

組織酸素レベルと筋線維動員パターンから見た 血流制限と筋収縮活動の関連性

電気通信大学 狩野 豊
(共同研究者) 同 水戸 和幸

The Relationship Between a Muscle Fiber Recruitment Pattern and a Tissue Oxygenation Level on Isometric Contractions with Vascular Occlusion

by

Yutaka Kano

*Department of Applied Physics and Chemistry,
University of Electro-Communications*

Kazuyuki Mito

*Department of Systems Engineering,
University of Electro-Communications*

ABSTRACT

This study examined how muscle ischemia influence tissue oxygen kinetics and a recruitment pattern of muscle fiber in the same intramuscular distal and proximal part of *vastus lateralis*. We measured changes in near-infrared spectroscopy (NIRS) and in surface EMG during knee extension movement at 10, 30 and 50%MVC in cuff ischemia and non-cuff ischemia conditions. Four adult male subjects were examined. Deoxygenation during knee extension was higher in distal part than in proximal part at 10%MVC with and without cuff ischemia. Cuff ischemia during muscle contraction influences tissue oxygen kinetics, but a recruitment pattern of muscle fiber is not necessarily influenced.

要 旨

本研究は、同一筋内の遠位部と近位部において、酸素レベルと筋線維の動員パターンがカフ阻血による外的な血流制限によってどのように変化するかを明らかにすることを目的とした。成人男性4名を対象として、10%、30%、50%MVCの膝伸展運動中の表面筋電図および組織酸素動態を外側広筋の遠位部と近位部で調べ、大腿部のカフ阻血条件と非カフ阻血条件で比較した。その結果、カフ阻血運動および非カフ阻血運動において、外側広筋の遠位部は近位部に比べ血液供給能力の制限をうけやすいことが低強度条件下（10%MVC）で明らかになった。また、筋収縮中のカフ阻血は、組織酸素動態に影響するものの、筋線維の動員パターンには必ずしも影響しないことが示された。

緒 言

近年、加圧トレーニングとよばれる血流制限下の筋収縮負荷が筋力トレーニングの有効な方法として注目されている^{1, 3, 5, 8)}。これまでの研究では、低酸素と筋収縮によるメカニカルなストレスの組み合わせがIGF-Iなどの細胞成長因子の発現を高め^{12, 13)}、骨格筋成長の抑制的調節因子であるミオスタチンの発現を低下させる⁶⁾ことが明らかとなっている。このような運動負荷方法はスポーツ選手のトレーニングのみならず、高齢者や廃用性筋萎縮をともなう患者におけるリハビリテーションとしてもその応用が期待されている。

本研究は血流制限下の筋収縮における生理学的な特性を明らかにするために、同一筋内での筋線維の動員パターンと組織酸素レベルの関連性に着目した。これまで同一筋内において、筋収縮中の血流分布や酸素消費などに不均一性があることが指摘されている¹¹⁾。また、筋酸素消費動態は運動単位の動員パターンと連動することが報告されている^{4, 9)}。したがって、筋収縮活動中の血流分

布や酸素消費不均一性は筋線維の動員パターンが関連していると考えられる。加圧トレーニングのような血流制限下の運動を実施した場合、組織酸素分布が通常とは異なるため、それに起因して筋線維の動員パターンも変化することが予想される。しかしながら、同一筋内の酸素レベルと筋線維の動員パターンが血流制限によってどのように変動するかについては明らかにされていない。

そこで本研究は、同一筋内の遠位部と近位部において、酸素レベルと筋線維の動員パターンがカフ阻血による外的な血流制限によってどのように変化するかを明らかにすることを目的とした。本研究の仮説は以下の通りである。非カフ阻血運動では、同一筋内において遠位部は近位部に比べて血管抵抗が高いため、血液供給能力の制限をうけやすく、一定張力発揮時の筋線維の動員パターンに部位差が生じる。しかしながら、カフ阻血時の運動では、血液供給の不均一性は生じないため、部位による筋線維動員パターンの違いは消失する。

