

博士学位論文

学位論文内容の要旨および審査結果の要旨

氏 名 東郷 将成

学位の種類 博士（食品栄養科学）

学位授与の条件 酪農学園大学学位規程第3条第3項に該当

学位論文の題目 高強度運動後の早期回復を目指した栄養補給に関する研究

審査委員

主査 准教授 山口 太一（健康栄養学）

副査 教授 竹田 保之（食品加工特性学）

副査 教授 山口 昭弘（食品微生物管理学）

副査 滝澤 一騎（一般社団法人身体開発研究機構）

高強度運動後の早期回復を目指した栄養補給に関する研究

東郷 将成 (健康栄養学)

【目的】

これまで運動前の栄養補給法については多くの検討がされてきた (東郷ら, 2010). 一方, 運動後の栄養補給に関する知見は少ない. しかしながら, 一日に複数回の試合がある場合など運動直後の栄養補給が次なる運動における運動能力に影響を及ぼすことを加味すると運動直後の早期回復のための栄養補給についても検討がなされるべきである. 持久的な運動や間欠的な高強度運動が長時間続くような場合では筋グリコーゲンがエネルギー源として利用される. したがって, これらの運動後には筋グリコーゲンを回復させる必要がある. 運動直後に筋グリコーゲンを回復させるためには, 血糖値およびインスリン濃度を高めて筋への糖取り込みを亢進させる必要があり, 同量の糖質を摂取するにも食品形態を考慮しなければならない. これまで食品形態の違いや摂取タイミングの違いがインスリン分泌に及ぼす影響は検討されてきたものの, 運動直後の糖質摂取の時間の長短がインスリン分泌に及ぼす影響は明らかにされていない. 加えて, 筋グリコーゲンの回復量増加には, 糖質とともにたんぱく質や脂質を含んだ食品を同時に摂取することでインスリン分泌促進による糖取り込み量の増大や糖利用の抑制を図ることも重要であり (東郷および山口, 2017), 身近な食品でこれらを実現できるものがないか検討することは有益であると考え.

そこで本研究の目的は高強度間欠的運動直後の回復のための適切な栄養補給法を検証するため, 筋への糖取り込みを促進させるインスリン分泌に着目し, 運動直後における糖質摂取時間の長短がインスリン分泌に与える影響 (検討1), 糖質と脂質を含んだ食品の摂取がインスリン分泌に与える影響を検討し (検討2), さらにこれら2つの検討結果から導き出された課題を解決すべく追加実験として糖質と脂質を含んだ食品摂取形態および温度の違いがインスリン分泌に与える影響 (検討3) を検証することとした.

【方法】

被検者は, まず自転車エルゴメーターを用いて最大酸素摂取量および最大運動強度の決定を行った. その後, 本実験として被検者は高強度間欠的運動プロトコルの実施直後に試験食を摂取した. 運動プロトコルは筋グリコーゲンの効率的な減少を目的に高強度間欠的運動と中等度運動を組み合わせ実施した. 高強度間欠的運動は自転車エルゴメーターを用いて, 体重あたり 0.075kp の負荷で 30 秒間の全力ペダリングを 4 セット実施した. また, 2-3 セットの間には最大運動強度の 40% 強度で 30 分の自転車漕ぎ運動を行った. 被検者は, 高強度間欠的運動プロトコルを実施した後に各食品を摂取した. 全ての検討に共通して, 被検者は 2 条件を別日にクロスオーバーかつランダム化して実施した. また, 被検者のサーカディアンリズムを考慮し, 1 週間以上の期間をおいた同時時間帯に実施した.

