

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：34315

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25871207

研究課題名(和文)筋エネルギー消費効率の新評価方法の確立

研究課題名(英文) Establishment of new evaluation method for muscle energy consumption efficiency

研究代表者

有光 琢磨 (ARIMITSU, Takuma)

立命館大学・スポーツ健康科学部・助教

研究者番号：00616021

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、運動時の骨格筋エネルギー代謝に着目し、エネルギー効率の計算における自由エネルギーの関与を検討した。本研究において、運動強度の増大に伴うエネルギーの減少は、活動筋動員増大及び酸素摂取量の増大を誘発する事を示している。また、一過性高強度負荷運動直後のエネルギー放出量は、preと比較して数日後でも変化が観られていないことから、一過性短時間高強度運動時のエネルギー効率・代謝は、一時的な減少を有しているが、運動を制限するほどでなく、エネルギー代謝以外の因子によって動きが制限される事を示した。以上より、運動時のエネルギー効率は、エネルギー量の変化や運動形態を考慮して検討する必要がある。

研究成果の概要(英文)：In this study, we focus on skeletal muscle energy metabolism during exercise, examined the relationship between the gibbs free energy and muscle energy efficiency in calculation. It is shown that the decrease of the gibbs free energy accompanying the increase of exercise intensity induces increase of active muscle recruitment and increase of oxygen uptake. In addition, since the energy release immediately after the temporary high intensity load exercise does not change even after several days as compared with pre exercise, the energy efficiency and metabolism during the short-time high intensity exercise do not limit the movement, and it is likely that the other factors limiting exercise (performance). Therefore, this study indicated that it is necessary to consider the gibbs free energy and/or movement form of exercise to calculate the energy efficiency during exercise.

研究分野：運動生理学

キーワード：運動効率 骨格筋代謝 ギブスの自由エネルギー 酸素摂取量

## 1. 研究開始当初の背景

### 【骨格筋エネルギー代謝】

運動の継続や発揮張力の維持は、絶え間ないエネルギー供給の下で行われる。従って、生体内には、運動に必要なエネルギーを供給するメカニズムが存在する。運動に必要なエネルギー源は、アデノシン三リン酸(ATP)が加水分解されると同時に放出される自由エネルギー( $G_{ATP}$ )であり、この  $G_{ATP}$  が外的仕事量に変換される。そのため、運動時の  $G_{ATP}$  と遂行された仕事量から運動時の効率が算出される。この  $G_{ATP}$  に関する研究は、生化学分野の研究で利用されるパラメータであるが、スポーツ科学分野では注目されていないため、筋内エネルギー効率・運動効率の解明に重要な指標となる。

### 【筋群間でのエネルギー消費の違い】

筋内の酸素消費と相関関係にあるクレアチンリン酸(PCr)濃度は、筋内ミトコンドリア呼吸による ATP 再合成のバランスによって決定される。近年、末梢組織での筋内酸素供給は時間・空間的に不均一になる事が報告され始めた。そのため、運動時の筋酸素消費量や筋エネルギー代謝に及ぼすこれらの影響は小さくない。また、吸気酸素濃度が低い条件で運動を行った場合、同一運動負荷(筋酸素消費量は等量)にも関わらず、PCr 濃度は減少、無機リン酸(Pi)濃度が増大するため、筋組織内の酸素化状態が筋エネルギー代謝に多大な影響を及ぼすだろう。この報告から、筋酸素供給の不均一性の結果として、末梢内での酸素利用は、筋群による不均一消費または貢献度の変化が観られる可能性があり、筋内においてエネルギー効率の差が生じている可能性が推測される。

### 【骨格筋エネルギー代謝の検出法】

骨格筋エネルギー代謝を検出する方法は、リン核磁気共鳴スペクトル法( $^{31}P$ -MRS)を用いてサーフェイスコイルを利用する事で行われてきた。この手法は、運動時の変化を観察することが可能であるが測定感度領域がコイルのサイズに依存し、測定領域はコイル設置全体の数値としか評価することが出来ない。近年、リン化学ケミカルシフトイメージング( $^{31}P$ -CSI)法が確立され、骨格筋内における運動時の PCr 濃度分布をより細かい単位(範囲・区画)で計測が可能となり、筋有酸素能力の部位差を詳細に検討可能となった。

