一過性コンバインド・サーキットトレーニングにおける局所脳内酸素動態

向 本 敬 洋¹⁾ 植 田 央²⁾ 韓 一 栄³⁾
先 場 瞬²⁾ 大 野 誠²⁾

CHANGES IN CEREBRAL OXYGENATION DURING A SINGLE BOUT OF COMBINED CIRCUIT TRAINING

TAKAHIRO MUKAIMOTO, HISASHI UEDA, ILL-YOUNG HAN,
SHUN SENBA and MAKOTO OHNO

Abstract

The purpose of present study was to investigate the cerebral oxygenation and oxygen uptake ($\dot{V}O_2$) during exercise of a combined circuit training (CCT) and a circuit resistance training (CRT). Nine healthy young male subjects performed the following two trails on separate days: 1) CCT trail (three circuits of aerobic exercise for 5 min at 50% $\dot{V}O_{2max}$ and 1 set of four resistance exercises at 50% one-repetition maximum) and 2) CRT trail (six circuits of the same resistance exercises and intensity as for CCT without aerobic exercise). Exercise duration of these trails was 30 minutes. Cerebral oxygenation was determined by near infrared spectroscopy, and $\dot{V}O_2$ was measured by breath by breath methods. Cerebral oxygenation and $\dot{V}O_2$ were continuously monitored during the exercise. Oxyhemoglobin and total hemoglobin concentration during CCT trail was significantly higher than during CRT trail ($p < 0.05$). Average $\dot{V}O_2$ and energy expenditure during CCT trail were significantly higher than during CRT trail ($p < 0.05$). These results suggest that a single bout of circuit resistance training combined with aerobic exercise induced greater energy expenditure and cerebral oxygenation than those induced by a resistance training with the same exercise duration.

(Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med. 2010, 59 : 529~540)

key word : resistance training, combined circuit training, oxygen uptake, cerebral oxygenation

I . 緒 言

通常、運動プログラムを作成する際には、主に有酸素運動とレジスタンス運動を組み入れることが多い。有酸素運動は、心肺機能や全身持久力の向上のみならず、体脂肪量の減少およびインスリン抵抗の改善、降圧効果、血中脂質プロファイルの改善など様々な効果をもたらし得ることがこれまでの先行研究^{1,2)}で報告されている。一方、レジスタンス運動は、筋力の向上や筋量の増加を目的に実施されることが通例である。

運動指導の現場では、有酸素運動とレジスタンス運動の効果を最大限に引き出す方法として、低強度の有酸素運動とレジスタンス運動を交互に行う運動方法、コンバインド・サーキットトレーニング (combined circuit training : CCT) が近年導入されてきている^{3,4)}。Gettmanら³⁾は、中年男女を対象に、CCTを週に3回、12週間実施させた結果、筋力や心血管系機能の向上が認められたことを報告している。一方、Monterioら⁴⁾によると、7種目のレジスタンス運動を各種目1分間反復する運動条件と同じ種目のレジスタンス運動を30秒間行った直後にトレッド

¹⁾日本体育大学体育研究所
〒158-8508 東京都世田谷区深沢7-1-1

²⁾日本体育大学大学院体育科学研究科
〒158-8508 東京都世田谷区深沢7-1-1

³⁾日本体育大学発育発達
〒227-0033 神奈川県横浜市青葉区鴨志田町1221-1

Research Institute for Sport Science, Nippon Sport Science University
7-1-1 Fukasawa, Setagaya-ku, Tokyo

Graduate School of Health and Sport Science, Nippon Sport Science University
7-1-1 Fukasawa, Setagaya-ku, Tokyo

Laboratory of Growth and Development, Nippon Sport Science University
1221-1 Kamoshida-cho, Aoba-ku, Yokohama, Kanagawa

ミル走を30秒間行う運動条件では, レジスタンス運動の直後にトレッドミル走を加えた運動条件の方が有意に酸素摂取量 (oxygen uptake: $\dot{V}O_2$) およびエネルギー消費量が高値を示したという。したがって, 運動処方において, CCTは筋力の向上はもとより心肺機能の向上やエネルギー消費量の増加をもたらすために有用な運動方法であると考えられる。そこで本研究では, レジスタンス運動の間に有酸素運動を組み入れることにより, 運動中の全身レベルの $\dot{V}O_2$ の増加とともに, 脳内の酸素代謝も亢進する可能性があるとの仮説のもと実験を計画した。

近年, 脳科学分野において, 脳内活動を測定する方法には, 脳磁図 (magnetoencephalography: MEG) や陽電子放射断層撮影装置 (positron emission tomography: PET), 機能的核磁気共鳴断層撮影装置 (functional magnetic resonance imaging: fMRI) などがある。これらの測定方法は頭部を固定して測定するため, 運動中の脳内活動の測定は困難である。一方, 運動中の脳内循環の酸素動態を測定する方法に近赤外分光法 (near infrared spectroscopy: NIRS) がある^{5~10}。NIRSは小型軽量で非侵襲的に神経活動に伴う脳内循環の酸素変化を測定することができるため, 運動中の脳活動を測定することに適している。これまで, NIRSを用いて運動中の局所脳内酸素動態を検討した先行研究は有酸素運動を用いたものがほとんどであり^{5~10}, レジスタンス運動単独あるいはレジスタンス運動の間に有酸素運動を組み入れる運動方法における局所脳内酸素動態を測定した研究は見当たらない。

