

疲労閾値以下のトレーニングが 循環・代謝機能に及ぼす効果

日本女子体育大学 本間 幸子

(共同研究者) 同 加賀谷 淳子

The Training Effect of Static Exercise at Low Intensity on Circulatory and Metabolic Responses to Handgrip Exercise

by

Sachiko Homma, Atsuko Kagaya

Research Institute of Physical Fitness, Japan

Women's college of Physical Education

ABSTRACT

The purpose of this study was to assess the effects of isometric, handgrip exercise training at low intensity (15% of maximum voluntary contraction : 15% MVC) on maximum muscle strength, and blood pressure, O₂ supply and O₂ consumption in the brachio-radialis muscles during submaximal isometric handgrip exercise (15% MVC). Twelve female subjects (aged 45 ~ 67 years) performed isometric handgrip exercise at 15% MVC for 5-min. The training frequency was 5 times per week and training period was 10 weeks.

After training, the maximum handgrip strength increased from 24.5 ± 1.0 kg to 26.4 ± 1.1 kg in trained forearm ($P < 0.05$), and from 24.0 ± 1.2 kg to 25.6 ± 1.0 kg in untrained forearm ($P < 0.05$). The number of contraction at 30% of pretraining MVC increased not only in the trained forearm (from 65.0 ± 5.7 to 139.3 ± 16.2 , $P < 0.05$), but also in the untrained forearm (from 61.4 ± 4.1 to 110.2 ± 16.1 , $P < 0.05$). After the training, the resting diastolic blood pressure was decreased ($P <$

0.05), and the systolic and diastolic blood pressure during 5-min isometric handgrip exercise at 15% MVC tended to decrease. The reduction in oxy-Hb volume during static exercise tended to decrease after training.

These results suggest that the training of isometric handgrip exercise at low intensity affects the circulatory system and metabolism, not only in the trained arm, but also in the untrained arm.

要 約

本研究は、疲労閾値以下（最大筋力の15%）の静的掌握運動トレーニングが中高年者の筋力、循環・代謝機能に及ぼす効果について検討することを目的とした。45～67歳の健康な女性12名は、最大筋力の15%に相当する強度（15% MVC）の静的掌握を5分間持続するトレーニングを1週間に5日の頻度で10週間行った。その結果、トレーニング肢および非トレーニング肢において最大筋力および一定強度の運動の持続回数が増加し、安静時の拡張期血圧が低下することが示された。また、トレーニング後ではいずれの腕の場合でも、一定強度（15% MVC）の静的掌握運動中の血圧上昇が抑制された。

さらにトレーニング後では、運動中の筋における酸素化ヘモグロビンの減少量は低下し、運動後の筋への酸素供給量は減少したことから、運動中の筋への酸素供給が亢進した可能性が考えられた。これらのことから15% MVC強度の静的掌握運動トレーニングはトレーニング肢のみならず、非トレーニング肢の循環および代謝にも影響を及ぼす可能性が示唆された。

緒 言

等尺性筋力の発揮場面では、最大筋力の15%強度が non-fatiguing contraction とされており、それ以下の強度では長時間にわたって収縮が

可能であるとされてきた^{3,9)}。しかし、一方で15%強度の等尺性収縮でも時間の経過にもなると血圧の上昇^{5,8)}、血中乳酸濃度および血中K⁺の増加^{10,12)}も報告されている。このことは、15%といった低強度の運動でも心臓血管系や代謝系を賦活させる効果がある可能性を示すと考えられる。

中高年者を対象として、筋機能および循環・代謝機能の向上を目的としたトレーニングを処方する場合、効果が同様であるならば運動強度は低く設定した方が安全性の面からは望ましいと思われる。したがって15%といった極めて低い強度を用いたトレーニングを行うことによって、筋機能および循環・代謝機能に向上が認められれば、運動処方の現場に重要な情報を提供すると考えられる。

以上のことから本研究では、15%強度の静的掌握運動が筋機能および循環・代謝機能に及ぼす影響について、最大筋力、運動持続時間、血圧および筋の酸素供給量および酸素消費量の変化から検討することにした。

1. 方 法

1.1 被検者

メディカルチェックにおいて、呼吸循環器系および血液成分等に異常が認められなかった45～67（平均58.8±2.3）歳の健康な女性12名を被検者とした。

1.2 トレーニング

最大握力 (MVC) の 15% 強度の静的掌握運動をトレーニングに用いた。被検者は、バネの強さをそれぞれの被検者の 15% MVC に設定した器具 (図1) を用いて、静的掌握運動を5分間行った。トレーニングの頻度は1週間に5日であり、トレーニングの期間は原則として10週間とした。なお、トレーニングを右腕で行う者は6名、左腕で行う者は6名とした。

