

II. 本プロジェクトの研究成果の概要

5年間のプロジェクト成果を統合的に理解できるまとめをするようにした。その統合的視点として、「運動特性との関連からみた運動時の血流再分配」、「セントラルコマンドと反射性制御からみた運動時の循環調節機構」、「さまざまな対象者の身体特性からみた運動時の循環適応」の3点とした。そして、最終的に本プロジェクトの最終目標であるエビデンスに基づき、「健康・体力づくり運動プログラムの構築に向けた提案・留意点」をまとめた。

1. 運動特性との関連からみた運動時の血流再分配

運動は、活動する骨格筋への血流量を増加させると同時に、運動指令を出す脳、運動を支援する心臓や肺への血液供給を適切に調節することが必要である。しかし、血液を循環させる心臓の拍出能力には限界があること、生命維持に必要な調節が不可欠であることなどから、これらの臓器への血流調節だけでなく、活動筋以外の臓器や組織への血流再分配が必要となる。逆に言えば、運動時の各器官・組織への血流量変化は、それら調節の結果として起こったものである。したがって、それらを把握することは、その背後にある調節機構を解明する有力な手がかりになる。一方、循環経路の動脈側と静脈側をつなぐ間に介在する骨格筋の活動は、循環に対して物理的あるいは代謝性に干渉する。そのため、骨格筋の活動特性が循環応答を修飾する極めて大きな要因である。そこで、運動特性と関連させながら、運動時の血流再分配を明らかにし、その背後にある循環機構についてまとめた。

1.1 骨格筋、脳、腹部内臓への血流分配

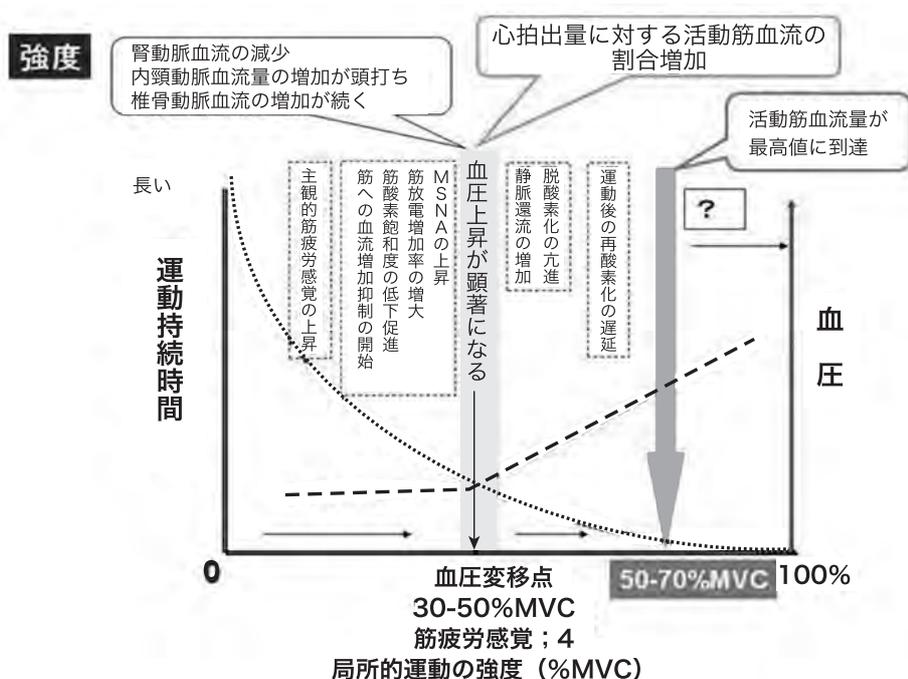
一般的に心拍出量は運動強度や活動筋量の増加に連動して変化するとされている。しかし、本プロジェクトでは、局所的な小筋群の運動の場合は、両者が必ずしも連動した変化を示さず、骨格筋の血流需要に対して末梢的な対応をすることもあることが示された⁵⁾ (Shimizu and Kagaya 2004)。

運動指令を出す脳への血流再分配を、内頸動脈と椎骨動脈の2つの経路から調べたところ、内頸動脈経路では静的および動的運動時に動脈血圧および心拍出量が著しく上昇しても、血流量の変化は見られな

