

継続時間の異なる中強度有酸素運動による 脂質利用動態の比較

木 本 理 可¹ 神 林 勲² 塚 本 未 来³
東 郷 将 成⁴ 内 田 英 二⁵ 武 田 秀 勝⁶

Effect of different duration of moderate aerobic exercise on fat metabolism in young healthy men

Rika Kimoto¹, Isao Kambayashi², Miku Tsukamoto³
Masanari Togo⁴, Eiji Uchida⁵, Hidekatsu Takeda⁶

Abstract

A study was conducted to examine the effects of exercise duration on fat metabolism during exercise and at 30 min postexercise in 6 healthy young men [age: 21.7 ± 0.8 yr, height: 173.3 ± 2.4 cm, weight: 73.7 ± 4.0 kg, maximal oxygen uptake ($\dot{V}O_{2\max}$): 52.4 ± 1.1 ml/kg/min]. After providing the written informed consent, the subjects exercised on separate days for 30 min (30EX), 60 min (60EX) and 90 min (90EX) at an identical intensity of 50 % of $\dot{V}O_{2\max}$ on a bicycle ergometer. Cardio-respiratory data and body surface temperature (2 sites: the breast and the anterior surface of thigh) were measured during and 30 min after the exercise on a sitting position. Blood samples were collected before exercise (baseline), immediately after exercise (0 h), and 1.5 hour after exercise (1.5 h) for analyzing serum free fatty acid (FFA) concentration. There were no significant differences of respiratory exchange ratio (RER) observed in 30EX (0.96 ± 0.01), 60EX (0.98 ± 0.01) and 90EX (0.95 ± 0.01), but RER seemed to gradually decrease with the lapse of time during each exercise. As compared with RER during exercise, those in postexercise period significantly lower in 30EX (0.91 ± 0.01) and 90EX (0.85 ± 0.02) and tended to be lower in 60EX (0.93 ± 0.03). In 90EX, RER in postexercise period was lower ($p < 0.01$) than that of 30EX and 60EX. Serum FFA concentration significantly increased in 0 h and 1.5 h after 90EX and in 1.5 h after 30EX and 60EX. Maximal body surface temperature of both sites rose ($p < 0.01$) in postexercise period only after 90EX. These results suggest that moderate aerobic exercise (50% $\dot{V}O_{2\max}$) for 90 min enhances fat metabolism during and after exercise with increase of serum FFA concentration and body temperature.

Key words : fat metabolism, respiratory exchange ratio, serum free fatty acid, maximal oxygen uptake, excess post-exercise oxygen consumption

1. 旭川工業高等専門学校
〒071-8142 旭川市春光台2-2-1-6
2. 北海道教育大学岩見沢校スポーツ教育課程
〒068-8642 岩見沢市緑が丘2-34-1
3. 東海大学国際文化学部
〒005-8601 札幌市南区南沢5-1-1-1
4. 室蘭太平洋病院
〒050-0054 室蘭市白鳥台5-19-2
5. 大正大学人間学部
〒170-8470 東京都豊島区西巣鴨3-20-1
6. 北星学園大学社会福祉部
〒004-8631 札幌市厚別区大谷地西2-3-1

1. Asahikawa National College of Technology
2-2-1-6 Shunko-dai Asahikawa 071-8142
2. Department of Sports Education, Hokkaido University of Education Iwamizawa
2-34-1 Midorigaoka Iwamizawa 068-8642
3. School of International Culture Relations, Tokai University
5-1-1-1 Minaminosawa Minami-ku Sapporo 005-8601
4. Muroran Taiheiyo Hospital
5-19-2 Hakucho-dai Muroran 050-0054
5. Faculty of Human Sciences, Taisho University
3-20-1 Nishi-sugamo Toshima-ku Tokyo 170-8470
6. School of Social Welfare, Hokusei Gakuen University
2-3-1 Oyachi Atsubetsu-ku Sapporo 004-8631

著者連絡先 木本 理可 kimoto@asahikawa-nct.ac.jp

緒 言

近年, 日本では, 急速な人口の高齢化や生活習慣の変化により疾病構造が変化し, 疾病全体に占めるガン, 虚血性心疾患, 脳血管疾患等の生活習慣病の割合が増加している. また, 生活習慣病のリスクが高まるメタボリックシンドロームの増加や若年化が社会問題となっている.

メタボリックシンドロームとは, 不健康な生活習慣等の起因する内臓脂肪の過剰な蓄積を中心病態として, 耐糖能異常, 脂質代謝異常および血圧の上昇の3つの内, 2つ以上が該当する場合を指す. メタボリックシンドロームが進行すると, 動脈硬化, 糖尿病合併症, 脳卒中および心疾患といった深刻な病状を引き起こすことが知られている. さらに, 肥満度が高くなるほど死亡率が上昇すること (Tokunaga et al., 1990) や, 大規模な疫学調査により肥満者の死亡率は約2倍高く, 肥満とインスリン抵抗性や高脂血症との関連について報告されており (Elkeles et al., 1998; Tuomilehto et al., 2001; Maruyama et al., 2009), 脂質の体内への過剰な蓄積は, 我々の健康を害する大きな要因であることが認識されてきた. こうした疾病構造の変化に対応するため, 厚生労働省では, 平成12年に「21世紀における国民健康づくり運動 (健康日本21)」を策定し, 安全で効果的な運動を行うためのツールとして「健康づくりのための運動指針2006」を作成した. このような中で, 健康の維持・増進における運動, 特に有酸素運動の効果が注目されている.

