

## スポーツ時の運動筋血流量はメンタル トレーニングにより増強できるか？

広島大学 松川 寛二  
(共同研究者) 同 村田 潤  
同 土持 裕胤  
同 小峰 秀彦

### **Does Mental Training Augment the Increase in Muscle Blood Flow During Exercise?**

by

Kanji Matsukawa, Jun Murata,  
Hirotugu Tsuchimochi, Hidehiko Komine  
*Institute of Health Sciences,  
Hiroshima University Faculty of Medicine*

#### **ABSTRACT**

Blood flow to skeletal muscle increases during exercise. The vasodilatation of muscular blood vessels is known to be caused by metabolic products released during exercise. However, a role of sympathetic neural control of muscle circulation during exercise is controversial. We hypothesized that the response in muscle sympathetic nerve activity may initiate muscle vasodilatation preceding metabolic hyperemia during exercise. To solve this question, the effects of mental simulation of previously-performed handgrip exercise on muscle blood flow and vascular conductance were examined using ultrasonic Doppler flowmetry in humans. Heart rate increased during mental simulation of exercise in the same time course and magnitude as those during the actual handgrip exercise. Mean arterial blood pressure did not change significantly during mental exercise whereas it decreased initially and increased during the actual exercise. Both brachial blood flow and vascular conductance increased

approximately 30 % during mental simulation of exercise. The present results suggest that descending central command from the higher brain center induces neurogenic vasodilatation of skeletal muscle blood vessels through the muscle sympathetic nerve.

## 要 旨

スポーツ時に運動筋への血流量は著明に増加する。このメカニズムとして、筋活動代謝により産生された物質が筋抵抗血管を拡張させ筋血流量を増加させると思われる。交感神経系は見込的・予測的な循環調節と深く関係するので、交感神経活動は運動開始時に予測的に筋血流量を増加させ運動準備状態を作るという仮説を考えた。この疑問を検証するために、超音波カラードップラー血流計を用いて無侵襲下でヒト上腕動脈血流量を計測し、運動イメージに対する血流量および血管コンダクタンスの応答を調べた。その結果、掌握運動のメンタルイメージにより高次中枢からの交感神経性調節は筋抵抗血管を拡張させ運動筋血流量を増加させることを明らかにした。この所見から、スポーツ筋運動のパフォーマンスを向上させる手段として、メンタルトレーニングより運動筋への血液供給を見込み的に迅速に行うことが有効であると思われた。また、スポーツ時の運動筋血流量はメンタルトレーニングより増強できることを示唆した。

## 1. 緒 言

スポーツ時に運動筋への血流量は著明に増加する。このメカニズムとして、筋活動代謝により産生された物質が筋抵抗血管を拡張させ筋血流量を増加させると現在考えられている。この考えに基づくと、スポーツ時の運動筋血流量は筋局所代謝により調節を受け自律神経性調節は重要でないと思われる<sup>1)</sup>。しかし、我々は交感神経活動を計測し交感神経性調節が見込的・予測的な循環調節と

深く関ることを報告しており<sup>2), 3), 4)</sup>、交感神経を介して運動開始時に予測的に筋血流量を増加させ運動準備状態を作ることは極めて合目的であると考えた。

しかし、このような運動筋血流量の交感神経性調節は未解決の課題である。この理由として、これまで運動筋の血流量を高精度かつ高時間分解能で記録できなかったことが挙げられる。本研究では、超音波カラードップラー血流計を用いて無侵襲でヒト上腕動脈の血管内径と血流速度をリアルタイムで記録し、血管断面積と血流速度の積から上腕動脈血流量を解析した。交感神経活動による運動筋血流量の調節の可能性を検証するために、本研究はスポーツ時の運動筋血流量に対する運動イメージの影響を明らかにした。

## 2. 研究方法

健康な成人9名が本研究に参加した（男9名、女2名）。年齢と体重は $29.9 \pm 2.3$ 歳（平均 $\pm$ 標準誤差）と $64.8 \pm 3.2$ kgであった。全員に実験内容

