

日本女子体育大学附属基礎体力研究所
学術フロンティア推進事業(平成 16～20 年度)

最終報告会

運動時における循環調節機構の統合的解明
—スポーツによる健康・体力づくりのプログラム構築に向けて—

日時:2009 年 2 月 28 日(土) 13 時 30 分～17 時 10 分

場所:日本女子体育大学 本館E101

プログラム

13:00 開会挨拶 定本 朋子 (日本女子体育大学・教授/プロジェクトリーダー)

「本プロジェクトのねらい」 加賀谷 淳子(日本女子体育大学・名誉教授)

13:05 - 14:15

Session 1 プログラム作成の基礎となる科学的エビデンス 1 ー運動時の循環調節ー

座長 定本 朋子(日本女子体育大学・教授)

「運動準備や想起に伴う脳活性」 岩館 雅子(日本大学生産工学部・助教)

「運動を持続させる大脳皮質の働き」 澁谷 颯一(日本女子体育大学・ポスドク研究員)

「運動時のモーターユニットの動員特性」 加茂 美冬(日本女子体育大学・准教授)

「活動筋代謝の有酸素性依存から無酸素性依存への変移」 笹原 千穂子(東海学園大学・講師)

「筋活動による心拍出量の変化と血流分配」 奥山 静代(慶應義塾大学・講師)

「筋形状の変化が筋循環に与える影響」

大森 芙美子(日本女子体育大学附属基礎体力研究所客員研究員)

「随意運動時の呼吸循環応答にみられるセントラルコマンドの働き」

佐藤 耕平(日本女子体育大学・助教)

14:15 - 14:45 質疑応答&コーヒーブレイク

14:45 - 15:35

Session 2 プログラム作成の基礎となる科学的エビデンス 2 ー発育、老化、疾患および

トレーニングによる循環系の変化ー

座長 加茂 美冬(日本女子体育大学・准教授)

「子どもの循環機能の発達」 佐藤 耕平(日本女子体育大学・助教)

「高齢者の左室重量と骨格筋量の関係」 奥山 静代(慶應義塾大学・講師)

「有疾患における運動と虚血に対する末梢血流調節」 長田 卓也(東京医科大学・講師)

「身体トレーニングによる循環機能の向上」 齊藤 満(豊田工業大学・教授)

質疑応答

15:35 - 16:00

Session 3 提案 -安全で効果的な運動プログラム構築に向けて-

座長 齊藤 満(豊田工業大学・教授)

「運動に対する循環応答からみた提案」

定本 朋子(日本女子体育大学・教授)

質疑応答

16:10-17:10

特別講演

座長 加賀谷淳子(日本女子体育大学・名誉教授)

長田 卓也(東京医科大学・講師)

翻訳概略 佐藤 耕平(日本女子体育大学・助教)

「Circulatory regulation during exercise」

Niels H. Secher

(Professor, The Copenhagen Muscle Research Center, Department of Anesthesia, Rigshospitalet,

University of Copenhagen, Denmark.)

17:10 閉会

特別講演

Circulatory regulation during exercise

Niels H. Secher

Professor, The Copenhagen Muscle Research Center, Department of Anesthesia,
Rigshospitalet, University of Copenhagen, Denmark.

Cardiovascular regulation during exercise

Niels H. Secher

Department of Anesthesia, The Copenhagen Muscle Research Center,
Rigshospitalet,
University of Copenhagen, Denmark.

During exercise the circulation is challenged by the ability to balance a marked increases in vascular conductance as muscle blood flow increases with the ability to maintain arterial blood pressure. Central in the regulation of arterial pressure is the arterial baroreceptors, which regulated blood pressure beat to beat by controlling sympathetic nerve activity via integrating various signal in the nucleus tractus solitarius (NTS). The signals that NTS integrates include besides the influence from the arterial baroreceptors, neural influence from the working skeletal muscles (the muscle pressor reflex), influence from other parts of the brain (central command) probably dominated by signals from the cortex and the insula area, besides influence from variation in the central blood volume. In other words, the arterial baroreceptors may be viewed as the instrument that the NTS uses to control the set blood pressure.

In response to exercise these various neural influences reset the arterial baroreceptors to control an elevated heart rate and blood pressure and two strategies can be defined to defend the elevation in blood pressure. The ideal strategy is that the circulation is able to secure the increase in blood pressure by elevation of cardiac output. On the other hand, if the increase in cardiac output is not large enough to elevate blood pressure to the set level, then blood pressure is defended by peripheral vasoconstriction that primarily affects the splanchnic blood flow and flow to the kidneys, but also affects skin blood flow, flow the working skeletal muscles and even to the brain. Such manifestations of restricted peripheral flow are important especially during whole body exercise, where the challenge to blood pressure control is the largest. Thus, during whole body exercise flow to the exercising muscles is lower than what is established when the investigated limb is working in isolation and the restriction in muscle blood flow is demonstrated to be by enhanced sympathetic activity. However, a restricted flow to both working skeletal muscles and to the brain manifests especially in diseases associated with a reduced ability to enhance cardiac output, i.e. with a failing heart.

A significant effect of endurance training is to elevate blood volume primarily by enhancing plasma volume. The likely mechanism involves that the central blood volume is reduced many hours after exercise because the muscle blood volume remains elevated

in the recovery and hormonal variables restrain urine production, while thirst compensates for the reduced central blood volume. Also total hemoglobin increases may be in response to arterial desaturation during intense whole body exercise and may be also because of the reduced kidney blood flow. Whatever the mechanism, both the increase in plasma and red cell volume enhances preload to the heart and makes it possible for the heart to increase its output. Thus following training the cardiovascular response to upright exercise approaches that seen during supine exercise with attenuated heart rate and blood pressure responses.

While the training induced enlarged central blood volume readily explains heart rate both at rest and during exercise, several mechanisms may be involved in attenuating the blood pressure response to exercise. Besides attenuation by the enlarged central blood volume, also enhanced muscle blood flow is likely to attenuate the muscle pressure reflex and thereby the upward resetting of the arterial baroreceptors. Furthermore, habituation to the exercise mode makes the need for central command smaller, further reducing resetting of the arterial baroreceptors.

