

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 18日現在

機関番号：35502

研究種目：若手研究（B）

研究期間：平成22年度～平成24年度

課題番号：22700666

研究課題名（和文）呼吸筋の活動が高所での有酸素パフォーマンスや活動筋の酸素動態に及ぼす影響

研究課題名（英文）The effect of work of breathing on aerobic performance and active muscles oxygenation level in hypoxia.

研究代表者

小川剛司（OGAWA TAKESHI）徳山大学・経済学部・准教授

研究者番号：70451698

研究成果の概要（和文）：本研究では、呼吸筋群の活動に注目して高所下で生じるような空気密度の低下や酸素分圧低下が運動時の呼吸筋活動や活動筋酸素レベルに及ぼす影響を調べることを目的として一連の研究を行った。その結果、低酸素環境下での運動時の呼吸筋活動は換気量が通常酸素下よりも高いことから高かいことが明らかとなった。低酸素下での換気量と活動筋の酸素化レベルとの間に有為な関係が見られた。一方、高所で生じうる空気密度の低下の影響をシミュレーションした、ヘリウム混合ガス吸入しながらの運動時の呼吸筋仕事量を調べたところ、換気量当たりの呼吸筋仕事量は低値を示す傾向にあり、運動パフォーマンスに影響することを明らかにした。この結果をふまえて、呼吸筋をトレーニングすることによって運動パフォーマンスや最大酸素摂取量および呼吸応答が変化するかを検討したところ、トレーニングによって呼吸筋力の指標である最大吸気圧および運動パフォーマンスが向上した。本研究の結果から、呼吸筋活動は高所での活動に影響を及ぼすこと、呼吸筋トレーニングは、健康な人において呼吸筋力および運動パフォーマンスを向上させることができることが示唆された。

研究成果の概要（英文）：The present study was tried to investigated whether respiratory muscles activity alter in hypobaric hypoxic condition, and whether it affects to thigh muscle issue oxygenation level. The results were as follow, 1) In hypoxic condition, work of breathing (WOB) was higher than in normoxia and, the magnitude of the pulmonary ventilation (VE) in hypoxia significantly correlated to the tissue oxygenation level during maximal exercise. 2) WOB during exercise with helium oxygen mixture gases (simulated hypobaric condition) inhalation was lower than in normal air inhalation despite of increase in VE and, it affected to aerobic exercise performance. 3) The improvement of respiratory muscles strength by inspiratory muscle training improved the aerobic exercise performance.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1600,000	480,000	2,080,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学・スポーツ科学

キーワード：呼吸・低酸素・低圧・運動・呼吸筋

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

1. 研究開始当初の背景

今日、オリンピックのマラソンなど、高所トレーニングを行った選手が国際レベルの大会で活躍している。また、高所登山の流行により、競技者だけでなく多くの人が高所で活動している。しかし高所での身体の生理的反応については十分に明らかでなく、高所に対する不適応による事故、高山病も頻発している。したがって、高所に対する不適応を防ぐことや、効果的な高所トレーニング法の開発には、高所環境、すなわち低圧低酸素下での運動能力や生体反応についてのメカニズムに関する基礎的な研究が重要であると考えられる。

