

最大位までの多段階ストレッチングが筋の循環に与える影響

大森芙美子¹ 奥山 静代² 村岡 慈歩³ 森 曜生⁴
鈴木早紀子⁴ 水村真由美⁵ 加賀谷淳子¹

要 旨：本研究では段階的に最大位まで伸長させるストレッチングが、下腿の筋血液量に与える影響を明らかにすることを目的とし、健康な成人女性 10 名に最大角度までのストレッチングを行わせ、腓腹筋内側頭(MG)とヒラメ筋(SOL)の酸素化(OxyHb)・脱酸素化(DeoxyHb)・総ヘモグロビン(TotalHb)濃度を測定した。また、膝窩動脈血流速度(ドップラー法)と血管径(Bモード法)から膝窩動脈血流量を算出した。TotalHbは、MGにおいては最大ストレッチング角度の80%(80% max)から角度増加とともに減少した($p < 0.05$)が、SOLでは40% maxから角度増加とともに増加した($p < 0.05$)。一方、膝窩動脈血流量は、角度増加に伴い有意な変化を示さなかった。以上のことから、最大位まで行うストレッチングでは、上位血管である膝窩動脈血流量は有意な変化を示さないが、下腿協働筋のSOLでは40% max以上、MGでは80% max以上で筋酸素動態に変化がみられ、筋循環への影響がみられることが示された。(J Jpn Coll Angiol, 2010, 50: 483-488)

Key words: calf muscle stretching, blood volume, medial gastrocnemius and soleus muscle

序 言

運動の実践現場でよく用いられているストレッチングの効果は、筋腱だけでなく、筋内循環にも及ぶとされている¹⁻⁴⁾。ストレッチングによる筋線維の伸長とストレッチング中止による筋線維の短縮は筋内の血管の形状や位置関係を変えるため⁵⁾、筋内循環に変化が起こればと考えられている。このような変化は、当該筋へ血液を供給している上位血管の血流量や筋血液量および酸素動態に反映されると考えられる。

先行研究では、最大下の一定角度でのストレッチング中、当該筋血液量は減少することが報告されている²⁾ので、循環系の変化を起こすのに必要なストレッチングは必ずしも最大でなくてもよいと考えられる。しかしながら、どの程度のストレッチングにより、当該筋血液量の減少がみ

られるのかは明らかにされていない。ストレッチング中の循環阻害の程度は、ストレッチング後の循環応答の促進にも影響を与えると考えられるので、ストレッチング中の血液量の減少がみられる角度を明らかにすることは、循環応答の促進に効果的なストレッチング方法を明らかにすることに役立つと考えられる。

一方、ストレッチング中の筋血液量の応答を下腿協働筋間で比較した場合、協働筋間で相違があることが報告されている⁴⁾。それによると、ストレッチングによって血液量が減少する筋だけでなく、増加する筋もみられたことから、下腿のストレッチングに関与する協働筋の各筋毎に、ストレッチングの角度と循環応答との関係を明らかにする必要があると考えられる。

以上のことから、本研究では、段階的に最大位まで伸長させるストレッチングが、1)下腿各筋群の血液量変化、2)下腿筋へ血液を供給する血管の血流動態、に与える影響についてストレッチングの角度との関係から検討することを目的とした。

¹日本女子体育大学

²慶應義塾大学体育研究所

³明星大学人文学部

⁴お茶の水女子大学大学院人間文化研究科博士後期課程

⁵お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科

2009年6月1日受付 2010年9月7日受理

対象と方法

1. 対象

トレーニングを定期的に行っていない成人女性 10 名 (21.6±0.8 歳, 158±5 cm, 54±7 kg) を被験者とした。被験者にはあらかじめ実験内容とそれに伴う危険性、被験者となることの任意性を十分説明し、文書で同意を得た。本研究は日本女子体育大学「人を対象とする実験・調査に関する倫理審査委員会」において承認され(申請番号 2006-3)、日本女子体育大学「人を対象とする実験・調査に関する倫理指針」およびヘルシンキ宣言に則って実施された。