実際にこれまで, 脂質代謝に関する中強度有酸素運動の効果について, 多くの報告がある. 中強度有酸素運動の実施で血漿中トリグリセリドが低下し, HDLコレステロールが増加したこと (佐々木, 1991) や, 最大心拍数の60%での30分間の自転車漕ぎ運動により, 食後の血漿トリアシルグリセロール濃度が低下したこと (Miyasita et al., 2008) が知られており, 一般的に, 中強度有酸素運動は高血圧, 動脈硬化および心疾患等のリスクを低下させると言われている. また実際に, 適度な有酸素運動のメタボリックシンドロームへの予防・改善効果 (佐藤ほか, 2006) や脂質代謝率の増加 (近藤, 2006) 等も報告されている.

しかしながら, これまで中強度有酸素運動と脂質代謝の関連について, 同一強度で異なる継続時間で調査し, 運動終了後の変化も含めて検討した研究は見当たらない. そこで本研究は, 同一の被検者に対して, 中強度 (最大酸素摂取量の50%) の一定負荷運動を30分間, 60分間および90分間実施させ, それぞれの運動中と運動後における呼吸交換比率 (respiratory exchange ratio; RER) および血清遊離脂肪酸 (free fatty acid; FFA) 濃度の変化から, 脂質利用動態について比較・検討することを目的とした.

方 法

1. 被 検 者

運動部に所属し, 日常定期的な運動を行っている健康な男子大学生6名 (年齢 21.7 ± 0.8 歳, 身長 173.3 ± 2.4 cm, 体重 73.7 ± 4.0 kg, BMI 24.4 ± 1.1 kg/m²) を対象とした. 被検者の運動部活動の内訳については, バレーボール部1名, 硬式野球部3名, 陸上競技部2名であった. 実験に先立ち, ヘルシンキ宣言に基づいて, 全員に本研究の趣旨および安全性について十分な説明を行い, 自主的な参加の同意を書面により得た.

2. 実験の概要

中強度有酸素運動に先立ち, 被検者の最大酸素摂取量 (maximal oxygen uptake; $\dot{V}O_{2max}$) を測定するため, 自転車エルゴメーターを用いた漸増負荷運動を疲労困憊まで実施した. その後, $\dot{V}O_{2max}$ の50%に相当する強度 (50% $\dot{V}O_{2max}$) の一定負荷自転車漕ぎ運動を, 30分間 (30EX), 60分間 (60EX) および90分間 (90EX) 負荷した. 疲労困憊までの漸増負荷運動を含む4回の運動は, 最低でも1週間以上間隔をあけて実施した. 採血は運動前 (baseline) と運動直後 (0 h) および運動終了1.5時間後 (1.5h) に実施し, 血清を分離しFFA濃度と乳酸値を測定した. また, 運動前の安静時から運動終了30分後まで自動呼気ガス分析装置により呼気ガスと心拍数を連続的に測定した. さらに, 運動前と運動開始から運動終了30分後まで10分毎に体表面温度の測定を行った. なお, 実験前の2食は検者が準備した同一の食事を被検者全員に摂らせ, 運動は最後の食事から2時間経過後に行った.

3. 運動プロトコル

1) 漸増負荷運動

運動は, 室温 22.1 ± 0.4 °C, 湿度 63.7 ± 2.4 %の実験室において行った. 被検者は, 体重測定後, ストレッチ運動等を約20分間実施した. その後, 自転車エルゴメーター (COMBI社製, 75XL II) のサドルの高さを調節し, ペダルの固定, 呼気ガス分析用のガスマスク, 血圧計および心拍計を装着した. 自転車で4分間の安静状態を保持し, ウォーミングアップとして60wattsの負荷で2分間, 60rpmのペダリング運動を行った. そして, 60rpmを維持した状態で, 毎分30watts増加するランプ負荷法により, 疲労困憊に至るまでの漸増負荷運動を実施した. なお, 疲労困憊の判断は, ペダリング頻度が50rpmを下回った時点とした.

2) 中強度有酸素運動

前述の自転車エルゴメーターを用いて50% $\dot{V}O_{2max}$ の一定負荷運動を行った. 被検者は安静後, 採血を行った. その後, 衣服を着用しない状態で体重を測定し, 準備体操やストレッチ等を約20分間行った. 自転車エルゴメー

ターのサドルの高さとハンドルの位置を調節した後、呼気ガス分析用のマスク、血圧計および心拍計を装着した。被検者は、自転車エルゴメーター上で3分間の安静状態を保持した後、1分間、目標負荷の50%の負荷で60rpmを維持したペダリング運動を行い、その後、連続して目標負荷で一定負荷運動を行った。運動終了直後から30分間（運動後30分間）は、運動中と同じ測定器具を装着したまま、座位安静状態を保たせた。その後、衣服を着用せずに体重の測定を行い、採血の実施により実験終了とした。なお、運動前後の体重減少に相当する量の水分（ミネラルウォーター）を呼気ガス分析用のマスクの脱着から30分以内に摂取させた。各運動時の室温と湿度はそれぞれ、30EXが $20.3 \pm 0.2^\circ\text{C}$ 、 $46.0 \pm 2.3\%$ 、60EXが $20.8 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、 $50.3 \pm 1.3\%$ 、90EXが $20.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 、 $51.5 \pm 2.2\%$ とほぼ同様であった（全体では $20.4 \pm 0.2^\circ\text{C}$ 、 $50.3 \pm 1.3\%$ ）。