高所では有酸素能力は低下し、結果として持久的運動能力は低下する。有酸素能力の指標である最大酸素摂取量(VO_{2max})の低下は動脈血酸素化レベルの低下によって生じるが、生体反応の個人差により、その低下の程度に差がある。我々のグループは VO_{2max} 低下について、換気応答との関連に注目してみたところ、低酸素を感知する呼吸化学受容器の感受性が低い者ほど低圧下での運動時の換気量が低く、動脈血酸素飽和度および VO_{2max} の低下が大きいことを明らかにした (Ogawa et al. 2007)。さらに、換気亢進命令があっても、気道における機械的な抵抗(気道抵抗)が換気量(VE)を制限し、低圧下での VO_{2max} の制限要因となることを明らかにした (American College of Sports Medicine 発表 2007)。一方で、低圧下においては空気密度が低下することから、気道での機械的な抵抗は減少するものと考えられ、気圧低下自体は VE_{max} を増加させる効果があることが考えられる。そこで、低圧下における空気密度低下の効果に注目し、平地と同程度まで酸素分圧のみを高めた低圧下で最大運動を行ったところ、 VE_{max} は通常酸素にした低圧下において常圧下よりも増加することが明らかとなった (ACSM 発表 2008)。これらの結果は、すなわち、低圧下での換気亢進の程度は血中酸素化レベルや気道抵抗の大きさの影響を受け、低圧下での有酸素能力制限の要因の一つとなることを示唆するものでもあった。しかしながら、このとき通常酸素低圧下では常圧下よりも運動パフォーマンスは高値を示したものの VO_{2max} に差は見られなかった。

先行研究では、最大運動時には換気増大によって呼吸筋群における VO_2 は全身の VO_2 の約 10~18% を占めることが報告されており (Aaron et al. 1992)、呼吸筋群への血流増大によって活動筋群への血流が制限され、結果として VO_{2max} やパフォーマンスが制限される可能性があることが報告されている

(Harms et al. 2000)。したがって、呼吸筋の仕事量は運動時の呼吸循環動態に影響を及ぼすものと考えられる。低圧低酸素下では、低酸素の影響で換気量が増大のために呼吸筋群の活動レベルが高まり、呼吸筋の仕事量は通常酸素下よりも増加することが考えられる。また、低酸素下において運動時の呼吸筋の仕事量が変化するならば、上述のメカニズムにより、活動筋への酸素供給量が変化し、活動筋である脚の酸素化レベルが変化することが予想され、さらには運動パフォーマンス低下と関連することが予想されるが、これについても明らかでない。

一方で、高所では、気圧低下に伴う空気密度低下により、気道抵抗は低下するため、呼吸筋の仕事量は低下する効果もあると考えられる。しかしながら、空気密度の低下は運動時の呼吸筋仕事量に影響をおよぼすかについては明らかでない。

もし、低圧低酸素下での運動時には呼吸筋の活動レベルの高さが循環応答や運動パフォーマンスに影響を及ぼすならば、呼吸筋をトレーニングすることによって、運動時の呼吸循環応答が変化し、運動パフォーマンスが向上することが予想される。先攻研究においては、呼吸筋に負荷をかける呼吸筋トレーニングを一定期間行うことで、横隔膜厚の増加や運動後の疲労低下などのトレーニング効果が見られたことが報告されているが、同様の手法でトレーニングを行っても健康な人においては、運動パフォーマンスは変化しないと報告されたものもあり、結果は一致しない。呼吸筋トレーニングはこれまで、安静時に吸気に負荷を与えて、トレーニングを行ってきた。運動時には、換気量は安静時よりも増大することから、より活発に呼吸筋が活動しているものと考えられ、運動時に呼吸筋負荷トレーニングを行う手法を用いることで、より運動パフォーマンスに対して効果が見られやすくなると考えられるが、このような手法で呼吸筋トレーニングを行った研究は見当たらない。

2. 研究の目的

本研究では、高所での運動パフォーマンスや有酸素能力低下のメカニズムについて、呼吸筋の活動に注目し、呼吸筋仕事量が他の活動筋の酸素化レベルに影響を及ぼし、高所での運動パフォーマンスや有酸素能力の低下に影響を及ぼすか否かについて調べることが目的として一連の研究課題を進めた。