1. 方 法

1. 1 被験者と実験プロトコール

被験者は、健常成人男性4名（年齢：27.3 ± 6.8歳，身長：175.0 ± 7.6cm，体重：67.8 ± 9.0kg，体脂肪率：14.2 ± 0.5%）であった。被験者には予め実験の趣旨を伝え、参加の同意を得た。各被験者は座位（竹井機器工業，TKK5710m）で膝関節120°の等尺性膝伸展運動において、最大発揮張力（MVC）を測定した。その後、10%MVC、30%MVC、50%MVCの張力発揮を60秒間維持する運動を大腿部のカフ阻血条件（VC+OCC）と非阻血条件（VC）とで実施した。この時のカフ圧は250mmHgとし、張力発揮中はカフ圧を継続してモニターすることで、この値を維持した。また、被験者に対しては、実際の張力発揮値をデジタル表示し、設定値のレベルを維持するように指示した。なお、6パターンの運動実施は15分間以

上の間隔を置いてランダムに実施した。膝伸展運動中の大腿部には、表面チャンネルアレイ電極(6チャンネル)、近赤外線分光プローブをそれぞれ近位部(大腿骨長に対して大転子より30%部位: Proximal)と遠位部(70%部位: Distal)に置き、サージカルテープで固定した。

1. 2 筋線維動員パターンの評価

表面多チャンネルアレイ電極によって、活動電位を記録し、筋線維動員パターン(積分値:iEMG, 周波数:MDF)を調べた。遠位部と近位部に6チャンネルアレイ電極を筋線維方向に沿って置いた。各パラメータは5秒ごとに抽出し、フーリエ変換プログラムによって算出した。

1. 3 筋組織酸素レベルの評価

組織の酸素レベル(ヘモグロビン・ミオグロビンの酸素飽和度)の評価には、近赤外線分光法(Near-Infrared Spectroscopy: NIRS, HAMAMATSU, NIRO-300)を用いた。組織酸素動態は最大脱酸素化レベルに対する相対的な変化量で評価した。安静状態においてカフ圧を230mmHg以上に設定し、筋酸素動態が一定になるまで4-5分間の阻血状態を維持した。このとき得られた脱酸素化ヘモグロビン・ミオグロビン(deoxy-Hb/Mb)値の30秒間を平均し、その値を100% deoxy-Hb/Mbと定義した。各運動プロトコールで行われたNIRS測定値の動態を指数関数モデルに置き(図1)、脱酸素化の相対的変化量(Relative deoxygenation)と時定数(Tau)を求めた。

1. 4 統計処理

得られたデータの統計処理にはprism 4.0を用いた。各パラメータ間の比較には2要因の分散分析(ANOVA)を用いた。有意水準は $P<0.05$ とした。

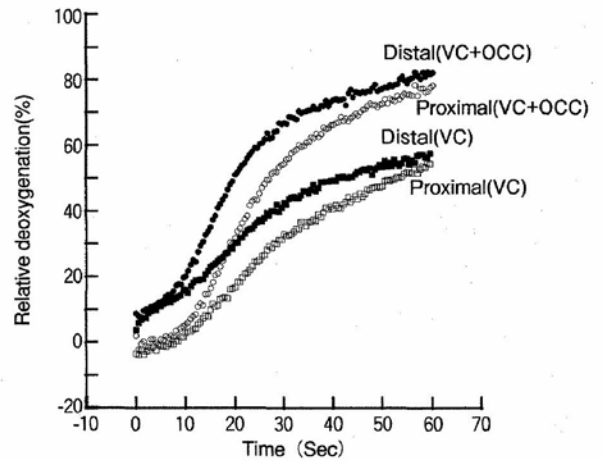


図1 10%MVCにおける近位部(Proximal)と遠位部(Distal)の脱酸素動態(Relative deoxygenation) VC(随意筋力発揮) VC+OCC(随意筋力発揮+カフ阻血)

2. 結果

2. 1 膝伸展運動時の平均発揮張力とカフ圧の変化

10%, 30%, 50%MVCを設定値として、膝伸展運動を実施した結果、実際の60秒間平均発揮張力はそれぞれ非カフ阻血時11.0%, 32.2%, 54.6%MVC, カフ阻血時11.2%, 32.2%, 54.2%MVCであった。また、筋収縮中のカフ圧は、10%, 30%, 50%MVC時で平均241, 251, 283mmHgであった。

