

Title	間欠的運動時の局所骨格筋酸素動態の検討
Sub Title	Changes in skeletal muscle oxygenation during intermittent exercise
Author	加藤, 幸司(Kato, Koji) 大西, 祥平(Onishi, Shohei)
Publisher	慶應義塾大学体育研究所
Publication year	2006
Jtitle	体育研究所紀要 (Bulletin of the institute of physical education, Keio university). Vol.45, No.1 (2006. 1) ,p.7- 12
JaLC DOI	
Abstract	The purpose of this study was to investigate the changes of oxygenation in working skeletal muscle during intermittent exercise. Six healthy subjects repeated 30 bouts of intermittent cycle exercise with a work: recovery ratio of 15s: 10s. The exercise workloads were 90% and 100% of maximal oxygen uptake (VO ₂ max). Changes in oxygenation in the vastus later-alis muscle were monitored using near-infrared spectroscopy (NIRS). Muscle oxygenation levels showed the pattern of that the decrease during every work period and the increase during recovery. From the onset of exercise at each workload, muscle oxygenation levels declined and then reached the minimum during the 2nd work period. However there was no difference between the two intensities. After the 25th pedalling a dynamic steady state for muscle oxygenation level was observed. The mean values of muscle oxygenation during last six work periods were 61.8±7.3% (mean±SD) and 54.8±11.2% at 90% and 100%, respectively. While the values for recovery periods were 79.9±8.6% and 72.7±15.0%, respectively. The values for both periods at 100%VO ₂ max were lower (p0.05). These data indicate a consequence of the interaction between work and recovery period, and it can be considered that the NIRS curve presented here is a typical change in muscle oxygenation during intermittent exercise.
Notes	
Genre	Departmental Bulletin Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN00135710-00450001-0007

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

間欠的運動時の局所骨格筋酸素動態の検討

加藤 幸司* 大西 祥平**

Changes in skeletal muscle oxygenation during intermittent exercise

Koji Kato¹⁾, Shohei Ohnishi²⁾

The purpose of this study was to investigate the changes of oxygenation in working skeletal muscle during intermittent exercise. Six healthy subjects repeated 30 bouts of intermittent cycle exercise with a work: recovery ratio of 15s: 10s. The exercise workloads were 90% and 100% of maximal oxygen uptake ($\dot{V}O_2\text{max}$). Changes in oxygenation in the vastus lateralis muscle were monitored using near-infrared spectroscopy (NIRS). Muscle oxygenation levels showed the pattern of that the decrease during every work period and the increase during recovery. From the onset of exercise at each workload, muscle oxygenation levels declined and then reached the minimum during the 2nd work period. However there was no difference between the two intensities. After the 25th pedalling a dynamic steady state for muscle oxygenation level was observed. The mean values of muscle oxygenation during last six work periods were $61.8 \pm 7.3\%$ (mean \pm SD) and $54.8 \pm 11.2\%$ at 90% and 100%, respectively. While the values for recovery periods were $79.9 \pm 8.6\%$ and $72.7 \pm 15.0\%$, respectively. The values for both periods at $100\% \dot{V}O_2\text{max}$ were lower ($p < 0.05$). These data indicate a consequence of the interaction between work and recovery period, and it can be considered that the NIRS curve presented here is a typical change in muscle oxygenation during intermittent exercise.

キーワード：間欠的運動，近赤外分光法，筋酸素動態

Key words: intermittent exercise, near-infrared spectroscopy, muscle oxygenation

緒 言

われわれが日常行っている身体活動の多くは、作業を長時間連続して行うのではなく、間に適当な休みをはさみながら繰り返す間欠的な作業（間欠的運動）がほとんどである。スポーツ場面においても、数秒から数十秒間の様々な強度の運動期と休息期を繰り返す間欠的運動が多くみられる。またわれわれはあらかじめ決められた量の作業を遂行する場合、大きな力を発揮しながら休みをとらず連続的に作業を行うよりも、作業と休息を交互に繰り返す方がより少ない疲労感で作業を終えられることを知っている。このように間欠的運動は様々な生活場面でみられる極めて実際的なものであり、個人の身体

