



等尺性脚伸展運動における中・長距離ランナーと非鍛錬者の筋酸素動態の比較

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 北海道教育大学 公開日: 2008-05-21 キーワード: 作成者: 神林, 勲, 柴原, 貴也, 佐川, 正人, 金木, 裕次郎 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.32150/00005164

等尺性脚伸展運動における中・長距離ランナーと非鍛錬者の筋酸素動態の比較

神林 勲¹⁾・柴原 貴也²⁾・佐川 正人¹⁾・金木裕次郎³⁾

¹⁾北海道教育大学教育学部札幌校スポーツ科学研究室

²⁾北海道大樹高等学校

³⁾北海道教育大学大学院教育学研究科

Comparison of Muscle Oxygenation in Middle-and Long-distance Runners and Untrained Persons during Isometric Knee Extension Exercise

KAMBAYASHI Isao¹⁾・SHIBAHARA Takaya²⁾・SAGAWA Masato¹⁾・KANAKI Yujiro³⁾

1) Department of Sports Science, Sapporo Campus Hokkaido University of Education

2) Hokkaido Taiki High School

3) Graduate School of Education, Hokkaido University of Education

《Abstract》

The aim of this study was to investigate the oxidative metabolism during isometric knee extension exercise (IKEE) in five middle-and long-distance runners (runners group) and seven untrained persons (untrained group). The right vastus lateralis muscle was monitored by near-infrared spectrometer for changes in oxygenated hemoglobin and myoglobin contents [oxy (Hb+Mb)] during IKEE with 10, 20, 30, 40, 50 and 60% of the maximum voluntary contraction (MVC). We calculated EX/RT ratio (an index of O₂ consumption) from the initial rate of deoxygenation during rest and immediate post exercise by 1 min ischemia and %oxygenation (a balance index of oxygen supply and consumption) by 15 min ischemia. There were no significant difference in EX/RT ratio and %oxygenation in all intensity between runners and untrained group. However, EX/RT ratio increased linearly up to 40% MVC and 30% MVC and %oxygenation decreased significantly down to 50% MVC and 40% MVC in runners and untrained group, respectively. It is suggested that middle-and long-distance runners can supply more energy to skeletal muscles by the oxidative metabolism up to higher intensity than untrained persons.

《Key words》 runner, untrained, muscle oxygenation, isometric knee extension exercise

I. 緒言

運動中に骨格筋で必要とされるエネルギーは、

無酸素性および有酸素性代謝の2つの経路から供給される。この2つの経路が貢献する比率はATP消費速度と密接な関係にあるが、骨格筋の代謝特性によってはその比率に個人差が生じると考えら

れる。

長期に渡り持久性トレーニングを継続的に行っている中・長距離ランナーは、非鍛錬者に比較して全身持久性に優れている^{5,22)}。また、彼らの主働筋は組織化学的および生化学的手法により測定された酸化能力も高く^{4,5)}、局所的な運動においても優れた持久性能力を示す^{7,18)}ことが報告されている。よって、中・長距離ランナーは非鍛錬者と同一強度の運動を実施しても、エネルギーをより有酸素的代謝によって供給していると推察される。

活動筋における酸素の供給および利用能力の測定には多くの方法が用いられて来た^{6,11,18)}。しかしながら、これらはカテーテルや筋生検などを用いる侵襲的な方法であり、運動中の連続的な測定が困難であった。近年、近赤外分光法 (Near Infra-red Spectroscopy; 以下, NIRS) を用いて、組織の酸素動態を非侵襲的に測定する方法が開発され、活動筋の酸素動態を連続的に長時間に渡り観察することが可能になった。