4. 呼気ガス分析

運動中の酸素摂取量（oxygen uptake; $\dot{V}\text{O}_2$ ）、二酸化炭素排出量（ CO_2 production; $\dot{V}\text{CO}_2$ ）、換気量（ventilation; VE）および呼吸交換比率（respiratory exchange ratio; RER）の測定は、自動呼気ガス分析装置（ミナト医科学社製、AE-300S）を用いて、安静時から運動後30分間までbreath-by-breath法によって行った。測定されたデータを8呼吸ごとに移動平均し、さらに15秒毎に単純平均したものを分析に用いた。運動後30分間の酸素摂取量は、運動後過剰酸素消費量（excess post-exercise oxygen consumption; EPOC）として、総酸素消費量で評価された。さらに、呼気ガス分析と同時に、自動血圧計（ミナト医科学社製、EBP-300）により収縮期・拡張期血圧を3分毎に、スポーツ心拍数計（POLAR社製、RS400TM）により心拍数（heart rate; HR）を15秒毎に測定した。

5. 採血と血清FFA濃度、血清乳酸値の測定

採血は医師の指示を受けた看護師が実施し、baseline、0hおよび1.5hの3度、真空管（テルモ社製）を用いて、肘静脈より行った。採取した血液10mlを常温で1時間放置後、3500rpm、 0°C で10分間遠心分離を施し、血清の抽出に供した。分注した血清サンプルは分析時まで -80°C で凍結保存した。

血清FFA濃度は、外注により酵素法を用いて測定された。血清乳酸値の測定は、凍結保存された血清サンプルを常温で解凍した後、自動乳酸分析器（YSI社製、1500 SPORT）を用いて直ちに行った。

6. 体表面温度の測定

赤外線サーモグラフィ（NEC Avio赤外線テクノロジー社製、Thermo Shot F30 series）を使用し、胸部と大腿部前面を撮影した。撮影は、運動前の自転車エルゴメーター上での安静時と運動開始から運動終了30分後まで10分毎に行った。撮影された画像からその部位の最高温

度を求めるために、レポート作成プログラム（日本アビオニクス販売社製、サーモトレーサ用NS92000）を用いて解析した。

7. 統計処理

測定した値はすべて平均値±標準誤差で表した。それぞれの運動における運動中と運動後の各測定値の差の検定には、一元配置の分散分析を行い、有意差が認められた場合には適宜post hoc testを行った。なお、いずれの場合も有意水準は5%未満とし、5~10%を傾向ありと判断した。

結 果

1. 中強度有酸素運動時の呼吸循環器系指標と体重の変化（Table 1）

被検者の $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ は、 52.4 ± 1.1 ml/kg/minであった。漸増負荷運動により得られた負荷と $\dot{V}\text{O}_2$ の一次回帰式から、50% $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ に相当する負荷値を算出した。本研究では予備実験の結果から、算出された値の75~80%に相当する負荷を一定負荷運動の負荷値とした。

一定負荷運動時の平均 $\dot{V}\text{O}_2$ 、 $\dot{V}\text{CO}_2$ 、 $\dot{V}\text{E}$ およびHRにおいて、各運動の条件間に有意な差は認められなかった。また、血圧において、30EXと比較して60EXで有意に高値を示し、体重減少量は、60EXにおいて30EXよりも有意に高く、90EXで30EXと60EXよりも有意に高値を示した。また、EPOCは30EXと比較して、60EXと90EXの値が有意に高値を示した。

Table 1 Cardio-respiratory data and loss of weight in each exercise.

Variables	30EX	60EX	90EX	Significance
$\dot{V}\text{O}_2$ (ml/kg/min)	26.5 ± 2.1	27.0 ± 0.7	27.5 ± 1.4	N.S.
% $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ (%)	50.7 ± 2.9	51.6 ± 2.6	52.7 ± 1.4	N.S.
$\dot{V}\text{CO}_2$ (ml/kg/min)	25.5 ± 1.4	26.4 ± 0.6	26.1 ± 1.2	N.S.
$\dot{V}\text{E}$ (l/min)	49.7 ± 7.9	48.9 ± 11.9	53.9 ± 9.5	N.S.
HR (bpm)	136.2 ± 11.7	146.6 ± 6.5	146.5 ± 11.4	N.S.
BP-sys(mmHg)	159.5 ± 19.8	$173.8 \pm 27.7^*$	166.3 ± 18.2	$p < 0.05$
BP-dia(mmHg)	66.5 ± 7.5	72.3 ± 15.9	70.9 ± 12.4	N.S.
Amount of decrease in Body weight (kg)	0.23 ± 0.10	$0.80 \pm 0.25^*$	$1.15 \pm 0.31^{* \#}$	$p < 0.01$
EPOC(ml/kg)	151.4 ± 11.3	$168.4 \pm 11.1^*$	$170.2 \pm 10.0^*$	$p < 0.01$

All values are presented mean $\pm$ SE. Cardio-respiratory data and EPOC represent mean values from start to end and sum of oxygen uptake for 30 minutes after exercise, respectively. $\dot{V}\text{O}_2$; oxygen uptake, % $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$; the percentage of maximal oxygen uptake, $\dot{V}\text{CO}_2$; CO_2 production, $\dot{V}\text{E}$; ventilation, HR; heart rate, BP-sys; systolic blood pressure, BP-dia; diastolic blood pressure, EPOC; excess-post oxygen consumption.

