

財団法人 ミズノスポーツ振興財団 スポーツ学術等研究助成  
2011年度 報告書

一過性運動が血圧調節機能に与える影響と運動習慣の関係

菅原 順

独立行政法人産業技術総合研究所  
ヒューマンライフテクノロジー研究部門

Exercise training elicits morphological adaptations in the left ventricle (LV) and large conduit arteries that are specific to the type of training performed (i.e., endurance vs. resistance exercise). We investigated whether the mode of chronic exercise training, and the associated cardiovascular adaptations, influence the blood pressure responses to orthostatic stimulation in 30 young healthy men (10 sedentary, 10 endurance-trained, and 10 resistance-trained). The endurance-trained group had a significantly larger LV end-diastolic volume normalized by body surface area (vs. sedentary and resistance-trained groups), whereas the resistance-trained group had a significantly higher LV wall thickness and aortic pulse wave velocity (PWV) compared with the endurance-trained group. Before the exercise, in response to 60-degree head-up tilt (HUT), mean arterial pressure (MAP) rose in the resistance-trained group ( $+6.5 \pm 1.6$  mmHg,  $P < 0.05$ ) but did not change significantly in sedentary and endurance-trained groups. After the exercise, MAP reduced with HUT in endurance-trained group but not in sedentary and endurance trained groups. Forward stepwise multiple regression analyses revealed that LV wall thickness and aortic PWV were significantly and independently associated with the pre-exercise MAP response to HUT, explaining ~41% of its variability ( $R^2 = 0.414$ ,  $P < 0.001$ ) and that changes in stroke volume was the only significant determinant of post-exercise MAP response to HUT, explaining ~34% of its variability ( $R^2 = 0.343$ ,  $P < 0.001$ ). These results indicate that chronic resistance and endurance exercise training differentially affect the BP response to HUT, that this appears to be associated with training-induced morphological adaptations of the LV and large conduit arteries, and that the regulatory mechanism of MAP to HUT seems to be different between pre- and post-exercise.

**Key words:** cardiovascular adaptation, endurance training, resistance training, head-up tilt

## 1. はじめに

動脈血圧（以下、血圧）は起立ストレスのような外乱に対して、脳血流を維持するために自律神経系および内分泌系の調節によって制御・維持されている。短時間の起立ストレスに対する血圧調整は主に動脈および心肺圧受容器による圧反射によるもので、心臓迷走神経を介した心拍数増大と血管交感神経を介した血管抵抗の増大が関与する<sup>1,2</sup>。この機能に関して、持久性競技鍛錬者は運動習慣のない者に比べ起立耐性が悪く、日常生活および急性運動直後に立ちくらみを起こしやすいことが多数報告されている<sup>3-6</sup>。一方、報告は少ないものの、筋力トレーニングを習慣的に実施している者は起立耐性が優れていることが示唆されている<sup>7,8</sup>。前者に関しては、持久性トレーニングによる圧反射感受性の低下<sup>1</sup>、左心室形態の適応（左室肥大とコンプライアンスの増大）<sup>5</sup>、末梢血管拡張能の増大<sup>4</sup>などの関与が示唆されているが、後者の機序については十分な検証が行われていない。左心室形態におけるトレーニング適応については、持久性トレーニングの長期的実施により左室内腔の拡大（eccentric remodeling）およびコンプライアンスの増大が観察され、一方、筋力トレーニングの長期的実施により左室内径は維持したまま壁が肥厚する concentric remodeling が観察されることが示唆されている<sup>9</sup>。また、左心室からつながる大動脈についても、その壁硬化度（スティフネス）が持久性トレーニングで低下、筋力トレーニングで増大することが明らかとなっている<sup>10,11</sup>。このように対照的な適応は、急性の姿勢変化刺激に対し異なる循環応答をもたらす可能性がある。また、アスリートのコンディショニングを念頭に置くと、一過性運動後に血圧調整機能がどのように変化するのかについても明らかにしておく必要があるが、現時点では十分な知見は得られていない。

以上の問題点を踏まえ、本研究では運動習慣の違いが姿勢変化に対する循環応答に与える影響を明らかにするとともに、それが一過性運動によって変化するかどうかを検証することを目的とした。さらに、機序を同定するために、左心室および大動脈形態、下肢動脈特性との関連についても調べた。

