短時間インターバル形式の一過性運動が脈波伝搬速度に及ぼす影響

出口 憲市¹, 三浦 哉²

Effect of acute short-term high and moderate-intensity interval exercise on pulse wave velocity

Kenichi Deguchi¹ and Hajime Miura²

¹徳島大学病院リハビリテーション部, 〒770-8503 徳島県徳島市蔵本町2-50-1 (*Department of Rehabilitation, Tokushima University Hospital, 2-50-1 Kuramoto-cho, Tokushima 770-8503, Japan*)

²徳島大学大学院ソシオ・アーツ・アンド・サイエンス研究部, 〒770-8502 徳島県徳島市南常三島1-1 (*Laboratory for Applied Physiology, Institute of Socio-Arts and Science, University of Tokushima, 1-1 Minamijyosanjima, Tokushima 770-8502, Japan*)

Received: April 1, 2014 / Accepted: July 3, 2014

Abstract Interval training has a beneficial effect for treating the cardiovascular disease. However, it is not clarify the effects of different exercise intensity and duration on arterial function. In the present study, we evaluated the effect of acute short-term high and moderate-intensity interval exercise on pulse wave velocity. Thirteen healthy men were randomly assigned to perform both acute interval exercise (IE; cycling for 24.6 min at 80% $\dot{V}O_2$ max and 50% $\dot{V}O_2$ max) and acute continuous moderate-intensity exercise (CME; cycling for 30 min at 50% $\dot{V}O_2$ max). The IE and CME protocols were designed such that the exercises resulted in the same workload during each session. The brachial systolic and diastolic blood pressure (SBP and DBP), and brachial to ankle pulse wave velocity (baPWV) were obtained in the supine position using an automatic pulse wave form analyzer at pre- and post-exercise. In IE, baPWV at post-exercise decreased significantly compared with pre-exercise value (1181.9 ± 119.2 cm $\cdot$ sec⁻¹ vs. 1108.4 ± 109.4 cm $\cdot$ sec⁻¹, $p < 0.01$). In CME, however, it was not significantly different between pre- and post-exercise values (1173.5 ± 137.1 cm $\cdot$ sec⁻¹ vs. 1164.8 ± 96.0 cm $\cdot$ sec⁻¹, $p = ns$). No significant differences in SBP and DBP were found both protocols. These results suggest that acute short-term high and moderate-intensity interval exercise was more effective in reducing baPWV compared with acute continuous exercise.

Jpn J Phys Fitness Sports Med, 63(5): 475-480 (2014)

Keywords : acute interval exercise, short-term, pulse wave velocity

緒 言

わが国の2010年の全死因に占める死因別死亡数の割合は、循環器疾患の代表である心疾患および脳血管疾患が約26.5%であり、悪性新生物の割合(30.1%)と同等である¹⁾。また、循環器疾患の代表である高血圧症の原因として、動脈スティフネスの増加²⁾があげられ、その代表的な指標である脈波伝搬速度(Pulse Wave Velocity: PWV)は、加齢により上昇し、心血管系疾患の独立した危険因子と報告されている³⁾。これまでに定期的な有酸素性運動は中心動脈の伸展性を改善し⁴⁾、その代表的な持続的トレーニングは、主に一定強度を持続的に実施する持続的トレーニングと高強度運動および低～中強度運動を繰り返すインターバルトレーニングとに分けられる。インターバルトレーニングでは、中強度の持続的トレーニングと

比較して血管内皮機能の著しい改善が報告^{5,6)}されており、インターバル形式の一過性運動でも心拍出量の増加およびnitric oxide (NO)が安静時と比較して、より一層増加したと報告されている^{7,8)}。しかし、高強度運動は、高齢者でも良好な健康状態を維持するために実施することを推奨されている⁹⁾が、心負荷の増加のために致死的不整脈の発生、高血圧症患者では血圧上昇などのリスクが高くなると報告されている¹⁰⁾。そのために、循環器疾患の一次予防を目的としたインターバルトレーニングでは、心負荷のリスクを軽減するために高強度運動の設定を低くして短時間にする必要があるが、これらの条件での運動が動脈機能に及ぼす影響については十分に検討されていない。

Ciolac⁷⁾らは、インターバル形式の一過性運動後に運動前と比較してNOがより一層増加したと報告しており、

さらに同じプロトコルでのインターバルトレーニング前後では, PWVが低下したと報告している. したがって, 運動による血流量の増加にともなう shear stressの増加により, 内皮細胞からNOを放出するといった一過性の変化が生じ, 定期的な運動により持続することで機能因子の改善につながるために, 一過性運動が動脈機能に及ぼす影響を検討することは重要と考えられる. そこで本研究では, 安全面への配慮から中高齢者ではなく, 高強度運動が推奨されている若年者を対象者に, 短時間の高強度および中強度運動から構成されるインターバル形式の一過性運動が高血圧治療ガイドライン¹¹⁾で推奨されている持続的運動と比較して脈波伝搬速度に及ぼす影響を検討した.

