

女性長距離ランナーの 日常生活下における血糖変動と栄養摂取状況

Glycemic variability and nutritional intakes in female long-distance runners under real-life conditions

阿藤わかな*1, 御所園実花*2, 田畑尚吾*3, 田口素子*4

キー・ワード：Continuous Glucose Monitoring, athlete, carbohydrate
持続血糖モニタリング, アスリート, 糖質

〔要旨〕 本研究は、実業団チームに所属している女性長距離ランナーを対象に、持続血糖モニタリング (continuous glucose monitoring : CGM) 装置を用いて日常生活下における血糖変動を明らかにすることを目的とした。対象は週に6日間のトレーニングを行う9名とし、測定は通常トレーニング期の連続した7日間に実施した。CGM装置を用いて血糖値を計測し、3軸加速度計を用いて活動量を算出した。また、同時期に食事調査を実施し栄養摂取状況を確認した。生活パターンは仕事及びトレーニング状況により「仕事あり日」「仕事なし日」「休日」に分類した。その結果、仕事あり日及び仕事なし日は総エネルギー消費量が高く、エネルギー及び糖質摂取量は不足していたため、練習後及び夜間に低血糖が確認された。トレーニングを実施しなかった休日においても夜間を中心に低血糖が発現した。運動によって消費された筋グリコーゲンの回復に糖質が優先的に利用された結果、血糖を維持するための糖質が不足した可能性がある。これらのことから、アスリートはエネルギー及び糖質不足のリスクを避けるべきであり、公認スポーツ栄養士による指導や食事管理を受けられない場合、CGMの活用によりエネルギー不足を早期に発見し、適切な栄養介入につなげられることが示唆された。

緒 言

アスリートはトレーニングによるエネルギー消費量 (exercise energy expenditure : EEE) や、日常生活活動のエネルギー消費量 (non-exercise activity thermogenesis : NEAT) が大きいことから、1日の総エネルギー消費量 (total energy expenditure : TEE) が大きくなるが、TEEに対してエネルギー摂取量 (energy intake : EI) が少ないケースが散見される。その状態が継続すれば、ホルモン分泌の攪乱、エネルギー代謝の抑制や骨密

度の低下、心理的ストレスの増大など、多岐にわたる健康リスクを引き起こすことが知られている¹⁾。これまで国際的にエネルギー不足の評価に用いられてきたエナジーアベイラビリティの算出には多くの測定と評価の誤差を含むため、精度高く評価することは困難である²⁾。そこで、アスリートのエネルギー不足を早期発見するための新たなアプローチとして近年、持続血糖モニタリング (continuous glucose monitoring : CGM) 装置を使用した血糖値の評価が行われるようになった³⁾。CGMは皮下組織に装着したセンサーを通じて間質液中のグルコース濃度を連続的に測定する技術であり、もともとは糖尿病患者の診療や臨床研究に用いられてきた。アスリートを対象として現在までに報告されているCGMを活用した研究は試合中のものがほとんどであり、試合時のエネルギー及び糖質の摂取不足が報告されている⁴⁾。しか

*1 早稲田大学スポーツ科学部

*2 早稲田大学スポーツ栄養研究所

*3 田畑クリニック

*4 早稲田大学スポーツ学術院

Corresponding author : 田口素子 (mtaguchi@waseda.jp)

しこれらの不足は試合中に限って生じるのではなく、日常生活においても生じうるものである。一般の健康な小児及び成人を対象に CGM を用いて測定した研究では、低血糖は起こりにくいことが報告されている⁵⁾。一方、アスリートはエネルギー不足の継続に起因する空腹時血糖の低下が報告されており、競技パフォーマンスにも深刻な影響を与える可能性がある¹⁾。

本研究の目的は、CGM を用いてアスリートの日常生活における血糖値の変動パターンを明らかにすることであった。

対象者及び方法

1. 対象者

対象者は全日本または東日本実業団対抗陸上競技選手権大会への出場経験を有する女性長距離ランナーであり、1型及び2型糖尿病でない者とした。1週間のうち平日の5日間は午前9時から午後3時まで働き、移動や立位の多い仕事に従事しており、日本人の食事摂取基準における身体活動レベルは「高い」に該当していた。トレーニングは土曜日を含め週6日間行っていた。研究期間は通常トレーニング期であり、主にペース走、インターバル走、レジスタンストレーニングを行っていた。トレーニング時間は $1,103 \pm 86$ 分/週であり、走行距離は 146.6 ± 13.8 km/週であった。対象者の除外基準は、怪我や故障等により日常的なトレーニングを行えない者とし、11名のうち2名を除いた9名を対象者とした(表1)。全員が血糖値に影響を与えるような薬剤の使用がないこと、及び胃切除歴や肝機能・腎機能障害など血糖値に影響を与えるような病歴がないことを確認した。対象者にはあらかじめ口頭で研究の目的、方法、危険性等を十分に説明し、書面による同意を得た。なお本研究は、早稲田大学の人を対象とする研究に関する倫理審査委員会より承認を得て実施した(承認番号:2024-039)。

