©NSCA JAPAN
Volume 30, Number 9, pages 57-65

Key Words【インスリン抵抗性：insulin resistance、グルコース代謝：glucose metabolism、有酸素性トレーニング：aerobic training、レジスタンストレーニング：resistance training】

エクササイズと2型糖尿病：エクササイズ専門職のための簡潔な指針

Exercise and Type II Diabetes Mellitus: A Brief Guide for Exercise Professionals

Alexios Batrakoulis, Ph.D., CSCS,*D, CSPS,*D, NSCA-CPT,*D.　**Athanasios Z. Jamurtas,** Ph.D.
Ioannis G. Fatouros, Ph.D.
Department of Physical Education and Sport Science, University of Thessaly, Trikala, Greece

要約

エクササイズは2型糖尿病（T2DM：TypeⅡDiabetes Mellitus）の管理と治療に効果的な手段であり、糖尿病管理プログラムの有益な構成要素である。短期または長期のエクササイズ介入により、血糖値のコントロールが不十分な患者の体力や代謝の健全性および心臓血管系の機能を改善できる。有酸素性エクササイズとレジスタンスエクササイズを包括的な糖尿病管理計画の一部として取り入れることは、この慢性代謝疾患との闘いにおいて重要な役割を果たす。ジム環境におけるエクササイズを効果的で楽しい経験にするためには、エクササイズの漸進と個別に組み立てられたプログラムが重要である。エクササイズ専門職は、安全性に関して特別留意すべき点を認識し、T2DMの患者がエクササイズ中に経験する可能性のある合併症の症状にも注意が必要である。

疫学と病態生理学および診断

2型糖尿病（T2DM）は最も一般的な慢性代謝疾患のひとつであり、世界的には、患者は全成人人口の8.5%に上る。米国では、成人の10人に1人が糖尿病で、3人に1人が糖尿病予備群である（66）。T2DMは、いくつかの遺伝的および非遺伝的な因子（非活動的な生活習慣や体重過多／肥満など）によって発症し、その特徴は、血糖値の適切な調節ができず、慢性的な高血糖に陥ることである（58）。具体的には、T2DMは骨格筋におけるインスリン抵抗性によって引き起こされ、インスリン刺激によるグルコース（ブドウ糖）の取り込みの減少として現れ、それはインスリンシグナルの伝達障害と受容体後の複数の細胞内欠陥に起因する（58）。このような遊離血糖の異常な高値には、心臓血管系疾患（CVD）、網膜症、神経障害、メタボリックシンドロームなど、いくつかの長期的な合併症の発症リスクの上昇が伴う（58）。T2DMは年齢を問わず発症する。中高年に多い疾患ではあるが、近年のエビデンスによると、運動不足や肥満の増加により、世界中でより多くの子どもや青少年、若年成人がT2DMに罹る可能性のあることが示されている（58）。

健康な人の血糖値の振れ幅は一定範囲に収まり、1日中大きく変動することはないため、血糖代謝の異常を知るには、ランダム血糖値（最後の食事時間とは無関係に測定する）の自己測定を行なうことが有用である。T2DMではない人の血糖値は、食前で72～99mg/dL、食後2時間で140mg/dL未満である。すなわちランダム血糖値の正常値は70～140mg/dLである。さらに、糖化ヘモグロビン（HbA1c）の検査は、過去3ヵ月間の平均血糖値を反映する。HbA1cの正常範囲は4～5.6%である。

一方、(a) 空腹時血糖値が100～125mg/dL、(b) 経口ブドウ糖負荷試験（OGTT）の結果が、試験後2時間で140～199mg/dL、(c) HbA1cの検査結果が5.7～6.4%の人は、糖尿病予備群に分類される。この特定の症状は腹部肥満やインスリン抵抗性と関連があり、内臓脂肪や酸化ストレスの増加、慢性炎症により、T2DMの発症リスクが高まる（14）。ランダム血糖値検査が200mg/dL以上、2回の別々の検査による空腹時血糖値が126mg/dL以上、OGTTが200mg/dL以上、およびHbA1c検査が6.5%以上の場合はT2DMと診断される（14）。

2型糖尿病の治療

T2DMの治療において、学際的な協同チーム(医師、登録栄養士、理学療法士、看護師、行動変容専門職、エクササイズ専門職など)の役割が広く取り上げられている(14)。具体的には、管理栄養士はこの学際的な医療チームの一員として、血糖値と体重の両方を管理する食事パターンを確立するために、患者に個別の食事計画を提供する(14)。T2DMおよび糖尿病予備群の予防と管理および治療において、質の高い糖尿病治療の基本要素として、栄養療法の役割は広く注目されている。より具体的には、糖代謝異常の診断を受けた人に対する個別の栄養計画は、目標血糖値の改善または維持、体重減少目標の達成、および心臓血管系リスク因子の低下に有益であると考えられる。そのため、管理栄養士は学際的な医療チームの主要メンバーであり、食習慣や健康的な栄養行動にかかわるクライアントのあらゆる問題に取り組むとともに、ジムや臨床現場でクライアントを定期的にトレーニングを指導するエクササイズ専門職と密接な協力関係を築く必要がある(18)。

さらに、治療の一環として、個別にエクササイズ指導を提供する専門職の重要な役割も広く報告されている(14)。T2DMは生活習慣や遺伝子の影響を受けた複雑な多因子性疾患であるため、患者は、最適な糖尿病治療を受けることを目的として、一人ひとりに合わせた治療計画に取り組む必要がある(14)。T2DMの患者は、グルコース処理能力が低下し、安静時の血糖値を適切にコントロールできないため、慢性的な高血糖が特徴であることを考慮すると、T2DMの典型的な治療には、血糖値管理の向上を目的として、生活様式の変化(身体活動や食事法など)と医薬品による介入(インシュリン感作薬など)の両方が含まれることになる(42)。インスリン抵抗性改善薬(メトホルミンなど)は、具体的には、肝臓の糖新生を阻害し、インスリン受容体の数を増やし、血清インスリンを減少させる**(表1)**。

