

持続的運動と比較して仕事量を減少させたレペティション運動が血管内皮機能に及ぼす影響

田村 靖明<sup>1,2</sup>, 三浦 哉<sup>3</sup>, 出口 憲市<sup>1</sup>, 橋本 祐司<sup>1</sup>, 東 亜弥子<sup>2</sup>, 石川 みづき<sup>2</sup>

## Influence of repetition exercise requiring less work than continuous exercise on the vascular endothelial function

Yasuaki Tamura<sup>1,2</sup>, Hajime Miura<sup>3</sup>, Kenichi Deguchi<sup>1</sup>, Yuji Hashimoto<sup>1</sup>,  
Ayako Azuma<sup>2</sup> and Mizuki Ishikawa<sup>2</sup>

<sup>1</sup>徳島県鳴門病院リハビリテーション部, 〒772-8503 徳島県鳴門市撫養町黒崎字小谷32 (*Department of Rehabilitation Medicine, Tokushima Prefecture Naruto Hospital, 32 Kotani Kurosaki, Muya-cho, Naruto, Tokushima 772-8503, Japan*)

<sup>2</sup>徳島大学大学院総合科学教育部, 〒770-8502 徳島県徳島市南常三島町1-1 (*Graduate School of Integrated Arts and Science, Tokushima University, 1-1 Minamijosanjima-cho, Tokushima, Tokushima 770-8502, Japan*)

<sup>3</sup>徳島大学大学院社会産業理工学研究所, 〒770-8502 徳島県徳島市南常三島町1-1 (*Laboratory for Applied Physiology, Faculty of Integrated Arts and Science, Tokushima University, 1-1 Minamijosanjima-cho, Tokushima, Tokushima 770-8502, Japan*)

Received : November 30, 2018 / Accepted : February 14, 2019

**Abstract** High-intensity interval exercise leads to greater improvements in the vascular endothelial function than continuous exercise at moderate intensity. However, few studies have been performed on the effects of repetition exercise consisting of high-intensity exercise followed by complete rest on the arterial function. Therefore, the purpose of this study was to investigate the effects of repetition exercise on the vascular endothelial function determined by flow-mediated vasodilation (FMD). Eleven healthy male subjects completed two exercise sessions on a cycle ergometer in a counterbalanced order. The exercise sessions were 20 min cycling at 50% maximal work rate ( $W_{max}$ ) (continuous exercise, CE) and 20 × 20-sec intervals at 100% $W_{max}$  interspersed with 40-sec intervals at complete rest (repetition exercise, RE). Before and after each protocol, the brachial systolic and diastolic blood pressure were measured in the supine position. Relative FMD was assessed at rest and 30 and 60 min after each exercise regimen, and then the normalized FMD (nFMD) was calculated from the peak shear rate. The FMD significantly increased 30 min after RE ( $8.2 \pm 1.5\%$  to  $11.5 \pm 3.1\%$ ,  $p < 0.01$ ) and non-significantly increased 30 min after CE ( $7.5 \pm 1.6\%$  to  $8.1 \pm 2.1\%$ , n.s.) before returning to baseline at 60 min after both exercise regimens. The FMD value at 30 min after RE was significantly greater than that at 30 min after CE ( $p < 0.01$ ). The nFMD (a.u.) significantly increased 30 min after RE ( $1.38 \pm 0.64$  to  $2.00 \pm 0.94$ ,  $p < 0.05$ ) and non-significantly increased 30 min after CE ( $1.20 \pm 0.54$  to  $1.49 \pm 0.57$ , n.s.) before returning to baseline at 60 min after both exercise regimens. These results suggest that repetition exercise may lead to an acute improvement in the vascular endothelial function.

*Jpn J Phys Fitness Sports Med, 68(3): 199-206 (2019)*

**Keywords** : vascular endothelial function, continuous exercise, repetition exercise

### 緒 言

米国スポーツ医学会 (American College of Sports Medicine, ACSM) および米国心臓協会の勧告では、健康増進および維持のための運動プログラムについて、中強度または高強度の有酸素性運動を推奨している<sup>1)</sup>。また、動脈機能と運動形式について、健康成人男性または中高者を対象とした研究では、一過性の中強度の持続的運動 (持続的運動) は、動脈機能を亢進させることが報告されている<sup>2-4)</sup>。さらに、成人男性または冠動脈疾患患

者を対象にした高強度および低から中強度運動を組み合わせた一過性のインターバル形式の運動 (インターバル運動) は、持続的運動と同様に血管内皮機能を亢進させることが報告されている<sup>5,6)</sup>。一方、回復期を完全休息にした場合の一過性のレペティション形式の運動 (レペティション運動) が、血管内皮機能に及ぼす影響については十分に明らかにされていない。しかし、運動形式の違いにより動脈機能に及ぼす効果は異なり、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であると考えられる。

レペティション運動が動脈機能に与える影響について、健康成人男性を対象に、総仕事量を統一させた持続的運動、インターバル運動、およびレペティション運動の3条件で運動前後の血管内皮機能を比較した結果、レペティション運動では、運動終了後に血流依存性血管拡張反応(flow-mediated vasodilation, FMD)は低下を示し、インターバル運動後に比べて有意に低値であったことが報告されている<sup>7)</sup>。このFMDの低下については、主運動が過度な強度設定であったため、活性酸素種(reactive oxygen species, ROS)などの血管収縮因子が多く発現したことが原因であると考察されているが、強度および時間の設定を再検討することで、血管内皮機能に有効なレペティション運動を提案できる可能性は残されている<sup>7)</sup>。