2. 方法

a. 研究デザイン

対象者には連続した7日間、CGM装置及び3軸加速度計を装着させ、食事調査、体重(body weight: BW)及び身体組成の測定を行わせた。なお、対象者の生活パターンに応じて、仕事及びトレーニングを行う平日(仕事あり日)、仕事はないがトレーニングを行う土曜日(仕事なし日)、仕事

表1 対象者の特徴

| | n = 9 |
|--------------------------|--------------|
| 年齢 (歳) | 22 ± 2 |
| 身長 (cm) | 161.1 ± 4.8 |
| 体重 (kg) | 50.13 ± 4.93 |
| BMI (kg/m ²) | 19.3 ± 1.1 |
| 体脂肪率 (%) | 17.8 ± 4.5 |
| 体脂肪量 (kg) | 9.0 ± 2.6 |
| 除脂肪量 (kg) | 41.1 ± 3.7 |
| 空腹時血糖値 (mg/dL) | 87 ± 8 |
| 推定 HbA1c (%)* | 5.7 ± 0.2 |
| 週間走行距離 (km/週) | 146.6 ± 13.8 |

平均値 ± 標準偏差, BMI: body mass index

*リブレ2による目安値:(目標値: ≤ 7.0%)

もトレーニングも行わない日曜日(休日)の3つに分類して分析した。

b. 体重及び身体組成の評価

体重体組成計(インナースキャンデュアル RD-803L, (株)タニタ製)を用いて、早朝空腹時排尿後に各自で毎朝測定させた。

c. 血糖値の評価

CGM装置(FreeStyle リブレ2, Abbott製)を対象者の上腕背部に装着させ、間質液中のグルコース濃度を測定し血糖値とした。対象者のスマートフォンとCGM装置をBluetooth接続で連携し、アプリ(FreeStyle リブレ Link, Abbott製)を用いてデータを収集した。解析には、収集された血糖値から算出された15分ごとの平均値を用いた。リブレ2によって分析された平均グルコース値に基づいて算出されたグルコース管理指標をヘモグロビンA1cの目安として用い、目標値は7%以下であった。なお、低血糖は70mg/dL未満と定義した。毎日午前5時頃に起床する対象者の生活リズムを考慮して、1日を午前5時から翌日の午前5時までとし、午前5時から午後10時を日中、午後10時から翌日の午前5時までを夜間と定義した。低血糖の割合は、低血糖が発生していた測定時間(分)を24時間(1,440分)、日中(1,020分)及び夜間(420分)の時間(分)で除し、100を乗じて求めた。

d. EIの評価

対象者のEIを把握するため、自己記入式食事記録法及び写真撮影法を併用した食事調査を7日間行った。摂取したものをすべて対象者に記録させて写真を撮らせたのち、公認スポーツ栄養士が聞き取り調査を行い、料理や食品の材料と分量を

表2 対象者の1日の活動時間, エネルギー消費量及び血糖値

| | 仕事あり日 | 仕事なし日 | 休日 | p 値 |
|--------------------|-------------|-------------|----------------|--------|
| 活動時間 | | | | |
| 睡眠時間 (分) | 427 ± 27 | 447 ± 67 | 560 ± 132* † | 0.007 |
| 日常生活活動時間 (分) | 838 ± 35 | 774 ± 103 | 842 ± 127 | 0.459 |
| 運動時間 (分) | 176 ± 18 | 219 ± 71 | 38 ± 55* † | <0.001 |
| エネルギー消費量 | | | | |
| TEE (kcal) | 3,301 ± 348 | 2,956 ± 377 | 1,917 ± 224* † | <0.001 |
| NEAT (kcal) | 670 ± 128 | 455 ± 110* | 470 ± 154* | 0.003 |
| EEE (kcal) | 1,225 ± 362 | 1,183 ± 365 | 116 ± 199* † | 0.001 |
| 朝練習 (kcal) | 718 ± 274 | 964 ± 359 | 116 ± 199* † | 0.008 |
| 午後練習 (kcal) | 539 ± 150 | 219 ± 203* | 0 ± 0* † | <0.001 |
| 平均血糖値 (mg/dL) | | | | |
| 24時間 (5:00 - 5:00) | 102 ± 7 | 104 ± 7 | 100 ± 11 | 0.205 |
| 日中 (5:00 - 22:00) | 107 ± 6 | 109 ± 8 | 105 ± 9 | 0.490 |
| 夜間 (22:00 - 5:00) | 91 ± 10 | 92 ± 15 | 87 ± 21 | 0.748 |
| 低血糖の割合 (%) | | | | |
| 24時間 (5:00 - 5:00) | 2.6 ± 4.5 | 3.5 ± 7.8 | 5.1 ± 11.7 | 0.248 |
| 日中 (5:00 - 22:00) | 1.0 ± 2.0 | 0.5 ± 0.8 | 2.3 ± 4.9 | 0.959 |
| 夜間 (22:00 - 5:00) | 6.2 ± 11.0 | 11.8 ± 30.3 | 9.8 ± 26.9 | 0.513 |