そこで本研究では, 脳内酸素代謝をより亢進させる運動方法の一資料を構築するために, 有酸素運動とレジスタンス運動を交互に反復する運動条件と, 同一強度・種目のレジスタンス運動を同じ時間実施する運動条件において, 一過性運動中の $\dot{V}O_2$ とエネルギー消費量およびNIRSを用いて局所脳内酸素動態を比較し, レジスタンス運動の間に有酸素運動を組み入れることによって脳内酸素動態が異なるか否かを明らかにすることを目的とした。

Ⅱ. 方 法

A. 被験対象

被験対象は, 20歳代の健康な若年男性9名である。被験対象の身体特性はTable 1に示したとおりであ

る。被験対象は, 特別な競技スポーツを行っておらず, 過去6ヵ月間は週1~2回の運動習慣を有していた。被験対象の健康状態については, 入念に聴き取り調査を行い, いずれの被験者も喫煙・飲酒習慣がなく, 常用薬を服用していないこと, 運動に支障をきたす疾病や障害がないことを確認した。本研究は日本体育大学倫理審査委員会の承認を得, ヘルシンキ宣言の精神に則って実施した。研究の開始に先立ち, 研究の主旨, 内容および注意点について文書および口頭にて説明し, 研究へ参加する同意を書面により得た。

B. 実験スケジュールおよび実験手順

1. 実験スケジュール

実験1では, 身体組成, 2時間の安静時呼吸ガスおよび心拍数 (heart rate: HR), レジスタンス運動における各種目の最大挙上重量 (one-repetition maximum: 1RM) を測定し, 実験2に最大酸素摂取量 (maximal oxygen uptake: $\dot{V}O_{2max}$) を測定した。その後, 実験3, 4に, combined circuit training (CCT) と, circuit resistance training (CRT) という2種類の運動条件下で実験を実施した。

全ての実験は4週間の期間内に実施し, 各実験ともに3~7日の間隔を空けて, 同一時間帯 (午前8

Table 1. Physical characteristics of subjects

Variable	Mean $\pm$ SD
Age (yr)	22.6 $\pm$ 2.5
Height (cm)	169.4 $\pm$ 4.2
Body weight (kg)	62.8 $\pm$ 5.2
BMI (kg/m ²)	21.9 $\pm$ 1.8
% Body fat (%)	15.8 $\pm$ 3.0
$\dot{V}O_{2max}$ (ml/kg/min)	50.4 $\pm$ 4.2
HRmax (beats/min)	188.7 $\pm$ 4.5
Chest press 1RM (kg)	84.9 $\pm$ 9.0
Leg press 1RM (kg)	132.0 $\pm$ 19.3
Seated row 1RM (kg)	91.9 $\pm$ 11.0
Leg extension 1RM (kg)	75.9 $\pm$ 7.7

BMI: body mass index, $\dot{V}O_{2max}$: maximal oxygen uptake, HRmax: maximal heart rate, 1RM: one-repetition maximum.

時～12時)に実施した。2種類の運動実験の実施順序は被験者によりランダム化した。被験者には実験前日の激しい運動を禁止し、さらに実験前日の食事は3食ともなるべく同一の内容の食事を摂取することと、さらに午後9時以降は、食事、アルコールおよびカフェインの摂取は行わないよう指示した。ただし、ミネラルウォーターの摂取は制限しなかった。各実験の当日、被験者には空腹のまま、なるべく運動量の少ない手段で実験室へ来るよう指示した。これらの実験は空調設備のある実験室で行い、実験室の室温および相対湿度をそれぞれ22～24℃、50～60%に設定して実施した。

2. 最大挙上重量 (1RM) の測定

レジスタンス運動の各種目(チェストプレス, レッグプレス, シーテッドロウ, レッグエクステンション)における1RMの測定は, 実際に使用するアイソトニックウエイトスタックマシン (PROTEUS STUDIO-2000, PROTEUS, Taiwan) を用いて行った。1RM測定の手順は, NSCA¹¹⁾ のガイドラインを参考にした。被験者は, 低負荷での挙上動作の確認を行い, その後, 被験者の任意で, 予想される1RMの70～80%に設定した。挙上動作は反動をつけずに, 規定の最大可動範囲を満たした正しいフォームで行った。各試技が成功した場合には負荷を5 kgずつ漸増させ, 1RMを決定した。各試技間の休息時間は3～5分間とした。1RMの判定は, 挙上の際に関節が完全に伸展あるいは屈曲しなくなった時点, 正しいフォームで挙上できなくなった時点のいずれかの前の重量とした。

