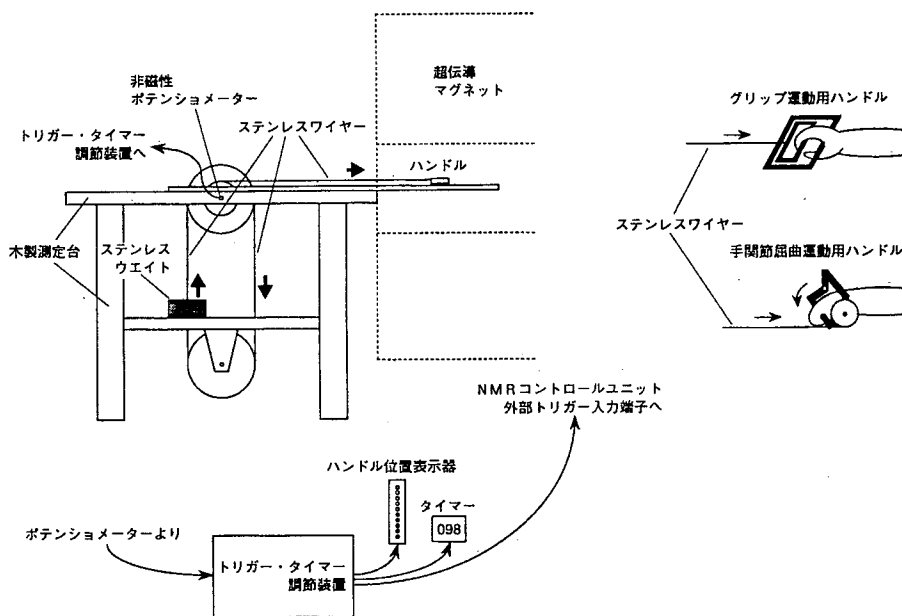


図9 荷重負荷方式非磁性エルゴメーターの略図

³¹P-MRSのスポーツ科学への応用

上記の内容に配慮し、図9に示すようなエルゴメーターを作製した。図に示すように材料はすべて非磁性体であり、このエルゴメーターを用いて³¹P-MRS測定を実施しエルゴメーターがスペクトルのノイズの原因とならないことを確認した。このエルゴメーターでは、構造がシンプルで故障が少なく容易に定量負荷を与えることができるように荷重負荷方式を採用した。運動の種類については、ハンドルを取りかえることによりグリップ運動と手関節屈曲運動のどちらでも採用することができるようにした。また、ポテンシオメーターを装備す

