

軽運動後のカフェイン摂取による持久力の回復について

The Metabolic Effects of Caffeine on Recovery Immediately After Endurance Exercise

笹川 友幸*, 海保 享代**, 松本 高明**, 内藤 祐子*

Tomoyuki SASAGAWA, Takayo KAIHO, Takaaki MATSUMOTO and Yuko NAITO

Abstract

Caffeine administration has been shown to increase fat metabolism and endurance ability. However, the effects of caffeine on metabolism during endurance exercise with reduced muscle glycogen are not clear.

Therefore, this single-blind crossover study aimed to investigate the effects of a slight prior depletion in internal glycogen on metabolic response during the following endurance exercise in 4 healthy males after ingestion of a low-concentration of caffeine. After 30min of cycling ergometer exercise at 50%VO_{2VT}, subjects ingested caffeine (3mg/body weight kg) or placebo (glucose 3mg/body weight kg), and sat on a chair for 60min. Participants performed 30min of the continuous exercise at the same intensity again after the rest. During the first and second exercise, HR, gas analysis, and Borg's scale were measured and fatty acid oxidation and sugar oxidation were calculated. During the second exercise with internal glycogen depletion, HR was significantly lower in the caffeine trial than in the placebo trial (caffeine : placebo=107±6 : 112±7, p<0.05), and the respiratory exchange ratio was also significantly lower with caffeine than with placebo (caffeine : placebo=0.861±0.038 : 0.871±0.025, p<0.05). Fatty acid oxidation was slightly higher with caffeine than with placebo (caffeine : placebo=0.343±0.083g/min : 0.325±0.058g/min p=0.0540). The results suggested that caffeine ingestion during continuous exercise with slight muscle glycogen depletion enhanced fat oxidation.

Key words; caffeine, fat oxidation, endurance exercise, glycogen

* 国士舘大学体育学部 (Faculty of Physical Education, Kokushikan University)

** 国士舘大学大学院スポーツシステム研究科 (Graduate School of Sport System, Kokushikan University)

I. 緒言

我々は日常生活においてカフェインをお茶やコーヒー、チョコレートとして摂取している。レギュラーコーヒー1杯分に含まれるカフェイン含有量は約70mg~130mgとされており、摂取後3~5時間で血中濃度は半減期を迎える。カフェインは血中カテコラミン増加作用およびホスホジエステラーゼ活性阻害作用を介して脂質代謝を促進させる¹⁻⁵⁾。この理由からIvy et al⁶⁾やSuzuki et al⁷⁾はカフェインを持久運動に応用した場合、脂質代謝を促進させグリコーゲンを温存できると報告している。しかし、先行研究で使用されているカフェイン量はコーヒー7~8杯程度に相当する高濃度での結果によるものが多い⁸⁾。カフェインは現在ドーピング薬物ではないが、ドーピング監視物質としてトレースされていることから、高濃度のカフェイン摂取量の実験は応用範囲が狭く、現実的とはいえない。

体内のグリコーゲンは運動時のエネルギーとして重要で、運動前の体内グリコーゲン貯蔵量は持久運動の継続に影響を及ぼす⁹⁻¹²⁾。持久性スポーツで良い成績をおさめるためにはあらかじめ体内グリコーゲン量を高めておく事や運動中に脂肪の利用割合を増やしてグリコーゲン節約に努めることが重要である。中道ら¹³⁾は炭水化物ローディングを実施したマウスにカフェインを投与したところ運動中の血中遊離脂肪酸濃度は高い値を示し、肝臓グリコーゲン含量の減少量は僅かであったと報告している。これは運動時のエネルギー源として脂肪分解を優先的に利用することで肝臓グリコーゲンは節約されたと推察している。塩瀬ら¹⁴⁾は筋肉グリコーゲン量を約50%と約20%減少した状態で持久性運動を実施させたところ、筋肉グリコーゲンの減少程度が高い場合に持久性運動中の脂質酸化量が高値を示したと報告している。

しかし、あらかじめ筋肉グリコーゲン量を減少した状態でカフェイン摂取と持久性運動を組み合わせた場合、同様の脂質代謝が亢進されるかどうか

かについての検討はなされていない。しかもコーヒーや紅茶1~2杯程度に含まれる低濃度のカフェインによる脂質代謝への影響を測定することは市民レベルでの軽運動に応用することも可能であり、有用性も高い。

