

原 著

若年健常女性における短時間・低強度の食後運動が
血糖値に及ぼす影響；無作為化比較クロスオーバー試験橘田 薫^{1*}, 樋口 友紀¹, 梶山 静夫^{2,3}, 宮脇 尚志⁴, 梶山 真太郎^{2,3}, 今井 佐恵子⁴

要 約

目的：2型糖尿病患者に対するパイロット研究として若年健常女性を対象に、短時間かつ低強度のステップ運動を食後の異なるタイミングで実施し、血糖値に及ぼす影響を無作為化比較クロスオーバー試験により調べた。**方法：**被験者は非連続の3日間で、いずれも試験食を5分以内に摂取し、食後運動なし、食事開始15分後または30分後に10分間のステップ運動を実施し、自己血糖測定にて食後の血糖値を調べた。ステップ運動は、カルボーネンの式を用いて運動強度が30%HRRになるよう個別に算出した目標心拍数から設定したステップ速度に合わせて行った。**結果：**運動終了直後から血糖上昇が抑制され、30分後運動では食事開始45分後の平均血糖値が運動なし、15分後運動と比較して有意に低値を示した。また、食事開始60分後の血糖上昇曲線下面積は15分後運動、30分後運動ともに運動なしと比較して有意に低値を示し、30分後運動では15分後運動と比較して低い傾向にあった。15分後運動、30分後運動の平均血糖値、15分後運動の最大血糖値は運動なしと比較して低い傾向にあった。**結論：**本研究結果より健常女性において、食事開始30分後に10時間かつ強度30%HRRの低強度のステップ運動を実施すると、食後の急激な血糖上昇を抑制する可能性が示唆された。

キーワード：運動のタイミング、短時間、低強度、血糖値

(受付日：2024年11月19日 採択日：2025年1月21日)

緒論

現在世界の10人に1人が糖尿病を罹患しており、今後も糖尿病患者が増加の一途をたどる中¹⁾、医療の発展や生活の変化により平均寿命が延伸し、日本を含む先進国では高齢の糖尿病患者の増加が新たな課題となっている。長年にわたる血糖コントロール不良は、細小血管障害や動脈硬化の進展による大血管障害のリスクを増大させるほか^{2,3)}、食後2時間血糖値が200 mg/dL以上ではアルツハイマー型認知症の発症リスクが3.4倍になると報告されている⁴⁾。また、高齢者糖尿病では認知機能障害だけでなく、日常生活

動作 (Activities of Daily Living; ADL) の低下、サルコペニア、転倒や骨折、フレイル、低栄養、うつ状態などの老年症候群を2倍きたしやすい⁵⁾。そのため、食事療法や運動療法によって1日の血糖変動をできるだけ小さくし、糖尿病に起因する様々な合併症を予防することが重要である。

糖尿病とサルコペニアは互いに増悪因子となることが指摘されている。高齢の2型糖尿病患者は非糖尿病の高齢者と比較して、骨格筋量の減少や筋力の低下がより顕著であり^{6,7)}、日本人高齢者の追跡研究では、2型糖尿病群は正常耐糖能群と比較してサルコペニアリスクが約2倍であったほか⁸⁾、握力の低下 (サルコペニア疑い) とインスリン抵抗性を併存する群は正常群と比較して2型糖尿病の発症リスクが約5倍だったと報告されている⁹⁾。加齢や糖尿病においてはインスリンの分泌低下や作用不足によってインスリンシグナル伝達が障害され、タンパクの同化作用の減弱や異化亢進が起こり、骨格筋量や筋力が低下する^{10,11)}。また、高血糖が筋萎縮を促進することも要因の一つと考えられる¹²⁾。一方、骨格筋ではインスリン作用により末梢のグ

¹ 京都女子大学大学院家政学研究科食物栄養学専攻

² 梶山内科クリニック

³ 京都府立医科大学大学院医学研究科内分泌・代謝内科学

⁴ 京都女子大学家政学部食物栄養学科

* 連絡先 京都府京都市東山区今熊野北日吉町 35,
京都女子大学大学院家政学研究科食物栄養学専攻,
橘田 薫
E-mail : 23131101@kyoto-wu.ac.jp

ルコースの80%以上を取り込んでエネルギーとして使用するため、サルコペニアによって骨格筋量が減少すると、インスリンによるグルコース処理能の低下、すなわちインスリン抵抗性が惹起される¹³⁾。骨格筋量が減少すると身体活動量の低下が予測され、さらに糖代謝が低下しインスリン抵抗性が増す、といった悪循環に陥ると考えられる。

運動には血糖値の低下だけでなく、インスリン抵抗性の軽減、減量、筋力増強、動脈硬化性疾患の予防、認知症やうつ病の予防など様々な効果がある¹⁴⁾。運動の急性効果は、糖輸送体4型 (glucose transporter 4; GLUT4) トランスポーター促進を介したインスリンに依存しない骨格筋へのグルコース取り込み亢進と、骨格筋での脂肪酸燃焼促進である^{13,15)}。また、運動を長期継続すると、GLUT4発現量の増加や、脂肪細胞の小型化による腫瘍壊死因子 (tumor necrosis factor- α ; TNF- α) の分泌減少、アディポネクチンの分泌増加などを介したインスリン抵抗性の改善が期待できる¹⁵⁾。

糖尿病における運動療法は食事療法に比べて遵守度が低いことが課題である¹⁶⁻¹⁸⁾。令和4年国民健康・栄養調査によると、運動習慣のある者の割合は男性35.5%、女性31.5%で、65歳以上では男性46.7%、女性40.5%といずれも健康日本21（第二次）の目標値に満たない状況であり、1日の歩数は10年間で男女とも有意な減少がみられた¹⁹⁾。糖尿病診療ガイドライン2024では、有酸素運動は中強度で週に150分かつそれ以上、週に3回以上、運動をしない日が2日間以上続かないように行い、レジスタンス運動は連続しない日程で週に2~3回行うことがそれぞれ推奨されている²⁰⁾。また、先行研究では健常者と糖尿病患者を対象に血糖値を効果的に下げる有酸素運動として、食後に最大酸素摂取量の50~80%の中~高強度かつ30~60分の運動を推奨している²¹⁻²³⁾。しかし、先行研究で示されている運動量を運動習慣のない者や高齢者が日常的に継続することは難しく、より短時間で低強度の運動は継続性や安全性の面からもより有効であると考えられる。そこで本研究は、短時間かつ低強度のステップ運動を食後の異なるタイミングで実施し、どのタイミングで運動を行うと食後の血糖上昇抑制に効果があるかを調べることを目的とした。

