

血流制限下の歩行トレーニングが中高齢女性の筋肥大と有酸素能に与える影響

2010年3月終了 人間環境学専攻 47-086693 尾崎 隼朗
指導教員 安部 孝 特任教授

The purpose of this study was to investigate the effects of walk training with blood flow reduction (BFR) on aerobic capacity, muscle size/function as well as arterial compliance in elderly women. 18 elderly women divided into either BFR-walk training (BFR-walk) or control-walk training (CON-walk) groups. Each subject performed 20 min treadmill-walking, 4 days/wk for 10 wks. The exercise intensity was set 45% of heart rate reserve. Subjects in the BFR-walk wore pressure belts on proximal part of both legs during training with restrictive pressure at 200 mmHg. Thigh muscle cross sectional area and maximum strength increased ($P < 0.05$) in the BFR-walk, but not in the CON-walk. Estimated maximum oxygen uptake improved in the BFR-walk group ($P < 0.05$), and tended to increase in the CON-walk group ($P < 0.15$). Carotid arterial compliance improved in both groups. Walk training with blood flow reduction concurrently improved aerobic capacity, muscle size/function and carotid arterial compliance.

Key words: Concurrent improvement, Muscle function, Cardiovascular fitness, Blood flow restricted walk

1. 緒言

加齢に伴う骨格筋量の低下は『サルコペニア』と呼ばれ、骨粗鬆症やインスリン抵抗性、肥満等の発症リスクを高めることが指摘されている。また骨格筋量の低下は特に下肢において著しく、下肢筋力の低下は、転倒の主な原因である。そのため、サルコペニアへの対策として、筋力トレーニングによる筋サイズと筋力の増加が推奨されている。また有酸素能の指標である最大酸素摂取量($\dot{V}O_{2max}$)も、加齢に伴う低下が観察され、その低下は心臓血管系の疾病リスクを高める。そのために、持久性トレーニングによる $\dot{V}O_{2max}$ の改善が推奨されている。しかし、こうした現在行われている一般的な対策では、高強度の辛いトレーニングが必要とされるため、特に中高齢者の場合、それに耐えうる強いモチベーションが欠如しているなど、誰もが実施できるわけではない。また通常、筋サイズ及び筋力と有酸素能の改善には異なる2つのトレーニングが必要であり、その実施には、必然的に多くの時間を要することとなる。従って、より低強度で、しかも単一の運動でこれらを同時に改善できれば、その方法は非常に有用なものとなりうる。

近年、低強度(20%1RM)の筋力トレーニングでも、活動筋への血流を制限することで、筋肥大及び筋力増加が生じることが報告されている。中高齢者においてもその効果は実証されており¹⁾、歩行程度の運動でも筋サイズ及び筋力は増加する²⁾。加えて、運動中の血流制限は、呼吸循環機能にも特異的な反応を引き起こす。歩行運動中、活動筋への血流制限によって心臓への静脈還流が減少した結果、1回拍出量(SV)が低下する一方で、心拍数(HR)は増加する。また同時に、収縮期血圧(SBP)の上昇もみられ、これらは心臓への機械的な負荷の増加を意味する。また代謝需要、すなわち酸素摂取量($\dot{V}O_2$)の増加も確認されており³⁾、これらは主観的な運動強度の低い歩行運動でも、身体へのストレスを引き上げ、有酸素能の改善に貢献するかもしれない。しかし、このような方法を利用したトレーニング効果の

研究は国際的にも始まったばかりであり、筋肥大効果と同時に有酸素能の改善も引き起こされるか否かは解明されていない。そこで、本研究では、血流制限下の歩行トレーニングが筋サイズ及び筋力と有酸素能を同時に改善するか否かを検討することを目的とした。

2. 実験 I: 安全性の確認

本研究では、中高齢者を対象に実験を行ったため、外部圧迫による血流制限の影響が危惧された。そこで、実験 I ではトレーニングの安全性について、最も危惧される血栓形成と心臓へのストレスの変化の両面から確認した。

