

令和 2 年 6 月 29 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02155

研究課題名（和文）低酸素環境での運動に対する糖代謝応答-筋収縮様式の相違の影響

研究課題名（英文）Effects of exercise under hypoxic condition: Influence of different types of muscle contraction

研究代表者

後藤 一成（GOTO, KAZUSHIGE）

立命館大学・スポーツ健康科学部・教授

研究者番号：60508258

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：低酸素環境で行うペダリング運動およびランニング運動のいずれにおいても、通常酸素環境で行う運動に比較して糖代謝の亢進することが明らかになった。また、低酸素環境で行う運動では活動筋における代謝（酸素消費）は亢進することが認められた。本研究の結果から、低酸素環境での運動が糖代謝の亢進にもたらす効果は、運動様式（筋収縮様式）の相違を問わずに共通してみられ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

中程度の低酸素環境で実施する有酸素性運動が糖代謝を亢進させることが明らかになった。また、この効果は、ペダリング運動とランニング運動の双方で認められた。したがって、糖代謝の改善（インスリン感受性の改善など）をねらいとして低酸素環境での有酸素性運動を導入する際には、運動様式（筋の収縮様式）を問わずに代謝改善効果を期待できると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Both cycling exercise and running exercise augmented carbohydrate metabolism compared with the same exercise in normoxia. Moreover, endurance exercise in hypoxia promoted muscle metabolism (muscle oxygen consumption). The findings from the present results suggest that endurance exercise in hypoxia facilitated carbohydrate metabolism with being independent of exercise modality (muscle contraction type).

研究分野：トレーニング科学

キーワード：低酸素 有酸素性運動 ペダリング運動 ランニング運動 筋収縮様式 糖代謝

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

人工低酸素室(疑似低酸素環境)を利用した低酸素トレーニングは、持久性競技種目のスポーツ選手を中心に盛んに取り入れられている(Dufour et al. 2006)。これに対して、低酸素環境での滞在や運動がインスリン感受性の改善(Haufe et al. 2008)、体脂肪量の減少(Lippl et al. 2010; Wiesner et al. 2010)、食欲の軽減(Wasse et al. 2010)など健康増進に対しても有益な効果を示すことが注目されている。また、研究代表者らも、低酸素環境での一過性の運動や長期のトレーニングは糖代謝を亢進させることを明らかにしてきた(Morishima et al. 2014, Goto et al. 2015)。

一方で、これまでに実施された「低酸素環境での運動と糖代謝」に関わる先行研究ではベダリング運動(短縮性筋活動が中心)が主に用いられており、伸張性筋収縮が含まれる他の運動様式で同様の効果がみられるかは明らかでない。また、既存の研究では、低酸素環境での運動が糖代謝に及ぼす影響を呼気ガス分析による炭水化物酸化量(酸素摂取量と二酸化炭素産生量から算出)から評価をしてきた。一方、この方法による炭水化物酸化量の評価はグルコース(糖)の酸化を直接示すものではない。また、低酸素環境では酸素摂取量が低下する場合もあるが、このことは炭水化物酸化量の過剰評価に繋がることも懸念される。したがって今後は、安定同位体により標識グルコース(^{13}C グルコース)を経口投与し、呼気からの排出動態を評価する「 ^{13}C グルコース呼気試験」から、体内での糖利用を検討する必要があると考えた。また、骨格筋での糖取り込みには活動筋での血流量が大きく影響する。そのため、低酸素環境での運動に対する末梢循環の動態(筋血流量、酸素動態など)を糖代謝と関連づけた検討も必要である。

2. 研究の目的

本研究では、低酸素環境での運動に対する糖代謝の亢進を、筋収縮様式(短縮性筋活動、伸張性筋活動)の相違と関連づけて検討することを目的とする。また、糖代謝の変化と末梢循環の動態との関連性についても検討する。