能力に応じた活動を可能にしている。間欠的運動はその運動パターンの特徴から、運動期には全身の酸素摂取量が高まり、休息期にはそれらが急激に低下することが明らかにされている（Astrand et al. 1960a, Christensen et al. 1960, Saltin et al. 1976）。この運動時の酸素摂取量の増加は、活動筋での酸素消費量が高まるためと考えられており、両者は密接な関係をもって変化することが報告されている（Poole et al. 1992, Knight et al. 1992）。活動筋での酸素消費量は、組織における酸素摂取効率を含む酸素利用能力を反映しており、活動筋への酸素供給能力とともに間欠的運動のパフォーマンスを決定する重要な因子である。これまで活動筋における酸素消費量は、動静脈酸素較差を測定（Jorfeldt and Wahren 1971）する

* 慶應義塾大学体育研究所専任講師

1) Assistant Professor, Institute of Physical Education, Keio University

** 慶應義塾大学スポーツ医学研究センター教授

2) Professor, Sports Medicine Research Center, Keio University

ことで評価されてきた。しかしながら、この方法は侵襲的で、技術的な困難さからダイナミックな運動中の測定には適用できないという制約があり、間欠的運動時の活動筋における酸素消費については未だ明らかになっていない。

一方で、近年、近赤外分光法 (NIRS, Near infrared spectroscopy) が開発され、筋組織内の酸素の供給と消費のバランスを非侵襲的に測定することが可能になった。この方法は、近赤外光のある波長領域に対するヘモグロビン (Hb) とミオグロビン (Mb) の吸光度特性を利用したもので、ダイナミックな運動中の Hb+Mb の酸素化、脱酸素化の状態を連続的に測定することができる (Chance et al. 1992)。これまでの NIRS を用いた研究では、運動時や回復期における筋組織内の酸素動態についての検討 (Chance et al. 1992, 本間 1992, Belardinelli et al. 1995, Hamaoka et al. 1996, Homma et al. 1996) が多くなされているが、間欠的運動中の酸素動態のパターンに関する研究はあまりなされておらず、Christmass et al. (1999a, 1999b) による報告がみられる程度である。そこで本研究では、NIRS を用いて、これまで検討されなかった間欠的運動時の筋内酸素動態を経時的に測定し、その変化を酸素の供給と消費のバランスから検討することを目的とした。なお間欠的運動は、運動期および休息期の長さとその時間比、運動期の作業負荷の大きさ、休息期の内容 (完全休息か不完全休息か) など様々な要因を含んでいるため無数の組み合わせが考えられるが、本研究ではスポーツ場面で頻繁にみられる短時間高強度の運動期と休息期からなる間欠的運動を取り上げることにした。

方 法

1. 被 験 者

被験者は、健康な男子大学生 6 名 (18~22 歳) であった。被験者の身長および体重はそれぞれ、 169.9 ± 3.6 cm, 63.8 ± 5.2 kg (平均値 \pm 標準偏差) であった。

2. 実験条件および実験手順

各被験者に対する間欠的運動の負荷量を決定するために、本実験に先立ち自転車エルゴメーター (Monark 818E) を用いて最大運動負荷テストを行った。被験者は自転車で 3 分間の安静を保った後に、無負荷でのペダリング (毎分 60 回転) を開始し、1 分毎に 25 ワットずつ負荷を漸増するランプ負荷運動を疲労困憊まで

行った。その結果をもとに間欠的運動の負荷強度を 90% $\dot{V}O_2\max$, 100% $\dot{V}O_2\max$ の 2 条件とした。また間欠的運動の運動期を 15 秒、休息期を 10 秒に設定した。