## 2. 方法

### 2.1 対象

健康成人 30 名（非鍛錬者[S 群]、持久性鍛錬者[E 群]、抵抗性運動鍛錬者[R 群]、各群 10 名）を対象とした。本実験内容は独立行政法人産業技術総合研究所・人間工学実験委員会に承認されたもので、被験者のインフォームドコンセントを得た上で実施された。

### 2.2 実験概要

実験の実施に際し、実験前 4 時間以内の食事およびカフェイン摂取を禁じた。また、実験 24 時間以内におけるアルコール摂取および激しい運動を避けるよう指示した。仰臥位で 15 分程度ベッドで仰臥位安静をとった後、超音波エコー法により左心室形態の

測定を行った。次いで、循環動態を仰臥位姿勢および 60° チルト姿勢で各 5 分間測定した。また、仰臥位姿勢中に大動脈脈波伝播速度を測定した。チルト姿勢での記録終了後、ベッドを水平位置まで戻し、5 分程度の安静をはさみ、安静時下腿血流量および 5 分間の下腿虚血 - 開放に伴う反応性充血機能測定を行った。その後、裸体重および下肢形態（大腿周囲および下肢容積）を測定し、年齢予測最高心拍数の 60% 相当の負荷で自転車エルゴメータ運動を 1 時間実施した。運動中は少量の飲水を許可し、運動後には、運動中および運動終了後の総水分摂取量が運動で減少した体重の 30% になるように調整し、不足分の水を摂取させた。運動終了後は、速やかに裸体重測定と着替えを行い、仰臥位安静をとらせた。運動終了 20~30 分後に循環動態を測定した（仰臥位姿勢および 60° チルト姿勢、各 5 分間）。最後に下腿最大血管拡張能を測定した。

## 2.3 測定項目

### 2.3.1 左心室・大動脈形態

超音波エコー検査装置（Vivid7, GE メディカル社製）および心エコー用セクタプローブ（4MHz）を使用し、左心室および大動脈形態を測定した。指標としては、左室拡張末期径（Left ventricular end-diastolic diameter: LVEDD）、拡張末期容積（LV end-diastolic volume: LVEDV）、平均左室壁厚（左心室後壁と心室中隔の平均厚: LV wall thickness: LVWT）、大動脈内径（心拡張末期の内径: aortic diameter: AoD）を得た。

### 2.3.2 循環動態

心拍数（heart rate: HR）は心電図により評価した。血圧は指先光電脈波センサによる連続血圧計（Finometer,）を用いて、仰臥位およびチルト負荷中、それぞれ 5 分間 beat-to-beat で記録した。さらに、循環動態解析ソフトウェア（BeatScope）を使用し、上腕動脈収縮期血圧（systolic blood pressure: SBP）、拡張期血圧（diastolic blood pressure: DBP）、平均動脈血圧（mean arterial pressure: MAP）、脈圧（pulse pressure: PP）を算出するとともに、Modelflow 法により一回拍出量（Stroke volume: SV）を推定した。更に、心拍数を乗じて心拍出量（Q）を得た。また、総末梢血管抵抗（total peripheral resistance: TPR = MAP/Q）も算出した。

### 2.3.3 大動脈脈波伝播速度

大動脈脈波伝播速度（pulse wave velocity: PWV）は、頸動脈および大腿動脈圧波形を同時記録し、それぞれの脈波の立ちあがりの時間差を算出した。これで両者の 2 点間の直線距離を除き、大動脈 PWV とした<sup>12</sup>。

### 2.3.4 下腿動脈特性

運動前に、静脈閉塞ストレインゲージプレチスモグラフィー法により 5 分間の下腿虚血 - 開放に伴う反応性充血機能測定（ischemia-induced reactive hyperemia: IRH）を行った。運動終了 90 分後に下腿血管床サイズの指標として下腿最大血管拡張能（exercise-induced maximal hyperemia: EHM）を測定した<sup>4</sup>。下肢最大血管拡張能の

評価では、大腿部に巻いた阻血用カフに収縮期血圧よりも 50mmHg 高い圧力を加え、下腿への血流を遮断した状態で足関節の底背運動を 2 秒に 1 回のペースで 2 分間行わせた。終了後 1 分間安静を保った後、血流を開放した。血流開放に伴う充血応答（単位組織あたりの血流量）を静脈閉塞ストレインゲージプレチスモグラフィ法にて評価した。さらに単位組織あたりの血流量に下肢体積を乗じて最大血流量（絶対値）を算出した。

