

種目や強度の違いによる最大下運動時の 呼気中アセトンの変動の比較

- 1) 名古屋大学大学院情報科学研究科複雑系科学専攻,
- 2) 名古屋大学総合保健体育科学センター,
- 3) 中部大学生命健康科学部スポーツ保健医療学科

永峰康一郎¹⁾, 峯田大暉¹⁾,
石田浩司²⁾, 片山敬章²⁾, 近藤孝晴³⁾

【緒言】

アセトンは体内での脂質代謝の際に生成され、体内で再利用されることがなく呼気や尿とともに体外へ排出されることが知られている¹⁾。そこで著者らは呼気中アセトンを脂質代謝の簡便な指標の候補として考え、様々な条件下で最大下運動テストを実施し、運動による体内での脂質代謝と呼気中アセトンの変動との関係について検討を行ってきた。最大下運動とは最大酸素摂取量に達しない運動、例えば任意時間継続可能な有酸素運動を指す。

著者らはこれまで自転車エルゴメーターを用いて最大下運動テストを実施してきた²⁾³⁾。それは運動強度を定量的に決定する最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$) の測定が自転車においてのみ可能であったことによる。一方で、日常生活においては自転車運動よりも歩行運動の方が道具を必要とせず容易に実施することができる。そこで本研究では自転車運動に加え、歩行運動による最大下運動テストを実施することとした。また、これまでは脂質代謝が最も亢進する運動強度として $40\% \dot{V}O_{2max}$ のみで最大下運動テストを実施してきたが、運動強度が異なると脂質代謝や糖質代謝の割合が変化するため、呼気中アセトンの変動も異なってくることが予想される。そこで本研究では運動強度

についてもこれまでより低い場合 ($30\% \dot{V}O_{2max}$) と高い場合 ($50\% \dot{V}O_{2max}$) を加えて比較検討を試みることにした。もし様々な運動種目あるいは運動強度において、運動により呼気中アセトン濃度がどのように増加するか明らかにできれば、呼気中アセトンの脂質代謝の指標としての汎用性が高められるであろう。

【対象】

健康若年男性7名を対象とした。表1に年齢・身長・体重・BMI・体脂肪率について平均と標準偏差を示す。体脂肪率は生体インピーダンス法により測定した。

本研究はあらかじめ名古屋大学大学院情報科学研究科倫理委員会の承認を得た(承認番号: 323-2)。また、被験者には本研究の主旨、実験方法について事前に説明を行い、文書による同意を得た上で実施した。

【方法】

本研究では、被験者から運動前後の呼気ガスを採取し、その中に含まれるアセトンを分析する最大下運動テストによって、運動に伴う呼気中アセトン濃度の変動について検討を行った。

表1 対象者の身体特性(いずれも健康男性, n=7)

年齢(歳)	22.4±1.8
身長(cm)	167.4±4.1
体重(kg)	59.7±10.5
BMI(kg/m ²)	21.2±3.1
体脂肪率(%)	13.1±5.9

1) 運動強度の定量化

被験者に与える運動負荷の強度を定量的に決定するため、最大下運動テストに先立って各被験者の $\dot{V}O_{2max}$ の測定を行った。この測定には自転車エルゴメーター(コンビ製, エアロバイク, 75XLII)を用いて、ペダル回転速度を毎分60回転に規定して行った。初期負荷を運動習慣のある者は90W, 運動習慣のない者は60Wとし、疲労困憊にいたるまで1分毎に15Wずつ増加させる連続的多段階漸増負荷法を用いた。疲労困憊の状態は、ペダル回転数が維持できなくなった時点とした。

本研究では自転車エルゴメーターを用いた自転車運動に加え、トレッドミルを用いた歩行運動も実施した。トレッドミルによる $\dot{V}O_{2max}$ 測定は高負荷時に安全面で問題が生じる可能性があるため、 $\% \dot{V}O_{2max}$ に代わる相対的運動強度として心拍数を基準とする、次式で表される心拍予備能(%HRR, HRR: heart rate reserve)を用いた⁴⁾。

心拍予備能(%HRR)

$$= (\text{ある負荷での心拍数} - \text{安静時心拍数}) / (\text{最大心拍数} - \text{安静時心拍数}) \times 100$$

ここで安静時心拍数は運動開始前の心拍数とした。また被験者の最大心拍数は運動種目によらず同等と仮定し、自転車エルゴメーターでの $\dot{V}O_{2max}$ 測定時の心拍数の最高値を最大心拍数とした。