対象と方法

1. 対象者

本研究は、2型糖尿病患者に対するパイロット研究として、京都女子大学の糖尿病でない健常な女子大学生を対象にボランティアを募った。被験者は洛和会東寺南病院（京都市南区）にて血液検査を受け、医師から糖尿病でない（空腹時血糖値126 mg/dL未満かつHbA1c 6.5%未満）と診断

されたのち研究に参加した。除外基準は①1型糖尿病または2型糖尿病患者、②運動禁忌の者、③妊娠または妊娠の可能性のある者、④血糖値に影響を与えるステロイド剤等を服用の者、⑤心疾患、肝疾患、腎疾患を持つ者、⑥その他医師が適切でないと判断した者、とした。以上の条件を満たす23名が研究の対象となり、研究開始前に身長、体重および血圧を測定し、糖尿病の家族歴を尋ねた。

本研究はヘルシンキ宣言の精神に基づき、京都女子大学臨床研究倫理審査委員会の承認(2021-20)およびUMIN-CTR (000050267)の登録をへて、文部科学省、厚生労働省の「人を対象とする医学系研究に関する倫理指針」を遵守して実施した。被験者には事前に研究の目的、内容、被験者に生じる負担や予測されるリスク及び利益、その負担およびリスクを最小化する対策、個人情報の保護、さらにいつでも研究を辞退できることを十分に説明し、理解を得たうえで同意書に署名を得た。また、研究で得た個人情報は暗号化し、研究目的のためにのみ使用した。

2. 研究プロトコル

本研究は無作為化比較クロスオーバー試験により実施し、被験者は非連続の3日間でそれぞれ無作為に割り当てた順序で食後運動なし（以下、運動なし）、食事開始15分後運動（以下、15分後運動）、食事開始30分後運動（以下、30分後運動）のすべての試験に参加した（図1）。研究プロトコルを図2に示す。各試験日の前日20時以降は絶食とし、12時間の絶食状態のもと試験日当日の9時00分に自己血糖測定にて空腹時血糖値を測定した。空腹時血糖値の測定後直ちに試験食（白飯200g）を食べ始め、5分以内に摂取を完了し、15分後運動の試験日は9時15分から、30分後運動の試験日は9時30分から10分間のステップ運動を行った。いずれの試験日も空腹時、食事開始15、30、45、60、75、90、120分後の計8回自己血糖測定を行い、運動を行うタイミングの違いが食後の血糖値に及ぼす影響を調べた。

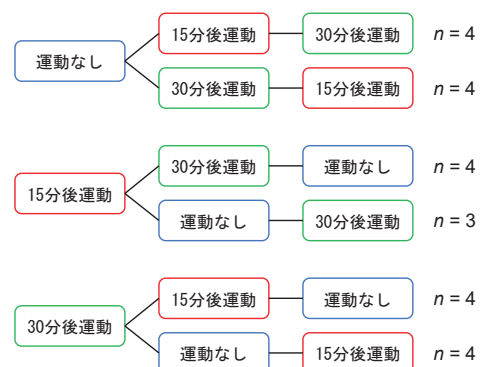


図1 無作為化比較クロスオーバー試験。被験者23名を6パターンに試験順序のうちいずれかに無作為に割り当て、非連続の3日間で試験を行った。

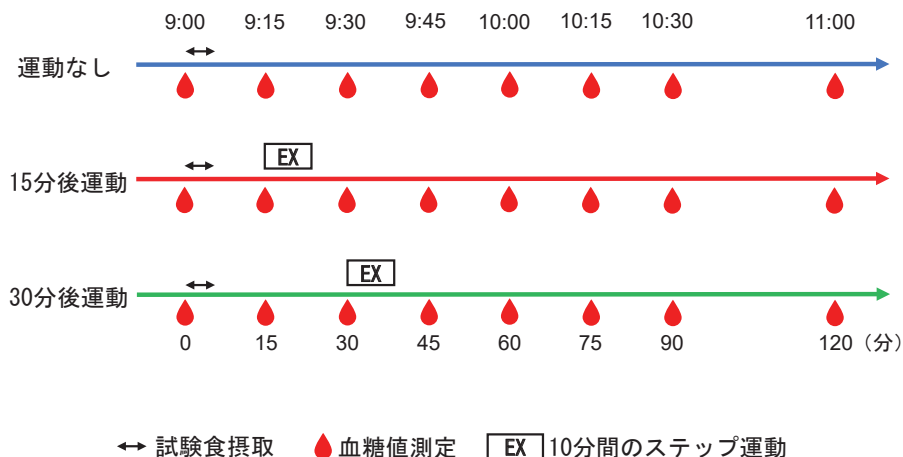


図2 研究プロトコル。各試験日当日の9時00分に自己血糖測定により空腹時血糖値を測定してから試験食を5分以内に摂取した。その後、食事開始15, 30, 45, 60, 75, 90, 120分後にそれぞれ血糖値を測定した。運動を行う試験日は食事開始15分後または30分後から10分間のステップ運動を行った。

また、運動の持ち越し効果を排除するため、各試験日間に6日間のウォッシュアウト期間を設けた。ウォッシュアウト期間中は習慣的な食事と身体活動パターンを維持し、試験前日は中～高強度の身体活動は控えるよう指示した。

