

日本運動生理学雑誌

第12巻第1号 13~21, 2005

軽強度自転車運動時の下肢筋血流に及ぼす 下半身陰圧負荷の影響

斎藤 満*・古谷克司**・城 宏**

Effect of LBNP Stimulation on Leg Muscle Blood Flow During Low Intensity Cycling Exercise

Mitsuru SAITO *, Katsushi FURUTANI ** and Hirosi TACHI **

Summary

The purpose of the study was to investigate whether lower body negative pressure (LBNP) was advantageous for increasing muscle blood flow during dynamic exercise in a supine position. Low intensity cycling exercise was performed in three different conditions in nine healthy volunteers; 6-min control exercise in a supine position without LBNP (EXP1), 6-min exercise begun 4 min after applying -40mmHg LBNP (EXP2), and 4-min LBNP added 3 min after 10-min cycling exercise begun (EXP3). Thigh muscle blood flow was estimated as hemoglobin (Hb) content in the tissue (i.e. oxygenated (oxy-Hb), deoxygenated (deoxy-Hb) and total hemoglobin (total-Hb)) determined by near infrared spectroscopy. During EXP1 and EXP2 oxy-Hb content tended to decrease and no significant change in total-Hb content compared to the rest. During EXP3 an application of LBNP during halfway of exercise caused total-Hb content increased from resting level ($p<0.05$) and oxyg-Hb content elevated preceded period of cycling alone ($p<0.05$). Comparing of oxy-Hb and total-Hb in response to different exercise conditions, both hemoglobin contents elevated significantly in EXP3 than that of EXP1 and EXP2. However, there was no significant difference in response in deoxy-Hb between different exercise conditions.

These results suggest that the LBNP enhanced muscle pumping effect on muscle blood flow during low intensity dynamic exercise in the supine position. The profitable effect of LBNP, however, depends on the timing of LBNP stimulus.

Key words: orthostatic stimulation, muscle pump, near-infrared spectroscopy, supine exercise

* 豊田工業大学 一般教育系 健康体力 (〒468-8511 名古屋市天白区久方二丁目12-1)
Applied Physiology Laboratory

** 豊田工業大学 工学部 機械システム系 (〒468-8511 名古屋市天白区久方二丁目12-1)
Department of Advanced Science and Technology, Toyota Technological Institute

I 目的

運動時の筋ポンプの効果は還流圧や運動姿勢、血管トーヌスの影響を受ける^{13,14}。Folkow et al.⁷は下腿の律動的筋収縮時の下腿筋血流を仰臥位と70度head-up 傾斜姿勢で比較し、傾斜体位で高くなることを確かめ、重力または静水圧が筋ポンプによる血流促進効果を高めることを認めた。一方、仰臥位で立位の循環応答を模擬する方法として下半身陰圧負荷 (LBNP) が用いられ⁴、この場合にも筋ポンプによる静脈還流の促進が報告されている¹⁸。しかし、この場合の静脈還流の増加が活動筋血流の増加を反映するか否かについては明らかとなっていない。

最近、Hamann et al.⁹ Dobson et al.⁶はヒトに比べて四肢循環に及ぼす重力の影響が小さい四足動物で筋ポンプの効果を再検討し、その効果に疑問を呈している。一方、LBNP は下肢方向への血液の移動を引き起こし、中心静脈圧を低下して反射性に筋交感神経活動を高め、骨格筋の血管を収縮する^{24,25,27}。この反応は活動筋の血流促進に対して拮抗的に働くことが考えられる²⁰。しかし神経性血管収縮が運動時には筋活動にともなう代謝産物によって無効にされることが報告され^{10,19}、Strandell と Shepherd²⁰はLBNP 刺激時の活動筋血流を観察しこの考えを支持する結果を得ている。しかしながら、この結果はLBNP の機械的影響を直接的に受けない上肢で観察されたものであり、下肢については明らかではない。

LBNP は下肢外部からの陰圧効果で下肢組織外の圧力を低下させ機械的に血液を脈管内に吸引する効果がある²。しかもこの効果は皮膚組織の脈管だけでなく、より深部の筋組織の脈管系にも及ぼす可能性が考えられ²⁰、筋ポンプの血流促進に寄与している可能性がある²。Nishiyasu et al.¹⁷は水平仰臥位で-50から 0 mmHg までのLBNP 刺激を行なった際の自転車運動の下肢 (筋) 酸素化ヘモクロビン動態を近赤外分光法で観察した結果、組織 (筋) 酸素化ヘモクロビンおよびトータルヘモクロビン動態はLBNP 無負荷の運動時と差を認めなかった。

本研究では臥位において立位姿勢の循環を模擬するLBNP 刺激が軽強度自転車運動時の筋ポンプ作用を促進するかどうか、および活動筋の筋酸素動態を改善する効果をもつかどうかについて近赤外分光法を応用して組織のヘモグロビン動態から再検討することを目的とした。

II 方法

A 被験者

19才から24才までの健康な男性 9名を対象とした。彼らの平均身長および体重はそれぞれ176±1 cm, 65±2 kg であった。被験者には実験の目的および危険性について十分説明を行い了承を得た上で測定を行った。本研究は豊田工業大学倫理委員会の承認を得た。

