

朝食摂取3時間後における運動前の糖質摂取量の相違が運動誘発性低血糖に及ぼす影響

八田 早那子^{1,2}, 藤江 衣織¹, 東郷 将成³, 柴田 啓介^{1,4}, 木村 宣哉⁴,
瀧澤 一騎⁵, 神林 勲⁶, 山口 太一^{1,4*}

Effects of pre-exercise ingestion of different amounts of carbohydrate at three hours after feeding breakfast on exercise-induced hypoglycemia

Sanako Hatta^{1,2}, Iori Fujie¹, Masanari Togo³, Keisuke Shibata^{1,4}, Nobuya Kimura⁴,
Kazuki Takizawa⁵, Isao Kambayashi⁶ and Taichi Yamaguchi^{1,4*}

¹酪農学園大学大学院酪農学研究科食品栄養科学専攻, 〒069-8501 北海道江別市文京台緑町582 (*Food and Nutrition Science, Graduate School of Dairy Sciences, Rakuno Gakuen University, 582 Bunkiyodai-Midorimachi, Ebetsu, Hokkaido 069-8501, Japan*)

²医療法人社団網走中央病院, 〒093-0006 北海道網走市南6条東1丁目7 (*Abashiri Central Hospital, 7 Minami-6 Higashi-1, Abashiri, Hokkaido 093-0006, Japan*)

³旭川大学短期大学部生活学科食物栄養専攻, 〒079-8501 北海道旭川市永山3条23丁目1-9 (*Food and Nutrition Major, Department of Life Sciences, Asahikawa University Junior College, 3-23-1-9 Nagayama, Asahikawa, Hokkaido 079-8501, Japan*)

⁴酪農学園大学農食環境学群食と健康学類, 〒069-8501 北海道江別市文京台緑町582 (*Department of Food Science and Human Wellness, College of Agriculture, Food and Environment Sciences, Rakuno Gakuen University, 582 Bunkiyodai-Midorimachi, Ebetsu, Hokkaido 069-8501, Japan*)

⁵一般社団法人身体開発研究機構, 〒060-0061 北海道札幌市中央区南1条西5丁目 (*Institute of Physical Development Research, Minami-1, Nishi-5, Chuo-ku, Sapporo, Hokkaido 060-0061, Japan*)

⁶北海道教育大学札幌校, 〒002-8501 北海道札幌市北区あいの里5条3丁目1-3 (*Department of Education, Hokkaido University of Education Sapporo, 1-3 Ainosato 5-3, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 002-8501, Japan*)

Received: March 2, 2021 / Accepted: April 26, 2021

Abstract The purpose of this study was to compare effects of different amounts of carbohydrate (CHO) in beverage on plasma glucose (GLU) concentration during exercise after feeding breakfast. Seven healthy Japanese male subjects performed 30-min cycling at an intensity on the 75% of maximal load at 3-h after feeding breakfast under 3 types of CHO (0 g, 30 g and 150 g) beverage conditions. The subjects ingested 500 mL of beverage dissolved each amount of glucose at 30-min before the exercise. The GLU concentrations were measured at 35- and 10-min before the exercise and every 5-min during the exercise. The minimum GLU concentrations under the 30 g condition for all subjects were lower than a criterion for hypoglycemic (72 mg / dL). The mean value also fell below the criterion at from 10- to 20-min during exercise. The minimum GLU concentration under the 150 g condition of only one subject was lower than the criterion, but the mean value did not fall below the criterion. Significant negative correlations were found between the subjects' maximum oxygen uptake ($\dot{V}O_2\text{max}$) and the decreases in GLU concentration from maximum to minimum under both the 30 g ($r = -0.947$, $p < 0.01$) and 150 g conditions ($r = -0.884$, $p < 0.01$). This study clarified that feeding breakfast at 3-h before the exercise followed by the 30 g CHO beverage ingestion at 30 min before the exercise induced exercise-induced hypoglycemia, and that the subjects with higher $\dot{V}O_2\text{max}$ had the greater decreases in GLU concentration.

Jpn J Phys Fitness Sports Med, 70(4): 247-256 (2021)

Keywords : hypoglycemic, plasma glucose, cycling, sports nutrition, maximal oxygen uptake

緒 言

持久的な運動の主要なエネルギー源は糖質ならびに脂質である¹⁾。このうち、糖質の体内貯蔵量は脂質のそれに比べて少ない。そのため、運動前日ならびに運動当日には糖質を積極的に摂取しなければならない。持久的な運動前の糖質摂取方法については、運動の強度や時間によって目安量が示されている。例えば、90分未満の持久的な運動に向けては、前日までの24時間に体重1 kgあたり7~12 g、当日は運動1~4時間前に体重1 kgあたり1~4 gの糖質を摂取することが推奨されている²⁾。また、運動当日の糖質摂取に関しては、摂取タイミングについても注意喚起がなされており、運動開始30~45分前の糖質摂取は控えるようにとされている。なぜなら、運動30~45分前に糖質を摂取して運動を開始すると、運動誘発性低血糖³⁻⁶⁾を生じる恐れがあるからである。運動誘発性低血糖が生じると、脂肪分解の抑制や糖質利用の亢進を引き起こし、持久的な運動パフォーマンスを低下させる可能性がある⁷⁾。

これまで運動前の糖質摂取が運動誘発性低血糖に及ぼす影響を検討した研究の多く³⁻⁶⁾は欧米人を対象としており、欧米人と比べてインスリン分泌能が低い日本人⁸⁾でも運動誘発性低血糖が生じるか否かは不明であった。この先行研究における課題を解決するべく、先頃、Kondoら⁹⁾は日本人を対象に、絶食条件に加え、朝食を摂取した条件のもと運動開始30分前に150 gのブドウ糖を含む飲料を摂取させ、運動誘発性低血糖の発生の有無を検討した。その結果、血糖値の平均値では、両条件ともに運動誘発性低血糖は生じなかった。一方で、被験者個人の血糖値の変動を観察すると、両条件ともに運動誘発性低血糖を生じた被験者がおり、絶食条件ではインスリン初期分泌能が高い者で、また、Kondoらは関連の別の報告¹⁰⁾において、朝食摂取条件では最大酸素摂取量 (maximum oxygen uptake: $\dot{V}O_2\text{max}$) が高い者で、運動誘発性低血糖が生じたことを確認した。さらに、Koma and Terasawa¹¹⁾は日本人を対象に、朝食摂取後、運動開始前30分前に被験者の体重1 kgあたり1.5 g (被験者の平均体重が 62.7 ± 4.9 kgであったことから 94.1 ± 7.4 g)のブドウ糖を含む飲料を摂取させ、運動誘発性低血糖の発生の有無を確認したところ、同様に血糖値の平均値では運動誘発性低血糖は生じなかったことを報告している。

