

一過性の自転車こぎ運動と下肢への電気刺激の併用が動脈スティフネスに及ぼす影響

西村 里奈¹, 三浦 哉^{2*}, 羅 成圭³, 田村 靖明⁴, 中村 みづき⁵,
久我 浩正⁶, 出口 純次⁷

Effects of acute cycling with electrical muscle stimulation of lower limbs on arterial stiffness

Rina Nishimura¹, Hajime Miura^{2*}, Song-Gyu Ra³, Yasuaki Tamura⁴, Mizuki Nakamura⁵,
Hiromasa Kuga⁶ and Jyunji Deguchi⁷

¹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 Minami-josanjima-cho, Tokushima-city, Tokushima 770-8502, Japan*)

²徳島大学大学院社会産業理工学研究部, 〒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 Minami-josanjima-cho, Tokushima-city, Tokushima 770-8502, Japan*)

³徳島大学教養教育院, 〒770-8502 徳島県徳島市南常三島町1-1 (*Institute of Liberal Arts and Sciences, Tokushima University, 1-1 Minami-josanjima-cho, Tokushima-city, Tokushima 770-8502, Japan*)

⁴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, Naruto, Tokushima 772-8503, Japan*)

⁵大阪行岡医療大学医療学部理学療法学科, 〒567-0801 大阪府茨木市総持寺1丁目1番41号 (*Department of Physical Therapy, Faculty of Medical Care, Osaka Yukioka Medical University, 1-1-41 Sojiji, Ibaraki-shi, Osaka 567-0801, Japan*)

⁶株式会社ニシ・スポーツ, 〒136-0075 東京都江東区新砂3-1-18 (*NISHI-SPORTS, Corporation, 3-1-18 Shinsuna, Koto-ku, Tokyo 136-0075, Japan*)

⁷勝浦学園徳島医療福祉専門学校理学療法学科, 〒771-4307 徳島県勝浦郡勝浦町大字三溪字平128-1 (*Department of Physical Therapy, Tokushima College of Medical Sciences and Welfare, 128-1 Taira, Mitani, Katsuura-cho, Katsuura-gun, Tokushima 771-4307, Japan*)

Received: April 11, 2023 / Accepted: August 7, 2023

Abstract Endurance exercises, such as cycling or running, are useful for reducing arterial stiffness. However, individuals with a low physical fitness level, or patients suffering from leg diseases with pain, are unable to perform such moderate-intensity lower-limb exercises for long periods of time. The aim of this study was to evaluate the effects of acute cycling with Electrical muscle stimulation (EMS) on the brachial to ankle pulse wave velocity (ba-PWV). Ten healthy adult men performed 3 sessions, as follows of 20 min: cycling at 50% $\dot{V}O_{2max}$ (C), cycling at an intensity of 50% $\dot{V}O_{2max}$ subtracted from $\dot{V}O_2$ during EMS (LC), and cycling at the intensity of the LC trial while also being combined with EMS (LC+E). The ba-PWV was measured before and after each exercise. In addition, the femoral artery blood flow (BF) was measured in eight healthy adult men before and after exercise using an ultrasound imaging system. In the C and LC+E trials, the ba-PWV significantly decreased immediately after the exercise session, whereas the ba-PWV did not significantly change following the LC trial in any session. Compared with the baseline, the femoral artery BF values significantly increased after all trials. In the C and LC+E trials, the femoral artery BF was significantly greater than that in the LC trial. Acute endurance low-intensity cycling with EMS results in a reduction in the arterial stiffness which is similar to that with moderate-intensity exercise.

Jpn J Phys Fitness Sports Med, 72(6): 371-380 (2023)

Keywords : electrical muscle stimulation, arterial stiffness, pulse wave velocity, cycling

緒 言

脳血管疾患, 心疾患などの循環器疾患 (cardiovascular disease: CVD) は, 我が国における主要な死因の一つとなっており¹⁾, 運動麻痺, 認知障害などの後遺症を引き起こすために, 日常生活動作の自立を困難にする場合が多い。したがって, CVDの発症を予防し, 健康寿命を延長させることは非常に重要である。動脈ステイフネスは, 動脈壁の硬化度を示し, 一般的に非侵襲的かつ簡便に使用できる Pulse Wave Velocity (PWV) で評価される²⁾。このPWVは, 心臓の収縮により生じる脈波が中心から末梢へ伝播する速度を示し, 動脈の壁が硬ければ脈波は速く, 動脈の壁が柔らかければ脈波は遅くなる。動脈ステイフネスの増大は, CVDの発症, 死亡と関連し^{3,4)}, CVD発症予防にはサイクリング, ウォーキング, ランニングなどの中強度の有酸素性運動は, 有効であることが報告されている⁵⁻¹¹⁾。

一方, 低体力者, 運動耐容能の低下した循環器疾患患者, 下肢に疼痛を抱えた運動器疾患患者などは, サイクリング, ウォーキング, ランニングといった下肢を主に用いる中強度の有酸素性運動を長時間実施することが困難である。下肢の変形性関節症などに代表される運動器疾患を持つ患者では, 疼痛により身体活動が低下し¹²⁾, 中強度以上の運動が実施出来ない人々が存在する。さらに, 長期入院, 長期臥床によって心肺機能が低下した人々も, 適切な強度かつ長時間の運動を実施できない場合が多い¹³⁾。このように, 身体不活動状態, 運動習慣を持たない者は運動耐容能が低く, 心血管系危険因子が高まることが報告されているが¹⁴⁻¹⁶⁾, 安全面の観点から心肺機能への急激なストレスを防ぐために, 低強度の運動を余儀なくされる。このような対象者に対して, 動脈ステイフネスの維持・低下につながる運動プログラムを確立する必要性が高まっている。

