

原著

# 運動前における糖質溶液の摂取タイミングの相違が運動誘発性低血糖に及ぼす影響

藤江 衣織<sup>\*1</sup>、池永 和奏<sup>\*1</sup>、吉本 香乃<sup>\*1</sup>、東郷 将成<sup>\*2</sup>、瀧澤 一騎<sup>\*3</sup>、木村 宣哉<sup>\*4</sup>、柴田 啓介<sup>\*1, \*4</sup>、山口 太一<sup>\*1, \*4</sup>

<sup>\*1</sup> 酪農学園大学大学院酪農学研究科食品栄養科学専攻、<sup>\*2</sup> 旭川市立大学短期大学部食物栄養学科、

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

## 【目的】

本研究の目的は運動前における糖質溶液の摂取タイミングの相違が運動中の血糖値変動に及ぼす影響について検討することであった。加えて、運動誘発性低血糖を引き起こす糖質溶液の摂取タイミングを明らかにすることを試みた。

## 【方法】

健康な男性9名が糖質30gを含む500mLの糖質溶液を摂取後、最大運動負荷の65%相当の強度で自転車漕ぎ運動を30分間行った。被験者は、運動の30分前（30分前条件）、15分前（15分前条件）、10分前（10分前条件）および5分前（5分前条件）に糖質溶液を摂取する4条件を実施した。血糖値は糖質溶液摂取前、運動前、運動中は、5分時から30分時まで5分毎に測定した。

## 【結果】

30分前条件のみで、運動中の最低血糖値（ $62.1 \pm 14.0$  mg/dL）が低血糖の基準値（72 mg/dL）を下回った。糖質溶液の摂取タイミングと運動中の最低血糖値との回帰式（ $y = 0.8492x + 88.099$ ）から運動誘発性低血糖を引き起こす糖質溶液の摂取タイミングは運動19分前となった。

## 【結論】

運動の30分前に糖質30gを含む500mLの糖質溶液を摂取した場合のみで運動誘発性低血糖を引き起こした。また、運動の19分よりも前に糖質溶液を摂取することによって、運動誘発性低血糖を引き起こすことが示唆される。

キーワード：血糖値、持久性運動、糖代謝、胃排出

## I 緒言

糖質を摂取し、血糖値および血中インスリン濃度が上昇した状態で持久性運動を開始すると、運動誘発性低血糖を引き起こす恐れがある。運動誘発性低血糖は、インスリンが血糖値を低下させる作用と、筋収縮に伴う血中から筋への糖取り込みが相まって、血糖値が急激に低下し、低血糖の基準値を下回る現象である<sup>1)</sup>。運動誘発性低血糖は、筋グリコーゲンの利用増加、糖質酸化の増大、脂質酸化の抑制を生じさせることで、持久性パフォーマンスを低下させることが示唆されている<sup>2),3)</sup>。

運動前の糖質摂取タイミングの相違が運動誘発性低血糖に及ぼす影響について、Moseley et al.<sup>4)</sup>は、男性

サイクリストを対象に、運動の75分前、45分前および15分前に糖質75gを含む糖質溶液500mLを摂取させ、最大運動負荷（Wmax）の65%相当強度の運動を実施させた。その結果、15分前条件の運動開始時における血糖値および血中インスリン濃度が75分前および45分前条件に比べて高値となった。しかしながら、いずれの条件においても運動誘発性低血糖を引き起こさなかった。ただし、Moseley et al.<sup>4)</sup>は、夜間絶食後における検討であった。Kondo et al.<sup>5)</sup>は、男子大学生を対象に、夜間絶食後および朝食摂食後の運動30分前に糖質150gを含む糖質溶液500mLを摂取させ、最大酸素摂取量の75%相当強度の運動を実施させた。その結果、運動開始時の血糖値および血中インスリン濃度、ならびに運動中における血糖値の平均値の推移では、

連絡先：〒069-8501 北海道江別市文京台緑町582番地

E-mail: taichi@rakuno.ac.jp

夜間絶食後と朝食摂取後の条件との間で相違がなく、両条件で運動誘発性低血糖を引き起こさなかった。しかしながら、夜間絶食後の条件において、運動誘発性低血糖を引き起こした被験者がおり、彼らの運動開始時の血中インスリン濃度は、運動誘発性低血糖を引き起こさなかった被験者と比較して高値を示した。よって、夜間絶食後の検討では、朝食摂取後の検討に比べ、血中インスリン濃度が上昇しやすい被験者で運動誘発性低血糖を引き起こす恐れがある。ただし、実際のスポーツ現場において、運動前に夕食以降、朝食を食べずに長時間絶食をして運動を行うことはごく稀である。また、運動前の水分摂取方法として、糖質や電解質を含むスポーツ飲料を200~600 mL摂取することが推奨されているが<sup>6)</sup>、我々が調べた範囲で市販の500 mLのペットボトルのスポーツ飲料に含まれる糖質量が最も多いものでも31 gであった。Moseley et al.<sup>4)</sup>において運動前に摂取された500 mLの糖質溶液に含まれていた糖質量は75 gであったことから、31 gと比較すると2倍以上多かったことになる。したがって、糖質摂取量の観点からもMoseley et al.<sup>4)</sup>を実際のスポーツ現場にそのまま応用することは難しい。他方、藤江ら<sup>7)</sup>は、運動習慣のある男性を対象に、朝食摂取後の運動30分前および運動直前に糖質30 gを含む糖質溶液500 mLを摂取させ、65% Wmax相当強度の運動を実施させた。その結果、運動30分前条件で運動開始前の血糖値および血中インスリン濃度が上昇し、運動誘発性低血糖を引き起こした。一方、運動直前(平均4分前)条件では、運動開始前の血糖値および血中インスリン濃度は上昇せず、運動誘発性低血糖を引き起こさなかった。よって、朝食摂取後の運動前に糖質30 gを含む500 mLの糖質溶液を摂取する場合、運動誘発性低血糖を引き起こす糖質溶液の摂取タイミングは、運動の30分前から4分前の間であることが予想されるものの、詳細な検討はなされていない。運動誘発性低血糖を引き起こす糖質溶液の摂取タイミングが明らかになれば、運動を安全かつより良いパフォーマンスで実施可能となる運動前の糖質摂取方法の提言につながると考えられる。

糖質溶液の摂取タイミングによって運動中の血糖値変動に相違が生じる要因として、運動開始時点で胃に留まる糖質溶液量が関係している可能性がある。経口摂取された糖質溶液は、一旦、胃に留まった後、徐々に腸へと排出され、吸収される。したがって、糖質溶液摂取後は、時間が経過すればするほど、糖質溶液が胃から腸へと排出され、胃に留まる量が少なくなる<sup>8)</sup>。そして、腸において糖質が吸収された結果、血糖値が高まり、血中インスリン濃度も上昇する<sup>8)</sup>。この時、運動が開始されると、インスリンと筋収縮の作用により急激な血糖値の低下を招く恐れがある。胃に留まる溶液量は、胃幽門部横断面の評価により推定

が可能である<sup>9)</sup>。したがって、運動前後の胃幽門部横断面積と血糖値変動との関連性について検討することで、糖質溶液の摂取タイミングの相違が運動誘発性低血糖に及ぼす影響についての裏付けを得られる可能性がある。

本研究の目的は、朝食摂取後における運動前の糖質30 gを含む糖質溶液500 mLの摂取タイミングの相違が、運動中の血糖値に及ぼす影響について明らかにすることとした。あわせて、糖質溶液摂取および運動に伴う胃幽門部横断面積の変化と血糖値変動との関連性についても検討することとした。本研究における仮説のひとつは、糖質溶液摂取後30分以内に運動を開始する場合、糖質溶液摂取から運動までの時間が長いほど運動中の最低血糖値が低値となることである。そして、もうひとつは、糖質溶液摂取後の胃幽門部横断面積の変化と糖質溶液の摂取タイミングの相違に伴う運動中の血糖値変動との間に関連が認められることである。仮説の検証に加え、糖質溶液の摂取タイミングと運動中の最低血糖値との関係から、運動30分前から4分前の間にあると予想される運動誘発性低血糖を引き起こす糖質溶液の摂取タイミングを明らかにすることも試みた。

## II 方法

### 1. 被験者

被験者は、運動習慣のある健康な男子大学生9名[年齢:  $21.1 \pm 1.9$ 歳(範囲: 19-24歳)、身長:  $170.6 \pm 6.6$  cm、体重:  $64.0 \pm 10.7$  kg、Wmax:  $261.2 \pm 53.8$  W]であった。被験者は大学の課外活動団体(陸上競技部、ハンドボール部、水泳部、硬式テニス部、スキー部)に所属していた。すべての被験者に対して事前に実験の目的、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。実験実施前に糖尿病の有無を確認したが、該当する者はいなかった。なお、本研究は酪農学園大学における人を対象とする生命科学・医学系研究倫理審査委員会により承認(23-4)を得て実施した。