検討1: 糖質飲料の摂取時間の長短が血糖値, インスリン分泌およびエネルギー基質利用に与える影響

ブドウ糖を添加したスポーツドリンクを自由に摂取する条件 (FAST) もしくは 30 秒ごとに 10-15ml ずつ摂取する条件 (SLOW) を遂行し, 血糖値およびインスリンの推移を比較した (n=6)

検討2: アイスクリーム摂取が血糖値, インスリン分泌およびエネルギー基質利用に与える影響

検討1と同様のスポーツドリンクを自由摂取する条件 (CON) とアイスクリーム摂取条件 (ICE) を遂行し, 血糖値, インスリン, 糖質および脂質利用ならびに深部温の推移を比較した (n=8)

検討3: アイスクリーム摂取時の形態および温度の違いが血糖値, インスリン分泌およびエネルギー基質利用に与える影響

検討2と同様のアイスクリームを固形状態で摂取する冷凍条件 (Freeze ICE: FICE) もしくは融解した状態で摂取する冷蔵条件 (Cold ICE: CICE) を遂行し、血糖値、インスリン、糖質および脂質利用ならびに深部温の推移を比較した (n=6)

すべての補給食品は急速な筋グリコーゲンの回復を目的に、体重 1kg 当たり 1.2g になるよう調整を行った。また、食品摂取後、被検者は2時間にわたって座位安静状態を保持した。高強度間欠的運動前 (Pre)、直後 (Post)、糖質飲料摂取後 30 分、45 分、60 分および 120 分に適宜身体組成、採血、呼気ガス採集および直腸温の測定を行った。実施環境は、気温 24°C、相対湿度 50%に設定した。

【結果および考察】

各検討において条件間で高強度間欠的運動パフォーマンスに有意な差がみられなかったことから、同程度の運動能力発揮および筋グリコーゲンの消費がされていたと考えられる。

検討1: 糖質飲料の摂取時間は SLOW が FAST よりも 16 分遅延した。SLOW と FAST の間で血糖値 (図 1-A) およびインスリン分泌量の推移 (図 1-B) に差は認められなかった。一方で、両条件を合わせて検討した血糖値とインスリン分泌量の2時間までの曲線下面積には正の相関関係傾向 ($r=0.619$, $p=0.06$) が認められ、血糖値が高い被検者ほどインスリン分泌量が多い傾向がみられた。また、6 名中 5 名で糖質摂取 30 分後のインスリン分泌量が FAST 条件よりも SLOW 条件で高値であった。高強度運動直後は食欲が落ち、固形食品の摂取が難しい場合もあるが、糖質飲料の摂取であれば比較的容易である。また、運動直後は糖質飲料であっても多量に摂取することが難しい場合も考えられるが、本研究の結果より運動直後から少量ずつ頻回に分けて糖質飲料が摂取できれば、血糖値およびインスリンを高めることが可能であることが示された。

検討2: ICE 条件は CON 条件と比較して血糖値を低下させ (図 2-A)、本来インスリン分泌を高めるとされる消化管ホルモンである gastric inhibitory peptide (GIP) を増加させたものの (図 2-B)、インスリンは低値を示した (図 2-C)。他方、ICE 条件は CON 条件に比べ、呼吸交換比 (RER) は低値を示し (図 2-D)、呼気ガス分析から算出した糖質利用量は低値、脂質利用量は高値であった。さらに、ICE 条件では CON 条件よりも血中の脂質関連指標が高値を示した。これらのことから、運動直後のアイスクリーム摂取はスポーツドリンクのみの糖質摂取よりもインスリンは分泌させないものの、糖質によるエネルギー基質利用を抑制し、脂質利用を亢進させたことは明らかであり、この点では回復に有効と言えるのかもしれない。なお、直腸温に条件間で有意な差はみられなかったものの、わずかに ICE 条件の方が CON 条件よりも低く推移する傾向にあった。

検討3: 検討2より、運動後の冷食品による深部冷却がその後の回復に負の影響を与えていた可能性が考えられたことから追加実験を行った。その結果、CICE 条件が FICE 条件よりも直腸温 (図 3-A)、血糖値およびインスリンが高値を示したにもかかわらず (図 3-B)、脂質利用亢進および糖質利用抑制効果は同程度であったことが明らかとなった。よって、通常のアイスクリームよりも融解したアイスクリームの方がインスリン分泌量を増大させたことから運動直後の補給食品として適していることが示唆された。

