

原 著

長期および短期ファットローディングが持久的運動のパフォーマンスに 及ぼす影響について

Effects of long- and short-term fat adaptation on performance
during endurance exercise

南本 裕介¹⁾

Yusuke Minamoto¹⁾

伊東 太郎²⁾

Taro Ito²⁾

Abstract

The aim of this study was to investigate the effect of a high-fat diet (HFD) for 6 days followed by 1 day of carbohydrate (CHO) loading (long-term HFD), or of a HFD involving just one meal after 1 day of CHO loading (short-term HFD) on substrate utilization during endurance exercise by analyzing the changes in oxygen uptake ($\dot{V}O_2$), carbon dioxide production ($\dot{V}CO_2$), the respiratory exchange ratio (RER; $\dot{V}CO_2/\dot{V}O_2$), effort perception (rate of perceived exertion (RPE)), heart rate (HR), and increase in the plasma lactate concentration from the resting baseline after exhaustion (ΔLa).

In a randomized, single-blind, crossover, long-term HFD experiment, eleven healthy young subjects with a sedentary lifestyle completed two trials, ingesting either a HFD (68% fat energy) or an isoenergetic HCD (68% CHO energy) for 6 days, followed by 1 day of CHO loading (8-10 g CHO/kg), and performing cycling to exhaustion at 80% peak $\dot{V}O_2$ after a 40-min steady-state cycle at 50% peak $\dot{V}O_2$ using an electronically braked cycle ergometer on *day 8*. On *day 6*, ingestion of the HFD reduced RER during training exercise at 50% peak $\dot{V}O_2$ ($P < 0.001$), indicating increased fat utilization; however, the fat adaptation disappeared and there was an increase in the HR, which was suggestive of increased sympathetic activation by HFD ingestion, on *day 8* after CHO loading. In a randomized, single-blind, parallel, short-term HFD experiment involving eight sedentary subjects, HFD ingestion reduced the RER and RPE ($P < 0.05$, 0.001 , respectively), but increased the HR ($P < 0.001$). There was a tendency for ΔLa at 3 min after exhaustion to be greater after HFD ($P = 0.053$) compared with HCD ingestion. These results suggest that glucose utilization increased as a last spurt on HFD ingestion, so-called “glucose sparing”. As a result, neither the long- nor short-term fat adaptation was able to prolong the endurance time to exhaustion when cycling at 80% peak $\dot{V}O_2$.

In conclusion, the HFD dietary strategy increased the utilization of the fat oxidation, but it may be ineffective at maintaining endurance performance at a high intensity, i.e., the last spurt in a race, possibly due to increased sympathetic activation or an altered transport function for glucose uptake into skeletal muscle.

キーワード 高脂肪食, ファットローディング, 持久的運動, パフォーマンス, 糖質節約
High fat diet, Fat adaptation, Endurance exercise, Performance, Glucose sparing

¹⁾ 独立行政法人 国立病院機構 呉医療センター・中国がんセンター

National Hospital Organization, Kure Medical Center, Chugoku Cancer Center

²⁾ 大阪青山大学 健康科学部 健康栄養学科

Department of Health Sciences, Osaka Aoyama University

1. 緒言

ファットローディングとは、マラソンなどの持久的運動のレース前、5～6日間の高脂肪食 (high-fat diet; HFD) 摂取後、レース前日に高炭水化物食 (high-carbohydrate diet; HCD) を摂取することで、レース中に脂質の優先利用を促すコンディショニング的な栄養処方である。この栄養処方では、安静時や運動中および空腹時 (Burke et al., 2000) や非空腹時 (Burke et al., 2002; Carey et al., 2001), そして運動中に炭水化物の多い食事を摂取した時でも、脂質の利用が増加する (Burke et al., 2002; Carey et al., 2001)。そのため、レース前半に脂質をエネルギー源として優先的に利用し、レースのラストスパートまで筋グリコーゲンの温存 (糖質節約) が期待できる (Burke et al., 2000)。

ファットローディングについての研究は、トップアスリートを用いたものがほとんどである (Burke et al., 2000; Burke et al., 2002; Carey et al., 2001; Havemann et al., 2006)。トップアスリートはトレーニング適応として脂質を有効に利用することができる (Hurley et al., 1986; Coggan et al., 1993) が、さらにHavemann et al. (2006) は、6日間のHFD摂取後、炭水化物ローディングを行うと、安静時及び運動時の呼吸交換比 (RER) は有意に低下し、脂質利用が増加したことを報告している。しかしながら、中強度から高強度に負荷を上げた時の運動持続時間や自転車100kmスプリントレース中でのファットローディングの顕著な効果は認められなかった (Burke et al., 2000; Burke et al., 2002; Carey et al., 2001; Havemann et al., 2006)。その理由として、交感神経活動の賦活などの要因が示唆されている (Havemann et al., 2006) が、未だ明らかではない。

一方、一般の健康な成人についてファットローディングの效果に注目した研究はみられない。マラソンブームの昨今、シティマラソン等に一般のランナーが参加する機会は多く、42.195kmを完走するには、レースの前半に脂質を優先的に利用してレース後半のラストスパートまで筋グリコーゲン温存が期待できる、この

