

原著

高強度間欠的運動後におけるブドウ糖で作製したアイスクリームの摂取が男性競技者のインスリン分泌に与える影響

東郷 将成^{*1}、山口 太一^{*2, *3}、瀧澤 一騎^{*2, *4}、保科 圭汰^{*2, *5}、佐藤 未来^{*6}、
八田 早那子^{*2}、藤江 衣織^{*3}、木村 宣哉^{*3}、竹田 保之^{*2, *3}、山口 昭弘^{*2, *3}、
栃原 孝志^{*2, *3}、神林 勲^{*7}

^{*1} 立命館大学総合科学技術研究機構、^{*2} 酪農学園大学大学院酪農学研究科、

^{*3} 酪農学園大学農食環境学群食と健康学類、^{*4} 一般社団法人身体開発研究機構、

^{*5} 環太平洋大学体育学部体育学科、^{*6} 帯広大谷短期大学生活科学科、^{*7} 北海道教育大学札幌校

【目的】

本研究の目的は高強度間欠的運動直後のブドウ糖で特製したアイスクリーム摂取がインスリン分泌に与える影響を市販のアイスクリームやスポーツドリンクを摂取した場合と比較検討することであった。

【方法】

男性7名が高強度間欠的運動と中等度運動を組み合わせた運動の直後に試験食品を摂取し、摂取後30、45、60、120分にglucose-dependent insulintropic polypeptide (GIP) 濃度、インスリン濃度、呼吸交換比の測定を行った。試験食品は1.2 g/kg体重の糖質量を含むブドウ糖で特製したアイスクリーム (G-ICE条件)、市販のアイスクリーム (C-ICE条件)、スポーツドリンク (CHO条件) であった。

【結果】

GIP濃度はG-ICE条件およびC-ICE条件がCHO条件と比較し摂取後30、45、60、120分で高値 ($p < 0.05$) であった。G-ICE条件のインスリン濃度は、CHO条件との間に相違はみられなかった。呼吸交換比はCHO条件がC-ICE条件、G-ICE条件と比較し摂取後30、45、60、120分で高値 ($p < 0.05$) であった。

【結論】

運動直後におけるブドウ糖で特製したアイスクリームの摂取は同糖質量のスポーツドリンク摂取と同程度までインスリンを分泌させた一方で、糖質利用を抑制する効果を有する食品であることが示唆される。

キーワード：GIP濃度 血糖値 呼吸交換比 深部体温

I 緒言

長時間にわたる持久的運動を1日に複数回行う場合には、運動直後に糖質を摂取し、次の運動までに筋グリコーゲンを回復させる必要がある。持久的運動後における筋グリコーゲンの回復法として、運動直後に体重1 kg当たり1.0~1.2 gの糖質を摂取することが推奨されてきた¹⁾。実際に、運動直後に推奨量の糖質を摂取することでインスリン分泌の増加に伴う筋グリコーゲン量の増加が報告されている²⁾。また、運動直後の糖質とたんぱく質の同時摂取が、糖質のみの摂取より

もインスリン分泌の増大による筋グリコーゲンの回復に有効であることも報告されている³⁾。これらのことから、運動直後の筋グリコーゲンの回復にはインスリン分泌を高めることが重要であるといえる。さらに近年、運動直後にブドウ糖と牛乳の混合物を摂取することが、筋グリコーゲンの回復に有効であることが示された。稲井ら⁴⁾は乳化した脂質を含む牛乳にブドウ糖を溶解させた混合物を運動直後のマウスに摂取させたところ、同量のブドウ糖のみの摂取に比べ、インスリン分泌の増加に伴う筋グリコーゲンの回復量が高値となったこと、そしてインスリン分泌量が多いほど筋肉

連絡先：〒525-0058 滋賀県草津市野路東1丁目1-1

E-mail : togo@fc.ritsumei.ac.jp, ma08t.nutrition@gmail.com

および肝臓のグリコーゲン濃度が高かったという正の相関関係を確認している。このメカニズムとして、運動直後に糖質と乳化した脂質を同時摂取することで、糖質のみの摂取よりもGlucose-dependent Insulinotropic Polypeptide (GIP)を増加させ、インスリン分泌量を促進させたことが関与していると考えられている⁵⁾。さらに、丸山ら⁶⁾は健康な女子大学生を対象とした研究において、運動直後の体重1 kg当たり1.0 gのブドウ糖と牛乳の混合物の摂取が、同量のブドウ糖のみの摂取よりもインスリン分泌を促進させたことを報告している。よって、運動直後の筋グリコーゲン回復において重要な役割を果たすインスリンの分泌を高めるためにはブドウ糖と牛乳の混合物を摂取することが有効であるといえる。

牛乳を原料に糖質を加えて製造された代表的な食品にアイスクリームがある。したがって、運動直後のアイスクリーム摂取も筋グリコーゲンの回復を促進するインスリン分泌を高めるうえで好ましい可能性がある。しかしながら、先行研究ではアイスクリーム摂取が運動後のインスリン分泌の促進に有効であるとは結論付けられていない。唯一行われた研究では、男性競技者を対象に高強度間欠的運動直後に体重1 kg当たり1.2 gの糖質量となるよう分量した市販のアイスクリームの摂取と、同じ糖質量のスポーツドリンクを摂取した場合におけるGIPおよびインスリン分泌量の比較検討が行われている⁷⁾。その結果、アイスクリーム摂取はスポーツドリンク摂取よりもGIPの分泌量を増加させたが、インスリン分泌量はスポーツドリンク摂取よりも低値を示した。インスリン分泌が増大しなかった原因として、アイスクリームに含まれる糖質が二糖類であるショ糖および乳糖であり、ブドウ糖が半量しか占めていなかったことが関与した可能性が考えられる。運動後におけるショ糖の摂取はブドウ糖と同糖質量摂取した場合に比較して、インスリン分泌量ならびに筋グリコーゲン回復量が少ないことが報告されている⁸⁾。また、乳糖はブドウ糖とガラクトースが結合したものであるが、ガラクトースの摂取は同糖質量のブドウ糖摂取よりもインスリン分泌量が低値となることも明らかにされている⁹⁾。これらのことから、運動直後のアイスクリーム摂取がインスリン分泌に及ぼす効果については、アイスクリームに含まれる糖質の種類をブドウ糖に変えることで高強度間欠的運動後の摂取によるインスリン分泌を高められるか否かについて検証する必要があると考える。