### 2.3.5 身体特性

身長、大腿周囲長、下肢容積（水中置換法）を運動前に測定した。また、運動の前後に、高精度デジタル体重計（BWB-200、タニタ社製）を使用し裸体重を測定した。さらに、運動中の摂取水分量を差し引いて、運動に伴う体重損失量を算定した。

## 2.4 運動および運動中の水分摂取

年齢予測最高心拍数の 60% 相当の負荷で自転車エルゴメータ運動を 1 時間実施した。運動中は光電式脈波センサを耳につけ心拍数を観察し、目標心拍数の上下 5 拍/分に相当するよう 5 分おきにペダルの負荷を増減した。運動中は少量の飲水を許可し、運動後には、運動中および運動終了後の総水分摂取量が運動で減少した体重の 30% になるように調整し、不足分の水を摂取させた。

## 2.5 統計処理

データは平均値±標準誤差で示す。身体特性および循環動態指標の変化量の群間比較には一元配置分散分析を用いた。循環動態指標の変化（姿勢変化および運動前後の評価）は反復測定による分散分析にて検討した。F 検定で有意差が認められ場合に、LSD 法による事後検定を行った。指標間の関係性の検討には単相関分析およびステップワイズ法による回帰分析を用いた。統計学的有意水準は 5% とした。

## 3. 結果

各群の身体特性を表 1 に示す。体重、BMI、大腿周囲長、下肢体積量は R 群が他の群よりも有意に高値を示した。超音波エコー所見の結果、E 群に左心室の拡張、R 群に左心室壁の肥厚が生じていることが確認された。大動脈 PWV は E 群と S 群の間で有意差が認められた。また、運動後には 3 群とも有意な低下を示した。血管内皮機能の指標である反応性充血応答に 3 群間で有意差は認められなかった。最大血管拡張能は E 群が S 群に対して有意に高値を示した。体重は運動後いずれの群も有意に減少したが、減少量は E 群と R 群が S 群よりも有意に高値であった。運動に伴う体重変化と後述する運動後の血圧変化との間には有意な相関関係は認められなかった。

表 2 に運動前後の循環系指標の変化を示す。運動前の血圧（SBP, MAP, DBP）は仰臥位、チルト負荷時とも E 群に対して R 群が有意に高値を示した。ただし、値は正常血圧の範囲（SBP: 140mmHg, DBP: 90mmHg 未満）であった。運動前、チルト負

荷により E 群の SBP は有意に低下し、一方 R 群の SBP は有意に上昇した。S 群の SBP に有意な変化は認められなかった。運動後には、S 群と E 群で SBP が有意に低下し、R 群では有意な変化を示さなかった。DBP は運動前に 3 群ともチルト負荷により有意に上昇し、運動後は S 群と R 群で有意に上昇した。MAP は運動前で S 群と R 群でチルト負荷により有意に上昇し、運動後は E 群のみ有意に低下した。PP は 3 群間で有意差はなく、運動前のチルト負荷により 3 群とも有意に低下した。運動後のチルト負荷では S 群と R 群で有意に低下した。HR および SV に 3 群間で有意差はなく、運動前後ともチルト負荷により HR は有意に増大、SV は有意に低下した。Q に 3 群間で有意差はなかった。3 群とも運動前に対して運動後で有意に高値を示したものの、チルト負荷に対しては有意な変化を示さなかった。TPR は 3 群間に有意差はなかったが、運動前において S 群と E 群でチルト負荷に対して有意に増大した。運動後において TPR は 3 群とも運動前に対して有意に低下したが、チルト負荷に対しては有意な変化を示さなかった。