歩行運動の運動強度の決定にあたって、トレッドミル(中旺ヘルス製, ヘルスジョガー, HJ-16)を用いて、以下のように運動負荷を変化させて心拍数を測定した。初期負荷(速度)

を3.0km/hとし、10.0km/hにいたるまで1分毎に0.5km/hずつ増加させた。心拍計(EPSON製, PULSESENSE, PS-100)を用いて運動開始直前および各速度増加直前の10秒間心拍数を測定し、心拍予備能(%HRR)と運動負荷(km/h)との間の関係について一次回帰直線を求めた。次に各被験者の自転車エルゴメーターでの $\dot{V}O_{2max}$ 測定時の運動開始前の心拍数を安静時心拍数、それぞれの運動負荷で心拍数の最高値をその運動負荷での心拍数とし、それらを基に自転車運動時の各強度($\% \dot{V}O_{2max}$)での心拍予備能(%HRR)を算出した。そして上記の一次回帰直線および自転車運動時の各強度($\% \dot{V}O_{2max}$)の心拍予備能(%HRR)から、自転車運動の各強度に対応した歩行運動の速度を決定した。

2) 最大下運動テスト

本研究で実施する最大下運動テストの運動強度と運動時間については次のように設定した。40% $\dot{V}O_{2max}$ で2時間の自転車運動を行った場合、運動90分以後になるとそれまでの時間に比べ、血中遊離脂肪酸濃度と脂肪燃焼量が有意に増加したとするHurleyら⁵⁾の報告を参考に、運動強度として30%、40%、50% $\dot{V}O_{2max}$ の3種類、運動時間として90分間を設定した。これに運動種目として自転車エルゴメーターを用いた自転車運動とトレッドミルを用いた歩行運動の2種類を組み合わせ、被験者毎に計6通りの最大下運動テストを日を変えて実施した。

実験プロトコルは図1のとおりである。被験者には、実験前日23時以降の食事および水以外の飲料の摂取を禁止させた。実験当日の8時(運動開始2時間前)に総合栄養食60g(カロリーメイト, 大塚製薬, 300kcal, 炭水化物31.5g, 蛋白質6.5g, 脂質16.8g)を摂取させた。それ以降実験終了まで再び食事および水以外の飲料の摂取を禁止させた。そして9時30分より10時まで実験

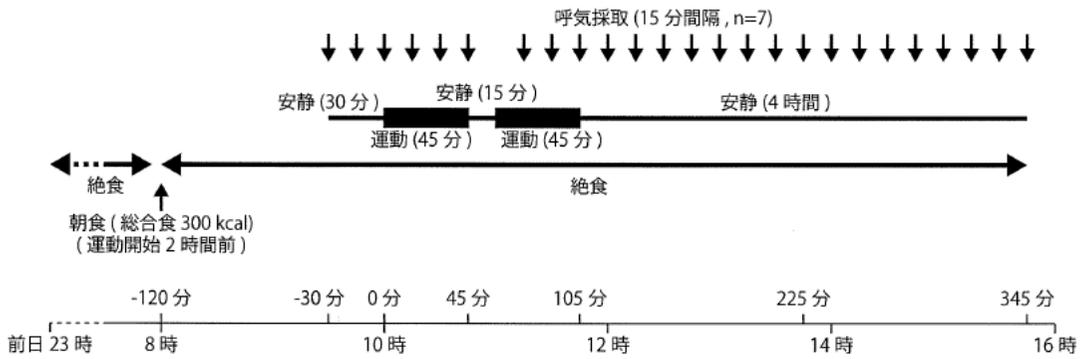
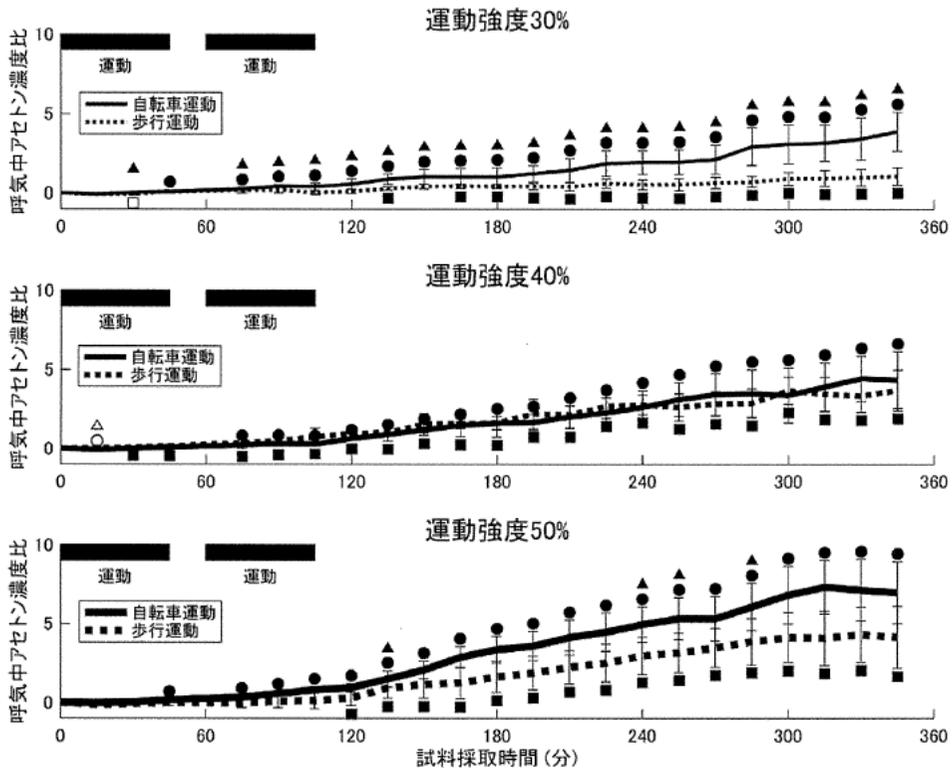