2.1 目的

一過性の血流制限下の歩行運動が中高齢女性の血液凝固作用と心臓へのストレスの変化に与える影響を検討した。

2.2 方法

全ての対象者に研究目的、内容などを十分に説明した後、口頭及び書面にて実験参加に対する同意を得た。その後、医師による問診を通過された 57-70 歳の中高齢女性 7 名(年齢: 64 ± 2 歳、身長: 154 ± 2 cm、体重: 51.8 ± 1.2 kg)を対象に本実験を実施した。被験者は、トレッドミル上での歩行運動を 20 分間実施した。運動強度は最大予備心拍数(HRR)を用い、45%HRR に設定した。被験者は、血流制限下の歩行運動(BFR-Ex)と通常の歩行運動(CON-Ex)を 2 日以上間隔をあけて、それぞれ 1 度ずつ実施した。血流制限には専用のベルトを用い、大腿基部に 200mmHg の圧を加えた。静脈血のサンプルは肘正中静脈から運動開始前(PRE)、運動終了直後(POST1)、運動終了 15 分後(POST2)の計 3 回採取し、血漿 D-ダイマー及びフィブリン分解産物(FDP)とノルアドレナリン及びアドレナリンの濃度変化を評価した。測定値はすべて平均値と標準偏差で示した。統計処理

は 2 元配置分散分析を実施し、有意水準は 5%とした。

2.3 結果および考察

血漿 D-ダイマー濃度は、両群ともに POST1、POST2 のどちらにおいても PRE に対して有意な変化はみられなかった。同様に、血漿 FDP 濃度も両群において変化は認められなかった。また血漿アドレナリン濃度は BFR-Ex においてのみ POST1 で有意に増加した。さらに血漿ノルアドレナリン濃度は、両群ともに POST1 で有意に上昇した。一方、その変化率は CON-Ex に比べ、BFR-Ex では、POST1、POST2 ともに有意に高かった。

	BFR-Ex			Con-Ex		
	PRE	POST1	POST2	PRE	POST1	POST2
D-dimer [μg/ml]	0.17 (0.02)	0.55 (0.44)	0.20 (0.05)	0.20 (0.04)	0.18 (0.03)	0.19 (0.04)
Adrenaline [pg/ml]	31 (9)	61* (11)	27 (5)	25 (5)	33 (4)	24 (4)
Noradrenalin [pg/ml]	371 (46)	1339** (338)	503# (78)	441 (49)	662* (71)	432 (63)

*p<0.05, PRE vs. POST1 or POST2 #p<0.05, BFR-Ex vs. CON-Ex

Table.1 Changes in plasma D-dimer and catecholamine

本実験において、D-ダイマーと FDP は両群ともに運動後に有意な変化はなかった。これは膝伸展運動中の血流制限が血液凝固作用に及ぼす影響を評価した先行研究⁴⁾と同様の結果であり、その安全性が確認された。

また、血漿カテコールアミン濃度は、BFR-Ex で、運動後に有意に上昇した。血漿カテコールアミン濃度の上昇は、心臓の収縮力や HR を増加させることから、歩行のように主観的な運動強度の低い運動でも、身体への運動ストレスを高めることが推察される。しかし、こうした心臓の仕事量の増加は心筋の酸素需要量を増加させるために、特に心疾患を有する者などへ処方する場合には考慮する必要があると考えられる。

一方で、血流制限下のトレーニングを実施する約 3 万名を対象とした疫学的な調査⁵⁾では、致命的な合併症はこれまでに起きていないことが報告されている。従って、一部の心血管疾患を有する者などを除いて、適切な管理下で実施すれば、トレーニングの安全性は十分に確保できるものと考えられる。

2.4 実験 I のまとめ

歩行運動中の血流制限は、血液凝固作用に影響することはなかった。一方、血漿カテコールアミンは低負荷運動であっても上昇した。従って、仮に心血管疾患を有する者などへ処方する場合には考慮すべきであると考えられた。また本研究では、循環器や血管疾患に精通した医師による問診および運動負荷テストを通過した者のみを対象に実験を実施した。

3. 実験 II: 筋肥大と有酸素能に与える影響

3.1 目的

適切な運動強度で実施する 10 週間の血流制限下の歩行トレーニングが中高齢女性の筋サイズ及び筋力と有酸素能に与える影響を検討した。

3.2 実験概要

実験の手順を Fig.1 に示した。

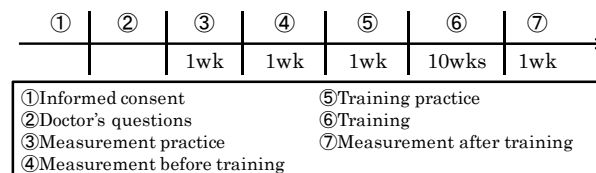


Fig.1 Study design

3.3 方法

・被験者

健康な中高齢女性 18 名(年齢: 66±1 歳、身長: 153±1 cm、体重: 53.5±1.2 kg)を血流制限歩行(BFR-walk)群 10 名と通常歩行(CON-walk)群 8 名に分けた。