B 組織血流および血圧測定

LBNP 刺激にともなう筋ポンプの効果をみるための組織血流は近赤外分光法 (NIRS) (オメガウエーブ OBL-50) による組織の酸素化および脱酸素化ヘモクロビンから推定した。センサーは膝上10 cm の外側広筋皮膚表面に光源と受光プローブを20 mm 間隔で装着した。この場合の理論的な測定深度は20 mm である。LBNP の効果は下肢全体に及ぶが自転車運動では大腿筋、中でも外側広筋が最も活動的に働く²⁰。したがって筋ポンプの効果と同時に筋収縮にともなう酸素利用が高まることからLBNP の影響をみるのに適切な部位であると考え、測定部位とした^{1,26}。血流変化は、酸素化ヘモクロビン (OxyHb), 脱酸素化ヘモクロビン (DeoxyHb) および総ヘモクロビン (TotalHb) 量変化から推定した。それぞれの値は電圧 (mV) で表し、コントロール値の電圧を基準にした電圧の変化値で表した。この場合、OxyHb, DeoxyHb および TotalHb の間には、OxyHb (mV) + DeoxyHb (mV) = TotalHb (mV) の関係がある。組織の酸素化ミオグロビン量の影響については安静、および低強度の定常状態運動であることから一定として解析した¹。

血圧は右上腕部でオシロメトリック法 (日本コリン208YP) により 1 分毎に測定し、平均血圧 (脈圧 / 3 + 拡張期血圧) で表した。心拍数は胸部より記録した心電図から測定した。

C 運動強度と LBNP 刺激強度

毎分心拍数が100拍を超える自転車運動では筋交感神経活動が高まることから²³、運動の効果による血管収縮神経活動の影響を取り除くため、心拍数が100拍/分程度になるような運動強度を設定した。運動強度決定のための自転車運動は直立座位姿勢で行なった。すなわち、3 分毎に負荷を上昇する3段階の自転車運動を行なった際の負荷と心拍数との回帰直

下半身陰圧負荷時の筋ポンプ作用

線から運動負荷強度を決定した。立位の循環応答模擬として広く用いられる LBNP 強度は -50 mmHg 程度までである⁴が、被験者の個人差や安全面を考慮し -40 mmHg に設定した。

D 運動と LBNP 刺激方法

姿勢は仰臥位とし、運動は次の 3 条件でおこなった。1) 5 分間の仰臥位安静に続いて 6 分間の運動および 5 分間の回復過程を設定したコントロール運動 (EXP1)。2) 5 分間の仰臥位安静に続き -40 mmHg の LBNP を 14 分間負荷し、その間 LBNP の開始 4 分から運動を 6 分間行ない、LBNP 解除後の 5 分間は回復過程とした (EXP2)。3) 5 分間の仰臥位安静に続き 10 分間の運動継続およびその間の運動開始 3 分からは 4 分間の LBNP を負荷した。さらに運動停止後の 5 分間は回復過程とした (EXP3)。以上の 3 条件の運動を実施する際には、各測定間に充分な休憩を入れ、心拍数の回復を確認した。3 条件の測定はランダムに配置して行なった。運動および LBNP 刺激は下半身陰圧装置内に腸骨稜以下の下半身を挿入し、腸骨稜位置にラバー布を装着し密閉した状態で実施した。自転車運動は運動強度決定の際に用いた自転車エルゴメータ (コンビ、エアロバイク 800) を下半身陰圧装置内にペダルのクランク軸がベッド面と水平になるように設置し、被験者の身長にあわせてクランク軸位置を前後に調整した。したがって、近赤外線プローブの位置は脚が最も伸展した条件で心臓位置より 3 から 5 cm 高かかった。

E 統計処理

安静値は 5 分間の平均値を用い、EXP1, EXP2 は運動後半の 3 分間、EXP3 は運動時の LBNP の最後の 3 分間の平均値で表した。EXP2, EXP3 条件の LBNP 刺激および回復期の値は運動停止あるいは LBNP 解除 1 分後からの値を用いた。なお、心拍数、OxyHb, DeoxyHb 反応は運動あるいは LBNP の開始および停止直後は安定しないが 1 分後には安定し、運動負荷 10 分、LBNP 負荷 14 分の間は定常状態が維持されることをあらかじめ確認した。

運動および LBNP の効果については繰り返しのある ANOVA で検討し、その結果、有意の場合には Scheffe のテストを用いて検定した。3 つの運動条件の比較は Bonfferoni/Dunn を適用して行なった。結果は平均値と標準誤差で表し、危険率 5 % 以下を

有意と判定した。

III 結果

A コントロール運動 (EXP1) (Fig. 1)

心拍数は安静の 65 ± 2 拍/分から運動時には 101 ± 3 拍/分に上昇した。安静および運動時の収縮期、平均血圧は 124 ± 2 , 82 ± 2 mmHg と 139 ± 4 , 93 ± 2 mmHg であり運動では有意に上昇した。運動時の拡