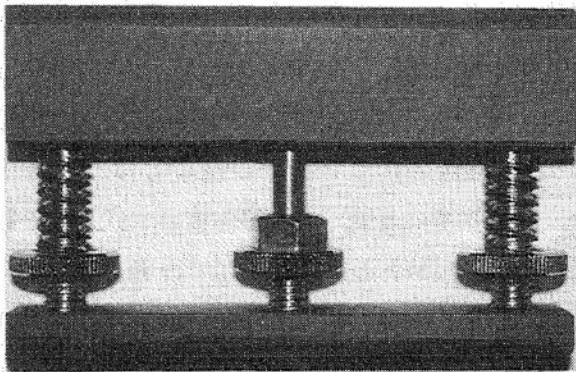


図1 掌握運動トレーニングに用いた器具

1.3 実験手順

被検者は環境温度が24度、相対湿度が60%に保持されている環境制御室に入室し、仰臥位で約20分休息した後、図2に示すようなプロトコルの測定を行った。すなわち、それは5分間の運動前安静、5分間の静的掌握運動 (15% MVC 強度)、5分間の運動後回復期、疲労困憊に至るまでの動的掌握運動で構成されるものである。動的掌握運動は、それぞれの被検者の 30% MVC 強度に相当する重りを1秒に1回の頻度で約2 cm 持ち

上げるものとした。測定は左右それぞれの腕で運動する場合について行い、各測定の間には30分以上の休息をはさんだ。掌握運動の強度はトレーニング前に測定した最大握力の15%とし、トレーニング前と後において同様のプロトコルの測定を行った。

1.4 測定項目

トレーニングの前後で、握力計 (ヤガミ, DN 100 N) を用いて最大握力を測定した。被検者は仰臥位で3回にわたって最大努力での筋力発揮を行い、その平均値を最大値とした。

環境制御室入室後、約20分仰臥位安静を保った後に、水銀血圧計を用いて3~5回、血圧を測定した。安定した3つの計測値の平均値を安静時血圧とした。

運動前安静時、運動中および運動後回復期において、腕橈骨筋に相当する部位に近赤外分光装置 (島津製作所, OM-100 A) の送受光プローブを固定し、その部位における酸素化ヘモグロビン量 (oxy-Hb)、脱酸素化ヘモグロビン量 (deoxy-Hb) および総ヘモグロビン量 (total-Hb) の変化を観察した。なお、送受光プローブ間の距離は原則的に3 cm とし、それぞれの量的な変化は以下の演算式を用いて算出した。

$$\Delta [\text{oxy-Hb}] = -2.89_{JA775} + 1.23_{JA807} + 2.30_{JA827}$$

$$\Delta [\text{deoxy-Hb}] = 3.01_{JA775} - 0.85_{JA807} - 1.82_{JA827}$$

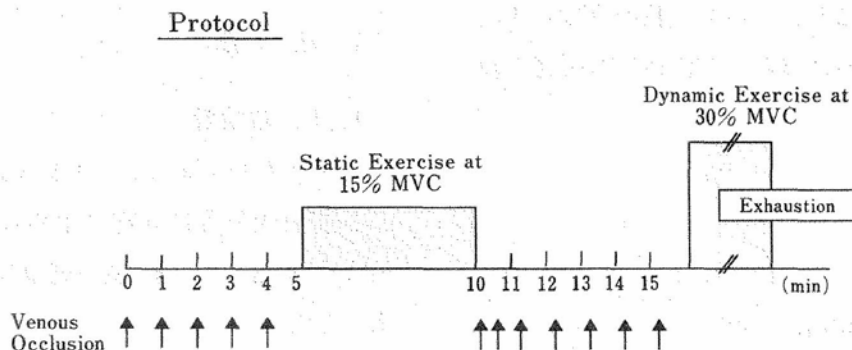


図2 測定のプロトコール

$$\Delta [\text{total-Hb}] =$$

$$0.12_{\Delta A775} + 0.38_{\Delta A807} + 0.48_{\Delta A827}$$

($\Delta A 775$, $\Delta A 807$ および $\Delta A 827$: それぞれの波長での吸光量)

また運動終了直後, 0.5, 1, 2, 3, 4 および 5 分後には上腕に巻いたカフに 60 mmHg の圧力を加え, そのときの total-Hb および deoxy-Hb の変化から以下の index を算出した²⁾.

$$\text{O}_2 \text{ supply index} =$$

$$\left[\frac{d(\text{total-Hb})}{dt} \right] \cdot \text{SaO}_2 \cdot 100^{-1} \quad (\text{O. D.} \cdot \text{min}^{-1})$$

$$\text{O}_2 \text{ consumption index} =$$

$$\left[\frac{d(\text{deoxy-Hb})}{dt} \right] - \left[\frac{d(\text{total-Hb})}{dt} \right] \cdot (100 - \text{SaO}_2) \cdot 100^{-1} \quad (\text{O. D.} \cdot \text{min}^{-1})$$

(SaO_2 : 動脈血酸素飽和度)