n=9, 平均値±標準偏差, TEE:1日の総エネルギー消費量, NEAT:日常生活活動によるエネルギー消費量, EEE:運動時エネルギー消費量, *vs. 仕事あり日, †vs. 仕事なし日

決定した。栄養計算は日本食品標準成分表2020年版(八訂)に準拠した栄養計算ソフト(栄養プラス, (株)建帛社製)を用いて行った。なお,炭水化物から食物繊維総量を差し引いたものを「糖質」として表記した。

e. EEE 及び NEAT の評価

対象者には就寝時と入浴時を除いて3軸加速度計(Active Style Pro HJA-750C, オムロンヘルスケア(株)製)を7日間,腰部に装着させた。収集した1分ごとの代謝当量(metabolic equivalents: METs)の値を用いて,アスリートを対象とした先行研究と同様の方法でEEE及びNEATを算出した。非装着時の活動には,対象者に5分単位で記録させた活動内容を用いて, METs 値を割り当てて算出した。

f. TEE 及びエネルギーバランスの推定

安静時代謝量(resting energy expenditure: REE), 食事誘発性熱産生(diet-induced thermogenesis: DIT), NEAT, EEEの4つの要素を合計してTEEを推定した⁶⁾。REEは日本人アスリートを対象とした田口らの推定式⁷⁾を用い, DITはEIに0.1を乗じて算出した⁶⁾。エネルギーバランスは, EIからTEEを差し引いて求めた。

g. 統計処理

すべての測定値は平均値±標準偏差で表し, 表

3には中央値も併記した。統計処理には, 統計解析ソフトSPSS Statistics version 29.0(日本アイ・ビーエム(株)製)を用いた。統計処理を行う前にShapiro-Wilk検定により正規性を確認し, 正規性が認められた項目の比較には一元配置分散分析, 正規分布に従わない項目にはフリードマン検定を用いた後にBonferroni法を使用して調整した。すべての統計データは危険率5%未満を統計的有意水準とした。

結果

対象者の活動時間, エネルギー消費量及び血糖値を表2に示した。休日の睡眠時間は有意に長く, 運動時間は有意に短かった。休日及び仕事なし日のNEATは仕事あり日と比較して, 有意に低値であった。休日のEEEは, 仕事あり日及び仕事なし日と比較して低値を示した。24時間の低血糖割合は仕事あり日では2.6±4.5%, 仕事なし日では3.5±7.8%であり, 休日は5.1±11.7%であった。低血糖割合は生活パターンごとに有意差は認められなかったが, 仕事なし日及び休日は夜間の低血糖発生頻度が約10%と高かった。対象者全員及び低血糖発生者の栄養摂取状況を表3に示した。休日の1日あたりの糖質摂取量は仕事あり日及び仕事なし日と比較して有意に低値であった。低血糖

表3 仕事およびトレーニング状況別の1日の栄養摂取状況

| | 全体 (n=9) | | | 低血糖発生者 (n=7) | | |
|--------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| | 仕事あり日 | 仕事なし日 | 休日 | 仕事あり日 | 仕事なし日 | 休日 |
| エネルギー (kcal) | 2,409±322 (2,470) | 2,416±451 (2,440) | 2,039±309 [†] (1,963) | 2,368±261 (2,470) | 2,298±385 (2,202) | 1,949±156* (1,963) |
| (kcal/kg BW) | 48.9±10.7 (47.0) | 48.9±12.3 (46.4) | 41.4±10.2 (38.3) | 47.1±8.4 (47.0) | 45.5±8.8 (46.0) | 38.8±6.4 (38.3) |
| たんぱく質 (g) | 122.3±17.4 (123.4) | 113.0±21 (105.0) | 97.9±15.3* (99.9) | 121.7±19.7 (123.4) | 104.3±13 (103.5) | 97.1±17.3* (99.9) |
| (g/kg BW) | 2.5±0.4 (2.6) | 2.3±0.6 (2.2) | 2.0±0.3 (1.9) | 2.4±0.4 (2.6) | 2.1±0.4 (2.0) | 1.9±0.3 (1.9) |
| 脂質 (g) | 60.7±13.2 (60.8) | 58.7±11.9 (56.7) | 62.6±29.4 (63.4) | 58.3±11.7 (60.8) | 55.6±9.1 (55.2) | 52.2±22.2 (58.4) |
| (g/kg BW) | 1.2±0.4 (1.3) | 1.2±0.3 (1.2) | 1.3±0.7 (1.3) | 1.2±0.3 (1.3) | 1.1±0.2 (1.2) | 1.1±0.5 (1.1) |
| 糖質 (g) | 340.4±43.5 (344.4) | 353.8±76.6 (341.6) | 266.2±40.2* [†] (274.4) | 336.7±30.6 (344.4) | 340.4±75.7 (328.2) | 266.7±31.2* [†] (274.4) |
| (g/kg BW) | 6.9±1.5 (6.5) | 7.2±1.9 (6.6) | 5.3±1.2 (5.4) | 6.7±1.1 (6.5) | 6.7±1.6 (6.5) | 5.3±0.9 (5.4) |