レペティション運動は、運動と完全休息を反復するために、一般的なインターバル運動よりも高強度の運動を短時間で実施できるという特徴があるが、血管内皮機能に与える影響は十分に検討されていない。したがって、この点を明らかにすることで、血管内皮機能の改善を目的にしたリハビリテーションなどの臨床場面において、新たな運動プログラムの構築に繋がり、トレーニングを多様化できる可能性がある。そこで本研究は、持続的運動よりも仕事量を減少させたレペティション運動が血管内皮機能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13名であり、高血圧治療ガイドラインによるI度高血圧以上の者2名を除外し、11名

を解析対象者とした(年齢:  $24.4 \pm 3.5$ 歳, 身長:  $171.3 \pm 3.2$  cm, 体重:  $68.0 \pm 7.5$  kg, 最大酸素摂取量:  $41.4 \pm 5.6$  ml·kg<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>)。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(受付番号152)、被験者には、事前に文書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、書面にて承諾を得た後に実験を開始した。

**研究デザイン** 実験プロトコルおよび各運動条件の概略図をFig. 1に示した。被験者は、実験初日に最大運動負荷テストを実施し、実験2日目または3日目に、高強度運動と完全休息で構成したレペティション運動(repetition exercise, RE)または中強度の持続的運動(continuous exercise, CE)を、それぞれほぼ同一時刻に、3日以上の間隔を開けて無作為の順序で実施した。運動には、自転車エルゴメータ(232C MODEL50: Combi社製)を使用し、ペダル回転数は、毎分60回転に規定した。また、すべての実験は、室温24~26℃および湿度50~70%に調整された実験室で実施した。

**第1セッション: 最大運動負荷テスト** 一過性運動時の各運動強度の仕事率を設定するために、東大式の多段階負荷法を一部改訂して最大酸素摂取量(maximal oxygen consumption,  $\dot{V}O_{2max}$ )を測定し<sup>8)</sup>、その時の自転車エルゴメータの負荷量を最大仕事率(maximal work rate,  $W_{max}$ )とした。

**第2セッション: 運動負荷テスト** 運動負荷テストの2

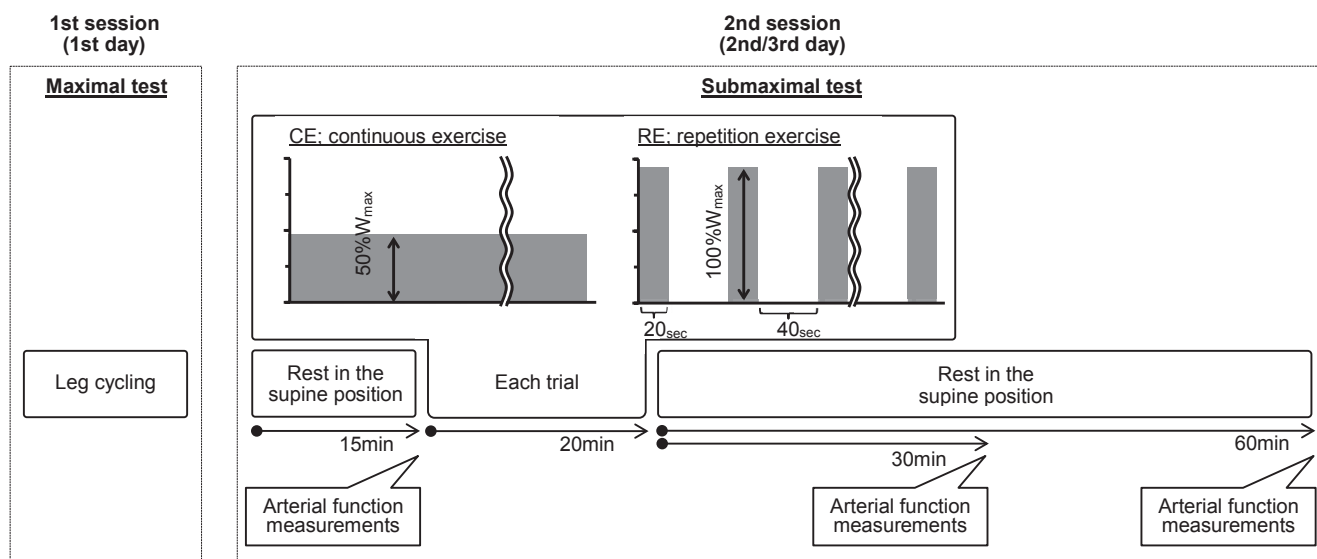


Fig. 1 Experimental protocol of maximal test and submaximal test session.

All subjects performed each test in random order. Arterial function measurements; systolic/diastolic blood pressure, heart rate and FMD. CE was 20min at 50%  $W_{max}$  and RE was 20 × 20sec intervals at 100%  $W_{max}$  interspersed with 40-sec intervals at rest. FMD: flow-mediated vasodilation,  $W_{max}$ : maximal work rate.