このようにKondoら⁹⁾、近藤ら¹⁰⁾およびKoma and Terasawa¹¹⁾の報告は日本人を対象に朝食摂取条件下において検討を行い、多くの示唆を示した点で意義深い研究であったものの、運動開始前に摂取された150 gあるいは94.1 gという糖質量は運動直前の摂取量としては過多であったように思える。例えば、運動時に頻繁に摂取

されるスポーツドリンクに含まれる糖質量は、500 mLのペットボトル飲料1本で20~30 g程度である。500 mLのスポーツドリンクのペットボトル飲料は、熱中症予防の観点から運動前に必要とされている250~500 mL¹²⁾の水分摂取量を満たし、かつ、1~2時間の中高強度の持久的な運動前や運動中に摂取すべき糖質量である1時間あたり30 g¹³⁾を摂取できることから運動直前に飲用されている。よって、日本人を対象に、朝食摂取後、運動開始前に500 mLのペットボトル飲料1本のスポーツドリンクと同等量の糖質を摂取した場合に運動誘発性低血糖が発生するの否かについて検討を行うことは、本邦における運動誘発性低血糖に関する重要な研究課題であると考えられる。

そこで本研究では、日本人を対象に運動開始3時間前に朝食を摂取した後、運動開始30分前にスポーツドリンクと同等量の30 gのブドウ糖を含む飲料を摂取することが運動中の血糖値に及ぼす影響を、150 gのブドウ糖を含む飲料摂取条件およびブドウ糖を含まない(0 g)飲料摂取条件と比較することを目的とした。なお、Jentjensら³⁾は欧米人を対象とした絶食下の運動誘発性低血糖に関する研究において、運動開始45分前の0 g、25 g、75 gおよび200 gの糖質摂取によって運動中の血糖値の変動には相違がなかったことを報告している。また、前述の通り、日本人を対象に朝食摂取後の運動開始前の糖質飲料摂取が運動中の血糖値の変動に及ぼす影響を検討したKondoらの研究⁹⁾では、糖質量150 gにおいて、Koma and Terasawaの研究¹¹⁾では、糖質量94.1 gにおいて、全被験者の血糖値の平均値でみると、運動誘発性低血糖は発生しなかった。よって、本研究においても、朝食摂取後の運動開始前の150 gの糖質飲料摂取条件だけでなく、30 gの糖質飲料摂取条件においても運動中の血糖値の平均値では運動誘発性低血糖は観察されないと仮説のもと検討を行った。

方 法

被験者 被験者は本学の課外活動団体で競技種目(バスケットボール2名、硬式野球2名、自転車ロード1名、バドミントン1名、およびバレーボール1名)を日常的に行ない、かつ本学のトレーニングセンターに定期的に通い、有酸素性トレーニングおよびレジスタンストレーニングの両方を行なっている健康な日本人男子大学生7名[年齢: 20.4 ± 1.0 歳, 身長: 171.9 ± 4.3 cm, 体重: 69.3 ± 5.3 kg, 体脂肪率: $11.6 \pm 2.8\%$, 筋肉量: 58.0 ± 3.6 kg, 体重当たりの $\dot{V}O_2\text{max}$: 50.5 ± 7.5 mL/kg/分, 最大運動負荷(Wmax): 261.4 ± 48.0 W, 体重当たりのWmax: 3.8 ± 0.7 W/kg]であった。被験者のサンプルサイズは、主要な測定項目である血糖値の測定値(3条件×8時点)を鑑み、水本および竹内の指摘¹⁴⁾に従い、統計ソフト

G*Power 3.1 (Allgemeine Psychologie und Arbeitspsychologie, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf) を用いて、最少人数7名と算出し、決定した。全ての被験者に対し事前に実験の目的、内容および危険性について十分に説明を行い、書面にて実験参加の同意を得た。実験実施前のスクリーニングとして、喫煙、糖尿病の罹患、服薬の有無を確認したが、該当する被験者はいなかった。なお、本研究は酪農学園大学における人を対象とする医学系研究倫理審査委員会により承認(15-9)を得て実施した。

実験の概要 全ての被験者は、事前に身長、体重、体組成の測定および自転車運動を用いた多段階漸増負荷試験を行い、 $\dot{V}O_2\max$ および W_{\max} の決定を行った。本実験では、被験者は、運動実施前日の22時までに指定した夕食(エネルギー:921 kcal, たんぱく質:20.0 g, 脂質:17.1 g, 炭水化物:171.2 g)を摂取し、運動当日の運動開始3時間前までに、指定した朝食(エネルギー:760 kcal, たんぱく質:24.6 g, 脂質:24.9 g, 炭水化物:109.1 g)を摂取した。指定した食事は、Burke²⁾による運動前の糖質摂取目安量を満たす食事とし、夕食は24時間で体重1 kgあたり7~12 gの糖質量を3食分で除した糖質量(体重1 kgあたり2.3~4 g)、朝食は体重1 kgあたり1~4 gの糖質量を満たす食事とした。

実験当日は(Fig. 1)、実験室来室後、30分程度安静を保持したのち、安静時(-35分)の採血を行った。採血終了後、糖質飲料を2分以内に摂取した。飲料摂取条件として、同一の飲料水500 mLにブドウ糖を溶解しない0 g条件、30 gおよび150 gのブドウ糖を溶解した30 g条件、150 g条件の3条件を設定した。各被験者の3条件の実験は別日に実施し、実施順序はランダム化した。糖質飲料摂取後、20分間の座位安静状態を保持した。20分の安静後(-10分)に採血を行い、採血終了後、自転車エルゴメーターに乗り、ウォーミングアップを行っ

た。5分間のウォーミングアップ後、75% W_{\max} 強度で30分間の自転車こぎ運動を行った。運動中は運動開始5分より5分ごとに指先から血糖値の測定を行った。さらに、運動開始15分、30分後は血糖値の測定に加え、肘正中皮静脈から採血を行った。また、脱水を予防するために決められた時点で水分摂取を行った。

なお、全ての被験者は各条件の実験を1週間以上の期間をおき、被験者のサーカディアンリズムを考慮し、時間帯に実施した。また、被験者には、実験期間中、標準的な食事、運動および睡眠を促し、実験実施24時間前からは激しい運動や飲酒、カフェイン摂取の禁止を促した。すべての実験は、室温24°C、相対湿度50%に設定した実験室内で実施した。