いのに対して、椎骨動脈経路では運動による血圧および心拍出量の上昇に伴い血流量が増加することが明らかになった⁷⁾。活動筋への動脈血流は筋収縮時には阻害され、筋の弛緩期に増加する。一方、活動筋からの静脈血の流出は筋活動期に加速され、筋弛緩期には減速し、両者は、筋内圧の局所的变化により相互に関連しているが、一義的ではない⁴⁾。また、筋の発揮張力が極めて低い場合であっても、ストレッチのように筋線維が伸長すると、動脈側からの血流の逆行成分が増えて血流量は減少し、ストレッチ終了後には動脈側での加速、それに連動した静脈側の流出増加が起こることがわかった³⁾。

骨格筋の血流がどこまで増えるかについてはなお議論が続いている問題である。この課題に関する先行研究は、主として代謝性の血管拡張能を調べたものが多かったが、酸素運搬系としての血流量の役割と考えると、運動中にどこまで増加するかが重要になる。本プロジェクトでは運動時最高値がどれくらいに達するかを知る前提条件として、最高血流量に達する運動条件を明らかにしようとした。その結果、動的運動時筋弛緩期の血流量については、運動強度とテンポの増加に伴って増加し、両者の組み合わせによって運動時血流量が最高になるのではないかとの見解を得た⁴⁾。また、活動筋での血流増加は酸素需要に応じて酸素輸送を高めるためであるが、閉塞性動脈硬化症保有者に多段階負荷運動を実施した結果では、安静時には患側での血流量が低いのに対して、運動時には患側の血流量が健側より増加して、虚血に伴う骨格筋酸素消費量を代償する現象が見られた⁶⁾。運動の物理的特性と代謝性特性の両面から、酸素供給系としての血流動態を捉えることが重要であることが示された。

運動に直接関与しない臓器である腹部内臓への血流量は、運動時に骨格筋へ血流を優先的に分配するために減少するとされてきた。しかし、静的・動的運動時の腎動脈と上腸間膜動脈の血流速度を調べると、腎動脈では血流速度減少が見られたが、上腸間膜動脈では顕著な変化は見られなかった。すなわち、運動時の腹部内臓器官への血流再分配は、一律の変化ではなく、本プロジェクトで調べた運動の範囲では、消化器官血流量は腎動脈血流量のような著しい減少がみられなかった⁷⁾。



図II.1-1 血流変位点を基準とした運動強度と血流再配分

1.2 運動の時間経過に伴う循環・代謝応答の変化

静的筋活動開始直後には筋内圧の上昇により、動脈側からの流入が低下し、静脈側からの血液流出は加速される⁴⁾。また、運動開始初期（約30秒程度）の動的運動では、心拍出量の増加に先行して活動筋への血流量が急速に増加するとされている。一方、運動開始初期の非活動肢の血流量変化をみると、強度依存で一過性の血流量の増加が見られ、それに続いて強度依存の血流減少が起こった（Yoshizawa *et al.* 2008）。すなわち、筋収縮開始と同時に起こる動静脈血流勾配の増加⁴⁾等の作用によって、運動開始初期から活動筋での血流増加が素早く起こるものの、全身性の血管収縮作用は高まらずに、この時期には血流再配分は適切になされていないことが示唆される。非活動肢での血流量増加や、総末梢血管抵抗の減少により血圧が低下することは¹⁾それを支持する結果であると考えられる。

律動的な運動が持続すると、活動筋での血管拡張により動脈血流量の増加が起こり、筋血流量が増加する。そうすると、筋活動による静脈側の血液流出が、続いて起こる動脈血流入量と密接な関係を保つようになることがわかっている⁴⁾。

運動が終了すると、静的筋活動後は急激な血流増加が起こり、運動後の血流は約3拍目の心周期で最高

値に達する（Ohmori *et al.* 2006）。この時期には静脈血流は安静時以下に減速し、動脈血流量が最高値に達し、筋の血管床への血液再充満が起こってから静脈血流が安静レベルに復帰した⁴⁾。

運動後の筋の酸素化動態の回復の速さは運動中の筋の代謝を反映しているので、筋線維組成の異なる深部と浅部において回復の速さ（ $T_{1/2}$ ）が異なるかどうかを検討したが有意な差は見られなかった⁸⁾。

1.3 運動強度と血流再配分

運動プログラムを考える上で、運動強度は極めて重要な運動条件である。本プロジェクトでは運動強度を筋収縮強度と収縮頻度から検討した。筋収縮強度がある強度を超えると筋交感神経の亢進が起こる（Saito *et al.* 1986）ことが知られているが、その結果、強度変化に対する血圧上昇が顕著になる（Kagaya *et al.* 2001）。そこで、血圧上昇が高くなる負荷（血圧変移点負荷）を基準として強度をとらえ、本研究の血流再配分の成果をまとめた（図II.1-1）。