図1 最大下運動テストのプロトコル



(●・○は自転車運動について運動開始前よりも有意にそれぞれ高い・低い ($p < 0.05$),
 ■・□は歩行運動について運動開始前よりも有意にそれぞれ高い・低い ($p < 0.05$),
 ▲は同一時間について自転車運動の方が歩行運動よりも有意に高い ($p < 0.05$),
 △は同一時間について歩行運動の方が自転車運動よりも有意に高い ($p < 0.05$)

図2 運動強度毎の種目による呼気中アセトン濃度比の変動比較 (n=7)

室にて安静状態を維持させ、その間に体組成測定を実施した。10時より運動を開始し、運動時間は45分間の実施後、15分間の安静を挟んで再び45分間実施する計90分間とした。運動後は実験終了まで4時間安静状態を維持させた。

呼気の採取は運動開始30分前から運動終了240分後（運動開始から345分後）まで、安静後の運動再開時（運動開始から60分後）を除き15分間隔で計25回行った。本研究では先行研究²⁾³⁾と同様に、コレクションバッグを用いて被験者の呼気500mlを採取し、水素炎イオン化検出器（FID）を備えたガスクロマトグラフ（GL Science 製、GC4000）を用いて呼気に含まれるアセトン进行分析した。

3) データ処理

呼気中アセトン濃度について、平常時の絶対量には大きな個人差があることが知られており、結果を絶対量で検討することは運動による呼気中アセトン濃度の変動を考察する上で適当ではない。そこで本研究では著者らの先行研究³⁾と同様に、呼気中アセトン濃度の相対的な変動に注目するため、運動開始後の試料採取時間毎の結果について、以下の式から算出した呼気中アセトン濃度比を用いて表すこととした。

呼気中アセトン濃度比

$$= \frac{(\text{各試料採取時のアセトン濃度} - \text{運動開始前の平均アセトン濃度})}{\text{運動開始前の平均アセトン濃度}}$$

ここで運動開始前の平均アセトン濃度は、運動開始前に採取した3回（30分前、15分前、直前）の呼気中アセトン濃度を平均した値とした。

本研究では被験者のデータ数がそれほど多くない。そこで先行研究²⁾³⁾と同様に、外れ値による影響を防ぐために中央値と四分位偏差を用いて結果を示す。有意差の検討については、対応のある2標本の差の検定を行う Wilcoxon の符号付順位和検定を用い、 $p < 0.05$