*: vs 30EX, #: vs 60EX

2. 運動中と運動後30分間におけるRERの変化（Fig. 1, Fig. 2）

Fig. 1 に示したように、いずれの運動においても、運動中のRERは時間経過とともに低下する傾向が認められた。運動終了直後においてRERは1.00を超える値にまで上昇したが、その後、緩やかに低下していった。運動後30分間のRERを比較すると、90EXで低い値で経過した。Fig. 2は運動中と運動後30分間のRERの平均値を比較したものである。30EXでは運動中 0.96 ± 0.01 、運動後30分

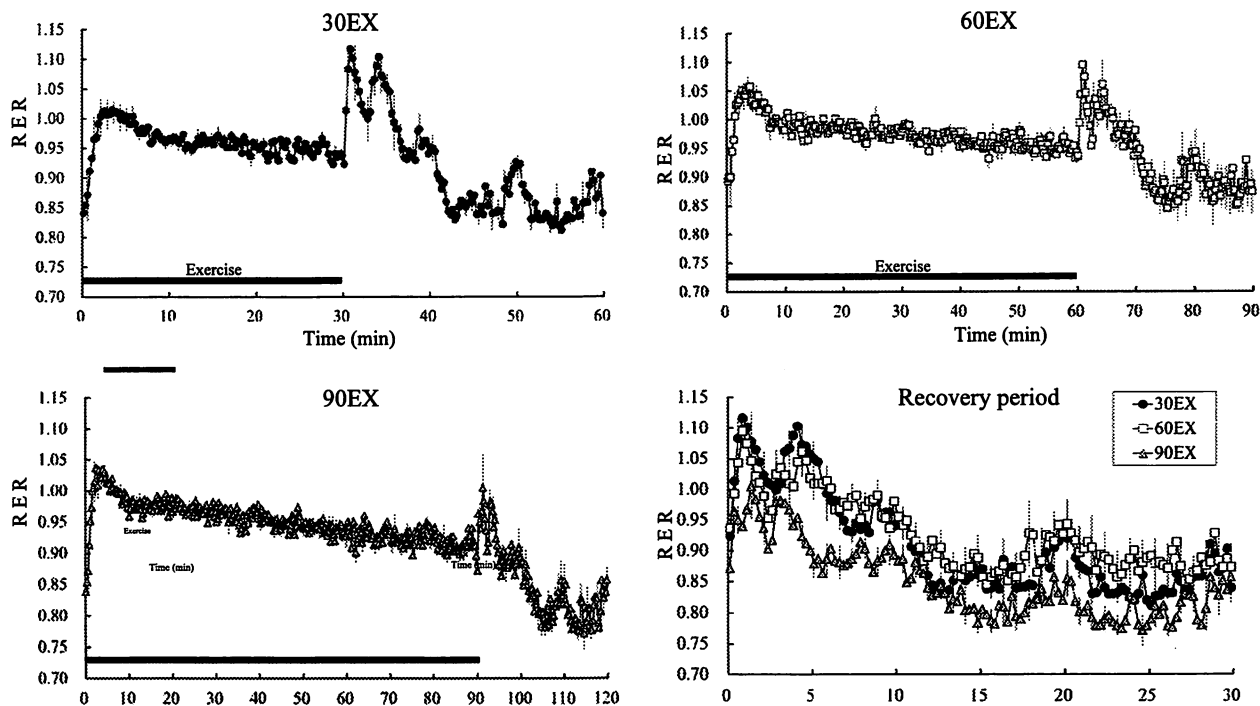


Fig. 1 Time course changes of RER during and after each exercise Each point represents mean values of 6 subject.

間 0.91 ± 0.01 , 60EXでは運動中 0.98 ± 0.01 , 運動後30分間 0.93 ± 0.03 , 90EXでは運動中 0.95 ± 0.01 , 運動後30分間で 0.85 ± 0.02 であった。運動中と比較して運動後30分間の値は, 30EXと90EXで有意に低く, 60EXで低い傾向を示した。また, 30EXと60EXの運動後30分間と比較して, 90EXの運動後30分間の値は有意に低値を示した。

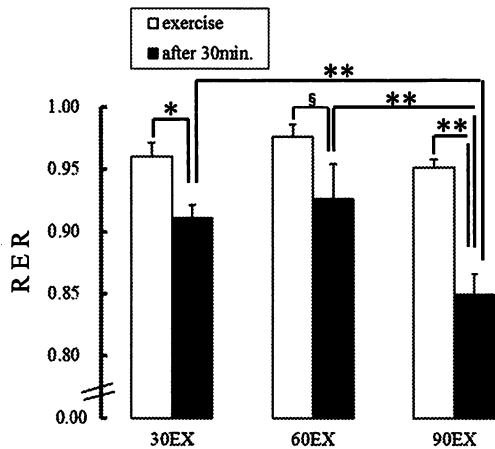


Fig.2 Mean RER during exercise and after exercise for 30 min.
**: $p < 0.01$, *: $p < 0.05$, §: $p < 0.1$

3. 運動前後の血清FFA濃度と血清乳酸値の変化 (Table 2)