活動筋への血流量が運動負荷強度の増加に伴って増加し、頭打ちになるかどうかは議論のあるところである。本プロジェクトでは動的膝伸展運動・足底屈運動や間欠的な静的掌握運動において検討し、前者では頭打ちが観察され、後者では筋弛緩期血流が負荷の増加とともに増加するという結果を得た^{1), 4)}。動的・静的

運動ともに、運動後血流量に対する運動中血流量の比は、血圧変移点負荷とほぼ類似の負荷強度で急激に低下し、運動中の血流需要を満たす割合が低くなることが確認された¹⁾。また、強度が高くなると、運動持続に伴う筋の電気活動漸増の割合が高くなり、筋疲労耐性の低い筋が動員されるようになることが示唆されたが、その強度は血圧変移点と類似であった¹⁾。筋の酸素代謝をみると、運動中の活動筋酸素化動態が負荷強度に対して低負荷とは異なる対応をする¹⁾ようになるのは、血圧変移点負荷よりやや低い負荷からであった⁴⁾。さらに、運動中の有酸素性エネルギー機構関与の度合いを、運動後の筋酸素動態（再酸素化時間 $T_{1/2}$ ）からみると、強度に対して指数関数的な延長を示し、有意な延長を示すようになるのは血圧変移点よりさらに高い強度においてであった⁸⁾。

次に、運動中、活動筋での変化を中心に身体の様々な変化を統合して感知する主観的筋疲労感覚(10段階)は、血圧変移点より低い負荷(38% MVC)から急上昇した。血圧変移点に対応する値は4.0であった⁴⁾。

骨格筋への血流量が心臓の拍出量とどう対応するかをみると、局所的な運動(足底屈運動)では、活動筋への動脈血流量が低負荷から増加を開始し始めるが、心拍出量(中心循環)は中等度負荷にならないと増加しなかった⁹⁾。すなわち、低負荷では、心拍出量の増加を伴わずに活動筋への血流再分配が起こり、強度が高くなると心拍出量を増加させて骨格筋への血流再分配を行っていることが明らかになった。また血圧が上昇するような強度の高い負荷では、脳への血液を供給する1つの経路である椎骨動脈の血流増加が見られた。それに対して、腹部内臓においては腎動脈での血流減少が確認された⁷⁾。

1.4 運動時の循環に対する重力の影響

本プロジェクトでは、循環系に対する重力の影響を、活動体肢の位置を変化させて検討した⁴⁾。掌握運動時の前腕を心臓より下にすると、筋活動中止期の血流量が有意に変化し、上腕動脈では増加、静脈では減少を示した。近赤外線分光法の総ヘモグロビン濃度変化からみた筋血液量は下垂で増加した。また、重力負荷を一定にして、血液貯留状態を変えた下肢の運動条件では、動脈静脈血流量には相違が見られず、30分程度では、貯留血液量レベルの差は影響し

