

令和 2 年 6 月 17 日現在

機関番号：14403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K01759

研究課題名(和文)呼吸筋トレーニングの奏功メカニズムの解明と高所トレーニングへの応用

研究課題名(英文) Explore of the mechanisms of Respiratory muscle training for exercise performance and Application for hypoxic training

研究代表者

小川 剛司 (Ogawa, Takeshi)

大阪教育大学・教育学部・准教授

研究者番号：70451698

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、運動中の吸気陰圧負荷による呼吸筋トレーニング時には、換気量は低下するものの呼吸筋の仕事量や心拍数が高まり、運動時の呼吸循環応答が過負荷されることが明らかとなった。また、そのような運動中の吸気陰圧負荷を加える呼吸筋トレーニングは、高所での運動能力低下の抑制に対して有効であること、呼吸筋トレーニングの効果は個人差が現れづらい傾向にあることが明らかとなった。また、本研究課題に関連する研究を追加で行うことができた。呼吸筋をウォーミングアップすることで一過性の運動能力の向上が見られることや、低酸素下において短時間運動トレーニングを行う低酸素トレーニングの効果について検討できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、これまでの申請者の研究成果を踏まえ、呼吸筋トレーニングの効果の詳細メカニズムや、低酸素下での運動に対する効果についての詳細を明らかにしたものであり、呼吸筋トレーニングを低酸素下での運動能力低下の予防に応用しようとする実践的研究となった。特に、呼吸筋トレーニングの奏功メカニズムを明らかにするものとなり、呼吸筋トレーニングが、効果的で安全な高所トレーニングに応用できることを証明するものとなった。本研究の成果は、学会発表や国際論文誌などで公表され、健康スポーツ科学の領域において一定の評価を得るに至り、スポーツの指導現場において即応用可能な先進的・実践的な示唆が得た。

研究成果の概要(英文)：This study was conducted to reveal the mechanism of the effect of inspiratory muscle training on the improvement of sports performance and exercise performance under hypoxia. During inspiratory muscle-loaded exercise training (IMLET), respiratory muscle activity increased, with a concomitant increase in oxygen uptake and heart rate. Further, after IMLET enhanced the respiratory muscle strength, the decrease in exercise performance under hypoxia was reduced regardless of the increase in  $\dot{V}O_2$ . This study provides new information that can be applied to sports coaching, such as inspiratory muscle training, which allows for safe exercise at high altitude.

研究分野：運動生理学

キーワード：呼吸 低酸素 有酸素能力 運動 トレーニング

## 1. 研究開始当初の背景

高所での活動は、近年の登山ブームや競技者における高所トレーニングなどでよく行われる。高所では酸素分圧低下によって、血中の酸素飽和度が低下し、有酸素能力の指標である最大酸素摂取量 ( $VO_{2max}$ ) は低下する。高所に滞在することで、身体の諸器官が低酸素環境に順化し、酸素摂取効率が高まることを利用して、運動パフォーマンスを向上させようとする高所トレーニングがトップアスリートの間で頻りに用いられている。しかしながら、高所での  $VO_{2max}$  低下、さらには高所順化のしやすさには大きな個人差があり、高山病に陥ったり、高所での活動時に事故が発生することがあり、高所での活動の課題となっている。

低圧低酸素環境下での  $VO_{2max}$  低下のメカニズムについて、運動時の換気量が高いほど低下が抑えられること、換気調節メカニズムが関係することが知られている。一方で、横隔膜を始めとする呼吸に関わる筋群である「呼吸筋」の活動が高い者では低酸素下での運動能力低下が大きいことも示唆されている。先行研究では、通常酸素下であっても最大運動時の呼吸筋における酸素摂取量 ( $VO_2$ ) は全身の  $VO_2$  の約 10~18% を占めることから、呼吸筋と活動筋の間で血流配分の競合が生じ、活動筋への血流量が低下することで、運動能力が制限される可能性があることが報告されている。低酸素下での高強度運動時には、血中の低酸素化に加えて、呼吸筋活動亢進によって活動筋への酸素供給がより強く制限されることが予想される。したがって、低酸素下での有酸素能力低下の程度は単純に換気量が高いだけでなく、呼吸筋活動の効率も関係するものと考えられる。これら一連の研究から安全で効果的な高所での運動・トレーニングを行う上では「呼吸応答の改善」は重要なキーワードであると考えられる。