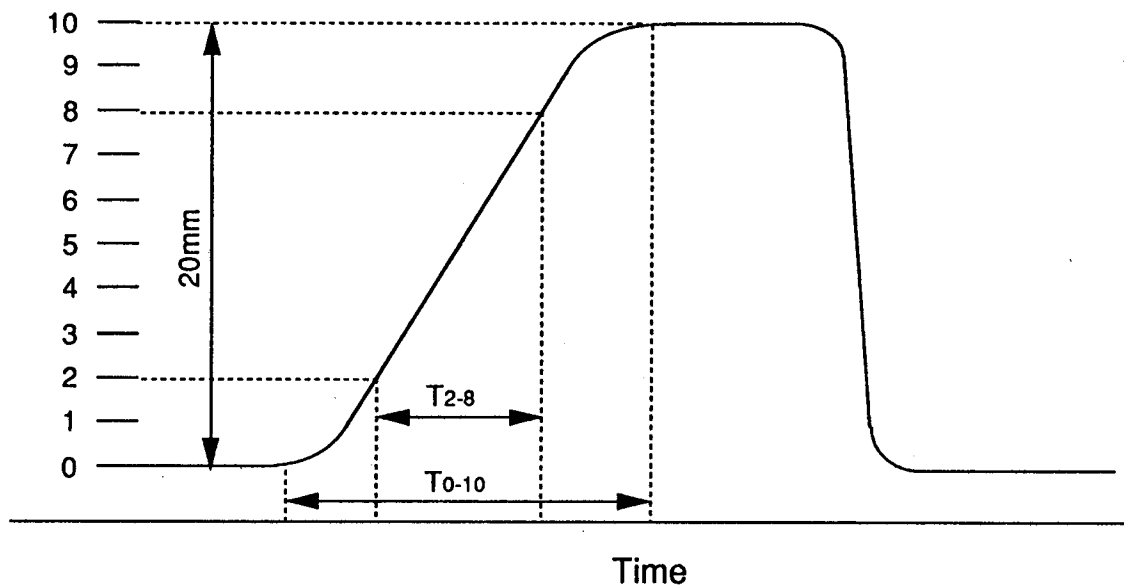


図10 ハンドル位置の変化

ることによりハンドル位置を電気的にとらえ、マグネットの外からハンドルの動きをモニターすることができるようにすると共に、トリガー・タイマー調節装置によりハンドル位置の任意の時点でトリガーパルスを出しその時点でMRS信号を得ることができるようにした。さらに、ハンドルの任意の位置間の時間をmsecの単位で表示し1回の収縮毎のスピードをマグネット外部で把握できるようにした。図10は1回の収縮時におけるグリップ位置の変化を模式的に示したものであるが、グリップスピードが速くなるほど T_{0-10} は短くなる。今回作製したエルゴメーターでは、デジタルタイマーにより図10に示す T_{2-8} をリアルタイムでモニターできるようにした。タイマーで測定された T_{2-8} とグリップ位置変化曲線（ペンレコーダーにより記録）から計測された T_{0-10} の関係は図11に示すように極めて強い直線関係が認められ、 T_{2-8} により収縮スピードを十分に把握し得ることが確認された。通常のグリップ運動時のMRS測定においては、被験者にグリップスピードを調節し T_{2-8} が100msec程度になるように指示しているが、オールアウトに近づくると徐々にグリップスピードが低下し T_{2-8} ははだいに高値となる。筆者らは、このようなことから T_{2-8} の変化を記録することにより筋疲労の進行をある程度評価し得るのではないかと考えている。

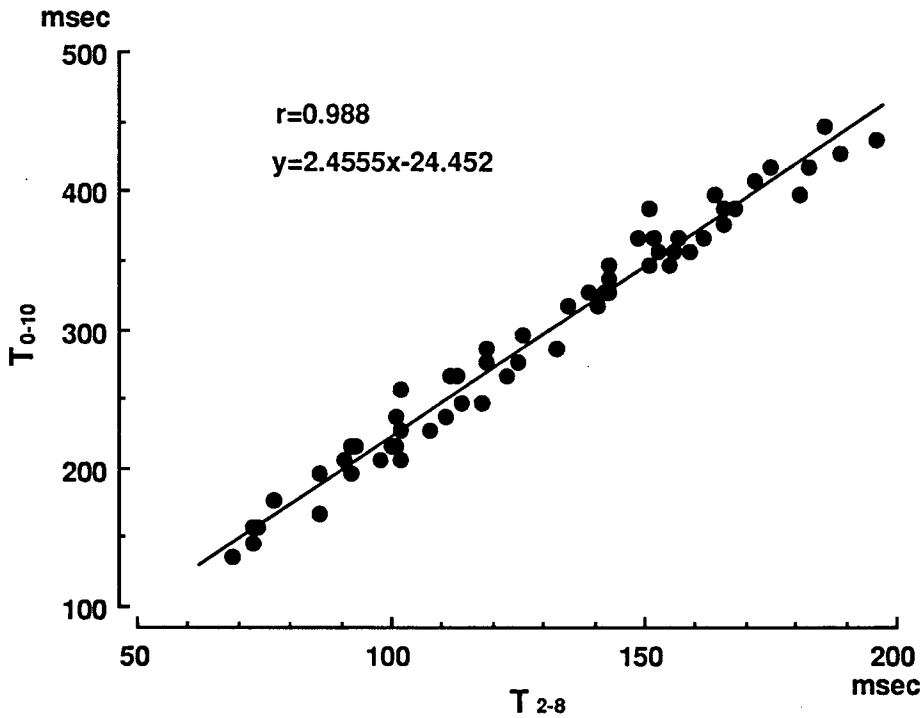


図 11 T_{2-8} と T_{0-10} の関係
 T_{2-8} はタイマーにより測定し、 T_{0-10} についてはレコーダーにより記録したグリップ位置変化曲線から計測した。