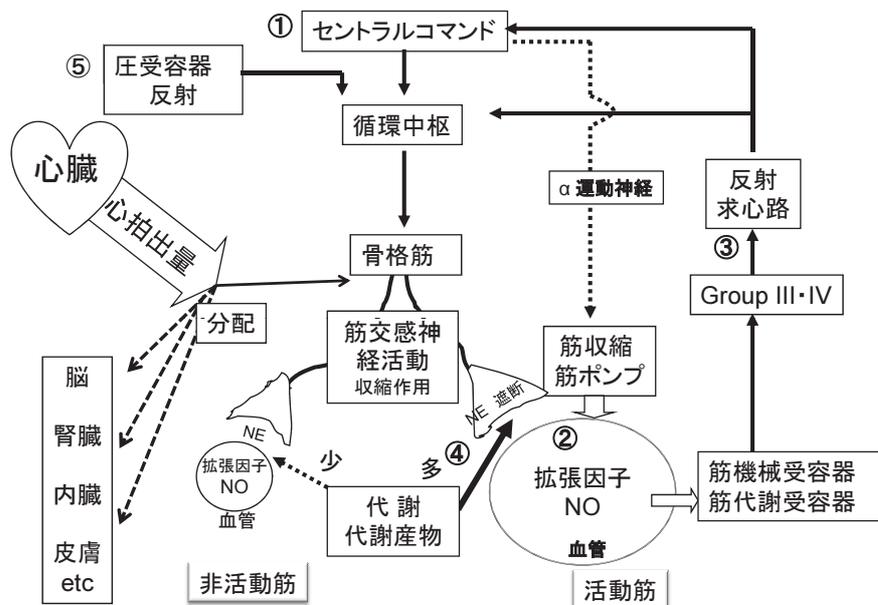
ないことが示された。

2. セントラルコマンドと反射性制御からみた運動時の循環調節機構

運動時の適切な血流再分配には、局所性調節に加えて、神経調節が必要である(図II.2-1参照)。運動は、脳の運動中枢から出る運動指令が α 運動神経を介して筋を収縮させることにより発現する。このような運動指令と並行して延髄の循環中枢に情報が送られる。この高位中枢から循環中枢に入力される情報をセントラルコマンドと呼び、運動開始に先行して起るフィードフォワード制御と考えられてきた。セントラルコマンドは運動に対する意思、頑張り、努力感といった主観的運動強度や筋疲労感覚を反映するといわれている。最近ではセントラルコマンドの概念が拡大され、筋収縮が伴わない運動想起や運動準備期に生じる循環反応もセントラルコマンドに起因すると考えられている。セントラルコマンドの発生回路と神経路および標的器官は部分的なデータがあるのみである。特に人における標的器官については、心臓、皮膚血管、腎以外はあまり調べられてはいない。また、運動(筋活動)が発現すると循環中枢に活動筋から反射性入力情報が伝えられる。これはフィードバック制御経路であり、活動筋に生じる機械的変化および化学的(代謝性)変化を刺激としてGroup III, IV求心性神経を介して循環中枢に連絡する。それらを筋機械受容器反射と筋代謝受容器反射と呼ぶ。さらに常時血圧調節に働く圧受容器反射がある。このような運動時の循環調節に関わる神経機構について、次のような新知見を得た。

2.1 運動発現にかかわる神経調節

運動発現にかかわる脳神経系の働きを理解するために、前頭前野の酸素化動態計測用の近赤外線分光計のセンサー、ホルダー、解析ソフトウェアの開発をした⁹⁾。それらを用いて、運動時の前頭前野の活性を調べた結果、運動肢と同側半球の前頭前野が対側半球の前頭前野よりも高い活動があることを報告し、この活動が運動遂行に重要な役割を担うことを示唆した¹⁰⁾。運動指令を出す一次運動野の活動についても両半球間で検討した結果、左右半球間が相互連絡をもち、対側一次運動野のみでは力発揮が不十分になる場合



図II.2-1 セントラルコマンドと反射性制御からみた運動時の循環調節機構

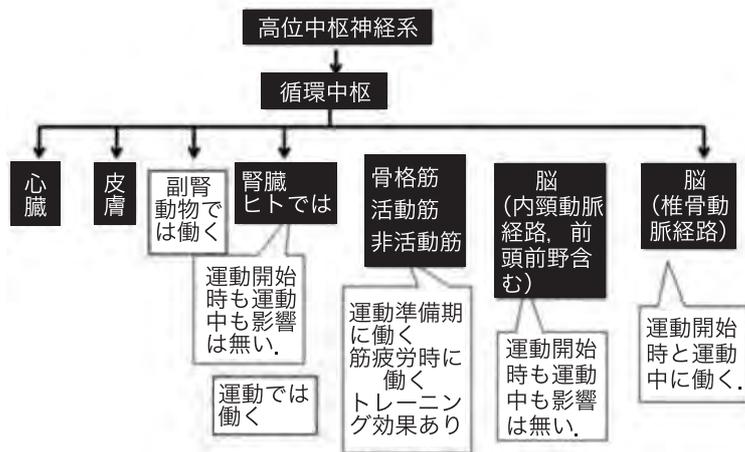
運動指令が脊髄を下降し α 運動神経を興奮させて活動筋が収縮する。この時にセントラルコマンドが生じる (①)。運動が開始されると、活動筋には血流増加が起こる。この血流増加には代謝性血管拡張および血流依存性血管拡張 (ずり応力による NO の増加が起因) が関与する (②)。運動強度が上がり活動筋の代謝が高まると、代謝産物が筋代謝受容器を刺激し (機械的刺激は筋機械受容器を刺激する)、グループ III・IV 求心性神経を介した反射性入力を循環中枢へ送る (③)。その結果、非活動筋や腎のように運動に直接関与しない部位では、交感神経活動が優勢となり、血流が減少する。一方、活動筋では代謝産物が交感神経活動の亢進を遮断するため [神経伝達物質のノルエピネフリン (NE) が無効にされる (④)、これを機能的交感神経遮断と呼ぶ]、血管拡張作用が優勢であり、血流増加が続く。このような活動筋と他の組織への心拍出量の血流分配を適正に保ち、一定の動脈血圧を常時維持するために圧受容器反射が働く (⑤)。