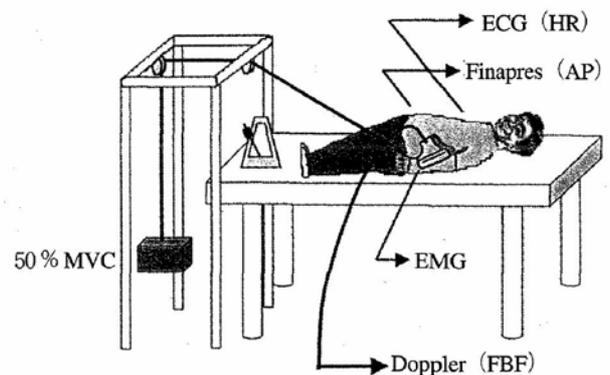


図1 実験セットアップ  
MVC, 最大努力筋収縮; ECG, 心電図; HR, 心拍数; AP, 動脈血圧; EMG, 筋電図; FBF, 上腕動脈血流量。動脈血圧はフィナプレス (Finapres) を用いて、上腕動脈血流量は超音波カラードップラー血流計 (Doppler) を用いて計測した

を説明し参加の同意を得た。

図1に実験装置や計測項目を表す。被験者はベッドの上に仰臥位で横になり、ハンドルを握り利き手で動的掌握（ハンドグリップ）運動を行う。その場合、メトロノームのリズム音に一致させて、1秒間収縮-1秒間弛緩という2秒周期のON-OFF運動を行わせた。実験前に最大努力握力（MVC）を計測し、最大握力の50%に相当する運動負荷（おもり）を与えた（図1）。

### 2. 1 実験プロトコール

図2に示すように、次の3種類の実験操作を順次繰り返した。各動的ハンドグリップ運動の持続時間は1分間であり、30回の収縮を50%の運動強度で行った。

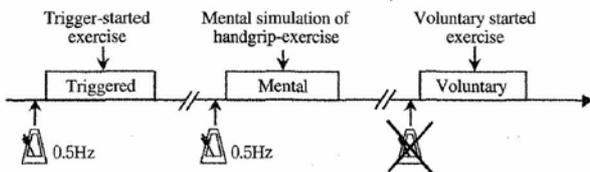


図2 実験プロトコール

#### 1) トリガー運動：

カウントダウン合図により運動開始する。メトロノーム音に同期してハンドグリップ運動を行う。

#### 2) メンタルイメージ：

同じカウントダウン合図により最初に実施した運動のイメージを開始する。イメージ中もメトロノーム音を与える。

#### 3) 自発運動：

全く自発的に運動を開始する。運動開始後も自分のリズムで運動を行う（メトロノーム音なし）。

### 2. 2 計測項目

標準四肢第2誘導を用いて心電図（ECG）を計測し、ECGからR-R間隔ならびに心拍数（HR）を計測した。非利き手の指にフィナプレス（Finapres）カフを装着し動脈血圧（AP）を連続

的に計測した。AP波形を時定数1秒で積分し、平均動脈血圧（MAP）を得た。一方、利き手側では運動筋から筋電図（EMG）を記録した。また超音波カラー Doppler 血流計（GE, Logic-700）を用いて上腕動脈内径および血流速度の画像データをリアルタイムで30フレーム/秒の速度でビデオに録画した（図3）。画像を再生しコンピュータに取り込んだ後、NIHイメージ処理プログラムを用いて5秒間に含まれる3-5心拍の平均血流速度（VEL）を計算した。また同じタイミングの上腕動脈の平均内径（ID）を計算した。これらのデータから、各時刻の上腕動脈血流量（FBF）ならびに上腕動脈血管コンダクタンス（FVC）を次式で計算した。

$$FBF = VEL \cdot \pi ID^2 / 4$$

$$FVC = FBF / MAP$$

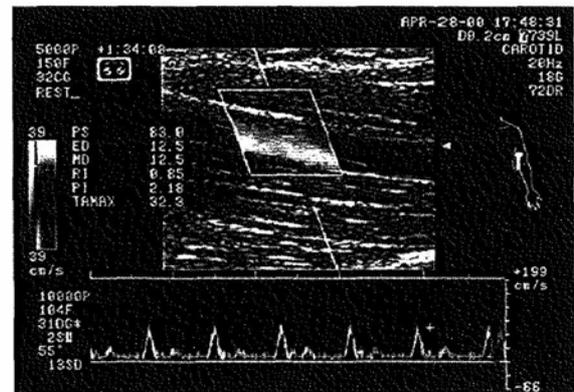


図3 上腕動脈の血管内径と血流速度の同時記録の一例 超音波カラー Doppler 血流計を用いて血管内径（上図）と血流速度（下図）をリアルタイムで記録した

### 2. 3 データおよび統計的解析

データを実験操作前、中および後それぞれ1分間計測した。データを2-5秒ごとに記録した。実験操作による統計的に有意な変化があるか調べるため、これらのデータに対して1元配置分散分析を試みた。もし有意なF-valueが得られたならば、おのおのの平均値と安静値とをDunnnett法を用いて比較した。有意水準を5%とし、データは平均値±標準誤差で表す。