そこで、 $^{31}P$ -CSI 法を用いて、運動に動員される筋や筋線維の変化が、筋内エネルギー動員の変化や筋エネルギー効率にどのような影響を及ぼすか検討する事が可能である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、活動筋エネルギー代謝やそれに伴う生化学エネルギー変化に着目し、運動時の筋内・筋群間におけるエネルギー消費の部位差と筋発揮力(パフォーマンス)や

呼吸応答とどのような関係にあるかを明らかにする事である。

## 3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために、以下に示す各実験を実施した。

### 運動形態の違いから見た、骨格筋内エネルギー代謝とパフォーマンスの関連性

被験者は、健常男性7名であった。実験プロトコルは、1) 漸増率 1 kg/min の脚伸展漸増負荷運動、2) 6 分間の低強度一定負荷脚伸展運動、3) 90 秒間 200%WRmax 激運動に続く 6 分間の高強度一定負荷脚伸展運動、4) 自体重の 80%荷重における一過性高強度運動、を実施した。

運動形態やあらかじめ激運動を実施する事で代謝状況を変化させた後、各運動時の骨格筋エネルギー代謝を検討する事で動員される筋エネルギー・エネルギー効率を評価する事を目的とした。

1)~3)における被験者は、6名の健康な成人男性であった。測定項目は、磁気共鳴装置(MRI)とサーフェイスコイルを用いて大腿四頭筋から骨格筋エネルギー代謝、さらに、筋電図を用いて外側広筋・大腿直筋・内側広筋より運動時の筋動員率、呼気ガス分析装置を用いて運動時及び回復時の酸素摂取量、近赤外線分析装置を用いて外側広筋・大腿直筋より筋内酸素動態を測定した。MR 装置より測定した骨格筋エネルギー代謝に関わるデータは、運動時に放出されるエネルギー量を計算するためにも用いた。

実験(1)：被験者は、3分間の安静、1分間の w-up 運動を実施した後、1kg/min を漸増させる片脚漸増負荷膝伸展運動を疲労困憊まで実施した。仰臥位膝伸展運動は、1分間に 50 回の頻度で実施した。疲労困憊の条件は、伸展脚が 10cm 上がらなくなった場合かつ周波数を維持できなくなった時とした。

実験(2)：被験者は、3分間の安静後、6分間の低強度一定負荷運動(WRmax の 30%負荷： $3.3 \pm 0.4$ kg,  $15.5 \pm 0.02\%$  1RM)を実施した。仰臥位膝伸展運動は、1分間に 50 回の頻度で実施した。測定項目は、実験(1)に準じている。

実験(3)：激前運動強度による一定負荷運動中の活動筋内エネルギー代謝の検討を実施した。被験者は、3分の安静後、1分間の激強度の膝伸展運動を実施した後、6分間の休息を挟み、低強度一定負荷運動を実施した。激強度負荷は、WRmax の 200% ( $18.6 \pm 2.0$ kg) とした。測定項目は、実験(1)に準じている。

実験(4)：一過性高強度負荷運動後の骨格筋エネルギー代謝の検討を実施した。本研究は、

パフォーマンス制御機構とエネルギー代謝の関連を探るための実験であった。パフォーマンス調節は、神経筋構造エネルギーパフォーマンスと系統だったメカニズムの出力として体现されるが、各因子の関連性は未だ明らかとなっていない。また、身近な生理現象である筋疲労（遅発性筋損傷）は、パフォーマンス出力の低下を引き起こす事が一般的に知られているが、上記系統の何れの因子の不活動、または制御機構の不連結による制限なのか明らかでない。

先ず、「エネルギーパフォーマンス」の連結に着目し実験を実施した。遅発性筋損傷誘発モデルとして、先行研究を参考に9人の健常男性被験者は、自体重の80%の負荷で1分間に40回の頻度(0.67Hz)で10回×10セット(計100回)のスクワット運動を実施した。その後、経時的なパフォーマンスは、等尺性膝伸筋筋力、脚の痛み等はVisual Analog Scaleを用いて評価した。パフォーマンス体现とした筋収縮・筋力の発揮は、骨格筋内エネルギー出力に依存すると仮定して、MR装置を用いて骨格筋内代謝産物濃度を測定した。これらの項目を経時的に分析することで、パフォーマンスの体现が何に起因するかを検討した。

