

持久性運動開始直前の糖質摂取による運動誘発性低血糖 (インスリン・ショック) の発生を規定する要因の解明

医薬基盤・健康・ 谷 澤 薫 平
栄 養 研 究 所
(共同研究者) 早 稲 田 大 学 近 藤 早 希
同 伊 藤 智 子
西 安 交 通 大 学 孫 曉 敏
早 稲 田 大 学 鈴 木 克 彦

Elucidation of Factors Determining Incidence of Hypoglycemia After Pre-Exercise Ingestion of Carbohydrate

by

Kumpei Tanisawa
*National Institutes of Biomedical Innovation,
Health and Nutrition,
Waseda University*
Saki Kondo, Tomoko Ito, Katsuhiko Suzuki
Waseda University
Xiaomin Sun
Xi'an Jiaotong University

ABSTRACT

The purpose of the present study was to examine the effect of feeding status before endurance exercise on the incidence of hypoglycemia after pre-exercise ingestion of carbohydrate, and to elucidate the characteristics of individuals with high susceptibility to hypoglycemia after pre-exercise ingestion of carbohydrate. Sixteen subjects performed 60 min cycle ergometer exercises at 75% $\dot{V}O_2$ max in overnight fasted and

fed (3 h after breakfast) states in random order. In both conditions, they consumed 500 ml of a beverage containing 150 g of glucose 30 min before the start of exercise. The criterion of hypoglycemia was set at 70mg/dL. In both conditions, mean plasma glucose levels did not drop below 70mg/dL 15 min after the start of exercise. In the fed state, plasma glucose levels dropped transiently below 70mg/dL in 7 subjects, who showed substantially higher $\dot{V}O_2\text{max}$, while plasma glucose levels remained above this level in the other subjects. On the other hand, 5 subjects developed transient hypoglycemia in the fasted state and their serum insulin levels at the onset of exercise and insulinogenic index were significantly higher than that in the other subjects who did not demonstrate a decline in plasma glucose. In conclusion, the present study demonstrated that pre-exercise ingestion of carbohydrate 30 min before endurance exercise causes hypoglycemia in several individuals regardless of feeding status. Furthermore, subjects with higher aerobic fitness and enhanced insulin secretory capacity seem to be more prone to hypoglycemia following pre-exercise carbohydrate ingestion under fed and fasted conditions, respectively.

要 旨

本研究は、持久性運動開始3時間前の食事摂取の有無が、運動開始直前の糖質摂取による低血糖の発生に及ぼす影響を明らかにすることと、運動開始直前の糖質摂取による低血糖を規定する要因を明らかにすることを目的として行った。16名の若年日本人男性を対象として、運動開始3時間前に朝食を摂取する条件と、一晩絶食の条件において、150gのグルコースを摂取した30分後に、最大酸素摂取量の75%の強度で60分の自転車運動を行った。両条件において、運動開始15分後における血糖値の平均値は低血糖の基準である70mg/dLを下回らなかったが、朝食摂取条件では7名、絶食条件では5名において低血糖が起こった。朝食摂取条件において、低血糖が起こった者は、正常血糖の者と比較して最大酸素摂取量が有意に高く、絶食条件においては、運動開始直前のインスリン濃度とインスリン分泌指標が高かった。以上の結果より、若年日本人男性において、

摂食状況に関わらず、運動開始直前の糖質摂取により低血糖が起こる者がいることが明らかになった。また、運動3時間前に食事を摂取した状態においては最大酸素摂取量が、一晩絶食の状態においては、インスリン初期分泌反応が高い者において、低血糖が起こりやすい可能性が示唆された。

緒 言

持久性運動における主たるエネルギー基質は糖質と脂質である。糖質は肝臓と骨格筋においてグリコーゲンとして貯蔵されるが、その貯蔵量には限りがあり、グリコーゲンの枯渇は持久性運動パフォーマンスを低下させる¹⁾。したがって、マラソンやトライアスロンなど、1時間を超える持久性スポーツのレース前には、十分な量の糖質を摂取してグリコーゲン貯蔵量を高めておくことが推奨されている²⁾。しかし、持久性運動の前日や、3~4時間前までの糖質摂取は持久性パフォーマンスに好影響を与える一方で、持久的運動の開始30~60分前における多量の糖質摂取は、運動開始