安静時呼吸に対して抵抗負荷(呼吸しづらい状況を作る)を与えることによって呼吸筋を鍛錬する、いわゆる、呼吸筋トレーニングは主に呼吸循環器疾患のリハビリなど臨床で用いられることがある。また、アスリートに対して呼吸筋トレーニングを行うことで、呼吸筋力が向上し、運動時の呼吸筋疲労が改善することが報告されているが、呼吸筋トレーニングの運動能力向上に対する有効性については結果が一致しておらず、呼吸筋トレーニングの奏功メカニズムについては十分に明らかでない。呼吸筋トレーニングはこれまで安静時に呼吸負荷を行う手法が取られてきた。運動時は安静時とは明らかに換気量が異なる。したがって、運動時に呼吸負荷を行う方がトレーニング効果が高いと考えられるが、そのような手法でトレーニングを行った研究は未だなかった。また、低酸素下では呼吸応答や呼吸筋活動の重要性は平地よりも高まることから、呼吸筋トレーニングは、高所での有酸素能力低下の抑制に有効である可能性が考えられる。しかしながら、これらについては明らかでない。

## 2. 研究の目的

本研究は、呼吸筋トレーニングが低酸素下での運動能力低下の抑制に対して有効である可能性に注目し、1) 呼吸筋トレーニングおよび呼吸筋賦活時の呼吸循環応答を調べ、呼吸筋トレーニングの奏功メカニズムの詳細を明らかにすること、2) 呼吸筋トレーニングが高所での運動能力低下に対して有効か否かを明らかにするとともに、また、そのトレーニング効果の個人差を明らかにすることを目的とした。

## 3. 研究の方法

### (1) 呼吸筋トレーニングの奏功メカニズム解明

呼吸筋陰圧負荷しながらの運動時の呼吸筋活動および呼吸循環応答を調べた。実験は、健康な男子大学生 9 名を対象とした。実験は、事前に  $VO_{2max}$  および最大吸気口腔内圧 ( $PI_{max}$ ) を測定し本実験の運動強度および呼吸筋負荷を決定した。本実験では、自転車エルゴメーターを用いて、60%  $VO_{2max}$  強度において一定負荷運動を 16 分間行った。運動開始から 8 分の後に、 $PI_{max}$  の 30% の吸気負荷を 4 分間行った。運動中の吸気負荷は吸気側の空気流入管の径を狭める事で陰圧負荷を発生させた。一定負荷運動中には呼気ガス分析による換気応答および  $VO_2$  の測定、心拍出量計による心拍出量および心拍数測定、さらに、食道内圧計による胸腔内圧の測定と呼吸筋仕事量 (WOB) の算出を行った。

### (2) 呼吸筋トレーニングの奏功メカニズム解明

呼吸筋の活動が運動能力や酸素摂取量に影響を及ぼすのならば、呼吸筋に対して運動前に負荷を加えることで、呼吸筋に対してウォーミングアップの効果が見られ、それが運動能力に対して一過性に効果があることが予想された。そこで、呼吸筋陰圧負荷刺激が一過性の運動に及ぼす効果を検討した。実験は、健康な男子大学生 8 名を対象とした。実験条件は、1) 20 分間安静を保つ条件 (CON), 2) 60%  $VO_{2max}$  強度で 10 分間の運動を行う条件 (EW), 3) 40%  $PI_{max}$  の呼吸筋負荷を 30 回 2 セット行う条件 (IMW), 4) IMW と EW の双方を行う条件 (CW) の 4 条件の後に、80%  $VO_{2max}$  の一定負荷運動の主運動を疲労困憊まで行い、 $VO_2$ ,  $V_E$ , 運動継続時間を測定した。

### (3) 呼吸筋トレーニングと低酸素トレーニング

呼吸筋トレーニングの検討では、16 名の健康な大学生を対照として、呼吸筋トレーニングを実施した。実験は、4 週間の吸気筋トレーニングを行った。本研究での呼吸筋トレーニング群 (IMLET 群: 8 名) は、吸気に対して 50%  $PI_{max}$  吸気負荷をかけながら 20 分間の自転車運動を週に 4 回行った。比較対照群として陰圧負荷なしで運動トレーニングを行う群 (ET 群: 8 名)