課題I) 低酸素下では、通常酸素下での運動と比較して、呼吸筋群の仕事量はどの程度変化し、それが活動筋である脚の酸素化レベルに

影響を及ぼすかを検討した。

課題II) 低圧下に見られるような空気密度低下をシミュレートした、ヘリウム混合ガス吸入しながらの最大運動時の呼吸応答および呼吸筋仕事量が変化するか否かを調べた。

課題III) 呼吸筋をトレーニングすることによって運動パフォーマンスや VO_{2max} が改善されるか否かを検討した。

3. 研究の方法

課題I

被験者：被験者は健康な成人男性9名と成人女性7名であった。実験に先立ち、被験者には口頭および文書にて実験の目的、方法および実験実施上の危険性を十分に説明し、実験参加の同意を得た後に実験を開始した。女性被験者においては、基礎体温を測定し、実験はすべて月経周期における卵胞期に行った。実験手順：自転車エルゴメーター (Power Max V3; コンビ社製) を用いて漸増負荷自転車運動テストを行った。テストは通常空気 (N条件) を呼吸しながらの条件及び、15%の低酸素ガスを吸入 (H条件) しながらの2条件で行った。ガスは加湿チャンバーを通過させ、加湿して700Lのダグラスバッグに注入することで吸気ガスとして用いた。実験中は蛇管に接続された Hans-Rudolph 一方弁を通してバッグから直接被験者のマウスピースに接続し、吸入させた。

運動プロトコール：実験は、任意のウォーミングアップの後、実験室に入室し、しばらく安静を保った後測定を開始した。測定開始後は3分間の安静を保った後、0.5kpで3分間のウォーミングアップを行った。その後、3分間の安静をはさみ、本運動を開始した。本運動では、男性は2分ごとに0.4kp、女性は2分ごとに0.3kpずつ負荷を漸増させ、疲労困憊に陥るまで強度を漸増させた。なお、ペダルの回転数はメトロノームの音に合わせて毎分60回転と規定し、55回転を維持することが困難になった時点で疲労困憊とみなし運動を中止した。

測定項目：蛇管を通して呼気ガス分析器のプローブに接続された。呼気ガス分析器 (AE-310; ミナト社製) を用いて、換気 (VE)、酸素摂取量 (VO_2)、 VCO_2 、 VE/VO_2 を測定した。

呼吸筋仕事量を算出するため、食道内圧及び口腔内圧を測定した。食道内圧及び口腔内圧は、水圧式のトランSDューサーを用いた。被験者は、プローブを身長/5+9 cmまで鼻腔から挿入した。口腔内圧は、マウスピースにセンサープローブを挿入し、測定した。呼吸流速は、マウスピースに装着したニューモタコメーターを用い、流速を積分することにより換気流量を算出した。食道内圧から口腔内圧

を減じた値を胸腔内圧とし、胸腔内圧と換気流量の積分値を呼吸筋の仕事量 (WOB) とした。LED式近赤外線分光法 (NIRS; 近赤分光計; ASTEM社製) を用いて、活動筋における組織酸素下レベルを測定した。LEDセンサープローブを外側広筋の筋腹 (大転子から腓骨に向かって3分の2の位置) に固定した。NIRSの測定から、活動筋の組織酸素飽和度 (StO₂) を算出した。動脈血酸素飽和度 (SaO₂) と心拍数 (HR) はパルスオキシメーター (Nellcore N-560; Nellcore社製) を用いて測定した。センサープローブは前額部に貼付した。

課題II

被験者：被験者は健康な成人男性5名と成人女性4名の計9名をであった。被験者には事前に実験の概要、実験実施上の危険性を十分に説明し、実験参加の同意を得た後に実験を行った。

実験手順：自転車エルゴメーター (E-828; Monark社製) を用いて漸増負荷自転車運動テストを行った。テストは通常空気 (Air) を呼吸しながらの条件及び、ヘリウムに21%の酸素を含んだヘリウム酸素ガス (HeO₂) を呼吸しながらの2条件で行った。課題Iと同様の手順でヘリウム混合ガスを吸入させた。

運動プロトコール：被験者は、機器測定開始後は自転車エルゴメーターに跨った状態で1分間の安静を保った後、1kpで3分間のウォーミングアップを行った。その後、1分間の安静をはさみ、本運動を開始した。自転車エルゴメーターの負荷は通常空気及びHe-O₂とともに開始負荷を1kpとし、1分経過ごとに0.25kpずつ増加させ、被験者が疲労困憊 (Exhaustion) に至るまで漸増させた。