日目は、最大運動負荷テストから7日以上の間隔を開けて実施した。ACSMの指針<sup>9)</sup>では、健康成人の健康および体力増強には、中強度から高強度の有酸素性運動を20分間から50分間実施することとしており、この指針を参考にCE条件を設定した。RE条件は、過度な高強度運動になることを避けるため、運動と休憩時間との比を1対2にすることで<sup>10)</sup>、各被験者の総仕事量をCE条件の約2/3に設定した。CE条件は、50% $W_{max}$ 強度の持続的運動とし、RE条件は、100% $W_{max}$ 強度で、20秒間の高強度運動と40秒間の完全休息を20回反復させる運動とした。なお、運動開始から終了までの時間は、両条件とも20分間とした。

#### 測定項目および測定方法

**運動中の $\dot{V}O_2$ および心拍数** 最大運動負荷テストおよび各条件実施中の $\dot{V}O_2$ は、自動呼気ガス分析器 (AR-1 Type-3: アルコシステム社製) を用いて分析を行い、各条件実施中の心拍数 (heart rate, HR) はハートレートモニター (Polar RS100: POLAR社製) を用いて測定した。

**一過性運動前後の動脈機能** 血管内皮機能検査装置 (ユネクスEF38, 日本ユネクス社製) を用いて、上腕の血圧, HR, 血管径, および血流速度をそれぞれ測定した。被験者には、各条件開始の24時間前から通常の身体活動以上の運動は中止させ、各条件開始の12時間前からカフェイン, アルコールおよびサプリメントの摂取を控えるように指示した。食後3時間以上経過した後に、各運動条件開始前の約15分間および運動終了直後から60分後まで安静仰臥位とし、運動前, 運動終了30分後, および60分後に測定を実施し、測定時間は被験者毎に同一時刻に設定した。測定は、仰臥位姿勢で右上肢を水平外転位とし、その前方に置かれた肘置き台および手台に腕を固定させ、右前腕に駆血カフを、左上腕に血圧計測用カフを巻いた。HRは、両手首に心電クリップを装着し、測定した。右上腕動脈の走行を触診にて確認した後、超音波プローブを血管と平行になる位置に設置し、駆血前の収縮期血圧 (systolic blood pressure, SBP), 拡張期血圧 (diastolic blood pressure, DBP), 血管径 (brachial artery baseline diameter,  $Di_{base}$ ), および血流速度 (brachial baseline blood flow velocity,  $FV_{base}$ ) を計測した。さらに、安静時の上腕SBP値の+50 mmHgの圧で5分間の駆血を行い、駆血解除後の上腕動脈血管径および血流速度を連続的に観察し、血管径の最大値 (brachial artery peak diameter,  $Di_{peak}$ ) および血流速度の最大値 (brachial peak blood flow velocity,  $FV_{peak}$ ) を計測した。FMDは以下の式を用いて算出した<sup>11,12)</sup>。

$$FMD(\%) = (Di_{peak} - Di_{base}) / Di_{base} \times 100$$

本研究は、異なる運動条件の影響を受けたFMDを比較するために、運動などの刺激によって変化することが考えられる血流速度を考慮して、以下の式のように血管径および血流速度から最大ずり速度 (peak shear rate, PSR) を算出し、その後、PSRを考慮して標準化したFMD (normalized FMD, nFMD) を以下の式を用いて算出した<sup>13)</sup>。

$$PSR(s^{-1}) = (FV_{peak} - FV_{base}) / Di_{base}$$

$$nFMD(a.u.) = FMD / PSR$$

本研究で使用した超音波画像診断装置のプローブは、短軸像を捉える2列の超音波探触子および長軸像を捉える超音波探触子から構成されており、血管の位置を的確に捉えることが可能である。また、アームによりプローブが固定されているために、計測位置を保持することができ、再現性の高い血流依存性血管拡張反応検査が可能である。なお、本研究はすべて同一検者が測定し、事前に上腕動脈血管径計測の再現性を検討するために、10名の健康な成人男性を対象に同一時間帯に日を変えて、 $Di_{base}$ 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、 $Di_{base}$ は、 $3.8 \pm 0.3$  mm,  $3.9 \pm 0.2$  mm, および $3.8 \pm 0.2$  mm, ICC=0.96であった。

**統計解析** 本研究の結果は、Shapiro-Wilk検定によって、データの正規性の検定を行い、正規分布を確認した。その後、一過性運動の効果を検討するために、各条件間における測定値の比較には、反復測定による二元配置の分散分析 (運動条件×時間) を行い交互作用および主効果の有無を検定した。二元配置の分散分析においては、Mauchlyの球面性の検定を行い、球面性が仮定できなかった時にはGreenhouse-Geisserのイプシロンを用いて、自由度を修正した。反復測定による二元配置の分散分析により交互作用および主効果が認められた場合には、Bonferroniの方法を用いて多重比較検定を行った。また、一過性運動時の $\dot{V}O_2$ について、各条件の20分間の曲線下面積から推定した総 $\dot{V}O_2$ の比較には、対応のあるt-検定を実施した。なお、データの解析には、統計解析ソフトSPSS ver.24.0を使用した。すべての測定値は、平均値および標準偏差 (Mean ± SD) で示し、有意水準5%をもって統計学的有意とした。