そこで本研究は、高強度間欠的運動直後に筋グリコーゲンの回復に必要とされる糖質量を満たした特製アイスクリーム、市販のアイスクリーム、および市販のスポーツドリンクにブドウ糖を溶解した飲料のそれぞれを摂取した場合において、インスリン分泌に与える影響を比較することとした。本研究の仮説は、高強

度間欠的運動直後の体格に見合った糖質が含まれているブドウ糖特製アイスクリームの摂取は同糖質量のスポーツドリンク摂取よりも、GIPとインスリン分泌を促進させ、同糖質量の市販のアイスクリーム摂取よりもインスリン分泌を促進させることである。

II 方法

1. 被験者

被験者は定期的に運動競技（硬式テニス、硬式野球および自転車ロード）を実施している健康な男性競技者7名〔年齢：19.9±1.0歳、身長：171.8±6.1 cm、体重：68.0±7.5 kg、最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$): 57.9±4.3 ml/kg/min、最大運動負荷: 280.9±6.7 W〕であった。全ての被験者に対し事前に実験の目的、実施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、乳糖不耐症や喫煙の有無を確認し、これらに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（15-10）を得て実施した。

2. 実験の概要

全ての被験者は、予備実験として $\dot{V}O_{2max}$ および最大運動負荷を決定したのちに、本実験として運動直後に3条件の試験食品を摂取させ120分までの生化学および生理学的指標の測定を行った。 $\dot{V}O_{2max}$ および最大運動負荷は、自転車エルゴメーター（エアロバイク75XL II、コンビ株式会社）および自動呼気ガス分析装置（AE-300S、ミナト医科学株式会社）を用いて事前に測定した。本実験では、運動開始4時間前までに規定食（エネルギー：832 kcal、たんぱく質：18.5 g、脂質：16.7 g、炭水化物：151.6 g）を摂取し、高強度間欠的運動と中強度運動を組み合わせたプロトコルを実施した。その後、被験者は3条件のいずれかの試験食品を摂取したのち、120分まで座位安静状態を保持した。運動直後に摂取した試験食品の条件は、競技現場で常用されているスポーツドリンクに筋グリコーゲン回復に必要とされる糖質量となるようブドウ糖を溶解した飲料摂取（carbohydrate-electrolyte beverage: CHO）条件、市販されているアイスクリーム摂取（commercial ice cream: C-ICE）条件、ブドウ糖で特製したアイスクリーム摂取（glucose ice cream: G-ICE）条件とし、各条件において被験者は試験食品を任意の速さで摂取した。

採血、呼気成分および深部体温の測定は、高強度間欠的運動直後、試験食品摂取後30分、45分、60分および120分目に行った（図1）。全ての被験者は各条件の実験を1週間以上の期間をおいた別日にクロスオーバーかつランダムマイズした順序で遂行した。また、各

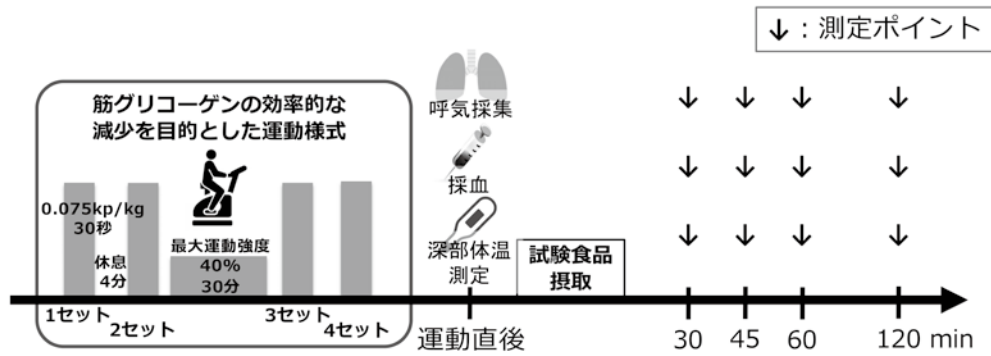


図1 実験プロトコル

被験者は筋グリコーゲンを効率的に消耗させるために、体重1 kg 当たり0.075 kpの負荷で30秒間の全力自転車漕ぎ運動4セットと最大運動負荷の40%相当強度の自転車漕ぎ運動を行った。その後、各試験食品を摂取したのちに120分まで安静を保持し、各時点において採血、呼気成分および深部体温の測定を行った。

表1 試験食品の栄養組成

		CHO 条件	C-ICE 条件	G-ICE 条件
重量	g	569 ± 9	383 ± 42	378 ± 42
エネルギー	kcal	327 ± 36	837 ± 93	723 ± 80
たんぱく質	g	0	12 ± 1	5 ± 1
脂質	g	0	51 ± 6	42 ± 5
糖質	g	82 ± 9	82 ± 9	82 ± 9
PFC 比	%	0 : 0 : 100	6 : 55 : 39	3 : 52 : 45
温度	℃	7.2 ± 1.7	-18.2 ± 5.1	-14.0 ± 2.7

CHO 条件、C-ICE 条件、G-ICE 条件の数値は平均値 ± 標準偏差で示した。

条件の実験は被験者のサーカディアンリズムを考慮し、同時時間帯に実施した。なお、被験者には実験24時間前から激しい運動の実施や飲酒の禁止を促し、すべての実験は、室温24℃、相対湿度50%に設定した実験室内で実施した。

3. 高強度間欠的運動プロトコル

高強度間欠的運動プロトコルには、筋グリコーゲンの効率的な減少を目的とした高強度間欠的運動と中強度運動を組み合わせた方法¹⁰⁾を採用した。自転車エルゴメーターは、高強度間欠的運動ではPowermax-V II (コンビ株式会社)を、中強度運動ではエアロバイク75XL II (コンビ株式会社)を用いて実施した。高強度間欠的運動時、セット毎の平均パワー (W)、ピークパワー (W)、最高回転数 (rpm) および最高回転数までの到達時間 (sec) を測定し、セット毎に運動前後の心拍数 (HR)、主観的運動強度 (RPE) をボルグスケール^{11), 12)}を用いて評価した。

