筋ポンプに関する研究
——筋収縮強度及び血液貯留量と筋ポンプ作用との関係——

西保 岳* 後藤 真二* 鍋倉 賢治* 池上 晴夫**

A STUDY OF MUSCLE PUMP
——RELATIONSHIP BETWEEN CONTRACTION FORCE
AND BLOOD VOLUME AND PUMPING ACTION——

TAKESHI NISHIYASU, SHINJI GOTO, YOSHIHARU NABEKURA and HARUO IKEGAMI

Abstract

The purpose of this study was to investigate the effects of contraction force and the pooled blood volume in the calf on the pumping action of calf muscle contraction. Calf blood volume was controlled by lower body negative pressure (LBNP) and isometric contraction of calf extensor muscle was performed using a handmade dynamometer in recumbent position. The relative volume changes ($\Delta V/V\%$) of calf were determined using rubber straining, when isometric contractions (5, 10, 20, 40 and 60 kg) of the calf muscle were repeated under LBNP of 0, -20, -40, and -60 mmHg.

During resting condition, $\Delta V/V$ was increased by 1.04% under -20 mmHg LBNP, 1.88% under -40 mmHg, and 2.54% under -60 mmHg. These increases of $\Delta V/V$ were due to the increased blood pooling in the calf. It was shown that the increased blood volume was almost expelled by several bouts of muscle contractions of proper force. The optimum force of contractions for expelling pooled blood was 20 kg under -20 mmHg LBNP, and 40 kg under -40 and -60 mmHg LBNP. And it was apparent that the effectiveness of muscle pump was accumulated with repeating contractions, arriving to a plateau after several bouts.

It was shown that the effect of muscle pump in the given contraction force was more effective under the condition with more amount of blood contained in the calf, but the muscle pumping action by light contraction forces couldn't overcome the effect of severe LBNP.

(Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med. 1987, 36: 195~201)

key words: 1) muscle pump, 2) LBNP, 3) contraction force.

I. 緒 言

ヒトが立位姿勢をとると、重力の作用によって下肢に多量の血液が貯留し、下肢から心臓への静脈還流が減少する。しかしこの際に、下肢筋を反復収縮すると、筋ポンプ作用によって下肢から血液が押し出され、静脈還流を促進させることができる^{1,10,16)}。このように下肢筋ポンプ作用は全身

の血液循環に重要な役割を果たしている。

筋ポンプ作用の効果は、筋収縮の強度や貯留している血液量によって影響をうける^{2,4)}。すなわち筋収縮強度が強いほど、また貯留血液が多いほど、多くの血液が押し出され、したがって筋ポンプの効果が増大すると考えられる。そして立位時には臥位時に比べて下肢に多量の血液が貯留しているため、一定強度の筋収縮を行なった場合に

* 筑波大学体育科学研究科 University of Tsukuba, Doctoral Program in Health and Sports Science, 茨城県新治郡桜村 Sakuramura, Niiharigun, Ibaraki 305

** 筑波大学体育科学系 University of Tsukuba, Institute of Health and Sports Science 茨城県新治郡桜村

は、臥位時よりも多くの血液を送り出すことができる。

筋ポンプに関するこれら2つの影響因子は互いに影響し合っていると考えられる。しかしその相互関係を考慮して、2つの因子が筋ポンプ作用に及ぼす効果について定量的に検討した研究はほとんど見あたらない。

本研究では、下肢における血液貯留量を種々に変化させた場合に種々の強度で下腿筋の等尺性収縮を行い、筋収縮力と血液貯留量が下肢筋ポンプ作用に及ぼす影響について定量的に検討することを目的とした。この目的のために、下半身陰圧負荷 (LBNP)^{14, 18)} を使用し、仰臥位姿勢のままで被検者の下肢血液貯留量を変化できるようにした。筋収縮もすべて同様の姿勢で行なった。

II. 方 法

A. 被検者

被検者は健康な男子学生7名であり、年齢、身長、及び体重の平均値と標準偏差はそれぞれ 23.1 ± 1.96 (years), 173.6 ± 4.16 (cm), 及び 67.4 ± 4.70 (kg) であった。

B. 下腿容積変化の測定

LBNP 負荷や筋収縮に伴う下腿の相対的な容積変化 ($\Delta V/V(\%)$) を測定するために、硫酸銅水溶液を封入したラバーストレインゲージプレチスモグラフを使用した。 $\Delta V/V$ の測定原理及びプレチ