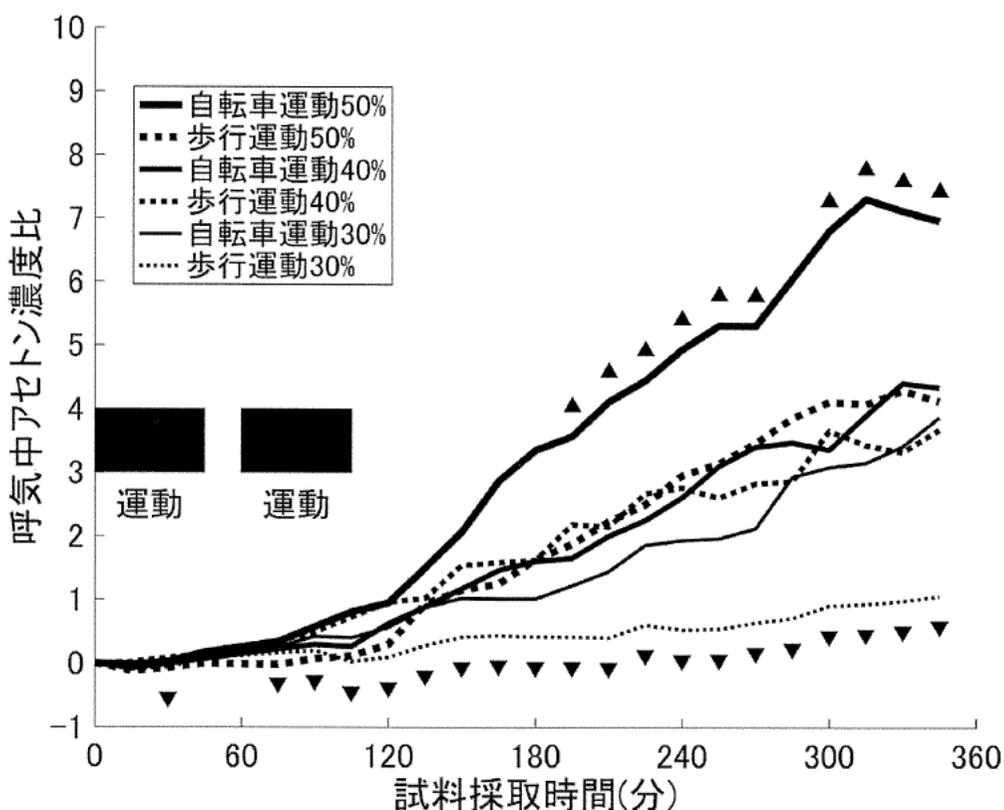
の場合に有意差が認められるとした。

【結果】

自転車運動と歩行運動の呼気中アセトン濃度比の変動を図2に示す。中心となる運動強度40%については、自転車運動では運動開始75分後以降、歩行運動では運動開始30分後以降、それぞれ実験終了時まで運動開始前と比べて呼気中アセトン濃度比の有意な増加が継続した。運動強度30%については、自転車運動では運動開始45分後以降、歩行運動では運動開始135分後および運動開始165分後以降、また運動強度50%については、自転車運動では運動開始45分後以降、歩行運動では運動開始120分後以降、いずれも実験終了時まで呼気中アセトン濃度比の有意な増加が継続した。

種目間で同一時間の呼気中アセトン濃度比を比較したところ、運動強度40%については運動開始15分後のみ、歩行運動の方が自転車運動に比べて有意に高くなった。これに対して、運動強度30%については運動開始30分後および運動開始75分後以降実験終了時まで継続して自転車運動の方が歩行運動に比べて有意に高い結果となった。また運動強度50%については、運動開始135分後、240分後、255分後および285分後に自転車運動の方が歩行運動に比べて有意に高くなった。

図3は図2の四分位偏差を省略して中央値の変動のみをまとめてプロットし、本研究で実施した条件全てについて呼気中アセトン濃度比の変動を比較したものである。運動強度30%の歩行運動において運動後の呼気中アセトン濃度の増加が他と比べて有意に小さく、また運動強度50%の自転車運動において運動後の呼気中アセトン濃度の増加が他と比べて有意に大きくなった。



(▲は同一時間について自転車運動50%がその他の運動よりも有意に高い ($p < 0.05$),
▼は同一時間について歩行運動30%がその他の運動よりも有意に低い ($p < 0.05$),
各点での四分位偏差は省略)

図3 全ての条件間の呼気中アセトン濃度比の変動比較 (n=7)

【考察】

運動強度40%においては自転車運動と歩行運動で呼気中アセトンの変動はほとんど差がないことが判明した(図2)。自転車運動と歩行運動での糖と脂肪の代謝比較を行った Capostagno and Bosch⁶⁾ は、最大心拍数(HR_{max})を基準とした運動強度($\%HR_{max}$)においては同運動強度で種目間の脂肪酸化に有意差はなかったと報告している。本研究では運動強度40%ではCapostagno and Bosch⁶⁾の結果と同様に有意差はほとんど認められなかったが、運動強度30%、運動強度50%では自転車運動の方が呼気中アセトンは有意に高くなる場合