栄養処方が有効である可能性が高いと考えられる。

そこで、本研究では、トップアスリートで関心が高まっているファットローディングが、一般の被験者において、運動中の脂質の優先利用に有効であるか否かを検証し、さらに長期 (6日間) と短期 (1食のみ) の2種のファットローディングのそれぞれの適応と効果について検討しようとした。

2. 方法

長期ファットローディングでは、運動習慣はないが健康な大学生11名 (男性5名・女性6名) を被験者とし、実験の概要および実験を行うにあたっての危険性や実験のデータをはじめとする個人情報の保護などについて、約1時間のインフォームドコンセントを実施し、参加したい場合、同意書を文書で提出させた。被験者の年齢は 19.7 ± 0.9 歳 (Mean $\pm$ SD), 身長は 164.1 ± 9.1 cm, 体重は 59.4 ± 8.6 kg であった。被験者は全員呼吸循環器疾患のないものとした。

短期ファットローディングでは、運動習慣のない健康な大学生8名 (男性6名・女性2名) を被験者として、長期ファットローディングと同様にインフォームドコンセントを実施した。被験者の年齢は 19.9 ± 0.9 歳, 身長は 165.5 ± 9.0 cm, 体重は 57.2 ± 5.6 kg であった。

2.1 peak $\dot{V}O_2$ 測定と負荷の決定

被験者には運動の習慣がないため安全性を考慮し、本実験の約2週間前に3回 (隔日), 20分間の中強度のエルゴメーター運動の練習を実施し、運動に慣れさせた。本実験の1週間前に、本実験でのエルゴメーター運動時の負荷を決定するため、各被験者に対して自転車エルゴメーターによる運動負荷試験を課し、携帯型呼気ガス分析装置 (VO2000, Medical Graphics Corporation, USA) を用い、breath by breath方式で最高酸素摂取量 (peak $\dot{V}O_2$) を計測した。peak $\dot{V}O_2$ 測定において、20 wattsで3分間のウォーミングアップをした後、1分間に10 wattsずつramp式に負荷を漸増させオールアウトに至ら

しめた．peak $\dot{V}O_2$ は，1分毎に確認した主観的運動強度（Borg's scale: RPE）が19，心拍数190 beats/min以上，呼吸交換比（RER）が1.15以上に達した時，および運動中に45 rpm以上の回転数を保持できなくなった時の1つに該当する時点exhaustionと判断し，その時点の $\dot{V}O_2$ の最高値を採用した．peak $\dot{V}O_2$ は，長期および短期

ファットローディング実験とも本実験1週間前に測定した．被験者のpeak $\dot{V}O_2$ の平均値は，長期ファットローディングでは 40.3 ± 5.4 ml/kg/min，短期では 39.5 ± 7.6 ml/kg/minであった．

本実験での運動負荷wattは，peak $\dot{V}O_2$ 測定時における $\dot{V}O_2$ と運動負荷との一次回帰直線から，50%および80% peak $\dot{V}O_2$ 時の負荷としてそれぞれ

表1．男性被験者の高脂肪食（HFD）のメニュー例（長期ファットローディング）
（19歳 体重59 kg 身体活動レベルⅠ 2300 kcal/day）

	朝食	昼食	夕食	間食
1日目	ロールパン(40g) スクランブルエッグ サラダ 牛乳	豚丼(めし 100g) 味噌汁 大根サラダ	鰯のから揚げ 野菜炒め 吸い物	ピーナッツバターパン (ロールパン 40g)
2日目	ご飯(めし 40g) 味噌汁 冷奴 サラダ	オムライス(めし 40g) わかめスープ サラダ	お好み焼き(薄力粉 25g) ホタテのバター焼き	ピーナッツバターパン (ロールパン 40g)
3日目	ヨーグルト ツナサラダ	ご飯(めし 80g) 豚汁 野菜の卵とじ	パン(ロールパン 40g) ステーキ サラダ	ピザ(食パン 45g)
4日目	食パン(30g) ベーコン サラダ 茹で卵 牛乳	ご飯(めし 50g) 鮭のムニエル かぼちゃスープ	ご飯(めし 40g) ハンバーグ 人参のグラッセ サラダ スープ	サンドウィッチ(食パン 35g) サラダ
5日目	ロールパン(40g) サラダ 牛乳	ホワイトシチュー ツナサラダ	ご飯(めし 70g) 味噌汁 ピーマンの肉詰め焼き	アイス カツサンド(食パン 25g)
6日目	食パン(30g) 茹で卵 牛乳	豚丼(めし 100g) 味噌汁 大根サラダ	お好み焼き(薄力粉 25g) わかめスープ サラダ	ピーナッツバターパン (ロールパン 40g)
7日目	食パン(120g) 苺ジャム(25g) 茹で卵・サラダ オレンジジュース (200ml)	きつねうどん (うどん 200g) おにぎり(めし 200g)	ご飯(めし 180g) 吸い物 肉じゃが 酢の物	桜餅(道明寺粉 40g) おにぎり(めし 100g) オレンジジュース (200ml) あんぱん(100g)

