

腕運動によって脂肪は燃焼するか？ —運動時間と強度からみた腕運動中の代謝特性—

九州芸術工科大学 村 木 里 志
(共同研究者) 県立長崎 シーボルト大学 網 分 憲 明

Does the Arm Exercise Promote Lipid Utilization? -Effects of Exercise Intensity and Duration on Metabolism During Arm Exercise-

by

Satoshi Muraki

*Department of Ergonomics
Kyushu Institute of Design*

Noriaki Tsunawake

*Department of Nutrition and Health Sciences,
Siebold University of Nagasaki*

ABSTRACT

The present study investigated the difference in metabolic responses to exercise intensity and duration between arm cranking and leg cycling, to clarify the effectiveness of arm exercise in fat combustion. During each experiment, oxygen uptake ($\dot{V}O_2$) and respiratory exchange ratio (RER) were monitored. Near-infrared spectroscopy was used to measure changes in muscle deoxygenation in the triceps during arm cranking as well as in the vastus lateralis during leg cycling. (Experiment 1) Twenty-seven females completed incremental arm cranking and leg cycling tests. During arm cranking, there was a rapid increase in the RER, and a lower lactate threshold, as compared with leg cycling. In addition, muscle deoxygenation during arm cranking rose up to the middle of $\dot{V}O_2$ peak (mean 51.4%). These results suggest that the oxygen demand in the triceps reached a maximum. (Experiment 2) Ten females performed three-intermittent 10-min arm cranking and leg

cycling sessions at 20, 40, and 60% of the mode-specific maximal workload. RER at steady state was significantly higher during arm cranking than during leg cycling at all intensities. (Experiment 3) Four females performed 60-min arm cranking and leg cycling at 40% of the mode-specific \dot{V}_{O_2} peak. Both modes showed similar response for RER, namely, gradual decrease from the 10-15th min until the end of exercise. At the beginning of arm cranking, however, temporary increase in RER and promotion of muscle deoxygenation were observed. In conclusion, the results of the present study suggest that anaerobic glycolytic metabolism is easily promoted during arm exercise, compared with leg cycling, especially at the beginning of exercise.

要 旨

本研究は、アームクランキング運動 (AC) と脚サイクリング運動 (LC) 中の運動強度および運動時間に対する代謝応答の違いを明らかにし、腕運動の脂肪燃焼の有効性を検証することを目的とした。各実験において、酸素摂取量 (\dot{V}_{O_2}) および呼吸交換比 (RER) を測定した。また、近赤外分光法により主動筋の組織酸素飽和度 (S_dO_2) を評価した。<実験1> 27名の女子に AC および LC を漸増負荷法により実施した。AC は急激な RER の上昇および低い換気性閾値を示した。さらに、AC の主動筋の S_dO_2 は最高 \dot{V}_{O_2} (\dot{V}_{O_2} peak) の約 50% の強度で止まった。このことは、AC 運動の主動筋の酸素取り込み能力が速く最大に達したことを示唆している。<実験2> 10名の女子に、両運動を3つの最大下負荷 (最高作業負荷の 20, 40, 60%, 各 10 分間) で実施させた。RER はどの運動強度においても腕運動の方が有意な高い値を示した。<実験3> 4名の女子に、両運動を 40% \dot{V}_{O_2} peak の強度で 60 分間実施させた。両運動とも運動時間が長くなるにつれて RER は低下し、主動筋の S_dO_2 は上昇した。以上の結果より、腕運動は脚運動に比べ、同じ相対強度でも脂肪燃焼が低い、長時間継続することにより脂肪燃焼が促進することが示唆された。

緒 言

肥満の解消や予防には、動的な運動によって脂肪を燃焼させることが効果的とされている。その動的な運動は動員される筋群によって異なった生理応答を示す^{7,10)}。代謝面では、腕運動は脚運動に比べ、呼吸交換比 (RER) が高く^{6,12)}、乳酸性閾値が低い^{2,3,11)} ことが報告されている。このことは、腕運動は無酸素性代謝が優位になりやすいことを示唆しており、脂肪燃焼に向いていないことになる。