が多く認められた。その原因について考察してみる。

まず運動強度30%については、同一時間毎に種目間の呼気中アセトン濃度比を比較したところ、運動中から運動後にかけてほとんどの時間で自転車運動の方が有意に高値であった(図2)。この要因について歩行運動時の速度に着目して検討した。運動強度30%での平均歩行速度は4.7km/hであった。一般的な歩行速度の目安として、不動産の表示に関する公正競争規約では徒歩は1分を80mとして計算するよう定められており、歩行速度に換算すると4.8km/hとなる。豊岡ら⁷⁾によると、ト

レッドミルを用いた30%, 40%, 50%, 60%, 70% $\dot{V}O_{2max}$ の最大下運動テストを実施したところ、運動時間が90分以上の場合、30% $\dot{V}O_{2max}$ のみ脂質代謝の亢進が認められなかった。したがって本研究においても運動強度30%の歩行運動は、脂質代謝を亢進させる運動強度としては十分ではなく、結果として呼気中アセトン濃度比がそれほど増加しなかったと考えられる。

次に運動強度50%については、運動強度30%の場合ほど有意差は多くなかったものの、自転車運動は歩行運動よりも呼気中アセトン濃度比が増加した。この要因については、運動時の負荷の偏りに着目した。自転車運動は歩行運動に比べると普段被験者が行う機会は少ないと考えられ、歩行運動よりも脚部骨格筋にかかる負荷が大きくなる可能性が高い。山本⁹⁾によると、持久性運動により糖質由来のエネルギー不足が生じると脂肪組織中の中性脂肪は分解されて遊離脂肪酸とグリセロールとなり、遊離脂肪酸は骨格筋や心筋に取り込まれ、 β 酸化を受けてエネルギーを産生する。特に運動強度50%の自転車運動では、この脚部骨格筋にかかる負荷がより顕著となり、そこで糖質不足による脂質代謝の亢進を招いたと考えられる。

全ての運動強度、運動種目について呼気中アセトン濃度比の変動結果をまとめた図3を見ると、以下の傾向が読み取れる。

1. 運動強度40%であれば、歩行運動は自転車運動と同等の脂質代謝亢進を得られる。
2. 歩行運動では強度40%と強度50%に有意な差はなく、脂質代謝を考慮した歩行運動では強度40%は有用性が高い。
3. 脂質代謝を考慮した時に、運動強度50%であれば、自転車運動は歩行運動より有用性が高い。

本研究で実施したような有酸素運動は生活習慣病の運動療法としてよく用いられている。

例えばKodamaら⁹⁾による高脂血症症例の運動効果についての総説によると、週に120分以上有酸素運動を行うことがHDLコレステロールの増加に効果的であると述べられている。但しこの総説で引用された過去の研究の運動強度は40%程度から85%程度まで様々であり、また運動能力の個人差は大きいので、個人毎に効果的な運動強度を設定することは容易ではない。このような状況において、本研究で得られた結果は、歩行運動であれば強度40%あれば脂質代謝亢進の効果が得られる(上記2.)、あるいは自転車運動で強度50%では歩行運動以上の効果が得られる(上記3.)など、運動療法実施において具体的な指標を与えるものである。生活習慣病の要因の一つに運動不足が挙げられ、罹患者は運動に積極的でない場合が多いと考えられるので、これらの指標は彼らの運動へのモチベーション向上に有用であろう。

【結論】

本研究では、運動種目として自転車運動と歩行運動、運動強度として30%, 40%, 50%の条件を組み合わせる最大下運動テストを実施し、呼気中アセトンの変動について比較検討を行った。その結果、いずれの条件についても運動後に呼気中アセトン濃度比が運動前と比較して有意に増加し、運動種目や運動強度にかかわらず、体内での脂質代謝が増加したことが示唆される。ただし運動強度30%の歩行運動のように運動強度が十分でない場合、脂質代謝もそれほど活発にならなかった。一方自転車運動のように歩行運動ほど普段行わない運動については、運動強度が十分でなくても運動後に呼気中アセトン濃度比が増加した。したがって脂質代謝をより促進させるためには、普段余り使わない筋肉に負荷をかける、言い換えれば普段余り行わない運動を行うことが効果的かもしれない。