平均値±標準偏差, カッコ内は中央値, *vs. 仕事あり日, [†]vs. 仕事なし日 BW: 体重

発生者の糖質摂取量は, すべての生活区分において7g/kg BW/日を下回っていた. 測定期間の7日間において, 夜間に対象者が食事や間食を摂取することはなかった. 対象者全体のエネルギーバランスは, 仕事あり日及び仕事なし日ではそれぞれ, -892 ± 395 kcal, -540 ± 494 kcal と負の状態であったが, 休日は $+113 \pm 417$ kcal と正の状態であった.

ある選手の血糖変動の例を図1に示した. 仕事あり日, 仕事なし日及び休日の3つパターンではトレーニング状況が異なることから血糖変動の状況も異なっていたが, いずれも夜間に低血糖の発生が認められた.

考 察

トレーニング実施日におけるエネルギー及び糖質摂取状況

対象者の仕事あり日及び仕事なし日のTEE(表2)は, 一般女性のTEE($2,086 \pm 312$ kcal)と比較して約1.5倍高値であった⁸⁾. この要因として, 中・高強度トレーニングの実施により1日のEEEが1,000kcalを超えていたことや, 仕事内容に身体活動レベルの比較的高い立位での作業が含まれていたためNEATも高値であったことがあげられる. しかし, 1日のエネルギーバランスは仕事あり日では約 -900 kcal, 仕事なし日では約 -540 kcalであり, とともに負の状態であった. BW 1kg当たりの糖質摂取量の全体平均値は, 長距離

ランナーが24時間で筋グリコーゲンを回復させるための推奨範囲($7 \sim 12$ g/kg BW/日)⁹⁾と同程度であったことから, 十分に糖質摂取量を摂取できているように見える. しかし, 9名中1名が10.6 g/kg BW/日を摂取しており, 残りの8名の摂取量は推奨範囲の下限值である7g/kg BW/日を下回っていた. 日本人持久系アスリートを対象とした先行研究¹⁰⁾では, 高強度持久系トレーニング後の24時間における筋グリコーゲンの回復には5 g/kg BW/日の糖質摂取では不十分であり, 7g/kg BW/日以上摂取が必要と報告されている. これらのことから, 対象者のほとんどがエネルギー及び糖質の不足状態であったと考えられる.

空腹時血糖値とトレーニング後の低血糖出現状況

日本人の糖尿病に罹患していない一般成人において, 空腹時に低血糖が起こることはあってもその頻度は非常に低いことが報告されている¹¹⁾. スポーツにおける相対的エネルギー不足(REDs)に関連する先行研究では日中のエネルギー及び糖質摂取量が少ないほど空腹時血糖値の低い者の割合が増加することが報告されている¹²⁾. 本研究で起床時に低血糖であったものは1名のみであった. しかし, 7日間の測定期間中に日中, 夜間を問わず9名中7名が低血糖を引き起こした. このチームの平均走行距離は先行研究により報告されている国際的な長距離ランナーの走行距離(130km \sim 220 km/週)¹³⁾と同程度であった. 練習量が多いにもか