・トレーニング内容

被験者は 20 分間のトレッドミル歩行を週 4 回、10 週間にわたって実施した。運動強度は HRR を用い、45% HRR に設定した。血流制限には専用のベルトを用い、両脚の大腿基部に 200mmHg の圧を加えた。

・測定項目

(a) 筋サイズと筋力の評価

大腿部筋横断面積 (CSA) は MRI 法を用いて、大腿部中央の画像で評価した。筋体積は筋 CSA と slice thickness(1cm)の積により算出した。また筋機能測定装置 Biodex System-3 を用いて、膝伸展時の等尺性最大筋力と 30°/sec と 180°/sec の異なる 2 つの速度で膝伸展及び屈曲時の等速性最大筋力を測定した。

(b) $\dot{V}O_{2peak}$ の推定(最大下運動負荷テスト)

自転車エルゴメータを用い、負荷 40W から 1 分ごとに 5W ずつ増加させ、HR が年齢から推定される最大心拍数 (220 - 年齢) の 70-80% に達するまで運動を行った。得られた酸素摂取量($\dot{V}O_2$)と HR との関係を利用し、推定最大心拍数における $\dot{V}O_2$ を $\dot{V}O_{2peak}$ とした。同時にインピーダンス法による SV を測定した。酸素脈 (O_2pulse)は $\dot{V}O_2$ を HR で除して算出した。

(c) 生活機能テスト

Chair Stand テスト (30 秒間で椅子から立ち上がることのできる回数) と Up&Go テスト (椅子から立ち上がり前方 2.4m の位置にあるコーンを折返し、再び椅子に座るまでの時間) を実施した。

・データ処理

測定値はすべて平均値と標準偏差で示した。統計処

理は2元配置分散分析を実施し、有意水準は5%とした。

3.4 結果および考察

大腿部筋 CSA(3%)と筋体積(4%)は BFR-walk 群において有意に($P<0.01$)増加した。しかし、CON-walk 群では変化はみられなかった。等尺性(6%)及び等速性最大筋力(3-22%)は、BFR-walk 群においてのみ有意な($P<0.05$)増加が確認され、一方、CON-walk 群では変化は認められなかった。

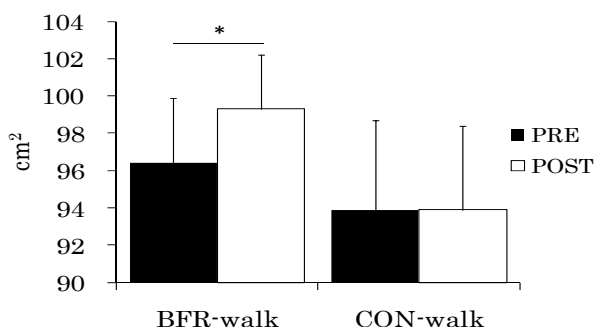


Fig.2 Change in thigh muscle cross sectional area

絶対値及び体重当たりの $\dot{V}O_{2peak}$ は、BFR-walk 群で有意に改善し、CON-walk 群でも増加傾向を示した。また、CON-walk 群では、 $\dot{V}O_{2peak}$ の増加率と SV 及び O_2pulse の増加率に有意な($P<0.05$)相関関係が認められた。一方、BFR-walk 群では、 $\dot{V}O_{2peak}$ の増加率と O_2pulse の増加率にのみ有意な($P<0.05$)相関関係が確認された。

