

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2014～2016

課題番号：26282180

研究課題名（和文）糖代謝の改善をねらいとした低酸素環境下でのトレーニングの効果に関する研究

研究課題名（英文）Effects of exercise training in hypoxia on glucome metabolism

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・准教授

研究者番号：60508258

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、低酸素環境で行う運動が糖代謝に及ぼす影響を検討した。その結果、低酸素環境での運動はペダリング運動、ランニング運動のいずれであっても糖代謝の亢進に有効であることが明らかになった。またその効果は、スポーツ競技者、一般の運動実施者、肥満者のいずれにおいても共通していた。また、低酸素環境での運動は通常酸素環境下での運動と比較して、過度の筋損傷や炎症反応、酸化ストレスを誘導することは確認されなかった。一方で、低酸素環境での運動に伴う耐糖能やインスリン感受性の改善に関わる急性効果は認められなかった。

研究成果の概要（英文）：The present study determined influence of exercise in hypoxia on glucose metabolism. The findings from experiments over 3 years indicated that exercise, including pedaling exercise, running exercise, was effective for promoting glucose metabolism. Moreover, augmented glucose metabolism by exercise in hypoxia was commonly observed in athletes, normal people and obese people. Furthermore, exercise in hypoxia did not promote exercise-induced muscle damage and inflammatory responses, and oxidation stress compared with the same exercise in normoxia. However, exercise in hypoxia did not affect acutely glucose tolerance or insulin sensitivity after the exercise.

研究分野：トレーニング科学

キーワード：低酸素トレーニング 耐糖能 インスリン感受性 糖代謝 健康増進

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

低酸素環境下での運動(低酸素トレーニング)は、持久性スポーツ競技者の体力向上(最大酸素摂取量の増加など)をねらいとして積極的に活用されてきた(Dufour et al. 2006)。一方で、おもに2010年以降は、健康増進や肥満予防に対する効果が新たに注目されている。この点に関してWiesner et al. (2010)は、低酸素環境下で行う週3回・4週間の有酸素性トレーニングが通常酸素環境で行う同様のトレーニングに比較して体脂肪量を大きく減少させることを報告している。Lippel et al. (2010)は、肥満者における高地での滞在は食事を低下させ、体重減少に貢献することを認めている。

これらの背景をふまえ、研究代表者は「低酸素環境下での運動が糖代謝に及ぼす影響」に注視し、研究を推進してきた。その結果、低酸素環境下での有酸素性トレーニングは耐糖能の改善に有効であること(Morishima et al. 2013)、通常酸素環境での運動と比較して運動中や運動終了後に糖利用が亢進する可能性を認めてきた(Goto, 2013a, 2013b)。

### 2. 研究の目的

本研究では、低酸素環境下で行う様々な形態での運動が糖代謝(運動中、運動後、食後など)に及ぼす影響を検討することを目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1) 研究1

低酸素環境下で行う有酸素性運動が運動中や運動後におけるエネルギー代謝や糖代謝に及ぼす影響を検討した。肥満男性8名を対象に、低酸素環境(吸入酸素濃度:15.0%)または通常酸素環境(吸入酸素濃度:20.9%)からなる2条件での測定をそれぞれ異なる日に実施した。運動には、最大酸素摂取量(各酸素環境下で測定)の60%に相当する30分間のペダリング運動を用いた。また、運動終了後に既定食を摂取させ、食事開始から2時間にわたり血中グルコースおよび血清インスリン濃度、エネルギー消費量や炭水化物の利用割合(呼吸交換比から算出)の推移を検討した。また、食欲調節に関わる血漿グレリンおよびPYY<sub>3-36</sub>濃度および主観的空腹感や満腹感の推移も検討した。

#### (2) 研究2

低酸素環境下で行う高強度運動が糖代謝やエネルギー代謝、食欲調節に関わる内分泌指標、食量などに及ぼす影響を検討した。運動には自転車エルゴメータでの間欠的な全力ペダリングを用いた。この運動を低酸素環境(吸入酸素濃度:14.5%)または通常酸素環境(吸入酸素濃度:20.9%)下で実施した。また、運動前後に採血し、血中