近年, 経皮的に骨格筋に電気刺激を与え, 他動的に筋収縮を引き起こす骨格筋電気刺激 (Electrical muscle stimulation: EMS) が注目されている。EMSは対象者の能動的な運動を必要とせず, 他動的に筋肉を収縮させることが可能であるため運動の代替手段となる可能性がある。これまでにEMSは, 筋力の増加, グルコース代謝の亢進, エネルギー消費量の増加, 動脈ステイフネスの低下を引き起こすことが示されている¹⁷⁻²²⁾。我々のグループもこれまでに, 下肢全体へのEMSが動脈ステイフネスを低下させること²³⁾, 中強度の上肢クランク運動時にEMSを併用することで動脈ステイフネスが低下することを明らかにしてきた²⁴⁾。しかし, 上肢クランク運動は日常生活で使用頻度が低く身体的疲労度が大きい, さらには炎症反応が誘発されやすい²⁵⁾ ために, 低体力者への適用が困難である。Watanabeら²⁶⁾ は, 低強度の

自転車こぎ運動とEMSを併用させることで, グルコース代謝ならびにエネルギー消費量が高まると報告している。低強度である有酸素性運動に, 他動的な運動であるEMSを組み合わせることで, 低強度の有酸素性運動のみでは不足していた運動量が担保され, 持久性が低下し自発的な運動を長時間十分にできない人々に, 効果をもたらす可能性が示唆されるが, 自転車こぎ運動とEMSの併用による動脈ステイフネスへの影響については十分に検討されていない。

そこで, 本研究では, 低強度の自転車こぎ運動とEMSの併用が, 動脈ステイフネス対して中強度の自転車こぎ運動と同等の効果をもたらす可能性について検証した。

方 法

対象 対象者は, 喫煙経験および服薬習慣の無い健康な成人男性10名である (年齢: 23.0 ± 3.6 歳, 身長: 172.0 ± 3.0 cm, 体重: 62.9 ± 2.9 kg)。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 (受付番号151) を得たものであり, 対象者には, 事前に文書および口頭にて研究の内容・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。

実験デザイン プロトコール

対象者は, 測定のために4回研究室へ訪問し, 1日目に最大運動負荷テストおよびEMS強度設定のために, EMSを20分間付加し, 刺激時の $\dot{V}O_2$ および最大耐性強度を測定した。2日目以降に, $50\% \dot{V}O_{2max}$ で自転車こぎ運動を実施する条件 (Cycling: C条件), $50\% \dot{V}O_{2max}$ からEMS分の負荷を差し引いた低強度での自転車こぎ運動条件 (Low intensity cycling: LC条件), 低強度の自転車こぎ運動とEMSを併用し $50\% \dot{V}O_{2max}$ に相当する強度で運動を実施する条件 (Low intensity cycling+EMS: LC+E条件) をランダムに20分間実施させた。各条件における運動強度の設定は, Fig. 1に示すとおりである。各条件の運動強度は, それぞれの最大運動負荷テスト時の $\dot{V}O_2$ と仕事率 (W) との関係の直線回帰式 ($y = \dot{V}O_2$, $x = W$, プロットした $\dot{V}O_2 = 17 \sim 26$, $R^2 = 0.97$) から運動強度を求めた。C条件は, それぞれの最大運動負荷テスト時の $\dot{V}O_2 - W$ の直線回帰式から $50\% \dot{V}O_{2max}$ に相当する強度, LC条件は, $50\% \dot{V}O_{2max}$ の値からEMS時の $\dot{V}O_2$ を差し引いた値を, それぞれの直線回帰式に当てはめて自転車こぎ運動の強度を設定した。LC+E条件は, LC条件で実施した強度の自転車こぎ運動にEMSを付与した。

対象者には, 測定前日および当日の激しい運動, 飲酒, 多量のカフェイン摂取を禁止し, 測定当日には, 食後4時間以上経過した後に, 室温 ($23 \sim 25^\circ\text{C}$) および湿度 ($50 \sim 70\%$) が管理された部屋で, 各対象者のすべて

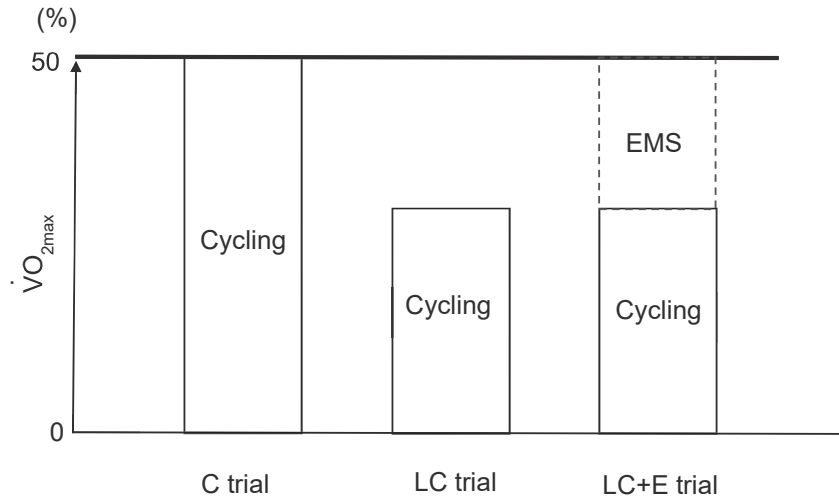


Fig. 1 Exercise intensity in each trial.

All subjects performed 3 sessions as follows: The C trial was 20 min of cycling at 50% $\dot{V}O_{2max}$. The LC trial consisted of 20 min of cycling at an intensity of 50% $\dot{V}O_{2max}$ subtracted from $\dot{V}O_2$ during EMS. The LC+E trial consisted of 20 min of cycling at the intensity of the LC trial while also being combined with EMS. EMS: electrical muscle stimulation, $\dot{V}O_{2max}$: maximal oxygen consumption

の実験時間および測定時間を統一した。また、すべての対象者は、最大運動負荷テストを行った1週間後に、各条件を、最低1週間の間隔を空けてクロスオーバーデザインを用いて実施した。運動前20分間の仰臥位安静後と運動後で、上腕-足首間脈波伝播速度 (ba-PWV)、心拍数 (Heart rate: HR)、収縮期血圧 (Systolic blood pressure: SBP)、拡張期血圧 (Diastolic blood pressure: DBP)、平均血圧 (Mean arterial pressure: MAP)、総大腿動脈の血管径 (Diameter: Di)、平均血流速度 (Mean blood flow velocity: MBFV)、および血流量 (Blood flow: BF) を測定した。なお、検者内信頼性を確認するために、Shroutら²⁷⁾の級内相関係数 (intra-class correlation coefficient: ICC) を用い、健常成人男性8名を対象に、 $\dot{V}O_2$ 、ba-PWV、Di、MBFV、およびBFの測定の再現性は、ICC (1,1) にて算出し、Landis and Kochの評価指標にて判定した²⁸⁾。それぞれの測定項目のICCは、 $\dot{V}O_2$ (ICC=0.85)、ba-PWV (ICC=0.87)、Di (ICC=0.85)、MBFV (ICC=0.88)、BF (ICC=0.89) であった。