測定項目：呼吸応答測定はダグラスバッグ法を用いて行った。運動中の呼気はダグラスバッグに集め、呼気ガス分析を行った。呼気ガスのO₂とCO₂は呼気ガス分析器 (AE-310; MINATO社製) で分析を行った。この分析器は各実験の前、通常空気条件下では1種類の校正ガス (14.75%O₂-4.70%CO₂) で、ヘリウム酸素条件下では2種類の校正ガス (1; 13.27%O₂-4.76%CO₂; 19.93%O₂-80.07%He) を用いて注意深くキャリブレーションした。その後、バック容量を乾式ガスメーターによって測定した。得られたデータから、 VO_{2max} 、VEを算出し、これらの運動中の最大値である VO_{2max} および VE_{max} を求めた。ニューモタコメーター (NL141; Ad Instruments社製 Australia) を用いてTV (tidal volume) 及び、1分ごとの呼吸数を測定した。SaO₂はパルスオキシメーター (Nellcore N-560; Nellcore社製) を用いて計測した。

呼吸筋仕事量を算出するため、食道内圧及び口腔内圧を測定した。呼吸筋仕事量の算出方法は課題Iと同様に行った。

課題III

被験者：健康な7名の男性を被験者とした。被験者のうち、2名は大学陸上競技選手であり、残りは健康な大学生であった。実験に先立ち、実験内容の説明とそれによって生じる危険性などについて説明し、実験参加の承諾を得た。

実験手順：被験者をコントロール群とIMT群とに分けて、4週間トレーニングを行った。

IMT群では50%PI_{max} 負荷で吸気筋に負荷をかけながら、50%VO_{2max} 強度で運動を行った。コントロール群は呼吸筋に負荷をせずに

50%VO_{2max} 強度で運動を行った。これを1日1回20分間、週4回実施した。トレーニング期間前後で、呼吸機能検査および最大吸気圧検査を行った。また、自転車エルゴメーターを用いて、疲労困憊までの漸増負荷運動テストを行い、最大酸素摂取量を測定した。

呼吸機能検査および最大吸気圧検査：呼吸機能検査は、小型電子スパイロメーター (Auto-spiro AS-307; ミナト医科学社製) を用いて行った。肺活量(VC)、努力性肺活量(FVC) を測定した。また、呼吸筋力の指標として、最大吸気圧を測定した。被験者は立位において、残気量位から、最大吸気努力を3秒間行った。このとき、マウスピースに圧力センサープローブを接続し、口腔内圧を測定した。この最大値を最大吸気圧(PI_{max})とした。

運動負荷試験と酸素摂取量の測定：漸増負荷運動テストを実施した。運動は被験者が疲労困憊(Exhaustion)に至るまで行った。運動は課題IIと同様の手順で行った。このとき、呼気ガス分析器(AE-310; MINATO 社製) を用いて、VO_{2max} および VE_{max} などを求めた。

4. 研究成果

課題I

課題Iでの低酸素下での最大運動において、VO_{2max} は通常酸素下(N)で 48.4±8.3ml/kg/min, 低酸素下(H)で 39.7±7 ml/kg/min となり、NよりもHにおいて18%有意に低値を示した。VE_{max} はNとHの2条件間で有意な差は見られなかったが、VE/VO₂ はNで 38.5±5.7 (BTPS/STPD), Hで 45±5.5 であり、NよりもHにおいて16.9%有意に高値を示した。

SaO₂ もNで 96.9±1.8%, Hで 84.9±3.8% となりNよりもHにおいて12.3%有意に低値を示した。WOBは、NとHの2条件間で有意な差は見られなかった。また、活動筋である外側広筋の組織酸素化レベル(StO₂)について、Fig.1に示す。通常酸素下(N)で 75.7±8.2%, 低酸素下(H)で 75.5±6.1% となり、NとHの2条件間で有意な差は見られなかった。低酸素下での StO₂ と VE_{max} において、有意な負の相関関係(r=0.55; p<0.05)が見られ、低酸素下においては、換気量が高く、呼吸筋の仕事量が高