心電図は胸部双極誘導法にて導出した。運動を行わない側の手の第 2 指にパルスオキシメータ (日本光電社, oxypal) のプローブを, 第 3 指にはフィナプレス血圧計測装置 (Ohmeda 社, Finapres 2300) のフィンガーカフを装着し, 動脈血酸素飽和度と血圧を連続的に測定した。

1. 5 統計処理

測定値はすべて平均値±標準誤差であらわした。左右それぞれの腕でのトレーニング前後の測定値の差の検定は paired-t test を用いて行った。有意水準は $P < 0.05$ とした。

2. 結 果

図 3 はトレーニング肢と非トレーニング肢での最大握力およびトレーニング前の MVC の 30% 強度の掌握運動の持続回数を示したものである。最大握力はトレーニング肢において被検者 12 名中 10 名で増加し, 平均値でも $24.5 \pm 1.0 \text{ kg}$ から, $26.4 \pm 1.1 \text{ kg}$ に有意 ($P < 0.05$) に増加した。また, 非トレーニング肢においても被検者 12 名中 9 名で増加し, 平均値でも $24.0 \pm 1.2 \text{ kg}$ から

$25.6 \pm 1.0 \text{ kg}$ に有意 ($P < 0.05$) に増加した。

その結果, トレーニング前の MVC の 15% 強度をトレーニング後の MVC を基準にすると, トレーニング肢では $12.2 \sim 15.7 (14.0 \pm 1.1) \%$, 非トレーニング肢では $10.7 \sim 15.4 (14.1 \pm 1.2) \%$ となった。30% MVC 強度の動的掌握運動の持続回数はトレーニング肢で 65.0 ± 5.7 から $139.3 \pm 16.2 (P < 0.05)$ に, 非トレーニング肢では 61.4 ± 4.1 から $110.2 \pm 16.1 (P < 0.05)$ に有意に増加した。

図 4 は安静時血圧および心拍数 (HR) をトレーニング前後で比較したものである。トレーニング前後において収縮期血圧 (SBP) は $115.6 \pm 11.0 \text{ mmHg}$ から $111.2 \pm 12.0 \text{ mmHg}$ に減少し, HR は $57.7 \pm 4.9 \text{ bpm}$ から $62.5 \pm 7.3 \text{ bpm}$ に増加する傾向にあるが, 統計的に有意な差は認められなかった。それに対し, 拡張期血圧 (DBP) は $70.9 \pm 6.5 \text{ mmHg}$ から $66.5 \pm 6.8 \text{ mmHg}$ に有意 ($P < 0.05$) に減少した。

図 5 は静的掌握運動中の total-Hb, oxy-Hb および deoxy-Hb の変化について典型的な例を示したものである。total-Hb は運動の開始と同時に減少するが, その後は運動時間の経過にともなって緩やかに増加する傾向を示した。

oxy-Hb は運動開始から約 25 秒まで急激に減少するが, その後は時間経過にともなって徐々に減少する傾向にあった。それに対して deoxy-Hb は運動開始時に減少するが, その後約 50 秒までは急激に増加し, それ以後運動終了時まで徐々に増加する傾向にあった。

15% MVC 強度の静的掌握運動時に認められた oxy-Hb の減少量を, 30% MVC 強度での動的掌握運動時に認められた oxy-Hb の減少量に対する比であらわすと, トレーニング肢での運動時ではトレーニング前後で $23.7 \pm 4.0\%$ から $20.0 \pm 5.4\%$ になったのに対し, 非トレーニング肢では $24.2 \pm 5.1\%$ から $21.9 \pm 5.0\%$ になったが, い