2. 2 組織酸素パラメータの変化

図1には10%MVCにおける脱酸素化ヘモグロビン/ミオグロビンの動態を示した。この動態を指数関数モデルにフィットさせ、振幅(図2)と時定数(図3)の平均値をまとめた。その結果、振幅では10%MVCと30%MVCにおいて、カフ阻血条件下での運動が非カフ阻血条件より有意(10%MVC: $p<0.01$, 30%MVC: $p<0.05$)に高値を示した。一方、50%MVCではカフ阻血による影響は統計的には差がなかった。時定数はすべての強度において、カフ阻血の影響がなかった。しかしながら、10%MVCでは測定部位による差が認められ、遠位部の時定数は近位部より有意

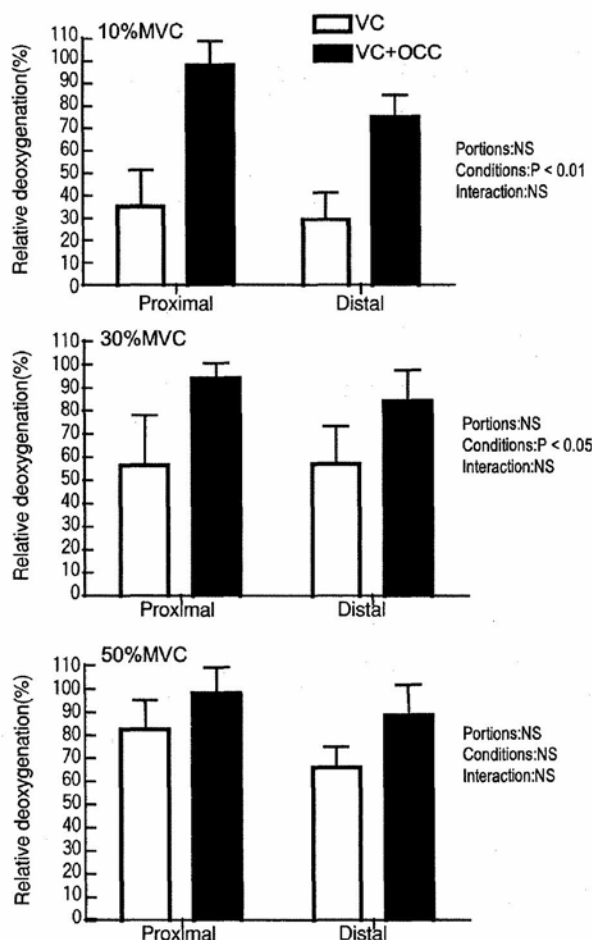


図2 運動時の最大脱酸素化 (Relative deoxygenation) レベルの比較
VC (随意筋力発揮) VC+OCC (随意筋力発揮+カフ阻血)

($p < 0.01$) に遅延した。

2. 3 表面筋電図パラメータの変化

図4には5秒毎の積分筋電図 (iEMG) の変動を示した。運動中のiEMGは強度の増加とともに増加した。カフ阻血の有無にかかわらず、10%MVCでは運動中のその値に大きな変動は見られなかった (図4, 上段)。30%MVCでは運動継続の40秒後の付近から5秒間の平均値が増加する傾向にあった (図4, 中段)。50%MVCにおいても運動開始から40秒付近から平均iEMG値が増加する傾向があり、それはカフ阻血条件下で大きく、とくに遠位部で顕著であった (図4, 下段)。iEMGと同様にMDFの変動を図5に示した。10%MVCでは時間経過にともなうMDFの変動は

