

2017 年度  
博士論文

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

21534101 東郷将成

指導教員 健康栄養学 准教授 山口太一

酪農学園大学大学院酪農学研究科

## 目次

### 第 I 章 運動後における回復のための栄養補給に関する知見の

文献研究および本研究の目的	1
1. 運動後の栄養補給の意義	2
2. 運動時におけるエネルギー代謝のメカニズム	4
3. 栄養補給のタイミングと摂取すべき糖質量	6
4. 栄養補給形態の違い	8
5. 栄養素の組み合わせが筋グリコーゲン回復に与える影響	10
6. 本研究の目的	12

### 第 II 章 高強度運動後における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	14
1. 序文	15
2. 方法	17
3. 結果	23
4. 考察	26
5. 小括	30

第Ⅲ章 高強度運動後の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	31
1. 序文	32
2. 方法	34
3. 結果	37
4. 考察	42
5. 小括	48
第Ⅳ章 高強度運動後の食品摂取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	49
1. 序文	50
2. 方法	52
3. 結果	55
4. 考察	58
5. 小括	60
総括	61
研究の限界と課題	64
食品栄養科学分野における学術貢献	66

Summary	68
謝辭	73
引用文獻	74
圖表一覽	88

第 I 章  
運動後における回復のための  
栄養補給に関する知見の文献研究  
および本研究の目的

## 1. 運動後の栄養補給の意義

運動時のエネルギー源となるアデノシン三リン酸(ATP)の体内貯蔵量は多くない。そのため、継続的に運動するためには ATP の再合成を繰り返さなければならない。ATP の再合成は運動時間や強度に伴って異なるエネルギー供給系で遂行される。エネルギー供給系には無酸素系代謝である ATP-クレアチンリン酸系および解糖系、有酸素系代謝である TCA 回路および電子伝達系がある。これらは相互に作用しあうことで、合目的的に ATP の再合成を行っている。数十秒の高強度運動では解糖系が主なエネルギー供給系として働き、筋に蓄えられている糖質である筋グリコーゲンを利用する。そのため、高強度運動の継続に伴い筋グリコーゲンが枯渇する[1]。一方、長時間の持続的な運動時には TCA 回路および電子伝達系が主なエネルギー供給系を担い、三大栄養素(たんぱく質、脂質および炭水化物)が利用される。利用される割合は、運動強度によって異なり、低強度の持続的な運動では主に脂質が利用されるものの、一定量の炭水化物(糖質)も利用される[2]。一方、高強度の持続的な運動では糖質が利用される[1]。したがって、継続的な高強度運動や長時間の持続的な運動に際して、糖質を適切に摂取することがより良い運動能力の発揮や維持のために重要である[3, 4, 5]。これまで運動前の有効な栄養摂取方法について多くの知見が報告され

てきた[4, 5, 6]. しかしながら, 運動後の栄養補給方法についての知見は限られている. 一日に複数回の試合がある場合については, 運動直後の糖質補給が次の運動においても能力を最大限発揮させるために必要不可欠となる[7, 8]. 加えて, 連日の練習や強化合宿中については, 複数回の運動の成果であるトレーニング効果を引き出すという観点においても運動後の糖質補給が重要となってくる.

## 2. 運動時におけるエネルギー代謝のメカニズム

筋グリコーゲンの貯蔵量は食事の摂取状況によって異なるものの[9], 脂質の貯蔵量と比べるとかなり少量である. 筋グリコーゲンは最大酸素摂取量( $\dot{V}O_2\max$ )の 80%相当強度における約 75 分間の持久的な運動で枯渇し[10], 運動強度が上がれば必然的に枯渇までの時間が短縮することから, 比較的長い時間の運動を継続する場合には必ず糖質摂取を行い, 筋グリコーゲン量を増やしておく必要がある. 経口摂取した糖質は肝臓や筋にグリコーゲンとして貯蔵される. 肝臓のグリコーゲンは血糖(グルコース)として血中を流れ, インスリンによって筋細胞内に取り込まれる. インスリンは膵臓ランゲルハンス島  $\beta$  細胞より分泌されるペプチドホルモンで, 筋内への糖取り込みを促進する. グルコーストランスporter 4 (GLUT4) は運動により活性化し, 筋細胞表面の糖取り込みを促進させる[11]. GLUT4 によって取り込まれた糖質は無酸素系である解糖系やミトコンドリアに局在する有酸素系の TCA 回路を経て ATP を合成する.

他方, 経口摂取した脂質はリンパ管から肝臓に到達し, その後脂肪組織でトリグリセリド(TG)として貯蔵される. 運動時は TG がグリセロールおよび遊離脂肪酸(FFA)に分解され, FFA は Fatty acid translocase cluster of differentiation 36 (FAT/CD36)によって筋細胞に取り



込まれミトコンドリアで $\beta$ 酸化を受け ATP を合成する. FAT/CD36 も GLUT4 同様に運動によって FFA の筋の取り込みが増加することが明らかとなっている[12, 13]. 脂質を運動のエネルギー源として利用する場合には筋内のリポたんぱくりパーゼ (LPL) が活性化し, 脂質の利用量が増加する[14, 15].

このように糖質および脂質がエネルギー基質となり, ミトコンドリアの TCA 回路にて ATP が合成されるものの, 解糖系において TCA 回路に入りきれなかったピルビン酸は一時的に乳酸となり[5, 16], 乳酸トランスporter-4 (MCT4) を介して直接エネルギー源として利用されることもある[11]. 他方, ケトン体も運動時では MCT を介して筋細胞質ゾルやミトコンドリアに取り込まれ, エネルギー源として利用されることが明らかとなっている[17]. 運動時や運動直後では各種輸送体やエネルギー供給系が運動に応じて適切に働き, 体内のグリコーゲンや脂肪を分解して ATP を合成している.

### 3. 栄養補給のタイミングと摂取すべき糖質量

運動後の栄養補給に関する文献における運動負荷設定および補給内容をそれぞれ表 1-1 および 2 に示した。栄養補給のタイミングについては、Ivy et al. [18]が運動直後の摂取が運動 2 時間後の摂取と比較して運動 4 時間後までの筋グリコーゲンの回復量が多いことを示している。筋グリコーゲンの早期回復には運動直後に糖質を補給して血糖値を高くしておくことが望ましい[18, 19, 20]。また、血糖値の上がりやすさを反映するグリセミックインデックス(GI)値の高い食品の摂取が早期の筋グリコーゲンの回復量を増大させることが明らかとなっている[21]。加えて、運動後の栄養補給では、インスリンの分泌量の増加[18, 19, 22]により筋グリコーゲンの早期回復[13, 23, 24, 25]が促進される。稲井ら[26]は、マウスを用いて運動直後、30, 60 および 120 分後に糖質飲料を摂取することで筋グリコーゲンの再合成率に相違が生じるかを検討し、直後の摂取において血糖値およびインスリン濃度が高値を示し、筋グリコーゲンが回復したことを示した。よって、運動直後に糖質補給を行って血糖値を高め、インスリンの分泌を促進させられる食事の摂取が好ましい。

摂取すべき糖質量については、運動直後に単回の食事を摂取した研究を概観すると、糖質量が 0.8-2.0g/kg 体重[18, 22]、エネルギー量が

5[22]-10 kcal/kg 体重[20]で筋グリコーゲンの回復がみられている(表 1-2)。糖質摂取のガイドライン[23]では、運動後 4 時間以内の筋グリコーゲンの早期回復については、1.0-1.2 g/kg 体重、24 時間後の筋グリコーゲンの回復については 10-12 g/kg 体重/日の糖質補給が推奨されている。糖質飲料の濃度については、7%[25]、21%[19, 20]、25% [18]と比較的濃度の高い飲料でもグリコーゲン回復が確認されている。運動前の糖質飲料の濃度についてはインスリンの過剰分泌によるインスリンショックを考慮しなければならないが、運動後ではエネルギー補給を優先し高濃度の糖質飲料の補給が望ましい。

#### 4. 栄養補給形態の違い

食品の形態や咀嚼による摂取時間の違いは血糖値、インスリンおよび消化管ホルモンの分泌に影響を与える[27]。運動直後は筋への血液循環が優先されたままで、消化器系への血液循環量は減少しているため消化吸収能力が低下する。あわせて、運動後には食欲を増大させるホルモンであるグレリンの分泌低下に伴う食欲の低下が起きる[28, 29]。これら理由により、通常の食事からの糖質補給が難しいことが考えられる。実際に、筋グリコーゲンの早期回復のためには、運動直後にマルトデキストリンなどを含有した飲料の補給が有効であることが述べられている[20]。つまり、運動後の筋グリコーゲン回復に際して栄養補給形態にも気を配らなければならない。飲料と固形食品とでは飲料の方が胃の排出や吸収の速度が速い。また、固形食品は食品構造や調理方法などの影響を受け、摂取時間自体を遅延させることも考えられる。加えて、運動直後に摂取する食品はできるだけ消化管に負担をかけない食品が好ましく、単回もしくは頻回で固形食品を含む一般的な食事で運動直後に必要な糖質量を満たすことは難しい。したがって、筋グリコーゲンの早期回復を考えた場合、運動現場で摂取しやすい食品は飲料や液体に近いような形態のものとなるだろう。

一方で、24 時間後に筋グリコーゲンを回復させるのであれば、固形食品の摂取でもかまわない。Parkin et al. [30]は、GI 値の高い固形食品を運動直後、2 時間後および 4 時間後に摂取してもそれぞれ 2 時間遅れで摂取しても、摂取エネルギー量や糖質量が同一であれば、24 時間後の筋グリコーゲンの回復量は相違がなかったことを示している。24 時間後の筋グリコーゲン回復が目的であれば、運動後、直ちに食事による糖質補給ができない場合には、喫食できるまで飲料により糖質補給を行い、喫食可能となった段階で固形食品を頻回摂取して筋グリコーゲンの回復を行うべきである[22, 30]。

## 5. 栄養素の組み合わせが筋グリコーゲン回復に与える影響

筋グリコーゲンは糖質だけではなく、たんぱく質や脂質を組み合わせで摂取することにより回復量が高まることが明らかとなっている。運動直後の糖質とたんぱく質を組み合わせた摂取はインスリン分泌を増加させ[24]、筋グリコーゲンの回復を促進させる[20]。実際に、糖質 0.8 g/kg 体重およびたんぱく質 0.4 g/kg 体重を含む飲料摂取で糖質 1.2 g/kg 体重の飲料のみの摂取よりもインスリンの分泌量が多くなり、筋グリコーゲンの回復量が増大したことが明らかとなっている[22]。たんぱく質の付加は筋グリコーゲンを回復させるだけでなく、たんぱく質代謝を亢進させ、筋たんぱく質の合成にも寄与する。先行研究では糖質にたんぱく質を付加(たんぱく質比 20%以上)させることで筋グリコーゲンや筋たんぱく質を増加させたことが報告されている[19, 31, 32]。

他方、近年脂質による筋グリコーゲン回復の可能性に関する報告が増えてきた。運動後の低糖質、高脂肪食の摂取は回復時に筋の TG 貯蔵量を増加させ、同じエネルギー量の高糖質、低脂質食の摂取と比較して全身の脂質分解を亢進させ、摂取後に行った運動中の脂質酸化量を増大させたことが明らかとなっている[33]。この結果は、インスリンが脂肪組織の LPL 活性を高め脂肪を運動時のエネルギー源として利用したこと[34]、運動後において、FAT/CD36[12, 13]や MCT[11] が、

GLUT4 同様に多く発現し、脂質のエネルギー利用率を増加させたことが関与したと考えられている。

一方、寺田[35, 36]は脂質による筋グリコーゲン回復の可能性について異なる観点から検討し、マウスに乳化した脂質と糖質を摂取させることで腸管から分泌されるインスリンの前駆体である **glucose-dependent insulinotropic polypeptide (GIP)** などのインクレチンを増加させ、インスリン分泌を促進し、筋グリコーゲンを回復させたことを報告している。試験食品の糖質量は、ヒトに換算すると **1.0 g/kg** 体重相当であった[35, 36]。このことから、筋グリコーゲンの回復に必要な糖質量を付加し、たんぱく質、脂質を含んだ食品を摂取することで筋グリコーゲンの回復が促進される可能性が考えられる。

## 6. 本研究の目的

運動直後における筋グリコーゲンの早期回復には、血糖値およびインスリン分泌を高めることが重要である。これまで、運動直後の栄養補給に関しては、運動後の食事摂取タイミングの差異が回復に及ぼす影響について検討した研究が多く、運動直後の栄養補給が好ましいと結論づけられていた。しかしながら、運動直後の糖質摂取時間の長短が回復に与える影響を検討した研究はない。また、筋グリコーゲンの回復量を増加させるためには、糖質とたんぱく質あるいは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を促し、糖取り込みを促進させることも重要である。近年では筋グリコーゲン回復に対する糖質と脂質の同時摂取の有効性も示されたが、対象がマウスであり、ヒトを対象とした研究はない。さらに、運動後の栄養補給方法の違いがインスリン分泌および筋グリコーゲン回復に及ぼす影響を検討した研究では、回復時のエネルギー基質利用について検討したものは少ない。

本研究の目的は運動直後の筋グリコーゲンの回復のための適切な栄養補給法を提案するため、筋のグリコーゲンの回復を促進させるインスリン分泌に着目し、1) 運動直後の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、および2)



糖質および脂質を含んだ食品の摂取が血糖値，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を，検証することとした．

これらを明らかにすることは，トップアスリートや運動愛好家などの運動実践者の栄養管理のための有益な情報を提供することに繋がると考えられる．運動現場では運動直後に生じる食欲低下によって，筋グリコーゲンの回復のために必要な体格に見合った十分な糖質量の摂取が困難な場合もある．このことから，必要とされる糖質量を少量ずつ頻回で摂取することの有効性を示せば，運動直後の糖質摂取方法の提言に繋がる．また，糖質と脂質を含んだ食品がヒトのインスリン分泌に及ぼす影響を明らかにし，さらに，エネルギー基質利用への影響をも明らかとすることは，運動後に筋グリコーゲンの回復に適した栄養補給方法の提言に繋がるだろう．本研究の最終的な目的は，運動直後に筋グリコーゲンの回復のために有効な食品ならびにその摂取方法を具体的に明示することであり，この明示は運動実践者への有益な情報としてだけでなく，研究結果としても食品栄養科学分野への貢献に繋がると考えられる．

## 第Ⅱ章

高強度運動後における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

## 1. 序文

高強度運動の主なエネルギー源となる糖質の多くは筋にグリコーゲンとして蓄えられている。筋グリコーゲンは最大酸素摂取量の 80%相当強度の運動を 75 分継続することで枯渇するとされている[10]。無論，運動強度が増大すれば，筋グリコーゲンの枯渇までの時間は短縮し，運動強度が低くても運動時間が長くなれば，筋グリコーゲンは枯渇してしまう。したがって，高強度運動を比較的長く継続するためには運動前に筋グリコーゲンをいかに多く蓄えられるかが重要となる。さらに，高強度の運動が 1 日に連続する場合や連日に渡って実施される場合には，運動後にどれだけ筋グリコーゲンを回復させることができるかがその後の運動パフォーマンスに影響を及ぼす。

運動後の筋グリコーゲンの早期回復のためには運動間の糖質補給によってインスリン分泌を促進させる必要がある[18, 23, 37]。国際スポーツ栄養学会のポジションスタンドでは，運動で消費した筋グリコーゲンの回復には運動直後から 30 分以内に 1.0-1.2g/kg 体重の糖質を摂取することが好ましいとされている[38]。一方，稲井ら[26]は，運動後 30 分以内に糖質を摂取することについて科学的根拠が乏しいとして，マウスを用いて，運動直後，30，60 ないし 120 分後に糖質を摂取することがインスリン分泌および筋グリコーゲンの再合成率にどのような相違を生む

かを比較検討した。その結果、運動直後の糖質摂取が血糖値ならびにインスリン濃度を高め、筋グリコーゲンを最も回復させたことを示した。

このような摂取タイミングの違いがインスリン分泌に及ぼす影響の他に、運動後ではないものの、食品の形態や咀嚼による摂取時間の違いが血糖値、インスリンおよび消化管ホルモンの分泌に影響を与えることも報告されている[27, 39, 40, 41]。高強度運動直後には必要とされる糖質量の全量を早急に摂取することが難しい場合もある。そのような場合には少量ずつ頻回に時間をかけて摂取することとなるものの、これまでに運動後の糖質の摂取時間の遅延がインスリン分泌に及ぼす影響について検討した研究は我々の知る限りない。そこで本研究の目的は、高強度間欠的な運動直後の高糖質飲料の摂取時間の長短がインスリン分泌に与える影響を検討することとした。

## 2. 方法

### 被検者

被検者は運動部に所属する男性運動競技者 6 名とした(年齢  $20.2 \pm 0.4$  歳, 身長  $176.7 \pm 4.0$  cm, 体重  $66.3 \pm 3.6$  kg, 最大酸素摂取量  $64.3 \pm 5.9$  ml/kg/min, 最大運動強度  $328 \pm 32.1$  W). 全ての被検者に対し事前に実験の目的, 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. なお, 実験実施前のスクリーニングとして, 喫煙の有無を確認し該当する被検者は除外した. 本研究は酪農学園大学研究倫理審査委員会により承認(15-10)を得て実施した.

### 実験の概要

被検者は, 事前に自転車エルゴメーター(エアロバイク 75XL II, コンビウエルネス株式会社)を用いて最大酸素摂取量( $\dot{V}O_2\max$ )および最大運動強度の決定を行った. 本実験として被検者は運動実施の 6 時間前に規定食(エネルギー: 824 kcal, たんぱく質: 18.6 g, 脂質: 15.7 g, 炭水化物: 152.0 g)を摂取し, 実験室を訪れ, 高強度間欠的な運動プロトコルを実施したのちに糖質飲料を摂取した(図 2-1). 摂取条件として, スポーツドリンクを被検者の任意の早さで自由に摂取する条件

(FAST)および 10-15 ml を 30 秒ごとに摂取する条件(SLOW)を設定した。各条件施行後, 2 時間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。実験 24 時間前から激しい運動や飲酒を禁止した。全ての被検者は両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。実験は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間帯で実施した。

### 最大酸素摂取量および最大運動強度の決定

被検者は実験室に来室後, 着衣のない状態で体重の計測を行った。体重を計測後, 自転車エルゴメーター(エアロバイク 75XL II, コンビウエルネス株式会社)に乗り, サドルおよびハンドル位置を調整し, 心拍数計(H1 トランスミッター, Polar Electro Oy)および  $\dot{V}O_2\max$  測定のため呼気ガス分析装置(AE-300S, ミナト医科学株式会社)のマスクを装着した。自転車エルゴメーター上で 2 分間の安静状態を保持したのちに 30W で 2 分間のウォーミングアップを実施した。その後, 回転数を 60rpm に維持した状態で 1 分間に 30W ずつ漸増するランプ負荷にて疲労困憊まで追い込んだ。疲労困憊の判断基準は, 1. 回転数が 50

rpm を下回った時点, 2. 酸素摂取量のレベリングオフがみられた時点, 3. 最大心拍数が 220-年齢を超えた時点, 4. 被検者が運動継続困難と判断した時点とした. 呼気ガス採取法にて 10 秒毎に得られた酸素摂取量の最大値を  $\dot{V}O_2\max$ , さらにその時の負荷量を最大運動強度とした.

### 高強度間欠的運動プロトコル

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軽運動を組み合わせて実施した[1]. 高強度間欠的運動は自転車エルゴメーター (Powermax-V II, コンビウエルネス株式会社) を用い, 体重 1kg あたり 0.075 kp 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 セットの間には自転車エルゴメーター (エアロバイク 75XL II, コンビウエルネス株式会社) を用い, 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. なお, 運動間の移行時間は 4 分とした. 高強度間欠的運動はセット毎に平均パワー (W), ピークパワー (W), 最高回転数 (rpm), 最高回転数までの到達時間 (sec) と運動前後の主観的運動強度 (ボルグスケール) [42, 43] を測定し, 摂取条件間で比較した.

## 糖質飲料

糖質飲料は高強度間欠的な運動の 4 セット目の直後に摂取した。糖質飲料は市販のスポーツドリンク(ポカリスエット, 大塚製薬株式会社)とした。ただし, 運動後の糖質の早期回復を目的とし, 500 ml の飲料に推奨糖質量の 1.2 g/kg 体重[23]になるようにブドウ糖(D(+)-グルコース, 和光純薬工業株式会社)を溶解した(エネルギー  $324 \pm 22.1$  kcal, 糖質  $80.8 \pm 5.5$  g)。食品の温度は FAST で  $5.5 \pm 0.8$  °C, SLOW が  $5.8 \pm 0.4$  °Cであった。

## 血液生化学分析

血糖値は指先血より測定した。測定に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)を用いた。インスリンおよび GIP の分析のため, 正中肘静脈より採血を行った。採取した血液は 3000 rpm, 4°Cで遠心分離にて血清を作成したのちに分析まで-80°Cの冷凍庫で保管した。その後, インスリン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。GIP の測定は Human GIP(Total)ELISA(株式会社 矢内原研究所)を用いて分析を行った。



## 呼気ガスの採集および分析

高強度間欠的運動前後および糖質飲料摂取後の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 ( $\dot{V}CO_2$ ) を測定し, 呼吸交換比 (RER) を算出した。糖質および脂質酸化量は先行研究 [8, 44] に従い, たんぱく質酸化の寄与は低いと仮定し,  $\dot{V}O_2$  および  $\dot{V}CO_2$  から以下の式で算出した。各指標は呼気ガス採取法にて 10 秒毎に記録し, 各測定時点において 1 分間の平均値を測定値として算出した。

$$\text{CHO oxidation} = 4.210 \dot{V}CO_2 - 2.962 \dot{V}O_2$$

$$\text{Fat oxidation} = 1.695 \dot{V}O_2 - 1.701 \dot{V}CO_2$$

## 直腸温の測定

運動中および糖質飲料摂取以降の深部体温の変化を調べるために直腸温の測定を行った。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-8A, グラム株式会社) を用いて 10 秒毎に記録し, 各測定時点において 1 分間の平均値を算出し測定値とした。

## 統計解析

本研究の結果は、平均値±標準偏差(Mean±SD)で示した。各指標の推移の摂取条件間の比較は重複測定の実験配置分散分析(摂取条件×測定時点)を用い、交互作用あるいは主効果の有無を確認した。交互作用が認められた場合には Tukey-Kramer 法を用いて多重比較検定を行った。また、各指標について運動直後から試験食品摂取 120 分後までの曲線下面積(Area under the curve: AUC)を算出した。高強度間欠的運動時の指標および AUC の摂取条件間の比較には対応のある t 検定を用いた。加えて、各指標間の相関関係は、Pearson の相関分析を用いて検討した。いずれも危険率 5%未満を有意水準とした。

### 3. 結果

#### 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パワー ( $p=0.80$ ) , ピークパワー ( $p=0.70$ ) , 最高回転数 ( $p=0.70$ ) , 最高回転数までの到達時間 ( $p=0.26$ ) および主観的運動強度 ( $p=0.99$ ) に摂取条件間で有意な差はみられなかった(表 2-1).