3. 研究の方法

(1) 低酸素環境でのランニング運動に対する糖代謝の評価

: ^{13}C グルコース呼気試験を用いた検討

男性9名を対象に、トレッドミルでの合計39分間のランニング運動(短縮性および伸張性筋収縮によって運動を遂行)を通常酸素環境下(吸入酸素濃度: 20.9%)または低酸素環境下(吸入酸素濃度: 14.5%)において実施した。走速度は通常酸素環境または低酸素環境で評価した最大酸素摂取量の90%(主運動区間)または50%(アクティブレスト区間)に設定した(低酸素条件は通常酸素条件に比較して走速度が低値)。運動開始前から運動終了30分後にかけて前腕静脈から採血を行い、血中乳酸、グルコース、pH、重炭酸イオン、血中酸素分圧、二酸化炭素分圧、カリウム、血清インスリンおよびケトン体濃度などの変化を検討した。また運動開始直前に、安定同位体(^{13}C)により標識したグルコースを経口摂取し、運動中は経時的に呼気を採取

し、呼気中に排出された $^{13}\text{CO}_2$ と $^{12}\text{CO}_2$ の存在比から外因性グルコースの酸化動態を評価した。その結果、低酸素条件は通常酸素条件と比較して運動後における血中乳酸濃度の上昇が亢進し ($P = 0.002$)、血中 pH ($P = 0.002$) および重炭酸イオン濃度 ($P = 0.002$) は有意に低下した。血中グルコース、カリウム、血清インスリンおよび総ケトン体濃度の変化の動態には、条件間における有意差は認められなかった。運動中における $^{13}\text{CO}_2/^{12}\text{CO}_2$ 比から ^{13}C 排出量を算出した結果、通常酸素条件と低酸素条件の間で有意差は認められなかった。上述の結果から、低酸素条件は通常酸素条件に比較して、走速度やエネルギー消費量が低値を示す状況であっても、有酸素性運動中における外因性の糖利用は同様に亢進することが明らかになった。

(2) 低酸素環境でのランニング運動に対する糖代謝の評価：運動強度の相違に着目して

男性 9 名を対象に、30 分間のランニング（短縮性および伸張性筋収縮によって運動を遂行）を通常酸素条件（通常酸素環境で測定した最大酸素摂取量の 65% 強度の走速度）、低酸素条件 1（低酸素環境で測定した最大酸素摂取量の 65% 強度の走速度）、低酸素条件 2（通常酸素環境と同一の走速度）の条件で実施をした。運動開始時に安定同位体 (^{13}C) により標識したグルコースを経口摂取し、運動中の呼気中に排出される $^{13}\text{CO}_2/^{12}\text{CO}_2$ 比の変化から、摂取した標識グルコースの酸化利用の程度を評価した。また、酸-塩基平衡に関わる各指標やエネルギー代謝指標の変化を検討した。その結果、運動前後での血中乳酸濃度の上昇の程度は、低酸素環境 1 が低酸素条件 2 および通常酸素条件に比較して有意に高値を示した。一方で、運動中の ^{13}C 排出量（外因性グルコースの酸化量を反映）は、低酸素環境 1 が通常酸素条件に比較して有意に低値を示した。これらの結果から、低酸素環境でのランニングでは通常酸素環境での同一速度で行うランニングに比較して筋グリコーゲン利用は亢進するが、外因性の糖利用はむしろ低下する可能性が示された。

(3) 低酸素環境での高強度ペダリング運動に対する糖代謝の応答

男性 10 名を対象に、通常酸素環境または低酸素環境での高強度ペダリング運動（おもに短縮性筋収縮によって運動を遂行）を実施した際の糖代謝や内分泌 応答、酸塩基平衡に関わる指標の変化を比較した。その結果、運動に伴う血中乳酸濃度の上昇や pH の低下、血漿アドレナリンおよびグルカゴン濃度（肝グリコーゲンの分解の関連）の変化には条件間で差がみられなかった。

(4) 低酸素環境での中強度ペダリング運動に対する糖代謝の応答

男性 12 名を対象に、通常酸素環境または低酸素環境（酸素濃度 14.5%）において 60 分間のペダリング運動（強度は最大酸素摂取量の 60%）を負荷した。その結果、低酸素条件は通常酸素条件に比較して、運動時のペダル負荷および動脈血酸素飽和度はいずれも低値を示した。また、血中酸素分圧および二酸化炭素分圧は低酸素条件が低値を示した。これに対して、血中グ