グルコース、血漿グレリンおよびグルカゴン様ペプチド1(GLP-1)濃度の推移を検討した。

#### (3) 研究3

低酸素環境下で行う運動が生理活性物質や筋損傷・炎症、酸化ストレスに及ぼす影響を検討した。男性9名を対象に、低酸素環境(吸入酸素濃度:14.5%)または通常酸素環境(吸入酸素濃度:20.9%)で中～高強度でのランニング運動を実施した。運動中には呼吸を連続的に採取し、エネルギー消費量(酸素摂取量、二酸化炭素産生量)や呼吸交換比を測定した。また、運動前から運動終了2時間後まで経時的に採血し、血中グルコース、乳酸、成長ホルモン、コルチゾール、ミオグロビン、血漿インターロイキン6(IL-6)濃度の推移を検討した。

#### (4) 研究4

低酸素環境下で行う運動が筋損傷や炎症、酸化ストレスの応答に及ぼす影響を検討した。男性10名を対象に、低酸素環境(吸入酸素濃度:14.5%)または通常酸素環境(吸入酸素濃度:20.9%)で全力での間欠的な自転車ペダリング運動を実施した。運動前から運動3時間まで経時的に採血し、血中グルコース、乳酸、血清ミオグロビン、血漿IL-6、インターロイキン1受容体拮抗物質(IL-1ra)濃度の推移を検討した。また、酸化ストレスの指標として、運動終了3時間における尿中8-OHdG排泄量(蓄尿により評価)を測定した。

### 4. 研究成果

#### (1) 研究1

低酸素環境での運動中は、通常酸素環境での運動中と比較して炭水化物の利用割合が有意に高値を示した( $P < 0.05$ )。食後における血中グルコースおよび血清インスリン濃度の変化の推移には、条件間で有意差が認められなかった。また、食事摂取に伴う血漿グレリンおよびPYY<sub>3-36</sub>濃度の変化、主観的指標(空腹感、満腹感)の推移にも条件間で有意差は認められなかった。

本研究の結果、「低酸素環境での運動は食後における血中グルコースおよび血清インスリン濃度の上昇を抑制する」という当初の仮説は支持されなかった。また、消化器由来の食欲調節に関与する内分泌指標(グレリン、GLP-1)の動態にも影響は認められなかった。この理由としては、中程度の酸素環境(吸入酸素濃度:14.5%)を用いたこと、被験者の特性(耐糖能が正常)、運動の内容(30分間のペダリング運動)など複数の要因が考えられた。

#### (2) 研究2

高強度運動時の発揮パワーには、条件間で有意差は認められなかった。低酸素条件は通常酸素条件と比較して、運動時におけ

る酸素摂取量が有意に低値を、呼吸交換比が有意に高値を示した ( $P < 0.05$ )。また、血中グルコースおよび乳酸濃度は両条件とも運動後に顕著に上昇したが、運動 30 分後時点での値は低酸素条件が通常条件に比較して有意に高値を示した ( $P < 0.05$ )。

血漿グレリン濃度は両条件とも運動終了直後および 30 分後に有意に低下したが ( $P < 0.05$ )、いずれの時点においても条件間での有意差は認められなかった。血漿 GLP-1 濃度にはいずれの条件においても運動に伴う有意な変化がみられず、条件間での有意差も認められなかった。運動後における食事量(運動 30 分後の時点から実施した食事摂取テストにより評価)には、低酸素条件と通常酸素条件の間で有意差が認められなかった。

本研究の結果、低酸素環境での高強度運動は通常酸素環境での運動に比較して血中乳酸濃度を大きく上昇させることが明らかになった。この結果は、低酸素環境では運動時の糖利用(糖分解)の亢進することを示唆するものと考えられる。一方で、食欲調節に関わる内分泌指標や食事量には低酸素環境への曝露の影響は認められなかった。

### (3) 研究 3

低酸素環境での運動時にはエネルギー消費量が有意に低値を示す一方で、炭水化物の利用割合は有意に高値を示した ( $P < 0.05$ )。

また、運動終了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有意に高値を示した ( $P < 0.05$ )。血清成長ホルモンおよびコルチゾール濃度は、両条件ともに運動後に著しく上昇したが ( $P < 0.05$ )、これらの変化の動態に条件間での有意差は認められなかった。筋損傷の間接指標である血清ミオグロビン濃度は両条件とも運動後に有意に上昇したが、低酸素条件が通常酸素条件に比較して有意に低値を示した ( $P < 0.05$ )。血漿 IL-6 濃度は、両条件とも運動直後に有意に上昇したが ( $P < 0.05$ )、その変化の動態に条件間で有意差は認められなかった。