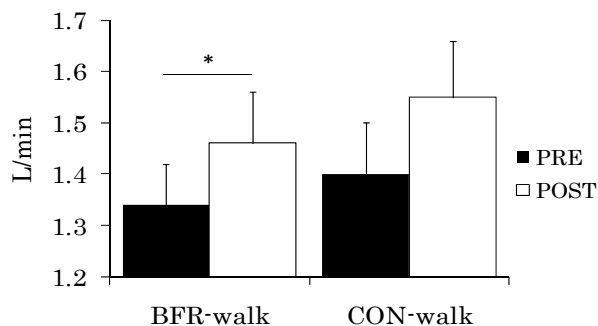


Fig.3 Change in estimated maximum oxygen uptake

本実験では、57-73 歳の中高齢女性を対象として、10 週間の血流制限下の歩行トレーニングにより、1)等尺性及び等速性最大筋力と筋サイズの増加に加えて、2) 推定 $\dot{V}O_{2peak}$ の改善が示された。これは中高齢者を対象として、単一運動のトレーニングにより筋サイズ及び筋力と有酸素能の同時改善を示した初めての研究である。

一般に、骨格筋の肥大反応は、タンパク合成と分解のバランスが合成優位に傾き、筋収縮タンパクの蓄積が促進された結果として引き起こされる。先行研究では、血流制限下の膝伸展運動後に、同化ホルモンや筋

タンパク合成の増加が確認されており⁶⁾、血流制限下の歩行トレーニングでも同様の機序によって筋肥大が引き起こされたものと推察される。また一般に筋肥大と有酸素能の改善のための2つの異なるトレーニングは、筋におけるエネルギー利用と供給の側面から相反する反応を有する。つまり、持久性運動による AMPK(AMP-activated protein kinase)の活性化が、筋タンパク合成を減少させることが指摘されている⁷⁾。一方で、本実験で採用したような $40\% \dot{V}O_{2max}$ ($\approx HRR$) 程度の比較的低強度の運動では AMPK 活性の有意な上昇はみられないことも示されており⁸⁾、本研究では、適切な運動強度の設定により、筋タンパク合成の阻害は最小限に抑えられたものと推察される。

推定 $\dot{V}O_{2peak}$ は、BFR-walk 群において有意に改善し、CON-walk 群でも増加傾向にあった。これは $\dot{V}O_{2peak}$ の改善が期待できる最低限度の運動条件に設定したためと考えられる。一般に $\dot{V}O_2$ は HR と SV、動静脈酸素較差(a-v O_2 diff) の積で表わされる。従って、 $\dot{V}O_{2peak}$ はそれぞれの最大値の積である。また O_2pulse は $\dot{V}O_2$ を HR で除した値であり、SV と a-v O_2 diff の積を表わす。BFR-walk 群では、 $\dot{V}O_{2peak}$ の増加率と SV の改善率には相関関係は認められなかった一方で、 O_2pulse の増加率には有意な相関関係が確認された。これは BFR-walk 群の $\dot{V}O_{2peak}$ の改善には、a-v O_2 diff の増加がより大きく貢献していたことを示唆する結果であると推測される。

3.5 実験 II のまとめ

血流制限下の歩行トレーニングは、中高齢女性の筋サイズ及び筋力とともに、有酸素能も同時に改善した。これは中高齢者を対象として、単一運動のトレーニングにより筋サイズ及び筋力と有酸素能の同時改善を示した初めての研究である。

4. 実験 III: 動脈コンプライアンスへの影響

近年、高強度筋力トレーニングは筋サイズ及び筋力の増加をもたらす一方で、同時に頸動脈コンプライアンスを低下させる可能性が指摘されている⁹⁾。こうした中枢動脈のコンプライアンスの低下は心臓血管機能の低下やこれらに関連した疾病リスクの上昇に影響する。一方、血流制限下の歩行トレーニングも筋肥大及び筋力増加を引き起こすが、その頸動脈コンプライアンスに及ぼす影響については明らかではない。

4.1 目的

中高齢女性を対象とした10週間の血流制限下の歩行トレーニングが頸動脈コンプライアンスに与える影響を検討した。

4.2 方法

10 週間の血流制限下の歩行トレーニングの前後に頸動脈コンプライアンスの測定を実施した。その他、被験者及びトレーニング方法、統計処理等は 3 と同様である。

・頸動脈コンプライアンスの測定

15 分間の仰臥位での安静の後、上腕部において安静時血圧をオシロメトリック法により測定した。頸動脈コンプライアンスは頸動脈の縦断超音波動画とアプレーンショントノメトリーの組み合わせにより、非侵襲的に評価した。