本研究の結果は、生活習慣病の運動療法において脂質代謝亢進に効果的な運動種目・運動強度の具体的な指標を与えるものであり、呼気中アセトンの脂質代謝の指標としての汎用性を高めるものであったと考えられる。

【謝辞】

本研究の実施にあたっては日本学術振興会による科学研究費補助金(25350812)の助成を受けた。ここに謝意を申し上げる。

【参考文献】

- 1) 渡辺明治：呼気測定の内科学的意義。呼気生化学—測定とその意義—。メディカルレビュー社，大阪，8-15，1998。
- 2) 峯田大暉，永峰康一郎，石田浩司，他：定常負荷運動時の呼気中アセトンと血液成分の変動比較。安定同位体と生体ガス医学応用，6: 24-31，2014。
- 3) 峯田大暉，永峰康一郎，石田浩司，他：食事や時間帯が定常負荷運動時の呼気中アセトンや血液成分に与える影響。安定同位体と生体ガス医学応用，7: 28-36，2015。
- 4) Swain D, Leutholtz BC, King ME, et al: Relationship between %heart rate reserve and % $\dot{V}O_2$ reserve in treadmill exercise. Med Sci Sport Exerc, 30: 318-321, 1998.
- 5) Hurley BF, Nemeth PM, Martin WH 3rd, et al: Muscle triglyceride utilization during exercise: effect of training. J Appl Physiol, 60: 562-567, 1986.
- 6) Capostagno B, Bosch A: Higher fat oxidation in running than cycling at the same exercise intensities. Int J Sport Nutr Exerc Metab, 20: 44-55, 2010.
- 7) 豊岡示朗，荒松 馨，松生香里：運動強度と運動時間から見た脂質代謝特性。大阪体育大学紀要，35: 39-50，2004。
- 8) 山本順一郎編著：運動生理学。化学同人，京

都，2005。

- 9) Kodama S, Tanaka S, Saito K, et al: Effect of aerobic exercise training on serum levels of high-density lipoprotein cholesterol: A meta-analysis. Arch Intern Med, 167: 999-1008, 2007.

別刷請求先

〒464-8601 名古屋市千種区不老町
Tel : 052-789-4255
E-mail : nagamine@is.nagoya-u.ac.jp
名古屋大学大学院情報科学研究科
永 峰 康 一 郎

Effect of exercise type and exercise intensity on exhaled acetone during and after submaximal exercise

Koichiro Nagamine¹⁾, Daiki Mineta¹⁾,
Koji Ishida²⁾, Keisho Katayama²⁾, Takaharu Kondo³⁾

Graduate School of Information Science, Nagoya University¹⁾,
Research Center of Health, Physical Fitness and Sports, Nagoya University²⁾,
College of Life and Health Sciences, Chubu University³⁾

Acetone contained in the exhaled air is expected to be an easy noninvasive indicator of lipolysis in our body because acetone is one of the final products in lipolysis. We carried out exercise experiments using two exercise types and three exercise intensities to elucidate the relationship between exhaled acetone and lipolysis induced by exercise.

All subjects were healthy men ($n=7$) who ranged in age from 19-24 years. A bicycle ergometer (cycling) or a treadmill (walking) was used for the exercise. The measurement of $\dot{V}O_{2max}$ to determine exercise intensity for each subject was carried out using a bicycle ergometer. Exercise intensity for a treadmill was determined by comparing the heart rate for both exercise types. For each subject, the exercise intensity was set at 30%, 40%, or 50% of $\dot{V}O_{2max}$ and the duration was 90 minutes in total. Exhaled end-tidal air samples were collected every 15 minutes from 30 minutes before the exercise to 240 minutes after the exercise. Acetone in the sample was analyzed using a FID gas chromatograph. All subjects had a balanced meal (300 kcal) 120 minutes before the exercise and had no meal until the end of the experiment.

Exhaled acetone in all experiments kept increasing after the exercise, and however, its increment rates were different by exercise type and exercise intensity. For mild exercise (40% of $\dot{V}O_{2max}$), there was no significant difference in the increment between cycling and walking. In contrast, for light (30%) and moderate (50%) exercises, the acetone increment in cycling was greater than in walking. For the light exercise, the walking pace might be too slow to induce effective acetone production, and for the moderate exercise, bicycle exercise might induce more glucose depletion and lipolysis in some muscles because cycling was not an ordinary exercise for most subjects.