以上の結果から、低酸素環境の中～高強度での有酸素性運動(ランニング運動)は糖代謝を亢進させることが明らかになった。一方で、運動に伴う筋損傷の程度は通常酸素環境での運動に比較してむしろ小さいことが示された。この結果には、低酸素環境下での運動時は通常酸素環境下での運動時に比較して走速度の低いことが影響していると考えられた。したがって、低酸素環境での有酸素性運動(ランニング運動)は通常酸素環境での運動に比較して、筋へのストレス(メカニカルストレス)を軽減した上で、糖代謝の亢進を促すことが可能であると推察される。

### (4) 研究 4

全セットを通しての平均パワーには、低酸素条件と通常酸素条件の間で有意差は認められなかった。両条件とも運動に伴い血中グルコースおよび乳酸濃度は有意に上昇したが、運動直後の血中乳酸濃度は低酸素条件が通常酸素条件に比較して有意に高値を示した ( $P < 0.05$ )。血清ミオグロビン濃度は両条件とも運動後に有意に上昇したが ( $P < 0.05$ )、その変化の動態に条件間で差は認められなかった。同様に、血漿 IL-6 濃度は両条件ともに運動後に有意に上昇したが ( $P < 0.05$ )、条件間での有意差は認められなかった。一方、抗炎症性サイトカインである血漿 IL-1ra 濃度は両条件とも運動後に上昇したが、運動 3 時間後における値は通常酸素条件が低酸素条件に比較して有意に高値を示した ( $P < 0.05$ )。

以上の結果から、低酸素環境での高強度運動は、通常酸素環境での高強度運動に比較して糖代謝(糖分解)を亢進させること、筋損傷・炎症や酸化ストレスの応答を助長する可能性は低いことが明らかになった。

研究 1~4 の結果を通して、低酸素環境での運動はペダリング運動、ランニング運動のいずれであっても運動に伴う糖代謝(糖分解、糖利用)の亢進に有効であることが明らかになった。また、その効果は、スポーツ競技者、一般の運動実施者、肥満者のいずれにおいても共通していた。また、低酸素環境での運動は通常酸素環境での運動と比較して、過度の筋損傷や炎症反応、酸化ストレスを誘導することは確認されなかった。一方で、低酸素環境での運動に伴う耐糖能やインスリン感受性の改善に関わる急性効果は認められなかった。したがって、研究代表者らがこれまでに報告した低酸素トレーニングに伴う耐糖能の改善効果を得る上では、長期的な運動・トレーニングの実施が必要であると考えられた。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 14 件)

Kasai N, Mizuno S, Ishimoto S, Sakamoto E, Maruta M, Kurihara T, Goto K. Impact of 6 consecutive days of sprint training in hypoxia on performance in competitive sprint runners. J Strength Cond Res, 査読有, 2017. (印刷中、掲載決定)

Doi: 10.1519/JSC.0000000000001954

Sumi D, Kojima C, Goto K. Impact of endurance exercise in hypoxia on muscle damage, inflammatory and performance responses. J Strength Cond Res, 査読有, 2017. (印刷中、掲載決定)

Doi: 10.1519/JSC.0000000000001911

Morishima T, Goto K. Ghrelin, GLP-1 and Leptin Responses during Exposure to Moderate Hypoxia. *Appl Physiol Nutr Metab*, 査読有, 41 (4), 2016, 375-381. Doi: 10.1139/apnm-2015-0311

Goto K. Influence of hypoxic exposure during rest and exercise on metabolic and endocrine responses. *Adv Ex Sports Physiol*, 査読なし, 22 (1), 2016, 7-11.

Tsuchiya Y, Ijichi T, Goto K. Effect of sprint training on resting serum irisin concentration –sprint training once daily vs. twice every second day-. *Metabolism*, 査読有, 65 (4), 2016, 492-495. Doi: 10.1016/j.metabol.2015.12.006

Sasaki H, Ishibashi A, Shimura N, Kurihara T, Ebi K, Goto K. A 3-day high-fat/low-carbohydrate diet does not alter exercise-induced growth hormone response in healthy males. *Growth Horm IGF Res*, 査読有, 25 (6), 2015, 304-311. Doi: 10.1016/j.ghir.2015.07.005

Kasai N, Mizuno S, Ishimoto S, Sakamoto E, Maruta M, Goto K. Effect of training in hypoxia on repeated sprint performance in female athletes. *Springerplus*, 査読有, 4, 2015, 310. Doi: 10.1186/s40064-015-1041-4