Also the influence of training on cerebral blood flow and oxygenation is complex. Cerebral blood flow is influenced primarily by the arterial carbon dioxide tension. Thus it is significant for maintained cerebral blood flow that the exponential increase in ventilation with increasing exercise intensity is delayed as the ability to perform more work is enhanced. In other words, only at a higher workload manifests a reduction in cerebral blood flow as the arterial carbon dioxide tension decreases. Yet, at exhaustion the calculated cerebral capillary and mitochondrial oxygen tension decreases and at least indirect evidence points to that exhaustion may be coupled to this reduction in cerebral oxygenation.

Niels H. Secher 氏の略歴

Department of Anesthesia, Rigshospitalet 2041, Blegdamsvej 9, DK-2100 Copenhagen Ø, Denmark
e-mail nhsecher@rh.dk

Associate professor of Anesthesiology 1990-

Head, Department of Anesthesia, the Abdominal Center, Rigshospitalet 1996-2003

Professor of Anesthesiology 2004-

Professional affiliations

Nordic Physiological Society

Danish Society for Anesthesiology

Nordic Society for Anesthesiology

American Physiological Society

The Copenhagen Muscle Research Center (1994 -

The Danish Cardiovascular Research Academy (2002 -

The Academy for Muscle Biology, Exercise and Health Research (2005 -

The MuscleCluster, Faculty of Health Sciences, University of Copenhagen
(2005-

European Journal of Applied Physiology, editor 2000 -

Editorial Board, Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports and Exercise, section
editor 2007-2009.

Journal of Sports Sciences, editorial board 1984

Experimental Physiology, editor (2001 - 2005)

Journal of Applied Physiology, editorial board 2005 -

Sports

Danish championship in rowing x 9 (1964-1974)

Nordic championship in rowing x 3 (1967-1972)

International West German championship in rowing x 2 (1969, 1970)

Holland Becker (1967, 1970)

North American Champion in single scull (1967)

World Champion in double sculls (1970)

本プロジェクトのねらい

加賀谷 淳子(日本女子体育大学・名誉教授)

本学基礎体力研究所が申請した本研究プロジェクト「運動時における循環調節機構の統合的解明—スポーツによる健康・体力づくりプログラムの構築に向けて—」は、2004年度文部科学省学術研究高度化推進事業の学術フロンティア推進事業に選定され、平成16年度～平成20年度の5年間補助を受けてきた。文部科学省学術フロンティア推進事業は、私立大学の大学院、研究所の中から、研究実績をあげ、将来の研究発展が期待される卓越した研究組織を選定し、内外の研究機関との共同研究に必要な研究施設、研究装置・設備の整備に対し、重点的かつ総合的支援を行うものとされている。したがって、本プロジェクトはでは課題とする研究を推進して学術的貢献をすると同時に、運動時の循環調節研究の拠点としてハード・ソフトの整備を推進することをねらいとしている。

1. 健康・体力づくりプログラム構築にむけた運動時循環調節の研究の推進

運動に対する循環系の適応は極めて巧妙にできていると考えられる。複雑な仕組みになっていることは、ひとつの系が破綻しても他の系が補償し、生命維持に必要な循環システムを破綻させないような安全弁が用意されているということであろう。安静時につくられた循環システムの安定性は、運動という外乱によって一端はその整合性が破られる。そこで、運動時の循環系は、運動遂行と生命維持という二つの方向で再調整される。効果的な運動と運動の安全性を考えなければならない所以である。しかし、運動に対する循環系調整の機序はまだ十分解明されていない。本プロジェクトでは、運動時の循環調整に関する科学的エビデンスを運動特性と関連させて統合的に解明し、蓄積されたエビデンスを基盤とし、健康・体力づくりのための運動プログラムの構築に向けた提案を行うことを目指している。

課題解明に向けた本プロジェクトでのアプローチは図1に示した通りである。5年間のプロジェクト研究期間の最初の3年間(2004-2006年度)は、運動時の循環調節に関する知見を集積することであった。運動時の生体応答研究の基盤となる運動時の運動単位の動員特性を明らかにすると共に、人を対象とした循環研究に必要な非侵襲的計測法(近赤外線分光法、超音波法など)の改善等を進めながら、1)運動時の血流再分配と2)循環系に対するセントラルコマンドを中心とした神経性調節に焦点を当てて研究が遂行されてきた。中心的課題である「運動時の血流分配に関する研究」と「運動時のセントラルコマンドが循環に与える影響に関する研究」はプロジェクトメンバー全員が参加する共同研究として行われた。さらに、特化したテーマについては、個別に研究を実施し、プロジェクト全体で討議して統合するという研究体制をつくった。これに関する個々の成果は、2006年11月の中間報告会で公表されている。さらに、それらを統合した運動時の循環調節の機序については、2008年11月の国際シンポジウムで報告した。

プロジェクト最後の2年間(2007-2008年度)では、それまでの成果を様々な身体特性を持つ対

象者で検証すること、運動の継続が循環調節に与える影響を横断的、縦断的に明らかにすることを中心課題とした。そして、それまでに得られたすべての知見を基に、スポーツによる健康・体力づくりプログラムの構築に対して、循環調整の観点から提案を行うこととした(2009年2月)。

以上のように、研究面では、本テーマに関して、学術的な貢献をすること、それを基に、運動プログラム構築にむけた提案を行い、社会のニーズに応えることが本プロジェクトの研究目的である。