スモグラフの操作法は Whitney¹⁷⁾ 及び加賀谷⁷⁾ の水銀ラバーストレインゲージの場合と同様である。あらかじめマイクロメーターで較正を行った後に、被検者の左下腿の最大囲部分に24gの張力で図1に示すようにプレチスモグラフを装着した。装着後レコーダー上の基線が十分に安定してから測定を開始するようにした。

C. 筋収縮方法ならびに収縮力の測定

図1に示すように、垂直な金属ペダルを踏み込むことによって下腿の等尺性筋収縮を行った。収縮強度は、5, 10, 20, 40, 及び60 kg 重の5種類であり、金属ペダルの下端部に箔ストレインゲージ (共和 KFC-5-CI) を接着して出力をストレインアンプ (共和 DPM-220A) で増幅することによって、発揮した筋力を測定できるようにした。この装置の較正は、実験前に各被検者についてペダル上の力点を求めておき、その点に較正用の荷重をかけることによって行った。アンプからの出力を記録計に接続すると共にオシロスコープ (岩通 SS-5710) にも導き、被検者がスコープ上で自分の筋力を確認し、規定強度の筋力になるように調節するようにした。この手技は実験前に各被検者によく練習させ、習熟させた。

D. 下半身陰圧負荷 (LBNP)

負荷した LBNP は、-20, -40, 及び -60 mmHg の3段階であり、LBNP 負荷の手順は先報^{14, 15)} に準じて行った。

Fig. 1. Experimental instrumentation in the present study.

E. 実験手順

被検者は下腿にラバーストレインゲージプレチスモグラフを装着した状態で約30分間の仰臥位安静をとった後に、常圧下（コントロール）で左脚の筋収縮運動を行った。この収縮運動は各強度について5秒に1回の頻度で10～15回連続して行った。同時にプレチスモグラフによって下腿容積変化($\Delta V/V$)を記録した。規定強度の収縮を行うにあたって、発揮した筋力にばらつきがある場合には再度収縮運動を行わせた。各強度の運動の間に、約5分間の安静をはさみ、間欠的に5種類の運動を行った。実施する運動の順序は無作為とした。常圧下での測定の後、3段階のLBNPを負荷した場合について、上記と同様にそれぞれの収縮運動を行い、 $\Delta V/V$ を測定した。

実験中の室温は25～27℃の範囲内にあった。

平均値の差の検定には Paired-t-test を用い、5%以下の危険率をもって有意差とした。

III. 結 果

下腿容積変化($\Delta V/V$)の代表的な例を図2に示した。これは-60 mmHgのLBNPを負荷した状態で40 kgの筋収縮を行った場合の例である。

LBNPを負荷することによって $\Delta V/V$ は増加し、約1分後にはほぼ一定値となった。このLBNPによって増加した $\Delta V/V$ をVC (Venous capacity) として図のように計測した。筋収縮を開始す

ると $\Delta V/V$ は速やかに減少した。最初の筋収縮によって減少する $\Delta V/V$ は、1回の筋収縮によって押し出される血液量に対応すると考えられる²⁾ことから、 SV_1 (Stroke Volume 1) として計測した。引き続いて収縮を反復すると、 $\Delta V/V$ は徐々に漸減し、この例では7回目にプラトーに達した。収縮による $\Delta V/V$ 変化量の最大値をEVmax (Expelled Volume max) とした。筋収縮を中止すると $\Delta V/V$ は徐々に増加して筋収縮前の値に近ずき、またLBNPを解除すると減少して基線にもどった。

各被検者について、VC、 SV_1 及びEVmaxを計測して、平均した結果を図3に示した。図に示したように、LBNPが強くなるほど安静時のVCは増大し、-20、-40、及び-60 mmHgのLBNPによってそれぞれ1.04%、1.88%、及び2.54%となり、各値の差はすべて有意であった。

コントロールにおいてもLBNP条件下でも筋収縮によって $\Delta V/V$ は減少した。全般的に SV_1 よりもEVmaxが明らかに大きいことから、筋収縮による筋ポンプ作用は反復することによって効果が累積することが分かる。

SV_1 及びEVmaxと筋収縮強度との関係をみると、コントロールでは、 SV_1 は40 kgまでは収縮強度が強いほど大きい傾向にあり60 kgでやや減少するが、EVmaxは5～20 kgの軽い収縮で高値を示し、それ以上の収縮ではかえって減少する

Fig. 2. Typical tracing of the relative calf volume change by muscle contractions under LBNP. The method to measure VC, SV_1 , and EVmax is showed in the figure.