に、同側運動野の活性がそれを補完する役割を担うことが示唆された。さらに筋疲労時における対側半球の運動野の活動を、トップアスリートと一般人とで比較すると、アスリートは筋疲労時における活動が有意に低いことから、トレーニングが一次運動野の活動を変化させることが示唆された¹¹⁾ (Shibuya *et al.* 2008)。運動指令に基づいて起こる運動単位の活動参加および放電間隔変化について検討した結果、一定筋力発揮時には運動単位の放電間隔時間の延長が観察されることを報告した¹²⁾ (Kamo *et al.* 2004)。

2.2 セントラルコマンドが働く標的器官

セントラルコマンドは、先行研究で示されている心臓および皮膚組織に加えて、①運動前と運動中の椎骨動脈経路の脳血流量調節に働くこと、②筋疲労時の活動筋と非活動筋の交感神経活動に働くこと、③セントラルコマンドの働きはレジスタンストレーニングで増大すること、④ヒトの腎血流量には働かないこと、という新しい知見が得られた (図II.2-2)。詳細は次のとおりである。

- 1) **運動準備期・開始直前:** 運動準備期 (約1分前から) の大脳皮質運動野周辺の脳酸素動態と心拍数、血圧および前腕屈筋群の酸素動態を同時計測し、運動準備に関連した皮質活動と循環応答の対応性を検討した。その結果、運動準備による大脳運動野周辺の活性は心拍数および筋酸素化ヘモグロビンの増加に対応することが示された (岩館と定本 2008)。随意運動と他動運動に伴う脳血流量を、内頸動脈経路 (主に大脳皮質側頭葉、前頭葉、頭頂葉、島皮質へ灌流) と椎骨動脈経路 (主に延髄、小脳、後頭葉へ灌流) において比較した。その結果、椎骨動脈経路においてのみ、随意運動開始前の動作に先行する血管拡張がみられた。つまりセントラルコマンドは椎骨動脈経路が灌流する脳部位にのみ働くことが示唆された⁷⁾。同様の実験を、腎動脈および上腸間膜動脈 (主に消化器官へ血液を送る) において行ったが、両動脈経路には予測制御に伴う変化は見られなかった⁷⁾。



図II.2-2 セントラルコマンドが働く標的器官

2) 運動中について：一定負荷保持時の活動筋へ振動刺激（バイブレーション）を与え反射性張力発揮により運動指令を低下させ、ひいてはセントラルコマンドも低下させるという実験条件を設定した。この実験条件により、セントラルコマンドが運動時の心拍数、動脈血圧、心拍量、筋疲労感覚、前頭前野の酸素化動態、内頸動脈経路、椎骨動脈血経路、腎動脈の血流調節にも低下をもたらすかどうかについて検討した。その結果、セントラルコマンド低下に伴う変化がみられたのは、心拍数、平均血圧、筋疲労感覚および椎骨動脈血流量のみであった。このことから、椎骨動脈経路の血流量がセントラルコマンドの影響を受けること、一方、動物とは異なり、ヒトの腎動脈血流がセントラルコマンドの影響を受けないことが示唆された²⁾。

3) 筋疲労時：最大ハンドグリップ張力を疲労困憊まで維持すると筋交感神経活動が亢進する。この亢進が活動筋からの筋代謝受容器反射の機構では説明できないため、筋疲労時における運動への意思・頑張り・努力感、すなわちセントラルコマンドがこの筋交感神経活動の上昇をもたらすことが示された。この交感神経活動の亢進は、抗疲労の役割を担うと示唆された¹⁵⁾ (Saito *et al.* 2007)。また筋疲労時にみられる筋交感神経活動の亢進は、短期間（4週間）の高強度レジスタンストレーニングにより増大することも明らかとなった¹⁵⁾ (Saito *et al.* 2009)。

2.3 反射性制御の働きと相互作用

筋機械受容器反射は反射性に心拍数を上げることが既に知られている。本プロジェクトでは、他動運動（セントラルコマンドや代謝受容器反射を刺激しない低負荷）で筋機械受容器反射の働きを調べた。その結果、脳、腎臓、消化器官といった血流量の調節には、低負荷では筋機械受容器反射が有意な作用をもたないことが示唆された⁷⁾。一方、筋代謝受容器反射は、筋交感神経活動の亢進¹⁵⁾ (Saito *et al.* 2007) および腎血流量の減少⁷⁾といった顕著な作用をもたらすことが示された。また消化器官の血流には作用しないことも明らかとなった⁷⁾。