3. 運動の方法と強度

本研究では高さ20 cmのステップ台（GronG, 株式会社Ultimate Life, 大阪）を使用して、メトロノーム（BPM Metronome, Drumset Fundamentals, YouTube, Google）に合わせて1拍で1歩踏み出してステップ台の昇り降りを繰り返すステップ運動を10分間実施した（図3）。また、ステップ運動の強度は心拍数による運動強度の設定として使用されるカルボーネンの式[目標心拍数 = (220 - 年齢 - 安静時心拍数) × 運動強度 + 安静時心拍数]を用いて^{24, 25)}、強度が30%HRR（Heart Rate Reserve；最大心拍予備量）になるよう被験者一人ひとり個別に目標心拍数を算出し、ステップ速度を設定して実

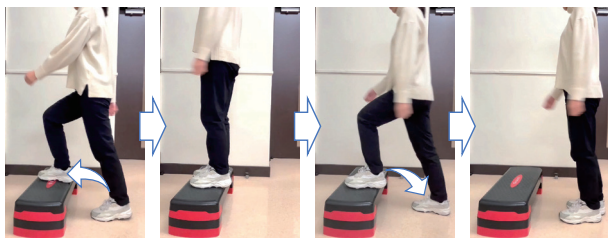


図3 ステップ運動動作。まずステップ台の手前に立ち、メトロノームに合わせて1拍目で右脚（または左脚）をステップ台に乗せ、2拍目で左脚（または右脚）をステップ台に乗せて膝を伸ばす、3拍目で右脚（または左脚）をステップ台の後ろ側におろす、4拍目で左脚（または右脚）をステップ台からおろす。この動作を10分間繰り返した。

施した。本研究は、高齢者や運動習慣のない者が取り組みやすく、安全かつ習慣的に継続できる運動の実施を目的とし、仕事や家事の合間に比較的時間を確保しやすい10分間かつアメリカスポーツ医学会（American College of Sports Medicine; ACSM）のガイドライン²⁶⁾によって低強度と定義づけられている30%HRRに設定した。

ステップ速度の設定は試験日の前日までに行い、被験者は実験室に到着後スマートウォッチ（スマートウォッチ S20 Proyoo Mingxun Technology (Shenzhen) Co., Ltd. Shenzhen, China）を装着し、30分間座位で安静後、安静時心拍数を測定した。カルボーネンの式より目標心拍数を算出したのち、適当なステップ速度（例：115BPM、1分間に115歩の速さ）で10分間のステップ運動を行い、運動終了時の心拍数が目標心拍数に到達したことを確認したらステップ速度を決定して本試験で使用した。目標心拍数に到達しなかった場合は、30分以上の休憩をとり安静時の心拍に戻ったことを確認してからステップ速度を上げて再度10分間のステップ運動を行い、目標心拍数に到達するまで繰り返した。試験当日もスマートウォッチを装着し、スマートフォンアプリ「Hband」と連動させて運動開始から30秒ごとにリアルタイムの心拍数を記録し、実際の運動強度を判定した。同時に、ボルグスケール²⁷⁾を用いて運動終了時の主観的強度の判定も行った。

4. 血糖値測定方法および血糖指標

本研究では、被験者自身が採血用穿刺器具（ジェントレット, ジェントレット針, 三和化学研究所, 愛知, 日本）で採取した血液を血糖自己測定器（グルテスト Neo アルファ,

グルテスト Neo センサー，三和化学研究所，愛知，日本）で読み取り，空腹時および食事開始 15，30，45，60，75，90，120 分後の血糖値を調べた。自己血糖測定により得られたデータから，平均血糖値，血糖標準偏差，最大血糖値，最小血糖値，最大血糖変動幅，血糖上昇曲線下面積を求めた。最大血糖変動幅は最大血糖値－最小血糖値，血糖上昇曲線下面積は食事開始時の血糖値から trapezoidal 法により算出した^{28, 29)}。

5. 統計処理

統計処理は，すべてのデータにおいて正規性および等分散性が確認できなかったことから，対応のあるノンパラメトリック検定の Wilcoxon の符号付き順位検定により解析した。数値は中央値（四分位範囲）で示した。本研究は運動なし，15 分後運動，30 分後運動の 3 群をそれぞれ比較し，3 回検定を行ったため，有意水準 $p < 0.017$ で有意差があると判断した。統計ソフトは SPSS（IBM SPSS Statistics28, SPSS Japan Inc. 東京）を用いた。

結果

被験者背景を表 1 に示す。表 2 は各試験日の運動時平均心拍数および平均運動強度を，図 4 はステップ運動時の平均運動強度の推移を示したものである。運動開始 1 分後から 15 分後運動 [27.7 (24.8–30.4)%HRR]，30 分後運動 [26.8 (25.7–29.0)] とともに目標とする強度 30%HRR に近づき（図 4），10 分間のステップ運動中は 30%HRR を維持できていた（表 2，図 4）。本研究で行ったステップ運動は，ACSM のガイドライン²⁶⁾ に示されている低強度運動 (30–39%HRR) に当てはまる強度であった。また，運動終了時の主観的運動強度は 15 分後運動および 30 分後運動ともに「11：楽である」から「13：ややきつい」の間の指標であった²⁷⁾（表 2）。

図 5 は被験者 23 名の平均血糖値の推移を示したものである。15 分後運動では運動終了直後にあたる食事開始 30 分後の平均血糖値が運動なしと比較して有意に低値を示した [122 (111–127) vs. 133 (120–143)mg/dL, $p < 0.01$]。30 分後運動終了直後の食事開始 45 分後の平均血糖値は，15 分後運動 [138 (127–142) vs. 149 (134–165), $p < 0.01$]，30 分後運動

表 1 被験者背景 ($n = 23$)

被験者背景	
年齢（歳）	21 (21–22)
性別（男性 / 女性）	0 / 23
身長 (cm)	160.6 (156.9–163.1)
体重 (kg)	52.1 (46.6–54.8)
BMI (kg/m ²)	20.1 (19.3–20.9)
収縮期血圧 (mmHg)	104 (98–108)
拡張期血圧 (mmHg)	64 (60–68)
空腹時血糖値 (mg/dL)	87 (84–92)
HbA1c (%)	5.3 (5.1–5.5)
糖尿病の家族歴（人）	
父	0
母	2
祖父	7
祖母	2
なし	12

中央値（四分位範囲），または n . BMI: Body Mass Index.