4.3 結果および考察

頸動脈コンプライアンスは両群において有意に ($P < 0.05$) 改善した。一方、両群において、安静時血圧に変化は認められなかった。

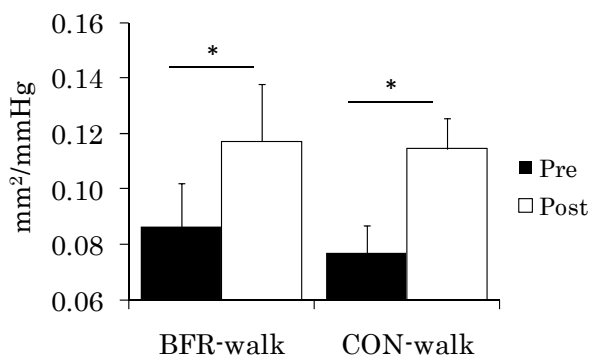


Fig.4 Change in carotid arterial compliance

10 週間の血流制限下の歩行トレーニングによって、筋サイズと筋力の増加と同時に、頸動脈コンプライアンスの改善も確認された。これらが歩行という単一運動のトレーニングによって同時に改善されたことは、これまでになく大変有益な点である。また安静時血圧には変化がみられなかったことから、このような動脈コンプライアンスの改善は、主に頸動脈の弾性特性の変化によるものと推察された。

血流制限下の歩行トレーニングによって頸動脈コンプライアンスが改善されたそのメカニズムの詳細は不明である。しかし、持久性トレーニング後には、ラットにおいて、動脈のエラスチン含有量の増加やエラスチンのカルシウム含有量の低下が確認されており¹⁰⁾、同様に、こうした変化が、血流制限下の歩行トレーニングにおける頸動脈コンプライアンスの改善の一因であるかもしれない。

4.4 実験 III のまとめ

血流制限下の歩行トレーニングでは筋肥大と筋力の増加が確認された一方で、高強度レジスタンストレーニングとは異なり、頸動脈コンプライアンスも同時に改善することが確認された。

5. 本研究の総括と今後の展望

本研究では、10 週間の血流制限下の歩行トレーニングにより中高齢女性の筋サイズ及び筋力の増加と同時に、有酸素能も改善されることを明らかにした。本研究に用いた運動は歩行であり、比較的強度で、しかも短時間(80 分/週)にもかかわらず良好な結果を得ることができた。本研究の結果は、中高齢者を対象に単一運動で筋肥大と筋力増加、さらに有酸素能の向上を同時に引き起こした初めての研究結果である。

また本研究では、先行研究の若年者を対象にした結果と同様に、中高齢者でも歩行中の血流制限が血液凝固作用に影響を与えないことを確認した。また、頸動脈コンプライアンスは改善することを確認した。従って、これらは中高齢者でも血流制限下の歩行トレーニングを適切な管理下で実施すれば、十分に安全性を確保できることを示す結果であった。一方、歩行運動であってもカテコールアミンは血流制限によって上昇した。従って、心血管疾患を有する者などへこのトレーニングを処方する場合には、今回の結果を十分に考慮すべきであると考えられる。

さらに本研究の有酸素能の改善には、動静脈酸素格差の増加が関与しているものと推察された。また、同時に起こる筋肥大には、筋タンパク出納バランスの適応が考えられる。しかし、この相反する 2 つの機能が同時に改善する詳細なメカニズムについてはほとんど解明されていない。今後、これらのメカニズムが解明されることによって、筋肥大や筋機能の改善、さらには有酸素能の向上を低強度で短時間に引き出すための、より効果的で効率的な運動条件の設定が可能になるものと期待される。

文献

- 1) Takarada Y et al. *Jpn J Physiol.* 54: 585-592, 2002
- 2) Abe T et al. *J Appl Physiol.* 100: 1460-1466, 2006
- 3) Ozaki H et al. *Proceedings of the ICSES 2009.* pp.342-347, 2009
- 4) Fujita T et al. *Int. J. KAATSU Training Res.* 4: 1-8, 2008
- 5) Nakajima T et al. *Int. J. KAATSU Training Res.* 2: 5-13, 2006
- 6) Fujita S et al. *J Appl Physiol.* 103: 903-910, 2007
- 7) Nader GA. *Med Sci Sports Exerc.* 38(11): 1965-1970, 2006
- 8) Chen ZP et al. *Diabetes.* 52: 2205-2212, 2003
- 9) Miyachi M et al. *Circulation.* 110: 2858-2863, 2004
- 10) Matsuda M et al. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 66: 122-126, 1993