【結論】

高強度運動後の早期回復にはインスリン分泌を高める必要がある。そのためには運動直後から体重を考慮した糖質量を含んだ食品を摂取して血糖値を高めることが重要である。一方、糖質に脂質を含んだ食品、すなわちアイスクリームを摂取する場合には、通常の固形のアイスクリームでも糖質利用抑制および脂質利用促進は図れるものの、融解したアイスクリームを摂取した方がインスリン分泌量は増大したことから早期回復に適していると結論づけられる。

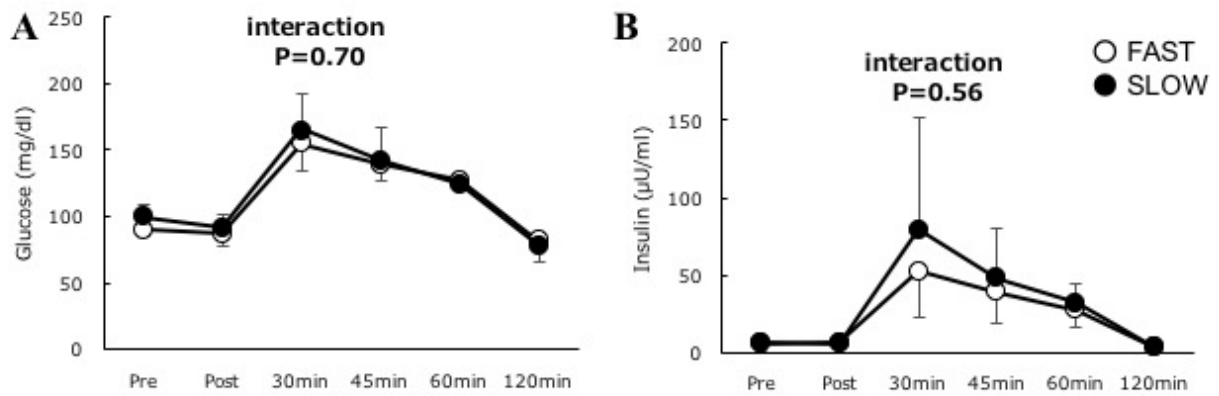


図1 糖質飲料の摂取時間の長短が血糖値 (A) およびインスリン (B) に与える影響

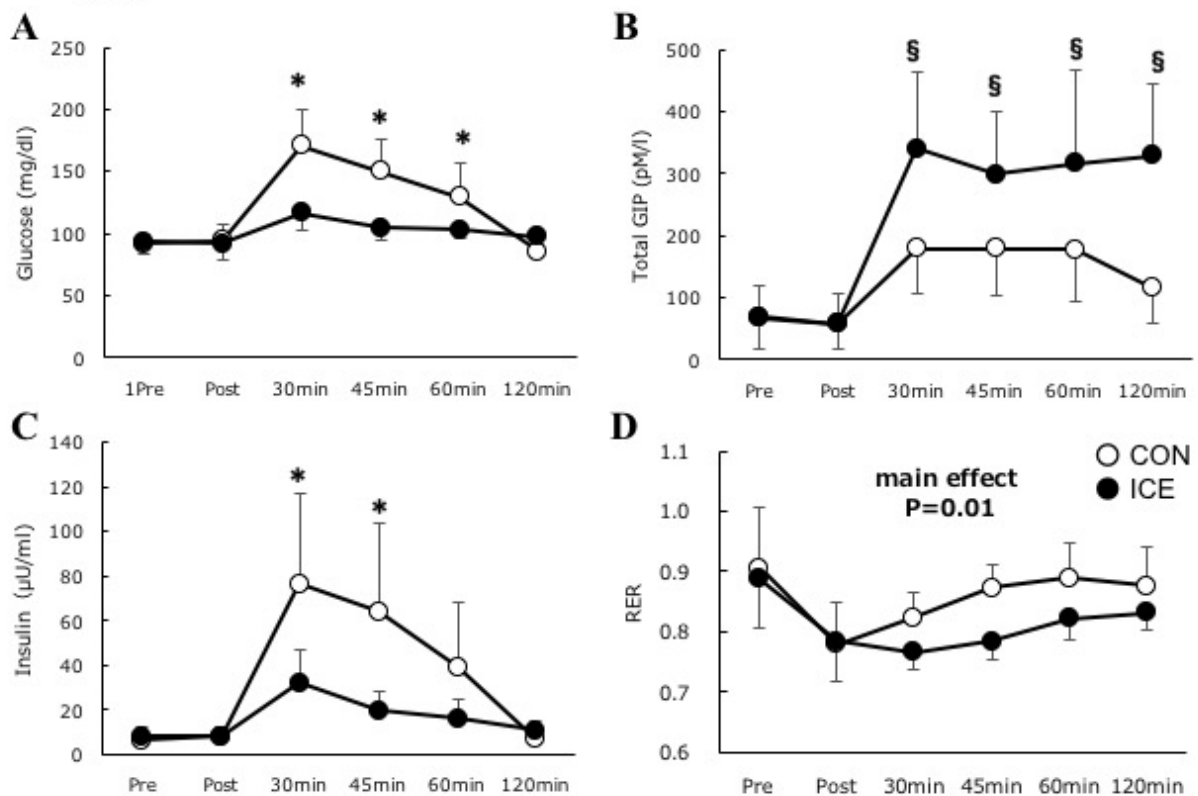


図2 アイスクリーム摂取が血糖値 (A) , GIP (B) , インスリン (C) および呼吸交換比 (D) に与える影響

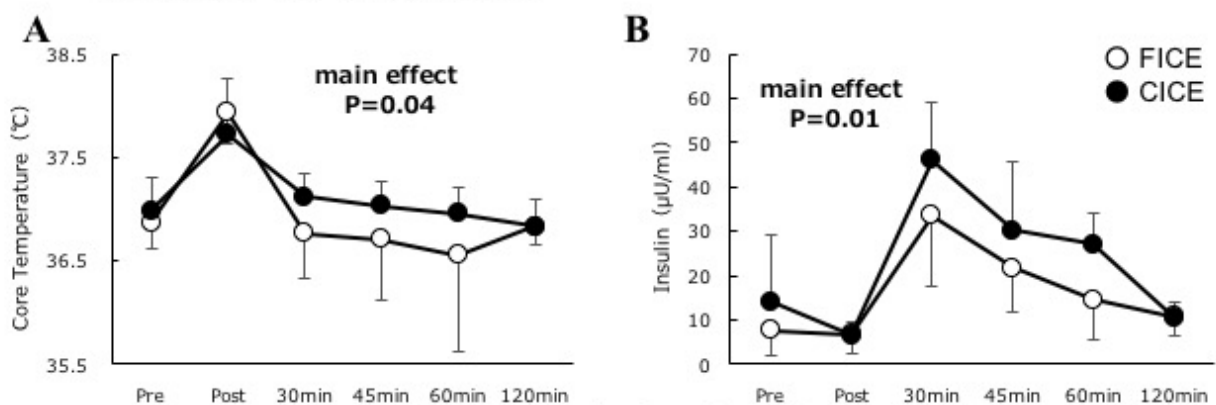


図3 アイスクリーム摂取時の形態および温度の違いが直腸温(A) およびインスリン(B) に与える影響

Mean±SD, * $p<0.05$, § $p<0.01$

論文審査の要旨および結果

1 論文審査の要旨および結果

1) 主査および副査による審査用論文の実質的審査

予備審査後、審査委員会ならびに予備発表会にて指摘された箇所について論文の加筆ならびに修正が行われ、2017年12月25日(月)に修正論文が審査委員に再提出された。実質的な審査として、審査委員が再提出論文を審査し、再度、加筆および修正箇所を指摘し、2018年1月11日(木)に再修正された審査用論文が教務1課に提出された。その後も引き続き、審査委員による審査用論文の実質的審査が継続された。

実質的審査は、第一に、博士論文の体裁が整っているかについての確認、第二として、博士論文を構成する研究の新規性および目的が明確であるか、適切な研究方法が利用されているか、そして、得られた結果から正しく議論がなされているかを確認した。さらに、第三として、得られた知見が食品栄養科学ならびにスポーツ栄養学の学問分野およびスポーツ現場に貢献するか否かについて確認が行われた。