最大運動負荷テストのプロトコール

運動強度を設定するために、自転車エルゴメータ (232C MODEL50: 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 ($\dot{V}O_{2max}$) を測定した。対象者は、自転車エルゴメータに座って3分間の安静後に40 wattsの負荷から開始し、1分毎に20 watts漸増させる最大負荷テストを実施した。なお、ペダルの回転数は毎分60回転に規定した。 $\dot{V}O_{2max}$ の決定には、 $\dot{V}O_2$ の leveling off (0.15 L/min以上増加しなくなっ

た状態)、予測最大心拍数 (220-年齢) 以上、呼吸交換率が1.1以上、およびBorg scaleが19以上のうち、2項目が該当することを条件とした。

EMS

EMSには、理学診療用器具低周波治療器 (G-TES: ホーマーイオン研究所社製、東京、日本) を使用した。ベルト電極式骨格筋電気刺激法 (周波数4 Hz、パルス幅250 μ s) を用いた。高周波の電気刺激では、骨格筋の強縮性収縮を誘発し、低周波の電気刺激と比較して筋疲労を誘発しやすい特性があること、また、本研究では、有酸素性運動による末梢循環促進を図るため、周波数4 Hzを採用した^{29,30)}。EMSは、水を十分浸透させたベルト電極 (腰部: 5.3 cm \times 93.3 cm、大腿部: 5.3 cm \times 69.6 cm、足関節部: 5.3 \times 54.6 cm) を、腰部 (臍上部)、両側大腿部 (膝関節上部10 cm)、および両側足関節部 (膝関節上部10 cm) の5ヶ所にベルト電極を装着した。なお、両側大腿部および下腿部の刺激周期は、同期されているため、両側の下肢筋群が同時に刺激された。

測定項目および測定方法

$\dot{V}O_2$ およびHR

最大運動負荷テスト、EMS刺激中、および下肢の自転車こぎ運動中の $\dot{V}O_2$ の測定は、ミキシングチャンバー方式によるエネルギー代謝測定を行うことができる自動呼気ガス分析装置 (AR-1 Type-3: アルコシステム社製、千葉、日本) を用いて、30秒ごとに測定した。酸素濃度センサー、炭酸ガス濃度センサー、および流量計の空気校

正は, 電源投入時および実験開始前に, O_2 濃度20.93%, CO_2 濃度0.04%になるよう実施した. 自動呼気ガス分析装置は, 平坦な場所に水平を保って設置し, 空気が漏れないよう留意しマスクを装着した. また, 運動中のHRは, ハートレートモニター (PolarRS100: POLAR社製, 東京, 日本) を用い, 30秒ごとに測定した.

SBP, DBP, MAP, HR, およびba-PWV

血圧脈波検査装置 (form PWV/ABI: フクダコーリン社製, 東京, 日本) を用いて, 上腕動脈のSBP, DBP, MAP, HR, およびba-PWVをすべて同一検者が測定した. 血圧脈波検査装置は, 脈波, 四肢血圧, 心電図, および心音図を同時測定することで, 動脈壁の硬化度を非侵襲的に測定することが可能である³¹⁾. 両上腕および両足首に血圧測定カフを巻き, カフ内の容積脈波から両上腕および両足首の脈波を取得することができる. これらの上腕および足首の脈波から立ち上がり時間差 (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, 以下に示す式からba-PWVを算出した³¹⁾.

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

総大腿動脈血流量

対象者10名のうち8名においては, 総大腿動脈のBFは超音波画像診断装置 (Xario 100 S Edition: Canon社製, 東京, 日本), プローブ (7-18リニア, PLU-1204BT: Canon社製, 東京, 日本) を用いて, 同一検者がすべて測定した. 超音波ビームと血管でなす角は 60° 以下とし, 横断面にて動脈の部位を確認し, 動脈径が最も太く描出される最大断面の血管中央をサンプルポイントとした. サンプルポイントを決定した後, 縦断面で描出し, すべての動脈径の計測は, 最大血管径 (血流速度波形の立ち上がり時) を測定した³²⁾. 動脈径の計測部位は, 検査者が無作為に選んだ3点とし, 3点の値の最大値を採用し, 平均血流速度の積分値は, 連続した4拍の速度波形を対象として計測し, その平均値を用いた. 測定部位は, 左足の大腿動脈と鼠径靭帯中央部との交点とし, 超音波画像診断装置により得られた血管断面像と波形データより平均血流量を測定した. 測定した血管断面像をもとに, 画像解析ソフト image J (NIH 1.51) を用いて最大血管径を測定し, 血管横断面積 (Cross-Sectional Area, CSA) を描出し, 以下に示す式1からBFを算出した.

$$\text{式1 } BF(\text{ml}/\text{min}) = \text{CSA}(\text{cm}^2) \times 60 \times \text{MBFV}(\text{cm}/\text{sec})$$

また, Poiseuilleの法則に基づいて総大腿動脈血管壁におけるずり速度 (SR) を, 以下に示す式2から算出した.

$$\text{式2 } SR(\text{s}^{-1}) = 4 \times \text{血流速度}(\text{cm}/\text{sec}) / \text{血管半径}(\text{cm})$$

また, 血流の流れやすさの指標である血管コンダクタンスは, 下記の式3から算出した³³⁾.

$$\text{式3 : 血管コンダクタンス}(\text{mL}/\text{min}/\text{mmHg}) = \text{BF}(\text{mL}/\text{min}) \div \text{MAP}(\text{mmHg})$$

統計処理 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. 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分散分析 (運動条件 \times 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, 各条件の自転車こぎ運動時のWの平均値の比較には, 対応のあるt検定を実施し, 運動時の $\dot{V}O_{2\text{max}}$ に対する $\dot{V}O_2$ の相対値の比較には, 一元配置分散分析を行った. データの解析には, 統計解析ソフト (SPSS ver.26.0, IBM社製, 東京, 日本) を使用した. すべての測定値は, 平均値および標準偏差 (Mean \pm SD) で示し, 有意水準5%をもって統計学的有意とした.