間欠的運動は被験者が自転車で 3 分間の安静の後、毎分 60 回転での 15 秒間ペダリングを 10 秒間の休息をはさみながら合計 30 回繰り返した。休息期には運動期終了と同時に脱力し、ペダルに足を乗せたままの状態のできるかぎり足および脚をリラックスするよう指示した。2 条件での測定は、間隔を少なくとも 5 日間以上あけ、その順番はランダムとした。いずれの実験においても、被験者は実験開始 24 時間以上前から激しい身体活動を避け、可能な限り同じ時間帯に測定を実施した。

3. 測定項目

局所骨格筋の酸素動態を近赤外分光測定装置 (オムロン社製、非侵襲ハンディ酸素モニター HEO-200) を用いて測定した。測定部位は右大腿部外側広筋であった。この装置のプロープは 760 nm および 840 nm の 2 波長の近赤外光を発光する 2 つの光源部と 1 つの受光部を装備しており、本実験で使用したプロープは光源と受光部間の距離が 3 cm であった。Patterson et al. (1989) によれば、近赤外光の組織への平均深度は光源と受光部間距離の約半分なので、本実験での平均深度は皮膚表面より約 1.5 cm であったと推定される。このプロープを被験者の測定対象部位皮膚表面 (右膝蓋骨上縁より約 11~13 cm) に装着した。さらにその上から弾性バンドで固定することによりプロープのズレを防いだ。測定は、安静時から 30 回の間欠的運動終了時まで連続して筋内の酸素化ヘモグロビン/ミオグロビン (酸素化レベル) の変化を記録した。また測定中は波形の変化をモニターで観察した。測定装置の時間分解能を 0.5 秒に設定し、運動期は 15 秒間、休息期は 10 秒間の平均値をそれぞれ算出した。

また測定で得られた酸素化レベルの変動を相対値で評価するために、動脈血流遮断法 (Chance et al. 1992, Hamaoka et al. 1996) を用いて校正した。運動終了後、被験者の測定部位より近位の大腿部付け根に大腿用マンシエットを巻き、250 mmHg 程度で加圧して測定部位の血流を遮断し、酸素化レベルがレベリングオフに至るまで行った。本研究では血流遮断中に得られた酸素化レベルの最低値を 0%、安静時のレベルを 100% と定義して分析することにした。

4. 統計処理

得られた数値はすべて平均値±標準偏差で示した。筋酸素化レベルの各運動強度間の差の検定には、関連2群間のt検定を用いた。時間経過に伴う筋酸素化レベルの差異は一元配置分散分析による統計処理を行った。結果は危険率5%未満を有意水準として採用した。

結 果

図1に90% $\dot{V}O_2\max$ および100% $\dot{V}O_2\max$ の負荷強度で間欠的運動を行ったときの外側広筋における酸素化レベルの変動を示した。図2および図3には間欠的運動の運動期と休息期の酸素化レベルの変動を分けて表した。測定の結果、間欠的運動時の筋酸素動態は、運動期に低下し休息期に上昇するパターンを示した。