### 3. 研究結果

#### 3. 1 心拍数と動脈血圧の変化

安静時の心拍数と平均動脈血圧はそれぞれ  $69 \pm 3.3 \text{ beats/min}$  と  $86 \pm 3.3 \text{ mmHg}$  であった。3種類の実験操作間で安静時心拍数や平均動脈血圧には差異が見られなかった。図4に、実験操作(トリガーあるいは自発的の掌握運動または運動イメージ)に対する心拍数と平均動脈血圧の変化をまとめる。

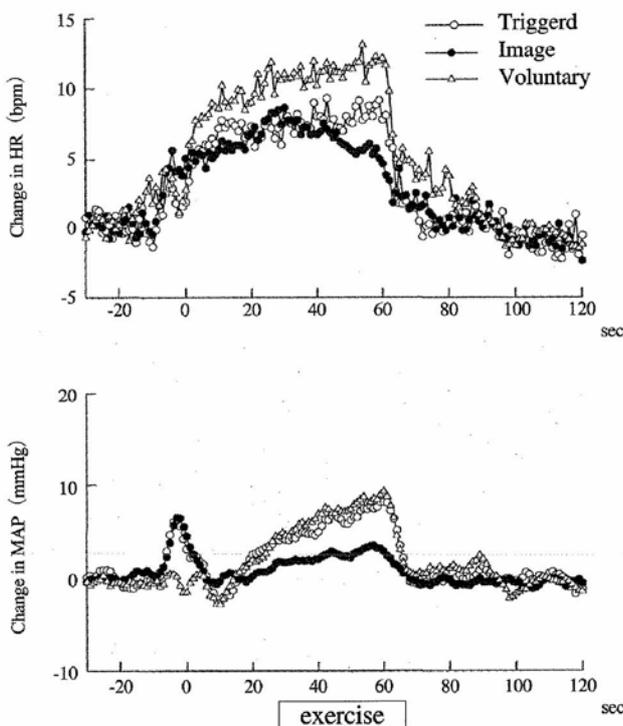


図4 合図トリガ掌握運動(○), 自発的運動(△)および運動イメージ(●)に対する心拍数(HR)および平均動脈血圧(MAP)の変化

トリガー掌握運動では、カウントダウン合図により心拍数は運動開始前から増加し始め、運動中にさらに増加した。心拍数の最大増加は  $9 \pm 2 \text{ beats/min}$  であった。対照的に、合図を使用しない自発運動では、心拍数は運動開始と同時に急激に上昇した。また心拍数増加の最大値 ( $13 \pm 2 \text{ beats/min}$ ) も大きかった。一方、カウントダウン合図により運動イメージを行わせた場合、心拍数は合図により増加し始めた。その時間経過はトリ

ガー掌握運動の場合と一致した。運動イメージ中も、心拍数はさらに増加し最大値は  $9 \pm 3 \text{ beats/min}$  であった。興味深いことに、トリガー運動と運動イメージ間で心拍数変化やその時間経過に差は観察されなかった。

平均動脈血圧の変化も興味深い。トリガー運動と運動イメージでは合図直後による動脈血圧の一時的な上昇がみられたが、自発運動ではそのような血圧上昇は観察されなかった。トリガー的あるいは自発的であろうと掌握運動を実際に行った場合、運動開始後の動脈血圧応答の時間経過はよく似ていた。すなわち一時的な血圧下降とその後の血圧上昇 ( $8\text{-}9 \text{ mmHg}$ ) である。この血圧上昇は運動終了まで持続した。対照的に、運動イメージでは、カウントダウン合図による血圧の一時的な上昇に続く、血圧下降および血圧上昇は殆ど観察されなかった。