一方、下肢にけがや障害を持つ者は、腕運動によって脂肪燃焼を試みなければいけない。これまでの先行研究から、腕運動は無酸素性代謝が優位になりやすいことは事実であろう。しかしながら、腕運動の運動強度や運動時間の違いによる代謝応答への影響については報告が少なく、これらの違いによって脂肪燃焼が促進する可能性は残っている。また、無酸素性代謝が優位になる原因は明らかではなく、その解明によって、脂肪燃焼を促進させる工夫を見出すこともできるかもしれない。

そこで、本研究は腕運動と脚運動の運動強度および運動時間に対する代謝応答の違いを明らかにし、腕運動の脂肪燃焼の有効性を検証した。また、腕運動時の筋内酸素動態を評価することにより、無酸素性代謝が優位になる原因について検討した。

1. 方法

1.1 被験者

健康な大学生女子31名を対象とした。年齢は18～22歳であった。被験者にはあらかじめ、研究の目的、内容および危険性等を説明し、実験参加の同意書を得た。

1.2 運動負荷

腕運動には腕クランキングエルゴメーター (Lode社製, Angio) による腕クランキング (AC) 運動, 脚運動には自転車エルゴメーター (Lode社製, Excalibur) による脚サイクリング (LC) 運動を用いた。回転数は両運動とも同じ毎分60回転 (rpm) とした。AC運動は座位状態で行い, 肩の高さが, エルゴメーターのクランクの支点と平行となるように椅子の高さを調整した。また, 腕が伸びるときには肘がわずかに曲がるよう椅子の位置を調整した。LC運動では, ペダルが最も下に位置したときに, 膝がわずかに曲がるようシートの高さを調整した。

被験者の服装は, 上半身は半袖シャツ, 下半身はハーフパンツとした。実験室の気温および相対湿度はそれぞれ22～25℃および40～60%に設定した。なお, 後述する各運動負荷テストは少なくとも24時間以上の間隔を空けて実施した。

1.3 実験手順

(実験1)

ランプ負荷法によるAC運動およびLC運動を実施した。運動負荷は始め0Wとし, AC運動で毎分+5～10W, LC運動で+7W～20Wの範囲で増加させ, 疲労困憊に達するまで実施させた。負荷の増加率は10～15分間で疲労困憊に達するよう, 被験者の体重や身体活動状況を参考に調整した。運動終了の判定は回転数が40rpmを下回った時点とした。本運動負荷テストより, AC運

動およびLC運動それぞれの最高酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2peak}$) および最高作業負荷 (W_{max}), ならびにV-slope法¹⁾による換気性閾値を求めた。なお, 被験者31名のうち27名を分析対象とした。

(実験2)

実験1に参加した被験者のうち10名を対象とした。被験者は最大下負荷によるAC運動およびLC運動を実施した。10分間の座位安静状態の測定後, 3つの運動負荷をそれぞれ10分間ずつ実施した。運動負荷は実験1で得られた W_{max} の20, 40, 60%とし, 低強度から試行した。各試行の間隔は少なくとも10分以上とした。

(実験3)

実験1に参加した被験者のうち4名を対象とした。被験者はAC運動およびLC運動を40% $\dot{V}O_{2peak}$ に相当する運動負荷でそれぞれ60分間ずつ実施した。運動開始時の負荷を0Wとし, ランプ負荷法により負荷を上昇させ, 10分間で定められた40% $\dot{V}O_{2peak}$ の負荷に到達するように調整した。その後の50分間は40% $\dot{V}O_{2peak}$ の負荷に設定した。

1.4 測定項目

安静時および運動時にbreath by breath法による呼吸代謝装置 (Sensor Medics社製, $V_{max}29c$) により酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) および呼吸交換比 (RER) 等を測定した。