### 2. 実験の概要

被験者は実験室に計6回来室した。1回目の来室時に被験者は事前測定として、体重の測定ならびに自転車エルゴメーターを用いた漸増負荷試験を行い、Wmaxを測定した。2~6回目の来室の前日は、23時まで規定された夕食(エネルギー: 911 kcal、たんぱく質: 18.4 g、脂質: 14.5 g、糖質: 172.6 g)を摂取した。2~6回目の来室の当日は、実験開始3時間前までに、規定された朝食(エネルギー: 550 kcal、たんぱく質: 9.8 g、脂質: 5.5 g、糖質: 112.9 g)を摂取した。前日の夕食および当日の朝食の摂取時刻

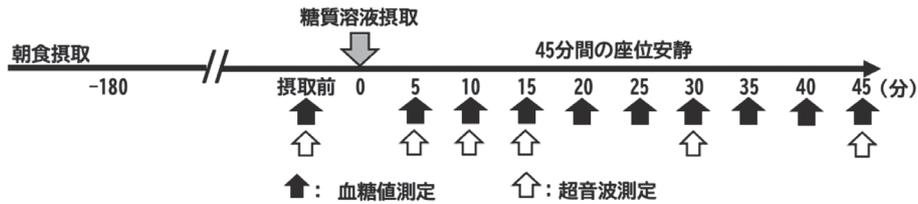


図1 実験1の実験プロトコル

は、被験者毎に異なったものの、各被験者内では大きな差はみられなかった。規定食は、Burke et al.<sup>10)</sup>による運動前の糖質摂取目安量を満たす食事であった。夕食の糖質量は、24時間で摂取すべき糖質量とされる体重1 kgあたり7~12 gの糖質量<sup>10)</sup>を3食分で除した体重1 kgあたり2.3~4 gの糖質量を満たす食事とした。朝食の糖質量は、体重1 kgあたり1~4 gの糖質量<sup>10)</sup>を満たす食事とした。また、実験の24時間前から激しい運動の実施、飲酒およびカフェインの摂取を禁止した。2回目(図1)の来室時は実験1として、糖質溶液摂取が安静時の胃幽門部横断面積および血糖値変動に及ぼす影響について検討した。3~6回目(図2)の来室時に運動前(0分)の血糖値の測定を時間通りに行うためには、同時に胃幽門部横断面積の測定が難しいと考えたことから、3~6回目の来室時の運動前と同じ経過時間における胃幽門部横断面積の結果を得ること、そして、運動の有無が胃幽門部横断面積や血糖値変動に及ぼす影響を明らかにするために、実験1を実施した。3~6回目の来室時は実験2として、糖質溶液の摂取タイミングの相違が運動に伴う血糖値および胃幽門部横断面積の変動に及ぼす影響について検討した。すべての実験は被験者のサーカディアンリズムを考慮し、午前中の同時間帯に実施(10時から11時の間に開始)した。なお、実験室の環境は、室温25℃、相対湿度55%となるよう調整した。

### 3. 事前測定

事前測定は実験1の1週間以上前に行った。被験者は、体重計(BC-622、株式会社タニタ、最小表示50g)を用いて体重を計測した後、自転車エルゴメーター(エアロバイク75XL II、コンピウエルネス株式会社)に乗り、心拍数計のトランスミッター(HIトランスミッター、Polar Electro Oy)を胸部に装着した。自転車エルゴメーター上で3分間の安静後、60 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分間に20 Wずつ漸増するステップ負荷にて疲労困憊まで自転車漕ぎ運動を継続した。疲労困憊の判断基準<sup>5)</sup>は、1. 回転数が50 rpmを下回った時点、2. 最大心拍数が(20-年齢)拍/分を超えた時点、3. 被験者が運動継続困

難と判断した時点のいずれかとした。漸増運動負荷試験にて10秒毎に得られた負荷の最大値をWmaxとし、運動で用いるWmaxの65%に相当する負荷強度を算出した。

### 4. 実験1

実験1は実験2の1週間以上前に行った。被験者は、糖質溶液摂取後に安静時の胃幽門部横断面積および血糖値の測定を行った(図1)。その後、ブドウ糖30 gを含む糖質溶液500 mLを摂取し、45分間、椅座位安静を保った。胃幽門部の超音波動画を、糖質溶液摂取前、摂取5分後、10分後、15分後、30分後および45分後に撮影した。また、血糖値を糖質溶液摂取前、摂取5分後から45分後まで5分毎に測定した。

### 5. 実験2

被験者は、運動開始30分前(30分前条件)、15分前(15分前条件)、10分前(10分前条件)および5分前(5分前条件)に糖質溶液を摂取する4条件を、条件間に1週間以上の間隔をあけて、ランダム化クロスオーバーデザインで実施した(図2)。実験室来室後、十分な安静を保った後、糖質溶液摂取前(摂取前)に椅座位で胃幽門部の超音波動画の撮影と、血糖値の測定を行った。その後、ブドウ糖30 gを含む糖質溶液500 mLを摂取した。糖質溶液摂取後、椅座位安静を保った。30分前条件では糖質溶液摂取30分後、15分前条件では15分後、10分前条件では10分後、5分前条件では5分後に、自転車エルゴメーター上で運動前(0分)の血糖値を測定した。血糖値の測定が終了し次第、被験者は65%Wmaxに相当する強度で30分間の自転車漕ぎ運動を開始した。運動中は開始5分から終了まで5分毎に血糖値を測定した。運動終了後は、椅座位で30分間、安静を保持した。運動終了10分後に、胃幽門部の超音波動画を撮影した。また、運動終了15分後および30分後に胃幽門部の超音波動画の撮影と血糖値の測定を実施した。

### 6. 糖質溶液

糖質溶液は、30 gのブドウ糖(扶桑薬品工業株式会社)を500 mLの市販の飲料水(北海道天然水 ナチュ

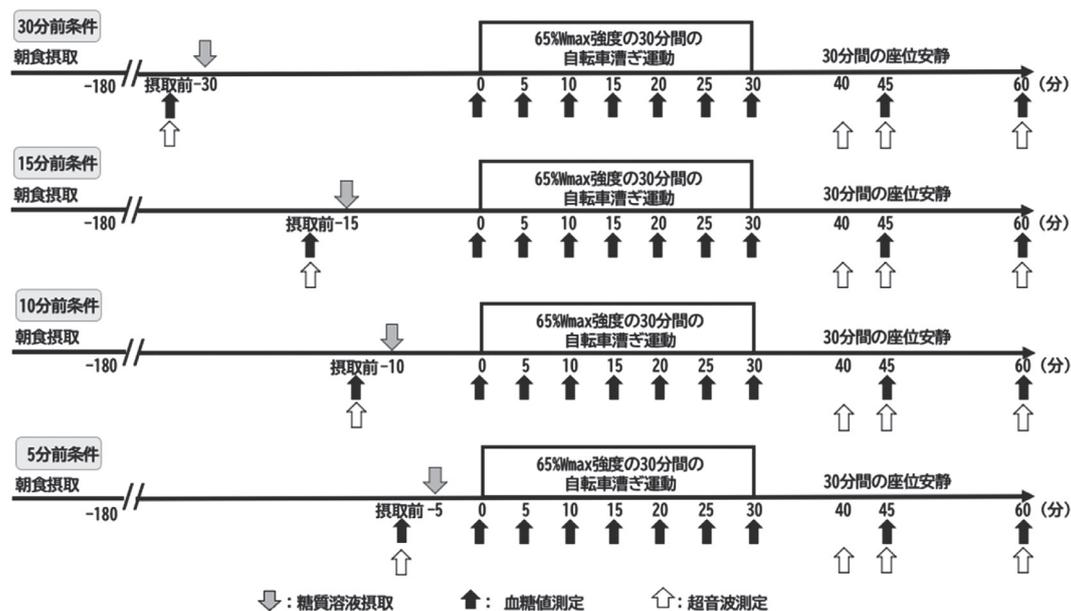


図2 実験2の実験プロトコル

ラルミネラルウォーター、黒松内銘水株式会社)に溶解して作製した(糖質濃度は6%)。糖質溶液の摂取時間は2分以内とした。実際の摂取時間は、実験1が $57 \pm 27$ 秒、実験2の30分前条件が $56 \pm 28$ 秒、15分前条件が $47 \pm 15$ 秒、10分前条件が $56 \pm 22$ 秒、5分前条件が $51 \pm 20$ 秒であり、実験1を含め条件間に有意差は認められなかった( $F = 0.65$ ,  $p = 0.63$ )。また、溶液の温度は、実験1が $15.4 \pm 2.1$  °C、実験2の30分前条件が $16.4 \pm 1.4$  °C、15分前条件が $16.4 \pm 1.3$  °C、10分前条件が $15.2 \pm 1.1$  °C、5分前条件が $15.4 \pm 1.7$  °Cであり、実験1を含め条件間に有意差は認められなかった( $F = 1.29$ ,  $p = 0.30$ )。