直後の急激な血糖値の低下を引き起こし、持久性パフォーマンスを低下させることが報告されている^{3,4)}。これらの研究結果から、現在のスポーツ栄養のガイドブックやインターネットなどのメディアでは、この運動誘発性低血糖を「インスリン・ショック」と名付け、運動開始直前の糖質摂取を控えることが推奨されている。しかしながら、運動開始直前の糖質摂取が急激な血糖値の低下を引き起こすことを報告した研究は、実験室内で、かつ長時間の絶食後に行われた研究であり、実際のスポーツ現場に即した状況では実験が行われていない。現在のスポーツ栄養のガイドラインでは、持久系種目の場合、運動開始の3-4時間前までに糖質を多く含む食事を摂取することが推奨されており²⁾、そのような条件下における糖質摂取が持久性運動中のインスリンと血糖値の動態に及ぼす影響は、絶食時とは大きく異なることが予想される。また、これまでの研究はいずれも欧米人を対象として行われており、欧米人と比較してインスリン分泌能が低いことが報告されている日本人においても⁵⁾、本当に低血糖が起こるかは不明である。さらに、運動開始直前に糖質を摂取しても低血糖やパフォーマンスの低下は起こらないと報告している研究もあり^{6,7)}、この見解の不一致を説明し得る要因は不明である。そこで本研究は、日本人男性を対象として、1) 持久性運動開始3時間前の食事摂取の有無が、運動開始直前の糖質摂取による低血糖の発生に及ぼす影響を明らかにすること、2) 運動開始直前の糖質摂取により、低血糖が起こりやすい者の特徴を明らかにすることを目的として行った。

1. 方法

1.1 研究デザイン

本研究では、持久性運動開始直前の糖質飲料摂取が運動中の血糖値とインスリンの動態に及ぼす影響が、運動開始3時間前の食事の有無により異

なるか否かを検討するため、非盲検クロスオーバー試験を行った。全ての被験者は、1) 運動開始3時間前に規定食摂取（朝食摂取条件）、2) 一晚絶食（絶食条件）の2条件にて、糖質飲料を摂取した後、1時間の自転車運動を行った。本研究は早稲田大学「人を対象とする研究に関する倫理委員会」の承認を受けた後実施された。

1.2 被験者

本研究の被験者は、20～23歳の健康な日本人男性16名とした。被験者特性は表1の通りであった。対象者にはあらかじめ実験の目的と内容を説明し、文書により同意を得た後実験を実施した。

表1 被験者特性

N	16
年齢 (歳)	21.0 ± 1.0
身長 (cm)	173.7 ± 5.1
体重 (kg)	67.3 ± 8.2
体脂肪率 (%)	13.1 ± 4.3
$\dot{V}O_2\max$ (mL/min)	3077 ± 340
$\dot{V}O_2\max$ (mL/kg/min)	46.3 ± 7.4

1.3 最大酸素摂取量の測定

自転車エルゴメーター（コンビウエルネス社製、エアロバイク75XL II）を用いた漸増運動負荷試験により最大酸素摂取量（ $\dot{V}O_2\max$ ）を測定した。5分間のウォーミングアップの後、60～90Wから15W/分ずつ負荷を漸増し、疲労困憊になるまで測定を行った。測定中はマスクを装着し、運動中の酸素摂取量、二酸化炭素排出量を自動代謝分析装置（AE-310、ミナト医科学社）により測定した。 $\dot{V}O_2\max$ の判定基準は、酸素摂取量のレベリングオフがみられることとした。ただし、酸素摂取量のレベリングオフがみられない場合でも、1) 心拍数が年齢から推定される最大心拍数（220 - 年齢 ± 5 拍/分）に達していること、2) 呼吸交換比が1.1以上であること、3) RPEが19もしくは20であること、この3指標中2つ以