表 2 運動時の平均心拍数および平均運動強度 ($n = 23$)

	運動なし	15 分後運動	30 分後運動
安静時平均心拍数 (bpm)	66 (64–70)	66 (64–70)	66 (64–70)
運動時平均心拍数 (bpm)	68 (65–71)	107 (104–111)	106 (104–110)
運動時平均運動強度 (%HRR)	0 (–1–4)	30 (28–32)	30 (28–31)
運動終了時主観的運動強度（ボルグスケール）	-	12 (12–13)	12 (12–13)
ステップ速度（歩 / 分）	-	117 (115–118)	117 (115–118)

中央値（四分位範囲），HRR: Heart Rate Reserved.

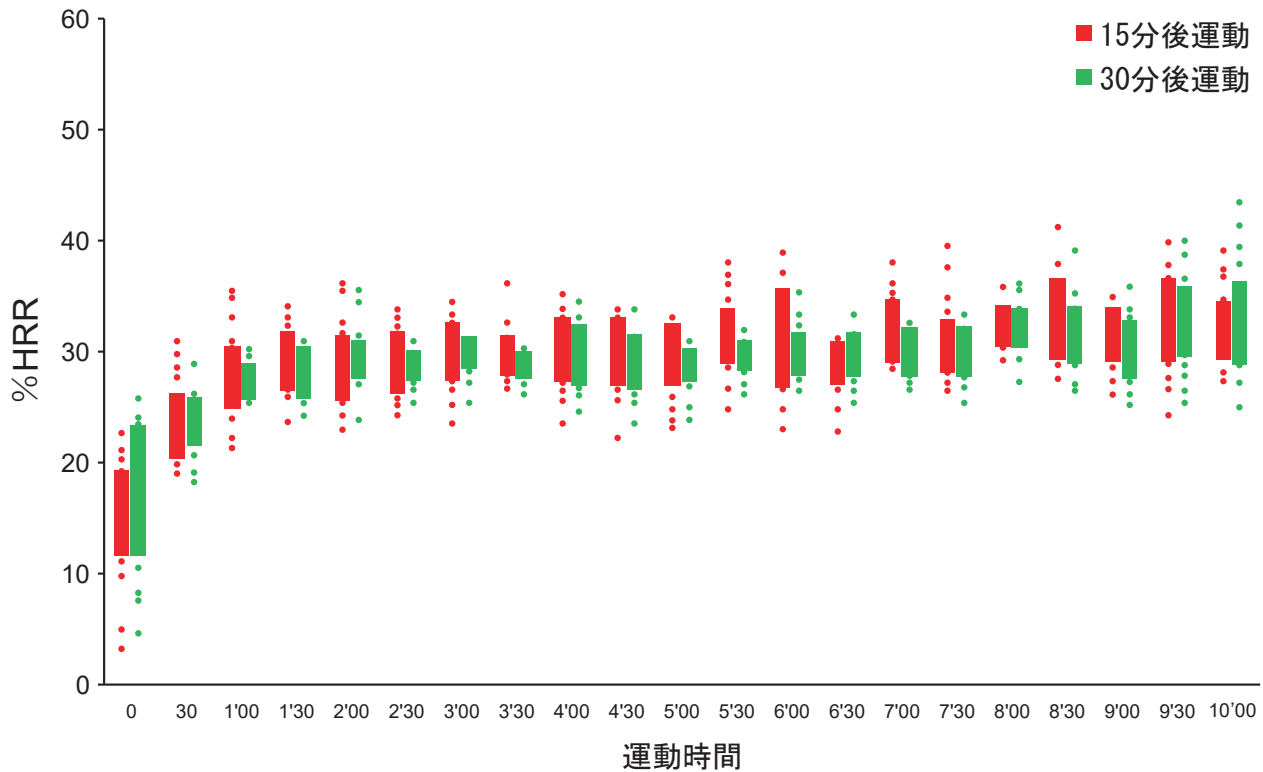


図4 被験者23名のステップ運動時の平均運動強度 [%HRR] の推移。赤が15分後運動、緑が30分後運動を示す。運動開始後30秒毎にリアルタイムの心拍数を記録し運動強度 [%HRR] を算出した。本研究では、強度30%HRRの運動を行うことを目標とした。