4. 試験食品

試験食品は全ての条件で運動後の筋グリコーゲンの

早期回復のために必要な推奨糖質量1.2 g/kg体重¹⁾が含まれていた。各条件における栄養組成を表1に示した。CHO条件は先行研究⁷⁾同様、市販のスポーツドリンク (ポカリスエット、大塚製薬社製) を用い、500 mlの容量に被験者の体重に合わせて1.2 g/kg体重の糖質を加えた。また、その際のCHO条件の糖質の濃度は、15 ± 1%であった。C-ICE条件も先行研究⁷⁾同様、市販のアイスクリームを使用し、分量した。C-ICE条件の糖質の組成は、乳糖が29.3%、ショ糖が70.7%であった。G-ICE条件はブドウ糖、牛乳、生クリームおよびバニラエッセンスを原材料とし、アイスクリームメーカー (ICE-100、Cuisinart社製) を用いて同一験者が作製した。G-ICE条件の糖質の組成は、乳糖が9.6%、ブドウ糖が90.4%であった。また、乳脂肪分は、C-ICE条件で13.4%に対し、G-ICE条件は11.1%と大きな違いはみられなかった。試験食品の摂取前の温度はそれぞれCHO条件が7.2 ± 1.7℃、C-ICE条件が-18.2 ± 5.1℃、G-ICE条件が-14.0 ± 2.7℃であった。

5. 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、インスリン濃度およびGIP濃度を測定した。血糖値は小型血糖測定器グルテストNEOスーパー (GT-1820、株式会社三和科学研究所) を用いて、指先血を採取して測定した。インスリン濃度およびGIP濃度は正中肘静脈より採血を行い分析に供した。得られた血液は3,000 rpm、4 °Cで遠心分離にて血漿を作成したのちに分析まで-80 °Cの冷凍庫で保管した。インスリン濃度の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。また、GIP濃度の測定はHuman GIP (Total) ELISA (YK253、株式会社矢内原研究所) を用いて験者が分析を行った。

6. 呼気ガス分析

エネルギー基質利用を把握するため呼気成分の測定を行った。呼気は自動呼気ガス分析装置 (AE-300S、ミナト医科学株式会社) を使用し、酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$)、二酸化炭素排出量 ($\dot{V}CO_2$)、呼吸交換比 (RER) の測定を行った。各指標は呼気ガス採取法にて10秒毎に記録し、各測定時点における1分間の平均値を測定値として採用した。また、得られた $\dot{V}O_2$ および $\dot{V}CO_2$ の数値を用いて消費エネルギー量¹³⁾、糖質および脂質酸化量¹⁴⁾を算出した。

7. 深部体温の測定

深部体温の指標として直腸温を測定した。直腸温は肛門括約筋を超える15 cmの位置へ温度センサーを挿入し、データ収集型ハンディタイプ温度計 (LT-8 A、グラム株式会社) を用いて10秒毎に記録した。なお、各測定時点において1分間の平均値を測定値として算出した。

8. 統計解析

本研究の結果は、平均値±標準偏差 (Mean±SD) で示した。各指標における試験食品摂取条件の経時変化の比較には重複測定の二元配置分散分析 (条件×時間) を用いた。有意な交互作用が確認された場合はTukey-Kramer法を用いて同測定時点における多重比較検定を行った。血糖値、インスリン濃度およびGIP濃度について運動直後から試験食品摂取120分後までの上昇の程度を評価するため上昇曲線下面積 (incremental area under the curve : iAUC) を算出した。消費エネルギー量は、運動直後から試験食品摂取120分後までの安静時におけるエネルギー消費の程度を評価するため曲線下面積 (Area under the curve : AUC) にて算出した。また、糖質および脂質酸化量は、運動直後から試験食品摂取120分後までの総体的なエネルギー基質の酸化量を評価するためAUCを算出した。高強度間欠的運動時の指標および各指標のiAUC値、消費エネルギー量、糖質および脂質酸化量の試験食品摂取条件間の比較には、正規分布がみられた場合

には繰り返しのある一元配置分散分析を用い、有意性が確認された場合にはTukey-Kramer法による多重比較検定を行った。また、正規分布がみられない場合には繰り返しのあるFriedman検定を用い、有意性が確認された場合には多重比較検定を行った。各指標間の相関関係は、Pearsonの積率相関分析を用いて検討した。すべての統計解析は、統計ソフトSPSS Statistic ver. 21.0 (IBM) を使用し、いずれも危険率5%未満を有意水準とした。

III 結果

1. 高強度間欠的運動時の指標

4セットの全力ペダリングにおける平均の走行パフォーマンスとHR、RPEについてはいずれの項目においても摂取条件間に有意差は認められなかった。平均パワーはCHO条件が 548 ± 27 W、C-ICE条件が 538 ± 30 W、G-ICE条件が 557 ± 38 W、ピークパワーはCHO条件が 678 ± 106 W、C-ICE条件が 658 ± 108 W、G-ICE条件が 667 ± 101 W、最高回転数はCHO条件が 136 ± 19 rpm、C-ICE条件が 132 ± 20 rpm、G-ICE条件が 134 ± 19 rpm、最高回転数までの到達時間はCHO条件が 8.2 ± 5.7 sec、C-ICE条件が 8.8 ± 5.8 sec、G-ICE条件が 8.8 ± 3.9 secであった。また、運動後のHRはCHO条件が 161 ± 11 bpm、C-ICE条件が 160 ± 11 bpm、G-ICE条件が 162 ± 10 bpm、RPEは全条件で 14 ± 1 であった。

2. 試験食品の摂取時間

試験食品の摂取時間はCHO条件が 3.5 ± 2.0 分、C-ICE条件が 18.6 ± 4.6 分、G-ICE条件が 19.1 ± 4.3 分であり、C-ICE条件およびG-ICE条件がCHO条件よりも有意に長かった ($p < 0.001$)。試験食品摂取に伴い下痢症状等を起こした被験者はいなかった。

3. 試験食品摂取後のGIP濃度、インスリン濃度および血糖値の変化

試験食品摂取後のGIP濃度、インスリン濃度および血糖値の変化を図2に示した。GIP濃度の経時変化は有意な交互作用が認められ ($F = 5.658$, $p < 0.001$)、G-ICE条件およびC-ICE条件はCHO条件と比較して摂取後30分、45分、60分および120分で有意に高値であった ($p < 0.05$)。120分時ではG-ICE条件がC-ICE条件よりも有意な高値を示した ($p < 0.01$ 、図2A)。GIP濃度のiAUC値はC-ICE条件とG-ICE条件との間には差が認められず、ともにCHO条件よりも有意な高値を示した ($p < 0.001$ 、図2B)。

インスリン濃度は、経時変化に有意な交互作用 ($F = 2.311$, $p < 0.05$) が確認され、CHO条件のインスリン濃度はC-ICE条件と比較して摂取後30分、45分およ