Ⅲ. ^{31}P -MRS のスポーツ科学への応用

スポーツ科学における研究の第 1 段階として、スポーツ選手の特徴をとらえるということがある。従来より、スポーツ選手を対象として骨格筋のエネルギー代謝面での特徴をとらえようとする場合、筋生検を施し筋線維組成、エネルギー系酵素活性、あるいは毛細血管密度などを測定するという組織化学的手法が用いられてきた。周知のごとくこの手法には大きな侵襲を伴い、特に現役スポーツ選手を対象としてこのような測定を実施することは極めて困難であった。また、この方法では安静時の測定が通常であり、運動時の筋内のエネルギー代謝に関わる化学物質の変化を連続的に測定することは不可能であった。

近年、NMR の進歩により非侵襲的かつ連続的に筋内の生化学的情報を得ることが可能となった。ここでは、筆者らが岩根らの研究グループとの共同で行なった研究結果を中心にスポーツ選手のエネルギー代謝について論ずることとする。

これまで、いくつかの研究により ^{31}P -MRS を用いてスポーツ選手のエネルギー代謝面での特徴について検討されてきた^{5, 6, 10, 11, 12, 14, 17, 21)}。McCully ら¹⁷⁾ は、一流ボート選手および一般健康常男性を対象に ^{31}P -MRS 測定を実施し、一流ボート選手では前腕屈筋群のミトコンドリア機能が一般健康常男性に比べより優れ、運動時の疲労物質の一つといわれている H_2PO_4^- の増加の

^{31}P -MRSのスポーツ科学への応用

程度がより少ないことを報告している。また、桑森ら¹²⁾は一流プロのモトクロス選手を対象に50% MVC（最大随意収縮力）のアイソメトリックなグリップ運動中の ^{31}P -MRSを測定し（図12）、モトクロス選手では一般健常男性に比べ、

