

短報

牛乳・糖質混合溶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—

丸山 まいみ^{*1}、寺田 新^{*2}、大家 千枝子^{*1}、岡村 信一^{*1}、木村 典代^{*1}

^{*1} 高崎健康福祉大学健康福祉学部健康栄養学科

^{*2} 東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻生命環境科学系

【目的】

インスリンは、骨格筋においてグリコーゲンおよびたんぱく質の合成を強力に促進する作用を持つため、運動後の栄養補給ではいかにインスリン分泌を高めるかが重要となる。これまでに糖質とたんぱく質、もしくは糖質と脂質を同時に摂取することで、インスリン分泌が高められることが報告されている。牛乳はたんぱく質と脂質をバランス良く含み、スポーツ選手にとっても身近な食品である。そこで本研究では、運動後に糖質と牛乳の混合物を摂取することによりインスリン分泌が高められるかを検証した。

【方法】

対象は健康な運動習慣のない女子大学生7名であった。30分間の低強度自転車運動終了後に被験物を摂取させた。糖質のみの試行（グルコース1g/BW+水250ml (CHO)）又は糖質と牛乳の混合物の試行（グルコース1g/BW+牛乳250ml (CHO+Milk)）の2試行をクロスオーバー法にて実施した。被験物摂取前、摂取後15、30、60、120分後に血漿インスリン値と血糖値の測定を行った。

【結果】

被験物摂取後の血漿インスリン値の曲線下面積（AUC）はCHOと比較してCHO+Milkの方が有意に高値を示し（ $p < 0.05$ ）、血糖値のAUCはCHOと比較してCHO+Milkの方が有意に低値を示した（ $p < 0.05$ ）。

【結論】

運動後における糖質と牛乳の混合物摂取は、健康な一般女子大学生においても、インスリン分泌を高める可能性が示唆された。

キーワード：牛乳 インスリン ヒト 自転車エルゴメーター

I 緒言

運動中には骨格筋および肝臓のグリコーゲンがエネルギー基質として利用され、減少する。練習や試合が1日のなかで複数回行われる場合、運動後に糖質を摂取し、グリコーゲンを速やかに回復させることが重要となる。また、運動後には、運動前に比べて筋たんぱく質の合成が高まるものの、十分なたんぱく質の摂取がなされない場合には、筋たんぱく質の分解が優位となったままであり、筋肥大効果が得られなくなる¹⁾。したがって、運動後の栄養補給は、運動中に減少したグリコーゲンを回復させ、さらに筋たんぱく質の合成を促進するうえで重要な役割を果たしているといえ

る。

そのような運動終了後の栄養補給の際、グリコーゲンや筋たんぱく質の材料である、糖質やたんぱく質・アミノ酸を摂取するだけでなく、インスリン分泌をいかに高めるか、ということが重要な要因の一つとなる。インスリンは、骨格筋における糖輸送体GLUT-4の細胞膜上への移動を促進することに加えて、グリコーゲン合成酵素の活性を高めることで、グリコーゲン合成を高める作用を持つ²⁾。また、同様に、インスリンによって活性化される情報伝達分子Aktは、Forkhead box class O (FoxO)の抑制やmechanistic Target of Rapamycin (mTOR)の活性化を介して、筋たんぱく質の分解を抑制し、かつ筋たんぱく質の合

成を促進することが知られている²⁾。以上のことから、運動後においてインスリン分泌を増強することは、筋グリコーゲン回復および筋たんぱく質合成において好ましい効果をもたらすものと考えられている。

インスリンは、糖質摂取に伴う血糖値の上昇が刺激となって膵臓のβ細胞から分泌される。一方、たんぱく質や脂質は、それ自体によるインスリン分泌は少ないものの、糖質と同時に摂取された場合には、Glucose-dependent insulintropic polypeptide (GIP) や Glucagon-like peptide-1 (GLP-1) などの消化管ホルモンを介して、糖質によるインスリン分泌を増強することが知られている³⁾。したがって、糖質だけではなく、たんぱく質や脂質を同時に摂取することで、インスリン分泌が促進すると考えられる。実際、運動後においても、糖質とたんぱく質、もしくは糖質と脂質を同時に摂取することで、インスリン分泌が増強され、筋グリコーゲンの回復も促進されることが、ヒトおよび動物実験で確認されている^{4), 5)}。