Fig. 3. Changes in leg volume (VC) by LBNP and changes in SV_1 and EV_{max} by muscle contractions during control stage and LBNP stage of 0, -20, -40, and -60 mmHg. *, $\star p < 0.05$

Fig. 4. Changes in SV_1 and EV_{max} by muscle contractions of 5, 10, 20, 40, and 60 kg under LBNP. *, $\star p < 0.05$

傾向にある。しかしいずれも有意な差ではなかった。-20 mmHg の LBNP においては、 SV_1 も EV_{max} も筋収縮強度の増加に伴って増大し、20 kg の筋収縮時に最大となり、筋収縮がそれ以上になると再び減少する傾向にあった。またこの図から、安静時に LBNP によって増加した下腿容積は 20 kg の筋収縮によってコントロールでの筋収縮時と近いレベルまで減少したことがわか

る。

-40 mmHg の LBNP の場合には、5 kg の筋収縮では SV_1 も EV_{max} もともに小さいが、 SV_1 は 60 kg まで、また EV_{max} は 40 kg まで収縮強度の増加に伴って増大する傾向にあった。40 kg の筋収縮時の下腿容積はコントロールの安静値以下まで減少した。-60 mmHg の LBNP の場合には、5 kg の収縮を行っても下腿容積はほとんど変化

しなかった。しかしそれ以上の強度の筋収縮では、40 kg までは強度の増加とともに SV_1 も EV_{max} も顕著に増大し、 -40 mmHg の LBNP の場合とほぼ同様に 40 kg の収縮によって下腿容積が最小となった。40 kg の筋収縮によって下腿容積は常圧臥位安静値に近くなるまで減少した。

次に各筋収縮強度について LBNP 負荷と SV_1 及び EV_{max} の関係をみると図 4 のようになった。5 kg の収縮の場合についてみると、コントロール及び -20 mmHg の軽い LBNP の場合には $-40\sim-60\text{ mmHg}$ の LBNP の場合よりも SV_1 も EV_{max} も大きい傾向にあった。しかし 20 kg から 60 kg の筋収縮の場合には、LBNP が強くなるほど EV_{max} はより増大し、 SV_1 は増大または頭打ちになる傾向にあった。

また全般的に筋収縮強度が増大するにつれて SV_1 も EV_{max} も増大するが、40 kg と 60 kg の筋収縮ではコントロールの場合にもいずれの LBNP の場合においても SV_1 、 EV_{max} はほぼ等しかった。

IV. 考 察

下半身に陰圧を負荷すると下肢静脈の壁内外圧差が増大して、静脈に多量の血液がプーリングする^{3,11,13)}。今回の実験では下腿容積が、 -20 mmHg の LBNP によって1.04%、 -40 mmHg で1.88%、そして -60 mmHg で2.54%増大した。これは Loepkkey ら⁹⁾が同様な LBNP 負荷時の下腿容積増加を水銀ラバーストレインゲージを使って測定し、1分後にはそれぞれ0.8, 1.6, 及び2.5%であったと報告しているのとはほぼ同程度の変化であるといえる。LBNP を長時間負荷すると血漿が血管から組織中に移動してくる^{9,12)}が、今回の実験のような短時間の LBNP 負荷では組織中への移動はほとんどなく、したがって LBNP 負荷による上記の下腿容積増加は静脈内に貯留した血液量に対応するものと考えられる。

LBNP によって下腿に多量の血液が貯留した状態で下腿筋を収縮させると、下腿容積 ($\Delta V/V$) は顕著に減少した (図 2)。この容積減少は、筋ポンプ作用によって、貯留していた血液が下腿から押

し出されるために生じたものであると考えられる。したがって SV_1 ならびに EV_{max} は筋ポンプによって押し出された血液量を示すものであり、換言すると筋ポンプの効果を表すものと考えられる。

図 3 は、LBNP によって生ずる血液貯留が筋収縮を行うことによって大部分解消されることを示している。また全体的にみれば筋収縮を反復すると効果は累積され、そして数回の収縮によって筋ポンプの効果はほぼプラトーに達するといえる。それに関連して、Pollack and Wood¹⁶⁾は立位安静状態から歩行を開始した時の大伏在静脈圧を測定して、7歩目前後まで静脈圧が徐々に減少することを示している。