### 7. 胃幽門部横断面積

胃幽門部横断面積の測定方法は、Van et al.<sup>9)</sup>に倣った。胃幽門部動画の撮影には超音波診断装置(SON-IMAGE HS1、コニカミノルタ株式会社)ならびにコンベックスプローブ(C5-2、平均周波数3.5 MHz)を用いた。撮影時、被験者は、椅子に深く座り、背中全体を背もたれにつけ、上半身を固定した。プローブを上腹部に垂直に当て、肝臓、上腸間膜静脈、腹部大動脈とともに胃幽門部が映り込む矢状面画像が取得されるまでプローブを右側に移動させた。その後、プローブが動かぬようにメラミンスポンジで作製した特製の固定パットとストラップを用いて腹部に固定した。胃幽門部の動画(解像度1024×768ピクセル)を10秒間連続撮影した。撮影時、各被験者は、験者の声掛けに合わせて、吸気後、呼吸を止めた。撮影後、自然に呼吸をし、10秒の間隔をあけて、同様の撮影を5

回繰り返した。すべての実験終了後、各動画を再生し、10秒間で胃幽門部の収縮時を避け、最大に拡張した時点を目視で確認し、画像を切り出した。その後、Image J (version 1.53、National Institutes of Health)を用いて各画像における胃幽門部の面積を算出した。画像5枚分の胃幽門部横断面積を算出後、最大値および最小値を除く3つの面積の平均値を算出し、分析に供じた。なお、測定誤差を最小限にするために、同一の験者(1F)が動画の撮影、画像の切り出し、面積の算出のすべてを行った。

### 8. 血糖値測定

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)を用いて指先血より測定した。低血糖の基準は、先行研究<sup>5),7)</sup>に倣い、血糖値が72 mg/dL以下とした。

### 9. 自転車漕ぎ運動

被験者は、自転車エルゴメーターを用いた65%Wmax相当強度で30分間の自転車漕ぎ運動を実施した。運動負荷および運動時間は、藤江ら<sup>7)</sup>に倣った。回転数は60 rpmを維持するよう被験者に指示した。

### 10. 統計解析

本研究の結果は、平均値±標準偏差で示した。実験1における糖質溶液摂取後の血糖値ならびに胃幽門部横断面積の推移の分析には重複測定一元配置分散分析を用いた。主効果が認められた場合には、Bonferroni/Dunn法を用いて多重比較検定を行った。実験2

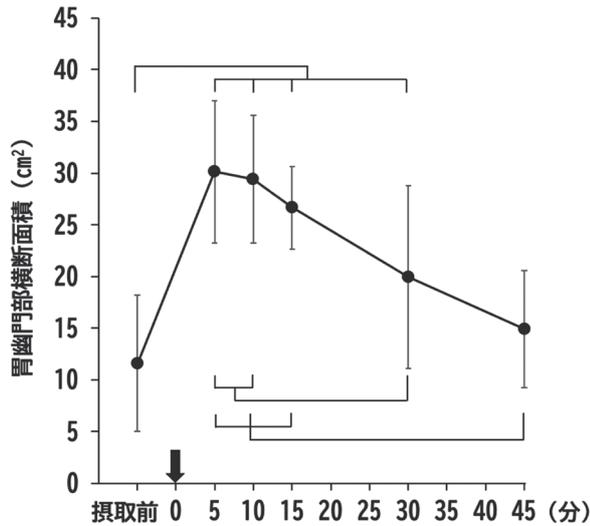


図3 実験1における糖質溶液摂取に伴う胃幽門部横断面積の変化

各経過時間の平均値は被験者9名分のもの。線で結ばれた時点の間に有意差 ( $p < 0.05$ ) があることを示す。

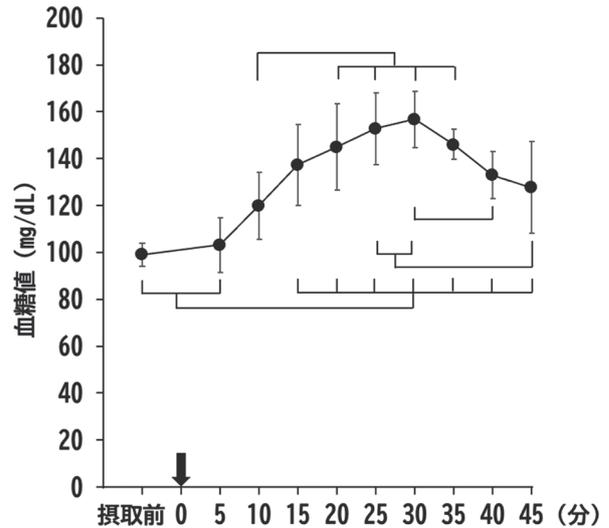


図4 実験1における糖質溶液摂取に伴う血糖値の変化  
各経過時間の平均値は被験者9名分のもの。線で結ばれた時点の間に有意差 ( $p < 0.05$ ) があることを示す。

における血糖値および胃幽門部横断面積の推移の条件間における比較には、重複測定二元配置分散分析（条件×経過時間）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には、各経過時間における血糖値および胃幽門部横断面積の条件間の比較のため重複測定一元配置分散分析を行い、主効果が認められた場合にはBonferroni/Dunn法を用いた多重比較検定を行った。また、各条件における血糖値および胃幽門部横断面積の推移の分析には重複測定一元配置分散分析を用いた。主効果が認められた場合にはBonferroni/Dunn法を用いて多重比較検定を行った。運動中の最低血糖値の条件間における比較には、重複測定一元配置分散分析を用いた。主効果が認められた場合には、Bonferroni/Dunn法を用いて多重比較検定を行った。実験1と実験2における糖質溶液摂取前の胃幽門部横断面積の比較には対応のあるt検定を用いた。2変数間の関係については、Pearsonの相関係数を算出した。糖質溶液の摂取タイミング (x) と運動中の最低血糖値 (y) との関係について、回帰分析を行った。すべての統計解析には、統計ソフトの4 Steps エクセル統計Statcel 3（オーエムエス出版）を使用した。有意水準は $p < 0.05$ とした。

### Ⅲ 結果

#### 1. 安静時における糖質溶液摂取後の胃幽門部横断面積および血糖値の変化（実験1）

安静時における糖質溶液摂取後の胃幽門部横断面積（図3）は、糖質溶液摂取5分後に最高値となり、その後、漸減した。胃幽門部横断面積の経時変化に有意な主効果が認められた ( $F = 26.58, p < 0.01$ )。糖質溶液摂取5～30分後の胃幽門部横断面積は、摂取前に比較し、有意に ( $p < 0.01$ ) 高値であった。糖質溶液摂取30分後は、糖質溶液摂取5分後および10分後と比較して有意に ( $p < 0.01$ ) 低値となった。糖質溶液摂取45分後は、糖質溶液摂取5～15分後と比較して有意に ( $p < 0.01$ ) 低値となった。

安静時における糖質溶液摂取後の血糖値（図4）は、糖質溶液摂取10分後以降に漸増し、30分後に最高値となり、その後、45分後まで漸減した。血糖値の経時変化に有意な主効果が認められた ( $F = 18.80, p < 0.01$ )。糖質溶液摂取15分後以降の血糖値は、摂取前および糖質溶液摂取5分後と比較して有意に（5分後 vs 45分後のみ $p < 0.05$ 、その他は $p < 0.01$ ）高値であった。また、糖質溶液摂取20～35分後は、糖質溶液摂取10分後と比較して有意に ( $p < 0.01$ ) 高値となった。さらに、糖質溶液摂取45分後は、糖質溶液摂取25分後および30分後と比較し有意に ( $p < 0.01$ ) 低値となった。糖質溶液摂取40分後は、糖質溶液摂取30分後と比較し有意に ( $p < 0.05$ ) 低値となった。

