

長時間運動中の女性鍛錬者の基礎代謝特性から見た運動処方

中井 聖^{1,2)} 佐川和則³⁾ 豊岡示朗⁴⁾ 伊藤 章⁴⁾

Akira Nakai^{1,2)}, Kazunori Sagawa³⁾, Jiro Toyooka⁴⁾, and Akira Ito⁴⁾: Exercise prescription from the characteristics of substrate metabolism during prolonged exercise in trained women

Abstract

The aims of the present study were to investigate characteristics of variations in substrate metabolism with time during prolonged exercise in trained women and to examine the optimal exercise intensity and duration of endurance training in women as exercise prescription. Expired gas was measured in ten trained women who performed 120-min treadmill walking and running at several exercise intensities. Substrate oxidation was computed by substituting determined oxygen uptake and carbon-dioxide output into stoichiometric equations. A constant level of energy expenditure was needed during prolonged exercise at the same intensity, but the enhancement of lipid metabolism with exercise duration led to an increase in fat-derived energy provision and a decrease in the dependency ratio of carbohydrate-derived energy to required energy. Lipid metabolism during low-intensity exercise was constantly-enhanced with duration whereas that during moderate- and high-intensity exercise was slowly increased beyond 60 min after initiating exercise and the proportion of fat-derived energy to required energy decreased with increasing exercise intensity. These findings suggest that women in endurance training should continue low-intensity exercise for as long time as possible and that they should select the moderate-intensity to sustain exercise beyond 60 min in order to increase the total volume of energy expenditure.

Key words: steady exercise, exercise intensity, exercise duration, substrate oxidation

1) 近畿大学経営学部非常勤講師

School of Business Administration, Kinki University, 3-4-1 Kowakae, Higashiosaka, Osaka, 577-8502, Japan

2) 大阪体育大学大学院スポーツ科学研究科

Graduate School of Sport and Exercise Science, Osaka University of Health and Sport Sciences, 1-1 Asashirodai Kumatori-cho Sennan-gun, Osaka, 590-0496, Japan

3) 近畿大学経営学部

School of Business Administration, Kinki University, 3-4-1 Kowakae, Higashiosaka, Osaka, 577-8502, Japan

4) 大阪体育大学体育学部

School of Sport and Exercise Science, Osaka University of Health and Sport Sciences, 1-1 Asashirodai Kumatori-cho Sennan-gun, Osaka, 590-0496, Japan

I. はじめに

心身において健康的な生活を営む上で、定期的に身体活動を行うことはさまざまな有益性をもたらすと考えられている (World Health Organization, 2010)。Kesaniemi et al.(2001)によると、身体活動と健康への効果との間には量-反応関係があり、身体活動量の増加によってさまざまな疾病や健康障害が低減すると結論付けられている。そのため、公衆衛生的観点から、体力向上や健康増進を図る目的で、身体活動量を増加させることが奨励されている。身体活動量は、運動の種類、強度、持続時間および頻度によって決定され、個人の健康状態や生活様式、目標などを考慮し、これらの変数を規定することを運動処方と呼んでいる。運動処方の代表的な指針としては、American College of Sports Medicine (ACSM, 2006) によって示された指針が挙げられ、一般健康者に対する心肺系の運動処方として、40% から85%の運動強度で20分から60分の継続的あるいは間欠的な運動を推奨している。

このような心肺系の運動処方における運動強度や運動時間の基準は、持久的トレーニングによって改善される最大酸素摂取量や有酸素性持久能力の程度に性差がない (Wells, 1991) ことを前提としており、男性鍛錬者を対象として行われた研究結果を基にして定められている (Pollock et al., 1998)。しかし、男性と比較し、女性は体脂肪率が高く、除脂肪量や骨密度が低く、体組成が大きく異なることや、筋量が少なく、基礎代謝量が低いことが知られている。さらに、女性は血中の赤血球量やヘモグロビン量が低く、心拍出量が少ないため、酸素運搬能力が低いとされている (Wells, 1991)。体力や運動パフォーマンスを左右する形態的および生理的特徴が男性と大きく異なる女性にとって、先に述べたような運動処方が最適であるかどうかは分かっていない (Pollock et al., 1998)。

身体活動量は、運動によるエネルギー消費量と等価と考えることができる。ACSMによる心肺系の運動処方では、エネルギー消費量での目標値を

運動1回あたり150~400 kcal、1週間あたり最低1000 kcalと設定している。このような運動処方に従い、長時間の持続的運動を実施する場合のエネルギー源は、主として炭水化物や脂肪などの基質の酸化によって得られるエネルギーとなる。Romijn et al.(1993)は、男性鍛錬者が長時間運動した際の基質の酸化利用状況は、運動強度と運動時間の影響を大きく受けることを指摘している。一方、女性の長時間運動時の基質代謝に関するデータは比較的少なく、長時間に渡って呼気ガスを採取し、運動中の経時的な基質代謝の変動について、明確なデータを示した研究は見られない。そこで、本研究では、女性が種々の運動強度で長時間の持続的運動を行った際の呼気ガスから基質代謝の経時的な変化を調べ、女性に対する心肺系の運動処方として適切な運動強度および運動時間について検討することを目的とした。

II. 方法

1. 被験者

被験者は、女子大学生長距離選手10名であった。被験者の年齢 (平均±標準偏差) は 20.0 ± 0.8 歳、身体的特徴は、身長: 1.62 ± 0.04 m、身体質量: 55.2 ± 2.9 kg、体脂肪率: $23.2 \pm 2.8\%$ であった。トレッドミル走での最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_2\text{max}$) は 59.6 ± 4.0 mL \cdot min $^{-1}\cdot$ kg $^{-1}$ であった。本研究は、大阪体育大学研究倫理審査委員会の審査、承認を受けて実施された。被験者には予め研究の目的や方法、予想される影響について十分に説明し、書面で同意書を得た後、実施した。