#### 3. 2 上腕動脈の血流量および血管コンダクタンスの変化

いずれの実験操作においても上腕動脈の平均血管内径はあまり変化しなかったため、上腕動脈の平均血管断面積は実験中ほぼ一定であると思われる。そのため血流量は血流速度に比例していた。ハンドグリップ運動が始まると、体動のため血流量の計測は困難であった。しかし、運動終了直後に上腕血流量は著明に増加していたので、運動中にも増加しているものと思われる。

運動イメージに対する上腕動脈の血流量および血管コンダクタンスの変化を図5に表す。カウントダウン合図により血流量ならびにコンダクタンスはイメージ直前にわずかに減少した。運動イメージの開始と同時に、血流量およびコンダクタンスは急激に増加した。運動イメージ中、この増加は持続した。上腕動脈血流量の最大増加は  $30 \pm 34\%$  であった。また血管コンダクタンスの最大増加は  $31 \pm 37\%$  であった。イメージ終了後に、血

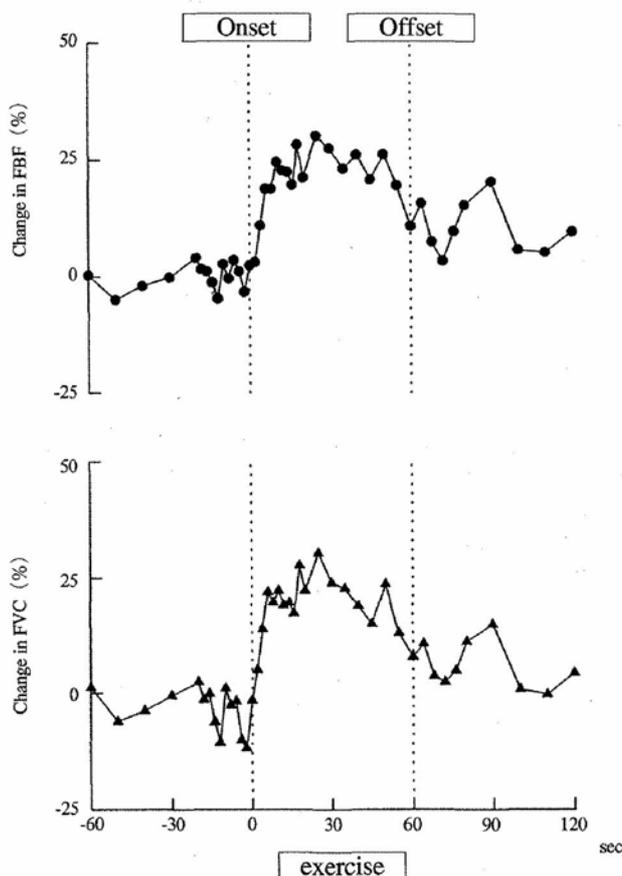


図5 運動イメージに対する上腕動脈血流量 (FBF) および血管コンダクタンス (FVC) の変化

流量およびコンダクタンスは安静レベルに戻った。

#### 4. 考 察

本研究結果は、掌握運動のメンタルイメージにより肢血管拡張が起こることを明らかにした。運動実施にともなう著明な代謝性血管拡張と比較すると小さいが、運動イメージによる血管コンダクタンスの上昇は約30%であり、それは肢血流量を同程度増加させた。運動イメージ中にはEMG活動は現れなかったため、この血管拡張は筋収縮に伴う代謝性血管拡張ではない。この発見は交感神経活動を介する神経性血管拡張の存在を明白に示している。運動のメンタルイメージ中、高次中枢から脊髄運動ニューロンに至る運動系下降路は抑制されているが、高次中枢から脊髄交感神経節前ニューロンに至る経路は活性化されていると想像される。