そこで、本研究では体内グリコーゲンをある程度減少した状態で、低濃度のカフェインを摂取させた場合での持久性運動の代謝応答への影響について検討した。

II. 方法

1. 被験者

被験者はK大学体育学部 に在籍する運動経験のある男性で、週1、2回程度の運動習慣を有する4名とした。全員は過去半年間の喫煙経験がなく、習慣的にカフェイン依存症でもないことを確認した。全ての被験者に対して本研究の内容を口頭で説明し同意の得られた者を対象とした上で、国士舘大学「人間を対象とした研究に関する研究倫理委員会」の承認 (No.132A025) を得て実験を行った。被験者の身体特性、最大酸素摂取量は表1に示した。

2. 最大酸素摂取量 (VO_{2max}) および換気性作業閾値 (VO_{2VT}) の測定

本実験の開始半月前に自転車エルゴメータ (コリバル) をもちいて漸増負荷法により最大酸素摂

表1 Subjects characteristics

		n=4
Age		21.2 ± 0.9
Height	cm	177.5 ± 8.1
Weight	kg	70.0 ± 5.5
VO _{2max}	ml/kg/min	55.4 ± 5.1
VO _{2max}	Watts	309 ± 19
VO _{2VT}	ml/kg/min	33.0 ± 4.2
VO _{2VT}	Watts	217 ± 49

取量の測定を実施した。50W から開始し 1 分ごとに 20W ずつ負荷が増加するように設定し、60 回転/分を維持させた。測定中の酸素摂取量と二酸化炭素排泄量はブレスバイブレス式呼気ガス分析装置 (AE310s、ミナト科学) を用いて連続的に記録した。最大酸素摂取量は以下のうち 2 項目以上を満たしていることを条件とした。1) VO_2 のプラトー現象の発現、2) 最高心拍数に達している、3) 呼吸交換比が 1.1 以上に達している、4) 主観的運動強度がほぼ 20 である、さらに、得られたデータから V-slope 法に基づき換気性作業閾値 (Ventilation threshold : VT) を決定した。

3. 実験プロトコル

実験は一重盲検クロスオーバー法を用いて実施した。被験者には実験前日から激しい運動を禁止し、カフェイン類を摂取しないように指示した。また、前日の夜から 12 時間の絶食とした。

被験者は 3 分間の安静ののちに 60W で 3 分間のウォーミングアップ実施後、換気性作業閾値時の酸素摂取量の 50% に相当する強度 ($50\% VO_{2VT}$) での自転車運動を 30 分間実施 (Exercise 1 : EX1) した。運動後、カフェインまたは対照試料を摂取すると同時に 60 分間の座位安静を保った。その後、同強度の運動を 30 分間実施した (Exercise 2 : EX2) (図 1)。被験者の運動中の呼気ガスと心拍数を継続的に測定した。各運動終了直前に主観的運動強度をボルグスケール (6 ~ 20 までの 15 段階) で被験者に評価させた。

クロスオーバー試験はウォッシュアウト期間を挟み 1 週間後にランダムに実施した。運動中の脂質酸化量と糖質酸化量は先行研究¹⁵⁾を参考に下記の式により算出し、運動時は 1 分当たりの平均値を求めた。

脂質酸化量 : $1.695VO_2 - 1.701VCO_2$

糖質酸化量 : $4.585VO_2 - 3.226VCO_2$

4. 試験試料

試験試料としてカフェインは体重 1 kg あたり無水カフェイン 3 mg に換算し 200ml の水で摂取した。対照試料としてグルコースを同量摂取させた。

5. 統計処理

測定結果は文中および表中では平均値 ± 標準偏差で、グラフでは平均値 ± 標準誤差で示した。心拍数、呼吸交換比、代謝関連項目については二元配置の分散分析 (two-way repeated-measures ANOVA, サプリメント × Exercise) を行い、有意な交互作用、主効果が検出された場合は多重比較を行った。全ての統計データは危険率 5% 未満を有意水準とした。