ルコース濃度および呼吸交換比は低酸素条件がいずれも高値を示したことから、低酸素条件では通常酸素条件に比較して糖代謝が亢進したものと考えられた。

(5) 低酸素環境での中強度ペダリング運動に対する糖代謝の応答

：筋血流量および筋酸素消費量の変化と関連づけて

男性 10 名を対象に、最大酸素摂取量の 65% に相当する強度での 30 分間のペダリング運動を、通常酸素環境または低酸素環境（酸素濃度 14.5%）で負荷した。その結果、低酸素条件は通常酸素条件に比較して、運動中の動脈血酸素飽和度は低値を、心拍数は高値を示した。運動直後における血中乳酸濃度は、低酸素条件が通常酸素条件に比較して高値を示した。また、運動に伴い大腿部での筋血流量はいずれの条件においても増加し、条件間での差はみられなかった。筋酸素消費率は運動に伴い増加したが、運動直後における値は低酸素条件が通常酸素条件に比較して高値を示した。以上の結果から、低酸素環境で行うペダリング運動では通常酸素環境で行う運動と比較して糖代謝が亢進すること、また、活動筋における酸素消費は亢進することが明らかになった。

4. 研究成果

低酸素環境で行うランニング運動は、通常酸素環境で行うランニング運動に比較して糖代謝を大きく亢進させることが明らかになった。一方、この際に外因性の糖利用は低下する傾向にあったことから、糖代謝の亢進はおもに内因性の糖利用の亢進（筋グリコーゲン利用の増加）を反映するものと考えられた。さらに、低酸素環境での運動に伴う糖利用の亢進はペダリング運動によっても認められた。上述の結果は、低酸素環境での運動時には筋収縮様式（短縮性筋活動、伸張性筋活動）に関わらず、通常酸素環境で行う同一の運動に比較して糖利用が亢進することを示唆するものである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件／うち国際共著 3件／うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Sumi D, Kasai N, Ito H, Goto K.	4. 巻 10
2. 論文標題 The Effects of Endurance Exercise in Hypoxia on Acid-base Balance, Potassium Kinetics and Exogenous Glucose Oxidation.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frontiers in Physiology	6. 最初と最後の頁 504
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fphys.2019.00504	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 Sumi D, Kojima C, Kasai N, Goto K.	4. 巻 4
2. 論文標題 The effects of endurance exercise in hypoxia on acid-base balance and potassium kinetics: a randomized crossover design in male endurance athletes.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Sports Medicine-Open	6. 最初と最後の頁 45
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40798-018-0160-1	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 Kasai N, Kojima C, Goto K	4. 巻 2
2. 論文標題 Metabolic and Performance Responses to Sprint Exercise under Hypoxia among Female Athletes.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Sports Medicine International Open	6. 最初と最後の頁 E71-E78
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1055/a-0628-6100	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 Kojima C, Kasai N, Ishibashi A, Murakami Y, Ebi K, Goto K	4. 巻 33
2. 論文標題 Appetite regulations after sprint exercise under hypoxic condition in female athletes.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Strength Conditioning Research	6. 最初と最後の頁 1773-1780
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1519/JSC.0000000000002131	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 Kasai N, Mizuno S, Ishimoto S, Sakamoto E, Maruta M, Kurihara T, Kurosawa Y, Goto K	4. 巻 33
2. 論文標題 Impact of six consecutive days of sprint training in hypoxia on performance in competitive sprint runners.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Strength and Conditioning Research	6. 最初と最後の頁 36-43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1519/JSC.0000000000001954	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 Sumi D, Kojima C, Goto K	4. 巻 32
2. 論文標題 Impact of Endurance Exercise in Hypoxia on Muscle Damage, Inflammatory and Performance Responses.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Strength and Conditioning Research	6. 最初と最後の頁 1053-1062
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1519/JSC.0000000000001911	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 Goto K, Kasai N, Kojima C, Ishibashi A	4. 巻 43
2. 論文標題 Post-exercise serum hepcidin response to repeated sprint exercise under normoxic and hypoxic conditions.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism	6. 最初と最後の頁 221-226
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1139/apnm-2017-0418	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 Goto K, Sumi D, Kojima C, Ishibashi A	4. 巻 12
2. 論文標題 Post-exercise serum hepcidin levels were unaffected by hypoxic exposure during prolonged exercise sessions.	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 e0183629
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 0.1371/journal.pone.0183629	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 Yamaguchi K, Kasai N, Hayashi N, Yatsutani H, Girard O, Goto K	4. 巻 -
2. 論文標題 Acute performance and physiological responses to repeated-sprint exercise in a combined hot and hypoxic environment.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physiological Reports	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) なし	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 該当する