以上のことから、運動後に糖質だけではなく、たんぱく質さらには脂質を同時に摂取することで、インスリン分泌が増強されると考えられる。そのような三大栄養素をバランスよく同時に摂取する方法として、牛乳の摂取が挙げられる。牛乳に含まれる糖質は、消化・吸収がゆるやかに行われる乳糖であり、インスリン分泌に対する刺激は弱いものの、乳化され、消化・吸収されやすい状態となっている脂質およびたんぱく質を多く含む。そこで、牛乳に糖質を添加したものを摂取することで、よりインスリン分泌を高めることができると考えられる。実際に我々は、実験動物(マウス)に対して、30分間の走行運動後に糖質と牛乳の混合溶液を投与したところ、糖質だけを摂取した場合に比べて、インスリン分泌が顕著に促進され、筋グリコーゲンの回復が促進することを報告している⁶⁾。

以上の研究結果は、運動後においてインスリン分泌を高める手法として、糖質と牛乳の混合溶液の摂取が有用である可能性を示唆するものである。しかしながら、これまで得られている結果は、実験動物を対象としたものであり、実際にヒトにおいても同様の結果が得られるかは明らかではない。そこで本研究では、健康な女子大学生を対象として、30分間の軽運動後の糖質と牛乳の混合溶液の摂取がインスリン分泌に及ぼす影響について検討することを目的とした。

II 方法

1. 被験者

被験者は、運動習慣のない健康な女子大学生7名であった。被験者の身体的特徴を表1に示した。被験者は、実験の主旨、内容およびそれに伴う苦痛と危険性についての説明を受け、それらを十分に理解したうえ

で同意書に署名し、自由意思により本実験に参加した。実験期間中は、通常の食事および身体活動を維持するように、また実験24時間前からは、激しい身体活動、カフェインの摂取および飲酒を禁止した。実験前日の夕食および当日の朝食は2回の試行で同一のものを摂取し、夕食は前日の21時まで、朝食は実験開始3時間前までに済ませるように指示した。なお、本実験は、高崎健康福祉大学研究倫理委員会の承認を得て行われた(承認番号2701)。

2. 実験プロトコル

被験者は事前に30分間の自転車エルゴメーター運動を行い、心拍数が130 bpmとなる運動強度を決定した。本実験のプロトコルを図1に示した。被験者は、事前測定で決定した運動強度で、30分間の自転車エルゴメーター(エアロバイク75XL2、コンピュエルネス社)運動を、最低1週間の間隔を置いて2回行った。運動終了後速やかに(ただし、溶液摂取前の採血が終了してから)、1) 体重1 kgあたり1 gのグルコースを250 mlの水で溶解した糖質溶液(CHO試行)、もしくは2) 体重1 kgあたり1 gのグルコースを250 mlの牛乳(100 ml中にたんぱく質3.3 g、脂質3.9 gおよび炭水化物4.8 gを含む: セブン&アイ・ホールディングス)で溶解した糖質・牛乳混合溶液(CHO-Milk試行)のいずれかをクロスオーバー法により摂取した。溶液の摂取後は、実験室内で2時間の安静を保った。なお、本実験での運動強度を設定するために、実際に30分間の自転車エルゴメーター運動を事前に1回行わせた。

3. 測定項目

運動中(10、20分目)および運動終了時に心拍数の測定を行った。また、運動開始10、20分目および運動終了時にBorg scaleによる主観的運動強度(Rating of Perceived Exertion: RPE)の測定を行った。