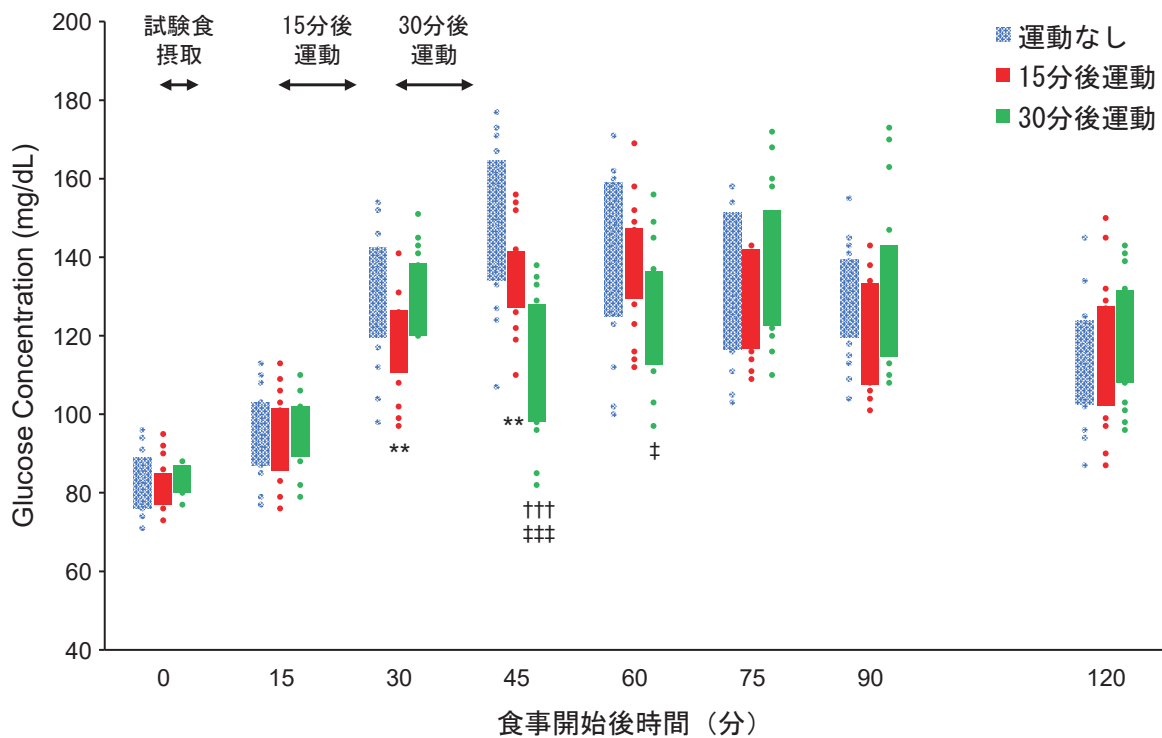


図5 被験者23名の平均血糖値の推移。青が運動なし、赤が15分後運動、緑が30分後運動を示す。いずれの試験日も試験食を5分以内に摂取し、運動を行う試験日は食事開始15分後または30分後から10分間のステップ運動を行った。運動なし vs. 15分後運動 $**p < 0.01$, 運動なし vs. 30分後運動 $†††p < 0.001$, 15分後運動 vs. 30分後運動 $†p < 0.05$, $†††p < 0.001$.

[112 (98–128), $p < 0.001$] ともに運動なしと比較して有意に低値を示し、30 分後運動は 15 分後運動と比較しても有意に低値を示した [$p < 0.001$]。また、30 分後運動では食事開始 60 分後の平均血糖値が 15 分後運動と比較して有意に低値を示した [124 (113–137) vs. 134 (130–148), $p < 0.05$]。その後は再度血糖上昇がみられたが、食事開始 75 分後をピークに低下し、食事開始 120 分後の平均血糖値は 3 群間で有意な差はみられなかった。

表 3 は運動なし、15 分後運動、30 分後運動における血糖指標を示したものである。食事開始 60 分後の血糖上昇曲線下面積は 15 分後運動、30 分後運動ともに運動なしと比較して有意に低値を示し、30 分後運動は 15 分後運動と比較して低い傾向にあった。また、15 分後運動、30 分後運動の平均血糖値および 15 分後運動の最大血糖値は運動なしと比較して低い傾向にあったが、血糖標準偏差、最大血糖変動幅、食事開始 120 分後の血糖上昇曲線下面積は 3 群間で有意な差はみられなかった。

考察

本研究は、2 型糖尿病患者に対するパイロット研究として若年健常女性を対象に、短時間かつ低強度のステップ運動を食後の異なるタイミングで実施し、どのタイミングで運動を行うと食後の血糖上昇抑制に効果があるかを調べた。その結果、15 分後運動、30 分後運動ともに運動終了直後から血糖上昇が抑制され、とくに 30 分後運動では食事開始 45 分後の平均血糖値が運動なし、15 分後運動と比較して有意に低値を示した。食事開始 60 分後の血糖上昇曲線下面積は 15 分後運動、30 分後運動ともに運動なしと比較して有意に低値を示し、30 分後運動では 15 分後運動と比較して低い傾向にあった。これらのことから、食事開始 30 分後に 10 分間かつ強度 30%HRR の低強度のステップ運動を実

施すると、食後の急激な血糖上昇を抑制する可能性が示唆された。

本研究では 15 分後運動および 30 分後運動のいずれも 10 分間かつ同じ低強度のステップ運動を行ったが、それぞれ血糖変動が異なっていた。15 分後運動は試験食を食べ終えた 10 分後に運動を開始したため、消化が始まった直後であり、運動によって副交感神経が抑制されて消化管機能が落ち、胃内容物の小腸への排出速度が低下したことで運動直後は血糖上昇が抑制され、運動が終了すると消化が再開されるため血糖上昇が続いたと考える。一方、30 分後運動では運動終了直後に有意に血糖上昇が抑制された。運動を開始した頃には胃内容物が小腸へ排出されてグルコースの吸収が始まっており、食事によるインスリン濃度の上昇と運動による骨格筋の収縮が相乗的に作用してグルコースの取り込みを亢進し、血中グルコース濃度の速やかな低下がみられたと考えられる^{15,30,31}。また、食後中期（食後 30～45 分）に運動を開始すると、運動中にインスリン/グルカゴン比が上昇し、肝臓でのグルコース産生と脂肪酸化が抑制されることも報告されている^{23,32}。健常者では食後 30～45 分でグルコースピークに到達することが示されていることから³³、グルコースピークに到達する前に運動を開始することは重要であると考ええる。しかし、その後は食事開始 75 分後をピークに再び血糖上昇がみられた。先行研究においても、運動終了後に血中グルコース濃度の急激な増加であるリバウンド現象が生じることが確認されており^{33–36}、運動をやめたことによる骨格筋のグルコースの取り込み量の減少と、肝臓のグルコース産生の一時的な増加が原因と考えられる^{30,37}。食後運動による血糖上昇抑制効果を持続させるためには、運動を 45～60 分間継続して行うか、5 分程度の短時間運動を 30 分おきに繰り返し行うことが効果的であるとの報告があることから^{33,36,37}、より短時間の運動を

表 3 運動なし、15 分後運動、30 分後運動における血糖指標 ($n = 23$)