定期的な身体活動と中強度の有酸素性エクササイズ(予備心拍数[HRR]の40～59%で週150分以上)は、すべての糖尿病管理プログラムの基本要素と考えられているが(13,25,40)、年齢やトレーニング経験、そして糖尿病に関連する合併症の有無など、いくつかの個人的要因により、T2DMの集団に対する特定の推奨事項や注意事項が示される(15)。しかし、T2DMを有する成人の大多数はエクササイズ処方の推奨ガイドラインを満たしていないため(13)、商業的なフィットネス分野では未開拓の市場と考えられる(7,35)。より具体的には、治療計画に定期的なエクササイズを取り入れているT2DM患者は、約40%であることが研究により明らかになっている(46)。アメリカでは、推奨される身体活動レベルを満たしている糖尿病の成人は、わずか28%にすぎない(49)。

この集団に対する安全で忍容性の高い薬理学的介入には経口血糖降下剤があり、臨床的に、HbA1cを0.5～1.25%の範囲まで有意に低下させる(42)。注目すべきは、薬物療法は、主に肝臓での糖新生を抑制し、インスリン感受性を高める遺伝子や酵素を活性化することにより血糖値を下げる点である(30)。糖尿病関連の健康合併症の減少に対する身体活動やエクササイズが果たす役割のメカニズムは、まだいくらか解明が不十分である。したがって、身体活動やエクササイズがもたらす有益な効果のメカニズムに関しては、さらに研究が必要である(30)。しかし、T2DMの患者は、体重が減少していなくても、定期的なエクササイズによってHbA1cが臨床的に有意に変化すること(−0.5%以上)が明らかになっている(13)。したがって、身体活動やエクササイズは、生活の質を高め、気分や睡眠の質の向上をもたらし、インスリン感受性を高め、様々なCVDのリスク因子を低下させることができる(14,40)。

エクササイズがグルコース代謝にもたらす利益

運動トレーニングは、あらゆる糖尿病管理計画の重要な構成要素である(15)。それは、骨格筋のインスリン感受性を高め(65)、糖尿病関連の合併症の可能性を低減し(44,48)、β細胞の機能を維持し(22,57)、さらに薬物療法への依存度を軽減する(13)ことにより、T2DMの患者を支援できる。複数のエビデンスにより、中強度の有酸素性エクササイズとレジスタンストレーニングを定期的に(1日おきに1セッションずつ)を組み合わせることで、耐糖能、CVDのリスク因子、総合的なQOLが改善されることが示されている(3)。T2DM患者の間では、非活動的な日常と運動不足が問題として多く指摘されることを考慮すると、エビデンスが示すように、日々の身体活動や計画的なエクササイズが、T2DMの成人における総合的な健康と長寿を向上させる効果的な戦略であると考えられる(13)。

エクササイズは、短期的にも長期的にも血糖のコントロールとインスリン作用を改善する効果的な方法であると考えられる。さらに詳しく述べると、エクササイズはグルコースの取り込みを増加させるが、それは、AMP活性化プロテインキナーゼが関与する筋収縮により、グルコース輸送体であるGLUT4が細胞表面へ移動することによる(23)。さらに、エクササイズは、血流から筋組織へのグルコース輸送を増加させることに役立つ。このような作用はT2DM患者をエクササイズ終了後数時間にわたりサポートするが、それはGLUT4が運動後も細胞表面に留まるためである(22)。このようなエクササイズの有益な効果は、イ

ンスリン抵抗性のある人やT2DM患者だけでなく健常者でもみられる。ただし、T2DM患者では、エクササイズ後1～3時間以内に低血糖に陥ることがあるため、エクササイズ後の血糖値をモニタリングする必要がある。一時的なエクササイズにより筋組織が用いられると、グルコースの取り込みを促進するためのインスリンの必要性が回避される。したがって、1回のトレーニング(一時的な運動)ののちは、活動中の筋組織へのグルコース取り込みが急激に促進されるため、インスリン感受性が20～60%向上するようである(5)。報告によると、この適応の背景にあるメカニズムとしては、骨格筋の充血、毛細血管の動員、筋鞘やT管へのGLUT4の移動などが考えられる(51)。さらに、長時間かつ高強度のエクササイズ後の筋においては、グリコーゲン合成酵素の活性とグルコース輸送が増加するため、グリコーゲンは運動後のグルコース代謝におけるシグナル伝達イベントの重要な調節因子として機能する。筋グリコーゲン濃度が高いと、筋活動に誘発される、またはインスリンにより促進されるグルコース輸送とGLUT4の移動は抑制される。この観察から、GLUT4を内包する小胞の移動過程に、グリコーゲン粒子が直接関与している可能性が高いと考えられる(50)。このような適応は、エクササイズプロトコルとそのトレーニング変数(量や強度など)に応じて1～3日間持続する。さらに詳細に説明すると、8ヵ月間のトレーニング介入の最終ワークアウトから16～24時間後のインスリン感受性は、少量／中強度(40～55% $\dot{V}O_2$peak、200分/週、3～4セッション/週、60分/セッション)、少量／高強度(65～80% $\dot{V}O_2$peak、125分/週、3セッション/週、45分/セッション)、および多量／高強度(65～80% $\dot{V}O_2$peak、200分/週、3～4セッション/週、60分/セッション)のいずれのトレーニングプロトコルにおいても、トレーニング前のレベルよりも向上した(5)。しかし、トレーニングを中止するとインスリン感受性が急速に逆戻りすることから、恒常的な身体活動やエクササイズが必要であることが示唆される(32)。したがって、T2DMのための運動として現在推奨されるのは、週3～4回のセッションにおけるエクササイズ(有酸素性エクササイズ、レジスタンスエクササイズ、または複合)をセッション間に約48時間以上の休息を設けずに実施することである(3,13)。一方、短期間または長期間にわたり(長期的な運動)、頻繁に行なう有酸素性トレーニングセッションは、GLUT4の移動増加だけでなく、内因活性やインスリンシグナル伝達経路を通じたグルコースの取り込みに好影響を及ぼす。具体的には、有酸素性エクササイズに基づく処方において、トレーニング停止から15日後のインスリン感受性は、少量／高強度(+6%)の処方では低下したものの、少量／中強度(+35%)と多量／高強度(+27%)の処方においては依然高値であった(5)。したがって、一貫性のある運動トレーニングは、結果的にグルコースの取り込みを増加させる筋活動の増加などを含め、長期的な利益があることは明らかである(51)。