3. 最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$) の測定

有酸素性能力は自転車エルゴメーター (AEROBIKE 800, COMBI, Japan) を用いて, 漸増運動負荷法で行い, 携帯型呼気ガス分析装置 (METAMAX3B, CORTEX, Germany) を用いてbreath by breath方式で測定した。測定は50 Wattから開始して, 3分毎に30 Wattずつ漸増的に増加させ, オールアウトまで行った。 $\dot{V}O_{2max}$ の判定基準は, 推定最高心拍数 ± 15 beats/min もしくは負荷を増加しても心拍数が増加しなくなった時点, 呼吸交換比が1.10以上になった時点, Borg's scale¹²⁾ が19(非常に辛い) になった時点, $\dot{V}O_{2max}$ が平衡状態になった時点, 被験者が運動中に50rpm以上の回転数を維持できなくなった時点¹³⁾のいずれかとした。

4. 運動条件および測定手順

各運動条件および測定手順の概要をFig. 1に示した。レジスタンス運動ではチェストプレス, レッグプレス, シーテッドロウ, レッグエクステンション (PROTEUS STUDIO-2000, PROTEUS, Taiwan) を用い, 有酸素運動は自転車エルゴメーター (AEROBIKE800, COMBI, Japan) を用いた。各運動条件とも, 同一の機器を用いて実施した。レジスタンス運動の運動強度は事前に測定した1RMから50%1RMの負荷 (kg) に設定した。有酸素運動の運動強度は事前に測定した $\dot{V}O_{2max}$ から一次回帰直線を算出し外挿法で50% $\dot{V}O_{2max}$ の負荷 (Watt) に設定した。

CCTは, 有酸素運動を5分間行った直後に4種類のレジスタンス運動を10回ずつ反復することを1セ

Fig. 1. Experiment procedure of the two exercise trials.

CCT: combined circuit training, CRT: circuit resistance training, A-ex: aerobic exercise, R-ex: resistance exercise, HR: heart rate, RPE: rating of perceived exertion, BL: blood lactate concentration.

ットとし, これを3セット行う運動条件とした。運動時間は計30分間であった。一方, CRTは, CCTと同一の運動強度・運動種目のレジスタンス運動10回ずつ反復することを1セットとし, CCTと同じ運動時間になるよう計6セット行う運動条件とした。反復動作速度は, 反動動作を避けるために挙上局面3秒, 降下局面3秒とした。全てのレジスタンス運動の反復動作はメトロノームのリズムに合わせながら反復させた。有酸素運動においては, 設定された負荷で60~70bpmの回転数で行わせた。総運動時間は両運動条件とも30分間に統一した。運動中においては, 運動5分毎にBorg's scale¹²⁾を用いて, 自覚的運動強度(rating of perceived exertion: RPE)を記録した。

各運動実験の当日, 被験者は前日の夕食後から10時間以上絶食の状態でご運動を実施した。被験者は10分以上の安静座位を保ち, 実験1日目に測定した安静時呼吸ガスおよびHRとほぼ同じレベルになったことを確認した後, 各条件の運動を実施した。測定内相関係数および変動係数はそれぞれ, 0.85および3.5% ($\dot{V}O_2$), 0.91および2.2% (HR) であった。

C. 測定項目および測定方法

1. 呼吸ガスおよび心拍数, エネルギー消費量

呼吸ガスは携帯型呼吸ガス分析装置(METAMAX 3B, CORTEX, Germany)を用いてbreath by breath方式で測定した。呼吸ガスは1呼吸毎に採取し, テレメトリ送信器によってPCに無線送信され, 呼吸ガス代謝分析ソフト(MetaSoft, CORTEX, Germany)で1呼吸毎の測定値から1分間の平均値を求めた。HRは, 胸部に装着した心拍ベルト(POLAR, Finland)によって無線送信され, 上記の呼吸ガス分析ソフトにオンラインで出力し, 1分間の平均値を記録した。その後, 呼吸ガスおよびHRの測定値は5分間毎に平均化して比較した。また, 運動中のエネルギー消費量(energy expenditure: EE)は, 測定後, $\dot{V}O_2$ と $\dot{V}CO_2$ から呼吸交換比を求め, Elia M and Livesey Gの式¹⁴⁾を用いて算出した。

2. 局所脳内酸素動態の測定

局所脳内酸素動態は, 近赤外分光法(NIRS)による携帯型近赤外線組織酸素モニタ装置(PocketNIRS, DynaSense Inc, Japan)を用いて前頭葉前頭前野から採取した。この測定装置は, 様々なノイズの影響