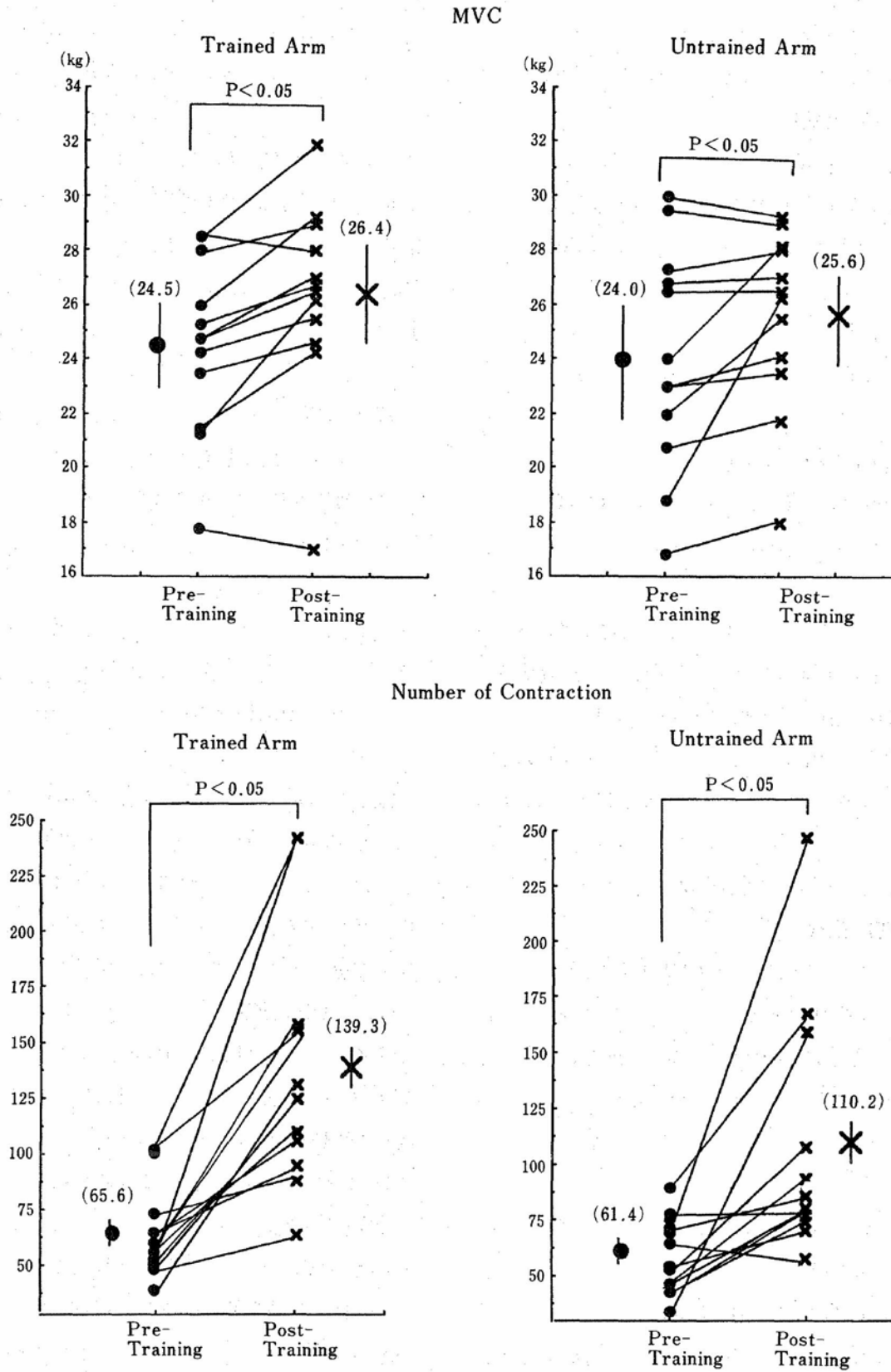


図3 トレーニング肢 (trained arm) および非トレーニング肢 (untrained arm) におけるトレーニング前後での最大握力と運動持続回数の変化