図 1 にチルト負荷に対する循環系指標の変化量を示す。HR 増加量は運動前後とも 3 群間で有意差はなかった。また、3 群とも運動後に有意に増大した。SV 減少量は運動前において S 群と R 群との間に有意差が認められた。また、運動により E 群と R 群で有意に増強された。Q および TPR に 3 群間で有意差はなく、また運動前後での有意な変化も認められなかった。SBP 変化量は運動前で S 群および E 群と R 群との間に、運動後で E 群と R 群との間に、それぞれ有意差が認められた。また、運動前後で R 群の SBP 変化量に有意な変化が認められた。MAP 変化量に関しては、運動前後で E 群と R 群との間に有意差が認められた。DBP 変化量に関しては、運動前のみ E 群と R 群との間に有意差が認められた。これらは 3 群とも運動前後で有意な変化を示さなかった。PP 変化量は運動前において S 群および E 群と R 群との間に有意差が認められたが、R 群は運動後に PP の減少が有意に増強され、運動前において S 群および E 群との間に見られた有意差は消失した。

単相関分析およびステップワイズ回帰分析を行い、MAP の変化に対する有意な独立変数の抽出を行った。単相関分析の結果を表 3 に示す。この検討で MAP 変化量と有意な相関関係にあった指標を独立変数としてモデルに加えたところ、運動前では MAP 変化量に対しては大動脈 PWV ( $\beta=0.523$ ,  $P<0.0001$ ) と SV 変化量 ( $\beta=0.356$ ,  $P<0.05$ ) が有意な独立変数として抽出された (表 4)。運動後では、MAP 変化量に対しては SV 変化量 ( $\beta=0.586$ ,  $P<0.001$ ) のみが有意な独立変数として抽出された。SV 変化量は血圧指標の変化量と有意な相関を示したのみで、体重損失、左心室形態、IRH、EMH と有意な変化を示さなかった。

#### 4. 考察

本研究の結果、習慣的に行っているトレーニングによってチルト負荷に対する循環応答が異なることが示唆された。脳血流の維持や起立耐性に関わる MAP について、習慣

的に運動を行っていない者と持久性鍛錬者では、運動前後において、チルト刺激を付加しても MAP は維持された。一方、筋力トレーニング実施者では運動前においてチルト負荷により MAP は有意に上昇し、運動後にはその応答が消失した。まず、運動前に認められたチルト負荷に対する MAP 応答の群間差の機序を探るために、ステップワイズ回帰分析を行ったところ、左心室壁厚と大動脈 PWV が有意な独立変数として採択された。左心室壁厚は左心室壁のディステンシビリティと関連すると考えられる。持久性鍛錬者では左心室壁のディステンシビリティが高いため、チルト負荷に対する SV の低下が大きい<sup>5</sup>。これにトレーニングに伴う頸動脈-迷走神経圧反射感受性の低下<sup>1</sup>が加わることで、起立不耐性が招来されると考えられる。この点について、左心室壁が厚い筋力トレーニング実施者では、左心室壁のディステンシビリティは低く、SV の低下が制限されている可能性がある。実際、運動前におけるチルト負荷に対する SV の減少量は他の 2 群に比べて R 群で有意に小さかった。運動後の応答については、MAP の応答と有意な相関関係を示したのは SV 変化量のみであった（表 4）。運動後のチルト負荷に対する SV の応答は、体液量の変化（体重損失など）、左心室容積、血管床のサイズや血管拡張能などと関連すると想定していたが、それらとの有意な相関は確認されなかった。詳細は機序に関しては、今後更なる検討が必要であるが、少なくとも姿勢変化刺激に対する血圧調節の機構は一過性運動の前後で変化すると考えられる。

運動前の MAP 応答の有意な独立変数として採択された大動脈 PWV については、解釈が難しい。大規模な疫学研究<sup>13</sup>では、高齢者では大動脈 PWV が高く動脈壁硬化が進行し、これが起立不耐性と関連するという結果が示されている。これは本研究で示された結果と逆の関係にある。したがって、運動トレーニングによって生じる大動脈スティフネスの適応が動脈圧反射に与える影響は、加齢変化によるものとは異なっていると考えられる。

持久性鍛錬者の起立不耐性を報告する先行研究<sup>3-6</sup>は多いが、本研究では運動前後ともそのような現象は観察されなかった。これは本研究で行ったチルト負荷の時間が 5 分間という短いものであり、その程度の時間であれば、動脈圧反射により十分対応できることを示唆しているかもしれない。