を受けにくいとされる3波長(735 nm, 810 nm, 850 nm)の吸光度から, Modified Beer-Lambert法¹⁵⁾を用いて, 安静時の計測開始時点基準とした相対的な酸素化ヘモグロビン量(oxygenated hemoglobin: oxy-Hb)と脱酸素化ヘモグロビン量(deoxygenated hemoglobin: deoxy-Hb)を算出する方式である。本測定装置は, プローブに光源(発光ダイオード)と検出器(フォトダイオード)が3 cmの間隔で配置されており, 前述した3波長により, 頭皮下2.5~3.0 cm間の大脳皮質表面の脳血管中のoxy-Hbおよびdeoxy-Hbを計測することが可能である¹⁶⁾。一方, この装置はその特性上絶対値の算出が困難であるため, 本研究では, 安静時の吸光度(optical density)を基準(0)とし, その変化量(arbitrary unit: A. U.)を用いて運動中の局所脳内酸素動態を経時的に比較した。測定の際, NIRSの測定用光ファイバースプロブは被験者の前頭鼻骨縫合部より2 cm上部の右前頭葉頭皮に粘着シートで固定した。装着後, 安静中および運動中は頭部を動かさないよう指示した。なお, サンプリング周波数は1 Hzで行った。NIRSの測定は, 運動前の安静時から運動終了まで継続的に行った。統計解析では, 1秒毎の測定値を1分間の値に平均化して比較した。

3. 血中乳酸濃度の測定

血中乳酸濃度は, 血中乳酸測定器(Lactate Pro LT-1710, ARKRAY, Japan)を用いて, 運動前と運動中5分毎に右指尖から採血を行い, 濃度を測定した。

D. 統計解析

被験者の身体特性は全て平均値±標準偏差(mean ± SD)で示し, その他の測定値は全て平均値±標準誤差(mean ± SE)で示した。各運動条件間と時間経過における平均値の差は, 反復測定による二元配置分散分析(運動条件×時間)を用いて比較し, 有意性がみられた場合には, Fisherの最小有意差法により多重比較検定を行った。なお, 運動条件間における平均値の差の検定には, 対応ありのt-testを用いた。なお, いずれの検定も, 有意水準は5%未満とした。

Ⅲ. 結 果

A. 自覚的運動強度(RPE)および心拍数(HR)

運動中のRPEは, CCT 12.7 ± 0.4 , CRT 12.0 ± 1.1

であり、両運動条件間で有意な差はみられなかった。HRの経時変化をFig. 2に示した。CCTにおけるHRは運動中5分から25分の時点までCRTより有意に高値を示した ($p < 0.05$)。運動中30分間の平均HRは、CCTにおける 125.6 ± 3.3 beats/min がCRTにおける 111.9 ± 4.5 beats/min よりも有意に高値を示した ($p < 0.05$)。

B. 酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) および二酸化炭素排出量 ($\dot{V}CO_2$)、エネルギー消費量 (EE)

$\dot{V}O_2$ の経時変化をFig. 3に示した。CCTにおける $\dot{V}O_2$ は運動中の全ての時点で、CRTよりも有意に高値を示した ($p < 0.05$)。運動中30分間の平均 $\dot{V}O_2$ は、CCTにおける 24.1 ± 1.3 ml/kg/min がCRTにおける 16.1 ± 0.3 ml/kg/min よりも有意に高値を示した ($p < 0.05$)。 $\dot{V}CO_2$ の経時変化をFig. 4に示した。 $\dot{V}O_2$ と

Fig. 2. Changes in average heart rate during the two trials.

Inset figure show the mean heart rate values during 30 min of exercise. Values are means $\pm$ SE. CCT: combined circuit training, CRT: circuit resistance training, A: aerobic exercise, R: resistance exercise. * Significant difference ($p < 0.05$) between two trials.

Fig. 3. Changes in average oxygen uptake during the two trials.

Inset figure show the mean oxygen uptake during 30 min of exercise. Values are means $\pm$ SE. CCT: combined circuit training, CRT: circuit resistance training, A: aerobic exercise, R: resistance exercise. * Significant difference ($p < 0.05$) between two trials.

Fig. 4. Changes in average carbon dioxide production during the two trials.

Inset figure show the mean carbon dioxide production during 30 min of exercise. Values are means $\pm$ SE. CCT: combined circuit training, CRT: circuit resistance training, A: aerobic exercise, R: resistance exercise. * Significant difference ($p < 0.05$) between two trials.

Fig. 5. Comparison of energy expenditure during exercise between the two trials.

Values are means $\pm$ SE. CCT: combined circuit training, CRT: circuit resistance training. * Significant difference ($p < 0.05$) between two trials.

同様に, CCTにおける $\dot{V}CO_2$ は運動中の全ての時点で, CRTよりも有意に高値を示した ($p < 0.05$). 運動中30分間の平均 $\dot{V}CO_2$ は, CCTにおける 20.3 ± 0.8 ml/kg/minがCRTにおける 14.8 ± 0.3 ml/kg/minよりも有意に高値を示した ($p < 0.05$).

Fig. 5には両運動条件におけるEEを示した. 30分間のEEは, CCTにおける 217.7 ± 9.6 kcalがCRTにおける 147.2 ± 5.1 kcalよりも有意に高値を示した ($p < 0.05$).