2. 実験プロトコール

被験者は仰臥位をとり、膝関節を完全伸展位とし、足関節角度 120 度(内角)の状態から、受動的足背屈ストレッチングを行った。受動的足関節背屈は、足関節の回転軸がずれないように固定された板を、験者が押すことによって行われた。

1) プロトコール 1: 最大ストレッチング角度の測定と痛みを感じない最大角度の算出

最大ストレッチング角度は、足関節角度 120 度(内角)から受動的に背屈させ、被験者が主観的にそれ以上背屈できないと感じた時に口頭で合図をしてもらい、その時の角度を記録することによって求めた。また、その過程で、被験者が主観的に「痛み」を感じた時に合図をしてもらい、その時の角度を「痛みを感じる最小角度」として記録した。そして、その角度から 3 度減じた角度を「痛みを感じない最大角度」とした。なお、最大ストレッチング角度および「痛みを感じる最小角度」の測定は、各試行間を 1 分の間隔をあけて 5 回行い、それぞれの角度は、最大値と最小値を除いた 3 回の値を平均して求めた。

2) プロトコール 2: 最大角度までの多段階ストレッチング

段階的にストレッチング角度を増加させ、連続的に最大角度まで背屈させるストレッチングを行った。ストレッチングの角度は、最大角度を 100% (max) とし、その 10, 30, 40, 60, 80, 100% (10% max, 30% max, 40% max, 60% max, 80% max, 100% max) とした。安静後、10 秒かけて 10% max の角度に変化させ、30 秒間保持した後、すぐに 10 秒かけて 30% max の角度に変化させるストレッチングを 100% max まで連続的に行わせた。

3. 測定項目および測定方法

腓腹筋内側頭(MG)およびヒラメ筋(SOL)において、

筋束長を超音波法で(GE Healthcare Japan: Vivid7pro)、酸素化(OxyHb)・脱酸素化(DeoxyHb)・総ヘモグロビン(TotalHb)濃度を近赤外線分光法(浜松ホトニクス: NIRO200)を用いて測定した。MG は下腿長の近位より 30%, SOL は下腿長の近位より 60% の筋腹を中心に近赤外線分光法(装置)のプロープの送光部と受光部を 4 cm の間隔で装着した。同部位の皮下脂肪厚は、MG で 0.6±0.1 cm, SOL で 0.8±0.1 cm であった。測定した OxyHb, DeoxyHb, TotalHb の値は、皮下脂肪厚を考慮した測定感度(測定感度 = $\exp\{-(h/A_1)^2\} - A_2 G(a,b) : G(a,b)$ はガンマー分布, A_1, A_2, a, b は送受光間距離によって決まる定数)を用いて補正した⁶⁾。各角度での OxyHb, DeoxyHb, TotalHb の値は、角度保持の終了直前 5 秒の値を平均し算出した。また、下腿へ血液を供給する膝窩動脈の血流速度および血管径を超音波ドップラー法と B モード法(GE Healthcare Japan: Vivid7pro)で測定し血流量を算出した[血流量 = 血流速度 × (血管径 / 2)² × π × 60]。各角度での血流量値は、角度保持終了直前 5 パルスの値を平均し算出した。

4. 統計処理

群の代表値は、平均値 ± 標準誤差で示した。各角度の平均変化量について、一元配置分散分析(one-way ANOVA)を行った。分散分析の結果、有意差が認められた場合、Dunnett 法を用いて下位検定を行った。