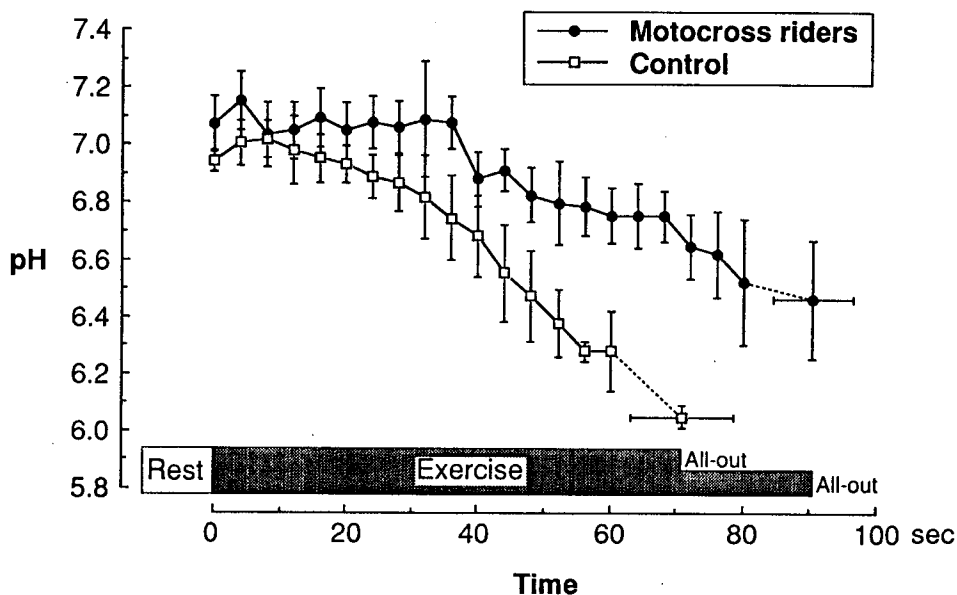


図12 アイソメトリックグリップ運動中における細胞内pHの変化
（桑森らの資料¹²⁾より引用）

(1) 運動時の無酸素的解糖システムの関与がより少ない、(2) 筋細胞内でのpH緩衝能がより優れている、(3) 有酸素的代謝能がより優れている、などの可能性を示唆している。

上記のように、これまでの研究では ^{31}P -MRSを用いてスポーツ選手の筋ミトコンドリアの有酸素的代謝能やいくつかの代謝性疲労要因について検討しているが、黒澤ら⁹⁾は、瞬発的スポーツ種目の選手を含むいくつかの種目のスポーツ選手について ^{31}P -MRSの測定を実施し、スポーツ種目別のエネルギー代謝面での特徴をとらえることを試みている。この研究では、アマチュア相撲選手、陸上競技短距離選手、マラソン選手、およびトライアスロン選手について、漸増グリップ運動時の ^{31}P -MRS測定を実施し、 Pi/PCr 比の変化からこれらのスポーツ選手では筋の有酸素的代謝能が優れること、および運動時の代謝性筋疲労要因の一つとして知られるPCr減少、細胞内pH低下、あるいは H_2PO_4^- 増加のいずれについてもこれらのスポーツ選手では改善されていることを認めている（図13）。

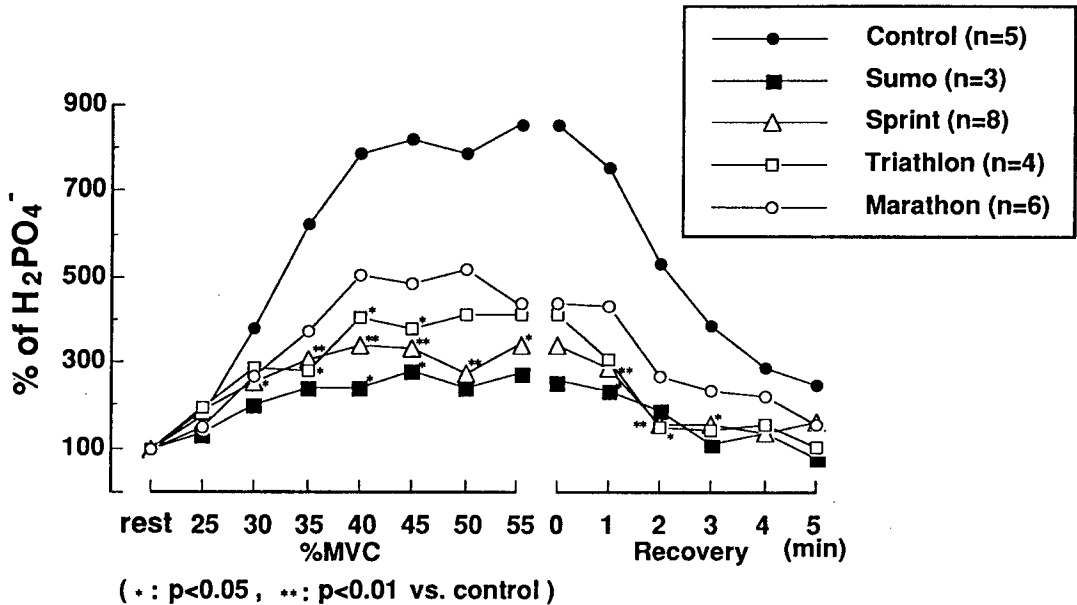


図13 運動時および回復時の H_2PO_4^- の変化
(黒澤らの資料⁹⁾より引用)