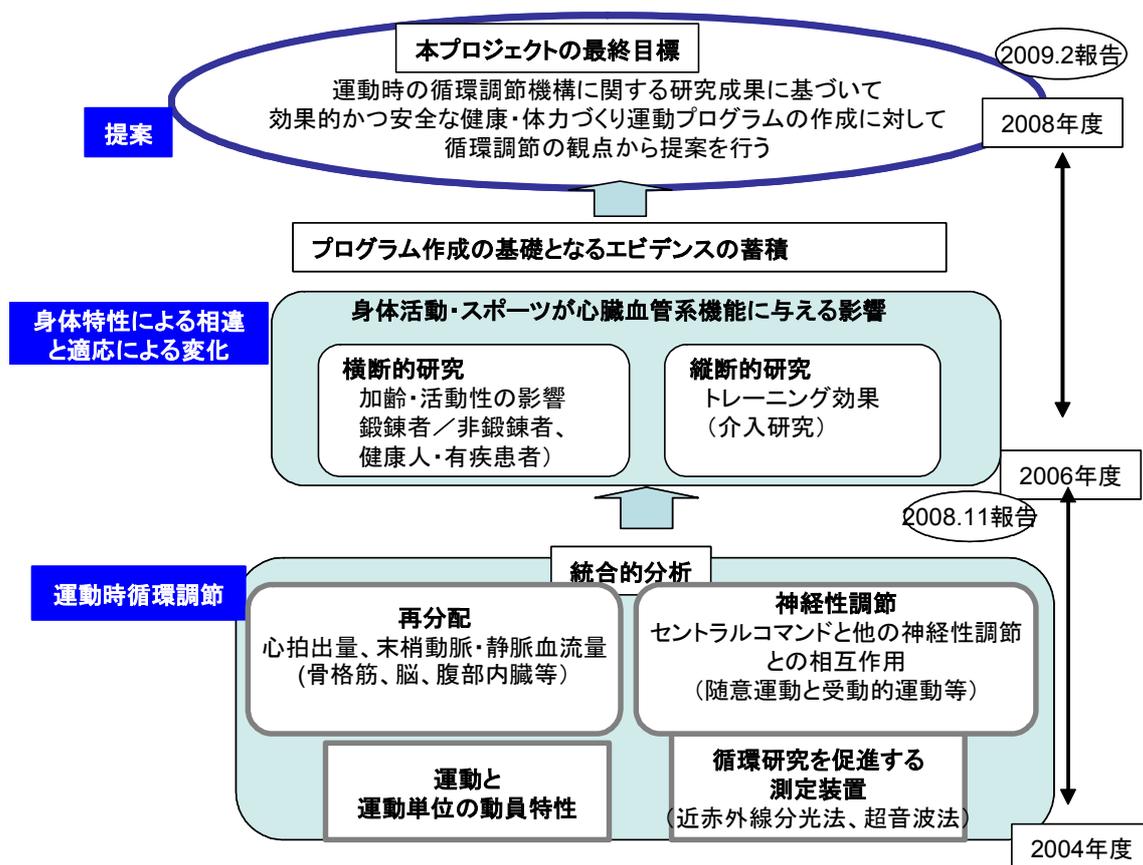


Fig1. Research design of the project

2. 運動時循環調整研究の拠点整備

本プロジェクトでは、初年度に脳の酸素動態を非侵襲的・連続的に計測する近赤外線分光法や解像度が高く、画像分析が自動化した超音波測定装置を購入した。さらに、既存の計測装置や運動負荷装置をシステム化して、研究の推進を図るなど、ハード面の整備が進んでいる。

多様な因子によって調節されている循環調節の研究を、様々な運動様式、運動強度・時間、様々な姿勢や環境の影響等を、性年齢身体特性の異なる対象者で検証するには多くの研究者による共同研究が必要である。本プロジェクトでは本研究所と他の機関との共同研究や本研究所を拠点として若手研究者が参加する研究プロジェクトについてもいくつかの試みを行った。本プロジェクトの実施による拠点整備により、遂行母体である日本女子体育大学の研究活性化の維持と多くの研究者が関心を持つ研究拠点となることはプロジェクト実施の大きなねらいである。

Session 1

プログラム作成の基礎となる科学的エビデンス 1

—運動時の循環調節—

運動準備や想起に伴う脳活性

岩館 雅子(日本大学生産工学部)

運動時の循環調節は、運動の始まる前からすでに開始されており、運動準備や想起に伴い生じる心拍上昇や筋血流上昇はその代表的な応答である。運動準備期の循環応答は運動時とは異なり筋収縮が生じていないことから、運動性循環反射がない状態で中枢指令(セントラルコマンド)が発現したことによる応答であるといえる。セントラルコマンドの起源は、近年、大脳や視床下部、脳幹部などに存在することが示唆されている。心臓や筋血管で生じる循環応答の神経調節としては、セントラルコマンドが自律神経系を介して標的部位に作用していることが明らかになりつつあるが、一方、セントラルコマンドの中枢と線維連絡のある脳領域は、どう影響を受けるのかは明らかでなかった。特に、運動出力に関連する大脳皮質運動野は視床下部などと密接な連絡がある。そのため、セントラルコマンドにより心臓や筋に予測制御応答が生じているとき、脳においてもすでに変化が生じている可能性があった。従来、運動準備期の運動野周辺領域の脳活動は、非侵襲的手法である脳波を用い、大脳皮質運動野の活動が運動準備期や運動想起時に見られることは多数報告されてきた。一方、運動制御に関する神経科学の研究では、研究視点の違いもあり、循環反応との対応は検討がされてこなかった。その理由の一つは、脳波を用いた研究では、加算平均を必要とするため被験者に同一試行を数十回繰り返し行わせるが、この繰り返しによる慣れや疲労が循環反応を変化させ、両変数の対応関係の検討を困難にするためと考えられた。このような状況の中で、近赤外分光法(NIRS)を用いた大脳皮質酸素動態の計測は、時間分解能にも比較的優れ、脳波のような加算を必ずしも必要としないことから、変動しやすい循環反応との対応関係をみるには、現時点では最も適していた。

そこで本研究では、NIRS を用いた大脳皮質運動野酸素動態の変化を脳活動の指標とし、掌握運動の開始約 1 分前からの大脳皮質運動野酸素動態、心拍数、平均血圧、心拍出量、前腕屈筋酸素動態を同時記録し、これらの対応関係を検討した。

その結果、運動準備や想起に伴い、循環応答としては、心拍上昇および心拍出量増加および筋血流速度上昇という応答がみられた。これに対し、大脳皮質運動野酸素動態においても、oxyHb および totalHb の上昇、deoxyHb の低下傾向という、神経活動賦活に伴う血流増加を反映する脳酸素動態変化がみられた。このことから、運動開始前において運動準備や想起により、心拍数の上昇、心拍出量増加および活動肢の筋血流速度上昇が生じるとき、大脳運動野周辺の脳活動も同時に亢進することが示された。

以上のことから、ヒトは実際に運動を行う前から、心臓、骨格筋における予測制御とほぼ同時期から運動出力を担う大脳皮質運動野の活性化を連動して生じていることが明らかになった。このことは、運動時に適応するためのプログラム化された一連の予測制御が、脳も含め全身性にフィードフォワード的に生じることを示すと考えられる。