本研究で得られた興味深い知見として、筋力トレーニング実施者では運動前のチルト負荷刺激で SBP が有意に上昇した点が挙げられる。若年者を対象にした疫学的調査<sup>14</sup>で、立位での SBP が仰臥位姿勢での SBP よりも 5mmHg 以上高い場合には、将来的な高血圧発症のリスクが高いことが示唆されている。本研究の筋力トレーニング実施者の血圧は正常範囲にあったものの E 群よりは有意に高値であった。さらに、左心室壁の肥厚、大動脈 PWV の増大も確認された。これらはレジスタンストレーニングによって生じる循環器の適応である<sup>9,10</sup>が、高血圧に見られる心血管疾患特性とも共通のものである。これらが、将来的に心血管疾患の発症につながるか、それとも、トレーニングによる可逆的な適応でトレーニングの中止によって消失するものであるのか、については今後の検証が必要であろう。

## 5. まとめ

本研究を通して、以下のような知見を得た。(1) 姿勢変化刺激に対する循環系応答は習慣的な運動トレーニングによって異なる,(2) その機序として左心室および大動脈特性のトレーニングによる変化が関連する,(3) 一過性運動後は血圧調節の機構が運動前とは変わる.

## 6. 謝辞

本研究に対し、多大な助成を賜りました公益財団法人 ミズノスポーツ振興財団に深謝申し上げます.

## 文献

1. Ogoh S, Volianitis S, Nissen P, Wray DW, Secher NH, Raven PB. Carotid baroreflex responsiveness to head-up tilt-induced central hypovolaemia: Effect of aerobic fitness. *J Physiol*. 2003;551:601-608
2. Victor RG, Leimbach WN, Jr. Effects of lower body negative pressure on sympathetic discharge to leg muscles in humans. *J Appl Physiol*. 1987;63:2558-2562
3. Convertino VA. Endurance exercise training: Conditions of enhanced hemodynamic responses and tolerance to lbnp. *Med Sci Sports Exerc*. 1993;25:705-712
4. Levine BD, Buckey JC, Fritsch JM, Yancy CW, Jr., Watenpaugh DE, Snell PG, Lane LD, Eckberg DL, Blomqvist CG. Physical fitness and cardiovascular regulation: Mechanisms of orthostatic intolerance. *J Appl Physiol*. 1991;70:112-122
5. Levine BD, Lane LD, Buckey JC, Friedman DB, Blomqvist CG. Left ventricular pressure-volume and frank-starling relations in endurance athletes. Implications for orthostatic tolerance and exercise performance. *Circulation*. 1991;84:1016-1023
6. Raven PB, Pawelczyk JA. Chronic endurance exercise training: A condition of inadequate blood pressure regulation and reduced tolerance to lbnp. *Med Sci Sports Exerc*. 1993;25:713-721
7. Lightfoot JT, Torok DJ, Journell TW, Turner MJ, Claytor RP. Resistance training increases lower body negative pressure tolerance. *Med Sci Sports Exerc*. 1994;26:1003-1011
8. Smith ML, Raven PB. Cardiovascular responses to lower body negative pressure in endurance and static exercise-trained men. *Med Sci Sports Exerc*. 1986;18:545-550
9. Pluim BM, Zwinderman AH, van der Laarse A, van der Wall EE. The athlete's heart. A meta-analysis of cardiac structure and function. *Circulation*. 2000;101:336-344
10. Miyachi M, Donato AJ, Yamamoto K, Takahashi K, Gates PE, Moreau KL, Tanaka H.



- Greater age-related reductions in central arterial compliance in resistance-trained men. *Hypertension*. 2003;41:130-135
11. Otsuki T, Maeda S, Iernitsu M, Saito Y, Tanimura Y, Ajisaka R, Miyauchi T. Relationship between arterial stiffness and athletic training programs in young adult men. *American Journal of Hypertension*. 2007;20:967-973
  12. Sugawara J, Hayashi K, Yokoi T, Cortez-Cooper MY, DeVan AE, Anton MA, Tanaka H. Brachial-ankle pulse wave velocity: An index of central arterial stiffness? *J Hum Hypertens*. 2005;19:401-406
  13. Mattace-Raso FU, van der Cammen TJ, Knetsch AM, van den Meiracker AH, Schalekamp MA, Hofman A, Wittteman JC. Arterial stiffness as the candidate underlying mechanism for postural blood pressure changes and orthostatic hypotension in older adults: The rotterdam study. *J Hypertens*. 2006;24:339-344
  14. Thomas RJ, Liu K, Jacobs DR, Jr., Bild DE, Kiefe CI, Hulley SB. Positional change in blood pressure and 8-year risk of hypertension: The cardia study. *Mayo Clin Proc*. 2003;78:951-958

TABLE 1. Subject characteristics.