#### 4. 研究成果

本研究では、以下の成果が得られた。

(1) 疲労困憊時の骨格筋エネルギー代謝項目は、ほぼ枯渇しており、運動時に放出されるエネルギー量は減少していた。疲労困憊時のPCrは、ほぼ枯渇していた。酸素摂取量は、運動強度の増大に伴い線形的に増大していた。SEMGより導出した筋動員を反映するiEMGは、運動開始時と比べて有意に増大していたが、筋線維タイプを反映するMPFは有意に減少していた。骨格筋内の自由エネルギーは、安静時と比べて疲労困憊時において有意に減少していた( $p<0.05$ )。

(2) 一定負荷運動6分目における活動筋内の自由エネルギー量は、安静時と比べて僅かに減少していた。一定負荷運動時の酸素摂取量を指数関数式でフィッティングすると $VO_2$ 動態はプラトーを示していた。さらに、自由エネルギー量は、3分目と6分目で有意な差は観られなかった。

(3) 激運動後の自由エネルギー量は、安静時と比べて減少していた。その後、6分間の休息を経ても安静時まで完全に回復していなかった。また、一定負荷運動6分目の自由エネルギー量は、安静時と比べて減少していた。一定負荷運動時の酸素摂取量を指数関数式でフィッティングすると $VO_2$  slow componentが観られた。運動時のiEMGは、安静時と比較して運動終了時是有意な増大を示したが、MPFは、安静時と比べて減少して

いた。

(4) 被験者の身体的特性は、年齢:  $22.1 \pm 0.6$  yrs, 身長:  $170.5 \pm 3.6$  cm, 体重:  $63.2 \pm 11.8$  kgであった。スクワット負荷強度は、 $51.9 \pm 9.8$  kg ( $82.0 \pm 1.1\%$ MaxBW)であった。最大筋力は、Preと比べて、Post 0h, Post 24hで有意な低下を示した( $p<0.05$ )。脚の痛み・ハリ・全身のきつさを示すVASは、Preと比べて、Post 0h, Post 24h, Post 48hで有意な増大を示した( $p<0.05$ )。MR装置によって測定した骨格筋内エネルギー代謝は、Preと比べて、Post 48hのみ有意な低下を示した( $p<0.05$ , VL)。本課題は、先行研究を基にしたモデルを用いて遅発性筋肉痛、及びパフォーマンスの低下を引き起こす事が出来た。さらに、エネルギー観点から評価した結果は、パフォーマンスの低下とエネルギー出力は同期していない事が明らかとなった。以上から、パフォーマンス制御機構として、中枢機構を考慮せず末梢部で評価した場合、パフォーマンスの低下とエネルギー出力に関連性が観られない事が明らかとなり、筋構造とパフォーマンスの系統がパフォーマンス制御に関連する可能性を示した。

#### 運動時の骨格筋内エネルギー(自由エネルギー)の変化と運動効率の関係

本研究の成果をまとめると、これまでのエネルギー効率の計算は、ATPから放出されるエネルギー量は変動しないと仮定し算出されてきた。しかし、本研究において、運動強度の増大に伴う減少や低強度一定負荷運動時の3分目と6分目の変化無しという結果は、運動における活動筋動員増大及び酸素摂取量の増大を誘発する因子として自由エネルギーが関与する事を示している。また、一過性高強度負荷運動時において、外側広筋と大腿直筋内におけるエネルギー放出量の変化を72時間後まで調査した。その結果、外側広筋の48h後でのみ、preと比較して有意な低下を示したが、それ以外は、有意な変化を示さなかった。エネルギー代謝の測定に要する時間が制限因子となるが、一時的な短時間高強度運動時のエネルギー効率・代謝は、運動を制限するほど変化せず、エネルギー代謝以外の因子によって運動は規定される事を示した。