実験1および3において, 近赤外線酸素モニタ (島津製作所, OM-200) を用い, 主動筋の酸化ヘモグロビン/ミオグロビン量 (oxyHb/Mb), 脱酸化ヘモグロビン/ミオグロビン量 (deoxyHb/Mb) および両者を足した総ヘモグロビン/ミオグロビン量 (totalHb/Mb) を1秒ごとに測定した (単位はarbitrary units)。totalHb/Mbに占めるoxyHb/Mbの割合を組織酸素飽和度 (SdO_2) とした。AC運

動時には上腕三頭筋, LC運動時には外側広筋の皮膚表面上にプローブを装着した。

1. 5 統計分析

各測定項目とも必要に応じて, 10秒, 1分, 2分ごとの平均値を求めた。AC運動とLC運動のRERの比較には, 実験デザインに応じてpaired t-testもしくは繰り返しのある二要因(運動様式×運動時間もしくは運動強度)の分散分析を用いた。分散分析の結果, 有意性が認められた場合は下位検定としてTukey's HSD検定を行った。また, oxyHb/Mb, deoxyHb/Mb, totalHb/Mbおよび S_dO_2 において, 各運動の安静時と運動時のみの比較には繰り返しのあるWilcoxonの順位和検定を用いた。有意水準は5%未満とした。

2. 結果

(実験1)

AC運動およびLC運動の $\dot{V}O_{2peak}$ はそれぞれ, $1.74 \pm 0.52 \cdot \text{min}^{-1}$ および $2.47 \pm 0.52 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$, 換気性閾値は $\dot{V}O_{2peak}$ のそれぞれ $36.8 \pm 6.7\%$ および $41.2 \pm 7.7\%$ であり, 両項目とも有意な差が認められた。図1に $\% \dot{V}O_{2peak}$ に対するRERの変化を示した。AC運動はLC運動に比べ, 低強度から高いRERを示し, $75\% \dot{V}O_{2peak}$ 以下では有意な差がみられた。

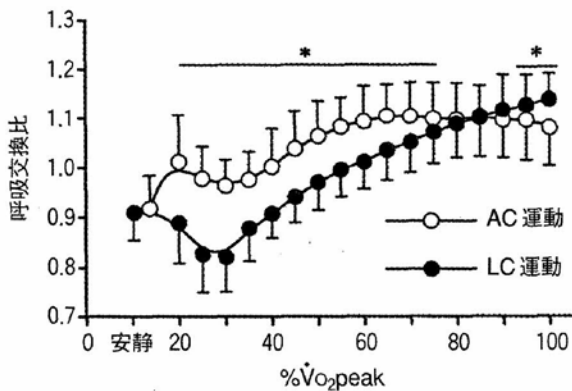


図1 漸増負荷による腕クランキング (AC) および脚サイクリング (LC) 運動中の $\% \dot{V}O_{2peak}$ に対する呼吸交換比の変化。* $p < 0.05$; LC運動との有意差