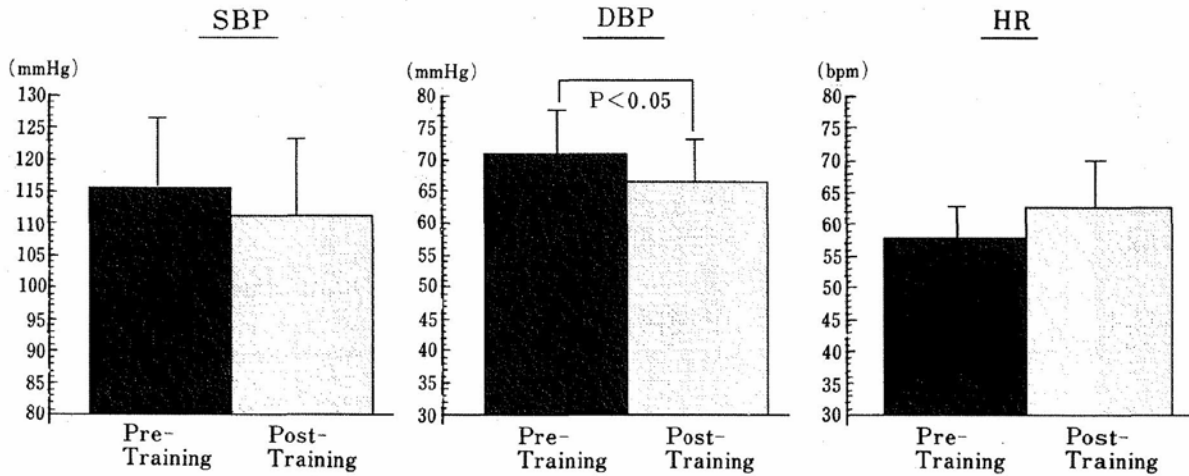


図4 安静時の収縮期血圧 (SBP), 拡張期血圧 (DBP) および心拍数 (HR) のトレーニング前後での変化

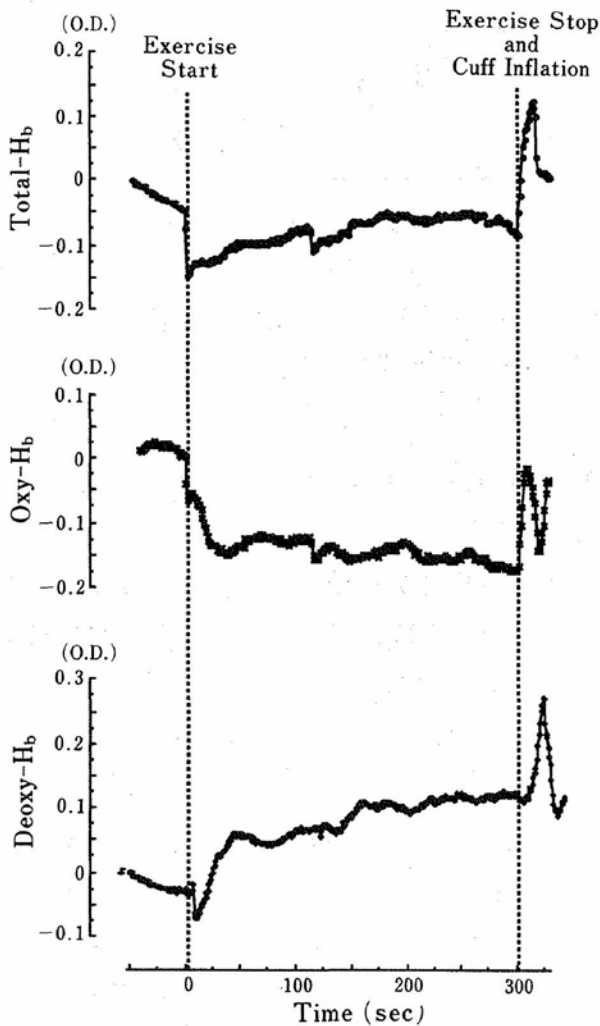


図5 最大握力の15%強度の静的掌握運動時における腕橈骨筋での総ヘモグロビン量 (total-Hb), 酸素化ヘモグロビン量 (oxy-Hb) および脱酸素化ヘモグロビン量 (deoxy-Hb) の変化

ずれについても有意な差は認められなかった。

図6に静的掌握運動後の回復期における O_2 supply index および O_2 consumption indexの時間経過にともなった変化を示した。なお、それぞれのindexについては運動前の安静時での値を100%として、相対的にあらわした。 O_2 supply indexは運動終了直後には安静時の1.9~2.5倍に増加するが、その後は時間経過にともなって減少し、運動後約3分にはほぼ安静時レベルにまで回復した。トレーニング前後で比較するとトレーニング前のトレーニング肢での運動終了後0.5および1分において O_2 supply indexが高値を示した。

O_2 consumption indexは運動終了直後に安静時の2.9~3.7倍になるが、その後は時間経過にともなって減少した。トレーニング前後で比較すると、トレーニング前のトレーニング肢での運動後において減少する傾向にあるが、有意な差ではなかった。

図7に運動時におけるSBP, DBPおよびHRの増加量を運動終了前30秒間の平均値で示した。SBPの増加量(Δ SBP)およびDBPの増加量(Δ DBP)は、トレーニング肢および非トレーニング肢のいずれの運動時においても、トレーニング後