## 結 果

**一過性運動時の $\dot{V}O_2$ およびHRの変化** CEおよびRE条件の運動中の $\dot{V}O_2$ およびHRの平均値はFig. 2に示す通りである。各条件の20分間の曲線下面積から推定の総 $\dot{V}O_2$  ( $\dot{V}O_2$  area under the curve,  $\dot{V}O_{2AUC}$ ) を算出し、全

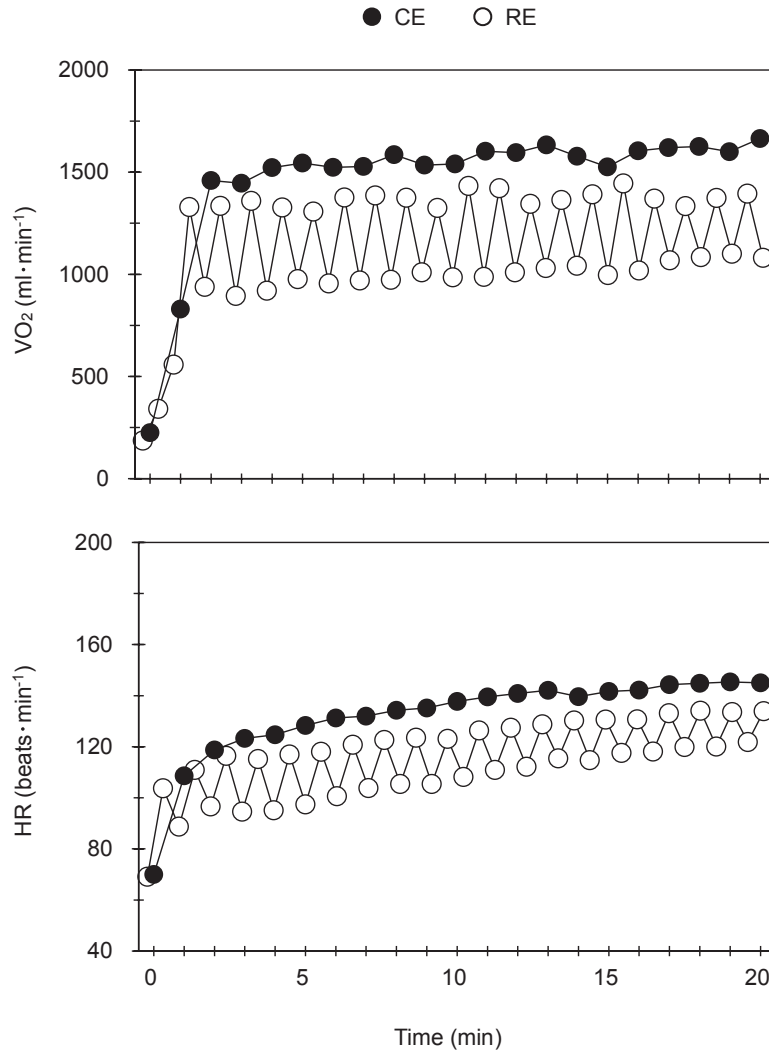


Fig. 2 Changes in  $\dot{V}O_2$  and HR during each trial.  
Value are mean.

CE: continuous exercise, RE: repetition exercise,  $\dot{V}O_2$ : oxygen consumption, HR: heart rate.

被験者の平均値を比較した結果, CEおよびRE条件の $\dot{V}O_{2AUC}$  (a.u.)は, それぞれ $29845 \pm 7521$ および $22943 \pm 4646$ であり, RE条件でCE条件に比べて有意に低値であった ( $p < 0.001$ ).

**一過性運動前後の動脈機能の変化** CEおよびRE条件の運動前, 運動終了30分後, および60分後のSBP, DBP, HR,  $Di_{base}$ ,  $Di_{peak}$ ,  $FV_{base}$ ,  $FV_{peak}$ , およびPSRの変化については, Table 1に示す通りである. SBP, DBP,  $Di_{base}$ ,  $Di_{peak}$ ,  $FV_{peak}$ , およびPSRは, 交互作用および有意な主効果は認められなかった. HRは, 交互作用は認められなかったが, 時間において有意な主効果が認められた ( $F_{(2, 20)} = 22.4$ ,  $p < 0.001$ ). 多重比較の結果, 両条件共に運動前に比べて運動終了30分後および60分後で有意に上昇した.  $FV_{base}$ は, 有意な交互作用が認められた ( $F_{(2, 20)} = 6.3$ ,  $p < 0.01$ ). 多重比較の結果, RE条件で運

動終了30分後は運動前および運動終了60分後に比べて有意に高値であった.

**一過性運動前後のFMDおよびnFMDの変化** CEおよびRE条件の運動前, 運動終了30分後, および60分後のFMDおよびnFMDの変化については, Fig. 3に示す通りである. FMDは, CE条件で $7.5 \pm 1.6\%$ ,  $8.1 \pm 2.1\%$ ,  $8.0 \pm 1.7\%$ , RE条件で $8.3 \pm 1.5\%$ ,  $11.5 \pm 3.1\%$ ,  $7.8 \pm 2.0\%$ であり, 有意な交互作用が認められた ( $F_{(2, 20)} = 13.9$ ,  $p < 0.001$ ). 多重比較の結果, RE条件で運動終了30分後は運動前および運動終了60分後に比べて有意に高値であった. また, 運動終了30分後のFMDは, CE条件に比べてRE条件で有意に高値であった. また, nFMD (a.u.)は, CE条件で $1.20 \pm 0.54$ ,  $1.49 \pm 0.57$ ,  $1.14 \pm 0.39$ , RE条件で $1.38 \pm 0.64$ ,  $2.00 \pm 0.94$ ,  $1.56 \pm 0.94$ であり, 交互作用は認められなかったが, 時間において有意な主効果が認



Table 1. Cardiovascular variable pre- and post-CE and RE trials.