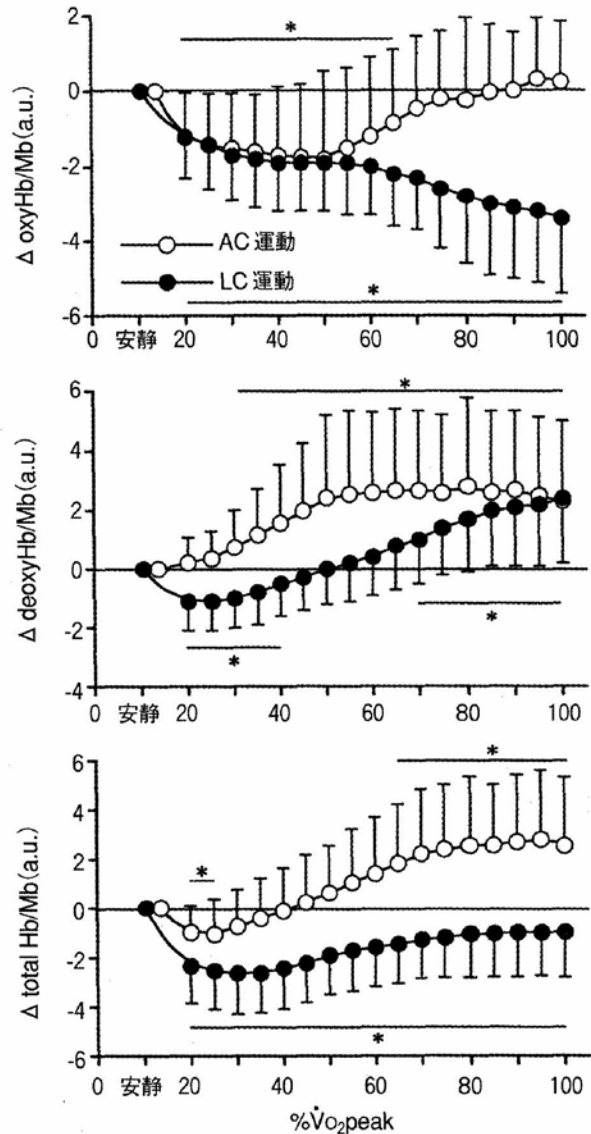


図2 漸増負荷による腕クランキング (AC) および脚サイクリング (LC) 運動中の $\% \dot{V}O_{2peak}$ に対する主動筋のoxyHb/Mb, deoxyHb/MbおよびtotalHb/Mbの変化。値は安静値からの増減であり, 単位はarbitrary units。* $p < 0.05$; 安静時との有意差

図2には主動筋のoxyHb/Mb, deoxyHb/MbおよびtotalHb/Mbの変化を示した。LC運動は負荷が上昇するにつれてoxyHb/Mbが低下し, deoxyHb/Mbが増加する傾向がみられた。しかし, AC運動では $50\% \dot{V}O_{2peak}$ あたりから, totalHb/Mbが増加しているにもかかわらず, それまで減少していたoxyHb/Mbが逆に増加し始め, その結果 S_dO_2 の低下が止まった(図3)。

(実験2)

AC運動はLC運動に比べ, 運動開始後RERが

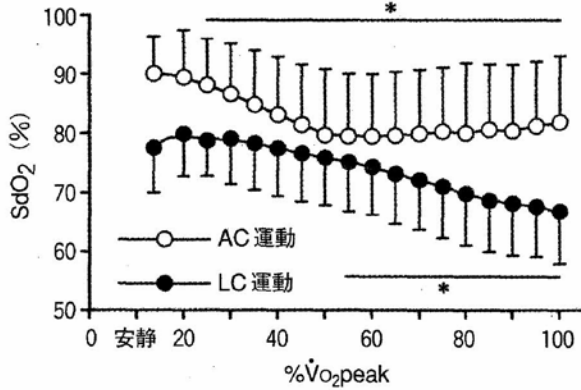


図3 漸増負荷による腕クランキング (AC) および脚サイクリング (LC) 運動中の $\% \dot{V}O_{2peak}$ に対する主動筋の組織酸素飽和度 (SdO_2) の変化. * $p<0.05$; 安静時との有意差