事前測定 被験者は、身長を測定し、インピーダンス式体組成計(BC-622, 株式会社タニタ)を用いて体重および体組成の測定を行った。その後、心拍計のトランスミッター(HIトランスミッター, Polar Electro Oy)および呼気ガス分析装置(AE-300S, ミナト医科学株式会社)のマスクを装着した。自転車エルゴメーター上で3分間の安静状態を保持したのちに30 Wで3分間のウォーミングアップを実施した。その後、回転数を60 rpmに維持した状態で1分ごとに15 Wずつ漸増するステップ負荷にて疲労困憊まで追い込んだ。疲労困憊の判断基準¹⁵⁾は、1. 回転数が50 rpmを下回った時点、2. 最大心拍数が(220-年齢)を超えた時点、3. 被験者が運動継続困難と判断した時点とした。呼気ガス採取法にて10秒毎に得られた酸素摂取量の最大値を $\dot{V}O_2\max$ 、さらにその時の負荷量を W_{\max} とした。各ステップにおける負荷と $\dot{V}O_2$ の関係から、運動で用いる W_{\max} の相対値、30%、40%、50%、60%、70%および75%に相当する強度を算出した。

試験飲料 試験飲料はブドウ糖を含まない0 gの飲料水

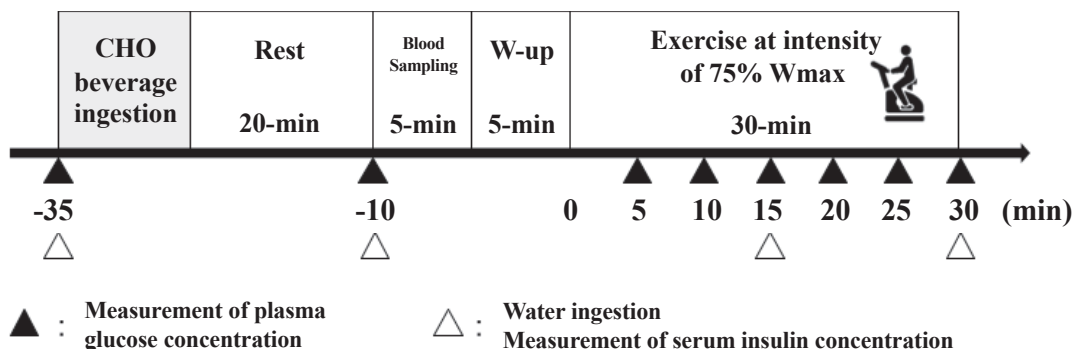


Fig. 1 Exercise protocol and timing of measurements.

(森の水だより 日本アルプス, 日本コカ・コーラ株式会社)と30 g, 150 gのブドウ糖(扶桑薬品工業株式会社)を500 mLの飲料水に溶解したものとした。よって, 30 gおよび150 g条件における糖質飲料の糖質の濃度はそれぞれ6%および30%であった。飲料の摂取時間は, 2分以内とし, 飲料の提供前の温度は0 g条件で $16.5 \pm 0.7^\circ\text{C}$, 30 g条件で $16.6 \pm 0.5^\circ\text{C}$, 150 g条件で $16.2 \pm 0.9^\circ\text{C}$ であった。

自転車漕ぎ運動 被験者は自転車エルゴメーターを用いて, 5分間のウォーミングアップを行った。回転数は60 rpmに維持し, 30%Wmax強度から1分ごとに, 40%, 50%, 60%, 70%Wmax強度の負荷に漸増させた。5分間のウォーミングアップ終了直後に75%Wmax強度の負荷に設定し, 回転数を60 rpmに維持したまま30分間の運動を実施した。75%Wmax強度における30分間の運動は, 40%および55%Wmax強度における同時間の運動よりも筋グリコーゲンならびに血糖をエネルギー源として利用するとされている¹⁶⁾。また, 本研究における30 gの糖質飲料条件は, 本来1~2時間継続される運動を想定し¹³⁾, 糖質必要量を設定した条件であるが, 運動開始初期の血糖値変動を確認することが目的であったため, 実験における運動時間は30分間とした。なお, 脱水による影響を除外するため, 熱中症予防ガイドブック¹²⁾に基づき, 各条件で-35分, -10分, 15分, 30分時の肘正中皮静脈採血前に250 mLの水分摂取を行った。

血液生化学分析 血液生化学分析は, 糖質代謝関連項目として, 血糖値およびインスリン濃度を測定した。血糖値はグルテストNeoスーパー(GT-1820, 株式会社三和化学研究所)を用いて験者が指先血より測定した。インスリン濃度は保健師あるいは看護師が肘正中皮静脈より採血を行い, 分析については外注依頼(札幌臨床検査センター株式会社)した。

統計解析 本研究の結果は, 平均値 \pm 標準偏差(Mean \pm SD)で示した。各指標の推移の摂取条件間の比較は, 重複測定の実験設計分散分析(摂取条件 \times 測定時間)を用い, 交互作用の有無を確認した。交互作用が認められた場合および各指標の測定値の摂取条件間の比較には, 等分散および正規性の認められたデータについては, 繰り返しのある一元配置分散分析後にTukey-Kramer法を用いて多重比較検定を行った。また, 等分散あるいは正規性の認められないデータについては, Friedman検定後に, Scheffe法を用いて多重比較検定を行った。各指標間の相関関係はPearsonの相関分析を用いて検討した。また, 0 g条件において, 低血糖の基準値(72 mg/dL)を下回った群を低血糖群, 基準値を下回らなかった群を正常血糖群とし, 2群間の血糖値の差の検定には

Studentのt検定, $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$ およびインスリン濃度の差の検定にはWelchのt検定を用いた。すべての統計解析は, 統計ソフトエクセル統計Statcel3(オーエムエス出版)を使用し, いずれも危険率5%未満を有意水準とした。

結果

血糖値およびインスリン濃度 血糖値の平均値の経時変化をFig. 2に, 0 g条件, 30 g条件, 150 g条件における各被験者の最大血糖値から最低血糖値までの推移をFig. 3-A, B, Cに示した。血糖値は30 g条件, 150 g条件で-10分時に最高値に到達し, 運動開始後低下した。30 g条件では, 10~20分間において平均値が低血糖の基準値(72 mg/dL)を下回った(Fig. 2)。また, 血糖値の最低値が出現する時間には個人差が認められたものの, すべての被験者が低血糖の基準値を下回った(Fig. 3-B)。一方, 150 g条件では1名の被験者のみ10分間において基準値を下回ったが(Fig. 3-C), 平均値では低血糖の基準値を下回らなかった(Fig. 2)。0 g条件の平均値は, -35分よりほぼ同水準で推移し, 低血糖の基準値は下回らなかったものの, 3名の被験者で基準値を下回った(Fig. 3-A)。血糖値の時間と条件に有意な交互作用が認められ($F=7.783, p<0.01$), 多重比較検定の結果, -10分間において, 30 g条件および150 g条件が0 g条件よりも有意に($p<0.01$)高値を示した。また, 20~30分間