上を満たした場合は $\dot{V}O_2\max$ と判定した。

1.4 実験プロトコル

$\dot{V}O_2\max$ の測定後、全ての被験者は、2条件での実験を最低1週間の間隔を空けて行った。実験前日の夜、被験者は規定食（エネルギー：808kcal、たんぱく質エネルギー比率：11.9%、脂質エネルギー比率：24.4%、炭水化物エネルギー比率：63.7%）を摂取し、実験当日の朝は、朝食摂取条件の場合は、運動開始3時間前に規定食（エネルギー：709kcal、たんぱく質エネルギー比率：10.4%、脂質エネルギー比率：28.7%、炭水化物エネルギー比率：60.9%）を摂取し、絶食条件の場合は水以外何も摂取せずに実験室へ入室した。

安静時採血を行った後、被験者は150gのグルコースを含む500mLの糖質飲料を2分以内に摂取した。一般的に、グルコースの代わりにデンプン部分加水分解物を含む飲料が75g経口糖負荷試験に用いられているが、本研究においては、純粋なグルコース150gを含む飲料を用いて実験を行った。糖質飲料摂取後、運動中に下痢嘔吐等を訴え実験を中断した者はいなかった。糖質飲料摂取30分後に、温度22℃、湿度50%に設定した実験室で、75% $\dot{V}O_2\max$ の強度で60分の自動車運動を開始した。ペダルの回転数は60~80rpmとした。60分の運動後、続けてパフォーマンステストを行った。パフォーマンステストは、90% $\dot{V}O_2\max$ の強度で自転車運動を行い、疲労困憊に至るまでの時間を計測するものであった。ペダルの回転数が50rpmを切った時点で疲労困憊と判断した。運動開始15分後、30分後、45分後、60分後およびパフォーマンステスト終了後に、心拍数と主観的運動強度を記録した。また、60分間の運動中、被験者は15分毎に3分間マスクを装着し、運動中の酸素摂取量、二酸化炭素排出量および呼吸交換比を測定した。

1.5 血液分析

採血は運動開始30分前、運動開始直前、運動開始15分後、30分後、60分後およびパフォーマンステスト終了後に行った。採血により得られた静脈血を3000rpm、4℃で15分間遠心して分離した血清と血漿を分析に用いた。血糖値、血清インスリン濃度、血漿アドレナリン濃度、血漿ノルアドレナリン濃度、血清コルチゾール濃度および血清成長ホルモン濃度の分析は血液検査会社（BML社）に委託した。インスリン抵抗性の指標として、絶食条件における空腹時血糖値と空腹時インスリン濃度より、homeostasis model assessment of insulin resistance（HOMA-IR）を以下の計算式より算出した。

HOMA-IR

$$= \text{空腹時血糖値} \times \text{空腹時インスリン濃度} / 405^{8)}$$

また、絶食条件における空腹時と糖質摂取30分後の血糖値とインスリン濃度より、インスリン初期分泌能の指標として、インスリン分泌指数⁹⁾を以下の計算式より算出した。

インスリン分泌指数

$$= (\text{糖質摂取30分後インスリン濃度} \\ - \text{空腹時インスリン濃度}) \\ / (\text{糖質摂取30分後血糖値} - \text{空腹時血糖値})$$

低血糖の基準は血糖値70mg/dL以下とし、朝食摂取条件と絶食条件それぞれにおいて、運動開始15分後に低血糖が生じた者を低血糖群、低血糖が生じなかった者を正常血糖群とした。

1.6 統計解析

各測定値は平均値 ± 標準偏差で示した。各変数の経時変化を試行間で比較するため、時間と試行を要因とした繰り返しのある二元配置分散分析

を行った。有意な交互作用が認められた場合、対応のある t 検定により同一時間における各変数の差を試行間で比較した。多重比較検定にはボンフェローニ法を用いた。試行間でのパフォーマンステストの継続時間の差は、対応のある t 検定により比較した。低血糖群と正常血糖群間における各変数の差は、対応のない t 検定により比較した。運動開始 15 分後における血糖値と各変数との相関はピアソンの積率相関係数により示した。全ての解析は SPSS22.0 (IBM 社製) を用いて行い、いずれの場合にも統計学的有意水準は 5% 未満とした。