2. 実験プロトコル

全ての実験は、室温を一定 (20℃) に保った環境制御室内のトレッドミルを用いて実施した。まず、各被験者の相対運動強度 (% $\dot{V}O_2\text{max}$) に対応する歩行速度および走行速度を求めするため、間歇的漸増負荷法を用いた歩・走行テストを行った。斜度0%に設定したトレッドミル上を、 $70 \sim 270$ m \cdot min $^{-1}$ の5~7種類の速度で3分間歩行あるいは走行させ、酸素摂取量を測定

女性への運動処方を目安

した。その後、トレッドミルの斜度を3%とし、速度を漸増させ疲労困憊まで継続し、測定された最大値を $\dot{V}O_2\max$ とした。次に、斜度0%のトレッドミル上を、先に行ったテストから求めた30% $\dot{V}O_2\max$ 、50% $\dot{V}O_2\max$ 、70% $\dot{V}O_2\max$ の各運動強度に対応した被験者ごとの規定速度で120分間持続運動させた。30% $\dot{V}O_2\max$ は歩行、50% $\dot{V}O_2\max$ および70% $\dot{V}O_2\max$ は走行で実施し、実施する運動強度はランダムに選択した。被験者には、実験前日は激しい運動を控え、夕食は20時まで済ませて十分な睡眠をとるよう指示した。運動前の栄養摂取状態は長時間運動中の基質利用に影響を与えることから(Bergman and Brooks, 1999)、実験前の食事の合計熱量および栄養素の比率を規定し、実験7時間前に410 kcalの朝食(炭水化物:42%、脂肪:41%、タンパク質:17%)、3時間前に550 kcalの昼食(炭水化物:63%、脂肪:19%、タンパク質:18%)を摂らせて休息させた後、運動を開始させた。なお、各運動強度の実験は、疲労の影響が及ばないように十分な間隔をあけて行った。

3. 測定方法

運動開始30分前に、身長を自動身長計(YKH-230P、ヤガミ社製)、体重および体脂肪率を体組成計(BC-118E、タニタ社製)を用いて測定した後、椅座位安静時の酸素摂取量および二酸化炭素排出量を10分間測定した。呼吸代謝モニタシステム(エアロモニタ AE-280 および MG-360、ミナト医科学社製)を用いて、安静時と運動中の酸素摂取量および二酸化炭素排出量を breath by breath 法で測定し、1分間の平均値を毎分の酸素摂取量および二酸化炭素排出量とした。各実験前には、システムのフローセンサを2Lのシリンジ、ガスメータを既知濃度の標準ガスで較正して測定に用いた。

4. データ処理

本研究で対象とした運動強度で運動した場合、運動開始直後には、体内の酸素貯留量の変化や肺と活動筋における血流動態の違い、過渡的な無酸

素性解糖代謝の関与による肺レベルでの酸素摂取量の応答の遅れや、有酸素性代謝により活動筋で増加した二酸化炭素の一部が血中に拡散されず活動筋へ貯蔵され、二酸化炭素排出量の一過性の低下が生じる(宮村ほか, 1998)ことが懸念された。本研究では、このような状況が収束し、定常状態になったと想定される15分以降から運動終末までを分析対象とし、測定したデータから15分毎の各変数を以下の方法で算出した。

測定した1分間の平均酸素摂取量および二酸化炭素排出量を、Frayn(1983)が示した化学量論式(式(1)および(2))に代入することで、1分間あたりの基質酸化量を算出した。なお、本研究では、Achten and Jeukendrup(2003)およびStisen et al.(2006)の報告に倣い、窒素酸化量は無視できると仮定して基質酸化量を算出した。

$$c = 4.55 \times \dot{V}CO_2 - 3.21 \times \dot{V}O_2 - 2.87 \times n \quad (1)$$

$$f = 1.67 \times \dot{V}O_2 - 1.67 \times \dot{V}CO_2 - 1.92 \times n \quad (2)$$

ここでは、 c : 1分間あたりの炭水化物酸化量 ($g \cdot \min^{-1}$)、 f : 1分間あたりの脂肪酸酸化量 ($g \cdot \min^{-1}$)、 $\dot{V}O_2$: 1分間の平均酸素摂取量 ($L \cdot \min^{-1}$)、 $\dot{V}CO_2$: 1分間の平均二酸化炭素排出量 ($L \cdot \min^{-1}$)、 n : 1分間の窒素排出量 ($g \cdot \min^{-1}$)を示す。

算出された1分間あたりの炭水化物酸化量および脂肪酸酸化量を Atwater 係数(炭水化物:4.1 kcal $\cdot g^{-1}$ 、脂肪:9.4 kcal $\cdot g^{-1}$)を用いて熱量換算した後、加算して1分間あたりのエネルギー消費量を求めた。また、消費エネルギーに占める炭水化物および脂肪由来のエネルギーの割合を算出し、それぞれの対消費エネルギー比率とした。累積炭水化物エネルギー量、累積脂肪エネルギー量および総エネルギー消費量は、1分間あたりの炭水化物、脂肪由来のエネルギー量およびエネルギー消費量を15分間分累積して求めた。

5. 統計処理

測定により得られた酸素摂取量および二酸化炭素排出量は、全被験者を一群として Shapiro-Wilk 検定を行い、データの正規性を確認した。データ処理によって得られた各変数と運動時間および運動強度について二要因分散分析を行い、主効果が認められた場合には、Bonferroni の方法による多重比較を行った。交互作用が認められた場合は、各要因の単純主効果および各水準間の差を検討した。球面性が仮定されない場合は、Greenhouse-Geisser の方法を用いて自由度を修正し、検定した。また、運動強度ごとに運動時間経過に伴う各変数の変動について、多項式対比により最適なモデルを選択し、最小二乗法によって回帰式を得た。全ての統計処理は、統計解析ソフト (SPSS 15.0J for Windows, SPSS Inc. 製) を使用して行い、統計的有意水準は 5% 未満に設定した。