黒澤らの研究の測定対象となったスポーツ選手の中の相撲選手および短距離選手は瞬発的スポーツ選手であり、またマラソン選手およびトライアスロン選手は持久的スポーツ選手といえる。これらの2つのタイプのスポーツ種目では³¹P-MRSの測定結果が異なることが予測されたが、この研究では測定結果を各スポーツ種目の選手間で比較しても明らかな差異を認めることができなかった。これまでの研究では、相撲競技はその競技自体は瞬発的であるが練習の過程では持久的な内容がかなり含まれていることを示唆する結果が得られており⁹⁾、また相撲選手の最大酸素摂取量が必ずしも低くないことも報告されている¹³⁾。さらに、スプリントトレーニングに関しては、速筋線維のサブタイプ間の移行(FG→FOG)が生じ速筋線維の酸化能力が向上することが知られている²⁹⁾。このようなことから、黒澤らの研究で測定対象となった瞬発的スポーツ選手(相撲選手および短距離選手)では、その競技自体が瞬発的であっても日常の練習の過程で筋の有酸素的能力が改善されていたのではないかとと思われる。

桑森ら¹¹⁾は、上記の点についてさらに検討するため、純粋な瞬発的トレーニングを実施しているスポーツ選手と持久的スポーツ選手の筋エネルギー代謝を比較している。この研究では、測定対象部位とした前腕屈筋群が瞬発的にトレーニングされたスポーツ選手としてウェイトリフティング選手を、また持久的にトレーニングされたスポーツ選手として硬式テニス選手を選び、これら2種目の選手に加え一般健常男性を被験者とし、グリップ運動時における³¹P-MRSの測定を実施している。その結果、テニス選手群ではコントロール群に比べ、強度増加に伴うPi/PCr比の上昇の程度がより低く、ミトコンドリアの機能がより優れることが確認された。また、筋疲労の代謝性要因として知られる細胞内pH低下、PCr減少、および H_2

³¹P-MRSのスポーツ科学への応用

PO₄ 増加の程度については、いずれの場合もテニス選手群はコントロール群よりも小さい傾向を示した。一方、ウエイトリフティング選手群についても、Pi/PCr比の上昇はコントロール群よりいくらか小さく、代謝性筋疲労要因の抑制傾向が認められたものの、その程度はテニス選手群の場合ほど顕著ではなかった（図14）。

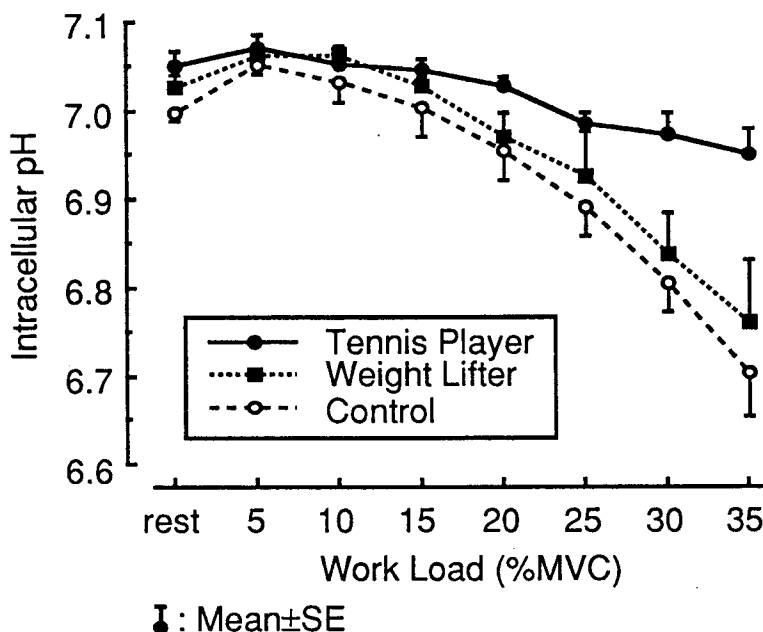


図14 強度増加に伴う細胞内pHの変化
(桑森らの資料¹⁰⁾より引用)