方 法

被験者 被験者は, 非喫煙者で運動習慣および末梢動脈疾患のない成人男性15名, 年齢: 25.6 ± 3.2 歳, 身長: 175.0 ± 3.9 cm, 体重: 69.7 ± 9.3 kg, BMI: 22.8 ± 3.4 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$, ABI: 1.1 ± 0.1 および $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$: 34.6 ± 5.8 $\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ であり, 高血圧治療ガイドラインによる I 度高血圧以上の2名を除外し, 13名を解析対象者とした. 本研究は, 徳島大学総合科学部人間科学分野における研究倫理委員会の承諾を得たものであり, 対象者には事前に文章および口頭にて研究内容・趣旨, 参加の拒否・撤回・中断などについて説明し, 承諾を得た後に研究を開始した.

最大運動負荷テスト 一過性運動時の各運動強度の仕事量を設定するために, 自転車エルゴメータ (232C MOD-EL50: Combi社製) を使用し, 東大式の多段階負荷法を一部改訂して最大酸素摂取量 ($\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$) を測定した¹²⁾. 被験者は, 自転車エルゴメータに座り3分間の安静後に90 Wattsの負荷から開始し, 3分毎に30 Watts漸増, 9分後からは1分毎に15 Watts漸増させる漸増負荷法による最大負荷テストを実施した.

一過性運動のプロトコル 一過性運動は, 自転車エルゴメータを使用し, 高強度と中強度運動から構成される短時間のインターバル形式の運動 (Interval exercise: IE) 条件および中強度の持続的運動 (Continuous moderate exercise: CME) 条件をそれぞれ1回, 無作為の順序で3日以上の間隔をあけて実施した. IE条件の運動強度は $80\% \dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ および中強度運動を $50\% \dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ として, インターバルトレーニングでの血中乳酸除去が促進される比率および運動時間である1:1および3分間ずつを繰り返す設定とした^{13,14)}. まず, 5分間の中強度運動の後, 3分毎に高強度運動を3回繰り返し, 4.6分間の中強度運動で終了する24.6分間の設定とし, CME条件は, 日本高血圧治療ガイドラインで推奨されている

$50\% \dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ で30分間の設定とした. なお, 両条件間での各個人の運動時の相対的な仕事量を同一になるように設定した.

測定項目 $\dot{V}\text{O}_2$ の測定は, 自動呼気ガス分析装置 (AR-1 Type-3: アルコシステム製) を用いて, 30秒毎に酸素濃度, 炭酸ガス濃度, 換気量を分析し, 心拍数 (HR) の測定はハートレイトモニター (PUX-1001: NISSEI社製) を用いて記録した. また, 一過性運動中の両条件時の $\dot{V}\text{O}_2$ およびHRも同様の方法にて測定した.

一過性運動前後の両上腕および両足首の収縮期血圧 (SBP), 拡張期血圧 (DBP), 脈圧, 上腕から足首間の脈波伝搬速度 (baPWV) およびHRの測定には, 血圧脈波検査装置 (form PWV/ABI: オムロンコーリン社製) を用いて測定した. 被験者は, 室温が調整された部屋 ($24 \sim 26^\circ\text{C}$), 湿度 $50 \sim 70\%$ の環境下で姿勢による影響を除くために, 各条件の運動前および運動終了後に15分間の仰臥位安静をとり, 同姿勢時の心音図, 心電図, 脈波, 四肢血圧およびHRの測定を実施した. 測定は, すべて同一験者が実施しており, 測定時刻は被験者ごとに随時異なったが, 両条件の一過性運動は, ほぼ同一時刻に測定した. また, 測定の前日より激しい運動, 動脈機能に影響を及ぼすアルコール, カフェインおよび塩分濃度の高い食事摂取などを制限した.