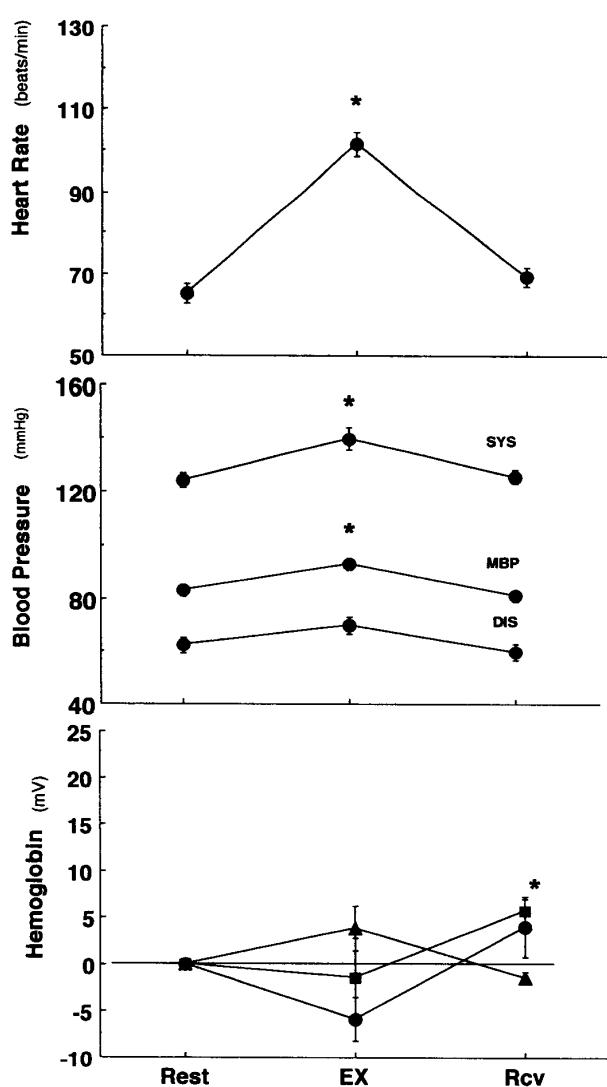


Fig. 1 Changes in heart rate, blood pressure and hemoglobin contents in the thigh at rest, during cycling exercise and the recovery in supine position.

*, different from rest value. EX, cycling exercise, Rcv, recovery, SYS, systolic blood pressure; MBP, mean blood pressure; DIS, diastolic blood pressure. ●; oxygenated hemoglobin, ▲; deoxygenated hemoglobin, ■; total hemoglobin.

張期血圧の上昇（安静は 62 ± 2 mmHg, 運動時は 69 ± 3 mmHg）は有意でなかった。

OxyHb は運動にともない安静値より減少傾向（ -5.9 ± 2.3 mV), DeoxyHb は増加傾向（ 3.8 ± 2.4 mV) にあったが両者とも有意でなかった。運動時の TotalHb の変化（ -1.4 ± 4.0 mV) は有意でなかったが、運動後の回復期には有意に増加した。

B LBNP 時の運動 (EXP2) (Fig. 2)

LBNP 刺激による心拍数上昇は有意でなかったが、運動時には安静値より有意に上昇した（ 67 ± 2 拍/分, 107 ± 4 拍/分)。運動停止後の LBNP 期間には運動時より低下したが安静値より高値であった（ 81 ± 4 拍/分)。

血圧は LBNP 刺激で低下傾向を示したが有意ではなかった。運動にともない収縮期および平均血圧は上昇し、LBNP のみの場合に比べて有意に高くなかった（LBNP は 119 ± 2 と 79 ± 2 mmHg, 運動は 133 ± 5 と 90 ± 2 mmHg)。しかし、安静値との統計的な差はみられなかった。拡張期血圧の反応も収縮期血圧と同様の傾向であったが（LBNP は 59 ± 2 mmHg, 運動は 69 ± 2 mmHg), 運動開始前 LBNP と統計的差はみられなかった。

DeoxyHb と TotalHb は LBNP 刺激で安静値より増加したが（DeoxyHb は 11.1 ± 2.3 mV, TotalHb は 17.3 ± 4.4 mV), 運動にともない低下して安静との差はなくなった。運動停止後の LBNP 期間には運動前 LBNP 値に回復した。LBNP 刺激及び運動で OxyHb 値は変動を示したが安静との有意差はみられなかった。しかし、運動前の LBNP 値（ 6.1 ± 2.2 mV) に比べて運動開始後（ -4.3 ± 2.3 mV) は有意に低下した。TotalHb も同様に運動前 LBNP 値（ 17.3 ± 4.4 mV) より運動開始後（ 1.3 ± 4.6 mV) に低下した。

C 運動時の LBNP 刺激 (EXP3) (Fig. 3)

運動にともない心拍数は安静値より上昇し（ 67 ± 2 拍/分, 102 ± 2 拍/分), LBNP 刺激にともないさらに 9 拍/分高まったがこの上昇は有意でなかった。

収縮期血圧は運動にともない安静値より 9 mmHg 高まり、LBNP を加えるとさらに上昇した（ 14 mmHg)。この上昇は有意であった。平均血圧は運動にともない安静値より 7 mmHg 上昇したが、LBNP を加えるとむしろ低下した。しかし、いずれも有意ではな