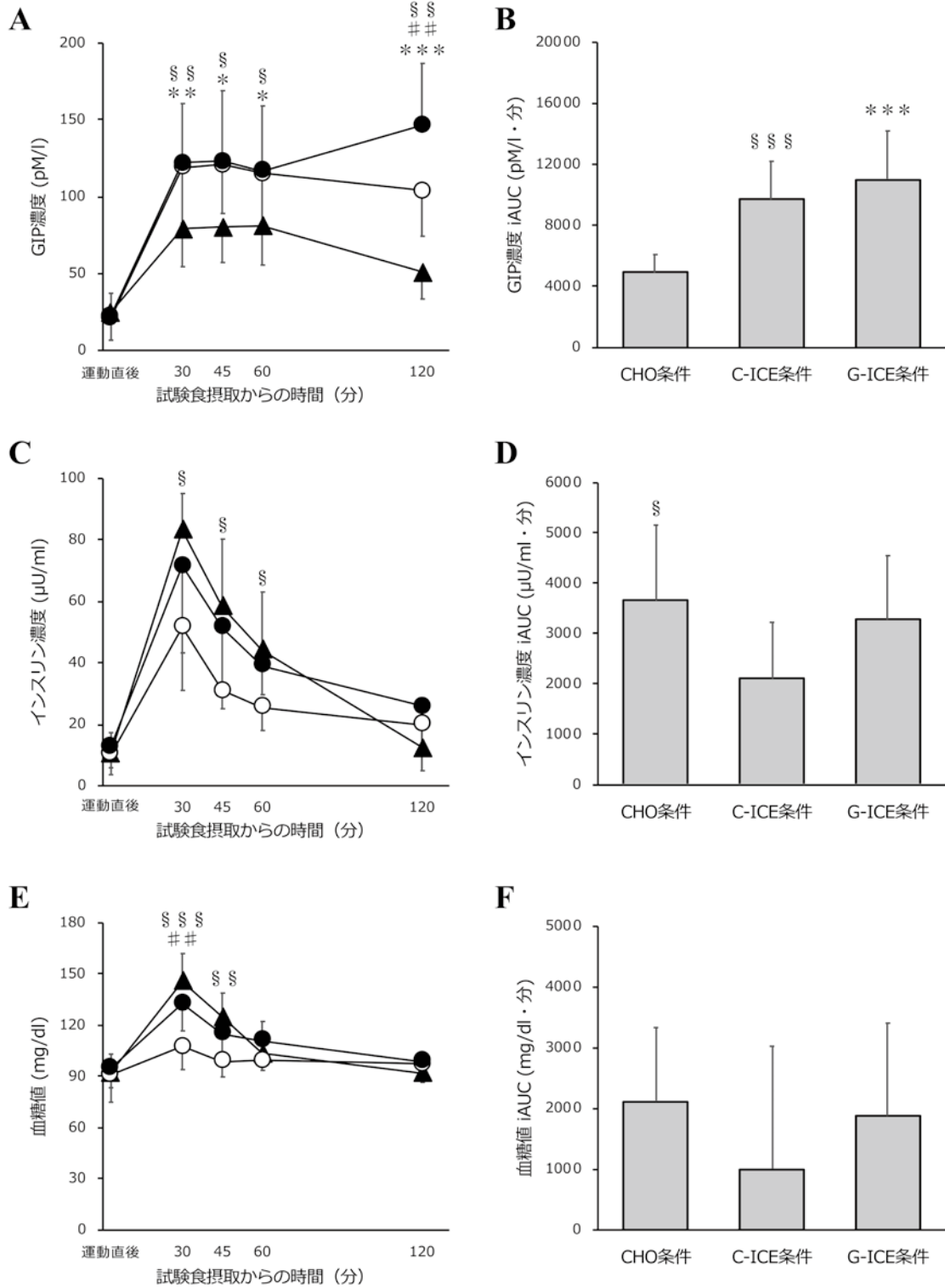


図2 試験食品摂取後のGIP濃度 (A、B)、インスリン濃度 (C、D)、血糖値 (E、F) の変化

CHO 条件 (▲)、C-ICE 条件 (○)、G-ICE 条件 (●) の数値は平均値 ± 標準偏差で示した。

iAUC : 上昇曲線下面積

* p < 0.05 G-ICE 条件 vs CHO 条件、** p < 0.01 G-ICE 条件 vs CHO 条件、*** p < 0.001 G-ICE 条件 vs CHO 条件

p < 0.01 G-ICE 条件 vs C-ICE 条件

§ p < 0.05 C-ICE 条件 vs CHO 条件、§§ p < 0.01 C-ICE 条件 vs CHO 条件、§§§ p < 0.001 C-ICE 条件 vs CHO 条件

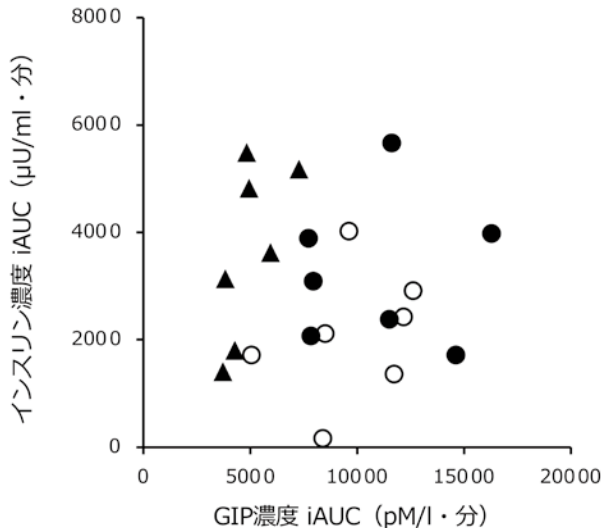


図3 GIP濃度iAUC値とインスリン濃度iAUC値との関係

CHO条件(▲)、C-ICE条件(○)、G-ICE条件(●)で示した。
iAUC：上昇曲線下面積

び60分で有意に高値であった ($p < 0.05$)。また、G-ICE条件のインスリン濃度はCHO条件およびC-ICE条件との間には各時点において有意差はみられなかった(図2C)。インスリン濃度のiAUC値はG-ICE条件とCHO条件との間に有意な差はみられなかった。CHO条件はC-ICE条件に比較して有意な高値 ($p < 0.05$) を示した。また、G-ICE条件はC-ICE条件と比較して高値傾向を示した ($p = 0.050$ 、図2D)。