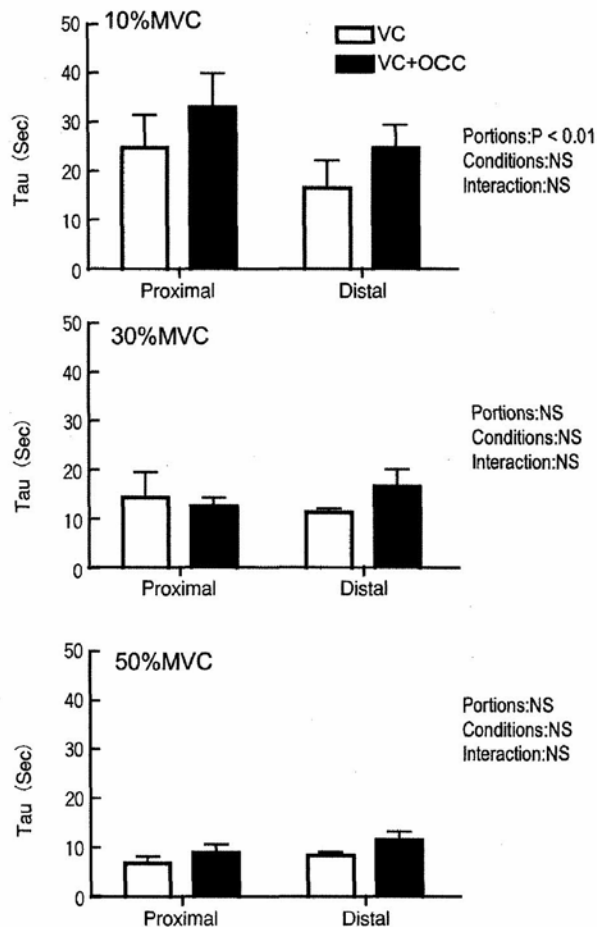


図3 運動時の脱酸素化 (Relative deoxygenation) 時定数の比較
VC (随意筋力発揮) VC+OCC (随意筋力発揮+カフ阻血)

みられなかった。ところが、30%MVCと50%MVCでは部位やカフ阻血に関わらず、時間経過とともにMDFが低下する傾向が認められた。

3. 考 察

3. 1 低強度収縮 (10%MVC) における組織酸素動態

本研究は10%MVC程度の低強度負荷において、非カフ阻血ならびにカフ阻血時の遠位部と近位部による組織酸素動態が異なることを示した。これはiEMGならびにMDF値に部位差がなかったことから、筋線維の動員パターンの違いによるものではないことが考えられる。Mizunoら¹¹⁾は、膝伸展運動時の外側広筋において、近位部よりも遠位部の脱酸素化が大きいことを指摘している。本

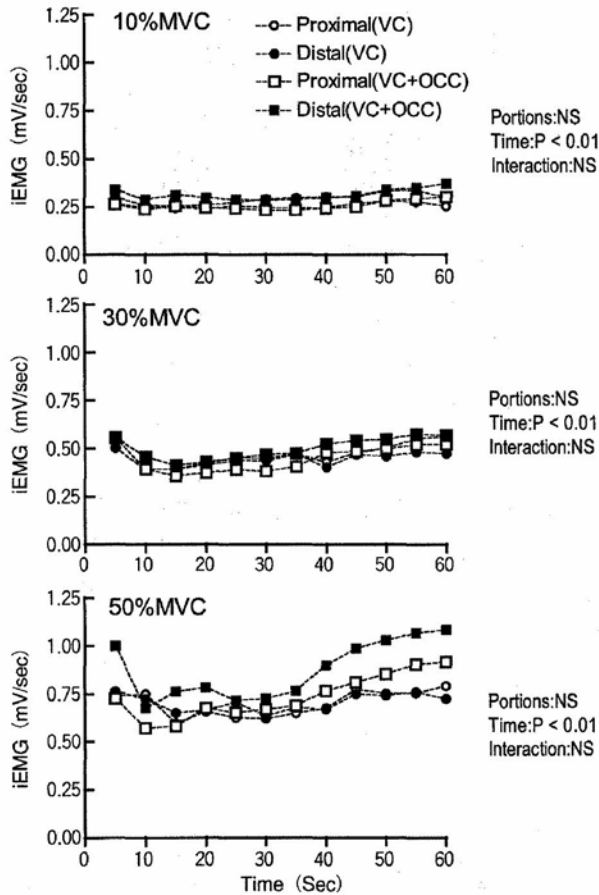


図4 運動時の活動電位積分値 (iEMG) の比較

Proximal(VC): 近位部 (随意筋力発揮)
 Distal(VC): 遠位部 (随意筋力発揮)
 Proximal(VC+OCC): 近位部 (随意筋力発揮+カフ阻血)
 Distal(VC+OCC): 遠位部 (随意筋力発揮+カフ阻血)

研究の10%MVC時の脱酸素化時定数が近位部においてより遅延した結果は、先行研究と同様に、近位部において脱酸素化が生じにくいこと示している。このような部位差が生じる原因として、1. 運動中の筋内圧の違い²⁾、2. 筋線維組成や毛細血管密度の違い¹⁴⁾、3. 血流量に起因したヘモグロビン量の違い^{10,11)}などが考えられている。ところが図3に示したように、カフ阻血による運動時においても、近位部は遠位部より脱酸素化の速度が有意に遅延した。この結果は、血流制限それ自体が脱酸素化レベルに影響する因子であることを否定するものである。したがって、運動時の酸素動態の部位差は、毛細血管などの形態的要因とそれに関係した総ヘモグロビン量などに関係して