結 果

最大運動負荷テスト時およびEMS時の呼吸循環応答
最大運動負荷テスト時の $\dot{V}O_{2\text{max}}$ は, 45.2 ± 6.1 ml/kg/min, HR_{max} は, 177 ± 7 beats/min, W_{max} は, 243 ± 36 W, EMS時の $\dot{V}O_2$ は, 9.1 ± 2.4 ml/kg/min, HRは, 87 ± 15 beats/minであり, なお, EMSの刺激強度は113~147 mAであった.

運動中の $\dot{V}O_2$ およびHR 運動中の $\dot{V}O_2$ およびHRの変化をFig. 2に示した. すべての条件において, 運動前と比較して各試行中の $\dot{V}O_2$ およびHRが有意に増加した. 運動中の $\dot{V}O_2$ およびHRは, LC条件と比較して, 運動開始5分後, 10分後, 15分後および20分後にてC条件およびLC+E条件で有意に高値であった.

C条件の $\dot{V}O_2$ は, 23.3 ± 4.9 ml/kg/min, 最大運動時における51.8%, LC条件の $\dot{V}O_2$ は, 14.8 ± 3.6 ml/kg/min, 最大運動時における32.8%, LC+E条件の $\dot{V}O_2$ は, 22.9 ± 5.1 ml/kg/min, 最大運動時における50.9%であった. $\dot{V}O_{2\text{max}}$ に対する運動中の $\dot{V}O_2$ の相対値は, LC+E条件およびC条件と比較して, LC条件で, 有意に低い値を示し, 有意な差が認められた.

運動時の絶対的運動強度 C条件のW数は、 132 ± 16 Wであり、LC条件およびLC+E条件のW数は、 83 ± 8 Wであった。C条件と比較しLC条件およびLC+E条件のW数は、有意に低い値を示し、有意な差が認められた。

動脈ステイフネス 運動前後のba-PWVの変化をFig. 3に示した。運動前のba-PWVは条件間で有意な差が認められなかった。LC条件のba-PWVは運動前後で変化しなかったが、C条件およびLC+E条件では運動後にba-PWVが、有意に低い値を示し、有意な差が認められた。また、運動後のba-PWVは、LC条件と比較してC条件

およびLC+E条件で、有意に低い値を示し、有意な差が認められた。

Di, MBFV, およびBF Di, MBFV, およびBFの変化をFig. 4に示した。運動前のDi, MBFV, およびBFに条件間の有意な差が認められなかった。MBFVおよびBFについては、有意な交互作用が認められた。また、すべての条件で運動前と比較し、運動後に有意に高い値を示し、有意な差が認められ、LC条件と比較してC条件およびLC+E条件で有意に高い値を示し、有意な差が認められた ($p < 0.05$)。Diについては、運動前後で有意な差は認められなかった。

SRおよび血管コンダクタンス SRおよび血管コンダクタンスの変化をFig. 5に示した。運動前のSRおよび血管コンダクタンスに条件間の有意な差は認められなかった。SRおよび血管コンダクタンスについては、有意な交互作用が認められた。また、すべての条件で運動前と比較し、運動後に増加し、有意な差を認め、LC条件と比較してC条件およびLC+E条件で有意な差が認められた ($p < 0.05$)。

SBP, DBP, MAP, およびHR SBP, DBP, MAP, およびHRの変化をTable 1に示した。すべての項目において運動前に条件間の有意な差は認められなかった。

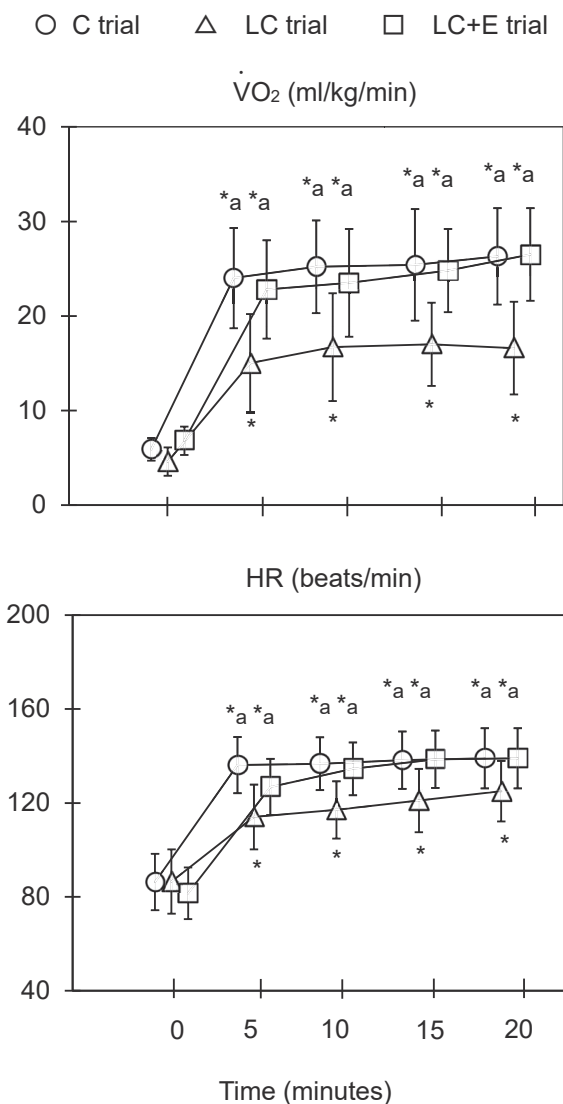


Fig. 2 Changes in oxygen uptake and heart rate during each trial. Values are presented as mean \pm SD. C trial: cycling exercise trial, LC trial: low intensity cycling trial, LC+E trial: low intensity cycling exercise with Electrical muscle stimulation trial, $\dot{V}O_2$: oxygen consumption, HR: heart rate * $p < 0.05$ vs. 0 min. ($p < 0.05$). ** $p < 0.05$ vs. LC trial. ($p < 0.05$).