筋代謝受容器反射は運動時の血圧を上昇させるが、圧受容器反射はその上昇を抑制する働きがあることが知られている。本プロジェクトにより、代謝受容器反射は圧受容器反射と競合関係にあるだけでなく、むしろ圧受容器反射の働きを助長する作用（反射の反応時間を早め、反応の大きさも上げる）をもつことが示された。これにより、筋疲労時や高強度運動時のように代謝産物が蓄積され代謝受容器反射が働く場合には、代謝受容器反射自体が血圧の監視機能を高め循環破綻を防ぐ役割を果たしていることがわかった¹⁵⁾ (Ichinose *et al.* 2004)。

3. 身体特性の相違と適応からみた循環調節

身体活動・スポーツによる循環機能の向上策に必要な横断的研究および縦断的研究により、運動プログラム作成上に有意義な結果を得た。以下に主な知見を述べる。

3.1 発育に伴う脳血流の変化について

加賀谷らによる先行研究 (Muraoka *et al.* 2002) では、心筋の形態と機能についてその発達が調べられた。このような心拍出量の発達に加えて、未知な部分であった脳循環の発達について検討した。特に、どの程度の心拍出量が脳へ分配されるのか (脳血流分配率) を、10～22歳の男女約300名について調べた。その結果、脳血流分配率は10歳で高く、その後徐々に低下し、15歳でほぼ発育が終了し、成人値に達することが示された。また心機能が脳循環より先行して発達するという新知見が得られた。さらに、心機能と脳循環の後に筋力 (握力) が著しく発達する時期が出現することが示された⁷⁾。

3.2 高齢者の心形態と血管形状の関連について

高齢者において心形態、筋厚および血管形状の変化がどのような関連を保っているのかを検討した結果、左室重量と大腿部筋体積との間には有意な正の相関関係が得られた。これまで、発育期の子どもでは、左室重量-大腿部体積の間に密な関係のあることが示されていたが、高齢者においても等しい関係性が認められたことは、身体運動による骨格筋量の保持が心臓の容量保持にも効果を与えるとの重要な知見を得た⁵⁾。

3.3 有疾患における運動および虚血に対する血流調節について

閉塞性動脈硬化症保有者は、下肢動脈血管の動脈硬化による血行障害のために運動歩行時に間歇性跛行を認める。しかしながら、疾病下肢運動中の血流動態についての報告は少ない。本研究では、閉塞性動脈硬化症保有者の患側肢と健側肢において多段階脚伸展運動時の下肢血行動態を比較検討した。その結果、運動時において、患側肢血流量が健側肢よりも顕著に増大することが確認され、末梢循環障害が安静時のみならず、運動中の骨格筋循環に大きな影響を及ぼすことが示唆された⁶⁾。

3.4 テニス選手の利腕と非利腕の比較から

利き腕と非利き腕を各々トレーニング側、非トレーニング側と捉えて、テニス選手の筋厚と血管形状、上腕動脈血流量を比較した。その結果、利き腕の筋厚と血管径が非利き腕よりも大きく、漸増負荷運動

時の最大血流量も利き腕が高いことがわかった。テニス選手の利き腕による運動時血流量が非利き腕の時よりも高くなるのは血管径の差によることも明らかにになった⁴⁾ (Kagaya *et al.* in press)。このようにトレーニングが筋量、血管形状、活動筋への血流量を増加させることが示された。

3.5 トレーニングによる交感神経系の適応について

成人男性の利き腕と非利き腕における掌握運動を維持した時にみられる筋交感神経活動を比較した結果、トレーニング側と考えた利き腕運動時の筋交感神経活動が非利き腕運動より高くなった。このことを、筋疲労に抗して運動を持続させるには、交感神経活動を高いレベルに保つことが重要であること示すものである¹⁵⁾ (斉藤ら 2006a, 2006b)。さらに、実際に、片側の腕によるハンドクリップレジスタンストレーニングを4週間行い、対照側と比較した結果、筋疲労時の筋交感神経活動が対照側の運動時よりも高くなることが示された。またこの交感神経活動の亢進は、活動筋からの反射性制御に起因するのではなく、高位中枢からのセントラルコマンドの増強に起因することも示された。したがって、短期間のレジスタンストレーニングは、活動筋というよりも、運動への頑張り・努力感にかかわる高位中枢に適応をもたらせ、その結果、抗疲労の役割を果たす交感神経活動の亢進をさせるという重要な知見を得た¹⁵⁾ (Saito *et al.* 2009)。