被験者の両上腕および両足首に血圧測定用カフを巻き, カフ内の容積脈波から両上腕および両足首の脈波から立ち上がり時間の差を (ΔT) を測定し, 身長から求めた大動脈弁口から足首までの長さ (L_a), 大動脈弁口から上腕の長さ (L_b) を求め, 以下に示すような式から baPWV を算出した^{15,16)}. 算出式は以下に示すとおりである.

$$\text{baPWV} = (L_a - L_b) / \Delta T$$

また, 再現性を検討するために17名の被験者を対象に同一時間帯に日を変えて baPWV を3回測定して級内相関係数 (intraclass correlation coefficient: ICC) を算出したところ, baPWV はそれぞれ 1165.9 ± 106.7 $\text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}$, 1152.2 ± 100.7 $\text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}$, 1164.4 ± 103.9 $\text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}$, ICC=0.98であった.

統計処理 本研究の全ての結果は, 平均値および標準偏差で示した. 一過性運動の効果を検討するために, SBP, DBP, baPWV およびHRと一過性運動中の $\dot{V}\text{O}_2$ およびHRの両条件間の比較には対応のある t 検定, 各測定項目の運動前後の経時変化は反復測定による二元配置分散分析を行い, 事後検定には Bonferroni 法をそれぞれ用いた. また, 統計解析には, 危険率は全て5%未満を有意水準として採用した.

結 果

一過性運動時の $\dot{V}O_2$ およびHRの変化 IE条件およびCME条件の一過性運動中の $\dot{V}O_2$ およびHRの変化については、Fig. 1に示す通りである。IE条件の高強度運動中では、 $\dot{V}O_2$ およびHRがCME条件と比較して高値であり、両条件間に有意な差が認められた ($p<0.01$)。

各条件の一過性運動前後のSBP, DBP, baPWVおよびHRの変化 (Table 1) IE条件およびCME条件の一過

性運動前後のSBP, DBP, baPWVおよびHRの変化については、Table 1に示す通りである。一過性運動前と比較して運動終了15分後のbaPWVは、IE条件では低下しており、運動前後で有意な差が認められた ($p<0.01$)。CME条件では、有意な差は認められなかった。両条件の上腕および足首のSBPおよびDBPについては、運動前後で有意な差は認められなかったが、HRについては、両条件ともに運動前と比較して運動後で高値であり、有意な差が認められた ($p<0.01$)。また、運動後のbaPWVは、IE条件で低下しており、CME条件と比較して有意な差

Fig. 1 Changes in $\dot{V}O_2$ and HR during acute exercise
Values are means $\pm$ SD.
IE: interval exercise, CME: continuous moderate exercise.
*: Significant ($p<0.01$) difference between IE and CME.

が認められた ($p<0.01$). また, 運動後のHRは, IE条件で上昇しており, CME条件と比較して有意な差が認められた ($p<0.01$).

考 察

本研究では, 正常血圧の成人男性を対象に自転車エルゴメータを用いて, 短時間の高強度および中強度運動から構成されるインターバル形式の一過性運動によるbaPWVの変化を中強度の持続的運動と比較検討した. その結果, IE条件では, 運動前と比較して運動終了15分後のbaPWVが低下しており, 運動前後では有意な差が認められた. baPWVが低下した原因の一つとしては, 運動時の血流量の増加にともなう血管壁へのshear stressが持続的に増加することで, 血管内皮細胞由来の血流依存性血管拡張物質であるNOの増加の影響が考えられる. 本研究でのbaPWVの低下は, 一過性運動前後の結果であるために, 1時間後には運動開始前の水準に戻ると推測される¹⁷⁾が, Ciolac⁷⁾らは, インターバル形式の一過性運動を実施することで, 安静時と比較してNOの増加および血管収縮物質であるエンドセリン-1濃度が減少したと報告している. したがって, 短時間インターバル形式の一過性運動を継続的に実施することで, 持続的運動よりも効果的に動脈ステイフネスを改善させる可能性が示唆される.

運動終了15分後のHRについては, IE条件とCME条件との間に有意な差が認められた. また, IE条件の高強度運動終了時のHRは, CME条件と比較して有意に上昇していることから, 運動中および終了後の心拍出量が増加していたことが推測される. また, Tordi⁸⁾らは, 30分間のインターバル形式の一過性運動終了から30分後の心拍出量が持続的運動と比較して増加しており, 頸動脈-足首間のPWVに改善が認められたと報告している. したがって, IE条件では心拍出量の増加によりshear stressが運動中から終了後も持続的に増大することでNOがより一層放出され, 一過性の動脈の機能的な変化を生じさせた可能性が考えられる. さらに, 血管平滑筋弛緩作用を有する心房性ナトリウム利尿ペプチド (ANP) は, 心房筋の伸展により生成分泌が生じるために, 静脈還流量の増加が予測されるIE条件では, ANPがより一層増加してbaPWVが低下した可能性も考えられる¹⁸⁾.