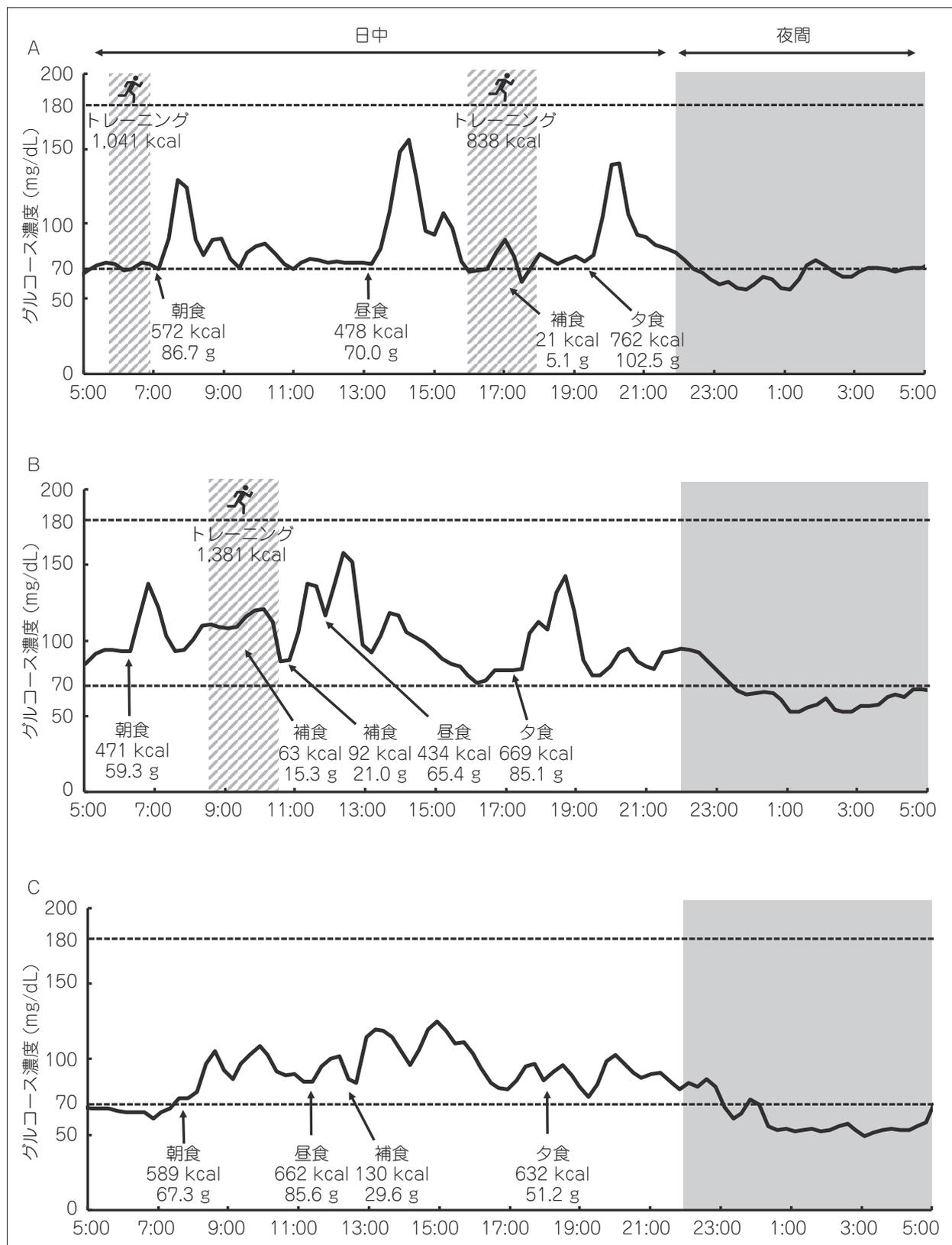


図1 仕事およびトレーニング状況別のグルコース濃度の変動の一例

A: 仕事あり日, B: 仕事なし日, C: 休日

上段: エネルギー摂取量

下段: 糖質摂取量

かわらず筋グリコーゲンを回復させるための推奨範囲の下限値 (7g/kg BW/日) の糖質を摂取できていない選手が8名いたことから、糖質摂取量が少ないために低血糖が生じたと考えられる。低血糖が発生したタイミングは朝練習後、午後練習後及び夜間であった。朝練習前に食事や飲料を何も摂取せずにトレーニングを行っていた場合に発生していたことから、トレーニング中のエネルギー源として糖質が利用され、体内で血糖維持のために利用できる糖質が少なくなったことにより練習直後に血糖が著しく低下し、低血糖が引き起こされたと推察される。選手は午後の練習までに朝食及び昼食を摂取しているものの、そのエネルギー摂取量は朝練習及び午後練習のエネルギー消費量を下回っており、低血糖は午後練習時にエネルギー不足状態となったタイミングで発生していた。また、エネルギー摂取量と同様に糖質摂取量も少なかったことから低血糖が発生したと考えられる。エネルギー不足や糖質不足はインスリンレベルの低下など内分泌機能に影響を及ぼし、循環血中のグルコースレベルを減少させたり、脂肪酸酸化や糖新生を増加させるなどの直接的な代謝への影響を及ぼすことが報告されている¹⁾。低血糖が認められなかった2名のうち1名は週の走行距離が50km以下と少なかったこと、もう1名は走行距離が150km程度と多いものの糖質摂取量も10.6g/kg BW/日と十分な量を摂取していたため低血糖の発生を防げたと考えられる。練習後の低血糖を防ぐためには、先行研究で示されている筋グリコーゲンの回復のために必要な糖質量⁹⁾を摂取することを目標にするだけでなく、個々のトレーニング状況に応じて練習前にエネルギー及び糖質源の補食をとるなどタイミングにも配慮する必要がある。