-20 mmHg の LBNP の場合には LBNP によって貯留した血液は、10~20 kg 程度の軽い筋収縮でもほぼ完全に中心部方向に送り返されることが示された (図 3)。そして -40 mmHg 以上の中・高度の LBNP においても、20 kg 以上の収縮によって下腿容積はほぼ常圧安静時の状態にまで減少した。このような筋ポンプの効果は、 -20 mmHg の LBNP では20 kg の収縮で、そして -40 mmHg ならびに -60 mmHg の LBNP の場合には40 kg の収縮でそれぞれ最大となった。Barendsen ら²⁾は、立位姿勢において、筋ポンプの効果と収縮強度との関係を調べたところ、体重の半分を片足にかけ程度の収縮強度までは収縮強度と筋ポンプの効果とは比例関係にあるが、それ以上の収縮強度では筋ポンプの効果が頭打ちになることを報告している。一方、立位時に下肢に貯留する血液量と $-40\sim-50\text{ mmHg}$ の LBNP 時の貯留量とがほぼ等しいと言われている^{13,14)}、したがって Barendsen らの結果と本実験での -40 mmHg ならびに -60 mmHg の LBNP の場合の結果とを比較してみると、本実験においても 40 kg までは収縮強度とともに SV_1 ならびに EV_{max} が増大して、彼らの結果と同様の傾向が示されている。しかし本研究では、60 kg の収縮の場合には 40 kg の場合より EV_{max} がわずかに減少する傾向にあった。この原因としては、40 kg から 60 kg に運動強度が増すことによって弛緩期の筋血流量が増大して

収縮後の refilling time が短縮し, 筋ポンプの累積効果が現れにくいためであろうと考えられる。

筋ポンプの効果は, ある一定強度の筋収縮を行う場合に下肢に貯留した血液量が多いほど, 増大するものと考えられる²⁾。この点に関してわれわれは先報¹⁵⁾において, LBNP 負荷時に自転車運動を行った際の SV の変化を測定して, 運動強度が一定の場合には LBNP 負荷が強いほど運動による SV 増加量が増すことを報告した。

コントロール及び LBNP 下の下腿容積変化 ($\Delta V/V$) を収縮強度別に検討した結果 (図 4) では, 5 kg や 10 kg の軽い筋収縮でも, コントロールや -20 mmHg の LBNP の場合には十分有効であるが, -40 mmHg や -60 mmHg の強い LBNP 下では EVmax や SV₁ が小さく, 筋ポンプの効果が現れにくい傾向がみられた。特に -60 mmHg の LBNP 下で 5 kg の筋収縮を行っても筋ポンプの効果はほとんど認められなかった。それに対して 20 kg 以上の収縮では, LBNP 強度の増大とともに EVmax が増大した。

これらのことは, 20 kg 以上の筋収縮では, 血液貯留量が増すほど筋ポンプの効果が増大するが, 筋の収縮強度が弱いと強い LBNP 作用には打ち勝てないことを示している。

筋ポンプの効果は, 今回検討した筋収縮強度や血液貯留量の他に, 筋収縮の頻度や環境温などによっても影響されることが知られている⁴⁻⁶⁾。本実験における収縮頻度は 5 秒に 1 回であったが, 常温下の筋収縮後の refilling time が 20 秒以上であることから, 収縮頻度を若干変化させたとしても結果はさほど変わらないのではないかと考えられる。しかし環境温が高くなると refilling time が短縮し, EVmax は頻度の影響を敏感に受けるものと考えられる。これらの因子は互に関連しているので, この点に関しては今後さらに検討する必要がある。

V. 総 括

下腿筋収縮強度と血液貯留量が筋ポンプ作用の効用に及ぼす影響について検討した。下腿血液量を増大させるために下半身陰圧負荷 (LBNP) を

用い, 下腿筋の収縮運動として仰臥位での左下腿伸筋の等尺性収縮を行った。負荷した LBNP は -20 mmHg, -40 mmHg, 及び -60 mmHg の 3 種類であり, 収縮頻度は 5 秒に 1 回であった。被検者は健康な男子学生 7 名であり, LBNP と筋収縮の組み合わせ条件下における下腿容積変化 ($\Delta V/V$) を測定した。