※7日目は炭水化物ローディング

れ決定した。

2.2 長期ファットローディング

2.2.1 長期ファットローディングの食事操作

ランダム化した単盲検クロスオーバー法を用い、被験者にはHFD（摂取エネルギーに占めるたんぱく質、脂質、炭水化物の構成比（PFC比）は、脂質68%、炭水化物20%、たんぱく質12%）あるいは等熱量のHCD（炭水化物68%、脂質20%、たんぱく質12%）を各々6日間摂取させ、7日目に炭水化物ローディング（8-10 g carbo / kg）を行い、8日目に本実験を実施した（図1参照）。熱量について、日本人の食事摂取基準2005年版に準じて、被験者の身体活動レベルを男性はⅠ、女性はⅡに設定して、身体活動レベルより推定エネルギー必要量を算出した。特にHFDにおいて、炭水化物摂取量が1日100 g以下となるとアシドーシスを起こす危険性があるため炭水化物のPFC比を20%とした。また、HFDでは炭水化物を減らす代わりに脂質を増やす必要があるため、様々な食材を用いて被験者にバラエティに富んだメニューを提供できるように工夫した（HFDの献立例は表1参照）。例えば、お好み焼きではソースを減らしてマヨネーズの量を増やしたり、肉類は脂質の豊富なばら肉やサーロインを使用したりするなどの工夫により脂質の摂取量を増加させる一方で、オムライスのように卵で包むことで、炭水化物源である米の量が少ないことを感じさせないように見た目にも配慮した。たんぱく質は熱量から脂

質・炭水化物の熱量を差し引いて算出し、ビタミン・ミネラル・食物繊維は日本人の食事摂取基準の目安量に準じて算出した。また、ビタミンとミネラルの摂取量については、1日ごとに栄養計算を行ったうえで、不足している日には目安量を上回るようにマルチビタミン・鉄・カルシウムの錠剤（いずれも大塚製薬社製）を必要に応じて経口摂取させた。

食事の提供方法について、朝食は前日に被験者に材料を渡したうえで指定したメニューどおりに自宅で調理させ、昼食・夕食と間食は大阪青山大学の集団給食経営管理実習室で検者が調理したものを提供した。また、実験前に被験者の普段の食事内容を把握するため食物摂取頻度調査（food frequency questionnaire based on food groups; FFQg）を実施した。これにより、被験者の嗜好や偏食などを知ることで、本研究で提供する食事が被験者の負担にならないよう献立を作成した。また、重篤な危険の伴う食物アレルギーの有無についても事前に被験者に確認し、細心の注意を払った。なお、食事の盲検化を図るため、被験者には別室でそれぞれの食事を摂取させた。実験終了後から次の食事操作に入る前、前食の影響が出ないように14日間のウォッシュアウト期間を設けた。

食事操作による自律神経系活動の変動を観察する目的で、2・4・6日目のトレーニングと8日目の本実験の直前に心拍変動（heart rate variability：HRV）を測定した（SA-3000P, Medicore

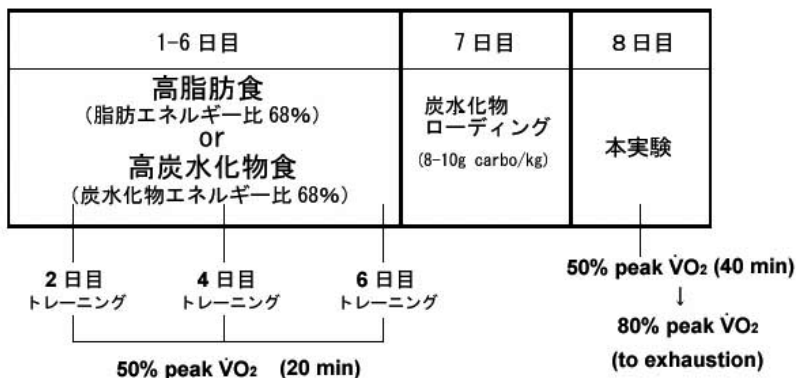


図1．長期ファットローディングの食事操作と運動プロトコル

Co., Ltd., Korea). HRVは、安静椅座位で指尖部脈拍を3分間記録し、パワースペクトル分析により求めた。交感神経機能の指標として、HRV信号を構成する各周波数パワーのうち高周波数領域に対する低周波数領域のパワー比 (LF/HF) を算出した。また、食事操作による体組成変動を観察する目的で、インピーダンス式体組成計(BC-118D, TANITA, Japan)を用いて、体重及び体組成を毎日定時に測定した。

2.2.2 長期ファットローディングの運動プロトコルとデータの測定・分析

本実験は、実験室の気温 $19.9 \pm 0.4^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $39.8 \pm 7.0\%$ の環境下で行われた。運動様式は60rpmの回転数で漕がせる自転車エルゴメーターとし、運動中に呼気ガス分析装置を用い、breath by breath方式で呼気ガスを測定分析した。本実験では、20 wattsのペダル負荷で3分間のウォームアップを行った後、step負荷として50% peak $\dot{V}\text{O}_2$ に相当する負荷で40分間、続いてstep式に80% peak $\dot{V}\text{O}_2$ に相当する負荷に上げて、疲労困憊 (45 rpm以上の回転数を維持できなくなった時) に至るまでエルゴメーターを漕がせ、80% peak $\dot{V}\text{O}_2$ の高強度運動の持続時間を計測した。測定された呼気ガスのデータは、1分毎に平均化し酸素摂取量 ($\dot{V}\text{O}_2$)、二酸化炭素排出量 ($\dot{V}\text{CO}_2$) を求めるとともにRERを算出した。また、心拍数 (HR) は胸部に装着した心拍ベルト (Polar, S-601, Finland) によって、ワイヤレス送信され、呼気ガス分析ソフト (m-