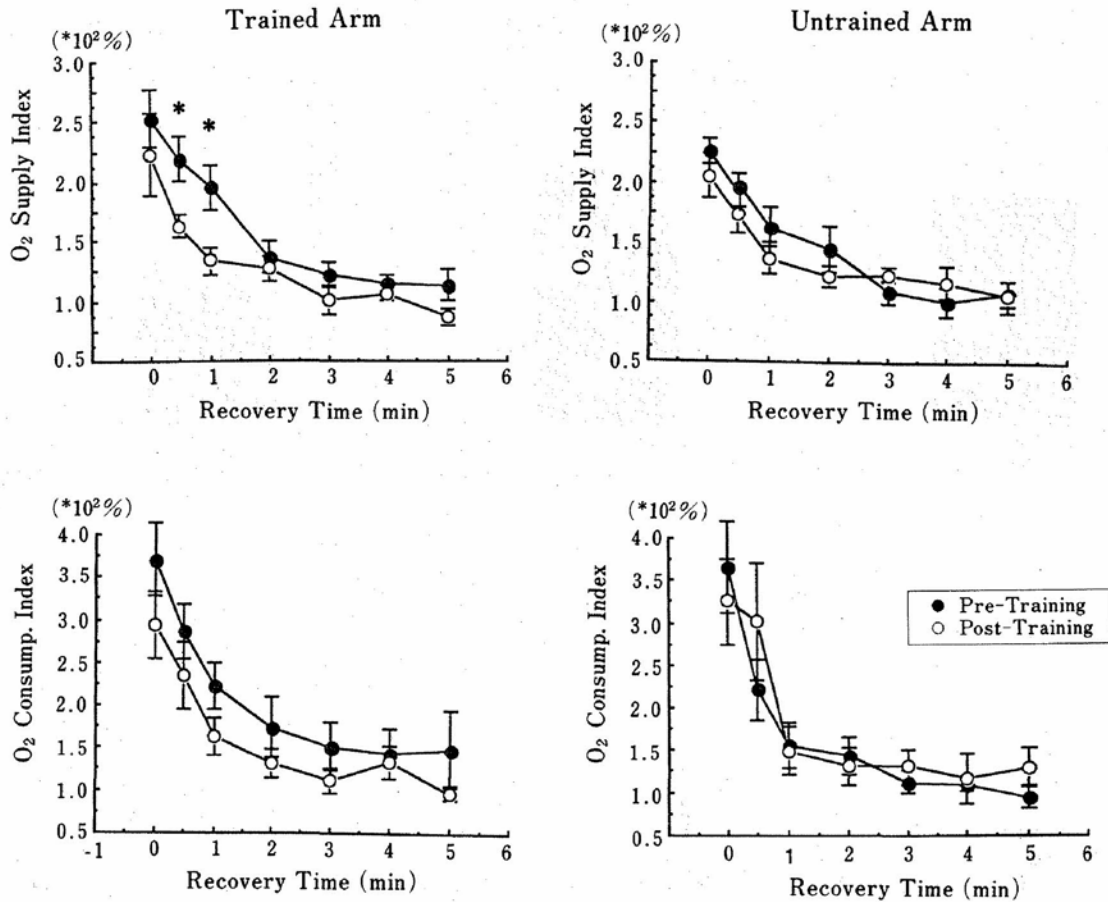


図6 トレーニング肢および非トレーニング肢におけるトレーニング前後での酸素供給量 (O₂ supply index) および酸素消費量 (O₂ consumption index) の変化

の測定においてトレーニング前のそれよりも低い傾向にあるが、有意な差ではなかった。HRの増加量 (Δ HR) はトレーニング肢での運動時にはトレーニング前後ではほぼ同等であるのに対し、非トレーニング肢でのトレーニング後の運動時は低い傾向にあるが有意な差ではなかった。

3. 考 察

Lindら⁵⁾は、5～30% MVC強度の静的掌握運動を3分間行っているときの前腕血流量を観察し、その結果から10% MVC以上の強度の運動では血流量が増加するが、約15% MVC以上の強度では筋の代謝需要に対して血流が不十分である可能性を示した。また、Sjogaardら¹²⁾、Saltinら¹⁰⁾は静的筋収縮時の血中乳酸濃度および血中K⁺濃

度等を観察し、10% MVCよりも低い強度ではそれらの濃度の増加は認められず、1時間にわたって運動の持続が可能であったのに対し、10% MVC以上の強度の運動ではそれらが増加する傾向にあることを報告している。

また、15% MVCの運動に対する循環器系応答については、3分の掌握運動中のSBP、DBPおよびHRがそれぞれ14 mmHg、13 mmHgおよび8 bpm増加すること⁵⁾、2分の運動では平均血圧が6 mmHg増加すること⁸⁾が示されている。さらに心拍出量は、18% MVC強度の前腕掌握運動時に2.4 l/min増加する結果⁴⁾も得られている。

以上の報告から、Monodら⁹⁾が non-fatiguing contraction と考えた15% MVC強度の運動は、循環および代謝を賦活させる強度であること