運動を持続させる大脳皮質の働き

(澁谷 顕一 日本女子体育大学附属基礎体力研究所・ポスドク研究員)

1. はじめに

運動中の脳における活動を計測することは、脳が運動をどのようにコントロールしているかを知るだけでなく、運動による身体における変化をどのように捉え、その情報を処理しているのかを理解するために重要である。そして、それにより、運動指令がどのように脳から末梢へ向けて放出されているのかを知ることができる。運動指令に関する知見は運動制御に関する分野だけでなく、循環調節に関わる分野にとっても重要な知見となる。本プロジェクトでは、近赤外線分光法を用い前頭前野および一次運動野の活動を計測し、皮質レベルにおける活動を計測し、運動を持続させるための大脳皮質の働きの一部を明らかにすることを目的とした。

2. 運動中の前頭前野における活動

運動の持続に対しては前頭前野における活動が関与している可能性も示唆されている。本研究では、学際的な視点を取り入れ、主に、心臓血管系と代謝は脳と筋の酸素化および代謝に影響を及ぼす心臓血管系および代謝機構について検証してきた。特に、1) 運動中の筋疲労のメカニズムや安静から運動への移行期の酸素化動態のメカニズムの理解を進めた。また、2) 前腕筋の出力維持と、巧妙な運動の制御と協働を必要とする正確な動作遂行を可能なものとする上で、前頭前・前頭野が重要な役割を果たすという仮説を支持する結果が得られた。

3. 運動中の一次運動野における活動

しかし、運動に対して実際に指令を出しているのは一次運動野である。その一次運動野における活動動態を知ることで、上記の仮説はより強固なものとなるであろう。そこで、本研究では左右半球における一次運動野の活動を記録した。左右の半球における一次運動野は相互作用を持つことが知られている。これまで、活動肢と同側半球における一次運動野は、活動肢の運動を直接制御することはないと考えられてきた。つまり対側半球一次運動野の制御により行われていると考えられてきた。しかし、近年の研究では、左右半球間の一次運動野の相互作用が存在する可能性が示されている。本研究の近赤外線分光法を用いた脳酸素化動態の時系列的分析により、運動開始後の左半球の一次運動野と右半球一次運動野の酸素化動態に時間的差異が存在することが明らかとなり、運動開始後の左右半球間の一次運動野の相互作用形成の可能性が示された。このような両側半球間の結合は対側半球の一次運動野だけでは力発揮が十分ではない場合に、それを補完するために同側半球一次運動野の活動が動員されると考えられる。また、トップアスリートと一般成人の一次運動野の活動比較から、疲労困憊に至る運動時に一次運動野の酸素化動態に明確な相違があることも示された。

4. まとめ

以上のことから、前頭前野のみならず、一次運動野においても活動肢に対して同側部位の活動が運動の調節に大きく関わっていることが明らかとなった。今後、さらにこれらの検討を行うことで、運動を遂行する命令が脳からどのように発信されているのかを知ることができるであろう。

運動時のモーターユニットの動員特性

加茂 美冬 (日本女子体育大学・准教授)

運動は、時間的、空間的に様々な組み合わせで起こるモーターユニット (Motor unit; MU) 活動を基礎として成り立っている。すなわち、筋力は、筋を構成する MU の発揮張力の総和であり、筋力増大は、活動する MU 数の増大と参加した MU の放電頻度の上昇により実現される。MU の収縮は種々の血管拡張シグナルを発すること、また、十分でない酸素供給は MU 活動を変化させることなど、MU 活動と循環系機能は密接に関わっていることは明らかである。しかしながら、種々の筋力発揮条件における両者の相互関係、さらには各々の動態についても不明な点が多く残されている。本プロジェクトにおいては、以下の 3 つのアプローチにより両者の関係を探ろうとした。

【動的膝関節伸展運動の強度変化に対する筋・循環系の対応 (平成 17 年度共同研究)】

MU 活動 (表面筋電位積分値 (IEMG) から評価) と循環系機能の関係を検討した。各種強度で 1 分間動的筋力発揮を反復したとき、IEMG は 30%MVC 以上の強度において時間に伴い直線的に増大した。血圧、筋血流量および筋酸素動態の境界強度も約 30%MVC で確認された。IEMG 増大は主に MU 活動参加を反映することから、新たな MU の動員が、循環系・代謝系機能変化の引き金になることおよびその発現強度は約 30%MVC であることがわかった。

【静的 (等尺性) 一定筋力発揮における運動単位放電特性を規定する因子 (個別研究課題)】

等尺性一定筋力を持続的に発揮するとき、MU は放電間隔を時間と伴に延長させる。この延長は全ての筋力レベルにおいて観察される特徴的な現象であることから、筋力調節および筋疲労発現に重要な役割を担っていることが示唆されている。したがって、この現象を理解することは、筋力発揮時の循環応答の統合的解明において意義をもつ。本実験では、その合目的性および発現メカニズムを“反復電気刺激に対する誘発張力応答”および“振動刺激による末梢感覚情報操作”から検討した。その結果、放電間隔延長現象は筋反復収縮初期の不完全強縮張力増強に対して抑制効果をもつことが確かめられた。さらに、低筋力発揮レベルではその効果は充分でないことを新たに見出した。また、人為的な末梢感覚刺激の増減により放電間隔延長は必ずしも消失しなかったことから、MU 放電間隔延長の発現に対する central drive による制御の重要性が示唆された。

【静的 (等尺性) 筋力発揮における運動単位活動と循環系機能の関係 (個別研究課題)】

Ascending ramp 収縮 (~10%MVC, 30s) を緊張性振動反射 (RC) と随意収縮 (VC) で行い、両条件における MU 活動と循環系・代謝系機能を比較した。IEMG は VC より RC において有意に大きいあるいは大きい傾向にあった。VC において心拍数と血圧はこれまでに報告されている随意筋力発揮における central cardiovascular command の制御による変化と同様な傾向を示したが、RC では観られなかった。筋酸素化ヘモグロビンの筋力発揮開始時低下の大きさは VC に比較し RC で大きかった。これらのことは、随意収縮では、central motor command による効率のよい MU 活動と central cardiovascular command による循環系機能制御が効率のよい酸素利用もたらすことを示唆している。

