

令和 6 年 6 月 24 日現在

機関番号：12102

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K20619

研究課題名（和文）進化運動生理学の創出：ロコモーションの収斂進化に基づくトレーニング・運動処方革新

研究課題名（英文）Emergence of Evolutionary Exercise Physiology: Exercise Innovations Rooted in Convergent Evolution of Locomotion

研究代表者

松井 崇 (Matsui, Takashi)

筑波大学・体育系・助教

研究者番号：80725549

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 19,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、ロコモーションの収斂進化に基づく断続運動モデルを確立し、そのエネルギー効率と心身機能への影響を解明することを目的とした。実験1では、ラットとマウスの断続運動モデルを確立した。実験2では、断続運動が脂質代謝を促進し、筋グリコーゲンを節約することで、抗疲労効果を示すことを見出した。この神経機構として、代謝中枢・視床下部のグリコーゲン節約が関係する可能性も確認した。実験3では、通常は低下する運動後の身体活動性と深部体温を断続運動が維持することを明らかにした。これらの結果から、断続運動はエネルギー効率が高く、疲労を軽減し、運動後の活動性低下を防ぐ有益な運動形態であることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

運動は肥満や生活習慣病だけでなく脳機能やメンタルヘルスにも奏功することが良く知られるようになったが、今も運動不足は世界的に蔓延する。本研究は、断続運動が疲れにくく意欲的に実施・継続しやすい運動形態であることが明らかにした。これは、スポーツ科学では全く未開拓の進化生物学との融合により、この課題の解決につながる挑戦性の高い成果であり、進化生物学の発展に寄与しながら、最近話題のHIITやPolarized Trainingの更に次世代となる新たな運動戦略の創出に貢献する。人々のハイパフォーマンスはもちろん、代謝性疾患や精神神経疾患の予防・治療にも貢献しうることから、医学的価値も包含する。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to establish an intermittent exercise model based on the convergent evolution of locomotion and to elucidate its energy efficiency and effects on physical and mental functions. In Experiment 1, we successfully established intermittent exercise models for both rats and mice. Experiment 2 revealed that intermittent exercise promotes lipid metabolism and conserves muscle glycogen, demonstrating an anti-fatigue effect. It was also confirmed that the neural mechanism of this effect likely involves glycogen conservation in the metabolic center, the hypothalamus. Experiment 3 demonstrated that intermittent exercise maintained post-exercise physical activity levels and core body temperature, which typically decline. These results suggest that intermittent exercise is an energy-efficient form of exercise that reduces fatigue and prevents post-exercise declines in activity levels.

研究分野：スポーツ神経生物学

キーワード：運動 疲労 脳 グリコーゲン 乳酸 断続運動 ロコモーション 進化

## 1. 研究開始当初の背景

アスリートや健康を目指す人々には、ある強度を一定時間持続する定常運動が主に推奨される。これは、運動生理学が人工的な運動条件により、心身の機能向上や生活習慣病の予防・改善に資する運動効果を解明してきた成果である。一方、大空を飛翔する鳥類、大海を遊泳する魚類、ホイールで走行する齧歯類、先を急ぐヒトなど、動物の移動運動（ロコモーション）は種を超えて断続的である（Gleissら、Nat Commun、2011）。進化生物学は、この現象を動物がエネルギー効率の高く継続しやすい運動形態を自然かつ合目的的に採用した結果生じた、移動運動の収斂進化であるとする。しかしながら、断続運動が定常運動よりもエネルギー効率が高いかどうかは生理学的に全く検証されておらず、心身の機能（持久性能力と認知機能）に及ぼす効果も不明であることから、トレーニングや運動処方にも適用されていない。

## 2. 研究の目的

本研究では、進化に基づく断続運動モデルを開発し、断続運動のエネルギー効率と心身の機能に及ぼす有益な効果を実験神経生理学手法で解明する「進化運動生理学」の創出を目的とした。そのために、以下の3点を検証した。