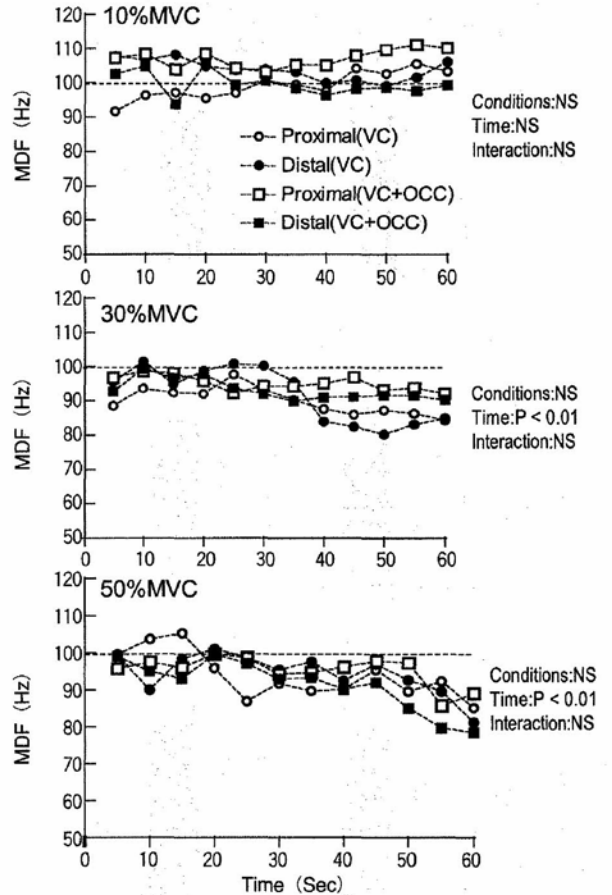


図5 運動時の活動電位周波数 (MDF) の比較

Proximal(VC): 近位部 (随意筋力発揮)
 Distal(VC): 遠位部 (随意筋力発揮)
 Proximal(VC+OCC): 近位部 (随意筋力発揮+カフ阻血)
 Distal(VC+OCC): 遠位部 (随意筋力発揮+カフ阻血)

いるかもしれない。

3. 2 中強度収縮 (30%MVC と 50%MVC) における組織酸素動態

30%MVCと50%MVCにおいて、カフ阻血の有無にかかわらず組織酸素動態の部位差は見られなかった。30%MVCでは10%MVCと同様に、カフ阻血による脱酸素化レベルが両部位において有意に高値を示し、血液供給の制限によって脱酸素化が促進されたことを示した。ところが、50%MVCでは脱酸素化レベルにカフ阻血の影響は見られなかった。これまで40%MVC以上の運動強度での持続的な等尺性膝伸展運動では血流が遮断されることが指摘されており⁷⁾、本研究において

も非カフ阻血運動時に血流遮断が生じていたことが考えられる。

3. 3 カフ阻血による筋線維動員パターンの変化

連続的に一定張力を維持すると筋線維動員パターンが変化し、iEMGの増加やMDFの低下が生じることが知られている。本研究の30%MVCと50%MVCにおいても収縮時間の経過とともにiEMGとMDFに先行研究と同様な変化が観察された。しかしながら、同一筋内の部位差やカフ阻血による動員パターンの違いは観察されなかった。Feliciら⁴⁾は本研究と同様にEMGとNIRSを用いて、上腕二頭筋の発揮張力とそれぞれのパラメータの対応関係を検討した。その結果、20%MVCから80%MVCの張力レベルとMDFならびに脱酸素化動態との間に高い相関関係があることを指摘している。本研究では、カフ阻血によって血流制限を加えたが、MDFやiEMGにおいて、カフ阻血の影響は見られなかった。カフのように外的な圧力によって血流を遮断した場合と筋発揮張力の増加による筋内圧の増加による血流遮断では、筋組織内の微小循環血流動態に違いがあるのかもしれない。この点についてはさらに検討が必要である。