#### 4. 1 血管拡張部位

運動イメージにより上腕動脈の血流速度は増加したが血管内径は変化しなかったため、上腕動脈のような太い分配動脈では拡張が起こらないことが判明した。運動イメージ中の血管拡張応答は上腕動脈の下流域にある抵抗血管の拡張に起因すると思われる。血管拡張は筋肉血管で起こるのか皮膚血管で起こるのかは不明であるが、おそらく筋肉内小動脈や細動脈が拡張部位であろう。骨格筋の血管は交感神経支配を受ける。交感神経はアドレナリン作動性線維、コリン作動性線維および一酸化窒素 (NO) 作動性線維を含有する。アドレナリン作動性線維は $\alpha$ 受容体を介して筋血管を拡張させ $\beta$ 受容体を介して筋血管を収縮させる。すなわち血管平滑筋細胞にある受容体のタイプと数により応答性が決定される。コリン作動性線維は主に筋小動脈を著明に拡張させる<sup>5)</sup>。NO作動性線維も筋血管を拡張させる。運動イメージに伴う筋血管拡張にはアドレナリン作動性線維の活動減少またはコリン作動性線維やNO作動性線維の活動増加が関係すると思われる。間脳の自律神経中枢である視床下部の防衛野と呼ばれる領域を電気刺激した場合、交感神経コリン作動性線維が選択的に興奮し筋小動脈を著明に拡張させる<sup>5), 6)</sup>。運動イメージに伴う筋血管拡張にも、このような交感神経コリン作動性拡張が関係するかもしれない。

#### 4. 2 心臓・血管運動系

運動イメージ時みられる心拍数応答の大きさや時間経過は、合図トリガー掌握運動あるいは自発的な掌握運動の場合とほぼ同様であった。対照的に、運動イメージでは、動脈血圧はカウントダウン合図による血圧の一時的な上昇を除いてあまり変化しなかった。実際に掌握運動を実施した場合には、運動初期に血圧下降および引き続いて血圧上昇が観察された。この結果から、心拍リズムは運動イメージ時におこる高位中枢の影響を強く受

けている。逆に考えると、実際の運動実施時にも高次中枢性に心拍リズムが増加することを示唆している。一方、血管運動系には運動イメージによる高次中枢の影響が少ないのかもしれない。運動実施時の昇圧は運動筋からの反射性調節による誘発されたものかもしれない。メンタルイメージ時に動脈血圧変化が少なかった理由として、上腕血管コンダクタンスの増加は心拍出量の増加と均衡するためかもしれない。

## 5. まとめ

本研究は、運動イメージが心拍リズムならびに筋血流量に影響を及ぼすことを明らかにした。高次中枢からの交感神経性調節は筋抵抗血管を拡張させ運動筋血流量を増加させることができた。この所見から推測すると、スポーツ時の運動筋血流量はメンタルトレーニングより増強できると思われる。スポーツ筋運動のパフォーマンスを向上させる手段として、メンタルトレーニングより運動筋への血液供給を見込み的に迅速に行うことが可能になるだろう。メンタル学習を繰り返し行うことにより、より精緻な中枢プログラムが形成され効率的な運動筋循環の制御が可能になるかもしれない。特にこのような調節は短持続の瞬発的な競技スポーツにメリットを与えられる。

## 文 献

- 1) J.T. Shepherd; Circulation to skeletal muscle. In: *Handbook of Physiology, The Cardiovascular System, Peripheral Circulation and Organ Blood Flow*. Bethesda, MD: Am. Physiol. Soc., p319-370 (1983)
- 2) K. Matsukawa, J.H. Mitchell, P.T. Wall, L.B. Wilson; The effect of static exercise on renal sympathetic nerve activity in conscious cats. *J. Physiol. (Lond.)* 434, 453-467 (1991)
- 3) K. Matsukawa, J. Murata, T. Wada, Augmented renal sympathetic nerve activity by central command during overground locomotion in decerebrate cats. *Am. J. Physiol.* 275, H1115-H1121 (1998)
- 4) K. Matsukawa, Central control of the cardiovascular system during exercise. In: *Exercise, Nutrition, and Environmental stress*. Vol. I. Cooper Publishing Press, p39-64 (2001)
- 5) K. Matsukawa, T. Shindo, M. Shirai, I. Ninomiya; Direct observations of sympathetic cholinergic vasodilatation of skeletal muscle small arteries in the cat. *J. Physiol. (Lond.)* 500, 213-225 (1997)
- 6) K. Matsukawa, T. Shindo, M. Shirai, I. Ninomiya, Nitric oxide mediates cat hindlimb cholinergic vasodilatation induced by stimulation of posterior hypothalamus. *Jpn. J. Physiol.*, 43, 473-483 (1993)
- 7) J.H. Mitchell; Neural control of circulation during exercise. *Med. Sci. Sports Exer.*, 22, 141-154 (1990)