上記知見の得られた研究課題は以下のとおりであり、学術雑誌に公表されていない個別課題は本報告書の個別課題研究成果に詳しくまとめられている。

¹⁾ 「再分配」共同研究, ²⁾ 「セントラルコマンド」共同研究, ³⁾ 若手研究者受け入れ「ストレッチング」研究, ⁴⁾ 加賀谷担当個別課題, ⁵⁾ 奥山 (清水) 担当個別課題, ⁶⁾ 長田担当個別課題, ⁷⁾ 定本担当個別課題, ⁸⁾ 笹原 (上田) 担当個別課題, ⁹⁾ Ferrari 担当個別課題, ¹⁰⁾ Quaessima 担当個別課題, ¹¹⁾ 澁谷担当個別課題, ¹²⁾ 加茂担当個別課題, ¹³⁾ 岩館担当個別課題, ¹⁴⁾ 佐藤担当個別課題, ¹⁵⁾ 斉藤担当個別課題

4. 運動時の循環応答からみた提案—エビデンスに基づく運動プログラムの構築に向けて—

運動プログラムは実施する運動特性と対象者の身

体特性を踏まえて作成する必要がある。本プロジェクトで得た知見をもとに次のような提案をする。

4.1 運動様式について

1) 動的運動・静的運動

動的運動は心拍数や心拍出量を増加させ、血液循環を促進する運動様式といえる。また筋の収縮と弛緩がリズムカルに繰り返され（収縮期には静脈血が筋から流出し、筋弛緩期には動脈血の流入量が増加する反応をもたらす）、活動筋の十分な血管拡張により、運動時の血圧上昇が低く、生体への負担度が少ないという特徴をもつ。また軽強度による脚の動的運動時（心拍数が110拍/分以下の強度）には、筋交感神経活動が安静時よりも低下することから、安静にするよりもゆっくり歩くほうがリラクゼーション効果をもつと示唆される。一方、筋収縮が持続する静的運動は、心拍数や心拍出量の著しい上昇はみられないが、活動筋での血液の流入・流出が制限されるため、動脈血圧を上昇させやすい運動様式となる。特に強度が高くなると、心臓や血管系への負担も大きくなりやすい。このような動的運動と静的運動の特徴を理解した運動プログラムの作成が必要である。

2) 大筋群運動（全身的運動）・小筋群運動（局所的運動）

大筋群を用いた全身的運動による持久性運動は呼吸循環機能の維持向上のために有効であり、既に運動処方でも広く活用されている。本プロジェクトでは、掌握運動のような小筋群の局所的運動であっても、活動筋のみならず非活動筋への血流量を増加させ、循環機能を活性化させることが示されている。運動強度が高くなると、脳血流増加の頭打ち、腎血流の減少、筋交感神経活動の亢進をもたらすことになる。また高強度負荷の掌握運動レジスタンストレーニングが運動時の頑張り・努力感にかかわる中枢指令（セントラルコマンド）を増強させる効果をもつことも示されている。したがって、対象者の特性を考慮した適切な運動様式や運動強度を選択することにより、小筋群の局所的運動も循環機能の活性化に有効な手段となる。

3) 上肢の運動・下肢の運動

上肢の運動と下肢の運動では、一定の酸素摂取量に対する動脈血圧、心拍数、毎分換気量などが異なる

り、いずれも上肢で高くなることが既に知られている。循環機能からみると、上肢の運動は、心臓との位置関係（重力作用）によって循環応答が変動することを考慮する必要がある。一方、心臓よりも低い位置で運動することが一般的である下肢の運動は、重力作用による血液貯留を避けるよう留意する必要がある。

4) 一側性の運動

循環促進に有効なサイクリングやウォーキングのような両側性運動が運動プログラムの主体となっている。しかし、腕や脚の運動を片側だけで行った場合でも、運動を行わない対側や他の体肢（脚運動をしている時の腕など）の骨格筋血流量を一時的に変化させることから、一側性の運動も運動プログラムとして活用できると考えられる。

5) その他の運動や運動想起

ストレッチングのように筋の長さを変える運動も、筋内循環を促進させることから、ウォーミングアップやクーリングダウンに用いるだけでなく、要介護者や病床にある患者の筋循環の促進を目的とした運動プログラムとしても活用できる。

運動の準備・想起（イメージ）は、運動野皮質関連領域の脳活性、心拍数、活動筋の酸素化動態、脳血流量（椎骨動脈経路）を上昇させたことから、随意的に運動を準備し運動遂行のイメージをもつことは、運動開始後の循環調節および動作をスムーズにさせる手段となる。