Goto K, Morishima T, Kurobe K, Huang Z, Ogita F. Augmented carbohydrate oxidation under moderate hypobaric hypoxia equivalent to simulated altitude of 2500 m. *Tohoku J Exp Med*, 査読有, 236 (3), 2015, 163-168. Doi: 10.1620/tjem.236.163

Morishima T, Kurihara T, Hamaoka T, Goto K. Effects of different periods of hypoxic training on glucose metabolism and insulin sensitivity. *Clin Physiol Funct Imaging*, 査読有, 35 (2), 2015, 104-109. Doi: 10.1111/cpf.12133

Morishima T, Goto K. Impact of exercise and moderate hypoxia on glycemic regulation and substrate oxidation pattern. *PLoS One*, 査読有, 9 (10), 2014, e108629. Doi: 10.1371/journal.pone.0108629

Morishima T, Goto K. Successive exposure to moderate hypoxia does not affect glucose metabolism and substrate oxidation in young healthy men. *Springerplus*, 査読有, 3, 2014, 370. Doi: 10.1186/2139-1801-3-370

〔学会発表〕（計 14 件）

Goto K. Human researches to address effects of exercise on endocrine and metabolic regulations. 2017 International

Conference on Sports Science, 2017年3月25日、ソウル（韓国）

後藤一成. 低酸素環境下でのスプリントトレーニングの効果. 第27回日本臨床スポーツ医学会大会、2016年11月6日、幕張メッセ（千葉）

Goto K. Usefulness of exercise in hypoxia for athletic performance and promotion of health. 2016 Global Sports Science Conference, 2016年7月13日、ソウル（韓国）

Sumi D, Kojima C, Goto K. Impact of endurance exercise in hypoxia on metabolic and muscle damage response and performance recovery. 63<sup>rd</sup> American College of Sports Medicine, 2016年6月2日、ボストン（アメリカ）

Kasai N, Kojima C, Goto K. Metabolic and performance responses to repeated sprint exercise in hypoxia in female athletes. 63<sup>rd</sup> American College of Sports Medicine, 2016年6月1日、ボストン（アメリカ）

後藤一成. 低酸素環境下における高強度トレーニングが長距離走パフォーマンスに及ぼす影響. 第28回ランニング学会大会、2016年3月12日、環太平洋大学（岡山）

後藤一成. 低酸素環境でのスプリントトレーニングの効果. 第70回日本体力医学会医学会大会、2015年9月20日、和歌山県民文化会館（和歌山）

佐々木裕人、石橋彩、土屋吉史、小島千尋、栗原俊之、海老久美子、後藤一成. 3日間の高脂肪食と低身体活動の組み合わせがメタボリックフレキシビリティに及ぼす影響. 第70回日本体力医学会医学会大会、2015年9月19日、和歌山県民文化会館（和歌山）

Goto K. Exercise and endocrine responses in humans. 27<sup>th</sup> International Sport Science Congress 2015, 2015年7月12日、光州（韓国）

後藤一成. 競技者を対象にした低酸素環境下での高強度トレーニングの効果. 第18回高所トレーニング国際シンポジウム 2014, 2014年10月25日、国立スポーツ科学センター（東京）

笠井信一、栗原俊之、黒澤裕子、後藤一成. 陸上短距離選手における6日間連続の低酸素トレーニングの効果. 第69回日本体力医学会大会、2014年9月20日、長崎大学（長崎）

森嶋琢真、後藤一成. 肥満者における低酸素環境での安静や運動に伴う食欲調節の変化. 第69回日本体力医学会大会、2014年9月19日、長崎大学（長崎）

後藤一成. 低酸素環境下での運動が糖代謝や内分泌応答に及ぼす影響. 第69回日本体力医学会大会、2014年9月19日、長崎大学（長崎）

後藤一成. 高強度スプリントトレーニングの効果. 第 22 回日本運動生理学会、2014 年 7 月 19 日、川崎医療福祉大学(岡山)

6. 研究組織

(1)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・准教授  
研究者番号：60508258

(2)研究分担者

片山 敬章 (KATAYAMA, Keisho)  
名古屋大学・総合保健体育科学センター・准教授  
研究者番号：40343214

荻田 太 (OGITA, Futoshi)  
鹿屋体育大学・スポーツ生命科学系・教授  
研究者番号：50224134