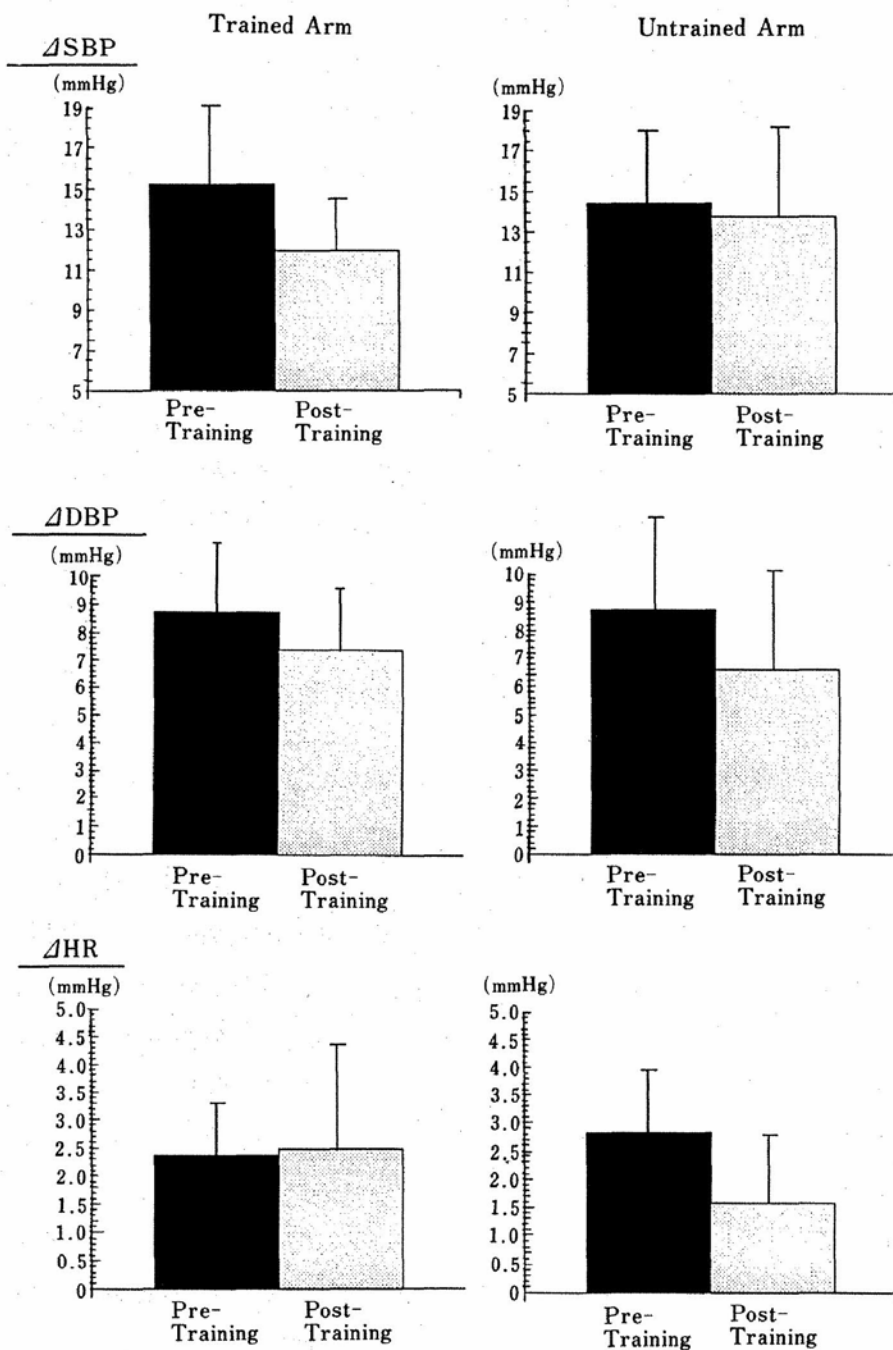


図7 トレーニング肢および非トレーニング肢での運動中における収縮期血圧 (SBP), 拡張期血圧 (DBP) および心拍数 (HR) の変化量

は明らかである。本研究においても、15% MVC 強度の運動時には SBP, DBP および HR は、それぞれ 4 回の測定時の平均で 11.9 ~ 16.4 mmHg, 6.2 ~ 9.3 mmHg, 1.1 ~ 3.0 bpm 増加する傾向にあった。また運動直後の O_2 supply index および O_2 consumption index もそれぞれ安静時の 2.0 ~ 2.5 倍, 2.9 ~ 3.7 倍になってお

り、15% MVC といった低強度の運動でも循環・代謝系の賦活が認められた。

このような 15% MVC 強度の掌握運動トレーニングを延べ 50 日間行った前後で最大筋力を比較すると、トレーニング肢および非トレーニング肢で有意な増加が見られた。同様に動的掌握運動の持続回数もトレーニング肢および非トレーニン

グ肢のいずれにおいても有意な増加が認められた。

掌握運動トレーニングの前後において、トレーニング肢のみならず、非トレーニング肢にも最大筋力および運動の持続回数に増加が認められたことは Yasuda ら¹⁴⁾も報告している。同時に Yasuda ら¹⁴⁾は、トレーニング肢と非トレーニング肢の血流量を測定し、トレーニングによってトレーニング肢の前腕血流量のみならず、非トレーニング肢の前腕血流量も増加することを見だし、これがパフォーマンスの向上に関与している可能性を示した。

本研究において、一定強度の運動中の oxy-Hb の減少量をトレーニング前後で比較すると、トレーニング肢および非トレーニング肢のいずれにおいても、トレーニング後でその減少が抑制される傾向にあった。このことはいずれの腕においてもトレーニングによって筋への酸素供給が亢進し、酸素需要量に対する供給量の相対的な不足が減少したことを示す可能性がある。また、本研究ではトレーニング後において運動後の O₂ supply index の減少傾向が認められているが、運動中の筋において酸素の需要量に対して、血流量が相対的に不十分であることが運動後血流量に反映される¹⁾ならば、O₂ supply index の変化からも、トレーニング後において、運動中の筋への酸素供給が亢進した可能性が考えられる。

安静時 DBP はトレーニング後で低下する傾向にあった。Wiley ら¹³⁾は、30% MVC 強度で2分間の静的筋収縮を1日4セット行うトレーニングを1週間に3日の頻度で8週間行った後に安静時の SBP および DBP は減少することを報告している。本研究で用いた強度は、15% MVC であり Wiley らが用いたものよりもさらに低いが、それでも安静時血圧を低下させる効果を持つ可能性を示唆している。また、運動中の SBP および DBP はトレーニング肢、非トレーニング肢のいずれの