溶液摂取直前(30分間の自転車エルゴメーター運動終了直後)および溶液摂取15、30、60、120分目において、穿刺器具(セーフティプロプラス、ロッシュダイアグノスティクス社)を用いて、被験者による自己穿刺を行い、指先から採血を行った。血糖測定装置(Precision Xceed、アボットジャパン株式会社)を用いて血糖値の測定を行い、同じ穿刺部位からヘパリン処理したキャピラリー採血管(Thermo Fisher Scientific K. K.)を用いて採血を行った。採取した血液は13,000rpmで10分間遠心分離することで血漿を得た。すべてのサンプルは血漿インスリン濃度の分析まで-80℃の超低温フリーザーにて保存した。血漿インスリン濃度は、ELISAキット(Insulin Human ELISA, Mercodia, Inc)を用いて測定を行った。

血糖値および血漿インスリン濃度の経時変化のグラ

表 1 被験者の身体的特徴

	身長 (cm)	体重 (kg)	体脂肪率 (%)
Mean ± S.D.	158.6 ± 4.0	52.3 ± 6.3	25.7 ± 5.6

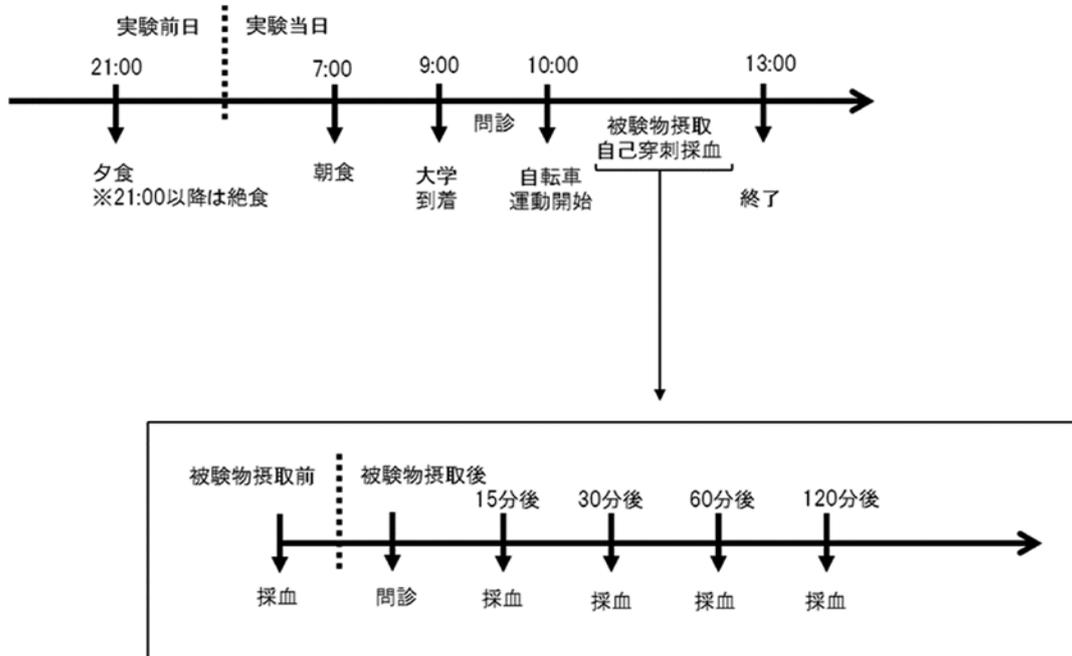


図 1 実験プロトコル

表 2 運動中の心拍数およびRPE

	心拍数 (拍 / 分)		RPE	
	CHO	CHO-Milk	CHO	CHO-Milk
10 分	118 ± 13	121 ± 8	11.0 ± 1.4	10.4 ± 1.0
20 分	122 ± 13	124 ± 8	11.6 ± 1.1	11.4 ± 0.8
30 分	126 ± 11	129 ± 5	12.4 ± 0.8	12.0 ± 0.6