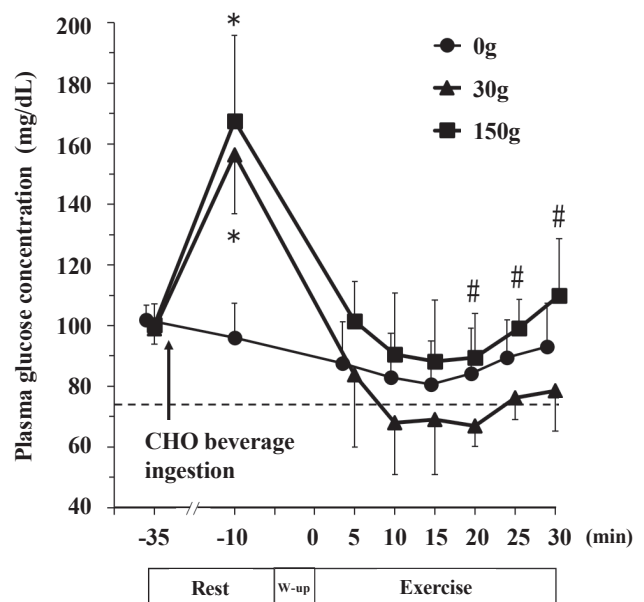


Fig. 2 Time courses of plasma glucose concentration. The dashed line was showing hypoglycemia level (plasma glucose of ≤ 72 mg/dL). * $p<0.01$: Significantly different between 0g and 30g or 150g of carbohydrate beverage conditions. #: $p<0.05$: Significantly different between 30g and 150g of carbohydrate beverage conditions.

150 g条件が30 g条件よりも有意に ($p < 0.05$) 高値を示した。なお、低血糖の基準値を下回る被験者が観察されたものの、運動中に体調不良を訴えるものはなかった。

インスリン濃度の平均値の経時変化をFig. 4に示した。インスリン濃度も血糖値と同様に、30 g条件、150 g条件で-10分時に最高値に到達し、15分時に低下した。イ

ンスリン濃度の経時変化は条件間で有意な交互作用が認められ ($F = 9.77, p < 0.01$)、30 g条件が0 g条件と比較して-10分時に有意に ($p < 0.01$) 高値であった。さらに、150 g条件は0 g条件と比較して-10分時 ($p < 0.01$)、15分時 ($p < 0.05$) において有意に高値を示した。また、150 g条件では30分時に30 g条件と比較して有意

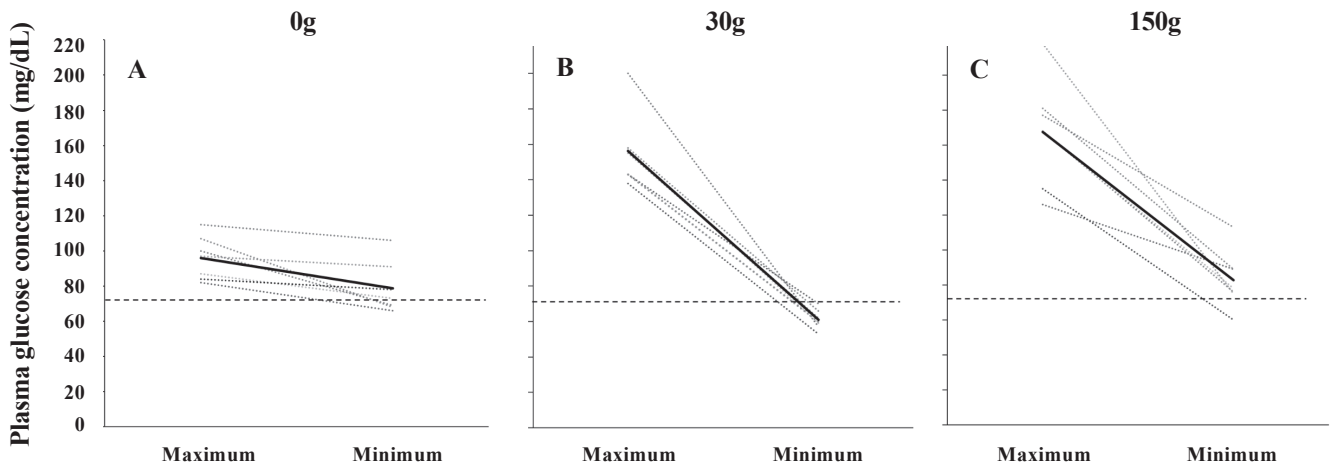


Fig. 3 Changes in mean values and individual subject's plasma glucose from maximum to minimum in 0g (A), 30g (B) and 150g (C) of carbohydrate beverage conditions. The bold lines were showing changes in mean values. The dotted lines were showing individual subject's changes. The dashed lines were showing hypoglycemia level (plasma glucose of ≤ 72 mg/dL).

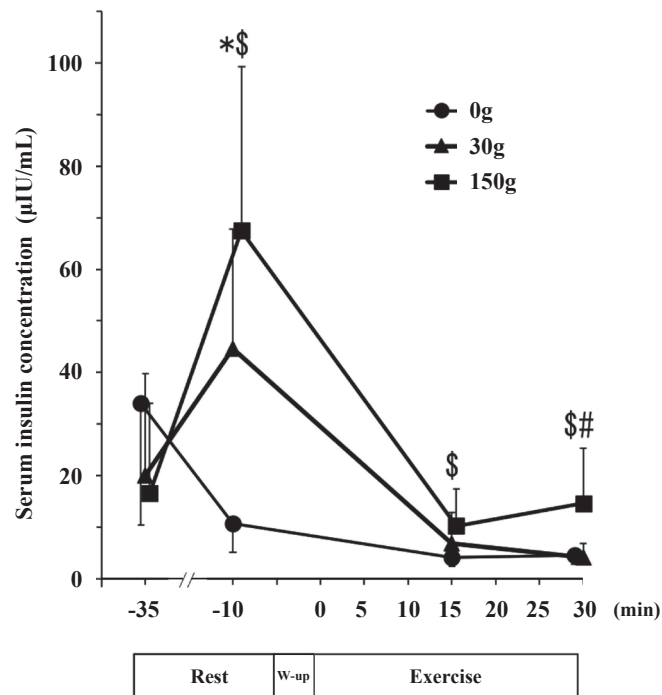


Fig. 4 Time courses of serum insulin concentration.

