

研究種目：若手研究（スタートアップ）

研究期間：2008 ～ 2009

課題番号：20800065

研究課題名（和文）呼吸筋の酸素消費が高地での有酸素能力やパフォーマンスに及ぼす影響

研究課題名（英文）The effects of the oxygen consumption at respiratory muscles on aerobic capacity and exercise performance in hypobaric condition

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、高地での気圧低下の効果自体に注目し、実験を行った。その結果、高地における気圧低下には、高強度運動時の1)呼吸量が増大したにもかかわらず呼吸筋での酸素消費量は低下した、2)その分、呼吸が容易になることで運動パフォーマンスが高まったなどの効果があることが分かった。平地での低酸素吸入よりも実際の高所のほうが、呼吸が容易になる可能性が示唆されるなど、効果的な高所トレーニングに応用できる重要な知見を得ることができた。

研究成果の概要（英文）：

We have tried to investigate whether the oxygen consumption at the respiratory muscles compromise to whole body oxygen uptake ( $VO_2$ ) and exercise performance during intensive exercise in hypobaric condition. In the present studies, we found that 1) the calculated  $VO_2$  at respiratory muscles were lower in hypobaric condition than in sea level, 2) in hypobaria, itself (hypobaric normoxia), induces an increase in maximal ventilation and exercise performance, but maximal  $VO_2$  and oxy-hemoglobin saturation do not change. These results suggested that hypobaria itself enhances the exercise performance without increase in  $VO_2$ , by the reduction in  $VO_2$  at respiratory muscles in hypobaric condition, which could lead to higher oxygen supply to the active muscles.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
20年度	1,340,000	402,000	1,742,000
21年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,540,000	762,000	3,302,000

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：スポーツ科学，運動生理学，低圧環境，呼吸

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 高所トレーニングと低圧下での運動

今日、高地トレーニングは様々な種目の競技者によって行われており、実際、女子マラ

ソン金メダリストの野口選手のように高地トレーニングを行った選手が、オリンピックや世界選手権で活躍している。しかし、その奏功メカニズムの詳細が不明であることや

高地での身体の生理的反応に個人差があることから、トレーニング中における高地に対する不適応による事故も発生している。したがって、健康・スポーツ科学および予防医学の分野において、高地に対する不適応を防ぎかつ効果的な高所トレーニング法の開発のためには、高地トレーニングで使われるような低圧下での運動能力や生体反応についてのメカニズムや個人差に関する基礎的な研究が極めて重要であると考えられる。

## (2) 低圧下での有酸素能力と換気応答

これまで、研究代表者を始めとするグループでは低圧下での運動パフォーマンスの変化や個人差、有酸素能力低下のメカニズムについて研究を行ってきた。有酸素能力の指標である最大酸素摂取量( $VO_{2max}$ )の低圧下での低下メカニズムについて、換気に注目して研究を進め、血中の低酸素を感知する感受性(低酸素呼吸化学感受性;HVR)が低い者ほど低圧下での運動時の換気量が低く、 $VO_{2max}$ の低下が大きいことを明らかにした(J Appl Physiol 2007)。この結果は、すなわち、換気亢進の程度は低圧下での有酸素能力低下に関係することや、HVRが運動時の換気量に影響を及ぼすことを示唆するものでもある。さらに、呼吸調節機能だけでなく、呼吸のメカニクスの観点からも換気量制限について検討したところ、気道における機械的な抵抗(気道抵抗)も最大換気量( $VE_{max}$ )を制限し、低圧下での $VO_{2max}$ の制限要因であることを明らかにした(ACSM 発表 2007)。

## (3) 低圧下での呼吸筋の酸素消費

一方で、低圧下においては平地よりも空気密度が低いことから、気道抵抗は減少するものと考えられ、低酸素刺激とは別に気圧低下が $VE_{max}$ を増加させる可能性が考えられる。しかしながら、低圧下で気道抵抗が軽減されることにより $VE_{max}$ が増加するか、それに伴い $VO_{2max}$ や運動パフォーマンスは変化するか否かは不明である。さらに、気道抵抗の低下は、呼吸を容易にさせ、呼吸筋の仕事量および酸素消費量を低下させる可能性もあるが、気道抵抗の軽減によって、呼吸筋群の仕事量および $VO_2$ は減少するか否かは明らかでない。最大運動時には換気増大によって呼吸筋における $VO_2$ は全身の $VO_2$ の約10~15%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、気圧低下により気道抵抗が軽減することで、呼吸筋群に対する負荷が軽減され呼吸筋の仕事量および酸素消費が減少するならば、 $VO_{2max}$ や運動パフォーマンスが増加す