CHO：糖質摂取試行、CHO-Milk：糖質・牛乳混合物摂取試行、RPE：主観的運動強度
数値は全て平均±標準偏差で表した。

フを作成し、溶液摂取直前（0分目）から溶液摂取120分目までにおける血液（血漿）中でのそれぞれの増加量の指標として、曲線下面積（Area under the curve：AUC_(0-120min)）値を算出した。

4. 統計処理

本研究のデータはすべて平均値±標準偏差で示した。2試行間の比較には、対応のあるStudentのt検定を用いた。いずれも危険率5%未満をもって有意とした。

Ⅲ 結果

1. 運動中の心拍数およびRPE

自転車エルゴメーター運動の開始前、運動中、運動終了後の心拍数およびRPEを表2に示した。心拍数、RPEともに両試行間で有意な差は認められなかった。したがって、両試行間で自転車運動による生体への負荷は同等であったと考えられる。

2. 回復期における血糖値および血漿インスリン濃度の変化

溶液摂取後の血漿インスリン濃度の経時変化とAUC_(0-120min)値を図2-AおよびBに示した。血漿イン

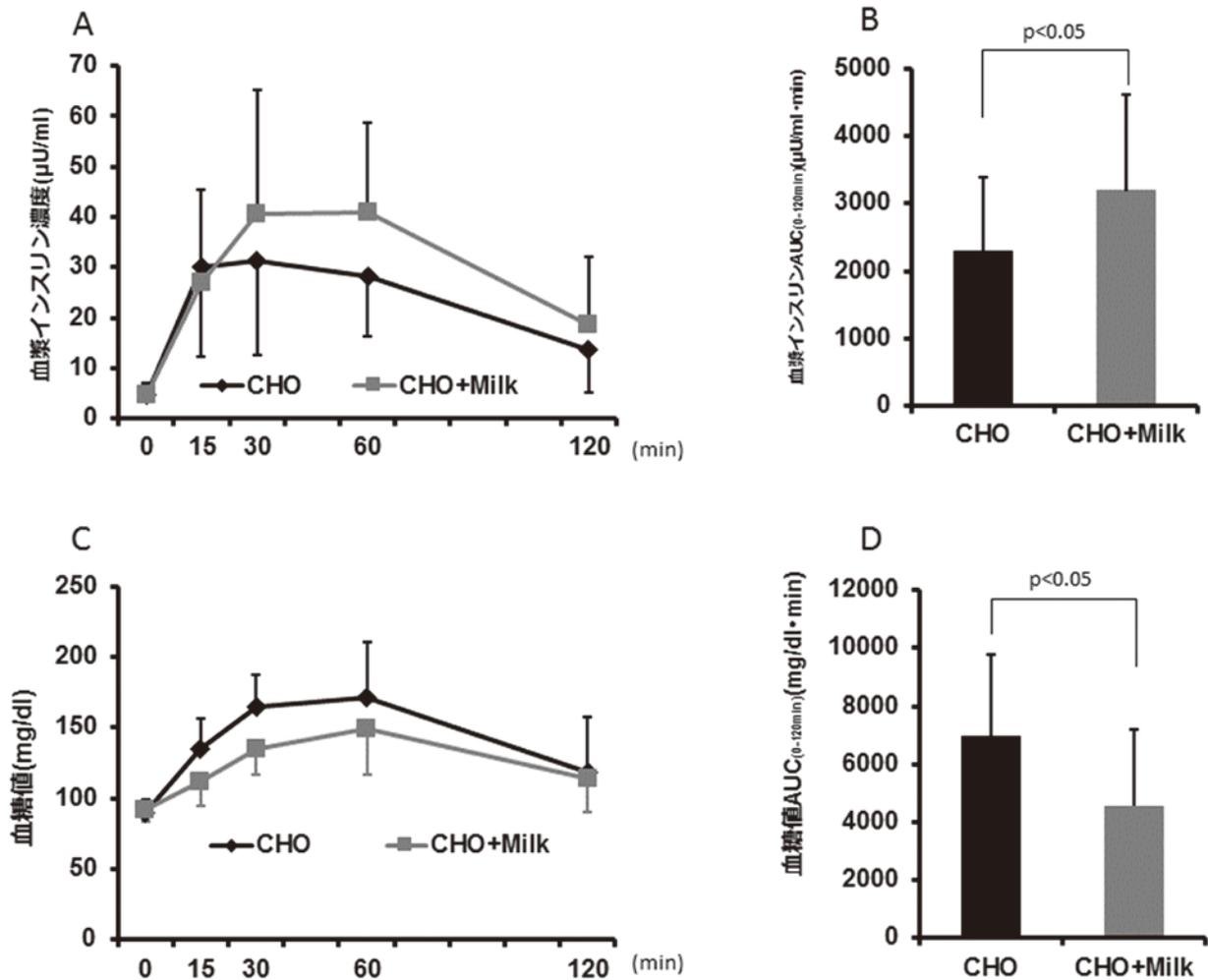


図2 2時間の回復期間中の血漿インスリン濃度および血糖値の経時変化と曲線下面積 (AUC_(0-120min))

CHO: 糖質摂取試行、CHO-Milk: 糖質・牛乳混合物摂取試行
 数値は全て平均±標準偏差で表した。

スリン濃度のAUC_(0-120min)値は、CHO試行時に比べてCHO-Milk試行で有意に高い値を示した(図2-B、 $p < 0.05$)。

溶液摂取後の血糖値の経時変化およびAUC_(0-120min)値を図2-CおよびDに示した。血糖値のAUC値は、CHO試行に比べてCHO-Milk試行で有意に低い値を示した(図2-D、 $p < 0.05$)。

IV 考察

インスリンは運動後の筋グリコーゲン回復および筋たんぱく質の増加を促進するうえで重要な役割を果たしていると考えられている²⁾。我々はこれまでに、マウスを対象とした動物実験において、糖質だけではなく牛乳を同時に摂取することで運動後のインスリン分泌が顕著に促進されることを報告してきた⁶⁾。本研究