本間ら¹⁵⁾は陸上競技部に所属する者 (トレーニング群; $\dot{V}O_2\max 70.0 \pm 3.9 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) と専門的なトレーニングを行っていない者 (非トレーニング群; $\dot{V}O_2\max 52.5 \pm 3.5 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot$

min^{-1}) を被検者に、自転車こぎ運動における大腿部の筋酸素動態について NIRS を用いて検討した。その結果、トレーニング群は非トレーニング群に比較して、より高強度まで活動筋への酸素供給が維持されていたことを認めている。しかしながら、これらの研究を含めた先行研究^{2,16)}の多くが全身的な運動中の筋酸素動態を検討しており、局所的な運動を用いている研究も存在する^{3,10,13)}が、有酸素能力の異なる者を被検者として局所的な運動中の筋酸素動態の違いを検討した報告はみられない。

そこで本研究は、NIRS を用いて、持久性トレーニングを継続的に行っている中・長距離ランナーと非鍛錬者を被検者とし、相対的に等しい強度の等尺性膝伸展運動における筋酸素動態を比較することを目的とした。

II. 方法

1. 被検者

継続的に持久性トレーニングを行っている中・長距離ランナー5名 (男性4名, 女性1名; 以下, ランナー群), および定期的に運動を行っていない健常者7名 (男性5名, 女性2名; 以下,

Table 1 Physical characteristics, MVC and running performance in each subject.

	no.	age year	sex	height cm	weight kg	MVC kg	running performance min' sec"
Runner group	1	23	male	172	57	62.0	1500m; 4'02" 5000m; 15'35"
	2	21	male	166	57	55.0	5000m; 16'05" 10000m; 34'17"
	3	19	male	171	60	74.0	800m; 1'55"
	4	18	male	174	56	49.0	5000m; 16'20" 3000mSC; 9'47"
	5	19	female	160	48	52.0	3000m; 10'19" 5000m; 17'54"
	mean±sd	20±2		168±6	55±4	58.4±10.0	
Untrained group	1	21	male	174	72	72.0	—
	2	21	male	171	71	51.0	—
	3	20	male	177	75	72.0	—
	4	20	male	176	57	47.9	—
	5	19	male	178	71	57.0	—
	6	22	female	154	44	30.8	—
	7	22	female	152	55	30.0	—
	mean±sd	21±1		169±11	63±12*	51.5±17.2	

Abbreviations : MVC = maximum voluntary contraction.

* denotes significant difference ($p < 0.05$) when compared with runner group.

非鍛錬者群)とした。被検者の身体特性は表1に示した。ランナー群には実験の前日には激しいトレーニングは行なわないよう指示した。また、被検者全員に実験の開始2時間前から食事や喫煙等を制限した。実験の開始前に全ての被検者に対して実験の内容を十分に説明し、参加同意の署名を承諾書に得た。

2. 実験の流れ

被検脚の外側広筋にNIRSのプロープ、大腿部上部に動脈血遮断用のカフ(幅75mm)、および足関節上部にストレインゲージに接続されたストラップを装着した後、被検者に座位姿勢で3分間の安静をとらせた。その後、動脈血遮断を1分間実施し、それを3分間の回復を挿み3回行った。さらに、3分間の回復後、6つの強度の等尺性膝伸展運動をそれぞれ2分間実施し、各運動終了後、直ちに1分間の動脈血遮断を行った。6つの運動がすべて終了し、5分間の回復をとった後、15分間の動脈血遮断を実施した。なお、NIRSの測定は安静開始から15分間の動脈血遮断終了まで約80分間連続的にを行い、動脈血遮断に用いたカフにはいずれも500mmHgの圧をかけた。

3. 等尺性最大随意筋力

実験に先立ち、被検者の右脚における等尺性最大随意収縮力(Maximum Voluntary Contraction; 以下, MVC)を測定した。被検者に股関節および膝関節を90度に保った座位姿勢をとらせ、足関節上部にストレインゲージ[竹井機器工業社製 T.K.K. 1269f (100kg用)]に接続されたストラップを装着した。そして前述の座位姿勢の状態でもVCを1分間の回復を挿み3回発揮させ、得られた最大値をMVCとして採用した。なお、発揮された筋力はストレインゲージに接続されたデジタル力量計(竹井工業社製 T.K.K. 1269)に出力されたものを読み取った。