#### 食品の摂取時間

摂取時間は FAST が  $4.9 \pm 1.2$  分, SLOW で  $21.9 \pm 6.4$  分と SLOW が FAST よりも有意に摂取時間が長かった ( $p<0.01$ ).

#### 糖質関連項目

運動前後および試験食品摂取後の血糖値の経時変化および AUC を図 2-2 に示した. 血糖値は両条件ともに摂取後 30 分で最高値に到達し時間経過につれて低下した. 血糖値の経時変化は摂取条件で有意な交互作用はみられなかった ( $F=0.60$ ,  $p=0.70$ , 図 2-2A). しかしながら, 血糖値の AUC は SLOW が FAST よりも有意に高値であった ( $p<0.01$ , 図 2-2B).

被検者のうち1名が溶血検体であったため、インスリン、GIPの測定値および統計結果は5名の値とした。運動前後および試験食品摂取後のインスリンの経時変化およびAUCを図2-3に示した。インスリンも血糖値と同様に両条件で摂取後30分に最高値に到達し時間経過につれて低下した。インスリンの経時変化は摂取条件で有意な交互作用はみられなかった( $F=0.45$ ,  $p=0.81$ , 図2-3A)。インスリンのAUCは摂取条件で有意な差はなかった( $p=0.28$ , 図2-3B)。一方で、被検者6名中5名でSLOWがFASTよりも試験食品摂取30分後のインスリン分泌量が多かった。

運動前後および試験食品摂取後のGIPの経時変化およびAUCを図2-4に示した。GIPは血糖値およびインスリンと同様に両条件で摂取後30分に最高値に到達し時間経過につれて低値を示した。GIPの経時変化は摂取条件で有意な交互作用はみられなかった( $F=0.07$ ,  $p=1.00$ , 図2-4A)。GIPのAUCは摂取条件で有意差がなかった( $p=0.14$ , 図2-4B)。

## 呼気成分

運動前後および試験食品摂取後の呼気成分の変化を図2-5, 6, 7, 8, 9に示した。その結果、 $\dot{V}O_2$ ,  $\dot{V}CO_2$ は両条件ともに運動直後に増加傾向がみられその後時間経過につれて減少していった。 $\dot{V}O_2$  ( $F=1.60$ ,

p=0.18, 図 2-5),  $\dot{V}CO_2$  (F=1.47, p=0.21, 図 2-6)ならびに RER (F=0.35, p=0.88, 図 2-7)は摂取条件で有意な交互作用はみられなかった。糖質 (F=0.48, p=0.79, 図 2-8)および脂質 (F=0.36, p=0.87, 図 2-9)酸化量の経時変化は摂取条件で有意な交互作用はみられなかった。

### 直腸温

運動前後および回復中の直腸温の変化を図 2-10 に示した。直腸温は両条件ともに運動前から運動直後にかけて上昇がみられ、時間経過につれて低下傾向を示した。直腸温は摂取条件に有意な交互作用 (F=0.82, p=0.54) はみられなかった。また、摂取条件で主効果 (F=0.08, p=0.78) も認められなかった。

### 血糖値とインスリン AUC の関係

血糖値とインスリンの AUC は正の相関関係の傾向がみられた (r=0.619, p=0.06)。

#### 4. 考察

本研究では、高強度間欠的運動直後における糖質飲料の摂取時間の長短が筋グリコーゲン回復を促進するインスリン分泌に与える影響を比較検討した。その結果、血糖値、インスリン分泌および GIP の変化に摂取条件間で相違は確認されなかった。また、直腸温および呼気ガスにより分析したエネルギー基質利用の変化にも摂取条件間で相違は確認されなかった。

本研究では糖質飲料の摂取時間を被検者の任意の早さで自由摂取する条件 (FAST) と 10-15 ml を 30 秒ごとに摂取する条件 (SLOW) の 2 条件を設定し、後者では摂取時間の遅延を図った。結果的に糖質飲料の摂取時間は FAST で  $4.9 \pm 1.2$  分、SLOW で  $21.9 \pm 6.4$  分となった。よって、両条件の時間差は約 17 分程度あった。Ivy et al. [18, 37] は、インスリンによる筋内への糖取り込み能は運動終了後から時間経過と共に低下することを報告している。しかしながら、本研究の結果から糖質飲料摂取の約 17 分の遅延はインスリン分泌に摂取条件で相違を生じさせなかった。したがって、運動直後より少量でも頻回にわたって糖質飲料を摂取し、糖質必要量を充足できれば、運動後 20 分程度まではインスリン分泌によって導かれる筋グリコーゲンの回復効果に相違がないことが示唆される。

FAST と SLOW との間でインスリン分泌に差が生じなかった理由として、本研究の飲料の濃度と胃からの排出速度が影響しているかもしれない。本研究の糖質飲料の濃度は、推奨糖質摂取量を満たすために市販の 500 ml のスポーツドリンクにブドウ糖を加え、15%以上の高濃度とした。先行研究においても回復を目的に摂取された糖質飲料の濃度は 7%[25]、21%[19, 20]、25%[18]と比較的高濃度であった。したがって、本研究における糖質飲料の濃度は決して高すぎるというわけではない。ところが、摂取する飲料の濃度が高いほど胃内で等張に希釈されてから移送されるため、胃内容排出速度が遅くなるとされている[45]。つまり、本研究の FAST 条件では胃からの排出速度が落ち、結果的に SLOW 条件の頻回摂取と同様の速度で胃から排出されていたために、インスリンに摂取条件間で差が生じなかった可能性が考えられる。

血糖値の経時変化には有意な交互作用が認められなかったものの、2 時間後までの AUC は SLOW が FAST よりも高値を示した。また、試験食品摂取後 30 分時のインスリンは被検者 6 名中 5 名で FAST よりも SLOW で高値を示した。加えて、両条件を含めると血糖値とインスリンの AUC は正の相関関係を示す傾向にあった。つまりこれらの結果は血糖値が高まった場合ほどインスリン分泌が高まる傾向にあったと言える。稲井ら[26]は本研究の結果と同様に運動直後に糖質を摂取することで、血糖値およびインスリンが上昇し、それぞれの増加量と筋グリコーゲン

の回復量との間に正の相関関係が認められたことを報告している。本研究においてインスリンの値に摂取条件間で有意な差がなかったため、いずれの摂取条件が筋グリコーゲンの回復に良いとは言いきれないものの、血糖値を高めることがインスリン分泌を促進させるうえで重要であるということは強調できるだろう。

本研究における糖質飲料は 15% 以上の高濃度であったにもかかわらず、両条件ともにインスリンの分泌に伴う急激な血糖値の低下、いわゆるインスリンショックは生じなかった。このことは、運動後の筋グリコーゲンの急速な回復を図るために、本研究で利用した 500 ml のスポーツドリンクに推奨量の糖質を加えることの実用性を示しているかもしれない。一方で、呼吸交換比および糖質利用量は両条件ともに摂取後 45 分で上昇する傾向にあった。このことは摂取した糖を筋にグリコーゲンとして蓄積できずに、エネルギー源として利用していたことを推察させる。筋グリコーゲンの蓄積量を増やすためには、血糖値およびインスリン分泌量の上昇とともに、呼吸交換比および糖質利用量の上昇抑制も図れる糖質飲料の濃度調節や他の栄養素との組み合わせなどの工夫を考えていかなければならない。

本研究の糖質飲料の温度は 5℃ 前後であった。SLOW は FAST よりも運動後から飲料摂取終了まで約 17 分長かったものの、摂取条件間に直腸温の有意な差はみられなかった。運動後の深部体温は時間経過と



ともに低下し，低温の飲料を摂取することでさらなる低下を示すとされる [46]．本研究では，同じ温度の飲料であれば，17 分程度の摂取時間の長短は深部体温の冷却効果に相違を生じないことが示された．このことも胃からの流出速度が同程度であったことが関与しているのかもしれない．

## 5. 小括

本研究は、運動現場で常用されているスポーツドリンクにブドウ糖を溶解した飲料を試験食品として、高強度間欠的な運動直後の高糖質飲料の摂取時間の長短がインスリン分泌に与える影響を検討することを目的とした。その結果、糖質飲料を短時間で多量に摂取しても少量ずつ頻回に分けて時間をかけて摂取してもインスリン分泌量に相違はなかった。また、摂取時間の長短に関係なく、血糖値を上昇させられるほどインスリン分泌量が多くなる傾向にあった。その一方で、糖質酸化量が増大する傾向も示された。よって、血糖値を上昇させ、インスリン分泌量を増大させつつも、エネルギー源としての糖質の利用抑制を図る栄養補給方法を考えなければならない。

### 第Ⅲ章

高強度運動後の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

## 1. 序文

運動後の筋グリコーゲンの早期回復のためには体重を考慮した糖質必要量を摂取し、血糖値を高め、インスリン分泌を促進させることが有効である[47]。一方で、運動後に糖質のみを多量に摂取すると、エネルギー基質として糖質利用が促進されるため、インスリン分泌を促しながらも糖質利用抑制を図ることが重要である。

これまで運動後に糖質のみを摂取することでもインスリンが分泌されるものの、他の栄養素を同時に摂取することでさらにインスリン分泌を促進させたことが明らかとなっている。例えば、糖質とたんぱく質の同時摂取は糖質のみの摂取よりもインスリン分泌を促進し筋グリコーゲンの回復量を増加させたことが報告されている[19, 20, 24, 31, 48, 49]。また、近年では糖質と脂質の同時摂取によって糖質単体の摂取よりも筋グリコーゲンの回復効果が高まったことも明らかにされている。この機序は脂質を摂取した際に分泌される消化管ホルモンである Glucose-dependent Insulinotropic Polypeptide (GIP) および Glucagon-like peptide-1 (GLP-1) が、インスリン分泌を高める作用を持つことに起因する[35]。稲井ら[36]はマウスを対象に乳化した脂質を含んだ牛乳に糖質を付加したものを摂取することで、糖質のみを摂取し

た場合よりも GIP およびインスリン分泌を促進させ、筋グリコーゲンを回復させたことを明らかにした。

他方、運動後の深部体温を早く安静状態に戻すことによる筋グリコーゲンの回復効果も明らかにされている。Naperalsky et al. [50]は、32.6 °Cの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22.2 °Cの常温環境下で過ごした方が、4 時間後の筋グリコーゲンが高値を示したことを報告した。

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、糖質と脂質を含んだ乳製品ならびに冷却作用のある低温食品の摂取が適している可能性が考えられる。アイスクリームは、PFC 比が 9:40:51 と糖質および脂質の含有割合が高い乳製品である。加えて、言わずもがな冷食品であることから冷却効果も備えており、筋グリコーゲンの回復食として有効であるかもしれない。そこで本研究は運動直後の筋グリコーゲンの回復に必要な糖質量の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を同じ糖質量のスポーツドリンクと比較することを目的とした。

## 2. 方法

### 被検者

被検者は運動部に所属する健康な男性運動競技者 8 名であった(年齢  $20.3 \pm 1.1$  歳, 身長  $174.6 \pm 4.8$  cm, 体重  $63.0 \pm 4.7$  kg, 最大酸素摂取量  $60.6 \pm 9.7$  ml/kg/min, 最大運動負荷  $307.5 \pm 37.9$  W). 全ての被検者に対し事前に実験の目的, 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. なお, 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該当する被検者は除外した. 本研究は酪農学園大学研究倫理審査委員会により承認(15-10)を得て実施した.

### 実験の概要

被検者は試験食品の摂取以外は前章と同様のプロトコルを遂行した. 試験食品はコントロールとしてスポーツドリンク(CON)およびアイスクリーム(ICE)とし, それぞれ任意の速度で摂取させた.

### 最大酸素摂取量および最大運動強度の決定

前章と同様の方法で決定した.

## 高強度間欠的運動プロトコル

前章と同様の方法を利用した。

## 試験食品

試験食品は CON として、前章と同様の市販のスポーツドリンク(ポカリスエット, 大塚製薬株式会社) 500 ml に運動後の早期回復のための推奨糖質量 1.2 g/kg 体重[23]となるようブドウ糖(D(+)-グルコース, 和光純薬株式会社)を溶解した。ICE は酪農学園大学で製造されているオリジナルアイスクリーム(乳固形成分 15%以上)を使用し、CON と同じ糖質量となるよう分量を調整した(表 3-1)。なお、アイスクリームの糖質の組成は、29.3 %が乳糖, 70.7 %がショ糖であった。食品の温度は CON で  $5.3 \pm 0.4$  °C, ICE が  $-13.8 \pm 1.5$  °C であった。

## 血液生化学分析

前章と同様の手順で採血, 測定および分析を行なった。インスリンの他に, 総ケトン体, アセト酢酸(ACAC), 3-ヒドロキシ酪酸(3-OHBA), 総コレステロール(T-ch), LDL コレステロール(LDL), トリグリセリド(TG)および遊離脂肪酸(FFA)も外注分析を依頼(札幌臨床検査センター株式会社)した。また, GIP に加え, GLP-1 の測定は Total

GLP-1-HS ELISA (株式会社 矢内原研究所) を用いて分析を行った。

### 呼気ガスの採集および分析

前章と同様の方法を利用した。

### 直腸温の測定

前章と同様の方法を利用した。

### 統計解析

本研究の結果は、平均値±標準偏差 (Mean±SD) で示した。試験食品間の経時変化の比較には重複測定の二元配置分散分析 (摂取条件×時間) を用い、交互作用あるいは主効果の有無を確認した。有意な交互作用が確認された場合は Tukey-Kramer 法を用いて多重比較検定を行なった。また、各指標について運動直後から試験食品摂取 120 分後までの曲線下面積 (Area under the curve: AUC) を算出した。高強度間欠的運動時の指標および AUC の摂取条件間の比較には対応のある t 検定を用いた。加えて、各指標間の相関関係は、Pearson の相関分析を用いて検討した。いずれも危険率 5% 未満を有意水準とした。



### 3. 結果

#### 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パワー ( $p=0.88$ ), ピークパワー ( $p=0.91$ ), 最高回転数 ( $p=0.87$ ), 最高回転数までの到達時間 ( $p=0.66$ ) および主観的運動強度 ( $p=0.29$ ) に摂取条件間で有意な差はみられなかった(表 3-2).

#### 試験食品の摂取時間

摂取時間は CON が  $4.6 \pm 1.4$  分, ICE で  $19.9 \pm 6.4$  分と ICE が CON よりも有意に摂取時間が長かった ( $p < 0.01$ ). 試験食品摂取に伴い下痢症状を起こした被検者はいなかった.

#### 糖質関連項目

運動前後および試験食品摂取後の血糖値の経時変化および AUC を図 3-1 に示した. 血糖値の経時変化に有意な交互作用 ( $F=11.80$ ,  $p < 0.01$ ) が確認され, ICE が CON よりも 30 分, 45 分および 60 分で有意に ( $p < 0.05$ ) 低値であった(図 3-1A). 一方, 血糖値の AUC に有意な差は認められなかった ( $p=0.19$ , 図 3-1B). 運動前後および試験食品摂取後のインスリンの経時変化および AUC を図 3-2 に示した. イン

スリンの経時変化に有意な交互作用 ( $F=6.87$ ,  $p<0.01$ ) が確認され、ICE が CON と比較して 30 分および 45 分で有意に ( $p<0.05$ ) 低値であった (図 3-2A)。また、インスリンの AUC は ICE が CON よりも有意に低値であった ( $p=0.04$ , 図 3-2B)。

運動前後および試験食品摂取後の GIP および GLP-1 の経時変化および AUC を図 3-3, 4 に示した。GIP の経時変化にも有意な交互作用が認められ ( $F=5.97$ ,  $p<0.01$ )、ICE が CON と比較して摂取後 30 分、45 分、60 分および 120 分で有意に ( $p<0.01$ ) 高値であった (図 3-3A)。GIP の AUC は ICE が CON よりも有意に高値であった ( $p<0.01$ , 図 3-3B)。運動前後および試験食品摂取後の GLP-1 の経時変化にも有意な交互作用が確認され ( $F=3.51$ ,  $p<0.01$ )、ICE が CON と比較して摂取後 120 分で有意に ( $p=0.03$ ) 高値であった (図 3-4A)。GLP-1 の AUC に有意な差は確認されなかった ( $p=0.34$ , 図 3-4B)。

### 脂質関連項目

運動前後および試験食品摂取後の総ケトン体、ACAC、3-OHBA の変化を図 3-5, 6, 7 に示した。総ケトン体の経時変化に有意な交互作用 ( $F=8.31$ ,  $p<0.01$ ) が認められ、ICE が CON と比較して摂取後 30 分、45 分、60 分および 120 分で有意に ( $p<0.01$ ) 高値であった (図 3-5A)。総ケトン体の AUC は ICE が CON よりも有意に高値であった ( $p<0.01$ ,

図 3-5B)。また、ACAC にも有意な交互作用が確認され ( $F=5.85$ ,  $p<0.01$ ), ICE が CON と比較して摂取後 45 分および 60 分で有意に ( $p<0.05$ ) 高値であった (図 3-6)。3-OHBA にも有意な交互作用 ( $F=7.63$ ,  $p<0.01$ ) を認め、ICE が CON と比較して摂取後 30 分, 45 分, 60 分および 120 分で有意に ( $p<0.01$ ) 高値であった (図 3-7)。

運動前後および試験食品摂取後の T-ch, LDL, TG および FFA の変化を図 3-8, 9, 10, 11 に示した。T-ch ( $F=0.83$ ,  $p=0.53$ , 図 3-8) および LDL ( $F=0.66$ ,  $p=0.65$ , 図 3-9) は摂取条件で有意な交互作用はみられなかった。しかしながら、TG には、有意な交互作用 ( $F=4.17$ ,  $p<0.01$ ) が確認され、ICE が CON と比較して摂取後 120 分で有意に ( $p<0.01$ ) 高値であった (図 3-10)。FFA は摂取条件に有意な主効果 ( $F=20.38$ ,  $p<0.01$ ) が認められ、ICE が CON と比較して高値で推移した (図 3-11)。

### 呼気成分

運動前後および試験食品摂取後の呼気成分の変化を図 3-12, 13, 14, 15, 16 に示した。 $\dot{V}O_2$  ( $F=0.25$ ,  $p=0.94$ , 図 3-12),  $\dot{V}CO_2$  ( $F=0.03$ ,  $p=1.00$ , 図 3-13) は摂取条件で有意な交互作用はみられなかった。一方で、RER は摂取条件に有意な主効果 ( $F=13.65$ ,  $p<0.01$ , 図 3-14) が認められ、ICE が CON と比較して低値で推移した。糖質酸

化量の経時変化は摂取条件に有意な主効果 ( $F=7.72$ ,  $p<0.01$ , 図 3-15A) が認められ, ICE が CON と比較して低値で推移した. また, 糖質酸化量は摂取条件に差が認められなかった ( $p=0.24$ , 図 3-15B). 脂質酸化量の経時変化は摂取条件に有意な主効果 ( $F=16.58$ ,  $p<0.01$ , 図 3-16A) が認められ, ICE が CON と比較して高値で推移した. また, 脂質酸化量は ICE が CON と比較して有意に高値であった ( $p=0.01$ , 図 3-16B). また, 被検者 8 名中 6 名で ICE の糖質酸化量が CON のそれよりも低値であった. 加えて, 全ての被検者で ICE の脂質酸化量が CON よりも高値を示した.

### 直腸温

運動前後および回復中の直腸温の変化を図 3-17 に示した. 運動前後では両条件ともに直腸温の上昇がみられ, 食品摂取以降で体温の低下がみられた. 食品摂取後から回復中の体温の変化に摂取条件で有意な交互作用 ( $F=1.11$ ,  $p=0.36$ ) はみられなかった. また, 摂取条件で主効果 ( $F=3.02$ ,  $p=0.09$ ) も認められなかった.