Ⅲ. 結果

1. 運動時間および運動強度と酸素摂取量、二酸化炭素排出量の関係

Shapiro-Wilk 検定の結果、測定された酸素摂取量および二酸化炭素排出量は正規分布に従うことが確認された。運動時間経過に伴う酸素摂取量および二酸化炭素排出量の変動を図 1 に示した。分散分析の結果、酸素摂取量 (図 1a) には、運動時間と運動強度の両要因に有意な主効果が認められた [$F(3.31, 29.77) = 12.68, p < 0.01$; $F(1.46, 13.11) = 565.38, p < 0.01$]。多重比較の結果、15 分の値に対して 90 分以降の値が有意に高値を示し ($p < 0.01$)、全ての運動時間において、 $30\% \dot{V}O_{2max}$ よりも $50\% \dot{V}O_{2max}$ 、 $50\% \dot{V}O_{2max}$ よりも $70\% \dot{V}O_{2max}$ の値が有意に高かった ($p < 0.01$)。二酸化炭素排出量 (図 1b) についても、運動時間と運動強度に有意な主効果が認められ [$F(3.52, 31.71) = 41.45, p < 0.01$; $F(1.57, 14.14) = 390.03, p < 0.01$]、15 分に対して 30 分の値、30 分に対して 45 分の値が有意に低く ($p < 0.05$)、60 分以降の値は 15 分の値と比べて有意に低かった ($p < 0.01$)。全運動時間で、 $30\% \dot{V}O_{2max}$ よりも

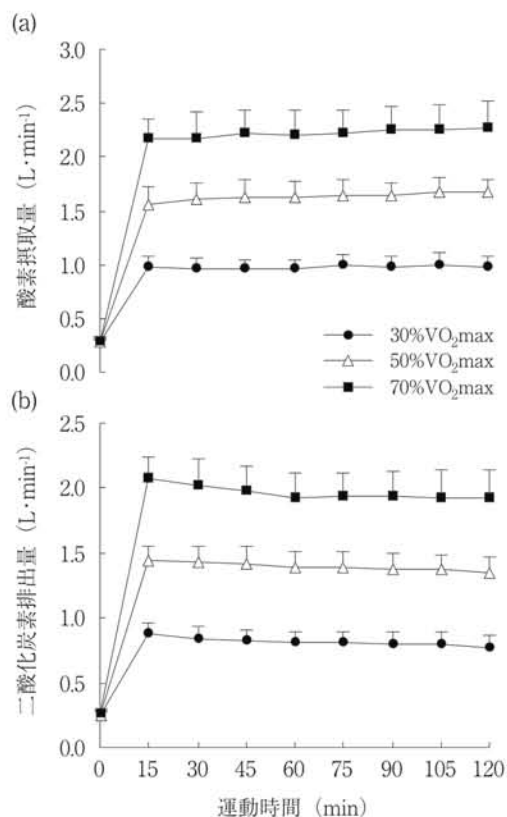


図 1 運動時間経過に伴う酸素摂取量 (a) および二酸化炭素排出量 (b) の変動プロットは平均値、エラーバーは標準偏差を示す。

$50\% \dot{V}O_{2max}$ 、 $50\% \dot{V}O_{2max}$ よりも $70\% \dot{V}O_{2max}$ の値が有意に高かった ($p < 0.01$)。

2. 運動時間および運動強度と炭水化物酸化量、脂肪酸酸化量の関係

運動時間経過に伴う炭水化物酸化量および脂肪酸酸化量の変動を図 2 に示した。分散分析の結果、炭水化物酸化量と脂肪酸酸化量には、運動時間と運動強度の両要因に有意な交互作用が認められたため [$F(4.49, 40.38) = 9.67, p < 0.01$; $F(3.91, 35.23) = 9.40, p < 0.01$]、各要因の単純主効果を検討した。炭水化物酸化量 (図 2a) では、各運動強度において運動時間の有意な単純主効果が

女性への運動処方を目安

認められ ($p < 0.01$)、15分の値と比較して45分以降の値が有意に低かった ($p < 0.05$)。各運動時間で運動強度の有意な単純主効果が認められ ($p < 0.01$)、全運動時間で30% $\dot{V}O_2\max$ よりも50% $\dot{V}O_2\max$ 、50% $\dot{V}O_2\max$ よりも70% $\dot{V}O_2\max$ の値が有意に高かった ($p < 0.05$)。脂肪酸化量 (図2b) では、各運動強度において運動時間の有意な単純主効果が認められ ($p < 0.01$)、15分の値に対して、30% $\dot{V}O_2\max$ と70% $\dot{V}O_2\max$ では45分以降の値、50% $\dot{V}O_2\max$ では30分以降の値が有意に高かった (それぞれ $p < 0.01$, $p < 0.01$, $p < 0.05$)。45分以降の運動時間において運動強度の有意な単純主効果が認められ ($p < 0.05$)、45分以降で30% $\dot{V}O_2\max$ よりも70% $\dot{V}O_2\max$ の値、105分以降で30% $\dot{V}O_2\max$ よりも50% $\dot{V}O_2\max$ の値が有意に高値を示した ($p < 0.01$)。全運動時間において、50% $\dot{V}O_2\max$ と70% $\dot{V}O_2\max$ の間に差は認められなかった。また、多項式対比の結果、30% $\dot{V}O_2\max$ の炭水化物酸化量は線形 ($r = 0.632$, $p < 0.01$)、50% $\dot{V}O_2\max$ と70% $\dot{V}O_2\max$ の炭水化物酸化量は対数関数 ($r^2 = 0.273$, $p < 0.01$; $r^2 = 0.684$, $p < 0.01$)、30% $\dot{V}O_2\max$ の脂肪酸化量は線形 ($r = 0.662$, $p < 0.01$)、50% $\dot{V}O_2\max$ と70% $\dot{V}O_2\max$ の脂肪酸化量は対数関数で回帰された ($r^2 = 0.261$, $p < 0.01$; $r^2 = 0.717$, $p < 0.01$)。