活動筋代謝の有酸素性依存から無酸素性依存への変移

笹原千穂子（東海学園大学・講師）

1. はじめに

筋収縮の強度は活動筋への血流を規定する重要な要素であり、筋内圧の機械的変化と筋の代謝性変化を伴い、活動筋における動脈血流入量と静脈血流出量を決定する。運動強度が異なると、動員される筋線維タイプが異なり、活動筋への酸素需要の増加による応答として、循環システムは心拍出量の増加や他の組織への血流減少という形で調節を行うが、その詳細については十分には検討されていない。本研究では、運動強度の変化に対する筋代謝と循環器系の調節との関係を解明することを目的とした。

2. 筋疲労感覚と筋酸素動態および血圧との関係

筋疲労感覚(Local Fatigue Sensation)は活動肢の主観的疲労感を数値化したものであり、筋交感神経活動の亢進と相関があることが報告されている(Saito, 1989)。筋疲労感覚と筋酸素動態、および血圧の関係を運動強度の観点から明らかにし、さらにこれらの関係が筋の浅部と深部、内側と外側で部位特異性があるかを検討することを目的とした。低、中、高強度の動的膝伸展運動を行った結果、①血圧の上昇しない低強度の運動では筋疲労感覚は筋脱酸素化と関連がみられたが、②血圧上昇が生じる中・高強度運動においては筋疲労感覚と筋脱酸素化との間に有意な相関は見られなかった。③また筋の部位特異性は見られなかった。以上のことから、低強度での筋疲労感覚は、筋の酸素化動態が関与しているが、中・高強度では血圧上昇と関連した他の要因が筋疲労感覚に関与しているものと考えられた。

3. 運動後の筋再酸素化時間と血圧変移点

運動中の筋酸素動態は、筋内圧の上昇による活動筋への血流制限の影響が大きい。一方、運動後の筋再酸素化時間(運動後の回復期に酸素動態が元に戻るまでの時間で、この時間が延長すると筋の有酸素性代謝貢献が低いという関係性が示されている)はより筋代謝の影響を反映すると思われる。筋再酸素化時間の延長し始める運動強度と、血圧変移点(血圧が急上昇する負荷)との関係について検討した。その結果①筋再酸素化時間は運動強度の上昇に伴い延長するが、②血圧変移点(最大随意筋力の30-50%)と比べてより高強度(最大随意筋力の70%)で顕著に延長することが明らかになった。活動筋における代謝が有酸素性依存から無酸素性依存へと移行するのは、血圧変移点より高い運動強度においてであることが示された。

4. 筋再酸素化時間の部位特異性の検討

運動中の筋内の酸素化動態が遠位と近位では異なることは既に知られているが、筋の浅部と深部間の不均一性については検討がなされていない。浅部では速筋線維が多く、深部では遅筋線維が多いといわれ、その酸素化動態が筋の深さにより異なることは十分に仮定される。同一筋内の浅部と深部において、筋再酸素化時間に相違があるかを検討した。その結果、どの強度においても筋再酸素化時間は浅部と深部で差がみられなかった。筋の有酸素性代謝貢献度が深さによって相違があるとは言えないことが示唆された。

筋代謝の有酸素性から無酸素へ移行する運動強度は筋疲労感覚の上昇し始める負荷や血圧

変移点より高強度においてみられることが明らかになった。血圧と筋代謝の両方の変異点を知ること
で、健康・体力づくりにおいて安全且つ効果的な運動強度の設定に役立つと考えられる。

筋活動による心拍出量の変化と血流分配

奥山静代(慶應義塾大学・講師)

1. はじめに

運動時の循環系の対応は手際よくシステム全体の再調整が行われるため、筋活動による血流再分配を明らかにすることにより、安全で効果的な健康のための運動に貢献できる。

2. 筋の活動による心拍出量の変化と骨格筋、脳、腹部内臓への血流分配

骨格筋への血流量が心臓の拍出量とどう対応するかについて、局所運動時に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血流分配を行うことが示された。一方、骨格筋への動脈血流量は、筋収縮期は一旦安静時より低下するが、筋収縮中止直後は顕著に増加する。逆に静脈血流速度は筋収縮期に加速され、筋弛緩期には顕著に低下し、両者は筋内圧の局所の変化により関連していることが示された。また筋活動が繰り返される動的運動時の動静脈血流量は相互に関連していることが明らかになった。骨格筋の血流がどこまで増加するか、最高血流量に達する運動条件を調べた結果、動的運動時筋弛緩期の膝窩動脈血流量は、運動強度とテンポが密接な関係を保って変化し、両者の組み合わせによって運動時血流量が最高値に達することが示された。一方、運動時の非活動肢血流量は、運動開始初期は一過性に強度依存の増加が起こるが、時間経過に伴い減少が起こった。このことは、運動開始後活動筋へ特化して血流量増加が起こるように調節されるまでには時間を要することを示唆している。さらに、運動時の脳への血流再分配は、内頸動脈血流量の変化はみられないのに対して、椎骨動脈経路では血流量が増加することが明らかになった。また運動に直接関与しない腹部内臓への血流量は、運動時の腎動脈血流の減少がみられたが、上腸間膜動脈では顕著な変化はみられず、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かった。加えて、重力の影響に対する血流量の応答をみると、掌握運動時の前腕を心臓より垂下した場合や下肢の血液プーリングの影響をみた結果、静脈血流量が減少し筋血液量が増加を示した。

3. 運動強度と循環系応答: 血圧変移点

筋収縮がある強度を超えると血圧の上昇が顕著になる(Kagaya et al. 2001)。そこで血圧上昇が高くなる負荷を基準として強度をとらえ血流再分配をみると、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。さらに、筋の酸素代謝は運動時の活動筋酸素動態が負荷強度に対して低負荷と異なる対応を示すのは、血圧変移点よりやや低い負荷からであった。また運動時の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は、血圧変移点より低い負荷(38%MVC)から急上昇した。

4. 血流再分配からみた運動プログラム作成への提案

運動時の循環系応答や主観的筋疲労感覚の変化がみられる時点が血圧変移点の出現付近の負荷強度に類似したことから、運動プログラム作成では適切な運動強度を選択する基準として血圧変移点の負荷を手がかりにすることが有用であると考えられる。

筋形状の変化が筋循環に与える影響

大森芙美子(日本女子体育大学基礎体力研究所客員研究員)