る可能性が考えられる。しかしながら、このことについては明らかでない。

## 2. 研究の目的

本研究では高地(低圧低酸素環境)での活動に伴う高山病の予防や、効果的な高地トレーニング法などを構築するための基礎的研究として、低圧下での呼吸筋の酸素消費が運動時の呼吸循環応答に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、以下の2つの研究課題を設定した。

### 研究課題 I

低圧下では、気道抵抗の違いにより呼吸筋群の $VO_2$ は変化するかどうかを検討する。

### 研究課題 II

低圧下における空気密度の低下による気道抵抗の低下が、最大換気量、 $VO_{2max}$ および運動パフォーマンスに影響を及ぼすかどうかについて検討する。

## 3. 研究の方法

### (1) 研究課題 I

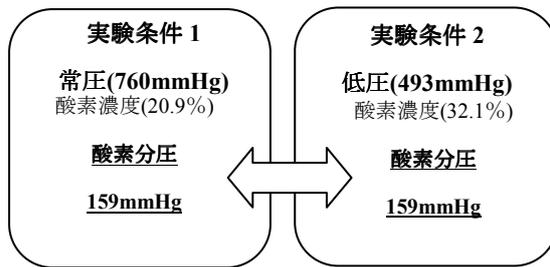
研究課題 I では低圧下での気道抵抗の違いにより呼吸筋群の仕事量および $VO_2$ は変化するか否かを検討するために、11名の健康な成人男性を被験者として、標高3,500m相当にまで減圧した低圧下および平地環境下において、最大運動時と同等の過換気を安静時に行った。過換気試技は事前に調べた $VO_{2max}$ 強度時の換気量と同等の過換気を3~6分間行った。被験者はマウスピースを咥え立位姿勢で過換気を行った。過換気中には失神を防ぐために二酸化炭素ガスを吸気ガスに適宜加え、呼気終末二酸化炭素濃度を一定に保った。このとき、過換気中には一呼吸ごとに呼気ガス分析を行い、換気量( $VE$ )、呼吸数( $f_R$ )、その時の( $VO_{2mimic}$ )を算出した。安静過換気時の $VO_2$ が定常状態を示す2分目以降のデータを分析に用いた。 $VO_{2mimic}$ から安静時の $VO_2$ ( $VO_{2rest}$ )を減じた値は呼吸筋群の酸素消費量( $VO_{2vent}$ )と考えることができる。また、マウスピースに取り付けた圧センサープローブを用いて、口腔内圧を測定した。口腔内圧は流速が低い場合はそれほど変化しないが、気道において乱流が生じるような高い流速時には大きく変化する。一呼吸サイクルにおける口腔内圧の吸気および呼気の最高圧を調べることで、気道抵抗の大きさを知ることができる。

### (2) 研究課題 II

研究課題 II では、低圧下における空気密度の低下そのものは、最大換気量( $VE_{max}$ )、 $VO_{2max}$ および運動パフォーマンスに影響を及ぼすかについて検討するために、12名の健康な男

性を被験者として実験を行った。実験は、1) 常圧下(760mmHg) (N)と2)標高3,500m相当の低圧下(493mmHg)において32.1%酸素を含んだ高酸素ガス吸入下(NH), および3)低圧下(H)の3条件下で漸増負荷運動を行った(図1)。漸増負荷運動はトレッドミルを用いて、200m毎分から2分ごとに20m毎分ずつ増速し、280m毎分からは1分ごとに10m毎分ずつ疲労困憊まで増速させた。運動中1分ごとに呼気をダグラスバッグに採気し、 $VE_{max}$  および  $VO_{2max}$  を算出した。被験者の疲労困憊に陥った強度を運動パフォーマンスとした。また、前額部よりパルスオキシメータを用いて動脈血酸素飽和度を測定した。