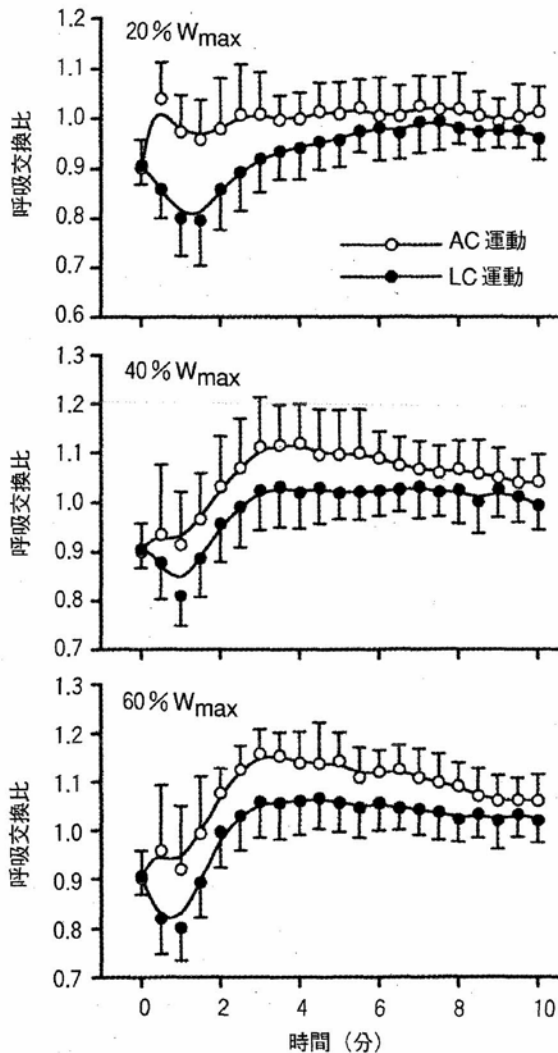


図4 3つの最大下負荷による腕クランキング (AC) および脚サイクリング (LC) 運動中の呼吸交換比の変化. 各運動負荷とも運動終了前5分間の呼吸交換比は運動様式間に有意差が認められた ($p<0.05$).

高くなる傾向がみられた. 両運動とも RER は, 図4のようにどの運動負荷においても運動開始5分目までには定常状態に達した. 5分目から運動終了時までの RER の平均値を運動様式間で比較すると, どの運動負荷においても腕運動のほうが有意に高くなった.

(実験3)

図5に60分間の運動中の RER の変化を示した. LC 運動の場合, 始めの10分間は運動強度の上昇に伴い, RER も増加する傾向が観察された. その後は, 運動時間が長くなるにつれて減少した. 一方, AC 運動は始めの数分に一時的上昇を示し, その後はほぼ LC 運動と同様の変化を示した. SdO_2 の変化をみると, 両運動とも運動時間が長くなるにつれて上昇した (図6). ただし, AC 運動は LC 運動と異なり, 運動開始15分間は低下す

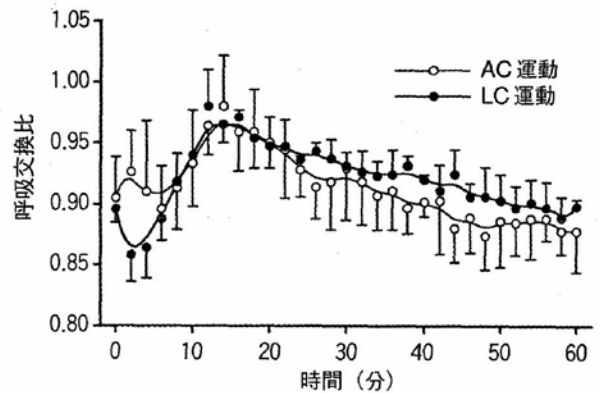


図5 60分間の長時間にわたる腕クランキング (AC) および脚サイクリング (LC) 運動中の呼吸交換比の変化

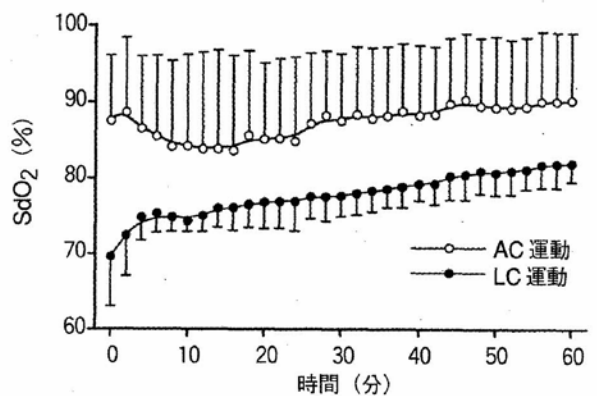


図6 60分間の長時間にわたる腕クランキング (AC) および脚サイクリング (LC) 運動中の主動筋の組織酸素飽和度 (SdO_2) の変化

る傾向がみられた。totalHb/Mbは両運動とも、運動時間が長くなるにつれて緩やかに上昇した。

3. 考 察

3. 1 運動強度の影響

AC運動の $\dot{V}O_2\text{peak}$ はLC運動の $\dot{V}O_2\text{peak}$ の約70%に相当し、ほぼ先行研究と一致した^{8,10,12)}。この差は主に運動時に動員される筋量の違いによるものと考えられている。この影響を除くため、最大下運動の運動様式間の比較には、相対強度である $\% \dot{V}O_2\text{peak}$ もしくは $\%W_{\text{max}}$ を用いた。