運動テスト

アメリカスポーツ医学会は、CVDの症状や徴候のない、従来運動不足だったT2DMの患者や糖尿病予備群の人が低～中強度のエクササイズプログラムに参加する場合は、通常、参加前に多くの生理学的変数を評価する必要はないと提言している(3,13,25,52)。すなわち、スクリーニングの手順は、T2DM患者以外のクライアントに適用されるのと同様であり、この集団には体力テストが推奨される。しかし、クライアントの健康歴や臨床検査から得られる情報も考慮する必要があるため、そのような体力評価が必須というわけではない(31)。同様に、米国糖尿病学会も、CVDの症状のないT2DM患者が、低～中強度のエクササイズプログラムに参加することを望む場合、医師による許可は必要ないと述べている(14)。しかし、T2DMのクライアントが高強度エクササイズ(≧65% $\dot{V}O_2$peak)に参加する場合には、事前に心電図運動負荷試験を実施することが勧められる可能性がある(13,14,25)。無症状の糖尿病患者の5人に1人以上にみられるが見落とされる可能性のある無症候性心筋虚血を検査するために、T2DM患者に対しては、年1回の医師によるCVDリスク因子の評価が強く推奨される(62)。最大下運動テストは、有酸素性能力(ロックポートウォーキングテスト)と筋力(ベンチプレスとレッグプレスの5～10RMテスト)に加えて、筋持久力(変形プッシュアップとパーシャルカールアップ)、柔軟性(修正シットアンドリーチテスト)、静的バランス(修正改良版ロンベルグ試験)、動的バランス(修正タイムアップアンドゴー[TUG]テスト)なども用いることができる。このような運動テストの手順を踏むことは、T2DMのクライアントのための個別的かつ安全なエクササイズプログラムを促進する(31)。

運動処方

有酸素性トレーニング(週150分以上)は、糖尿病管理プログラムの基本的な構成要素として広く報告されている(13–15,39)。注目すべきは、内臓脂肪の減少には、レジスタンストレーニングよりも有酸素性トレーニングが効果的であることが報告されている点である。この内臓脂肪は、T2DMのある、体重過多や肥満の成人によくみられる心血管代謝合併症と関連がある(55)。しかし、レジスタンストレーニング(週2回以上、連続しない日に行な

う全身トレーニング）もまた、T2DM患者の血糖コントロールの向上をもたらし、疾病管理プロセスの重要な一部であることが証明されている(27)。さらに、この集団に適応した漸進的なレジスタンストレーニングプロトコルは、筋骨格系の体力と身体機能全体にも好ましい変化をもたらすと思われる(12,13,15,25)。T2DMの患者において、有酸素性エクササイズ(−1.33%)またはレジスタンスエクササイズ(−0.55%)を単独で行なうよりも、中強度の有酸素性エクササイズとレジスタンスエクササイズを組み合わせることは、HbA1cに好ましい影響を与えるようである(−1.74%)(4,14,36,40,68,69)。さらに具体的には、T2DMの患者に対しては、中強度の有酸素性エクササイズ(40～59% HRR)と漸進的なレジスタンストレーニング(40～80% 1RM)を優先し(4,47,68,69)、そのようなエクササイズをトレーニング経験や体力レベルに合わせて実施する必要がある(3)。

高強度インターバルトレーニング(HIIT)は、血糖調節に好ましい変化をもたらすため、代謝が低下している患者にとって有望なエクササイズ様式として注目を集めている(9,20,21)。血糖値の管理が不十分な患者において、HIITは、有酸素性トレーニングやレジスタンストレーニング、または複合トレーニング(−0.36～−0.89%)よりも、HbA1cに有益な変化(−2%)をもたらすことができる(11,16,59,64)。さらに、HIITは、短期間(2週間)少量(20分/セッション)の高強度(80% $\dot{V}O_2$peak)エクササイズ介入であっても、その後の空腹時血糖値を下げる可能性がある(34)。従来の単一要素のHIIT(ウォーキング、ランニング、自転車、階段昇降、ロウイングなど)は、心血管代謝系における健康予防のための貴重なエクササイズ様式となりうると思われ(10,11,21,29,67)、この集団の血糖コントロール、酸化還元状態、体組成、内臓脂肪、体力を改善するための人気のある(28)、効率的な対策であると報告されている(20,26,34,37,56)。最近では、ファンクショナルタイプのHIITプロトコルが、インスリン抵抗性や心血管代謝リスク因子を低下させるのに有効なエクササイズ方法であると考えられている(19,43)。このような従来とは異なるHIITプロトコルは、1回のエクササイズセッションを通して、心肺系と筋骨格系の刺激を組み合わせたハイブリッドで多要素なフォーマットが特徴である(8,9)。

柔軟性トレーニングは、グルコース代謝や体組成およびインスリン作用には影響を及ぼさないが、T2DMの患者は、柔軟性、バランス、コーディネーション、歩行、アジリティ、および固有感覚トレーニングなどに焦点を当てた運動療法にも定期的に参加すべきである(3)。T2DMの患者は、疾病に関連して、機能的能力の低下(14,38)や転倒リスクの上昇(41)、および運動不足(46,49)を伴うことがあるため、柔軟性と運動スキルの重要性を指摘することには価値がある。