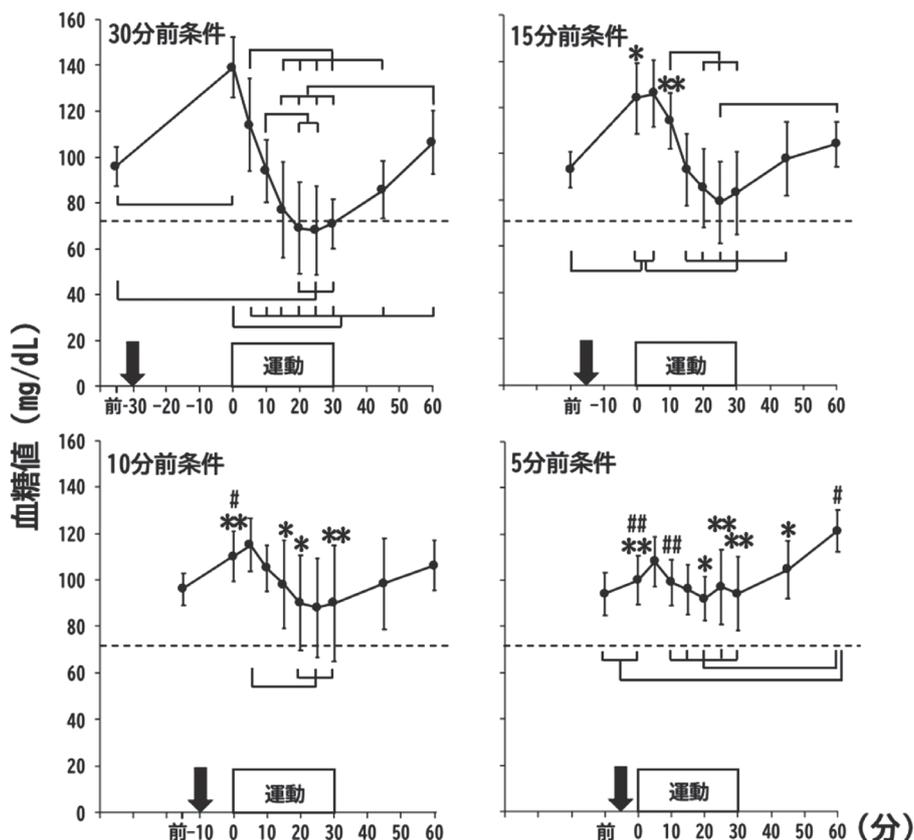


図5 実験2における各条件の血糖値の推移

各経過時間の平均値は被験者9名分のもの。黒矢印は糖質溶液の摂取タイミングを示す。破線は低血糖の基準値(72 mg/dL)を示す。\* ( $p < 0.05$ )、\*\* ( $p < 0.01$ )は30分前条件との有意差を示す。# ( $p < 0.05$ )、## ( $p < 0.01$ )は15分前条件との有意差を示す。線で結ばれた時点の間に有意差 ( $p < 0.05$ )がある。

## 2. 糖質溶液摂取後の運動に伴う血糖値の変化(実験2)

糖質溶液摂取および運動に伴う血糖値の推移(図5)について、条件と経過時間との間で有意な交互作用が認められた( $F = 4.33$ ,  $p < 0.01$ )。30分前条件の運動前(0分)の血糖値( $139.1 \pm 13.0$  mg/dL)は他の条件と比較して有意に( $p < 0.05$ )高値であった。15分前条件の運動前の血糖値( $123.8 \pm 15.2$  mg/dL)は10分前条件( $110.2 \pm 10.8$  mg/dL)および5分前条件( $100.1 \pm 10.7$  mg/dL)と比較して有意に( $p < 0.05$ )高値であった。30分前条件の運動15分時、20分時および30分時の血糖値が10分前条件よりも有意に( $p < 0.05$ )低値であった。また、30分前条件の運動20~30分時の血糖値が5分前条件と比較して有意に( $p < 0.05$ )低値であった。30分前条件の運動20~30分時の血糖値が低血糖の基準値(72 mg/dL)を下回った。5分前条件の運動終了15分後の血糖値が30分前条件よりも、運動終了30分後の血糖値が15分前条件よりも有意に( $p <$

0.05)高値となった。

すべての条件において血糖値の推移に有意な主効果が認められた(図5)。30分前条件では( $F = 22.22$ ,  $p < 0.01$ )、糖質溶液摂取前と比較して運動前に有意に( $p < 0.01$ )高値となり、運動20~25分時( $p < 0.01$ )および運動30分時( $p < 0.05$ )に有意に低値となった。運動前と比較して運動5分時( $p < 0.05$ )、運動10~30分時および運動終了15~30分後に有意に( $p < 0.01$ )低値であった。運動5分時と比較して運動15~30分時および運動終了15分後に有意に( $p < 0.01$ )低値であった。運動10分時と比較して運動20~25分時に有意に( $p < 0.05$ )低値であった。運動15~30分時と比較して運動終了30分後に有意に( $p < 0.01$ )高値となった。15分前条件では( $F = 12.93$ ,  $p < 0.01$ )、糖質溶液摂取前と比較して運動前および運動5分時に有意に( $p < 0.01$ )高値であった。運動前および運動5分時の血糖値と比較して、運動15~30分時および運動終了15分後に有意に( $p < 0.01$ )低値であった。運動10分時と比

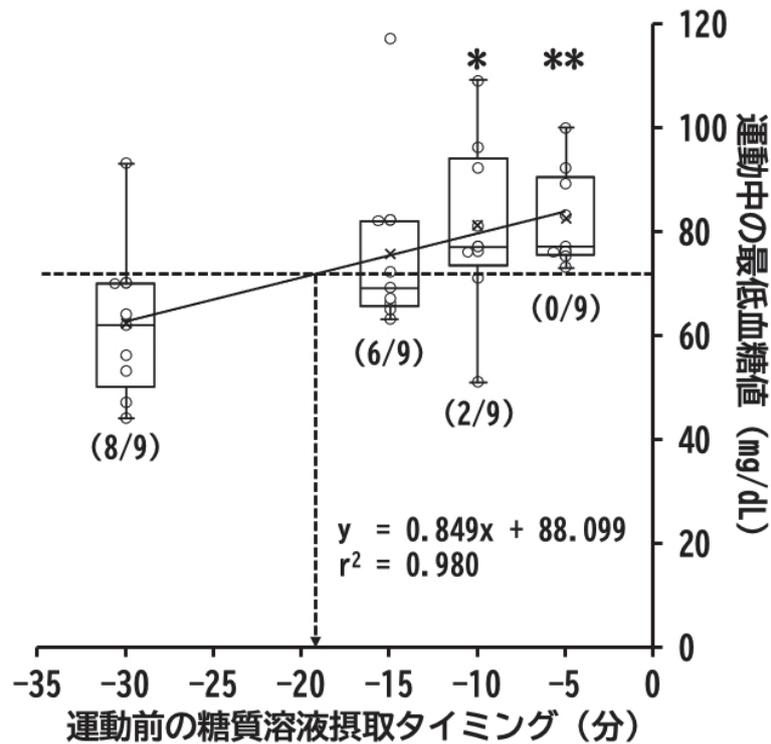


図6 実験2における運動中の最低血糖値

左から30分前条件、15分前条件、10分前条件および5分前条件の被験者9名分の運動中における最低血糖値 (○) を示す。箱髭図は四分位範囲、×は平均値を示す。箱髭図下の括弧内は、運動中の最低血糖値が低血糖の基準値を下回った人数の割合を示す。横破線は低血糖の基準値 (72 mg/dL) を示す。縦破線は糖質溶液摂取のタイミングと運動中の最低血糖値の回帰直線と低血糖の基準値の接点から下ろした運動誘発性低血糖が生じる糖質溶液の摂取タイミング (-19.0分) を示す。  
\* (p < 0.05)、\*\* (p < 0.01) は30分前条件との有意差を示す。

較して運動20~30分時に有意に (p < 0.01) 低値であった。運動25分時と比較して運動終了30分後に有意に (p < 0.05) 高値となった。10分前条件では (F = 3.61、p < 0.01)、運動5分時と比較して運動20分時および30分時 (p < 0.05)、運動25分時 (p < 0.01) に有意に低値であった。5分前条件では (F = 4.49、p < 0.01)、運動終了30分後に、糖質溶液摂取前 (p < 0.01)、運動前 (p < 0.05)、運動10分時 (p < 0.05)、運動15~30分時 (p < 0.01) と比較して有意に高値となった。なお、実験1の糖質溶液摂取後の安静5分、10分、15分、30分の血糖値の推移と実験2の各条件における運動前の血糖値の推移と間に有意な交互作用は認められなかった (F = 1.57、p = 0.19、図表なし)。

運動中の最低血糖値を被験者毎に算出した。運動中の最低血糖値が出現した経過時間は被験者によって異なった。運動中の最低血糖値 (図6) は、30分前条件で被験者9名中8名、15分前条件で6名、10分前条件

で2名において低血糖の基準値を下回った。運動中の最低血糖値に条件間で有意な主効果が認められた (F = 5.78、p < 0.01)。30分前条件の運動中の最低血糖値 (62.1 ± 14.0 mg/dL) が低血糖の基準値を下回り、10分前条件 (81.1 ± 15.6 mg/dL) および5分前条件 (82.3 ± 8.9 mg/dL) よりも有意に (p < 0.05) 低値であった。15分前条件の運動中の最低血糖値 (75.9 ± 15.9 mg/dL) は、いずれの条件とも相違は認められなかった。糖質溶液の摂取タイミング (x) と運動中の最低血糖値 (y) との関係について回帰式  $y = 0.8492x + 88.099$  が得られた。この式に低血糖の基準値 (y = 72) を代入したxの解は-19.0となった。

