

食後に行う有酸素運動が血糖値の変動に及ぼす影響—連続運動と間欠運動の比較—

後藤 一成¹、高松 薫²

¹立命館大学スポーツ健康科学部 ²流通経済大学スポーツ健康科学部

1. 緒言

生活の利便に伴う省力化や高脂肪食の摂取などにより、多くの先進国において肥満や生活習慣病の予防はきわめて重要な問題となっている。日本においても例外ではなく、平成 21 年国民健康・栄養調査によると、男性の肥満者 (BMI が 25 以上) の割合は対象となった成人の 30.5%に達する。また、30～50 歳代の中年齢においてはこの傾向にさらに顕著であり、約 35%の男性が肥満者であると判定されている (平成 21 年国民健康・栄養調査)。このように、肥満の予防、解消は現代の日本が抱える健康課題の一つであると言える。

肥満に伴う内臓脂肪量の増加はインスリンの作用不足を惹起し、耐糖能異常や糖尿病発症の一因となる。また、これらの疾患は、心筋梗塞など心血管系疾患の発症リスクを増加させる (Laakso and Lehto, 1997; Stamler et al. 1993)。一般に、耐糖能異常や糖尿病の指標として、空腹時における血中グルコース濃度 (血糖値) が用いられる。実際に、疫学研究においても、空腹時の血中グルコース濃度は心血管系疾患の独立したリスクファクターであることが示されている (Barrett-Connor et al. 1991; Pan et al. 1986; Wilson et al. 1991; deVegt et al. 1999)。一方、耐糖能異常により、食後は数時間にわたりきわめて高血糖の状況が確認される。さらに、最近の研究では、食後の血中グルコース濃度は、空腹時の濃度に比較して、心血管系疾患発症のより正確な予測因子であることが報告されている (Haffner, 1998; Bonora and Muggeo, 2001; Heine and Dekker, 2002; Gerich, 2003)。たとえば、2 型糖尿病患者を対象にした調査においても、昼食後における血中グルコース濃度が心血管系疾患発症の独立したリスクファクターであることが示されている (Cavalot et al. 2006)。

食後における血中グルコース濃度の上昇を抑制する手段として、運動の実施が推奨されている。特に、有酸素運動を実施すると、活動筋でのグルコース取り込みや血流量の増加によるクリアランスの亢進により、血中グルコース濃度の速やかな低下が認められる (Poirier et al. 2001; Derave et al. 2007)。このように、食後における有酸素運動は血中グルコース濃度をコントロールする上で有用である一方で、運動終了後には血中グルコース濃度の急激な増加 (リバウンド現象) の生じることも確認されている (Larsen et al. 1999; Derave et al. 2007)。

我々はこれまで、休息を挟みながら間欠的に有酸素運動を行う「分割法」による運動の効果に着目してきた。これまでの研究において、分割法による運動では、休息を挟まずに長時間にわたり運動を継続する「連続法」による運動と比較して、運動終了後に脂質代謝の亢進がみられることを明らかにしている (Goto et al. 2007, 2011)。一方、分割法による運動は食後の血中グルコース濃度のコントロールにおいても有効である可能性もあるが、「食後」に実施した連続法と分割法による運動の効果を比較した研究はみられない。

そこで本研究では、食後における有酸素運動が血中グルコース濃度や代謝・内分泌応答に及ぼす影響を、運動の実施方法 (連続法、分割法) の違いと関連づけて検討することを目的とする。我々は、分割法による運動では「リバウンド現象」を起こさずに、血中グルコース濃度の過度の上昇を抑制できるという仮説をたてた。

2. 方法

2. 1 被験者

健康な成人男性8名を対象とした。対象者の年齢や身体組成は、 23 ± 0.3 歳、 170.8 ± 2.1 cm、 62.3 ± 1.9 kgであった（いずれも平均値±標準誤差を示す）。対象者には事前に書面および口頭により本研究の内容や主旨を十分に説明し、参加同意書への署名が得られた場合にのみ被験者として選定した。