を設定した。4週間のトレーニング期間の前後で漸増負荷運動テストを、通常酸素吸入（21%酸素）および低酸素吸入（15%酸素）下においてそれぞれ行い、有酸素能力および換気応答を調べた。呼吸筋トレーニングの効果や、呼吸筋トレーニングの低酸素下での有酸素能力低下抑制に対する効果の個人差などについて検討した。

追加実験として、低酸素トレーニングを行った。低酸素下においては運動能力が低下することでトレーニング刺激の絶対量が不足し、トレーニング効果が得られないことや、トレーニング中に高山病の危険性がある。そこで、低酸素によって呼吸応答に強い負荷がかかりながらも、トレーニング強度が保てるインターバル運動を実施した。16名の男性を対象に、20秒間の自転車スプリント運動を100秒間の休息を挟んで4回繰り返すトレーニングを、低酸素下（15%酸素）でトレーニングを行うH群と通常酸素下でトレーニングを行うC群に分け実施した。トレーニングは、週3回、4週間にわたって行った。トレーニング前後において20秒間の運動を100秒の休息を挟んで疲労困憊まで漸増負荷で繰り返すテストを行い、その時の運動パフォーマンスおよび代謝応答を測定した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 呼吸筋トレーニングの奏功メカニズム解明

###### 呼吸筋陰圧負荷しながらの運動時の呼吸筋活動および呼吸循環応答

$V_E$ は吸気負荷によって呼吸無負荷時よりも、低い傾向にあった。吸気負荷時には、一回換気量は大きく、呼吸数は少なくなり（ $P < 0.05$ ）、換気が抑制されることが示唆された。一方で、吸気負荷によりWOBは高値を示し（図1）、30% $PI_{max}$ 程度の弱い吸気負荷であっても呼吸筋に対して通常の2倍の負荷が加わることが示唆された。また、吸気負荷によって呼吸困難感が増加し、心拍数は高値を示した（図2:  $P < 0.05$ ）が、心拍出量は一定であった。吸気負荷時には $SaO_2$ が低下したことから、酸素供給を維持するために心拍数が高まった可能性がある。また $VO_2$ は吸気負荷によって高値を示し、呼吸筋での酸素消費が高まったことが考えられる。これらの結果から、60% $VO_{2max}$ の一定負荷運動中の30% $PI_{max}$ の吸気負荷は、呼吸筋に十分な負荷を与えるだけでなく、血中の低酸素下や呼吸循環応答を高めるなどの一過性の効果があることが示唆され、呼吸筋トレーニングの奏功メカニズムの一端が明らかとなった。

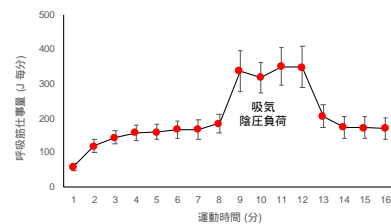


図1: 吸気負荷による呼吸筋仕事量の変化

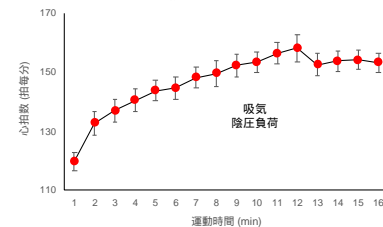


図2: 吸気負荷による心拍の変化

###### 呼吸筋陰圧負荷刺激が一過性の運動に及ぼす効果の検討

運動継続時間はCW, IMW, EW, CONの順に長く、CWにおいてCONよりも有意に高値を示した。また、IMWとEWでは運動継続時間が同程度であった（図3）。これらの結果から、呼吸筋刺激と運動のウォームアップを組み合わせることで一過性に運動パフォーマンスを高めるとともに、呼吸筋刺激は、運動によるウォームアップと同等の効果が