Variables	Sedentary	Endurance-trained	Resistance-trained
Age, years	24 ± 0.9	22 ± 1.3	21 ± 0.4
Height, cm	173 ± 2.1	174 ± 1.2	176 ± 2.0
Pre-exercise body weight, kg	65.88 ± 3.26	61.76 ± 1.16	79.92 ± 4.14 <sup>*†</sup>
Post-exercise body weight, kg	65.44 ± 3.25 <sup>‡</sup>	60.72 ± 1.13 <sup>‡</sup>	79.03 ± 4.10 <sup>*†‡</sup>
Body weight loss, kg	0.59 ± 0.07	1.17 ± 0.07 <sup>*</sup>	1.08 ± 0.09 <sup>*</sup>
Body weight loss, %	0.90 ± 0.11	1.89 ± 0.09 <sup>*</sup>	1.35 ± 0.09 <sup>*†</sup>
Thigh circumference, cm	51.7 ± 1.1	51.1 ± 0.5	58.3 ± 1.3 <sup>*†</sup>
Leg volume, L	7.3 ± 0.3	6.8 ± 0.3	9.5 ± 0.8 <sup>*†</sup>
LVEDV, mL	94.2 ± 6.9	125.5 ± 5.7 <sup>*</sup>	114.5 ± 7.8 <sup>*</sup>
LVEDV index, mL/m <sup>2</sup>	52.3 ± 3.6	71.5 ± 3.1 <sup>*</sup>	58.1 ± 4.4 <sup>†</sup>
LVWT, cm	0.91 ± 0.03	0.85 ± 0.01	1.08 ± 0.05 <sup>†</sup>
LVWT/LVEDD, ratio	0.20 ± 0.01	0.17 ± 0.01 <sup>*</sup>	0.22 ± 0.02 <sup>*†</sup>
LVM, g	155 ± 12	177 ± 10	234 ± 19 <sup>*</sup>
LVM index, g/m <sup>2</sup>	86.2 ± 6.1	100.4 ± 5.3	117.5 ± 9.1 <sup>*†</sup>
Aortic EDD, cm	2.4 ± 0.0	2.4 ± 0.1	2.4 ± 0.1
Pre-exercise aortic PWV, cm/s	900 ± 29	842 ± 21	949 ± 33 <sup>†</sup>
Post-exercise aortic PWV, cm/s	862 ± 22 <sup>‡</sup>	800 ± 23 <sup>‡</sup>	912 ± 32 <sup>†‡</sup>
IRH, ml/100g tissue/min	27.1 ± 2.0	30.6 ± 3.4	27.0 ± 4.1
EMH, ml/100g tissue/min	31.7 ± 2.2	43.4 ± 4.1 <sup>*</sup>	36.8 ± 2.4

Data are mean and SEM. Body weight loss was the combined volume of changes in body weight and water intake. LVEDV=left ventricular end-diastolic volume, LVEDV index=LVEDV normalized by body surface area, LVWT=LV wall thickness, LVEDD=LV internal end-diastolic diameter, LVM=LV mass, LVM index=LVM normalized by body surface area, EDD= end-diastolic diameter, PWV=pulse wave velocity, IRH=ischemia-induced reactive hyperemia, EMH=exercise-induced maximal hyperemia. \*: P<0.05 vs. Sedentary, †: P<0.05 vs. Endurance-trained, ‡: P<0.05 vs. pre-exercise.

TABLE 2. Responses of hemodynamic variables to head-up tilt (HUT).