2. 2 実験デザイン

食後における連続法または分割法による運動が血中グルコース濃度の変化に及ぼす影響を検討するために、各被験者は以下の3試技をそれぞれ異なる日に実施した。

- 食後 30 分から 30 分間のペダリング運動を休息を挟まずに行う試技（連続法）
- 食後 30 分から 15 分間のペダリング運動を 10 分間の休息を挟んで 2 回行う試技（分割法）
- 食後に運動を行わずに安静にする試技（安静）

いずれの試技においても、被験者は前日の夕食以降何も食べない状態で 8:30 に実験室に来室し、約 20 分間座位安静にした。その後、座位安静時における酸素摂取量、心拍数（HR）、収縮期・拡張期血圧を測定した。次に、血中グルコースやホルモン濃度測定のために採血をした。

安静時の測定終了後に、被験者は 75g のブドウ糖を含有した溶液（225ml）を摂取した。ブドウ糖摂取後は再び座位姿勢にて安静にした。なお、連続法および分割法による試技では、ブドウ糖摂取後 30 分の時点からペダリング運動を開始した。安静試技では運動を実施せずに、座位姿勢での安静を維持した。いずれの試技においてもブドウ糖摂取直後～120 分後まで経時的に採血し、血中グルコースおよび血漿インスリン濃度を測定した。

運動プロトコール

連続法、分割法試技では、ブドウ糖摂取後 30 分の時点から自転車エルゴメーター（Monark828E、モナーク社製）による合計 30 分間のペダリング運動とした。運動時の負荷は、あらかじめ測定をした最大酸素摂取量の 60%とした。なお、連続法では、休息を挟まずに 30 分間連続で運動を実施し、分割法では、15 分間の運動を 10 分の休息を挟んで 2 セット行った（合計 30 分間ペダリング運動）。

2. 3 測定項目

最大酸素摂取量

運動時に用いる負荷設定のために、多段階漸増負荷法による最大酸素摂取量の測定を行った。ウォーミングアップに引き続き、60W から 2 分後に 30W ずつ漸増する負荷に対し、疲労困憊に至るまでペダリング運動を継続した。疲労困憊の定義としては、①酸素摂取量にレベリングオフがみられる、②規定のペダル回転数を 5 秒間以上連続で下回る、③呼吸交換比（二酸化炭素排出量/酸素摂取量）が 1.10 を上回る、④年齢から推定される最大心拍数に達している、からなる 4 項目のうち 3 項目以上を満たした時点とした。

酸素摂取量の測定には代謝分析測定装置（AE-310S、ミナト医科学社製）を用い、酸素摂取量、二酸化炭素排出量などを breath by breath 法により測定した。得られた値から 30 秒毎の平均値を算出し、代表値とした。また、運動時における負荷と酸素摂取量との一次回帰式より、最大酸素摂取量の 60%

に相当する負荷を算出した。

血液パラメーター

空腹時、ブドウ糖摂取 30、45、60、75、90、105、120 分後に血液を採取し、血中グルコース濃度および血漿インスリン濃度を測定した。血中グルコース濃度の測定には、自動分析測定機（ニプロフリースタイル、ニプロ社）を用いた。また、血漿インスリン濃度の測定においては、採取した血液を遠心分離し、血漿を採取した。血漿は-80 度にて冷凍保存し、すべての実験試技を終了した後に、酵素免疫測定法（ELISA）により血漿グルコース濃度を測定した。

主観的運動強度

連続法、分割法では運動開始から 10 分、20 分、30 分の時点での主観的運動強度を測定した。主観的運動強度の評価では、6〜20 までの 15 段階の尺度を用いた（Borg、1973）。