*: $p < 0.01$: Significantly different between 0g and 30g of carbohydrate beverage conditions.

\$: $p < 0.05$: Significantly different between 0g and 150g of carbohydrate beverage conditions.

#: $p < 0.05$: Significantly different between 30g and 150g of carbohydrate beverage conditions.

に ($p < 0.05$) 高値を示した。

30 g条件および150 g条件におけるインスリン最大濃度と血糖値減少量との関係 30 g条件, 150 g条件における-10分時のインスリン最大濃度と血糖値の最大値から最小値への減少量との関係をFig. 5-A, Bに示した。30 g条件, 150 g条件ともにインスリン最大濃度と血糖値減少量との間に有意な相関関係 (30 g条件: $r = 0.163$, 150 g条件: $r = 0.210$) は認められなかった。

体重当たりの $\dot{V}O_2\text{max}$ およびWmaxと30 g条件および150 g条件における血糖値減少量との関係 体重当たりの $\dot{V}O_2\text{max}$ と30 g条件, 150 g条件における血糖値減少量との関係をFig. 6-A, Bに示した。30 g条件, 150 g条件ともに体重当たりの $\dot{V}O_2\text{max}$ と血糖値減少量との間に有意な負の相関関係 (30 g条件: $r = -0.947$, $p < 0.01$, 150 g条件: $r = -0.884$, $p < 0.01$) が認められた。同様に, 30 g条件, 150 g条件ともに体重当たりのWmaxと血糖値減少量との間にも有意な負の相関関係 (30 g条件: $r = -0.984$,

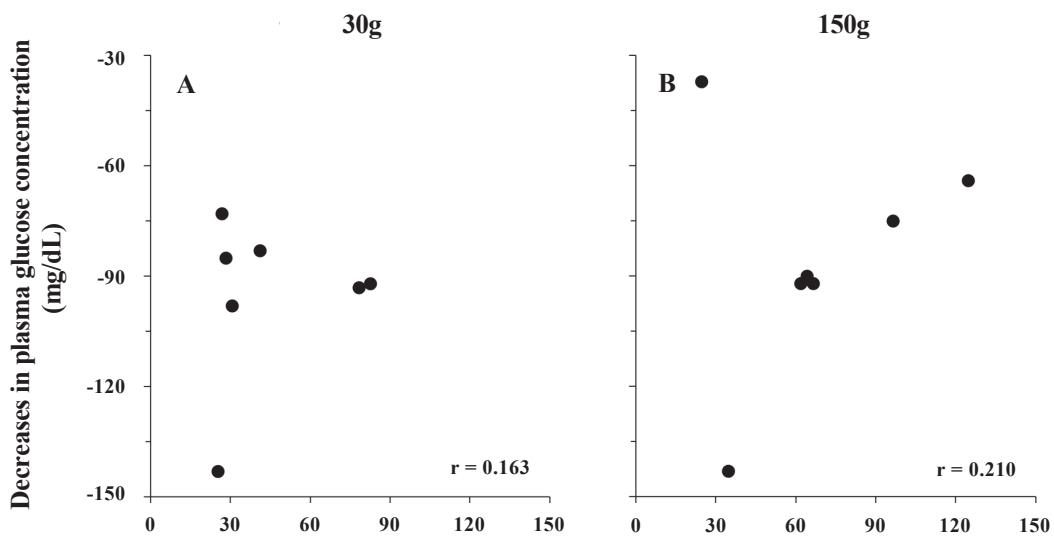


Fig. 5 Relationships between maximum insulin concentrations and changes in plasma glucose concentration from maximum to minimum in 30g (A) and 150g (B) of carbohydrate beverage conditions.

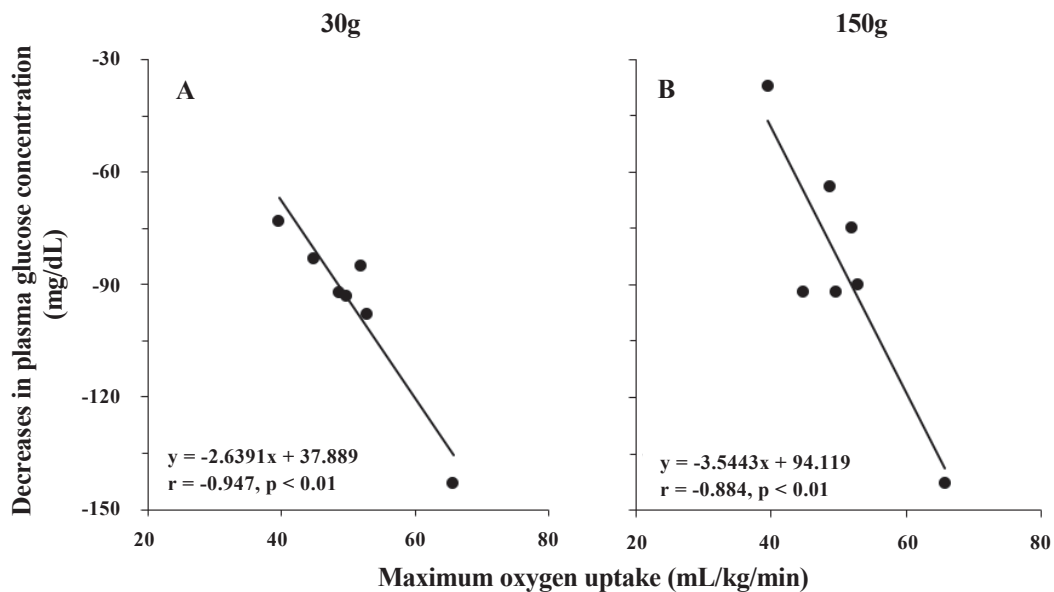


Fig. 6 Relationships between maximum oxygen uptakes ($\dot{V}O_2\text{max}$) and changes in plasma glucose concentration from maximum to minimum in 30g (A) and 150g (B) of carbohydrate beverage conditions.

$p < 0.01$, 150 g条件: $r = -0.881$, $p < 0.01$) が認められた (図表なし).

体組成と30 g条件および150 g条件における血糖値減少量との関係 体脂肪率と30 g条件, 150 g条件における血糖値減少量との間には有意な相関関係 (30 g条件: $r = 0.128$, 150 g条件: $r = 0.193$) は認められなかった (図表なし). 同様に, 筋肉量と30 g条件, 150 g条件における血糖値減少量との間にも有意な相関関係 (30 g条件: $r = 0.247$, 150 g条件: $r = -0.007$) は認められなかった (図表なし).