血糖値は、経時変化に有意な交互作用 ($F = 3.199$ 、 $p < 0.01$) が確認され、CHO条件はC-ICE条件と比較して30分、45分で有意に高値であった ($p < 0.01$)。G-ICE条件はC-ICE条件と比較して30分で有意な高値であった ($p < 0.01$ 、図2E)。G-ICE条件とCHO条件は経時変化に有意な差はみられなかった。血糖値のiAUC値は、条件間で有意な差はみられなかった(図2F)。

4. GIP濃度iAUC値とインスリン濃度iAUC値との関係

GIP濃度iAUC値とインスリン濃度iAUC値との関係を図3に示した。GIP濃度iAUC値とインスリン濃度iAUC値との間には相関関係がみられなかった(図3)。

5. 試験食品摂取による $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ および消費エネルギー量、RER、糖質および脂質酸化量の変化

運動直後から試験食品摂取後120分までの平均の $\dot{V}O_2$ は、CHO条件が 348 ± 29 ml/min、C-ICE条件が

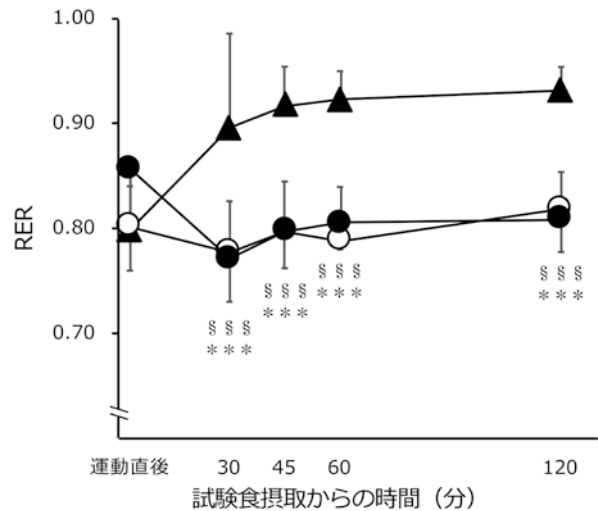


図4 試験食品摂取後のRERの変化

CHO条件(▲)、C-ICE条件(○)、G-ICE条件(●)の数値は平均値±標準偏差で示した。

*** $p < 0.001$ G-ICE条件 vs CHO条件

§§§ $p < 0.001$ C-ICE条件 vs CHO条件

347 ± 33 ml/min、G-ICE条件が 362 ± 14 ml/minであり、条件間で有意な差はみられなかった。運動直後から試験食品摂取後120分までの平均の $\dot{V}CO_2$ は、CHO条件が 310 ± 29 ml/min、C-ICE条件が 276 ± 22 ml/min、G-ICE条件が 293 ± 15 ml/minであった。条件間の比較では、CHO条件はC-ICE条件と比較して $\dot{V}CO_2$ が有意な高値を示した ($p < 0.05$)。運動直後から試験食品摂取後120分までの消費エネルギー量は、CHO条件が 200 ± 17 kcal、C-ICE条件が 197 ± 19 kcal、G-ICE条件が 206 ± 8 kcalであり、条件間で有意な差はみられなかった。

試験食品摂取後のRERの変化、糖質および脂質酸化量を図4、5に示す。RERの経時変化に有意な交互作用 ($F = 4.260$ 、 $p < 0.001$) が確認され、CHO条件がC-ICE条件、G-ICE条件と比較して摂取後30分、45分、60分および120分まで有意に高値であった ($p < 0.001$)。G-ICE条件とC-ICE条件との間には有意な差はみられなかった(図4)。

糖質酸化量のAUC値(=糖質酸化総量)は、CHO条件がG-ICE条件およびC-ICE条件と比較して有意な高値を示した ($p < 0.05$ 、図5A)。脂質酸化量のAUC値(=脂質酸化総量)は、G-ICE条件およびC-ICE条件がCHO条件と比較して有意な高値を示した ($p < 0.01$ 、図5B)。算出した糖質および脂質酸化量をエネルギー換算したところ、糖質酸化量がCHO条件で 149 ± 16 kcal、C-ICE条件で 68 ± 21 kcal、G-ICE条件で 82 ± 20 kcalであった。脂質酸化量がCHO条件で 59 ± 5 kcal、C-ICE条件で 128 ± 32 kcal、G-ICE条

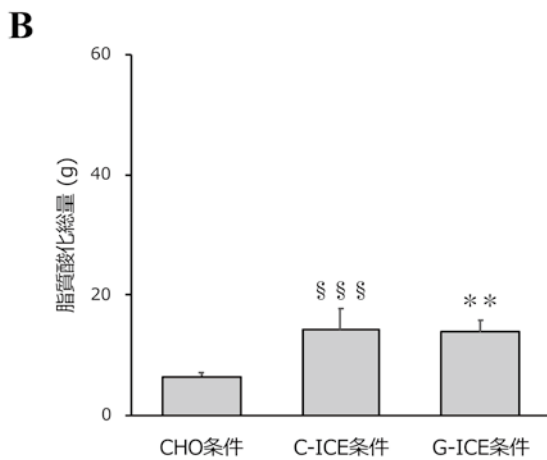
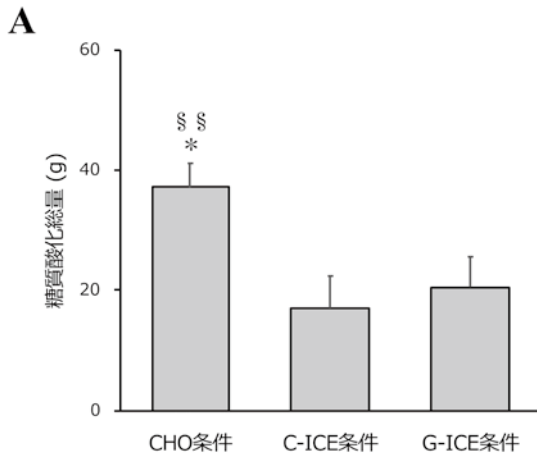


図5 試験食品摂取後の糖質 (A) および脂質 (B) の酸化総量の比較

CHO 条件、C-ICE 条件、G-ICE 条件の数値は平均値 ± 標準偏差で示した。
 * $p < 0.05$ G-ICE 条件 vs CHO 条件、** $p < 0.01$ G-ICE 条件 vs CHO 条件
 § § $p < 0.01$ C-ICE 条件 vs CHO 条件、§ § § $p < 0.001$ C-ICE 条件 vs CHO 条件