夜間低血糖について

すべての生活パターンにおいて低血糖の発生頻度は日中よりも夜間に高く、特に仕事なし日の夜間では平均11.8%と高値であった。夜間低血糖はアドレナリンの分泌を引き起こし、睡眠の質を低下させることが報告されている¹⁴⁾。リカバリーに影響を与える可能性があることを考慮すると、夜間低血糖を防ぐことは大切である。仕事なし日は午前中に高強度トレーニングを実施しており、仕事あり日と同様にTEEは高値であった。いずれもエネルギーバランスが負の状態であったことか

ら、7日間のうち6日間は継続したエネルギー不足状態であったと考えられる。内分泌への影響を検討した食事介入研究¹⁵⁾では、エネルギー不足の食事では糖質量も少なくなっている。また、EIが少なかった者は低血糖の頻度が高かったことも報告されている¹⁶⁾。エネルギー不足の原因の多くは糖質摂取量の不足である。エネルギー不足と糖質不足はそれぞれ独立した食事課題であるものの、しばしば同時に発生することが報告されている¹⁷⁾。本研究の仕事あり日及び仕事なし日については、TEEに見合ったエネルギー及び糖質の適切な摂取が行われていなかったことが、夜間の低血糖発生の一因であったと考えられる。

摂取した糖質は肝臓と筋肉にグリコーゲンとして貯えられる。肝グリコーゲンは、血糖を常に一定に保ちながら、肝臓の様々な代謝と機能を維持する生理的役割を果たしている。筋グリコーゲンは血糖維持には寄与せず、主に運動時の筋線維活動のために利用される。運動時に最初に筋肉を収縮させた時には筋グリコーゲンが利用され、筋グリコーゲンが減少してくると血糖がエネルギー源として利用される割合が増加する¹⁸⁾が、これは肝グリコーゲンを分解して血液中に放出されたものが主体となる。筋グリコーゲンはエネルギー摂取が足りない状態で70%VO₂maxにて75分間の走行を3日間継続すると著しく低下する¹⁹⁾。アスリートでは連続する高強度運動において枯渇または低下した筋グリコーゲンを速やかに回復させることが重要であり、特に運動後の筋におけるインスリン感受性が高まっている時の糖質摂取は、筋グリコーゲンの回復を効率的に行わせると考えられる。夜間は筋グリコーゲンの回復期間である運動後24時間に該当し⁹⁾、筋グリコーゲン合成が急速に行われるため²⁰⁾、摂取した糖質は筋グリコーゲン合成に優先的に利用された可能性がある。一方、血糖維持に貢献する肝グリコーゲンも高強度トレーニング後に低下し、糖質摂取量が不十分だと24時間でベースラインまで回復しないことが示されている²¹⁾。夜間低血糖が発生した対象者は、先行研究と比較して運動量が多く糖質摂取も不足していたことから肝グリコーゲンが減少し、夜間に低血糖が頻発したと考えられる。夜間低血糖が出現していることを本人は気づきにくい。特に休日はトレーニングを行わないことから栄養摂取量も少ない状態であった。このことから、アスリー

トが健康管理と生活の質を高めるためには、トレーニングにより消費した体内での糖質の生理的必要性に素早く応じられるように日頃から糖質を十分に含む適切なエネルギーの食事を摂取する必要がある。本研究で日中、夜間も含めて低血糖が出現したことは、体内におけるエネルギー及び糖質が不足した状態を示唆しており、トレーニングを実施していない休日であっても、筋グリコーゲンと肝グリコーゲンの回復、及び血糖維持のための適切なエネルギーと糖質の摂取をすることが明らかとなった。

事例検討

図1に空腹時血糖値が70mg/dLを下回っていた選手の一例を示した。仕事あり日(図1-A)では朝練習と午後練習のトレーニング中に低血糖の発生が確認された。この選手は朝練習前に補食などでエネルギーや糖質を摂取していなかった。トレーニングによって消費された筋グリコーゲンを効率的に回復させるためには運動後4時間以内にBW 1kgあたり1.0~1.2g/hの糖質を摂取することが推奨されている⁹⁾。しかし、対象者が朝練習終了後4時間以内に摂取したのは朝食のみであり、その後の昼食のエネルギー及び糖質摂取量が少なかったことも低血糖を招いた原因と考えられる。