2. 結果

図 1 に、朝食摂取条件と絶食条件における血糖値の経時変化を示した。二元配置分散分析の結果、時間に有意な主効果が認められ ($P < 0.001$)、運動開始 30 分前と比較して、運動開始直前、運

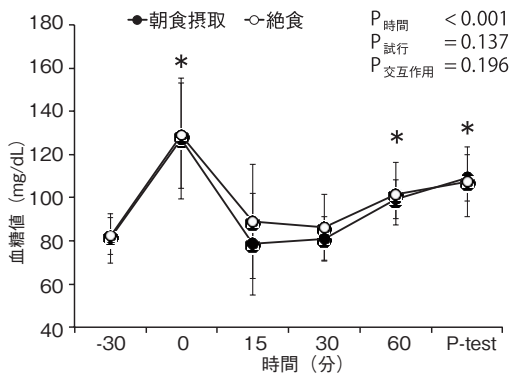


図1 血糖値の経時変化
* $P < 0.05$ vs. 運動開始 30 分前

表2 運動中の酸素摂取量, 二酸化炭素排出量, 呼吸交換比, 心拍数および主観的運動強度の経時変化

		時間(分)				P-test	有意確率		
		15	30	45	60		時間	試行	交互作用
酸素摂取量 (mL)	朝食摂取	2281 ± 244	2312 ± 205	2349 ± 200	2385 ± 204	-	<0.001	0.721	0.770
	絶食	2284 ± 233	2304 ± 208	2347 ± 213	2369 ± 179	-			
二酸化炭素排出量 (mL)	朝食摂取	2218 ± 225	2204 ± 185	2219 ± 178	2240 ± 187	-	0.343	0.022	0.691
	絶食	2185 ± 188	2169 ± 176	2164 ± 160	2182 ± 129	-			
呼吸交換比	朝食摂取	0.97 ± 0.03	0.96 ± 0.02	0.95 ± 0.02	0.94 ± 0.03	-	<0.001	0.024	0.384
	絶食	0.96 ± 0.04	0.94 ± 0.03	0.93 ± 0.03	0.92 ± 0.03	-			
心拍数 (拍/分)	朝食摂取	148.9 ± 10.4	156.8 ± 10.9	163.1 ± 11.2	166.7 ± 11.9	181.3 ± 10.5	<0.001	0.969	0.189
	絶食	150.5 ± 8.0	158.1 ± 9.2	162.9 ± 11.2	166.4 ± 10.1	179.3 ± 8.5			
主観的運動強度	朝食摂取	12.9 ± 1.4	14.2 ± 1.5	15.3 ± 1.6	16.5 ± 2.0	18.8 ± 1.3	<0.001	0.054	0.549
	絶食	12.3 ± 1.5	13.8 ± 1.6	14.7 ± 1.9	15.9 ± 2.1	18.7 ± 1.7			

P-test: パフォーマンステスト

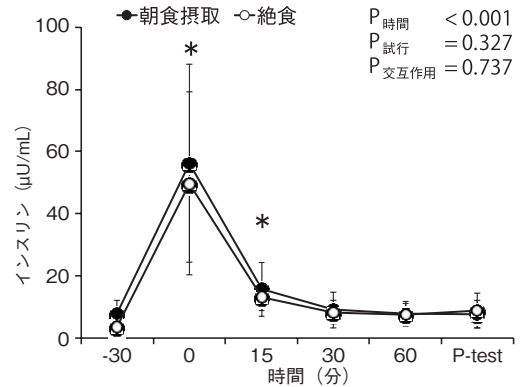


図2 血清インスリン濃度の経時変化
* $P < 0.05$ vs. 運動開始 30 分前

動開始 60 分後およびパフォーマンステスト終了後における血糖値は有意に高い値を示した。運動開始 30 分前と運動開始 15 分後および 30 分後との間で血糖値に差は認められなかった。また、試行の主効果および時間と試行間の交互作用は認められなかった。両条件において、いずれの時間においても、血糖値の平均値は 70mg/dL を下回らなかった。

