

シンポジウムⅠ 「体力評価の科学性を問う」

MRI 及び ^1H , ^{13}C , ^{31}P -MRS を用いての体力評価への応用*

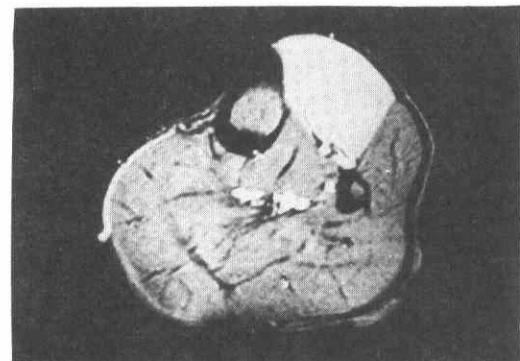
脇元 幸一**

はじめに

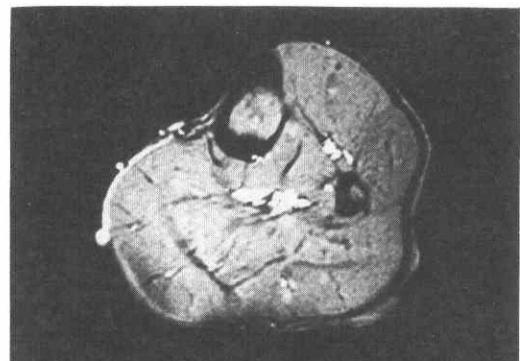
Magnetic Resonance Imaging (MRI), Magnetic Resonance Spectroscopy (MRS) 法は無侵襲に生体における組織の分子レベルの状態を反映する指標である。そこから得られる様々なパラメータは、近年 *in vivo* レベルでの研究を基礎として、神経筋疾患等の診断に重要な役割を果たしつつある。これまで我々は、体力評価に呼吸循環器系のパラメータ、及び心拍数を用いることで、最適な運動強度の検討をしてきた。これらのパラメータは、心機能に加えて運動を負荷された筋肉の組織レベルでの代謝の反映でもある。今回、我々は MRI, MRS から得られるパラメータを駆使することで、理学療法分野への応用を試みている。運動中、運動後の各々のパラメータの変化は、生体内の代謝動向を反映しており、より細かい impairment level の評価から、スポーツなどの高いパフォーマンスレベル下の筋肉の代謝動向が把握できる。これらの評価はパフォーマンスを低下させている疾患周辺の評価にとどまらず、オーバーストレスを惹起しない適確な運動処方を可能とし、トレーニング効果の判定、及び予防医学的観点からもかなり貢献できると考える。

MRI を用いた評価指標

MRI は単なる形態的な情報のみにとどまらず、多分に生化学的情報が内蔵されている。MRI の対象としている原子核はプロトン (^1H) であるため、緩和時間が生体中の含水量、水の構造の割合 (タンパク質等生体高分子に結合しているもの) に大きな影響を受けると考えられる。運動によりプロトンの状況が変化することを利



負荷直後



負荷後 60 分

図 1

用して画像上から解剖学的構築要素、signalintensity および T_1 値 (縦緩和の時定数)、 T_2 値 (横緩和の時定数) を用いて以下に応用する。

① signal intensity の変化…運動を負荷された骨格筋のうち、嫌気的代謝に陥った筋肉は細胞周囲の環境変化により細胞内外のプロトンが増し、 T_1 ・ T_2 値に影響を与え、high intensity を呈す (図 1)。運動負荷直後より、この signal intensity は徐々に低下することから、この変化をプロトンの増減を支配する血流のクリアランスによると考えると、図 2 のような指数関数曲線が