仕事なし日(図1-B)では朝練習の後半に急激な血糖低下と夜間低血糖が確認された。朝練習前に朝食(エネルギー471kcal, 糖質59.3g)を摂取していたことから、練習の序盤においては血糖値が維持できていたと考えられる。しかし、朝練習のEEEは1,381kcalと高かったため、朝練習の後半にかけて筋グリコーゲンの消費が進むことで肝グリコーゲンがエネルギー源として消費され、急激な血糖値低下を招いた可能性が高い。この選手のTEEは3,198kcalに達していた一方で、EIは1,729kcalにとどまり、エネルギーバランスは著しく負の状態にあった。これは、体重増加を懸念して意図的にエネルギー及び糖質の摂取を制限していたことに起因している。このような慢性的なエネルギー及び糖質摂取制限は、日中の運動だけでなく、夜間の血糖値にも影響を及ぼすと考えられる。夜間は食事からの糖質の供給がないため、肝グリコーゲンに依存して血糖が維持される。しかし、日中の過度なエネルギー消費と不十分な補給により、肝グリコーゲンの蓄積が制限されていたと推察され、夜間において低血糖を誘発したと考

えられる。

トレーニングを実施しなかった休日(図1-C)においても夜間に低血糖が継続した。休日のエネルギーバランスは正の状態であったことから、十分なエネルギー状態が保たれていたように見える。しかし、前述した通り休日はアスリートにとって筋グリコーゲンの回復期間であり、4.4g/kg BW/日という対象者の糖質摂取量では十分な回復が得られなかったと推察される。その結果、肝グリコーゲンの蓄積が十分に行われず、夜間に血糖値を維持することが厳しくなり、低血糖が発生した可能性がある。

結語

本研究では、女性長距離ランナーを対象にCGMを用いて日常生活下の血糖変動を評価した結果、トレーニングの後半や夜間に低血糖の発生が確認された。公認スポーツ栄養士の指導や食事管理を受けることができず、消費量に見合うエネルギーと糖質の摂取ができていないアスリートは、CGMの使用によりエネルギー不足の早期発見ができることが明らかとなった。

謝辞

対象者の皆様に感謝いたします。

利益相反

本論文に関連し、開示すべき利益相反はなし。

著者貢献

阿藤 わかな：Date curation, Formal analysis, Investigation, Writing original draft, Writing review & editing

御所園 実花：Date curation, Investigation, Methodology, Writing review & editing

田畑 尚吾：Supervision, Writing review & editing

田口 素子：Methodology, Project administration, Supervision, Funding acquisition, Writing review & editing

文献

- 1) Mountjoy M, Ackerman KE, Bailey DM, et al. 2023 International Olympic Committee's (IOC) consensus statement on Relative Energy Deficiency in Sport (REDs). *Br J Sports Med.* 2023; 57: 1073-1097 doi: 10.1136/bjsports-2023-106994.
- 2) 田口素子, 本 国子. スポーツ栄養における「エネルギー不足」の概念とその生理的影響. *栄養学雑誌.* 2024; 82: 3-12.