い者ほど、組織酸素化レベルが低くなることが示唆された。

最大下強度において、同一絶対強度で比較した場合(Fig.2,3), VEは強度が高くなるにつれて増加し、HにおいてNよりも有意に高値を示した (p<0.05; ANOVA)。WOBは、強度が高くなるにつれて増加し (p<0.05; ANOVA), NよりもHにおいて有意に高値を示した (p<0.05; ANOVA)。StO₂は強度が高くなるにつれて低下傾向にあるが、NとHでの2条件間で有意な差は見られなかった。以上の結果から、低酸素下での運動時には平地よりも、換気量が高いことで、呼吸筋の仕事量が高まり、呼吸筋に血流が高まることで、活動筋への血流量が制限され、活動筋での酸素化レベルが低くなることが示唆された。

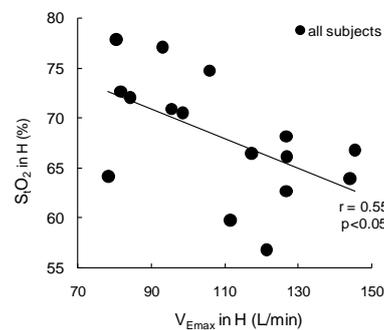


Fig.1 低酸素下での換気量と活動筋酸素化レベルの関係

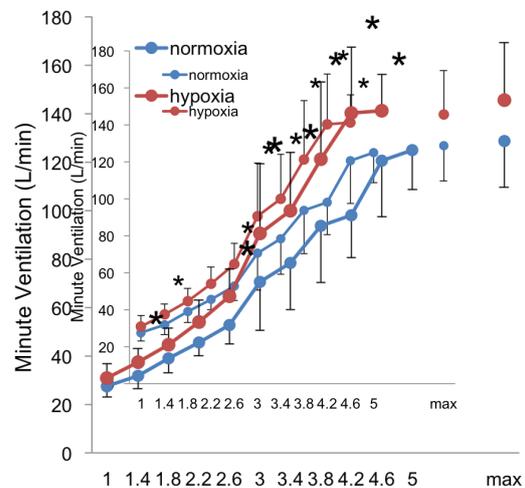


Fig.2 漸増負荷運動中の VE

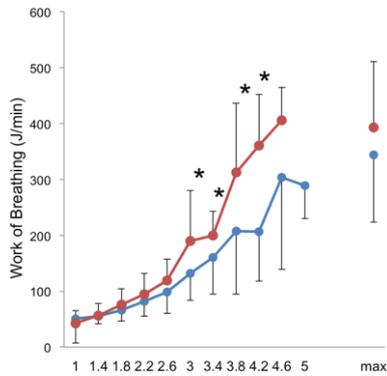


Fig.3 漸増負荷運動中の呼吸筋仕事量

課題II

課題IIでは高所における気圧低下の影響をシミュレートして、気体の密度が低い HeO₂ ガスを吸入させながら運動を行った。その結果、最大運動時では、HeO₂ による VE 増加にもかかわらず(Fig.4), WOB は増加しなかった。換気量当たりの呼吸筋仕事量は有意に低値を示した。また、最大到達運動強度は HeO₂ において有為に高かった。最大運動時の呼吸筋の活動の程度は持久的運動パフォーマンスの制限要因である可能性が考えられる。