III. 結果

運動中の心拍数、酸素摂取量、二酸化炭素排泄量、エネルギー消費量の結果を表 2 に示した。安静時、1 回目の運動 (EX1) 中の心拍数についてカフェイン摂取と対照試料摂取を比較すると有意

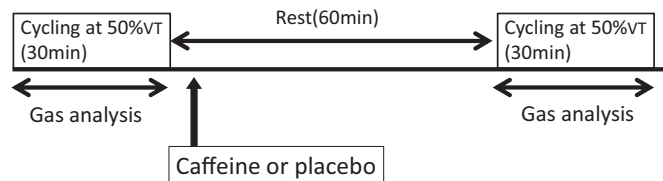


図 1 Experimental protocol

表 2 HR, VO_2 , VCO_2 , and energy expenditure during exercise with caffeine or placebo.

	Caffeine		Control	
	EX1	EX2	EX1	EX2
HR(beat/min)	111 ± 8	107 ± 6 *	112 ± 7	112 ± 7
VO_2 (ml/kg/min)	20.6 ± 1.4 *	20.9 ± 1.5	21.2 ± 2.3	21.1 ± 1.9
VCO_2 (ml/kg/min)	18.4 ± 1.2	18.0 ± 1.1	19.1 ± 2.3	18.4 ± 1.9
Energy expenditure (kcal/min)	7.3 ± 0.6	7.3 ± 0.5	7.4 ± 0.7	7.3 ± 0.5

EX1 : cycling exercise at $50\%VO_{2VT}$ before sample intake.

EX2 : cycling exercise at $50\%VO_{2VT}$ after sample intake.

*: $p < 0.05$ (control vs caffeine)

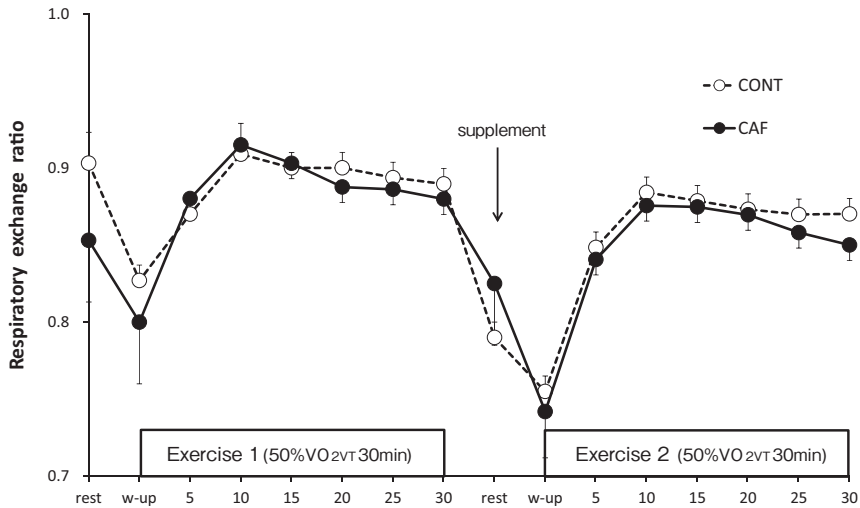


図2 Time course of Respiratory exchange ratio during exercise at 50%VT with caffeine or placebo

差は認められなかった。しかし、サプリメント摂取後の運動 (EX2) 中の心拍数ではカフェイン摂取群は対照群と比べて有意に低下した (caffeine : placebo = $107 \pm 1 : 112 \pm 7$, $p < 0.01$)。酸素摂取量、二酸化炭素排泄量、エネルギー消費量に関してはサプリメント後の両群の違いは認められなかった。運動時の主観的運動強度はボルグのスケールで EX1 は対照で 12.5 ± 0.8 、カフェイン摂取群で 11.8 ± 0.5 、EX2 ではそれぞれ 11.7 ± 0.5 、 11.7 ± 0.5 を示した。ボルグのスケールの 11~12 は「楽な運動」を示しており、主観的運動強度に関してはカフェイン摂取と対照群との間で有意な差はなかった。