血清FFA濃度は, 30EXと60EXにおいてbaselineに比較して1.5hで, 90EXにおいてbaselineに比較して0hと1.5h, 0hに比較して1.5hで有意に高値を示した。また, 運動間の比較では, 0hで30EXと比較して90EXで, 1.5hで30EXと60EXに比較して90EXで有意な高値を示した。血清乳酸値は, いずれの運動でも0hにおいてbaselineに比較して有意な増加が認められた。また, 1.5hではいずれの運動でもbaselineの値にまで回復したが, 90EXの値は, 30EXや60EXよりも有意に高い値であった。

4. 体表面温度の変化 (Fig. 3)

胸部の最高温度は, いずれの運動中も 38°C 前後で推移した (運動中の平均値, 30EX $38.4 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$, 60EX $37.7 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$, 90EX $38.3 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$)。運動後30分間では30EX ($38.3 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$, NS) と60EX ($38.2 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$, $p < 0.10$) では運動中とはほぼ同様な値であったが, 90EX ($39.5 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$, $p < 0.01$) では運動中よりも増加した。大腿部前面の運動中の最高温度は, 30EX ($37.4 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$) と90EX ($36.9 \pm$

Table 2 Concentration of free fatty acid and lactate acid in serum before and after each exercise.

Variables		baseline	0 h	1.5 h
Serum FFA concentration (mEq/L)	30EX	0.10 ± 0.02	0.35 ± 0.09	0.58 ± 0.04 **
	60EX	0.10 ± 0.02	0.53 ± 0.17	0.75 ± 0.14 **
	90EX	0.11 ± 0.02	0.94 ± 0.12 **◎	1.24 ± 0.14 **β##
Serum lactate acid concentration (ml/dl)	30EX	2.20 ± 0.12	3.27 ± 0.38 *	2.30 ± 0.09
	60EX	2.33 ± 0.18	3.33 ± 0.29 *	2.30 ± 0.12
	90EX	2.30 ± 0.11	3.53 ± 0.22 **	2.75 ± 0.10 #

All data are presented mean $\pm$ SE. FFA; free fatty acid, *: $p < 0.05$ (vs baseline), **: $p < 0.01$ (vs baseline), β: $p < 0.01$ (vs 0 h), ◎: $p < 0.01$ (vs 30EX), #: $p < 0.05$ (vs 30EX and 60EX), ##: $p < 0.01$ (vs 30EX and 60EX)

0.2℃)は37℃前後で推移したが、60EX (35.2±0.4℃)ではより低い値で推移した。運動後30分間ではいずれの運動でも運動中よりも2℃程度の増加がみられた(30EX 39.1±0.3℃, 60EX 37.0±0.2℃, 90EX 39.1±0.5℃, いずれも $p < 0.01$)。

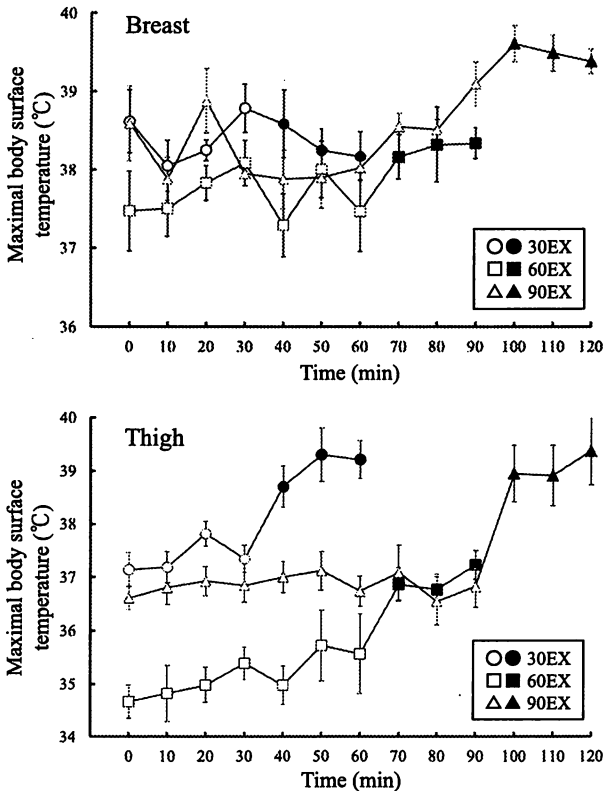


Fig. 3 Changes of maximal body surface temperature in the breast (top) and the anterior surface of thigh (bottom) during and after each exercise. Open and closed symbols represent during and after exercise, respectively.

考 察

本研究では、健康な男子大学生6名を対象に、50% $\dot{V}O_2\text{max}$ に相当する一定負荷運動を、30分間、60分間および90分間という異なった継続時間で実施させ、それぞれの運動におけるRERおよび血清FFA濃度の変化から、各運動中および運動終了後の脂質利用動態について検討した。3つの運動における平均 $\dot{V}O_2$ やHR等には有意差は認められなかった(Table 1)こと、運動後の血清乳酸値に差がなかったこと(Table 2)から、3つの運動の運動強度は等しかったと考えられる。また、本研究における平均 $\dot{V}O_2$ やRER等の呼吸循環器系指標の値は、豊岡ほか(2004)、水上ほか(2009)、高橋ほか(2010)の先行研究とはほぼ同等であり、各指標の測定値は信頼性のあるものと考えられる。