- (1) 実験1：進化に基づく断続運動の動物モデル確立
- (2) 実験2：断続運動はエネルギー効率が高いか？
- (3) 実験3：断続運動は運動後の身体活動性の低下を予防するか？

## 3. 研究の方法

### (1) 実験1：進化に基づく断続運動の動物モデル確立

運動に順化させた成体雄性 Wistar ラットを短レーン（体長に合わせた 45 cm）と長レーン（65 cm）の2条件に分け、分速 20 m（LT 付近の中強度）で 30 分間のトレッドミル走を課した。走行中のラットをトレッドミルの真上から撮影し、重心追跡ソフト（DIPP Motion 5、ディテクト社）により走速度を測定することで、運動形態が長レーンで断続的となるかどうかを検討した。BL6 マウスでも同様に実施した。

### (2) 実験2：断続運動はエネルギー効率が高いか？

健康なラットやマウスを安静、長、短レーンの3群に分け、動物用代謝チャンバー内で走運動を課した。運動中の酸素摂取量、呼吸交換比（RER）、血糖、血中乳酸、筋と脳のグリコーゲンを定量することで、断続運動のエネルギー効率は高いかどうかを検討した。

### (3) 実験3：断続運動は運動後の身体活動性の低下を予防するか？

マウスを安静、長、短レーンの3群に分け、マウスの身体活動量（トレッドミル走以外の、飼育ケージ内活動量）と深部体温を評価するために、加速度計と体温センサーを内蔵した小型デバイスを活用し、運動の2日前から運動後3日目まで経時的に測定した。さらに、マウスの起床前にあたる運動後6時間における血漿コルチコステロン値を評価し、運動による身体活動の変化との関係を検討した。

## 4. 研究成果

### (1) 実験1：進化に基づく断続運動の動物モデル確立

長レーンと短レーンではともにラットの平均速度に差はないものの、長レーンの方が走行速度の幅が広く、最高速度が速く、最低速度は低いことが確認された。したがって、トレッドミルでの断続運動ラットモデルの作成に成功した（図1）。

同様に、BL6 マウスの断続走モデルも作成できた。

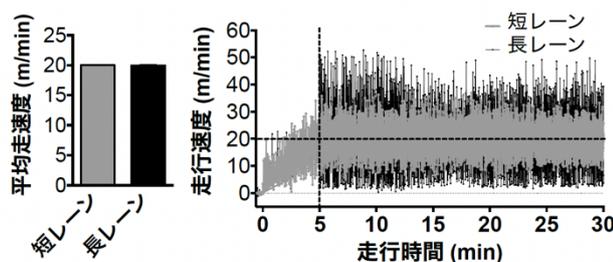


図1 ラットの断続運動モデル

(2) 実験 2：断続運動はエネルギー効率が高いか？

断続運動は定常運動と比較しても酸素摂取量を変えることはなかったことから、消費エネルギー量を変えるものではないことが分かった。次に、呼吸交換比を確認したところ、断続運動では運動開始の約 20 分後以降に明らかに低下し、脂質酸化量は上昇したことから、断続走は運動時間が長くなると脂質代謝を優先的に高めやすい運動形態であることが示唆された。この効果を更に検証するため、筋グリコーゲン量を測定したところ、断続走では同一時間の運動後のグリコーゲン量が明らかに節約されており、疲労困憊に至る走行時間は約 2 倍に延びることが確認された (図 2)。このとき、代謝中枢・視床下部のグリコーゲン量も節約され、乳酸濃度は低く維持されていた。したがって、断続運動は VMH のグリコーゲンに作用し、全身の糖質利用を節約することで疲労の発生を遅らせる、エネルギー効率の高い運動形態として役立つ可能性が高い。