4. 等尺性膝伸展運動

局所的な運動として、等尺性膝伸展運動(Iso-

metric Knee Extension Exercise; 以下, IKEE)を用いた。被検者はMVC測定と同様の座位姿勢および測定方法により、MVCの10%、20%、30%、40%、50%および60%に相当する筋力を5秒収縮、5秒弛緩のリズムで2分間発揮した。発揮筋力のレベルは被検者と検者がデジタル力量計に出力された数値を読み取ることで確認した。なお、各運動強度間には少なくとも5分間の回復を設けた。

5. NIRS

安静時およびIKEE中の筋酸素動態の測定にはNIRS(オムロン社製HEO200)を用いた。近赤外光の送光部と受光部の距離が3cmのプロープを右脚の外側広筋(膝上約10cm)上に装着し、2種類の波長(760および840nm)を用いて酸素化ヘモグロビン+ミオグロビン[oxyhemoglobin + oxymyoglobin; 以下, oxy(Hb+Mb)]の相対的变化を0.5秒の計測間隔で連続的に測定した。得られたoxy(Hb+Mb)は個人内の相対的变化を表しており、被検者間の比較を行なうことはできない。そこで、すべてのIKEEが終了後、カフによって動脈血遮断を15分間行った(阻血キャリブレーション法⁸⁾)。そして、安静時におけるoxy(Hb+Mb)の平均値を「100」、動脈血遮断によって最も減少した値を「0」として、IKEE中の筋酸素化レベル(以下, %oxygenation)を評価した。

6. 分析項目

運動中の酸素消費が安静時に対してどの程度増加しているかを評価するため、先行研究⁹⁾にならい、以下の方法を用いた。安静時において動脈血遮断により被検筋を虚血状態にすると、%oxygenationの減少は安静時の筋酸素消費を反映する。そして、運動終了直後においても動脈血遮断を行なえば、その時の%oxygenationの減少は運動中の筋酸素消費を反映していると考えられる。よって、この2つの減少の比率を算出することで、安静時に対する運動中の酸素消費の増加程度

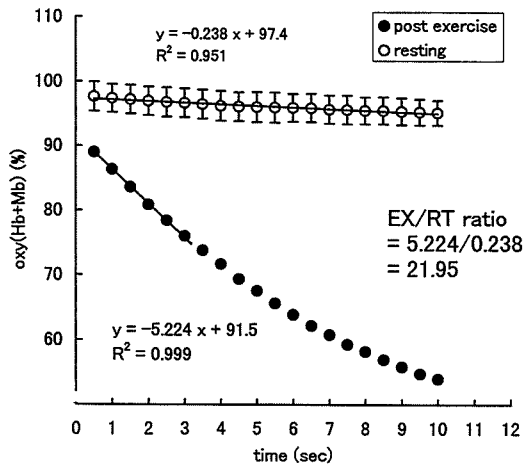


Fig. 1 A typical example of determination of EX/RT ratio in one subject at 40% maximum voluntary contraction.

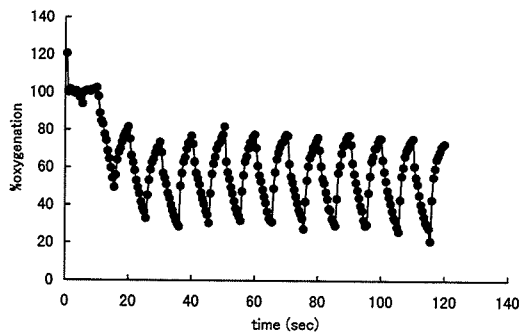


Fig. 2 A typical example of %oxygenation change during isometric knee extension exercise (5 sec. contraction/5 sec. relaxation; 2 min) in one subject at 50% maximum voluntary contraction.