30EX, 60EXおよび90EXのRERの平均値の変化をみると、運動中と比較して運動後30分間の平均値は、30EXおよび90EXで有意に低く、60EXで低い傾向を示した(Fig. 2)。RERは、一定時間に摂取した酸素に対して排出された二酸化炭素の量の比である。この値はエネルギー基質に用いられた糖質と脂質の比率によって変

化する。理論的には糖質のみが用いられた場合、RERは1.0に、脂質のみが用いられた場合、RERはおよそ0.7になることから、0.7に近いほど脂質がエネルギー基質として多く使用されていることを意味する。本研究では、いずれの運動においても、運動中は0.95前後(糖質85%、脂質15%)であったが、運動後30分間は運動中と比較して低値を示し、特に90EXにおいては脂質利用率の高い0.85(糖質50%、脂質50%)まで低下した。これまでも、Ishikawa et al. (2006)が60% $\dot{V}O_2\text{max}$ で30分間のトレッドミル運動後、Glisezinski et al. (2003)が50% $\dot{V}O_2\text{max}$ で60分間の自転車漕ぎ運動後、Josse et al. (2010)が55% $\dot{V}O_2\text{max}$ で90分間の自転車漕ぎ運動後に、それぞれ運動中に比較してRERの低下を報告している。また、Wolfe et al. (1990)は運動後120分にわたり脂質代謝が高進すること、Mulla et al. (2000)は皮下脂肪の代謝が運動後、長時間にわたり高進していたことを報告しており、本研究の結果を支持するものである。また、血清FFA濃度の1.5hの有意な増加(Table 2)、運動後30分間の体表面温度の上昇(Fig. 3)等も脂質代謝を高進させ、運動中と比較して運動後30分間でRERが有意に低くなった要因と考えられる。

運動間の比較においては、30EXと60EXの運動後30分間と比較して、90EXの運動後30分間のRERは有意に低値を示したことから、90EXの運動後、エネルギー基質としての脂質利用が特に高まった可能性がある。この原因については、様々な要因が考えられる。Table 2に示したように、90EXの血清FFA濃度は0hでbaselineより高く、1.5hではさらに値が増加し、その濃度は0h、1.5hとも他の2つの運動時よりもおよそ2倍であった。このことから90EXの運動後は血中の脂質を利用しやすい状況であったと考えられる。血中のFFA濃度の上昇は、カテコールアミンによる脂肪組織からの分解促進による。一般に、カテコールアミンの分泌は運動強度に依存して増加する(Galbo, 1983)が、強度が一定の場合、運動時間の経過にともなって増加することが報告されている(堤, 1990; Wilmore and Costill, 1994)。よって、90EXでは特に運動開始60分以降にかけて、血中のカテコールアミン濃度が増加し、それが血清FFA濃度の増加をもたらしたと推察される。

運動による体温上昇も運動後の脂質代謝に影響を与えたと考えられる。Fig. 3に示したように、90EXにおいて胸部の体表面温度の最高値は運動後で高くなり、大腿部前面でも運動後に増加が認められた。このような運動後の体温上昇が、90EXでの運動後30分間の脂質代謝を高進させた要因の1つと思われる。30EXや60EXでも運動後に大腿部前面の体温上昇が観察されたが、血清FFA濃度の増加が小さいこと、60EXでは原因は明らかではないが、運動中から体表面温度が低く、運動後の最高値も90EXと比較して2℃ほど低いこと等から、運動後30分間のRER低下をもたらさなかったと推察される。EPOCは60EXと90EXにおいて、30EXと比較して有意に高値を

示した (Table 1). EPOCは, 主に活動筋における酸素消費量の上昇が反映されたものであり, 脂質代謝による酸素利用量の上昇がその要因の1つと考えられている (河原, 2005). よって, 90EXにおけるEPOCの高値は, 脂質利用の高進を裏付けるものと考えられる. 60EXのEPOCが90EXと同等量であったにもかかわらず, 2つの運動でRERに違いが認められた原因については明らかではない.

Fig. 1 は, 30EX, 60EXおよび90EXの運動中におけるRERの経時的変化を示したものである. 本研究では, 運動中のRERはいずれも0.95前後であり, 比較的脂質の利用率は少なく, 継続時間の違いによる変化も認められなかったが, Fig. 1 では, 継続時間が長くなるほど, RERの値に緩やかな低下が認められる. そこで, 各運動におけるRERの値を, 運動開始0分~30分, 30分~60分および60分~90分の時間帯に分け, 平均値を検討した. その結果, 運動開始0分~30分は 0.98 ± 0.03 , 30分~60分は 0.96 ± 0.01 , 60分~90分は 0.92 ± 0.01 と運動が進行するに従い, RERは有意に低値を示した (Fig. 4). 運動後30分間の結果と合わせて, 90EXは30EXと60EXに比較して, 脂質の利用度から考えた場合, より有効な運動時間であると考えられる.

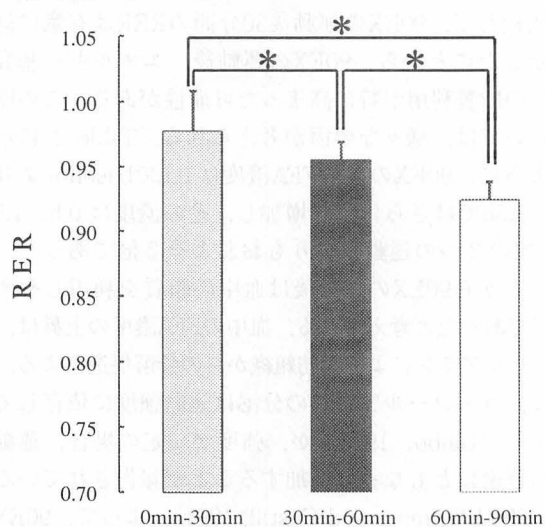


Fig.4 Mean RER in 3 periods (every 30 min.) during each exercise.