1. はじめに

運動の実践現場では、筋腱を伸張させるストレッチングが良く用いられている。その効果は、筋腱だけでなく、循環系の活性化にも影響を及ぼすと考えられるが、ヒトについてのそのエビデンスは十分ではない。もし、ストレッチングにより、循環系機能が促進あるいは抑制することが明らかになれば、循環機能を促進する効果的なストレッチングの方法を明らかにすることにより、健康・体力づくりのための運動プログラム作成に貢献できる。

2. ストレッチングが筋循環に与える影響

ストレッチングが筋循環に与える影響を明らかにするために、仰臥位での下腿筋受動的ストレッチングを2種の角度[解剖学的正位(AP)と快適最大角度(痛みを感じる角度 -3° : CP)]を用いて行った。そして、1)筋束長の変化、2)筋酸素動態の変化、3)ストレッチング部位より上位に位置する当該筋へ血液を供給する膝窩動脈および静脈血流速度の変化、について検討した。

その結果、1)足関節の背屈に従って、腓腹筋内側頭(MG)とヒラメ筋(SOL)は筋束が伸長し、それらの拮抗筋である前脛骨筋(TA)は短縮し、協働筋であるMGとSOLの筋束長伸張率が異なることを示した(伸長率:MG73%, SOL30%, 短縮率:TA19%)。2)ストレッチング中、SOLでは両角度において筋血液量は増加したが、MGにおいては、APではほとんど変化せず、CPでは減少したことから、筋血液量の応答には下腿協働筋間で相違があり、ストレッチングによって減少する(MG)だけではなく増加する(SOL)筋もあることがわかった。3)ストレッチング中の動脈血流速度および静脈血流速度は有意な変化を示さなかったが、ストレッチング終了に伴う足底屈と共に、動脈血流速度は有意に上昇し、静脈血流速度はそれより数秒遅れて有意に増加した。動脈血流量の増加に遅れて起こる静脈血流量の増加は動脈血流依存であると考えられた。また、ストレッチング中の血流速度を順行成分速度と逆行成分速度に分けて計測すると、CPでは安静時より有意に速度が速くなることが示された。筋束長の伸長度が高いCPでは、ストレッチによって当該筋内の血管が大きく伸長され、血管径が短縮し、血管抵抗が増加したことにより、逆行成分速度が速くなったと考えられる。

次に、Flesh Blood Image法を用いて、ストレッチング中の末梢血管の撮像を行った。その結果、静脈血indexがストレッチング中に減少することが示された。ストレッチングによる筋線維の形状的变化が各筋の血管形状をどのように変化させるはまだ明らかにされていないので、今後は、この方法を用い、各筋別に検討していく必要がある。

3. 循環機能促進に効果的なストレッチングプログラムについて

以上のことから、筋形状を変化させるストレッチングは、その角度や時間等を適切に選定すれば、筋循環へ効果を及ぼすことが確かめられた。本結果からは、快適最大角度で1分間のストレッチングを行うことにより、筋循環への効果が認められた。より効果的なプログラム作成には、まだ更なる検討が必要である。

随意運動時の呼吸・循環応答にみられるセントラルコマンドの働き

佐藤 耕平（日本女子体育大学・助教）

1. セントラルコマンドとは？

運動時に起こる呼吸・循環活動の制御機構の一つとしてセントラルコマンド説がある。このセントラルコマンドは、大脳皮質から生じる運動指令と同期して高位中枢から起こり、呼吸・循環機能を修飾する、フィードフォワード型の調節であると定義されてきた。一方、運動時に筋弛緩薬を投与し、運動努力(effort)を増加させた侵襲的な実験モデルでは、運動努力に比例した循環応答の増加がみられることが報告されている。また、運動をイメージしただけでも、呼吸・循環応答が引き起こされることが知られている。これらは、セントラルコマンドによる循環調節が、必ずしも運動指令を伴わないものであること、さらには努力感や疲労度を反映したセントラルコマンドが循環応答に作用するという、フィードバック型の調節機構であることも示唆する。

2. セントラルコマンドと運動時の循環調節

本プロジェクトでは、運動時の循環調節に対するセントラルコマンドの役割を検討した。検討した課題は主に、1)運動時の脳・内臓血流に対するセントラルコマンドの役割と、2)身体トレーニングに伴う筋交感神経活動の変化に対する、セントラルコマンドの影響である。課題1)では、セントラルコマンドが運動時における脳血流調節に関与するか否かを、2つの実験モデルを用いて検討した。一つ目は「随意-受動運動モデル」、二つ目は「バイブレーションモデル」である。「無負荷随意-受動運動モデル」を用いた実験では、動的運動開始初期に起こる脳血流の増加は、セントラルコマンドに関与する可能性が示唆された。また、セントラルコマンドの脳血流に対する影響は、部位差(地域差)がある可能性が示された。さらに、「バイブレーションモデル」を用いて静的運動時の努力感・疲労感を低下させた場合、努力感に応じた脳血流の応答が見られることが明らかになった。しかしながら、このモデルでは、腎血流応答に対するセントラルコマンドの影響は認められなかった。これらの知見は、セントラルコマンドは、交感神経系を介して応答を調節しているとされているが、交感神経全体に均一して作用するのではなく、地域差があることを示唆するものである。課題2)では、最大努力での局所的なレジスタンストレーニングを導入することにより、上位中枢機能(セントラルコマンド)に刺激を与え、運動時の筋交感神経活動がトレーニング前後において変化するか否かを検討した。その結果、トレーニング後に静的運動時の筋交感神経活動は増加することが明らかとなり、その亢進は筋からの末梢神経反射よりも、セントラルコマンドの増加が関与する可能性が示唆された。

3. 高強度運動時の循環調節

セントラルコマンドの活動が極めて亢進するような、高強度運動時の循環調節の解明は、安全で有効な運動プログラムを構築するうえで重要な課題である。稀にはあるが、ウェイトリフティングやレジスタンス運動時には、脳出血や失神・眩暈を起こすことが報告されている。これは、過度の血圧および脳血流の増減が影響しており、これらの応答には運動中の呼吸法が密接に関連すると考え