すべての条件における体重あたりのWmaxと運動前の血糖値から運動中の最低血糖値までの変化量との間に相関関係は認められなかった (r = 0.246、p = 0.15、図7a)。5分前条件における体重あたりのWmaxと運動前の血糖値から運動中の最低血糖値までの変化量と

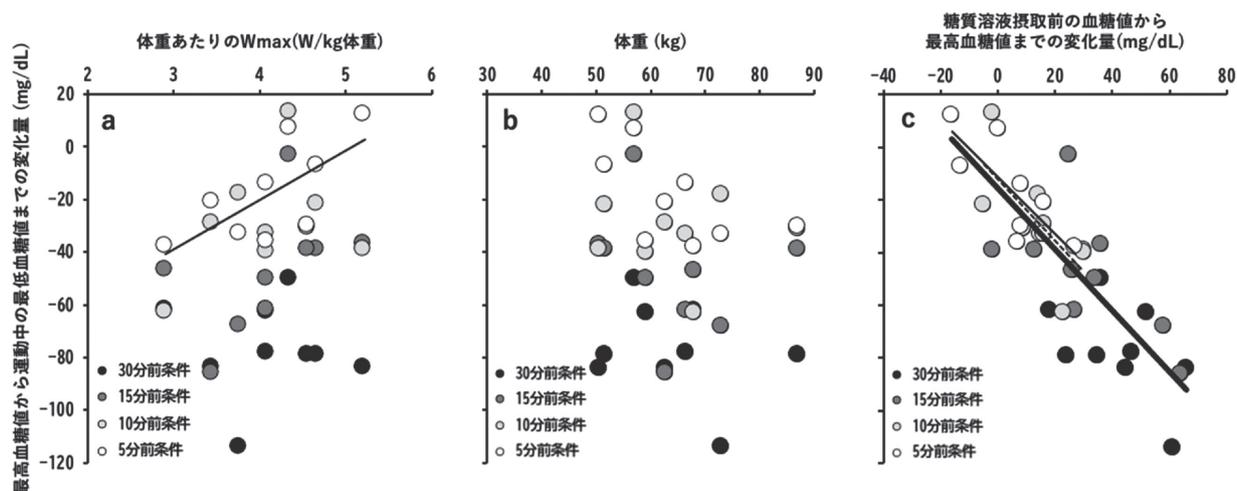


図7 体重あたりのWmax、体重および糖質溶液摂取前の血糖値から最高血糖値までの変化量と最高血糖値から運動中の最低血糖値までの変化量との関係

有意な相関関係が認められた条件について回帰直線を引いた。回帰直線は、太い実線がすべての条件、破線が10分前条件、細い実線が5分前条件のものを示す。

の間に正の相関関係が認められた ( $r = 0.696$ ,  $p = 0.02$ , 図7 a)。その他の条件には相関関係が認められなかった (30分前条件:  $r = -0.043$ ,  $p = 0.91$ , 15分前条件:  $r = 0.490$ ,  $p = 0.15$ , 10分前条件:  $r = 0.351$ ,  $p = 0.33$ , 図7 a)。すべての条件における体重と運動前の血糖値から運動中の最低血糖値までの変化量との間にも相関関係は認められなかった ( $r = -0.206$ ,  $p = 0.23$ , 図7 b)。5分前条件における体重と運動前の血糖値から運動中の最低血糖値までの変化量との間に負の相関関係の傾向が認められた ( $r = -0.649$ ,  $p = 0.06$ , 図7 b)。その他の条件には相関関係が認められなかった (30分前条件:  $r = -0.271$ ,  $p = 0.48$ , 15分前条件:  $r = -0.243$ ,  $p = 0.53$ , 10分前条件:  $r = -0.152$ ,  $p = 0.70$ , 図7 b)。すべての条件における糖質溶液摂取前から運動前までの血糖値の変化量と運動前から運動中の最低血糖値までの変化量との間に有意な負の相関関係が認められた ( $r = -0.821$ ,  $p < 0.01$ , 図7 c)。10分前条件 ( $r = -0.709$ ,  $p < 0.05$ , 図7 c) および5分前条件 ( $r = -0.804$ ,  $p < 0.01$ , 図7 c) では、条件内においても同様に負の相関関係が認められた。15分前条件では、負の相関関係の傾向が認められた ( $r = -0.635$ ,  $p = 0.07$ , 図7 c)。30分前条件については、相関関係は認められなかった ( $r = -0.529$ ,  $p = 0.14$ , 図7 c)。

### 3. 安静時における糖質溶液摂取後の胃幽門部横断面積の変化(実験1)と運動に伴う血糖値の変化(実験2)との関係

実験1の糖質溶液摂取前と実験2の各条件における糖質溶液摂取前の胃幽門部横断面積の間に有意差は認

められなかった (30分前条件:  $p = 0.70$ , 15分前条件:  $p = 0.50$ , 10分前条件:  $p = 0.75$ , 5分前条件:  $p = 0.77$ )。

実験1における糖質溶液摂取前から実験2の各条件と同じ糖質溶液摂取5分後、10分後、15分後および30分後までの胃幽門部横断面積の変化量と実験2における運動前から運動中の最低血糖値までの変化量との間に有意な正の相関関係が認められた ( $r = 0.574$ ,  $p < 0.01$ , 図8)。

### 4. 糖質溶液摂取後の運動に伴う胃幽門部横断面積の変化(実験2)

運動前後の胃幽門部横断面積の推移(図9)について、条件と経過時間との間に有意な交互作用が認められた ( $F = 2.05$ ,  $p = 0.04$ )。5分前条件の運動終了10分後の胃幽門部横断面積が30分前条件および10分前条件と比較し、有意に ( $p < 0.05$ ) 高値であった。

すべての条件において胃幽門部横断面積の推移に有意な主効果が認められた(図9)。30分前条件では ( $F = 3.90$ ,  $p = 0.02$ )、運動終了10分後の胃幽門部横断面積が糖質溶液摂取前に比べ、有意に ( $p < 0.05$ ) 高値であった。15分前条件では ( $F = 6.77$ ,  $p < 0.01$ )、運動終了10分後および15分後の胃幽門部横断面積が糖質溶液摂取前に比べ、有意に ( $p < 0.05$ ) 高値であった。10分前条件では ( $F = 3.05$ ,  $p = 0.05$ )、有意な主効果が認められたものの、経過時間の間で有意な差は認められなかった。5分前条件では ( $F = 21.81$ ,  $p < 0.01$ )、運動終了10分後、15分後および30分後の胃幽門部横断面積が、糖質溶液摂取前と比較して、運動終了15分後および30分後では、運動終了10分後と比較して、有意

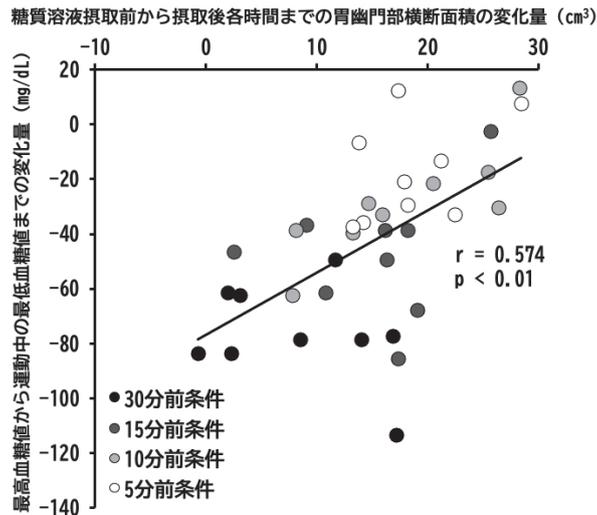


図8 実験1における糖質溶液摂取前から摂取後各時間までの胃幽門部横断面積の変化量と実験2における最高血糖値から運動中の最低血糖値までの変化量との関係

に ( $p < 0.05$ ) 高値となった。

#### IV 考察

##### 1. 安静時における糖質溶液摂取後の胃幽門部横断面積および血糖値の変化

安静時における糖質溶液摂取後の胃幽門部横断面積は、糖質溶液摂取5分後で最高値となり、その後、45分後まで徐々に小さくなった(図3)。血糖値は、糖質溶液摂取10分後から30分後まで漸増し、最高値となり、それ以降45分後まで漸減した(図4)。Horowitz et al.<sup>8)</sup>は、夜間絶食後における糖質75gを含む350mLの糖質溶液摂取が胃排出ならびに血糖値に及ぼす影響を検討した。Horowitz et al.<sup>8)</sup>によれば、糖質溶液の胃から腸への排出は、溶液摂取直後から始まり、血糖値は摂取30分後に最高値となったという。本研究とHorowitz et al.<sup>8)</sup>とでは、朝食摂取の有無および摂取した糖質量の点で異なる。加えて、本研究では胃幽門部横断面積の変化のみを評価しており、溶液の胃排出を直接同定したわけではない。しかしながら、朝食摂取後に糖質30gを含む500mLの糖質溶液を摂取した場合においても、胃幽門部横断面積が徐々に縮小したことから、Horowitz et al.<sup>8)</sup>と同様に摂取直後から糖質溶液が胃から腸へと排出され、血糖値が摂取30分後に最高値に達したと考えられる。実験1の安静時における糖質溶液摂取後の安静5分、10分、15分、30分の血糖値の推移と実験2の各条件における運動前の血糖値を便宜的に結んだ推移との間には相違が認められな