	CE			RE		
	Pre	Post 30	Post 60	Pre	Post 30	Post 60
SBP (mmHg)	119 ± 8	118 ± 8	116 ± 9	117 ± 10	115 ± 9	118 ± 9
DBP (mmHg)	67 ± 8	70 ± 6	68 ± 5	64 ± 9	66 ± 8	68 ± 8
HR (beats·m <sup>-1</sup> )	59 ± 6	67 ± 8*	63 ± 5*	56 ± 8	65 ± 9*	61 ± 8*
Di <sub>base</sub> (mm)	3.8 ± 0.2	3.8 ± 0.2	3.7 ± 0.2	3.7 ± 0.2	3.7 ± 0.2	3.7 ± 0.2
Di <sub>peak</sub> (mm)	4.1 ± 0.2	4.1 ± 0.2	4.0 ± 0.2	4.0 ± 0.2	4.1 ± 0.2	4.0 ± 0.2
FV <sub>base</sub> (cm·sec <sup>-1</sup> )	9.2 ± 3.3	10.4 ± 3.4	10.9 ± 3.6	7.8 ± 2.9	12.3 ± 5.3*	8.6 ± 4.0†
FV <sub>peak</sub> (cm·sec <sup>-1</sup> )	36.3 ± 11.8	32.3 ± 8.2	38.8 ± 10.1	34.8 ± 17.3	38.0 ± 18.8	33.8 ± 18.7
PSR (s <sup>-1</sup> )	7.2 ± 2.8	5.9 ± 2.2	7.5 ± 2.0	7.5 ± 4.3	7.1 ± 4.1	7.0 ± 4.4

Value are mean ± SD.

\*: p < 0.05 versus at Pre, †: p < 0.05 versus at Post 30.

CE: continuous exercise, RE: repetition exercise, SBP: systolic blood pressure, DBP: diastolic blood pressure, HR: heart rate, Di<sub>base</sub>: brachial artery baseline diameter, Di<sub>peak</sub>: brachial artery peak diameter, FV<sub>base</sub>: brachial baseline blood flow velocity, FV<sub>peak</sub>: brachial peak blood flow velocity, PSR: peak shear rate.

められ ( $F_{(2, 20)} = 8.3, p < 0.01$ ), 運動条件の主効果は有意傾向であった ( $F_{(1, 10)} = 4.4, P = 0.062$ ).

## 考 察

本研究では、レペティション運動が血管内皮機能に及ぼす影響について、持続的運動 (CE) と持続的運動よりも総仕事量を減少させたレペティション運動 (RE) とを比較検討したところ、FMDはRE条件で、運動前と比較して運動終了30分後に有意な上昇が認められ、運動終了30分後に、CE条件に比べてRE条件で有意に高値であった。

有酸素性運動により活動筋の血流量は増加し、血管壁と血流との間で生じるずり応力を亢進させ、内皮型一酸化窒素合成酵素 (endothelial nitric oxide synthase, eNOS) が活性化されることで、一酸化窒素 (nitric oxide, NO) の生物学的利用能力が向上し、血管平滑筋は弛緩することが明らかにされている<sup>14,15)</sup>。また、一過性の持続的運動に対するFMDの反応は、運動方法、時間、強度、被験者の特性などにより異なり、運動強度については、健康成人男性における50%最大心拍数 (maximal heart rate, HR<sub>max</sub>) 強度で30分間の持続的運動に対して、70%HR<sub>max</sub> 強度および85%HR<sub>max</sub> 強度では、FMDが低下したことが報告されている<sup>16)</sup>。このように持続的運動は、運動強度の違いによって動脈機能に与える影響は異なる事が明らかである。一方、高強度運動を伴うインターバル運動を用いた介入研究において、インターバル運動は持続的運動と比較して、窒素酸化物 (nitrogen oxide, NO<sub>x</sub>) 量がより増加することが明らかにされている<sup>17)</sup>。本研究で注目したレペティション運動は、インターバル運動と運動形式が類似しているために、RE条件でCE条件以上にNOが増加したことが推察され、インターバル

運動と同様の効果を得ることができたと考えられる。一方、CE条件ではFMDの増加が認められず、各被験者の血管内皮機能を亢進させるための運動強度としては不十分な設定であった可能性がある。これらの知見は、健常者を対象に動脈硬化予防を目的としたトレーニングに用いる運動プログラムを構築する際に活用することができると考えられる。

