

有酸素運動トレーニングが活動筋の 酸素供給と消費のバランスに及ぼす効果

神戸芸術工科大学大学院	古賀俊策
(共同研究者) 県立広島大学	福場良之
筑波大学	西保岳
神戸大学	近藤徳彦
同志社大学	福岡義之

Effects of Aerobic Exercise Training on Balance for Oxygen Delivery and Utilization of Exercising Muscles

by

Shunsaku Koga

Graduate School of Kobe Design University

Yoshiyuki Fukuba

Faculty of Human Culture and Science,

Prefectural University of Hiroshima

Takeshi Nishiyasu

Institute of Health and Sport Sciences,

University of Tsukuba

Narihiko Kondo

School of Human Development, University of Kobe

Yoshiyuki Fukuoka

Faculty of Health and Sports Science, Doshisha University

ABSTRACT

To investigate effects of aerobic exercise training on balance for oxygen delivery and utilization of exercising muscles, the relationship between muscle deoxygenation

(HHb) and activation was examined in 3 different muscles of the quadriceps during cycling ramp exercise. Seven young aerobic-trained and seven untrained male adults pedaled at 60 rpm to exhaustion, with a work rate (WR) increase of 20 W/min. At the vastus lateralis (VL), rectus femoris (RF) and vastus medialis (VM), muscle deoxygenation and activity were measured by time-resolved near-infrared spectroscopy (NIRS) and surface electromyography (EMG), respectively. Muscle deoxygenation was corrected for adipose tissue thickness and normalized to the amplitude of the HHb response. Muscle deoxygenation and activation were then plotted as a percentage of maximal work rates (%WRmax). The HHb responses for all three muscle groups showed sigmoid function, which were determined as the best fitting model. The RF muscle demonstrated a "right shift" of the HHb response compared to VL and VM throughout the majority of the ramp exercise. There existed no significant differences of the HHb response per se between the aerobic-trained and untrained subjects. However, the spatial heterogeneity of HHb responses per unit of muscle activity in different muscles of the quadriceps was greater in the trained subjects compared with the untrained subjects. These data suggest that greater oxygen delivery of the trained subjects might not have improved the regional balance for oxygen delivery and utilization in different muscles of the quadriceps during ramp-incremental exercise.

要 旨

時間分解・近赤外分光装置を用いて、活動筋の複数部位における脱酸素化ヘモグロビン+ミオグロビン (HHb) を計測し、有酸素運動トレーニングが活動筋の酸素供給と消費のバランスに及ぼす効果を考察した。ランプ負荷運動において、外側広筋、大腿直筋、および内側広筋の HHb は、運動強度の増加に伴ってシグモイド状に増加した。同じ運動強度では大腿直筋の HHb が他の筋肉に比べてより低い値を示した。大腿筋の3部位において HHb の空間的な不均一性が認められたが、有酸素運動トレーニング者と非トレーニング者の間には有意な差はなかった。有酸素運動トレーニング者における単位筋活動あたりの HHb 空間不均一性は、非トレーニング者に比べてより高いことが示された。有酸素運動

トレーニング者では、動員される活動筋毛細血管と筋細胞の間の酸素分圧差が非トレーニング者に比べてより大きいので、上記の空間的不均一性が改善されなかった可能性も示唆された。

緒 言

運動不足の状態が続くと、活動筋へ酸素が適切に供給されず(酸素不足)、無酸素性エネルギー供給が関与する速筋線維がより多く動員されて、運動を長時間続けることが困難になる。一方、有酸素運動トレーニングを定期的 to 実施した場合、持久性に優れる遅筋線維がより多く動員されて、活動筋の酸素供給と酸素消費 ($\dot{V}O_2$) のバランスが改善される。そこで、運動時における「全身レベル」の酸素供給と需要の関係を評価するために、最大酸素摂取量、無酸素性作業閾値 (AT) や酸素摂取動態 ($\dot{V}O_2$ kinetics) が計測されてい

る (古賀, 2001; 2004)^{1,2)}。

ヒトの活動筋レベルでは酸素の消費量と供給量 (つまり血流量, $\dot{Q}$) のバランスは不均等で、両者の間にミスマッチが存在する。とくに、運動強度の増加にともない、 $\dot{V}O_2$ と $\dot{Q}$ のミスマッチは活動筋の部位ごとに異なった変化を示す (局所的に $\dot{Q}$ の増加が $\dot{V}O_2$ に追いつかず、酸素不足が生じる) (Chin 等, 2011; Koga 等, 2007; 古賀, 2012)³⁻⁵⁾。