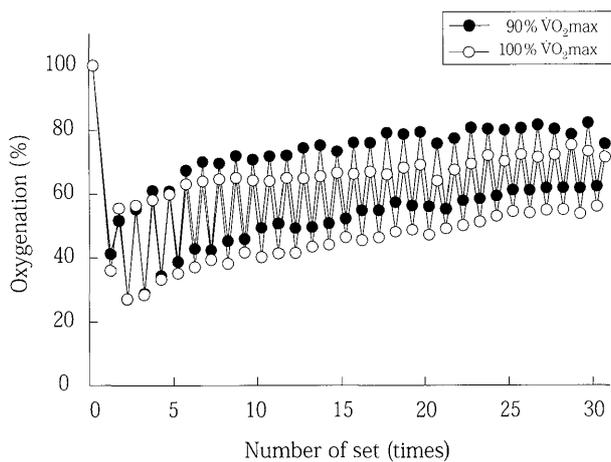


図1. 間欠的運動中の筋酸素動態

運動期の筋酸素化レベルは、両運動強度において1回目の運動期で急激に低下し、2回目の運動期で最低値を示した(図2)。その値は、90% $\dot{V}O_2\max$ で27.1±11.2%、100% $\dot{V}O_2\max$ で26.9±11.1%であった。2条件間の値に有意な差はみられなかった。その後、各運動期で筋酸素化レベルは休息期のレベルから低下を繰り返した。そして運動期全体としてはゆるやかに上昇し、後半はほぼ一定になった。運動期25回目から30回目までの筋酸素化レベルの平均は、90% $\dot{V}O_2\max$ で61.8±7.3%、100% $\dot{V}O_2\max$ で54.8±11.2%であり、100% $\dot{V}O_2\max$ の場合の方が有意に低かった。(図4)。

一方、休息期の酸素化レベルは、各運動強度とも1回目の休息期で最低値を示した(図3)。その値は、90% $\dot{V}O_2\max$ で51.7±10.1%、100% $\dot{V}O_2\max$ で55.6±12.8%であり、強度間で有意差は認められなかった。その後、休息期の酸素化レベルはわずかに増加する傾向を