FMDは、安静時の血管径と駆血開放後の血管径との変化率から算出されるが、安静時の血管径の影響を受けるため、血管径または血流などを考慮して、FMDを補正する必要がある<sup>18,19)</sup>。FMDの確立された刺激である血管内のずり応力は、血管径、血流速度、および血液粘度から算出することが可能であるが<sup>20,21)</sup>、正確な測定は非常に困難であり<sup>22)</sup>、本研究ではFMDを補正するために、PSRを算出した。ずり速度は、潜在的な血液粘度の変化または被験者によって異なるが、ずり応力の適切な代替手段になることが報告されている<sup>23-25)</sup>。本研究で用いたPSRの算定式<sup>13)</sup>にはDi<sub>base</sub>およびFVが含まれているが、これらのうち、FV<sub>base</sub>では、交互作用が認められ、RE条件で運動終了30分後と運動前および運動終了60分後との間で有意な差が認められた。従って、RE条件で運動後にFMDが上昇した要因として、血流速度が影響した可能性が考えられる。RE条件を実施することで、FV<sub>base</sub>が運動前と比較して運動終了30分後に有意に上昇しており、運動中の血流速度は不明であるが、運動終了30分後までに血流が増加し、効果的な血管内のずり応力を得ることができたと考えられる。一方、nFMDについては、時間の主効果が認められ、運動条件の主効果は有意傾向であったが、交互作用は認められなかった。この原因について、nFMDは、FMDをPSRで除することで算出しているため、RE条件では、PSRに

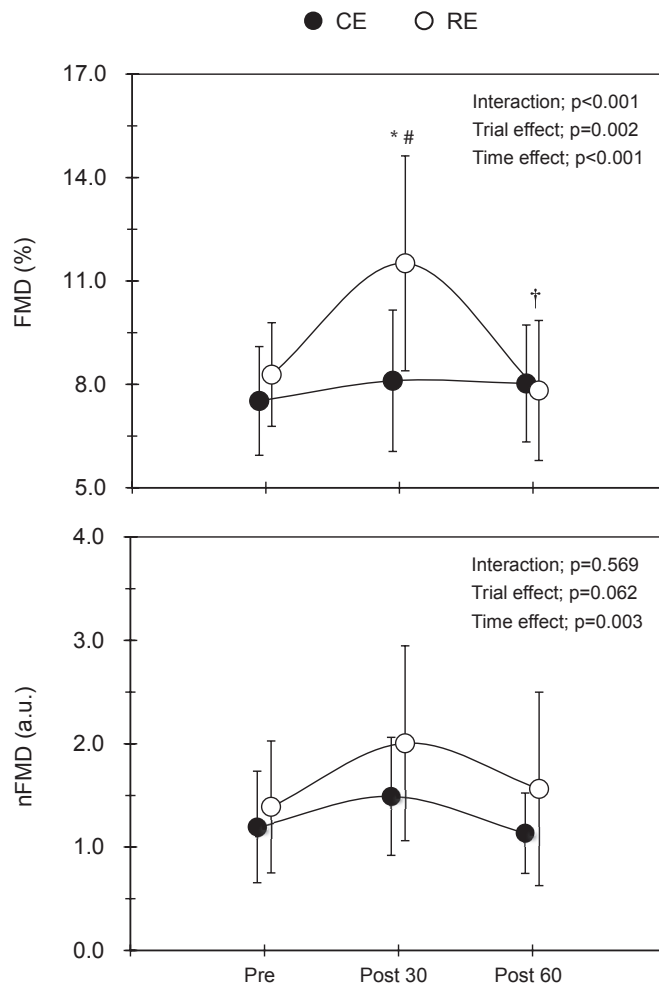


Fig. 3 Changes in FMD and nFMD during each trial.

Value are mean  $\pm$  SD.

CE: continuous exercise, RE: repetition exercise, FMD: flow-mediated vasodilation, nFMD: normalized flow-mediated vasodilation.

\*:  $p < 0.05$  versus Pre in RE trial.

†:  $p < 0.05$  versus Post30 in RE trial.

#:  $p < 0.05$  versus the CE trial at the post 30.

対するFMDは不十分であった可能性があり, nFMDを効果的に亢進させるためには, RE条件の運動強度および運動/休息時間の設定を検討する必要がある。

レペティション運動に関連する冠動脈疾患患者を対象にした研究では, レペティション運動はインターバル運動と比較して疲労困憊までの運動時間が長いにも関わらず,  $\dot{V}O_{2max}$ に近い強度で運動した時間はインターバル運動と同程度であり, 冠動脈疾患患者に用いる間欠的運動にはレペティション運動が適していることが報告されている<sup>26,27</sup>。さらに, 冠動脈疾患患者を対象に, レペティション運動が換気応答に及ぼす影響を比較した検討においても, 持続的運動と比較して $\dot{V}O_2$ および総仕事量は低値を示し, レペティション運動は, 総仕事量が少ないにも関わらず持続的運動と同等かそれ以上の効果が得られたことが報告されている<sup>28</sup>。これらは本研究を支持す

る内容であり, 本研究で実施したRE条件も,  $W_{max}$ 強度の運動と完全休息とを反復させた高強度の運動であったが, 運動中の $\dot{V}O_{2AUC}$ を条件間で比較した結果, CE条件とRE条件との間で有意な差が認められ, 主運動は高強度であるにも関わらず, 呼吸循環機能に対する負荷強度は低く設定できる可能性が示された (Fig. 2)。