しかし、有酸素運動トレーニングが活動筋の複数部位における $\dot{V}O_2$ と $\dot{Q}$ のミスマッチに及ぼす効果については、明らかではない。有酸素運動トレーニングを定期的の実施すると、遅筋線維がより多く動員されるとともに空間的により均一になって、活動筋全体の $\dot{V}O_2$ と $\dot{Q}$ のバランス ($\dot{V}O_2/\dot{Q}$) が改善されること (酸素不足の減少) が予想される。

今回は最新の時間分解・近赤外分光装置を用いて、活動筋の複数部位における $\dot{V}O_2$ と $\dot{Q}$ のバランス、つまり動脈と静脈の酸素量較差を反映する脱酸素化ヘモグロビン+ミオグロビン (HHb) を非侵襲的に計測し、酸素不足の空間不均一性を評価した。本研究の目的は、有酸素運動トレーニングが活動筋の酸素供給と消費のバランスに及ぼす効果について検討することである。

1. 研究方法

所属機関の倫理委員会の承認後、成人男性 14 名 (21.5 ± 1.2 歳) に被験者を依頼した。そのうち、定期的な有酸素運動トレーニングを 5 年以上実施した者を 7 名選んだ (最大酸素摂取量: 55.2 ± 2.1 ml/kg/min)。一方、非トレーニング者として、日常的に有酸素運動を実施していない 7 名に被験者を依頼した (最大酸素摂取量: 42.3 ± 1.7 ml/kg/min)。座位姿勢において、15 分間の安静と 4 分間の無負荷強度 (0 watt) の自転車運動を行い、その直後にランプ負荷自転車運動 (20watt 毎分

の増加率) を行なった。

1) 大腿筋における $\dot{V}O_2$ と $\dot{Q}$ の空間的・時間的不均一性に焦点を当て、時間分解・近赤外分光装置 (TRS-NIRS, 浜松ホトニクス TRS-20D) を 2 台用いて、外側広筋、大腿直筋、および内側広筋における HHb の絶対値を計測した。今回採用した TRS-NIRS は、毛細血管と筋肉組織を通過する近赤外分光の光路長、散乱、吸収の係数を実測し、HHb を計測する装置である。HHb は血液量変動の影響を受けにくく、 $\dot{V}O_2/\dot{Q}$ を反映するので、鏡像関係にある微小循環 PO_2 ($\dot{Q}/\dot{V}O_2$) の動的応答を推測できる (Koga 等, 2007)⁴⁾。通常使用されている連続波 (CW) NIRS は、上記の光学係数を一定とみなし、HHb の相対変化を測定するが (Koga 等, 2007; Saitoh 等, 2009)^{4,6)}、TRS-NIRS を用いれば HHb の絶対値 (振幅) を計測できる (Koga 等, 2011)⁷⁾。

大腿筋の皮膚表面に貼り付けた近赤外分光センサーの送光部と受光部の距離を 3cm、測定深度は約 1.5cm とした。さらに、HHb の値は被験者間、および測定部位間における皮下脂肪厚の影響を受けるので、超音波ドップラー装置 (Yokogawa-GE Medical, Logiq400) を用いて皮下脂肪厚を測り、HHb の値を補正した (Koga 等, 2011)⁷⁾。

2) 活動筋全体の酸素消費動態 ($\dot{V}O_2$) を反映する肺泡レベルの $\dot{V}O_2$ 動態 (第 2 相と第 3 相) をブレスバイブレスの呼吸ガス交換測定装置 (ミナト医科学, AE-300S) で連続的に測定した。

3) 外側広筋、大腿直筋、および内側広筋における筋電図を生体電気計測装置 (BioLog DL-1000, S&ME) で測定し、その積分値 (iEMG) を求めて、各部位の筋活動の指標とした。

4) 応答特性解析プログラムを用いて、運動時における生体応答の速さ (遅れ時間、時定数) と増加量 (振幅) を求めた (Koga 等, 2005, 2011)^{7,8)}。