3. 運動時間および運動強度と1分間あたりのエネルギー消費量、炭水化物および脂肪の対消費エネルギー比率の関係

運動時間経過に伴う1分間あたりのエネルギー消費量、炭水化物および脂肪の対消費エネルギー比率の変動を図3に示した。分散分析の結果、1分間あたりのエネルギー消費量 (図3a) には、運動時間と運動強度の両要因に有意な主効果が認められた [$F(3.27, 29.39) = 4.23$, $p < 0.05$; $F(1.56, 14.07) = 508.20$, $p < 0.01$]。多重比較の結果、15分の値に対して、60分と90分の値のみが有意に低く ($p < 0.01$, $p < 0.05$)、全運動時間で30% $\dot{V}O_2\max$ よりも50% $\dot{V}O_2\max$ 、50% $\dot{V}O_2\max$ よりも70% $\dot{V}O_2\max$ の値が有意に高い値を示した ($p < 0.01$)。炭水化物および脂肪の対消費エネルギー比率 (図3b) に

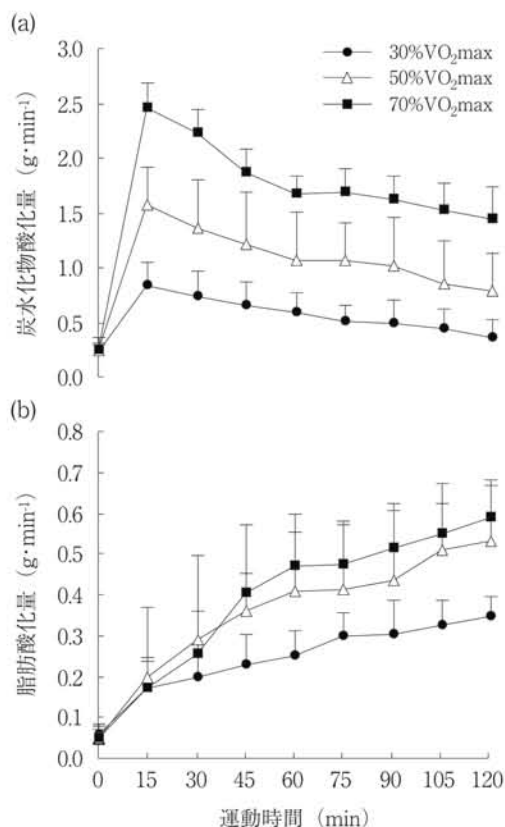


図2 運動時間経過に伴う炭水化物酸化量(a)および脂肪酸化量(b)の変動

も、運動時間と運動強度に有意な主効果が認められ [$F(3.20, 28.78) = 97.30$, $p < 0.01$; $F(1.77, 15.88) = 5.32$, $p < 0.05$]、脂肪の対消費エネルギー比率は、15分に比べて30分の値、30分に比べて45分の値がそれぞれ有意に高く ($p < 0.01$, $p < 0.05$)、60分以降も15分の値より有意に高かった ($p < 0.01$)。全運動時間において、30% $\dot{V}O_2\max$ の値は70% $\dot{V}O_2\max$ よりも有意に高かったが ($p < 0.01$)、50% $\dot{V}O_2\max$ と70% $\dot{V}O_2\max$ との間に差は認められなかった。多項式対比の結果、脂肪の対消費エネルギー比率は、各運動強度とも対数関数で回帰された ($r^2 = 0.444$, $p < 0.01$; $r^2 = 0.292$, $p < 0.01$; $r^2 = 0.775$, $p < 0.01$)。