表1に、T2DMのエクササイズ初心者のためのエクササイズ処方に関する現在のガイドラインをまとめて示す

表1　2型糖尿病の初心者クライアントのためのエクササイズのガイドライン

トレーニング変数	有酸素性トレーニング	HIIT	レジスタンストレーニング	柔軟性トレーニング
頻度	3～7回/週	2～3回/週	2～3回/週(連続しない日)	2～3回/週
強度	40～59% $\dot{V}O_2$RまたはRPE 11～12	運動時間：2～4分 (80～90% $\dot{V}O_2$R、RPE 15～16) 回復時間：1～3分 (50～60% $\dot{V}O_2$R、RPE 11～13)	40～69% 1 RM	わずかに張りを感じるまで
持続時間	30～60分/セッション 150分/週	20～30分/セッション(ウォームアップとクールダウンを含む) セッションごとのセット数：4～6回	30～60分/セッション 8～10種目の多関節エクササイズを1～3セット、10～15レップ、各セット疲労直前まで	20～30分/セッション 静的ストレッチングは10～30秒保持し、各エクササイズを2～4レップ
様式	ウォーキング、ランニング、自転車、ステアクライミング、エリプティカル、ロウイング、または水泳	ウォーキング、ランニング、自転車、ステアクライミング、エリプティカル、ロウイング、または水泳	空圧式、水圧式、ウェイトプレートまたはセレクトライズドのいずれかのマシーン、フリーウェイト、レジスタンスバンド、および／または自重エクササイズ	静的、動的、PNF、および／またはヨガ
漸進	エクササイズ強度を週5～10%以下、徐々に増加させる(60～79% $\dot{V}O_2$RまたはRPE 14～15)または持続時間(5～10分)	持続時間および／または強度を週ごとに徐々に増加させる	連続2回のセッションの最終セットで、連続で2レップ多く完遂できたら徐々に増加させる クライアントが70～80% 1 RMで8～10レップを3セット行なえるように負荷を調節する	各エクササイズの持続時間を徐々に延長する

1 RM＝最大挙上重量、HIIT＝高強度インターバルトレーニング、PNF＝固有受容神経筋促通法、RPE＝主観的運動強度、$\dot{V}O_2$R＝酸素消費予備能(3,13,27,38,39,47)

(3)。漸進的有酸素性トレーニング、HIIT、レジスタンストレーニングの例はそれぞれ**表2～4**に記載されている。

運動トレーニングの留意事項

有酸素性トレーニングは、T2DM患者の心臓血管系持久力を有意に改善できるが、心臓血管系持久力は全死亡率にかかわる臨床的に重大な徴候と考えられているため(53)、その改善は患者のアウトカムとしてきわめて重要である。T2DMの成人はCVDのリスクが高いと考えられることから、いくつかのCVDのリスク因子(血中脂質、血圧、肥満など)を低下させるために、少なくとも週150分の有酸素性トレーニングが推奨される(13–15)。さらに、HIITは、動脈緊張と末梢血管抵抗を低下させる一方、最大有酸素性能力とミトコンドリア内酵素の活性を高める有益な方法であると思われる(20,21,34)。したがって、T2DMだが合併症のない患者に対しては、少量のHIIT(1～2セッション/週、約80～95%$\dot{V}O_2$peak、20分/セッション)の実施により、血糖の管理を改善できることが示唆される(14,16,21,39,64)。このような代謝亢進は、ミトコンドリア機能およびインスリン感受性の向上、ならびにエクササイズに誘発されるGLUT4の量の増加によってもたらされると考えられる(54)。T2DMの成人で禁忌(高血圧や網膜症など)のない場合には、インスリン感受性を高めると同様に筋力と持久力を向上させるために(6,45)、低強度(60%1RM)と高強度(80%1RM)の両方のレジスタンストレーニングを提案するべきである。一方、CVDや網膜疾患のある糖尿病患者に推奨されるのは、低～中強度のレジスタンストレーニングだけである(6,45,63)。

硝子体出血は、T2DMと網膜症の患者によくみられる。したがって、この集団では、高強度の有酸素性エクササイズやレジスタンストレーニング、

表2　2型糖尿病患者のための有酸素性トレーニングの漸進例

期間(週)	頻度(回/週)	強度(% $\dot{V}O_2$R/RPE6～20)	セッションの持続時間(分/セッション)[a]	様式
1～6	2～3	40～44% /10～11	15～20	ウォーキング、ランニング、自転車、ステアクライミング、エリプティカル、ロウイング、または水泳
7～12	3～4	45～49% /11～12	20～30	
13～18	4～5	50～54% /11～12	30～45	
19～24	5～6	55～60% /12～13	45～60	

[a]1日に複数回のトレーニングを行なうことで、提案された合計時間を達成することが推奨される(3,13,27,38)
RPE(6～20)＝主観的運動強度、$\dot{V}O_2$R＝酸素消費予備能

表3　2型糖尿病患者のためのHIITの漸進例

期間(週)	頻度(回/週)[a]	強度 (% $\dot{V}O_2$/RPE)	W：R	セッションの持続時間(分)[b]	様式(1種目の要素)
1～6	1～2	2～3×3～4分の運動時間 (70～74% $\dot{V}O_2$R/15～16) 1～2×2～3分の回復時間 (40～44% $\dot{V}O_2$R/11～13)	1：1	15	ウォーキング、ランニング、自転車、ステアクライミング、エリプティカル、ロウイング、または水泳
7～12	1～2	2～3×3～4分の運動時間 (75～79% $\dot{V}O_2$R/15～16) 1～2×2～3分の回復時間 (45～49% $\dot{V}O_2$R/11～13)	1：0.75	20	
13～18	2～3	3～4×3～4分の運動時間 (80～84% $\dot{V}O_2$R/15～16) 2～3×2～3分の回復時間 (50～54% $\dot{V}O_2$R/11～13)	1：0.67	25	
19～24	2～3	4～5×3～4分の運動時間 (85～90% $\dot{V}O_2$R/15～16) 3～4×2～3分の回復時間 (55～60% $\dot{V}O_2$R/11～13)	2：1	30	

[a]有酸素トレーニング(**表2**)とHIITを週単位で組み合わせる場合、HIITのセッション数は同量の有酸素トレーニングのセッション数と置き換える必要がある。
[b]ウォームアップとクールダウンを含む(3,9,10,20,67)
HIIT＝高強度インターバルトレーニング、RPE＝主観的運動強度、$\dot{V}O_2$R=酸素消費予備能、W：R＝運動休息比