	運動なし	15 分後運動	30 分後運動	<i>p</i>		
				運動なし vs. 15 分後運動	運動なし vs. 30 分後運動	15 分後運動 vs. 30 分後運動
平均血糖値 (mg/dL)	123 (114–129)	112 (110–121)	115 (108–125)	0.055	0.080	0.843
血糖標準偏差 (mg/dL)	26 (22–29)	23 (20–27)	20 (18–30)	0.316	0.394	0.903
最大血糖値 (mg/dL)	155 (140–167)	143 (139–153)	144 (139–164)	0.066	0.394	0.465
最大血糖変動幅 (mg/dL)	73 (61–88)	66 (58–75)	62 (55–82)	0.117	0.447	0.537
血糖上昇曲線下面積 60min (mg/dL × min)	2393 (1708–2963)	2033 (1568–2303)*	1560 (1151–2168) ^{††}	0.015	0.004	0.045
血糖上昇曲線下面積 120min (mg/dL × min)	4943 (4281–6514)	4163 (3647–5456)	4500 (3420–5629)	0.223	0.338	0.761

中央値（四分位範囲）。いずれも食事開始 120 分後までの計 8 回の自己血糖測定による血糖指標。平均血糖値：計 8 回の血糖測定値の平均値。血糖標準偏差：計 8 回の血糖測定値の標準偏差。最大血糖値：計 8 回の血糖測定値の最大値。最大血糖変動幅：計 8 回の血糖測定値の最大値－最小値。血糖曲線下面積 60 min：食事開始 60 分後の血糖上昇曲線下面積。血糖上昇曲線下面積 120 min：食事開始 120 分後の血糖上昇曲線下面積。運動なし vs. 15 分後運動 * $p < 0.05$ ，運動なし vs. 30 分後運動 ^{††} $p < 0.01$ 。

断続的に行う方法も検討する必要があると考える。スポーツ庁の調査による運動・スポーツの主な阻害要因は「仕事や家事が忙しい」「面倒くさい」「年をとった」「お金に余裕がない」であり³⁸⁾、多くの先行研究で推奨される最大酸素摂取量の50～80%の中～高強度かつ30～60分の運動²¹⁻²³⁾は運動習慣のない者や高齢者だけでなく、健常者や若者にとっても毎日継続して行うことは困難であることが予想される。しかし、本研究のように10分間かつ強度30%HRRの低強度の運動は比較的容易に実施でき、継続しやすい運動である。また、ステップ運動は片足立ちの側面があり、その足で自分の体重を支える必要があることから、先行研究においては高齢者のバランス能力の向上や下肢パワーの向上が認められており^{39, 40)}、フレイル・サルコペニアの予防としてウォーキングや散歩よりも効果的と考える。さらには、運動の得意、不得意にかかわらず誰でも簡単に実践でき、身の回りの段差を用いても取り組めることから、運動習慣がない者でも始めやすい運動であったと言える。

本研究にはいくつかの限界がみられる。第一に、本研究は短時間かつ低強度の食後運動の急性効果を調べた研究であり、長期間運動を継続した場合の効果は明らかではないことである。今後は運動習慣のない者や高齢の糖尿病患者が長期間、安全に継続することができ運動を提案していくため、長期的に運動を継続した場合の効果および安全性を検証していく必要がある。第二に、若年健常女性を対象に介入を行ったことから、月経周期によるインスリン感受性の変化によって血糖応答の代謝変動が起こる可能性があること、男性や高齢者、2型糖尿病患者に対する効果は不明なことである。第三に、自己血糖測定は採血よりも正確性に欠ける可能性があり、測定された血糖値は実際の血糖値との誤差が生じていることが考えられる。第四に、インスリンやグルカゴン様ペプチド-1 (glucagon-like peptide-1; GLP-1) などのホルモン動態や血清脂質を調べていないことである。先行研究では夕食後運動によって食後血糖値だけでなく、インスリン分泌およびトリアシルグリセロール濃度も低下したことが報告されており³⁰⁾、本研究における短時間かつ低強度の食後運動を行った際のホルモンや血清脂質の変化も調べる必要がある。また、耐糖能の日内変動や時間帯による食後のトリグリセリド濃度の違いから、朝よりも夕方に運動を行う方が効果的であるとの報告もあることから⁴¹⁾、運動を行う時間帯の違いによる効果も今後検証していく。第五に、本研究での試験食は白飯200gのみであったため、実際の食事とは解離した内容であったことである。主食、主菜、副菜の揃った食事では食事摂取に15～20分を要するため食事開始15分後に運動を行うと消化吸収の機能が低下する可能性があり、血糖値測定にも影響を

及ぼすため、運動の開始時間を再度設定する必要があると考える。

結論

若年健常女性を対象に短時間かつ低強度のステップ運動を食後の異なるタイミングで実施したところ、15分後運動、30分後運動ともに運動終了直後の血糖上昇が抑制された。とくに30分後運動では、食事開始45分後の平均血糖値が運動なし、15分後運動と比較して有意に低値を示し、食事開始60分後の血糖上昇曲線下面積は運動なしと比較して有意に低く、15分後運動と比較しても低い傾向にあったことから、食後の急激な血糖上昇を抑制する可能性が示唆された。しかし、運動をやめると再び血糖上昇がみられたことから、より効果的な運動のタイミングや継続時間を検討していく必要があると考える。

謝辞

本研究にご協力くださいました京都女子大学の学生の皆様に感謝申し上げます。

利益相反

本研究において利益相反に該当する事項はない。

参考文献

- 1) IDF Diabetes Atlas 10th edition, Diabetes around the world in 2021, <https://diabetesatlas.org/> (アクセス日: 2024年10月1日)
- 2) Torimoto K, Okada Y, Mori H, et al.: Relationship between fluctuations in glucose levels measured by continuous glucose monitoring and vascular endothelial dysfunction in type 2 diabetes mellitus. *Cardiovasc Diabetol.* 2013, 12: 1, doi: 10.1186/1475-2840-12-1.
- 3) Kawano H, Motoyama T, Hirashima O, et al.: Hyperglycemia rapidly suppresses flow-mediated endothelium-dependent vasodilation of brachial artery. *J Am Coll Cardiol.* 1999, 34: 146-154, doi: 10.1016/s0735-1097(99)00168-0.
- 4) 小原知之, 神庭重信, 清原裕: 地域高齢者における認知症の実態—久山町研究. *日本生物学的精神医学学会誌.* 2012, 23: 211-216.
- 5) 日本糖尿病学会: 糖尿病診療ガイドライン 2024, 日本糖尿病学会編, 東京, 南江堂, 2024, p.419-446.
- 6) Park SW, Goodpaster BH, Strotmeyer ES, et al.: Health, Aging, and Body Composition Study. Accelerated loss of