以上より、運動時のエネルギー効率は、エネルギー放出量の変化を運動形態に合わせて考慮し、算出に用いる必要がある事を示唆する。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計14件)

1. 有光琢磨. 高強度負荷運動に現れる酸素

- 摂取量の緩慢相の機序. 北海道大学大学院教育学研究紀要 125: 111-56, 2016, 査読有
2. Osawa T, Arimitsu T, Takahashi H. Do Two Tissue Blood Volume Parameters Measured by Different Near-Infrared Spectroscopy Methods Show the Same Dynamics During Incremental Running? *Adv Exp Med Biol* 876: 27-33, 2016, 査読有
  3. Hoshikawa M, Uchida S, Osawa T, Eguchi K, Arimitsu T, Suzuki Y, Kawahara T. Effects of Five Nights under Normobaric Hypoxia on Sleep Quality. *Med Sci Sport Exerc* 47(7): 1512-8, 2015, 査読有
  4. 荒川裕志, 山下大地, 有光琢磨, 佐藤満, 和田貴広, 嘉戸洋, 松本慎吾, 久木留毅. 男子エリートレスリング選手の体力水準. *バイオメカニクス研究* 19(2): 69-78, 2015, 査読有
  5. Arakawa H, Yamashita D, Arimitsu T, Sakae K, Shimizu S. Anthropometric Characteristics of Elite Japanese Female Wrestlers. *Int J Wrest Sci* 5: 13-21, 2015, 査読有
  6. Matsuura R, Arimitsu T, Yunoki T, Kimura T, Yamanaka R, Yano T. Effects of heat exposure in the absence of hyperthermia on power output during repeated cycling sprints. *Biol Sport* 32(1): 15-20, 2015, 査読有
  7. Afroundeh R, Arimitsu T, Yamanaka R, Lian CS, Shirakawa K, Yunoki T, Yano T. Effect of work intensity on time delay in mediation of ventilation by arterial carbon dioxide during recovery from impulse exercise. *Physiol Res* 63(4): 457-63, 2014, 査読有
  8. Lian CS, Arimitsu T, Yamanaka R, Afroundeh R, Shirakawa K, Oda S, Yunoki T, Yano T. 長時間一定負荷運動時の心拍ドリフトと自律神経活動の関係. 北海道大学大学院教育学研究紀要 120: 45-52, 2014, 査読有
  9. Yano T, Afroundeh R, Yamanaka R, Arimitsu T, Lian CS, Shirakawa K, Yunoki T. Oscillation in O<sub>2</sub> uptake in impulse exercise. *Acta Physiol Hung* 101(2): 143-9, 2014, 査読有
  10. Yano T, Afroundeh R, Yamanaka R, Arimitsu T, Lian CS, Shirakawa K, Yunoki T. Response of end tidal CO<sub>2</sub> pressure to impulse exercise. *Acta Physiol Hung* 101(1): 103-11, 2014, 査読有
  11. Yano T, Lian CS, Arimitsu T, Yamanaka R, Afroundeh R, Shirakawa K, Yunoki T. Oscillation of oxygenation in skeletal muscle at rest and in light exercise. *Acta Physiol Hung* 100(3): 312-20, 2013, 査読有
  12. Afroundeh R, Arimitsu T, Yamanaka R, Lian CS, Shirakawa K, Yunoki T, Yano T. Relationship between ventilation and predicted arterial CO<sub>2</sub> pressure during recovery from an impulse-like exercise without metabolic acidosis. *Physiol Res* 62(4): 387-93, 2013, 査読有
  13. Yano T, Lian CS, Arimitsu T, Yamanaka R, Afroundeh R, Shirakawa K, Yunoki T. Comparison of oscillation of oxygenation in skeletal muscle between early and late phases in prolonged exercise. *Physiol Res* 62(3): 297-304, 2013, 査読有
  14. Matsuura R, Arimitsu T, Yunoki T, Kimura T, Yamanaka R, Yano T. Effects of deception for intensity on SEMG activity and blood lactate concentration during intermittent cycling followed by exhaustive cycling. *Acta Physiol Hung* 100(1): 54-63, 2013, 査読有
- [学会発表](計 23 件)
1. 大島逸生, 栗原俊之, 有光琢磨, 後藤一成. 高頻度・高強度でのレジスタンストレーニングの効果. 第 29 回日本トレーニング科学大会, 桐蔭横浜大学(神奈川県横浜市), 2016.10.29
  2. 黄忠, 黒部一道, 西脇雅人, 有光琢磨. 低酸素環境下での複合トレーニングが筋パワーおよび筋内基質に及ぼす影響. 第 71 回日本体力医学会大会, 盛岡地域交流センター市民文化ホール・他(岩手県盛岡市), 2016.9.23
  3. 黄忠, 黒部一道, 西脇雅人, 有光琢磨. 低酸素環境下での複合トレーニングが筋力・筋パワーに及ぼす影響. 日本体育学会第 67 回大会, 大阪体育大学熊取キャンパス(大阪府泉南郡), 2016.8.25
  4. 山下大地, 荒川裕志, 有光琢磨, 河野隆志, 和田貴広, 清水聖志人. 育成世代における男子エリートレスリング選手の体力水準. 日本体育学会第 67 回大会, 大阪体育大学熊取キャンパス(大阪府泉南郡), 2016.8.25
  5. Saito Y, Motonaga K, Kondo E, Ozawa S, Arakawa H, Kumagawa D, Suzuki N, Arimitsu T, Wada T, Kamei A, Nakajima K. Effects of the different weight-loss pattern on body composition and performance in collegiate wrestlers. the 21nd Annual Congress of the European College of Sport Science, Vienna(Austria), 2016.7.8
  6. 中村大輔, 有光琢磨, 山中亮, 安松幹展. 高温多湿環境がサッカー選手のパフォーマンス