ROS, 血管内炎症反応などは, 血管内皮機能に影響を及ぼすことは明らかであるが<sup>29</sup>, 高強度持続的運動, 中強度持続的運動, およびインターバル運動がIL-6, IL-10などの炎症性サイトカインに及ぼす影響を比較した研究では, 3条件ともに運動終了後にIL-6は有意に高値を示し, 運動終了30分後では, 高強度持続的運動は中強度持続的運動と比較して, IL-6, IL-10は有意に高値であったことが報告されている<sup>30</sup>。さらに, 高強度持続的運動は, 中強度持続的運動およびインターバル運動

と比較して、運動後の酸化ストレス血漿マーカーは有意に高値を示したが、インターバル運動は中強度持続的運動と同程度であったことが示されている<sup>30)</sup>。20秒間の100%W<sub>max</sub>強度の主運動に対して、完全休息を20秒間に設定したレペティション運動は、血管内皮機能を低下させたことが報告されているが<sup>7)</sup>、その原因には、高強度運動に伴うROS、血管内炎症反応などが影響した可能性がある。それに対して、本研究では、主運動後の完全休息を40秒に設定したことで、主運動後に増加した $\dot{V}O_2$ およびHRの回復には、十分な休息を得ることができ、高強度運動に伴い発現されるROS、血管内炎症反応などを抑制できた可能性がある。

なお、本研究の限界として、被験者が健常者の男性に限られているために、女性、体力レベル、疾病状況などが異なる被験者も今後対象に検討し、これらの対象者を含め、トレーニングによる介入が、血管内皮機能に及ぼす影響を明らかにする必要がある。また、本研究は、我々の先行研究<sup>7)</sup>を元に総仕事量を減少させたレペティション運動が、血管内皮機能に及ぼす影響を検証したために、運動時間は20分間に規定したが、中強度の持続的運動は動脈機能を亢進させることが明らかにされている<sup>2,4)</sup>。さらに、40%W<sub>max</sub>強度の持続的運動を27分間実施することでFMDを亢進させることが報告されており<sup>31)</sup>、本研究で対象条件にした持続的運動は、運動時間を延長することで、FMDは亢進する可能性が考えられるので、その場合の比較検討も必要である。さらに、本研究は持続的運動との比較であったが、運動形式が類似しているインターバル運動は、血管内皮機能を亢進させることが明らかにされているため、持続的運動以外の運動形式との比較により、動脈硬化症を予防するために有効な有酸素性運動がより明確になる。FMDの変化については、ずり応力およびNO、ROSなどが影響したことを考察しているが、ずり応力については、PSRのみの評価であり、NOおよびROSについては、生化学検査をしていないためその関与は不明であった。したがって、運動中の血流量を測定し、生化学検査を実施することで、それぞれの運動効果のメカニズムを明らかにする必要がある。

## 結 語

本研究では、レペティション運動が血管内皮機能に及ぼす影響を明らかにするために、持続的運動と持続的運動よりも総仕事量を減少させたレペティション運動を比較したところ、持続的運動に比較してレペティション運動は血管内皮機能を亢進させることが示された。今後、本研究で設定したレペティション運動でトレーニングすることで、血管内皮機能が改善するか否かの検討に期待される。

## 利益相反自己申告：

本研究に関連し開示すべきCOIはありません。

## 謝 辞

本研究は、快く研究主旨にご賛同して頂いた対象者の皆様、徳島大学応用生理学研究室の森智大氏の協力によって遂行できました。ここに心から敬意と感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) Kingwell BA, Berry KL, Cameron JD, Jennings GL, Dart AM. Arterial compliance increases after moderate-intensity cycling. *Am J Physiol* 273: 2186-2191, 1997.
- 3) Goto C, Higashi Y, Kimura M, Noma K, Hara K, Nakagawa K, Kawamura M, Chayama K, Yoshizumi M, Nara I. Effect of different intensities of exercise on endothelium-dependent vasodilation in humans role of endothelium-dependent nitric oxide and oxidative stress. *Circulation* 108: 530-535, 2003.
- 4) Nickel KJ, Acree LS, Gardner AW. Effects of a single bout of exercise on arterial compliance in older adults. *Angiology* 62: 33-37, 2011.
- 5) Rakobowchuk M, Tanguay S, Burgomaster KA, Howarth KR, Gibala MJ, MacDonald MJ. Sprint interval and traditional endurance training induce similar improvements in peripheral arterial stiffness and flow-mediated dilation in healthy humans. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 295: R236-R242, 2008.
- 6) Currie KD, McKelvie RS, Macdonald MJ. Flow-mediated dilation is acutely improved after high-intensity interval exercise. *Med Sci Sports Exerc* 44: 2057-2064, 2012.
- 7) 田村靖明, 三浦 哉, 出口憲市, 東 亜弥子, 橋本祐司, 石川みづき: レペティション形式の有酸素性運動が血管内皮機能に及ぼす影響, 体力科学, 66: 437-444, 2017.
- 8) 山地啓司. 最大酸素摂取量の科学, 杏林書院, 東京, 3-55, 2001.
- 9) American College of Sports Medicine position stand. The recommended quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory and muscular fitness in healthy adults. *Med Sci Sports Exerc* 22: 265-274, 1990.
- 10) Billat LV. Interval Training for Performance: A scientific and empirical practice special recommendations for middle- and long-distance running. Part I: Aerobic interval training. *Sports Med* 31: 13-31, 2001.
- 11) 循環器病の診断と治療に関するガイドライン2013, 血管機能の非侵襲的評価方法に関するガイドライン. <http://www.j-circ.or.jp/guideline/> (閲覧日2018年12月25日).