### 血糖値, インスリンおよびその他指標の AUC の関係

血糖値とインスリンの AUC には正の相関関係がみられた ( $r=0.894$ ,  $p<0.01$ ). また, 血糖値とエネルギー基質利用量の関係では, 糖質酸

化量において正の相関関係の傾向 ( $r=0.473$ ,  $p<0.06$ ) が認められたが、脂質酸化量には関連はみられなかった ( $r=-0.189$ ,  $p=0.48$ )。また、インスリンと GIP の AUC には関連がみられなかった ( $r=-0.303$ ,  $p=0.25$ )。

#### 4. 考察

本研究は、高強度間欠的運動直後における筋グリコーゲンの回復に必要なとされる糖質量を含んだアイスクリーム摂取(ICE)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を同糖質量のスポーツドリンク(CON)と比較した。その結果、ICEの摂取はCONと比較して血糖値の上昇を抑制し、GIPの分泌を促したものの、インスリンは低値を示した。また、TG、FFA、ケトン体などの脂質関連指標は高値であった。加えてエネルギー基質利用の観点では、ICEはCONに比べ糖質利用を抑制し、脂質利用を亢進させた。一方で、直腸温には摂取条件で有意な差はみられなかった。

稲井ら[36]は、マウスを対象に運動後の糖質と牛乳の混合物の摂取がGIPを分泌しインスリンを上昇させ、糖取り込み能を高めることで、血糖を低下させたことならびに筋グリコーゲン量を増加させたことを示した。本研究では、ICEはCONよりもGIPが高く、血糖値も低値であったという点で稲井ら[36]の研究結果と一致したものの、インスリンはICEがCONよりも低値を示したことから稲井ら[36]の研究結果に反した。筋グリコーゲンの回復にもっとも重要な働きを担うインスリン分泌に牛乳とアイスクリームを試験食品とした2つの研究間で相違が生じた理由として、

1. 糖質の種類と量, 2. エネルギーバランス(PFC 比)の相違が関連しているかもしれない.

第一に, 糖質の種類と量の相違については, 稲井ら[36]の試験食品は筋グリコーゲンの回復に必要なとされる糖質量のブドウ糖を超純水あるいは牛乳で溶解していた. ブドウ糖は, 小腸で吸収され肝臓から全身へ血糖として血液中を流れ, インスリンの作用によって細胞内に取り込まれて蓄積される[51]. 他方, 本研究の ICE は運動後の筋グリコーゲンの回復に必要な糖質量となるようアイスクリームに含まれる糖質で分量を調整した. 本研究で用いたアイスクリームは, 主原材料が生乳および乳製品であり, 製造工程上で砂糖が添加されていたため, その糖質の組成は乳糖が 30 %, ショ糖が 70 %であった. 乳糖はラクターゼにより, ブドウ糖とガラクトースに分解される. ガラクトースはガラクトキナーゼによりグルコース-1-リン酸になり, その後解糖系で利用されたり, グリコーゲンとして貯蔵されるが, その場合には血中においてインスリンの影響を受けにくい[52]. ショ糖もブドウ糖と果糖に分解されるが, 乳糖同様インスリンの影響はさほど受けない. つまり, 本研究における ICE でインスリンが CON に比べ低値を示した理由として乳糖およびショ糖が含まれていたことが関連していると考えられる. また, アイスクリームは血糖値の上がりやすさを反映するグリセミックインデックス(GI)値が低いとされている[53]. このことから, ICE の血糖値が CON よりも低値であったの

は、稲井ら[36]の研究のように高まる血糖値を多量のインスリン分泌によって低下させたのではなく、乳糖やショ糖が含まれていたために血糖値が上がらなかったのかもしれない。

また、PFC 比の相違については、稲井ら[36]の研究では、ブドウ糖を牛乳 (PFC=17:56:27) で溶解しており、その飲料の PFC 比は P:F:C=14:44:42 であったと概算できる。一方、本研究の ICE の PFC 比は、6:55:39 であった、つまり、本研究の ICE におけるエネルギー比は、たんぱく質が比較的 low、脂質が比較的高かったといえる。従来より、糖質とたんぱく質の同時摂取によるインスリン分泌促進効果についての知見 [19, 20, 24, 31, 48, 49] が散見されており、本研究ではたんぱく質よりも脂質のエネルギー比の割合が高かったことが、インスリンの分泌量における先行研究 [36] との相違を生んだ可能性も考えられる。

また、稲井ら[36]の研究では、GIP とインスリン分泌量の間には正の相関関係があったことが示されていたが、本研究において、同様の検討を行ったところ、有意な相関関係は認められず、インスリン分泌量と強い正の相関関係が認められたのは血糖値であった。稲井らは別の研究 [26] において、運動直後の糖質摂取が筋グリコーゲン回復に有効であったことを示し、摂取の遅延とともに筋グリコーゲン回復量が少なくなったことを明らかにした。また、当研究において、血糖値およびインスリンと筋グリコーゲンの回復量との間にそれぞれ有意な相関関係があったこ



とも示している. このことから, 筋グリコーゲン回復にもっとも重要な働きをするのがインスリン分泌とするならば, 本研究および稲井らの別の研究結果[26]を考慮するといかに血糖値を上昇させられるかが重要な要素といえる.

本研究において ICE は CON よりも呼吸交換比が低値を示し, 糖質酸化量が低値となり, 脂質酸化量が高値であった. CON と ICE の糖質酸化量の差である正味の糖質利用抑制量は 4.9 g (19.6 kcal)であった. これらの結果は ICE に比べ CON では血糖値が上昇しインスリンが高まった反面, 糖質がエネルギー源として基質利用されてしまっていたという負の一面を示す. すなわち, 摂取した糖質の全てが筋にグリコーゲンとして蓄積されていなかったことを示唆する. それに対し, ICE は CON と比較して糖質利用量が低値, 脂質利用量は高値で推移したことから, 摂取後のエネルギー基質として脂質を利用していた. 先行研究では運動後のリカバリーにおける低糖質高脂質食の摂取は筋トリグリセリド貯蔵量を増加させ, 同じエネルギーの高糖質低脂質食と比較して全身の脂質分解および運動中の脂質利用を高めたことを示した[33]. 本研究における ICE においても CON に比較しケトン体, TG および FFA が高値を示した. これらのことから, 運動後の ICE 摂取は, 脂質をエネルギー基質として利用していた可能性が考えられる. したがって, 運動直後の筋グリコーゲンの早期回復を目指した栄養補給時のアイスクリーム摂

取はエネルギー基質利用の観点では好ましいと考えられ、必要量のブドウ糖を充足させ、血糖値およびインスリンをしっかりと分泌させつつ、エネルギー基質利用を脂質によるものに保てるような成分調整をしたアイスクリームの効果に関する検討も必要であると考えられる。

Neperalsky et al. [50]は、32.6°Cの環境下における運動後にそのまま同環境で過ごすよりも22.2°Cで過ごした方が深部体温が0.4°C低く推移し、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た。本研究においても試験食品の摂取時の温度の違いにより、体温に相違が生じるのではないかと仮説を立てた。本研究で摂取した試験食品の温度はCONで $5.4 \pm 0.7^{\circ}\text{C}$ 、ICEが $-13.7 \pm 1.4^{\circ}\text{C}$ であり、試験食品間で20°C近い差があった。しかしながら、摂取後の直腸温には摂取条件で有意な相違はみられなかった。Neperalsky et al. [50]の研究では温熱環境下における運動に伴って上昇した体温を常温環境下で低下させたことが、筋グリコーゲンの回復に寄与したことを報告した。一方、本研究では常温環境下における運動に伴い、体温は上昇したものの、安静および体温以下の食品摂取に伴って両条件共にPreよりも体温が低下傾向で推移した。したがって、摂取条件間で体温に相違が生じるという仮説が棄却された理由として、運動および安静時の環境温の違いが関連している可能性がある。

ところで運動後の ICE 摂取は, CON に比べ直腸温を有意ではなかったものの, 0.2℃程度低下させ, 被検者の中には安静 2 時間に冷感を訴えるものもいた. Togashi et al. [54]は, 体温の低下がインスリン分泌の低下を引き起こすことを報告しており, 運動後の冷食品摂取による冷感の増大は, その後の回復に負の影響を与えていたことも考えられる. よって, さらに糖質および脂質を含んだ食品の摂取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を検討する必要がある.

## 5. 小括

本研究の結果から、運動後の筋グリコーゲンの回復に必要な糖質量を満たしたアイスクリーム摂取が同糖質量のスポーツドリンクと比較し、インスリン分泌促進という観点で筋グリコーゲンの回復食として優れていることを実証できなかった。一方、アイスクリーム摂取はスポーツドリンク摂取よりも糖質のエネルギー基質利用を抑制し、脂質利用を亢進させた点では少なからず筋グリコーゲンの回復に貢献するといえるのかもしれない。

## 第Ⅳ章

高強度運動後の食品摂取形態および温度  
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

## 1. 序文

運動後の筋グリコーゲンの早期回復を図るには、必要量の糖質を摂取し、血糖値を高めてインスリン分泌の促進を図ることが有効である[47]。しかしながら、糖質飲料の摂取では血糖値とインスリン分泌を促進するものの、糖質からのエネルギー基質利用量の増加がみられる。他方、糖質と脂質が含まれる食品であるアイスクリームを摂取することで、インスリン分泌能は糖質飲料に劣るものの、糖質利用抑制および脂質利用促進効果がみられることが確認された。

ところで低体温はインスリン分泌の低下を引き起こす要因の一つであると報告されている[54]。このメカニズムは温度を感知するイオンチャンネルである Transient Receptor Potential (TRP) のうち腭臓に局在する TRPM2 が温度感知をして、インスリン分泌を低下させるというものである[54]。

通常、アイスクリームは摂取後、口腔内で溶解させた後に嚥下される。また、アイスクリーム摂取に伴う頭痛、いわゆるアイスクリーム頭痛の誘発により、早く摂取することは難しい。食品の形態や咀嚼の変化に伴う摂取時間の違いは、血糖値、インスリンおよび消化管ホルモンの分泌に影響を与えることが示されている[27, 39, 40, 41]。Labouré et al. [55] は、アイスクリームではないものの、異なる食品を用いて咀嚼回数を変

化させることでインスリン分泌に差が生じることを明らかにした。また、飲料と固形食品とでは飲料の方が胃の排出や吸収の速度が早く、筋グリコーゲンの早期回復を考えた場合には、飲料や液体に近いような食品形態が好ましいと考えられる[47]。これらのことから、通常のアイスクリュームの摂取は、摂取温度および食品形態の観点から、インスリン分泌に負の影響を与えることが懸念される。よって、本研究はアイスクリームを溶解し、温度および食品形態を変化させることが、通常のアイスクリュームとの間に血糖値、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に相違が生じるかを比較検討することを目的とした。

## 2. 方法

### 被検者

被検者は運動部に所属する健康な男性運動競技者 6 名(年齢  $20.2 \pm 0.4$  歳, 身長  $176.7 \pm 4.0$  cm, 体重  $66.3 \pm 3.6$  kg, 最大酸素摂取量  $64.3 \pm 5.9$  ml/kg/min, 最大運動強度  $328 \pm 32.1$  W)であった. 全ての被検者に対し事前に実験の目的, 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. なお, 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該当する被検者は除外した. 本研究は酪農学園大学研究倫理審査委員会により承認(15-10)を得て実施した.

### 実験の概要

被検者は試験食品の摂取以外は前章と同様のプロトコルを実施した. 試験食品は前章と同様の通常のアイスクリューム(Freeze ICE: FICE)および同量のアイスクリュームを溶解したもの(Cold ICE: CICE)とし, それぞれ任意の速度で摂取させた.

### 最大酸素摂取量および最大運動強度の決定

前章と同様の方法で決定した.



## 高強度間欠的運動プロトコル

前章と同様の方法を利用した。

## 試験食品

試験食品は高強度間欠的な運動の 4 セット目の運動直後に摂取するよう指示した。試験食品であるアイスクリームは前章と同様の製品を同分量準備し、CICE 条件では、冷蔵庫で溶解して摂取させた。食品の摂取温度は FICE で  $-13.5 \pm 1.4$  °C, CICE が  $5.7 \pm 0.8$  °C であった。

## 血液生化学分析

前章と同様の手順で採血，測定および分析を行なった。

## 呼気ガスの採集および分析

前章と同様の方法を利用した。

## 直腸温の測定

前章と同様の方法を利用した。

## 統計解析

本研究の結果は、平均値±標準偏差(Mean±SD)で示した。試験食品間の経時変化の比較(摂取条件×時間)は重複測定の二元配置分散分析を行い、交互作用あるいは主効果の有無を確認した。また、有意な交互作用が確認された場合には Tukey-Kramer 法を用いて多重比較検定を行なった。交互作用が認められなかった場合には主効果(摂取条件)の検定を行なった。各指標について運動直後から試験食品摂取 120 分後までの曲線下面積(Area under the curve: AUC)を算出した。高強度間欠的運動時の指標および AUC の摂取条件の比較には対応のある t 検定を用いた。いずれも危険率 5%未満を有意水準とした。

### 3. 結果

#### 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パワー ( $p=1.00$ ) , ピークパワー ( $p=0.97$ ) , 最高回転数 ( $p=0.98$ ) , 最高回転数までの到達時間 ( $p=0.91$ ) , 主観的運動強度 ( $p=0.26$ ) には摂取条件で有意な差はみられなかった(表 4-1).

#### 摂取時間

摂取時間は FICE が  $21.3 \pm 6.8$  分, CICE で  $5.5 \pm 1.7$  分と CICE が FICE よりも有意に摂取時間が短かった ( $p < 0.01$ ) . 摂取後に下痢症状を起こした被検者はいなかった.

#### 糖質関連項目

運動前後および試験食品摂取後の血糖値およびインスリン, GIP, GLP-1 の変化を図 4-1, 2, 3, 4 に示した. 血糖値は摂取条件に交互作用は認められなかったものの, 有意な主効果 ( $F=5.58$ ,  $p=0.02$ ) が認められ, CICE が FICE と比較して高値で推移した(図 4-1A). 血糖値の AUC は摂取条件で差はみられなかった ( $p=0.29$ : 図 4-1B). インスリンは交互作用が確認されなかったものの, 摂取条件に有意な主効果

( $F=8.52$ ,  $p=0.01$ )が認められ, CICE が FICE と比較して高値で推移した(図 4-2). インスリンの AUC は摂取条件で差はみられなかった( $p=0.34$ ). GIP は摂取条件で有意な交互作用はみられなかった( $F=2.67$ ,  $p=0.31$ , 図 4-3). GLP-1 は測定試料の関係上, 測定ポイントを Pre, Post, 45 分, 60 分, 120 分とした. GLP-1 は摂取条件に交互作用は認められなかったものの, 有意な主効果( $F=8.71$ ,  $p=0.01$ )が認められ, CICE が FICE と比較して高値で推移した(図 4-4).

#### 脂質関連項目

運動前後および試験食品摂取後の T-ch ( $F=0.17$ ,  $p=0.97$ ), LDL ( $F=0.19$ ,  $p=0.97$ ), TG ( $F=0.21$ ,  $p=0.96$ ), FFA ( $F=1.22$ ,  $p=0.31$ ) は摂取条件で有意な交互作用はみられなかった.

#### 呼気成分

運動前後および試験食品摂取後の呼気成分の変化を図 4-5, 6, 7, 8, 9 に示した. その結果,  $\dot{V}O_2$  ( $F=1.06$ ,  $p=0.39$ , 図 4-5),  $\dot{V}CO_2$  ( $F=0.79$ ,  $p=0.57$ , 図 4-6)は両条件で有意な交互作用はみられなかった. また, RER においても摂取条件で有意な交互作用はみられなかった( $F=0.95$ ,  $p=0.46$ , 図 4-7). 糖質 ( $F=0.79$ ,  $p=0.56$ , 図 4-8)および

脂質 ( $F=1.14$ ,  $p=0.35$ , 図 4-9) 酸化量の経時変化は摂取条件で有意な交互作用はみられなかった。

### 直腸温

運動前後および回復中の直腸温の変化を図 4-10 に示した。直腸温は運動前から運動後にかけて両条件において上昇がみられ、食品摂取以降で低下がみられた。摂取条件に交互作用はなかったものの ( $F=1.64$ ,  $p=0.16$ )、有意な主効果 ( $F=4.56$ ,  $p=0.04$ ) が認められ、CICE が FICE よりも試験食品摂取以降で高値推移した。

#### 4. 考察

本研究は、運動直後の糖質および脂質を含んだ食品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を検討した。その結果、アイスクリームを溶かした CICE が通常のアイスクリュームである FICE よりも直腸温が高値で推移し、血糖値、インスリン、GLP-1 も高値推移した。一方、RER、糖質および脂質酸化量、T-ch、LDL、TG および FFA は摂取条件で有意な差は認められなかった。

本研究における CICE と FICE とでは食品の形態および摂取温度が異なったことで、FICE では口腔内での溶解が必要とされた。また、FICE ではアイスクリーム頭痛の誘発なども相まって、結果的に摂取時間が CICE よりも平均 16 分延長した。これらの相違が総合的に起因して、直腸温は試験食品摂取以降で CICE が FICE よりも高値で推移したと考えられる。TRP は温度を感知するイオンチャンネルで現在までに多くの種類が確認されてきたが、それぞれ発現部位や活性化する温度が異なるとされる[56]。この一種である TRPM2 は膵臓に多く発現しており、36℃以下でインスリン分泌を低下させる作用を持つとされる[54]。本研究において直腸温は 36℃を下回ることはなかったものの、直腸温

が CICE で FICE よりも高く推移したことは FICE では何らかの影響を及ぼし、インスリン分泌量を低下させたことを推察させる。

また、食品形態や摂取温度の違いにより生じた摂取時間の長短が血糖値、インスリン分泌および GLP-1 に直接影響を及ぼしたことも考えられる。Labouré et al. [55]は、食品形態が複雑であるほど口腔内で咀嚼される時間が長くなりインスリン分泌量が低下したことを明らかとした。本研究においても液体のアイスクリームの方が摂取時間が短く、血糖値、インスリン分泌および GLP-1 が高値推移であった。溶解したアイスクリームでは摂取時間の短縮ならびに消化吸収の速度が速かったことでインスリン分泌量が高まったと予想される。

一方で、両条件における RER、糖質および脂質酸化量、T-ch, LDL, TG および FFA は、エネルギー基質利用の観点から脂質利用を示唆する変化を示し、条件間に有意な差は認められなかった。これらのことは、アイスクリームは食品の形態、摂取温度ならびに摂取時間の相違に関わらず、脂質利用を亢進させたと考えられる。よって、インスリン分泌を促進した点も加味すると CICE 条件のアイスクリーム摂取は FICE 条件よりも筋グリコーゲンの回復食として適しているといえる。

## 5. 小括

運動後の糖質と脂質を含んだアイスクリームの摂取形態や温度の差異が血糖値，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について検証を行なった．その結果，溶解したアイスクリームの摂取は通常のアイスクリュームを摂取するよりも深部体温を低下させず，血糖値を高め，インスリン分泌を促すにもかかわらず，エネルギー基質利用の観点では同様に脂質利用を亢進させることが実証された．



## 総括

運動直後の栄養補給は筋グリコーゲンの回復のために重要である。殊に一日に連続した練習や試合，翌日早朝からの練習や試合など休息時間が短い状況下では早急な栄養補給が不可欠である。適切な栄養補給方法としては運動直後に糖質を補給し，血糖値およびインスリンを十分に高めて，筋への糖取り込みを行う必要がある。加えて，糖質にたんぱく質や脂質を加えて摂取することでよりインスリン分泌の促進を図ることが可能となる。本研究は運動直後のより良い栄養補給について提案するため，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，高強度運動後における 1. 糖質飲料の補給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，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を検証することとした。加えて，得られた知見より，3. アイスクリームの摂取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について検討した。

## 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

運動直後は，消化器系の血液循環量低下等に伴う食欲低下により固形食品の摂取が難しいことが多い．このことから，比較的容易な摂取形態である飲料を用いて，運動直後の栄養補給タイミングに関する研究が行われてきた．しかしながら，飲料の摂取時間の長短が筋グリコーゲンの回復効果に及ぼす影響については検討されてこなかった．そこで高強度間欠的な運動直後の高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を検証した．その結果，短時間で多量に摂取する場合と比較的長い時間で少量ずつこまめに摂取する場合とでインスリン分泌に相違がないことが明らかとなった．

## 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

近年，糖質と脂質の摂取が運動後の筋グリコーゲン回復に有効とされている．また，運動によって高まった体温を低下させることが筋グリコーゲンの回復に有効であることも報告されてきた．そこで高強度間欠的な

運動直後に糖質と脂質を含んだ冷食品であるアイスクリームを摂取することが運動後の血糖値，インスリン分泌およびエネルギー基質利用に及ぼす影響を検証した。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 濃度を高め，血糖値を低く抑えたが，インスリン分泌量は低値であった。一方で，アイスクリームの摂取はスポーツドリンクの摂取に比べ，脂質酸化量を増加させ，ケトン体および FFA が高値となった。これらのことから，運動直後のアイスクリーム摂取はインスリン分泌の促進効果はスポーツドリンク摂取に比べ低いものの，エネルギー基質として脂質利用を促進し，糖質の利用を抑制することが示唆された。

### 3. 食品摂取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

アイスクリームを用いて食品摂取形態や摂取温度の差異がインスリン分泌に与える影響を検討した。その結果，溶解したアイスクリームの摂取は通常のアイスクリーム摂取に比較し，深部体温を高く保ち，血糖値およびインスリン分泌を促した。他方，エネルギー基質の脂質利用促進および糖質利用抑制の効果は同様であった。よって，溶解したアイスクリームの方が通常のアイスクリームよりも運動直後の筋グリコーゲンの回復のために適していることが示唆された。

## 研究の限界と課題

本研究は、筋グリコーゲンの回復を促進させるインスリン分泌に着目して検討を行った。しかしながら、実際には筋グリコーゲン量を測定していないため、摂取した糖質が筋にグリコーゲンとして取り込まれたかについては論ずることができない。筋グリコーゲンの測定には筋生検のような侵襲的方法、あるいは炭素磁気共鳴分光法などの大型の機材を用いた非侵襲的な測定方法で同定しなければならない。これらの測定方法は運動現場で応用するには非現実的であることに加え、本学ならびに研究協力機関でもそれらの測定ができなかったため、本研究ではインスリンの動態で検証せざるを得なかった。今後は筋グリコーゲンの動態は確認できなくとも、実際の運動現場を想定し、回復食摂取後 2 時間から 4 時間に運動能力の測定を実施して、回復食の有効性を検討すべきであると考ええる。

また、その他の課題としては、食品および食事の PFC バランスの検討が挙げられる。運動後の栄養補給は摂取する栄養素のバランスでインスリン分泌量が左右され、その後の糖取り込みに影響を与えられられる。運動直後から早期にインスリン分泌量を増大させ、かつ分泌の継続時間が延長するにもかかわらず、エネルギー基質利用の観点からは糖質利用抑制および脂質利用促進を図ることができるより良い PFC バ

