

博士論文

高強度・短時間・間欠的運動が運動後の安静時
酸素摂取量に与える影響に関する研究
(Effects of high intensity intermittent exercise on
resting oxygen uptake after the exercise)

2019 年 9 月

立命館大学大学院スポーツ健康科学研究科
スポーツ健康科学専攻博士課程後期課程

街 勝憲

立命館大学審査博士論文

高強度・短時間・間欠的運動が運動後の安静時

酸素摂取量に与える影響に関する研究

(Effects of high intensity intermittent exercise on
resting oxygen uptake after the exercise)

2019 年 9 月

September 2019

立命館大学大学院スポーツ健康科学研究科

スポーツ健康科学専攻博士課程後期課程

Doctoral Program in Sport and Health Science

Graduate School of Sport and Health Science

Ritsumeikan University

街 勝憲

TSUJI Katsunori

研究指導教員：田畑 泉教授

Supervisor: Professor TABATA Izumi

原著論文の一覧

本博士論文は、以下の副論文をまとめたものである。

【副論文】

1. 研究課題 1-1

Tsuji K, Xu Y, Liu X, Tabata I. Effects of short-lasting supramaximal-intensity intermittent exercise on diet-induced oxygen uptake. *Physiological Reports*. Nov;5(22), 2017.

2. 研究課題 1-2

Tsuji K, Xu Y, Tabata I. Effects of moderate-intensity exercise on diet-induced increase in resting oxygen uptake. *The Journal of Physical Fitness and Sports Medicine*, Jan;8(1), 15-27, 2019.

目次

第1章 序論	1
1. ヒトの1日のエネルギー消費量に影響を与える因子	1
2. 基礎代謝量に影響を与える因子	2
3. 身体活動・運動時のエネルギー代謝に影響を与える因子	2
4. 身体活動・運動後のエネルギー代謝に影響を与える因子	3
5. 高強度・短時間・間欠的運動トレーニングのエネルギー代謝	6
7. DIT に及ぼす運動の影響	9
8. 運動トレーニングが運動後のエネルギー代謝に及ぼす影響	10
10. 本研究の目的	16
第2章 高強度・短時間・間欠的運動が運動後における安静時酸素摂取量に与える影響（研究課題 1-1）	20
1. 緒言	20
2. 方法	21
3. 結果	29
4. 考察	36
5. 結論	41
第3章 中等度の強度の運動が食事誘発性安静時酸素摂取量に与える影響（研究課題 1-2）	42
1. 緒言	42
2. 方法	42
3. 結果	48
4. 考察	60
5. 結論	63
第4章 高強度・短時間・間欠的運動時における高濃度酸素吸入が運動後の酸素摂取量及び直腸温・筋温に与える影響（研究課題 2）	64
1. 緒言	64
2. 方法	65
3. 結果	70
4. 考察	78
5. 結論	83
第5章 高強度間欠的運動・トレーニングにより増加する最大酸素摂取量が、同運動の運動後過剰酸素摂取量及び運動後における食事後の酸素摂取量に与える影響（研究課題 3）	84
1. 緒言	84
2. 方法	85

3. 結果.....	89
4. 考察.....	97
5. 結論.....	101
第6章 総合討論.....	102
第7章 結論.....	116
謝辞.....	117
参考文献.....	118

第1章 序論

近年、肥満に関連した糖尿病等の非感染性疾患の罹患者が増加している。肥満者の数を減少させることは、国民医療費の削減や国民の生活の質の向上に鑑み、現代社会の最も大切な施策である。

肥満を解消するには、1日のエネルギー消費量を増やすか、食事によるエネルギー摂取量を減らす、あるいは両方を行い、エネルギー収支を負にすることが必要である。1日のエネルギー消費量を増加させる要素として、身体活動・運動による運動中のエネルギー消費量とその運動後に増加する安静時の酸素摂取量（EPOC: excess post-exercise oxygen consumption）がある。これまでの研究により、身体活動・運動を行なうことが肥満の解消に有効であることが明らかとなり、多くの人々が実践している。

1. ヒトの1日のエネルギー消費量に影響を与える因子

ヒトの1日のエネルギー消費量は、基礎代謝量（Basal Metabolic Rate: BMR）、食事誘発性熱産生（Thermic Effect of Food: TEF）、身体活動・運動に起因するエネルギー消費量で構成されている(安藤 2018)。基礎代謝量は、年齢、体組成、性別、人種などの影響を受けている(Henry 2005)。食事誘発性熱産生は、食事の量、質、摂取のタイミングなどの影響を受けている(Quatela *et al.* 2016)。一方、身体活動・運動に起因するのは身体活動・運動中のエネルギー消費量と運動後の EPOC によるエネルギー消費量の増加がある。

基礎代謝量は、1日の総エネルギー消費量の 60～70%を占めており、運動によるエネルギー消費量を除けば基礎代謝量によるエネルギー消費量が最も大きな割合を占める。また、基礎代謝量は、測定日の前日に激しい運動を控え、早朝空腹時に仰臥位の姿勢で安静にした状態で測定される(Henry 2005)。この条件下でない場合の安静時に測定されたエネルギー消費量は、安静時代謝量と呼ばれる。

2. 基礎代謝量に影響を与える因子

基礎代謝量は、性別や年齢、体組成、遺伝、体力の影響を受ける。基礎代謝量は厳密に管理された条件下で測定される必要があることから、安静時代謝量とほぼ同意義で扱われることが多い(安藤 2018)。安静時代謝量を基礎代謝量としてみた場合に、Ravussin and Bogardus (1989)は、249 名の男女の年齢、体組成、最大酸素摂取量と安静時代謝量の関係を横断的に調べたところ、除脂肪体重 (kg) と安静時代謝量 ($\text{kcal} \cdot \text{day}^{-1}$) の間に有意な正の相関関係 ($r^2=0.82$, $p<0.0001$) があることを報告している。Weyer *et al.* (1999)は、24 時間の安静時エネルギー消費量と除脂肪量の間に最も強い関連があり、脂肪量、性別、年齢、腹囲と大腿部の比ともそれぞれ関連があることを報告しており、特に、24 時間のエネルギー消費量のうち 72%は除脂肪量により説明されることを示唆している。これらのことから、性別や年齢が安静時代謝量に与える影響の多くは、加齢に伴う骨格筋量の減少や、男女の骨格筋量の差によるものと考えられている。また、Tremblay *et al.* (1986)は、鍛錬者と非鍛錬者の安静時代謝量 ($\text{kJ} \cdot 60\text{min}^{-1}$) を比較したところ、鍛錬者の安静時代謝量の方が有意に高い ($p<0.01$) ことを明らかにした。一方、最大酸素摂取量が多いと考えられる長距離陸上選手、特に体脂肪率が低く、月経異常の女性は、安静時代謝量が非トレーニング群より低いという報告がある(Myerson *et al.* 1991)。

3. 身体活動・運動時のエネルギー代謝に影響を与える因子

運動時は、運動強度が高いほど時間当たりのエネルギー消費量が多くなる(Romijn *et al.* 1993)。しかし、運動強度が高くなるほど運動継続可能時間が短くなり、運動強度が最大酸素摂取量を上回るような場合においては、数分程度で疲労困憊に至る(Medbo *et al.* 1988)。したがって、体重減少を目的に運動による総エネルギー消費量を増大させたい場合は、中程度の強度の運動を長時間実施することが望ましいと考えられる。Despres *et al.* (1991)の研究では、肥満の中年女性 13 名を対象に 6 か月間、最高心拍数の 55%の強度で週 4~5 回、1 回 90

分間の歩行を行わせたところ、体重と体脂肪率が有意に減少した。また、Donnelly *et al.* (2003)の研究では、過体重の若年男性 25 名を対象に 16 か月間、最大酸素摂取量の 70%の強度で週 5 回、1 回 45 分間のトレッドミルでの歩行を行わせたところ、体重と体脂肪率が有意に減少した。Schwartz *et al.* (1991)の研究では、過体重の中年男性 13 名を対象に 27 週間、心拍数予備の 85%の強度で週 4〜5 回、1 回 45 分間のトレッドミルでの歩行を行わせたところ、体重と体脂肪率が有意に減少した。Ross *et al.* (2000)の研究では、肥満の中年男性 52 名のうち 30 名を対象に 12 週間、最高心拍数の 77%程度の強度で毎日 60 分程度の歩行や軽いジョギングを行わせた。この介入研究では、運動を行わせた 30 名のうち 14 名には、体重を減少させないよう調節させたところ、介入前後における体重に変化はなかったものの内臓脂肪が有意に減少した。Ohkawara *et al.* (2007)は、これらの研究から内臓脂肪の減少のために必要な有酸素性運動の最低量を 1966 年から 2006 年までに報告された文献を整理し、有酸素性運動と内臓脂肪の減少の間には有意な量反応関係があることを示唆しており、やはり肥満の改善には有酸素性運動を持続的に行うことの効果が大きいと考えられている。しかし、このようなエネルギー消費量が高い運動を行った場合には、エネルギー摂取量（食事量）も増加するため、運動によるエネルギーバランスの不均衡は期間とともに減少するともいわれている(Westerterp 2018)。

4. 身体活動・運動後のエネルギー代謝に影響を与える因子

一方、運動による肥満改善という観点から、運動中に消費される酸素摂取量だけではなく、運動後に増加する安静時の酸素摂取量、即ち EPOC(Excess post-exercise oxygen consumption)も無視できないことが示唆されている。EPOC は運動中のエネルギー消費量の約 15%に達する(Dietary Reference Intakes for Energy, Carbohydrate, Fiber, Fat, Fatty Acids, Cholesterol, Protein, and Amino Acids2005)と考えられており、EPOC は体のエネルギー消費量の増加に重要な役割を果たすと推測されている。Benedict and Carpenter (1910)の研究により、

初めて身体活動後に安静時の酸素摂取量が増加することが報告された。この報告によると、2 人の研究参加者を対象に、高強度の運動終了後から 7～13 時間の睡眠中の安静時代謝量が 11.1%増加することが示された。その後、Hill and Lupton (1923)により、運動後に増加する安静時の酸素摂取量について、酸素負債(Oxygen deficit)という概念が考え出された。これは、運動開始直後や運動強度が非常に高い場合には、必要な酸素量（酸素需要量）に対して酸素供給量が追いつかず、酸素を借りた状態で運動をすることとなる。運動終了後は、安静時よりも高い酸素摂取量により借りた分の酸素を返済する。借りた酸素量と返却する酸素量が同等であると考えられており、この量を酸素負債と定義した。当時は、酸素負債が、主に運動により産生された乳酸の除去の為のものであると考えられていた。その後、Margaria *et al.* (1933)は、クレアチンリン酸の再合成のような運動後に速やかに回復する成分（rapid component）に加えて、乳酸からのグリコーゲンの再合成などによる遅い成分(slow component)によっても運動後の安静時酸素摂取量（ここでは酸素負債）が増加すると修正した。

運動後、特に高い強度や長時間の運動後において、筋中のクレアチンリン酸濃度や乳酸濃度が運動前の値に回復する運動終了後 2 時間以上、安静時酸素摂取量が運動前の値よりも高い状態が続くことが報告されている。この長時間継続する運動後の安静時酸素摂取量の継続的な高値は、筋グリコーゲンやクレアチンリン酸と関係なく、さら運動中の酸素（エネルギー）の貸し借りという概念では説明できないことなどが議論された。その結果、この運動後における安静時の酸素摂取量の高値は、その理由（機序）を付せず、現象として EPOC（Excess post-exercise oxygen consumption）と定義された（Gaesser and Brooks (1984））。

EPOC の機序に関する研究は古くから行われており、主に運動強度、運動時間、アドレナリン分泌量、体温などの影響を受けているとされていると考えられている(Borsheim and Bahr 2003)。EPOC に関する研究は、一般的に相対的あるいは絶対的運動強度の異なる運動における運動後の安静時の酸素摂取量に与える影響について報告されてきた。Sedlock *et al.* (1989) は、26±6 歳の鍛錬された男性を対象に、最大酸素摂取量の 50%の強度で約 30 分間

あるいは 60 分間の自転車運動、または最大酸素摂取量の 75%の強度で約 20 分間の自転車運動を行わせた場合の EPOC を観察した。その結果、最大酸素摂取量の 50%の強度で 30 分間の運動を行わせた場合と、同強度で 60 分間の運動を行わせた場合の EPOC の量に有意な差は認められなかったため、この運動強度は、EPOC に対して運動時間が影響を与えないことを示唆した。しかし、最大酸素摂取量の 50%の強度で 30 分間の自転車運動を行わせたときのエネルギー消費量 (307kcal) と、最大酸素摂取量の 75%の強度で 20 分間の自転車運動を行わせたときのエネルギー消費量 (304kcal) を同等にした場合における EPOC の量は、最大酸素摂取量の 75%の強度で運動を行わせた場合の方が大きくなったことから、運動強度が EPOC に影響を与えているとした。一方、Bahr *et al.* (1987)は、最大酸素摂取量の 70%の強度で運動を行わせた場合、運動時間が長くなるほど、EPOC の絶対量は大きくなり、EPOC の量は運動中の総酸素摂取量に対して 15%程度になると報告した。しかし、Chad and Wenger (1988)らは最大酸素摂取量の 70%の強度の運動を 30 分間行わせた場合の EPOC が運動中の総酸素摂取量に対して 10%であったのに対し、60 分間行わせた場合においては運動中の総酸素摂取量に対して 30%となったと報告した。これらの研究は、運動実施時間が EPOC に影響を与えていることを示している。Gore and Withers (1990)は、より詳細に検討するべく、最大酸素摂取量の 30%、50%、70%の強度で、それぞれ 20 分間、50 分間、80 分間の運動を行わせた場合の EPOC を測定した。その結果、最大酸素摂取量の 30%で運動を行った場合、いずれの運動時間においても EPOC の総量に差が無かった。しかし、最大酸素摂取量の 50%、70%の強度で運動を行った場合においては、運動時間が増加するとともに EPOC の量が増大した。さらに、その増大した量は、最大酸素摂取量の 50%の強度で運動を行わせた場合より最大酸素摂取量の 70%の強度で運動を行わせた場合の方が大きくなった。Borsheim and Bahr (2003)は、これらのような低強度から中強度の運動における EPOC に関する研究を整理し、EPOC には運動強度が強く影響を与えており、最大酸素摂取量の 75%の運動強度以上においては運動時間も影響を与えていることを示唆した。

中等度の強度の持続的運動に比較して、高い強度の運動の運動中のエネルギー消費量は低い。しかし高強度の運動においては、運動後の EPOC が大きいことが知られている (Laforgia *et al.* 2006)。Bahr *et al.* (1992)は、最大酸素摂取量の 108%の強度で 2 分間の運動を 2 分間の休息を挟んで 1〜3 セット行った場合、運動実施回数が多いほど EPOC が増大し、3 セット実施した場合に運動終了 4 時間後まで酸素摂取量が安静時よりも増大することを報告している。Laforgia *et al.* (1997)は、最大酸素摂取量の 105%の強度で 1 分間のトレッドミル走運動を、2 分の休息を挟んで 20 回繰り返すインターバル運動を行なった場合と、最大酸素摂取量の 70%の強度で 30 分間の走運動を行なった場合の運動後の安静時酸素摂取量を 9 時間測定し、非運動日の安静時酸素摂取量と比較した。その結果、最大酸素摂取量の 105%の強度で運動を行った場合の EPOC の方が、最大酸素摂取量の 70%の強度で運動を行った場合と比較して有意に大きくなった。Schaun *et al.* (2017)は、最大酸素摂取量の 130%の強度で 20 秒間のトレッドミル走運動を、10 秒間の休息を挟んで 8 回繰り返す間欠的運動を行なった場合と、最高心拍数の 90-95%の強度で 30 分間の走運動を行なった場合の運動後の安静時酸素摂取量を 30 分間測定した。その結果、運動後から 5 分間の安静時酸素摂取量は、間欠的運動を行った場合の方が、最高心拍数の 90-95%の強度で 30 分間の走運動を行なった場合と比較して有意に大きくなったが、その後の 25 分間の酸素摂取量に有意な差はみられなかったと報告している。しかし、高強度の運動後に長時間のエネルギー消費量を測定した報告は少なく、1 日のエネルギー消費量にどの程度の影響を及ぼすか不明である。また、酸素摂取量の測定は、ダグラスバッグ法によるものが多く、エネルギー代謝測定室を用いた研究は少ない。

5. 高強度・短時間・間欠的運動トレーニングのエネルギー代謝

最近、短時間で体力向上効果が期待される高強度・短時間・間欠的トレーニング(HIIT: high intensity intermittent (interval) training)というような高強度の運動を用いたトレーニングが注

目を集め、多くの人が実践している。そのなかでも、タバタトレーニングと呼ばれるトレーニングで用いられる運動は、最大酸素摂取量の 170%の強度で 20 秒間の自転車エルゴメータ運動を、10 秒間の休息を挟んで 7~8 回で疲労困憊に至るような運動である(Tabata *et al.* 1997, Tabata *et al.* 1996)。この運動は、運動の最後のセットにおける酸素摂取量が最大酸素摂取量に達し、また、この運動の総酸素借が無酸素性エネルギー供給量の指標である最大酸素借に達することにより、この運動は有酸素性及び無酸素性エネルギー供給機構に最大の負荷をかけることが知られている。したがって、この運動を用いたトレーニングでは、有酸素能力の指標である最大酸素摂取量及び無酸素性エネルギー供給量の指標である最大酸素借が大きく向上する。この運動トレーニングの 1996 年から 2017 年までに報告された研究を整理したレビューによると、運動方法が自転車運動だけでなく走運動や自体重を用いて行うものも存在する(Viana *et al.* 2019)。高い強度の運動は、一般的には運動時間が短いために、運動中のエネルギー消費量はそれほど高くないことが知られており、体重減少のための運動としては、その効果は限定的であると考えられる。最近報告された高強度・短時間・間欠的運動と体脂肪率および体脂肪量に関するメタ解析を用いた系統的レビューによると、高強度・短時間・間欠的運動トレーニングは、中等度の強度の運動トレーニングと同程度の体脂肪率の減少がみられ、さらに、高強度・短時間・間欠的運動トレーニングは、中等度の強度の運動トレーニングよりも体脂肪量の減少がみられることが示された(Viana *et al.* 2019)。しかし、この系統的レビューでは、高強度・短時間・間欠的運動トレーニングの運動時間や運動強度が統一されておらず、上述したような高強度・短時間・間欠的運動トレーニングによる体重減少効果は不明である。したがって、このような高強度・短時間・間欠的運動トレーニングのエネルギー消費量を定量化した報告は未だないため、運動中のエネルギー消費量のみならず、高強度・短時間・間欠的運動が運動後のエネルギー消費量に与える影響を明確に示すことは、生理学的に意義があるものと考えられる。

6. 食事誘発性熱産生に影響を及ぼす因子

また、食事誘発性熱産生は、食物の消化、吸収および同化に関連するエネルギー消費量であり、Diet Induced Thermogenesis (DIT) とも呼ばれる。DIT (食後の安静時酸素摂取量の増加) は、主に2つの要因によるものである。これは、栄養素の消化、吸収、輸送、貯蔵に必要なエネルギー(Acheson *et al.* 1984)と、交感神経活動(Yoshioka *et al.* 1995)、副交感神経活動(Deriaz *et al.* 1989, Nacht *et al.* 1987)や糖の合成 (Ravussin *et al.* 1985)などの際に使われるエネルギーである。

DIT は、測定の際の手段や方法、食事の量・組成、体組成、耐糖能、体力、年齢、活動量のように、様々な因子による影響を受ける(Granata and Brandon 2002)。DIT は、摂取したエネルギーの10%程度に相当すると考えられてきた(Van Zant 1992)。食事摂取により発生したDIT は、そのエネルギー消費量から肥満に対する体重減少効果を引き起こす可能性があると考えられてきた。DIT は摂取した栄養素の種類によってエネルギー消費量が異なる。通常の食事は、主にたんぱく質、糖質、脂質から成る。Westerterp (2004)は、DIT についての多くの研究報告を整理したところ、たんぱく質のみを摂取した場合は摂取エネルギーの約30%、糖質のみの場合は約6%、脂質のみの場合は約4%に相当することを示した。また、DIT は食品の辛味成分や嗜好性からも影響を受けることが報告されている(Hashkes *et al.* 1997)。Yoshioka *et al.* (1995)は、辛味成分を摂取した場合に交感神経を介した食後の熱産生を増大させることを明らかにした。しかしながら、このようなDIT により生じるエネルギー消費量と体重減少との関連を決定づける結論には至っておらず、DIT が体重減少に影響を与えるか否かは不明である。

一方、DIT は、最大酸素摂取量との関連がある可能性があることも指摘されている。Poehlman *et al.* (1989) は、鍛錬者と非鍛錬者のDIT を比較したところ、鍛錬者のDIT の方が有意に高い ($p<0.01$) ことを明らかにした。一方、Schulz *et al.* (1991)は、男性の持久性アスリートと非鍛錬者のDIT を比較し、最大酸素摂取量がDIT に影響を与えないことを示唆

している。しかし、これらの関連を決定づける結論には至っておらず、最大酸素摂取量が DIT に影響を与えるか否かは不明である。

7. DIT に及ぼす運動の影響

運動が、食事誘発性エネルギー産生に影響を与える可能性を示唆する報告がいくつかある。しかし、運動後に食事を摂った場合に、運動が DIT に対して影響を与えるか否かということに関して、一貫した結論は得られていない。Bahr and Sejersted (1991)は、最大酸素摂取量の 75%の強度で 80 分間の疲労困憊に至るような自転車運動実施後、2 時間が経過した時点で食事を摂らせた場合に、運動終了後から 7 時間の酸素摂取量が非運動条件と比較して有意な差がなかったと報告した。Ohnaka *et al.* (1998)も、最大酸素摂取量の 58%の強度で 60 分間の自転車エルゴメータ運動実施後における、食事摂取後の酸素摂取量が非運動条件と比較して有意な差がなかったことを報告した。Broeder *et al.* (1991)は、最大酸素摂取量の 30%および 60%の強度での自転車運動を実施させた直後に食事を摂らせた場合に、食事を摂らせたことによる酸素摂取量の増大を観測しなかったと報告している。Willms and Plowman (1991)も、最大酸素摂取量の 56%の強度でトレッドミルで歩行した場合の運動直後に食事を摂らせた場合に、食事を摂らせたことによる酸素摂取量の増大を報告していない。一方、Young *et al.* (1986)は、中等度の強度の運動（最大酸素摂取量の 70%の強度で 45 分間）後の安静時酸素摂取量に対する食事の影響を示唆している。

一方、高強度運動が DIT に与える影響について検討した先行研究では、Treadway and Young (1990)が、最大酸素摂取量の 34%、54%、及び 75%の強度で運動を行なわせた後に 100g のグルコースを経口投与させた場合に、最大酸素摂取量の 75%の強度での運動後のみ、熱産生が有意に上昇したことから、高糖質食後における糖代謝の上昇は、高強度の運動後のみに限定されることを示唆している。また、Denzer and Young (2003)は、単回の高強度レジスタンス運動によって高糖質食後の熱産生が高まると報告している。一方、エネルギー代謝測定

室を用いて、高強度のスプリントインターバル運動後、3 回の食事摂取を含めた 22 時間に渡る安静時酸素摂取量を測定した研究では、運動終了後 3 時間～22 時間後（EPOC 消失後）の総酸素摂取量に、運動日と非運動日の間に有意な差を認めていない(Sevits *et al.* 2013)。

Hazell *et al.* (2012)は、2 分間のスプリントインターバル運動中、及び、運動後 7 時間まで測定された酸素摂取量の総量が、30 分間の中等度の運動中、及び、その後の同期間の酸素摂取量の総量より有意に低い、両運動の開始からの 24 時間の総酸素摂取量は、2 つの条件間で差が無かったと報告している。この結果は、3 回の食事を含む回復期間後期の酸素摂取量がスプリントインターバル運動によって増加した可能性を示唆している。また、この研究では、高強度運動の回復期・後期における酸素摂取量の増加に、高強度運動が誘発する食事誘発性の酸素摂取量増加という観点から議論がなされていない。これらのことから、DIT に対して運動が影響を与えるか否かは未だ不明である。

8. 運動トレーニングが運動後のエネルギー代謝に及ぼす影響

上述のように、運動が運動後の DIT を含むエネルギー代謝に対して与える影響は、数多く報告されている。一方、運動後のエネルギー代謝に及ぼす運動トレーニングの影響は、これまでにほとんど報告されていない。Sedlock *et al.* (2010)は、運動トレーニングが運動後の安静時酸素摂取量に及ぼす影響についての研究を初めて行った。12 週間の中程度の強度の走運動トレーニング前後における、中等度の強度（最大酸素摂取量の 70%の強度）の走運動後の安静時酸素摂取量は、トレーニング前と同一強度で運動を行った条件において、トレーニング前の値と比較してトレーニング後に有意に低くなった。一方、トレーニングにより増加した最大酸素摂取量に対して 70%の強度で運動を行った場合の運動後の安静時酸素摂取量は、トレーニング前と比較して有意な差がなかった。したがって、トレーニングによる最大酸素摂取量の増加は、中等度の強度の運動による EPOC に影響を与えない可能性が示唆された。しかしながら、運動トレーニングが運動後の安静時酸素摂取量に及ぼす影響につい

ての報告は、上述した研究のみであり、高強度の運動トレーニングによる運動後の安静時酸素摂取量に与えるについての報告は全くない。また、上述した研究における運動後の安静時酸素摂取量は、測定期間が運動終了後 2 時間であり、食事による影響の検討がされていない。したがって、運動トレーニングによる最大酸素摂取量の増加や、トレーニング時の総仕事量の増加が EPOC や DIT に影響を与えるか否かは不明である。

9. エネルギー代謝測定室を用いたエネルギー消費量の測定について

1 日の総エネルギー消費量のうち運動後や食事後における酸素摂取量の増加は、わずかなものであるため、その測定には厳密に管理された条件下で行われる必要がある。従来、酸素摂取量の測定にはダグラスバッグ法によって行われてきたが、安静時酸素摂取量に影響を与えるような測定を実施する場合にはエネルギー代謝測定室 (Figure 1) を用いる必要がある。

エネルギー代謝測定室には、密閉された室内 (18.5 m³) に、必要最低限の設備 (トイレ、ベッド、机、PC など) が備えられている。このエネルギー代謝測定室を用いることで、マスクを装着せずに日常的な生活に近い形で、身体活動や運動を行う際の動きに制約がなく、様々な活動 (睡眠、基礎代謝、安静、食事摂取時、DIT、運動時、運動後の安静時酸素摂取量など) の酸素摂取量やエネルギー消費量を測定することができる (田中 2006)。日本国内においても 2016 年までに 17 施設に設置されており、研究が進められている。特に、長時間のエネルギー消費量を測定する場合に優れているため、睡眠時代謝量の推定式の開発 (Ganpule *et al.* 2007) や、生活活動記録によるエネルギー消費量の推定誤差の検証 (Yamamura *et al.* 2003)、活動量計による低強度の身体活動のエネルギー消費量の推定誤差の検証 (Midorikawa *et al.* 2007)、身体活動が安静時のエネルギー消費量に与える影響 (Ohkawara *et al.* 2008) など、多くの研究が行われてきた。また、食事誘発性の安静時代謝の昂進などの比較的微量な代謝量の変化を観察することが可能である。



Figure 1 立命館大学スポーツ健康科学部に設置されているエネルギー代謝測定室

エネルギー代謝測定室を用いた酸素摂取量は 1 分毎に測定される酸素濃度の変化から、30 分間毎に Henning の式(Henning *et al.* 1996)により推定している。したがって、高強度の運動のような短時間で大きな代謝変動があるような場合には酸素摂取量が過小評価される可能性が高い。これらのことから、これまでに高強度の運動をエネルギー代謝測定室内で行うような研究はされてこなかった。しかし、本研究で使用した立命館大学びわこ・くさつキャンパスのインテグレーションコア 3 階に設置されているエネルギー代謝測定室では、ダグラスバッグとエネルギー代謝測定室を連結する装置を導入し (Figure 2)、世界で初めてエネルギー代謝測定室内で高強度運動の運動中から運動後にかけての酸素摂取量を測定することを可能とした。



Figure 2 世界で唯一のエネルギー代謝測定室とダグラスバッグを連結した装置

実際に、高強度・短時間・間欠的運動後における酸素摂取量を正確に測定できているかを確認するために、あらかじめ予備実験を行った。エネルギー代謝測定室内でマスクを装着し、高強度・短時間・間欠的運動中および運動後 15 分間はダグラスバッグ法にて酸素摂取量を測定した。その後、マスクを外し、エネルギー代謝測定室による酸素摂取量の測定を開始した。その結果、エネルギー代謝測定室を用いて得られた最初の 1 分間（即ち、高強度・短時間・間欠的運動後 15-16 分）の酸素摂取量 ($0.425 \pm 0.060 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$) と、ダグラスバッグ法を用いて得られた最後の 1 分間の酸素摂取量 ($0.433 \pm 0.061 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$) の間に有意な正の相関が認められた ($r=0.98$, $p<0.001$, Figure 3)。また、この 2 点間の標準誤差は $0.02 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ であり、高強度・短時間・間欠的運動後の酸素摂取量に与える影響は、ほぼ無いと考えられる。したがって、この装置により、これまでは正確に評価することが困難であった、本研究で用いるような高強度・短時間・間欠的運動の運動中および運動後の酸素摂取量をほぼ正確に測定することが可能である。

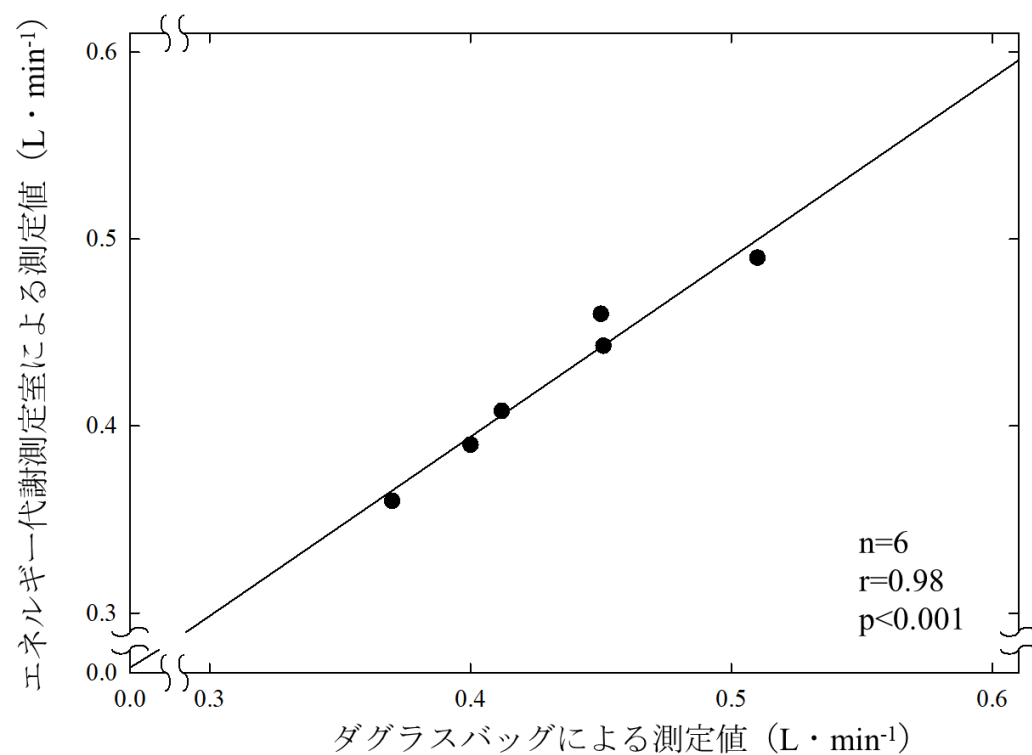


Figure 3 エネルギー代謝測定室を用いて得られた最初の 1 分間の酸素摂取量とダグラスバッグ法を用いて得られた最後の 1 分間の酸素摂取量の関係

本研究では、このエネルギー代謝測定室（Fuji Human Calorimeter、富士医科産業、千葉、日本）を用いて運動後の酸素摂取量を測定した。室内の温度及び湿度は、それぞれ 25℃及び 50%にコントロールされている。測定室内の面積および容積は、それぞれ 8.1m² および 18.5m³であった。ファンは部屋内の空気を循環させるために使用されている。立命館大学に設置されたエネルギー代謝測定室は、プル型のカロリメーター（流量がカロリメーターの出口の部分において 80L・min⁻¹の速度になるようにコントロール、測定された）である。流量の測定は、マスフローコントローラー（CMQ02、山武、東京、日本）を用いている。オンラインプロセス質量分析計（VG Prima dB; Thermo Fisher Scientific、Winsford、U.K.）により、流出空気中のガス濃度を高精度に測定した。質量分析計で、O₂、CO₂、N₂ および Ar の濃度を測定する。酸素摂取量は、Henning の式(Henning *et al.* 1996, Nguyen *et al.* 2003)を利用して計算する。酸素摂取量の測定精度は、アルコール燃焼試験により、3 時間アルコールを燃焼させた時のアルコール燃焼量から算出される総酸素消費量及び二酸化炭素排出量（理論値）と、実際に測定して得られた値（実測値）とを比較することにより求められる。本研究で用いたエネルギー代謝測定室での測定では、酸素摂取量の実測値/理論値は 100.3±0.9%（平均±SD）であった。また、外気中のガス濃度の変化の影響を排除するために、外気中のガス濃度を 1 時間ごとに測定して、吸入ガス濃度の変化の影響を補正している。

10. 本研究の目的

研究目的

上述のこれまでの研究から、以下の点が検討課題として挙げられた。

- ① 高強度運動後の安静時酸素摂取量を検討した研究は、ダグラスバッグ法を用いて酸素摂取量の測定をしたものが多く、特に長時間の安静時酸素摂取量を測定するに適したエネルギー代謝測定室を用いて行われた研究が少ない。
- ② 運動が DIT に及ぼす影響に関する研究は未だ数少なく、一貫した結果が得られていない。
- ③ 高強度・短時間・間欠的運動の運動中および運動後のエネルギー消費量を検討した研究はみられない。
- ④ 運動トレーニングが運動後の安静時酸素摂取量に与える影響は、これまでに中強度の運動トレーニングの検討に限られており、運動後の安静時酸素摂取量に対する運動トレーニングの効果は不明な点が多い。また、高強度・短時間・間欠的運動トレーニングによる影響を検討した研究はみられない。

本研究では、上述のこれまでの研究を踏まえ、高強度・短時間・間欠的運動に焦点をあて、高強度・短時間・間欠的運動および運動トレーニングが運動後の DIT を含んだ安静時酸素摂取量に与える影響について検討することを目的とした。

研究課題

上述の研究目的を達成するために、以下の4つの研究課題を設定した。

高強度・短時間・間欠的運動が、運動中及び、食事摂取を含む1日の生活を模した条件での運動後の安静時代謝に与える長時間の影響を明らかにすることを目的に、代謝測定室を用いた研究を行った（研究課題 1-1）。その結果、10:30より開始した高強度・短時間・間欠的運動による EPOC は、その終了後 1.5 時間後すなわち、昼食の摂取開始である 12:00 時には消滅することが明らかになった。また、その後の安静時酸素摂取量は非運動コントロール日に比較して高強度・短時間・間欠的運動後には高い値を示し、それが昼食及び夕食後に顕著であることが明らかとなった。この結果は高強度・短時間・間欠的運動は EPOC に加えて DIT（diet-induced thermogenesis）を亢進させることが明らかになった。これは、従来の運動による1日のエネルギー代謝に与える影響の要素として、運動中の代謝、EPOC に加えて、運動により DIT 増強効果という新しい要素の存在を初めて明らかにした。