C. 脳内酸素化ヘモグロビン量 (oxy-Hb量), 脳内脱酸素化ヘモグロビン量 (deoxy-Hb量), 脳内総ヘモグロビン量 (total-Hb量) の変化

脳内oxy-Hb量 (Fig. 6A) は運動前と比較して, CCTでは運動開始3分後から運動終了まで, CRTでは運動開始12分後運動終了まで有意に高値を示した ($p < 0.05$). 運動条件間の比較では, 運動開始8分後から運動終了まで, CCTにおけるoxy-Hb量がCRTにおけるそれよりも有意に高値を示した ($p < 0.05$). 運動中30分間の平均oxy-Hb量は, CCTにおける 0.23 ± 0.02 A. U. がCRTにおける 0.11 ± 0.02 A. U. よりも有意に高値を示した ($p < 0.05$).

脳内deoxy-Hb量 (Fig. 6B) は, 両運動条件とも, 運動開始から22分まで運動前と比較して有意に低値を示した ($p < 0.05$). 運動条件間の比較では, 全ての時点において有意な差はみられなかった. また, 運動中30分間の平均値も, 運動条件間で有意な差はみられなかった.

脳内total-Hb量 (Fig. 6C) は, CCTでは運動開始4分後から運動終了まで, CRTでは運動開始8分後から運動終了まで運動前と比較して有意に高値を示した ($p < 0.05$). 運動条件間の比較では, 運動開始8分後から19分後までCCTにおけるtotal-Hb量がCRTによるそれよりも有意に高値を示した ($p < 0.05$). 運動中30分間の平均値もCCT (0.17 ± 0.03 A. U.) がCRT (0.08 ± 0.02 A. U.) よりも有意に高値を示した ($p < 0.05$).

Fig. 6. The values of changes from resting values (pre-exercise) in A) Cerebral oxyhemoglobin concentration (Δ oxy-Hb), B) deoxyhemoglobin concentration (Δ deoxy-Hb) and C) total hemoglobin concentration (Δ total-Hb) during the two trials.

Inset figure show the mean values for 30 min during exercise. Values are means $\pm$ SE. CCT: combined circuit training, CRT: circuit resistance training, A: aerobic exercise, R: resistance exercise. * $p < 0.05$ between two trials. †† and underline $p < 0.05$ between CCT trial and Pre. † and underline $p < 0.05$ between CRT trial and Pre.

D. 血中乳酸濃度

血中乳酸濃度の経時的変化をFig. 7に示した。血中乳酸濃度は運動前と比較して、両運動条件とも全ての時点において有意に高値を示した ($p < 0.05$)。運動条件間の比較では、全ての時点で有意な差はみられなかった。また、運動30分間の平均値においても有意な差はみられなかった。

Ⅳ. 考 察

本研究では、有酸素運動とレジスタンス運動を交互に行う運動条件 (CCT) と、レジスタンス運動のみを行う運動条件 (CRT) を同一の相対運動強度と運動時間で実施し、運動中の $\dot{V}O_2$ 、エネルギー消費量と脳内酸素動態を比較した。これまで、NIRSを用いて一過性の運動による運動中の脳内酸素動態に関する研究は数多く報告されている⁵⁻¹⁰)。先行研究によると、自転車エルゴメーターを用いて150% $\dot{V}O_{2max}$ で30秒間の運動を間欠的に6セット実施させた結果、運動中のoxy-Hb量が前半の1~3セットでは安静時よりも増加したが、後半のセットでは段階的に減少したとする成績⁸)や、上肢による6分間の最大負荷運動をオールアウトまで実施させたところ、運動中のoxy-Hb量は運動開始とともに減少したとする成績が報告されている⁷)。これらの先行研究のように $\dot{V}O_{2max}$ を超えるような超最大運動やオールアウトま

で行う運動では、筋内の低酸素化が進み、筋内の乳酸などの代謝産物が蓄積され、末梢および中枢の疲労が引き起こされるに伴い脳内血流が減少することから、運動時の脳内のoxy-Hb量が安静時よりも低下したものと考えられる^{8,9,17,18})。一方、脳虚血患者を対象にマルチチャンネルfNIRSを用いて、指先タッピング作業中における運動皮質中心部の酸素動態を測定した研究⁵)では、作業開始直後にoxy-Hbが増加したことが報告されている。また、健康な若年者を対象に比較的低強度の有酸素運動を運動強度30% $\dot{V}O_{2max}$ から60% $\dot{V}O_{2max}$ に漸増させる運動条件で実施させた研究では、前頭葉のoxy-Hb量および側頭葉後方の中大脳動脈血流速度が運動強度の漸増とともに増加したという⁶)。このように、低強度の運動ではoxy-Hb量が安静時よりも増加することが先行研究より明らかになっている。

本研究の成績では、両運動条件とも運動中のoxy-Hb量が安静時より高値を示し、deoxy-Hb量が安静時よりも低値を継続した (fig. 6)。本研究で採用した運動強度は、レジスタンス運動では50%1RM、有酸素運動では50% $\dot{V}O_{2max}$ であり、これらの運動強度は、比較的安全に実施しうる強度であり、実際の運動指導の現場では運動初心者や高齢者、低体力者に対する運動処方において推奨される運動強度である^{19,20})。Ideら⁶)の研究によると、運動強度30%~60% $\dot{V}O_{2max}$ の運

Fig. 7. Changes in mean blood lactate concentration during the two trials.