1. 著者名 Sumi D, Hayashi N, Yatsutani H and Goto K	4. 巻 -
2. 論文標題 Exogenous glucose oxidation during endurance exercise in hypoxia.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physiological Reports	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) なし	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 Hayashi N, Yatsutani H, Mori H, Ito H, Badenhorst CE, Goto K	4. 巻 120
2. 論文標題 No effect of supplemented heat stress during an acute endurance exercise session in hypoxia on hepcidin regulation.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 European Journal of Applied Physiology	6. 最初と最後の頁 1331-1340
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00421-020-04365-x	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 該当する

1. 著者名 Kasai N, Kojima C, Sumi D, Ikutomo A, Goto K	4. 巻 10
2. 論文標題 Inflammatory, oxidative stress, and angiogenic growth factor responses to repeated-sprint exercise in hypoxia.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frontiers in Physiology	6. 最初と最後の頁 844
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fphys.2019.00844	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 Yamaguchi K, Kasai N, Sumi D, Yatsutani H, Girard O, Goto K	4. 巻 10
2. 論文標題 Muscle oxygenation during repeated double-poling sprint exercise in normobaric hypoxia and normoxia.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frontiers in Physiology	6. 最初と最後の頁 743
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fphys.2019.00743	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 該当する

[学会発表] 計10件(うち招待講演 6件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Goto K
2. 発表標題 Impact of Hypoxia on Glucose Metabolism, Appetite Regulations, Muscle Damage and Inflammatory Responses
3. 学会等名 65th Annual Meeting of American College of Sports Medicine (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kasai N, Motomura Y, Ikutomo A, Goto K
2. 発表標題 Muscle oxygenation and systemic metabolic responses during maximal sprint exercise in hypoxia among athletes
3. 学会等名 65th Annual Meeting of American College of Sports Medicine (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sumi D, Kojima C, Goto K
2. 発表標題 The effects of endunrace exercise in hypoxia on hepcidin response in athletes
3. 学会等名 65th Annual Meeting of American College of Sports Medicine (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yamaguchi K, Kasai N, Sumi D, Yatsutani H, Goto K
2. 発表標題 Muscle oxygenation during repeated double-poling sprint exercise under hypoxic condition
3. 学会等名 65th Annual Meeting of American College of Sports Medicine (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 後藤一成
2. 発表標題 高強度や長時間の運動が食欲調節に及ぼす影響－運動に伴う食欲減退とその打開策－
3. 学会等名 第73回日本体力医学会大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 後藤一成
2. 発表標題 高強度運動が食欲に及ぼす影響-運動後における食欲減退の機序とその対策-
3. 学会等名 ストレングス&コンディショニングカンファレンス2017 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 後藤一成
2. 発表標題 高強度トレーニング時における栄養摂取が代謝・内分泌指標や運動パフォーマンスに及ぼす影響
3. 学会等名 第64回栄養改善学会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 後藤一成
2. 発表標題 低酸素環境下での高強度運動に対する代謝・内分泌動態
3. 学会等名 第21回酸素ダイナミクス研究会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 後藤一成
2. 発表標題 低酸素環境や暑熱環境下で行う運動に対する代謝応答
3. 学会等名 第27回日本運動生理学会大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 後藤一成
2. 発表標題 低酸素トレーニングに関わる新たな試み
3. 学会等名 第74回日本体力医学会大会（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
研究分担者	片山 敬章 (KATAYAMA KEISHO) (40343214)	名古屋大学・総合保健体育科学センター・教授 (13901)	