研究課題 1-1 の研究の結果により、高強度・短時間・間欠的運動は、運動後の安静時酸素摂取量のうち、EPOC に加えて DIT に対して大きな影響を与えることが明らかとなった。つまり、高強度・短時間・間欠的運動により運動後に増加する DIT (Δ DIT) の存在が初めて明らかとなった。従来、このような運動後の安静時酸素摂取量という観点では中強度の運動が用いられることが多く、中等度の強度の運動が EPOC、DIT に与える影響について検討されてきた。そのため、研究課題 1-1 で定量化された高強度・短時間・間欠的運動のような非常に高い強度の運動が運動後の安静時酸素摂取量に与える影響の程度が、中等度の強度の運動に対してどの程度であるかを比較することは、肥満解消のための運動処方の開発や生理学的に意義がある。また、安藤 (2018)は、研究課題 1-1 についての報告に関して、高強度・短時間・間欠的運動後における食事摂取時の酸素摂取量を同一被験者間で食事非摂取条件と比較されていないため、運動後の DIT 増強効果を正確に明らかにできていないと指摘し

た。この指摘に対して明確に答えるためには、同一被験者に対して運動後食事摂取実験と運動後食事非摂取実験を行う必要がある。そこで研究課題 1-2 では高強度・短時間・間欠的運動後の EPOC と Δ DIT が、中等度の強度の運動と比較することを目的とした研究を行った（研究課題 1-2）。

研究課題 1-1 と 1-2 により、高強度・短時間・間欠的運動後に安静時酸素摂取量が高くなることが明らかとなったが、その量は、中等度運動を長時間行った場合と比較して、それほど小さくなく、肥満に対する効果は限定的である可能性が示された。そこで、高強度・短時間・間欠的運動によるエネルギー消費量を少しでも高くすることにより、肥満解消効果が期待できる方法論を開発するために研究課題 2 を行った。研究課題 1-1 において、高強度・短時間・間欠的運動後の安静時の酸素摂取量が非運動コントロール条件より、12 時間以上高値が継続した。また、この高強度・間欠的運動により増加した酸素摂取量の総量が、運動時の総仕事量との間に有意な正の相関関係（ $r=0.743$ 、 $p<0.05$ ）があることが明らかになった。運動中に通常空気よりも高濃度の酸素を吸入させると、運動中に発揮できる仕事量を増加させることが知られていることより、高強度・短時間・間欠的運動中に高濃度の酸素を吸入させると、運動を実施する際に、さらに高い仕事量を得ることが可能になる可能性がある。そこで、研究課題 2 では、高濃度の酸素を吸入し高強度・短時間・間欠的運動を行わせることで、運動中の総仕事量が増加し、それが運動後の安静時酸素摂取量を増大させるか否かを明らかにすることを目的として研究を行った（研究課題 2）。

最後に研究課題 3 では、本研究で対象とした高強度・短時間・間欠的運動を用いたトレーニングが、高強度・短時間・間欠的運動後のエネルギー代謝に与える影響を明らかにすることを目的とした研究を行った。その理由は、研究課題 1-1 から、高強度・短時間・間欠的運動後に増加した安静時の酸素摂取量（特に食事後の安静時酸素摂取量の増加）と最大酸素摂取量の間に関連のある正の相関関係があり、高強度・短時間・間欠的運動を用いた運動トレーニングにより最大酸素摂取量が増加すれば、高強度・短時間・間欠的運動後の DIT が増加し、

エネルギー消費量が増加する可能性があると考えたからである。これまでに、このような高強度・短時間・間欠的運動トレーニングが運動後の安静時の酸素摂取量に与える影響についての報告はなく、もし実際にこのようなトレーニング後に、高強度・短時間・間欠的運動後の安静時酸素摂取量が増加すれば、それが量的に多ければ、体重減少効果も期待され、それは社会的に意義があると考えられる。そこで、研究課題 3 では、高強度・短時間・間欠的運動トレーニングが高強度・短時間・間欠的運動中および運動後の安静時酸素摂取量に与える影響を明らかにすることを目的に実験を行った（研究課題 3）。

第 2 章 高強度・短時間・間欠的運動が運動後における安静時酸素摂取量に与える影響（研究課題 1-1）

1. 緒言

Borsheim and Bahr (2003)は、低強度から中強度の運動における EPOC に関する研究を整理し、EPOC に対する影響は運動強度が強く与えていることを示唆した。中等度の強度の持続的運動に比較して、高い強度の運動の運動中のエネルギー消費量は運動時間が短いためにそれほど高くはないことが知られている。しかし、高い強度の運動は、運動後に増加する安静時酸素摂取量が大きくなることが示唆されている(Laforgia *et al.* 2006)。

一方、運動が DIT に及ぼす影響に関する研究は未だ少なく、一貫した結果が得られていない。Bahr and Sejersted (1991)は、最大酸素摂取量の 75%の強度で 80 分間の疲労困憊に至るような自転車運動実施後、2 時間が経過した時点で食事を摂らせた場合に、運動終了後から 7 時間の酸素摂取量が非運動条件と比較して有意な差がなかったことを報告した。Ohnaka *et al.* (1998)も、最大酸素摂取量の 58%の強度で 60 分間の自転車エルゴメータ運動実施後における食事摂取後の酸素摂取量は、非運動条件と比較して有意な差がなかったことを報告した。一方、Weststrate and Hautvast (1990)及び Young *et al.* (1986)は、高強度の長時間の運動が食後のエネルギー消費量を増加させると示唆している。また、Sevits *et al.* (2013)は、エネルギー代謝測定室を用いて、スプリントインターバル運動後に 3 回の食事を含めた 22 時間に渡る安静時エネルギー消費量を測定したところ、運動日の運動後の回復期（運動終了後 3 時間～22 時間後）の総酸素摂取量と非運動日の総酸素摂取量との間に有意な差がみられなかったと報告している。Treadway and Young (1990)は、最大酸素摂取量の 34%、54%、及び 75%の強度で行なった運動のうち、最大酸素摂取量の 75%の運動後にのみグルコース誘発熱産生が有意に上昇したことから、グルコース負荷後における糖代謝の上昇は、高強度運動後のみに限定されることを示唆している。さらに、Denzler and Young (2003)は、単回の高強

度レジスタンス運動によって糖質食の熱産生が高まると報告している。これまでに高強度運動後の安静時酸素摂取量を検討した研究は、酸素摂取量をダグラスバッグ法により測定したものが多く、特に長時間の安静時酸素摂取量測定に適したエネルギー代謝測定室を用いて行われた研究が少ない。したがって、高強度運動が運動後長時間の安静時酸素摂取量に与える影響は未だ明らかでない。

これまでに、有酸素性能力の指標である最大酸素摂取量を向上させるような中～高強度の運動及び無酸素性エネルギー供給量の指標である最大酸素借を高めるようなスプリントインターバル運動のような運動の運動後のエネルギー代謝は報告されてきたが、最大酸素摂取量及び最大酸素借を同時に向上させるようなトレーニングとして用いられている高強度・短時間・間欠的運動の運動後のエネルギー代謝量についての報告は無い。そこで、本研究課題では、エネルギー代謝測定室を用いて、高強度・短時間・間欠的運動の運動中および運動後の総酸素摂取量を定量化することを目的に実験を行なった。

2. 方法

本研究課題は、エネルギー代謝測定室を用いて、高強度・短時間・間欠的運動後の酸素摂取量を測定し、運動後に食事を摂らせた場合と摂らせなかった場合の 2 条件で実験を行なった。また、それぞれの条件で、運動を行なわせた場合と行わせなかった場合の実験を行なった。高強度・短時間・間欠的運動後に食事を摂らせた場合を食事摂取実験、高強度・短時間・間欠的運動後に食事を摂らせなかった場合を食事非摂取実験とした。食事摂取実験における被験者は、健常な成人男性 10 名であった。被験者の年齢、身長、体重、BMI (Body mass index)、最大酸素摂取量は、それぞれ 23 ± 1 歳、 1.71 ± 0.05 m、 64.4 ± 6.0 kg、 22.1 ± 1.7 kg \cdot m⁻¹ \cdot m⁻¹、 52.1 ± 6.6 mL \cdot kg⁻¹ \cdot min⁻¹ であった。食事非摂取実験における被験者は、食事摂取実験とは異なる健常な成人男性 6 名であった。被験者の年齢、身長、体重、BMI、最大酸素摂取量はそれぞれ 22 ± 0 (歳)、 1.77 ± 0.06 (m)、 68.8 ± 6.7 (kg)、 21.8 ± 1.4 (kg \cdot m⁻¹ \cdot m⁻¹)、

53.2±5.3 (mL · kg⁻¹ · min⁻¹) であった。各実験条件において、試技の順はランダムとし、試技の間隔は少なくとも 1 週間の間を設けた。運動時は、Monark 社製の自転車エルゴメータ (Ergomedic 828E, Monark, Stockholm, Sweden) を用いた。

本研究課題に関わる実験や手順は、立命館大学倫理委員会の承認を受けた (BKC-IRB-2011-005、BKC-IRB-2012-024)。各被験者に対して、研究の目的、利益、及び危険性の詳細な説明を行った後、書面により同意を得た。心血管疾患、貧血、糖尿病、腎または肝疾患、甲状腺機能低下症または甲状腺機能亢進症、または筋骨格系に問題があった被験者は除外した。喫煙者、投薬を受けた人も除外した。被験者には、実験期間中に食事や運動習慣を変更しないように指示した。

A) 予備測定

運動は全て自転車エルゴメータを用いて行い、ペダルの回転速度は 90 回転/分とした。本研究課題で用いた運動強度は、最大酸素摂取量との関係から決定しているため、以下のよう

に予備測定でその値を決定した。

各被験者について、自転車エルゴメータ運動における最大下の運動強度 (watts) と酸素摂取量 (L · min⁻¹) の関係を明らかにするために、10 分間の一定強度の運動を、強度を変えて 8～10 回 (最大酸素摂取量の 35～90% に相当する強度) 行った。各運動強度の運動終了前 2 分間の呼気をダグラスバッグに採取し、酸素摂取量を測定した。これらから運動強度と酸素摂取量の一次回帰直線 を求めた。

次に、最大酸素摂取量を決定するために、最大酸素摂取量の 70～80% の強度で 2 分間運動を行った後、約 2～4 分で疲労困憊に至る超最大強度の運動を被験者に行わせた。運動終了前 1～2 分間の酸素摂取量を 30 秒毎に測定した。このような運動を、強度を変えて 2～3 回 (最大酸素摂取量の 110～130% に相当する強度) 行わせた。そして、このような超最大強度の運動で得られた酸素摂取量が、運動強度と酸素摂取量の一次回帰直線から、運動強度が

増加しても酸素摂取量が増加しない点、即ち、酸素摂取量のレベリングオフが確認された点を、最大酸素摂取量 ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ あるいは体重あたり $\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) とした(Taylor *et al.* 1955)。

高強度・短時間・間欠的運動中の運動強度である、最大酸素摂取量の 170% の強度の決定方法は、予備測定で得られた各被験者の最大下の運動強度での酸素摂取量と運動強度の関係式に外挿法を用いて求めた。最大酸素摂取量を 1.7 倍することで最大酸素摂取量の 170% の酸素需要量を求め、その値を運動強度と酸素摂取量の関係式に外挿することで、実際に行なう際の運動強度を決定した(Tabata *et al.* 1997) 。7〜8 セットの間で疲労困憊に至ることが望ましいため、6 セットより少ない回数で疲労困憊に至った場合は負荷を下げ、8 セット以上行なうことができた場合は負荷を上げることによって、7〜8 セットの間で疲労困憊に至るよう調節した。

最大下の運動強度の酸素摂取量の測定、最大酸素摂取量の測定、高強度・短時間・間欠的運動時の運動強度の決定は、3〜4 日間かけて行った。

B) 食事摂取実験

被験者には、各実験の前日に運動を控えるよう指示した。また、実験前日は通常の食事を摂るよう指示し、記録させた。実験の 24 時間前からアルコールまたはカフェインを摂らないよう指示した。これらは、全ての実験（食事摂取および食事非摂取実験）において統一した。エネルギー代謝測定室の環境に慣れさせるために、初回の実験の数日前に被験者をエネルギー代謝測定室に 2 時間程度滞在させた。

食事摂取実験のスケジュールを表に示した (Table 1) 。実験前日、17:00 にエネルギー代謝測定室に来室させ、18:00 に規定の夕食を摂らせた。その後、22:30 まで自由行動とし、23:00 に就寝させた。実験当日、7:00 に起床させ、エネルギー代謝測定室外で安静にさせた。8:00 に規定の朝食を摂らせた。その際、20 分の間に食事を完了するよう指示した。朝食後は、エネルギー代謝測定室外で安静にさせた。10:00 に被験者にエネルギー代謝測定室入室

させ、ダグラスバッグ法で酸素摂取量を測定する目的で、被験者にエネルギー代謝測定室外のダグラスバッグに三方コックで連結しているホースにマスクを装着させた。ホースの端部は、エネルギー代謝測定室の外側にある三方コックに接続されており、ホースの長さは 1.0m であった。

被験者がエネルギー代謝測定室に入室したと同時に、エネルギー代謝測定室による酸素摂取量の測定を開始した。入室と同時に被験者は、呼気ガス採取用のマスクを装着した。この時点では、被験者の呼気は、マスクを通してエネルギー代謝測定室外に送られたため、マスク装着期間におけるエネルギー代謝測定室による測定値は、被験者の呼気による影響を受けない。

10:10 より被験者に自転車エルゴメータを用いて最大酸素摂取量の 50%の強度で 10 分間のウォーミングアップを行なわせ、10 分間の休息の後、10:30 から高強度・短時間・間欠的運動(高強度・短時間・間欠的運動)を行なわせた。高強度・短時間・間欠的運動は、最大酸素摂取量の 170%の強度の 20 秒間の運動を 10 秒間の休憩を挟んで、7～8 回で疲労困憊に至る運動であった(Tabata *et al.* 1997)。高強度・短時間・間欠的運動の終了後、マスクを装着した状態で、15 分間自転車エルゴメータ上で安静を保たせた。その後、被験者にマスクを外させた。運動時は、運動負荷が予備測定で行われた実験と同様にするために、エネルギー代謝測定室の窓を通して、エネルギー代謝測定室外側の実験実施者が運動負荷を監視し、室内のスピーカーを備えたマイクを通して口頭で指示を出した。

その後、被験者に就寝時刻である 23:00 までベッドにて 20 分間の仰臥位安静と、椅子に座って 10 分間のデスクワークを交互に行わせた。この間、被験者は、読書や、勉強を行なった。被験者に運動後や食後の昼寝や規定外の行動を取らせないように、被験者の心電図および行動をエネルギー代謝測定室外で常に観察し、規定外の行動があった場合には備え付けのマイクから既定の行動を行うよう指示した。翌朝 7:00 に起床させ、エネルギー代謝測定

室から退室させた。非運動日は、高強度・短時間・間欠的運動実施しなかった以外は運動日と同様とした。

昼食と夕食は、12:00 と 18:00 に摂らせた。規定食は、日本人の食事摂取基準(日本人の食事摂取基準 2010)より、身体活動レベルを 1.5 と仮定して推定されたエネルギー必要量を算出した。Table 2 に被験者へ供与した食事内容を示した。実験日の朝食、昼食、夕食の総エネルギー量は 2186kcal・日であった。規定食のエネルギー構成比は、日本人の食事の平均値である比率とし、15%のタンパク質、25%の脂肪、60%の炭水化物とした。被験者は、食事を全て摂取し、また、エネルギー代謝測定室に滞在中、水は自由に摂取させた。

C) 食事非摂取実験

食事非摂取実験のスケジュールを表に示した (Table 1)。実験前日、17:00 に実験室へ来させ、18:00 に規定の夕食を摂らせた。その後、22:30 まで自由行動とし、23:00 に就寝させた。実験当日、7:00 に起床させ、エネルギー代謝測定室外で安静にさせた。運動実施日に、被験者に 8:00 に朝食を摂らせた後、10:00 にエネルギー代謝測定室に入室させた。食事摂取実験と同様のプロトコルに従って、10:30 から高強度・短時間・間欠的運動を行なわせた。食事非摂取実験では、運動後に昼食を摂らせずにエネルギー代謝測定室に滞在させた。食事を摂らせない以外は食事摂取実験と同様のプロトコルに従い、16:00 に退室させた。非運動日は、高強度・短時間・間欠的運動実施しなかった以外は運動日と同様とした。

D) ダグラスバッグ法を用いた酸素摂取量の測定

運動日における 10:30 から 10:48 までの酸素摂取量は、ダグラスバッグ法によって測定された。呼気中の酸素と二酸化炭素の濃度は、質量分析計 (Arco 2000; アルコシステム、千葉、日本) を用いて測定された。ガス量は、乾式ガスメータ (品川製作所、品川、東京、日本) により測定した。

エネルギー代謝測定室を用いた研究でダグラスバッグ法を使用した理由は、エネルギー代謝測定室の酸素摂取量及び二酸化炭素排出量を計算する際に用いるヘニング（Henning）の式(Henning *et al.* 1996, Nguyen *et al.* 2003)の特性から、高強度・短時間・間欠的運動のような短時間で終了するような高強度運動ではエネルギー代謝測定室内の酸素濃度、二酸化炭素濃度及びガス換気量の急激な変化による計算誤差を防ぐためであった。

E) 運動後の酸素摂取量の計算方法

エネルギー代謝測定室により測定された酸素摂取量は、運動終了 15 分後である 10:48 以降に得られた酸素摂取量から使用し、1 分毎に算出されている酸素摂取量を各分析期間に応じて総じた。その際、運動終了時点から 11:00 の総酸素摂取量は、運動終了時点から 10:48 にダグラスバッグ法により測定された総酸素摂取量と 10:48 以降にエネルギー代謝測定室で測定された総酸素摂取量を総じた。11:00 以降の酸素摂取量は、30 分毎に酸素摂取量を総じた。EPOC は、運動日の運動後から 11:30 の総酸素摂取量と非運動日の同時刻の総酸素摂取量の差として算出した。ΔDIT は、運動日と非運動日の 12:00 から 23:00 における総酸素摂取量の差から算出された値(高強度・短時間・間欠的運動により増加した DIT)として算出した。

F) 統計分析

すべての測定値は平均値±標準偏差で表した。二元配置反復測定分散分析（Two way repeated measure ANOVA）を使用してデータを分析し、条件間差異の有意性の程度を決定した。多重比較検定は、Bonferroni 法を用いた。項目間の相関関係の検討には、Pearson の積率相関係数（Pearson Product Moment）を用いた。統計の有意性は、危険率 5%未満で有意差ありと判定した。統計分析は統計解析ソフト SigmaPlot13（SYSTAT 社）を用いて行った。

Table 1 Timetable of Diet experiments and Fasting experiments

食事摂取実験 (n=10)				食事非摂取実験 (n=6)			
	非運動日	運動日			非運動日	運動日	
7:00	起床	起床		7:00	起床	起床	
8:00-8:20	朝食	朝食		8:00-8:20	朝食	朝食	
8:20-10:00	座位安静	座位安静		8:20-10:00	座位安静	座位安静	
10:00-10:10	自転車エルゴメータ上で安静	自転車エルゴメータ上で安静		10:00-10:10	自転車エルゴメータ上で安静	自転車エルゴメータ上で安静	
10:10-10:20	ウォーミングアップ	ウォーミングアップ		10:10-10:20	ウォーミングアップ	ウォーミングアップ	
10:20-10:30		自転車エルゴメータ上で安静		10:20-10:30		自転車エルゴメータ上で安静	
10:30		高強度・短時間・間欠的運動		10:30		高強度・短時間・間欠的運動	
運動後 - 10:48	自転車エルゴメータ上で安静	自転車エルゴメータ上で安静		運動後 - 10:48	自転車エルゴメータ上で安静	自転車エルゴメータ上で安静	
10:48-12:00	繰り返し 10分間のデスクワーク 20分間の臥位安静	繰り返し 10分間のデスクワーク 20分間の臥位安静			繰り返し 10分間のデスクワーク 20分間の臥位安静	繰り返し 10分間のデスクワーク 20分間の臥位安静	
12:00-12:20	昼食	昼食					
12:20-18:00	繰り返し 10分間のデスクワーク 20分間の臥位安静	繰り返し 10分間のデスクワーク 20分間の臥位安静					
18:00-18:20	夕食	夕食					
18:20-23:00	繰り返し 10分間のデスクワーク 20分間の臥位安静	繰り返し 10分間のデスクワーク 20分間の臥位安静					
23:00	就寝	就寝					
翌朝							
7:00	起床	起床					

Table 2 被験者に提出した規定食

		重量(g)	エネルギー(kcal)	たんぱく質(g)	脂質(g)	炭水化物(g)
朝食	白飯	200	336	5.0	0.6	74.2
	みそ汁	25	38	2.6	1.2	4.3
	卵焼き	120	154	13.4	10.8	0.6
	醤油	6	4	0.5	0.0	0.6
	ほうれん草のお浸し	30	22	1.6	0.6	2.4
合計		381	554	23.1	13.2	82.1
PFC比				16.7	21.5	61.8

昼食	白飯	200	336	5.0	0.6	74.2
	ハンバーグ	170	288	17.2	16.0	18.7
	レタス-生	30	4	0.2	0.0	0.8
	トマト-生	30	6	0.2	0.0	1.4
	きんぴらごぼう	45	52	1.2	0.9	9.8
	たまごスープ	7	28	1.9	1.4	2.0
合計		482	713	25.7	18.9	107.0
PFC比				14.4	23.9	61.7

夕食	白飯	200	336	5.0	0.6	74.2
	カレー	200	169	5.2	8.8	17.4
	サラダ	160	108	8.1	5.6	6.3
	ごま中華ドレッシング	25	69	0.6	5.0	5.1
	からあげ	46	90	6.2	5.2	4.4
	牛乳	220	147	7.3	8.4	10.6
合計		851	919	32.4	33.6	118.0
PFC比				14.1	32.9	53.1

1日合計		1714	2186	81.2	65.7	307.0
PFC比				14.9	27.0	58.1

3. 結果

A) 食事摂取実験

高強度・短時間・間欠的運動の平均運動時間は、 139 ± 11 秒 (127-159 秒)であった。Figure 4 には、食事摂取実験における高強度・短時間・間欠的運動終了後から翌朝 7:00 までの 30 分毎の酸素摂取量を示した。非運動日と比較して、運動日の酸素摂取量は 12:00 まで有意に高い値を示した($p < 0.001$)。しかし、被験者が昼食を摂取した時刻である 12:00 から 13:00 の酸素摂取量は、両日間で有意な差は認められなかった。昼食後、13:00 から 18:00 までの酸素摂取量は、非運動日と比較して運動日の方が有意に高い値を示した($p < 0.05$)。夕食を摂取した時刻である 18:00 から 19:00 の酸素摂取量は、両日間で有意な差は認められなかった。夕食後、19:00 から 23:00 までの酸素摂取量は、非運動日と比較して運動日の方が有意に高い値を示した($p < 0.05$)。就寝時刻である 23:00 から起床時刻である翌朝 7:00 の酸素摂取量は、両日間で有意な差は認められなかった。

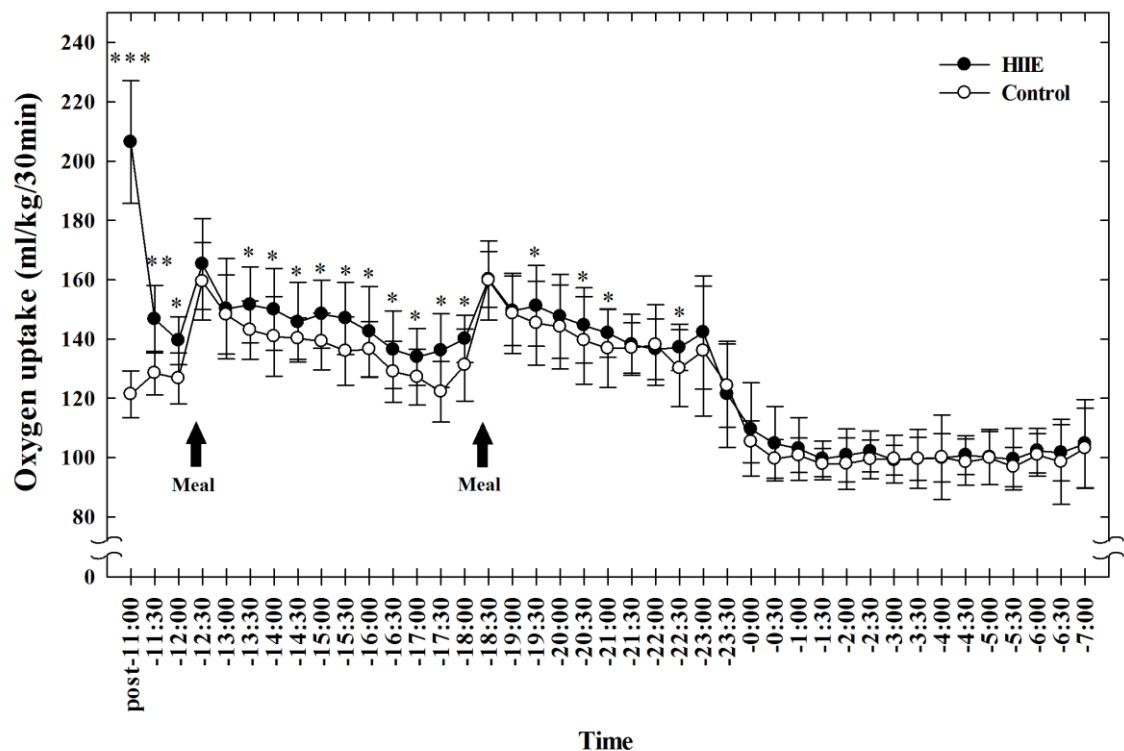


Figure 4 Resting oxygen uptake measured from the end of the HIIE to 07:00 on the next day in Diet Experiments. Values are expressed in means \pm SDs (n=10). ***, **, and * indicate significant differences between HIIE day and non-exercise control day at $p < 0.001$, $p < 0.01$ and $p < 0.05$, respectively.

10 分間のウォーミングアップ中の酸素摂取量は、 $227.8 \pm 25.0 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ であった。また、高強度・短時間・間欠的運動の運動中の酸素摂取量は、 $123.4 \pm 12.0 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ であった。運動日における運動後から 12:00 の総酸素摂取量($488.9 \pm 35.0 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$)は、非運動日の同時刻の総酸素摂取量($373.6 \pm 20.8 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$)より有意に高く($p < 0.001$)、その差は $115.3 \pm 32.3 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ であった。運動日における昼食開始時刻である 12:00 から夕食開始時刻である 18:00 の総酸素摂取量($1714.5 \pm 126.9 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$)もまた、非運動日の同時刻の総酸素摂取量($1627.5 \pm 108.9 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$)より有意に高い値を示した($p < 0.001$)。さらに、運動日における夕食開始時刻である 18:00 から就寝時刻である 23:00 の総酸素摂取量($1438.1 \pm 105.9 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$)も、非運動日の同時刻の総酸素摂取量($1379.1 \pm 95.2 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$)より有意に高い値を示し($p < 0.001$)、高強度・短時間・間欠的運動後から 23:00 までの総酸素摂取量も同様の結果となった(運動日: $3641.5 \pm 253.0 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$; 非運動日: $3380.2 \pm 214.6 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($p < 0.001$))。睡眠時の酸素摂取量(23:00 から翌朝 7:00)は、運動日($1623.8 \pm 132.6 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$)と非運動日($1593.4 \pm 83.9 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$)との間で有意な差は認められなかった。

運動日の運動後から 12:00 の総酸素摂取量と非運動日の同時刻の総酸素摂取量の差（即ち EPOC）は、 $115.3 \pm 32.3 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ であった。運動日と非運動日の昼食開始時刻である 12:00 から夕食開始時刻である 18:00 の総酸素摂取量の差は $87.1 \pm 53.3 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、夕食開始時刻である 18:00 から就寝開始時刻である 23:00 の総酸素摂取量の差は $59.0 \pm 65.6 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ であった。運動日と非運動日の 12:00 から 23:00 における総酸素摂取量の差から算出された値（高強度・短時間・間欠的運動により増加した DIT）、即ち ΔDIT は $146.1 \pm 90.9 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ であった。運動日と非運動日の運動後から 23:00 までの総酸素摂取量の差は $261.4 \pm 114.6 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ であった。また、運動日と非運動日の昼食開始時刻から就寝開始時刻における総酸素摂取量の差（ ΔDIT ）と被験者の最大酸素摂取量との間に有意な相関関係が認められた（ $r=0.76$, $p<0.05$, $n=10$, Figure 5）。

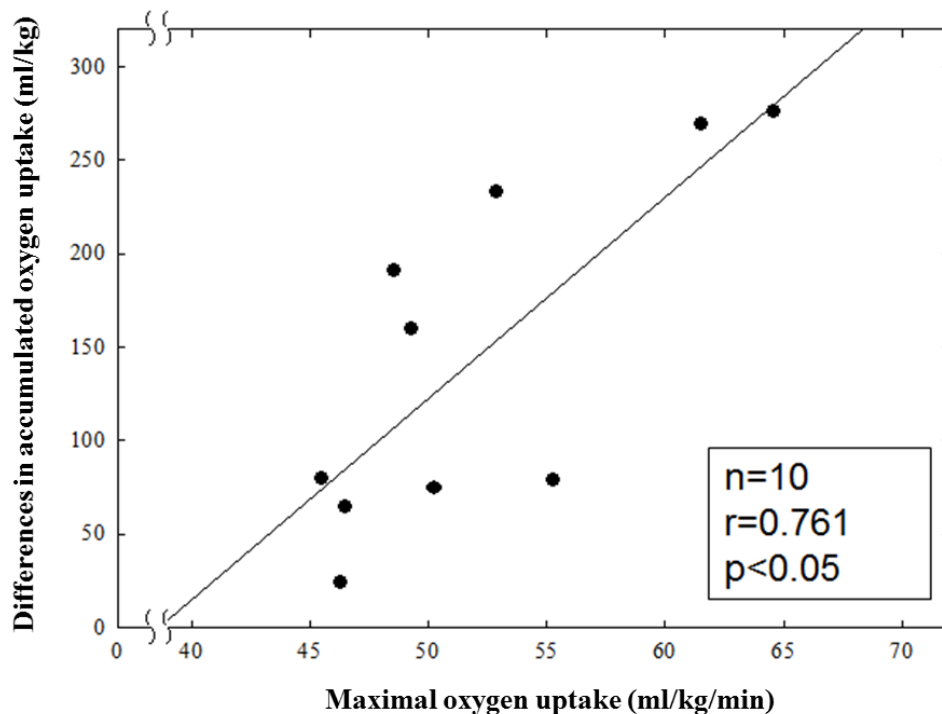


Figure 5 Relation between differences in oxygen uptake accumulated from the start of lunch to the start of sleep between the exercise day and control day ($\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1}$), and maximal oxygen uptake ($\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) of our subjects in the Diet Experiments ($n=10$).

運動日と非運動日の昼食開始時刻から就寝開始時刻における総酸素摂取量の差(Δ DIT)と被験者の最大酸素摂取量との間に有意な相関関係が認められた($r=0.743$, $p<0.05$, $n=10$, Figure 6)。

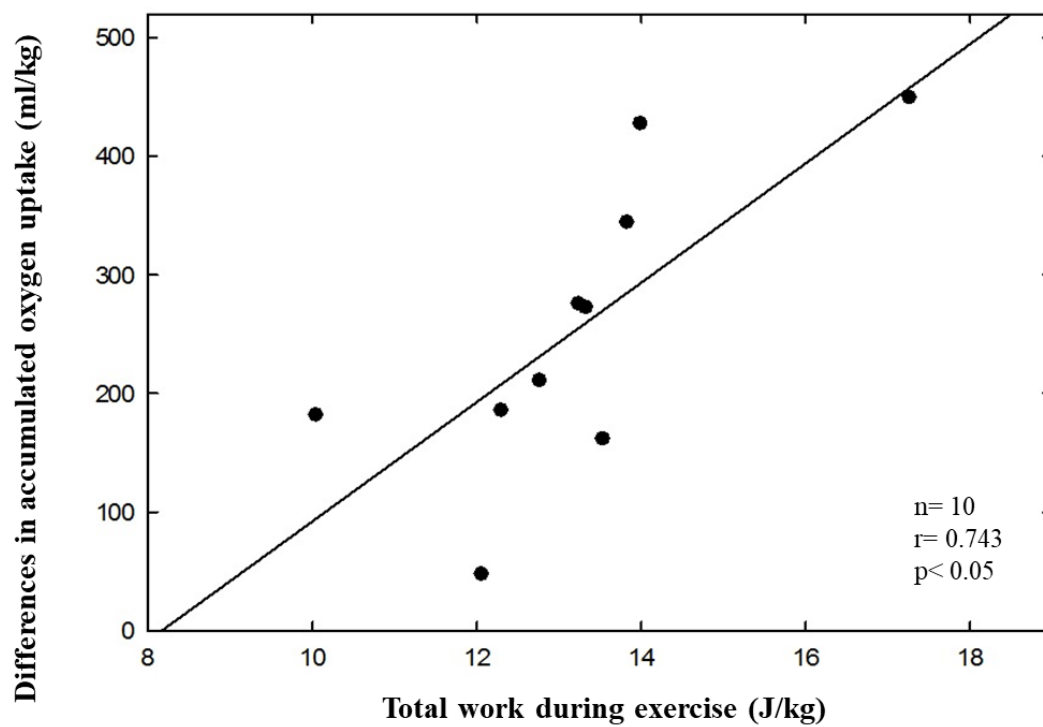


Figure 6 Relationship between difference in accumulated oxygen uptake ($\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1}$) and total work during exercise ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$).