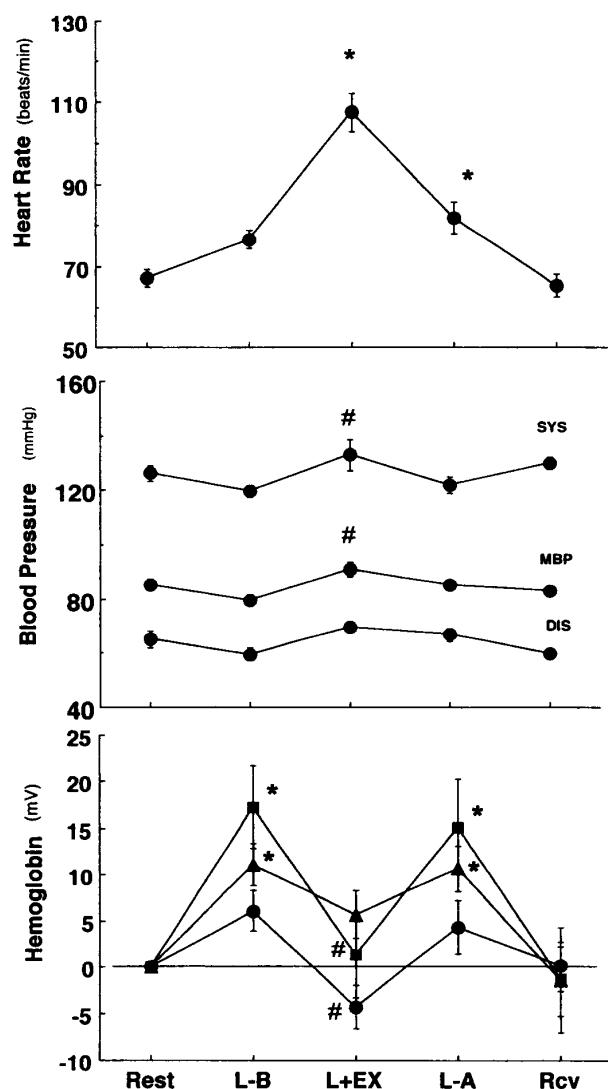


Fig. 2 Changes in heart rate, blood pressure and hemoglobin contents in the thigh at rest, during -40 mmHg LBNP and superimposing 6-min cycling exercise and the recovery in supine position. SYS, systolic blood pressure; MBP, mean blood pressure; DIS, diastolic blood pressure. ●; oxygenated hemoglobin, ▲; deoxygenated hemoglobin, ■; total hemoglobin.

*, different from rest value. #, different from previous value. L-B: LBNP, L + EX: exercise during LBNP, L-A: LBNP after exercise ceased.

かった。拡張期血圧は平均血圧と同様の傾向で、いずれも安静値との有意差はみられなかった（安静は 60 ± 2 mmHg, 運動は 67 ± 2 mmHg, 運動に LBNP を加えた時は 66 ± 5 mmHg)。