表4　2型糖尿病患者のためのレジスタンストレーニングの漸進例					
期間(週)	頻度(回/週)	強度(%1RM)	持続時間	筋群	様式
1～6	2～3	40～59%	1～2セット×12～15レップ(6種目)	大腿四頭筋、ハムストリングス、背部、胸部、肩部、体幹部	空圧式、水圧式、ウェイトプレートまたは選択されたいずれかのマシーン、フリーウェイト、レジスタンスバンド
7～12	2～3	60～69%	1～2セット×10～12レップ(8種目)	大腿四頭筋、ハムストリングス、背部、胸部、肩部、上腕三頭筋、上腕二頭筋、体幹部	
13～18	2～3	70～74%	2～3セット×8～10レップ(8種目)	大腿四頭筋、ハムストリングス、背部、胸部、肩部、上腕三頭筋、上腕二頭筋、体幹部	
19～24	2～3	75～80%	2～3セット×8～10レップ(10種目)	大腿四頭筋、ハムストリングス、殿筋、下腿、背部、胸部、肩部、上腕三頭筋、上腕二頭筋、体幹部	

1RM＝最大挙上重量

高負荷の活動(ランニング、ジャンプ、ステップエアロビクスなど)およびバルサルバ法は避けるべきである(14)。T2DMと腎症(ネフロパシー)の患者は、身体的制限や低い有酸素性能力レベルを考慮して、低強度の有酸素性エクササイズプログラム(40～50%$\dot{V}O_2$peak)に参加することが推奨される(14,61)。最後に、体重負荷のかからない運動(水泳、水中エアロビクス、ロウイング、自転車、レジスタンストレーニング、ストレッチングなど)は、足潰瘍の予防や脚部切断リスクの低下、転倒リスクの低減のために、T2DMと末梢神経障害のある患者に広く推奨される(14)。

T2DMの患者は、様々な筋骨格系の健康問題(糖尿病による足の痛みや腱症など)や神経障害を起こしやすく、それが身体機能や生活の質に影響を及ぼすため、レジスタンストレーニングプログラムを処方する場合には、傷害のリスクを低減することを、T2DMのクライアントの最優先事項とするべきである。したがって、特に腱鞘炎、関節炎、慢性腰痛、関節可動域制限などの筋骨格系の健康問題が明らかになっているクライアントには、漸進的なレジスタンストレーニングが重要である(1)。傷害のリスクを減らすためには、レジスタンスエクササイズセッションのすべてのトレーニング変数をゆっくりと漸進させることが推奨される。例えば、様々なエクササイズにおいて、1セットあたりの目標レップ数を常に確実に超えることができる場合には、負荷の増加をまず優先させる。その上で、セット数の増加やトレーニング頻度の増加が、T2DMの成人に対する漸進的なレジスタンストレーニングルーティンのための追加的な解決策となるだろう(3)。また、2for2ルールを適用することもできる。このルールに従うと、連続した2回のセッションで、あるエクササイズの最終セットで目標レップ数よりも2回以上多く完遂できたら、そのエクササイズに対する良好な耐性があるとみなして、目標レップ数の下限が完遂できる程度まで負荷を増加させることができる(2)。また、主観的運動強度のOMNI-レジスタンスエクササイズスケールは、ジム環境での運動強度をモニタリングするための貴重かつ実施可能なツールであると思われる(33)。

特別な注意事項

T2DMでは、合併症(高血圧、体重過多／肥満、高脂血症、慢性腎臓病、CVDなど)が存在することがきわめて多い。詳しく述べると、患者の97.5%はT2DMに加えて1つの合併症を有し、88.5%は少なくとも2つの合併症を有する(24)。したがって、エクササイズ専門職は、副作用や禁忌によって患者のエクササイズプログラムに影響を及ぼす可能性のある、これらの付随的な症状およびクライアントの処方薬すべてに注意を払う必要がある**(表1)**。エクササイズ専門職は、低い機能的能力や体力レベルに関連すると思われるこれらの合併症に対処することを目的として、必要に応じてエクササイズテクニックを調節し、エクササイズ手法を変更するための十分な教育訓練を受けている必要がある(3)。特に、エクササイズ前、エクササイズ中、エクササイズ後にクライアントの血糖値をモニタリングするべきである。低血糖(血糖値70mg/dL未満)を避けるため、就寝前の時間帯(3時間以内)にエクササイズを行なってはならない。インスリンの分泌を増やすための薬物療法(インスリン注射や経口剤)を受けているT2DM患者にとって、最も多く懸念されるのが低血糖であるため、低血糖は重要な問題である(13,14,25)。したがって、まず血糖値をモニタリングし、低血糖状態でのクライアントは、即効性のある炭水化物(15g)(ブドウ糖タブレットやゼリー、果汁、ドライフルーツ、蜂蜜など)を摂取することが強く推奨される。そして15分後に血糖値を再度測定し、正常範囲(72～126mg/dL)に戻ったことを確認する(14)。

インスリン依存性T2DMのクライアントのトレーニングを行なう場合、エクササイズの前後およびエクササイズ中の低血糖や高血糖を予防する目的

で、エクササイズのタイミングを考慮する必要がある。血糖値が250mg/dL以上でケトン体が存在しない場合は、低～中強度のエクササイズだけが推奨される。さらに、ケトン体が存在しなくても血糖値が350mg/dLを超える場合は、エクササイズを延期し、エクササイズ実施前の是正的なインスリン療法が推奨される(14)。血中に高濃度のケトン体が存在すると、生命を脅かす糖尿病性ケトアシドーシスを発症するリスクが高まるため、エクササイズを開始することは推奨されない。したがって、エクササイズ専門職は、糖尿病性ケトアシドーシスの兆候(過度の喉の渇き、頻尿、吐き気と嘔吐、胃痛、衰弱や疲労、息切れ、果物のような香りのする息、意識混濁など)に注意する必要がある。さらに、エクササイズ前後のクライアントの血糖値やケトン体の値にも注意が必要である(17)。