呼吸筋の仕事量は HeO₂ 吸入で低下する傾向にあり、換気量当たりの仕事量は有意に低かった (fig.5)。HeO₂ 吸入によって通常大気よりも、呼吸筋活動が同一相対強度において低下したことが示唆された。HeO₂ 吸入で吸気側のみ胸腔内圧は低値を示したことから (Fig.6)、呼吸筋活動の軽減は高強度運動時において吸気時の気道抵抗の減少によって生じることが示唆された。同一相対強度での最大下強度において、HeO₂ 吸入では通常空気吸入時よりも、呼吸の努力度が低くなったため、呼吸筋疲労が軽減され、運動パフォーマンス向上につながった可能性が考えられる。以上の結果から、高所下での高強度運動時には、平地よりも呼吸筋の活動が低くなることによって、呼吸循環応答に影響を及ぼす可能性が示唆された。

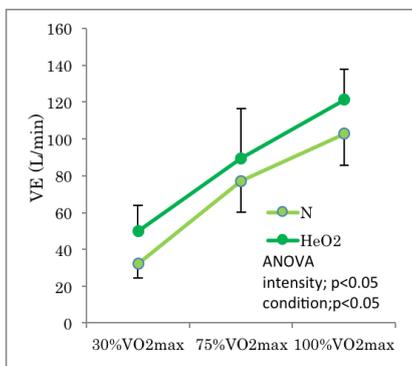


Fig.4 漸増負荷運動中の VE の変化

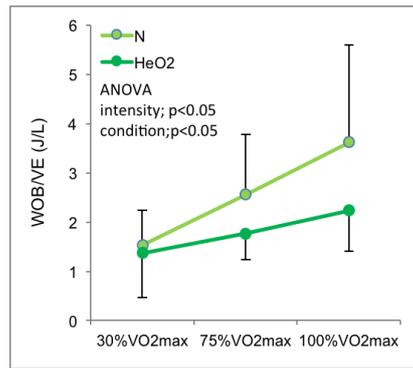


Fig.5 漸増負荷運動中の換気量当たりの呼吸筋仕事量

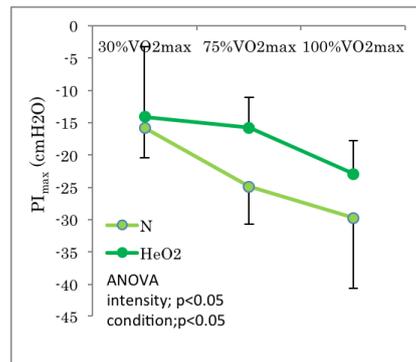


Fig.6 漸増負荷運動中の PI_{max}

課題III

課題IIIでは 50% VO_{2max} 強度での自転車エルゴメーター運動中に吸気に負荷をかけて、呼吸筋トレーニングを 4 週間行った。その結果、トレーニング期間前後において、トレーニング群 (IMT 群)、コントロール群 (Con 群) の両群とも肺機能には大きな変化がなかったが、IMT 群においてはトレーニング期間前後で比較して、PI_{max} が有意に増加した (159.9±48.2 cmH₂O in pre test; 203.5±45.0 cm H₂O in post test) (Fig.7)。

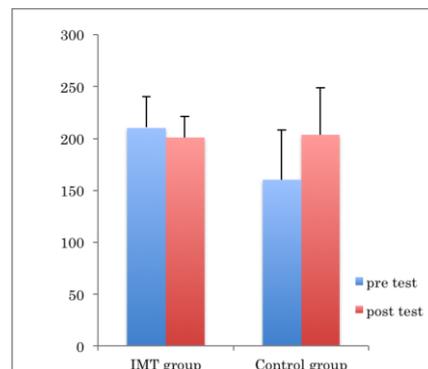


Fig.7 呼吸筋トレーニング前後の最大吸気圧(cmH₂O)

また、運動能力や呼吸応答の変化について、最大運動時の VO_{2max}, VE_{max}, 呼吸数、一回換気量などは、有意な変化は見られなかった。

しかしながら、IMT 群においてのみ、漸増負荷運動の最大到達運動強度は有意に増加し、有酸素能力の変化や呼吸応答の変化なしに運動パフォーマンスが向上することが示唆された。呼吸筋トレーニングにより、運動時の呼吸筋の仕事の効率が改善されたことが考えられるが、本研究では明らかに出来ず、今後の検討課題となった。