本研究では血中乳酸濃度を直接測定していないが、AC運動はLC運動に比べ換気性作業閾値は有意に低くなり、先行研究と一致した^{2,3,11)}。また、RERも同じ $\% \dot{V}O_2\text{peak}$ で比較しても、腕運動の方が高くなった。AC運動のRERの特徴として、運動強度が低い段階から高値になりやすく、容易に1.0を超える傾向がみられた。1.0を超えることは、過剰に二酸化炭素を排出していることとなり、これは乳酸産生により血中に排出される H^+ イオンを緩衝するために起こると言われている¹³⁾。このように本研究の結果は、腕運動では同じ相対強度であっても無酸素性代謝が優位になりやすいことを支持した。

腕運動が無酸素性になりやすい原因として、活動筋への酸素供給不足が考えられる。しかし、AC運動はLC運動と違い、約50%前後で S_dO_2 の低下が止まった。さらに、totalHb/Mbが増加しているにもかかわらず、oxyHb/Mbはそれまで低下していたのが、逆に上昇する傾向がみられた。このことから、活動筋への酸素供給が不足しているのではなく、活動筋自体の酸素の取り込みが限界に達したとみなす方が適当であろう。また、言い換えれば上腕三頭筋は酸素取り込み能力が低いとも言える。その原因としては、筋線維組成の違いがあげられる。AC運動の主動筋である上腕三頭筋は、LC運動の主動筋である外側広筋より速筋

線維の割合が高く^{4,9)}、毛細血管が発達していない⁷⁾。以上のことより、腕運動は酸素供給に関係なく、無酸素性代謝が優位になりやすい特性を持っていると示唆される。

3. 2 運動時間の影響

3つの実験の全てにおいて、腕運動は運動開始時にRERが増加しやすい傾向がみられた。腕運動は脚運動に比べて $\dot{V}O_2$ の立ち上がりが遅く⁵⁾、主動筋への酸素供給速度が遅いことも考えられる。また、運動開始時に S_dO_2 の低下も観察されることから、一見酸素不足が無酸素代謝を優位にしていると解釈される。しかし、前述したように、上腕三頭筋は酸素取り込み能力自体が低く、 S_dO_2 の低下は筋の酸素消費が促進したとは考えがたい。もし、運動開始時に多くの酸素を消費するのなら、 $\dot{V}O_2$ の立ち上がりは速く、RERは容易に1.0を超えないと思われる。 S_dO_2 の低下がみられたのは、無酸素性代謝の促進による血中のpHの低下により、ヘモグロビンの酸素親和性が減少したことが原因であると考えられる。このように腕運動は運動開始時に無酸素性代謝が速く活性化する特性をもっていると示唆される。

一方、AC運動を長時間実施すると、RERは低下し、脚運動と同様の生理応答を示した。RERの上昇が抑えられた原因は、totalHb/Mbが増加しているように血流量が増大し、無酸素性代謝によって放出された H^+ イオンや乳酸が除去されたことが考えられる。また、脚運動と同じように、有酸素性代謝のエネルギー源が糖質から脂質へ移行したことも大きな要因であろう。腕運動も長時間継続することにより、脂肪燃焼が促進されることが示された。しかし、腕運動は活動筋量が小さいため、エネルギー消費量が多くなく、脂肪燃焼の割合が高くなっても、その量は必ずしも多くなならない。その点も考慮した上で、脂肪燃焼の効果を見極めるべきである。