Variables	Posture	Sedentary		Endurance-trained		Resistance-trained	
		Pre-exercise	Post-exercise	Pre-exercise	Post-exercise	Pre-exercise	Post-exercise
SBP	Supine	120 ± 3	116 ± 2 ‡	113 ± 3	112 ± 3	127 ± 4 †	127 ± 3 †
mmHg	HUT	116 ± 4	111 ± 3 ‡§	105 ± 4 §	101 ± 3 §	132 ± 5 *†§	123 ± 5 ‡‡
DBP	Supine	67 ± 3	68 ± 2	62 ± 2	65 ± 2	74 ± 3 †	74 ± 2 †
mmHg	HUT	74 ± 3 §	74 ± 2 §	65 ± 2 *§	67 ± 2	82 ± 3 †§	80 ± 3 †
MAP	Supine	87 ± 3	86 ± 2	81 ± 2	83 ± 2	94 ± 4 †	94 ± 3 †
mmHg	HUT	90 ± 3 §	88 ± 3	80 ± 3	80 ± 2 §	101 ± 4 †§	97 ± 4 *†‡
PP	Supine	53 ± 2	48 ± 2 ‡	51 ± 2	48 ± 1	53 ± 2	52 ± 2
mmHg	HUT	43 ± 2 §	37 ± 2 ‡§	40 ± 3 §	34 ± 1 §	50 ± 2 *†§	43 ± 2 †§
HR	Supine	55 ± 2	63 ± 3 ‡	50 ± 3	57 ± 2 ‡	53 ± 3	64 ± 3 ‡
beat/min	HUT	77 ± 3 §	90 ± 4 ‡§	66 ± 5 §	81 ± 4 ‡§	70 ± 3 §	86 ± 3 ‡§
SV	Supine	104 ± 4	103 ± 7	112 ± 7	112 ± 9	113 ± 4	111 ± 4
ml	HUT	75 ± 5 §	73 ± 5 §	84 ± 8 §	79 ± 8 ‡§	93 ± 3 §	83 ± 3 ‡§
Q	Supine	5.7 ± 0.3	6.3 ± 0.3 ‡	5.6 ± 0.4	6.4 ± 0.5 ‡	6.0 ± 0.3	7.1 ± 0.3 ‡
L/min	HUT	5.7 ± 0.3	6.5 ± 0.4 ‡	5.4 ± 0.5	6.2 ± 0.6 ‡	6.4 ± 0.3 §	7.1 ± 0.3 ‡
TPR	Supine	15.5 ± 0.8	13.8 ± 0.7 ‡	15.4 ± 1.4	13.6 ± 1.0 ‡	15.9 ± 0.4	13.5 ± 0.6 ‡
unit	HUT	16.3 ± 1.1 §	14.0 ± 1.1 ‡	16.2 ± 1.8 §	13.8 ± 1.3 ‡	15.7 ± 0.4	13.8 ± 0.8 ‡

Data are mean and SEM. SBP=systolic blood pressure, MAP=mean arterial pressure, HR=heart rate, SV=stroke volume, Q=cardiac output, TPR=total peripheral resistance. \*: P<0.05 vs. Sedentary, †: P<0.05 vs. Endurance-trained, ‡: P<0.05 vs. pre-exercise, §: P<0.05 vs. supine.

TABLE 3. Results of simple correlation analyses.

Variables	MAP	
	Pre-exercise	Post-exercise
Body weight	0.274	0.266
Body weight loss	-0.072	-0.080
LVEDV	-0.230	-0.203
LVWT	<b>0.523</b>	0.245
AoD	-0.110	-0.055
LVM	<b>0.383</b>	0.148
Thigh circumference	0.302	0.309
Leg mass	0.127	0.229
IRH	0.028	-0.022
EMH	0.011	-0.110
Aortic PWV	<b>0.514</b>	0.048
$\Delta$ HR	-0.197	-0.079
$\Delta$ SV	<b>0.438</b>	<b>0.586</b>
$\Delta$ Q	0.164	0.274
$\Delta$ TPR	0.221	0.354

Numbers are correlation coefficients. Bold numbers mean significant correlation ( $r > 0.35$ ,  $P < 0.05$ ;  $r > 0.45$ ,  $P < 0.01$ ). Abbreviations are shown in Table 1 and 2.  $\Delta$  means the difference from supine to head-up tile.

TABLE 4. Results of stepwise multiple regression analyses.

**Dependent variable: Changes in MAP with HUT**

**Pre-exercise:**

Independent variables	$\beta$	P-value	R <sup>2</sup> change
LVWT, mm	0.406	<0.05	0.274
Aortic PWV, cm/sec	0.392	<0.05	0.140

R<sup>2</sup> = 0.414, P<0.01.  $\beta$ =standard regression coefficient.

**Post-exercise:**

Independent variables	$\beta$	P-value	R <sup>2</sup> change
$\Delta$ SV, mL	0.586	<0.001	0.343

R<sup>2</sup> = 0.343, P<0.01.