を推測することが可能である。本研究では、図1に示したように安静時の動脈血遮断直後10秒間の%oxygenationと時間を一次回帰し、その回帰直線の傾き (Rest rate; 以下, RT rate) を求めた。また、各%MVCの運動直後に動脈血遮断を行い、%oxygenationが直線的に減少した3秒間を時間で一次回帰し、その回帰直線の傾き (Exercise rate; 以下, EX rate) を求めた。これら2つの傾きの比 (以下, EX/RT ratio) をそれぞれの被検者について各%MVC毎に算出し、運動中の酸素消費の指標とした。なお、RT rateは3回の測定の前値を比率の算出に用いた。

被検者毎に各%MVC発揮中の%oxygenationを評価するために、運動後半1分間の%oxygenationの平均値を算出した。図2にある被検者の50%MVCにおける%oxygenationの変化を示した。筋力発揮とともに%oxygenationは急激に低下し、その後、筋力発揮終了まで定常状態を維持している。よって、後半1分間の%oxygenationの平均値によって運動中の筋酸素動態を評価することに問題はないと判断した。

7. 統計処理

本研究の結果はすべて平均値±標準偏差で表した。同一群における各MVC間の検定には一元配置の分散分析を用いた。また、二群間の検定にはt検定および二元配置の分散分析を用いた。なお、有意性はいずれの場合も危険率5%および1%とした。

III. 結果

1. MVC

各被検者のMVCを表1に示した。MVCの平均値を比較するとランナー群は 58.4 ± 10.0 kg、非鍛錬者群は 51.5 ± 17.2 kgとなり両群間に有意差はなかった。

2. EX/RT ratio

図3は、EX/RT ratioを各群の平均値で示したものである。両群において同一のMVC間にはい

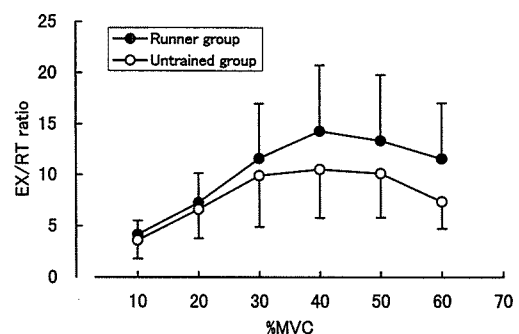


Fig. 3 Changes of EX/RT ratio at different exercise intensity in each group. See abbreviation in table 2

Table 2 Slopes of EX/RT ratio between each %MVC in runner and untrained group.

%MVC	Runner group	p	Untrained group	p
10%–20%	31.2±19.3		31.9 ±14.8	
20%–30%	43.9±31.9	ns	40.3 ±23.6	ns
30%–40%	26.7±35.1	ns	3.8 ± 3.3	**
40%–50%	-10.2±16.7	ns	-6.32± 7.7	ns
50%–60%	-18.2±16.5	ns	-25.7 ±30.1	ns

Abbreviation : EX/RT ratio = the initial rate of deoxygenation during rest and immediate post exercise by 1 min ischemia ; %MVC = the percentage of the maximum voluntary contraction ; p = probability ; ns = no significance. ** denotes significant difference (p<0.01) when compared with the slope between 20%MVC and 30%MVC in untrained group.

ずれの強度においても有意差は認められなかった。また、ランナー群および非鍛錬者群のそれぞれにおいても MVC 間に有意差は認められなかった。しかしながら、ランナー群では40%MVCまで直線的に増加しているのに対して、非鍛錬者群では30%MVCまでである。そこで、各MVC間を直線で結び、その直線の傾きを各群毎に求めた(表2)。ランナー群では20%–30%MVC間の傾きと30%–40%MVCの傾きに有意差は認められなかった。一方、非鍛錬者群では、30%–40%MVCの傾きは20%–30%MVCの傾きに比較して有意に小さかった (p<0.01)。