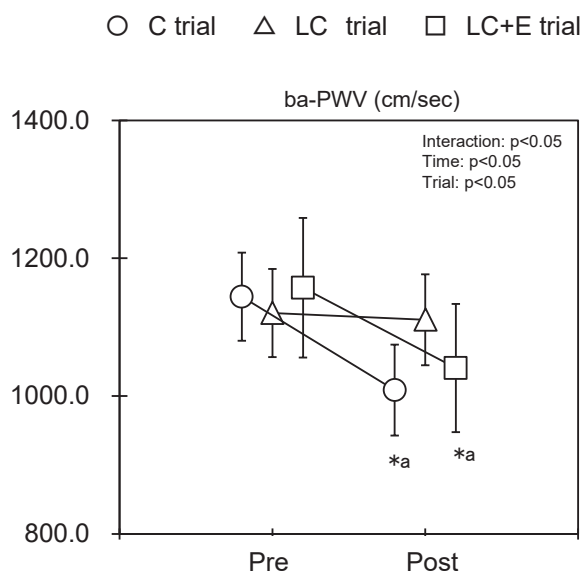


Fig. 3 Changes in brachial-ankle pulse wave velocity (ba-PWV) before and after each trial. C: cycling exercise, LC: low intensity cycling, LC+E: low intensity cycling exercise with Electrical muscle stimulation, ba-PWV: brachial-ankle pulse wave velocity Values are presented as mean \pm SD. * $p < 0.05$ vs. Pre. ** $p < 0.05$ vs. Post in LC trial. ($p < 0.05$).

○ C trial △ LC trial □ LC+E trial

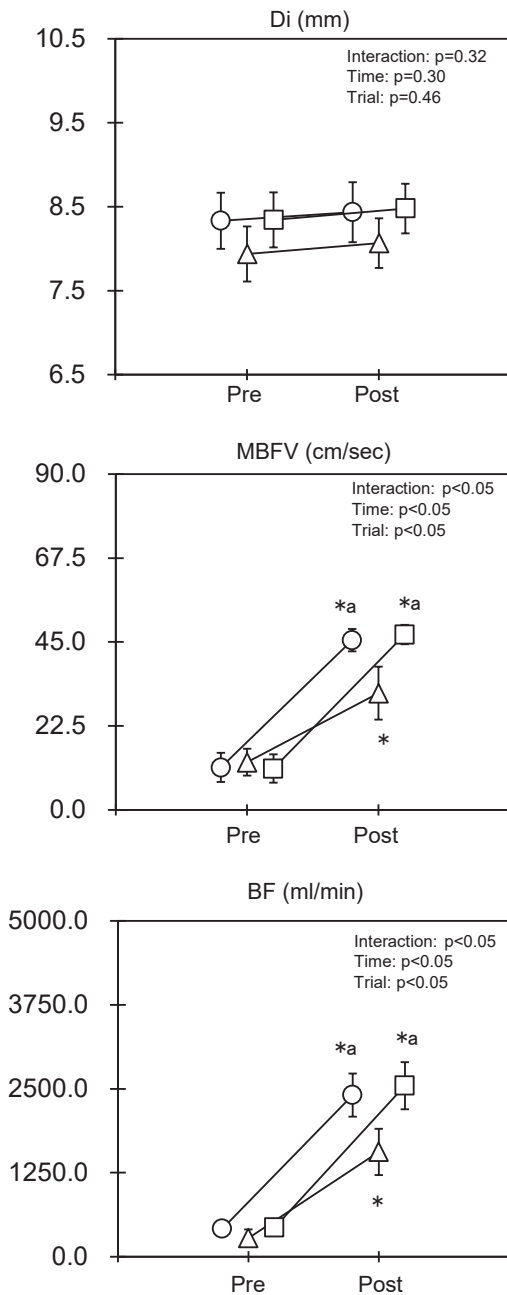


Fig. 4 Changes in Di, MBFV, and BF before and after each trial.

Di: max brachial artery diameter, MBFV: mean blood flow velocity, BF: blood flow

Values are presented as mean ± SD.

*p < 0.05 vs. Pre. *a p < 0.05 vs. Post in LC trial.

HRはすべての条件において運動後に増加し有意な差を認め、運動後のHRはLC条件と比較してC条件およびLC+E条件で有意な差が認められた。SBP, DBP, およびMAPは、運動前後で有意な変化は認められなかった。

考 察

本研究では、健康な成人男性を対象に、一過性の下肢

○ C trial △ LC trial □ LC+E trial

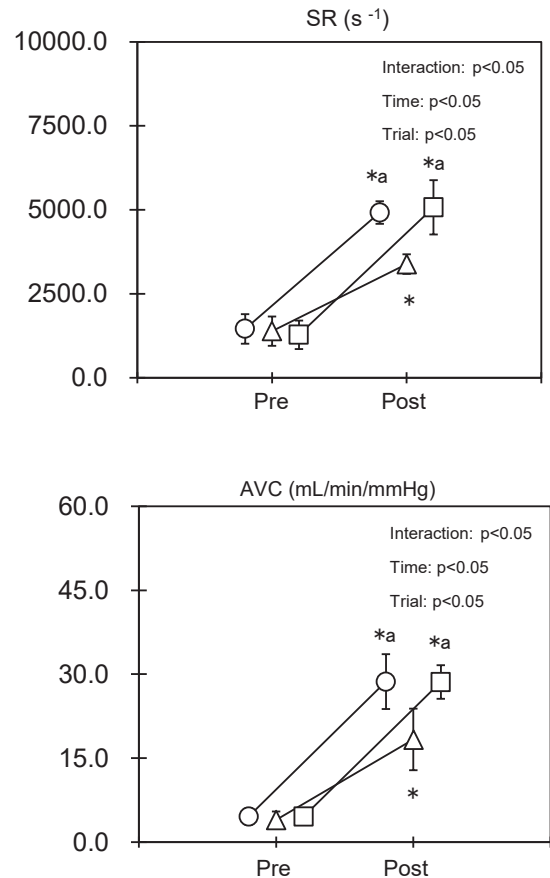


Fig. 5 Changes in SR and AVC before and after each trial. SR: shear rate, AVC: artery vascular conductance

Values are Mean ± SD.