図 2 に、朝食摂取条件と絶食条件における血清インスリン濃度の経時変化を示した。二元配置分散分析の結果、時間に有意な主効果が認められ ($P < 0.001$)、運動開始 30 分前と比較して、運動開始直前および運動開始 15 分後におけるインスリン濃度は有意に高い値を示した。また、試行の主効果および時間と試行間の交互作用は認められなかった。

表 2 に、朝食摂取条件と絶食条件における、

酸素摂取量, 二酸化炭素排出量, 呼吸交換比, 心拍数および主観的運動強度の経時変化を示した. 二元配置分散分析の結果, 二酸化炭素排出量と呼吸交換比において, 試行に有意な主効果が認められ, 朝食摂取条件と比較して, 絶食条件は低い二酸化炭素排出量と呼吸交換比を示した (二酸化炭素排出量: $P = 0.022$, 呼吸交換比: $P = 0.024$). 酸素摂取量, 呼吸交換比, 心拍数および主観的運動強度においては時間に有意な主効果が認められた ($P < 0.001$). いずれの変数においても, 時間と試行間の交互作用は認められなかった. また, パフォーマンステストの継続時間に試行間で差は認められなかった (図 3, $P = 0.906$).

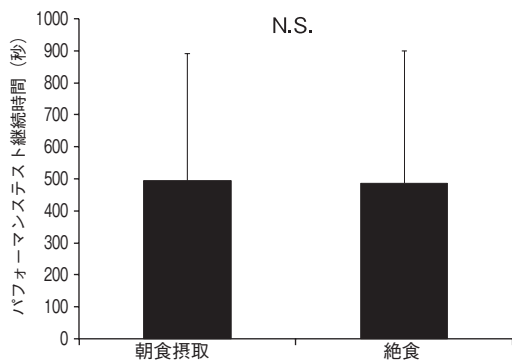


図3 朝食摂取条件と絶食条件間におけるパフォーマンステスト継続時間の比較

図4~5に, 朝食摂取条件と絶食条件における, 運動開始30分前~運動開始15分後の血糖値の経時変化を被験者毎に示した. 運動開始15分後における血糖値の平均値は70mg/dLを下回らなかったが, 朝食摂取条件においては7名, 絶食条件においては5名, 血糖値が70mg/dLを下回る者がいた. そこで, 朝食摂取条件と絶食条件それぞれにおいて, 運動前の糖質飲料摂取による低血糖発生を規定する要因を探索するため, 低血糖群と正常血糖群との間で各変数の値を比較した. その結果, 朝食摂取条件において, 低血糖群は正常血糖群と比較して有意に高い $\dot{V}O_2\max$ を示した(図6) $P=0.025$. また, $\dot{V}O_2\max$ と運動開始15分後の血