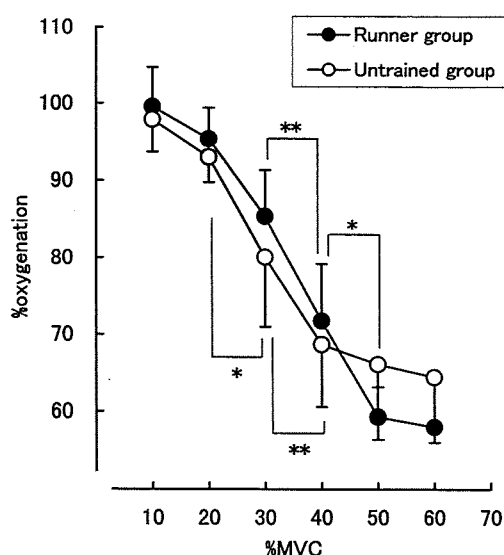


Fig. 4 Changes of %oxygenation at different exercise intensity in each group. * and ** denote significant difference (p<0.05 and p<0.01) when compared with values in each group. See abbreviation in table 2.

3. %oxygenation

図4は運動中の%oxygenationを各群の平均値で示したものである。各群とも強度の増加とともに%oxygenationは低下する傾向にある。同一のMVC間にはいずれの強度においても群間で有意差は認められなかったが、40%MVCまではランナー群が高く、それ以後はランナー群が低くなる傾向を示した。ランナー群の値についてみると、30%–40%MVC (p<0.01), 40%–50%MVC (p<0.05) へとそれぞれ有意に減少した。それに対して非鍛錬者群では、20%–30%MVC (p<0.05), 30%–40%MVC (p<0.01) にかけて有意に減少した。50%MVCから60%MVCまでは両群ともに減少は認められなかった。

IV. 考察

本研究において算出されたEX/RT ratioは、安静時に対する運動中の酸素消費の比率を示している。そして、安静中および運動直後に動脈血遮断を行なって求めていることから、血流量の影響を除いて考えることができる。図3に示したように、ランナー群のEX/RT ratioは非鍛錬者群と比較して、有意差は認められなかったものの、すべての強度で高い傾向であった。また、表2に示したように、ランナー群では20%–30%MVCと30%–40%MVCの傾きは等しかったが、非鍛錬者群では30%–40%MVCの傾きが20%–30%MVCの傾きに比較して有意に小さかった (p<0.01)。よって、ランナー群は40%MVCの強度までEX/RT ratioが直線的に増加しているのに対して、非鍛錬者群の増加は30%MVCまでと判断することができる。このことから、ランナー群はより高い強度まで酸素消費が増加していたと考えられる。

Hommaら¹⁷⁾は被検者に1分間に60回の掌握運動をMVCの5~30%の範囲で実施させ、NIRSによって算出した酸素消費指標と運動強度との関係を検討した。その結果、酸素消費指標は5~25%MVCまでは直線的に増加したが、30%MVCで

はそれ以上の増加が認められなかったことを報告している。また、Hamaoka ら⁹⁾は5名の被検者に4秒に1回の頻度で5分間の掌握運動を10~40%MVCの強度で実施させ、本研究で用いたのと同様な方法でEX/RT ratioを計算した。そして、すべての被検者に同一の安静時酸素消費速度 ($1.2\mu\text{M}\cdot\text{sec}^{-1}$) を乗じ、酸素消費速度と運動強度との関係を検討した。その結果、酸素消費速度は安静時から20%MVCまでは直線的に増加する傾向にあるが、30%MVC以降はその増加率が減少することを報告している。これら2つの先行研究^{9,17)}で用いられている被検者は特別なトレーニングを行っていない健康者である。よって、MVCで運動強度を評価した局所的な運動では、25~30%MVCで酸素消費が定常になり、それ以上の運動強度では無酸素性代謝によるエネルギー供給の貢献が増加してくるものと推察される。本研究の非鍛錬者群のEX/RT ratioは30%MVCまで直線的に増加し、それ以後60%MVCまでは減少する傾向を示した。この結果は先行研究^{9,17)}とほぼ一致するものである。しかしながら、ランナー群のEX/RT ratioは40%MVCまで直線的に増加しており、非鍛錬者群や先行研究^{9,17)}の結果よりも、より高い強度まで増加する傾向にある。このことは中・長距離ランナーの骨格筋はミトコンドリアの含有量が高く、エネルギーを有酸素的代謝によって供給する能力に優れていることに起因すると思われる。