これらの結果から、瞬発的にトレーニングされた骨格筋では持続的にトレーニングされた骨格筋に比べ、ミトコンドリアの有酸素的代謝能や代謝性筋疲労要因の改善の程度がより小さいことが明らかとされた。

これまで、スポーツ選手あるいはスポーツ種目別の選手の筋エネルギー代謝面での特徴について述べてきたが、1つの種目の中でも選手のタイプにより筋のエネルギー代謝能が異なることが考えられる。桑森¹⁰⁾はこの点について検討するため、アマチュア相撲選手を対象にグリップ運動時の³¹P-MRS測定を実施し、異なるタイプの選手の筋エネルギー代謝を比較している。この研究においては、相撲選手では一般健常男性に比べ筋の有酸素的代謝能や代謝性筋疲労要因の面で改善されているが、中でも「よつ相撲」タイプの選手では「おし相撲」タイプの選手に比べそれらの改善の程度がより大きいことが確認された。

以上、スポーツ選手の運動時における骨格筋エネルギー代謝面での特徴について論じた。今後、前述のようなスポーツ選手の筋エネルギー代謝面での特徴が先天的なものであるのか、あるいはこのような特徴がトレーニングにより得られた後天的なものであるのかについてさらに検討する必要がある。この点に関しては今後の課題としたい。

謝 辞

本研究をすすめるにあたり、御指導・御協力頂いた東京医科大学衛生学公衆衛生学教室の岩根久夫教授および藤波襄二教授、ならびに同教室の垣平博臣先生をはじめとするNMR研究グループの方々に心より感謝いたします。

引用文献

- 1) Bangsbo, J., Johansen, B., Quistorff, B., and Saltin, B (1993): NMR and analytic biochemical evaluation of CrP and nucleotides in human calf during muscle contraction. *J. Appl. Physiol.*, 74 (4), 2034-2039.
- 2) Chance, B., Leigh, J. S., Clark, B. J., Maris, J., Kent, J., Nioka, S., and Smith, D. (1985): 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.
- 3) Gardian, D. G. (1985): NMRのパラメーターとその測定, 今井昭一 訳, 医学・生物学のためのNMR——生体系への応用——, 初版, 第6章, 西村書店, 新潟, 107-140.
- 4) Iles, R. A., Stevens, A. N., Griffiths, J. R., and Morris, P. G. (1985): Phosphorylation status of liver by ^{31}P -n. m. r. spectroscopy, and its implications for metabolic control. *Biochem. J.*, 229, 141-151.
- 5) 垣平博臣 (1993): 骨格筋の有酸素的代謝能の評価—— ^{31}P -MRSと近赤外分光法(NRS)を用いて——, *Jap. J. Sports Sci.*, 12 (2), 89-96.
- 6) 核磁気共鳴医学会 編 (1984): 他核種のスペクトロスコピー, NMR医学——基礎と臨床, 初版, 第7章, 丸善, 東京, 185-210.
- 7) 片山憲史, 樋口敏宏, 田中忠蔵, 三船哲郎, 伴眞二郎, 越智秀樹, 行待寿紀, 西川弘恭, 成瀬昭二 (1989): ^{31}P -MRSによるヒト骨格筋エネルギー代謝の観察——臨床用MR装置内での定量的運動負荷の試み——, *日磁医誌*, 9 (3), 161-167.
- 8) 黒澤裕子, 岩根久夫, 桑森真介, 木村直人, 垣平博臣, 浜岡隆文, 藤波襄二 (1992): リン31磁気共鳴分光法(^{31}P -MRS)によるスポーツ選手の骨格筋エネルギー代謝の比較, *体力科学*, 41 (6), 731.
- 9) 桑森真介 (1983): 心拍数からみた相撲競技の練習について, 明治大学教養論集体育学号, 164, 73-88.
- 10) 桑森真介 (1992): 相撲選手の局所筋エネルギー代謝, 日本武道学会第25回大会プログラム, 43.
- 11) 桑森真介, 岩根久夫, 垣平博臣, 浜岡隆文, 村瀬訓生, 木村直人, 黒澤裕子, 藤波襄二 (1993): 持久的スポーツ選手と瞬発的スポーツ選手の運動時エネルギー代謝の比較——リン31磁気共鳴分光法(^{31}P -MRS)による評価——, *体力科学*, 42 (6), 699.
- 12) 桑森真介, 岩根久夫, 垣平博臣, 高波嘉一, 木下修三, 藤波襄二 (1991): 一流モトクロス選手における「握り」運動中の筋細胞内pHに関する ^{31}P -MRS研究, *体力科学*, 40 (6), 732.
- 13) 桑森真介, 佐藤隆 (1988): 学生相撲選手の体力科学的研究——主に全身持久性について——, 明治大学人文科学研究所紀要, 別冊9, 139-157.
- 14) Laurent, D., Reutenauer, H., Payen, J. F., Favre-Juvin, A., Eterradossi, J., Lebas, J. F., and Rossi, A.