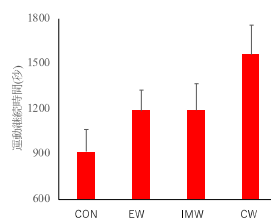


図3: 呼吸筋刺激による運動継続時間

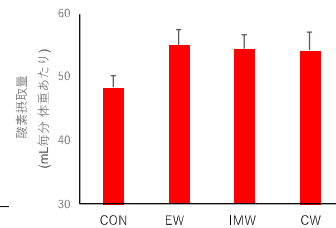


図4: 呼吸筋刺激による酸素摂取量

ことが示唆された。 $VO_2$ と $V_E$ は、呼吸筋刺激によって高まった（図4）。これら結果から、運動前の呼吸筋刺激は、換気応答を改善し、運動開始時の有酸素代謝からのエネルギー供給が高まることで、高強度運動におけるパフォーマンス発揮に効果をもたらすことが示唆された。また、呼吸筋の賦活（増強）が代謝応答および運動パフォーマンスに影響を及ぼすなど、呼吸筋トレーニングの奏功メカニズムの一端が明らかとなった。

##### (3) トレーニングの検討

###### 呼吸筋トレーニング

本研究で用いた呼吸筋トレーニング法により、呼吸筋力が有意に高まった（図5）。低酸素下での $VO_{2max}$ および運動パフォーマンスは、IMLET群およびET群とで、同程度高まった。しかしながら、低酸素下での運動パフォーマンスの低下の程度は、トレーニング後にIMLET群において小さくなった（図6:  $-14.7 \pm 2.2\%$ から $-12.5 \pm 1.7\%$ ;  $P < 0.05$ ）。これらの結果から、本研究で用いた運動時に吸気に負荷を加える呼吸筋トレーニングは、低酸素下での運動パフォーマンスの低下を抑制することが示唆され、呼吸筋トレーニングによって、低酸素下での活動を安全に行うことができるようになることが考えられる。一方で、トレーニングによる呼吸筋力の増加の程度は14.6-75.4%と非常に個人差が大きかった

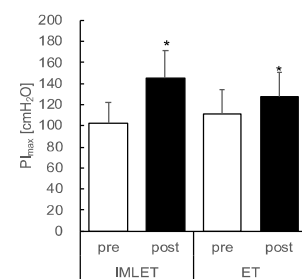


図5: 呼吸筋力( $P_{max}$ )の結果  
Pre, トレーニング前; Post, トレーニング後; \*, 有意あり ( $P < 0.05$ )

ものの、有酸素能力の高さなど個人の特性によって効果の現れ方が異なるかについては、有意な傾向が見られなかった。今後、データを蓄積する必要がある。

#### 低酸素トレーニング

追加で行った低酸素トレーニング実験について、トレーニング後における最大発揮パワーはH群とC群の双方において有意に増加したが、その程度に群間の差はみられなかった。しかしながら、H群にのみ運動中の $VO_2$ はトレーニング前よりも後で有意に低値を示した。これらの結果から、低酸素下でのインターバル運動トレーニングは、運動パフォーマンス向上に対しては通常酸素下でのトレーニングと同等の効果しかないものの、その運動中の無酸素代謝の動員を高めることが示唆され、安全にトレーニングが可能な効果的な無酸素トレーニングを行うなど、スポーツ指導および教育現場に応用可能な示唆が得られた。

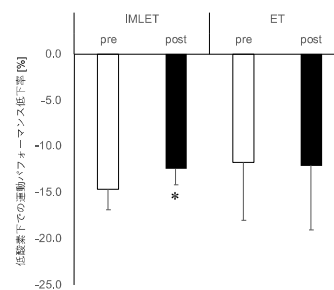


図6:低酸素下での運動能力の結果  
Pre, トレーニング前; Post, トレーニング後; \*, 有意差あり (P<0.05)

#### (4) まとめ

本研究の一連の研究課題の遂行により以下の成果が得られた。

運動を行いながら吸気に陰圧負荷を加えることで、呼吸筋に大きな負荷が加えられ、呼吸循環応答が高まることや、呼吸筋刺激を行うことで一過性にその後の運動中の $VO_2$ および耐性が高まることが観察され、呼吸筋トレーニングの奏功メカニズムの一端が明らかとなった。呼吸筋トレーニングによって、低酸素下での運動パフォーマンス低下が抑制されることが明らかとなり、呼吸筋トレーニングによって、低酸素下での活動を安全に行うことができるようになることが示唆された。

また、運動能力低下を防ぎながら低酸素下での短時間運動トレーニングを実施したところ、パフォーマンス自体には通常酸素下でのトレーニングに対して有効な効果は見られなかったが、無酸素代謝の動員が高まることが示唆された。