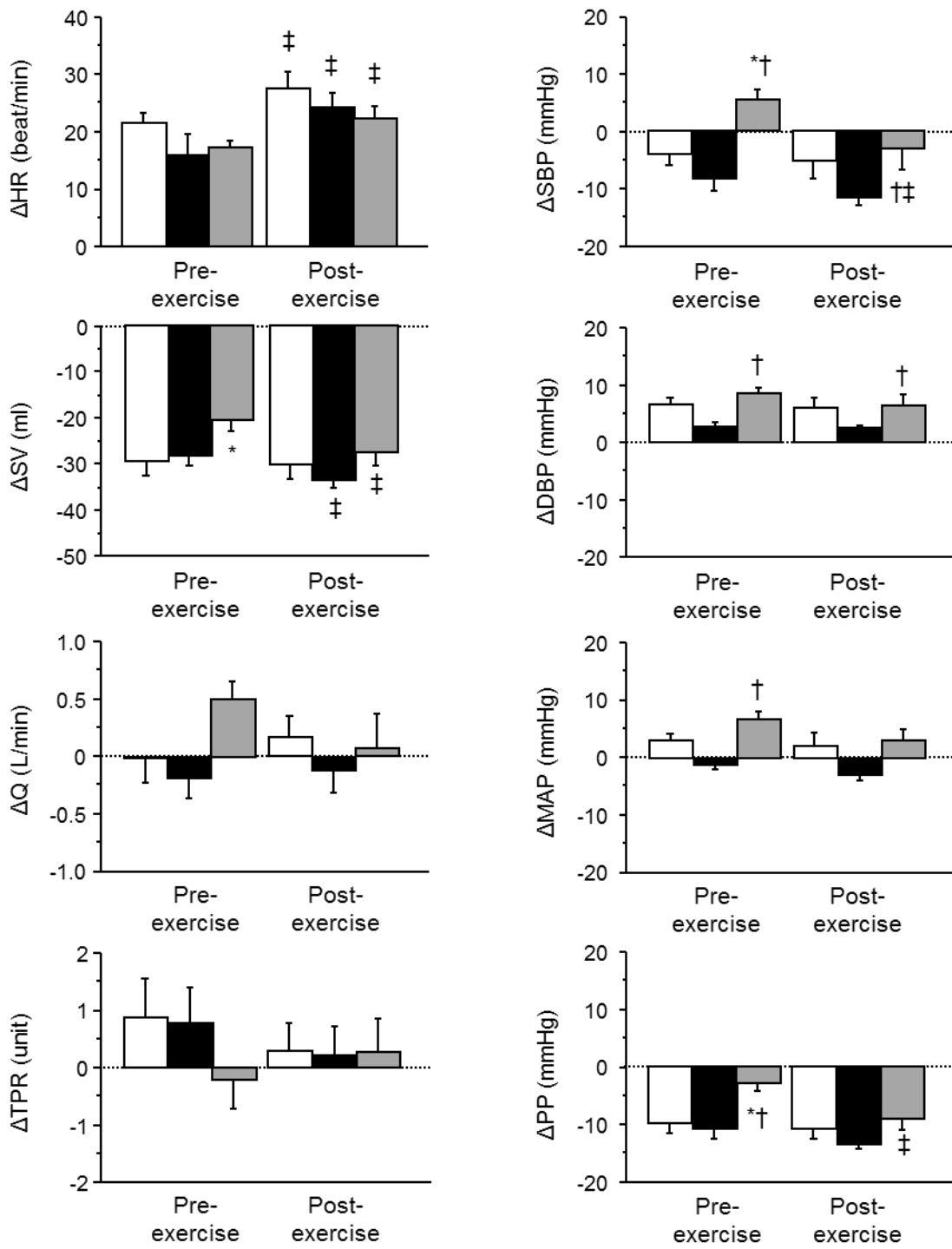


Figure 1. Changes in hemodynamic variables to head-up tilt. Open bars are sedentary, Filled bars are endurance-trained, Gray bars are resistance-trained. \*: P<0.05 vs. Sedentary, †: P<0.05 vs. Endurance-trained, ‡: P<0.05 vs. pre-exercise, §: P<0.05 vs. supine.