OxyHb は運動開始により安静値より低下した（ -6.3 ± 2.1 mV) が有意ではなかった。LBNP を加

下半身陰圧負荷時の筋ポンプ作用

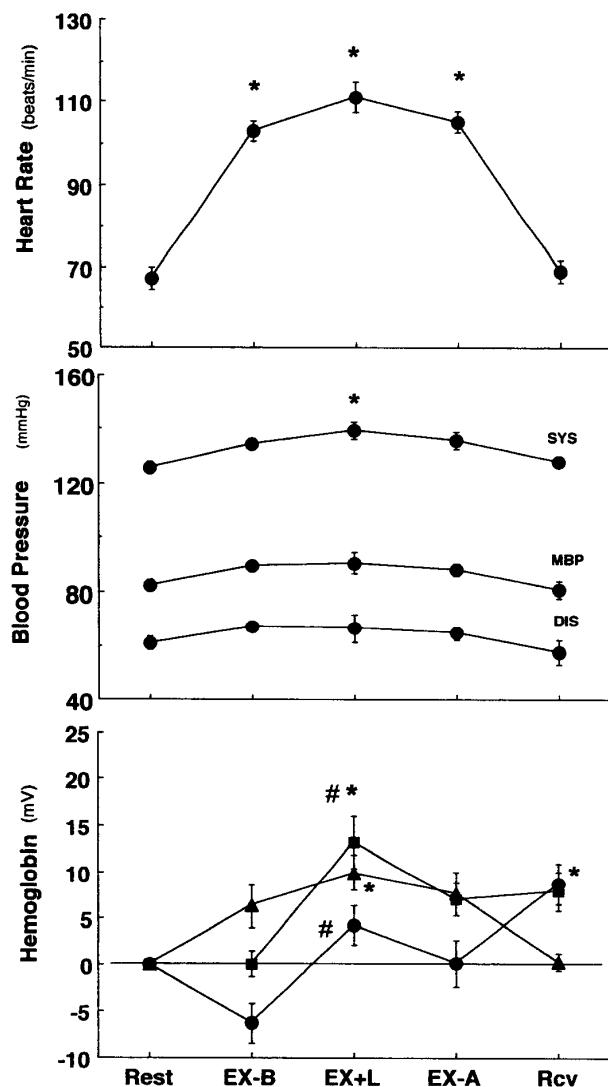


Fig. 3 Changes in heart rate, blood pressure and hemoglobin contents in the thigh at rest, during cycling exercise and superimposing 4-min — 40 mmHg LBNP, and the recovery in supine position. SYS, systolic blood pressure; MBP, mean blood pressure; DIS, diastolic blood pressure. ●; oxygenated hemoglobin, ▲; deoxygenated hemoglobin, ■; total hemoglobin. *, different from rest value. #, different from previous value. EX-B: exercise without LBNP, EX+LBNP: exercise with LBNP, EX-A: exercise after LBNP released).

えると運動のみの時より有意に上昇した (4.2 ± 2.1 mM). しかし安静値との統計的差はみられなかった。LBNP解除後は安静値とほぼ同値となり, LBNP前の運動時との差はみられなくなった。運動停止後の回復期には OxyHb は大きく上昇した。

DeoxyHb は運動期間を通して安静より高値を示し, 運動時に LBNP を加えた際の増加は有意となった。TotalHb は運動による変化はみられなかつたが, LBNP を加えると有意に上昇した (13.2 ± 2.8 mM). その後 LBNP を解除しても安静より高い水準を維持した。回復期も安静値より有意に高値を持続した。

D 運動時循環に及ぼす LBNP の影響

運動時のヘモグロビン, 心拍数, 血圧値を EXP1, EXP2, EXP3 条件間で比較して Fig. 4 に示す。心拍数及び血圧値はともにコントロール運動 (EXP1) と LBNP の刺激条件の違いによる差は認められなかつたが, ヘモグロビン動態には差がみられた。EXP3 の運動時の OxyHb, TotalHb は EXP1 と EXP2 条件より有意に高くなつたが, EXP1 と EXP2 条件間の差はみられなかつた。DeoxyHb は全ての条件間で差はみられなかつた。

IV 考察

A コントロール運動の循環動態

活動筋の収縮弛緩にともなつて組織のヘモグロビン容量は大きく変動するが²⁶, 今回はヘモグロビン量を時間平均で観察した。その結果 OxyHb は減少し, DeoxyHb は増加傾向を示したが TotalHb は変わらなかつた。TotalHb が変わらなかつた理由としては, 姿勢の影響が考えられる。すなわちヘモグロビン測定部位が心臓位より常に高い位置にあつたため筋ポンプによる血液駆出がよりすみやかに進み, 運動性充血の影響を隠蔽した可能性が考えられる。さらに運動強度が低かったことも関係したと考えられる。

また, 低強度の自転車運動では OxyHb が安静値より低下することはこれまでの報告¹⁰と同様であつた。このことは運動強度が低かつたため大きな運動性充血による血流増加に頼らなくとも酸素の抜き取りを高めるだけで代謝に必要な酸素が組織に供給されたことを示すものであろう。