結 果

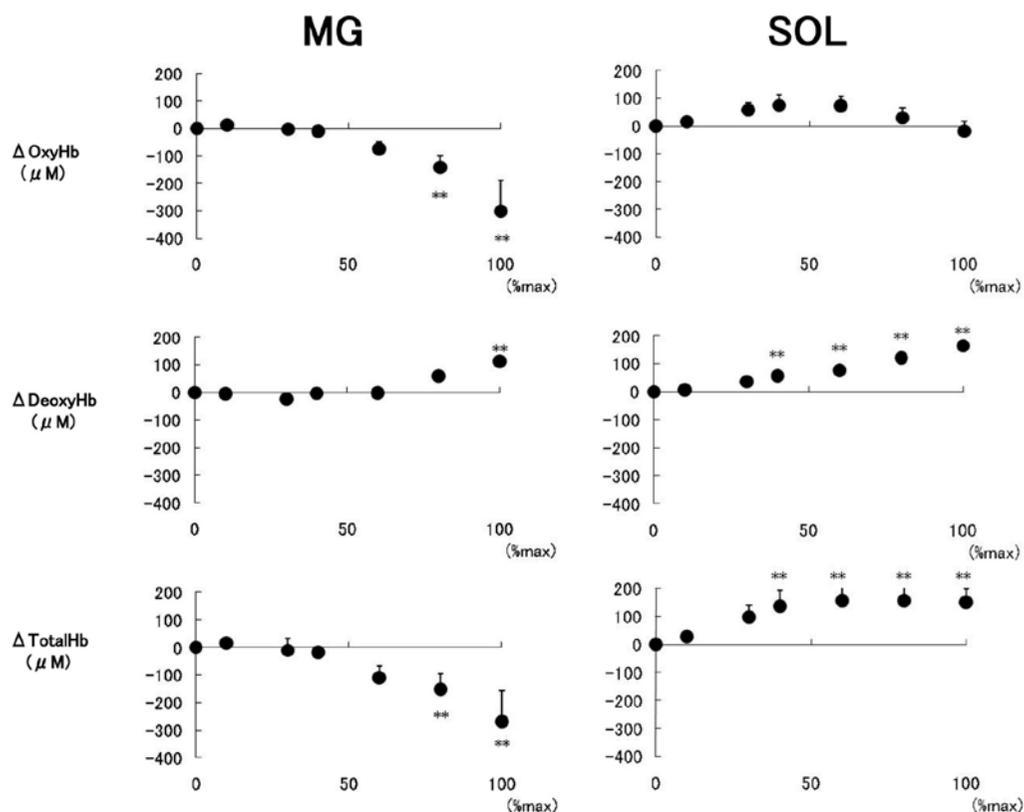
最大位までストレッチングを行ったときの関節角度は 64.6±2.5 度であり、痛みを感じない最大角度は、51.8±1.5 度であった。ストレッチングに伴う筋束長の変化を Table 1 に示した。MG および SOL において、安静時に対し、痛みを感じない最大角度および最大ストレッチング角度で筋束長が有意(p<0.05)に伸長した。また、安静時に対する最大ストレッチング角度での伸長率(伸長率 = 最大角度時筋束長 / 安静時筋束長 × 100)は、MG で 187%, SOL で 139% であり、MG で有意(p<0.05)に高い値を示した。

多段階ストレッチングにおける MG および SOL の OxyHb・DeoxyHb・TotalHb の変化を Fig. 1 に示した。MG では、OxyHb および TotalHb は 40% max までは変化しないが、その後角度増加に伴い減少し、80% max で安静値に対して有意(p<0.05)に減少した。また、DeoxyHb は 60% max までは変化しないが、その後角度増加に伴い増加し、100% max で安静値に対して有意(p<0.05)に増加した。一方、SOL の DeoxyHb および TotalHb は角

Table 1 Fascicle length of MG and SOL at comfortable maximal position without pain and maximal dorsiflexion

	Rest	Comfortable maximal position without pain	Maximal position
MG	42.6 ± 2.8	73.8 ± 3.6*	78.1 ± 3.1*
SOL	37.2 ± 2.3	48.3 ± 2.8*	51.8 ± 3.0*

mean ± SE, *p<0.05 vs. rest, (mm)

**Figure 1** Muscle oxygenation in MG and SOL during passive dorsiflexion to maximal extent. *p<0.05, **p<0.01 vs. baseline.