安静状態で LBNP を負荷すると $\Delta V/V$ は増加した。すなわち -20 mmHg の LBNP によって 1.04% 増加し, -40 mmHg 及び -60 mmHg の LBNP でそれぞれ 1.88% 及び 2.54% 増加した。この増加は下腿に血液が貯留したためであるが, この貯留した血液は適当な強度の筋収縮を行うことによって, ほとんど完全に下腿から押し出されることが示された。この至適な収縮強度は -20 mmHg の LBNP の場合は 20 kg であり, -40 mmHg ならびに -60 mmHg の LBNP の場合には 40 kg であった。そしてこれら筋ポンプの効果には累積効果があり, 1 回の収縮よりも連続して数回行った方が明らかにその効果が増大した。

同一強度の筋収縮による筋ポンプの効果は, 20 kg 以上の筋収縮では下腿血液量が増すほど増大する傾向にあった。しかしそれ以下の強度の収縮では, -40 ~ -60 mmHg の強い LBNP の作用には打ち勝てず, 筋ポンプの効果は顕著でなかった。

(受付 昭和 61 年 10 月 14 日)

References

- 1) Barcroft, H. and Dornhorst, A. C. (1949) : Demonstration of the "muscle pump" in the human leg. *J. Physiol (London)*, **108**, 39.
- 2) Barendsen, G. J. and van den Berg, Jw. (1984) : Venous capacity, venous refill time and the effectiveness of the calf muscle pump in subjects, *Angiology*, **35** (3), 163-172.
- 3) Coles, D. R., Kidd, B. S. L. and Moffat, W. (1975) : Distensibility of blood vessels of the human calf determined by local application of subatmospheric pressure, *J. Appl. Physiol.*, **10** (3), 416-468.
- 4) Folkow, B., Gaskell, P. and Waaler, B. A. (1970) : Blood flow through limb muscles during heavy

- rhythmic exercise, *Acta. Physiol. Scand.*, **80**, 61-72.
- 5) Folkow, B., Haglund, U., Jodal, M. and Lundgren, O. (1971) : Blood flow in the calf muscle of man during heavy rhythmic exercise, *Acta. Physiol. Scand.*, **81**, 157-163.
 - 6) Henry, J. P. and Gauer, O. H. (1950) : The influence of temperature upon venous pressure in the foot, *J. Clin. Invest.*, **29**, 855-861.
 - 7) 加賀谷淳子(1979) : 体育学実験・演習概説, 初版, 筋血流量, 大修館書店, 東京, 74-75.
 - 8) Loeppky, J. A., Kobayashi, Y., Venters, M. D. and Luft, U. C. (1979) : Effects of regional hemoconcentration during LBNP on plasma volume determinations, *Aviat. Space Environ. Med.*, **50**(8), 763-767.
 - 9) Loeppky, J. A., Venters, M. D. and Luft, U. C. (1978) : Blood volume and cardiorespiratory responses to lower body negative pressure, *Aviat. Space Environ. Med.*, **49**(11), 1297-1307.
 - 10) Ludbrook, J. (1969) : Functional aspects of the veins of the leg, *Am. Heart J.* **64**(5), 706-713.
 - 11) Montgomery, L. D., Kirk, P. J., Payne, P. A., Gerber, R. L., Newton, S. D. and Williams, B. A. (1977) : Cardiovascular responses of men and women to lower body negative pressure, *Aviat. Space Environ. Med.*, **48**(2), 138-145.
 - 12) Murray, R. H., Krog, J., Carlson, L. D. and Bowers, J. A. (1967) : Cumulative effects of venesection and lower body negative pressure, *Aerosp. Med.*, **38**, 243-247.
 - 13) Musgrave, F. S., Zechman, F. W. and Mainns, R. C. (1969) : Change in total leg volume during lower body negative pressure, *Aerosp. Med.*, **40**(6), 602-606.
 - 14) 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.
 - 15) 西保 岳, 姜 熙成, 池上晴夫(1985) : 筋ポンプが血液循環動態に及ぼす影響(第2報), *体力科学*, **34**, 284-293.
 - 16) Pollack, A. A. and Wood, E. H. (1949) : Venous pressure in the saphenous vein at the ankle in man during exercise and changes in posture, *J. Appl. Physiol.*, **1**, 649-662.
 - 17) Whitney, R. J. (1953) : The measurement of volume changes in human limbs, *J. Physiol.*, **121**, 1-27.
 - 18) Wolthuis, R. A., Bergman, J. A. and Nicogossian, A. E. (1974) : Physiological effects of locally applied reduced pressure in man, *Physiol. Rev.*, **54**(3), 566-595.