件で 124 ± 18 kcal であった。

6. 試験食品摂取後の深部体温の変化

深部体温である直腸温の変化を図6に示した。摂取条件と時間の間で有意な交互作用は認められなかった。

IV 考察

本研究は、男性競技者を対象に高強度間欠的運動直後にブドウ糖を原材料にしたアイスクリーム (G-ICE 条件)、市販のアイスクリーム (C-ICE 条件) および市販のスポーツドリンクにブドウ糖を溶解した飲料

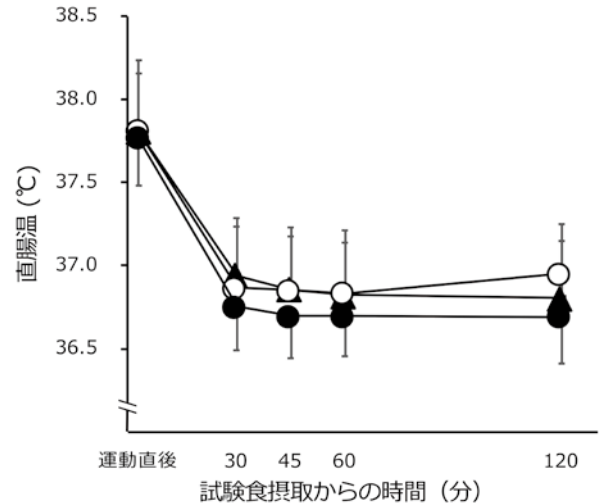


図6 試験食品摂取後の直腸温の変化

CHO 条件 (▲)、C-ICE 条件 (○)、G-ICE 条件 (●) の数値は平均値 ± 標準偏差で示した。

(CHO 条件) の摂取が、その後のインスリン分泌に与える影響を検討した。高強度間欠的運動のパフォーマンス、HR および RPE、そして運動終了直後の血液生化学的データ、呼気成分および深部体温に相違が認められなかったことから、運動による体内のグリコーゲンの減少およびインスリン濃度に及ぼす生体への影響は3条件間で等しかった。よって、結果で示された条件間の違いは、高強度間欠的運動後に摂取した食品の違いによる影響と考えられる。本研究の主要な知見は、G-ICE 条件が、CHO 条件と同等のインスリン分泌能を有し、さらに、CHO 条件よりも脂質酸化量を増大させ、糖質酸化量を減少させたことである。

1. G-ICE 条件と CHO 条件との間の GIP 濃度、インスリン濃度の比較

インスリンの分泌量は、G-ICE 条件と CHO 条件との間で相違がなかった (図 2D)。よって、ブドウ糖で特製したアイスクリームはスポーツドリンクと同程度のインスリンの分泌作用を有していたと考えられる。一方で、G-ICE 条件は、CHO 条件よりも GIP 濃度を上昇させた (図 2A, B)。消化管ホルモンである GIP は、血糖上昇時にインスリン分泌を促す作用を持つ¹⁵⁾。このことから、G-ICE 条件は CHO 条件よりもインスリン分泌量を増大させることも考えられた。しかしながら、G-ICE 条件と CHO 条件のインスリン分泌量は同程度であった。この結果は運動直後のブドウ糖と乳化した脂質の同時摂取が、ブドウ糖のみの摂取よりも GIP 濃度を増加させ、さらにはインスリン分泌を促進したことを示した報告^{4), 5)}とは異なる。その理由として、GIP は血糖上昇時にインスリン分泌を促進させる働き

だけでなく、胃運動を抑制させる作用も有していることが関連しているかもしれない¹⁵⁾。稲井ら⁴⁾はGIP濃度とインスリン濃度のiAUC値との間に正の相関関係を報告し、GIP濃度が高いほどインスリン分泌が促進されることを示した。しかし、本研究ではGIP濃度とインスリン濃度のiAUC値との間に同様の関連性を見出すことはできなかった(図3)。このことから、本研究では脂質エネルギー比の高いG-ICE条件において分泌したGIPによって胃運動が抑制され、消化吸収能の低下が生じた結果、G-ICE条件とCHO条件との間でインスリン分泌量に相違が認められなかったことが推察される。

2. G-ICE条件とCHO条件との間の脂質・糖質利用の比較

G-ICE条件は、CHO条件よりも食品摂取後において呼気ガス分析により同定した脂質利用を亢進させ、糖質利用を抑制させる効果を有した。本研究における運動直後から試験食品摂取後120分までの消費エネルギー量は3条件間で相違が認められず、同程度であった。一方、試験食品摂取後のRERは、G-ICE条件およびC-ICE条件でCHO条件よりも低値を示した。また、G-ICE条件はCHO条件よりも脂質酸化量が高値を示し、糖質酸化量が低値となった(図4)。CHO条件とG-ICE条件との糖質酸化量の差は 16.6 ± 5.4 g (66 ± 22 kcal)、脂質酸化量の差は 7.2 ± 1.9 g (65 ± 17 kcal)であった。よって、G-ICE条件はCHO条件に比べ、糖質のエネルギー利用を抑制し、その抑制分を脂質のエネルギー利用を増大させ補填したと考えられる。これまで、運動直後の摂取食品の相違がその後の安静時のエネルギー基質利用、そして、筋グリコーゲン量の回復に与える影響を検討した研究はみられない。他方、Naperalsky et al.¹⁶⁾は、 32.6 °Cの暑熱環境下における運動後に同量の糖質を摂取し、運動後のそのままの温度環境で曝されるよりも 22.2 °Cの常温環境下で過ごした方が、深部温が低値を示し、糖質酸化量が抑制され、インスリン分泌量に依存せずに4時間後の筋グリコーゲン量が高値を示したことを報告している。本研究では常温環境下において試験食品摂取2時間後までの検討しかしておらず、Naperalsky et al.¹⁶⁾の研究に比べ検討時間は短い。しかしながら、G-ICE条件とCHO条件とでは同量の糖質が摂取されたにもかかわらず、G-ICE条件がCHO条件に比べ、試験食品摂取2時間後まで糖質酸化量が低値を示したことは、筋グリコーゲン量の回復に貢献した可能性が考えられる。一方で、試験食後の脂質酸化の亢進が骨格筋の糖取り込みを抑制させることも考えなければならない。脂質酸化の亢進は、 β 酸化の増加に伴うピルビン酸脱水素酵素および解糖系の働きを抑制し、骨格筋の糖取り込みを減少させることが報告されている¹⁷⁾。したがって、

実際には筋グリコーゲン量の評価を行わなければ、G-ICE条件がCHO条件よりも脂質酸化量を増大させ、糖質酸化量を減少させたことにより筋グリコーゲンの回復に有効であったとは結論づけられない。