られている。本研究では運動時の息こらえと、運動前の過換気が脳血流調節に及ぼす影響を検討した。その結果、高強度運動時に息こらえをした場合、運動中の脳血流の低下と、運動後の急激な増加を誘発することが明らかになった。また、運動前の自発的な過換気による脳血流の低下は、運動後まで持続することが明らかになった。これらの結果は、息こらえによるバルサルバ呼吸と、過換気による低炭酸ガス血症が、運動時の脳血流応答に作用したと考えられる。また、運動前の過換気および運動中の息こらえを防いだ場合、脳血流の増減は抑制された。本研究は、アスリートや一般人がウエイトトレーニングを行う際の、安全な呼吸法を提言するものだと考えられた。

Session 2

プログラム作成の基礎となる科学的エビデンス 2

— 発育、老化、疾患およびトレーニングによる循環系の変化 —

子どもの循環機能の発達

佐藤 耕平 (日本女子体育大学・助教)

身体を構成する各部位の形態や諸機能の発達は一様ではなく、部位および機能により相互に異なる発達過程を持つと言われている。他の組織に比べ、脳神経系の発達は早期に完了すると言われているが、脳の神経細胞がその機能を十分に発揮するには、エネルギー供給を担う脳循環の発達が不可欠と言える。先行研究における、脳血流の発育に関する研究は極めて少ない。また、これら研究においては脳血流量の絶対値を算出し、その経年的な変化にのみ注目し、脳循環機能の発達を捉えている。しかしながら、発育期においては、脳循環の発達と同時に、心拍出量などの心臓を中心とした中心循環機能も発達する。故に、脳循環と中心循環の相対的・相互的な発達過程を把握することも重要であると考えられる。このような観点から本研究プロジェクトでは、発育期の子どもの、心拍出量(Cardiac Output: CO)に対する総頸動脈血流量(Common Carotid Artery Blood Flow: Q_{CCA})の比(%)を脳血流配分比率として算出し、脳循環と心循環の相対的・相互的な発達過程を検討した。

本研究の被験者は、小学校高学年男女 66 名(男 35:女 31)、中学生男女 96 名(男 38:女 58)、高校生女子 83 名であった。測定項目は、椅子座位での安静時の循環機能の指標として、動脈血圧、心拍数(Heart Rate: HR)、一回拍出量(Stroke Volume: SV)、CO をフィノメータ連続指血圧測定装置(Finapres Medical Systems)により測定した。また Q_{CCA} を超音波画像診断装置(Logiq5, GE)により算出した。脳血流配分比率は、 Q_{CCA}/CO の計算式から算出した。

脳血流配分比率(%)の経年的変化を男女毎に下図に示した。男女ともに小 5 が最も高く、中 2 から中 3 にかけて漸減することが示された。女子では小 5-小 6 間および中 1-中 2 間で有意な減少が見られ、中 3 以降ではほぼ成人の値になることが示された。小学および中学期には男女差は認められなかった。本研究における女子における小学 5 年生から中学 3 年生にかけての脳血流配分比率の低下は 1) 小 6 以降の CO (SV 依存) の増加と、2) Q_{CCA} の低下によりもたらされた。この小学期に見られる高い脳血流配分比率は、おそらく発育期における脳神経機能の発達を反映したものである可能性が高い。また、中学後期において脳血流配分比率が、ほぼ成人の値に達する現象は、発育に伴って効率的な脳機能が形成され、余剰な血流が不要になったことを示唆する可能性がある。しかしながら、この発達過程の生理学的な意味については今後の検討が必要である。本研究は、発育期における運動指導や体力作りを行う上での基礎的な資料となるものであり、循環系に対するトレーニングの至適年齢を考慮する上でも興味深いものである。

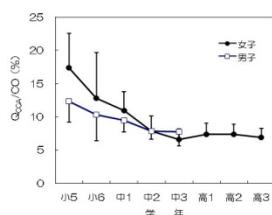


図. 発育期における脳血流配分比率の経年的変化

有疾患における運動および筋虚血に対する血流調節プロファイル

長田卓也 (東京医科大学・講師)

背景: 閉塞性動脈硬化症保有者は、下肢動脈血管の動脈硬化に伴う血流障害のために歩行距離の低下が認められ、運動による疾病下肢筋血行動態への影響が示唆される。

目的: 一過性運動時における血流動態を検討する事を目的とし、末梢循環障害 (Fontaine 分類第 II 度) をきたす下肢閉塞性動脈硬化症保有者を対象に、運動時における血行動態について検討を行うこととした。

方法: 末梢循環障害 (血管造影にて確認されている) をきたす5名の男性閉塞性動脈硬化症保有者 (平均年齢 71 ± 2 歳) を対象に、座位姿勢での多段階負荷等尺性片側膝伸展運動を行った。運動開始前の安静時に足関節上腕血圧比 (ABI) を測定し、運動は一足ごとに両側について行った。両下肢で ABI が低い下肢を患測とし、反対側の下肢を健側とした。運動強度は、最大随意収縮力の 5%、10%、30%そして 50%とそれぞれの強度で3分間とし、多段階的漸増負荷とした。下肢運動の頻度は、5 秒間の等尺性膝伸展運動 (筋収縮) にひき続き、5 秒間の休止期 (筋弛緩) を1サイクルとした。下肢血流の評価は、超音波ドプラー法にて大腿動脈部位において行い、血管径と血流速度により算出した。血流速度は、5 秒間の等尺性膝伸展運動及び5秒間の休止期のそれぞれに得られた3~4拍動の波形を計測し、血流量評価に使用した。運動中の血流反応は、筋弛緩期である休止期血流量から筋収縮期のそれを差し引いた血流増加量を指標とした。

結果: 安静時において患測下肢の ABI 値は、健側に比べ低い値を示した。安静時下肢血流量は、患測が健測より低い傾向を示したが、運動中の下肢血流増加量は、患測において大きい傾向を示した。

考察: 動脈硬化が強い下肢動脈血管 (ABI 値が低い下肢側) における筋収縮血流増加反応が高い事が示唆された。この事はより運動強度の上昇に伴う骨格筋酸素消費量を代償するための血流増加調節、筋虚血に伴う血管拡張代謝産物などの影響が強い事が示唆される。本研究では、運動に伴う患側下肢血流反応は、健側と比べて異なることが明かとなり、今後は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与える影響を検討する必要があると思われる。

高齢者の左室重量と骨格筋量の関係

奥山静代(慶應義塾大学・講師)