本研究課題の成果から、呼吸筋トレーニングは、呼吸筋や呼吸循環応答に刺激を与えることによって、呼吸筋力の向上や運動時の換気応答の改善がもたらされ、低酸素下での運動パフォーマンスの低下を抑制することが明らかとなり、呼吸筋トレーニングによって、高所での活動における事故防止や、効果的な高所トレーニングが行うことができると提言する。また、本研究の成果は、今後スポーツの現場に応用できる示唆を得ることができた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Ogawa Takeshi, Fujii Naoto, Kurimoto Yasuhiro, Nishiyasu Takeshi	4. 巻 7
2. 論文標題 Effect of hypobarica on maximal ventilation, oxygen uptake, and exercise performance during running under hypobaric normoxic conditions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physiological Reports	6. 最初と最後の頁 e14002 ~ e14002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.14814/phy2.14002">https://doi.org/10.14814/phy2.14002</a>	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 Cao Yinhang, Ichikawa Yuhei, Sasaki Yosuke, Ogawa Takeshi, Hiroyama Tsutomu, Enomoto Yasushi, Fujii Naoto, Nishiyasu Takeshi	4. 巻 7
2. 論文標題 Expiratory flow limitation under moderate hypobaric hypoxia does not influence ventilatory responses during incremental running in endurance runners	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physiological Reports	6. 最初と最後の頁 e13996 ~ e13996
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.14814/phy2.13996">https://doi.org/10.14814/phy2.13996</a>	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 Hiroki Sugane, Kentaro Ida, Kosuke Moritani, Hiroshi Hasegawa, Takeshi Ogawa	4. 巻 24(4)
2. 論文標題 Effect of inspiratory muscle loading on the respiratory response and cardiac output during moderate exercise	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advances in Exercise and Sports Physiology	6. 最初と最後の頁 76
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 Kentaro Ida, Hiroki Sugane, Kosuke Moritani, Takeshi Ogawa	4. 巻 24(4)
2. 論文標題 Effects of specific respiratory muscle warm-up on cycling exercise performance and respiratory response	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advances in Exercise and Sports Physiology	6. 最初と最後の頁 81
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 Ogawa Takeshi, Nagao Maiko, Fujii Naoto, Nishiyasu Takeshi	4. 巻 12
2. 論文標題 Effect of inspiratory muscle-loaded exercise training on peak oxygen uptake and ventilatory response during incremental exercise under normoxia and hypoxia	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation	6. 最初と最後の頁 25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s13102-020-00172-1	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 -

[学会発表] 計5件(うち招待講演 0件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 小川 剛司, 長尾 麻衣子, 鉄口 宗弘, 西保 岳
2. 発表標題 呼吸筋トレーニングが低酸素下での有酸素能力、呼吸応答および運動パフォーマンスに及ぼす影響 (2/
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 小川 剛司, 長尾 麻衣子, 鉄口 宗弘, 西保 岳
2. 発表標題 呼吸筋トレーニングが低酸素下での有酸素能力、呼吸応答および運動パフォーマンスに及ぼす影響
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 菅根大幹、井田健太郎、菅根大幹、森谷公亮、長谷川 博、小川剛司
2. 発表標題 動中の吸気負荷が呼吸応答、呼吸筋仕事量および循環動態に及ぼす影響
3. 学会等名 第26回日本運動生理学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 井田健太郎、菅根大幹、森谷公亮、小川剛司
2. 発表標題 呼吸筋ウォームアップが高強度運動時におけるパフォーマンス発揮および呼吸代謝応答に及ぼす影響
3. 学会等名 第26回日本運動生理学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yinhang Cao, Yuhei Ichikawa, Yosuke Sasaki, Takeshi Ogawa, Tsutomu Hiroshima, Yasushi Enomoto, Naoto Fujii, Takeshi Nishiyasu
2. 発表標題 Expiratory flow limitation under moderate hypobaric hypoxia does not influence ventilation, oxygen uptake, and operating lung volumes during incremental running in endurance runners
3. 学会等名 The 17th International Conference on Environmental Ergonomics (国際学会)
4. 発表年 2017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
---------------------------	-----------------------	----