本研究課題では、高所環境下における高強度運動中の肺換気量増加の結果、呼吸筋の活動が変化するか、それが脚の組織酸化レベルに影響を及ぼし、有酸素運動パフォーマンスの制限要因となるかについて調べた。その結果、低酸素刺激による換気量増加は呼吸筋の仕事量増加をもたらすことが示唆されたが、空気密度の低下は逆に、呼吸筋仕事量低下をもたらすことが示唆された。呼吸筋トレーニングによって呼吸筋力が向上することで、有酸素運動パフォーマンスが向上することが示唆され、呼吸筋の活動は高所での運動時の呼吸循環応答に影響し、有酸素運動パフォーマンスの制限要因の一つであることが示唆された。

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 5 件)

- ① Fujii Naoto, Honda Yasushi, Ogawa Takeshi, Tsuji Bun, Kondo Narihiko, Koga Shunsaku, Nishiyasu Takeshi. Short-term exercise-heat acclimation enhances skin vasodilation but not hyperthermic hyperpnea in humans exercising in a hot environment. *European Journal of Applied Physiology* 122, 295-307(2012)(査読あり)
- ② 小川 剛司、榎 幸実、野澤 絵里、白石 智子、水尾 彰太、山岸 由佳. 下肢無酸素能力が陸上投擲選手の競技パフォーマンスに及ぼす影響 73,103-114(2012) (査読なし)
- ③ 藤井 直人、小川 剛司、西保 岳. 陸上競技中距離競技者における 800m および 1500m 走タイムと無酸素的運動パフォーマンスの関係 陸上競技研究 84,2-11(2011)(査読あり)
- ④ Takeshi Ogawa, Jose A Calbet, Yasushi Honda, Naoto Fujii, Takeshi Nishiyasu. The effects of breathing a helium-oxygen gas mixture on maximal pulmonary ventilation and maximal oxygen consumption during exercise in acute moderate hypobaric hypoxia. *European Journal Applied Physiology* 110,853-861(2010)(査読あり)

- ⑤ 小川剛司. 大学スポーツ選手におけるインターバル運動中の発揮パワーおよび酸素摂取量に関する研究. 徳山大学論叢 71,169-180(2010)(査読なし)

[学会発表] (計 5 件)

- ① 小川剛司、大迫 聖也、西保 岳. ヘリウム混合ガス吸入が漸増負荷運動時の呼吸筋活動と最大酸素摂取量に及ぼす影響. 第 67 回日本体力医学会大会 2012/9/16, 岐阜
- ② 佐々木洋輔、高木英樹、小川剛司、辻 文、村瀬 陽介、椿本 昇三、西保 岳. 水球競技選手における最大下巻き足運動時の呼吸応答及び呼吸筋の仕事量に関する研究. 第 67 回日本体力医学会大会 2012/9/16, 岐阜
- ③ 小川剛司、榎幸実、藤井直人、辻 文、西保 岳. 低酸素下での漸増負荷運動時の呼吸筋仕事量. 日本運動生理学会大会 2011/8/25, 徳島
- ④ 丹羽岳悠、小川剛司、藤井直人、西保岳. 低圧下での高強度間欠的運動時の呼吸循環応答及び運動パフォーマンスに関する研究～空気密度の低下による気道抵抗の減少に着目して～第 65 回日本体力医学会大会 2010/9/17(千葉)
- ⑤ 及川将太、藤井直人、丹羽岳悠、小川剛司、西保岳. 陸上中距離選手における低圧下高強度間欠的走運動時の呼吸代謝応答及びパフォーマンス-無酸素代謝と気道抵抗軽減の影響-第 65 回日本体力医学会大会 2010/9/17(千葉)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等
なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

小川剛司 (OGAWA TAKESHI) 徳山大学・
経済学部・准教授
研究者番号：70451698