Figure 7 には、高強度・短時間・間欠的運動終了後から 23:00 までの 30 分毎の R(換気交換比)及び RQ(呼吸商)を示した。R(RQ)は、非運動日に対して、運動日の高強度・短時間・間欠的運動直後から運動後 14 分まで有意に高い値を示した($p<0.001$)。しかし、この時点より後の R(RQ)は、昼食開始時刻である 12:00 まで非運動日に対して運動日の方が有意に低い値を示した($p<0.05$)。昼食後及び夕食後の RQ の値は、両日共に同様に上昇したが、12:00 から就寝開始時刻である 23:00 までの RQ の値に、両日間で有意な差は認められなかった。

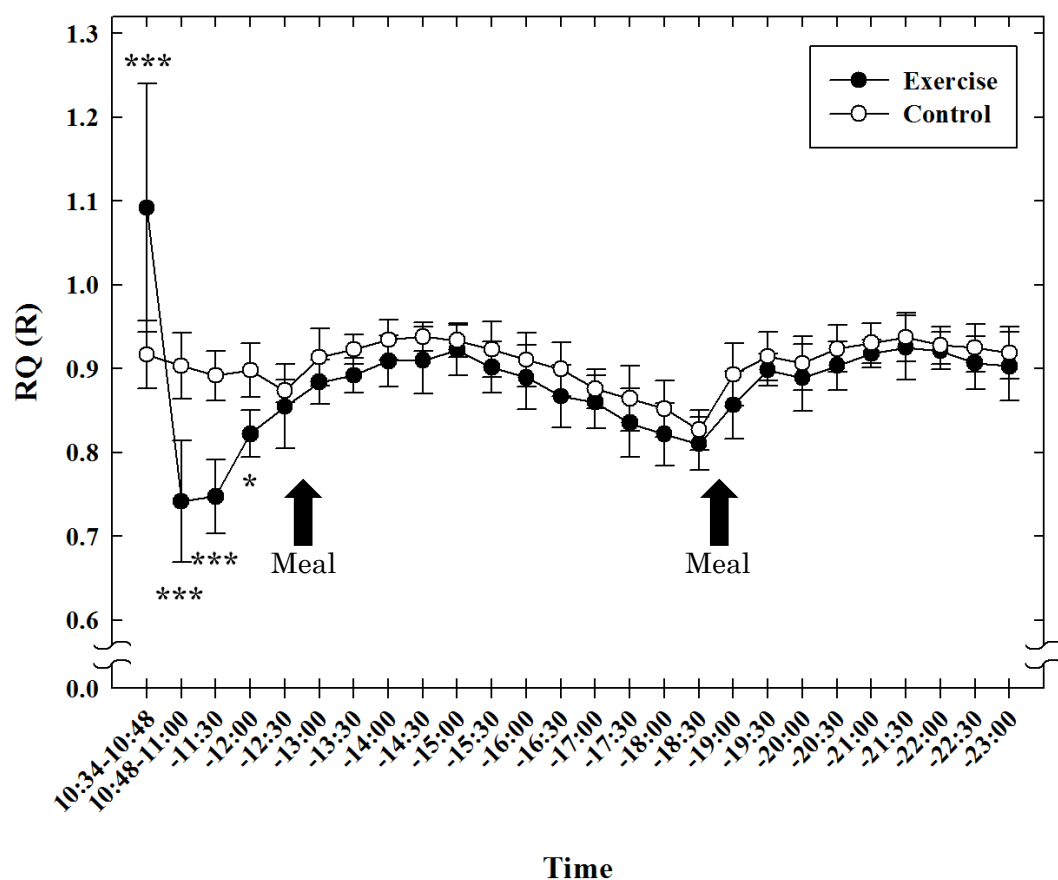


Figure 7 Respiratory quotient (RQ) and respiratory exchange ratio (R) measured from the end of the HIIE to 23:00 on Diet Experiments. Values are expressed in means \pm SDs ($n=10$). *** and * indicates significant differences between HIIE day and non-exercise control day at $p<0.001$ and $p<0.05$, respectively.

B) 食事非摂取実験

高強度・短時間・間欠的運動の平均運動時間は、 138.8 ± 8.1 秒 (133-155 秒)であった。Figure 8 には、食事非摂取実験における高強度・短時間・間欠的運動終了後から 16:00 までの 30 分毎の酸素摂取量を示した。10 分間のウォーミングアップ中の酸素摂取量は、 224.2 ± 22.7 $\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ であった。また、高強度・短時間・間欠的運動の運動中の酸素摂取量は、 117.9 ± 17.9 $\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ であった。

非運動日と比較して、運動日の酸素摂取量は 11:30 まで有意に高い値を示した($p < 0.001$)。しかしながら、11:30 から 12:00 の酸素摂取量は、両日間で有意な差は認められなかった。

運動日における運動後から 16:00 の総酸素摂取量(1479.6 ± 36.9 $\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1}$)は、非運動日の同時刻の総酸素摂取量(1358.9 ± 70.5 $\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1}$)より有意に高い値を示した($p < 0.01$)。運動日の運動後から 11:30 の総酸素摂取量と非運動日の同時刻の総酸素摂取量の差 (即ち EPOC) は、 115.9 ± 12.8 $\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ であった。また、運動日の運動後から 16:00 の総酸素摂取量と非運動日の同時刻の総酸素摂取量の差は、 120.7 ± 50.1 $\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ であった。

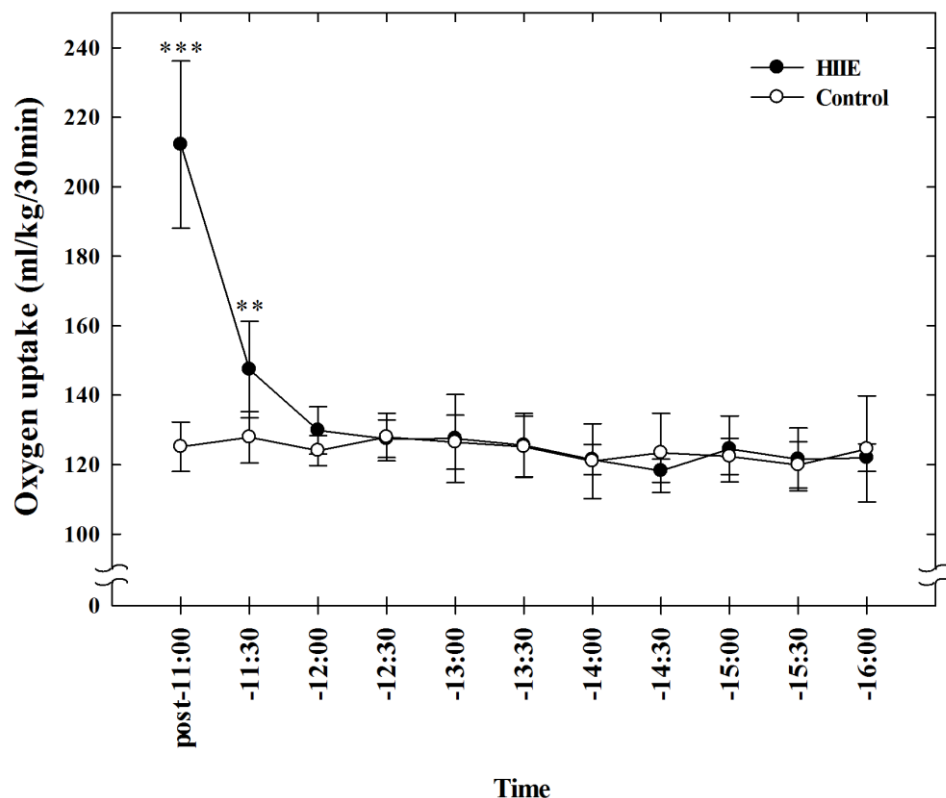


Figure 8 Resting oxygen uptake measured from the end of the HIIE to 16:00 on Fasting Experiments. Values are expressed in means \pm SDs ($n=6$). ***, and ** indicate significant differences between HIIE day and non-exercise control day at $p < 0.001$ and $p < 0.01$, respectively.

Figure 9 には、高強度・短時間・間欠的運動終了後から 16:00 までの 30 分毎の R(換気交換比)及び RQ(呼吸商)を示した。R(RQ)は、非運動日に対して、運動日の高強度・短時間・間欠的運動直後から運動後 14 分まで有意に高い値を示し($p<0.001$)、この時点より後から 12:00 までは、有意に低い値を示した($p<0.05$)。12:00 以降の RQ は、両日間で有意な差は認められず、さらに、両日共に 16:00 まで有意な変化は認められなかった(12:00 から 12:30 の平均値と 15:30 から 16:00 の平均値との間に有意な差は認められなかった)。

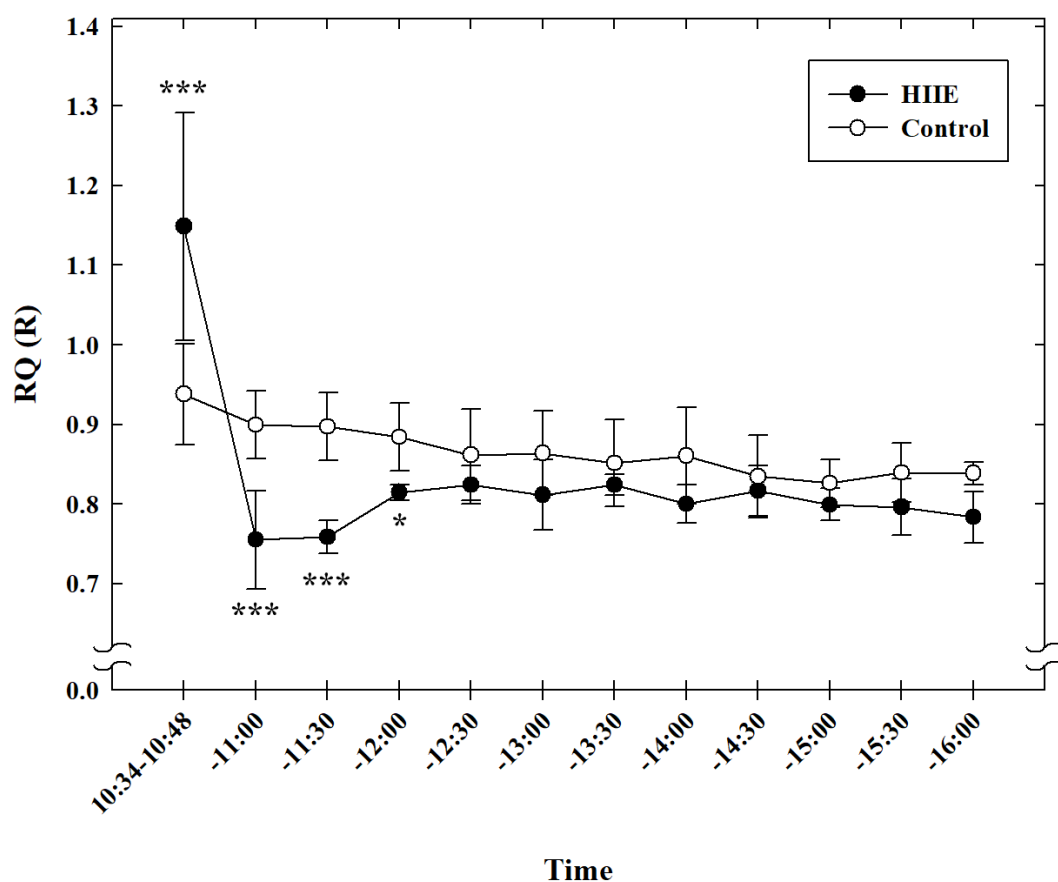


Figure 9 Respiratory quotient (RQ) and respiratory exchange ratio (R) measured from the end of the HIIE to 16:00 on Fasting Experiments. Values are expressed in means \pm SDs ($n=6$). *** and * indicate significant differences between HIIE day and non-exercise control day at $p<0.001$ and $p<0.05$, respectively.

4. 考察

高強度・短時間・間欠的運動の運動中及び運動後の酸素摂取量を、エネルギー代謝測定室を用いて明らかにした。その結果、高強度・短時間・間欠的運動が食事誘発性の酸素摂取量をさらに増加をさせることが示された。また、その量は、高強度・短時間・間欠的運動の運動中の総酸素摂取量、及び高強度・短時間・間欠的運動直後から 1.5 時間に測定された EPOC と同等であった。また、その量 (Δ DIT) は、被験者の有酸素性エネルギー供給機構の指標である最大酸素摂取量と有意な相関関係があることが示された。

食事非摂取実験では、運動後 56 分に対応する 11 時 30 分以降において、運動日と非運動日の間の酸素摂取量に有意な差がなかったことから、高強度・短時間・間欠的運動の安静時の酸素摂取量への影響（即ち、EPOC）は、この時点で消失していると考えられる。食事摂取実験における高強度・短時間・間欠的運動後も、12 時以降において EPOC は消失した。一般に、EPOC の持続時間は、最大下の強度の運動の運動強度および運動時間に依存している(Gore and Withers 1990)。Bahr *et al.* (1992)は、超最大強度（最大酸素摂取量の 108%の強度）で 2 分間の運動を 1 回、2 回、3 回とそれぞれ行なった場合に、EPOC が運動後 30 分間、1 時間、及び 4 時間持続することを報告しており、EPOC は超最大強度の運動の回数（時間、仕事量）に依存することが示唆されている。また、EPOC の構成の主な要因は酸素借であるが、この報告では、2 分間の運動 1 回、2 回、及び 3 回の酸素借は、それぞれ $3.2 \pm 0.1\text{L}$ 、 $5.6 \pm 0.2\text{L}$ および $7.5 \pm 0.2\text{L}$ （平均 \pm 標準偏差）であった。本研究課題において、上記の報告の被験者より体重が軽かった（本研究課題の被験者: $64.4 \pm 6.0\text{kg}$ 対 $75.0 \pm 3.7\text{kg}$ ）が、高強度・短時間・間欠的運動中の酸素借は、 $4.1 \pm 1.2\text{L}$ であった。本研究課題で測定された酸素借は、上記の報告の 2 分間の運動を 1 回及び 2 回行なった時の酸素借の値の間であった為、本研究課題の EPOC が運動後 60 分および 90 分で消失したと考えられる。

食事摂取実験において、高強度・短時間・間欠的運動終了後に発生した EPOC は、昼食の前には消失していたため、運動日と非運動日における昼食後の酸素摂取量の差は、先行する運動の影響を受けた可能性がある。食事摂取実験、食事非摂取実験における DIT の影響が生じる時間帯（正午から 23:00 まで）で、高強度・短時間・間欠的運動が安静時の酸素摂取量に与える影響（EPOC）自体は消失していると考えられるが、食事摂取実験でのみ運動日の昼食後、夕食後に酸素摂取量が非運動日と比較して高くなったため、運動日の昼食後及び夕食後に非運動日より高くなった酸素摂取量は、高強度・短時間・間欠的運動に起因する可能性がある。運動日の DIT に加算された酸素摂取量 (Δ DIT) は、高強度・短時間・間欠的運動により上昇したインスリン感受性のための酸素摂取量によるものである可能性がある(Koshinaka *et al.* 2009)。運動や筋収縮によりインスリン感受性は上昇し、さらに運動後にイ

ンスリン感受性の上昇は最大で2日間持続することが知られているからである(Mikines *et al.* 1988)。従って、高強度・短時間・間欠的運動によりインスリンに刺激されたグリコーゲン合成の増加が、非運動日の DIT に加えて、運動日の昼食後及び夕食後に酸素摂取量を増大させた可能性がある。インスリン感受性の上昇の程度は、被験者の最大酸素摂取量と相関があるため(Larsen *et al.* 2012, Sato *et al.* 1986)、本研究課題で被験者の最大酸素摂取量と高強度・短時間・間欠的運動後の食後に増加した酸素摂取量との間に相関関係が認められたことにおける推察は妥当であると考えられる。

被験者には運動日と非運動日に同一の食事を供与したため、DIT のうち、摂取した食物の消化等のためのエネルギー消費量や、そのための酸素摂取量には運動日と非運動日には差が無いと考えられる。一方、Davis *et al.* (1983)は、DIT 自体が被験者の最大酸素摂取量と有意な正の関連がある($r=0.658$, $p<0.01$, $n=26$)と報告している。Ebeling *et al.* (1993)は、最大酸素摂取量と外側広筋中の GLUT4 の量との間に有意な正の関連がある($r=0.61$, $p<0.05$, $n=19$)と報告している。Sato *et al.* (1986)は、食後の血糖値及び血中インスリン濃度が高い状態における、糖代謝量の程度は被験者の最大酸素摂取量と高い相関を示したと報告している。これらのことから、最大酸素摂取量が高い人ほど GLUT4 濃度が高く、インスリン感受性が高いことにより、食後に血中インスリン濃度が高くなると糖の取り込み量及び糖の合成量が高く、より多くの酸素を消費する可能性がある。これらの機序が、高強度・短時間・間欠的運動後に DIT をさらに増加させたものと推測される。しかしながら、食事後である 12:30~23:00 の呼吸交換比 (R あるいは RQ) から算出された糖質酸化量は、運動日 (156.4 ± 16.8 g) と非運動日 (167.1 ± 10.4 g) で有意な差がなかった ($p=0.127$)。一方、同期間の脂質酸化量は、非運動日 (35.2 ± 8.2 g) と比較して運動日 (45.0 ± 10.0 g) の方が有意に高くなった ($p<0.01$)。したがって、呼吸交換比から算出した糖質酸化量は、運動による影響を受けていないと考えられる。しかし、本研究では、尿中窒素排出量の測定をしていないことから、たんぱく質代謝量の影響を排除できていなかった。また、エネルギー代謝測定室を用いての基質酸化量の測定精度は、酸素摂取量の測定精度と比較すると低くなるため、データとしての信頼性が低い。これらのことから、糖質酸化量への影響は、本研究では明らかにすることができなかった。

これまでに、高強度運動後における睡眠時の酸素摂取量は、運動を行わなかった日の睡眠時酸素摂取量と差が無いことが報告されている(Hazell *et al.* 2012, Sevits *et al.* 2013, Skelly *et al.* 2014)。本研究課題においても、睡眠時の酸素摂取量は、運動日と非運動日とで差は認められなかった。従って、本研究課題を含むこれらの研究は、高強度運動によって睡眠時代謝が上昇しないことを示唆している。

さらに、本研究課題において、高強度・短時間・間欠的運動を行なうことにより昼食後及び夕食後における酸素摂取量の増加の度合いを非運動日よりさらに高めることが初めて示された。酸素摂取量及びエネルギー消費量（47.8 kcal）自体は少ないが、エネルギー消費量の観点から、このような高強度運動の生理学的な特性を表している可能性がある。これまでも、超高強度運動後に安静時酸素摂取量が増大するという報告はある。Chan and Burns (2013)は、体重の 6.5%の負荷で 30 秒間の全力自転車エルゴメータ運動を 4.5 分間の休息を挟んで 4 セット行った場合、運動終了 45 分後には酸素摂取量が非運動日と差が無くなると報告した。Burns *et al.* (2012)は、体重の 7.5%の負荷で 30 秒間の全力自転車エルゴメータ運動を 4 分間の休息を挟んで 2 セット行った場合、運動終了 15 分後には酸素摂取量が非運動日と差が無くなると報告した。しかし、これらの報告では運動後に食事を摂らせていないため、これらの研究では食事誘発性の酸素摂取量に与える影響までは検討されてこなかった。

一方、超高強度運動後に食事を摂らせた場合の酸素摂取量を測定した研究では、Bahr *et al.* (1992)は、最大酸素摂取量の 108%の強度で 2 分間の運動を 2 分間の休息を挟んで 1～3 セット行った場合、運動実施回数が多いほど EPOC が増大し、3 セット実施した場合に運動終了 4 時間後まで酸素摂取量が安静時よりも増大することを報告した。また、Hazell *et al.* (2012)は、2 分間のスプリントインターバル運動後に昼食及び夕食を摂らせた後、breath-by-breath 法を用いて酸素摂取量を 30 分間測定したが、運動を行わなかった日に測定した酸素摂取量と差が無かったと報告した。Skelly *et al.* (2014)は、最高心拍数の 90%の負荷で 60 秒間の自転車エルゴメータ運動を 1 分間の休息を挟んで 10 セット行った場合、運動後 22.5 時間の総酸素摂取量は非運動日と比較して有意に高くなったと報告した。しかし、これらの報告では、運動後における食後の酸素摂取量について検討はされていない。Kelly *et al.* (2013)は、Skelly らと同様に最高心拍数の 90%の負荷で 60 秒間の自転車エルゴメータ運動を 1 分間の休息を挟んで 10 セット行った 1.25 時間後から 9.75 時間後までの酸素摂取量をフード法により測定した。この研究では、運動後に昼食、夕食が被験者に与えられていたが、運動後の酸素摂取量の総量と非運動日の同時間の酸素摂取量に差が無かった。これらの研究では、本研究課題において運動日と非運動日の安静時の酸素摂取量に有意な差が見られた時間、すなわち昼食後及び夕食後 4～5 時間酸素摂取量を測定していなかったため、超高強度運動及びスプリントインターバル運動により引き起こされた安静時の酸素摂取量の増加を見落としていた可能性がある。

本研究課題の結果を考察する際に、最も興味深く、類似した研究は、Sevits *et al.* (2013)によるエネルギー代謝測定室を用いた研究であった。この研究では、スプリントインターバル運動（体重の 7.5%の負荷で 30 秒間の全力自転車エルゴメータ運動を 4 分間の休息を挟んで

5 セット) を行なった日に 3 回の食事を摂らせたが、食後 4 時間の酸素摂取量は、非運動日と差が無かったと報告された。本研究課題では、高強度・短時間・間欠的運動後の食後の酸素摂取量が非運動日の酸素摂取量よりも高くなった (Figure 4) ため、Sevits らの研究とは異なった結果が得られたが、その理由は不明である。本研究課題と Sevits らの研究の類似点は以下に挙げられる。一つ目に、EPOC は超最大強度の運動後 2 時間以内に消失した。二つ目に、被験者の年齢、最大酸素摂取量、BMI、食事のエネルギー摂取量が類似していた。運動方法は研究間で異なっており、Sevits らの方法では総運動時間が 150 秒 (30 秒間×5 回) であったのに対し、本研究課題では総運動時間が 120~140 秒間 (20 秒間×6 または 7 日間) であった。しかし、運動時の平均の仕事量 ($J \cdot kg^{-1}$) は類似していた。最も大きな違いは、食事を供与したタイミングであり、Sevits らの研究では朝食前に運動を行なわせたのに対し、本研究課題では朝食の後に運動を行なわせた。これまでの研究では、運動の前に朝食を摂った場合、或いは運動後に朝食を摂った場合の運動後の酸素摂取量に与える影響については議論されていない。そのため、今後さらなる研究を行なう必要がある。

食事摂取実験の運動日に観測された EPOC の絶対量は、 $8.0 \pm 1.3L$ であった。この値は、最大酸素摂取量の 56% の強度で 90 分間の運動後の値 ($8.1L$) (Borsheim *et al.* 1998) 及び最大酸素摂取量の 51% 強度で 120 分間の運動後の値 ($7.8L$) (Bahr *et al.* 1987) と同等であった。本研究課題における高強度・短時間・間欠的運動後の EPOC の絶対量は、Sevits *et al.* (2013) の 30 秒間の最大自転車運動を 3 分間の休息を挟んで 5 セット行なった後に、エネルギー代謝測定室を用いて 23 時間測定された値 ($225kcal \cdot 日$) より少なかった。この差は、2 つの研究の運動時の総仕事量の差 (酸素借) によるものと考えられる。また、本研究課題で観測された EPOC は、運動中の総酸素摂取量 ($123.4 \pm 12.0 mL \cdot kg^{-1}$) に対する割合が $92.4 \pm 18.7\%$ であった。これは、従来考えられていたような運動中の総酸素摂取量に対する EPOC の割合が 15% 程度 (Dietary Reference Intakes for Energy, Carbohydrate, Fiber, Fat, Fatty Acids, Cholesterol, Protein, and Amino Acids 2005) であったことに対してはるかに大きいものであることが示された。

本研究課題によって、食事摂取実験における運動日と非運動日の昼食開始時刻から睡眠開始時刻までの総酸素摂取量の差 (ΔDIT) と被験者の最大酸素摂取量の値との間に有意な正の関係がある ($r=0.761, p<0.05, n=10$, Figure 5) ことが初めて示された。本研究課題で観測された ΔDIT ($146.1 \pm 90.9 mL \cdot kg^{-1}$) は、運動中の総酸素摂取量 ($123.4 \pm 12.0 mL \cdot kg^{-1}$) に対する割合が $114.1 \pm 62.8\%$ であった。また、 ΔDIT の運動中の総酸素摂取量に対する割合と最大酸素摂取量 ($mL \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$) の値との間に有意な正の関係がある ($r=0.683, p<0.05$) ことが示された。Figure 5 の結果は、 ΔDIT および最大酸素摂取量をともに体重で割った値を用いた

が、 Δ DIT の絶対量 (L) と最大酸素摂取量の絶対値 ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$) との間には($r=0.808, p<0.01$)、 Δ DIT の絶対量 (L) と体重当たりの最大酸素摂取量 ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) との間には($r=0.796, p<0.01$)と、ともに有意な正の相関が認められた。体重の差による最大酸素摂取量の影響を統計的に補正するために、 Δ DIT の絶対量に対する最大酸素摂取量の絶対値および体重当たりの最大酸素摂取量の偏相関係数を算出したところ、 $r=0.661$ であった。これらのことから、有酸素性体力が高いほど運動後における DIT を高めるといえる。

本研究課題では、最大酸素摂取量が高いほど、高強度・短時間・間欠的運動後の食後の酸素摂取量が高くなることが示された。このような高強度・短時間・間欠的運動を継続してトレーニングとして用いると、最大酸素摂取量が増加するため、高強度・短時間・間欠的運動後の食後の酸素摂取量自体を増大させることができるかもしれない。従って、定量的なエネルギー消費量としては少ないが、トレーニングとして用いることで、体重減少に貢献する可能性がある。

5. 結論

高強度・短時間・間欠的運動は、DIT を昂進することが明らかとなった。また、それは有酸素性体力と関連することが明らかになった。

第3章 中等度の強度の運動が食事誘発性安静時酸素摂取量に与える影響（研究課題 1-2）

1. 緒言

研究課題 1-1 により、高強度・短時間・間欠的運動は運動後の安静時酸素摂取量のうち、EPOC と DIT に大きな影響を与えることが明らかとなった。

従来、運動後の安静時酸素摂取量という観点では中等度の強度の運動が用いられることがかなり多く、中等度の強度の運動が EPOC、DIT に与える影響について検討されてきた。また、研究課題 1-1 では、特に高強度・短時間・間欠的運動が DIT に影響を及ぼすことが明らかとなった。中等度の強度の運動が DIT を高めることを示す報告がある一方で (Segal *et al.* 1987, Weststrate and Hautvast 1990, Young *et al.* 1986)、中等度の強度の運動が DIT に影響を与えないという報告もある (Bahr and Sejersted 1991, Ohnaka *et al.* 1998)。Laforgia *et al.* (2006) は、これらの研究を整理し、総説のなかで DIT が中等度の強度の運動の影響を受ける可能性は低いと示唆している。しかしながら、酸素摂取量はダグラスバッグ法による測定が多く、中等度の強度の運動が DIT に与える影響が僅かである場合に、その量を検出できなかった可能性がある。研究課題 1-1 は、エネルギー代謝測定室を用いたことによって、高強度・短時間・間欠的運動後の Δ DIT の存在を明らかにした。したがって、DIT が中等度の強度の運動の影響を受けるか否か、エネルギー代謝測定室を用いて明らかにする必要がある。また、高強度・短時間・間欠的運動が運動後の安静時酸素摂取量に与える影響の程度が、中等度の強度の運動に対してどの程度であるかを比較することは意義があると考えられる。

そこで、研究課題 1-2 では、高強度・短時間・間欠的運動後の EPOC と Δ DIT が、中等度の強度の運動と比較してどの程度であることを明らかにすることを目的とした。

2. 方法

被験者は、健常な成人男性 8 名であった。被験者の年齢、身長、体重、BMI、最大酸素摂取量は、それぞれ 23 ± 2 歳、 1.74 ± 0.06 m、 67.9 ± 7.7 kg、 22.4 ± 1.5 kg \cdot m⁻¹ \cdot m⁻¹、 52.5 ± 4.6 mL \cdot kg⁻¹ min⁻¹ であった。

本研究課題は、エネルギー代謝測定室を用いて、中等度の強度の運動及び高強度・短時間・間欠的運動の運動中及び運動後の安静時酸素摂取量を測定し、運動後に食事を摂らせた場合と摂らせなかった場合の 3 条件で実験を行なった。また、それぞれの条件で、運動を行なわせた場合と行わせない場合の実験を行なった。運動後に食事を摂らせた場合を食事

摂取実験、運動後に食事を摂らせなかった場合を**食事非摂取実験**とした。試技の順はランダムとし、試技の間隔は少なくとも 1 週間の間を設けた。運動時は、Monark 社製の自転車エルゴメータ(Ergomedic 828E, Monark, Stockholm, Sweden)を用いた。酸素摂取量は、高強度・短時間・間欠的運動直後の期間を除いて、研究課題 1-1 で用いたエネルギー代謝測定室 (Fuji Human Calorimeter、Fuji Ika Sangyo、千葉、日本) によって測定した。

本研究課題に関わる実験や手順は、立命館大学倫理委員会の承認を受けた(BKC-IRB-2014-003)。各被験者に対して、研究の目的、利益、及び危険性の詳細な説明を行った後、書面により同意を得た。心血管疾患、貧血、糖尿病、腎または肝疾患、甲状腺機能低下症または甲状腺機能亢進症、または筋骨格系に問題があった被験者は除外した。喫煙者、投薬を受けた人も除外した。被験者には、実験期間中に食事や運動習慣を変更しないように指示した。

A) 予備測定

運動は自転車エルゴメータを用いて行い、ペダルの回転速度は 90 回転/分とした。最大酸素摂取量の測定及び、本研究課題で用いた運動強度は、研究課題 1-1 の方法と同様に予備測定から決定した。最大下の運動強度の酸素摂取量の測定、最大酸素摂取量の測定、高強度・短時間・間欠的運動時の運動強度の決定は、3～4 日間かけて行った。

B) 食事摂取実験

被験者には、各実験の前日に運動を控えるよう指示した。また、実験前日は通常の食事を摂るよう指示し、記録させた。実験の 24 時間前からアルコールまたはカフェインを摂らないよう指示した。これらは、全ての実験（食事摂取および食事非摂取実験）で同様とした。エネルギー代謝測定室の環境に慣れさせるために、初回の実験の数日前に被験者を 2 時間程度滞在させた。

実験前日、17:00 にエネルギー代謝測定室へ来室させ、18:00 に規定の夕食を摂らせた。その後、22:30 まで自由行動とし、23:00 に就寝させた。実験当日、7:00 に起床させ、エネルギー代謝測定室外で安静にさせた。実験当日、8:00 に規定の朝食を摂らせた（エネルギー摂取量 554kcal、エネルギー構成比：タンパク質 16%、脂肪 22%、炭水化物 62%）。その際、20 分の間に食事を完了するよう指示した。朝食後は、エネルギー代謝測定室外で安静にさせた。

食事摂取実験のスケジュールを表に示した (Table 3、上)。高強度・短時間・間欠的運動日は、10:00 に被験者にエネルギー代謝測定室に入室させ、ダグラスバッグ法で酸素摂取量を測定する目的で、被験者にエネルギー代謝測定室外のダグラスバッグに三方コックで連

結しているホースにマスクを装着させた。ホースの端部は、エネルギー代謝測定室の外側にある三方コックに接続されており、ホースの長さは 1.0m であった。

被験者がエネルギー代謝測定室に入室したと同時に、エネルギー代謝測定室による酸素摂取量の測定を開始した。入室と同時に被験者は、呼気ガス採取用のマスクを装着することにより、この時点では、被験者の呼気は、マスクを通してエネルギー代謝測定室外に送られたため、マスク装着期間におけるエネルギー代謝測定室による測定値は、被験者の呼気による影響を受けない。

10 時 10 分より被験者に自転車エルゴメータを用いて最大酸素摂取量の 50% の強度で 10 分間のウォーミングアップを行なわせ、10 分間の休息の後、10 時 30 分から高強度・短時間・間欠的運動を行なわせた。高強度・短時間・間欠的運動は、最大酸素摂取量の 170% の強度の 20 秒間の運動を 10 秒間の休憩を挟んで、7~8 回で疲労困憊に至る運動であった (Tabata *et al.* 1997)。高強度・短時間・間欠的運動の終了後、マスクを装着した状態で、15 分間自転車エルゴメータ上で安静を保たせた。その後、被験者にマスクを外させた。運動時は、運動負荷が予備測定で行われた実験と同様にするために、エネルギー代謝測定室の窓を通して、エネルギー代謝測定室外側の実験実施者が運動負荷を監視し、室内のスピーカーを備えたマイクを通して口頭で指示を出した。

その後、被験者に退室時刻である 16:00 までベッドにて 20 分間の仰臥位安静と、椅子に座って 10 分間のデスクワークを交互に行わせた。この間、被験者は、読書や、勉強を行なった。被験者が運動や食事の後に昼寝や規定外の行動を取らないよう、被験者の心電図および行動をエネルギー代謝測定室外で常に観察し、規定外の行動があった場合には備え付けのマイクから既定の行動を行うよう指示した。16:00 にエネルギー代謝測定室から退室させた。

昼食は 12 : 00 に摂らせた (エネルギー摂取量 713kcal、エネルギー構成比 : タンパク質 15%、脂肪 25%、炭水化物 60%)。規定食は、日本人の食事摂取基準(日本人の食事摂取基準 2010)より、身体活動レベルを 1.5 と仮定して推定されたエネルギー必要量を算出した。被験者は、食事を全て摂取し、また、エネルギー代謝測定室に滞在中は水を自由に摂取させた。

中等度の強度の運動日は、実験前日の 17:00 にエネルギー代謝測定室へ来室させ、18:00 に規定の夕食を摂らせた。その後、22:30 まで自由行動とし、23:00 に就寝させた。実験当日、7:00 に起床させ、エネルギー代謝測定室外で安静にさせた。被験者に 8:00 に朝食を摂らせた後、9:00 にエネルギー代謝測定室に入室させた。10 時 04 分から中等度の強度の運動を行わせた。中等度の強度の運動は、最大酸素摂取量の 70% の強度で 30 分間の運動であつ

た。酸素摂取量は全てエネルギー代謝測定室内で測定された。運動後は、高強度・短時間・間欠的運動日と同様とした。

非運動日は、高強度・短時間・間欠的運動及び中等度の強度の運動を実施しなかった以外は同様とした。

C) 食事非摂取実験

食事非摂取実験のスケジュールを表に示した（Table 3、下）。高強度・短時間・間欠的運動日及び中等度の強度の運動日に、実験前日の 17:00 にエネルギー代謝測定室へ来室させ、18:00 に規定の夕食を摂らせた。その後、22:30 まで自由行動とし、23:00 に就寝させた。実験当日、7:00 に起床させ、エネルギー代謝測定室外で安静にさせた。被験者に 8 時に朝食を摂らせた後、高強度・短時間・間欠的運動日は 10 時に、中等度の強度の運動日は 9 時にエネルギー代謝測定室に入室させた。被験者に、食事摂取実験と同様に、それぞれ 10 時 30 分と 10 時 04 分から高強度・短時間・間欠的運動と中等度の強度の運動を行わせた。食事非摂取実験では、運動後に昼食を摂らせずにエネルギー代謝測定室に滞在させた。食事を摂らない以外は食事摂取実験と同様のプロトコルに従い、16:00 に退室させた。非運動日は、高強度・短時間・間欠的運動及び中等度の強度の運動を実施しなかった以外は運動日と同様とした。

D) 統計分析

すべての測定値は平均値±標準偏差で表した。二元配置反復測定分散分析（Two way repeated measure ANOVA）を使用してデータを分析して、条件間差異の有意性の程度を決定した。多重比較検定は、Bonferroni 法を用いた。統計の有意性は、危険率 5%未満で有意差ありと判定した。統計分析は統計解析ソフト SigmaPlot13（SYSTAT 社）を用いて行った。

Table 3 Timetable of Lunch experiments and Fasting experiments

食事摂取実験			
	非運動日	運動日	運動日
7:00	起床	起床	起床
8:00-8:20	朝食	朝食	朝食
8:20-10:00	座位安静	座位安静	座位安静
10:00-10:10	自転車エルゴメータ上で安静	自転車エルゴメータ上で安静	自転車エルゴメータ上で安静
10:10-10:20	ウォーミングアップ	ウォーミングアップ	ウォーミングアップ
10:20-10:30		自転車エルゴメータ上で安静	自転車エルゴメータ上で安静
10:30	自転車エルゴメータ上で安静	高強度・短時間・間欠的運動	高強度・短時間・間欠的運動
運動後 - 10:48		自転車エルゴメータ上で安静	自転車エルゴメータ上で安静
10:48-12:00	繰り返し 10分間のデスクワーク 20分間の臥位安静	繰り返し 10分間のデスクワーク 20分間の臥位安静	繰り返し 10分間のデスクワーク 20分間の臥位安静
12:00-12:20	昼食	昼食	昼食
12:20-16:00	繰り返し 10分間のデスクワーク 20分間の臥位安静	繰り返し 10分間のデスクワーク 20分間の臥位安静	繰り返し 10分間のデスクワーク 20分間の臥位安静