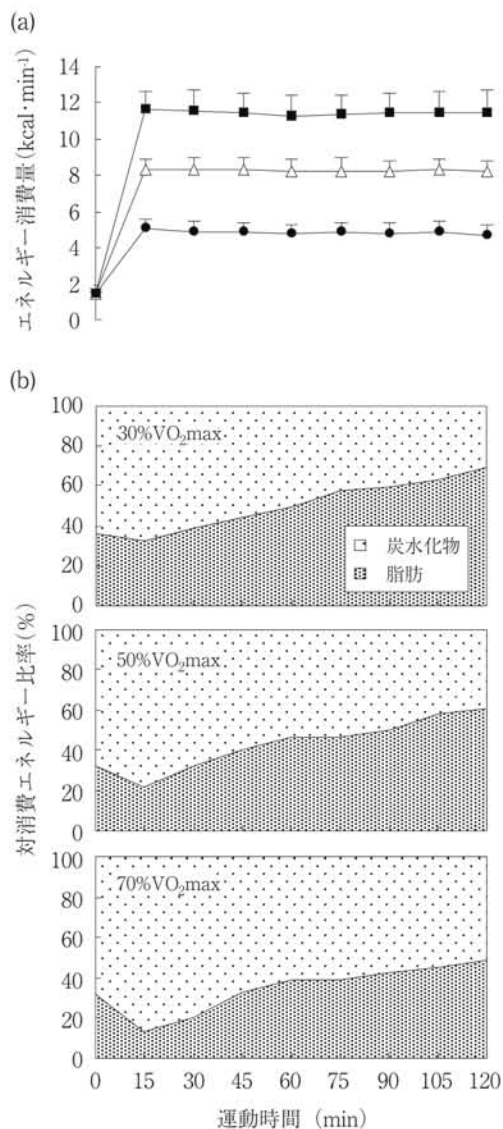


図3 運動時間経過に伴う1分間あたりのエネルギー消費量(a)と炭水化物および脂肪の対消費エネルギー比率(b)の変動

4. 運動時間および運動強度と累積炭水化物エネルギー量、累積脂肪エネルギー量および総エネルギー消費量の関係

運動時間経過に伴う累積炭水化物エネルギー量、累積脂肪エネルギー量および総エネルギー消費量の変動を図4に示した。分散分析の結果、累積炭水化物エネルギー量、累積脂肪エネルギー量、総エネルギー消費量の全てに、運動時間と運動強度に有意な交互作用が認められ [$F(1.40, 12.62) = 53.40, p < 0.01$; $F(1.79, 16.09) = 8.31, p < 0.01$; $F(1.61, 14.47) = 468.20, p < 0.01$]、各運動強度において運動時間の有意な単純主効果が認められた(それぞれ $p < 0.05, p < 0.01, p < 0.01$)。累積炭水化物エネルギー量および総エネルギー消費量には、各運動時間で運動強度の有意な単純主効果が認められたが ($p < 0.01$)、累積脂肪エネルギー量では60分以降の各運動時間でのみ運動強度の有意な単純主効果が認められた ($p < 0.05$)。累積炭水化物エネルギー量(図4a)は、全ての運動強度において、15分以降運動終末まで有意に増加し ($p < 0.01$)、全運動時間で30%VO₂maxよりも50%VO₂max、50%VO₂maxよりも70%VO₂maxの値が有意に高かった ($p < 0.01$)。累積脂肪エネルギー量(図4b)は、30%VO₂maxと70%VO₂maxでは15分以降運動終末まで、50%VO₂maxでは30分以降運動終末まで有意に増加した(それぞれ $p < 0.01, p < 0.01, p < 0.05$)。60分以降、70%VO₂maxの値は30%VO₂maxよりも有意に高かったが ($p < 0.05$)、50%VO₂maxとの間に差異は認められなかった。総エネルギー消費量(図4c)は、15分以降運動終末まで有意に増加し ($p < 0.01$)、全運動時間で30%VO₂maxよりも50%VO₂max、50%VO₂maxよりも70%VO₂maxの値が有意に高かった ($p < 0.01$)。多項対比の結果、各運動強度とも累積炭水化物エネルギー量は対数関数 ($r^2 = 0.675, p < 0.01$; $r^2 = 0.627, p < 0.01$; $r^2 = 0.921, p < 0.01$)、累積脂肪エネルギー量は指数関数 ($r^2 = 0.855, p < 0.01$; $r^2 = 0.689, p < 0.01$; $r^2 = 0.938, p < 0.01$)、総エネルギー消費量は線形 ($r = 0.980, p < 0.01$; $r = 0.989, p < 0.01$; $r = 0.983, p < 0.01$) で回帰された。

女性への運動処方を目安

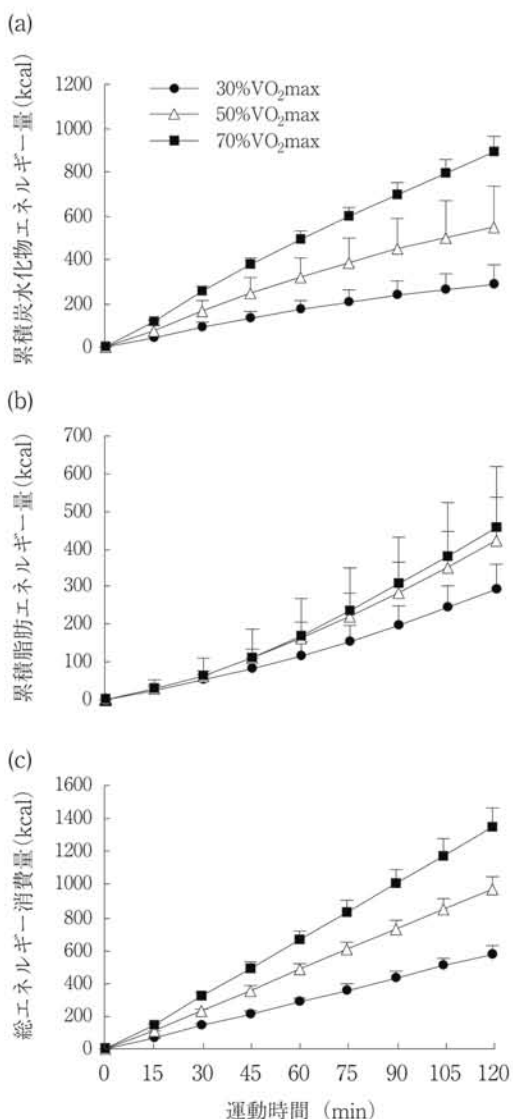


図4 運動時間経過に伴う累積炭水化物エネルギー量(a)、累積脂肪エネルギー量(b)および総エネルギー消費量(c)の変動

IV. 考察

1. 運動時間の経過に伴う酸素摂取量および二酸化炭素排出量の変動

酸素摂取量(図1a)は、運動強度が高くなるほど増加し、運動強度の上昇に伴う換気量や心拍

数の増大が直接反映された形となった。運動時間の経過に伴う酸素摂取量の変動は、30% $\dot{V}O_2\max$ では運動開始後15分から120分までほぼ一定であったが、50% $\dot{V}O_2\max$ と70% $\dot{V}O_2\max$ では、15分の値と比べて90分以降の値がそれぞれ4.9~7.1%、3.4~4.8%増加した。この増加は、呼吸筋の疲労による換気量の漸増(MacDougall et al., 1974)あるいは速筋線維が動員されて活動筋での酸素消費が増加したことによるslow component(緩成分)が原因と考えられる(Poole et al., 1994)。

二酸化炭素排出量(図1b)もまた、運動強度が高いほど高値を示した。運動強度が上昇すると、有酸素性代謝由来の二酸化炭素に解糖系代謝の緩衝によって産生される二酸化炭素が加わり、全体として二酸化炭素の排出量が増加したのであろう。また、運動強度にかかわらず同様の変動傾向を示し、運動開始後15分から45分までは他の時間区分よりも減少率が大きく、60分以降120分まではほぼ同程度の値であった。15分から45分までの漸減期は、運動開始直後の血流量増加による二酸化炭素の排出量の増加とその後遅れて起こる分圧上昇による排出量の増加が収束する段階であり、60分以降の定常期は、有酸素性代謝および解糖系代謝の緩衝による二酸化炭素の産生量と排出量が平衡状態にあったと考えられる(宮村ほか, 1998)。