* Evaluation of physical fitness using MRI and MRS

** 舟橋整形外科

Kouichi Wakimoto, RRT : Funabashi Orthopedics

キーワード：核磁気共鳴画像、核磁気共鳴スペクトロスコピー、骨格筋

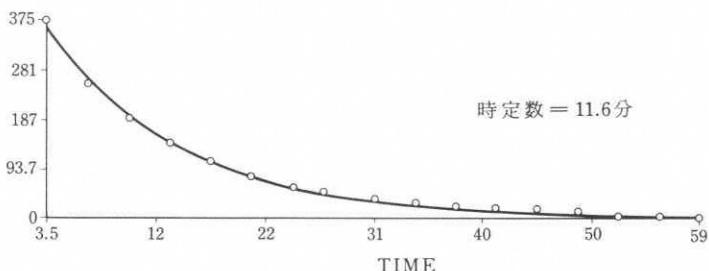


図2 縦軸は信号強度を示す

得られる。この曲線は signal intensity が約 6 割減少するまでの時間、つまり時定数 11.6 分と表せる。この時定数を用いて骨格筋評価のパラメータとした¹⁾。つまり同じ運動に対し、回復が早いほどこの時定数は小さくなることから、トレーニングの効果判定に利用できる。この他、この signal intensity を用いて、あるパフォーマンス下でのオーバーストレスを呈している筋の抽出²⁾、遅発性筋痛の存在を、視覚にて観察できる利点がある。

② 筋断面積の算出…個々の筋肉がはっきりと分離抽出され、容易に同定できることから運動能力を左右する重要な因子である筋断面積の算出が可能となり、筋力測定などと併せて評価できる。

③ 緩和時間による筋線維組成（速筋線維と遅筋線維の割合）の推定・・筋線維組成と MRI から得られる緩和時間 (T_1 , T_2) の間に、非常に高い相関関係を認めている。このことは両線維のうち、速筋線維に ATP 再生速度の違いによる含水量が多く存在し、また ATPase 活性の差異による水の構造状態（自由水と結合水の割合）が異なるためと考えられ、筋力トレーニング前後の

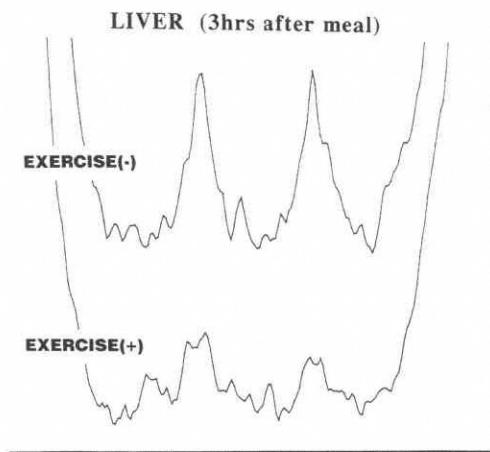


図3

緩和時間を測定することで、速筋線維の肥大の程度を評価できる³⁾。このことはスポーツの適性、トレーニング効果を知る上で実際的な指標となり得る。

MRS を用いた評価指標

④ ^{13}C -MRS

最近、グリコーゲン、グルコースのスペクトルピークの同定が可能となり、肝臓、骨格筋のそれを様々な状況下で検討を試みている⁴⁾。グリコーゲンの貯蔵庫といわれる肝臓は食事の前後と運動時に、そのスペクトルピークは激しく変化する（図3）。一方、骨格筋のグリコーゲンは、肝臓に比し単位体積当たりのグリコーゲンの貯蔵量が少なく、その変化量も小さい。しかし、カーボローディング中の骨格筋のグリコーゲンの動向を観察すると、ローディング前後で明らかな過補償を生じており、グリコーゲン量は以前より上昇していることが確認できた（図4）⁵⁾。カーボローディングは好気的代謝に依存する競技に利用されるが、 ^{13}C -MRS の利用により骨格筋の過補償能を無侵襲に測定可能である。今後、個人レベルでの適切なローディング処方、また臨床での肝、腎、副腎疾患、及び全身性代謝性疾患患者の運動処方及び運動療法の効果判定に有用であると考える。