さらに、HHb 値の部位間変動係数 (CV, 部位間の標準偏差 ÷ 平均値) を計算して、活動筋の

酸素供給と消費のバランスの空間不均一性を評価した。

5) 筋線維動員パターンの推定：ラットの筋収縮時において、活動筋の酸素分圧 (PO_2) と HHb の応答は近似する (Koga 等, 2012)⁹⁾。そこで、動物筋線維の酸素交換特性を基にして (Behnke 等, 2003)¹⁰⁾、ヒトの筋線維動員パターンを TRS-NIRS で推定する方法を着想した。とくに、無酸素性代謝がより多く関与する速筋線維では、酸素供給が不十分になるので $\dot{V}O_2/\dot{Q}$ の比率が増加し、酸素不足が顕著になり、酸素分圧と pH が減少すると考えられる。今回の研究では $\dot{Q}$ の応答が $\dot{V}O_2$ のそれよりも速い (HHb の増加速度が遅く、かつ運動時の増加量が小さい) 部位を遅筋線維の動員割合が多い部位とした。一方、HHb の応答が速く、振幅が大きい、さらに pH がより減少する部位を速筋線維の動員割合が多い部位とした。

2. 研究結果

ランプ負荷様式を用いた自転車運動において、各々の筋肉の脱酸素化ヘモグロビン濃度 (HHb) の絶対値はシグモイド (S 字) 状に増加した。つまり、 $\dot{V}O_2$ と $\dot{Q}$ の関係は運動強度に依存して変化した (図 1)。つまり、低い運動強度では、 $\dot{Q}$

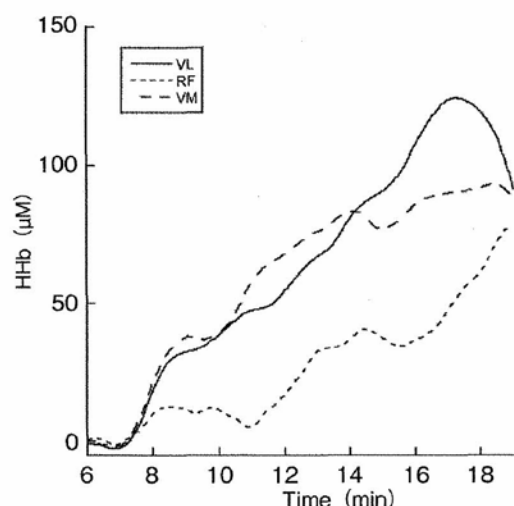


図1 ランプ負荷自転車運動における外側広筋 (VL)、大腿直筋 (RF)、および内側広筋 (VM) の脱酸素化ヘモグロビン濃度 (HHb) の応答動態 (代表的な被験者の例)。

は $\dot{V}O_2$ よりも速く増加したが、強度の増加に伴って $\dot{V}O_2$ よりも遅く増加した。最大強度近くでは、両者の増加率は同じになり、 $\dot{V}O_2$ と $\dot{Q}$ のマッチングが見られた。しかし、同じ運動強度では大腿直筋の HHb が他の筋肉に比べてより低い値を示した。

外側広筋、大腿直筋、および内側広筋における HHb を連続的に測定した結果、空間的な不均一性の変化が認められた (部位間変動係数 (CV), 図 2)。有酸素運動トレーニング者の HHb の空間分布は非トレーニング者に比べて、有意な差はなかった。

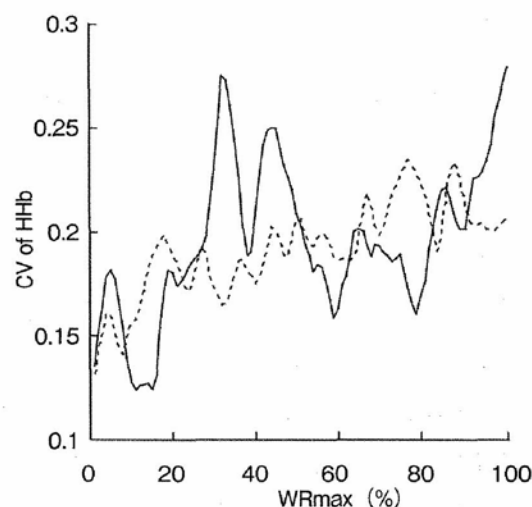


図2 外側広筋、大腿直筋、および内側広筋における HHb の空間的な不均一性 (変動係数, CV) (代表的な有酸素運動トレーニング者 (実線) と非トレーニング者 (点線) の比較)。(%WRmax : 最大運動強度に対する割合)。