では、健康な女子大学生を対象として検討を行い、動物実験の結果と同様の結果が得られた。この知見は、ヒトにおいても、糖質と牛乳の混合物の摂取が運動後のインスリン分泌を促進するうえで効果的な手法である可能性を支持するものである。

牛乳の中には、乳糖が含まれており、消化・吸収後にグルコースへと変換される。また、たんぱく質(アミノ酸)も、糖質ほど強力ではないものの、インスリン分泌を刺激する作用を持つ。したがって、CHO-Milk試行で認められたインスリン分泌の増加が、糖質と牛乳によるインスリン分泌量を合算しただけであったという可能性も考えられる。本研究においては、普段トレーニングを行っていない女子大学生を被験者としたため、過度な負担とならないように、CHO試行とCHO-Milk試行の2試行のみを行った。したがって、本研究に参加した被験者において、牛乳のみを運動後

に摂取した場合にインスリンがどの程度分泌されるかは明らかではない。しかしながら、日本人に比べてインスリン分泌能力が高いと言われている欧米人⁷⁾を対象として行われた研究では、運動後に牛乳のみ(237g)を摂取した場合の血漿インスリン濃度のAUC値は、約700 $\mu\text{U}/\text{ml}\cdot\text{分}$ であることが報告されている⁸⁾。本研究では、CHO試行におけるインスリンAUC_(0-120min)値は、約2,200 $\mu\text{U}/\text{ml}\cdot\text{分}$ であった。したがって、牛乳によるインスリン分泌量は、糖質摂取に比べて小さく、糖質と牛乳それぞれによるインスリン分泌量を単純に合算しても、CHO-Milk試行で得られた値(約3,200 $\mu\text{U}/\text{ml}\cdot\text{分}$)を超えることはないと考えられる。また、我々が行った動物実験においても、同様に、運動後の糖質・牛乳混合物の摂取で、糖質摂取単独摂取に比べて著しく高いインスリン分泌が認められている⁶⁾。したがって、これらの結果から、糖質と牛乳を同時摂取することでインスリン分泌に対しては相加的というよりはむしろ相乗的な効果が得られる可能性が高いと思われる。ただし、今後は、CHO試行とCHO-Milk試行のエネルギー摂取量を同等した場合(例えば、CHO試行の糖質摂取量を増やした場合など)の比較検討や糖質を加えないMilkのみの試行を実施し、ヒトにおいても相乗的な効果が認められるかどうかの検証などを行う必要があるだろう。