3. 4 今後の課題

本研究は4名の成人男性の結果をまとめたものである。個体差などを考慮するために、さらに多くの被験者を対象とする必要がある。また、本研究では外側広筋の遠位部と近位部にそれぞれEMG電極とNIRSプローブを配置した。しかしながら、これらのセンサーからの生体情報は同一場所からのものではない。したがって、多チャンネルの電極やプローブの使用などによって、これらの問題点を解決する必要があるだろう。

4. 結 論

非カフ阻血運動およびカフ阻血運動において、外側広筋の遠位部は近位部に比べて、血液供給能力の制限をうけやすいことが低強度条件下で明らかになった。筋収縮中のカフ阻血は、組織の脱酸素動態を促進されるものの、筋線維の動員パターンには必ずしも影響しないことが示された。

謝 辞

本研究のNIRS測定は増田和実氏（金沢大学）の協力によって実施された。また、本研究の実施と解析には竹中香月氏（電気通信大学）の協力を得た。ここに記して深く感謝の意を表します。また、本研究の遂行に際して、研究助成を賜りました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を申し上げます。

文 献

- 1) Abe T., Kearns C.F., and Sato Y., Muscle size and strength are increased following walk training with restricted venous blood flow from the leg muscle, Kaatsu-walk training. *J. Appl. Physiol.*, 100: 1460-1466 (2006)
- 2) Ameredes B.T., and Provenzano M.A., Regional intramuscular pressure development and fatigue in the canine gastrocnemius muscle in situ. *J. Appl. Physiol.*, 83: 1867-1876 (1997)
- 3) Cook S.B., Clark B.C., and Ploutz-Snyder L.L., Effects of exercise load and blood-flow restriction on skeletal muscle function. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 39: 1708-1713 (2007)
- 4) Felici F., Quaresima V., Fattorini L., Sbriccoli P., Filligoi G.C., and Ferrari M., Biceps brachii myoelectric and oxygenation changes during static and sinusoidal isometric exercises. *J. Electromyogr Kinesiol* (2007)
- 5) Fujita S., Abe T., Drummond M.J., Cadenas J.G., Dreyer H.C., Sato Y., Volpi E., and Rasmussen B.B., Blood flow restriction during low-intensity resistance exercise increases S6K1 phosphorylation

- and muscle protein synthesis. *J. Appl. Physiol.*, 103: 903-910 (2007)
- 6) Kawada S., and Ishii N., Skeletal muscle hypertrophy after chronic restriction of venous blood flow in rats. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 37: 1144-1150 (2005)
 - 7) Koba S., Hayashi N., Miura A., Endo M., Fukuba Y., and Yoshida T., Pressor response to static and dynamic knee extensions at equivalent workload in humans. *Jap. J. physiol.*, 54: 471-481 (2004)
 - 8) Meyer R.A., Does blood flow restriction enhance hypertrophic signaling in skeletal muscle? *J. Appl. Physiol.*, 100: 1443-1444 (2006)
 - 9) Miura H., Araki H., Matoba H., and Kitagawa K., Relationship among oxygenation, myoelectric activity, and lactic acid accumulation in vastus lateralis muscle during exercise with constant work rate. *Int. J. Sports Med.*, 21: 180-184 (2000)
 - 10) Miura H., McCully K., Hong L., Nioka S., and Chance B., Regional difference of muscle oxygen saturation and blood volume during exercise determined by near infrared imaging device. *Jap. J. Physiol.*, 51: 599-606 (2001)
 - 11) Mizuno M., Tokizawa K., Iwakawa T., and Muraoka I., Inflection points of cardiovascular responses and oxygenation are correlated in the distal but not the proximal portions of muscle during incremental exercise. *J. Appl. Physiol.*, 97: 867-873 (2004)
 - 12) Reeves G.V., Kraemer R.R., Hollander D.B., Clavier J., Thomas C., Francois M., and Castracane V.D., Comparison of hormone responses following light resistance exercise with partial vascular occlusion and moderately difficult resistance exercise without occlusion. *J. Appl. Physiol.*, 101: 1616-1622 (2006)
 - 13) Takarada Y., Nakamura Y., Aruga S., Onda T., Miyazaki S., and Ishii N., Rapid increase in plasma growth hormone after low-intensity resistance exercise with vascular occlusion. *J. Appl. Physiol.*, 88: 61-65 (2000)
 - 14) Wang L.C., and Kernell D., Proximo-distal organization and fibre type regionalization in rat hindlimb muscles. *Muscle Res. Cell Motil.*, 21: 587-598 (2000)