^{31}P -MRSのスポーツ科学への応用

- (1993): Discrimination between cross-country and downhill skiers by pulmonary and local ^{31}P NMR evaluation. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 25 (1), 29-36.
- 15) 真野勇 (1988) : NMR 診断法の原理, NMR 診断法——基礎から臨床まで——, 初版, 第2章, 秀潤社, 東京, 27-64.
- 16) 真野勇 (1988) : 生体NMR分析法, NMR 診断法——基礎から臨床まで——, 初版, 第5章, 秀潤社, 東京, 113-142.
- 17) McCully, K. K., Boden, B. P., Tuchler, M., Fountain, M. R., and Chance, B. (1989): Wrist flexor muscles of elite rowers measured with magnetic resonance spectroscopy. *J. Appl. Physiol.*, 67, 926-932.
- 18) 日本磁気共鳴医学会 編 (1991) : NMR 医学総論, NMR 医学——基礎と臨床, 第2版, 第1章, 丸善, 東京, 1-13.
- 19) 日本磁気共鳴医学会 編 (1991) : NMR の原理, NMR 医学——基礎と臨床, 第2版, 第2章, 丸善, 東京, 15-39.
- 20) 日本磁気共鳴医学会 編 (1991) : スペクトロスコーピー, NMR 医学——基礎と臨床, 第2版, 第8章, 丸善, 東京, 211-265.
- 21) Park, J. H., Brown, R. L., Park, C. R., Cohn, M., and Chance, B. (1988): Energy metabolism of the untrained muscle of elite runners as observed by ^{31}P magnetic resonance spectroscopy: Evidence suggesting a genetic endowment for endurance exercise. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 85, 8780-8784.
- 22) Quistorff, B., Nielsen, S., Thomsen, C., Jensen, K. E., and Henriksen, O. (1989): A simple calf muscle ergometer for use in a standard whole-body MR scanner. *Magn. Reson. Med.*, 13, 444-449.
- 23) 田口貞善 (1986) : エネルギー代謝とトレーニング, 宮村実晴, 矢部京之助 編, 体力トレーニング——運動生理学的基礎と応用——, 初版, 第6章, 真興交易, 東京, 126-150.
- 24) Taylor, D. J. Bore, P. J., Styles, P., Gadian, D. G., and Radda, G. K. (1983): Bioenergetics of intact human muscle: A ^{31}P nuclear magnetic resonance study. *Mol. Biol. Med.*, 1, 77-94.
- 25) Wilkie, D. R. (1986): Muscular fatigue: effects of hydrogen ions and inorganic phosphate. *Federation Proc.*, 45, 2921-2923.

(くわもり まさすけ)

(さとう たかし)