本研究で使用した牛乳には、100 mlあたり4.8 gの糖質が含まれていた。したがって、CHO-Milk試行では、CHO試行に比べて、牛乳に含まれる糖質の分だけ血糖値が高くなると考えられる。しかしながら、CHO試行に比べてCHO-Milk試行の血糖値のAUCは、有意に低い値であった(図2-D)。血糖は小腸からの糖質の吸収量と末梢組織における糖質の取り込み量の差分として現れる。血糖の吸収量が少ないことが原因で血糖値の上昇が緩やかであった場合には、膵臓からのインスリン分泌が少なくなるはずである。しかしながら、先述したように、CHO-Milk試行では、CHO試行に比べてインスリン分泌が高値を示していた(図2-A、B)。したがって、CHO-Milk試行で認められた血糖値の低下は、小腸での糖の吸収が抑えられたというよりも、インスリン分泌が増加し、それにより末梢での糖の取り込みが増加したことを反映していると考えられる。食事などで摂取した糖質の80%以上が骨格筋において処理されることが知られている⁹⁾。さらに、本研究と同様の血糖値およびインスリン濃度の変化を示した動物実験では、糖質と牛乳の混合物の摂取により糖質単独摂取に比べて、運動後の筋グリコーゲンの回復が促進されることが報告されている⁶⁾。したがって、CHO試行に比べてCHO-Milk試行で低下した分の血糖は、骨格筋に取り込まれ、筋グリコーゲンの再合成に利用されていた可能性が高いと考えられ、今後の実験においては、実際にヒトを対象として筋グ

リコーゲン濃度の測定を行う必要もあるだろう。

本研究では、2回の試行を同一の運動強度で行い、さらに、表2に示すように、運動中および運動終了時の心拍数およびRPEには、両試行間で有意な差が認められなかった。したがって、両試行で生体に対する負荷は両試行間で同等であり、その差がインスリン分泌に影響を及ぼしていた可能性は低いといえる。先述したように、本研究では、普段トレーニングを行っていない女子大学生を対象とした。そのため、運動中の心拍数が130拍程度であり、運動強度は必ずしも高いものではなかった。高強度の運動中および運動後には、インスリン分泌に対して抑制的に作用するアドレナリンおよびノルアドレナリンの分泌が高まる¹⁰⁾。今後の研究においては、実際のアスリートなどを対象として、より強度の高い運動後でも(インスリン分泌に対して抑制的に働くアドレナリン、ノルアドレナリンの分泌がより高まるような条件下においても)糖質と牛乳の同時摂取によるインスリン分泌促進効果が認められるか検討する必要があるだろう。

本研究において用いた牛乳中のたんぱく質量は、100 mlあたり3.3 gであった。筋量および筋力増加のために、運動後に摂取すべきたんぱく質に関しては、体重1 kgあたり0.25~0.4 gという値が推奨されている¹¹⁾。CHO-Milk群におけるたんぱく質の摂取量(8.25 g)は、被験者の体重から算出される運動後の推奨たんぱく質摂取量(13~20 g)に比べて少し足りないものであった。したがって、骨格筋量の増加という点に関しては、たんぱく質摂取量をさらに増やす方が良いかもしれない。今後の研究においては、インスリン分泌を最も高め、グリコーゲンの回復および筋たんぱく質合成を促進するうえで最適な糖質・牛乳混合物の組成および摂取量を検討する必要があるだろう。