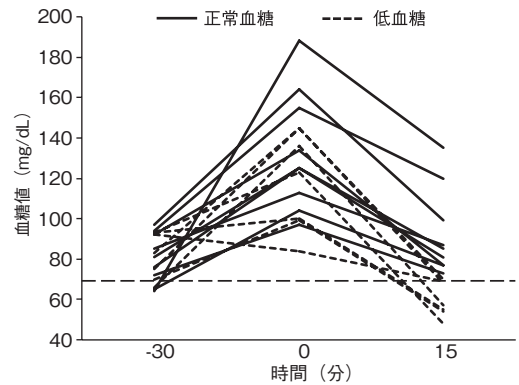


図4 朝食摂取条件における被験者毎の血糖値の経時変化

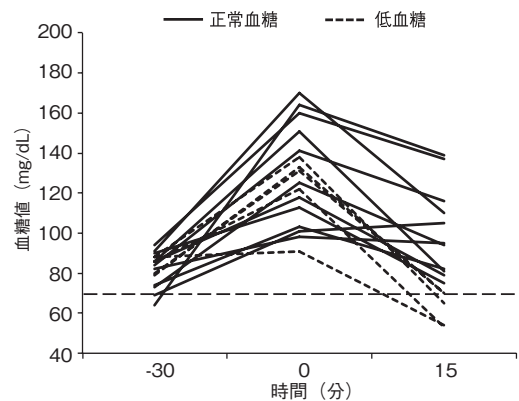


図5 絶食条件における被験者毎の血糖値の経時変化

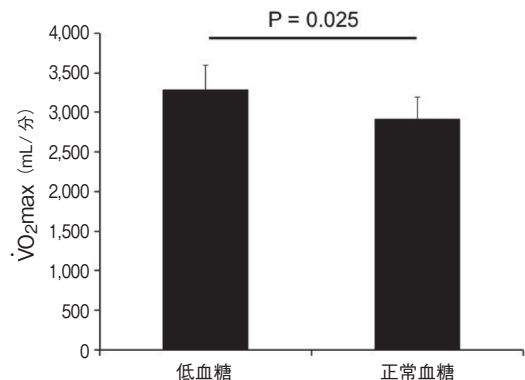


図6 朝食摂取条件における低血糖群と正常血糖群間の $\dot{V}O_2\max$ の比較

糖値との間に, 有意な負の相関が認められた ($r = -0.657, P = 0.006$). また, 体重あたりの $\dot{V}O_2\max$ は, 正常血糖群と比較して低血糖群で高い傾向を示した (低血糖群: 50.0 ± 7.1 mL/kg/min, 正常血糖群: 43.5 ± 6.7 mL/kg/min, $P = 0.081$). 絶食条件にお

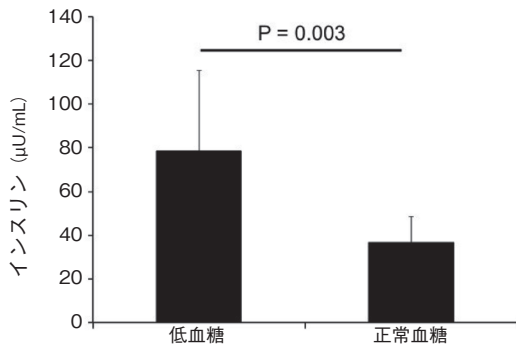


図7 絶食条件における低血糖群と正常血糖群間の血清インスリン濃度（運動開始直前）の比較

いて、低血糖群は正常血糖群と比較して、運動開始直前の血清インスリン濃度と（図7） $P=0.003$ 、インスリン分泌指数（対数変換後の値を比較）は有意に高かった（低血糖群： 0.40 ± 0.72 ，正常血糖群： -0.15 ± 0.27 ， $P = 0.039$ ）。また、運動開始直前のインスリン濃度およびインスリン分泌指数と、運動開始15分後の血糖値との間に、有意な負の相関が認められた（運動開始直前のインスリン濃度： $r = -0.661$ ， $P = 0.005$ ；インスリン分泌指数： $r = -0.691$ ， $P = 0.003$ ）。両条件において、運動開始直前の血糖値と運動開始15分後の血糖値との間に有意な正の相関関係が認められた（朝食摂取条件： $r = 0.684$ ， $P = 0.003$ ；絶食条件： $r = 0.554$ ， $P = 0.026$ ）。その他の変数については、低血糖群と正常血糖群との間で差は認められず、両条件において、各時間における主観的運動強度とパフォーマンステストの継続時間に差は認められなかった。

3. 考 察

本研究の結果、1) 若年日本人男性において、持久性運動開始3時間前の食事摂取の有無に関わらず、運動開始直前の糖質摂取により、運動開始15分後に低血糖が起こる者がいること、2) 運動開始前の摂食状況により、低血糖の発生を規定する要因が異なる可能性があることが示唆された。