一方, CME条件では, IE条件とは異なり一過性運動前後のbaPWVに有意な差が認められなかった. これまで, $65\%\dot{V}O_{2max}$ の30分間の持続的な自転車こぎ運動をすることで, 運動前と比較して運動終了後のleg PWVは有意に低下することが報告されている¹⁹⁾. 本研究では, 運動強度を高血圧治療ガイドラインにより推奨されている $50\%\dot{V}O_{2max}$ に設定しており, 先行研究²⁰⁾と比較して運

Table 1. Changes in SBP, DBP, baPWV and HR between pre and post acute exercise

	IE		CME	
	pre	post	pre	post
Brachial blood pressure				
SBP (mmHg)	115.8±6.6	115.6±7.6	117.2±7.1	118.0±7.7
DBP (mmHg)	67.4±5.6	66.3±5.7	67.8±8.1	68.8±5.1
Ankle blood pressure				
SBP (mmHg)	131.8±6.9	126.1±12.0	131.9±10.3	131.9±10.7
DBP (mmHg)	70.1±6.6	65.9±7.9	70.3±7.8	69.7±6.3
baPWV (cm · sec ⁻¹)	1181.9±119.2	1108.4±109.4*†	1173.5±137.1	1164.8±96.0
HR (beats · min ⁻¹)	60.8±5.4	79.2±7.3*†	59.6±7.0	65.2±7.2*

Values are means ± SD.

IE: interval exercise, CME: continuous moderate exercise.

SBP: systolic blood pressure, DBP: diastolic blood pressure, baPWV: brachial - ankle pulse wave velocity, HR: heart rate.

*: Significant ($p<0.01$) difference between pre- and post-exercise.

†: Significant ($p<0.01$) difference between IE and CME.

動強度が低く、運動時間が同じであるために仕事量が小さいことがbaPWVの結果に影響したと考えられる。

Nakaら¹⁹⁾は、約15分の最大運動負荷テスト後に運動前と比較してbaPWVに有意な低下が認められたと報告している。しかし、この研究では、運動終了3分後のSBPが180 mmHgを超えているために、循環器疾患予防の定期的なインターバルトレーニングとして、高強度の最大下運動を実施することは、安全面から問題がある。したがって、心負荷のリスクを軽減するために、短時間で動脈機能の改善に効果がある運動条件を検討する必要がある。本研究のIE条件は先行研究⁵⁻⁷⁾と比較して運動時間を約15分短縮したにもかかわらず、一過性運動後のbaPWVに低下がみられた。したがって、高強度と中強度でインターバル形式の運動を構成することで短い運動時間でbaPWVの低下をもたらす可能性がある。

なお、本研究の限界として、運動終了15分以降の動脈機能を測定していない点、心拍出量、自律神経活動、血中NO濃度および血中ANP濃度などを測定していない点、トレーニングによる影響を検討していない点、対象者が若年者であり、中高齢者を対象にしていない点あげられる。今後、これらの点を考慮して、動脈機能の改善を目的としたインターバルトレーニングを確立するための検討が必要である。

結 論

本研究は、20歳代の正常血圧の男性を対象に短時間の高強度および中強度運動から構成されるインターバル形式の一過性運動がbaPWVに及ぼす影響を検討した。その結果、持続的運動とは異なり、インターバル形式の一過性運動は、運動前と比較して運動終了後にbaPWVが低下した。したがって、高血圧治療ガイドラインで推奨されている持続的運動より、短時間の高強度および中強度運動から構成されるインターバル形式の運動は、baPWVを低下させる可能性が示された。