3. G-ICE条件とC-ICE条件との間のインスリン分泌の比較

高強度間欠的運動後のC-ICE条件がインスリン分泌を高めなかったのはG-ICE条件との間で糖質の組成が異なっていたことが要因と考えられる。C-ICE条件およびG-ICE条件のGIP濃度は、摂取後120分でG-ICE条件が高値を示したものの、それ以前の推移は同水準であり、iAUC値にも相違は認められなかった(図2A、B)。一方、G-ICE条件の血糖値は、C-ICE条件と比較し、摂取後30分で高値を示した(図2E)。前述の通り、GIPは、血糖上昇時にインスリン分泌を促す作用を持つ¹⁵⁾。よって、C-ICE条件とG-ICE条件におけるインスリン分泌量のiAUC値の相違(図2D)は血糖値の相違が強く影響したと考えられる。ブドウ糖の摂取は乳糖を構成するガラクトース⁹⁾および運動後のショ糖⁸⁾の摂取と比較して血糖値およびインスリン分泌量を高めたことが報告されている。このことから、G-ICE条件のように糖質の組成がブドウ糖で占められている食品が運動後のインスリン分泌量を増大させるといえるだろう。

4. 摂取条件間の深部体温の冷却作用の比較

常温環境における高強度間欠的運動直後の試験食品の摂取は、冷凍から冷蔵の温度帯の食品で深部体温の冷却作用は同程度であった。本研究の試験食品の温度はCHO条件が最も高く、C-ICE条件が最も低かった。ところが、試験食品摂取後の深部体温の推移に試験食品間で相違が確認されなかった(図6)。よって、試験食品による深部体温の冷却作用は同程度であったことが示唆される。前述の通り、Naperalsky et al.¹⁶⁾は、暑熱環境下における運動後、そのままの環境で曝されるよりも常温環境下で過ごした方が、深部温が低値を示し、4時間後の筋グリコーゲン量が高値を示したことを報告している。また、暑熱環境下における4 °Cの冷水摂取に比べ-1 °Cの液体と微細な氷の混合物であるアイスラリーの摂取が深部体温を低下させたことが明らかとなっている¹⁸⁾。本研究の実験環境は、温度が 25 °C、湿度が 50% であった。したがって、少なくとも本研究のような常温・常湿環境における運動で上昇した深部体温に対し、 -18 °C~ 7 °Cの温度帯の食品摂取は同程度の冷却効果を有すると考えられる。一方で、暑熱環境下であれば、本研究よりも運動後に深部体温が上昇することも予想されることから、Siegel et al.¹⁸⁾のアイスラリーのように食品温度の低いG-ICE条件がCHO条件よりも深部体温を低下させ、

Naperalsky et al.¹⁶⁾の研究のように糖質酸化を抑制する可能性も考えられる。

5. 本研究の限界と課題

本研究の限界は、筋グリコーゲン回復の主要な因子であるインスリン分泌量の測定を行ったが、前述の通り、実際の筋グリコーゲン量を測定できていないことである。このことから、取り込まれた糖質が筋グリコーゲンとして蓄積しているとは断言できない。今後は筋グリコーゲンを測定し、摂取した糖質がどの程度蓄積されるかを検討する必要がある。加えて、回復後のパフォーマンステストを実施し、運動後のブドウ糖特製アイスクリームの摂取の効果をより明確にしていく必要もあるであろう。

また、ブドウ糖アイスクリームのエネルギー量、摂取量ならびに栄養組成に関しても検討の余地がある。G-ICE条件は、体重1 kgあたり1.2 g/kgのブドウ糖を原材料とし、脂質エネルギー比をC-ICE条件に近づけるために52%とした。そのため、G-ICE条件のエネルギーは723±80 kcalとCHO条件の327±36 kcalに比べ2倍以上高値となった。G-ICE条件はCHO条件と同程度のインスリンを分泌させることができるものの、体重管理を行っている競技選手に対しては他の食事のエネルギーを加味して摂取してもらう必要がある。さらに、G-ICE条件は摂取量が多く、摂取の時間がCHO条件よりも15分程度長かった。このことは、G-ICE条件では摂取中にも消化吸収が始まっており、各測定項目について食後同時間に評価を行ったものの、摂取時間の相違の影響が何らか生じていたことも考えられる。よって、食品の摂取量を少量にする工夫やシェイクのような液体に近い形状にすることで摂取時間を短縮する方法についても検討していく必要がある。また、柄澤ら¹⁹⁾は運動直後に体重1 kgあたり1 gのブドウ糖にたんぱく質と乳化した脂質を多く含んだ食品の摂取が血中のGIP濃度およびインスリン濃度に与える影響を検討した。その結果、ブドウ糖、たんぱく質および乳化した脂質を多く含んだ食品の摂取は、血中のGIP濃度を増加させたものの、インスリン分泌を高めなかったことを報告し、GIP濃度の増加はインスリン分泌を高めるとは限らず、個人差も大きいということを結論づけている。このことを加味すると、GIP濃度の増加に伴うインスリン分泌の促進という点に焦点を当てるだけでなく、インスリン分泌を高めることができるアイスクリームの適切な栄養組成やPFC比を明らかにする必要がある。

V 結論

運動直後の筋グリコーゲン回復に必要とされる糖質量のブドウ糖で特製したアイスクリーム (G-ICE条件)

の摂取は、同糖質量のスポーツドリンク (CHO条件)と同程度のインスリンを分泌させることができ、脂質利用を促進し、糖質利用を抑制する効果を持つ食品であることが示唆される。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、平成30年度牛乳製品健康科学学術研究、2017年酪農学園後援会より助成を賜りましたこと厚く御礼申し上げます。