Hamaoka ら⁹⁾は、EX/RT ratioに安静時におけるPCrの消費速度を6で除した値を乗じることによって、酸素消費速度を定量化する方法を提案している。この算出方法はATP再合成における関係式、 $3\text{ADP} + 3\text{Pi} + \text{NADH} + \text{H}^+ + 0.5\text{O}_2 = 3\text{ATP} + \text{NAD}^+ + \text{H}_2\text{O}$ から、 P/O_2 比が6であることを利用している。一般的に持久性トレーニングを行っている者は安静時におけるPCr消費速度が高い²⁰⁾。よって本研究で算出されたEX/RT ratioの値に各被検者におけるPCr/6の値を乗じることによって酸素消費速度を定量化すれば、両群間に明らかな差が認められる可能性が示唆される。

%oxygenationは酸素消費の絶対値を示すものではなく、酸素の供給と消費のバランスを示す指標である。そのため、%oxygenationの変化に対しては酸素消費の影響のみならず、血流量(酸素供給)の変化が大きく影響する。本研究で用いたような運動負荷形態における血流量の変化については明らかではない。1分間に60回の等張性グリップ運動をMVCの5%~30%まで実施させた研究¹⁷⁾によると、前腕の血流量は運動強度の増加にともない直線的に増加することが認められている。一定レベルの等尺性筋力発揮中の血流量については検討がなされている。一般的に筋力を%MVCで表した場合、血流量は30%MVCまでは増加するが、それ以後は低下して60~70%MVCでは完全に遮断されると考えられている²⁵⁾。しかしながら、本研究で用いたIKEEは一定の筋力発揮を5秒収縮・5秒弛緩のリズムで2分間実施するものであった。この場合、弛緩時には血流の還流が生じることから、60%MVCにおいても血流が完全に遮断されることはなかったであろう。また、40%MVC以降の強度においても、血流量の低下が生じたか否かは明らかでない。MVCが大きいと運動強度を相対値で評価しても実際の筋力発揮は大きくなり、血流が遮断されやすくなると言われている^{1,12)}。ランナー群と非鍛錬者群ではMVCに差がないことから(表1)、この影響については考慮する必要がないと思われる。

IKEE中の%oxygenationは強度の増加にともない低下を示し、ランナー群では50%MVCから、非鍛錬者群では40%MVCから定常状態となった(図4)。このような傾向については、桑森ら²²⁾もグリップ運動と手関節屈曲運動を用いた局所的な漸増負荷運動で同様な報告を行なっている。%oxygenationが低下を示すのは酸素消費が供給を上回り、定常を示すのは酸素消費と供給のバランスが保たれていると推察される。ランナー群の方が非鍛錬者群よりも酸素消費が供給を上回る強度が高いことは(各々40%MVCと30%MVC)、中・長距離ランナーの骨格筋の酸素利用能が高いことを反映していると考えられる。