運動停止後の回復期の TotalHb は有意に高まつた。これは運動後充血により組織のヘモグロビン量が増加したためと考えられる。

B 運動負荷と LBNP 負荷の相互作用

1. LBNP 負荷時の運動 (EXP2)

EXP2 と EXP3 の運動では組織のヘモグロビン反応

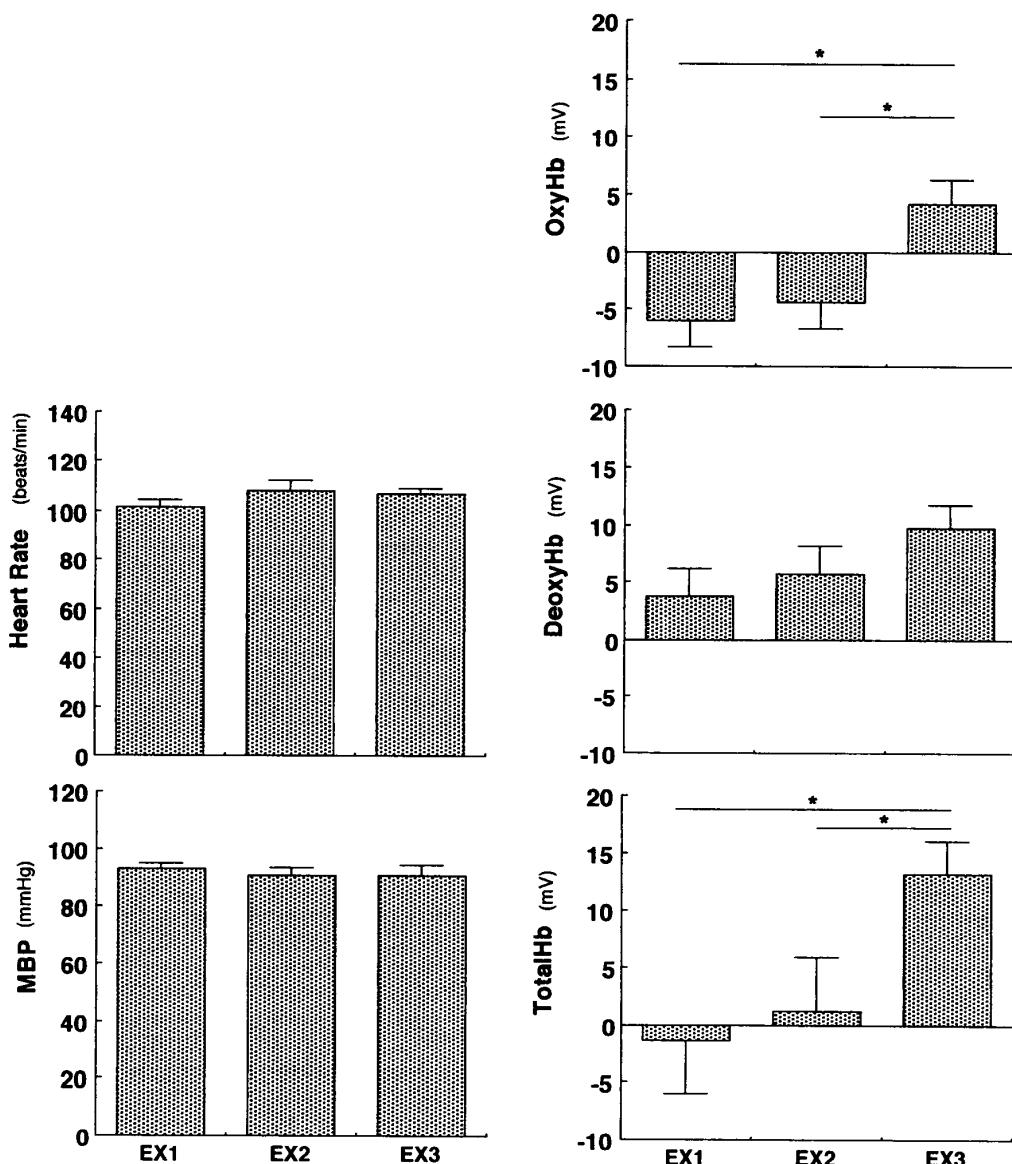


Fig. 4 Comparison of heart rate, blood pressure and oxygenated, deoxygenated and total hemoglobin content in response to three different exercise conditions.

EXP1: control exercise without LBNP, EXP2: exercise begin during LBNP stimulus, EXP3: LBNP stimulus begin during exercise. *, p < 0.05.

が異なった。EXP2の運動ではLBNP刺激開始によりDeoxyHb, TotalHbは増加したが、運動開始後は低下しEXP1運動と同じ傾向を示した。このことはLBNPにより下肢に貯留した血液が筋ポンプで駆出され、それに続く動脈からの血液流入量と筋ポンプによる排出量が平衡に達し平均として安静値に等しくなったことが考えられる。この場合低い運動強度のためTotalHb量を増すほどの運動性充血は生じていなかつたと思われる。

これに対し運動停止後のLBNP期間にDeoxy, TotalHbは運動開始前のLBNPの時とほぼ同値にまで上昇した(Fig. 2)。このことは運動後充血とLBNPによる骨格筋および皮膚や皮下組織の血液貯留量が筋ポンプによる血液駆出作用の停止によって促進したことを示すものであろう。

EXP2およびEXP3の運動においてLBNP刺激時の心拍数が有意ではないがコントロール運動(EXP1)に比べて高い傾向を示した。このときの動脈血圧は

下半身陰圧負荷時の筋ポンプ作用

高い傾向にあったことから (Fig. 2, 3), LBNP による下肢や骨盤部の血液貯留にともなう静脈還流の減少が筋ポンプの効果で充分補償できず、中心静脈圧が低下し、心肺圧受容器脱刺激を引き起こして反射性に心拍数を高めた可能性が考えられる¹²⁾。

2. 運動時の LBNP 刺激の効果 (EXP3)

運動中に LBNP を負荷すると低下していた OxyHb は有意に上昇した。しかし、DeoxyHb は運動で上昇したもの、LBNP を加えても大きな変化はみられなかつた (Fig. 3) が、TotalHb は増加した。これは運動により血管のトーヌスが減少した所に LBNP を加えたために血管経壁圧がさらに低下し血管内に血液が貯留しやすくなつたこと、これに筋ポンプが相乗的に作用して血流が促進したことが考えられる。実際、LBNP 解除後 TotalHb が安静および LBNP を加える前の運動値より高レベルで推移したことは血管トーヌスが低下していたことを示すものであろう。

さらに、運動時に LBNP を加えると OxyHb がコントロール運動 (EXP1) と比べて有意に高まつた (Fig. 4) ことは代謝に見合う以上の血流があつたことを示し、筋ポンプがより効果的に作用したこと伺わせる。但し、この場合には深部の筋だけでなく皮膚血流の増加も関与した可能性は否定できない⁸⁾。