- マンス発揮および口腔内局所免疫能に与える影響. 日本フットボール学会 13th Congress, 東洋大学白山キャンパス(東京都文京区), 2016.3.12
7. 横澤俊治, 窪康之, 池田達昭, 熊川大介, 中村真理子, 松林武生, 有光琢磨, 稲葉優希, 高嶋涉, 内藤耕三, 袴田智子, 前川剛輝, 松田有司, 山下大地, 山中亮, 山本真帆, 澁谷顕一, 持田尚, 熊野陽人. トレーニングに伴うパフォーマンス変化の横断的・多角的評価. 第 12 回 JISS スポーツ科学会議, 国立スポーツ科学センター・味の素ナショナルトレーニングセンター (東京都北区), 2015.12.10
  8. 元永恵子, 荒川裕志, 有光琢磨, 山下大地, 藤山光太郎, 松永共広, 栄和人, 西口茂樹, 和田貴広, 亀井明子, 中嶋耕平. レスリング全日本選手権出場選手の減量実施状況. 第 70 回日本体力医学会大会, 和歌山県民文化会館 (和歌山県和歌山市), 2015.9.18-20
  9. Arakawa H, Arimitsu T, Shitara K, Sato M, Wada T, Kado H, Matsumoto S, Kukidome T. Longitudinal changes in body composition and fitness profiles of elite male Japanese wrestlers. 19th Annual Congress of the European College of Sport Science, Amsterdam (Netherlands), 2014.7.2-5
  10. Osawa T, Arimitsu T, Takahashi H. Validation of two tissue blood volume parameters measured by near-infrared spectroscopy. ISOTT 2014: International Society on Oxygen Transport to Tissue. London (UK), 2014.6.28-7.3
  11. Osawa T, Arimitsu T, Takahashi H. The influence of exercise intensity and inspired  $O_2$  on muscle deoxygenation were different between the thigh and calf during square-wave running exercise. ISOTT 2014: International Society on Oxygen Transport to Tissue. London (UK), 2014.6.28-7.3
  12. Osawa T, Arimitsu T, Takahashi H. Is hypoxia-decreased maximal  $O_2$  uptake related to muscle  $O_2$  saturation during incremental running exercise? 61th Annual Meeting of American College of Sports Medicine. Florida (USA), 2014.5.27-31
  13. 紅椋英信, 横澤俊治, 前川剛輝, 有光琢磨, 相田裕次, 湯田淳. スピードスケート競技チームパシュートにおける隊列形態の相違がレースに及ぼす影響. 日本コーチング学会第 25 回学会大会, 筑波大学 (茨城県つくば市), 2014.3.16