*: $p < 0.01$

本研究の被検者は, 健康な男子大学生であった. 先行研究では, 中強度有酸素運動において, 男性よりも女性の方が, 肥満者よりも痩身者の方がFFAやグルコースの分泌量が多い (Vettor et al., 1997; Henderson et al., 2007) ことや, 中性脂肪の分解速度は女性の方が高い (Watts, 2000) こと等が報告されている. また, 男性でもエストロゲンを投与して運動すると, 運動中のRERが低下したという報告 (Hamadeh et al., 2005) もあることから, 被検者の身体特性や性差により結果が異なる可能性もある. 今後も, より多くの様々な特性をもった被検者において検討を進めることで, 中強度有酸素運動の脂質利用

動態について, より詳細な知見が得られると思われる.

先行研究 (Elia and Livesey, 1988) における消費カロリーの計算式 [$\text{VO}_2 \cdot (15.480 + 5.550 \cdot \text{RER}) / 4.184 / 1000$, VO_2 の単位はℓ] により, 本研究の運動中の消費カロリーを算出すると, 30EXは298kcal, 60EXは599kcal, 90EXは892kcalとなる. 同様に運動後30分間の消費カロリーは, それぞれ54, 59および58kcalである. $58\% \dot{\text{V}}\text{O}_2 \text{max}$ で1時間の自転車漕ぎ運動において, 運動後12時間の消費カロリーは約120kcalと報告されている (長野ほか, 1992) ことから, 本研究における運動後30分間の消費カロリーは運動後12時間の50%ほどを占めていると考えられる. しかしながら, 運動中の消費カロリーと比較すると, その消費量は少なく, 本研究における運動中の7~20%程度である. 本研究では, 運動後の血清FFA濃度や体表面温度の変化およびRERの値から, 運動終了後は脂質代謝が運動中よりも高進することが明らかとなった. よって, 運動終了後の行動様式をよりエネルギーの消費を促すように見直すことや, 生活の中での運動実施時刻の位置づけを工夫することで, 効果的に脂質を利用し, 健康増進や生活習慣病等の予防に役立てることができるのではないかと推察される.

総 括

本研究は, 健康な男子大学生6名を被検者に, 最大酸素摂取量の50%に相当する中強度有酸素運動を30分間 (30EX), 60分間 (60EX) および90分間 (90EX) という異なった継続時間で実施させた. そして, 運動中と運動後30分間のRERと体表面温度 (胸部と大腿部前面), 運動前後の血清FFA濃度を測定し, 脂質利用動態について検討した. 結果は以下の通りである.

1. 運動中のRERは3つの運動で差はなかったものの, 運動後30分間のRERは, 運動中と比較して30EXと90EXにおいて有意に低く, 60EXで低い傾向を示した.
2. 運動中のRERの値を, 運動開始0分~30分, 30分~60分および60分~90分の時間帯に分けて検討したところ, 運動が進行するに従い, RERは有意に低値を示した.
3. 血清FFA濃度は, いずれの運動でも1.5hで, baselineに比較して増加した. また, 90EXでは0hでも有意な増加がみられた. 運動間の比較では, 90EXの値は他の2つの運動と比較して0h, 1.5hとも約2倍の高値であった.
4. 体表面温度の最高値は, 胸部においては90EXのみで, 大腿部前面においてはいずれの運動でも運動後に増加する傾向が認められた.

以上のことから, $50\% \dot{\text{V}}\text{O}_2 \text{max}$ の有酸素運動では, 運動時間が長い程, 運動中の脂質代謝が高まり, また運動後では, 中性脂肪の分解によるFFA濃度の増加や体温上昇等の要因により, 運動中と比較して, より脂質代謝が高進することが明らかとなった.

追 記

本研究の内容は、平成22年度北海道体育学会研究大会（於 北海道大学）において発表され、その発表により「若手研究者賞」を頂きました。この紙面をお借りし、北海道体育学会研究委員会ならびに審査委員の皆様および共同研究者の皆様に感謝するとともに、お礼を申し上げます。