- skeletal muscle strength in older adults with type 2 diabetes: the health, aging, and body composition study. *Diabetes Care*. 2007, 30(6): 1507–1512, doi: 10.2337/dc06-2537.
- 7) Park SW, Goodpaster BH, Lee JS, et al.: Health, Aging, and Body Composition Study. Excessive loss of skeletal muscle mass in older adults with type 2 diabetes. *Diabetes Care*. 2009, 32(11): 1993–1997, doi: 10.2337/dc09-0264.
 - 8) Kaga H, Tamura Y, Someya Y, et al.: Prediabetes is an independent risk factor for sarcopenia in older men, but not in older women: the Bunkyo Health Study. *J Cachexia Sarcopenia Muscle*. 2022, 13(6): 2835–2842, doi: 10.1002/jcsm.13074.
 - 9) Tajima T, Kaga H, Someya Y, et al.: Low Handgrip Strength (Possible Sarcopenia) With Insulin Resistance Is Associated With Type 2 Diabetes Mellitus. *J Endocr Soc*. 2024, 8(3): bvae016, doi: 10.1210/jendso/bvae016.
 - 10) Sasako T, Umehara T, Soeda K, et al.: Deletion of skeletal muscle Akt1/2 causes osteosarcopenia and reduces lifespan in mice. *Nat Commun*. 2022, 13(1): 5655, doi: 10.1038/s41467-022-33008-2.
 - 11) O'Neill BT, Lee KY, Klaus K, et al.: Insulin and IGF-1 receptors regulate FoxO-mediated signaling in muscle proteostasis. *J Clin Invest*. 2016, 126(9): 3433–3446, doi: 10.1172/JCI86522.
 - 12) Hirata Y, Nomura K, Senga Y, et al.: Hyperglycemia induces skeletal muscle atrophy via a WWP1/KLF15 axis. *JCI Insight*. 2019, 4(4): e124952, doi: 10.1172/jci.insight.124952.
 - 13) 川中健太郎: 運動と骨格筋 GLUT4. 学術の動向. 2006, 11 (10): 42–46, https://doi.org/10.5363/tits.11.10_42.
 - 14) Argyropoulou D, Geladas ND, Nomikos T, et al.: Exercise and Nutrition Strategies for Combating Sarcopenia and Type 2 Diabetes Mellitus in Older Adults. *J Funct Morphol Kinesiol*. 2022, 7(2): 48, doi: 10.3390/jfmk7020048.
 - 15) 高本偉碩, 門脇孝: 運動とインスリン抵抗性. 糖尿病. 2004, 47 (8): 622–625, https://www.jstage.jst.go.jp/article/tonyobyol1958/47/8/47_8_622/_pdf.
 - 16) Resnick HE, Foster GL, Bardsley J, et al.: Achievement of American Diabetes Association clinical practice recommendations among U.S. adults with diabetes, 1999–2002: the National Health and Nutrition Examination Survey. *Diabetes Care*. 2006, 29(3): 531–537, doi: 10.2337/diacare.29.03.06.dc05-1254.
 - 17) Oftedal B, Bru E, Karlsen B.: Motivation for diet and exercise management among adults with type 2 diabetes. *Scand J Caring Sci*. 2011, 25(4):735–744, doi: 10.1111/j.1471-6712.2011.00884.x.
 - 18) Kamiya A, Ohsawa I, Fujii T, et al.: A clinical survey on the compliance of exercise therapy for diabetic outpatients. *Diabetes Res Clin Pract*. 1995, 27(2):141–145, doi: 10.1016/0168-8227(95)01032-9.
 - 19) 厚生労働省: 令和4年国民健康・栄養調査結果の概要, <https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/001296359.pdf> (アクセス日: 2024年10月20日)
 - 20) 日本糖尿病学会: 糖尿病診療ガイドライン 2024, 日本糖尿病学会編, 東京, 南江堂, 2024, p. 67–83.
 - 21) Huang T, Lu C, Schumann M, et al.: Timing of Exercise Affects Glycemic Control in Type 2 Diabetes Patients Treated with Metformin. *J Diabetes Res*. 2018, 2483273, doi: 10.1155/2018/2483273.
 - 22) Haxhi J, Scotto di Palumbo A, Sacchetti M.: Exercising for metabolic control: is timing important? *Ann Nutr Metab*. 2013, 62(1): 14–25, doi: 10.1159/000343788.
 - 23) Chacko E.: Exercising Tactically for Taming Postmeal Glucose Surges. *Scientifica (Cairo)*, 2016, 4045717, doi: 10.1155/2016/4045717.
 - 24) 和田正信, 松永智: 勝田茂 編著, 入門運動生理学 第4版, 東京, 杏林書院, 2015, p. 114–128.
 - 25) 正保哲, 洲崎俊男, 出口清喜, ほか: Karvonen 法による運動負荷強度における生体反応. 理学療法科学. 2011, 26(1): 33–39, <https://doi.org/10.1589/rika.26.33>.
 - 26) American College of Sports Medicine: ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription TENTH Edition, https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7965558/mod_resource/content/1/Colegio%20Americano%20de%20Medicina%20do%20Esporte_Guidelines%20for%20Exercise%20Testing%20and%20Prescription%20-%20ACSM%202018.pdf (アクセス日: 2024年12月19日)
 - 27) 小野寺孝一, 宮下充正: 全身持久性運動における主観的強度と客観的強度の対応性. 体育学研究. 1976, 21: 191–203.
 - 28) Le Floch JP, Escuyer P, Baudin E, et al.: Blood glucose area under the curve. Methodological aspects. *Diabetes Care*. 1990, 13(2): 172–175, doi: 10.2337/diacare.13.2.172.
 - 29) Allison DB, Paultre F, Maggio C, et al.: The use of areas under curves in diabetes research. *Diabetes Care*. 1995, 18(2): 245–250, doi: 10.2337/diacare.18.2.245.
 - 30) Heden TD, Winn NC, Mari A, et al.: Postdinner resistance exercise improves postprandial risk factors more effectively