ランスの食品に関する検証が必要である。アイスクリーム様の食品を利用して脂質を含みながら、ブドウ糖で糖質が組成され、たんぱく質も含まれているものでインスリン分泌の促進を図れる食品を利用した検証が必要であろう。

## 食品栄養科学分野における学術貢献

本研究は、身近に入手できるスポーツドリンクおよびアイスクリームを用いて運動後の筋グリコーゲンの回復に及ぼす影響について生化学および生理学的データより多面的に検討を行なった。その結果、運動後の栄養補給戦略として各食品の具体的な摂取方法について明示できた。

スポーツドリンクについては、必要な糖質量が溶解されていれば、摂取時間の長短に関わらず、インスリンが分泌されることが明らかとなった。運動現場においては試合や練習直後にクールダウンやミーティングなどがあり、運動直後に食品や食事を摂取できない場合もある。本研究の結果は、運動直後に筋グリコーゲンの回復に必要な量の糖質を含んだ飲料を摂取することをクールダウンの選択肢の一つに加える根拠を明示したといえる。

また、スポーツドリンクとアイスクリームがインスリン分泌に及ぼす影響についての比較検討では、アイスクリーム摂取はスポーツドリンク摂取よりも血糖値およびインスリンを高めなかった。一方で、アイスクリーム摂取はスポーツドリンク摂取に比較し、運動後の脂質利用促進および糖質利用抑制を図れたことが示された。これらのことは運動直後に摂取する筋グリコーゲンの回復食として、エネルギー基質利用の観点から考え

るとアイスクリーム摂取が有効であることを示唆する。さらに、溶解したアイスクリームは、通常のアイスクリームよりもインスリンを高めることができ、運動直後の筋グリコーゲンの回復に適していることも明らかとなった。運動現場では冷凍保存の方が環境的に難しい。したがって、衛生面さえ注意を払えば、溶解されたアイスクリームの利用は保存の点からも無理なく利用できると考えられる。さらに、摂取も通常のアイスクリームよりも容易であるため摂取方法の観点からも有用といえる。

なお、本研究の対象は比較的持久力の高い運動実践者であった。また、運動の様式が高強度間欠的な運動であった。これらのことから、本研究で得られた知見は、サッカーやバスケットボールなどの間欠的な高強度運動競技における比較的持久力の高い競技選手の栄養管理の一助を担えると考えられる。

## *Summary*

**Aims:** Muscle glycogen is the fuel source during endurance or intermittent high-intensity exercise. In the case that the exercise is performed on multiple sessions per day, muscle glycogen needs to be restored by carbohydrate ingestion during short-term recovery. Post exercise muscle glycogen synthesis during short-term recovery is promoted by insulin. The previous studies have investigated the effect of carbohydrate ingestion timing on insulin secretion, but not the effect of carbohydrate ingestion duration. It was revealed that the co-ingestion of carbohydrate and protein and/or fat during short-term recovery promoted insulin secretion. It was important to investigate the effect of ingestion some commercially available foods containing these nutrients during short-term recovery on insulin secretion. The purposes of this study were to reveal the optimal ingestion for post exercise muscle glycogen synthesis during short-term recovery, we investigated as follows: effects of carbohydrate ingestion duration after exercise on insulin secretion and energy substrate utilization (Study 1), effects of ice cream ingestion



after exercise on insulin secretion and energy substrate utilization (Study 2) and effects of ice cream ingestion form after exercise on insulin secretion and energy substrate utilization (Study 3).

**Methods:** Subjects in each study were measured their maximum oxygen intake and maximum exercise intensity for using bicycle ergometer. Subjects performed exercise that was included high intensity intermittent and moderate exercises for skeletal muscle glycogen depletion. High intensity intermittent exercise was included 2 sets of 2 maximum cycling (0.075 kp/kg body weight) for 30-second with a 4-minute recovery between each cycling, and a moderate cycling at 40% maximum exercise intensity for 30-minute after 1 set of cycling. Immediately after the exercise, subjects ingested trial foods. The trial food of Study 1 was carbohydrate-electrolyte beverage. Each subject ingested the beverage for 2 types of duration. The types were FAST (non-controlled) and SLOW controlled ingestion at 10-15 ml / 30 sec. The trial foods of Study 2 were carbohydrate-electrolyte beverage (CON) same as study 1 and ice cream (ICE). The trial

food of Study 3 was ice cream same as study 2. Each subject ingested the two types of ice cream form. The types were normal (=frozen) ice cream (FICE) and melted cold ice cream (CICE), All trial foods contained carbohydrate at 1.2 g/kg body weight of each subject. After the ingestion of trial food, each subject rested in a sitting position for two hours. Blood samplings, respiratory gas collections and core temperature measurements were performed at pre- and post-exercise, and 30, 45, 60 and 120 min after ingestion trial food. Experimental trials were performed in randomized and crossover designs. Each trial was performed at the same time of day for circadian rhythm and separated by of least a week washout period. The temperature and humidity in the laboratory were controlled to 24 °C and 50%, respectively.

**Results:** In Study 1, the ingestion time in SLOW delayed for about 16 minutes than that in FAST. Insulin secretion was not a significant difference between the FAST and SLOW. In Study 2, glucose-dependent insulintropic polypeptide (GIP) in ICE was significantly higher compared with that in CON. However,

insulin secretion in ICE was significantly lower than that in CON. On the other hand, respiratory exchange ratio in ICE was significantly lower compared with that in CON. Some blood lipid properties were also significantly higher in ICE than in CON. Additional experiments were performed in Study 3 since the result of study 2 showed that core temperature in ICE was trended to be lower than in CON. The result suggested that ingestion of frozen food immediately after exercise might have some negative effects of recovery. Core temperature and insulin secretion in CICE was higher than those in the FICE. Respiratory exchange ratio between CICE and FICE was not significant difference.

**Conclusions:** The results of this study suggest that 1) even if ingestion carbohydrate beverage after exercise is delayed and small quantity and frequent, insulin secretion may promote, 2) ingestion ice cream immediately after exercise does not have sufficient insulin secretion ability compared with ingestion carbohydrate beverage, although may promote fat oxidation utilization and 3) ingestion melted cold ice cream immediately

after exercise may promote insulin secretion compared with ingestion frozen ice cream in spite that both ice cream ingestions promote fat oxidation utilization as well.

## 謝辞

本研究に対して 2015 年, 2016 年, 2017 年酪農学園後援会の助成および 2016 年度酪農学園大学共同研究助成を賜りましたこと厚く御礼申し上げます.

本稿を終えるにあたりまして, 多大なる御助言と御指導をいただきました指導教員の山口太一准教授に, 心より感謝致します. また, 本実験の測定にあたり御指導ならびに御助言をいただきました一般社団法人身体開発研究機構の瀧澤一騎代表理事, 北海道教育大学札幌校の神林勲教授, 藤女子大学の中島寿宏准教授, 酪農学園大学乳製品製造学研究室の竹田保之教授, 栃原孝志講師, 倉内清貴技師, 応用微生物学研究室の山口昭弘教授に深く感謝致します.

本実験において, 実験に参加協力して下さった北海道教育大学の皆様, ならびに測定にご協力していただきました環太平洋大学の保科圭汰講師, 酪農学園大学大学院の佐藤未来さん, 食・健康スポーツ科学研究室的の皆様に心から感謝致します.

## 引用文献

- [1] 塩瀬圭佑, 飛奈卓郎, 桧垣靖樹, 清水明, 田中宏暁, 2011. 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.
- [2] Ahlborg, G., Felig, P., Hagenfeldt, R., Hendler, R. and Wahren, J. 1974. Substrate turnover during pro-longed exercise in man. Splanchnic and leg metabolism of glucose, free fatty acids, and amino acids. J. Clin. Invest., 53: 1080-1090.
- [3] Hawley, J.A., Burke, L.M., Angus, D.J., Fallon, K.E., Martin, D.T. and Febbraio, M.A. 2000. Effect of altering substrate availability on metabolism and performance during intense exercise. Br. J. Nutr., 84(6): 829-838.
- [4] Paul, D., Jacobs, K.A., Geor, R.J. and Hinchcliff, K.W. 2005. No effect of pre-exercise meal on substrate metabolism and time trial performance during intense endurance exercise. Int. J. Sport. Nutr. Exerc. Metab., 13(4): 489-503.

- [5] 東郷将成, 佐々木将太, 山田祐輝, 山口太一, 眞船直樹, 寺井格, 小林邦彦, 神林勲, 2010. 糖質サプリメント摂取が長時間の間欠的な高強度自転車運動の走行パフォーマンスに与える影響. 北海道教育大学紀要, 61(1): 13-20.
- [6] Murakami, I., Sakuragi, T., Uemura, H., Menda, H., Shindo, M. and Tanaka, H. 2012. Significant effect of a pre-exercise high-fat meal after a 3-day high-carbohydrate diet on endurance performance. *Nutrients.*, 4, 625-637.
- [7] Pitsiladis, Y.P., Smith, I. and Maughan, R.J. 1999. Increased fat availability enhances the capacity of trained individuals to perform prolonged exercise. *Med. Sci. Sports. Exerc.*, 31(11): 1570-1579.
- [8] Ichinose, T., Arai, N., Nagasaka, T., Asano, M. and Hashimoto, K. 2012. Impact of intensive high-fat ingestion in the early stage of recovery from exercise training on

substrate metabolism during exercise in humans. *J. Nutr. Sci. Vitaminol.*, 58(5): 354-359.

- [9] Bergström, J., Hermansen, L., Hultman, E. and Saltin, B. 1967. Diet, muscle glycogen and physical performance. *Acta. Physiol. Scand.*, 71(2): 140-150.
- [10] Saltin, B. and Gollnick, P.D. 1988. Fuel for muscular exercise: role for carbohydrate. New York., 45-71.
- [11] Green, H.J., Duhamel, T.A., Holloway, G.P., Moule, J.W., Ranney, D.W., Tupling, A.R. and Ouyang, J. 2008. Rapid upregulation of GLUT-4 and MCT-4 expression during 16 h of heavy intermittent cycle exercise. *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.*, 294(2): R594-600.
- [12] Kim, J., Lim, K. 2016. Relationship between FAT/CD36 Protein in Skeletal Muscle and Whole-body Fat Oxidation in Endurance-trained Mice. *J. Exerc. Nutrition. Biochem.*, 31:20(4):48-52. doi: 10.20463/jenb.2016.0057.



- [13] Cheng, I.S., Liao, S.F., Liu, K.L., Liu, H.Y., Wu, C.L., Huang, C.Y., Mallikarjuna, K., Smith, R.W. and Kuo, C.H. 2009. Effect of dietary glycemic index on substrate transporter gene expression in human skeletal muscle after exercise. *Eur. J. Clin. Nutr.*, 63(12): 1404-1410.
- [14] Kiens, B., Lithell, H., Mikines, K.J. and Richter, E.A. 1989. Effects of insulin and exercise on muscle lipoprotein lipase activity in man and its relation to insulin action. *J. Clin. Invest.*, 84: 1124-1129.
- [15] Seip, R.L., Mair, K., Cole, T.G. and Semenkovich, C.F. 1997. Induction of human skeletal muscle lipoprotein lipase gene expression by short-term exercise is transient. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.*, 272: E255-E261.
- [16] 八田秀雄, 2000. 乳酸輸送担体 MCT の発現と乳酸の代謝との関係. *日本運動生理学雑誌*, 7: 45-56.

- [17] Halestrap, A.P. and Meredith, D. 2004. The SLC16 gene family-from monocarboxylate transporters (MCTs) to aromatic amino acid transporters and beyond. *Pflugers. Arch.*, 447: 619-628.
- [18] Ivy, J.L., Katz, A.L., Cutler, C.L., Sherman, W.M. and Coyle, E.F. 1988. Muscle glycogen synthesis after exercise: effect of time of carbohydrate ingestion. *J. Appl. Physiol.*, 64(4): 1480-1485.
- [19] Zawadzki, K.M., Yaspelkis, B.B. and Ivy, J.L. 1992. Carbohydrate-protein complex increases the rate of muscle glycogen storage after exercise. *J. Appl. Physiol.*, 72(5): 1854-1859.
- [20] Ivy, J.L., Goforth, H.W, Jr., Damon, B.M., McCauley, T.R., Parsons, E.C. and Price, T.B. 2002. Early postexercise muscle glycogen recovery is enhanced with a carbohydrate-proteinsupplement. *J. Appl. Physiol.*, 93(4): 1337-1344.

- [21] Burke, L.M., Collier, G.R., Davis, P.G., Fricker, P.A., Sanigorski, A.J. and Hargreaves, M. 1996. Muscle glycogen storage after prolonged exercise: effect of the frequency of carbohydrate feedings. *Am. J. Clin. Nutr.*, 64(1): 115-119.
- [22] Van. Loon. L.J., Saris, W.H., Kruijshoop, M. and Wagenmakers, A.J. 2000. Maximizing postexercise muscle glycogen synthesis: carbohydrate supplementation and the application of amino acid or protein hydrolysate mixtures. *Am. J. Clin. Nutr.*, 72(1): 106-111.
- [23] Burke, L.M., Hawley, J.A., Wong, S.H. and Jeukendrup, A.E. 2011. Carbohydrates for training and competition. *J. Sports. Sci.*, 29: S17-S27.
- [24] 寺田新, 大森一伸, 中村好男, 村岡功, 2002. 長時間運動後の糖質・タンパク質混合物摂取が日本人陸上長距離選手の回復期の血中エネルギー基質並びに関連ホルモン動態に及ぼす影響. *日本運動生理学雑誌*, 9(1): 47-52.

- [25] De, Sousa, M.V., Simões, H.G., Oshiiwa, M., Rogero, M.M. and Tirapegui, J. 2007. Effects of acute carbohydrate supplementation during sessions of high-intensity intermittent exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 99(1): 57-63.
- [26] 稲井真, 西村脩平, 浦島章吾, 野中雄大, 木村典代, 寺田新, 2017. 糖質摂取のタイミングの違いが運動後の筋グリコーゲン回復率に及ぼす影響. *日本スポーツ栄養研究誌*, 10: 48-57.
- [27] 宮下政司, 柏原杏子, 2016. 咀嚼と運動からみた消化管ホルモンの変動. *体力科学*, 65: 367-373.
- [28] Broom, D.R., Batterham, R.L., King, J.A. and Stensel, D.J. 2009. Influence of resistance and aerobic exercise on hunger, circulating levels of acylated ghrelin, and peptide YY in healthy males. *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.*, 296(1): R29-35.

- [29] King, J.A., Miyashita, M., Wasse, L.K. and Stensel, D.J. 2010. Influence of prolonged treadmill running on appetite, energy intake and circulating concentrations of acylated ghrelin. *Appetite.*, 54(3): 492-498.
- [30] Parkin, J.A., Carey, M.F., Martin, I.K., Stojanovska, L. and Febbraio, M.A. 1997. Muscle glycogen storage following prolonged exercise: effect of timing of ingestion of highglycemic index food. *Med. Sci. Sports. Exerc.*, 29(2): 220-224.
- [31] Carrithers, J.A., Williamson, D.L., Gallagher, P.M., Godard, M.P., Schulze, K.E. and Trappe, S.W. 2000. Effects of postexercise carbohydrate-protein feedings on muscle glycogen restoration. *J. Appl. Physiol.*, 88(6): 1976-82.
- [32] Berardi, J.M., Price, T.B., Noreen, E.E. and Lemon, P.W.R. 2006. Post-exercise muscle glycogen recovery enhanced with a carbohydrate-protein supplement. *Med. Sci. Sports. Exerc.*, 38: 1106-1113.

- [33] Zderic, T.W., Davidson, C.J., Schenk, S., Byerley, L.O. and Coyle, E.F. 2004. High-fat diet elevates resting intramuscular triglyceride concentration and whole body lipolysis during exercise. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.*, 286: E217-E225.
- [34] Sadur, C.N. and Eckel, R.H. 1982. Insulin stimulation of adipose tissue lipoprotein lipase. Use of the euglycemic clamp technique. *J. Clin. Invest.*, 69: 1119-1125.
- [35] 寺田新, 2015. 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.
- [36] 稲井真, 西村脩平, 浦島章吾, 野中雄大, 木村典代, 寺田新, 2017. 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.

- [37] Ivy, J.L., Lee, M.C., Brozinick, J.T., Brozinick, Jr J.T. and Reed, M.J. 1988. Muscle glycogen storage after different amounts of carbohydrate ingestion. *J Appl Physiol.*, 65: 2018-2023.
- [38] Kerksick, C., Harvey, T., Stout, J., Campbell, B., Wilborn, C., Kreider, R., Kalman, D., Ziegenfuss, T., Lopez, H., Landis, J., Ivy, J.L. and Antonio, J. 2008. International Society of Sports Nutrition position stand: nutrient timing. *J. Int. Soc. Sports. Nutr.*, 3;5:17. doi: 10.1186/1550-2783-5-17.
- [39] Stensel, D.J. 2010. Exercise, appetite and appetite-regulating hormones: implications for food intake and weight control. *Ann. Nutr. Metab.*, 57(2): 36-42.
- [40] Schubert, M.M., Sabapathy, S., Leveritt, M. and Desbrow, B. 2014. Acute exercise and hormones related to appetite regulation : A meta-analysis. *Sports. Med.*, 44: 387-403.

- [41] Miquel-Kergoat, S., Azais-Braesco, V., Burton-Freeman, B. and Hetherington, M.M. 2015. Effects of chewing on appetite, food intake and gut hormones: A systematic review and meta-analysis. *Physiol. Behav.*, 151: 88-96.
- [42] Borg G. 1973. Perceived exertion: a note on “history” and method. *Med. Sci. Sports.* 5(2): 90-93.
- [43] 小野田孝一, 宮下充正, 1976. 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.
- [44] Jeukendrup, A.E. and Wallis, G.A. 2005. Measurement of substrate oxidation during exercise by means of gas exchange measurements. *Int. J. Sports. Med.*, 26(1): S28-S37.
- [45] Coyle, E.F. 1987. Gastric empty rates for selected athletic drinks. *Res Quart.*, 49: 119-124.



- [46] 寄本明, 中井誠一, 芳田哲也, 森本武利, 1995. 屋外における暑熱下運動時の飲水行動と体温変動の関係. 体力科学, 44: 357-364.
- [47] 東郷将成, 山口太一, 2017. 運動後における筋グリコーゲン回復のための栄養補給方法. Research of One Health. 1-10.
- [48] Tarnopolsky, M.A., Bosman, M., Macdonald, J.R., Vandeputte, D., Martin, J. and Roy, B. D. 1997. Postexercise protein-carbohydrate and carbohydrate supplements increase muscle glycogen in men and women. J. Appl. Physiol., 83(6): 1877-1883.
- [49] Potgieter, S. 2013. Sport nutrition: A review of the latest guidelines for exercise and sport nutrition from the American College of Sport Nutrition, the International Olympic Committee and the International Society for Sports Nutrition. S. Afr. J. Clin. Nutr., 26: 6-16.

- [50] Naperalsky, M., Ruby, B. and Slivka, D. 2010. Environmental temperature and glycogen resynthesis. *Int. J. Sports. Med.*, 31(8): 561-566.
- [51] 富樫健二. 2013. スポーツ生理学 2章 スポーツとエネルギー供給機構. 14-24. 化学同人. 東京.
- [52] Aro, A., Pelkonen, R. and Leino, U. 1987. Glucose and insulin responses to meals containing milk, lactose, glucose or fructose in subjects with non-insulin-dependent diabetes. *Diabete. Metab.*, 13(6): 603-606.
- [53] Foster-Powell, K., Holt, S. H. and Brand-Miller, J. C. 2002. International table of glycemic index and glycemic load values. *Am J Clin Nutr.*, 76(1): 5-56.
- [54] Togashi, K., Hara, Y., Tominaga, T., Higashi, T., Konishi, Y., Mori, Y. and Tominaga, M. 2006. TRPM2 activation by cyclic ADP-ribose at body temperature is involved in insulin secretion. *EMBO. J.*, 3;25(9): 1804-1815.

- [55] Labouré, H., Van, Wymelbeke, V., Fantino, M. and Nicolaidis, S. 2002. Behavioral, plasma, and calorimetric changes related to food texture modification in men. *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.*, 282: 1501-1511.
- [56] 富永真琴, 2011. TRP チャンネルと感覚-痛みと温度感覚に焦点をあてて-. *顕微鏡*, 46(4): 222-226.