2. 運動時間の経過に伴う炭水化物酸化量および脂肪酸酸化量の変動

炭水化物酸化量(図2a)は、運動強度が高いほど高い値を示し、運動時間の経過に伴い減少した。30% $\dot{V}O_2\max$ では15分から運動終末まで一定の割合で減少したのに対し、50% $\dot{V}O_2\max$ と70% $\dot{V}O_2\max$ では60分の時点で運動終末までの総減少量のそれぞれ63.7%、77.4%まで減少し、その後は一転して緩やかに減少した。一方、脂肪酸酸化量(図2b)は運動時間の経過に伴って運動終末まで増加し続けたが、運動強度によって異なる増加傾向を示した。30% $\dot{V}O_2\max$ では、炭水化物酸化量と同様に15分から120分まで一定の割合

で増加したが、50% $\dot{V}O_2\text{max}$ と 70% $\dot{V}O_2\text{max}$ では、15分から60分の間に運動終末までの総増加量のそれぞれ62.1%、71.6%まで大きく増加した後、120分までは増加率が低下した。また、50% $\dot{V}O_2\text{max}$ と 70% $\dot{V}O_2\text{max}$ では、15分から運動終末まで脂肪酸化量に差は見られなかった。

Horowitz et al.(1999) は、男性が25% $\dot{V}O_2\text{max}$ と 68% $\dot{V}O_2\text{max}$ の運動強度で120分間の自転車こぎ運動を行った際の基質酸化量について、運動強度が高いほど炭水化物および脂肪の酸化量が高く、炭水化物酸化量は運動開始から終末まで漸減するのに対して脂肪酸化量は漸増し、運動強度が高いほどその変化率が大きいと報告している。本研究とHorowitz et al.の報告では、被験者の性別や運動様式、基質酸化量の算出方法が異なるが、基質酸化量の変動傾向は概ね一致した。Stisen et al.(2006) は、女性鍛錬者と非鍛錬者が自転車こぎ運動した際の脂肪酸化量について、運動強度の高低にかかわらず鍛錬者の脂肪酸化量が非鍛錬者よりも高かったことから、十分な有酸素性トレーニングを積んだ鍛錬者は非鍛錬者よりも高い脂肪酸化利用能力を有していると述べている。このことから、本研究の50% $\dot{V}O_2\text{max}$ での炭水化物酸化量および脂肪酸化量の標準偏差が他の運動強度と比較して著しく大きな値であったこと(図2b参照)は、トレーニング状態の違いによる被験者の脂肪酸化利用能力の差異が反映されたからであると考えられる。

以上のことから、運動強度にかかわらず、運動時間の延長によって脂肪の代謝は高進し続け、運動の持続に必要なエネルギー供給における炭水化物への依存度は減少する。また、運動強度が低ければ脂肪の代謝は一定の割合で高進し続けるが、中程度以上の運動強度では60分を越えると高進が緩やかになること、高進の度合いはそれぞれが有する脂肪酸化利用能力に依存することが示唆される。さらに、50% $\dot{V}O_2\text{max}$ と 70% $\dot{V}O_2\text{max}$ の脂肪酸化量に運動開始から終末まで差が見られなかったことから、長時間の持続的運動では運動開始直後は脂肪代謝の遅れが生じ、無酸素性解糖代謝がエネルギー供給が過渡的に関与するが、それ

が収束した後は脂肪の酸化にエネルギー供給源が移行し、運動に必要なエネルギー量が脂肪の酸化によって賄うことができない場合、その不足分が炭水化物の酸化で充当されて運動が維持されていると考えることができよう。

3. 運動時間経過に伴う1分間あたりのエネルギー消費量と炭水化物および脂肪の対消費エネルギー比率の変動

炭水化物および脂肪酸化量から熱量換算した1分間あたりのエネルギー消費量(図3a)は、運動強度が高いほど多く、運動時間の経過にかかわらずほぼ一定であった。このことは、長時間にわたって等速度で歩行あるいは走行する場合、単位時間当たりの消費エネルギーの高低は運動強度に依存し、同じ運動強度を保てばほぼ一定の消費エネルギーで運動が継続されることを示している。

炭水化物と脂肪の対消費エネルギー比率(図3b)は相補関係にあるので、運動時間の経過に伴い増加する脂肪の対消費エネルギー比率の観点から考察したい。脂肪の対消費エネルギー比率は運動強度が高くなるほど低下するが、50% $\dot{V}O_2\text{max}$ と 70% $\dot{V}O_2\text{max}$ との間に差は見られなかった。全ての運動強度において、運動開始後15分から45分間に大きく増加し、それ以降は120分まで緩やかに増加した。運動開始後60分の時点で、最大値である120分の値に対して、30% $\dot{V}O_2\text{max}$ では46.7%、50% $\dot{V}O_2\text{max}$ では63.1%、70% $\dot{V}O_2\text{max}$ では72.8%まで増加しており、運動強度が高くなるにつれて60分以降の増加率が低くなることが明らかとなった。また、30% $\dot{V}O_2\text{max}$ では60分以降、50% $\dot{V}O_2\text{max}$ では90分以降、脂肪の対消費エネルギー比率が炭水化物を上回るが、70% $\dot{V}O_2\text{max}$ では120分まで運動を継続したとしても、脂肪が炭水化物の対消費エネルギー比率を上回ることはなかった。