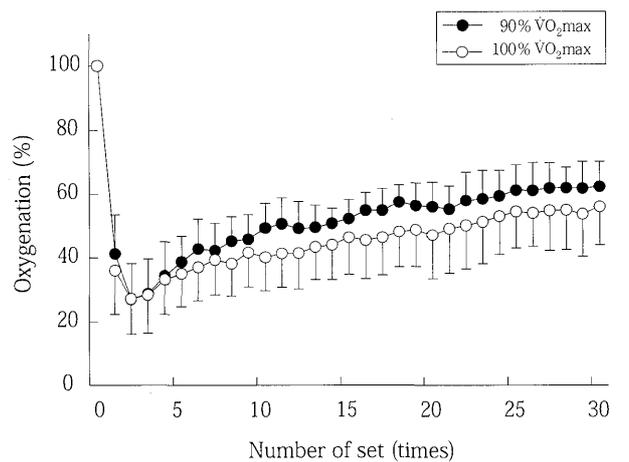


図2. 運動期 (work period) の筋酸素動態

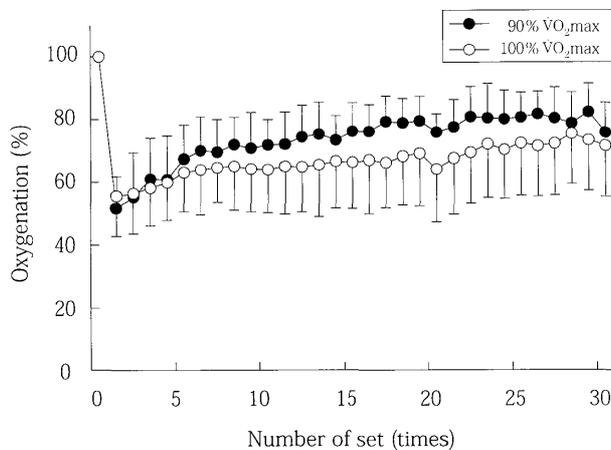


図3. 休息期 (recovery period) の筋酸素動態

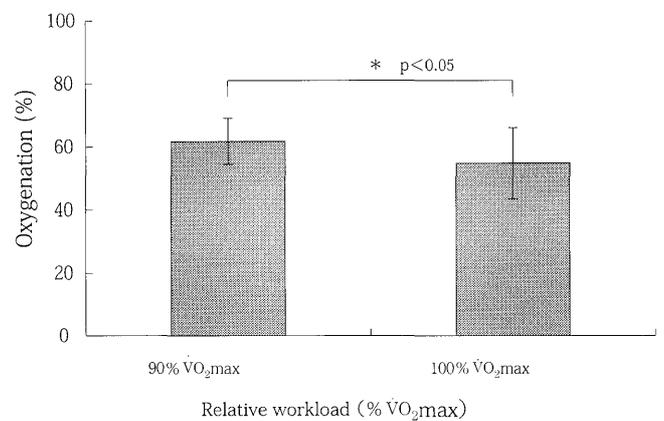


図4. 間欠的運動後半の運動期における筋酸素化レベル

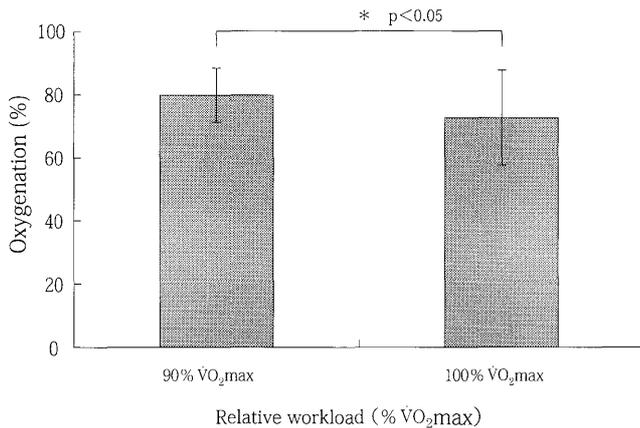


図5. 間欠的運動後半の休息期における筋酸素化レベル

示し、100% $\dot{V}O_2\text{max}$ では5回目以降はほぼ一定となった。90% $\dot{V}O_2\text{max}$ の場合は、ゆるやかな増加を続けながら後半ではほぼ一定となった。休息期25回目から30回目までの酸素化レベルの平均は、90% $\dot{V}O_2\text{max}$ および100% $\dot{V}O_2\text{max}$ の各強度でそれぞれ79.9±8.6%、72.7±15.0%であり、強度間で有意な差が認められた(図5)。

考 察

間欠的運動は肺胞での酸素摂取量や心拍数の変化にみられるように、運動期と休息期が互いに影響を及ぼしながら運動全体を構成し、その生理学的特徴を示すと考えられている(Christensen et al. 1960, Saltin et al. 1976)。本研究で得られた間欠的運動時の局所骨格筋における酸素化レベルは、運動開始から全運動終了まで、運動期に低下し、休息期に上昇するパターンを示し(図1)、Saltin et al. (1976)の報告した間欠的運動中の酸素摂取量の応答パターンと類似していた。本研究では、観察された筋酸素動態の特徴から、酸素化レベルが急激な低下を示した運動開始直後、全体として徐々に上昇する運動継続中、ほぼ一定となる運動後半について検討を加えた。

1. 運動開始直後の筋酸素動態

1回目の運動期に酸素化レベルは最も急激な低下を示した。浜岡(1993)は、一定負荷で持続的に自転車運動を行わせた研究で、運動初期に筋酸素化レベルの急激な低下がみられることを報告しているが、本研究で観察された1回目の運動期での酸素化レベルの急激な低下は同

様の現象とみることができる。すなわち運動開始とともに高まった酸素需要に対して、活動筋である外側広筋での酸素の抜き取り(O_2 extraction)が増加したことで、運動初期で筋への血流が不十分な状態であったために、酸素消費が供給を大きく上回ったことなどによるものと考えられる。またHampson and Piantadoshi (1988)の報告を参考にすると、今回の実験では総ヘモグロビン量の変化を記録していないが、2条件とも高強度での運動であったため、ペダリング時の筋収縮に伴う機械的圧迫(mechanical compression)が生じて、筋への血流を制限していた可能性もある。つまり活動筋での酸素需要量の増加に対し、動脈血の流入が不十分で酸素供給が追いついていなかったことのアラわれとみることができる。