利益相反

本研究内容に関して利益相反は存在しない。

文献

- 1) Burke, L.M., Hawley, J.A., Wong, S.H., et al: Carbohydrates for training and competition, *J. Sports. Sci.*, 29, S17-S27 (2011)
- 2) Ivy, J.L., Katz, A.L., Cutler, C.L., et al: Muscle glycogen synthesis after exercise: effect of time of carbohydrate ingestion, *J. Appl. Physiol.*, 64, 1480-1485 (1988)
- 3) Ivy, J.L., Goforth, H.W. Jr., Damon, B.M., et al: Early postexercise muscle glycogen recovery is enhanced with a carbohydrate-protein supplement, *J. Appl. Physiol.*, 93, 1337-1344 (2002)
- 4) 稲井 真, 西村脩平, 浦島章吾, 他: 運動後の糖質・牛乳混合物の摂取がマウス骨格筋および肝臓におけるグリコーゲン回復に及ぼす影響, *日本スポーツ栄養研究誌*, 10, 38-47 (2017)
- 5) 寺田 新: 脂質による消化ホルモン分泌作用を活用した新たな筋グリコーゲン回復法の開発, *デサントスポーツ科学*, 36, 61-67 (2015)
- 6) 丸山まいみ, 寺田 新, 大家千枝子, 他: 牛乳・糖質混合液の摂取が運動後のインスリン分泌に及ぼす影響—女子大学生を対象とした検討—, *日本スポーツ栄養研究誌*, 11, 79-85 (2018)
- 7) 東郷将成, 山口太一, 瀧澤一騎, 他: 高強度運動後のアイスクリーム摂取がインスリン分泌に及ぼす影響—男性競技者を対象とした検討—, *日本スポーツ栄養研究誌*, 12, 12-20 (2019)
- 8) Bowtell, J.L., Gelly, K., Jackman, M.L., et al: Effect of different carbohydrate drinks on whole body carbohydrate storage after exhaustive exercise, *J. Appl. Physiol.*, 88, 1529-1536 (2000)
- 9) Jentjens, R.L., Jeukendrup, A.E.: Effects of pre-exercise ingestion of trehalose, galactose and glucose on subsequent metabolism and cycling performance, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 88, 459-465 (2003)
- 10) 塩瀬圭佑, 飛奈卓郎, 桧垣靖樹, 他: 骨格筋グリコー

- ゲンの効率的な減少を目的とした高強度間欠的な運動
プロトコル, *体力科学*, 60, 493-502 (2011)
- 11) Borg, G.A.: Perceived exertion: a note on "history"
and method, *Med. Sci. Sports.*, 5, 90-93 (1973)
 - 12) 小野田孝一, 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*, 21, 191-
203 (1976)
 - 13) Weir, J.B.: New methods for calculating metabolic
rate with special reference to protein metabolism, *J.*
Physiol., 109, 1-9 (1949)
 - 14) Péronnet, F., Massicotte, D.: Table of nonprotein re-
spiratory quotient: an update, *Can. J. Sport. Sci.*, 16,
23-29 (1991)
 - 15) Baggio, L.L., Drucker, D.J.: Biology of incretins: GLP-1
and GIP, *Gastroenterology*, 132, 2131-2157 (2007)
 - 16) Naperalsky, M., Ruby, B., Slivka, D.: Environmental
temperature and glycogen resynthesis, *Int. J. Sports.*
Med., 31, 561-566 (2010)
 - 17) Jeukendrup, A.E.: Regulation of fat metabolism in
skeletal muscle, *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, 967, 217-235
(2002)
 - 18) Siegel, R., Maté, J., Brearley, M.B., et al.: Ice slurry in-
gestion increases core temperature capacity and run-
ning time in the heat, *Med. Sci. Sports. Exerc.*, 42,
717-725 (2010)
 - 19) 柄澤拓也, 丸山まいみ, 大家千枝子, 他: たんぱく質
および脂質を多く含む乳製品と糖質の同時摂取が運動
後の Glucose-dependent insulintropic polypeptide な
らびにインスリン分泌におよぼす影響, *日本スポーツ
栄養研究誌*, 早期公開版

(受付日: 2019年5月9日)
(採択日: 2019年11月27日)

Original Article

Effect of ingestion of glucose ice cream after high-intensity intermittent exercise on insulin secretion in male athletes

Masanari TOGO ^{*1}, Taichi YAMAGUCHI ^{*2, *3}, Kazuki TAKIZAWA ^{*2, *4}, Keita HOSHINA ^{*2, *5}, Miku SATO ^{*6}, Sanako HATTA ^{*2}, Iori FUJIE ^{*3}, Nobuya KIMURA ^{*3}, Yasuyuki TAKEDA ^{*2, *3}, Akihiro YAMAGUCHI ^{*2, *3}, Takashi TOCHIHARA ^{*2, *3}, Isao KAMBAYASHI ^{*7}

^{*1} Research Organization of Science and Technology, Ritsumeikan University

^{*2} Food and Nutrition Science, Graduate School of Dairy Sciences, Rakuno Gakuen University

^{*3} Department of Food Science and Human Wellness, College of Agriculture, Food and Environment Science, Rakuno Gakuen University

^{*4} Institute of Physical Development Research

^{*5} Department of Physical Education, International Pacific University

^{*6} Life Science Department, Obihiro Otani Junior College

^{*7} Department of Education, Hokkaido University of Education Sapporo

ABSTRACT

[Aim]

The purpose of this study was to compare the effects of ingestion of glucose ice cream, commercial ice cream and a carbohydrate-electrolyte beverage after high-intensity intermittent exercise on the insulin secretion.

[Methods]

Seven male subjects ingested the trial foods immediately after high-intensity intermittent exercise. Glucose-dependent insulinotropic polypeptide (GIP) and insulin secretions and the respiratory exchange ratio (RER) were measured immediately post-exercise, and 30, 45, 60 and 120 min after the exercise. The trial foods were glucose ice cream (G-ICE), commercial ice cream (C-ICE) and a carbohydrate-electrolyte (CHO) beverage containing carbohydrates at 1.2 g/kg body weight of the subject.

[Results]

GIP secretion at 30-120 min post-exercise in the subjects was significantly higher ($p < 0.05$) after the ingestion of G-ICE or C-ICE as compared to that after ingestion of the CHO beverage. Insulin secretion after G-ICE ingestion did not differ from that after ingestion of the CHO beverage. The RER at 30-120 min was significantly higher ($p < 0.05$) after ingestion of the CHO beverage as compared to that after ingestion of C-ICE or G-ICE.

[Conclusion]

Ingestion of G-ICE after high-intensity intermittent exercise was associated with a similar degree of increase in GIP secretion as ingestion of C-ICE. Insulin secretion after ingestion of G-ICE increased to a similar degree to that after ingestion of the CHO beverage. Carbohydrate oxidation of G-ICE was lower as compared that of CHO beverage. Therefore, ingestion of ice cream made with glucose immediately after exercise promoted secretion of insulin and reduced carbohydrate utilization. This finding suggests that ice cream made specially with glucose might be the optimal food to ingest to increase insulin secretion and reduce carbohydrate utilization after high-intensity intermittent exercise.

Keywords: GIP, blood glucose, respiratory exchange ratio, core temperature