食事非摂取実験			
	非運動日	運動日	運動日
7:00	起床	起床	起床
8:00-8:20	朝食	朝食	朝食
8:20-10:00	座位安静	座位安静	座位安静
10:00-10:10	自転車エルゴメータ上で安静	自転車エルゴメータ上で安静	自転車エルゴメータ上で安静
10:10-10:20	ウォーミングアップ	ウォーミングアップ	ウォーミングアップ
10:20-10:30		自転車エルゴメータ上で安静	自転車エルゴメータ上で安静
10:30	自転車エルゴメータ上で安静	高強度・短時間・間欠的運動	高強度・短時間・間欠的運動
運動後 - 10:48		自転車エルゴメータ上で安静	自転車エルゴメータ上で安静
10:48-16:00	繰り返し 10分間のデスクワーク 20分間の臥位安静	繰り返し 10分間のデスクワーク 20分間の臥位安静	繰り返し 10分間のデスクワーク 20分間の臥位安静

3. 結果

A) 酸素摂取量：食事摂取実験

Figure 10 には、食事摂取実験における高強度・短時間・間欠的運動、中等度の強度の運動終了後から 16:00 までの 30 分毎の酸素摂取量を示した。高強度・短時間・間欠的運動日における高強度・短時間・間欠的運動の平均運動時間は、 144 ± 10 秒(127-159 秒)であった。非運動日と比較して、高強度・短時間・間欠的運動日の酸素摂取量は、高強度・短時間・間欠的運動終了後から 11:30 まで有意に高い値を示した ($p < 0.001$)。しかし、11:30 から 12:00、および被験者が昼食を摂取した時刻である 12:00 から 12:30 の酸素摂取量は、両日間で有意な差は認められなかった。昼食後、12:30 から 16:00 の酸素摂取量は、非運動日と比較して、高強度・短時間・間欠的運動日の方が有意に高い値を示した ($p < 0.05$)。

非運動日と比較して、中等度の強度の運動日の酸素摂取量は、中等度の強度の運動終了後から 11:00 ($p < 0.01$) および 11:00 から 11:30 ($p < 0.05$) において、それぞれ有意に高い値を示した。しかし、11:30 から 12:00、および被験者が昼食を摂取した時刻である 12:00 から 12:30 の酸素摂取量は、両日間で有意な差は認められなかった。昼食後、非運動日と比較して、中等度の強度の運動日の酸素摂取量は、12:30 から 13:00、および 15:30 から 16:00 まで有意に高い値を示した ($p < 0.05$)。

運動終了時から 11:00 ($p < 0.001$)、11:00 から 11:30 ($p < 0.001$)、および 13:00 から 13:30 ($p < 0.05$) の酸素摂取量は、中等度の強度の運動日と比較して高強度・短時間・間欠的運動日の方が有意に高い値を示した。

高強度・短時間・間欠的運動日、中等度の強度の運動日、および非運動日の 10:34 から 16:00 までの総酸素摂取量は、それぞれ 1578.6 ± 74.3 、 1459.0 ± 79.4 、および 1399.9 ± 70.7 mL \cdot kg⁻¹ であった。非運動日の総酸素摂取量は、中等度の強度の運動日および高強度・短時間・間欠的運動日より有意に低い値を示した ($p < 0.001$)。また、高強度・短時間・間欠的運動日の 10:34 から 16:00 までの総酸素摂取量は、中等度の強度の運動日と比較して有意に高い

値を示した ($p < 0.01$)。

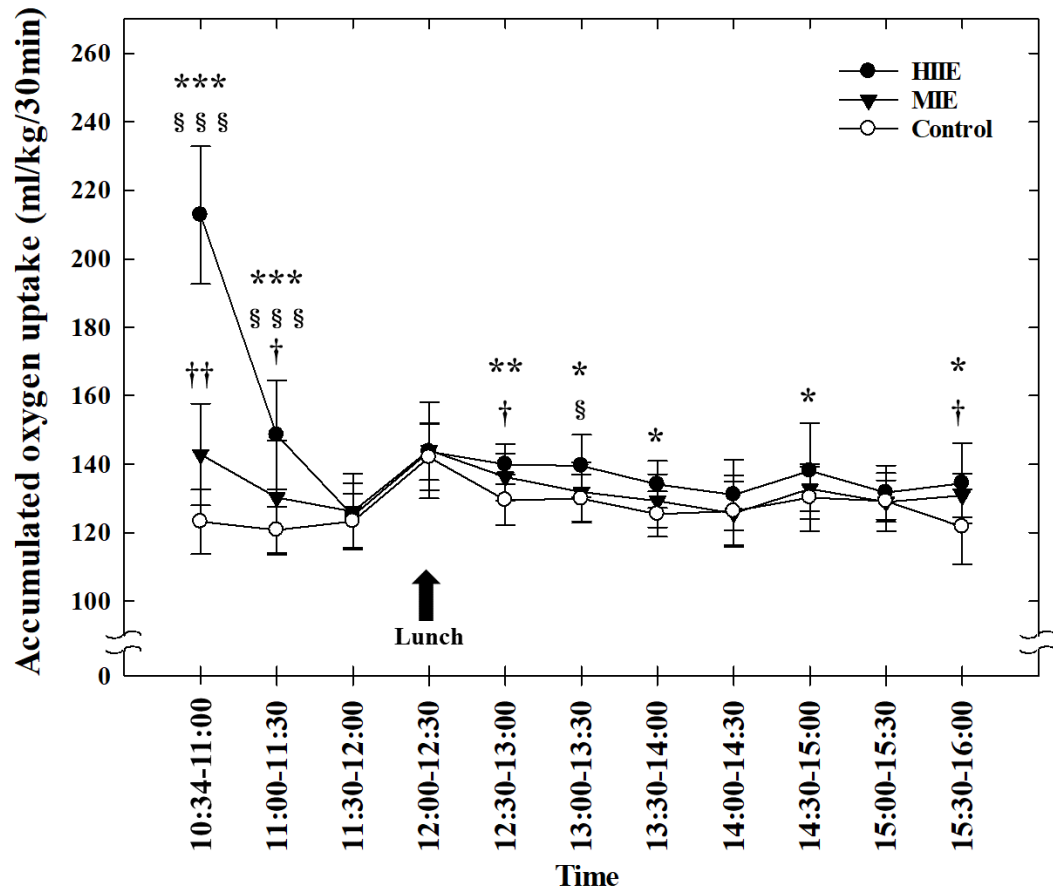


Figure 10 Effect of lunch on the accumulated resting oxygen uptake after MIE and HIEE (mean \pm SD) (Lunch experiments). ††p < 0.01, †p < 0.05, MIE vs. the non-exercise control day. ***p < 0.001, **p < 0.01, *p < 0.05, HIEE vs. the non-exercise control day. §§§p < 0.001, §p < 0.05, MIE vs. HIEE.

B) 酸素摂取量：食事非摂取実験

Figure 11 には、食事非摂取実験における高強度・短時間・間欠的運動、中等度の強度の運動終了後から 16:00 までの 30 分毎の酸素摂取量を示した。高強度・短時間・間欠的運動日における高強度・短時間・間欠的運動の平均運動時間は 143 ± 10 秒(127-159 秒)であり、食事摂取実験と有意な差は認められなかった。非運動日と比較して、高強度・短時間・間欠的運動日の酸素摂取量は、高強度・短時間・間欠的運動終了後から 11:30 まで有意に高い値を示した ($p < 0.001$)。しかし、11:30 から 16:00 の酸素摂取量は、両日間で有意な差は認められなかった。

非運動日と比較して、中等度の強度の運動日の酸素摂取量は、中等度の強度の運動終了後から 11:00 ($p < 0.01$) および 11:00 から 11:30 ($p < 0.05$) において、それぞれ有意に高い値を示した。しかし、11:30 から 16:00 の酸素摂取量は、両日間で有意な差は認められなかった。

運動終了時から 11:00 ($p < 0.001$)、11:00 から 11:30 ($p < 0.001$) の酸素摂取量は、中等度の強度の運動日と比較して高強度・短時間・間欠的運動日の方が有意に高い値を示した。しかし、11:30 以降の酸素摂取量に有意な差は認められなかった。

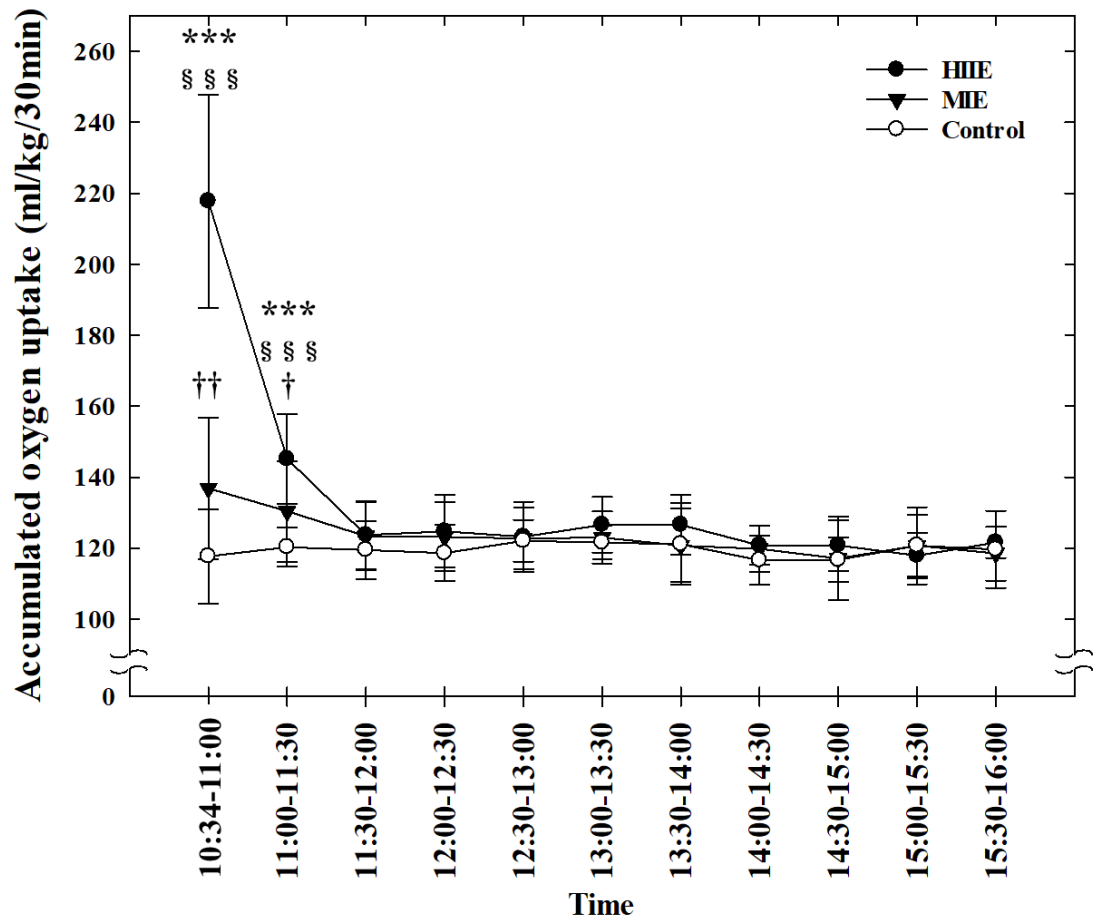


Figure 11 The accumulated resting oxygen uptake after MIE and HIIE without lunch (mean \pm SD) (Fasting experiments). $\dagger\dagger p < 0.01$, $\dagger p < 0.05$, MIE vs. the non-exercise control day. $***p < 0.001$, HIIE vs. the non-exercise control day. $§§§p < 0.001$, MIE vs. HIIE.

高強度・短時間・間欠的運動の 10 分間のウォーミングアップ中の酸素摂取量は、 $221.6 \pm 14.0 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ であった (Table 4)。中等度の強度の運動中の総酸素摂取量は、高強度・短時間・間欠的運動中の総酸素摂取量よりも有意に高かった。EPOC は、運動日 (中等度の強度の運動または高強度・短時間・間欠的運動) と非運動日の 10:34 から 11:30 までの安静時の総酸素摂取量の差として計算した。高強度・短時間・間欠的運動日と非運動日の 10:34 から 11:30 までの安静時の総酸素摂取量の差 ($139.0 \pm 23.6 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$) として計算された EPOC は、中等度の強度の運動日の EPOC ($50.8 \pm 17.3 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$) よりも有意に高かった ($p < 0.01$)。

食事摂取実験 ($1034.3 \pm 52.6 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$) と食事非摂取実験 ($957.1 \pm 46.2 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$) の 12:00 から 16:00 の安静時の総酸素摂取量の差として計算された、非運動日の食後の安静時酸素摂取量の増加 (DIT) は $77.8 \pm 40.7 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ であった (Table 4)。高強度・短時間・間欠的運動日および中等度の強度の運動日の DIT 値は、それぞれ $132.7 \pm 37.2 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ および $102.8 \pm 48.0 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ であった。中等度の強度の運動日と非運動日の DIT の差として計算された、中等度の強度の運動日 ($25.0 \pm 17.8 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$) の食事による DIT の増加 (ΔDIT) は、高強度・短時間・間欠的運動日の ΔDIT ($55.0 \pm 25.4 \text{ mL}$) より有意に低い値を示した ($p < 0.01$)。

Table 4 Accumulated oxygen uptake (AOU), excess post-exercise oxygen consumption (EPOC), diet-induced thermogenesis (DIT), and Δ DIT in the lunch and fasting experiments (n = 8)

(ml•kg ⁻¹)	Lunch Experiments			Fasting Experiments		
	HIE	MIE	Control	HIE	MIE	Control
AOU during 10-min warm-up exercise	221.6 ± 14.0			222.5 ± 15.3		
AOU during exercise	131.2 ± 24.3***	1083.6 ± 173.2		127.9 ± 18.0***	1075.0 ± 196.4	
10:34-11:30						
AOU	361.3 ± 31.6***§§§	273.1 ± 29.7†††	222.3 ± 18.0	362.9 ± 39.7***§§§	267.3 ± 32.3†††	228.0 ± 10.7
EPOC	139.0 ± 23.6***	50.8 ± 17.3		134.9 ± 33.5***	39.3 ± 26.1	
12:00-16:00						
AOU	1092.4 ± 51.8***§§§	1059.7 ± 46.5†	1034.3 ± 52.6	959.7 ± 43.7***§§§	956.9 ± 43.8†	956.5 ± 45.4
DIT	132.7 ± 37.2***§	102.8 ± 48.0	77.8 ± 40.7			
Δ DIT	55.0 ± 25.4**	25.0 ± 17.8				

***p < 0.001, **p < 0.01, HIE vs. the non-exercise control day. †††p < 0.001, ††p < 0.01, †p < 0.05
MIE vs. the non-exercise control day. §§§p < 0.001, §p < 0.05, HIE vs. MIE.

C) 二酸化炭素排出量：食事摂取実験

食事摂取実験における高強度・短時間・間欠的運動、中等度の強度の運動終了後から 16:00 までの 30 分毎の二酸化炭素排出量を示した (Figure 12)。高強度・短時間・間欠的運動後 10:34 から 11:00 の間の総二酸化炭素生産量は、中等度の強度の運動および非運動日のものより有意に高かった。この期間後、3 条件間で有意な差は認められなかった。

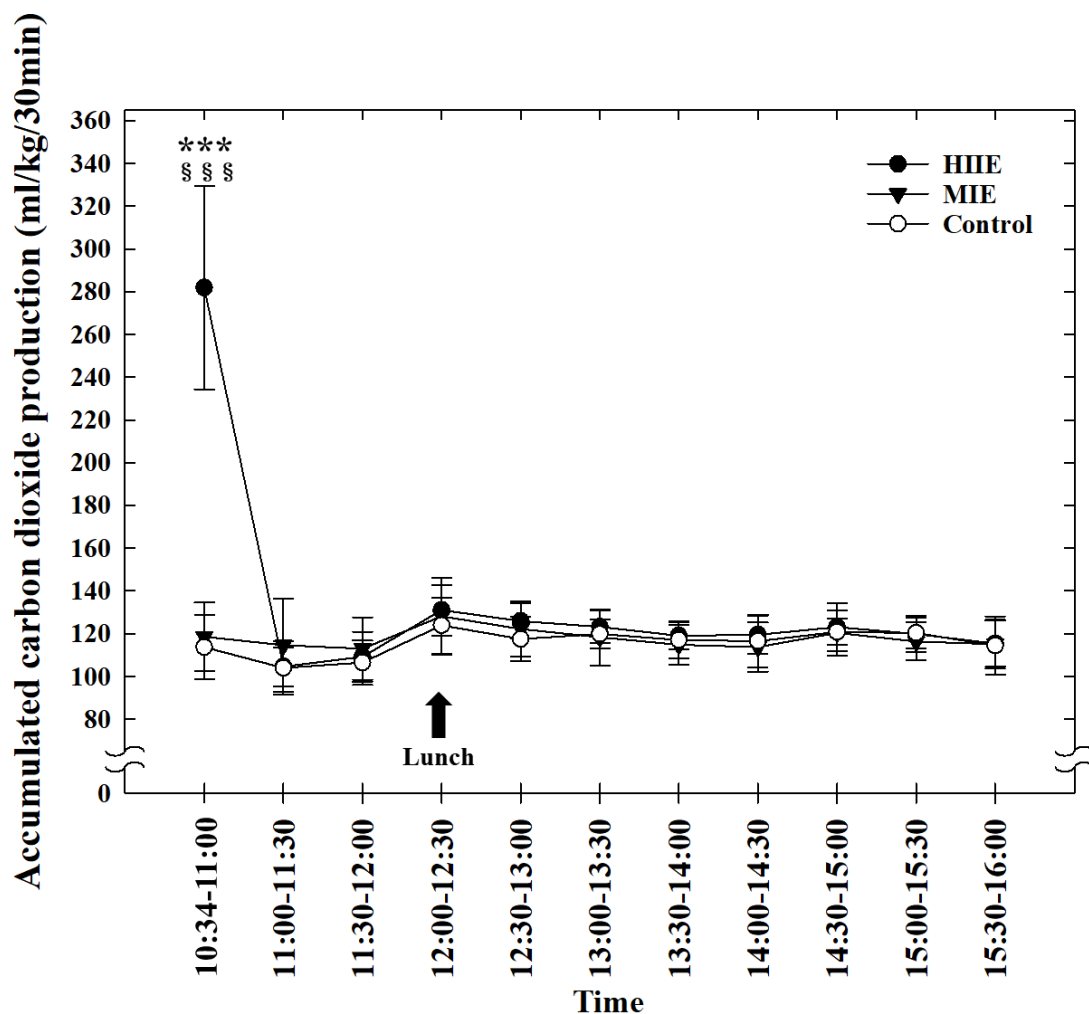


Figure 12 Effect of lunch on the accumulated resting carbon dioxide production after MIE and HIIE (mean \pm SD) (Lunch experiments). *** $p < 0.001$, HIIE vs. the non-exercise control day. §§§ $p < 0.001$, MIE vs. HIIE.

D) 二酸化炭素排出量：食事非摂取実験

食事非摂取実験における高強度・短時間・間欠的運動、中等度の強度の運動終了後から 16:00 までの 30 分毎の二酸化炭素排出量を示した (Figure 13)。高強度・短時間・間欠的運動後 10:34 から 11:00 の間の総二酸化炭素生産量は、中等度の強度の運動および非運動日のものよりも有意に高かった。この期間後、3 条件間で有意な差は認められなかった。

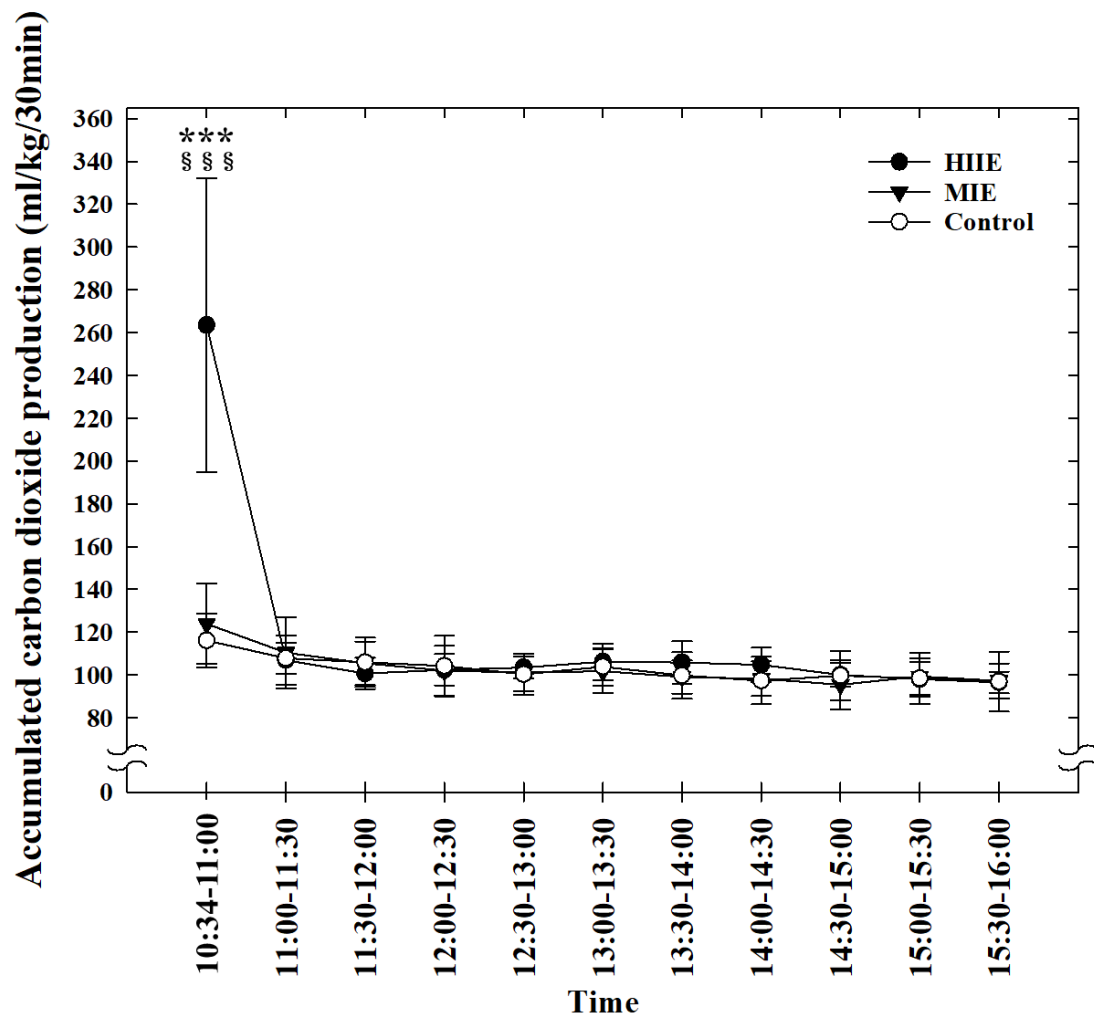


Figure 13 The accumulated resting carbon dioxide production after MIE and HIIE without lunch (mean \pm SD) (Fasting experiments). *** $p < 0.001$, HIIE vs. the non-exercise control day. §§§ $p < 0.001$, MIE vs. HIIE.

E) 呼吸商 (RQ) と呼吸交換率 (R) : 食事摂取実験

食事摂取実験における高強度・短時間・間欠的運動、中等度の強度の運動終了後から 16:00 までの 30 分毎の呼吸商 (RQ) と呼吸交換率 (R) を示した (Figure 14)。10:34 から 10:48 に観察された高強度・短時間・間欠的運動の RQ (R) は、中等度の強度の運動および非運動日より有意に高かった ($p < 0.001$)。10:48 から 12:00 の高強度・短時間・間欠的運動の RQ (R) は、中等度の強度の運動および非運動日に観察されたものより有意に低かった。昼食後、3 条件間で有意な差は認められなかった。

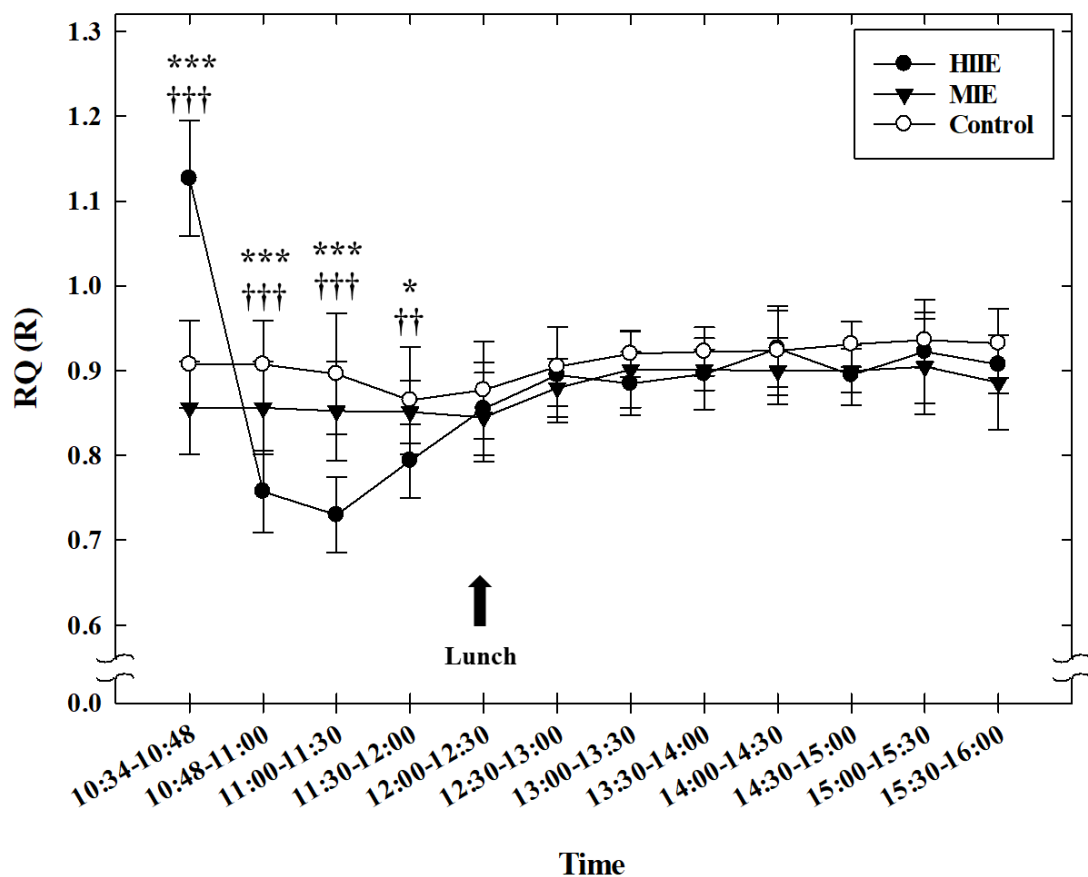


Figure 14 Effect of lunch on the RQ (R) after MIE and HIIE (mean \pm SD) (Lunch experiments).

††† $p < 0.001$, †† $p < 0.01$, MIE vs. the non-exercise control day. *** $p < 0.001$, * $p < 0.05$, HIIE vs. the non-exercise control day.

F) 呼吸商 (RQ) と呼吸交換率 (R) : 食事非摂取実験

食事非摂取実験における高強度・短時間・間欠的運動、中等度の強度の運動終了後から16:00までの30分毎の呼吸商 (RQ) と呼吸交換率 (R) を示した (Figure 15)。10:34から10:48に観察された高強度・短時間・間欠的運動の RQ (R) は、中等度の強度の運動および非運動日より有意に高かった ($p < 0.001$)。10:48から12:00の高強度・短時間・間欠的運動の RQ (R) は、中等度の強度の運動および非運動日に観察されたものより有意に低かった。昼食後、3条件間で有意な差は認められなかった。

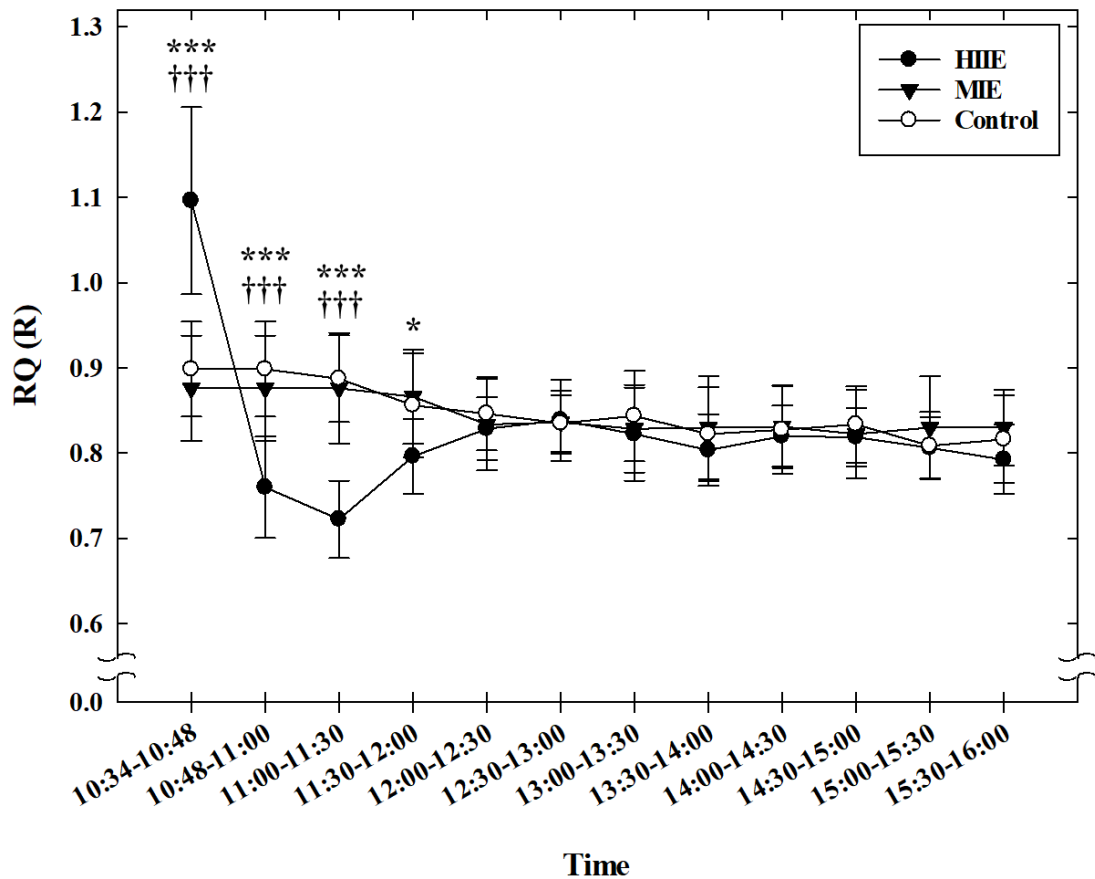


Figure 15 The RQ (R) after MIE and HIIE without lunch (mean \pm SD) (fasting experiments). $\dagger\dagger\dagger p < 0.001$, MIE vs. the non-exercise control day. $***p < 0.001$, $*p < 0.05$, HIIE vs. the non-exercise control day.

G) エネルギー消費量 (kcal) : 食事摂取実験

食事摂取実験における 12:00 から 16:00 までの 30 分毎のエネルギー消費量を示した (Figure 16)。高強度・短時間・間欠的運動日の 12:30～13:00 (昼食後 30～60 分) および 13:00～13:30 (昼食後 60～90 分) のエネルギー消費量は、非運動日と比較してそれぞれ有意に高かった ($p < 0.01$ および $p < 0.05$)。中等度の強度の運動日の 12:30～13:00 (昼食後 30 分から 60 分) の間のエネルギー消費値は、高強度・短時間・間欠的運動日より有意に低かった ($p < 0.05$)。高強度・短時間・間欠的運動日の 15:30～16:00 のエネルギー消費量は、非運動日により有意に高かった ($p < 0.05$)。

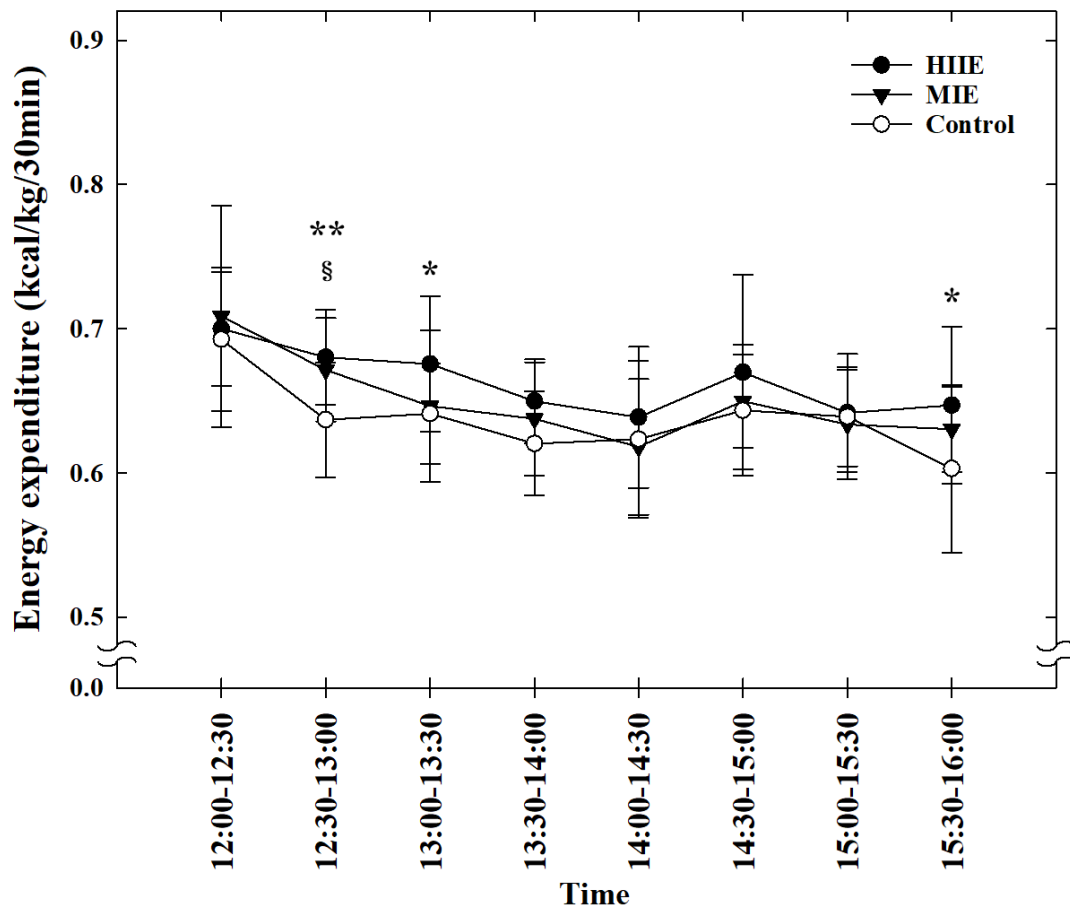


Figure 16 Effect of lunch on the energy expenditure after MIE and HIE (mean \pm SD). ††† $p < 0.001$, †† $p < 0.01$, † $p < 0.05$, MIE vs. the non-exercise control day. *** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$, HIE vs. the non-exercise control day. §§§ $p < 0.001$, §§ $p < 0.01$, § $p < 0.05$, MIE vs. HIE.