参考文献

- Elia, M., and Livesey, G. (1988) Theory and validity of indirect calorimetry during net lipid synthesis. *Am.J.Clin.Nutr.*, 47 : 591-607.
- Elkeles, R.S., Diamond, J.R., Poulter, C., Dhanjil, S., Nicolaides, A.N., Mahmood, S., Richmond, W., Mather, H., Sharp, P., and Feher, M.D. (1998) Cardiovascular outcomes in type 2 diabetes. A double-blind placebo-controlled study of bezafibrate: the St. Mary's, Ealing, Northwick Park Diabetes Cardiovascular Disease Prevention (SENDCAP) Study. *Diabetes Care*, 21 : 641-648.
- Galbo, H. (1983) Hormonal and Metabolic Adaptation to Exercise. Thieme - Stratton: New York, pp. 2-58.
- Glisezinski, I., Moro, C., Pillard, F., Marion-Latard, F., Harant, I., Meste, M., Berlan, M., Crampes, F., and Riviere, D. (2003) Aerobic training improves exercise-induced lipolysis in SCAT and lipid utilization in overweight men. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.*, 285 : E984-E990.
- Hamadeh, M.J., Devries, M.C., and Tarnopolsky, M.A. (2005) Estrogen supplementation reduces whole body leucine and carbohydrate oxidation and increases lipid oxidation in men during endurance exercise. *J. Clin. Endocrinol. Metab.*, 90 : 3592-3599.
- Henderson, B.C., Sen, U., Tyagi, N., Moshal, K.S., Kartha, G.K., Rosenberger, D., Joshua, I.G., and Tyagi, S.C. (2007) Cardiac synchronous and dys-synchronous remodeling in diabetes mellitus. *Antioxid Redox Signal* 9 : 971-978.
- Ishikawa, T., Mizunoya, W., Shibakusa, T., Inoue, K., and Fushiki, T. (2006) Transforming growth factor- β in the brain regulates fat metabolism during endurance exercise. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.* 291 : E1151-E1159.
- Josse, A.R., Sherriffs, S.S., Holwerda, A.M., Andrews, R., Staples, A.W., and Phulips, S.M. (2010) Effects of capsinoid ingestion on energy expenditure and lipid oxidation at rest and during exercise. *Nutrition & Metabolism*, 7 : 65.
- 河原弥生 (2005) 近赤外線分光装置による運動後回復期の血流量と酸素摂取量の検討. 早稲田大学博士学位論文.
- 近藤和夫 (2006) 心肺運動負荷試験における運動時の糖質・脂質代謝率評価. *理学療法学*, 33 : 279.
- Maruyama, K., Hirobe, K., Noda, H., Iso, H., Dohi, S., Terai, T., Fujioka, S., Goto, K., Horie, S., and Nakano, S. (2009) Associations between Blood Lipid Profiles and Risk of Myocardial Infarction Among Japanese Male Workers: 3M Study. *J. Atheroscler Thromb.*, Sep 14.
- Miyashita, M., Burns, S.F., and Stensel, D.J. (2008) Accumulating short bouts of brisk walking reduces postprandial plasma triacylglycerol concentrations and resting blood pressure in healthy young men. *Am. J. Clin. Nutr.*, 88 : 1225-1231.
- 水上健一・藤枝賢晴・安部久貴・高原桂・三本木千秋 (2009) アントシアニンの短期間摂取は肥満傾向にある若年女性の有酸素性運動中・運動後の脂質利用を亢進させる. *東京学芸大学紀要*, 61 : 135-140.
- Mulla, NAL., Simonsen, L., and Bulow, J. (2000) Post-exercise adipose tissue and skeletal muscle lipid metabolism in humans: the effects of exercise intensity. *J. Physiol.*, 524 : 919-928.
- 長野真弓・白山正人・平野裕一・宮下充正 (1992) 換気性閾値強度の運動が運動後過剰酸素消費量の量・持続時間に及ぼす影響について. *体力科学*, 41 : 436-446.
- 佐々木淳 (1991) 肥満・高脂血症に対する運動療法. *運動療法の実践*: 東京, pp.73-83.
- 佐藤誠也・前澤善朗・横手幸太郎・齋藤康 (2006) メタボリックシンドローム治療. *日本脈管学会機関紙*, 46 : 475-480.
- 高橋将記・久保早哉香・的場秀樹・小原繁 (2010) 難消化性デキストリン摂取が軽運動時における糖・脂質代謝に及ぼす影響. *自然科学研究*, 24 : 21-26.
- Tokunaga, K., Tarui, S., Kanai, H., Matsuzawa, Y., and Kotani, K. (1990) Close correlation of intra-abdominal fat accumulation to hypertension in obese women. *Hypertension*, 16: 484-490.
- 豊岡示朗・荒松馨・松生香里 (2004) 運動強度と運動時間からみた脂質代謝特性. *大阪体育大学紀要*, 35 : 39-50.
- Tuomilehto, J., Lindström, J., Eriksson, J.G., Valle, T.T., Hämäläinen, H., Ilanne-Parikka, P., Keinänen-Kiukkaanniemi, S., Laakso, M., Louheranta, A., Rastas, M., Salminen, V., Uusitupa, M., and Finnish Diabetes Prevention Study Group. (2001) Prevention of type 2 diabetes mellitus by changes in lifestyle among subjects with impaired glucose tolerance. *N. Engl. J. Med.*, 344 : 1343-1350.

- 堤達也 (1990) ホルモンと運動, 運動生理生化学: 東京, pp. 204-238.
- Vettor, R., Macor, C., Rossi, E., Piemonte, G., and Federspil, G. (1997) Impaired counterregulatory hormonal and metabolic response to exhaustive exercise in obese subjects. *Acta. Diabetol*, 34 : 61-66.
- Watts, N.B. (2000) Focus on primary care postmenopausal osteoporosis : an update. *Obstet Gynecol Surv.*, 55 : S49-55.
- Wilmore, J.H., and Costill, D.L. (1994) Physiology of sport and exercise. *Human kinetics : Illinois*, pp. 122-143.
- Wolfe, R.R., Klein, S., Carraro, F., and Weber, J. (1990) Role of triglyceride-fatty acid cycle in controlling fat metabolism in humans during and after exercise. *Am. J. Physiol.*, 258(Endocrinol Metab. 21) : E382-E389.

〔平成23年 3 月31日 受付〕
〔平成23年 7 月27日 受理〕