図表一覧

表 1-1 運動後の栄養補給に関する研究の被検者および運動方法

文献データ		被験者				運動		
筆頭著者	年	n	性	VO <sub>2</sub> max ml/min/kg	体重 kg	様式	強度	時間
Ivy[18]	1988	12	男	59.7	70.2	自転車	VO <sub>2</sub> max 68%(8min), 88%(2min) 7set	70min
Zawadzki[19]	1992	9	男	66.6	73.1	自転車	60-65% VO <sub>2</sub> max 3set	15min
							70-75% VO <sub>2</sub> max 3set	15min
							60-65% VO <sub>2</sub> max	10min
							70-75% VO <sub>2</sub> max	10min
							50% VO <sub>2</sub> max	5min
						80-85% VO <sub>2</sub> max	5min	
Burke[21]	1996	5	男	69.9	68.7	自転車	75% VO <sub>2</sub> max HIT 30sec, rest 2min	2h 疲労困憊
Parkin[30]	1997	6	男	60.5	73	自転車	70% VO <sub>2</sub> max HIE 30sec rest 2min	疲労困憊
Carrithers[31]	2000	7	男	55.7	75.4	自転車	75%VO <sub>2</sub> max	75min
							125%VO <sub>2</sub> max	1min
Van Loon[22]	2000	8	男		70	自転車	w-up 50% watt max	10min
							90%+50% watt max	2min
							80% or 70% watt max	2min
Ivy[20]	2002	7	男	61.1	74	自転車	65-75% VO <sub>2</sub> max	120min
寺田[24]	2002	8	男	73	62	ランニング	30km	-
Berardi[32]	2006	① 6	男	-	80.2	自転車	タイムトライアル (後輪負荷)	60min
		② 6	男	-	80.2		休息 (10,60,120,240分で栄養補給)	6h
		③ 4	男	-	80.7		タイムトライアル (後輪負荷)	60min
De Sousa[25]	2007	15	男	-	64.5	ランニング	800m 12set HIE, rest 1.2min	-
Cheng[13]	2009	8	男	49.7	69.1	自転車	75% VO <sub>2</sub> max	60min

VO<sub>2</sub> max : 最大酸素摂取量, w-up : ウォーミングアップ, HIE : High Intensity Intermittent Exercise

表 1-2 運動後の栄養補給に関する研究の栄養補給内容および回復効果

果

文献データ		被験者			運動後の食事					結果				
筆頭著者	年	n	性	食事 形態	摂取時間 タイミング	条件	総エネルギー kcal	エネルギー kcal/kg	糖質 g/kg	たんぱく質 g/kg	脂質 g/kg	インスリン	グリコーゲン	FFA
Ivy[18]	1988	12	男	飲料	①直後 ②2時間後	CHO	562	8	2.0	-	-	①↑	2h after ①↑	①↓
Zawadzki[19]	1992	9	男	飲料	直後	①CHO 112g ②PRO 40.7g ③CHO112g +PRO 40.7g	448 163 611	6 2 8	1.5 - 1.5	- 0.6 0.6	- - -	①③↑	4h after ①③↑	-
Burke[21]	1996	5	男	食品	0, 4, 8, 21h 計4回	①Lo GI (GI71) ②Hi GI (GI108)	3833 3815	56 56	10.5 10.4	2.0 1.9	0.7 0.7	→	24h after ②↑	-
Parkin[30]	1997	6	男	食品	①直後(IT) ②2時間後 (DT)	①IT 0h, DT2h ②IT 2h, DT4h ③IT 4h, DT6h ④8h ⑤22h	780 710 792 710 780	11 10 11 10 11	2.3 2.3 2.3 2.3 2.3	0.3 0.1 0.2 0.1 0.1	0.1 0.0 0.1 0.0 0.1	→	24h after →	-
Carrithers[31]	2000	7	男	飲料	8回/30min	①CHO100% ②CHO-PRO ③CHO-AA	1206 1206 1206	16 16 16	4.0 2.8 3.2	- 0.8 0.6	- 0.2 -	→	4h after →	-
Van Loon[22]	2000	8	男	食品	3.5ml/kg/ 30min	①CHO+PRO 0.8+0.4g/kg ③CHO 1.2g/kg	336 336	5 5	0.8 1.2	0.4 -	- -	②③↑	5h after ②③↑	-
Ivy[20]	2002	7	男	飲料	直後	①CHO-Pro: 28g:6g:80g ②Hi CHO : 0g:6: 108g ③Lo CHO : 0g:6g:80g	756 756 588	10 10 8	1.6 2.2 1.8	0.6 - -	0.2 0.2 0.2	→	2h after ①↑	→
寺田[24]	2002	8	男	飲料	直後	①CHO 1.5g/kg ②CHO 1.5g/kg PRO 0.5g/kg	372 496	6 8	1.5 1.5	- 0.5	- -	②↑	-	→
Berardi[32]	2006	①6 ②6 ③4	男 男 男	飲料	運動後10, 60, 120min	①CHO+PRO ②CHO ③風味飲料	385 385 0	4.8 4.8 -	0.8 1.2 -	0.4 - -	- - -	-	6h after ①↑	-
De Sousa[25]	2007	15	男	飲料	①直後 ②60分毎	①②固形食 ③3倍量の固形食	561 1684	7 21	1.2 3.6	0.3 1	0.1 0.3	②↑	-	②↑
Cheng[13]	2009	8	男	食品	直後	①fasting ②Hi GI(76.6) ③Lo GI(36.1)	- 678 682	- 10 10	- 2.0 2.0	- 0.3 0.3	- 0.1 0.1	②↑	-	②③↓

CHO: Carbohydrate, PRO: Protein, AA: Amino Acid, FFA: Free Fatty Acid

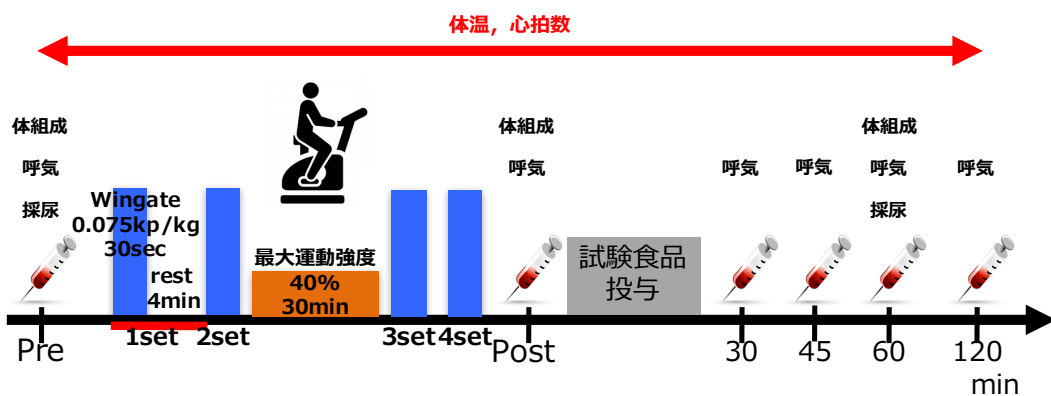


図 2-1 筋グリコーゲン枯渇を目的とした高強度間欠的な運動プロトコル

対象者は筋グリコーゲンの効率的な減少のため、体重 1kg 当たり 0.075kp の負荷で 30 秒の全力運動を 4 セットと最大運動負荷の 40% 強度の運動を行った。その後、各試験食品を摂取から 2 時間後までの経時変化を測定した。

表 2-1. 高強度間欠的運動における摂取条件のパフォーマンスの比較

		FAST	SLOW	P value
平均パワー	W	551 ± 64	575 ± 64	0.80
最大パワー	W	667 ± 101	693 ± 113	0.70
最高回転数	rpm	143 ± 15	139 ± 16	0.70
到達時間	sec	8.4 ± 6.1	7.3 ± 4.2	0.26
RPE		13 ± 1	14 ± 1	0.99

Mean±SD

到達時間: 最高回転数までの到達時間

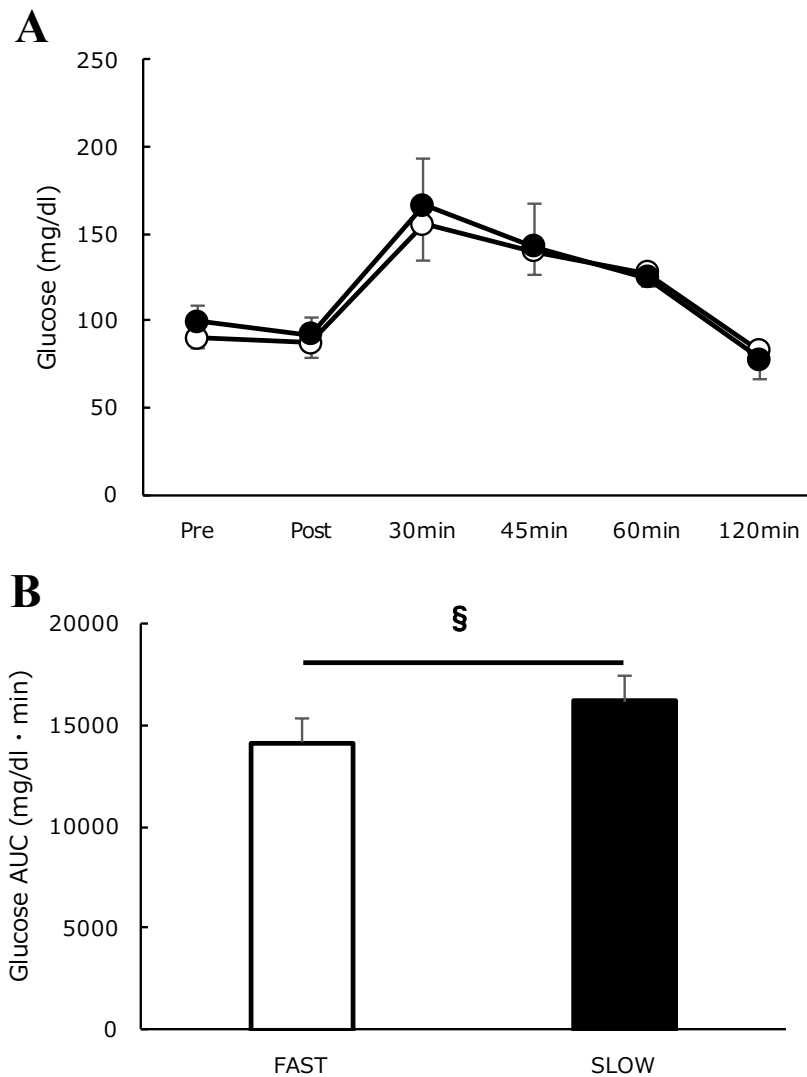


図 2-2 血糖値の経時変化および AUC の比較

FAST (○) および SLOW (●) の数値は平均値 ± 標準偏差で示した。  
 図 A : 血糖値の経時変化は摂取条件で交互作用はみられなかった (F=0.60, p=0.70). 図 B : 血糖値の AUC は SLOW が FAST よりも高値であった (p<0.01).

AUC: 曲線下面積, § p<0.01 FAST vs SLOW



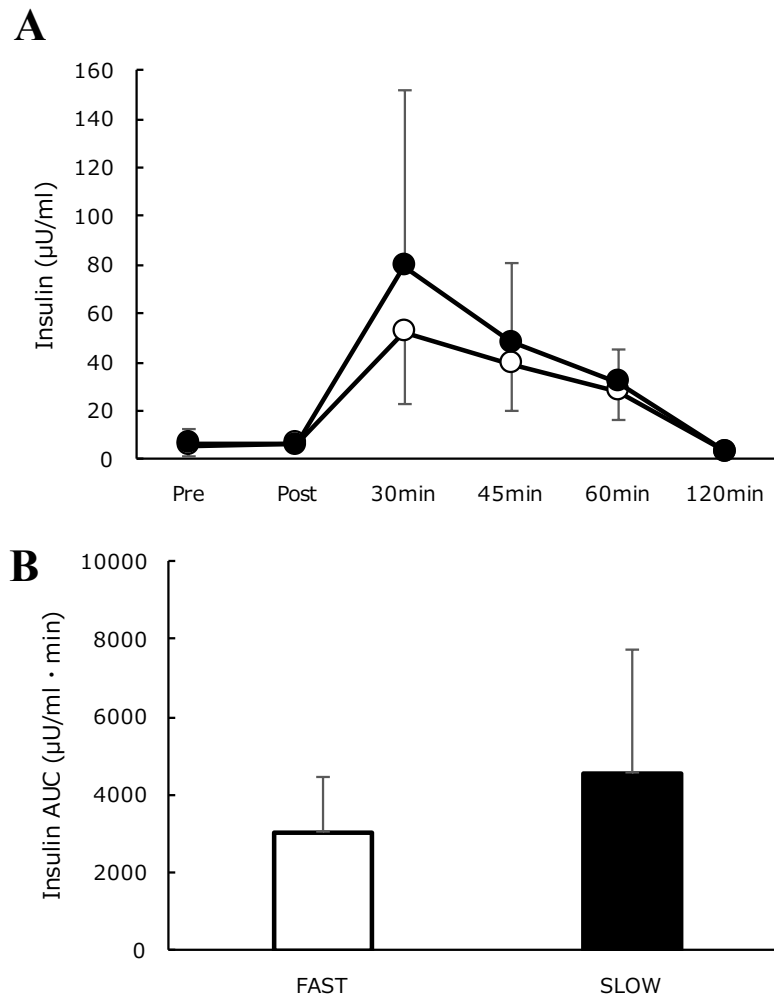


図 2-3 インスリンの経時変化および AUC の比較

FAST (○) および SLOW (●) の数値は平均値 ± 標準偏差で示した。

図 A: インスリンの経時変化は摂取条件で交互作用はみられなかった ( $F=0.45$ ,  $p=0.81$ )。図 B: インスリンの AUC は摂取条件で差はみられなかった ( $p=0.28$ )。なお、被検者のうち 1 名が溶血検体であったため、インスリンの測定値および統計結果は 5 名の値とした。AUC: 曲線下面積

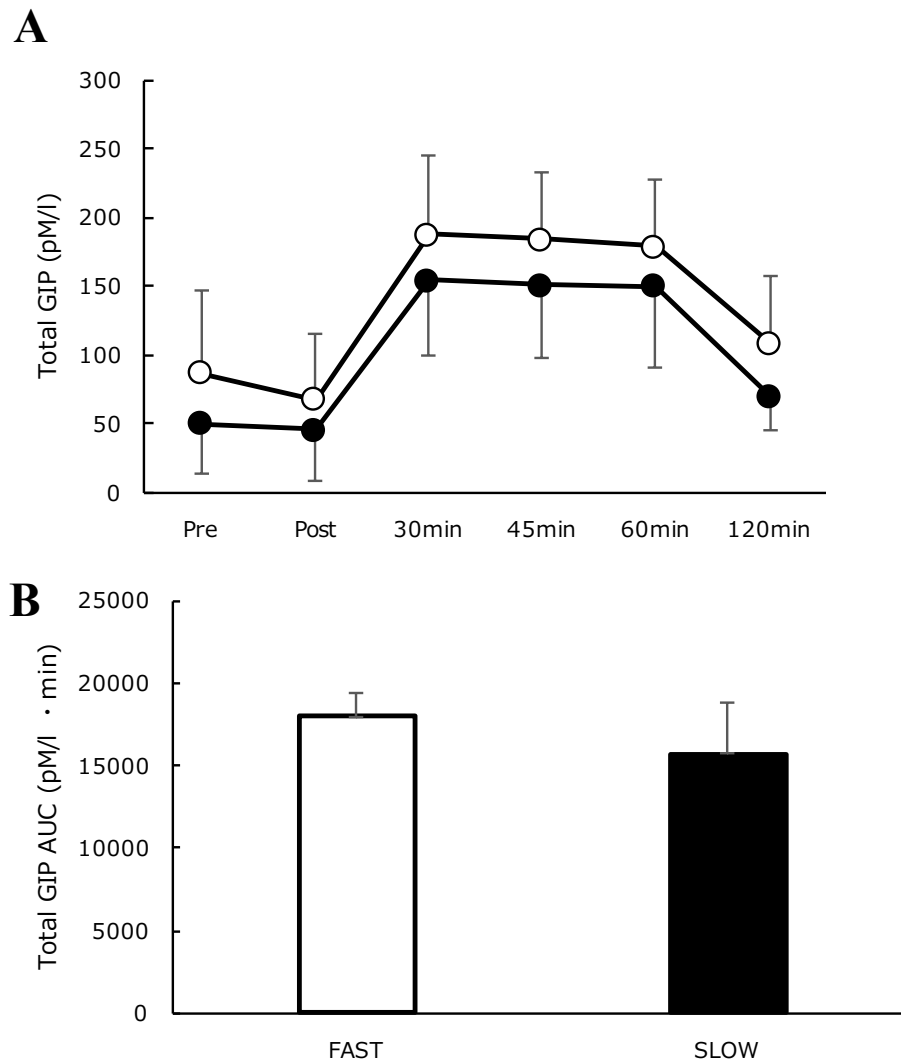


図 2-4 GIP の経時変化および AUC の比較

FAST (○) および SLOW (●) の数値は平均値 ± 標準偏差で示した。  
 図 A : GIP の経時変化は摂取条件で交互作用はみられなかった (F=0.07, p=1.00). 図 B : GIP の AUC は摂取条件で差はみられなかった (p=0.14). なお, 被検者のうち 1 名が溶血検体であったため, GIP の測定値および統計結果は 5 名の値とした. AUC: 曲線下面積

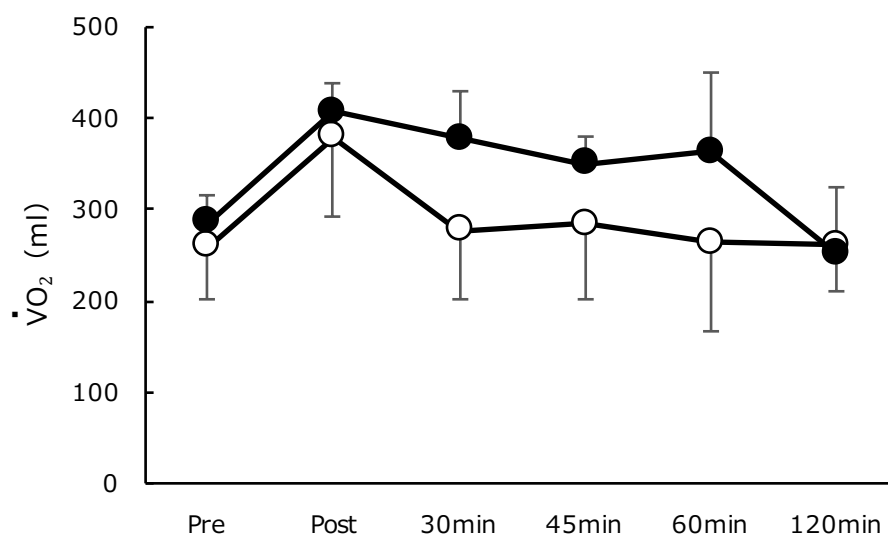


図 2-5  $\dot{V}O_2$  の経時変化の比較

FAST (○) および SLOW (●) の数値は平均値 ± 標準偏差で示した。  
 $\dot{V}O_2$  の経時変化は摂取条件で交互作用はみられなかった ( $F=1.60$ ,  $p=0.18$ ) .

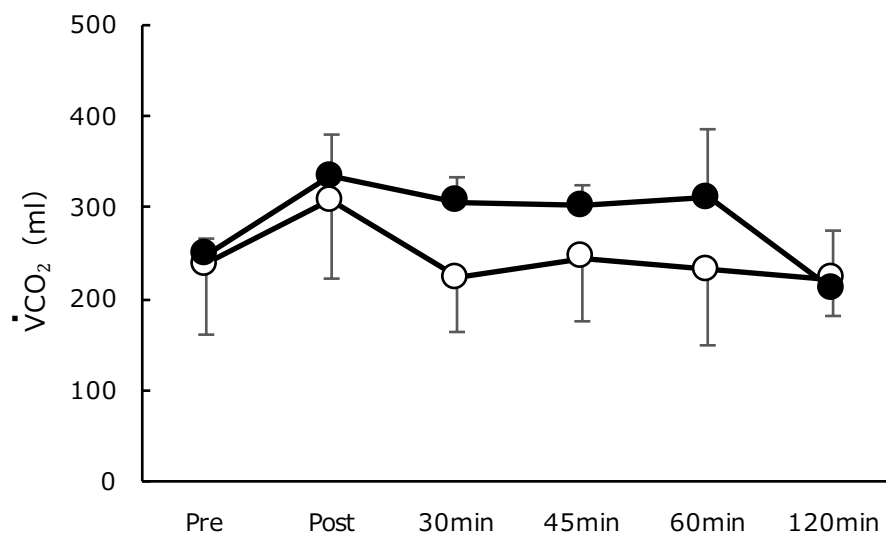


図 2-6  $\dot{V}CO_2$  の経時変化の比較

FAST (○) および SLOW (●) の数値は平均値 ± 標準偏差で示した。  
 $\dot{V}CO_2$  の経時変化は摂取条件で交互作用はみられなかった ( $F=1.47$ ,  
 $p=0.21$ ) .

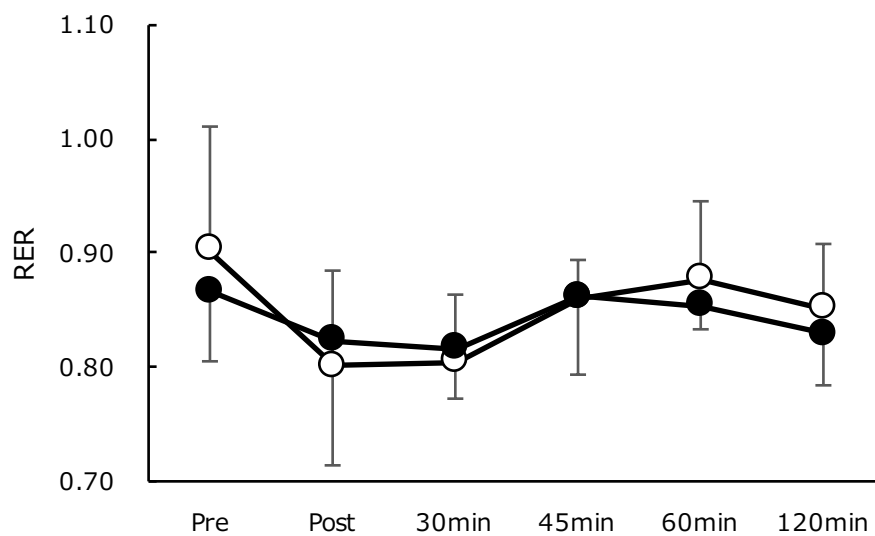


図 2-7 呼吸交換比の経時変化の比較

FAST (○) および SLOW (●) の数値は平均値 ± 標準偏差で示した。  
 RER の経時変化は摂取条件で交互作用はみられなかった ( $F=0.35$ ,  $p=0.88$ ) .