- 3) Bowler AM, Whitfield J, Marshall L, et al. The use of continuous glucose monitors in sport: possible applications and considerations. *Int J Sport Nutr Exerc Metab.* 2022; 33: 121-132 doi: 10.1123/ijsnem.2022-0139.
- 4) Yoshitake R, Ogata H, Omi N. Blood glucose levels during decathlon competition: an observational study in timing of intake and competing time. *Metabolites.* 2024; 14: 47 doi: 10.3390/metabo14010047.
- 5) Shah VN, DuBose SN, Li Z, et al. Continuous glucose monitoring profiles in healthy nondiabetic participants: a multicenter prospective study. *J Clin Endocrinol Metab.* 2019; 104: 4356-4364 doi: 10.1210/jc.2018-02763.
- 6) Westerterp KR. Exercise, energy expenditure and energy balance, as measured with doubly labelled water. *Proc Nutr Soc.* 2018; 77: 4-10 doi: 10.1017/S0029665117001148.
- 7) 田口素子, 高田和子, 大内志織, 他. 除脂肪量を用いた女性競技者の基礎代謝量推定式の妥当性. *体力科学.* 2011; 60: 423-432.
- 8) 高田和子, 別所京子, 田中茂穂, 他. 日本人成人における秤量法によるエネルギー摂取量の推定精度. *栄養学雑誌.* 2011; 69: 57-66.
- 9) Burke LM, Kiens B, Ivy JL. Carbohydrates and fat for training and recovery. *J Sports Sci.* 2004; 22: 15-30 doi: 10.1080/0264041031000140527.
- 10) Motonaga K, Kondo E, Osawa T, et al. Effect of different carbohydrate intakes within 24 hours after glycogen depletion on muscle glycogen recovery in Japanese endurance athletes. *Nutrients.* 2022; 14: 1320 doi: 10.3390/nu14071320.
- 11) Tanaka K, Higuchi R, Mizusawa K, et al. Fasting biochemical hypoglycemia and related-factors in non-diabetic population: Kanagawa Investigation of Total Check-up Data from National Database-8. *World J Diabetes.* 2021; 12: 1131-1140 doi: 10.4239/wjd.v12i7.1131.
- 12) Melin A, Tornberg ÅB, Skouby S, et al. Energy availability and the female athlete triad in elite endurance athletes. *Scand J Med Sci Sports.* 2015; 25: 610-622 doi: 10.1111/sms.12261.
- 13) Haugen T, Sandbakk Ø, Seiler S, et al. The training characteristics of world-class distance runners: an integration of scientific literature and results-proven practice. *Sports Med Open.* 2022; 8: 46 doi: 10.1186/s40798-022-00438-7.
- 14) Flockhart M, Larsen FJ. Continuous glucose monitoring in endurance athletes: interpretation and relevance of measurements for improving performance and health. *Sports Med.* 2024; 54: 247-255 doi: 10.1007/s40279-023-01910-4.
- 15) Koehler K, Hoerner NR, Gibbs JC, et al. Low energy availability in exercising men is associated with reduced leptin and insulin but not with changes in other metabolic hormones. *J Sports Sci.* 2016; 34: 1921-1929 doi: 10.1080/02640414.2016.1142109.
- 16) Thomas F, Pretty CG, Desai T, et al. Blood glucose levels of subelite athletes during 6 days of free living. *J Diabetes Sci Technol.* 2016; 10: 1335-1343 doi: 10.1177/1932296816648344.
- 17) Lodge MT, Ward-Ritacco CL, Melanson KJ. Considerations of low carbohydrate availability (LCA) to relative energy deficiency in sport (RED-S) in female endurance athletes: a narrative review. *Nutrients.* 2023; 15: 4457 doi: 10.3390/nu15204457.
- 18) Coyle EF. Substrate utilization during exercise in active people. *Am J Clin Nutr.* 1995; 61: 968S-979S doi: 10.1093/ajcn/61.4.968S.
- 19) Kojima C, Ishibashi A, Tanabe Y, et al. Muscle glycogen content during endurance training under low energy availability. *Med Sci Sports Exerc.* 2020; 52: 187-195 doi: 10.1249/MSS.0000000000002098.
- 20) Murray B, Rosenbloom C. Fundamentals of glycogen metabolism for coaches and athletes. *Nutrition Reviews.* 2018; 76: 243-259 doi: 10.1093/nutrit/nuy001.
- 21) Iwayama K, Tanabe Y, Tanji F, et al. Diurnal variations in muscle and liver glycogen differ depending on the timing of exercise. *The Journal of Physiological Sciences.* 2021; 71: 35 doi: 10.1186/s12576-021-00821-1.

(受付 : 2025 年 5 月 16 日, 受理 : 2025 年 8 月 19 日)

Glycemic variability and nutritional intakes in female long-distance runners under real-life conditions

Ato, W.^{*1}, Goshozono, M.^{*2}, Tabata, S.^{*3}, Taguchi, M.^{*4}

^{*1} School of Sport Sciences, Waseda University

^{*2} Research Institute for Sports Nutrition, Waseda University

^{*3} Tabata Clinic

^{*4} Faculty of Sport Sciences, Waseda University

Key words: Continuous Glucose Monitoring, athlete, carbohydrate

[Abstract] This study investigated the daily glycemic fluctuations in female long-distance runners using continuous glucose monitoring (CGM) under real-life conditions. Nine athletes who train six days per week participated in the study. CGM measurements were conducted over seven consecutive days during a regular training period. Physical activity levels were assessed using a triaxial accelerometer, and nutritional intake was evaluated through dietary records. Based on the activity status, data were categorized into “working days with training”, “non-working day with training”, and “rest day without training”. Results revealed that total energy expenditure was elevated on both working and non-working day with training, while energy and carbohydrate intakes were consistently inadequate. Consequently, post-training hypoglycemia was frequently observed on training days. Furthermore, nighttime hypoglycemia occurred on rest days. These results suggest that carbohydrate intake may have been preferentially utilized for muscle glycogen resynthesis following exercise, resulting in an inadequate supply for maintaining blood glucose levels. Thus, endurance athletes should avoid risks of energy and carbohydrate deficiencies. In cases where athletes do not have access to certified sports dietitians for guidance and dietary management, the use of CGM may facilitate early detection of energy deficiency and enable athletes to initiate timely nutritional interventions.