H) エネルギー消費量 (kcal) : 食事非摂取実験

食事非摂取実験における 12:00 から 16:00 までの 30 分毎のエネルギー消費量を示した (Figure 17)。食事非摂取実験では、3 条件間でエネルギー消費に有意な差は認められなかった。

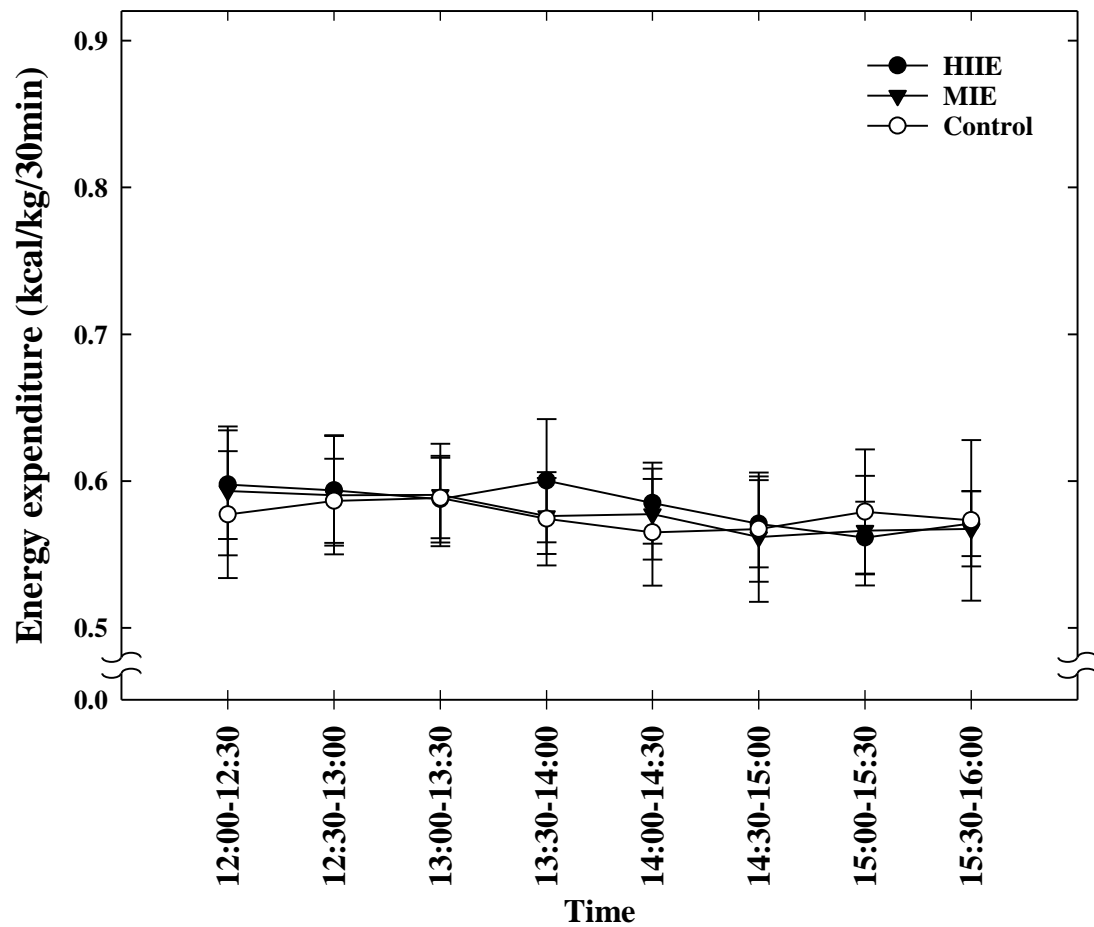


Figure 17 The energy expenditure after MIE and HIIE without lunch (mean \pm SD) (Fasting experiments). $\dagger\dagger\dagger p < 0.001$, $\dagger\dagger p < 0.01$, $\dagger p < 0.05$, MIE vs. the non-exercise control day. $***p < 0.001$, $**p < 0.01$, $*p < 0.05$, HIIE vs. the non-exercise control day. $$$$p < 0.001$, $$$p < 0.01$, $$p < 0.05$, MIE vs. HIIE.

4. 考察

本研究課題では、高強度・短時間・間欠的運動後の Δ DIT が、中等度の強度の運動後に観察されたものより有意に多いことを明らかにした。また、同一被験者に対して運動日、非運動日ともに食事摂取、食事非摂取実験を実施したことによって、研究課題 1-1 により明らかにできなかった DIT を正確に示すことが可能となった。また、これによって Δ DIT は、運動日の運動後における食後の安静時酸素摂取量の増加と DIT の差を示し、運動による DIT の増加分を示した。

研究課題 1-1 における高強度・短時間・間欠的運動後の Δ DIT (12:00-16:00) は 60.6 ± 40.0 mL \cdot kg⁻¹ であったのに対して、本研究課題における高強度・短時間・間欠的運動後の Δ DIT (12:00-16:00) は 55.0 ± 25.4 mL \cdot kg⁻¹ となったため、同様の結果が得られた。一方、中等度の強度の運動後の Δ DIT (12:00-16:00) は 25.0 ± 17.8 mL \cdot kg⁻¹ であった。本研究課題での新たな知見は、高強度・短時間・間欠的運動の運動時の総酸素摂取量（昼食摂取実験： 131.2 ± 24.3 mL \cdot kg⁻¹）は、中等度の強度の運動の運動時の総酸素摂取量（昼食摂取実験： 1083.6 ± 173.2 mL \cdot kg⁻¹）よりはるかに小さいにもかかわらず、高強度・短時間・間欠的運動後の Δ DIT が中等度の強度の運動後の Δ DIT よりも大きいことを明らかにした。

本研究課題では高強度・短時間・間欠的運動と中等度の強度の運動の運動時のエネルギー消費量と酸素借を均一にすることは出来なかった。ただし、最大酸素摂取量の 70% の強度での運動後のグリコーゲン分解量は高強度・短時間・間欠的運動後のグリコーゲン分解量と同等であると考えられるため(Choi *et al.* 1994, Medbo *et al.* 1988, Saltin and Karlsson 1971)、高強度・短時間・間欠的運動および中等度の強度の運動の運動時に用いられる主要なエネルギー基質であるグリコーゲン分解量を調整した。その結果、高強度・短時間・間欠的運動後の Δ DIT が中等度の強度の運動後に観察されたものより高いことを示した。したがって、エネルギー収支（運動中の酸素摂取量）自体が Δ DIT に影響を与える主な要因となるとは考えられない。しかし、高強度・短時間・間欠的運動及び中等度の強度の運動とエネルギー消費量

(運動時のエネルギー消費量および EPOC を含む) が同等となるような研究を実施し、食事前のエネルギー収支の差が Δ DIT に及ぼす影響を正確にする必要がある。

酸素摂取量の結果 (Figure 10、Figure 11) に加えて、Figure 12 から Figure 17 は 12:00 以降における二酸化炭素生成量および RQ (R) が食事摂取実験、食事非摂取実験の運動日、非運動日の条件の間で有意な差がなかったことを示している。これらは、安静時代謝に対する中等度の強度の運動と高強度・短時間・間欠的運動の急性効果が 12:00 までに消失したことを示唆している。

Bahr and Sejersted (1991)は、最大酸素摂取量の 75%の強度で 80 分間の自転車運動を実施した 2 時間後に 4.5MJ の食事を摂らせた場合では、食事非摂取実験と比較して酸素摂取量の有意な増加が認められなかったと報告した。Broeder *et al.* (1991)は、最大酸素摂取量の 30%および 60%の強度での自転車運動を実施させた直後に食事を摂らせたことによる酸素摂取量の増大を観測しなかったと報告している。Willms and Plowman (1991)は、最大酸素摂取量の 56%の強度でトレッドミルで歩行した場合の運動直後に摂らせた食事による酸素摂取量は増大しなかったとしている。しかし、Young *et al.* (1986)は、中強度運動 (最大酸素摂取量の 70%の強度で 45 分間) 後の安静時酸素摂取量に対する食事の影響が示されている。

本研究課題では、中等度の強度の運動の 1.5 時間後に摂らせた食事は、安静時酸素摂取量を有意に増加させた。安静時の酸素摂取量に対する食事の影響は、食事から少なくとも 20 分後に始まると報告されている (Scott *et al.* 2007)。本研究課題では、中等度の強度の運動後における昼食後に、非運動日より安静時酸素摂取量が高くなることを観察した。これらのことから、12:00~16:00 の安静時酸素摂取量の上昇は食事によるものであり、この上昇は中等度の強度の運動によって増強されることを示唆している。

中等度の強度の運動後に観察された Δ DIT について、本研究課題と先行研究の方法論の違いにより、これまで明らかとされてこなかった可能性がある。本研究課題では、中等度の強度の運動により誘発される Δ DIT 自体が非常に小さい値であったため (体重 67.9 ± 7.7 kg の

被験者では 25.0 mL / kg)、食事を中等度の強度の運動直後に摂取していた場合、安静時の酸素摂取量に対する食事の影響は中等度の強度の運動直後の EPOC の影響により見落としていた可能性がある (Figure 10)。本研究課題では、中等度の強度の運動及び高強度・短時間・間欠的運動後における安静時代謝（酸素摂取量、二酸化炭素産生量、および RQ [R]）が非運動日と差が無くなった後に昼食が供与されたために、僅かな Δ DIT を検出することができた。

5. 結論

本研究課題では、高強度・短時間・間欠的運動の ΔDIT は、中等度の強度の運動より有意に大きいことを明らかにした。

第4章 高強度・短時間・間欠的運動時における高濃度酸素吸入が運動後の酸素摂取量及び直腸温・筋温に与える影響（研究課題2）

1. 緒言

研究課題 1-1 において、高強度・短時間・間欠的運動後の安静時酸素摂取量、特に食事誘発性エネルギー産生に関連した酸素摂取量（ Δ DIT）が高くなることを明らかにした。しかし、そのエネルギー消費量は、それほど大きくなかった。そこで、本研究課題では高強度・短時間・間欠的運動における運動中および運動後のエネルギー消費量を高くするための方法論を開発することを目的とした。

研究課題 1-1 において、高強度・短時間・間欠的運動後の安静時の総酸素摂取量が 12 時間以上高くなり、さらに、増加した酸素摂取量の総量が、運動時の総仕事量との間に有意な正の相関関係がある（ $r=0.743$, $p<0.05$ ）ことが明らかになった。また、運動中に通常空気よりも高濃度の酸素を吸入させると、運動中に発揮できる仕事量が増加することが知られている(Sperlich *et al.* 2016, Welch 1982)。また、運動強度が高いほど、EPOC も増加することが知られている(Laforgia *et al.* 2006)。これらの先行研究の結果は、高強度・短時間・間欠的運動中に高濃度の酸素を吸入させると、仕事量が増加し、それにより運動後の EPOC を増加させ、総エネルギー消費量が増大する可能性がある。

また、EPOC の機序について、Gaesser and Brooks (1984)は、体温または運動中の主働筋の筋温、或いはその両方が EPOC の量に影響を及ぼす要因となる可能性があると指摘した。また、Chad and Wenger (1988)は、鼓膜温を深部体温とした場合に、最大酸素摂取量の 70% の強度で 30 分、60 分、75 分のそれぞれの運動後 30 分間及び 60 分間の EPOC と鼓膜温（ $r=0.64-0.75$ ）との間に有意な相関があることを報告した。さらに、Frey *et al.* (1993)らは、運動中に 300kcal のエネルギーを消費するような最大酸素摂取量の 80% の高強度運動後の EPOC、特に EPOC の構成要素の内、長時間継続する成分と直腸温との間に高い相関がある

($r=0.89$) ことを報告した。しかし、筋温が運動後の酸素摂取量に影響を与えていることが実証されているにも関わらず、ヒトの筋温と EPOC との関係について未だ明らかになっていない(Brooks *et al.* 1971, Hagberg *et al.* 1980)。したがって、体温に対する運動時の仕事量の増大あるいは運動後の酸素摂取量が及ぼす影響を明らかにすることは、生理学的に意義があると考えられる。

そこで、本研究課題の目的は、高濃度の酸素を吸入させて高強度・短時間・間欠的運動を行った場合の運動後の安静時の酸素摂取量を通常空気吸入条件の値と比べることとした。さらに、高強度・短時間・間欠的運動が体温に与える影響を観察することとした。

2. 方法

被験者は、健常な成人男性 8 名であった。被験者の年齢、身長、体重、BMI、最大酸素摂取量は、それぞれ 23 ± 2 歳、 1.71 ± 0.05 m、 65.1 ± 9.0 kg、 22.1 ± 1.7 kg \cdot m⁻¹ \cdot m⁻¹、 48.2 ± 6.5 mL \cdot kg⁻¹ min⁻¹ であった。

本研究課題は、エネルギー代謝測定室を用いて、高濃度酸素吸入による高強度・短時間・間欠的運動後の急性効果を詳細に検討するために、高強度・短時間・間欠的運動開始から 3.5 時間の酸素摂取量、直腸温、筋温を測定し、運動中に通常空気を吸入させた条件（通常空気吸入条件）と高濃度酸素を吸入させた条件（高濃度酸素吸入条件）の 2 条件で構成された。各条件の順序はランダムとし、試技の間隔は少なくとも 1 週間の間を設けた。全ての運動は、Monark 社製の自転車エルゴメータ(Ergomedic 828E, Monark, Stockholm, Sweden)を用いた。

本研究課題に関わる実験や手順は、立命館大学倫理委員会の承認を受けた（BKC-IRB-2015-016）。各被験者に対して、研究の目的、利益、及び危険性の詳細な説明を行った後、書面により同意を得た。心血管疾患、貧血、糖尿病、腎または肝疾患、甲状腺機能低下症または甲状腺機能亢進症、または筋骨格系に問題があった被験者は除外した。喫煙者、投薬を受

けた人も除外した。被験者には、実験期間中に食事や運動習慣を変更しないように指示した。

A) 予備測定

各被験者について、自転車エルゴメータ運動における最大下の運動強度 (watts) と酸素摂取量 ($L \cdot min^{-1}$) の関係及び最大酸素摂取量の測定方法は研究課題 1-1 と同様とした。

高濃度酸素吸入時の運動負荷の設定については、通常空気吸入時の運動負荷に 5% 程度加算して運動を行なわせ、6 セットより少ない回数で疲労困憊に至った場合は負荷を下げ、8 セット以上行なうことができた場合は負荷を上げることによって、7~8 セットの間で疲労困憊に至るよう調節した。最大下の運動強度の酸素摂取量の測定、最大酸素摂取量の測定、高強度・短時間・間欠的運動時の運動強度の決定は、3~4 日間かけて行った。

B) 通常空気吸引条件

予備測定終了後少なくとも 1 週間の間を空けて、通常空気吸引条件または高酸素吸引条件のいずれかを行った。実験の順序は、各被験者でランダム化された。

被験者には、各実験の前日に運動を控えるよう指示した。また、実験前日は通常の食事を摂るよう指示し、記録させた。実験の 24 時間前からアルコールまたはカフェインを摂らないよう指示した。これらは、両条件で統一した。また、エネルギー代謝測定室の環境に慣れさせるために、初回の実験の数日前に被験者をエネルギー代謝測定室に 2 時間程度滞在させた。

通常空気吸引件では、高強度・短時間・間欠的運動後 14:00 までエネルギー代謝測定室に滞在させた。実験前日、17:00 にエネルギー代謝測定室へ来室させ、18:00 に規定の夕食を摂らせた。その後、22:30 まで自由行動とし、23:00 に就寝させた。実験当日、7:00 に起床させ、エネルギー代謝測定室外で安静にさせた。実験当日、8:00 に規定の朝食を摂らせた (エネルギー摂取量 554kcal、エネルギー構成比: タンパク質 16%、脂肪 22%、炭水化物 62%)。

その際、20 分の間に食事を完了するよう指示した。朝食後は、エネルギー代謝測定室外で安静にさせた。

高強度・短時間・間欠的運動日は、10:00 に被験者にエネルギー代謝測定室に入室させ、ダグラスバッグ法で酸素摂取量を測定する目的で、被験者にエネルギー代謝測定室外のダグラスバッグに三方コックで連結しているホースにマスクを装着させた。ホースの端部は、エネルギー代謝測定室の外側にある三方コックに接続されており、ホースの長さは 1.0m であった。

被験者がエネルギー代謝測定室に入室したと同時に、エネルギー代謝測定室による酸素摂取量の測定を開始した。入室と同時に被験者は、呼気ガス採取用のマスクを装着することにより、この時点では、被験者の呼気は、マスクを通してエネルギー代謝測定室外に送られたため、マスク装着期間におけるエネルギー代謝測定室による測定値は、被験者の呼気による影響を受けなかった。

10 時 10 分より被験者に自転車エルゴメータを用いて最大酸素摂取量の 50%の強度で 10 分間のウォーミングアップを行なわせ、10 分間の休息の後、10 時 30 分から高強度・短時間・間欠的運動を行なわせた。高強度・短時間・間欠的運動は、最大酸素摂取量の 170%の強度の 20 秒間の運動を 10 秒間の休憩を挟んで、7~8 回で疲労困憊に至る運動であった。高強度・短時間・間欠的運動の終了後、マスクを装着した状態で、15 分間自転車エルゴメータ上で安静を保たせた。その後、被験者にマスクを外させた。運動時は、運動負荷が予備測定で行われた実験と同様にするために、エネルギー代謝測定室の窓を通して、エネルギー代謝測定室外側の実験実施者が運動負荷を監視し、室内のスピーカーを備えたマイクを通して口頭で指示を出した。

その後、被験者に退室時刻である 14:00 までベッドにて 20 分間の仰臥位安静と、椅子に座って 10 分間のデスクワークを交互に行わせた。この間、被験者は、読書や、勉強を行なった。被験者が運動や食事の後に昼寝や規定外の行動を取らないよう、被験者の心電図およ

び行動をエネルギー代謝測定室外で常に観察し、規定外の行動があった場合には備え付けのマイクから既定の行動を行うよう指示した。14:00 にエネルギー代謝測定室から退室させた。

エネルギー代謝測定室滞在中は、水のみ自由引水可とした。

C) 高濃度酸素吸入条件

高濃度酸素吸入条件では、被験者に高強度・短時間・間欠的運動を行わせた際に高濃度酸素（60%O₂：40%N₂）を吸引させたことを除いて、通常空気吸入条件と同様とした。

高濃度酸素は、実験開始前にエネルギー代謝測定室の外側に 2 から 3 個のダグラスバッグに貯めておいた。運動中、被験者は、高濃度酸素の入ったダグラスバッグに接続されたホースに取り付けられたマスクを通して、高濃度酸素を吸入した。運動は、予備測定で設定された負荷で、20 秒間の運動を 10 秒間の休憩を挟んで、7～8 回で疲労困憊に至る運動であった。被験者の運動終了直後に、高濃度酸素の入ったダグラスバッグに接続された三方活栓を他のホースの側に切り替えることによって、ホースに接続されたマスクを通して通常空気を吸入した。三方活栓の切り替えの操作は、エネルギー代謝測定室の外側の実験実施者によって行われた。運動終了直後から 30 秒間の酸素摂取量は、体内に残存した高濃度酸素と通常空気が混合したものとなり、正確な酸素摂取量を算出することは不可能であるため、測定対象外とした(Welch and Pedersen 1981)。

D) 直腸温及び筋温の測定方法

被験者自身に、直腸温を測定するためのプローブを肛門から 10-15cm 程度挿入させた(Brajkovic and Ducharme 2005, Matsukawa *et al.* 1996, Yamakage *et al.* 2002)。直腸温は、実験中、温度計（NT Logger N543、日揮 - サーモ、東京、日本）によって連続的に記録した。筋温は、自転車運動を行なう際の主働筋である大腿直筋の温度変化を測定するために、コアテ

ンプ（CTM-205、Terumo、Tokyo、Japan）を用いて、プローブを被験者の膝蓋骨の上端から 15cm 上の左大腿部に置き、サージカルテープで固定した。測定された温度は、パーソナルコンピュータによって 1 分間隔で記録された。

G) 運動後の酸素摂取量の計算方法

エネルギー代謝測定室により測定された酸素摂取量は、運動終了 15 分後である 10:48 以降に得られた酸素摂取量から使用し、1 分毎に算出されている酸素摂取量を各分析期間に応じて総じた。その際、運動終了時点から 11:00 の総酸素摂取量は、運動終了時点から 10:48 にダグラスバッグ法により測定された総酸素摂取量と 10:48 以降にエネルギー代謝測定室で測定された総酸素摂取量を総じた。11:00 以降の酸素摂取量は、30 分毎に酸素摂取量を総じた。

E) 統計分析

すべての測定値は平均値±標準偏差で表した。二元配置反復測定分散分析（Two way repeated measure ANOVA）を使用してデータを分析して、条件間差異の有意性の程度を決定した。多重比較検定は、Bonferroni 法を用いた。項目間の相関関係の検討には、Pearson の積率相関係数（Pearson Product Moment）を用いた。統計の有意性は、危険率 5%未満で有意差ありと判定した。統計分析は統計解析ソフト SigmaPlot13（SYSTAT 社）を用いて行った。

3. 結果

A) 仕事量

高強度・短時間・間欠的運動の運動時の総仕事量は、通常空気吸入条件 ($811 \pm 156 \text{ J/kg}$) と比較して、高濃度酸素吸入条件 ($881 \pm 141 \text{ J/kg}$) の方が有意に高く ($p < 0.05$)、その差は $70 \pm 32 \text{ J/kg}$ であった。運動時間は、通常空気吸入条件 (140 ± 9 秒; 128~156 秒) 及び高濃度酸素吸入条件 (141 ± 10 秒; 126-157 秒) の間で有意な差は認められなかった。

B) 運動後の酸素摂取量

通常空気吸入条件及び高濃度酸素吸入条件の酸素摂取量は、高強度・短時間・間欠的運動後に増加し、回復期間中に徐々に減少した (Figure 18)。10:34 から 11:00 (高強度・短時間・間欠的運動直後から 26 分間) の安静時の酸素摂取量は、通常空気吸入条件と比較して、高濃度酸素吸入条件が有意に高かった ($p < 0.05$)。しかし、その後の酸素摂取量に有意な差は認められなかった。また、通常空気吸入条件と比較して、高濃度酸素吸入条件の酸素摂取量 ($\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1} \text{分}^{-1}$) は、高強度・短時間・間欠的運動終了後 0.5 分から 2.5 分まで有意に高かった (Table 5)。この期間の後においては、酸素摂取量に有意な差は認められなかった。高濃度酸素吸入条件の高強度・短時間・間欠的運動終了後 0.5 分から 2.5 分の総酸素摂取量 ($46.3 \pm 11.5 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$) は、通常空気吸入条件 ($31.2 \pm 9.0 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$) より有意に高かった ($p < 0.05$)。高濃度酸素吸入条件と通常空気吸入条件の総酸素摂取量の差は、 $15.1 \pm 11.4 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ であった。

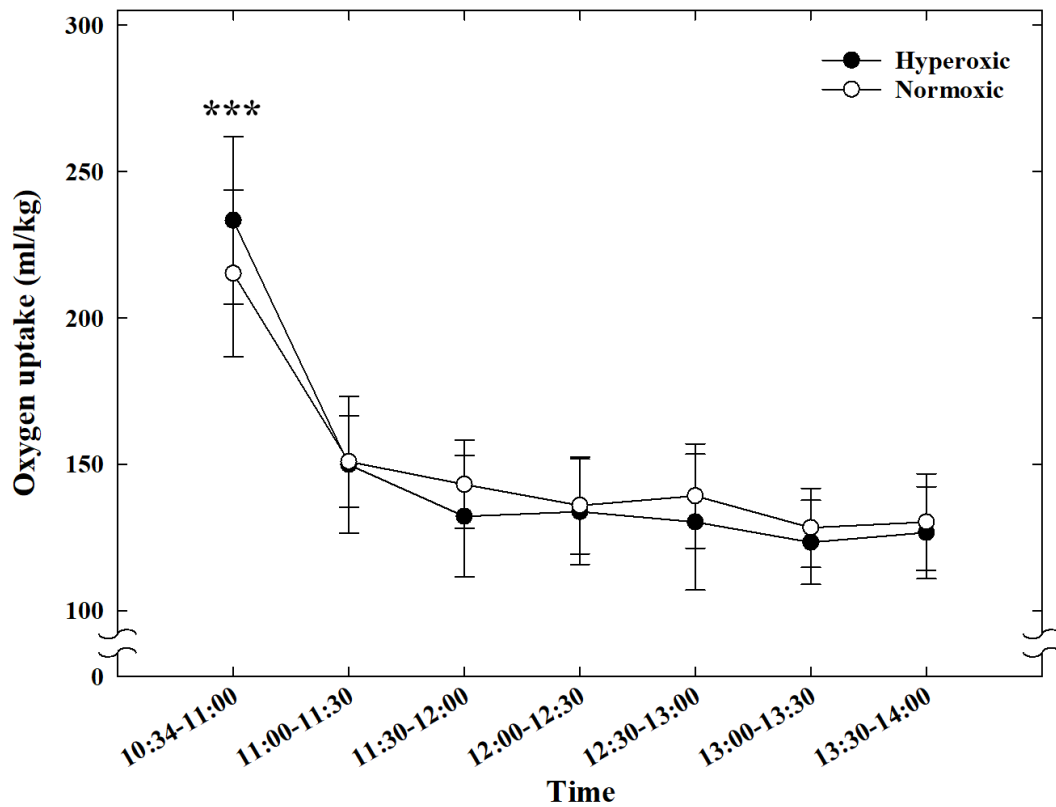


Figure 18 Effects of HIIE on resting oxygen uptake in N and H (means \pm SDs). ***, **, and * indicate significant differences between H and at $p<0.001$, $p<0.01$ and $p<0.05$, respectively. N, normoxia; H, hyperoxia

Time after HIIE (min)	Resting oxygen uptake (ml \cdot kg $^{-1}\cdot$ min $^{-1}$)	
	N	H
10:34-10:36	15.8 \pm 4.8	23.0 \pm 5.8 **
10:36-10:38	10.7 \pm 3.6	12.2 \pm 3.2
10:38-10:40	9.8 \pm 1.8	9.2 \pm 2.5
10:40-10:43	7.9 \pm 1.9	7.6 \pm 1.7
10:43-10:48	6.9 \pm 1.3	7.0 \pm 1.1

Table 5 Resting oxygen uptake (mL \cdot kg $^{-1}\cdot$ min $^{-1}$) during 0.5 to 15.5 min after the HIIE in N and H conditions. ** indicates a significant difference between the H and N at $p<0.01$. N, normoxia; H, hyperoxia

C) 筋温の変化

Pre-exercise の時点の筋温において、高濃度酸素吸入条件 ($35.69 \pm 0.70^\circ\text{C}$) と通常空気吸入条件 ($35.47 \pm 0.37^\circ\text{C}$) との間で有意な差は認められなかった。Pre-exercise の値と比較して、高強度・短時間・間欠的運動後 (10:34~14:00) の筋温は、全回復期間を通して ($p < 0.05$ -0.001) 有意に高かった (Figure 19)。

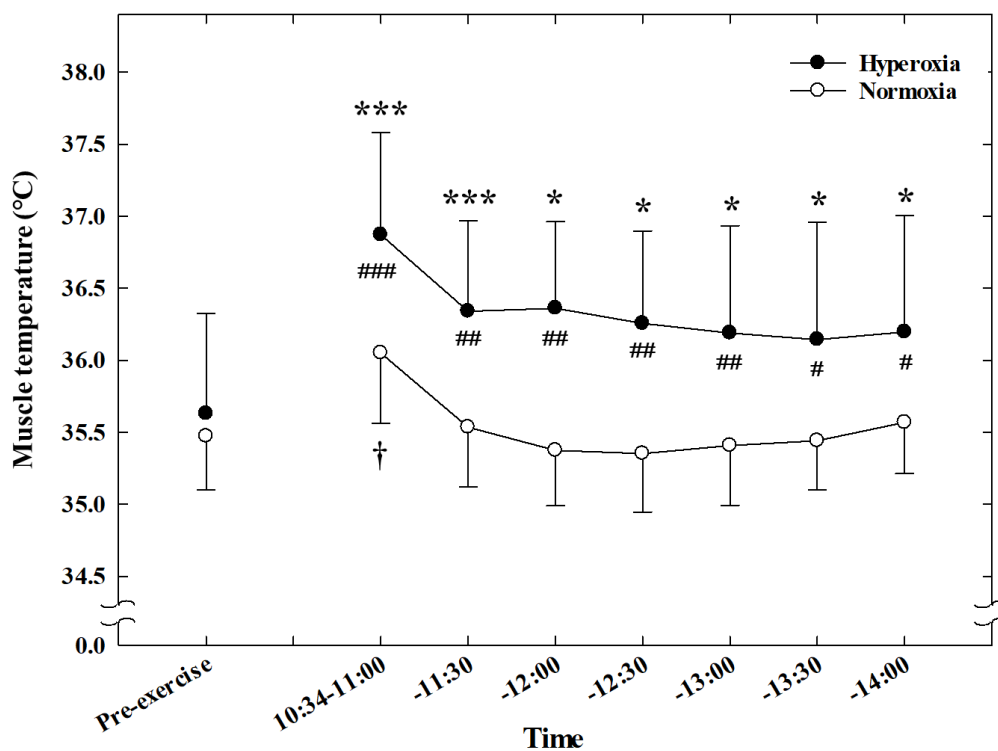


Figure 19 Effects of HIIE on muscle temperature in N and H (means±SDs). *** indicates significant differences from the pre-exercise value in H at $p < 0.001$. †††, ††, and † indicate significant differences from the pre-exercise value in N at $p < 0.001$, $p < 0.01$ and $p < 0.05$, respectively. ###, ##, and # indicate significant differences between H and N at $p < 0.001$, $p < 0.01$ and $p < 0.05$, respectively. N, normoxia; H, hyperoxia

通常空気吸入条件において、10:36-10:52（高強度・短時間・間欠的運動の直後）からのみ、筋温は運動前の値より有意に高かった（ $p<0.05-0.001$ ）（Figure 20）。通常空気吸入条件と比較して、高濃度酸素吸入条件の筋温は、高強度・短時間・間欠的運動終了時から実験終了時刻である 14:00 まで有意に高かった（ $p<0.05-0.001$ ）。

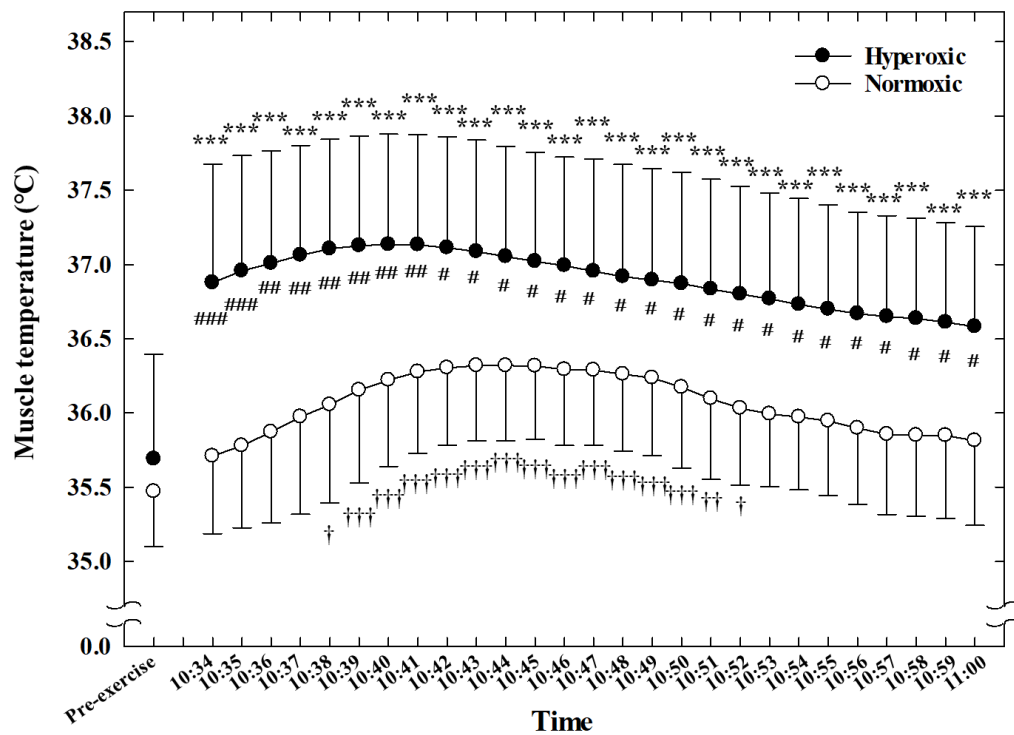


Figure 20 Effects of HIIE on muscle temperature in N and H (means \pm SDs) from 10:34-11:00. *** indicates significant differences from the pre-exercise value in H at $p<0.001$. †††, ††, and † indicate significant differences from the pre-exercise value in N at $p<0.001$, $p<0.01$ and $p<0.05$, respectively. ###, ##, and # indicate significant differences between the H and N at $p<0.001$, $p<0.01$ and $p<0.05$, respectively. N, normoxia; H, hyperoxia

D) 直腸温の変化

運動前の直腸温は、高濃度酸素吸入条件 ($36.83 \pm 0.32^\circ\text{C}$) と通常空気吸入条件 ($36.74 \pm 0.21^\circ\text{C}$) との間で有意な差はなかった。運動前の値と比較して、直腸温は、高強度・短時間・間欠的運動後から全回復期間を通して (10:35~14:00) 通常空気吸入条件と高濃度酸素吸入条件で有意に高かった (Figure 21)。

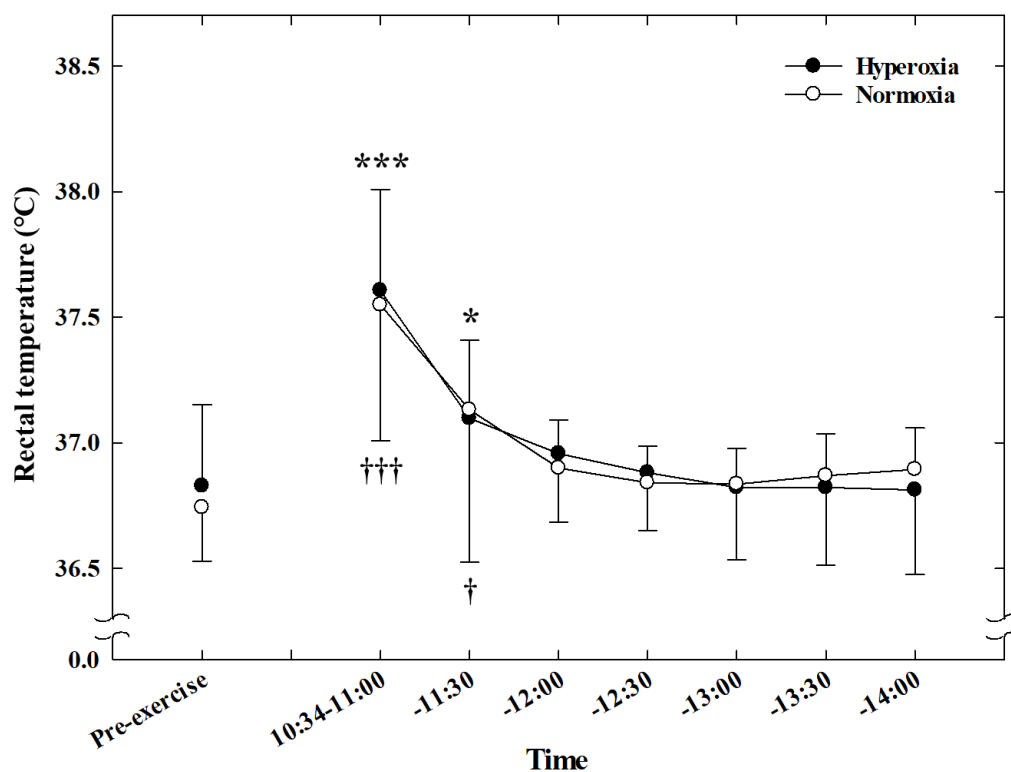


Figure 21 Effects of HIIE on rectal temperature in N and H (means \pm SDs). *** indicates significant differences from the pre-exercise value in H at $p < 0.001$. ††† indicates significant difference from the pre-exercise value in N at $p < 0.001$.