次に、外側広筋、大腿直筋、および内側広筋における HHb を筋電図積分値 (iEMG) で除し、単位筋活動あたりの HHb を計算し、それぞれの運動強度における空間的な不均一性 (CV) を求めた。その結果、有酸素運動トレーニング者における単位筋活動あたりの HHb の CV は非トレーニング者に比べて、有意に高い、つまり空間的な不均一性がより高いことが示された (図 3)。

3. 考 察

ランプ負荷様式を用いた自転車運動において、

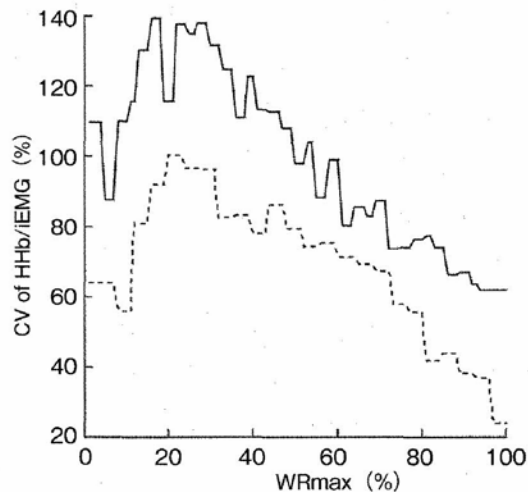


図3 外側広筋, 大腿直筋, および内側広筋における単位筋活動 (iEMG) あたりのHHbの空間不均一性 (CV) (代表的な有酸素運動トレーニング者 (実線) と非トレーニング者 (点線) の比較)。

外側広筋の脱酸素化ヘモグロビン濃度 (HHb) はシグモイド状に増加することが報告されている (Chin 等, 2011; Ferreira 等, 2007)^{3, 11)}。しかし, 活動筋毛細血管レベルの $\dot{Q}$ は不均一に分布しているため, 活動筋全体に酸素を供給する血流 (例, 大腿動脈血流) と微小循環における血流の調節は異なる (Koga 等, 2005)⁸⁾。また, 運動中に動員される筋線維の種類によって酸素の供給と利用の割合 ($\dot{V}O_2/\dot{Q}$) が異なり, 活動筋の酸化代謝が不均一になることが推測される。

今回の研究では, HHb は各々の筋肉においてシグモイド状に増加したが, 同じ運動強度では大腿直筋のHHbが他の筋肉に比べてより低い値を示した (図1)。この結果は, 先行研究の結果と一致している (Chin 等, 2011)³⁾。したがって, 大腿直筋の $\dot{Q}$ の増加は他の筋肉よりも速く増加することが示唆される。さらに, 大腿直筋HHbの増加速度が遅く, かつ運動時の増加量が小さいので, 大腿直筋は $\dot{Q}$ の応答が $\dot{V}O_2$ のそれよりも速い部位であることが示唆される。

外側広筋, 大腿直筋, および内側広筋におけるHHbを連続的に測定した結果, 空間的な不均一性 (CV) の変化が認められた (図2)。しかし,

有酸素運動トレーニング者のHHbの空間分布は非トレーニング者に比べて, 有意な差はなかった。著者たちは当初, 有酸素運動トレーニングを定期的 to 実施すると, 遅筋線維が多く動員されるとともに空間的により均一になって, 活動筋全体の $\dot{V}O_2$ と $\dot{Q}$ のバランス ($\dot{V}O_2/\dot{Q}$) が改善されること (酸素不足の減少) を予想した。とくに, 乳酸閾値が高い有酸素運動トレーニング者においては, 乳酸などの代謝産物による酸素解離曲線の右方シフトと血管拡張が非トレーニング者に比べてより顕著に起き, 酸素供給量がより増加すると予想された。

HHbの空間不均一性が有酸素運動トレーニング者と非トレーニング者の間で有意な差がない理由の一つとして, NIRS装置の測定深度の限界が考えられる。今回採用したTRS-NIRS, および通常用いられる連続波 (CW) NIRSの測定深度は約1.5-2cmであり, 筋肉の表層部に限られたHHb応答を計測している。筋肉の深層部においては, 遅筋 (Type I) 線維が多く含まれる可能性もある (Koga 等, 2012)⁹⁾。有酸素運動トレーニングを定期的 to 実施すると遅筋線維がより多く動員されて, 活動筋全体の $\dot{V}O_2$ と $\dot{Q}$ のバランス ($\dot{V}O_2/\dot{Q}$) が改善されること (酸素不足の減少) も予想される。したがって, 活動筋深層部におけるHHbの空間不均一性の計測が期待される。