Graph, S & ME, Japan) によって呼気ガスデータとともに10秒毎にオンライン出力され、その後1分間の平均値に換算し分析された。なお、運動中は1分毎に被験者のRPEを確認した。

また、食事操作2日目、4日目、6日目に50% peak $\dot{V}\text{O}_2$ の負荷で20分間のトレーニングを行った。その運動中も呼気ガスデータのみ測定した。

2.3 短期ファットローディング

2.3.1 短期ファットローディングの食事操作

単盲検パラレル法を用い、被験者8名をランダムにHFD群4名とHCD群4名に分けた。被験者の1日目の昼食と夕食に、筋グリコーゲンを蓄える目的で両群ともに炭水化物ローディング (8-10 carbo / kg) を実施し、実験当日 (2日目) の朝食にHFD (脂質70% : 中鎖脂肪酸含有の日清オイリオ製品を中心に摂取) あるいはHCDを運動180分前に摂取させ、本実験を行った (図2参照)。その後、前食の影響が出ないように14日間のウォッシュアウト期間を設け、今度は運動30分前にHFDあるいはHCDを摂取させ同様に本実験を行った。

短期ファットローディングのHFDで使用中鎖脂肪酸は、一般的な油脂を構成している長鎖脂肪酸と比べ、肝臓で素早く分解されエネルギーとなりやすい。中鎖脂肪酸は、摂取後2~3時間付近でエネルギーとしての利用が最大となる (Seaton et al., 1986) ことから、摂取した脂質を効率よく運動エネルギーに利用するため採用した。また、運動前の食事摂取のタイミング

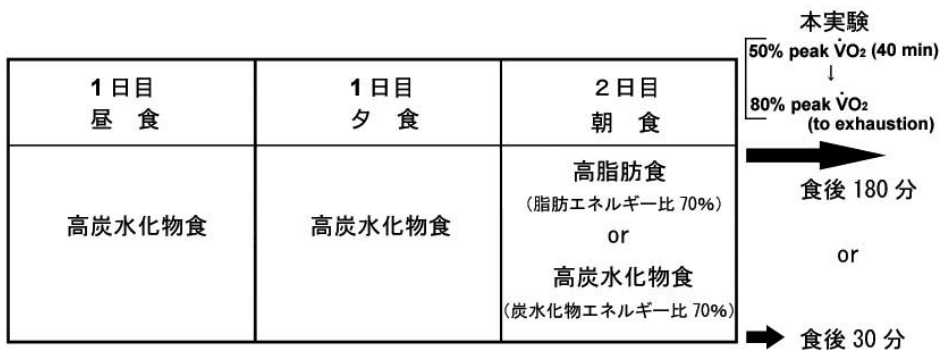


図2. 短期ファットローディングの食事操作と運動プロトコル

は運動中に中鎖脂肪酸の影響を受ける180分前と影響をあまり受けないと考えられる30分前に設定した。

食事操作について、熱量、栄養処方、献立および提供方法は長期ファットローディング実験に準じて実施した。

2.3.2 短期ファットローディングの運動プロトコルとデータの測定・分析

本実験は、気温 $24.4 \pm 0.8^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $66.1 \pm 2.1\%$ の環境下で実施した。被験者には、長期ファットローディングと全く同じプロトコル(50% peak $\dot{V}\text{O}_2$ の負荷40分間+80% peak $\dot{V}\text{O}_2$ でexhaustionまで)で、自転車エルゴメーターを漕がせた。その際、長期ファットローディングの測定項目に加え、安静時、50% peak $\dot{V}\text{O}_2$ の運動開始から10分毎および疲労困憊3分後に血中乳酸濃度を測定した。血中乳酸濃度は、ラクテート・プロ (LT-1710, ARKRAY, Japan) を用い、左指尖部からの採血により測定した。血中乳酸濃度は、安静時からの増加値 (ΔLa) をデータとして用いた。

2.4 統計処理

長期ファットローディングのHFD・HCDの食事条件間における、本実験時の50% および80%

peak $\dot{V}\text{O}_2$ 負荷時それぞれの $\dot{V}\text{O}_2$ 、 $\dot{V}\text{CO}_2$ 、RER、HR、RPE、HRVおよび80%での持続時間について、平均値の差を対応のあるt-testを用いて検定を行った。短期ファットローディングにおける、本実験時の50% および80% peak $\dot{V}\text{O}_2$ 負荷時それぞれの $\dot{V}\text{O}_2$ 、 $\dot{V}\text{CO}_2$ 、RER、HR、RPE、 ΔLa および80%での持続時間について、二元配置分散分析(食事内容×食後時間)を用い、その主効果と交互作用の有意性を検定した。なお、いずれの検定も危険率5%未満とした。