高濃度酸素吸入条件と通常空気吸入条件の間において、直腸温は、どの時点においても有意な差は認められなかった (Figure 22)。

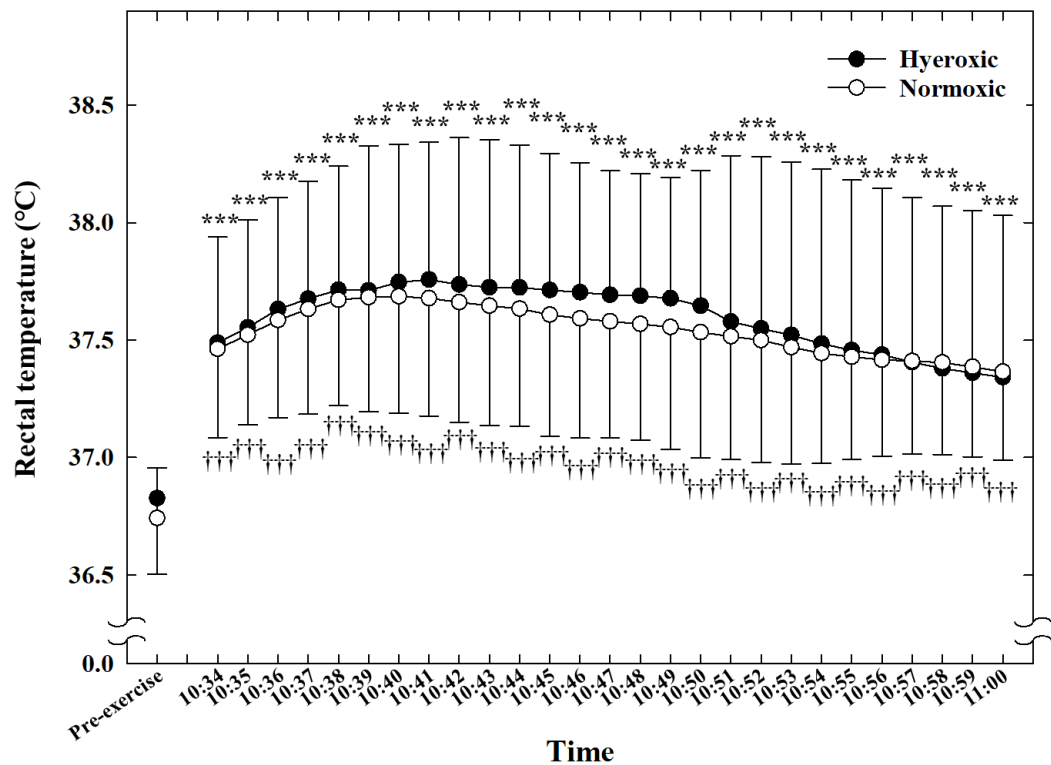


Figure 22 Effects of HIIE on rectal temperature in N and H (means±SDs) from 10:34-11:00. *** indicates significant differences from the pre-exercise value in H at $p<0.001$. ††† indicates significant differences from the pre-exercise value in N at $p<0.001$.

E) 運動後の安静時酸素摂取量と体温

通常空気吸入条件において、高強度・短時間・間欠的運動終了後 0.5 分から 11:00 までの筋温の平均値と安静時の酸素摂取量の平均値との間に有意な相関が認められた ($r = 0.756$, $p < 0.05$)。その後においては、30 分間の間隔で記録された筋温の平均値に対して有意な相関は認められなかった。高濃度酸素吸入条件では、同様に 30 分間隔で記録された筋温の平均値と安静時の酸素摂取量の平均値との間に有意な相関は認められなかった。

通常空気吸入条件において、高強度・短時間・間欠的運動終了後 0.5 分から 11:00 ($r=0.741$, $p<0.05$) 及び 1 ($r=0.767$, $p<0.001$) の間に測定された直腸温の平均値と安静時の酸素摂取量の平均値との間に有意な相関が認められた。高濃度酸素吸入条件において、高強度・短時間・間欠的運動後の 30 分毎の直腸温の平均値と安静時の酸素摂取量の平均値との間に有意な相関は認められなかった。

高強度・短時間・間欠的運動終了後 0.5 分から 2.5 分の間に測定された高濃度酸素吸入条件と通常空気吸入条件との間の安静時の酸素摂取量の差と、同時間に測定された高濃度酸素吸入条件と通常空気吸入条件の筋温の平均値の差 ($1.17 \pm 0.74^{\circ}\text{C}$) との間に有意な相関が認められた ($r=0.923$, $p<0.001$, Figure 23)。その後においては、2 条件間の酸素摂取量の差と筋温の差の間に有意な相関は認められなかった。

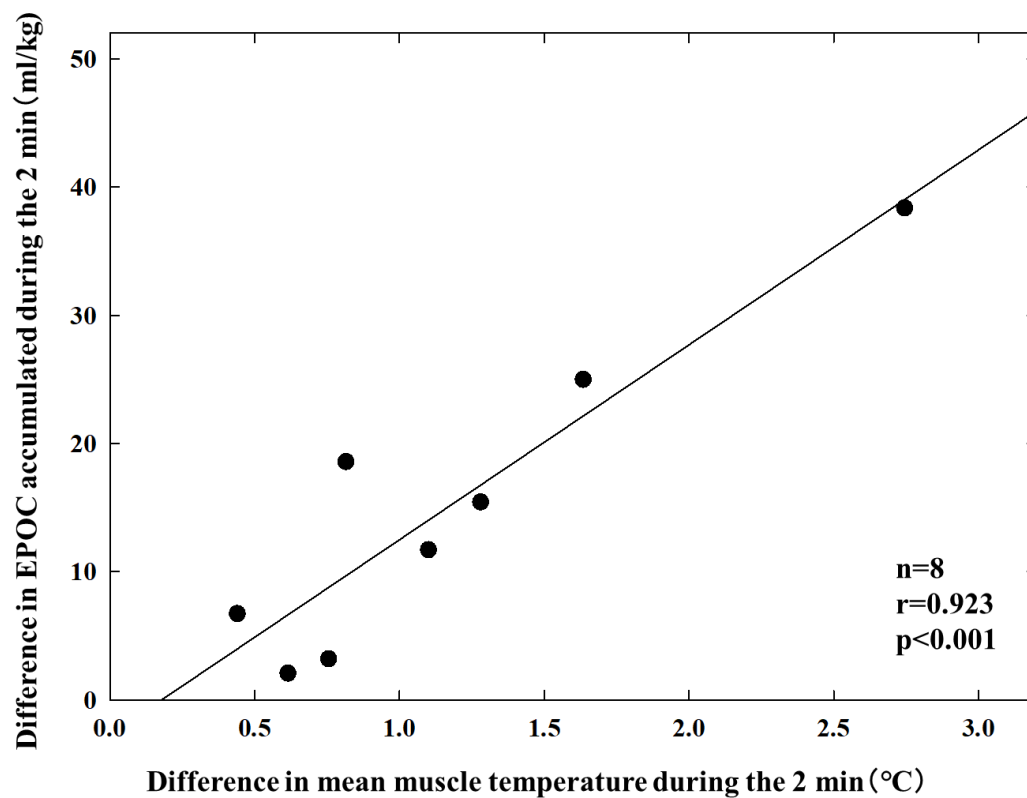


Figure 23 Relation between differences in oxygen uptake accumulated from 0.5 to 2.5 min after the HIIE ($\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1}$) between N and H and differences in mean muscle temperature ($\Delta^{\circ}\text{C}$) between N and H during the same time period.

4. 考察

高濃度酸素を吸入させて高強度・短時間・間欠的運動を行なうと、通常空気を吸入して高強度・短時間・間欠的運動を行なった場合よりも運動後 0.5 分から 2.5 分の 2 分間高くなり、その量は $15.1 \pm 11.4 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ であった。研究課題 1-1 における高強度・短時間・間欠的運動の EPOC (10:34-12:00) が $115\text{-}139 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ であったため、本研究課題において高濃度酸素を吸入させて高強度・短時間・間欠的運動を行なった場合の EPOC は、通常空気を吸入させた場合と比較すると 11-13% 増大することが推察された。また、この運動直後 2 分間の酸素摂取量について、酸素 1L 当たり 5kcal としてエネルギー消費量に換算すると、 $5.2 \pm 4.7 \text{ kcal}$ となった。研究課題 1-1 における平均体重が $64.4 \pm 6.0 \text{ kg}$ の 10 人の被験者の、酸素摂取量から計算したエネルギー消費量は、高強度・短時間・間欠的運動の運動中が $39.8 \pm 6.3 \text{ kcal}$ 、高強度・短時間・間欠的運動後 1.5 時間の EPOC が $37.5 \pm 12.7 \text{ kcal}$ であった。本研究課題により、このような高強度・短時間・間欠的運動を行なう際に高濃度酸素を吸入させた場合に、運動後の EPOC を約 14% 増大させることが推察された。一方、高濃度酸素吸入による影響のため運動時のエネルギー消費量は測定出来なかったが、本研究課題において運動時の総仕事量が通常空気吸入時と比較して 9% 増大したことから、運動時のエネルギー消費量も 10% 程度増大していた可能性がある。これらを基に概算すると、高濃度酸素を吸入させて高強度・短時間・間欠的運動を実施した場合、運動中及び運動後 1.5 時間のエネルギー消費量を 10% 程度増大させることができると推察され、その総エネルギー消費量は 87kcal 程度になることが予想される。しかし、高濃度酸素を吸入させることによるエネルギー消費量の増加の程度は、体重減少を考えると、その効果は小さいことが考えられる。

本研究課題においては、高強度・短時間・間欠的運動終了後 1 時間までの酸素摂取量と直腸温との間に有意な相関があった($r=0.741$, $p<0.05$)が、それ以降の時間では相関が認められなかった。これらの結果は、高強度・短時間・間欠的運動後における回復期のうち、運動後 1 時間以内の酸素摂取量が直腸温の上昇の影響を受けている可能性があることを示唆して

いる。Dubois (1921)は、安静時代謝は、体温が 1°C上昇するにつき約 13%上昇すると報告している。さらに、研究 1-1 によって、高強度・短時間・間欠的運動後には運動後 90 分まで安静時の酸素摂取量の上昇が維持されることが明らかとなったため、この時間における酸素摂取量は、直腸温以外の要因による影響を受けている可能性がある。

運動後の酸素摂取量と運動時に活動した筋の温度を測定したような報告はこれまでにない。本研究課題では、通常空気吸入条件において、高強度・短時間・間欠的運動後 0.5 分から 2.5 分までの筋温と酸素摂取量が相関しており ($r = 0.675$, $p < 0.05$)、筋温が運動後に上昇する酸素摂取量に関与している可能性を示唆している。また、本研究課題で得られたデータをさらに分析した結果、高濃度酸素吸入条件の安静時の酸素摂取量の増加分 ($15.1 \pm 12.2 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$)、つまり高濃度酸素吸入条件の酸素摂取量が通常空気吸入条件に比較して有意に高かった期間の酸素摂取量と、同期間に測定された高濃度酸素吸入条件と通常空気吸入条件の平均筋温の差との間に非常に高い相関があった ($r = 0.923$, $p < 0.001$, Figure 23)。この期間中に直腸温の差は観察されなかったため、高濃度酸素吸入条件による筋温の上昇が、高濃度酸素吸入条件における高強度・短時間・間欠的運動後の酸素摂取量の増加に影響したと考えられる。

一方、通常空気吸入条件と高濃度酸素吸入条件の高強度・短時間・間欠的運動後のその他の時間帯（運動後 0.5 分から 2.5 分より後の時間帯）における安静時の酸素摂取量と筋温或いは直腸温との間に有意な相関は認められなかった。この知見は、高濃度酸素を吸入させて運動を行なったことが運動後の酸素摂取量に対して複雑に影響を与えていることを示唆している。

Gaesser and Brooks (1984)は、体温が運動後の酸素摂取量に与える影響の程度は、運動時の主働筋内におけるミトコンドリアのエネルギー代謝(Q10 effect)に対して、骨格筋温度の上昇が影響を及ぼしていると推定している。ラットおよびヒトで観察された研究では、運動中および運動後に直腸温および筋温が上昇すると、骨格筋および肝臓のミトコンドリア内での、

リン酸化の効率が低下することにより基質呼吸 (state4) が増加する(Brooks *et al.* 1971, Brooks *et al.* 1971)。その結果として、必要な ATP が合成されるためにより多くの酸素を消費することになる。疲労困憊に至るような運動後に筋中の CrP は枯渇するが、運動後 2~4 分後にはほとんど回復する(Harris *et al.* 1976)。この間、CrP を有酸素性代謝により再合成するための酸素需要量は、かなり高いと考えられる。本研究課題において、通常空気吸入条件の高強度・短時間・間欠的運動後 0.5 分から 2.5 分まで測定された酸素摂取量は、高濃度酸素吸入条件と比較して有意に高く、通常空気吸入条件の筋温と相関し ($r = 0.799$, $p < 0.01$)、さらに、高濃度酸素吸入条件と通常空気吸入条件の酸素摂取量の差と、高濃度酸素吸入条件と通常空気吸入条件の筋温の差との間で有意な相関があった ($r = 0.923$, $p < 0.001$) ことを踏まえると、高濃度酸素吸入条件では、筋温が高くなることによるミトコンドリアの非効率性(Q10 effect)のために、高濃度酸素吸入条件のこの期間中により多くの酸素が消費されたと推測するのは合理的であると考えられる。

さらに、高濃度酸素吸入条件の高強度・短時間・間欠的運動直後に高くなった EPOC は、運動で動員された筋への温度依存性の糖取り込みによって説明することができる可能性もある。近年、Koshinaka *et al.* (2013)は、緩衝液中でインキュベートしたラット骨格筋の糖輸送活性が緩衝液の温度の上昇に伴って直線的に増加したため、骨格筋温の上昇が、安静時の骨格筋への糖取り込みを増強することを示唆した。輸送された糖はグリコーゲンに急速に合成されるため、グリコーゲンが合成される際に必要なエネルギーは、酸素摂取量の増加に関与している可能性がある。

EPOC の大部分は、運動中の酸素借に関係していることが知られている Gaesser and Brooks (1984)。酸素借の生化学的要素は、クレアチンリン酸の分解および乳酸からのグリコーゲンの再合成による。これまでに、最大酸素借に達する(Medbo *et al.* 1988)か、或いはそれに近い、3 分から 4 分で疲労困憊に至るような運動(Linnarsson *et al.* 1974)による酸素借や乳酸の生成量、クレアチンリン酸の枯渇には、低酸素環境や高酸素環境は影響を及ぼさないと報告され

ている。高強度・短時間・間欠的運動の運動中の総酸素借は最大酸素借とほぼ等しいと報告されている(Tabata *et al.* 1997)ため、高濃度酸素吸入条件の運動中の酸素借は、通常空気吸入条件の運動中の酸素借と同等であったと考えられる。従って、高濃度酸素吸入条件と通常空気吸入条件の酸素摂取量の差は、運動中の総酸素借に起因するものではないと考えられる。

本研究課題において、自転車運動による高強度・短時間・間欠的運動の総仕事量 (J) は、両条件で同等の運動時間であったのにも関わらず、通常空気吸入条件に比較して高濃度酸素吸入条件の方が $9.4 \pm 5.8\%$ 有意に高かった。高強度・短時間・間欠的運動の最終セット中の酸素摂取量は最大酸素摂取量に達すると報告されている(Tabata *et al.* 1997)ため、高濃度酸素吸入条件の最終セット中の酸素摂取量は高酸素吸入時における最大酸素摂取量に達している可能性があり、それは通常空気吸入時より 5 から 10% 高くなる (Knight *et al.* 1993)。高強度・短時間・間欠的運動中の無酸素性エネルギー供給量、即ち最大酸素借が通常空気吸入条件と高濃度酸素吸入条件で同等であることが考えられるため、有酸素性エネルギー供給系からのエネルギー供給量の増加は、高濃度酸素吸入条件で運動時の総仕事量が増大した理由となる可能性がある。そして、高濃度酸素吸入条件における仕事量の増加が高強度・短時間・間欠的運動後の筋温に影響を及ぼしているかもしれない。

高酸素環境は直腸温を上昇させ(Yamashita and Tochihara 2003)、また、低酸素環境は直腸温を低下させることが知られている(Dipasquale *et al.* 2015)。しかし、本研究課題においては、通常空気吸入条件と高濃度酸素吸入条件の運動後における回復期のいずれの時点においても直腸温に差が無かった。この相違は、高酸素環境に曝露した時間によって説明することができるかもしれない。本研究課題では、被験者は運動中の 4 分間のみ高酸素環境に暴露されたが、これまで報告があった研究では、本研究課題より長い時間に渡って高酸素環境に暴露された。一方、高濃度酸素吸入条件における高強度・短時間・間欠的運動後の筋温は通常空気吸入条件よりも有意に高かったが、通常空気吸入条件において、高強度・短時間・間欠的運動直後の筋温は運動前の値と差が無かった。高濃度酸素吸入条件の高強度・短時間・間欠

的運動後 4 分間の温度の上昇（～1.5℃）は顕著であった。このような 4 分間程度の短時間の高酸素暴露後に、このように顕著に温度が上昇するような現象について説明することは現在の段階では困難であるため、今後さらなる研究によって明らかにする必要がある。

5. 結論

高濃度酸素吸入は、高強度・短時間・間欠的運動時の仕事量を増加させ、運動直後の EPOC を増加させることが示された。さらに、高濃度酸素吸入下での高強度・短時間・間欠的運動直後の酸素摂取量の増加は、活動筋の筋温と関連していることが示唆された。

第5章 高強度間欠的運動・トレーニングにより増加する最大酸素摂取量が、同運動の運動後過剰酸素摂取量及び運動後における食事後の酸素摂取量に与える影響（研究課題3）

1. 緒言

研究課題 1-1 と 1-2 により、高強度・短時間・間欠的運動中及び運動後、食事後の安静時酸素消費量が増加することを明らかにした。また、研究課題 2 は、高濃度酸素吸入により高強度・短時間・間欠的運動中および運動後の酸素摂取量を増加させるために実験を行ったが、体重減少に影響を与えるほどの増加量ではなかった。本研究が対象とした高強度・短時間・間欠的運動トレーニングによる増加するエネルギー消費量は比較的少なく、その体重減少効果は限定的であると考えられる。

しかし、研究課題 1-1 から、高強度・短時間・間欠的運動後に増加した安静時の酸素摂取量（特に食事後の安静時酸素摂取量の増加）と最大酸素摂取量の間に有意な正の相関関係が認められた($r=0.76, p<0.05$)。つまり、高強度・短時間・間欠的運動を用いた運動トレーニングにより最大酸素摂取量を高めることにより、高強度・短時間・間欠的運動後の DIT が増加し、総エネルギー消費量が増加する可能性がある。高強度・短時間・間欠的運動の運動中および運動後の総エネルギー消費量が増加することにより、体重減少効果が起きる可能性がある。

一方、運動後のエネルギー代謝に及ぼす運動トレーニングの影響は、これまでにほとんど報告されていない。Sedlock *et al.* (2010) は、中等度の強度の運動トレーニングが運動後の安静時酸素摂取量に及ぼす影響についての研究を初めて行ったが、運動トレーニングによる EPOC の増大は起きなかった。これまでに、このような高強度・短時間・間欠的運動トレーニングが運動後の安静時の酸素摂取量に与える影響についての報告はない。実際にこのようなトレーニング後に、高強度・短時間・間欠的運動後の安静時酸素摂取量が増加すれば、

体重減少効果も期待され、それは社会的に意義があると考えられる。そこで、研究課題 3 では、高強度・短時間・間欠的運動トレーニングが高強度・短時間・間欠的運動中および運動後の安静時酸素摂取量に与える影響を明らかにすることを目的に実験を行った。

2. 方法

被験者は、健常な成人男性 8 名であった。被験者の年齢、身長、体重、BMI、最大酸素摂取量は、それぞれ 23 ± 3 歳、 1.70 ± 0.08 m、 68.3 ± 7.5 kg、 23.7 ± 2.0 kg \cdot m⁻¹ \cdot m⁻¹、 45.6 ± 6.6 mL \cdot kg⁻¹ min⁻¹ であった。

高強度・短時間・間欠的トレーニングは、最大酸素摂取量の 170% の強度の 20 秒間の運動を 10 秒間の休憩を挟んで、7~8 回で疲労困憊に至る高強度・短時間・間欠的運動トレーニングを 1 日 1 回、週 3 回、10 週間行った。最大酸素摂取量、体組成及びエネルギー代謝測定室を用いて高強度・短時間・間欠的運動の運動中及び運動後の酸素摂取量の測定はトレーニング前後において行った。

全ての運動は、Monark 社製の自転車エルゴメータ (Ergomedic 828E, Monark, Stockholm, Sweden) を用いた。

本研究課題に関わる実験や手順は、立命館大学倫理委員会の承認を受けた (BKC-IRB-2014-035)。各被験者に対して、研究の目的、利益、及び危険性の詳細な説明を行った後、書面により同意を得た。心血管疾患、貧血、糖尿病、腎または肝疾患、甲状腺機能低下症または甲状腺機能亢進症、または筋骨格系に問題があった被験者は除外した。喫煙者、投薬を受けた人も除外した。被験者には、実験期間中に食事や運動習慣を変更しないように指示した。

A) 最大酸素摂取量測定

各被験者について、自転車エルゴメータ運動における最大下の運動強度 (watts) と酸素摂取量 (L \cdot min⁻¹) の関係及び最大酸素摂取量の測定方法は、研究課題 1-1 と同様とした。

最大下の運動強度の酸素摂取量の測定、最大酸素摂取量の測定、高強度・短時間・間欠的運動時の運動強度の決定は、3～4 日間かけて行った。

B) 体組成測定

体重、体脂肪量、体脂肪量と骨量を除いた除脂肪量、体脂肪率は二重エネルギー線吸収法 (dual-energy X-ray absorptiometry: DEXA) (PRODIGY、GE Healthcare、東京)を用いて測定した。DEXA 法は、波長の異なる 2 種類の X 線を全身に照射し、X 線吸収率の差から骨密度と体組成を計測する方法である。測定は仰臥位安静状態にて行った。

C) エネルギー代謝測定室を用いた高強度・短時間・間欠的運動の運動中及び運動後の酸素摂取量測定

被験者には、実験の前日に運動を控えるよう指示した。また、実験前日は通常の食事を摂るよう指示し、記録させた。実験の 24 時間前からアルコールまたはカフェインを摂らないよう指示した。これらは、全ての実験（食事摂取および食事非摂取実験）において統一した。エネルギー代謝測定室の環境に慣れさせるために、初回の実験の数日前に被験者をエネルギー代謝測定室に 2 時間程度滞在させた。

実験前日、17:00 にエネルギー代謝測定室に来室させ、18:00 に規定の夕食を摂らせた。その後、22:30 まで自由行動とし、23:00 に就寝させた。実験当日、7:00 に起床させ、エネルギー代謝測定室外で安静にさせた。8:00 に規定の朝食を摂らせた。その際、20 分の間に食事を完了するよう指示した。朝食後は、エネルギー代謝測定室外で安静にさせた。10:00 に被験者にエネルギー代謝測定室入室させ、ダグラスバッグ法で酸素摂取量を測定する目的で、被験者にエネルギー代謝測定室外のダグラスバッグに三方コックで連結しているホースにマスクを装着させた。

10:10 より被験者に自転車エルゴメータを用いて最大酸素摂取量の 50%の強度で 10 分間のウォーミングアップを行なわせ、10 分間の休息の後、10:30 から高強度・短時間・間欠的運動を行なわせた。高強度・短時間・間欠的運動は、最大酸素摂取量の 170%の強度の 20 秒間の運動を 10 秒間の休憩を挟んで、7〜8 回で疲労困憊に至る運動であった(Tabata *et al.* 1997)。高強度・短時間・間欠的運動の終了後、マスクを装着した状態で、15 分間自転車エルゴメータ上で安静を保たせた。その後、被験者にマスクを外させた。運動時は、運動負荷が予備測定で行われた実験と同様にするために、エネルギー代謝測定室の窓を通して、エネルギー代謝測定室外側の実験実施者が運動負荷を監視し、室内のスピーカーを備えたマイクを通して口頭で指示を出した。

その後、被験者に就寝時刻である 23:00 までベッドにて 20 分間の仰臥位安静と、椅子に座って 10 分間のデスクワークを交互に行わせた。この間、被験者は、読書や、勉強を行なった。被験者が運動や食事の後に昼寝や規定外の行動を取らないよう、被験者の心電図および行動をエネルギー代謝測定室外で常に観察し、規定外の行動があった場合には備え付けのマイクから既定の行動を行うよう指示した。翌朝 7:00 に起床させ、エネルギー代謝測定室から退室させた。

昼食と夕食は、12:00 と 18:00 に摂らせた。規定食は、日本人の食事摂取基準(日本人の食事摂取基準 2010)より、身体活動レベルを 1.5 と仮定して推定されたエネルギー必要量を算出した。実験日の朝食、昼食、夕食の総エネルギー量は 2186kcal・日であった。規定食のエネルギー構成比は、日本人の食事の平均値である比率とし、15%のタンパク質、25%の脂肪、60%の炭水化物とした。被験者は、食事を全て摂取し、また、エネルギー代謝測定室に滞在中は水を自由摂取とした。

D) 7〜8 回で疲労困憊に至る間欠的運動トレーニングの強度設定

被験者は、最大酸素摂取量の 170%の強度で 20 秒間の運動を 10 秒間の休憩を挟んで、7

～8回で疲労困憊に至るまで運動を行った。7～8セットで疲労困憊に至った場合は、その強度で、それよりも短い場合は強度をやや低く、長い場合は強度を高くした。

H) 運動後の酸素摂取量の計算方法

エネルギー代謝測定室により測定された酸素摂取量は、運動終了 15 分後である 10:48 以降に得られた酸素摂取量から使用し、1 分毎に算出されている酸素摂取量を各分析期間に応じて総じた。その際、運動終了時点から 11:00 の総酸素摂取量は、運動終了時点から 10:48 にダグラスバッグ法により測定された総酸素摂取量と 10:48 以降にエネルギー代謝測定室で測定された総酸素摂取量を総じた。11:00 以降の酸素摂取量は、30 分毎に酸素摂取量を総じた。

E) 統計分析

すべての測定値は平均値±標準偏差で表した。統計分析は統計解析ソフト SigmaPlot13 (SYSTAT 社) を用いて行った。対応のある t 検定 (paired t-test) を使用してデータを分析し、介入前後の比較を行った。項目間の相関関係の検討には、Pearson の積率相関係数 (Pearson Product Moment) を用いた。統計の有意性は、危険率 5% 未満で有意差ありと判定した。

3. 結果

A) 運動トレーニング時の仕事率・総仕事量の変化 (Table 6)

トレーニング期間前後における高強度・短時間・間欠的運動の運動時間は、トレーニング開始時 (145±8 秒) とトレーニング後 (143±9 秒) の間に有意な差は認められなかった。

高強度・短時間・間欠的運動トレーニングの仕事率は、トレーニング開始時 (371±33watts) と比較して、トレーニング後 (456±44watts) に有意に増加し ($p<0.001$)、その差は 85±30 watts であった。また、その増加率は 23.2±8.4% であった。

高強度・短時間・間欠的運動トレーニングの体重当たりの総仕事量は、トレーニング開始時 (789±81 J・kg⁻¹) と比較して、トレーニング後 (944±79 J・kg⁻¹) に有意に増加し ($p<0.001$)、その差は 155±75 J・kg⁻¹ であった。また、その増加率は 20.3±10.8% であった。

Table 6 トレーニング期間前後における高強度・短時間・間欠的運動トレーニング時の仕事量の変化

	pre			post			diffrence			%change		
仕事率(W)	371	±	33	456	±	44***	85	±	30	23.2	±	8.4
運動時間(秒)	145	±	8	143	±	9	2	±	11	1.1	±	7.7
総仕事量(J・kg ⁻¹)	789	±	81	944	±	79***	155	±	75	20.3	±	10.8

平均±標準偏差

***; $p < 0.001$ vs. Pre

B) 体組成の変化 (Table 7)

体重は、トレーニング前 (68.3 ± 7.5 kg) とトレーニング後 (69.1 ± 7.1 kg) の間に有意な差は認められなかった。

全身脂肪量は、トレーニング前 (9.8 ± 3.9 kg) とトレーニング後 (9.3 ± 4.2 kg) の間に有意な差は認められなかった。両腕脂肪量は、トレーニング前 (0.9 ± 0.4 kg) とトレーニング後 (0.8 ± 0.4 kg) の間に有意な差は認められなかった。両脚脂肪量は、トレーニング前 (3.2 ± 1.3 kg) とトレーニング後 (3.1 ± 1.3 kg) の間に有意な差は認められなかった。体幹脂肪量は、トレーニング前 (5.3 ± 2.2 kg) とトレーニング後 (4.9 ± 2.4 kg) の間に有意な差は認められなかった。

全身除脂肪量は、トレーニング開始時 (55.4 ± 4.6 kg) と比較して、トレーニング後 (57.0 ± 5.3 kg) に有意に増加し ($p < 0.05$)、その差は 1.6 ± 2.3 kg であった。また、その増加率は 2.9 ± 3.9 % であった。体幹除脂肪量は、トレーニング前 (25.3 ± 2.3 kg) とトレーニング後 (26.2 ± 3.0 kg) の間に有意な差は認められなかった。両脚除脂肪量は、トレーニング開始時 (19.5 ± 1.6 kg) と比較して、トレーニング後 (20.0 ± 1.7 kg) に有意に増加し ($p < 0.01$)、その差は 0.5 ± 0.6 kg であった。また、その増加率は 2.6 ± 2.9 % であった。両腕除脂肪量は、トレーニング前 (6.5 ± 0.7 kg) とトレーニング後 (6.7 ± 0.8 kg) の間に有意な差は認められなかった。

全身体脂肪率は、トレーニング開始時 (14.0 ± 4.6 %) と比較して、トレーニング後 (13.2 ± 5.2 %) に有意に減少し ($p < 0.05$)、その差は 0.9 ± 1.1 % であった。また、その変化率は 8.2 ± 9.8 % であった。

Table 7 トレーニング期間前後における体組成の変化

	pre			post			diffrence			%change		
体重(kg)	68.3	±	7.5	69.1	±	7.1	0.8	±	2.3	1.3	±	3.4
全身脂肪量(kg)	9.8	±	3.9	9.3	±	4.2	0.5	±	0.8	7.2	±	8.3
全身体脂肪率(%)	14.0	±	4.6	13.2	±	5.2*	0.9	±	1.1	8.2	±	9.8
両腕脂肪量(kg)	0.9	±	0.4	0.8	±	0.4	0.0	±	0.1	6.0	±	11.3
両脚脂肪量(kg)	3.2	±	1.3	3.1	±	1.3	0.2	±	0.3	6.7	±	7.1
胴体脂肪量(kg)	5.3	±	2.2	4.9	±	2.4	0.3	±	0.4	8.3	±	10.0
全身除脂肪量(kg)	55.4	±	4.6	57.0	±	5.3*	1.6	±	2.3	2.9	±	3.9
両腕除脂肪量(kg)	6.5	±	0.7	6.7	±	0.8	0.2	±	0.3	2.4	±	4.2
両脚除脂肪量(kg)	19.5	±	1.6	20.0	±	1.7**	0.5	±	0.6	2.6	±	2.9
体幹除脂肪量(kg)	25.3	±	2.3	26.2	±	3.0	0.9	±	1.6	3.6	±	5.8

平均±標準偏差

*; p < 0.05 vs. Pre

**; p < 0.01 vs. Pre

C) 最大酸素摂取量 (Table 8)

最大酸素摂取量の絶対値は、トレーニング前の値 ($3.05 \pm 0.29 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$) と比較して、トレーニング後 ($3.47 \pm 0.26 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$) に有意に増加し ($p < 0.001$)、その差は $0.42 \pm 0.14 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ であった。また、その増加率は $14.0 \pm 5.5 \%$ であった。

体重当たりの最大酸素摂取量は、トレーニング前の値 ($45.6 \pm 6.6 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) と比較して、トレーニング後 ($51.1 \pm 6.8 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) に有意に増加し ($p < 0.001$)、その差は $5.5 \pm 1.7 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ であった。また、その増加率は $12.2 \pm 4.1 \%$ であった。

Table 8 トレーニング期間前後における最大酸素摂取量の変化

	pre			post			diffrence			%change		
VO ₂ max												
(L • min ⁻¹)	3.05	±	0.29	3.47	±	0.26***	0.42	±	0.14	14.0	±	5.5
(mL • kg ⁻¹ • min ⁻¹)	45.6	±	6.6	51.1	±	6.8***	5.5	±	1.7	12.2	±	4.1

平均±標準偏差

VO₂max : 最大酸素摂取量

***; $p < 0.001$ vs. Pre

D) 高強度・短時間・間欠的運動の運動中及び運動後の酸素摂取量 (Table 9)

運動中の総酸素摂取量 (10:30-10:34)

トレーニング前の運動中の総酸素摂取量は $137.4 \pm 29.6 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ であり、トレーニング後では $140.2 \pm 23.6 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ となった。トレーニング前後において、有意な変化がみられなかった。

運動後から昼食摂取までの総酸素摂取量 (10:34-12:00)

トレーニング前の運動後から昼食摂取までの総酸素摂取量は $495.3 \pm 40.6 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ であり、トレーニング後では $516.2 \pm 39.0 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ となった。トレーニング前後において、有意な変化がみられなかった。

昼食摂取時から夕食摂取前までの総酸素摂取量 (12:00-18:00)

トレーニング前の昼食摂取時から夕食摂取前までの総酸素摂取量は $1560.3 \pm 188.7 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ であり、トレーニング後では $1533.6 \pm 155.4 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ となった。トレーニング前後において、有意な変化がみられなかった。

夕食摂取時から就寝前までの総酸素摂取量 (18:00-23:00)

トレーニング前の夕食摂取時から就寝前までの総酸素摂取量は $1232.7 \pm 155.9 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ であり、トレーニング後では $1221.4 \pm 119.4 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ となった。トレーニング前後において、有意な変化がみられなかった。

昼食摂取時から就寝前までの総酸素摂取量 (12:00-23:00)

トレーニング前の昼食摂取時から就寝前までの総酸素摂取量は $2793.0 \pm 336.3 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ であり、トレーニング後では $2755.0 \pm 264.0 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ となった。トレーニング前後において、有意な変化がみられなかった。

睡眠時の総酸素摂取量 (23:00-07:00)

トレーニング前の睡眠時の総酸素摂取量は $1442.1 \pm 164.4 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ であり、トレーニング後では $1409.7 \pm 106.3 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ となった。トレーニング前後において、有意な変化がみられ

なかった。

運動開始時から起床までの総酸素摂取量 (10:30-07:00)