本研究での脂肪の対消費エネルギー比率の最大値は、30% $\dot{V}O_2\text{max}$ では69.4%、50% $\dot{V}O_2\text{max}$ では61.2%、70% $\dot{V}O_2\text{max}$ では48.4%であった。Tarnopolsky et al.(1990)によると、65% $\dot{V}O_2\text{max}$ で90分間トレッドミル走行した場合、消費エネ

女性への運動処方を目安

ルギーに対する脂肪の割合は、男性では約 20%、女性では約 44% とされている。自転車こぎ運動時については、 $40\% \dot{V}O_2\max$ で 120 分間持続した場合、男性では 43.7%、女性では 50.9% (Horton et al., 1998)、 $58\% \dot{V}O_2\max$ で 90 分間持続した場合、男性では 35.2%、女性では 40.6% と報告されている (Horton et al., 2006)。これらの先行研究と本研究とを考え合わせると、運動形態や運動強度、脂肪酸化量の算出方法に多少の相違が見られるが、運動強度が高くなるほど脂肪の対消費エネルギー比率は低下すること、運動開始後 60 分程度は脂肪代謝が著しく高進するが、それ以降は高進が緩やかになること、さらに男女では脂肪の酸化利用能力に差があり、男性よりも女性の方が高い脂肪酸化利用能力を有することが示唆される。

4. 運動時間経過に伴う累積炭水化物エネルギー量、累積脂肪エネルギー量および総エネルギー消費量の変動

累積炭水化物エネルギー量、累積脂肪エネルギー量および総エネルギー消費量 (図 4) は、運動時間の経過に伴い増加した。Hurley et al. (1986) は、男性を被験者として $64\% \dot{V}O_2\max$ での 120 分間の自転車こぎ運動を有酸素性トレーニングの前後に実施し、炭水化物由来と脂肪由来のエネルギーを加えた総エネルギーは運動時間の経過に伴って一定の割合で増加すると述べており、本研究の総エネルギー消費量 (図 4c) の変動と同様の増加傾向を示した。さらに、Hurley et al. は、トレーニング前の脂肪由来のエネルギーは運動の継続に伴って一定の割合で増加するのに対し、トレーニング後は増加率が漸増することを報告しており、指数関数的な増加を示した本研究の累積脂肪エネルギー量 (図 4b) と近似した変動を示した。また、先に述べた脂肪酸化量 (図 2b)、脂肪の対消費エネルギー比率 (図 3b) と同様、 $50\% \dot{V}O_2\max$ と $70\% \dot{V}O_2\max$ の累積脂肪エネルギー量の間に差は見られなかった。運動時間の経過により、総エネルギー消費量が一定の割合で増加したのに対し、累積脂肪エネルギー量は指数関数的に増加したことから、累積脂肪エネルギー量

と相補関係にある累積炭水化物エネルギー量 (図 4a) は、運動時間の経過により増加率が漸減する対数関数的な増加を示した。これらのことから、運動時間に伴う累積脂肪エネルギー量の増加率の漸増が認められた本研究の被験者は、十分な有酸素性トレーニングを経て脂肪酸化利用能力が高進された状態にあると言えよう。また、一定の運動強度で長時間運動を継続した場合、必要とされるエネルギー量は一定であるが、運動時間が長くなるにつれて脂肪由来のエネルギーが多く供給されるようになり、炭水化物の供給は低減する。しかし、運動強度が中程度以上になると、脂肪由来のエネルギーの供給量が上限に達し、不足分のエネルギー供給を炭水化物の酸化に頼らざるを得ない状況になると考えられる。

5. 運動処方への示唆

ACSM によって示されている心肺系の運動処方の指針 (2006) では、運動強度を $\% \dot{V}O_2\max$ ではなく、 $\dot{V}O_2\max$ と安静時 $\dot{V}O_2$ の差分 (酸素摂取予備量、 $\dot{V}O_2R$) に対する運動時の $\dot{V}O_2$ の割合 ($\% \dot{V}O_2R$) で示している。本研究の運動強度を $\% \dot{V}O_2R$ に換算すると、 $30\% \dot{V}O_2\max$ は約 $33\% \dot{V}O_2R$ 、 $50\% \dot{V}O_2\max$ は約 $55\% \dot{V}O_2R$ 、 $70\% \dot{V}O_2\max$ は約 $77\% \dot{V}O_2R$ に相当する。ACSM が推奨する 1 回の運動あたりのエネルギー消費目標は 150~400 kcal に設定されているが、本研究の結果から $30\% \dot{V}O_2\max$ では 30~85 分、 $50\% \dot{V}O_2\max$ では 20~50 分、 $70\% \dot{V}O_2\max$ では 20~40 分の運動時間で目標に達すると考えられる。

先に述べたとおり、男女では形態のおよび生理的特徴が異なるのに加えて、長時間運動時の脂肪代謝にも差があるにもかかわらず、同様の運動処方がなされている。男性に比べて高い脂肪酸化利用能力を有する女性は、より長時間の運動を継続することが可能であると考えられ、運動強度を高くするよりも運動時間を延長し、エネルギー消費量を増加させるような処方が有効であろう。本研究の被験者よりも低い脂肪酸化利用能力を有すると考えられる一般健康女性に対して、本研究の結果から心肺系の運動処方を行うとすれば、

30% $\dot{V}O_2$ max 程度の低い運動強度では、脂肪代謝の一定の高進により安定的にエネルギー供給がなされ、長時間にわたって運動を継続できることから、できる限り長い時間運動を継続することが有効と考えられる。総エネルギー消費量をより増加させるには、高い運動強度でなるべく長時間運動することが最も有効であるが、ACSM が上限としている 85% $\dot{V}O_2$ R のような高運動強度では、エネルギー消費目標を達成するのに必要な時間運動を継続できないであろう。中程度以上の運動強度では、運動強度を高く設定しても脂肪代謝の高進は同程度であるので、運動強度を高くするよりもそれぞれが最も長い時間運動を継続できる運動強度に設定する処方適切であると考えられる。そして、脂肪代謝の高進が緩やかな変動に転じる 60 分を目安とし、できればそれ以上運動を継続することが望ましいと思われる。