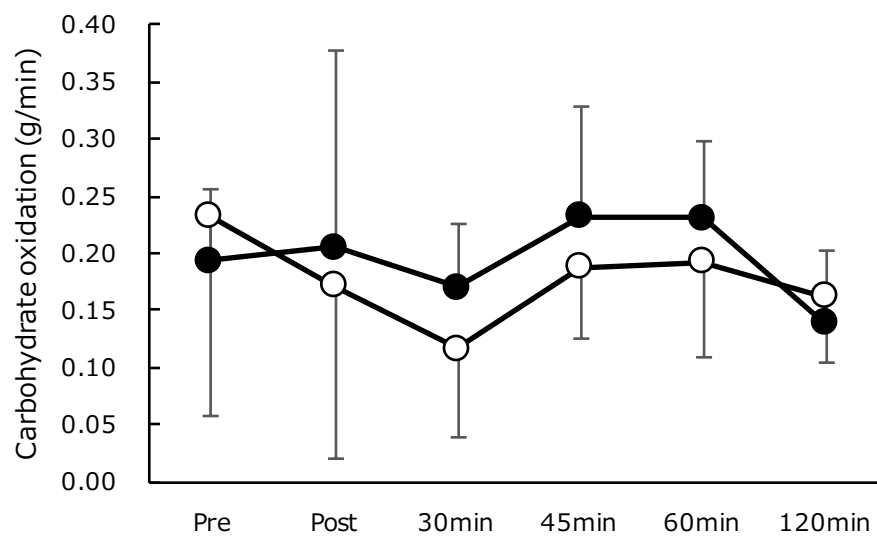


図 2-8 糖質酸化量の経時変化の比較

FAST (○) および SLOW (●) の数値は平均値 ± 標準偏差で示した。  
 糖質酸化量の経時変化は摂取条件で交互作用はみられなかった  
 (F=0.48, p=0.79)。

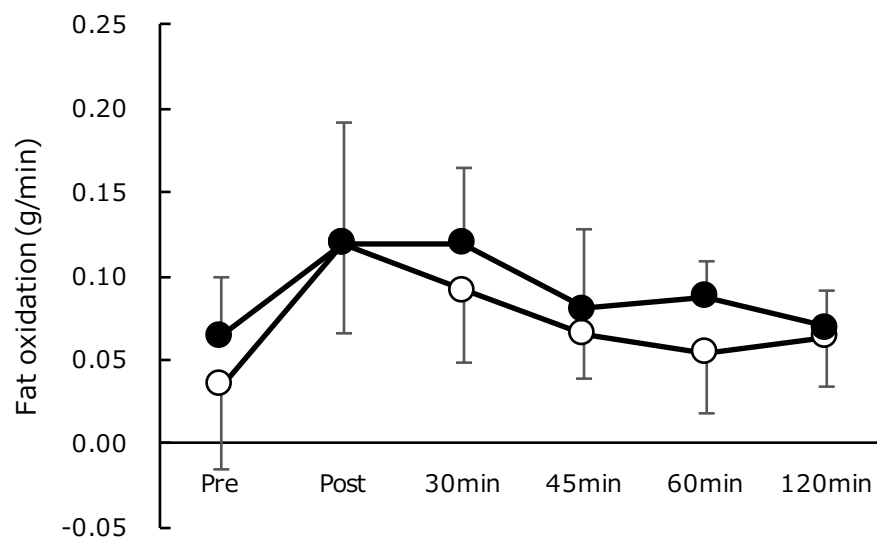


図 2-9 脂質酸化量の経時変化の比較

FAST (○) および SLOW (●) の数値は平均値 ± 標準偏差で示した。  
 脂質酸化量の経時変化は摂取条件で交互作用はみられなかった  
 ( $F=0.36$ ,  $p=0.87$ ) .

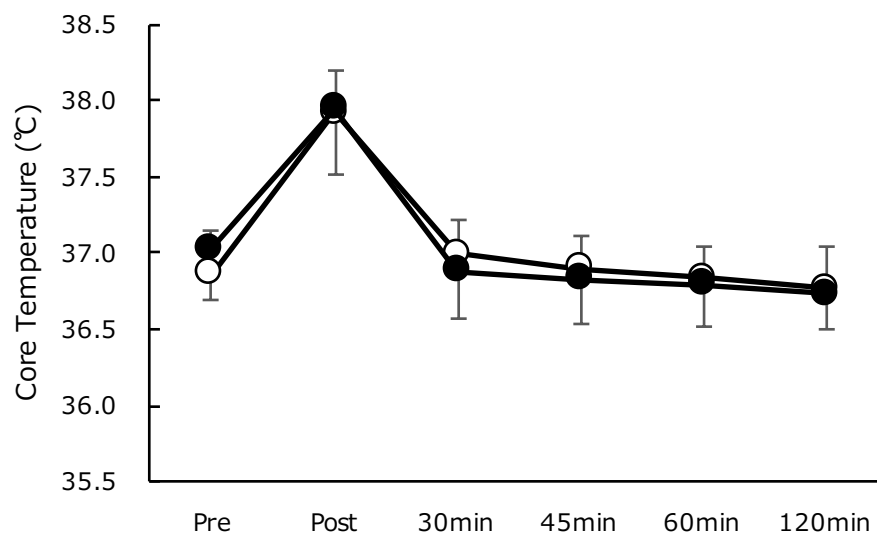


図 2-10 直腸温の経時変化の比較

FAST (○) および SLOW (●) の数値は平均値 ± 標準偏差で示した。直腸温の経時変化は摂取条件で有意な交互作用はみられなかった ( $F=0.82$ ,  $p=0.54$ )。摂取条件で主効果 ( $F=0.08$ ,  $p=0.78$ ) も認められなかった。



表 3-1. スポーツドリンクおよびアイスクリームの栄養組成

		CON	ICE
Energy	kcal	303 ± 23	776 ± 59
Protein	g	0 ± 0	11 ± 1
Fat	g	0 ± 0	48 ± 4
Carbohydrate	g	76 ± 6	76 ± 6
PFC ratio	%	0 : 0 : 100	6 : 55 : 39
temperture	°C	5.3 ± 0.4	-13.8 ± 1.5

Mean±SD

表 3-2. 高強度間欠的運動における摂取条件のパフォーマンスの比較

		CON	ICE	P value
平均パワー	W	540 ± 57	537 ± 63	0.88
最大パワー	W	646 ± 85	636 ± 84	0.91
最高回転数	rpm	141 ± 14	139 ± 13	0.87
到達時間	sec	9.0 ± 6.3	8.4 ± 5.8	0.66
RPE		15 ± 2	15 ± 2	0.29

Mean±SD

到達時間：最高回転数までの到達時間

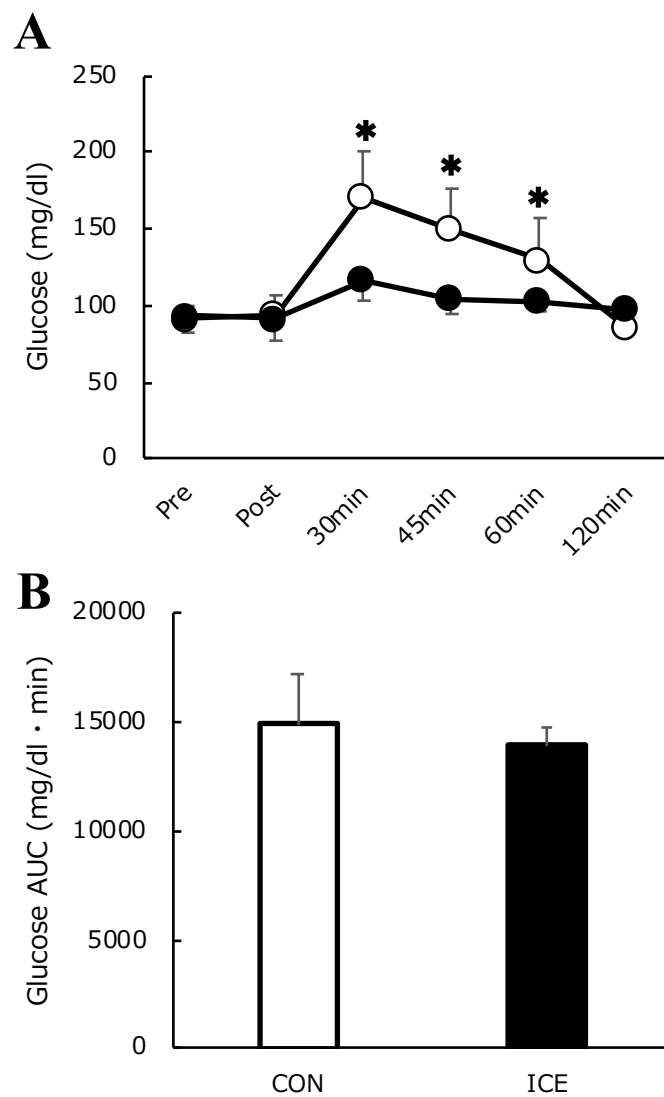


図 3-1 血糖値の経時変化および AUC の比較

CON (○) および ICE (●) の数値は平均値 ± 標準偏差で示した。

図 A: 血糖値の経時変化は摂取条件で交互作用が確認され ( $F=11.80$ ,  $p<0.01$ ), ICE が CON よりも 30 分, 45 分, 60 分で低値であった ( $p<0.05$ ). 図 B : 血糖値の AUC は摂取条件で変化はみられなかった ( $p=0.19$ ). AUC: 曲線下面積, \* $p<0.05$  CON vs ICE

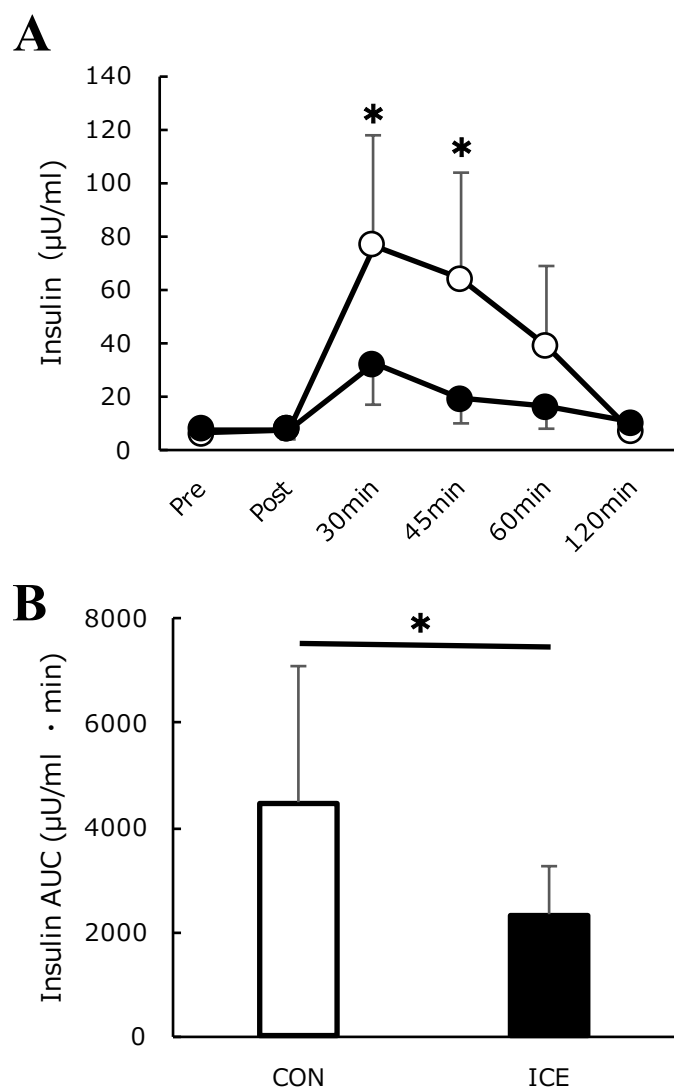


図 3-2 インスリンの経時変化および AUC の比較

CON(○)およびICE(●)の数値は平均値±標準偏差で示した。

図 A :インスリンの経時変化は摂取条件で交互作用が確認され (F=6.87, p<0.01), ICE が CON よりも 30 分, 45 分で低値であった (p<0.05). 図 B :インスリンの AUC は ICE が CON よりも低値であった (p=0.04). AUC: 曲線下面積, \*p<0.05 CON vs ICE

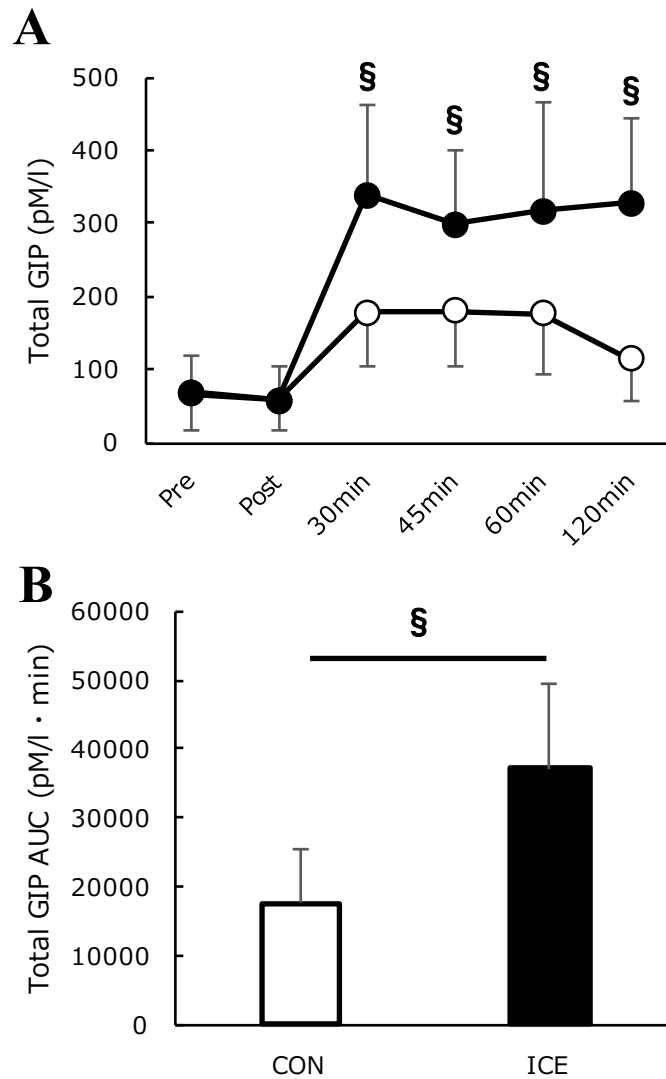


図 3-3 GIP の経時変化および AUC の比較

CON(○)およびICE(●)の数値は平均値±標準偏差で示した。

図 A :GIP の経時変化は摂取条件で交互作用が確認され( $F=5.97$ ,  $p<0.01$ ), ICE が CON よりも 30 分, 45 分, 60 分, 120 分で高値であった( $p<0.01$ ). 図 B :GIP の AUC は ICE が CON よりも高値であった( $p<0.01$ ). AUC: 曲線下面積, §  $p<0.01$  CON vs ICE

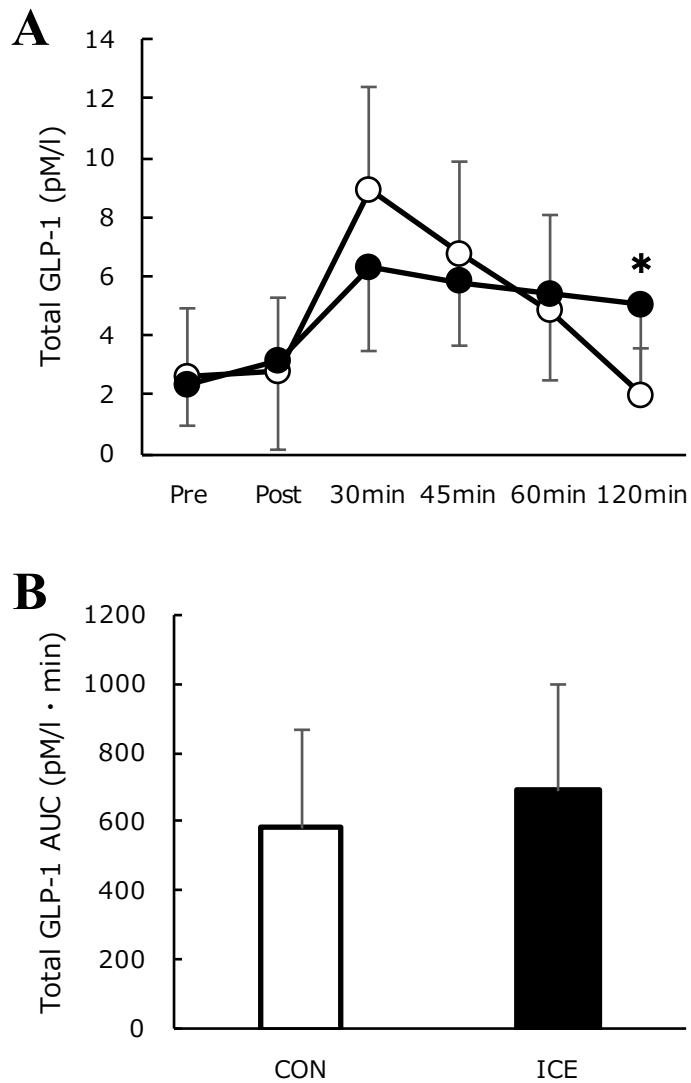


図 3-4 GLP-1 の経時変化および AUC の比較

CON(○)およびICE(●)の数値は平均値±標準偏差で示した。

図 A :GLP-1 の経時変化は摂取条件で交互作用が確認され( $F=3.51$ ,  $p<0.01$ ), ICE が CON よりも 120 分で高値であった( $p=0.03$ )。図 B :

GLP-1 の AUC は有意な差は確認されなかった( $p=0.34$ )。

AUC: 曲線下面積, \* $p<0.05$  CON vs ICE

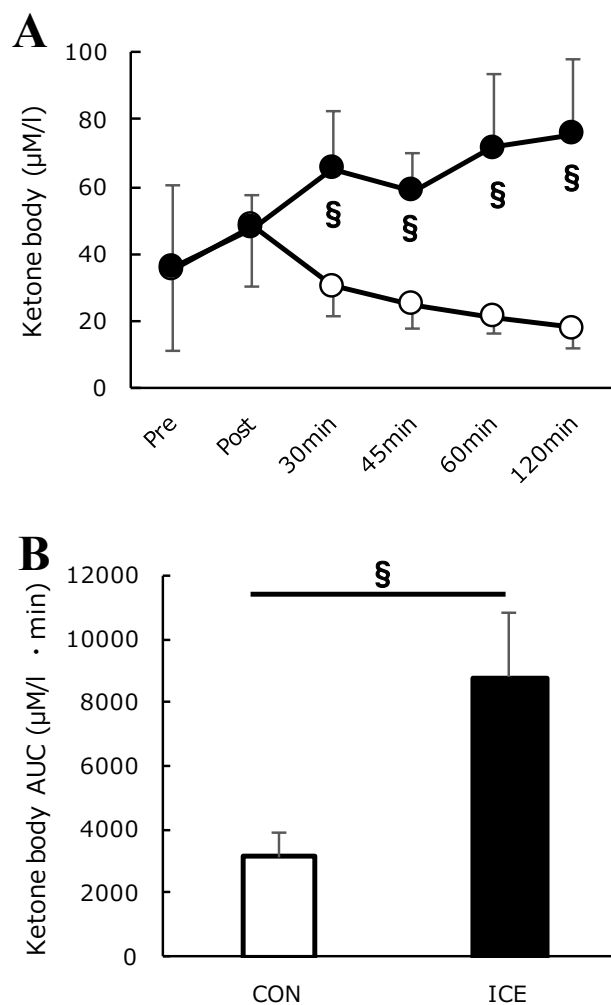


図 3-5 総ケトン体の経時変化および AUC の比較

CON(○)およびICE(●)の数値は平均値±標準偏差で示した。

図 A : 総ケトン体の経時変化は摂取条件で交互作用が確認され (F=8.31, p<0.01), ICE が CON よりも 30 分, 45 分, 60 分, 120 分で高値であった (p<0.01)。図 B : 総ケトン体の AUC は ICE が CON よりも高値であった (p<0.01)。

AUC: 曲線下面積, § p<0.01 CON vs ICE

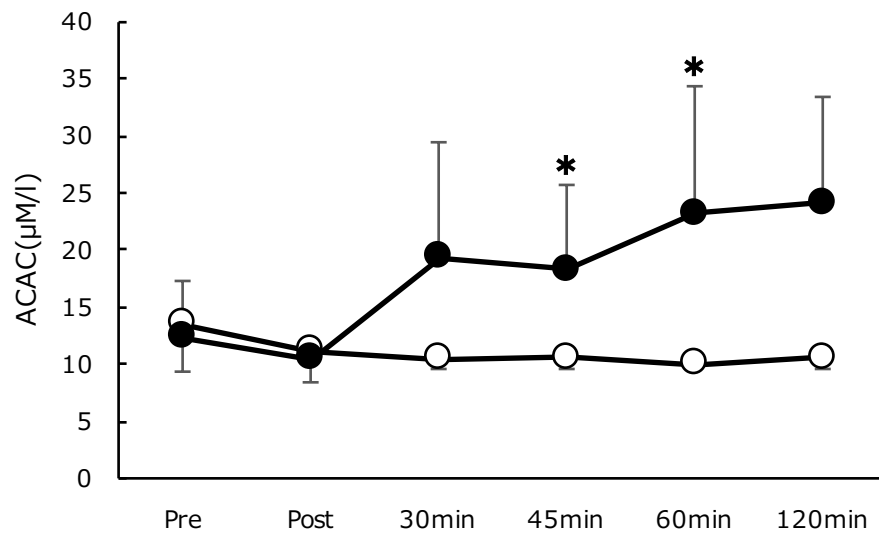


図 3-6 ACAC の経時変化の比較

CON (○) および ICE (●) の数値は平均値 ± 標準偏差で示した。ACAC の経時変化は摂取条件で交互作用が確認され ( $F=5.85$ ,  $p<0.01$ ), ICE が CON と比較して摂取後 45 分, 60 分で高値であった ( $p<0.05$ )。