*p < 0.05 vs. Pre. *a p < 0.05 vs. Post in LC trial.

の自転車こぎ運動と骨格筋電気刺激の併用が、動脈ステイフネスに及ぼす影響について検討した。その結果、低強度の自転車こぎ運動であるLC条件ではba-PWVは低下しなかったが、低強度の自転車こぎ運動とEMSを併用したLC+E条件では、C条件と同様に運動後のba-PWVの有意な低下が認められた。

本研究における重要な所見は、低強度の自転車こぎ運動のみでは有意に低下しなかったba-PWVが、骨格筋電気刺激を併用させたLC+E条件において、中強度の自転車こぎ運動を実施したC条件と同様に、運動後の総大腿動脈の血流量が増加し、ba-PWVの有意な低下を示した点である。つまり、低強度の自転車こぎ運動にEMSを付加することで血流量が増加し、動脈ステイフネスを低下させる可能性が示唆された。骨格筋収縮による筋肉内圧のリズミカルな上昇および下降は血流を増加させ³⁴⁾、血管内皮細胞への力学的ストレスであるシェアストレスを増大させることで、血管拡張反応を引き起こすことが

Table 1. Changes in SBP, DBP, MAP, and HR before and after each trial

		Pre	Post	two-way ANOVA		
				Time	Trial	interaction
SBP (mmHg)	C	126 ± 13	136 ± 14	F(1,9)=0.31	F(2,18)=0.34	F(2,18)=5.03
	LC+E	127 ± 8	139 ± 17	p=0.59	p=0.57	p=0.55
	LC	127 ± 10	134 ± 13			
DBP (mmHg)	C	75 ± 10	76 ± 10	F(1,9)=0.02	F(2,18)=0.20	F(2,18)=0.13
	LC+E	77 ± 8	75 ± 7	p=0.91	p=0.67	p=0.73
	LC	75 ± 9	79 ± 6			
MAP (mmHg)	C	84 ± 8	84 ± 9	F(2,18)=0.22	F(2,18)=0.61	F(2,18)=0.12
	LC	85 ± 9	87 ± 5	p=0.65	p=0.56	p=0.99
	LC+E	86 ± 6	85 ± 8			
HR (beats/min)	C	69 ± 18	79.2 ± 15* ^a	F(1,9)=17.85	F(2,18)=7.28	F(2,18)=18.92
	LC+E	69 ± 18	79.3 ± 20* ^a	p<0.05	p<0.05	p<0.05
	LC	70 ± 15	77.3 ± 16*			

Values are presented as mean ± SD.

SBP: systolic blood pressure, DBP: diastolic blood pressure, MAP: mean arterial pressure, HR: heart rate

C: cycling exercise, LC: low intensity cycling, LC+E: low intensity cycling exercise with Electrical muscle stimulation

*p < 0.05 vs. at Pre. ^ap < 0.05 vs. Post in LC.

報告されている³⁵⁾。本研究において、C条件と同等にLC+E条件では、運動後において総大腿動脈の血流量の有意な増加を示した。本研究では、総大腿動脈の血流量を血管径および平均血流速度から算出しており、本研究のすべての条件において血管径は有意な差が認められなかったが、平均血流速度は運動前後で有意な差が認められた。このことから、総大腿動脈の血流量増加は血流速度が影響していると考えられる。平均血流速度は、血管壁に対する物理刺激であるはずり応力と関連し、SRを増大させる。本研究においても、LC条件と比較しC条件およびLC+E条件でSRが有意な差を示した。したがって、下肢へのEMSを付加させた低強度の自転車こぎ運動によって、動脈ステイフネスが低下する要因は、EMSによる骨格筋収縮によって生じた血流速度の増加に伴う、SRの増加が一つの要因であると考えられる。また、本研究においてLC条件と比較しC条件およびLC+E条件で、血管コンダクタンスは有意に高値を示した。血管コンダクタンスは、動脈径の変化と無関係であることが報告されており⁹⁾、これはBFの増加によって生じる平滑筋の弛緩を引きこし、血管コンダクタンスの増加とともに動脈ステイフネスを低下させることが推測される。HRの増加、局所的な温度上昇、二酸化炭素、サブスタンスP、カルシトニン遺伝子関連ペプチド^{9,36-38)}などの要

因が、局所的な皮膚血管拡張に寄与し、血管コンダクタンスを変化させた要因であると考えられる。血管コンダクタンスは、動脈ステイフネスと関連性があり⁹⁾、本研究においても、血管コンダクタンスの増加が動脈ステイフネスを低下させた原因となる可能性が推察される。

先行研究において、有酸素性運動および骨格筋への電気刺激が血流量およびシユアストレスを増加させるメカニズムは、活動筋の血流量が増加し、血管壁と血流との間で生じるは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を高め、血管拡張を誘発することであると報告されている^{39,40)}。このように、代謝性血管拡張物質の産生が促進されたこともba-PWVを低下させた要因として推察されるが、本研究ではこれらの物質を測定できていない。

本研究の限界点の一つは、健常者を対象とした研究結果であるために、低体力者、高齢者、心疾患患者などを対象とした更なる研究が必要な点である。さらに、介入研究、EMSの刺激部位、刺激強度、刺激時間の違いなどについても検討し、低体力者、高齢者へ応用させるために、自覚的運動強度、酸化ストレス血漿マーカーなど心理的および生理的負荷の指標を測定する必要がある。

ba-PWVは、全身の動脈スティフネスを反映する指標であるために、本研究におけるC条件およびLC+E条件で生じたba-PWVの低下は、中心部ならびに末梢部のどちらの動脈スティフネスの低下を反映しているのか明確に判断することは困難である。今後は、大動脈、頸動脈などの中心動脈の動脈スティフネスを反映する頸動脈-大腿動脈間脈波伝播速度(carotid-femoral pulse wave velocity: cf-PWV)、下肢の末梢動脈の動脈スティフネスを反映する大腿-足首間脈波伝播速度(femoral-ankle pulse wave velocity: fa-PWV)など^{41,42)}、その他の測定法でも検証していく必要がある。さらに、中強度の自転車こぎ運動および低強度の自転車こぎ運動とEMSを併用させた運動によるBFの増加が、cf-PWVおよびfa-PWVなどの動脈スティフネスに関与するかについてもさらなる検証が必要である。また、LC条件において、血流量が増加しているにも関わらず、ba-PWVが低下しなかった点については、血管拡張物質の産生が少なかったことなど、血流量以外の因子が関連している可能性があるが、生化学検査を実施していないためにNOなどの産生量については不明であり、今後検討する必要がある。