2. 4 統計解析

値はすべて平均値±標準誤差で示した。時間経過における各項目（血液パラメーター）の平均値の差の検定には、反復測定による二元配置の分散分析を用い、有意な交互作用（条件×時間）または主効果がみられた場合には、多重比較を行った。また、血中グルコースおよび血漿インスリン濃度の変化の比較には、ブドウ糖摂取直後〜120 分後までの濃度曲線下面積（area under curve; AUC）を算出した。試技間での AUC の比較には、反復測定による一元配置の分散分析を用いた。有意水準は 5%とした。

3. 方法

3. 1 空腹時の酸素摂取量、心拍数、血圧

空腹時における酸素摂取量（連続法：257±12 ml/min、分割法：270±112 ml/min、安静：270±10 ml/min）には試技間で有意差はみられなかった。また、心拍数、収縮期血圧、拡張期血圧においても、試技間で有意な差は認められなかった。

3. 2 血中グルコースおよび血漿インスリン濃度

図 1 には、血中グルコースおよび血漿インスリン濃度の変化を示した。

血中グルコース濃度は、いずれの試技でもブドウ糖摂取 30 分後の時点で有意に増加した（ $P < 0.05$ ）。一方、連続法および分割法では、運動に伴い血中グルコース濃度は急激に低下し、安静試技との間に有意差が認められた（ $P < 0.05$ ）。運動終了後から血中グルコース濃度は再び増加したが、その増加の程度は連続法において顕著であった。その結果、ブドウ糖摂取後 75 分および 90 分の時点で、連続法が分割法に比較して有意に高値を示した（ $P < 0.05$ ）。

血漿インスリン濃度は、いずれの試技でもブドウ糖摂取後 30 分の時点で有意に増加した（ $P < 0.05$ ）。連続法および分割法では、運動に伴い血中インスリン濃度は急激に低下し、安静試技との間に有意差が認められた（ $P < 0.05$ ）。一方、いずれの時間帯においても、連続法と分割法の間に有意差はみられなかった。

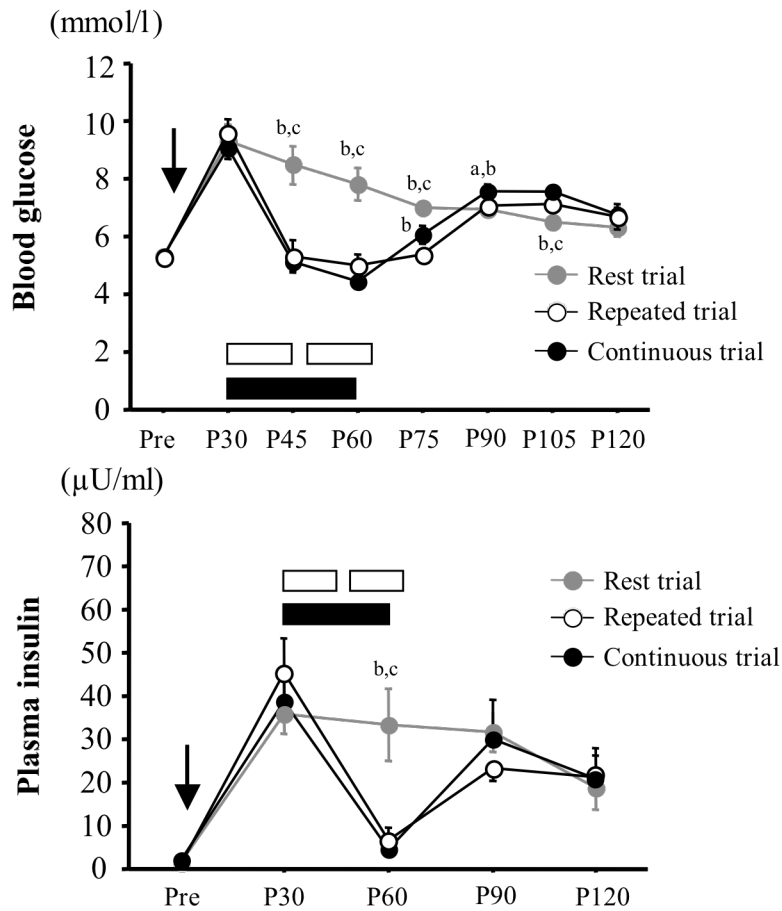


Figure 1. Fasting (Pre) and postprandial blood glucose and plasma insulin concentrations. Values are means \pm SE. Black and white bars indicate exercise durations in each trial. Arrows indicate time point of the 75 g glucose ingestion. a; $P < 0.05$ vs. Rest trial. b; $P < 0.05$ vs. Repeated trial. c; $P < 0.05$ vs. Continuous trial.