2. 運動継続中の筋酸素動態

運動期2回目に酸素化レベルは最低値に達した後、運動期での低下と休息期での上昇を繰り返しながら全体としては徐々に増加した。記録された酸素化レベルの最低値(強度90% $\dot{V}O_2\text{max}$ で27.1±11.2%、100% $\dot{V}O_2\text{max}$ で26.9±11.1%)は、先行研究(Haga 1998, Bae et al. 1996)で報告されている漸増負荷やランプ負荷による最大運動時のそれと比べて明らかに低かった。このことは、高強度で運動が開始されると、運動初期から局所骨格筋における酸素供給と消費のバランスがより大きく崩れ、酸素動態は酸素消費側により大きくシフトする可能性があることを示唆している。したがって間欠的運動でも低強度の場合には、酸素化レベルの最低値がそれほど低値を示すとは考えられない。また短時間高強度の間欠的運動でも、運動中の酸素運搬系は不十分ながら有気的代謝が優位に行われ(Astrand et al. 1960b, McCartney et al. 1986, Cheetham et al. 1986)、そこでは筋内ミオグロビンが運動開始初期に重要な役割を果たすとされている。つまり酸化ミオグロビンとして蓄えられた貯蔵酸素が各運動期の開始初期に使われ、この貯蔵酸素は休息期に速やかに充填され、次の運動期に再度利用が可能となる。したがって本研究でも運動初期に酸化ミオグロビンが関与した可能性は考えられる。しかしながらNIRSではヘモグロビンとミオグロビンの光吸収特性が極めて類似しているためそれぞれを分離して測定することは不可能であった。またChance et al. (1992)やWilson et al. (1989)は、NIRSによる測定は主にヘモグロビンの変化を反映したものであるとしており、本実験の運動開始初期の酸素供給にミオグロビンがどれだけ関与し、貢

献したかについては言及できない。

2回目以降の運動期では酸素化レベルが1回目ほど大きな低下を示さなかった。一般に、運動後の回復期には活動筋内の血管が拡張し、筋血流が増加して酸素供給を増大させることがわかっている。本研究においても、この血流増大の効果が毎回の運動期に及び、酸素消費は供給を上回りながらも、前の運動期に比べるとより多くの酸素供給が可能な状態になっているのではないだろうか。つまり運動停止により、筋収縮のための機械的圧迫が解除され、ミトコンドリアでの酸素の抜き取りが低下し、動脈血流入量が増加した状態で次の運動期をむかえていると考えることができる。この運動と休息の繰り返しが徐々に酸素供給量を増加させた結果、運動による酸素消費が1回目ほど大きく供給を上回ることがなくなったのではないか。

休息期の酸素化レベルは、100% $\dot{V}O_2\max$ の条件では運動回復5回目以降でほぼ一定になり、90% $\dot{V}O_2\max$ では漸増した後、後半にほぼ一定となった(図3)。これは負荷強度が低い方が、間欠的運動の後半においても休息期での回復が進み続けることを示唆している。また、休息期の酸素化レベルが一定になったということは、休息期に回復できるレベルの上限に達したと考えることもできよう。運動期に対する休息期の酸素化レベルの上昇は、3回目ないし4回目の休息期をピークとして上昇の割合は漸減した。運動期における酸素化レベルの低下の割合が漸減し、休息期の回復の割合も漸減するということは、運動期と休息期の酸素化レベルの差が、時間経過にともない徐々に縮小し、酸素化レベルの振幅が小さくなることを意味している。これは休息期での酸素化レベルが早い段階で一定になっていることから、休息期における回復が頭打ちになる一方で、運動と休息の反復にともない、運動期の酸素需要に対する酸素供給が徐々に改善されつつあることや、筋組織での酸素の利用効率が変わらずつつながら高まっている可能性がある。

3. 運動後半の筋酸素動態

間欠的運動後半の酸素化レベルは、運動期、休息期ともそれぞれほぼ一定となった。これは毎回の運動期で酸素供給に対する酸素消費の上回る割合がほぼ一定になるとともに、休息期においては酸素供給が酸素消費を上回る割合もほぼ一定になったことを意味する。また運動期25回目から30回目までの筋酸素化レベルの平均値は、100% $\dot{V}O_2\max$ で有意に低かった。この結果は、動静脈