度増加に伴い増加し、40% max 以上で安静値に対して有意(p<0.05)に増加したが、OxyHbは有意な変化は示さなかった。

多段階ストレッチ中の膝窩動脈血流量の変化をFig. 2に示した。角度増加に伴う有意な変化はみられなかった。

考 察

本研究では段階的に最大位まで伸長させるストレッチ

グにおいて、1)下腿筋群の血液量変化、2)上位血管の血流動態と下腿筋群での血液量との関係について検討した。その結果、次のような結果が得られた。1)下腿協働筋群間では角度が大きくなると筋血液量応答に相違がみられ、MGでは80% max 以上でTotalHbおよびOxyHbが有意に減少し、SOLでは40% max 以上でTotalHbおよびDeoxyHbが有意に増加した。2)上位血管である膝窩動脈血流量では有意な変化がみられなかった。

近赤外線分光法を用いて測定されたヘモグロビン濃度

は、組織での酸素消費と酸素供給のバランスを反映している⁷⁾。酸素需要が少ない強度の筋活動時では、TotalHb、OxyHb、DeoxyHbに顕著な変化はみられないが、酸素需要が高まる強度の筋活動では、ヘモグロビンの脱酸素化が亢進したにもかかわらず、それに対応した酸素供給量の増加がみられないため、OxyHbが急激に低下し、逆にDeoxyHbは増加する⁸⁾。また、血管径の縮小などの機械的な要因による酸素供給量の減少がみられる場合には、TotalHb、OxyHb、DeoxyHbのすべてにおいて低下する²⁾ことが報告されている。横澤ら²⁾は、ストレッチングによる筋腱複合体の伸長によってMGの筋血液量が減少することを報告しているが、どの程度の伸長によって筋血液量の減少が起こるかについて、明らかにされていない。本研究では、多段階ストレッチングにおけるTotalHbおよびOxyHbの減少は、MGにおいて80% max以上の角度で顕著となることが明らかにされた。そして、この角度は痛みを感じない最大角度に相当していることが示された。足関節角度120度(内角)から30度背屈する角度と痛みを感じない最大角度の2種類の角度を用いて1分間のストレッチングを行った先行研究では、伸長されたMGにおいてストレッチング中に筋血液量の減少がみられた⁴⁾。そして、ストレッチング中の膝窩動脈血流速度は有意な変化は示さなかったが、ストレッチング終了後に膝窩動脈血流速度の促進が起こることが報告されている⁴⁾。また、筋血液量の変化と膝窩動脈血流速度の促進は、30度背屈する角度でのストレッチングより、さらに背屈して痛みを感じない最大角度で行ったほうが大きいことが報告されている⁹⁾。これらの先行研究の結果と本研究結果を合わせて考えると、「痛みを感じない最大角度でのストレッチング」では、筋内循環が機械的な影響を受け、ストレッチング中の筋内循環の抑制がストレッチング後の循環応答の促進に貢献することが明らかになった。

TotalHbについては、MGでは減少したが、SOLでは増加がみられた。また、その増加が顕著に起こったのは、40% maxであり、MGでのTotalHbの減少がみられた80% maxよりも小さい角度であった。この協働筋間でのTotalHbの増減が異なったこと、またMGとSOLでTotalHbの増減の起こる角度が異なったことは、筋束長伸長率の相違が要因の1つに考えられる。本研究では、最大ストレッチング角度での安静時からの伸長率は、MGで187%、SOLで139%とMGで有意に大きな伸長が

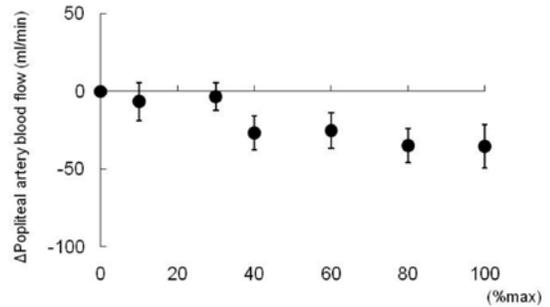


Figure 2 Popliteal artery blood flow during incremental stretching to maximal extent.