トレーニング前の運動開始時から起床までの総酸素摂取量は $4867.8 \pm 522.5 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ であり、トレーニング後では $4821.1 \pm 392.2 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ となった。トレーニング前後において、有意な変化がみられなかった。

Table 9 トレーニング期間前後における高強度・短時間・間欠的運動の運動中および運動後の総酸素摂取量

$\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1}$	pre			post			diffrence	
10:30-10:34	137.4	\pm	29.6	140.2	\pm	23.6	2.8	\pm 34.7
10:34-12:00	495.3	\pm	40.6	516.2	\pm	39.0	20.8	\pm 41.1
12:00-18:00	1560.3	\pm	188.7	1533.6	\pm	155.4	-26.7	\pm 127.4
18:00-23:00	1232.7	\pm	155.9	1221.4	\pm	119.4	-11.3	\pm 117.1
12:00-23:00	2793.0	\pm	336.3	2755.0	\pm	264.0	-38.0	\pm 216.8
23:00-07:00	1442.1	\pm	164.4	1409.7	\pm	106.3	-32.3	\pm 120.3
10:30-07:00	4867.8	\pm	522.5	4821.1	\pm	392.2	-46.7	\pm 321.7

平均 \pm 標準偏差

E) 高強度・短時間・間欠的運動の運動中及び運動後のエネルギー消費量 (Table 10)

運動中の総エネルギー消費量 (10:30-10:34)

トレーニング前の運動中の総エネルギー消費量は $0.69 \pm 0.15 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$ であり、トレーニング後では $0.70 \pm 0.12 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$ となった。トレーニング前後において、有意な変化がみられなかった。

運動後から昼食摂取までの総エネルギー消費量 (10:34-12:00)

トレーニング前の運動後から昼食摂取までの総エネルギー消費量は $2.38 \pm 0.20 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$ であり、トレーニング後では $2.48 \pm 0.18 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$ となった。トレーニング前後において、有意な変化がみられなかった。

昼食摂取時から夕食摂取前までの総エネルギー消費量 (12:00-18:00)

トレーニング前の昼食摂取時から夕食摂取前までの総エネルギー消費量は $7.55 \pm 0.91 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$ であり、トレーニング後では $7.47 \pm 0.75 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$ となった。トレーニング前後において、有意な変化がみられなかった。

夕食摂取時から就寝前までの総エネルギー消費量 (18:00-23:00)

トレーニング前の夕食摂取時から就寝前までの総エネルギー消費量は $6.01 \pm 0.76 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$ であり、トレーニング後では $5.99 \pm 0.59 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$ となった。トレーニング前後において、有意な変化がみられなかった。

昼食摂取時から就寝前までの総エネルギー消費量 (12:00-23:00)

トレーニング前の昼食摂取時から就寝前までの総エネルギー消費量は $13.56 \pm 1.63 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$ であり、トレーニング後では $13.45 \pm 1.29 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$ となった。トレーニング前後において、有意な変化がみられなかった。

睡眠時の総エネルギー消費量 (23:00-07:00)

トレーニング前の睡眠時の総エネルギー消費量は $6.91 \pm 0.79 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$ であり、トレーニング後では $6.80 \pm 0.50 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$ となった。トレーニング前後において、有意な変化がみられな

かった。

運動開始時から起床までの総エネルギー消費量（10:30-07:00）

トレーニング前の運動開始時から起床までの総エネルギー消費量は $23.53 \pm 2.54 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$ であり、トレーニング後では $23.43 \pm 1.88 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$ となった。トレーニング前後において、有意な変化がみられなかった。

Table 10 トレーニング期間前後における高強度・短時間・間欠的運動の運動中および運動後の総エネルギー消費量

kcal \cdot kg ⁻¹	pre		post		diffrence	
10:30-10:34	0.69	\pm 0.15	0.70	\pm 0.12	-0.01	\pm 0.17
10:34-12:00	2.38	\pm 0.20	2.48	\pm 0.18	0.10	\pm 0.21
12:00-18:00	7.55	\pm 0.91	7.47	\pm 0.75	-0.08	\pm 0.54
18:00-23:00	6.01	\pm 0.76	5.99	\pm 0.59	-0.02	\pm 0.53
12:00-23:00	13.56	\pm 1.63	13.45	\pm 1.29	-0.10	\pm 0.94
23:00-07:00	6.91	\pm 0.79	6.80	\pm 0.50	-0.11	\pm 0.53
10:30-07:00	23.53	\pm 2.54	23.43	\pm 1.88	-0.10	\pm 1.41

平均 \pm 標準偏差

4. 考察

本研究課題の結果、高強度・短時間・間欠的運動トレーニングによる最大酸素摂取量の増加は、高強度・短時間・間欠的運動の運動中および運動後の総酸素摂取量に対して影響しないことが明らかとなった。

研究課題 1-1 において、高強度・短時間・間欠的運動後の総酸素摂取量と被験者の最大酸素摂取量との間に有意な正の相関関係が認められた。そこで、研究課題 1-1 で得られた成果からトレーニングによって最大酸素摂取量を増加させることにより高強度・短時間・間欠的運動後の食事後に増加する酸素摂取量がさらに高まるか否かを検証したが、その効果を観察することはできなかった。

本研究課題において、トレーニング前後における最大酸素摂取量の増加の程度と運動後の食事後における総酸素摂取量の増加 (ΔDIT) の程度との間に有意な関連は認められなかった ($r=0.164$, $p=0.698$)。この理由について、本研究課題の被験者の最大酸素摂取量は、トレーニング後に平均で $5.5 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 増加したが、最大酸素摂取量の増加量が不足していたことが要因として挙げられる。本研究課題におけるトレーニング前後の被験者の最大酸素摂取量は、トレーニング前が $45.6 \pm 6.6 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 、トレーニング後が $51.1 \pm 6.8 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ であった。研究課題 1-1 では、最大酸素摂取量が $45.5 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ から $64.6 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ の範囲で、 ΔDIT との間に有意な正の相関関係があった。しかし、研究課題 1-1 の最大酸素摂取量が $45.6\text{-}51.1 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ の被験者における運動後の ΔDIT と最大酸素摂取量の間に有意な関連は認められなかった ($r=0.494$, $p=0.320$)。本研究の被験者数は 8 名であったため、仮説通りの結果を得るには被験者数が不足していた可能性がある。運動後における食事後の酸素摂取量を増加させるには、今後、被験者数を増やして検証する必要があると考えられる。

Sedlock *et al.* (2010)は、唯一、トレーニング介入研究による運動後の安静時酸素摂取量の変化についての研究を行った。被験者は若年男性 19 名（トレーニング群：9 名、コントロール

ール群：10名）であった。トレーニング群は、12週間、トレッドミルを用いた走運動トレーニングを行った。トレーニング開始時は、週に3回、最大酸素摂取量の60%の強度で25分間の運動トレーニングを行わせた。段階的にトレーニング強度、頻度を増加させ、トレーニング最終週には週に4回、最大酸素摂取量の80%の強度で40分間の運動トレーニングを行わせた。トレーニング群の最大酸素摂取量は、トレーニング前後で有意に増加（トレーニング前： $46.2 \pm 1.2 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 、トレーニング後： $51.0 \pm 1.3 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ）した。運動後の安静時酸素摂取量は、トレーニング期間前後に測定した。トレーニング前の運動後の安静時酸素摂取量は、最大酸素摂取量の70%の強度で30分間のトレーニング走運動を行わせ、その後2時間の酸素摂取量を測定した。トレーニング後の運動後の安静時酸素摂取量は、トレーニング前と同一強度およびトレーニング後における最大酸素摂取量の70%の強度で30分間のトレーニング走運動を行わせ、その後2時間の酸素摂取量をそれぞれ測定した。運動後の安静時酸素摂取量は、トレーニング前と同一強度で運動を行った条件において、トレーニング前の値と比較してトレーニング後に有意に低くなった。一方、トレーニング後における最大酸素摂取量の70%の強度で運動を行った条件では、トレーニング前後で運動後の安静時酸素摂取量に有意な差がなかった。著者らは、トレーニング前と同一強度で運動を行った条件での運動後の安静時酸素摂取量が減少した機序について、運動中に産生された乳酸が少なくなったこと、運動中および運動後の深部体温が介入前に行った条件と比較して低くなったことによる影響が大きいと示唆している。本研究課題において、高強度・短時間・間欠的運動の運動時の総仕事量は、トレーニング前と比較してトレーニング後に有意に増加したが、高強度・短時間・間欠的運動後の直後の総酸素摂取量（10:34-12:00）は、トレーニング前後で有意な差が認められなかった。この結果は、Sedlock *et al.* (2010)の報告と一致している。

本研究の結果、トレーニング期間前後において、最大酸素摂取量が有意に増加し、高強度・短時間・間欠的運動時の総仕事量が増大したことから、運動時の酸素摂取量も同様に酸素摂

取量が高くなると考えられたが、運動時の総酸素摂取量に有意な差がみられなかった。これは、本研究では、ダグラスバッグ法による運動時と運動後の酸素摂取量を厳密に分けることができなかったことによる測定誤差であると考えられる。

Tabata *et al.* (1996)の研究では、本研究課題と同様の高強度・短時間・間欠的運動トレーニングを週に4回、6週間行くと最大酸素摂取量及び最大酸素借が増加したが、体重の変化はみられなかった。一方、本研究課題の結果、トレーニング前後において除脂肪体重が有意に増加し、部位別では両脚の除脂肪量のみ有意に増加することが明らかとなった。また、体重の変化はトレーニング前後にみられなかったが、全身の体脂肪率はトレーニング前と比較してトレーニング後に有意に低下した。これは、除脂肪体重の増加による影響であると考えられる。本研究課題で行った高強度・短時間・間欠的運動トレーニングは、1回あたりの正味の運動時間が2分から3分であったため、トレーニング期間全体における高強度・短時間・間欠的運動トレーニングによる総エネルギー消費量が少なかったことが予想される。体脂肪量を1kg減少させるためには、7000kcalのエネルギーを余剰に消費する必要がある。研究課題1-1の結果、高強度・短時間・間欠的運動の1回あたりのエネルギー消費量は、ウォームアップやEPOC、 Δ DITを含めると約200kcalであることを明らかとした。したがって、高強度・短時間・間欠的運動トレーニングにより体脂肪量を1kg減少させるためには、少なくとも35回実施する必要があった。しかし、本研究課題におけるトレーニング回数は30回であった。したがって、今回の研究課題での高強度・短時間・間欠的運動トレーニングによる総エネルギー消費量は、体脂肪量を1kg減少させるには満たなかったと考えられる。実際に、本研究課題では、有意ではないもののトレーニング前後における体脂肪量の差が0.5kgであった。よって、さらに長期間継続して高強度・短時間・間欠的運動トレーニングを実施することで、体脂肪量を減少させる可能性がある。

一方、トレーニング期間中における食事摂取量は調整せず、また、食事摂取量の調査を行わなかった。本研究で実施したような高強度・短時間・間欠的運動トレーニングが、食欲に

影響を与え、エネルギー摂取量が変化した可能性がある。しかし、Poon *et al.* (2018)は、少なくとも運動後の短期間は、高強度・短時間・間欠的運動トレーニングが食欲に有意な影響を及ぼさないことを示唆している。本研究は、体重や体脂肪の減少を目的として実施しなかったため、今後、このような高強度・短時間・間欠的運動トレーニングが食欲に及ぼす影響も検討する必要がある。

また、本研究では、高強度・短時間・間欠的運動トレーニングにより除脂肪量が増加した。除脂肪量は、本研究においては骨格筋量を反映していると考えられるが、自転車を用いた運動トレーニングで骨格筋量が増加したことは、本研究で行った高強度・短時間・間欠的運動トレーニングの特徴を示すものである可能性がある。本研究では、運動トレーニングの期間経過とともに、運動トレーニング時の仕事量を増加させた。これは、運動トレーニングによる最大酸素摂取量の増加によって、運動トレーニング時の仕事量も増加していると考えられる。しかし、10週間のトレーニング期間中に、総仕事量は $155 \pm 75 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 増加した。この増加した仕事量が、骨格筋量の増加に寄与した可能性がある。しかしながら、自転車運動は、下肢に対する仕事量が低いため、骨格筋量が増加しないという考え方が一般的であった。本研究で起きた現象については、今後さらなる研究によって、その機序を明らかにする必要がある。

5. 結論

10 週間の高強度・短時間・間欠的運動トレーニングによる最大酸素摂取量の増加は、高強度・短時間・間欠的運動後における食事後の安静時酸素摂取量に対して影響を与えないことが示唆された。しかし、さらに長期間継続して高強度・短時間・間欠的運動トレーニングを実施することにより、体組成の変化を引き起こす可能性が示された。

第6章 総合討論

本研究は、高強度・短時間・間欠的運動の運動中および運動後の安静時酸素摂取量に与える影響を明らかにすることを目的に実験を行なった。

Hill *et al.* (1924)は、EPOC が時間経過にしたがって、fast component（運動直後）、slow component（運動後2時間以内）、ultraslow component（運動後2時間以上）に分類することができるとしている。

運動時に消費されたクレアチンリン酸の再合成などによる EPOC は、fast component と呼ばれており、運動後数分間で消失する(Bahr *et al.* 1992, Gaesser and Brooks 1984)。これは、EPOC の主要成分であるクレアチンリン酸の再合成が、運動後2～4分後にはほとんど終了するからであると考えられている(Harris *et al.* 1976)。この間、クレアチンリン酸を有酸素性代謝により再合成するための酸素需要量は、かなり高いと考えられる。研究課題2において、高濃度酸素吸入条件の高強度・短時間・間欠的運動後の酸素摂取量は、通常空気吸入条件と比較して運動後0.5分から2.5分までのみ有意に増加した ($15.1 \pm 12.2 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$) (Table 12)。高濃度酸素吸入による高強度・短時間・間欠的運動後0.5分から2.5分に増加した EPOC は、同期間に測定された高濃度酸素吸入条件と通常空気吸入条件の平均筋温の差との間に有意な正の相関関係が認められた ($r=0.923$, $p<0.001$, Figure 23)。これらの結果から、このような高強度・短時間・間欠的運動後の EPOC の fast component は、運動により上昇する筋温の影響を受けていることが示唆された。Koshinaka *et al.* (2013)は、高濃度酸素吸入条件の高強度・短時間・間欠的運動による骨格筋温の上昇が、安静時の骨格筋への糖取り込みを増強することを示唆した。輸送された糖はグリコーゲンに急速に合成されるため、グリコーゲンが合成される際に必要なエネルギーは、酸素摂取量の増加に関与している可能性がある。また、高濃度酸素吸入条件では、筋温が高くなることによるミトコンドリアでのエネルギー代謝が Q10 effect により非効率化したために、高濃度酸素吸入条件のこの期間中に多くの酸素が消費された可能性もある。研究課題2における高濃度酸素吸入による EPOC

の増加は、 $15.1 \pm 12.2 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、エネルギー消費量にすると $5.2 \pm 4.7 \text{ kcal}$ のであることより、高強度・短時間・間欠的運動中における高濃度酸素吸入による、エネルギー消費量の増加は限定的であることが示唆された。

Table 12 研究課題 1-1 と 2 の結果のまとめ

($\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1}$)	研究課題 1-1	研究課題 2	
	食事摂取実験	高濃度酸素吸入	通常空気吸入
運動中総酸素摂取量			
10:30-10:34	123.4 ± 12.0		
EPOC			
10:34-12:00	115.3 ± 32.3		
高濃度酸素吸入による EPOCの増加量		15.1 ± 12.2	
10:34-12:00			
総仕事量 ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)	795 ± 100	881 ± 141	811 ± 156

平均 \pm 標準偏差

運動後、乳酸からのグリコーゲンの再合成や直腸温の上昇による EPOC は、slow component と呼ばれており、長時間続くと考えられている。研究課題 1-2 により、同一被験者に対して食事摂取実験、食事非摂取実験の両実験において非運動日、高強度・短時間・間欠運動日、中等度の強度の運動日の 6 条件で実験を行なった。その結果、食事非摂取実験における高強度・短時間・間欠的運動日の酸素摂取量は、11:30 の時点で非運動日との差が無くなることが明らかとなった (Figure 12)。また、Hagberg *et al.* (1980) は、EPOC の slow component に直腸温が関係していると示唆しているが、研究課題 2 において、高強度・短時間・間欠的運動後 12:00 の時点における直腸温は、運動前の安静時の値と差が無かった (Figure 21)。これらの研究課題 1-1、1-2、2 の結果より、高強度・短時間・間欠的運動による EPOC の slow component は、少なくとも運動終了後 1.5 時間後に、ほぼ消失していると考えられる。

EPOC の slow component は、運動による乳酸からのグリコーゲンの再合成や直腸温の上昇が関係していると考えられている (Borsheim and Bahr 2003)。Bahr *et al.* (1992) の研究では、最大酸素摂取量の 108% の強度で 2 分間の運動を 2 分間の休息を挟んで 3 セット行った場合に、血中乳酸濃度が運動後 2 時間以内に、直腸温が運動後 60 分以内に安静時の値になったと報告した。本研究においても、高強度・短時間・間欠的運動後における血中乳酸濃度は、運動後 2 時間以内に安静時の値になることが推測される。したがって、本研究で行なったような高強度・短時間・間欠的運動による EPOC の slow component が、昼食前に消失している可能性が高いことは、筋中及び血中乳酸濃度からも説明できると考えられる。言い方を変えると、本研究で対象とした高強度・短時間・間欠的運動は、EPOC の ultraslow component は存在しない可能性が高い。

研究課題 1-1・1-2 の高強度・短時間・間欠的運動日における 10:34 から 12:00 までの総酸素摂取量と非運動日の差、即ち EPOC は、食事摂取実験、食事摂取実験非摂取実験でそれぞれ $115.3 \pm 32.3 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $115.9 \pm 12.8 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $139.0 \pm 23.6 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $134.9 \pm 33.5 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ であった。高強度・短時間・間欠的運動の運動中の総酸素摂取量に対する EPOC は、それぞれ

92.4±18.7%、70.9±24.0%、109.9±30.9%、106.9±27.8%であった。また、中等度の強度の運動の EPOC は、食事摂取実験と食事非摂取実験でそれぞれ 50.8±17.3 mL・kg⁻¹、39.3±26.1 mL・kg⁻¹ となった。中等度の強度の運動後における EPOC も、高強度・短時間・間欠的運動と同様に 12:00 に消失することが明らかになった。中等度運動中の総酸素摂取量に対する EPOC は、4.7±1.4%であった。

高強度・短時間・間欠的運動と中等度の強度の運動中の総酸素摂取量および EPOC について検討するために、研究課題 1-1 と研究課題 1-2 の結果をまとめたところ、高強度・短時間・間欠的運動中の総酸素摂取量（研究課題 1-1、食事摂取実験：123.4±12.0 mL・kg⁻¹）は、中等度の強度の運動中の総酸素摂取量（研究課題 1-2、食事摂取実験：1083.6±173.2 mL・kg⁻¹）に対して少ないことがいえる。一方、高強度・短時間・間欠的運動の EPOC（研究課題 1-1、食事摂取実験：115.3±32.3 mL・kg⁻¹）は、中等度の強度の運動の EPOC（研究課題 1-2、食事摂取実験：50.8±17.3 mL・kg⁻¹）の約 2 倍となり、かなり高いことが分かった。この結果は、EPOC の総量は運動量ではなく、運動強度に強く依存していることを示しており、EPOC は運動強度が大きな影響を与えるという先行研究と同様な結果であった。また、高強度・短時間・間欠的運動の運動中の総酸素摂取量に対する EPOC の量が 92.4±18.7%（研究課題 1-1、食事摂取実験）、中等度の強度の運動中の総酸素摂取量に対する EPOC の量が 4.7±1.4%（研究課題 1-2、食事摂取実験）であった。これらのことから、本研究で行ったような高強度・短時間・間欠的運動が運動後の安静時酸素摂取量に与える影響は、中等度の強度の運動より大きくなることが推察された。

Table 13 研究課題 1-1 と 1-2 の結果のまとめ

(ml・kg ⁻¹)	研究課題 1		研究課題 2	
	高強度・短時間・間欠的運動 食事摂取実験	高強度・短時間・間欠的運動 食事摂取実験	中等度の強度の運動 食事摂取実験	中等度の強度の運動 食事摂取実験
<u>ヴォームアップ</u> 10:10-10:20	227.8±25.0	224.2±22.7	221.6±14.0	222.5±15.3
<u>運動中総酸素摂取量</u> 10:30-10:34	123.4±12.0	117.9±17.9	131.2±24.3	127.9±18.0
10:04-10:34				
<u>EPOC</u> 10:34-12:00	115.3±32.3	115.9±12.8	139.0±23.6	134.9±33.5
<u>ΔDIT</u> 12:00-16:00	60.6±40.0		55.0±25.4	
<u>ΔDIT</u> 12:00-23:00	146.1±90.9			
運動後に加算された 安静時総酸素摂取量	261.4±114.6			75.8±32.4
当該運動による 総酸素摂取量	613.3±131.9			1159.4±183.6

平均±標準偏差

研究課題3のトレーニング後における高強度・短時間・間欠的運動時の総仕事量は、トレーニング前に対して $20 \pm 11\%$ 増大したにもかかわらず、トレーニング前後の高強度・短時間・間欠的運動による EPOC の量は有意な差が認められなかった。これらの結果について議論するために研究課題1-1と3の実験結果を Table 11 に示した。EPOC の fast component の主要因子である筋中のクレアチンリン酸は、トレーニングにより増加しないものと考えられる。また、本研究では運動後に血中乳酸濃度を測定していないが、EPOC がトレーニングにより増大しなかったことから、トレーニング前後における高強度・短時間・間欠的運動時の総酸素借が変わらなかった可能性がある。一方、Tabata *et al.* (1996) は、本研究で行ったトレーニングと同様の高強度・短時間・間欠的運動トレーニングにより最大酸素借が増加すると報告している。したがって、研究課題3において、トレーニング前後で高強度・短時間・間欠的運動後の EPOC が増加しなかった理由については不明である。

Table 11 研究課題1-1と3の結果のまとめ

(ml · kg ⁻¹)	研究課題1	研究課題3	
	食事摂取実験	トレーニング前	トレーニング後
運動中総酸素摂取量			
10:30-10:34	123.4 \pm 12.0	137.4 \pm 29.6	140.2 \pm 23.6
EPOC			
10:34-12:00	115.3 \pm 32.3		
トレーニングによる EPOCの増加量			20.8 \pm 41.1
10:34-12:00			
Δ DIT			
12:00-23:00	146.1 \pm 90.9		-38.0 \pm 216.8
総仕事量 (J · kg ⁻¹)	795 \pm 100	789 \pm 81	944 \pm 79

平均 \pm 標準偏差

研究課題1～3を統合して、本研究で用いたような高強度・短時間・間欠的は、EPOC の成分のうち fast component および slow component に影響を与えるが、ultraslow component には影響を与えないことが明らかとなった。

本研究で用いたような高強度・短時間・間欠的運動後の EPOC が運動終了約 1.5 時間後である昼食摂取時まで消失した。これは、このような運動では EPOC の成分のうち ultraslow component は存在しないと考えられる。しかし、研究課題 1-1、1-2 において、高強度・短時間・間欠的運動を行った日の昼食後の安静時酸素摂取量が、非運動日の値より高くなった。この結果は、高強度・短時間・間欠的運動が食事誘発性の酸素摂取量をさらに増大させた結果であると考えられる (Table 12 : Δ DIT)。 Δ DIT は、各実験の運動日 (高強度・短時間・間欠的運動あるいは中等度の強度の運動) における 12:00 以降の総酸素摂取量と非運動日の差から算出した。研究課題 1-1 と 1-2 における Δ DIT を比較するため、研究課題 1-2 の測定期間である 12:00 から 16:00 までの Δ DIT を、研究課題 1-1 でも同様に算出した。研究課題 1-1 と 1-2 の高強度・短時間・間欠的運動後の Δ DIT (12:00-16:00) は、それぞれ $60.6 \pm 40.0 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $55.0 \pm 25.4 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ であった。また、研究課題 1-1 の総 Δ DIT (12:00-23:00) は、 $146.1 \pm 90.9 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ であった。これらの結果から、高強度・短時間・間欠的運動後による Δ DIT は、食事を 2 回摂取した方が大きくなることが示唆された。また、運動中の総酸素摂取量に対する Δ DIT は、研究課題 1-1 の結果から算出したところ、 $114.1 \pm 62.8\%$ となった。

DIT (食後の安静時酸素摂取量の増加) は、主に 2 つの要因によるものである。これは、栄養素の消化、吸収、輸送、貯蔵に必要なエネルギー (Acheson *et al.* 1984) と、副交感神経活動 (Deriaz *et al.* 1989, Nacht *et al.* 1987) や糖の合成 (Ravussin *et al.* 1985) などの際に使われるエネルギーである。本研究における高強度・短時間・間欠的運動日と非運動日の DIT の差は、これらの要因の違いによるものである可能性がある。第一に、DIT に対する栄養素の消化などに使われるエネルギーについて、食事の摂取、特に高炭水化物食を摂ることにより、交感神経活動の活性化を誘導し、酸素消費量/代謝率の上昇をもたらすことが示唆されている (Acheson *et al.* 1984, Berne *et al.* 1989)。しかし、本研究で供与した食事は、運動日と非運動日で同一であったため、DIT 及び DIT の酸素摂取量自体には差が無いと考えられる。したがって、高強度・短時間・間欠的運動後の Δ DIT は、運動後のインスリン感受性の長期的上

昇(Mikines *et al.* 1988)によって説明することができる可能性があるが、真の機序は未だに不明である。これまでに、最大酸素摂取量が高いほど DIT が高くなることが示唆されていたが(Poehlman *et al.* 1989)、運動後の DIT に与える影響については全く不明であった。運動後には、糖代謝が長時間亢進することが明らかとなっている。Mikines *et al.* (1988)の研究では、健康な成人男性に最大酸素摂取量の 64%の強度で 60 分間の自転車運動を行なわせたところ、運動終了から 48 時間後のインスリン感受性が運動実施前と比較して増加していたことを報告している。研究課題 1-1 において、高強度・短時間・間欠的運動の運動後の Δ DIT は、昼食後だけでなく、夕食後である 19:00 以降に再び増加した。この Δ DIT の増加は、高強度・短時間・間欠的運動終了後から 12 時間継続した。これらのことから、高強度・短時間・間欠的運動によって長時間増加した Δ DIT は、高強度・短時間・間欠的運動により糖代謝が亢進したことによる影響を受けている可能性がある。

研究課題 1-2 における中等度の強度の運動後の昼食後の Δ DIT (12:00-16:00) は、 $25.0 \pm 17.8 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ であった。また、中等度の強度の運動後における昼食後の Δ DIT は、食事後に短い期間で消失し、12:30-13:00 の 30 分間の期間のみ安静時酸素摂取量が増加した。研究課題 1-1 では、高強度・短時間・間欠的運動後における昼食により Δ DIT は、夕食摂取時 (18:30) まで、継続した。この結果は、本研究で行った高強度・短時間・間欠的運動の Δ DIT は、中等度の強度の運動と比較して、時間・量ともにはるかに大きいことを示唆している。

次に、研究課題 1-1 における高強度・短時間・間欠的運動の Δ DIT と、研究課題 1-2 における中等度の強度の運動後の Δ DIT を比較する。高強度・短時間・間欠的運動の Δ DIT (研究課題 1-1、食事摂取実験： $146.1 \pm 90.9 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$) は、中等度の強度の運動中の総酸素摂取量 (研究課題 1-2、食事摂取実験： $25.0 \pm 17.8 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$) と比較して約 5 倍程度であった。また、その量は、高強度・短時間・間欠的運動の運動中の総酸素摂取量に対する Δ DIT の量が $114.1 \pm 62.8\%$ (研究課題 1-1、食事摂取実験)、中等度の強度の運動中の総酸素摂取量に対する Δ DIT の量が $2.3 \pm 1.6\%$ (研究課題 1-2、食事摂取実験) であった。これらの結果から、本

研究で用いた高強度・短時間・間欠的運動が Δ DIT に与える影響の程度は、中等度の強度の運動と比較してかなり大きいことが明らかとなった。上述したように、運動後にはインスリン感受性が高まる(Mikines *et al.* 1988)。また、インスリン感受性の程度は、行った運動の質・量による。疲労困憊に至るような高強度・短時間・間欠的運動を行った場合や、低強度・長時間で疲労困憊に至るまで運動を行った場合に、インスリン感受性は最大に高まる(Koshinaka *et al.* 2008)。本研究においては、中等度の強度の運動を 30 分間行った場合より、高強度・短時間・間欠的運動を行った場合の方が、運動後に高まったインスリン感受性の程度が大きかったと考えられるため、DIT の増加の程度も、高強度・短時間・間欠的運動後の方が高くなったと考えられる。しかし、 Δ DIT の機序は、これまでの先行研究での報告がほとんどないため不明である。本研究の結果から、少なくとも運動強度が強く影響を与えていることが示唆される。

研究課題 1-1 では、 Δ DIT と被験者の最大酸素摂取量との間に有意な正の相関があることが明らかとなった。研究課題 3 では、高強度・短時間・間欠的運動トレーニングによる最大酸素摂取量の増加により、高強度・短時間・間欠的運動トレーニングの運動後の Δ DIT が増加することが推測された。しかし、運動後の Δ DIT は、トレーニング前後で差が無かった。これは、トレーニング期間が短かったことによる最大酸素摂取量の増加の程度が少なかったことが要因として考えられた。

高強度・短時間・間欠的運動が一日の総酸素摂取量およびエネルギー消費量に与える影響

高強度・短時間・間欠的運動が 1 日の総酸素摂取量に与える影響は、このような高強度・短時間・間欠的運動を実施する際に行なうウォームアップ中の総酸素摂取量 ($227.8 \pm 25.0 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$) と高強度・短時間・間欠的運動中の総酸素摂取量 ($123.4 \pm 12.0 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$) の和を運動時の総酸素摂取量とし、運動後に増加する安静時酸素摂取量 (EPOC と Δ DIT の和： $261.4 \pm 114.6 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$) を加算して算出した (研究課題 1-1 の結果より)。本研究で用いた高

強度・短時間・間欠的運動は、1日の総酸素摂取量を $613.3 \pm 131.9 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ 増加させることが明らかとなった。

本研究で用いたような高強度・短時間・間欠的運動は、運動中の R (RQ) が 1.0 より高く、運動直後に 0.7 未満になる (Figure 16) ため、酸素摂取量と RQ または R を用いて、高強度・短時間・間欠的運動及び運動後のエネルギー消費量を計算することはできない。これは、標準的に用いられる Weir の式では、RQ の範囲が 0.7-1.0 であると仮定しているためである (Weir 1949)。本研究の目的のうちの一つは、高強度・短時間・間欠的運動のエネルギー消費量及び運動直後の回復期、食後の消費量を含む運動後長期間の回復期について比較することであった。そのため、日常生活のエネルギー消費量の様々な要素に対する高強度・短時間・間欠的運動の影響を評価するには、エネルギー消費量ではなく共通の指標である総酸素摂取量を用いる必要があった。しかし、高強度・短時間・間欠的運動のエネルギー消費量に関して、エネルギー消費量及び RQ (R) の値を示す価値があるものと考えられるため、その値を算出した。研究課題 1-1 における被験者 (体重 $64.4 \pm 6.0 \text{ kg}$, $n=10$) のエネルギー消費量は、高強度・短時間・間欠的運動前に行なったウォーミングアップが $74.3 \pm 5.2 \text{ kcal}$ 、高強度・短時間・間欠的運動の運動中が $39.8 \pm 6.3 \text{ kcal}$ 、高強度・短時間・間欠的運動後 1.5 時間の EPOC が $37.5 \pm 12.7 \text{ kcal}$ 、高強度・短時間・間欠的運動後の食事後に観測された ΔDIT が $47.8 \pm 32.0 \text{ kcal}$ であった。EPOC の量は、一般的に運動中の総酸素摂取量の約 15% と推定されている (Dietary Reference Intakes for Energy, Carbohydrate, Fiber, Fat, Fatty Acids, Cholesterol, Protein, and Amino Acids 2005)。研究課題 1-1 の結果、高強度・短時間・間欠的運動後の初めの 1.5 時間に観測された EPOC は、高強度・短時間・間欠的運動の運動中の酸素摂取量とほぼ同等 ($92.4 \pm 18.7\%$) であったことが明らかとなった。さらに、高強度・短時間・間欠的運動の総酸素需要量 ($191.1 \pm 25.5 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$) に対しては、EPOC が $60.1 \pm 12.8\%$ 、 ΔDIT が $74.0 \pm 41.1\%$ となり、EPOC と ΔDIT を合計すると総酸素需要量に対して $134.0 \pm 47.5\%$ となることが示さ

れ、運動によるエネルギー消費量の算定について今後、高強度・短時間・間欠的運動の場合は、留意する必要があることが示唆された。

これまでに、最大酸素摂取量が高い人ほど DIT が高いことが知られていたが(Poehlman *et al.* 1989)、最大酸素摂取量と運動後における DIT の増加の程度に関する報告は全くなかった。研究課題 1-1 によって、食事摂取実験における運動日と非運動日の昼食開始時刻から睡眠開始時刻までの総酸素摂取量の差 (Δ DIT) と被験者の最大酸素摂取量の値との間に有意な正の相関関係がある($r=0.76$, $p<0.05$, $n=10$, Figure 5)ことが初めて示された。これは、Obesity reviews(Byrne and Hills 2018)により引用されるなど、興味深い結果を得ることができた。

高強度・短時間・間欠的運動の運動中のエネルギー消費量は、中等度の運動に比べて少ない。この高強度・短時間・間欠的運動を用いたトレーニングを体重の増減という観点での報告はされていないが(Tabata *et al.* 1996)、高強度・短時間・間欠的運動を用いたトレーニング期間中に EPOC や Δ DIT が一日の総エネルギー消費量に少なからず影響を与えていると考えられる。Hill *et al.* (2003)は、米国国民健康栄養調査により 1 日当たり 100kcal の余剰エネルギー消費 (1 日の総エネルギー消費量と 1 日の総エネルギー摂取量の差) により体重増加を予防できる可能性があると報告した。研究課題 1-1 の被験者 (体重 64.4 ± 6.0 kg) に対しては、前述した 4 種のエネルギー消費量 (運動中や運動後の酸素摂取量) の合計値は 199.4 ± 12.4 kcal であり、体重減少を引き起こす影響を与えている可能性がある。

Weir の式を使用して計算された中等度の強度の運動による Δ DIT は、 8.2 ± 5.3 kcal であった。1 日の総エネルギー消費量の増加量は、食事の摂取量に変化がないと仮定した場合、約 1%と量的には少ないが、中等度の強度の運動による Δ DIT の存在が本研究で初めて明らかとなった (Figure 24)。これまで、中等度の運動の Δ DIT の存在について一貫した結果が出なかった理由として、その値が高強度・短時間・間欠的運動のそれに比べて量的に少ないことから、その存在が方法論的に確認できなかったことが挙げられる。この中等度の運動において Δ DIT の存在が確認されたことは、純粋生理学および栄養科学の観点から重要であると

考えられる。このような僅かなエネルギー消費量の差を検出できたのは、昼食後の被験者の安静時酸素摂取量を連続的かつ安定的に測定することができるエネルギー代謝測定室を用いたためであると推測される。