図1: 実験条件1と2の概念



#### 4. 研究成果

##### (1) 研究課題 I

常圧下と低圧下での過換気試技の結果を表1に示す。事前に行った最大運動時の  $VE_{max}$  は、低圧下で常圧下よりも高かったため、過換気試技においては、各環境下での過換気を再現した。その結果、過換気試技では運動時と同様に  $VE$  および呼吸数 ( $f_R$ ) において有意に高くコントロールできた。過換気試技時の  $VO_{2mimic}$  は低圧下において常圧下よりも有意に低値を示した。そのため、 $VO_{2mimic}$  から安静時の  $VO_2$  を減じた値である  $VO_{2vent}$  も低圧下において常圧下よりも有意に低値を示した。安静立位において過換気試技を行っていることから  $VO_{2vent}$  は呼吸筋の酸素消費量と考えることができる。したがって、これらの結果から、低圧下での最大運動時の呼吸筋における酸素消費は常圧下よりも低いことが示唆された。そのメカニズムについて、低圧下では酸素分圧の低下により動脈血中の酸素飽和度 ( $SaO_2$ ) は低下することによって、最大酸素摂取量は低下する。本実験では低圧下常圧下ともに過換気時の  $SaO_2$  は100%であり、血液の低酸素化による酸素摂取量の低下の可能性はないものと考えられる。空気の密度 ( $\rho$ ) は  $\rho = P / R (T+273)$  [ $P$ , 気圧 ;  $R$ , 気体計数;  $T$ , 気温] で表わされる。気温が  $20^\circ C$  で、大気係数  $R$  が 2.87 のとき、空気の密度は標高3,500 m においては  $0.83 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  あり、平地では  $1.20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  である。本実験での過換気

表 1: mimic trial

	N	HN
TV (ml)	2218 ± 0.28	2222 ± 0
$f_R$ (n/min)	68 ± 9	73 ± 11*
$V_E$ (l/min)	147.9 ± 11.9	158.1 ± 12.7*
Pi (cmH <sub>2</sub> O)	8.98 ± 2.80	6.20 ± 2.00*
Pe (cmH <sub>2</sub> O)	-9.15 ± 2.11	-6.87 ± 1.59*
$VO_{2mimic}$ (ml/kg/min)	12.19 ± 2.11	10.15 ± 1.66*
$VO_{2rest}$ (ml/kg/min)	4.46 ± 0.84	4.48 ± 1.02
$VO_{2vent}$ (ml/kg/min)	7.73 ± 2.04	5.67 ± 1.80*
% $VO_{2max}$ (ml/kg/min)	12.4 ± 3.6	9.1 ± 3.4*

Mean ± SD, \*;  $p < 0.05$  vs. N. TV: 一回換気量,  $f_R$ : 呼吸回数,  $V_E$ : 換気量, Pi: 吸気最高口腔内圧, PE: 呼気最高口腔内圧,  $VO_{2mimic}$ : 過換気試技での  $VO_2$ ,  $VO_{2rest}$ : 安静時  $VO_2$ ,  $VO_{2vent}$ : 呼吸筋  $VO_2$ , % $VO_{2max}$ :  $VO_{2max}$  に対する  $VO_{2vent}$  の割合。

時の口腔内圧は吸気時 (Pi) および呼気時 (Pe) ともに低圧下において常圧下よりも有意に低値を示した。これは、低圧下において大気の密度が約 3 分の 2 まで低下したため、気道抵抗が軽減されていたことを示唆する。呼吸筋にかかる負荷について、呼吸筋の仕事量をモデルにして考えた場合、仕事量は圧と流量の積で表すことができる。気道抵抗の低下は胸腔内の圧力低下を引き起こす可能性が考えられ、本実験において呼吸筋の仕事量は減少していたものと考えられる。したがって、過換気時において呼吸筋群における酸素重要量が低下したことが、 $VO_{2vent}$  が低下した原因と考えられる。

研究課題 I では、低圧下と常圧下で最大運動時の換気量を再現し、呼吸筋の酸素消費量を検討した。その結果、低圧下では、大気密度の低下によって気道抵抗が軽減されることから、換気量が高くなっても呼吸筋の仕事量は常圧下よりも低く、酸素消費量も少ないことが明らかとなった。