3. 結果

3.1 長期ファットローディングの結果

トレーニング及び本実験について、参加者が途中で脱落することはなかった。また、HFDとHCDは等熱量で処方したため、6日間の食事操作による体重および体脂肪率の平均値に有意差はみられなかった。食事操作中の2日目と6日目のトレーニング時(50% peak $\dot{V}\text{O}_2 \times 20$ minのエルゴメーター運動)のRERについて比較すると、食事条件間で有意な差が認められた($P < 0.001$: 図3)。また、図3で明らかなように、HCD摂取2日後からすでにRERは高値を示したが、HFD摂取時のRERは2日後より6日後の方が有意に低く、脂質のエネルギー利用のための適応に時間を要することを示した($P < 0.01$)。

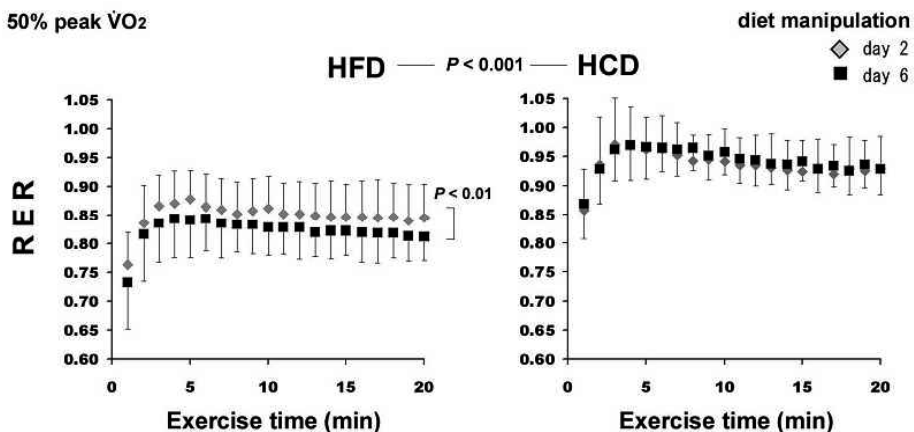


図3. 長期ファットローディングにおける、食事操作開始2日目・6日目のトレーニング中(50% peak $\dot{V}\text{O}_2$ の負荷 $\times 20$ 分のエルゴメーター運動)の呼吸交換比(RER)の変化。左図は高脂肪食(HFD)摂取、右は高炭水化物食(HCD)摂取の場合(11名の平均値)。

本実験は、7日目の炭水化物ローディングの翌日に実施されたが、HFD条件において 50% peak $\dot{V}O_2$ 負荷時のRPEは低下する傾向 ($P=0.06$) を示したが、RERはトレーニング時とは異なり食事条件間で有意差はなかった。なお、50% peak $\dot{V}O_2$ 負荷の運動中、HR、 $\dot{V}O_2$ と $\dot{V}CO_2$ は食事条件間で有意な差はみられなかった (表2参照)。

80% peak $\dot{V}O_2$ に負荷を上げて疲労困憊に至るまでの持続時間 (HFD 6.5 ± 6.4 min, HCD 6.8 ± 7.6 min) は、食事条件間で有意差はなかつた。

HFD条件で80% peak $\dot{V}O_2$ 負荷時のHRは有意に高かった ($P < 0.01$) が、RPEは低下傾向 ($P = 0.09$) を示した。また、80% peak $\dot{V}O_2$ 負荷の運動中に $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ およびRERは食事条件間で有意な差はみられなかった (表2参照)。また、運動前に測定したHRV (LF/HF) は、食事条件間で有意な差はみられなかった。

3.2 短期ファットローディングの結果

本実験における50% peak $\dot{V}O_2$ 負荷時のRERとRPEには有意な交互作用が認められ (それぞれ

表2. 長期ファットローディング本実験における測定項目の各平均値 (SD).

	HFD	HCD	Pvalue
50% peak $\dot{V}O_2$ exercise (40 min)			
Heart rate [HR] (beats/min)	130.2 (6.7)	129.2 (8.6)	NS
$\dot{V}O_2$ (ml/kg/min)	20.6 (3.7)	20.7 (3.3)	NS
$\dot{V}CO_2$ (ml/kg/min)	18.9 (4.3)	18.6 (3.3)	NS
Respiratory exchange ratio [RER]	0.91 (0.05)	0.90 (0.04)	NS
Rate of perceived exertion [RPE]	7.3 (1.5)	8.7 (2.3)	NS [$P=0.06$]
80% peak $\dot{V}O_2$ exercise (to exhaustion)			
Heart rate [HR] (beats/min)	170.0 (7.2)	166.9 (8.0)	$P < 0.01$
$\dot{V}O_2$ (ml/kg/min)	32.6 (4.5)	32.2 (4.2)	NS
$\dot{V}CO_2$ (ml/kg/min)	32.4 (6.2)	31.4 (5.5)	NS
Respiratory exchange ratio [RER]	0.99 (0.07)	0.98 (0.07)	NS
Rate of perceived exertion [RPE]	13.0 (2.9)	15.0 (2.1)	NS [$P=0.09$]

NS (有意差なし) の場合、Pvalue 0.1 未満を記述。

れ $P = 0.046$, $P < 0.001$), HFD摂取後180分後からの運動開始では有意にRERとRPEが低下することを示した(図4)。HFD条件では、HCDと比して、HRは有意に増加した($P < 0.001$)。また、50% peak $\dot{V}O_2$ 負荷の運動中 $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$ および ΔLa には、主効果と交互作用とも有意性はみられなかった。