酸素摂取機構、心拍反応、血圧は、無症候性虚血をもたらす自律神経障害によって影響を受けることがある。したがって、エクササイズ専門職は、実際の現場でT2DMのクライアントを指導する場合には、安静時頻脈、運動不耐性、起立性低血圧などのリスクに注意しなければならない。具体的には、自律神経障害はT2DM患者に多くみられる機能不全であり、不随意機能を制御する神経の障害が特徴である(60)。末梢神経障害や微小循環障害は固有感覚や平衡感覚を低下させるだけでなく、感染症や壊疽のリスクを高める。このような合併症は、通常、四肢に存在する神経の損傷の結果起こる可能性があり、脱力感や無感覚、疼痛を引き起こす(14)。

現場への応用

T2DMは糖代謝に影響を及ぼす多因子の代謝疾患であり、メタボリックシンドロームやCVDの発症リスクとも関連がある。定期的なエクササイズ(4～7回/週)は、健康や体力増進に多くの効果をもたらし、治療というパズルのきわめて重要な1ピースであると思われる。エクササイズ専門職はT2DMに関連する安全上の配慮とエクササイズが、この慢性疾患を改善するメカニズムについて知る必要がある。血糖値調節を最適化するためには、漸進的で個別化された有酸素性トレーニングとレジスタンストレーニングを組み合わせたプロトコルを使用するべきである。中強度から高強度のエクササイズはβ細胞機能を維持し、インスリン感受性を高めるための実行可能で安全かつ効果的な手段であると思われる。合併症は運動能力や運動耐性を制限する可能性があるため、T2DM患者に合わせたエクササイズプログラムを指導し作成する際には、合併症の可能性を慎重に検討する必要がある。最後に、いまだ十分なサービスを受けていないT2DMの集団において、魅力的なエクササイズセッションや実生活における包括的な経験を促進するためには、有資格者のエクササイズ専門職による監督が重要な要素であると思われる(7,35)。◆

References

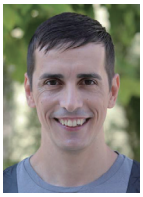
1. Abate M, Schiavone C, Pelotti P, Salini V. Limited joint mobility (LJM) in elderly subjects with type II diabetes mellitus. *Arch Gerontol Geriatr* 53: 135–140, 2011.
2. American College of Sports M. American College of Sports Medicine position stand. Progression models in resistance training for healthy adults. *Med Sci Sports Exerc* 41: 687–708, 2009.
3. American College of Sports Medicine, Liguori G, Feito Y, Fountaine C, Roy BA. *ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription*. Philadelphia, PA: Wolters Kluwer Health, 2021.
4. AminiLari Z, Fararouei M, Amanat S, et al. The effect of 12 Weeks aerobic, resistance, and combined exercises on omentin-1 levels and insulin resistance among type 2 diabetic middleaged women. *Diabetes Metab J* 41: 205–212, 2017.
5. Bajpeyi S, Tanner CJ, Slentz CA, et al. Effect of exercise intensity and volume on persistence of insulin sensitivity during training cessation. *J Appl Physiol* (1985) 106: 1079–1085, 2009.
6. Balducci S, Zanuso S, Cardelli P, et al. Italian Diabetes Exercise Study I. Effect of high- versus low-intensity supervised aerobic and resistance training on modifiable cardiovascular risk factors in type 2 diabetes; the Italian Diabetes and Exercise Study (IDES). *PLoS One* 7: e49297, 2012.
7. Bantham A, Taverno Ross SE, Sebastiao E, Hall G. Overcoming barriers to physical activity in underserved populations. *Prog Cardiovasc Dis* 64: 64–71, 2021.
8. Batrakoulis A, Jamurtas AZ, Draganidis D, et al. Fatouros IG. Hybrid neuromuscular training improves cardiometabolic health and alters redox status in inactive overweight and obese women: A randomized controlled trial. *Antioxidants (Basel)* 10: 1601, 2021.
9. Batrakoulis A, Jamurtas AZ, Fatouros IG. Fatouros IG. High-intensity interval training in metabolic diseases: Physiological adaptations. *ACSMs Health Fit J* 25: 54–59, 2021.
10. Campbell WW, Kraus WE, Powell KE, et al. Physical Activity Guidelines Advisory C. Highintensity interval training for cardiometabolic disease prevention. *Med Sci Sports Exerc* 51: 1220–1226, 2019.
11. Cassidy S, Thoma C, Houghton D, Trenell MI. High-intensity interval training: A review of its impact on glucose control and cardiometabolic health. *Diabetologia* 60: 7–23, 2017.
12. Castaneda C, Layne JE, Munoz-Orians L, et al. A randomized controlled trial of resistance exercise training to improve glycemic control in older adults with type 2 diabetes. *Diabetes Care* 25: 2335– 2341, 2002.
13. Colberg SR, Albright AL, Blissmer BJ, et al. American College of Sports M, and American Diabetes A. Exercise and type 2 diabetes: American College of Sports Medicine and the American Diabetes Association: Joint position statement. Exercise and type 2 diabetes. *Med Sci Sports Exerc* 42: 2282–2303, 2010.
14. Colberg SR, Sigal RJ, Fernhall B, et al. American College of Sports M, and American Diabetes A. Exercise and type 2 diabetes: The American College of Sports Medicine and the American Diabetes Association: Joint position statement. *Diabetes Care* 33: e147–e167, 2010.
15. Colberg SR, Sigal RJ, Yardley JE, et al.