かった(図表なし)。また、糖質溶液摂取前の胃幽門部横断面積は、実験1と実験2の各条件において相違がなかった(図表なし)。実験2では、各条件の運動前の胃幽門部横断面積は測定していないものの、実験1の同じ経過時間における胃幽門部横断面積と同程度となっていたことが推察され、糖質溶液が胃から腸へと排出されていたものと考えられる。

##### 2. 糖質溶液摂取後の運動に伴う血糖値の変化

仮説の通り、糖質溶液摂取から運動開始までの時間が長くなるほど運動中の最低血糖値が低値となった。そして、運動中の最低血糖値は30分前条件のみ(62.1 ± 14.0 mg/dL)で低血糖の基準値である72 mg/dLを下回った(図6)。また、30分前条件では、血糖値の推移においても運動20~30分時に低血糖の基準値を下回った(図5)。よって、朝食摂取後の運動30分前における糖質30gを含む500mLの糖質溶液の摂取は、65% Wmax強度の運動中に運動誘発性低血糖を引き起こすことが示唆される。この結果は、藤江ら<sup>7)</sup>を支持するものであった。一方、5~15分前条件では、運動中の血糖値が低血糖の基準値を下回らなかった(図5、6)。したがって、朝食摂取後の運動5~15分前の糖質30gを含む500mLの糖質溶液摂取は、65% Wmax強度の運動中に運動誘発性低血糖を引き起こさないことが示唆される。15分前条件の結果は、朝食摂取の有無ならびに糖質摂取量が異なるものの、Moseley et al.<sup>4)</sup>と同様であった。また、5分前条件の結果は、藤江ら<sup>7)</sup>の運動直前(4分前)条件の結果と酷似

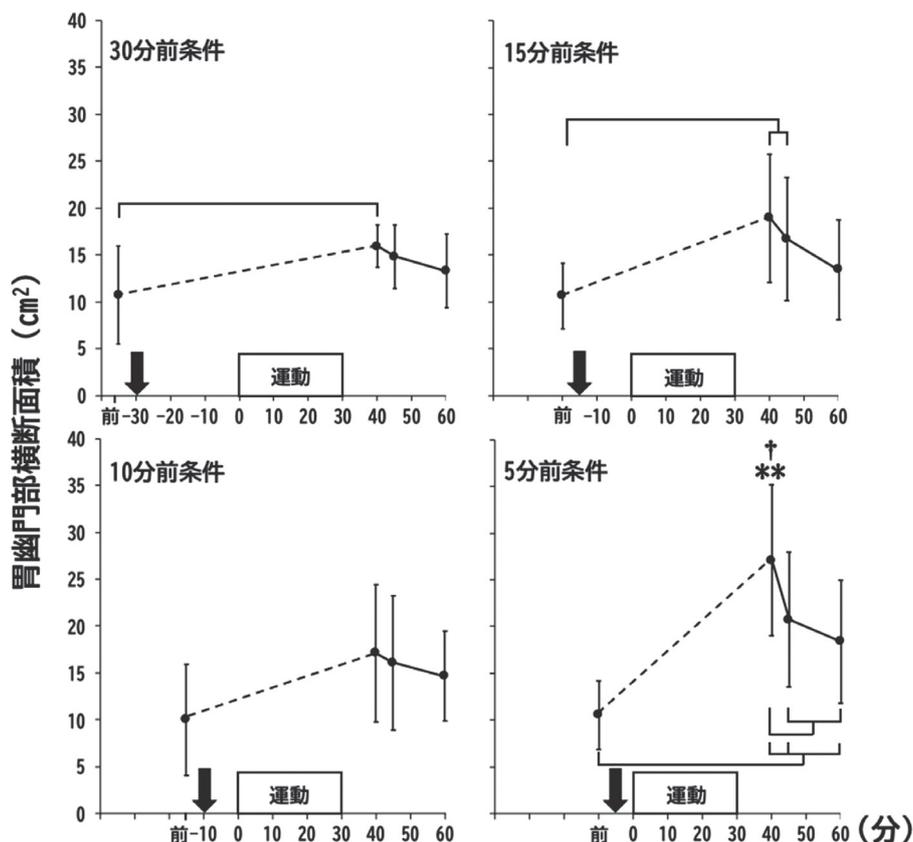


図9 実験2における各条件の胃幽門部横断面積の推移

各経過時間の平均値は被験者9名分のもの。黒矢印は糖質溶液の摂取タイミングを示す。\*\*は30分前条件との有意差 ( $p < 0.01$ ) を示す。†は10分前条件との有意差 ( $p < 0.05$ ) を示す。線で結ばれた時点の間に有意差 ( $p < 0.05$ ) がある。

していた。

本研究において30分前条件のみで運動中の血糖値が低血糖の基準値を下回った要因として、30分前条件の運動前の血糖値が、他の条件よりも高値を示したことが関与したと考えられる。血糖値および血中インスリン濃度は、糖質摂取20~40分後に最高値に達するとされている<sup>1)</sup>。本研究の実験1においても、血糖値は糖質溶液摂取30分後に最高値に達した(図4)。JeukendrupとKiller<sup>1)</sup>によれば、運動誘発性低血糖の発生のメカニズムは以下の通りである。糖質溶液摂取後、血糖値とともに血中インスリン濃度が上昇する。そして、すぐにグルコーストランスポーター4 (glucose transporter type 4: GLUT 4) が筋膜で動員され、筋内への糖取り込みが増大する。さらに、血中インスリン濃度が高い状態で運動が開始されるとGLUT 4の独立したカルシウム依存性プールを介して筋への糖取り込みがより増大する。これらの作用の結果、運動開始後、急激に血糖値が低下し、低血糖に陥るとされる。30分前条件では、運動前の血糖値が他の条件と比較

し、高値であった(図5)。本研究では、血中インスリン濃度は測定できていないものの、藤江ら<sup>7)</sup>は、本研究と同じ糖質溶液を摂取後、直前(4分前)条件では、運動前の血中インスリン濃度は上昇せず、30分前条件のみで上昇したことを示している。また、糖質量が75gで溶液量が350mL<sup>8)</sup>であったり、糖質量が30gでも溶液量が200mL<sup>11)</sup>であったりと本研究と同じ糖質溶液ではなかったものの、糖質溶液摂取後の血糖値や血中インスリン濃度の継時的な変化を追った研究では、糖質溶液摂取後から30分後まで血糖値も血中インスリン濃度も漸増したことが報告されている。よって、本研究においても糖質溶液摂取から運動開始までの時間が長くなればなるほど、血中インスリン濃度が上昇していたことが予想される。これらのことから、30分前条件では運動前の血中インスリン濃度が最も上昇したことで、運動開始後に血糖値が急激に低下し、低血糖の基準値を下回ったと考えられる。