- than predinner resistance exercise in patients with type 2 diabetes. *J Appl Physiol* (1985). 2015, 118(5): 624–634, doi: 10.1152/japplphysiol.00917.2014.
- 31) 後藤一成, 高松薫: 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—. 財団法人ミズノスポーツ振興会助成金. 2010.
 - 32) Verboven K, Wens I, Vandenabeele F, et al.: Impact of Exercise-Nutritional State Interactions in Patients with Type 2 Diabetes. *Med Sci Sports Exerc.* 2020, 52(3): 720–728, doi: 10.1249/MSS.0000000000002165.
 - 33) Bellini A, Nicolò A, Bazzucchi I, et al.: Effects of Different Exercise Strategies to Improve Postprandial Glycemia in Healthy Individuals. *Med Sci Sports Exerc.* 2021, 53(7): 1334–1344, doi: 10.1249/MSS.0000000000002607.
 - 34) Larsen JJ, Dela F, Madsbad S, et al.: The effect of intense exercise on postprandial glucose homeostasis in type II diabetic patients. *Diabetologia.* 1999, 42(11): 1282–1292, doi: 10.1007/s001250051440.
 - 35) Høstmark AT, Ekeland GS, Beckstrøm AC, et al.: Postprandial light physical activity blunts the blood glucose increase. *Prev Med.* 2006, 42(5): 369–371, doi: 10.1016/j.ypmed.2005.10.001.
 - 36) Bellini A, Nicolò A, Rocchi JE, Bazzucchi I, Sacchetti M. Walking Attenuates Postprandial Glycemic Response: What Else Can We Do without Leaving Home or the Office? *Int J Environ Res Public Health.* 2022 Dec 24;20(1):253. doi: 10.3390/ijerph20010253. PMID: 36612575; PMCID: PMC9819328.
 - 37) Hatamoto Y, Goya R, Yamada Y, et al.: Effect of exercise timing on elevated postprandial glucose levels. *J Appl Physiol* (1985). 2017, 123(2): 278–284, doi: 10.1152/japplphysiol.00608.2016.
 - 38) 文部科学省: 令和5年度「スポーツの実施状況等に関する世論調査」結果の概要, https://www.mext.go.jp/sports/content/20240327-kensport01-000034684_1_2.pdf (アクセス日: 2024年10月20日)
 - 39) Bean J, Herman S, Kiely DK, et al.: Weighted stair climbing in mobility-limited older people: a pilot study. *J Am Geriatr Soc.* 2002, 50(4): 663–70, doi: 10.1046/j.1532-5415.2002.50160.x.
 - 40) Mori Y, Ayabe M, Yahiro T, et al.: The Effects of Home-based Bench Step Exercise on Aerobic Capacity, Lower Extremity Power and Static Balance in Older Adults. *Int J Sport Health Sci.* 2006, 4: 570–576, doi: 10.5432/ijshs.4.570.
 - 41) Kim HK, Furuhashi S, Takahashi M, et al.: Late-afternoon endurance exercise is more effective than morning endurance exercise at improving 24-h glucose and blood lipid levels. *Front Endocrinol (Lausanne).* 2022, 13: 957239, doi: 10.3389/fendo.2022.957239.

Effect of postprandial short-time low-intensity exercise on blood glucose levels in Japanese young healthy women; Randomized control cross-over trial

Kaoru Kitta^{1*}, Yuki Higuchi¹, Shizuo Kajiyama^{2,3}, Takashi Miyawaki⁴, Shintaro Kajiyama^{2,3}, Saeko Imai⁴

¹ Department of Food and Nutrition, Graduate School of Home Economics, Kyoto Women's University, Kyoto, Japan

² Kajiyama Clinic, Kyoto, Japan

³ Department of Endocrinology and Metabolism, Graduate School of Medical Science, Kyoto Prefectural University of Medicine, Kyoto, Japan

⁴ Department of Food and Nutrition, Faculty of Home Economics, Kyoto Women's University, Kyoto, Japan

Abstract

The purpose of this randomized controlled crossover study is to examine the effect of post-meal timing of short-time low-intensity exercise on postprandial blood glucose concentration in young healthy women as a pilot study for patients with type 2 diabetes. The test meals were consumed within 5 min, and the participants conducted 10 min of step exercise at 15 min of post-meal, 30 min of post-meal, and no exercise on a non-consecutive 3-day study period, and blood glucose concentrations were measured by self-monitoring of blood glucose. Target heart rates were calculated for each participant to achieve 30%Heart Rate Reserve (%HRR) exercise intensity using Karvonen's formula. The post-meal exercise at 30min significantly suppressed blood glucose elevation at 45 min compared to exercise at 15 min of post-meal and no exercise. The incremental areas under the curve (IAUC) for glucose at 60 min in post-meal exercise at 15 min and 30 min were significantly lower than that of no exercise, and the IAUC of post-meal exercise at 30 min tended to be lower than that of post-meal exercise at 15 min. The mean blood glucose in post-meal exercise at 15 min and 30 min, and maximum blood glucose in post-meal exercise at 15 min tended to be lower than that of no exercise. The results suggest that postprandial short-time (10 min) low-intensity (30%HRR) step exercise at 30 min is effective in suppressing postprandial blood glucose elevation in young healthy women.

Key words: Exercise timing, Short-time, Low-intensity, Blood glucose