Physical activity/exercise and diabetes: A position statement of the American diabetes association. *Diabetes Care* 39: 2065–2079, 2016.
16. De Nardi AT, Tolves T, Lenzi TL, Signori LU, Silva A. High-intensity interval training versus continuous training on physiological and metabolic variables in prediabetes and type 2 diabetes: A meta-analysis. *Diabetes Res Clin Pract* 137: 149– 159, 2018.
17. Dhatariya KK, Umpierrez GE. Guidelines for management of diabetic ketoacidosis: Time to revise? *Lancet Diabetes Endocrinol* 5: 321–323, 2017.
18. Evert AB, Dennison M, Gardner CD, et al. Nutrition therapy for adults with diabetes or prediabetes: A consensus report. *Diabetes Care* 42: 731–754, 2019.
19. Fealy CE, Nieuwoudt S, Foucher JA, et al. Functional high-intensity exercise training ameliorates insulin resistance and cardiometabolic risk factors in type 2 diabetes. *Exp Physiol* 103: 985–994, 2018.
20. Francois ME, Little JP. Effectiveness and safety of high-intensity interval training in patients with type 2 diabetes. *Diabetes Spectr* 28: 39–44, 2015.
21. Gibala MJ, Little JP, Macdonald MJ, Hawley JA. Physiological adaptations to low-volume, highintensity interval training in health and disease. *J Physiol* 590: 1077–1084, 2012.
22. Goodyear LJ, Kahn BB. Exercise, glucose transport, and insulin sensitivity. *Annu Rev Med* 49: 235–261, 1998.
23. Hayashi T, Hirshman MF, Kurth EJ, Winder WW, Goodyear LJ. Evidence for 5' AMP-activated protein kinase mediation of the effect of muscle contraction on glucose transport. *Diabetes* 47: 1369–1373, 1998.
24. Iglay K, Hannachi H, Joseph Howie P, et al. Prevalence and co-prevalence of comorbidities among patients with type 2 diabetes mellitus. *Curr Med Res Opin* 32: 1243–1252, 2016.
25. Kanaley JA, Colberg SR, Corcoran MH, et al. Exercise/physical activity in individuals with type 2 diabetes: A consensus statement from the American College of Sports Medicine. *Med Sci Sports Exerc* 54: 353–368, 2022.
26. Karstoft K, Winding K, Knudsen SH, et al. The effects of free-living interval-walking training on glycemic control, body composition, and physical fitness in type 2 diabetic patients: A randomized, controlled trial. *Diabetes Care* 36: 228–236, 2013.
27. Kemps H, Kränkel N, Dörr M, et al. Exercise training for patients with type 2 diabetes and cardiovascular disease: What to pursue and how to do it. A Position Paper of the European Association of Preventive Cardiology (EAPC). *Eur J Prev Cardiol* 26: 709–727, 2019.
28. Kercher VM, Kercher K, Bennion T, et al. 2022 fitness trends from around the globe. *ACSMs Health Fit J* 26: 21–37, 2022.
29. Kessler HS, Sisson SB, Short KR. The potential for high-intensity interval training to reduce cardiometabolic disease risk. *Sports Med* 42: 489–509, 2012.
30. Knowler WC, Barrett-Connor E, Fowler SE, et al. Diabetes Prevention Program Research G. Reduction in the incidence of type 2 diabetes with lifestyle intervention or metformin. *N Engl J Med* 346: 393–403, 2002.
31. Kosinski C, Besson C, Amati F. Exercise testing in individuals with diabetes, practical considerations for exercise physiologists. *Front Physiol* 10: 1257, 2019.
32. Krogh-Madsen R, Thyfault JP, Broholm C, et al. A 2-wk reduction of ambulatory activity attenuates peripheral insulin sensitivity. *J Appl Physiol* (1985) 108: 1034–1040, 2010.
33. Lagally KM, Robertson RJ. Construct validity of the OMNI resistance exercise scale. *J Strength Cond Res* 20: 252–256, 2006.
34. Little JP, Gillen JB, Percival ME, et al. Low-volume high-intensity interval training reduces hyperglycemia and increases muscle mitochondrial capacity in patients with type 2 diabetes. *J Appl Physiol* (1985) 111: 1554– 1560, 2011.
35. Luque M. Create an inclusive experience for special populations. *IDEA Fit J* 13: 40–47, 2016.
36. Maiorana A, O'Driscoll G, Cheetham C, et al. The effect of combined aerobic and resistance exercise training on vascular function in type 2 diabetes. *J Am Coll Cardiol* 38: 860–866, 2001.
37. Mallard AR, Hollekim-Strand SM, Coombes JS, Ingul CB. Exercise intensity, redox homeostasis and inflammation in type 2 diabetes mellitus. *J Sci Med Sport* 20: 893–898, 2017.
38. Marwick TH, Hordern MD, Miller T, et al. Council on Clinical Cardiology AHAECR, Prevention C, Council on Cardiovascular Disease in the Y, Council on Cardiovascular N, Council on Nutrition PA, Metabolism, Interdisciplinary Council on Quality of C, and Outcomes R. Exercise training for type 2 diabetes mellitus: Impact on cardiovascular risk: A scientific statement from the American Heart Association. *Circulation* 119: 3244–3262, 2009.
39. Mattioni Maturana F, Martus P, Zipfel S, NI AM. Effectiveness of HIIE versus MICT in improving cardiometabolic risk factors in health and disease: A meta-analysis. *Med Sci Sports Exerc* 53: 559– 573, 2021.
40. Mendes R, Sousa N, Almeida A, et al. Exercise prescription for patients with type 2 diabetes-a synthesis of international recommendations: Narrative review. *Br J Sports Med* 50: 1379–1381, 2016.
41. Morrison S, Colberg SR, Mariano M, Parson HK, Vinik AI. Balance training reduces falls risk in older individuals with type 2 diabetes. *Diabetes Care* 33: 748–750, 2010.
42. Nelson KM, Reiber G, Boyko EJ, Nhanes III. Diet and exercise among adults with type 2 diabetes: Findings from the third national health and nutrition examination survey (NHANES III). *Diabetes Care* 25: 1722–1728, 2002.