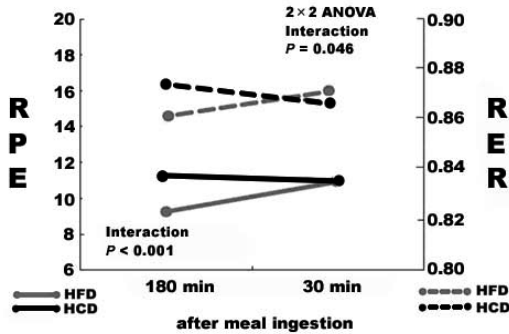


図4．短期ファットローディング本実験（HFD群4名・HCD群4名）の50% peak $\dot{V}O_2$ 負荷時（40分間）における呼吸交換比（RER：点線）と主観的運動強度（RPE：実線）について、運動開始時間（食後180分・30分）ごとの平均値を示したもの。

80% peak $\dot{V}O_2$ に負荷を上げて疲労困憊に至るまでの持続時間は、HFD 8.1 ± 4.4 min, HCD 6.0 ± 3.9 minであり、食事内容および食後時間条件において有意差はなかった。80% peak $\dot{V}O_2$ 負荷時の運動中RER, RPE, HR, $\dot{V}O_2$ および $\dot{V}CO_2$ について、主効果と交互作用とも有意性はみられなかった。しかし、疲労困憊3分後の ΔLa は、HCDよりHFDの方が増加する傾向(食事条件間の主効果： $P = 0.053$)を示した(図5)。

4. 考察

運動習慣のない健康成人のファットローディングの適応効果として、運動中における脂質の優先利用および自覚的つらさの改善が認められたが、心拍数の増加を抑えることができず、高強度運動の持続時間の増加にも寄与しなかった。今回の実験結果からHFD摂取がパフォーマ

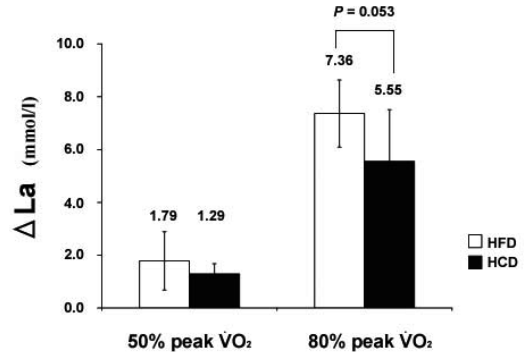


図5．短期ファットローディング本実験における、安静時からの血中乳酸濃度の増加値（ ΔLa ）。HFD群4名およびHCD群4名の運動強度別の各平均値。

ンスに貢献できなかった要因を分析し、ファットローディング効果の可能性を検討した。

4.1 長期ファットローディング

今回の実験では、一般の被験者の6日間のHFD摂取により、運動中のRERは有意に低下し(図3)、一般人においても食事内容によってトップアスリート同様に脂質優位の基質利用に変化できることが証明された。トップアスリートでは、6日間のHFDによりRERは有意に低下し、7日目の炭水化物ローディング後も、脂質利用は維持されたままであった(Havemann et al., 2006)。しかし本研究では、7日目に炭水化物ローディングを行うと8日目の本実験中、RERは食事条件間での有意性が消失する結果となった。これは、一般の被験者において短期間のHCD摂取により脂質のエネルギー利用が減少したとの報告(Roberts et al., 2008)と合致しており、本研究でも同様の結果となったと考えられる。対照的に、トップアスリートでは食事に関係なく脂質を有効に利用することができる(Hurley et al., 1986; Coggan et al., 1993)ため、HCDを摂取した後も、脂質利用を維持できた(Havemann et al., 2006)ことが示唆される。

今回の研究でパフォーマンスの指標とした80% peak $\dot{V}O_2$ 高強度運動の持続時間は、食事間で有意差はみられなかった。これは前述した通り、HFDによる脂質優位の基質利用が、1日間の炭水化物ローディングによって消失したことに起因すると考えられる。しかし、HFD条件で50% peak $\dot{V}O_2$ と80% peak $\dot{V}O_2$ 負荷時ともに、RPEが低下傾向を示し、被験者がHCD条件と比較して運動負荷を楽に感じていることが示唆された。これまで、高脂肪食の摂取は交感神経活動を賦活させ (Helge et al., 1996; Jansson et al., 1982; Sasaki et al., 1991; Havemann et al., 2006)、その結果として、HRの増加を引き起こし、さらに運動中のRPEが高くなることとの関連が指摘されてきた (Helge et al., 1996; Prusaczyk et al., 1992; Stepto et al., 2002)。RPEの増加は、3日間のHFD摂取後の高強度 (85% peak $\dot{V}O_2$ 以上) 運動時 (Stepto et al., 2002) や30~90% peak $\dot{V}O_2$ の運動時 (Prusaczyk et al., 1992) でも報告されており、持続的な運動能力の低下につながると考えられる。しかしながら、本研究ではHFDを摂取したにも関わらず、運動中にRPEが低下傾向を示し、これまでの報告とは異なる結果となった。さらに、Burke et al. (2000) やHavemann et al. (2006) は、HFD摂取の被験者が実験中、疲れや運動負荷維持の困難を訴えたと報告しているが、本研究では同様の訴えはなく、安静時の交感神経活動は食事間で有意差はみられなかった。これは、多彩な食材を用いてバラエティに富んだHFDのメニューを提供することで、被験者への負担を抑えることが出来た可能性が示唆された。しかし、中強度運動では運動負荷を楽に感じているにも関わらず、高強度に負荷を上げると交感神経活動の亢進を示唆するように、HRは増加してしまった。高強度運動中のHR増加によって、心肺機能への負担が生じたことが、パフォーマンス増加につながらなかった要因の一つであると考えられる。