ランナー群と非鍛錬者群の間でいずれの強度の %oxygenation にも有意差が認められなかったのは、ランナー群において血流量が高いレベルに維持されており、酸素供給が十分になされていたことによると思われる。ランナー群では20%MVCから30%MVCにかけて%oxygenationは有意に低下しなかったが、非鍛錬者群はすでに有意な低下が観察されている(図4)。この結果はランナー群の酸素供給能の高さを示唆している。組織の酸素分圧の低下は、ミトコンドリアの酸素利用能(最大呼吸速度)もしくは呼吸調節物質(NADH, ADPやPi等)への感受性の低下を生じ、その代謝的代償として増加する呼吸調節物質の増加が解糖系を亢進させることが報告されている^{14,15,21,24)}。酸素供給能が高ければ骨格筋の組織酸素分圧が高いレベルに維持されることから、中・長距離ランナーは運動強度が増加しても非鍛錬者に比較して有酸素的代謝が低下せず、無酸素的代謝が亢進し難いと考えられる。

V. 総括

NIRSを用いて持久性トレーニングを行っている中・長距離ランナー5名(ランナー群)と定期的に運動を行っていない健常者7名(非鍛錬者群)を被検者に、相対的に等しい等尺性脚伸展運動(IKEE)における外側広筋の筋酸素動態を比較した。結果は以下に示す通りである。

1. EX/RT ratio はいずれの強度においてもランナー群が非鍛錬者群よりも高値を示す傾向にあり、ランナー群では40%MVCまで、非鍛錬者群では30%MVCまで直線的な増加を示した。

2. 運動中の%oxygenationは40%MVCまではランナー群が非鍛錬者群よりも高い傾向あり、その後50, 60%MVCでは反対にランナー群の方が低くなる傾向を示した。

以上のことから、中・長距離ランナーは非鍛錬者と比較して、局所的な運動においても酸素の消費や供給が高く、エネルギーを有酸素的代謝によって多く供給していることが示唆された。

参考文献

- 1) Barnes, W.S. "The relationship between maximal isometric strength and intramuscular circulatory occlusion" *Ergonomics*, 23 : 351-357, 1986.
- 2) Chance, B., Dait, M.T., Zhang, C., Hamaoka, T. and Hagerman, F., "Recovery from exercise-induced desaturation in the quadriceps muscle of elite competitive rowers" *Am.J.Physiol.*, 262(31):766-775, 1992.
- 3) Colier, W.M.J.M., Meeuwssen, I.B.A.E., Degens, H. and Oeseburg B., "Determination of oxygen consumption in muscle during exercise using near infrared spectroscopy" *Acta.Anaesthesiol.Scand.*, 107 (39) : 151-155, 1995.
- 4) Costill, D.L., Fink, W.J. Flynn, M. and Kirwan, J. "Muscle fiber composition and enzyme activities in elite female distance runners" *Int.J.Sports Med.*, 8 : 103-106, 1987.
- 5) Fink, W.J., Costill, D.L. and Pollock, M.L. "Submaximal and maximal working capacity of elite distance runners. part II. muscle fiber composition and enzyme activities" *Ann.N.Y.Acad.Sci.*, 301 : 323-327, 1977.
- 6) Gollnick, P.D., Piehl, K. and Saltin, B. "Selective glycogen depletion pattern in human muscle fibers after exercise of varying intensity and at varying pedaling rates" *J.Physiol.*, 241 : 45-57, 1974.
- 7) Guthrie, B.M., Frostick, S.P., Goodman, J., Mikulis, D. J., Plyley, M.J. and Marshall, K.W. "Endurance-trained and untrained skeletal muscle bioenergetics observed with magnetic resonance spectroscopy" *Can.J.Appl. Physiol.*, 21 (4) : 251-263, 1976.
- 8) 浜岡 隆文, 岩根 久夫, 近赤外光を用いた局所筋酸素動態のモニタリング. *体育の科学*, 43 (5) : 365-368, 1993.
- 9) Hamaoka, T., Iwase, H., Shimomitu, T., katsumata, T., Murase, N., Nishio, S, Osada, T., Kurosawa, Y. and Chance, B., "Noninvasive measures of oxidative metabolism on working human muscle by near-infrared spectroscopy" *J. Appl. Physiol.*, 81 (3) : 1410-