回復期の OxyHb と TotalHb の反応が EXP2 と EXP3 条件で大きく異なつたのは、EXP2 では運動後の LBNP 期間に交感神経活動が亢進し血管収縮が生じ運動後充血の消失が早まつた可能性が考えられ、EXP3 では交感神経活動の亢進がなく体温の上昇や運動後充血（血管拡張）が優位となり高い血流が持続したためと考えられる。

Nishiyasu et al.¹⁷⁾ はコントロール運動と -50mmHg, -20mmHg LBNP 下の運動ではヘモグロビンの酸素化レベルおよび TotalHb の差は認めなかつた。この違いの一つは運動の方法であろう。彼らは -50mmHg の高強度 LBNP 開始後に運動をはじめており、強力な血管収縮が生じた状態で運動を開始したことからこの効果が大きくあらわれ、筋ポンプの効果がマスクされた可能性が考えられる。もう一つは運動強度であろう。本研究では 100 拍/分程度の軽い運動で最大 10 分間持続したが、この場合には運動性筋交感神経活動亢進は生じない^{22, 23)}。しかし、彼らの用いた運動強度、120~130 拍/分では筋交感神経活動が促進し、LBNP による反射性の筋交感神経活

動増加が相乗的に作用した可能性がある。

活動筋内の血流および代謝水準は一様でないことが報告されている¹⁶⁾。NIRS による血流測定範囲や深度が局所的であることからすれば、今回の外側広筋局所の単独測定では下肢全体の筋ポンプを正確に示すものとは言えない。しかし、自転車運動では大腿筋群、特に外側広筋が優位に働くことから²⁶⁾、自転車運動時の筋ポンプおよび血流変化に対する LBNP の効果を評価するうえでは適切と考える。

C 立位姿勢運動との違い

Folkow et al.⁷⁾ は臥位と立位時の筋ポンプの効果を下腿筋血流量について比較し立位で大きく高まることを認めた。しかし、本研究では立位でみられるような明確な筋ポンプの血流促進効果はみられなかつた。筋血流は還流圧と血管トーヌスの相互作用で決まる²⁰⁾が、血管トーヌスに及ぼす筋交感神経活動は立位および -40mmHg LBNP で亢進^{11, 25, 27)}することから両者の遠心性血管緊張には大きな違いはないと考えられる。また、筋ポンプによる静脈血排出後の静脈内圧の低下についても大きな差はないとみられるから¹⁴⁾、下肢の循環が立位姿勢と LBNP で違うもつとも大きな点は重力（静水圧）の効果による還流圧の違いとみることができる^{7, 13, 14)}。したがつて、LBNP 刺激下で明確な筋ポンプの促進がみられなかつたのは動脈流入圧に対する LBNP の効果が小さかつたためと言えよう。

今回は低強度の運動を用いたが Folkow et al.⁷⁾ は高強度の律動的運動を用いており、運動強度の違いも一部関係したかもしれない。これについてはさらに検討が必要である。

D ヘモグロビン動態と血流

NIRS は組織の酸素化レベルを評価する方法として広く用いられているが、今回は組織の循環動態評価法として用いた。組織の酸素化レベルは酸素化ミオグロビンに影響される⁵⁾ため、今回の NIRS による組織の酸素化レベルはヘモグロビンの酸素化動態だけを示すものではないが、本研究では定常状態に達する軽強度の運動を用いたことから、運動による酸化ミオグロビン変化の影響は小さいと考える¹⁵⁾。

また、NIRS の吸光量は太い血管よりも細径動、静脈血量の変化に大きく影響される³⁾。特に筋組織血液量の多くは細径動、静脈に存在し、筋血流調節

にも大きく関わっていることから、本結果は筋組織の血流動態を表したものと考える。

V 要約

臥位で立位の循環を模擬する LBNP 刺激が軽強度自転車運動時の筋ポンプ作用を高めるかどうかについて検討した。LBNP 刺激によって活動筋血流量は高まったが、LBNP 刺激のタイミングが大きく影響した。すなわち、運動時に LBNP 刺激を加えた場合には下肢骨格筋血流の促進が明らかとなった。しかし、LBNP 刺激時に運動を加えた場合には明確な効果はみられなかった。これらの結果から LBNP 刺激による筋ポンプの促進効果は立位姿勢に比べて小さく、しかも刺激のタイミングが大きく関係する。

謝辞

実験補助を戴いた相澤清香 学審特別研究員に謝意を表します。本研究は科学研究費補助金（課題番号13680064, 15500464）および第4回トヨタ先端科学技術助成プログラムの補助で行なわれた。