また、パフォーマンス増加につながらなかった要因として、HFD摂取によるインスリンと糖輸送担体 (GLUT4) の機能低下が挙げられる

(Tanaka et al., 2007)。エネルギー需要に応じた筋細胞でのグルコースの取込には、膵臓 β 細胞より分泌されるインスリンが関与している (Olefsky et al., 1989)。インスリンは、細胞膜とT管へのGLUT4のトランスロケーションを惹起して糖輸送を活性化する。一方、インスリンとは独立してGLUT4の活性には、運動による刺激が関与していることが示唆されている (Lund et al., 1995)。運動により筋収縮が生じると、AMP活性たんぱく質キナーゼの活性が起り、GLUT4のトランスロケーションを惹起しグルコースの筋内取り込みが促進され (Mu et al., 2001)、習慣的な酸素運動も骨格筋のGLUT4濃度を増加させることが示唆されている (Yaspelkis et al., 2002)。しかしながら、運動直後にHFD (脂肪エネルギー比45%) を摂取すると筋グリコーゲン再合成も耐糖能も改善しないこと (Fox et al., 2004) や、HFDなどの食事戦略により炭水化物の摂取が少ないと、インスリン分泌量が低下しGLUT4を介した筋内へのグルコース取込を抑制することが報告されている (Tanaka et al., 2007) ことから、本研究でも高強度運動持続中の筋内への糖質の取り込みが妨げられたことが、運動持続時間を延ばせなかった原因であることが示唆された。

さらに、HFD摂取によるセロトニン (5-hydroxytryptamin: 5-HT) 生成の増加による中枢性疲労が起きている可能性も考えられる (Davis et al., 2000)。セロトニンはトリプトファン (TRP) から生合成される神経伝達物質であり、体温調節や摂食抑制のほか、脱力感や眠気、そして憂鬱などメンタル面にも作用している。血漿内のTRPは大部分がアルブミンと結合して循環しており、アルブミンと結合していないTRP (f-TRP) は脳内でセロトニンとなる。HFDの摂取により血漿中の脂肪酸 (FA) 濃度が増加すると、FAはTRPよりもアルブミンとの親和力が強いので、f-TRPの増加が生じて、脳内でセロトニンが生成される。長時間の持続的な運動を行うとエネルギー源として脂質を優先的に利用するため、血漿中のFA濃度は増加する。また、ファットローディングのように、

脂質を多く摂取した場合でも血中FA濃度の増加が考えられる。本研究では、血漿中のFA濃度測定は行っていないが、HFDにより運動時のFA濃度は増加した (Havemann et al, 2006) と推測される。その結果、脳内へのf-TRP供給が増し、脳内セロトニン濃度が増加することで中枢性疲労を引き起こした可能性が考えられた。本研究で測定した安静時HRVに有意差は認められず、安静時には中枢性疲労は起こしていないことが示唆されたが、運動中の血漿成分を今後検討する必要がある。

4.2 短期ファットローディング

長期ファットローディングの結果をふまえ、我々は運動直前の食事だけをHFDとすることで、一般の被験者において運動中でもRERは減少し、パフォーマンスの増加に影響するのではないかと考えた。

今回、運動開始180分前に中鎖脂肪酸を主とするHFDを摂取することで、運動中 (50% peak $\dot{V}O_2$) でもRERはHCD条件と比較して有意に低下し、さらにRPEも減少した。すなわち、中強度運動時に被験者はHCD条件よりも脂質を優先的に利用するとともに運動負荷を楽に感じていることが示唆された。また、HFD条件で、安静時からの血中乳酸濃度 (ΔLa) は、HCD条件と比して疲労困憊後に増加する傾向を示した。これは、ラストスパートに相当する80% peak $\dot{V}O_2$ 高強度運動で、糖質をより多く利用できたことが示唆される。これらは、中強度の運動負荷で脂質を優先的に利用することで筋グリコーゲンを温存し、高強度に負荷を上げると筋グリコーゲンを優先的に利用できる、“糖質節約”を示す結果と推察されたが、実際にラストスパートの持続時間の延伸には寄与しなかった。中強度運動中にHFD摂取によるHR増加を抑えることができなかったことが原因であると思われる。

一方、ファットローディングの顕著な効果はウルトラマラソン開始4時間以降に報告されており (Carey et al, 2001), 5時間以上かけてゴールするランナーの多いシティマラソンなどにおいて、HFD摂取によるグリコーゲン節約の可能