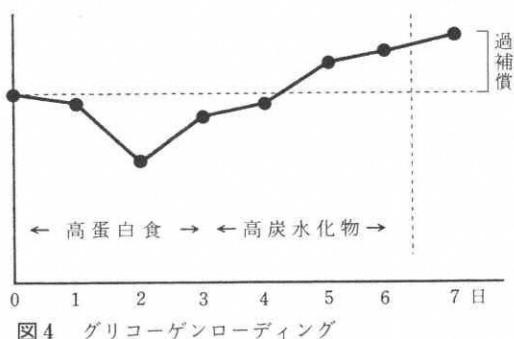


図4 グリコーゲンローディング

縦軸はグリコーゲンスペクトルの面積を示す

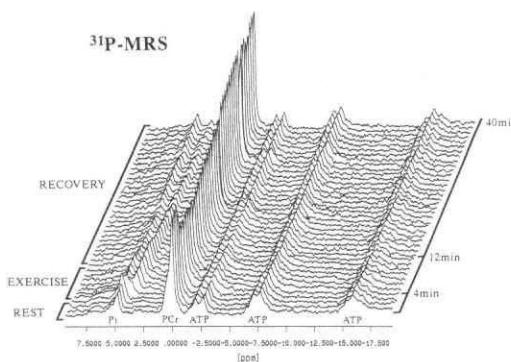


図 5

⑤ ^{31}P -MRS

^{31}P -MRS の利点は、生体筋組織の運動時エネルギー代謝効率、筋細胞内 pH の変化を連続的に測定できることである。図 5 は前脛骨筋に連続的強縮を与えたときの経時的リスペクトルを示す。正常では無機リン (Pi) のピークは低く、クレアチニンリン酸 (PCr), ATP の 3 つのピークが高く観察される。しかし運動が開始されると、エネルギー源として、PCr が动员されるため、PCr は減少し、Pi は上昇する。PCr が枯渇するような運動強度でなければ、ATP レベルはほぼ一定に保たれる。また Pi が上昇する時は解糖系が動き、乳酸が生成され、細胞内 acidosis を呈する。この細胞内 acidosis は、Pi の化学シフト計算により pH の絶対値として求められる。

図 6 は片側性にしひれ、痛み、重だるさを訴える腰部椎間板ヘルニアの患者の両下腿三頭筋に、1 分間 40 ジュールの仕事量を負荷した時のリスペクトルを示し、図 7 にはスペクトルから得られた Pi, PCr の比の変化

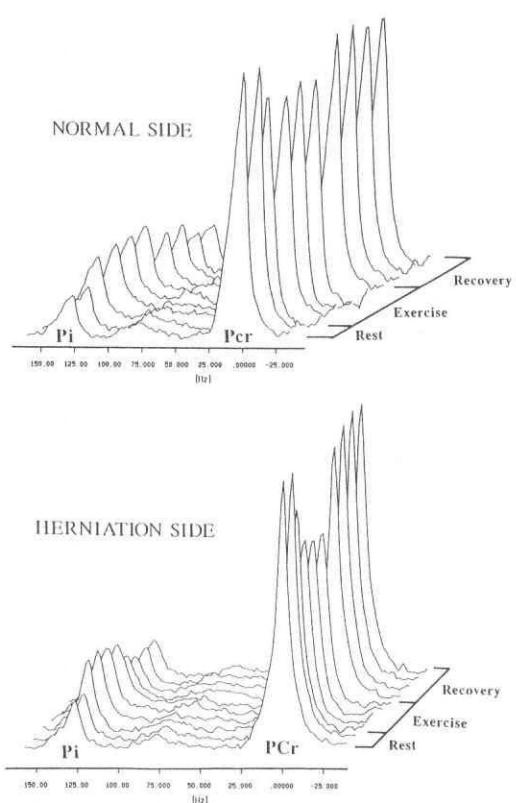
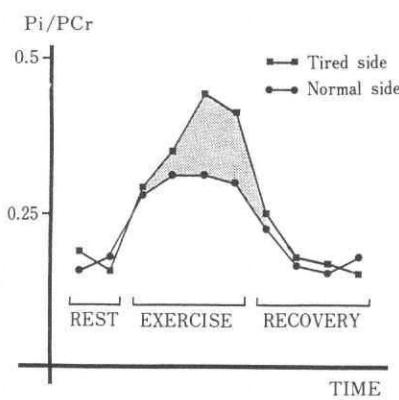