呼吸交換比の時間的変化を図 2 に示した。カフェイン摂取群は投与前の運動 (EX1) 中の呼吸交換比が 0.892 ± 0.034 から投与後の運動 (EX2) では 0.861 ± 0.038 へと有意に低下した ($F = 9.26$, $p < 0.001$)。対照群でも EX1 中の呼吸交換比は 0.893 ± 0.046 であったのに対し、摂取後の運動 (EX2) では 0.871 ± 0.025 と有意に低下した ($F = 7.41$, $p < 0.001$)。さらに、EX2 中の呼吸交換比の値は対照群に比し、カフェイン摂取群では有意に低値を示した。 ($F = 5.09$, $p < 0.05$) (図 3)。

試験試料投与後の運動 (EX2) 中の糖質酸化量と脂質酸化量は呼気測定法から計算によって求め

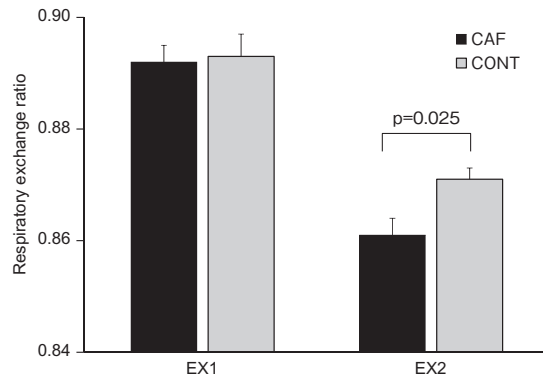


図3 Respiratory exchange ratio during exercise with caffeine or placebo

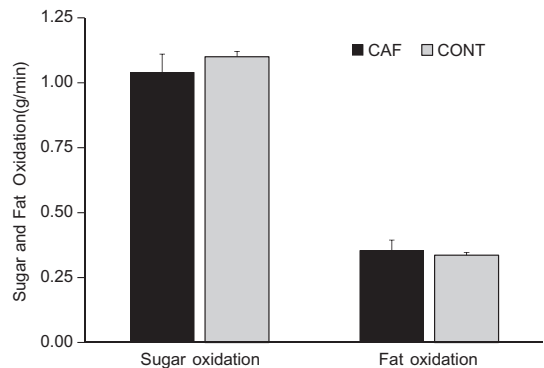


図4 Sugar and Fatty acid oxidation during Exercise 2 with caffeine or placebo

た(図4)。糖質酸化量ではカフェイン摂取群は $1.035 \pm 0.292 \text{g/min}$ 、対照群では $1.096 \pm 0.190 \text{g/min}$ となり有意な差は認められなかったものの($F=3.648$, $p=0.057$)、カフェイン群では糖質利用が低下傾向を示した。また、カフェイン群での脂質酸化量は対照群と比べて高い傾向($\text{caffeine} : \text{placebo}=0.343 \pm 0.083 \text{g/min} : 0.325 \pm 0.058 \text{g/min}$, $F=3.750$, $p=0.054$)が見られ、脂質代謝が亢進されていた。

IV. 考 察

本研究ではあらかじめ自転車エルゴメータによる軽運動実施直後のカフェイン摂取が、その後に行った持久性運動時のヒトのエネルギー代謝にどのような影響を与えるかを検討する目的で、健康な男性を対象に運動時の脂質ならびに糖質酸化量を呼気測定法から算出した。その結果、軽運動後のカフェイン摂取により持久能力は回復し、再度の軽運動時の心拍数や呼吸交換比は有意に減少した。また、カフェイン摂取後の運動中の糖質酸化量は低下し脂質酸化量は増加する傾向が見られた。

これまでカフェイン摂取の運動時の脂質代謝亢進についての研究は多数行われている^{1-6, 8, 13, 14)}。その上、中道ら¹³⁾は炭水化物ローディング後のカフェイン投与により運動後の血中遊離脂肪酸濃度は増加し、肝臓グリコーゲン量は温存されたとしている。その一方で、Weir et al¹⁶⁾は炭水化物ローディング後のカフェイン摂取による持久運動では血中遊離脂肪酸は増加せず、呼吸商にも変化はないと述べている。こうしたカフェイン効果の不一致は運動前の食事内容の違い、カフェイン投与から運動するまでの時間の違い、投与したカフェイン量の違いなどが原因だと考えられる。