- 1417, 1996.
- 10) Hamaoka, T., Mizuno, M., Osada, T., Ratkevicius, A., Nielsen, A.N., Nakagawa, Y., Katsumura, T., Shimomitsu, T. and Quistorff, B. "Changes in oxygenation and phosphocreatine during exercise and recovery in relation to fiber types and capillary supply in human skeletal muscle" *SPIE.*, 3194 : 478-484, 1997.
 - 11) Hartling, O.J., Kelbaek, H., Gjørup, T., Schibye, B., Klausen, K. and Trap-Jensen, K. "Forearm oxygen uptake during maximal forearm dynamic exercise" *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, 58 : 466-470, 1989.
 - 12) Heyward, V.H. "Influence of static strength and intramuscular occlusion on submaximal static muscle endurance" *Res. Quart.*, 46 : 393-402, 1975.
 - 13) Hicks, A., McGill, S. and Hughson, R. L., "Tissue oxygenation by near-infrared spectroscopy and muscle blood flow during isometric contractions of the forearm" *Can. J. Appl. Physiol.*, 24(3) : 216-230, 1999.
 - 14) Hogan, M.C., Arthur, P.G., Bebout, D.E., Hochachka, P. W. and Wagner, P.D., "Role of O₂ in regulating tissue respiration in dog muscle working in situ" *J. Appl. Physiol.*, 73 : 728-736, 1992.
 - 15) Hogan, M.C., Nioka, S., Brechue, W.F. and Chance, B., "A³¹P-NMR study of tissue respiration in working dog muscle during reduced O₂ delivery conditions" *J. Appl. Physiol.*, 73 : 1662-1670, 1992.
 - 16) 本間 幸子, 藤井 宣晴, 江田 英雄, 池上 晴夫, 健康増進のための至適運動強度の評価—活動筋における酸素の供給と消費のバランスからの検討— *体力研究.*, 85 : 96-106, 1994.
 - 17) Homma, S., Eda, H., Ogasawara, S. and Kagaya, A., "Near-infrared estimation of O₂ supply and consumption in forearm muscles working at varying intensity" *J. Apply. Physiol.*, 80(4) : 1279-1284, 1996.
 - 18) Johansson, C., Lorentzon, R., Sjöström, M., Fagerlund, M. and Fugl-Meyer, A.R. "Sprinters and marathon runners. Does isokinetic knee extensor performance reflect muscle size and structure?" *Acta. Physiol. Scand.*, 130 : 663-669, 1987.
 - 19) Joyner, M.J., Nauss, L.A., Warner, M.A. and Warner, D.O. "Sympathetic modulation of blood flow and O₂ uptake in rhythmically contracting human forearm muscles" *Am. J. Physiol.*, 32 : 1078-1083, 1992.
 - 20) 勝田 茂, 運動生理学20講 朝倉書店, 6-29, 1993.
 - 21) Katz, A. and Sahlin, K. "Effect of decreased oxygen availability on NADH and lactate contents in human skeletal muscle during exercise" *Acta. Physiol. Scand.*, 131 : 119-127, 1987.
 - 22) 桑森真介, 岩根久夫, 浜岡隆文, 村瀬訓生, 黒澤裕子, 前腕の運動時における活動筋の酸素化ヘモグロビン・ミオグロビン濃度およびリン酸化合物濃度と細胞内pHとの関係 *体力科学*, 44 : 465-474, 1995.
 - 23) Rusko, H., Havu, M. and Karvinen, E. "Aerobic performance capacity in athletes" *Eur. J. Appl. Physiol.*, 38 : 151-159, 1978.
 - 24) Sahlin, K., Katz, A. and Henriksson, J. "Redox state and lactate accumulation in human skeletal muscle during dynamic exercise" *Biochem. J.*, 245 : 551-556, 1987.
 - 25) 山田 茂, 福永 哲夫, 骨格筋—運動による機能と形態の変化— *NAP Limited*, 63-84, 1997.