15分前条件および10分前条件における運動中の最低血糖値の平均値は、低血糖の基準値を下回らなかった

ものの (図 5)、15分前条件で 6 名、10分前条件で 2 名の被験者において運動中の最低血糖値が低血糖の基準値を下回った (図 6)。10分前条件で運動中の最低血糖値が低血糖の基準値を下回った 2 名は、15分前条件でも下回っていた。さらに、15分前条件で基準値を下回った 6 名は、30分前条件でも下回っていた。Moseley et al.<sup>4)</sup>では、運動75分前条件で被験者 8 名中 5 名、45分前条件で 3 名、15分前条件で 2 名が低血糖を引き起こした。そして、Moseley et al.<sup>4)</sup>においても、15分前条件で低血糖を引き起こした 2 名が45分前条件でも低血糖を引き起こしたこと、45分前条件で低血糖を引き起こした 3 名が75分前条件でも低血糖を引き起こしたことが述べられており、運動誘発性低血糖の生じやすさには個人差があることが指摘されている。運動誘発性低血糖の生じやすさにおける個人差について、近藤ら<sup>12)</sup>および八田ら<sup>13)</sup>は、日本人男性を対象にした朝食摂取後の検討において、全身持久力が高い被験者ほど最高血糖値から運動中の最低血糖値までの減少量が大きいことを報告している。本研究においても全身持久力の指標である体重あたりのWmaxと各条件における運動前の血糖値から運動中の最低血糖値までの変化量との関係を確認したところ、5分前条件以外では、相関関係が認められなかった (図 7a)。近藤ら<sup>12)</sup>および八田ら<sup>13)</sup>では、運動30分前に糖質溶液が摂取されていたことから、本研究の30分前条件の結果は、近藤ら<sup>12)</sup>および八田ら<sup>13)</sup>の結果を支持しなかったと言える。他方、5分前条件において認められた正の相関関係 (図 7a) は、全身持久力が高い被験者ほど最高血糖値から運動中の最低血糖値までの減少量が小さかったことを示している。この関係については、体重と運動前の血糖値から運動中の最低血糖値までの変化量との間に負の相関関係の傾向が認められたことから (図 7b)、体重の影響があったことが考えられる。本研究ではすべての被験者が糖質30 gを含む500 mLの糖質溶液を摂取したことから、体重の重い被験者では体重あたりの糖質摂取量が少なかった。糖質溶液摂取から運動開始までの時間が5分と短時間の場合には、体重あたりの糖質摂取量が少ない被験者で、消化および吸収が早くなり、運動前に血糖値が上昇したことで、運動中の血糖値を低下させた可能性が考えられる。また、すべての条件における糖質溶液摂取前から運動前までの血糖値の変化量と運動前の血糖値から運動中の最低血糖値までの変化量との間に有意な負の相関関係が認められた (図 7c)。10分前条件および5分前条件では、条件内で個別に見ても同様に負の相関関係が認められ (図 7c)、5分前条件における相関関係 ( $r = -0.804$ ) は、体重あたりのWmaxとの関係 ( $r = 0.696$ ) よりも強かった。さらに、15分前条件では、有意ではなかったものの、負の相関関係の傾向が示された (図 7c)。これらの結果は、日本人男性を対象に、

朝食摂取後の運動開始30分前に、31 g、45 gおよび60 gの糖質を含む500 mLの糖質溶液を摂取し、すべての糖質量の条件において運動誘発性低血糖を引き起こしたことを示した吉本ら<sup>14)</sup>においても確認されている。よって、全身持久力が高いだけでなく、糖質溶液摂取による血糖値の上昇量が大きい被験者も、運動中の血糖値の減少量が大きいことが示唆される。朝食摂取後の運動開始30分前に加えて、運動開始15分前や10分前に糖質30 gを含む500 mLの糖質溶液を摂取する場合も、摂取後の血糖値の上昇量が大きい対象者は、運動誘発性低血糖の発生リスクに留意しなければならない。また、本研究において、運動開始5分前の糖質溶液摂取により運動誘発性低血糖を引き起こした被験者はいなかったものの、糖質溶液摂取前から運動前までの血糖値の変化量と運動前の血糖値から運動中の最低血糖値までの変化量との間に強い負の相関関係が認められ、数名の被験者において運動中の最低血糖値が低血糖の基準値近くまで低下した (図 6)。したがって、糖質溶液摂取後の血糖値の上昇量が大きい対象者では運動開始5分前の糖質溶液摂取であっても運動中の血糖値の低下には注意を払わなければならないと言えるであろう。

本研究における4つの摂取タイミング (x) と運動中の最低血糖値 (y) との関係より得られた回帰式 ( $y = 0.8492x + 88.099$ ) から低血糖の基準値 ( $y = 72$ ) に相当する糖質溶液の摂取タイミング、すなわち、運動誘発性低血糖を引き起こす糖質溶液の摂取タイミングを算出した。その結果、運動誘発性低血糖を引き起こす摂取タイミングは運動19.0分前となった (図 6)。上述の運動誘発性低血糖の発生しやすさにおける個人差を考慮しなければならないが、朝食摂取後に糖質30 gを含む糖質溶液500 mLを摂取し、その後19分以内に65% Wmax強度の運動を開始することでできれば、運動誘発性低血糖を引き起こす可能性は低くなることが示唆される。今後は、糖質30 gを含む糖質溶液500mLを摂取後、30分以上あけて運動を開始する場合、運動の何分前までに糖質溶液に摂取すると65% Wmax強度の運動中に運動誘発性低血糖を引き起こすのか、その最長時間についても明らかにする必要があるだろう。

### 3. 胃幽門部横断面積の変化と運動に伴う血糖値の変化との関係

実験1における糖質溶液摂取前から糖質溶液摂取5分後、10分後、15分後および30分後までの胃幽門部横断面積の変化量と、実験2における運動前の血糖値から運動中の最低血糖値までの変化量との間に有意な正の相関関係が認められた (図 8)。この結果は、糖質溶液摂取後の胃幽門部横断面積の変化と糖質溶液の摂取タイミングの相違に伴う運動中の血糖値変動に関連性が示されるとした本研究の仮説を支持するものであ

る。糖質溶液摂取前から摂取後の各条件と同じ経過時間までの胃幽門部横断面積の変化量（差）は、摂取された糖質溶液の胃の容量を示している<sup>9)</sup>。したがって、この値が大きいほど糖質溶液摂取後の時間経過に伴う胃から腸への溶液の排出量が少なかったことを意味する。本研究では、糖質溶液摂取前から各条件と同じ経過時間までの胃幽門部横断面積の変化量（差）が大きい被験者ほど、運動中の血糖値の低下量が少なかった（図8）。よって、運動誘発性低血糖を防ぐカギは、運動前における胃の中の糖質溶液の残留量にあると言えるのかもしれない。先述の通り、本研究の結果より糖質溶液摂取から運動開始までの時間が19分以上であると運動誘発性低血糖に陥る恐れがある。しかしながら、糖質溶液の摂取が運動開始の19分より前であっても、何らかの方法で運動に悪影響のない状態で糖質溶液を胃に貯留することができれば、運動誘発性低血糖を防げる可能性がある。糖質溶液の胃から腸への排出速度は、糖質溶液の糖質濃度や性状によって異なる<sup>15)</sup>。したがって、今後は、運動前に摂取する糖質溶液の糖質濃度や性状が胃幽門部横断面積や運動中の血糖値の変化に及ぼす影響についても検討する必要があるであろう。

運動終了後の血糖値は、10分前条件以外で運動中よりも運動終了30分後（60分）に有意に上昇した（図5）。30分前条件および15分前条件は糖質溶液摂取前と運動終了30分後との間で血糖値に相違がなかった。したがって、30分前条件および15分前条件では、運動中に低下した血糖値が糖質溶液摂取前の値に回復したと考えるのが妥当であろう。一方、5分前条件では運動終了30分後の血糖値が糖質溶液摂取前の値よりも高値であり、全経過時間の中で最も高い値となった。5分前条件の運動終了10分後（40分）の胃幽門部横断面積は、30分前条件および10分前条件に比べて高値であり、15分前条件と比較しても高値傾向であった（図9）。運動終了15分後（45分）以降、条件間における胃幽門部横断面積に相違はなくなったものの、5分前条件では運動終了30分後の胃幽門部横断面積が糖質溶液摂取前と比較して高値のままであった。これらのことは、5分前条件では運動終了時においても糖質溶液が胃に残留しており、運動終了直後より胃から腸へと排出されたものの、運動終了30分後までにすべてが排出し切らなかったこと、そして、運動終了30分後も糖質の吸収が続いており、結果的に血糖値が上昇し続けたことを示唆する。

実験1における糖質溶液摂取後の安静時の胃幽門部横断面積は、糖質溶液摂取5分後から15分後まで相違がなかったことから（図3）、実験2における15分前条件、10分前条件および5分前条件の運動前の胃幽門部横断面積も条件間で相違がなかったことが想定される。中強度以上の運動時には溶液の胃から腸への排出

速度が低下することから<sup>16)</sup>、65%Wmax強度の運動時、これら3条件では糖質溶液の胃から腸への排出速度は同様に低下したと考えられる。したがって、運動終了10分後の胃幽門部横断面積も3条件間で相違がないことが予想された。しかしながら、運動終了10分後の胃幽門部横断面積は、5分前条件に比べ、15分前条件および10分前条件で有意に低値か、あるいは低値傾向であった（図9）。その要因として、15分前条件および10分前条件における運動中の血糖値の低下が関わった可能性が考えられる。運動中ではなく安静時における検討ではあるものの、血糖値の低下に伴って、溶液の胃から腸への排出速度が増大することが報告されている<sup>17)</sup>。15分前条件および10分前条件では、運動中の最低血糖値が低血糖の基準値を下回った被験者がいた（図6）。また、血糖値の推移において、低血糖の基準値は下回っていないものの、運動前よりも運動中に血糖値が低下した（図5）。したがって、15分前条件および10分前条件では、運動中の血糖値の低下に伴い、糖質溶液の胃から腸への排出が促進され、結果的に運動終了10分後の胃幽門部横断面積が小さくなった可能性が考えられる。