酸素較差は運動強度上昇とともに増大するという Jorfeldt and Wahren (1971) の知見と一致する。さらに酸素化レベルの低下は筋における酸素消費を反映すると考えられるため、90% $\dot{V}O_2\max$ と100% $\dot{V}O_2\max$ で酸素化レベルに差がみられたことは、両強度間の酸素消費に差が生じたことを推測させる。Christmass et al. (1999b) は、高強度の間欠的運動時に筋酸素化ヘモグロビン動態にダイナミック・ステディ・ステイトがみられることを報告している。彼らの実験条件とは運動様式、負荷強度および運動期と休息期の時間などの点で異なるが、本研究において観察された間欠的運動後半の筋酸素動態は彼らの報告と同様な結果となった。以上の結果は、持続的運動の定常状態のような循環系の安定した状態が間欠的運動においても形成される可能性を示すものである。このように間欠的運動では、運動と休息を反復する過程で呼吸循環系のリズムをとろうとする何らかの働きが末梢においておこっているように思われる。もしこのダイナミック・ステディ・ステイトが成り立つような条件の間欠的運動ならば、一定のリズムのもとに運動と休息を繰り返すことによって、安静時の酸素化レベルからかなり低下したレベルであっても、長時間の運動が可能になることが予想される。この点については今後、運動期の長さや強度を様々な設定し、乳酸値を測定しながら持続時間との関連を検討する必要がある。また間欠的運動におけるこのような循環系の安定した状態が、運動開始からどのくらいの時間で得られるのかは、運動期と休息期の長さ、運動の負荷強度、被験者の体力レベルなどによって異なることが予想され、今後さらに詳細な検討が必要と思われる。

まとめ

本研究では、短時間高強度の間欠的運動中の外側広筋における酸素動態を、近赤外分光法(NIRS)を用いて測定し、その特徴について酸素の供給と消費のバランスから検討した。男子大学生6名(年齢18~22歳)が被験者であり、15秒間の自転車ペダリングと10秒間の休息を合計30回反復した。負荷強度は90% $\dot{V}O_2\max$ および100% $\dot{V}O_2\max$ の2条件であった。得られた結果は以下の通りである。いずれの運動強度においても筋酸素動態は運動期に低下し、休息期に上昇するパターンを示した。これは間欠的運動時の心拍数や酸素摂取量の応答パター

ンに類似していた。また酸素化レベルは、運動開始直後の1回目の運動で急激に低下し、2回目の運動で最低値を示した後、全体としてはゆるやかに上昇しながら、運動後半には運動期、休息期ともほぼ一定になることが観察された。運動反復25回目以降の酸素化レベルの平均値については、運動強度による差が認められ、運動期、休息期ともに100% $\dot{V}O_{2max}$ の場合で有意に低値を示した。以上観察された間欠的運動における筋酸素動態は、運動期および休息期の活動筋における酸素供給と消費のバランスを反映した結果であるが、今後さらに、運動期と休息期の長さを様々に設定して実験を行い、詳細な検討をする必要があると思われる。