AUC: 曲線下面積, \*  $p<0.05$  CON vs ICE



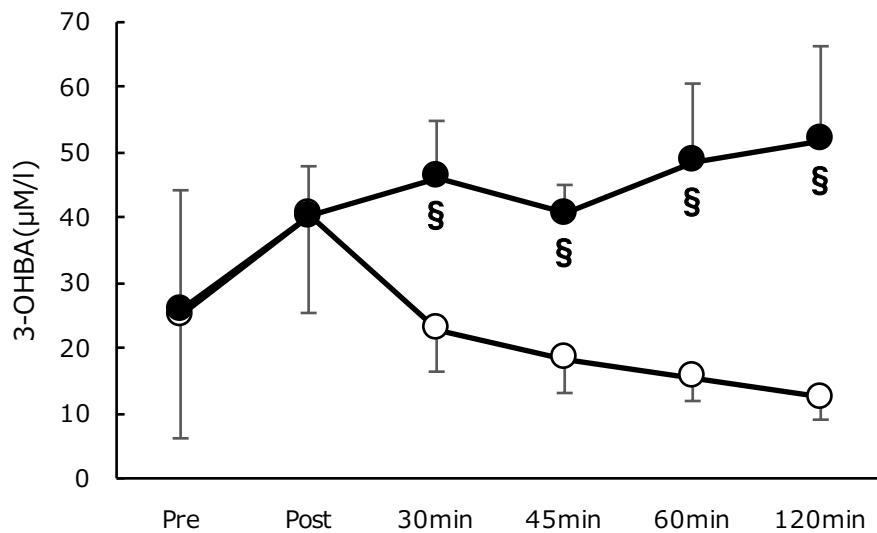


図 3-7 3-OHBA の経時変化の比較

CON (○) および ICE (●) の数値は平均値 ± 標準偏差で示した。3-OHBA の経時変化は摂取条件で交互作用が確認され ( $F=7.63$ ,  $p<0.01$ ), ICE が CON と比較して摂取後 30 分, 45 分, 60 分, 120 分で高値であった ( $p<0.01$ )。

AUC: 曲線下面積, §  $p<0.01$  CON vs ICE

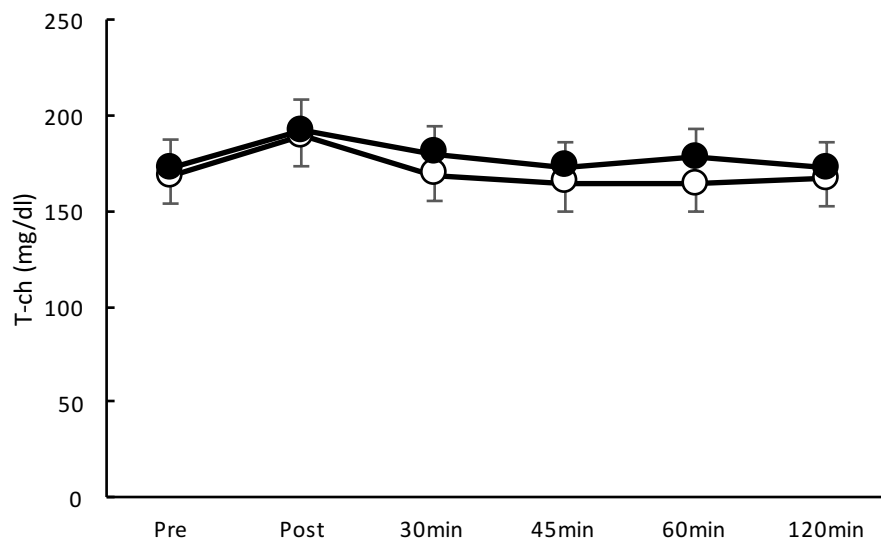


図 3-8 T-ch の経時変化の比較

CON (○) および ICE (●) の数値は平均値 ± 標準偏差で示した。  
 T-ch の経時変化は摂取条件で交互作用はみられなかった ( $F=0.83$ ,  $p=0.53$ ) .

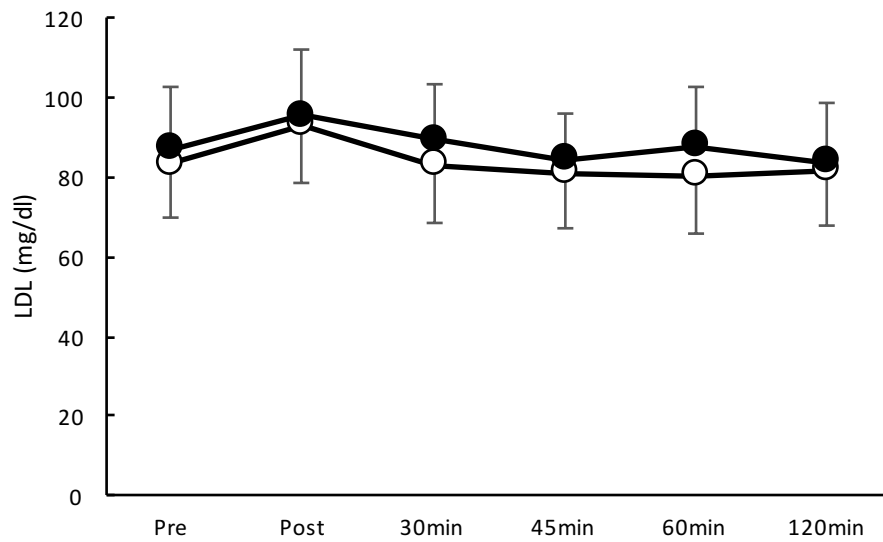


図 3-9 LDL の経時変化の比較

CON (○) および ICE (●) の数値は平均値 ± 標準偏差で示した。  
 LDL の経時変化は摂取条件で交互作用はみられなかった ( $F=0.66$ ,  $p=0.65$ ) .

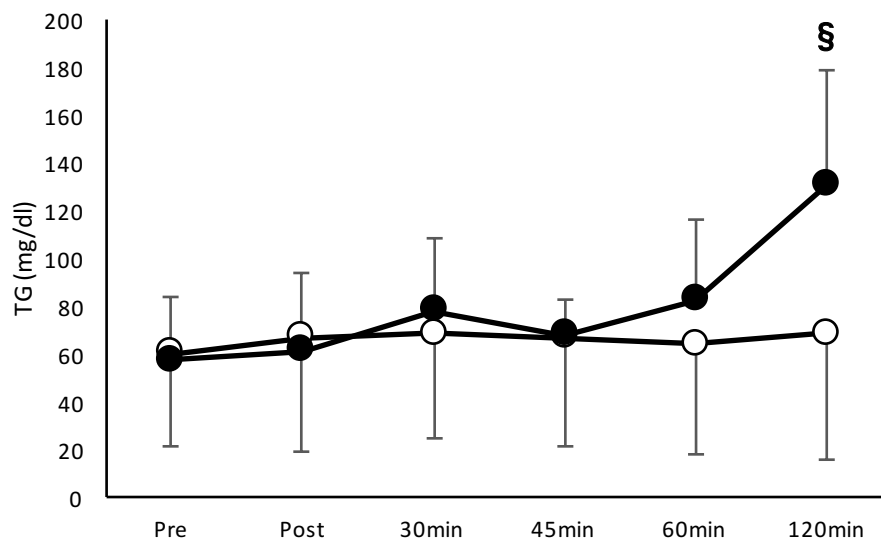


図 3-10 TG の経時変化の比較

CON (○) および ICE (●) の数値は平均値 ± 標準偏差で示した。

TG の経時変化は摂取条件で交互作用が確認され ( $F=4.17, p<0.01$ ),

ICE が CON と比較して摂取後 120 分で高値であった ( $p<0.01$ )。

§  $p<0.01$  CON vs ICE

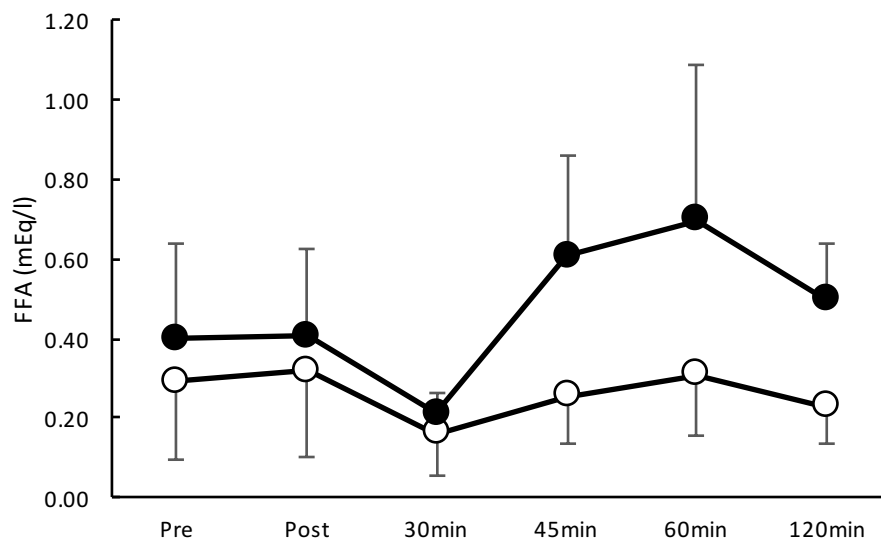


図 3-11 FFA の経時変化の比較

CON (○) および ICE (●) の数値は平均値 ± 標準偏差で示した。  
 FFA の経時変化は摂取条件に主効果が確認され ( $F=20.38$ ,  $p<0.01$ ),  
 ICE が CON と比較して高値で推移した。

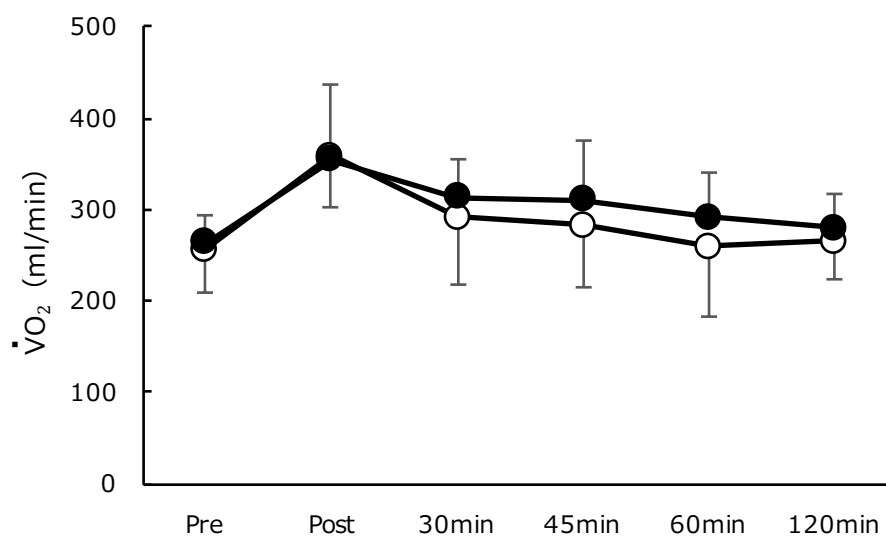


図 3-12  $\dot{V}O_2$  の経時変化の比較

CON (○) および ICE (●) の数値は平均値 ± 標準偏差で示した。  
 $\dot{V}O_2$  の経時変化は摂取条件で交互作用はみられなかった ( $F=0.25$ ,  $p=0.94$ ) .

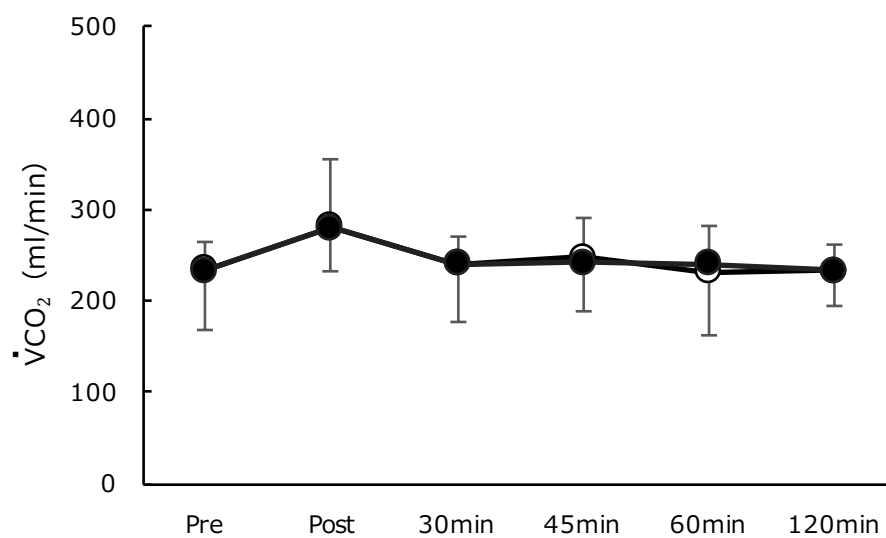


図 3-13  $\dot{V}CO_2$  の経時変化の比較

CON (○) および ICE (●) の数値は平均値 ± 標準偏差で示した。  
 $\dot{V}CO_2$  の経時変化は摂取条件で交互作用はみられなかった ( $F=0.03$ ,  
 $p=1.00$ ) .

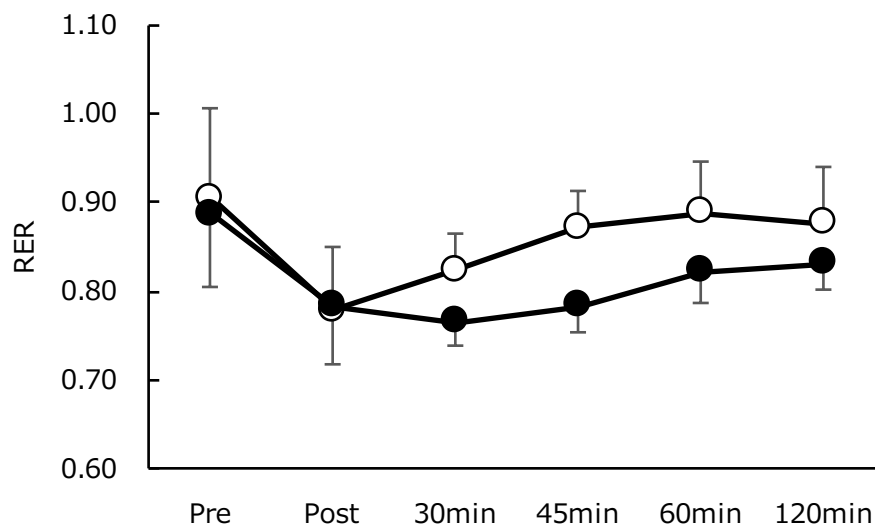


図 3-14 呼吸交換比の経時変化の比較

CON (○) および ICE (●) の数値は平均値 ± 標準偏差で示した。

RER の経時変化は摂取条件に主効果が確認され ( $F=13.65$ ,  $p<0.01$ ),

ICE が CON と比較して低値で推移した。



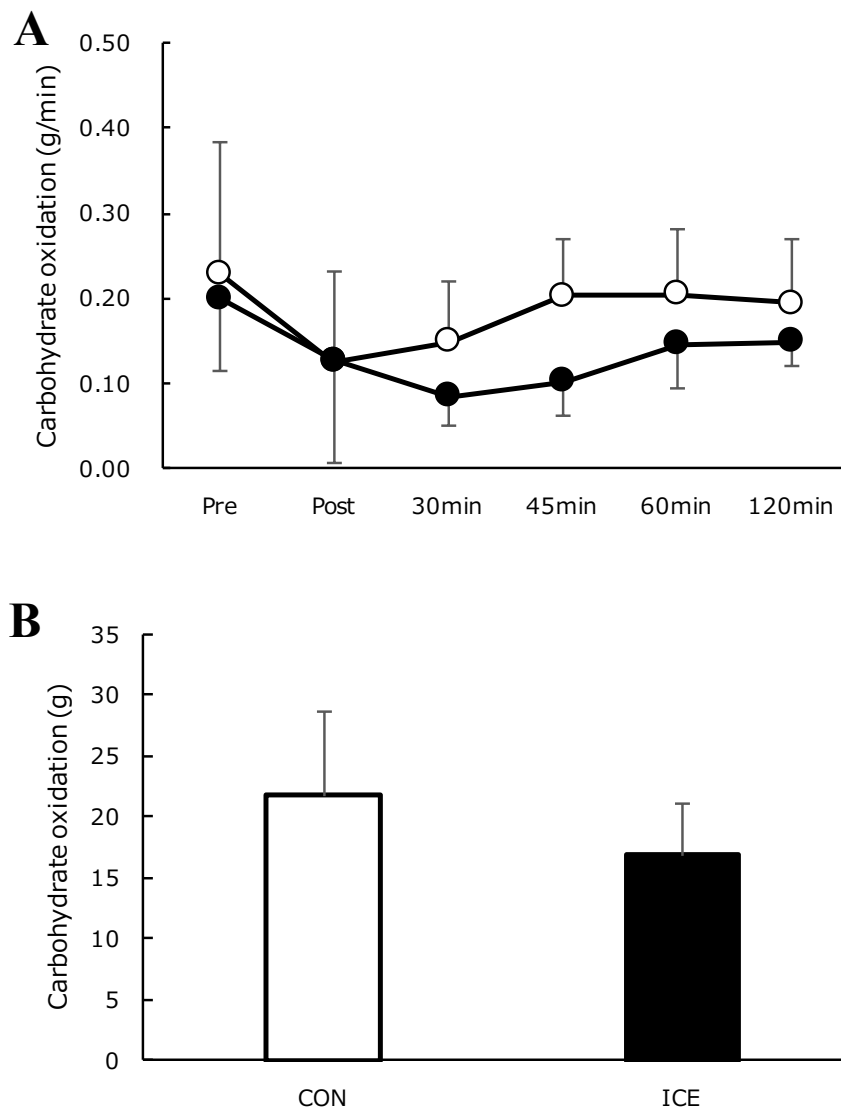


図 3-15 糖質酸化量の経時変化および AUC の比較

CON (○) および ICE (●) の数値は平均値 ± 標準偏差で示した。

図 A: 糖質酸化量の経時変化は摂取条件に主効果が確認され ( $F=7.72$ ,  $p<0.01$ ), ICE が CON と比較して低値で推移した。図 B : 糖質酸化量は摂取条件に有意な差はみられなかった ( $p=0.24$ )。

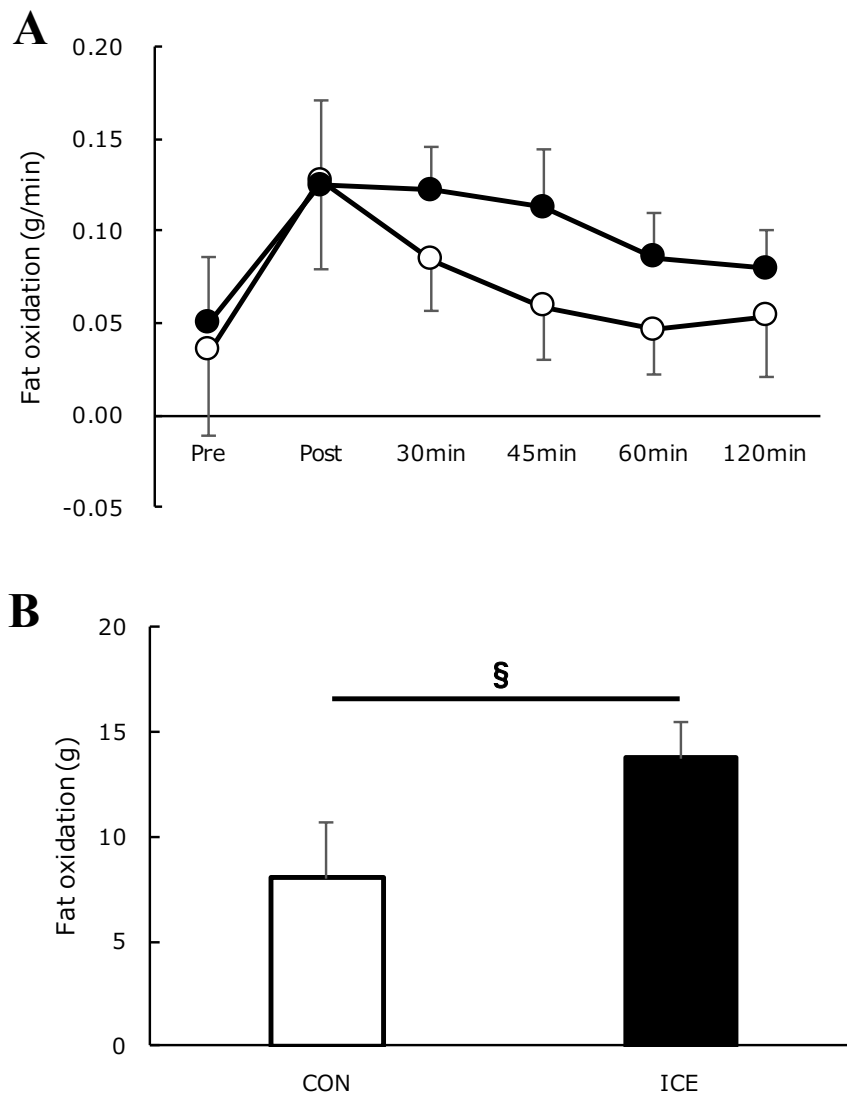


図 3-16 脂質酸化量の経時変化および AUC の比較

CON(○)およびICE(●)の数値は平均値±標準偏差で示した。

図 A : 脂質酸化量の経時変化は摂取条件に主効果が確認され (F=16.58,  $p<0.01$ ), ICE が CON と比較して高値で推移した. 図 B : 脂質酸化量は ICE が CON よりも高値であった ( $p<0.01$ ). §  $p<0.01$  CON vs ICE