  14. 高橋英幸, 有光琢磨, 大澤拓也, 大岩奈青, 中嶋耕平, 丸山克也. リン磁気共鳴分光法を用いた骨格筋リン酸化合物濃度の非侵襲的定量. 第 69 回日本体力医学会大会. 長崎大学文教キャンパス (長崎県長崎市), 2014.9.19
  15. 高橋英幸, 有光琢磨, 大澤拓也, 大岩奈青, 中嶋耕平, 丸山克也, 瀧澤修. Extended ISIS 法を用いた  $^{31}P$ -MRS による骨格筋リン酸化合物の定量方法の検討. 第 42 回日本磁気共鳴医学会大会. ホテルグランヴィア京都 (京都府京都市), 2014.9.18
  16. 荒川裕志, 有光琢磨, 設楽佳世, 久木留毅, 佐藤満, 和田貴広, 嘉戸洋, 松本慎吾. 男子レスリング競技における五輪メダリスト・全日本代表レベル・全日本ジュニア代表レベルの体力水準の比較. 第 10 回 JISS スポーツ科学会議, 国立スポーツ科学センター・味の素ナショナルトレーニングセンター (東京都北区), 2013.11.29
  17. 鈴木康弘, 居石真理絵, 松林武生, 有光琢磨, 山中亮, 麻場一徳, 川原貴. 常圧低酸素環境における宿泊とトレーニングの組み合わせは短期間で無酸素性運動能力を向上させる. 第 10 回 JISS スポーツ科学会議, 国立スポーツ科学センター・味の素ナショナルトレーニングセンター (東京都北区), 2013.11.29
  18. 荒川裕志, 有光琢磨, 設楽佳世, 佐藤満, 和田貴広, 嘉戸洋, 松本慎吾, 久木留毅. 男子レスリング・ロンドン五輪メダリストの体力水準. 第 26 回日本トレーニング科学大会, ZAO たいらぐら (山形県上山市), 2013.11.8-9
  19. 荒川裕志, 有光琢磨, 設楽佳世, 久木留毅, 佐藤満, 和田貴広, 嘉戸洋, 松本慎吾. レスリング・男子ナショナルチームの体力測定におけるロンドン五輪メダリストの特徴. 第 26 回日本トレーニング科学大会, ZAO たいらぐら (山形県上山市), 2013.11.8-9
  20. 連長順, 有光琢磨, 山中亮, アフルンデロガイエ, 白川和希, 柚木孝敬, 矢野徳郎. 仰臥位の一定中強度長時間運動における心拍ドリフトの要因. 日本生理人類学会第 69 回大会. 同志社大学京田辺キャンパス (京都府京田辺市), 2013.10.27
  21. 近藤衣美, 元永恵子, 斉藤陽子, 荒川裕志, 熊川大介, 鈴木なつ未, 有光琢磨, 和田貴広, 朝倉利夫, 亀井明子, 川原貴. 大学レスリング選手の急速減量前後における栄養素等摂取量とパフォーマンスの変化. 第 68 回日本体力医学会大会, 日本教育会館学術総合センター (東京都千代田区), 2013.9.22
  22. 星川雅子, 大澤拓也, 有光琢磨, 江口和美, 鈴木康弘, 内田直. 標高 2,000m 相当の低酸素環境での 5 日間の宿泊が, 競技選手の換気の化学感受性と睡眠の質に及ぼす影響. 第 68 回日本体力医学会大会,

日本教育会館学術総合センター (東京都千代田区), 2013.9.21-23

23. Osawa T, Arimitsu T, Takahashi H. Is hypoxia-decreased fat oxidation attributed to the intramyocellular lipid oxidation? 18th Annual Congress of the European College of Sport Science. Barcelona (Spain), 2013.6.26-29

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

有光 琢磨 (ARIMITSU Takuma)

立命館大学・スポーツ健康科学部・助教

研究者番号 : 00616021