本研究では、低強度の自転車こぎ運動に下肢へのEMSを併用することで、中強度の自転車こぎ運動と同程度に動脈スティフネスを低下させることが明らかになった。中・高齢の低体力者、循環器疾患患者のリハビリテーションにおいて、低強度の有酸素性運動と他動的な運動であるEMSを併用することで、安全かつ持続可能な運動プログラムを提示し、低体力者であっても循環器疾患の発症、増悪などのリスクを軽減させる効果が期待される。

結 語

健康な成人男性を対象に、一過性の下肢の自転車こぎ運動と骨格筋電気刺激の併用が、動脈スティフネスに及ぼす影響について検討した。その結果、低強度の自転車こぎ運動に骨格筋電気刺激を組み合わせると、中強度の自転車こぎ運動と同程度に動脈スティフネスを低下させる効果を発揮し、低体力者などに有効な運動方法となり得る可能性がある。

謝 辞

本研究の実施にあたり、御協力頂いた徳島大学応用生理学研究室スタッフの皆様へ深く感謝いたします。なお、本研究の一部は、JSPS科研費20K11361の助成で実施された。

利益相反

共著者の久我浩正は株式会社ニシ・スポーツに所属しているが、株式会社ニシ・スポーツからの本研究への出費、労務提供はない。したがって、本研究の結果解釈および結論に株式会社ニシ・スポーツの影響はない。その他、すべての著者に利益相反はない。

著者貢献

著者RN, HM, HKは研究デザインと研究プロトコルを立案、データ収集、データ分析、論文執筆を行った。著者SR, YT, MN, JDは論文の推敲を担当した。すべての著者は、原稿を批判的にレビュー、修正し投稿を承認した。

引用文献

- 1) 厚生労働省ホームページ. 令和2年人口動態統計月報年計の概況. <https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/geppo/nengai20/index.html> (令和5年3月31日引用)。
- 2) 菅原 順: 中心動脈伸展性と身体活動, 日本人間工学会大会講演集, 45: 152-153, 2009.
- 3) Ohkuma T, Ninomiya T, Tomiyama H, Kario K, Hoshida S, Kita Y, Inoguchi T, Maeda Y, Kohara K, Tabara Y, Nakamura M, Ohkubo T, Watada H, Munakata M, Ohishi M, Ito N, Nakamura M, Shoji T, Vlachopoulos C, Yamashina A. Brachial-Ankle Pulse Wave Velocity and the Risk Prediction of Cardiovascular Disease: An Individual Participant Data Meta-Analysis. *Hypertension* 69: 1045-1052, 2017.
- 4) Vlachopoulos C, Aznaouridis K, Terentes-Printzios D, Ioakeimidis N, Stefanadis C. Prediction of cardiovascular events and all-cause mortality with brachial-ankle elasticity index: a systematic review and meta-analysis. *Hypertension* 60: 556-562, 2012.
- 5) 厚生労働省. 次期国民健康づくり運動プラン(令和6年度開始)策定専門委員会資料. https://www.mhlw.go.jp/stf/shingi/shingi-kousei_127752_00001.html (令和5年3月31日引用)。
- 6) 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.
- 7) Madhura M, Sandhya TA. Effect of short duration aerobic exercise training on reflection index, stiffness index and pulse wave velocity. *Indian J physiol Pharmacol* 56: 15-20, 2012.
- 8) Tanaka H, Dinverno FA, Monahan KD, Clevenger CM, DeSouza CA, Seals DR. Aging, habitual exercise, and dynamic arterial compliance. *Circulation* 102: 1270-1275, 2000.
- 9) Kingwell BA, Berry KL, Cameron JD, Jennings GL, Dart AM. Arterial compliance increases after moderate-intensity cycling. *Am J Physiol* 273: 2186-2191, 1997.
- 10) Tanaka H, DeSouza CA, Seals DR. Absence of Age-Related Increase in Central Arterial Stiffness in Physically Active Women. *Arterioscler Thromb Vasc Biol* 18: 127-132, 1998.
- 11) 厚生労働省. 健康づくりのための身体活動基準2013. <https://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000002xple-att/2r9852000002xpqt.pdf>