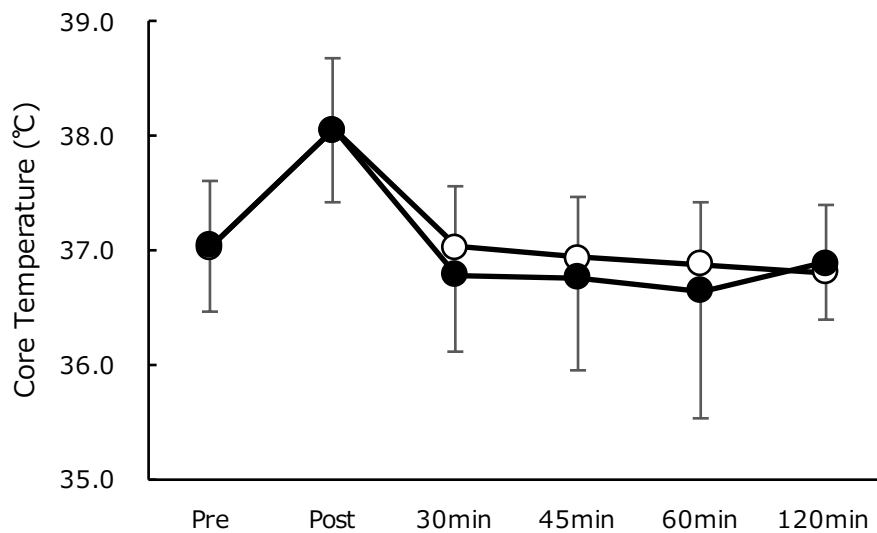


図 3-17 直腸温の経時変化の比較

CON (○) および ICE (●) の数値は平均値 ± 標準偏差で示した。  
 直腸温の経時変化は摂取条件で交互作用はみられなかった ( $F=1.11$ ,  $p=0.36$ )。また、摂取条件で主効果 ( $F=3.02$ ,  $p=0.09$ ) も認められなかった。

表 4-1 高強度間欠的運動における摂取条件のパフォーマンスの比較

		FICE	CICE	P value
平均パワー	W	577 ± 56	586 ± 42	1.00
最大パワー	W	685 ± 88	697 ± 87	0.97
最高回転数	rpm	138 ± 14	144 ± 13	0.98
到達時間	sec	9.1 ± 5.7	7.4 ± 4.8	0.91
RPE		17 ± 1	16 ± 1	0.26

Mean±SD

到達時間：最高回転数までの到達時間

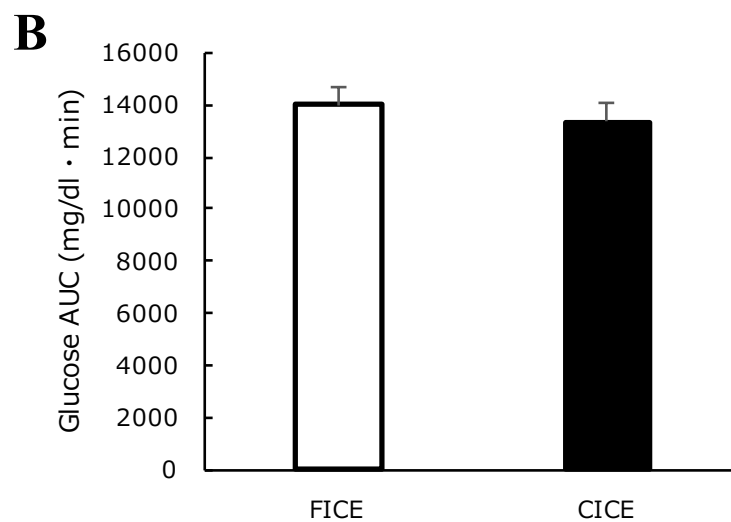
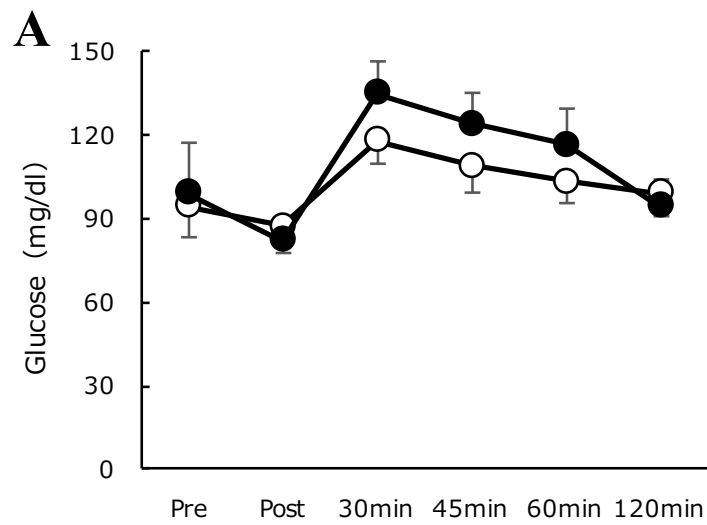


図 4-1 血糖値の経時変化および AUC の比較

FICE (○) および CICE (●) の数値は平均値 ± 標準偏差で示した。  
 図 A : 血糖値の経時変化は摂取条件に主効果が確認され ( $F=5.58$ ,  $p=0.02$ ), CICE が FICE と比較して高値で推移した。図 B : 血糖値の AUC は摂取条件で有意な差はみられなかった ( $p=0.29$ )。AUC: 曲線下面積

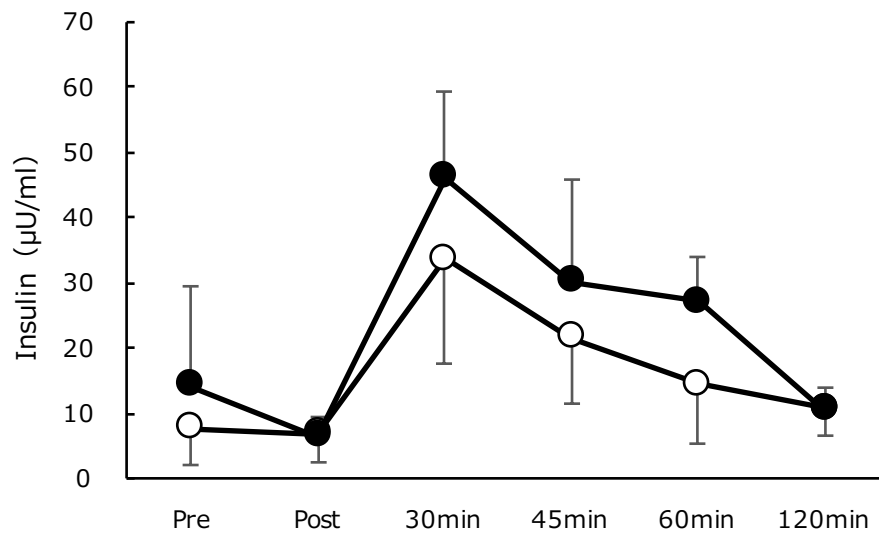


図 4-2 インスリンの経時変化の比較

FICE(○)およびCICE(●)の数値は平均値±標準偏差で示した。  
 インスリンの経時変化は摂取条件に主効果が確認され( $F=8.52$ ,  
 $p=0.01$ ), CICEがFICEと比較して高値で推移した。

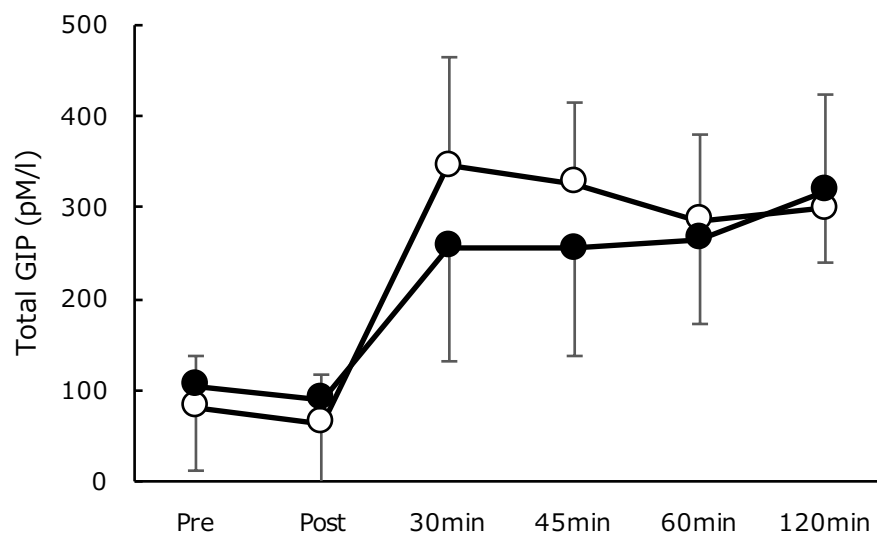


図 4-3 GIP の経時変化の比較

FICE (○) および CICE (●) の数値は平均値 ± 標準偏差で示した。GIP の経時変化は摂取条件に交互作用はみられなかった ( $F=2.67$ ,  $p=0.31$ )。

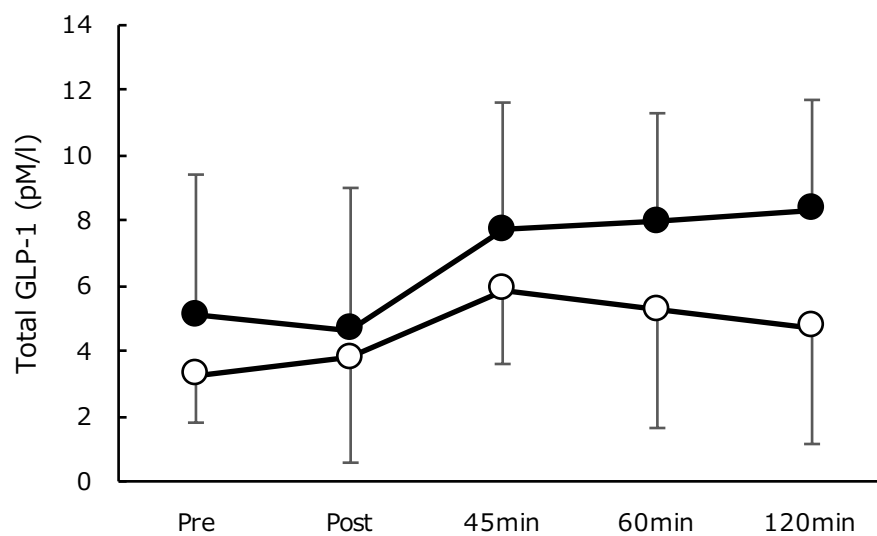


図 4-4 GLP-1 の経時変化の比較

FICE (○) および CICE (●) の数値は平均値 ± 標準偏差で示した。GLP-1 の経時変化は摂取条件に主効果が確認され ( $F=8.71$ ,  $p=0.01$ ), CICE が FICE と比較して高値で推移した。



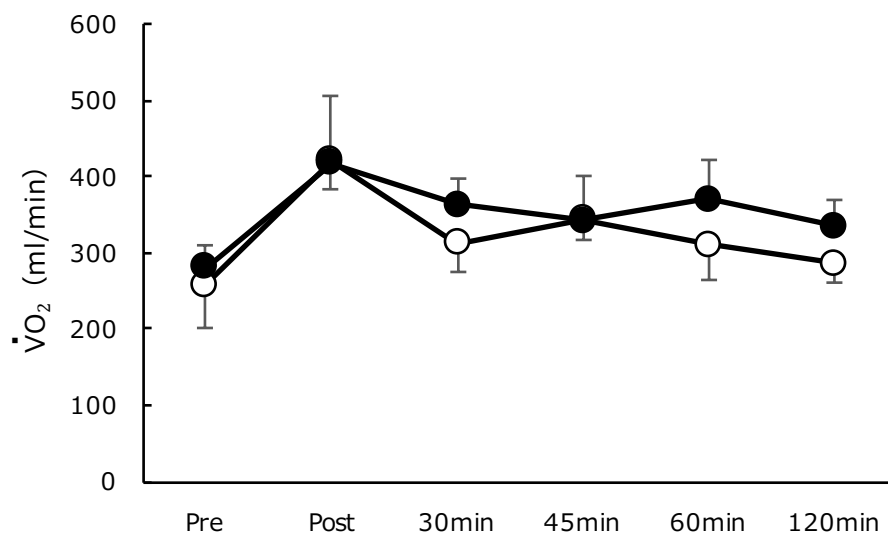


図 4-5  $\dot{V}O_2$  の経時変化の比較

FICE (○) および CICE (●) の数値は平均値 ± 標準偏差で示した。  
 $\dot{V}O_2$  の経時変化は摂取条件で交互作用はみられなかった ( $F=1.06$ ,  $p=0.39$ ) .

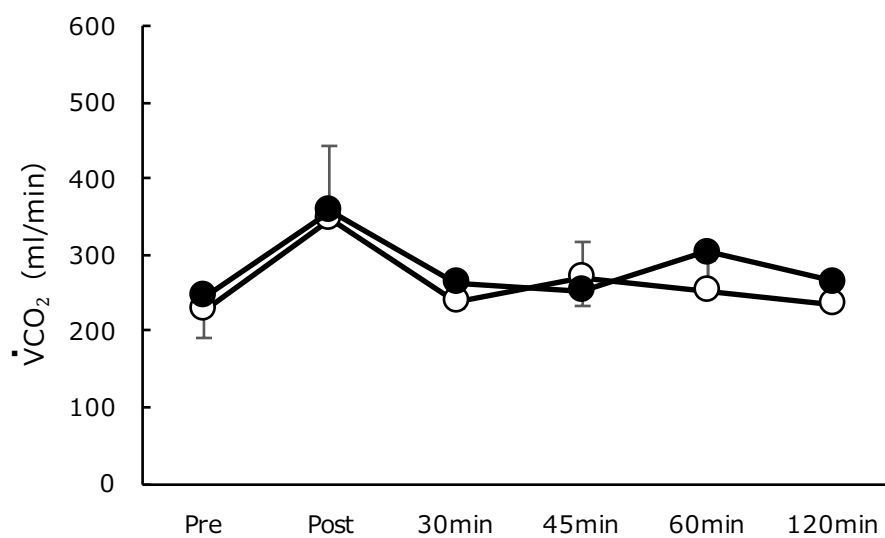


図 4-6  $\dot{V}CO_2$  の経時変化の比較

FICE (○) および CICE (●) の数値は平均値 ± 標準偏差で示した。  
 $\dot{V}CO_2$  の経時変化は摂取条件で交互作用はみられなかった ( $F=0.79$ ,  $p=0.57$ ) .

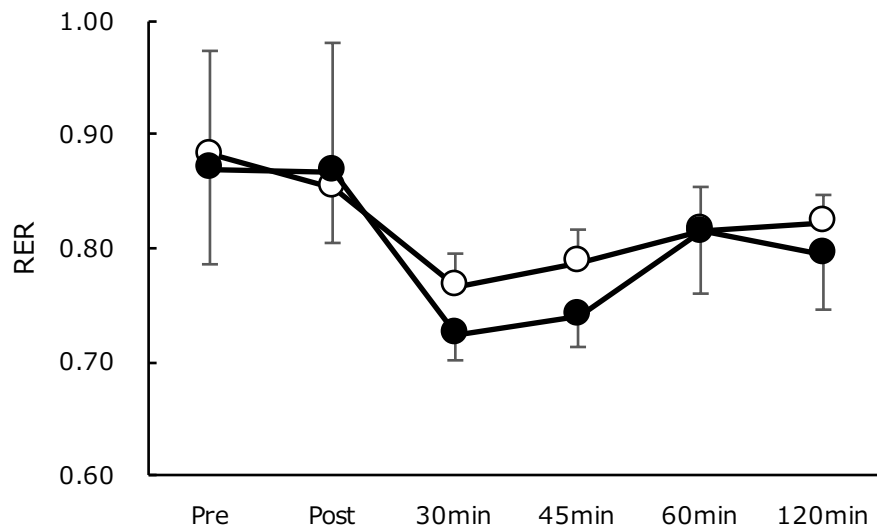


図 4-7 呼吸交換比の経時変化の比較

FICE (○) および CICE (●) の数値は平均値 ± 標準偏差で示した。  
 RER の経時変化は摂取条件で交互作用はみられなかった ( $F=0.95$ ,  $p=0.46$ ) .

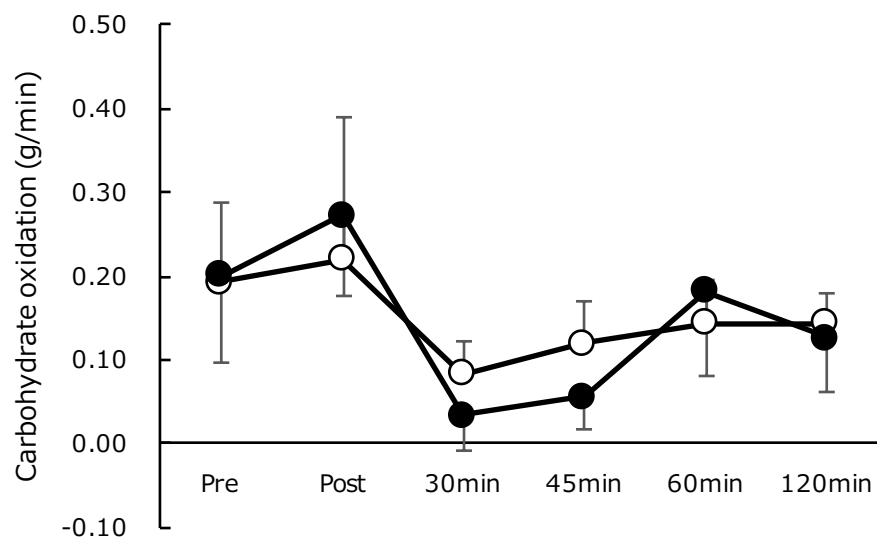


図 4-8 糖質酸化量の経時変化の比較

FICE (○) および CICE (●) の数値は平均値 ± 標準偏差で示した。  
 糖質酸化量の経時変化は摂取条件で交互作用はみられなかった  
 (F=0.79, p=0.56)。

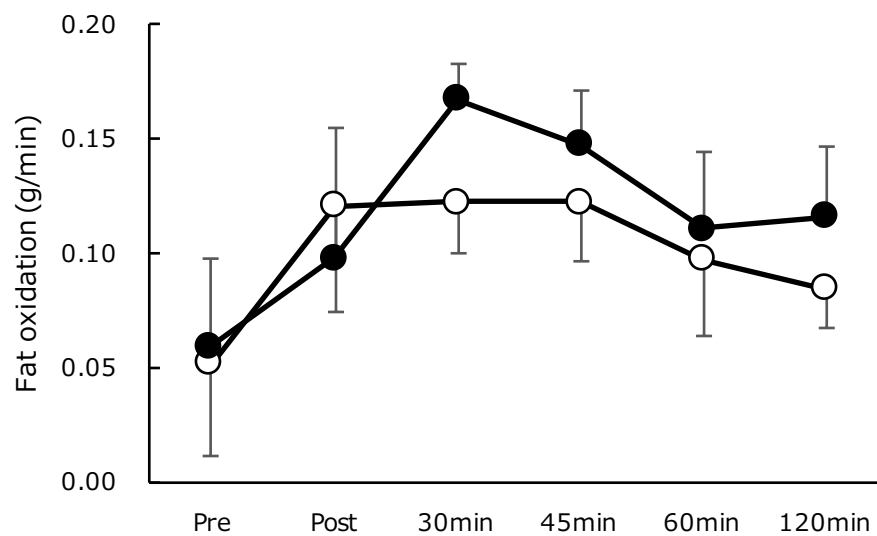


図 4-9 脂質酸化量の経時変化の比較

FICE (○) および CICE (●) の数値は平均値 ± 標準偏差で示した。  
 脂質酸化量の経時変化は摂取条件で交互作用はみられなかった  
 (F=1.14, p=0.35)。

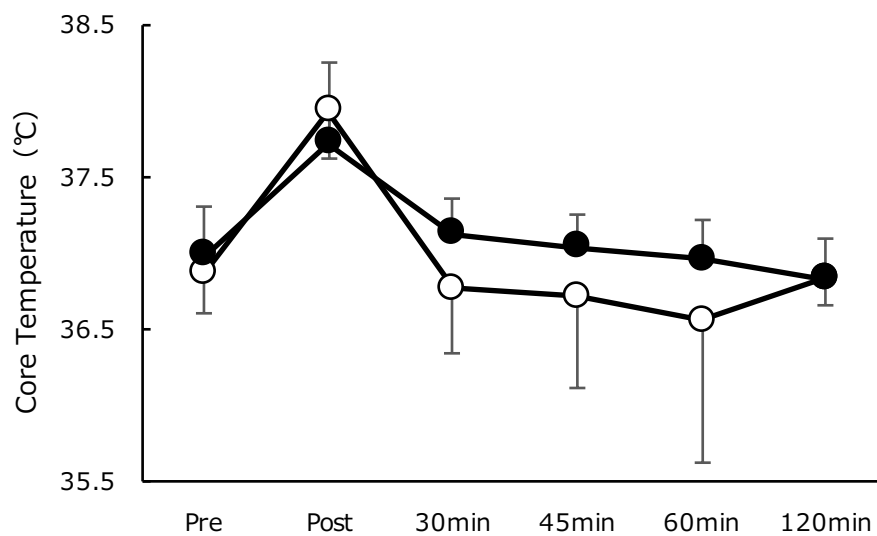


図 4-10 直腸温の経時変化の比較

FICE (○) および CICE (●) の数値は平均値 ± 標準偏差で示した。直腸温の経時変化は摂取条件で交互作用がみられなかったものの (F=1.64, p=0.16), 主効果が確認され (F=4.56, p=0.04), CICE が FICE と比較して高値で推移した。