4.2 運動強度の選定について

運動プログラムの作成において、適切な運動強度を選択することは重要課題である。全身運動における強度設定指標は確立されているが、局所運動については未だ確立されてはいない。本プロジェクトの結果から、次の二つの強度選定指標を提案する。

1) 負荷増加に対して血圧上昇が顕著になる「血圧変移点」を指標とする。

「血圧変移点」を調べると（図II.1-1）、随意最大筋力（MVC）の30～50%の運動強度に分布する。この血圧変移点の出現付近の負荷強度から、血液供給

が不足し、筋交感神経活動の亢進も起こる。そして、腎動脈および内頸動脈血流量の減少や頭打ちがみられる。なお、血圧変移点を超過して50～70% MVCまで上がると、活動筋代謝は有酸素系から無酸素系へとシフトし、活動筋中には代謝産物・局所性ホルモンが蓄積されることになる。

2) 主観的筋疲労感覚を指標として活用する。

筋疲労感覚は筋交感神経活動を反映する指標であり、血圧変移点負荷に相当する筋疲労感覚は「4」であり、これは「疲れた」と「かなり疲れた」の中間の感覚である。この指標は誰もが容易に活用できることから、単独で、あるいは他の強度指標と併用して用いることを提案する。また、運動実施時には常にモニターすることを推奨する。

4.3 運動実施にあたっての留意点

本プロジェクトの成果に関連する運動実施上の留意点をまとめた。

1) 運動時間の観点から

- ①運動開始前：運動への準備やイメージをもつことは運動開始後の循環調節および動作をスムーズにさせる有効な手段となる。
- ②運動開始時：運動に適した循環システムを再調整するには、運動開始後約30秒間は必要である。この調整がうまく運ばないと、血圧が低下することもある。したがって、運動開始時の急激な負荷上昇を避け、ゆっくりと徐々に運動強度を上げるようにする。
- ③運動終了前（疲労時）：運動持続時間とともに活動筋の疲労が始まる。筋疲労に抗して「頑張り・努力感」を働かせると、交感神経活動を介した力の維持が可能となる。しかし、運動経験の少ない人や低体力者の人は、無理のない時点で運動を終了させるようにする。その判断基準には主観的運動強度や筋疲労感覚を用いる（図II.1-1参照）。
- ④運動終了直後：運動終了とともに、身体の各部位の調節機能は運動前のレベルに戻ろうとする。しかし、活動筋では運動時に生じた血管拡張物質が洗い出されるまで、血流増加が続くことになる。この運動後の著しい血流増加が静脈還流量を低下

させ、ひいては運動終了後低血圧を招く場合もある。そのため、軽い運動（クーリングダウン）を運動終了後にも行い、筋ポンプ作用により静脈還流の急激な低下を予防する必要がある。

2) 対象者の身体特性の観点から

- ①発育期の子どもにおける循環機能の発達：心機能および脳循環が著しく発達する時期は、心機能（推定心拍出量）が10～12歳頃であり、脳循環（頸動脈血管内径）が12～15歳である（男女差がある）。したがって、このような心臓および血管機能が発達する時期を考慮した運動のプログラムが発育期には必要である。
- ②高齢者における筋量の保持：高齢者の心臓の形態（左室重量）は大腿部筋体積と密接に相関することが示された。このことから、高齢者においても骨格筋量の保持が心機能の保持に有効であるといえ、高齢者も筋量の維持に結びつく運動プログラムが必要である。
- ③末梢循環系有疾患者の運動：閉塞性動脈硬化症保有者は筋虚血を代償するために著しい血流量増加が生じる。しかし、運動時の心拍出量の増大には限界があることを考えると、健常人よりも運動時の血流および血圧調節が難しい。このことを踏まえたプログラム作成が必要である。

3) 呼吸法との関連について

短時間の高強度レジスタンス運動時の脳血流応答から、息こらえは脳血流減少を、過呼吸は運動終了後の著しい血流増加（オーバーシュート）をもたらせることから、運動時の呼吸をコントロールすることに留意する必要がある。

4) 運動時の姿勢（重力作用）について

活動筋と心臓との位置関係によって生じる重力作用が循環応答を大きく変動させることに留意する必要がある。活動筋が心臓よりも高い位置にある場合は、筋への動脈血流量が低下し筋から流出する静脈血流量が増加し、運動遂行には不利なことが多い（上肢の運動・下肢の運動参照）。