

令和 6 年 5 月 10 日現在

機関番号：14403

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K11521

研究課題名（和文）レジスタンストレーニングがミトコンドリアの糖酸化代謝に与える影響

研究課題名（英文）The effects of resistance training on pyruvate oxidation in mitochondria.

研究代表者

榎木 泰介（ENOKI, Taisuke）

大阪教育大学・教育学部・准教授

研究者番号：70392701

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、高い筋力発揮（レジスタンストレーニング・筋トレ）によって特に解糖系を活性化した際に、産生されたピルビン酸が糖酸化系にも影響を与えるのかについて検討した。その結果、ピルビン酸をミトコンドリアへ取り込む酵素（PDH）が増加し、その活性が亢進することが明らかとなった。加えて、PDH活性を制御する酵素も増加し、筋トレが解糖系だけではなく糖酸化系にも少なからず影響を及ぼす可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高強度の筋収縮を特徴とする筋力トレーニングは、筋肥大や筋力発揮を主な目的とするが、エネルギー代謝の観点からみると、特に解糖系代謝を活性化させ、糖酸化系代謝の動員は少ない。しかし、本研究の結果から、筋力トレーニングは糖酸化系の酵素にも少なからず影響を与えており、スポーツ科学におけるトレーニングや健康科学分野における運動療法へと応用の可能性を示唆するものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：This study investigated whether the pyruvate produced by high muscle exertion (resistance & strength training), especially when the glycolytic pathway is activated, also affects the glycooxidative pathway in mitochondria. The results showed that the PDH enzyme that imports pyruvate into the mitochondria was increased and its activity was also upregulated. In addition, the enzyme that regulates PDH activity also increased. These findings suggest that muscle strength training may affect not only the glycolytic but also the glycooxidative pathway.

研究分野：運動生理生化学、健康科学、スポーツ科学

キーワード：エネルギー代謝 ミトコンドリア レジスタンストレーニング ピルビン酸 骨格筋 乳酸

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

スポーツなど活動する骨格筋では、特に糖を利用したエネルギー代謝が重要である。糖代謝には、解糖と糖酸化がある。糖代謝のうち、ピルビン酸は解糖系代謝の最終産物であり、しかしミトコンドリアに取り込まれることで糖酸化の起点にもなる非常にユニークな糖質である。持久的運動では、解糖と糖酸化の2つの経路が連動して稼働する。一方、高強度の筋発揮を要するレジスタンストレーニング（筋トレ）では、特に解糖が亢進する。よって、筋トレでは解糖から多くのピルビン酸が産生されるが、実際の筋活動は短時間で終了する。そのため、ピルビン酸を利用する糖酸化からエネルギーを得る機会は大きくはない。このように、エネルギー代謝が特徴的な筋トレだが、多くの先行研究では骨格筋の肥大や発揮出力に注目しており、エネルギー代謝についての研究情報は十分ではない。そこで本研究では、筋トレによる解糖代謝の活性化が、糖酸化代謝へどのような影響を与えるのかに注目した。

2. 研究の目的

本研究は、高強度の筋力発揮を必要とし、そのために解糖系を活性化するレジスタンストレーニング（RT）が、糖酸化系に与える影響を解明することを目的として実施した。活動する骨格筋において、解糖系で産生したピルビン酸を、糖酸化系で代謝利用するならば、ミトコンドリアに取り込む必要がある、それを担うのがピルビン酸脱水素酵素（PDH）である。本研究では、習慣的なRTによる影響について、PDH量、PDH活性、PDH活性型/不活性型の比率、PDHを制御する物質などを中心に検討した。

3. 研究の方法

9週齢のWistar/ST系雄ラット（24匹）をCON群とRT群に分け、RT群にはハシゴ登りを用いたRTを2日に1回、計15回実施した。最終RT直後、および最終RTの24時間後に、下肢から長母指屈筋（FHL）を採取し、Western Blotting法により骨格筋内のPDHおよび糖代謝系の酵素、膜輸送担体について、分析を行った。

4. 研究成果

(1) PDH-E1 α とPDH活性の適応変化 (Fig. 1)

約3週間のRTによって、速筋線維FHLのPDH-E1 α は有意な増加を示した。同様に、PDH活性についても有意な増加を示した。

(2) RT直後におけるp-PDHの適応変化 (Fig. 2)

PDHの不活性型であるp-PDHは、PDHのser部位のリン酸化によって判定される。RT直後のp-PDHを3種類のser部位（293、300、232）で検討した結果、全ての部位で有意な低下を示した。また、それらを（1）で示したPDH-E1 α で割った値についても、有意な低下を示した。これらのことから、本研究のRTは、運動中にPDH不活性型を減少させることによって、PDH活性型を増加させることがわかった。

(3) 安静時におけるp-PDHの適応変化 (Fig. 3)

約3週間の習慣的RTののち、安静時におけるp-PDHを検討した結果、3種類のser部位の全てにおいて有意な増加を示した。このことから、RT群では、安静時において不活性型のPDHが増加し、RT群では安静時に糖酸化系代謝が抑制される可能性が示唆された。これは持久的トレーニングを用いた先行研究の結果と同様であり、トレーニングに対する骨格筋の適応変化として、安静時における脂質代謝の亢進が示唆される。一方、安静時のp-PDHを（1）のPDH-E1 α で割った値では、p-PDHser293において有意な増加がキャンセルされた。このことから、PDHの活性/不活性を制御するser部位について、3種類で異なる適応変化が明らかとなった。