- 12) Corretti MC, Anderson TJ, Benjamin EJ, Celermajer D, Charbonneau F, Creager MA, Deanfield J, Drexler H, Gerhard-Herman M, Herrington D, Vallance P, Vita J, Vogel R. Guidelines for the ultrasound assessment of endothelial-dependent flow-mediated vasodilation of the brachial artery a report of the international brachial artery reactivity task force. *J Am Coll Cardiol* 39: 257-265, 2002.
- 13) Genta FT, Eleuteri E, Temporelli PL, Comazzi F, Tidu M, Bouslenko Z, Bertolin F, Vigorito C, Giannuzzi P, Giallauria F. Flow-mediated dilation normalization predicts outcome in chronic heart failure patients. *J Cardiac Fail* 19: 260-267, 2013.
- 14) Cosio-Lima LM, Thompson PD, Reynolds KL, Headley SA, Winter CR, Manos T, Lagasse MA, Todorovich JR, Germain M. The acute effect of aerobic exercise on brachial artery endothelial function in renal transplant recipients. *Prev Cardiol* 9: 211-214, 2006.
- 15) Tinken TM, Thijssen DH, Hopkins N, Black MA, Dawson EA, Minson CT, Newcomer SC, Laughlin MH, Cable NT, Green DJ. Impact of shear rate modulation on vascular function in humans. *Hypertension* 54: 278-285, 2009.
- 16) Birk GK, Dawson EA, Batterham AM, Atkinson G, Cable T, Thijssen DH, Green DJ. Effects of exercise intensity on flow mediated dilation in healthy humans. *Int J Sports Med* 34: 409-414, 2013.
- 17) Ciolac EG, Bocchi EA, Bortolotto LA, Carvalho VO, Greve JMD, 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.
- 18) Atkinson G, Batterham AM. The percentage flow-mediated dilation index: A large-sample investigation of its appropriateness, potential for bias and causal nexus in vascular medicine. *Vasc Med* 18: 354-365, 2013.
- 19) Atkinson G, Batterham AM. Allometric scaling of diameter change in the original flow-mediated dilation protocol. *Atherosclerosis* 226: 425-427, 2013.
- 20) Davies PF, Tripathi SC. Mechanical stress mechanisms and the cell. An endothelial paradigm. *Circ Res* 72: 239-245, 1993.
- 21) Gnasso A, Carallo C, Irace C, De Franceschi MS, Mattioli PL, Motti C, Cortese C. Association between wall shear stress and flow-mediated vasodilation in healthy men. *Atherosclerosis* 156: 171-176, 2001.
- 22) Woodman RJ, Playford DA, Watts GF, Cheetham C, Reed C, Taylor RR, Puddey IB, Beilin LJ, Burke V, Mori TA & Green D. Improved analysis of brachial artery ultrasound using a novel edge-detection software system. *J Appl Physiol* 91: 929-937, 2001.
- 23) Duffy SJ, Castle SF, Harper RW, Meredith IT. Contribution of vasodilator prostanoids and nitric oxide to resting flow, metabolic vasodilation, and flow-mediated dilation in human coronary circulation. *Circulation* 100: 1951-1957, 1999.
- 24) Betik AC, Luckham VB, Hughson RL. Flow-mediated dilation in human brachial artery after different circulatory occlusion conditions. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 286: 442-448, 2004.
- 25) Pyke KE, Dwyer EM, Tschakovsky ME. Impact of controlling shear rate on flow-mediated dilation responses in the brachial artery of humans. *J Appl Physiol* 97: 499-508, 2004.
- 26) Guiraud T, Juneau M, Nigam A, Gayda M, Meyer P, Mekary S, Paillard F, Bosquet L. Optimization of high intensity interval exercise in coronary heart disease. *Eur J Appl Physiol* 108: 733-740, 2010.
- 27) Meyer P, Normandin E, Gayda M, Billon G, Guiraud T, Bosquet L, Fortier A, Juneau M, White M, Nigam A. High-intensity interval exercise in chronic heart failure: protocol optimization. *J Card fail* 18: 126-133, 2012.
- 28) Guiraud T, Nigam A, Juneau M, Meyer P, Gayda M, Bosquet L. Acute responses to high-intensity intermittent exercise in CHD patients. *Med Sci Sports Exerc* 43: 211-217, 2011.
- 29) 國友 勝: 酸化ストレスと動脈硬化, *YAKUGAKU ZASSHI* 127: 1997-2014, 2007.
- 30) Wadley AJ, Chen YW, Lip GY, Fisher JP, Aldred S. Low volume-high intensity interval exercise elicits antioxidant and anti-inflammatory effects in humans. *J Sports Sci* 34: 1-9, 2015.
- 31) Bailey TG, Perissiou M, Windsor MT, Schulze K, Nam M, Magee R, Leicht AS, Green DJ, Greaves K, Golledge J, Askew CD. Effects of acute exercise on endothelial function in patients with abdominal aortic aneurysm. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 314: H19-H30, 2018.