有酸素運動トレーニング者における単位筋活動あたりのHHbの空間的な不均一性は非トレーニング者に比べて, より高いことが示された (図3)。有酸素運動トレーニングによって空間的な不均一性が改善されない理由は不明である。著者たちは最近, 通常空気と低酸素ガス吸入 (16% と 12% O_2) の条件で一定負荷運動における大腿筋の酸素動態を測定した (未発表データ)。その結果, 吸入ガス濃度の低下に伴って運動開始時の過渡的な酸素不足が顕著になる一方, HHb最大値 (つまり, 活動筋毛細血管 PO_2 の最小値) は

より均一になることが示唆された。したがって、非トレーニング者では、活動筋全体の $\dot{V}O_2$ を維持して運動を継続するために、毛細血管の血流分布と筋肉動員のパターン、あるいはいずれかがより均一になって臨界 (critical) PO_2 への到達を防ぐと考えられる。

一方、有酸素運動トレーニング者では、動員される活動筋毛細血管と筋細胞の間の酸素分圧差が非トレーニング者に比べてより大きく、酸素が筋肉組織により多く取り込まれる。したがって、臨界 PO_2 へ到達するまでには余裕があるので、上記の空間的不均一性が改善されない可能性も示唆される。また、同一の運動強度で比較すれば、有酸素運動トレーニング者における大腿筋全体の相対的な活動度が非トレーニング者に比べてより低い可能性がある (運動効率の向上)。このため、運動強度の増加に伴って $\dot{Q}$ が $\dot{V}O_2$ よりも速く増加したと考えられる。前述の様に、活動筋深層部における HHb の空間不均一性の計測が実施されれば、この点についての理解が深まると考えられる。

動物実験レベルでは、筋線維の種類によって活動筋の酸素交換の動的な応答は異なる (Behnke 等, 2003)¹⁰⁾。筋収縮の開始直後、持久性に優れる遅筋線維 (例、ヒラメ筋) では $\dot{Q}$ の増加速度が $\dot{V}O_2$ のそれよりも速く、酸素分圧 (PO_2) と pH は低下しにくい [筋収縮開始前の PO_2 がしばらく維持される。また、応答の遅れ時間が長く、低下速度 (時定数) が遅い]。一方、疲労しやすい速筋線維 (例、腓骨筋) では $\dot{V}O_2$ に対して $\dot{Q}$ が不足し、 PO_2 と pH がより速く低下して筋細胞への酸素の取り込みが遅れる。したがって、有酸素運動トレーニングを定期的実施した被験者がランブ負荷自転車運動を行なった場合、運動強度の増加に伴う遅筋線維から速筋線維へ動員の切替えが非トレーニング者に比べてより遅く、 $\dot{Q}$ 全体の増加量が $\dot{V}O_2$ の増加量を上回る期間が

長いことが考えられる。但し、ヒトの自転車運動における活動筋の筋線維動員パターンは、他の動物の走行運動に比べてより多様である。したがって、活動筋の酸素動態不均一性に関して、動物実験の知見をヒトの実験結果と比較する場合には留意が必要である。

今後の検討課題と期待される効果

1. 今回は、定期的な有酸素運動トレーニングを長年実施した者と非トレーニング者の生体応答を比較した (横断的研究)。しかし、今後は有酸素運動トレーニングが及ぼす経時的な効果の検討 (活動筋の酸素供給と消費バランスの縦断的研究) が必要である。

2. ヒトの活動筋微小循環における酸素供給 ($\dot{Q}$) と $\dot{V}O_2$ の動的応答を個別に測定する必要がある。とくに、多チャンネルの NIRS と磁気共鳴スペクトル (MRS) 装置を用いて、運動筋の酸素の抜き取りと $\dot{V}O_2$ の局所的な測定部位を一致させ、筋毛細血管レベルの $\dot{Q}$ の空間的な分布を同時計測することが期待される。運動時の活動筋における $\dot{V}O_2$ と $\dot{Q}$ の局所分布を個別に計測して、活動筋 $\dot{V}O_2$ の空間的な不均一性を把握して酸素が不足しやすい部位を特定できれば、従来よりも効果的な筋持久力トレーニングが実現する。