欧米人を対象とした研究により、一晩の絶食後、

持久性運動の開始直前に糖質を摂取することにより低血糖が起こることが報告されており、その理由として、急激なインスリン濃度の上昇に伴う骨格筋における糖質利用の増加と脂質利用の低下が関与する可能性が示唆されていた^{3,4)}。欧米人と比較して、日本人はインスリン分泌能が低いことが報告されており⁵⁾、欧米人と同様に運動開始直前の糖質摂取により低血糖が起こるかどうかは不明であったが、本研究において、運動開始15分後の血糖値は、平均値では70mg/dLを下回らなかったものの、朝食摂取条件においては16名中7名、絶食条件においては16名中5名70mg/dLを下回っており、30%以上の頻度で低血糖を発症する者が存在することが明らかになった。実際のスポーツ現場を想定して運動3時間前に食事を摂取した条件においても、運動開始直前の糖質摂取により低血糖が起こる者がいたことから、日本人においても、持久性スポーツのレースあるいは練習直前の糖質摂取により、低血糖が起こる者が存在することに留意する必要があると考えられる。

一晩絶食の条件においては、運動開始直前のインスリン濃度およびインスリン分泌指数が高い者において、低血糖が起こりやすいという結果が得られた。この結果は、糖質摂取に対するインスリンの初期分泌反応が高い者において、低血糖が起こりやすい可能性があることを示唆している。一晩の絶食後、レース直前に糖質を摂取するという状況は考えにくいですが、朝練習など、絶食後に糖質を摂取した後すぐに運動を行う状況もあるため、経口糖負荷試験によりインスリン初期分泌反応を把握し、低血糖が起こりやすい者を予め把握することが重要であると考えられる。

一方、朝食摂取条件においては、運動開始直前のインスリン濃度ではなく、 $\dot{V}O_{2max}$ が低血糖の発生と関連していた。運動開始3時間前の摂食状況により、低血糖の発生を規定する要因が変わる

理由として、食事の摂取により、その後の糖質摂取に対するインスリン感受性が変化する可能性が挙げられる。ラットの骨格筋にインスリンを一度投与すると、その3時間後における骨格筋へのグルコース取り込み量は、インスリンを投与しない場合と比較して多いことが報告されている¹⁰⁾。したがって、朝食摂取条件においては、朝食後に一度インスリン濃度が上昇するため、骨格筋へグルコースが取り込まれやすい状態であったことが予想される。 $\dot{V}O_2\max$ が高い者においてはインスリン感受性が高いことが報告されているため¹¹⁾、骨格筋へグルコースが取り込まれやすい朝食摂取条件において、低血糖が起こりやすい状況であったことが予想される。低血糖群と正常血糖群の間で、インスリン抵抗性の指標であるHOMA-IRには差は認められなかったが、HOMA-IRは肝臓のインスリン抵抗性を反映する指標であることが報告されており¹²⁾、今後はインスリンクランプ法¹³⁾により評価した骨格筋のインスリン感受性や、運動中の骨格筋の糖取り込み能を測定し、これらが低血糖の発生を規定するかを明らかにする必要がある。いずれにせよ、持久系スポーツの競技者は一般的に高い $\dot{V}O_2\max$ を有するため、朝食を摂取してから臨むレースや日々の練習において、直前の糖質摂取が低血糖を引き起こす可能性があることに留意する必要があると考えられる。

運動前の糖質摂取により低血糖が起こった者はいたものの、低血糖群と正常血糖群との間で、運動中の主観的運動強度とパフォーマンステストの結果に差は認められなかった。メタアナリシスこそ行われてはいないが、Hargreavesらの総説において、運動開始30～60分前の糖質摂取は持久性パフォーマンスを低下させないと結論づけており¹¹⁾、本研究の結果はこの結論を支持している。しかし、運動中の血糖値の低下がスキルパフォーマンスや運動中の認知低下機能と関連する可能性も示唆されており^{15,16)}、今後はスキルや認知機

能を含む多角的視点からパフォーマンスを評価し、運動直前の糖質飲料摂取による低血糖が、運動パフォーマンスに影響を及ぼすかどうかを明らかにする必要がある。また、2時間を超えるような長時間の運動や、より強度の高い運動を行った場合に、運動前の糖質飲料摂取による低血糖が運動パフォーマンスに及ぼす影響についても検討する必要がある。