Inset figure show the mean values for 30 min during exercise. Values are means $\pm$ SE. CCT: combined circuit training, CRT: circuit resistance training, A: aerobic exercise, R: resistance exercise. No significant differences were observed between the two trials.

動中に脳内oxy-Hb量が増加し、HRは95～134beats/minであったという。本研究における運動中のHR (Fig. 2) は、CCTが 125.6 ± 3.3 beats/min, CRTが 111.9 ± 4.5 beats/minであり、Ideら⁶⁾の成績と同様の値を示し、また、本研究で設定した運動強度では、換気亢進から誘発される動脈CO₂分圧の減少により、脳血流が増加し、脳内の血中酸素量も一定に保たれるか、あるいは増加するといわれている²¹⁾。つまり、低強度の運動は、有酸素性エネルギー供給系に依存するため、運動中において全身レベルのヘモグロビンの酸素運搬能が増加し、それに伴う全身の血流量が増加し、脳内のoxy-Hb量が増加すると推察される。

ところで、前頭前野は短期記憶、感情、意欲など様々な機能を統合する部位であり、この部位の指令により一次運動野が働き、身体活動を調節している。先行研究²²⁾では、50% $\dot{V}O_{2peak}$ の運動強度で10分間の自転車ペダリングを行い、運動前後のStroopテスト中の脳活動をfNIRSを用いて解析した結果、運動後において前頭前野背外側部の酸素化が有意に上昇したことを報告している。また、疲労困憊に至る激運動においては、前頭前野および一次運動野の酸素化が低下することが、NIRSを用いて明らかにされている^{8,9)}。このように、運動により前頭前野および一次運動野の酸素動態が変化することがNIRSを用いて検証されており、前頭前野の酸素動態を測定することによって脳内の活性を同定できうと考えられる。運動中の脳内の深部情報を得るためには、マルチチャンネルfNIRSを用いて精密に測定する必要がある。しかしながら、本研究での測定部位は前頭前野であり、測定装置の特性上、測定の限界部位が大脳皮質の外側部のみであるため、脳内の深部における酸素動態については明確な評価はできていないのが実状である。本研究の測定条件では運動中における前頭前野の深部情報について詳細に検討することは困難であるため、今後、運動中の脳内酸素動態を測定する際は測定装置および方法を考慮する必要があると考えられる。

一方、脳内oxy-Hb量は運動開始8分後から運動終了までCCTがCRTに比べ、有意に高値を示した。脳内oxy-Hb量とdeoxy-Hb量の総和であるtotal-Hbでは運動開始8分後から19分後までCCTがCRTよりも有

意に高値を示した。また、HRおよび $\dot{V}O_2$ も運動開始から全ての時点でCCTがCRTよりも高値を示した。したがって、全身レベルの $\dot{V}O_2$ の増加に伴い、脳内oxy-Hb量も増加することが推察される。一方、運動中の血中乳酸濃度 (Fig. 7) はそれぞれ 4.2 ± 0.7 mmol/l (CCT), 4.6 ± 0.4 mmol/l (CRT) であり、両運動条件間で有意な差はみられなかった。本研究で実施したCRTおよびCCTは低強度であっても、解糖系を主とした無酸素性エネルギー供給機構に依存する運動であり、血中乳酸濃度を高める運動条件であったと考えられる。Ideら⁶⁾によると、脳酸素動態は血中乳酸濃度に関係するという。これは、運動中に $\dot{V}O_2$ が増えると、蓄積された筋内の乳酸からグルコースの新生が亢進し²³⁻²⁶⁾、新生されたグルコースを脳に供給する過程で脳血流量が増加するためと考えられる。しかしながら、本研究においては、両運動条件間で血中乳酸濃度に有意な差はみられなかったことから、血中乳酸濃度の差異が脳内oxy-Hb量に大きく関与した可能性は少ないと思われる。

運動時には中心循環が呼応し、血圧およびHRの増加はもとより、脳全体に血液を供給する中大脳動脈速度、血中CO₂濃度が増加する⁶⁾。一般に、有酸素運動は心拍数が増加しやすく、また、収縮期血圧は増加するが、拡張期血圧は低下するため平均血圧が比較的一定に保たれる²⁷⁾。これに対し、レジスタンス運動はHRの増加が少なく²³⁾、収縮期および拡張期ともに血圧が上昇し平均血圧は上昇する^{28,29)}。全身血圧の変化に対して脳血管抵抗は変化し、脳灌流圧が比較的一定に保たれる自動調整が働く³⁰⁾ため、CCTに比べレジスタンス運動のみのCRTでは、脳血管は収縮しやすいと考えられる。脳血流量は、HRや脳血管抵抗で規定されることから、CCTの方が脳血流は増加しやすいと考えられる。このような機序も想定され、CCTの方がCRTよりも運動中の脳内oxy-Hb量が高値を継続したと推察される。しかしながら、運動時の脳内酸素動態に影響を及ぼす要因として、動脈血中のCO₂分圧の変化、脳神経細胞の活動に起因する代謝産物、さらに自律神経系活動など多彩な要因が明らかにされている^{5-9,30)}。したがって、CCTにおける運動中の脳内酸素動態については今後さらに検討を要する課題が多いといえよう。