文 献

- 1) 厚生統計協会. 国民衛生の動向・厚生指標, 増刊, 奥村印刷, 東京, 48-49, 2010.
- 2) Tomiyama H, Yamashina A, Arai T, Hirose K, Koji Y, Chikamori T, Hori S, Yamamoto Y, Doba N, Hinohara S. Influences of Age and Gender on Results of Noninvasive Brachial-Ankle Pulse Wave Velocity Measurement a Survey of 12517 Subjects. *Atherosclerosis* 166: 303-309, 2003.
- 3) Yamashina A, Tomiyama H, Arai T, Hirose K, Koji Y, Hirayama Y, Yamamoto Y, Hori S. Brachial-ankle pulse wave velocity as a marker of atherosclerotic vascular damage and cardiovascular risk. *Hypertension Res* 26: 615-622, 2003.
- 4) Tanaka H, Dinverno FA, Monahan KD, Clevenger CM, DeSouza CA, Seals DR. Aging, Habitual Exercise, and Dynamic Arterial Compliance. *Circulation* 102: 1270-1275, 2000.
- 5) Tjønnå AE, Lee SJ, Rognmo Ø, Stølen TO, Bye A, Haram PM, Loennechen JP, Al-Shahre QY, Skogvoll E, Slørdahl SA, Kemi OJ, Najjar SM, Wisløff U. Aerobic Interval Training Versus Continuous Moderate Exercise as a Treatment for the Metabolic Syndrome: A Pilot Study. *Circulation* 118: 346-354, 2008.
- 6) Wisløff U, Støylen A, Loennechen JP, Bruvold M, Rognmo Ø, Haram PM, Tjønnå AE, Helgerud J, Slørdahl SA, Lee SJ, Videm V, Bye A, Smith GL, Najjar SM, Ellingsen Ø, Skjaerpe T. Superior cardiovascular effect of aerobic interval training versus moderate continuous training in heart failure patients a randomized study. *Circulation* 115: 3086-3094, 2007.
- 7) Ciolac EG, Bocchi EA, Bortolotto LA, Carvalho VO, Greve JM, Guimaraes GV. Effects of high-intensity aerobic interval training vs. moderate exercise on hemodynamic, metabolic and neuro-humoral abnormalities of young normotensive women at high familial risk for hypertension. *Hypertens Res* 33: 836-843, 2010.
- 8) Tordi N, Mourrot L, Colin E, Regnard J. Intermittent versus constant aerobic exercise: effects on arterial stiffness. *Eur J Appl Physiol* 108: 801-809, 2010.
- 9) Haskell WL, Lee IM, Pate RR, Powell KE, Blair SN, Franklin BA, Macera CA, Heath GW, Thompson PD, Bauman A. Physical activity and public health: updated recommendation for adults from the American College of Sports Medicine and the American Heart Association. *Circulation* 116: 1081-1093, 2007.
- 10) Singh JP, Larson MG, Manolio TA, O'Donnell CJ, Lauer M, Evans JC, Levy D. Blood pressure response during treadmill testing as a risk factor for new-onset hypertension. The Framingham heart study. *Circulation* 13: 1831-1836, 1999.
- 11) 日本高血圧学会高血圧治療ガイドライン作成委員会. 高血圧治療ガイドライン, ライフサイエンス出版, 東京, 34-35, 2001.
- 12) 山地啓司. 最大酸素摂取量の科学, 杏林書院, 東京, 3-55, 2001.
- 13) Gaiga MC, Docherty D. The Effect of an Aerobic Interval Training Program on Intermittent Anaerobic Performance. *Can J Appl Physiol* 20: 452-464, 1995.
- 14) Lesmes GR, Fox EL, Stevens C, Otto R. Metabolic response of females to high intensity interval training of different frequencies. *Med Sci Sports* 10: 229-232, 1978.
- 15) 山科 章, 小澤利男, 増田善明編. 脈波速度測定法, 脈波速度, メジカルビュー社, 東京, 26-34, 2002.
- 16) 富山博史, 山科 章, 西沢良記. 動脈硬化の診断・測定法, Arterial Stiffnessの臨床, メディカルレビュー社, 大阪・東京, 19-24, 2005.
- 17) Sugawara J, Otsuki T, Tanabe T, Maeda S, Kuno S, Ajisaka R, Matsuda M. The effects of low-intensity single-leg exercise on regional arterial stiffness. *Jpn J Physiol* 53: 239-241, 2003.

- 18) Kingwell BA, Berry KL, Cameron JD, Jennings GL, Dart AM. Arterial compliance increases after moderate-intensity cycling. *Am J Physiol* 273: 2186-2191, 1997.
- 19) Naka KK, Tweddel AC, Parthimos D, Henderson A, Goodfellow J, Frenneaux MP. Arterial distensibility: acute changes following dynamic exercise in normal subjects. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 284: 970-978, 2003.
- 20) Onuoha GN, Nicholls DP, Patterson A, Beringer T. Neuropeptide secretion in exercise. *Neuropeptides* 32: 319-325, 1998.