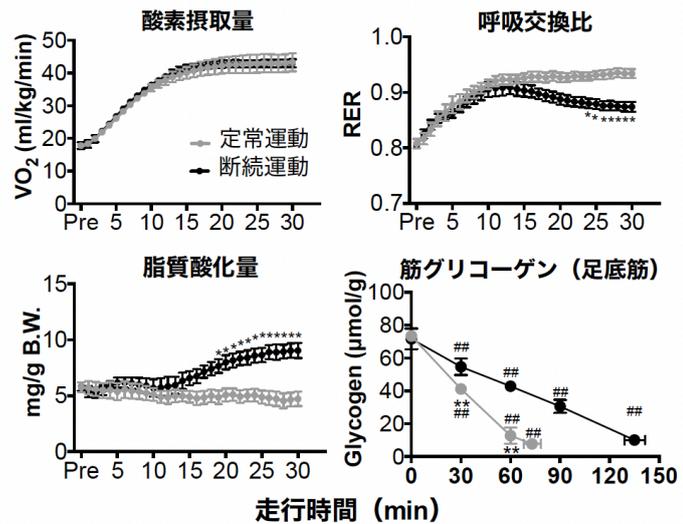


図 2 断続運動時の全身エネルギー代謝

(3) 実験 3：断続運動は運動後の身体活動性の低下を予防するか？

次に、断続運動が運動後に生じる身体活動性の低下を予防するかどうかを検討した。運動が心身機能にもたらす有益な効果は多岐に渡るが、減量効果は期待より小さい。その要因のひとつは、運動後の疲労による自発活動性と代謝の低下であるとされるものの、機構や解決策は不明のままである。これに迫り、「疲労しにくく、自発活動性を下げない運動戦略」を確立することは、世界の肥満解消に向けた喫緊の課題といえよう。

① 高強度運動がその後の身体活動性と体温を低下させる

BL6 マウスにおいて、高強度運動、中強度運動、安静の 3 群を設定し、運動前後の身体活動量と熱産生の指標となる深部体温を観察した。その結果、高強度運動群で運動後の身体活動量と深部体温が低下した (図 3)。その際、食餌摂取量には変化がなかったにもかかわらず、体重の増加がみられた。また、身体活動量と体温の同調性が乱れており、起床時の血中コルチコステロン濃度が低いほど身体活動量が低いという正の相関も確認された。したがって、一度の激しい運動がコルチコステロンの概日リズムを乱し、身体活動と体温の低下を招いて、体重を増加させることが明らかになった。本研究は、運動自体のエネルギー消費量だけでなく、その後の活動性や概日リズムも考慮した運動強度の設定が、減量効果を引き出す上で重要であることを示す初めての成果である (文献①)。

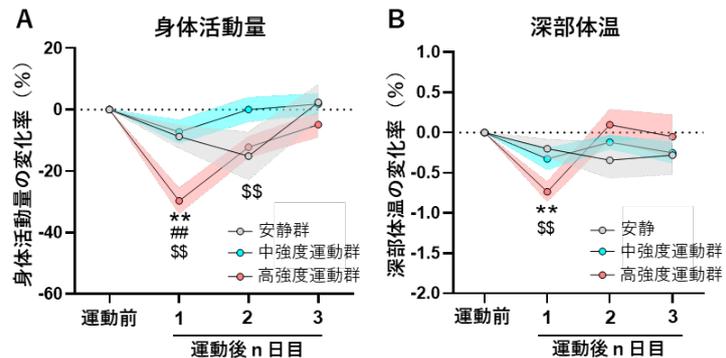


図 3 高強度運動がその後の身体活動量と深部体温を下げる

② 断続運動がその後の身体活動性と体温の低下を抑制する

BL6 マウスにおいて、断続運動、持続運動、安静の 3 群を設定し、運動前後の身体活動量と熱産生の指標となる深部体温を観察した。その結果、持続運動ではその後の身体活動性と体温が低下するが、断続運動ではそれらの低下が生じないことを確認した。したがって、断続運動は、通常は低下する運動後の身体活動性と体温を維持できる運動形態として役立つ可能性がある。