本研究では、両運動条件とも運動中のoxy-Hb量が安静時よりも高値を持続し、さらに、レジスタンス

運動と有酸素運動を交互に行うことによって, レジスタンス運動のみの運動条件よりも運動中の oxy-Hb 量および total-Hb 量が増加した。したがって, レジスタンス運動の途中に有酸素運動を組み入れることで, $\dot{V}\text{O}_2$ およびエネルギー消費量を増加させることはもとより, 脳内酸素代謝も亢進する可能性が示めされた点は興味深い。本研究の成績は, レジスタンス運動と有酸素運動を交互に実施する運動方法は, 運動中の脳活動に対しても有用な運動方法の一つである可能性を示唆するものである。実際に, CCTの運動方法は多岐にわたるが, 運動処方への応用が着手されて日が浅い。今後は, 運動強度や時間を考慮し, 様々な運動方法における生理的応答を, 脳内酸素動態のみならず心理的および精神的な面からの検討を加えることで, 生活習慣病の予防・改善および健康づくりに対する運動処方に加え, 脳機能を高める運動処方の開発にも貢献できると考えられる。

V. ま と め

本研究は, 特別な競技スポーツを行っていない健康な若年男性 9 名を対象に, 有酸素運動とレジスタンス運動を交互に反復するコンバインド・サーキットトレーニング (CCT) と, 同一の強度・種目のレジスタンス運動を同じ時間行う運動条件 (CRT) における運動中の酸素摂取量 ($\dot{V}\text{O}_2$) およびエネルギー消費量, 局所脳内酸素動態を比較検討した。CCTは, $50\%\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ で 5 分間の有酸素運動後に, $50\%1\text{RM}$ で 4 種目のレジスタンス運動を 3 セット実施し, 合計 30 分間行った。CRTは同一の運動強度・種目でレジスタンス運動のみをCCTと同じ時間になるよう 6 セット実施した。酸素摂取量の測定はbreath by breath法を用い, 局所脳内酸素動態はNIRSを用いて測定した。運動中の平均 $\dot{V}\text{O}_2$ および総 $\dot{V}\text{O}_2$, エネルギー消費量は, CCTがCRTよりも有意に高値を示した。局所脳内酸素動態では, 両運動条件とも oxy-Hb 量および total-Hb 量が安静時よりも高値を示した。さらに, CCTにおける oxy-Hb および total-Hb 量はCRTによるそれらより有意に高値を示した ($p < 0.05$)。以上より, 有酸素運動とレジスタンス運動を交互に行う運動方法 (CCT) はレジスタンス運動のみを実施する方法 (CRT) よりも運動中の $\dot{V}\text{O}_2$ およびエネルギー消費量を増加させるだけではなく, 脳内酸素代謝をも上昇させることが確認された。

謝 辞

本研究は, 平成21年度日本体育大学学術研究補助費の助成により実施された研究の一部である。ここに感謝の意を表します。

(受 理 日 平成22年 8 月 3 日)

参 考 文 献

- 1) Bahr R, Høstmark AT, Newsholme EA, Grønnerød O, and Sejersted OM. Effect of exercise on recovery changes in plasma levels of FFA, glycerol, glucose and catecholamines. *Acta Physiol Scand*, 143: 105-115, 1991.
- 2) Pescatello LS, Franklin BA, Fagard R, Farquhar WB, Kelley GA, and Ray CA. American College of Sports Medicine. American College of Sports Medicine position stand. Exercise and hypertension. *Med Sci Sports Exerc*, 36: 533-553, 2004.
- 3) Gettman LR, Ward P, and Hagan RD. A comparison of combined running and weight training with circuit weight training. *Med Sci Sports Exerc*, 14: 229-234, 1982.
- 4) Monteiro AG, Alveno DA, Prado M, Monteiro GA, Ugri-nowitsch C, Aoki MS, and Piçarro IC. Acute physiological responses to different circuit training protocols. *J Sports Med Phys Fitness*, 48: 438-442, 2008.
- 5) Akiyama T, Ohira T, Kato T, Toda Y, Orii M, Hiraga K, Fukunaga A, Kobayashi M, Onozuka S, and Kawase T. Motor-related intracortical steal phenomenon detected by multichannel functional near-infrared spectroscopy imaging. *Cerebrovasc Dis*, 20: 337-346, 2005.
- 6) Ide K, Horn A, and Secher NH. Cerebral metabolic response to submaximal exercise. *J Appl Physiol*, 87: 1604-1608, 1999.
- 7) Nielsen HB, Boushel R, Madsen P, and Secher NH. Cerebral desaturation during exercise reversed by O_2 supplementation. *Am J Physiol*, 277: H1045-H1052, 1999.
- 8) Shibuya K, Tanaka J, Kuboyama N, and Ogaki T. Cerebral oxygenation during intermittent supramaximal exercise. *Respir Physiol Neurobiol*, 140: 165-172, 2004.
- 9) Shibuya K, Tanaka J, Kuboyama N, Murai S, and Ogaki T. Cerebral cortex activity during supramaximal exhaustive exercise. *J Sports Med Phys Fitness*, 44: 215-219, 2004.
- 10) 田中利明, 山田陽介, 横山慶一, 安藤創一, 矢部京之助. 頸髄損傷者の常酸素・低酸素環境下における軽運動時の脳内酸素動態, 日本生理人類学会誌, 14: 157-162, 2009.
- 11) Carmer JT and Coburn JW. Fitness Testing Protocols and Norms. In: *NSCA's essential of personal training* (Earle RW, Baechle TR) Champaign: Human Kinetics, 217-263, 2004.
- 12) Noble BJ, Borg GAV, Jacobs I, Ceci R, and Kaiser P. A category-ratio perceived exertion scale: relationship to blood and muscle lactates and heart rate. *Med Sci Sports Exerc*, 15: 523-528, 1983.