#### 4. 本研究における限界

本研究における限界として、1点目に糖質溶液の摂取時間が挙げられる。本研究では、500 mLの糖質溶液を2分以内に摂取させた。しかしながら、スポーツの現場において、運動前に2分以内に500 mLのスポーツドリンクを飲み切ることは決して多くない。したがって、今後は糖質溶液の摂取時間を延長させた場合や小分けにして摂取した場合の検討も必要である。また、2点目として、被験者の特性について述べなければならない。本研究の被験者は、運動習慣のある男性であった。したがって、体力、特に糖代謝に影響を及ぼし得る全身持久力がより高い被験者や運動習慣のない被験者の場合には、異なる結果が生じる可能性がある。加えて、本研究の被験者は、様々な課外活動団体に所属していた。よって、普段行っている運動様式が統一されているわけではなかった。持久系やパワー系など、日常的に統一された運動様式のみを実施している被験者を対象とした場合には、異なる結果となる場合もある。さらに、本研究では糖代謝に影響を及ぼす骨格筋量等の身体組成の影響も考慮できていない。最後に、3点目として、被験者の食習慣の影響も考慮しなければならない。本研究では、被験者の食習慣を統制したわけではない。習慣的な糖質摂取量の多少、朝食の欠食の有無、事前のグリコーゲンローディング等の食事の統制によって、研究結果が異なることが想定される。

## V 結論

実験2において、朝食摂取後の運動開始30分前、15分前、10分前および5分前に糖質30gを含む500mLの糖質溶液を摂取させ、65% Wmax強度の運動を実施させた。その結果、30分前に糖質溶液を摂取した場合のみで運動誘発性低血糖を引き起こした。また、実験1における糖質溶液摂取前から実験2の各条件と同じ経過時間までの胃幽門部横断面積の変化量と実験2における運動前の血糖値から運動中の最低血糖値までの変化量との間に関連性が認められた。このことから、糖質溶液摂取後の溶液の胃排出が運動中の血糖値変動に関連することが示唆された。そして、実験2における糖質溶液の摂取タイミングと運動中の最低血糖値の関係から、運動誘発性低血糖を引き起こす糖質溶液の摂取タイミングが運動の19分以上前であることが示唆された。

## 利益相反

著者全員が利益相反はない。

## 著者貢献

IFおよびTYが、研究のデザインの素案を作成し、その後、IF、WI、KY、MT、KT、NK、KSおよびTY（以下、すべての著者）で確認し、研究デザインを確定させた。IF、WI、KY、MT、NKおよびTYがデータ収集、分析を担当した。分析されたデータの解釈はすべての著者が担当した。草稿はIFおよびTYが執筆し、すべての著者が批判的にレビュー、修正した。最後に原稿の最終版をすべての著者が確認し、投稿を承認した。

## 文献

- 1) Jeukendrup, A.E., Killer, S.C.: Myths Surrounding pre-exercise carbohydrate feeding, *Ann. Nutr. Metab.*, 57, 18-25 (2010)
- 2) Costill, D.L., Coyle, E., Dalsky, G., et al.: Effects of elevated plasma FFA and insulin on muscle glycogen usage during exercise, *J. Appl. Physiol. Respir. Environ. Exerc. Physiol.*, 43, 695-699 (1977)
- 3) Foster, C., Costill, D.L., Fink, W.J.: Effects of preexercise feedings on endurance performance, *Med. Sci. Sports*, 11, 1-5 (1979)
- 4) Moseley, L., Lancaster, G.I., Jeukendrup, A.E.: Effects of timing of pre-exercise ingestion of carbohydrate on subsequent metabolism and cycling performance, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 88, 453-458 (2003)
- 5) Kondo, S., Tanisawa, K., Suzuki, K., et al.: Preexercise carbohydrate ingestion and transient hypoglycemia: Fasting vs. feeding, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 51, 168-173 (2019)
- 6) 日本スポーツ振興センター, パスウェイ科学チーム・ハイパフォーマンススポーツセンター: パフォーマンスに差を生み出す水分補給作戦, <https://pathway.jpnsport.go.jp/sports/column04.html>, (2024年9月23日)
- 7) 藤江衣織, 垣内ちひろ, 吉本香乃, 他: 朝食摂取後における運動直前の糖質溶液摂取が定常負荷運動時の血糖値に及ぼす影響, *日本スポーツ栄養研究誌*, 18, 39-47 (2025)
- 8) Horowitz, M., Edelbroek, M.A., Wishart, J.M., et al.: Relationship between oral glucose tolerance and gastric emptying in normal healthy subjects, *Diabetologia*, 36, 857-862 (1993)
- 9) Van, P., Putte, D., Perlas, A.: Ultrasound assessment of gastric content and volume, *Br. J. Anaesth.*, 113, 12-22 (2014)
- 10) Burke, L.M., Hawley, J.A., Wong, S.H., et al.: Carbohydrates for training and competition, *J. Sports Sci.*, 29, S17-S27 (2011)
- 11) Lutnik, M., Weisshaar, S., Mussbacher, L.M., et al.: The substitute ENSO 16 has low impact on glucose metabolism in healthy humans: a randomized, double-blind, active-controlled, cross-over trial, *Sci. Rep.*, 14, 14534 (2024)
- 12) 近藤早希, 谷澤薫平, 鈴木克彦, 他: 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)
- 13) 八田早那子, 藤江衣織, 東郷将成, 他: 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, *体力科学*, 70, 247-256 (2021)
- 14) 吉本香乃, 藤江衣織, 池永和奏, 他: 運動前の糖質摂取量の相違が日本人男性の運動時の血糖値に及ぼす影響, *日本スポーツ栄養研究誌*, 18, 48-61 (2025)
- 15) Leiper, J.B.: Fate of ingested fluids: factors affecting gastric emptying and intestinal absorption of beverages in humans, *Nutr. Rev.*, 73, 57-72 (2015)
- 16) Neuffer, P.D., Young, A.J., Sawka, M.N.: Gastric emptying during exercise: effects of heat stress and hypohydration, *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, 58, 433-439 (1989)
- 17) Murthy, T.A., Grivell, J., Hatzinikolas, S., et al.: Acceleration of gastric emptying by insulin-induced hypoglycemia is dependent on the degree of hypoglycemia, *J. Clin. Endocrinol. Metab.*, 106, 364-371 (2021)

(受付日: 2024年8月25日)  
(採択日: 2024年10月28日)

Original Article

# Effects of different timings of pre-exercise consumption of a carbohydrate beverage on exercise-induced hypoglycemia

Iori FUJIE <sup>\*1</sup>, Wakana IKENAGA <sup>\*1</sup>, Kano YOSHIMOTO <sup>\*1</sup>, Masanari TOGO <sup>\*2</sup>, Kazuki TAKIZAWA <sup>\*3</sup>, Nobuya KIMURA <sup>\*4</sup>, Keisuke SHIBATA <sup>\*1, \*4</sup>, Taichi YAMAGUCHI <sup>\*1, \*4</sup>

<sup>\*1</sup>Food and Nutrition Science, Graduate School of Dairy Sciences, Rakuno Gakuen University

<sup>\*2</sup>Department of Food and Nutrition, Asahikawa City University Junior College

<sup>\*3</sup>Institute of Physical Development Research

<sup>\*4</sup>Department of Food Science and Human Wellness, College of Agriculture, Food and Environment Sciences, Rakuno Gakuen University

---

## ABSTRACT

### **【Aim】**

This study was aimed at examining the effects of different timings of consumption prior to exercise of a carbohydrate beverage on the blood glucose levels (BGLs) during exercise, and to determine the consumption threshold timing that would cause exercise-induced hypoglycemia.

### **【Methods】**

Nine healthy men cycled for 30 minutes at an intensity equivalent to 65% of their maximal load after consuming 500 mL of a beverage containing 30 g of glucose. Participants completed the four trials in a crossover manner: consumption of the beverage 30 minutes, 15 minutes, 10 minutes and 5 minute pre-exercise (30-min, 15-min, 10-min, and 5-min trials, respectively). The BGLs were measured prior to the carbohydrate beverage consumption, and just before and at 5-minute intervals during the 30 minutes of exercise.

### **【Results】**

Only in the 30-min trial did the lowest BGL ( $62.1 \pm 14.0$  mg/dL) fall below the hypoglycemia threshold (72 mg/dL). The regression equation ( $y = 0.8492x + 88.099$ ) between the timing of the carbohydrate beverage consumption pre-exercise and the lowest BGL during exercise showed that the threshold timing of consumption of the carbohydrate beverage prior to exercise that could cause exercise-induced hypoglycemia was 19.0 minutes prior.

### **【Conclusion】**

Consumption of 500 mL of a beverage containing 30 g of carbohydrate 30 minutes before exercise caused exercise-induced hypoglycemia in our study, and a regression equation showed that consumption of the beverage more than 19 minutes prior to the exercise could result in exercise-induced hypoglycemia.

**Keywords:** blood glucose level, endurance exercise, glucose metabolism, gastric emptying