<引用文献>

① Funabashi D, Dobashi S, Sameshima K, Sagayama H, Nishijima T, Matsui T. (2024) Acute Vigorous Exercise Decreases Subsequent Non-Exercise Physical Activity and Body Temperature Linked to Weight Gain. *Med Sci Sports Exerc.* doi:10.1249/MSS.0000000000003487

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 松井 崇	4. 巻 20
2. 論文標題 グリコーゲンローディング：筋と脳の双方に効くスポーツ栄養戦略	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 食と医療	6. 最初と最後の頁 6-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Matsui Takashi	4. 巻 320
2. 論文標題 Exhaustive endurance exercise activates brain glycogen breakdown and lactate production more than insulin-induced hypoglycemia	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology	6. 最初と最後の頁 R500 ~ R507
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1152/ajpregu.00119.2020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Funabashi Daisuke, Dobashi Shohei, Sameshima Kazuki, Sagayama Hiroyuki, Nishijima Takeshi, Matsui Takashi	4. 巻 in press
2. 論文標題 Acute Vigorous Exercise Decreases Subsequent Non-Exercise Physical Activity and Body Temperature Linked to Weight Gain	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Medicine & Science in Sports & Exercise	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1249/MSS.0000000000003487	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 松井 崇	4. 巻 41
2. 論文標題 運動時の脳で乳酸が担う2つの役割：エネルギー供給と疲労シグナル形成	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 実験医学	6. 最初と最後の頁 195-201
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 8件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 松井 崇
2. 発表標題 運動時の全身エネルギー代謝と疲労を司るSelfish Brain機構：脳内乳酸の役割
3. 学会等名 第44回日本肥満学会・第41回日本肥満症治療学会学術集会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 船橋 大介, 土橋 祥平, 鮫島 和貴, 下山 寛之, 西島 壮, 松井 崇
2. 発表標題 一過性の高強度運動後に生じる自発活動性と体温の低下：コルチコステロンの関与
3. 学会等名 第 31 回日本運動生理学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takashi Matsui
2. 発表標題 Central fatigue during endurance exercise and preventive strategies: A role of brain glycogen
3. 学会等名 2022 International Conference of the Korean Society of Exercise Physiology (KSEP)（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松井 崇
2. 発表標題 持久性運動時の中枢性疲労とその予防策：脳グリコーゲン代謝の役割
3. 学会等名 第77回日本体力医学会大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松井 崇
2. 発表標題 Lactate receptor GPR81 in the ventromedial hypothalamus suppresses whole body fat oxidation during endurance exercise: Implications for brain lactate as a central fatigue signal
3. 学会等名 日本生理学会第100回記念大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松井 崇
2. 発表標題 二流柔道家の“ありのまま” 研究半生に学際性はあるか? : 運動、武道、そしてeスポーツへ
3. 学会等名 日本体育・スポーツ・健康学会 第71回大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松井 崇
2. 発表標題 自他共栄の科学を目指して ~ 運動、武道、そしてeスポーツへ ~
3. 学会等名 第54回 日本武道学会 剣道専門分科会企画講演会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松井 崇
2. 発表標題 運動時の脳内乳酸産生機構としての脳グリコーゲン代謝
3. 学会等名 第75回日本体力医学会大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takashi Matsui
2. 発表標題 Lactate derived from brain glycogen: a potential linkage between endurance and cognition
3. 学会等名 The 2020 Yokohama Sport Conference (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松井 崇
2. 発表標題 脳グリコーゲンからみた持久性運動による中枢疲労の神経機構とその予防策
3. 学会等名 第16回日本疲労学会大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 松井 崇, 川中 健太郎	4. 発行年 2020年
2. 出版社 市村出版	5. 総ページ数 28
3. 書名 スポーツ栄養学最新理論 (担当: 糖質摂取とパフォーマンス)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

筑波大学松井研究室 <a href="https://www.tsukuba-matsui-lab.org/">https://www.tsukuba-matsui-lab.org/</a>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------