##### (2) 研究課題 II

研究課題 II では、気圧低下による大気密度の低下に伴い生じるであろう気道抵抗低下の影響に注目して、低圧環境制御装置室を用いて、3,500m 相当の常圧下 (N) と低圧下において酸素濃度を 32% に高めた高酸素下 (低圧常酸素下; NH) において漸増負荷運動を行った。32% の酸素濃度は低圧下では、酸素分圧は 159mmHg となり、常圧下の酸素分圧と等しい。2 条件を比較することによって「低酸素刺激」を排して、高地における、空気密度低

下のみの最大運動時の呼吸代謝応答に対する影響を検討することができた。

その結果、低圧常酸素下では常圧下よりも  $VE_{max}$  および呼吸数は高値を示した ( $150.7 \pm 10.0 \text{ L min}^{-1}$  in N vs.  $160.9 \pm 10.6 \text{ L min}^{-1}$  in HN) (図 2)。先行研究においては、気道抵抗を軽減させる手法として、気体密度の低いヘリウム混合ガスを吸入させながら運動を行ったとき、 $VE_{max}$  が増加したことが報告されている。本研究においても、低圧下での空気密度低下による気道抵抗低下によって、流速が増加し、容易に呼吸ができるようになったため  $VE_{max}$  が低圧常酸素下で常圧下よりも増加したものと考えられる。

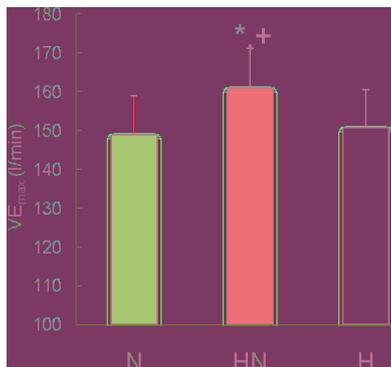


図 2: The maximal minute ventilation. \*,  $p < 0.05$  vs. N; +,  $p < 0.05$  vs. H.

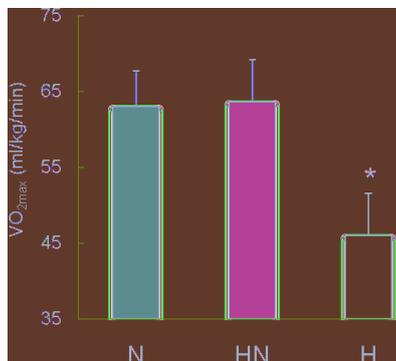


図 3: The maximal oxygen uptake. \*,  $p < 0.05$  vs. HN.

一方で、 $SaO_2$  ( $91 \pm 3\%$  in N and  $90 \pm 5\%$  in HN) および  $VO_{2max}$  ( $63.0 \pm 4.7 \text{ ml kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$  in N vs.  $63.6 \pm 5.6 \text{ ml kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$  in HN) (図 3) は常圧下と低圧常酸素下で有意な差が見られなかった。我々は過去に、2,500m 相当の低圧下において、ヘリウム混合ガスを吸入させながら最大運動を行ったとき、通常の空気を吸入させた時よりも  $SaO_2$  および  $VO_{2max}$  が増加したことを報告している。また、他の先行研究でもヘリウム混合ガス吸入によって  $VO_{2max}$  の有意な増加が観察されている。先行研

究と本実験の結果の矛盾は、最大運動時の  $SaO_2$  の違ったことが原因と考えられる。先行研究では  $SaO_2$  は低酸素状態で運動を行っている一方で、本実験では通常酸素状態であり、先行研究ほど低くない。本実験の  $SaO_2$  は、換気増大によってガス交換が改善されても、 $SaO_2$  に影響がない程度であったことが原因の一つと考えられる。

しかしながら、 $VO_{2max}$  に差がないにも関わらず、低圧常酸素下では常圧下よりも運動継続時間は有意に長かった ( $910 \pm 79 \text{ sec}$  in N vs.  $932 \pm 83 \text{ sec}$  in HN) (図 4)。

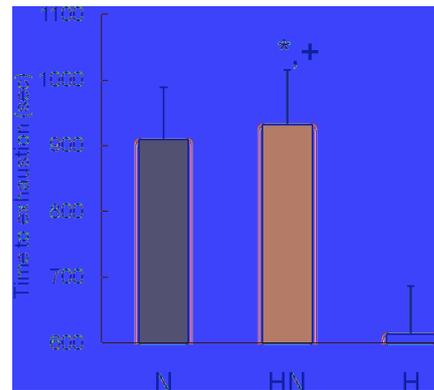


図 4: The time to exhaustion. \*,  $p < 0.05$  vs. N; +,  $p < 0.05$  vs. H.