運動時でもトレーニング後で、その上昇が抑制される傾向にあった。

本研究においては、トレーニング肢および非トレーニング肢において最大握力の増加を認めており、トレーニング前の MVC の 15% に相当する強度は、トレーニングの MVC を基準にするとトレーニング肢で 14.0%、非トレーニング肢では 14.1% に相当するものとなった。したがって、この結果は筋収縮中の血圧は相対的な運動強度に比例する^{6,7)}とする報告に一致する。

トレーニング後で血圧の上昇が抑制された原因を、トレーニング後で運動中の筋の oxy-Hb の減少が抑制されたことから考えると、トレーニング後では筋収縮によって生じる Po₂ の低下、および代謝産物の蓄積等が軽減され、それにとまって筋化学受容器への刺激が減弱する結果、交感神経活動の亢進が相対的に抑制され、血圧の上昇が低く抑えられた可能性が考えられる。15% MVC 強度での静的掌握運動時の交感神経活動に関しては、3分間の運動時では変化が認められていない¹¹⁾が、5分間の運動時に関する報告はされておらず、その動態は不明である。

以上のように 15% MVC 強度の静的掌握運動トレーニングによって、トレーニング肢のみならず、非トレーニング肢の最大筋力および一定強度の運動の持続回数が増加することが明らかとなり、安静時の DBP が低下することが示された。また、一定強度 (15% MVC) の静的掌握運動中の血圧応答は、いずれの腕での運動時においてもトレーニング後で抑制される傾向にあった。このことから、15% MVC 強度の静的掌握運動トレーニングはトレーニング肢のみならず、非トレーニング肢の循環および代謝機能にも効果を及ぼす可能性が示された。

謝 辞

稿を終えるにあたり、研究助成を頂きました財

団法人 石本記念デサントスポーツ科学振興財団
に深く感謝いたします。

文 献

- 1) Blair, D. A., Glover, W. E., Roddie, I. C.; The abolition of reactive and post-exercise hyperemia in the forearm by temporary restriction of arterial in flow, *J. Physiol. Lond.*, **148**, 648-658 (1959)
- 2) Homma, S., Eda, H., Ogasawara, S., Kagaya, A.; Near-infrared optical estimation of O₂ supply and O₂ consumption in forearm muscles working at varying intensity. (Submitted)
- 3) Kahn, J. F., Monod, H.; Fatigue induced by static work, *Ergonomics*, **32**, 839-846 (1989)
- 4) Kilbom, A., Brudin, T.; Circulatory effects of isometric muscle contractions, performed separately and in combination with dynamic exercise, *Eur. J. Appl. Physiol.*, **36**, 7-17 (1976)
- 5) Lind, A. R., McNicol, G. W.; Local and central circulatory responses to sustained contractions and the effect of free or restricted arterial inflow on post-exercise hyperaemia, *J. Physiol.*, **192**, 575-593 (1967)
- 6) Macdougall, J. D., Tuxen, D., Sale, D. G., Moroz, J. R., Sutton, J. R.; Arterial blood pressure response to heavy resistance exercise, *J. Appl. Physiol.*, **58**, 785-790 (1985)
- 7) McCartney, N., Makelvie, R. S., Martin, J., Sale, D. G., Macdougall, J. D.; Weight-training-induced attenuation of the circulatory response of older males to weight lifting, *J. Appl. Physiol.*, **74**, 1056-1060 (1993)
- 8) Mitchell, J. H., Reeves, D. R., Rogers, H. B., Secher, N. H., Victor, R. G.; Autonomic blockade and cardiovascular responses to static exercise in partially curarized man, *J. Physiol.*, **413**, 433-445 (1989)
- 9) Monod, H., Sherrer; The work capacity of a synergic muscular group, *Ergonomics*, **8**, 329-338 (1965)
- 10) Saltin, B., Sjogaard, G., Gaffney, F. A., Rowell, L. B.; Potassium, lactate and water fluxes in human quadriceps muscle during static contractions, *Circ. Rec.*, **48**, 18-24 (1981)
- 11) Seals, D. R., Chase, P. B., Taylor, J. A.; Autonomic mediation of the pressor responses to isometric exercise in humans, *J. Appl. Physiol.*, **64**, 2190-2196 (1988)
- 12) Sjogaard, G., Savard, G., Juel, C.; Muscle blood flow during isometric activity and its relation to muscle fatigue, *Eur. J. Appl. Physiol.*, **57**, 327-335 (1988)
- 13) Wiley, R. L., Dunn, C. L., Cox, R. H.; Isometric exercise training lowers resting blood pressure, *Med. Sci. Sports. Exerc.*, **24**, 749-754 (1992)
- 14) Yasuda, Y., Miyamura, M.; Cross transfer effects of muscular training on blood flow in the ipsilateral and contralateral forearms, *Eur. J. Appl. Physiol.*, **51**, 321-329 (1983)