みられた。血管が伸長すると、血管径が縮小することによって、当該血管内の血流量は低下する¹⁰⁾とされてきた。Poiseuilleの法則($Q = \pi r^4 / 8 \eta l \Delta P$, Q:血流量, r:血管径, η :粘性率, l:血管の長さ, P:血圧)により、血流量は血管径の4乗に比例する($R = P / \pi r^4 \cdot \Delta P$, R:抵抗)ことから、血管の拡張・縮小が血流量の増減に与える影響は大きい。また、血管抵抗は血管径の4乗に反比例することから、末梢血管径のわずかな変化が血管抵抗を大きく変化させる。本研究では、筋束長の伸長率がMGで高かったことから、筋内血管の伸長、血管径の縮小程度が大きく、その結果、MGでは血管抵抗が高くなり、血液の流入が制限されたことが考えられる。一方、上位の同一血管から血液が配分されるSOLでは、相対的に血管抵抗が低くなり血液が多く流入した可能性が推察される。また、最大ストレッチング角度は両筋で異なるので、絶対値が同一の角度であっても両筋の伸長率は異なる。伸長率の大きいMGでは、筋内血管の伸長や血管径の縮小程度も大きく、より低い絶対的角度からSOLに血液が流入した可能性が考えられる。DeoxyHbについては、MGでは60% maxまでは変化がみられないが、その後、角度増加に伴い増加し、100% maxでは安静値より有意に増加した。SOLでは、30% maxまでは変化がみられなかったが、その後は角度増加とともに有意に増加した。MGでは、TotalHbおよびOxyHbが減少しており、SOLでは、TotalHbは増加しているがOxyHbは有意な変化を示していないことから、MGおよびSOLにおけるDeoxyHbの増加は、血液量増加に依存するものではなく、骨格筋有酸素代謝が亢進した可能性を示している。

一方、当該筋の上位血管である膝窩動脈血流量は、

下位血管における血管径縮小という物理的要因による血管抵抗の増加や機械受容器反射による血管収縮¹⁾により、ストレッチング中には減少すると考えられた。しかし、本研究の結果では、角度の増加とともに減少傾向を示したものの、最大位まで有意な変化はみられなかった。一定角度のストレッチングを行った先行研究では、MGでは血液量が減少したものの、拮抗筋である前脛骨筋(TA)では増加したと報告されている⁴⁾。先行研究と本研究結果を合わせて考えると、膝窩動脈血流速度が有意な変化を示さなかった理由の1つとして、ストレッチング中の筋血液量の応答には、下腿協働筋間で相違があり、ストレッチングによって減少するだけでなく増加する筋もみられたこと以上に、ストレッチングによる下腿協働筋の筋線維の伸長に伴って、筋線維長が受動的に短縮する拮抗筋への血液量増加がかかっていると考えられる。この点については今後さらに検討する必要がある。また、ストレッチングにおける逆行速度の増加も理由の1つとして考えられる。筋への動脈流入を規定する血流速度は、順行速度と逆行速度から成り立ち、逆行速度は血管抵抗が増加したときに増加することが知られている¹²⁾。ストレッチングによる筋線維の伸長が血管径の縮小、血管抵抗の増加を引き起こし、上位血管で逆行速度を増加させた可能性も考えられ、今後の検討課題である。

結 論

本研究で用いた段階的に最大位まで伸長させるストレッチングでは、上位血管である膝窩動脈血流量は有意な変化を示さないにもかかわらず、下腿協働筋群においては、筋循環への影響がみられ、そのストレッチング角度はSOLでは40% max以上、MGでは80% max以上であることが示された。