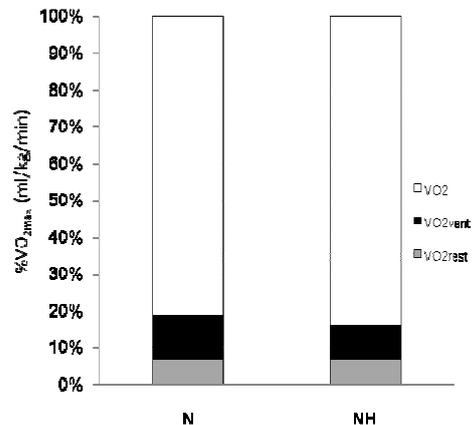


図 5: The distribution of  $VO_2$  at respiratory muscles.

呼吸筋の活動と運動パフォーマンスの関係に注目した Harms ら (1997, 2000) の研究では、呼吸を補助する機器を用いて呼吸筋の仕事量を低下させた状態で、高強度の自転車運動を行ったところ、コントロール条件と比較して、活動筋である大腿への血流量が高かったことや運動継続時間が延長したことなど

を報告しており、呼吸筋の仕事は全身の呼吸循環応答や運動パフォーマンスに影響を及ぼすことを示唆している。研究課題Iで明らかになった通り、低圧下では空気密度低下によって呼吸筋の酸素消費量が低くなったことが明らかとなっている。したがって、本実験において低圧通常酸素下で運動パフォーマンスが常圧下よりも向上したメカニズムとしては、気圧低下に伴う呼吸筋群の仕事低下により酸素需要が低くなり、活動筋へ血流が再分配されたことで生じたものと考えられる。

研究課題IおよびIIの実験結果から、全身の $VO_{2max}$ に対する呼吸筋群での酸素消費量の割合を算出したところ、常圧下では $12.4 \pm 3.6\%$ であったのに対して、低圧通常酸素下では $9.1 \pm 3.4\%$ と有意に低くなっている(図5)。この結果は、上述のとおり、呼吸筋群での酸素需要の低下に伴う血流量の低下によって、活動筋への血流量が増加したため、活動筋での酸素摂取量が増えたためと考えられる。

### (3) 研究成果の応用と課題

これら本研究課題の一連の実験結果の応用の可能性と課題について以下に述べる。本研究の成果は、高所トレーニングの効果的な方法への応用が期待される。近年、高所トレーニングでは、実際に高所に滞在し運動トレーニングを行うだけでなく、平地にしながら低酸素ガス吸入を行いながら運動トレーニングを行う、低酸素トレーニングも行われている。両者とも低酸素状態に暴露するという点においては同じであるが、本研究の結果から、後者では、実際の高所では気圧低下は生じないため、生体にかかる負荷が実際の高所よりも高い可能性が考えられる。

これらを踏まえて、低酸素トレーニングでは高所トレーニングよりも運動負荷の設定を慎重に行うなどの考慮が必要であると考えられる。反対に、高所では低酸素の影響を取り除けば呼吸が楽になり、運動パフォーマンスが増加することから、高所において高酸素吸入を行いながら運動を行うことで、平地で運動トレーニングを行うよりも、より強い絶対的負荷がかけられるなどの応用が考えられる。

したがって、高所と低酸素における生体への負担の違いを明らかにすることに成功した本研究課題の結果は、世界的に見ても例がなく、今後より効果的な高所トレーニングへの応用可能など、スポーツ科学分野をリードできる非常に重要な基礎的研究となった。

一方、残された課題として、低圧下では、気道抵抗低下の効果があったことは示唆できたものの、呼吸筋の仕事量は低下していたかどうかについては直接測定できなかった。呼吸筋の仕事量測定には、胸腔内圧の測定が

必要であり、今後、胸腔内圧の測定および仕事量の算出などを行い詳細なデータを収集する必要がある。

### (4) まとめ

本研究課題では、高地(低圧低酸素環境)での活動に伴う高山病の予防や、効果的な高地トレーニング法などを構築するための基礎的研究として、低圧下での空気密度の低下が高強度運動時の呼吸循環応答に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、1)気道抵抗の違いにより呼吸筋群の $VO_2$ は変化するかどうか、2)低圧下における空気密度の低下による気道抵抗の低下が、最大換気量、 $VO_{2max}$  および運動パフォーマンスに影響を及ぼすかどうかについて調べた。