本研究で使用したカフェイン摂取量は先行研究よりも少なく、コーヒー1.5~2杯程度とほぼ同等量である。また、カフェインは人体に吸収されたのち血中濃度上昇までに30分程度時間を要し、

その上昇は摂取90分後も継続することから本実験ではカフェイン摂取60分後に再度持久運動(EX2)を実施することとした。

実施した運動の強度は換気性作業閾値の50%の程度と低く、軽いジョギング程度に相当する。主観的運動強度も11~12を示し、「きつい」と答える被験者はおらず、有酸素運動を行うためには適切な負荷設定であった。予想では対照試料と比べてカフェイン摂取条件において主観的にも「楽になる」と予想したが、違いは認められなかった。しかし、カフェイン摂取は対照と比べて心拍数、呼吸交換比といった生理的数値はいずれも低下していた。

中条ら¹⁷⁾やWarrenら¹⁸⁾は横断的研究ながらコーヒー摂取頻度と脚伸展力や随意最大筋力との間の関連性を認める報告をしている。あくまでも一過性の現象であるとしたうえで、カフェインは筋量増加に有利に働く可能性を示唆している。その理由としてカフェインによる中枢神経系への働きかけをあげている。また、カフェインは直接アデノシン受容体に働き、筋小胞体からのカルシウムイオン遊離を増大させることで動員する運動単位を増やす可能性についても指摘している。本来、カフェインは中枢神経系に働きかけ、交感神経興奮様作用を示す。しかし、本実験ではカフェイン摂取後の運動において心拍数は対照条件と比べて低い値を示している。もし、動員する運動単位の増加によって作動筋がたやすく運動したならば、心拍数が抑えられる可能性はある。Yamaguchi et al¹⁹⁾は体重1kgあたり5mgのカフェイン投与で血圧は上昇したが、心拍数に変化はなかったと報告している。本実験で用いたカフェイン量はさらに低濃度であることから対照試料と比較して運動中の心拍数が低かったことは脂質代謝を亢進し、呼吸循環への負担がすくなかった影響と考えることが妥当であろう。

本実験では筋生検を実施していないためあらかじめ行った軽運動による筋肉グリコーゲン量の減少程度については不明である。しかし、先行研究

から筋肉グリコーゲン減少程度が中程度以下の場合では持久性運動に伴うPDK-4mRNA発現量に違いはなかったことが報告されている¹⁴⁾。PDK-4mRNA遺伝子はピルビン酸からアセチルCoAへの変換を阻害し、脂質代謝を促進するのに関与する。本研究の軽運動による筋肉グリコーゲン減少量も中程度以下であるから、得られた結果は筋グリコーゲン減少に付随する遺伝子発現というよりはカフェイン投与による血中代謝物質の変化による影響が大きいと考えられる。

本研究は持久能力の高い男性成人を被験者としたため、日頃運動を全くしない一般成人に応用できるかあるいはカフェイン耐性をもつ場合でも同様の結果が得られるのかについては不明である。また、本研究の限界として前日の食事条件を統一しなかったため運動開始前の体内のグリコーゲン量の違いについては不明である。しかし、被験者全員がカフェイン摂取によって呼吸交換比の低下が観察されたことから、軽いジョギング程度の身体活動後の低濃度カフェイン摂取はその後の持久性運動を回復して、脂質代謝を亢進する可能性がある。今後、被験者数を増やし運動時の血中代謝物質の検討も加えたカフェイン摂取の研究が望ましいと考えられる。

V. 結 論

健康な男性4名に自転車エルゴメータによる50% $\dot{V}O_{2VT}$ での30分間の運動直後にカフェイン(3mg/kg)を摂取させ、1時間後に再度同強度での30分間の持久性運動を実施して運動中のエネルギー代謝応答への影響を測定した。その結果、対照試料と比較してカフェイン摂取では心拍数および呼吸交換比が有意に低下した。また、糖質酸化量は減少傾向を、脂質酸化量は増加傾向を観察した。本研究から軽運動直後にコーヒー1.5~2杯程度のカフェイン摂取はその後の持久性運動において持久能力を回復させ、脂質代謝量を増加させる可能性が示唆された。