図2には、血中グルコースおよび血漿インスリン濃度のAUC（濃度曲線下面積）を示した。その結果、血中グルコース濃度では、ブドウ糖摂取後120分間（ブドウ糖摂取後0-120分）、前半60分間（ブドウ糖摂取後0-60分）において連続法および分割法が安静試技に比較して有意に低値を示した（ $P < 0.05$ ）。後半60分間（ブドウ糖摂取後60-120分）においては、分割法は安静試技に比較して有意に低値を示したが（ $P < 0.05$ ）、分割法と安静試技との間に差はみられなかった。いずれの時間帯においても、連続法と分割法との間に有意差は認められなかった。

血漿インスリン濃度では、ブドウ糖摂取後120分間（0-120分）において連続法および分割法が安静試技に比較して有意に低値を示した（ $P < 0.05$ ）。また、ブドウ糖摂取後60-120分において、分割法が安静試技に比較して有意に低値を示した（ $P < 0.05$ ）。一方、いずれの時間帯においても、連続法と分割法との間に有意差は認められなかった。

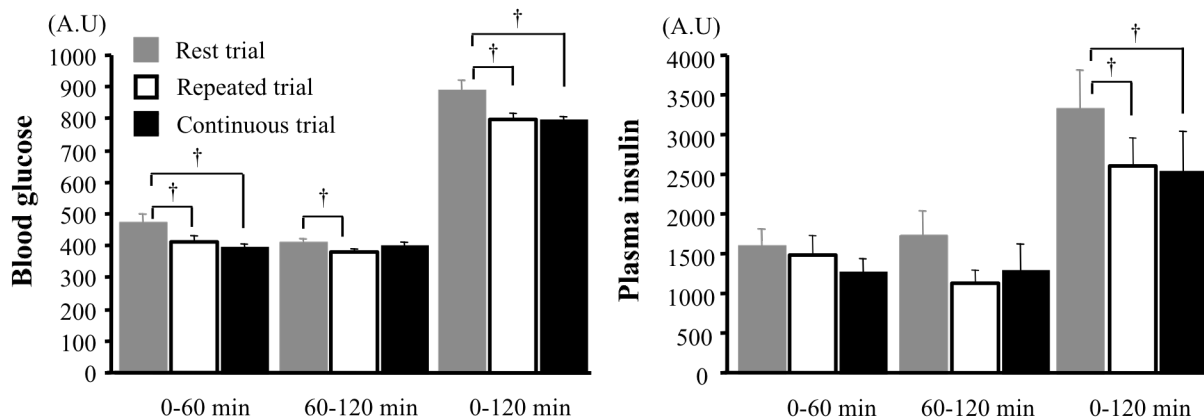


Figure 2. Area under the curve (AUC) of postprandial concentrations for blood glucose and plasma insulin. Values are means \pm SE. †; $P < 0.05$ between trials.