その結果、高所の高酸素吸入によって低酸素刺激を排除した場合、気圧低下そのもの効果として、1)気道での物理的な抵抗が減少し、最大運動時の換気量が増加すること。2)呼吸筋での仕事量低下に伴う酸素消費量の低下によって、活動筋での酸素利用が高まり、全身の $VO_{2max}$ の変化を伴わないで運動パフォーマンスを増加させることが示唆された。

本研究課題の一連の実験結果は、いわゆる高所トレーニングにおける、低酸素下で行うトレーニングと実際の高所で行うトレーニングにおいて生体への負担の違いを明らかにすることに成功し、今後、より効果的な高所トレーニングへの応用可能な重要な基礎的研究となった。

## 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3件)

Keiji Hayashi, Yasushi Honda, Takeshi Ogawa, Narihiko Kondo, Takeshi Nishiyasu. The cross-sectional relationships among hyperthermia-induced hyperventilation, peak oxygen consumption, and the cutaneous vasodilatory response during exercise. *European Journal of Applied Physiology*. 査読あり 107 巻 (2009) pp527-534

Masashi Ichinose, Mitsuru Saito, Naoto Fujii, Takeshi Ogawa, Keiji Hayashi, Narihiko Kondo, Takeshi Nishiyasu. Modulation of the control of muscle sympathetic nerve activity during incremental leg cycling. *Journal of Physiology*. 査読あり 586 巻 (2008) pp2753-2766

小川剛司 低酸素下での短時間高強度インターバル運動時中休息時の高酸素ガス吸入が発揮パワーに及ぼす影響. デサントスポーツ科学査読あり 30 巻(2009)pp 70-76

[学会発表] (計 3 件)

小川剛司 藤井直人 辻文 西保岳 低圧下での最大運動時の呼吸代謝応答～気圧低下の効果に注目して～第 64 回日本体力医学会 2009 年 9 月 20 日 朱鷺メッセ (新潟)

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～空気密度低下による気道抵抗の減少に着目して～第 64 回日本体力医学会 2009 年 9 月 20 日 朱鷺メッセ (新潟)

小川剛司 藤井直人 吉武成美 松本真由美 西保岳 低酸素下でのインターバル運動における休息時の高酸素吸入が運動パフォーマンスに及ぼす影響. 日本体力医学会第 63 回日本体力医学会 2008 年 9 月 18 日 別府ビーコンプラザ(大分)

吉武成美 藤井直人 小川剛司 松本真由美 西保岳 上肢と上肢における漸増負荷運動時の呼吸パターン及び代謝応答の比較. 日本体力医学会第 63 回日本体力医学会 2008 年 9 月 18 日 別府ビーコンプラザ (大分)

藤井直人 林 恵嗣 小川剛司 近藤徳彦 古賀俊作 西保岳 運動トレーニングが運動時の深部体温上昇に伴う換気亢進反応に及ぼす影響. 日本体力医学会第 63 回日本体力医学会 2008 年 9 月 18 日 別府ビーコンプラザ(大分)

Takeshi Ogawa, Naoto Fujii, Yasuhiro Kurimoto, Takeshi Nishiyasu. The effect of hypobarica on ventilation and  $VO_{2max}$  during maximal running American College of Sports medicine 56th annual meeting Indianapolis, Indiana, US (2008)

Naoto Fujii, Yasushi Honda, Takeshi Ogawa, Narihiko Kondo, Takeshi Nishiyasu. The effect of hypohydration on hyperthermic hyperpnea and cutaneous vasodilation during exercise American College of Sports medicine 56th annual meeting Indianapolis, Indiana, US (2008)

[図書] (計 1 件)

・体育の科学 平成 20 年 10 月 杏林書院 小川剛司 西保岳. 「肺機能と運動適応」担当 pp694-699

[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

6. 研究組織  
(1) 研究代表者  
小川剛司 ( 徳山大学 )

研究者番号：

(2) 研究分担者 ( )

研究者番号：

(3) 連携研究者 ( )

研究者番号：