- (令和5年3月31日引用)。
- 12) Fontaine KR, Heo M, Bathon J. Are US adults with arthritis meeting public health recommendations for physical activity? *Arthritis Rheum* 50: 624-628, 2004.
 - 13) Convertino VA. Cardiovascular consequences of bed rest: effect on maximal oxygen uptake. *Med Sci Sports Exerc* 29: 191-196, 1997.
 - 14) Cooper KH, Pollock ML, Martin RP, White SR, Linnerud AC, Jackson A. Physical fitness levels vs selected coronary risk factors. A cross-sectional study. *JAMA* 12: 166-169, 1976.
 - 15) 稲次潤子, 斉藤俊弘, 清水正比古, 稲垣義明: 日常運動習慣の変化と身体組成および運動耐容能 - 健康者と軽症高血圧者における1年間の追跡調査 -, 体力科学, 42: 301-316, 1993.
 - 16) 河本昭子, 島田和幸, 松林公蔵, 楠目 修, 近森大志郎, 木村茂昭, 斉藤 昇, 小沢利男: 老年早期における運動耐容能と心血管系危険因子, 日本老年医学会雑誌, 28: 13-17, 1991.
 - 17) Dobsák P, Nováková M, Siegelová J, Fiser B, Vitovec J, Nagasaka M, Kohzuki M, Yambe T, Nitta S, Eicher JC, Wolf JE, Imachi K. Low-frequency electrical stimulation increases muscle strength and improves blood supply in patients with chronic heart failure. *Circ J* 70: 75-82, 2006.
 - 18) Mohr T, Dela F, Handberg A, Biering-Sorensen F, Galbo H, Kjaer M. Insulin action and long-term electrically induced training in individuals with spinal cord injuries. *Med Sci Sports Exerc* 33: 1247-1252, 2001.
 - 19) Harris S, LeMaitre JP, Mackenzie G, Fox KA, Denvir MA. A randomised study of home-based electrical stimulation of the legs and conventional bicycle exercise training for patients with chronic heart failure. *Eur Heart J* 24: 871-878, 2003.
 - 20) Dobsak P, Tomandl J, Spinarova L, Vitovec J, Dusek L, Novakova M, Jarkovsky J, Krejci J, Hude P, Honek T, Siegelova J, Homolka P. Effects of neuromuscular electrical stimulation and aerobic exercise training on arterial stiffness and autonomic functions in patients with chronic heart failure. *Artif Organs* 36: 920-930, 2012.
 - 21) Kahraman BO, Savci S, Ozsoy I, Baran A, Acar S, Ozpelit E, Balci A, Sevinc C, Akdeniz B. Effects of neuromuscular electrical stimulation in patients with pulmonary arterial hypertension: a randomized controlled pilot study. *J Cardiol* 75: 702-708, 2020.
 - 22) Oda H, Fujibayashi M, Matsumoto N, Nishiwaki M. Acute Effects of Low-Intensity Electrical Stimulation on Segmental Arterial Stiffness. *Front Physiol* 13: 828670, 2022.
 - 23) 三浦 哉, 西村里奈, 出口純次, 石川みづき, 田村靖明, 村上亜弥子: 下肢への電気刺激部位の違いが動脈機能に及ぼす影響, 理学療法学, 49: 348-353, 2022.
 - 24) 石川みづき, 三浦 哉, 東 亜弥子, 出口憲市, 田村靖明: 一過性の上肢の有酸素性運動と骨格筋電気刺激の併用が動脈ステイフネスに及ぼす影響, 体力科学, 68: 183-190, 2019.
 - 25) Barnes JN, Trombold JR, Dhindsa M, Lin HF, Tanaka H. Arterial stiffening following eccentric exercise-induced muscle damage. *J Appl Physiol* 109: 1102-1108, 2010.
 - 26) Watanabe K, Yoshida T, Ishikawa T, Kawade S, Moritani T. Effect of the combination of whole-body neuromuscular electrical stimulation and voluntary exercise on metabolic responses in human. *Front Physiol* 10: 291, 2019.
 - 27) Shrout PE, Fleiss JL. Intraclass correlations uses in assessing rater reliability. *Psychol Bull* 86: 420-428, 1979.
 - 28) Landis JR, Koch GG. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics* 33: 159-174, 1977.
 - 29) Bigland-Ritchie B. EMG and fatigue of human voluntary and stimulated contractions. *Ciba Found Symp* 82: 130-156, 1981.
 - 30) Muro M, Nagata A, Sakuma C, Moritani T, Yona M, Sakamoto K. Observation of high and low frequency muscle fatigue by means of 31P nuclear magnetic resonance. *Ann Physiol Anthropol* 5: 89-96, 1986.
 - 31) Matsui Y, Kario K, Ishikawa J, Eguchi K, Hoshida S, Shimada K. Reproducibility of arterial stiffness indices (Pulse wave velocity and augmentation index) simultaneously assessed by automated pulse wave analysis and their associated risk factors in essential hypertensive patients. *Hypertens Res* 27: 851-857, 2004.
 - 32) Holland CK, Brown JM, Scutt LM, Taylor KJ. Lower extremity volumetric arterial blood flow in normal subjects. *Ultrasound Med Biol* 24: 1079-1086, 1998.
 - 33) Holwerda SW, Holland MT, Reddy CG, Pierce GL. Femoral vascular conductance and peroneal muscle sympathetic nerve activity responses to acute epidural spinal cord stimulation in humans. *Exp Physiol* 103: 905-915, 2018.
 - 34) 加賀谷淳子: 運動時の筋血流量, 体育学研究, 46: 429-442, 2001.
 - 35) Hambrecht R, Fiehn E, Weigl C, Gielen S, Hamann C, Kaiser R, Yu J, Adams V, Niebauer J, Schuler G. Regular physical exercise corrects endothelial dysfunction and improves exercise capacity in patients with chronic heart failure. *Circulation* 98: 2709-2715, 1998.
 - 36) Petrofsky JS, Al-Malty AM, Prowse M. Relationship between multiple stimuli and skin blood flow. *Med Sci Monit* 14: 399-405, 2008.
 - 37) Fisher JP, White MJ. The time course and direction of lower limb vascular conductance changes during voluntary and electrically evoked isometric of the contralateral calf muscle in man. *J Physiol* 546: 315-323, 2003.
 - 38) Johnson JM, Proppe DW. Cardiovascular adjustments to heat stress. The handbook of Physiology, section4, Environmental Physiology Vol. 1. Fregly MJ (Ed.). American Physiological Society: 215-243, 1996.
 - 39) Furchgott RF, Zawadzki JV. The obligatory role of endothelial cells in the relaxation of arterial smooth

- muscle by acetylcholine. *Nature* 288: 373-376, 1980.
- 40) Palmer RM, Ferrige AG, Moncada S. Nitric oxide release accounts for the biological activity of endothelium-derived relaxing factor. *Nature* 327: 524-526, 1987.
- 41) Chirinos JA, Segers P, Hughes T, Townsend R. Large-Artery Stiffness in Health and Disease: JACC State-of-the-Art Review. *J Am Coll Cardiol* 74: 1237-1263, 2019.
- 42) Stone K, Fryer S, Kelsch E, Burnet K, Zieff G, Faulkner J, Credeur D, Lambrick D, Hanson ED, Stoner L. Validity and reliability of lower-limb pulse-wave velocity assessments using an oscillometric technique. *Exp Physiol* 104: 765-774, 2019.