論文の概要について

本研究の目的は、高強度間欠的な運動直後のエネルギー源である糖質の早期回復のための栄養補給方法を明らかにすることであった。第1章において、運動後のエネルギー源としての糖質の回復のための栄養補給方法について検討した文献の調査を行った結果をもとに、第2章では、比較的持久力の高い運動鍛錬者を対象に、運動直後における糖質飲料の摂取時間の遅延が、インスリン分泌量の観点からみた糖質の早期回復に悪影響を及ぼさないことを明らかにした。また、第3章では、比較的持久力の高い運動鍛錬者を対象に、運動直後における糖質と脂質を含んだ食品であるアイスクリームの摂取がエネルギー源としての糖質の早期回復効果に及ぼす影響は、糖質飲料と比較し、インスリン分泌の観点では劣るものの、エネルギー基質利用の観点では好ましいことを明らかにした。さらに、第4章では、比較的持久力の高い運動鍛錬者を対象に、運動直後における溶解されたアイスクリームの摂取がエネルギー源としての糖質の早期回復効果に及ぼす影響は、通常のアイスクリームとエネルギー基質利用の観点では相違がないにも関わらず、インスリン分泌の観点からは好ましいことを明らかにした。

研究の背景と目的

高強度運動の主なエネルギー源は糖質である。したがって、高強度運動を1日のなかで連続して行う場合には、運動後にできるだけ早く糖質を摂取し、エネルギー源としての糖質を回復させなければならない。これまで運動後の糖質の摂取方法に関する知見として、実験動物を対象に運動直後に糖質を摂取することが運動30分後以降に糖質を摂取する場合よりもエネルギー源としての糖質の回復に優れていることが明らかにされている。また、ヒトを対象とした研究では、運動直後に糖質を摂取することが、運動2時間後以降に摂取する場合よりもエネルギー源としての糖質の回復に優れていることが明らかとなっている。このように運動後の糖質の摂取タイミングに関する研究は行われているものの、運動直後からの糖質摂取の時間の長短がエネルギー源としての糖質の回復に及ぼす影響については検討されていない。運動直後は食欲が落ちている場合も

あり、必要な糖質量のすべてを早急に摂取することが難しい場合も多い。よって、糖質の摂取時間が遅延しても同様のエネルギー源としての糖質の回復効果が得られるかを明らかにできれば、スポーツ現場において有用性が高い知見となり得る。また、運動後のエネルギー源としての糖質の回復促進のためには糖質だけでなく、糖質とタンパク質を摂取することの有効性が示されてきた。加えて、昨今、実験動物を対象に糖質に脂質を加えて摂取することで糖質のみよりも運動後のエネルギー源としての糖質の回復を促進することが報告された。このような糖質に脂質を加えた食品の摂取がヒトにおいてもエネルギー源としての糖質の回復を促進させるのであれば、スポーツ現場において有効活用できる。そこで、本研究の目的は、1) 運動直後の糖質飲料の摂取時間の長短がエネルギー源としての糖質の早期回復効果に及ぼす影響を検討すること、2) 運動直後の糖質と脂質を含んだ食品の摂取がエネルギー源としての糖質の早期回復効果に及ぼす効果を検討することとした。なお、エネルギー源としての糖質の早期回復はインスリンの分泌量ならびにエネルギー基質利用によって評価し、糖質と脂質を含んだ食品として、比較的手軽に入手できるアイスクリームを利用した。