引用文献

- 1) Belardinelli R, Barstoe TJ, Porszasz J, and Wasserman K (1995) Skeletal muscle oxygenation during constant work rate exercise. *Med Sci Sports Exerc* 27: 512-519
- 2) Coles DR, Kidd BSL and Moffat W (1957) Distensibility of blood vessels of the human calf determined by local application of subatmospheric pressure. *J Appl Physiol* 10: 461-468
- 3) Chance B, Nioka S, Kent J, McCully K, Fountain M, Greefeld R, and Holton G (1988) Time resolved spectroscopy of hemoglobin and myoglobin in resting and ischemic muscle. *Anal Biochem* 174: 698-707
- 4) Convertino VA (1993) Endurance exercise training: conditions of enhanced hemodynamic responses and tolerance to LBNP. *Med Sci Sports Exerc* 25: 705-712
- 5) DeBlasi RA, Quaglia E, and Ferrari M (1991) Skeletal muscle oxygenation monitoring by near infrared spectroscopy. *Biochem Int* 25: 241-248
- 6) Dobson JL and Gladden B (2003) Effect of rhythmic tetanic skeletal muscle contractions on peak muscle perfusion. *J Appl Physiol* 94: 11-19
- 7) Folkow B, Haglund M, Jodal M, and Lundgren O (1971) Blood flow in the calf muscles of man during heavy rhythmic exercise. *Acta Physiol Scand* 81: 157-163
- 8) Hachiya T, Blaber A, and Saito M (2004) Changes in superficial blood distribution in thigh muscle during LBNP assessed by NIRS. *Aviat Space Environ Med* 75: 118-122
- 9) Hamann JJ, Valic Z, Bukwalter JB, and Clifford PS (2003) Muscle pump does not enhance blood flow in exercising skeletal muscle. *J Appl Physiol* 94: 6-10
- 10) Hansen J, Thomas GD, Harris SA, Parsons WJ, and Victor RG (1996) Differential sympathetic neural control of oxygenation in resting and exercising human skeletal muscle. *J Clin Invest* 98: 584-596
- 11) Iwase S, Mano T, and Saito M (1987) Effects of graded head-up tilting on muscle sympathetic activity in man. *Physiologist* 30 (suppl): S62-S63
- 12) Johnson JM, Rowell LB, Niederberger M, and Eisenman MM (1974) Human splanchnic and forearm vasoconstrictor responses to reduction of right atrial and aortic pressures. *Circ Res* 34: 515-524
- 13) Laughlin, M.H (1987) Skeletal muscle blood flow capacity role of muscle pump in exercise hypervolemia. *Am J Physiol* 253 (Heart Circ Physiol 22): H993-H1004
- 14) Laughlin MH, Korthuis RJ, Duncker DJ, and Bache RJ (1996) Control of blood flow to cardiac and skeletal muscle during exercise. In: *Handbook of Physiology. Exercise: Regulation and Integration of Multiple Systems*. Bethesda, MD: Am. Physiol Soc, sec. 12, chapt. 16, p.705-769
- 15) Mancini DM, Bolinger L, Li H, Kendrick K, Chance B, and Wilson JR (1994) Validation of near-infrared spectroscopy in humans. *J Appl Physiol* 77: 2740-2747
- 16) Miura H, McCully K, and Chance B (2003) Application of multiple NIRS imaging devise to the exercising muscle metabolism. *Spectroscopy* 17: 549-558
- 17) Nishiyasu T, Tan N, Kondo N, Nishiyasu M, and Ikegami H (1999) Near-infrared monitoring of tissue oxygenation during application of lower body pressure at rest and during dynamic exercise in humans. *Acta Physiol Scand* 166: 123-130
- 18) 西保 岳, 池上晴夫 (1985) 筋ポンプが血液循環動態に及ぼす影響. *体力科学* 34: 167-175
- 19) Remensnyder J.P, Mitchell JH, and Sarnoff SJ

下半身陰圧負荷時の筋ポンプ作用

- (1962) Functional sympatholysis during muscular activity. *Circ Res* 11: 370-380
- 20) 斎藤 満 (1999) 循環システムの概観. In 斎藤 満, 加賀谷淳子編 循環: 運動時の酸素運搬システム調節, ナップ, 東京, 1999 p1-37.
- 21) Saito M and Miyamura M (1984) Influence of body posture on maximum calf blood flow in reactive hyperemia. *Jpn J Physiol* 34: 769-773
- 22) Saito M, Sone R, Ikeda M, and Tadaaki M (1997) Sympathetic outflow to the skeletal muscle in humans increases during prolonged light exercise. *J Appl Physiol* 82: 1237-1243
- 23) Saito M, Tsukanaka A, Yanagihara D, and Mano T (1993) Muscle sympathetic nerve responses to graded leg cycling. *J Appl Physiol* 75: 663-667
- 24) Strandell T and Shepherd JT (1967) The effect in humans of increased sympathetic activity on the blood flow to active muscles. *Acta Med Scand* Suppl 472: 146-167
- 25) Sundlof G and Wallin BG (1978) Effect of lower body negative pressure on human muscle nerve sympathetic activity. *J Physiol* 278: 525-532
- 26) Takaishi T, Sugiura T, Katayama E, Sato Y, Shima N, Yamamoto T, and Moritani T (2002) Changes in blood volume and oxygenation level in working muscle during a crank cycle. *Med Sci Sports Exerc* 33: 520-528
- 27) Victor RG and Leinbach WN (1987) Effects of lower body negative pressure on sympathetic discharge to leg muscles in humans. *J Appl Physiol* 63: 258-2562
- 28) Wolthuis RA, Bergman SA and Nicogossian AE (1974) Physiological effects of locally applied reduced pressure in man. *Physiol Rev* 54: 566-595
(平成16年1月27日受付, 平成16年3月15日訂正, 平成16年4月15日受理)