1. はじめに

心臓は活動筋の酸素需要に応えるために、心拍出量を増加あるいは血流配分を増減させ運動に必要な酸素の需要を満たそうとする。一方、骨格筋では筋収縮時に筋ポンプ作用が働き、静脈還流量を高め、心臓の前負荷を増加させるので、加齢による骨格筋量の低下は、心筋や血管動態に対する刺激を低下させると考えられる。したがって、骨格筋量の低下がみられる高齢者において、心筋と骨格筋のバランスを取りながら、両機能を高めることが重要であると考えられる。

2. 左室重量と骨格筋量の関係

心筋と骨格筋の関係をみるために、高齢者(15名, 76 ± 5.4 歳)安静時の心形態(心室中隔厚, 左室後壁厚, 左室拡張・収縮末期内径), および大腿部筋厚(大腿直筋, 中間広筋)を超音波Bモード法で測定した。その結果, 心筋の厚さ(左室後壁厚+心室中隔厚)と大腿部筋厚(大腿直筋+中間広筋)との関係をみると, 両者には有意な相関関係($r=0.647$, $p<0.01$)がみられた。さらに大腿部筋厚から推定した大腿部筋体積と, 心形態より算出した左室重量との間において, 正の相関関係($r=0.561$, $p<0.05$)がみられ(図1), 左室重量は大腿部筋体積との間に密接な関係があることが示唆された。

3. 提案

以上のことから, 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臓の容量保持に有効であるといえ, 高齢者も身体運動による筋量の維持が必要といえる。

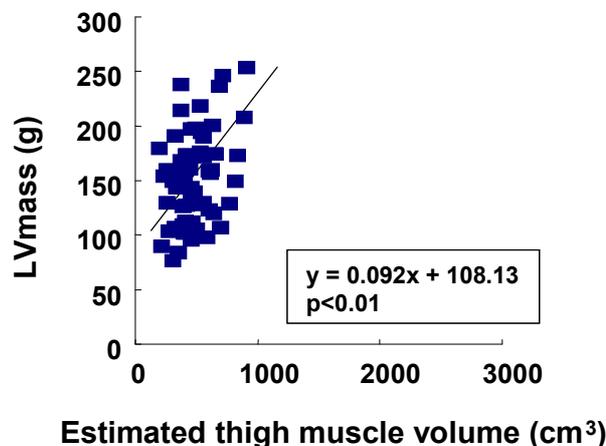


図1. 左室重量と大腿部筋体積との関係

身体トレーニングによる循環機能の向上

齊藤 満(豊田工業大学・教授)

1. はじめに

生活習慣や加齢変化に伴う健康・体力の低下は最終的に高血圧、心疾患などの循環機能の低下や障害としてみられる。この予防には身体活動が有効なことは広く認められているが、その方法論についてはまだ開発の余地が残されている。

2. 循環機能向上を目指す身体トレーニングとしてのハンドグリップ運動

健康の維持・増進をQOLからみると、循環機能に定量的な変化が認められなくても主観的効果として評価されることが少なくない。この背景には定量的には表現できない循環調節システムの機能の向上の存在が考えられる。

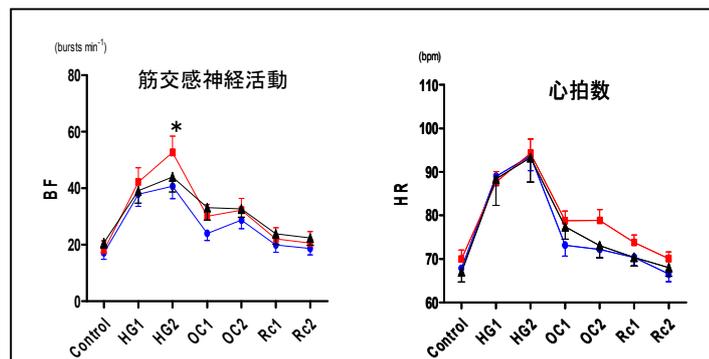
心拍出量などの定量的な循環機能向上にハンドグリップ運動はほとんど期待できないことから、トレーニング運動としての有用性についてはあまり注目されない。しかし、身体運動の一つとして循環調節システムに影響を及ぼす可能性は十分考えられ、何と云っても手軽に行えることから、「トレーニング運動」としての応用可能性は高い。本研究では、ハンドグリップ運動の循環機能向上への効果について、律動的、静的運動、運動時間や強度などを目的合わせて選定し、心拍・血圧反応、循環調節システムの代表としての交感神経活動及び主観的運動感覚の面から検討した。

検討内容は、1)ハンドグリップ運動時の運動意欲・頑張り、疲労感覚や循環反応と交感神経活動の関係、2)高強度ハンドグリップ運動が循環調節に及ぼす影響、3)長期トレーニングモデルとしての利き腕と非利き腕運動時の交感神経活動と循環反応の比較、4)神経性循環調節機能に与えるレジスタンストレーニングの効果とその後の脱トレーニングの影響、である。

結果の概要は、1)小筋群の運動でも全身の循環調節に携わる交感神経活動に十分刺激が与えられる、2)使用頻度の高い利き腕運動の循環調節は非利き腕運動とは異なる、3)短期間の強いハンドグリップレジスタンストレーニングは運動時の交感神経活動反応をより高めるが、この効果はトレーニング停止により速やかに消失する(図1)、にまとめられる。

以上の結果から、ハンドグリップを用いた運動トレーニングは、その運動強度や時間等を適切に選定すれば、心拍や血圧などの定量的な改善が認められなくても、循環調節システムとしての交感神経系に十分効果を及ぼすことが確かめられた。

図 1. 4 週間のハンドグリップトレーニング及び脱トレーニングに伴う運動及び運動後阻血時の交感神経活動、心拍反応の比較。運動時の交感神経活動反応はトレーニング後高まるが、心拍反応の変化はみられない。



Session 3

提案

—安全で効果的な運動プログラム構築に向けて—

「運動に対する循環応答からみた提案」

定本 朋子（日本女子体育大学・教授）

本プロジェクトで得た運動時の循環応答に関する知見をもとに、安全で効果的な運動プログラムの構築に向けて次のような提案をする。

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方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(全身運動)・小筋群運動(局所運動)

大筋群を用いた全身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・努力感に関わる中枢指令(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、運動を行な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持つことは、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。

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(下図)、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、血圧変移点を超えて 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。

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持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。

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)。