3. 3 その他

運動時の主観的運動強度には、連続法と分割法の間で有意な差はみられなかった。また、ブドウ糖摂取後 120 分間における HR の平均値は、連続法 (95 ± 3 bpm) および分割法 (97 ± 2 bpm) が安静試技 (67 ± 2 bpm) に比較して有意に高値を示した ($P < 0.05$)。一方、連続法と分割法との間に有意差は認められなかった。

4. 考察

本研究におけるおもな知見は、食後に行う 30 分間の有酸素運動は血中グルコース濃度の上昇を抑制すること、運動の途中に休息を挟んで間欠的に行うことにより、血中グルコース濃度の下降に対してより大きな効果を期待できることである。これらの結果は、食後の過剰な高血糖を抑止するための運動処方を提案する上で、重要な示唆になると考えられる。

内臓脂肪型肥満者の増加に伴い、我が国における糖尿病有病者あるいは糖尿病が疑われる予備群に相当する人口は 1800 万人を超える。一般に、糖尿病予防のためのモニタリングにおいては、空腹時における血中グルコース濃度が指標とされている。一方、近年では、食後のグルコース濃度が心血管系疾患のリスクファクターとして重要であることが指摘されている (Cavalot et al. 2006)。たとえば、2 型糖尿病患者を対象にした Hanefeld et al. (1996) の研究によると、朝食後における血中グルコース濃度は心筋梗塞の予測因子となる一方で、空腹時の値で同様の関係はみられなかった。また、メタ分析を用いた研究でも、食後高血糖は特に、女性における心血管疾患の発症と関連することが示されている (Drchard, 1996; Lee et al. 2000)。これに対して、運動がエネルギー代謝や内分泌応答に及ぼす影響を検討した研究の多くは、空腹時に実施されたものである。しかし、上述の諸点を踏まえると、食後の血中グルコース濃度を適切にコントロールするための至適な運動処方を提案することが必要であると考えられる。

図1に示したように、75gのブドウ糖摂取後30分の時点で血中グルコース濃度は顕著に増加し、その後には有酸素運動を行うことで速やかな減少が認められた。本研究でみられた運動による血中グルコース濃度の急激な低下には、運動開始初期における活動筋での糖利用の亢進が関与している(Larsen et al. 1997)。一方、空腹時での運動時には、交感神経の賦活に伴うカテコールアミンの放出促進や肝臓での糖新生を抑制するインスリンの放出が減少するために、肝臓からのブドウ糖供給自体も亢進する。そのために、空腹時での運動時に血中グルコース濃度の急激な低下はみられない(Poirier et al. 2001)。これに対して、本研究では、運動開始時点で血漿インスリン濃度が大きく上昇していることから、血中グルコース濃度の急激な低下が引き起こされたものと推察される。これらを踏まえると、食後における血中グルコース濃度の過剰な増加を防ぐ上では、食後の運動は食前の運動よりも有効であると考えられる。実際に、朝食後に運動を実施した場合と朝食前に同様の運動を行った場合を比較した結果、朝食後の運動では血中グルコース濃度の上昇が有意に軽減されることも示されている(Derave et al. 2007)。

一方、食後における有酸素運動の実施は、血中グルコース濃度の急激な低下を引き起こし、低血糖に至る例も見受けられる。また、興味深いことに、血中グルコース濃度が大きく低下した後に、反動的に急激な増加を示す「リバウンド現象」が複数の先行研究で確認されている(Larsen et al. 1999; Derave et al. 2007)。本研究の連続法においても30分間のペダリング運動により血中グルコース濃度は約50%低下した後に、30分間にわたり血中グルコース濃度の急激な増加が認められた。これに対して、分割法による運動では、同様の「リバウンド現象」はみられたもののその程度は連続法に比較して緩やかであった。その結果、ブドウ糖摂取後75分および90分の時点において、分割法における血中グルコース濃度は連続法に比較して有意に低値を示した。

これまで我々は、分割法による運動の特性をおもに脂質代謝に観点から検討してきた。これまでの結果から、①連続法による60分間の運動に比較して、30分間の運動を2セット行う分割法による運動では運動終了後における脂質代謝の亢進が有意に大きい(Goto et al. 2007)、②連続法による30分間の運動に比較して、10分間の運動を3セット行う分割法による運動では、運動終了後における脂質利用の亢進が顕著に生じる、ことなどを見出してきた。また、分割法によるトレーニングは連続法に比較して、体力の改善や体脂肪量の減少に対する効果が大きいことも認めている(後藤ら、未発表データ)。一方、これらの研究の多くは空腹時に実施されたものであり、食後に運動を行った本研究とは運動の目的が大きく異なる。本研究の結果は、脂質代謝の亢進への効果を示したこれまでの報告に加えて、食後における血中グルコース濃度のコントロールの点からも、分割法による運動が有用であることを示唆するものである。