6. 本研究の限界

本研究では、運動中連続採取した呼気ガスから化学量論式を用いて基質酸化量を算出した。その際、先行研究に倣い、タンパク質については無視できると仮定し、炭水化物と脂肪のみに着目して検討を行った。運動中の血液採取は行っておらず、血液性状、ホルモンの変動については考慮していない。また、本研究の被験者は女性鍛錬者であり、その結果を直接一般女性に適用することは困難であったため、トレーニング状態の違いによる脂肪酸化利用能力の差を加味し、一般女性への運動処方を論じた。これらのことが本研究の限界となろう。

V. まとめ

本研究では、女性が種々の運動強度で長時間の持続的運動を実施した際の基質代謝の経時的な変化を調べ、女性に対する心肺系の運動処方として適切な運動強度および運動時間について検討した。一定の運動強度で長時間運動する際には必要とされるエネルギー消費量は一定であるが、運動時間が長くなるにつれて運動強度にかかわらず脂

肪の代謝が高進し、脂肪由来のエネルギーが多く供給されるようになり、炭水化物由来のエネルギーへの依存度は減少する。また、低い運動強度では脂肪の代謝は一定の割合で高進するのに対し、中程度以上の運動強度では 60 分を越えると高進が緩やかになり、運動強度が高くなるほど消費エネルギーに対する脂肪由来のエネルギーの割合は低下し、長時間の運動継続が困難となる。これらのことから、エネルギー消費量を増加させる目的で女性に心肺系の運動処方をする際には、低い運動強度ではできる限り長い時間運動を継続すること、中程度以上の運動強度では、運動強度を高くするよりもそれぞれが最も長い時間運動を継続できる運動強度を選択し、60 分以上の運動の継続を目指すことが有効であると考えられた。

VI. 文献

- Achten, J. and Jeukendrup, A. E. (2003) Maximal fat oxidation during exercise in trained men. *Int. J. Sports Med.*, 24(8): 603-608.
- American College of Sports Medicine. (2006) ACSM's guidelines for exercise testing and prescription (7th ed.). Lippincott Williams & Wilkins: Baltimore, MD.
- Bergman, B. C. and Brooks, G. A. (1999) Respiratory gas-exchange ratios during graded exercise in fed and fasted trained and untrained men. *J. Appl. Physiol.*, 86: 479-487.
- Frayn, K. N. (1983) Calculations of substrate oxidation rates in vivo from gaseous exchange. *J. Appl. Physiol.*, 55(2): 628-634.
- Horowitz, J. F., Mora-Rodriguez, R., Byerley, L. O., and Coyle E. F. (1999) Substrate metabolism when subjects are fed carbohydrate during exercise. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.*, 276: E828-E835.
- Horton, T. J., Grunwald, G. K., Lavelly, J., and Donahoo, W. T. (2006) Glucose kinetics differ between women and men, during and after exercise. *J. Appl. Physiol.*, 100: 1883-1894.

女性への運動処方を目安

- Horton, T. J., Pagliassotti, M. J., Hobbs, K., and Hill, J. O. (1998) Fuel metabolism in men and women during and after long-duration exercise. *J. Appl. Physiol.*, 85: 1823-1832.
- Hurley, B. F., Nemeth, P. M., Martin, W. H. 3rd, Hagberg, J. M., Dalsky G. P., and Holloszy, J. O. (1986) Muscle triglyceride utilization during exercise: effect of training. *J. Appl. Physiol.*, 60: 562-567.
- Kesaniemi, Y. K., Danforth, E. Jr, Jensen, M. D., Kopelman, P. G., Lefèbvre, P., and Reeder, B. A. (2001) Dose-response issues concerning physical activity and health: an evidence-based symposium. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 33: S351-358.
- MacDougall, J. D., Reddan, W. G., Layton, C. R., and Dempsey, J. A. (1974) Effects of metabolic hyperthermia on performance during heavy prolonged exercise. *J. Appl. Physiol.*, 36: 538-544.
- 宮村実春・古賀俊策・安田好文編 (1998) 呼吸－運動に対する応答とトレーニング効果－. ナッブ: 東京, pp. 122-147.
- Pollock, M. L., Gaesser, G. A., Butcher, J. D., Després, J-P., Dishman, R. K., Franklin, B. A., and Garber, C. E. (1998) ACSM position stand: The recommended quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory and muscular fitness, and flexibility in healthy adults. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 30(6): 975-91.
- Poole, D. C., Barstow, T. J., Gaesser, G. A., Willis, W. T., Whipp, B. J. (1994) $\dot{V}O_2$ slow component: physiological and functional significance. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 26(11): 1354-1358.
- Romijn, J. A., Coyle, E. F., Sidossis, L. S., Gastaldelli, A., Horowitz, J. F., Endert, E., and Wolfe, R. R. (1993) Regulation of endogenous fat and carbohydrate metabolism in relation to exercise intensity and duration. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.*, 265: E380-E391.
- Stisen, A. B., Stougaard, O., Langfort, J., Helge, J. W., Sahlin, K., and Madsen, K. (2006) Maximal fat oxidation rates in endurance trained and untrained women. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 98: 497-506.
- Tarnopolsky, L. J., MacDougall, J. D., Atkinson, S. A., Tarnopolsky, M. A., and Sutton, J. R. (1990) Gender differences in substrate for endurance exercise. *J. Appl. Physiol.*, 68: 302-308.
- Wells, C. L. (1991) Women, sport, and performance: A physiological perspective (2nd ed.). Human Kinetics: Champaign, IL.
- World Health Organization. (2010) Global recommendations on physical activity for health. WHO Press: Geneva, Switzerland.

平成 22 年 10 月 23 日受付

平成 23 年 1 月 26 日受理