43. Nieuwoudt S, Fealy CE, Foucher JA, et al. Functional high-intensity training improves pancreatic beta-cell function in adults with type 2 diabetes. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 313: E314–E320, 2017.
44. O'Leary VB, Marchetti CM, Krishnan RK, et al. Exercise-induced reversal of insulin resistance in obese elderly is associated with reduced visceral fat. *J Appl Physiol* (1985) 100: 1584–1589, 2006.
45. Pesta DH, Goncalves RLS, Madiraju AK, Strasser B, Sparks LM. Resistance training to improve type 2 diabetes: Working toward a prescription for the future. *Nutr Metab (Lond)* 14: 24, 2017.
46. Peyrot M, Rubin RR, Lauritzen T, et al. Psychosocial problems and barriers to improved diabetes management: Results of the crossnational diabetes attitudes, wishes and needs (DAWN) study. *Diabet Med* 22: 1379–1385, 2005.
47. Qadir R, Sculthorpe NF, Todd T, Brown EC. Effectiveness of resistance training and associated program characteristics in patients at risk for type 2 diabetes: A systematic review and meta-analysis. *Sports Med Open* 7: 38, 2021.
48. Racette SB, Evans EM, Weiss EP, Hagberg JM, Holloszy JO. Abdominal adiposity is a stronger predictor of insulin resistance than fitness among 50-95 year olds. *Diabetes Care* 29: 673–678, 2006.
49. Resnick HE, Foster GL, Bardsley J, Ratner RE. 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* 29: 531–537, 2006.
50. Richter EA, Derave W, Wojtaszewski JF. Glucose, exercise and insulin: Emerging concepts. *J Physiol* 535: 313–322, 2001.
51. Richter EA, Hargreaves M. Exercise, GLUT4, and skeletal muscle glucose uptake. *Physiol Rev* 93: 993–1017, 2013.
52. Riebe D, Franklin BA, Thompson PD, et al. Updating ACSM's recommendations for exercise preparticipation health screening. *Med Sci Sports Exerc* 47: 2473–2479, 2015.
53. Ross R, Blair SN, Arena R, et al. American Heart Association Physical Activity Committee of the Council on L, Cardiometabolic H, Council on Clinical C, Council on E, Prevention, Council on C, Stroke N, Council on Functional G, Translational B, and Stroke C. Importance of assessing cardiorespiratory fitness in clinical practice: A case for fitness as a clinical vital sign: A scientific statement from the American heart association. *Circulation* 134: e653–e699, 2016.
54. Sabag A, Little JP, Johnson NA. Low-volume highintensity interval training for cardiometabolic health. *J Physiol* 600: 1013–1026, 2022.
55. Sabag A, Way KL, Keating SE, et al. Exercise and ectopic fat in type 2 diabetes: A systematic review and meta-analysis. *Diabetes Metab* 43: 195–210, 2017.
56. Sabag A, Way KL, Sultana RN, et al. The effect of a novel low-volume aerobic exercise intervention on liver fat in type 2 diabetes: A randomized controlled trial. *Diabetes Care* 43: 2371–2378, 2020.
57. Slentz CA, Tanner CJ, Bateman LA, et al. Effects of exercise training intensity on pancreatic beta-cell function. *Diabetes Care* 32: 1807–1811, 2009.
58. Taylor R. Type 2 diabetes: Etiology and reversibility. *Diabetes Care* 36: 1047–1055, 2013.
59. Umpierre D, Ribeiro PA, Kramer CK, et al. Physical activity advice only or structured exercise training and association with HbAlc levels in type 2 diabetes: A systematic review and meta-analysis. *JAMA* 305: 1790–1799, 2011.
60. Vinik AI, Freeman R, Erbas T. Diabetic autonomic neuropathy. *Semin Neurol* 23: 365–372, 2003.
61. Violan MA, Pomes T, Maldonado S, et al. Exercise capacity in hemodialysis and renal transplant patients. *Transpl Proc* 34: 417–418, 2002.
62. Wackers FJ, Young LH, Inzucchi SE, et al. Detection of Ischemia in Asymptomatic Diabetics I. Detection of ischemia in asymptomatic diabetics I. Detection of silent myocardial ischemia in asymptomatic diabetic subjects: The DIAD study. *Diabetes Care* 27: 1954–1961, 2004.
63. Willey KA, Singh MA. Battling insulin resistance in elderly obese people with type 2 diabetes: Bring on the heavy weights. *Diabetes Care* 26: 1580–1588, 2003.
64. Winding KM, Munch GW, Iepsen UW, et al. The effect on glycaemic control of low-volume highintensity interval training versus endurance training in individuals with type 2 diabetes. *Diabetes Obes Metab* 20: 1131–1139, 2018.
65. Winnick JJ, Sherman WM, Habash DL, et al. Shortterm aerobic exercise training in obese humans with type 2 diabetes mellitus improves whole-body insulin sensitivity through gains in peripheral, not hepatic insulin sensitivity. *J Clin Endocrinol Metab* 93: 771–778, 2008.
66. World Health Organization. *Global Report on Diabetes*. Geneva, Switzerland: WHO, 2016.
67. Wormgoor SG, Dalleck LC, Zinn C, Harris NK. Effects of high-intensity interval training on people living with type 2 diabetes: A narrative review. *Can J Diabetes* 41: 536–547, 2017.
68. Yavari A, Azizova GI. Effect of oxidative stress on immunological parameters in type 2 diabetes mellitus in the Azerbaijan Republic. *Diabetes Metab Syndr* 6: 195–198, 2012.
69. Zhao X, He Q, Zeng Y, Cheng L. Effectiveness of combined exercise in people with type 2 diabetes and concurrent overweight/obesity: A systematic review and meta-analysis. *BMJ Open* 11: e046252, 2021.

From Strength and Conditioning Journal
Volume 44, Number 6, pages 64-72.

著者紹介



Alexios Batrakoulis：
University of Thessaly（ギリシャ）の体育・スポーツ科学学科で非常勤講師を務める。

Athanasios Z. Jamurtas：
University of Thessalyの体育・スポーツ科学学科の運動生化学の教授である。

Ioannis G. Fatouros：
University of Thessalyの体育・スポーツ科学学科の運動生化学の教授である。