0g条件における低血糖群と正常血糖群の体重当たりの $\dot{V}O_2\max$, 血糖値およびインスリン濃度の比較 0g条件において, 低血糖の基準値を下回った低血糖群と基準値を下回らなかった正常血糖群の $\dot{V}O_2\max$, -35分時の血糖値および-10分時のインスリン濃度の比較をFig. 7-A, B, Cに示した. 低血糖群では, 正常血糖群よりも $\dot{V}O_2\max$ が低い傾向 ($p = 0.06$), -35分時の血糖値および-10分時のインスリン濃度が高い傾向 (血糖値: $p = 0.16$, インスリン濃度: $p = 0.27$) を示した.

考 察

本研究の結果において, 150 g条件の血糖値は, 1名の被験者が運動中に低血糖の基準値(72 mg/dL)を下回ったものの, 平均値は下回らなかった (Fig. 2, Fig. 3-C). Kondoら⁹⁾の研究においても, 本研究と同様に, 朝食を摂取し, 運動開始30分前に150 gの糖質飲料を摂取した場合には, 運動中の血糖値が, 低血糖の基準値を下回っ

た被験者がいたものの, 平均値では下回らなかったことが報告されている. よって, 本研究における150 g条件の結果はKondoら⁹⁾の研究の結果と一致したと言える. 一方, 本研究の30 g条件では, 全被験者において運動中に血糖値が低血糖の基準値を下回り, 平均値においても10~20分時に低血糖の基準値を下回った (Fig. 2, Fig. 3-B). 我々は, Jentjensらの研究³⁾において運動前の糖質摂取量の相違が運動中の血糖値変動に影響を及ぼさなかったこと, Kondoらの研究⁹⁾およびKoma and Terasawaの研究¹¹⁾において, それぞれ運動直前の150 gおよび94.1 gの糖質飲料摂取によって運動中の血糖値の平均値は低血糖の基準値を下回っていなかったことから, 本研究の30 g条件においても, 150 g条件とほぼ同様に血糖値が推移し, 運動中の血糖値は低血糖の基準値を下回らないと仮説を立てた. しかしながら, この仮説に反し, 500 mLのペットボトル1本分のスポーツドリンクと同等の糖質量を含む30 gの糖質飲料を運動開始30分前に摂取することで運動中の血糖値は低血糖の基準値を下回った. 本研究の結果から, 日本人を対象とした朝食摂取3時間後における運動開始30分前の30 gの糖質飲料摂取は, 運動誘発性低血糖を生じさせることが示唆される.

本研究において150 g条件では運動誘発性低血糖が生じなかったにも関わらず, 30 g条件では生じた要因として糖質飲料の糖質濃度の相違が胃排出量に影響を及ぼした可能性が考えられる. 30 gおよび150 g条件における糖質飲料の糖質の濃度は6%および30%であった. 6%と30%の糖質濃度の飲料を運動開始30分前に単回摂取し, その後の30分の安静時および運動中の胃排出量について検討した研究はない. 一方, 4.5%および17%の糖質

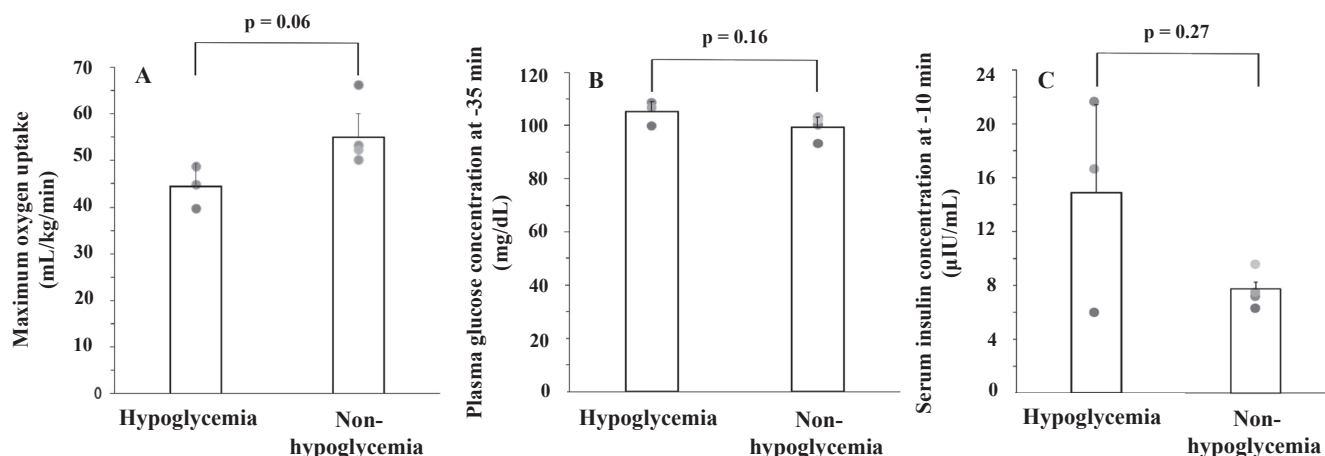


Fig. 7 Comparisons of maximum oxygen uptakes ($\dot{V}O_2\max$) (A), plasma glucose concentrations at -35 minutes point (B) and serum insulin concentrations at -10 minutes point between hypoglycemia subjects ($n = 3$) and non-hypoglycemia subjects ($n = 4$) in 0g of carbohydrate beverage conditions. The dots were showing individual subject's values. The bar graphs were mean values in hypoglycemia and non-hypoglycemia subjects.

濃度の飲料を運動開始時, 運動20分, 40分および60分時に摂取し, 70% $\dot{V}O_2\text{max}$ 強度の80分の運動後の胃排出量について検討した研究¹⁷⁾では, 糖質濃度4.5%では摂取量の95%の容量が胃から排出したのに対し, 糖質濃度17%では60%しか排出せず, 40%が胃に留まったことが報告されている. 糖質の濃度が高まるほど単位時間あたりの胃排出量は減少することから, 本研究における糖質濃度30%の150 g条件では, 飲料が-10分時でも胃に残っており, 運動中も緩徐に胃排出がなされた可能性が考えられる. その結果, 150 g条件では血糖値が-10分時から15分時まで30 g条件よりも高値傾向で推移し, 20~30分時までは有意に高値で推移したことが示唆される. 今後は, 糖質飲料にアルギン酸を混合するなど, 胃排出速度の低下を抑えるような工夫¹⁸⁾をし, 本研究と同様の検討を行うことで, 本研究の結果が糖質飲料の濃度の相違によって生じたか否かについて明らかにすることができると考えられる. また, 運動誘発性低血糖は糖質飲料濃度が何%以下の場合で生じるのかを明らかにすることも重要な課題であろう.