本研究には幾つかの限界や課題がみられる。まず始めに、本研究では75gのブドウ糖摂取を用いており、実際の食事内容に基づくものではない。一方、最近の研究では、ブドウ糖摂取後における血中グルコース濃度(Postchallenge blood glucose)と試験食摂取後における血中グルコース濃度(Postprandial blood glucose)を明確に区別すべきという意見もみられる(Yudkin, 2002)。したがって、今後、糖質、タンパク質、脂質をすべて豊富に含んだ実際の食事摂取を用いた同様の試みも必要であろう。また、その際には、血中グルコースやインスリン濃度の変化に加えて、その他の内分泌因子への影響をみることも重要である。特に、食後に血中濃度が低下するグレリン(摂食亢進作用をもつホルモン)や血中濃度が増加するグルカゴン様ペプチド-1(摂食抑制作用をもつホルモン)の変化(Martin et al. 2010)や主観的な食欲に対する効果を検討することは興味深い。その他の限界としては、被験者の特性が考えられる。本研究では、健康な若年男性を被験者として用いた。一方、分割法による食後の運動の有

用性を示す上では、耐糖能が低下した肥満者や2型糖尿病患者を対象に同様の研究を実施することが今後必要であろう。

5. 結語

食後における合計30分間のペダリング運動により、血中グルコース濃度は有意に低下をした。一方、連続法による運動では、運動終了後に血中グルコース濃度が急激に上昇をする「リバウンド」現象が認められた。これに対し、30分間のペダリング運動の途中で休息を挟んだ分割法による運動では「リバウンド現象」が比較的小さく、連続法に比較して血中グルコース濃度が有意に低値を示した。これらの結果は、休息を挟みながら食後に行う分割法による運動が、食後の血中グルコース濃度の過度の上昇を防ぐ上で有用であることを示唆するものである。

参考文献

- Barrett-Connor et al. JAMA 265: 627-63, 1991.
Bonora and Muggeo. Diabetologia 44: 2107-2114, 2001.
Borg. Med Sci Sports Exerc 5:90-93, 1973.
Cavalot et al. J Clin Endocrinol Metab 91 (3): 813-819, 2006.
Derave et al. Obesity 15: 704-711, 2007.
de Vegt et al. Diabetologia 42: 926-931, 1999.
Gerich. Arch Intern Med 163: 1306-1316.
Goto et al. J Appl Physiol 102:2158-2164, 2007.
Goto et al. Clin Physiol Func Imaging, 2011 (in press)
Haffner. Endocr Rev 19: 583-592, 1998.
Hanefeld et al. Diabetologia 39: 1577-1583, 1996.
Heine RJ and Dekker JM. Diabetologia 45: 461-475, 2002.
Laakso and Lehto. Diabetes Rev 5: 294-315, 1997.
Lee et al. Diabetes Care 23: 962-968, 2000.
Larsen et al. Diabetologia 40: 447-453, 1997.
Larsen et al. Diabetologia 42: 1282-1292, 1999.
Martin et al. J Clin Endocrinol Metab 95: 1609-1616, 2010.
Orchard. Ann Med 28: 323-333, 1996.
Pan et al. Am J Epidemiol. 123: 504-516, 1986.
Poirier et al. Med Sci Sports Exerc 33 (8): 1259-1264, 2001.
Stamler et al. Deabetes Care 16: 434-444, 1993.
Yudkin. Lancet 359: 166-167, 2002.
Wilson et al. Am Heart J 121: 586-590, 1991.
平成21年国民健康・栄養調査、厚生労働省