- 13) American College of Sports Medicine. In: *ACSM's Guidelines for exercise testing and prescription* (7th ed), Philadelphia: Lippincott Williams & Willins, 93-114, 2006.
- 14) Elia M and Livesey G. Theory and validity of indirect calorimetry during net lipid synthesis. *Am J Clin Nutr*, 47: 591-607, 1988.
- 15) Delpy DT, Cope M, van der Zee P, Arridge S, Wray S, and Wyatt J. Estimation of optical pathlength through tissue from direct time of flight measurement. *Phys Med Biol*, 33: 1433-1442, 1988.
- 16) 水野利彦, 渡辺享志, 鹿山貴弘, 岩井秀直, 山下 豊, 三輪光春. 無拘束計測のための携帯型近赤外線組織酸素モニタ装置の開発. 医用・生体工学研究会, MBE-09-114: 1-4, 2009.
- 17) Loscher WN and Nordlund MM. Central fatigue and motor cortical excitability during repeated shortening and lengthening actions. *Muscle Nerve*, 25: 864-872, 2002.
- 18) Pitcher JB and Miles TS. Alterations in corticospinal excitability with imposed vs. voluntary fatigue in human hand muscles. *J Appl Physiol*, 92: 2131-2138, 2002.
- 19) American College of Sports Medicine. In: *ACSM's Guidelines for exercise testing and prescription* (7th ed), Philadelphia: Lippincott Williams & Willins, 131-173, 2006.
- 20) Earle RW and Baechle TR. Resistance training program design. In: *NSCA's essential of personal training* (Earle RW, Baechle TR), Champaign: Human Kinetics, 362-398, 2004.
- 21) Hellström G, Fischer-Colbrie W, Wahlgren NG, and Jogestrand T. Carotid artery blood flow and middle cerebral artery blood flow velocity during physical exercise. *J Appl Physiol*, 81: 413-418, 1996.
- 22) Yanagisawa H, Dan I, Tsuzuki D, Kato M, Okamoto M, Kyutoku Y, Soya H. Acute moderate exercise elicits increased dorsolateral prefrontal activation and improves cognitive performance with Stroop test. *Neuroimage*, 50: 1702-1710, 2010.
- 23) Bloomer RJ. Energy cost of moderate-duration resistance and aerobic exercise. *J Strength Cond Res*, 19: 878-882, 2005.
- 24) Astrand PO, Hultman E, Juhlin-Dannfelt A, and Reynolds G. Disposal of lactate during and after strenuous exercise in humans. *J Appl Physiol*, 61: 338-343, 1986.
- 25) Gollnick PD, Bayly WM, and Hodgson DR. Exercise intensity, training, diet, and lactate concentration in muscle and blood. *Med Sci Sports Exerc*, 18: 334-340, 1986.
- 26) Hermansen L and Stensvold I. Production and removal of lactate during exercise in man. *Acta Physiol Scand*, 86: 191-201, 1972.
- 27) MacDougall JD. Blood pressure responses to resistive, static and dynamic exercise, In: *Cardiovascular response to exercise* (Fletcher GF, ed.), New York: Futura Publishing, 155-173, 1994.
- 28) MacDougall JD, McKelvie RS, Moroz DE, Sale DG, McCartney N, Buick F. Factors affecting blood pressure during heavy weight lifting and static contractions. *J Appl Physiol*, 73: 1590-1597, 1992.
- 29) Shoemaker JK, Hodge L, Hughson RL. Cardiorespiratory kinetics and femoral artery blood velocity during dynamic knee extension exercise. *J Appl Physiol*, 77: 2625-2632, 1994.
- 30) 定本朋子. 末梢循環 運動性充血と運動時の血流再配分. 循環Ⅱ:運動時の調節と適応, 第1版, 斎藤満編著, 東京, ナップ, 54-63, 2007.