本研究において運動誘発性低血糖の発生要因を明らかにするために, 各被験者の血糖値の最大値から最小値への減少量とインスリン濃度の最大値との関係を検討したが, 30 g条件, 150 g条件ともに, 有意な相関関係は認められなかった (Fig. 5-B, C). 近藤ら¹⁰⁾は, 朝食摂取後における150 gの糖質飲料摂取後の75% $\dot{V}O_2\text{max}$ 強度の運動による血糖値の変化量が-10 mg/dL以内の被験者を変化なし群, -10 mg/dLより大きい被験者を低下群としてインスリン濃度の比較を行った. その結果, 両群間で相違を認めず, インスリン濃度が運動誘発性低血糖に及ぼす影響は僅少であったことを報告している. よって, 本研究の結果は近藤ら¹⁰⁾の知見を支持する結果であった. また, 近藤ら¹⁰⁾は変化なし群と低下群との間に $\dot{V}O_2\text{max}$ の相違を認め, 低下群において $\dot{V}O_2\text{max}$ が高値であること, さらに, $\dot{V}O_2\text{max}$ と血糖値変化量との間に有意な負の相関関係があることを明らかにした. 本研究においても, 体重当たりの $\dot{V}O_2\text{max}$ と血糖値低下量との関係を確認したところ, 30 g条件, 150 g条件共に近藤ら¹⁰⁾の結果と一致する高い負の相関関係を示した (Fig. 6-A, B). さらに, 体重当たりの $W\text{max}$ と血糖値低下量との間にも高い負の相関関係が認められた. 体重当たりの $\dot{V}O_2\text{max}$ および $W\text{max}$ が高い, すなわち, 全身持久力が高い被験者では, 日常のトレーニングによって5'AMP-activated protein kinase (AMPK)の活性化により骨格筋の糖輸送体 (glucose transporter-4: GLUT4)の発現量が多く, トランスロケーションするGLUT4が多いこと¹⁹⁾に加え, インスリン感受性が高いことから²⁰⁾, インスリンの分泌量に依存せずに運動中の骨格筋への糖取り込みが増大するとされている¹⁰⁾. また, 筋量自体が多

ければ, 糖取り込み量が多くなり, より血糖値が低下することも予想されるが, 本研究において, 筋量ならびに体脂肪率の2つの体組成に関わる測定項目と30 g条件および150 g条件における血糖値減少量との間には相関関係は認められなかった. これらのことから, インスリン分泌量や筋量ではなく, 全身持久力が高い者で朝食摂取後, 運動30分前の糖質飲料摂取により, 運動中の骨格筋の収縮に伴う骨格筋への糖取り込みにより血糖値低下量が大きくなり, 30 g条件では全被験者において運動誘発性低血糖が発生した可能性が高いと考えられる. また, 150 g条件では運動誘発性低血糖が確認されたのは1名のみであり, 上述の胃排出速度の影響で糖質の吸収速度が遅延した可能性は考えられるものの, 体重当たりの $\dot{V}O_2\text{max}$ ならびに $W\text{max}$ が高いことが血糖値の減少に強く影響していることが示唆される.

本研究では0 g条件においても7名中3名において10~15分時に血糖値が低血糖の基準値を下回った (Fig. 3-A). この3名は低血糖の基準値を下回らなかった被験者よりも体重当たりの $\dot{V}O_2\text{max}$ が低い傾向を示した (Fig. 7-A). 先に述べた通り, 体重当たりの $\dot{V}O_2\text{max}$ はインスリン感受性に影響を及ぼし, 体重当たりの $\dot{V}O_2\text{max}$ が低いほどインスリンによる血糖値低下能が低い. 低血糖の基準値を下回った3名の-35分時の血糖値の平均値および-10分時のインスリン濃度の平均値は, 低血糖の基準値を下回らなかった被験者のそれらよりも高値傾向を示した (Fig. 7-B, C). これらの結果は, 体重当たりの $\dot{V}O_2\text{max}$ が低い者では, インスリン感受性が低いために, 運動開始3時間前の朝食摂取によって上昇した血糖値およびインスリン濃度が運動前までに下がりきっておらず, 運動中の骨格筋の収縮に伴う骨格筋への糖取り込みと同時にインスリンの作用による骨格筋への糖取り込みが生じ, 低血糖が生じた可能性を示しているのかもしれない.

今後検討すべき研究課題として, 糖質飲料の摂取時間や摂取タイミングに関することが挙げられる. 本研究では, 運動30分前に2分以内で500 mLの糖質飲料を摂取した. しかしながら, 運動の現場では500 mLのスポーツドリンクを2分以内に飲みきることは少ないと考えられる. 本研究と同量の糖質飲料を運動開始前に何回かに分けて時間をかけて飲んだ場合, 本研究と異なる結果が得られる可能性がある. また, 運動開始30分前の糖質30 gの飲料摂取によって運動誘発性低血糖が生じたものの, 血糖値上昇やインスリン分泌が生じる前の運動開始直前の摂取では起こらない可能性も考えられる. したがって, 運動誘発性低血糖は運動開始何分前の糖質飲料摂取から生じるのかについても明らかにする必要があると考える. 他方, 持続的な運動を行う場合の調整法として, 数日前から運動量を減らし, 糖質の多い食事によつ

て筋グリコーゲンを蓄えるグリコーゲンローディング法が推奨されている²¹⁾。また、糖質の多い食事を継続的に摂取することは胃排出速度の増大を含め、糖質の消化吸収に好影響を及ぼすとされる²²⁾。本研究では実験前日の夕食および実験当日の朝食のみを統制し、高糖質食とした。今後は、実験開始数日前から高糖質の食事を摂取し、グリコーゲンローディングを行った場合に本研究と同様の検討を実施することも必要である。最後に、本研究では3条件×血糖値の測定時点である8点から被験者数は最少の7名というサンプルサイズで実験を実施した。しかしながら、今後は被験者間の個人差を考慮し、さらにサンプルサイズを大きくし、詳細に検討することも必要であろう。

結 論

運動開始3時間前の朝食摂取後における運動30分前の30 gの糖質摂取が運動誘発性低血糖を生じさせた。また、体重当たりの $\dot{V}O_2\text{max}$ および W_{max} が高いものほど糖質摂取後の血糖値の最大値から運動開始後の血糖値の最小値までの減少量が大きかった。以上の結果より、朝食摂取後における運動前の現実的な糖質摂取量である30 gの糖質を含む飲料を摂取することによって運動誘発性低血糖が生じ、特に、全身持久力が高いもので運動誘発性低血糖が生じることが示唆された。