3. 運動時に動員される筋線維タイプの推定が可能になれば、筋肉疲労の評価に貢献する。例えば、定期的な有酸素運動による筋線維動員パターンの改善効果を定量化することにより (持久性に優れる遅筋線維の動員増加と筋内 PO_2 レベルの維持)、健常者、心肺疾患、末梢循環疾患などの患者の有酸素運動処方やリハビリテーションへ多大に貢献すると考えられる。

4. 結 論

ランブ負荷自転車運動において、外側広筋、大腿直筋、および内側広筋の HHb は、運動強度の

増加に伴ってシグモイド状に増加した。同じ運動強度では大腿直筋の HHb が他の筋肉に比べてより低い値を示した。したがって、大腿直筋の $\dot{Q}$ の増加は他の筋肉よりも速く増加し、 $\dot{Q}$ の応答が $\dot{V}O_2$ よりも速い部位であることが示唆された。大腿筋の 3 部位において HHb の空間的な不均一性が認められた。しかし、有酸素運動トレーニング者と非トレーニング者の間には空間不均一性の有意な差はなかった。有酸素運動トレーニング者における単位筋活動あたりの HHb 空間不均一性は、非トレーニング者に比べてより高いことが示された。有酸素運動トレーニング者では、動員される活動筋毛細血管と筋細胞の間の酸素分圧差が非トレーニング者に比べてより大きく、酸素が筋肉組織により多く取り込まれる。したがって、活動筋の臨界 PO_2 へ到達するまでには余裕があるので、上記の空間的不均一性が改善されなかった可能性も示唆された。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、研究助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚くお礼申しあげます。

文 献

- 1) 古賀俊策: 酸素摂取動態. 新運動生理学下巻(宮村實晴編集), 真興交易医書出版部, 57-65(2001)
- 2) 古賀俊策, 遠藤雅子, 塩尻智之: 運動開始時の酸素摂取. 運動と呼吸(宮村實晴編集), 真興交易医書出版部, 24-32(2004)
- 3) Chin L.M.K., Barstow T.J., Koga S. et al., The relationship between muscle deoxygenation and

- activation in different muscles of the quadriceps during cycle ramp exercise. *J. Appl. Physiol.*; 111: 1259-1265(2011)
- 4) Koga S., Poole D.C., Ferreira L.F., et al., Spatial heterogeneity of quadriceps muscle deoxygenation kinetics during cycle exercise. *J. Appl. Physiol.*; 103: 2049-2056(2007)
- 5) 古賀俊策: 活動筋の酸素動態不均一性. 身体運動と呼吸・循環機能(宮村實晴編集), 真興交易医書出版部, 147-154(2012)
- 6) Saitoh T., Ferreira L.F., Koga S. et al., Effects of prior heavy exercise on heterogeneity of muscle deoxygenation kinetics during subsequent heavy exercise. *Am. J. Physiol.: Regul. Integr. Comp. Physiol.*; 297: R615 - R621(2009)
- 7) Koga S., Poole D.C., Fukuoka Y. et al., Methodological validation of the dynamic heterogeneity of muscle deoxygenation within the quadriceps during cycle exercise. *Am. J. Physiol.: Regul. Integr. Comp. Physiol.*; 301: R534-R541(2011)
- 8) Koga S., Poole D.C., Shiojiri T., et al., A comparison of oxygen uptake kinetics during knee extension and cycle exercise. *Am. J. Physiol.: Regul. Integr. Comp. Physiol.*; 288: R212-R220(2005)
- 9) Koga S., Kano Y., Barstow T.J. et al., Kinetics of muscle deoxygenation and microvascular PO_2 during contractions in rat: Comparison of optical spectroscopy and phosphorescence-quenching techniques. *J. Appl. Physiol.*; 112: 26-32(2012)
- 10) Behnke B.J., McDonough P., Padilla D.J. et al., Oxygen exchange profile in rat muscles of contrasting fibre types. *J. Physiol.*; 549: 597-605(2003)
- 11) Ferreira L.F., Koga S., Barstow T.J., Dynamics of noninvasively estimated microvascular O_2 extraction during ramp exercise. *J. Appl. Physiol.*; 103: 1999-2004(2007)