謝 辞

本研究は、日本女子体育大学「学術フロンティア推進事業」プロジェクト(文部科学省、平成16~20年度)による研究助成を受けて実施されたものである。

文 献

- 1) Poole DC, Musch TI, Kindig CA: In vivo microvascular structural and functional consequences of muscle length changes. *Am J Physiol*, 1997, **272**: H2107-2114.
- 2) 横澤仁美, 村岡慈歩, 清水静代 他: 静的ストレッチング中の筋束長の変化と筋酸素動態. *脈管学*, 2002, **42**: 25-28.
- 3) Kagaya A, Muraoka Y: Muscle architecture and its relationship to muscle circulation. *Int J Sport Health Sci*, 2005, **3**: 171-180.
- 4) 加賀谷淳子, 村岡慈歩, 奥山静代 他: Integrative study of circulation regulation during exercise; contribution to developing optimal program for health promotion and physical fitness through sports and exercise, 2006, 58-64.
- 5) Nakao M, Segal SS: Muscle length alters geometry of arterioles and venules in hamster retractor. *Am J Physiol*, 1995, **268**: H336-H344.
- 6) Niwayama M, Yamamoto K, Kohata D et al: A 200-channel imaging system of muscle oxygenation using CW near-infrared spectroscopy (special issue on measurements and visualization technology of biological information). *IEICE Trans Inf Syst*, 2002, **E85-D**: 115-123.
- 7) 浜岡隆文, 佐古隆之: 骨格筋循環・代謝の非侵襲測定の確立と脈管学領域への応用. *脈管学*, 2003, **43**: 239-244.
- 8) Homma S, Kagaya A: Oxygen delivery and utilization in working muscles during 1-min static handgrip exercise at varied intensity. *J Exerc Sci*, 1998, **8**: 30-37.
- 9) 大森美子, 村岡慈歩, 清水静代 他: 受動的な下腿ストレッチングによる膝窩動脈血流速度の変化—AntegradeとRetrograde成分からの検討—. *日本体育学会第58回大会予稿集*, 2007, 192.
- 10) Supinski GS, Bark H, Guanciale A et al: Effect of alterations in muscle fiber length on diaphragm blood flow. *J Appl Physiol*, 1986, **60**: 1789-1796.
- 11) Cui J, Blaha C, Moradkhan R et al: Muscle sympathetic nerve activity responses to dynamic passive muscle stretch in humans. *J Physiol*, 2006, **576**: 625-634.
- 12) Green D, Cheatham C, Reed C et al: Assessment of brachial artery blood flow across the cardiac cycle: retrograde flows during cycle ergometry. *J Appl Physiol*, 2002, **93**: 361-368.

Effect of Calf Muscle Incremental Stretching to Maximal Extent on Peripheral Circulation

Fumiko Ohmori,¹ Shizuyo Okuyama,² Yoshiho Muraoka,³ Aki Mori,⁴ Sakiko Suzuki,⁴ Mayumi Mizumura,⁵
and Atsuko Kagaya¹

¹Research Institute of Physical Fitness, Japan Women's College of Physical Education, Tokyo, Japan

²Institute of Physical Education, Keio University, Kanagawa, Japan

³School of Humanities, Meisei University, Tokyo, Japan

⁴Graduate school of Humanities and Science, Ochanomizu University, Tokyo, Japan

⁵Department of Performing Arts, Graduate school of Humanities and Science, Ochanomizu University, Tokyo, Japan

Key words: calf muscle stretching, blood volume, medial gastrocnemius and soleus muscle

The purpose of this study was to clarify the effect of calf muscle incremental stretching to the maximal extent on calf muscle blood volume (NIRS) and popliteal artery blood flow (the Doppler ultrasound method). The popliteal artery blood flow did not change significantly during incremental stretching. The total Hb of the medial gastrocnemius (MG) significantly ($p<0.05$) decreased above the range of 80% of the maximally extended position, whereas it significantly ($p<0.05$) increased in the soleus muscle (SOL) above 40% of the maximum during incremental stretching. In conclusion, the calf muscle blood volume during incremental stretching began to change at 40% of the maximally stretched position in the SOL and 80% of the maximum in the MG, increasing in the former and decreasing in the latter muscles, without a significant change in the upstream blood flow. (J Jpn Coll Angiol, 2010, **50**: 483–488)