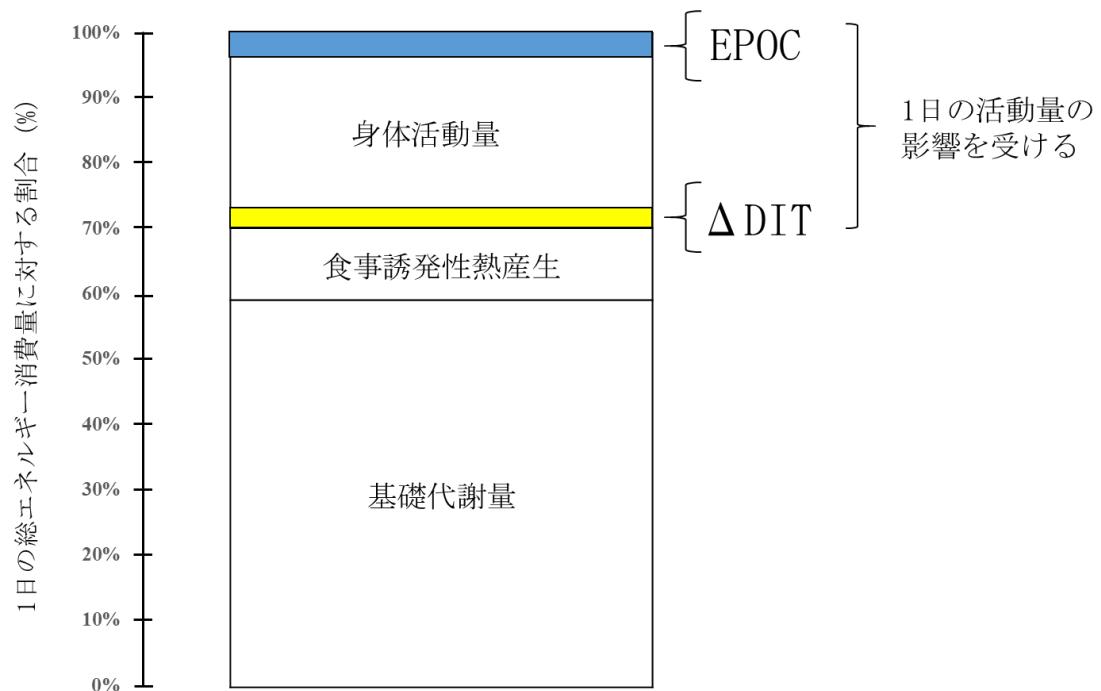


Figure 24 一日の総エネルギー消費量の構成に Δ DIT を加えた図

しかし、体重増加を防ぐという観点からは中等度の強度の運動誘発性 Δ DIT は期待できないため、中等度の強度の運動については、運動時間を増加させることによってエネルギー消費量を増加させることが重要である。

高強度運動が体組成に与える影響

これまで、体重減少を目的とした運動方法としては、中等度の強度の運動によるエネルギー消費量が多いことから推奨されてきた。一方、高い強度の運動は、中等度の強度の運動に比較して運動時間が短いことから、運動中のエネルギー消費量が少ないために体重減少を目的とした場合、それほど効果が見込めないと考えられてきた。しかし、高強度の運動でも休息期間を設けて複数回繰り返すようなインターバルトレーニングを用いることで、

運動によるエネルギー消費量を増加させることが可能となる。Helgerud *et al.* (2007)の研究では、10名の若年男性を対象に最高心拍数の90-95%の運動強度で4分間の走運動を3分間の休息を挟んで4セット繰り返すトレーニングを週3回、8週間行わせたところ、トレーニング前と比較してトレーニング後に体重が1.5kg減少したと報告されている。Tjønnå *et al.* (2008)の研究では、12名の過体重の中年男女を対象に最高心拍数の90%の運動強度で4分間、登り傾斜をつけたトレッドミルでの走運動あるいは歩行を3分間の休息を挟んで4セット繰り返すトレーニングを週3回、16週間行わせたところ、トレーニング前と比較してトレーニング後に体重が2.3kg減少したと報告している。また、全力自転車運動を用いたスプリントインターバルトレーニングによる研究では、Trapp *et al.* (2008)は、健康若年女性を対象に8秒間の全力自転車運動を12秒間のインターバルで60セットのトレーニングを15週間行わせたところ、体重が1.5kg、体脂肪量が2.5kgの減少が見られたと報告した。一方、Perry *et al.* (2008)の研究では、8名の健康な若年男女を対象に、自転車エルゴメータを用いた負荷漸増法による最高酸素摂取量測定時において疲労困憊に至った運動強度の90%の運動強度で4分間の自転車運動を2分間の休息を挟んで10セット繰り返すトレーニングを週3回、6週間行わせたところ、トレーニング前後で体重に有意な変化はみられなかったと報告した。Boutcher (2011)は、上記の研究を含んだHIIEによる運動トレーニングの総説で正常体重の若年者や、やや過体重の男女の皮下脂肪および腹部の脂肪を減少させることを示唆している。

研究課題3では、高強度・短時間・間欠的運動トレーニングによる最大酸素摂取量の増加により、高強度・短時間・間欠的運動トレーニングの運動後の安静時酸素摂取量が増加することが推測された。しかし、高強度・短時間・間欠的運動の運動中および運動後の安静時酸素摂取量は、トレーニング前後で差が無かった。この理由は、トレーニング期間が短かったことによる最大酸素摂取量の増加の程度が小さかったことが原因として考えられた。また、体重および体脂肪量は、トレーニング前後で変化がみられなかった。本研究で実施した高強

度・短時間・間欠的運動トレーニングは、1 回あたりの正味の運動時間が 4 分程度であり、週に 3 回、10 週間実施したため、総運動時間は 120 分程度であった。研究課題 3 におけるトレーニング期間前後に体重あるいは体脂肪量が減少しなかった理由は、トレーニング期間における総仕事量が少なかったことが原因かもしれない。したがって、他の先行研究のような体重減少やさらなる体脂肪率の減少を引き起こすためには、トレーニング期間を長くすることによって、トレーニング期間全体における総エネルギー消費量を増大させる必要があると考えられた。

本研究では、高強度・短時間・間欠的運動の運動中および運動後の酸素摂取量を、エネルギー代謝測定室を用いて測定したことによって、これまで不明確であった DIT に運動が及ぼす影響を明らかにすることができた (Figure 24)。しかし、本研究で用いた高強度・短時間・間欠的運動の総酸素摂取量自体は、体重減少を引き起こすには不十分である可能性が示された。体重減少を目的に運動を実施する場合は、エネルギー消費量の大きい中等度の強度の運動トレーニングなどと組み合わせて実施することが望ましいと考えられる。

第7章 結論

本研究の結果より、高強度・短時間・間欠的運動は、運動後の食事による安静時酸素摂取量増加をさらに昂進させ、それは有酸素性体力と相関関係があることが明らかとなった。しかし、高強度・短時間・間欠的運動トレーニングを行い、最大酸素摂取量を増加させても、運動後の食事による安静時酸素摂取量は増加しない可能性が示された。したがって本研究は、高強度・短時間・間欠的運動による体重減少効果が限定的であることを示すことができた。

謝辞

本稿を終えるにあたり、終始懇切丁寧な御指導、御校閲を賜りました指導教員の田畑泉教授に心から謝意を表します。先生と歩んだ9年間は、かけがえのないものであり、すべてが私の財産です。ありがとうございました。

また、ご多忙の中副査を引き受けてくださった、国立健康・栄養研究所・田中茂穂先生、立命館大学・真田樹義教授、後藤一成教授には、貴重な御指導、御助言を賜りました。実験を進める上では、東京医科大学・浜岡隆文教授、立命館大学・海老久美子教授、塩澤成弘教授、有光琢磨助教に多大な御指導を賜りました。諸先生方に深く感謝いたします。

川崎医療福祉大学・松生香里准教授、順天堂大学・宮本恵里特任助教、神戸大学・佐藤幸治准教授には、全く研究を知らない私に様々な場面で相談に乗っていただき、助言を頂きました。田畑研究室の皆さまにも大変お世話になりました。特に、奥野（劉）辛さん、徐宇中さん、浜野純さんの三人なくしては本稿を終えることはできませんでした。さらに、田畑研究室の研究を引き継いでくださった助手の東郷将成先生には、本稿を締めくくるときに大変お世話になりました。本当にありがとうございました。

実験にご協力くださいました被験者の皆様には、厚く御礼申し上げます。被験者の皆様にとって非常に負担の大きい実験であったにも関わらず、快くご協力くださり誠にありがとうございました。また、多くの実験を協力していただいた田畑ゼミ卒業生の皆様にも感謝の意を表します。最後になりましたが、9年間いつでも私を温かく見守り、支えてくれた家族に、深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Acheson KJ, Ravussin E, Wahren J and Jequier E (1984). Thermic effect of glucose in man. Obligatory and facultative thermogenesis. *J Clin Invest* 74(5): 1572-1580. DOI: 10.1172/jci111573
- 2) Bahr R, Gronnerod O and Sejersted OM (1992). Effect of supramaximal exercise on excess postexercise O₂ consumption. *Med Sci Sports Exerc* 24(1): 66-71.
- 3) Bahr R, Ingnes I, Vaage O, Sejersted OM and Newsholme EA (1987). Effect of duration of exercise on excess postexercise O₂ consumption. *J Appl Physiol (1985)* 62(2): 485-490. DOI: 10.1152/jappl.1987.62.2.485
- 4) Bahr R and Sejersted OM (1991). Effect of feeding and fasting on excess postexercise oxygen consumption. *J Appl Physiol (1985)* 71(6): 2088-2093. DOI: 10.1152/jappl.1991.71.6.2088
- 5) Benedict FG and Carpenter TM (1910). The metabolism and energy transformations of healthy man during rest. Washington, DC: The Carnegie Institute.
- 6) Berne C, Fagius J and Niklasson F (1989). Sympathetic response to oral carbohydrate administration. Evidence from microelectrode nerve recordings. *J Clin Invest* 84(5): 1403-1409. DOI: 10.1172/jci114313
- 7) Borsheim E and Bahr R (2003). Effect of exercise intensity, duration and mode on post-exercise oxygen consumption. *Sports Med* 33(14): 1037-1060. DOI: 10.2165/00007256-200333140-00002
- 8) Borsheim E, Bahr R and Knardahl S (1998). Effect of beta-adrenoceptor stimulation on oxygen consumption and triglyceride/fatty acid cycling after exercise. *Acta Physiol Scand* 164(2): 157-166. DOI: 10.1046/j.1365-201X.1998.00422.x
- 9) Boutcher SH (2011). High-intensity intermittent exercise and fat loss. *Journal of*

obesity 2011. DOI: 10.1155/2011/868305

- 10) Brajkovic D and Ducharme MB (2005). Confounding factors in the use of the zero-heat-flow method for non-invasive muscle temperature measurement. *Eur J Appl Physiol* 94(4): 386-391. DOI: 10.1007/s00421-005-1336-1
- 11) Broeder CE, Brenner M, Hofman Z, Paijmans IJ, Thomas EL and Wilmore JH (1991). The metabolic consequences of low and moderate intensity exercise with or without feeding in lean and borderline obese males. *Int J Obes* 15(2): 95-104.
- 12) Brooks GA, Hittelman KJ, Faulkner JA and Beyer RE (1971). Temperature, liver mitochondrial respiratory functions, and oxygen debt. *Med Sci Sports* 3(2): 72-74.
- 13) Brooks GA, Hittelman KJ, Faulkner JA and Beyer RE (1971). Temperature, skeletal muscle mitochondrial functions, and oxygen debt. *Am J Physiol* 220(4): 1053-1059. DOI: 10.1152/ajplegacy.1971.220.4.1053
- 14) Brooks GA, Hittelman KJ, Faulkner JA and Beyer RE (1971). Tissue temperatures and whole-animal oxygen consumption after exercise. *Am J Physiol* 221(2): 427-431. DOI: 10.1152/ajplegacy.1971.221.2.427
- 15) Burns SF, Oo HH and Tran AT (2012). Effect of sprint interval exercise on postexercise metabolism and blood pressure in adolescents. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 22(1): 47-54.
- 16) Byrne NM and Hills AP (2018). How much exercise should be promoted to raise total daily energy expenditure and improve health? *Obes Rev* 19 Suppl 1: 14-23. DOI: 10.1111/obr.12788
- 17) Chad KE and Wenger HA (1988). The effect of exercise duration on the exercise and post-exercise oxygen consumption. *Can J Sport Sci* 13(4): 204-207.
- 18) Chan HH and Burns SF (2013). Oxygen consumption, substrate oxidation, and blood pressure following sprint interval exercise. *Appl Physiol Nutr Metab* 38(2): 182-187. DOI:

10.1139/apnm-2012-0136

19) Choi D, Cole KJ, Goodpaster BH, Fink WJ and Costill DL (1994). Effect of passive and active recovery on the resynthesis of muscle glycogen. *Med Sci Sports Exerc* 26(8): 992-996.

20) Davis JR, Tagliaferro AR, Kertzer R, Gerardo T, Nichols J and Wheeler J (1983). Variations of dietary-induced thermogenesis and body fatness with aerobic capacity. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 50(3): 319-329.

21) Denzer CM and Young JC (2003). The effect of resistance exercise on the thermic effect of food. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 13(3): 396-402.

22) Deriaz O, Nacht CA, Chiolo R, Jequier E and Acheson KJ (1989). The parasympathetic nervous system and the thermic effect of glucose/insulin infusions in humans. *Metabolism* 38(11): 1082-1088.

23) Despres JP, Pouliot MC, Moorjani S, Nadeau A, Tremblay A, Lupien PJ, Theriault G and Bouchard C (1991). Loss of abdominal fat and metabolic response to exercise training in obese women. *Am J Physiol* 261(2 Pt 1): E159-167. DOI:

10.1152/ajpendo.1991.261.2.E159

24) Dipasquale DM, Kolkhorst FW and Buono MJ (2015). Acute normobaric hypoxia reduces body temperature in humans. *High Alt Med Biol* 16(1): 61-66. DOI:

10.1089/ham.2014.1098

25) Donnelly JE, Hill JO, Jacobsen DJ, Potteiger J, Sullivan DK, Johnson SL, Heelan K, Hise M, Fennessey PV, Sonko B, Sharp T, Jakicic JM, Blair SN, Tran ZV, Mayo M, Gibson C and Washburn RA (2003). Effects of a 16-month randomized controlled exercise trial on body weight and composition in young, overweight men and women: the Midwest Exercise Trial. *Arch Intern Med* 163(11): 1343-1350. DOI: 10.1001/archinte.163.11.1343

26) Dubois EF (1921). The basal metabolism in fever. *JAMA* 77: 352-357.

- 27) Ebeling P, Bourey R, Koranyi L, Tuominen JA, Groop LC, Henriksson J, Mueckler M, Sovijarvi A and Koivisto VA (1993). Mechanism of enhanced insulin sensitivity in athletes. Increased blood flow, muscle glucose transport protein (GLUT-4) concentration, and glycogen synthase activity. *J Clin Invest* 92(4): 1623-1631. DOI: 10.1172/jci116747
- 28) Frey GC, Byrnes WC and Mazzeo RS (1993). Factors influencing excess postexercise oxygen consumption in trained and untrained women. *Metabolism* 42(7): 822-828.
- 29) Gaesser GA and Brooks GA (1984). Metabolic bases of excess post-exercise oxygen consumption: a review. *Med Sci Sports Exerc* 16(1): 29-43.
- 30) Ganpule AA, Tanaka S, Ishikawa-Takata K and Tabata I (2007). Interindividual variability in sleeping metabolic rate in Japanese subjects. *Eur J Clin Nutr* 61(11): 1256-1261. DOI: 10.1038/sj.ejcn.1602645
- 31) Gore CJ and Withers RT (1990). Effect of exercise intensity and duration on postexercise metabolism. *J Appl Physiol (1985)* 68(6): 2362-2368. DOI: 10.1152/jappl.1990.68.6.2362
- 32) Gore CJ and Withers RT (1990). The effect of exercise intensity and duration on the oxygen deficit and excess post-exercise oxygen consumption. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 60(3): 169-174.
- 33) Granata GP and Brandon LJ (2002). The thermic effect of food and obesity: discrepant results and methodological variations. *Nutr Rev* 60(8): 223-233. DOI: 10.1301/002966402320289359
- 34) Hagberg JM, Mullin JP and Nagle FJ (1980). Effect of work intensity and duration on recovery O₂. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol* 48(3): 540-544. DOI: 10.1152/jappl.1980.48.3.540
- 35) Harris RC, Edwards RH, Hultman E, Nordesjo LO, Nyling B and Sahlin K (1976). The

time course of phosphorylcreatine resynthesis during recovery of the quadriceps muscle in man. *Pflugers Arch* 367(2): 137-142.

36) Hashkes PJ, Gartside PS and Blondheim SH (1997). Effect of food palatability on early (cephalic) phase of diet-induced thermogenesis in nonobese and obese man. *Int J Obes Relat Metab Disord* 21(7): 608-613.

37) Hazell TJ, Olver TD, Hamilton CD and Lemon PW (2012). Two minutes of sprint-interval exercise elicits 24-hr oxygen consumption similar to that of 30 min of continuous endurance exercise. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 22(4): 276-283.

38) Helgerud J, Hoydal K, Wang E, Karlsen T, Berg P, Bjerkaas M, Simonsen T, Helgesen C, Hjorth N, Bach R and Hoff J (2007). Aerobic high-intensity intervals improve VO₂max more than moderate training. *Med Sci Sports Exerc* 39(4): 665-671. DOI: 10.1249/mss.0b013e3180304570

39) Henning B, Lofgren R and Sjostrom L (1996). Chamber for indirect calorimetry with improved transient response. *Med Biol Eng Comput* 34(3): 207-212.

40) Henry CJ (2005). Basal metabolic rate studies in humans: measurement and development of new equations. *Public Health Nutr* 8(7a): 1133-1152.

41) Hill A and Lupton H (1923). Muscular exercise, lactic acid, and the supply and utilization of oxygen. *QJM: An International Journal of Medicine*(62): 135-171.

42) Hill AV, Long CNH and Lupton H (1924). Muscular Exercise, Lactic Acid, and the Supply and Utilisation of Oxygen. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Containing Papers of a Biological Character* 97(681): 84-138.

43) Hill JO, Wyatt HR, Reed GW and Peters JC (2003). Obesity and the environment: where do we go from here? *Science* 299(5608): 853-855. DOI: 10.1126/science.1079857

44) Kelly B, King JA, Goerlach J and Nimmo MA (2013). The impact of high-intensity

- intermittent exercise on resting metabolic rate in healthy males. *Eur J Appl Physiol* 113(12): 3039-3047. DOI: 10.1007/s00421-013-2741-5
- 45) Knight DR, Schaffartzik W, Poole DC, Hogan MC, Bebout DE and Wagner PD (1993). Effects of hyperoxia on maximal leg O₂ supply and utilization in men. *J Appl Physiol* (1985) 75(6): 2586-2594. DOI: 10.1152/jappl.1993.75.6.2586
- 46) Koshinaka K, Kawamoto E, Abe N, Toshinai K, Nakazato M and Kawanaka K (2013). Elevation of muscle temperature stimulates muscle glucose uptake in vivo and in vitro. *J Physiol Sci* 63(6): 409-418. DOI: 10.1007/s12576-013-0278-3
- 47) Koshinaka K, Kawasaki E, Hokari F and Kawanaka K (2009). Effect of acute high-intensity intermittent swimming on post-exercise insulin responsiveness in epitrochlearis muscle of fed rats. *Metabolism* 58(2): 246-253. DOI: 10.1016/j.metabol.2008.09.021
- 48) Koshinaka K, Sano A, Howlett KF, Yamazaki T, Sasaki M, Sakamoto K and Kawanaka K (2008). Effect of high-intensity intermittent swimming on postexercise insulin sensitivity in rat epitrochlearis muscle. *Metabolism* 57(6): 749-756. DOI: 10.1016/j.metabol.2008.01.014
- 49) Laforgia J, Withers RT and Gore CJ (2006). Effects of exercise intensity and duration on the excess post-exercise oxygen consumption. *J Sports Sci* 24(12): 1247-1264. DOI: 10.1080/02640410600552064
- 50) Laforgia J, Withers RT, Shipp NJ and Gore CJ (1997). Comparison of energy expenditure elevations after submaximal and supramaximal running. *J Appl Physiol* (1985) 82(2): 661-666. DOI: 10.1152/jappl.1997.82.2.661
- 51) Larsen FJ, Anderson M, Ekblom B and Nystrom T (2012). Cardiorespiratory fitness predicts insulin action and secretion in healthy individuals. *Metabolism* 61(1): 12-16. DOI: 10.1016/j.metabol.2011.05.010

- 52) Linnarsson D, Karlsson J, Fagraeus L and Saltin B (1974). Muscle metabolites and oxygen deficit with exercise in hypoxia and hyperoxia. *J Appl Physiol* 36(4): 399-402. DOI: 10.1152/jappl.1974.36.4.399
- 53) Margaria R, Edwards H and Dill DB (1933). The possible mechanisms of contracting and paying the oxygen debt and the role of lactic acid in muscular contraction. *American Journal of Physiology-Legacy Content* 106(3): 689-715.
- 54) Matsukawa T, Kashimoto S, Ozaki M, Shindo S and Kumazawa T (1996). Temperatures measured by a deep body thermometer (Coretemp) compared with tissue temperatures measured at various depths using needles placed into the sole of the foot. *Eur J Anaesthesiol* 13(4): 340-345.
- 55) Medbo JJ, Mohn AC, Tabata I, Bahr R, Vaage O and Sejersted OM (1988). Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O₂ deficit. *J Appl Physiol (1985)* 64(1): 50-60. DOI: 10.1152/jappl.1988.64.1.50
- 56) Medicine IO (2005). Dietary Reference Intakes for Energy, Carbohydrate, Fiber, Fat, Fatty Acids, Cholesterol, Protein, and Amino Acids. Washington, DC(The National Academies Press): 1358. DOI: doi:10.17226/10490
- 57) Midorikawa T, Tanaka S, Kaneko K, Koizumi K, Ishikawa-Takata K, Futami J and Tabata I (2007). Evaluation of low-intensity physical activity by triaxial accelerometry. *Obesity (Silver Spring)* 15(12): 3031-3038. DOI: 10.1038/oby.2007.361
- 58) Mikines KJ, Sonne B, Farrell PA, Tronier B and Galbo H (1988). Effect of physical exercise on sensitivity and responsiveness to insulin in humans. *Am J Physiol* 254(3 Pt 1): E248-259. DOI: 10.1152/ajpendo.1988.254.3.E248
- 59) Myerson M, Gutin B, Warren MP, May MT, Contento I, Lee M, Pi-Sunyer FX, Pierson RN, Jr. and Brooks-Gunn J (1991). Resting metabolic rate and energy balance in

amenorrheic and eumenorrheic runners. *Med Sci Sports Exerc* 23(1): 15-22.

60) Nacht CA, Christin L, Temler E, Chiolo R, Jequier E and Acheson KJ (1987).

Thermic effect of food: possible implication of parasympathetic nervous system. *Am J Physiol* 253(5 Pt 1): E481-488. DOI: 10.1152/ajpendo.1987.253.5.E481

61) Nguyen T, De Jonge L, Smith SR and Bray GA (2003). Chamber for indirect calorimetry with accurate measurement and time discrimination of metabolic plateaus of over 20 min. *Med Biol Eng Comput* 41(5): 572-578.

62) Ohkawara K, Tanaka S, Ishikawa-Takata K and Tabata I (2008). Twenty-four-hour analysis of elevated energy expenditure after physical activity in a metabolic chamber: models of daily total energy expenditure. *Am J Clin Nutr* 87(5): 1268-1276. DOI: 10.1093/ajcn/87.5.1268

63) Ohkawara K, Tanaka S, Miyachi M, Ishikawa-Takata K and Tabata I (2007). A dose-response relation between aerobic exercise and visceral fat reduction: systematic review of clinical trials. *Int J Obes (Lond)* 31(12): 1786-1797. DOI: 10.1038/sj.ijo.0803683

64) Ohnaka M, Iwamoto M, Sakamoto S, Niwa Y, Matoba H, Nakayasu K and Nakaya Y (1998). Does prolonged exercise alter diet-induced thermogenesis? *Ann Nutr Metab* 42(6): 311-318. DOI: 10.1159/000012750

65) Perry CG, Heigenhauser GJ, Bonen A and Spriet LL (2008). High-intensity aerobic interval training increases fat and carbohydrate metabolic capacities in human skeletal muscle. *Appl Physiol Nutr Metab* 33(6): 1112-1123. DOI: 10.1139/h08-097

66) Poehlman ET, Melby CL, Badylak SF and Calles J (1989). Aerobic fitness and resting energy expenditure in young adult males. *Metabolism* 38(1): 85-90.

67) Poon ET, Sun FH, Chung AP and Wong SH (2018). Post-Exercise Appetite and Ad Libitum Energy Intake in Response to High-Intensity Interval Training versus Moderate-

- or Vigorous-Intensity Continuous Training among Physically Inactive Middle-Aged Adults. *Nutrients* 10(10). DOI: 10.3390/nu10101408
- 68) Quatela A, Callister R, Patterson A and Macdonald-Wicks L (2016). The Energy Content and Composition of Meals Consumed after an Overnight Fast and Their Effects on Diet Induced Thermogenesis: A Systematic Review, Meta-Analyses and Meta-Regressions. *Nutrients* 8(11). DOI: 10.3390/nu8110670
- 69) Ravussin E, Acheson KJ, Vernet O, Danforth E and Jequier E (1985). Evidence that insulin resistance is responsible for the decreased thermic effect of glucose in human obesity. *J Clin Invest* 76(3): 1268-1273. DOI: 10.1172/jci112083
- 70) Ravussin E and Bogardus C (1989). Relationship of genetics, age, and physical fitness to daily energy expenditure and fuel utilization. *Am J Clin Nutr* 49(5 Suppl): 968-975. DOI: 10.1093/ajcn/49.5.968
- 71) Romijn JA, Coyle EF, Sidossis LS, Gastaldelli A, Horowitz JF, Endert E and Wolfe RR (1993). Regulation of endogenous fat and carbohydrate metabolism in relation to exercise intensity and duration. *Am J Physiol* 265(3 Pt 1): E380-391. DOI: 10.1152/ajpendo.1993.265.3.E380
- 72) Ross R, Dagnone D, Jones PJ, Smith H, Paddags A, Hudson R and Janssen I (2000). Reduction in obesity and related comorbid conditions after diet-induced weight loss or exercise-induced weight loss in men. A randomized, controlled trial. *Ann Intern Med* 133(2): 92-103.
- 73) Saltin B and Karlsson J (1971). Muscle Glycogen Utilization During Work of Different Intensities. Muscle Metabolism During Exercise: Proceedings of a Karolinska Institutet Symposium held in Stockholm, Sweden, September 6–9, 1970 Honorary guest: E Hohwü Christensen. B. Pernow and B. Saltin. Boston, MA, Springer US: 289-299.

- 74) Sato Y, Hayamizu S, Yamamoto C, Ohkuwa Y, Yamanouchi K and Sakamoto N (1986). Improved insulin sensitivity in carbohydrate and lipid metabolism after physical training. *Int J Sports Med* 7(6): 307-310. DOI: 10.1055/s-2008-1025781
- 75) Schaun GZ, Alberton CL, Ribeiro DO and Pinto SS (2017). Acute effects of high-intensity interval training and moderate-intensity continuous training sessions on cardiorespiratory parameters in healthy young men. *Eur J Appl Physiol* 117(7): 1437-1444. DOI: 10.1007/s00421-017-3636-7
- 76) Schulz LO, Nyomba BL, Alger S, Anderson TE and Ravussin E (1991). Effect of endurance training on sedentary energy expenditure measured in a respiratory chamber. *Am J Physiol* 260(2 Pt 1): E257-261. DOI: 10.1152/ajpendo.1991.260.2.E257
- 77) Schwartz RS, Shuman WP, Larson V, Cain KC, Fellingham GW, Beard JC, Kahn SE, Stratton JR, Cerqueira MD and Abrass IB (1991). The effect of intensive endurance exercise training on body fat distribution in young and older men. *Metabolism* 40(5): 545-551.
- 78) Scott CB, Fernandes J and Lehman M (2007). Onset of the Thermic Effect of Feeding (TEF): a randomized cross-over trial. *J Int Soc Sports Nutr* 4: 24. DOI: 10.1186/1550-2783-4-24
- 79) Sedlock DA, Fissinger JA and Melby CL (1989). Effect of exercise intensity and duration on postexercise energy expenditure. *Med Sci Sports Exerc* 21(6): 662-666.
- 80) Sedlock DA, Lee MG, Flynn MG, Park KS and Kamimori GH (2010). Excess postexercise oxygen consumption after aerobic exercise training. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 20(4): 336-349.
- 81) Segal KR, Gutin B, Albu J and Pi-Sunyer FX (1987). Thermic effects of food and exercise in lean and obese men of similar lean body mass. *Am J Physiol* 252(1 Pt 1): E110-

117. DOI: 10.1152/ajpendo.1987.252.1.E110

82) Sevits KJ, Melanson EL, Swibas T, Binns SE, Klochak AL, Lonac MC, Peltonen GL, Scalzo RL, Schweder MM, Smith AM, Wood LM, Melby CL and Bell C (2013). Total daily energy expenditure is increased following a single bout of sprint interval training. *Physiol Rep* 1(5): e00131. DOI: 10.1002/phy2.131

83) Skelly LE, Andrews PC, Gillen JB, Martin BJ, Percival ME and Gibala MJ (2014). High-intensity interval exercise induces 24-h energy expenditure similar to traditional endurance exercise despite reduced time commitment. *Appl Physiol Nutr Metab* 39(7): 845-848. DOI: 10.1139/apnm-2013-0562

84) Sperlich B, Calbet JaL, Boushel R and Holmberg H-C (2016). Is the use of hyperoxia in sports effective, safe and ethical? *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 26(11): 1268-1272. DOI: 10.1111/sms.12746

85) Tabata I, Irisawa K, Kouzaki M, Nishimura K, Ogita F and Miyachi M (1997). Metabolic profile of high intensity intermittent exercises. *Med Sci Sports Exerc* 29(3): 390-395.

86) Tabata I, Nishimura K, Kouzaki M, Hirai Y, Ogita F, Miyachi M and Yamamoto K (1996). Effects of moderate-intensity endurance and high-intensity intermittent training on anaerobic capacity and VO₂max. *Med Sci Sports Exerc* 28(10): 1327-1330.

87) Taylor HL, Buskirk E and Henschel A (1955). Maximal oxygen intake as an objective measure of cardio-respiratory performance. *J Appl Physiol* 8(1): 73-80. DOI: 10.1152/jappl.1955.8.1.73

88) Tjønnå AE, Lee SJ, Rognmo Ø, Stølen TO, Bye A, Haram PM, Loennechen JP, Al-Sharq QY, Skogvoll E, Slørdahl SA, Kemi OJ, Najjar SM and Wisløff U (2008). Aerobic interval training versus continuous moderate exercise as a treatment for the metabolic

syndrome: a pilot study. *Circulation* 118(4): 346-354. DOI:

10.1161/CIRCULATIONAHA.108.772822

89) Trapp EG, Chisholm DJ, Freund J and Boutcher SH (2008). The effects of high-intensity intermittent exercise training on fat loss and fasting insulin levels of young women. *Int J Obes (Lond)* 32(4): 684-691. DOI: 10.1038/sj.ijo.0803781

90) Treadway JL and Young JC (1990). Failure of prior low-intensity exercise to potentiate the thermic effect of glucose. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 60(5): 377-381.

91) Tremblay A, Fontaine E, Poehlman ET, Mitchell D, Perron L and Bouchard C (1986). The effect of exercise-training on resting metabolic rate in lean and moderately obese individuals. *Int J Obes* 10(6): 511-517.

92) Van Zant RS (1992). Influence of diet and exercise on energy expenditure--a review. *Int J Sport Nutr* 2(1): 1-19.

93) Viana RB, De Lira CaB, Naves JPA, Coswig VS, Del Vecchio FB and Gentil P (2019). Tabata protocol: a review of its application, variations and outcomes. *Clin Physiol Funct Imaging* 39(1): 1-8. DOI: 10.1111/cpf.12513

94) Viana RB, Naves JPA, Coswig VS, De Lira CaB, Steele J, Fisher JP and Gentil P (2019). Is interval training the magic bullet for fat loss? A systematic review and meta-analysis comparing moderate-intensity continuous training with high-intensity interval training (HIIT). *Br J Sports Med*. DOI: 10.1136/bjsports-2018-099928

95) Weir JB (1949). New methods for calculating metabolic rate with special reference to protein metabolism. *J Physiol* 109(1-2): 1-9.

96) Welch HG (1982). Hyperoxia and human performance: a brief review. *Med Sci Sports Exerc* 14(4): 253-262.

97) Welch HG and Pedersen PK (1981). Measurement of metabolic rate in hyperoxia. *J*

Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol 51(3): 725-731. DOI:

10.1152/jappl.1981.51.3.725

98) Westerterp KR (2004). Diet induced thermogenesis. *Nutrition & Metabolism* 1(1): 5.

DOI: 10.1186/1743-7075-1-5

99) Westerterp KR (2018). Exercise, energy balance and body composition. *Eur J Clin*

Nutr 72(9): 1246-1250. DOI: 10.1038/s41430-018-0180-4

100) Weststrate JA and Hautvast JG (1990). The effects of short-term carbohydrate overfeeding and prior exercise on resting metabolic rate and diet-induced thermogenesis.

Metabolism 39(12): 1232-1239.

101) Weyer C, Snitker S, Rising R, Bogardus C and Ravussin E (1999). Determinants of energy expenditure and fuel utilization in man: effects of body composition, age, sex,

ethnicity and glucose tolerance in 916 subjects. *Int J Obes Relat Metab Disord* 23(7): 715-722.

102) Willms WL and Plowman SA (1991). Separate and sequential effects of exercise and meal ingestion on energy expenditure. *Ann Nutr Metab* 35(6): 347-356. DOI:

10.1159/000177667

103) Yamakage M, Iwasaki S and Namiki A (2002). Evaluation of a newly developed monitor of deep body temperature. *J Anesth* 16(4): 354-357. DOI: 10.1007/s005400200056

104) Yamamura C, Tanaka S, Futami J, Oka J, Ishikawa-Takata K and Kashiwazaki H (2003). Activity diary method for predicting energy expenditure as evaluated by a whole-body indirect human calorimeter. *J Nutr Sci Vitaminol (Tokyo)* 49(4): 262-269.

105) Yamashita K and Tochihara Y (2003). Effects of hyperoxia on thermoregulatory responses during feet immersion to hot water in humans. *J Physiol Anthropol Appl Human Sci* 22(4): 181-185.

- 106) Yoshioka M, Lim K, Kikuzato S, Kiyonaga A, Tanaka H, Shindo M and Suzuki M (1995). Effects of red-pepper diet on the energy metabolism in men. *J Nutr Sci Vitaminol (Tokyo)* 41(6): 647-656.
- 107) Young JC, Treadway JL, Balon TW, Gavras HP and Ruderman NB (1986). Prior exercise potentiates the thermic effect of a carbohydrate load. *Metabolism* 35(11): 1048-1053.
- 108) 安藤 貴史 (2018). エネルギー消費量・摂取量の個人内・個人間変動から迫るエネルギーバランスの規定要因. *体力科学* 67(5): 327-344. DOI: 10.7600/jspfsm.67.327
- 109) 田中 茂穂 (2006). 間接熱量測定法による 1 日のエネルギー消費量の評価. *体力科学 = JAPANESE JOURNAL OF PHYSICAL FITNESS AND SPORTS MEDICINE* 55(5): 527-532. DOI: 10.7600/jspfsm.55.527
- 110) 日本人の食事摂取基準 (2010). Ministry of Health, Labour and Welfare., Japan. *The Dietary Reference Intakes for Japanese, 2010*. (Dai-ichi shuppan publishing, Co Ltd., Tokyo, Japan.).