3. 3 腕運動と脂肪燃焼

腕運動が中心となる運動種目に車椅子スポーツがある。山崎ら¹⁴⁾によると、長時間のトレーニングを要する車椅子マラソン選手でさえも残存部位の皮下脂肪厚の減少は認められないことを報告している。車椅子マラソンを含め、車椅子スポーツ種目の多くは瞬発的な筋収縮発揮の要素が強く、特に球技系スポーツは運動が中断しやすい。そのため、本研究の結果に基づくと、車椅子スポーツは脂肪燃焼に向いていないことになる。運動強度を調節できる運動負荷装置には、本研究で用いた腕エルゴメーターがあるが、現在のところ普及していない。仮に車椅子生活者であるならば、車椅子を中強度の筋収縮で長時間こぐような運動が脂肪燃焼に効果的なものかもしれない。車椅子生活者が手軽に脂肪燃焼に取り組める運動種目の開発が望まれる。

4. まとめ

本研究の結果、腕運動は脚運動と比べ、同じ相対強度でも無酸素性代謝が優位になりやすく、特に運動開始時にその傾向が高いことが示された。しかしながら、腕運動を長時間継続するとエネルギー源が糖質から脂質への移行することも示唆された。

文 献

- 1) Beaver W., Wasserman K., Whipp B.; A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange., *J. Appl. Physiol.*, 60, 2020-2027 (1986)
- 2) Bevegård S., Freyschuss U., Strandell T.; Circulatory adaptation to arm and leg exercise in supine and sitting position., *J. Appl. Physiol.*, 21, 37-46 (1966)
- 3) Davis J.A., Vodak P., Wilmore J.H., Vodak J., Kurtz P.; Anaerobic threshold and maximal aerobic power for three modes of exercise., *J. Appl. Physiol.*, 41, 544-550 (1976)
- 4) Johnson, M.A., Polgard J., Weightman D., Appleton D.; Data on the distribution of fibre types in thirty-six human muscles. An autopsy Study., *J. Neurological Sci.*, 18, 111-129 (1976)
- 5) Koga S., Shirojiri T., Shibasaki M., Fukuba Y., Fukuoka Y., Kondo N.; Kinetics of oxygen uptake and cardiac output at onset of arm exercise., *Respir. Physiol.*, 103, 195-202 (1996)
- 6) Louhevaara V., Sovijärvi A., Ilmarinen J., Teräslinna P.; Differences in cardiorespiratory responses during and after arm crank and cycle exercise., *Acta Physiol. Scand.*, 138, 133-143 (1990)
- 7) Pendergast D.R.; Cardiovascular, respiratory, and metabolic responses to upper body exercise., *Med. Sci. Sports Exerc.*, 21, S121-S125 (1989)
- 8) Reybrouck T., Heigenhauser G.F., Faulkner J.A., Limitations to maximum oxygen uptake in arm, leg and combined arm-leg ergometry., *J. Appl. Physiol.*, 38, 774-779 (1975)
- 9) Saltin B., Henrikson J., Nygaard E., Andersen P.; Fiber type and metabolic potentials of skeletal muscles in sedentary man and endurance runners., *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, 301, 3-29 (1977)
- 10) Sawka M.N.; Physiology of upper body exercise. *Exerc. Sports Sci. Rev.*, 14, 175-211 (1986)
- 11) Schneider D.A., McLellan T.M., Gass G.C.; Plasma catecholamine and blood lactate responses to incremental arm and leg exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 32, 608-613 (2000)
- 12) Stenberg J., Åstrand P.O., Ekblom B., Royce J., Saltin B.; Hemodynamic responses to work with different muscle groups, sitting and supine. *J. Appl. Physiol.*, 22, 61-70 (1967)
- 13) Wasserman K., Beaver W.L., Whipp B.J.; Gas exchange theory and the lactic acidosis (anaerobic) threshold. *Circulation*. 81 (Suppl II), 14-30 (1990)
- 14) 山崎昌廣, 江原喜人, 村木里志; 中高年齢脊髄損傷者の皮下脂肪厚に及ぼす車椅子スポーツ活動の影響. *デサントスポーツ科学*, 17, 161-168 (1996)