図 6

と、PCr の減少率を示す。安静、回復期にほとんど差はみられない Pi, PCr 比と PCr の減少率が運動時に患側で大きくなっている。このことは、患側でのエネルギー産生に対する筋効率の低下を示唆し、健側に比し少ない負荷で嫌気的代謝に移行しやすいことが考えられ

【Pi/PCr の変化】



【PCr の変化】

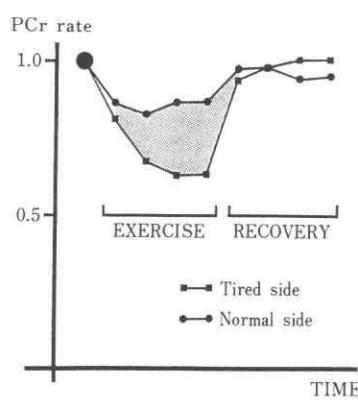


図 7

る⁶⁾。

運動負荷において、ある一定の負荷以上で急激な Pi/PCr、および pH の変化が起こり、血中乳酸濃度はほぼこの変化に対応する。長距離選手と非鍛練者を比べると同一負荷にて、前者では常に Pi/PCr 値が低く、かなり強い負荷にて、はじめて PCr 系がよく使われ、嫌気的代謝に移行する。しかし、後者では、少ない運動負荷量で Pi/PCr、および pH は急激に変化する。これは Pi/PCr の増加に対する仕事率の上昇が大きいほど好気的エネルギーの産生効率が良いことが言える。このように³¹P-MRS を利用して、定量負荷時と回復時の PCr、Pi/PCr 及び pH の動向を観測することで運動能力の評価に利用できる。

むすび

今回、 $\dot{V}O_2$ の測定などでは検討できないような、末梢での筋肉の運動時エネルギー代謝の検討、および評価を様々なパフォーマンス下で行い、身体運動適性評価としての臨床応用への可能性を紹介した。現況では、MRI はかなりの病院に普及されており、比較的簡便な方法で前述した評価が可能である。今後、理学療法分野で評価、正確な運動処方に利用されることを期待したい。

シンポジウムに際し、施設を利用して戴いた科学技術庁放射線医学総合研究所の臨床研究部の先生方、また本研究の遂行に際し終始御指導と御協力を戴いた千葉大学整形外科 西川悟先生、筑波大学臨床医学系放射線医学教室 久野譜也先生および船橋整形外科副院長 白主英明先生をはじめ諸先生に心から感謝いたします。

参考文献

- 1) 西川 悟、脇元幸一・他：骨格筋運動時における MRI、MRS (¹H, ³¹P, ¹³C) の経時的変化の検討。日本画像医学雑誌、9(5) : 426, 1990.
- 2) Fleckenstein JL : Acute effects of exercise on MR imaging of skeletal muscle in normal volunteers. AJR, 151 : 231 - 237, 1988.
- 3) 久野譜也・他：MRI による緩和時間と筋線維組成との関係に及ぼす筋力トレーニングの影響。日磁医誌、8(2) : 73 - 79, 1988.
- 4) Beckmann N, Seeling J and Wick H : Analysis of glycogen storage disease by in vivo ¹³C NMR : Comparison of normal volunteers with a patient. Magnetic Resonance in Medicine, 16 : 150 - 160, 1990.
- 5) 西川 悟、脇元幸一・他：¹³C-MRS によるヒト骨格筋・肝臓のグリコーゲン代謝測定。第17回日本磁気医学会大会講演抄録集、11(S-1) : 357, 1991.
- 6) 西川 悟・他：MRS を用いた骨格筋代謝の検討。千葉 MR 研究会誌、1(2) : 15 - 18, 1990.