性が期待できると考えられる。今後は被験者を増やすとともに運動時間を増加させ検証を進め、一般の被験者だけでなくアスリートにも適用させていきたい。

謝辞

被験者へ提供した食事の調理にご協力いただいた、羽床晃一、杉原佑紀、中村晃子の栄養士各氏に厚く御礼を申し上げます。

文献

- Burke, L.M., Angus, D.J., Cox, G.R., Cummins, N.K., Febbraio, M.A., Gawthorn, K., Hawley, J.A., Minehan, M., Martin, D.T., Hargreaves, M. (2000) Effect of fat adaptation and carbohydrate restoration on metabolism and performance during prolonged cycling. *J. Appl. Physiol.*, 89: 2413-2421.
- Burke, L.M., Hawley, J.A., Angus, D.J., Cox, G.R., Clark, S.A., Cummins, N.K., Desbrow, B., Hargreaves, M. (2002) Adaptations to short-term high-fat diet persist during exercise despite high carbohydrate availability. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 34: 83-91.
- Carey, A.L., Staudacher, H.M., Cummings, N.K., Stepto, N.K., Nikolopoulos, V., Burke, L.M., Hawley, J.A. (2001) Effects of fat adaptation and carbohydrate restoration on prolonged endurance exercise. *J. Appl. Physiol.*, 91: 115-122.
- Coggan, A.R., Spina, R.J., Kohrt, W.M., Holloszy, J.O. (1993) Effect of prolonged exercise on muscle citrate concentration before and after endurance training in men. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.*, 264: E215-E220.
- Davis, J.M., Alderson, N.L., Welsh, R.S. (2000) Serotonin and central nervous system fatigue: nutritional considerations. *Am. J. Clin. Nutr.*, 2;72(suppl):573S-578S.
- Fox, A.K., Kaufman, A. E., Horowitz, J.F. (2004) Adding fat calories to meals after exercise does not alter glucose tolerance. *J. Appl. Physiol.*, 97:11-16.

- Havemann, L., West, S.J., Goedecke, J.H., Macdonald, I.A., Gibson, A.S.C., Noakes, T.D., Lambert, E.V. (2006) Fat adaptation followed by carbohydrate loading compromises high-intensity sprint performance. *J. Appl. Physiol.*, 100: 194-202.
- Helge, J.W., Richter, E.A., Kiens, J. (1996) Interaction of diet and training on metabolism and endurance during exercise in man. *J. Physiol.*, 492: 293-306.
- Hurley, B.F., Nemeth, P.M., Martin, W.H. III, Hagberg, J.M., Dalsky, G.P., Holloszy, J.O. (1986) Muscle triglyceride utilization during exercise: effect of training. *J. Appl. Physiol.*, 60: 562-567.
- Jansson, E., Hjemdahl, P., Kaijser, L. (1982) Diet induced changes in sympatho-adrenal activity during submaximal exercise in relation to substrate utilisation in man. *Acta. Physiol. Scand.*, 114: 171-178.
- Lund, S., Holman, D.G., Schmitz, O., Pedersen, O. (1995) Contraction stimulates translocation of glucose transporter GLUT4 in skeletal muscle through a mechanism distinct from that of insulin. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 92: 5817-5821.
- Mu, J., Brozinick, J.T. Jr, Valladares, O., Bucan, M., Birnbaum, M.J. (2001) A role for AMP-activated protein kinase in contraction-and hypoxia-regulated glucose transport in skeletal muscle. *Mol. Cell*, 7:1085-1094.
- Olefsky, J.M., Garvey, W.T., Henry, R.R., Brillon, D., Matthaei, S., Freidenberg, G.R. (1989) Cellular mechanisms of insulin resistance in non insulin dependent (type 2) diabetes. *Am. J. Med.*, 85:86-105.
- Prusaczyk, W.K., Cureton, K.J., Graham, R.E., Ray, C.A. (1992) Differential effects of dietary carbohydrate on RPE at the lactate and ventilator thresholds. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 24: 568-575.
- Roberts, R., Bickerton, A.S., Fielding, B.A., Blaak, E.E., Wagenmakers, A.J., Chong, M.F.F., Gilbert, M., Karpe, F., Frayn, K.N. (2008) Reduced oxidation of dietary fat after a short term high-carbohydrate diet. *Am. J. Clin. Nutr.*, 87: 824-831.
- Sasaki, H., Hotta, N., Ishiko, T. (1991) Comparison of sympatho-adrenal activity during endurance exercise performed under high- and low-carbohydrate diet conditions. *J. Sports Med. Phys. Fitness*, 31: 407-412.
- Seaton, T.B., Welle, S.L., Wardenko, M.K., Campbell, R.G. (1986) Thermic effect of medium-chain and long-chain triglycerides in man. *Am. J. Clin. Nutr.*, 44: 630-634.
- Stepto, N.K., Carey, A.L., Staudacher, H.M., Cummins, N.K., Burke, L.M., Hawley, J.A. (2002) Effect of short-term fat adaptation on high-intensity training. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 34: 449-455.
- Tanaka, S., Hayashi, T., Toyoda, T., Hamada, T., Shimizu, Y., Hirata, M., Ebihara, K., Masuzaki, H., Hosoda, K., Fushiki, T., Nakao, K. (2007) High-fat diet impairs the effects of a single bout of endurance exercise on glucose transport and insulin sensitivity in rat skeletal muscle. *Metabolism*, 56: 1719-1728.
- Yaspelkis, B.B. III, Singh, M.K., Trevino, B., Krisan, A.D., Collins, D.E. (2002) Resistance training increases glucose uptake and transport in rat skeletal muscle. *Acta. Physiol. Scand.*, 175: 315-323.