(4) PDHを制御するPDPとPDKの適応変化

PDHの不活性/活性は、PDHのser部位のリン酸化/脱リン酸化によって制御されるが、それを担う酵素がPDPとPDKである。本研究のRTでは、PDK4のみに有意な増加がみられた。一方、PDPとPDKをそれぞれ（1）のPDH-E1 α で割ると、PDP1とPDK2で有意な減少を示し、PDK4は増減を示さなかった。これらの結果から、習慣的なRTはPDK4にのみ特異的な影響を与えることがわかった。PDKは活性型となったPDHを不活性型（安静型）に還元する酵素だが、特にPDK4は慢性

的な細胞内ピルビン酸の増加に反応しない可能性が示唆された。

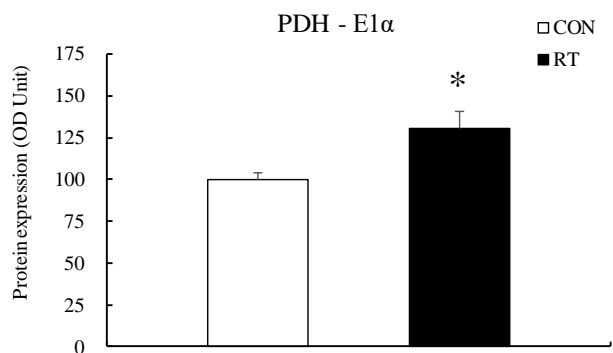


Fig.1 PDH - E1 α protein expression * P < 0.05

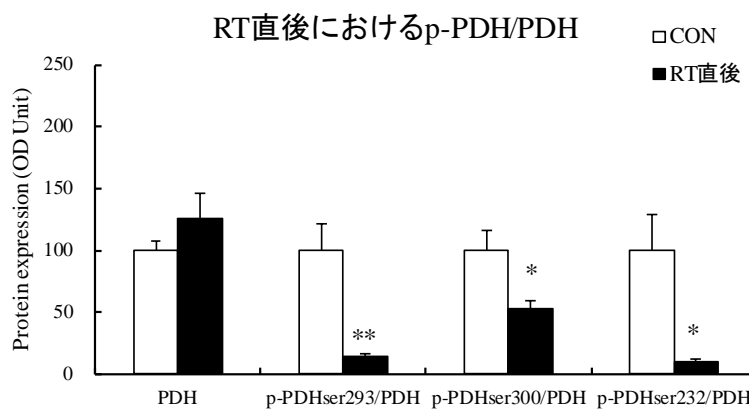


Fig.2 RT直後におけるp-PDH / PDH * P < 0.05, ** P < 0.01

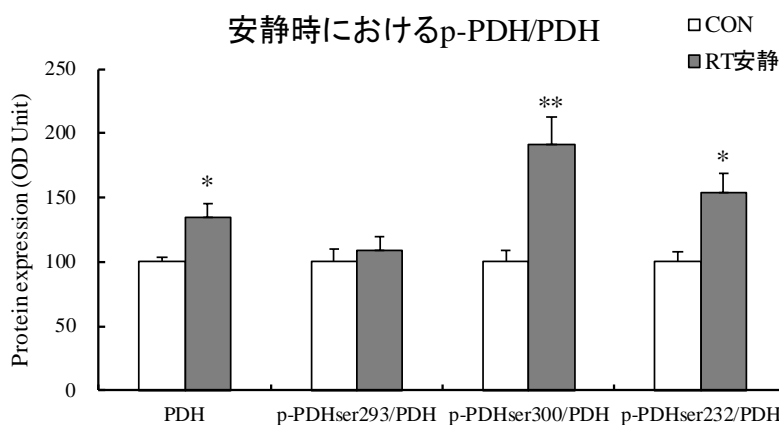


Fig.3 安静時におけるp-PDH / PDH * P < 0.05, ** P < 0.01

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 西口治佳, 小山健藏, 榎木泰介	4. 巻 69
2. 論文標題 高強度インターバルトレーニングが骨格筋線維の乳酸脱水素酵素に及ぼす影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 大阪教育大学紀要, 人文社会科学・自然科学	6. 最初と最後の頁 1-7.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.32287/TD00031760	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 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 西口治佳, 榎木泰介
2. 発表標題 短期間の高強度インターバルトレーニングが遅筋線維群と速筋線維群の乳酸の産生及び分解に及ぼす影響
3. 学会等名 第76回日本体力医学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 榎木泰介, 小笠原佑衣, 岡田優香, 久世恵利花, 上田萌湖, 西口治佳
2. 発表標題 高強度間欠のレジスタンストレーニングが糖酸化代謝の活性化に与える効果
3. 学会等名 第76回日本体力医学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 榎木泰介, 小笠原佑衣, 岡田優香, 久世恵利花, 西口治佳
2. 発表標題 高強度間欠のレジスタンストレーニングがピルビン酸代謝に与える影響
3. 学会等名 第75回日本体力医学会大会 (鹿児島)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西口治佳, 小笠原佑衣, 岡田優香, 久世恵利花, 榎木泰介
2. 発表標題 レジスタンストレーニングは長母趾屈筋の筋原線維タンパク質量の増加を引き起こす
3. 学会等名 第75回日本体力医学会大会(鹿児島)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西口治佳, 小笠原佑衣, 榎木泰介
2. 発表標題 レジスタンストレーニングが長母趾屈筋の筋タンパク質合成経路に及ぼす影響
3. 学会等名 第74回 日本体力医学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 榎木泰介, 小笠原佑衣, 西口治佳
2. 発表標題 レジスタンストレーニングによる乳酸・ピルビン酸代謝の適応変化
3. 学会等名 第74回 日本体力医学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 榎木泰介
2. 発表標題 エネルギー供給からみた体カトレーニング
3. 学会等名 第7回 日本野球科学研究会(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 榎木泰介
2. 発表標題 トレーニングメニューをエネルギー代謝から考える
3. 学会等名 アスレティックトレーナー連絡会議 関西ブロック研修会（招待講演）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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