研究の成果

第1章では、運動後のエネルギー源としての糖質の早期回復のための栄養補給方法を検討した研究の文献調査を行った。その結果、運動後のエネルギー源としての糖質の早期回復に必要な糖質量を明らかにするとともに、糖質を含んだ食品の形態がエネルギー源としての糖質の回復効果に影響を及ぼすこと、糖質とタンパク質や脂質の同時摂取がエネルギー源としての糖質の回復に有効であることを明示した。また、エネルギー源としての糖質の回復効果を高めるためには、糖質摂取によりインスリンを分泌させることが重要であることを明らかにした。これらの検討結果をもとに、第2章では、比較的持久力の高い運動鍛錬者を対象に、運動後の糖質飲料の摂取時間の相違がエネルギー源としての糖質の回復効果に及ぼす影響を検討した。その結果、糖質飲料の摂取時間が4.9分と21.9分と17分程度の相違があったにも関わらず、インスリンの分泌量に相違が認められなかった。このことから、運動直後の糖質飲料の摂取時間の17分程度の遅延は、エネルギー源としての糖質の回復効果に相違を生じないことが明らかとなった。また、第3章では、比較的持久力の高い運動鍛錬者を対象に運動後の糖質と脂質を含んだ食品であるアイスクリームの摂取がエネルギー源としての糖質の回復効果に及ぼす影響を糖質飲料と比較検討した。その結果、アイスクリームの摂取は糖質飲料摂取に比較し、インスリンの分泌量が低値を示した。一方で、アイスクリーム摂取は糖質飲料摂取に比べ、摂取後の糖質からのエネルギー消費量が低値、脂質からのそれが高値を示した。これらのことから、アイスクリーム摂取は糖質飲料摂取に比較し、インスリン分泌の観点からみたエネルギー源としての糖質の回復には有効とは言えないものの、摂取後のエネルギー基質利用の観点からは有効であった。他方、第3章の研究の被験者のなかにはアイスクリーム摂取によって冷感を訴えるものがいた。温度感受性 Transient Receptor Potential チャンネルに関する知見をもとに考えると体温低下がインスリン分泌に負の影響を及ぼした可能性が考えられた。そこで、第4章では、摂取温度の相違がエネルギー源としての糖質の回復効果に及ぼす影響を検討するために、溶解したアイスクリームを利用して、運動後の糖質と脂質を含んだ食品の摂取温度および形態の違いがエネルギー源としての糖質の回復に及ぼす影響を比較検討した。その結果、溶解したアイスクリームは通常のアイスクリームと比較し、エネルギー基質利用の面では等しいにも関わらず、インスリン分泌量が増大した。よって、溶解

したアイスクリームは通常のアイスリムよりも運動後のエネルギー源としての糖質の回復に有効であることが示された。

研究の評価

本研究において、高強度間欠的な運動後のエネルギー源としての糖質の早期回復を目指した栄養補給方法を明らかにするという明確な目的が設定された。また、エネルギー源としての糖質の早期回復を評価するためにインスリン分泌量ならびにエネルギー基質利用に着目する適切な研究方法が用いられた。得られた新規の知見として、1) 糖質飲料の摂取時間の遅延がエネルギー源としての糖質の回復に悪影響を及ぼさないこと、2) 糖質と脂質を含んだ食品であるアイスクリームが糖質飲料に比較し、インスリン分泌の観点からみたエネルギー源としての糖質の回復効果は劣るものの、エネルギー基質利用の観点では優位性を示すこと、さらに、3) 溶解したアイスクリームが通常のアイスクリームと比較し、エネルギー基質利用には相違がないにも関わらず、インスリン分泌量を増大させ、エネルギー源としての糖質の回復効果が高いことを示した。これらの知見は、食品栄養科学およびスポーツ栄養学の学問分野に十分に貢献し、スポーツ現場に還元可能であることから有用性も兼ね備えている。なお、内容の一部は、以下の論文雑誌に掲載済または投稿査読中である。

- Research of One Health 2017/Sept. :1-10, 2017
- 日本スポーツ栄養研究誌、投稿査読中

2) 学位論文発表会、審査委員会および口頭試問

2018年2月8日(木)に13時よりC1号館202号室で学位論文発表会を開催した。東郷君より13時00分から13時20分まで(20分間)発表がなされ、その後、13時20分から13時40分まで(20分間)口頭試問が行われた。発表は規定の時間内に行われ、口頭試問に対する回答も適切に行われた。口頭試問において指摘された箇所については、最終製本原稿にて加筆および修正可能であると判断できる。

よって、以上の審査をもって、東郷将成君は博士(食品栄養科学)の学位を授与されるに十分な資格を有していると審査委員一同が認めた。

2 最終試験の結果

審査委員4名が最終試験を行った結果、合格と認める。

2018年2月8日

審査委員

主査	准教授	山口	太一
副査	教授	竹田	保之
副査	教授	山口	昭弘
副査		滝澤	一騎