引用文献

- 1) Astrand, I., Astrand, P.-O., Christensen, E. H. and Hedman, R. (1960a) Intermittent muscular work. *Acta Physiol. Scand.*, 48: 448-453.
- 2) Astrand, I., Astrand, P.-O., Christensen, E. H. and Hedman, R. (1960b) Myohemoglobin as an oxygen-store in man. *Acta Physiol. Scand.*, 48: 454-459.
- 3) Bae, S. Y., Yasukochi, M., Kan, K., Sasaki, M., Koseki, S., Hamaoka, T., Iwane, H. and Haga, S. (1996) Changes in oxygen content and blood volume in working skeletal muscle up to maximal exercise by near infrared spectroscopy. *Therapeutic Research*, 17: 129-136.
- 4) Belardinelli, R., Barstow, T. J., Porszasz, J. and Wasserman, K. (1995) Changes in skeletal muscle oxygenation during incremental exercise measured with near infrared spectroscopy. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 70: 487-492.
- 5) Chance, B., Dait, M. T., Zhang, C., Hamaoka, T. and Hagerman, F. (1992) Recovery from exercise-induced desaturation in the quadriceps muscles of elite competitive rowers. *Am. J. Physiol.*, 262: C766-775.
- 6) Cheetham, M. E., Boobis, L. H., Brooks, S. and Williams, C. (1986) Human muscle metabolism during treadmill sprinting. *J. Appl. Physiol.*, 61: 54-60.
- 7) Christensen, E. H., Hedman, R. and Saltin, B. (1960) Intermittent and continuous running. *Acta Physiol. Scand.*, 50: 269-273.
- 8) Christmass, MA., Dawson, B., Passeretto, P. and Arthur, PG. (1999a) A comparison of skeletal muscle oxygenation and fuel use in sustained continuous and intermittent exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 80: 423-435.
- 9) Christmass, MA., Dawson, B. and Arthur, PG. (1999b) Effect of work and recovery duration on skeletal muscle oxygenation and fuel use during sustained intermittent exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 80: 436-447.
- 10) Haga, S., Bae, S. Y., Hamaoka, T., Katsumura, T., Toshinai, K., Koseki, S., Shiga, T., Nakase, Y., Kizaki, T. and Ohono, H. (1998) Oxidative metabolism in skeletal muscle measured during supramaximal exercise in sprinter and active control groups by near infrared continuous wave spectroscopy. *Adv. Exerc. Sports Physiol.*, 4: 57-64.
- 11) 浜岡隆文 (1993) 運動における局所骨格筋酸素動態の非観血的評価—近赤外分光法の応用—, *東京医科大学雑誌*, 51: 437-445.
- 12) Hamaoka, T., Iwane, H., Shimomitsu, T., Katsumura, T., Murase, N., Nishio, S., Osada, T., Kurosawa, Y. and Chance, B. (1996) Noninvasive measures of oxidative metabolism on working human muscles by near-infrared spectroscopy. *J. Appl. Physiol.*, 81: 1410-1417.
- 13) Hampson, N. B. and Piantadosi, C. A. (1988) Near infrared monitoring of human skeletal muscle oxygenation during forearm ischemia. *J. Appl. Physiol.*, 64: 2449-2457.
- 14) 本間幸子, 福岡義之, 藤井宣晴, 江田英雄, 池上晴夫 (1992) 近赤外分光法を用いた活動筋の循環動態の評価—自転車運動時の大腿活動筋について—, *体力科学*, 41: 586-594.
- 15) Homma, S., Eda, H., Ogasawara, S. and Kagaya, A. (1996) Near-infrared estimation of O_2 supply and consumption in forearm muscles working at varying intensity. *J. Appl. Physiol.*, 80: 1279-1284.
- 16) Jorfeldt, L. and Wahren, J. (1971) Leg blood flow during exercise in man. *Clin. Sci.*, 41: 459-473.
- 17) Knight, D. R., Poole, D. C., Schaffartzik, W., Guy, H. J., Prediletto, B., Hogan, M. C. and Wagner, P. D. (1992) Relationship between body and leg VO_2 during maximal cycle ergometry. *J. Appl. Physiol.*, 73: 1114-1121.
- 18) Patterson, M. S., Chance, B. and Wilson, B. C. (1989) Time resolved reflectance and transmittance for the noninvasive measurement of tissue optical properties. *J. Appl. Optics.*, 28: 2331-2336.
- 19) Poole, D. C., Gaesser, G. A., Hogan, M. C., Knight, D. R. and Wagner, P. D. (1992) Pulmonary and leg VO_2 during submaximal exercise : implications for muscular efficiency. *J. Appl. Physiol.*, 72: 805-810.
- 20) Saltin, B., Essen, B. and Pedersen, P. K. (1976) Intermittent Exercise; its physiology and some practical applications. *Med. Sport.*, 9: 23-51.
- 21) Wilson, J. R., Mancini, D. M., McCully, K., Ferraro, N., Lanoce, V. and Chance, B. (1989) Noninvasive detection of skeletal muscle underperfusion with near-infrared spectroscopy in patients with heart failure. *Circulation*, 80: 1668-1674.