V 結論

運動後における糖質と牛乳の混合物摂取は、健康な一般女子大学生においても、インスリン分泌を高める可能性が示唆された。

謝辞

本研究に対して多大な助成を賜りました牛乳乳製品健康学会議に深く感謝いたします。また、本研究に協力していただきました被験者の皆様に深く感謝いたします。

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) Beelen, M., Burke, L.M., Gibala, M.J., et al.: Nutritional strategies to promote postexercise recovery, *Int. J. Sport. Nutr. Exerc. Metab.*, 20, 515-532 (2010)
- 2) 寺田新, 稲井真: 運動後の栄養補給法に関する最近の知見, *臨床スポーツ医学*, 33, 1144-1149 (2016)
- 3) Kim, W., Egan, J.M.: The role of incretins in glucose homeostasis and diabetes treatment, *Pharmacol.Rev.*, 60, 470-512 (2008)
- 4) Zawadzki, K.M., Yaspelkis III, B.B., Ivy, J.L.: Carbohydrate-protein complex increases the rate of muscle glycogen storage after exercise, *J. Appl. Physiol.*, 72, 1854-1859 (1992)
- 5) 寺田新: 脂質による消化管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) 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)
- 7) Fukushima, M., Suzuki, H., Seino, Y.: Insulin secretion capacity in the development from normal glucose tolerance to type 2 diabetes, *Diabetes. Res. Clin. Pract.*, 66, 37-43 (2004)
- 8) Elliot, T.A., Cree, M.G., Sanford, A.P., et al.: Milk ingestion stimulates net muscle protein synthesis following resistance exercise, *Med. Sci. Sports. Exerc.*, 38, 667-674 (2006)
- 9) DeFronzo, R.A., Gunnarsson, R., Björkman, O., et al.: Effects of insulin on peripheral and splanchnic glucose metabolism in noninsulin-dependent (type II) diabetes mellitus, *J. Clin. Invest.*, 76, 149-155 (1985)
- 10) Christensen, N.J., Galbo, H.: Sympathetic nervous activity during exercise, *Annu. Rev. Physiol.*, 45, 139-153 (1983)
- 11) Egan, B.: Protein intake for athletes and active adults: Current concepts and controversies, *Nutr. Bull.*, 41, 202-213 (2016)

(受付日: 2017年10月16日)
(採択日: 2017年12月1日)

Original Article

Effects of co-ingestion of glucose with milk after exercise on insulin secretion in female university students

Maimi MARUYAMA ^{*1}, Shin TERADA ^{*2}, Chieko OIE ^{*1}, Shinichi OKAMURA ^{*1},
Michiyo KIMURA ^{*1}

^{*1} Department of Nutrition, Faculty of Health and Welfare, Takasaki University of Health and Welfare

^{*2} Department of Life Sciences, Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo

ABSTRACT

Insulin stimulates glycogen and protein synthesis in skeletal muscle. Post-exercise nutritional strategies designated to augment insulin secretion are therefore required for athletes to improve athletic performance and enhance training adaptations. In this study, we examined the effects of the post-exercise co-ingestion of glucose and milk, which has been shown to stimulate insulin secretion during post-exercise recovery in mice, on plasma insulin levels in female university students. Seven female university students completed 30-min cycle ergometer exercise on 2 separate occasions. Immediately after each exercise, they ingested a solution containing either 1) glucose alone (1 g/kg body weight dissolved in 250 ml of water) or 2) glucose (1 g/kg body weight) + milk (250 ml). Blood samples were collected before and 15, 30, 60 and 120 min after ingestion to determine the concentrations of blood glucose and the plasma insulin levels. The areas under the curve for plasma insulin and blood glucose were significantly higher and significantly lower after the co-ingestion of glucose and milk compared with glucose alone, respectively. These results suggest that the ingestion of glucose in combination with milk immediately after exercise potently stimulates insulin secretion in female university students.

Keywords: milk, insulin, human, cycle ergometer