4. 結 論

若年日本人男性において、持久性運動開始3時間前の食事摂取の有無に関わらず、運動開始直前の糖質摂取により、運動開始15分後に低血糖が起こる者がいることが明らかになった。また、運動3時間前に食事を摂取した状態においては $\dot{V}O_2\max$ が、一晚絶食の状態においては、インスリン初期分泌反応が高い者において、低血糖が起こりやすい可能性が示唆された。

謝 辞

実験を補助して下さった早稲田大学運動生化学研究室の皆様と、被験者として協力して下さった早稲田大学の学生の皆様に感謝申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に心よりお礼申し上げます。

文 献

- 1) Bergstrom J., Hermansen L., Hultman E., Saltin B., Diet, muscle glycogen and physical performance. *Acta Physiol Scand.*, 71:140-150(1967)
- 2) Burke L.M., Kiens B., Ivy J.L., Carbohydrates and fat for training and recovery. *J. Sports Sci.*, 22:15-30 (2004)
- 3) Costill D.L., 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)

- 4) Foster C., Costill D.L., Fink W.J., Effects of preexercise feedings on endurance performance. *Med. Sci. Sports*, 11:1-5(1979)
- 5) Ahuja V., Kadowaki T., Evans R.W., Kadota A., Okamura T., El Khoudary S.R., et al., Comparison of HOMA-IR, HOMA-beta% and disposition index between US white men and Japanese men in Japan: the ERA JUMP study. *Diabetologia*, 58:265-271 (2015)
- 6) Febbraio M.A., Stewart K.L., CHO feeding before prolonged exercise: effect of glycemic index on muscle glycogenolysis and exercise performance. *J. Appl. Physiol.* (1985) ., 81:1115-1120(1996)
- 7) Hargreaves M., Costill D.L., Fink W.J., King D.S., Fielding R.A., Effect of pre-exercise carbohydrate feedings on endurance cycling performance. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 19:33-36(1987)
- 8) Matthews D.R., Hosker J.P., Rudenski A.S., Naylor B.A., Treacher D.F., Turner R.C., Homeostasis model assessment: insulin resistance and beta-cell function from fasting plasma glucose and insulin concentrations in man. *Diabetologia*, 28:412-419 (1985)
- 9) Seltzer H.S., Allen E.W., Herron A.L., Jr., Brennan M.T., Insulin secretion in response to glycemic stimulus: relation of delayed initial release to carbohydrate intolerance in mild diabetes mellitus. *J. Clin. Invest.*, 46:323-335(1967)
- 10) Geiger P.C., Han D.H., Wright D.C., Holloszy J.O., How muscle insulin sensitivity is regulated: testing of a hypothesis. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.*, 291:E1258-1263(2006)
- 11) King D.S., Dalsky G.P., Staten M.A., Clutter W.E., Van Houten D.R., Holloszy J.O., Insulin action and secretion in endurance-trained and untrained humans. *J. Appl. Physiol.* (1985) ., 63:2247-2252 (1987)
- 12) Hoffman R.P., Indices of insulin action calculated from fasting glucose and insulin reflect hepatic, not peripheral, insulin sensitivity in African-American and Caucasian adolescents. *Pediatr Diabetes*, 9:57-61 (2008)
- 13) DeFronzo R.A., Tobin J.D., Andres R., Glucose clamp technique: a method for quantifying insulin secretion and resistance. *Am. J. Physiol.*, 237:E214-223(1979)
- 14) Hargreaves M., Pre-exercise nutritional strategies: effects on metabolism and performance. *Can. J. Appl. Physiol.*, 26 Suppl:S64-70(2001)
- 15) Ali A., Williams C., Nicholas C.W., Foskett A., The influence of carbohydrate-electrolyte ingestion on soccer skill performance. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 39:1969-1976(2007)
- 16) Grego F., Vallier J.M., Collardeau M., Bermon S., Ferrari P., Candito M., et al., Effects of long duration exercise on cognitive function, blood glucose, and counterregulatory hormones in male cyclists. *Neurosci. Lett.*, 364:76-80(2004)