参考文献

- 1) Bride C.A, Jones M.A. The effect of caffeine in coffee polyphenols modulate whole-body substrate oxidation and suppress postprandial hyperglycaemia, hyperinsulinaemia and hyperlipidaemia. *Br J Nutr* 107 (12) : 1757-1765, 2012.
- 2) Costill D.J., Dalsky G.P. Fink W.J. Effects of caffeine ingestion on metabolism and exercise performance. *Med Sci Sports Exerc* 10 (3) : 155-158, 1978
- 3) Davis JK, Green JM. Caffeine and anaerobic performance : ergogenic value and mechanism of action. *Sports Med* 39 : 813-832, 2008
- 4) Spriet L, MacLean DA, Dyck DJ, et al. Caffeine ingestion and muscle metabolism during prolonged exercise in humans. *Am J Physiol*, 262 : E891-E898, 1992
- 5) Acheson KJ, Gremaud G, Meirim I, et al. Metabolic effects of caffeine in human's lipid oxidation or futile cycling? *Am J Clin Nutr* 79 : 40-46, 2004
- 6) Ivy J.L., Costill D.L., Fink W.J., Lower R. W. Influence of caffeine and carbohydrate feedings on endurance performance. *Med Sci Sports Exerc* 11 (1) : 6-11, 1979
- 7) Suzuki M., Shimomura Y., Satoh Y. Diurnal changes in lipolytic activity of isolated fat cells and their increased responsiveness to epinephrine and theophylline with meal feeding in rats. *J Nutr Sci Vitaminol* 29 : 399-411, 1983
- 8) Graham T.E., Spriet L.L. Performance and metabolic responses to a high caffeine dose during prolonged exercise. *J Appl Physiol* 71 (6) : 2292-2298, 1991
- 9) Astrand, P.O. Diet and athletic performance. *Federation Proceedings*. 26 (26) : 1772-1777, 1967
- 10) Bergstrom J., Hermansen L., Hultman E., Saltin B. Diet, muscle glycogen and physical performance. *Acta Physiol Scand* 71 : 140-150, 1967
- 11) Costill D.L., Coyle E., Dalsky G., Evans W., Fink W., Hoopes D. Effect of elevated plasma FFA and insulin on muscle glycogen usage during exercise. *J Appl Physiol* 43 (4) : 690-695, 1977
- 12) Hickson R.C., Rinnie M.J., Conlee R.K., et al. Effect of increased plasma fatty acid on glycogen utilization and endurance. *J Appl Physiol* 43 (5) : 829-833, 1977
- 13) Nakamichi R., Makatani A. Effect of carbohydrate loading and caffeine ingestion on endurance exercise. *Bull Nara Univ Educ* 42 (2) : 45-52,

- 1993 (In Japanese)
- 14) Shiose K, Tobina T., Higaki Y., kiyonaga A, Tanaka H. Effects of prior muscle glycogen depletion level on metabolic response during endurance exercise. JSPFSM 63 (4) : 401-408, 2014 (In Japanese)
 - 15) Taguchi M., Watanabe M., Nosaka N., Yamasawa F. Effects of short-term ingestion of medium-chain triacyl glycerol on substrate oxidation and endurance performance at moderate- and high-intensity exercise in female collgiate athletes. J J sports nutrition 5 : 15-23, 2012 (In Japanese)
 - 16) Weir J., Noakes T.D., Myburgh K., Adams B. A high carbohydrat diet negates the metabolic effects of caffeine during exercise. Med Sci Sports Exerc 19 (2) : 100-105, 1987
 - 17) Chujo M, Niu K, M. Haruki et al. Frequent coffee drinking is associated with higher leg extension power among adult men : a cross-sectional study. JSPFSM 63 (4) : 383-389, 2014 (In Japanese)
 - 18) Warren GL, Park ND, Maresca RD, Mckibans KI, Millard-Stafford ML. Effect of caffeine ingestion on muscular strength and endurance. a meta-analysis. Med Sci Sports Exerc 42 : 1375-1387, 2010
 - 19) Yamaguchi T, Chikama A, Mori K, et al. : Hydroxyhydroquione-free coffee : a double-blind, randaomized controlled dose-response study of blood pressure. Nutr Metab Cardiovasc Dis 18 : 408-414, 2008