利益相反自己申告：著者全員が利益相反はない。

著者貢献

SHおよびTYが、研究をデザインした。SH, IF, NK, MTおよびTYがデータ収集、分析を担当した。保健師であるNKは採血を行った。データの解釈はすべての著者が担当した。草稿はSHおよびTYが担当した。最後にすべての著者が原稿を批判的にレビューし、修正し、投稿を承認した。

引用文献

- 1) Coyle EF. Substrate utilization during exercise in active people. *Am J Clin Nutr* 61: 968S-979S, 1995. doi: 10.1093/ajcn/61.4.968S.
- 2) Burke LM, Hawley JA, Wong SH, Jeukendrup AE. Carbohydrates for training and competition. *J Sports Sci* 29: S17-S27, 2011. doi: 10.1080/02640414.2011.585473.
- 3) Jentjens RL, Cale C, Gutch C, Jeukendrup AE. Effects of pre-exercise ingestion of differing amounts of carbohydrate on subsequent metabolism and cycling performance. *Eur J Appl Physiol* 88: 444-452, 2003. doi: 10.1007/s00421-002-0727-9.
- 4) Jentjens RL, Jeukendrup AE. Effects of pre-exercise ingestion of trehalose, galactose and glucose on subsequent metabolism and cycling performance. *Eur J Appl Physiol* 88: 459-465, 2003. doi: 10.1007/s00421-002-0729-7.
- 5) Achten J, Jeukendrup AE. Effects of pre-exercise ingestion of carbohydrate on glycaemic and insulinaemic responses during subsequent exercise at differing intensities. *Eur J Appl Physiol* 88: 466-471, 2003. doi: 10.1007/s00421-002-0730-1.
- 6) Moseley L, Lancaster GL, Jeukendrup AE. Effects of timing of pre-exercise ingestion of carbohydrate on subsequent metabolism and cycling performance. *Eur J Appl Physiol* 88: 453-458, 2003. doi: 10.1007/s00421-002-0728-8.
- 7) Costill DL, Coyle E, Dalsky G, Evans W, Fink W, Hoopes D. Effects of elevated plasma FFA and insulin on muscle glycogen usage during exercise. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol* 43: 695-699, 1977. doi: 10.1152/jap.1977.43.4.695.
- 8) Ahuja V, Kadowaki T, Evans RW, Kadota A, Okamura T, El Khoudary SR, Fujiyoshi A, Barinas Mitchell EJ, Hisamatsu T, Vishnu A, Miura K, Maegawa H, El Saed A, Kashiwagi A, Kuller LH, Ueshima H, Sekikawa A. Comparison of HOMA-IR, HOMA- β % and disposition index between US white men and Japanese men in Japan: the ERA JUMP study. *Diabetologia* 58: 265-271, 2015. doi: 10.1007/s00125-014-3414-6.
- 9) Kondo S, Tanisawa K, Suzuki K, Terada S, Higuchi M. Preexercise carbohydrate ingestion and transient hypoglycemia: Fasting vs. feeding. *Med Sci Sports Exerc* 51: 168-173, 2019. doi: 10.1249/MSS.0000000000001773.
- 10) 近藤早希, 谷澤薫平, 鈴木克彦, 寺田 新, 樋口 満：運動誘発性低血糖時の血糖変化量の再評価：安静時との比較, 日本スポーツ栄養研究誌, 12: 77-85, 2019.
- 11) Koma R, Terasawa N. Pre-exercise glucose ingestion may improve endurance capacity in east asian student athletes with lower blood glucose response. *J Nutr Sci Vitaminol (Tokyo)* 66: 150-157, 2020. doi: 10.3177/jnsv.66.150.
- 12) 公益財団法人日本体育協会. スポーツ活動中の熱中症予防ガイドブック, 16, 2006.
- 13) Jeukendrup A. A step towards personalized sports nutrition: carbohydrate intake during exercise. *Sports Med* 44: S25-S33, 2014. doi: 10.1007/s40279-014-0148-z.
- 14) 水本 篤, 竹内 理：効果量と検定力分析入門－統計的検定を正しく使うために－, 2010年度部会報告論集「より良い外国語教育のための方法」, 47-73, 2011.
- 15) 佐藤未来, 山口太一, 東郷将成, 保科圭汰, 八田早那子, 藤江衣織, 瀧澤一騎, 神林 勲：月経周期が漸増多段階運動負荷試験に伴う脂質酸化量および全身持久力に与える影響, 北海道体育学研究, 54: 73-79, 2019.
- 16) van Loon LJ, Greenhaff PL, Constantin-Teodosiu D, Saris WH, Wagenmakers AJ. The effects of increasing exercise intensity on muscle fuel utilisation in humans. *J Physiol* 536: 295-304, 2001. doi: 10.1111/j.1469-7793.2001.00295.x.
- 17) Rehrer NJ, Wagenmakers AJ, Beckers EJ, Halliday D, Leiper JB, Brouns F, Maughan RJ, Westerterp K, Saris WH. Gastric emptying, absorption, and carbohydrate oxidation during prolonged exercise. *J Appl Physiol* 72: 468-475, 1992. doi: 10.1152/jap.1992.72.2.468.

- 18) Sutehall S, Muniz-Pardos B, Bosch AN, Di Gianfrancesco A, Pitsiladis YP. Sports drinks on the edge of a new era. *Curr Sports Med Rep* 17: 112-116, 2018. doi: 10.1249/JSR.0000000000000475.
- 19) Kristiansen S, Gade J, Wojtaszewski JF, Kiens B, Richter EA. Glucose uptake is increased in trained vs. untrained muscle during heavy exercise. *J Appl Physiol* 89: 1151-1158, 2000. doi: 10.1152/jappl.2000.89.3.1151.
- 20) Ebeling P, Bourey R, Koranyi L, Tuominen JA, Groop LC, Henriksson J, Mueckler M, Sovijarvi A, Koivisto VA. Mechanism of enhanced insulin sensitivity in athletes. Increased blood flow, muscle glucose transport protein (GLUT- 4) concentration, and glycogen synthase activity. *J Clin Invest* 92: 1623-1631, 1993. doi: 10.1172/JCI116747.
- 21) Casazza GA, Tovar AP, Richardson CE, Cortez AN, Davis BA. Energy availability, macronutrient intake, and nutritional supplementation for improving exercise performance in endurance athletes. *Curr Sports Med Rep* 17: 215-223, 2018. doi: 10.1249/JSR.0000000000000494.
- 22) Jeukendrup AE. Training the gut for athletes. *Sports Med* 47: 101-110, 2017. doi: 10.1007/s40279-017-0690-6.